

국내 제조업부문에 대한 에너지소비 요인 분해 분석[†]

김수이*

요약 : 이 논문은 국내 제조업부문의 에너지소비 증가 요인을 LMDI(Log mean divisia index) 분해 분석방법을 이용하여 분석하였다. 1999년부터 2019년까지 20년간의 에너지소비 변화를 분석하였다. LMDI 분해 분석방법 중 에너지소비 증가량을 분석한 가법적 요인분해 분석과 에너지소비 증가율을 분석한 승법적 요인분해 분석 모두를 사용하였다. 분석결과, 국내 제조업의 에너지소비를 증가시킨 요인은 생산효과이며, 구조효과와 집약도 효과는 에너지소비를 감소시키는 요인으로 나타났다. 특히 구조효과에 의한 에너지소비 감소가 집약도 효과에 의한 에너지 소비 효과보다 더 크게 나타났다. 시기별로 보면, 2011년까지는 에너지소비가 생산효과에 의해 급속히 증가한 반면 그 이후에는 생산효과에 의한 에너지소비 증가가 둔화된 것을 알 수 있다. 이에 반해 그 이후에는 구조효과와 집약도효과에 의한 에너지 감소효과가 두드러지고 있는데 이는 2011년부터 실시된 온실가스에너지목표관리제와 2015년 이후 실시된 배출권거래제의 효과가 나타난 결과로 보인다. 향후 제조업부문의 에너지절약을 위해서는 EMS(Energy management system), FEMS(Factory energy management system) 등을 통한 에너지진단과 관리가 더욱 필요해 보인다. 아울러 에너지저소비형 산업으로의 구조조정도 더 필요해 보인다.

주제어 : LMDI, 요인분해분석, 에너지 집약도, 생산효과, 구조효과, 집약도효과

JEL 분류 : Q40

접수일(2022년 11월 21일), 수정일(2022년 12월 14일), 게재확정일(2022년 12월 15일)

[†] 이 논문은 2022학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었습니다.

* 홍익대학교 상경대학 상경학부 교수, 교신저자(e-mail: suyikim@hongik.ac.kr)

Decomposition Analysis on Energy Consumption of Manufacturing Industry[†]

Suyi Kim*

ABSTRACT : This paper analyzed the factors for increasing energy consumption in the domestic manufacturing sector using the LMDI (Log mean division index) decomposition method for the period from 1999 to 2019. Among the LMDI decomposition analysis methods, both additive and multiplicative factor decomposition methods were used. in this analysis. According to the result of the analysis, the factor that increased energy consumption in the domestic manufacturing industry was the production effect, and the structure effect and intensity effect were found to be the factors that decreased energy consumption. In particular, the reduction of energy consumption due to the structure effect was greater than that of energy consumption effect due to the intensity effect. By period, it can be seen that energy consumption increased rapidly due to the production effect until 2011, but after that, the increase in energy consumption due to the production effect slowed down. On the other hand, after that, the energy reduction effect due to the structure effect and the intensity effect became prominent. In order to save energy in the manufacturing sector in the future, energy diagnosis and management through EMS (Energy management system) and FEMS (Factory energy management system) are more necessary. In addition, restructuring into a low-energy consumption industry seems more necessary.

Keywords : LMDI, Factor decomposition analysis, Energy intensity, Production effect, Structure effect, Intensity effect

Received: November 21, 2022, Revised: December 14, 2022, Accepted: December 15, 2022.

[†]This work was supported by 2022 Hongik University Research Fund.

* Professor, College of Business Management, Hongik University, Corresponding author (e-mail: suyikim@hongik.ac.kr)

I. 서론

2015년 파리협정을 통해 국제사회는 2100년까지 지표면 온도 상승을 2°C 이내로 제한하기로 합의하였으며, 2018년에 발간된 IPCC의 「지구온난화 1.5°C 특별보고서」를 계기로 국제사회는 2050 탄소중립에 대한 필요성이 고조되었다. 이에 따라 선진국은 「장기 저탄소 발전 전략(Long-term greenhouse gas Emission Development Strategies, LEADS)」을 ‘탄소중립(Net-zero)’으로 설정하고, 그 중간 단계로서 「2030년 국가 온실가스 감축목표(Nationally Determined Contribution, NDC)」를 상향 조정하기 위해 노력해왔다.¹⁾ 우리나라도 2020년 10월 ‘2050 탄소중립’을 선언하고 2021년 10월에는 두 개의 복수안으로 구성된 ‘2050 탄소중립 시나리오’를 발표하였다. 그 후속조치로서 우리나라는 2030 NDC 부문별 감축목표를 발표하였다. 최종적으로 발표된 NDC상향안에는 2030년 국내 배출량을 2018년 대비 40% 감축하기로 하였다. 이러한 국가 온실가스 감축 목표는 후속 이행방안이 구체적으로 설정되어야 한다. 하지만 구체적인 감축 경로에 대해서는 2022년 정부가 바뀌면서 수정될 가능성이 크다. 특히 온실가스 배출의 80%를 차지하고 있는 에너지부문의 온실가스 감축은 향후 우리나라의 2030감축 목표, 2050 탄소중립을 위해 반드시 필요한 조치이다. 하지만 우리나라는 이러한 온실가스 감축목표를 위한 에너지효율 목표는 2030 혹은 2050 감축목표에 대응하여 구체적으로 수립되지 않았다. EU에서는 2030온실가스 감축목표와 더불어 2030 에너지효율 목표를 구체적으로 제시하고 있다. 따라서 이러한 에너지효율 목표 제시를 위해서는 국내 에너지소비 증감 요인에 대한 구체적인 파악이 필요하다.

에너지경제연구원 에너지밸런스의 최종에너지 부문별 소비를 보면 산업부문의 에너지사용이 다른 부문에 비해 압도적으로 높은 실정이다. 산업부문이 전체 에너지소비의 60% 이상을 차지하고 있으며 그 비중 또한 꾸준히 증가해 왔다. 2000년에는 산업부문의 에너지소비가 전체 에너지소비의 56%를 차지하였지만 2019년에는 62%로 증가하였다. 또한 제조업 내에서도 대표적인 에너지다소비업종인 화학 및 석유화학의 에너지소비 비중이 지난 20년 동안 급속히 증가하였다. 그리고 철강 및 비철금속의 에너지소비

1) 2019년 유엔 기후행동 정상회의에서 ‘2050년 탄소중립을 위한 LEADS’ 수립을 촉구했으며 2021년 4월에는 미국 주도로 열린 ‘기후정상회의’에서는 선진국 위주로 ‘2030년 감축목표(NDC)’를 상향 조정했다.

비중도 그대로 유지한 채 그 비중이 줄어들고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 지난 20년 동안 우리나라 제조업 에너지소비에 대하여 그 증가요인이 무엇인지를 살펴보고 향후 에너지 정책에 대한 시사점을 고찰해 보고자 한다. 에너지소비 증가요인에 대한 요인분해 방법은 라스파이레스 인덱스(Laspeyres Index)와 디비지아 인덱스(Divisia Index) 등 두 그룹으로 나눌수 있는데 라스파이레스 인덱스에 속하는 방법론으로는 Modified Fisher ideal index method(Ang et al., 2002), Sharply 요인분해 방법론(Albrecht et al., 2002; Sun, 1998), Adaptative Weighting Parametric Divisia Index 방법론(Liu et al., 1992; Ang, 1994), Additive Perfect Decomposition Method(Chung and Rhee, 2001) 등이 있으며 디비지아 인덱스(Divisia Index) 방법론으로는 Ang and Liu(2001)에서 제시된 승법적 LMDI(Log Mean Divisia Index) 방법과, Ang et al.(1998)에서 제시된 가법적 LMDI 방법이 있다. 그 외에서 Boyd et al.(1987)가 제시한 승법적 AMDI(Arithmetic Mean Divisia Index) 방법과 Boyd et al.(1988)이 제시한 가법적 AMDI 방법이 있다. 이 중에서 LMDI 방법은 factor-reversal test를 만족함으로써 설명되지 않는 잔차가 결과에 남지 않는다는 장점이 있으며, Aggregation할 때 일관성을 유지할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 여러 가지 장점을 가지고 있는 LMDI 방법을 사용하여 에너지소비를 분석하고자 한다.

이상에서와 같이 LMDI 분석방법론을 이용하여 에너지소비량, 온실가스 배출량을 분석한 연구로는 Kaivo-oja and Luukkanen(2004), Ang(2005), Kwon(2005), Lee and Oh(2006), Han and Shin(2007), Liu et al.(2007), Bacon and Bhattacharya(2007), 황인창(2008), 나인강·이성근(2008), 이유아·허은영(2009), 진상현·황인창(2009a), 진상현·황인창(2009b), Oh et al.(2010), 김수이·김현석(2011), 김수이·정경화(2011), 김수이·박정욱(2013), 박성준·김진수(2014), 박년배·심성희(2015) 등이 있다. 이 중에서 국내 산업 부문에 대한 에너지소비 및 온실가스 배출량에 대한 요인분해 분석을 살펴보면 다음과 같다. 나인강·이성근(2008)의 연구는 산업 부문에 대한 LMDI 요인분해 분석을 시도하였다. 하지만 기준연도에 대비하여 시계열적으로 분석하지 않아 지속적인 경제성장에 따른 구조적인 변화를 파악하기가 어려운 측면이 있다.²⁾ 김수이·김현석(2011)에서는

2) 나인강·이성근(2008)의 연구에서는 시계열적으로 분석은 하였으나 전년대비 에너지소비량 변화에 대해서 분석하였다. 즉 기준연도가 1991년이라면 최종연도는 1992년이 되며, 기준연도가 1992년이라면 최종연도가

1991년부터 2007년 기간동안 생산, 구조, 집약도 등 3가지 요인으로 국내 제조업 에너지 소비를 분석하였다. 주요 분석결과에 의하면 제조업 부문의 에너지소비 증가는 주로 생산효과에 기인하였으며, 구조효과와 집약도 효과는 에너지소비를 감소시키는 요인으로 작용하였다. 구조효과는 2000년 이후, 집약도 효과는 2005년 이후 에너지소비 감소요인으로 작용하였다. 이 연구에서는 방법론적으로 시계열적으로 가법적 분석방법과 승법적 분석방법 모두를 적용하였다. 따라서 분석방법을 좀 더 다각적인 면에서 분석하였다는 점에서 의의가 있다.

박성준·김진수(2014)의 연구에서는 1981년부터 2011년 기간동안 국내 산업부문의 1차에너지와 최종에너지소비에 대하여 생산효과, 구조효과, 집약도효과로 요인분해 분석을 하였다. 본 연구결과에 의하면 구조효과는 에너지소비를 증가시키는 요인으로 작용하였으며, 집약도 효과는 에너지소비를 감소시키는 요인으로 작용하였다. 방법론적으로는 Refined Laspeyres 모형과 LMDI 모형을 사용하였으며 누적 에너지소비 변화량에 대해서 요인분해분석을 하였으며, 1차 에너지소비량을 기준으로 분해 분석한 결과와 최종에너지를 기준으로 분해 분석한 결과를 상호 비교하면서 1차 에너지 기준의 중요성을 역설하였다. 분석기간은 1981년부터 2011년까지로 최근 10년간의 에너지소비 변화는 반영되어 있지 않다.

박년배·심성희(2015)의 연구에서는 2004년부터 2011년 기간 동안 온실가스 감축 목표 업종체계에 따라 산업부문을 18개 세부업종으로 구분하여 에너지소비량과 온실가스 배출량 변화에 대해 LMDI 분해 분석을 하였다. 이 기간 동안 생산효과와 집약도 효과에 의하여 에너지소비가 증가하였으나 구조효과에 의해서 에너지소비는 감소하였다. 즉 산업구조의 변화가 저탄소산업으로 재편되면서 에너지소비 감소에 기여하였다는 것을 알 수 있다. 하지만 산업별 에너지소비량과 온실가스 배출량에 대해서 일부는 실측자료는 일부는 추정자료를 사용하였으며, 분석기간도 2004년부터 2011년까지에 한정되어 있어, 최근의 에너지소비에 대한 분석은 이루어지지 않았다. 특히 2015년 이후 배출권거래제가 본격적으로 시작된 이후 에너지소비에 대한 분석이 없어 정책적인 효과를 파악할 수 없었다.

1993년으로 항상 전년대비 에너지소비량 증가분에 대한 요인분해 분석인 반면 본 연구에서는 기준연도가 1991년으로 고정되어 있고 최종연도가 해마다 1년씩 증가하는 방식이다.

김수이·김현석(2011) 이래로 에너지 및 온실가스 배출에 대한 요인분해분석은 가법적·승법적 요인분해 방법을 모두 적용한 연구는 박년배·심성희(2015)의 연구가 있다. 또한 일부 연구에서 시계열로 분석하였지만 아직도 대다수의 연구는 시계열로 분석되지 않아 요인별로 그 흐름을 파악하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 가법적 요인분해 분석과 승법적 요인분해 분석을 모두 시도하였으며, 그리고 누적시계열과 전년대비 시계열을 함께 파악함으로써 기준연도 대비 전체적인 에너지소비 요인 변화뿐만 아니라 전년 대비 에너지소비 요인 변화를 살펴봄으로써 해마다 에너지소비 요인 변화도 아울러 파악하였다.

본 연구에서는 1999년부터 2019년까지 약 20년의 국내 제조업의 산업별 에너지소비를 분석하였다. 제조업의 산업별 에너지소비량 데이터를 기반으로 생산 효과, 집약도 효과, 산업구조 효과 등 3가지 요인으로 분석하였다. 특히 본 연구에서는 에너지경제연구원의 개정된 에너지밸런스를 이용하였다.³⁾

본 연구의 구성은 다음과 같다. 제Ⅱ 장에서는 본 연구에서 적용한 방법론과 자료, 그리고 산업별 에너지소비 및 생산현황에 대해서 살펴본다. 제Ⅲ 장에서는 LMDI 요인분해 분석결과를 가법적 요인분해 분석결과와 승법적 요인분해 분석결과로 나누어 살펴본다. 제Ⅳ 장에서는 본 연구결과와 함께 정책적 시사점을 제시한다.

II. 연구방법 및 자료

1. 연구방법론

본 연구에서는 LMDI(Log mean divisia index) 방법론을 사용하고 있다. 이 방법론은 크게 가법적 요인분해 방법과 승법적 요인분해 방법으로 나뉘는데 가법적 요인분해는 변화량을 요인분해한 것이며, 승법적 요인분해는 총변화에 대한 변화율을 요인분해한 것이다. LMDI 요인분해 방법론은 설명되지 않는 잔차가 결과에 남지 않는 factor-reversal test를 만족하고 있다. 또한 산업을 여러 부문으로 나누어 그룹별로 다시 재구분하여 분석할 시 그룹별 결과를 이용하여 전체 결과를 도출할 수 있다(Ang and Liu, 2001).

3) 개정에너지밸런스에서는 제조업 총에너지소비(자가전환 포함)는 환류납사를 제거하면서 기존 에너지밸런스의 제조업 에너지소비보다 감소하였다.

제조업의 총에너지는 식 (1)에서의 카야 항등식(Kaya equation)을 따른다. 첫 번째, 생산효과는 생산액(Q)의 증가로 에너지소비가 증가하는 것을 의미한다. 두 번째, 산업구조효과는 각 산업의 생산액이 총생산액에서 차지하는 비중(Q_i/Q)의 증감 여부에 따라서 총 에너지소비량에 미치는 변화를 의미한다. 즉 산업구조의 변화에 따라서 총 에너지소비량 변화를 가능한다. 세 번째, 집약도 효과는 i 산업의 생산액에서 차지하는 에너지소비량 비중(E_i/Q_i)의 증감여부에 따른 효과를 의미한다. 즉 산업별 에너지 집약도의 변화에 따른 총에너지소비 변화를 가능한다.

$$E = \sum_i E_i = \sum_i Q \frac{Q_i}{Q} \frac{E_i}{Q_i} = \sum_i QS_iI_i, \quad (1)$$

E : 제조업의 총 에너지소비량

E_i : i 산업의 에너지소비량

Q : 제조업 생산액

Q_i : i 산업의 생산액

S_i : i 산업이 제조업 총생산에서 차지하는 비중

I_i : i 산업의 에너지 집약도

본 연구에서 사용한 LMDI 요인분해 분석 구조식은 Ang(2005)에서 제시한 방법이다. 식 (2)에서 보는 바와 같이 승법적 요인분해는 기준연도(0기)에서 목표연도(T 기)까지의 제조업부문의 총 에너지소비량 변화율을 활동효과(D_{act}), 구조효과(D_{str}), 집약도효과(D_{int}) 등 세 가지 요인으로 분해하였다. D_{act} , D_{str} 그리고 D_{int} 는 각각 생산효과, 구조효과, 그리고 집약도 효과에 의한 에너지소비 변화율이다. 각 효과에 의한 에너지소비 변화율을 모두 곱하면 전체 제조업부문 에너지소비변화율이 된다.⁴⁾ 따라서 승법적 요인분해는 각각의 요인별로 상대적인 기여도를 계산할 수 있다.

4) $D_t = E^T/E^0 = D_{act}D_{str}D_{int}$

$$\begin{aligned}
 D_{act} &= \exp \left(\sum_i \frac{(E_i^T - E_i^O) / (\ln E_i^T - \ln E_i^O)}{(E^T - E^O) / (\ln E^T - \ln E^O)} \ln \left(\frac{Q^T}{Q^O} \right) \right) \\
 D_{str} &= \exp \left(\sum_i \frac{(E_i^T - E_i^O) / (\ln E_i^T - \ln E_i^O)}{(E^T - E^O) / (\ln E^T - \ln E^O)} \ln \left(\frac{S_i^T}{S_i^O} \right) \right) \\
 D_{int} &= \exp \left(\sum_i \frac{(E_i^T - E_i^O) / (\ln E_i^T - \ln E_i^O)}{(E^T - E^O) / (\ln E^T - \ln E^O)} \ln \left(\frac{I_i^T}{I_i^O} \right) \right)
 \end{aligned} \tag{2}$$

LMDI 가법적 요인분해 분석 구조식은 식 (3)에서 보는 바와 같이 기준연도(0기)에서 목표연도(T기)까지의 에너지소비량 증가량을 생산(ΔE_{act}), 구조(ΔE_{str}), 집약도(ΔE_{int}) 효과 등 세 가지 요인으로 분해하였다. ΔE_{act} , ΔE_{str} 그리고 ΔE_{int} 는 각각 생산효과, 구조효과, 집약도효과에 의한 에너지소비량 변화이다. 각 효과에 의한 에너지소비량을 모두 더하면 전체 제조업부문 에너지소비량 변화량이 된다.⁵⁾ 따라서 가법적 요인분해는 각각의 요인별 에너지소비량 변화를 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \Delta E_{act} &= \sum_i \frac{E_i^T - E_i^O}{\ln E_i^T - \ln E_i^O} \ln \left(\frac{Q^T}{Q^O} \right) \\
 \Delta E_{str} &= \sum_i \frac{E_i^T - E_i^O}{\ln E_i^T - \ln E_i^O} \ln \left(\frac{S_i^T}{S_i^O} \right) \\
 \Delta E_{int} &= \sum_i \frac{E_i^T - E_i^O}{\ln E_i^T - \ln E_i^O} \ln \left(\frac{I_i^T}{I_i^O} \right)
 \end{aligned} \tag{3}$$

2. 분석자료

본 연구에서는 사용한 제조업부문의 에너지소비량은 2021년 7월부터 KESIS를 통해 공개되고 있는 개정에너지밸런스를 기준으로 하고 있다. 이 개정에너지밸런스에 의하면 기존의 산업분류가 더 세분화되어 있다. 본 연구에서는 산업을 식품 및 담배, 섬유 및 가죽, 목재 및 나무제품, 제지 및 인쇄, 화학 및 석유화학, 비금속광물, 철강 및 비철금속, 기계류, 수송장비, 기타제조 등 10개 산업으로 분류하였다. 산업별 생산액은 통계청의

5) $\Delta E_i = E^T - E^O = \Delta E_{act} + \Delta E_{str} + \Delta E_{int}$

「광업제조업조사」 ‘시도/산업분류별 출하액, 생산액, 부가가치 및 주요생산비(10인 이상)’ 데이터를 사용하였다. 산업별 생산액 데이터를 산업별 생산자 물가지수로 나누어서 산업별 실질 생산액 데이터를 구하였는데 이 산업별 실질 생산액 데이터가 최종적으로 사용되었다. 산업별 생산자 물가지수는 한국은행의 ‘생산자물가지조사’의 데이터를 사용하였는데 2015년 물가지수 100을 기준으로 하였다.

3. 산업별 에너지소비 및 생산현황

국내 제조업의 에너지소비 변화는 크게 생산효과, 구조효과, 집약도 효과로 분해가 가능하다. 따라서 본격적인 요인분해 이전에 국내 제조업의 산업별 생산현황, 산업별 에너지 집약도, 산업구조의 변화에 대해서 먼저 살펴보자.

〈표 1〉 국내 제조업의 산업별 생산액 변화(1999년-2019년)

	1999		2009		2019		연평균 증가율 (%)	총증가율 (%)
	금액 (10억 원)	비중 (%)	금액 (10억 원)	비중 (%)	금액 (10억 원)	비중 (%)		
식품 및 담배	645,196	10.03	750,153	6.36	977,791	6.49	2.10	51.55
섬유 및 가죽	430,629	6.69	443,811	3.76	380,634	2.53	-0.62	-11.61
목재 및 나무제품	36,925	0.57	47,807	0.41	53,427	0.35	1.86	44.69
제지 및 인쇄	189,068	2.94	234,841	1.99	266,294	1.77	1.73	40.85
화학 및 석유화학	1,423,259	22.12	2,516,609	21.33	3,658,592	24.28	4.83	157.06
비금속광물	176,209	2.74	292,801	2.48	344,481	2.29	3.41	95.50
철강 및 비철금속	1,049,634	16.31	1,479,749	12.54	1,942,479	12.89	3.13	85.06
기계류	1,640,308	25.49	3,728,898	31.61	4,888,323	32.43	5.61	198.01
수송장비	769,414	11.96	2,172,760	18.42	2,406,391	15.97	5.87	212.76
기타제조	73,691	1.15	129,154	1.09	152,748	1.01	3.71	107.28
제조업전체	6,434,332	100.00	11,796,582	100.00	15,071,160	100.00	4.35	134.23

자료: 광업제조업 조사 각 연호.

주: 산업생산은 2015년 기준 불변가격.

<표 1>에서 보는 바와 같이 국내 제조업의 산업별 실질생산액 변화를 살펴보면 몇 가지 특징을 볼 수 있다. 총 증가율이 가장 큰 산업은 수송장비이다. 2019년에 1999년 대비 212.76% 증가하였다. 그 다음으로 기계류, 화학 및 석유화학, 기타제조, 비금속광물, 철강 및 비철금속 등의 순으로 증가하였다. 섬유 및 가죽의 경우에는 오히려 동기간 동안 생산이 감소하였다. 연평균 증가율의 경우에도 수송장비가 가장 큰 증가율을 보이고 있으며 기계류, 화학 및 석유화학, 기타제조, 비금속 광물, 철강 및 비철금속이 그 뒤를 잇고 있다. 1999년에는 기계류의 산업비중이 25.49%로 가장 높는데 2019년에는 그 비중이 32.43%로 더욱 증가하였다. 수송장비의 경우에도 1999년에는 11.96%이던 비중이 15.97%로 대폭 증가하였다. 화학 및 석유화학의 경우에도 그 비중이 1999년에는 22.14%였으나 2019년에는 24.28%로 증가하였다. 비금속광물과 철강 및 비철금속의 경우에는 1999년에 각각 2.74%, 16.31%였던 것이 2019년에는 2.29%, 12.89%로 감소하였다. 그 외 산업의 경우에는 산업별로 차이는 있지만 비중이 감소하였다.

<표 2>에서 보는 바와 같이 국내 제조업의 에너지소비량을 보면, 제조업 전체적으로 2019년에 1991년 대비 47.54% 증가하였다. 제조업 전체 생산량이 동기간 동안 134.23% 증가한 것과 비교하면 에너지 집약도(에너지소비량/생산액)가 많이 개선되었다고 할 수 있다. 2019년 기준으로 에너지소비가 가장 많은 산업은 철강 및 비철금속으로 제조업 전체 에너지소비의 23.19%를 차지하고 있다. 그 다음으로 화학 및 석유화학이 21.65%로 그 뒤를 잇고 있다. 특히 화학 및 석유화학은 1999년 그 비중이 11.73%였지만 2019년에는 21.65%로 그 비중이 두배 증가하였다. 기계류와 수송장비의 에너지소비량도 1999년 각각 10.48%, 3.64%였지만 2019년에는 그 비중이 17.86%, 5.72%로 증가하였다. 이에 반해 섬유 및 가죽, 제지 및 인쇄, 그리고 비금속 광물은 1999년 대비 2019년에 에너지소비가 감소하였으며 그 비중도 동기간 동안 감소하였다.

국내 제조업부문에 대한 에너지소비 요인 분해 분석

〈표 2〉 국내 제조업의 에너지소비량 변화(1999년-2019년)

	1999		2009		2019		연평균 증가율 (%)	총증가율 (%)
	소비량 (1000TOE)	비중 (%)	소비량 (1000TOE)	비중 (%)	소비량 (1000TOE)	비중 (%)		
식품 및 담배	1,566	5.20	1,542	3.65	2,262	4.46	1.86	44.45
섬유 및 가죽	3,970	13.17	2,813	6.67	2,007	3.95	-3.35	-49.46
목재 및 나무제품	227	0.75	297	0.70	255	0.50	0.57	12.14
제지 및 인쇄	2,012	6.68	1,815	4.30	2,027	3.99	0.04	0.72
화학 및 석유화학	3,537	11.73	7,622	18.06	10,989	21.65	5.83	210.71
비금속광물	5,343	17.73	5,514	13.07	5,087	10.02	-0.25	-4.80
철강 및 비철금속	7,214	23.94	10,724	25.41	11,772	23.19	2.48	63.18
기계류	3,159	10.48	5,477	12.98	9,066	17.86	5.41	186.97
수송장비	1,098	3.64	2,295	5.44	2,904	5.72	4.98	164.50
기타제조	2,011	6.67	4,097	9.71	4,394	8.66	3.99	118.49
제조업전체	30,139	100.00	42,195	100.00	50,762	100.00	2.64	68.43

자료: KESIS, 에너지밸런스.

〈표 3〉 국내 제조업의 에너지 집약도(1999년-2019년)

	1999 (천TOE/천억 원)	2009 (천TOE/천억 원)	2019 (천TOE/천억 원)	변화율(%)
식품 및 담배	0.2427	0.2056	0.2313	-4.68
섬유 및 가죽	0.9220	0.6337	0.5272	-42.82
목재 및 나무제품	0.6161	0.6215	0.4775	-22.50
제지 및 인쇄	1.0644	0.7727	0.7611	-28.49
화학 및 석유화학	0.2485	0.3029	0.3004	20.87
비금속광물	3.0324	1.8833	1.4766	-51.31
철강 및 비철금속	0.6873	0.7247	0.6061	-11.83
기계류	0.1926	0.1469	0.1855	-3.71
수송장비	0.1427	0.1056	0.1207	-15.43
기타제조	2.7290	3.1719	2.8765	5.40
제조업전체	0.4684	0.3577	0.3368	-28.09

2019년 기준으로 기타제조를 제외하고 에너지 집약도가 가장 높은 산업은 비금속광물이다. 그 다음으로 에너지 집약도가 높은 산업은 제지 및 인쇄, 철강 및 비철금속이다. 생산액비중이 가장 높은 기계류는 에너지 집약도가 0.1207로 다소 낮게 나타나고 있다. 국내 제조업의 에너지 집약도는 지난 20년 동안 <표 3>에서와 같이 화학 및 석유화학과 기타제조를 제외하고는 대부분의 산업에서 개선되었다. 가장 에너지 집약도가 많이 개선된 산업은 비금속 광물이다. 그 다음으로 섬유 및 가죽이 집약도가 많이 개선되었다. 에너지다소비업종인 철강 및 비철금속은 에너지 집약도가 지난 20년 동안 11.83% 감소되었으며, 화학 및 석유화학은 오히려 20.87% 증가하였다.

III. LMDI 요인분해 분석결과

1. 가법적 요인분해 분석결과

국내 제조업의 에너지소비에 대한 가법적 요인분해는 크게 두가지 방법으로 분석하였다. 첫 번째는 기준연도(1999년) 대비 에너지소비 증가량에 대하여 생산효과, 구조효과, 집약도 효과로 분해하였다. 이 방법은 기준연도 대비 누적 에너지소비 증가량에 대하여 분석함으로써 요인분해 분석이 갖는 시계열의 한계를 극복할 수 있다는 장점이 있다. 두 번째는 전년 대비 에너지소비 증가량에 대하여 역시 생산효과, 구조효과, 집약도 효과로 분해하였다. 이 방법은 전년 대비 에너지소비 증가량에 대하여 분석함으로써 연도별 에너지소비 증가량을 구체적으로 분석할 수 있다는 장점이 있다.

우선 기준연도 대비 에너지소비 증가량에 대한 요인분해 분석은 <표 4>와 <그림 1>에 나타나 있다. <표 4>에서는 각각의 요인별로 구체적인 에너지소비량을 나타내었으며, <그림 1>에서는 전체적인 요인별 흐름을 파악할 수 있다. 제조업의 에너지소비는 각각의 요인별로 다른 흐름을 보이고 있다. 먼저 생산 효과는 2009년 아시아금융위기로 인한 감소를 제외하고는 1999년부터 2011년까지 상승흐름을 보이고 있다. 2011년 이후에는 2018년 소폭 증가하는 것을 제외하고는 생산효과로 인한 에너지소비가 정체되는 흐름을 보이고 있다. 반면 구조효과에 의한 에너지소비는 계속 음(-)의 효과를 보이고 있어 구조효과로 인해 에너지소비가 감소한다는 것을 알 수 있다. 그리고 2011년까지는 구조

효과에 의한 에너지소비 감소가 지속적으로 커졌으며, 그 이후에는 구조 효과의 상대적 크기가 조금 줄어드는 현상을 보이고 있지만 그래도 여전히 산업구조조정이 진행되고 있으며 이는 에너지소비를 감소시키는 요인으로 작용하고 있음을 알 수 있다.

에너지 집약도 효과로 인한 에너지소비는 2014년 이후 에너지소비를 감소시키는 방향으로 작용하고 있다. 이는 에너지 집약도가 꾸준히 개선되고 있는 흐름과 그 궤를 같이 하고 있다. 특히 배출권거래제가 실시된 2015년 이후에는 집약도 효과로 인한 에너지소비가 많이 줄어들고 있는 것을 볼 수 있다. 2016년 이후에는 구조효과로 인한 에너지소비 감소보다 집약도 효과로 인한 에너지소비 감소가 더욱 뚜렷해지고 있다.

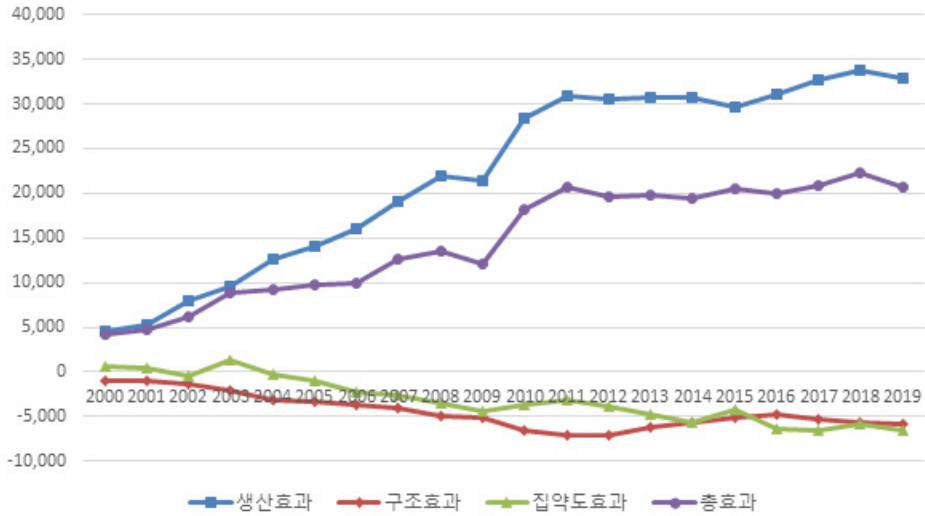
〈표 4〉 국내 제조업의 에너지소비 가법적 요인분해 분석(기준연도 1999년)

단위: 천TOE

	생산효과	구조효과	집약도효과	총효과
2000	4,651	-956	573	4,268
2001	5,347	-962	368	4,752
2002	7,994	-1,358	-536	6,100
2003	9,624	-2,030	1,340	8,935
2004	12,671	-3,151	-320	9,201
2005	14,000	-3,343	-952	9,705
2006	15,943	-3,690	-2,327	9,926
2007	19,111	-4,022	-2,520	12,569
2008	22,018	-5,003	-3,421	13,595
2009	21,491	-5,054	-4,380	12,056
2010	28,344	-6,566	-3,680	18,098
2011	30,949	-7,144	-3,094	20,712
2012	30,624	-7,046	-3,923	19,655
2013	30,782	-6,210	-4,742	19,830
2014	30,736	-5,635	-5,643	19,457
2015	29,649	-5,020	-4,142	20,488
2016	31,031	-4,783	-6,293	19,955
2017	32,602	-5,250	-6,540	20,812
2018	33,840	-5,677	-5,842	22,321
2019	32,884	-5,782	-6,478	20,624

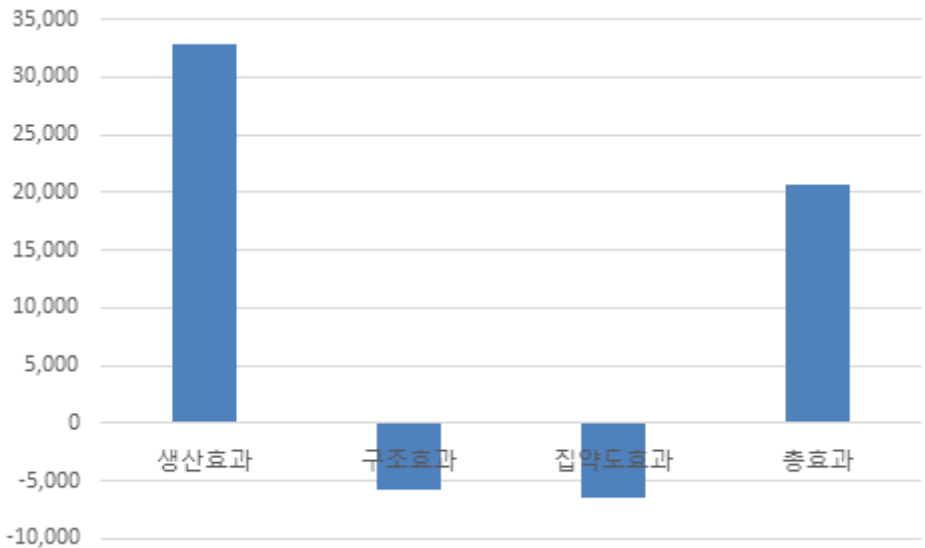
〈그림 1〉 국내 제조업의 에너지소비 가법적 요인분해 분석(기준연도 1999년)

단위: 천TOE



〈그림 2〉 국내 제조업의 에너지소비 가법적 요인분해 분석(1999년 대비 2019년)

단위: 천TOE



국내 제조업부문에 대한 에너지소비 요인 분해 분석

1999년부터 2019년까지 누적 에너지소비 증가량에 대한 요인분해 분석은 <그림 2>에 나타나 있다. 역시 생산효과에 의한 에너지소비 증가량이 32,884TOE, 구조효과에 의한 에너지소비 감소량이 5,782TOE, 집약도효과에 의한 에너지소비 감소량이 6,478TOE를 나타내고 있으며 총효과는 20,624TOE의 에너지소비량 증가를 보이고 있다. 생산효과에 의한 에너지소비 증가량은 구조효과와 집약도 효과에 의해 어느 정도 상쇄되고 있다는 것을 보이고 있으며, 그간의 에너지소비 절약 및 관련 기술개발에 의한 투자가 어느 정도 그 효과를 보이고 있다는 것을 알 수 있다.

전년 대비 에너지소비 증가량에 대한 요인분해 분석은 <표 5>와 <그림3>에 나타나 있다. <표 5>에서는 각각의 요인별로 구체적인 에너지소비량을 나타내었으며, <그림

<표 5> 국내 제조업의 에너지소비 가법적 요인분해 분석(전년대비)

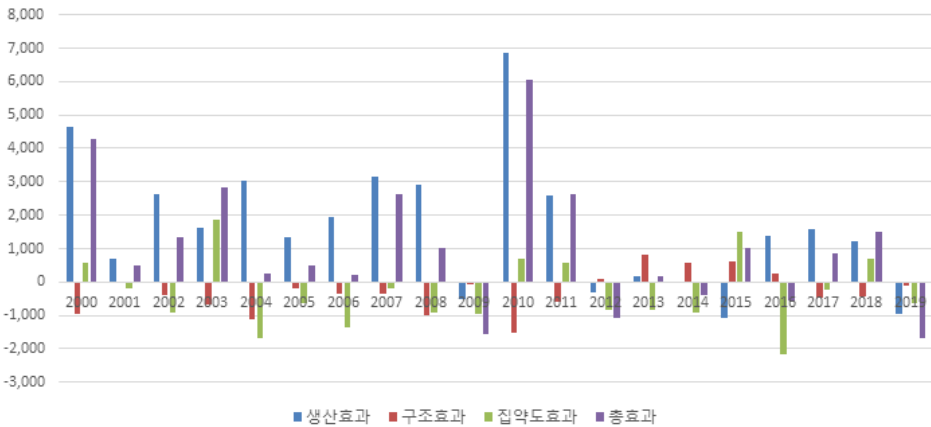
단위: 천TOE

	생산효과	구조효과	집약도효과	총효과
2000	4,651	-956	573	4,268
2001	695	-6	-205	484
2002	2,647	-396	-904	1,347
2003	1,630	-672	1,877	2,835
2004	3,047	-1,121	-1,660	266
2005	1,329	-192	-633	504
2006	1,943	-346	-1,375	221
2007	3,168	-332	-193	2,643
2008	2,907	-981	-901	1,026
2009	-527	-52	-959	-1,538
2010	6,853	-1,511	700	6,042
2011	2,605	-579	586	2,613
2012	-325	98	-829	-1,057
2013	158	836	-819	175
2014	-47	575	-901	-373
2015	-1,086	615	1,501	1,030
2016	1,382	236	-2,151	-533
2017	1,571	-467	-247	858
2018	1,237	-426	698	1,508
2019	-956	-106	-635	-1,697

3>에서는 전년대비 요인별 흐름을 연도별로 파악할 수 있다. 생산효과는 대체로 에너지 소비를 증가시키는 결과를 보이고 있지만 2009년, 2012년, 2014년, 2015년, 2019년에는 전년대비 생산효과로 인해 에너지소비가 감소하였다. 구조효과는 2000년부터 2011년까지 구조효과로 인해 전년대비 에너지소비가 감소하였다. 즉 이 기간에는 산업구조 조정이 저탄소 산업으로 재편되었다는 것을 알 수 있다. 하지만 2012년부터 2016년 동안에는 오히려 산업구조 재편이 전년대비 에너지소비를 증가하는 방향으로 작용하였다. 2017년부터는 다시 구조효과로 인해 전년대비 에너지소비가 감소한 것으로 보아 산업의 저탄소화가 진행된 것을 알 수 있다. 에너지 집약도 효과로 인한 전년대비 에너지소비 변화는 증가와 감소를 반복하고 있다. 이는 에너지 집약도 개선이 꾸준하다기 보다는 해마다 그 변화폭이 출렁이고 있다는 사실을 보여 주고 있다. 하지만 <그림 3>에서 보는 바와 같이 2012년 이후에는 각 요인별 전년대비 에너지소비 변화가 그 이전에 비해서는 둔화되었다는 사실을 확인할 수 있다.

<그림 3> 국내 제조업의 에너지소비 가법적 요인분해 분석(전년대비)

단위: 천TOE



2. 승법적 요인분해 분석결과

국내 제조업의 에너지소비에 대한 승법적 요인분해도 크게 두가지 방법으로 분석하였다. 첫 번째는 기준연도(1999년) 대비 에너지소비 증가율에 대하여 생산효과, 구조효

과, 집약도 효과로 분해하였다. 두 번째는 전년 대비 에너지소비 증가율에 대하여 역시 생산효과, 구조효과, 집약도 효과로 분해하였다.

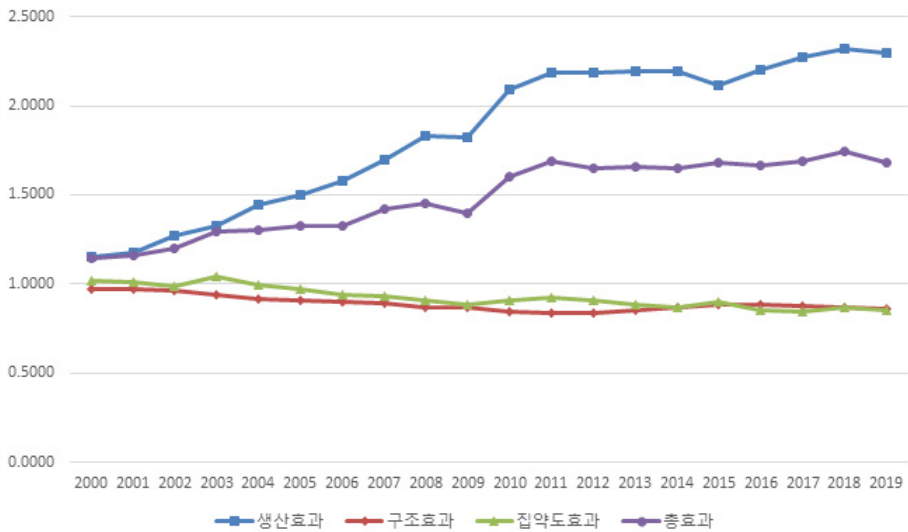
먼저 기준연도(1999년) 대비 목표연도까지 누적 에너지소비 증가율에 대한 승법적 요인분해 분석은 <표 6>, <그림 4>에 나타나 있다. 예를 들면 2010년의 경우 1999년부터 2010년까지 총 에너지소비는 60.05% 증가하였는데 생산효과에 의해서 108.88% 증가하였지만 구조효과에 의해서 15.69% 감소하였으며, 집약도효과에 의해서 9.12% 감소하였다. 따라서 생산효과(2.0888), 구조효과(0.8431), 집약도 효과(0.9088)를 모두 곱하면 총 효과가 도출된다. 여기에서 지수가 1보다 크면 에너지소비 증가에 기여하였으며, 지수가 1보다 작으면 에너지소비 감축에 기여하였다는 것을 알 수 있다. 1999년부터 2019년까지 누적 에너지소비 증가율에 대한 승법적 요인분해 결과는 <그림 5>에 나타

<표 6> 국내 제조업의 에너지소비 승법적 요인분해 분석(기준연도 1999년)

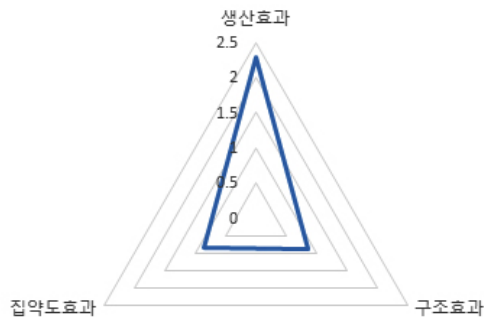
	생산효과	구조효과	집약도효과	총효과
2000	1.1553	0.9708	1.0179	1.1416
2001	1.1791	0.9708	1.0114	1.1577
2002	1.2732	0.9598	0.9839	1.2024
2003	1.3227	0.9427	1.0397	1.2965
2004	1.4433	0.9128	0.9908	1.3053
2005	1.4959	0.9083	0.9730	1.3220
2006	1.5797	0.8996	0.9354	1.3293
2007	1.6989	0.8945	0.9325	1.4170
2008	1.8276	0.8720	0.9106	1.4511
2009	1.8218	0.8684	0.8849	1.4000
2010	2.0888	0.8431	0.9088	1.6005
2011	2.1850	0.8349	0.9248	1.6872
2012	2.1865	0.8353	0.9047	1.6522
2013	2.1920	0.8536	0.8861	1.6580
2014	2.1964	0.8657	0.8655	1.6456
2015	2.1183	0.8807	0.9005	1.6798
2016	2.2036	0.8853	0.8519	1.6621
2017	2.2762	0.8759	0.8479	1.6906
2018	2.3170	0.8685	0.8650	1.7406
2019	2.2962	0.8640	0.8490	1.6843

나 있다. 상대적으로 생산효과가 에너지소비 증가의 주요요인이며, 구조효과와 집약도 효과는 에너지소비 감소에 기여하였다. 상대적으로 생산효과가 구조효과나 집약도 효과에 비해 크므로 총효과는 에너지소비가 증가할 것으로 나타난다. <그림 4>에서 보는 바와 같이 누적 시계열 흐름은 2011년 이후 생산효과의 둔화가 관찰되며, 2015년 이후에는 구조효과보다 집약도 효과가 두드러져 보인다. 2009년부터 2014년까지는 집약도 효과보다는 구조효과가 더 두드러져 보인다.

〈그림 4〉 국내 제조업의 에너지소비 승법적 요인분해 분석(기준연도 1999년)



〈그림 5〉 국내 제조업의 에너지소비 승법적 요인분해 분석(1999년-2019년)

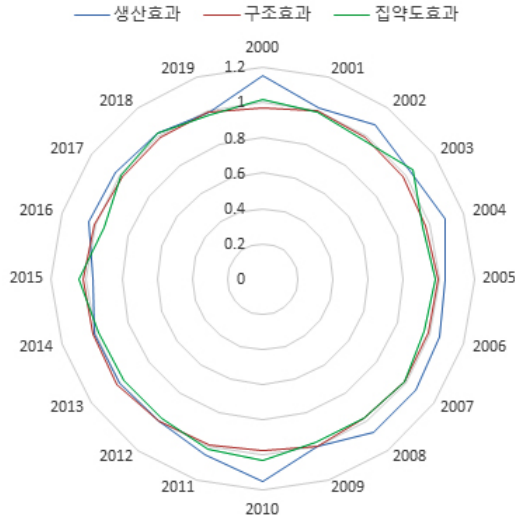


이와 같은 흐름은 <표 7>, <그림 6>에서 보는 바와 같이 전년대비 승법적 요인분해 결과에서도 관찰된다. 2012년부터 2016년까지는 구조효과 지수값이 1보다 큰 값을 보이고 있는 사실을 바탕으로 판단해 보건데 이 기간 동안에는 에너지다소비 업종의 구조조정이 둔화된 것을 알 수 있으며, 대신 에너지 집약도는 2010년, 2011년, 2015년, 2018년을 제외하고는 전년대비 개선된 것을 확인할 수 있다. 생산효과는 2009년, 2015년, 2019년을 제외하고는 계속 지수값이 1보다 커서 생산효과로 인한 에너지소비 증가를 알 수 있다. 2009년, 2015년, 2019년에는 지수값이 1보다 작아 생산효과로 인한 전년대비 에너지소비 감소를 확인할 수 있다. 2009년과 2019년에는 생산효과, 구조효과, 집약도 효과로 에너지소비가 전년대비 감소하였음을 알 수 있다. 2015년에는 생산효과로 인해 에너지소비가 감소하였지만 구조효과와 집약도효과가 악화되어 에너지소비가 증가하였다. 결과적으로 2015년 총효과는 전년대비 에너지소비가 소폭 증가하였음을 확인할 수 있다.

<표 7> 국내 제조업의 에너지소비 승법적 요인분해 분석(전년대비)

	생산효과	구조효과	집약도효과	총효과
2000	1.1553	0.9708	1.0179	1.1416
2001	1.0206	1.0000	0.9936	1.0141
2002	1.0798	0.9887	0.9728	1.0386
2003	1.0389	0.9822	1.0567	1.0782
2004	1.0912	0.9683	0.9529	1.0068
2005	1.0364	0.9951	0.9820	1.0128
2006	1.0561	0.9904	0.9614	1.0056
2007	1.0755	0.9943	0.9969	1.0660
2008	1.0757	0.9749	0.9765	1.0240
2009	0.9968	0.9959	0.9718	0.9648
2010	1.1466	0.9709	1.0270	1.1432
2011	1.0461	0.9902	1.0177	1.0542
2012	1.0006	1.0004	0.9782	0.9792
2013	1.0025	1.0219	0.9795	1.0035
2014	1.0020	1.0142	0.9767	0.9925
2015	0.9644	1.0173	1.0404	1.0208
2016	1.0403	1.0053	0.9461	0.9895
2017	1.0329	0.9894	0.9953	1.0171
2018	1.0179	0.9915	1.0201	1.0296
2019	0.9911	0.9948	0.9815	0.9677

〈그림 6〉 국내 제조업의 에너지소비 승법적 요인분해 분석(전년대비)



IV. 결론

본 논문은 과거 20년(1999년-2019년)간의 국내 제조업 부문의 에너지소비에 대하여 요인 분해 분석을 시도하였다. LMDI 요인분해 분석 중 가법적 요인분해와 승법적 요인 분해 분석 모두를 시도하였다.

요인분해 분석결과 다음과 같은 몇 가지 에너지소비 특성 사실을 확인할 수 있다. 첫째, 지난 20년 기간 동안 국내 제조업의 에너지소비를 증가시킨 요인은 생산효과에 의한 생산증가이다. 구조효과와 집약도효과는 에너지소비를 감소시키는 요인으로 나타났다. 특히 구조효과에 의한 에너지소비 감소가 집약도효과에 의한 에너지소비보다 더 크게 나타났다. 이러한 연구결과는 선행연구인 김수이·김현석(2011), 박년배·심성희(2015)의 연구결과와 일맥상통하고 있다. 서론에서 서술한 바와 같이 김수이·김현석(2011)의 연구는 2007년까지 그리고 박년배·심성희(2015)의 연구는 2011년까지이므로 겹치는 기간에서는 비슷한 결과가 도출되고 있다. 물론 본 연구에서는 개정 에너지밸런스를 사용하였고 논문마다 고려한 산업분류가 다르고 또한 시작연도가 다르기 때문에 구체적인 결과값은 달라질 수 있다. 하지만 겹치는 기간 동안 생산효과, 구조효과, 그리고 집약

도 효과의 흐름은 비슷한 추세를 보인다고 할 수 있다. 둘째, 시기별로는 2012년을 전후하여 에너지소비에 미치는 영향들이 다른 형태로 진화하고 있다. 전년대비 에너지소비 요인분해 분석에 의하면 2009년을 제외하고 2012년까지는 생산효과에 의한 에너지소비 증가가 뚜렷하였다면, 2012년 이후에는 생산효과로 인해 에너지소비 증가가 둔화되고 대신에 구조효과가 더 크게 진전되는 경향을 보이고 있다. 2011년부터 온실가스·에너지목표관리제가 실시되고 있는데 그 효과가 2012년부터 구체적으로 나타난 결과라고 해석할 수 있다. 2009년 이후부터 2014년까지는 구조효과에 의한 에너지소비 감소가 집약도효과에 의한 에너지소비 감소보다 더 크게 나타난 것을 볼 수 있다. 이는 2008년 글로벌 금융위기 이후로 한동안 국내 산업구조가 에너지저소비산업으로 재편되었음을 알 수 있다. 배출권거래제가 실시된 2015년 이후부터는 구조효과보다는 집약도 효과에 의한 에너지소비 감소가 두드러지고 있다. 2015년 이후 정부의 주요 에너지효율향상 정책을 살펴보면 다음과 같다. 2014년 수립된 제2차 에너지기본계획에서는 산업부문의 에너지경영시스템의 보급을 확대하고 있다. 또한 2019년 마련된 에너지효율 혁신전략에서는 2030년 최종에너지소비를 BAU 대비 14.4% 감축하는 안을 마련하였다. 그 외에도 에너지절약전문기업(ESCO)사업, 에너지진단사업 등을 통해 기업의 에너지절약을 지원하고 있다. 2018년 5월부터는 한국전력, 한국가스공사, 한국지역난방공사 등 에너지공급자에게 연도별 절감목표를 부여하고, 이를 달성하기 위해 효율향상 투자사업을 의무적으로 이행하는 제도인 에너지공급자 효율향상의무화제도(EERS)를 시범운영하고 있다.

향후 제조업부문의 기후변화 대응 탄소중립을 위한 에너지절약을 위해서는 다음과 같은 정책적 함의를 생각해 볼 수 있다. 우선 우리나라는 다른 나라와는 달리 철강, 석유화학 등이 국내 제조업에서 차지하는 위치가 견고하다. 물론 이러한 산업은 국가 경제를 지탱하는 핵심 소재부품산업임에는 틀림없다. 하지만 장기적으로 제조업부문의 에너지소비 구조를 개편하기 위해서는 관련 산업의 구조조정은 불가피하다. 이러한 산업의 구조를 에너지저소비형으로 점차 재편하고 에너지다소비산업의 에너지절약 노력을 기울여야 할 것이다.

에너지 집약도를 개선함으로써 에너지소비를 줄여나가야 할 것이다. 현재 산업부문의 에너지절약을 위해서 크게는 배출권거래제와 온실가스에너지목표관리제가 실시되

고 있다. 물론 배출권거래제는 온실가스 감축이 목표이지만 에너지절감은 온실가스 감축으로 이어질 수 있다. 2022년 6월 정부에서는 ‘시장원리 기반 에너지 수요효율화 종합 대책’을 마련하였다. 이중 산업부문의 에너지소비 효율 개선 주요 정책을 보면 다음과 같다. 연간 20만 TOE 이상 사용하는 에너지다소비 산업현장을 대상으로 에너지 효율혁신 파트너십을 구축하는 한편 에너지공기업이 부여된 목표만큼 고객의 효율혁신을 지원토록 의무화하는 EERS(Energy Efficiency Resources Standards)를 본격도입하고 있다. 그리고 지역별 산업단지의 효율개선을 위해 스마트 그린산단을 중심으로 한국형 LEEN(Learning Energy Efficiency Network)사업을 추진하고 있다. 그 외에도 각 기업과 공장에서는 EMS(Energy Management System), FAMS(Factory Energy Management System) 등의 보급이 확산되고 있는데 보다 보급을 촉진하기 위해서는 이를 도입한 기업에 대해서 세제혜택, 인센티브 제공 등의 노력이 더 필요해 보인다.

본 연구의 한계점은 LMDI 요인분해 분석법의 한계이기도 한데, LMDI 요인분해 분석은 에너지소비요인을 생산효과, 구조효과, 집약도 효과로 나눌 수 있다는 장점이 있지만 구체적으로 각 요인에 영향을 미치는 다양한 요인들을 파악하기는 힘들다는 것이다. 예를 들면 에너지가격이 에너지소비에 어떤 영향을 미치는지는 이 분석방법으로는 알 수가 없다. 따라서 향후 에너지수요에 가격이 미치는 영향은 이 분석방법론을 개량하든가 계량경제 분석을 이 연구와 접목할 필요가 있다.

[References]

- 김수이·김현석, “LMDI를 이용한 국내 제조업의 에너지소비 요인분해분석”, 『에너지경제연구』, 제10권 제1호, 2011, pp. 51~78.
- 김수이·박정욱, “한국과 일본의 산업부문 에너지소비에 대한 LMDI 요인분해 분석”, 『에너지경제연구』, 제12권 제1호, 2013, pp. 67~103.
- 김수이·정경화, “LMDI방법론을 이용한 국내 제조업의 온실가스 배출 요인분해분석”, 『자원·환경경제연구』, 제20권 제2호, 2011, pp. 229~254.
- 나인강·이성근, “산업부문 에너지 효율 변화요인 분석”, 『자원·환경경제연구』, 제17권 제2호,

- 2008, pp. 255~286.
- 박년배·심성희, “감축목표 업종 분류체계에 따른 산업부문의 에너지소비 및 온실가스 배출 요인분해 분석”, 「자원·환경경제연구」, 제24권 제1호, 2015, pp. 189~224.
- 박성준·김진수, “우리나라 1차 에너지와 최종 에너지소비 변화요인 분해 비교 분석”, 「자원·환경경제연구」, 제23권 제2호, 2014, pp. 305~330.
- 이유아·허은녕, “에너지 소비로 인한 이산화탄소 배출량 변화의 상향식지수분해 분석”, 경제학공동학술대회 자료집, 2009.
- 진상현·황인창, “지수분해분석을 이용한 지자체의 에너지 소비특성에 관한 연구”, 「자원·환경경제연구」, 제18권 제4호, 2009a, pp. 557~586.
- 진상현·황인창, “지자체의 온실가스 배출특성에 관한 지수분해분석: 에너지부문을 중심으로”, 「환경정책」, 제17권 제3호, 2009b, pp. 101~128.
- 황인창, “기후변화 대응전략에 따른 이산화탄소 배출량 변화요인 분석: 생태적 근대화 전략을 중심으로”, 「ECO」, 제12권 제2호, 2008, pp. 153~184.
- Albrecht, J., D. Francois, and K. Schoors, “A Shapley decomposition of carbon emissions without residuals,” *Energy Policy*, Vol. 30, No. 9, 2002, pp. 727~736.
- Ang, B. W. and F. L. Liu, “A new energy decomposition method: perfect in decomposition and consistent in aggregation,” *Energy Policy*, Vol. 26, 2001, pp. 537~548.
- Ang, B. W., “Decomposition of industrial energy consumption :the energy intensity approach,” *Energy Economics*, Vol.16, No. 3, 1994, pp. 163~174.
- Ang, B. W., “The LMDI Approach to Decomposition Analysis: a Practical Guide,” *Energy Policy*, Vol. 33, 2005, pp. 867~871.
- Ang, B. W., F. L. Liu, and H. S. Chung, *Index numbers and the Fisher ideal index approach in energy decomposition analysis*, Research Report 38/2002. Department of Industrial and Systems Engineering, National University of Singapore, 2002.
- Ang, B. W., F. L. Zhang, and K. Choi, “Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition,” *Energy Policy*, Vol. 23, 1998, pp. 489~495.
- Bacon, R. and S. Bhattacharya, *Growth and CO₂ Emission*, Washington, World Bank Environmental Department, 2007.
- Boyd, G. A., D. A. Hanson, and T. Sterner, “Decomposition of changes in energy intensity—A comparison of the Divisia index and other methods,” *Energy Economics*, Vol. 10, No. 4,

1988, pp. 309~312.

Boyd, G. A., J. F. McDonald, M. Ross, and D. A. Hanson, "Separating the changing composition of US manufacturing production from energy efficiency improvements: A Divisia index approach," *Energy Journal*, Vol. 8, No. 2, 1987, pp. 77~96.

Chung, H. S. and H. C. Rhee, "A residual-free decomposition of the sources of carbon dioxide emissions: A case of the Korean industries," *Energy*, Vol. 26, No. 1, 2001, pp. 15~30.

Han, T. and W. Shin, "Decomposition of CO₂ Emissions in the Manufacturing Sector," *Environmental & Resource Economics Review*, Vol. 16, No. 3, 2007, pp. 723~738.

Kaivo-oja, J. and J. Luukkanen, "The EU Balancing Between CO₂ Reduction Commitments and Growth Policies," *Energy Policy*, Vol. 32, 2004, pp. 1511~1530.

Kwon, T., "Decomposition of Factors Determining the Trend of CO₂ Emissions from Car Travel in Great Britain," *Ecological Economics*, Vol. 53, 2005, pp. 261~275.

Lee, K. and W. Oh, "Analysis of CO₂ Emission in APEC Countries," *Energy Policy*, Vol. 34, 2006, pp. 2779~2787.

Liu, L., Y. Fang, G. Wu, and Y. M. Wei, "Using LMDI Method to Analyze the Change of China's Industrial CO₂ Emissions from Final Fuel Use," *Energy Policy*, Vol. 35, 2007, pp. 5892~5900.

Liu, X. Q., B. W. Ang, and H. L. Ong, "The application of the Divisia index to the decomposition of changes in industrial energy consumption," *Energy Journal*, Vol. 13, No. 4, 1992, pp. 161~177.

Oh, I., W. Wehrmeyer, and Y. Mulugetta, "Decomposition analysis and mitigation strategies of CO₂ emissions from energy consumption in South Korea," *Energy Policy*, Vol. 38, 2010, pp. 364~377.

Sun, J. W., "Changes in energy consumption and energy intensity: a complete decomposition model," *Energy Economics*, Vol. 20, No. 1, 1998, pp. 85~100.

https://www.kesis.net/sub/sub_0001.jsp

https://kosis.kr/statisticsList/statisticsListIndex.do?vwcd=MT_ZTITLE&menuId=M_01_01