

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)

이상중* · 임정균**

(Sang-Joong Lee · Jeong-Kyun Lim)

요 약

1997년 지구온난화 문제를 해결하기 위해 교토 기후협약이 체결되었고, 우리나라도 2013년부터 기후협약 규제가 거의 확실히 되고 있다. 우리나라 온실가스 배출량은 연간 약 6억 톤이며, 그 중 CO₂가 5억 톤이다. 특히 화석연료의 연소로 대부분의 전력을 생산하는 발전 산업은 우리나라 CO₂ 배출량의 20[%] 이상을 차지하고 있다. 따라서 발전소의 전력생산에 따른 화석연료의 소모량과 이에 따른 CO₂ 배출량을 monitoring하는 것이 매우 중요해졌다. 본 논문은 발전소의 성능시험 결과 얻어지는 입출력 특성계수와 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 온실가스 추계 방법론을 이용하여 순시 발전출력에 따른 CO₂ 대기배출량을 계산하는 방법을 제시하였다. 4모선 모형계통의 시뮬레이션을 통하여 전력계통의 조류계산과 발전소별 CO₂ 배출량을 연립 연산하는 예를 도시하였다.

Abstract

Burning the fossil fuel in the thermal power plants causes green house gas emission. Monitoring of CO₂ emission of the thermal power plants is growing more important because the amount produced by them is more than 20 percent of national total emission. 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. The power flow computation together with the CO₂ emission calculation are demonstrated in a sample power system.

Key Words : CO₂ emission, Input-output coefficients, Thermal power plant

* 주저자 : 서울산업대학교 교수
 ** 교신저자 : (주)준영이앤씨 사장
 Tel : 02-970-6411, Fax : 02-978-2754
 E-mail : 85sjlee@snut.ac.kr
 접수일자 : 2007년 3월 2일
 1차심사 : 2007년 3월 8일
 심사완료 : 2007년 3월 21일

1. 서 론

북극 지역의 빙하는 지난 25년 동안 25[%] 줄어들었다. 빙하가 녹으면서 바다는 더 많은 열을 북극 지역으로 이동시켰고 바닷물이 더 많은 태양열을 흡수

하면서 온난화에 가속도가 붙었다. 이는 또다시 더 많은 빙하를 녹이는 악순환으로 반복되고 있다. 탄산가스 배출은 지난 2000년 이후 점점 더 빨라지면서 당시보다 두 배 이상 늘었다. 탄산가스 배출은 북극 지역의 빙하를 더욱 빠른 속도로 녹이면서 환경 생태계에 심각한 영향을 미치고 있다[1-3].

20세기 후반부터 지구온난화에 대한 우려는 국제 사회에서 적극적으로 논의되기 시작했으며 1992년 브라질 리우데자네이루에서 개최된 UN 환경개발회의에서 기후변화협약을 체결했다. 곧 이어 1997년 교토 기후협약이 체결되었고, 우리나라도 2013년부터 기후협약 규제가 거의 확실시 되고 있다. 전력 생산을 위하여 화석연료를 태우고 이에 따른 CO2의 대기배출을 당연히 여기던 시절은 이미 지나갔다. 화석연료를 태우는 자체가 비용이 드는 시대, 즉, CO2 배출에 대가를 지불해야하는 시대가 도래 한 것이다.

세계 10위권의 온실가스 배출 국가인 우리나라는 기후변화협약에 따른 의무를 이행해야 할 경우, 우리나라 경제 전반에 걸쳐 매우 큰 충격을 줄 것으로 전망된다. 특히, 화석연료의 연소로 대부분의 전력을 생산하는 발전 산업은 우리나라 온실가스 배출량의 약 25[%]를 차지하고 있다. 발전부문의 CO2배출량은 1990년 3,847만 톤에서 2011년 1억2,262만 톤으로 약 3.2배 증가하였으며, 2015년에는 약 1억 6,248만 톤이 배출될 전망이다. 발전소의 화석연료 소모에 따른 CO2 배출량을 monitoring 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(열사이클의 종류), 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 입출력 특성계수와 IPCC 온실가스 추계방법을 이용하여 순시 발전출력에 따른 CO2 대기배출량을 계산하는 방법을 제시하였다. 4모션 모형계통의 시뮬레이션을 통하여 조류계산과 병행하여 발전소별 CO2 대기배

출량을 직접 계산하는 예를 도시하였다.

2. 발전소 입출력 특성계수를 이용한 발전출력 대비 연료소모량 계산

발전소는 성능시험(performance test)을 통하여 2차 계수 a, 1차 계수 b 및 상수 c의 세 입출력 특성계수를 구한다. 식 (1)이 그것이며, 여기서 P는 발전출력[MW], y(P)는 열입력 [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 한다[5]. 입출력 특성곡선의 x축은 발전출력 [MW], y축은 열입력량 [Gcal/hour]이 된다.

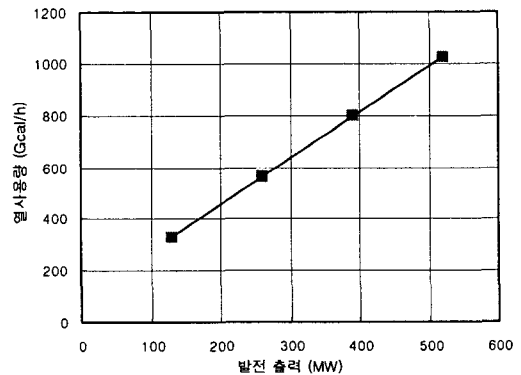


그림 1. 입출력 특성곡선
Fig. 1. Input-output curve

열 입력 y(P)를 사용연료의 발열량과 연소율로 나누면 발전출력에 상응하는 연료소모량(ton/hour)을 얻을 수 있다.

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

유연탄을 연료로 사용하는 K 발전소의 경우를 예로 들어보자. 성능시험 결과 K 발전소의 입출력 특성계수가 a=0.00004, b=1.95, c=107로 각각 주어졌다

외력발전소 입출력 특성계수를 이용한 순시 발전출력 대비 CO2 대기배출량 계산

면, K 발전소의 열 입력함수 $y(\text{Gcal}/\text{hour})$ 는 아래와 같이 표시된다.

$$y(P) = 0.00004P^2 + 1.95P + 107 \quad (3)$$

이는 발전출력이 500[MW]라면 1,092[Gcal]의 열 입력이 필요함을 의미하고, 이때 사용되는 연료의 발열량이 6,000[kcal/kg]이라면 완전연소의 경우 연료소모량은 식 (2)로부터 182[ton/hour]가 된다.

3. IPCC 온실가스(GHG) 추계 방법론

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

다음은 IPCC가 제시하는 연료연소에 따른 해당국의 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 스톱의 순변동량을 빼주어 한 경제내의 연료 총 투입량을 추계한다. 이에 따라 에너지의 명시적 소비량은 다음과 같이 산정될 수 있다.

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

- 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 content values

연료 구분		탄소배출계수		
		(kgC/GJ)	ton C/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 : 미연탄소분(Unburned Carbon)의 고려
연료에 함유되어있는 탄소 중 연소과정에서 산화되지 않은 부분은 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 oxidation factor values

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 CO2와 탄소간의 질량비는 44/12이다[7].

4. 발전소 입출력 특성계수를 이용한 [MW] 출력 CO2 대기배출량 계산

3장의 1~5 단계를 종합하면 [MW] 출력에 대한 CO2 대기배출량[ton CO2/hour]을 계산 하는 수식을 얻을 수 있다.

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

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

$$\text{CO2 배출량} = \text{열 입력} * \text{IPCC 탄소배출계수} * 44/12 \\ = (aP^2 + bP + c) * \text{IPCC 탄소배출계수} * 44/12 \quad (6)$$

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

5. CO2 대기배출량 계산사례

5.1 500[MW] 운전 중인 유연탄 연소 K발전소의 경우

- 1) 주어진 발전소의 입출력 특성계수 :
a=0.00004, b=1.95, c=107

- 2) 표 1로부터 유연탄의 IPCC 탄소배출계수 25.8 kg[C/GJ]을 얻을 수 있다. 그런데 여기서 발전소의 열 입력 $y(P)$ 의 단위가 Gcal이므로 GJ과 단위통일을 위한 환산이 필요하다. 1 Joule = 0.24 cal이므로 :

$$25.8 \frac{\text{kg C}}{\text{GJ}} = 25.8 \frac{\text{kg C}}{\text{GJ} * 0.24 (\frac{\text{cal}}{\text{J}})} \\ = 107.5 \frac{\text{kg C}}{\text{Gcal}} = 0.1075(\text{ton C/Gcal}) \quad (7)$$

가 된다. 따라서 [ton C/Gcal] 단위로 환산된 IPCC 탄소배출계수는 0.1075가 된다.

- 3) 표 2로부터 유연탄의 연소율 0.98을 얻을 수 있으나 열 입력함수 $y(P)$ 자체가 연소율을 포함하고 있으므로 연소율은 고려할 필요가 없다.

따라서 500 [MW]의 발전출력에 대한 K 발전소의 CO2 대기배출량은 1) 및 2)의 data와 식 (6) 으로부터

$$500[\text{MW}] \text{ 출력에 대한 K발전소의 CO2 배출량} \\ = (aP^2 + bP + c) * \text{IPCC 탄소배출계수} * 44/12 \\ = 1,092 * 0.1075 * 44/12 \\ = 430 [\text{ton CO2/hour}] \quad (8)$$

을 얻을 수 있다.

5.2 200[MW] 운전 중인 LNG 연소 J발전소의 경우

- 1) J 발전소의 입출력 특성계수가 a=0.00003, b=1.54, c=33.4로 주어졌다고 가정한다.
2) 표 1로부터, LNG의 IPCC 탄소배출계수 15.30[kg C/GJ]을 얻을 수 있으며 이를 [ton C/Gcal] 단위로 환산하면 0.064가 된다.

따라서 200[MW]의 발전출력에 대한 J발전소의 CO2 배출량은 1) 및 2)의 data와 식(6)으로부터

회력발전소 입출력 특성계수를 이용한 순시 발전출력 대비 CO2 대기배출량 계산

$$\begin{aligned}
 & 200[\text{MW}] \text{ 출력에 대한 J 발전소의 CO2 배출량} \\
 & = (aP^2 + bP + c) * \text{IPCC 탄소배출계수} * 44/12 \\
 & = 342.6 * 0.064 * 44/12 \\
 & = 80.4 [\text{ton CO2/hour}] \quad (9)
 \end{aligned}$$

를 얻을 수 있다.

5.3 Power flow와 병행한 CO2 배출량 연산

시뮬레이션에 의하여 주어진 부하조건에서 각 발전기의 분담출력에 대한 각 발전소의 CO2 배출량을 구해보자. 그림2와 같은 두 대의 발전기 G1(모선1 : J발전소), G2(모선2 : K발전소)와 부하모선 3, 4로 구성된 4 모선 모형계통을 가정한다[8]. 선로정수를 표 3에 base case의 각 부하모선의 소모전력 및 전압을 표 4에 기술하였다.

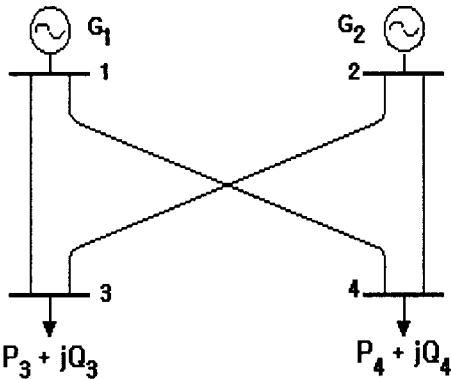


그림 2. 4모선 시스템
Fig. 2. Single line diagram of four-bus system

표 3. 선로정수
Table 3. Line Parameters(p.u.)

from	to	R	X	Shunt Y
1	4	.00744	.0372	0.0775
1	3	.01008	.0504	0.1025
2	3	.00744	.0372	0.0775
2	4	.01272	.0636	0.1275

표 4. Base-case 모선 data
Table 4. Base-case bus data(base MVA=100)

Bus	P	Q	V	θ
1			1.0	0
2	3.0		1.0	
3	-2.20	-1.36		
4	-2.80	-1.73		

G2(K발전소)가 300[MW]를 분담한다고 가정하고, 계통의 power flow와 병행하여 각 발전소의 CO2 배출량을 연립으로 계산한 결과를 표 5에 도시하였다. 시스템의 power flow와 J, K 발전소의 CO2 배출량을 연립으로 연산하기 위한 수식을 열거하면 아래와 같다.

가. 각 모선의 power equation

$$\begin{aligned}
 P_i &= V_i \sum_{m=1}^n V_m (G_{im} \cos \delta_{im} + B_{im} \sin \delta_{im}) \\
 Q_i &= V_i \sum_{m=1}^n V_m (G_{im} \sin \delta_{im} - B_{im} \cos \delta_{im}) \quad (10)
 \end{aligned}$$

나. K 발전소의 CO2 배출량(ton/hour)

$$KCO_2 = (aP_K^2 + bP_K + c) * 0.1075 * 44/12 \quad (11)$$

다. J 발전소의 CO2 배출량 (ton/hour)

$$JCO_2 = (aP_J^2 + bP_J + c) * 0.064 * 44/12 \quad (12)$$

표 5. Power-flow 및 CO2 배출량 계산결과
Table 5. Power-flow and CO2 emission

Bus	P	Q	V	CO2 emissions [ton CO2/hour]
1	2.09	1.83	1.0	J 발전소의 CO2 배출량
2	3.0	1.34	1.0	= 83.68
3	-2.20	-1.36	0.96	K 발전소의 CO2 배출량
4	-2.80	-1.73	0.94	= 274.18
Remark : total CO2 emission = 357.86				

6. 결론

세계 10 위권의 온실가스 배출 국가인 우리나라는 기후변화협약에 따른 의무를 이행해야 할 경우, 우리나라 경제 전반에 걸쳐 매우 큰 충격을 줄 것으로

전망된다. 특히 화석연료를 연소로 대부분의 전력을 생산하는 발전 산업은 우리나라 CO₂ 배출량의 20[%]이상을 차지하고 있다. 발전소의 전력생산에 따른 CO₂ 배출량을 monitoring하는 것은 매우 중요한 일이 되었다.

발전소의 CO₂ 가스 배출량에 영향을 주는 요소로는 발전방식, 사용연료 및 연소율, 설비의 열효율 등이 있으며 발전소의 성능시험 결과 얻어지는 입출력 특성곡선은 이들 요소를 모두 반영하고 있다.

본 논문은

- 발전소의 입출력 특성계수, IPCC 연료별 탄소배출 계수, 연소율, CO₂와 탄소간의 질량비 등으로부터
- IPCC 온실가스 추계방법을 적용하여
- 순시 발전출력에 상응하는 시간당 CO₂ 대기배출량을 계산하는 공식을 제시하였다.

4모선 모형계통의 시뮬레이션을 통하여 순시 발전출력에 대한 CO₂ 대기배출량을 계통의 power flow와 병행 연산하는 예를 도시하였다.

순시 발전출력에 상응하는 시간당 CO₂ 대기배출량 함수는 CO₂ 배출과 관련한 전력계통의 연산에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

References

- (1) China Daily, Editorial, Dec 18, 2006.
- (2) 서울경제신문 2006. 12.19.
- (3) 조선일보, 2007. 2. 3.
- (4) 이명철, 정재모, 김현철, “기후변화 협약에 따른 발전부문 대응방안”, 2004년도 한국자원경제학회 공동학술대회 (2004년도 봄 정기학술대회)논문 자료집, 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) John J. Grainger, William D. Stevenson, Jr. “Power System Analysis , Mcgraw Hill Inc., 1994. pp 548-560.

◆ 저자소개 ◆

이상중 (李尙中)

1955년 1월 10일생. 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.

임정균 (林定均)

1960년 6월 20일생. 2004년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2007년 현재 동 대학원 석사과정. 2005년~현재 (주)준영이앤씨 사장.