

Complete Decomposition Model을 통한 국내 Energy Flow 분석

김유정¹⁾, 허은녕²⁾

1. 연구의 목적

에너지는 난방, 전력공급 등을 위한 생활에너지로, 또 산업 및 수송에 있어서는 생산요소의 하나로 경제성장에 있어서 중요한 역할을 하는 등 여러 가지 면에서 중요한 의미를 지닌다. 최근 환경에 대한 관심이 국제적으로 대두되면서 우리나라 역시 각종 국제환경협약에 참여하고 있다. 기후변화협약과 같은 국제환경규제가 발효될 경우 온실가스류의 발생원천 중에 상당 부분을 차지하는 에너지는 환경과도 긴밀한 관계를 가지고 있다. 따라서 앞으로 환경규제가 본격화될 경우 그 규제를 피하기 위해 가장 먼저 생각할 수 있는 방안이 에너지 소비를 줄이는 것일 것이다.

우리정부는 이러한 이유 등으로 에너지효율을 높이기 위해 1983년부터 에너지절약시설에 대해 정부보조금을 지급하고 있으며, 1992년부터는 에너지절약기술개발사업을 위해 연간 약 150억원을 투자하고 있다. 또한 각종 고효율전동 및 가전기구들이 소개되고 있으며, 수송에 있어서도 연비향상차량들이 소개되고 있다.

그러면 과연 우리나라의 에너지소비가 어떠한 요인에 의해 변화되는지, 또한 실제로 에너지절약형으로 움직이고 있는지 알아보는 것은 앞으로의 에너지정책에 방향점을 제시해 줄 수 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 1975년부터 2001년의 산업, 가정상업, 수송, 공공기타 등 4개 부문 별로 완전분해모형(Complete decomposition model)을 이용하여 경제성장, 에너지효율, 구조적 변화로 인한 에너지변화량을 알아보았다. 이뿐만 아니라 에너지간의 대체효과를 알아보기 위해 에너지원별로도 요인분석을 하였다. 그리고 우리나라의 energy saving이 실질적으로 일어나고 있는지를 살펴봄으로써 에너지 지속성(sustainability)을 살펴보았다.

2. 이론적 고찰

본 연구에서 주로 사용된 방법론은 분해분석(decomposition analysis)으로써 기준년도(based year)를 중심으로 하여 목표연도(target year)의 분석대상변화량을 요인별로 추정하는 것이다.

분해분석은 에너지소비와 이산화탄소의 요인을 알아보는 방법론으로 1980년 초반부터 대두되기 시작했다. 그 이후에 에너지소비변화의 요인에 대한 분해분석(decomposition analysis)에 대한 여러 가지 방법들이 소개되었다. 예를 들어 Hankinson(1983)의 요소분리방법(factor isolation method), Reitler(1987)의 combination method, Howarth(1991)의 지수모형(simple index method), Doblin(1988)의 라스파이레스지수모형(Laspeyres index method),

1 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정 yikim3@snu.ac.kr

2 서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수 exheo@plaza.snu.ac.kr

Liu(1991)의 디비지아지수모형(Divisia index Method)등이 있다.

분해분석을 통해 에너지와 이산화탄소배출량의 변화에 관련된 대표적인 연구를 살펴보면, 김연배(2002)는 우리나라, 미국, 멕시코, 브라질, 인도, 중국 철강산업의 이산화탄소배출 변화 추이를 물류생산지수(Physical Production index)를 이용하여 에너지 집중도(energy intensity)를 변화를 요인별로 분석하였다. 그리고 최기홍은 디비지아지수 분해모형을 이용하여 1995년에는 한국제조업의 energy intensity를 분석한 적 있으며 2002년에는 국내 발전(Power Generation)에 있어서 효율성 향상 정도를 평가하였다.

Sun(1996)은 앞서 언급한 다른 모형과 달리 잔차항을 제거한 완전분해분석(complete decomposition analysis)을 소개하였다. 본 연구에서는 좀 더 발전된 모형인 완전분해분석모형을 이용하여 국내 에너지소비변화 요인을 분석해보았다.

Sun(1998)은 완전분해모형을 이용해 OECD국가의 에너지소비량을 경제성장효과, 에너지 집중도효과, 구조적변화효과 등 3가지 요인으로 분해하였으며, 1999년에는 핀란드와 스웨덴의 화석연료사용으로 인한 이산화탄소배출량을 이산화탄소배출계수, 경제성장, 에너지집중도 등의 요인으로 분해하였다.

J.Luukkanen(2002)는 마찬가지로 완전분해모형을 이용해 노르딕의 에너지와 이산화탄소 집중도를 분석하기도 하였다.

3. 연구 방법론

본 연구에서는 에너지소비의 변화의 요인을 알아보기 위해 'Sun(1996)'에 의해 소개된 complete Decomposition Model을 사용하였다.

완전분해모형은 다른 분해모형과 달리 residual항목이 나타나지 않아 더 발전된 모형이라 할 수 있는데 '여러요인에 의해 변화된 항목은 모두 동등하게 효과를 미친다'는 것을 기본으로 하는 모형이다.

본 연구에서는 부분별분석에서는 기존에 소개된 경제성장으로 인한 효과, 집중도효과, 구조적 효과 등 3가지 요인으로 분석하였다. 또한 에너지형태에 따른 변화요인도 살펴보기 위해 앞서 예기한 3가지 요인에 에너지형태별 비중에 의한 요인을 하나 더 첨가시켜 에너지형태별로 4가지 요인으로 분해하여 각 효과를 살펴보았다.

■ 부분별 에너지 분해모형

에너지소비량은 $E = \sum_i \frac{E_i}{Q_i} \frac{Q_i}{Q} Q$ 으로 분해할 수 있어 에너지소비변화량은 경제성장에 의한효과(Activity effect)와 에너지집중도(energy intensity)에 의한 효과 구조적 효과(structural effect)로 나타낼 수 있다.

$$\Delta E = E^1 - E^0$$

$$S_i = \frac{Q_i}{Q} : i\text{부문의 구조적 비중}(share) \quad I_i = \frac{E_i}{Q_i} : i\text{부문의 에너지집중도}$$

$$Q_{effect} = \Delta Q \sum_i I_i^0 S_i^0 + \frac{1}{2} \Delta Q \sum_i (I_i^0 \Delta S_i + S_i^0 \Delta I_i) + \frac{1}{3} \Delta Q \sum_i \Delta I_i \Delta S_i$$

$$I_{effect} = Q^0 \sum_i S_i^0 \Delta I_i + \frac{1}{2} \sum_i I_i^0 (S_i^0 \Delta Q + Q^0 \Delta S_i) + \frac{1}{3} \Delta Q \sum_i \Delta I_i \Delta S_i$$

$$S_{effect} = Q^0 \sum_i I_i^0 \Delta S_i + \frac{1}{2} \sum_i \Delta S_i (I_i^0 \Delta Q + Q^0 \Delta I_i) + \frac{1}{3} \Delta Q \sum_i \Delta I_i \Delta S_i$$

$$\Delta E = Q_{effect} + I_{effect} + S_{effect}$$

■ 에너지형태별 분해모형

각 부문별 및 에너지형태별 에너지소비량을 $E_{ik} = \sum_i \frac{E_{ik}}{E_i} \frac{E_i}{Q_i} \frac{Q_i}{Q}$ 과 같이 분해할 수 있다. 따라서 각 부문별·에너지형태별 소비량은 활동효과, 집중도효과, 구조적효과 그리고 대체효과 등으로 표현될 수 있다.

$\frac{E_{ik}}{E_i}$: i부문에서 k에너지종류(석탄, 석유, 도시가스, 전력, 기타)별 비중

완전분해모형은 에너지 소비(E)의 변화량을 활동효과, 집중도 효과, 구조적 효과로 설명할 수 있다.

- activity effect - 경제성장에 대한 에너지의 소비변화 효과로 전체성장에 대한 효과
- intensity effect- 기술 및 생산공정의 변화에 의해 발생하는 효과
- structure effect - sector(산업, 가정, 수송, 공공기타)의 비중(share)차의 변화로 인한 에너지 소비의 변화 효과
- substitute effect - 에너지간의 대체로 인한 효과

■ Sustainability evaluation

환경부하량(environmental stress)을 적게한다는 면에서 에너지소비감소는 적어도 지속성(sustainability)을 위한 필요조건으로 볼 수 있다. 그래서 환경적 지속성과 분해분석을 연결하기 위해 Malaska(1999)에 의해 제안된, 생산에 있어서 DEenergization과 소비의 측면에서의 IMenergization의 개념을 통해 지속성을 알아보도록 한다.

$$S_{DE} = - I_{effect}$$

$$S_e = - (I_{effect} + S_{effect})$$

- DE-energization: 기술이나 공정의 변화로 인해 생산과정의 에너지감소량
- IM-energization(energy saving): 전반적인 경제활동이 변하지 않는 조건 하에서 에너지 사용의 총감소량(에너지효율의 증가+전체생산량의 share의 감소)

4. 자료 및 분석 결과

4-1. 자료

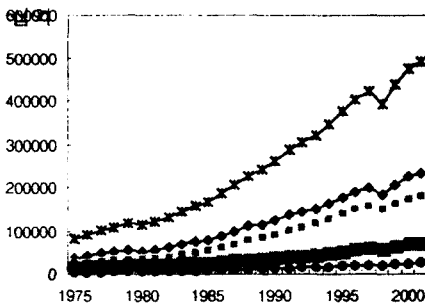
1990년을 기준년도로하여 1975년부터 2001년까지의 에너지 소비의 패턴과 그 변화 요인을

분석하였다.

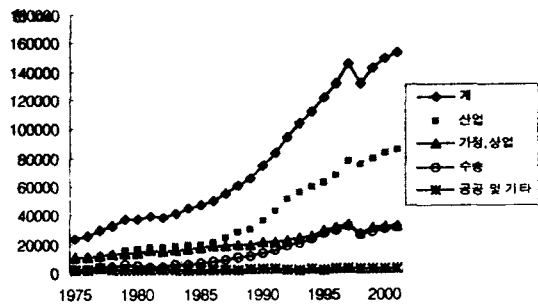
본 연구에 사용된 자료는 연간 부문별 에너지소비량(E)과 부가가치(Q)인데, 에너지소비량은 에너지통계연보(에너지경제연구원)의 자료를 사용하였으며, 부가가치는 통계청에서 발표한 자료를 사용하였다.

본 연구에서는 산업(광업, 어업·농업·임업, 제조업, 건설업), 가정·상업(금융업, 도소매업, 비영리(가계)), 수송(운송관련서비스), 공공·기타(전기수도가스, 통신업, 수입세, 정부서비스, 기타) 등 4부문으로 각 부문별 에너지 소비변화 요인을 분석하였다. 또한 에너지를 석탄, 석유, 도시가스, 전력, 기타 등의 5개로 나누어 그 형태별로 앞서서 정의한 4부문의 에너지소비의 변화를 요인별로 분해하였다.

< 그림 1 >과 < 그림 2 >는 각각 부문별 부가가치와 에너지 소비량을 나타낸 것이다. 전반적으로 유사한 형태를 띄고 있는 것을 알 수 있다.



< 그림1 > 부문별 부가가치



< 그림2 > 부문별 에너지소비량

4-2. 부문간의 에너지변화요인 분석 결과③

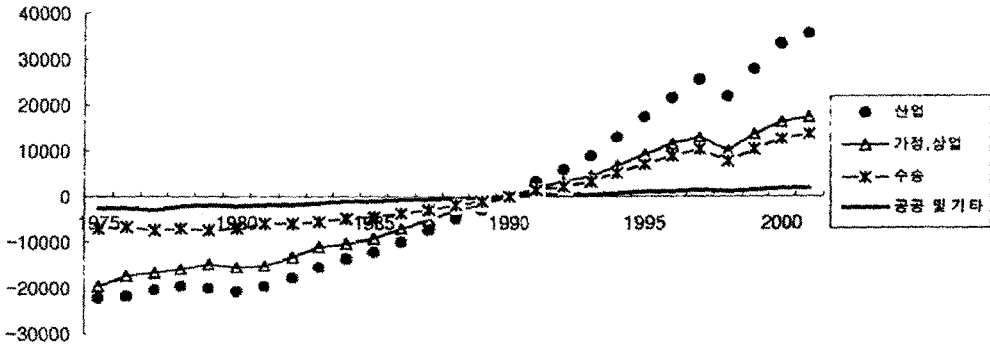
1975-2001년까지의 에너지소비량의 변화는 < 그림 2 >에서 볼 수 있듯이 IMF의 영향을 제외하면 계속 증가추세를 보이고 있다. 에너지 소비량은 산업, 수송, 가정상업, 공공기타 순으로 많은 것으로 나타났다.

먼저 < 그림 3 >에서 경제성장에 따른 에너지소비량 변화를 나타내는 활동효과(activity effect)의 결과를 살펴보면, 모든 부문에서 꾸준한 증가추세를 보이는 것을 알 수 있다. 에너지소비량의 변화와 거의 유사한 형태를 나타내고 있어 우리나라의 75년부터 2001년까지의 에너지소비증가의 요인은 대부분이 경제성장에 의한 것이라 볼 수 있다.

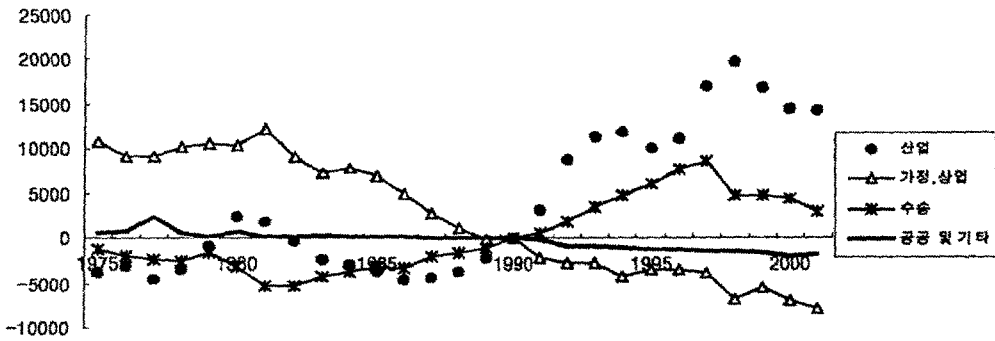
<그림 4>는 기술 및 공정변화에 따른 에너지소비변화효과를 나타내는 집중도효과를 나타낸 것으로 산업부문은 85년 이전까지는 집중도가 감소하다가 그 이후부터 증가하는 것을 볼 수 있는데 이것은 86년 이후에 석유의 가격하락으로 인한 효과로 볼 수 있다. 수송은 75년부터 꾸준히 에너지집중도가 높아져 에너지사용이 비효율적이라 할 수 있다. 한편 가정·상업부문에서는 집중도가 전반적으로 하락하는 것을 볼 수 있는데 이것으로 에너지효율이 향상했음을 의미한다. 가정상업부문에서 에너지집중도 감소가 있었지만 에너지 소비량이 가장 많은 산업부문과 수송에서 에너지집중도가 높아져 집중도효과가 양으로 나타나 에너지절약이 발생하지 않았다.

3 분석결과에 대한 그래프는 Appendix1. 참조

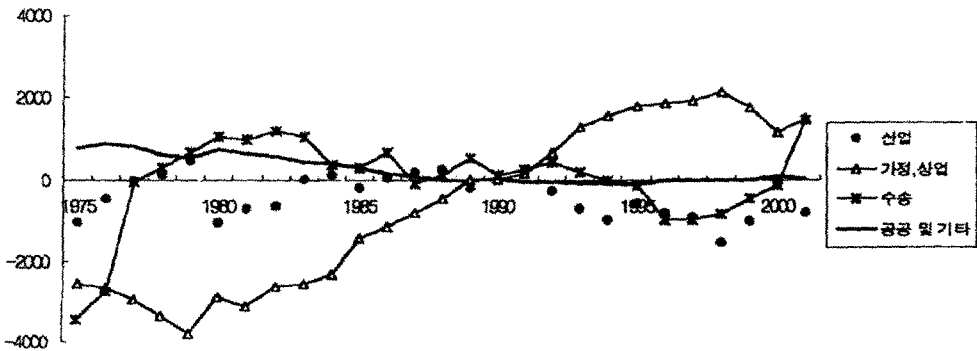
4부문간의 구조적 전환(structural shift)에 따른 에너지소비변화를 나타내는 구조적효과에 대한 결과가 <그림 5>에 나타나 있다. 가정상업부문의 구조적 비중의 꾸준히 증가추세로 인한 에너지소비는 증가하는 추세를 보이고 있으며 공공기타부문은 반대로 비중의 감소로 에너지소비가 감소하고 있다. 한편 산업과 수송부문은 비교적 일정한 비중을 유지하고 있다. 그리고 <그림 6>에서 볼 수 있듯이 구조적 효과는 다른 효과에 비해 그 크기가 작은 것을 볼 수 있어 국내의 경제구조의 변화가 그리 빠르지 않고 그로 인해 발생하는 에너지변화는 적음을 알 수 있다.



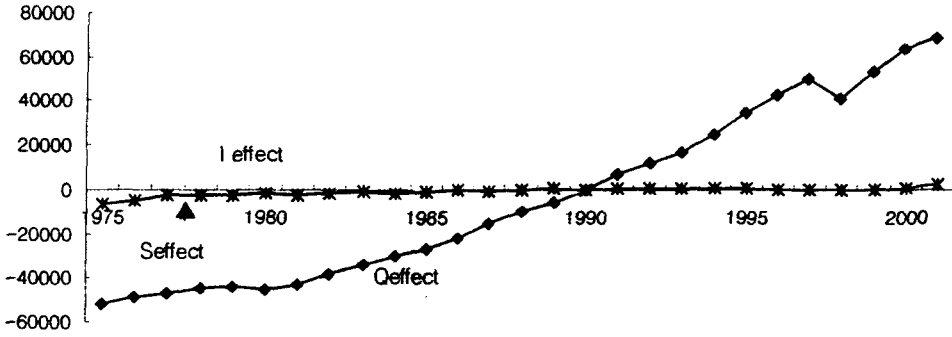
<그림 3> 에너지 활동효과(Activity effect)



<그림 4> 에너지 집중도 효과(Intensity effect)



<그림 5> 구조적 효과(structural effect)



<그림 6 >효과별 에너지소비변화 추이

4-3. 에너지원별 변화요인분석 결과

석탄, 석유, 도시가스, 전력, 기타 등 5개의 에너지형태별로 4부문의 에너지소비변화요인을 분해한 결과가 아래에 나타나 있다. 경제성장효과, 집중도효과, 구조적 효과 등은 그 절대량은 다를지라도 변화추이가 유사한 형태로 나타나게 되므로 에너지형태별로 다른 특성을 나타내는 에너지대체효과(substitute effect)

를 중심으로 결과를 분석해 보고자 한다.

각 에너지원별의 총에너지사용에 대한 비중의 변화에 따른 에너지소비변화 효과를 나타내는 에너지대체효과(substitute effect)는 다음과 같다.

석탄의 대체효과에서 가장 두드러지는 것은 가정상업부문에서 1986년 이후로 급격한 감소를 보이는 것이다. 이것은 가정상업부문에서 석탄이 차지하는 비중이 빠른 속도로 감소하는 것으로 다른 에너지로 대체가 일어나고 있다는 것을 알 수 있다. 산업은 90년대 이후에 에너지 대체로 인한 석탄소비가 감소하고 있는 것으로 나타난다. 석탄에서는 가정상업의 효과로 인해 전체적으로 다른 에너지로 대체되고 있는 것을 알 수 있다.

석유의 대체효과를 살펴보면 산업은 86년 이전까지는 다른 에너지로 대체됨으로 인해 소비량이 감소하다가 86년 이후로 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 86년 이후부터 석유가격 자율화로 인해 가격의 하락으로 인해 에너지소비비중이 늘어난 것으로 보여진다. 가정은 75년부터 꾸준히 증가하다가 95년 이후에 감소하는 것을 알 수 있는데 이것은 석유의 에너지 효율이 상승과 90년대부터 활성화되기 시작한 도시가스의 보급으로 난방의 주연료가 석유에서 도시가스로 대체로 인한 것으로 볼 수 있다. 수송부문은 거의 대체효과가 0인 것으로 나타나는데 이것은 석유 외의 다른 에너지로 대체가 일어나기 어려운 특성을 잘 보여준다.

도시가스는 주로 가정 상업, 공공기타부문에서 사용되고 있는 것으로 나타났으며 1990년대 이후에 본격적으로 사용되기 시작하여 가정상업부문의 에너지소비에 있어서 비중이 급격히 증가하고 있는 것을 알 수 있다.

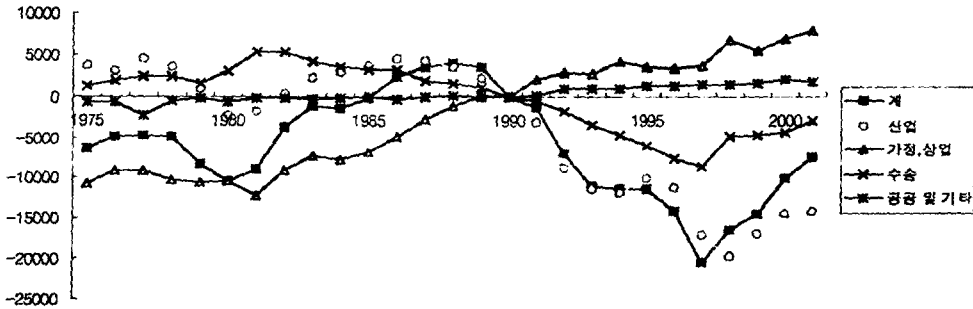
전력의 대체효과를 살펴보면 산업부문에서는 분석기간 동안 별다른 변화가 없는 것으로 나타난다. 한편 가정상업부문에서는 분석기간 동안 꾸준히 증가하고 있다.

이상으로 에너지형태별 대체효과를 분석해 본 결과 가정상업부문에서 특징이 두드러지게 나타나고 있다. 가정상업부문에서는 석탄의 비중이 급격히 하락하고 석유, 도시가스, 전력 등의 비중이 늘어난 것을 볼 수 있는데 이것은 난방에 사용되는 에너지가 석탄위주에서 석

탄, 도시가스, 심야전기 등으로 다양화되고 있는 것을 볼 수 있다.

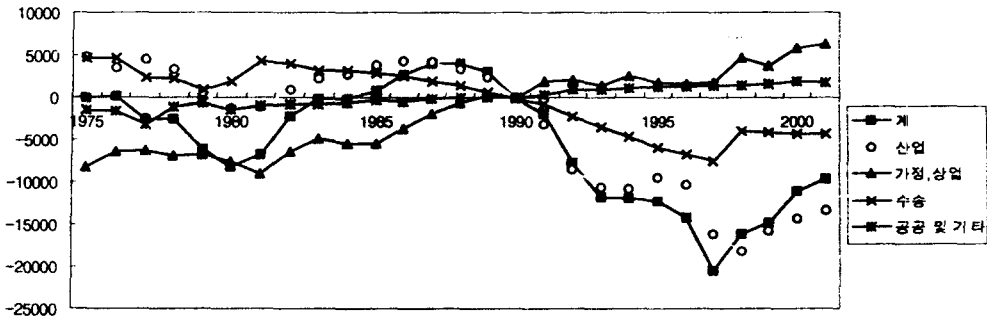
4-4 에너지소비의 지속성

에너지집중도의 감소로 인해 발생하는 에너지소비의 감소를 나타낸 것이 DEenergization이다. 즉 기술이나 공정의 변화 등 에너지효율의 상승으로 인해 에너지소비량이 감소한 것을 의미한다. 따라서 집중도효과에 부호를 반대로 한것과 동일하다. < 그림 7 >에서 그 결과를 보면 가정상업은 꾸준히 DEenergization이 일어나고 있음을 알 수 있고, 산업과 수송은 DEenergization이 일어나고 있지 않음을 알 수 있다. 국내에서는 83년부터 에너지합리화 시설자금이라는 형태로 에너지절약기술에 대해서 정부보조금지원하고 있으며 및 92년부터 에너지절약기술개발사업을 실시하고 있지만 아직까지는 뚜렷한 효과가 나타나고 있지 않다. 오히려 산업의 에너지소비는 에너지가격의 변화에 가장 많은 영향을 받는 것으로 보인다.



< 그림 7 > DEenergization

국내의 에너지절약효과가 어떠한지를 나타내는 IMenergization(energy saving)은 경제성장의 효과를 배제하고 에너지집중도와 구조적 변화로 인해 에너지소비량이 감소한 것을 나타내는 것이다. 따라서 에너지집중도효과와 구조적 효과의 합과 반대값을 갖게 된다. 그 결과가 < 그림 8 >에 나타나 있다. DEenergization과 유사한 형태로 나타나는데 이것은 국내의 에너지소비에 있어서 집중도효과에 비해 구조적 효과가 적기 때문이다. 85년부터 90년까지 IMenergization(energy saving)이 발생하여 우리나라는 전반적으로 에너지절약(energy saving)은 일어나고 있지 않는 것을 알 수 있다. Sun(1998)의 OECD국가가 소비하는 에너지에 대한 지속성 평가에서는 에너지절약이 이루어지고 있는 것과 달리 아직 우리나라는 에너지소비에 있어서 지속가능성은 선진국수준에 이르지 못하고 있음을 확인할 수 있다.



< 그림8 > IMenergization (energy saving)

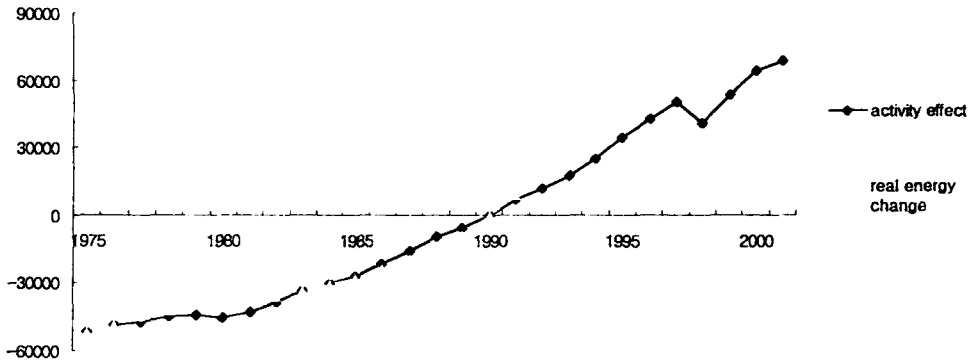
5. 결론 및 토의

본 연구는 산업, 가정상업, 수송, 공공기타 등 4개 부문별 에너지소비량의 변화를 경제성장, 에너지효율, 구조적 변화의 3가지 요인으로 나누어 살펴보았다. 또한 기존의 3가지 요인 분석과 달리 본고에서는 에너지간의 대체효과도 알아보기 위해, 석탄, 석유, 도시가스, 전력, 기타 등 5개의 에너지원별로 경제성장, 에너지효율, 구조적 변화, 에너지대체효과 등의 4가지 요인으로 나누어 분석하였다. 그리고 에너지지속성을 알아보기 위해 DEenergization 및 IMenergization(energy saving)을 분석해 보았다.

에너지원별 분석결과를 살펴보면, 전반적으로 에너지사용량의 변화에 있어서 에너지집중도(energy intensity) 및 구조적 변화(structure shift)에 따른 효과보다 에너지별 비중의 변화로 인한 효과가 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이로써 에너지의 소비변화에 있어서는 대체관계에 있는 다른 에너지로의 변화가 에너지소비 변화에 더 큰 요인으로 작용하고 있다는 것을 알 수 있었다. 가정상업부문에서는 석탄의 비중이 급격히 줄어들고 석유, 도시가스, 전력의 비중이 증가하는 것으로 나타났는데 이것은 난방원료간의 대체효과가 발생한 것으로 보인다.

부문별 분석결과를 정리해보면 국내의 에너지소비의 변화에서 산업은 거의 일정한 소비 패턴을 나타내고 있음을 알 수 있었고, 에너지집중도가 증가하는 것을 나타내고 있다. 이로써 아직까지는 국내 산업의 에너지 효율이 향상되었다고 할 수 없다. 산업과 달리 가정상업 부문에서 에너지 집중도의 하락에 따른 에너지소비감소가 일어나고 있었다. 가정상업부문은 주로 서비스업계로서 부가가치의 증가폭이 큰 것이 주 요인이라 할 수 있다.

우리나라의 에너지소비변화를 3가지 요인을 분석해 본 결과 경제성장으로 인한 활동효과(activity effect)가 가장 큰 요인으로 대부분을 차지하고 있었다. 그리고 구조적 효과(structural effect)가 다른 효과에 비해 적은 편으로 우리나라의 경제적 구조변화에 따른 에너지 소비변화는 그리 크지 않는 것을 알 수 있었다. 기술 및 공정의 변화를 통한 에너지효율 등의 효과를 나타내는 집중도효과(intensity effect)분석결과 85년부터 90년까지는 에너지효율이 상승하였지만 그 외에는 오히려 에너지효율이 감소한 것으로 나타나 80년 초반부터 꾸준히 진행되어온 에너지 절약투자 및 각종 에너지관련 정책의 도입으로 에너지효율을 높이기 위해 노력하고 있지만 최근 25년 간은 에너지효율이 향상되었다고 보기 힘들었다.



< 그림9 > 실제에너지소비량과 경제성장에 따른 에너지소비량의 변화추이

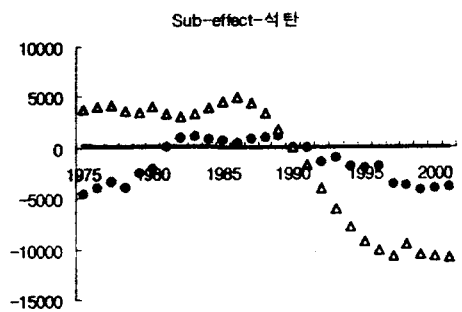
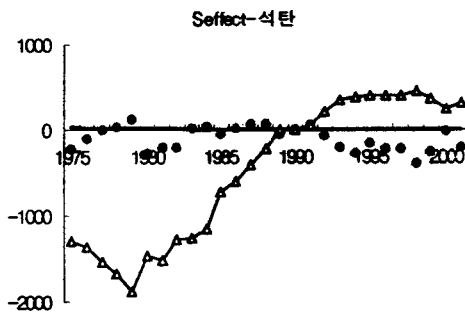
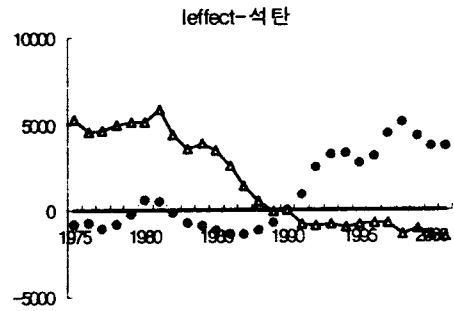
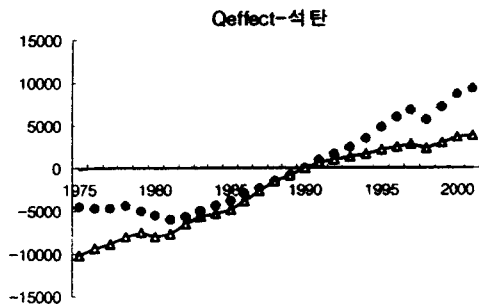
< 그림9 >는 경제성장의 추세에 따른 에너지소비량 변화와 실제 에너지소비량을 나타낸 것으로 그 차이는 IMenergization(energy saving)을 나타낸다. 그림에서 경제성장 추세에 따른 에너지소비량보다 실제 에너지소비량이 더 크게 나타나 우리나라는 IMergization(energy saving)이 일어나고 있지 않음을 확인할 수 있었다. 따라서 우리나라는 에너지 절약을 위한 정책을 좀 더 적극적으로 시행해야 할 것으로 생각된다.

6. 참고문헌

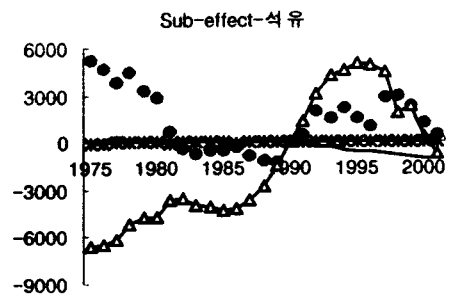
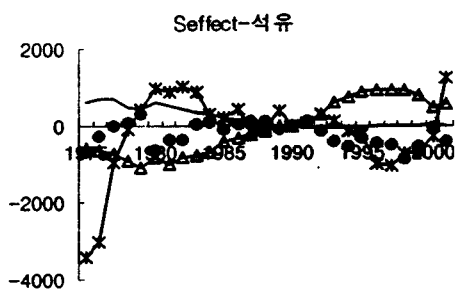
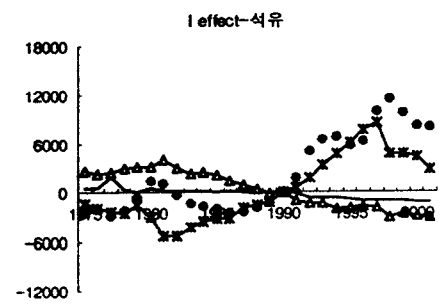
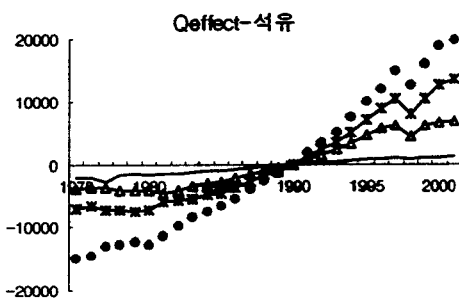
- Jukka Hoffern(2001) Decomposition Analysis of Finnish Material Flows, *Journal of Industry Ecology*, 4(4), 105-125
- J.W.Sun(1998) Changes in energy consumption and energy intensity: A complete decomposition model , *Energy Economics*, 20, 85-100
- J.W.Sun (2000) An analysis of the difference in CO₂ emission intensity between Finland and Sweden, *Energy*, 25, 1139-1146
- Ki-hong Choi, B.W.Ang(1995), Decomposition of the energy-intensity index with application for the korean manufacturing industry, *energy*, 20, 835-842
- Ki-hong Choi, B.W.Ang(2002) Measuring thermal efficiency improvement generation: the Divisia decomposition approach, *Energy* . 27, 447-455
- Lorna A. Greening, William B. Davis(1997) Comparison of six decomposition methods: application to aggregate energy intensity for manufacturing in 10 OECD countries, *Energy Economics*, 19, 375-390
- Pentti Malaska(1999), Decomposition method in Sustainability analysis, *Turku school of economics and business administration Finland futures research centre* , 1/99
- Stephan Moll(1999), Reducing Societal Metabolism: A Sustainable Development Analysis, *Nature, Society and Industry(conference)*
- Yeonbae Kim, Ernst Worrell(2002), International comparison of CO₂ emission trends in the iron and steel industry, *Energy Policy*, 30, 827-838
- 에너지통계연보(1984-2000), 에너지경제연구원
- 경제통계연보(1980-2001), 통계청

Appendix 1. 에너지원별 분해분석 결과4)

■ 석탄

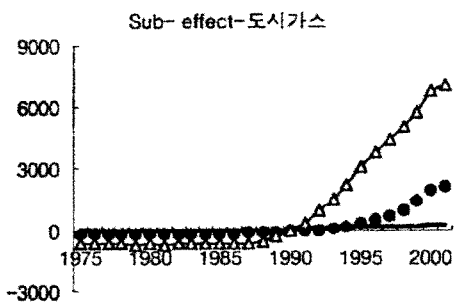
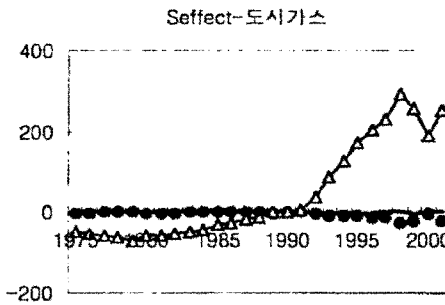
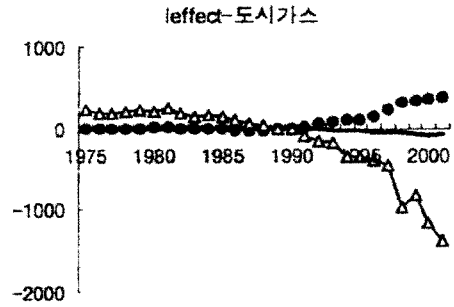
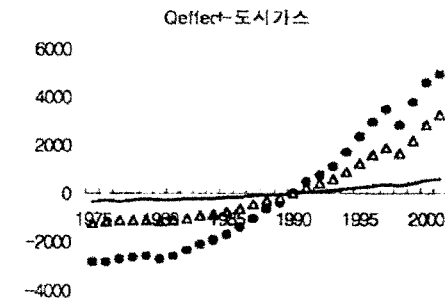


■ 석유



4) ● : 산업 ▲ : 가정·상업 * : 수송 — : 공공기타

■ 도시가스



■ 전력

