

국내 에너지 및 전력산업 부문의 전과정평가

강희정*, 권영한**

(건국대학교 산업공학과*, 한국전기연구소**)

An Overview of the LCA in Energy and Electric Power Industry of Korea

Kang, Hee Jung* · Kwon, Young Han**

(Dept. of Industrial Engineering, Konkuk University*, Korea Electrotechnology Research Institute**)

ABSTRACT

The main results of the LCA case studies were applied in the energy and electric power sector in Korea are summarized. Alternative policies to address global climate change are being debated in many countries. In order to provide comprehensive analyses in support of this process, many assessment models have been developed. Some of models were also expanded for dealing with the effects of greenhouse gas emission. Among them, the LCA was compiled in the model and used as a tool of the technical assessment of electric power sector. In this paper representative analytic methodologies applicable to the LCA are also discussed to judge their usefulness and applicability in the energy and electric power sector.

요 약 문

본 논문은 국내 에너지 및 전력산업 부문의 LCA 연구 및 주요 적용사례 결과를 요약한 것이다. 기후변화 협약에 대처하기 위하여 현재 많은 국가에서는 다각적인 노력을 기울이고 있다. 이러한 노력에 대한 포괄적 분석을 수행하기 위하여 많은 분석 모형이 개발된 바 있으며 현재까지 일부 모형에서는 지구온난화가스 배출 영향 분석까지도 그 영역이 확대되고 있다. 이 가운데는 LCA 개념이 응용된 것도 있으며 주로 전력부문의 기술평가에 적용되고 있다. 현재까지 개발된 이러한 분석적 방법에 대한 유용성과 응용성의 평가를 본 논문에서는 에너지 및 전력부문에 국한하여 논의하였다.

I. 서 론

최근 국가의 에너지 계획, 기술개발 전략 등을 포함하는 모든 경제발전 전략의 구상은 그 개발환경이 지속 가능한 개발(Sustainable development)로 변화하였기에 이를 뒷받침하기 위한 확고한 목표설정 및 관리체계의 수립을 요구하고 있다. 수년간 논의되어온 지속 가능한 개발의 정의가 최근 이슈화되면서 이에 대한 구체적 지표 개발 등의 논의가 국제기관을 중심으로 이루어지고는 있으나 지구온난화가스

감축을 통한 인류의 지속적인 번영이라는 공동 목표에는 변함이 없을 것이다. 이러한 측면에서 모든 경제활동은 에너지사용 및 환경부담 저감이라는 공통적 목표를 달성할 필요가 있다. 또한 상대적으로 에너지와 환경은 공공복지를 위한 비상품성을 지니고 있기 때문에 그 특성과 투자재원의 활용이 국가 전체적으로 최적화되어야 한다. 기술개발 측면에서도 현존하는 거의 모든 기술이 동원되는 거대 복합 기술체적 특성을 지니고 있다.

최근의 지구온난화 문제에 대한 국제적 논의와 국가적 대응전략 수립은 결국 에너지 부문에 대한 환

경제약성을 더욱 부각시키고 있다. 에너지소비는 결국 그 생산에서부터 최종 소비까지 일정한 체인(Chain)을 형성시켜 여러 가지 활동이 시스템화된 결과이다. 이러한 과정에는 생산, 가공, 수송이라는 공급과정에서부터 소비단계에 이르기까지 전 단계에서 환경부하를 발생시킨다. 에너지사용에 따르는 환경부하의 저감에 대한 지금까지의 주 논의의 대상은 에너지의 소비단계를 중심으로 이루어져 왔다. 그러나 앞서 지적한 바와 같이 에너지의 생산에서부터 최종소비 단계까지 전과정에서의 환경부하(온난화가스 등)와 그 영향을 생각할 필요성은 점점 높아가고 있다.

본 논문은 이와 같은 배경 하에 그 동안 국내에서 제품 중심의 전과정평가(LCA)에 비해 다소 부진하였던 에너지부문에서의 전과정평가 논의의 과정을 살펴보기로 한다. 따라서 주로 에너지시스템과 에너지 기술평가 분야(주로 전력시스템의 평가)가 포함된다. 특히 에너지부문의 기술평가 과정은 매우 복잡한 절차이다. 기술의 각 요인들에 대한 속성이 종합적, 체계적으로 고려되어야 하며 또한 물리적이거나 사회심리적인 특성들에 의해서도 평가되어야 하기 때문이다. 따라서 이의 평가방법을 제공하는 적절한 의사결정 모형의 필요성이 제기되는데 전과정평가는 그 하나의 분석 개념으로서 응용될 수 있다. 즉, 제반 에너지·환경부문에 대한 정책수립과 함께 관련 기술의 잠재적 역할을 사전 평가하는데 이용되면서 국가적 차원에서의 에너지 연구개발 정책을 수립하

는 데에도 활용될 수 있다.

II. 에너지와 전과정평가

1. 직접에너지와 간접에너지

일반적으로 생산과정에서나 에너지소비를 생각할 때 다음과 같은 3가지 형태의 에너지가 투입된다고 볼 수 있다(Fig. 1. 참조).⁵⁾

- (1) 직접에너지 소비 : 생산 공정이나 소비단계에서 직접 소비되어진 에너지.
- (2) 간접에너지 소비 : 서비스 및 원료의 형태로 투입되어진 간접적인 에너지소비.
- (3) 제조설비에 투입된 에너지 : 생산에 필요한 설비의 제조에 투입된 에너지.

위의 (1), (2)항은 생산과정이나 소비단계에서 투입되어진 에너지이지만 (3)항은 자본 즉, 스톡(stock)생성으로 소비되어진 에너지로써 직접 및 간접 에너지소비 시점 이전에 투입된 에너지이다. 생산비용의 계산에서 자본비용으로써 설비비용을 상각하듯이 자본형성을 위하여 소비되어진 에너지는 생산 활동이 계속됨에 따라 상각될 수 있다. 매우 단순한 재화의 생산이라도 여러 가지 투입요소의 조합으로 생산이 이루어지고 있기 때문에 투입된 에너지의 공간적, 시간적 흐름을 파악하는 것은 그리 간단하지가 않다. 더욱이 환경부하를 고려할 때는 더욱 복잡해지게 된다. 그러므로 모든 인간의 활동, 상품과 서비스

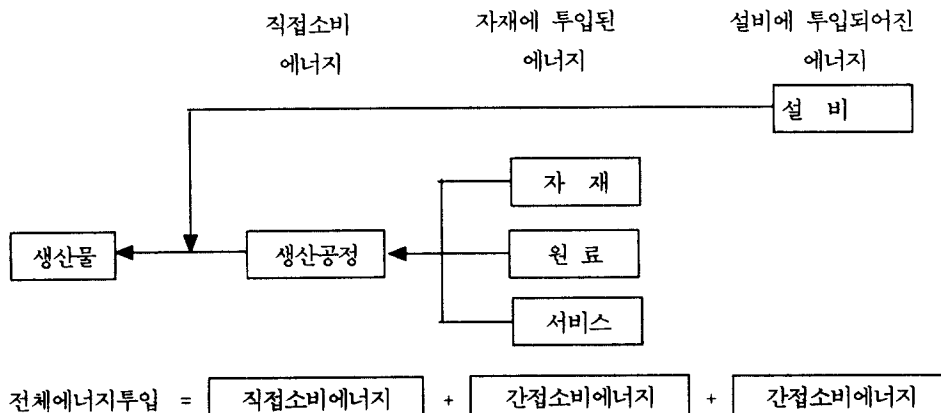


Fig. 1. 직접, 간접 에너지소비의 분석

의 생산에 얼마만큼의 에너지가 소비되고 있는가를 구체적으로 파악하는 것은 에너지계획과 관련 정책 수립의 기본이 되는 것으로 가능한 한 직접에너지 뿐만이 아닌 간접에너지 소비까지를 모두 포함시켜 에너지소비의 척도로 계량화하여야 하는데 이를 보통 에너지부문에서는 “에너지분석(Energy Analysis)”으로 정의하며 이는 환경부문에서의 “전과정평가” 개념과 일치한다. 즉 전과정평가에서 요구하는 소비단계 예서만이 아닌 에너지원의 생산, 유통, 폐기 단계 등에 투입된 간접에너지도 모두 포함시킨다는 의미이다. 지구온난화 방지를 위한 에너지부문의 역할이 강조되고 있는 현실점에서 에너지사용과 환경과의 통합성에 대한 연구에 에너지분석은 유용한 분석 도구를 제공하여 줄 수 있다. 에너지부문에서 고전적이며 협의의 전과정평가 개념이 처음 사용된 것은 1974년과 1975년 2회에 걸쳐 스웨덴 국제 고등연구소의 심포지움에서 “에너지분석(Energy Analysis)”이라는 이름으로 공식화되었다. 이전에는 에너지계량(Energy Accounting) 혹은 에너지예산(Energy Budget)등의 명칭으로 주로 산업(농업 및 제조업 분야)부문에서 응용되어 왔다. 에너지분석의 계량 단위로서는 에너지 원단위(특정 상품 및 서비스의 가치 척도(Kg, Ton, 부가가치, 생산액 등)단위 당 소비된 에너지량(TOE, Kcal, kWh등))가 이용되며 직접 에너지와 간접 에너지 소비를 포함한 확장된 에너지 원단위가 이용될 수 있다.

2. 에너지분석의 대상

에너지분석의 고전적인 원형은 산업연관분석(Input-Output Analysis)에서 찾아볼 수 있다. 산업연관분석은 Leontief에 의하여 창시되어진 이래 세계 각국에서 산업연관표(Input-Output)에 이용되고 있으며 특히 2차 석유위기 이후인 1980년대부터 에너지분석을 목적으로 산업연관분석을 많이 시도하고 있다. 전형적인 산업연관분석에서는 일정한 가정 하에서 부문별 단위 최종수요에 의하여 유발된 각 부문의 생산액을 구할 수 있는데 여기에서 유발대상 부문으로서 에너지부문을 선택하면 각 부문의 최종수요에 의하여 유발되어진 직·간접 1차 에너지 생산액을 구하여 단위소비에 대한 에너지량을 알 수

있으므로 이를 하나의 에너지분석 방법으로 이용할 수 있는 것이다. 그러나 이 방법은 몇 가지의 결점을 내포하고 있으며 또한 결과의 해석에 대한 제한 등으로 인해 방법상의 개선이 필요하다. 그동안 에너지분석이 활발하게 적용된 분야는 에너지생산부문 특히 정유산업과 발전부문이다. 선진국의 공업화가 계속되고 우리 나라를 포함한 개발도상국가들의 공업화 특히 에너지를 다소비하는 중화학공업이 본격화되기 시작한 1970년대 중반이후 각 국가는 대량의 에너지소비에 대응하기 위하여 수입원유에 대한 정제시설 확충과 특히 전력수요에 대한 발전소 건설에 많은 노력을 기울였다. 이같은 1차 에너지원의 가공 산업은 장치의 건설, 운반, 정제, 변환 등의 단계를 거치면서 소비된 에너지가 산출(Output)에너지에 대해 어느 정도의 비율을 갖는가 즉 수지분석(Output/Input)이 중요한 개념으로 이때의 비율이 적을 때는 사용된 1차 에너지원의 가치는 당연히 하락할 것이다. 특히 원자력 발전소의 경우 연료정제에 많은 시간이 필요하고 또한 건설에도 막대한 투자비가 소요되기 때문에 위의 에너지분석 방법이 적용된 대표적인 사례로 꼽히고 있다. Chapman¹⁶⁾ 몇 가지 형태의 원자력발전소에 대한 분석을 통하여 원자력 발전소 건설이 급격히 확대될 경우 생산되는 전력에너지가 발전소건설과 운전, 연료정제에 필요한 에너지보다 낮아 원자력발전소 자체가 에너지공급이 아닌 소비자가 될 수 있는 위험도 있을 수 있다는 점을 지적하였다. 이 연구결과는 찬반의 논의를 야기 시키기도 하였으나 이후 모든 1차 에너지를 대상으로 한 에너지분석을 시도할 수 있게 한 동기를 부여하였다. 여기에 전과정평가 개념이 도입되면서 에너지분석의 응용은 계속 확장되고 있다.

3. 에너지분석의 범위

에너지분석에서 우선 명확한 ‘에너지’의 범위를 정해둘 필요가 있다. 첫째는 간접에너지의 범위이다. 미곡생산의 경우 간접에너지 형태로 투입되는 비료와 농약 등은 보통 화학공업에서는 최종 제품에 해당된다. 이때 이의 생산에 필요한 에너지는 직접에너지 형태로 소비된다. 따라서 미곡생산에서 이들 제품에 소비된 에너지를 계량 하게 되면 중복계산이 된

다(이에 대한 방법론적인 사항은 후술). 보통 직접 에너지소비는 통계자료 등에서 쉽게 구할 수 있지만 간접에너지 소비량을 얻기 위해서는 많은 시간과 노력이 필요하며 경우에 따라서는 큰 의미가 없을 수도 있다. 이들 간접 에너지 소비를 무한히 확장, 포함시킨다면 그 범위는 끝도 없이 넓어질 것이다. 두 번째는 상업용 에너지와 비 상업용 에너지의 구분이다. 우리가 통상 생각하는 에너지는 그 질에 의하여 수요와 공급에 따라 시장가격이 형성되거나 정책적인 요인에 의해 결정되어진다. 생산의 또 다른 요소인 노동, 자본, 토지 등의 가치도 물론 에너지와 마찬가지로 시장가격으로 표현되나 어느 정도 이들 요소의 대체는 가능하지만 이들 모두 동일하게 취급할 수 없듯이 에너지분석에 포함되는 에너지원도 석유, 석탄, 가스 등의 상업적인 과정을 거쳐 판매된 혹은 판매 가능성이 있는 상업용 에너지에 국한된다. 농업 생산에서 일조량은 중요한 에너지원이지만 이는 수급의 문제나 그 자체가 시장성을 갖고 있는 것은 아

니다. 이와 같은 에너지원은 상업용 에너지와 물리적 의미는 같아도(열량 기준으로 환산 가능) 사회, 경제적 의미는 완전히 다르다.

Ⅲ. 에너지분석의 방법

에너지분석의 방법은 크게 3가지로 구분되는데 첫째는 미시적 분석방법으로서의 공정분석 방법(과정분석)이며 두번째 방법은 산업연관분석이다. 세번째 방법은 주로 에너지생산분야, 주로 발전부문에 널리 사용되는 에너지 수지분석이다. 이러한 기본분석 방법과 에너지분석의 확장분야 특히 환경문제와의 관계를 정리하면 Fig. 2와 같이 표현할 수 있다.⁵⁾

1. 공정분석(Process Analysis)

어떤 특정제품을 생산하는 공장은 많은 부분공정의 결합으로 구성되며 다시 부분공정은 단위공정으

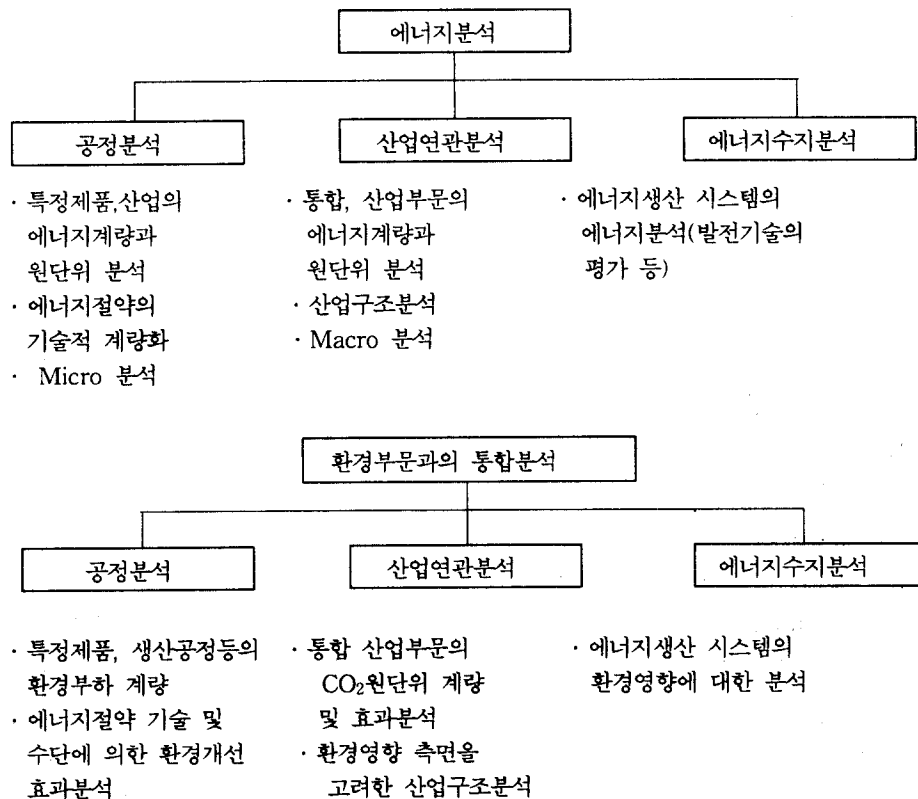


Fig. 2. 에너지분석의 방법과 응용분야

로 이루어진다. 공장 전체의 직·간접소비 에너지는 이를 구성하는 각 단위 공정에서 필요로 하는 에너지를 모두 합산함으로써 구할 수 있는데 이를 공정 분석 방식이라고 한다. 즉 Bottom up approach를 채택한다. 에너지분석에서 많이 이용되고 있는 것이 바로 이 방법이다. 이 방법의 장점으로서는 우선 어떠한 형태의 분석 대상이라도 적용 가능하며 특히 에너지분석을 통한 에너지절약과 환경부하에 관련된 내용을 분석하는데 용이하다. LCA에서도 시스템이나 기술의 평가보다는 제품관련 분야에 주로 응용되고 있다.

국내 한 시멘트 제조회사의 시멘트 Ton당 생산에 필요한 총 전력량은 109.84Kcal인데 만일 전력사용 설비의 고효율화나 절전기술을 도입하게 되면 10%의 전력소비가 감소될 수 있다고 한다면 총 전력소비량은 98.86 kWh/Ton이 된다. 이때 10%의 전력을 절약할 수 있는 기술적 해결문제, 투자비 분석 등을 통하여 적절한 절전 프로그램의 2차 분석까지도 가능하며 환경개선 효과까지의 분석도 가능하다고 볼 수 있다. 이 방법의 결점은 우선 에너지계량을 위한 노력이 많이 요구된다는 점이다. 매우 간단하게 보이는 생산공정이라도 그 구성요소를 추적하여 보면 상당히 복잡한 것이 보통이며 더욱이 그 하나 하나의 부분에 소비되어지는 에너지량을 구한다는 것은 많은 노력, 시간, 비용이 필요하다. 더욱이 다수의 제품과 활동이 그 구성요소에서 이루어지는 경우(동일공정에서 복수제품이 생산되는 경우)의 소비에너지량 측정은 매우 복잡하게 된다. 이는 어느 제품에 얼마만큼의 소비에너지량을 어떻게 배분할 것인가의 문제이다. 또 하나의 문제는 계량결과가 실제와 많은 차이가 날 수 있다는 가능성이다. 동일한 제품을 생산하는 공정이라도 완전하게 같은 것은 아니며 설사 동일하다 하더라도 여러 요인에 의하여 투입에너지량이 반드시 동일할 수는 없는 것이다. 공정의 필요에너지는 시간에 따라 또 공장의 생산능력이나 여건에 따라 차이를 갖게 되기 때문이다.

2. 산업연관분석(Input-Output Analysis)

모든 산업 혹은 상품의 생산에서 상호간의 연관 구조를 분석할 때 Leontief에 의해 개발된 산업연관

분석이 유용하게 이용될 수 있으며 이를 에너지분석에도 응용할 수 있다. 산업연관분석을 이용한 에너지 분석 방법을 설명하면 우선,

X_i : i산업부문의 총 생산액(i는 산업분류에 따른 분류로써 예를 들어 제지, 석유, 비금속 광물산업 등을 말함)

X_{ij} : i산업에서 j산업부문으로의 중간재 투입액

D_i : i산업부문의 국내 최종수요

E_i : i 부문의 수출액

M_i : i 산업부문의 수입액으로 정의하면

i 산업의 총생산액 X_i 는 다음 식과 같이 표시된다.

$$X_i = \sum_j X_{ij} + D_i + E_i - M_i \quad (1)$$

여기에서 각 산업부문의 중간재 투입비율이 일정, 즉

$$X_{ij} / X_j = a_{ij} \quad (2)$$

가 일정하다면 (1)식은 D_i, E_i, M_i 가 주어졌을 때 X_i 에 관한 일차연립방정식이 된다. 이는 다음과 같이 된다.

$$X_i - \sum_j a_{ij} X_j = D_i + E_i - M_i \quad (3)$$

여기서는 a_{ij} 는 투입계수로 불려진다. 따라서 이 방정식을 이용하면 i 산업의 최종수요 한단위 증가에 필요한 에너지생산산업 부문의 생산액 증가량을 계산할 수 있다. 예를 들어 자동차산업의 최종수요 100만원의 증가에 대해 석유산업 생산액 증가량이 5만원이라는 결과를 얻었다면 이는 최종 수요재 로써의 자동차 100만원 생산을 하는데 5만원가치의 석유 투입이 필요하다는 것을 의미한다. 이처럼 기존의 산업연관분석의 수법은 최종수요에 대한 에너지산업 부문의 생산유발계수(위의 예에서 석유생산의 유발계수는 5만원/100만원 즉, 0.05이다)를 이용한다는 점에서 에너지분석이 일단은 가능하다. 그렇지만 이를

좀더 살펴보면 유발계수는 어디까지나 최종수요로부터의 유발량을 나타낸 것이고 최종재(자동차와 같은) 이외의 구성품 중의 하나인 철강과 같은 중간재의 경우에서 얻은 결과에 대한 해석은 곤란하다. 또한 이러한 방법은 모두 금액단위로 계산을 하고 있으므로 에너지가격이 변동되는 경우 이를 어떻게 처리할 것인가도 문제점의 하나이다. 이상과 같은 산업연관 분석을 보다 더 에너지분석의 관점에서 분석한 형태가 미국의 Herendeen에¹⁰⁾ 의하여 제시되어졌는데 재화나 제품 단위 생산액 당 필요한 1차 에너지량(Kcal등의 열량)을 그 재화의 에너지원단위라고 정의하여 사용하고 있다. 이는 앞에서 설명한 공정분석을 이용하여 구할 수 있다. 즉 직접, 간접에너지 소비를 구한다는 것은 한가지 재화의 생산에 필요한 에너지가 그 재화에 보존되어지고 그 재화를 원료로 한 다음단계의 재화에도 계속 포함된다는 사실을 기초로 하고 있다.

산업연관분석은 공정분석과 대조적인 성격을 갖고 있다. 산업연관표는 많은 노력과 시간을 투자해 만든 데이터베이스로써 이용자 입장에서 보면 분석목적에 맞게 대부분의 데이터를 그대로 이용할 수 있어 공정분석보다 자료분석이 비교적 간단하다. 물론 공정분석에서도 관련자료가 충분히 확보되어있는 경우는 예외이다. 또 국가경제 전체를 대상으로 충분한 검증을 거친 관계로 결과의 차이도 적다. 그러나 산업연관표에서의 산업 및 상품의 분류는 많아야 수백개에 불과하고 이로부터의 결과는 그 산업부문 전체의 평균치이다. 예를 들면 비금속광물 산업에서의 특정 유리제품의 에너지원단위나 환경부하를 구하는 것은 불가능하고 전체 유리제품의 평균치만을 구할 수 있을 뿐이며 이 역시 단위는 단위금액당의 에너지원단위나 환경부하이다. 따라서 산업연관분석과 공정분석 가운데 어느 것이 우수한가는 일률적으로 판단할 수 없다. 비교적 큰 분류에서의 상품과 산업부문의 분석은 산업연관분석 방식, 개별적 제품과 활동에 대해서는 공정분석을 기초로 하여 서로 보완적으로 그 결과를 이용하는 것이 바람직할 것이다. 산업연관표 분석의 장점으로서 산업연관표가 국가 경제구조를 나타내는 것이므로 경제동향과 에너지 소비의 관련을 정량적으로 파악하는 데에 유용하며 산업부문의

투입/산출 구조를 명확하게 하는 것이므로 각 업종에서의 직접적인 에너지소비를 근거로 전체 산업부문의 분석이 가능하다는 장점이 있다. 그러나 동일부문에 속하는 2차 에너지 제품의 가격차이의 문제나 산업분류가 세밀하지 못한 산업연관표(수십 개 부문 정도)를 이용하는 경우는 바람직하지 못한 결과를 얻을 수 있다.

3. 에너지수지 분석

에너지수지 분석방법이 일반적인 에너지분석과 다른 점은 에너지생산프로세스를 주요대상으로 한다는 점이다. 화력발전소의 경우 에너지입력은 석유, 석탄 등이고 출력은 전기에너지이다. 즉 투입된 에너지와 생산된 에너지는 그 양과 질이 다르다. 따라서 에너지수지 분석의 목적은 직, 간접으로 투입된 에너지와 산출된 에너지를 양적, 질적으로 어떻게 비교할 것인가를 분석하는 것이다.

에너지수지분석에는 총 에너지수지(Gross energy analysis)와 순 에너지수지(Net Energy analysis)로 구분할 수 있다.¹⁰⁾ 예를 들어 발전소에서 생산되는 에너지는 전기에너지(E)이며 투입되는 에너지(T)는 건설 및 운전에서 소요되는 에너지이다. 총 에너지수지는 전기 1단위 생산에 필요한 투입에너지와 비즉 T/E로 표시된다. 그러나 순 에너지수지는 발전시스템이 생산하는 에너지의 이용 가능한 순 에너지량을 계산하여 이를 E-T로 표시한다. 발전시스템은 전형적인 에너지생산시스템의 하나로 기본적으로 $E>T$ (즉 $E/T > 1.0$)의 관계식이 성립되어야 한다.

에너지수지 분석에서 투입에너지(직·간접)를 구하는 방법은 이미 앞서 설명된 산업연관분석과 공정분석을 그대로 이용할 수 있다. 공정분석에서는 특정 발전 시스템의 건설과 운영에 필요한 에너지량을 즉, 직접, 간접에너지량을 모두 파악하여야 한다. 발전시스템의 에너지수지 분석이 처음 시도된 것은 앞서 Chapman의 원자력 발전소를 대상으로 한 사례이고 이후 많은 연구가 행하여졌는데 특히 일본의 전력중앙연구소에^{10) 11)} 의해 발전시스템에 대하여 에너지수지 분석과 LCA를 이용한 지구온난화 측면의 영향에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. 연구결과를 요약하면 에너지수지가 가장 높은 것은 원자력(경수로)

발전이고 그 다음이 석유화력으로 평가하고 있으며 비화석 연료원을 이용하는 발전시스템 가운데는 수력, 지열발전이 가장 우수한 것으로 나타나고 있다 (Table 1 참조). 이렇게 화석 연료원을 사용하는 발전시스템의 에너지수지가 높은 이유는 비화석 연료원에 비하여 설비 이용률이 높고 상대적으로 단위출력에 대한 건설에 소요되는 에너지투입량이 아직도 낮기 때문이다. 따라서 태양광, 지열, 풍력발전시스템에 대한 지속적인 기술개발과 경제성 확보에 대한 노력이 계속 뒤따라야 함을 암시하고 있다. 지구온난화 영향에 대한 결과를 보면(건설 및 운용에 필요한 투입자재의 에너지 및 CO₂ 발생 원단위의 계산은 산업연관분석을 이용) 원자력을 제외하고는 대체로 비화석 에너지원이 유리한 것으로 나타나고 있다.

Table 1. LCA를 이용한 발전기술의 온난화 영향과 에너지수지

발전기술	CO ₂ 배출원단위 (탄소 g/kWh)	에너지수지비
원자력	5.7	24
석유화력	200	21
석탄화력	270	17
LNG화력	178	6
수력	4.8	50
지열	6.3	31
태양광(분산형)	34.3	5
파력	24.8	8
풍력	33.7	6
해양온도차	35.9	5

IV. 에너지/환경 기술평가모형과 LCA

에너지계획과 지구환경문제에 대한 대응책 분석의 도구(Tool)로서 에너지 및 환경부문에 대한 의사결정 모형 즉 기술평가모형의 개발이 이루어져 왔다. 이러한 에너지/환경부문간의 통합모형은 기존의 에너지계획 모형과는 여러 측면에서 비교가 된다. 즉, 에너지부문을 중심으로 한 기존의 모형에 비해 분석대상의 공간적 시야가 넓어졌고 기존의 오염물질 배출구조 분석을 확장하여 이산화탄소, 메탄 등의 온난화가스에 대한 분석으로까지 오염물질 분석에 대한 범

위가 확장되었다. 또한 탄소세 도입의 경제에 미치는 영향 분석과 같은 경제적 측면, 효율개선, 신기술 채택 등을 분석하는 기술적 측면, 여기에 상향식 접근방법과 하향식 접근방법을 동시에 이용하는 방법론의 질적 향상까지도 가져왔으며 환경부하 평가시 LCA적인 접근방법도 시도되고 있다. 이는 경제활동과 자원, 환경부문과의 복잡하면서도 어려운 상관관계의 문제 해결을 위해서 환경영향에 대한 측면을 보다 더 광범위하고 심도 있게 분석해야 할 필요가 있기 때문이다. 즉 모든 제품, 재화, 기술, 시스템에 대해 이용 단계에서만 환경문제를 생각할 것이 아니라 전체 수명기간 동안의 평가를 통한 분석 필요성이 제기되고 있다.

최근에 개발된 모형의 일반적 특성²⁾ 1) 분석기간의 장기화; 2) 분석대상 공간의 확대; 3) 모형의 세밀화와 투명성 증대; 4) 불확실성의 고려 등을 꼽을 수 있다. 우선 분석기간의 장기화 관점에서는 기존 시스템모형 등은 장래 수십년 간의 분석기간을 주로 채택하였으나 지구온난화 영향 및 기술, 경제적 시스템은 초 장기적으로 분석되어야 하기 때문에 통합모형에서는 50~100여년(2100년) 정도의 분석기간을 채택하고 있다. 분석대상 공간은 기존 오염 물질원에 의한 환경영향, 예를 들면 산성비와 같은 것이 국지적, 지역적인 것이었으나 기후변화 등과 같은 문제는 발생원이 어디가 되었던 그 영향이 전 세계에 미치는 때문에 분석대상 지역이 일부에 국한되는 것은 큰 의미가 없다고 보아야 할 것이다. 모형의 세밀화와 투명성 증대는 모형 자체가 거대화되고 이에 따른 입력자료의 양적, 질적 수준이 높아짐에 따라 당연히 요구되는 사항이다. 또한 에너지, 환경부문이 그 자체만의 분석에 끝나지 않고 경제부문, 국가 과학기술 체계와의 연계성이 증가함에 따라 그만큼 관련 의사결정 및 전략적 정책수립에도 투명성과 신뢰성을 요구하고 있기 때문이다. 불확실성에 대한 고려는 어느 의사결정 문제도 그러하지만 미래 예측에 대한 불확실한 요소(인구예측, 경제성장률 등)에 대한 평가를 보다 더 구체화시키고자 하는 노력이다. 예를 들어 통합모형의 하나인 New Earth21 모형에서는 60년의 분석기간을 설정하여 에너지 및 환경부문의 주어진 총 시스템비용과 각 관련기술의 평가를 하고 있

다. 목적함수는 다음과 같이 표시된다.⁹⁾

$$Min \sum_{t=1}^6 dt(\text{제 } t \text{ 시점의 시스템 총 비용} + W_t$$

· 제 t 시점의 CO₂배출량)

여기에서

$$dt = \{1/(1+rate)\}^{p(t-1/2)} \sum_{n=0}^{t-1} \{1/(1+rate)\}^n \text{이다.}$$

또한 W_t는 탄소세, rate는 할인율을 가르키며 p는 시점간격(10년)을 나타낸다. 모형에 포함되는 변수는 약 11,000개, 제약 조건식은 9,000개로 구성되며 일반 LP패키지에서도 운영 가능하다. 분석 가능한 기술은 모든 발전기술과 에너지 변환기술이 포함된다. 주요 제약 조건식은 에너지 생산비용 및 CO₂

처리비용, 최종수요에서의 에너지절약 효과, 국제무역, 재생가능 에너지원의 시장 침투효과 등이 포함된다. 지금까지 각 국가 및 국제기관에서 개발된 대표적인 통합모형을 정리하면 Table 2와 같다.²⁾

한편 국제원자력기구(IAEA)에서는 미래의 전력부문 계획 수립 시 필요한 기술평가, 비용, 환경 등의 모든 측면을 분석함이 필요하다는 점을 인식하여 관련자료의 데이터베이스 구축과 이의 활용을 DECADES(Data Base and Methodologies for Comparative Assessment of different Energy Sources for Electricity Generation) 프로젝트를 추진하고 있다.^{8) 20) 21)} 이 프로젝트에는 ESCAP, IBRD, OECD/NEA 등 9개 국제기구와 우리나라를 포함한 15개국이 IAEA와 CRP(Coordinated Research Program)계약을 맺고 IAEA에서 제공되

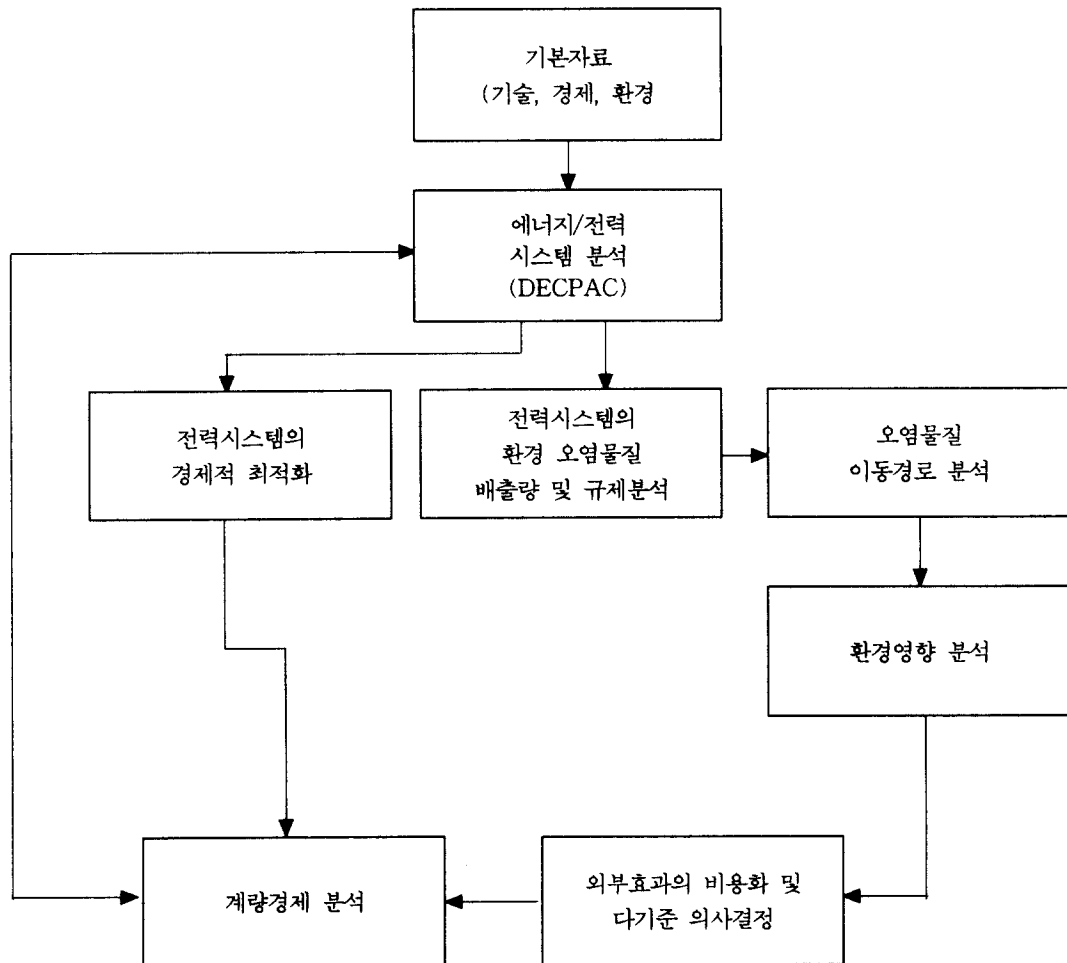


Fig. 3. DECADES모형의 구성요소

는 정보와 소프트웨어를 이용하여 각국의 사례연구를 수행한 바 있다. Fig. 3은 DECADES의 전반적인 연구범위이다. 입력자료로는 크게 기술, 비용, 환경관련 데이터베이스가 구성되며 전력공급시스템 분석은 DECPAC 모형을 통해 이루어진다. DECA

DES프로젝트의 목적은 미래의 전략부문에 대한 계획수립과 의사결정을 위해 전력공급원별로 연료의 추출(채광)에서부터 발전소에서 사용한 후 최종처분에 이르기까지의 전과정을 포함한 Energy Chain(전과정)측면에서의 비교를 하는데 있다. 앞서의 데

Table 2. 모형별 세부 분석기능

모형	개발기관	세부분석기능							
		지역분할	경제	온난화가스	대기	기후변화	물리적평가	경제적평가	불확실성평가
AIM	일본 국립환경 연구소	19개 경제지역	간단함	중간	중간	상세함	상세함	X	△
CETA	미국 Peck, EPRI	2개(선진국, 개발도상국)	중간	중간	간단함	간단함	간단함	간단함	△
CSERGE	영국 U. of London	세계전체	간단함	△	간단함	간단함	간단함	간단함	○
DICE	미국 Yale 대학	세계전체	중간	간단함	간단함	간단함	간단함	간단함	△
ESG	스위스 연방기술연	국가단위	상세함	간단함	간단함	간단함	X	중간	○
GCAM	미국 Pacific North-west Lab	9개 지역	상세함	중간	중간	중간	중간	중간	○
ICAM-2	미국 카네기멜론대학	2개(선진국, 개발도상국)	간단함	중간	중간	중간	상세함	중간	○
IIASA	IIASA	12개 경제지역	중간	상세함	상세함	상세함	상세함	간단함	△
IMAGE	네델란드 RIVM	10개 경제지역	X	중간	상세함	상세함	상세함	X	△
ISM	미국 로렌스 리버모어 연구소	세계전체	X	X	상세함	상세함	X	X	△
MAGICC	미국 UCAR	세계전체	X	X	상세함	상세함	○	X	△
MARIA	일본 동경이과대	3개 지역(일본, OECD, 기타)	중간	간단함	간단함	간단함	간단함	간단함	△
MARKAL-MACRO	IEA, ETSAP	국가단위	상세함	상세함	상세함	상세함	중간	상세함	○
MELODIE	CEA	국가단위	상세함	간단함	상세함	간단함	중간	중간	△
MERGE	미국 스탠포드대학	5개 지역	중간	중간	간단함	간단함	간단함	간단함	△
MiniCAM ¹	미국 Pacific North-west Lab	9개 지역	중간	중간	중간	중간	간단함	간단함	○
EPPA	미국 MIT대학	12개 경제지역	상세함	상세함	상세함	상세함	상세함	상세함	○
New Earth ¹	일본 요코하마대학	10개 지역	간단함	중간	간단함	간단함	미정	미정	△
PAGE	영국 케임브리지대학	4개 지역	간단함	△	간단함	간단함	간단함	간단함	○
PEF	미국 Decision Focus Inc.	2개 지역(미국 및 기타)	간단함	간단함	간단함	간단함	중간	중간	○
TARGETS	네델란드 RIVM	임의 분할가능	간단함	중간	중간	중간	중간	간단함	○

주: ○ 평가 가능, △ 일부 평가가능(모형 내에서 명시적으로 분석되지는 않음), X 평가 불가

이터베이스 역시 이러한 관점에서 작성된다. 즉, 화석연료, 원자력, 재생가능 에너지 등에 대한 포괄적인 정보를 의사 결정자와 에너지분석가에게 제공함으로써 지속 가능한 개발을 위한 자료를 제공함에 있다.

Table 2에서 대표적인 모형의 하나인 MARKAL 모형도 최근 이러한 LCA적 분석이 포함되도록 확장하고 있다.

V. 에너지/전력부문의 LCA

LCA는 산업제품이나 기술의 환경부하나 영향을 평가하는 유용한 체계이다. 환경부하는 CO₂, NO_x, SO_x 그리고 에너지부하 등이 포함되는데 실제로 LCA에 포함될 수 있는 환경 부하요소는 매우 많다.¹¹ 그러나 이를 모두 평가함에는 방대한 자료와 노력이 요구될 것이다. LCA의 구성요소 가운데 무엇보다도 인벤토리 분석(Inventory Analysis)이 선행되어야 한다. 인벤토리 분석이란 해당 공정과 자재를 이용하여 산출된 제품에 의하여 발생할 수 있는 환경부하가 어떻게 투입, 산출되는가를 규명하는 단계이다. 제품의 전과정에 걸쳐 발생할 수 있는 환경부하를 모두 열거하는 일이란 그리 용이한 작업은 아니다. 또한 인벤토리 분석 과정에서는 제품이 유발하는 환경부하를 측정할 수 있는 단위도 함께 결정되어야 한다. 국내에서 에너지계획 부문이나 기술평가에 대한 LCA 적용은 제품에 대한 LCA 분야에

비해 그리 활발한 편은 아니다. 여기에서는 그동안 국내에서 수행된 에너지부문 주로 전력부문의 대표적인 사례를 중심으로 살펴보기로 한다.

1. 인벤토리 부문(LCI)

발전기술의 LCA 적용연구로는 우선 과학기술부가 수행한 “에너지 기술혁신 전략에 관한 연구(1998)”를 들 수 있다.³⁾ 분석대상은 석탄, 석유, 가스화력, 원자력, 수력의 우리 나라 전원 구성에서 차지하고 있는 주요 발전기술을 모두 대상으로 하고 있다. 즉 전력사업용의 상용플랜트의 설계를 기본으로 대상시스템의 발전용량과 기기 구성을 결정하여 분석하였다. 분석 대상 발전시스템의 용량은 석탄발전 800MW, 석유와 LNG화력은 500MW, 원자력은 1,000MW이다. 설비 이용율, 발전효율 및 소내 소비율은 현재 운영되고 있는 국내의 각 발전시스템 자료를 참고하여 설정되었다.

분석의 과정을 간략히 설명하면 먼저 설비에너지에 대해서는 소재, 제조, 수송, 건설에 대해 투입에너지를 계산하고 운용에너지는 발전플랜트만이 아닌 연료의 채굴, 수송, 정제 등의 각 과정에서 투입되는 에너지를 계산한다. 본 연구에서는 플랜트의 제조, 수송, 건설에너지를 총 소재에너지의 20%로 가정하고 이를 포함해 설비의 총 투입에너지를 계산하였다. 이상과 같은 데이터를 사용하여 전력시스템 전체의 에너지수지 분석 및 이산화탄소 배출량을 구하기로 한다. 또한 발전플랜트의 경우 모든 설비소재량을 구

Table 3. 각 발전시스템의 총수지 및 순수수지

구 분	총 수 지		순 수 지(Tcal)	
	20년	30년	20년	30년
석탄화력	11.30 (50.7)	11.50 (38.3)	103,140	155,046
석유화력	19.59 (87.9)	19.98 (66.5)	124,846	187,465
LNG발전	4.1036 (18.4)	4.1045 (13.7)	88,238	132,367
원 자 력	21.00 (94.2)	21.00 (69.9)	344,964	517,744
수 력	22.29 (100)	30.05 (100)	899,068	1,364,971

주 : 괄호는 수력을 100으로 하였을때의 값임.

하는 것은 불가능 하므로 주요 소재를 우선 파악하여 이를 전체의 70%로 가정하였다.¹²⁾

각 발전시스템별 수지분석 결과는 Table 3과 같다. 분석에서 적용된 내용 연수 30년을 기준으로 한 투입에너지 대비 산출에너지 즉, 총 수지비율은 수력 발전이 30.05로 원자력발전의 약 1.5배, 가장 낮은 값을 보이는 LNG발전의 7.3배에 이르고 있다(수력을 100으로 보았을 때 원자력 69.9, 석탄 38.3, 석유 66.5, LNG발전 13.7 이다). 설비수명 20년을 가정한 경우에는 그 차이가 어느 정도 감소되지만 수력과 원자력발전이 여전히 큰 값을 유지하고 있다. 특히 수력과 원자력발전이 높은 값을 보이고 있다.

이는 수력과 원자력이 막대한 설비 소재에너지의 투입에도 불구하고 산출에너지 비율이 상대적으로 높아 우수한 전원임을 입증하고 있다고 보아야 할 것이다. 특히 수력의 경우에는 발전소 연료에너지가 거의 투입되지 않으며 원자력의 경우에는 단위용량 증가에 따른 효율 향상, 높은 이용율의 유지 등의 요인에 기인된다. 원자력과 함께 기저부하 전원으로 이용되는 석탄(유연탄)화력의 경우에는 원자력의 54.8%의 수준으로 석유발전보다 다소 낮은 것으로 나타나고 있다. 이는 발전소건설 등에서의 소재에너지 필요량이 높기 때문이다. 전체적으로는 수력, 원자력, 석유, 석탄(유연탄)화력, LNG발전의 순서이다. 열량으로 환산된 순수 수지(산출에너지에서 투입에너지를 제외한 값)측면에서의 순서도 총 수지와 동일하다. 물론 여기에서는 분석된 각 발전시스템의 제시된 운영조건이 다를 경우 서로의 비교는 다소 차이

가 발생할 수 있다.

발전소에서의 연료연소 과정을 포함해 설비의 제조, 수송 등 전과정에 대한 각 발전시스템의 이산화탄소 배출량은 Table 4와 같다. 원자력발전이 가장 우수하고 그 다음은 수력, LNG발전, 석유화력의 순서이다. 이는 본 연구에서의 전과정평가 기존의 분석 방식인 발전단계에서 만의 이산화탄소 배출량에 대한 일반의 인식과 거의 동일한 결과를 얻고 있다. 단 수력이 원자력발전 보다 수치가 높게 나타난 이유는 수력의 소규모 용량에 따른 설비, 자재의 소재 에너지의 고정비율이 높은 이유 등에서 비롯된 것으로 볼 수 있다. 석탄화력의 배출계수가 전과정평가에서도 높게 나타남에 따라 발전원 가운데 이산화탄소 배출 저감 노력이 가장 요구되는 분야임이 다시 한번 증명되고 있다.

또 다른 전과정평가에 대한 연구로는 한국가스공사에서 수행한 천연가스 전과정 환경영향 평가를 들 수 있다.⁷⁾ 발전용 및 산업용 연료로서 가스(LNG)와 타 연료원인 석탄, 석유, 원자력과의 환경성 비교평가를 하였다. 포함된 환경영향 인자(특성화 인자)로는 자원고갈, 지구온난화, 오존층 파괴, 산성화, 부영양화, 광화학적 산화물 형성, 생태계 독성으로 구분하였다. 발전용 연료원에 대한 환경성 비교는 Table 5와 같은 결과를 제시하였는데 원자력을 제외한 화석연료 가운데 가스가 환경 친화적 우위성을 확보하고 있다. 이러한 결과는 그 동안 발전단계에서 만의 환경성 평가 결과와도 일치되며 국내외 유사연구와도 거의 동일한 결론을 얻고 있다. 또한 환경, 경제성 통합평가를 수행하였는데 이는 지구온난화, 산성화, 부영양화, 자원고갈 등의 환경성과 지수와 건설비, 운전유지비, 연료비의 경제성과 지수를 구하여 통합비교 지수를 구하였다. 분석방법으로는 1998년 B. C. Lippatt가²²⁾ 발표한 BEES(Building for Environmental and Economic Sustainability)를 채택하고 있다. 이 방법의 가장 큰 특징은 경제성분석으로는 전주기비용(Life Cycle Cost)을 이용하며 다요인 의사결정 기법(Multiple Attribute Decision Analysis)을 채택하고 있다. 분석결과를 살펴보면 환경성과 지수의 가중치가 클수록 가스의 발전용 연료로서의 상대적 유리함이 증가되는 것으로 나타나

Table 4. 각 발전시스템의 이산화탄소 배출원단위

구 분	CO ₂ 원단위(10 ⁴ t-CO ₂ /MWh)	
	20년	30년
석탄화력	0.9047	0.9040
석유화력	0.7321	0.7314
LNG발전	0.7274	0.7221
원 자 력	0.0228	0.0223
수 력	0.0379	0.0273

Table 5. 발전용 연료간의 환경성 비교(전기 1GWh 생산 기준)

구 분	LNG	석탄	석유	원자력
자원고갈 (kg resource equiv.)	2.16E+05	4.52E+05	2.69E+05	1.06E+01
지구온난화 (kg CO ₂ equiv.)	CO ₂ 6.23E+05	CO ₂ 9.24E+05	CO ₂ 7.49E+05	CO ₂ 9.21E+00
오존층 파괴 (kg CFC11 equiv.)	Halon 1.22E-03	Halon 2.75-03	Halon 3.92E-01	Halon 3.55E-08
산성화 (kg SO ₂ equiv.)	SO _x 4.21E+02 NO _x 7.01E+00	SO _x 2.87E+03 NO _x 1.33E+03	SO _x 2.52E+03 NO _x 1.52E+03	SO _x 4.73E+00 NO _x 2.38E+00

고 있다. 이는 가스발전의 발전단가가 높기 때문이다. 즉, 경제성은 다른 연료보다 낮기 때문이다. 일반적인 LNG발전의 특성은 연료비는 고가이나 건설비가 비교적 저렴하고 열효율이 높다. 발전소 건설기간은 원자력, 석탄화력에 비해 가장 짧다.

열병합발전 시스템에 대한 LCI연구 사례는 1997년 에너지관리공단에 의해 수행된 바 있다.⁶⁾ 시스템은 목동에 위치한 열병합발전 플랜트, 소각플랜트를 대상으로 하여 지역난방용 열과 전력을 공급하기 위한 연료생산, 가공, 공급에 이르기까지의 전과정에 걸친 에너지소비, 대기 및 수질오염, 폐기물 발생에 대한 LCI 분석을 실시하였다. 계산은 Boustead Model 2.0을 이용하였다. Boustead 는 상업용 전과정 목록 분석 연산용 소프트웨어로 영국의 Boustead Consulting Ltd.에서 개발되었다. 본 연구는 국내에서 처음으로 상용 발전소를 대상으로 한 LCI 분석 연구이다.

2. 영향평가

인벤토리분석 이후에는 영향평가(Impact Assessment)가 이루어져야 한다. 영향평가는 인벤토리 분석과정에서 포함된 환경부하에 대하여 제품이 갖는 환경부하의 값으로 표현하고 또한 인벤토리상의 환경부하가 갖는 상대적인 중요도를 측정함으로써, 개별 제품에 대한 환경부하의 총합을 산출하는 과정이다. 이를 위해서는 각 환경부하단위에 대한 환경부하의 값을 산출하여야 한다. 환경부하값을 결정하는 수법은 현재까지 다수 제시된 바 있으나 전세계적으

로 범용화 되지는 않고 있다. 영향평가가 시간적, 공간적으로 평가치가 가변적이며 불확실성을 내포하고 있기 때문이다. 또한 환경부하항목이 갖는 영향력의 측면에서 환경부하의 가중치를 산출하는 수법이 매우 다양하며 주관적일 수도 있기 때문이다.

영향평가에는 크게 두 가지 방법으로 구분된다.¹⁾ 하나는 직접적인 요소와 간접적인 요소를 계량적으로 측정하는 수법으로서 가장 일반적인 수법으로 볼 수 있다. 이것은 실제로 발생하는 환경해악적인 요소를 원인과 결과로서 직접 찾아서 계산하는 수법이다. 따라서 많은 노력과 비용이 소모되므로 그리 실용적인 것으로는 볼 수 없다. 두 번째는 인간의 지능, 경험, 정보, 본능 그리고 정보처리능력을 활용하는 수법이다. 이 수법은 전술한 수법에 비하여 시간과 노력이 훨씬 적게 소모되는 수법이다. 그러나 이 수법은 인간의 두뇌에 의존하는 수법이므로, 분석자의 경험이나 지식체계 등에 따라서 매우 상대적인 결과를 얻을 수 있는 문제점을 가지고 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서는 평가자가 객관적 판단을 할 수 있도록 근거자료가 확보되는 것이 매우 중요하다.

환경부하의 값은 반드시 절대값의 형태를 가질 필요는 없다. 이는 제품이 절대적인 환경부하값을 가지지 않는 데도 그 이유가 있지만, LCA에서는 상대적 으로 환경 친화적인 제품을 선정하므로 상대적 인 값 만으로도 충분하기 때문이다. 물론 절대적인 환경부하 값을 얻기 위해서는 전자의 방법을 사용하면 가능하지만 이는 많은 노력과 시간이 소모되므로 비현실적이라 할 수 있다.

국내에서 영향평가에 대한 여러 연구사례를 살펴볼 수 있다. 대표적인 것으로는 정확한 부하중요도(상대적 가중치)를 얻기 위하여 계층화 의사결정(Alytic Hierarchy Process: AHP)과 변형 형태 그리고 최근에 제안된 네트워크화 의사결정수법(Alytic Network Process)등을 적용한 사례이다.

AHP는 단일 평가자(Single decision maker)뿐만이 아닌 다수로부터의(Multiple decision maker) 평가도 가능하다. AHP는 여러개의 선정기준을 갖는 여러 대안을 선정하는 다속성(기준) 의사결정방법론으로서, 계층적인 여러 단계를 통하여 최종적인 가중치를 결정한다. LCA 영향평가에서는 대체적으로 대안의 선정보다는 대안선정을 위한 가중치 산출방법에 그 초점을 두게 된다. 다수 의사결정자에 관한 AHP는 여러 전문가가 제시한 쌍대비교 행렬을 기하평균 함으로서 통합화된 가중치를 산출할 수 있는 방법이다. 이 과정에서는 일관성 지수를 이용하여 여러 전문가중 비교적 비교의 일관성이 없다고 판단되

는 정보를 제외하는 방법을 적용한다.

AHP가 많은 장점을 가지며, 또한 많은 응용분야에 이용되고 있지만 이것에 대한 한계성 및 제약도 많이 지적되고 있다.^{4) 13) 14) 15) 17) 19)} 특히 의사결정자의 정성적 판단에 따른 감각의 애매함, 각 대안의 평가기준별 평가치가 1이 되는 정규화의 문제, 독립성의 문제 등은 아직도 해결되어야 할 과제이다. 특히 AHP에서는 의사결정자가 정확한 판단을 하였음에도 불구하고, 종속성을 가진 대안이나 기준이 추가되는 경우에는 대안간의 순위 역전(Rank Reversal)이 발생할 수 있다. 물론 각 대안과 기준간에 완전한 독립성이 확보된다면 AHP의 기본 공리를 이용하더라도 순위역전은 발생하지 않지만, 계층을 구성하는 과정에서 이와 같은 독립성을 확보하는 것은 매우 어려운 일이다.

이와 같은 이유로 많은 의사결정 문제에서 AHP의 변형된 형태가 사용되고 있다. AHP를 문제의 성격에 따라 보완시킨 것들이다. 대표적인 형태를 예시하면 Table 6과 같다.

Table 6. AHP의 변형형태 예시

분석 기법		특징	적용 의의
일반적 AHP		여러개의 선정기준을 갖는 여러 대안을 선정하는 다속성 의사결정방법론으로서, 계층적인 여러단계를 통하여 최종적인 가중치를 결정한다.	설문조사를 통한 빈도수 가중치보다 일관성 있는 가중치를 산출할 수 있고, 영향평가와 관련된 여러 요인을 계층화함으로서 쉽게 접근할 수 있다. 또한 여러 대안을 동시에 평가하기보다는 두 개의 대안만을 비교함으로서 인간의 판단과정에 보다 적합하다.
다수전문가를 통한 가중치 결정	C.I.를 이용한 AHP	일관성 지수(C.I.)를 이용하여 여러 전문가중에서 비교적 일관성이 없다고 판단되는 정보를 제외하는 방법을 적용한다.	단일전문가뿐만 아니라 여러 환경전문가에 대한 LCA영향평가에 대한 의견을 종합하여 하나의 수치로 가중치를 표현할 수 있다.
	S.I.를 이용한 AHP	대용가능지수(S.I.)를 이용하여 평균행렬을 중심으로 이상행렬이라 판단되는 행렬을 제외함으로서 전체 기하평균의 일관성을 추구할 수 있다.	
ANP (Alytic Network Process)		AHP의 계층성 한계를 극복하여 네트워크 구조에도 적용할 수 있는 가중치산출 방법을 제시할 수 있다.	내부종속성과 외부종속성을 갖는 구조를 제시함으로서 LCA영향평가와 관련된 여러요인을 동시에 고려하여 최종적인 가중치를 산출할 수 있다.

Table 7. AHP와 ANP의 비교

구분	AHP	ANP
기본 모형	단방향 계층구조 대안들의 독립성	피이드백 구조 내부/외부종속성 인정
계층/네트워크 구조	Goal Criteria Alternative	Control Hierarchy Control Criteria Cluster(Element) Alternative
계산 절차	Eigenvalue Weighting	Eigenvalue Weighting Supermatrix Limiting Properties

Table 6에서 ANP는 AHP를 보완·발전시킨 의사결정론으로서, AHP가 단방향의 계층적구조를 지니고 있는 반면, ANP는 피이드백(Feedback)과 (내부 및 외부)상호종속성(Inner & Outer Dependence)이 허용된 네트워크 구조(Network Structure)를 갖는다는 점에서 큰 차이가 있다. 그 결과 AHP와 ANP에서 사용되는 용어에서도 다소 차이가 있다. AHP에서의 기준(Criteria)과 대안(Alternatives), 그리고 목표(Goal)를 ANP에서는 기준집합(Clusters)과 요소(Elements), 그리고 이들의 상위개념인 통제기준(Criteria ; 이해의 편의상 '하위목표'라고 해도 무방)과 이를 포괄하고 있는 통제계층(Control Hierarchy)으로 달리 표현하고 있다. 또 다른 중요한 차이점으로서 AHP가 기준과 대안들끼리의 상호독립성과 이들간에 피이드백이 없는 단방향흐름을 가정한 반면, ANP는 이들간의 내부종속성뿐만 외부종속성 그리고 계층간의 피이드백 효과까지 고려한다는 것이다. 결국 ANP를 도입함으로써 정성적 요소가 포함된 다기준 의사결정에서 계층구조만을 대상으로 하는 것이 아니라 네트워크구조 형태도 대상으로 할 수 있게 되었다. 기본적인 AHP와 ANP의 차이를 정리하면 다음의 Table 7과 같다.¹⁾

VI. 결 론

국가 에너지계획 수립은 에너지 자체가 공공복지를 위한 비상품성을 내포하고 있어 매우 복잡한 양

상을 띠고 있다. 특히 최근 중요한 부분은 환경문제에 관한 것으로 환경부하 저감에 대한 각 부문의 기술별 특성을 파악하고 기여도, 파급효과 등의 다원적인 요소를 적절히 에너지 계획에 투영시키는 일이다. 현재까지 개발된 에너지계획의 수립모형이나 기술평가 시스템은 포괄적 견지에서 국가 에너지의 수요, 공급이라는 거시적 측면에서 이루어져 온 것이 사실이다. 이는 일정한 특성과 한계를 보여주고 있다. 이러한 관점에서 국내에서도 좀 더 포괄적인 분석에 의한 평가 결과가 요구되어져 왔다. 전과정평가(LCA) 개념을 통한 분석은 그 하나의 대안이 될 수 있다. 즉 에너지기술의 개발에서부터 이를 채택한 시스템의 운영, 폐기까지의 전과정에 걸친 환경 영향평가를 보다 포괄적으로 분석할 수 있는 하나의 도구로서의 역할이다. 최근 유럽, 일본 등의 국가에서는 신기술 평가까지도 많이 적용되고 있으나 아직 국내에서는 본격적인 연구가 이루어지지 않고 있다. 우리나라와 같이 입력 데이터 개발과 활용이 용이하지 않은 상황에서 LCA 역시 많은 연구와 적용 노력이 필요하다고 보겠다. 본 연구는 이와 같은 배경 하에 국내 에너지부문에 적용된 지금까지의 주요 사례를 검토하였다.

지적한 바와 같이 에너지와 환경은 분리될 수 없는 통합관리 체제로 전환되고 있는 추세이다. 일례로 지구온난화 문제를 야기시키는 이산화탄소 배출량 저감에 가장 큰 영향을 미치는 것은 상당부분 에너지계획을 여하히 수립하는가에 달려있다. 이러한

의미에서 앞으로 보다 광범위한 자료와 다양한 전문가 집단의 의견이 포함된 보다 실제적 LCA 연구를 기대한다.

참 고 문 헌

- 1) 강희정, "네트워크 의사결정 기법을 이용한 LCA 환경영향 평가," 한국에너지공학회지, 제8권, 제4호, pp. 612-620, 1995.
- 2) 강희정, "에너지 및 환경분야의 기술평가 기법에 관한 연구," 대한설비관리학회지, Vol. 3, No. 1, pp. 121-146, 1998.
- 3) 과학기술부, 에너지 기술혁신 전략에 관한 연구, 1998.
- 4) 이상설, 강희정, "전문가 평가척도 향상을 위한 계층적 의사결정에 관한 연구", 생산성논집, 제12권, 제1호, pp. 123-138, 1997.
- 5) 통상산업부, 에너지분석, 1996.
- 6) 통상산업부, 에너지부문 전과정평가 인프라 데이터베이스 구축 방법론, 1997.
- 7) 한국가스공사, 천연가스 전과정 환경영향평가(LCA), 1999.
- 8) 한국원자력연구소, 전력공급원별 비교 평가를 위한 기초자료 구축, 1995. 10.
- 9) 일본 국립환경연구소, 기술선택을 고려한 아국의 이산화탄소배출량의 예측모델 개발, NIES, 1994.
- 10) 전력중앙연구소(일본), 발전플랜트의 에너지수지분석, 1990.
- 11) 전력중앙연구소(일본), 발전플랜트의 온난화영향분석, 1993.
- 12) Asad T. Amr, Jack Golden and Robert P. Quелlette, Energy Systems in the United States, Marcel Dekker Inc. New York, 1981.
- 13) Ashton, R. H., "Sensitivity of Multiattribute Decision Models to Alternative Specifications of Weighting Parameters," J. of Business Res., Vol. 8, No. 3, pp. 341-359, 1980.
- 14) Barron, F. H., "Empirical Validation of Elicited Utilities for Prediction and Decision Making," Decision Sci., Vol. 11, No. 3, pp. 411-424, 1980.
- 15) Chang, P. L., and Chen, Y. C., "A Fuzzy Multi-Criteria Decision Making Method for Technology Transfer Strategy Selection in Biotechnology," Fuzzy Sets and Systems, Vol. 63, pp.131-139, 1994.
- 16) Chapman, F. P., "Energy Analysis of Nuclear Power Stations," Energy Policy, Vol. 3, No. 4, pp. 285, 1975.
- 17) Fischer, G. W., "Multidimensional Utility Models for Risky and Riskless Choice," Organizational Behaviour and Human Performance, Vol. 17, pp. 127-146, 1976.
- 18) Herenden R. A. et al., "Energy Impact of Consumption Decisions," Proc. IEEE, Vol. 63, No. 3, 1975.
- 19) Hobbs, B. F., "A comparison of Weighting Methods in Power Plant Siting," Decision Sci., Vol. 11, No. 4, pp. 725-737, 1980.
- 20) IAEA, DECADES Project, Working Paper No. 1, Project Outline, Vienna, 1993.
- 21) IAEA, DECADES Project, Working Paper No. 2, DECADES Software Package DECPAC, Vienna, 1993.
- 22) Lippiatt B. C., BEES 1.0 Building for Environmental and Economic Sustainability, Technical Manual and User Guide, NIST and Building and Fire Res. lab. 1998.