



원자력 발전과 석탄 화력 발전의 발전 원가 비교 연구

김 교 상

한국전력기술(주) 원자로설계개발단 부장



서론

전력 부문의 발전 비용은 외부 비용의 포함 여부에 따라 사적 비용과 사회적 비용으로 구분할 수 있다. 전력 부문의 사적 비용은 일반적으로 발전 원가로 불리며 전력 생산 과정에 투입되는 자본비, 운전 유지

비 및 연료비로 구성되는데, 전력 회사의 투자 수익성 및 경영 수립에 필요한 참고 자료를 제공하는 기준이 된다. 이에 따라 현재 운전중인 발전소의 실적 발전 원가를 연간 발전 원가법에 의해 알아보하고자 한다.

그러나 1970년 이후 사적 비용에 추가하여 전력 생산 과정에서 발생하는 오염원에 의한 인체 피해와 같은 발전의 외부 비용을 포함한 사회 환경 비용(Social-Environment Cost)을 고려해야 한다는 '지속 가능한 개발(sustainable development)' 인식이 일반화되고 있는 경향이다.

이에 따라 대기 오염 물질 배출에 의한 환경 시설의 부착에 따른 외부 비용¹⁾ (External Cost) [1] 을 고려한 지구 온실 가스 감축 수단의 하나인 청정 개발 체제(CDM) 사업에

서의 연구 결과에 1400MWe급 신형경수로 1400(이하 'APR 1400' 이라 칭함) 1·2호기와 800MWe급 석탄 화력 발전의 경제성 평가 연구 관련 주요 입력 자료를 수정하여 외부 비용을 포함한 균등화 발전 원가를 알아보하고자 한다.

그리고 우리 나라를 비롯하여 원자력 선진국인 프랑스·미국 및 일본 등 주요 국가의 할인율(discount rate)과 이용률(load factor)에 따른 원자력 발전과 석탄 화력 발전의 발전 원가를 국제 비교해 보고자 한다.

본 논문은 현재까지 건설된 1000MWe급 한국표준형원전(KSNP)과 500MWe급 석탄 화력 발전에 추가하여 앞으로 건설 예정인 1400MWe급 원전인 APR 1400과 경쟁적 관계에 있는 대용량의

1) OECD(2003)에 의하면 일반 소비재, 서비스, 제품 등의 비용이 외부적 요소(exteermality)에 의해 재화의 시장 가격에는 내재되어 있지 않고 일반 시장 가격 형성 메커니즘에 따르지 않는 비용을 의미한다. 사회적 비용(social cost)이라고 정의되기도 한다.

800MWe급 석탄 화력 발전과의 경제성을 평가하고자 외부 비용을 포함한 균등화 발전 원가를 비교해 보는 데 있다.

특히 우리 나라 기저 부하 발전원의 역할을 담당하고 있는 원자력 발전이 경제성 평가를 통해 비교 기저 부하 발전원인 석탄 화력 발전과 대비하여 어느 정도 경제적 우위에 있는지를 제시함으로써, 발전 시장 자유화(liberalised electricity market)에서의 향후 장기 전력 수급 계획 수립을 위한 경제성 기초 자료를 제공하는 데 목적이 있다

발전 원가의 개념과 경제성 평가 기법

1. 발전 원가의 개념과 구성 요소
가. 발전 원가의 개념 및 구분

산업 자원 용어 사전에 의하면 발전 원가(generating cost)는 전력 생산(발전)에 소요된 총비용을 생산된 발전량으로 나눈 단위 발전 비용(kWh)을 의미한다.

발전 원가는 활용 용도에 따라 실적 관리용의 실적 발전 원가와 경제성 검토용의 균등화 발전 원가로 구분한다.

실적 발전 원가는 한 회계 기간 동안 전력 계통을 운영하였을 때 발생하는 총비용을 총발전량으로 나누어서 발전 설비의 과거 투자 및 운영 비용에 대한 원가 회수를 목적

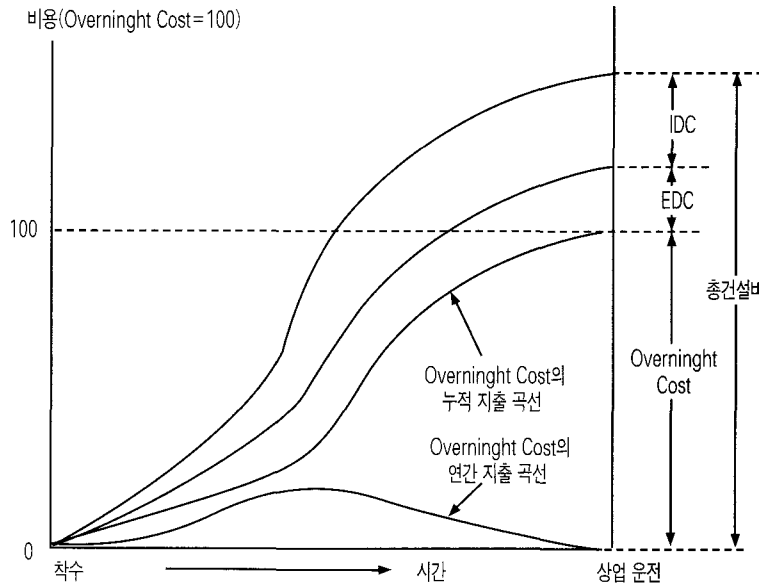


그림 1) 원자력발전소의 건설비 구성도

자료: 「원자력과 경제」 2000. 6, P.110

으로 한 재무 관리 측면의 원가 개념이다.

실적 발전량은 발전소 이용률의 함수로 실적 발전 원가는 해당 발전소의 이용률에 따라 변하므로 각 발전소별 운전 실적을 비교할 때 사용한다.

균등화 발전 원가는 미래의 어느 한 기간에 대하여 발전소 전 수명 기간을 대상으로 전원 개발 계획 수립시 발전소 건설 직전 또는 전원별 전력 설비의 경제성 평가 및 대안의 비교에 활용하여 적정 설비 후보를 결정할 때 사용하는 원가 개념이다.

나. 발전 원가의 구성 요소

① 자본비 (Capital Investment Cost)

발전소 자본비는 순수 건설비(Overnight Cost 혹은 Base Cost), 건설중 물가 상승비(Escalation-

During Construction : EDC), 건설중이자(Interest-During Construction : IDC) 등으로 구성된 총건설비를 의미한다.

순수 건설비는 직접 비용과 간접 비용으로 나누어지며, 건설중 이자는 발전소 건설에 투입된 비용의 단순한 합을 의미하는 일시불 비용(Overnight Cost) 및 EDC를 포함한 금액에 이자율을 적용하여 구해지므로 이자율(interest rate)과 건설 기간에 큰 영향을 받는다.

자본비는 발전소 부지 조건, 건설 기간, 발전 용량, 건설 기간 중의 물가 인상을, 할인율 및 규제 조건 등에 따라 큰 차이를 보이는데, 원자력 발전의 경우 전체 발전 원가의 대략 45% ~ 70%, 석탄 화력 발전의 경우 30% ~ 40%를 차지한다.

그리고 자본비에서 건설중 이자

〈표 1〉 우리나라 정광의 수입 물량, 수입 가격 및 현물 시장 가격 추이 (단위 : US\$ / 1b U₃O₈)

구분 \ 연도	1986	1990	1994	1996	1998	2000
현물 시장	17.0	9.8	9.3	15.6	10.2	8.2
수입 물량(톤)	229	170	322	457	730	556
수입 가격(백만달러)	176	167	211	207	238	278

자료 : 「지역에너지통계연보」 2001. 12, p. 225

〈표 2〉 석탄(유연탄)의 평균 수입 물량 및 단가 추이 (단위 : 백만 톤, CIF \$/MT)

구분	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
수입 물량*	10.9 (5.7)	11.8 (6.3)	15.6 (9.0)	19.4 (12.4)	21.8 (14.2)	27.5 (18.9)	31.5 (22.7)	32.9 (25.7)	35.7 (28.3)	40.9 (33.5)
수입 단가	47.5	45.9	40.7	39.4	42.3	46.0	42.3	37.0	32.1	30.1

*()은 발전용 유연탄 물량을 나타냄.
자료 : 「지역에너지통계연보」, 2001. 12, p. 50

석탄 화력 발전에는 수입 연료인 유연탄을 주로 사용하는데, 수입 유연탄은 국내 무연탄에 비해 열량이 상당히 높아 발전용과 제철용으로 많이 사용되고 있다.

유연탄은 무연탄 대체로 발전 설비 및 철강 생산량 증가에 따른 소비량은 매년 증가하고 있다.

국제 유연탄 가격은 1990년 이후 지속적인 하락세를 유지하여 왔으나, 1996년에는 연료용 유연탄 가격이 일시적으로 톤당 약 46달러에 달하는 상승세를 나타냈다. 그러나 1997년부터는 다시 하락세를 보여 2000년에는 30달러 수준에 머무르고 있다(〈표 2〉 참조).

국제에너지기구(IEA)는 2000년대 이후 국제 유연탄 가격이 상승세로 반전하여 2015 ~ 2020년에는 톤당 46달러대에 달할 것으로 전망하고 있다 [3].

③ 운전 유지비(Operation and Maintenance Cost)

운전 유지비는 발전소를 운전 및 유지 보수에 소요되는 인건비를 비롯하여 수선 유지비, 보험, 제세금 및 본사 경비 등에 모든 직접 및 간접 비용이 포함된다.

또 발전소 철거, 사용후 핵연료의 처분 및 방사성 폐기물의 처리 처분 등 원전 사후 처리비가 포함된 비용이다.

운전 유지비는 정상 운전 상태에서 발전소 평균 이용률(average

가 차지하는 비율은 원자력의 경우 11 ~ 20%, 석탄 화력 발전의 경우에는 7 ~ 15%를 보이고 있다 [2].

경제성 평가에 있어서는 타인 자본뿐만 아니라 자기 자본에 대해서도 이자가 발생하는 것으로 간주하는데, 이는 투자 금액에 대한 기회비용을 보상해야 하기 때문이다.

〈그림 1〉은 원자력발전소의 착수 시점에서부터 상업 운전시까지의 건설비 구성을 보여준다.

② 연료비(Fuel Cost)

연료비(원자력 발전의 경우 핵연료 주기비)는 각 발전소에서 연료를 확보하여 사용하는 데 소요되는 비용을 말한다.

일반적으로 석탄 화력 발전에 비해 원자력 발전의 연료비는 복잡한데, 그 이유는 석탄 화력 발전은 연소와 동시에 소비되어 전기 에너지로 변환되는 반면, 핵연료는 한 번 장전되면 수 년에 걸쳐 사용될 뿐만

아니라 대개 재처리(reprocessing)되어 재사용되기 때문이다.

연료비는 전체 발전 원가에서 할인율, 이용률 및 발전소 수명에 따라 차이를 보이는데, 원자력 발전의 경우 대략 20%를 석탄 화력 발전의 경우에는 35% 이상을 차지하고 있다.

원자력 발전의 연료인 우라늄의 시장 가격은 1970년대 말 제2차 석유 파동을 계기로 원자력발전소의 경제성에 대한 국제적 관심이 고조되어 파운드당 40달러를 상회하기도 하였다.

그러나 세계적인 원자력산업의 침체와 러시아산 우라늄의 방매 등으로 1980년대 중반부터 하락하기 시작하여 최근에는 파운드당 9달러 수준을 유지하고 있다. 〈표 1〉은 우리나라 정광의 수입 물량, 수입 가격(CIF 기준) 및 현물 시장 가격 추이를 보여준다.

load factor)을 기초로 추정하며, 일반적으로 변동비적인 요소와 고정비적인 요소로 나누는데, 발전소의 위치·규모·운전 방식·설비 이용률 등에 따라 각 발전소마다 상이하게 나타난다.

그러나 국내의 계산 방법에서는 운전 유지비를 고정비로 취급하는 한편 운전 유지비를 각 발전 설비 자산 가액의 일정 비율로 정형화하여 사용하고 있다.

2. 발전 원가의 경제성 평가 기법

발전 원가의 경제성 평가 기법에는 연간 발전 원가법(Annual Generating Cost Method)에 의한 실적 발전 원가, 최저 필요 수입액에 의해 계산되는 균등화 발전 원가법(Levelized Generating Cost Method), 계통 원가 분석법(System Cost Analysis Method) 및 심사 곡선 분석법(Screening Curve Analysis Method) 등이 있으며, 비용 항목과 비용 분류 방법에 있어서 많은 차이가 있다.

가. 연간 발전 원가법(Annual Generating Cost Method)

현재 운전중인 발전소에 있어서 당해 연도의 자본비·연료비 및 운전 유지비 등 연간 발전을 위해 투

입된 제비용을 모두 합하여 계산한 값으로서 실적 발전 원가가 이에 해당한다.

연간 발전 비용은 매우 편리한 비교 기준으로 간주되기 쉬우나, 발전 원간의 경제성 판단 기준으로 특정한 해 동안의 고정비는 계산 기준과 연도별 배분 방법에 따라 결과가 상이할 수 있다.

그리고 발전소의 가동 상태는 해당 연도의 여건에 따라 크게 달라질 수 있으므로 주로 사후적인 회계 분석 자료로 활용되고 있다.

나. 균등화 발전 원가법(Levelized Generating Cost Method)

발전원별 경제성 평가를 위해 각 국에서 널리 사용되고 있으며, 단일 발전소에 대한 고정비와 운전 유지비를 포함한 모든 비용을 최저 필요 수입액(Minimum Revenue Requirements)에 의해 일정한 이용률 가정하에 순발전량(net electrical output)으로 나누어 구한다.

균등화 원가는 적정 할인율²⁾(discount rate) [4]을 이용하여 구하며, 자본비에 운전 유지비와 사용 후연료의 처리비 및 발전소 폐로 비용 등 운영 비용(operating costs)이 포함된 평균 총비용 개념이다.

발전소 수명 기간에 걸쳐 송전된 전력이 균등화 비용으로 판매된다 고 가정하면, 현가화된 판매 수입은 현가화된 모든 비용의 합과 일치하게 된다.

미래의 발전소에 대해서는 물가 상승률과 연료비, 그리고 기타 비용의 실적 정산 금액을 더한 값을 사용한다.

다. 계통 원가 분석법(System Cost Analysis Method)

계통 원가는 기준 연도의 불변 가격으로 계산되는 것이 보통이지만, 인플레이션 등을 이용하여 모델 사용자가 원하는 시점, 예를 들면 특정 발전소가 최초 상업 가동되는 시점의 정상 가격으로 계산이 가능하다.

계통 원가 분석 방법은 한 전력 계통에 추가되는 설비의 경제적 효과를 계산하는 것이므로 각 계통별 비용 계산 결과가 다르다. 따라서 계통이 다른 국가나 전력 회사와의 비용 비교는 의미가 없다.

라. 심사 곡선 분석법(Screening Curve Analysis Method)

심사 곡선 분석법은 각 발전원의 설비 특성에 따라 이용률 수준별 경제성의 우위가 변할 수 있다는 점에 주목을 한 것으로, 일명 부하형 발

2) 「장기 전력 수급 계획 수립을 위한 제도 개선 연구('98)」에 의하면 적정 할인율은 1) 전력 채권 및 국공채의 기간별 수익률을 이용한 방법, 2) 전력 투자의 자금원별 기회 비용을 이용한 방법, 3) 전력 투자의 자금 용도별 기회 비용을 이용한 방법 등이 있다.



〈표 3〉 경제성 평가 기법 비교

구분	기본 개념	장단점	비고
연간 발전 원가법	임의의 한 해에 분배된 자본비·연료비·운전 유지비를 당해 연도 전력 생산량으로 나눈 값	자본비 분배에 계산이 여러 형태임. 불변 또는 경상 가격 계산 가능, 미래 가격에 대한 다양한 접근 방법 존재	회계 처리에 주로 이용되며 비교 불가
균등화 발전 원가법	단일 발전 설비에 대한 수명 기간 중 할인된 모든 비용의 합을 수명 기간 중 할인된 발전량으로 나눈 값	불변 또는 경상 가격 계산 가능, 핵연료 주기 전략에 따른 계산 가능	투자 선택을 위한 발전 원가 비교에 유용
계통 원가 분석법	신규 설비가 수오, 부하 형태에 따라서 기존 계통에 미치는 효과를 모의한 값	불변 또는 경상 가격 계산 가능, 핵연료 주기 전략에 따른 계산 가능	전력 공급의 장기 비용을 최소화, 계통 특성에 따라 계산 결과가 상이하여 비교 불가
심사 곡선 분석법	발전원의 이용률 수준별 균등화 비용 곡선을 예상 부하 곡선에 대응시켜 최적 원가를 도출	불변 가격 기준, 계통 원가 계산 전에 활용	설비의 고장 정지, 계통 신뢰도 등 고려 불가

자료 : OECD/NEA, 「The Cost of Generating Electricity in Nuclear and Coal Fired Power Stations」, 1983

전 비용에 의한 경제성 비교 방법이라고도 한다.

이 방법은 계통 원가 분석법에서와 같이 설비의 고장 정지, 정기 보수나 계통의 신뢰도, 단위 용량의 크기 등을 고려할 수 없다는 것이 그 한계점이다. 이에 따라 설비 확장 모델 운용 전에 대략의 원가를 도출하는데 활용되고 있다.

이상에서 살펴본 발전 원가 경제성 평가 기법을 비교하면 〈표 3〉과 같다.

원자력 발전 및 석탄 화력 발전의 발전 원가 비교

본 연구에서는 우리 나라 기저 부

하 발전원으로서의 원자력 발전과 석탄 화력 발전의 발전 원가를 연간 발전 원가법에 의한 실적 발전 원가와 최저 필요 수입액에 의해 계산된 균등화 발전 원가를 중심으로 비교해 보고자 한다.

1. 원자력 발전 및 석탄 화력 발전의 실적 발전 원가 비교

가. 원자력 발전 및 석탄 화력 발전의 실적 발전 원가의 개념
현재 운전중인 발전소의 발전 원가를 산출하기 위해서는 연간 발전 원가(Annual Generating Cost)를 이용하는데, 자본비·연료비 및 운전 유지비 등 당해 연도 발전에 투입된 총비용을 당해 연도 발전량

으로 나누어 발전 단가를 계산하는 방법이다.

대상 발전소의 연간 발전량이 일정하다면, 즉 이용률이 주어지면 초기 투자비를 회수하는 방법에 따라 발전 원가의 고정비 부분은 달라진다.

또한 운전 조건에 따라 매년 발전량이 변화하면 그에 따라 발전 원가의 고정비 부분은 매년 변동한다.

전력 회사에서 경영 실적을 발표함에 있어서 각 발전소별 운전 실적에 따른 발전 원가를 산출할 때 이용된다.

$$\begin{aligned} & \text{실적 발전 원가 (원/kWh)} \\ &= \text{발전 비용(원)} / \text{송전량(kWh)} \\ &= \text{고정비 원가} + \text{변동비 원가} \\ &= (\text{자본비} + \text{연료비} + \text{운전 유지} \end{aligned}$$

비 + 세금 + 보험료/ 발전량
 나. 원자력 발전 및 석탄 화력 발전
 의 실적 발전 원가 비교

우리 나라 기저 부하 발전원으로
 서의 원자력 발전과 석탄 화력 발전
 의 실적 발전 원가는 <표 4>에서 보
 는 바와 같이 점차 증가하고 있다.

석탄 화력 발전의 발전 원가는
 1991년 25.14원/kWh에서 1998년
 37.84원/kWh으로 연평균 6%로
 발전 원가가 상승하였다. 특히 발전
 원가의 상승 요인으로 연료비 증가
 에 의한 영향이 큰 것으로 보인다.

발전 시장 자유화 이전(2001. 4.)
 의 발전원별 발전 원가를 살펴보면,
 대체로 원자력 발전이 석탄 화력 발
 전보다 낮았다.

원자력 발전의 발전 원가는 대규
 모의 정기 보수 및 기기 교체 작업
 의 시기, 불시 가동 중지 등의 기술
 적 요인을 비롯하여 중·저준위 폐
 기물과 사용후핵연료 처분 총당금,
 철거비 적립금 등의 비용 요인들에
 의해 영향을 받는다.

원자력 발전의 발전 원가는 1991
 년 22.62원/kWh에서 1998년
 33.68원/kWh으로 연평균 5.85%
 의 증가율을 기록하고 있다.

이와 같이 원자력 발전과 석탄 화
 력 발전의 발전 원가는 연도별로 차
 이는 있지만, 연평균 5% ~ 6%의
 증가율을 기록하고 있다.

<표 5>는 석탄 화력 발전과 원자
 력 발전의 실적 발전 원가 구성 내

<표 4> 기저 부하 발전원으로서의 실적 발전 원가 비교

(단위: 원 / kWh)

연도	석탄 화력 발전(A)	원자력 발전(B)	발전 원가 비율(A/B)
1991	25.14	22.62	1.11
1992	23.22	25.31	0.91
1993	25.63	24.57	1.04
1994	30.16	22.70	1.33
1995	29.46	25.17	1.17
1996	29.12	28.77	1.01
1997	28.05	30.59	0.92
1998	37.84	33.68	1.12
1999	36.27	35.38	1.03

자료: 「원자력 경제성 분석 연구」, '99.12, p.39

「원자력 장기 비전 수립 예비 연구」, '03. 5, p.119)

<표 5> 석탄 화력 발전과 원자력 발전의 실적 발전 원가 구성 내역

(단위: 원 / kWh)

구분	1996년		1997년		1998년	
	석탄	원자력	석탄	원자력	석탄	원자력
연료비	14.28	3.55	13.42	3.13	18.88	3.73
인건비	0.75	1.21	0.70	1.27	0.74	1.17
수선유지비	1.79	2.63	1.77	2.77	1.86	3.07
경비	0.92	6.44	0.50	10.74	0.51	8.49
감가상각비	7.79	11.19	9.56	10.98	12.01	13.28
본사 비용	1.37	0.62	1.16	0.64	1.31	0.91
이자 비용	2.21	3.11	0.93	1.06	2.53	3.03
합계	29.12	28.77	28.05	30.59	37.84	33.68

자료: 「원자력과 경제」, 2000. 6, p.111

역을 보여준다.

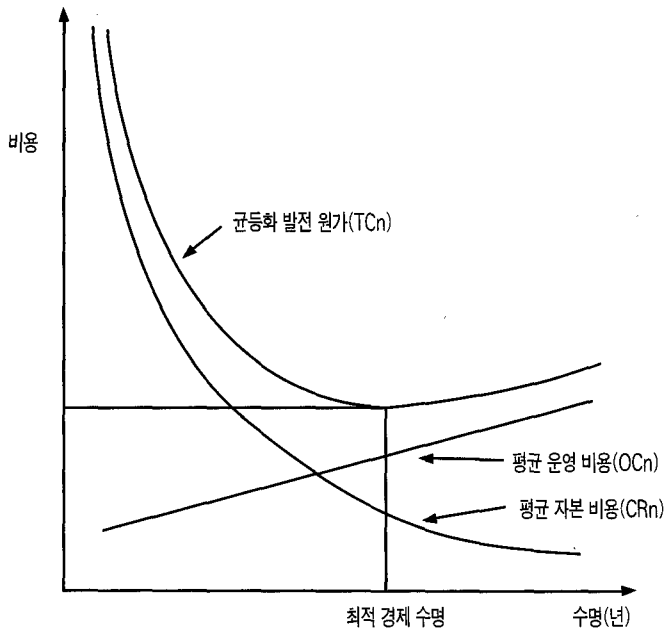
2. 원자력 발전 및 석탄 화력 발
 전의 균등화 발전 원가 비교

가. 균등화 발전 원가의 개념

균등화 발전 원가(Levelized
 Generating Cost)는 발전소의 수
 명 기간 동안에 걸쳐 연도별로 불규
 칩하게 발생하는 발전 비용과 발전
 량을 매년 일정하다고 가정하여, 수
 명 기간 동안 발생하는 비용을 할인

율(discount rate)에 의해 기준시
 점의 현재 가치(present value)로
 환산한 전력 단위당 생산 비용이다.

또 균등화 발전 원가는 통상 불변
 가격 기준으로 계산하는데 <그림
 2>에서 보는 바와 같이 평균 자본
 비용(CRn)에 사용후연료의 처리비
 및 발전소 폐로 비용 등을 포함한
 운전 유지비와 연료비를 합한 평균
 운영 비용(OCn)이 포함되는 평균
 총비용(TCn)의 개념이다.



〈그림 2〉 균등화 발전 원가의 개념

자료 : 「생애 비용을 응용한 원전과 화전의 경제적 수명 설정 비교 연구」97, P.16

한국전력공사(2001)의 APR 1400과 석탄 화력 발전의 경제성 평가 연구[6]에 의하면, APR 1400 기술 개발의 기본적인 경제성 목표 선정에 관한 비교 발전원은 500MWe급 석탄 화력 발전이나 현실적으로 경쟁적 관계에 있는 발전원은 대용량의 800MWe급 석탄 화력 발전이므로, 본 논문에서는 800MWe급 석탄 화력 발전을 비교 발전원으로 사용하기 위한 주요 입력 자료는 <표 6>과 같다.

② 원자력 발전 및 석탄 화력 발전 원가

전력 부문 CDM 사업의 경제성은 다양한 변수에 의해 영향을 받을 수 있다. 특히 할인율은 정책적으로 결정될 수 있는 입력 변수로, 초기 투자비의 규모가 큰 원자력 발전의 경우 이용률이 증가할수록 상대적인 경제성이 향상되는 것으로 나타났다.

주요 가정 사항에 의한 APR 1400 1·2호기 1400MWe급과 영흥 1·2호기 석탄 화력 800MWe급의 자본비, 운전 유지비 및 연료비와 최저 필요 수입액(Minimum Revenue Requirements)³⁾에 의해 계산된 균등화 발전 원가법을 적용하여 각각의 발전 원가를 계산한

균등화 발전 원가를 수식으로 표시하면 다음과 같다.

균등화 발전 원가

$$\frac{\sum (c+f+m) / (1+r/100)^L}{\sum eL / (1+r/100)^L}$$

c : 건설중 이자와 발전소 폐로 비용이 포함된 자본비

f : 연료비

m : 운전 유지비

e : 송전량

L : 발전소 수명 기간

r : 할인율(%)

본 연구에서는 교토의정서에 나타

난 지구 온실 가스(GHG) 감축 수단 중의 하나인 청정 개발 체제(Clean Development Mechanism : CDM) 사업에서의 원자력 발전과 석탄 화력 발전의 발전 원가를 1400MWe급 APR 1400이 현실적으로 경쟁적 관계에 있는 대용량의 800MWe급 석탄 화력 발전의 경제성 평가 자료를 이용하여 알아본다[5] [6].

나. 청정 개발 체제(CDM) 사업에서의 균등화 발전 원가

① 주요 가정 사항

3) 「차세대 원전의 경제성 평가(1999)」에 의하면, 최저 필요 수입액은 미국 EPRI에서 설계중인 발전소에 대한 경제성 평가 방법으로, 발전소를 건설하여 운전 후 최종 폐로시까지 예상되는 모든 소요 비용을 전력 사용자로부터 회수해야 할 최소한의 수입액으로 정하여 발전 원가를 산정하는 방법을 의미함.

〈표 6〉 주요 입력 자료

항목	단위	석탄 화력 발전	원자력 발전
발전소 수명	년	30	40
시설 용량	MWe	800×2	1,400×2
이용률	%	85	85
건설 단가	천원 / kW	1,133	1,658
순건설 단가	천원 / kW	913	1,288
적용 환율	원 / US\$	1,300	1,300
실질 할인율	%	8	8

자료 : 「차세대원자력기술개발 (III)」, 2001. 12, p.1,022~1,049

결과는 〈표 7〉과 같다.

③ CDM 사업에서의 외부 비용

IAEA에서 개발한 프로그램을 이용하여 국내의 대표적인 석탄 화력 발전소와 원자력 발전소를 대상으로 환경 시설의 부차이 외부 비용에 미치는 효과를 추정한 결과는 〈표 8〉과 같다.

외부 비용에 사용된 참조 발전소는 영광 원전과 삼천포 화력발전소이다. 삼천포 화력발전소는 총설비용량은 3,240MWe(560MWe 4기, 500MWe 2기)이며, 환경 설비의 부차 여부에 따른 외부 비용을 추정하기 위해 집진기, 탈황 설비 및 탈질 설비 등과 같은 환경 설비를 고려하였다.

원자력 발전소의 방사능 방출에 의한 외부 비용을 산출하기 위해 영광 원자력 발전소를 대상으로 연간 방사능 배출량은 영광 1호기~6호기 평균값을 이용하였다.

먼지 피해, 시정 거리 피해, 농업 생산 피해, 사망 위험, 질병 위험 및 지구 온난화 등의 외부 비용을 발전원별로 연구한 추정 결과는 석탄 화력 발전이 3.087원/kWh로 원자력 발전 0.013원/kWh 보다 아주 큰 것으로 나타났다 [5].

결국 원자력 발전의 외부 비용은 석탄 화력 발전에 비하면 거의 인체 및 작물에 영향을 미치지 않는 것으로 보인다.

④ 청정 개발 체제(CDM) 사업에

〈표 7〉 원자력 발전 및 석탄 화력 발전의 발전 원가 평가 결과

(단위 : 원 / kWh)

항목	석탄 화력 발전 (baseline)	원자력 발전
자본비	15.65	21.68
운전 유지비	6.32	9.50
연료비	16.10	4.71
발전 원가	38.06	35.89

주: 2001. 1. 불변 가격, 환율 1300원/\$, 할인율 8%, 차입율 100%, 이용률 85% 기준

자료 : 「차세대원자력기술개발 (III)」, 2001. 12, p. 1,049

서의 균등화 발전 원가 비교

1400MWe급 APR 1400 1,2호기 및 800MWe급 석탄 화력 발전 발전 원가에 외부 비용을 더한 균등화 발전 원가는 〈표 9〉에서 보는 바와 같이, 원자력 발전은 35.9원/kWh로 석탄 화력 발전 41.1원/kWh로 발전 원가의 우위(약 12.7%)에 있는 것으로 나타났다. 이는 발전 원가의 연료비에 의한 차이가 큰 영향 요인의 하나인 것으로 보인다.

지구 온실 가스 감축 수단의 하나인 청정 개발 체제(CDM) 사업에서의 균등화 발전 원가는 석탄 화력 발전이 원자력 발전에 비해 상당히 큰 것으로 나타나, 원자력 발전이

석탄 화력 발전에 비해 환경 친화적인 발전원으로 밝혀졌다 [7].

원자력 발전 및 석탄 화력 발전의 발전 원가 국제 비교

1. 주요 국가의 원자력 발전 및 석탄 화력 발전 발전 원가

가. 미국의 원자력 발전 및 석탄 화력 발전 발전 원가

미국 원자력산업계는 2001년도에 최고의 원자력 발전량(7,688억 kWh) 기록과 20년 동안 최저의 발전 원가를 경신하는 등 원자력 발전 산업의 호황을 맞고 있다.

미국의 원자력 발전에 대한 연료비와 운전 유지비(O&M)를 합한 실

〈표 8〉 발전원별 외부 비용 비교

(단위: 원 / kWh)

구분	석탄 화력 발전	원자력 발전
먼지 피해	0.263	0
시정 거리 피해	0.082	0
농업 생산 피해	0.209	0
사망 위험	0.830	0
질병 위험	1.104	0
지구 온난화	0.599	0.013
합계	3.087	0.013

자료: 「원자력 경제성 분석 연구」, 2000. 12, p. 36

〈표 9〉 청정 개발 체제(CDM) 사업에서의 균등화 발전 원가

(단위: 원 / kWh)

항목	석탄 화력 발전	원자력 발전
발전 원가	자본비	21.68
	운전 유지비	9.50
	연료비	4.71
	합계	35.89
외부 비용	3.087	0.013
균등화 발전 원가 합계	41.147	35.903

〈표 10〉 미국의 발전원별 실적 발전 원가 추이

(단위: ¢ / kWh)

발전원	1998년	1999년	2000년	2001년
원자력	2.09	1.90	1.81	1.68
석탄	2.07	2.07	1.94 ^(주2)	1.80

주 1) 2001년 달러 기준, 연료비 + O&M 비용 기준

2) 2000년도 석탄 화력 발전의 발전 원가는 1999년과 2001년도 기중 평균치로 추정

자료: NEI, 「Comfiled from FERC data and EUCG industry reports」, January, 2003

도 운전 개시 참조 발전소에서 할인을 3%, 설비 이용률 80%를 가정할 경우, 운전 수명 40년 동안의 평균 발전 원가는 원자력 발전이 가장 싼 5.6엔이었고, 석탄 화력 발전이 5.9엔을 나타내고 있다 (〈표 11〉 참조).

설비 이용률 85% 이상에서 원자력 발전이 석탄 화력 발전보다 발전 원가가 저렴했으며, 또한 원자력 발전은 이용률 향상에 따라 경쟁력 향상이 효율적이라는 것을 알 수 있다.

다. 프랑스의 원자력 발전 및 석탄 화력 발전 발전 원가

프랑스는 1970년대 초부터 에너지 공급의 안전성과 경제 여건을 고려하여 강력한 원자력 프로그램을 추진하고 있다.

2003년 1월 1일 현재 59기의 원자력발전소가 415,500 GWh를 생산하여 전력 생산의 약 78%를 공급하고 있어 프랑스의 주요 에너지 공급원이 되고 있다.

IAEA(1997) 자료에 의하면 5%의 할인을 경우, 원자력 발전이 석탄(복합) 화력 발전에 비해 경쟁력이 있으며, 높은 할인을 적용할수록 원자력 발전의 경쟁력이 줄어드는 것으로 분석되었다.

〈표 12〉는 프랑스의 발전원별 연간 6,000 운전 시간 기준의 할인을 별 실적 발전 원가와 추정값을 보여 주는데, 원자력 발전이 석탄 화력

발전 원가는 〈표 10〉에서 보는 바와 같이 1998년의 2.09 ¢/kWh에서 2001년에는 1.68 ¢/kWh로 크게 감소하였으며, 석탄 화력 발전의 발전 원가 또한 1998년의 2.07 ¢/kWh에서 2001년에는 1.8 ¢/kWh로 감소 추이를 보이고 있다.

원자력발전소의 발전 원가는 1991년의 2.8 ¢/kWh에서 2001년의 1.68 ¢/kWh까지 지난 10년 동

안 무려 40%나 하락하였다.

이는 발전 전력량의 증가가 발전 원가 감소에 기여하고 있음을 알 수 있다. 이는 효율 향상과 원가 관리에 초점을 맞춘 발전소 운영 절차의 개선과 안정적인 연료비 지출 등에 따른 결과로 볼 수 있다.

나. 일본의 원자력 발전 및 석탄 화력 발전 발전 원가

일본 전기사업연합회는 2002년

〈표 11〉 일본의 발전원별 이용률 및 할인율에 따른 발전 원가 비교

(단위: ¥ / kWh)

발전원	이용률	할인율				
		0%	1%	2%	3%	4%
원자력	70%	5.4	5.5	5.8	6.1	6.6
	80%	5.0	5.0	5.2	5.6	5.9
	85%	4.8	4.8	5.0	5.3	5.7
석탄	70%	5.2	5.5	5.9	6.4	6.8
	80%	4.9	5.2	5.5	5.9	6.3

발전보다 경쟁 우위에 있음을 보여 주고 있다 [8].

2. 원자력 발전 및 석탄 화력 발전 발전 원가의 국제 비교

OECD/NEA(1998)는 향후 원전 건설시 균등화 발전 원가가 5%의 할인율에서 2.5 ~ 6¢/kWh, 10% 할인율에서 4~8¢/kWh 범위에서 결정될 것으로 예측하고 있다 [9].

〈표 13〉은 우리 나라를 비롯해 원자력 선진국인 프랑스·일본 및 미국 등 주요 국가를 대상으로 5% 할인율에서 원자력 발전과 석탄 화력 발전의 발전 원가를 비교한 결과이다. 〈표 14〉는 주요 국가의 5% 할인율에서 원자력 건설 기간 중 이자를 포함하는 발전 원가가 자본비 약 60%, 운전 유지비(O&M) 25% 그리고 연료비 15%로 구성되어 있음을 보여준다.

〈표 15〉는 주요 국가의 5% 할인율 경우의 발전 원가에 대한 민감도 분석 결과로, 프랑스와 우리나라는 원자력 발전이 이용률과 수명에 상관없이 석탄 화력 발전보다 발전 원가가 저렴하므로, 원자력 발전이 석탄 화력 발전보다 경제성이 있는 것으로 볼 수 있다. 또다른 연구에서도 원자력 발전이 3%에서 8%까지의 할인율에서 석탄 화력 발전보다 발전 원가가 우위에 있는 것으로 나타났다 [9] [10].

World Nuclear Association(2002)의 2005~2010년 동

자료 : 〈日本原産新聞〉 2003. 12. 18

〈표 12〉 프랑스의 발전원별 실적 발전 원가 비교 (연간 6,000 운전 시간 기준)

발전원	연도(할인율)	자본비	운전 유지비	연료비	R & D	합계
원자력	1993 (8%)	13.6	5.6	4.5~6.2	0.4	24.1~25.8
	1997 (5%)					20.7~21.2
	1997 (8%)					16.7~17.2
석탄	1993 (8%)	11.3	5.8	11.7~17.7	-	28.8~34.8
	1997 (8%)					22.7~26.5 19.5~23.9

자료 : IAEA, 「Sustainable Development & Nuclear Power- Annex II」, 1997

〈표 13〉 주요 국가의 원자력 발전 원가 비교

국가	할인율	자본비(%)	운전 유지비(%)	연료비(%)	발전 원가(¢/kWh)
프랑스	5%	54	21	25	3.2
	10%	70	14	16	4.9
일본	5%	43	29	27	5.7
	10%	60	21	19	8.0
한국	5%	55	31	14	3.1
	10%	71	20	9	4.8
미국	5%	55	27	19	3.3
	10%	68	19	13	4.6

자료 : NEA, 「Nuclear Energy in a Sustainable Development Perspective」, 2000. p. 30

안 발전 원가 추정 자료[11]에 의하면, 우리나라를 비롯해 프랑스 등은 원자력 발전이 석탄 화력 발전과의 경쟁에 있어 우위를 유지할 수 있는 것으로 전망하고 있다.

또한 원자력 발전 원가 절감을 위해 입증된 수단으로 표준화

(standardization) 및 연속 건설 (series construction), 부지 한 곳에 여러 호기 건설(multiple unit construction at a site), 건설 공기 단축(reduction of construction schedule), 규모의 경제 (economy of scale), 그리고 기술

〈표 14〉 주요 국가의 할인율에 따른 원자력 및 석탄의 발전 원가 비교

(단위 : US mills/ kWh, 1996. 7.1. 기준)

구분		5% 할인율			
		자본비	O & M	연료비	합계
프랑스	원자력	17.39 (54%)	6.77 (21%)	8.07 (25%)	32.24 (100%)
	석탄	13.85 (30%)	9.91 (21%)	22.62 (49%)	46.38 (100%)
일본	원자력	24.91 (43%)	16.84 (29%)	15.71 (27%)	57.45 (100%)
	석탄	23.95 (43%)	12.51 (22%)	19.35 (35%)	55.81 (100%)
한국	원자력	16.83 (55%)	9.60 (31%)	4.27 (14%)	30.70 (100%)
	석탄	11.37 (33%)	8.17 (24%)	14.86 (43%)	34.40 (100%)
미국	원자력	18.20 (55%)	8.86 (27%)	6.22 (19%)	33.28 (100%)
	석탄	11.20 (45%)	5.15 (21%)	8.70 (35%)	25.05 (100%)

자료 : OECD/NEA-IEA(1998), 「Projected Costs of Generating Electricity : Update 1998」, Paris, France, pp 66 ~ 71

탄 화력 발전과 원자력 발전의 발전 원가를 우리 나라를 비롯해 프랑스·일본 및 미국 등 원자력 선진국의 이용률과 할인율을 통해 비교한 결과는 다음과 같다.

첫째, 우리 나라의 석탄 화력 발전은 발전 원가에서 연료비가 35% 이상 차지하기 때문에 연료비의 변화가 발전 원가에 직접적으로 영향을 받아 실적 발전 원가가 상승하는 경향을 보이고 있다.

원자력 발전의 경우에는 발전 원가가 기술적 요인과 방사성 폐기물 관리 등의 비용 요인들에 의해 영향을 받으므로, 원가 관리에 초점을 맞춘 발전소 운영 절차의 개선 등이 필요할 것으로 생각한다.

둘째, 현재까지 건설된 1000MWe 급 한국 표준형 원전(KSNP)과 500MWe급 석탄 화력 발전에 추가하여 앞으로 건설 예정인 1400MWe 급 APR1400 및 800MWe급 석탄 화력 발전의 발전 단가에 외부 비용을 더한 균등화 발전 원가의 경제성 평가에서는 원자력 발전이 석탄 화력 발전보다 우위에 있는 것으로 나타났다.

또 IAEA에서 개발한 외부 비용 프로그램을 이용한 외부 비용 추정 결과에 의하면, 석탄 화력 발전소에 환경 설비 부착시 석탄 화력 발전의 발전 원가에 상당한 외부 비용이 발생하지만, 원자력 발전의 경우에는 외부 비용에 의한 영향이 상당히 작

〈표 15〉 주요 국가의 원자력 및 석탄의 발전 원가 민감도 분석 결과

(단위 : US mills/ kWh, 1996. 7.1. 기준)

국가	항목	할인율 5%			
		이용률(%)	수명(년)		
			65	75	80
프랑스	원자력	38.29	34.42	32.24	32.85
	석탄	51.70	47.98	46.38	46.47
일본	원자력	67.14	60.56	57.45	57.88
	석탄	64.11	58.36	55.81	56.03
한국	원자력	36.81	32.64	30.70	30.95
	석탄	38.78	35.71	34.40	34.47
미국	원자력	39.84	35.54	33.27	33.79
	석탄	28.93	26.35	25.01	25.30

자료 : OECD/NEA-IEA(1998), ibid, pp 73 ~ 77

자립 촉진(furthering self-reliance)과 국내 업체 참여 강화(enhancing local participation) 등을 언급하고 있다[12].

결론

본 연구를 통해 우리 나라의 기저 부하 발전원으로 사용되고 있는 석

은 것으로 나타났다.

이에 따라 환경에 대한 관심이 증폭되면서 유엔 기후 변화 협약(UNFCCC)의 추진에 따른 탄소세 및 청정 개발 체제(CDM) 도입 등과 관련된 원가 상승 요인 등이 향후의 발전 원가를 크게 좌우할 것으로 본다.

셋째, OECD/NEA(1998)는 향후 원전 건설시 균등화 발전 원가가 5%의 할인율에서 2.5 ~ 6¢/kWh 범위에서 결정될 것으로 예측하고 있다.

주요 국가의 5% 할인율에서 원자력 발전과 석탄 화력 발전의 발전 비용 민감도를 분석한 결과에 의하면, 우리나라는 원자력 발전이 이윤률과 수명에 상관없이 석탄 화력 발전보다 발전 원가가 저렴한 것으로 나타났다.

특히 프랑스는 원자력 발전이 이윤률과 수명에 상관없이 석탄 화력 발전보다 절대 우위를 차지하는 것으로 밝혀졌다.

결론적으로, 원자력 발전은 발전 원가에서 자본비가 차지하는 비중이 큰 반면, 연료비가 차지하는 비중이 낮아 앞으로 연료비의 국제 가격 변동에 크게 좌우되지 않고 전력을 생산할 수 있기 때문에 발전 시장 자유화(liberalised electricity market)에서 큰 장점을 가지게 될 것이다.

결국 원자력 발전은 기술 의존형

대량 전력 공급원으로서 환경 친화적이며 에너지 부존 자원이 빈약하고 에너지 수입 의존도가 높은 우리나라에서 가장 현실적인 대체 에너지 지원으로서 에너지 안보(security of supply)에 기여하는 바가 클 것이다.

또한 현재까지 건설된 한국표준형원전(KSNP)에 의한 원자력 발전소 건설의 기술 자립 및 표준화에 추가하여 대용량인 APR1400 원자력 발전의 건설로 자본비가 지속적으로 절감될 것으로 예상되므로, 이에 따른 원자력 발전의 경제성은 더욱 향상될 전망이다.

그러나 발전 시장 자유화에 따른 장기 전력 수급 계획 수립시 가장 중요한 요소는 바로 발전 원가이므로, 지속적으로 원자력 발전이 가장 낮은 발전 원가를 계속 유지하기 위해서는 건설 공기 단축 등에 의한 자본비의 원가 절감 노력이 뒤따라야 할 것으로 생각한다. ☉

〈참고 문헌〉

1. OECD/NEA, "Nuclear Electricity Generation : What Are the External Costs?", 2003, p. 16
2. 한국전력공사, "원자력과 유연탄발전의 경제성분석 기법확립에 관한 연구", 1986. 7, p. 49
3. OECD/IEA, "World Energy Outlook (2001 INSIGHTS)",

2001

4. 에너지경제연구원, "장기전력 수급계획 수립을 위한 제도개선 연구", 1998, Chapter III

5. 한국원자력연구소, "원자력 경제성 분석연구", 2000. 12, pp. 13 ~ 39

6. 한국전력공사 전력연구원, "차세대원자로 기술개발(III)", 2001. 12

7. 문기환/임채영/송기동, "석탄 화력과 원자력의 환경외부 비용 비교", 2001 원자력학회 춘계학술발표 논문

8. IAEA, "Sustainable Development & Nuclear Power, Annex II", 1997

9. OECD/NEA-IEA, "Projected Costs of Generating Electricity : Update 1998", Paris, France

10. Lee, ManKi, "Economic Assessment of SMART in Korea", IAEA-SR-218/58, 2001. 5

11. World Nuclear Association, "The Economics of Nuclear Power", 2002. 12

12. IAEA, "Improving economics and safety of water cooled reactors : Proven means and new approaches", 2002. 5