

LCA와 에너지수지비 개념의 확장을 통한 대체에너지기술의 평가방법론

박찬국 · 박영구 · 최기련
아주대학교 에너지학과

A Study on the Alternative Technology Evaluation Based on LCA and "extended" Energy I/O Technique

Chan Gook Park, Young Gu Park and Ki Ryun Choi
Department of Energy Studies, Ajou University

요 약

대체에너지기술이 국내의 발전시스템에 도입되기 위해서는 경제성 뿐만 아니라 환경적인 측면에서도 기존의 발전시스템과 경쟁이 가능해야 한다. 특히 SOx, NOx 뿐만 아니라 CO₂의 배출영향을 고려하는 평가가 반드시 이루어져야 한다. 이에 본 연구에서는 연료의 채굴부터 발전까지의 모든 단계를 포함하는 전과정평가(LCA) 개념과 에너지수지비 개념의 확장을 통한 발전기술의 경쟁력 평가방법론을 제시하였다. 이에 대한 실증연구로 오리멀전(Orimulsion) 화력발전소에 대한 평가를 실시하였다. 그 결과, 본 연구에서 제시하는 평가방법론에 의거하는 경우 오리멀전을 중간부하나 기저부하용 발전원의 연료로서 도입하는 것이 가능하다는 실증결과를 얻었다.

Abstract — This study suggests the effectiveness of an "extended" power system evaluation methodology based on LCA and energy input-output analysis techniques. This "extended" evaluation methodology is designed to incorporate total energy system costs through fuel cycle and external costs, including CO₂ abatement cost. As an empirical test, we applied the methodology to orimulsion-fired power generation technology and found that orimulsion could be considered as an attractive base-load power generation fuel in terms of economic and environmental aspects, compared to conventional coal-fired power plant.

1. 서 론

대체에너지에 근거를 둔 신발전기술은 현시점에서 '현재의 기술'이 아닌 '미래의 기술'이며, 상용화되기에는 기술적/경제적으로 많은 해결과제들을 안고 있다. 그러나 최근 관련 기술수준과 실용화 가능성이 급진전되고 있어 건설비가 상당히 절감되고 있을 뿐만 아니라 환경비용, 토지사용료, 주민이해도 등 사회적 비용을 통합적으로 고려한다면 가까운 미래에 신발전기술의 경쟁력이 급속히 강화될 것으로 예상된다. 따라서 이들 기술의 시장진입 가능성을 합리적으로 판단하기 위해서는 기술평가지 이들 기술의 잠재력이 다양한 평가기준하에 반영되어야 한다.

또한 기후변화협약의 진행과 OECD 가입을 계기로 가까운 장래에 우리나라도 CO₂ 규제대상국이 될 것이며, 이로 인하여 CO₂ 배출저감 압력을 받게 될 것이 명백하다. 이러한 CO₂ 규제는 발전산업 특히 연소과정에서 CO₂를 다량으로 배출하는 화력발전소에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 그러나 기존의 환경영향평가는 단지 발전플랜트에서 배출되는 오염물질만을 평가하며 에너지시스템의 전주기적 영향을 제대로 평가하지 못하고 있다.

이에 본 연구에서는 LCA 개념과 에너지수지비 분석 개념을 확장하여 미래 기회비용 극대화 차원에서 발전기술의 환경/경제성 평가를 위한 방법론을 제시하고, 대체발전연료원의 하나로서 주목받는 오리멀전을 대상으로 실증연구를 실시하였다.

2. 평가방법론 제시

2-1. LCA개념을 이용한 에너지수지분석¹⁾

에너지수지분석의 목적은 직·간접 투입에너지와 산출 에너지를 같은 에너지 단위로 환산하여 각 과정에서 투입된 에너지 양을 계량화하고 에너지시스템 개선방향을 설정하는데 있다.

일반적으로 에너지수지분석에서는 평가지표로 총 에너지수지비와 순 에너지수지비가 이용된다. 총 에너지수지비는 투입에너지와 생산에너지와의 비(생산에너지/투입에너지)로서 표시되지만, 순 에너지수지비는 시스템이 생산하는 에너지의 이용가능한 순 에너지량을 산정하여 “생산에너지-투입에너지”의 값으로 표현된다.

발전시스템은 전형적인 에너지생산시스템의 하나로서 기본적으로 “생산에너지>투입에너지”의 관계식이 성립하여야 한다. 순 에너지수지분석의 결과는 투입에너지에 연료를 포함시키더라도 생산에너지인 발전용량이 크면 그 수치도 크게 나타난다. 따라서 원자력발전과 같은 대용량 발전이 태양열과 같은 소용량의 대체에너지 발전보다 그 수치가 크게 나타나는 것은 당연한 이치이다. 따라서 이러한 경우에 순 에너지수지분석의 결과는 양자를 비교하는데 의미가 없게 된다. 이에 반해 총 에너지수지비는 생산/투입에너지의 비율로서 발전용량 및 특성이 상이한 기술을 비교하는데 적합하다.

전과정평가의 개념을 도입하여, 발전시스템 설명을 보다 확장하여 일반화시켜 보기로 한다. 에너지시스템은 생산에서 최종의 소비단계에 이르기까지 채굴, 정제, 변환, 수송, 발전 등 다단계의 에너지주기 과정을 거친다. 이러한 각 단계를 전체 시스템 내에서 하나의 서브시스템으로 보면 각각의 서브시스템으로 구성된 전체시스템은 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

여기에서 E_{input}^i : 서브시스템 i 의 투입에너지, E_{output}^i : 서브시스템 i 의 산출에너지, W^i : 서브시스템 i 의 손실, I_i : 서브시스템 i 의 투입에너지 중 운용에너지에 사용되는 내

부이용 에너지(석유정제, LNG 액화 등), I_i' : 서브시스템 i 의 산출에너지 중 설비제조에너지에 사용되는 내부이용 에너지(발전소의 소내 소비에너지 등), I_i' : 서브시스템 i 의 외부투입 운용에너지, I_i : 서브시스템 i 의 외부투입 설비제조에너지이라 하면, 다음과 같은 에너지 밸런스식이 성립된다.

$$E_{output}^i = E_{input}^i - (W^i + I_i + I_i')$$

$$E_{output}^i = E_{input}^{i+1}$$

따라서 확장된 전체시스템의 총에너지수지비는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{총에너지수지비} &= \text{총산출에너지} / (\text{총투입에너지} \\ &\quad + \text{총외부투입에너지}) \\ &= \frac{E_{output}^{last}}{E_{input}^1 + \sum_1^n (I_i + I_i')} \end{aligned}$$

2-2. 발전시스템의 투입에너지²⁾

에너지수지분석은 발전시스템에 투입되는 에너지를 어떻게 정의하고 어떤 방법으로 계산하느냐가 절대적인 요인이 된다. 투입에너지에는 발전시에 투입되는 연료를 포함시켜 계산하는 방법이 있으나, 원자력이나 자연에너지 발전과 같이 연료 투입에너지를 구하기가 어려운 경우도 있다.

연료를 제외한 발전시스템의 투입에너지는 설비에너지와 운용에너지로 크게 구분한다. 설비에너지는 발전시스템에 관련된 설비의 건설에 필요한 에너지로 단위설비나 기기의 소재에너지, 설비나 기기를 공장에서 제조하는데 필요한 제조에너지, 그것을 건설현장까지 운반하는 수송에너지, 건설현장에서 그 설비나 기기를 설치하는데 필요한 건설에너지 등이 포함된다. 운용에너지는 발전시스템의 전 생애동안 그 운용에 필요한 에너지에서 발전시에 소비하는 연료분을 제외한 나머지를 운용에너지로 한다.



Fig. 1. Energy flow of the total system.

그리고 발전시스템의 건설이나 운용, 연료의 반입에는 여러 종류의 에너지 및 다수 노동자가 관계된다. 인간의 노동과 사람이 먹는 물질까지도 간접적으로는 투입 에너지에 포함시켜야 한다는 견해도 있다. 그러나 본 연구에서는 분석이 용이하도록 발전시스템의 투입에너지는 직접적으로 관계하는 물질에 대해서만 분석한다. 따라서 발전시스템의 건설이나 운용에 사용되는 인간의 노력에 대한 여러 형태의 에너지는 투입에너지에서 제외하기로 한다.

2.3. 발전시스템에서의 확장된 에너지수지분석 평가방법론

본 연구에서 제시하는 발전시스템 평가방법론의 첫 번째 단계는 전과정평가 개념을 이용한 에너지수지분석을 시행하는 것이다. 수지분석을 위한 발전시스템의 투입에너지는 앞에서 언급한 바와 같이 설비에너지와 운용에너지로 분류하여 분석하며, 이들은 각각 채굴·가공/수송발전 부문으로 소분류하여 투입에너지량을 계산한다.

두 번째 단계는 전과정평가의 개념을 이용한 에너지수지분석의 결과와 플랜트의 발전량, 에너지원별 탄소배출계수를 이용하여 탄소배출량 및 시스템의 탄소배출계수를 계산하는 과정이다. 마지막 단계로는 구해진 시스템의 탄소배출계수를 이용하여 이산화탄소를 중심으로

한 환경영향을 평가하고, 환경설비의 설치비용을 포함한 발전원가 및 이산화탄소의 환경비용을 고려하여 경제성 평가를 실시하는 단계이다. 구체적인 방법 및 절차는 Fig. 2와 같다.

이러한 분석과정에서 원단위의 개념들이 많이 이용된다. 그 대표적인 것들이 에너지원별 발열량, 에너지원별 탄소배출계수, 설비를 구성하는 각 소재(철(鐵), 동(銅), 알루미늄, 시멘트 등)들의 투입에너지원단위 등이다. 에너지원별 발열량은 정부기관에서 고시한 값을 이용하며¹³⁾, 에너지원별 탄소 배출원단위는 IPCC에서 권고하는 탄소배출계수와 탄소연소율을 이용하여 계산한다¹⁴⁾. 즉, 연료에 포함된 탄소가 불완전 연소되는 부분은 이산화탄소로 전환되지 않기 때문에, IPCC(기후변화에 관한 정부간 협의체)에서 제시하는 연료별 평균 탄소 연소율에 에너지원별 탄소원단위를 곱하여 배출원단위를 계산하였다.

또한 전력의 탄소배출원단위는 국내의 전력산업 현황과 에너지원별 탄소배출원단위를 이용하여 구한다. 한편, 발전소의 건설에 투입되는 소재들 중 시멘트는 제조과정에서 CO₂의 배출이 많기 때문에 이를 특별히 고려할 필요가 있다. 탄소배출계수는 시멘트의 투입에너지원단위와 각 에너지원별 탄소배출계수를 이용하여 구할

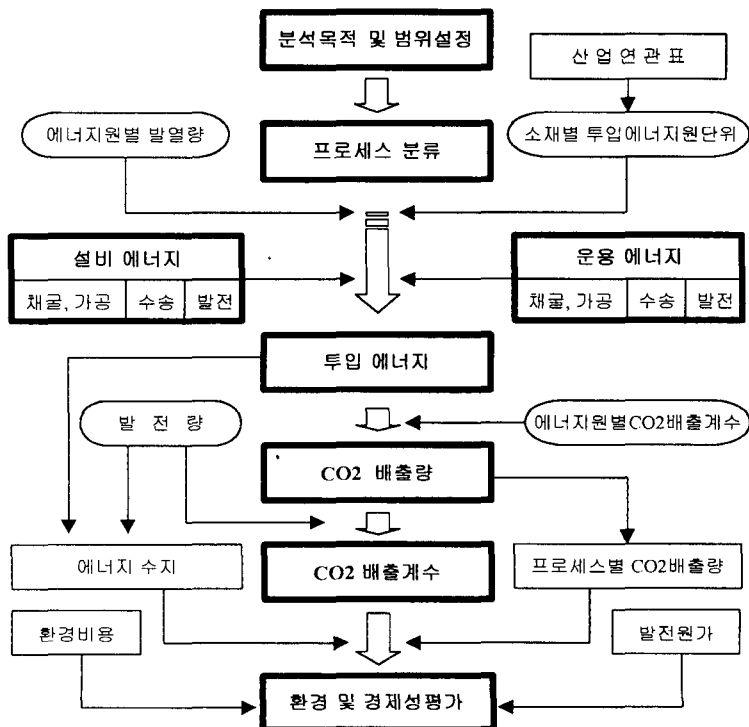


Fig. 2. Procedure of the evaluation

Table 1. Carbon emission coefficient of energy sources.

구분	단위	탄소배출 계수*	탄소연소율 (%)*	탄소배출 원단위
전력	g-C/kWh	-	-	122.21
석탄	g-C/Mcal	108.02	98.0	105.86
석유	g-C/Mcal	83.74	99.0	82.90
천연가스	g-C/Mcal	66.15	99.5	65.82
오리멸전	g-C/Mcal	-	-	76.60**
시멘트	g-C/g-시멘트	-	-	0.09569

*에너지경제연구원, 기후변화협약 관련 국가보고서 작성 및 대응방안 연구, 1994

**Mitsubishi corp. overview of a coal-fired/orimulsion-fired power plant and construction costs, 1995

수 있다. 이상의 배출계수 계산결과를 Table 1에 나타내었다.

한편, 각 소재별 투입에너지원단위는 산업연관표를 이용하여 계산하며, 구체적인 계산절차는 다음과 같다.

① 산업연관표의 405개 기본부문을 주요 소재별로 분류한다.

예) 철: 선철, 합금철, 조강, 열간압연강판, 봉강, 형강 등
 동: 동괴, 동압연품 등

② 각 소재의 기본부문별로 각 에너지원(전력, 석탄, 석유, 천연가스)으로부터의 투입액을 국산과 수입을 분류하여 조사한다. 이때 각 에너지원의 세부항목(예: 석탄인 경우, 무연탄, 유연탄, 기타석탄제품 등)별로 투입액을 조사한다. 각각의 발열량이 다르기 때문에 나중에 총 투입에너지량의 산정이 용이하게 된다.

③ 산업연관표의 부문별 품목별 공급액표를 이용해 각각의 에너지원별 세부항목에 대한 단위당 가격을 계산한다. 역시 국내생산과 수입을 분류하여 계산한다.

④ ②의 결과를 ③의 결과로 나누어 줌으로서 각 소재의 기본부문별 에너지원의 투입량(국산+수입)을 계산한다.

⑤ 산업연관표의 부문별 품목별 공급액표를 이용해 각 소재별 기본부문의 국내 생산량을 구한다.

⑥ ④의 결과를 ⑤의 결과로 나누어 줌으로서, 소재의 단위생산량당 에너지원 투입량을 구한다.

⑦ ⑥의 결과와 각 에너지원 세부항목별 발열량을 이용하여 각 소재의 기본부문 생산을 위한 에너지원의 투

Table 2. Input energy for main material (Mcal/ton).

구분	전력(kWh/톤)	석탄	석유	천연가스
철(鐵)	362.78(145.11)	604.94	181.63	0
동(銅)	712.98(285.19)	1,204.88	535.09	0
알루미늄	271.64(108.66)	24.56	254.15	0
시멘트	178.01(71.20)	790.64	39.70	0

입에너지 원단위를 구한다.

⑧ 각 소재별 세부항목의 투입에너지원단위를 소재별로 기본부문을 합산하여 소재별 투입에너지원단위를 구한다.

이상의 절차에 따른 각 소재별 투입에너지원단위의 계산결과는 Table 2와 같다.

3. 실증연구: 오리멸전 화력발전의 환경/경제성 평가

오리멸전은 1935년 남미 베네수엘라의 오리노코(Orinoco)강 유역에서 발견된 타르형태의 연소가능한 물질인 천연역청(Natural Bitumen)을 석유대체연료로서 실용화한 새로운 에너지원이다. 천연역청을 정제하여 물과 혼합한 에멀전 상태(천연역청 70%, 물 30%, 첨가제, 유화제 첨가)의 연료를 발전용 연료로 활용하고자하는 시도가 제기되고 있다. 그러나 높은 황 함유로 인해 거의 사용되지 않다가 탈황기술의 개발 및 석유의 쿼터 배당에 묶여 있지 않아 최근에 새로운 에너지원으로 각광을 받고 있는 연료이다¹⁵⁾.

본 절에서는 앞에서 제시한 평가방법론에 대한 실증 연구로서 오리멸전 화력발전기술에 대한 환경적/경제적 평가하고자 한다. 이를 위해서 LCA 방법론을 이용한 탄소배출계수를 산정하고, 환경설비(FGD, SCR)의 설치에 따른 경제성의 변화, SOx, NOx, CO₂의 환경비용을 고려했을 때의 경제성 변화를 전통적인 석탄화력발전과 비교하여 경쟁력을 평가한다. 대상 발전 플랜트의 특성자료는 Table 3과 같다.

3-1. 에너지수지분석 결과의 비교평가

오리멸전 화력발전과 석탄화력발전에 대한 에너지수지분석의 결과를 비교함으로써, 각 서브시스템에서의 투입에너지량 비교가 가능하다. 또한 에너지다소비 서브시스템을 확인함으로써 에너지수지비를 향상시킬 수 있는 대책을 강구할 수 있다. 에너지수지분석의 결과 중 각 서브시스템에 투입된 에너지량(발전연료 제외)을 비교하면 Table 4와 같다.

Table 3. Properties of considered power plant¹⁾.

구분	오리멸전 화력	석탄 화력
설비용량(MW)	600	600
설비이용율(%)	75	75
열효율(%)	39.44	39.30
소내소비율(%)	4.13	5.54

¹⁾일본 Mitsubishi사와 MC. BITOR사의 실증자료를 이용하여 계산한 결과이며¹⁶⁾, 석탄은 호주탄 기준.

Table 4. Input energy of power plant system²⁾ (life time: 30 years).

구 분	오리멸전화력발전		석탄화력발전		
	투입에너지 (Gcal/년)	구성비 (%)	투입에너지 (Gcal/년)	구성비 (%)	
설비 에너지	채굴	2,010.9	0.4	836.8	0.2
	수송	1,416.1	0.3	1,368.4	0.4
	발전	5,603.1	1.2	9,650.4	2.5
	소계	9,030.1	1.9	11,855.6	3.1
운용 에너지	채굴	117,656.7	24.9	108,807.1	28.5
	수송	336,720.0	71.4	246,285.0	64.6
	발전	8,404.6	1.8	14,475.6	3.8
	소계	462,781.3	98.1	369,567.7	96.9
계	471,811.4	100.0	381,423.3	100.0	

두 발전시스템 모두 투입에너지의 대부분이 운용에너지이며, 그중 60~70% 정도가 수송부문에 투입되는 것으로 밝혀졌다. 또한 발전 플랜트의 건설에 필요한 에너지는 석탄화력이 상대적으로 크며, 그 이외의 채굴 및 수송설비는 석탄화력이 적은 투입에너지를 요하는 것으로 나타났다. 수송설비의 경우 선박을 대상으로 분석하였으며, 석탄은 5만톤급, 오리멸전의 경우는 25만톤급 선박을 기준으로 하였기 때문에 오리멸전의 수송설비 투입에너지가 높은 것으로 나타났다. 하지만, 발전플랜트 건설에 필요한 에너지의 격차가 심하기 때문에 설비에너지의 합은 석탄화력이 많은 것으로 나타났다.

수송부문의 운용에너지는 수송거리의 영향을 크게 받으며, 베네수엘라에서 수입하는 오리멸전이 호주로부터 수입하는 석탄에 비해 월등하게 수송거리가 크기 때문에 수송과정의 운용에너지가 높게 나타났다. 오리멸전 화력발전의 총 투입에너지가 석탄화력에 비해 더 많은데, 이것도 오리멸전의 수송에너지가 석탄의 수송에너지보다 월등하게 많기 때문이다. 한편, 산출에너지인 전력량과 투입에너지의 비로 표현되는 에너지수지비를 발전연료의 포함여부에 따라 비교하면 Table 5와 같다.

에너지수지비의 계산에 발전연료를 투입에너지로서 포함시켰을 때 오리멸전의 에너지수지비 높으며, 발전연료

Table 5. Input-output energy ratio.

구 분	오리멸전화력		석탄화력	
	연료 포함	연료 미포함	연료 포함	연료 미포함
수지비(수명기간 20년)	1.0416	19.91	1.0329	24.10
수지비(수명기간 30년)	1.0420	20.02	1.0335	24.41

²⁾투입에너지 중 발전부문의 설비/운용에너지에는 연료가 포함되어 있지 않음.

를 포함시키지 않았을 때는 석탄화력의 에너지수지비가 우수한 것으로 나타났다. 이는 크게 두가지 이유로 생각할 수 있다. 첫째는 오리멸전의 발열량이 석탄에 비해 높고, 오리멸전 화력발전의 열효율이 석탄화력에 비해 높은 이유로 적은 에너지량이 투입되기 때문이다.

둘째는 앞서서도 언급했듯이 발전 플랜트의 건설에는 오리멸전 화력이 적은 에너지가 투입되지만, 총 투입에너지 중 대부분을 운용에너지가 차지하고 오리멸전의 수송에 따른 운용에너지가 크기 때문이다. 이상의 두가지 이유가 복합적으로 작용하여 위의 Table 5와 같은 에너지수지비가 나타나게 된다.

하지만 이러한 사실들은 발전 설비의 특성 및 연료의 수입처에 따라 달라질 수 있으므로 절대적이라고는 할 수 없다. 그러나 우리나라에서 오리멸전 화력발전소를 가동할 경우, 베네수엘라로부터 연료를 수입해야하고, 그에 따른 수송거리가 상당히 크기 때문에 운용에너지의 수송부문은 어쩔 수 없이 많은 에너지가 필요할 수밖에 없다.

3-2. 탄소배출량 및 배출계수 비교평가

에너지수지분석의 결과와 에너지원별 탄소배출계수를 이용하여 계산한 두 발전시스템의 각 서브시스템에서 배출되는 탄소의 배출량을 비교하면 Table 6과 같다.

에너지수지분석의 결과와 마찬가지로, 설비부문에서는 석탄화력이, 운용부문에서는 오리멸전 화력이 더 많은 탄소를 배출하고 있지만, 이들은 시스템 전체의 배출량 중 적은 부분을 차지하고 있다. 전체 탄소배출의 대부분을 차지하고 있는 발전연료를 비교할 때, 오리멸전이 석탄에 비해 탄소의 함유량이 적기 때문에 오리멸전 화력발전의 탄소배출량이 현저하게 작음을 알 수 있다. 따라서 에너지수지면에서는 오리멸전이 다소 불리하다하더라도, 환경적인 측면, 특히 지구온난화적인 측면에서는 오리멸전 화력발전이 우수하다고 볼 수 있다.

3-3. 환경영향을 고려한 경제성 평가

기존 화력발전뿐만 아니라 오리멸전 화력발전 역시 강화되는 환경규제에 대응하기 위해서는 탈황, 탈질설비의 설치가 요구되고 있다. 탈황설비의 경우 이미 국내에서 FGD를 설치하기 시작하였으며, 탈질설비의 경우 현재 저

Table 6. Carbon emission factor (life time: 30 years).

구 분	단 위	오리멸전화력	석탄화력
설비부문	g-C/kWh	0.28	0.44
운용부문	g-C/kWh	9.64	7.67
연 료	g-C/kWh	174.22	245.24
시스템전체	g-C/kWh	184.14	253.34

Table 7. Generation cost for environmental protection equipments (\$/kWh).

이용율(%)	모두 미포함		SCR만 포함		FGD만 포함		모두 포함	
	오리멸전	석탄	오리멸전	석탄	오리멸전	석탄	오리멸전	석탄
50	0.0538	0.0577	0.0550	0.0588	0.0611	0.0636	0.0623	0.0648
60	0.0484	0.0505	0.0493	0.0515	0.0545	0.0555	0.0554	0.0565
70	0.0445	0.0454	0.0453	0.0462	0.0497	0.0497	0.0506	0.0506
80	0.0415	0.0416	0.0422	0.0423	0.0462	0.0454	0.0469	0.0461

NOx 버너 등을 사용하고 있으나 2001년부터 건설되는 신규발전소에 대해서는 SCR을 설치할 계획이다⁹⁾.

이에 본 연구에서는 FGD, SCR의 설치에 따른 오리멸전, 석탄화력의 발전원가 변화를 비교하고, 환경규제가 점차 강화되는 경우의 발전원가 변화를 비교하고자 한다. 이때 FGD나 SCR로서 제거할 수 있는 수준 이상으로 환경규제가 강화되는 경우에는 규제치 이상으로 배출되는 SOx, NOx의 환경비용을 발전원가에 부가시키는 것을 원칙으로 한다.

3-3-1. 환경설비의 설치에 따른 발전원가의 변화

환경설비를 부착하지 않았을 때, FGD만 부착했을 때, SCR만 부착했을 때, 모두 부착했을 때의 발전원가를 비교한다. 오리멸전은 황 함유량이 많기 때문에 제거율 95%의 FGD를 설치하고 석탄은 제거율 90%의 FGD를 설치하며, SCR은 동일한 설비를 부착한다고 가정한다³⁾. 전체 이용율(5%~100%)에서 분석한 결과, 50%에서 발전원가가 낮은 발전원이 그 이하에서도 발전원가가 낮고, 80%에서 발전원가가 낮은 발전원이 그 이상에서도 발전원가가 낮은 것으로 나타났다. 그러나 현실적으로 오리멸전 화력이나 석탄화력이 기저부하용 발전원이기 때문에 이용율은 50%~80% 사이만을 비교한다.

FGD가 고가이기 때문에 FGD를 부착하는 경우에 SCR보다 발전원가가 높게 나타났다. 환경설비를 부착하지 않은 경우에는 오리멸전 화력발전의 발전원가가 이용율에 관계없이 낮게 나타났지만, 환경설비를 모두 부착하는 경우에는 이용율 70%까지는 오리멸전, 그 이상에서는 석탄화력의 발전원가가 낮은 것으로 나타났다. 이는 오리멸전의 황 함유량이 높아 고효율의 FGD를 필요로 하기 때문이다.

3-3-2. 환경규제 강화에 따른 발전원가의 변화

오리멸전이나 석탄화력의 SOx, NOx 배출수준은 환경설비를 설치하지 않고서는 '99년의 환경규제치를 만족할 수 없다. 하지만 FGD와 SCR을 부착하더라도 환경규제가 강화되는 정도에 따라 SOx, NOx의 배출수준이 규제치를 넘어설 수도 있다. 이러한 경우에 규제치를 초

과한 SOx, NOx 배출량의 환경비용을 발전원가에 부가하여 비교함으로써 환경규제 강화에 따른 발전원가의 변화를 비교한다.

신규 발전설비에 대한 '99년 규제치와 오리멸전, 석탄화력의 SOx, NOx 배출수준은 Table 8과 같다. 환경시설 미부착시의 배출수준은 평균 배출량이며, 환경시설 부착시의 배출수준은 FGD, SCR을 풀가동한다고 할 때의 배출수준이다.

한편, 환경오염에 대한 가치평가방법은 분석방법에 따라 여러 가지로 나눌 수 있지만 일반적으로 피해비용(Damage cost) 접근법과 통제비용(Control cost) 접근법이 가장 많이 사용된다. 피해비용접근법은 환경피해를 받는 소비자 중심적인 접근방법으로 주로 환경오염과 관련이 있는 소비자에 대한 설문조사를 통해 얻은 자료 또는 객관적인 피해조사 자료를 이용하여 환경외부성을 추정하는 방법이다.

이에 비하여 통제비용접근법은 법적 규제를 받는 생산자 중심적 접근방법으로 공학적 계산방법과 계량경제학적 분석방법으로 나뉘며 계량경제학적 접근법은 다시 모수적 추정과 비모수적 분석으로 나뉜다¹⁰⁾.

우리나라의 경우 전력산업이 유발하는 환경외부성에 대한 가치추정과 관련하여 아직까지 구체적인 통계자료가 없어 환경규제와 관련된 통제비용을 구하기가 어려우며 또한 피해비용방법도 많은 시간을 요하며 명확한 기준을 설정하기가 어렵다. 따라서 두 가지 방법에 의해 추정된 해외사례를 중심으로 이들의 평균값을 이용하기로 한다. 피해비용방법과 통제비용방법에 의한 환경

Table 8. Emission with environmental protection equipment (ppm)⁹⁾.

구분	석탄 화력		오리멸전 화력	
	SOx	NOx	SOx	NOx
'99년 규제치	120	350	120	250
환경시설 미부착	400	500	2000	230
환경시설 부착	40	100	100	46

³⁾ 이러한 가정은 발전원가의 계산을 위한 입력자료 중 FGD, SCR의 건설단가, 운전유지비, 소내소비용 등에 차등 반영되었음.

⁴⁾ 한국전력공사와 MC. BITOR 사의 자료를 이용하였으며¹⁸⁾, FGD 제거효율: 90%(석탄), 95%(오리멸전), SCR 제거효율: 80%(석탄, 오리멸전) 가정

Table 9. The example of environmental cost estimation⁵⁾.

구 분	SOx	NOx	CO ₂
환경피해비용(\$/톤)	2,890	4,538	18.1
환경통제비용(\$/톤)	4,336	7,730	21.0

비용의 추정 사례를 종합하면 Table 9와 같다.

가. SOx, NOx의 환경비용을 고려하는 경우

환경규제가 점차 강화됨에 따라 오리멀전 및 석탄화력의 배출 허용치는 점점 낮아지게 된다. 따라서 미래의 강화된 환경규제하에서는 이미 설치된 FGD나 SCR로서는 처리할 수 없는 수준까지 이르게 될 것이다. 이때에는 강화된 환경규제치 이상으로 배출하게 되고, 이 초과 배출량을 환경비용으로 계산할 수 있다. 이 환경

비용이 외부비용으로서 발전원가에 부가되는 것으로 간주하여 오리멀전과 석탄화력간의 발전원가를 비교한다. 환경규제의 강화와 이에 따른 SOx, NOx의 환경비용을 고려한 발전원가를 계산한 결과는 Table 10과 같다.

FGD, SCR을 설치하고 '99년의 환경규제치를 고려한 경우(환경규제강화 0%)에는 이용율 60% 이하에서는 오리멀전, 이용율 70%에서는 대등, 이용율 80% 이상에서는 석탄화력이 유리하다. 석탄화력은 환경규제가 70% 이상 강화되는 경우에만 환경비용이 발전원가에 부가되며, 오리멀전화력은 20%, 30% 환경규제가 강화될때부터 환경비용이 발전원가에 부가되는 것으로 나타났다. 이는 오리멀전의 SOx 배출이 많아 95% 제거효율의 FGD만으로는 강화되는 환경규제치를 만족시킬 수 없기 때문이다. 나. SOx, NOx, CO₂의 환경비용을 고려하는 경우

Table 10. Generation cost with variation of regulation (\$/kWh) (considering the environmental cost of SOx, NOx)⁶⁾.

환경 규제강화	이용율 50%		이용율 60%		이용율 70%		이용율 80%	
	오리멀전	석 탄	오리멀전	석 탄	오리멀전	석 탄	오리멀전	석 탄
0%	0.0623	0.0648	0.0554	0.0565	0.0506	0.0506	0.0469	0.0461
10%	0.0623	0.0648	0.0554	0.0565	0.0506	0.0506	0.0469	0.0461
20%	0.0623	0.0648	0.0555	0.0565	0.0506	0.0506	0.0469	0.0461
30%	0.0624	0.0648	0.0556	0.0565	0.0507	0.0506	0.0470	0.0461
40%	0.0625	0.0648	0.0557	0.0565	0.0508	0.0506	0.0472	0.0461
50%	0.0626	0.0648	0.0558	0.0565	0.0509	0.0506	0.0473	0.0461
60%	0.0628	0.0648	0.0559	0.0565	0.0511	0.0506	0.0474	0.0461
70%	0.0629	0.0648	0.0560	0.0565	0.0512	0.0506	0.0475	0.0462
80%	0.0630	0.0653	0.0562	0.0570	0.0513	0.0510	0.0476	0.0466
90%	0.0633	0.0658	0.0565	0.0575	0.0516	0.0515	0.0480	0.0471

Table 11. Generation cost with variation of regulation (\$/kWh) (considering the environmental cost of SOx, NOx, CO₂).

환경 규제강화	이용율 50%		이용율 60%		이용율 70%		이용율 80%	
	오리멀전	석탄	오리멀전	석탄	오리멀전	석탄	오리멀전	석탄
0%	0.0623	0.0694	0.0554	0.0611	0.0506	0.0552	0.0469	0.0507
10%	0.0623	0.0694	0.0554	0.0611	0.0506	0.0552	0.0469	0.0507
20%	0.0623	0.0694	0.0555	0.0611	0.0506	0.0552	0.0469	0.0507
30%	0.0624	0.0694	0.0556	0.0611	0.0507	0.0552	0.0470	0.0507
40%	0.0625	0.0694	0.0557	0.0611	0.0508	0.0552	0.0472	0.0507
50%	0.0626	0.0694	0.0558	0.0611	0.0509	0.0552	0.0473	0.0507
60%	0.0628	0.0694	0.0559	0.0611	0.0511	0.0552	0.0474	0.0507
70%	0.0629	0.0694	0.0560	0.0611	0.0512	0.0552	0.0475	0.0508
80%	0.0630	0.0699	0.0562	0.0616	0.0513	0.0556	0.0476	0.0512
90%	0.0633	0.0704	0.0565	0.0621	0.0516	0.0561	0.0480	0.0517

⁵⁾ 피해비용은 미국 대표적인 주의 환경외부성 가치로서 미국 텔러스(Tellus)사가 캐나다 온타리오 하이드로(Ontario Hydro)사의 의뢰에 의하여 조사한 3개주 8개 기관의 자료분석결과이며, 통제비용은 미국 11개 전문기관이 추정한 환경외부성 가치임.

⁶⁾ 두가지 형태의 환경비용을 각기 고려하는 경우 그 결과가 주는 의미는 동일하기 때문에 본 논문에서는 환경피해비용의 결과만을 제시한다.

이상에서 SOx와 NOx의 환경비용을 고려하는 경우에는 이용율 60% 이하에서는 오리멸전, 이용율 70% 이상에서는 석탄화력이 유리한 것으로 나타났다. 하지만 현재 규제는 하고있지 않지만 지구온난화의 주요인으로 간주되는 이산화탄소의 배출문제를 고려한다면 다른 형태의 경제성 비교가 이루어질 수 있다.

이산화탄소에 대한 규제치가 없어 배출기준을 정할 수가 없으므로 두 발전원의 배출수준을 직접 비교하여 탄소 배출이 많은 발전원에 배출수준 차이만큼의 환경비용을 부가하기로 한다. 계산결과는 Table 11과 같다.

환경외부비용으로서 SOx, NOx, CO₂의 환경비용을 모두 고려하는 경우에는 환경비용의 추정방식이나 환경규제의 강화 정도에 관계없이 오리멸전 화력의 경제성이 우수한 것으로 나타났다.

이상의 실증연구를 종합해 볼 때, 비록 황 함유량이 타연료에 비해 많은 편이지만, 본 연구에서 제시한 바와 같은 새로운 평가방법을 통해 오리멸전이 가지는 기존의 화력발전, 특히 석탄화력과의 경쟁가능성을 추정할 수 있다. 특히 SOx, NOx만을 고려하는데 그치지 않고 지구온난화의 주범인 이산화탄소를 고려하는 경우에 오리멸전 연료의 석탄화력에 대한 경쟁력이 더욱더 강화되는 점은 시사하는 바가 크다.

4. 결 론

본 연구에서는 대체에너지기술을 포함한 기존의 발전시스템에 대한 전주기적 평가방법을 제시하고, 이에 대한 실증연구로서 대체에너지원인 오리멸전과 기존의 석탄화력과의 비교평가를 실시하였다. 본 연구에서 제시한 신발전기술 평가방법의 특징을 요약하면 다음과 같다.

첫째, 기존의 평가방법과는 달리 LCA 기법을 도입하여 전주기적 에너지수지분석을 통해 발전산업의 전반적인 파급효과 영향을 평가하는 것이 가능하다.

둘째, 환경영향을 경제성 평가방법론상의 내부요인으로 반영하였다. 그러나 이를 위해서는 환경비용에 대한 국내의 DB 확충이 시급하다.

셋째, 발전시스템에 관련된 전과정을 고려한 탄소배출

계수를 산정함으로써 진정한 의미의 지구온난화 영향평가가 가능하다.

대체에너지기술이 열악하게 평가되는 현 시점에서, 위의 특성들을 지닌 기술평가방법론이 신발전기술뿐만 아니라 여타 대체에너지기술들을 공정하게 평가할 수 있는 객관적 기준으로 이용될 수 있기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소에서 주관한 “전력기술 기초연구과제(관리번호 97-049)”의 일환으로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 일본전력중앙연구소: “發電フ란トのエネルギー收支分析”, 平成 3년 11월.
2. 일본전력중앙연구소: “發電フ란トの温暖化影響分析”, 平成 4년 5월.
3. 에너지경제연구원: “에너지통계연보”, 1997.
4. 에너지경제연구원: “지구온난화 방지를 위한 에너지 부문 환경문제 대응방안 연구”, 1993.
5. MC BITOR Ltd.: “ORIMULSION-A New Energy Source for the 21st Century”, 1995.
6. Mitsubishi Corp.: “Overview of a coal-fired/orimulsion-fired power plant and construction costs”, 1995.
7. Bitor America Corp.: “The Orimulsion Power System”, 1997.
8. Bitor: “ORIMULSION User Manual”, 1989.
9. 한국전력공사: “발전설비현황”, 1998.
10. 한국전기연구소: “IRP 자원유형별 평가기법과 Data Base에 관한 연구”, 1997.
11. ASAD T. AMR: “Energy Systems in the United States”, 1991.
12. OECD: “Expert Workshop on Life Cycle Analysis of Energy Systems”, 1993.
13. 한국은행: “1990년 산업연관표”, 1993.