

우리나라 제조업 에너지 효율 변화의 요인 분석*

문혜정¹

충남대학교 경제학과, 강사

이기훈²

충남대학교 경제학과, 명예교수

요약

본 연구는 2000~2016년 기간중 우리나라 제조업의 에너지 효율 변화에 미친 요인들과 그 영향의 정도를 LMDI 분해법으로 추정한다. 특히 제조업을 에너지 고집약, 중집약, 저집약 등 3개 그룹으로 나누어 LMDI 다계층 모형을 활용하였다. 그 결과 분석기간 중 구조변화 효과와 에너지 집약도 효과는 제조업 에너지 집약도 개선에 기여한 것으로 나타났다. 그룹 별로는 에너지 저집약 그룹, 중집약 그룹의 에너지 효율이 크게 개선된 것으로 나타났다. 반면 에너지 고집약 그룹은 효율 개선 정도가 미미하였다. 따라서 향후 제조업부문의 에너지 효율화 정책은 에너지 집약산업에 초점을 두는 것이 바람직할 것으로 평가된다. 또 본 연구는 연구방법론상에 있어서 다계층 모형과 단일계층 모형간의 관계를 규명하고 그룹 내부 효과와 그룹간 효과를 구분하여 파악할 수 있음을 보였다.

핵심주제어 : 제조업, 에너지 효율, LMDL 다계층 분석

논문접수일 2020년 06월 17일

심사완료일 2020년 10월 06일

게재확정일 2020년 10월 13일

* 본 논문은 본 논문은 제1저자의 박사학위 청구논문 제Ⅳ장을 수정·보완한 것임을 밝힘. 본 논문은 한국연구재단과 아태경상저널에서 정한 윤리규정을 준수함.

1. 제1저자(교신저자), canon21@hanmail.net

2. 공동저자, khl@cnu.ac.kr

1. 서론

개별 기업이나, 제조업 나아가 한 국가의 에너지 효율 향상은 에너지 원가 절감으로 인한 제품이나 국가 경쟁력 향상은 물론 에너지 의존도 축소를 통한 에너지 안보라는 측면에서 매우 중요한 의미를 갖는다. 더욱이 기후변화가 가속화되고 있는 지구적 상황에서 이산화탄소 배출 저감을 위해서도 에너지 효율 향상의 중요성은 더욱 증가하고 있다.

2000년대 들어서도 꾸준히 지속되어 오던 우리나라 제조업의 에너지 효율 개선 추세가 2007년을 고비로 변화하고 있다. 에너지 효율을 나타내는 대표적인 지표인 에너지 집약도(energy intensity)¹⁾로 에너지 효율 변화 추세를 살펴보면, 제조업의 경우 2000년 0.186 TOE/백만 원²⁾에서 2007년 0.135 TOE/백만 원으로 개선되었으나, 그 이후는 등락을 거듭하다 2016년 0.132 TOE/백만 원 수준에 머물렀다. 즉, 2000~2016년 사이에 에너지 효율은 29.3% 개선되었지만 대부분의 효율 개선은 2000~2007년 사이에 이루어졌고, 2007년 이후 2016년까지 10년 기간 중에는 별다른 개선이 이루어지지 않고 있다. 특히 이 기간 중에는 배럴당 50~60달러 수준이던 국제 유가가 배럴당 110~120달러까지 치솟았음에도 불구하고 에너지 효율 향상이 지지부진한 것은 상당히 이례적인 현상으로 우려를 자아낸다.

본 연구는 2000~2016년 기간 중 우리나라 제조업 에너지 효율의 변화와 변화 요인, 그리고 변화 요인별 영향의 크기를 분석하고자 한다. 구체적으로는 에너지 집약도 변화가 제조업을 구성하고 있는 개별 산업들의 에너지 효율 향상에 기인한 것인지, 아니면 제조업 내 구성 산업의 구조 변화에 기인한 것인지를 구분하여 파악하고자 한다. 에너지 경제 관련 연구에서 에너지 소비량 변화의 요인 분석은 흔히 에너지 집약도의 변화에 초점을 맞춘 연구는 드물다.

분석 방법은 Ang and Choi(1997)가 처음 제시한 이래로 에너지, 환경 분야 요인 분석에 널리 쓰이는 로그평균 디비지아 지수 분해법(Logarithmic Mean Divisia Index Decomposition, 이하 LMDI)을 이용한다. LMDI는 크게 변화량을 분해 대상으로 하는 가법(additive) 방식과 변화율을 분해 대상으로 하는 승법(multiplicative) 방식이 있다³⁾. 두 방법은 본질적으로 동일한 바, 본 연구에서는 승법을 채택하였다.

1) 에너지 집약도는 부가가치 생산액당 투입 에너지의 양으로 측정한 값으로 에너지 원단위라고도 하며 가장 보편적인 에너지 효율지표이다.

2) TOE(Ton of Oil Equivalent, 석유환산톤)는 투입된 석탄, 가스, 전기 등 모든 에너지를 열량기준으로 석유로 환산한 에너지 단위이다.

3) LMDI 모형의 승법과 가법 방식의 차이와 장단점은 Ang (2005)을 참고할 것.

본 연구에서는 또 오랫동안 널리 사용되고 있는 단일 계층 모형(single level model)이 아닌 다계층 모형(multi-level model)을 이용한다. 전자는 분석 대상 그룹의 구성단위들이 단일 계층일 경우 혹은 단일 계층으로 편성 가능한 경우에 적용할 수 있다. 예를 들어 제조업 그룹 전체를 분석 대상으로 할 경우 이를 구성하는 11개 산업의 위계(hierarchy)를 구분하지 않고 동일한 계층으로 놓고 분해하는 방법이다.

현실적으로 많은 에너지 부문은 다계층으로 구성되어 있다. 예를 들어 수송 부문은 육상, 해상, 항공의 3개 그룹으로 구성되고, 육상 부문은 또 철도, 도로 운송 그룹으로, 도로 운송은 다시 승용차, 버스, 트럭 운송 그룹으로 구성된다. 이 경우 수송 부문은 세 개의 하위 그룹(subgroup)으로 구성된 다계층 구조이다. 수송 부문의 에너지 효율 개선을 분석할 경우 서로 다른 성격과 측정 단위를 가진 하위 그룹의 효율 변화를 아울러야 한다는 문제가 발생한다. 예를 들어 버스의 승객 수송 효율 변화와 트럭의 물량 수송 효율 변화를 아울러서 도로 운송 효율 개선 정도를 평가해야 한다. 나아가 수송 부문의 효율 개선은 육상, 해상, 항공 부문의 변화를 아울러 평가해야 한다. 이처럼 다계층 모형은 분석 대상이 동일한 계층이 아니고 여러 계층인 경우의 분석에 적용 가능하도록 개발되었다. 다계층 모형은 Ang and Liu (2001)에서 제시된 2단계 모형(two-step approach)과 Xu and Ang (2014)에서 제시된 다계층 수평 모형(multi-level parallel model, 이하 MP 모형), 다계층 위계 모형(multi-level hierarchical model, 이하 MH 모형) 등이 대표적이다.

본 연구에서는 Xu and Ang (2014)의 다계층 위계 모형을 우리 실정에 맞게 조정하여 분석에 활용한다. 구체적으로는 제조업의 9개 산업을 에너지 고집약, 중집약, 저집약 산업의 하위 그룹으로 세분하여, 제조업 전체는 물론 하위 그룹의 에너지 효율 변화를 에너지 집약도 변화 효과와 구조 변화 효과로 구분하여 추정한다. 또, 다계층 모형이 갖는 장점을 살려, 하위 그룹이나 개별 산업의 에너지 집약도 변화와 구조 변화가 전체 집약도 변화에 미친 영향을 그룹내 변화 효과(within group effect)나 그룹간 변화 효과(between group effect)로 구분하여 파악하고자 한다. 우리나라에서 에너지 집약도에 초점을 맞춘 연구는 흔치 않으며, 특히 다계층 모형을 이용한 에너지 집약도 분석은 본 연구가 처음이다. 본 연구는 다음과 같이 구성되어 있다. 2장은 선행연구 분석, 3장은 기초 데이터 분석 및 모형 설명이며, 4장은 추정 결과, 마지막으로 5장은 요약 및 정책적 시사점이다.

2. 선행연구 분석

지금까지 에너지 분야에서 LMDI 방식을 이용한 경제 분석은 주로 에너지 효율 보다는 에너지 소비량의 변화 분석에 치중되어 있다. 구체적으로는 산업이나 국가 전체의 에너지 소비량 변화를 성장(생산증가) 효과, 에너지 집약도 변화 효과, 구조 변화 효과로 구분하여 파악하는 것이다. 예를 들면 이성근 등 (2007)은 LMDI 가법 방식으로 1990~2005년 국내 제조업부문의 에너지 소비변화를 분석하였다. 분석 결과, 생산효과가 에너지소비 변화를 주도하였고, 업종별로 차이가 있으나 산업구조와 원단위는 개선되고 있는 것으로 나타났다. 김수이·김현석 (2011)은 LMDI 가법과 승법 방식 모두를 사용하여 1991~2007년 기간의 국내 제조업부문 에너지소비를 분해하였다. 이들도 제조업 전체 에너지소비는 생산 효과가 에너지소비 증가를 주도하였음을 지적하였다. 1차금속·비철금속, 조립금속, 비금속, 섬유·의복 등은 에너지 집약도 효과로 인한 에너지 소비 감소가 가장 큰 업종으로 나타났다. 임재규·김종익 (2014)은 LMDI 가법과 승법 방식으로 산업부문과 제조업을 구분하여 1990년부터 2011까지 전력 소비의 변화 요인을 분석하고 이를 최종에너지소비 변화와 비교하여 살펴보았다. 그 결과, 산업부문 전체의 전력 및 최종에너지 소비 증가에 제조업의 생산효과가 큰 영향을 미쳤으며, 에너지 집약도 효과도 소비 증가에 영향을 미친 것으로 나타났다. 김태현 등 (2015)은 1998년부터 2011년 기간 동안 서비스업을 제외한 산업부문 에너지 소비 변화를 LMDI 가법 방식으로 생산효과, 구조효과, 원단위효과로 구분하여 분해하였다. 그 결과, 구조효과는 음으로 에너지 소비 증가효과를 상쇄하는 것으로 나타났고, 원단위효과는 1997~2008년 기간에는 음으로, 2008~2011년 기간에는 양으로 분석되었다. 생산효과는 양으로 에너지 소비 증가를 주도한 것으로 나타났다. 김철현·강병욱 (2017)은 산업부문의 에너지 소비를 LMDI 가법의 방식으로 분석하였다. 산업을 농림어업, 광업을 포함한 총 11개 업종으로 분류하고, 원료용 에너지를 포함한 경우와 그렇지 않은 경우의 에너지 소비를 생산효과, 구조효과, 원단위효과로 분해하였다. 1995년에서 2015년까지를 분석한 결과, 산업용 에너지 소비 증가는 생산효과가 주도하였다. 2008년 금융위기 이후 생산효과에 의한 에너지 소비는 주춤한 모습을 보였으며, 이후 증가세가 둔화된 것으로 파악되었다.

국제간 비교연구의 예를 보면, 박정욱·김수이 (2013)는 1990~2009년 한국과 일본의 산업부문 에너지 소비 변화 요인을 분석하였다. LMDI 가법과 승법 방식으로 분석 결과, 한국과 일본 모두 제조업부문 에너지 소비 변화의 가장 큰 요인은

생산효과로 나타났다. 구조효과는 에너지 소비 증가 둔화 요인으로 작용했다. 그러나, 일본의 경우 한국보다 구조효과가 크게 나타났다. 에너지 집약도 효과는 한국의 경우 에너지 소비 둔화요인으로 작용하였으나 일본은 반대로 파악되었다.

이상의 에너지 분야 LMDI 연구들은 제조업, 산업, 혹은 국가 전체의 에너지 소비를 대상으로 그 변화 요인을 분석하였으며, 이런 연구들을 통해 전체 에너지 소비변화에 전반적으로 성장효과가 두드러졌으며, 구조변화 효과, 에너지 집약도 효과는 시기와 업종에 따라 가변적인 영향을 미쳐 왔음을 알 수 있다. 그러나, 이러한 연구들은 개별 업종의 에너지 효율 변화나 제조업, 산업, 국가 전체의 에너지 효율 변화의 분석 혹은 이들 효율 변화간의 상관관계를 파악하는 데는 충분하지 않다.

LMDI 기법을 이용한 에너지 효율의 변화 분석에 있어서는 성장 효과를 제외하고 개별 업종의 에너지 효율 변화 효과와 업종의 구성비 변화 즉, 구조 효과를 중심으로 분석하게 된다(김화영·김지효, 2008; 이성인, 2011; 이성인, 2012 등). 김화영·김지효(2008)는 1981년부터 2006년의 산업부문(농림어업, 광업, 제조업, 건설업) 석유 소비량과 실질 GDP 자료를 이용하여 에너지 집약도 변화를 분석하였다. 연구 결과, 전체 변화에 미치는 영향은 세부 산업 중 제조업이 가장 컸다. 산업 전체 분석에 있어서 에너지 집약도 변화의 영향이 크게 나타났으며, 구조 변화는 전체 변화에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 분석했다. 이성인(2011)은 2000~2010년 기간 중 제조업 업종별 에너지 효율성 평가와 에너지 절약 잠재량 분석에서, 에너지 원단위 개선 효과가 2006년까지는 전체 에너지 원단위 개선에 구조효과보다 크게 기여한 것으로 나타났다. 구조효과는 2001~2002년 기간을 제외하고 전체 에너지 원단위 개선에 기여하는 요인으로 작용하였다. 특히 2007~2009년 기간에는 업종별 원단위 악화에도 구조효과는 개선되어 전체 원단위 개선에 기여한 것으로 나타났다. 이는 제조업이 외환위기 이후 에너지 저소비형 구조로 변화하고 있다는 것을 의미한다고 보았다⁴⁾.

국가 간 비교연구로서는, 이성인(2012)이 2000~2010년 기간 한국, 미국, 일본, 독일의 제조업 에너지 원단위 분해를 시도하였다. 분석 결과 한국은 구조변화와 업종별 원단위가 빠르게 개선되고 있는 것으로 나타났다. 그리고 4개국 모두 에너지 저소비형 구조로 전환되고 있는 것으로 나타났으며, 한국과 일본은 업종별

4) 다만, 에너지 소비량 가운데 원료용을 제외한 분석에서는 에너지원단위 효과 지수가 훨씬 크게 개선된 것으로 나타났는데 이는 원료용 에너지가 대체불가능한 원자재의 성격을 갖고 있기 때문일 것이다.

원단위 개선효과가, 미국과 독일은 구조변화 효과가 상대적으로 크게 나타나는 특징이 있다고 분석하였다. 이상의 연구들을 통해서 볼 때 우리나라나 비교 대상 선진국들의 경우 에너지 효율은 전반적으로 향상되고 있으며, 그 원인은 개별 산업의 에너지 효율 향상과 에너지 집약 산업의 비중 감소로 인한 구조 효과에 기인한 것으로 분석된다.

지금까지 살펴본 연구들은 각 산업 또는 업종들을 단일 계층으로 놓고 분석한 연구들이다. 최근에는 단일 계층 분석법 외에 다계층 분석법에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다. LMDI의 전통적인 모형은 모든 분석대상을 수평으로 놓고 동등한 레벨(단일 계층)에서 다루는 방식이다. 대부분의 연구에서는 이 방법으로 구조 효과와 에너지 집약도 효과를 측정한다. 그러나 이런 전통적인 접근법은 구조 변화와 에너지 집약도 변화가 미친 총체적인 효과만 알 수 있다. 다계층 모형은 구체적인 효과를 추정할 수 있다.

대표적인 모형으로는 Ang and Liu (2001)에서 제시된 2단계 모형(two-step approach)과 Xu and Ang (2014)에서 제시된 다계층 수평 모형(multi-level parallel model), 다계층 위계 모형(multi-level hierarchical model)이 있다. Ang and Liu (2001)에서는 단계별(two-step) LMDI 승법 방식으로 전체 제조업부문을 에너지 집약도가 높은 그룹과 그렇지 않은 그룹으로 나누어 이산화탄소 배출 요인을 분석하는 사례를 소개하고 있다. 또한 OECD와 개발도상국으로 나뉘는 다계층 방식을 적용하였다. Ang (2016)에서는 다계층 분석의 구체적인 적용방법을 소개하고 있다. Xu and Ang (2014)은 다계층 위계를 가진 성장, 구조, 에너지 집약도 효과의 LMDI 분석에서 구조효과가 그룹간 효과(between effect)와 그룹내 효과(within effect)로 구분될 수 있음을 설명하였다.

국가, 지역데이터를 이용하여 다계층 분석을 시도한 연구로는 González et al. (2014), Jiang et al. (2017), 문혜정 (2019), 문혜정·이기훈 (2019), Liu et al. (2019)의 연구가 있다. González et al. (2014)은 2001~2008년 기간 EU 27개국의 에너지 소비 변화를 성장, 구조, 에너지 집약도 효과로 분석하였다. 에너지 집약도를 기준으로 에너지 저집약(LIC), 중집약(MIC), 고집약(HIC)의 세 그룹으로 나누어 EU 전체, 각 그룹, 각 국가 수준을 구분하고 승법 방식의 다계층 모형을 적용하였다. Jiang et al. (2017)은 1996~2013년 기간 중국 30개 지역의 이산화탄소 배출량 변화를 성장, 구조, 에너지 집약도 효과로 분석하였다. MATLAB 소프트웨어와 SPSS Q-type 계층적 군집 분석(Q-type hierarchical clustering model)을 이용해 6개 그룹으로 분류한 다계층 모형을 개발한 바 있다. 문혜정·이기훈 (2019)은

2006~2016년 기간 우리나라 에너지 소비 변화를 단일 계층 분석법과 다계층 수평 모형, 다계층 위계 모형을 이용하여 분석하였다. 전국 16개 지역을 에너지 고집약, 중집약, 저집약으로 구분한 후, 변화요인을 크게 성장효과 구조효과, 에너지 집약도 효과로 살펴보았다. 세부적으로는 다계층 모형을 통해 그룹간, 그룹내 효과, 하부 구조 효과와 하부 집약도 효과도 분석하였다.

Liu et al. (2019)은 2000~2015년 기간 16개의 산업, 30개 지역 자료를 이용하여 중국의 총 탄소 집약도를 배출계수, 에너지 집약도, 산업 구조, 지역 구조 효과로 분석하는데 승법 방식의 다계층 모형을 활용하였다.

3. 방법론

3.1. 데이터 분석

경제활동별 국내 총생산 항목 중 제조업은 음식료품·담배, 섬유·가죽제품, 목재·종이·인쇄·복제업, 석탄 및 석유제품, 화학제품, 비금속광물제품, 1차금속제품, 금속제품, 기계 및 장비, 전기전자기기, 정밀기기, 정밀기기, 운수장비, 기타제조 등 13개 산업으로 구성되어 있다. 그러나 국가에너지통계종합정보시스템(KESIS) 에너지 밸런스 상의 제조업부문은 음식·담배, 섬유·의복, 목재·나무, 펄프·인쇄, 석유·화학, 비금속, 1차 금속, 비철금속, 조립금속, 기타제조, 기타에너지 등 11개 산업으로 구성되어 있다. 제조업 분류 기준이 이처럼 다르므로 강윤영 등 (2013)의 분류기준에 맞추어 ①음식·담배, ②섬유·의복, ③목재·종이·인쇄, ④석유·화학, ⑤비금속, ⑥1차금속·비철금속, ⑦조립금속, ⑧기타제조, ⑨건설업의 9개 업종으로 재분류하였다.

제조업 각 업종별 산출은 국가통계포털(KOSIS)에서 제공하는 경제활동별 국내총생산(2010년 기준 연쇄가격, 실질)을 활용하였다. 제조업 각 업종별 에너지 소비량은 국가에너지통계종합정보시스템(KESIS)의 에너지 밸런스에 나온 최종 에너지 소비량을 이용하였다. 이 때 석탄, 석유류, 가스류, 전력의 열량 합계를 사용하였다. 기타에너지로 열에너지, 신재생에너지가 있으나 2006년 전후 관련 법 개정에 따라 집계방법이 불일치하고, 제조업부문에서 차지하는 바가 매우 작아 제외하였다. 또한 나프타, 용제, 아스팔트, 윤활기유, 파라핀왁스, 석유코크, 기타제품 등 비에너지유는 제외하였다.

연구대상 기간은 2000년에서 2016년까지로 하였다. 기간 선정 이유는 우선 2000년 이전은 연구들이 많이 진행되었고, 2000년 이후의 추세 변화가 있는지 관심을 가졌기 때문이며, 2016년은 분석 시점에서 관련 데이터를 입수 가능한 가장 최근 연도이다.

다음 <표 1>에서 보듯이 제조업 부문 산출은 2016년에 495조 8,109 억 원으로 2000년 246조 1,729 억 원에 비해 101.4% 증가하였다. 연평균 증가율이 4.47%에 달한다. 제조업 9개 업종의 산출이 모두 증가하였지만, 특히 조립금속업의 경우 산출이 같은 기간 중 71조 5,359 억 원에서 234조 3,542 억 원으로 3배 이상 증가하였다. 반면 섬유·의복, 목재·종이·인쇄, 음식·담배업의 경우 산출 증가율이 20% 수준에 불과하였다.

<표 1> 제조업 업종별 산출(2000년, 2016년)

단위: 십억 원

연도	제조업 합계	음식 · 담배	섬유· 의복	목재· 종이· 인쇄	석유 · 화학	비금속	1차금속 · 비철 금속	조립 금속	기타 제조	건설업
2000	246,172.9 (100.0)	13,362.9 (5.4)	15,147.4 (6.2)	8,347.1 (3.4)	34,449.5 (14.0)	7,712.9 (3.1)	42,379.1 (17.2)	71,535.9 (29.1)	3,520.1 (1.4)	49,718.0 (20.2)
2016	495,810.9 (100.0)	16,411.8 (3.3)	18,264.6 (3.7)	10,086.6 (2.0)	69,845.7 (14.1)	13,163.1 (2.7)	62,961.7 (12.7)	234,354.2 (47.3)	5,026.9 (1.0)	65,696.3 (13.3)
증가율 (%)	101.4	22.8	20.6	20.8	102.8	70.7	48.6	227.6	42.8	32.1
연평균 증가율 (%)	4.47	1.29	1.18	1.19	4.52	3.40	2.51	7.70	2.25	1.76

자료: 국가에너지통계종합정보시스템

* 괄호 안의 숫자는 구성비(%)임.

다음 <표 2>에서 보듯이 제조업의 최종 에너지 소비는 2000년 4,588 만 TOE에서 2016년에 6,530 만 TOE로 42.3% 증가하였다. 연평균 증가율은 2.23%이다. 그러나, 업종별로 구분해서 보면 음식·담배, 석유·화학, 1차금속·비철금속, 조립금속, 건설업의 5개 산업의 최종에너지 소비는 증가한 반면, 섬유·의복, 목재·종이·인쇄, 비금속, 기타제조업의 최종에너지 소비는 감소하였다. 제조업 에너지 소비에서 제일 비중이 높은 1차금속·비철금속 업종의 경우 최종에너지 소비량이 1,718 만 TOE에서 2,966 만 TOE로 72.7% 증가하여 제조업 전체에서 차지하는 비중이 37.4%에서 45.4%로 높아졌다.

제조업의 에너지 소비량을 산출량으로 나눈 에너지 집약도는 2000년 0.186 TOE/백만 원에서 2016년 0.132 TOE/백만 원으로 하락하였다. 즉, 제조업 전반적으로 에너지 효율이 약 29.3% 향상된 것이다⁵⁾. 그러나, 에너지 효율 개선 정도는 업종별로 크게 다르다. 섬유·의복 업종의 경우 에너지 집약도가 0.225 TOE/백만 원에서 0.076 TOE/백만 원으로 크게 개선된 반면, 1차금속·비철금속은 0.405 TOE/백만 원에서 0.471 TOE/백만 원으로 오히려 악화되었다. 1차금속·비철금속은 금속의 제조 및 주조 과정에서 고로, 전기로의 사용 증가가 주원인으로 지적된다.

〈표 2〉 제조업 업종별 최종 에너지 소비(2000년, 2016년)

단위: 천 TOE

연도	제조업 합계	음식 · 담배	섬유 · 의복	목재· 종이· 인쇄	석유 · 화학	비금속	1차금속 · 비철금 속	조립 금속	기타 제조	건설업
2000	45,884.7 (100.0)	1,598.0 (3.5)	3,408.4 (7.4)	2,226.1 (4.9)	6,199.2 (13.5)	5,576.4 (12.2)	17,180.7 (37.4)	5,107.8 (11.1)	4,105.8 (8.9)	482.3 (1.1)
2016	65,301.6 (100.0)	1,755.0 (2.7)	1,384.4 (2.1)	1,349.3 (2.1)	11,024.0 (16.9)	4,952.0 (7.6)	29,662.6 (45.4)	10,581.9 (16.2)	3,682.2 (5.6)	910.2 (1.4)
증가율 (%)	42.3	9.8	-59.4	-39.4	77.8	-11.2	72.7	107.2	-10.3	88.7
연평균 증가율 (%)	2.23	0.59	-5.48	-3.08	3.66	-0.74	3.47	4.66	-0.68	4.05

자료: 국가에너지통계종합정보시스템

* 최종 에너지 소비에서 비에너지유와 기타에너지는 제외.

** 괄호 안의 숫자는 비중(%)임.

제조업의 에너지 효율 변화를 다계층 모형을 적용하여 분석하기 위해 제조업 9개 산업을 에너지 집약도의 크기에 따라 에너지 고집약, 에너지 중집약, 에너지 저집약 산업군으로 나누었다. 에너지 고집약 산업군은 1차금속·비철금속, 비금속, 기타제조업이다. 이들 산업의 에너지 집약도는 2000년 기준 0.405~1.166 TOE/백만 원에 해당한다. 이들은 제조업 에너지 소비의 58.5%를 차지하고 있고, 제조업 산출의 21.8%를 차지한다.

에너지 고집약 산업군의 에너지 집약도는 분석 기간 중 0.501 TOE/백만 원에서 0.472 TOE/백만 원으로 개선되었다. 비금속업종은 0.723 TOE/백만 원에서 0.376

5) 추정치가 1에 가까울수록 비교년도와 기준년도의 에너지 집약도가 비슷하고, 음의 값은 에너지 집약도 하락 즉 에너지 효율 개선을, 양의 값은 그 반대를 의미한다.

TOE/백만 원으로, 기타제조업종은 1.166 TOE/백만 원에서 0.732 TOE/백만 원으로 개선되었다. 그러나 1차금속·비철금속업은 0.405 TOE/백만 원에서 0.471 TOE/백만 원으로 에너지 효율이 다소 악화되었다.

에너지 중집약 산업군은 석유화학, 섬유·의복, 목재·종이·인쇄업이다. 이들 산업의 에너지 집약도는 0.180~0.267 TOE/백만 원 수준이다. 이들은 제조업 에너지 소비의 25.8%를 차지하고 있고, 제조업 산출의 23.5%를 차지한다. 에너지 중집약 산업들의 에너지 집약도는 분석 기간 중 0.204 TOE/백만 원에서 0.140 TOE/백만 원으로 개선되었다. 석유화학업종은 0.180 TOE/백만 원에서 0.158 TOE/백만 원으로, 섬유·의복업종은 0.225 TOE/백만 원에서 0.076 TOE/백만 원으로, 목재·종이·인쇄업은 0.267 TOE/백만 원에서 0.134 TOE/백만 원으로 모든 업종에서 에너지 효율이 향상되었다.

2000년 기준 에너지 집약도가 0.120 TOE/백만 원 이하를 에너지 저집약 산업군으로 구분하였다. 에너지 저집약 산업들은 건설업, 조립금속, 음식·담배업이다. 이들 산업의 에너지 집약도는 0.010~0.120 TOE/백만 원으로 나타났다. 이들은 제조업 에너지 소비의 15.7%를 차지하고 있고, 제조업 산출의 54.7%를 차지한다. 에너지 저집약 산업들의 에너지 집약도는 분석 기간 중 0.053 TOE/백만 원에서 0.042 TOE/백만 원으로 거의 변하지 않았다. 조립금속업 등 이들 산업의 산출이 제조업에서 차지하는 비중이 54.7%에서 63.8%로 크게 증가한 반면 에너지 소비는 15.7%에서 20.3%로 상대적으로 증가폭이 크지 않았기 때문이다. 에너지 집약도는 조립금속업은 같은 기간 중 0.071 TOE/백만 원에서 0.045 TOE/백만 원으로 음식·담배업은 0.120 TOE/백만 원에서 0.107 TOE/백만 원으로 개선되었으나, 건설업의 경우 0.010 TOE/백만 원에서 0.014 TOE/백만 원으로 악화되었다.

그룹별 산출과 에너지 소비 비중 변화를 보면, 에너지 고집약 산업군은 제조업 산출에서 차지하는 비중이 분석기간 중 21.8%에서 16.4%로 줄어들었지만, 에너지 소비에서 차지하는 비중은 58.5%에서 58.6%로 줄지 않았다. 반면 에너지 중집약 산업군은 산출과 에너지 소비에서 차지하는 비중이 모두 감소하였다. 에너지 저집약 산업들은 제조업에서 차지하는 산출, 에너지 소비 비중이 증가하였다. 특히 산출 비중이 54.7%에서 63.8%로 크게 증가하였다. 이렇게 제조업을 세분화할 경우 하위 그룹별로 변화의 양상이 매우 다를 수 있다.

<표 3> 제조업 업종별 최종에너지 소비량* · 산출량과 에너지 집약도(비에너지유 제외)**

단위: 천 TOE, 십억 원

구분	최종에너지소비(E)		산출액(Y)		에너지 집약도(I=E/Y)			
	2000년	2016년	2000년	2016년	2000년	2016년	변화율 (%)***	
제조업 합계	45,884.7 (100.0)	65,301.6 (100.0)	246,172.9 (100.0)	495,810.9 (100.0)	0.186	0.132	-29.0	
에너지 저집약 그룹	건설업	482.3 (1.1)	910.2 (1.4)	49,718.0 (20.2)	65,696.3 (13.3)	0.010	0.014	40.0
	조립금속	5,107.8 (11.1)	10,581.9 (16.2)	71,535.9 (29.1)	234,354.2 (47.3)	0.071	0.045	-36.6
	음식·담배	1,598.0 (3.5)	1,755.0 (2.7)	13,362.9 (5.4)	16,411.8 (3.3)	0.120	0.107	-10.8
	소 계	7,188.1 (15.7)	13,247.1 (20.3)	134,616.8 (54.7)	316,462.3 (63.8)	0.053	0.042	-20.8
에너지 중집약 그룹	석유·화학	6,199.2 (13.5)	11,024.0 (16.9)	34,449.5 (14.0)	69,845.7 (14.1)	0.180	0.158	-12.2
	섬유·의복	3,408.4 (7.4)	1,384.4 (2.1)	15,147.4 (6.2)	18,264.6 (3.7)	0.225	0.076	-66.2
	목재·종이·인쇄	2,226.1 (4.9)	1,349.3 (2.1)	8,347.1 (3.4)	10,086.6 (2.0)	0.267	0.134	-49.8
	소 계	11,833.7 (25.8)	13,757.7 (21.1)	57,944.0 (23.5)	98,196.9 (19.8)	0.204	0.140	-31.4
에너지 고집약 그룹	1차금속·비철금속	17,180.7 (37.4)	29,662.6 (45.4)	42,379.1 (17.2)	62,961.7 (12.7)	0.405	0.471	16.3
	비금속	5,576.4 (12.2)	4,952.0 (7.6)	7,712.9 (3.1)	13,163.1 (2.7)	0.723	0.376	-48.0
	기타제조	4,105.8 (8.9)	3,682.2 (5.6)	3,520.1 (1.4)	5,026.9 (1.0)	1.166	0.732	-37.2
	소 계	26,863 (58.5)	38,296.8 (58.6)	53,612 (21.8)	81,151.7 (16.4)	0.501	0.472	-5.8

자료: 국가에너지통계종합정보시스템

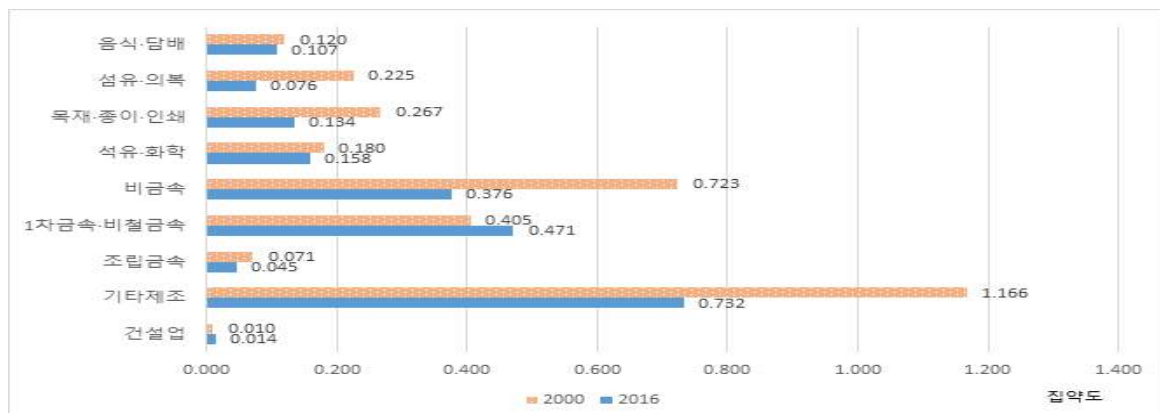
* 최종 에너지 소비에서 비에너지유와 기타에너지는 제외.

** 괄호 안의 숫자는 비중(%)임.

*** (-)값은 에너지 집약도 저하(즉 에너지 효율 개선), (+)값은 에너지 집약도 상승(즉 에너지 효율 악화)을 의미함.

<그림 1> 제조업 업종별 에너지 집약도 변화(2000년, 2016년)

단위: TOE/백만 원



자료: <표3>의 에너지 집약도를 이용하여 작성

3.2. 추정 방법

3.2.1. 단일 계층 분석(기본 모형)

본 연구에서는 로그평균 디비지아 지수 분해법(Logarithmic Mean Divisia Index Decomposition, 이하 LMDI)을 사용하여 제조업 에너지 집약도 변화를 분석한다.

제조업 에너지 집약도는 제조업 전체에서 차지하는 비중($S_i = \frac{Y_i}{Y}$), 그리고 각 산업의 에너지 집약도($I_i = \frac{E_i}{Y_i}$)의 곱으로 (1)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_t = \sum_{i=1}^n I_{i,t} = \sum_{i=1}^n \frac{Y_{i,t}}{Y_t} \cdot \frac{E_{i,t}}{Y_{i,t}} = \sum_{i=1}^n S_{i,t} I_{i,t} \quad (1)$$

I_t : 제조업 전체 에너지 집약도

$E_{i,t}$: i 산업의 에너지 소비, $i = 1, \dots, n$

Y_t : 제조업 전체 산출

$Y_{i,t}$: i 산업의 산출

$S_{i,t}$: i 산업의 산출액 비중 ($= \frac{Y_{i,t}}{Y_t}$)

$I_{i,t}$: i 산업의 집약도 ($= \frac{E_{i,t}}{Y_{i,t}}$)

LMDI를 이용한 (1)식의 분해 결과는 아래 (2)식과 같다. 여기서 하첨자 0은 기준년도, 하첨자 T는 비교년도를 의미한다. 두 시점 간 에너지 집약도의 비율(혹은 에너지 집약도 지수)은 두 항목의 곱으로 나타내어진다. 첫 번째 항, D_S ($= \exp(\sum_{i=1}^n w_i^* \ln \frac{S_{i,T}}{S_{i,0}})$)는 제조업 업종들의 산출 구성 변화가 초래한 효과로 흔히 구조변화효과(structural change effect)라고 불린다. 두 번째 항 D_I ($= \exp(\sum_{i=1}^n w_i^* \ln \frac{I_{i,T}}{I_{i,0}})$)는 각 산업의 에너지 집약도 변화(즉 에너지 효율 변화, 단위 생산량 산출에 투입되는 에너지 양) 효과(intensity effect)이다. 식 (2)에서 보듯이

에너지 집약도 변화율(에너지 집약도 지수)은 다음 두 항목 즉 (1) 구조 변화율, (2) 에너지 집약도 변화율의 가중 평균이다. 가중치는 각 산업 에너지 집약도의 두 시점 로그 평균을 전체 제조업 에너지 집약도 두 시점 로그 평균으로 나눈 값이다.

$$\begin{aligned} \frac{I_T}{I_0} &= \exp\left(\sum_{i=1}^n w_i^* \ln \frac{S_{i,T}}{S_{i,0}}\right) \cdot \exp\left(\sum_{i=1}^n w_i^* \ln \frac{I_{i,T}}{I_{i,0}}\right) & (2) \\ &= D_S \cdot D_I \end{aligned}$$

여기서, $w_i^* = \frac{L(E_{i,T}, E_{i,0})}{L(E_T, E_0)}$, $i = 1, \dots, n$

$$D_S : \text{구조효과} = \exp\left(\sum_{i=1}^n w_i^* \ln \frac{S_{i,T}}{S_{i,0}}\right)$$

$$D_I : \text{집약도효과} = \exp\left(\sum_{i=1}^n w_i^* \ln \frac{I_{i,T}}{I_{i,0}}\right)$$

참고로 a 와 b 의 로그 평균은 $L(a,b)$ 로 표현하였으며, 실제 계산은 다음과 같다.

$$L(a,b) = \frac{a-b}{\ln a - \ln b}, \quad a, b > 0, \quad a \neq b$$

이 기본 모형 2(L2)는 제조업의 세부 9개 산업을 대상으로 한 분석뿐만 아니라 제조업을 에너지 고집약, 중집약, 저집약 산업군으로 대분류한 경우를 대상으로 한 분석(기본 모형 1(L1))에서도 사용 가능하다. 후자의 경우 기본모형에서 $i=1$ (에너지 고집약 산업), 2(에너지 중집약 산업), 3(에너지 저집약 산업)으로 바뀔 뿐 나머지는 변함이 없다.

분석은 기준연도 변경 방식(rolling base year) 즉, 비교연도는 기준연도의 다음 해이고, 그 다음 해는 비교연도가 기준연도가 된다.

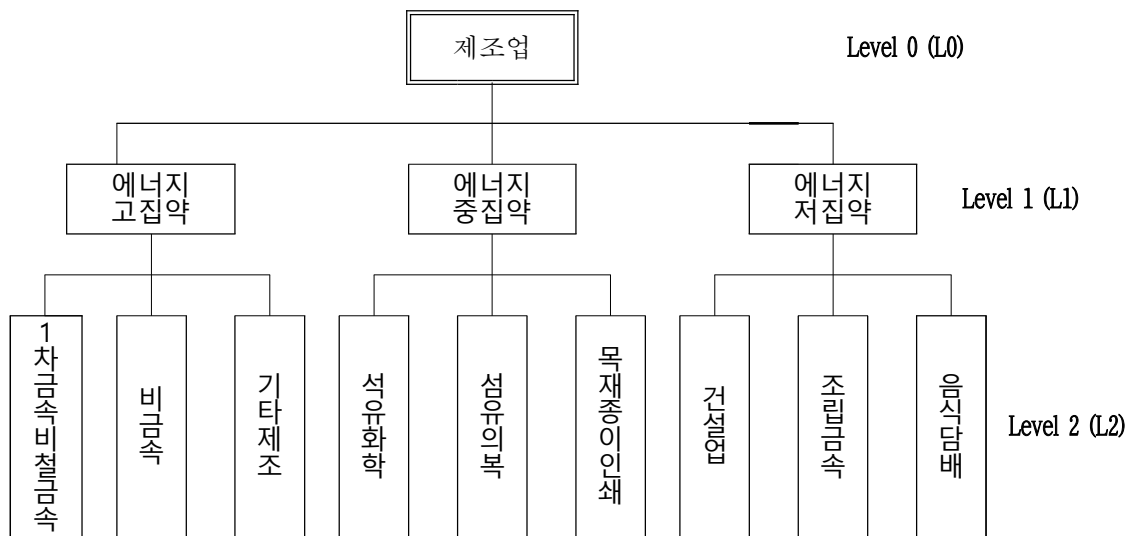
3.2.2. 다계층 분석

단일 계층의 분석은 전체적인 윤곽만 보여줄 뿐 모형, 그룹 간 관계 등 세부적인 분석이 미흡한 단점이 있다. 예를 들어 제조업의 에너지 집약도 변화 현상을

분석할 때 제조업 전체의 변화는 파악할 수 있으나, 하부 단계의 변화를 구분하기 어려운 한계가 있다.

실제 에너지 소비구조는 단일 계층이 아닌 여러 계층 구조를 갖는 경우가 많다. <그림 2>는 다계층 구조의 제조업 위계를 나타낸 것으로, Level 0(이하 L0)을 기본 모형에서 설명한 제조업 에너지 집약도라고 할 때, Level 1(이하 L1)은 제조업의 하부 그룹인 에너지 고집약, 중집약, 저집약 그룹의 에너지 집약도이다. 끝으로 Level 2(이하 L2)는 에너지 고집약, 중집약, 저집약 그룹의 하부 개별 산업 에너지 집약도이다.

<그림 2> 제조업의 위계구조



3.2.2.1. 다계층 수평 모형

다계층 수평 모형(MP 모형)은 기본 모형의 식 (1)을 다음 식 (3)과 같이 변형한 것이다 (Xu and Ang, 2014).

$$I_t = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{n_k} \frac{Y_{i,t}}{Y_t} \cdot \frac{Y_{ij,t}}{Y_{i,t}} \cdot \frac{E_{ij,t}}{Y_{ij,t}} = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{n_k} S_{i,t} \cdot S_{ij,t} \cdot I_{ij,t}, \quad (3)$$

$$i = 1, \dots, K \quad (\text{그룹})$$

$$j = 1, \dots, n_k, \left(\sum_{i=1}^K n_k = n \right) \quad (\text{그룹 내 구성요소})$$

$Y_{i,t}$: i 그룹의 산출

$Y_{ij,t}$: i 그룹내 j 산업의 산출

$E_{ij,t}$: i 그룹내 j 산업의 에너지 소비

$S_{i,t}$: i 그룹의 산출비중 ($= \frac{Y_{i,t}}{Y_t}$)

$S_{ij,t}$: i 그룹내 j 산업의 산출비중 ($= \frac{Y_{ij,t}}{Y_{i,t}}$)

위 (3)식의 분해 결과는 (4)식과 같다⁶⁾. 여기서 가중치는 LMDI I 방식⁷⁾을 적용한다. 참고로 LMDI II 방식의 경우 가중치는

$$w_{ij}^* = L(w_{ij,T}, w_{ij,0}) / \sum_j L(w_{ij,T}, w_{ij,0}), w_{ij,T} = \frac{E_{ij,T}}{E_T}, w_{ij,0} = \frac{E_{ij,0}}{E_0} \text{ 이다.}$$

$$\begin{aligned} \frac{I_T}{I_0} &= \exp \left\{ \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{n_k} w_{ij}^* \left(\ln \frac{S_{i,T}}{S_{i,0}} + \ln \frac{S_{ij,T}}{S_{ij,0}} + \ln \frac{I_{ij,T}}{I_{ij,0}} \right) \right\} \quad (4) \\ &= D_{S_i} \cdot D_{S_{ij}} \cdot D_I \end{aligned}$$

$$\text{여기서, } w_{ij}^* = \frac{L(E_{ij,T}, E_{ij,0})}{L(E_T, E_0)}$$

이 경우 두 시점 간 에너지 집약도의 변화비율은 식 (4)의 우변 3개항의 곱이 된다. 이들 3개 항은 각각 구조변화 효과, 하부 구조변화 효과, 집약도 효과를 나타내게 된다. 즉,

$$D_{S_i} : \text{그룹간 구조효과(구조효과)} = \exp \left(\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{n_k} w_{ij}^* \ln \frac{S_{i,T}}{S_{i,0}} \right)$$

$$D_{S_{ij}} : \text{그룹내 구조효과(하부 구조효과)} = \exp \left(\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{n_k} w_{ij}^* \ln \frac{S_{ij,T}}{S_{ij,0}} \right)$$

$$D_I : \text{집약도효과} = \exp \left(\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{n_k} w_{ij}^* \ln \frac{I_{ij,T}}{I_{ij,0}} \right)$$

6) 승법의 경우, 기본적으로 식 (3)의 양변에 로그를 취한 뒤 시간 미분한 다음 근사치를 구하면 식 (4)가 된다. 자세한 도출법은 Liu (2004)를 참조.

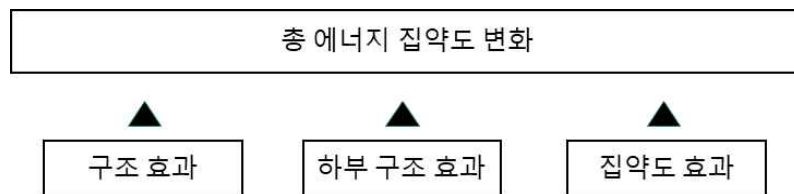
7) LMDI I과 II는 가중치로 구분된다. 추정 결과는 매우 유사하나(Ang et al., 2003; 김수이·김현석, 2011), LMDI I은 일관성(consistency) 유지가 가능하다는 장점이 있다(Zhao et al., 2010).

이를 통해 D_S (구조 효과)가 D_{S_1} 와 D_{S_2} 의 두 구조 효과로 구분되었다. 첫 번째 구조효과 D_{S_1} 은 전체 산출에서 에너지 고집약 그룹, 중집약 그룹과 에너지 저집약 그룹의 산출 비중 변화로 인한 그룹간 구조변화 효과(between structural change effect)이고, 두 번째 구조효과 D_{S_2} 는 각 그룹 내에서 소속 업종의 산출 비중 변화로 인한 그룹 내 구조변화 효과(within structural change effect)이다. 즉,

$$D_S = D_{S_1} \cdot D_{S_2} \quad (5)$$

이를 그림으로 나타내면 다음과 같다.

<그림 3> 다계층 수평 모형 개념도

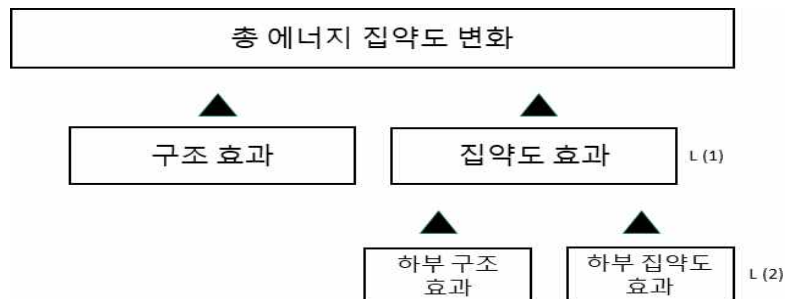


자료: Xu and Ang (2014) 참고

3.2.2.2. 다계층 위계 모형

다계층 위계 모형(MH 모형)은 에너지 집약도 효과를 하부 그룹의 구조효과와 에너지 집약도 효과로 세분하여 파악하는 것이 가능하다. MH 모형은 Xu and Ang(2014)의 multilevel hierarchical 모형을 그대로 이용하였다.

<그림 4> 다계층 위계 모형의 개념도



자료: Xu and Ang (2014) 참고

이 모형에서는 먼저 총 에너지 집약도 변화 효과를 추정한 후, 이를 그룹별로 하부 구조효과와 하부 집약도효과로 구분하여 분석한다. 그룹은 에너지 고집약, 중집약, 저집약 산업이다. MH 모형의 1단계 즉, L(1) 식은 앞서 살펴본 기본 모형과 동일하다. 다만 i 가 그룹1 = 에너지 고집약 그룹, 그룹2 = 중집약 그룹, 그룹3 = 저집약 그룹으로 바뀐다. 즉,

$$I_t = \sum_{i=1}^K I_{i,t} = \sum_{i=1}^K \frac{Y_{i,t}}{Y_t} \frac{E_{i,t}}{Y_{i,t}} = \sum_{i=1}^K S_{i,t} I_{i,t} \quad , \quad (6)$$

$i = 1, \dots, K$ 개 그룹

여기서 에너지 집약도는 다음과 같이 추가 분해된다. 각 그룹의 에너지 집약도 $I_{i,t} (= \frac{E_{i,t}}{Y_{i,t}})$ 는 식 (7)에서와 같이 각 그룹내 하부 개별 산업들의 비중 $S_{ij,t} (= \frac{Y_{ij,t}}{Y_{i,t}})$ 와 집약도 $I_{ij,t} (= \frac{E_{ij,t}}{Y_{ij,t}})$ 의 곱으로 표현된다(Xu and Ang, 2014; USDOE, 2003). 여기서 j 는 각 그룹내 개별 산업들(n_k)에 해당한다.

$$I_{i,t} = \frac{E_{i,t}}{Y_{i,t}} = \sum_{j=1}^{n_k} \frac{Y_{ij,t}}{Y_{i,t}} \frac{E_{ij,t}}{Y_{ij,t}} = \sum_{j=1}^{n_k} S_{ij,t} I_{ij,t} \quad (7)$$

이를 종합하면, 다음과 같다.

$$I_t = \sum_{i=1}^K S_{i,t} I_{i,t} = \sum_{i=1}^K S_{i,t} \sum_{j=1}^{n_k} S_{ij,t} I_{ij,t} \quad (8)$$

위 (8)식을 LMDI 기법을 이용하여 분해하면, (9)식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{I_T}{I_0} &= \exp \left\{ \sum_{i=1}^K w_i^* \left(\ln \frac{S_{i,T}}{S_{i,0}} + \ln \frac{I_{i,T}}{I_{i,0}} \right) \right\} \quad (9) \\ &= \exp \left\{ \sum_{i=1}^K w_i^* \left(\ln \frac{S_{i,T}}{S_{i,0}} + \sum_{j=1}^{n_k} w_{ij} \left(\ln \frac{S_{ij,T}}{S_{ij,0}} + \ln \frac{I_{ij,T}}{I_{ij,0}} \right) \right) \right\} \\ &= D_S \cdot D_{S_2} \cdot D_{I_2} \\ &\quad (\because D_I = D_{S_2} \cdot D_{I_2}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \exp \left\{ \sum_{i=1}^K w_i^* \left(\ln \frac{S_{i,T}}{S_{i,0}} + \sum_{j=1}^{n_k} \bar{w}_{ij} \left(\ln \frac{S_{ij,T}}{S_{ij,0}} + \ln \frac{I_{ij,T}}{I_{ij,0}} \right) \right) \right\} \\
 &= D_S \cdot D_{S_2} \cdot D_{I_2} \\
 &\quad (\because D_I = D_{S_2} \cdot D_{I_2})
 \end{aligned}$$

$$\text{여기서, } w_i^* = \frac{L(E_{i,T}, E_{i,0})}{L(E_T, E_0)}, \quad \bar{w}_{ij} = \frac{L(E_{ij,T}/Y_{i,T}, E_{ij,0}/Y_{i,0})}{L(E_{i,T}/Y_{i,T}, E_{i,0}/Y_{i,0})}$$

두 시점 간 에너지 집약도 변화는 D_S (에너지 구조효과)와 D_I (에너지 집약도 효과)의 곱으로 나타낼 수 있다. D_I (에너지 집약도 효과)는 D_{S_2} (하위부문 구조효과)와 D_{I_2} (하위부문 에너지 집약도 효과)의 곱이다. 위 식의 분해 결과는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 D_S : \text{구조효과} &= \exp \left\{ \sum_{i=1}^K w_i^* \ln \left(\frac{S_{i,T}}{S_{i,0}} \right) \right\} \\
 D_I : \text{집약도효과} &= \exp \left\{ \sum_{i=1}^K w_i^* \ln \left(\frac{I_{i,T}}{I_{i,0}} \right) \right\} \\
 D_{S_2} : \text{하부 구조효과} &= \exp \left[\sum_{i=1}^K w_i^* \left\{ \sum_{j=1}^{n_k} \bar{w}_{ij} \ln \left(\frac{S_{ij,T}}{S_{ij,0}} \right) \right\} \right] \\
 D_{I_2} : \text{하부 집약도효과} &= \exp \left[\sum_{i=1}^K w_i^* \left\{ \sum_{j=1}^{n_k} \bar{w}_{ij} \ln \left(\frac{I_{ij,T}}{I_{ij,0}} \right) \right\} \right]
 \end{aligned}$$

4. 추정 결과

2000~2016년 기간 제조업의 에너지 집약도 변화에 영향을 미친 요인을 구조변화 효과, 그리고 에너지 집약도 개선 효과로 나누어 추정하였다. 추정 모형은 앞에서 제시한 승법방식의 LMDI 기본 모형(L1, L2), 다계층 수평 모형(MP), 다계층 위계 모형(MH)을 사용하였다. 승법 방식은 완전분해가 가능하고, 분석결과치의 직접 비교가 가능한 장점이 있으나, 총 변화가 분해 요소인 구조, 에너지 집약도 요소의 합으로 표현되는 방식이 아니기 때문에 결과치를 이해하는 데 어려움이 있다. 이러한 점을 보완하기 위해 본 연구에서는 추정 결과를 기준연도 변경 방

식을 이용하여 연평균 증가율을 계산하여 제시함으로써 결과를 좀 더 쉽게 이해할 수 있도록 하였다⁸⁾.

<표 4>에 제시된 추정 결과를 보면, 모든 모형에서 동일하게 기준년도에 대비한 비교연도의 에너지 집약도는 0.707로 29.3% 하락하였다. 즉 단위생산당 에너지 투입량이 그만큼 줄어들면서 에너지 효율은 반대로 높아진 것이다. 이를 기준년도 변경 방식(rolling base year)으로 환산하면 -2.15%, 즉 제조업 전체 에너지 효율은 분석기간 중 연평균 2.15% 만큼 향상된 것임을 쉽게 이해할 수 있다.

L1 모형은 에너지 고집약 그룹과 중집약, 저집약 그룹의 합계 데이터를 이용한 그룹 차원의 분석이다. L1 모형 분석 결과 구조효과와 집약도 효과는 각각 0.834, 0.847로 나타났다. 이는 연평균 변화율로는 다음과 같이 설명 가능하다. 2000~2016년 기간 중 제조업 에너지 집약도는 2.15% 낮아졌는데, 이는 구조 효과와 그룹간 에너지 집약도 효과 각각 -1.13%, -1.03%에 기인하는 것이다. 즉 제조업 에너지 효율 개선에는 구조 효과가 그룹내 에너지 집약도 효과보다 더 크게 나타났다.

L2 모형은 9개의 개별 산업 데이터를 그룹화하지 않고 이용한 분석모형이다. L2 모형 분석 결과 구조 효과가 0.844(연평균 -1.06%), 에너지 집약도 효과가 0.838(연평균 -1.10%)로 추정되었다. 즉 구조효과와 에너지 집약도 효과가 각각 -1.06%, -1.10%로 연평균 증가율 -2.15% 변화에 기여하고 있음을 확인할 수 있다. L1 모형과는 달리 개별 업종들을 그룹화 하지 않은 L2 모형에서 에너지 집약도 효과가 구조 효과보다 약간 더 크게 나타났다. 이처럼 구조 효과도 그룹으로 묶는가, 아닌가에 따라 달라짐을 알 수 있다.

다계층 모형인 MP 모형은 구조효과를 그룹간 구조효과와 그룹내 구조효과로 구분할 수 있다. 즉, L2의 구조효과 0.844는 그룹간 구조효과 0.834와 그룹내 구조효과 1.011로 구분된다. 그룹간 구조효과가 그룹내 구조효과보다 더 많이 에너지 집약도 개선에 영향을 미쳤음을 파악할 수 있다.

또 다른 다계층 모형인 MH 모형으로는 전체 구조 효과와 전체 에너지 집약도 효과는 L1 모형의 추정치와 동일하지만, 이를 그룹별로 세분해서 파악할 수 있다. 아래 <표 4>에서 보듯이 MH 모형에서 추정한 에너지 집약도 변화를 그룹별로 살펴보면, 에너지 저집약 그룹은 0.784, 중집약 그룹은 0.686, 고집약 그룹은

8) 기준년도 변경 방식(rolling base year)을 이용한 시계열 분석 시, 전년 대비 값을 그대로 이용하는 방식(나인강·이성근, 2008)과 비교년도를 누적하여 분석하는 방식(김수이·김현석, 2011)이 있는데, 본 연구에서는 후자의 방식을 사용한다.

0.942로 각각 분석기간 중 약 21.6%, 31.4%, 5.8%의 에너지 효율 향상을 보였다. 이는 각 그룹별 에너지 효율이 각각 연평균 1.51%, 2.33%, 0.37% 향상되었음을 의미한다. 에너지 중집약 그룹의 에너지 향상 비율이 가장 높고, 반대로 에너지 고집약 그룹의 에너지 효율 향상 비율이 가장 낮은 것이다. 에너지 고집약 그룹에 속하는 1차금속·비철금속업 등 에너지 다소비 산업의 에너지 효율 향상이 크지 않았기 때문으로 분석된다.

MH 모형의 장점은 전체 제조업 에너지 집약도 효과를 하부 그룹별 에너지 집약도 효과와 하부 구조효과로 구분하여 추정 가능하다는 점이다. 다음 <표 4>에서 보듯이 전체 에너지 집약도 효과 0.847은 하부 에너지 집약도 효과 0.838과 하부 구조 효과 1.011로 구분된다. 즉, 전체 제조업 에너지 효율 개선은 그룹 하부 에너지 집약도 효과에 대부분 기인하고 있고, 하부 구조 효과는 미미하지만 오히려 에너지 효율 향상을 저해하는 방향으로 진행되었음을 알 수 있다.

MH 모형의 그룹별 에너지 집약도 변화 효과는 그룹별 하부 에너지 집약도 변화 효과와 하부 구조 변화 효과로 분리하여 추정할 수 있다. <표 4>를 보면, 에너지 저집약, 중집약, 고집약 그룹 각각의 에너지 집약도 변화 추정치 0.784, 0.686, 0.942는 에너지 집약도 효과 각각 0.719, 0.687, 0.946과 구조 효과 각각 1.091, 0.998, 0.995로 분리된다. 이것을 보면 세부 그룹별로도 에너지 집약도 개선 현상이 두드러지지만, 구조 효과는 미미한 것임을 알 수 있다. 김수이, 김현석(2011), 박정욱·김수이(2013)의 연구에서도 우리나라 에너지 소비 변화에 있어서 구조 효과의 영향이 크지 않음을 지적한 바 있다.

각 모형간의 상관관계를 보면, 지금까지의 분석을 통해서 보듯이 기본모형 L1은 MH 모형을 통해 전체 에너지 집약도 효과를 각 그룹별 에너지 집약도 효과를 추가적으로 추정할 수 있다. 기본 모형 L2는 MP 모형을 이용하여 전체 구조 효과를 그룹간 구조 효과와 그룹내 구조 효과로 나누어 파악 가능함을 알 수 있다.

<그림 5>는 기준연도 변경 방식으로 효과를 누적 추정한 것이다. 기준연도와 비교연도를 매년 이동하면 분석 기간 동안의 변동의 흐름과 특징을 더 자세히 파악할 수 있다. 이 분석은 그룹을 구분하지 않은 기본 모형 분석(L2)의 결과이다.

분석기간 중 에너지 집약도 효과는 음의 부호를 갖는다. 즉 에너지 소비 증가를 상쇄하는 요인으로 작용하였다. 그러나 2007년을 저점으로 다시 소폭 상승하였다. 이는 에너지 효율 개선 속도가 둔화 내지 악화되고 있음을 보여주는 것이

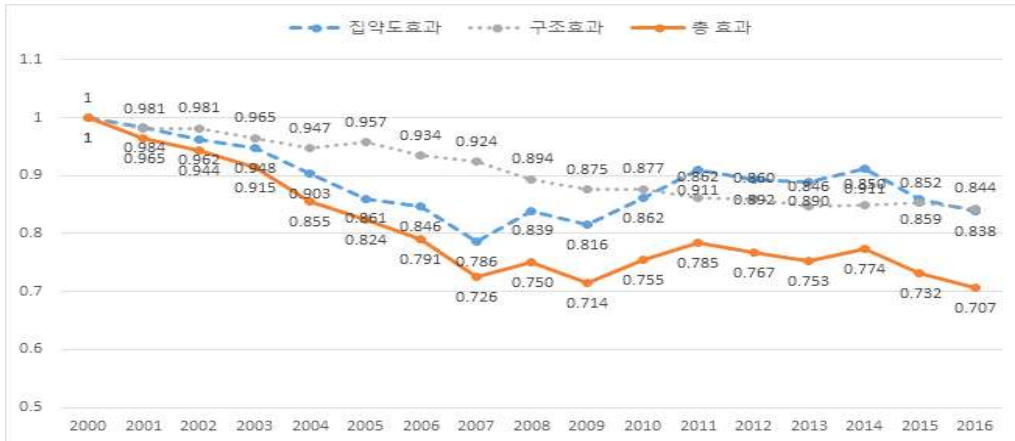
다. 이성인 (2011)은 2000년부터 2010년까지 우리나라 제조업의 에너지 집약도는 연평균 4.6% 개선되었으며 이는 에너지 집약도 효과 2.4%, 구조효과 2.3% 개선에 기인한 것으로 추정된 바 있다. 본 연구의 2000~2016년 기간 에너지 집약도가 연평균 2.15%(에너지 집약도 효과와 구조효과가 각각 1.10%, 1.06%) 개선된 것과 비교하면 에너지 집약도는 더 크게 향상되었고, 따라서 에너지 집약도 효과와 구조 효과도 더 크게 추정되었다. 그러나, 본 연구에서 파악되듯이 2007년 이후 우리나라 제조업의 에너지 집약도 개선이 둔화되고, 구조 조정도 크지 않음을 감안하면 두 연구 결과는 일맥상통함을 알 수 있다.

<표 4> 제조업 에너지 집약도 변화 요인 분해(2000년, 2016년)

모형	집약도 변화 (IT/I0)	구조 효과 (D_s)		집약도 효과 (D_I)		
		그룹간 구조 효과 (D_{s_1})	그룹내 구조 효과 (D_{s_2})	하부 집약도 효과 (D_{I_1})	하부 구조 효과 (D_{I_2})	
		단 일	L1	0.707 (-2.15)	0.834 (-1.13)	0.847 (-1.03)
계 층	L2	0.707 (-2.15)	0.844 (-1.06)	0.838 (-1.10)		
	MP	0.707 (-2.15)	0.834 (-1.13)	1.011 (0.07)	0.838 (-1.10)	
다 계 층	전체	0.707 (-2.15)	0.834 (-1.13)	0.847 (-1.03)		
	MH	저집약	0.784 (-1.51)		0.838 (-1.10)	1.011 (0.07)
		중집약	0.686 (-2.33)		0.719 (-2.04)	1.091 (0.54)
		고집약	0.942 (-0.37)		0.687 (-2.32)	0.998 (-0.01)
				0.946 (-0.35)	0.995 (-0.03)	

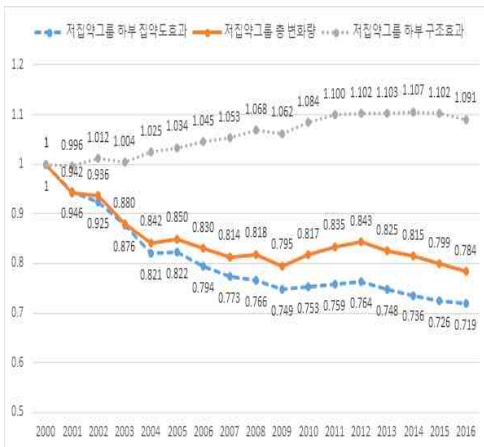
* 괄호 안의 숫자는 연평균 증가율(%)임.

<그림 5> 제조업 에너지 집약도 변화 요인 분해
(L2 모형, 2000-2016년, 기준연도 변경 방식)

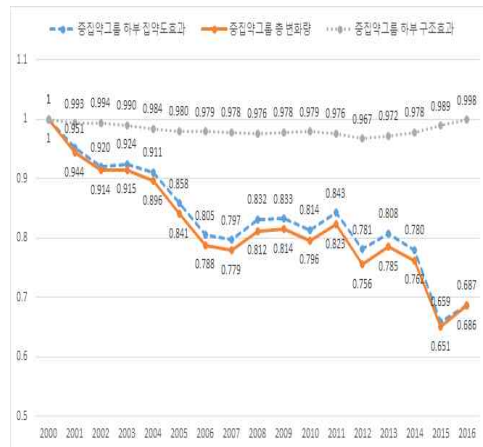


<그림 6> 제조업 그룹별 에너지 집약도 변화 요인 분해
(M2 모형, 2000~2016년, 기준연도 변경 방식)

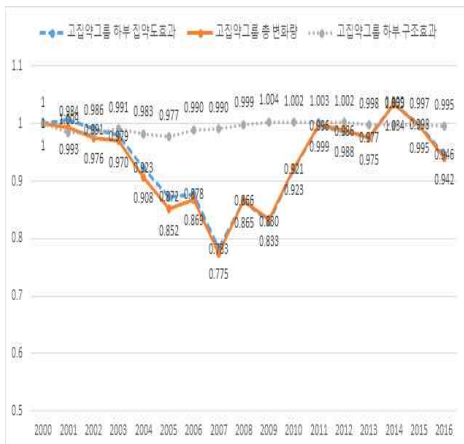
에너지 저집약그룹



에너지 중집약그룹



에너지 고집약그룹



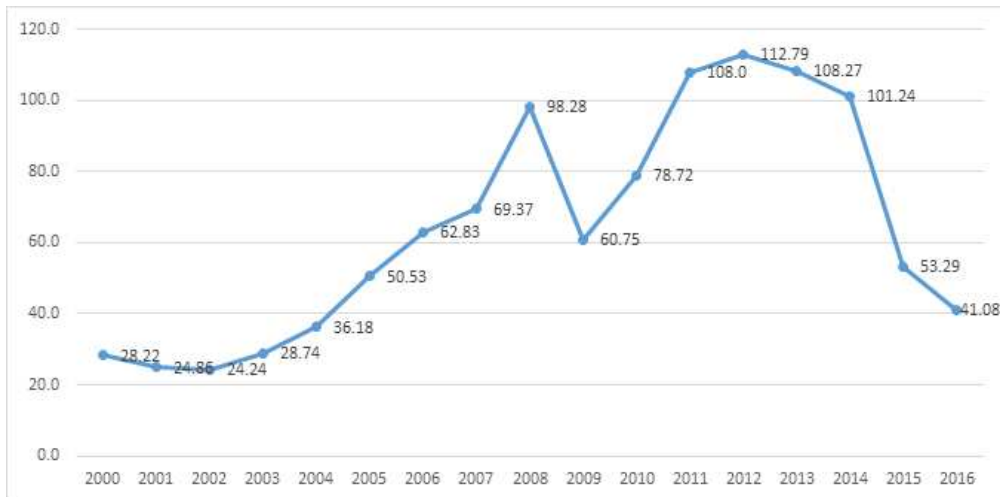
전체



<그림 6>은 다계층 모형 M2의 그룹별, 전체 효과가 분석기간 중 어떻게 변화하였는지를 보여준다. 에너지 저집약 그룹에서 에너지 집약도 효과는 분석 전 기간에 걸쳐 에너지 집약도 개선에 기여하고 있는 것을 알 수 있다. 특히 2000년대 중반부터 이러한 현상은 두드러진다. 에너지 집약도 개선에 구조효과가 크게 기여하지 않는 반면 에너지 집약도 효과는 지속적으로 크게 기여하고 있다. 에너지 중집약 그룹에서 에너지 집약도 효과는 전 기간 에너지 집약도 개선에 크게 기여한다. 구조효과도 미약하지만 개선에 기여하고 있는 것으로 나타났다. 에너지 고집약 그룹에서 에너지 집약도 총 변화는 에너지 집약도 효과와 거의 일치한다. 특히 2007년 이후의 변화는 매우 유사하다. 2007년을 저점으로 에너지 집약도 개선이 큰 폭으로 둔화되고 있다. 이러한 에너지 고집약 그룹의 변화양상은 제조업 전체 에너지 집약도 변화에도 영향이 크다. 에너지 고집약 그룹 에너지 집약도 효과의 변화 패턴과 전체 에너지 집약도 효과 변화 패턴이 유사하게 나타난다.

<그림 7> 우리나라 원유 수입단가(CIF 기준)

단위:US\$/bbl



자료: 국가에너지통계종합정보시스템

<그림 7>은 분석 기간 원유 수입가격을 나타낸다. 제조업 에너지 집약도 효과는 유가 흐름과 밀접한 관련이 있다(이성인, 2011). 에너지 집약도 효과와 비교해보면, 원유 가격이 치솟기 시작한 2004년부터 2007년까지 에너지 집약도는 꾸준히 개선되었다. 그러나 2000년 이후 최고가를 기록한 2011~2014년 기간 중 에너지 집약도는 크게 개선되지 않았다. 1차금속 산업 등 에너지 집약산업에서 고유가에 따른 성장 제약이 있었기 때문으로 추정된다.

5. 요약 및 시사점

본 연구에서는 2000년부터 2016년까지 에너지 통계자료와 업종별 산출자료를 활용하여 제조업 9개 업종의 에너지 효율 변화와 효율 변화에 영향을 준 요인들, 각 요인별 영향의 크기를 추정하였다. 추정에는 LMDI I 승법 방식을 사용하였으나, 일반적으로 많이 사용하는 단일 계층 모형과 더불어 MP, MH 모형과 같은 다계층 모형을 개발, 활용하였다.

분석 결과, 2000년에 대비한 2016년의 제조업 에너지 집약도는 0.707로 2000년보다 29.3% 하락하였다. 즉 단위생산당 에너지 투입량이 그만큼 줄어들면서 에너지 효율은 반대로 높아진 것이다. 이를 연평균 변화율로 환산하면 -2.15%, 즉 제조업 전체 에너지 효율은 분석기간 중 연평균 2.15% 만큼 향상된 것임을 쉽게 이해할 수 있다. 제조업 에너지 효율 향상에는 개별 업종의 에너지 효율 향상 효과와 에너지 고집약 산업에서 저집약 산업으로 구조 변화가 영향을 미친 것으로 나타났다. 이러한 에너지 집약도 효과와 구조 효과는 비슷하게 제조업 전체 에너지 효율을 매년 각각 1% 정도 개선시키는 데 기여한 것으로 추정되었다.

그러나 시기를 나누어서 분석하면, 2000년 이후 꾸준히 지속되던 제조업의 에너지 효율 개선은 2007년을 기점으로 정체 상태에 들어가는 것으로 나타났다. 이것은 2007년부터 제조업 내에서 구조 효과가 크게 둔화된 반면 개별 업종의 에너지 효율은 오히려 악화되기 시작한 때문으로 분석된다. 특히 이 시기는 유가가 배럴당 100달러를 상회하던 초고유가였음을 감안하면 제조업의 에너지 절약 노력이 둔화된 것은 상당히 이례적인 현상으로 지적된다.

본 연구에서는 기존 연구와는 달리 단일 계층이 아닌 다계층 모형 분석을 시도하였다. 우선 다계층 MP 모형으로 전체 구조효과를 그룹간 구조효과와 그룹내 구조효과로 구분하여 파악하였다. 그 결과 그룹간 구조효과가 그룹내 구조효과보다 더 많이 에너지 집약도 개선에 영향을 미친 것으로 드러났다. 또 다른 다계층 모형인 MH 모형을 이용하여 전체 구조 효과와 전체 에너지 집약도 효과를 그룹별로 세분해서 파악하였다. MH 모형에서 추정한 에너지 집약도 변화를 에너지 저집약, 중집약, 고집약의 3개 그룹으로 구분하면 분석기간 중 각각 연평균 1.51%, 2.33%, 0.37% 효율 향상되었다. 에너지 중집약 그룹의 에너지 효율 향상 비율이 가장 높고, 반대로 에너지 고집약 그룹의 에너지 효율 향상 비율이 가장 낮은 것이다. 에너지 고집약 그룹에 속하는 1차금속·비철금속업 등 에너지 다소비 산업의 에너지 효율 향상이 크지 않았기 때문으로 분석된다. 또 전체 에너지

집약도 변화 효과는 하부 그룹별 에너지 집약도 변화 효과와 그룹별 구조 변화 효과로 분리하여 추정해 보면 그룹별로도 에너지 집약도 개선 현상이 두드러지지만, 구조 효과는 미미한 것임을 알 수 있다.

단일 계층 모형과 다계층 모형간의 상관관계를 보면, 기본모형 L1은 MH 모형을 통해 전체 에너지 집약도 효과를 각 그룹별 에너지 집약도 효과를 추가적으로 추정할 수 있다. 기본 모형 L2는 MP 모형을 이용하여 전체 구조 효과를 그룹간 구조 효과와 그룹내 구조 효과로 나누어 파악 가능함을 알 수 있다.

기존 연구에서는 총 변화가 분해 요소인 구조, 에너지 집약도 요소의 합으로 표현되는 방식이 아니기 때문에 결과치를 이해하는 데 어려움이 있었다. 이러한 점을 보완하기 위해 본 연구에서와 같이 추정 결과를 기준연도 변경 방식을 이용하여 연평균 증가율로 환산하면 분석 결과가 훨씬 더 쉽게 설명되는 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 다음과 같은 에너지 정책적 시사점을 얻을 수 있다. 첫째, 에너지 효율 향상 정책의 강화 필요성이다. 앞서 살펴보았듯이 꾸준히 개선되던 에너지 집약도 하락 현상이 2007년 이후 둔화 내지는 정체되고 있다. 에너지 시장의 불확실성과 기후변화 저감, 그리고 에너지 원가 절감을 통한 기업 경쟁력 제고 측면에서 기업 차원의 에너지 효율 향상 노력과 동시에 이를 권장, 지원하는 정책적 뒷받침이 요구된다. 박희천 (2001)에서도 일찍이 제조업의 에너지 효율 향상을 위해서는 보다 적극적인 고부가가치화와 에너지효율화 정책이 필요함을 지적한 바 있다.

둘째, 구조 개선의 필요성이다. 본 분석을 통해서 제조업 내에서 에너지 다소비 업종에서 에너지 저소비 업종으로의 비중 변화는 시간이 갈수록 둔화되고 있음을 알 수 있다. 따라서, 제조업의 에너지 효율 개선을 위해서 구조조정의 원활한 이행을 위한 정책의 강화 필요성이 대두된다.

셋째, 에너지 다소비 산업에 대한 에너지 효율 점검과 대책 강화의 필요성이다. 본 연구에서 보듯이 제조업 하부 그룹 가운데 에너지 고집약 그룹에서는 에너지 집약도 개선이나 구조 조정 효과가 가장 미약한 것으로 나타났다. 가장 에너지 소비가 많은 업종에서 가장 효율 개선이 지연되고 있는 것이다. 따라서, 이들 산업을 대상으로 에너지 효율 개선이 부진한 원인을 먼저 파악하여야 하며, 이를 토대로 개선 대책을 마련하여 시행하는 것이 효과적인 제조업 에너지 효율 개선 정책이 될 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 강운영, 최도영, & 이상열. (2013). *과거 5년간 에너지 수요증가 요인분석*, 에너지경제연구원.
- 김수이, & 김현석. (2011). LMDI 방법론을 이용한 국내 제조업의 에너지 소비 요인 분해 분석. *에너지경제연구*, 10(1), 49-76.
- 김철현, & 강병욱. (2017). *국내 에너지 소비 변화의 요인 분해 분석*, 에너지경제연구원.
- 김태헌, 임덕오, & 김윤경. (2015). 2008~2011년 산업부문의 에너지소비 및 온실가스 배출 급증에 대한 요인분해연구. *에너지경제연구*, 14(3), 203-227.
- 김화영, & 김지효. (2008). 주요 분해분석 방법론을 이용한 에너지유 소비 변화 분석. *한국지구시스템공학회지*, 45(2), 91-100.
- 나인강, & 이성근. (2008). 산업부분 에너지 효율 변화요인 분석. *자원·환경경제연구*, 17(2), 255-286.
- 문혜정. (2019). *LMDI 방법론을 이용한 우리나라 에너지 소비 변화요인 분석*, 박사학위논문, 충남대학교.
- 문혜정, & 이기훈. (2019). 다계층 LMDI 분해법을 이용한 지역에너지 소비 변화의 영향 분석. *경영경제연구*, 41(2), 221-243.
- 박정욱, & 김수이. (2013). 한국과 일본의 산업부분 에너지 소비에 대한 LMDI 요인 분해 분석. *에너지경제연구*, 12(1), 67-103.
- 박희천. (2001). 한국 제조업의 에너지효율 향상평가. *자원·환경연구경제연구*, 10(2), 135-159.
- 이성근, 안영환, & 나인강. (2007). 국가 에너지절약 및 효율향상 추진체계 개선 방안 연구-산업부문의 에너지효율 평가, *에너지경제연구원 연구보고서*, 1-196.
- 이성인. (2011). 저소비 고효율 경제사회구축을 위한 국가에너지효율화 추진전략 연구-제조업 업종별 에너지효율 평가 및 에너지 절감잠재량 추정 II, 에너지경제연구원, 기본보고서, 12-15.
- 이성인. (2012). 저소비·고효율 경제사회 구축을 위한 국가 에너지효율화 추진전략 연구-제조업 업종별 에너지효율성 및 절약 잠재량 평가, *에너지경제연구원, 기본 보고서*, 12-15.
- 임재규, & 김종익. (2014). 국내 산업부문의 전력·에너지 소비효율 비교·분석: LMDI 요인분해 방법론 활용. *에너지경제연구*, 13(1), 121-143.
- Ang, B. W. (2005). The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide. *Energy Policy*, 33(7), 867-871.

- Ang, B. W. (2016). *A simple guide to LMDI decomposition analysis*. Singapore, National University of Singapore. Department of Industrial and Systems Engineering.
- Ang, B. W., & Choi, K. H. (1997). Decomposition of aggregate energy and gas emission intensities for industry: a refined Divisia index method. *The Energy Journal*, 18(3), 59–73.
- Ang, B. W., & Liu, F. L. (2001). A new energy decomposition method: Perfect in decomposition and consistent in aggregation. *Energy*, 26(6), 537–548.
- Ang, B. W., & Liu, F. L., Chew, E. P. (2003). Perfect decomposition techniques in energy and environmental analysis. *Energy Policy*, 31(14), 1561–1566.
- Department of Energy(EERE USDOE), 2003. Summary: Energy indicators system: Index construction methodology, http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/06/f24/index_methodology.pdf
- González P. F., Landajo M., & Presno M. J. (2014). Multilevel LMDI decomposition of changes in aggregate energy consumption. A cross country analysis in the EU-27. *Energy Policy*, 68, 576–584.
- Jiang, J., Ye, B., Xie, D., & Tang J. (2017). Provincial-level carbon emission drivers and emission reduction strategies in China: combining multi-layer LMDI decomposition with hierarchical clustering. *Journal of Cleaner Production*, 169, 178–190.
- KESIS(국가에너지통계종합정보시스템) www.kesis.net
- KOSIS(국가통계포털) kosis.kr
- Liu, F. L. (2004). *Decomposition analysis applied to energy: some methodological issues*, Master Dissertation. National University of Singapore.
- Liu, N., Ma, Z., Kang, J., & Su, B. (2019). A multi-region multi-sector decomposition and attribution analysis of aggregate carbon intensity in China from 2000 to 2015. *Energy Policy*, 129, 410–421.
- Xu, X. Y., & Ang, B. W. (2014). Multilevel index decomposition analysis: approaches and application. *Energy Economics*, 44, 375–382.
- Zhao, X., Xu, H., Yang, J., & Chen, Z. (2010, June). *Study on Chinese industrial SO₂ emission intensity based on LMDI I and LMDI II method*. In 2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (pp. 1665–1668). IEEE.

An Analysis on the Change of Energy Efficiency in Korean Manufacturing Industry*

Moon, Hyejung¹

Lecturer, Department of Economics, Chungnam National University

Lee, Kihoon²

Emeritus Professor, Department of Economics, Chungnam National University

Abstract

This study examines the energy efficiency change of Korean manufacturing industry from 2000 to 2016 by LMDI decomposition method. In particular, we focused on the change of energy intensity and compared and analyzed energy high-intensive, midium-intensive and low-intensive groups using LMDI multi-level model. As a result, the structural change effect and energy intensity effect contributed to improvement of energy intensity during the analysis period. While the energy efficiency of the low-energy and midium-energy groups was significantly improved, that of the energy high-intensive group was relatively minimal. Therefore, it is recommended that the energy efficiency policy of the manufacturing sector should be focused on the energy-intensive industries. This study shows that the LMDI multi-level model is useful for distinguishing between-group effect and within-group effect and for identifying the relationship between single level model and multi-level model.

Keywords : Manufacturing industry, Energy efficiency, LMDI, Multi-level analysis

Received June 17, 2020 Co-author, khl@cnu.ac.kr

Revised October 06, 2020

Accepted October 13, 2020

* This paper states that the first author's doctoral claim paper, Chapter IV, has been revised and supplemented. This paper complies with the ethical codes set by NRA and AJBC.

1. First Author(Corresponding Author), canon21@hanmail.net

2 Co-author, khl@cnu.ac.kr