



### 저작자표시-비영리 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사학위논문

한국 생활폐기물 에너지화 시설의  
온실가스 배출량 산정방법에 관한  
연구

A Study on the Greenhouse Gas Emission  
Estimation from Waste-to-Energy  
Facilities in Korea

2021년 02월

서울대학교 대학원  
건설환경공학부  
권 혁영

# 한국 생활폐기물 에너지화 시설의 온실가스 배출량 산정 방법에 관한 연구

A Study on the Greenhouse Gas Emission  
from Waste-to-Energy Facilities in Korea

지도교수 김 재영

이 논문을 권혁영 박사학위논문으로 제출함

2021년 02월

서울대학교 대학원  
건설환경공학부  
권 혁영

권혁영의 박사학위논문을 인준함

2020년 10월

|      |   |   |   |     |
|------|---|---|---|-----|
| 위원장  | 남 | 경 | 필 | (인) |
| 부위원장 | 김 | 재 | 영 | (인) |
| 위원   | 최 | 용 | 주 | (인) |
| 위원   | 김 | 민 | 수 | (인) |
| 위원   | 김 | 승 | 도 | (인) |



## 초록

권혁영  
건설환경공학부  
서울대학교 대학원

IPCC 지침서 제 2권(에너지)와 제 5권(폐기물)에 의해서 폐기물 소각시설은 에너지생산시설이자 배출시설이다. 폐기물의 연소 과정에서 발생하는 배출량을 산정하는 방법은 수준별로 Tier1, Tier 2, 해당시설의 고유특성을 적용한 Tier3가 있다. 한국은 현재 Tier1, 2단계에서 Tier3 단계로의 이행과정에 있으며 해당 시설의 고유특성을 장기간 관찰하여 추세적인 계수를 인정하는 Tier4를 시범적으로 검토하고 있다. 배출량 산정 시 회수되는 에너지로 인한 저감량을 공제할 수 있는 규정이 있지만, 지자체 온실가스 관리지침에서는 열에너지로 송출된 회수량을 에너지사용자가 보고하도록 하고 있다.

IPCC와 환경관리공단 생활폐기물 온실가스배출량 산정지침에 따라 폐기물 소각시설은 생물기반연료와 화석기반연료의 혼합연소 시설이다. 온실가스 배출량의 대부분은 이산화탄소가 차지하고 있으며, 화석기반연료(FCF)에서 발생하는 이산화탄소만을 대상으로 한다. 생물기반탄소를 산정하는 방법은 폐기물성상에 따른 표준계수를 이용하는 방법(Tier 1, 2)과 연소가스중에 방사성 동위원소 ( $^{14}\text{C}$ )를 측정하는 ASTM D6866시험법이 국제적으로 통용된다. ASTM 방법론은 연소가스중의  $\text{CO}_2$ 중  $^{14}\text{C}$ 비율을 계산하여 이를 보정한 후 생물기반탄소(BCF)를 구하고 총탄소(CF)에서 생물기반탄소를 제외한 값을 화석기반탄소로 구한다.  $^{14}\text{C}$ 는 반감기가 5730년 정도로서 생물기반탄소에는 존재하지만 화석기반탄소에는 존재하지 않는다는 특성을 이용한 측정법이다.

여기에서  $^{14}\text{C}$ 비율을 1950년대의 공기 중 비율을 기준으로 해당년도 대기중의  $^{14}\text{C}$ 농도로 나타낸 값을 percent Modern Carbon (pMC)라고 칭한다. 한국내 적용가능한 pMC표준값을 어떻게 정할 것인가, 각각의 폐기물 성상별 FCF분율 어떻게 정할 것인가에 따라 폐기물소각설에서의 배출량은 변동되며 이를 첫 번째 소주제로 정하였다.

배출량 산정 시 생산된 에너지를 외부로 송출함에 따른 저감실적만큼 공제할 수 있어야 하지만 현재 지방자치단체 온실가스관리지침에서는 세부적인 규정이 없다. 에너지 회수효율을 산정하는 방법에는 열역학적인 접근방법과 온실가스 간접배출 계수를 적용하는 두 가지 접근법이 있다. 열역학적인 접근법에는 제 1법칙에 따른 에너지회수효율 측정법, 제 2법칙에 따른 엑서지효율계산법, 전력손실계수측정법, 1, 2 법칙을 종합한 엑서지/에너지 분율측정법 등이 있다. 간접배출 계수계산법은 얻어진 에너지 중 연료, 전기, 열 등에 대하여 각각의 사회적 평균배출계수를 곱하여 합산한 값을 산정한다.

에너지 회수효율을 계산하는 표준으로서 한국에서는 에너지회수 효율지수 (R1)를 2018년부터 도입하였다. R1 지수는 2008년부터 유럽에서 소각로에 대한 권장기준으로 시행중인 제도로서, 생산된 에너지를 투입된 에너지로 나눈 분율 ( $R1 = E_{\text{product}}/E_{\text{input}}$ )로 구성된다. 생산하여 사용된 에너지의 합( $E_p$ )을 구할 때 전기생산량에는 2.6배의 등가지수 (Equivalent Factor)를, 열생산은 1.1배의 EF를 부여한다. 에너지 회수효율을 산정할 때 전기에너지와 열에너지의 회수효율은 다르다. R1에서 적용하고 있는 전기/열 분율 2.38의 적정성을 평가하기 위하여 국내 열병합 시설을 대상으로 전기와 열생산이 공종하는 구간에서 Exergy/energy 비율의 비교를 통한 적정 전기/열 비율을 구하고 이를 사회적 간접배출계수와

비교하는 것을 두 번째 소주제로 하였다.

에너지회수효율을 올리는데 전기생산은 열사용에 비하여 기여도가 크기 때문에 온실가스 저감량을 높이는 방법중 전기생산량을 늘리는 것이 가장 효율적이다. 소각로 설계 시 반영되는 요소기술 중 스팀고효율화 또는 스팀효율화를 위한 열생산시스템의 설계에 관해 각국의 사례를 분석하고, 적용가능한 기술 중 최신기술 (BAT)을 도입한 경우 온실가스 저감량이 어떻게 달라질 수 있는가를 세번째 소주제로 연구하였다.

자료는 국내의 폐기물 소각시설중 R1제도 시행 이후 에너지효율화 설비를 설치한 국내 3개 소각시설을 대상으로 하여 배출량, 에너지회수효율, 에너지의 저감량을 증대시키는 효율적인 방안을 검토하였다.

3장 배출량 산정에서는 percent Modern Carbon에 대한 추세를 분석하였다. 대기중  $^{14}\text{C}$ 농도는 1950년까지  $1.27 \times 10^{-12}$ 정도의 농도로 일정하였다가 대기중 핵실험의 영향으로 1965년에 두 배 가까이 증가하였고 이후 일정하게 감소하고 있다. 핵발전소의 가동에 따라 계속 발생하며, 화석연료사용으로 대기중  $\text{CO}_2$ 량에 증가함에 따라 점유비율이 희석되며, 해상, 육상, 바이오매스에 침적되어 방출되는 매체이동에 따라 대기중 농도는 변화한다. 국내 연소가스에서 검출된 pMC 농도와 pMC의 거동해석을 통하여 한국대기중 pMC 농도를 산출한 결과 2020년 기준 101.3으로서 ASTM-2020이 정하고 있는 국제표준 100을 약간 상회하는 것으로 나타났다. ASTM은 연소가스중에서 측정된  $^{14}\text{C}$ 의 분율을 보정계수 (Atmocphere Corection Factor, REF)로 나누어 주고 REF를 pMC와 거의 동일하게 적용한다. 연소과정의 외부공기에는 pMC가 적용되는 것이 타당하지만, 연소대상물질인 목재, 종이류의 경우 생장연령이 평균 15~20년 정도이므로 이미 15년전의 대기중 pMC가 누적되어

있기 때문이다. 생물기반탄소에 내재된 pMC는 연소공기에 함유하게 되므로, 대기중의 pMC의 농도와 같을 수 없다. 종이·목재류의 pMC 값은 약 110으로 계산되며, 폐기물 정상중 종이·목재류의 분율을 반영하여 계산하면 한국 내 연소가스중의 보정지수 REF 값은 20220년 기준 102 +/- 0.5로 산정된다.

그리고 이를 기반으로 3개 시설의 폐기물로 인하여 발생하는 CO<sub>2</sub> 배출량을 산정한 결과 Plant N은 484.5kg/waste.ton, Plant S는 439.2kg/waste.ton, Plant I는 662 kg/waste.ton으로 계산되었다. 연소가스중에 포함된 <sup>14</sup>C를 측정된 환경공단의 ASTM 측정결과와 소각시설에서의 정상별 FCF default 값에 의한 배출량을 비교한 결과 ASTM 방법론의 의한 측정결과가 더 높은 화석기반 탄소분율을 보였다. 이는 최근 점유율이 높아진 석유류에 기인한 것으로 보여진다. 석유류의 생물기반탄소분율을 정하기 위하여 최근 석유류 판매량 통계를 조사한 결과 석유류 중 화석석유의 점유율이 50%를 넘으므로 석유류중 화석석유분율을 IPCC가 정한 표준 값 20%에서 연구결과를 반영한 40%로 증가시키는 것이 <sup>14</sup>C농도 측정결과와 유사함을 알 수 있었다. 석유류의 탄소기반 탄소분율에 관한 범위는 IPCC의 표준배출계수 산정 시 부기 (comment) 사항으로 기재되어 있으므로 국내에서 석유류의 화석기반탄소 분율을 40%로 변경함이 IPCC의 기준과 다르지 않다. 석유류의 FCF 보정으로 얻어진 CO<sub>2</sub>배출량은 Plant N, S, I에서 542.1 kg.CO<sub>2</sub>/waste.ton, 482.0 kg.CO<sub>2</sub>/waste.ton, 680kg.CO<sub>2</sub>/waste.ton으로 산출되었다. 여기에 CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O의 표준배출계수와 외부로부터 유입된 전기와 열을 합쳐서 Plant N 550.6 kg.CO<sub>2</sub>/waste.ton, Plant S 514.4 kg.CO<sub>2</sub>/waste.ton 그리고 Plant I 687.1 kg.CO<sub>2</sub>/waste.ton로 조사되었고 이 결과를 3개시설의 온실가스배출량으로 기준한다.

에너지회수효율을 측정하는 방법론 중 전기/열의 적정비율을 산정

하기 위하여 엑서지/에너지 회수효율 비교를 통하여 전기/열의 비율을 계산하여본 결과 열병합구간에서 전기/열의 비율은 평균 4.70, 최소 3.47로 나타났다. 간접배출계수비교에 의한 등가계수는 기준지수를 어떻게 정하느냐에 따라 여러 지표를 보이고 있다. 온실가스 관리지침에서 정한 전기에너지와 열에너지 생산단에서의 표준배출계수 기준으로 할 경우 등가계수는 3.80, 소비단에서의 표준배출계수 기준의 비율은 3.69이다. 석탄화력 전기생산 배출계수와 LNG 열생산 배출계수비율은 3.90, 위 기준년도가 2010년임을 감안하여 최근 2017년의 통계를 이용하여 계산된 석탄화력 전기배출계수와 LNG 열생산배출 계수의 비율은 3.65이다. 엑서지/에너지효율에 따른 계산, 간접배출계수를 적용한 계산 등을 종합하면 엑서지 효율로 구한 최소치 3.47을 적용함에 무리가 없을 것으로 보여진다. 전기/열 계수 3.47을 적용할 경우 수정에너지회수효율 R2는  $R2 = 3.817E_{el} + 1.1E_{th}/(E_w + E_f)$ 로 표현될 수 있다. 간접배출계수에 의한 전기/열비율중 생산단에서의 기준인 3.80을 적용할 경우  $R2' = 4.18E_{el} + 1.1E_{th}$ 로 표현될 수 있다.

에너지사용으로 얻어지는 온실가스저감량을 산정하는 네 가지 방법론을 비교 검토하였다. 온실가스관리지침에서 정한 에너지회수량산정방법론(GGGI), 전기생산 및 열생산에 적용되는 간접배출계수를 이용하는 방법(CDM), 그리고 에너지회수효율산정식 R1과 이 연구에서 도출된 R2를 비교하였다. R1은 82%의 상관도를 보였으며, R2는 96%의 상관도를 보였고 R2'는 100% 비례한다. GGGI방식은 CDM값과 연관성을 찾기 어려웠다. 에너지회수효율만을 비교하기 위하여 R1/CDM, R2/CDM, R2'/CDM을 비교하였다. R2, R2' 모두 열역학 제 2법칙에 충실한 계수이자 CDM값과 비례한다. R2/CDM 지수 1.56 +/- 5%는 전국적으로 거의 모든 소각시설에서 에너지 회수효율과 기후변화 저감효과의

상관관계를 파악하는 지수가 될 수 있어 모든 소각시설을 관리할 수 있는 효율적인 지수가 될 것이다.

위 R2지수는 열병합시설중에서 전기생산 후 지역난방으로 열원을 공급하는 경우에 한하여 적용된다. 전기생산과 고온의 스팀을 공급하는 열병합시설에서는 엑서지 파괴효율이 전기와 열 모두 1에 수렴하고, 간접배출계수도 다르게 적용되어야 한다.

소각로에서 에너지/엑서지 효율을 개선하기 위한 요소기술들 중 Plant I의 복수기 개선 효과는 약 15%로서 전기전용의 경우 매우 중요한 요소로 파악되었다. 스팀고효율화에 따른 효과 중 Super Critical 스팀조건 (130bar, 440℃)으로 변경할 경우 300℃ 스팀이 기반인 Plant 2에서는 43%, 193℃가 기반인 Plant S에서는 102%가 증가하였다. Plant S에서의 증가율이 높은 이유는 현재의 스팀조건이 낮기 때문에 상승효과가 커지지 때문이다. Plant S의 현재 Turbine 입출구 온도는 각각 193℃와 104℃로서 열낙차가 89℃에 불과하지만 SC 조건에서 터빈입출구의 열낙차는 335℃에 달해 열낙차만으로도 3.5배의 차이가 있기 때문이다. Re-heat 사이클과 SC 사이클을 비교하면 발전전용인 Plant I에서는 28%가 증가하였지만 열병합 발전인 Plant S에서는 21%가 증가되었다. Plant S가 CHP로 운영되므로 열교환과정의 엑서지 손실이 발전량증대를 감소시키는 결과이다.

위에서 구해진 전력생산효율향상을 기반으로 온실가스저감 효과와 에너지 회수효율 R1/R2, R1/R2'와를 비교하였다. 온실가스저감효과(CDM)로 보면 발전전용인 Plant I는 0.62, 열병합 시설인 Plant S는 0.66를 달성할 수 있어 거의 같은 수준의 회수율을 보인다. GHG 배출량 산정 시 에너지 회수를 통하여 저감시키는 방법은 전기전용만으로도 효과를 거둘 수 있다는 결과이다. . Plant I에서의 고유계수 R2/CDM은 1.49, Plant S에서의 고유계수

R2/CDM은 1.63으로서 이 수치, 또는 R2지수는 시설관리  
고유계수로 활용될 수 있음이 증명되었다.

소각시설에서의 에너지회수효율은 온실가스저감 정책하에서  
운영되어야 한다. 공학적으로 얻어지는 회수효율계산은 열역학적  
법칙에 입각한 R2지수가 유용하며 이를 간접배출계수 산정방식과의  
연관도가 이를 증명하고 있다.

그럼에도 R2와 R2'중 어느 지수를 정하는 것이 합리적인지는  
추가적인 연구가 필요하다. 아울러서 배출량산정 시 영향을 주는  
pMC와 REF지수는 국가별, 지역별표준지수가 제시되어야 하고  
국내외의 대기중 CO<sub>2</sub> 농도를 반영하여 수시로 보정되어야 한다.

주요어 : 에너지회수효율 R1, 온실가스 경감, 폐기물소각로,  
수정에너지회수효율 R2, pMC, BCF, FCF, 재열사이클

학번 :2008-30250

# 목 차

|   |          |
|---|----------|
| 표목차 .....                               | xii      |
| 그림목차 .....                              | xvii     |
| <b>제 1 장 서 론 .....</b>                  | <b>1</b> |
| 제 1 절 연구의 배경 .....                      | 1        |
| 제 2 절 연구의 목적 .....                      | 6        |
| 제 3 절 자료 출처와 논문 구성 .....                | 6        |
| 제 4 절 참고문헌 .....                        | 8        |
| <b>제 2 장 선행연구와 방법론 검토 .....</b>         | <b>9</b> |
| 제 1 절 소각시설에서 온실가스배출량 및 저감량 .....        | 9        |
| 제 2 절 에너지 회수효율에 관한 규정과 연구 .....         | 23       |
| 제 3 절 발전효율을 올리기 위한 요소기술 .....           | 29       |
| 제 4 절 참고문헌 .....                        | 35       |
| <b>제 3 장 배출량의 산정</b>                    |          |
| 제 1 절 서론 .....                          | 39       |
| 제 2 절 배출량 산정식 .....                     | 43       |
| 제 3 절 배출량 산정을 위한 요소별 자료 .....           | 65       |
| 제 4 절 대상시설인 Plant N, S, I 에서의 배출량 ..... | 84       |
| 제 5 절 결론 .....                          | 85       |
| 제 6 절 참고문헌 .....                        | 89       |

|  |     |
|--|-----|
| 제 4 장 등가지수분율 (전기/열)의 재산정을 통한 수정에너지 회수효율(R2)의도출 ..... | 92  |
| 제 1 절 서론 .....                                       | 92  |
| 제 2 절 R1에 대한 수정의견 .....                              | 94  |
| 제 3 절 등가계수분율 (전기/열)의 비교 .....                        | 101 |
| 제 4 절 국내 실증시설에서의 에너지회수효율 R1과 온실가스 저감실적과의 관계 검증 ..... | 113 |
| 제 5 절 수정에너지회수효율 (R2)의 도출 .....                       | 122 |
| 제 6 절 결론 .....                                       | 126 |
| 제 7 절 참고문헌 .....                                     | 131 |
| <br>   |     |
| 제 5 장 재열사이클을 이용한 에너지이용 효율화와 온실가스 저감효과 분석 .....       | 134 |
| 제 1 절 서론 .....                                       | 134 |
| 제 2 절 관계식과 선행연구 .....                                | 135 |
| 제 3 절 재열사이클의 적용과 효과에 대한 검토 .....                     | 147 |
| 제 4 절 결론 .....                                       | 161 |
| 제 5 절 참고문헌 .....                                     | 163 |
| <br>   |     |
| 제 6 장 결론 .....                                       | 166 |
| <br>   |     |
| 참고문헌 .....   | 169 |
| <br>   |     |
| Abstract .....                                       | 178 |
| <br>   |     |
| 감사의 글 .....  | 187 |

## 표 목차

|   |    |
|---|----|
| [표 1-1] Energy potential of solid waste .....   | 1  |
| [표 2-1] 지자체온실가스산정지침 .....   | 9  |
| [표 2-2] GHG reduction by CDM methodology of AM0025<br>& ACM0012 .....   | 14 |
| [표 2-3] Example of GHG performance of WtE systems .....   | 17 |
| [표 2-4] CO <sub>2</sub> substitution potential through energy recovery<br>from Wte plants related to the investigated<br>(Status 2007-2010) and total amounts of<br>incinerated MSW in EU 27 and EU 27 + CH + NO<br>(Stauts 2009) ..... | 18 |
| [표 2-5] KSEF .....  | 20 |
| [표 2-6] Various report to calculate emission factor in heat<br>generation as per LCA analysis .....   | 22 |
| [표 2-7] Emission factor of heat generation .....  | 22 |
| [표 2-8] Waste heat utilization status in South Korea(2015)<br>.....   | 29 |
| [표 2-9] Evaluation of power product efficiency as per<br>technology .....   | 30 |
| [표 3-1] Default factor of Non-CO <sub>2</sub> in continous stoker<br>incinerator .....  | 44 |
| [표 3-2] Waste classification of MSW components .....  | 46 |

|  |    |
|--|----|
| [표 3-3] Default value of parameters for different MWS components .....         | 44 |
| [표 3-4] pMC of biomass materials .....   | 52 |
| [표 3-5] $\Delta^{14}C$ trend of atmosphere in Seoul, Gyeonggi area .....       | 63 |
| [표 3-6] REF value of ASTM D6866-20 during recent 10 years .....                | 64 |
| [표 3-7] pMC contents in seasonal fluctuation in 2017 year .....                | 65 |
| [표 3-8] National statistic report - MSW Incinerator .....                      | 68 |
| [표 3-9] National statistic report - MSW Landfill .....                         | 68 |
| [표 3-10] Amount of incoming waste from province, SLC .....                     | 69 |
| [표 3-11] Waste composition of Input waste in SLC .....                         | 70 |
| [표 3-12] Statistics of Input waste in incinerators .....                       | 71 |
| [표 3-13] Trend of Textile components in MSW .....                              | 72 |
| [표 3-14] Survey result of waste components in Plant I .....                    | 72 |
| [표 3-15] Categories of MSW components in Plant I .....                         | 72 |
| [표 3-16] BCF&FCF contents of input waste in Korea incinerator (MOE 2018) ..... | 73 |
| [표 3-17] BCF&FCF contents of input waste in Korea incinerator(MOE 2019) .....  | 73 |
| [표 3-18] BCF&FCF contents of input waste in SLC (SLC 2019) .....               | 74 |
| [표 3-19] BCF&FCF contents of input waste in Plant N (MOE 2019) .....           | 74 |

|   |        |
|---|--------|
| [㉟ 3-20] BCF&FCF contents of input waste in Plant S<br>(MOE 2019) .....                           | 75     |
| [㉟ 3-21] BCF&FCF contents of input waste in Plant I<br>(MOE 2019) .....                           | 75     |
| [㉟ 3-22] BCF&FCF contents of input waste in Plant I<br>(Site survey 2019) .....                   | 76     |
| [㉟ 3-23] Comparison of BCF in MSW Incinerators .....  | 76     |
| [㉟ 3-24] BCF & FCF during 2014~2018 years in Plant S<br>.....                                     | 77     |
| [㉟ 3-25] BCF & FCF content in Plant N with revised FCF<br>default value into 40% of Textile ..... | 77     |
| [㉟ 3-26] BCF & FCF during 2014~2018 years in Plant S ..   | 78     |
| [㉟ 3-26] BCF & FCF during 2014~2018 years in Plant S ..   | 78     |
| [㉟ 3-27] BCF & FCF content in Plant S with revised FCF<br>default value into 40% of Textile ..... | 78     |
| [㉟ 3-28] BCF & FCF in Plant B by TIER 2 methodology at<br>2017 year .....                         | 81     |
| [㉟ 3-29] BCF & FCF in Plant U by TIER 2 methodology at<br>2017 year .....                         | 82     |
| [㉟ 3-30] ASTM test result of plant B&U at 2017 samples ..   | 82     |
| [㉟ 3-31] CO <sub>2</sub> emission in MSW incinerator at 2018 year .....                           | 84     |
| [㉟ 3-32] Trend of GHG emission in three incinerator plant   | 82     |
| <br>[㉟ 4- 1] Average Exergy efficiency and R1 value of WtE<br>plant in European Country .....     | <br>99 |

|  |     |
|--|-----|
| [표 4-2] Comparison of R1 formula and exergy efficiency<br>by specific plant .....                            | 100 |
| [표 4-3] EC of electricity/heat in various efficiency .....   | 101 |
| [표 4-4] The exergy and thermodynamic parameters of<br>CHP incinerator in Plant N .....                       | 104 |
| [표 4-5] Energy/Exergy ratio of District heating in Korea ..  | 105 |
| [표 4-6] Thermodynamic parameters of steam inlet of<br>turbine .....  | 106 |
| [표 4-7] Exergy efficiency in heat exchanging area of 4<br>plant in Korea .....                               | 109 |
| [표 4-8] Energy/Exergy ratio of District heating in Plant S,<br>N with two stages heat-exchanger system ..... | 110 |
| [표 4-9] Exergy efficiency between Electricity/heat ratio in<br>district heating system in Korea .....        | 110 |
| [표 4-10] Country specific emission factor .....  | 111 |
| [표 4-11] EC of electricity/heat in IEF and exergy .....  | 112 |
| [표 4-12] General status of the reference sites at 2018 years ·   | 114 |
| [표 4-13] Operation status of three incineration plants .....   | 117 |
| [표 4-14] Calculation of R1 in three incineration plants ..   | 118 |
| [표 4-15] GHG emissions of three plants .....   | 119 |
| [표 4-16] 온실가스 저감량 (회수량) 산정방법론 비교 .....   | 120 |
| [표 4-17] GHG mitigation ratio by three methodologies ..  | 120 |
| [표 4-18] Adjusted EC of electricity/heat in IEF and exergy<br>.....  | 123 |
| [표 4-19] Comparison between R1/R2 in three plants .....  | 127 |

|   |     |
|---|-----|
| [ㄨ 4-20] Relative Standard Deviation of R1/CDM and<br>R2/CDM .....    | 127 |
| [ㄨ 5-1] Power generation increasing ratio by various<br>method .....  | 137 |
| [ㄨ 5-2] Advanced waste technology in Europe .....                     | 137 |
| [ㄨ 5-3] Average loss in WtE plant in Europe .....                     | 143 |
| [ㄨ 5-4] Generation in different stage of plant N .....                | 147 |
| [ㄨ 5-5] Heat and mass balance of plant N .....                        | 148 |
| [ㄨ 5-6] Heat supply to district heating system in Plant N<br>.....    | 149 |
| [ㄨ 5-7] Case study in Plant I and S .....                             | 150 |
| [ㄨ 5-8] Case study conditions of Plant I .....                        | 150 |
| [ㄨ 5-9] Thermodynamic parameters of Re-heat cycle in<br>Plant I ..... | 151 |
| [ㄨ 5-10] Power generation at each cases in Plant I .....              | 154 |
| [ㄨ 5-11] Case study in S plant (Design Parameter) .....               | 155 |
| [ㄨ 5-12] R1, R2, R2' of different steam flow in Plant I<br>.....      | 158 |
| [ㄨ 5-13] R1/R2 of different steam design at Plant I .....             | 159 |
| [ㄨ 5-14] R1, R2 ,R2' of different steam design at Plant S<br>.....    | 159 |
| [ㄨ 5-15] R1, R2 ,R2' effect by increasing power<br>generation .....   | 159 |

## 그림 목차

|   |    |
|---|----|
| [그림 2-1] Trend of emission factor in EU 28 countries  | 21 |
| [그림 2-2] Water-stream of Brescai WtE plant  | 31 |
| [그림 2-3] Water-stream of Amsterdam WtE plant  | 32 |
| [그림 2-4] The ideal reheat rankine cycle   | 33 |
| [그림 2-5] Water-steam schematic diagram of 130bar/<br>440 °C system with intermediate reheating  | 34 |
| [그림 3-1] Illustration for Eq1 (Biobased Carbon Content<br>BCC), ASTM D6866-20 Table 3   | 50 |
| [그림 3-2] Illustration for Eq3 (Biogenic Carbon Content,<br>BGCC), ASTM D6866 -20 Table 5  | 50 |
| [그림 3-3] Radiocarbon results of acacia and unknown<br>botanical origin honey samples  | 53 |
| [그림 3-4] $^{14}\text{C}$ BP(‰) contents in Atmosphere   | 54 |
| [그림 3-5] pMC content in atmosphere  | 55 |
| [그림 3-6] A comparison of Heidelberg and Seattle German<br>pine measurements   | 56 |
| [그림 3-7] Smoothed (200-yr moving average) $^{14}\text{C}$ age<br>profiles for the atmosphere and surface ocean  | 57 |
| [그림 3-8] Ocean circulation change as the causal agent   | 58 |
| [그림 3-9] Temporal variations of concentrations of total<br>carbon (TC) and water-soluble organic carbon<br>(WSOC), mass ratios of WSOC/TC, and stable<br>carbon isotope ratios ( $\delta^{13}\text{C}$ ) of TC and WSOC |    |

|   |     |
|---|-----|
| in aerosols (TSP) from Sapporo, northern Japan<br>during the campaign .....   | 59  |
| [그림 3-10] PMC content nearby Nuclear Power Plant .....  | 60  |
| [그림 3-11] Comparison curve between CO2 content in<br>Korean atmosphere and world average .....                                  | 61  |
| [그림 3-12] 14C content in korea during 2010-2013 .....   | 62  |
| [그림 3-13] Status and forecast of pMC content in<br>atmosphere .....   | 64  |
| [그림 3-14] Photos of test process .....  | 64  |
| [그림 4-1] Comparison of plants & energy efficiency<br>summary between CEWEP report II 2009 and<br>CEWEP report III 2013.10 ..... | 95  |
| [그림 4-2] R1 efficiency based on Heating Degree Date ·   | 96  |
| [그림 4-3] Exergy destruction flow diagram of Plant N ·   | 103 |
| [그림 4-4] Turbine efficiency as per input steam condition ·  | 107 |
| [그림 4-5] Variation of entropy at exhaust terminal of turbine·   | 103 |
| [그림 4-6] Energy Balance of plant N .....  | 114 |
| [그림 4-7] Energy Balance of plant S .....  | 115 |
| [그림 4-8] Energy Balance of plant I .....  | 115 |
| [그림 4-9] Schematic diagram of three methodologies .....   | 121 |
| [그림 4-10] System Boundaries of R1 .....   | 122 |
| [그림 5-1] Steam diagram of 75bar, 460°C at Brescia model·  | 139 |
| [그림 5-2] Configuration diagram of two stage steam<br>boosting process in Reno-Nord .....  | 140 |
| [그림 5-3] Schematic diagram of By-pass process .....   | 141 |

|   |     |
|---|-----|
| [그림 5-4] Water-steam schematic diagram of 130bar/440°C<br>intermediating process .....      | 142 |
| [그림 5-5] Condenser pressure vs net power output at 100%<br>load .....                       | 145 |
| [그림 5-6] Electricity generation varied by vacuum gauge in<br>Plant I .....                  | 146 |
| [그림 5-7] Simulation of one stage reheat cycle .....   | 149 |
| [그림 5-8] Case 1 Current(29.4bar, 290°C) T-S diagram of<br>Plant I .....                     | 152 |
| [그림 5-9] Case 2 - Advanced ACC(0.12 bar, 49°C) T-S<br>diagram in Plant I .....              | 152 |
| [그림 5-10] Case 3 - Supercritical T-S diagram(129bar, 440°C)<br>in Plant I .....             | 153 |
| [그림 5-11] Case 4 - Supercritical(129bar, 440°C) and Re-heat<br>T-S diagram in Plant I ..... | 153 |
| [그림 5-12] Power generation increasing ratio by 4 cases in<br>Plant I .....                  | 154 |
| [그림 5-13] Case 1 Current(13.3 bar, 195°C) T-S diagram of<br>Plant S .....                   | 156 |
| [그림 5-14] Supercritical T-S diagram(129bar, 440°C) in Plant S<br>.....                      | 156 |
| [그림 5-15] Case 4 reheat(13bar 320°C) T-S diagram in<br>Plant S .....                        | 157 |
| [그림 5-16] Power generation and increasing ratio of three<br>options in Plant S .....        | 157 |

# 제 1장 서론

## 1.1 연구의 배경

### 1.1.1 폐기물소각시설의 필요성

폐자원에너지에 주목하는 이유는 에너지 잠재량과 온실가스 저감효과가 높다는 점에 있다. 에너지관리공단(2015)에서 최근에 보고한 신재생에너지 활용현황에 따르면 폐기물로 분류되어 신고된 발전용량은 301MW이다. 전국 고형폐기물의 발생 현황과 발열량을 기준으로 에너지공단의 발전 잠재량을 15%의 전기변환이 달성될 경우로 추정하면 아래 표 1-1과 같이 2,026MWh의 발전시설에서 14,700GWh/년의 발전량을 얻을 수 있어 2015년 기준 국내 총소비전력의 2.8%를 담당할 수 있다.

**Table 1-1. Energy potential of solid waste**

| Source     | Ratio                         | Potential of energy |          | 5%* | 10%*  | 15%*  |
|------------|-------------------------------|---------------------|----------|-----|-------|-------|
| Unit       | %                             | TOE/year            | GWh/year | MWh | MWh   | MWh   |
| Household  | 42.8                          | 3,580,706           | 41,644   | 289 | 578   | 868   |
| Industry   | 40.4                          | 3,381,586           | 39,328   | 273 | 546   | 819   |
| Demolition | 5.5                           | 456,044             | 5,304    | 37  | 74    | 110   |
| Harzadous  | 11.3                          | 943,432             | 10,972   | 76  | 152   | 229   |
| Total      | 100.0                         | 8,361,768           | 97,247   | 675 | 1,351 | 2,026 |
| Remarks    | * Based on 300 operation days |                     |          |     |       |       |

생산된 전기와 열은 2차에너지의 일부분을 담당하게 되며 1차에너지인 석탄, 석유, 천연가스등의 절감으로 귀결될 수 있어 온실가스의 간접 저감효과를 가지게 된다.

### 1.1.2 온실가스 배출시설로서의 소각로

2015년 파리에서 합의된 신기후체제 Post-2020에 따라 국가별 감축목표를 제시하고 있다. 한국은 2030년 배출전망치(Business as Usual BAU) 대비 37%를 감축하기로 하였으며 폐기물 부문의 감축목표는 2030년 배출전망치(BAU) 13.83백만톤의 12.3%에 해당하는 1.71 백만톤 (한국환경공단 2018)이다.

폐기물의 배출량을 계산하는 방법론은 IPCC Guideline (2007, 2019)의 규정과 환경공단 (2017) ‘지자체온실가스관리지침’에 따른다. IPCC (2007, 2019)에서는 제 2권 에너지 분야(Volume II) 제 2장 고정시설연소(Ch.2 Stationary Combustion)과 제 5권 (Volume V) 제 5장 소각 및 노천소각 (Ch. 5, Incineration and Open burning)의 산정식을 적용한다.

배출량 계산 시 측정방법의 난이도와 정확성에 따라 Tier 1, 2, 3의 수준으로 구분된다. 각 수준별 배출량을 계산할 때 불확실성의 요인으로는 크게 세 가지를 들 수 있다. 첫째는 표본추출의 오류이다. 둘째는 추출된 폐기물의 품목별 생물기반탄소분율(Biogenic Carbon Fraction)의 설정값이다. 셋째는 생물기반탄소분율 측정법에서 percent modern carbon (pMC)에 기반한 보정지수(Atmospheric Correction Factor, REF)의 산정이다. Tier 1, 2에서는 첫 번째, 두 번째 그리고 세 번째 불확실성이 모두 적용되며, Tier3에서는 세 번째 요인이 결정적으로 작용한다.

pMC는 대기 중  $^{14}\text{C}$ 비율을 1950년을 기준으로 해당년도의 대기중  $^{14}\text{C}$ 비율로 나눈 비율로 표시된다.  $^{14}\text{C}$ 는 광합성작용과 핵반응으로 생성되는 물질로서 약 5700년의 반감기를 가지고 베타분해를 거쳐  $^{14}\text{N}$ 으로 전환되며 고고학에서 화석의 연대를 측정하는 주요한 원소로 사용되어 왔다. 1950년대까지는 대기중에 약  $1.2 \times 10^{-6}$ 의 비율로서 존재하였지만 이후 대기 중 핵실험의 영향으로

비약적으로 증가하게 된다. 국제적으로 통용되는 측정법은 ASTM D6866로서 2020년까지 총 일곱 번 수정되었다. ASTM D6866은 화석연료기반탄소인 석탄, 석유 등에서는 -생성연도가 오래전이므로 대기 중에 포함되어 있던  $^{14}\text{C}$ 의 반감기가 충분히 경과되어-  $^{14}\text{C}$ 가 검출될 수 없으므로 검출된  $^{14}\text{C}$ 는 모두 생물유래기반탄소로 간주하도록 하고 있다. 그리고 이를 현재 대기 중의 pMC값을 이용하여 보정계수를 적용한다. 보정계수를 어떻게 정하는가에 따라 총배출된 탄소량 중에 온실가스 양은 많은 편차를 보이게 된다.

### 1.1.3 에너지회수에 따른 저감량의 산정

소각시설에서 에너지회수를 이용하여 온실가스 저감량을 산정하는 방법에는 열역학적 접근법과 간접배출계수 적용법이 있다. 열역학적으로 산정하는 방식은 환경공단(2017)의 ‘지자체 온실가스 관리지침’에서 정한 에너지회수효율방식과 엑서지 손실계산법, 새로 시행되고 있는 에너지회수효율제도(R1)에 의한 방법 등 다양한 연관식이 존재한다. 에너지 회수효율 기본식은 아래 식 1-1과 같다.

$$\eta = \text{Useful out put energy} / \text{input energy} \quad \text{식 1-1}$$

환경부 (2017)는 폐기물소각시설에서 에너지회수효율을 측정하기 위하여 R1제도를 공표하였다. 이 제도는 유럽연합(EU)의 Waste Framework Directive 2008/98/EC [3,4] (WFD) R1제도<sup>5)</sup>와 동일하다. 달성목표는 EU기준 0.65, 한국기준은 0.75이며 계산식은 아래 1-2와 같다.

$$R1(\text{energy efficiency}) = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0.97 \times (E_w + E_f)} \quad \text{식 1-2}$$

R1지수와는 별도로 독자적인 에너지회수효율 제도를 시행하는

국가들이 있다. 유럽연합 안에서 스위스, 네덜란드, 오스트리아 (Gohlke, 2009), 그리고 아시아 지역의 일본 (박정규., 2013)은 고유의 에너지회수효율지수를 운영하고 있다.

열역학적으로 에너지회수효율을 계산하기에 적합한 방식은 엑서지 계산법이다. Grosso (2010)는 R1의 에너지효율이 엑서지 효율을 반영하여야 한다고 주장하였다.

간접배출계수를 이용하는 방식은 생산된 전기, 열, 액체연료, 기체연료 등이 가진 배출계수를 이용하여 온실가스 저감량을 산정하는 방법이다. CDM 방법론에서 가장 널리 사용되고 있다.

위의 접근방법들에서 각 회수효율산정기준의 차이를 나타내는 요소는 전기/열의 등가지수이다. 자자체온실가스관리지침에서는 전기로 생산된 에너지와 열로 생산된 에너지는 등가로서 전기/열의 비율은 1이다. 에너지회수효율 R1에서는 전기는 2.6배의 등가계수(Equivalent Factor), 열의 EF는 1.1로서 전기/열의 비율은 2.38이다. 오스트리아의 경우는 2.6, 일본의 경우 전력손실계수법(Power Loss Coefficient)을 적용하면 최대 6.70에 이르게 된다. 이러한 전기/열의 등가지수 산정은 에너지회수 효율과 온실가스 저감효과와의 상관관계를 설정하는데 중요한 요인이 된다. 온실가스배출계수로 보면 전기는 0.466TCO<sub>2</sub>/Mwh, 열로 회수될 때는 0.1228TCO<sub>2</sub>/Gcal로서 전기/열의 비율은 3.8이다.

#### 1.1.4 전기생산효율 제고를 위한 요소기술의 적용

소각로에서 전기생산량을 늘리는 것은 에너지회수효율과 온실가스저감효과를 증대시키는 효과가 있다. 발전효율을 올리기 위한 요소기술 (국립환경과학원 et al., 2018)로서는 열회수능력 강화, 시설 내 사용량의 절감, 스팀의 엑서지 (exergy)제고 등의

방법이 사용되며 이중 액서지 제고가 가장 발전효율을 올리는 것으로 알려져 있으므로 이에 관한 체계적인 검토가 필요하다. R1제도는 전기생산의 효율을 2.38배로 규정하고 있으며 이전에도 유럽에서는 Waste Management Frame Directive (1998)에 의해 에너지회수효율에 관한 많은 규정들이 있었다. 2000년 이후에 신설되거나 개조된 많은 소각시설들이 에너지회수 효율을 증대하는 방안으로서 전기생산효율을 제고하기 위한 기술들을 개발해 왔다. Matin (2004), Gohlke(2009), Bogale (2014) 등에서 조사된 기술로서 스팀고효율화, steam boosting, Exhaust gas by-pass, Intermediate re-heat 등의 기술들이 소개되었으며 암스테르담시설의 경우 전기생산효율을 30% 이상 달성하였다. 국내 소각기술에서 적용되는 에너지이용효율화는 위의 유럽 선진시설들 중에서 향후 어떠한 기술들을 도입하는 것이 가장 현실적이고 에너지이용효율과 온실가스저감에 기여하는지 검토하여볼 필요가 있다.

### 1.1.5 에너지회수효율과 온실가스 저감과의 상관관계

온실가스저감은 세계적인 흐름이고 불가역적인 방향성을 가지고 있다. 한국에서 생활폐기물처리는 각 자치단체장의 법정 의무로서 기초, 광역의 구분 없이 필수시설이다. 또한 각 자치단체는 배출권 목표관리자에 해당되며 [공공부문온실가스목표관리제]에 의해 배출량 저감목표를 가지게 된다. 자치단체가 관리하는 배출량 중 가장 많은 부분이 폐기물소각시설과 하수처리장이다. IPCC vol V에 따른 배출량은 발생량의 저감 없이는 배출량자체를 감소시키는 것이 거의 불가능하므로, 온실가스는 에너지회수를 통한 저감이 거의 유일하다. 그러므로 소각시설에서의 에너지 회수효율은 온실가스저감이라는 상위 목표 아래 위치해야 하고 이 두 가지 정책목표들이 상호 관계하에 통합적으로 관리되어야 한다. 그럼에도

국내 지자체온실가스관리지침에서는 전기, 열생산을 통해 외부로 송출된 에너지에 대해서는 어느 경우도 감축량으로 산정할 수 있는 방법론이 존재하지 않는다. 열의 경우, 사용자( 집단에너지사업자)가 보고할 수 있는 규정만이 있어 생활폐기물 소각로 운영자는 감축수단을 보유하지 못하고 있으며 전기로 생산되어 송출된 경우에는 아예 배추량상정방법론이 제시되어 있지 않다.

## 1.2 연구의 목적

이 연구는 아래의 세부주제를 연구목적으로 한다.

- 1) 소각시설에서의 배출량 산정 시 불확실성에 대한 고찰과 Tier 3, Tier 4 산정방법을 위한 요소들의 분석과 바이오기반탄소 함량산정 시 주요 지수인 pMC에 대한 연구 및 지수예측
- 2) 전기/열의 등가지수를 엑서지효율로 비교검토하여 이 결과를 이용한 에너지회수효율(R2)의 도출.
- 3) 폐자원에너지회수시설에서 전력생산증대를 위한 요소기술 중 재열사이클을 적용할 경우, 전산모사를 통한 효율증대 분석 및 온실가스저감과의 관계검증

## 1.3 자료 출처와 논문 구성

폐기물 통계는 환경부, 한국환경공단, 국립환경과학원 등 정부 또는 정부 관계기관에서 발표한 공식자료를 사용하였고, 그중에서 R1제도 이후에 에너지효율화설비를 설치한 Plant S, Plant I, Plant N의 3개 시설을 표본으로 선택하였다. Plant S는 열병합시설로서 지역 난방 사업자가 연중 열을 이용하고 있는 시설이며, Plant I는 소량의 소내 주민편익시설을 제외하고 주변에 열이용자가 없는 발전전용 시설이며, Plant N 은 국내에 설치된 보일러 중 가장 고효율화된 스팀(40bar, 400℃)을 생산하는 열병합시설이지만

하절기에는 열수요가 감소하는 사용곡선을 보인 시설이다. 위 3개 시설은 한국 내 소각시설의 전형을 가진 대표시설로 볼 수 있다. 위의 자료를 이용하여 1, 2, 3 연구목적의 소주제별로 아래와 같은 방법으로 결과 값을 구하였다.

1) 배출량 산정 시 공표된 자료 이외에 Plant I에서 종이류와 플라스틱류, 섬유류의 세부항목별 구성비율을 현장 조사를 통해 구하였다.

환경부의 전국생활폐기물 운영현황(2014, 2015, 2016, 2017, 2018)에 의거하여 계산된 3개 시설의 배출량을 검증하기 ASTM D6866에 따른 Biogenic Carbon Fraction (BCF)과 Fossil Carbon Fraction (FCF)의 측정결과와 비교하여 배출량 산정 시 BCF에 대한 보정치 및 pMC 농도를 계산하였다.

2) R1제도에 대한 여러 가지의 이견들을 취합하여 타당성과 이론적 기반에 대하여 검토하고 Plant N을 대상으로 엑서지 파괴에 의한 열역학적 요소들을 본 논문에서 구하였다. 그리고 열교환 구간에서의 Exergy/Energy분율을 구하기 위하여 국내 열병합으로 운영중인 Plant IN의 자료를 추가로 비교하였다.

3) 전산모사에는 Steam-online 프로그램을 사용하였다.

논문의 구성은 제 1장 서론, 제2장 문헌조사와 방법론 고찰, 제 3장 온실가스 배출량 산정 시의 불확실성 분석과 대상 시설의 배출량 계산, 제 4장 전기/열 등가지수 고찰에 따른 수정에너지 회수효율(R2) 도출, 제 5장 재열사이클 도입 시 에너지 회수효율과 온실가스 저감과의 상관관계분석, 제 6장 결론으로 구성하였다.

## 1.4 참고문헌

1. CEWEP Report I (2007)
2. CEWEP Report II (2010)
3. CEWEP Report III(2013)
4. <https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/FXBXLVGFF4DLI5WC1PKFW7KBRW62QB>
5. <https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/SU1HDJCPVB9QB8D54SGUARSQVLTJUG>
6. Lombardi, L., Carnevale, E.A. “Evaluation of the environmental sustainability of different waste-to-energy plant configurations”. Waste Management (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.006>
7. Mario Grosso , Astrid Motta, Lucia Rigamonti. “Efficiency of energy recovery from waste incineration, in the light of the new Waste Framework Directive”, Waste Management 30 (2010)

## 제2장 선행연구와 방법론 검토

### 2.1 소각시설에서 온실가스배출량 및 저감량

#### 2.1.1 소각로에서의 배출량 산정

##### 1) 산정식

소각로에서 발생하는 온실가스는 전국 지자체온실가스 배출지침 (환경관리공단 et al. 2017)에 의거 산정한다. 폐기물 소각 시 배출되는 온실가스는 CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O이며, 소각량중 바이오기반 탄소함량(Biogenic Carbon Fraction BCF)를 공제한다. CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O로 인한 배출량이 총배출량에서 차지하는 정도가 미미하므로 일반적으로 CO<sub>2</sub>의 배출농도를 소각로에서의 배출농도로 하며 아래 식 2-1을 사용한다.

$$\text{CO}_2 \text{ Emissions} = \sum (\text{SW}_{ij} \times \text{dm}_{ij} \times \text{CF}_{ij} \times \text{FCF}_{ij} \times \text{OF}_{ij}) \times 44/12 \quad 2-1$$

dm : 건조물질함량, FCF : 화석탄소비율(Fossil Carbon Fraction)

OF<sub>ij</sub> : 성상별 산화계수

방법론은 2006 IPCC G/L을 따르며 Tier수준은 아래와 같다.

**Table 2-1. 지자체온실가스산정지침 (환경공단 2017 et al.)**

| 카테고리   | 온실가스             | 적용Tier 수준 | 설 명                               |
|--|------------------|-----------|-----------------------------------|
| 4C1  | CO <sub>2</sub>  | Tier1     | 국가활동자료, IPCC기본배출계수                |
|  | CH <sub>4</sub>  | Tier2     | 국가활동자료(소각폐기물총량)(1), IPCC기본배출계수(2) |
|  | N <sub>2</sub> O | Tier2     |                                   |
| (1) 배출원(생활,사업장)은 구분, 배출원별 구성(음식물, 플라스틱 등)은 구분 없이 사용<br>(2) 폐기물 소각 유형/기술별 기본값 분류 적용 |                  |           |                                   |

Tier수준을 보다 높은 단계인 Tier3로 격상하여 상향식으로 작성하여야 한다는 의견 (유종익 et al. 2019)이 있고 소각장에서의 온실가스배출량을 Tier3 수준으로 평가한 보고(Lee 2018)도 있다. 폐기물의 탄소함량측정법에는 DS/CEN/TS 15440 CEN/TR 15591, and ASTM D6866 등이 사용되고 있다. 특히 ASTM D6866은 BCF를 측정하는 세계적인 기준으로서  $^{14}\text{C}$ 를 측정하는 방식이다. Hyeyoung Lee (2018), Seung Min Kang (2016)은 3가지 시험방법으로 소각로에서의 온실가스 산정을 비교하였다. 세 가지 방법은

- 1) IPCC GL Method - IPCC 에서 부여한 표준 dm, FCF분율을 이용하는 방법,
- 2) 성상을 조사하고 성상별 dm과 FCF를 조사하여 배출량을 산정하는 방법
- 3) 연소가스를 이용한 분석법
  - 3-1) 연소가스중의  $\text{CO}_2$ 분율
  - 3-2) 연소가스중의  $\text{O}_2$ 분율

Hyeyoung Lee (2018)에서는 IPCC GL, 3-1), 3-2)에 의한 방법으로 배출량을 산정하였고 Seung Min Kang (2016, 2018)에서는 1), 2), 3-1)에 의한 방법으로 배출량을 산정하여 비교하였다. 배출량 산정시 폐기물에 포함된 BCF와 FCF분석은 배출량산정에서 아주 중요하다. 배출량은 위 식 2-1에 의하여 FCF만을 대상으로 하기 때문이다. Lee et al. (2018)은 4곳의 MSW 소각로와 3곳의 사업장폐기물 소각로를 대상으로 한국환경공단의 TMS 시스템에서 측정된 자료를 이용하여 1) 과 3-1)과 3-2)의 결과를 비교하였다.

측정결과를 보면

1) 3-1), 3-2) 방법론은 7곳 모두에서 유사하였다.

2) MSW소각로에서는 1)값은 3)값과 모두 유사하였다.

3) 사업장폐기물 소각로 3곳에서 1) 값은 3) 값보다 훨씬 높았다. 위의 결과는 사업장폐기물의 플라스틱 함량이 아주 높는데 플라스틱의 FCFij가 IPCC GI의 100%보다 낮은 87% 정도가 원인일 것으로 추정하였다. ASTM D6866을 사용하는데 연소공정은 필수적으로 외부공기의 공급이 필요하므로 공급된 외부공기중의  $^{14}\text{C}$ 의 분율을 무시할 수 없다.  $^{14}\text{C}$  측정법은 Frantz Curie (1934)에 의해 고안되었으며 Karmen(1940), Willard Frank Libby(1946)에 의해 연대측정법으로 정립되어, Willard는 1960년 노벨상을 수상하며 보편적인 측정법으로 자리잡게 되었다. Stuiver (2017)에 의하면 20세기 전반기(정확히는 1952년도까지)에 공기중의  $^{14}\text{C}$  농도는  $1.26 \times 10^{-12}$ 에 불과하였다. ASTM D6866-20에서 설명하고 있는 pMC의 농도에 관한 기준을 보면, 전세계에서 시행된 잣은 핵실험으로 대기중의 이산화탄소 ( $\text{CO}_2$ )중  $^{14}\text{C}$ 의 분율(Percent modern Carbon,  $\text{PMC}=100$  at 1950 years)에 영향을 주어 1963년에는 190 pMC에 이르렀다가 1975년에는 140 pMC, 1985년에 120 pMC, 2016년에는 101.5 pMC가 되었다. 표준값의 측정은 대기중  $\text{CO}_2$  확산의 영향을 가장 적게 받는 뉴질랜드와 알래스카 지역이며 지역별로 편차를 보일 수 있다.

ASTM의 규정에 의한 pMC값은 무차원 변수로서 아래 식 2-2와 같이 구할 수 있다.

$$pMC = \left( \frac{{}^{14}\text{C}/{}^{13}\text{C}}{\text{sample}} \right) / \left( \frac{{}^{14}\text{C}/{}^{13}\text{C}}{\text{standard, 1950}} \right) * 100 \quad \text{식 2-2}$$

이 pMC값의 급격한 감소는  $^{14}\text{C}$ 의 반감기가 경과되어 감소하는

것이 아니라, 화석연료사용량의 증가에 따라  $^{14}\text{C}$ 의 농도가 희석되었기 때문이다. 폐기물의 연소과정에서 발생하는 탄소는 총유기탄소 (Total Organic Carbon)와 총무기탄소(Total inorganic Carbon)가 더해진 총탄소량(Total Carbon)으로 구성된다. ASTM 측정법은 생분해성플라스틱중의 생물기반유기탄소를 분석하는 Bio-based carbon과 연소시설에서의 생물기반탄소(Biogenic Carbon)을 구분 하여 정의하고 있으며 소각로의 연소가스에서 얻어진 탄소는 모두 연료에서 기인한다고 가정하고 총탄소량에서 Biogenic Carbon Fraction을 제외한 탄소량을 화석기반탄소(Fossil Carbon Fraction, FCF)로 정한다. pMC 측정결과가 0이라는 의미는 연소된 탄소의 성질이 모두 반감기가 충분히 경과된(석유류 등) 화석기반탄소라는 의미이고 pMC100의 의미는 연소된 탄소가 모두 현재시점에서 생산된 탄소(Biogenic Carbon)라는 의미이다. pMC가 100을 초과하는 경우는 대기중의 pMC농도가 높은 시절에 바이오매스에 흡수된  $^{14}\text{C}$ 의 비율이 존재한다는 의미이다.

우리나라 소각시설에서 BCF를 계산하려면 대기중의 pMC농도에 대한 표준값이 정해져야 한다. 대기중  $^{14}\text{C}$ 는 연소과정에서 공기중에 함유되어 연소가스중에 포함되므로 연료에 함유된  $^{14}\text{C}$ 의 분율과 대기중에 함유된  $^{14}\text{C}$ 의 분율이 함께 고려되어야 한다. 이 논문에서는 위의 측정법중 BCF산정 시 샘플로 취합된 각 폐기물성상별 FCF분율과 대기중의 pMC농도를 동시에 고려하여 FCF를 산정하고자 한다.

## 2.1.2 소각로에서의 온실가스 배출량 산정방안

### 1) 메탄회피방법 (Methane Avoidance Methodology)

온실가스배출량, 혹은 시설설치에 따른 저감량을 산정할 때 현재의 폐기물 처리방식이 매립이고 매립장에서 매립가스가

회산되고 있었다면 소각시설은 우수한 온실가스저감시설(Project Emission)이다. 1톤의 폐기물(LHV=2,850kcal/kg)이 매립처리대신에 소각시설에서 연소하여 투입에너지의 10%가 전기로, 38%가 열로 전환된 WtE시설의 온실가스 저감효과는 <표2-2>와 같다. 표2-2는 이상적인 모델로서 본항의 메탄회피방법론과 얻어진 에너지를 산정할 때는 4)항의 국가고유배출계수방법론을 사용한 경우이다.

이 표에서 보면 소각로는 매립을 대체하는 에너지 회수시설로서 4.01TCO<sub>2</sub> /waste.ton의 온실가스저감효과를 가진 저감시설이다. 에너지회수로 인한 저감량만을 산정하면 0.28 TCO<sub>2</sub> /waste.ton의 온실가스저감실적을 보여준다.

**Table 2-2. GHG reduction by CDM methodology of AM0025&ACM0012**

| Field | BCF*  | FCF   |
|-------|-------|-------|
| RGHG  | 57.2% | 42.8% |

A. BE(Baseline emission) : Sanitary landfill

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| $E_{\text{landfill.TCO}_2}$ | $BCF \times Cf \times Mf \times GWP = 0.572 \times 0.6 \times 0.6 \times 25$<br>$= 5.35 \text{ TCO}_2$ |
| Cf                          | means organic waste to LFG in landfill site, 60%   |
| Mf                          | means content of methane among LFG gas, 60%  |
| GWP                         | means Global warming potential, $CH_4=25$  |

B. PE(Project Emission)

$$(1) E_{\text{incinerator.TCO}_2} = 0.428 \times 3.67 = 1.57 \text{ TCO}_2$$

$$(2) E_{\text{recovery.TCO}_2} = E_{\text{el}} \times \text{IEF}(1) + E_{\text{h}} \times \text{IEF}(2) = 0.28 \text{ TCO}_2$$

|                 |   |
|-----------------|---|
| $E_{\text{el}}$ | means electricity connected to public grid<br>$= 0.277\text{kg/sec} \times 3,000\text{kcal/kg} \div 0.86 \times 10\% = 331.5 \text{ kwh}$ |
| $E_{\text{h}}$  | means heat connected to outside<br>$= 1\text{ton/hr} \times 2,850\text{kcal/kg} \times 38\% = 1.08\text{Gcal/hr}$                         |
| IEF             | Electricity : $0.466\text{TCO}_2/\text{MWh}$ , $0.1226 \text{ TCO}_2/\text{Gcal}$   |

C. GHG Reduction = BE-PE

$$= E_{\text{landfill}} - (E_{\text{incinerator}} - E_{\text{recovery}}) = 4.01 \text{ TCO}_2$$

\* BCF 값은 3절에서 계산된 수치를 사용하였음

## 2) 지자체 온실가스 관리지침에 따른 회수율 산정법

소각로에서 생산되어 외부로 공급된 에너지에 대하여 환경관리공단 (2017) ‘지자체 온실가스 산정지침 별표 [2.4.3] 폐열 회수에 의한 온실가스 산정 및 보고’에서는 아래와 같은 계산식 (2-3, 4, 5, 6, 7,

8) 을 제시하고 있다.

[Part 1 회수율 산정]

$$NBF = \frac{\sum_i (AD_i \times dm_i \times CF_i \times FCF_i)}{AD_{waste}} \quad (2-3)$$

$$NCV_{actual} = (AD_{waste} \times NCV_{WtE \text{ plant}}) \quad (2-4)$$

$$R_{recovery} = R_{real} / NCV_{real} \quad (2-5)$$

NBF는 폐기물 내 화석탄소비율

{Part 2} 회수에 의한 배출량 산정

$$Emission_{total} = Emission_{waste, CO2eq} + Emission_{energy, CO2eq} \quad (2-6)$$

$$Emission_{energy, CO2eq} = R_{emissionCO2} + R_{emissionCH4} + R_{emission N2O} \quad (2-7)$$

CH<sub>4</sub> 와 N<sub>2</sub>O 배출량을 무시하면

$$R_{emission CO2,eq} = E_{emission CO2} \times R_{recovery} \quad (2-8)$$

NBF : 폐기물 내 화석탄소 비율, *i* : 폐기물 조성

AD<sub>*i*</sub> : *i* 폐기물 조성 내 소각량(톤/년)

AD<sub>waste</sub> : 총 소각 폐기물량(톤/년)

dm<sub>*i*</sub> : *i* 폐기물 조성 내 건조물질 함량

CF<sub>*i*</sub> : *i* 폐기물(건량기준) 조성 내 총 탄소함량

FCF<sub>*i*</sub> : *i* 폐기물 조성의 총 탄소함량 중 화석탄소 비율

R<sub>실제</sub> : 소각 폐열 회수율(Gcal/년)

R<sub>회수율</sub> : 발열량 기준 회수율(fraction)

NCV<sub>실제(이론치)</sub> : 투입 총 폐기물의 실제(이론적)

발열량(Gcal/년) NCV<sub>자원회수시설</sub> : 자원회수시설

Emission<sub>전체</sub> : 소각에 의한 온실가스 총 배출량

Emission<sub>폐기물, CO2eq</sub> : 소각 배출량 중 폐기물 분야 보고 대상 배출량

Emission<sub>에너지, CO2eq</sub> : 소각 배출량 중 에너지 분야 보고 대상 배출량

R<sub>배출량(CO2/CH4/N2O)</sub> : 에너지분야에 포함되는 각 온실가스별 배출량

환경공단 (2017) 기준에는 회수율 산정방법과 보고주체를 구분하여 규정하였다. 먼저 회수율은 외부로 송출된 에너지를 투입에너지로 나눈 분율을 의미한다. 그리고 보고주체는 송출된 에너지로 인한 배출량을 에너지를 사용한 사업자 (지역난방사업자 혹은 산업단지공단 내 기업)가 나누어 신고하게 된다. 일반적으로 지역난방사업자는 기업인벤토리목록을 가지고 있으므로 외부에서 공급받은 열량만큼 연료소모량이 감소하게 되어 감축효과로 인정받을 수 있다. 산업단지에 공급된 경우 산업단지는 공간적·지리적 개념으로서 활동주체가 아니므로 산업단지내에 소재한 기업에 따라 보고의무를 지닌 경우도 있으나 대부분 보고주체가 아니므로 회수된 열량이 국가인벤토리에 반영되지 않는다.

저감량을 산정함에 있어서 가장 큰 문제는 소각로 운영자가 저감량을 보고할 방법론이 존재하지 않는다는 점이다. 위의 규정은 외부로 송출된 열에너지를 에너지사용자(집단에너지 사업자이거나 기업)만이 보고할 수 있으며 전기가 외부로 송출된 경우에는 경우에는 별도의 산정방법이 없다.

### 3) 에너지회수효율(R1)에서의 저감량 산정값

Gohlke et al. (2009)은 소각로에서의 온실가스저감효과를 산정하였다. 비교에서 사용된 가정은 다음과 같다.

- (1) 스팀생산조건 40bar, 380°C (독일 내 보통수준의 소각로 )
- (2) 발전전용시 에너지전환효율 : 21% (열수지에 의함)
- (3) 열병합 시 효율 배분 : 전기 17%, 열공급 30% (열수지에 의함)
- (4) BCF : 56% ( 2007 US department of energy statistics)
- (5) 석탄 1톤당 온실가스 : 93 ton/TJ

(6) LNG 1톤당 온실가스 : 56 ton/TJ

(7) 폐기물 1톤당 온실가스 : 53 ton/TJ

표 2-3에서 위의 값에서 대입하여 구한 결과를 정리하였다. 아래의 온실가스 산정결과는 Gohlke의 계산법에 따라 본 보고서에서 추가한 사항으로 원문에서는 계산되지 않은 수치들이다. 그리고 R1규정은 온실가스감출량에 대한 언급이 없고 학술적으로만 검토된 내용이다.

**Table 2-3. Examples of GHG performance of WtE system (Gohlke 2009)**

|                                    |               |         | Energy generation by fossil fuel WtE for favourable CO2 balance |         |          |         | Typical WtE    |       |
|------------------------------------|---------------|---------|---|---------|----------|---------|----------------|-------|
|                                    |               |         | Coal  | LNG     | WtE      |         | (40Bar, 380°C) |       |
|                                    |               |         | Electric  | heating | Electric | Heating | Electric       | CHP   |
| Efficiency                         | Power         | 40%     | 0%  | 10%     | 0%       | 21%     | 17%            |       |
| (Secondary energy /primary energy) | Heat          | 0%      | 95%   | 0%      | 40%      | 0%      | 30%            |       |
| CO2 referred by primary energy     | Specific      | ton/TJ  | 93  | 56      | 53       | 53      | 53             | 53    |
|                                    | FCF           | ton/TJ  | 93  | 56      | 23       | 23      | 23             | 23    |
|                                    | BCF           | ton/TJ  | 0   | 0       | 30       | 30      | 30             | 30    |
| GHG by secondary energy            |               | ton/TJ  | 232.5   | 58.9    | 232.3    | 57.5    | 109.5          | 48.9  |
|                                    |               | kg/MWh  | 836.9   | 212.2   | 836.3    | 207.0   | 394.3          | 176.2 |
|                                    |               | kg/Gcal | 973.2   | 246.7   | 972.4    | 240.7   | 458.4          | 204.8 |
| Remarks (1)                        | R1            |         |   |         | 0.27     | 0.45    | 0.56           | 0.80  |
|                                    | GHG Reduction | kg/MWh  |   |         | 0.6      | 5.2     | 442.7          | 888.4 |

(1) Remark : 이 연구에서 삽입한 자료.

$$\begin{aligned}
 \text{GHG Reduction} &= \text{전력부문감축량} + \text{열공급부문감축량} \\
 &= \text{전력생산량} \times (\text{석탄기반전력배출량} - \text{WtE 배출}) \\
 &\quad + \text{열공급량} \times (\text{LNG기반열배출량} - \text{WtE 배출량}) \quad (2-9)
 \end{aligned}$$

Gohlke (2009)가 구한 온실가스 저감량은 전기생산에서는 석탄화력 발전을 기준으로, 열사용부문은 LNG사용을 가정하여 계산되었다.

CEWEP (Confederation of European Waste to Energy Plants) 에서 R1제도의 시행을 전후로 하여 유럽지역을 대상으로 3차례에 걸쳐 조사보고서를 발간하였다. CEWEP Report III (2013)은 유럽의 314개의 에너지회수시설을 대상으로, R1제도시행 이후 에너지 회수로 얻어진 온실가스 저감효과를 아래 표 2-4와 같이 정리하였다.

**Table 2-4 CO2 substitution potential through energy recovery from WtE plants related to the investigated (Status 2007-2010) and total amounts of incinerated MSW in EU 27 and EU 27 + CH + NO (Status 2009)**

| CO <sub>2</sub> balance related to recovered energy as electricity, heat and material and incinerated MSW and Imported energy | pollution/savings based on European energy mix                             | investigated amount of MSW incinerated in 285 plants, related to EU 27 | investigated amount of MSW incinerated in 285 plants, related to EU 27 + CH + NO |
|---|--|--|--|
|   |  | 55.71 mio<br>Mg MSW/(2007-10)  | 55.71 mio<br>Mg MSW/(2007-10)  |
|   |  | Mg CO <sub>2</sub> /a  | Mg CO <sub>2</sub> /a  |
| heat produced   | savings:0.232<br>Mg CO <sub>2</sub> /MWh th                                | 12,941,832   | 13,808,338   |
| electricity produced  | savings:0.540<br>Mg CO <sub>2</sub> /MWh th                                | 12,972,143   | 13,840,678   |
| material recovery   | savings:0.53<br>Mg CO <sub>2</sub> /MWh th                                 | 2,952,630  | 3,150,320  |
| MSW incinerated   | pollution : 0.334<br>Mg CO <sub>2</sub> / Mg MSW<br>(36% fossil fraction)  | 18,607,140   | 19,852,960   |
| heat imported   | pollution : 0.232<br>Mg CO <sub>2</sub> /MWh th<br>(0.266oil:0.202nat,gas) | 318,230  | 339,537  |
| electricity imported  | pollution : 0.540<br>Mg CO <sub>2</sub> /MWh el                            | 180,870  | 192,980  |
| Σ net for total Europe  | savings of Mg CO <sub>2</sub> /a   | 9,760,365  | 10,413,859   |

위 표에 따르면 유럽 314개 시설의 온실가스 저감효과가 2,887만톤에 달하여 배출량 1,910만톤을 공제하고도 976만톤의

온실가스 순저감효과가 있다고 보고하였다.

그러나 위 결과에는 많은 의문과 불확실성이 존재한다. 첫째는 온실가스 배출량을 산정하는 기준으로서 0.334 TCO<sub>2</sub>/ton의 적절성 여부이다. 배출량에 관한 원문을 보면 다음과 같다.

**A). The CO<sub>2</sub> production by the combustion of biogenic carbon is considered by the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) as CO<sub>2</sub> neutral, and therefore without any negative influence on the climate.**

**B). As a consequence, only 37% of the total CO<sub>2</sub> emission of about 0.9 Mg CO<sub>2</sub> /Mg MSW, equivalent to 0.334 Mg CO<sub>2</sub> /Mg MSW (≈ 0.033 Mg CO<sub>2</sub> /GJ in MSW), is of fossil origin.**

**C). Also the use of imported fuels such as light oil (0.266 Mg CO<sub>2</sub> /MWh th) and natural gas (0.202 Mg CO<sub>2</sub> /MWh th) have a negative influence on the CO<sub>2</sub> balance.**

**D). On the other hand the substitution, and in case of imported electricity pollution potential for electricity based on the EU 27 energy mix including nuclear power (published by IEA for 2009 [12]) is about 0.540 Mg CO<sub>2</sub> /MWh el and for heat about 0.232 Mg CO<sub>2</sub> /MWh th.**

위 설명문중 A)항은 IPCC의 규정상 이론의 여지가 없다. B). 항의 계산에서 유럽평균 FCF분율을 37%로 간주한 것은 통계작성의 표준값이고 BCF가 63%이므로 국내와 비교하여 별다른 차이가 없다. 그러나 IPCC 계산식에서 소각로 평균 배출량 0.9TCO<sub>2</sub>/ton가 이미 FCF분율을 기준으로 산정하였음에도 다시 여기에 FCF분율만큼을 곱하여  $0.9 \text{ TCO}_2/\text{ton} \times 0.37 = 0.334 \text{ TCO}_2/\text{ton}$ 으로 환산하여 FCF분율이 이중계산되는 산술오류가 있는 것으로 보여진다. IPCC vol II (2006)의 표준값이 3,000 kcal/kg의 저위발열량을 가진 폐기물의 평균 배출계수가 0.87 TCO<sub>2</sub>/ton이고, 유럽지역에는 많은 SRFthrkr로가 존재한다는 점을 감안하고,

한국환경공단 (2017) 지자체 온실가스 관리지침 표 2.5.10에서 정한 국내 소각로 폐기물 발생 간접배출계수 1.052 TCO<sub>2</sub>/ton를 감안하면 CEWEP의 계산법이 문제가 있음을 간접적으로 알 수 있다.

#### 4) CDM방법론 (사회간접배출계수 적용방안)

UNFCCC Clean Development Management에서는 획득된 전기와 열에 대한 감축량을 계산할 때 국가고유배출계수(Country Specific Emission Factor CSEF 혹은 KSEF)를 사용한다. 환경과학원(2018), Yeo 2018 et al., UNFCCC methodology AM0025 & ACM0012 등에서는 외부로 송출된 에너지로 얻어지는 온실가스감축량을 산정할 때 이 방법을 사용하고 있으며 우리나라에서는 에너지분야 간접배출계수는 아래 표 2-5와 같다.

**Table 2-5. KSEF(환경관리공단 2017, 첨부5 간접배출계수)**

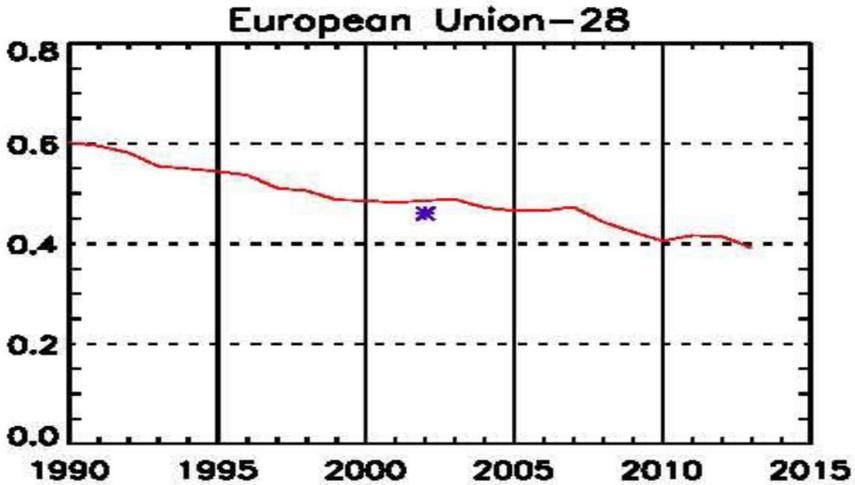
| Category                 |                     | Unit                | Emission factor            |        |
|--------------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|--------|
| Indirect Emission Factor | Power               | Product             | gCO <sub>2eq</sub> /kWh    | 453.00 |
|                          |                     | User <sup>(1)</sup> | gCO <sub>2eq</sub> /kWh    | 466.25 |
|                          | Heat <sup>(2)</sup> | District heat       | TONCO <sub>2eq</sub> /Gcal | 0.1226 |
|                          |                     | Industrial park     |                            | 0.1962 |
|                          |                     | Incinerator         |                            | 0.2725 |
|                          | MSW Incinerator     |                     | kgCO <sub>2eq</sub> /ton   | 1052.4 |

(1) Average of 2007~2008, GWP(SAR)

(2) Korea Environment Corporation

CEWEP(2013) 보고서에서 인용한 위 표 2-5에서는 0.540 TCO<sub>2</sub>/MWh.el이라는 전력부문 계수와 0.232 TCO<sub>2</sub>/MWh.th라는 열부문 계수를 사용하였다. 그리고 이의 근거로 2009년도 IEA Report 유럽 평균을 기반으로 한 것으로 설명하고 있다. JRC (2017) 보고서에서

본 유럽 28개 국가의 전력부문 간접배출계수는 아래 그림 2-1과 같이, 1990년 0.6 TCO<sub>2</sub>/MWh에서 2009년 0.42 TCO<sub>2</sub>/MWh, 2013년 0.4 TCO<sub>2</sub>/ MWh로 감소하였다. 이 수치는 원자력과 태양광, 풍력등 모든 신재생에너지를 포함한 발전부문의 총 평균값을 의미한다.



**Fig. 2-1 Trend of emission factor in EU 28 countries**

열생산 부문에서 발생하는 온실가스에 대한 여러 연구결과를 정리하면 아래 표 2-6과 같다. LNG 열병합에서는 0.202 TCO<sub>2</sub>/MWh, peroleum 연료에서는 0.238 TCO<sub>2</sub>/MWh이며 평균값은 0.232 TCO<sub>2</sub>/MWh라는 의미로 사용되어지고 있다.

Table 2-6 Various report to calculate emission factor in heat generation as per LCA analysis

| Source                           | Reference                   | Case studies | Min LCA EF [gCO <sub>2</sub> /kWh] | Max LCA EF [gCO <sub>2</sub> /kWh] | Suggested LCA EF or LCA average [gCO <sub>2</sub> /kWh] |
|----------------------------------|-----------------------------|--------------|------------------------------------|------------------------------------|---|
| Motor Oil                        | Turconi et al., 2013        | 10           | 530.0                              | 900.0                              | na  |
| Motor Oil                        | Weisser, 2007               | 5            | 500.0                              | 1200.0                             | na  |
| Motor Oil                        | Ardente et al., 2008        | 6            | 780.0                              | 900.0                              | na  |
| Coal                             | Evans et al., 2009          | 48           | na                                 | na                                 | 1004.0  |
| Coal                             | Weisser, 2007               | 7            | 950.0                              | 1250.0                             | na  |
| Coal                             | Ardente et al., 2008        | 6            | 900.0                              | 1200.0                             | na  |
| Coal                             | Turconi et al., 2013        | 36           | 660.0                              | 1050.0                             | an  |
| Lignite                          | Turconi et al., 2013        | 7            | 800.0                              | 1300.0                             | an  |
| Lignite                          | Weisser, 2007               | 3            | 800.0                              | 1700.0                             | an  |
| Natural Gas                      | Evans et al., 2009          | 48           | na                                 | na                                 | 543.0   |
| Natural Gas                      | Weisser, 2007               | 9            | 440.0                              | 780.0                              | na  |
| Natural Gas                      | Ardente et al., 2008        | 6            | 400.0                              | 500.0                              | na  |
| Natural Gas                      | Turconi et al., 2013        | 23           | 380.0                              | 1000.0                             | na  |
| Waste Treatment                  | Amponsah et al.,2014        | 4            | 97.2                               | 1000.0                             | na  |
| Biomass                          | Bhat & Praksah,2009         | 5            | 35.0                               | 178.0                              | na  |
| Biomass                          | Turconi et al., 2013        | 25           | 8.5                                | 130.0                              | na  |
| Biomass                          | Weisser, 2007               | 3            | 35.0                               | 99.0                               | na  |
| Biomass                          | Muench & Guenther,2013      | 25           | 0.5                                | 5.9                                | 2.3   |
| Biomass                          | Amponsah et al.,2014        | 14           | 25.5                               | 550.0                              | na  |
| <b>Geothermal<sup>1</sup></b>    | <b>Amponsah et al.,2014</b> | <b>4</b>     | <b>11.0</b>                        | <b>78.0</b>                        | <b>50.0</b>   |
| Geothermal                       | Evans et al.,2009           | 48           | na                                 | na                                 | 170.0   |
| Geothermal                       | Asdrubail et al.,2015       | 20           | 16.9                               | 142.0                              | 33.6  |
| <b>Solar thermal<sup>1</sup></b> | <b>Amponsah et al.,2014</b> | <b>6</b>     | <b>36.2</b>                        | <b>43.0</b>                        | <b>39.6</b>   |
| Solar thermal                    | Bhat & Praksah,2009         | 3            | 13.6                               | 202.0                              | na  |

위 표 2-6와 JRC (2018) 폐기물에너지를 비교하면 아래 표 2-7과 같다.

Table 2-7 Emission factor of heat generation

| Source    | LCA EF(TCO <sub>2</sub> /MWh. th) |      |           |      |
|-----------|-----------------------------------|------|-----------|------|
|           | Min                               | Max  | Suggested |      |
| Fossil    | Coal                              | 660  | 1250      | 1004 |
|           | Natural Gas                       | 380  | 1000      | 543  |
| Renewable | Solar Thermal                     | 36.3 | 43        | 39.6 |
| Fossil    | MSW                               | 295  | 337       | 337  |
| Biomass   | MSW                               | 0    | 0         | 0    |

CEWEP(2013)에서 비교하고 있는 2009년 온실가스 배출계수는

유럽평균을 적용할 것인가, 화석연료를 적용할 것인가에 따라 달라지며 전기부문 배출계수를 유럽평균을 적용하였으면 열부문도 유럽평균을 적용하였어야 하는데 LNG 기반의 IPCC 배출계수를 적용하고 있다. 열사용부문에 간접배출계수로서 한국지역난방의 경우 0.1226TCO<sub>2</sub>/Gcal가 사용되는 것에 비추어서 위 간접배출 계수 0.232TCO<sub>2</sub>/Gcal가 과다하게 계산되었다고 보여진다.

## 2.2 에너지 회수효율에 관한 규정과 연구

### 2.2.1 에너지회수효율에 대한 열역학적 접근

열역학적으로 에너지 회수효율을 산정하는 방식에는 세 가지 접근방법이 있었다. 소각로에서 생산된 스팀을 열병합방식 (Combined Heat and Power CHP)이라고 가정하여 첫째 방법은 열량 (Gcal/year) 환산방식이다. 생산된 전기도 열량으로 환산하여 계산하는 방식이고 아래 식 2-10과 같다.

$$nth = \frac{P_{el.net} + Q_{th}}{Q_{waste}} \quad (2-10)$$

\* 분자 분모 모두 Gcal 단위

두 번째 방법은 엑서지 계산법이다. 전기를 생산할 수 있는 영역에서 전기생산량은 엑서지효율 1에 비례한다. 열을 생산하여 공급하는 영역에서는 온도의존형이며 카르노효율이 적용된다. 카르노효율은 해당국가의 기온평균값이 반영되며 엑서지 기본식은 2-11과 같다.

$$B = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (2-11)$$

B는 엑서지값, h는 엔탈피(Enthalpy), s는 엔트로피(Entropy)

세번째 방법은 전력손실계수(Power Loss Coefficient PLC)산정방법이다. Steam Turbine에서 Condensing전단, 터빈후단에서 배출되는 에너지를 기준으로 열공급을 위하여 추기할 경우 추기열량 (Extraction enthlpy) 과 복수기열량 (Condensing Enthalpy)의 차이를 말하며 아래 식 2-12와 같이 주로 열병합시설에서 지수로 사용된다. 복수기 열량은 엑서지효율로 볼 때 사용되어질 수 없는 열량(Unabailability)라 보고 있다.

$$\vartheta = \frac{P_{el\,cost}}{Q_{th}} \quad (2-12)$$

전력손실이 발생하는 응축구간(Condensing process)에서는 일반적으로 Isentropic process와 Real process 차이가 있어 정확한 Entropy지수를 산정하기 어려우므로 배출온도의 차이로 산정하는 방법이 더 효과적이므로 비유동성 엑서지는 아래 식 2-13로 표현된다.

$$ex(\text{non flow}) = (u - u_0) + p_0 \cdot (v - v_0) - T_0 \cdot (s - s_0) \quad (2-13)$$

u mean internal energy

To means temperature of 25 celsius

여기에 엑서지로 인한 일량은 식 2-14과 같다.

$$ex(\text{flow work}) = (p - p_0) \cdot v \quad (2-14)$$

스팀이 가지고 있는 엑서지의 합은 식 2-15과 같다.

$$\text{ex}(\text{flow}) = \text{ex}(\text{non flow}) + \text{ex}(\text{flow work})$$

$$\text{ex}(\text{flow}) = (u - u_0) + p_0 \cdot (v - v_0) - T_0 \cdot (s - s_0) + (p - p_0) \cdot v \quad (2-15)$$

따라서 위의 식 2-13, 2-14에서 엔탈피는  $h = u + p \cdot v$  로 표현됨으로 유동에너지(Flow exergy)는 식 2-16과 같으며 스팀터빈, 펌프, 발전소 등에서 사용되어지는 개념이다.

$$\text{ex}(\text{flow}) = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0) \quad (2-16)$$

만약 어떤 기관이 대기온도 아래에서 작동되는 경우에는 압력이 대기압보다 적어지는 경우가 발생할 수 있고, 이 경우 유동에너지는 음수를 보일 수 있다. 이런 경우에는 자연계에서 평형상태를 판단할 수는 없으나, 대부분의 열기관이 상온보다 높은 압력에서 작동되므로 열기관 내에서의 에너지과괴를 표현할 수 있다.

유체의 유동은 반드시 입구와 출구를 가지게 된다. 이 경우에 입구와 출구에서의 아래 식 2-17과 같이 표현된다.

$$\text{ex}_{in} = h_{in} - h_0 - T_0 \cdot s_{in} + T_0 \cdot s_0$$

$$\text{ex}_{out} = h_{out} - h_0 - T_0 \cdot s_{out} + T_0 \cdot s_0 \quad (2-17)$$

$-h_0 + T_0 \cdot s_0$ 는 0으로 간주하여 소거하면 아래 식 2-18과 같이 표현된다.

$$\text{ex}(\text{component}) = (h_{in} - T_0 \cdot s_{in}) - (h_{out} - T_0 \cdot s_{out}) \quad (2-18)$$

결론적으로 엑서지(ex)는  $h - T_0 \cdot s$ 로 계산할 수 있다.

에너지 회수효율은 위 세가지 방법을 각각 혹은 조합하여 적용되고 각 에너지 효율사이의 관계는 3장에서 다루기로 한다.

## 2.2.2 한국과 유럽의 에너지회수 (Recovery) 효율 R1

한국의 제도는 유럽연합의 R1과 동일하므로 유럽 R1제도에 대한 해석 및 의견을 살펴보기로 한다. WFD Annex II 규정에 의한 R1계산식은 아래 2-19와 같다.

$$R1(\text{energy efficiency}) = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0.97 \times (E_w + E_f)} \quad (2-19)$$

$E_w$  means annual energy contained in the treated waste calculated using the net calorific value(NCV) of the waste (GJ/year)

$E_f$  means annual energy input to the system from fuels contributing to the production of steam(GJ/year),

$E_i$  means annual energy imported excluding  $E_w$  and  $E_f$  (GJ/year),

$E_p$  means annual energy produced as heat or electricity, which was multiplied by equivalent Factor (EF)

WFD(2009)에서 정한 바에 의하면  $E_p$ 는 가용에너지의 합으로 정의되며 전기에너지(Gcal/year)와 열에너지(Gcal/year)에 각각 등가계수(Equivalent Coefficient, EC)를 곱하여 계산된다. 등가계수는 전기의 경우 2.6, 열은 1.1로 정해졌으며, 전기등가계수는 독일 화력발전의 평균효율(38%)을 기준으로, 열의 등가계수는 독일 열전환보일러의 평균효율(91%)을 반영하였다. 2차에너지인 전기와 열의 등가계수의 차등을 둔 이유는 2차에너지를 획득하기 위한 사회적효율이 다르다는 점과, 이론적으로 Exergy의 차이를 효율에 반영하였기 때문이다. 종래 에너지회수율이 단순열량(Gcal)만을 대상으로 하였던 것을 감안할 때, R1제도는 가용에너지

(availability)라는 열역학적인 개념이 일부 포함되어 에너지회수 효율을 계산하였다는 점에서 진일보한 개념이며 사회적 수용성에도 일치한다. 이를 강제하는 수단으로서 우리나라에서는 R1지수에 따른 폐기물처분분담금의 감액(최대 75%)을 인센티브로 제시하고 있다. R1>0.75의 시설은 1등급시설로서 분담금의 75%를 감액한다.

### 2.2.3 네덜란드 에너지 회수효율 기준

Gohlke 2009 et. al은 네덜란드의 독자적인 에너지효율 계산식(SDE, Stimulerang Duurzame Energieproductie)을 보여주고 있다. 2003년부터 시행하여 왔으며, 계산식은 2-20에 의하며 매월 보고하도록 의무화되어 있다. 아래 산식에 따른 효율은 30%에 도달할 때까지 생산될 전력에 할증료(Adder)를 추가해주는 제도가 시행중이다.

$$\eta_{SDE} = \frac{E_{el\ net} + 2/3 * Q_{th}}{Q_{Waste}} \quad (2-20)$$

R1과 유사하지만 R1에서 규정하고 있는 보일러손실 0.97을 반영하지 않았고 전기와 열의 등가계수 산정방식이 다르다

### 2.2.4 스위스의 SDE 규정

Gohlke (2009)에서 인용된 스위스의 에너지회수효율 계산법은 따로 식으로 정리되어 공표되지 않고 전기생산효율과 열생산효율 그래프(Bundesamt für Energie 2008)로 표시되며 산식화하면 아래

식 2-21과 같다.

$$\eta_{\text{th min Schweiz}} = 0.67 \cdot 0.97 - 2.6 \eta_{\text{el.gross}} \quad (2-21)$$

### 2.2.5 오스트리아의 효율계산식

오스트리아의 산식은 네덜란드와 아주 유사하다. 그러나 달성목표는 훨씬 높다. 0.6이상이 되어야 기준치를 넘어설 수 있다.

$$0.6 \leq \eta_A = \frac{E_{\text{el net}} + 2/3 \cdot Q_{\text{th}}}{Q_{\text{Waste}}} \quad (2-22)$$

### 2.2.6 일본의 에너지효율제도

일본에서는 2009년 발표된 순환사회형성을 위한 기본계획을 수립시에 에너지회수효율기준으로 투입에너지 대비 전기생산량을 산정하는 방식을 채택하였다. 즉 열 사용량은 감안하지 않는 지수이다.

$$\eta_{\text{Japan}} = \frac{E_{\text{el.gross}}}{(Q_{\text{waste}} + Q_{\text{externalenergy}})} \quad (2-23)$$

일본정부가 정한 기준은 2012년까지는  $16\% < \eta_{\text{Japan}}$ ,

2017년까지는 21% <nJapan 로 정하여 시행중이다. 그리고 이에 따라 시설설치에 소요되는 사업비중 정부지원금을 50%까지 차등지급하는 정책을 펴고 있다. 해마다 에너지효율 상위 10개시설을 발표하는데 2014년 상위10개시설의 전기생산량은 557KWh/waste.ton이다. (국립환경과학원 et al., 2018)

## 2.3 발전효율을 올리기 위한 요소기술

### 2.3.1 기존의 연구

에너지회수효율과 온실가스 저감율을 향상시키는 방법으로는 2차 에너지중 전기에너지로의 전환효율을 올리는 것이 효과적이다. 국립환경과학원 (2017)에서 2015년 현재 전국에 가동중인 172개의 소각시설에을 대상으로 조사한 바에 따르면 88개 시설에서는 에너지사용실적이 없는 것으로 보고되고 있으며 전체 소각량중 에너지회수비율은 17%에 그치고 있다. 보고된 84개 시설의 에너지이용현황은 아래 표 2-8과 같다.

Table 2-8. Waste heat utilization status in South Korea(2015)

| Items   | Total (Tcal/yr)  | E <sub>exp</sub> |          |       |                  | E <sub>In site</sub> |         |
|---------|--|------------------|----------|-------|------------------|----------------------|---------|
|         |  | District heat    | Industry | Power | CSR <sup>*</sup> | Power                | Process |
| Recover | 7,227  | 2,747            | 862      | 636   | 252              | 1,686                | 1,045   |
| Ratio   | 100.0%   | 38.0%            | 11.9%    | 8.8%  | 3.5%             | 23.3%                | 14.5%   |
| Remarks | * CSR means Cooperative Social Responsibility “주민편익시설” |                  |          |       |                  |                      |         |

소각시설의 발전효율을 향상시키는 요소기술(환경과학원., 2018)에 대해서는 주로

- ① 열회수능력 강화(저온이코노마이저, 저공기비 연소),
  - ② 시설 내 사용량의 절감(저온촉매탈질-Low temperature SCR),
  - ③ 스팀의 Exergy 제고(고온고압보일러, 스팀사용사이클의 변경)
- 등으로 구분된다. 평균적인 발전효율개선효과는 국립환경과학원 (2017, et al)에서 아래 표와 같이 조사되었다. .

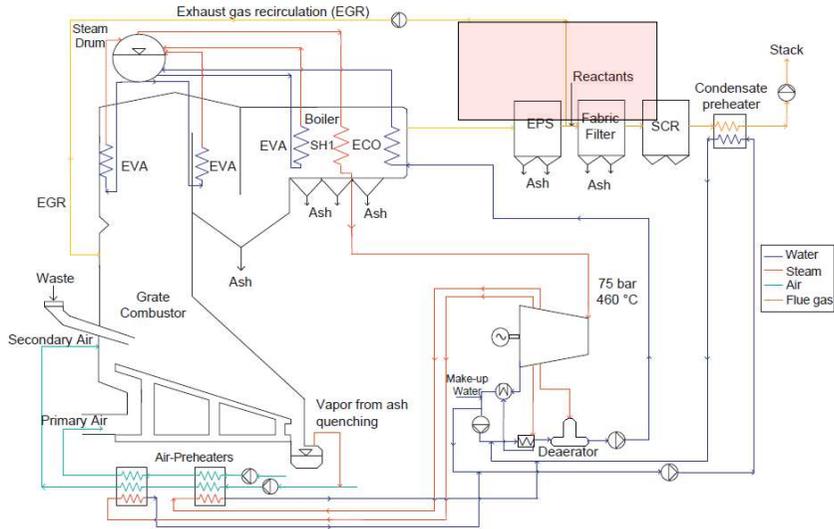
**Table 2-9. Evaluation of power product efficiency as per technology**

| Technology           |  | Eff(%) | Comparison condition                      |
|----------------------|--|--------|---|
| Heat recovery        | Low temperature economizer   | 1.0    | Gas temperature at boiler exit 250℃→210℃) |
|                      | Low A/F ratio  | 0.9    | A/F ratio 1.8→1.3                         |
| Utilization of steam | Low temperature SCR  | 0.5    | Temperature at SCR input 210℃→190℃)       |
|                      | Reduce heating energy at chimney                                       | 0.7    | reduce heating steam : 3.5%               |
| Super-heater         | Increase steam enthalpy  | 71.3   | 20kg.cm2m<br>300℃→60kg/cm2, 600℃          |
| Remarks              | Based on NCV 3,000~4,100 kcal/kg,<br>Exhaust gas : 9,500~11,500 m3/ton |        |   |

표 2-9에서 보면 고효율스팀의 생산이 발전출력을 증대시키는 효과가 가장 크다.

R1제도의 시행을 전후하여 유럽의 여러 연구들이 에너지 회수효율을 제고시키는 방안을 보고하였다. Murer M et al. (2009), Federico Viganoa et al. (2014) 에서는 유럽의 선진사례들에 대하여 에너지회수효율을 발표하였다. Brescia in Italy, Amsterdam in Netherlands 소각시설은 가장 발전효율을 높인 두 가지의 사례이다. Bonono et al. (2012)에 의하면 Brescia시설은 재열사이클 없이 75bar, 460℃의 스팀을 생산한다. 입열량 대비 발전효율은 약

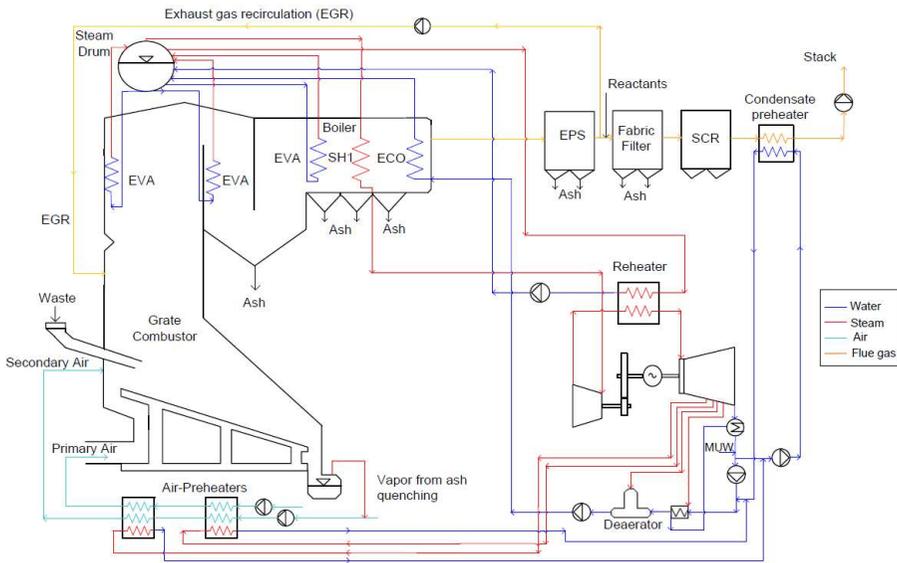
26%이다. 시설은 열병합으로 운전되지만 이태리의 특성상 전기로 생산된 에너지가 열공급으로 보내진 열보다 많아 전체 에너지 효율은 약 56%이다. (그림 2-1)



**Fig 2-2. Water - stream of Brescai WtE plant. Bonono 2012 et al.**

Vigano (2014)에 따르면, Amsterdam 시설은 재열사이클을 성공적으로 정착시킨 사례이다. 130bar, 440°C의 전기를 생산하며 고압터빈에서 전기생산 후 재열사이클을 거쳐 저압터빈으로 공급된다. 전기생산효율은 약 30%, 열병합 효율은 72%에 이르고 있다.(그림 2-2)

폐기물소각로의 스팀온도를 올릴수록 exergy가 증가하여 exergy efficiency에 따라 발전량이 많아지지만 Berlo M et al. (2006) 등의 연구에 따르면 금속피로도와 열화현상으로 최대온도를 480°C 정도로 권장하고 있다. 또한 폐기물에 포함된 염소(Chloride)성분에 의한 고온부식과 저온부식을 방지하기 위하여 보일러에 공급온도는



**Fig. 2-3. Water-stream of Amsterdam WtE plant, Vigano 2014 et al.**

125°C 이상, Super heater의 스팀온도는 450°C를 넘지 않게 설계하는 것이 일반적이다.

Reheat 공정은 초임계압 석탄화력(Ultra Superheater Pulverrized Coal power plant USPC)등에서는 이미 보편화되어 있으며 보일러에서의 스팀온도를 무한하게 상승시키지 않으면서 발전효율을 제고할 수 있는 요소기술이다. 아래 그림 2-3은 전형적인 1단 재열사이클을 보여주고 있다.

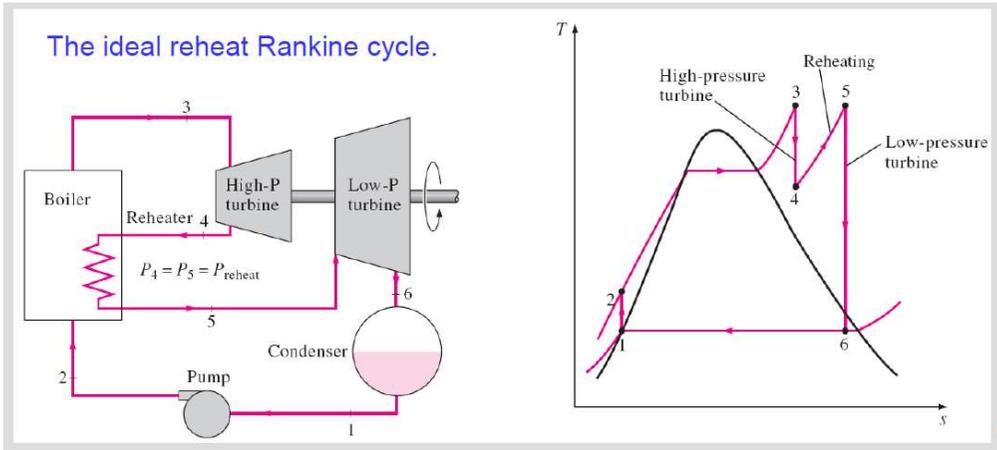


Fig. 2-4. The ideal reheat rankine cycle.

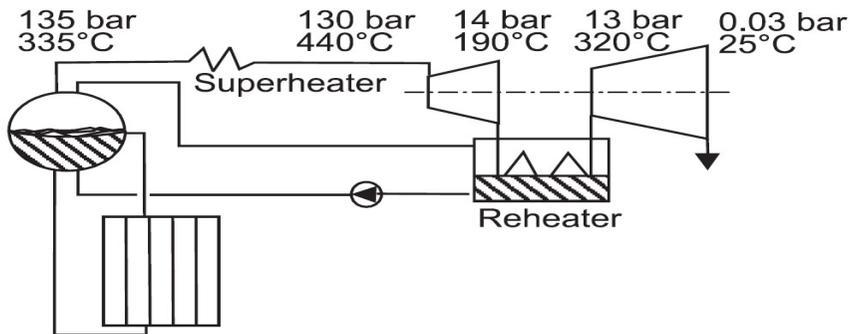
Yanus et al (2015)는 Reheat cycle에서 발전량에 대한 계산방법으로 아래의 식을 제시하고 있다.

$$Q_{in} = Q_{primary} + Q_{reheat} = (h_3 - h_2) + (h_5 - h_4) \quad (2-24)$$

$$W_{turb.out} = W_{turb.I} + W_{turb.II} = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6) \quad (2-25)$$

재열사이클은 고압터빈에서 1차로 전력을 생산한 후( $W_{turb.I}$ ) 재열공정을 거쳐 저압터빈으로 발전( $W_{turb.II}$ )하는 방식이다. 고압터빈과 저압터빈의 2단으로 설계하는 것이 보편적이지만 1단터빈의 중간에서 추기하여 재열하는 공정도 가능하다. 즉 고압⇒저압의 유체흐름의 중간에서 추기하여 스팀을 가열하는 공정이다.

Gohlke (2009)는 Amsterdam에서 사용된 재열사이클의 열/물질수지를 아래 그림 2-4와 같이 제시하고 전력생산효율 상승분을 7.5% ~ 28.1%로 계산하였다.



**Fig. 2-5. Water-steam schematic diagram of 130 bar/440 °C system with intermediate reheating.** ( Gohlke 2009 et al.)

1단 재열사이클의 열이용효율 증대효과는 입열량 대비 4-5% 정도(Yanus A, et al)이다. 발전효율이 10%인 WtE시설에서는 약 40%의 발전효율증대가 가능하고 발전효율이 20%인 WtE시설에서는 약 20%정도의 효율증대가 가능하다.

## 2.4 참고문헌

1. 박정구, “일본의 순환형 사회형성을 위한 법제도 시행상황” 국가환경정보센터, 2013
2. 한국환경공단, “지자체온실가스 배출량 산정지침(V4.1)” pp. 221-231 20171219,
3. 환경부, ‘Method of energy recovery efficiency of municipal waste incineration facilities’, 2017
4. 환경부, “2030 Greenhouse Gas Reduction Target 37%(BAU) Press Release”. 2015
5. ASTM D6866 Standard Test Methods for Determining the Biobased Content of Solid, Liquid, and Gaseous Samples Using Radiocarbon Analysis1
6. ASTM, DESIGNATION: D6866 - 20 “Standard Test Methods for Determining the Biobased Content of Solid, Liquid, and Gaseous Samples Using Radiocarbon Analysis”. 2018
7. Berlo M., Wandschneider J, 2006, “materials from urban waste”
8. CARBON FOOTPRINT CARBON FOOTPRINT, COUNTRY SPECIFIC ELECTRICITY GRID GREENHOUSE GAS EMISSION FACTORS Last Updated June 2019
9. CEN/TS 16640:2014 Biobased Products—Determination of the biobased carbon content of products using the radiocarbon method
10. Dincer I, Acar C. A review on clean energy solutions for better sustainability. International journal of energy research 2015 ; 39:585-606
11. Federico Viganò 2018, “A practical method to calculate the R1 index of waste-to-energy facilities”. Waste Management 73:

287 - 300.

12. Federico Viganò, A practical method to calculate the R1 index of waste-to-energy facilities, 2014
13. Federico Viganò, A practical method to calculate the R1 index of waste-to-energy facilities, 2014
14. Kamen, Martin D. (1963). "Early History of Carbon-14: Discovery of this supremely important tracer was expected in the physical sense but not in the chemical sense". *Science*. 140 (3567): 584 - 90. Bibcode:1963Sci...140..584K. doi:10.1126/science.140.3567.584. PMID 17737092
15. GUIDANCES ON THE INTERPRETATION OF THE R1 ENERGY EFFICIENCY FORMULA FOR INCINERATION FACILITIES DEDICATED TO THE PROCESSING OF MUNICIPAL SOLID WASTE ACCORDING TO ANNEX II OF DIRECTIVE 2008/98/EC ON WASTE
16. Hyeyoung Lee, Seung Muk Yi, Thomas M. Holsen, Yong-Seok Seo, Eunhwa Choi, 2018 Estimation of CO2 emissions from waste incinerators : Comparison of three methods, *Waste management* 74(2018) 247-255
17. IPCC 2006 Volume 5 Chapter 3.7 Table 3.5
18. Koffi B, Cerutti A.K., Duerr M., Iancu A., Kona A., Janssens-Maenhout G., *Covenant of Mayors for Climate and Energy: Default emission factors for local emission inventories - Version 2017*, EUR 28718 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017, ISBN 978-92-79-71479-5, doi:10.2760/290197, JRC107518.
19. Larsen, A.L., Fugslang, K., Pederson, N.H., Fellner, J.,

- Rechberger, H., Astrup, T., 2013. Biogenic carbon in combustible waste: Waste composition, variability and measurement uncertainty. *Waste Manage. Res.* 31 (10), 56 - 66.
20. Mario Grosso, Astrid Motta, Lucia Rigamonti , “Efficiency of energy recovery from waste incineration, in the light of the new Waste Framework Directive”, *Waste management* 30 (2010) 1238-1243
21. Murer M, Spliethoff H., Van Berlo M., and Gohlke O., 2009, “Comparison of Energy Efficiency indicators for Energy-from- Waste Plants”, In: Cossu R, Diaz LF and Stegmann R (eds.) *Sardinia 2009 Symposium* (pp. 697 - 698), Cagliari, Italy: CISA Publisher
22. Murer M, Spliethoff H., Van Berlo M., and Gohlke O., 2009, “Efficiency indicators for Energy-from- Waste Plants”
23. National Institute of Environmental Research, “A study on GHG mitigation and waste heat utilization from waste - to-energy high efficiency recovery(II)“, 2018
24. Oliver Gohlke, “Efficiency of energy recovery from municipal solid waste and the resultant effect on the greenhouse gas balance”, *Waste Management & Research* 2009: 27: 894 - 906 DOI: 10.1177/0734242X09349857
25. Results of Specific Data for Energy, R1 Plant Efficiency Factor and NCV of 314 European Waste-to-Energy (WtE) Plants : CEWEP Energy Report III(Status 2007-2010)
26. Seongmin Kang, Seungjin Kim, Jeongwoo Lee, Hyunki Yun, Ki-Hyun Kim & Eui-Chan Jeon (2016) *The study on biomass*

- fraction estimate methodology of municipal solid waste incinerator in Korea, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 66:10, 971-977, DOI: 10.1080/10962247.2016.1185479
27. The EIB, “Methodologies for the Assessment of Project GHG Emissions and Emission Variations, version 11”, DEC-2018
28. Yoo, Jong Ik 주요국 국가온실가스인벤토리보고서의 사업장 정보 활용 동향 *Journal of Climate Change Research* 2019, Vol. 10, No. 4, pp. 371~380
29. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 2 Energy, Chapter 2 Stationary combustion.

## 제 3장 배출량의 산정

### 3.1 서론

소각시설은 폐기물처리시설이자 에너지생산시설이다. IPCC의 가이드라인에서도 폐기물소각시설에 관한 규정과 해석은 2권 에너지분야 제 2장 고정연소시설에서의 연소 (IPCC 2006~2019 vol 2, Energy Chapter 2 Stationary combustion)와 5권 폐기물분야 5장 소각시설과 노천소각(IPCC 2019 vol 5 Waste, Chapter 5 Incineration and Open Burning of Waste)이 배출량 산정 시 적용된다.

IPCC 2권의 분류에서 소각시설은 복합고체연료 연소시설에 해당한다. 복합이란 생물기반탄소 (Biogenic Carbon Content, 이하 BCC)와 화석연료기반 탄소 (Fossil Carbon Content, 이하 FCC)가 혼합 연료를 사용하는 연소시설에서의 배출량 산정이 적용된다. Tier 1 수준에서 배출량은  $tCO_2$  기준  $91.7 tCO_2/TJ$ 로 설정되어 있고 폐기물의 저위발열량이  $3,000kcal/kg$ 일 경우  $1.152 tCO_2/ton waste$ 에 해당한다. 5권에서는 배출량 산정 시 적용되는 요소들로  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$ 로 정하고 있다.  $CO_2$  산정 시 BCC는 제외하고 FCC만 산정한다.  $CH_4$ 는 소각공정이 얼마나 완전연소에 가깝게 되는가에 따른 시설 의존적 배출량을 보여주며 원인 탄소는 BCC와 FCC 모두 이에 해당된다.  $N_2O$ 는 연소로의 특성 및 배가스 처리시설과 연관된다. 불완전연소에 기인한 배출원이다. 따라서  $CO_2$ 는 화석연료기반탄소만을 고려하여야 하고  $CH_4$ 와  $N_2O$ 는 시설의 규모와 운영현황에 좌우된다. 소각시설 온실가스배출량에서  $CO_2$ 가 차지하는 비중이 절대적이다.

소각시설의 배출량 산정방식으로는 Tier 1부터 Tier 3까지 규정되어 있으며 가장 정확성이 높은 방식으로 연속측정에 의한 Tier 4방식(오승환 외, 2018)을 규정하고 있다. 국내에서  $25,000 tCO_2/년$  이상을 배출하는 소각시설은 모두 배출권목표관리제에 해당되어 연속측정방식 (CEMS,

Continuous Emission Monitoring System)의 적용을 권장하고, 측정된 결과 값을 제3기관의 모니터링을 거쳐 그 결과를 보고하도록 하고 있다. IEA와 IPCC에서 정한 기본배출계수 (Default Emission Factor)로 계산하는 방식이 Tier 1이며 각국의 고유한 계수를 적용하여 계산된 배출량 산정을 Tier 2로, 시설별 고유 배출계수를 적용하여 배출량을 산정하는 Tier 3, 그리고 장기간, 정기적으로 검사된 연소가스 측정에 의한 산정방법을 Tier 4로 나눌 수 있다.

소각시설에서는 배출량 산정과 관련된 불확실성은 아래와 같은 요인으로 분류할 수 있다.

첫 번째 요인은 폐기물 성상 분류의 부정확성이다. 폐기물소각시설에 반입되는 성상은 지역별, 요일별, 재활용잔재물이나 대형폐기물류의 바이오매스 물질의 반입 정도에 따라 많은 편차를 보일 수 밖에 없다. IPCC에서도 샘플 추출로 인한 성상 조사 오차율이 비정기적인 경우 30%, 정기적인 경우라도 10%의 오차를 가질 수 있다고 보고 있다.

두 번째 요인은 얻어진 샘플에서 화석연료기반탄소 (Fossil Carbon Fraction, FCC)의 설정값 (Default Value)이다. 음식물류와 천연임목의 경우는 모두 생물기반탄소 (Bio-based Carbon Content)로 볼 수 있다. 그러나 섬유류와 기저귀류는 생물기반탄소와 화석연료기반탄소가 혼재하고 있으며 이에 대한 화석탄소분율을 각각 20%와 10%로 정하고 있다. 이 FCC값이 변화되는데 따라 배출량은 많은 편차를 갖게 된다.

생물기반탄소는 ASTM D6866에서 두 가지로 구분하여 정의를 내리고 있다. Bio-based carbon은 유기탄소 중의 생체 탄소를 말한다. (the amount of bio-based carbon in the material or product as a percent of the total organic carbon (TOC) in the product.) Biogenic containing carbon은 유기탄소와 무기탄소를 합하여 농업, 식물, 동물, 균류, 미생물, 유기물군, 해양 혹은 삼림물질 등에서 기원한 것을 의미한다. (biogenic-containing carbon (organic and inorganic) of renewable

origin like agricultural, plant, animal, fungi, microorganisms, macro organisms, marine, or forestry materials).

위 불확실성의 요소 중 샘플링의 오류와 폐기물성상별 TIER1과 TIER 2수준에 의한 배출량 산정시 불확실성의 원인이다.

세 번째 화석연료기반 산정시 불확실성 요인은 TIER3, TIER4에서 배출가스에서의  $^{14}\text{C}$  측정에 영향을 주는 pMC (percent Modern Carbon)값이다. FCF를 계산하는 것은 총탄소량 (Carbon Fraction, CF)을 분석하고 BCF값을 구한 후 CF에서 BCF만을 공제하여 계산한다. BCF 산정의 TIER 3 방식은 배출가스 중에 탄소의 동위원소를 측정 (Radiocarbon) 하여 계산한다.  $^{14}\text{C}$ 는 광합성작용 (Photosynthetic)과 핵실험 (Pre-bomb action) 등에 의해서만 생성되는 물질로서 화석연료 중의  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ 와는 구별된다.  $^{14}\text{C}$ 는 약 5700년 +/- 40년의 반감기를 가진 물질로서 베타와 감마선을 배출한 후 질소로 전환된다. 지구상에 존재하는  $^{14}\text{C}$ 의 양은 총 탄소 중에 약  $1.2 \times 10^{-12}$  정도로 존재하는 미량물질이다. ASTM, D6866, 2004, CEN/TS 16640:2014, CEN/ TS 16137:2011 (Plastics-Determination of bio-based carbon content) 가 모두 같은 시험법으로서  $^{14}\text{C}$  측정법을 규정하고 있다.

$^{14}\text{C}$ 의 측정법은 고고학계에서 유물의 생성년도를 측정하는 방법으로 개발되어 현재는 바이오플라스틱 (Bio plastic) (한국산업기술시험원, 2019)의 공정시험법이자 폐기물소각시설에서의 바이오매스 분율 산정 등에도 사용되고 있다.

ASTM D6866에서 바이오 분율은 두 가지 다른 개념을 가지고 있다. 바이오플라스틱의 경우 생분해성을 측정한다. Biodegradable Carbon Fraction의 분율을 측정하기 위한 것은 Bio-based Carbon Fraction이다. 소각시설 연소가스 측정 시 바이오 분율은 생물기반탄소 (Biogenic Carbon Fraction)이다. 이 두 가지 개념의 차이는 유기탄소 중 생물기반물질은 공통으로 반영되지만 무기탄소의 경우 온실가스 측정 시에는 반영되지만 바이오플라스틱의 생분해성 측정에서는 제외된다는

차이점을 보여준다.

우리나라는 전 세계에서 가장 강력한 배출권 거래시장을 가지고 있다. 감축량 산정의 정확성도 중요하지만 배출량 산정의 정확성이 더욱 엄격하게 요구된다. 이 경우 pMC값과 REF를 어떻게 정할 것인가는 아주 중요한 요소이다. TIER 3, 4가 정한, ‘정기적으로 장기간 연소가스를 측정하여 얻어진 값을 사용하여야 한다.’는 양적 평형성보다 측정된 연소가스 중에 FCF를 어떻게 산정하는가는 질적 적합성을 갖춰야 TIER 3, TIER 4 산정방식이 의미를 가질 수 있다.

따라서 제 3장의 목적은 소각시설에서의 배출량을 산정하는데

- (1) 방법론과 입력변수들의 영향을 파악하고,
- (2) 불확실성의 주요 원인을 찾고 그 개선책을 제시하며,
- (3) TIER 3, TIER4 적용 시 pMC 농도를 중심으로 개선 방안을 제안하는 것을 목적으로 한다.

사용 되어진 자료들은 폐기물처리기본계획 (한국환경공단 2013, 2018)과 전국생활폐기물소각시설 운영현황 (2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018), 그리고 위 통계 중 대상시설인 Plant N, S, I의 5개년 통계자료를 기본자료로 사용하였다. 위 자료의 세부내용을 비교·검증하기 위해 Plant I의 2019년도 실측자료 중 폐기물 성상조사의 자료를 이용하였다. FCF 산정의 적합성을 비교·검증하기 위하여 Plant B, Plant U의 2017년도 통계자료와 ASTM D6866 pMC 측정 및 REF 표준분율을 이용한 BCF 측정결과를 비교하여 차이점을 구하고 이를 바탕으로 Plant N, S, I의 표준 배출량을 구하였다.

## 3.2 배출량 산정식

### 3.2.1. IPCC guideline

환경공단(2017)은 지자체 온실가스 관리지침에서 TIER 1, 2 수준의 배출량 산정식으로 아래의 계산방법을 제시하고 있다.

CO2 배출량에 사용되는 산정식은 아래 식 3-1과 같다.

$$CO_2 \text{ Emissions} = \sum_{i,j} (SW_{ij} \times dm_{ij} \times CF_{ij} \times FCF_{ij} \times OF_{ij}) \times 44/12 \quad \text{식 3-1}$$

*CO2 Emissions*: 고품폐기물 소각에 의한 CO2배출량, tCO2/yr

*SW<sub>ij</sub>*: 소각되는 *i*유형, *j*성상 고품 폐기물의 총량(습량기준),  
t Waste/yr

*dm<sub>ij</sub>*: 소각되는 *I*유형, *j*성상폐기물(습량기준)중 건조물질함량  
Fraction

*CF<sub>ij</sub>*: 건조물질중 탄소비율(총탄소함량), Fraction

*FCF<sub>ij</sub>*: 총 탄소량 중 화석탄소 비율, Fraction

*OF<sub>ij</sub>*: 산화계수. Fraction 44/12 : 탄소에 대한 CO2변환계수

*i* : 다음과 같이 소각되는 폐기물 유형 :

생활폐기물, 사업장배출시설계폐기물, 건설폐기물,

지정폐기물, 병원성폐기물등

*j* : 다음과 같이 소각되는 폐기물 유형별 성상 :

종이류, 나무류, 플라스틱류, 섬유류, 피혁류, 기타가연분 등

여기서, 확보한 폐기물 소각량 자료가 건량 기준일 경우  
dm(건조물질함량)인자는 배출량 산정 시 고려하지 않는다.

CH<sub>4</sub>의 산정식은 아래 3-2와 같다.

$$CH_4 \text{ Emissions} = \sum_i (IW_i \times EF_i) \times 10^{-6} \quad \text{식 3-2}$$

CH<sub>4</sub> Emissions: 폐기물 소각에 의한 CH<sub>4</sub> 배출량 tCH<sub>4</sub>/yr

IW<sub>i</sub>: i유형 폐기물의 소각된 양 t Waste/yr

EF<sub>i</sub>: I유형 폐기물의 CH<sub>4</sub> 배출계수, g CH<sub>4</sub>/t Waste

i : 소각된 폐기물의 카테고리나 유형

j : 생활폐기물, 사업장배출시설계폐기물, 건설폐기물,  
지정폐기물, 병원성폐기물 등

N<sub>2</sub>O의 산정식은 아래 식 3-3과 같다.

$$N_2O \text{ Emissions} = \sum_i (IW_i \times EF_i) \times 10^{-6} \quad \text{식 3-3}$$

N<sub>2</sub>O Emissions: 폐기물 소각에 의한 N<sub>2</sub>O 배출량 tN<sub>2</sub>O/yr

IW<sub>i</sub>: i유형 폐기물의 소각된 양 t Waste/yr

EF<sub>i</sub>: I유형 폐기물의 N<sub>2</sub>O 배출계수, g N<sub>2</sub>O/t Waste

i : 소각된 폐기물의 카테고리나 유형

j : 생활폐기물, 사업장배출시설계폐기물, 건설폐기물,  
지정폐기물, 병원성폐기물 등

환경공단(2017)은 위 세 가지 배출량 요소중 CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O에 대한 표준배출계수를 아래 표 3-1과 같이 정하고 있다.

**Table 3-1 Default factor of Non-CO<sub>2</sub> in continuous stoker incinerator**

| 구분               | 값   | 단위                    | 출처                                 |
|------------------|-----|-----------------------|------------------------------------|
| CH <sub>4</sub>  | 0.2 | kgCH <sub>4</sub> /Gg | 2006IPCCG/LVol.5, Chap.5, Table5.3 |
| N <sub>2</sub> O | 47  | kgN <sub>2</sub> O/Gg | 2006IPCCG/LVol.5, Chap.5, Table5.4 |

폐기물처리시설의 운영지침상 소내온도는 850℃ 이상이어야 한다. 높아진 종량제 폐기물의 저위발열량(LHV > 2,500kcal/kg)으로 로내온도는 기준보다 고온(930-980℃)으로 운영되고 있다. CH<sub>4</sub>는 불완전 연소시에, N<sub>2</sub>O는 낮은 연소온도(500℃~900℃)에서 생성된다.

위 표준값을 온실가스 배출계수로 곱하여 환산된 CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O의 배출량 기여도는 2% 미만으로 나타난다. IPCC vol 2, 2장 배출량 설정값에 의한 배출량 기여도가 1.7% 내외이므로 소각시설의 운전조건이 지침에서 정한 표준값 범위라면 CH<sub>4</sub>와 N<sub>2</sub>O의 값은 무시할 수 있다. 결과적으로 소각시설에서의 온실가스배출량은 CO<sub>2</sub>만의 배출량으로 간략히 표현될 수 있으며 전장 2-1에서 정한 아래의 식으로 귀결된다.

$$CO_2 \text{ Emissions} = \sum (SW_{ij} \times dm_{ij} \times CF_{ij} \times FCF_{ij} \times OF_{ij}) \times 44/12 \quad \text{식 3-4}$$

위의 식에서 폐기물성상에 따른 주요인자는 dm, CF, FCF이다.

이중 CF는 아래 식 3-5와 같이 표현될 수 있다.

$$CF = BCF(\text{Biogenic carbon Fraction}) + FCF(\text{Fossil Carbon Fraction}) \quad \text{식 3-5}$$

### 3.2.2 dm, CF, FCF에 관한 규정 및 계산

폐기물소각시설에서의 배출량을 산정하기 위해 IPCC, 환경관리공단 (2017 et al), 환경부에서 정한 폐기물 조성에 대한 기준을 참조하여 이 논문에서 배출량을 구하기 위한 성상분류를 아래 표3-2와 같이 구분하였다.

**Table 3-2 Waste classification of MSW components**

| IPCC           | IPCC (2006) | KECO (2017) | MOE (2012)          | This paper                     |
|----------------|-------------|-------------|---------------------|--------------------------------|
| Paper          | O           | O           | O                   | O                              |
| Textile        | O           | O           | Leather/<br>Textile | Leather/<br>Rubber/<br>Textile |
| Food           | O           | O           | O                   | O                              |
| Wood           | O           | O           | O                   | O                              |
| Garden         | O           | O           | Wood                | Wood                           |
| Nappies        | O           | O           | Paper               | Paper                          |
| Leather/Rubber | O           | O           |                     |                                |
| Plastic        | O           | O           | O                   | O                              |
| Others         | O           | O           | O                   | O                              |

위의 성상별 분류에 따른 성상별 배출량산정에 적용되는 표준계수는 아래 표 3-3과 같다.

**Table 3-3 Default values of parameters for different MSW components**

| Category       | dm  | CF | FCF     |        | BCF |
|----------------|---|----|---------|--------|-----|
|                |   |    | Default | Range* |     |
| Paper          | 90  | 46 | 1       | 0-5    | 99  |
| Textile **     | 80  | 50 | 20      | 0-50   | 80  |
| Food           | 40  | 38 | 0       | 0      | 100 |
| Wood           | 85  | 50 | 0       | 0      | 100 |
| Garden         | 40  | 49 | 0       | 0      | 100 |
| Nappies        | 40  | 70 | 10      | 10     | 90  |
| Leather/Rubber | 84  | 67 | 20      | 20     | 80  |
| Plastic        | 100   | 75 | 100     | 95-100 | 0   |
| Others         | 90  | 3  | 100     | 50-100 | 0   |
| Remarks        | * Range : 2006 IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 2.14 Table 2.4<br>** textile : 2006 IPCC et al. Table 2.4 comment 3 “40 percent of textile are assumed to be synthetic(default)” |    |         |        |     |

dm에 대해서는 이견이 많지 않다. dm은 함수율의 역수로서 시료채취시점과 측정시점과의 시차로 자연건조가 이루어지는 경우가 많으나 표준분율을 이용하는데 큰 문제가 없다. CF도 Bomb Calorie Meter를 이용하여 측정하므로 시료채취 및 분류의 일관성만 유지된다면 표준분율을 사용하여도 무방할 것이다. 배출량과 관련하여 가장 쟁점이 되는 부분은 화석연료분율(FCF)이다.

배출량을 산정하는 수준은 TIER 1, TIER2, TIER3가 있으며 최근 국내에서 TIER4의 기준을 실험적으로 도입하려 하고 있다. TIER 1, 2, 3, 4, 모두 BCF는 배출량에서 제외하고 FCF만을 배출량 산정의 근거로 산정한다. TIER 1, 2에서는 위의 표 3-2에서 정한 국가고유배출계수를 사용한다. TIER 3에서는 ASTM D6866에 의거 pMC값을 구한 후 대기보정계수 (Atmospheric Correction Factor, REF)로 나눈 값을 사용한다. TIER 4는 TIER3와 동일하게 시설고유의 측정계수를 이용하지만 장기간 축적된 자료를 이용한다는 점만 다르다.

ASTM 측정법에서는 LSC (Liquid Scintillation Counting), AMA (Accelerator Mass Spectrometry)와 그리고 IRMS (Isotope-ratio mass spectrometry) 방법론이 있다. AMS 측정법은 가스성분의 원자를 가속시켜 에너지(엑서지 및 내부에너지), 모멘텀, 전하를 분석하여 <sup>14</sup>C를 측정하는 방법이다. 구해진 <sup>14</sup>C의 값을 <sup>12</sup>C로 나누어 분율을 계산하는 방식이며 측정오차가 적어 최근 사용빈도가 늘어났다. 생물기반 탄소분율을 구하는데 사용되는 산식은 아래와 3-6과 같이 같이 정의되어 있다. Bio-based carbon content의 총량을 구하고 Bio-based carbon의 분율인 Bio-based fraction을 구한다. 그리고 Biogenic carbon fraction을 구하게 된다.

$$\% \text{Bio based Carbon Content of Product} \quad \text{식 3-6}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n M_i \times BCC_i \times CC_i}{\sum_{i=1}^n M_i \times OCC_i}$$

M<sub>i</sub> means mass of the nth component present in the assembly

BCC<sub>i</sub> means % biobased carbon content of the nth component

OCC<sub>i</sub> means % organic carbon content of the nth component

전체 유기탄소량을 알고 있으므로 bio-based Carbon의 분율 산식은 아래 3-7과 같다.

$$\% \text{ Biobased Carbon Content(mass basis)} \\ = [\% \text{ total organic carbon}/100 \times \% \text{ bio-based carbon content}/100] \times 100$$

식 3-7

Biogenic carbon Fraction은 위와는 다르게 구해진다.

$$\% \text{ biogenic Carbon Content} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i \times GbCC_i \times CC_i}{\sum_{i=1}^n M_i \times CC_i}$$

식 3-8

M<sub>i</sub> means mass of the nth component present in the assembly,  
BgCC<sub>i</sub> means biogenic content of the nth component, and  
CC<sub>i</sub> means carbon content of the nth component.

총 탄소량은 유기탄소에 무기탄소를 더한 값이다. 위 식 3-8에서 구해진 생물유래탄소의 분율을 BCF라고 정의하고 아래 식 3-9와 같이 사용된다.

$$\% \text{ biogenic Carbon Content(mass basis)} = [\% \text{ total carbon}/100 \times (\% \text{ biogenic Carbon Content})] \times 100$$

식 3-9

Biobased Carbon Content와 Biogenic Carbon Content의 미묘한 차이를 구분하기 위하여 ASTM D 6866-20에서는 아래 그림 3-1과 같이 Biobased carbon content에 관한 예시를 들고 있다.

| Constituents | Grams Present (M <sub>i</sub> ) | % Biobased Carbon Content (BCC <sub>i</sub> ) | % Organic Carbon Content (OCC <sub>i</sub> ) | Grams Biobased Carbon | Grams Organic Carbon | Total % Biobased Carbon Content |
|--------------|---------------------------------|---|--|-----------------------|----------------------|---------------------------------|
| Organic A    | 25                              | 0   | 67   | 0                     | 16.75                |                                 |
| Organic B    | 45                              | 100   | 36   | 16.20                 | 16.20                | 47                              |
| Organic C    | 17                              | 40  | 52   | 3.54                  | 8.84                 | (47.24)                         |
| Total :      |                                 |   |  | 19.74                 | 41.79                |                                 |

Fig 3-1 Illustration for Eq1 (Biobased Carbon Content BCC), ASTM D6866-20 Table 3

동일한 품목을 대상으로 Biogenic carbon content에 관한 예시는 그림 3-2와 같다.

| Constituents | Grams Present (M <sub>i</sub> ) | % Biogenic Carbon Content (BgCC <sub>i</sub> ) | % Carbon Content (CC <sub>i</sub> ) | Grams Biogenic Carbon | Grams Carbon | Total % Biogenic Carbon Content |
|--------------|---------------------------------|--|-------------------------------------|-----------------------|--------------|---------------------------------|
| Organic A    | 25                              | 0  | 67                                  | 0                     | 16.75        |                                 |
| Organic B    | 45                              | 100  | 36                                  | 16.20                 | 16.20        |                                 |
| Organic C    | 17                              | 40   | 52                                  | 3.54                  | 8.84         |                                 |
| Inorganic D  | 3                               | 0  | 12                                  | 0                     | 0.36         | 48.17                           |
| Inorganic E  | 10                              | 95   | 12                                  | 1.14                  | 1.2          |                                 |
| Total :      |                                 |  |                                     | 20.88                 | 43.35        |                                 |

Fig. 3-2 Illustration for Eq3 (Biogenic Carbon Content, BGCC), ASTM D6866 -20 Table 5

위 두 가지 계산예에서 무기탄소의 분율을 감안한 경우 BGGC값은 48.17%로서 유기탄소중의 분율만을 계산한 BCC 47.24%에 비하여 무기탄소비율만큼 높은 값을 보여주고 있다.

여기에서 구해진 값은 Biogenic Carbon Content를 구하는데 기초자료인 pMC(percent modern carbon)에 해당한다. 이 값을 실제 존재하는 Bio-genic carbon content로 환산하기 위해서는 대기탄소계수 (Atmospheric correction factor, REF)로 나누어 주어야 한다.

$$BCF = pMC \text{ value} / REF$$

식 3-10

REF는 대기 중의 pMC 농도로서 핵실험유래동위원소효과(Bomb-carbon correction factor)가 반영된 값이다.

Biomass는 대기중의  $^{14}\text{C}$ 를 광합성 작용으로 흡수하여 몸체에 저장하게 되므로  $^{14}\text{C}$ 의 비율로서 Biogenic carbon fraction을 계산하게 된다.  $^{14}\text{C}$  측정법이 개발된 1930년대부터 지난시기의 화석 및 목재샘플을 통하여 지구상의 대기중  $^{14}\text{C}$ 농도를 추정하게 되었다. 그런데 1950년도부터 각국의 핵무기 개발이 가속화됨에 따라 대기중의 핵실험이 빈번하게 실시되었고 이에 따라 대기중 방사성동위원소( $^{14}\text{C}$ )의 비율이 급격히 상승하여 1962년에는 190까지 치솟았다가 대기핵실험 금지조약이 발효된 이후 점차 낮아져 1950년과 같은 수준으로 회복되고 있다.

연소가스를 이용하여 FCF 산정시 ASTM D6866 시험법을 사용하여야 한다. 이때  $^{14}\text{C}$ 측정법에서 pMC가 미치는 영향은 두 가지로 나타난다.

첫째는 연소가스중에 검출된  $^{14}\text{C}$ 의 비율이 Biomass의 수명에 따라 다르게 나타난다는 점이다. 목재 (Wood)와 종이 (Paper)의 경우에는 원료의 수명이 10-50년에 이른다. 평균 20년으로 가정할 경우 pMC의 비율은 20년전의 대기중 pMC농도부터 최근년도의 pMC가 누적되어 Biomass에 흡수되었다는 가정으로 산되어야 하고, 음식물류 폐기물 등의 초본류 Biomass에는 1-2년차의 해당년도 pMC가 적용되어야 한다.

둘째는 연소에 사용된 공기 중 함유된  $^{14}\text{C}$ 농도에 대한 기준을 어떻게 규정할까의 문제이다. ASTM에서 REF값의 기준으로 사용되는 해당년도 대기중의 pMC값 측정을 위해서 Netherlands (Lutjewad, Groningen), Alaska 지역의 측정치를 사용한다. ASTM D 6866 - 16부터 사용된 2015년도 REF값 pMC값 105는 이는 위 지역의 측정치를 반영한 값이고

매년 1월에 측정된 값을 전년도 REF로 사용한다. 이는 대기중의 pMC값에 대한 보정계수이다.

각 국가별로 표준 대기질중의 pMC 농도와 비교하기 위하여 해당국가내의 단년생식물을 측정하기도 한다. T. Ploykrathok (2016)은 태국 내 단년생 식물에 관하여 연구하였다. Sugarcane과 Cassava는  $^{14}\text{C}$ 를 측정하는 대표적인 초본류 Biomass이다. 단당류가 많은 단년생 식물이며 이 두 품목에서 측정된 pMC값과 측정대상 시료의 pMC값과 비교하여 Bio-genic carbon fraction량을 결정하는데 사용된다. Sugarcane과 Cassava의 측정결과는 아래 표 3-4와 같다.

**Table 3-4 pMC of biomass materials**

| Biomass material | pMC(N=3) | $\rho$ | Bio-Based contents | $\rho$ |
|------------------|----------|--------|--------------------|--------|
| Sugarcane        | 112.15   | 2.18   | 100.00             | 2.75   |
| Cassava          | 112.05   | 2.49   | 99.91              | 4.03   |

위 실험결과에 따르면 2016년 태국에서의 pMC값은 112.1 정도이다. 단년생 식물중 단당류의 함량이 높을수록 pMC측정이 정확해진다는 점에서 대표품목으로 꿀을 대상으로 한 연구결과가 많이 보고되었다. Varga 2020는 1950년부터 2020년까지 헝가리 5개 지역에서 채취된 아카시아 꿀과 잡화꿀을 대상으로  $^{14}\text{C}$  농도를 측정하여 결과값을 동기간을 대상으로 조사된 목재와 비교하였다. 위 보고서에 따르면 아카시아 꿀에 포함된 pMC농도는 해당년도 대기중의 pMC농도와 아주 유사함을 보여주고 있으며 바이오매스의 pMC 집적농도를 측정하는데 적합하다는 것을 아래 그림 3-3과 같이 보여주고 있다.

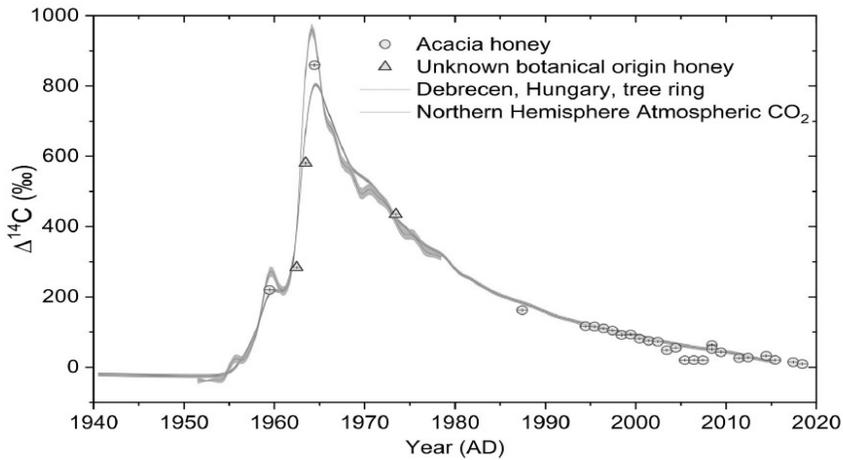


Fig 3-3 Radiocarbon results of acacia and unknown botanical origin honey samples. The red bars in the symbols (triangle and circle) show the x error, the blue bars show the y error of individual samples. Northern Hemisphere Atmospheric CO<sub>2</sub> data from Graven et al., 2017; Debrecen tree ring data from Hertelendi and Csongor, 1982.( Varga 2020 et al, Table 6)

바이오매스중 다년생 품목에 의한 REF값의 가중치요소와는 별도로 해양생물질에 의한 가중치는 다른 접근이 필요하다. <sup>14</sup>C는 탄산석회석 (Lime- stone Carbonate)에 흡수되고 해양생물체의 몸체를 이루는 물질로 흡수되어 무기탄소로 전환된다. 먹이사슬이 높을수록 집적도가 상승하여 전세계적으로 해수 및 갯벌의 농축영향은 3~6 pMC로 보고되었다. 우리나라와 같이 갯벌이 넓게 분포된 경우 해양에서 얻어진 바이오매스의 분율이 다시 3~4 pMC 정도의 영향을 미칠 것으로 보여지며 해양기반 바이오매스는 6~10 pMC의 영향을 받을 것으로 보여진다. ( ASTM D6866-20 page 13)

이러한 영향요소를 해양집적기반동위탄소효과 (Reservoir correction Factor RCF)라 부르고 표준값으로 측정된 pMC 값에 0.95를 곱하여 사용하는 것이 일반적이다.

두 번째는 연소용으로 공급되는 공기중  $^{14}\text{C}$ 의 분율이다. pMC 값과 대기중의  $^{14}\text{C}$ 의 분율은 아래 식 3-11로 표시될 수 있다.

$$pMC = \frac{(^{14}\text{C}/^{13}\text{C})_{\text{sample}}}{(^{14}\text{C}/^{13}\text{C})_{\text{standard}, 1950}} \times 100 \quad \text{식 3-11}$$

Stuiver et al., 1998 은 BC 1954년도까지 전지구적인  $^{14}\text{C}$ 의 농도를 계산하였다. 아래 그림 3-4에서 보면 대기중의  $^{14}\text{C}$  농도는 1900년대 초 38에서 1950년에 200으로 증가하게 된다. 표의 아래 축 제목에서 1950년이 0으로 표시된 것은 이 시기부터 방사성탄소의 비율을 측정하기 위한 원년으로 정하였기 때문이다 2020년은 BP 70으로 표시된다.

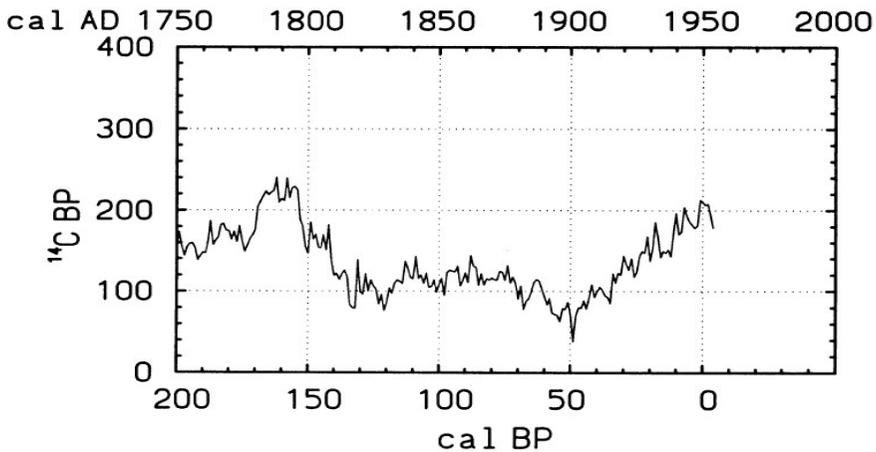


Fig 3-4  $^{14}\text{C}$  BP(‰) contents in Atmosphere (Stuiver 1998 et al)

목재류를 대상으로 한  $^{14}\text{C}$  측정 결과는 여러 논문에서 보고되었다. 시애틀(S) 지역은 Department of Geological Sciences and Quaternary Research Center, University of Washington에서 지속적으로 연구되어 왔으며, 벨파스트(B) 지역은 Pearson and Qua (1993) and Pearson, Becker and Qua (1993), 하이델베르그(H) 지역은 Spruk (1993), Chile의 경우에는 Southers J.R (1993) 등이 자료를 보고하였다.

Feller 외 (2009)에서는 여러 개의 조사보고논문 중 두 가지 항목에 대하여 취합 보고하였다. 우선 Stuiver (1998) 에서 조사된  $^{14}\text{C}$ 농도를 2003년까지 확장하여 전 지구적인  $^{14}\text{C}$ 의 연간적용농도를 제시하였다. 그는 2차 세계대전 이후의 이후 전세계에서 시행된 잣은 핵실험과 원자력발전의 증가에 따라  $^{14}\text{C}$ 의 대기중 농도가 증가하여 대기중 이산화탄소( $\text{CO}_2$ )중  $^{14}\text{C}$ 의 비율(Percent modern Carbon, pMC=100 at 1950 years)에 영향을 주어 1962년에는 200pMC에 이르렀고 2007년에는 105.4pMC를 보여주고 있다 (그림3-5).

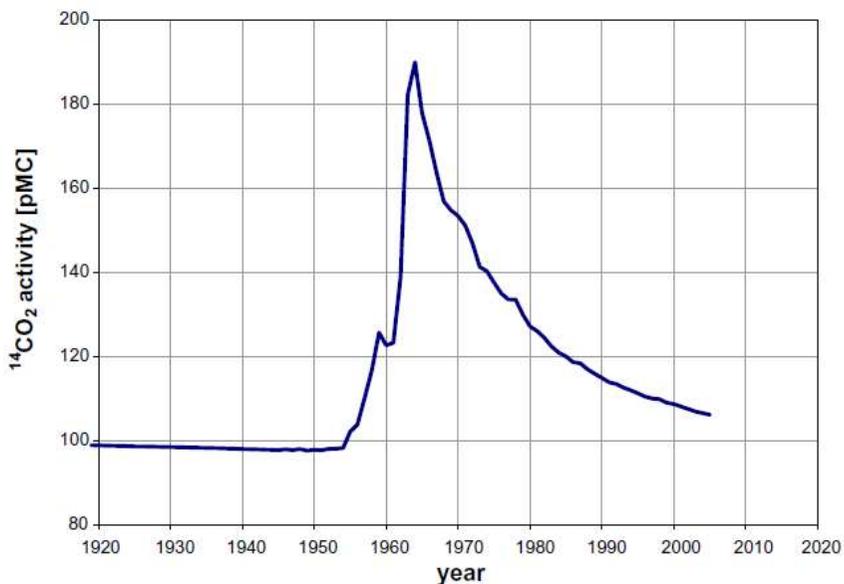


Fig. 3-5 pMC content in atmosphere (Fellner 2009, Fig.1 -  $^{14}\text{C}$  values [pMC] from North American tree ring investigations (data prior to 1959) (Stuiver et al., 1998) and annual mean values of  $^{14}\text{CO}_2$  from the Vermont, Schauinsland, and Jungfrauoch stations for the period from 1959 to 2003 (Levin and Kromer, 2004).

지역적 편차를 알아보기 위하여 미국의 시애틀과 독일의 하이벨베르그의 동일수종(German Pipe Tree)를 대상으로 각각의 pMC값을 구하여

비교하였다. 아래 그림 3-6을 보면 지구상의 대기중 pMC농도가 일정하다고 가정하면 의 두 지역의 방사성동위원소측정에 따른 오차보정은 기원전 9000년(BP기준 10950년)을 기준으로 23~24년의 편차를 두고 모두 pMC감소율이 선형으로 비례한다는 결론에 이를 수 있다.

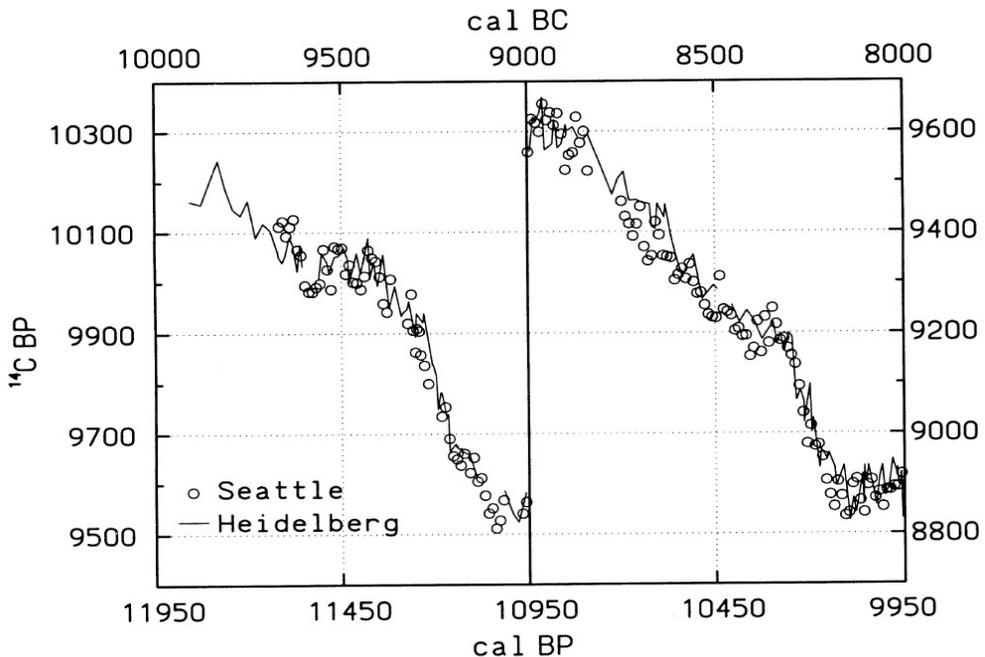


Fig. 3-6 A comparison of Heidelberg and Seattle German pine measurements. The solid line connects the Heidelberg points; the average standard deviation in a single measurement is 24 and 23  $^{14}\text{C yr}$  for, respectively, Heidelberg and Seattle. ( Stuiver 1998 at al. Fig 1 )

대기중의 탄소는 광합성작용, 빗물과 수면접촉을 통한 용존작용 (Dissolved mechanism)으로 용존성탄소 (Water soluble Organic carbon, WSOC)가 수생태계로 전이되고 방출된다. 탄소의 거동에 따라 대기중의  $^{14}\text{C}$ 농도와 연안갯벌지역의  $^{14}\text{C}$ 농도는 밀접한 연관관계를 지니게 된다.

Stuiver(1998)은 목재와 수서생태지역에서의  $^{14}\text{C}$ 농도의 상관관계를 연대별로 분석하여 아래 그림 3-7, 3-8와 같이 제시하였다.

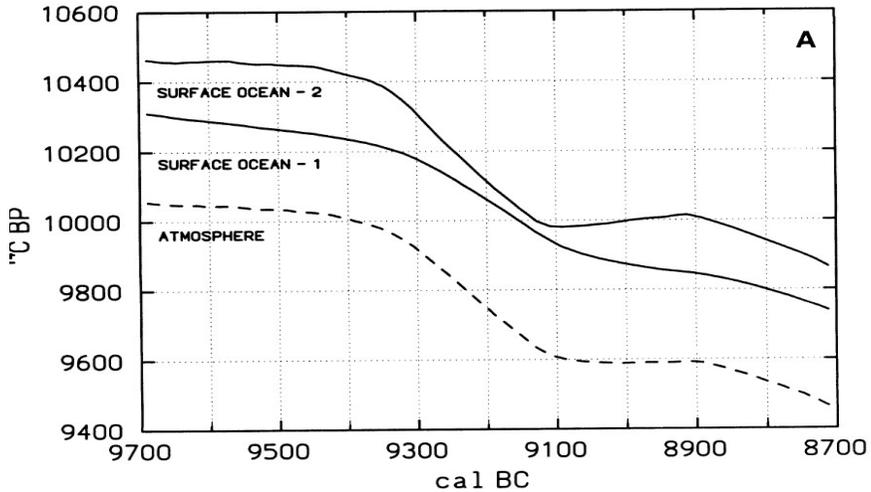
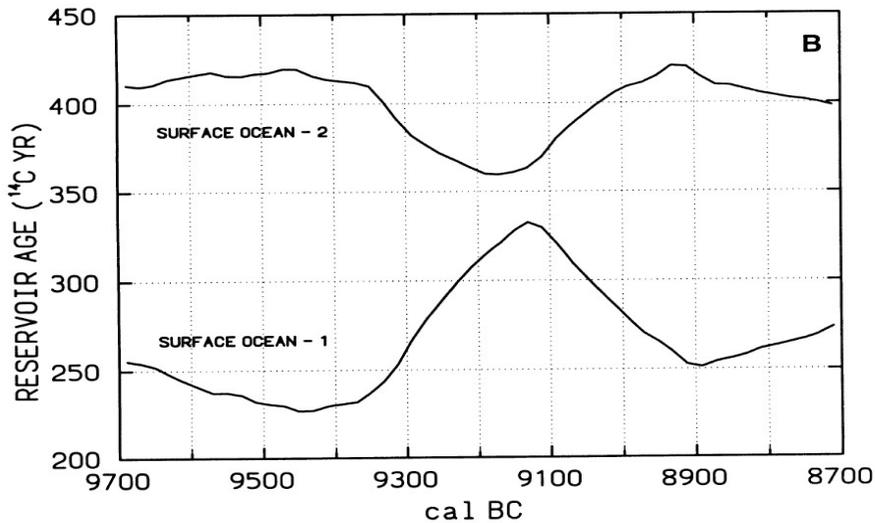


Fig 3-7 Smoothed (200-yr moving average)  $^{14}\text{C}$  age profiles for the atmosphere and surface ocean. Calculated from a carbon reservoir model assuming atmospheric  $^{14}\text{C}$  production rate change to be responsible for the observed atmospheric  $^{14}\text{C}$  change (Stuier 1998 Fig 3-A)



**Fig 3-8 Ocean circulation change as the causal agent. B. Reservoir ages of the model ocean (mixed layer) or oceanic circulation change. (Stuier 1998 et al. Fig 3-A)**

대기중의 총탄소(Total carbon, TC)와 용존탄소 (WSOC)는 계절적으로 편차가 있다. 동절기는 화석연료 연소로 인한 탄소발생량이 많고, 광합성 작용은 가장 느리게 발생하므로 총탄소(Total Carbon) 비율중 용존성탄소(WSOC)의 비율이 가장 높다. 반대로 여름철에는 난방수요가 감소하고 광합성 작용이 활발하게 이루어지므로 총탄소비율중 용존탄소의 비율이 가장 줄어들게 된다. Chandra Mouli Pavuluri(2018)은 일본 Sapporo지역에서  $^{13}\text{C}$ 가 대기과 수서지역에 계절적으로 어떻게 이동하는지를 그림 3-9에서 보여주고 있다. 탄소의 용존은  $^{14}\text{C}$ 와  $^{13}\text{C}$ 의 차이가 거의 없어  $^{14}\text{C}$ 의 거동해석으로 보아도 무방하다.

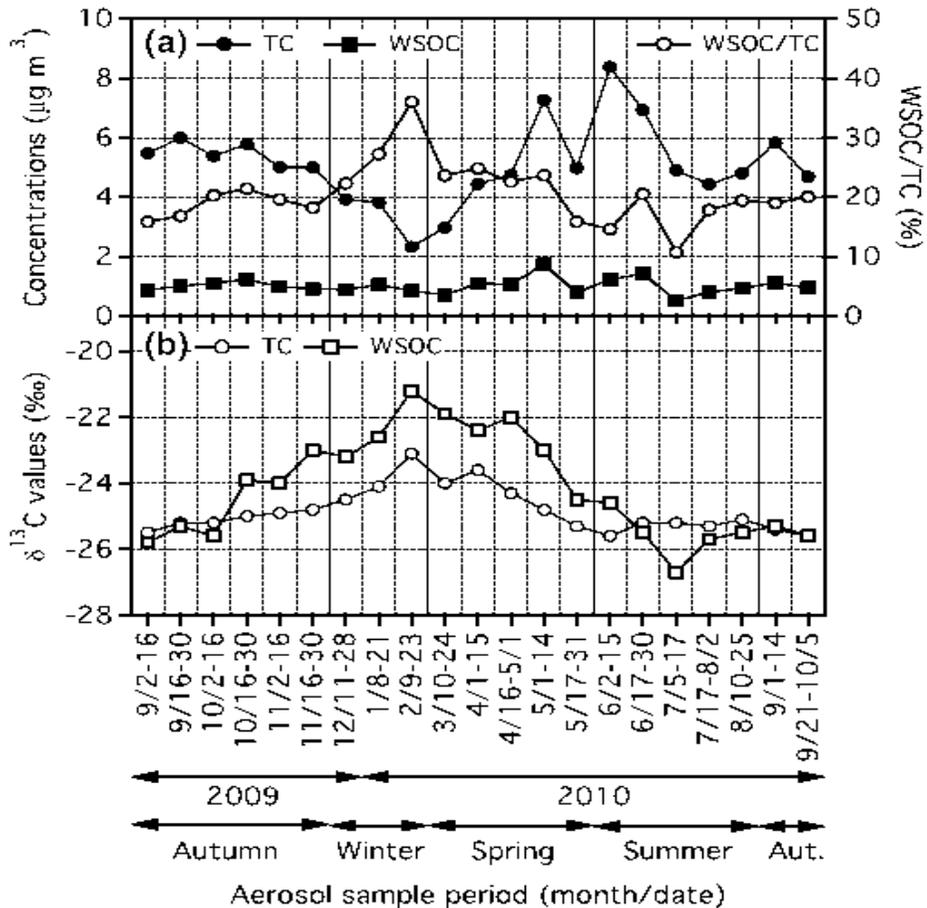


Fig 3-9 Temporal variations of concentrations of total carbon (TC) and water-soluble organic carbon (WSOC), mass ratios of WSOC/TC, and stable carbon isotope ratios ( $\delta^{13}\text{C}$ ) of TC and WSOC in aerosols (TSP) from Sapporo, northern Japan during the campaign.

pMC는 핵활동에 의하여 생성된다. 아시아 지역에 다수 분포하고 있는 원자력 발전은 주변지역의 pMC를 증가시키게 된다. Kim CS (2019)는 국내 원자력 발전 주변지역에서 측정된 pMC와 일반지역을 비교하여 아래와 같이 그 편차를 보고하였다.

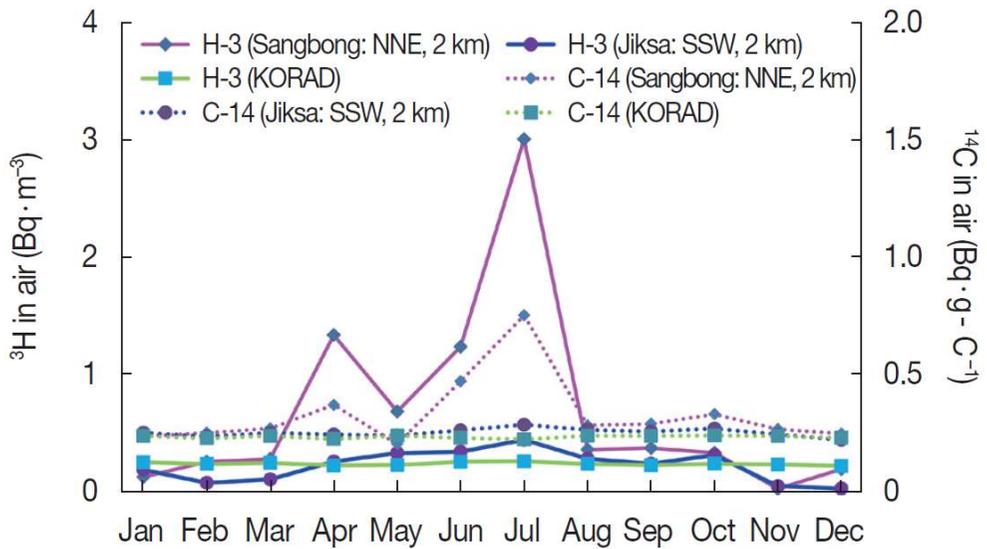


Fig 3-10 PMC content nearby Nuclear Power Plant

대기중의  $^{14}\text{C}$  분율은 대기중의 총  $\text{CO}_2$ 농도에 영향을 받는다. 기상청 기후변화포털(2020)에 따르면 한국 대기중의  $\text{CO}_2$ 농도는 2015년 394.9ppm에서 2019년 417.9ppm으로 연 2.4% 증가하여, 전세계 평균 2015년 388.9ppm에서 2019년 407.8ppm으로 연 2.2% 증가율보다 높았다. 국내  $\text{CO}_2$ 농도와 전세계  $\text{CO}_2$  농도의 비율은 2015년 101.54%에서 2019년 102.48%로 증가하였다. 이는 극동지역에서의 화석연료 사용량이 증가함에 따른 희석효과에 기인한다.

## 국내외 이산화탄소 연평균농도

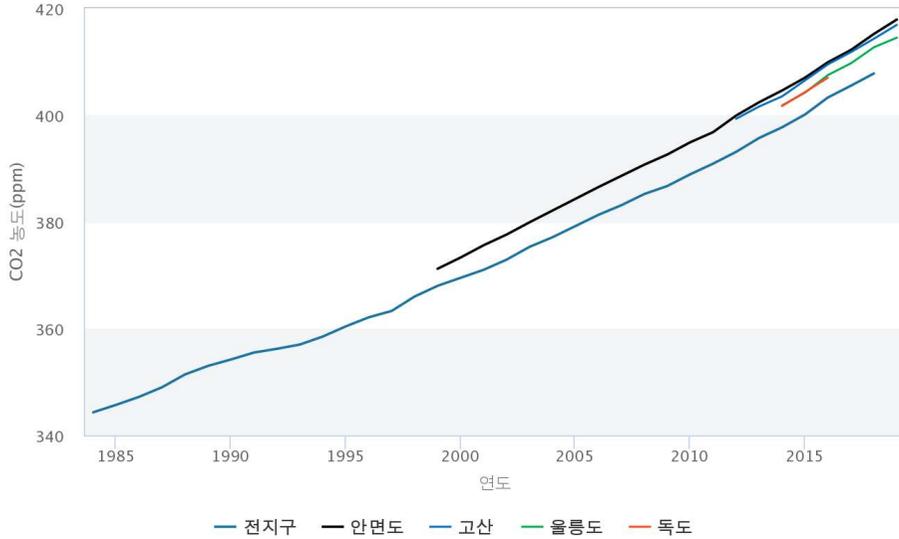
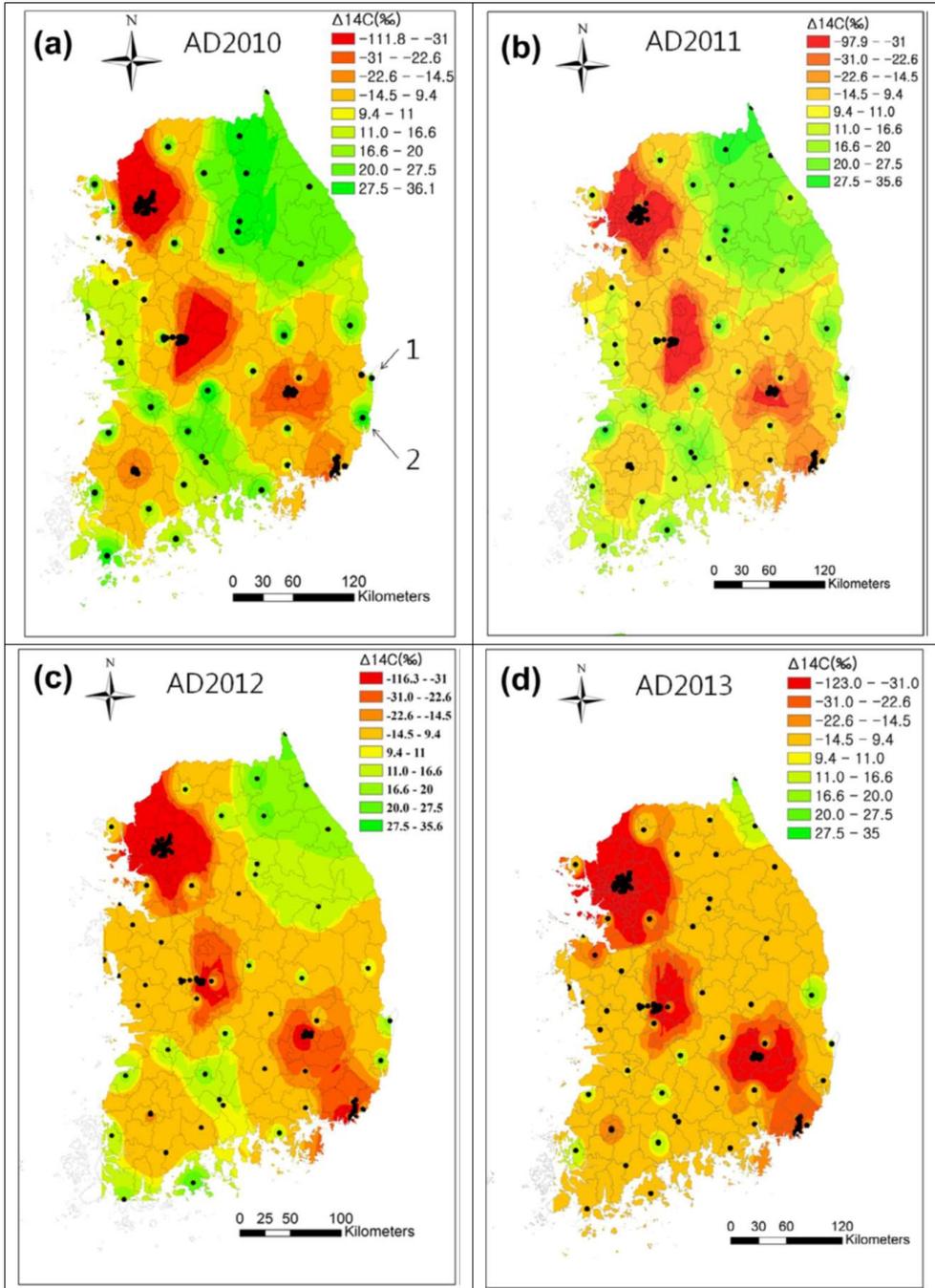


Fig. 3-11 Comparison curve between CO<sub>2</sub> content in korean atmosphere and world average.

J.H.Park (2016)은 국내 여러 지역을 대상으로 2010년부터 2013년까지 대기중의 <sup>14</sup>C농도를 분석하여 아래 그림 3-12와 같이 보고하였다. 위 도표에 따르면 전국적으로 매년 대기중 14C농도가 5-6% 씩 감소하지만 2011년과 2012년에는 약간 증가세를 보이고 있다. Park (2016)에서는 이 결과를 후쿠시마 원전사고의 영향이 일부 있을 수 있음을 언급하고 있다.

Fig. 3-12  $\Delta 14C$  content in Korea during 2010-2013.



지질자원연구원 제공자료 (박중현 2020)에 의하면 수도권 지역에서 분석대상인 2015-2018년의 추이는 2016년까지 거의 동일수준을 유지하다가 2018년에는 급격히 하강함을 알 수 있다. 이를 종합하여 수도권 지역에서의 대기중  $^{14}\text{C}$  농도를 보면 아래 표 3-5와 같다.

Table 3-5  $\Delta^{14}\text{C}$  trend of atmosphere in Seoul, Gyeong gi area.

| Area              | 2015   | 2016   | 2017   | 2018   |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|
| Seoul sanggye     | -30.86 | -26.84 | -44.69 | -56.36 |
| Gyeong gi Hwasung | -14.18 | -14.67 | -4.61  | -27.81 |

한국내 대기중의  $^{14}\text{C}$ 비율에 관하여 위에서 분석된 pMC농도의 변화를 요약하고 현재에 적용될 pMC값을 구해보면 아래 그림 3-10과 같다. 측정지점은 대관령과 강원도 고성을 기준하였으며 여기서  $^{14}\text{C}$ 의 분율은 대기중에서의 핵실험금지조약의 시행 이후 반감기에 따라 로그함수로 감소하여야 하지만 지구상의 대기중  $\text{CO}_2$ 의 농도가 증가함에 따라 선형에 가까운 감소율을 보이고 있으나 2019년 이후의 지수는 거의 변동이 없는 것으로 나타났다. pMC 값은 반감기를 적용하였고 지구상의 대기중의  $\text{CO}_2$  농도증가는 UNFCCC가 정한 Hawawi Maunalowa 측정치를 이용하였다. 대기중의  $\text{CO}_2$ 농도는 2015년 388.9ppm을 넘어선 이후 2020년 5월 현재 418.12 ppm을 보여주고 있다. 2020년 자료에 의하면 인위적인 배출량증가가 정체를 하더라도 대기중의 온실가스배출량은 지속적으로 증가하여  $^{14}\text{C}$ 의 농도를 희석시키고 있음을 보여주고 있다. 증가량의 대부분은 열대우림지역의 토양에서 발생하고 있으며 증가된  $\text{CO}_2$ 농도의 일정부분은  $^{14}\text{C}$ 를 포함하고 있어 2010년부터 2015년까지의 희석율보다는 감소하고 있다. 위 두 가지 지표를 종합하여 예측한  $^{14}\text{C}$  농도의 추세와 전망치는 아래 그림 3-13과 같다.

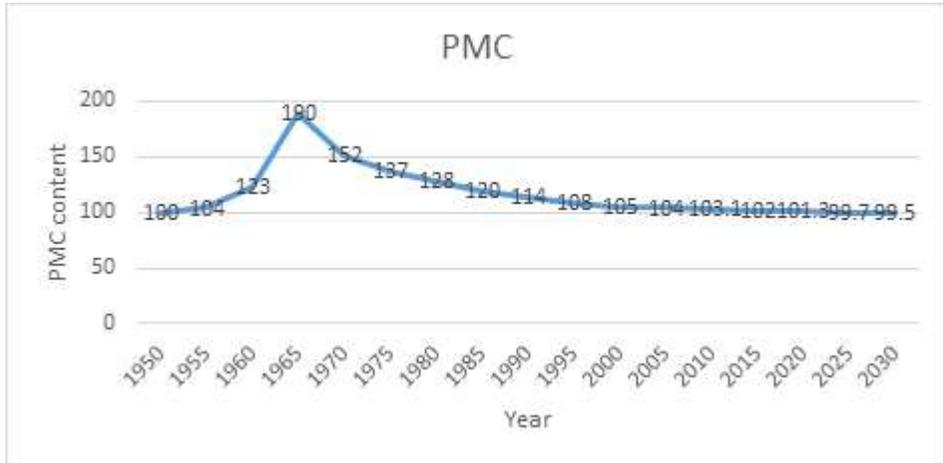


Fig.3-13 Status and forecast of pMC content in atmosphere. Until 2013, data was brought by Fellner(2013). From 2014 year, calculated by logarithmic function and CO2 concentration of UNFCCC.

위 전망치는 아래 표 3-6에서 볼 수 있듯이 ASTM-20에서 정한 REF 값의 기준치(네덜란드 측정치)와 비교할 때 거의 같은 수치를 보이고 있어 그림 3-13을 이용하여도 무방함을 알 수 있다.

Table 3-6 REF value of ASTM D6866-20 during recent 10 years

| Year | 2010  | 2011  | 2012  | 2013  | 2014  | 2015  | 2016  | 2017  | 2018  | 2019  | 2020  |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| REF  | 104.8 | 104.3 | 103.8 | 103.3 | 102.8 | 102.0 | 101.5 | 101.0 | 100.5 | 100.0 | 100.0 |

측정된 위치가 서울 상계동처럼 대도시 지역이라면 위 표 3-5에서 본 바와 같이 99.7 수준이다.

계절별로도 분율의 차이가 있을 수 있다. 위 그림 3-9의 계절적 변화요인중 대기중 WSOC의 농도변화값을 본 논문에서 주된 분석대상으로 설정한 2017년의 계절별 분율로 계산하면 아래 표 3-7과 같다.

**Table 3-7 pMC contents in seasonal fluctation in 2017 year**

| Feb   | May   | Aug   | Nov   | Average |
|-------|-------|-------|-------|---------|
| 101.4 | 101.2 | 100.4 | 100.9 | 101.0   |

### 3.3 배출량산정을 위한 요소별 자료

#### 3.3.1 조사대상과 자료의 취득

전국단위의 폐기물성상조사는 국가폐기물처리기본계획에 의거 매 5년마다 이루어지고 있으며 한국환경공단 (2019), 한국환경공단(2014) 에서 수행하였다. 수도권지역에서 발생한 생활폐기물의 일반현황은 수도권매립지관리공사 통계연감 (2019, 2018, 2017, 2016, 2015)을 이용하여 5개년 간의 성상을 조사하였다. 소각로에 반입되는 성상에 관한 자료는 환경부 전국생활폐기물소각장운영현황 (2019, 2018, 2017, 2016, 2015)을 이용하였다. 위 환경부 통계중 본 논문에서 에너지효율화를 위하여 선정한 N, S, I의 3개 지자체를 대상으로 2013년부터 2018년까지의 5개년 통계를 조사하였고 위의 국가통계와의 비교분석을 위하여 I 시의 경우 직접 조사한 자료를 이용하여 성상조사결과와 정합성을 비교하여 dm, BCF FCF를 이용하여 TCO<sub>2</sub>를 구하였다.

전국생활폐기물소각장 운영현황자료에서 구한 배출량(TCO<sub>2</sub>)와 TIER3에서 정한 BCF산정값과의 정합성을 비교하기 위하여 두 개의 시설에서 측정된 BCF, FCF 분율과를 비교하여 차이점을 분석하였다.

생활폐기물 중 BCF 분율을 산정하는데 가장 교란작용을 일으키는 것은 섬유류와 기저귀류이다. 섬유류의 경우 소각장 반입비율이 5~15%이며 IPCC 2000과 지자체온실가스관리지침(GGGI, 2017)에서 정한 FCF는 20%이지만 실제로는 화석연료기반탄소율이 좀 더 높을 것으로 추정된다. 기저귀류는 고령화 및 도시화의 진전에 따라, 소각장에 반입되는 생활폐기물중 10%에 상당하는 비율을 보이고 있지만

자치단체에 따라서 종이류로 분류하는 곳도 있고, 섬유류로 분류하는 곳도 있고 독립적인 분율로 계산하는 곳도 있어 GGGI (2017) 에 따른 FCF분율만으로는 정확한 배출량을 산정하기 어렵다. 고령화와 소득수준의 향상에 따라 발생비율은 꾸준히 증가하고 있다. 따라서 생활폐기물중의 섬유류와 기저귀류의 FCF를 구하기 위하여 생활계기물소각장중 두 개의 시설에서 ASTM D6866에 의한 측정결과를 바탕으로 섬유류 및 기저귀류의 FCF분율을 재산정하여 GGGI (2017)와 비교하였다.

마지막으로 ASTM 분석법에 따른 오류가능성을 검토하기 위하여 pMC (Percent modern Carbon)에 관한 표준분율을 검토하였다. ASTM 규정에 의하면 Tier3 방법론인  $^{14}\text{C}$ 측정에서는 총방사선탄소량(Total  $^{14}\text{C}$ )을 구한 후 이를 표준 pMC(Percent Modern Carbon)의 기준지수(Reference of fraction)율로 나누게 되어 있다. 이 분율의 환산값은 앞서 설명한 바와 같이 ASTM D6866 : 20에서 규정하고 있다.

### 3.3.2 시험법

#### 가. 성상조사

Plant I에 대한 성상조사는 공인시험기관 F사에게 조사항목을 정하여 의뢰하여 시행되었다. 시험방법은 물리적 조성시험의 경우, 환경부(2016) 폐기물공정시험기준에 따라 조사되었고, 원소분석, 발열량, 삼성분의 경우에는 환경부(2014) 고형연료제품 품질시험분석방법을 적용하였다.

시료의 채취 및 시험방법은 아래 그림 3-14와 같다.



시료 사진



시료균질화(원추사분법)



겉보기밀도



성상분석(음식물)

Fig. 3-14 Photos of test process

### 3.3.3 BCF 산정 - 지자체온실가스관리지침(TIER 2)

환경공단(2018, 2013)에서 조사한 전국폐기물통계조사보고서의 소각시설 반입대상폐기물의 성상조사는 조사결과는 아래 표 3-8과 같다.

**Table 3-8 National statistic report - MSW Incinerator (KECO 2018 (5th report), 2013(4th report))**

| Year    | Methodology | Flammables |      |       |      |        |         |         |         |        |
|---------|-------------|------------|------|-------|------|--------|---------|---------|---------|--------|
|         |             | Total      | Food | Paper | Wood | Rubber | Leather | Textile | Plastic | Others |
| 2016/17 | Report      | 86.6       | 12.4 | 23.8  | 6.8  | 2.9    | 2.4     | 6.6     | 17.8    | 13.9   |
| 2017    | Site        | 88.8       | 5.1  | 16.3  | 1.8  | 0.7    | 0.1     | 10.3    | 26.6    | 27.9   |
| 2012/13 | Report      | 93.4       | 13.2 | 27.5  | 11.9 | 8.2    |         |         | 25.7    | 6.9    |

같은 조사에서 매립대상폐기물의 성상조사결과는 아래 표 3-9와 같다.

**Table 3-9 National statistic report - MSW Landfill (KECO 2018 (5th report), 2013(4th report))**

| Year    | Methodology | Flammables |      |       |      |        |         |         |         |        |
|---------|-------------|------------|------|-------|------|--------|---------|---------|---------|--------|
|         |             | Total      | Food | Paper | Wood | Rubber | Leather | Textile | Plastic | Others |
| 2016/17 | Report      | 48.4       | 8.2  | 11.5  | 4.1  | 1.4    | 1.1     | 2.7     | 8.3     | 11.1   |
| 2017    | Site survey | 64.6       | 7.5  | 10.5  | 1.1  | 0.8    | 1.2     | 5.7     | 15.1    | 22.7   |
| 2012/13 | Report      | 51.9       | 9.6  | 11.4  | 5.3  | 3.6    |         | 2.7     | 10.2    | 9.1    |
| 2017*   | Site survey | 88.9       | 10.3 | 14.4  | 1.5  | 1.1    | 1.7     | 7.8     | 20.8    | 31.2   |
| 2012**  | Report      | 93.4       | 17.3 | 20.5  | 9.5  | 6.6    | -       | 4.8     | 18.3    | 16.4   |

매립지에는 건설폐기물, 소각잔재물 등이 반입되고 있으나

생활폐기물 만의 통계가 없어 종량제 봉투가 소각시설에

비고 반입되는 경우의 가연성비율만큼 보정하여 계산하였음

\* 제5차 조사 시와 동일한 가연성비율로 가정하여 환산

\*\* 제4차 조사 시와 동일한 가연성비율로 가정하여 환산

위의 조사에서 제 5차 조사시기에 현장조사가 더 신빙성이 있다는 가정하에 주요차이점은 아래와 같이 요약할 수 있다.

먼저 소각시설만을 보면 종이, 목재, 음식물류의 반입이 52.6%에서 23.1%로 대폭 감소하였다. 플라스틱의 함량이 비슷한 만큼 분류가 어려운 복합가연성물질이 6.9%에서 29.9%로 증가하였다. 복합가연성물질은 앞의 환경공단(2017)에서 FCF를 100%로 분류되는 만큼 BCF산정에 많은 영향을 주므로 기타가연성물질에 관한 현장조사를 다시 수행하여 그 결과값을 보정하여 주는 것이 타당하다 할 것이다. FCF를 산정하기 위한 물리적조성조사중에서 가장 파악되기 어려운 것은 섬유류와 기타가연성물질이다.

소각시설에서의 폐기물성상과 관련하여 수도권매립지 자료와 비교하여 차이점을 분석하여 보고자 한다. 수도권 매립지는 서울, 경기, 인천 3개지역의 폐기물중 종량제 생활폐기물이 반입되는 지역이고 수도권지역 55개 자치단체의 소각장들의 정비기간에는 해당자치단체의 발생량이 모두 수도권매립지로 반입된다. 반입되는 폐기물은 아래 표 3-10의 (수도권매립지 통계연감 2019 et al.)에서 보여주듯이 최근 8년간 수도권 3개광역시도의 반입량이 평준화되어 있음을 보여주고 있다.

**표 3-10 Amount of incoming waste from province, SLC ton/day**

| Area      | 2010  | 2013  | 2014  | 2015  | 2016  | 2017  | 2018  |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Seoul     | 1,887 | 1,651 | 1,614 | 1,686 | 1,624 | 1,678 | 1,587 |
| Gyoung gi | 1,514 | 1,155 | 1,139 | 1,265 | 1,236 | 1,326 | 1,463 |
| Incheon   | 641   | 644   | 610   | 714   | 743   | 680   | 691   |
| Total     | 4,042 | 3,450 | 3,363 | 3,665 | 3,603 | 3,684 | 3,741 |

SLC (2019)는 반입되는 모든 자치단체생활폐기물을 대상으로 성상을 조사하고 있다. 조사된 성상(SLC 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, et al.)은 아래 표 3-11과 같다.

**Table 3-11 Waste composition of Input waste in SLC**

| Year  | Category of waste(Wet basis) |      |         |      |         |                |        |
|-------|------------------------------|------|---------|------|---------|----------------|--------|
|       | Paper                        | Wood | Plastic | Food | Leather | Non-flammables | Others |
|       | %                            | %    | %       | %    | %       | %              | %      |
| Total | 45.18                        | 0.78 | 25.12   | 7.54 | 5.56    | 6.16           | 9.66   |
| 2014  | 43.80                        | 0.60 | 26.70   | 8.10 | 5.20    | 5.80           | 9.70   |
| 2015  | 50.10                        | 0.50 | 21.90   | 8.00 | 5.60    | 5.70           | 8.20   |
| 2016  | 43.50                        | 0.80 | 25.10   | 7.90 | 4.00    | 6.70           | 12.00  |
| 2017  | 43.60                        | 1.10 | 26.00   | 6.90 | 4.80    | 6.60           | 11.00  |
| 2018  | 44.90                        | 0.90 | 25.90   | 6.80 | 8.20    | 6.00           | 7.40   |

SLC 통계 표 3-11은 환경공단 표 3-8과 3-9의 평균적 성상을 보여야 함에도 환경공단의 국가통계하고는 다르다. 우선 분해가능물질 (Degradable Organic Contents, DOC) 성분이 90% 이상으로 정의된 유기물질(음식물류, 종이, 목재초본)의 비율이 환경공단 통계의 경우 2012/13년 52.6%에서 2016/17년에 26.1%로 감소하였지만 SLC의 통계에서는 2014년부터 2018년까지 모두 52-53%의 동일한 수준을 보여주고 있다. 플라스틱의 함량은 환경공단과 수도권매립지 모두 25%+/- 2%의 안정적 수치를 보여주고 있다. 기타가연성 부분이 큰 차이를 보여주고 있으며 불연성비율과 플라스틱의 합이 비슷하다는 결과를 가지고 유추해보면 환경공단 기타가연성의 상당부분이 수도권매립지통계에서는 대부분이 종이류, 일부분이 섬유류로 분류되고 있다고 추정되어진다.

위의 국가 통계와는 별도로 환경부가 인정하고 있는 각 소각장별 전국통계와 본 논문에서 다루고자 하는 3개 시설의 성상 조사결과는 아래 표 3-12와 같다.

**Table 3-12 Statistics of Input waste in incinerators (MOE)**

| Area  | Year  | Category of waste(Wet basis) |      |         |       |         |                |        |
|-------|-------|------------------------------|------|---------|-------|---------|----------------|--------|
|       |       | Paper                        | Wood | Plastic | Food  | Textile | Non-flammables | Others |
|       |       | %                            | %    | %       | %     | %       | %              | %      |
| Korea | Total | 31.22                        | 8.07 | 22.71   | 12.56 | 10.87   | 7.70           | 6.62   |
|       | 2014  | 31.32                        | 8.67 | 24.76   | 12.62 | 9.13    | 7.95           | 4.88   |
|       | 2015  | 30.19                        | 7.61 | 22.18   | 12.88 | 9.73    | 7.59           | 8.48   |
|       | 2016  | 30.33                        | 7.14 | 21.84   | 13.11 | 10.94   | 7.47           | 6.69   |
|       | 2017  | 32.49                        | 8.30 | 22.91   | 12.37 | 11.38   | 8.05           | 6.95   |
|       | 2018  | 31.78                        | 8.64 | 21.89   | 11.80 | 13.19   | 7.42           | 6.10   |
| N     | Total | 36.86                        | 5.32 | 18.89   | 18.38 | 11.72   | 5.52           | 3.32   |
|       | 2014  | 40.43                        | 5.00 | 24.52   | 19.83 | 5.50    | 4.72           | -      |
|       | 2015  | 45.49                        | 5.75 | 18.77   | 15.15 | 9.08    | 5.76           | -      |
|       | 2016  | 42.29                        | 5.18 | 20.88   | 18.19 | 7.37    | 5.40           | 0.69   |
|       | 2017  | 25.00                        | 5.08 | 14.97   | 18.30 | 17.02   | 4.68           | 14.94  |
|       | 2018  | 31.08                        | 5.57 | 15.30   | 20.40 | 19.61   | 7.04           | 0.99   |
| S     | Total | 24.72                        | 7.76 | 17.79   | 25.64 | 10.68   | 7.77           | 5.64   |
|       | 2014  | 23.76                        | 7.59 | 20.99   | 27.85 | 7.69    | 6.69           | 5.43   |
|       | 2015  | 23.46                        | 8.06 | 20.40   | 28.27 | 8.23    | 6.46           | 5.13   |
|       | 2016  | 25.42                        | 8.27 | 20.46   | 24.06 | 8.20    | 7.95           | 5.64   |
|       | 2017  | 25.24                        | 8.19 | 13.06   | 24.86 | 14.68   | 8.40           | 5.58   |
|       | 2018  | 25.74                        | 6.68 | 14.03   | 23.17 | 14.59   | 9.35           | 6.45   |
| I     | Total | 36.25                        | 5.64 | 27.75   | 9.45  | 8.55    | 10.25          | 2.10   |
|       | 2014  | 32.17                        | 5.10 | 30.67   | 10.64 | 11.03   | 10.39          | -      |
|       | 2015  | 38.39                        | 3.38 | 28.49   | 9.94  | 8.76    | 13.15          | -      |
|       | 2016  | 38.00                        | 2.71 | 21.86   | 9.80  | 7.73    | 15.83          | 4.08   |
|       | 2017  | 40.41                        | 7.39 | 22.51   | 10.95 | 6.94    | 7.39           | 4.43   |
|       | 2018  | 32.27                        | 9.92 | 35.25   | 5.92  | 9.04    | 5.62           | 1.98   |

폐기물의 성상의 변화에서 가장 주목하여 불 항목중 섬유류(고무,피혁 포함)에 대한 변화추이를 보면 아래 표 3-13과 같다.

**Table 3-13 Trend of Textile components in MSW**

| Year          | SLC  | Korea | Plant N | Plant S | Plant I |
|---------------|------|-------|---------|---------|---------|
| 2014          | 5.20 | 9.13  | 5.50    | 7.69    | 11.03   |
| 2015          | 5.60 | 9.73  | 9.08    | 8.23    | 8.03    |
| 2016          | 4.00 | 10.94 | 7.37    | 8.20    | 7.73    |
| 2017          | 4.80 | 11.38 | 17.02   | 14.68   | 6.94    |
| 2018          | 8.20 | 13.19 | 19.61   | 14.59   | 9.04    |
| Increase rate | 12%  | 9%    | 51%     | 18%     | -4%     |

국내 섬유류 폐기물의 성상에 대한 면밀한 조사를 위하여 Plant I를 대상으로 단독으로 성상조사를 실시하였다. 조사시기는 2019년 12월, 3회 sampling한 평균값을 적용하였으며 조사결과는 아래 표 3-14와 같다.

**Table 3-14 Survey result of waste components in Plant I (2019)**

| Paper | Wood | Plastic | Food  | Textile | Non-flammables | Others |
|-------|------|---------|-------|---------|----------------|--------|
| 32.50 | 1.70 | 40.60   | 11.20 | 10.90   | 3.00           | 0.10   |

이중 Plastic, Paper와 Textile은 그 종류를 세분화하여 조사하였다.

**Table 3-15 Categories of MSW components in Plant I (2019)**

| Paper(%) |         | Plastic(%) |         |           | Textile/Leather(%) |         |
|----------|---------|------------|---------|-----------|--------------------|---------|
| Paper    | Nappies | Vinyl      | Plastic | Styrofoam | Textile            | Leather |
| 18.9     | 13.6    | 29.8       | 9.7     | 1.1       | 10.8               | 0.1     |

위 실측치를 환경부 5개년간의 소각장 반입자료와 비교하면 거의 유사함을 알 수 있지만 기저귀류의 분류에 따라 영향을 받고 있다.

표 3-8, 3-9, 3-10을 종합하여 BCF와 FCF를 구하면 아래 표 3-16과 같다. 국내에서 사용되고 있는 지자체 온실가스 관리지침의 각각의 표준값율은 표 3-5를 적용하였다. 먼저 환경공단(2018)의 국가통계를 대상으로 한 BCF와 FCF는 아래표 3-16과 같다.

**Table 3-16 BCF&FCF contents of input waste in Korea incinerator (MOE 2018)**

| Items | Unit   | Paper | Wood | Food | Textile | Plastic | Others | Total |
|-------|--------|-------|------|------|---------|---------|--------|-------|
| Ratio | %      | 23.8  | 6.8  | 12.4 | 11.9    | 17.8    | 13.9   | 86.6  |
| dm    | kg/ton | 214.2 | 57.8 | 49.6 | 95.2    | 178.0   | 125.1  | 719.9 |
| CF    | kg/ton | 109.5 | 34.0 | 47.1 | 133.5   | 133.5   | 4.2    | 461.8 |
| FCF   | kg/ton | 1.1   | -    | -    | 26.7    | 133.5   | 4.2    | 165.5 |
| BCF   | kg/ton | 108.4 | 34.0 | 47.1 | 106.8   | -       | -      | 296.3 |
| BCF   | =      | 64.2% |      | FCF  | =       | 35.8%   |        | 100%  |

환경부(2019)에 의한 전국 소각장 반입성상을 기준으로 한 BCF와 FCF값은 아래 표 3-17와 같다.

**Table 3-17 BCF&FCF contents of input waste in Korea incinerator (MOE 2019)**

| Items | Unit   | Paper | Wood | Food | Textile | Plastic | Others | Total |
|-------|--------|-------|------|------|---------|---------|--------|-------|
| Ratio | %      | 31.8  | 8.6  | 11.8 | 13.2    | 21.9    | 6.1    | 93.4  |
| dm    | kg/ton | 286.0 | 73.4 | 47.2 | 105.5   | 218.9   | 54.9   | 786.0 |
| CF    | kg/ton | 131.6 | 36.7 | 17.9 | 52.8    | 164.2   | 1.6    | 404.8 |
| FCF   | kg/ton | 1.3   | -    | -    | 10.6    | 164.2   | 1.6    | 177.7 |
| BCF   | kg/ton | 130.3 | 36.7 | 17.9 | 42.2    | -       | -      | 227.1 |
| BCF   | =      | 56.1% |      | FCF  | =       | 43.9%   |        | 100%  |

같은 기간동안 수도권 매립지에 반입된 생활폐기물을 대상으로 한 조사에서는 아래 표 3-18과와 같이 나타났다.

**Table 3-18 BCF&FCF contents of input waste in SLC (SLC 2019)**

| Items | Unit   | Paper | Wood | Food | Textile | Plastic | Others | Total |
|-------|--------|-------|------|------|---------|---------|--------|-------|
| Ratio | %      | 44.9  | 0.9  | 6.8  | 8.2     | 25.9    | 7.4    | 94.1  |
| d m   | kg/ton | 404.1 | 7.7  | 27.2 | 65.6    | 259.0   | 66.6   | 830.2 |
| CF    | kg/ton | 206.5 | 4.5  | 25.8 | 194.3   | 194.3   | 2.2    | 627.6 |
| FCF   | kg/ton | 2.1   | -    | -    | 38.9    | 194.3   | 2.2    | 237.4 |
| BCF   | kg/ton | 204.5 | 4.5  | 25.8 | 155.4   | -       | -      | 390.2 |
| BCF   | =      | 62.2% |      | FCF  | =       | 37.8%   |        | 100%  |

표 3-16, 3-17, 3-18의 폐기물전국통계조사보고 (한국환경공단 2018), 전국소각장처리현황 (환경부 2019), 수도권매립지 반입폐기물현황 (SLC 2019)등의 통계를 종합하면 BCF값은 평균 60.81%로 나타났다.

위의 전국단위 통계와 비교하기 위하여 이 논문에서 다루고자 하는 대상시설에서의 BCF를 구하여 보고자 한다. 대상시설은 서울지역 1곳, 경기지역 2곳이다. 성상조사는 매월 실시하였으며, 시험법은 폐기물공정관리법상의 표준시험법에 따라 조사되었다.

아래 표 3-19는 Plant N에서의 탄소분율을 보여주고 있다.

**Table 3-19 BCF&FCF contents of input waste in Plant N(MOE 2019)**

| Items | Unit   | Paper | Wood | Food  | Textile | Plastic | Others | Total |
|-------|--------|-------|------|-------|---------|---------|--------|-------|
| Ratio | %      | 31.08 | 5.57 | 15.30 | 20.40   | 19.61   | 7.04   | 99.01 |
| dm    | kg/ton | 279.8 | 47.3 | 61.2  | 163.2   | 196.1   | 63.4   | 811.0 |
| CF    | kg/ton | 143.0 | 27.8 | 58.2  | 147.1   | 147.1   | 2.1    | 525.3 |
| FCF   | kg/ton | 1.4   | -    | -     | 29.4    | 147.1   | 2.1    | 180.0 |
| BCF   | kg/ton | 141.6 | 27.8 | 58.2  | 117.7   | -       | -      | 345.2 |
| BCF   | =      | 65.7% |      | FCF   | =       | 34.3%   |        | 100%  |

아래 표 3-20은 Plant S에서의 BCF와 FCF의 계산값이다.

**Table 3-20 BCF&FCF contents of input waste in Plant S (MOE 2019)**

| Items | Unit   | Paper | Wood | Food | Textile | Plastic | Others | Total |
|-------|--------|-------|------|------|---------|---------|--------|-------|
| Ratio | %      | 25.7  | 6.7  | 23.2 | 14.6    | 14.0    | 6.4    | 90.7  |
| d m   | kg/ton | 231.6 | 56.8 | 92.7 | 116.8   | 140.3   | 58.0   | 696.1 |
| CF    | kg/ton | 106.6 | 28.4 | 35.2 | 58.4    | 105.2   | 1.7    | 335.5 |
| FCF   | kg/ton | 1.1   | -    | -    | 11.7    | 105.2   | 1.7    | 119.7 |
| BCF   | kg/ton | 105.5 | 28.4 | 35.2 | 46.7    | -       | -      | 215.8 |
| BCF   |        | 64.3% | FCF  |      |         | 35.7%   | 100%   |       |

Plant I의 경우에는 환경부 통계를 이용한 값은 아래 표3-21과 같다.

**Table 3-21 BCF&FCF contents of input waste in Plant I (MOE 2019)**

| Items | Unit   | Paper | Wood | Food | Textile | Plastic | Others | Total |
|-------|--------|-------|------|------|---------|---------|--------|-------|
| Ratio | %      | 32.3  | 9.9  | 5.9  | 9.0     | 35.2    | 2.0    | 94.4  |
| d m   | kg/ton | 290.5 | 84.4 | 23.7 | 72.3    | 352.5   | 17.8   | 841.1 |
| CF    | kg/ton | 133.6 | 42.2 | 9.0  | 36.2    | 264.3   | 0.5    | 485.8 |
| FCF   | kg/ton | 1.3   | -    | -    | 7.2     | 264.3   | 0.5    | 273.4 |
| BCF   | kg/ton | 132.3 | 42.2 | 9.0  | 28.9    | -       | -      | 212.4 |
| BCF   | =      | 43.7% | FCF  |      |         | =       | 56.3%  | 100%  |

Plant I를 대상으로 실측한 BCF는 아래 표 3-22와 같다.

**Table 3-22 BCF&FCF contents of input waste in Plant I (Site survey 2019)**

| Items | Unit   | Paper | Wood | Food | Textile | Plastic | Others | Total |
|-------|--------|-------|------|------|---------|---------|--------|-------|
| Ratio | %      | 32.5  | 1.7  | 11.2 | 10.9    | 40.6    | 0.1    | 97.0  |
| d m   | kg/ton | 292.5 | 14.5 | 44.8 | 87.2    | 406.0   | 0.9    | 845.9 |
| CF    | kg/ton | 134.6 | 7.2  | 17.0 | 43.6    | 304.5   | 0.0    | 506.9 |
| FCF   | kg/ton | 1.3   | -    | -    | 8.7     | 304.5   | 0.0    | 314.6 |
| BCF   | kg/ton | 133.2 | 7.2  | 17.0 | 34.9    | -       | -      | 192.3 |
| BCF   |        | 37.9% |      | FCF  | =       | 62.1%   |        | 100%  |

비교값으로 채택한 수도권매립지, SM Kang (2018), et , al. HY Lee (2018)에서 구한 BCF를 비교하면 아래 표 3-23과 같다.

**Table 3-23 Comparison of BCF in MSW Incinerators**

| Site | SLC   | KECO  | N     | S     | I     |       | Kang (2018) | Lee (2018) |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|------------|
|      |       |       |       |       | MOE   | Site  |             |            |
| BCF  | 62.2% | 64.2% | 65.7% | 64.3% | 43.7% | 37.9% | 58.1%       | 57%        |
| Year | 2018  | 2017  | 2018  | 2018  | 2018  | 2019  | 2013        | 2015       |

성상변화에 따른 추세를 분석하기 위하여 Plant N, S, I에서의 지난 5년간 BCF와 FCF값의 변화추이를 조사하였다.

지난 5년간 Plant N에서의 BCF분율의 변화추이를 보면 아래 표 3-24와 같다.

**Table 3-24 BCF & FCF during 2014~2018 years in Plant N**

| Year    | CF     | BCF    |       | FCF   |
|---------|--------|--------|-------|-------|
| Average | 392.55 | 239.09 | 60.9% | 39.1% |
| 2014    | 424.67 | 234.70 | 55.3% | 44.7% |
| 2015    | 412.87 | 262.98 | 63.7% | 36.3% |
| 2016    | 411.01 | 246.57 | 60.0% | 40.0% |
| 2017    | 337.32 | 206.36 | 61.2% | 38.8% |
| 2018    | 376.86 | 244.83 | 65.7% | 34.3% |

BCF분율은 5년간 약 10% 증가하였다. 증가의 원인 중 가장 큰 부분은 섬유류의 증가이다. 섬유류의 FCF는 20%이지만 IPCC의 참고의견인 40%로 가정하면 아래의 표 3-25의 추세를 구할 수 있다.

**Table 3-25 BCF & FCF content in Plant N with revised FCF default value into 40% of Textile**

| Year  | TC(kg/ton) | BCF    |       | FCF   |
|-------|------------|--------|-------|-------|
| Total | 392.55     | 229.71 | 58.5% | 41.5% |
| 2014  | 424.67     | 230.30 | 54.2% | 45.8% |
| 2015  | 412.87     | 255.71 | 61.9% | 38.1% |
| 2016  | 411.01     | 240.67 | 58.6% | 41.4% |
| 2017  | 337.32     | 192.74 | 57.1% | 42.9% |
| 2018  | 376.86     | 229.14 | 60.8% | 39.2% |

Plant S에서의 지난 5년간 BCF와 FCF값은 아래 표 3-26과 같다.

**Table 3-26 BCF & FCF during 2014~2018 years in Plant S**

| Year  | TC(kg/ton) | BCF    |       | FCF   |
|-------|------------|--------|-------|-------|
| Total | 351.92     | 207.44 | 58.9% | 41.1% |
| 2014  | 362.58     | 196.57 | 54.2% | 45.8% |
| 2015  | 361.62     | 199.70 | 55.2% | 44.8% |
| 2016  | 364.69     | 202.14 | 55.4% | 44.6% |
| 2017  | 335.25     | 222.98 | 66.5% | 33.5% |
| 2018  | 335.47     | 215.80 | 64.3% | 35.7% |

Plant N에서와 같이 Textile의 FCF 산정값이 0.4라고 가정하여 Plant S에서의 BCF의 변화추이를 보면 아래 표 3-27과 같다.

**Table 3-27 BCF & FCF content in Plant S with revised FCF default value into 40% of Textile**

| Year  | CF ( kg/ton) | BCF    |       | FCF   |
|-------|--------------|--------|-------|-------|
| Total | 351.92       | 198.90 | 56.5% | 43.5% |
| 2014  | 362.58       | 190.42 | 52.5% | 47.5% |
| 2015  | 361.62       | 193.12 | 53.4% | 46.6% |
| 2016  | 364.69       | 195.58 | 53.6% | 46.4% |
| 2017  | 335.25       | 211.24 | 63.0% | 37.0% |
| 2018  | 335.47       | 204.12 | 60.8% | 39.2% |

3개 대상시설의 BCF 비율은 한국환경부의 공식통계에 사용되어 국가 인벤토리로 관리되고 있는 점을 감안하여 여기서는 위 실제 통계치를 사용하여 배출량을 구하였다.

위 시설간의 BCF함량에 관한 차이점 중에서 편차가 심한 항목은 섬유/고무류와 플라스틱의 비율이다. IPCC guideline에서 정한 섬유류는 천연섬유와 화학섬유로 나누고 화학섬유의 비율을 10% 내외로 판단하여 BCF 비율을 80%, FCF의 비율을 20%로 보고 있다. IPCC Guideline 중

유념할 부분은 작성자의 의견으로서 합성섬유의 비율을 40%로 볼 것을 제시하고 있다. Fellner (2012)에 의하면 섬유류는 소득수준의 향상에 따라 BCF의 함량이 상승하며 2009년 오스트리아의 경우 67%가 천연섬유기반, 10%가 화학섬유, 23%가 복합재질인 것으로 보고되었다. 국내 지역적 특성으로는 N지역은 서울 강북지역 섬유류 공장의 폐섬유류의 반입이 관찰되며 N지역은 재활용섬유중 잔재물의 반입이 관찰되어 실제 BCF비율은 IPCC에서 정한 80%보다는 약간 낮을 것으로 추정되어 IPCC의 guideline과 Comment사항을 반영한 두 가지 값으로 계산하였다.

**TABLE 2.4**  
**DEFAULT DRY MATTER CONTENT, DOC CONTENT, TOTAL CARBON CONTENT AND FOSSIL CARBON FRACTION OF**  
**DIFFERENT MSW COMPONENTS**

| MSW component         | Dry matter content in % of wet weight <sup>1</sup> | DOC content in % of wet waste |                   | DOC content in % of dry waste |                    | Total carbon content in % of dry weight |         | Fossil carbon fraction in % of total carbon |          |
|-----------------------|--|-------------------------------|-------------------|-------------------------------|--------------------|---|---------|---|----------|
|                       | Default  | Default                       | Range             | Default                       | Range <sup>2</sup> | Default                                 | Range   | Default                                     | Range    |
| Paper/cardboard       | 90   | 40                            | 36 - 45           | 44                            | 40 - 50            | 46                                      | 42 - 50 | 1   | 0 - 5    |
| Textiles <sup>3</sup> | 80   | 24                            | 20 - 40           | 30                            | 25 - 50            | 50                                      | 25 - 50 | 20  | 0 - 50   |
| Food waste            | 40   | 15                            | 8 - 20            | 38                            | 20 - 50            | 38                                      | 20 - 50 | -   | -        |
| Wood                  | 85 <sup>4</sup>                                    | 43                            | 39 - 46           | 50                            | 46 - 54            | 50                                      | 46 - 54 | -   | -        |
| Garden and Park waste | 40   | 20                            | 18 - 22           | 49                            | 45 - 55            | 49                                      | 45 - 55 | 0   | 0        |
| Nappies               | 40   | 24                            | 18 - 32           | 60                            | 44 - 80            | 70                                      | 54 - 90 | 10  | 10       |
| Rubber and Leather    | 84   | (39) <sup>5</sup>             | (39) <sup>5</sup> | (47) <sup>5</sup>             | (47) <sup>5</sup>  | 67                                      | 67      | 20  | 20       |
| Plastics              | 100  | -                             | -                 | -                             | -                  | 75                                      | 67 - 85 | 100   | 95 - 100 |
| Metal <sup>6</sup>    | 100  | -                             | -                 | -                             | -                  | NA                                      | NA      | NA  | NA       |
| Glass <sup>6</sup>    | 100  | -                             | -                 | -                             | -                  | NA                                      | NA      | NA  | NA       |
| Other, inert waste    | 90   | -                             | -                 | -                             | -                  | 3                                       | 0 - 5   | 100   | 50 - 100 |

<sup>1</sup> The moisture content given here applies to the specific waste types before they enter the collection and treatment. In samples taken from collected waste or from e.g., SWDS the moisture content of each waste type will vary by moisture of co-existing waste and weather during handling.

<sup>2</sup> The range refers to the minimum and maximum data reported by Dehoust *et al.*, 2002; Gangdonggu, 1997; Guendehou, 2004; JESC, 2001; Jager and Blok, 1993; Würdinger *et al.*, 1997; and Zeschmar-Lahl, 2002.

<sup>3</sup> 40 percent of textile are assumed to be synthetic (default). Expert judgement by the authors.

<sup>4</sup> This value is for wood products at the end of life. Typical dry matter content of wood at the time of harvest (that is for garden and park waste) is 40 percent. Expert judgement by the authors.

<sup>5</sup> Natural rubbers would likely not degrade under anaerobic condition at SWDS (Tsuchii *et al.*, 1985; Rose and Steinbüchel, 2005).

<sup>6</sup> Metal and glass contain some carbon of fossil origin. Combustion of significant amounts of glass or metal is not common.

### 3.3.4 BCF 산정 - <sup>14</sup>C 방법론 (TIER 3)과 비교검토

전항에서 구한 BCF를 검증하기 위하여 AMS방식에 의한 BCF값을 구하였다. 측정은 2017년 시료를 대상으로 국내 U시설에서의 TIER2 방법론에 의한 BCF값과 지질자원연구원에서 2017년 시료로 측정한 TIER3방법론을 비교분석하였다. 바이오탄소는 14C/12C≈E-12의 14C 함량을 가지며, 화석탄소는 14C/12C≈E-15의 14C 함량을 가진다. 1950년부터 실시된 대기 핵실험 영향으로 대기중 14C농도는 1950년 이전에 비해 급격히 증가하였다가 감소하는 추세이며 현재도 1950년 이전에 비해 높다. 이를 보정하기 위해 pMC 값에 REF(대기탄소계수)를 곱한 값을 시료의 바이오탄소 함량으로 정의한다. (ASTM D6866-16, 20).

두 시설의 측정은 2017년 채집된 자료로 2017년에 조사되었다. 조사된 생활폐기물 소각시설은 U, B 두 개의 시설로서 각각의 BCF를 TIER 2 (공인통계에 의한 정상별비율을 각 정상별 설정값-default value-로 구한 값)와 TIER3 (ASTM D-6866측정법에 의한 측정치)와 비교하면 다음과 같다.

먼저 TIER 2에 의한 plant B의 BCF는 아래 표 3-28과 같다.

**Table 3-28 BCF & FCF in Plant B by TIER 2 methodology at 2017 year**

| Field      | Paper | Wood  | Food | Textile | Plastic | Others | Total  |
|------------|-------|-------|------|---------|---------|--------|--------|
| Status(%)  | 29.48 | 15.85 | 9.94 | 8.58    | 26.28   | 4.75   | 94.88  |
| TC(kg/ton) | 122.1 | 67.4  | 15.1 | 34.3    | 197.1   | 13.1   | 437.21 |
| BC(kg/ton) | 120.8 | 67.4  | 15.1 | 27.5    | -       | -      | 230.74 |
| BCF        | 52.8% |       | FCF  |         |         | 47.2%  |        |

그리고 Plant U시의 BCF는 아래 표 3-29과 같다.

**Table 3-29 BCF & FCF in Plant U by TIER 2 methodology at 2017 year**

| Field      | Paper | Wood  | Food  | Textile | Plastic | Others | Total  |
|------------|-------|-------|-------|---------|---------|--------|--------|
| Status(%)  | 35.89 | 16.88 | 12.70 | 9.40    | 13.80   | 0.88   | 89.54  |
| TC(kg/ton) | 148.6 | 71.7  | 19.3  | 37.6    | 103.5   | 0.2    | 380.95 |
| BC(kg/ton) | 147.1 | 71.7  | 19.3  | 30.1    | -       | -      | 268.21 |
| BCF        | 70.4% |       | FCF   |         |         | 29.6%  |        |

같은 소각시설의 같은 기간 한국지질자원연구원을 통하여 측정된 BCF와 FCF는 아래 표 3-30과 같다.

**Table 3-30 ASTM test result of plant B&U at 2017 samples**

| Site    | pMC  | BCF     |           | FCF    |         |
|---------|--|---------|-----------|--------|---------|
|         |  | Report* | Revised** | Report | Revised |
| Plant U | 58.64  | 55.71   | 58.12     | 44.29  | 41.88   |
| Plant B | 57.67  | 54.79   | 57.16     | 45.21  | 42.84   |
| Remarks | * BCF was calculated by ASTM D6866- ver08 ,<br>which BCF can be achieved by pMC x 0.95 |         |           |        |         |

위 표 3-30에서 BCF Revised value는 아래 조사결과표에서 다시 계산된 수치이다.

| 바이오탄소 함량(%)                     |                             | 화석탄소 함량(%)                      |                             | pMC(%)                               | pMC오차(%) |
|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|----------|
| 55.71                           |                             | 44.29                           |                             | 58.64                                | 0.31     |
| $\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$ | $\delta^{13}\text{C}$ 오차(‰) | $\Delta^{14}\text{C}(\text{‰})$ | $\Delta^{14}\text{C}$ 오차(‰) | $^{12}\text{C}$ 전하량( $\mu\text{C}$ ) | 측정시간(초)  |
| -20.03                          | 1.07                        | -418.3                          | 3.12                        | 242.3                                | 1620     |

**Fig. 3-15 BCF & FCF test report of Plant U, tested by KIGAM**

위 시험성적서는 pMC값 58.64%에 ASTM D6866-08에서 정한 REF 0.95를 곱하여 55.71%의 BCF값을 구하였다. 그러나 ASTM

D6866-08이후 ASTM D6866-16에서 2017년도 REF값을 101로 규정하고 있으므로 pMC/REF 는 58.12%가 정확한 계산으로 판단된다.

TIER 2와 TIER 3에 의한 BCF의 차이는 Plant B의 경우 각각 52.8%와 57.16%를 보여주고 있다. 위 차이는 Wood 성분의 함량이 높아 대기중의 pMC 값을 적용하는데 무리가 있기 때문일 것으로 보여진다. Wood의 Paper에 사용된 펄프의 평균수명을 15년으로 가정하여 2002년도의 pMC값(107)을 적용하여 계산하면 55.8%로 나타나 TIER1과의 차이가 감소하게 된다. Plant U의 경우에는 TIER 2, 3 측정법의 BCF값이 각각 70.4%와 58.12%로 나타났는데 이는 시료채취상의 문제로서 ASTM 방법론으로 측정할 시 채집된 연소가스의 pMC분율이 적은 샘플이 측정된 요인으로 보여진다. 또한 Textile의 FCF value를 0.2보다 높은 0.4로 적용하게 되면 Biobased carbon은 260.8 kg/waste.ton으로 계산되어 TIER 2에 의한 BCF값은 68.6%가 된다.

위 두 분석법의 차이를 요약하면 pMC test (ASTM D6866)측정법에서는 종이와 목재의 pMC분율을 해당연도 pMC로 계산하게 될 경우 BCF비율이 과대계상값 (Over weighted value)이 되며 그 차이는 약 3% 정도이다. TIER 2에 의한 계산법에서는 Textile의 FCF 값을 0.2 대신에 IPCC comment 사항인 0.4로 적용하는 것이 TIER 3에 의한 측정값과 좀 더 유사하게 나타나게 된다. 이 논문에서는 이를 검증할 만한 TIER 3, 4 (다년간의 연소가스 측정에 의한 FCF 값 산정)수준의 측정이 이루어지지 못하였으나 좀 더 많은 시료가 감도된다면 위의 두 가지 결론과 유사한 결과를 얻을 것으로 보여진다.

오승환(2018)은 TIER 4에 의한 측정값을 조사보고하였다. 조사시기는 2014년부터 2017년 4년간으로서, 화석탄소함량 (FCF)의 값은 생활폐기물 시설의 경우 41.6%, 사업장폐기물소각시설인 경우 58.2%로 제안하였다.

위 논문은 국내 소각시설의 표준자료로 인용되고 있으나 pMC 측정의 경우 해마다 달라지는 pMC 값을 반영한 것은 아니므로 약간의 보정이 있어야 할 것으로 보인다.

### 3.4 대상시설인 Plant N, S, I 에서의 배출량

위의 결과를 종합하여 대상시설에서의 배출량을 구하면 아래 표 3-31과 같다.

**Table 3-31 CO<sub>2</sub> emission in MSW incinerator at 2018 year**

( unit : kg/waste.ton)

|           | Korean*  | N     | S     | I                 | Default(GGGI) |
|-----------|--|-------|-------|-------------------|---------------|
| GGGI      | 652.1  | 484.5 | 439.2 | 1,004.0           | 1,052         |
| Revised** | 690.8  | 542.1 | 482.0 | 1,030.0<br>680*** |               |
| Remarks   | * means statistics of 33 incineration plant on korea   |       |       |                   |               |
|           | ** Change default value of textile FCF from 0.2 to 0.4 |       |       |                   |               |
|           | *** Estimated value as per trend of recent 4 years.    |       |       |                   |               |

위 표 3-31에 CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O의 표준배출계수를 더하여 환산된 시설별 배출량은 아래 표 3-32와 같다.

**Table 3-32 Trend of GHG emission in three incineration plant**

| Field             | Unit                        | S     | I     | N     |
|-------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|
| kgCO <sub>2</sub> | Waste                       | 482.0 | 680.0 | 542.1 |
|                   | Fuel(LNG)                   | 27.32 | 2.07  | 3.45  |
| CH <sub>4</sub>   | Waste                       | 5     | 5     | 5     |
|                   | Fuel(LNG)                   | 0.03  | 0.00  | 0.00  |
| N <sub>2</sub> O  | Waste                       | 0.016 | 0.016 | 0.016 |
|                   | Fuel(LNG)                   | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| GHG               | TCO <sub>2</sub> /waste.ton | 514.4 | 687.1 | 550.6 |
|                   | TCO <sub>2</sub> /hr        | 11.7  | 6.4   | 13.4  |

한국 내 소각로의 평균 배출량은 690.8 kg/waste.ton으로 조사되었다. 소각시설에서의 총배출량은 폐기물기반 CO<sub>2</sub>배출량에 전기사용, 보조연료 사용으로 인한 배출량을 추가하여야 한다. 위 3개시설에서의 평균 전기사용량과 보조연료량을 더한 배출량은 3개 시설 평균 18톤waste.ton/hr을 연소하는데 928.9kgCO<sub>2</sub>가 사용되어 50.6.kgCO<sub>2</sub>/waste.ton의 배출량을 보여주고 있다. 이와 관련된 배출량 보정은 4장에서 상세하게 다루고자 한다. 위 전기 및 보조연료 소모량을 감안하더라도 전국 평균 배출량은 741 kg /waste.ton으로서 지자체온실가스관리기준에서 정한 기준값 1,052 kg/ waste.ton에 비하여 30% 정도 낮은 수치를 보이고 있다. 특히 대도시 지역에서는 최근 석유류와 기저귀류의 증가로 BCF비율이 평균 10% 정도 상승하여 온실가스 배출량은 8%정도 감소하였다.

### 3.5 결론

본 장에서는 생활폐기물 소각시설에서의 배출량 산정에 관하여 IPCC 2장 에너지분야와 5장 폐기물 분야의 관련규정에 기초하고 한국 내 공식통계와 검증을 위한 비교측정치를 사용하여 아래와 같이 연구목적에

따른 결론에 도달하였다.

첫째로 방법론과 입력변수들의 상관관계를 파악하였다. 거의 모든 생활폐기물소각시설이 자치단체 소관의 시설로서 배출권목표관리업체로 지정되어 있다는 측면에서 TIER 2를 사용하고 있다. TIER 2 수준의 배출량산정에는 폐기물처리기본계획의 자료, 수도권매립지 5개년 반입자료, 전국생활폐기물소각시설 5개년간 반입자료를 이용하여 배출량을 산정하고 이를 두 개의 소각시설에서 TIER 3와 비교하였다. 그리고 이 논문에서 대상으로 선정한 Plant N, S, I의 배출량을 산정하였다.

둘째는 배출량 산정 시 불확실성의 주요 요인을 정리하였다.

1 요인은 TIER1, 2에서 샘플링에 의한 정상조사의 불확실성이다. IPCC 2006 지침에서는 정기적인 샘플링을 통하여 조사하는 경우에  $\pm 10\%$ 의 불확실성, 간헐적인 연구 및 특수 목적으로 샘플링을 통하여 성상을 분석하는 경우  $\pm 30\%$ 의 불확실성을 내포하고 있는 것으로 평가하고 있다. 이러한 오차를 줄이기 위하여 Plant N, S, I의 경우 5개년간 매월 측정된 자료를 이용하여 배출량을 산정하였고 Plant I에서는 현장실측을 통하여 이를 검증하였다.

2 요인은 섬유류와 기저기류에 대한 BCF 산정이다. 온실가스배출량에서 BCF는 산정하지 않으므로 배출량에 많은 영향은 준다. 이 두 항목은 거의 모든 자치단체에서 점유율이 증가하고 있으며 조사대상 3 개 시설에서 지난 5년간 점유율이 평균 10% 증가하였다. 섬유류의 경우 BCF값을 0.8로 적용하고 있으나 화학섬유제품의 사용량으로 비추어 볼 때 IPCC 권고사항을 적용하여 0.6으로 적용하는 것이 좀 더 적합한 것으로 계산되었다.

3 요인은 BCF를 산정하기 위한 ASTM측정법에서 pMC 농도에 대한 기준이다. 대기중에 pMC 농도는 기존의 연구결과를 해석하여 함수로 표현하였고 2000년 현재 pMC 값은 1950년과 거의 유사한 101.3으로

나타났다. 이는 ASTM D6866-20에서 동일하게 2019년과 2000년을 100으로 정함에 따라 ASTM기준치와 거의 유사함을 보여주었다. 그럼에도 음식물류와 초본계 바이오매스는 해당년도의 pMC값을 사용할 수 있지만 종지와 가구의 경우, 원료로 사용된 목재의 수령이 15-20년으로 보여지므로 그 시대의 pMC값이 적용할 경우 110+/-3 정도로 조사되었다. 이를 생활폐기물 중 점유율로 환산하면 101.5~102.5 정도로 계산되어 ASTM 기준보다는 높지만 이 연구의 예측치 101.3과 거의 유사하다고 볼 수 있다. 이는 동아시아의 지역적 특성과 계절별 편차가 일부 반영된 것으로 보여진다. 대도시 지역에서의 총탄소량에 의한 희석효과를 반영하면 서울지역은 99.5, 경기지역은 99.8정도일 것으로 예측된다.

위에서 도출한 pMC농도는 대기, 육지, 해양의 다매체거동해석 (Multimedia fate model) 의한 해석이고 지구상의 대기중 탄소농도는 동일하다는 전제로 계산되었다. 그러나 한국은 전세계에서 가장 많은 화석연료배출국가중 하나이며 또한 중국에 인접하고 있어 대기중의 CO<sub>2</sub>농도가 급속히 증가하는 지역중 하나이다. 화석연료로 인한 CO<sub>2</sub> 확산이 느리다면 총 탄소농도가 증가하여 pMC의 희석배율이 높아지고 이에 따라 REF값이 모델에서 예측하고 있는 것보다 낮아질 수 있다.

셋째는 TIER 3, 4 수준의 배출량 산정 시 pMC 농도에 대한 개선방안을 제안하였다. 목재, 종이류의 품목별 pMC 농도를 감안한 REF를 적용할 경우 폐기물의 BCF값이 하향조정될 수 있다. 아시아지역의 유사사례인 태국의 예를 들어보면 단년생 Biomass의 2015년도 pMC값은 110정도로서 ASTM의 2015년 REF 지수 102보다 훨씬 높아 ASTM REF지수 사용시 BCF값이 과다계상되어 소각시설에서의 배출량이 과소산정될 것이다. 따라서 TIER 3, TIER 4 수준의 배출량 산정이 TIER 2 수준보다 엄격하기 위한 조건은 우리나라의 단년생 식물을 기준으로, 계절별 기준치를 측정하여 이를 공식자료로 이용하여야 한다. TIER 3, 4

방법론이 시설교유계수의 개발을 위하여 연소가스를 정기적으로 장기간 측정하여 사용하여야 하지만 결정적으로 REF 값에 아주 많은 영향을 받을 수 밖에 없다. 즉 연소가스에서 측정된  $^{14}\text{C}$  pMC값을 BCF로 환산하기 위하여 반영되는 REF 값은 5% 이상의 편차를 보일 수 있다. 이는 총탄소량중 BCF를 제외한 나머지를 FCF로 환산하여 이를 배출량산정의 기초로 삼는 계산법에서는 곧바로 배출량 차이를  $\pm 5\%$ 로 확대시키게 되며 최대 10%의 편차를 보일 수 있다. 나아가서 TIER 3, TIER4 방법론을 적용한다 하더라도 REF 값에 대한 객관적인 지표 없이는 TIER3, TIER4 배출량산정방식이 정확한 것인가에 대한 의문은 지속적으로 제기될 것이다. 이를 위하여 폐기물을 대상으로 단위물질의 pMC농도를 측정하여 이를 단위성상당 표준 pMC로 규정하는 작업이 선행되어야 한다. 아울러서 당해연도 대기중의  $^{14}\text{C}$ 농도를 뜻하는 REF 값을 산정하기 위하여 대표품목을 선정하여야 한다. 가장 수요가 많은 배추와 단당류로서 보편성을 가진 국산 꿀 등이 주요 추천항목으로서 태국 등 열대지방의 경우 Sugarcane과 Cassaba를 대표 실험품목으로 지정하는 것과 같은 측정법이다.

따라서 제 3장에서는 섬유류의 BCF분율을 기준치 0.2대신에 0.4로 조정하고, REF 값은 ASTM 기준인 100 대신에 101.3을 적용하는 것이 한국 현실에 부합될 것이라는 결론을 얻을 수 있었다.

위의 결론을 종합하여 대상 3개시설의  $\text{TCO}_2$ 배출량은 각각 Plant N 542kg/waste.ton, Plant S 482 kg/waste.ton, Plant I 680 kg/waste.ton로 계산되었으며 이 결과를 폐기물로 인한 시설별 배출량으로 사용하였다.

### 3.6 참고문헌

1. 기상청 기후변화포털 종합 기후변화 감시정보  
[http://www.climate.go.kr/home/09\\_monitoring/index.php/main](http://www.climate.go.kr/home/09_monitoring/index.php/main)
2. 박중헌 지질자원연구원 서울대자료(excel)
3. 수도권매립지관리공사 수도권매립지통계연감(2014)
4. 수도권매립지관리공사 수도권매립지통계연감(2015)
5. 수도권매립지관리공사 수도권매립지통계연감(2016)
6. 수도권매립지관리공사 수도권매립지통계연감(2017)
7. 수도권매립지관리공사 수도권매립지통계연감(2018)
8. 오승환·강임석·정동희, 폐기물 소각시설의 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>) 연속측정 실효성에 관한 연구, Journal of Climate Change Research 2018, Vol. 9, No. 3, pp. 273~281
9. 이천뉴파워 동부권광역자원화수시설 폐기물성상조사보고서 2019.12
10. 한국산업기술시험원 기술이슈레포트 VOL 19-10 2019.10, KEIT PD ISSUE REPORT
11. 한국환경공단 제 4차 전국폐기물통계조사 2012.12
12. 한국환경공단 제 5차 전국폐기물통계조사 2017.12
13. 환경부 고형연료제품품질시험.분석방법[환경부고시 제 2014-135호, 2014. 08.06.]
14. 환경부 전국생활폐기물소각장 운영현황(2015) 2015.07
15. 환경부 전국생활폐기물소각장 운영현황(2016) 2016.07
16. 환경부 전국생활폐기물소각장 운영현황(2017) 2017.07
17. 환경부 전국생활폐기물소각장 운영현황(2018) 2018.07
18. 환경부 전국생활폐기물소각장 운영현황(2019) 2019.07
19. 환경부 폐기물공정시험기준[환경부고시 제2016-196호, 2016.10.13.]
20. ASTM D6866 Standard Test Methods for Determining the Biobased Content of Solid, Liquid, and Gaseous Samples Using

## Radiocarbon Analysis1

21. CEN/TS 16640:2014 Biobased Products – Determination of the biobased carbon content of products using the radiocarbon method
22. Chandra Mouli Pavuluri, Kimitaka Kawamura, "Seasonal changes in TC and WSOC and their  $^{13}\text{C}$  isotope ratios in Northeast Asian aerosols: land surface - biosphere - atmosphere interactions, *Acta Geochim* (2017) 36(3):355 - 358 DOI 10.1007/s11631-017-0157-3
23. IPCC 2006 Volume 5 Chapter 3.7 Table 3.5
24. J.H. Park, W. Hong, X. Xu, G. Park, K.S. Sung, Kilho Sung, Jong-geol Lee, T. Nakanishi, Hyo-Seok Park, " The distribution of  $\text{D}_{14}\text{C}$  in Korea from 2010 to 2013".
25. Johann Fellner, Helmut Rechberger, Abundance of  $^{14}\text{C}$  in biomass fractions of wastes and solid recovered fuels, *Waste Management* 29 (2009) 1495 - 1503
26. Larsen, A.L., Fugslang, K., Pederson, N.H., Fellner, J., Rechberger, H., Astrup, T., 2013. Biogenic carbon in combustible waste: Waste composition, variability and measurement uncertainty. *Waste Manage. Res.* 31 (10), 56 - 66.
27. Pearson, G. W. and Qua, F. 1993 High-precision  $^{14}\text{C}$  measurement of Irish oaks to show the natural  $^{14}\text{C}$  variations from AD 1840-5000 BC: A correction. In Stuiver, M., Long, A. and Kra, R. S., eds., *Calibration 1993. Radiocarbon* 35(1):105-123.
28. Pearson, G. W., Becker, B. and Qua, F. 1993 High-precision  $^{14}\text{C}$  measurement of German and Irish oaks to show the natural  $^{14}\text{C}$  variations from 7890 to 5000 BC. In Stuiver, M., Long, A. and Kra, R. S., eds., *Calibration 1993. Radiocarbon* 35(1): 93-104.
29. Southon, J. R., Rodman, A. O. and True, D. 1995 A comparison of marine and terrestrial radiocarbon ages from northern Chile. In

- Cook, G. T., Harkness, D. D., Miller, B. F. and Scott, E. M., eds.,  
Proceedings of the 15th International 14C Conference. Radiocarbon  
37(2): 389–393.
30. Spurk, M., Friedrich, M., Hofmann, J., Remmele, S., Frenzel, B.,  
Leuschner, H. H. and Kromer, B. 1998 Revisions and extension of  
the Hohenheim oak and pine chronologies: New evidence about the  
timing of the Younger Dryas I Preboreal transition.
31. T Ploykrathok and S Chanyotha 2017 J. Phys.: Conf. Ser. 860  
012014
32. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National  
Greenhouse Gas Inventories Volume 2 Energy, Chapter 2  
Stationary combustion.

## 제4장 등가지수분율 (전기/열)의 재산정을 통한 수정에너지회수효율(R2)의 도출

### 4.1 서론

R1제도가 에너지회수효율정도를 객관화시키고 지향점을 부여하였다는 긍정적인 결과를 가짐에도, R1 제도의 보완을 요구하는 의견도 제시되고 있다. 2장에서 조사된 바를 정리하면 다음과 같다. 에너지회수효율을 측정하는 방법에는 총에너지계산법, 액서지 계산법, 전력손실계수 계산법 등이 있다. R1에서 정한 등가지수 전기부문 2.6, 열부문 1.1중 열부문은 위의 계산법 중 어느 것을 기준으로 하여도 무방하다. 전기부문 등가지수 2.6은 위 계산식 어디에도 해당하지 않는다. 또한 R1은 열의존적 (외부에서 얼마나 열을 사용하여 줄 것인지)인 수식으로서 단위시설의 노력으로 효율을 달성할 수 없다는 문제를 안고 있다. 지역난방 활용의 필요성이 거의 없는 열대지방에서 에너지효율을 제고하는 방법은 전기생산을 증가시키는 방법 외에는 없다. 또한 온실가스 저감정책과 R1과의 관계식이 모호하다. 달성목표로 정해놓은 EU기준 0.65, 한국기준 0.75가 왜 그렇게 설정되었는지, 어떤 지향점을 가지고 있는지를 기술적인 요인, 객관적인 요인으로 설명되지 못하고 이를 강제하는 제도로써 시행되고 있는 폐기물 처분부담금의 목적도 온실가스저감이라는 대전제와 간접적인 관계로만 연결되고 있다.

에너지회수효율은 국가단위로 실시하는 국지적 정책이다. 우리나라에서 R1은 모든 지역, 모든 규모의 소각로에 적용되며 향후 연료화시설, 생물학적 소화조 등에도 적용될 예정이다. 그리고 폐기물처분부담금 (Waste Disposal charge)과 연계된 강제적

제도로서 환금성을 가진 재원이다. 그럼에도 개별 소각로 운영자의 관점에서 보면 온실가스배출로 인한 목표관리제라는 강제적 제도가 시행되고 있는 상황에서 별로 연관성이 없는 다른 정책적 목표를 별도로 관리하여야 한다는 것이 부담으로 작용하게 된다. 에너지회수효율과 온실가스배출량 관리는 같은 목적을 지닌 두 가지 정책제도 (Policy Tool)임에도 관리목표가 상이한 결과가 된다. 또한 에넷 회수효율을 제고하는 방안이 온실가스 저감량을 높여서 소각시설에서의 배출량 목표치를 달성시키는 방법론도 없다. 그런 점에서 둘 사이의 관계를 파악하고 적절한 관계식을 만드는 것은 정책목표달성에 필요하다 할 것이다.

에너지회수효율과 온실가스감축은 모두 엑서지 계산식과 연관이 있다. 전기에너지에 적용되는 값과 열에너지에 적용되는 값이 서로 다르다는 점이 특히 그러하다. 에너지회수효율제도는 관할 영역이 시행과 변경이 자유롭다. 반면에 온실가스 저감량 산정은 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC)의 규범에 따라 각국의 규정이 마련되므로 변경이 용이하지 아니하다. 이 연구에서는 양자의 관계를 일치시킬 수 있는 수정에너지회수효율제도를 도이하여 세계적으로 통일하여 사용할 수 있는 온실가스 저감량과 연계될 수 있는 보편성을 부여하고자 한다.

제 4장에서는

- 1) R1제도와 관련된 수정의견들을 분석하여 각각의 배경과 의미를 해석하고
- 2) R1제도에서 사용하고 있는 전기/열의 등가지수분율을 주된 검토대상으로 하여, 열역학적 분석에 의한 전기/열 등가지수를 구하고 이를 기반으로 수정에너지회수효율 R2를 도출하고, 온실가스 간접배출계수에 의해 구해진 전기/열

- 등가지수를 기초로 수정에너지회수효율 R2'를 구하고
- 3) 에너지회수량, R1지수, 수정지수(R2, R2')가 온실가스 저감량 산정과 어떠한 상관관계를 가지는가를 비교거토하고자 한다.

## 4.2 R1에 대한 수정의견

### 4.2.1 기후교정지수(CCF Climate Corection Factor)와 규모교정지수 (SCF Size Correction Factor)

에너지회수효율 R1의 계산식은 2장에서 정의된 바와 같다.

$$R1(\text{energy efficiency}) = \frac{E_p - (E_f + E_i)}{0.97 \times (E_w + E_f)} \quad \text{식 2-19}$$

에너지회수효율에 대한 보완의견은 유럽폐자원에너지 (CEWEP) 2012년 회의에 Clerens (2012)에 의하여 보고되었고 Appendix II에 근거하여 예외로 인정되어 이태리 북부지역에서 시행중이다. R1제도의 보완의견은 에너지회수효율실적이 종합적으로 집계된 2010년 이후 본격화 되었다. CEWEP (Confederation of European Waste-to energy Plant) 은 2001 ~2004년, 2005 ~2007년, 2007 ~2010 3차에 걸쳐 유럽 폐자원에너지시설의 에너지 회수효율을 조사하였고 제3차 조사결과를 정리하여 2013년에 CEWEP Energy Efficiency Report 2013 발표하였다. 3차 보고서의 특징은 유럽내에서 R1제도가 시행된 이후의 공식적인 통계라는 점이다.

조사결과는 아래 그림 4-1로 요약할 수 있다. 이전 CEWEP report II에서는 231개 시설이 조사되었고 CEWEP report

2013에서는 총 314개의 시설이 조사되었다. 기설치운영중인 시설의 에너지회수효율 달성기준인 0.6을 기준으로 달성율을 보면, 발전전용에서는 83개의 시설중 31개의 시설로서 37.3% 평균 R1지수는 0.55, 열전용 시설에서는 47개의 시설중에 32개 시설로서 68.15%로서 평균 R1지수는 0.64, 열병합 시설에서는 184개의 시설중에 142개로서 77.2 %로서 평균 R1지수 0.74를, 전체적으로는 63.6%의 달성율에 평균 R1지수 0.69를 보여주고 있다. 이는 CEWEP report II의 종전조사 결과값 52.1%에 비하여 10% 이상의 달성율 증가가 이루어 졌다. CEWEP (2013)은 열의 사용방법 - 전기전용, 열전용, CHP -, 유럽각국의 기후지수의 차이, 규모의 차이 등이 R1값을 결정하는데 중요한 요소임을 보고하였다. 즉 전기전용인 시설에서는 아주 대형시설이어야 하고, 주변에 열사용시설이 없거나 열사용시간이 많지 않은 지역에서는 근본적으로 R1지수의 달성이 거의 불가능함을 보여주고 있다.

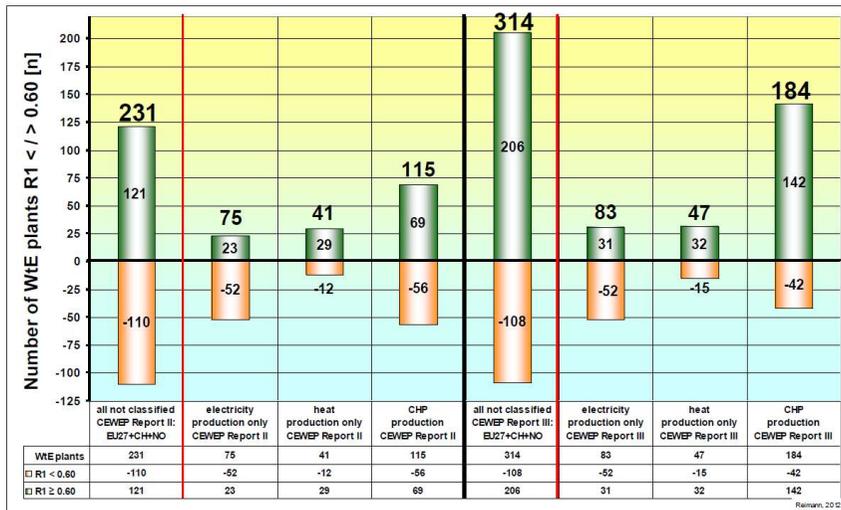


Fig. 4-1 Comparison of plants & energy efficiency summary between CEWEP report II 2009 and CEWEP report III 2013.

R1제도가 열의존적이라는 특성을 보완하고자 Ozansoy (2017)는 기후교정지수 (Climate Corection Factor, CCF), 규모교정지수 (Size Correction Factor, SCF)를 제안하였다. Kazi (2018)는 적용지수를 구체화하였다. Ozansoy (2017)가 유럽지역을 대상으로 3단계로 분리한 기후교정지수는 다음과 같다. 먼저 난방필요정도 (Heating Degree Days, HDD)를 구한다. 남서부 유럽 “하”등급은  $HDD < 2,150$  hours/year, 북부유럽 “상”등급은  $HDD > 3,350$  hours/year, 그리고 나머지 지역을 “중”등급으로 편성하였다. 그는 위 그림 4-1 CEWEP report III (2013)를 분석하고 각 기설주변의 연중난방시간을 조사하여 아래의 그림 4-2와 같이 제시하였다.

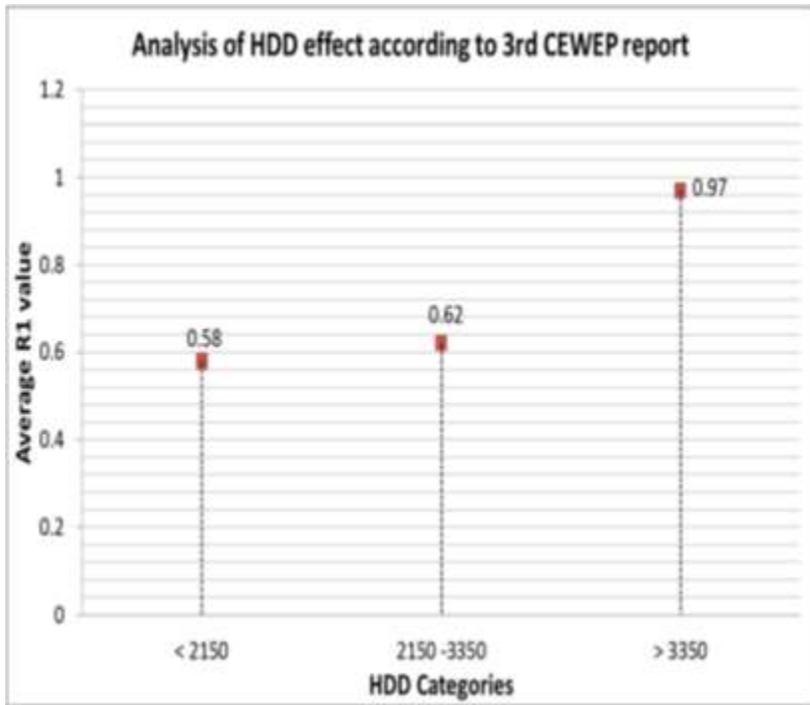


Fig. 4- 2 R1 efficiency based on Heating Degree Date

위의 HDD를 기준으로  $K_{HDD}$ 는 아래 식 4-1과 같이 정의하였다.

$$K_{HDD} = 1 \text{ for } HDD \geq 3,350$$

$$K_{HDD} = (-2.1 \times 10^{-5} \times HDD) + 1.071690 \quad \text{for } HDD < 3,350 \quad \text{식 4-1}$$

산식 4-1에서 얻어진 값을 표본으로 지역지수를 그룹화하여

$$CCF=1 \text{ if } HDD \geq 3350$$

$$CCF=1.25 \text{ if } HDD \leq 2150$$

$$CCF = -(0.25/1200) \times HDD + 1.698 \quad \text{when } 2150 \leq HDD \leq 3350$$

SCF에 대해서는 ‘하’급 < 2ton/hr, ‘중급’, ‘상급’ > 15ton/hr을 기준으로 아래와 같은 보정식을 제안하였다.

$$R1 = 0.0692 \times \ln(\text{plant\_Capacity}) - 0.1303 \quad \text{식 4-2}$$

위 수치를 대략 상급을 1로 볼 때 중급 1.1, 하급 1.25에 해당하는 수치이다. 이와 같은 보정지수 (Corection Factor, CF)의 적용은 R1을 전 유럽에 통일하여 효율적으로 적용하기 위한 보완책이라 볼 수 있다.

그러나 위의 보정지수값으로 구해지는 에너지 회수효율이 어떤 과학적 근거를 가질 것인가 하는 점과, 온실가스 배출 및 회수량과는 무관한 인자라는 점에서 한계도 가지고 있다. 또한 국내의 새로운 경향처럼 하절기 냉방수요를 지역난방온수로 대체하는 흡수식, 제습식 공조설비가 보급될 경우, 난방지수 HDD값이 Heatong date의 의미를 넘어서서 Cooling date를 포함하는 열이용가능시간 ( Heat supply degree date)일 경우에는 기술적으로 사용하기 어렵다는 단점을 가지고 있다.

#### 4.2.2 R1과 Exergy 효율과의 상관관계에 따른 수정안

Vigano (2018 et al)에서는 R1제도 도입 이후 소각장들의 사례를 실측하여 R1계수가 변경되어야 함을 보여줬다. Mario Grosso (2010)와 Vakalis (2018)는 Exergy 효율과 R1과의 관계를 검토하였다. 일반적으로 에너지라 함는 열역학 제 1법칙에 따른 1차원적인 개념이고 Exergy는 열역학 제 2법칙, 실질(내재)에너지에 따른 2차원적인 분석으로 볼 수 있다. Exergy를 구하는 식은 2장의 식 2-11과 같다.

$$B = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad \text{식 (2-11)}$$

*B is exergy. h means enthalpy, s means entropy and T means temperature.*

$$n_{ex} = \frac{P_{el \neq t} + f_{ex} \times Q_{th}}{Q_{waste}} = n_{el \text{ net}} + f_{cx} \times n_{th} \quad \text{식 (4-2)}$$

$f_{cx}$  = Carnot factor

엔탈피 (enthalpy, h)값은 증기선도에서 스팀의 온도와 압력으로 구해진다. 소각로에서 h값은 소각로 내의 연소온도에 의존한다. 국내 폐기물관리법에서 정한 기준온도 (850℃ 이상)를 감안하면 열전달에 필요한 연소온도는 충분하다 볼 수 있으며 소재금속의 선택, 소각로내 총가용열량 (Total Heating Value)에 따라 스팀조건이 설계되므로, 규모지수를 간접적으로 반영하였다고 볼 수 있다. 엔트로피 (s)는 T-S선도에서 구해진다. Exergy값을 결정하는 요인중 기준점 ( $h_0, s_0, T_0$ )은 해당지역의 기후특성과 연관된다. 즉 지리적 기후요인이 사회의 평균Exergy값과 연관된다. Mario (2010 et, al)가 국가별로 구한 Exergy 효율값과 R1의 비교표는 아래 Table 4-1과 같다.

아래 표 4-1에서 보면 기후요인과 Exergy효율은 대체로 비례한다. 그러나 북유럽 국가중 Finland는 독특하다. R1값은 상당히 높으나 Exergy efficiency는 낮다. 전력수요의 많은 부분을 수력, 원자력, 바이오매스발전에 의존함에 따라 전력가격이 낮아 상대적으로 열사용량이 많은 관계로 보인다. Sweden, Denmark, Italy등의 경우는 Exergy효율과 R1값이 거의 정확하게 비례한다.

**Table 4-1 Average Exergy efficiency and R1 value of WtE plant in European Country**

| Country         | Average Exergy Efficiency | R1   |
|-----------------|---------------------------|------|
| Italy           | 0.15                      | 0.37 |
| Hungary         | 0.16                      | 0.38 |
| Germany         | 0.16                      | 0.49 |
| Finland         | 0.17                      | 0.77 |
| Switzerland     | 0.18                      | 0.54 |
| Czech Republic  | 0.19                      | 0.85 |
| Spain           | 0.19                      | 0.48 |
| Portugal        | 0.20                      | 0.49 |
| Norway          | 0.20                      | 0.87 |
| The netherlands | 0.21                      | 0.55 |
| Sweden          | 0.26                      | 1.06 |
| Denmark         | 0.28                      | 1.04 |

위 표 4-1과 식 2-11을 다시 해석하여 보면 Exergy는 규모에는 약간의 영향을 받으나 기후에는 많은 영향을 받는다. 전기생산의 경우에 고온고압의 스팀생산으로 높은 엔탈피 (Enthalpy)를 만들어 유효에너지 ( $h - h_0$ )를 크게 하는 것이 Exergy효율을 높이는 것이므로 전기생산만으로도 사회적 표준 Exergy값에 근접할 수 있다. R1의 경우는 절대적인 에너지 사용량이 중요하므로 열사용이

중요하다. 아래 표 4-2는 Mario(2010)에서 구한 Exergy 와 R1과의 계산 예이다. 예를 들어 40bar, 400℃스팀을 기준으로 전기전용과 열전용, 열병합을 비교하였다. 우선 먼저 Carnot factor를 구하면 지역난방용 온수공급 시  $T_{in}$  333.15k,,  $T_{out}$  408.15k 인 경우  $T_{ml}$ 은 369.35k

$$\Theta_{dh} = 1 - T_a / T_{ml} = 0.23 \text{ (지역난방열로 교환될 때)}$$

위 조건으로 R1과  $\eta_{ex}$  은 아래 표 4-2와 같이 구해진다.

**Table 4-2 Comparison of R1 formula and exergy efficiency by specific plant (40 bar, 400℃ steam condition)**

| Type        | CHP   | Electricity | Heat  |
|-------------|-------|-------------|-------|
| Electricity | 12%   | 20%         | 0%    |
| Heat        | 35%   | 0           | 61%   |
| R1          | 0.72  | 0.54        | 0.70  |
| $\eta_{ex}$ | 20.1% | 20.1%       | 15.3% |

위 표에서 보듯이 열사용량이 높은 경우 R1값은 높지만 exergy효율은 전기전용에 비하여 오히려 떨어진다.

위의 Exergy 효율로 계산된 결과를 보면

**“전기에너지/열에너지 비율( $E_{el}/E_{th}$ )은 R1의 등가계수분율 2.36(전기 2.6 / 열 1.1)보다 커져야 Exergy 효율을 반영할 수 있다.”는 결론에 도달한다.**

Dincer I (2015)은 소각시설을 Biomass 혼합연소의 개념에서 접근하여 폐기물처리의 방법인 소각이 아니라 에너지원으로 접근하고 있다. 선진국에서 소각시설설치에 따른 기회비용은 이미

지출이 완료되었고 에너지회수효율을 높이기 위한 개선의 방향이 중요하다고 판단하였다. 우리나라도 유사한 상황으로 볼 수 있다. 열경제학 ( Exergeconomics) 의 개념을 도입한 것이다.

### 4.3 등가계수분율(전기/열)의 비교

#### 4.3.1 R1의 등가지수에 대한 검토

R1제도와 다른 국가들의 제도와 차이점은 등가계수(Equivalent Coefficient EC)이다. 아래 표 4-3에 차이점을 정리하였다.

**Table 4-3 EC of electricity/heat in various energy efficiency**

|                                     | R1                | SS    | SDE   | ON      | $\eta_{\text{Japan}}$ |
|-------------------------------------|-------------------|-------|-------|---------|-----------------------|
| Country                             | EU, Korea         | Swiss | Dutch | Austria | Japan                 |
| Back ground                         | Social efficiency |       |       |         | Power loss            |
| Boiler efficiency                   | 0.97              | 0.97  | 1     | 1       | 1                     |
| EC <sub>Heat</sub>                  | 1.100             | 1.000 | 1.000 | 1.000   |                       |
| EC <sub>Electricity</sub>           | 2.6               | 2.6   | 1.5   | 1.5     |                       |
| EC <sub>el</sub> / EC <sub>th</sub> | 2.36              | 2.60  | 1.50  | 1.50    |                       |

한국과 유럽각국의 지수는 모두 비슷한 유형을 보이고 있지만 일본의 경우 이를 해석하기 위해서는 다른 계산법이 필요하다. R1제도는 일반적인 가정으로 열병합으로 전기와 열을 모두 사용하는 것에 정책적 목표가 주어져 있다. 일본의 경우는 남부유럽의 경우처럼 전기만 생산하고 열사용처가 없다는 가정으로 검토되었다. 이 경우 에너지 회수효율을 산정하는 적절한 산식은 PLC (전력손실계수) 계산식이다. 2장에서 보여준 식 2-12)와 2-13)에 4장 2절에서 측정된 'N'시설과 'I'시설의 condensing temperature를 예로 들어 계산해보면 아래와 같다.

$h$  ( 398°C ) : Turbine inlet steam enthalpy = 3212 KJ/kg

$h_1$  ( 127°C ) : Extraction Steam enthalpy for DH = 2,640 KJ/kg

$h_2$  ( 68.6°C ) : Turbine exhaust steam Enthalpy = 2,346 KJ/kg

$$PLC \text{ (Power Loss Coefficient)} = 1 - (h_1 - h_2) / (h - h_2) = 0.47 \quad (4-3)$$

일본의 기후환경이 우리나라와 일정하다는 가정하에 컨덴서가 최선의 설비 (Best Available Technology BAT)로 설치되었다고 가정하여 변경할 때

$h_0$  ( 39°C ) : Turbine exhaust steam Enthalpy with State-or-Art technology = 2,276 KJ/kg

$$PLC_2 = (h_1 - h_0) / h_0 = (2,640 - 2,276) / 2,276 = 0.16 \quad (4-4)$$

이 경우 일본의 전기등가계수/열등가계수 = 6.25로 추정되었다.

#### 4.3.2 국내 소각로 열병합시설에서의 엑서지 계산예

제2장 표 2-9에서 우리나라의 폐자원에너지시설에서의 평균 열효율이 36% (전기생산비율 30%, 전체 에너지투입량의 10.8%)를 기준으로 Exergy효율을 계산하면 약 0.16으로 계산되며 R1을 역산하면 전국 평균 R1값은 40% 정도로 예측된다.

열병합시설에서의 엑서지효율계산을 위하여 4.2장에서 검토된 소각+열병합시설에서의 엑서지 계산을 위해 국내 4곳에서의 열병합시설을 대상으로 실증자료를 바탕으로 전기/열의 엑서지 효율을 비교하였다.

소각로에서의 전체공정을 살펴보기 위하여 먼저 Plant N 시설에서 각각의 공정을 세분하면 아래 그림 4-3과 같다.

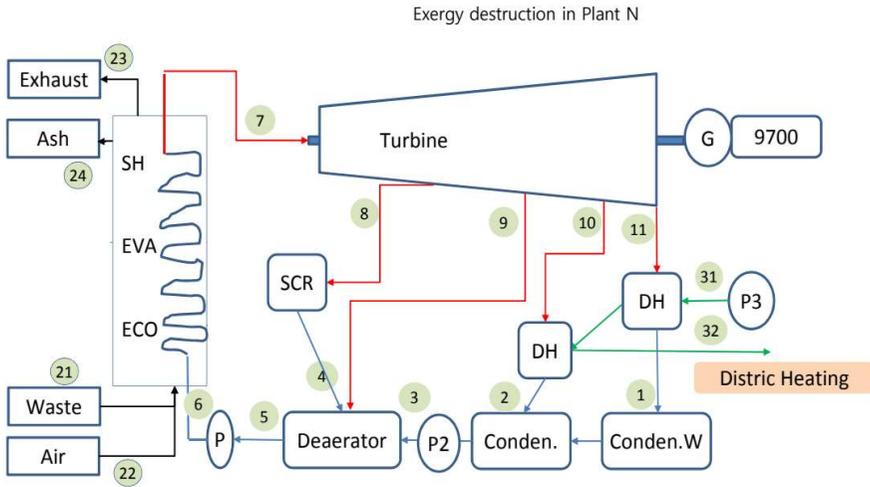


Fig 4-3 Exergy destruction flow diagram of Plant N

위 공정도에 따른 공정별 엑서지 계산 및 주요 열역학적 요소들에 대한 분석은 아래 표 4-4와 같다.

**Table 4-4 The exergy and thermodynamic parameters of CHP incinerator in Plant N**

| Field               | 21                   | 22       | 1       | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8       | 9       | 10      | 11      | 31      | 32     | Ambient |         |
|---------------------|----------------------|----------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|
| Pressure p          | kg/cm <sup>2</sup> A | 0.03     | 1.01    | 1.01  | 3.00  | 3.00  | 3.70  | 72.00 | 39.00 | 20.00   | 5.30    | 1.40    | 0.51    | 15.07   | 14.70  | 0.03    |         |
| Temperature t       | °C                   | 25.0     | 25.0    | 51.0  | 109.3 | 84.2  | 142.9 | 140.0 | 140.5 | 398.0   | 296.2   | 192.4   | 109.3   | 81.8    | 55.0   | 100.0   | 25.0    |
| Temperature t       | °K                   | 298.0    | 298.0   | 324.0 | 382.3 | 357.2 | 415.9 | 413.0 | 413.5 | 671.0   | 569.2   | 465.4   | 382.3   | 354.8   | 328.0  | 373.0   | 298.0   |
| Specific enthalpy h | kJ/kg                | 11,848   | 2,254   | 214   | 459   | 352   | 602   | 589   | 596   | 3,212   | 3,030   | 2,838   | 2,643   | 2,600   | 232    | 420     | 2,254   |
| Specific entropy s  | kJ/(kg.K)            | 7.57     | 0.72    | 1.41  | 1.41  | 1.12  | 1.77  | 1.74  | 1.74  | 6.78    | 6.91    | 7.00    | 7.12    | 7.16    | 0.77   | 1.31    | 7.57    |
| Specific exergy ex  | kJ/kg                | 12,652.1 | 1,670.3 | 158.4 | 350.6 | 265.6 | 465.3 | 455.6 | 472.0 | 2,689.5 | 2,498.1 | 2,299.1 | 2,094.5 | 2,025.8 | 172.4  | 319.6   | 1,670.3 |
| Mass flow m         | ton/hr               | 24.30    | 92.39   | 23.64 | 30.53 | 54.17 | 20.00 | 80.00 | 80.00 | 80.00   | 20.00   | 5.83    | 30.53   | 23.64   | 715.20 | 715.20  |         |
| Total energy Ten    | TJ/hr                | 287.89   | -       | 5.05  | 14.02 | 19.07 | 12.03 | 47.16 | 47.66 | 256.92  | 60.60   | 16.54   | 80.69   | 61.46   | 165.57 | 300.55  |         |
| Total Exergy Tex    | TJ/hr                | 307.44   | -       | 3.74  | 10.71 | 14.39 | 9.31  | 36.44 | 37.76 | 215.16  | 49.96   | 13.40   | 63.95   | 47.89   | 123.32 | 228.55  |         |

이것을 지역난방 열교환기 (District Heat exchanger, DH) 구간에서의 엑서지와 에너지효율식을 계산하면 아래 식 4-5로 표현될 수 있다.

$$\alpha = 1 - \frac{T_0 (S_{sup} - S_{ret})}{(h_{sup} - h_{ret})} \quad \text{식 4-5}$$

여기서 첨자 sup는 supply를 의미하고 ret는 return을 의미한다. 위 식 4-6과 표 4-4를 이용하여 열병합 시설에서 온수공급에 의한 엑서지 효율과  $\alpha$ 값을 구하면 아래 표 4-5과 같다. 한국 내 거의 전지역에서 계절별 온수공급조건은 거의 동일하므로 표 4-5는 지역난방에서의 일반적인 값으로 볼 수 있다.

Table 4-5 Energy/Exergy ratio of District heating in Korea.

| Field  | Month       | T0  |    | Return |      | Supply |       | Ener | Entro      | $\alpha_{DH}$ |            |
|--------|-------------|-----|----|--------|------|--------|-------|------|------------|---------------|------------|
|        |             | °K  | T  | h      | s    | T      | h     | s    | $\Delta h$ |               | $\Delta s$ |
| Winter | Nov-Mar     | 273 | 47 | 198.1  | 0.66 | 97     | 407.5 | 1.27 | 209.4      | 0.61          | 0.21       |
| Inter  | Apr,May,Oct | 288 | 55 | 231.5  | 0.77 | 100    | 420.1 | 1.31 | 188.6      | 0.54          | 0.17       |
| Summer | Jun-Sep     | 298 | 70 | 294.2  | 0.95 | 105    | 441.2 | 1.36 | 147.0      | 0.41          | 0.17       |
| mean   | Avg. Temp   | 285 | 50 | 209.7  | 0.70 | 102    | 427.0 | 1.33 | 217.3      | 0.63          | 0.18       |
| mean   | 0 °C 기준     | 273 | 50 | 209.7  | 0.70 | 102    | 427.0 | 1.33 | 217.3      | 0.63          | 0.21       |

지역난방으로 공급된 열의 엑서지/에너지 비율은 겨울철 0.21, 간절기 및 하절기 0.17로 계산된다. 한국의 대도시에서는 연중 거의 전량의 열을 사용할 수 있으며, 전국적으로 거의 동일한 열공급온도를 보인다. Ambient temperature 25°C에서의 엑서지 효율은 0.17이며 총 열공급량을 연중 평균온도를 기준한 연중

평균온도 엑서지 효율은 0.178, 절대온도  $T^0(0^{\circ}\text{C})$ 기준의 엑서지 효율은 0.21이다. 위 표 4-5에서 얻어진 효율은 지역난방을 대상으로 한정하여 사용할 수 있으며 스팀을 직접사용하는 산업단지나 슬러지건조시설 등에서는 각각의 조건에 맞게 계산되어야 한다.

동일구간에서 전력생산 시 엑서지 효율을 구하기 위하여 위의 N시설을 포함하여 국내 4개시설에서 열공급을 위하여 추기된 스팀을 기준으로 전력생산시의 엑서지 효율을 계산하였다. 대상시설은 분석대상인 S, N, I시설과 IC시설을 추가하였다. 각각의 시설에서 터빈으로 공급되는 스팀의 열역학적 성질은 다음과 같다.

Table 4-6 Thermodynamic parameters of steam inlet of turbine

| Plant | Flow<br>(Ton/hr) | p<br>bar | t<br>$^{\circ}\text{C}$ | v<br>$\text{m}^3/\text{kg}$ | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/kg | ex<br>kJ/kg |
|-------|------------------|----------|-------------------------|-----------------------------|------------|------------|-------------|
| IC    | 44.6             | 15.50    | 202.0                   | 0.128                       | 2798.3     | 6.445      | 2302.1      |
| S     | 74.5             | 13.12    | 195.0                   | 0.151                       | 2795.2     | 6.508      | 2294.0      |
| N     | 80.0             | 39.00    | 398.0                   | 0.075                       | 3211.5     | 6.780      | 2689.5      |
| I     | 48.0             | 29.4     | 290.0                   | 0.081                       | 2970.6     | 6.508      | 2469.5      |

네 시설에 설치된 터빈은 규모와 공급되는 스팀의 효율에 따라 다른 발전효율을 보이고 있다. 각 시설의 터빈효율은 아래 그림 4-4와 같다. 터빈효율은 추기배압식(Pessure trubine)보다 복수식터빈(Condinsing turbine)이, 스팀의 공급엔탈피가 높을수록, 그리고 용량이 클수록 효율이 증가한다. 아래 그림에서 보면 IC시설과 S시설의 터빈인입온도는 비슷하지만 S시설의 터빈효율이 높은 이유는 S시설의 스팀투입량이 더 많고 2단 열교환기가 설치되어 복수구간(Condensing curve)이 증가하였기 때문이다.

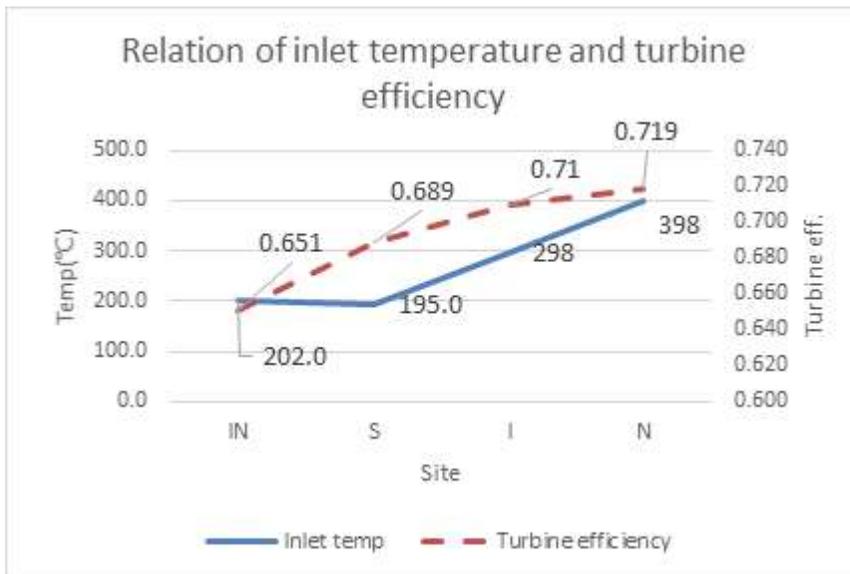


Fig. 4-4 Turbine efficiency as per input steam condition.

터빈의 효율이 증가함에 따라 배출단에서의 엔트로피는 증가한다. Ambient temperature인 25°C에서의 각 시설별로 배출단에서의 엔트로피 변화를 보면 아래 그림 4-5와 같다.

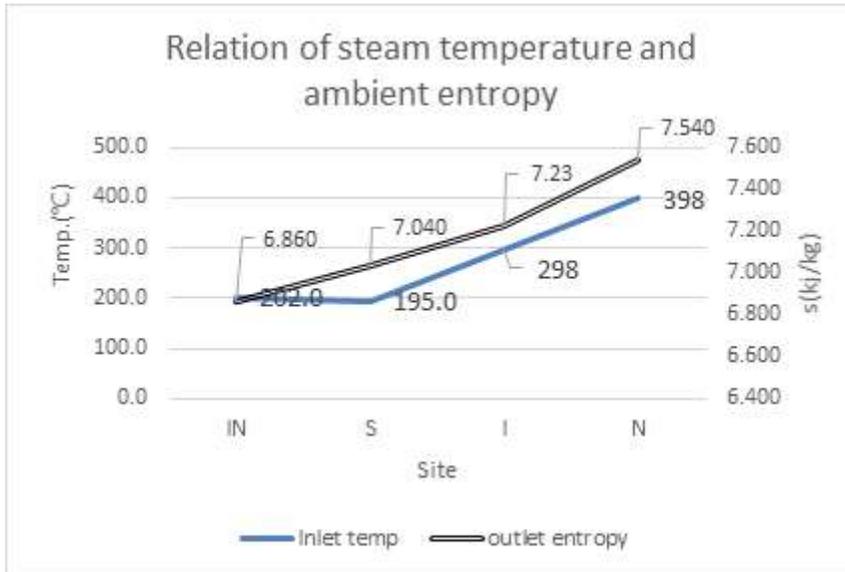


Fig. 4-5 Variation of entropy at exhaust terminal of turbine

위의 그림 4-4와 4-5를 이용하여 지역난방으로 공급되는 열을 생산하기 위한 열교환구간에서의 엑서지 효율을 계산하면 아래표 4-7과 같다.

Table 4-7 Exergy efficiency in heat exchanging area of 4 plant in Korea.

| Plant |         | <b>p</b><br><b>bar</b> | <b>t</b><br><b>°C</b> | <b>v</b><br><b>m<sup>3</sup>/kg</b> | <b>h</b><br><b>kJ/kg</b> | <b>s</b><br><b>kJ/kg</b> | <b>ex</b><br><b>kJ/kg</b> | $\alpha_{el}$ |
|-------|---------|------------------------|-----------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------|
| IN    | DH      | 1.82                   | 117.3                 | 0.882                               | 2508.7                   | 6.663                    | 1995.7                    | 0.846         |
|       | Ambient | 0.03                   | 25.0                  | 34.36                               | 2040.6                   | 6.860                    | 1512.4                    |               |
| S     | DH2     | 1.90                   | 118.6                 | 0.863                               | 2546.0                   | 6.741                    | 2027.0                    | 0.811         |
|       | DH1     | 0.70                   | 89.9                  | 2.200                               | 2497.7                   | 7.034                    | 1956.1                    | 0.996         |
|       | Mean    | 0.98                   | 99.0                  | 1.608                               | 2519.1                   | 6.949                    | 1984.0                    | 0.893         |
|       | Ambient | 0.03                   | 25.0                  | 35.31                               | 2094.3                   | 7.040                    | 1552.2                    |               |
|       | DH2     | 1.40                   | 109.3                 | 1.210                               | 2643.0                   | 7.123                    | 2094.5                    | 0.703         |
| N     | DH1     | 0.51                   | 81.8                  | 3.118                               | 2600.0                   | 7.457                    | 2025.8                    | 0.933         |
|       | Mean    | 0.80                   | 94.6                  | 2.043                               | 2624.2                   | 7.321                    | 2060.5                    | 0.803         |
|       | Ambient | 0.03                   | 25.0                  | 36.32                               | 2243.4                   | 7.540                    | 1662.8                    |               |
| I     | DH      | 13.71                  | 215.5                 | 0.153                               | 2845.7                   | 6.595                    | 2337.9                    | 0.740         |
|       | Ambient | 0.03                   | 25.00                 | 36.32                               | 2151.0                   | 7.231                    | 1594.3                    |               |

위 Plant S와 N은 2단 열교환기를 설치하였다. Plant IC는 1단 열교환기에 배압식 스팀터빈을 사용하였다. Plant I의 경우에는 공정용 열원에서 일부만 주민지원용으로 사용하고 있으므로 지역난방을 고려한 열병합이라고 보기 어렵다. 위 표에서 얻어진 추기 온도가 가장 낮은 것은 Plant N이다. 추기 온도가 낮아질수록 복수구간이 커지므로 전기생산효율은 감소한다. 그렇지만 그와 비례하여 열교환시의 온수공급구간의 효율도 감소한다. 하절기에 인입되는 지역난방유입수 (Return hot water)의 온도가 70°C라는 점을 감안하면 Plant N에서의 DH1에 유입되는 스팀온도 81.8°C는 열병합에서의 스팀조건중 최저값이라 볼 수 있다. 이 구간의 해석을 위하여 Plant N과 Plant S에서의 DH2, DH1구간에서의 온수공급온도를 감안한 효율은 아래 표 4-8과 같다.

Table 4-8 Energy/Exergy ratio of District heating in Plant S, N with two stages heat-exchanger system.

| Plant   | Return  |      |       | Supply |       |       | Energy     | Entropy    | $\alpha_{DH}$ |      |
|---------|---|------|-------|--------|-------|-------|------------|------------|---------------|------|
|         | T(°C)   | h    | s     | T(°C)  | h     | s     | $\Delta h$ | $\Delta s$ |               |      |
| DH1     | S   | 50   | 209.7 | 0.70   | 79.4  | 332.3 | 1.07       | 122.6      | 0.37          | 0.14 |
|         | N   | 50   | 209.7 | 0.70   | 69    | 288.7 | 0.94       | 79.05      | 0.24          | 0.13 |
| DH2     | S   | 79.4 | 332.3 | 1.07   | 101.8 | 427.0 | 1.33       | 94.7       | 0.26          | 0.23 |
|         | N   | 69   | 288.7 | 0.94   | 101.8 | 427.0 | 1.33       | 138.24     | 0.39          | 0.20 |
| Remarks | T <sub>o</sub> will be average temperature of 288.05 <sup>0</sup> K |      |       |        |       |       |            |            |               |      |

표 4-5, 4-7, 4-8에서 얻어진 열교환구간에서의 엑서지효율을 비교하여 전기와 열공급의 효율을 비교하면 아래 표 4-9와 같이 정리된다.

Table 4-9 Exergy efficiency between Electricity/ heat ratio in district heating system in Korea.

| Plant |      | p(bar) | t(°C) | $\alpha_{el}$ | $\alpha_{DH}$ | $\alpha_{el}/\alpha_{DH}$ |
|-------|------|--------|-------|---------------|---------------|---------------------------|
| IN    | DH   | 1.82   | 117.3 | 0.846         | 0.18          | <b>4.77</b>               |
|       | DH2  | 1.90   | 118.6 | 0.811         | 0.23          | 3.58                      |
| S     | DH1  | 0.70   | 89.9  | 0.996         | 0.14          | 7.14                      |
|       | Mean | 0.98   | 99.0  | 0.893         | 0.19          | <b>4.75</b>               |
| N     | DH2  | 1.40   | 109.3 | 0.703         | 0.20          | 3.47                      |
|       | DH1  | 0.51   | 81.8  | 0.933         | 0.13          | 6.94                      |
|       | Mean | 0.80   | 94.6  | 0.803         | 0.17          | <b>4.65</b>               |

위의 표 4-9에서 보면 지역난방에서의 전기/열 비율은 평균 4.70이다. 가장 적은 값은 Plant S, N 모두 DH2에서 나타나며 각각 3.58과 3.47이다. 열교환기가 무한히 많은 Cascade 방식의 시스템을 가정하더라도 DH1의 스팀공급온도를 무한정 낮출 수는 없으므로 Plant T의 DH2에서의 전기/열 비율은 최소치로 볼 수 있으므로 전기/열의 비율은 3.47보다는 큼을 알 수 있다. 따라서 국내 4개

시설을 대상으로 비교한 전기/열의 분율은 최소치로 보아 3.47을 적용함에 무리가 없고 Exergy/energy 평균치를 적용할 경우 4.7이다.

### 4.3.3 IEF에 따른 등가지수의 검토

2장 표-4에서는 소각로와 발전, 지역난방의 간접배출계수를 구하였다. 여기에 R1의 기준이 되는 석탄화력발전, LNG 보일러의 간접배출계수를 국내 환경관리공단 (2017)과 유럽투자은행 (European Investment Bank, 2018 et al.)의 2018년도 한국의 배출량통계와 비교하여 예시하면 아래 표 4-10과 같이 나타난다.

**Table 4-10 Country specific emission factor**

| Category |         | Unit                | KECO <sup>(1)</sup>      | EU <sup>(2)</sup> |                      |
|----------|---------|---------------------|--------------------------|-------------------|----------------------|
| IEF      | Power   | Product             | TCO <sub>2eq</sub> /MWh  | 0.453             | 0.566                |
|          |         | User <sup>(1)</sup> | TCO <sub>2eq</sub> /MWh  | 0.466             | 0.606                |
|          |         | SCPC※               | TCO <sub>2eq</sub> /MWh  | 0.890             | 0.788                |
|          | DH Heat | Total               | TCO <sub>2eq</sub> /Gcal | 0.1226            |                      |
|          |         | LNG                 | TCO <sub>2eq</sub> /Gcal | 0.228             | 0.216 <sup>(3)</sup> |
|          |         | IND Complex         | TCO <sub>2eq</sub> /Gcal | 0.1992            |                      |

※ SCPC means Supercritical Pulverized Coal power plant

(1) 2008~2009 Investigated by KECO

(2) 2012-2014 IEA(International Energy Association)

(3) LNG industrial steam boiler in Europe

위 표 4-9, 4-10에서 계산된 등가지수비 (전기/열)은 아래와 같이 표시되고 있다.

**Table 4-11 EC of electricity/heat in IEF and exergy**

|      | $EC_{el}/EC_{th}$ | Description                              |
|------|-------------------|--|
|      | 3.69 (A)          | $IEF_{user} / IEF_{DH\ Heat\ total}$     |
| KECO | 3.80 (B)          | $IEF_{producer} / IEF_{DH\ Heat\ total}$ |
|      | 3.90 (C)          | $IEF_{SCPC,KECO} / IEF_{LNG}$            |
| EIB  | 3.65 (D)          | $IEF_{SCPC,EIB} / IEF_{LNG}$             |

이 값은 R1에서 정하고 있는 전기 등가계수 2.6, 열 등가계수 1.1의 비율인 2.38에 비하면 훨씬 높은 값을 보여준다.

## 4.4 국내 실증시설에서 에너지회수효율 R1과 온실가스 저감실적과의 관계

### 4.4.1 선정시설 개요

R1제도가 시행된 후 에너지 효율을 개선하기 위하여 스팀터빈을 신설한 3개 사업장을 대상으로 R1, 에너지 회수율, 온실가스 저감효과를 산정하고자 한다. 세 시설 모두 보일러와 복수기는 기존에 설치된 시설을 사용하였으며 터빈발전시설, 열교환기와 연관된 시설만 신설하였다. Plant N은 CHP로 운전되며, 고온·고압(40bara, 400℃)의 스팀을 생산하고 CHPfh 운전되지만, 하절기에 열수요가 적어 발전후 에너지이용효율이 S시설에 비하여 떨어진다. Plant S는 CHP로 운전되며 생산된 스팀온도가 193℃로 낮은 대신에 발전 후 온수로 교환된 열을 지역난방사업자가 100% 전량 이용한다. Plant I는 주변에 집단에너지사업자가 없어, 주민편익시설로 설치된 수영장 및 주변지역농가에 소량만 사용하므로 전기생산전용으로 운전하는 복수식 터빈(Condensing Turbine)을 설치하였다. 생산되는 스팀의 조건은 중질(300℃) 수준이다.

위 3개의 시설은 한국 소각로중 선진적으로 에너지효율개선을 시작하였으며, 각각의 사례에 대해 대표성을 지니고 있다. 아래 표 4-12는 각 시설들의 2018년도 운영실적은 아래 표 4-12와 같다.

Table 4-12 General status of the reference sites at 2018 years

| Field                                  | Unit   | N       | S       | I                |
|--|--------|---------|---------|------------------|
| Waste amount                           | ton/yr | 175,209 | 157,446 | 86,357           |
| Installation                           | year   | 1997    | 1996    | 2008             |
| Steam temperature                      | °C     | 400     | 193     | 300              |
| Boiler                                 | series | 2       | 2       | 2                |
| Energy utilization                     | Type   | CHP     | CHP     | Turbine<br>-only |
| Heat exchanger                         | stage  | 2       | 2       |                  |
| Exhaust Temperature of Turbine for DH1 | °C     | 89      | 89      | 68               |
| Extraction Steam Temperature for DH2   | °C     | 119     | 109     | -                |

그림 4-6는 Plant N의 에너지 흐름도이다. 주요특징은 고온·고압의 스팀을 생산 (엔탈피 3,211 KJ/kg)하며, 일반소각로가 생산된 스팀중 공정용을 먼저 공제하고 발전기에 공급하는데 비하여, N공정은 생산스팀을 터빈에 공급한 후 공정에 필요한 스팀을 추가하여 사용한다. 전력손실계수를 줄이기 위하여 열교환기는 2단으로 설치되었다.

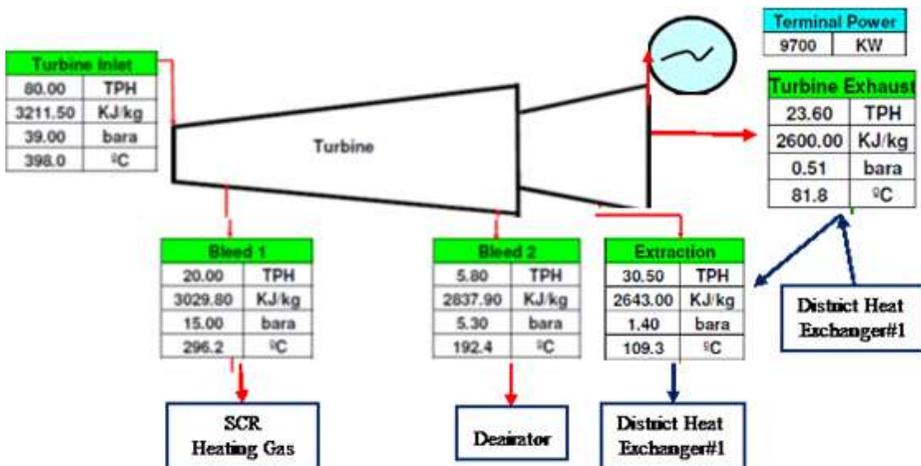


Fig 4-6 Energy Balance of plant 'N'

그림 4-7은 Plant S의 에너지 흐름도이다. 지역난방사업자가 하절기에도 냉방수요를 개발하여 연중으로 온수를 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있어 에너지이용도가 가장 높다. 스팀엔탈피 (2,794 KJ/kg)가 높지 않아서 스팀생산 후 공정용과 발전용을 구분하여 사용할 수밖에 없다. 2단 열교환기가 사용되었다.

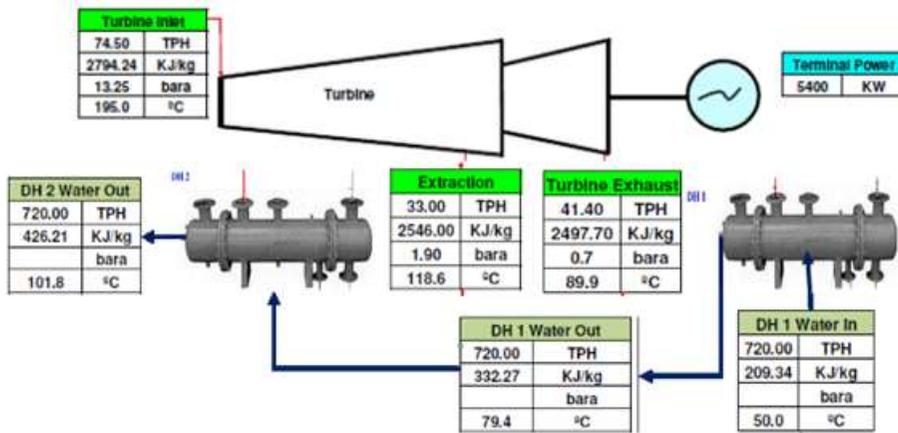


Fig. 4-7 Energy balance of Plant S

그림 4-8은 Plant I의 에너지 흐름도이다. ACC (Air cooled condenser)를 변경하지 못하여 터빈출구엔탈피가 약간 높다.

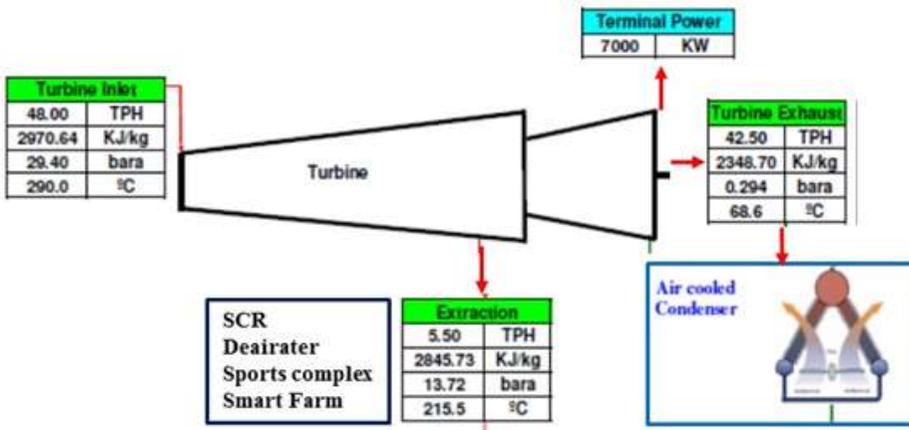


Fig. 4-8 Energy balance of plant 'I'

#### 4.4.2 대상시설에서의 에너지 회수효율R1

위의 그림 4-6, 4-7, 4-8을 기초로 3개 시설의 에너지 흐름을 시간단위로 정리하면 아래 표 4-13과 같다. 폐기물 반입량 및 열량, 보조연료사용량은 환경부 전국소각장가동현황 (2019) 자료중 S와 N은 2018년, I시설은 2017년 가동자료를 사용하였다.

**Table 4-13 Operation status of three incineration plants**

| Field                | Unit    | S     | I     | N     | Average |
|----------------------|---------|-------|-------|-------|---------|
| E <sub>waste</sub>   | Ton/hr  | 22.7  | 9.3   | 24.3  | 19      |
|                      | kcal/kg | 2,597 | 3,413 | 2,830 | 2,947   |
|                      | Gcal/hr | 58.94 | 31.70 | 68.68 | 53      |
| E <sub>fuel</sub>    | Gcal/hr | 0.5   | 0.1   | 0.3   | 0       |
| E <sub>process</sub> | Gcal/hr | 1.8   | -     | -     | 1.0     |
| Steam generation     | kJ/kg   | 2,794 | 2,971 | 3,212 | 2,992   |
|                      | kcal/kg | 668   | 710   | 768   | 715     |
|                      | ton/hr  | 80.9  | 41.6  | 73.6  | 65      |
|                      | Gcal/hr | 54.0  | 29.5  | 56.5  | 47      |
| Steam to process     | Gcal/hr | 10.5  | 5.6   | 11.5  | 9       |
| Turbine              | kcal/kg | 668   | 710   | 768   | 715     |
|                      | ton/hr  | 65.2  | 37.9  | 73.6  | 59      |
|                      | Gcal/hr | 43.6  | 23.9  | 56.5  | 41      |
| Power generation     | kWh     | 4,729 | 5,267 | 9,444 | 6,480   |
|                      | Gcal/hr | 4.1   | 4.5   | 8.1   | 5.6     |
| Power consumption    | kWh     | 2,315 | 1,423 | 2,336 | 2,025   |
| Power to grid        | kWh     | 2,414 | 3,844 | 7,108 | 4,455   |
| Heat supply          | Gcal/hr | 38.3  | 2.9   | 32.77 | 24.6    |

의의 표 4-13과 연간에너지사용량을 통하여 R1을 구하면 아래 표 4-14와 같다.

Table 4-14 Calculation of R1 in three incineration plants

| Category             |                           | S         | I       | N       | Average |
|----------------------|---------------------------|-----------|---------|---------|---------|
| Operation day        | day/year                  | 305       | 311     | 305     | 307     |
| Annual waste         | Ton/year                  | 166,144   | 67,985  | 177,654 | 137,261 |
| LHV                  | kcal/kg                   | 2,597     | 3,413   | 2,830   | 2,947   |
| Ewaste               | Gcal/year                 | 431,476   | 232,020 | 502,761 | 388,752 |
| Process electricity  | MWh/year                  | 16,948    | 10,618  | 17,102  | 14,889  |
| Imported fuel        | Nm <sup>3</sup> -LNG/Year | 358,565   | 56,811  | 242,010 | 219,129 |
|                      | Gcal/year                 | 3,378     | 535     | 2,280   | 2,064   |
| Process fuel         | Nm <sup>3</sup> -LNG/Year | 1,434,260 | 0       | -       | 478,087 |
|                      | Gcal/year                 | 13,511    |         |         | 13,511  |
| Steam production     | Gcal/yr                   | 395,526   | 220,423 | 413,308 | 343,086 |
| Steam in process     | Gcal/yr                   | 76,592    | 41,215  | 83,819  | 67,209  |
| Power generation     | MWh/yr                    | 34,619    | 39,309  | 69,129  | 47,686  |
|                      | Gcal/yr                   | 29,772    | 33,806  | 59,451  | 41,010  |
| Electricity export   | MWh/yr                    | 17,671    | 28,691  | 52,027  |         |
|                      | Gcal/yr                   | 15,197    | 24,675  | 44,743  |         |
| Heat Supply          | Gcal/yr                   | 278,231   | 15,385  | 238,027 | 177,214 |
| Air cooled condenser | Gcal/yr                   |           | 123,645 | 22,811  | 73,228  |
| Steam to CSR         | Gcal/yr                   | 2,326.0   | 5,896.0 | 1,839.0 | 3,353.7 |
| R1                   |                           | 0.75      | 0.38    | 0.77    | 0.70    |

#### 4.4.3 온실가스 회수량 산정

3장에서 위 세 개의 시설에서 구한 배출량과 표 4-9에서 구한 수입된 전기에너지와 보조연료의 양을 합쳐 계산된 배출량은 아래 표 4-15와 같다.

Table 4-15 GHG emissions of three plants

| Field             | Unit                         | S     | I     | N     |
|-------------------|------------------------------|-------|-------|-------|
| kgCO <sub>2</sub> | Waste.ton                    | 482.0 | 680.0 | 542.1 |
|                   | Fuel(LNG)                    | 27.32 | 2.07  | 3.45  |
| CH <sub>4</sub>   | Waste                        | 5     | 5     | 5     |
|                   | Fuel(LNG)                    | 0.03  | 0.00  | 0.00  |
| N <sub>2</sub> O  | Waste                        | 0.016 | 0.016 | 0.016 |
|                   | Fuel(LNG)                    | 0.00  | 0.00  | 0.00  |
| GHG               | kgCO <sub>2</sub> /waste.ton | 514.4 | 687.1 | 550.6 |
|                   | TCO <sub>2</sub> /hr         | 11.7  | 6.4   | 13.4  |

온실가스 회수량 산정방법은 네 가지를 살펴보았다. 각각의 특징을 요약하면 아래 표 4-16과 같다. 네 가지 방법론 중

- (1) 메탄회피는 국내 모든 매립장이 매립가스 포집처리가 의무화되어, 도서지역을 제외하고는, 적용이 불가하다.
- (2) 지방자치단체온실가스관리지침 (Guideline of Local Government Greenhouse gas Inventory, GGGI)은 적용 가능하지만 보고의무와 활용권리는 에너지사용자에게 있으며 전기로 송출된 에너지를 산정하는 방법론은 없다
- (3) R1은 회수효율과 GHG 저감량사이의 계산식이 존재하지 않아 적용이 어렵고 간접적으로 효과를 유추해 볼 수 있다.
- (4) IEF 방법론은 발전부문전체배출량(0.466TCO<sub>2</sub> /MWh)을 활용하는 방법과 부분배출량 (석탄화력배출계수와 천연가스 보일러)을 사용하는 방법이 있어 활용 가능하지만 보고 및

활용주체가 누구일지는 불분명하다.

**Table 4-16. 온실가스 저감량 (회수량) 산정방법론 비교**

| 방법론      | (1)메탄회피      | (2)열량계산     | (3)R1 | (4)IEF       |
|----------|--------------|-------------|-------|--------------|
| Baseline | 매립장          | 소각장         | 소각장   | 소각장          |
| 실적집계기준   | 메탄회피<br>+IEF | 회수열<br>/투입열 | R1 산식 | 전기와<br>열을 구분 |
| 근거       | CDM          | GGGI        | R1    | CDM          |
| 적용가능성    | 불가           | 용이          | 불가    | 용이           |

위의 의의 (2), (3), (4) 방법론으로 대상시설 3곳의 회수율을 구해보면 아래 표4-17<sup>1)</sup>과 같다. Plant S와 N을 비교하여 보면 온실가스저감비율은 각각 50%, 55%로서 Plant N이 높지만 R1지수는 각각 0.80, 0.77로서 Plant S가 높다. 이는 에너지 회수 효율 R1이 GHG mitigation 실적인 CDM의 저감실적과 일치하지 않는다는 것을 보여주고 있다.

**Table 4-17 GHG mitigation ratio by three methodologies**

| Site | Emission              | Ewaste  | Eexp(Gcal,TCO <sub>2</sub> ) |      |      | Rrecovery Ratio |       |      |
|------|-----------------------|---------|------------------------------|------|------|-----------------|-------|------|
|      | TCO <sub>2</sub> /hr* | Gcal/hr | R1                           | GGGI | CDM  | R1              | GGGI  | CDM  |
| S    | 11.7                  | 58.9    | 47.6                         | 40.4 | 5.81 | 0.80            | 0.685 | 0.50 |
| I    | 6.4                   | 31.7    | 11.7                         | 6.2  | 2.12 | 0.38            | 0.194 | 0.33 |
| N    | 13.4                  | 68.7    | 51.6                         | 38.9 | 7.29 | 0.77            | 0.566 | 0.55 |

\* As per table 4-13

전항에서 구한 값을 도식화하여 표현하며 아래 그림 4-9와 같다. 적색화살표는 탄소의 순환구조이다. 소각로에서 발생한 배출량이 외부공급된 전기와 열에 의하여 상쇄될 수 있음을 표시하였다.

1) GGGI는 지하체온실가스관리지침, CDM은 간접배출계수를 활용한 측정

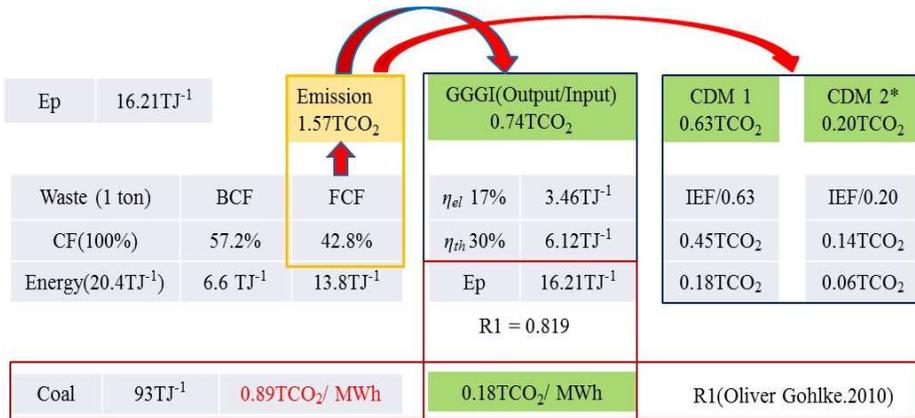


Fig 4-9 Schematic diagram of three methodologies.

CDM 방법론은 간접배출계수 전기와 지역난방을 대상으로 계산한 것이다. CDM 1은 전체 전기와 열을 모두 반영한 것이고 CDM2는 폐기물중에 BCF에 의한 기여도를 반영한 것이다. 많은 논문 (NIER 2017 et al., Lee 2018 et al., Mario 2010 et al.)들이 모두 외부로 송출된 전기와 열에 대하여 온실가스저감편익을 계산할 때 CDM1을 기준으로 계산하지만 이러한 방식은 두 가지 쟁점이 남아 있다. 첫째는 국가인벤토리보고서 작성기준에 외부로 송출된 열을 지역난방사업자가 보고하도록 되어 있으므로 이중 계산의 우려가 있다는 점이다. 두 번째는 외부로 송출된 전기를 저감량으로 산정할 때 폐기물중의 화석연료기반탄소로 생산된 에너지를 모두 국가저감실적으로 보고할 수 있는지 여부로서 좀 더 논의가 필요하다. CDM1과 CDM2 어느 것을 택하더라도 등가지수 분율에는 변함이 없고 저감총량에만 영향이 있다.

## 4.5 수정에너지회수효율(R2)의 도출

### 4.5.1 경계의 구분

R1은 소각로 경계내에서 생산되어 외부로 송출된 열량 전체를 효율화 대상으로 한다. R1 Annex V에서는 R1지수 산정을 위한 경계값 및 측정조건을 아래 그림 4-10과 같이 제시하고 있다.

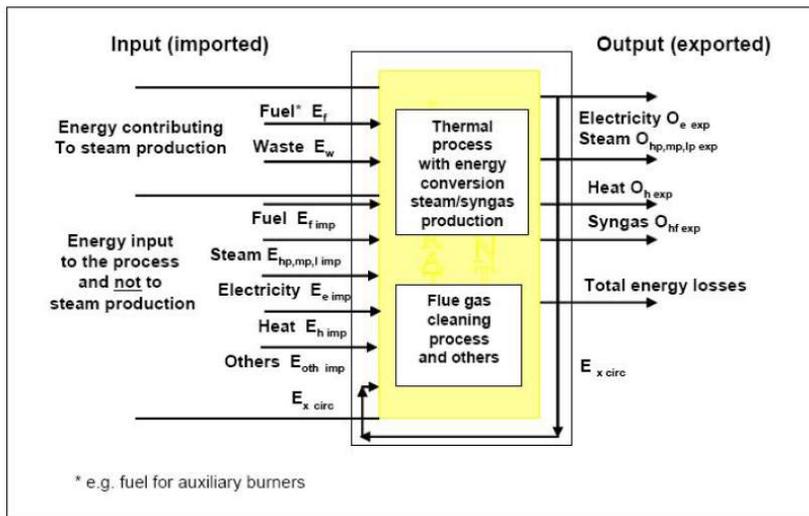


Fig. 4-10 System Boundaries of R1 (WFD 2018 et al.)

위 그림 4-10에서 보면 외부로 송출된 에너지가 어디에서 사용되건 소각로 내부에 이를 측정할 수 있는 기기가 존재하면 모두 소각로 (생산자)의 효율로 인정해주는 제도이다.

그러나 환경공단 (2017)에 의하면 보고의 의무와 권리는 에너지사용자 (지역난방업체)에게 있다. 에너지회수효율제도가 단위사업장의 에너지회수효율을 올려 국가목표에 부합하게 하여야 한다는 취지에서 시스템 경계는 R1의 경계조건과 동일하게 효율을 계산하는 것이 타당할 것이다.

#### 4.5.2 등가계수분율(전기/열)의 산정

전 4-3절에서 R1 및 다른 나라의 에너지회수효율제도와 간접배출계수에 의한 등가계수분율을 구하였다. 에너지회수에 따른 온실가스저감량 산정은 간접배출계수를 적용하는 것이 가장 보편적으로 사용되는 개념이다. 간접배출계수를 적용하여 등가계수분율 (전기/열)을 산정하는 지표는 여러 가지가 있고 전항의 표 4-11에서 구한값에 적용가능한 계수를 반영하여 보정한 표는 아래 4-18과 같이 비교할 수 있다.

**Table 4-18 Adjusted EC of electricity/heat in IEF and exergy.**

|                     | EC <sub>e</sub> /EC <sub>th</sub>                          | Description  | Analysis                       |
|---------------------|--|--|--------------------------------|
|                     | 3.80 (A)   | IEF <sub>el.prod</sub> /IEF <sub>DH total</sub>                          |                                |
| KECO                | 3.69 (B)   | IEF <sub>el.user</sub> / IEF <sub>DH total</sub>                         | Simple, widely used            |
|                     | 3.90 (C)   | IEF <sub>SCPC</sub> / IEF <sub>LNG</sub>                                 | Firm basis                     |
| EIB                 | 3.65 (D)   | IEF <sub>SCPC</sub> / IEF <sub>LNG</sub>                                 | non-equal to country           |
|                     | 3.47 (E)   | f <sub>ex</sub> =0.23, T <sub>o</sub> /T <sub>ml</sub> =0.8              | T <sub>0</sub> =288°K, minimum |
| η <sub>exergy</sub> | 4.70 (F)   | Average exergy efficiency in condensing area for district heating system |                                |
| Remarks             | All ratios are ignoring conversion factor of MWh and Gcal. |  |                                |

위 표에서 전력부문배출량과 지역난방배출량의 분율로 산정하는(A)방식이 가장 보편적이고 널리 사용되는 방식임에도 온 전력부문 간접배출계수가 국가마다 너무 다르다는 문제점을 가지고 있다. EIB (2019)에 따르면 원자력 발전이 많은 프랑스는 전력부문 간접배출계수가 0.06 TCO<sub>2</sub> /MWh로서 우리나라의 간접배출계수의 13%에 그친다. 바이오매스 발전이 많은 Finland는 0.162 TCO<sub>2</sub>/

MWh, Brazil은 0.139 TCO<sub>2</sub>/ MWh로서 등가계수분율이 1.5 이하가 될 것이며 이러한 등가계수분율은 엑서지 효율을 반영하지 못하는 측면이 있다. 가장 이상적인 전기/열 분율은 석탄화력발전의 전기발생배출량과 LNG보일러의 열생산배출량의 비율인 3.90으로 보여진다. 과학적으로는 최신의 통계를 반영한 EIB 지수 (B) 3.65 MWh/Gcal와, 열병합발전에서의 엑서지 계산법에 의한 등가계수분율 (C)도 3.47로 거의 동일한 수치로 나타났다. 따라서 엑서지 효율로 계산해본 전기/열 분율인 3.47(E)를 적용하여도 다른 등가계수분율에 비하여 과다 책정되지 않으므로 위 표 4-15에서 비교한 값들 중에 3.47(E)를 전기/열의 최소분율로 정하고자 한다. 위 전기/열 분율은 이미 카르노지수를 반영하고 있다고 판단되어 기후영향지수 (CCF)는 반영하지 않아도 무방하다. 시설 규모에 대한 문제는 앞의 그림 4-5와 4-6에서 본 바와 같이 터빈효율의 차이로 나타나고 어느 경우에도 전기/열의 비율이 3.47보다는 클 수밖에 없으므로 규모영향지수도 반영하지 않는 것이 타당할 것이다.

#### 4.5.3 수정에너지회수효율(R2) 산정식

위에서 구한 전기/열 등가지수는 3.47이다. 열에너지가 1.1일 때 전기에너지는 3.47 x 1.1로 표시될 수 있으며 전력부문에 적용되는 등가계수는 3.817로 계산되었다. MWh단위를 Gcal로 환산하려면 변환계수 0.86으로 나누어 주어야 하지만 위 에너지/엑서지 분율계산이 모두 동일한 열량단위인 kJ/kg단위를 사용하여 계산된 무차원변수이므로 열량환산단위는 적용하지 않아도 무방하다. 위의 전기/열 분율을 기초로 수정식 R2는 아래 식 4-8과 같다.

$$R2 = EP / Ew$$

$$Ep = 3.817 \times Eel + 1.1 Eth \quad \text{식 4-8}$$

Eel 은 순수하게 외부로 송출된 전기에너지

Eth 는 순수하게 외부로 송출된 열에너지

제도적 편이성을 위하여 간접배출계수의 전기/열 분율 3.80을 이용한다면 수정식 R2'는 아래 식 4-9와 같이 표현될 수 있다.

$$R2' = EP /Ew$$

$$Ep = 4.18 \times Eel + 1.1 Eth \quad \text{식 4-9}$$

Eel 은 순수하게 외부로 송출된 전기에너지

Eth 는 순수하게 외부로 송출된 열에너지

국내에서 온실가스 배출량이 없는 태양광발전과 풍력발전, 원자력발전의 비율이 계속 늘어나고 있다. 발전부문 표준 온실가스계수는 현재의 기준에서는 유효하지만 배출량이 없는 신재생에너지가 증가함에 따라 점차 감소할 것으로 보여진다. 이 경우 전기/열의 등가계수를 적용하면 사회적 신재생에너지점유율에 따라 전기부문 간접배출계수의 하락으로 전기/열의 등가지수도 계속 하락하게 된다. 엑서지 계산법에 따라 산정한 최소치 3.47로 정할 경우 공학적 접근이 용이하고 장기적으로 안정된 지수를 사용할 수 있다는 점이 장점이고, 온실가스 저감효과와 곧바로 비례하지 않는다는 단점을 지니게 된다.

R1에서는 이상적인 보일러 효율 0.97을 반영하였으나 위산식에는 반영하지 않았다. 굴뚝열 손실이나 미연분 탄소라 하더라도 TIER3, TIER4 연소가스 측정방법에서는 이미 연소공기중 GHG를 계산할 수 있으므로 온실가스배출량과 에너지 회수율 산정에는 아무 영향을 미치지 않기 때문이다. 외부에서 유입된 전기에도 등가계수는 동일하게 3.817이 적용되며 열에너지는 1.1, 연료의 형태로 공급된 에너지는 1.0을 적용한다. 위 R2 지수를

반영하면 전기생산을 하지 않고 열사용이 없는 소각로는 R2 지수가 음의 수로 표현될 수 있다. 이는 R1에서도 마찬가지로 결과인데 소각과정에서 외부로부터 청정에너지를 공급받는다는 의미이므로 소각시설 GHG Inventory Report (GIR)는 소모된 외부전기와 열이 포함되므로 온실가스와의 상관관계에서 R1, R2가 음수로 산정된다고 해서 무의미해지지 않는다.

2장 CEWEP (2013) Report의 배출량 산정 식은 EU의 R1제도도 이러한 간접배출계수의 결과임을 보여주고 있다.

폐기물소각시설은 IPCC 제 2장에서 규정한 바와 같이 “고정형 에너지생산시설중 석탄과 바이오매스 혼소시설”로 간주하여 배출량 및 저감량을 산정하여야 한다. 위 CEWEP Report에서의 열부문 온실가스 배출계수는 와 환경공단 (2017) 온실가스 산정식과의 차이점은 지역난방열원으로 공급되는 열원은 종합배출계수의 차이이다. CEWEP에서는 LNG boiler의 평균배출계수를 사용하였고 이 논문에서는 LNG열병합 발전, 폐기물소각열, LNG boiler의 종합 효율이 반영된 0.123을 사용한 것이 가장 큰 차이이고 IPCC Vol2 (Energy)와 Vol 5 (Waste)의 정의에 따르면 표 4-15에서 계산된 (A) 혹은 (B)의 분율이 적정하다.

#### 4.5.4 수정에너지회수효율R2와 R1과의 비교

식 4-8에서 도출된 수정에너지회수효율(R2)을 적용하여 대상 사업장 3곳을 대상으로 R2를 구하고 이를 R1과 비교하여 보았다.

Table 4-19 Comparison between R1/R2 in three plants

| Site | Emission             | Ewaste  | Eexp(Gcal,TCO <sub>2</sub> ) |      |      | Rrecovery |      |      | Ratio  |        |
|------|----------------------|---------|------------------------------|------|------|-----------|------|------|--------|--------|
|      | TCO <sub>2</sub> /hr | Gcal/hr | R1                           | R2   | CDM  | R1        | R2   | CDM  | R1/CDM | R2/CDM |
| S    | 11.7                 | 58.9    | 45.0                         | 47.5 | 5.81 | 0.75      | 0.81 | 0.50 | 1.50   | 1.62   |
| I    | 6.4                  | 31.7    | 11.7                         | 15.7 | 2.12 | 0.33      | 0.49 | 0.33 | 1.14   | 1.49   |
| N    | 13.4                 | 68.7    | 51.6                         | 59.0 | 7.29 | 0.76      | 0.86 | 0.55 | 1.42   | 1.58   |

위 표 4-19에서 보면 전력생산이 높은 N시설과 I시설의 지수상승이 두드러졌고 S시설은 거의 변화가 없었다. 또한 R2지수로 측정된 에너지회수효율과 온실가스저감효과가 Plant S, I, N 모든 시설에서 거의 유사한 결과 값을 보이고 있다.

상관관계를 분석하기 위하여 통계에서 사용하는 기법중 상대적 표준편차분산도 (Relative Standard Deviation RSD)를 통하여 각각의 모집단과의 연계성을 추정하여 보았다. RSD는 아래 식 4-8로 표현되는데 측정하지 않은 모집단이 다수 존재한다고 가정할 경우 주어진 조사결과로 모집단내에서의 연관성을 유추하는 기법이다. 여기서는 CDM (온실가스저감실적) R1지수와의 연관도, R2지수와의 연관도를 추정하기 위하여 사용하였다.

$$RSD = 100 \times SD (\text{표준편차}) / \text{Mean Value} (\text{평균값}) \quad \text{식 4-10}$$

Table 4-20 Relative Standard Deviation of R1/CDM and R2/CDM.

| Field      | CDM   | R1/CDM | R2/CDM |
|------------|-------|--------|--------|
| Mean value | 0.46  | 1.35   | 1.56   |
| SD(%)      | 0.091 | 0.154  | 0.054  |
| RSD(%)     | 19.96 | 11.36  | 3.48   |

위의 표 4-20에서 보듯이 CDM의 상대적 표준편차가 19.96%일 때 R1과의 연관도의 상대적 표준편차는 11.36%이지만 R2의 경우는

3.48%로 줄어 R2지수가 온실가스저감효과를 거의 정확히 반영한다고 볼 수 있다.

#### 4.5.5 소각시설고유계수 (R2)

R2를 확장된 시설고유계수로 사용할 수 있다. R2/CDM계수는 각 시설마다 고유한 값으로 그 의미는 ‘에너지회수효율 R2 1단위가 증가할 때 온실가스저감량 1단위가 증가한다’는 시설별 고유계수이다. 이 계수는 평균적으로 1.55로 표현될 수 있다.

이 계수의 의미는 R2값이 15.5% 증가하면 온실가스 저감효과는 10% 늘어난다는 수치로서 GHG mitigation의 효과를 측정하는 방법론이 될 수 있으며 전국의 소각시설들을 한 개의 지수로서 에너지회수효율과 온실가스 저감효과를 동시에 관리할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

## 4.6 결론

R1지수는 외부로 송출된 전기에너지는 2.6배, 열에너지는 1.1배의 등가지수를 채택하고 있다. 이와 관련하여 제 4장에서는 세 가지 연구목적을 설정하였다.

첫째, R1제도와 관련된 수정의견들 중 기후변화지수, 규모지수, 엑서지 반영법, 기후변화요인 반영법등을 분석하였다. 종래의 에너지회수효율이 열역학 1법칙에 따른 에너지회수효율계산법을 적용하였다고 볼 때, R1제도가 전기에너지와 열에너지의 차등을 인정하였다는 점에서는 열역학 제 2법칙을 일부 인용한 진일보한 회수효율개념이다. 그럼에도 주변에 대량의 열에너지 사용시설이 열을 사용하여야 효율적인 시설로 판단되는 외부환경 의존적 지수라는 점을 극복하기 어렵다. 이 수정제안들이 가진 공통적인 배경은 전기와 열의 비율을 어떻게 정할 것인가로 귀결된다.

둘째, 전기/열의 등가지수는 엑서지 계산법과 온실가스배출량 산정법으로 나누어 볼 수 있다. IPCC 2장의 규정에 따라 소각시설은 폐기물처리시설이자 화석연료와 바이오매스연료가 혼합된 에너지생산시설이다. 엑서지 계산법은 열병합시설에서 열을 공급할 경우 전력손실계수를 기반으로 엑서지/에너지 회수효율 비교를 구하여 등가계수를 계산하여본 결과 3.47로 나타났다. 간접배출계수비교에 의한 등가계수는 기준지수를 어떻게 정하느냐에 따라 약간의 차이가 있다. 국내 전기에너지와 열에너지 생산단에서의 표준배출계수 기준 3.80, 소비단에서의 표준배출계수 3.69, 석탄화력 전기생산배출계수와 LNG 열생산 배출계수비율 3.90, 위 석탄화력 전기배출계수와 LNG열 생산배출계수의 최신통계를 이용한 등가계수 3.65등이 거의 동일한 값을 보이고 있어 등가계수분율은 엑서지효율법으로 계산된 3.47로 정하였고 이 경우

수정에너지회수효율(R2)는

$$R2 = E_p / (W_w + E_f)$$

$$E_p = 3.814 \times E_{el} + 1.1 \times E_{th}$$

셋째, R1의 에너지회수효율과 온실가스 저감량과의 관계 (R1/CDM), 수정에너지회수효율과 온실가스저감량과의 상관관계 (R2/CDM)를 계산하고 이 효과를 분석하였다. R2는 열열학 제 2법칙에 충실한 계수이자 국가고유배출계수를 반영하고 있다. 이로부터 얻어진 R2/CDM 1.55지수는 전국적으로 모든 소각시설에서 에너지회수효율과 기후변화저감효과의 상관관계를 파악하는 지수가 될 수 있어 모든 소각시설을 관리할 수 있는 효율적인 지수가 될 것이다. 또한 R2는 온실가스 저감효과와 비례하는 산식임을 알 수 있었다. 위 R2지수는 열병합시설중에서 전기생산 후 지역난방으로 열원을 공급하는 경우에 한하여 적용된다.

#### 4.7 참고문헌

1. 박정구, “일본의 순환형 사회형성을 위한 법제도 시행상황” 국가환경정보센터, 2013
2. 자원순환기본법[시행 2019. 4. 17.] [법률 제15840호, 2018. 10. 16.]
3. 한국에너지공단, ‘Statistics of renewable energy’ 2015
4. 한국환경공단, “지자체온실가스 배출량 산정지침(V4.1)” pp. 221-231 20171219,
5. 환경부, ‘Method of energy recovery efficiency of municipal waste incineration facilities’, 2017
6. 환경부, “2030 Greenhouse Gas Reduction Target 37%(BAU) Press Release”. 2015
7. ASTM, DESIGNATION: D6866 - 20 “Standard Test Methods for Determining the Biobased Content of Solid, Liquid, and Gaseous Samples Using Radiocarbon Analysis”. 2018
8. CARBON FOOTPRINT CARBON FOOTPRINT, COUNTRY SPECIFIC ELECTRICITY GRID GREENHOUSE GAS EMISSION FACTORS Last Updated June 2019
9. Chunhui Liao, Ivar S. Ertesvåg, Jianing Zhao, ‘Energetic and exergetic efficiencies of coal-fired CHP (combined heat and power) plants used in district heating systems of China’, Energy 57 (2013) 671-681
10. Dincer I, Acar C. A review on clean energy solutions for better sustainability. International journal of energy research 2015 ; 39:585-606
11. Federico Viganò 2018, “A practical method to calculate the R1 index of waste-to-energy facilities”. Waste Management 73: 287 - 300.

12. Federico Viganò, A practical method to calculate the R1 index of waste-to-energy facilities, 2014
13. GUIDANCES ON THE INTERPRETATION OF THE R1 ENERGY EFFICIENCY FORMULA FOR INCINERATION FACILITIES DEDICATED TO THE PROCESSING OF MUNICIPAL SOLID WASTE ACCORDING TO ANNEX II OF DIRECTIVE 2008/98/EC ON WASTE
14. <https://www.steamtablesonline.com/steam97web.aspx>
15. Hyeyoung Lee, Seung Muk Yi, Thomas M. Holsen, Yong-Seok Seo, Eunhwa Choi, 2018 Estimation of CO2 emissions from waste incinerators : Comparison of three methods, Waste management 74(2018) 247-255
16. Mario Grosso, Astrid Motta, Lucia Rigamonti , “Efficiency of energy recovery from waste incineration, in the light of the new Waste Framework Directive”, Waste management 30 (2010) 1238-1243
17. Murer M, Spliethoff H., Van Berlo M., and Gohlke O., 2009, “Comparison of Energy Efficiency indicators for Energy-from- Waste Plants”, In: Cossu R, Diaz LF and Stegmann R (eds.) Sardinia 2009 Symposium (pp. 697 - 698), Cagliari, Italy: CISA Publisher
18. National Institute of Environmental Research, “A study on GHG mitigation and waste heat utilization from waste - to-energy high efficiency recovery(II)“, 2018
19. Oliver Gohlke, “Efficiency of energy recovery from municipal solid waste and the resultant effect on the greenhouse gas balance”, Waste Management & Research 2009: 27: 894 - 906

DOI: 10.1177/0734242X09349857

20. Ozansoy, C (2016) “Development of revised R1 thermal energy efficiency guidelines for energy from waste plants”. *International Journal of Energy Research* 40: 1178 - 1192.
21. Seongmin Kang, Seungjin Kim, Jeongwoo Lee, Hyunki Yun, Ki-Hyun Kim & Eui-Chan Jeon (2016) The study on biomass fraction estimate methodology of municipal solid waste incinerator in Korea, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 66:10, 971-977, DOI: 10.1080/10962247.2016.1185479
22. The EIB, “Methodologies for the Assessment of Project GHG Emissions and Emission Variations, version 11”, DEC-2018
23. Yoo, Jong Ik 주요국 국가온실가스인벤토리보고서의 사업장 정보 활용 동향 *Journal of Climate Change Research* 2019, Vol. 10, No. 4, pp. 371~380

## 제5장 재열사이클을 이용한 에너지이용 효율화와 온실가스 저감효과 분석

### 5.1 서론

3장에서는 온실가스 배출량의 산정을 위하여 TIER 3, TIER 4 도입에 대비한 pMC의 영향을 검토하여 대상시설 3곳에서 폐기물의 연소과정에서 발생하는 온실가스 배출량을 구하고 추가로 투입된 외부에너지로 인하여 배출되는 온실가스량을 더하여 시설별 배출량을 구하였다. 4장에서는 전기와 열의 엑서지파괴효율을 비교한 열역학적인 접근과, 전기와 열의 사회간접 배출계수에 기반한 전기/열의 비율을 구하고 이 둘을 비교하여 엑서지효율비교를 통하여 전기/열의 비율을 3.47, 간접배출계수의 비교를 통하여 3.80을 구하였다. 새로 구해진 전기/열 분율을 기준으로 수정에너지회수효율  $R2$ 와  $R2'$ 를 제시하고 에너지회수로 얻어진 온실가스저감효과와  $R1$ ,  $R2$ ,  $R2'$  지수와의 상관관계를 분석하였다. 3, 4장의 연구는 이미 설치되어 운영중인 시설을 대상으로 배출량, 저감량, 그리고 에너지회수효율  $R1$   $R2$ 와의 상관관계를 분석한 것이다. 5장에서는 전기생산을 최대화하여  $R2$ 지수를 높이고 온실가스저감효과를 높이는 방법론을 전사모사로 예측하고자 한다.

전기/열의 등가계수를 3.47보다 크다는 것을 알 수 있으므로 전기생산을 높이는 방법이 가장 에너지회수효율을 올리는 방법임에는 이론이 없으나 전기만 단독으로 생산하여야 할 조건을 가지지 않는다면 열병합시설로 운전하는 것이 가장 에너지 효율이 높다는 것을 알 수 있다. 전기생산을 늘려 에너지회수효율을

올리고자 하는 시설에 대한 보고는 Gohlke (2007), Mario (2010), Trinade (2018), 환경과학원 (NIER 2017) 등에서 보고되었다. 국내 소각장의 열이용효율이 열량기준으로 36%에 그치고 있는 상황에서 정부는 에너지회수효율제도 R1을 시행하였다. 위 3, 4장의 연구결과에 기초하여 5장에서는 에너지회수효율을 향상시키는 요소기술들이 열역학적으로 어떻게 해석되어야 하며, 유럽의 선진기술 (Best Available Technology)중 보편적으로 적용되고 있는 재열사이클 (Re-Feat)을 도입할 경우의 발전효율향상 및 에너지회수효율 상승을 전산모사하고 그 결과값을 R2, 온실가스저감효과, 엑서지효율과 비교하여 R2의 적용가능성을 검증하였다. 다음과 같은 소주제로 나눌 수 있다.

- 1) 요소기술별 엑서지/에너지 개선효과를 분석하고
- 2) Plant S 와 Plant I를 대상으로 중단슈퍼히터재열사이클 (Intermediate Superheater Reheat Cycle)을 적용하였을 때 발전효율 상승 및 에너지회수효율상승을 검토하였다. Plant S는 지역난방 사업자가 100% 열을 전량 이용한다는 점에서 전형적인 CHP 발전소에서의 exergy 효율을 분석할 수 있으며, Plant I의 경우에는 발전전용인 에너지시설에서 Exergy 효율을 계산해 볼 수 있기 때문이었다.
- 3) 위 2)항의 두 개 시설을 대상으로 R1과 R2값을 구하고 이를 엑서지 효율 및 온실가스 저감효과와 비교분석함으로써 R2의 열역학적 효율이 온실가스 저감실적과 어떤 연관관계를 가지는지 분석하였다.

## 5.2 관계식과 선행연구

4장에서 정의한 바와 같이 R2 formula는 다음과 같이 정의된다.

$$R2 = EP/Ew$$

$$Ep = 3.817 \times Eel + 1.1 Eth \quad (4-9)$$

Eel 은 순수하게 외부로 송출된 전기에너지 (Gcal)

Eth 는 순수하게 외부로 송출된 열에너지 (Gcal)

$$R2' = EP/Ew$$

$$Ep = 4.18 \times Eel + 1.1 Eth \quad (4-10)$$

Eel 은 순수하게 외부로 송출된 전기에너지 (Gcal)

Eth 는 순수하게 외부로 송출된 열에너지 (Gcal)

R2는 엑서지효율에 의하여 계산된 최고비율을 적용한 것이고 R2'는 온실가스배출계수로 구현된 산식이다.

사용된 열역학요소의 계산은

<https://www.steamtablesonline.com/steam97web.aspx>의 프로그램으로 전산모사하였다.

### 5.2.1 해외관련사례와 문헌 검토

환경과학원 (2017)에서는 국내 31개 시설을 대상으로 전력생산에 기여할 수 있는 요인별로 효과를 계산하였다. 재질의 문제로 600℃의 스팀을 만들기는 어렵지만 석탄화력과 동일한 스팀조건을 가정하여 비교하였다. 이 연구에서 보여준 요소기술중 검토과정에서 누락된 가장 큰 두 가지 항목은 공랭식복수기의 운영조건과 스팀생산시의 고효율화 방안이다.

**Table 5-1 Power generation increasing ratio by various method.**

|                      | Technology   | Eff(%) | Comparison condition                        |
|----------------------|--|--------|---|
| Heat recovery        | Low temperature economizer   | 1.0    | Gas temperature at boiler exit 250°C→210°C) |
|                      | Low A/F ratio  | 0.9    | A/F ratio 1.8→1.3                           |
| Utilization of steam | Low temperature SCR  | 0.5    | Temperature at SCR input 210°C→190°C)       |
|                      | Reduce heating energy at chimney                                       | 0.7    | reduce heating steam : 3.5%                 |
| Super-heater         | Increase steam enthalpy  | 71.3   | 20kg.cm2m 300°C → 60kg/cm2, 600°C           |
| Remarks              | Based on NCV 3,000~4,100 kcal/kg,<br>Exhaust gas : 9,500~11,500 m3/ton |        |   |

유럽의 선진기술에 대한 공법들은 모두스팀 고효율화에 관한 사례와 연구보고들이다. Bogale and Vigano (2014)가 분석한 선진기술의 종류에는 Bilbao - Spain, Brescia-Italy와 같이 고온·고압의 스팀생산을 주목적으로 한 시설과 Amsterdam -Netherland와 같이 재열사이클을 이용한 모델이다 유럽에서 선진적인 시설로 알려진 3개 시설의 열이용현황을 정리하면 다음 표 5-2와 같다.

**Table 5-2. Advanced waste technology in Europe, Bogale(2014)**

|             |      | Bilbao | Brescia | Amsterdam |
|-------------|------|--------|---------|-----------|
| Temperature | ℃    | 540    | 460     | 440       |
| Pressure    | bara | 100    | 75      | 130       |
| $\eta_{el}$ | %    | 29.5   | 29.7    | 31.0      |

소각로의 보일러는 염소성분에 의한 고온부식과 저온부식의 위험성을 가지고 있어 480°C 이상으로 스팀온도를 설정할 경우

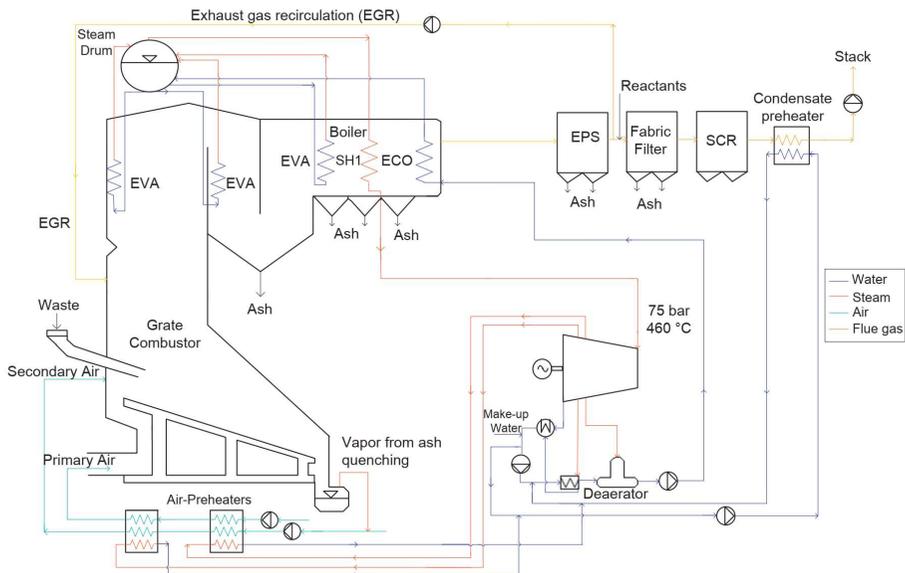
특수한 재질이 필요하게 된다. P. Prigent (2012), Baran (2013), Kamuk (2010) 등은 보일러튜브에서의 고온부식에 관하여 보고한 바 있다. 표 5-2에서 보듯이 Amsterdam 시설은 고압을 사용하지만 고온은 적용되지 않으면서 가장 높은 전기생산효율을 보이고 있다. 이는 재열사이클의 효율증가효과를 보여주고 있다고 볼 수 있다.

Gohlke (2007), Bogale (2014)에서는 설치 운영중인 시설에 관하여 아래와 같이 보고하였다.

#### 1) Brescia, Italy and Bilbao, Spain model

스페인의 Bilbao 소각시설은 유럽 소각시설중 가장 높은 온도와 압력으로 스팀을 생산한다. 100 bara, 540℃의 스팀은 일반적인 석탄화력발전의 설계치와 거의 유사하며 해양수를 활용한 수냉식복수기를 적용할 경우 총발전효율은 42%에 이른다. 그러나 폐기물에 함유된 부식성 성분 (Chloride, VOS)으로 인한 유지보수 기간의 증가로 연간 가동시간이 줄어든다는 단점을 가지고 있다.

Bonomo (2003), Bogale (2014)는 적용가능한 기술중에서 Brescia 설비를 예로 들어 다음과 같이 설명하였다. 사용된 공정은 최적 스팀생산조건으로 75bar, 460℃로 생산하며, 요소기술중 공기비 하향조정, 연소공기 예열조건을 적용하였다 (그림 5-1).

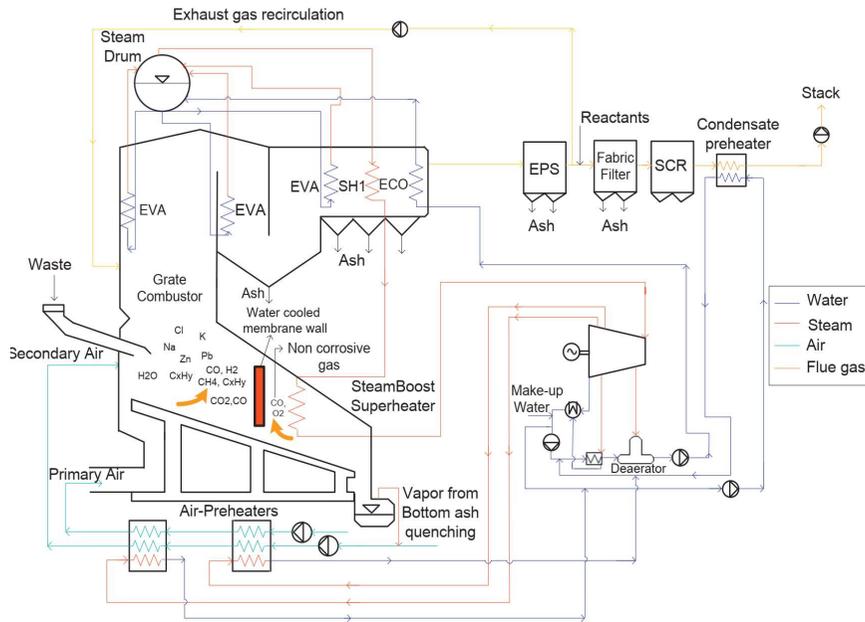


**Fig. 5-1 Steam diagram of 75bar, 460°C at Brescia model, Bogale (2014) Fig. 4**

|  |                 |
|--|-----------------|
| Treated waste ( of which biomass 137.000 t ) | 514,000ton/year |
| electricity production (net)                 | 334 GWh         |
| district heating                             | 261 GWh         |
| fossil fuels saving (equivalent tons of oil) | 110,000ton/year |
| CO2 avoided emissions                        | > 200,000 TCO2  |

2) Steam boost - Denmark, Reno-Nord WtE CHP model

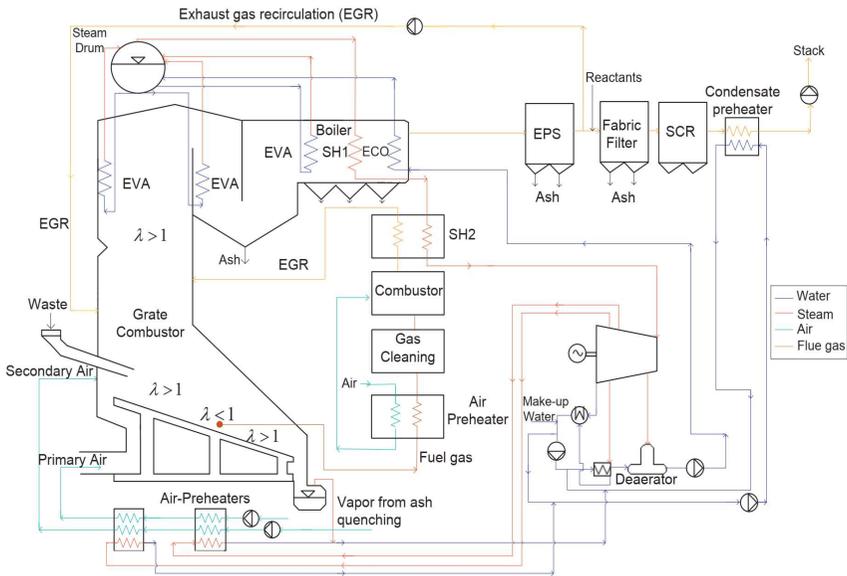
Bobcock & Wilcox에 의해 개발되어 덴마크의 Reno-Nord에 설치된 기술이다 (그림5-2). 스팀을 고온으로 만드는데 장애가 되는 부식성물질들이 소각로의 전단에서 휘발한다는 점을 이용하여 연소로를 두 개로 구분하고 전단에서는 40bar, 400°C의 스팀을 생산한 후 후단에 Super heater를 추가로 설치하여 부식성 물질이 적은 연소가스를 이용하여 50bar, 500°C의 Boosting process를 채택하여 발전효율을 18%에서 21%로 올릴 수 있다.



**Fig 5-2 Configuration diagram of two stage steam boosting process in Reno-Nord, Bogale (2014) Fig. 2**

### 3) By-pass process - Karlsruhe Institute

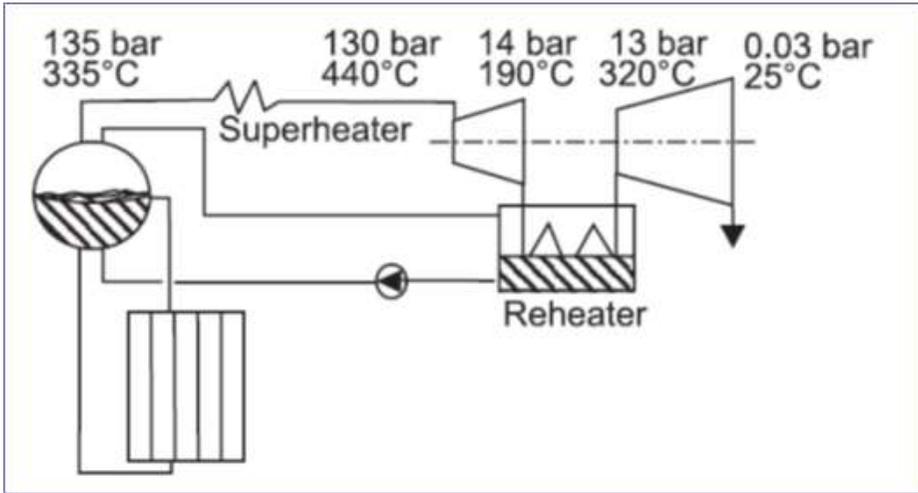
독일의 Karlsruhe연구소에서 제안된 기술로서 위의 Steam boost 기술이 연소기를 두 단으로 나누어 각각 Super heater를 설치하는데 비하여, 후단 연소공기를 외부로 추출 (By-pass)한 후 정제과정을 거쳐 연소로 외부에 두 번째 Super heater를 설치하는 방법이다. 주요공정은 아래 그림 5-3과 같다.



**Fig. 5-3 Schematic diagram of By-pass process, Bogale (2014) Fig.3**

#### 4) Re-heat cycle : Amsterdam Model

재열사이클은 화력발전에서 보편적으로 사용되어진 기술임에도 소각로에서는 보편화되지 못하였다. Matin GMBH에 의하여 설계된 Amsterdam Plant는 처음 이 기술을 적용하였다. 1차적으로 Super heater를 통하여 생산된 440°C의 스팀을 이용하여 고압터빈에서 발전한 후 다시 연료로 내부의 2단 Super heater를 이용하여 재가열하여 중저압터빈으로 발전량을 높이는 방식이다. 국내 화력발전의 경우 3단 재열시스템까지 장착한 설계도 이루어지고 있으므로 소각로에서의 재열시스템은 많은 연구와 적용이 있을 것으로 예상된다. 개략 공정도는 아래 그림 5-4와 같다.



**Fig. 5-4 Water-steam schematic diagram of 130bar/440°C intermediating process. Gohlke 2007 Fig. 10**

위 네 가지 기술 중 가장 효율성이 높은 것은 Amsterdam 시설의 Re-heat cycle이고 앞으로 더 검토하여야 할 기술은 By-pass 공정이다. 소각로에서의 스팀온도의 한계를 뛰어넘기 위한 방법중 재질의 개선은 한계가 있으므로 소각로의 1차 Super heater를 이용하여 400°C 정도를 생성한 후 2차 Super heater에서 LNG등을 이용하여 Ultra Super Critical 조건인 585°C까지 승온시키는 공정도 충분히 성립할 수 있다. 그러나 위의 By-pass 기술은 대규모 설비에서만 가능할 것이므로, 제 5장에서는 보편적으로 이용가능한 Re-heat 기술을 이용하여 전산모사를 수행하였다.

국내 시설을 대상으로 재열사이클을 적용하기 전에 두 가지 선행조건을 정하였다.

1) 보일러 효율의 표준화

Lucia (2014)는 유럽의 9개 소각로에서 평균 손실율을 구하였다. 보일러 손실은 평균 15.45%이고 굴뚝열 손실이 12.2%, 기타손실(미연분 등) 3.3%로 조사되었다 (표 5-3).

**Table 5-3. Average loss in WtE plant in Europn (Lucia, 2014)**

|                   | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | Avg.  |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Boiler efficiency | 83.02 | 83.39 | 84.74 | 84.43 | 85.76 | 86.43 | 83.24 | 85.11 | 84.83 | 84.6  |
| Boiler Losses     | 16.98 | 16.61 | 15.26 | 15.57 | 14.24 | 13.57 | 16.76 | 14.89 | 15.17 | 15.45 |
| Stack Loss        | 12.71 | 12.17 | 12.27 | 12.29 | 11.27 | 11.47 | 12.85 | 12.29 | 12.57 | 12.2  |
| Other losses      | 4.28  | 4.45  | 2.99  | 3.78  | 2.97  | 2.1   | 3.91  | 2.6   | 2.61  | 3.3   |
| Subtotal          | 33.96 | 33.23 | 30.52 | 31.64 | 28.48 | 27.14 | 33.52 | 29.78 | 30.35 | 30.96 |

4장에서 검토한 국내시설중에는 Plant I의 보일러 효율이 가장 높아서 유럽 평균치를 약간 상회한 87%로 나타났지만 효율증가 분석 시에는 모두 85%를 기준으로 하였다.

2) 공랭식 응축기 (Air Cooled Condenser) 운전조건의 결정  
 전항 Table 2-10 (NIER 2017)에서 요소기술 적용 시 발전효율에 미치는 영향을 검토하였고 .이중 200℃로 생산되는 스팀을 600℃의 스팀으로 생산할 때 발전효율 증가분이 71.3%로 계산하였다. 이외에도 저온 절탄기 (economizer), 저온 SCR (Selactive Catalytic Reactor)등의 효율개선을 들고 있지만 가장 큰 영향을 미치는 요소기술 중 하나는 공랭식 응축기의 선정이다. 응축기는 발전전용설비에서는 터빈출구에서의 h (enthalpy)를 결정짓는 요소로서 발전효율에 미치는 영향이 크다.

엑서지는 물리적 엑서지, 화학적 엑서지, 속도엑서지, 위치엑서지로 이루어져 있다. 스팀에서의 화학적 엑서지는 0이라고 보고 속도엑서지와 위치엑서지는 무시하기로 한다. 이 장에서는 스팀이 생산된 후의 시스템에 대하여 엑서지 (5-1)와 엑서지율 (5-2)을 사용할 것이며 수식은 아래와 같다.

$$ex = h-h_0-T_0(S-s_0)$$

식 5-1

$$\epsilon = \frac{e_X}{h-h_0} = 1 - \frac{T_0(s-s_0)}{h-h_0} \quad \text{식 5-2}$$

$e_X$  는 비엑서지,  $h$ 은 엔탈피,  $s$ 는 엔트로피, 하첨자 0 는 상태를 의미한다.

카르노 팩터를 어떻게 정의할 것인가는 매우 중요하다. 보통은 대기온도를 기준으로 다음과 같이 정의한다.

$$T_0 = 273 + 15 = 288$$

$h_0$  = 외기온도

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

터빈의 발전효율을 계산하는 계산식은 아래와 같다.

- 1)  $h_e = h_i - n_i \times (h_i - h_{es})$
- 2)  $yes = (S_{es} - S_{e'}) \div (S_{e''} - S_{e'})$
- 3)  $h_{es} = h_{e'} + (h_{e''} - h_{e'}) \times yes$
- 4)  $\Delta h = h_i - h_{es}$

여기서는 Plant I가 발전전용이므로 Plant I를 대상으로 복수기의 변화에 따른 효율을 분석하면 아래와 같다.

Chuang (2004, et al.)는 타이완의 석탄화력을 대상으로 복수기 압력이 0.268 bara에서 0.118 bara로 낮아질 경우 3%만큼의 출력증가가 있음을 아래 그림 5-5와 같이 보여주고 있다.

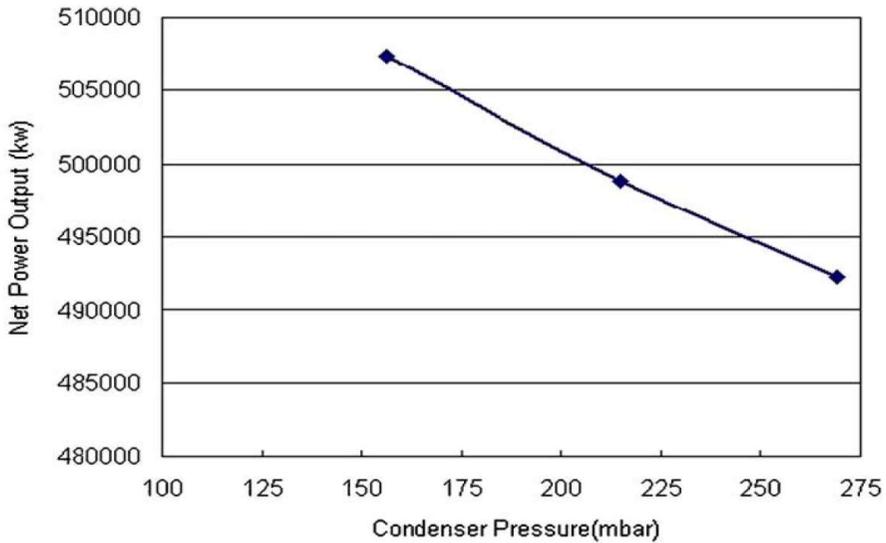


Fig 5-5 Condenser pressure vs net power output at 100% load.(Chuang 2004)

Plant I의 시운전기록<sup>1)</sup>에서 나타난 복수기의 효율 변화곡선은 아래 그림 5-6과 같다. 그림에서 보면 ACC 압력이 0.43 bar abs (Vacuum - 0.57)에서 0.24 bar abs (Vacuum - 0.76)으로 변화할 때 동일한 스팀 1톤당 출력은 119.3KWh에서 146.5 KWh로 약 22.7% 증가하였다. 여기서 vacuum gauge값은 모두 음수이다. 실제 운전조건은  $T_{air} < 10^{\circ}\text{C}$  이하의 조건이므로 연중 동일한 효율을 낼 수는 없다.

1) 2019년 12월 10일 ~2020년 3월 20일 운전기록

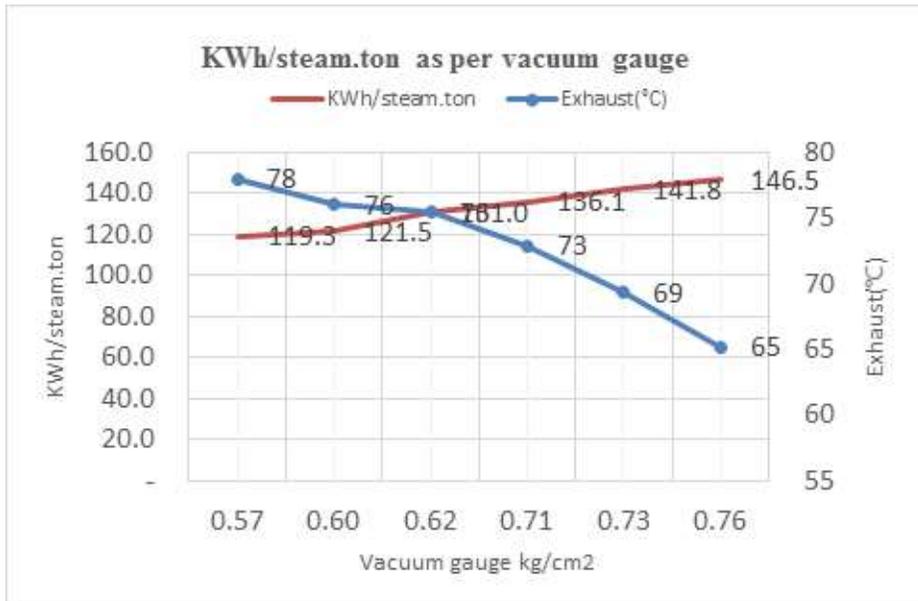


Fig 5-6 Electricity generation varied by vacuum gauge in Plant I

동일한 스팀조건이라면 복수기의 운전조건은 발전효율에 큰 영향을 끼칠 수 있다. Plant I와 같이 발전전용에서의 공랭식 응축기는 국내 소각로에서의 최적설계조건인 50℃, 0.12 bar abs를 검토조건에 추가하였고 Plant S의 경우에는 전량 열공급이 가능하므로 공랭식 응축기를 변경한 경우는 검토대상에서 제외하였다.

### 5.3 재열사이클의 적용과 효과에 대한 검토

#### 5.3.1 일반발전소 발전효율 분석

국내시설중 고온고압의 스팀조건을 가진 N시설을 대상으로 발전효율을 계산하면 아래 표 5-4와 같다. 터빈의 흐름은 크게 3단으로 나뉜다.

먼저 모든 보일러 스팀은 터빈으로 인입되며 1개의 터빈안에 세개의 구간(Stage)으로 나누어진다.

-Stage 1 : High pressure area (398.0°C ⇒ 296.2°C)

※ 공정용 스팀 추가<sup>2)</sup> (SCR, ACC, Deaerator)

-Stage 2 : High pressure area (296.2°C ⇒ 109.3°C)

※ 공정용 스팀 추가 - 지역난방 열교환기 2 (DH2)

-Stage 3 : High pressure area (109.3°C ⇒ 81.9°C)

※ 배기 후 지역난방 열교환기 1 (DH1), 열교환 없을 시 ACC

**Table 5-4 Generation in different stage of plant N**

| Parameter   |                      | Inlet | #1    | #2    | #3    | Total |
|-------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pressure    | kg/cm <sup>2</sup> G | 39.0  | 15.0  | 1.4   | -0.49 |       |
| Temperature | °C                   | 398.0 | 296.2 | 109.3 | 81.9  |       |
| Enthalpy    | kcal/kg              | 767.6 | 716.9 | 631.7 | 621.4 |       |
| Flow        | Ton/hr               | 72.0  | 48.0  | 20.2  | 20.2  |       |
| Energy      | Gcal/hr              | 55.3  | 34.4  | 12.8  | 12.6  |       |
| Power       | Kwh                  | 4,012 | 4,494 | 229   |       | 8,735 |

2) 실제설비의 추가위치는 두 곳으로 192°C 추기를 하나 더 두어 deaerator에 공급

Table 5-5 Heat and mass balance of plant N

| Field               |                    | Unit        | Plant N              | Remarks |            |
|---------------------|--------------------|-------------|----------------------|---------|------------|
| Total Generationl   | VWO                | kW          | 9967                 |         |            |
|                     | MGR                | kW          | 8735                 |         |            |
|                     | MGR(90%)           | kW          | 7501                 |         |            |
| TB1                 | generation         | VWO         | kW                   | 4457    |            |
|                     |                    | MGR         |                      | 4012    |            |
|                     |                    | MGR(90%)    |                      | 3566    |            |
|                     | Turbine efficiency |             | %                    | 68%     | ← Supplier |
| Reducer & generator |                    |             | 95%                  |         |            |
| Steam               | In-let             | Pressure    | kg/cm <sup>2</sup> G | 39      |            |
|                     |                    | Temperature | °C                   | 398.0   |            |
|                     |                    | Enthalpy    | kcal/kg              | 767.6   | 3211.5     |
|                     |                    | Entropy     | kcal/kg·K            | 1.619   |            |
|                     | Out-let            | Pressure    | kg/cm <sup>2</sup> G | 15      |            |
|                     |                    | Temperature | °C                   | 296.2   |            |
|                     |                    | Enthalpy    | kcal/kg              | 716.9   | Real       |
|                     | Flow               | VWO         | kg/hr                | 80000   |            |
|                     |                    | MGR         |                      | 72000   | 90%        |
|                     |                    | MGR(90%)    |                      | 64000   | 80%        |
| TB2                 | Generation         | VWO         | kW                   | 5243    |            |
|                     |                    | MGR         |                      | 4494    |            |
|                     |                    | MGR(90%)    |                      | 3745    |            |
| Steam               | In-let             | Pressure    | kg/cm <sup>2</sup> G | 15      |            |
|                     |                    | Temperature | °C                   | 296.2   |            |
|                     |                    | Enthalpy    | kcal/kg              | 716.91  | Real       |
|                     | Out-let            | Pressure    | kg/cm <sup>2</sup> G | 1.4     |            |
|                     |                    | Temperature | °C                   | 109.3   |            |
|                     |                    | Enthalpy    | kcal/kg              | 631.72  | Real       |
|                     | Flow               | VWO         | kg/hr                | 56000   | 24,000     |
| MGR                 |                    |             | 48000                |         |            |
| MGR(90%)            |                    |             | 40000                |         |            |
| TB3                 | Generation         | VWO         | kW                   | 267     |            |
|                     |                    | MGR         |                      | 229     |            |
|                     |                    | MGR(90%)    |                      | 190     |            |
| Steam               | In-let             | Pressure    | kg/cm <sup>2</sup> G | 1.4     |            |
|                     |                    | Temperature | °C                   | 109.3   |            |
|                     |                    | Enthalpy    | kcal/kg              | 631.7   | Real       |
|                     | Out-let            | Pressure    | kg/cm <sup>2</sup> G | -0.49   |            |
|                     |                    | Temperature | °C                   | 81.9    |            |
|                     |                    | Enthalpy    | kcal/kg              | 621.44  | Real       |
|                     | Flow               | VWO         | kg/hr                | 23600   | 42%        |
| MGR                 |                    |             | 20229                |         |            |
| MGR(90%)            |                    |             | 16857                |         |            |

이때의 열교환 조건은 다음 표 5-6과 같다.

**Table 5-6 Heat supply to district heating system in Plant N**

|              |         | DH2   | DH1                | Total | Remarks |
|--------------|---------|-------|--------------------|-------|---------|
| Heat         | Gcal/hr | 17.5  | 12.6               | 30.1  | TB2⇒TB3 |
| Heat(actual) | Gcal/hr | 16.7  | 11.9               | 28.6  | 95%     |
| Water In     | ℃       | 70.7  | 50.0 <sup>3)</sup> |       |         |
| Water Out    | ℃       | 101.8 | 70.7               |       |         |
| Flow         | Ton/hr  | 552.3 |                    |       |         |

### 5.3.2 Reheat 발전효율 분석

Plant I (발전전용)과 Plant S (CHP)를 대상으로 발전효율을 분석하였다. 기본공정은 Amsterdam re-heat cycle을 모델로 설계하였다. 다른 점은 Amsterdam의 분석은 Condensing type을 기본으로 하였지만 지역난방공급을 포함한 열병합으로 설계하였다.

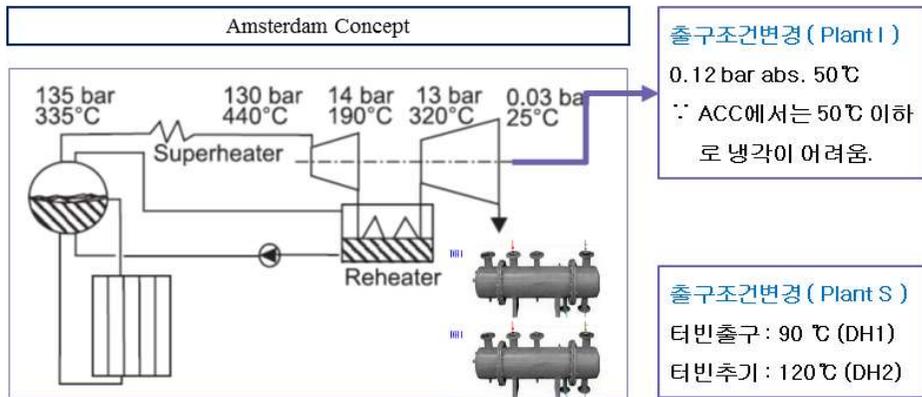


Fig 5-7 Simulation of one stage reheat cycle.

위에서 설정된 조건에 따라서 분석할 경우는 전산모사대상인

3) 하절기 인입온도는 70도로서 에너지 흐름이 다름

분석대상으로 본 시설별 경우의 수는 아래 표 5-7과 같이 정해진다.

**Table 5-7 Case study in Plant I and S**

|         | Case 1 | Case 2 | Case 3 | Case4     |
|---------|--------|--------|--------|-----------|
| Plant I | 현재     | 복수기 변경 | 스팀변경   | reheat 적용 |
| Plant S | 현재     |        | 스팀변경   | reheat 적용 |

먼저 Plant I에 대한 각각의 조건은 아래 표 5-8과 같다.

**Table 5-8 Case study conditions of Plant I**

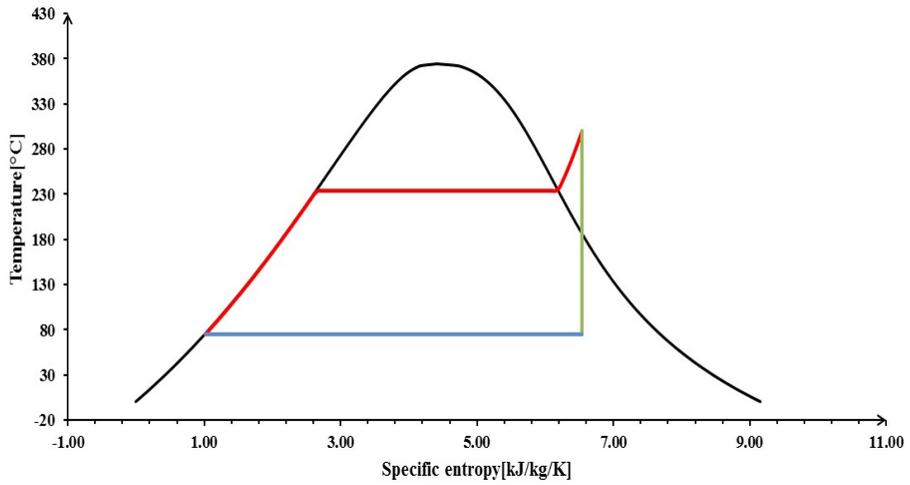
| Field     |             | Case 1  | Case 2 | Case 3         | Case4  |       |
|-----------|-------------|---------|--------|----------------|--------|-------|
|           | Dim.        | 현재      | 복수기 변경 | Super Critical | reheat |       |
| steam in  | Pressure    | bara    | 29.4   | 29             | 129    | 129   |
|           | Temperature | ℃       | 290    | 290            | 440    | 440   |
|           | Enthalpy    | kcal/kg | 710.0  | 710.0          | 755.3  | 755.3 |
| steam out | Pressure    | bara    | 0.38   | 0.12           | 0.12   | 0.12  |
|           | Temperature | ℃       | 74.2   | 49.0           | 49.0   | 49.0  |
|           | Enthalpy    | kcal/kg | 567.04 | 545.2          | 545.2  | 545.2 |
| 스팀 공급량    | ton/hr      | 37.90   | 37.90  | 35.75          | 33.35  |       |

이중에서 Re-heat steam cycle에서의 세부적인 계산식은 아래와 같이 구할 수 있다.

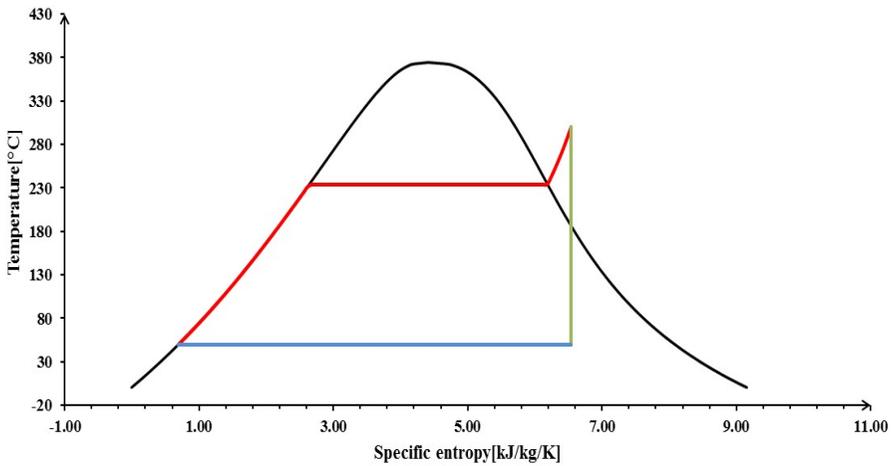
**Table 5-9 Thermodynamic parameters of Re-heat cycle in Plant I**

|                 |         |             | <b>Unit</b>          | <b>I plant</b> |
|-----------------|---------|-------------|----------------------|----------------|
| Generation      | Total   | VVO         | kW                   | 9672           |
|                 |         | generation  | kW                   | 3470           |
| HP Turbine      | In-let  | Pressure    | kg/cm <sup>2</sup> G | 129            |
|                 |         | Temperature | °C                   | 440.0          |
|                 |         | Enthalpy    | kcal/kg              | 755.3          |
|                 | Out-let | Pressure    | kg/cm <sup>2</sup> G | 14             |
|                 |         | Temperature | °C                   | 190            |
|                 |         | Enthalpy    | kcal/kg              | 660.6          |
| Re-heat Process |         |             |                      |                |
|                 |         | Generation  | kW                   | 6,202          |
| LP Turbine      | In-let  | Pressure    | kg/cm <sup>2</sup> G | 13             |
|                 |         | Temperature | °C                   | 320            |
|                 |         | Enthalpy    | kcal/kg              | 737.09         |
|                 | Out-let | Pressure    | kg/cm <sup>2</sup> G | 0.12           |
|                 |         | Temperature | °C                   | 45             |
|                 |         | Enthalpy    | kcal/kg              | 545.17         |

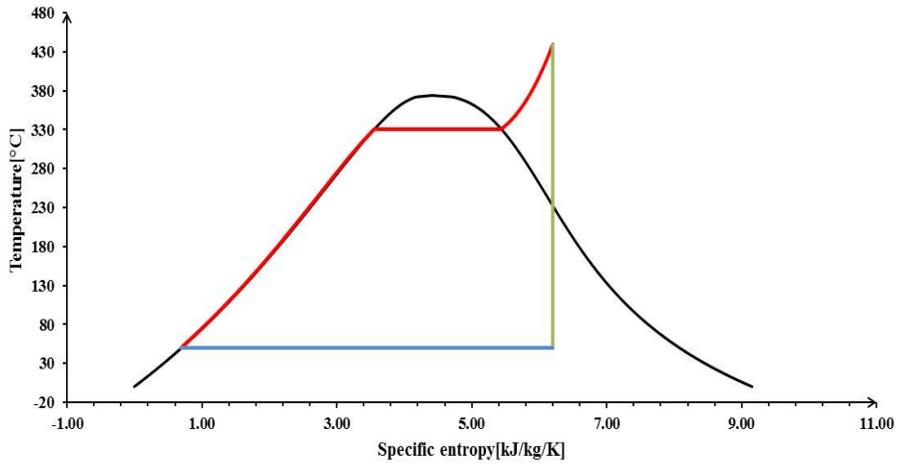
위에서 정한 각각의 경우에 대한 Plant I의 T-S 선도는 아래 그림 5-8, 9, 10, 11과 같다.



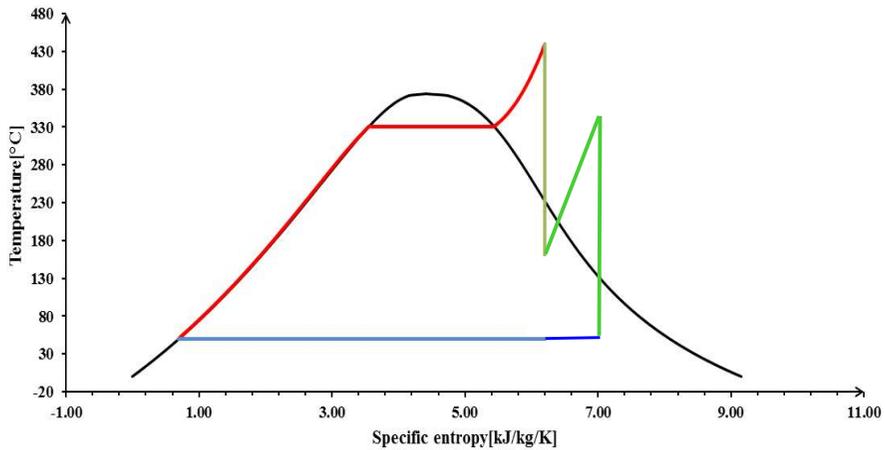
**Fig 5-8 Case 1 Current(29.4bar, 290°C) T-S diagram of Plant I**



**Fig 5-9 Case 2 - Advanced ACC(0.12 bar, 49°C) T-S diagram in Plant I**



**Fig 5-10 Case 3 - Supercritical T-S diagram(129bar, 440°C) in Plant I**



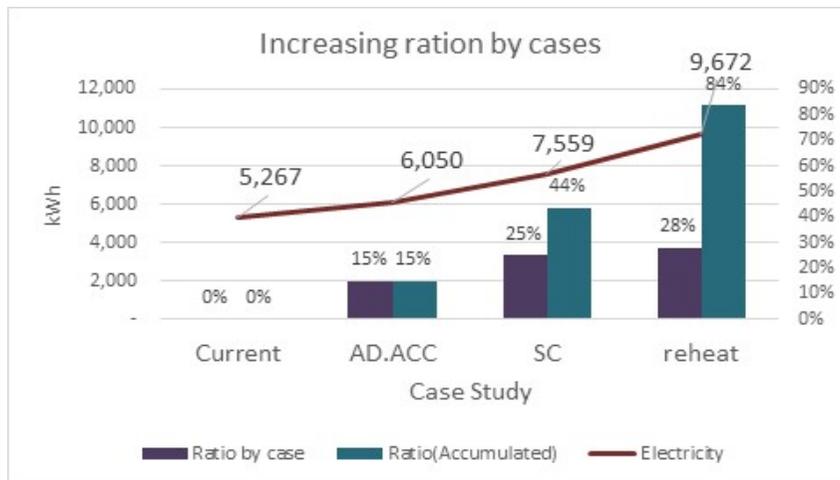
**Fig. 5-11 Case 4 - Supercritical(129bar, 440°C) and Re-heat T-S diagram in Plant I**

위 네 가지 경우로 계산된 발전효율의 변동은 아래 표 5-10과 같다.

**Table 5-10 Power generation at each cases in Plant I**

| Field       |         | Case 1  | Case 2 | Case 3 | Case4   |
|-------------|---------|---------|--------|--------|---------|
|             | Dim.    | Current | AD.ACC | SC     | Re-heat |
| m           | ton/hr  | 37.90   | 37.90  | 35.75  | 33.35   |
| Electricity | kWh     | 5,267   | 6,050  | 7,559  | 9,672   |
| Energy      | Gcal/hr | 4.71    | 5.20   | 6.50   | 8.32    |

위 표에서 각각의 요인별로 증가율을 계산해보면 아래 그림 5-12와 같다. SC (Super-critical steam mode)로서 현재의 발전량보다 44% 정도 증가한다. Case 4는 Case 3의 SC 조건에서 Reheating cycle을 적용하여 현재보다 84%의 발전량이 증가하였다.



**Fig 5-12 Power generation increasing ratio by 4 cases in Plant I**

Plant S에서 각각의 조건에 대한 발전량 계산식은 아래 표 5-11과 같다.

Table 5-11 Case study in S plant (Design Parameter)

| Field                       |          |         | Case 1 | Case 3     | Case4  |
|-----------------------------|----------|---------|--------|------------|--------|
|                             |          | Dim.    | 현재     | S-critical | reheat |
| steam in<br>(HP)            | Pressure | bara    | 13.25  | 129        | 129    |
|                             | Temp.    | ℃       | 195    | 440        | 440    |
|                             | Enthalpy | kcal/kg | 667.8  | 755.8      | 755.3  |
| steam out<br>(HP)           | Pressure | bara    | 1.30   | 1.30       | 14.0   |
|                             | Temp.    | ℃       | 104.0  | 104.0      | 190    |
|                             | Enthalpy | kcal/kg | 602.7  | 606.7      | 660.6  |
| mass                        | Steam    | ton/hr  | 74.5   | 65.8       | 58.7   |
| Re-Heat<br>Steam in<br>(LP) | Pressure | bara    |        |            | 13.0   |
|                             | Temp.    | ℃       |        |            | 320    |
|                             | Enthalpy | kcal/kg |        |            | 737.1  |
| Steam out<br>(LP)           | Pressure | bara    |        |            | 1.07   |
|                             | Temp.    | ℃       |        |            | 104    |
|                             | Enthalpy | kcal/kg |        |            | 607.2  |
| Power                       | Capacity | kWh     | 5,383  | 10,893     | 13,194 |
|                             | Energy   | Gcal/hr | 4.6    | 9.4        | 11.3   |
| Heat<br>exchanger           | Feed in  | ℃       | 50.0   | 50.0       | 50.0   |
|                             | Feed out | ℃       | 101.8  | 101.8      | 101.8  |
|                             | energy   | Gcal/hr | 38.0   | 33.8       | 30.8   |
| mass                        | water    | ton/hr  | 774.7  | 689.1      | 594.3  |

Plant S의 T-S 선도는 아래 그림 5-13, 14, 15와 같다.

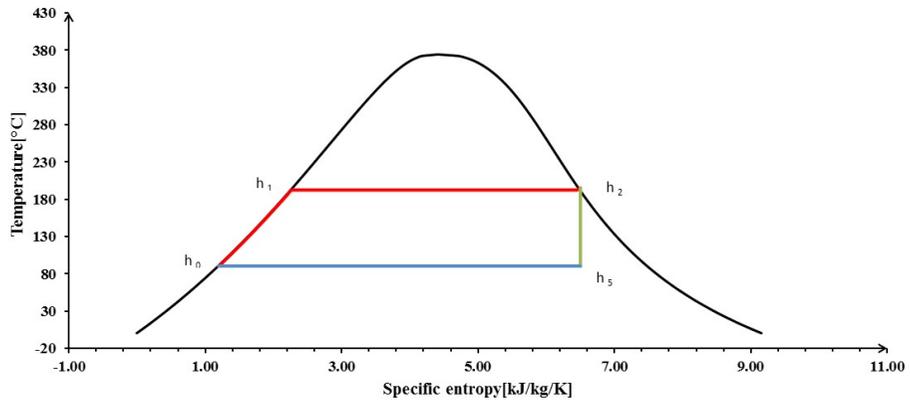


Fig 5-13 Case 1 Current(13.3 bar, 195°C) T-S diagram of Plant S

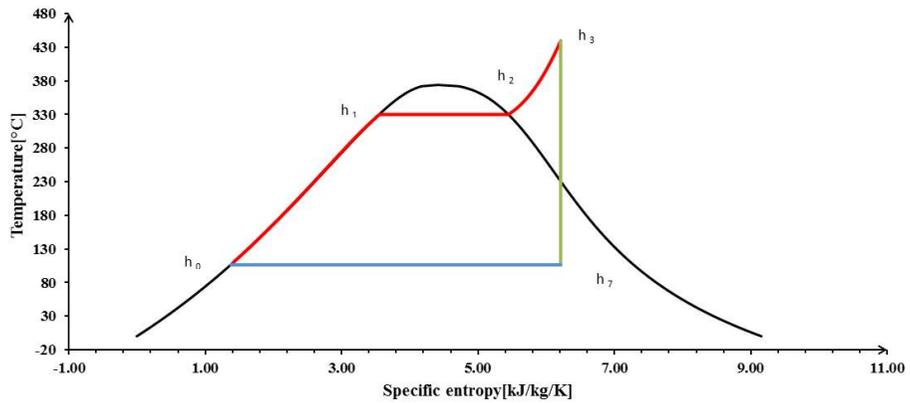


Fig 5-14 Supercritical T-S diagram(129bar, 440°C) in Plant S

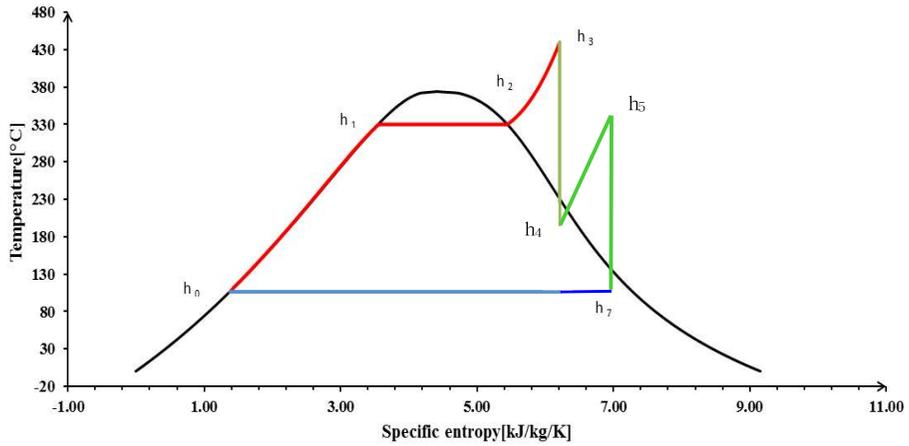


Fig 5-15 Case 4 reheat(13bar 320°C) T-S diagram in Plant S

위의 설계기준에서 실제 가동율 86%를 반영하여 증가율은 나타내면 아래 그림 5-16과 같다.

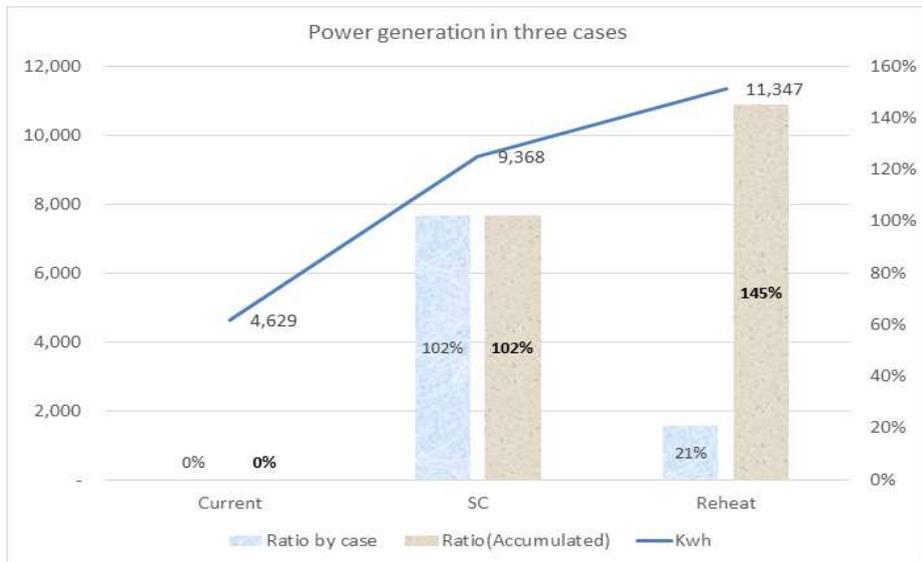


Fig. 5-16 Power generation and increasing ratio of three options in Plant S

위에서 두 개의 시설을 대상으로 발전효율을 증대시키기 위한 여러 조건에서의 발전량 증대를 산정하였다. SC 조건의 스팀생산은 발전효율을 향상시키는데 많은 기여를 할 수 있다. 그러나 소각시설에서는 석탄화력 SC 스팀온도인 585°C까지 구현하기에는 소재의 제약과 규모의 제약이 따른다. 위 두 가지 제약조건을 벗어날 수 있는 방법으로는 Re-heat 공정을 도입하는 것이 가장 효율적으로 보여진다.

### 5.3.3 각각의 요소기술 적용 시 R1과 R2, R2'의 비교

위의 두 시설 (Plant S, Plant I)의 경우의 수에서 구한 발전량과 열교환량을 기준으로 에너지회수효율을 구하여 비교하고자 한다.

Plant I를 보면 아래 표 5-12와 같다.

**Table 5-12 R1, R2, R2' of different steam flow in Plant I**

| Category         | Unit    | Case#1  | Case#2  | Case#3  | Case#4  |
|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Generation       | kWh     | 5,267   | 6,050   | 7,554   | 9,662   |
|                  | Gcal/hr | 4.53    | 5.20    | 6.50    | 8.31    |
|                  | Gcal/yr | 33,154  | 38,086  | 47,554  | 60,824  |
| Site Consumption | kWh     | 1,451   | 1,596   | 1,741   | 1,886   |
|                  | Gcal/hr | 1.25    | 1.37    | 1.50    | 1.62    |
|                  | Gcal/yr | 9,134   | 10,048  | 10,961  | 11,875  |
| Elec. export     | Gcal/hr | 3.28    | 3.83    | 5.00    | 6.69    |
|                  | Gcal/yr | 24,019  | 28,038  | 36,593  | 48,950  |
| Heat supply      | Gcal/hr | 2.85    | 2.85    | 2.85    | 2.85    |
|                  | Gcal/yr | 20,870  | 20,870  | 20,870  | 20,870  |
| Ep 1             | Gcal/yr | 85,408  | 95,857  | 118,098 | 150,226 |
| Ep 2             | Gcal/yr | 114,640 | 129,979 | 162,632 | 209,798 |
| EP 2'            | Gcal/yr | 123,359 | 140,157 | 175,915 | 227,567 |
| R1               |         | 0.38    | 0.43    | 0.52    | 0.67    |
| R2               |         | 0.49    | 0.56    | 0.70    | 0.90    |
| R2'              |         | 0.53    | 0.60    | 0.76    | 0.98    |

Table 5-13 R1/R2 of different steam design at Plant I

| Category | Unit | 현재    | 복수기<br>변경 | Super<br>Critical | reheat |
|----------|------|-------|-----------|-------------------|--------|
| 발전       | kWh  | 5,267 | 6,050     | 7,554             | 9,662  |
| R1       |      | 0.38  | 0.43      | 0.52              | 0.67   |
| R2       |      | 0.53  | 0.60      | 0.76              | 0.98   |

Plant S에서는 아래 표 5-14와 같다.

Table 5-14 R1, R2, R2' of different steam design at Plant S

| Category | Unit | Current | SC    | Re-heat |
|----------|------|---------|-------|---------|
| 발전       | kWh  | 4,729   | 9,570 | 11,592  |
| R1       |      | 0.75    | 0.92  | 0.93    |
| R2       |      | 0.82    | 0.98  | 1.03    |
| R2'      |      | 0.83    | 1.05  | 1.10    |

위 표 13, 14를 통하여 R1, R2, 온실가스저감실적과를 비교하면 아래 표 15와 같다.

Table 5-15 R1', R2, R2' effect by increasing power generation

|   |     | GHG Reduction |          |       | Energy Efficiency |      |      | Ratio/CDM |      |      |
|---|-----|---------------|----------|-------|-------------------|------|------|-----------|------|------|
|   |     | TCO2 /hr      | TCO2 /hr | Ratio | R1                | R2   | R2'  | R1        | R2   | R2'  |
| I | Cu  | 6.38          | 2.13     | 0.33  | 0.38              | 0.49 | 0.53 | 1.14      | 1.48 | 1.59 |
|   | ACC | 6.38          | 2.43     | 0.38  | 0.43              | 0.56 | 0.60 | 1.12      | 1.47 | 1.59 |
|   | SC  | 6.38          | 3.06     | 0.48  | 0.52              | 0.70 | 0.76 | 1.09      | 1.46 | 1.58 |
|   | RH  | 6.38          | 3.97     | 0.62  | 0.67              | 0.90 | 0.98 | 1.07      | 1.45 | 1.58 |
| S | Cu  | 11.68         | 5.81     | 0.50  | 0.75              | 0.82 | 0.83 | 1.51      | 1.65 | 1.67 |
|   | SC  | 11.68         | 7.30     | 0.63  | 0.92              | 0.98 | 1.05 | 1.47      | 1.57 | 1.68 |
|   | RH  | 11.68         | 7.76     | 0.66  | 0.93              | 1.03 | 1.10 | 1.40      | 1.55 | 1.66 |

위의 식에서 Re-heat를 적용한 경우 온실가스 저감효과는 Plant I와 S에서 각각 0.62와 0.66을 보이고 있다. 즉 전기생산을 최대화하는 경우에는 열병합 시설 못지 않은 온실가스 저감효과를 낼 수 있다고 나타났다. 이는 시설을 설치 운영자가 인근에 열을 사용할 수 있는 에너지사업자가 없거나, 에너지 사용자의 연중 사용율이 저조한 경우 전력생산만으로 온실가스저감에 기여할 수 있음을 보여준다. 지역난방으로 열을 공급할 경우, 소각시설은 스팀생산 시 투입된 증발잠열까지 모두 이용할 수 있게 됨으로서 에너지로 보는 회수편익이 훨씬 큼에도 발전을 극대화한 경우와 유사하게 나타난 이유는 전기에너지를 생산하는 사회적 비용(온실가스, 엑서지 효율)이 열을 생산하는 비용에 비하여 현저하게 높은 경우라 볼 수 있으므로 R2의 전기/열 등가지수 3.47은 최소지수라는 점이 간접적으로 증명된다.

## 5.4 결론

소각로에서 에너지/엑서지 효율을 개선하기 위한 요소기술 들 중 스팀고효율화는 가장 주요한 항목이다. 국내시설중 100% 열병합시설로 운영되어 공급된 열이 연중무휴로 사용되는 Plant S와, 주민편익시설의 소량열공급이외에 발전전용으로만 운전되는 Plant I의 경우를 대상으로 스팀고효율화 및 복수기 개선에 따른 효율을 비교하였다.

첫째로 요소별 기술을 보면 Plant I의 복수기 개선 효과는 약 15%에 이르고 있어 매우 중요한 요소로 파악되었다. 만약 발전전용시설이 해안가에 위치하여 해양수를 냉각용으로 사용이 가능하다면 이 효과는 더욱 증가할 것이다.

둘째로 스팀고효율화에 따른 효과 중 Super Critical 스팀조건 (130bar, 440℃)으로 변경할 경우 300℃ 스팀이 기반인 Plant 2에서는 43%, 193℃가 기반인 Plant S에서는 102%가 증가하였다. 이는 비교기준이 다르다는 점 이외에도, 열병합의 경우 지역난방 공급수를 열교환하는 과정에서의 엑서지 손실에 기인한다. Plant S의 Turbine 입출구 역낙차는 89℃에 불과하지만 SC 조건에서 터빈입출구의 열낙차는 335℃에 달해 열낙차만으로도 3.5배의 차이가 있기 때문이다. Re-heat 사이클과 SC 사이클을 비교하면 발전전용에서는 28%가 증가하였지만 열병합 발전에서는 21% 증가로 다르게 나타났다. 이는 열병합 시설에서 열교환과정의 엑서지 손실이 반영된 결과이다.

셋째로 위에서 구해진 전력생산효율향상을 기반으로 온실가스 저감효과와 에너지 회수효율 R1/R2와의 상관관계를 분석하였다. 재열사이클을 적용한 열병합 시설이 에너지회수효율상으로는 가장

높겠지만 발전전용과 열병합시설이 아주 유사한 0.62와 0.66을 보이고 있다. 투입된 폐기물로 인하여 발생된 GHG배출량을 에너지 회수를 통하여 저감시키는 방법은 전기전용만으로도 충분히 그 효과를 거둘 수 있다는 결론이다. 그리고 Plant I 에서의 고유계수 R2/CDM은 1.58, Plant S 에서의 고유계수 R2/CDM은 1.63으로서 이 수치, 또는 R2지수는 시설관리고유계수로 활용될 수 있음을 증명하였다.

R2지수로 표현된 수정에너지회수효율은 발전전용시설이나 열병합 시설 모두에 적용가능하다. 단 열병합의 경우에는 지역난방에 공급하는 것을 전제로 하고 있으므로 발전과 스팀공급의 공정으로 구성된 CHP 시설에서는 4장의 결론과 같은 예외식이 적용되어야 할 것이다.

## 5.5 참고문헌

1. Albina D. Theory and experience on corrosion of waterwall and superheater tubes of Waste-to-Energy facilities. MSc thesis. The Waste-to Energy Research and Technology Council (WTERT), 2005.
2. Balan G, Losurdo M, Spliethoff H. Experimental Study of High-Temperature Chlorine-Induced Corrosion in Dependence of Gas Velocity. American Chemical Society, 2013.
3. Berlo M, Wandschneider J. Waste fired power plant the new standard for recovery of sustainable energy, metals and building materials from urban waste”, 2006.
4. Berlo M., Wandschneider J, 2006, “materials from urban waste”
5. Bøjer M, Jensen P, Frandsen F, Johansen K, Madsen O, Lundtorp K. Alkali/Chloride release during refuse incineration on a grate: Fullscale experimental findings, Fuel Process. Technol. 89 (5) (2008) 528-539.
6. Bonomo A. Waste-to-Energy in high efficiency district heating. The experience in Brescia, Italy, 2012.
7. Chia-Chin Chuang, Deng-Chern Sue, ‘Performance effects of combined cycle power plant with variable condenser pressure and loading, 2004, Energy 30 (2005) 1793 - 1801 <https://doi:10.1016/j.energy.2004.10.003>
8. Excerpts from Plenary Lecture at 2nd Meeting of WTERTCouncil, Tampa, Florida April, 28-30, 2003 WASTE TO ENERGY ADVANCES  
: THE BRESCIA EXPERIENCE, Antonio Bonomo

9. Flemming J. Next Generation of High-Efficient Waste Incinerators, Final Report, FORSKEL-10487, DTU Chemical Engineering, Technical University of Denmark, Denmark, 2010.
10. Hunsinger H. A new technology for high efficient waste-to-energy plants”nd W2W and 6th I-CIPEC conference, Putra World Trade Centre, Kuala Lumpur, Malaysia, 2010.
11. Kamuk B. Best available technologies (BAT): Ramboll, 2010.
12. Madsen O. High Electrical Efficiency by Dividing the Combustion Products”American Waste-to-Energy conference, May 19-20, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2008.
13. Madsen O. Next Generation of Waste Fired Power Plants, NAWTEC 15, Miami, USA, 2007.
14. Manca D, Rovaglio M, Pazzaglia G, Serafini G. Inverse Response Compensation and Control Optimization of Incineration Plants with Energy Production. *Computers and Chemical Engineering* 22 (n. 12), 1998, 1879 - 1896
15. Murer M, Spliethoff H., Van Berlo M., and Gohlke O., 2009, “Efficiency indicators for Energy-from- Waste Plants”  
In: Cossu R, Diaz LF and Stegmann R (eds.) Sardinia 2009 Symposium (pp. 697 - 698), Cagliari, Italy: CISA Publisher.
16. P.Prigent, M.L.Bouchetou, J.PoirieraE. de Bilbao E. Blond, “Corrosion of oxide bonded silicon carbide refractories by molten salts in solid waste-to-energy facilities”, 2012 ceramic international Volume 38, Issue 7, September 2012, Pages 5643-5649 <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.04.007>

17. Ralf K, 2008, “-Efficiency EfW Plants”16th Annual North American Waste-to-Energy Conference, May 19-21, Philadelphia, Pennsylvania, USA.
18. Seguin. Zabalgardi Bilbao plant: integration of a waste to energy unit into a combined cycle with a high energy efficiency. GVCDECHEMA Jahrestagung Karlsruhe, 2004.
19. Shang-hsiu L, Themelis N, Cataldi M. High temperature corrosion in Waste-to-Energy Boilers. ASME international, JITEE 16:1-7, 2006.

## 제6장 결론

연구의 목적으로 선정한 소주제는 다음과 같다.

- 1) 소각시설에서의 배출량 산정 시 불확실성에 대한 고찰과 Tier 3, Tier 4 산정방법을 위한 요소들의 분석과 바이오기반 탄소 함량산정 시 주요 지수인 pMC에 대한 연구 및 지수예측
- 2) 전기/열의 등가지수 정립을 통한 수정 에너지회수효율(R2)의 도출과 에너지효율증대가 온실가스저감과의 상관관계 검증
- 3) 폐자원에너지회수시설에서 전력생산증대를 위한 요소기술 중 재열사이클을 적용할 경우, 전산모사를 통한 효율증대 분석 및 온실가스저감과의 관계검증

자료 및 가동현황은 에너지효율화제도시행이후에 열이용효율화 설비를 설치한 3개 시설을 대상으로 배출량산정, 열회수효율분석 그리고 에너지회수에 의한 저감량산정 등의 방법론을 이용하여 전기/열의 등가지수를 산출하였고, 여기에 전기생산량을 증가시킬 수 있는 공정개선을 전산모사하였다. 전기/열의 지수 계산시에는 열병합으로 운전되고 있는 Plant IC를 추가하였다.

3장에서는 배출량 산정 시 불확실성을 해소하기 위하여 한국 대기중의 pMC 농도를 예측하였다. 대기중 pMC 농도는 기존의 연구결과를 해석하여 함수로 표현하였고 2020년 현재 pMC 값은 1950년과 거의 유사한 101.3으로 나타났다. 이는 ASTM D6866-20에서 2019년과 2020년 기준치를 100으로 정함에 따라 ASTM기준치와 거의 유사함을 보여주었다.

국내 연소가스를 측정하여 얻어진 생물기반탄소분율이 성장조사와 성장별 설정값으로 구해진 생물기반탄소분율보다 높은 조사결과를 보정하기 위하여 최근 발생량이 급증하고 있는

섬유류에 대하여 생물기반탄소분을 설정값 80%에서 60%로 하향 조정하였다. 이로부터 얻어진 배출량은 Plant S 514.4kg.CO<sub>2</sub>/waste.ton, Plant I는 687.1kg.CO<sub>2</sub>/waste.ton, Plant N은 550.6 kg.CO<sub>2</sub>/waste.ton으로 조사되었으며 이를 배출부문의 결과로 이용하였다.

에너지송출로 얻어지는 회수량을 산정하는 방법론은 지자체 온실가스산정지침(GGGI)에서 정하고 있는 에너지 계산법, UNFCCC에서 CDM 등록 시 산정기준인 전력과 열 생산 간접배출계수 계산법, 에너지회수효율제도로시행중인 R1 지수, 그리고 이 연구에서 도출된 수정에너지회수효율 R2, R2'를 비교하였다.

수정에너지회수효율을 도출하는 방법은 두 가지로 계산하였다. 먼저 열병합 4개 시설을 대상으로 열병합구간에서 엑서지손실을 비교하여 전기/열의 등가지수를 구하였다. 지역난방과 연계하여 운영되는 열병합시설의 전기/열의 엑서지 효율지수는 평균 4.7로 나타났고 일부구간에서 최저치 3.47로 나타났다. 이 등가지수를 이용하여  $R2 = EP/(E_w + E_f)$ ,  $EP = 3.817E_{el} + 1.1E_{th}$ 로 정하였다. 두 번째로 전기생산과 열생산에 적용되는 간접배출계수를 이용하여 전기/열의 분율을 계산한 결과는 3.80으로 나타났으며  $R2' = EP/(E_w + E_f)$ ,  $EP = 4.18E_{el} + 1.1 E_{th}$  구해졌다. 온실가스 감축량과 상대적인 연관성을 보면 GGGI 산정식은 온실가스 관계식을 설정하기 어려웠고, R1의 경우는 65%, R2는 96%, R2'는 100% 일치(Synchronize)하였다. 간접배출계수는 국가마다 다르고 신재생에너지의 보급률 및 전원믹스계획에 따라 수시로 조정이 불가피하므로 엑서지효율을 이용한 R2가 적합함을 알 수 있다.

전기생산효율개선방법은 발전전용의 경우 냉각기(Condenser) 효율개선, 고효율스팀(Super critical), 고효율+Reheat사이클로

나누어 효율을 계산하였다. 발전전용의 냉각기 개선효과는 최소 15%로서 전기전용의 경우 매우 중요한 요소로 파악되었다. Super Critical 스팀조건 (130bar, 440°C)으로 변경할 경우 300°C 스팀이 기반인 Plant I에서는 43%, 193°C가 기반인 Plant S에서는 102%가 증가하였다. 재열사이클 적용 시 발전전용인 Plant I에서는 28%가 증가하였지만 열병합 발전인 Plant S에서는 21%가 증가되었다. Plant S 가 CHP로 운영되므로 열교환과정의 엑서지 손실이 발전량증대를 감소시키는 결과이다.

재열사이클을 적용한 경우 CDM방법론에 의한 온실가스 저감비율은 발전전용인 Plant I가 62%, 열병합시설인 Plant S는 0.66으로 나타나 발전전용만으로도 온실가스저감달성율은 거의 유사하였다. R2/CDM은 어떤 보편적으로 1.56 +/- 3%로서 전국적으로 1.56으로 산정할 수 있으며 이 계수는 국내소각시설에서 에너지회수효율과 온실가스저감과 상관계지표로 사용되어질 수 있다.

저감량 및 온실가스 회수율은 공학적으로 계산되어질 수 있지만 배출량 산정에 필요한 pMC 지수는 많은 실험결과를 바탕으로 국가별, 지역별로 정립되어야 하며 수시로 보정되어야 한다. 정상별 FCF분율에 관해서 최근 발생량이 증가한 기저귀류에 대한 추가 상향조정이 이뤄져야 한다.

## 참 고 문 헌

1. 기상청 기후변화포털 종합 기후변화 감시정보
2. 박정구, “일본의 순환형 사회형성을 위한 법제도 시행상황” 국가 환경정보센터 , 2013
3. 박중현 지질자원연구원 서울대자료(excel)
4. 수도권매립지관리공사 수도권매립지통계연감(2014)
5. 수도권매립지관리공사 수도권매립지통계연감(2015)
6. 수도권매립지관리공사 수도권매립지통계연감(2016)
7. 수도권매립지관리공사 수도권매립지통계연감(2017)
8. 수도권매립지관리공사 수도권매립지통계연감(2018)
9. 오승환·강임석·정동희, 폐기물 소각시설의 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>) 연속측정 실효성에 관한 연구, Journal of Climate Change Research 2018, Vol. 9, No. 3, pp. 273~281
10. 이천뉴파워 동부권광역자원화수시설 폐기물성상조사보고서 2019.12
11. 자원순환기본법[시행 2019. 4. 17.] [법률 제15840호, 2018. 10. 16.]
12. 한국산업기술시험원 기술이슈레포트 VOL 19-10 2019.10, KEIT PD ISSUE REPORT
13. 한국에너지공단, ‘Statistics of renewable energy’ 2015
14. 한국환경공단 제 4차 전국폐기물통계조사 2012.12
15. 한국환경공단 제 5차 전국폐기물통계조사 2017.12
16. 한국환경공단, “지자체온실가스 배출량 산정지침(V4.1)” pp. 221-231 20171219,
17. 환경부 고형연료제품품질시험.분석방법[환경부고시 제 2014-135 호, 2014. 08.06.]

18. 환경부 전국생활폐기물소각장 운영현황(2015) 2015.07
19. 환경부 전국생활폐기물소각장 운영현황(2016) 2016.07
20. 환경부 전국생활폐기물소각장 운영현황(2017) 2017.07
21. 환경부 전국생활폐기물소각장 운영현황(2018) 2018.07
22. 환경부 전국생활폐기물소각장 운영현황(2019) 2019.07
23. 환경부 폐기물공정시험기준[환경부고시 제2016-196호, 2016.10.13.]
24. 환경부, ‘Method of energy recovery efficiency of municipal waste incineration facilities’, 2017
25. 환경부, “2030 Greenhouse Gas Reduction Target 37%(BAU) Press Release”. 2015
26. [http://www.climate.go.kr/home/09\\_monitoring/index.php/main](http://www.climate.go.kr/home/09_monitoring/index.php/main)
27. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 2 Energy, Chapter 2 Stationary combustion.
28. Albina D. Theory and experience on corrosion of waterwall and superheater tubes of Waste-to-Energy facilities. MSc thesis. The Waste-to Energy Research and Technology Council (WTERT), 2005.
29. ASTM D6866 Standard Test Methods for Determining the Biobased Content of Solid, Liquid, and Gaseous Samples Using Radiocarbon Analysis1
30. ASTM, DESIGNATION: D6866 - 20 “Standard Test Methods for Determining the Biobased Content of Solid, Liquid, and Gaseous Samples Using Radiocarbon Analysis”. 2018
31. Balan G, Losurdo M, Spliethoff H. Experimental Study of High-Temperature Chlorine-Induced Corrosion in Dependence

- of Gas Velocity. American Chemical Society, 2013.
32. Berlo M, Wandschneider J. Waste fired power plant the new standard for recovery of sustainable energy, metals and building materials from urban waste”, 2006.
  33. Berlo M., Wandschneider J, 2006, “materials from urban waste”
  34. Bøjer M, Jensen P, Frandsen F, Johansen K, Madsen O, Lundtorp K. Alkali/Chloride release during refuse incineration on a grate: Fullscale experimental findings, *Fuel Process. Technol.* 89 (5) (2008) 528–539.
  35. Bonomo A. Waste-to-Energy in high efficiency district heating. The experience in Brescia, Italy, 2012.
  36. CARBON FOOTPRINT CARBON FOOTPRINT, COUNTRY SPECIFIC ELECTRICITY GRID GREENHOUSE GAS EMISSION FACTORS Last Updated June 2019
  37. CEN/TS 16640:2014 Biobased Products – Determination of the biobased carbon content of products using the radiocarbon method
  38. CEWEP Report I (2007)
  39. CEWEP Report II (2010)
  40. CEWEP Report III (2013)
  41. Chandra Mouli Pavuluri, Kimitaka Kawamura, “Seasonal changes in TC and WSOC and their <sup>13</sup>C isotope ratios in Northeast Asian aerosols: land surface - biosphere - atmosphere interactions, *Acta Geochim* (2017) 36(3):355 - 358 DOI 10.1007/s11631-017-0157-3
  42. Chia-Chin Chuang, Deng-Chern Sue, ‘Performance effects of combined cycle power plant with variable condenser pressure

- and loading, 2004, Energy 30 (2005) 1793 - 1801  
<https://doi:10.1016/j.energy.2004.10.003>
43. Chunhui Liao, Ivar S. Ertesvåg, Jianing Zhao, 'Energetic and exergetic efficiencies of coal-fired CHP (combined heat and power) plants used in district heating systems of China', Energy 57 (2013) 671-681
  44. Dincer I, Acar C. A review on clean energy solutions for better sustainability. International journal of energy research 2015 ; 39:585-606
  45. Excerpts from Plenary Lecture at 2nd Meeting of WTERTCouncil, Tampa, Florida April, 28-30, 2003 WASTE TO ENERGY ADVANCES : THE BRESCIA EXPERIENCE, Antonio Bonomo
  46. Federico Viganò 2018, "A practical method to calculate the R1 index of waste-to-energy facilities". Waste Management 73: 287 - 300.
  47. Federico Viganò, A practical method to calculate the R1 index of waste-to-energy facilities, 2014
  48. Flemming J. Next Generation of High-Efficient Waste Incinerators, Final Report, FORSKEL-10487, DTU Chemical Engineering, Technical University of Denmark, Denmark, 2010.
  49. GUIDANCES ON THE INTERPRETATION OF THE R1 ENERGY EFFICIENCY FORMULA FOR INCINERATION FACILITIES DEDICATED TO THE PROCESSING OF MUNICIPAL SOLID WASTE ACCORDING TO ANNEX II OF DIRECTIVE 2008/98/EC ON WASTE
  50. high efficiency recovery(II)", 2018

51. <https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/FXBXLVGFF4DLI5WC1PKFW7KBRW62QB>
52. <https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/SU1HDJCPVB9QB8D54SGUARSQVLTJUG>
53. <https://www.steamtablesonline.com/steam97web.aspx>
54. Hunsinger H. A new technology for high efficient waste-to-energy plants”nd W2W and 6th I-CIPEC conference, Putra World Trade Centre, Kuala Lumpur, Malaysia, 2010.
55. Hyeyoung Lee, Seung Muk Yi, Thomas M. Holsen, Yong-Seok Seo, Eunhwa Choi, 2018 Estimation of CO2 emissions from waste incinerators : Comparison of three methods, Waste management 74(2018) 247-255
56. IPCC 2006 Volume 5 Chapter 3.7 Table 3.5
57. J.H. Park, W. Hong, X. Xu, G. Park, K.S. Sung, Kilho Sung, Jong-geol Lee, T. Nakanishi, Hyo-Seok Park, " The distribution of D14C in Korea from 2010 to 2013".
58. Johann Fellner, Helmut Rechberger, Abundance of 14C in biomass fractions of wastes and solid recovered fuels, Waste Management 29 (2009) 1495 - 1503
59. Kamuk B. Best available technologies (BAT): Ramboll, 2010.
60. Koffi B, Cerutti A.K., Duerr M., Iancu A., Kona A., Janssens- Maenhout G., *Covenant of Mayors for Climate and Energy: Default emission factors for local emission inventories - Version 2017*, EUR 28718 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017, ISBN 978-92-79-71479-5, doi:10.2760/290197, JRC107518.

61. Larsen, A.L., Fugslang, K., Pederson, N.H., Fellner, J., Rechberger, H., Astrup, T., 2013. Biogenic carbon in combustible waste: Waste composition, variability and measurement uncertainty. *Waste Manage. Res.* 31 (10), 56 - 66.
62. Lombardi, L., Carnevale, E.A. "Evaluation of the environmental sustainability of different waste-to-energy plant configurations". *Waste Management* (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.006>
63. Madsen O. High Electrical Efficiency by Dividing the Combustion Products" American Waste-to-Energy conference, May 19-20, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2008.
64. Madsen O. Next Generation of Waste Fired Power Plants, NAWTEC 15, Miami, USA, 2007.
65. Manca D, Rovaglio M, Pazzaglia G, Serafini G. Inverse Response Compensation and Control Optimization of Incineration Plants with Energy Production. *Computers and Chemical Engineering* 22 (n. 12), 1998, 1879 - 1896
66. Mario Grosso , Astrid Motta, Lucia Rigamonti. "Efficiency of energy recovery from waste incineration, in the light of the new Waste Framework Directive", *Waste Management* 30 (2010)
67. Mario Grosso, Astrid Motta, Lucia Rigamonti , "Efficiency of energy recovery from waste incineration, in the light of the new Waste Framework Directive", *Waste management* 30 (2010) 1238-1243
68. Murer M, Spliethoff H., Van Berlo M., and Gohlke O., 2009, "Comparison of Energy Efficiency indicators for

- Energy-from- Waste Plants”, In: Cossu R, Diaz LF and Stegmann R (eds.) Sardinia 2009 Symposium (pp. 697 - 698), Cagliari, Italy: CISA Publisher
69. National Institute of Environmental Research, “A study on GHG mitigation and waste heat utilization from waste - to-energy high efficiency recovery(II)“, 2018
  70. Oliver Gohlke, “Efficiency of energy recovery from municipal solid waste and the resultant effect on the greenhouse gas balance”, *Waste Management & Research* 2009: 27: 894 - 906 DOI: 10.1177/0734242X09349857
  71. Ozansoy, C (2016) “Development of revised R1 thermal energy efficiency guidelines for energy from waste plants”. *International Journal of Energy Research* 40: 1178 - 1192.
  72. P.Prigent, M.L.Bouchetou, J.PoirieraE. de Bilbao E. Blond, “Corrosion of oxide bonded silicon carbide refractories by molten salts in solid waste-to-energy facilities”, 2012 ceramic international Volume 38, Issue 7, September 2012, Pages 5643-5649 <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.04.007>
  73. Pearson, G. W. and Qua, F. 1993 High-precision 14C measurement of Irish oaks to show the natural 14C variations from AD 1840-5000 BC: A correction. In Stuiver, M., Long, A. and Kra, R. S., eds., *Calibration 1993. Radiocarbon* 35(1):105-123.
  74. Pearson, G. W., Becker, B. and Qua, F. 1993 High-precision 14C measurement of German and Irish oaks to show the natural 14C variations from 7890 to 5000 BC. In Stuiver, M., Long, A. and Kra, R. S., eds., *Calibration 1993. Radiocarbon* 35(1): 93-104.
  75. Ralf K, 2008, “-Efficiency EfW Plants”16th Annual North

- American Waste-to-Energy Conference, May 19–21, Philadelphia, Pennsylvania, USA.
76. Results of Specific Data for Energy, R1 Plant Efficiency Factor and NCV of 314 European Waste-to-Energy (WtE) Plants : CEWEP Energy Report III(Status 2007–2010)
  77. Seguin. Zabalgardi Bilbao plant: integration of a waste to energy unit into a combined cycle with a high energy efficiency. GVCDEHEMA Jahrestagung Karlsruhe, 2004.
  78. Seongmin Kang, Seungjin Kim, Jeongwoo Lee, Hyunki Yun, Ki-Hyun Kim & Eui-Chan Jeon (2016) The study on biomass fraction estimate methodology of municipal solid waste incinerator in Korea, Journal of the Air & Waste Management Association, 66:10, 971–977, DOI: 10.1080/10962247.2016.1185479
  79. Shang-hsiu L, Themelis N, Cataldi M. High temperature corrosion in Waste-to-Energy Boilers. ASME international, JITEE 16:1–7, 2006.
  80. Southon, J. R., Rodman, A. O. and True, D. 1995 A comparison of marine and terrestrial radiocarbon ages from northern Chile. In Cook, G. T., Harkness, D. D., Miller, B. F. and Scott, E. M., eds., Proceedings of the 15th International 14C Conference. Radiocarbon 37(2): 389–393.
  81. Spurk, M., Friedrich, M., Hofmann, J., Remmele, S., Frenzel, B., Leuschner, H. H. and Kromer, B. 1998 Revisions and extension of the Hohenheim oak and pine chronologies: New evidence about the timing of the Younger Dryas I Preboreal transition.
  82. T Ploykrathok and S Chanyotha 2017 J. Phys.: Conf. Ser. 860

012014

83. The EIB, “Methodologies for the Assessment of Project GHG Emissions and Emission Variations, version 11”, DEC-2018
84. The EIB, “Methodologies for the Assessment of Project GHG Emissions and Emission Variations, version 11”, DEC-2018
85. Yoo, Jong Ik 주요국 국가온실가스인벤토리보고서의 사업장 정보 활용 동향 Journal of Climate Change Research 2019, Vol. 10, No. 4, pp. 371~380

## Abstract

# A Study on the Greenhouse Gas Emission from Waste-to-Energy Facilities in Korea

Kwon Hyeok Young

Construction and Environmental Engineering

Department

Seoul National University

According to IPCC Guidelines for Greenhouse Gas Inventories Volume 2 (energy) and Volume 5 (waste), waste incineration facilities are both energy production facilities and GHG emission facilities. The methods for calculating the emission are Tier 1, Tier 2, Tier 3. Tier 4, which recognizes the trend factor with Continuous Emission Measuring system(CEMS). Korea is currently in the process of transition from Tier 1 to Tier 3 and is reviewing Tier 4 on a trial basis. Under the IPCC and the Korean Environment Corporation's guidelines for calculating Greenhouse Gas emissions, waste incineration facilities are mixed combustion facilities for biogenic carbon fraction(BCF) and fossil carbon fraction(FCF), with carbon dioxide accounting for most of the emissions, and only carbon dioxide generated from FCF. Methods for calculating biogenic carbon fraction are accepted by the default value of IPCC guideline based on waste characteristics (Tier 1, 2) and the ASTM D6866 test method for measuring radioactive isotopes ( $^{14}\text{C}$ ) among combustion gases. There are uncertainties to check  $^{14}\text{C}$  content

in atmosphere, which is an important factor in measuring biogenic carbon fraction. In Korea, where TMS is installed at the exhaust gas stack for real-time and long-term monitoring, Tier 3 levels can be applied when calculating emissions. This is why the FCF requires a standard for an appropriate atmospheric concentration of  $^{14}\text{C}$ . This paper reviewed the Fossil Carbon Fraction (FCF) for textiles and diapers and obtained the adjusted default factors and the Korean index of percent Modern Carbon (pMC), a key factor in the BCF calculation, among the factors that lead to uncertainty in the emission calculation of emissions.

Most of the greenhouse gas reduction results will be recovered from energy when calculating emission reductions. There are two approaches to calculating energy recovery efficiency: thermodynamic approaches and indirect greenhouse gas emission coefficients. Thermodynamic approaches include the measurement of energy recovery efficiency under the first law, the calculation of exergy efficiency under the second law, the measurement of power loss coefficient, and the measurement of the exergy/energy fraction by combining the first and second laws. Indirect emission factors calculation method calculates the sum of the energy obtained by multiplying each social average emission coefficient for fuel, electricity, heat, etc. As a standard for calculating energy recovery efficiency, the Energy Recovery Efficiency Index (R1) was introduced in Korea from 2018 as well as in EU from 2008. The R1 index is a formula consisting of a fraction of the energy produced divided by the energy injected ( $R1 = E_{\text{product}}/E_{\text{input}}$ ). When obtaining the sum of the energy used by production, an equivalent factor (EF) of 2.6 times the electricity production and 1.1 times the heat production are given EF.

Electricity production contributes more to energy recovery efficiency than heat use.

Among the ways to increase energy recovery effectiveness and reduce greenhouse gas emissions in waste incineration facilities, it is most efficient to increase electricity production. For power generation only, the efficiency of the ACC and how much the use of the reheat cycle in the EU to increase the heat efficiency of incinerators could increase the electricity output.

The objectives of the study set out in this paper are three: the calculation of emissions from incineration facilities in Korea, the formula for calculating the energy recovery efficiency derived from the ratio of electricity/heat, and measures to increase the amount of energy reduction through the efficiency of electricity production. Data was selected from three WtE facilities equipped with energy efficiency formulas were reviewed for efficient use of energy. Firstly, Chapter 3 used the data on the operation status of the national incinerator issued by the Ministry of Environment from 2014 to 2018, and among them, it was verified using the actual data of Plant I. Based on ASTM methodologies, trends for PMC concentrations in the atmosphere were analyzed to estimate trends for applicable PMC concentrations in Korea. The trend curves obtained here were compared with those of the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources(KIGAM), which had the dataes in  $^{14}\text{C}$  research in Korea, to verify logical convergence. In addition, the bio-based carbon ratio of textile oil, which has been increasing its share of domestic waste in Korea, was adjusted to examine the emissions of the three facilities, Plant N, S, I. The basis for adjustment was to use research data from the Korea Environment Corporation, which calculated FCF values by

analyzing the  $^{14}\text{C}$  fraction among domestic household waste emissions. The trend curve obtained above may be used as an indicator of the concentration of  $^{14}\text{C}$  in the atmosphere, a major source of uncertainty in calculating emissions at Korean Waste-to-Energy facilities. Chapter 4 presents an adjusted model of energy recovery efficiency system R1 based on the equivalent coefficient of electricity/heat in the post-generation cogeneration section under cogeneration conditions combined with district heating for three incineration facilities. To compare and analyze this, one of the facilities that were inspected in Korea was added to calculate each energy/exergy efficiency for Plant N, S, and I. The revised energy recovery efficiency (R2) was derived from these calculations, and the revised energy recovery efficiency (R2') obtained by comparing indirect emission coefficients for comparative analysis. The convergence between R1, R2 and indirect emission coefficients used in reducing greenhouse gases was reviewed. Chapter 5 studied a computational simulation to maximize electricity production by increasing energy recovery efficiency based on the emission of Plant S, N, and I obtained in Chapter 3 and 4. According to the current status of heat use in the three facilities above, Plant S and N, which are operated as Combined Heat and Power (CHP), and Plant I, which is a power-only facility, reflect various types of energy use of domestic waste incineration facilities.

The conclusions obtained in each chapter are as follows:

Chapter 3 for calculating emissions in the country and concentrations in flue gas detected pMC at 2020 calculated results derived through the Analysis of Korean atmospheric concentrations of pMC, as 101.3, which is a higher value of 100 in ASTM-2020. ASTM applies the

same correction factor (REF) as pMC. However, there is a risk of directly equating PMCs to REFs. PMC is applied to external air in the combustion process, but in the case of wood products subject to combustion, specially major content of waste paper in MSW, the age of growth is about 15 to 20 years on average. When estimating the PMC value of timber at 110, referring to other data, the correction index REF value to be applied in Korea is calculated at  $102 \pm 0.5$ . Based on this, the CO<sub>2</sub> emissions generated by waste from the three facilities were calculated as 484.5kg.CO<sub>2</sub>/waste.ton for Plant N, 439.2kg.CO<sub>2</sub>/waste.ton for Plant S, and 662kg.CO<sub>2</sub>/waste.ton for Plant I. Comparing the results of measurement by the Korea Environment Corporation, which measured <sup>14</sup>C in combustion gases, with the results by the ASTM methodology, the results showed a higher fossil-based carbon fraction. This seems to be due to fibers that have recently increased occupancy. According to a recent survey of textile sales statistics to determine the bio-based carbon fraction of textiles, the share of Hwaseong fiber among textiles exceeded 50%, indicating that increasing the fossil fiber fraction from 20 percent set by IPCC to 40 percent reflecting the research results was similar to the results of <sup>14</sup>C concentration measurement. Because the Biogenic carbon content of textiles was expressed as a component of the standard emission coefficient for IPCC, it was confirmed that changing the fossil-based carbon fraction for textiles to 40 per cent was not different from the standard for IPCC. The CO<sub>2</sub> emissions obtained from FCF correction of fibres were calculated at Plant N, S, and I at 542.1kg.CO<sub>2</sub>/waste.ton, 482.0kg.CO<sub>2</sub>/waste.ton, 680kg.CO<sub>2</sub>/waste.ton. Adding to this, emissions calculated by the standard emission coefficient of CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O were found to be Plant N 550.6 kg.CO<sub>2</sub>/waste.ton, Plant S 514.4 kg.CO<sub>2</sub>/waste.ton

and Plant I 687.1 kg.CO<sub>2</sub>/waste.ton, and this result was determined as the reference emission for greenhouse gas emissions.

Chapter 4 reviewed the second subtopic. The R1 index adopts an equal index of 2.6 times the electricity energy sent out to the outside boundaries and 1.1 times the heat energy to outside. The ratio of electricity/heat is 2.38, which is an advanced recovery efficiency concept partly citing the Second Law of Thermodynamics. Nevertheless, it is difficult to overcome the fact that large amounts of thermal energy use facilities around them are external environment-dependent indices that are judged to be efficient only when heat is used, and all the focus is on how to set the equivalent coefficients for electricity/heat.

This study surveyed in Korean 4 WtE plants which has combined power and heat utilization by calculating Electricity/heat ratio through exergy/energy efficiency. The equivalent coefficient was calculated and found to be minimum 3.67. The equivalence coefficient by indirect emission coefficient comparison varies depending on how the reference index is determined. Based on the standard emission coefficient of Korean factors to produce electricity and thermal energy production groups, the equivalence coefficient was 3.80, the standard emission coefficient of 3.69 by comparing the ratio of coal-fired electricity generation and LNG heat-producing coefficient of 3.90, and the equivalent coefficient of 3.65 using the latest statistics of the above coal-fired electricity and LNG-heated output, so the equivalence coefficient was 3.80 based on the Korean standard emission coefficient. Consequently, we can derive adjusted energy efficiency formula R2 with equivalent factor of electricity/heat ratio as 3.67 by exergetic approaches, and R2' with 3.80 by indirect emission factors.

The relationship between energy recovery efficiency and greenhouse gas reduction (R1/CDM) of R1 and the correlation between adjusted energy recovery efficiency and greenhouse gas reduction (R2/CDM, R2//CDM) were calculated and this effect was analyzed. R2 is a coefficient that is faithful to the Second Law of Thermal Studies and reflects the national oil emission coefficient. The R2/CDM 1.63 index obtained from this could be an index that identifies the correlation between energy recovery efficiency and climate change reduction at all incineration facilities nationwide, making it an efficient index to manage all incineration facilities. R2 was also found to be a formula proportional to the greenhouse gas reduction effect. The above R2 index applies only to heat sources supplied by district heating after generating electricity among cogeneration facilities.

The proportion of solar, wind and nuclear power generation without greenhouse gas emissions continues to increase in Korea. The standard greenhouse gas coefficient in the power generation sector is expected to gradually decrease as renewable energy, which is valid under current standards but has no emissions, increases. In this case, there is a need to reset the equivalent coefficient of electricity/heat based on the social average efficiency among 3.67 under the Exergy Calculation Method or 3.90, the coefficient of electricity emission for coal-fired power and the coefficient of heat production for LNG.

Chapter 5 calculated the increase in efficiency as a computer simulation assuming steam-high efficiency and re-heating cycle are applied among the component technologies for improving energy/exergy efficiency in incinerators. The target facilities included Plant S, which is operated as 100% cogeneration facility among domestic facilities, and Plant I, which is operated exclusively for power generation, in addition

to the small amount of heat supply to residents' convenience facilities. First, looking at element-specific technology, Plant I's effect of improving the plural was about 15% and was identified as a very important factor for electricity use. Second, if the Super Critical Steam Condition (130 bar, 440°C) is changed to Super Critical Steam Condition (130 bar, 440°C), the 300°C steam based Plant 2 increased by 43% and 193°C based Plant S by 102%. This is the main reason why the current steam production, the comparison target, is different. Plant S's current Turbine inlet and outlet temperatures are 193°C and 104°C respectively, which is only 89°C, but under SC conditions, the thermal drop at the turbine inlet and exit reaches 335°C, which makes a 3.5 times of difference. Comparing the Re-Heat side frames with the SC cycle increased by 28% in Plant I, which is for power generation only, but by 21% in Plant S, which is a cogeneration. Plant S is operated by CHP, so the loss of exergy in the heat exchange process is the result of reducing power generation increase. Third, the correlation between the greenhouse gas reduction effect and energy recovery efficiency R1/R2 was analyzed based on the power production efficiency improvement obtained above. Although the cogeneration facilities applied with the re-heat cycle will be the highest in energy recovery efficiency, they show 0.62 and 0.66, which are very similar for power generation only and cogeneration facilities. It is concluded that the method of reducing GHG emissions caused by injected waste through energy recovery can be sufficiently effective for electricity use alone. In addition, the R2/CDM at Plant I was 1.58, and the R2/CDM at Plant S was 1.63, proving that this figure, or the R2 index, could be used as the facility management own factor.

The energy recovery efficiency in incineration facilities shall be

operated under the greenhouse gas reduction policy. Engineeringly obtained recovery efficiency calculations prove that the R2 index based on thermodynamic law is useful, and its association with the calculation method of indirect emission coefficient is proving this. Nevertheless, PMC and REF indexes, which affect emission calculations, are based on countries. The regional standard index shall be presented and corrected from time to time to time to reflect the concentration of CO<sub>2</sub> in the atmosphere at home and abroad.

Key words : Energy recovery efficiency R1, Greenhouse gas mitigation, Waste-to Energy facilities, pMC, BCF, FCF, re-heat cycle, Adjusted energy efficiency R2.

Student I.D : 2008-30250

## 감사의 글

80년 민주화의 봄에 입학하여 만 40년만에 박사를 마쳤습니다. 앞으로도 살아있는 동안은 더 공부하고 싶네요.

박사과정 12년 동안 많이 참아가면서 가르쳐주신 김 재영 지도교수님에게 우선 감사를 드립니다. 나이 많은 제자 때문에 속상한 일도 많으셨죠?

전체적인 면을 조망하시며 심사위원장까지 맡아주신 남 경필 교수님, 정말 꼼꼼하게 내용을 검토해주신 최 용주교수님 감사드립니다. 열역학의 권위자 기계공학부 김 민수교수님, 기후변화의 석학이시며 앞으로의 과제를 조언해 주신 한림대 김 승도 교수님에게도 감사드립니다. 두 번의 학부와 대학원기간 25년을 지켜보시며 지도해주신 기계공학과의 전설 노승탁 교수님은 은사님이라는 명칭이 어울리는 존경하는 선생님이셨습니다.

44년동안 교편을 잡으시고 돌아가신 아버지(權 五貞) 생각이 먼저 나네요. 80년대라는 시기에 속 썩인 자식 때문에 약간의 한이 남아 있으셨을텐데. 그리고 고3에 돌아가셔서 아들이 서울대 합격하는 것도 보지 못하고 돌아가신 어머니(吳 純英), 두 분의 무덤에 이 논문을 바칩니다.

교직에 종사하셨던 장인어른 (李 鐘奭 선생님), 막내 고명딸 사는 것만 봐도 저절로 웃음이 나고 배가 부르다고 하셨던 장모님(洪 癸漢), 두 분의 무덤에도 올립니다.

나보다 스물 한 살이 많으셔서 “엄마는 낳기만 했고 키우는 건 내가 다 키웠다” 하시는 모란꽃 같은 큰누님(권 혁란), 오래 사시면서 좋은데도 많이 같이 가셔야해요. 중학교와 고등학교까지 동생 뒷바라지해주다가 일찍 작고하신 큰형님(권혁선), 굵은 소나무처럼 선산을 지키시며 열 한살 어린 동생과 친구처럼 지내다 돌아가신 둘째 혁문이 형, 두 분께 절 드립니다. 형님 돌아가신 후에도 저를 거둬주신 큰형수 김수자 여사님, 아직 색시 같은 둘째 형수 김정숙 여사님, 미안하고 고맙습니다. 시골국민학교에 있던 나를 서울로 데려와 밥해 먹여가면서 공부시켜준 혁임이 누나, 내 인생의 향로는 누나 때문에 여기까지 온 겁니다. 육사를 졸업하고서 국가의 동량으로 촉망받으시다 운동권동생 때문에 마음고생도 심하셨고, 불이익도 받으셨던 셋째 혁도형, 죄송하고 감사드립니다. 조카들이 모두 잘 컸는데 그중 MIT에 있는 순형이보다 먼저 박사 받으려고 진짜 고생했어요. 오빠처럼 노동운동의 현장에서 일하던 기억을 뒤로하고, 머나먼 토론토에서 뿌리내리며 살고 있는 동생 은숙이, 이제는 건강을 위해 고독한 싸움을 하고 있는데 꼭 이겨서 오래 같이 보길 바래..

항상 형제처럼 다정하게 지내며 도와주신 창범, 기범, 승범, 주범이형. 처남같다가 보다 그냥 형님들같아 좋습니다.

실험실에서 여러모로 도와준 이 창민, 김 승환 후배님들 고맙고 Cambodia에서 와서 고생하고 있는 Mr. Sarith, I hope to make a good relationship in Cambodia project after your return with doctor degree.

올해로 결혼 34년차 우리색시 이 윤범. 고마워요! 사랑해요!! !!!!!

우리아들 순우 봤지? 언제나 공부해라.

이쁜 며느리 지수, 식구가 되어 좋다.

너희들의 자식들이 “감사의 글”에 할아버지 이름을 쓰게 해주렴.

감사합니다

