

CO₂ 배출비용을 고려한 발전소의 연료교체 경제성에 대한 연구

(An Economic Feasibility Study on Fuel Transfer of A Thermal Power Plant Considering CO₂ Emission Cost)

이상중* · 정영호

(Sang-Joong Lee · Yeong-Ho Jeong)

요 약

일본 도야코에서 2008년 7월 열린 G8 정상회의에서 2050년까지 전세계 온실가스 배출량을 절반으로 줄이는 장기 목표를 추진하는 방안이 논의되었다. 우리나라도 2013년부터 기후협약 규제가 거의 확실시 되고 있다. 화석연료의 연소로 대부분의 전력을 생산하는 발전산업은 우리나라 CO₂ 대기배출량의 20[%] 이상을 차지하고 있다. 발전소의 화석연료의 소모와 이에 따른 CO₂ 대기배출 규제는 갈수록 엄격해 질 전망이며 전력생산단가에 크게 영향을 끼칠 것이다. 본 논문은 발전소의 연료교체 검토시 CO₂ 배출비용을 감안하는 간단한 경제성 검토를 수행하였다. 중유 전소 발전소인 D 발전소가 LNG로 연료전환을 고려할 경우, 발전비용이 같아지는 ton당 CO₂ 배출비용, 즉, LNG-중유 연료교체의 손익분기점에 해당하는 ton당 CO₂ 배출비용을 계산하는 방법과 예제를 제시하였다. 이를 위하여 D발전소의 성능시험 결과 얻어진 입출력 특성계수를 이용하였다.

Abstract

With respect to the goal of achieving at least 50[%] reduction of global emissions by 2050, the G8 leaders agreed to seek to share and adopt it with all Parties to the UNFCCC in the 34th Group of Eight Summit held in Toyako, Japan in July 2008. Korea is also expected to obey the Kyoto Protocol starting in 2013, which will result in a serious shock especially to the electric power industry. The power plants burning the fossil fuel produce more than 20 percent of national CO₂ emission. This paper presents an economic feasibility study on fuel transfer for a thermal power plant considering CO₂ emission cost. Calculation of the breakeven point for the fuel transfer from LNG to heavy oil of D power plant is demonstrated using the input-output coefficients obtained by the performance test.

Key Words : CO₂ Emission Cost, Performance Test, Input-Output Coefficient, Thermal Power Plant, Fuel Transfer, Breakeven Point

* 주저자 : 서울산업대학교 전기공학과 부교수

Tel : 02-978-6411, Fax : 02-978-2754

E-mail : 85sjlee@snut.ac.kr

접수일자 : 2008년 11월 28일

1차심사 : 2008년 12월 3일

심사완료 : 2008년 12월 15일

1. 서 론

일본 홋카이도 도야코에서 2008년 7월 열린 G8 정상회의에서 2050년까지 전세계 온실가스 배출량을 절반으로 줄이는 장기 목표를 추진하는 방안이 논의되었다. 우리나라는 온실가스 의무 감축 대상국에 포함되지 않음에도 불구하고 2050년까지 온실가스 배출량을 절반으로 감축하자는 목표에 동참할 의사를 표명했다[1].

우리나라 CO₂ 대기배출량의 20[%] 이상을 차지하고 있는 발전설비의 CO₂ 배출량을 줄이는 것이 시급한 과제로 대두되었다. CO₂ 배출량이 많은 발전용 연료의 사용을 줄이는 것도 온실가스 감축을 위한 한가지 방법이다.

현재 중유를 발전용 연료로 사용하고 있는 D 발전소가 LNG로의 연료전환을 검토하고 있다고 가정하자. 일반적으로 중유는 LNG보다 열량단가가 싸지만 LNG는 중유보다 CO₂ 배출량이 훨씬 적다. CO₂ 배출비용을 고려할 때 이 계산은 달라질 수 있다. CO₂의 배출권 가격은 해가 갈수록 비싸질 것이라는 것은 기정사실로 받아들여지고 있다. 따라서 CO₂ 배출비용이 고가일 경우, 중유가 LNG보다 항상 싼 연료라고 단언할 수 없다.

본 논문은 성능시험 결과 얻어진 발전소의 입출력 특성계수를 이용하여, D 발전소의 중유 연소에 따른 발전비용과 LNG 연소에 따른 발전비용이 같아지는 ton당 CO₂ 배출비용, 즉 LNG-중유 연료교체의 손익분기점에 해당하는 ton당 CO₂ 배출비용을 계산하고자 하였다.

2007. 8 이후 국제유가의 이상 폭등으로 중유가 LNG 보다 열량단가가 높은 기현상이 나타나고 있으나 이는 일시적일 가능성이 높다. 본 논문은 LNG의 열량단가가 중유보다 높은 일반적인 경우를 전제로 한다.

2. 발전소 성능시험과 입출력 계수

발전소는 성능시험(performance test)을 통하여 2차 계수 a, 1차 계수 b 및 상수 c의 세 입출력 특성계수를 구한다. 식 (1)에서, P는 발전출력[MW], y(P)

는 열입력량[Gcal/hour]이다.

$$y(P) = aP^2 + bP + c \tag{1}$$

그림 1은 식 (1)을 그래프로 나타낸 것으로서 입출력 특성곡선(input-output curve)이라 부른다[2]. 입출력 특성곡선의 x축은 발전출력[MW], y축은 열입력량[Gcal/hour]이다.

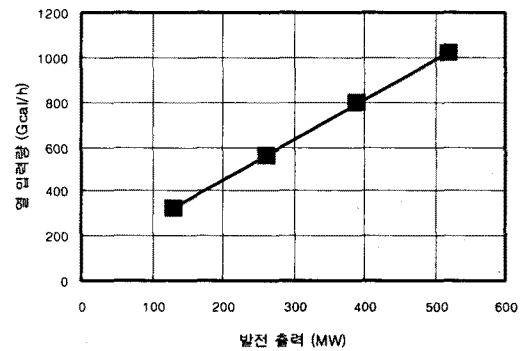


그림 1. 입출력 특성곡선
Fig. 1. Input-output curve

식 (1)의 열입력량 y(P)를 사용연료의 발열량과 연소율로 나누면 발전출력에 상응하는 연료소모량 [ton/hour]을 얻을 수 있다[3].

$$\frac{\text{열입력량} \left(\frac{\text{Gcal}}{\text{hour}} \right)}{\text{발열량} \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) * \text{연소율}} = \text{연료소모량} \left(\frac{\text{ton}}{\text{hour}} \right) \tag{2}$$

3. 입출력계수를 이용한 발전기 출력 대비 CO₂ 대기배출량 계산

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 온실가스 추계방법론을 이용하여 [MW] 출력에 대한 CO₂ 대기배출량 [ton-CO₂/hour]을 계산하는 수식을 얻을 수 있다. 즉,

CO₂ 배출량 = 공통단위로 전환된 연료소모량
 [=연료소모량(ton/hour)*발열량(Kcal/kg)]
 *연소율*연료의 IPCC 탄소배출계수
 *CO₂와 탄소간의 질량비(=44/12) (3)

그런데, 식 (2)의 관계로부터 식 (3)은 아래와 같이 간략히 표현될 수 있다.

CO₂ 배출량=열입력량*IPCC탄소배출계수*44/12
 =(aP²+bP+c)*IPCC 탄소배출계수*44/12 (4)

즉, 발전소 입출력 특성계수 a, b, c가 주어지면 식 (4)으로부터 발전출력에 대한 CO₂ 대기배출량을 바로 계산할 수 있다[3].

탄소배출계수는 화석연료별 탄소함유량에 따라 주어지는 계수이다. 표 1은 IPCC가 추천한 연료별 탄소배출 계수이다.

표 1. IPCC 탄소배출계수
 Table 1. IPCC carbon content values

연료구분		탄소배출계수	
		kg-C/GJ	ton-C/TOE
액체 화석연료	경유	20.20	0.837
	중유	21.10	0.875
고체 화석연료	무연탄	26.80	1.100
	원료탄	25.80	1.059
	연료탄	25.80	1.059
기체화석연료	LNG	15.30	0.637

4. D 발전소의 적용사례 : LNG-중유 연소시 CO₂ 대기배출량 계산

4.1 중유 연소시

250[MW] 용량의 D 발전소를 예로 들어 중유 연소시 CO₂ 대기배출량을 계산해 보자. 성능시험결과는 표 2와 같다고 가정한다[4].

표 2. 중유 연소시 성능시험결과
 Table 2. Performance test result with firing heavy oil

출력([MW])	연료소모량 ([ton/h])	발열량 ([kcal/kg])
127.3	31.5	9,636
188.3	44.8	9,622
252.3	60.9	9,611

- ① 표 2로부터 식 (1)을 적용하여 D 발전소의 입출력 특성계수 a=0.00255, b=1.284, c=98.6을 얻을 수 있다.
- ② 표 1로부터 중유의 IPCC 탄소배출계수 21.10 [kgC/GJ]을 얻을 수 있으며, 이를 [ton-C/Gcal] 단위로 환산하면 0.088 이 된다.

따라서 250[MW]의 발전출력에 대한 D 발전소의 CO₂ 배출량은 ① 및 ② 와 식 (4)로부터

중유 연소시 250[MW] 출력에 대한 CO₂ 배출량
 = (aP²+bP+c) × IPCC탄소배출계수 × 44/12
 = 584.87 × 0.088 × 44/12
 = 188.7[ton-CO₂/hour] (5)

을 얻을 수 있다.

4.2 LNG 연소시

LNG 연소시 CO₂ 대기배출량을 계산해 보자. 성능시험결과는 표 3과 같다고 가정한다[4].

표 3. LNG 연소시 성능시험결과
 Table 3. Performance test result with firing LNG

출력([MW])	연료소모량([ton/h])	발열량([kcal/kg])
125.0	22.5	13,026
188.8	34.0	13,026
250.9	45.1	13,024

- ① 표 3으로부터 D 발전소의 입출력 특성계수 a=0.00082, b=1.96, c=45.0을 얻을 수 있다.

CO₂ 배출비용을 고려한 발전소의 연료교체 경제성에 대한 연구

② 표 1로부터, LNG의 IPCC 탄소배출계수 15.30 [kgC/GJ]을 얻을 수 있으며, 이를 [tonC/Gcal] 단위로 환산하면 0.064 가 된다.

따라서 250[MW]의 발전출력에 대한 D 발전소의 CO₂ 배출량은 ① 및 ②와 식 (4)로부터

$$\begin{aligned} \text{LNG 연소시 250[MW] 출력에 대한 CO}_2 \text{ 배출량} \\ &= (aP^2 + bP + c) \times \text{IPCC 탄소배출계수} \times 44/12 \\ &= 588.45 \times 0.064 \times 44/12 \\ &= 138.1[\text{ton-CO}_2/\text{hour}] \end{aligned} \quad (6)$$

을 얻을 수 있다.

5. D 발전소의 LNG-중유 연소시 CO₂ 배출량 및 배출비용 비교

식 (5) 및 (6)으로부터 동일 출력시 LNG를 사용할 때가 중유를 사용할 때 보다 CO₂ 배출량이 50.6[ton-CO₂/hour] 정도 적게 배출됨을 알 수가 있다. 즉, CO₂ 배출량 측면으로 보면 LNG가 유리하다. CO₂의 ton당 배출가격은 예측이 어렵지만 해가 갈수록 비싸질 것이라는 것은 기정사실로 받아들여지고 있다. CO₂ 배출 규제가 발효되어 CO₂ 배출에 대한 ton당 penalty가 부과될 경우 사용연료의 경제성을 재검토해야 한다. 표 4는 Euro 시장에서의 탄소 배출권 가격을 나타낸다[5].

표 4. Euro 시장에서의 탄소 배출권 가격
Table 4. CO₂ emission cost in Euro Market

년 도	€/ton	비고
2005	21.59	
2006	17.95	
2007	5.60	
2008	23.87	

5.1 중유 연소시 250[MW]에 대한 CO₂ 배출비용

중유 연소시 D 발전소의 250[MW]에 대한 CO₂ 배

출비용은 식 (5)의 250[MW] 출력에 대한 D 발전소의 CO₂ 배출량에 표 4의 ton당 CO₂ 배출가격을 곱하면 구해진다. 즉,

$$\begin{aligned} \text{중유 연소시 250[MW]에 대한 CO}_2 \text{ 배출비용} \\ &= 188.7[\text{ton-CO}_2/\text{hour}] \times \text{ton당 CO}_2 \text{ 배출가격} \\ &= 188.7x \end{aligned} \quad (7)$$

를 얻을 수 있다. 단 x는 ton당 CO₂ 배출가격[원/ton-CO₂]이다.

5.2 LNG 연소시 250[MW]에 대한 CO₂ 배출비용

LNG 연소시 D 발전소의 250[MW]에 대한 CO₂ 배출비용은 식 (6)의 250[MW] 출력에 대한 D 발전소의 CO₂ 배출량에 표 4의 ton당 CO₂ 배출가격을 곱하면 구해진다. 즉,

$$\begin{aligned} \text{LNG 연소시 250[MW]에 대한 CO}_2 \text{ 배출비용} \\ &= 138.1[\text{ton-CO}_2/\text{hour}] \times \text{ton당 CO}_2 \text{ 배출가격} \\ &= 138.1x \end{aligned} \quad (8)$$

를 얻을 수 있다.

6. 입출력 특성계수를 이용한 D 발전소의 [MW] 발전출력 대비 연료비 계산

연료의 열량단가를 알면 식 (1)에 열량단가[원/Gcal]를 곱하여 출력 P[MW]에 대한 연료비[원/hour]를 곧바로 얻을 수 있다. 표 5는 LNG와 중유의 열량단가를 나타낸다[6].

표 5. 발전원별 연료의 열량단가
Table 5. Calorific cost of fuel

년 도	LNG (원/Gcal)	중유 (원/Gcal)
2005	35,775	31,898
2006	43,321	39,577
2007	43,590	40,334

6.1 중유 연소시 250[MW]에 대한 연료비

중유 연소에 대한 D 발전소의 입출력 특성계수 $a=0.00255$, $b=1.284$, $c=98.6$ 및 식 (1)과 표 5의 2007년 중유 열량단가 40,334[원/Gcal]를 적용하면

$$\begin{aligned} & \text{중유 연소시 250[MW] 출력에 대한 연료비} \\ & = \text{열입력}(aP^2 + bP + c) \times \text{중유의 열량단가} \\ & = 584.87 \times 40,334 \\ & = 23.59[\text{백만원/hour}] \end{aligned} \quad (9)$$

을 얻을 수 있다.

6.2 LNG연소시 250[MW]에 대한 연료비

LNG 연소에 대한 D 발전소의 입출력 특성계수 $a=0.00082$, $b=1.96$, $c=45.0$ 및 식 (1)과 표 5의 2007년 LNG 열량단가 43,590[원/Gcal]를 적용하면

$$\begin{aligned} & \text{LNG 연소시 250[MW] 출력에 대한 연료비} \\ & = \text{열입력}(aP^2 + bP + c) \times \text{LNG의 열량단가} \\ & = 588.45 \times 43,590 \\ & = 25.65[\text{백만원/hour}] \end{aligned} \quad (10)$$

을 얻을 수 있다.

7. CO₂ 배출비용을 감안한 연료전환의 경제성 검토

우선 여기서 연료비와 CO₂ 배출비용의 합을 “총발전비용”이라 정의하고, $COST_{OI}$ 을 중유 연소시 총발전비용, $COST_{LNG}$ 를 LNG 연소시의 총발전비용이라 정의한다. D 발전소가 정격출력 250[MW]로 상시 운전된다고 가정하면,

$$\begin{aligned} COST_{OI} & = \text{중유연료비} + \text{중유연소시 CO}_2 \text{ 배출비용} \\ & = \text{식 (9)} + \text{식 (7)} \\ & = 23.59 + 188.7x \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} COST_{LNG} & = \text{LNG연료비} + \text{LNG연소시 CO}_2 \text{ 배출비용} \\ & = \text{식 (10)} + \text{식 (8)} \\ & = 25.65 + 138.1x \end{aligned} \quad (12)$$

가 된다.

여기서 $COST_{LNG} = COST_{OI}$ 을 만족하는 ton당 CO₂ 배출가격 x 를 계산하자. 식 (11)와 식 (12)로부터

$$25.65 + 138.1x = 23.59 + 188.7x \quad (13)$$

라 놓으면

$$\begin{aligned} x & = 0.0407[\text{백만원/ton}] \\ & = 40,700[\text{원/ton}] \end{aligned} \quad (14)$$

을 얻을 수 있다. 즉, CO₂ 배출단가가 40,700[원/ton]을 넘어설 경우에는 D 발전소의 경우 연료비가 비싸지만 CO₂ 배출이 적은 LNG를 연료로 채택하는 것이 더 경제적임을 의미한다[7].

8. 결 론

발전소의 화석연료의 소모와 이에 따른 CO₂ 대기 배출 규제는 갈수록 엄격해 질 전망이다. 전력생산단에 크게 영향을 끼칠 것이다.

본 논문은

1. 성능시험 결과 얻어진 입출력 특성계수를 이용하여 LNG와 중유 연소시 CO₂ 대기 배출비용과 발전연료비를 각각 계산·비교하였으며
2. 발전소의 연료교체 검토시 CO₂ 배출비용을 감안하는 간단한 경제성 검토를 수행하였다.
3. D 발전소의 사례연구 결과, 발전소가 250[MW] 전부하 운전을 한다고 가정하면,
 - LNG 연소시의 입출력 특성계수 $a=0.00082$, $b=1.96$, $c=45.0$ 와
 - 중유 연소시의 입출력 특성계수 $a=0.00255$, $b=1.284$, $c=98.6$ 및
 - LNG 열량단가 43,590와 중유 열량단가

CO₂ 배출비용을 고려한 발전소의 연료교체 경제성에 대한 연구

40,334[원/Gcal]

를 적용할 경우, 연료전환의 손익분기점에 해당하는 CO₂의 ton당 배출가격은 40,700[원/ton]이 됨을 계산하였다. 본 논문에 제시된 CO₂ 배출가격을 고려한 연료전환 손익분기점 계산기법은 발전회사의 연료정책과 CO₂ 경영정책에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구를 위한 에너지관리공단의 연구비 지원에 대하여 깊이 감사드립니다.

References

- [1] 조선일보, 2008. 7. 9, A5.
- [2] RBergen, V.Vittal, Power Systems Analysis, 2nd ed. Prentice Hall, pp 401-403, 2000.
- [3] 이상중, 임정균, "화력발전소 입출력 특성계수를 이용한 순시 발전출력 대비 CO₂ 대기배출량 계산(Calculation of CO₂ Emission w.r.t. Instantaneous Generator Output using Input-output Coefficients of Thermal Power Plant), 한국조명전기설비학회논문지, Vol.21, No.5, pp 120-125, Jun 2007.
- [4] 윤홍규, 이상중, "성능시험 결과를 이용한 D발전소의 CO₂ 대기배출량 계산"(CO₂ Emission Calculation of D Thermal Power Plant using Performance Test Results), 한국조명전기설비학회 학술대회 논문집, pp 341-344, COEX 대서양홀 Nov 2. 2007.

- [5] <http://www.europeanclimateexchange.com>, European Climate Exchange.
- [6] 한국전력거래소 "전력시장 운영실적 보고서" 2008. 5.
- [7] 정영호, 이상중, 이진규, 양성덕, "CO₂ 배출비용을 감안한 D 발전소의 LNG-중유 연료교체 손익분기점 계산"(Calculation of Breakeven Point for LNG-Heavy Oil Transfer of D Thermal Power Plant Considering CO₂ Emission Cost), 한국조명·전기설비학회 추계학술대회 논문집, pp.31~34, Oct 17. 2008.
- [8] 한국중부발전(주) 발전설비 성능관리지침, 2003. 9.

◆ 저자소개 ◆

이상중 (李尙中)

1965년생. 부산공업고등전문학교 전기과 5년 졸업. 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1988년 GE PSEC 수료. 충남대학교대학원(박사). 1995년 한국전력공사 전력연구원 부장. 1996년 한국전력공사 보령화력본부 부장. 1998년~현재 서울산업대학교 전기공학과 부교수.

정영호 (鄭泳鎬)

1962년 2월 7일생. 김화공업고등학교 졸업. 2004년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2008년 현재 동 대학원 석사과정. 1987~2004년 조선일보사 전기부 근무. 2005년~현재 (주)코리아에너지 이사.