

우리나라 전력화(Electrification)의 CO₂ 배출 영향 연구

Analysis of Electrification Effect on CO₂ Emissions in Korea

한 준*
Joon Han

요약: 전력화는 수요 부문에서의 화력연료 대체로 인한 CO₂ 배출 저감 뿐만이 아니라 전기 사용 증가로 인한 발전 부문에서의 CO₂ 배출 증가를 유발하기 때문에 전력화가 CO₂ 배출 저감에 효과적인지 판단하기는 쉽지 않다. 이 연구에서는 전력화가 CO₂ 배출에 미치는 영향을 분석하기 위해 LMDI 방법론을 활용해 1980-2015년 기간 동안의 우리나라 CO₂ 배출량을 요인 분해하였다. 이를 위해 수요 부문과 발전 부문에서의 효과들을 요인으로 고려하였다. 구체적으로는 최종에너지로서 화석연료 소비에 의한 CO₂ 배출은 탄소 배출계수 효과, 화석연료 비중 효과, 최종에너지 집약도 효과, 1인당 GDP 효과, 인구효과로 분해하였고, 전기 사용에 의한 발전 부문 CO₂ 배출은 탄소 배출계수 효과, 화력발전 효율 효과, 화력발전 비중 효과, 전력화율 효과, 최종에너지 집약도 효과, 1인당 GDP 효과, 인구효과로 분해하였다. 그리고 전력화 효과로서 전력화율 효과와 화석연료 비중 효과를 고려하였다. 분석결과, 전력화가 국내 CO₂ 배출량이 증가하는데 영향을 준 것을 확인했다.

핵심주제어: 전력화, CO₂ 배출, LMD

Abstract: Judging whether electrification is effective for the reduction of CO₂ emissions is difficult. The reason is that electricity use not only reduces CO₂ emissions due to the substitution of fossil fuel in the demand sector, but also increases them in the thermal power generation sector due to the rise in electricity use. In this study, we used LMDI methodology to decompose CO₂ emissions in Korea for the period 1980-2015 to analyze the effect of electrification on the levels of CO₂ emissions. To this end, several effects in the demand and power generation sectors have been considered as factors.

Specifically, CO₂ emissions from fossil fuel consumption, considered as final energy, were decomposed by the carbon emission factor, fossil fuel proportion, final energy intensity, per capita GDP, and population effects. Additionally, CO₂ emissions from power generation created by electricity use were decomposed by the carbon emission factor, thermal power generation efficiency, thermal power generation proportion, electrification rate, final energy intensity, per capita GDP, and population effects. In this study, electrification rate and fossil fuel proportion effects were considered as electrification effect. As a result, we confirmed that electrification contributed to the reduction of domestic CO₂ emissions.

Key Words: Electrification, CO₂ Emissions, LMDI

* 녹색기술센터 선임연구원

I. 서론

2015년 기준 우리나라 온실가스 배출량은 OECD 국가 중에서 미국, 일본, 독일, 멕시코, 캐나다에 이어 6위를 차지했고, UNFCCC 의무감축국과 비부속서I 국가들을 다 포함했을 경우는 12위를 차지했다(온실가스종합정보센터, 2017). 한편 우리나라에서는 에너지원이 전기로 대체되거나 전기 설비 이용이 늘어나는 현상인 전력화(electrification)¹⁾가 심화되어 2014년 기준 전력화율이 24.6%를 차지해 OECD 국가 중 10위였으며, 최근 전력수급 불안정 문제가 계속 대두되어 왔다.

전력화 심화가 전 세계적인 추세인 가운데, 전력화가 온실가스 감축에 효과적인지 아닌지에 관해서는 논쟁이 있다. 일부에서는 전력화가 화석연료 사용을 줄여 온실가스 감축에 있어 효과적이라는 주장하기도 하고 (EURELECTRIC, 2011, 2015; EC, 2011; Kiviluoma and Collantes, 2008; de la Chesnaye and Bistline, 2015), 일부 연구에서는 화석연료를 통해 발전을 하는 과정에서의 비효율적 전환으로 인해 에너지 소비와 온실가스 배출이 오히려 증가한다고 주장한다(산업통상자원부, 2014; 김창섭, 2013; 조영탁, 2012, 2013; 석광훈, 2012; 현대경제연구원, 2013). 이런 논란 가운데 전력화가 온실가스 감축에 미치는 영향을 제대로 판단하는 것은 발전 정책이나 온실가스 감축 정책 수립에 있어 매우 중요하다.

사실 전력화가 온실가스 감축에 미치는 영향에 대해 단정적으로 판단하기는 쉽지 않다. 왜냐하면 전력화는 수요 부문에서의 화력연료 대체로 인한 CO₂ 배출 저감뿐만 아니라 전기 사용 증가로 인해 발전 부문에서 CO₂ 배출 증가가 복합적으로 영향을 미치기 때문이다. 따라서 전력화가 CO₂ 배출에 미치는 영향을 분석하기 위해서는 수요 부문에서의 화석연료 저감으로 인한 배출 저감뿐만 아니라 전기 사용 증가로 인한 간접 배출 증가를 종합적으로 고려해야만 한다.

한편, 온실가스 배출량에 영향을 미치는 요인 연구에서 지수분해분석

1) 전력화는 전기화라는 표현과 혼용되기도 한다(김창섭, 2014; 현대경제연구원, 2013).

(Index Decomposition Analysis; IDA) 방법론이 많이 활용되었으며, 특히 로그 평균 디비지아 방식(Log Mean Divisia Index; LMDI)은 국내에서도 지자체, 산업, 제조업, 발전 부문 등을 대상으로 CO₂ 배출량이나 에너지 사용량의 요인분해 연구에 많이 이용되었다. 그러나 기존의 LMDI를 이용한 CO₂ 배출량 요인분해 연구들은 주로 탄소 배출 집약도, 화석연료 비중, 에너지 집약도, GDP, 인구 등을 중심으로 분석을 하였고, 전력화의 영향, 즉 소비 부문에서의 화석연료 이용 감소와 발전 부문에서의 화력발전 증가를 요인으로 고려한 연구는 없었다.

이런 배경에서 이 연구는 LMDI 방법론을 활용해 우리나라 CO₂ 배출량에 대한 요인분해분석을 수행하였으며, 특히 전력화가 CO₂ 배출에 미치는 영향을 분석하기 위해 수요 부문과 발전 부문에서의 효과들을 요인으로 고려하였다.

이 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 전력화 개념 및 현황과 함께 전력화의 영향에 대한 선행연구들을 살펴보면서 전력화가 CO₂ 배출에 미치는 영향과 그 근거들을 살펴보았다. III장에서는 LMDI 방법론 소개 및 이 연구에서 구성한 항등식을 설명하고, 분석기간과 자료를 제시하였다. IV장에서는 LMDI 분석결과를 제시하였으며, 이를 바탕으로 V장에서 결론을 정리하였다.

II. 전력화

1. 전력화의 개념 및 현황

전력화라는 개념은 전기가 국가 경제와 삶의 질 향상에 기여한다는 측면에서 원래 발전 수준을 나타내는 개념의 하나로 많이 활용되었다(Banal-Estanol et al., 2017; Wolfram et al., 2012; World Bank Independent Evaluation Group, 2008). 그래서 전력화를 표현하는 지표로서 전기 접근이 가능한 가구 비율 같은 것이 여러 지수에 이용되기도 했다.²⁾ 그러나

이와 같은 전력화 개념은 저소득 국가나 인프라가 열악한 농촌지역 혹은 산업화 과정에서 전력설비가 조금씩 확대되던 시기에 적용하기 적합한 개념으로 최근 우리나라에 적용하고 있는 개념과는 다소 차이가 있다. 때문에 Sugiyama(2012)는 개발 경제학 같은 분야에서 전기 접근이 어려운 지역에 전력 보급을 하는 의미로 사용하는 전력화 개념과 에너지 서비스에 대한 수요 관점에서 전기 사용 확대라는 의미로 사용하는 전력화 개념을 사용하는데 주의해야 한다고 지적한 바 있다. 이 연구에서는 후자의 의미로서 전력화 개념을 사용하였다.

다음 <표 1>은 OECD 국가들의 전력화율 추이를 나타낸 것이다. 전력화의 수준을 나타내는 지표인 전력화율(electrification rate)은 소비 부문에서 사용되는 총 에너지원 중에서 전기가 차지하는 비중으로 정의한다(Desbrosses, 2006; Jung and Lee, 2014; Nishio and Hoshino, 2010; Schurr et al., 1990). 표에서 보듯이, 우리나라는 전력화율이 지속적으로 증가하여 2014년 기준 24.6%로 OECD 국가 중 10위였으며, 1975-2014년 기간 동안 전력화율의 연평균 증가율(Compound Annual Growth Rate: CAGR)은 3.1%에 달해 터키에 이어 2위를 차지했다. 우리나라의 전력화가 빠르게 심화되고 있는 것이다.

2) 이 지표는 UN 지속가능발전위원회(UN Commission on Sustainable Development: UNCSD) 지속가능발전 지수, 세계은행(World Bank) 세계 발전 지수(World Development indicator), 콜럼비아대학·예일대학의 환경성과지수(Environmental Performance Indicator: EPI), 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency: IAEA) 지속가능발전 에너지 지수, 사회 진보 조사기구(Social Progress Imperative) 사회진보지수(Social Progress Index) 등에서 활용되고 있다.

〈표 1〉 OECD 국가의 전력화를 추이 (1975~2014년)

(단위:%)

Time	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2014	1975-2014 CAGR
아이슬란드	17.0	19.2	20.4	24.8	25.3	33.6	34.9	53.3	52.9	3.0
노르웨이	41.4	40.3	45.4	47.8	48.0	47.6	46.6	45.7	46.4	0.3
스웨덴	17.6	21.1	30.0	32.2	29.9	31.4	32.5	32.4	33.0	1.6
이스라엘	18.6	20.9	23.3	22.4	24.4	27.7	30.6	28.2	30.5	1.3
핀란드	13.2	16.5	22.0	22.7	25.1	26.6	27.4	27.2	27.7	1.9
일본	16.6	19.0	21.1	23.1	23.8	25.4	26.2	28.4	27.7	1.3
그리스	14.4	16.0	17.2	16.9	19.1	20.1	21.1	23.5	27.5	1.7
스위스	16.9	18.2	19.9	21.9	22.0	23.2	24.1	24.7	26.5	1.2
스페인	14.3	16.0	18.6	17.8	17.6	19.0	20.4	22.8	24.8	1.4
한국	7.6	9.0	11.4	12.5	13.4	17.8	21.9	24.5	24.6	3.1
프랑스	10.5	12.7	15.7	18.2	19.3	20.3	21.6	23.7	24.2	2.2
포르투갈	13.0	15.6	17.1	15.1	16.3	17.0	19.5	22.6	24.0	1.6
뉴질랜드	23.3	24.3	26.2	25.0	23.2	22.8	26.1	26.1	23.2	0.0
칠레	10.6	11.5	13.0	12.0	13.7	15.5	19.0	19.7	23.0	2.0
호주	12.9	14.6	17.1	19.6	20.0	21.4	22.5	23.5	22.1	1.4
영국	14.5	15.4	15.5	17.1	17.6	18.8	20.2	20.5	21.2	1.0
미국	11.9	13.3	15.3	17.5	19.0	19.5	20.5	21.5	21.2	1.5
슬로바키아 공화국	9.6	12.6	14.2	12.8	17.0	16.6	16.8	18.1	21.2	2.1
캐나다	15.3	16.8	20.9	22.2	21.7	21.6	22.1	22.0	21.0	0.8
이탈리아	11.6	13.4	14.9	16.1	17.0	18.2	18.3	19.2	20.8	1.5
터키	5.0	6.4	7.9	9.6	11.8	14.3	16.9	18.8	20.6	3.7
아이슬란드	10.6	11.7	13.0	13.5	15.8	16.2	17.2	19.1	20.5	1.7
덴마크	10.0	12.6	15.2	18.5	18.3	19.6	19.3	18.4	20.5	1.8
독일	12.2	13.6	15.0	16.3	16.6	18.0	19.5	20.0	20.4	1.3
오스트리아	14.1	15.2	16.8	18.6	18.9	18.8	18.1	18.8	19.5	0.8
체코 공화국	8.7	9.4	10.0	12.6	15.2	16.4	17.1	18.6	19.4	2.1
멕시코	7.0	7.5	8.4	10.3	11.8	13.1	15.4	15.8	18.3	2.5
헝가리	9.6	10.2	11.8	13.1	13.8	14.7	13.9	16.2	17.8	1.6
벨기에	9.6	11.5	13.8	15.5	15.5	16.0	16.5	16.5	17.3	1.5
폴란드	8.9	9.4	10.2	13.5	12.0	14.7	14.6	14.6	16.6	1.6
네덜란드	9.0	9.1	10.5	12.9	11.9	13.6	13.9	14.0	15.4	1.4
룩셈부르크	10.5	11.3	13.4	12.8	15.4	15.3	12.9	14.4	14.7	0.9

주 (a) 에스토니아, 슬로베니아, 라트비아는 자료 부재로 제외

(b) 2014년 전력화율 순으로 배열

자료 : IEA 데이터

2. 전력화의 영향 관련 선행 연구 검토

전력화가 사회에 미치는 영향과 관련해 국내외 일부 문헌, 즉 학술지, 국가 계획, 워크샵 자료집 등에서 언급한 사례들이 있다. 다음 〈표 2〉와

〈표 3〉은 이들 문헌에서 기술하고 있는 전력화의 영향과 전제하고 있는 발전원에 대해 정리한 것이다.³⁾ 먼저 〈표 2〉에서는 국내 정부 계획이나 민간 연구소 등에서 전력화 심화에 따른 영향에 대해 기술한 것을 정리한 것으로 우리나라 전원 구성을 전제로 한 것이어서 부정적 영향이 대부분이다. 표에서 보면 전력수급 불안정 문제를 가장 많이 언급하였고, 비효율적 전환으로 인한 에너지 소비 및 CO₂ 배출 증가, 전력 인프라 구축에 따른 사회적 갈등 및 환경오염 초래, 기후변화협약이나 에너지 가격 변동 등 외부요인에 대한 산업경쟁력 약화 등이 초래될 수 있다고 하였다. 여기서 비효율적 전환은 전환 손실로 인해 원래 1차 에너지가 가지고 있는 열량을 상당 부분 손실되어서 1차 에너지를 직접 활용하는 것보다 효율이 많이 낮아진다는 의미이다. 결국 이는 에너지 소비 증가와 CO₂ 배출 증가로 이어진다.

〈표 2〉 주요 국내 문헌에서 언급한 전력화 영향 및 발전원 가정

	영향					발전원
	비효율적 전환으로 인한 에너지 소비 및 CO ₂ 배출 증가	전력수급 불안정 심화	전력인프라 구축에 따른 사회적 갈등 초래	전력인프라 구축에 따른 환경오염	기후변화협약, 에너지가격 변동 등 외부요인에 대한 산업 경쟁력 약화	
산업통상자원부(2014)	○	○	○	○		국내 전원 믹스
지식경제부(2013)		○				
김창섭(2013)	○	○	○			
조영탁(2012)	○	○	○			
조영탁(2013)	○	○				
석광훈(2012)	○	○				
현대경제연구원(2013)	○					
구자열 등(2016)					○	
Kim et al.(2016)		○				

3) 국내 문헌의 경우 ‘전력화’ 혹은 ‘전기화’, 해외 문헌의 경우 ‘electrification’을 키워드로 해서 구글 검색을 하였으며, 이렇게 찾은 문헌 중에서 전력화의 영향을 기술한 문헌 위주로 정리하였다.

반면 <표 3>은 해외 문헌들에서 기술한 전력화의 영향과 이들 문헌에서 전제하고 있는 발전원을 나타낸 것이다. 해외문헌에서는 주로 환경오염 저감, 화석연료 의존도 저감, 화석연료 대비 비용 저감, 온실가스 배출 저감, 효율 증가 등을 전력화의 장점을 제시하였고, 특히 온실가스 배출 저감을 가장 많이 장점으로 꼽았다. 이들 문헌에서는 발전원으로 원자력이나 재생가능에너지, 열병합 발전 등의 저탄소에너지원을 가정하였으며, 일부에서는 CCS 병행을 가정하기도 했다. 이처럼 전력화가 온실가스 배출 저감(탈탄소화)에 기여하기 위해서는 발전원에서의 배출 저감(탈탄소화)가 반드시 달성되어야 한다(AEBIOM et al., 2017).

<표 3> 주요 해외 문헌에서 언급한 전력화 영향 및 발전원 가정

	영향							발전원		
	환경 오염 저감	화석 연료 의존 도 저감	화석 연료 대비 비용 저감	온실 가스 배출 저감	효율 증가	재생 가능 에너지 확대 기여	CCS 병행	원자력	재생 가능 에너지	열병합 발전
EURELECTRIC (2015)		○		○	○*			○	○	
EURELECTRIC (2011)				○			○	○	○	○
EC (2011)				○			○	○	○	
Kiviluoma and Collantes (2008)			○	○				○	○	
de la Chesnaye and Bistline (2015)				○				저탄소에너지원		
Greenpeace and EREC (2012)**	○		○						○	
Philibert (2015)						○				

* 전기자동차나 전기설비가 화석연료 자동차나 화석연료 설비보다 효율이 높음

** 화석연료 전력공급시스템이 back-up 시스템으로 필요

관련 문헌들을 살펴본 결과, 전력화로 인한 영향에서 온실가스 배출 저

감과 온실가스 배출 증가가 동시에 거론되고 있다. 이렇게 전력화로 인한 정반대의 영향이 함께 거론되고 있는 것은 결국 전력화에 소요되는 전기를 어떤 에너지원으로 만드느냐의 전제가 다르기 때문이다. 이는 앞으로 전력화 논의에서 반드시 발전원 구성까지 포함시켜 논의해야 하는 이유이다.

III. 방법론

1. LMDI 분석

지수분해분석(Index Decomposition Analysis; IDA)은 지수 이론(Index Theory)에 근거한 방법론으로서(김진수·허은녕, 2005; 진상현·정경화, 2013), 몇 개의 요인을 결합시켜 만든 중심 함수를 정의하고 이를 여러 다양한 방식으로 분해하여 각 요인들이 중심 함수에 미치는 영향을 분석하는 방법이다(Ang, 2004). 지수분해분석은 자료 양이 적어도 분석이 가능하고, 기준년도와 비교년도 자료만 필요하므로 분석기간에서 자유로움이 크며, 기준년도와 비교년도 간의 변화량과 비율 변화까지 분석할 수 있다는 장점이 있다(김진수·허은녕, 2005). 때문에 지수분해분석은 1970년대 후반부터 에너지 집약도 변화나 산업구조 변화가 에너지 이용 추세에 미치는 영향을 분석하기 위해 많이 활용되었다.

지수분해분석 방법 중에서 로그 평균 디비지아 방식(Log Mean Divisia Index; LMDI)은 기준년과 비교년의 로그 평균을 이용하여 요인들의 영향을 측정하는 방식으로 Ang et al.(1998, 2003), Ang(2004, 2005) 등을 거치면서 체계가 잡혔다(김수이, 2018; 에너지경제연구원, 2007). 특히 LMDI는 분해 이후에 잔차(residuals)가 남지 않는 장점과 함께 이론적 기반, 적용가능성, 사용이나 결과 해석의 편리성 때문에 우수한 방식으로 평가받고 있다(Ang, 2004; Muller, 2006).

이 연구는 우리나라 CO₂ 배출량을 LMDI 방법을 통해 분석한 연구로서 전력화를 고려하기 위해 수요 부문과 발전 부문을 요인으로 포함시켰다.

이를 위해 전기 사용에 의한 발전 부문과 최종에너지로서 화석에너지 소비 부문에 대한 LMDI를 병렬적으로 통합하였다. 이와 같이 두 부문 이상에 대한 LMDI를 병렬적으로 통합하여 분석한 사례는 이미 있었다. 예를 들어, de Freitas and Kaneko(2011)은 브라질의 CO₂ 배출량을 LMDI를 활용해 분석하면서 생산 활동과 주거 부문에서의 에너지 소비에 대한 LMDI를 병렬 통합해 분석한 바 있다.⁴⁾

이 연구에서는 우리나라 CO₂ 배출량과 관련해 발전 부문에서의 효과와 최종에너지로서 화석연료 소비 부문에 대한 효과를 고려해 LMDI 분석을 하였다. 발전 부문 CO₂ 배출은 탄소 배출계수 효과, 화력발전 효율 효과, 화력발전 비중 효과, 전력화율 효과, 최종에너지 집약도 효과, 1인당 GDP 효과, 인구 효과로 분해하였고, 최종에너지로서 화석연료 소비에 의한 CO₂ 배출은 탄소 배출계수 효과, 화석연료 비중 효과, 최종에너지 집약도 효과, 1인당 GDP 효과, 인구 효과로 분해하였다.

이 요인들을 좀 더 자세히 살펴보면 다음과 같다. 먼저 발전부문에서 탄소 배출계수 효과는 발전용 화석연료 소비량 대비 CO₂ 배출량으로 탄소 배출계수가 높은 연료들이 많이 사용될수록 이 효과에 의한 배출량은 증가한다. 화력발전 효율 효과는 화력 발전량 대비 화석연료 소비량으로 발전효율의 역수이며, 이 효과가 커질수록 배출량이 증가한다. 화력발전

4) 생산 활동의 CO₂ 배출은 생산 부문 탄소 집약도 효과(CI), 생산 부문 에너지 믹스 효과(EM), 생산 부문 에너지 집약도 효과(EI), 경제 구조(ES), 경제 활동(일인당 실질 GDP)(EA), 인구 효과(P)로 분해하였고, 주거 부문의 CO₂ 배출은 주거 부문 탄소 집약도 효과(CIR), 주거 부문 에너지 믹스 효과(EMR), 주거 부문 에너지 집약도 효과(EIR), 주거 부문 인구 효과(PR)를 분석하였으며, 항등식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 CO_{2t} - CO_{2,t-1} &= \Delta CO_2 \\
 &= \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^{19} \Delta CI_{ij} + \Delta EM_{ij} + \Delta EI_i + \Delta ES_i + \Delta EA + \Delta P \\
 &+ \sum_{i=6}^7 \sum_{j=1}^7 \Delta CIR_{ij} + \Delta EMR_{ij} + \Delta EIR_i + \Delta PR
 \end{aligned}$$

i = 1(산업) or 2(에너지) or 3(농업/농업생산) or 4(서비스/공공) or 5(수송) or 6(주거 부문)

j = 산업, 에너지, 농업/농업생산, 서비스/공공, 수송에서 사용되는 19개 에너지(단, 주거부문에서는 7개 에너지만 사용)

비중 효과는 전력 소비량⁵⁾ 대비 화력 발전량으로서 소비되는 전력을 위해 화력이 어느 정도 기여하는지를 나타내고, 이 값이 커질수록 배출량도 커진다. 전력화율 효과는 최종에너지 소비량 대비 전력 소비량을, 최종에너지 집약도 효과는 GDP당 최종에너지 소비량을 의미하며, 이들 효과가 커질수록 배출량이 증가한다. 1인당 GDP는 일인당 실질 GDP이며, 인구 효과와 함께 그 값이 커지면 배출량이 증가한다.

소비부문에서의 탄소 배출계수 효과는 화석연료 사용량 대비 CO₂ 배출량으로 탄소 배출계수가 높은 연료들이 많이 사용될수록 이 효과에 의한 배출량이 증가한다. 화석연료 비중 효과는 최종에너지 소비량 대비 화석연료 사용량으로 이 값이 커질수록 배출량이 증가한다. 최종에너지 집약도 효과는 GDP당 최종에너지 소비량을 의미하며, 이 효과가 커지면 배출량도 증가한다. 인구 효과도 마찬가지이다.

한편, 이 논문에서 핵심적으로 살펴보고자 하는 전력화 현상은 타 에너지원이 전기로 대체되는 현상으로서 전기 비중 증가와 타 에너지원, 즉 화석연료 비중 감소가 동반되는 개념이다. 때문에 전력화에 의한 CO₂ 배출량 변화를 살펴보기 위해서는 전력화율 증가에 의한 영향과 함께 최종에너지 중 화석연료 비중 감소에 의한 영향까지를 같이 고려해야 한다. 만약 전력화 현상을 반영할 때 전력화율, 즉 최종 에너지 대비 전력 비중만을 고려하게 되면 전력 비중 증가에 의한 CO₂ 배출 증가 측면만을 반영하는 것이다. 전기 소비 증가에 따라 최종 에너지 중 화석연료 비중 감소에 의한 CO₂ 배출 감소도 같이 고려해야 한다.⁶⁾ 한편 전력화에 따라 발전 부문 탄소 배출계수가 변한다거나 화력발전 효율 변화 혹은 화력발전 비

5) 엄밀하게는 전력소비량 대신 전력생산량을 사용하는 것이 자연스럽고 두 개념의 차이가 있지만, 전력화율 정의에 전력소비량 개념이 포함되어 있고 이것이 포함된 항등식을 구성하기 위해 이 연구에서는 전력소비량 개념을 사용하였다.

6) 물론 최종에너지 중 화석연료 비중 감소를 전적으로 전기 소비 증가에 의한 것이라고 할 수만은 없다. 화석연료나 전기 이외에 열에너지나 신재생에너지의 비중 변화도 영향을 줄 수 있기 때문이다. 그러나 이들의 비중이 크지 않기 때문에(2015년 기준 최종에너지 대비 5.6%) 이 연구에서는 화석연료 비중 감소를 모두 전기 소비 증가에 의한 것이라고 가정한다.

중 변화가 유발되어 CO₂ 배출에 영향을 줄 수도 있다. 전력화 현상의 범위를 어디까지 포함할 것인가의 문제인데, 이 연구에서는 보수적인 차원에서 전력화율 효과와 화석연료 비중 효과를 합친 효과를 전력화의 효과로 정의하고, 이것이 CO₂ 배출에 미친 영향을 분석하고자 한다.

이 연구에서는 우리나라 CO₂ 배출량에 대해 다음과 같은 항등식으로 표현하였다.

$$CO_2 = \sum_{i=1}^2 CO_{2i} \quad i = 1(\text{발전 부문}) \text{ or } 2(\text{최종에너지 수요 부문}) \quad (1)$$

위 식 (1)은 다음과 같이 여러 효과들로 분해해서 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} CO_2 &= \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 \frac{CO_{2ij}}{FFC_{ij}} \times \frac{FFC_{ij}}{FEG_i} \times \frac{FEG_i}{ELC} \times \frac{ELC}{FEC} \times \frac{FEC}{GDP} \times \frac{GDP}{POP} \times POP + \\ &\sum_{i=2}^2 \sum_j \frac{CO_{2i}}{FFC_i} \times \frac{FFC_i}{FEC} \times \frac{FEC}{GDP} \times \frac{GDP}{POP} \times POP \\ &= \sum_{i=1} M_i \times F \times S \times L \times I \times G \times P + \sum_{i=2} M_i \times O \times I \times G \times P \end{aligned} \quad (2)$$

j = 발전 에너지원인 무연탄 or 유연탄 or BC유 or 기타중유 or 경유 or LNG

FFC = 화석연료 소비량

FEG = 화력 발전량

ELC = 전력 소비량

FEC = 최종에너지 소비량

GDP = 실질 GDP

POP = 인구

M_1 = 발전 부문 탄소 배출계수

M_2 = 최종에너지 소비 부문의 탄소 배출계수

- F = 화력 발전량 대비 화석연료 소비량 (화력발전 효율 효과)
- S = 전력 소비량 대비 화석 발전량 (화력발전 비중 효과)
- L = 최종에너지 소비량 대비 전력 소비량 (전력화율 효과)
- I = GDP 대비 최종에너지 소비량 (최종에너지 집약도 효과)
- G = 인구 대비 GDP (1인당 GDP 효과)
- P = 인구 (인구 효과)
- O = 최종에너지 소비량 대비 화석연료 소비량 (화석연료 비중 효과)

이때 CO₂ 배출량을 시간의 함수라고 가정하고 발전 부문과 최종에너지로서 화석에너지 소비 부문을 각각 시간에 대해 미분하면 다음과 같이 나타낼 수 있다. 먼저 전력 소비에 의한 발전 부문 ($i=1$)의 경우는 식 (3)과 같고, 이는 다시 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{CO_{2i}} \frac{dCO_{2i}}{dt} = \frac{1}{M_1} \frac{dM_1}{dt} \times \frac{1}{F} \frac{dF}{dt} \times \frac{1}{S} \frac{dS}{dt} \times \frac{1}{L} \frac{dL}{dt} \times \frac{1}{I} \frac{dI}{dt} \times \frac{1}{G} \frac{dG}{dt} \times \frac{1}{P} \frac{dP}{dt} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \ln CO_{2i} = \frac{d}{dt} \ln M_1 \times \frac{d}{dt} \ln F \times \frac{d}{dt} \ln S \times \frac{d}{dt} \ln L \times \frac{d}{dt} \ln I \times \frac{d}{dt} \ln G \times \frac{d}{dt} \ln P \quad (4)$$

식 (4)의 양변을 시간 0→T까지 적분하면 식 (5)와 같고, 다시 양변에 $\frac{CO_{2i}(T) - CO_{2i}(0)}{\ln(CO_{2i}(T)/CO_{2i}(0))}$ 를 곱하면 식 (6)과 같다.

$$\ln \frac{CO_{2i}(T)}{CO_{2i}(0)} = \ln \frac{M_1(T)}{M_1(0)} + \ln \frac{F(T)}{F(0)} + \ln \frac{S(T)}{S(0)} + \ln \frac{L(T)}{L(0)} + \ln \frac{I(T)}{I(0)} + \ln \frac{G(T)}{G(0)} + \ln \frac{P(T)}{P(0)} \quad (5)$$

$$CO_{2i}(T) - CO_{2i}(0) = \frac{CO_{2i}(T) - CO_{2i}(0)}{\ln(CO_{2i}(T)/CO_{2i}(0))} \times [\ln \frac{M_1(T)}{M_1(0)} + \ln \frac{F(T)}{F(0)} + \ln \frac{S(T)}{S(0)} + \ln \frac{L(T)}{L(0)} + \ln \frac{I(T)}{I(0)} + \ln \frac{G(T)}{G(0)} + \ln \frac{P(T)}{P(0)}] \quad (6)$$

여기서 $\frac{CO_{2i}(T) - CO_{2i}(0)}{\ln(CO_{2i}(T)/CO_{2i}(0))} \times \ln \frac{X(T)}{X(0)}$ 형태를 X_{eff} 로 표현한다고 하면, 식 (6)은 식 (7)과 같이 정리할 수 있다.

$$\Delta CO_{2i} = CO_{2i}(T) - CO_{2i}(0) = M_{ieff} + F_{ieff} + S_{ieff} + L_{ieff} + I_{ieff} + G_{ieff} + P_{ieff} \quad (i=1) \quad (7)7$$

마찬가지로 최종에너지로서 화석에너지 소비 부문 ($i=2$)의 경우는 다음 식 (8)과 같고, 이는 다시 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{CO_{2i}} \frac{dCO_{2i}}{dt} = \frac{1}{M_2} \frac{dM_2}{dt} \times \frac{1}{O} \frac{dO}{dt} \times \frac{1}{I} \frac{dI}{dt} \times \frac{1}{G} \frac{dG}{dt} \times \frac{1}{P} \frac{dP}{dt} \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \ln CO_{2i} = \frac{d}{dt} \ln M_2 \times \frac{d}{dt} \ln O \times \frac{d}{dt} \ln I \times \frac{d}{dt} \ln G \times \frac{d}{dt} \ln P \quad (9)$$

식 (9)의 양변을 시간 0→T까지 적분하면 다음 식 (10)과 같고, 여기에 다시 양변에 $\frac{CO_{2i}(T) - CO_{2i}(0)}{\ln(CO_{2i}(T)/CO_{2i}(0))}$ 를 곱하면 다음 식 (11)과 같다.

$$\ln \frac{CO_{2i}(T)}{CO_{2i}(0)} = \ln \frac{M_2(T)}{M_2(0)} + \ln \frac{O(T)}{O(0)} + \ln \frac{I(T)}{I(0)} + \ln \frac{G(T)}{G(0)} + \ln \frac{P(T)}{P(0)} \quad (10)$$

$$CO_{2i}(T) - CO_{2i}(0) = \frac{CO_{2i}(T) - CO_{2i}(0)}{\ln(CO_{2i}(T)/CO_{2i}(0))} \times \left[\ln \frac{M_2(T)}{M_2(0)} + \ln \frac{O(T)}{O(0)} + \ln \frac{I(T)}{I(0)} + \ln \frac{G(T)}{G(0)} + \ln \frac{P(T)}{P(0)} \right] \quad (11)$$

7) 여기서 I_{ieff} , G_{ieff} , P_{ieff} 라고 표시한 이유는 최종에너지 집약도, 일인당 GDP, 인구는 부문(i)에 상관없이 각각 일정한 값이지만 각 부문에서 이들의 효과는 부문별로 다르기 때문에 구분을 해서 표시한 것이다.

여기서 $\frac{CO_{2i}(T) - CO_{2i}(0)}{\ln(CO_{2i}(T)/CO_{2i}(0))} \times \ln \frac{X(T)}{X(0)}$ 형태를 X_{eff} 로 표현한다고 하면, 다음 식 (12)와 같이 정리할 수 있다.

$$\Delta CO_{2i} = CO_{2i}(T) - CO_{2i}(0) = M_{2eff} + O_{eff} + I_{2eff} + G_{2eff} + P_{2eff} \quad (i=2) \quad (12)$$

지금까지의 식들을 바탕으로 식 (2)는 다음 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다. 이때 $I_{1eff} + I_{2eff}$ 는 I_{eff} , $G_{1eff} + G_{2eff}$ 는 G_{eff} , $P_{1eff} + P_{2eff}$ 는 P_{eff} 로 합했다.

$$\begin{aligned} \Delta CO_2 &= \sum_{i=1}^2 (CO_{2i}(T) - CO_{2i}(0)) \\ &= M_{1eff} + F_{eff} + S_{eff} + L_{eff} + I_{eff} + G_{1eff} + P_{1eff} + M_{2eff} + O_{eff} + I_{2eff} \\ &\quad + G_{2eff} + P_{2eff} \\ &= M_{1eff} + F_{eff} + S_{eff} + L_{eff} + I_{eff} + G_{eff} + P_{eff} + M_{2eff} + O_{eff} \end{aligned} \quad (13)$$

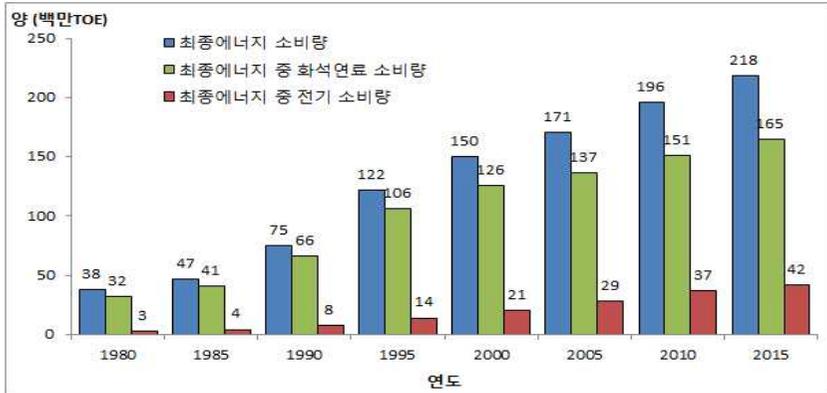
2. 분석 시점과 분석 자료

이 연구의 분석 시점은 1980년부터 2015년까지 매 5년 단위로 분석을 하였다. 이 연구에 사용된 자료는 인구, 실질 GDP, 최종에너지 소비량, 전기 소비량, 화력발전량, 발전부문 화석연료 사용량, 화력발전에 의한 CO₂ 배출량, 최종에너지 중 화석연료 사용량, 화석연료 사용에 의한 CO₂ 배출량 자료이다.

먼저 인구 자료는 통계청 자료를 활용하였고, 실질 GDP는 한국은행 명목 GDP 자료에 GDP 디플레이터(2010년 기준)를 적용하여 계산하였다. 최종에너지 사용량 및 최종 에너지 중 화석연료 사용량, 전기 소비량 자료는 에너지통계연보를 활용하였다. 이들의 1980-2015년 기간 동안 추이는 다음 <그림 1>과 같다. 화력발전량은 전력거래소 전력통계정보시스템(EPSIS) 자료를 활용하였는데, '사업자+한전구입 발전량' 수치에서 수력,

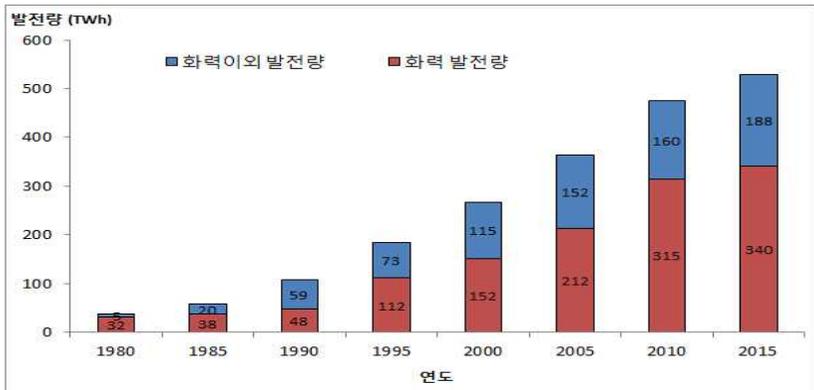
원자력, 대체 발전량을 제외한 값을 사용하였다. 전체 발전량과 화력발전량의 1980-2015년 기간 동안의 추이는 다음 <그림 2>와 같다.

<그림 1> 우리나라 최종에너지 및 최종에너지 중 화석연료와 전기 소비량 추이



자료: 에너지통계연보

<그림 2> 우리나라 화력발전량 및 화력이외 발전량 추이



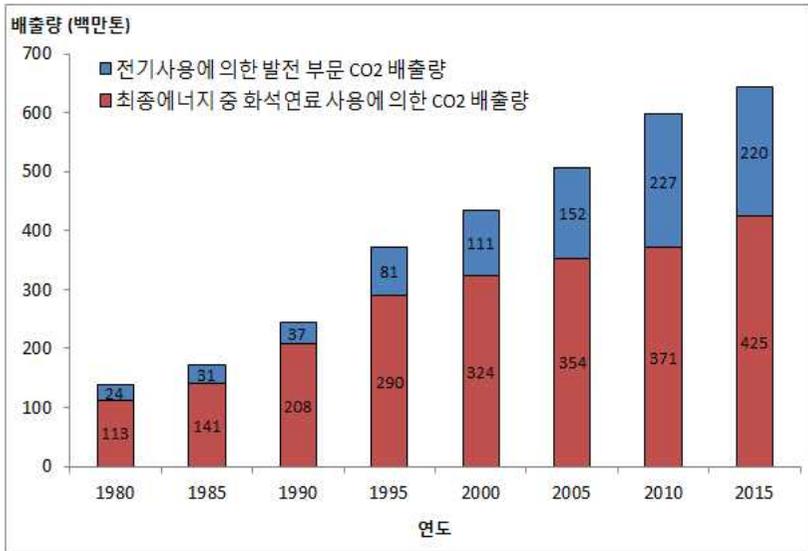
자료: EPSIS

발전 부문 화석연료 사용량 자료는 EPSIS와 에너지통계연보 수치를 활용하였으며, 화력발전에 의한 CO₂ 배출량은 에너지관리공단의 CO₂ 배출량 계산기를 활용해 산정하였고, IPCC 1996 가이드라인을 반영하였다.⁸⁾

8) 이를 위해 발전 부문 화석연료인 무연탄, 유연탄, 중유(BC유, 기타중유), 경유, 가스를

최종에너지 중 화석에너지 소비에 따른 CO₂ 배출량의 경우, 미국 EIA (Energy Information Administration) International Energy Statistics에서 제공하고 있는 한국 에너지 소비에 따른 CO₂ 배출량 수치로부터 이 연구에서 직접 산정한 발전 부문 CO₂배출량을 뺀 값을 이용하였다. EIA 자료를 활용한 것은 우리나라 국가 인벤토리 보고서에서는 1990년 이후 수치만 제공하고 있어 분석기간에 필요한 데이터 확보를 위한 것이다. 다음 <그림 3>은 1980-2015년 기간 동안 최종에너지 중 화석연료 사용에 의한 CO₂ 배출량과 전기 사용에 의한 발전 부문 CO₂ 배출량 추이를 나타낸 것이다.

<그림 3> 우리나라 최종에너지 중 화석연료 사용에 의한 CO₂ 배출량과 전기 사용에 의한 발전 부문 CO₂ 배출량 추이



대상으로 각 연료별 소비량에 각 연료별 순발열량과 탄소배출계수 및 탄소 톤을 이산화탄소 톤으로 변환하기 위한 값(44/12)을 곱했다.

IV. 분석결과

LMDI를 이용해 1980-2015년까지 우리나라 CO₂ 배출량을 요인 분해한 결과는 다음 <표 4> 및 <그림 4>와 같다. <표 4>에서 보면 1980-2015년 기간 우리나라 CO₂ 배출량은 총 506.8 백만 톤이 증가했으며, 이에 영향을 미쳤던 가장 큰 효과는 일인당 GDP 효과(618.1 백만 톤)였고, 그 다음으로 최종에너지 집약도 효과(-141.9 백만 톤), 인구효과(94.5 백만 톤) 순이었다. 이는 이 기간 동안 우리나라에서 일인당 GDP가 크게 증가해 CO₂ 배출량이 많이 증가시키는 쪽으로 영향을 주었고, 한편에서 효율 개선 등으로 GDP 당 최종에너지 소비량이 감소해 CO₂ 배출 감소에 상당히 기여했음을 의미한다.

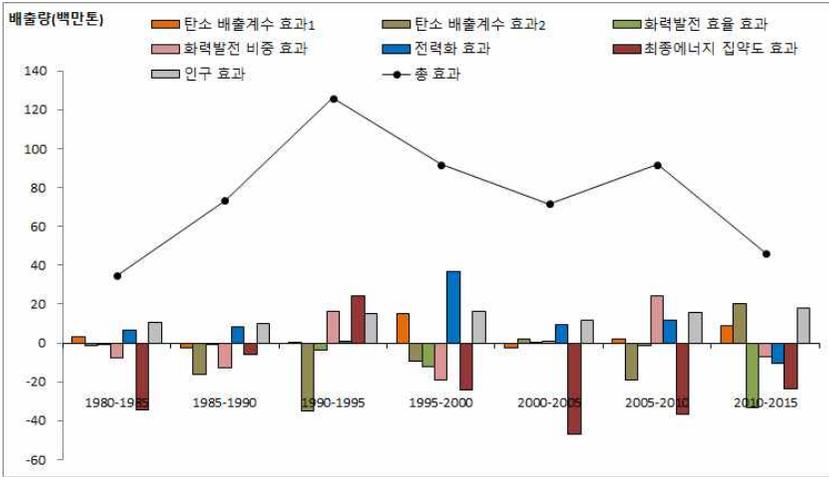
<표 4> 우리나라 CO₂ 배출량 분해분석 결과

(단위: 백만톤)

	탄소 배출 계수 효과1	탄소 배출 계수 효과2	화력 발전 효율 효과	화력 발전 비중 효과	전력화 효과			최종 에너지 집약도 효과	일인당 GDP 효과	인구 효과	총 효과
					전력 화율 효과	화석 연료 비중 효과	소계				
1980-2015	12.0	-72.1	-27.6	-28.6	83.0	-30.6	52.5	-141.9	618.1	94.5	506.8
1980-1985	3.0	-1.5	-0.7	-7.5	6.0	0.8	6.8	-34.5	58.4	10.5	34.5
1985-1990	-2.5	-16.4	-0.4	-12.6	5.2	3.2	8.4	-6.0	92.6	10.2	73.3
1990-1995	0.3	-35.0	-3.7	16.4	3.6	-2.6	0.9	24.5	107.2	15.3	126.0
1995-2000	15.1	-9.5	-12.2	-19.1	42.1	-5.5	36.6	-24.0	88.5	16.3	91.7
2000-2005	-2.3	2.0	0.1	1.0	25.7	-16.5	9.2	-46.9	96.9	11.6	71.5
2005-2010	1.9	-19.1	-1.2	24.0	24.7	-12.9	11.8	-36.5	95.4	15.4	91.7
2010-2015	8.7	20.1	-33.3	-7.0	-0.5	-10.0	-10.5	-23.3	73.7	18.0	46.3

주. 여기서 탄소배출계수효과1은 발전부문, 탄소배출계수효과2는 소비부문으로서 최종에너지로서 화석 연료 연소에 의한 탄소배출계수 효과를 의미함

〈그림 4〉 우리나라 CO₂ 배출량 분해분석 결과 추이



한편, 1980-2015년 동안 탄소 배출계수 효과1은 12.0 백만 톤이고, 탄소 배출계수 효과2는 -72.1 백만 톤이었다. 이는 수요 부문에서는 화석연료의 구성 변화 등으로 인해 CO₂ 배출량이 72.1 백만 톤 감소했지만, 반대로 발전부문에서는 화석연료 구성 변화 등으로 인해 CO₂ 배출이 12.0 백만톤 증가했다는 것을 보여준다. 수요부문에서는 평균 탄소 배출계수는 개선되었지만, 발전부문에서의 평균 탄소 배출 계수는 악화된 것이다. 화력발전 효율 효과와 화력발전 비중 효과의 경우 각각 -27.6 백만 톤, -28.6 백만 톤이었는데, 이는 화력발전에 필요한 화석연료 소비량이 줄어들음으로 인해 CO₂ 27.6 백만 톤 배출이 줄었고, 발전에서 화석발전이 차지하는 비중 감소로 인해 CO₂ 28.6 백만 톤 배출이 줄었음을 의미한다.

이 연구에서 전력화 효과에 포함된 전력화율 효과와 화석연료 비중 효과는 1980-2015년 기간 동안 각각 83.0 백만 톤과 -30.6 백만 톤이었다. 이는 이 기간 동안 최종에너지로서 화석연료 비중 감소에 의해 CO₂ 배출량이 30.6 백만 톤 감소한 반면, 전기 비중 증가에 의해 CO₂ 배출량이 83.0 백만 톤 증가했다는 것을 말하는 것이다.⁹⁾ 결과적으로 화석연료 비

9) 실제로 최종에너지에서 전기가 차지하는 비중은 1980년 7.5%에서 2015년 19.0%로

중 감소에도 불구하고 전력화율 증가에 힘입어 52.5 백만 톤의 CO₂ 배출이 증가한 것이다. 그동안 CO₂ 배출에 대한 전력화 영향에 대해 논쟁이 많았던 가운데 이 결과는 국내 전력화가 CO₂ 배출을 증가시키는 방향으로 영향을 주었음을 확인한 것이다. 아울러 전력화 효과에 있어 전력화율 효과가 화석연료 비중 효과보다 영향력이 더 크다는 것도 확인할 수 있다.

기간별로 보면 1995-2000년 기간에 전력화 효과가 36.6 백만 톤으로 가장 크게 나타났는데, 이는 전력화율 효과의 영향이 컸기 때문이다. 이 기간 최종에너지에 비해 전력소비 증가폭이 더 컸다. 반면, 2010-2015년 기간에는 전력화 효과가 -10.5 백만 톤으로 가장 낮게 나타났는데, 이는 화석연료비중 효과도 상당히 낮았지만 전력화율 효과가 예전에 비해 대폭 감소한 것에 기인한다. 2010년 이후 전력 소비량 증가폭이 대폭 줄어들었는데, 대중국 수출 감소, 서비스업 및 전력저소비 업종 성장, 전기요금 인상, 주5일제 근무 확대, 백열등 퇴출 등의 복합적인 원인을 추정해 볼 수 있다(김철현·박광수, 2016).

V. 결론

이 연구는 LMDI 방법론을 활용하여 그동안 심화된 우리나라 전력화 현상이 CO₂ 배출에 미친 영향을 분석한 연구이다. 이를 위해 우리나라의 수요 부문과 발전 부문의 여러 효과를 요인으로 고려하였다. 이는 전력화가 수요 부문에서 화력연료 대체를 통해 CO₂ 배출을 저감시키는 것과 동시에 전기 사용 증가로 인해 발전 부문에서 CO₂ 배출을 증가시키는 복합적인 영향을 미치기 때문이다.

이 연구에서는 전기 사용에 의한 발전 부문 CO₂ 배출은 탄소 배출계수 효과, 화력발전 효율 효과, 화력발전 비중 효과, 전력화율 효과, 최종에너지 집약도 효과, 1인당 GDP 효과, 인구 효과로 분해하였고, 최종에너지로

대폭 증가했다.

서 화석연료 소비에 의한 CO₂ 배출은 탄소 배출계수 효과, 화석연료 비중 효과, 최종에너지 집약도 효과, 1인당 GDP 효과, 인구 효과로 분해하였다. 그리고 이 중에서 전력화율 효과와 화석연료 비중 효과의 합을 전력화 효과로 정의하였다. 이 연구를 통해 제시하는 결과 및 정책적 시사점은 다음과 같다.

첫째, 전력화가 CO₂ 배출에 미치는 영향은 발전원 구성에 따라 좌우되기 때문에 전력화 영향에 대한 논의에서는 반드시 전제로 하고 있는 발전원 구성도 수반되어야 한다. 국내외 주요 문헌에서 CO₂ 배출에 대한 전력화의 영향을 각기 다르게 제시하는 것도 전제로 하고 있는 발전원 구성이 다르기 때문이다. 아울러 발전원 연료 구성 변화에 따라 CO₂ 배출에 미치는 영향도 달라지므로 발전원 연료 구성에 대한 부분도 전력화 영향 논의에 같이 포함되어야 한다.

둘째, 1980-2015년 기간 동안 우리나라 CO₂ 배출량을 요인분해한 결과, 전력화는 CO₂ 배출량을 증가시키는 쪽으로 영향을 준 것으로 나타났다. 구체적으로는 소비 부문에서의 화석연료 비중 감소가 CO₂ 배출량 저감에 일부 기여를 하였으나, 그보다는 전기 비중 증가를 통해 발전부문에서의 CO₂ 배출을 증가시키는데 더 많은 영향을 줌으로써 결과적으로는 CO₂ 배출량 증가를 유발하였다. 이는 그동안 전력화가 CO₂ 배출에 미치는 영향에 대한 여러 논쟁 가운데 주목할 만한 결과라 할 수 있다. 이를 통해 우리나라 발전 구조의 변화 없이 기존 형태가 유지되는 상황에서는 전력화 심화가 CO₂ 배출 저감에 긍정적이지 않다는 것을 알 수 있다. 앞으로 전력화가 우리나라 CO₂ 배출을 감소시키는 방향으로 기여할 수 있기 위해서는 발전 방식에서의 탈탄소화 노력이 보다 더 필요하다. 화력발전 비중 감소를 비롯해 화력발전 배출계수 개선 등 다각적 노력이 병행되어야 한다.

셋째, 이 연구에서는 전력화 효과로 보수적인 차원에서 전력화율 효과와 화석연료비중 효과만을 고려하였는데, 발전부문 탄소 배출계수 효과, 화력발전 효율 효과, 화력발전 비중 효과처럼 추가적으로 전력화 효과에

포함시킬 수 있는 변수들을 검토해 볼 수 있다. 향후 전력화 효과를 어디까지 포함할 것인가에 대해 추가적인 논의가 더 필요하며, 그에 따라 CO₂ 배출에 대한 전력화 영향도 달라질 것이다.

■ 참고문헌 ■

- 구자열·주희천·정은호, 2016, “전력소비 변화 요인분석을 통한 국내 제조업의 전력효율성 평가,” 『에너지경제연구』, 15(2), pp.23-54.
- 김수이, 2018, “국내 발전부문의 온실가스 배출 요인 분해 분석,” 『에너지경제연구』, 17(1), pp.241-264.
- 김진수·허은녕, 2005, “구조분해분석을 통한 국내 산업별 에너지 소비 변화요인 연구,” 『자원환경경제연구』, 14(20), pp.257-290.
- 김창섭, 2013, “새로운 에너지세계 시스템의 필요성 및 방향,” 『새 정부의 바람직한 에너지정책 - 에너지 세계를 중심으로 정책토론회 자료집』, 프란치스코 교육회관.
- 김철현·박광수, 2016, “국내 전력소비 패턴의 구조적 변화 및 변화요인 분석,” 『기초 이슈 페이지 16-14』, 울산: 에너지경제연구원.
- 산업통상자원부, 2014, 『제2차 에너지기본계획』, 세종: 산업통상자원부.
- 석광훈, 2012, 전력 수요관리 및 요금체제의 현황과 개선방안, 『이명박정부 기후변화정책 평가 및 차기 정부 정책과제』, (정책보고서 2012-02), (pp.179-197), 서울: 국회기후변화포럼 부설 기후변화정책연구소.
- 에너지경제연구원, 2007, 『산업부문 에너지이용효율화 추이 분석기법 및 Tool 개발』, 과천: 산업자원부.
- 온실가스종합정보센터, 2017, 『2017 국가 온실가스 인벤토리 보고서』, 서울: 온실가스 종합정보센터.
- 조영탁, 2012, “기획특집 1: 차기 에너지정책 개선방안 - 에너지의 전력화, 어떻게 대응할 것인가,” 『석유와 에너지』, 286, pp.19-22.
- _____, 2013, “에너지 가격체계 개선과 에너지 세계개편방안 - 재정수단과 에너지정책 수단의 연계 및 조화,” 『합리적인 에너지세계 개편방안 토론회』, 국회 의원회관 제1소회의실, 서울: 조정식 의원실.
- 지식경제부, 2013, 『제6차 전력수급기본계획(2013~2027)』, 세종: 지식경제부.
- 진상현·정경화, 2013, “지역별 온실가스 배출특성에 관한 연구: 지수분해분석을 중심으로,” 『한국정책과학학회보』, 17(2), pp.1-26.
- 현대경제연구원, 2013, “에너지 수급 불균형 해소를 위한 생산 효율성 제고 방안 - 에너지 전환손실 1% 감축으로 원자력발전소 1기를 대체할 수 있다,” 『새로운 경제

시스템 창출을 위한 경제주평』, 566, pp.1-16.

- AEBIOM (European Biomass Association)·EGEC (European Geothermal Energy Council)·ESTIF (European Solar Thermal Industry Federation), 2017, *Renewable heat sources – The best available solution to decarbonise the heating sector*, Joint Position Paper.
- Ang, B. W., F. L. Zhang, and K. Choi, 1998, “Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition,” *Energy Policy*, 23, pp.489-495.
- Ang, B. W., F. L. Liu, and E. Chew, 2003, “Perfect decomposition techniques in energy and environmental analysis,” *Energy Policy*, 31, pp.1561-1566.
- Ang, B. W., 2004, “Decomposition analysis for policy-making in energy: Which is the preferred method?,” *Energy Policy*, 32, pp.1131-1139.
- _____, 2005, “The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide,” *Energy Policy*, 33, pp.867-871.
- Banal-Estañol, A., J. Calzada, and J. Jordana, 2017, “How to achieve full electrification: Lessons from Latin America,” *Energy Policy*, 108, pp.55-69.
- de Freitas, L. C. and S. Kaneko, 2011, “Decomposition of CO₂ emissions change from energy consumption in Brazil: Challenges and policy implications,” *Energy Policy*, 39, pp.1495-1504.
- de la Chesnaye, F. and J. Bistline, 2015, Carbon emission reduction strategy & electrification: EPRI’s role, *IEA workshop “Integrating New Technologies While Maintaining Resource Adequacy”* Session 4.
- Desbrosses, N., 2006, “Understanding the electrification of industrial energy consumption in Europe,” *Leonardo Energy*, <http://www.leonardo-energy.org/blog/understanding>.
- EURELECTRIC, 2011, *Electrification of heating and cooling*, A EURELECTRIC Policy Paper.
- _____, 2015, *The benefits of electrification - Electricity’s contribution to sustainable energy use*, A EURELECTRIC Paper.
- European Commission, 2011, *Energy roadmap 2050*, Luxembourg: Publication Office of European Union, DOI: 10.2833/10759.
- Greenpeace and EREC(European Renewable Energy Council), 2012, *Energy Ir|volution – A Sustainable EU 27 Energy Outlook*, Brussels: Greenpeace and EREC.
- Jung, Y. H. and S. H. Lee, 2014, “Electrification and productivity growth in Korean manufacturing plants,” *Energy Economics* 45, pp.333-339.

- Kim, C. S. and J. W. Shin, 2016, "Electricity pricing policy alternatives to control rapid electrification in Korea," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 11(2), pp.285-299.
- Kiviluoma, J. and G. Collantes, 2008, *Electrification of energy*, The Harvard Kennedy School Workshop report, Cambridge: The Harvard Kennedy School.
- Muller, A., 2006, "Putting decomposition of energy use and pollution on a firm footing - Clarifications on the residual, zero and negative values and strategies to assess the performance of decomposition methods," *Working Papers in Economics 215*, Goteborg University, Department of Economics. Revised 10 Aug 2007.
- Nishio, K. and Y. Hoshino, 2010, Impacts of electrification on CO₂ emission reduction potentials in the G7 countries, *SERC discussion Paper 10004*, Central research institute of electric power industry, Japan.
- Philibert, C., 2015, *Electrification, vector for further renewables deployment*, EPRI-IEA Electricity Decarbonisation Workshop paper, Paris: IEA.
- Schurr, S. H., C. Burwell, W. D. Devine, and S. Sonenblum, 1990, *Electricity in the American economy: Agent of technical progress*, New York: Greenwood Press.
- Sugiyama, M., 2012, "Climate change mitigation and electrification," *Energy Policy, Communication*, 44, pp.464-468.
- Wolfram, C., O. Shelef, and P. Gertler, 2012, "How will energy demand develop in the developing world?," *Journal of Economic Perspectives*, 26(1), pp.119-138.
- World Bank IEG (Independent Evaluation Group), 2008, *The welfare impact of rural electrification: A reassessment of the costs and benefits*, Washington DC: The World Bank, DOI:10.1596/978-0-8213-7367-5.

한 준: 서울대학교에서 도시계획학 박사학위를 취득하였으며, 현재 녹색기술센터 선임연구원으로 재직 중이다. 주요 연구 실적으로는 "An analysis of the electricity consumption reduction potential of electric motors in the South Korean manufacturing sector", "지속가능발전을 위한 에너지 지표에 관한 연구", "LMDI 요인 분해분석을 이용한 우리나라 제조업 전력화 현상에 관한 연구" 등이 있다(joonie@gtkc.re.kr).

투 고 일: 2019년 03월 14일
 심 사 일: 2019년 03월 19일
 게재확정일: 2019년 03월 26일