



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 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](#)

도시계획학석사 학위논문

자원순환 지표를 이용한
국내 화력발전소 연소재 관리
전과정 진단

2023년 2월

서울대학교 대학원
환경계획학과 환경관리전공
현 승 연

자원순환 지표를 이용한
국내 화력발전소 연소재 관리
전과정 진단

지도교수 이 동 수

이 논문을 도시계획학 석사 학위논문으로 제출함
2023년 1월

서울대학교 대학원
환경계획학과 환경관리전공
현 승 연

현승연의 석사 학위논문을 인준함
2023년 1월

위 원 장 _____ 윤순진 (인)

부위원장 _____ 홍종호 (인)

위 원 _____ 이동수 (인)

국문초록

국내 폐기물 발생량은 연도별로 지속적인 증가 추세에 있으며, 사업장 배출시설계 폐기물의 증가 추세가 가장 높다. 이 중 국내 화력발전소에서 발생한 석탄재는 연간 약 840만 톤에 이르러 연소 잔재물의 대부분을 차지하고 있다. 우리나라는 좁은 국토 면적에 인구밀도가 높은 데다 폐기물 처리 시설에 대한 지역 주민 수용성이 낮아 폐기물 매립지의 추가적인 건설이 어렵기 때문에 더욱 자원의 순환성을 높일 수 있는 석탄재 처리 방안이 필요하다. 최근 적절한 폐기물 관리와 자원순환에 대한 관심이 증가하면서 정부에서도 2018년 「제1차 자원순환기본계획(2018-2027)」을 수립하여 지속가능한 순환경제를 실현하는 것을 비전으로 삼고 있으며, 자원의 순환 정도를 계량화하고 단순화하여 통합관리 지표를 개발하려는 국가 및 기관의 연구도 진행되고 있다.

이 연구에서는 2012년부터 2021년까지의 연도별 국내 공기업 석탄화력발전소(한국남동발전, 한국남부발전, 한국동서발전, 한국서부발전, 한국중부발전)에서 발생한 석탄재를 대상으로 하여 ‘포틀랜드 1종 시멘트로의 재활용’, ‘레미콘 25-210-12로의 재활용’, ‘매립’ 처리 경로에 따른 전과정평가를 진행했고, 석탄재가 처리되는 주요 경로의 물질 흐름을 정량화하였다. 연구의 두 번째 단계에서는 자원의 순환 정도를 평가할 수 있는 ‘기후변화’, ‘산업’, ‘폐기물 순환 관리’, ‘유해성 감축’ 네 영역의 지표를 도입하여, 앞서 얻은 전과정평가 자료를 바탕으로 화력발전소에서 발생하는 석탄재를 처리하는 전체 과정이 얼마나 자원의 순환과 환경에 얼마나 기여할 수 있는지 평가했다. 각 지표값을 최대-최소 방식으로 표준화한 뒤 동일 가중치로 처리하여 최종 지수 값을 얻고, 최근 10개년 시

계열 회귀분석을 통해 석탄재 처리 과정에서 자원순환 정도의 전체적인 추이를 분석하였다. 이후 민감도분석을 실시하여 운송거리와 직매립 감축이 지표값에 미치는 영향을 구하였다.

연구 결과에 따르면, 석탄재(비산재) 1톤 투입을 기준으로 한 전과정평가 결과, ‘레미콘 25-210-12 재활용’, ‘포틀랜드 1종 시멘트로의 재활용’, 매립 경로 순으로 연간 온실가스 배출량, 오존파괴물질 배출량, PM 배출량, 다이옥신/퓨란 배출량이 높게 나타났다. 이 값은 영역 1과 영역 4의 지표값 산정에 반영되었다. 기후변화, 산업, 석탄재 순환 관리, 유해성 감축의 4개 영역에서 10개 지표를 이용해 석탄재 처리 전과정을 평가하였다. 10개년 시계열 회귀 분석 결과 산업 영역(영역 2)와 지표 2-2는 긍정적인 방향의 결과를 보였으며, 나머지 지표와 영역에서는 경향성이 나타나지 않았다. 또한 영역 값을 종합하여 얻은 자원순환 지수의 10개년 회귀분석 결과 최근 10년 간 석탄재 처리 과정에서 자원의 순환은 긍정적인 방향으로 개선이 일어나지 않았음을 확인하였다. 영역과 영역 내 지표 값의 10개년 데이터를 상관 분석한 결과, 영역 2는 어느 영역과도 의미 있는 상관관계를 갖지 않았으며, 영역 1과 영역 4는 아주 높은 양의 상관관계를 나타내었고, 영역 1과 영역 3, 영역 3과 영역 4는 높은 정도의 음의 상관 관계를 나타냈다. 민감도 분석 결과 운송 거리의 감축은 PM 배출량에 큰 민감도를 가지는 것으로 나타났다. 그리고 직매립량의 감축은 석탄재 최종처분량, 석탄재 순환이용률의 지표 값을 높여 매립량을 가능한 한 많이 감축할수록 자원의 순환에 기여할 것이라고 예측할 수 있었다.

본 연구에서는 석탄재 처리 경로에 대해 구체적인 평가를 시행하여 순환 정도를 평가할 수 있었다. 최근 10년 간 자원으로써 석탄재의 기여는 전체적으로 제자리 걸음이었으나, 운송거리와 직매립량 감축 등을 통해 순환에 기여할 수 있음을 확인하였다. 지표

의 분석 결과를 다각도로 고려하여 석탄재 처리 경로에 대한 장단점을 파악하고 개선이 가능한 부분을 구체적으로 찾아 나간다면, 자원의 순환 사회로 한걸음 더 다가갈 것으로 기대한다.

주요어 : 석탄재 관리, 화력발전소 연소재 관리, 전과정평가, 자원순환, 자원순환 지표

학 번 : 2020-21365

목 차

I. 서론	1
1. 연구의 배경 및 목적	1
2. 연구의 범위	3
3. 연구의 방법	4
II. 연구 설계를 위한 선행연구 고찰	6
1. 석탄재 처리의 전과정평가에 관한 선행연구	6
1) 폐기물 부문 전과정평가에 관한 선행연구	6
2) 석탄재 처리 방안에 관한 선행 연구	8
2. 자원순환 지표 선정에 관한 선행연구	10
3. 연구의 차별성	13
III. 석탄재 처리의 전과정평가	15
1. 전과정평가의 목적 및 범위 정의	15
1) 전과정평가의 목적	15
2) 전과정평가의 범위	16
3) 시스템 경계	18
2. 전과정목록분석	18
1) 전과정목록분석 자료 수집	18
2) 운송 단계	18
3) 재활용 단계	20
4) 매립 단계	23

IV. 자원순환 평가지표체계 구성	25
1. 지표의 선정	25
1) 기후변화 영역 평가지표	28
2) 산업 영역 평가지표	30
3) 석탄재 순환 관리 영역 평가지표	32
4) 유해성 감축 영역 평가지표	33
2. 지수화 방식 및 평가 방법	36
V. 연구 결과	39
1. 연도별 석탄재 처리 전과정평가 결과	39
2. 자원순환 지표 분석 결과	43
1) 영역별 시계열 분석	43
2) 소결	56
3. 민감도 분석	60
1) 석탄재 운송 거리에 따른 민감도 분석	60
2) 직매립 감축에 따른 민감도 분석	66
VI. 결론	69
1. 결과 정리 및 의의	69
2. 한계점 및 향후 연구 방향	71
참고문헌	73
부록	80
Abstract	83

표 목 차

[표 1] 주요 기관의 지표 선정 원칙 및 평가 기준	13
[표 2] 10개년 발전소 석탄재 발생량 및 재활용 실적	16
[표 3] 본 연구의 전과정평가 기능과 기능 단위	17
[표 4] 전과정목록분석(LCI) 자료의 출처	18
[표 5] 25톤 트럭의 전과정목록분석 자료	19
[표 6] 석탄재의 평균 운송 거리	20
[표 7] 포틀랜드 1종 시멘트의 전과정목록분석 자료	22
[표 8] 레미콘 25-210-12의 전과정목록분석 자료	23
[표 9] 비산재 매립의 전과정목록분석 자료	24
[표 10] 지표 선정 여부 및 제외 사유	26
[표 11] 자원순환 지표와 영역	27
[표 12] 지구온난화지수(GWP100)	29
[표 13] 오존파괴지수(ODP)	30
[표 14] Toxic Equivalency Factors(TEFs)	29
[표 15] 지표의 특성에 따른 표준화 산식	37
[표 16] 지표 및 영역의 가중치	38
[표 17] 영역별 지수와 최종 자원순환 지수의 산식	38
[표 18] 처리 경로별 석탄재 1톤 투입에 따른 전과정평가 결과	40
[표 19] 포틀랜드1종시멘트로의 재활용 전과정평가 결과 ·	40
[표 20] 레미콘 25-210-12로의 재활용 전과정평가 결과 ...	41
[표 21] 매립 전과정평가 결과	42
[표 22] 연도별 기후변화 영역의 10개년 시계열 분석 결과	44
[표 23] 기후변화 영역의 지표-지표, 지표-영역 간 상관관계	46
[표 24] 연도별 산업 영역의 10개년 시계열 분석 결과	47

[표 25]	산업 영역의 지표-지표, 지표-영역 간 상관관계	48
[표 26]	연도별 석탄재 순환 관리 영역의 10개년 시계열 분석 결과	50
[표 27]	석탄재 순환 관리 영역의 지표-지표, 지표-영역 간 상관관계	52
[표 28]	연도별 유해성감축 역의 10개년 시계열 분석 결과	54
[표 29]	유해성감축영역의 지표-지표, 지표-영역 간 상관관계	56
[표 30]	연도별 자원순환 지수의 10개년 시계열 분석 결과	57
[표 31]	영역 간 상관관계	59
[표 32]	민감도 분석에 이용된 석탄재의 평균 운송 거리	60
[표 33]	기후변화 영역 내 지표값 민감도 분석	63
[표 34]	유해성 감축 영역 내 지표값 민감도 분석	63
[표 35]	운송 거리에 따른 영역 1과 영역 1 내 지표의 표준화 값 변화	64
[표 36]	운송 거리에 따른 영역 4와 영역 4 내 지표의 표준화 값 변화	65
[표 37]	지표 3-2, 3-3의 지표값 민감도 분석	66
[표 38]	직매립 감축에 따른 영역 3과 영역 3 내 지표의 표준화 값 변화	68
[부록 표 1]	석탄화력발전소 및 시멘트 생산 공장과 레미콘 생산 공장의 좌표	79
[부록 표 2]	자원순환 관련 지표 연구 문헌	80

그림 목 차

[그림 1] 연구의 흐름도	5
[그림 2] 전과정평가의 단계	6
[그림 3] 시스템 경계	17
[그림 4] 연도별 기후변화 영역의 지표 값	45
[그림 5] 연도별 산업 영역의 지표 값	47
[그림 6] 연도별 석탄재 순환 관리 영역의 지표 값	51
[그림 7] 연도별 유해성 감축 영역의 지표 값	55
[그림 8] 연도별 자원순환 지수	57
[그림 9] 연도별 자원순환 지수(2012년 기준)	58
[그림 10] 기후변화 영역 내 지표값 민감도 분석	61
[그림 11] 유해성 감축 영역 내 지표값 민감도 분석	62
[그림 12] 석탄재 순환 관리 영역 내 지표값 민감도 분석	67

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

최근 전 세계적으로 적절한 폐기물 관리와 자원순환에 대한 관심이 증가하면서 ‘생산-소비-폐기’의 선형경제에서 순환경제로 패러다임이 전환되고 있다(주문술 외, 2019). 순환경제는 친환경 공정개발, 폐기물을 활용한 재활용품 생산, 신재생 에너지 활용 등을 통해 구현될 수 있다(이소라 외, 2019). 이에 EU, 독일, 일본, OECD 등 주요 국가 및 국제기구에서는 순환경제 및 지속가능목표 실현을 위한 정책을 내놓고 있으며, 자원순환의 이행 정도를 계량화하고 단순화하여 자원의 투입, 순환, 폐기 등의 각 흐름의 특성을 반영한 통합관리 지표를 개발하려는 국가 및 기관의 연구도 진행되고 있다. 한국 정부도 2018년 「제1차 자원순환기본계획(2018-2027)」을 수립하여 ‘생산-소비-관리-재생’에 이르는 순환이용 체계를 구축하고, 궁극적으로는 자원의 선순환으로 지속가능한 순환경제를 실현하는 것을 비전으로 삼고 있다.

그러나 「전국 폐기물 발생 및 처리 현황 (2020년도)」에 따르면 우리나라의 폐기물 발생량은 연도별로 지속적인 증가 추세에 있으며, 그 중 사업장배출시설계 폐기물의 증가 추세가 가장 높다. 사업장배출시설계폐기물 전체 발생량에서는 광재류와 연소잔재물이 차례로 큰 비율을 차지하고 있으며, 이 중 국내 공기업 화력발전소에서 발생한 석탄재는 개별 발전사 제공 자료에 따르면 최근 5개년(2017년~2021년) 평균 연간 약 840만 톤에 이르러 연소잔재물의 대부분을 차지하고 있다.

석탄재는 석탄화력발전소 운영에 따라 피치 못하게 발생하는 부산물이다. 에너지원별 발전량 현황(e-나라지표 2022년 11월 30일)에 따르면 석탄발전량과 비중은 2018년 이후 지속적으로 감소하고 있지만, 2021년 기준 석탄발전량 비중은 34.3%로 국내 발전에서 차지하는 비중이 가장

높다. 「2050 탄소중립 시나리오안」, 「석탄발전 폐지·감축을 위한 정책 방향」, 「제9차 전력수급기본계획(2020-2034)」 등의 국가 정책의 수립을 통해 화력발전 의존을 낮추고 석탄발전의 제한을 시행하고자 하나 현재 석탄발전 폐지는 사업자의 자발적인 의향에 의존할 수밖에 없는 상황이라 그 한계가 있다(산업통상자원부, 2020). 화력발전 의존도가 낮아지지 않는 이상 많은 양의 석탄재가 꾸준히 발생할 것이다. 발생하는 석탄재는 주로 시멘트, 레미콘, 성토재, 골재 등으로 재활용되며 매립 처리되기도 한다. 석탄재의 재활용 비율은 최근 5개년 평균 96.4%로 상당히 높다. 그러나 이미 물질을 태운 이후의 연소재 상태이기 때문에 재활용 경로가 매우 한정적이고, 사회, 경제적인 이유로 재활용되지 못하는 경우가 있으며(서동환 외, 2015), 재활용되더라도 상품성이 떨어져 방치되거나 매립되는 양도 적지 않다(배연환, 2018). 이에 전과정평가 방식을 도입하여 석탄재 발생 이후 처리 경로에 따라 발생하는 물질을 산출하여 석탄재의 처리 과정을 비교·평가해보고자 한다.

석탄재는 비산재(Fly ash)와 바닥재(Bottom ash)로 이루어지며, 비산재는 특히 여러 종류의 유기오염물질, 중금속 등을 함유하고 있어 매립시 이러한 유해물질이 토양과 물로 침출되면 주변 환경에도 악영향을 미칠 수 있다(Jambhulkar et al., 2018). 그러므로 석탄재를 감축하거나 적절하게 관리할 수 있는 방안을 모색하고, 정책이나 기술 개발의 방향성을 설정해야 한다. 특히 우리나라는 국토가 좁고 인구밀도가 높은 데다 폐기물 처리 시설에 대한 지역주민 수용성이 낮아 폐기물 매립지의 추가적인 건설이 어렵다. 그러므로 더욱 자원의 순환성을 높일 수 있는 관리방안이 필요하다(관계부처 합동, 2018). 석탄재처럼 지속적으로 발생량이 많은 폐기물의 경우 환경에 부정적인 영향을 최소화하면서 적절한 관리방안을 마련하는 것이 더욱 중요할 것이다.

순환경제로 나아가면서 자원의 순환을 강조하는 사회 분위기가 형성되고는 있으나, 석탄재 등 특정 종류의 폐기물 관리 과정 자체에 대하여 구체적인 지표를 활용해 평가한 연구는 부재한 상황이다. 폐기물 처리 경로에 대해 여러 측면에서 구체적인 평가를 시행하여 각 처리 경로에

대한 장단점을 파악하고, 자원의 순환과 관련한 계획을 수립할 때 그 결과를 고려해야 할 것이다.

이에 본 연구에서는 지표를 활용한 평가를 개발·도입하여 석탄재 처리 과정에 대해 자원순환 관점에서 종합적으로 분석하고자 한다. 연구의 첫 번째 단계로 석탄재가 처리되는 주요 경로의 전과정목록분석(LCI) 자료를 활용하여 석탄재 처리 전체 과정에서의 물질 흐름을 정량화하고, 두 번째 단계로 자원순환 정도를 측정할 수 있는 직간접적 지표를 도입하여 앞선 단계에서 얻은 자료를 이용해 최근 10년 간 석탄 화력발전 연소재 관리의 전체 과정이 실제로 자원의 순환에 긍정적인 방향으로 진행되고 있는지 평가하고자 한다.

2. 연구의 범위

이 연구에서는 국내의 5개 공기업(한국남동발전, 한국남부발전, 한국동서발전, 한국서부발전, 한국중부발전)의 석탄화력발전소에서 발생한 석탄재를 대상으로 하여 석탄재 처리 경로에 따른 전과정평가를 진행한다. 2019년 기준 공기업의 석탄화력발전소에서 발생한 석탄재량은 약 8557천 톤으로 같은 해 국내 전체 연소잔재물 발생량의 92.8%를 차지하고 있다. 이에 민간 석탄화력발전소의 석탄재 발생량은 공기업 석탄화력발전소 석탄재 발생량의 10% 이하로 추정될 뿐 아니라, 정보공개 청구 서비스 대상이 아니기 때문에 정확한 석탄재 발생량을 알 수 없어 이 연구에서는 공기업 소속 석탄화력발전소에서 발생한 석탄재만을 연구의 범위로 설정하였다.

석탄재 처리 경로에는 ‘포틀랜드 1종 시멘트로의 재활용’, ‘레미콘 25-210-12로의 재활용’, ‘매립’이 포함된다. 연구의 첫 번째 단계에서 연도별 석탄재 발생량을 바탕으로 석탄재가 처리되는 주요 경로의 물질 흐름을 정량화하는 과정을 거친다.

또한 2012년부터 2021년까지를 자원순환 지표를 활용한 석탄재 처리

전과정 진단의 시간적 범위로 설정하였다. 2012년부터 2021년까지의 연도별 석탄재 발생량 자료를 활용함으로써 각 처리 경로에서의 최근 10년간의 물질 흐름 추이를 파악하고자 한다. 이 결과를 바탕으로 연구의 두 번째 단계에서 자원 순환 지표 값을 분석하여 최근 10년 동안 석탄재 처리 전과정이 자원 순환에 얼마나 부합해왔는지 그 추이를 파악할 수 있을 것이다.

3. 연구의 방법

연구는 크게 석탄재 처리 경로의 전과정평가와 자원순환 지표를 이용한 진단의 두 부분으로 나누어 진행하고자 하며, 방법은 다음과 같다.

본 연구의 첫 번째 단계로 석탄 화력발전 연소재의 처리 과정에 대한 전과정평가 자료를 활용해 석탄재 처리 과정에서 소비, 발생하는 물질 흐름을 정량적으로 규명하고자 한다. 전과정 목록(Life Cycle Inventory, LCI) 분석 자료를 이용해 석탄재 처리 과정에서의 물질 흐름을 정량적으로 산출한다. 이후 국내 화력발전소의 석탄재 발생량에 따른 공정별 투입물과 산출물을 연도별로 도출하여 전과정 평가에 이용한다. 석탄재 처리의 여러 경로에서 물질 소비, 유해물질 및 온실기체 발생 등 환경에 영향을 미치는 다양한 요인을 확인하는 단계이다.

석탄재 발생량 자료는 정보공개포털(open.go.kr)의 정보 청구 서비스를 통해 각 발전소에서 개별 제공 받아 수집하였다. 이에 따르면 석탄재 처리의 경로는 크게 매립과 재활용으로 나누며, 석탄재 재활용 경로에는 ‘시멘트’, ‘레미콘(콘크리트)’, ‘기타(성토재 등)’가 있다. 전과정 목록 분석 자료는 한국환경산업기술원의 국가 LCI DB를 우선적으로 이용한다. 그러나 국내 LCI DB만으로 자료가 충분하지 않은 경우 국외 데이터베이스 및 논문에서 제공하는 자료를 사용하였다.

연구의 두 번째 단계에서는 자원 순환과 관련한 지표를 여러 측면에서 선정하여 화력발전소에서 발생하는 석탄재를 처리하는 전체 과정을 자원

순환의 관점에서 평가하고자 한다. 앞선 전과정평가를 통해 수집한 자료를 활용할 수 있는 평가 항목과 지표를 문헌 조사를 통해 선정하며, ‘자원순환성’, ‘환경오염’, ‘기후변화’, ‘친환경산업’ 등 자원의 선순환을 추구하며 이를 모니터링할 수 있는 다양한 영역의 지표를 도입한다(조지혜, 2020). 영역별로 선정된 지표를 일괄하여 석탄재의 처리 전과정을 전반적으로 진단할 수 있는 지수를 개발한다. 지수값 계산에 있어 지표와 각 영역은 동일가중치로 처리하며, 최근 10년의 결과를 시계열 분석하여 전체적인 추이를 분석한다. 이러한 연구의 과정을 요약하여 [그림 1]에 정리하였다.

서론	<ul style="list-style-type: none"> • 연구의 배경 및 목적 • 연구의 범위 및 방법
이론적 배경 및 선행연구 고찰	<ul style="list-style-type: none"> • 전과정평가 이론 • 석탄재 처리의 전과정평가에 관한 선행연구 • 자원순환 지표의 의미 • 자원순환 지표 선정에 관한 선행연구
석탄재 처리 전과정평가	<ul style="list-style-type: none"> • 전과정평가의 목적과 범위 • 전과정 목록 분석
순환경제 이행 진단 평가체계 구성	<ul style="list-style-type: none"> • 자원순환 평가지표 선정 • 지표의 목적 및 산정 방법
연구 결과	<ul style="list-style-type: none"> • 연도별 석탄재 처리 전과정평가 결과 • 자원순환 지표 결과 분석
결론 및 향후 과제	<ul style="list-style-type: none"> • 연구 결론 및 시사점 도출

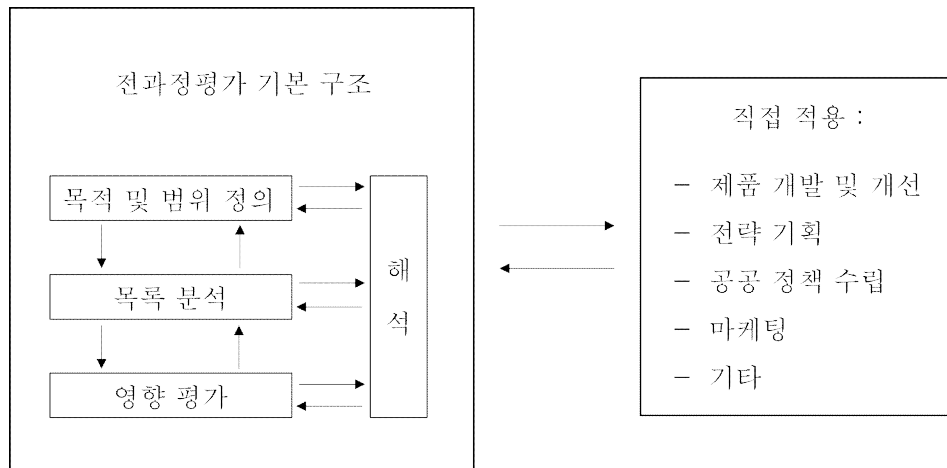
[그림 1] 연구의 흐름도

Ⅱ. 연구 설계를 위한 선행연구 고찰

1. 석탄재 처리의 전과정평가에 관한 선행연구

1) 폐기물 부문 전과정평가에 관한 선행연구

전과정평가는 제품의 생산, 소비, 폐기까지의 전과정에서 환경에 미치는 영향을 파악하는 과정이다(정우정, 2005). 전과정평가는 기본적으로 [그림 2]와 같이 ISO14040 구조를 따르며, 목적 및 범위 정의, 목록분석, 영향평가, 전과정 해석의 활동을 수행한다(국립기술품질원, 1997).



[그림 2] 전과정평가의 단계(출처: 국립기술품질원, 1997)

전과정평가 방법에 따르면 전과정평가의 목적 및 범위는 명확하게 정의되어야 하는데, 이 단계에서 연구 목적은 연구를 수행하는 이유 및 연구 결과가 전달되는 대상자를 제시해야 한다. 그리고 연구 범위에서는 기능 단위, 연구 대상이 되는 제품 시스템, 제품 시스템 경계, 영향의 유형과 사용될 영향평가 방법 및 해석 방법의 유형, 데이터 조건, 가정, 제

한 사항 등이 반드시 고려되어야 한다(국립기술품질원, 1997).

전과정 목록분석 단계는 제품 시스템과 관련된 모든 투입물과 산출물을 정량화하기 위한 데이터 수집 및 계산 과정을 모두 포함하며, 투입물과 산출물은 시스템과 관련된 자원 사용 및 대기, 수질, 토양으로의 배출을 포함할 수 있다(국립기술품질원, 1997). 전과정 영향평가는 목록분석 결과를 통해 잠재적인 환경부하를 평가하는 것을 목적으로 한다. 전과정 결과 해석 단계에서는 전과정 목록분석과 영향평가의 결과를 전과정평가 연구 목적과 범위에 따라 조합하여 해석하고 개선방안을 판단한다(정우정, 2005).

국내에서 이뤄진 폐기물과 관련된 전과정평가는 대부분 폐기물 처리 공정에 대해 전과정평가를 진행한 후 환경 영향 평가 연구나 온실가스과 관련된 연구가 함께 수행되었다. 정우정(2003)은 생활폐기물의 소각 및 매립 공정에 관한 전과정평가를 진행하였고, 박익범 외(2005)는 지정폐기물의 소각공정에 대해 전과정평가를 진행하여 지정폐기물의 소각으로 인한 환경 영향을 종합적으로 평가하였다. 조성훈(2009)은 전과정평가를 이용하여 폐기물의 매립 처리 과정과 폐기물 고형연료화의 환경 영향을 비교하였다. 또한 폐기물 처리에 대한 여러 시나리오를 가정하여 전과정평가를 진행하고 각 시나리오에 따른 환경 영향을 평가·분석한 연구도 있다. 고광훈 외(2007)의 연구에서는 건축물 해체 폐기물 처리 공정을 건물 철거, 폐기물 수송, 위탁처리 및 재활용, 매립 등으로 구분하여 여러 시나리오에 대해 전과정평가를 수행한 후 환경적으로 가장 우수한 건설폐기물 처리법을 제안했다. 양지선(2020)은 전과정평가를 이용하여 서울시 종량제 가정생활폐기물 감량 시나리오에 따른 온실가스 감축 효과를 분석하고 평가하였다. 전과정평가를 통해 얻은 자료가 순환 경제 및 폐기물 관리와 관련한 의사결정에 있어 더 다양한 측면에서 활용될 수 있는데, 환경 영향 평가에 속한 6개 문항으로만 연구 결과를 산출했다는 데에 아쉬움이 있다.

또한 해외에서는 폐기물 관리의 전과정평가가 순환경제로 나아가는 데에 미치는 영향에 대한 연구도 다수 진행되고 있다. Haupt &

Zschokke(2017)의 연구에서는 전과정평가가 순환경제에 어떻게 도움을 주고 있으며, 폐기물과 자원이 환경 영향을 최소화하기 위해서 어떻게 관리 되어야 하는지도 논의되었다. Rigamonti et al. (2017)은 순환경제로 나아가는 데에 요구되는 새로운 형태의 폐기물 관리법의 필요성을 인식하고 전자기기 폐기물 회수의 전과정평가를 진행하였으며, 이후 민감도분석을 통해 물질 회수로부터 얻을 수 있는 이익을 평가하였다. 전과정평가는 단순한 에너지와 관련한 관점을 넘어 자원회수와 환경 영향을 체계적으로 설명하는 데에 도움을 주지만, 민감도 분석과 필수적으로 함께 진행되어야 연구 결과를 지지할 수 있을 것이라고 연구 방식을 제안하였다.

또한 H. Lei et al.(2021)은 건설 환경에서의 전과정평가 방법을 관찰하고 순환경제에서의 전과정평가 적용 시 이점과 한계점을 분석하였고, K.S. Mulya et al.(2022)은 2009년부터 2020년까지 지속가능한 폐기물 관리에 대한 전과정평가 연구를 검토하였다. 두 논문에서는 모두 환경 분야의 전과정평가에 있어 보완해야 할 점으로 시스템 경계가 명확하지 않은 것과 가용 데이터의 정확성에 따라 평가의 결과가 달라지는 것을 짚었다.

2) 석탄재 처리 방안에 관한 선행연구

전 세계적으로 기후 위기에 대응하기 위해 석탄 화력 발전소를 점차 줄이는 추세이지만, 우리나라를 비롯해 여전히 석탄을 이용한 발전에 의존도가 높은 국가가 많다(산업통상자원부, 2020). 이에 화력발전소에서 발생하는 많은 양의 석탄재를 처리하기 위해 기존의 처리 방법에서 벗어나 여러 방면으로의 재활용을 돕는 다양한 기술을 국내외에서 개발하고 있다. 박조범 외(2019)의 연구에서는 바텀애시를 활용한 경량골재를 천연 잔골재와 함께 사용해 콘크리트를 제조하였고, 개발한 콘크리트의 역학적 특성을 다양한 측면에서 분석하였다. 이수정 외(2013)는 서천화력 발전소 매립 석탄재에 함유된 반응성 규소와 알루미늄의 양을 계산하여

다양한 원료의 배합으로 지오폐리머를 제조한 후 그 특성을 평가하였다. 또한 석탄재로부터 제올라이트를 합성하거나(Henmi, 1986), 발전소 비산재를 결합재로 활용한 로내탈황용 석회 흡수제, 혼합석탄재를 재활용한 수평배수재 등을 제조하는 기술의 연구도 진행되었다(서준형 외, 2018; 고용일, 2013). Zhou et al.(2019)는 다양한 콘크리트로의 재활용, 실리카 기반 물질의 원료 제공 등 석탄 저회(Bottom ash)의 지속 가능한 재활용 방법을 여러 가지 제안하였으며, 러시아에서는 석탄재의 화학적 성분을 분석하고 석탄재로부터 알루미늄을 얻는 연구도 진행되었다(Valeev et al., 2022). 국내외에서 여러 연구를 통해 석탄재를 재활용할 수 있는 신기술이 다양하게 개발되고 있으나, 비용 부담 및 정책, 규제 등의 여러 사회·경제적 이유로 유효 이용 확대까지는 쉽게 이어지지 않는다는 한계가 있다.

석탄재 재활용 확대 및 관리 방안을 제안하는 연구도 진행되고 있다. Zacco et al. (2014)의 연구에서는 문헌조사를 통해 플라이애쉬의 성분을 파악하여 플라이애쉬가 가진 독성을 완화시켜 농업 및 건축 재료 등으로 재활용할 수 있는 여러 방안을 제시하였다. 국립환경과학원에서는 화력 발전소 발생 석탄재의 재활용을 활성화하고 관리 방안을 마련하기 위해 석탄재의 유해 물질 함량 특성 및 용출 특성을 파악하였다(전태완 외, 2014). 두 연구는 석탄재의 재활용 증진을 위해 석탄재 특성을 파악하여 기초 자료를 제시했다는 데에 의의가 있다. 서동환과 맹준호(2015)는 국내 석탄회의 배출 현황을 바탕으로 석탄재로 인한 환경 영향을 최소화하고 재활용 확대를 위한 정책적 개선 방향을 제시하였고, 조한나 외(2017)의 연구에서도 마찬가지로 국내 석탄재 재활용 확대를 가로막고 있는 문제점을 분석하고 석탄재 재활용 확대 방안을 제안하였다. 두 연구에서 공통적으로 지적한 점은 ‘철강슬래그 및 석탄회 배출사업자의 재활용 지침’에 따르면 석탄재는 15가지 재활용 용도로 제한되어 있으므로 국가적으로 제도적 지원과 환경성 검증, 홍보체계 구축을 위해 노력해야 한다는 것이다. 박진희 외(2019)의 연구에서는 환경 영향을 바탕으로 호주의 석탄재 재활용 사례를 분석하여 우리나라에서도 적용할 수 있는 석탄재

재활용 방안을 제안하고자 하였다. 호주 석탄재는 독성 미량원소의 함량이 비교적 낮아 재활용 범위가 확대될 수 있는데, 한국은 호주에서 가장 많은 양의 석탄을 수입하기 때문에 호주의 석탄재와 비슷한 특성을 가질 것으로 예상하였다. 이에 석탄재의 안정성을 확보하고 재활용을 확대할 것을 제안하였다. 국내 연구에서 짙은 석탄재 재활용 확대에 대한 문제점은 모두 석탄재의 유효 이용이 아주 한정된 분야에서만 이뤄지고 있으며 재활용 기술이 개발되고 있음에도 불구하고 여러 가지 법적 규제가 재활용의 확대를 가로막고 있다는 것이다. 석탄재 재활용 경로를 확대하기 위해서는 이를 지지할 법적 근거와 인식 전환을 통한 이해관계자의 지원이 필요하다는 것을 확인할 수 있었다.

2. 자원순환 지표 선정에 관한 선행연구

사회 과학 용어로서의 지표(Indicator)란 측정 대상의 상태나 수준을 측정할 수 있는 도구이며, 추상적인 현상을 구체적인 수치로 바꾸어 보여줄 수 있다(통계개발원, 2019). 일반적으로 지표는 복잡한 현상에 대한 정보를 단순화, 계량화하여 정보를 쉽게 전달할 수 있게 한다(강상목, 2000). 특히 지표를 이용해 동일한 측정 대상에 대해 시계열 비교를 함으로써 측정 대상의 상태와 변화 수준을 객관적으로 분석할 수 있다. 일정 기준에 따라 선정한 복수의 지표들을 합산하여 종합지수(Index) 형태로 하나의 점수로 나타낼 수도 있다. 경제성장, 지속가능성, 순환경제 등 복합적이고 다면적인 사회 현상은 하나의 지표로 측정하기 힘들기 때문에 복수의 지표로 이뤄진 지수를 통해 측정 대상의 일반적인 차원을 표현하기도 한다(통계개발원, 2019).

환경지표는 환경 상태 변화를 양적으로 표현하는 데 도움을 주고 해결해야 할 환경문제의 우선순위를 결정할 수 있는 척도이며, 추상적이고 주관적인 환경 상태를 양적으로 단순화하여 그 사회나 국가에 적절한 정보를 제공해 줄 수 있다.

해외에서는 1990년대에 이미 일본, 미국 EPA, EU 등 주요 국가 및 기관에서 환경지표가 개발되기 시작하였으며, Bockstaller & Girardin(2003)과 Gabrielsen & Bosch(2003) 등은 개발된 환경지표를 분석하여 정교성과 타당성을 검증하였다. 이외에도 국내외의 다양한 연구를 통해 건축, 에너지, 생태계 분야 등에서 활용할 수 있는 수많은 환경지표가 개발되었다. 국내에서는 이보다 한 발짝 늦게 환경지표에 대한 연구가 시작되었는데, 유승훈(1998)은 전력산업을 중심으로 환경과 관련된 의사결정을 위한 환경영향지수를 개발하였고, 강상목(2000)은 우리나라의 국가적인 환경 지표체계가 수립되지 않던 시기에 환경지표의 개념을 이론적으로 명확히 제시하고 환경지표 개발체계에 관한 국제적 작성 방법을 분석하여 우리나라의 환경개발 이론적 체계를 설정하고자 하였다. 그러나 기존의 국제기관 및 국가에서 선정한 지표들을 기반으로 우리나라의 기초통계작성 수준에서 자료를 구하기 수월한 지표만을 제안하여 환경문제의 다양한 측면을 고려하지 못했다는 한계점이 있다. 그리고 임만택과 권창룡(2010)은 환경관련법, 지역 수준에서의 환경관리계획 등을 고려하여 신뢰성 있는 지속가능 환경평가지표 개발 방법을 제안하였다. 사회, 환경, 경제, 제도를 아우르는 지속가능발전지수를 개발하여 국가의 지속가능 역량을 가늠하고자 한 것이 최근에 여러 연구에서 이루어지고 있는 순환경제 이행 지표 개발과 맞닿아 있었다.

European Commission의 「Circular Economy Action Plan」에 따르면 순환경제를 ‘제품, 물질 및 자원의 가치를 가능한 한 길게 지속시키고, 폐기물 발생을 최소화하는 경제’로 정의하고 있다(EC, 2015). 또한 우리나라에는 자원순환의 정의를 「자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률」에서 찾아볼 수 있으며, “자원순환이란 환경정책 상의 목적을 달성하기 위하여 필요한 범위 안에서 폐기물의 발생을 억제하고 발생된 폐기물을 적정하게 재활용 또는 처리하는 등 자원의 순환과정을 환경친화적으로 이용·관리하는 것을 말한다.”고 정의되어 있다(임혜숙 외, 2015). 즉, 사회의 각 분야에서 폐기물 발생량 감축, 폐기물 재활용, 폐기물의 친환경적 처리, 기존보다 오염물질 배출을 감축시키는 친환경 공정 개발

등을 통해 자원순환을 높이는 것이 최근 사회에서 추구하는 방향이라 볼 수 있다. 순환경제나 자원순환을 측정하는 하나의 특정 지표는 존재하지 않으며, 여러 분야의 지표가 직·간접적으로 도움을 주고 있다(Eurostat, n.d.). V. Elia et al(2017)은 문헌조사를 통해 세계적으로 널리 사용되는 지표를 기반으로 한 환경평가 방법을 비판적으로 분석하였다. 순환경제에 대한 관심도가 높아지고 있음에도 불구하고, 널리 사용되는 지표들은 대부분 micro level에서 초기 단계를 평가하는 것들이므로 평가를 확장시킬 수 있는 지표를 개발할 것을 제안하였다. A. De Pascale et al.(2020)은 문헌조사를 통해 얻은 61개의 환경 지표를 micro, meso, macro의 공간 수준으로 구분하여, 다양한 수준에서 활용할 지표를 선정할 수 있도록 후속 연구의 발판을 마련하였다.

국내에서 순환경제나 자원순환과 관련하여 지표를 개발한 연구는 해외에 비해 아직 미흡하다. 박상우(2018)의 연구에서는 EU, 일본, OECD 등에서 미리 개발한 평가지표를 비교하였으나 새로운 제안 없이 기존의 지표 파악에 그쳤다는 한계점이 있다. 우리나라에는 국가 단위에서 개발한 지표가 제대로 마련되어 있지 않으며, 한국환경정책평가연구원(KEI)에서 그나마 지표 개발과 관련한 연구가 진행되고 있다. 그 중 조지혜 외(2020)의 연구에서는 국내외 순환경제 모니터링 지표 개발 현황을 파악하여 순환경제 이행 진단을 위한 평가지표를 개발하고자 하였다. ‘폐기’ 단계에 집중되어 있는 국가 자원 순환 계획 내 지표에서 더 나아가 생산 및 소비, 관리, 재생 단계를 모두 아우르는 지표를 선정했다는 데에 큰 의의가 있다. 그러나 지표를 개발한다 해도 관련 통계 데이터가 구축되어 있지 않아 그 결과를 산정하기 어려운 경우가 존재한다는 근본적인 한계가 있다.

자원순환 이행 정도를 진단하기 위해서는 자료의 가용성, 국내 상황 적합성, 적절성 등을 고려하여 타당한 지표를 선정하는 것이 매우 중요하다. 이에 지속가능성 및 자원순환, 순환경제 등을 평가한 대표적인 기관의 지표 선정 원칙 및 평가 기준을 [표 1]에 정리하였다.

[표 1] 주요 기관의 지표 선정 원칙 및 평가 기준

기관	지표 선정 원칙 및 평가 기준
OECD	해석의 용이성, 시간 경과에 따른 추세 반영 가능성, 과학적 관점에서의 생성, 합리적 비용, 자료 가용성, 조건변화 민감성
WHO	구체성, 측정 가능성, 자료 가용성, 적절성, 시의성 (Time-bound)
World Bank	측정 가능성, 실용성, 신뢰성, 적절성, 직접성, 민감성, 관리 유용성, 반응성, 객관성
국민 삶의 질 지표	시계열 분석 가능, 이해 용이성, 정책 반응성, 국내 상황 적합성, 정치적 중립성, 공식 통계, 포괄적, 액면 타당성
국가지속가능발전위원회	적합성, 측정 가능성, 합리적 측정 비용, 적용 가능성, 비교 가능성, 이해 관계자와 최종 사용자 지향성

출처: 김정석 외(2013)

이를 종합하여 본 연구에서는 다음의 조건을 토대로 순환경제 이행 진단 지표를 선정하고자 한다(강상목, 2000; 통계개발원, 2019).

첫째, 대표성과 논리적 타당성을 가져야 한다.

둘째, 측정 가능성과 자료 가용성이 높아야 한다. 신뢰할 수 있는 과정에 따라 지속적인 측정이 가능하고, 정기적으로 업데이트할 수 있어야 한다. 또한 과학적 관점에서 생성된 자료와 및 공식 통계 등 자료에 기초해야 한다.

셋째, 해석과 이해의 용이성을 가져야 한다. 해석이 단순해야 하며 시계열 변화를 보여줄 수 있어야 한다.

3. 연구의 차별성

본 연구와 선행연구와의 차별성은 다음과 같다.

첫 번째, 본 연구에서는 화력발전소 석탄연소재 처리 과정에 초점을

맞추어 전과정평가를 진행하고, 이 결과를 지표 분석의 자료로 활용하였다. 폐기물 전과정평가와 관련한 선행 연구에서는 대부분 전과정평가를 통해 얻은 결과를 환경 영향 평가 연구나 온실가스와 관련된 연구에 이용하였다. 이 연구에서는 더 나아가 전과정 목록분석을 통해 얻은 자료를 자원순환 정도를 평가하는 지표값 산정의 기초 자료로 활용함으로써 그 활용 범위를 넓혔다는 데에 차별점이 있다.

두 번째, 본 연구에서는 석탄재 재활용 처리 과정에 대한 전과정평가를 진행함으로써 경로별 물질 흐름을 파악할 수 있었다. 기존 선행연구에서는 석탄재 재활용 확대의 중요성을 역설하고 정책적인 확대 방안을 제안하고는 있으나, 기존의 재활용 방법에 어떤 장단점이 있는지 구체적으로 명시하거나 과학적인 근거를 제시한 연구는 찾아보기 힘들었다.

세 번째, 이 연구에서는 화력발전소에서 발생한 석탄 연소재라는 특정 폐기물을 선정하여 처리의 전과정을 자원순환의 관점에서 평가하였다. 기존 선행연구에서는 대부분 지표를 제시하는 수준에 그치거나, 또는 국가 단위 통계 자료에 적용되었다. 조지혜(2020)의 연구에서도 개발한 지표를 국가 단위 통계 자료에 적용하였으며, EU 순환경제 지표, OECD 지속가능개발지표 등 대부분의 국가 및 국제 기관에서 개발한 지표 또한 국가 단위로 그 결과를 보여주고 있다. A. De Pascale et al.(2020)의 연구에서처럼 지표를 micro, meso, macro 단위로 구분할 수는 있지만 실제로 더 좁은 수준에서 지표를 적용하여 폐기물 처리 과정에서의 환경 영향을 분석한 연구는 국내외 모두 찾아보기 힘들었다.

마지막으로 본 연구에서는 최근 10개년 자료의 시계열 분석을 통해 전체적인 지표 값의 추이를 분석했을 뿐 아니라, 지표 간, 영역 간 상관관계를 수행하였다. 폐기물 처리 전과정을 자원 순환의 관점에서 평가한 연구 자체가 부재하기도 하지만, 기존 선행연구에서는 지표 값의 결과만을 보여주고 시계열 분석을 수행하지 않았으며, 지표 간 상관관계를 파악한 연구를 제시한 연구는 더욱 드물었다. 이들과 달리 본 연구는 시계열 회귀분석을 통해 10개년 추이를 구체적으로 파악하고, 지표와 지표 간, 영역과 영역 간 상관관계를 파악했다는 점에 차별성이 있다.

Ⅲ. 석탄재 처리의 전과정평가

1. 전과정평가의 목적 및 범위 정의

1) 전과정평가의 목적

이 연구에서는 선행연구에 의해 마련되어 있는 전과정 목록 분석 자료를 이용해 국내 5개 공기업에서 운영하는 석탄화력발전소에서 발생한 석탄재의 처리 공정에서의 물질 흐름을 정량적으로 산출하고자 한다. 정보공개포털(open.go.kr)의 정보 청구 서비스를 통해 발전소에서 개별제공 받은 최근 10개년(2012년~2021년) 석탄재 발생량과 재활용, 매립량을 합산하여 [표 2]에 나타내었다.

이를 각 처리 공정별 전과정목록분석 결과자료에 대입하여, 연간 석탄재 발생량에 따른 공정별 투입물과 배출물의 양을 산출한다. 이후, 전과정목록분석을 통해 수집한 자료를 분석하여 석탄재 처리 공정별로 환경에 미치는 영향을 다양한 측면에서 파악한다. 일반적으로 환경영향평가의 범주로 자원고갈, 지구온난화, 산성화, 부영양화 등을 설정하고 평가하지만, 이 연구에서는 다음 단계에서 자원순환과 관련한 새로운 지표를 도입하여 평가를 하고자 한다.

[표 2] 10개년 발전소 석탄재 발생량 및 재활용 실적 (단위: 천 톤)

연도	발생량	재활용량				매립량*
		콘크리트 (레미콘)	시멘트	기타 (성토재 등)	계	
2012	8,100	4,187	1,234	1,314	6,735	1,625
2013	8,212	5,361	1,580	1,684	8,625	515
2014	8,259	4,548	1,341	1,426	7,315	1,382
2015	8,084	5,250	1,547	1,648	8,445	643
2016	8,936	4,739	1,397	1,487	7,623	1,313
2017	9,220	5,840	1,227	1,906	8,973	947
2018	9,395	5,443	1,191	1,478	8,297	1,680
2019	8,557	5,073	1,793	1,481	8,240	866
2020	7,140	4,327	1,612	1,570	7,312	252
2021	7,729	4,352	1,557	1,539	7,448	587

주: 발전소 자료에서는 매립량을 (발생량-재활용량)으로 산정한다. 그러나 현실적으로 매립량이 음수인 것은 불가능하므로 특정 발전소의 매립량이 음수로 산정되었을 경우 당해 년도의 매립량을 '0'으로 계산하여 합산하였음.

2) 전과정평가의 범위

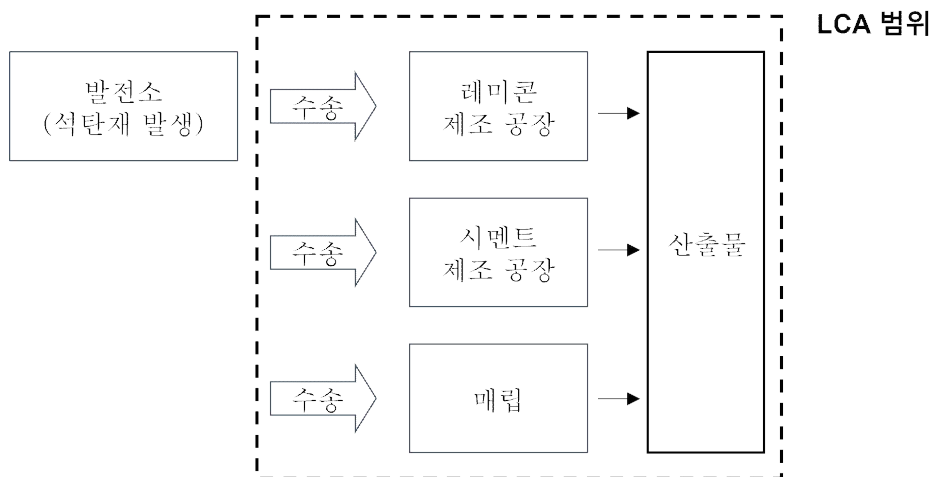
전과정평가의 기능 단위(functional unit)란 제품 시스템의 정량화된 주요 기능으로 연구에서 기준 단위로 사용된다(국립기술품질원, 1997). 이 연구에서의 기능 단위는 연구대상이 되는 폐기물인 석탄재 1톤(1000kg)의 매립, 석탄재 1톤의 레미콘으로의 재활용, 석탄재 1톤의 포틀랜드 1종 시멘트로의 재활용으로 설정한다. 또한 기준 흐름은 화력발전소에서 발생하는 '석탄재 1톤'으로 정한다. 이를 정리하면 [표 3]과 같다.

[표 3] 본 연구의 전과정평가 기능과 기능 단위

구분	전과정 기능과 기능 단위		
기능	석탄재 매립	석탄재의 레미콘으로의 재활용	석탄재의 포틀랜드 1종 시멘트로의 재활용
기능 단위	석탄재 매립 1톤	석탄재의 레미콘으로의 재활용 1톤	석탄재의 포틀랜드 1종 시멘트로의 재활용 1톤

3) 시스템 경계

전과정평가의 지역적 경계는 한국이며, 석탄재 처리 경로로서, 레미콘으로의 재활용 과정, 포틀랜드 1종 시멘트로의 재활용 과정, 매립 과정을 석탄재의 처리 경로로 선정하였다. 이에 평가 대상의 시스템 경계는 [그림 3]과 같이 설정하고자 한다.



[그림 3] 시스템 경계

2. 전과정목록분석

1) 전과정목록분석 자료 수집

전과정목록분석 자료는 한국환경산업기술원의 국가 LCI DB를 우선적으로 이용하고자 하였으나 국내 LCI DB만으로 자료가 충분하지 않아 국외 공공기관 및 논문에서 제공하는 자료를 함께 이용하였다. 자료의 출처를 정리하면 [표 4]와 같다.

[표 4] 전과정목록분석(LCI) 자료의 출처

구분		출처
매립	Fly ash disposal	NETL, 2014 ¹⁾
재활용	레미콘 25-210-12	국가 LCI DB
	포틀랜드 1종 시멘트	Marceau et al., 2006 국가 LCI DB
수송	12톤 이상 카고화물차	국가 LCI DB

2) 운송 단계

석탄재의 수송은 국가 LCI DB의 ‘12톤 이상 카고화물차’ 전과정목록 분석 결과 자료를 활용하며, 화물 수송에 보편적으로 이용되는 대형 트럭인 25톤 카고화물차로 석탄재를 수송한다고 가정한다. 국가 LCI DB의 ‘12톤 이상 카고화물차’ 자료 상에는 카고화물차가 1톤을 싣고 1km를 이동할 때의 투입/산출되는 물질의 종류(투입물 36종, 산출물 151종)와 그

1) NETL Life Cycle Inventory Data - Unit Process: Coal Fly Ash Disposal. U.S. Department of Energy, National Energy, Technology National Energy Technology Laboratory. Last Updated: April 2014 (version 01). www.netl.doe.gov/LCA (<http://www.netl.doe.gov/LCA>)”

양이 명시되어 있다. 본 연구에 직접 이용한 값을 중심으로 석탄재를 25톤 수송하는 1대의 트럭이 1km 거리를 이동할 때의 전과정목록분석 자료를 [표 5]에 정리하였다.

[표 5] 25톤 트럭의 전과정목록분석 자료(1대, 1km 이동 기준)

방향	분류	명칭	값 (kg)
INPUT	Resource	Crude oil	9.29E-03
		Natural gas	4.07E-04
OUTPUT	Air	Carbon dioxide(CO ₂)	2.84E-02
		CFC-11	4.77E-13
		CFC-114	4.89E-13
		CFC-12	1.03E-13
		CFC-13	6.44E-14
		Dioxins(TCDD)	1.19E-15
		Dust	5.73E+00
		Halon-1301	8.89E-10
		HCFC-22	1.12E-13
		Methane	2.70E-05
		Nitrous oxide(N ₂ O)	2.89E-07
	Water	Heavy metals	2.79E-10
		Methyl chloride	8.98E-09
		PAHs	4.37E-08
		Phenol	5.13E-08
		TOC	3.75E-06
	Waste	Hazardous waste	3.65E-04
		Industrial waste	1.72E-03

이 연구에서는 석탄재 운송 거리 산출을 위해서 석탄화력발전소로부터 시멘트 생산 공장과 레미콘 생산 공장까지의 권역별 평균 거리를 계산하였다. 권역은 수도권, 충청권, 강원권, 경상권, 전라권으로 구분하였으며, 권역 내 각 석탄화력발전소로부터 시멘트 생산 공장, 레미콘 생산 공장 간의 좌표 거리를 구하여 산술평균하였다. 운송 평균 거리는 [표 6]

과 같으며, 권역별 화력발전소와 공장의 좌표 주소는 [부록 표 1]에 정리하였다. 시멘트 공장의 위치는 포틀랜드 시멘트를 생산하는 공장을 중심으로 전국에서 18개소를 선정하였고, 레미콘 생산 공장은 한국레미콘공업협회 홈페이지(www.krmcia.or.kr)의 지역별 공장 현황을 참조하여 1,085개 공장 중 지역별로 레미콘 생산 능력이 높은 27개 공장을 석탄재의 운송 목적지로 선정하였다. 또한 석탄재 매립지는 주로 화력발전소에서 직접 마련해두고 있기 때문에 화력발전소로부터 1km 떨어진 위치로 가정하였다.

[표 6] 석탄재의 평균 운송 거리

구분	평균 운송 거리(km)
화력발전소-매립지	1
화력발전소-시멘트 공장	82.05
화력발전소-레미콘 공장	93.01

3) 재활용 단계

각 발전소에서 수집한 석탄재 발생량 자료에 따르면 석탄재 처리의 경로는 크게 매립과 재활용으로 나누며, 재활용 경로에는 ‘시멘트’, ‘레미콘(콘크리트)’, ‘기타(성토재 등)’가 있다. 경량골재, 제올라이트 등 여러 분야에 소량 재활용되기도 하지만 ‘기타(성토재 등)’으로 한 번에 통계처리 되고 있다. 이에 ‘기타(성토재 등)’으로의 재활용 처리 과정은 전과정 평가가 어렵다고 판단되어, 본 연구에서는 ‘시멘트’로의 재활용과 ‘레미콘(콘크리트)’로의 재활용 처리 과정만을 다루었다.

(1) 포틀랜드 1종 시멘트로의 재활용

건설 및 토목 현장에서 일반적으로 사용되는 시멘트는 포틀랜드 1종

시멘트이며, 국내 시멘트 공장에서의 포틀랜드 1종 시멘트 생산 비중과 내수 비중이 90%가 넘는다(최상훈, 1995; 한국시멘트협회, 2021). 그러므로 본 연구에서는 화력발전소 석탄재의 ‘시멘트’로의 재활용을 모두 포틀랜드 1종 시멘트로의 재활용으로 간주하였다.

국가 LCI DB에도 ‘포틀랜드 1종 시멘트’ 자료가 있으나 시멘트 생산 시 Fly ash의 투입량이 상세히 나와 있지 않기 때문에 미국의 Portland Cement Association에서 발행한 보고서²⁾의 포틀랜드 1종 시멘트 생산의 전과정목록분석 자료를 함께 참고하였다. 이를 바탕으로 하여 시멘트의 생산에 투입/산출되는 물질의 양을 석탄재 1톤 투입을 기준으로 산정했으며, 본 연구에 이용한 물질의 값을 중심으로 [표 7]에 정리하였다.

2) Marceau, Medgar L.; Nisbet, Michael A., and VanGeem, Martha G., *Life Cycle Inventory of Portland Cement Manufacture*, SN2095b, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2006, 69 pages.

[표 7] 포틀랜드 1종 시멘트의 전과정목록분석 자료(비산재 1톤 투입 기준)

방향	분류	명칭	값 (kg)
INPUT	Raw material	Fly ash	1.00E+03
OUTPUT	Air	Particulate matter, total	1.81E+02
		Particulate matter, PM-10	2.28E+01
		Particulate matter, PM-2.5	7.01E-03
		CO ₂	7.13E+04
		CH ₄	3.04E+00
		CFC-11	5.86E-06
		CFC-12	2.34E-05
		CFC-13	7.88E-07
		CFC-113	9.74E-07
		CFC-114	4.63E-03
		Dioxins(TCDD)	3.93E-07
		Halon-1211	2.57E-03
		Halon-1301	7.47E-02
		HCFC-21	1.30E-08
	HCFC-22	1.13E-02	
	Methly Bromide	1.66E-15	
	Water	Chlorides	5.22E-01
		Sulfates	3.04E-01
		Ammonia, ammonium	8.60E-04
		Phosphorus	5.00E-06
Zinc		2.00E-05	
Product	포틀랜드 1종 시멘트	7.69E+04	

(2) 레미콘 25-210-12로의 재활용

레미콘은 혼합물질의 성분과 비율에 따라 그 종류가 매우 다양하다. 일반적인 토목 공사에서는 굵은 골재 최대치수 25mm를 사용하는 경우가 많으며, 도로포장과 건물에 모두 널리 사용되는 레미콘에는 25-210-12가 있다(한천구, 1997). 이에 본 연구에서는 화력발전소 석탄재의 ‘레미콘’으로의 재활용을 ‘레미콘 25-210-12’로의 재활용으로 간주하였다. 국가 LCI DB에서 얻은 ‘레미콘 25-210-12’ 생산의 전과정목록분석 자료를 석탄재 1톤 투입을 기준으로 다시 산정한 뒤, 본 연구에 이용한 물질의 값을 중심으로 [표 8]에 정리하였다.

[표 8] 레미콘 25-210-12의 전과정목록분석 자료(비산재 1톤 투입 기준)

방향	분류	명칭	값	단위
INPUT	Raw material	Fly ash	1.00E+03	kg
OUTPUT	Air	Carbon dioxide(CO ₂)	7.93E+03	"
		CFC-11	4.12E-08	"
		CFC-114	4.22E-08	"
		CFC-12	8.85E-09	"
		CFC-13	5.56E-09	"
		Dioxin	1.86E-13	"
		Dioxin(TCDD)	1.09E-10	"
		Dust	1.41E+00	"
		Halon-1301	7.69E-05	"
		HCFC-22	9.67E-09	"
		Methane(CH ₄)	8.50E+00	"
		Nitrous oxide(N ₂ O)	1.37E-02	"
		VOC	1.59E-01	"
	Water	Benzene	4.99E-03	"
		BOD	3.77E-02	"
		COD	2.52E-01	"
		PAH	3.78E-03	"
		Phenol	4.43E-03	"
		TOC	3.24E-01	"
	Product	Remicon (25-210-12)	1.98E+01	m ³

4) 매립 단계

국내 화력발전소에서는 발생하는 석탄재 중 연간 수십만 톤의 석탄재가 매립 처리되고 있다. 이에 「폐기물관리법 시행령」에서는 폐기물을 매립하는 경우 주변환경의 오염을 방지하기 위해 처리 시설을 마련하게끔 폐기물의 처리 기준을 마련해두고 있다(폐기물관리법 시행령, 제 7 조). 석탄 화력발전소에서의 비산재(Fly ash)와 바닥재(Bottom ash) 발생 비율은 약 80%, 20%이다(김둘선 외, 2019). 이에 매립되는 석탄재도 비산재의 비율이 높을 것으로 예상될 뿐 아니라 비산재는 매립 후 물과 접촉 시 중금속, 유기오염물질 등 함유하고 있는 독성 물질을 환경으로 방출시킬 수 있으며 그 농도가 석탄이 방출시키는 것보다 일반적으로 4-10배 높다(Akar et al., 2012; Jambhulkar et al., 2018). 이에 보수적인

평가를 위해 본 연구에서는 매립 단계에 있어 비산재의 매립 전과정목록 분석 자료를 이용하였다. 국가 LCI DB에는 석탄재 매립에 대한 전과정 목록분석 자료가 존재하지 않아 미국의 U.S. Department of Energy에서 운영하는 National Energy Technology Laboratory(NETL)에서 얻은 자료를 이용하였으며, 비산재 1톤 매립 시 투입물과 산출물 중 본 연구에 이용한 물질의 값을 중심으로 [표 9]에 정리하였다.

[표 9] 비산재 매립의 전과정목록분석 자료(비산재 1톤 매립 기준)

방향	분류	명칭	값 (kg)
INPUT	Waste	Fly ash, transported to disposal	1.00E+03
OUTPUT	Air	Fly ash dust(PM 10)	9.60E-02
		Fly ash dust(PM 2.5)	1.80E-02
	Water	Silver	8.90E-04
		Barium	5.07E-03
		Cadmium	4.50E-04
		Chromium	6.75E-03
		Lead	1.22E-03
		Mercury	2.00E-05
		Arsenic	5.70E-04
		Selenium	1.14E-03
		Antimony	5.20E-03
		Beryllium	8.00E-04
		Nickel	1.14E-02
		Thalium	2.00E-04

IV. 자원순환 평가지표체계 구성

1. 지표의 선정

지표의 선정을 위해 ‘자원순환(Resource circulation)’, ‘순환경제(Circular economy)’, ‘폐기물 관리(Waste management)’ 등을 키워드로 하여 국내외의 문헌을 조사해 자원순환과 직·간접적으로 관련된 지표를 수집하였다. 조사한 문헌의 목록은 [부록 표 2]에 정리하였다. 수집한 개별 지표를 ‘기후변화’, ‘산업’, ‘석탄재 순환 관리’, ‘유해성 감축’의 4개 영역으로 분류하였으며, 이 중 앞서 진행한 석탄재 처리 과정의 전과정평가를 통해 수집한 자료나 공개된 자료로는 평가가 어렵거나 이외의 통계 확보가 어려운 지표를 제외하였다. 또한 석탄재 처리 과정을 대상으로 지표값을 산정하기에 수치 평가가 곤란하거나, 의미가 중복된 지표도 제외하여 지표 선정 여부 및 제외 사유를 [표 10]에 정리하였다. 최종적으로 본 연구에서 화력발전소 석탄재 관리 평가에 사용할 지표를 [표 11]과 같이 선정하였다.

[표 10] 지표 선정 여부 및 제외 사유

구분	지표	선정 여부	제외 사유
기후변화	- 온실가스 배출량	○	-
	- 온실가스 배출률(온실가스배출량/DMC)	×	의미 중복
	- 오존 파괴 물질 총량	○	-
산업	- 산업 규모	△	업체 수로 산정
	- 산업 종사자수 비중	×	수치자료 부재
	- GDP 대비 환경보호지출 비중	×	"
	- 정부 R&D 지출 중 녹색 R&D 비중	×	"
	- 관련 특허 출원 건수	○	-
	- 환경산업 매출액 비중	×	수치자료 부재
	- 천명당 ISO14001 인증기업수	×	수치평가 곤란
	- 재활용 및 2차 원료 관련 특허 출원 건수	×	의미 중복
	- 'zero waste' 프로그램 보유 기업 수	×	수치평가 곤란
석탄재 순환관리	- 국내 자원소비량	×	석탄재 한정 곤란
	- GDP단위당 국내 물질소비량	×	"
	- 화석연료 생산성	×	수치평가 곤란
	- 순환이용률(재활용률)	○	-
	- 에너지회수율(에너지화 된 폐기물/가연성 폐기물 발생량)	×	수치평가 곤란
	- 원단위발생량(폐기물발생량/GDP)	×	의미 중복
	- 폐기물 발생량	○	-
	- 폐기물 최종처분량	○	-
	- 최종처분율(최종처분량/폐기물발생량)	×	의미 중복
	- 자원투입 매립 비율	×	"
	- 최종처분시설 잔여 가용용량	×	수치자료 부재
- 잔여물량(연소재, 슬러지, 매립, 등)	×	의미 중복	
유해성 감축	- 1인당 유해폐기물 발생량	×	수치비교 곤란
	- 유해 화학물질 배출률	×	의미 중복
	- PM10 배출집약도	×	의미 중복
	- Particulate matter	○	-
	- 대기오염	×	범위한정 곤란
	- 토양오염	×	범위한정 곤란
	- 산성화	×	수치평가 곤란
	- 대기, 토양, 수질로의 오염물질 배출량 (다이옥신, 퓨란, 중금속, NOx, SOx, 등)	△	산정 가능한 일부만 차용

[표 11] 자원순환 지표와 영역

영역	지표	비고
1. 기후변화	1-1. 온실가스 총배출량	2013 녹색성장지표 작성결과 국가지표체계 (index.go.kr) 국가지속가능발전목표 수립보고서 2019 조지혜 외, 2020 Deus et al., 2020 Manfredi et al., 2013
	1-2. 오존파괴물질	Manfredi et al., 2013
2. 산업	2-1. 자원순환 관련 특허 개수	2013 녹색성장지표 작성결과 EU indicator OECD 2014
	2-2. 석탄재 재활용 관련 기업 비중	국가지표체계 (index.go.kr) 김종호 외, 2016 Smoal et al., 2017
3. 석탄재 순환 관리	3-1. 석탄재 발생량	EU indicator Smoal et al., 2017
	3-2. 석탄재 최종 처분량	조지혜 외, 2020
	3-3. 석탄재 순환이용률(재활용률)	제1차 자원순환기본계획 제5차국가환경종합계획(2020-2040) 이일석 외, 2015 조지혜 외, 2020 Lokesh et al., 2020 EU indicator
4. 유해성 감축	4-1. 미세먼지(PM) 배출량	김종호 외, 2016 Lokesh et al., 2020 Manfredi et al., 2013
	4-2. 다이옥신/퓨란 배출량	Azevedo et al., 2017 Chong et al., 2016 Lokesh et al., 2020 Veleva et al., 2017
	4-3. 중금속 배출량	Chong et al., 2016 Lokesh et al., 2020

1) 기후변화 영역 평가지표

재활용, 매립 등의 폐기물 처리 공정에서 배출하는 물질이 기후변화에 미치는 영향을 파악하는 것은 자원의 생산 및 소비, 관리, 재생 단계의 전체 범주를 모두 아우르는 자원순환 관련 지표가 될 수 있다(조지혜, 2020). 지표를 통해 기후변화에 미치는 영향을 평가함으로써 환경친화적인 석탄재 처리 공정 개발과 기술 혁신을 추구할 수 있다.

(1) 온실가스 총배출량

가. 목적

- 폐기물 처리 과정에서의 온실가스 배출 추이를 파악하여 온실가스 배출 저감에 기여하는 산업 공정 개발을 촉진할 수 있다.

나. 산정 방법

- 7개 종류의 주요 온실가스(이산화탄소, 메탄, 아산화질소, 수소불화탄소, 과불화탄소, 육불화황, 삼불화질소) 배출량을 CO₂ 단위로 환산한 총량이다.

- 이산화탄소 환산량(kg CO₂ eq.)은 각 석탄재 처리 공정에서 배출되는 7개 온실가스 배출량에 지구온난화지수(GWP)를 적용하여 산정한다. IPCC 평가 보고서에서는 GWP20과 GWP100을 제시하고 있는데 국내에서 발행한 「2021 국가 온실가스 인벤토리 보고서」 및 대부분 국가기관의 연구에서 GWP 100을 사용하고 있어 이 연구에서도 이를 적용하였다. 주요 온실가스의 GWP 값은 [표 12]³⁾에 나타내었다.

- 이산화탄소 환산량(kg CO₂ eq.) = $\sum(\text{온실가스 농도} \times \text{GWP})$

3) 출처: IPCC 제6차 평가 보고서(2021)

[표 12] 주요 온실가스의 지구온난화지수(GWP100)

온실가스	지구온난화지수
CO ₂	1
CH ₄	27.9
N ₂ O	273

(2) 오존층 파괴 물질 총량

가. 목적

- 오존층파괴로 인한 태양 복사에너지 증가는 지구의 기온 상승 및 강우량 변화 등의 기후변화를 초래할 수 있으므로(환경보전협회, 1998), 폐기물 처리 공정별 오존 파괴 물질의 배출 추이를 파악하여 효율적인 오존파괴물질 배출 저감을 위해 노력할 수 있다.

나. 산정 방법

- 오존 파괴 지수(Ozone depletion Potential, ODP)는 오존 파괴에 미치는 영향을 기준 물질인 CFC-11(CFCI)에 대해 상대적인 오존층 파괴 능력을 나타낸 것이다(George, 2014).

- 지표의 값은 각 석탄재 처리 공정에서 배출되는 CFCs 등의 오존 파괴 물질량을 구한 뒤 오존파괴지수(ODP)를 적용하여 산정하며, 적용한 ODP의 값은 [표 13]⁴⁾에 정리하였다.

4) 출처: WMO's Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2010.

[표 13] 오존파괴지수(ODP)

온실가스	ODP
CFC-11	1
CFC-12	0.82
CFC-13	1
CFC-113	0.85
CFC-114	0.58
Halon-1211	7.9
Halon-1301	15.9
HCFC-21	0.04
HCFC-22	0.04
Methyl Bromide	0.66
Methyl Chloride	0.11

2) 산업 영역 평가지표

순환경제로 빠르게 나아가기 위해서는 관련된 산업 분야에서 환경친화적인 연구와 기술 혁신이 필요하다. 이에 산업 영역의 평가지표를 선정하여 자원의 순환과 순환경제 이행에 기여하고 있는 특허 및 산업체수를 파악하여 기업의 지속가능 경제 활동을 추적하고, 관련 산업구조 및 현황 변화를 파악하여 정책의 수립에도 활용할 수 있다(OECD, 2014).

(1) 자원순환 관련 특허 개수

가. 목적

- 자원의 순환에 기여한 연구 및 기술의 특허 개수를 파악함으로써 관련 분야의 기술 진보를 평가할 수 있다(EC, 2018a). 이 연구에서는 석탄재 재활용 및 기타 처리 공정과 관련된 국내의 특허 실용 등록 개수를

연도별로 파악하고자 한다.

나. 산정 방법

- 연도별 석탄재 처리 및 재활용 관련 특허 수
- 자원순환 관련 특허의 기준: 폐기물의 재활용 및 재사용, 폐기물 발생 저감, 이차원료 사용 등
- 국내 특허 공고 전문을 참고하여 석탄재의 적절한 처리 및 배출 저감, 배출되는 석탄재의 유해성 감축, 석탄재를 활용한 재활용 기술 등의 내용을 담고 있는 특허의 개수를 구한다.
- 데이터 출처: 키프리스(kportal.kipris.or.kr)

(2) 석탄재 재활용 관련 기업 비중

가. 목적

- 국내 기업 중 폐기물 재활용과 관련된 산업체의 수를 측정함으로써 석탄재 재활용 산업의 규모와 육성 정도를 파악하여 석탄재가 자원으로써 얼마나 순환되고 있는지 가늠할 수 있다. 폐기물 재활용 산업이 성장하는 동안 석탄재 재활용 산업 규모가 변화해 온 정도를 알 수 있다.

나. 산정 방법

- 연도별 폐기물 재활용 산업체 수 중 석탄재 재활용 관련 산업체 수의 비율
- 폐기물 처리 신고 업체 중 대상 업무가 ‘재활용’으로 분류된 업체들의 인허가 등록년도를 기준으로 연도별 재활용 관련 산업체의 수를 산정한다. 수집운반 업체는 포함하지 않으며 압축시설, 사료화시설, 파쇄시설, 절단시설 등의 과정을 수행하는 재활용 산업체를 대상으로 하였다. 그 중 대상폐기물이 ‘석탄재’로 분류된 산업체를 석탄재 재활용 산업체로 보고 산업체 수를 산정한다.
- 데이터 출처: 순환자원정보센터(re.or.kr)

3) 석탄재 순환 관리 영역 평가지표

폐기물 관리는 크게 원천 감량과 직매립 최소화를 목적으로 한다. 국내의 자원재활용법에서도 폐기물의 발생을 억제하고 재활용을 촉진하여 자원을 순환적으로 이용하여 환경 보전에 이바지 할 것을 목적으로 하고 있다(자원재활용법 제1조 제1항). 이에 이 연구의 대상 폐기물인 석탄재 발생량과 석탄재 최종처분량, 석탄재 순환이용률(재활용률)의 추세를 파악하여, 효율적으로 폐기물 원천 감량과 직매립 최소화, 순환이용 증가를 위한 계획과 정책을 수립하는 데 활용할 수 있다.

(1) 석탄재 발생량

가. 목적

- ‘생산-소비-폐기’의 선형경제를 벗어나기 위해서는 자원의 재사용과 재활용을 늘려 생산 및 소비 단계에서 폐기물 발생을 최소화해야 한다. 이에 폐기물 원천 예방과 발생 저감을 목적으로 하여 석탄재 발생량 추이를 측정하고자 한다.

나. 산정 방법

- 연간 석탄재 발생량(단위: 천 톤)
- 데이터 출처: 발전소별 연간 석탄재 발생량

(2) 석탄재 최종 처분량

가. 목적

- 발생한 폐기물 중 직매립과 단순 소각 처리되는 양을 줄여 자원의 재사용·재활용과 폐기물 원천 감량에 기여할 수 있다.

- ‘제1차 자원순환기본계획(2018-2027)’ 등 국가 지표에서 폐기물 발생량 중 최종 처분되는 폐기물량의 비율을 산정하는 경우가 많은데, 최종처분 비율을 감축하는 것도 중요하지만 폐기물 발생량이 많을 경우에

는 최종 처분되는 폐기물의 양이 많아도 그 비율은 적게 측정될 수 있다. 그러므로 최종 처분되는 석탄재의 양을 측정하고자 한다.

나. 산정 방법

- 이 연구에서는 연간 석탄재 매립처분량(단위; 천 톤)으로 최종 처분량을 산정한다.

- 데이터 출처: 발전소별 연간 석탄재 발생량 자료

(3) 석탄재 순환이용률(재활용률)

가. 목적

- 순환이용률 추이 분석을 통해 재활용이 잘 이뤄지지 않는 폐기물을 파악하여 기업에 폐기물 수거 및 선별과 재활용이 쉬운 제품 생산을 권고하고, 폐기물 및 공정 잔재물을 활용한 재생원료 사용 확대에도 기여할 수 있다(관계부처합동, 2018).

나. 산정 방법

- 이 연구에서는 연간 석탄재 발생량 중 재활용량으로 순환이용률을 산정한다.(재활용량/석탄재 발생량 *100, 단위; %)

- 데이터 출처: 발전소별 연간 석탄재 발생량 자료

4) 유해성 감축 영역 평가지표

석탄재는 다이옥신, 중금속 등 독성 물질이 함유되어 있으며(Reash, 2012), 석탄의 종류와 연소 조건에 따라 석탄재가 함유하는 독성 물질은 매우 다양해진다(Lemly 1985; Reash 2004, 2012). 이 중 석탄 연소 과정 및 석탄재 처리 과정에서 발생하여 대기오염에 영향을 미치는 미세먼지(PM)와, 수질과 토양으로 흘러 들어가 토양과 농작물에 잔류하여 생태계에 영향을 미칠 수 있는 중금속, 다이옥신/퓨란계 물질을 대표적인 독

성 물질로 선정하여 그 발생량을 산정하고자 한다.

(1) 미세먼지(PM) 배출량

가. 목적

- 석탄재 처리 공정별 미세먼지 배출량 추이를 분석함으로써 미세먼지 저감을 위한 세부 시행계획을 수립하고 적절한 대책을 마련할 수 있다.

- 폐기물 처리 과정에서 발생하는 미세먼지의 관리를 통해 공장 인근 주민의 건강을 보호하고 대기오염을 예방할 수 있다(환경부 보도자료, 2018).

나. 산정 방법

- 각 석탄재 처리 공정에서 배출되는 미세먼지(PM, PM-10, PM-2.5)의 양을 합산하여 산정한다.

(2) 다이옥신/퓨란 배출량

가. 목적

- 폐기물 처리 과정에서 발생할 수 있는 유해 환경오염물질 중 다이옥신/퓨란 등의 잔류성유기오염물질은 대기 중으로 배출될 경우 토양과 농작물에서까지 검출될 수 있다.

- 석탄재 처리 공정별 다이옥신/퓨란 발생량 추이 분석을 통해 친환경적인 공정 개발을 인식하고, 잔류성유기오염물질 저감 대책 및 공장 인근 주민과 농작물의 피해를 최소화하는 방안을 마련할 수 있다.

나. 산정 방법

- 2,3,7,8-TCDD를 기준값 1로 하여 상대적인 독성값을 나타낸 독성등가지수(Toxic Equivalent Factor, TEF)를 사용하여 독성등가값(Toxic

Equivalent Quantity, TEQ)을 구할 수 있다.

- 각 석탄재 처리 공정에서 배출되는 다이옥신/퓨란계 물질량을 구하고, [표 14]5)의 독성등가지수를 적용하여 석탄재에 포함된 다이옥신/퓨란의 독성등가값을 산정한다.
- 총 독성등가값(TEQ) = $\sum(\text{다이옥신농도} \times \text{TEF})$

[표 14] Toxic Equivalency Factors(TEFs)

분류	TEF	분류	TEF
2,3,7,8-TCDD	1	2,3,4,7,8-PeCDF	0.3
1,2,3,7,8-PeCDD1	1	1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1	1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1	1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.1
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.01	1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.01
1,2,3,4,6,7,8,9-OCDD	0.0003	1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.01
2,3,7,8-TCDF	0.1	1,2,3,4,6,7,8,9-OCDF	0.0003
1,2,3,7,8-PeCDF	0.03		

(3) 중금속 배출량

가. 목적

- 폐기물 처리 과정에서 발생할 수 있는 중금속 성분은 집진장치에 의해 포집되지 않는 미세한 입자에 함유되어 대기를 오염시킬 수 있다. 또한 석탄재의 토양 매립 시 침출수에 의해 용출되어 주변 토양과 지하수 등을 오염시켜 환경에 악영향을 미칠 수 있다(Chang et al., 1981).

5) U.S. EPA 웹페이지

(<https://www.epa.gov/toxics-release-inventory-tri-program/tri-dioxin-and-dioxin-compounds-and-teq-data-files-calendar> 에서 22.09.30 인출)

- 석탄재 처리 공정별 중금속 배출량 추이를 분석하여 공정의 중금속 발생 저감 및 개선을 위한 기초자료로 활용할 수 있다.

나. 산정 방법

- 수은(Hg) 배출량, 카드뮴(Cd)-탈륨(Tl) 배출량, 그 외 중금속 배출의 세 개 세부 지표를 수립하고⁶⁾, 연도별 세부 지표 값을 표준화한 뒤 동일가중치 처리하여 이 지표의 값으로 정한다.

- 지표의 값 = Σ (세부지표 값 × 세부지표가중치)

- 수은은 독성이 아주 강한 금속이며, 적절한 정화 시스템 없이는 수은을 함유한 폐기물과 소각재가 많이 배출될 수 있다. 또한 유해폐기물에 다량 함유되어 있는 카드뮴과 탈륨 또한 독성이 아주 강하며 카드뮴은 특히 토양에 잘 축적될 수 있다. 이에 수은과 카드뮴-탈륨은 다른 중금속과 따로 구분하여 산정하고자 한다. 그 외 안티모니, 철, 크롬, 코발트, 구리, 니켈 등의 중금속은 EU를 포함한 많은 국제 기구에서 하나의 그룹으로 묶어서 그 발생량을 산정한다. 이 중금속들의 함유량은 중금속의 증기압과 공정에서 발생하는 먼지와 효과적으로 분리되는 정도에 따라 달라질 수 있다(EU, 2019).

2. 지수화 방식 및 평가 방법

지표 분석에서 다른 측정 단위를 가진 자료의 수합 시 편의(bias)를 보정하기 위해 자료 값의 표준화(Normalization) 과정은 필수적이며, 값을 표준화하는 방법에는 Z-스코어, 순위화 방식, 최대 최소 방식 등 여러 가지가 있다(Freudenberg, 2003; Jacobs et al., 2004). 본 연구에서는 OECD ‘보다 나은 삶의 지수(Better Life Index; BLI)’에서 이용하는 최

6) 세부 지표는 2019년에 발행한 EU의 「Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration」 내 중금속 발생 데이터 분석 지표를 참고하였음.

대-최소 방식으로 자료의 값을 표준화하였다. 최대-최소 방식으로 정규화된 값은 [0,1] 범위에 있으며, 범위 안의 값 중 최솟값은 0, 최댓값은 1로 변환된다. 이 정규화 방법은 극단적인 값이나 이상값(outlier)은 지표를 왜곡할 수 있다는 단점이 있으나, 양수로만 표현되고 계산이 용이하여 광범위하게 사용된다(OECD, 2008). 본 연구에서 얻은 지표의 값에서는 두드러진 이상값이 나타나지 않았기 때문에 최대-최소 방식을 사용하여 표준화할 수 있었다.

지표의 특성에 따라 자료의 값이 클수록 자원순환 관점에서의 석탄재 관리가 긍정적일 경우 순기능에 의한 산식을, 자료의 값이 작을수록 긍정적일 경우에는 역기능에 의한 산식을 활용하였다([표 15])⁷⁾. 이에 따라 모든 지표의 값은 자원순환 관점에서 석탄재 관리가 부정적인 경우 0, 순환경제 이행에 긍정적인 경우 1에 가깝게 표준화된다. 연구에서 사용한 지표의 기능은 [표 16]에 나타내었다.

[표 15] 지표의 특성에 따른 표준화 산식

구분	순기능	역기능
산식	$Z_i = \frac{X_i - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)}$	$Z_i = \frac{\max(X_i) - X_i}{\max(X_i) - \min(X_i)}$
설명	i: 지표, max(Xi): 해당 지표 중 최댓값, min(Xi): 해당 지표 중 최솟값	

최종적으로 자원순환 지수의 결과를 얻기 위해서 각 영역이 동일한 수준의 중요도를 나타낼 수 있도록 동일가중치(Equal weights) 방식을 활용하였다. 「자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률」에 따르면 자원순환은 폐기물의 발생의 억제, 폐기물의 적정한 재활용 또는 처리, 자원의 순환과정을 환경친화적으로 관리하는 것을 모두 포함한다(임혜숙 외, 2015). 이에 따라 각 영역이 모두 중요하다고 보아 동일가중치를 설정하

7) OECD Better Life Index 웹페이지

(<https://www.oecdbetterlifeindex.org/about/better-life-initiative/#question15>에서 2022.09 28. 인출)

였으며, 각 영역을 구성하는 지표 또한 동일한 가중치를 가진다. 각 지표의 최종 가중치는 영역가중치와 지표가중치의 곱으로 나타낼 수 있다(정해식 외, 2018). [표 15]에 이 연구에서 활용된 각 지표 및 영역의 가중치를 나타내었다.

[표 16] 지표 및 영역의 가중치

영역	가중치	지표			최종 가중치
			기능	가중치	
1. 기후변화	1/4	1-1. 온실가스 총배출량	(-)	1/2	1/8
		1-2. 오존파괴물질	(-)	1/2	1/8
2. 산업	1/4	2-1. 자원순환 기여 특허 개수	(+)	1/2	1/8
		2-2. 석탄재 재활용 관련 기업 비중	(+)	1/2	1/8
3. 석탄재 순환 관리	1/4	3-1. 석탄재 발생량	(-)	1/3	1/12
		3-2. 석탄재 최종처분량	(-)	1/3	1/12
		3-3. 석탄재 순환이용률(재활용률)	(+)	1/3	1/12
4. 유해성 감축	1/4	4-1. 미세먼지(PM) 배출량	(-)	1/3	1/12
		4-2. 다이옥신/퓨란 배출량	(-)	1/3	1/12
		4-3. 중금속 배출량	(-)	1/3	1/12

이를 반영하여 영역별 지수의 값과 최종적으로 지수화한 결과의 값은 [표 17]의 산식으로 계산할 수 있다.

[표 17] 영역별 지수와 최종 자원순환 지수의 산식

구분	산식
연도별 영역별 지수	$\sum(\text{개별 지표 표준화값} \times \text{지표가중치})$
최종 자원순환 지수	$\sum(\text{영역별 지수} \times \text{영역가중치})$

V. 연구 결과

1. 석탄재 처리 경로에 따른 전과정평가 결과

본 연구에서는 앞서 석탄재 처리 경로를 ‘포틀랜드 1종 시멘트로의 재활용’, ‘레미콘 25-210-12로의 재활용’, ‘매립’으로 설정하였다. 매립지나 생산공장으로의 운송은 각 처리 경로에 포함된다. 전과정 영향평가는 순환경제 이행 진단을 위해 선정된 지표의 분석에 필요한 자료를 중심으로 진행하였다. 선정된 지표 중 전과정목록분석 자료를 직접적으로 이용하는 <영역 1. 기후변화>의 ‘온실가스 총배출량’, ‘오존파괴물질 총배출량’과 <영역 4. 유해성 감축>의 ‘PM 배출량’, ‘다이옥신/퓨란 배출량’을 전과정목록분석 자료를 토대로 하여 계산하였다. 석탄재(비산재) 1톤 투입에 따른 처리 경로별 결과를 비교하여 [표 18]에 나타내었다.

석탄재(비산재) 1톤 투입을 기준으로 한 전과정평가 결과, ‘포틀랜드 1종 시멘트로의 재활용’ 경로에서는 ‘레미콘 25-210-12 재활용’ 경로에 비해 온실가스 배출량은 8.73배, 오존파괴물질 배출량은 992배, PM 배출량은 5.83배, 다이옥신/퓨란 배출량은 3500배 이상 높았다. 매립 처리 시 모든 물질의 배출량이 다른 처리 경로에 비해 낮았지만, 매립 처리를 위해서는 넓은 매립지 면적이 필요하고 침출수로 인한 장기적인 환경 오염 문제도 있기 때문에(한국건설기술연구원, 1992) 이 결과만으로 매립 처리가 환경에 긍정적인 영향을 준다고 볼 수는 없다.

[표 18] 처리 경로별 석탄재(비산재) 1톤 투입에 따른 전과정평가 결과

구분	포틀랜드1중시멘트 로의 재활용	레미콘 25-21-12 로의 재활용	매립
온실가스 배출량 (kg CO2 eq.)	7.14E+04	8.18E+03	1.16E-03
오존파괴물질 배출량 (kg CFC-11eq.)	1.21E+00	1.22E-03	6.05E-10
PM 배출량 (kg)	2.47E+02	4.24E+01	3.43E-01
다이옥신/퓨란 배출량 (kg)	3.93E-07	1.09E-10	4.77E-17

이후 공기업 화력발전소의 석탄재 발생량 자료에 따라 연도별로 각 처리 경로에 유입된 석탄재의 양을 적용하여 연도별 전과정평가 결과를 [표 19], [표 20], [표 21]에 정리하였다.

[표 19] 포틀랜드 1중 시멘트로의 재활용 전과정평가 결과(운송거리: 82.05km)

구분		온실가스 배출량 (kg CO2 eq.)	오존파괴물질 배출량 (kg CFC-11eq.)	PM 배출량 (kg)	다이옥신/퓨란 배출량 (kg)	
연도별 석탄재 유입량 (단위: 천)	'12	1,234	8.81E+10	1.49E+06	2.74E+08	4.85E-01
	'13	1,580	1.13E+11	1.91E+06	3.51E+08	6.21E-01
	'14	1,341	9.57E+10	1.62E+06	2.98E+08	5.27E-01
	'15	1,547	1.10E+11	1.87E+06	3.44E+08	6.08E-01
	'16	1,397	9.97E+10	1.69E+06	3.11E+08	5.49E-01
	'17	1,227	8.76E+10	1.49E+06	2.73E+08	4.82E-01
	'18	1,191	8.50E+10	1.44E+06	2.65E+08	4.68E-01
	'19	1,793	1.28E+11	2.17E+06	3.99E+08	7.05E-01
	'20	1,612	1.15E+11	1.95E+06	3.58E+08	6.33E-01
	'21	1,557	1.11E+11	1.89E+06	3.46E+08	6.12E-01

포틀랜드 1중 시멘트로의 재활용 경로에 석탄재가 유입된 양은 2012년부터 2021년까지의 10개년 평균 1448 천 톤이며, 석탄재 발생량의 약

17.3%이다. 이에 따라 이 경로에서는 연간 $8.50E+10 \sim 1.28E+11$ kg CO₂ eq. 사이의 온실가스, $1.44E+06 \sim 2.17E+06$ kg CFC-11 eq. 사이의 오존과
 괴물질, $2.65E+08 \sim 3.99E+08$, kg 사이의 PM과 $4.68E-01 \sim 7.05E-01$ kg 사
 이의 다이옥신/퓨란 물질을 배출하였다. 2017년과 2018년에 시멘트 재활
 용 경로로 투입된 석탄재의 양은 각각 1272 천 톤과 1191 천 톤으로 가
 장 적은 양의 석탄재가 유입되었으며, 석탄재 발생량에 대한 비중도
 13.3%, 12.6%로 나타나 10년 중 그 비중 또한 제일 낮다. 이에 2017년과
 2018년에는 온실가스 배출량, 오존과괴물질 배출량, PM 배출량, 다이옥
 신/퓨란 배출량이 적으며, 석탄재의 유입량이 1793 천 톤으로 최근 10개
 년 중 가장 많았던 2019년에는 그 결과 또한 가장 높게 나타났다.

[표 20] 레미콘 25-210-12로의 재활용 전과정평가 결과 (운송 거리: 93.01km)

구분		온실가스 배출량 (kg CO ₂ eq.)	오존과괴물질 배출량 (kg CFC-11eq.)	PM 배출량 (kg)	다이옥신/퓨란 배출량 (kg)	
연도별 석탄재 유입량 (단위: 천	'12	4,187	3.42E+10	5.12E+03	9.51E+07	4.57E-04
	'13	5,361	4.38E+10	6.55E+03	1.22E+08	5.86E-04
	'14	4,548	3.72E+10	5.56E+03	1.03E+08	4.97E-04
	'15	5,250	4.29E+10	6.42E+03	1.19E+08	5.73E-04
	'16	4,379	3.87E+10	5.79E+03	1.08E+08	5.18E-04
	'17	5,840	4.77E+10	7.14E+03	1.33E+08	6.38E-04
	'18	5,443	4.45E+10	6.65E+03	1.24E+08	5.95E-04
	'19	5,073	4.15E+10	6.20E+03	1.15E+08	5.54E-04
	'20	4,327	3.54E+10	5.29E+03	9.82E+07	4.73E-04
	'21	4,352	3.56E+10	5.32E+03	9.88E+07	4.75E-04

레미콘 25-210-12로의 재활용 경로에 석탄재가 유입된 양은 2012년부
 터 2021년까지의 10개년 평균 4912 천 톤이며, 석탄재 발생량의 약
 58.7%이다. 이에 따라 이 경로에서는 연간 $3.42E+10 \sim 4.77E+10$ kg CO₂
 eq. 사이의 온실가스, $5.12E+03 \sim 7.14E+03$ kg CFC-11 eq. 사이의 오존과
 괴물질, $9.51E+07 \sim 1.33E+08$, kg 사이의 PM과 $4.57E-04 \sim 6.38E-04$ kg 사

이의 다이옥신/퓨란 물질을 배출하였다. 2017년에는 레미콘 재활용 경로로 유입된 석탄재의 양이 5840 천 톤으로 최근 10개년 중 가장 많았고, 이에 온실가스 배출량, 오존과괴물질 배출량, PM 배출량, 다이옥신/퓨란 배출량 결과 또한 가장 높게 나타났다.

석탄재(비산재) 1톤 투입을 기준으로 한 전과정평가 결과, ‘레미콘 25-210-12 재활용’ 경로는 ‘포틀랜드 1종 시멘트로의 재활용’ 경로에 비해 온실가스 배출량 비중은 11.5%, 오존과괴물질 배출량 비중은 0.1%, PM 배출량 비중은 17.2%, 다이옥신/퓨란 배출량 비중은 0.03%에 불과했다. 그러나 연간 레미콘으로의 재활용 경로에 투입되는 석탄재의 양이 시멘트로의 재활용 경로에 투입되는 석탄재의 양보다 3배 이상 많기 때문에 두 재활용 경로를 비교했을 때, ‘레미콘25-210-12 재활용’ 경로는 ‘포틀랜드 1종 시멘트로의 재활용’ 경로에 비해 연간 온실가스 배출량 비중은 37.8%, 오존과괴물질 배출량 비중은 0.3%, PM 배출량 비중은 58.6%, 다이옥신/퓨란 배출량 비중은 0.09%로 나타났다.

[표 21] 매립 전과정평가 결과 (운송 거리: 1km)

구분		온실가스 배출량 (kg CO ₂ eq.)	오존과괴물질 배출량 (kg CFC-11eq.)	PM 배출량 (kg)	다이옥신/퓨란 배출량 (kg)	
연도별 석탄재 유입량 (단위: 천	‘12	1,625	1.90E+03	9.83E-04	5.57E+05	7.74E-11
	‘13	515	6.02E+02	3.12E-04	1.77E+05	2.45E-11
	‘14	1,382	1.62E+03	8.36E-04	4.74E+05	6.59E-11
	‘15	643	7.52E+02	3.89E-04	2.21E+05	3.06E-11
	‘16	1,313	1.54E+03	7.95E-04	4.50E+05	6.26E-11
	‘17	947	1.11E+03	5.73E-04	3.25E+05	4.51E-11
	‘18	1,680	1.96E+03	1.02E-03	5.76E+05	8.01E-11
	‘19	866	1.01E+03	5.24E-04	2.97E+05	4.13E-11
	‘20	252	2.95E+02	1.52E-04	8.64E+04	1.20E-11
	‘21	587	6.86E+02	3.55E-04	2.01E+05	2.80E-11

매립 경로에 유입된 석탄재는 최근 10개년(2012~2021) 평균 전체 석탄

재 발생량의 약 11.7%이며 그 양은 981 천 톤이다. 그러나 석탄재의 매립 비율은 3.5%~20%로 그 편차가 매우 크다. 2018년은 전체 석탄재 발생량이 9395 천 톤으로 최근 10개년 중 가장 많았으며, 이 중 17.9%가 매립되어 매립 경로로의 유입량도 많았다. 석탄재 발생량이 그 뒤를 잇는 2017년에는 9220 천 톤의 석탄재가 발생하였으나 그 중 947천 톤인 10.3% 만이 매립 처리되었다. 전과정평가 결과 상으로는 매립 처리 시 모든 물질의 배출량이 다른 처리 경로에 비해 낮는데, 이는 매립지까지의 운송 거리가 다른 재활용 처리 경로에 비해 매우 짧아 수송에 의한 오염물질 발생이 적기 때문이다. 또한 단순 매립은 처리 공정이 따로 없어 석탄재를 처리하는 공정에서 발생하는 오염물질이 적은 것도 그 이유로 볼 수 있다. 그러나 매립 처리가 단순히 물질의 배출량이 적어 환경에 이롭다고 볼 수 없을 뿐 아니라 재활용할 수 있는 자원을 매립하는 것은 자원순환의 측면에서 순환경제로 나아가는 데에 있어 걸림돌이 된다. 이 결과는 다음 절인 자원순환 지표 분석에서 더 자세히 다루었다.

2. 자원순환 지표 분석 결과

1) 영역별 시계열 분석

본 연구에서는 국내 화력발전소 석탄연소재 관리의 전과정을 자원순환과 관련된 4개 영역 10개 지표로 평가하였다. 지표별 10개년 데이터를 [표 15]의 산식에 따라 표준화하였으며, 영역의 값은 각 지표의 표준화된 데이터에 가중치를 반영하여 계산하였다([표 17] 산식 참조). 각 영역의 가중치는 1/4로 최종 지수값에 반영된다. 10개년 시계열 지표값과 영역 값을 회귀 분석하여 추세선 기울기를 구하고 기울기가 양수일 경우 석탄재 관리 과정이 자원순환의 관점에서 긍정적인 방향으로 나아가는 것으로, 기울기가 음수일 경우 부정적인 것으로 분석하였다. P값이 0.05보다 크거나 95%상한, 하한 구간에 0이 들어있으면 기울기에 따른 유의

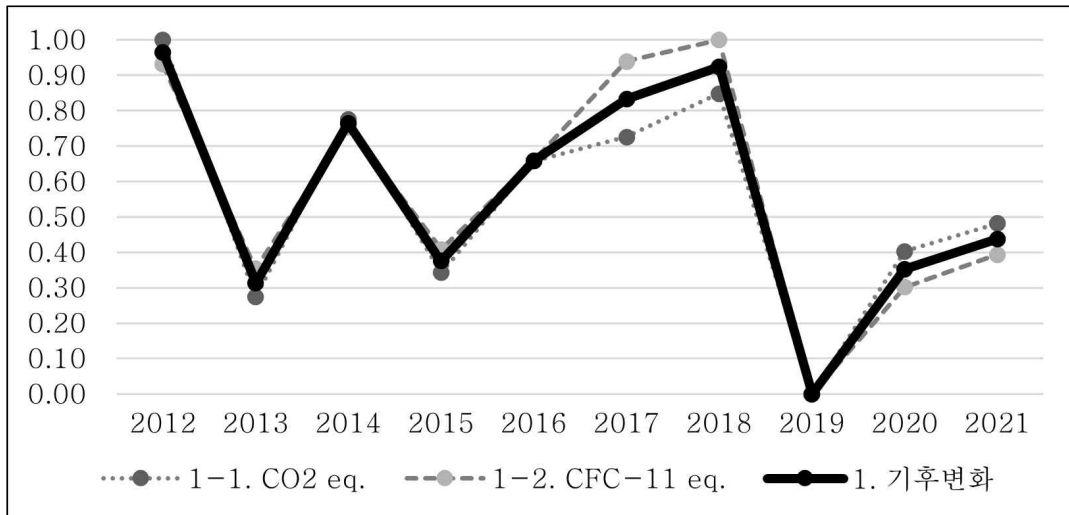
미한 추세를 보이지 않는다고 판단하였다. 또한 영역과 영역 내 지표 값의 10개년 데이터를 상관 분석하여 지표-지표 간 상관관계와 지표-영역 간 상관관계를 구하였다.

(1) 기후변화 영역

앞서 진행한 전과정평가에서 각 석탄재의 처리 경로에 따른 연도별 온실가스 총배출량과 오존과피물질 총배출량을 산정하였다. 이를 합산하여 연도별 온실가스 총배출량과 오존과피물질 총배출량을 구하였고, 표준화 과정을 거쳐 지표 값을 얻었다. 기후변화 영역에 속하는 각 지표의 가중치는 1/2이며, 이를 반영하여 기후변화 영역의 가중치 반영 최종값을 계산하여 [표 22]과 [그림 4]에 나타냈다.

[표 22] 연도별 기후변화 영역의 10개년 시계열 분석 결과

1-1. 온실가스 총배출량 (단위; kg CO ₂ eq.)										
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
발생량	1.22E +11	1.56E +11	1.33E +11	1.53E +11	1.33E +11	1.35E +11	1.29E +11	1.69E +11	1.50E +11	1.46E +11
표준화	1.00	0.27	0.78	0.34	0.66	0.72	0.85	0.00	0.40	0.48
기울기	-0.037		P값	0.299	R ²	0.133	95% 하한	-0.113	95% 상한	0.040
1-2. 오존과피물질 총배출량 (단위; kg CFC-11 eq.)										
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
발생량	1.50E +06	1.92E +06	1.63E +06	1.88E +06	1.61E +06	1.49E +06	1.45E +06	2.18E +06	1.96E +06	1.89E +06
표준화	0.93	0.35	0.75	0.41	0.66	0.94	1.00	0.00	0.30	0.39
기울기	-0.042		P값	0.277	R ²	0.145	95% 하한	-0.125	95% 상한	0.041
영역 1. 기후변화										
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
가중치 반영 지수값	0.97	0.31	0.76	0.38	0.66	0.83	0.92	0.00	0.35	0.44
기울기	-0.039		P값	0.279	R ²	0.143	95% 하한	-0.118	95% 상한	0.039



[그림 4] 연도별 기후변화 영역의 지표 값

온실가스 총배출량(지표 1-1, 역기능)은 2012년에 제일 적고(지표값=1), 2019년에 가장 많다(지표값=0). 오존과괴물질의 배출량(지표 1-2, 역기능)은 2018년에 가장 적고(지표값=0), 2019년에 가장 많다(지표값 1). 지표 1-1과 지표 1-2 모두 회귀분석 결과 95% 상한, 하한 구간에 0이 포함되므로 10년간 지표의 값이 유의미한 추세를 보인다고 할 수 없다.

이 영역에 속하는 지표와 지표 사이의 상관계수와 지표와 영역 간의 상관 계수를 구하여 [표 23]에 정리하였다. 지표 1-1과 지표 1-2는 0.9485의 아주 높은 상관관계가 있어 대부분 같은 추세를 보인다. 연도별 석탄재 발생량과 경로별 투입된 석탄재의 양에 따라 온실가스와 오존과괴물질의 발생량이 같은 추세로 움직이기 때문에 이렇게 높은 상관관계가 나타난 것으로 보인다. 다만 2017년 온실가스 총배출량은 증가한 반면 오존과괴물질의 배출량은 감소하였는데, 그 이유는 레미콘으로의 재활용 경로보다 990배 이상 오존과괴물질의 배출량이 많은 시멘트 재활용 경로로 유입되는 석탄재의 양이 적었기 때문에 오존과괴물질의 배출량 감축에 영향을 미쳤다고 볼 수 있다.

[표 23] 기후변화 영역의 지표-지표, 지표-영역 간 상관관계

구분	Pearson correlation	p-value
지표 1-1 vs 지표 1-2	0.9485	0
지표 1-1 vs 영역 1	0.9864	0
지표 1-2 vs 영역 1	0.9876	0

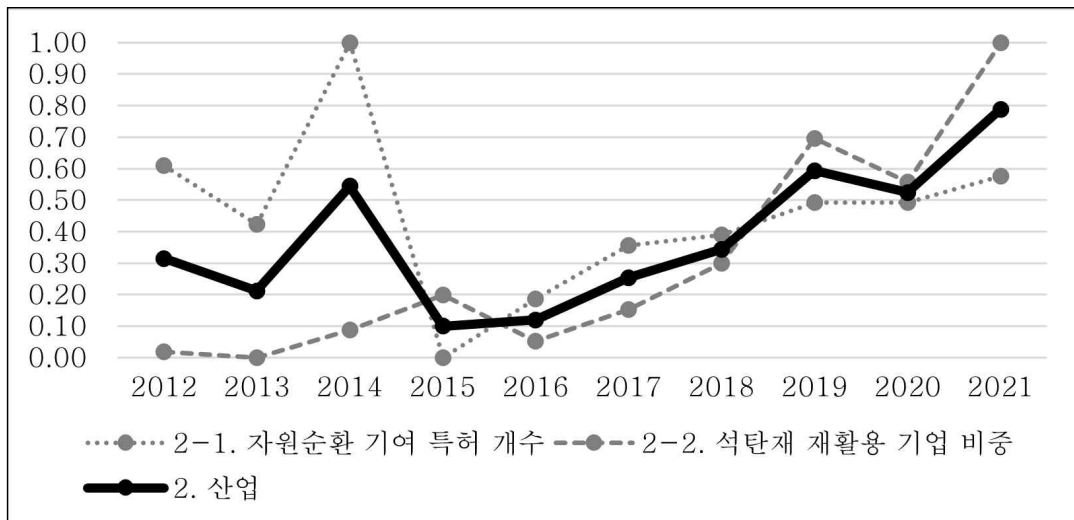
기후변화 영역의 값은 각 지표의 가중치(1/2)를 반영하여 계산하였으며, 최근 10개년(2012년~2021년)의 영역 값은 2012년에 가장 높고 2019년에 가장 낮다. 기후변화 영역의 10개년 추세는 통계적으로 유의미한 기울기를 나타내지 않았고, 친환경적인 폐기물 처리 과정을 관리한다는 자원순환의 측면에서는 10년간 이 영역에서 개선된 점이 없다고 볼 수 있다.

(2) 산업 영역

특허청의 특허정보검색서비스인 ‘키프리스’의 국내 특허 공고 정보를 이용하여 석탄재 활용과 관련된 자원순환 기여 특허의 개수를 산정하였다. 또한 한국환경공단의 ‘순환자원정보센터’의 폐기물 처리 신고업체 정보를 활용하여 석탄재 재활용 관련 기업 비중을 산정하였다. 이후 표준화 과정을 거쳐 지표 값을 얻었으며, 산업 영역에 속하는 각 지표의 가중치는 1/2이고 이를 반영하여 산업 영역의 가중치 반영 최종 지수값을 [표 24]와 [그림 5]에 나타내었다.

[표 24] 연도별 산업 영역의 10개년 시계열 분석 결과

2-1. 자원순환 기여 특허 개수 (단위; 수)										
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
값	115	104	138	79	90	100	102	108	108	113
표준화	0.61	0.42	1.00	0.00	0.19	0.36	0.39	0.49	0.49	0.58
기울기	-0.006		P값	0.851	R ²	0.005	95% 하한	-0.077	95% 상한	0.065
2-2. 석탄재 재활용 관련 기업 비중 (단위; %)										
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
값	1.72	1.61	2.15	2.84	1.94	2.55	3.45	5.88	5.04	7.75
표준화	0.02	0.00	0.09	0.20	0.05	0.15	0.30	0.70	0.56	1.00
기울기	0.098		P값	0.001	R ²	0.775	95% 하한	0.055	95% 상한	0.141
영역 2. 산업										
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
가중치 반영 지수값	0.31	0.21	0.54	0.10	0.12	0.25	0.34	0.59	0.52	0.79
기울기	0.046		P값	0.050	R ²	0.383	95% 하한	0.000	95% 상한	0.094



[그림 5] 연도별 산업 영역의 지표 값

자원순환 기여 특허 개수(지표 2-1, 순기능)은 2015년에 제일 적고(지표값=0), 2014년에 가장 많다(지표값=1). 석탄재 재활용 기업 비중(지표 2-2, 순기능)은 2013년에 가장 적고(지표값=0), 2021년에 가장 많다(지표값 1).

회귀분석 결과 지표 2-1의 10년간 시계열 데이터는 시간의 흐름에 유의미한 추세를 가지지 않으며, 지표 2-2는 10년간 지표 값의 기울기가 0.098로 양의 추세를 가진다. 이 기울기 값을 표준화 전 데이터로 환산하면 연도별로 산업체 비중이 약 0.6%p 증가하는 수치이다. 특히 2015년 이후 꾸준한 상승세를 보여주는데, 이는 국내 폐기물 처리 산업 규모의 확대와 맞물린 것으로 보인다. 중국이 폐기물 수입을 금지하면서 국내 폐기물 처리 수요가 늘어났고, 경제성장에 따른 소비 증가, 코로나19로 인한 일회용 쓰레기 배출 등의 이유로 국내 폐기물 처리 관련 사업체 수가 점차 증가하였다(류지민, 2021). 사회경제적 환경과 맞물려 폐기물 재활용 산업의 규모가 커짐에 따라 석탄재 재활용 업체 수 또한 많이 증가해온 것을 지표 2-2의 결과를 통해 알 수 있다.

산업 영역에 속하는 지표와 지표 사이의 상관계수와 지표와 영역 간의 상관계수를 구하여 [표 25]에 정리하였으며, 석탄재 관련 특허 개수를 나타낸 지표 2-1과 석탄재 재활용 산업 비중을 나타낸 지표 2-2은 통계적으로 유의미한 상관관계를 가지지 않았다.

[표 25] 산업 영역의 지표-지표, 지표-영역 간 상관관계

구분	Pearson correlation	p-value
지표 2-1 vs 지표 2-2	0.1112	0.7598
지표 2-1 vs 영역 2	0.6659	0.0356
지표 2-2 vs 영역 2	0.8154	0.0040

산업 영역의 값은 각 지표의 가중치(1/2)를 반영하여 계산하였으며, 이 영역의 가중치는 1/4로 최종 지수 값에 반영된다. 최근 10개년(2012년~2021년)의 산업 영역의 값은 2015년에 가장 낮고 2021년에 가장 높으

며, 최근 10년 간 영역 값의 추세선 기울기는 0.046으로 양의 추세를 보였다. 석탄재 재활용 관련 산업 규모가 커지고 기술이 개발됨에 따라 친환경적 공정 운영 등 자원순환의 측면에서 긍정적으로 가까워지고는 있으나 그 기울기 값이 작은 것으로 보아 그 개선 속도는 더디다고 볼 수 있다.

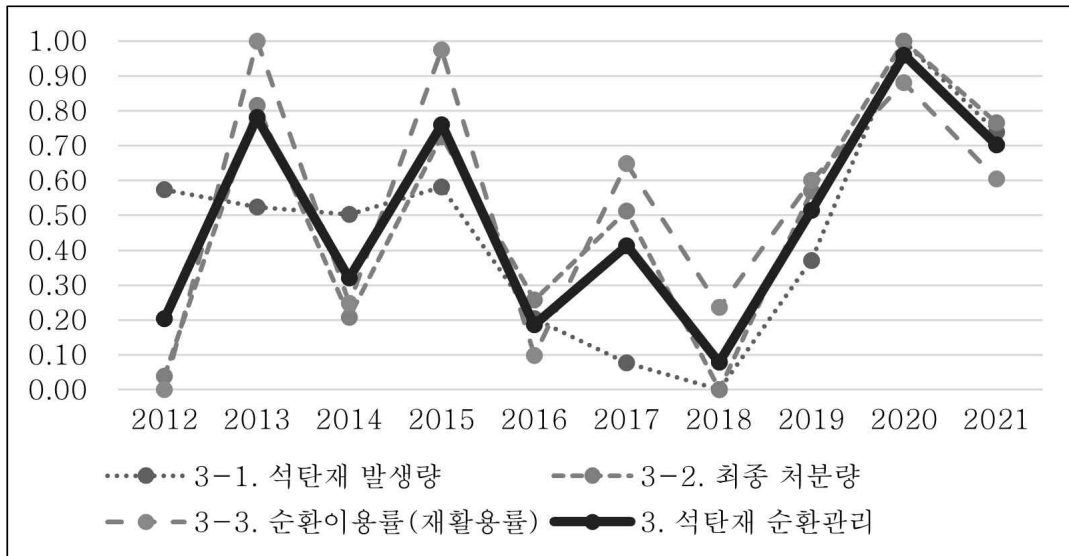
(3) 석탄재 순환 관리 영역

국내 공기업 화력발전소에서 제공받은 연도별 석탄재 발생량 자료를 이용하여([표 2] 참조) 석탄재 발생량과 석탄재 최종 처분량, 순환이용률(재활용률)을 구하고, 표준화 과정을 거쳐 지표 값을 얻었다. 폐기물 순환 관리 영역에 속하는 각 지표의 가중치는 1/3이며, 이를 반영하여 석탄재 순환 관리 영역의 가중치 반영 최종값을 계산하여 [표 26]과 [그림 6]에 나타냈다.

석탄재 발생량(지표 3-1, 역기능)은 2020년에 제일 적고(지표값=1), 2018년에 가장 많다(지표값=0). 2020년은 석탄재 폐기물 발생량이 10개년 평균에 비해 1,200 천 톤 적은 85.4% 수준인데, 이는 코로나-19의 확산, 탄소중립 정책에 따른 석탄 화력발전 감축 정책 등 여러 가지 사회경제적 이유로 화력발전소의 전력 생산량이 감소했기 때문이다(e나라지표, 2022). 석탄재 최종 처분량(지표 3-2, 역기능) 또한 2020년에 가장 적고(지표값=1), 2018년에 가장 많다(지표값=0). 그리고 순환이용률(지표 3-3, 순기능)은 2013년에 가장 높고(지표값=1), 2012년에 가장 낮다(지표값=0). 지표 3-1, 3-2, 3-3 모두 회귀분석 결과 95% 상한, 95% 하한 구간에 0이 포함되므로 10년간 지표 값의 추세는 통계적으로 유의미하지 않다.

[표 26] 연도별 석탄재 순환 관리 영역의 10개년 시계열 분석 결과

3-1. 석탄재 발생량 (단위; 천 톤)										
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
값	8100	8212	8259	8084	8936	9220	9395	8557	7140	7729
표준화	0.57	0.52	0.50	0.58	0.20	0.08	0.00	0.37	1.00	0.74
기울기	0.014		P값	0.692	R ²	0.021	95% 하한	-0.067	95% 상한	0.096
3-2. 석탄재 최종 처분량 (단위; 천 톤)										
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
값	1625	515	1382	643	1313	947	1680	866	252	587
표준화	0.04	0.82	0.21	0.73	0.26	0.51	0.00	0.57	1.00	0.77
기울기	0.047		P값	0.244	R ²	0.165	95% 하한	-0.039	95% 상한	0.132
3-3. 석탄재 순환이용률(재활용률) (단위; %)										
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
값	83.15	105.	88.6	104.6	85.3	97.3	88.3	96.3	102.4	96.4
표준화	0.00	1.00	0.25	0.97	0.10	0.65	0.24	0.60	0.88	0.60
기울기	0.028		P값	0.512	R ²	0.056	95% 하한	-0.067	95% 상한	0.123
영역 3. 석탄재 순환 관리										
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
가중치 반영 지수값	0.20	0.78	0.32	0.76	0.19	0.41	0.08	0.51	0.96	0.70
기울기	0.030		P값	0.398	R ²	0.091	95% 하한	-0.047	95% 상한	0.106



[그림 6] 연도별 석탄재 순환 관리 영역의 지표 값

석탄재 순환 관리 영역에 속하는 지표와 지표 사이의 상관계수와 지표와 영역 간의 상관계수를 구하여 [표 27]에 정리하였다. 지표 3-1과 지표 3-2는 피어슨 상관계수 값이 0.6436으로 양의 상관 관계를 나타내는 것으로 보아 석탄재 발생량이 많은 해에 매립되는 석탄재 또한 많다는 것을 알 수 있다. 연도별 석탄재의 발생량을 나타내는 지표 3-1과 석탄재의 순환이용률(재활용률)을 나타낸 지표 3-3은 통계적으로 유의미한 상관관계를 가지지 않았다(p -value=0.2328). 그리고 지표 3-2와 지표 3-3은 p -value 0.0004, 피어슨 상관계수 0.9017로 높은 수준의 양의 상관 관계를 나타내었다. 발생한 석탄재 중 매립량이 적은 연도에는 석탄재가 매립 처리되는 대신 재활용 경로로 석탄재가 유입된 것이기 때문에 두 지표가 높은 양의 상관 관계를 나타낸다고 볼 수 있다.

[표 27] 석탄재 순환 관리 영역의 지표-지표, 지표-영역 간 상관관계

구분	Pearson correlation	p-value
지표 3-1 vs 지표 3-2	0.6436	0.0447
지표 3-1 vs 지표 3-3	0.4152	0.2328
지표 3-2 vs 지표 3-3	0.9017	0.0004
지표 3-1 vs 영역 3	0.7581	0.011
지표 3-2 vs 영역 3	0.9733	0
지표 3-3 vs 영역 3	0.8974	0.0004

석탄재 순환 관리 영역의 값은 [표 17]의 산식에 따라 각 지표의 가중치(1/3)를 반영하여 계산하였으며, 이 영역의 가중치는 1/4로 최종 지수 값에 반영된다. 최근 10개년(2012년~2021년)의 석탄재 순환 관리 영역의 값은 2020년에 가장 높고 2018년에 가장 낮으며, 이 기간 동안 시계열 영역 값의 회귀분석 결과 95% 상한, 95% 하한 구간에 0이 포함되므로 추세는 통계적으로 유의미하지 않았다. 최근 10년간 석탄재 순환 관리 영역에서는 자원순환 측면에 긍정적인 방향으로 개선이 일어나지 않았다.

(4) 유해성 감축 영역

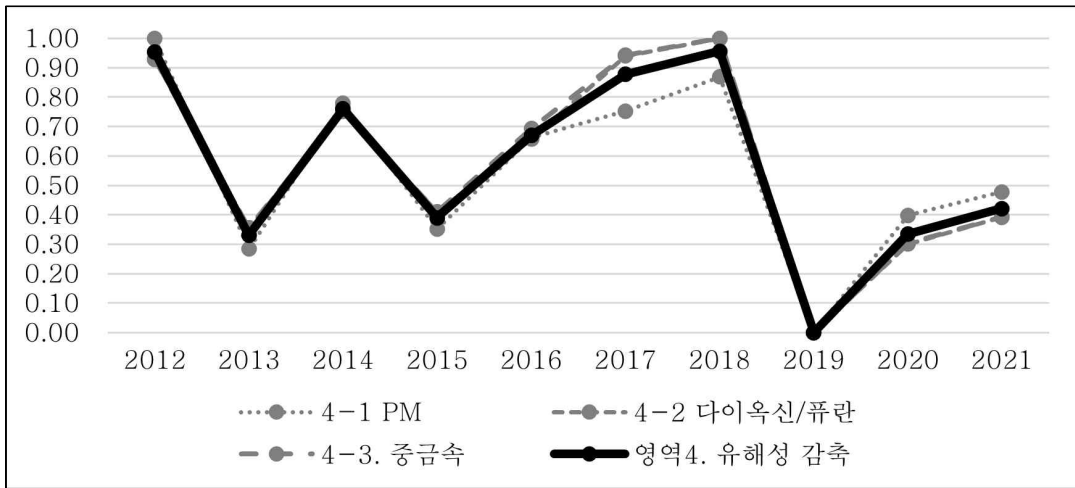
앞서 진행한 전과정평가에서 각 석탄재의 처리 경로에 따른 연도별 PM 배출량과 다이옥신/퓨란 배출량을 산정하였다. 또한 수은 배출량, 카드뮴-탈륨 배출량, 그 외 중금속 배출량의 세 가지 세부 지표를 설정하여 중금속 배출량을 산정하였다. 이를 합산하여 연도별 PM 배출량과 다이옥신/퓨란 배출량을 구하였고, 표준화 과정을 거쳐 지표 값을 얻었다. 유해성 감축 영역에 속하는 각 지표의 가중치는 1/3이며, 이를 반영한 유해성 감축 영역의 가중치 반영 최종 지수 값을 [표 27]와 [그림 7]에 나타냈다.

PM 배출량(지표 4-1, 역기능)은 2012년에 제일 적고(지표값=1), 2019년에 가장 많다(지표값=0). 다이옥신/퓨란의 배출량(지표 4-2, 역기능)은

2018년에 가장 적고(지표값=0) 2019년에 가장 많으며(지표값=1), 중금속 배출량(지표 4-3, 역기능) 또한 2018년에 가장 적고(지표값=0), 2019년에 가장 많다(지표값=1). 2019년은 석탄재 발생량이 가장 높은 해가 아님에도 불구하고 모든 지표에서 가장 낮은 값을 얻었는데, 생산 공장까지의 운송 거리가 먼 시멘트나 레미콘으로의 처리 경로에 유입된 석탄재가 매립 처리된 석탄재에 비해 그 비율이 높아 PM 및 다이옥신/퓨란 발생량이 많은 것으로 보인다. 지표 4-1, 4-2, 4-3 모두 10개년 지표 값의 회귀 분석 결과 95% 상한, 95% 하한 구간에 0이 포함되므로 이 기간 동안 지표 값은 통계적으로 유의미한 추세를 나타내지 않았다.

[표 27] 연도별 유해성 감축 영역의 10개년 시계열 분석 결과

4-1. PM 배출량 (단위; kg)										
	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
값	3.70E +08	4.73E +08	4.02E +08	4.63E +08	4.19E +08	4.06E +08	3.89E +08	5.14E +08	4.57E +08	4.45E +08
표준화	1.00	0.28	0.78	0.35	0.66	0.75	0.87	0.00	0.40	0.48
기울기	-0.037		P값	0.296	R ²	0.135	95% 하한	-0.114	95% 상한	0.040
4-2. 다이옥신/퓨란 배출량 (단위; kg)										
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
값	4.85E -01	6.21E -01	5.27E -01	6.08E -01	5.49E -01	4.83E -01	4.69E -01	7.05E -01	6.34E -01	6.12E -01
표준화	0.93	0.35	0.75	0.41	0.66	0.94	1.00	0.00	0.30	0.39
기울기	-0.042		P값	0.277	R ²	0.145	95% 하한	-0.125	95% 상한	0.041
4-3. 중금속 배출량 (단위; kg)										
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
표준화	0.93	0.36	0.75	0.41	0.69	0.94	1.00	0.00	0.30	0.39
기울기	-0.042		P값	0.277	R ²	0.145	95% 하한	-0.125	95% 상한	0.041
4-3-1. 수은 배출량										
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
값	2.88E +04	3.69E +04	3.13E +04	3.61E +04	3.26E +04	2.86E +04	2.78E +04	4.18E +04	3.76E +04	3.63E +04
표준화	0.93	0.35	0.75	0.41	0.66	0.94	1.00	0.00	0.30	0.39
4-3-2. 카드뮴-탈륨 배출량										
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
값	1.63E +05	2.07E +05	1.77E +05	2.03E +05	1.84E +05	1.61E +05	1.57E +05	2.36E +05	2.11E +05	2.04E +05
표준화	0.93	0.36	0.75	0.41	0.66	0.95	1.00	0.00	0.31	0.40
4-3-3. 그 외 중금속 배출량										
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
값	7.62E +07	9.75E +07	8.28E +07	9.55E +07	8.24E +07	7.57E +07	7.35E +07	1.11E +08	9.95E +07	9.61E +07
표준화	0.93	0.35	0.75	0.41	0.76	0.94	1.00	0.00	0.30	0.39
영역 4. 유해성 감축										
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
가중치 반영 최종값	0.95	0.33	0.76	0.39	0.67	0.88	0.96	0.00	0.33	0.42
기울기	-0.040		P값	0.279	R ²	0.145	95% 하한	-0.120	95% 하한	0.040



[그림 7] 연도별 유해성 감축 영역의 지표 값

유해성 감축 영역에 속하는 지표와 지표 사이의 상관계수와 지표와 영역 간의 상관계수를 구하여 [표 29]에 정리하였다. 영역 내 세 지표는 서로 높은 상관관계를 보인다. 이는 연도별 석탄재 발생량과 경로별 석탄재 투입량에 따라 PM, 다이옥신/퓨란, 중금속의 배출량이 비슷한 추세로 움직이기 때문이다. 다만 2017년의 PM 총배출량과 중금속 배출량은 증가한 반면에 다이옥신/퓨란의 배출량은 감소하였다. 그 이유는 2017년에 레미콘으로의 재활용 경로보다 3500배 이상 다이옥신/퓨란의 배출량이 많은 시멘트로의 재활용 경로에 유입되는 석탄재의 양이 적었기 때문이다. 레미콘으로의 재활용 경로로 석탄재 투입량이 많았던 것이 오존과 피물질의 배출량 감축에 영향을 미쳤고, 해당 연도에 지표 4-2에서 높은 값을 얻었다.

최근 10개년(2012년~2021년)의 유해성 감축 영역의 값은 2012년에 가장 높고 2019년에 가장 낮다. 시계열 영역 값을 회귀분석한 결과 95% 상한, 하한 구간에 0이 포함되므로 영역 값의 추세는 통계적으로 유의미하지 않다. 이 기간 동안 유해성 감축 영역에서의 진단 결과, 자원순환의 친환경적인 공정 운영을 지향하는 측면에서 긍정적인 방향으로 개선이 일어나지 않았다.

[표 29] 유해성 감축 영역의 지표-지표, 지표-영역 간 상관관계

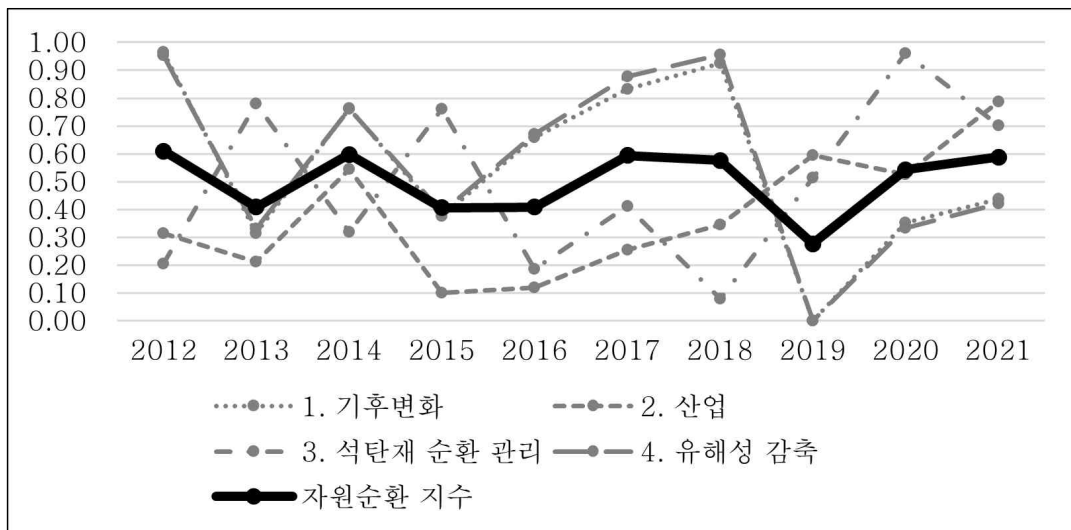
구분	Pearson correlation	p-value
지표 4-1 vs 지표 4-2	0.9591	0.0000
지표 4-1 vs 지표 4-3	0.9594	0.0000
지표 4-2 vs 지표 4-3	0.9995	0.0000
지표 4-1 vs 영역 4	0.9809	0.0000
지표 4-2 vs 영역 4	0.9958	0.0000
지표 4-3 vs 영역 4	0.9959	0.0000

2) 소결

이 연구에서 자원순환 종합 지수를 구성하는 각 영역의 가중치는 1/4로 최종적인 지수 값에 반영된다. 10개년 시계열 지수 값을 회귀분석하여 기울기가 양수일 경우 석탄재폐기물 전과정 진단 결과 자원순환에 긍정적인 방향으로 흘러가는 것으로, 기울기가 음수일 경우 부정적인 것으로 판단하였다. 또한 95% 상한, 95% 하한 구간에 0이 포함되면 귀무가설에 의해 유의미한 추세를 보이지 않는다고 판단하였다. 연도별 자원순환 지수의 값을 [표 30]과 [그림 8]에 나타내었다.

[표 30] 연도별 자원순환 지수의 10개년 시계열 분석 결과

영역 별 지수 값											
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	평균
영역 1	0.97	0.31	0.76	0.38	0.66	0.83	0.92	0.00	0.35	0.44	0.56
기울기	-0.039		P값	0.279	R ²	0.143	95% 하한	-0.118		95% 상한	0.039
영역 2	0.31	0.21	0.54	0.10	0.12	0.25	0.34	0.59	0.52	0.79	0.38
기울기	0.046		P값	0.050	R ²	0.383	95% 하한	0.000		95% 상한	0.094
영역 3	0.20	0.78	0.32	0.76	0.19	0.41	0.08	0.51	0.96	0.70	0.49
기울기	0.030		P값	0.398	R ²	0.091	95% 하한	-0.047		95% 상한	0.106
영역 4	0.95	0.33	0.76	0.39	0.67	0.88	0.96	0.00	0.33	0.42	0.57
기울기	-0.040		P값	0.279	R ²	0.145	95% 하한	-0.120		95% 상한	0.040
자원순환 지수 값											
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	평균
값	0.61	0.41	0.60	0.41	0.41	0.59	0.58	0.28	0.54	0.59	0.54
기울기	-0.001		P값	0.937	R ²	0.001	95% 하한	-0.032		95% 상한	0.030

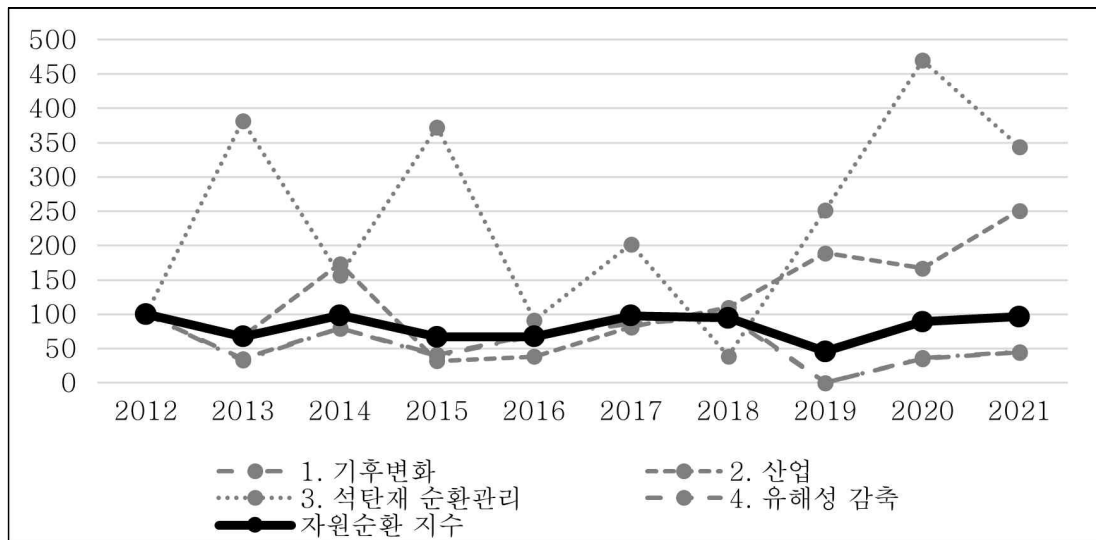


[그림 8] 연도별 자원순환 이행 지수

앞서 살펴보았듯이 영역 2를 제외한 나머지 영역에서는 95% 상한, 하한 구간에 0을 포함하여 10개년 영역 값에서 유의미한 추세를 보이지 않

았다. 영역 1 ~ 영역 4의 10개년 영역 값을 평균한 결과, 영역 1과 영역 4의 값이 영역 2와 영역 3에 비해 높았다. 이를 통해 10년간 석탄재 처리 과정에서 기후변화와 유해물질 감축 영역에서는 친환경적인 폐기물 처리 측면에서 자원순환에 긍정적으로 기여한 바가 비교적 높다는 것을 알 수 있다.

연도별 각 영역의 값과 자원순환 지수의 값을 2012년을 기준(값: 100)으로 하여 상대적인 비율(%)을 [그림 9]에 나타내었다. 2012년도에 비해 영역 1과 영역 4는 계속 낮은 지표값을 나타낸다. 앞서 살펴본 영역별 평균에 의하면 자원순환에 기여한 바는 비교적 높았지만, 2012년도 이후에는 개선된 점이 없었다. 영역 2는 2012년에 비해 낮은 지표값을 보이는 해도 있지만, 2018년 이후의 지표 값은 모두 2012년에 비해 높기 때문에 최근 이 영역에서는 석탄재 폐기물 관리가 긍정적인 방향으로 이행되고 있다고 할 수 있다. 영역 3에서는 2018년도를 제외하고는 2012년에 비해 모두 높은 지표값을 나타낸다. 시계열 분석에서 의미있는 추세가 나타나지는 않았지만 10년 전에 비해서는 자원순환 측면에 있어 개선된 모습을 보여주고 있다.



[그림 9] 연도별 자원순환 이행 지수(2012년 기준)

최근 10개년(2012년~2021년)의 자원순환 지수 값의 회귀분석 결과, 지수의 변화 추세는 시간의 흐름에 유의미하지 않았다. 지수 값은 2019년에 가장 낮고 2012년에 가장 높는데, 2012년의 값이 가장 높다는 것은 결국 2012년 이후 10년 간 자원순환 측면에서 석탄재 관리에 개선이 없거나 오히려 악화한 것과 다름없다.

10개년 데이터를 상관 분석하여 최종 지수를 구성하는 각 영역 사이의 상관관계를 [표 31]에 정리하였다. 영역 1과 영역 4에 속하는 지표는 전과정평가 결과를 직접적으로 이용한 것으로, 모두 연도별 석탄재 발생량과 경로별 석탄재 투입량에 따라 영역의 값을 얻었기 때문에 그 추세가 비슷하다. 이에 영역 1과 영역 4는 아주 높은 양의 상관관계를 나타내었다. 영역 1과 영역 3, 영역 3과 영역 4는 높은 정도의 음의 상관관계를 나타냈는데, 이는 석탄재 발생량과 직매립을 줄이고, 재활용률이 높아지는 것이 온실가스나 유해 물질 감축에는 긍정적인 방향으로 작용하지 않는다는 것이다. 그 이유로 매립지까지의 석탄재 운송 거리가 가깝고 매립 시 처리공정이 없어 수송과 공정 상에서 발생하는 오염물질이 적은 것을 들 수 있다. 또한 영역 2는 어느 영역과도 의미 있는 상관관계를 갖지 않았다. 석탄재 재활용과 관련된 업체 수 및 기술 개발의 증가는 기후변화, 석탄재 순환 관리, 유해성 감축 등의 다른 영역들과는 독립적인 경향성을 나타내고 있다.

[표 31] 영역 간 상관관계

구분	Pearson correlation	p-value
영역 1 vs 영역 2	-0.2759	0.4404
영역 1 vs 영역 3	-0.7220	-0.0184
영역 1 vs 영역 4	0.9973	0,0000
영역 2 vs 영역 3	0.2139	0.5529
영역 2 vs 영역 4	-0.3093	0.3845
영역 3 vs 영역 4	-0.7303	0.0165

3. 민감도 분석

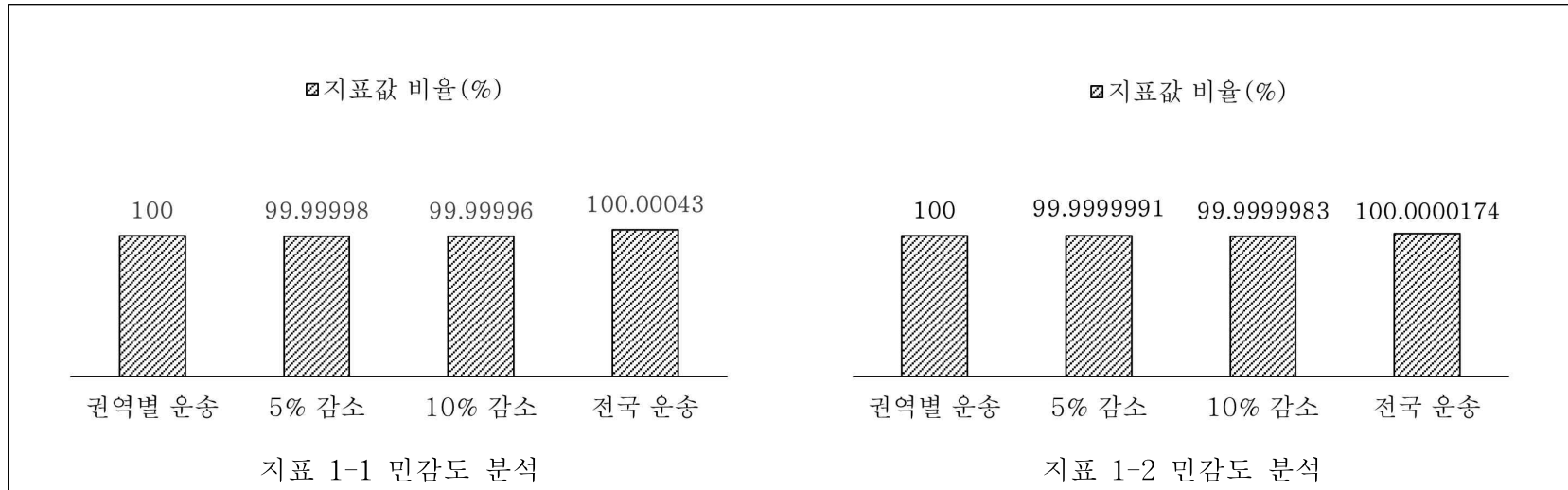
1) 석탄재 운송 거리에 따른 민감도 분석

석탄재가 발생한 화력발전소로부터 시멘트와 레미콘 생산 공장까지의 석탄재 운송 거리에 따른 지표 값의 민감도 분석을 실시하였다. 앞서 이 연구에 적용했던 권역별 운송 거리에 비해 석탄재 운송 거리가 5%, 10% 감소했을 경우와 석탄재를 전국적으로 운송한다고 가정했을 경우 지표의 값 변화를 권역별 운송 시 지표의 값과 비교하였다. 전국 운송 평균 거리는 국내 화력발전소 10개소로부터 시멘트 생산 공장 18개소, 레미콘 생산공장 27개소 간의 좌표 거리를 구하여 산술평균하였다. 민감도 분석에 이용된 석탄재의 평균 운송 거리는 [표 32]와 같다.

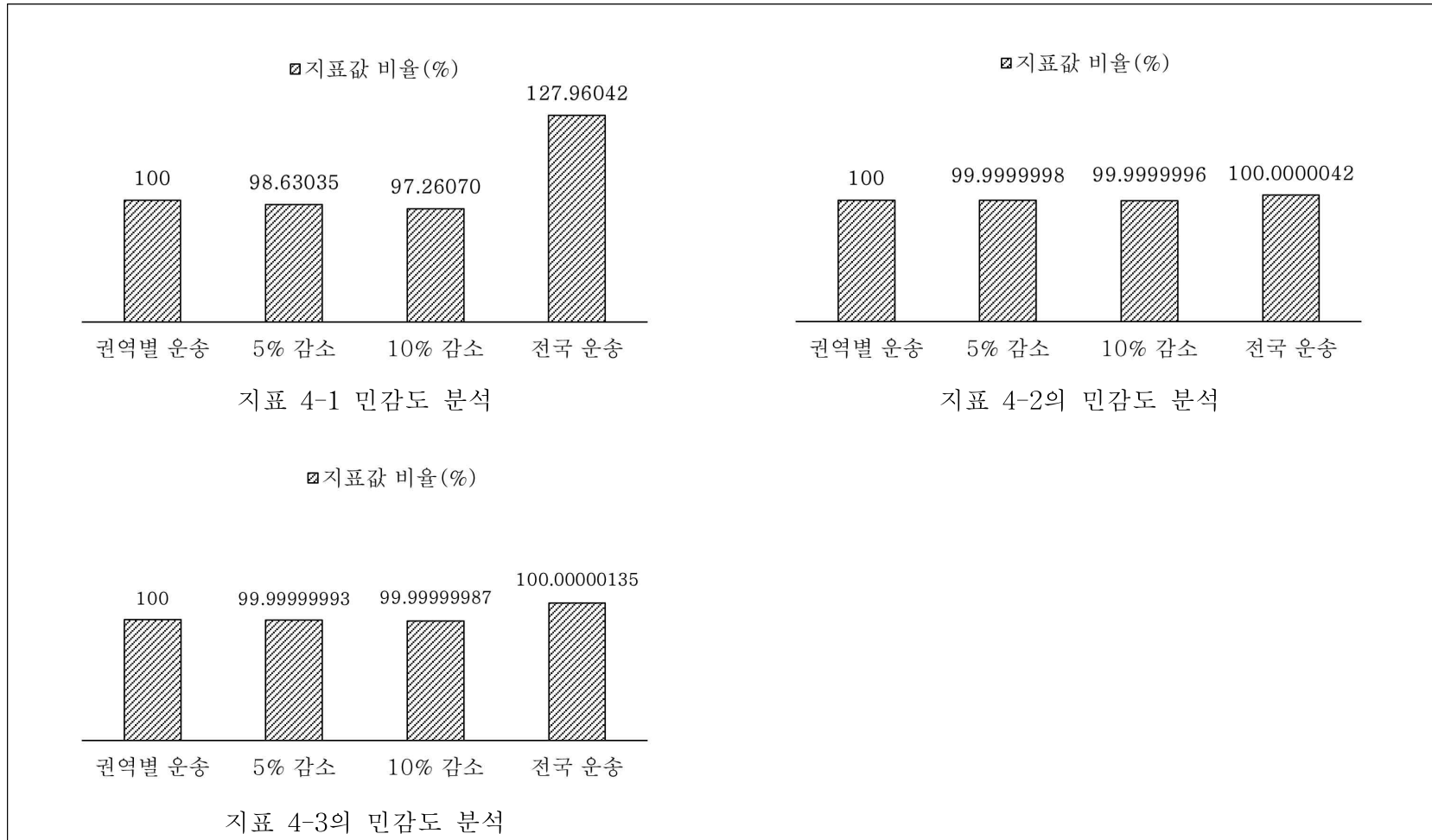
[표 32] 민감도 분석에 이용된 석탄재의 평균 운송 거리(단위; km)

구분	권역별 운송	5% 감소	10% 감소	전국 운송
화력발전소-시멘트 공장	82.05	77.95	73.85	190.22
화력발전소-레미콘 공장	93.01	88.40	83.71	179.21

운송 거리에 영향을 받는 지표는 기후변화 영역(영역 1)과 유해성 감축 영역(영역 4)에 속하는 지표이다. 운송 거리 변화에 따른 민감도 분석 결과를 이 연구에 적용했던 권역별 운송 시 지표 값(100%)을 기준으로 하여 [그림 10]과 [그림 11], [표 33], [표 34]에 나타내었다.



[그림 10] 기후변화 영역 내 지표값 민감도 분석



[그림 11] 유해성 감축 영역 내 지표값 민감도 분석

[표 33] 기후변화 영역 내 지표값 민감도 분석

지표 1-1 민감도 분석				
구분	권역별 운송	5% 감소	10% 감소	전국 운송
지표값 차이(kg CO ₂)	0	-3.11E+04	-6.23E+04	6.36E+05
지표값 비율(%)	100	99.99998	99.99996	100.00043
(증감 비율, %p)	(0)	(-0.00002)	(-0.00004)	(+0.00043)
지표 1-2 민감도 분석				
구분	권역별 운송	5% 감소	10% 감소	전국 운송
지표값 차이(kg)	0	-1.61E-02	-3.22E-02	3.29E-01
지표값 비율(%)	100	99.9999991	99.9999983	100.0000174
(증감 비율, %p)	(0)	(-0.0000009)	(-0.0000017)	(+0.0000174)

[표 34] 유해성 감축 영역 내 지표값 민감도 분석

지표 4-1 민감도 분석				
구분	권역별 운송	5% 감소	10% 감소	전국 운송
지표값 차이(kg)	0	-6.10E+06	-1.22E+07	1.24E+08
지표값 비율(%)	100	98.63035	97.26070	127.96042
(증감 비율, %p)	(0)	(-1.36965)	(-2.73930)	(+27.96042)
지표 4-2 민감도 분석				
구분	권역별 운송	5% 감소	10% 감소	전국 운송
지표값 차이(kg)	0	-1.27E-09	-2.54E-09	2.59E-08
지표값 비율(%)	100	99.9999998	99.9999996	100.0000042
(증감 비율, %p)	(0)	(-0.0000002)	(-0.0000004)	(+0.0000042)
지표 4-3 민감도 분석				
구분	권역별 운송	5% 감소	10% 감소	전국 운송
지표값 차이(kg)	0	-3.50E-02	-6.99E-02	7.14E-01
지표값 비율(%)	100	99.9999993	99.9999987	100.00000135
(증감 비율, %p)	(0)	(-0.0000007)	(-0.0000013)	(+0.00000135)

지표 4-1 외의 모든 지표의 값은 운송 거리 변화에 따른 변화가 아주 적었다. 이는 시멘트나 레미콘 생산 공정에서 배출되는 물질의 양이 운송 과정에서 배출되는 양에 비해 훨씬 많기 때문에 민감도 분석 결과 운송 거리에 따른 물질 배출량 변화는 최종 지표 값에 크게 반영되지 않았

다. PM 배출량만이 지표 값에서 큰 변화가 나타났는데, 이는 시멘트와 레미콘 생산 공정에서 배출되는 PM에 비해서도 운송 트럭에서 배출되는 PM이 많다는 것을 의미한다. 운송거리가 5% 감소할 경우와 10% 감소할 경우 PM 배출량은 각각 1.36965%p, 2.73930%p 줄었다. PM 배출량 감소 측면에서는 석탄재의 발생지로부터 재활용 처리 공정까지의 석탄재 운송 거리를 가능한 한 줄이는 것이 의미가 있다.

운송 거리에 따라 달라진 지표 값을 표준화한 결과는 [표 35]와 [표 36]에 나타내었다. 지표 1-1, 지표 1-2, 지표 4-2, 지표 4-3에서는 워낙 운송 거리에 따른 지표 값 자체의 변화량이 작기 때문에 표준화한 지표의 최종 값과 영역 1의 값은 변화가 없었다. PM 배출량을 나타낸 지표 4-1만이 전국 운송 시 표준화 이후 값에 변화가 생겼으며, 이에 따라 전국 운송 시 영역 4의 값도 함께 변화하였다.

[표 35] 운송 거리에 따른 영역 1과 영역 1 내 지표의 표준화 값 변화

지표 1-1											
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
권역별 운송	1.00	0.27	0.78	0.34	0.66	0.72	0.85	0.00	0.40	0.48	
5% 감소	1.00	0.27	0.78	0.34	0.66	0.72	0.85	0.00	0.40	0.48	
10% 감소	1.00	0.27	0.78	0.34	0.66	0.72	0.85	0.00	0.40	0.48	
전국 운송	1.00	0.27	0.78	0.34	0.66	0.72	0.85	0.00	0.40	0.48	
지표 1-2											
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
권역별 운송	0.93	0.35	0.75	0.41	0.66	0.94	1.00	0.00	0.30	0.39	
5% 감소	0.93	0.35	0.75	0.41	0.66	0.94	1.00	0.00	0.30	0.39	
10% 감소	0.93	0.35	0.75	0.41	0.66	0.94	1.00	0.00	0.30	0.39	
전국 운송	0.93	0.35	0.75	0.41	0.66	0.94	1.00	0.00	0.30	0.39	
영역 1											
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	평균
권역별 운송	0.97	0.31	0.76	0.38	0.66	0.83	0.92	0.00	0.35	0.44	0.55
5% 감소	0.97	0.31	0.76	0.38	0.66	0.83	0.92	0.00	0.35	0.44	0.55
10% 감소	0.97	0.31	0.76	0.38	0.66	0.83	0.92	0.00	0.35	0.44	0.55
전국 운송	0.97	0.31	0.76	0.38	0.66	0.83	0.92	0.00	0.35	0.44	0.55

[표 36] 운송 거리에 따른 영역 4와 영역 4 내 지표의 표준화 값 변화

지표 4-1											
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
권역별 운송	1.00	0.28	0.78	0.35	0.66	0.75	0.87	0.00	0.40	0.48	
5% 감소	1.00	0.29	0.78	0.36	0.66	0.76	0.88	0.00	0.40	0.48	
10% 감소	1.00	0.29	0.78	0.36	0.67	0.77	0.88	0.00	0.39	0.47	
전국 운송	1.00	0.23	0.76	0.30	0.64	0.61	0.76	0.00	0.44	0.51	
지표 4-2											
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
권역별 운송	0.93	0.35	0.75	0.41	0.66	0.94	1.00	0.00	0.30	0.39	
5% 감소	0.93	0.35	0.75	0.41	0.66	0.94	1.00	0.00	0.30	0.39	
10% 감소	0.93	0.35	0.75	0.41	0.66	0.94	1.00	0.00	0.30	0.39	
전국 운송	0.93	0.35	0.75	0.41	0.66	0.94	1.00	0.00	0.30	0.39	
지표 4-3											
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
권역별 운송	0.93	0.36	0.75	0.41	0.69	0.94	1.00	0.00	0.30	0.39	
5% 감소	0.93	0.36	0.75	0.41	0.69	0.94	1.00	0.00	0.30	0.39	
10% 감소	0.93	0.36	0.75	0.41	0.69	0.94	1.00	0.00	0.30	0.39	
전국 운송	0.93	0.36	0.75	0.41	0.69	0.94	1.00	0.00	0.30	0.39	
영역 4											
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	평균
권역별 운송	0.95	0.33	0.76	0.39	0.67	0.88	0.96	0.00	0.33	0.42	0.57
5% 감소	0.95	0.33	0.76	0.39	0.67	0.88	0.96	0.00	0.33	0.42	0.57
10% 감소	0.95	0.33	0.76	0.39	0.67	0.88	0.96	0.00	0.33	0.42	0.57
전국 운송	0.95	0.31	0.75	0.37	0.66	0.83	0.92	0.00	0.35	0.43	0.56

전국으로 석탄재를 운송할 경우 2013년부터 2018년까지의 지표 4-1과 영역 4의 값이 감소하였고, 영역 4의 10개년 값의 평균이 0.1 감소하였다. 지표 값의 감소는 석탄재 폐기물 자원순환성의 감소를 의미하며, 이를 통해 운송 거리가 길어질수록 석탄재 관리에서 자원의 순환이 친환경적으로 이루어지지 않는다고 판단할 수 있다.

2) 직매립 감축에 따른 민감도 분석

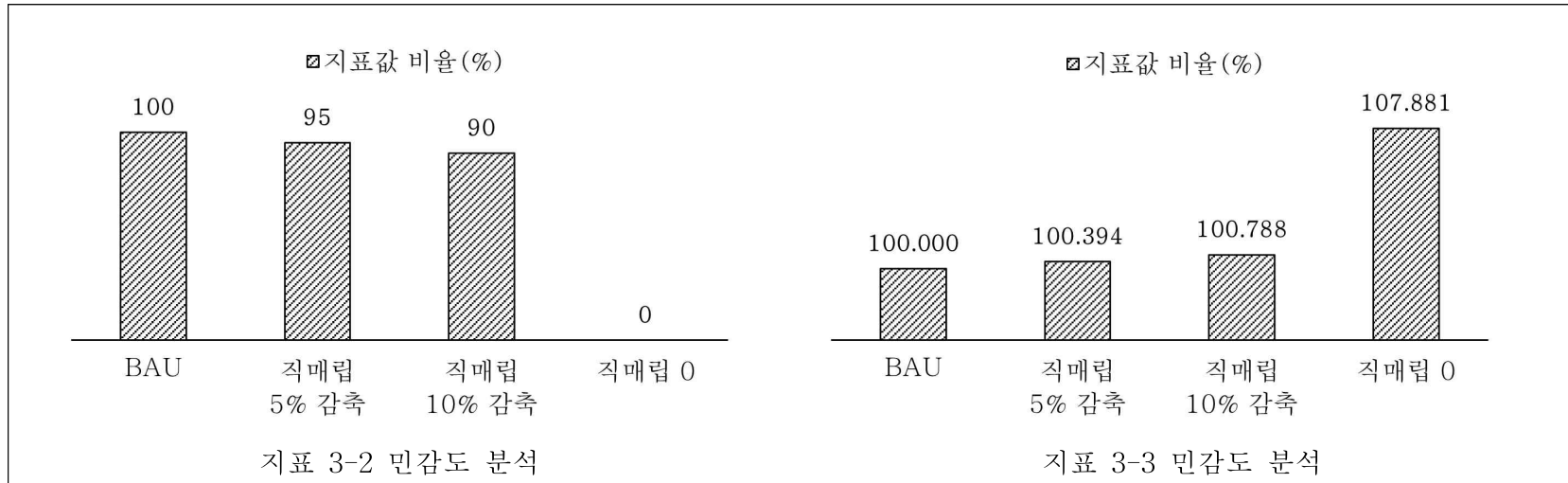
석탄재의 직매립량에 따른 지표 값의 민감도 분석을 실시하였다. 이 연구에서 적용한 기존 석탄재 매립량(BAU)에 비해 5%, 10% 감축될 경우와 직매립이 0일 경우를 가정하였으며, 각 상황에 따른 지표의 값 변화를 기존 발생량을 적용했을 경우의 지표 값과 비교하였다. 또한 매립량 감축으로 인해 매립되지 않은 석탄재는 모두 재활용된다고 가정하였다.

직매립량에 직접 영향을 받는 지표는 석탄재 순환 관리 영역(영역 3)의 지표 3-2와 지표 3-3이다. 석탄재의 직매립량에 따른 민감도 분석 결과를 기존 연구에서 가장 최근 자료인 2021년 석탄재 매립량을 기준으로 하여(지표 값 100%) 비교한 것을 [표 37]과 [그림 12]에 나타내었다.

[표 37] 지표 3-2, 3-3의 지표값 민감도 분석

지표 3-2 민감도 분석				
구분	BAU	5% 감축	10% 감축	직매립 0
지표값 차이(천톤)	0	-29.35	-58.7	-587
지표값 비율(%)	100	95	90	0
(증감 비율, %p)	(0)	(-5)	(-10)	(-100)
지표 3-3 민감도 분석				
구분	BAU	5% 감축	10% 감축	직매립 0
지표값 차이(%)	0	+0.38	+0.76	+3.96
지표값 비율(%)	100	100.394	100.788	107.881
(증감 비율, %p)	(0)	(+0.394)	(+0.788)	(+7.881)

지표 3-2는 석탄재의 최종처분량을 그대로 적용하여 산정한 값이기 때문에 직매립량이 5%, 10% 감소함에 따라 지표값도 5%p, 10%p 감소하였으며, 직매립 제로를 가정했을 경우에는 지표값이 0이 되었다. 또한 석탄재의 순환이용률(재활용률)을 나타낸 지표 3-3은 직매립량이 줄어들어 따라 지표값이 상승하는 추세를 보여주었다. 직매립량을 5% 감축 시 지표값은 0.394%p, 10% 감축 시 0.788%p 증가하는 것으로 나타났다.



[그림 12] 석탄재 순환 관리 영역 내 지표값 민감도 분석

직매립량 감축에 따라 달라진 지표의 값을 표준화한 결과는 [표 38]에 나타내었다. 지표 3-2에서는 직매립량을 5%, 10% 감축한다고 가정했을 경우 10개년 지표의 값이 모두 같은 비율로 감소했기 때문에 최소/최대 방식으로 표준화한 지표의 최종 값에는 변화가 없었다. 지표 3-3에서는 석탄재 직매립량을 5%, 10% 감축했을 경우 표준화한 지표의 값에는 변화가 없었으며, 직매립을 0으로 가정했을 경우에는 지표 3-2와 지표 3-3, 영역 3의 값이 모두 증가하였다. 지표 값의 증가는 자원순환 측면에서 폐기물 관리의 긍정적인 개선을 의미하며, 이를 통해 직매립량을 가능한 한 많이 감축할수록 자원순환에 부합할 것이라 판단할 수 있다.

[표 38] 직매립 감축에 따른 영역 3과 영역 3 내 지표의 표준화 값 변화

지표 3-2											
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
BAU	0.04	0.82	0.21	0.73	0.26	0.51	0.00	0.57	1.00	0.77	
5% 감축	0.04	0.82	0.21	0.73	0.26	0.51	0.00	0.57	1.00	0.77	
10% 감축	0.04	0.82	0.21	0.73	0.26	0.51	0.00	0.57	1.00	0.77	
직매립 0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
지표 3-3											
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	
BAU	0.00	1.00	0.25	0.97	0.10	0.65	0.24	0.60	0.88	0.60	
5% 감축	0.00	1.00	0.25	0.98	0.09	0.65	0.24	0.60	0.87	0.59	
10% 감축	0.00	1.00	0.25	0.98	0.08	0.64	0.24	0.59	0.86	0.58	
직매립 0	0.26	0.91	0.43	1.00	0.00	0.61	0.50	0.52	0.48	0.32	
영역 3											
연도	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	평균
BAU	0.20	0.78	0.32	0.76	0.19	0.41	0.08	0.51	0.96	0.70	0.49
5% 감축	0.20	0.78	0.32	0.76	0.18	0.41	0.08	0.51	0.96	0.70	0.49
10% 감축	0.20	0.78	0.32	0.76	0.18	0.41	0.08	0.51	0.95	0.70	0.49
직매립 0	0.61	0.81	0.64	0.86	0.40	0.56	0.50	0.63	0.83	0.69	0.65

VI. 결 론

1. 결과 정리 및 의의

전세계적으로 적절한 폐기물 관리와 자원순환에 대한 관심이 증가하면서 한국 정부도 2018년 「제1차 자원순환기본계획(2018-2027)」을 수립하여 순환경제를 실현하고자 노력하고 있다. 그러나 우리나라의 폐기물 발생량은 연도별로 지속적인 증가 추세에 있으며, 이 중 국내 공기업 화력발전소에서 발생한 석탄재 발생량은 최근 5개년 평균 연간 약 840만 톤에 이른다. 국내 전력 생산에 있어 화력발전 의존도가 낮아지지 않는 이상 많은 양의 석탄재는 꾸준히 발생할 수밖에 없는데, 이렇게 지속적으로 발생량이 많은 폐기물의 경우 환경에 부정적인 영향을 최소화하면서 순환성을 높일 수 있는 관리 방안이 필요하다. 특정 폐기물의 처리 경로에 대한 여러 측면에서의 평가와 검토가 자원순환 사회 실현을 위한 의사결정에 도움을 줄 수 있다.

이에 본 연구에서는 자원의 순환과 직·간접적으로 관련된 4개 영역의 10개 지표를 활용하여 최근 10년 간 석탄 화력발전 연소재 처리의 전과정이 실제로 자원순환에 긍정적인 방향으로 진행되고 있는지 평가하였다. 지표값 산정에 활용할 자료를 얻기 위해 국내의 5개 공기업 석탄화력발전소에서 발생한 석탄재를 대상으로 하여 석탄재 처리 경로에 따른 전과정평가를 진행하였다. 전과정 영향평가는 순환경제 이행 진단을 위해 선정된 지표의 분석에 필요한 자료를 중심으로 진행하였다. 이후 석탄재 운송거리 변화와 직매립 감축에 따른 지표 값의 변화를 평가하기 위해 민감도 분석을 실시하였다.

석탄재(비산재) 1톤 투입을 기준으로 한 전과정평가 결과, ‘레미콘 25-210-12 재활용’ 경로는 ‘포틀랜드 1종 시멘트로의 재활용’ 경로에 비해 연간 온실가스 배출량 비중은 37.8%, 오존파괴물질 배출량 비중은

0.3%, PM 배출량 비중은 58.6%, 다이옥신/퓨란 배출량 비중은 0.09%로 나타났다. 그리고 매립 처리 시 모든 물질의 배출량이 다른 처리 경로에 비해 매우 적은데, 이는 매립지까지의 운송 거리가 다른 재활용 처리 경로에 비해 매우 짧고 석탄재를 처리하는 공정에서 발생하는 오염물질이 적은 것도 그 이유로 볼 수 있다.

기후변화, 산업, 석탄재 순환 관리, 유해성 감축의 4개 영역에서 10개 지표로 석탄재 처리 과정에서의 자원순환 정도를 연도별로 평가하였다. 10개년 시계열 회귀 분석 결과 산업 영역(영역 2)와 지표 2-2는 긍정적인 방향으로 나아가고 있었으며, 나머지 지표와 영역에서는 통계적인 경향성이 나타나지 않았다. 또한 영역 값을 종합하여 얻은 자원순환 지수의 10개년 회귀분석 결과 또한 유의미한 경향성이 나타나지 않았다. 지수 값은 2019년에 가장 낮고 2012년에 가장 높았는데, 이는 결국 과거에 비해 순환경제와 폐기물 관리에 대한 사회적 관심도가 높아졌음에도 불구하고 석탄재를 처리하는 과정에서는 자원순환에 있어 개선이 일어나지 않고 제자리걸음 상태이거나 오히려 악화된 것을 의미한다.

영역과 영역 내 지표 값의 10개년 데이터를 상관 분석한 결과, 영역 2는 어느 영역과도 의미 있는 상관관계를 갖지 않았으며, 전과정평가 결과를 직접적으로 이용한 영역 1과 영역 4는 경로별 석탄재 투입량에 따라 비슷한 추세의 결과를 얻었기 때문에 아주 높은 양의 상관관계를 나타내었다. 영역 1과 영역 3, 영역 3과 영역 4는 높은 정도의 음의 상관관계를 나타냈는데, 이는 석탄재 발생량과 직매립을 줄이고 재활용률이 높아지는 것이 온실가스나 유해 물질 감축에는 긍정적인 방향으로 작용하지 않을 수 있다는 것을 보여준다. 자원순환을 평가하는 여러 측면에 있어 영역 간 음의 상관관계가 나타날 수 있다는 것은 관련 정책 및 계획 수립에 있어 우선순위를 매겨야 할 상황이 생길 수도 있다는 것을 의미한다. 다양한 지표를 활용한 평가 방식의 도입이 도움을 줄 것이라고 보인다.

운송 거리에 따른 민감도 분석 결과 PM 배출량(지표 4-1) 외의 모든 지표의 값은 운송 거리 변화에 따른 변화가 아주 적었다. PM 배출량 감

소 측면에서는 석탄재의 발생지로부터 재활용 처리 공정까지의 석탄재 운송 거리를 가능한 한 줄이는 것이 의미가 있다고 볼 수 있다. 직매립량 감축에 따른 민감도 분석 결과 직매립을 0으로 가정했을 경우에는 석탄재의 최종처분량(지표 3-2)과 석탄재 순환이용률(지표 3-3), 석탄재 순환 관리 영역(영역 3)의 표준화 이후 지표 값이 모두 증가하였다. 직매립량을 가능한 한 많이 감축할수록 석탄재 폐기물 관리 과정이 자원순환에 긍정적인 방향으로 나아갈 것이라고 예측할 수 있다.

이 연구에서는 석탄재 처리 경로에 대해 여러 측면에서 평가를 시행하여, 특정 폐기물에 있어 자원순환의 의미에 부합하는 관리가 이루어지고 있는지 그 추이를 파악할 수 있었다. 기후변화, 석탄재 순환 관리, 유해물질 감축 영역, 그리고 최종 자원순환 지수에서 모두 최근 10년 간 개선된 모습을 보이지 못했다. 그러나 석탄재 운송거리와 직매립량 감축 등을 통해 자원순환 사회에 한 걸음 다가갈 수 있음을 확인하였다.

또한 전과정평가와 지표값 분석에 따르면 화력발전소에서 발생한 석탄재가 어떤 관리 과정으로 많이 유입되는지에 따라 환경 오염에 더 부정적인 영향을 미치기도, 순환이용률이 높아지기도 하였다. 시멘트나 레미콘으로 재활용되는 석탄재가 많은 연도일수록 자원순환에 긍정적인 영향을 미쳐 석탄재 순환 관리 영역(영역 3)에서 높은 값을 얻는 경향을 보였다. 그러나 이 경우 재활용 공정이나 석탄재 운송에서 발생하는 유해 물질이 많아 기후변화 영역(영역 1)이나 유해성 감축 영역(영역 4)에 속하는 지표는 낮은 값을 보인다. 이에 처리 공정과 운송에서 발생하는 유해물질을 줄일 수 있는 친환경 공정과 기술의 개발이 향후 석탄재 관리에 좋은 대안이 될 것이다. 지표의 분석 결과를 다각도로 고려하여 석탄재 처리 경로에 대한 장단점을 파악하고 개선이 가능한 부분을 구체적으로 찾아 나간다면, 폐기물과 자원순환에 대한 계획이나 정책을 수립할 때 큰 도움이 될 것이다.

2. 한계점 및 향후 연구 방향

본 연구에서는 자료의 접근성으로 인해 공기업 화력발전소의 석탄재 발생량만을 고려하였고, 여러 석탄재 처리 경로 중 시멘트와 레미콘으로의 재활용 처리 과정만을 전과정평가의 대상으로 삼았다는 한계점이 있다. 또한 가용 자료의 부족으로 4개 영역 10개 지표에 한정하여 순환경제의 이행을 분석했기 때문에 다른 측면에서는 구체적인 평가가 이뤄지지 못했다는 한계점이 존재한다. 향후 관련 지표를 더 추가하여 평가한다면, 석탄재 관리에 있어 어떤 방안이 자원순환 측면에서 가장 의미가 있을지 구체적으로 판단할 수 있을 것이다. 또한 이 연구에서 개발한 자원순환 이행 진단 방식을 석탄재 뿐만 아니라 다른 종류의 폐기물에 대해서도 적용, 확장시키는 연구도 가능할 것이다.

참 고 문 헌

[국내 문헌]

- 강상목 & 김명수. (2000). 환경지표와 지표체계 개발. *국토연구* 30, 31-49.
- 고광훈, 황용우 & 조현정. (2007). 건축물 해체 폐기물 처리에 대한 전과정평가. *한국전과정평가학회지* 8(1), 1-9.
- 고용일. (2013). 수평배수재로 재활용하는 회사장 혼합석탄재의 시공 방안. *한국지반환경공학회 논문집* 14(4), 53-58.
- 관계부처 합동. (2018). *지속가능한 순환경제 실현을 위한 제1차 자원순환기본계획(2018-2027)*.
- 국립기술품질원. (1997). *KS A 14040 환경경영-전과정평가-원칙 및 기본 구조*.
- 김돌선, 한광수 & 이동근. (2019). 석탄화력발전소에서 발생하는 비회로부터 유용성분의 회수. *청정기술* 25(3), 179-188.
- 김정석, 황선재, 송유진 & 김혜영. (2013). 지표 체계안 개발을 위한 제언: 출산 환경 및 행태 지표를 중심으로. *조사 연구* 14(3), 79-114.
- 박상우. (2018). 순환경제, 그 이행을 위한 평가지표 비교 : EU·일본·한국. *한국폐기물자원순환학회 춘계학술발표논문집, 2018*, 82.
- 박익범, 송일석, 이문구, 임송택 & 정재수. (2005). 지정폐기물 소각공정의 전과정평가(LCA) 연구. *한국전과정평가학회지* 6(1), 25-33.
- 박조범, 조현태, 김용혁 & 류득현. (2019). 석탄재 재활용 경량 골재를 사용한 콘크리트의 역학적 특성. *콘크리트학회 논문집* 31(2), 173-180.
- 박진희, 지상우, 신희영, 조환주 & 안지환. (2019). 호주의 석탄재 재활용 사례와 석탄재 재활용과 관련된 환경 문제. *자원리싸이클링* 28(4), 15-22.
- 산업통상자원부. (2020). *제9차 전력수급기본계획 (2020~2034)*.

- 「석탄발전 폐지·감축을 위한 정책 방향」 (산업통상자원부, 2021)
- 서동환 & 맹준호. (2015). 화력발전소 회처리장 구성에 따른 환경영향 최소화를 위한 석탄회 재활용 확대방안에 관한 연구. *환경영향평가* 24(5), 472-486.
- 서준형, 백철승, 조진상, 안지환, 윤도영 & 조계홍. (2018). 발전소 비산재를 결합재로 활용한 로내탈황용 석회 흡수제의 탈황효율. *자원리사이클링* 27(3), 2018, 58-65.
- 양지선. (2020). *서울시 종량제 분리배출 가정생활폐기물 감량 시나리오에 따른 온실가스 배출량 감축 효과의 전과정 평가*. (석사학위, 서울대학교 환경대학원)
- 유승훈, 곽승준 & 김태유. (1998). 환경관련 의사결정을 위한 환경영향지수: 전력산업을 중심으로. *자원경제학회지*, *한국자원경제학회* 7(2), 111-135.
- 이소라, 조지혜, 신동원, 정다운, 고인철, 이찬희, 황용우 & 홍수열. (2019). *순환경제로의 전환을 위한 플라스틱 관리전략 연구*. 한국환경정책평가연구원.
- 이수정, 주형태, 전철민, 강남희 & 조성백. (2013). 서천화력발전소 매립 석탄재로부터 제조한 다양한 조성비의 지오폐리와 그 특성의 평가. *한국세라믹학회지* 50(2), 134-141.
- 임만택 & 권창룡. (2010). 지속가능 환경평가지표의 개발에 관한 연구. *한국주거학회논문집* 21(6), 99-108.
- 임혜숙. (2015). *자원순환분야 지속가능발전목표(SDGs) 이행 기반 마련을 위한 기초연구*. 한국환경정책평가연구원.
- 자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법률 제1조 제1항.
- 전태완. (2014). *석탄재 재활용 적정성 및 용도 확대방안 연구*. 국립환경과학원.
- 정우정. (2003). *생활폐기물 소각 및 매립처리 공정에 관한 전과정 평가* (석사학위, 이화여자대학교 과학기술대학원)
- 정우정, 이상돈 & 김동수. (2005). 생활폐기물 소각 처리공정의 전과정평

- 가에 의한 비교. *환경영향평가* 14(6), 443-453.
- 정해식, 강신욱, 김동진 & 김선아. (2018). *삶의 질 개선을 위한 정책과제 개발*. 경제인문사회연구회 협동연구총서.
- 조성훈. (2009). *전과정 평가를 이용한 매립과 폐기물 고형연료화의 환경영향 비교* (석사학위, 서울대학교 환경대학원)
- 조지혜, 주문술, 신동원, 고인철. (2020). *순환경제 이행 진단을 위한 통합평가지표 개발 및 활용방안 구축*. 한국환경정책평가연구원.
- 조한나, 맹준호 & 김은영. (2017). *국내 석탄재 재활용 확대 방안 연구*. *한국환경영향평가학회* 26(6), 563-573.
- 주문술, 이소라 & 이진혁. (2019). *순환경제사회를 위한 물질흐름분석의 정책적 활용 동향 연구*. 한국환경정책평가연구원.
- 최상홀. (1995). 시멘트의 종류. *시멘트* 141, 67-71.
- 통계개발원. (2019). *지표작성방법론*.
- 한국건설기술연구원. (1992). *성토재로서의 석탄회 이용방안 연구*.
- 한국시멘트협회. (2021). *2020 한국의 시멘트산업 통계*.
- 한천구. (1997). 레미콘의 제조. *콘크리트학회지* 9(2), 23-29.
- 환경보전협회. (1998). *오존층파괴와 기후변화*. *환경보전* 20(6), 10-15.
- 환경부 온실가스종합정보센터. (2018). *국가 온실가스 인벤토리 보고서*.

[국외 문헌]

- Akar, G., Polat, M., Galecki, G. & Ipekoglu, U. (2012). Leaching behavior of selected trace elements in coal fly ash samples from Yenikoy coal-fired power plants. *Fuel Processing Technology* 104, 50 - 56.
- Bockstaller, C. & Girardin, P.(2003). How to validate environmental indicators. *Agricultural Systems* 76(2), 639-653.
- Chang, A. C., Page, A. L. & Bingham, F. T. (1981). Re-utilization of Municipal Wastewater Sludge-Metals and Nitrate. *JWPCF*, 58(2). 237-235.

- De Pascale, A., Arbolino, R., Szopik-Depczynska, K., Limosani, M. & Ioppolo, G. (2020). A systematic review for measuring circular economy: The 61 indicators, *Journal of Cleaner Production* 281, 124942.
- Elia, V., Gnoni, M. G. & Tornese, F. (2017). Measuring circular economy strategies through index methods: A Critical analysis, *Journal of Cleaner Production* 142, 2741-2751.
- European Commission. (2015). *Circular Economy Action Plan*.
- European Commission: EC. (2018a). *Measuring Progress Towards Circular Economy in the European Union*.
- Freudenberg, M. (2003). *Composite indicators of country performance: a critical assessment*. OECD, Paris.
- Gabrielsen, P. & Bosch, P.(2003). *Environmental Indicators: Typology and Use in Reporting*. European Environmental Agency.
- George, W. (2014). 2 - *FUNDAMENTAL PRINCIPLES GOVERNING SOLVENTS USE*. *Handbook of Solvents (Second Edition, pp. 11-72)*. ChemTec Publishing.
- Haupt, M. & Zschokke, M. (2017). How can LCA support the circular economy? –63rd discussion forum on life cycle assessment, *The International Journal of Life Cycle Assess* 22, 832 - 837.
- Henmi, T. (1987). Synthesis of Hydroxy-Sodalite (“Zeolite”) from Waste Coal Ash, *Soil Science and Plant Nutrition* 33(3), 517-521.
- IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Jacobs, R., Smith, P. & Goddard, M. (2004). Measuring performance: an examination of composite performance indicators. *Centre for Health Economics, Technical Paper Series 29*.

- Jambhulkar, H. P., Shaikh, S., & Kumar, M. S. (2018). Fly ash toxicity, emerging issues and possible implications for its exploitation in agriculture; Indian scenario: A review. *Chemosphere* 213, 333 - 344.
- Lei, H., Li, L., Yang, W., Bian, Y. & Li C. (2021). An analytical review on application of life cycle assessment in circular economy for built environment. *Journal of Building Engineering* 44, 103374.
- Lemly, A. D. (1985). Ecological basis for regulating aquatic emissions from the power industry: The case with selenium. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 5, 465 - 486.
- Mulya, K. S., Zhou, J., Phuang, Z. X., Laner, D. & Woon, K. S. (2022). A systematic review of life cycle assessment of solid waste management: Methodological trends and prospects. *Science of the Total Environment* 831, 154903.
- National Oceanic and Atmospheric Administration, National Aeronautics and Space Administration, United Nations Environment Programme, World Meteorological Organization & European Commission. (2010). *World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 52. Scientific Assessment of Ozone depletion: 2010*.
- Neuwahl, F., Cusano, G., Benavides, J. G., Holbrook, S. & Roudier, S. (2019). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration. *EUR 29971*
- OECD. (2008). *Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide*.
- OECD. (2014). *Green Growth Indicators*.
- Reash, R. J. (2004). Dissolved and total copper in a coal ash effluent

and receiving stream: Assessment of in situ biological effects. *Environmental Monitoring and Assessment* 96, 203 - 220.

Rigamonti, L., Falbo, A., Zampori, L. & Salsa, S. (2017). Supporting a transition towards sustainable circular economy: sensitivity analysis for the interpretation of LCA for the recovery of electric and electronic waste. *The International Journal of Life Cycle Assess* 22, 1278 - 1287.

Valeev, D., Bobylev, P., Osokin, N., Zolotova, I., Rodionov, I., Salazar-Concha, C. & Verichev, K. (2022). A review of the alumina production from coal fly ash, with a focus in Russia, *Journal of Cleaner Production* 363.

Zacco, A., Borgese, L., Gianoncelli, A., Struis, R. P. W. J., Depero, L. E. & Bontempi, E. (2014). Review of fly ash inertisation managements and recycling. *Environmental Chemistry Letters* 12, 153 - 175.

Zhou, H., Bhattarai, R., Li, Y., Li, S. & Fan, Y. (2019). Utilization of coal fly and bottom ash pellet for phosphorus adsorption: Sustainable management and evaluation. *Resources, Conservation and Recycling*, 149, 372-380.

[웹 페이지]

류지민. (2021년 7월 25일). 황금알 낳는 ‘쓰레기 처리’ 대기업도 눈독. 매경이코노미. <https://m.mk.co.kr/economy/view.php?sc=50000001&year=2021&no=716895>

배연환. [MBC강원영동NEWS]. (2018년 12월 24일). [뉴스리포트] 석탄회 재활용 제품 생산, 재활용 맞나?181224 [영상]. 유튜브. <https://www.youtube.com/watch?v=JwqT9a2v7N4>.

에너지원별 발전량 현황. (2022년 7월 22일). *e-나라지표*.

https://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1339

Circular Economy Indicators. (2022, June 6). European Commission. https://ec.europa.eu/environment/ecoap/indicators/circular-economy-indicators_en.

OECD Better Life Index. (n.d.) <https://www.oecdbetterlifeindex.org/about/better-life-initiative/#question15>

TRI Dioxin and Dioxin-like Compounds and TEQ Data Files: Calendar Years 2008 - Present. (2022, October 19). U.S. EPA <https://www.epa.gov/toxics-release-inventory-tri-program/tri-dioxin-and-dioxin-compounds-and-teq-data-files-calendar>

부 록

[부록 표 1] 석탄화력발전소 및 시멘트 생산 공장과 레미콘 생산 공장의 좌표

구분		위도(°)	경도(°)	구분	위도(°)	경도(°)				
강원	석탄화력발전소	1	37.1878308	수도권	레미콘공장	1	37.6757588	126.8843080		
		2	37.4851603			129.1457605	2	37.6205720	127.1419635	
	시멘트공장	1	37.4954657			129.1320488	3	37.0567179	127.1312849	
		2	37.4261957			129.1763488	4	37.4660378	127.1192628	
		3	37.8885896			127.7188917	5	37.4060037	126.7018301	
	레미콘공장	1	37.7205078	128.9776258	발전소	1	34.8397667	127.6922168		
		2	37.3796701	127.9343890		시멘트공장	1	34.9385677	127.7648701	
		3	37.4447849	128.0853473	2		35.3202188	127.1437152		
	경상	석탄화력발전소	1	34.9133630	전라	레미콘공장	1	35.1141325	126.8787026	
			2	34.9513667			127.8207650	2	35.3545229	127.0278323
		시멘트공장	1	35.3267124			128.8041699	3	35.3498889	126.7757891
			2	36.5198892			128.6878258	4	35.8247898	127.0002358
3			35.0756490	128.9942874			5	35.8673258	127.0719087	
레미콘공장		1	35.3169896	128.7956030	석탄화력발전소	1	37.0509196	126.5124773		
		2	35.3919663	128.7267540		2	36.9026549	126.2324481		
		3	36.0468811	128.3469750		3	36.4028551	126.4958410		
		4	36.1380063	129.3434661		4	36.1463285	126.5004776		
		5	35.9022134	128.5698556	시멘트공장	1	36.1237998	127.0887486		
		6	35.9072826	128.6042644		2	36.6042411	126.6779171		
		7	35.1181300	129.0845164		3	37.2053630	128.3019418		
		8	35.5154666	129.3689575		4	36.5228337	127.5132076		
수도권		석탄화력발전소	1	37.2445308	충청	레미콘공장	5	37.0249865	128.3197493	
			1	37.5887945			126.8820012	1	36.3752985	127.4096579
		시멘트공장	2	37.3381410			126.9516595	2	36.4326833	127.2749137
	1		36.4096711	127.2606475			3	36.4096711	127.2606475	
	2	36.9319789	126.5951635	4			36.9319789	126.5951635		
	3	36.9294879	127.7207414	5			36.9294879	127.7207414		
4	36.5288726	127.4102766	6	36.5288726	127.4102766					

[부록 표 2] 자원순환 관련 지표 연구 문헌

제목	저자
국가지속가능발전목표 수립보고서 2019	환경부
국가지표체계 - 국민 삶의 질 지표	통계청
2013 녹색성장지표 작성 결과	통계청
제5차 국가환경종합계획(2020-2040)	관계부처합동
녹색경제 평가를 위한 지표체계 개발	김종호 외, 2016
순환경제 이행 진단을 위한 통합 평가지표 개발 및 활용방안 구축	조지혜 외, 2020
지속가능한 자원관리를 위한 산업 전과정에서의 자원효율성 관리 전략 수립	이일석 외, 2015
제1차 자원순환기본계획	관계부처 합동
EU Circular economy indicators	EU
OECD Inventory	OECD, 2014
Material Circularity Indicator(MCI)	Ellen Macarthur Foundation
A lifecycle-based sustainability indicator framework for waste-to-energy systems and a proposed metric of sustainability	Chong et al., 2016
A municipal solid waste indicator for environmental impact: Assessment and identification of best management practices	Deus et al., 2020
Nano and micro level circular economy indicators: Assisting decision-makers in circularity assessments	de Oliveira et al., 2021
Hybridised sustainability metrics for use in life cycle assessment of bio-based products: resource efficiency and circularity	Lokesh et al., 2020
Circular economy indicators in relation to eco-innovation in European regions	Smoal et al., 2017
Life cycle indicators for monitoring the environmental performance of European waste management	Manfredi et al., 2013
Proposal of a Sustainable Circular Index for Manufacturing Companies	Azevedo et al., 2017
Bringing the circular economy closer to small and medium enterprises: Improving water circularity without damaging plant productivity	Sartal, 2020
Measuring Progress towards a Circular Economy; A Monitoring Framework for Economy-wide Material Loop Closing in the EU28	Mayer et al., 2018
The need for better measurement and employee engagement to advance a circular economy: Lessons from Biogen's "zero waste" journey	Veleva et al., 2017

부록 표 2 계속

제목	저자
Circular Economy - Theoretical Benchmark or Perpetual Motion Machine?	Cullen, 2017
Establishing and testing the “reuse potential” indicator for managing wastes as resources	Park et al., 2014
The zero waste index: a performance measurement tool for waste management systems in a ‘zero waste city’	Zaman et al., 2013
Circular economy assessment tool for end of life product recovery strategies	Alamerew et al., 2019

Abstract

Life cycle assessment of power plant ash management in Korea using Resource Circulation Indicators

Hyeon, Seungyeon

Environmental Management Major

Department of Environmental Planning

The Graduate School of Environmental Study

Seoul National University

Domestic waste generation is on a continuous increase year by year, and the increase in waste in the workplace emission facility system is the highest. Among them, coal ash generated from domestic thermal power plants reaches about 8.4 million tons a year, accounting for most of the combustion residue. Korea needs a coal ash management plan that can further increase the circulation of resources as it is difficult to

construct additional waste landfills due to its high population density in a small land area and low acceptance of local residents. With the recent increase in interest in proper waste management and resource circulation, the government has established the First Basic Plan for Resource Circulation (2018-2027) in 2018 to realize a sustainable circulation system.

In this study, coal ash generated by coal-fired power plants (Korea Southeast Power, Korea Southern Power, Korea East-West Power, Korea Western Power, Korea Central Power) from 2012 to 2021 was evaluated according to the recycling of Portland Type 1 cement furnace, Recycling to Remicon 25-210-12, and the flow of coal ash. The second phase of the study introduced indicators of four areas: climate change, industry, waste circulation management, and hazard reduction, and evaluated how much the entire process of treating coal ash from thermal power plants can contribute to the resource circulation and environment. Each indicator value was standardized in the maximum-minimum method and then processed with the same weight to obtain the final index value, and the overall trend of resource circulation in the coal ash management process was analyzed through regression analysis of the last 10 years. After that, sensitivity analysis was conducted to determine the effect of transportation distance and direct landfill reduction on the surface value.

According to the results of the study. As a result of the entire process evaluation based on the input of 1 ton of coal ash (scattering), the annual greenhouse gas emissions,

ozone-destructive substance emissions, PM emissions, and dioxin/furan emissions were high in the order of "Recycling 25-210-12 Recycling," "Portland Type 1 Cement." This value was reflected in the calculation of index values in areas 1 and 4. The entire process of treating coal ash was evaluated using 10 indicators in four areas: climate change, industry, coal ash circulation management, and risk reduction. As a result of 10-year time series regression analysis, the industrial area (area 2) and the index 2-2 showed positive direction results, and no trends appeared in the remaining indicators and areas. In addition, as a result of a 10-year regression analysis of the resource circulation index obtained by synthesizing the area values, it was confirmed that the circulation of resources has not improved in a positive direction in the process of coal ash management over the past 10 years. As a result of correlating the 10-year data of the area and the index values in the area, Area 2 did not have a meaningful correlation with any area, Area 1 and Area 4 showed a very high positive correlation, and Area 1 and Area 3, and Area 3 and Area 4 showed a high negative correlation. As a result of sensitivity analysis, it was found that the reduction of transportation distance has a great sensitivity to PM emissions. In addition, it could be predicted that the reduction of direct landfill volume would contribute to the circulation of resources as much as possible by increasing the index values of the final disposal amount of coal ash and the circulation utilization rate of coal ash.

In this study, it was possible to evaluate the degree of

circulation by performing a specific evaluation on the coal ash management path. In the past 10 years, the contribution of coal ash as a resource has been in place as a whole, but it has been confirmed that it can contribute to circulation by reducing transportation distance and direct landfill. Considering the results of the analysis of the indicators from various angles, it is expected that if the pros and cons of the coal ash management path are identified and the areas that can be improved are specifically found, it will take a step closer to a resource circulation society.

Keywords : Coal Ash Management, Thermal Power Plant Combustion Management, LCA, Resource Circulation, Resource Circulation Indicators

Student Number : 2020-21365