

혼소율을 고려한 화력 발전소의 CO₂ 대기배출량 계산

(Calculation of CO₂ Emission for Fossil-Fired Thermal Power Plant considering Coal-Oil Mix Rate)

이상중* · 김순기**

(Sang-Joong Lee · Soon-Ki Kim)

Abstract

G8 summit meeting held in July 2008 decided to set up a long-term goal, by 2050, reducing the world greenhouse emissions by half of those emitted in 1990. In November 2009, the Government announced to reduce the national CO₂ emission by 30[%] of BAU by 2020. Electric power industries in Korea produce most of their electricity by burning fossil fuels, and emit approximately 28[%] of national CO₂ emissions. Monitoring the CO₂ emission of electric power plants is very important. This paper presents a method to calculate the hourly CO₂ emission for a thermal power plant burning mixture of coal and oil using the performance test data and coal-oil mix rate. An example of CO₂ emission calculation is also demonstrated.

Key Words : CO₂ Emission Calculation, Thermal Power Plant, Coal-Oil Mix Rate

1. 서 론

산업혁명 이후 화석연료 사용의 급격한 증가와 이로 인한 온실가스 배출은 지구 평균 온도의 지속적 상승을 초래했다. 1997년 교토기후협약이 체결된 이래, 2008년 7월 열린 G8 정상회의에서는 1990년 대비 2050년 까지 전세계 온실가스 배출량을 절반으로 줄이는 장기 목표를 추진하기로 했다[1]. 2009년 11월 정부는 온실가스 감축목표를 BAU(Business As Usual)

대비 30[%] 또는 2005년 대비 4[%]를 감축기로 발표 했다[2]. 세계 9위 규모의 온실가스를 배출하는 우리나라는 85[%]가 에너지 부문에서 발생하며, 특히 전력 생산의 60[%]를 석탄, 석유, LNG 등의 화석연료에 의존하고 있기 때문에 발전부문의 온실가스 배출비중이 높다. 2007년 온실가스 배출량은 약 6억2천만 톤이며, 전력생산에 의한 배출량은 1억7천만 톤으로 국가 총 배출량의 약 28[%]에 달하고 있으며, CO₂ 배출량을 줄이는 과제는 매우 시급하다[3]. 발전소의 전력 생산에 따른 CO₂ 배출량의 모니터링과 계산 또한 매우 중요하다. 발전소의 CO₂ 배출량을 산출하는 대표적인 방법으로서 우선 Inventory 기법이 있다. Inventory 기법은 시간당 배출량(CO₂-ton/hour)을 구할 수 없는 단점은 있으나, 총 연료소비량(연초 연료입고량-연

* 주저자 : 서울과학기술대학교 전기공학과 교수
** 교신저자 : 서울과학기술대학교 전기공학과 대학원
Tel : 011-9879-9597, Fax : 02-978-2754
E-mail : ilmin2001@hanmail.net
접수일자 : 2010년 7월 6일
1차심사 : 2010년 7월 9일, 2차심사 : 2010년 8월 25일
심사완료 : 2010년 9월 3일

말재고량)에 연료의 탄소배출계수를 곱하는 간단한 계산식으로 일정기간의 CO₂ 배출량을 쉽게 계산할 수 있고, IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)도 이 방법을 권장하고 있다[4].

발전소의 CO₂ 배출량의 영향을 주는 요소로는 발전방식, 사용연료, 연소율 및 설비의 열효율과 함께 혼소율도 변수로 작용하고 있다. CO₂ 배출량 계산과 혼소율에 관한 기존의 타 연구사례를 조사한 바, 화력발전소의 발전출력과 CO₂ 대기배출량 계산[5], 입출력 특성계수를 이용한 순시 발전출력 대비 CO₂ 대기배출량 계산[6], 성능시험 결과를 이용한 D발전소의 CO₂ 대기배출량 계산[7], CO₂ 배출비용을 고려한 발전소의 연료교체 경제성에 대한 연구[8], 이용율과 혼소율을 이용한 발전기의 입출력 특성식 산정[9] 등의 발표 논문을 찾을 수 있었다. 석탄의 발열량이 낮은 저열량 무연탄을 연료로 사용하는 경우, 화염의 안정을 위해 중유 등의 보조연료를 같이 연소시키게 되는데, 이러한 발전소를 혼소발전소라 부른다. 기존의 연구는 단일 연료를 사용하는 발전소에 한해 CO₂ 배출량을 계산한 반면, 본 논문은 발전소의 혼소율을 감안한 CO₂ 배출량 계산식을 세웠고, S 발전소를 모델로 순시 발전출력 대비 CO₂ 대기배출량을 계산하였다.

2. 발전소 성능시험과 입출력 계수

발전소는 operation data의 취득 및 분석을 통하여 보일러, 터빈, 열교환기 등 주요 발전설비의 성능을 주기적으로(주로 계획예방정비 전후) 진단하며 이를 성능시험(performance test)이라 부른다[10]. 또한 plant 전체의 열에너지입력-발전기 출력 data 를 분석하여 2차 계수 a, 1차 계수 b 및 상수 c의 세 입출력 특성계수를 구한다. 식 (1)이 그것이며 여기서 P는 발전출력 [MW], y(P)는 열입력량 [Gcal/hour]이다.

$$y(P) = aP^2 + bP + c \quad (1)$$

그림 1은 식 (1)을 그래프로 나타낸 것으로서 입출력 특성곡선(input-output curve)이라 부른다. 입출력

특성곡선의 x축은 발전출력[MW], y축은 열입력량 [Gcal/hour]이다. 입출력 특성곡선은 대개 직선에 가까운 형태를 가지며, 2차 계수 a는 b, c에 비해 상당히 적은 값이지만 엄격히 말해 비선형이다. 발전기의 출력이 커지면 aP²항은 무시할 수 없는 크기를 가지게 된다.

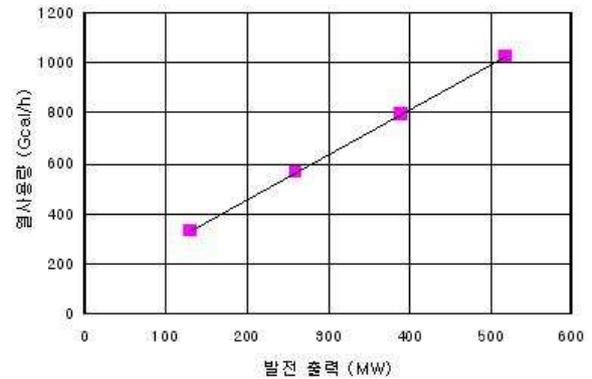


그림 1. 입출력 특성곡선
Fig. 1. Input-output curve

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

$$\frac{\text{열입력량} \left(\frac{\text{Gcal}}{\text{hour}} \right)}{\text{발열량} \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) \times \text{연소율}} = \text{연료소모량} \left(\frac{\text{t}}{\text{hour}} \right) \quad (2)$$

또는

$$\text{열입력} y(P) = \text{연료소모량} \times \text{발열량} \times \text{연소율} \quad (3)$$

의 관계가 있다[6].

3. 발전소 입출력 특성계수를 이용한 [MW] 출력당 CO₂ 대기배출량 계산

IPCC 온실가스 추계방법론을 이용하여 [MW] 출력에 대한 CO₂ 대기배출량 [ton - CO₂/hour]을 계산하는 수식을 얻을 수 있다. 즉

$$CO_2\text{배출량} = [\text{공통단위로 전환된 연료소모량}] \times IPCC\text{탄소배출계수} \times \text{연소율} \times CO_2\text{와 탄소간의 질량비} \left(\frac{44}{12}\right) \quad (4)$$

탄소 C의 원자량이 12, 산소 O의 원자량이 16이므로, CO₂의 원자량은 12+16*2=44가 되며, 따라서 CO₂와 C 사이의 질량비는 44/12가 된다.

그런데, 식 (3)의 관계를 이용하면 식 (4)는 아래와 같이 간단히 요약 될 수 있다.

$$CO_2\text{배출량} = \text{열입력량} \times IPCC\text{탄소배출계수} \times \frac{44}{12} = (aP^2 + bP + c) \times IPCC\text{탄소배출계수} \times \frac{44}{12} \quad (5)$$

발전소 입출력 특성계수 a, b, c가 주어지면 식 (5)로부터 발전출력에 대한 CO₂ 대기배출량을 바로 계산할 수 있다[6].

4. 기존의 CO₂ 대기배출량 계산 예

표 1은 IPCC가 추천한 연료별 탄소배출계수(Carbon content factor, CCF)이다.

표 1. IPCC 탄소배출 계수
Table 1. IPCC Carbon content factor(CCF)

연료구분			탄소배출계수	
			(kgC/GJ)	tonC/TOE
액체 화석 연료	1차 연료	원유	20.00	0.829
		경유	20.20	0.837
	2차 연료	중유	21.10	0.875
고체 화석 연료	1차 연료	무연탄	26.80	1.100
		원료탄	25.80	1.059
		연료탄	25.80	1.059
기체화석연료		LNG	15.30	0.637

4.1 500[MW] 유연탄 연소 K 발전소의 경우

- 1) 주어진 발전소의 입출력 특성계수를 a=0.00004, b=1.95, c=107 라 가정할 경우,
- 2) 표 1로부터 무연탄의 IPCC탄소배출계수 25.8 [kgC/GJ]을 얻을 수 있다. 여기서 1[Joule]=0.24[cal]이므로 이를 [tonC/Gcal] 단위로 환산하면,

$$25.8 \frac{kg\ C}{GJ} \times 0.24 \left(\frac{cal}{J}\right) = 107.5 \frac{kg\ C}{Gcal} = 0.1075 [tonC/Gcal] \quad (6)$$

가 된다.

따라서 500[MW] 출력의 석탄 연소 발전소의 CO₂ 대기배출량은 1) 및 2)의 data와 식 (5)로부터

$$CO_2\text{ 대기배출량} = (aP^2 + bP + c) \times CCF(IPCC\text{탄소배출계수}) \times \frac{44}{12} = 1,092 \times 0.1075 \times \frac{44}{12} = 430 [ton\ CO_2/hour] \quad (7)$$

가 된다[6].

4.2 250[MW] 중유-LNG 연소 D 발전소의 경우

4.2.1 중유 연소시

- 1) D발전소의 중유연소시 성능시험결과 입출력 특성계수 a=0.00255, b=1.284, c=98.6 가 얻어졌다면
- 2) 표 1로부터 중유의 IPCC 탄소배출계수 21.10 [kgC/GJ]을 얻을 수 있으며, 이를 [tonC/Gcal] 단위로 환산하면 0.088이 된다.

따라서 250[MW]의 발전출력에 대한 D 발전소의 CO₂ 배출량은 2) 및 3)의 data와 식 (5)로부터

혼소율을 고려한 화력 발전소의 CO₂ 대기배출량 계산

$$\begin{aligned}
 CO_2 \text{ 대기배출량} &= (aP^2 + bP + c) \times CCF \times 44/12 \\
 &= 584.87 \times 0.088 \times 44/12 \\
 &= 188.7 \text{ [tonCO}_2\text{/hour]} \quad (8)
 \end{aligned}$$

을 얻을 수 있다.

4.2.2 LNG 연소시

- 1) D발전소의 LNG 연소시 성능시험 결과, 입출력 특성계수 a=0.00082, b=1.96, c=45.0가 주어졌다면
- 2) 표 1로부터 LNG의 IPCC 탄소배출계수 15.30 [kgC/GJ]을 얻을 수 있으며, 이를 [tonC/Gcal] 단위로 환산하면 0.064가 된다.

따라서 D 발전소의 250[MW] 발전출력에 대한 CO₂ 배출량은 2) 및 3)의 data와 식 (5)로부터

$$\begin{aligned}
 CO_2 \text{ 대기배출량} &= (aP^2 + bP + c) \times CCF \times 44/12 \\
 &= 588.45 \times 0.064 \times 44/12 \\
 &= 138.1 \text{ [tonCO}_2\text{/hour]} \quad (9)
 \end{aligned}$$

을 얻을 수 있다. LNG 연료를 사용 할 때가 중유 연료를 사용할 때보다 CO₂ 배출량이 적음을 알 수 있다 [7-8].

5. 혼소율 고려한 CO₂ 배출량 계산식

석탄-중유 혼소발전소는 가정용이나 산업용으로 사용이 곤란한 국내의 저열량 무연탄을 석탄산업 합리화 차원에서 발전에 사용하는 경우가 대부분이다.

이러한 저질탄을 사용할 경우 화염형성을 위하여 일반적으로 보조연료인 중유를 혼소하게 된다. 혼소율은 전력생산을 위하여 투입된 연료의 총 열량에 석탄이 차지하는 열량의 백분율을 말한다. 발전소의 운전 결과 소모된 중유가 B톤, 석탄이 C톤이라면,

$$\begin{aligned}
 \text{중유발열량} &= B\text{톤} \times \text{중유톤당 발열량} \\
 \text{석탄발열량} &= C\text{톤} \times \text{석탄톤당 발열량}
 \end{aligned}$$

이 되는데, 여기서

$$\text{혼소율} = \frac{\text{석탄발열량}}{\text{석탄발열량} + \text{중유발열량}} \times 100\% \quad (10)$$

로 정의된다.

CO₂^{coal}, CO₂^{oil} 을 석탄 및 중유의 CO₂ 배출량으로 정의하면, (5)와 (10)로부터

$$CO_2^{coal} = (H \times M) \times CCF^{coal} \times \frac{44}{12} \quad (11)$$

$$CO_2^{oil} = [H \times (1 - M)] \times CCF^{oil} \times \frac{44}{12} \quad (12)$$

로 주어지며, 따라서 총 CO₂ 배출량 CO₂^{total} 은

$$CO_2^{total} = CO_2^{coal} + CO_2^{oil} \quad (13)$$

으로 주어진다.

여기서 H는 총열입력량[Gcal/hour], M은 혼소율[p.u]이다.

6. 혼소 발전소의 CO₂ 배출량 계산 사례

석탄-중유를 혼소하는 S 발전소를 예로 들어 CO₂ 배출량을 계산해 보자. 입출력 특성계수는 a=0.001 b=1.89 c=81로 주어졌다고 가정한다.

100[%] 발전기 출력 200[MW]과 80[%] 혼소율의 경우를 예를 들면,

$$\begin{aligned}
 CO_2^{coal} &= (aP^2 + bP + c) \times M \times CCF^{coal} \times \frac{44}{12} \\
 &= (a200^2 + b200 + c) \times 0.8 \times 0.1116 \times \frac{44}{12} \\
 &= (499) \times 0.8 \times 0.1116 \times \frac{44}{12} \\
 &= 163.4 \text{ [tonCO}_2\text{/hour]} \quad (14)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 CO_2^{oil} &= [(aP^2 + bP + c) \times (1 - M)] \times CCF^{oil} \times \frac{44}{12} \\
 &= [(499) \times (1 - 0.8)] \times 0.088 \times \frac{44}{12} \\
 &= 32.2 [tonCO_2/hour]
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

따라서

$$\begin{aligned}
 CO_2^{total} &= CO_2^{coal} + CO_2^{oil} \\
 &= 163.4 + 32.2 = 195.6 [tonCO_2/hour]
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

가 된다. 표 2는 발전기 출력 100[%], 75[%], 50[%] 와, 혼소율 60[%], 70[%], 80[%] 의 경우 각각의 계산결과이다.

표 2. MW-혼소율 변화에 대한 CO₂ 배출량 계산 예
Table 2. Calculation of CO₂ emission for various MW levels and coal-oil mix rates

[MW]		100[MW]	150[MW]	200[MW]
		혼소율		
M1=60[%]	CO ₂ ^{coal}	68.7	95.0	122.5
	CO ₂ ^{oil}	36.1	49.9	64.4
	CO ₂ ^{total}	104.8	144.9	186.9
M2=70[%]	CO ₂ ^{coal}	80.2	110.9	142.9
	CO ₂ ^{oil}	27.1	37.5	48.3
	CO ₂ ^{total}	107.3	148.4	191.2
M3=80[%]	CO ₂ ^{coal}	91.7	126.7	163.4
	CO ₂ ^{oil}	18.1	25.0	32.2
	CO ₂ ^{total}	109.8	151.7	195.6

식 (7)의 500[MW]급 신예 대용량 석탄화력의 경우 [MWh] 출력당 0.86[ton](=430[ton]/500[MW])인 반면, 국내저질탄-중유 혼소 S 발전소의 경우 [MWh] 출력당 0.97[ton](=195.6[ton]/200[MW], 80[%] 혼소율의 경우) 으로 나타났다. S발전소의 단위 [MWh] 출력당 CO₂ 배출량이 다소 높은 이유로서는, S발전소의 용량이 작고, 저질탄을 연소함에 따른 효율저하가 주된 원인인 것으로 사료된다.

7. 결 론

발전소의 CO₂ 배출량의 모니터링은 매우 중요하며 CO₂ 배출량 계산에 있어 혼소율도 상당한 변수로 작용한다. 본 논문은 성능시험 data와 혼소율을 이용하여 석탄-중유 혼소발전소의 순시 발전출력 대비 CO₂ 대기배출량을 계산 하였다. 500[MW] 급 기존 석탄화력발전소의 CO₂ 배출량이 430[tonCO₂/hour] 정도인 것과 비교할 때, 본 논문의 계산결과는 타당성이 있는 것으로 보인다. 향후 국내탄과 수입탄과의 혼합연소 등, 다양한 경우의 혼소에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

References

- [1] 한국경제신문, 2008.07.14.
- [2] 연합뉴스, 2009.11.17.
- [3] 양수근, “국내 발전부분 기후변화 대응현황과과제”, KOREC Vol.83-시사칼럼.
- [4] IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change 2001, The Science Basis, Cambridge: Cambridge University Press.
- [5] 임정균, 이상중, “화력발전소의 발전출력과 CO₂ 대기배출량 계산, 한국조명 · 전기설비학회 2007춘계학술대회 논문지, 2007. 5월. pp. 417-420.
- [6] 이상중, 임정균, “화력발전소 입출력 특성계수를 이용한 순시발전출력 대비 CO₂ 대기배출량 계산”, 한국조명 · 전기설비학회 논문지 제21권 제5호, 2007. 6월 pp 21, 25-28.
- [7] 문흥규, 이상중, “성능시험 결과를 이용한 D발전소의 CO₂ 대기배출량 계산” 한국조명·전기설비학회 학술대회 논문지, pp 120-125, COEX 대서양홀 Nov 2. 2007. pp. 341-344.
- [8] 이상중, 정영호, “CO₂ 배출비용을 고려한 발전소의 연료 교체 경제성에 대한 연구” 한국전기·조명설비학회 논문지 제23권 제2호, 2009년 2월. pp. 125-130.
- [9] 송경빈, 남재현, 박시우, “이용율과 혼소율을 이용한 발전기의 입출력 특성식 산정”, 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 1999. 7월. pp 19-21.
- [10] 한국**발전(주) 발전설비 성능관리 지침, 2003. 9.

Appendix

본 논문에서 제시한 방법과 기존의 Inventory 기법에 의한 CO₂ 배출량 계산 결과의 비교 분석

혼소율을 고려한 화력 발전소의 CO₂ 대기배출량 계산

S발전소의 성능시험결과 아래와 같은 표를 얻었다고 가정하자.

표 A1. S 발전소의 성능시험결과
Table A1. Performance test result of S T/P

연료	연료소모량 (kg/h)	발열량 (kcal/kg)
석탄	89,000	4,800
중유	10,300	10,300

Remark : 발전출력 200[MW]
미연탄소분손실 : 석탄 9.5[%],
중유 3.0[%]

식 (10) 으로부터, 혼소율은 약 80[%]가 된다.

본 논문에서 제시한식 (16)과 표 2로부터, 혼소율 80[%], 200[MW]에 대한 CO₂ 배출량은

$$CO_2^{total} = 195.6[\text{ton-CO}_2/\text{hr}] \quad (A1)$$

를 얻을 수 있다. IPCC 가 추천한 Inventory 기법을 이용하여 CO₂ 배출량을 계산해 보자. 식 (4)로부터:

$$\begin{aligned} CO_2^{coal} &= 89[\text{ton/hr}] * 4,800[\text{kcal/kg}] \\ &* 0.1116[\text{ton-C/Gcal}] * 0.905 * 44/12 \\ &= 158.2[\text{ton-CO}_2/\text{hr}] \end{aligned} \quad (A2)$$

$$\begin{aligned} CO_2^{oil} &= 10.3[\text{ton/hr}] * 1[\text{hours}] * 10,300[\text{kcal/kg}] \\ &* 0.088[\text{ton-C/Gcal}] * 0.97 * 44/12 \\ &= 33.2[\text{ton-CO}_2/\text{hr}] \end{aligned} \quad (A3)$$

따라서

$$\begin{aligned} CO_2^{total} &= CO_2^{coal} + CO_2^{oil} \\ &= 191.4[\text{ton-CO}_2/\text{hr}] \end{aligned} \quad (A4)$$

를 얻을 수 있다. 본 논문에서 제시한식 방법에 의한 CO₂ 배출량과(A1), Inventory 기법에 의한 CO₂ 배출량(A4)와의 계산결과의 차이는

$$195.6 - 191.4 = 4.2[\text{ton-CO}_2/\text{hr}] \quad (A5)$$

로서 약 2[%] 정도이다. 이는 fuel flow meter, 열량계, MW meter 등의 계측기오차와 입출력 함수의 추정 오차, 연소율 연산오차 등이 그 원인일 것이나, 정밀계측기의 사용, 성능시험 절차의 엄격한 관리, 정확한 연소율 계산 등으로 어느 정도 극복이 가능한 범위인 것으로 사료된다.

◇ 저자소개 ◇



이상중(李尙中)

1955년생. 부산공업고등전문학교 전기과 5년 졸업. 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1988년 GE PSEC 수료. 충남대학교 대학원(박사). 1995년 한국전력공사 전력연구원 부장. 1996년 한국전력공사 보령화력본부 부장. 1998년~현재 서울과학기술대학교 전기공학과 교수.



김순기(金順基)

1959년 12월 27일생. 2008년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2010년 현재 동대학원 석사과정. 2001년~현재 (주)일민 전력 대표이사.