creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

경제학석사학위논문

원자력 및 신재생에너지 발전의 온실가스 감축 비용 비교

2021년 8월

서울대학교 대학원
농경제사회학부
이 용 성

원자력 및 신재생에너지 발전의 온실가스 감축 비용 비교

지도교수 김 현 석

이 논문을 경제학석사학위논문으로 제출함

2021년 8월

서울대학교 대학원
농경제사회학부 농업·자원경제학전공
이 용 성

이용성의 석사학위논문을 인준함
2021년 8월

위 원 장 권 오 상
부 위 원 장 김 현 석
위 원 유 도 일

국문초록

원자력 및 신재생에너지 발전의 온실가스 감축 비용 비교

서울대학교 대학원
농경제사회학부
이용성

20세기와 21세기에 지구에서 온난화가 진행 중이라는 것은 부정할 수 없는 과학적 사실이다. 동 기간 지구에서 진행된 지구 온난화는 인류의 활동에 큰 영향을 받았다는 것 역시 연구를 통해 확인되었으며(IPCC, 2014), 특히 화석연료의 사용에 의한 이산화탄소(CO_2) 배출이 지구의 온난화에 큰 역할을 끼치고 있었음이 알려졌다. 온실 효과를 발생시키는 온실가스의 종류에는 CO_2 이외에도 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O), 프레온가스(CFC) 수증기(H_2O)등 다양한 종류가 있으며 이 중에는 동일 중량에서 CO_2보다 훨씬 큰 온실효과를 일으키는 기체도 있으나, 그 배출량의 차이 때문에 온실효과 발생의 65%가량을 CO_2가 차지하는 것으로 추정되고 있다(IPCC, 2014).

그러나 미국의 파리협정 탈퇴와 같은 사례에서 보이듯이 온실가스 감축이 저항에 부딪히는 이유는 온실가스 배출과 경제적 성장이 밀접한 연관이 있기 때문이다. 과거의 연구에 의하면 GDP로 측정되는 국가의 경제적 성장과 해당 국가의 온실가스 배출량은 강력한 양의 상관관계로 나타났으며(Bengochea-Morancho et al., 2001; Farhani and Rejeb, 2012; 진상현,

2013; 노건기 외, 2016; 진보영 외, 2020), 이 때문에 온실가스 배출 감축 목표를 달성하고자 하면 경제적 성장이 둔화될 것이라는 우려가 있다. 따라서 CO_2를 비롯한 온실가스 배출량을 감축하면서도 경제적 성장에 가해지는 부담과 피해를 최소화하기 위해서는, 가장 비용 효율적인 이산화탄소 감축방안을 탐색할 필요가 있다.

기존의 연구에서 경제성장과 CO_2 배출량에 대한 상관관계에 관한 연구는 비교적 충실하게 진행되었으며 CO_2 배출량을 감축하기 위한 대안으로서 CO_2 배출량에 원자력과 신재생에너지가 미치는 영향을 연구한 논문도 존재하고 있다. 그러나 발전원의 전환을 통하여 이산화탄소 배출량을 감축하기 위한 비용을 계산한 연구는 아직 부족한 실정이다.

본 연구에서는 다양한 발전원 중 운용 과정에서 CO_2를 배출하지 않는 원자력 발전과 신재생 발전의 비중 변화가 대한민국에서 CO_2 배출량이 가장 많은 영역인 전력 부분에서 CO_2 배출에 어떤 영향을 주었는지를 규명하고, 이를 이용해 발전원별 CO_2 감축비용을 비교하였다. 먼저 1977년부터 2017년까지의 국민소득, CO_2 배출량, 원자력 발전 비중, 신재생에너지 발전 비중을 자기회귀분배시차(Autoregressive distributed lag, ARDL) 모형을 통해 그 장기 영향 계수를 계산하였다. 그 후 도출된 장기 영향계수에 각 발전원에 대해 균등화 발전원가(Levelized cost of electricity, LCOE)를 곱하여 이산화탄소 배출량을 1% 감축하기 위해 각 발전원별로 소요되는 비용을 $/MWh 단위로 계산하였고, 이를 비교하여 어떤 발전원이 더 효율적인가를 추정하였다.

또한 각 발전원별 비용을 비교하는 과정에서, 원자력 발전은 운용 단가는 저렴하나 사고 발생 시 비용이 매우 크고, 환경적인 피해와 주민 건강에 미치는 영향 등의 비용이 발생하므로 실질 비용은 눈에 보이는 것보다 더 높다는 주장이 있었다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 위험을 모두 외부비용으로 환산하여 포함했으며, 신재생에너지 부분도 동일하게 처리하였다.

이를 고려하여 분석을 진행한 결과 총발전량을 1MWh 라고 가정하였을 때 이산화탄소 배출량을 1% 감축시키기 위해서는 원자력 발전을 통해서는 $3.61, 신재생 발전을 통해서는 $21.45가 필요한 것으로 분석되었다.

이를 통하여 볼 때 이산화탄소 배출량을 감축시키기 위해서는 원자력 발전이 신재생에너지 발전보다 상대적으로 비용 효율적인 것을 알 수 있다.
본 연구는 신재생 발전의 경우 21세기 이후 발전원의 다변화가 이루어지고 그 비중이 급격하게 증가하여 분석에 있어 신재생 발전을 각 발전 종별로 세세하게 나누어서 분석하지 못했다는 한계점을 가진다. 또한, 각 발전원의 외부 비용을 추산하는 과정에서 발전 용지의 조성에 소요되는 환경적 피해 등이 아직 연구가 미비하여 면적당 발전 원가 등이 연구에 포함되지 못하였다. 이러한 부분에 대해서는 차후 관련 연구가 진행되어 데이터가 축적된다면 해결될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 원자력, 신재생, 발전, 온실가스, 이산화탄소,
학　번 : 2013-21120

< 목 차 >

제 1 장 서 론 ····· **1**
제 1 절 연구의 배경 및 필요성 ····· 1
제 2 절 연구의 목적 및 내용 ····· 4
제 3 절 논문의 구성 ····· 5
제 2 장 기후변화 대응과 대한민국의 전력 산업 현황 ····· **6**
제 1 절 기후변화 대응 현황 ····· 6
제 2 절 대한민국의 전력 발전 현황 ····· 7
제 3 장 선행 연구 및 연구 범위 ····· **9**
제 1 절 선행연구 검토 ····· 9
제 2 절 연구의 범위 ····· 11
제 3 절 분석대상 자료 ····· 11
제 4 장 이론적 배경 및 모형 ····· **20**
제 1 절 이론적 배경 ····· 20
제 2 절 실증 분석 모형 ····· 22
제 5 장 실증분석 결과 ····· **27**
제 1 절 단위근 검정 및 공적분 검정 결과 ····· 27
제 2 절 실증분석 모형의 추정 결과 ····· 29
제 6 장 요약 및 결론 ····· **33**
참 고 문 헌 ····· **35**

< 표 목 차 >

<표 2-1> 연도별·연료원별 대한민국 발전 설비 용량 ····· 8
<표 3-1> 각 발전원 별 균등화 발전 원가 ····· 13
<표 3-2> 각 발전원 별 외부 비용 총액 및 발전량당 비용 ····· 14
<표 3-3> 신재생 발전의 단가 계산 ····· 15
<표 3-4> 원자력 및 신재생에너지 발전단가 (외부비용 포함) ····· 16
<표 3-5> 변수별 자료분석 ····· 18
<표 5-1> ADF 단위근 검정 결과 ····· 27
<표 5-2> CO_2 배출량과 관련 변수들 간 공적분 검정 결과 ····· 28
<표 5-3> CO_2 배출량의 장기 영향계수 추정결과 ····· 30
<표 5-4> CO_2 배출량의 단기 영향계수 추정결과 ····· 30

< 그림 목 차 >

<그림 2-1> 연도별·발전원별 발전실적 ····· 8
<그림 3-1> 각 변수별 연간 변동 ····· 19

제 1 장 서 론

제 1 절 연구의 배경 및 필요성

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 발간한 5차 기후변화 보고서에 따르면, 최근 인간이 배출한 인위적 온실가스의 양은 관측 이래 최고 수준이며, 이로 인한 기후변화는 인간계와 자연계에 광범위한 영향을 주고 있다. 인간의 활동에 의한 온실가스 배출량은 1970년부터 2011년까지의 40년간의 배출량이 그 이전 인간의 역사 전부에 해당하는 기간 배출된 분량보다 많은 것으로 추정되고 있다. 동 보고서에 의하면 화석연료의 사용과 다양한 산업공정에서 배출되는 CO_2 는 1970년~2010년 기간 동안 배출된 온실가스 배출량의 78%를 차지하고 있으며, 온실효과 발생량의 65%가량을 차지하는 것으로 추정된다.

이처럼 인간의 활동에 의해 대량으로 배출된 온실가스에 의한 기후변화는 다양한 문제를 일으키고 있다. Stern Review(2006) 에 의하면, 이미 기온은 0.5℃이상 증가하였으며, 향후 10~20년동안 온난화로 인한 기온은 0.5℃이상 더 증가할 것으로 예상하였다. 산업화로 말미암은 대기 중의 온실가스 축적은 경제성장에 의해 가속하고 있으며, 이로 인한 해수면 상승, 홍수, 식량난, 이상기후로 자연재해와 질병은 세계 인구 및 생태계의 생물이 감소하는 결과를 가져올 것이라고 한다. Stern Review(2006)는 다음 세기 동안 5~6℃ 기온의 증가가 있을 것이며, 이는 전 세계적으로 5~10%가량의 GDP 손실을, 일부 빈곤 국가에서는 10% 이상의 GDP 손실을 가져올 것으로 추정하고 있다.

이처럼 기후 변화에 의해 극한기후 현상의 발생 빈도 증가는 자연재해의 발생 빈도 증가, 해양 및 농업 지역에서 수확량 감소, 가용수자원 감소로 인한 거주 가능 구역의 축소와 재배 가능 구역의 축소, 생태계 교란으로 인한 전염병 발생 빈도 증가 등을 일으킬 것으로 예측되었으며, 이러한 예측은 현재 진행형으로 우리 곁에서 실현

되고 있다(IPCC, 2014). 일례로 미국 서부를 대표하는 후버댐의 경우, 지구 온난화로 인한 강수량 감소와 증발량 증가는 댐 수위의 지속적인 감소를 일으켰으며, 이로 인해 발전량 감소와 상수도 공급 지역의 광범위한 절수 조치도 시행되게 하였다.

전 세계는 이와 같은 지구 온난화 문제를 억제하거나 최소한 둔화시켜야 한다는 것에는 동의하고 있다. 1997년 채택된 교토의정서나 2015년의 파리 협약으로 대표되는 기후변화 협약 등이 그와 같은 노력의 하나이며, 대한민국 역시 파리 기후변화 협약을 비준한 비준국으로서 2015년 제출한 INDC(Intended Nationally Determined Contribution)에 따르면 2030년 배출 전망 대비 37% 감축을 목표로 하고 있다.

그러나 CO_2 감축이 이토록 이슈가 되는 것에는 경제 발전과 CO_2 배출 감축이 양립하기 어렵기 때문이다. 인간은 개인의 행복을 위해 삶의 질을 높이려 하고, 많은 연구에서 삶의 질에 대한 대리변수로 사용되는 GDP의 증가는 에너지 소비량과 양(+)의 상관관계가 있음은 다수의 연구를 통해 입증된 바가 있다. 이러한 연구 중 Kraft J., and A. Kraft(1978)의 연구에서는 미국의 경제성장이 에너지 소비를 증가시켰다는 인과관계를 입증하였고, Glasure and Lee(1997)는 오차수정모형을 사용하여 분석한 결과 대한민국과 싱가포르에서는 두 변수 간 상호의존 관계를 확인하였다. 이러한 연구들을 통하여 볼 때 GDP 증가와 함께 에너지 소비량이 증가하는데, 이는 는 주요 에너지원인 화석연료 소비의 증가와 이로 인한 온실가스 배출의 증가를 가져올 것이라고 예상할 수 있다.

그러나 Shafik and Bandyopadhyay(1992) 에 의하면, 경제성장과 환경오염에 미치는 영향은 단순한 양의 상관관계로 한정되지 않는다. 경제성장이 환경오염에 미치는 영향은 환경쿠즈네츠 곡선(Environmental Kuznets Curve, EKC)으로 설명될 수 있는데, 환경쿠즈네츠 곡선은 경제성장과 온실가스 배출량 사이에 역 U자형 관계를 가진다는 가설로, 이는 경제성장 초기 단계에는 경제 성장이 환경 악화를 불러오지만 일정 수준 이상의 소득수준 에서는 경제성장이 오히려 환경 개선을 불러온다는 가설이다.

이러한 환경 쿠즈네츠 곡선은 Maslow(1943)의 욕구 단계설을 통해

서도 뒷받침할 수 있는데, 의식주를 포함한 생리적 욕구가 충족되기 이전에는 경제발전을 통해 얻어지는 자원이 이를 만족시키기 위해 투입되는 반면, 경제 발전을 통해 기본적인 생리적 욕구와 안전에 대한 욕구가 충족된 이후에는 좀 더 나은 삶의 질을 만족시키고자 하는 욕구가 비로소 나타나게 되고 이것이 환경 쿠즈네츠 곡선과 같은 형태로 나타난다는 것이다.

따라서 1인당 국민소득이 2019년 기준 28,675달러[1)]인 대한민국의 경우에서도 향후 환경에 대한 욕구는 더 증가할 것으로 예상할 수 있으며, 이를 위하여 탄소 감축을 달성하는 가운데에서 전력 수요를 충족시키는 발전 방안을 연구하는 것이 필요하다. 대한민국의 경우, IEA(International Energy Agency, 2020)의 자료에 따르면 2018년 기준 대한민국 전체 CO_2 배출량의 54.9%에 달하는 CO_2가 전력과 난방에서 배출되고 있는데, 이러한 전력과 난방 부문에서 CO_2 배출량을 감소시킨다면 전체 CO_2 배출량을 감소시킬 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 그러므로 소득 증가 추세를 유지하면서도 CO_2 배출량을 저감하기 위해서는 에너지 발전원에서 탄소 배출량을 줄일 수 있는 방안을 제시할 필요가 있다.

CO_2 배출이 적거나 없는 경제적인 에너지 발전 방법은 최근까지 원자력 발전이 가장 널리 활용되었으나, 체르노빌과 후쿠시마 등의 원자력 발전 사고로 인하여 대한민국에서는 탈원전 정책이 대두되었다. 이에 대한 대안으로 신재생에너지라 불리는 풍력, 태양광 등을 이용한 발전 방안에 대한 관심이 높아지고 있으며, 실제로 많은 국가에서는 실험적으로 혹은 장기적으로 신재생에너지를 미래 에너지 발전 방안으로 연구 중에 있다. 그러나 신재생 발전은 그동안 많은 발전을 거듭하여 왔음에도 불구하고 2021년 현시점에서는 아직 균등화발전원가(Levelized Cost of Electricity, LCOE) 측면에서 다른 발전에 비해 단가가 비싼 편이며, 원자력과 비교하는 경우 특히 발전 단가와 단위 면적당 발전용량 측면에서 크게 불리하여 원자력을 대체 할 수 있는가에 대해서는 논쟁의 대상이 되고 있다.

기존의 선행연구에서 발전원별 LCOE 에 대한 연구나 발전원별

1) Worldbank, Constant 2010 USD

CO_2 배출량에 영향을 미치는 정도에 대한 연구는 이미 많이 진행되어 있으나, 이를 동시에 적용하여 경제적 측면에서 CO_2 감축 단가를 연구한 논문은 거의 없으며, LCOE를 추산하는 과정에서도 원자력의 사고 비용과 같은 외부 비용이 고려되지 않고 누락된 경우가 많았다. 따라서 장기적인 CO_2 감축 전략을 수립할 때 앞서 언급된 요소를 모두 고려한 CO_2 감축시 실질적으로 소요될 것이라 예상되는 비용을 연구할 필요가 있다.

제 2 절 연구의 목적 및 내용

본 연구에서는 에너지 부분의 CO_2 배출량을 감축하는 데에 있어, 에너지 발전 과정에서 CO_2 배출이 없고 입지 조건의 제한이 비교적 적은 원자력 발전과 신재생 발전의 LCOE에 외부 비용을 각각 합산하여 계산하고, 다시 각각의 발전원이 CO_2 배출 감축에 미치는 영향을 계산하여 이 두 가지에서 합산된 CO_2 감축 단가의 효율성을 경제적 측면에서 비교하고자 한다.

또한 2011년의 후쿠시마 원자력 발전소 사고 이후, 원자력 발전의 발전 운용 단가가 낮다고 하더라도 사고 비용을 발전 단가에 포함하면 원자력 발전의 발전 단가가 낮지 않다는 문제 제기가 있었다. 본 연구에서는 이 문제 제기에 대해 원자력 발전 단가를 산출함에 있어 사고 비용과 원자력 폐기물에 의한 비용을 외부 비용으로 원자력의 발전 단가에 포함으로서 해결하고자 한다.

기존의 연구에서 CO_2 배출에 영향을 미치는 요인을 분석한 연구는 GDP와 같은 경제적인 변수와 원자력 발전이나 신재생 발전과 같은 발전원의 비중 변화가 CO_2 배출에 미치는 영향을 분석하는 데 주력하여 왔다(김정인 외, 1999; 정군오 외, 2004; 최충익 외, 2006; 이광훈, 2010; 정수관 외, 2013). 원전의 발전 비중 변화에 따른 경제성 평가에 관한 연구는 발전단가에 대한 연구는 상당수 진행되어 왔으나 여기에 환경 영향 평가와 같은 외부 요인이 함께 고려된 연구는 아직 그 수가 많지 않았다.

본 연구에서는 기존의 선행연구들이 주제로 삼았던 CO_2 배출에 미

치는 변수들의 영향 계수에 더해, 각 발전의 발전단가를 고려함으로써 CO_2 배출을 감축시키는데 필요한 비용을 추정하고자 한다. 이를 통해 각 발전원의 비중 변화를 통한 경제성 평가를 좀 더 직관적으로 이룰 수 있을 것으로 기대하고 있다. 또한, 일반적으로 발전 단가로 평가되는 LCOE에 더해 각 발전의 환경 비용과 같은 외부 비용을 함께 고려하였다. 이를 통해 발전원을 통하여 CO_2 배출량을 감축하고자 하였을 때 어느 정도의 예산이 소요될 것인지 예측하는데에 있어 중요한 근거가 될 수 있다.

구체적으로, 첫 번째 단계에서는 각 발전원별로 발전 단가를 확인하고, 두 번째 단계에서는 각 발전원이 CO_2 배출에 미치는 영향을 확인한다. 세 번째 단계에서는 앞서 구한 각 변수의 CO_2 배출에 미치는 영향과 발전 단가를 동시에 고려하여, 발전 비중을 어떻게 조정하는 것이 CO_2 배출량 감축에 있어 더 비용 효율적인가를 확인하고자 한다.

제 3 절 논문의 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제1장에서는 연구의 배경 및 필요성, 연구의 목적 및 내용을 서술한다. 제2장에서는 본 연구의 배경이 되는 기후변화 대응과 대한민국의 전력 산업 현황을 확인한다. 제3장 에서는 선행연구를 검토하고 본 연구의 범위와 분석대상 자료를 보인다. 제4장에서는 연구의 이론적 배경과 연구 모형, 실증분석 모형을 보인다. 제5장에서는 실증분석 결과를 분석하고 결과에 대한 해석을 보인다. 제6장에서는 도출된 결론과 시사점을 제시한다.

제 2 장 기후변화 대응과 대한민국의 전력 산업 현황

제 1 절 기후변화 대응 현황

1992년 브라질 리우데자네이루에서 개최된 유엔환경개발회의에서 채택된 '유엔 기후변화 협약(United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)'은 선진국과 개도국이 '공동의 그러나 차별화된 책임(Common But Differentiated Responsibilities)'에 따라 각자의 능력에 맞게 온실가스를 감축할 것을 약속하였다. 이후 1997년 일본 교토에서 개최된 제3차 UNFCCC 당사국총회(COP3)에서는 선진국들의 수량적인 온실가스 감축의무를 규정한 교토의정서(Kyoto Protocol)가 채택되었다. 교토의정서는 기후변화의 주범인 6가지 온실가스(CO_2, CH_4, N_2O, HFC, PFC, SF_6)를 정의하였을 뿐만 아니라, 부속서 1 국가들에 제1차 공약기간(2008~2012년)동안 온실가스 배출량을 1990년 수준 대비 평균 5.2% 감축하는 의무를 부과하였다. 2015년 제21차 당사국총회(COP21, 파리)에서는 2020년부터 모든 국가가 참여하는 신기후체제의 근간이 될 파리협정(Paris Agreement)이 채택되었다. 파리협정은 지구 평균기온 상승을 산업화 이전 대비 2℃ 보다 상당히 낮은 수준으로 유지하고, 1.5℃로 제한하기 위해 노력한다는 전 지구적 장기 목표 하에 모든 국가가 2020년부터 기후 행동에 참여하며, 5년 주기 이행점검을 통해 점차 노력을 강화하도록 규정하고 있다. 파리 협정은 또한, 모든 국가가 스스로 결정한 온실가스 감축목표를 5년 단위로 제출하고 국내적으로 이행토록 하고 있으며, 재원 조성 관련, 선진국이 선도적 역할을 수행하고 여타 국가는 자발적으로 참여하도록 하고 있다.

대한민국은 국제사회의 기후변화 대응노력에 동참하기 위해 2016

년 11월 3일 파리협정 국내 비준 절차를 완료하고, 유엔에 비준서를 기탁하여, 12월 3일부터 국내에서 발효되었다. 우리나라는 기후 재원이 선진국과 개도국 간의 신뢰 구축을 위해 필수적인 요소임을 인식하고, GCF(Green Climate Fund 녹색기후기금) 사무국 유치를 계기로 기후변화 협상의 주요 쟁점인 기후재원 분야에서도 활발하게 활동하고 있다. 2014년 9월 개최된 유엔 기후정상회의에서 우리나라는 멕시코와 함께 '기후 재원(Climate Finance)' 세션의 공동의장 역할을 수행하였고, GCF에 대한 1억 달러 기여 공약을 발표하여 GCF 초기 재원조성을 위한 선도적 역할을 수행하였다.

또한 대한민국에서는 기후변화 패러다임의 변화 시대에서 기후변화정책은 환경정책인 동시에 에너지정책으로서의 성격을 가지게 되었다. 에너지(기본)법[법률 제10352호 2010. 6. 8.시행] 제1조는"이 법은 안정적이고 효율적이며 환경친화적인 에너지수급구조를 실현하기 위한 에너지정책 및 에너지 관련 계획의 수립•시행에 관한 기본적인 사항을 정함으로써 국민경제의 지속 가능한 발전과 국민의 복리향상에 이바지함을 목적으로 한다."라고 정하고 있다. 그리고 에너지 관련 법규를 제정하면서 환경과 관련된 내용을 포함하여 제정. '저탄소 녹색성장 기본법' '탄소 배출권 거래제도' 등을 함께 제정하여 에너지와 환경 문제를 동시에 다루고 있다(허성욱, 2011).

제 2 절 대한민국의 전력 발전 현황

전력거래소에서 2020년 7월에 발표한 자료에 의하면, 2019년 전체 발전설비 용량 125,338 MW 중 각 발전이 차지하는 비중은 <표 2-1>과 같다.

<표 2-1> 연도별 · 연료원별 대한민국 발전 설비 용량

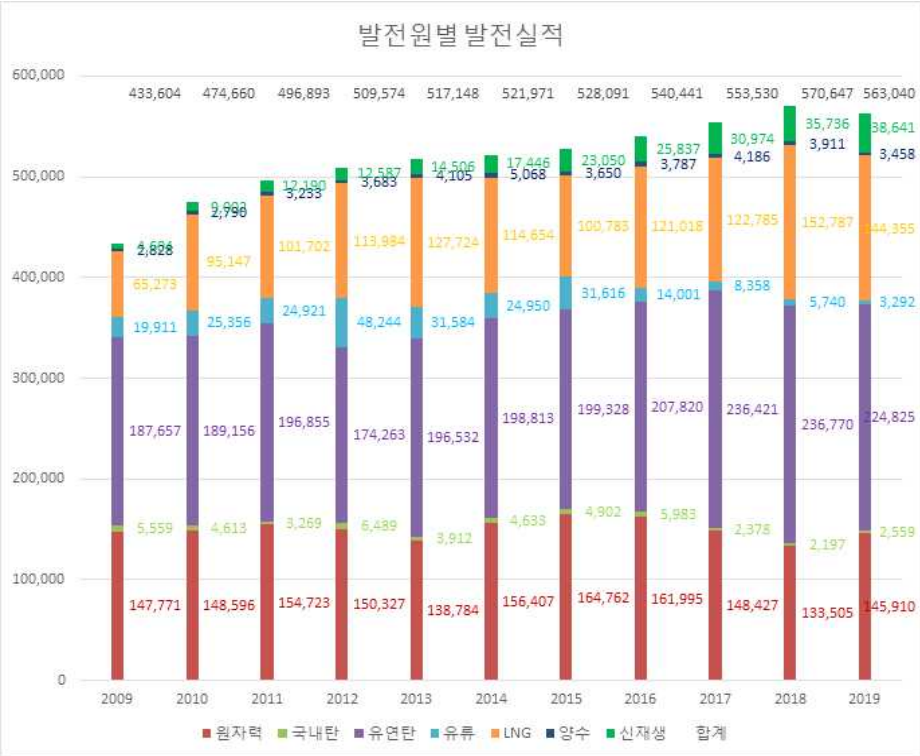
단위 : MW

구분	2000		2019	
	설비용량	발전비중	설비용량	발전비중
전체	48,451	100.00%	125,338	100.00%
원자력	13,716	28.31%	23,250	18.55%
석탄	14,031	28.96%	36,992	29.51%
유류	4,866	10.04%	3,771	3.01%
LNG	12,389	25.57%	39,655	31.64%
양수발전	1,600	3.30%	4,700	3.75%
신재생	1,549	3.20%	15,791	12.60%
기타	0	0.00%	1,178	0.94%

출처 : 전력거래소(2020)

<그림 2-1> 연도별 · 발전원별 발전실적

단위 :GWh



출처 : 전력거래소(2020)

2000년과 비교하여 2019년의 발전설비 용량은 대략 2.58배 증가하였으며, 그중에서도 신재생에너지의 발전설비 용량이 대략 10배가량 증가하여 빠른 성장세를 보이고 있다. 신재생 발전의 경우 태양광이 67%로 대부분을 차지하고 있으며, 풍력과 수력발전이 그 다음 비중을 차지하고 있었다.

동 기간 평균 이상의 용량 증가를 보인 연료 원별 발전설비는 신재생, LNG 등이었으며, 석탄 화력발전과 양수발전도 준수한 성장세를 보인 반면, 유류 발전과 원자력 발전의 경우 설비 용량 증가가 평균에 미치지 못하거나 오히려 감소하였다.

이 같은 변화 양상을 통하여 볼 때, 대한민국에서의 발전 비중은 2019년 산업통상자원부에서 발표한 제3차 에너지 기본계획에 맞추어 변화하고 있는 것으로 여겨진다.

제 3 장 선행 연구 및 연구 범위

제 1 절 선행연구 검토

과거의 연구에서, 우리나라를 비롯한 여러 국가의 CO_2 배출량에 영향을 미치는 요소에 대한 연구는 다수이다 (김정인 외, 1999; 정군오 외, 2004; 최충익 외, 2006; 이광훈, 2010; 정수관 외, 2013). 이들 연구 대부분은 EKC 가설이 성립하는지에 대한 검증으로 경제성장과 소득이 CO_2 배출량에 미치는 영향을 분석하였다. 이광훈, 이춘화(2009)는 소득에 의한 환경 쿠츠네츠 곡선의 추정과 석유류의 가격탄력성을 기준으로 분석을 진행하였다. 해외에서는 에너지 부문도 추가하여 상호관계를 분석한 연구도 있다 (Brock and Taylor, 2004; Marrero, 2010; Ang, 2007). 우리나라에서는 정용훈·김수이(2012)의 연구에서 CO_2 배출량과 경제성장 간의 인과관계 및 에너지 믹스의

영향을 실증 분석하였다. 이 연구에서는 우리나라의 CO_2 배출량의 결정요소로 경제성장 외의 요소를 고려하지 않은 점을 문제로 제시하였다. 원두환 외(2018)은 일본의 사례에서 원자력과 신재생에너지가 CO_2 배출에 끼치는 영향을 분석하였다. 진태영·김진수 (2017)은 도시화율과 화석연료 사용량이 CO_2배출량에 미치는 영향에 있어 고소득 국가와 중소득 국가에서 서로 탄력성이 다름을 보였고, 김재화·김현석(2015) 에서는 대한민국의 1인당 CO_2 배출량에 GDP와 총전력 소비량, 신재생에너지 발전량이 미치는 영향을 분석하였다.

이들 선행연구에서는 CO_2 배출량과 각 요소의 인과관계를 분석하였으나, 발전 단가의 분석이 함께 이루어지지 않아 경제적 효율성이 어느 정도 차이를 보이는지 한눈에 파악하기 어려운 문제점이 있었다.

상기의 선행 연구들은 CO_2 배출량에 끼치는 변수들의 영향을 측정함에 있어, 환경 쿠즈네츠 가설을 고려하지 않거나, 원자력과 신재생에너지 발전을 동시에 고려하지 못하고 하나의 발전원에 관한 연구만을 고려하는 연구가 대부분이었다. 또한 각 발전원에 대하여 LCOE를 통한 발전 비용을 분석하는 연구들은 각 발전의 환경적 영향을 비롯한 다양한 외부 비용을 분석에 고려하지 못하여 원자력 발전과 신재생 발전을 비교함에 있어 환경오염과 사회적 비용이 고려되지 않았다.

본 연구는 경제 소득과 원자력 발전, 신재생 발전이 CO_2 배출량에 미치는 영향을 동시에 분석하고, 이에 더하여 각각의 발전원의 CO_2 장기 영향계수와 각각의 발전원의 LCOE에 외부비용을 더한 발전단가를 함께 분석함으로써 각각의 발전원의 비중 변화를 통해 대한민국의 CO_2 배출량을 감축하려 할 때 실질적인 비용이 얼마나 될 것인가를 추측할 수 있다는 점에서 선행연구와의 차별성을 가진다.

제 2 절 연구의 범위

상기의 연구 목적 달성을 위하여 본 연구는 IEA에서 제공한 2019년도 자료에서 1977년부터 2017년까지의 CO_2 배출량 데이터와 발전원별 발전 비중과 발전량 데이터를 사용하였고, World Bank의 WDI(World Development Indicators)에서 제공한 2019년도 자료에서 중 1977년부터 2017년까지의 인구와 GDP를 사용하였다.

각 발전원별 발전 단가는 IEA에서 제공한 2015년도 국가별, 각 발전원별 균등화발전원가를 사용하였다. 대한민국 발전현황과 발전량 데이터는 2020년에 발간된 2019년도 발전설비현황 데이터를 사용하였다.

본 연구에서 사용한 연구 방법은 자기회귀분배시차(Autoregressive Distributed Lag, ARDL) 모형에 기초하고 있다. ARDL 모형은 일반 공적분 접근법과 달리 사용하는 변수가 $I(0)$ 또는 $I(1)$에 상관없이 사용할 수 있는 장점을 가진다. 그러나 사용된 변수가 $I(2)$이상일 경우 ARDL 모형을 사용할 수 없다. 따라서 본 연구에서 사용된 시계열 자료들이 $I(2)$ 이상을 따르지 않는지를 ADF(Augmented Dickey - Fuller)검정을 통하여 확인한 후, 정보기준을 활용하여 시계열의 ARDL모형의 적정 차수를 선정하고, 이후 각 변수들의 장기 영향계수와 단기 영향계수를 확인하였다.

제 3 절 분석대상 자료

1. 각 발전원별 발전 단가 및 외부 비용

각 발전원의 탄소 감축 효율성을 판단하기 위해, 먼저 발전원별 발전 단가를 수집하였다. 분석에 사용된 각 발전원별 발전 단가는 균등화 발전 단가(LCOE)를 사용하였으며, 자료는 IEA에서 발간한

Projected Costs of Generating Electricity(2015)에서 제공하는 자료를 활용하였다.

국내에서 수행된 국내 발전 설비의 LCOE 에 관한 연구는 단일 발전 원천의 장기적인 LCOE의 변화에 관한 자료이거나, 동일 시점에 동일 기준을 적용한 소수의 발전 원천에 대한 비교가 존재하고 있었으나, 광범위한 발전 원천에 대해 발전소 건설비용과 같은 기초 데이터에서 각각의 LCOE를 직접 계산한 자료는 발견할 수 없었다.

반면 Projected Costs of Generating Electricity(2015)의 자료에서는 대한민국의 경우로 한정 지은 경우에도 풍력의 경우 육상/해상 발전을 별도의 발전 원천으로 보아 LCOE를 각각 계산하는 등 대한민국에서 시행 중인 발전에 대해 발전 원천을 태양광 3종류, 풍력 2종, 천연가스 2종, 석탄 2종, 원자력 1종 총 10종으로 구분하여 LCOE를 계산하고 있었다.

IEA(2015)에서 밝힌 LCOE를 산출하기 위해 사용한 계산 식은 식(1)과 같다.

$$\sum P_{MWh} * MWh * (1+r)^{-t} = \sum [(Capital_t + O\&M_t + Fuel_t + Carbon_t + D_t) * (1+r)^{-t}] \quad \text{식(1)}$$

P_{MWh} = 수명 기간 동안의 유지 보수 비용

MWh = 생산량 일정 가정시 수명기간 동안 전력 생산량

r = 할인율

$Capital_t$ = t년의 총 건설 비용

$O\&M_t$ = t년의 운용 및 정비 비용

$Fuel_t$ = t년의 연료 비용

$Carbon_t$ = t년의 탄소 비용

D_t = t년의 해체 및 폐기물 처리 비용

<표 3-1> 각 발전원 별 균등화 발전 원가

구분	탄소 배출 비용 (USD/MWh)[1]	LCOE(USD/MWh)[2]		
		3%	7%	10%
천연가스	10.08	115.11	118.60	121.70
석탄	24.22	74.30	80.36	86.00
원자력	0.00	28.63	40.42	51.37
태양광	0.00	101.86	142.07	176.34
풍력	0.00	111.64	147.45	178.63

주: 1) 운용 중 배출되는 탄소의 가격은 IEA(2015)의 $30/tonne을 사용
2) 초기 건설비용에 대한 할인율에 따른 단가 변화를 의미

<표3-1>은 각 발전원에 따른 LCOE를 의미하는데, 이는 각 발전에 대해 운용상 발생하는 비용뿐만 아니라 건설과 발전소 수명 종료 후 폐기 비용까지 합산하여 추정한 원가를 의미한다.

화석 연료를 이용한 발전은 발전 과정에서 다량의 CO_2를 배출하는 반면, 원자력과 신재생 발전은 운용 과정에서 CO_2를 배출하지 않는다. 따라서 전력 부분의 발전 에너지원을 화석 연료 발전에서 원자력, 수력, 신재생 발전으로 전환하는 것으로 발전 부분의 CO_2 배출량을 저감 할 수 있을 것이라 기대할 수 있다.

그러나 이들 발전원에는 제각기 장단점이 있는데, 화석 연료 발전은 건축비가 비교적 저렴하고 발전소의 발전 용량 내에서 발전량 조절이 비교적 손쉬운 반면, 운용 중 CO_2 배출량이 많은 문제점이 있다. 수력 발전의 경우 수량이 풍부한 계곡 지형에 건설되어야 하는 만큼 건설 가능 입지가 제한적이고 강우 상태에 따라 실질 가용 발전량에 제한되는 문제가 있다. 원자력의 경우 발전 단가는 가장 저렴하나, 사고가 발생하는 경우 사고 피해 규모가 여타 다른 발전에 비해 큰 경향이 있고, 발전소 주변에 거주하는 주민과의 마찰 등의 문제가 발생할 여지가 있다. 신재생 발전의 경우 발전 입지의 제한이 비교적 적으나 발전량이 일정하지 않고 발전 단가가 가장 높은 문제가 있다. 따라서, 본 연구에서는 전력 부분의 CO_2 배출량을 감축하는 데에 있어, 운용중 CO_2 배출이 없고 비교적 용량의 증설

이 용이한 원자력 발전과 신재생 발전을 통한 CO_2 배출량 감축의 효율성을 비교하고자 한다.

본 연구에서는 원자력 발전과 신재생에너지 발전의 발전 비용으로 IEA(2015)에서 제시된 LCOE 와 Ecofys(2014)에 제시된 발전원별 외부비용을 합산하여 사용하였다. Ecofys(2014)는 각 발전원에서 발생하는 다양한 결과에 대해 이를 외부 비용으로 환산하는 시스템을 제시하였는데, 기본적인 발상은 발전소 운영 중에 발생하는 다양한 오염 물질과 발전소 건설 과정에서 발생하는 환경적 요인을 일정한 규칙에 따라 Midpoint impacts로 환산하고 이를 다시 endpoints damages로 환산하는 데에 있다. Ecofys(2014)에서는 기후변화, 에너지 자원고갈, 미세먼지 발생, 인체독성, 농업가능 토지점유, 기타 등의 변화를 6가지 Midpoints로 정리하여 이를 다시 <표3-2>와 같이 외부 비용으로 환산하였다.

<표 3-2> 각 발전원 별 외부 비용 총액 및 발전량당 비용

단위 : 1Billion USD

구분	원자력[1]	태양광 (지붕)	태양광 (지상)	풍력 (육상	풍력 (해상	수력 (댐)	수력 (유수)	바이오-매스
기후변화	0.33	0.17	0.08	0.00	0.21	0.08	0.06	0.44
에너지 자원고갈	14.06	0.05	0.03	0.00	0.06	0.01	0.01	0.08
미세먼지 발생	0.98	0.15	0.08	0.00	0.22	0.05	0.12	0.27
인체 독성	1.75	0.28	0.08	0.01	0.24	0.01	0.03	0.35
농업가능 토지 점유	0.04	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
기타	1.90	0.15	0.13	0.01	0.32	0.05	0.05	0.08
단위 : USD/MWh								
단위당 외부비용	22.88	18.25	18.12	3.08	5.40	1.29	1.29	22.75

출처: Ecofys(2014)
주: 1) 원자력의 사고 비용은 별도 계산

Ecofys(2014)에서는 위에서 제시한 6가지 Midpoint를 통해 계산된 외부비용을 <표 3-2>와 같이 제시하고 있는데, 각 발전원별로 총 비용을 계산하고 이를 다시 각 발전원별 발전량으로 나누어 각 발전원의 발전량 단위당 외부 비용을 계산하였다.

신재생 발전의 경우 신재생 발전에 포함되는 발전원이 다양하여 각 발전원별 LCOE와 전력거래소(2020)에서 제시된 발전원별 국내 발전 비중을 곱하여 대한민국 신재생에너지의 가중평균 발전단가와 가중평균 외부비용을 계산하였다. 가중평균 발전단가와 가중평균 외부비용의 계산 결과는 <표 3-3>과 같다.

<표 3-3> 신재생 발전의 단가 계산

구분	국내 발전 비중	LCOE USD/MWh			비중 적용 LCOE			외부 비용 USD/MWh	비중 적용 외부비용	비고
		3%	7%	10%	3%	7%	10%			
태양광	67%	101.86	142.07	176.34	68.25	95.19	118.15	18.12	12.14	대한민국
풍력	10%	214.47	274.63	326.88	21.45	27.46	32.69	4.24	0.42	대한민국
바이오/매립가스	6%	112.49	137.17	158.6	6.75	8.23	9.52	22.75	1.37	스페인
일반수력	10%	61.53	132.94	201.65	6.15	13.29	20.17	1.29	0.13	스위스
소수력	1%	74.48	147.68	218.12	0.74	1.48	2.18	1.29	0.01	스위스
소계					103.34	145.65	182.70		14.07	

계산 결과 국내 신재생에너지의 가중평균 LCOE는 할인율 3%, 7%, 10%에서 각각 $103.34, $145.65, $182.70 으로 계산되었는데, 여기에 발전 단가와 마찬가지로 Ecofys(2014) 에서 제시된 발전원별 외부비용 단가에 국내의 신재생에너지 발전 비중을 적용하여 국내 신재생에너지의 가중평균 외부비용을 계산하였다. 이중 태양광과 풍력의 경우 IEA(2015)에서 대한민국에서의 LCOE 가 알려졌으나, 바이오/매립가스, 일반수력, 소수력의 경우 대한민국의 LCOE 가 알려지지 않아 OECD 국가 중 발전 규모가 가장 큰 국가의 것을 대신하여 사용하였다.

원자력 발전의 외부비용은 Ecofys(2014)에서는 $23.27~$28.02/MWh로 제시하고 있으며, 여기에는 기후변화 비용 $0.40/MWh, 자원고갈

비용 $16.88/MWh, 건강비용 $2.10/MWh, 사고비용 $0.39~$5.14/MWh가 포함되어 있다.[2] 본 연구에서는 원자력 발전의 외부 비용 중 사고에 의한 외부 비용을 최대치로 추정하여 $5.14/MWh를 적용, 원자력 발전의 외부 비용 총계를 $28.02/MWh로 계산하였다.

<표 3-1>, <표 3-2>, <표 3-3>을 합산하여 계산된 원자력 발전과 신재생에너지의 발전 단가는 <표 3-4>와 같다.

<표 3-4> 원자력 및 신재생에너지 발전단가 (외부비용 포함)

단위 : USD/MWh

구분	할인율		
	3%	7%	10%
원자력 발전	56.65	68.44	79.39
신재생 발전	117.41	159.72	196.77

본 연구를 통해 계산된 원자력 발전과 신재생 발전의 LCOE 는 건설비용을 포함한 초기 비용에 대한 할인율을 얼마로 설정하는가에 따라 크게 3가지로 계산되었는데, IEA(2015)에서는 3%, 7%, 10%의 각 할인율에 대해 다음과 같은 적용 사례를 제시하고 있다. “3%의 경우 ‘자본에 대한 사회적 비용’ 만을 추산하고 있는 경우, 7%의 경우 규제가 심하거나 재구조화 중인 업종의 경우, 10%의 경우 변동성이 극히 심한 환경인 경우”로, 기술적 수준이 동일하더라도 해당 국가의 자본·경제적 환경에 따라 가장 경제적인 발전원이 달라질 수 있음을 보이고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 IEA(2015)의 기준을 적용하여 원자력 발전을 대한민국에서 ‘규제가 심하거나 재구조화 중인 업종’ 으로 보고 7%의 할인율을, 신재생 발전에 대해서는 대한민국에서 ‘규제가 완화 중인 업종’으로 보아 3%의 할인율을 적용하여 LCOE를 계산하였다.

2) Ecofys(2014) 에서는 2012년 유로 환율을 기준으로 표기되었으며, 여기에서는 해당 기간의 유로-달러 평균 환율($1.2854/€)을 이용하여 달러로 환산하였다.

2. CO_2 배출량 추정에 사용된 변수 자료

본 연구에 사용된 추정 식에서 인구가 직접적인 변수로 사용되지는 않았으나, 수집한 자료가 국가 전체 발전량으로 제공되고 있었기에 이를 동 기간의 인구로 나누어 1인당 발전량으로 변환하여 사용하기 위해 수집하였다. 여기에 사용된 대한민국 인구 자료는 Worldbank에서 제공하는 WDI의 1977~2017년의 대한민국 인구 자료를 사용하였다.

1인당 GDP 의 경우 위와 마찬가지로 Worldbank에서 제공하는 WDI의 1977~2017년의 대한민국 자료를 사용 하였으며, 2010년 USD를 기준으로 한 "GDP per capita (constant 2010 US$)" 항목을 사용하였다.

1인당 CO_2 배출량의 경우 IEA에서 제공하는 Data services 중 CO2 emissions statistics 항목의 1977~2017년 자료를 수집하였다.

1인당 원자력 발전량, 1인당 신재생 발전량의 경우 IEA에서 제공하는 Data services 중 World energy balances and statistics 항목의 1977~2017년 자료를 수집하였으며, 수집된 자료는 각 발전 원별 연간 발전 총량(단위 GWh) 이었다. 본 연구에서는 이를 다시 인구로 나누어 1인당 발전량으로 변환하여 사용하였다.

3. 변수별 기초 자료 분석

<표 3-5>는 대한민국의 연간 GDP, CO_2 배출량, 발전 연료 원별 전력 생산량, 총 전력소비량, 인구 등의 변수에 대한 기초 분석 자료이다. 인구를 제외한 나머지 변수는 모두 연간 1인당 소비량/생산량으로 표준화하여 인구 증감에 따른 변동성을 제거하고자 하였다.

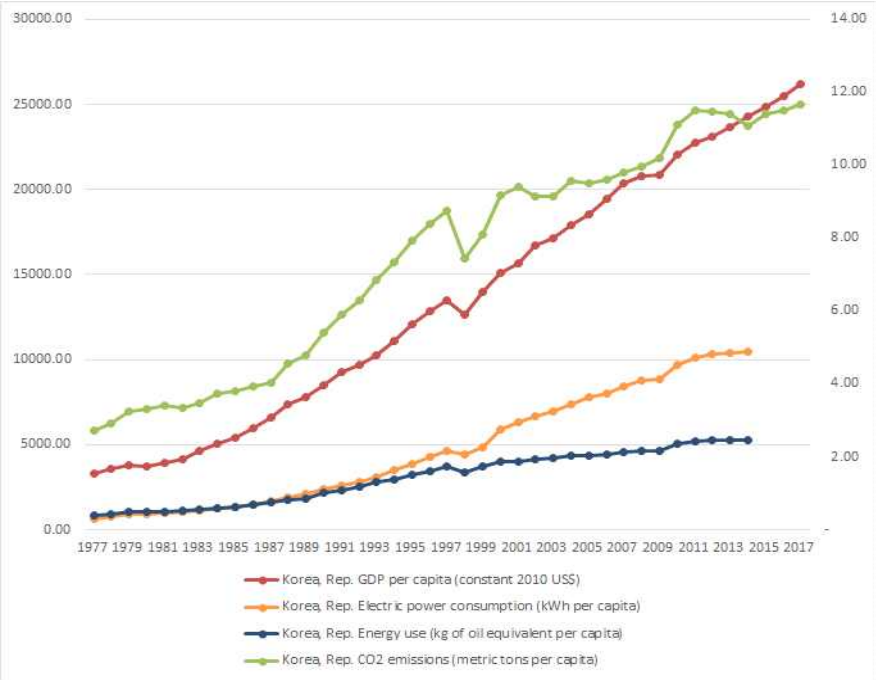
<표 3-5> 변수별 자료분석

구분	최대	최소	평균	평균 성장율	표준편차
1인당 GDP($)	26,205.13	3,275.05	13,517.23	5.40%	7,436.30
1인당 CO_2 배출량(tonne)	11.66	2.71	7.47	3.85%	3.06
1인당 원자력 발전(KWh)	3,229.68	1.95	1,765.31	90.15%	1,138.84
1인당 신재생 발전(KWh)	362.54	38.26	105.39	9.04%	64.75
1인당 총 발전(KWh)	10,496.51	659.24	4,707.26	7.88%	3,359.33
1인당 총 에너지(oil kg)	5,289.28	866.02	3,057.27	5.13%	1,521.57
인구	513,619,11	36,411,795	45,118,965	0.86%	4,439,044.55

<그림 3-1> 에서는 각 연료 원별 1인당 발전량을 제외한 나머지 변수를 그래프로 표시하였다. 모든 변수는 연구기간 동안 상승하는 추세를 보였다. 1997년의 IMF 사태와 2009년의 리만브라더스 사태가 벌어진 해에는 성장 폭이 둔화하거나 역성장하는 추세를 보였으나, 전체적인 추세는 우상향하는 모습을 보인다.

대한민국의 경우 1977년부터 2017년까지 41년간의 데이터를 사전 분석한 결과 GDP 와 총 전력 소비량, GDP 와 총 에너지 소비량, 총 에너지소비량과 CO2 배출량 사이에는 상관 계수가 0.99 이상으로 해당 변수를 모두 사용하는 경우 다중 공선선 문제를 발생시킬 여지가 있어 해당 변수를 분석에서 제외하고, 분석에서는 GDP, CO2 배출량, 1인당 원자력 발전량, 1인당 신재생 발전량만을 분석에 사용하였다.

<그림 3-1> 각 변수별 연간 변동



제 4 장 이론적 배경 및 모형

제 1 절 이론적 배경

과거의 다양한 연구에서, 온실가스 배출량은 경제성장과 에너지 사용량의 함수임이 알려져 있다. 이에 따라 본 연구에서는 분석을 위해 아래의 식(2)와 같은 모형을 가정하였다.

$$G = f(Y, E) \tag{2}$$

G는 온실가스 배출량, Y는 소득, E발전량을 의미한다. 소득의 경우 경제 발전을 측정하기 위한 대리 변수이며, 발전량의 경우 CO_2 배출량에 영향을 끼칠 것으로 예상되어 분석 대상으로 삼은 변수이다.

김재화, 김현석(2015)의 연구에서는 온실가스 배출량에 영향을 미치는 변수로 소득 Y, 전체 발전량 TE, 신재생 발전량 RE를 이용하여 식 (3)과 같이 구성하였다.

$$G = f(Y, TE, RE) \tag{3}$$

본 연구에서는 이와 같은 선행연구를 검토하여 수집된 자료에 대한 사전 분석을 실시한 결과, 1인당 전력 소비량의 경우 GDP 와 0.994의 양의 상관을 보였으며 1인당 에너지 소비량의 경우 GDP 와 0.990의 양의 상관을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 전력 소비량, 에너지 소비량, GDP 변수를 동시에 사용하는 것은 다중 공선성 발생의 문제 소지가 있어 본 연구에서는 전력 소비량과 에너지 소비량은 변수에서 제외하였으며, 연구 목표에서 원자력 발전량과 신재생 발전량을 비교하고자 하였으므로 원자력 발전량 NE를 변수로 추가하여 아래와 같은 식 (4)를 추정하였다.

$$G = f(Y, NE, RE) \quad (4)$$

여기서 G는 온실가스 배출량을 나타내며, Y는 GDP, NE는 원자력 발전량(kWh per capita), RE는 신재생 발전량(kWh per capita)을 나타낸다. 각 변수는 인구변화에 의한 영향을 제거하기 위해 1인당으로 계산되었다.

경제성장과 환경의 질의 관계에 관한 연구는 흔히 환경 쿠즈네츠 곡선(Environmental Kuznets Curve: EKC)으로 대표된다. 원래의 쿠즈네츠 곡선에 대한 연구(Kuznets, 1955) 은 경제성장과 소득 불평등에 대한 논문으로 산업화 과정에 있는 국가의 소득 불평등 정도는 처음에 증가하다가 산업화가 일정 수준을 지나면 다시 감소한다고 주장한 논문이다. 그러나 이 연구는 당시 소득격차가 줄어든 이유는 산업화가 원인이 아닌 대공황과 2차 세계대전에 의한 노동력의 수요·공급 불균형이 원인이었다는 것이다. 그러나 최근의 연구에서 소득 불평등은 단순한 역 U자형 곡선을 그리며 시간이 지날수록 감소하는 것이 아닌 파동(Wave)의 형태를 띠며 증가와 감소를 반복한다는 (Branco Milanovic, 2016) 주장이 나타나는 등, 쿠즈네츠 곡선 자체는 비판의 대상이 되고 있다.

그러나 환경적인 측면에서, 경제적 성장과 해당 사회의 환경수준, 혹은 소득수준과 환경에 대한 관심이나 욕구를 설명하기 위해서는 여전히 환경 쿠즈네츠 곡선이 큰 지지를 받고 있다. 환경 쿠즈네츠 곡선은 경제적 성장이 이루어지는 초기에는 환경에 대한 파괴, 환경오염이 점차 심해지다가 경제적 소득이 일정 수준에 도달하면 환경파괴가 정체되거나 오히려 회복된다는 가설이다.

한 국가의 경제성장과 환경오염 사이에 환경쿠즈네츠 가설이 성립한다면, 경제변수와 환경오염변수 간에 역 U자형 관계가 나타나게 된다. 이 경우 온실가스 배출량은 소득의 2차 함수를 통해 표현할 수 있다. 따라서 관계식은 식(5)와 같은 변수를 지닌다.

$$G = f(Y, Y^2, NE, RE) \quad (5)$$

제 2 절 실증분석 모형

1. 실증분석 모형의 추정

식 (5)의 CO2 배출량과 소득 및 각 발전량 간의 관계를 나타내는 함수에서 다음의 식 (6)를 추정하였다.

$$\ln G_t = a_0 0 + a_1 \ln Y_t + a_2 (\ln Y_t)^2 + a_3 \ln NE_t + a_4 \ln RE_t + \varepsilon_t \qquad (6)$$

여기서 ε는 오차항을 나타낸다. 우리나라에서 환경쿠즈네츠 곡선 가설이 성립한다면 온실가스 배출량과 소득 사이에는 양의 관계($a_1 > 0$)가 성립하고, 온실가스 배출량과 소득의 제곱 사이에는 음의 관계($a_2 < 0$)가 성립하여 두 변수 간 역 U자형 관계를 가지게 된다. 또한 원자력 발전과 신재생에너지 발전량의 증가는 화석에너지를 사용한 발전을 대체하여 온실가스 배출량을 감소시키므로 두 변수는 CO_2 배출량과 음의 관계($a_3, a_4 < 0$)를 가질 것으로 예상 할 수 있다. 온실가스 배출량과 그에 영향을 미치는 변수들 간의 장·단기 영향을 분석하기 위해서는 Pesaran et al.(2001)에 따라 식 (5)를 오차수정항 형태의 ARDL 체계로 재구축 하면 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta \ln G_t &= \beta_0 + \sum_{k=1}^{p} \gamma_k \Delta \ln G_{t-k} + \sum_{k=0}^{p} \delta_k \Delta \ln Y_{t-k} \\ &+ \sum_{k=0}^{p} \eta_k \Delta (\ln Y_{t-k})^2 + \sum_{k=0}^{p} \theta_k \Delta \ln NE_{t-k} \\ &+ \sum_{k=0}^{p} \lambda_k \Delta \ln RE_{t-k} + \phi_1 \ln G_{t-1} + \phi_2 \ln Y_{t-1} \\ &+ \phi_3 (\ln Y_{t-1})^2 + \phi_4 \ln NE_{t-1} + \phi_5 \ln RE_{t-1} + \mu_t \end{aligned} \qquad (7)$$

여기서 Δ는 각 변수의 차분을 나타내며, p는 각 변수에 대한 시차를 의미 하는데 각 변수에 대해 다르게 나타난다. ϕ로 표현된 시차

변수들의 선형결합이 오차수정모형의 오차수정항(ec_{t-1})을 대신하기 때문에 식 (7)을 ARDL 에서의 오차수정모형이라고 한다. 즉, ϕ로 표현되는 계수들은 장기적인 공적분 관계를 나타내며, Σ를 따르는 계수들은 단기적 관계를 나타낸다.

2. 단위근 검정

앞서의 식 (7)과 같은 형태로 시계열 자료를 분석하는 경우 일반적으로 분석에 사용된 자료가 안정적(stationary)이지 않은 경우 자료의 분석 결과 가성회귀(spurious regression)의 문제가 발생할 수 있다. 가성회귀 문제란 분석에 사용된 변수 간에 실제로는 어떠한 관계가 존재하지 않음에도 불구하고 분석결과 어떤 유의한 관계가 있는 것처럼 추정되는 것이다. 즉 분석을 통해 실재하지 않는 유의한 회귀분석 결과를 얻는 경우가 발생할 수 있으며, 이를 가성회귀 문제라고 한다.

따라서 시계열 분석을 시행하기 전 분석 대상 자료가 안정적인지 검증하는 과정이 먼저 수행되어야 할 필요가 있으며, 이를 단위근 검정이라 한다. 단위근 이란 불안정(non-stationary) 시계열을 자기회귀모형($Y_t = \alpha + \beta Y_{t-1} + \epsilon_t$)으로 표현했을 경우, 그 특성근이 단위근을 갖는다는 사실($\beta = 1$)에 근거한 것으로, 단위근이 존재한다는 의미는 해당 시계열 자료가 불안정하다는 의미가 된다.

시계열의 단위근 여부를 검정하는 방법으로는 Augmented Dicky-Fuller 검정법이 주로 사용된다. Augmented Dicky-Fuller 검정법은 Dicky-Fuller 검정법을 보완한 방법으로, 자기상관의 효과를 제거하기 위해 방정식에 오차항($\triangle Y_{t-j}$)을 추가하여 분석하는 특징이 있다. 이러한 Augmented Dickey-Fuller 검정법은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y_t &= \rho y_{t-1} + v_t \\ y_t - y_{t-1} &= \rho y_{t-1} - y_{t-1} + v_t \\ \triangle y_t &= (\rho - 1) y_{t-1} + v_t = \gamma y_{t-1} + v_t \end{aligned} \qquad (8)$$

여기에서 v_t는 평균이 0이며, 분산이 동일한 오차를 의미하며, 시계열이 비정상적이라는 귀무가설인 $H_0 : \rho = 1$ or $\gamma = 0$을 기각할 수 있다면 해당 시계열 자료는 정상적이라고 볼 수 있다.

Pesaran et al.(2001)에 따르면 ARDL 모형은 전통적인 공적분 방법과는 달리 변수의 값들이 $I(0)$ 또는 $I(1)$에 상관없이 사용할 수 있기 때문에 변수의 사전검정(pre-testing)이 필요하지 않다는 장점이 있다. 그러나 변수들의 값이 $I(2)$ 이상의 진행을 따를 경우, 사용할 수 없으므로 이를 먼저 확인하기 위해 ADF검정을 통해 단위근 검정을 하였다.

3. 모형의 정보기준

Christiano and Ljngqvist(1988)의 연구에 따르면, ARDL 모형에서 인과성 검정을 시행 위해서는 시차의 선정이 중요한 것으로 나타났다. 모형의 시차를 연구자가 임의로 설정할 경우 모수추정치에 대하여 절사오차(Truncation Error)가 발생할 가능성이 존재하기 때문에, 연구의 신뢰성 확보를 위하여 객관적 기준에 입각한 최적 시차의 선별이 중요하다.

이 경우 선택 대상이 되는 변수에 대한 유의성 검정을 통해 모형을 선택하는 방법 이외에, 모형의 설명력과 모형의 크기를 동시에 고려한 정보기준(Information Criteria)을 이용하는 방법을 고려해 볼 수 있다. 이러한 정보기준은 모형의 적합도를 판단하는 기준인 R^2 혹은 $\overline{R^2}$와 유사하게 새로운 변수의 도입이 모형의 설명력을 높일 수는 있으나, 그와 함께 자유도의 감소를 초래한다는 사실에 착안한 개념이다. 정보 기준은 설명변수의 추가에 따르는 장단점을 비교하여 보다 타당한 모형을 선택할 수 있는 지표로서 다수의 선행연구에서 활용되고 있다.

정보기준에는 여러 가지 종류가 존재하지만, 본 논의에서는

AIC(Akaike Information Criterion)를 실증분석에 이용하였다. AIC는 해당 값이 작을수록 모형 적합도가 높음을 의미하며, 다음과 같은 방식으로 도출된다.

$$\ln AIC = (\frac{2k}{n}) + \ln(\frac{SSE}{n}) \qquad (9)$$

여기서 n은 총 관측치, k는 설명변수 개수, SSE는 잔차제곱의 합을 의미한다.

상기 식에서 우변 첫 번째 항은 회귀모형에 포함된 변수들의 전반적인 설명력을 나타내며, 두 번째 항은 변수를 추가하는데 수반되는 일종의 벌점 항으로서 기능한다. 설명변수를 추가할 경우 잔차제곱합이 감소하여 정보기준을 감소시키게 된다. 하지만 우변의 두 번째 항이 동시에 증가하여 결론적으로는 모형추정에 수반되는 비용이 동시에 증가하는 결과가 발생하게 된다. 그 결과 설명변수의 추가로 인하여 정보기준의 값이 증가할 가능성도 있다. 따라서 새로운 변수가 추가됨에 따라 설명력이 높아지는 이익(Statistical Benefit)과 새로운 변수의 계수추정을 위해 소요되는 비용(Statistical Cost) 사이의 상충관계를 고려하여 설명변수의 도입 여부를 결정해야 한다.

4. 공적분 관계의 검정

그 다음 결정된 최적시차 ρ를 이용해 Pesaran et al.(2001)이 제시한 F-한계통계량을 이용한 한계검정 을 통해 변수 간 공적분의 존재유무를 검정해야 한다. 한계 검정의 귀무가설은 식 (7)에서 $H_0 : \phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = \phi_4 = \phi_5 = 0$ 으로 변수들 간에 공적분이 존재하지 않는다는 가설이다.

한계검정을 통해 얻 은 F-통계값이 유의수준에서 F-한계통계량의 상한 임계값보다 크면 변수 간 공적분 관계가 존재한다. 반대로

F-통계값이 유의수준에서 F-한계통계량의 하한 임계값보다 작으면 변수 간 공적분 관계가 존재하지 않는다. 만약 F-통계값이 F-한계통계량의 상한과 하한 임계값 사이에 위치할 경우에는 변수 간 공적분 관계는 ARDL 모형의 오차수정항의 부호와 통계적 유의성에 따라 결정된다. 이 때 오차수정항이 음(-)의 부호를 가지면서 통계적으로 유의하게 나타나면 변수 간 공적분 관계가 존재한다고 할 수 있다(Kremers et al., 1992).

5. 감축비용의 도출

CO_2 배출량을 1% 감축하기 위한 총 비용(TC)은 식(9)과 같이 도출할 수 있다.

$$TC_k = \left(H_k \times \frac{1}{\hat{\alpha}_k} \times \frac{1}{100} \right) \times (LCOE_k + EXC_k) \qquad (10)$$

여기서 H_k는 k발전원(k=원자력 or 신재생)에 의한 발전량이며, $\hat{\alpha}_k$은 앞서 식(6)에서 원자력, 신재생에너지에 대해 각각 a_3, a_4로 계산된 k발전원의 장기 영향 계수 이며, $LCOE_k$는 **<표 3-1>**과 **<표 3-3>**에서 계산된 k발전원의 균등화 발전 원가, EXC_k는 **<표 3-2>**에서 계산된 k발전원의 외부 비용을 의미한다.

제 5 장 실증분석 결과

제 1 절 단위근 검정 및 공적분 검정 결과

Pesaran et al.(2001)에 따르면 ARDL 모형은 전통적인 공적분 방법과는 달리 변수의 값들이 $I(0)$ 또는 $I(1)$에 상관없이 사용할 수 있기 때문에 변수의 사전검정이 필요하지 않다는 장점이 있다. 그러나 변수들의 값이 $I(2)$ 이상의 진행을 따를 경우 사용할 수 없기 때문에 이를 먼저 확인하기 위해 ADF검정을 통해 단위근 검정을 하였다. <표 5-1>은 본 연구에서 사용된 각 변수에 대한 단위근 검정 결과를 보여 주고 있는데, *NE*를 모든 제외한 변수가 단위근을 가지고 있는 것으로 나타났고 이를 차분한 변수들은 정상성을 가지는 것으로 나타나 *NE*를 제외한 모든 변수가 $I(1)$인 것으로 나타났다. 따라서 ARDL 모형의 사용이 적절함을 알 수 있다.

<표 5-1> ADF 단위근 검정 결과

변수	Z-value		결과
	수준변수	차분변수	
$\ln G$	-0.80	-5.72***	$I(0)$
$\ln Y$	-0.02	-5.72***	$I(1)$
$(\ln Y)^2$	-0.01	-5.79***	$I(1)$
$\ln NE$	-7.41***		$I(0)$
$\ln RE$	-2.21	-9.06***	$I(1)$

주: ***는 1% 수준에서 통계적으로 유의함을 의미함을 나타냄.

ARDL 모형을 이용하여 CO2 배출량과 관련 변수 사이의 관계를 분석하기 위해서는 먼저 식 (7)의 최적 시차 p를 결정하여야 한다.[3)]

3) CO2 배출량과 소득 간에 역인과관계가 나타날 수 있기 때문에 본 연구에서는 Iwata et al.(2010)을 따라 소득과 소득의 제곱을 각각 종속변수로 하여 공적분

최적 시차 p의 결정은 라그랑지승수(Lagrange Multiplier, LM) 검정을 통해 변수 간 계열상관(serial correlation)이 없는 것 중에서 AIC의 값이 가장 작은 것으로 정한다.

<표 5-2 > CO2 배출량과 관련 변수들 간 공적분 검정 결과

lag(p)	AIC	χ^2_{sc}	계열상관	F-통계값	공적분 검정
1	78.40	3.87	유	3.09**	유
2	81.91	0.13	무	3.10**	유
3	84.28	0.28	무	2.28*	무
4	84.41	0.55	무	3.96***	유

주: *, **, ***은 각각 10%, 5%, 1% 수준에서 통계적으로 유의함을 나타냄.

분석 결과 시차가 1일 때 AIC 가 가장 작았으나 계열상관이 있는 것으로 나타나 기각되었고, 시차가 2일 때 계열상관이 없고 최소의 AIC를 가진 것으로 나타나 채택하였다.

<표 5-2>는 변수들 간의 공적분 검정결과를 나타내는데 최소 AIC 값을 가지는 최적 시차는 p=2였으며, 이 때 LM 검정값이 χ^2_{xc}=0.13으로 나타나 변수 간 계열상관이 없는 것으로 판명되었다. 한계검정으로부터 구해진 F-통계값이 3.10으로 5% 유의수준에서 F-한계통계량의 상한 임계값인 2.57보다 크므로 추정 변수들 사이에 장기적 균형관계가 존재하는 것을 알 수 있다.

관계를 검정한 결과 두 경우 공적분 관계를 갖지 않는 것으로 나타났다. 이는 CO2 배출량을 종속변수로 할 경우에만 변수들 간 장기적 균형관계를 가짐을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 CO2 배출량을 종속변수로 하고, 소득과 소득의 제곱을 설명변수로 하여 추정모형을 설정하였다.

제 2 절 실증분석 모형의 추정 결과

1. 장기 영향 계수 분석

우리나라의 CO_2 배출에 미치는 소득 및 1인당 원자력 에너지 발전량, 1인당 신재생에너지 발전량의 장기적 영향을 나타내는 식 (6)의 추정 결과는 <표 5-3>과 같다. CO_2 배출량의 추정에 사용된 변수의 경우 소득(Y), 소득의 제곱(Y^2), 원자력 발전량(NE)의 변수는 1% 유의수준에서, 신재생 발전량(RE) 변수는 10% 수준에서 유의한 것으로 나타났으며, 앞 장의 모형에서 설명한 이론과 부호가 일치하는 것으로 나타났다. 이를 변수별로 자세하게 살펴보면, 소득($\ln Y$)과 소득의 제곱($(\ln Y)^2$)에 대한 추정치가 각각 양(+)의 부호와 음(-)의 부호를 갖는 것은 소득수준이 일정 수준 이상이 되면서 CO_2 배출이 줄어드는 EKC 가설이 성립함을 의미한다. 두 변수에 대한 추정치는 1977년 이후 소득이 1% 증가함에 CO_2 배출량은 약 5.554%씩 빠르게 증가하다가 소득 임계점을 지나면서 약 0.2413%씩 감소하고 있음을 의미한다.

총 발전량 중 원자력 발전량($\ln NE$)과 신재생 발전($\ln RE$)의 증가가 음(-)의 부호를 가지며 그 추정치가 각각 -0.2199, -0.0543로 나타난 것은 발전부문에서 원자력 에너지의 비중이 1% 증가함에 따라 화석연료 발전 대체효과로 우리나라 총 CO_2 배출량을 각각 0.2199%, 0.0543% 씩 감소시켰음을 의미한다. 이는 원자력 발전 비중의 증가가 신재생 발전 비중의 증가에 비해 4배 이상 CO_2 배출량 감축에 효율적인 효과를 보이고 있음을 나타내고 있다.

<표 5-3> CO2 배출량의 장기 영향계수 추정결과

변수	추정치	*t*-통계값
$\ln Y$	5.5540	6.13***
$(\ln Y)^2$	-0.2413	-5.19***
$\ln NE$	-0.2199	-6.06***
$\ln RE$	-0.0543	-1.99*
상수항	-27.0528	-6.39***

주: *, ***은 각각 10%, 1% 수준에서 통계적으로 유의함을 나타냄.

2. 단기 영향 계수 분석

<표 5-4>은 소득과 총 전력소비량 및 신재생에너지의 발전량이 CO_2 배출량에 미치는 단기적 영향을 분석하기 위한 식 (7)를 추정한 결과를 보여준다. 원자력 발전량은 단기적으로도 CO_2 배출량에 1% 유의수준에서 통계적으로 유의한 영향을 미치며 그 부호도 장기적 영향과 동일한 것으로 나타나고 있다.

<표 5-4> CO2 배출량의 단기 영향계수 추정결과

변수	추정치	*t*-통계값
$dln Y$	0.1048	0.07
$dln Y^2$	0.0659	0.84
$dlnNE$	-0.1546	-4.08***
$dlnRE$	0.0131	0.64
ec_{t-1}	-0.7031	-5.06***

주: ***은 1% 수준에서 통계적으로 유의함을 나타냄.

오차수정항의계수(ec_{t-1})가 1% 유의수준에서 통계적으로 유의하며 음(-)의 부호를 갖는 것으로 나타나는데, 이를 통해 CO_2 배출과 관련 변수 간 외부 충격 등에 의해 발생하는 불균형 관계가 단기조

정과정을 통해 장기적으로 균형상태에 놓이게 됨을 의미한다. 즉, 앞에서 설명한 것과 같이 추정에 사용된 변수들 사이에 장기적인 공적분 관계가 성립하고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 오차수정항 계수의 절댓값은 장기균형을 이루기 위한 단기 조정과정의 속도를 나타낸다. 위 결과에서 오차수정항계수의 절댓값이 0.7031로 나타나는데 이는 CO_2 배출이 약 70.3%씩 장기균형관계로 조정됨을 의미한다. 즉, 어떤 외부 충격으로 인한 CO_2 배출과 변수들 사이에 장기 불균형이 발생할 경우 1년 동안 약 70.3% 정도씩, 총 1.42년에 걸쳐 장기균형관계로 조정된다는 것을 의미한다.

3. 감축 비용 도출 결과

각 발전원을 통해 CO_2 배출량을 1% 감축하기 위한 총비용(TC_k)을 식 (10)을 이용하여 도출하면, 전체 발전량이 1MWh 일 때, 원자력 발전을 통해 CO_2 배출량을 1% 감축시키기 위해서는 약 $3.61가 소요되는 것으로 도출되었으며, 신재생에너지 발전을 통해 CO_2 배출량을 1% 감축시키기 위해서는 $21.45가 소요되는 것으로 도출되었다.[4)]

본 연구를 통해 도출된 감축 비용은 원자력 발전을 통해 CO_2 배출량을 감축하는 것이 신재생 발전을 통해 CO_2 배출량을 감축시키는 것에 비해 16.83% 정도의 비용만으로 동일한 효과를 얻을 수 있다는 것을 의미하고 있다. 이는 도출 과정에서의 오차나 오류를 고려하더라도 충분히 의미가 있는 수치로 추정된다.

---

4) $\left(1\times\frac{1}{0.2199}\times\frac{1}{100}\right)\times(51.37+28)=3.61$

$\left(1\times\frac{1}{0.0543}\times\frac{1}{100}\right)\times(102.41+14.07)=21.45$

4. 결과 해석

장기 영향계수의 도출 결과 신재생에너지 발전량 증가가 CO_2 배출에 미치는 장기 영향계수는 -0.0543으로, 원자력에너지가 CO_2 배출에 미치는 장기 영향계수의 - 0.2413의 1/4 수준인 것으로 도출되었다. 이는 신재생에너지의 LCOE가 원자력에너지의 LCOE의 두 배 가까운 상황임을 감안하면, CO_2 배출을 감축하기 위해 신재생에너지의 비중을 증가시키는 것이 비용 효율적인 선택이 되기 어려움을 의미한다.

이는 1977년부터 2017년까지의 자료에 기초하여 판단한 결과, 현재 시점에서 발전량 부분의 CO_2 배출량을 감축하기 위해서는 원자력 발전이 신재생에너지 발전에 비해 상당히 비용 효율적임을 시사한다.

제 6 장 요약 및 결론

우리나라는 온실가스 저감정책의 일환으로 RPS 제도 및 탄소 배출권 거래제 등을 도입하여 기후변화협약에 대응하고 탄소 배출량을 감축할 수 있는 산업 기반을 마련하고자 노력하고 있다. IEA(2020)자료에 따르면, 2018년 기준 대한민국의 1인당 탄소 배출량 11,738kg 중 전력과 난방분야 탄소 배출량이 6,448kg으로써 약 54.9%를 차지한다. 따라서 전력분야에서 탄소 배출량 저감은 전체 탄소 배출량 저감에 있어 주요한 방법이 될 수 있다. 원자력 발전의 경우 2019년 기준 전체 발전량의 25.9%를 차지하고 있으며, 신재생 발전의 경우 전체 발전에서 차지하는 비중이 2009년 1.0%에서 2019년 5.8%로 급격하게 증가하고 있어 이에 대한 평가가 필요한 시점이라고 할 수 있다.[5)]

본 연구는 우리나라의 경제성장과 에너지 소비량이 환경오염에 미치는 영향을 분석함에 있어 이를 단일 업종 중 온실가스 배출의 가장 큰 전력부문에서 원자력 발전량과 신재생에너지 발전량의 변화가 온실가스 배출에 미치는 영향을 분석하는데 그 주목적을 두었다. 이를 위하여 ARDL 모형을 도입하여 그 장·단기 영향을 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같았다.

장기적으로 1977년 이후 우리나라의 가파른 경제성장으로 CO_2 배출이 빠르게 증가한 것으로 나타났는데, CO_2 배출량에 대한 GDP의 장기 영향 계수 추정치는 5.5540으로, 이는 1%의 소득 증가가 5.554%의 CO_2 배출 증가를 유발하는 것으로 나타났다. 그러나 소득 임계점을 지나면서는 1%의 소득 증가가 0.2413%의 CO_2 배출을 감소시키는 것으로 나타났다. 이는 우리나라 경제에서 EKC 가설이 성립하고 있음을 의미한다.

원자력 발전의 경우, CO_2발전량에 대한 장기 영향 계수 추정치가 -0.2199, 신재생 발전의 경우 장기 영향 계수 추정치가 -0.0543으로 나타났다.

---

5) 수력을 포함한 비중으로, 수력을 제외한 경우 0.41%에서 5.38%로 증가하였다.

이는 소득이 증가함에 따라 증가하는 전력소비를 충당하기 위해 원자력 발전량을 늘려 대응하는 경우, 원자력 발전량이 1% 증가함에 따라 CO_2 배출은 0.2199% 감소하며, 신재생 발전량이 1% 증가함에 따라 CO_2 배출은 0.0543% 감소하는 것으로 나타났다.

동일 조건하에서 원자력 발전과 신재생 발전을 통한 CO_2 감축 비용은 각각 $3.61, $21.45인 것으로 추정되었다. 이는 대한민국의 1977~2017년도까지의 자료를 기초로 분석하였을 때, 대한민국에서는 원자력 발전이 신재생 발전보다 CO_2 배출량 감축에 있어 좀 더 비용 효율적임을 의미한다.

대한민국에서는 2021년부터 전기료에 대해 연료비 연동제를 시행하고 있다. 현재 유가를 기준으로 하여 이루어지고 있는 연료비 연동제가 전체 발전 원가에 대해 적용될 경우, 전기료가 상승할 가능성이 있다. KPX 의 한전 공시자료에 따르면 2016년의 경우, 한국전력은 전체 전력 1kwh 당 84원에 구매해 112원에 전력을 판매하였는데, 동일한 2016년을 기준으로 한전은 태양광을 190.13 원에 구매하고 있었다. 향후 한전에서 태양광을 구매하는 비중이 증가할 경우 한전의 전력 구매 단가가 증가할 것으로 예측되는바, 이에 대한 대비책이 필요할 것으로 생각된다.

본 연구에서는 환경, 위험성, 운용비용 등의 다양한 요인들을 고려하여 총비용을 추정하였던 바, 향후 신재생에너지 비중이 지속적으로 늘어나는 경우 사회 후생을 극대화할 수 있는 발전분야 에너지 믹스의 도출이 필요할 것으로 사료되는데, 이는 추후 연구자의 몫으로 남겨둔다.

참 고 문 헌

김정인, 김진욱, 박창원 “주요 OECD 국가의 환경쿠즈네츠곡선 검증”, 「자원·환경경제연구」, 8(1):77-108, 1999.

김재화, 김현석, “신재생에너지 발전이 우리나라 CO 배출에 미치는 영향분석”, 「에너지경제연구」, 14(3):185-201, 2015.

노건기, 이중호, 박중구, “한국의 경제성장, 전력소비, CO2 배출 간 인과관계 분석”,「신재생에너지」, 12:34-41, 2016.

원두환, 이연정, 정수관, “일본의 CO 배출, 원자력 에너지, 신재생 에너지 관계 분석”,「에너지경제연구」, 17(2):89-114, 2018.

이광훈, “국내 지역별 이산화탄소 배출에 대한 환경 쿠즈네츠 곡선 추정 및 비교”, 「환경정책연구」, 9(4):53-76, 2010.

이광훈, 이춘화, “수도권 지역 이산화탄소 배출에 대한 환경 쿠즈네츠 곡선 탐색 및 정책적 함의”, 「서울 도시연구」, 10(3):83-95, 2009.

전력거래소, ″2019년도 발전설비 현황″ 2020.

정군오, 정영근, “경제성장과 이산화탄소 배출에 관한 다국가 비교분석”, 「산업경제연구」, 17(4):1077-1098, 2004.

정수관, 강상목, “소득 및 에너지소비와 환경오염의 관계에 대한 분석”, 「환경정책연구」, 12(3):97-122, 2013.

정용훈, 김수이. “한국의 CO2 배출, 경제성장 및 에너지믹스와의 관계분석”, 「국제지역연구」, 21(2):271-299, 2012.

21(2): 271-299.

진상현 “국가 온실가스 배출구조 변화요인 분석” 온실가스종합정보센터, 2013.

진보영, 김근우, 박중구, “한국의 경제성장, 전력소비량, 이산화탄소 배출량 및 환경규제 간 인과관계 분석”,「에너지공학」, .29(1):.1-12, 2020.

진태영, 김진수, “화석연료 사용량을 고려한 탄소배출량과 도시화율

의 관계에 관한 연구",「환경정책연구」, 25(3):47-70, 2017.
최충익, 김지현, "경제성장과 환경오염간의 관계에 대한 국제비교연구", 「국토계획」, 41(1):153-166, 2006.
허성욱, "기후변화시대의 에너지법", 「경제규제와 법」, 4(1):235-253, 2011.
Ang J. B., "CO_2 Emissions, Energy Consumption, and Output in France" *Energy Policy* 35(10):4772-4778, 2007
Bengochea-Morancho A., F. Higón-Tamarit, and I. Martínez-Zarzoso, "Economic Growth and CO2 Emissions in the European Union" *Environmental & Resource Rconomics* 19(2):165-172, 2001.
Brock W. A., and M. S. Taylor, *Handbook of Economic Growth* :1749-1821, Nroth-Holland, Amsterdam.
Christiano L. J., and L. Ljungqvist, "Money does Granger Cause Output in the Brvariate Money-Output Relation" *Journal of Monetary Economics* 22(2):217-235, 1988.
Glasure Y. U., and A. R. Lee, "Cointegration, Error-correction, and the Relationship between GDP and Energy: The Case of South Korea and Singapore" *Resource and Energy Economics* 20:17-25, 1997.
IEA, Projected Costs of Generating Electricity (2015), 2015.
IEA, CO_2 Emissions from Fuel Combustion, 2020.
INDC, Submission by the Republic of Korea, 2015.
IPCC, 기후변화 2014 종합보고서, 2014.
Iwata H., K. Okada, and S. Samreth, "Empirical Study on the Environmental Kuznets Curve for CO_2 in France: The Role of Nuclear Energy" *Energy Policy* 38:4057-4063, 2010.
Kraft J., and A. Kraft, "On the relationship between energy and GNP" *The Journal of Energy and Development* 3(2):401-403, 1978.

Kremers J. J. M., N. R. Ericsson, and J. J. Dolado "The Power of Cointegration Tests" *Oxford Bulletin of Economics and Statistics* 54(3):325-348, 1992.

Kuznets S., "Economic Growth and Income Inequality" *The American Economic Review* 45(1):1-28, 1955

Marrero G. A., "Greenhouse Gases Emissions, Growth and the Energy Mix in Europe" *Energy Economics* 32(6):1356-1363, 2010

Maslow, A. H., "A Theory of Human Motivation" *Psychological Review* 50(4):370 - 396, 1943.

Milanovic B. *Global Inequality: A New Approach for the Age of Globalization.* Harvard University Press, Cambridge.

Pesaran M. H., Shin Y., and Smith R. J., "Bounds Testing Approaches to the Analysis of Level Relationships" *Journal of Applied Econometrics* 16:287-326, 2001.

Farhani S., and Rejeb J. B., "Energy Consumption, Economic Growth and CO_2 Emissions: Evidence from Panel Data for MENA Region" *International Journal of Energy Economics and Policy* 2(2):71-81, 2012.

Shafik N., and S. Bandyopadhyay, *Economic Growth and Environmental Quality* Policy Research Working Paper [WPS904], June. 1992.

Stern, N. *Stern review: the economics of climate change.* United Kingdom., 2006.

참고 사이트

Earth Lab (Drying of the American West)
: https://serc.carleton.edu/eslabs/drought/6a.html
IEA 데이터 서비스
: https://www.iea.org/subscribe-to-data-services
IMF 1인당 국민소득 추정 자료
: https://www.imf.org/external/datamapper/NGDPDPC@WEO/OEMDC/ADVEC/WEOWORLD/KOR
TIME.com
: https://time.com/4344983/lake-mead-water-reservoir-drought/
United Nations Global Pulse, Big Data Climate Challenge 2014
: http://www.unglobalpulse.org/big-data-climate-challenge-2014
World bank 데이터베이트
: https://databank.worldbank.org
식품산업통계정보
: http://fis.foodinkorea.co.kr
전력통계정보 시스템
: http://epsis.kpx.or.kr
외교부 기후변화협상 안내서
: http://www.mofa.go.kr/www/wpge/m_20150/contents.do
외교부 홈페이지
: http://www.mofa.go.kr/www/wpge/m_20150/contents.do
파리 기후협약 탄소 감축목표
: https://www4.unfccc.int

Abstract

Compare Carbon reduction cost of nuclear power and renewable power generation

Yongsung Lee
Dept. of Agricultural Economics and Rural Development
The Graduate School
Seoul National University

It is an undeniable scientific fact that global warming is underway in the 20th and 21st centuries. It was also confirmed through research that global warming was greatly influenced by human activities (IPCC, 2014), and it was also known that CO_2(Carbon dioxide) emissions from the use of fossil fuels played a large role in global warming. There are various types of greenhouse gases that cause the more greenhouse effect than CO_2 on the earth, such as methane, nitrous oxide, and CFC (freon gas) water vapor. But due to the difference in the amount of emissions, it is estimated that CO_2 takes 65% of the total amount of greenhouse effect (IPCC, 2014).

However, as in the case of the US withdrawal from the Paris Agreement, greenhouse gas reductions face resistance because greenhouse gas emissions and economic growth are closely related.

Recent studies have shown that a country's economic growth as measured by GDP and its greenhouse gas emissions have a strong positive correlation(Bengochea-Morancho et al. 2001; Farhani and Rejeb, 2012; Jin, 2013; Roh, et al. 2016; Jin, et al. 2020). For this reason, there are concerns that economic growth will slow down if greenhouse gas reductions are achieved.

Therefore, to reduce the amount of greenhouse gas emissions including CO_2, and minimize the damage to economic growth, it is necessary to search for the most cost-effective CO_2 reduction plan.

In previous studies, the correlation between economic growth and CO_2 emissions has a strong relative. And as an alternative electric source like nuclear energy and renewable energy could reduce CO_2 than fossil fuel. But research that calculated the cost to reduce CO_2 emissions through conversion of power generation sources is still insufficient.

In this study, we investigate how the change in the proportion of nuclear power generation and renewable power generation affects CO_2 emission in the area of power generation, which is the most CO_2 emissions source in Korea, then we calculate and compare CO_2 reduction cost of each power source.

To this end, first, we calculate the long-term impact factor through the autoregressive distributed lag model(ARDL) which uses national income, CO_2 emissions, nuclear power generation, and renewable power generation from 1977 to 2017. Then multiplying the estimated long-term impact factor by LCOE(Levelized Cost of Energy) to calculate 1% of CO_2 emissions reduction cost for each power generation source was estimated in $/MWh.

Furthermore, according to the researcher's claim that the operation cost of nuclear power generation is inexpensive but nuclear power generation has some hidden costs such as environmental damage and impact on residents' health and incident handling costs. In this study, all of these risks were converted into external costs and included in the LCOE of nuclear power generation and renewable power generation.

As a result of the analysis taking this into account, assuming that if the total power generation is 1MWh, it was calculated that $3.61 is generated through nuclear power generation and $21.45 through renewable power generation to reduce CO_2 emissions by 1%. From this, it is estimated that increasing nuclear power generation is more cost-effective than increasing renewable power generation to reduce CO_2 emissions.

This study has the following limitations. the proportion and the diversification of renewable power generation have greatly increased since the 21st century, so it was not possible to analyze renewable power by dividing it into each power generation type in detail. In addition, in the process of estimating the external cost of each power plant, the environmental damage required for the construction of the power generation site has not been studied yet, so the power generation cost per area could not be included in the research.

This part is expected to be resolved if related research is conducted in the future and data is accumulated.

keywords : Nuclear power generation, Renewable power generation, Green house gas, Carbon dioxide,

Student Number : 2013-21120