

# LMDI 요인 분해분석을 이용한 우리나라 제조업 전력화 현상에 관한 연구

한 준<sup>†</sup>

녹색기술센터 연구원

(2014년 10월 13일 접수, 2015년 2월 25일 수정, 2015년 2월 27일 채택)

## LMDI Decomposition Analysis for Electricity Consumption in Korean Manufacturing

Joon Han<sup>†</sup>

Researcher, Green Technology Center - Korea

(Received 13 월10 2014, Revised 25 February 2015, Accepted 27 February 2015)

### 요 약

그동안 우리나라 산업은 빠르게 전력화가 되어 왔는데, 특히 제조업에서 직접가열용으로 이용되는 에너지는 전체 에너지의 44.0%(2010년 기준)를 차지하면서 전력화가 많이 일어났다. 이 연구는 1992~2012년 기간 동안 우리나라 제조업에서 직접가열용으로 소비되는 전기사용량에 대해 로그 평균 디비시아 방식(Log Mean Divisia Index; LMDI) 분해분석을 이용하여 소비 특성을 분석하였다. 분해요인으로는 전기비중 효과, 직접가열용 비중 효과, 에너지집단위 효과, 부가가치 효과를 포함하였으며, 업종별 소비 양상도 비교하였다. 분석 결과, 우리나라 제조업에서 직접가열용 전기 소비가 증가한 것은 무엇보다 직접가열용 에너지의 전력화 현상으로 인한 영향이 가장 컸다. 업종으로는 석유화학과 1차금속 업종에서 직접가열용의 전력화 현상이 가장 크게 나타났다.

**주요어** : 제조업, 전력화, LMDI 분해분석, 직접가열용

Abstract - So far, the phenomenon of "electrification" has been deepened in Korean industry and especially direct heating energy which accounted for 44.0%(2010) of total energy consumed in Korean manufacturing has been significantly electrified. This paper decomposed electricity consumption for direct heating in Korean manufacturing from 1992 to 2012 using LMDI(Log Mean Divisia Index). This paper includes 4 different factors such as electricity proportion effect, direct heating proportion effect, energy intensity effect and added value effect. And this paper compared the consumption pattern by business type. As results, electricity proportion effect had contributed the most to the increase of electricity consumption for direct heating in Korean manufacturing. And Petrol-Chemical and Iron & Steel had the most electrification of direct heating.

**Key words** : Decomposition Analysis, LMDI, Electricity Consumption, Direct heating

## 1. 서 론

오늘날 전기는 모든 부문에서 많이 쓰이고 있는 에너지 형태이다. 전기는 타 에너지원에 비해 전달이 용이하고, 수요단에서 온실가스나 대기오염물질을 발생시키지 않으며, 여러 용도의 서비스로 변환이 용이하

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.  
Future Strategy Division, Green Technology Center - Korea  
Tel : 02-3393-3916 E-mail : joonie-han@hanmail.net

다. 때문에 그동안 전기는 타 에너지를 대체하기도 하고 신규 소비도 늘면서 지속적으로 소비량이 증가했다. 이처럼 에너지원이 다른 에너지원에서 전기로 에너지원이 대체되거나 전기설비 이용이 늘어나는 현상을 전력화(electrification)라고 한다.<sup>1)</sup> 전력화의 정도는 국제적으로 사회의 발전이나 진보, 지속가능한 발전의 정도를 나타내는 척도로도 많이 활용되고 있을 만큼<sup>2)</sup> 오늘날 전기는 중요한 에너지가 되었다.

우리나라의 전기 소비도 꾸준히 늘어 1980~2012년 기간 동안 전기소비 연평균 증가율은 13.0%에 달해 OECD 최고를 기록했으며, 2012년 최종 에너지 소비의 19.8%를 차지했다.<sup>3)</sup> 특히 우리나라 총 전기 수요의 53.4%(2012년 기준)를 차지하고 있는 산업부문(지식경제부·에너지경제연구원, 2013)은 1980~2012년 기간 동안 연평균 전기소비 증가율이 11.5%로 OECD 최고였으며, 석탄(5.1%)이나 석유(-3.0%)의 연평균 소비증가율보다 상당히 높았다(IEA & OECD, 2014). 그러면서도 2012년 전력 예비율이 3.8%까지 떨어지는 등 우리나라 전력수급 불안정이 점점 더 심각해지고 있다.

이런 상황에서 우리나라 총 전력소비의 50.5%, 산업용 전기소비의 94.5%(2012년 기준)(지식경제부·에너지경제연구원, 2013)를 차지하는 제조업에서의 전력화 양상과 정도는 우리나라 전력수급에 큰 영향을 미치기 때문에 세부적으로 분석해 볼 필요가 있다. 게다가 제조업에서 사용되는 에너지는 산업공정에 따라 다섯 가지 분야로 구분할 수 있는데,<sup>4)</sup> 이 중에서 재료나 제품 등에 직접 열을 가하는 공정인 직접가열용에서 특히 전력화가 심화되고 있다. 그러므로 우리나라 제조업 직접가열용 에너지의 전력화 현상을 살펴보는 것이 중요하다고 할 수 있다.

이 연구에서는 LMDI 분해분석 방법을 이용해서 1992~2010년 동안 우리나라 제조업에서 업종별로 이용되는 직접가열용 전기 소비의 특징을 분석하였다. 이를 위해 우리나라 제조업 산업공정의 전기소비량을

전기 비중 효과, 직접가열용 에너지 비중 효과, 에너지원단위 효과, 부가가치 효과의 4가지 요인으로 구분하여 분석하였다. 그리고 업종별 전력화 양상도 비교 분석하였다.

이 연구는 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 우리나라 산업 및 제조업에서의 전력화 현황과 전력화에 대한 선행연구를 살펴본다. 3장에서는 제조업에서의 산업공정별 에너지 분류와 지수분해분석 방법론에 대한 소개 및 분석자료에 대해 살펴본다. 4장에서는 LMDI 분석 결과를 제시하고 5장에서는 결론을 제시한다.

## 2. 전력화

### 2-1. 전력화의 개념 및 국내외 산업, 제조업의 전력화 현황

전력화의 정도를 나타낼 때 대개 전력화 비율(electrification rate)을 사용하는데, 이것은 전기 접근이 가능한 가구의 비율로서 정의되는 것이 일반적이다.<sup>5)</sup> 혹은 전력화 비율을 총 에너지 소비량 대비 전기 소비량의 비중으로 정의하기도 한다(Desbrosses, 2006; Jung & Lee, 2014; Nishio & Hoshino, 2010; Schurr et al., 1990). 이 연구에서는 산업 및 제조업의 전력화를 대상으로 하므로 총 에너지 소비량 대비 전기 소비량의 비율 개념을 전력화 비율로 정의하여 사용한다.

다음 Table 1은 OECD 국가들의 연도별 산업부문 전력화 비율은 나타낸 것이다. OECD 국가들의 산업부문 전력화 비율은 2012년 기준으로 평균 23.0% 수준이며, 우리나라는 24.0%로 OECD 평균과 비슷하다. 그러나 전력화 비율의 연평균 증가율(Compound Annual Growth Rate; CAGR)을 보면 우리나라는 2.41%로 OECD 5위이며 OECD 평균(0.06%)보다도 훨씬 높다. 이를 통해 우리나라는 산업부문에서 1970년대 이후 빠른 속도로 전력화가 일어났다는 것을 알 수 있다. 또한 우리나라 산업부문의 전력소비량은 2012년 기준으로 OECD 3위이며, 1971-2012년 동안 연평균

1) 전력화 대신 전기화라는 표현을 쓰기도 한다(현대경제연구원, 2013).

2) 세계은행(World Bank)의 세계 발전 지수(World Development indicator), 사회 진보 조사기구(Social Progress Imperative)의 사회진보지수(Social Progress Index), 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency; IAEA)의 지속가능발전 에너지 지수, UN 지속가능발전위원회(UN Commission on Sustainable Development; UNCSD)의 지속가능발전 지수, 환경성과지수(Environmental Performance Indicator; EPI) 등에서 전기 보급률을 포함하고 있다.

3) 에너지경제연구원 국가에너지통계종합정보시스템 (<http://www.ksesis.net>)

4) 이에 대한 상세한 설명은 뒤에서 기술한다.

5) 출처: Kanagawa & Nakata(2008), World Bank 성과평가지표(Corporate Scorecard) 홈페이지 (<http://corporatescorecard.worldbank.org/> 검색일자 2014.09.07)

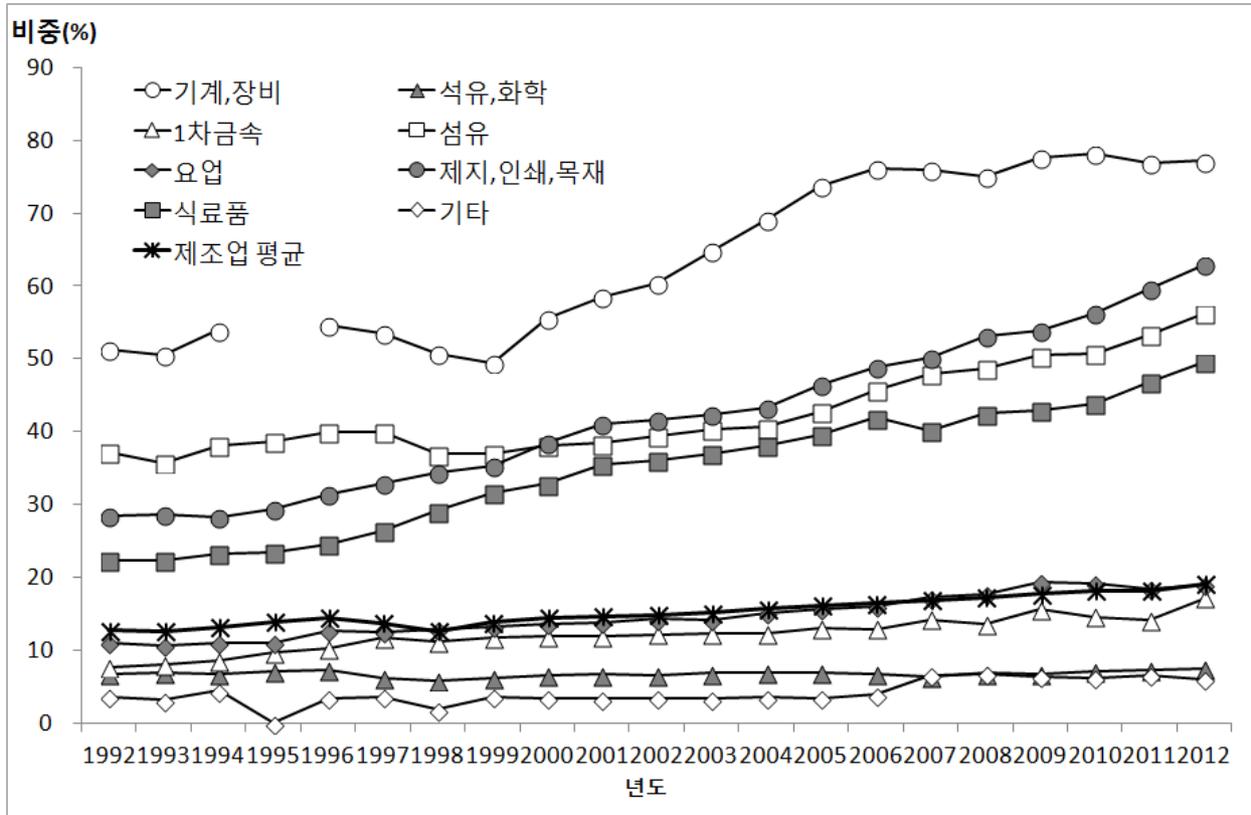
Table 1. 연도별 OECD 국가 산업부문 전력화 비율 (단위: %)

|             | 1971       | 1973        | 1980        | 1990        | 2000        | 2010        | 2012        | 1971-2012<br>CAGR |
|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|
| 아일랜드        | 7.5        | 10.2        | 12.0        | 16.9        | 21.9        | 33.1        | 31.3        | 3.5               |
| 룩셈부르크       | 9.9        | 9.6         | 12.5        | 18.0        | 37.3        | 40.8        | 34.9        | 3.1               |
| 멕시코         | 9.1        | 9.5         | 9.6         | 12.9        | 22.7        | 27.7        | 29.7        | 2.9               |
| 덴마크         | 9.5        | 9.9         | 14.0        | 24.7        | 27.0        | 28.0        | 29.4        | 2.8               |
| <b>대한민국</b> | <b>9.0</b> | <b>10.1</b> | <b>14.6</b> | <b>19.1</b> | <b>20.5</b> | <b>23.7</b> | <b>24.0</b> | <b>2.4</b>        |
| 이스라엘        | 13.3       | 14.6        | 16.0        | 20.7        | 28.4        | 30.9        | 35.0        | 2.4               |
| 체코 공화국      | 7.9        | 8.7         | 9.6         | 13.2        | 14.7        | 18.7        | 19.7        | 2.2               |
| 호주          | 9.9        | 11.2        | 13.7        | 21.9        | 23.5        | 25.0        | 24.1        | 2.2               |
| 아이슬란드       | 38.1       | 46.4        | 47.2        | 45.8        | 53.6        | 70.7        | 89.1        | 2.1               |
| 영국          | 11.9       | 12.3        | 16.3        | 20.5        | 21.9        | 26.8        | 27.6        | 2.1               |
| 이탈리아        | 13.4       | 14.0        | 18.2        | 21.6        | 26.5        | 27.9        | 29.1        | 1.9               |
| 프랑스         | 11.5       | 13.0        | 15.1        | 21.7        | 23.0        | 24.7        | 24.9        | 1.9               |
| 슬로바키아공화국    | 11.4       | 11.7        | 16.8        | 16.9        | 17.0        | 22.1        | 24.2        | 1.8               |
| 칠레          | 18.2       | 17.7        | 19.7        | 20.1        | 24.4        | 31.7        | 37.0        | 1.7               |
| 폴란드         | 10.6       | 11.1        | 12.2        | 13.6        | 16.2        | 18.7        | 21.1        | 1.7               |
| 미국          | 11.2       | 11.6        | 13.2        | 18.7        | 20.4        | 17.9        | 20.8        | 1.5               |
| 스위스         | 21.1       | 20.3        | 22.9        | 38.1        | 35.5        | 37.2        | 38.1        | 1.5               |
| 독일          | 13.9       | 14.6        | 17.0        | 21.0        | 23.9        | 24.9        | 25.2        | 1.5               |
| 터키          | 14.2       | 12.9        | 14.2        | 17.3        | 17.2        | 22.8        | 24.3        | 1.3               |
| 스웨덴         | 20.9       | 22.1        | 26.0        | 33.8        | 32.2        | 34.1        | 35.8        | 1.3               |
| 스페인         | 15.2       | 15.8        | 19.8        | 21.9        | 21.9        | 22.8        | 24.1        | 1.1               |
| 오스트리아       | 16.8       | 16.8        | 19.2        | 23.3        | 23.4        | 24.3        | 25.2        | 1.0               |
| 벨기에         | 11.1       | 11.5        | 15.0        | 19.4        | 17.5        | 17.4        | 16.6        | 1.0               |
| 헝가리         | 12.4       | 12.4        | 12.1        | 15.2        | 15.7        | 18.3        | 18.5        | 1.0               |
| 포르투갈        | 15.8       | 16.7        | 18.8        | 15.8        | 16.3        | 21.0        | 22.8        | 0.9               |
| 그리스         | 19.2       | 18.2        | 20.6        | 22.8        | 22.9        | 26.9        | 27.1        | 0.8               |
| 뉴질랜드        | 17.9       | 22.0        | 25.2        | 22.7        | 20.5        | 24.7        | 24.8        | 0.8               |
| 핀란드         | 23.3       | 20.5        | 27.1        | 26.8        | 29.2        | 28.8        | 28.9        | 0.5               |
| 일본          | 17.3       | 17.8        | 23.7        | 21.6        | 22.8        | 22.3        | 19.9        | 0.3               |
| 캐나다         | 19.1       | 17.3        | 19.1        | 23.6        | 23.8        | 22.6        | 20.2        | 0.1               |
| 네덜란드        | 10.8       | 9.3         | 9.5         | 13.7        | 14.5        | 11.8        | 11.0        | 0.1               |
| 노르웨이        | 45.8       | 46.0        | 42.9        | 50.1        | 49.1        | 45.8        | 46.8        | 0.1               |
| OECD 평균     | 13.1       | 13.5        | 15.8        | 20.1        | 21.9        | 22.0        | 23.0        | 1.4               |

주 1. 에스토니아, 슬로베니아는 자료 부재로 제외함.

2. 1971-2012년 CAGR 순으로 배열

출처: IEA & OECD(2014)



주: 1995년도 기계장비 업종 데이터는 이상치(outlier)로 판단되어 제거.  
 자료: 에너지경제연구원 국가에너지통계종합정보시스템 (<http://www.kses.net>) 재구성

Fig. 1. 제조업 업종별 총 에너지 대비 전력의 비중 추이(1992~2012) (단위: %)

증가율은 18.2%로 OECD 최고였다. 이처럼 우리나라 산업의 전력화는 속도 측면이나 양적 측면에서 빠르게 진행되어 왔다.

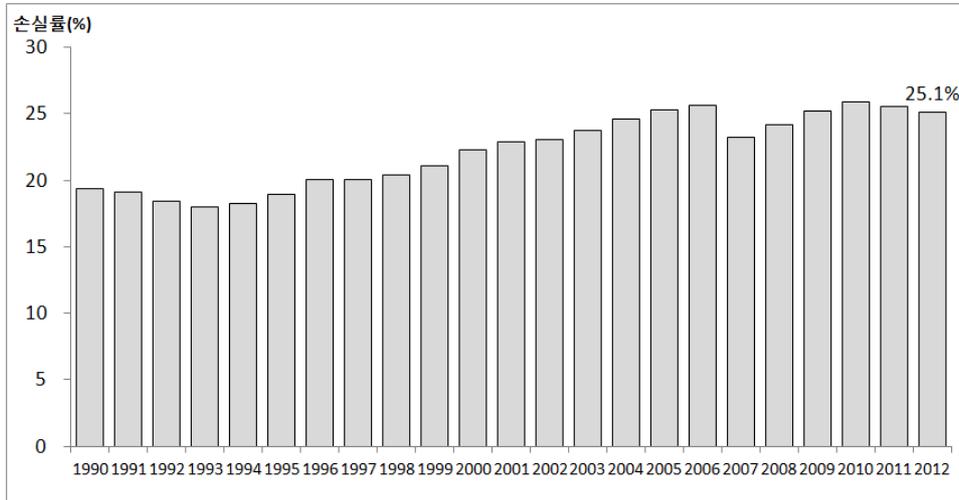
한편, 우리나라 제조업의 전력화 양상을 업종별로 살펴보면 다음 Fig. 1과 같다. 1992~2012년 기간 동안 제조업에서 사용된 총 에너지 대비 전력 비중의 추이를 업종별로 나타낸 것이다. Figure에서 보듯이, 제조업 모든 업종에서 전력 비중이 증가했으며, 평균 12.7%에서 19.1%로 1.5배 정도 증가하였다. 특히 섬유, 제지·목재·인쇄, 식료품 업종에서는 전력 비중이 2배 이상 증가했으며, 기계·장비 업종은 전력 비중이 51%에서 77%까지 증가했다.

2-2. 전력화에 대한 선행연구

전력화는 산업화 초기 단계에 있는 국가나 개도국, 농촌, 격지 등에 전기를 공급하는 것을 의미하는 농촌 전력화(rural electrification) 차원에서 주로 연구되었다. 예를 들어, 농촌 주민들의 후생 증진이나 고용, 여

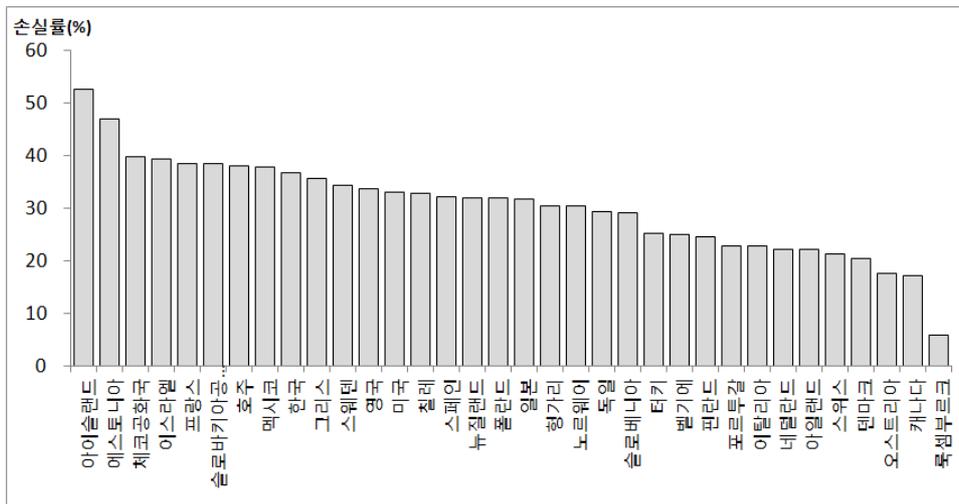
성 지위, 교육, 가구형태, 생식력, 농업 생산성 등에 대해 농촌 전력화가 미치는 영향에 대해 여러 연구들이 진행되었고, 대체로 긍정적인 영향을 미친다고 결론을 맺었다(Barnes & Binswanger, 1986; Carmody, 1938; Dinkelman, 2011; Herrin, 1979; Ranganathan & Ramanayya, 1998, Valunjar, 1968; 임소영, 2012).

혹은 전력화가 온실가스 저감이나 생산성 증가에 미치는 영향에 대한 연구들도 수행되었다(EPRI, 2009; Jung & Lee, 2014; Manne and Richels, 1992; Nishio & Hoshino, 2010; Schurr et al., 1990). 먼저 온실가스 배출 저감과 관련해서는 Manne and Richels(1992)와 Nishio & Hoshino(2010)가 전기자동차나 전기난방장치(heat pump) 이용과 같은 전력화를 통해 이산화탄소 배출을 획기적으로 줄일 수 있음을 보여주었다. 그리고 EPRI(2009)는 시나리오 분석을 통해 전력화를 통한 이산화탄소 저감량을 분석했다. 생산성에 대한 영향에 대해서도 몇 가지 연구들이 수행되었는데, Schurr et al.(1990)은 생산기술의 전력화가 기술



자료 : 산업자원부에너지경제연구원(2013)을 바탕으로 재구성

Fig. 2. 우리나라 전환과정에서 1차 에너지 공급량 대비 손실량 비율 연도별 추이



주. IEA and OECD(2014)에 있는 한국 데이터는 산업자원부에너지경제연구원(2013)과 차이를 보임.  
 자료 : IEA and OECD(2014) 재구성

Fig. 3. OECD국가 전환과정에서의 1차 에너지 공급량 대비 손실량 비율 (2012년 기준)

진보를 촉진하고, 기술 진보에 의해 생산성이 증가하며 그로 인해 에너지 소비도 줄어든다고 하였다.<sup>6)</sup> Berndt (1983)는 전력화 비율이 미국 제조업의 생산성 증가에 통계적으로 유의미한 양(+)의 효과를 가지고 있다는 것을 확인했고, Stern(2011)은 전기와 같은 질 좋

은 에너지를 사용할수록 생산성이 증가한다고 했다. Jung & Lee(2014)도 전력화에 의해 단기적으로는 생산성이 줄어들지만, 장기적으로는 증가한다는 것을 모형을 통해 이론적으로 보여주었다.

그러나 이들 연구들은 전력화 영향에 대한 분석 범

6) 기존에는 한 개의 수차 엔진이나 스팀 엔진으로 공장 안의 모든 축과 벨트, 도르래를 가동시키는 시스템이었기 때문에 동력 전달을 위한 복잡한 설계로 인해 설비를 배치할 때 상당한 제약이 있었다. 그러다가 전동기가 도입되고 전선이 연결되면서 설비마다 전동기가 별도로 구동할 수 있게 되었고, 설비의 위치 선정도 자유롭게 되었다. 그렇게 되면서 공정이 합리적으로 배열되고 생산성을 높이는 방향으로 개선이 될 수 있었다(Schurr et al., 1990).

위를 최종에너지인 전기에만 한정하였다는 한계가 있다. 전력화의 영향을 제대로 평가하기 위해서는 1차 에너지로부터 전기로 전환되는 과정에서의 손실, 즉 전환 손실 및 기타 손실을 반드시 고려해야 한다.7) 다음 Fig. 2와 Fig. 3은 각각 우리나라 전환부문에서의 연도별 1차 에너지 대비 열량 손실량(전환손실+기타 손실) 비율과 OECD 국가들의 1차 에너지 대비 열량 손실량(전환손실+기타손실) 비율을 나타낸 것이다. 전환과정에서의 손실량, 즉 전환 손실과 기타손실의 합은 에너지 밸런스 관점에서 1차 에너지 공급량에서 최종에너지 소비량을 빼면 구할 수 있다(현대경제연구원, 2013). Fig. 2에서 보면 우리나라의 손실률은 1990년 이래로 약간 주춤했다가 서서히 증가하여 2012년 기준 25.1%까지 증가했다. 한편 Fig. 3과 같이 OECD 주요 국가들과 비교해보면, 우리나라는 2012년 기준 OECD 국가 중 9번째로 손실률이 컸다.

한편, 전력화가 심각해질 경우의 부정적 측면을 지적한 연구들도 있다. 석광훈(2012)과 조영탁(2012)은 전력화가 과하게 될 경우 전력 수급 불안이 심화될 수 있고, 비효율적 전환과정으로 인해 국가적 효율성이 저하돼 에너지 낭비와 온실가스의 추가적인 배출이 발생할 수 있으며, 발전소와 송전망 건설이 늘어나 사회적 갈등이 심화될 수도 있다고 지적하였다.

### 3. 대상과 방법론 및 분석 자료

#### 3-1. 우리나라 제조업의 직접가열용 전기 소비

우리나라 제조업에서의 에너지 사용은 다음 Table 2와 같이 산업공정에 따라 직접가열용, 간접가열용, 동력용, 전기화학용, 난방·조명·기타로 구분할 수 있다. 직접가열용은 여러 요·로와 소성, 가스 용접기, 가스 절단기와 같이 직접 열을 가하는데 사용되는 에너지를 의미하고, 간접가열용은 증기나 온수를 생산하는 보일러 설비에 이용되는 에너지이다. 동력용은 동력을 생산하기 위해 전동기 및 내연기관 설비 등에서 이용되는 에너지를 의미하며, 전기화학용은 전기화학 반응을 이용하는데 쓰이는 에너지, 난방·조명·기타는 공정설비 이외에 난방이나 조명 및 기타용으로 이용되는 에너지를 의미한다.

다음 Table 3은 2010년 기준으로 제조업에서 이용되는 산업공정별 에너지 소비량의 원별 비중을 나타낸 것이다. 공정별로는 직접가열용 에너지의 비중(44.0%)이 가장 많았으며, 그 다음 간접가열용(21.3%), 동력용(20.9%) 순으로 많았다. 그리고 직접가열용 에너지 중에서 전기가 차지하는 비중은 29.9%이고, 간접가열용은 0%, 동력용은 69.8%였다. 이처럼 직접가열용은 산업공정 에너지 중에서 차지하는 비중이 가장 크면서 에너지원의 전력화가 일어나고 있는 사례이다. 반면, 간접가열용과 동력용 에너지는 제조

Table 2. 제조업 산업공정별 에너지 분류

| 항목       | 내용  |
|----------|---|
| 직접가열용    | 원재료, 반제품, 공기 등에 열을 주기 위하여 사용된 연료로서, 용해로, 가열로 등 각종 공업용 요·로 및 소성 등의 가열설비, 가스용접기 및 가스절단기 등으로 사용한 연료를 포함                                    |
| 간접가열용    | 제품생산 및 가공을 위하여 최종 생산 공정에 투입된 에너지의 형태가 증기 또는 온수로서 이를 발생시키는 보일러 설비에 사용된 에너지 소비  |
| 동력용      | 자가 발전용 디젤기관, 가스터빈 등 내연기관에서 사용한 연료와 콤푸레셔, 펌프, 송풍기, 모터 등에 사용하는 전력 포함  |
| 전기화학용    | 전해용, 전해조, 전해로, 전기 분해, 전기도금, 용접 등에 사용한 전력  |
| 난방·조명·기타 | 공정설비 이외의 난방, 취사 등 용도로 사용한 연료소비와 건물에 설치되어있는 운반용 설비 및 보안 등에 사용한 전력. 운반용 설비에는 지게차, 컨베이어 벨트 같은 작업장 내 생산품의 이동에 있어서 사용된 설비 및 장비(단, 수송용은 제외)임. |

자료: 지식경제부(2012)

7) 전환손실은 1차 에너지가 전기나 열 같은 최종에너지로 전환되는 과정에서 손실되는 에너지 손실을 의미하고, 기타손실에는 송·배전 손실 등과 같은 전력 손실과 자가소비 등이 포함된다. 전환손실에 기타 손실을 같이 포함하기도 하고 포함하지 않기도 하는데, OECD에서는 이를 포함하며 우리나라에서는 포함하지 않는다(현대경제연구원, 2013).

**Table 3.** 2010년 제조업 산업공정별 에너지원별 비중 (단위: %)

| 에너지 \ 공정 | 합계    | 직접가열            | 간접가열            | 동력용             | 전기화확용          | 난방,조명<br>및 기타   |
|----------|-------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| 합계       | 100.0 | 44.0<br>(100.0) | 21.3<br>(100.0) | 20.8<br>(100.0) | 3.2<br>(100.0) | 10.7<br>(100.0) |
| 석탄소계     | 8.0   | 6.4<br>(14.5)   | 1.5<br>(7.2)    | 0.0<br>(0.0)    | -<br>-         | 0.1<br>(0.8)    |
| 석유소계     | 37.7  | 17.0<br>(38.6)  | 13.2<br>(62.0)  | 4.1<br>(19.7)   | -<br>-         | 3.4<br>(31.9)   |
| 도시가스     | 15.0  | 4.7<br>(10.8)   | 5.7<br>(26.7)   | 1.4<br>(6.9)    | -<br>-         | 3.2<br>(29.6)   |
| 기타연료     | 1.1   | 0.4<br>(0.9)    | 0.2<br>(1.0)    | 0.1<br>(0.3)    | -<br>-         | 0.5<br>(4.2)    |
| 열에너지     | 4.3   | 2.3<br>(5.3)    | 0.6<br>(3.0)    | 0.7<br>(3.3)    | -<br>-         | 0.6<br>(5.9)    |
| 전력       | 33.8  | 13.2<br>(29.9)  | -<br>-          | 14.5<br>(69.8)  | 3.2<br>(100.0) | 2.9<br>(27.6)   |

주. 괄호 안은 각 산업공정별 에너지를 100%로 했을 때의 에너지원별 비율  
자료: 지식경제부(2012)

업 산업공정 에너지 소비 중에서 차지하는 비중이 적진 않지만, 간접가열용은 아예 전기를 사용하지 않고 동력용은 대체로 전기를 사용하는 경우가 많기 때문에 에너지원의 전기 대체와는 크게 관련이 없다.

### 3-2. 지수분해분석

지수분해분석(Index Decomposition Analysis; IDA)은 1970년대 후반부터 산업구조 변화나 부문별 에너지 집약도 변화가 산업의 에너지 이용 추세에 미치는 영향을 연구하기 위해 이용되기 시작했다(Ang, 2004). 이것은 경제 시스템 변화를 몇 개 지수로 단순화하여 파악하는 지수 이론(Index Theory)에 근거한 방법이다(김진수·허은영, 2005; 진상현·정경화, 2013). 지수분해분석은 몇 개의 요인을 결합시켜 만든 중심 함수를 정의한 뒤, 이를 여러 다양한 방식으로 분해하여 각 요인들이 중심 함수에 미치는 영향을 분석한다(Ang, 2004).

지수분해분석은 크게 라스파이레스(Laspeyres) 지수 계열과 디비지아(Divisia) 지수 계열로 나눌 수 있다(Ang, 2004). 먼저 라스파이레스 지수 계열에는 라

스파이레스 지수와 파셰 지수(Paasche Index)가 대표적인데, 이들은 각각 기준년 혹은 비교년을 기준으로 가중치를 설정하여 요인의 변화로 인한 영향을 비율을 측정한다. 다음으로 디비지아 계열은 라스파이레스 계열이 특정 년도의 수치에 가중치를 둠으로 인해 발생하는 왜곡을 방지하기 위해 기준년과 비교년의 평균을 이용하는 방식이다. 디비지아 계열 방식에는 단순 평균을 이용한 단순 로그 디비지아 방식(Simple Log Mean Divisia Index)과 로그 평균을 이용한 로그 평균 디비지아 방식(Log Mean Divisia Index)이 있다(에너지경제연구원, 2007). 한편, 라스파이레스 계열과 디비지아 계열은 다시 각각 가법(Addictive) 분해와 승법(Multiplicative) 분해로 나눌 수 있는데, 가법 분해는 전체 변화를 변화량으로 분해한 것이고 승법 분해는 전체 변화를 변화율로 분해한 것이다(김수이·김현석, 2011).

지수분해분석의 장점은 적은 양의 자료만으로도 분석이 가능하고, 기준년과 비교년의 자료만 가지고 하기 때문에 분석기간이 비교적 자유로우며, 시점간의 변화량뿐만 아니라 비율변화로도 분석이 가능하다는

것이다(김진수·허은영, 2005). 이러한 특징 때문에 지수분해분석은 에너지 이용이나 CO<sub>2</sub> 배출에 관한 요인 분해분석을 하는데 많이 활용되었다(Ma, 2014; Mairret and Decellas, 2009; Rogan et al., 2012; Zhao et al., 2012; 김수이·정경화, 2011; 황인창, 2008). 그리고 에너지 소비 및 CO<sub>2</sub> 배출량을 분해할 때는 대개 생산효과(production effect), 구조 효과(structure effect), 집약도 효과(intensity effect)의 세 가지 요인(factor)으로 분해되며(Xu and Ang, 2013), 요인을 추가하여 확장된 분해분석을 하기도 한다.

이 연구에서는 LMDI 분해분석을 이용하였는데, 이 방식은 분해 후 잔차(residuals)가 남지 않고 이론적인 기초, 적용가능성, 사용의 편리성, 결과 해석의 편리성이 있기 때문에 다른 지수분해방식에 비해 더 우수한 방식으로 평가받고 있다(Ang, 2004; Muller, 2006). 이 연구는 LMDI 분해분석을 이용하여 우리나라 제조업에서 이용되는 직접가열용 전기사용량의 변화를 분석하였다. 제조업의 직접가열용 전기사용량은 다음 식 (1)과 같이 네 가지 요인, 즉 전기 비중 효과, 직접가열용 비중 효과, 에너지집약도 효과, 부가가치 효과를 포함하였다. 전기 비중 효과는 직접가열용 에너지 중 전기 비중이 차지하는 비중의 효과이고, 직접가열용 비중 효과는 전체 에너지 중에서 직접가열용이 차지하는 비중의 효과이며, 에너지 집약도 효과는 부가가치 대비 에너지 사용량 효과이다.

$$\sum_i Eld_i = \sum_i \left( \frac{Eld_i}{End_i} \times \frac{End_i}{En_i} \times \frac{En_i}{GDP_i} \times GDP_i \right) \quad (1)$$

$$= \sum_i (E_i \times P_i \times I_i \times Q_i)$$

$i$  = 업종

$Eld_i$  =  $i$ 업종 직접가열용 전기 사용량

$End_i$  =  $i$ 업종 직접가열용 에너지 사용량

$En_i$  =  $i$ 업종 에너지 사용량

$GDP_i$  =  $i$ 업종 GDP

$E_i$  =  $i$ 업종 직접가열용 에너지 중 전기 비중

$P_i$  =  $i$ 업종 에너지 중 직접가열용 에너지 비중

$I_i$  =  $i$ 업종 GDP당 에너지 사용량

$Q_i$  =  $i$ 업종 GDP

위 식에서 보듯이,  $Q_i$ 는  $i$ 업종의 GDP,  $I_i$ 는  $i$ 업종에서의 GDP당 에너지 사용량, 즉 에너지원단위를 의

미한다.  $P_i$ 는  $i$ 업종에서 사용하는 총 에너지 중에서 직접가열용 에너지가 차지하는 비중,  $E_i$ 는  $i$ 업종 직접가열용 에너지 중에서 전기가 차지하는 비중을 의미한다. 식 (1)을 구성하는 각 요인을 시간의 함수라고 가정하고 각각을 시간에 대해 미분하면 시간에 따른 직접가열용 전기사용량 변화율은 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있고, 이는 다시 식 (3)과 같이 변환할 수 있다.

$$\frac{1}{Eld_i} \frac{dEld_i}{dt} = \frac{1}{E_i} \frac{dE_i}{dt} \times \frac{1}{P_i} \frac{dP_i}{dt} \times \frac{1}{I_i} \frac{dI_i}{dt} \times \frac{1}{Q_i} \frac{dQ_i}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \ln Eld_i = \frac{d}{dt} \ln E_i \times \frac{d}{dt} \ln P_i \times \frac{d}{dt} \ln I_i \times \frac{d}{dt} \ln Q_i \quad (3)$$

그런 다음, 양변을 시간(0→T)까지 적분하고 다시 양변에  $\frac{Eld_i(T) - Eld_i(0)}{\ln(Eld_i(T)/Eld_i(0))}$ 를 곱하면 다음 식 (4)와 같이 된다.

$$Eld_i(T) - Eld_i(0) = \frac{Eld_i(T) - Eld_i(0)}{\ln(Eld_i(T)/Eld_i(0))} \times \left[ \ln \frac{E(T)}{E(0)} + \ln \frac{P(T)}{P(0)} + \ln \frac{I(T)}{I(0)} + \ln \frac{Q(T)}{Q(0)} \right] \quad (4)$$

식 (4)의 각 요소들이 직접가열용 전기 사용량 변화에 미치는 영향은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 E, P, I, Q는 각각 식 (6)의  $X_{eff}$ 와 같은 형태이다.

$$\Delta El = El(T) - El(0) = E_{eff} + P_{eff} + I_{eff} + Q_{eff} \quad (5)$$

$$X_{eff} = \frac{Eld_i(T) - Eld_i(0)}{\ln(Eld_i(T)/Eld_i(0))} \times \ln \frac{X(T)}{X(0)} \quad (6)$$

### 3-3. 분석시점과 분석 자료

이 연구의 분석시점은 매 3년마다 실시되고 있는 에너지총조사의 분석시점과 맞춰 1992, 1995, 1998, 2001, 2004, 2007, 2010년으로 하였다. 분석자료는 「에너지총조사」의 1992·1995·1998·2001·2004·2007·2010년 산업공정별 에너지소비량(열량) 자료와 에너지통계연보의 1992·1995·1998·2001·2004·2007·2010년 자료, 한국은행 업종별 실질 부가가치 자료(2005년 불변가격)를 이용하였다. 에너지총조사의 산업공정별 에너지소비량 자료는 전체 에너지 소비를

다 포함하고 있는 용도별 에너지 자료에서 원료용과 수송용 등을 제외하고 자가발전 전력량은 포함한 것인데(지식경제부, 2012), 여기에서 업종별 직접가열용 비중과 업종별 직접가열용 전기 비중을 도출하였다. 제조업의 업종은 『에너지통계연보』에 따라 기계·장비, 석유·화학, 1차금속, 섬유·의복, 요업, 제지·인쇄·목재, 음식담배, 기타제조 8가지 업종으로 구분하였다.

#### 4. 결과

LMDI 분해분석 방법을 이용해 1995~2010년까지의 우리나라 제조업 직접가열용 전기사용량을 분해한 결과는 다음 Table 4와 같다. 여기서는 1995년부터 해당 연도까지의 분해분석 결과를 연도별로 모아 시계열 형태로 제시하였다. 원래 분해분석은 기준년과 마지막년의 값을 이용하는데, 자료 값이 불연속적인 경우 해석하는데 오류가 생길 가능성이 있기 때문에 이렇게 제시하는 것이 유용하다(김수이·김현석, 2011). Table 4에서 보듯이, 2010년 제조업에서의 직접가열용 전기

사용량은 1995년에 비해 11,484 천TOE가 증가했으며, 여기서 전기 비중 효과에 의해 7,554 천TOE, 부가가치 효과에 의해 5,109 천TOE가 증가했고, 직접가열 에너지 비중 증가와 에너지원단위 개선에 의해서 전기사용이 조금 감소하였다. 이는 제조업 직접가열용 전기 사용이 가장 크게 증가한 것이 직접가열을 위해 사용되는 에너지가 전기로 대체된 것에 가장 크게 영향을 받았다는 것을 의미한다. 물론 부가가치 증가에 의해 늘어난 효과도 있었으나, 직접가열용 비중이 줄고 에너지원단위 개선에 의해 전기 사용이 줄었음에도 불구하고, 직접 가열용의 전력화가 더 심화된 것에 영향을 가장 크게 받은 것이다. 연도별로 보면, 2001년 이후부터 전기 비중 효과가 크게 증가한 것이 두드러지고, 부가가치 효과도 지속적으로 증가해왔다. 직접가열 비중이나 에너지원단위는 분석기간에 따라 약간의 편차는 보이고 있다.

한편, Table 5는 1992년과 2010년 사이 업종별 직접가열용 전기에너지 사용량 분해분석 결과를 나타낸

**Table 4.** 제조업 직접가열 전기사용량 분해분석 결과 (단위: 천TOE)

|       | 전기비중 효과 | 직접가열 비중 효과 | 에너지원단위 효과 | 부가가치 효과 | 총 효과   |
|-------|---------|------------|-----------|---------|--------|
| 1995년 | 1,073   | -817       | -55       | 372     | 573    |
| 1998년 | 1,085   | -484       | 229       | 548     | 1,379  |
| 2001년 | 1,683   | -1,048     | -203      | 1,182   | 1,614  |
| 2004년 | 4,494   | 516        | -21       | 2,586   | 7,575  |
| 2007년 | 6,219   | -615       | -843      | 3,827   | 8,588  |
| 2010년 | 7,554   | -364       | -814      | 5,109   | 11,484 |

**Table 5.** 1992-2010년 업종별 직접가열용 전기사용량 분해분석 결과 (단위: 천TOE)

|          | 전기비중 효과       | 직접가열 비중 효과 | 에너지원단위 효과 | 부가가치 효과 | 총 효과  |
|----------|---------------|------------|-----------|---------|-------|
| 1차금속     | 3,939 (21.1%) | -1,391     | -170      | 1,646   | 4,024 |
| 석유·화학    | 1,747 (53.1%) | 349        | 56        | 1,140   | 3,292 |
| 기계장비     | 891 (55.1%)   | 296        | -821      | 2,208   | 2,574 |
| 기타       | 531 (12.3%)   | -140       | 234       | 14      | 639   |
| 섬유       | 39 (66.6%)    | 262        | -6        | -13     | 283   |
| 요업       | 291 (27.4%)   | -7         | -74       | 65      | 275   |
| 제지·인쇄·목재 | 84 (19.6%)    | 162        | -26       | 34      | 254   |
| 식품       | 31 (57.8%)    | 106        | -8        | 15      | 144   |

주. 전기비중 효과의 괄호 안 값은 각 효과의 절대값 합 대비 전기비중 효과가 차지하는 비율을 의미함

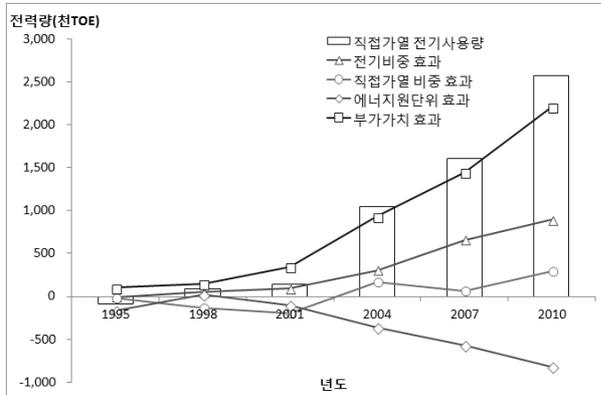


Fig. 4. 기계·장비 직접가열용 전기사용량 분해분석 결과 (천TOE)

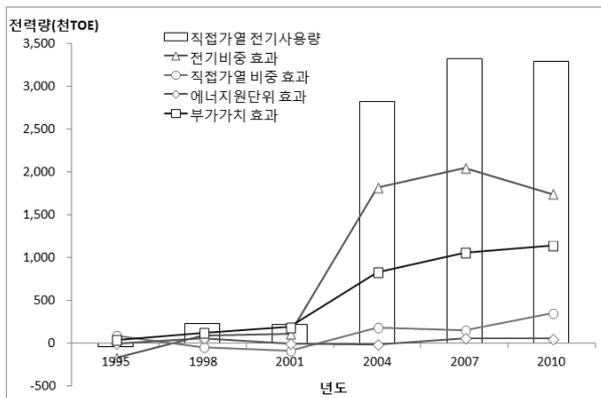


Fig. 5. 석유·화학 직접가열용 전기사용량 분해분석 결과 (천TOE)

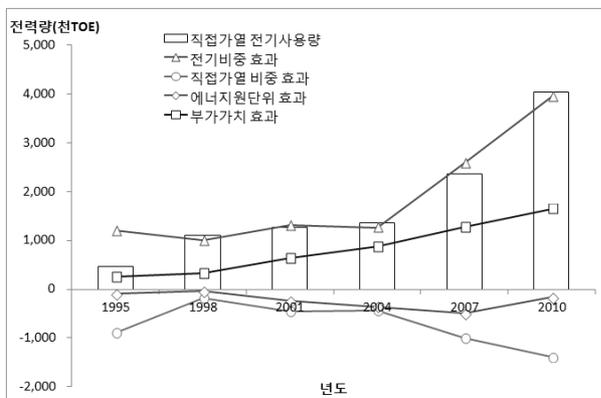


Fig. 6. 1차금속 직접가열용 전기사용량 분해분석 결과 (천TOE)

것이다. 업종 중에서 1차금속, 석유·화학, 기계·장비의 전기사용량이 많이 증가했는데, 1차금속, 석유·화학에서는 전기 비중 효과, 전력화 현상의 영향이 가

장 컸고, 기계·장비 업종은 부가가치 증가 영향이 가장 컸다. 특히 1차금속에서는 직접가열 비중이 감소함으로써 직접가열용 전기사용량이 감소하는데 상당한 영향을 주었음에도 전기비중 효과가 매우 커서 전체적으로는 전기 소비가 늘었다. 한편, 각 효과들의 절대값 합 대비 전기비중 효과가 차지하는 비율을 구하면 업종별로 전력화의 영향의 정도를 확인해볼 수 있다. 이는 Table 5에서 전기비중 효과 안의 괄호 값으로 나타냈는데, 섬유(66.6%), 식료품(57.8%), 기계·장비(55.1%), 석유·화학(53.1%), 요업, 1차금속, 제지·인쇄·목재, 기타 업종순으로 전기비중 효과의 비중이 컸다. 그리고 기계·장비, 석유·화학, 1차금속 업종의 연도별 분해분석 결과는 다음 Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6과 같다.

### 5. 결론

산업부문의 전력화는 산업에서 사용되는 에너지원이 화석에너지 등에서 전기로 대체되어 가는 현상을 말하는 것으로 우리나라는 OECD 국가 중에서 비교적 빠른 속도로 전력화가 진행되고 있고, 특히 제조업의 직접가열용 에너지는 빠르게 전력화가 일어나는 분야이다. 전력화를 평가할 때 간과하지 말아야 할 부분은 전기는 결국 다른 에너지원의 연소를 통한 전환 과정을 거쳐야만 얻을 수 있기 때문에 전환과정에서의 손실까지를 고려해야 한다는 것이다. 그런 점에서 필요이상으로 과도한 전력화는 바람직하지 않을 수 있다. 그런 점에서 이 연구는 우리나라 제조업에서의 직접가열용 에너지의 전력화 현상을 구체적으로 분석하기 위해 LMDI 분해분석방법을 이용하여 1992~2010년 기간 동안 제조업에서의 직접가열용 전기 소비의 특성을 분석하였다.

분석 결과, 이 연구에서는 몇 가지를 확인할 수 있었다.

첫째, 우리나라 산업의 전력화 수준은 비율만 보면 OECD 평균 수준(2012년 기준)과 비슷한 수준이지만 증가속도가 매우 빠르게 증가했으며, 산업부문의 전력사용량 자체도 큰 폭으로 빠르게 증가해왔다. 1992~2012년 기간 동안 제조업에서 사용되는 에너지 중 전력 비중이 차지하는 비중은 평균 1.5배가 증가했고, 기계·장비 업종의 경우 전력 비중이 77%까지 늘어났다. 이처럼 우리나라 산업부문의 전력화는 양적 측면과 속도 측면에서 크고 빠르게 진행되고 있다고 할 수 있다.

둘째, 우리나라 제조업에서 직접가열용으로 이용된 전기가 증가한 것은 무엇보다 직접가열용 에너지원에서 전기 비중이 크게 늘어난 것의 영향이 가장 컸다. 즉, 제조업 직접가열용 에너지에서의 전력화가 가장 두드러졌다는 것이다. 특히 제조업의 원단위 개선으로 제조업에 사용된 에너지 소비 자체가 줄었고 산업공정에서 직접가열용 에너지의 비중이 줄었음에도 불구하고 결과적으로 직접가열용 전기 사용량이 크게 늘었는데, 이는 제조업에서 직접가열용의 전력화가 그만큼 컸다는 것이다.

셋째, 업종별로 보면 석유·화학과 1차금속 업종에서 직접가열용의 전력화 현상이 가장 크게 나타났다. 특히 1차금속에서는 산업공정 내 직접가열용 에너지의 비중이 감소했음에도 불구하고, 에너지원에서의 전기비중 효과가 매우 컸기 때문에 직접가열용 전기사용이 크게 늘었다. 석유·화학은 전체 전기 소비 증가에서 전기비중 효과가 차지하는 비중이 가장 컸다.

산업 및 제조업의 전력화는 분명 공정을 합리화하고 기술 진보를 촉진하며 생산성을 높이는데 크게 기여하는 측면이 있고 반드시 필요한 측면도 있다. 그러나 전기를 얻기 위한 전환과정에서의 전환 손실까지를 고려하게 되면 전력화가 반드시 에너지 절감이나 온실가스 저감, 생산성 측면에 긍정적인 효과만 있는 것은 아니다. 그리고 매년 전력수급 불안이 가중되는 상황에서 에너지 수요가 전기로 집중되는 현상이 심화되는 것도 바람직하지 않다.

중요한 것은 에너지원에 대한 수요 중에서 전기에 대한 수요가 합리적인 수준에서 형성되도록 하는 것이다. 즉, 합리적이고 필요한 수준에서의 전력화를 달성하는 것이다. 아울러 업종별로도 업종 특성에 맞는 전력화를 달성하는 것이 필요하다. 이를 위해서는 여러 가지 대안이 있을 수 있는데, 무엇보다 중요한 것이 바로 적절한 가격신호체계를 확립하는 것이다. 우리나라의 산업용 전기요금은 OECD 국가 중에서 제일 낮다는 사실(2009년 기준, 구매력지수 미고려)에서 알 수 있듯이, 현재의 과도한 산업의 전력화는 낮은 전기요금에서 기인하는 것이 크다. 전기에 대한 바람직한 가격신호체계가 제대로 회복된다면 산업계에서도 그에 맞게 합리적인 의사 결정을 통해 적정 수준의 전기에 대한 수요를 하도록 할 것이다.

## Reference

1. 김수이·김현석, “LMDI 방법론을 이용한 국내 제조업의 에너지 소비 요인 분해 분석”, 『에너지경제연구』, 2011, 제10권, 제1호, pp.49-760
2. 김수이·정경화, “LMDI 방법론을 이용한 국내 제조업의 온실가스 배출 요인분해 분석”, 『자원·환경경제연구』, 2011, 제20권, 제2호, pp.229-254
3. 김진수·허은영, “구조분해분석을 통한 국내 산업별 에너지 소비 변화요인 연구”, 『자원·환경경제연구』, 2005, 제14권, 제2호, pp.257-290
4. 산업자원부, “1999년도 에너지총조사 보고서”, 2000
5. 산업자원부, “2002년도 에너지총조사 보고서”, 2003
6. 산업자원부, “2005년도 에너지총조사 보고서”, 2006
7. 상공자원부, “1993년도 에너지총조사 보고서”, 1993
8. 석광훈, “전력 수요관리 및 요금체제의 현황과 개선 방안”, 『국회기후변화포럼 부설 기후변화정책연구소 정책보고서 ‘이명박정부 기후변화정책 평가 및 차기 정부 정책과제’』, 2012
9. 에너지경제연구원, “산업부문 에너지이용효율화 추이 분석기법 및 Tool 개발”, 2007
10. 임소영, “개발도상국의 지속가능한 농촌전력화를 위한 개발협력 프로그램”, 『환경사회학연구 ECO』, 2012, 제16권, 제1호, pp.205-248
11. 조영탁, “에너지의 전력화, 어떻게 대응할 것인가?”, 『석유협회지』, 2012, 제286권, pp.19-22
12. 지식경제부, “2008년도 에너지총조사 보고서”, 2009
13. 지식경제부, “2011년도 에너지총조사 보고서”, 2012
14. 지식경제부·에너지경제연구원, “2012 에너지통계 연보”, 2013
15. 진상현·정경화, “지역별 온실가스 배출특성에 관한 연구: 지수분해분석을 중심으로”, 『한국정책과학 학회보』, 2013, 제17권, 제2호, pp.1-6
16. 통상산업부, “1996년도 에너지총조사 보고서”, 1996
17. 현대경제연구원, “에너지 수급 불균형 해소를 위한 생산 효율성 제고 방안 - 에너지 전환손실 1% 감축으로 원자력발전소 1기를 대체할 수 있다”, 『새로운 경제시스템 창출을 위한 경제주평』, 2013, 제566호
18. 황인창, “생태적 근대화와 기후변화정책 - 영국과 독일, 한국의 비교”, 서울대학교 석사학위논문, 2008
19. Herrin, A. N., “Rural Electrification and Fertility Change in the Southern Philippines”, Population

- and Development Review, 1979, Vol.5 No.1, pp.61-86
20. Ang, B. W., "Decomposition Analysis for Policy-making in Energy: Which is the Preferred Method?", Energy Policy, 2004, Vol.32, pp.1131-1139
  21. Barnes, D. F. and Binswanger, H. P., "Impact of Rural Electrification and Infrastructure on Agricultural Changes", Economic and Political Weekly, 1986, Vol.21, No.1, pp.26-34
  22. Carmody, J. M., "Rural Electrification in the United States", Annals of the American Academy of Political and Social Science, 1938, Vol.201, pp.82-88
  23. Desbrosses, N., "Understanding the electrification of industrial energy consumption in Europe", The Leonardo Energy initiative homepage, 2006
  24. Dinkelman, T. "The Effects of Rural Electrification on Employment: New Evidence from South Africa", The American Economic Review, 2011, Vol.101, No.7, pp.3078-3108
  25. Electric Power Research Institute (EPRI), "The potential to reduce CO<sub>2</sub> emissions by expanding end-use applications of electricity", 2009
  26. International Energy Agency (IEA) and Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). "Energy Balances of OECD Countries 2014 Edition", 2014
  27. Ma, C. "A multi-fuel, multi-sector and multi-region approach to index decomposition: An application to China's energy consumption 1995~2010", Energy Economics, 2014, Vol.42, pp.9-16
  28. Mairet, N. and Decellas, F., "Determinants of energy demand in the French service sector: A decomposition analysis", Energy Policy, 2009, Vol.37, pp.2734-2744
  29. Manne, A., Richels, R., "Buying greenhouse insurance: the economic costs of CO<sub>2</sub> emission limits", 1992
  30. Muller, A. "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, 2006, Göteborg University, Department of Economics. Revised 10 Aug 2007
  31. Nishio, K., Hoshino Y., "Impacts of electrification on CO<sub>2</sub> emission reduction potentials in the G7countries", SERC discussion Paper 10004, 2010, Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan
  32. Ranganathan, V. and Ramanayya, T. V., "Long-Term Impact of Rural Electrification: A Study in UP and MP" Economic and Political Weekly, 1998, Vol.33, No.50, pp.3181-3184
  33. Rogan, F., Cahill, C. J., Gallachoir, B. P. Ó., "Decomposition analysis of gas consumption in the residential sector in Ireland." Energy Policy, 2012, Vo.42, pp.19-36
  34. Schurr, S. H., Burwell, C. C., Devine, W. D., Sonenblum, S., "Electricity in the American Economy: Agent of Technical Progress", 1990, Greenwood Press, New York
  35. Stern, D. I. "The role of energy in economic growth", ANNALS OF THE NEW YORK ACADEMY OF SCIENCES, 2011, ISSN 0077-8923
  36. Torvanger, A. "Manufacturing sector carbon dioxide emissions in nine OECD countries: 1973~87" Energy Economics, 1991, Vol.13, pp.168-186
  37. Valunjkar, T. N. "Social Consequences of Rural Electrification", Economic and Political Weekly, 1968, Vo.3, No.10, pp.431-434
  38. Xu, X. Y. and Ang, B. W., "Index decomposition analysis applied to CO<sub>2</sub> emission studies", Ecological Economics, 2013, Vol.93, pp.313-329
  39. Zhao, X., Li, N., Ma, C., "Residential energy consumption in urban China: A decomposition analysis", Energy Policy, 2012. Vol.41, pp.644-653
  40. Social Progress Imperative 홈페이지 <http://www.socialprogressimperative.org>
  41. World Bank 홈페이지 <http://www.worldbank.org>