

화력발전소의 발전출력과 CO₂ 대기배출량 계산

(Calculation of CO₂ Emission and Generator Output of Thermal Power Plant)

임정균* · 이상중

(Jeong- Kyun Lim · Sang-Joong Lee)

요 약

1997년 교토 기후협약이 체결되었고, 우리나라도 2013년부터 기후협약 규제가 거의 확실시 되고 있다. 화석 연료의 연소로 대부분의 전력을 생산하는 발전 산업은 우리나라 CO₂ 배출량의 25%를 차지하고 있으며, 발전소의 전력 생산에 따른 CO₂배출량의 계산은 매우 중요한 일이 되었다. 본 논문은 발전소의 시험data 와 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)의 온실가스 추계방법론을 이용하여 시간당 CO₂ 대기 배출량을 계산하는 방법을 제시한다. 발전출력에 대한 CO₂ 배출량을 계산하는 한 예를 도시하였다.

Abstract

This paper proposes a method to calculate the amount of the CO₂ emission w.r.t. generator MW output using the input-output coefficients of the thermal power plants. A calculation of CO₂ emission for an LNG fired combined cycle power plant is demonstrated.

Key Words : CO₂ emission, performance test, thermal power plant

1. 서 론

지구 온난화로 인하여 금세기 후반까지 북극얼음(sea ice)이 완전히 사라질 수 있다고 IPCC 는 경고하고 있다. 북극 지역의 빙하는 지난 25년 동안 25% 줄어들었다. 탄산가스 배출은 지난 2000년 이후 점점 더 빨라지면서 당시보다 두 배 이상 늘었다. 탄산가스 배출은 북극 지역의 빙하를 더욱 빠른 속도로 녹이면서 기상이변을 비롯한, 환경 생태계에 심각한 영향을 미치고 있다. [1,2,3]

20세기 후반부터 지구온난화에 대하여 국제사회에서는 적극적인 논의가 되기 시작 됐다.

1997년 교토 기후협약이 체결되었고, 우리나라도 2013년부터 기후협약 규제가 거의 확실시 되고 있다. 전력생산을 위하여 화석연료를 태우고 이에 따른 CO₂ 의 대기배출을 당연히 여기던 시절은 이미 지나갔다. 유럽거래소(European Trading System)등 세계 도처 에서는 CO₂ 배출권 거래가 이미 이루어지고 있다.

우리나라는 2003년 기준 전 세계 10위의 CO₂ 가스 배출국이다. 특히, 화석연료의 연소로 대부분의 전력을 생산하는 발전 산업은 우리나라 온실

가스 배출량의 약 25%를 차지하고 있다. [4]

발전소의 화석연료 소모에 따른 CO₂ 배출량을 계산 하는 것은 매우 중요한 일이 되었으며, 이를 위하여 발전소의 순시 MW 출력에 대한 CO₂ 배출량을 계산하는 함수가 필요하다.

발전소의 CO₂ 가스 배출량에 영향을 주는 요소로는 발전방식, 사용연료 및 연소율, 설비의 열효율 등이 있다.[4]

다행히, 이들 요소를 한꺼번에 반영하는 자료를 각 발전소는 이미 확보하고 있다. 그것은 바로 발전소의 입출력 특성곡선이다.

본 논문은 발전소의 성능시험 결과 얻어진 data 와 IPCC 온실가스 추계 방법론을 이용하여, CO₂ 대기배출량을 계산하는 방법을 제시하였다. 발전소의 발전출력에 대한 CO₂ 배출량을 계산하는 한 예를 도시하였다.

2. 발전소 성능시험 Data를 이용한 발전출력 대비 연료소모량 계산

발전소는 성능시험(performance test)을 통하여 2차 계수 a , 1차 계수 b 및 상수 c 의 세 입출력 특성계수를 구한다. 식 (1)이 그것이며 여기서, P 는 발전출력[MW], $y(P)$ 는 열입력량 [Gcal/hour]

이다.

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

그림1은 식 (1)을 그래프로 나타낸 것으로서 입출력 특성곡선(input-output curve)이라 부른다.[5] 입출력 특성곡선의 x축은 발전출력[MW], y축은 열입력량[Gcal/hour] 이다.

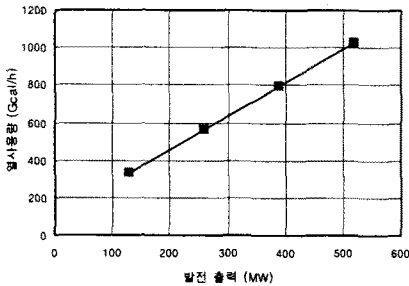


그림 1. 입출력 특성곡선
Fig 1. Input-output curve

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

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

유연탄을 연료로 사용하는 L 발전소의 경우를 예로 들어보자. 성능시험 결과 L 발전소의 입출력 특성계수가 $a=0.0001$, $b=2.1$, $c=140$ 로 각각 주어졌다면, L 발전소의 열 입력함수 $y(P)$ [Gcal/hour]는 아래와 같이 표시된다.

$$y(P) = 0.0001P^2 + 2.1P + 140 \quad (3)$$

이는 발전출력이 500 [MW] 라면 1,215 [Gcal] 의 열 입력량이 필요함을 의미하고, 이때 사용되는 연료의 발열량이 6,000 [kcal/kg] 이라면 완전연소의 경우 연료소모량은, 식 (2) 로부터 202.5 [ton/hour] 가 된다.

3. IPCC 온실가스(Green House Gas)추계 방법론

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change, 정부 간 기후변화위원회)는 지구환경, 특히 온실화에 관한 종합적인 대책을 검토할 목적으로 세계기상기구(WMO, World Meteorological Organization)와 유엔환경계획(UNEP, United Nations Environment Program)이 1988년 설립한 위원회로서 UN 산하 각국 전문가로 구성된 조직이다.[6]

다음은 IPCC 가 제시하는 연료연소에 따른 해당 국가의 CO2 배출량의 추계 방법론에 대한 요약이다.

1단계: 연료제품별 연료 소비량의 추계

IPCC의 기준방법론의 1단계는 해당 국가의 연료 형태별 명시적 소비(Apparent consumption)를 추계하는 것이다. 이는 일차 에너지 밸런스상의 생산량에 수입량을 합하고, 수출량, 국제병커량 그리고 스톡의 순변동량을 빼주어 한 경제내의 연료 총 투입량을 추계한다. 이에 따라, 에너지의 명시적 소비량은 다음과 같이 산정될 수 있다.

$$\text{명시적소비량} = \text{생산량} + \text{수입량} - \text{수출량} - \text{국제병커량} - \text{스톡변동량} \quad (4)$$

2단계: 연료소비량을 공통단위로 전환

화석연료별 고유계량단위는 분석의 편의를 위하여 하나의 공통단위로 통일을 시켜야 한다. IPCC에서는 열량단위 GJ(또는 TJ)을 공통 단위로 하여 단위를 통일시킨다.

3단계: 제품별 탄소배출계수의 선정

화석연료별로 탄소함유량이 상이하므로 연료별 탄소배출계수를 결정하여야 한다. 표 1은 IPCC가 추천한 연료별 탄소배출 계수이다.

표 1. IPCC의 탄소 배출 계수
Table 1, IPCC carbon emission coefficient

연료 구분		탄소배출계수		
		(kgC/GJ)	tonC/TOE	
액체 화석 연료	1차 연료	원유	20.00	0.829
		천연액화가스	17.20	0.630
	2차 연료	경유	20.20	0.837
		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
	2차 연료	BKB & Patent Fuel	25.80	1.059
		Coke	29.50	1.210
기체화석연료	LNG	15.30	0.637	

4단계: 연소과정에서 산화되지 않은 탄소량의 고려

연료에 함유되어있는 탄소 중 연소과정에서 산화되지 않은 부분은(Unburned carbon) 이산화탄소로 전환되지 않는다. 일반적으로 연료의 연소율은 연료종류별, 연료사용기기의 기술별로 상이하기 때문에, 사전에 정할 수 없으나, IPCC 방법론에서는 연료별로 평균 연소율을 제시하고 있다. 표 2는 IPCC가 제시하고 있는 평균 연소율이다.

표 2. 연료별 평균연소율(IPCC, 1996)
Table 2. Fuel combustion rate

연료 구분	연소율
석탄	0.98
원유 및 석유제품	0.99
가스	0.995
발전용 Peat	0.99

5단계:

탄소배출량을 CO2로 전환

위에서 설명하고 있는 절차를 통해 얻게 되는 배출량은 탄소(carbon)량이므로 CO2 배출량을 구하기 위해서는 탄소배출량을 CO2 배출량으로 전환시켜주어야 한다. 연료연소를 통해 탄소가 산화될 때 산소(O2)와 결합하여 질량이 증가하므로, 탄소배출량을 CO2 배출량으로 전환할 때 CO2와 탄소간의 질량비를 탄소량에 곱하여 CO2

배출량을 구할 수 있다. 화학적으로 CO2 가 탄소간의 질량비는 44/12 이다.[7]

4. 발전소 성능시험 Data를 이용한 MW 출력 CO2 대기배출량 계산

3장의 1-5 단계를 종합하면 MW 출력에 대한 CO2 대기배출량 [tonCO2/hour]을 계산하는 수식을 얻을 수 있다.

$$\text{CO2 배출량} = \text{공통단위로 전환된 연료소모량} \\ [= \text{연료소모량}(\text{ton}/\text{hour}) * \text{발열량}(\text{Kcal}/\text{kg}) * \text{IPCC} \\ \text{탄소배출계수} * \text{연소율} * \text{CO2와 탄소간의 질량비} \\ 44/12] \quad (5)$$

그런데, 식 (2)에서, 열입력량 $y(P) = \text{연료소모량} * \text{발열량} * \text{연소율}$ 의 관계가 있으므로 식 (5)는 아래와 같이 간략히 표현 될 수 있다.

$$\text{CO2 배출량} = \text{열입력량} * \text{IPCC탄소배출계수} * 44/12 \\ = (aP^2 + bP + c) * \text{IPCC탄소배출계수} * 44/12 \quad (6)$$

발전소 입출력 특성계수 a, b, c 가 주어지면 식 (6)으로 부터 발전출력에 대한 CO2 대기배출량을 바로 계산할 수 있다.

5. 사례연구 : LNG연소 200 MW 출력 M 발전소의 CO2 대기배출량 계산

- 1) M 발전소의 입출력 특성계수가 $a=0.000024$, $b=1.58$, $c=34.7$ 로 주어졌다고 가정한다. (이는 최신에 LNG 복합발전소의 계수값에 근접한 수치이다.)
- 2) 표1로부터, LNG의 IPCC 탄소배출계수 15.30 [kgC/GJ]을 얻을 수 있으며, 이를 [tonC/Gcal] 단위로 환산하면 0.064 가 된다.

따라서 200MW의 발전출력에 대한 M 발전소의 CO2 배출량은 1) 및 2)의 data와 식(6)으로부터

$$\text{200 MW 출력에 대한 M 발전소의 CO2 배출량} \\ = (aP^2 + bP + c) * \text{IPCC탄소배출계수} * 44/12 \\ = 351.66 * 0.064 * 44/12 \\ = 82.6 \text{ [tonCO2/hour]} \quad (7)$$

를 얻을 수 있다.

계산결과 비교 검토

산업자원부는 제3차 전력수급기본계획에서 기후변화협약 등 국제 환경규제 대응을 위해 적정전원 Mix 구성시, 해외배출권거래가격, CDM, 한계저감비용 등을 감안하여 CO2 비용을 13,000[원/CO2톤] 정도로 반영 하고 있다.

전원별 CO2 배출량[kg-C/kWh] 은 원자력 0, 석탄 0.21, LNG 0.10 을 반영하고 있다.[8]

식, (7)에서 얻어진 82.6 [tonCO2/hour] 를 [kg-C/kWh] 로 환산하면

M 발전소의 CO2 배출량(kg-C/kWh)

$$\begin{aligned} &= (82.6 \frac{\text{ton } CO_2}{\text{h}} \div 200\text{MW}) * \frac{12}{44} \\ &= 0.11 \end{aligned} \quad (8)$$

이 된다. 사례연구의 계산결과가 산업자원부가 제시한 LNG 발전소의 CO2 배출량 0.10 [kg-C/kWh] 에 거의 일치하고 있다.

6. 결 론

세계 10 위권의 온실가스 배출 국가인 우리나라는 기후변화협약에 따른 의무를 이행해야 할 경우, 우리나라 경제 전반에 걸쳐 매우 큰 충격을 줄 것으로 전망된다. 발전소의 전력생산에 따른 CO2 배출량을 계산 하는 것은 매우 중요한 일이 되었다. 본 논문은

- 발전소의 성능시험 data 와 IPCC 연료별 탄소 배출 계수, 연소율, CO2 와 탄소간의 질량비 등으로부터
- IPCC 온실가스 추계방법론을 적용하여
- 순시 발전출력에 대한 시간당 CO2 대기배출량을 계산하는 방법을 제시 하였다.

최신에 LNG 연소 발전소의 발전출력에 대한 CO2 배출량을 계산하는 한 예를 도시 하였다. 계산결과가 산업자원부가 제시한 LNG 발전소의 CO2 배출량과 거의 일치하였다.

Reference

- [1] China Daily, Editorial, Dec 18. 2006
- [2] 서울경제신문 2006. 12.19.
- [3] 조선일보, 2007. 2. 3.
- [4] 이영철, 정재모, 김현철, “기후변화 협약에 따른 발전부문 대응방안”, 2004년도 한국자원경제학회공동학술대회 (2004년도 봄 정기학술대회)논문자료집, 2004.2.13. pp,11-30
- [5] R.Bergen, V.Vittal, : Power Systems Analysis, 2nd ed. Prentice Hall, 2000, pp 401-403
- [6] IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)(2001) Climate Change 2001, The Science Basis, Cambridge: Cambridge University Press
- [7] IPCC Reference Manual, 1996
- [8] 산업자원부, 제3차 전력수급기본계획(2006-2020년), 2006.12. pp6