

연료분석 방법을 적용한 산업단지 열병합발전소 이산화탄소 배출량 및 배출특성 분석

강석훈^{*,**†}, 정대현^{*}

^{*}한국에너지기술연구원, ^{**}KAIST 기계공학과

Analysis of the CO₂ emission amount and characteristics of combined heat and power plants in industrial complex by using the fuel analysis method

Seok Hun Kang^{*,**†}, Dae Hun Chung^{*}

^{*}Korea Institute of Energy Research, 71-2, Jang-dong, Yuseong-gu 305-343

^{**}Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Kusong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-701

(Received January 5, 2008; revision received February 10, 2008)

ABSTRACT: CO₂ emission amount and characteristics of combined heat and power (CHP) plant in industrial complex of Korea is evaluated by using the fuel analysis method. Fuel analysis methods of several foreign countries and developed one which is developed considering the operation characteristics of the surveyed CHP plants are used. The operation data is surveyed for all of the CHP plants in industrial complex and is composed of fuel consumption amount, generation, sale and efficiency of heat and electricity, condensed steam enthalpy, and etc of the each CHP.

Key words: CHP plant (열병합발전 플랜트), CO₂ emission (이산화탄소 배출), Emission factor (배출계수), Fuel consumption analysis method (연료사용량분석법)

기 호 설 명

- CO₂H : 스팀 생산에 따른 이산화탄소 배출량
- CO₂P : 전기생산에 의한 이산화탄소 배출량
- CO₂T : 이산화탄소 총 배출량
- EH : 스팀 생산량
- EP : 전기 생산량
- EH,총생산 : 스팀 총 생산량
- EH,소내소비 : 스팀 생산량 중 소내 소비량
- E연료 : 연료에너지 소비량
- E수열 : 수열 에너지량
- E수전 : 수전 에너지량
- eH : 시스템열효율

1. 서 론

열병합발전 설비에서의 온실가스 배출은 보일러, 엔진, 터빈 등에서의 연료 연소에 의해 발생하며 이때 배출되는 온실가스는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 질산(N₂O) 등으로 구성된다. 이 중 이산화탄소가 배출량의 대부분을 차지하며 미국의 경우 CO₂ 구성 비율을 99.5%, 나머지 CH₄, N₂O의 구성 비율을 0.5% 미만으로 설정한다.

이산화탄소 배출량 계산 방법은 크게 두 가지가 존재하며 이는 직접 측정 방법과 사용연료 분석 방법이다. 직접 측정법은 연속적인 배출량 관측 시스템(CEMS, Continuous Emissions Monitoring System)을 사용하여 배출량을 측정

하며 실측을 통한 데이터 확보의 장점을 지니지만 측정 오차가 크고 측정 소요 시간이 크다는 단점을 지닌다. 연료분석 방법은 연료 소비량과 연료가 지닌 탄소량 그리고 탄소 산화도 등을 고려하여 이산화탄소 배출량을 계산한다. 본 방법은 연료 소비량과 에너지 생산량만을 고려하여 배출계수를 계산하는 장점을 지니지만 이론식과 실제 현상과의 차이에 의한 오류 발생 한계를 지닌다.

본 연구는 연료분석 방법을 사용하여 국내 산업단지 열병합발전소에서의 열, 전기 생산시 배출하는 이산화탄소량을 계산하였다. 또한 발전소별 사용연료 종류 및 운전 차이에 따른 이산화탄소 배출 특성을 분석하였다. 연료분석 방법론은 일부 국제기구 및 선진국에서 개발한 식과 직접조사 대상 발전소 특성을 고려하여 개발한 식을 사용하였다. 연료분석 방법론에 적용하기 위한 발전소 운전 데이터는 22개 전체 산업단지 열병합발전소를 대상으로 직접 또는 간접 방문을 통해 수집하였다.

2. 연료분석 방법

현재 열병합발전소에 대한 연료 사용량 분석을 통한 이산화탄소 배출계수 방법론은 국내에는 존재하지 않고, 일부 국제기구와 선진국에만 존재한다. 연료분석 방법론 중 IPCC는 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 기후변화에 관한 정부간 패널) 열병합발전 플랜트에서 연료 연소에 의해 배출되는 이산화탄소 총량을 식 (1)을 사용하여 계산한다. IPCC는 각 연료별 이산화탄소 배출계수 테이블을 개발하여 제공하며 식 (1)의 배출계수는 이 테이블 값을 사용한다.

$$\text{배출량} = \text{연료소비량} \times \text{연료종류} \times \text{배출계수} \quad (1)$$

WRI/WBCSD 방법론은 이산화탄소 배출 총량 뿐만 아니라 이 량을 열, 전기 동시 생산 시 각각의 생산에 따른 발생량을 계산한다. 계산의 첫 번째 단계에서는 IPCC와 동일한 계산식을 사용하여 CO₂ 배출 총량을 계산하며 이때 배출계수는 WRI/WBCSD에서 개발한 값을 사용한다. 다

음 단계에서 열, 전기 생산효율을 각각 80%, 35%로 가정하고 식 (2), (3)에 이 값을 적용하여 배출량을 할당한다. 이 때 사용하는 효율 가정치는 미국 열병합발전협회에서 권고하는 값이다. 미국 EPA 방법론은 WRI/WBCSD 방법론과 동일한 식과 열, 전기 효율 가정치를 사용하여 배출계수를 계산한다. 단지 이산화탄소 배출 총량 계산시 연료별 탄소 함유량, 탄소 산화율 등의 데이터를 적용하는 차이점을 지닌다. 이 밖에 미국 캘리포니아의 CCAR과 영국의 DEFRA 역시 위 두 방법론과 동일한 식 (2), (3)을 사용하여 배출량을 계산하며 단지 열, 전기 생산 효율 가정치만 다른 값을 사용한다. CCAR의 경우 열, 전기 생산 효율을 동일하다고 가정하고, DEFRA는 열 생산 효율이 전기 생산 효율 보다 2배 높다고 가정한다.

$$CO2_H = \frac{E_H/e_H}{E_H/e_H + E_P/e_P} \times CO2_T \quad (2)$$

$$CO2_P = CO2_T - CO2_H \quad (3)$$

해외 방법론과 별도로 조사대상 발전소의 원동기 및 운영 특성 등을 고려하여 열, 전기 생산에 따른 이산화탄소 배출계수 계산식을 개발하였다. 본 식은 열, 전기 생산에 소비된 연료량 배분을 통해 CO₂ 배출량을 계산하는 것을 기본 전제로 하였다. 열, 전기 생산에 소비되는 스팀량을 구분하는 것은 이론적으로 가능하지 않기 때문에 본 연구에서는 현장 특성을 반영하여 최대한 실제와 근접한 방법을 찾는데 초점을 두었다. 본 연구에서 직접방문을 통해 조사한 9개 발전소 중 8개 발전소가 스팀터빈 발전방식 이었다. 이를 감안하여 열, 전기 생산에 소비된 연료량은 각각의 생산에 소비되는 스팀량을 기반으로 계산하였다. 열, 전기 생산에 소비된 연료량은 각각의 생산을 위해 소비된 스팀량을 시스템열효율로 나누어 계산하였다. 시스템열효율은 증기보일러에서 생산한 스팀 총량과 열, 전기 소내 소비량의 차를 발전소에서 소비한 총 연료에너지로 나눈 값으로 정의하였다.

$$e_H = (E_{H, \text{총생산}} - E_{H, \text{소내소비}} - E_{P, \text{소내소비}}) / (E_{\text{연료}} + E_{\text{수열}} + E_{\text{수전}}) \quad (4)$$

$$e_P = E_{P, 판매} / E_{P,P} \quad (5)$$

열 생산에 소비되는 스팀량은 열판매량 값을 사용하였다. 전기 생산에 소비되는 스팀량은 터빈과 발전기의 효율에 의해 손실되는 엔탈피와 복수량의 합에서 생산전력 중 소내 소비로 활용되는 양을 제외한 값으로 설정하였다. 여기서 복수량 전량을 전기 생산에 소비되는 스팀량으로 설정하는 것은 모순이나 정확하게 열, 전기 생산에 기여하는 양을 구분할 수 없기 때문에 전량이 전기 생산에 소비되는 것으로 가정하였다. 전기 생산에 소비된 스팀량 계산식에서 소내 소비로 사용되는 생산전력을 빼는 이유는 이 값은 시스템 열효율 계산에 이미 반영이 되었기 때문에 중복반영을 피하기 위해서이다.

3. 이산화탄소 배출량 계산

3.1 발전소 운영데이터 조사

22개 전체 산업단지 열병합발전소를 대상으로 간접방문 설문조사를 통해 2005년 운영 데이터를 수집하였다. 그러나 데이터 오차가 커서 본 연구의 계산 자료로 활용하지 못하였고, 이를 보완하기 위해 9개 발전소를 대상으로 2005~7년 데이터를 직접방문을 통해 조사하였다. 직접방문을 통해 조사한 자료 중 3개 발전소의 데이터 역시 오차가 커서 계산에서 제외하여 총 6개 발전소 데이터를 사용하여 계산을 수행하였다.

22개 산업단지 열병합발전소에서 소비한 2005년 연료 총량은 40,619Tcal로 조사되었고 Fig. 1과 같다. 각 발전소에서 배출하는 CO₂ 량은 Fig. 2와 같으며 전체 발전소에서 배출한 총량은 13.81 Mton으로 조사되었다. Fig. 3는 각 발전소에서 소비한 연료 종류별 양을 나타내며 B-C와 유연탄 사용 비율이 높은 것으로 조사되었다.

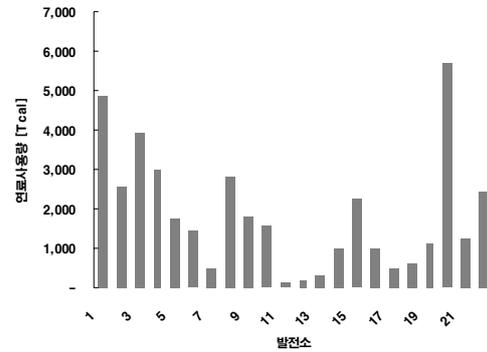


Fig. 1 Fuel consumption amount of surveyed plants

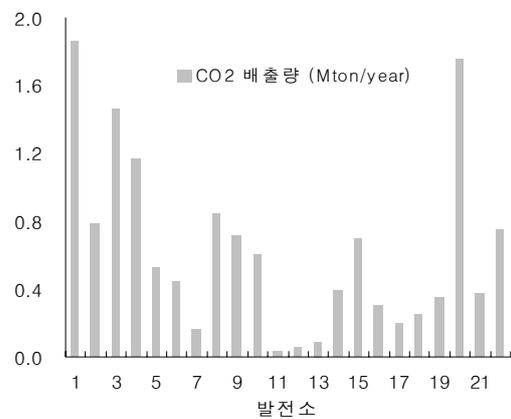


Fig. 2 CO₂ emission amount of surveyed plants

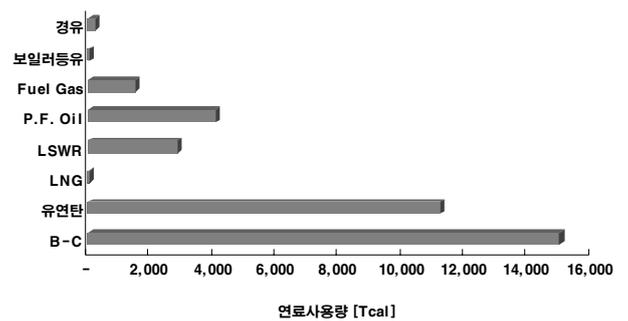


Fig. 3 Kinds of fuels consumed in surveyed plants

3.2 이산화탄소 배출율 계산

열병합발전소에서 열, 전기 생산에 따른 이산화탄소 배출량 계산을 위해서는 먼저 발전소에서 배출하는 이산화탄소 총량을 계산하여야 한다. 본 연구에서는 열병합발전소에서 사용하는 연료에 대한 배출계수 국내 자료가 존재하지 않는 점

을 감안하여 국제적으로 통용되는 IPCC 계수 값을 사용하였다. WRI/WBCSD, CCAR, EPA, DEFRA 등 해외 방법론을 사용한 계산에서도 이산화탄소 배출 총량은 IPCC 값을 사용하였다. 사용 데이터는 직접방문을 통해 수집한 2005~7년 자료를 사용하였다.

Table 1은 직접 방문을 수행한 6개 발전소의 열, 전기 생산 효율 계산 결과이고, Table 2는 열, 전기 생산에 따른 CO₂ 배출율이다. 계산 결과 열, 전기 생산 효율은 각 발전소 별 운영 특성 등에 따른 데이터의 차이에 의해 서로 다른 경향의 값들이 계산되었다. B와 D 발전소의 경우 시스템열효율이 매우 높게 계산되었으며 이는 데이터 조사 오류에 의한 것으로 판단된다. CO₂ 배출율은 효율 값에 비례하는 값이기 때문에 앞의 계산 결과와 유사한 추이를 보였다.

Fig. 4와 Fig. 5는 직접조사를 수행한 6개 발전소의 3년 동안의 데이터를 사용하여 계산한 열, 전기 생산에 따른 CO₂ 배출율이다. 계산 방법론에 따라 배출율 값의 차이가 발생하였으며 년도별 계산 결과의 차이가 크지 않았다. Fig. 6은 각 발전소별 복수율에 따른 발전효율이다. 복수율 증가시 발전효율이 감소하는 경향이 나타났으며 이는 본 개발 방법론은 복수 스팀을 전기생산시 소비되는 에너지로 설정하였기 때문이다. 여기서 복수율은 터빈입구 엔탈피 대비 복수엔탈피 량의 백분율이다. Fig. 7은 열전비에 따른 온실가스 배출율이며, 열전비에 따른 배출율의 특성이 나타나지 않았다. 따라서 열전비와 배출율 사이의 상관관계는 없는 것으로 판단된다. Fig. 8은 유연탄 사용 비율에 따른 온실가스 배출율을 나타낸다. 유연탄의 배출계수가 다른 연료에 비해 크기 때문에 사용 비율이 높아질수록 온실가스 배출율도 증가하였다. Fig. 9는 종합효율에 따른 온실가스 배출율을 나타낸다. 종합효율이 증가할수록 사용 연료량이 감소하기 때문에 온실가스 배출율이 감소하였다.

Table 1 Efficiency of heat and electricity generation

방법론	항목	발전소별 계산결과 (%)					
		A	B	C	D	E	F
개발식	e _H	61	89	74	87	65	84
	e _P	59	77	34	39	51	66
WRI, EPA	e _H	70	99	75	88	75	94

	e _P	31	43	33	39	33	41
DEFRA	e _H	68	96	72	84	72	92
	e _P	34	48	36	42	36	46
CCAR	e _H	60	89	61	66	62	81
	e _P	60	89	61	66	62	81

Table 2 CO₂ emission rate by heat and electricity generation

방법론	항목	발전소별 계산결과 (kg/MWh)					
		A	B	C	D	E	F
개발식	CO ₂ 열	541	324	417	387	407	315
	CO ₂ 전기	569	369	919	856	525	403
WRI, EPA	CO ₂ 열	470	296	412	381	351	282
	CO ₂ 전기	1,074	677	941	872	803	645
DEFRA	CO ₂ 열	485	303	430	404	366	291
	CO ₂ 전기	969	605	861	808	731	582
CCAR	CO ₂ 열	544	328	511	509	427	325
	CO ₂ 전기	544	328	511	509	427	325

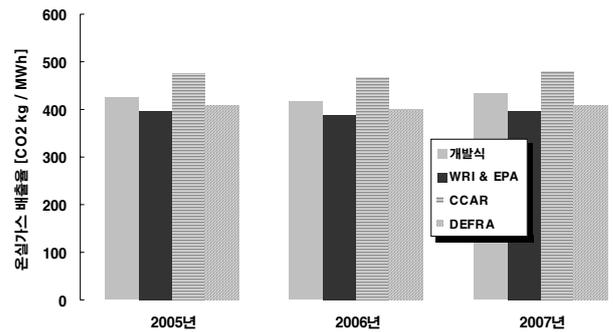


Fig. 4 CO₂ emission rate by heat generation

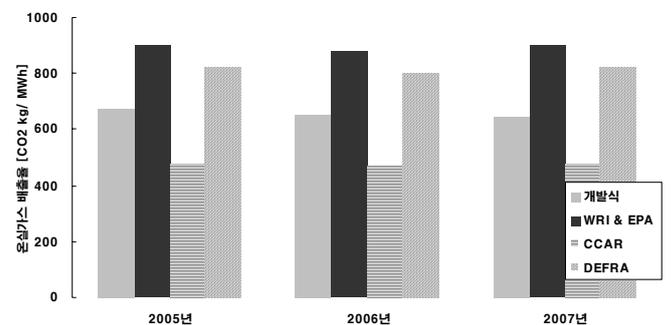


Fig. 5 CO₂ emission rate by electricity generation

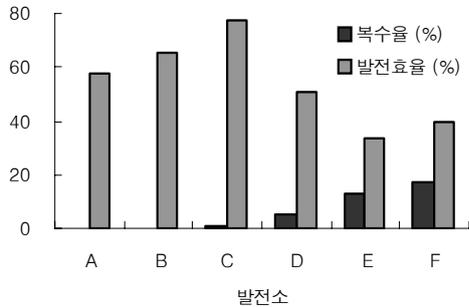


Fig. 6 Electricity generation efficiency according to steam condensing amount.

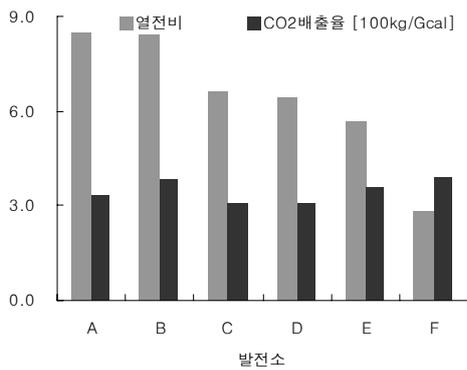


Fig. 7 CO2 emission rate according to heat and electricity generation ratio

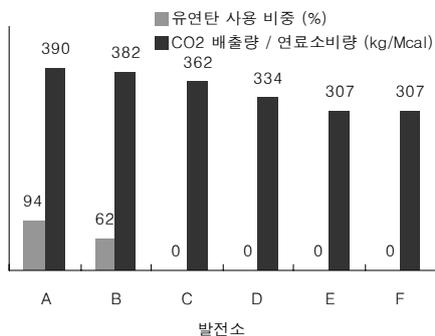


Fig. 8 CO2 emission rate according to fuel kinds

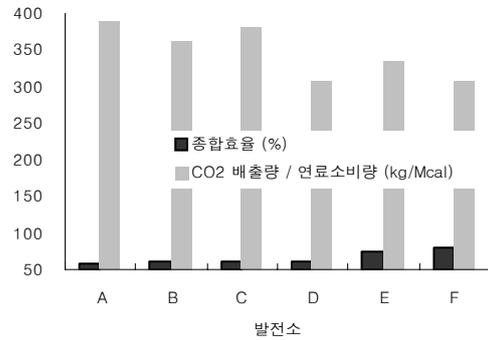


Fig. 9 CO2 emission rate according to efficiency of CHP plant

4. 결론

본 연구를 통해 국내 산업단지 열병합발전소를 대상으로 연료분석 방법을 통해 열 전기 생산에 따른 온실가스 배출율을 계산하였고, 사용연료, 열전비 그리고 복수율 등의 차이에 따른 배출율 특성을 분석하였다.

분석결과 각 발전소별 운전 방식의 차이에 따라 열, 전기 생산효율이 달라지고 이에 따라 배출율 계산값도 차이가 발생하였다. 따라서 연료 분석 방법론을 통해 이산화탄소 배출량을 분석할 경우 해외 방법론 처럼 임의의 효율값을 전체 발전소에 일괄 적용하여 배출계수를 계산하는 방법 보다는 각 발전소별 열, 전기 생산효율 특성을 반영한 방법론 적용이 적절할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. U.S. EPA 2004 Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2002, PPA430-R-04-003.
2. Direct Emissions from Stationary Combustion Sources, Climate Leaders Greenhouse Gas Inventory Protocol Core Module Guidance, U.S. Environmental Protection Agency, October 2004.
3. GHG Protocol Initiative, World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, October 2001, <http://www.ghgprotocol.org/.standard/tools.htm>
4. Analysis of Output-Based Allocation of

- Emission Trading Allowances, U.S. Combined Heat and Power Association, submitted by: Energy and Environmental Analysis, Inc., June 2003
5. California Climate Action Registry(CCAR), General Reporting Protocol, Version 2.1. Part III, Chapter 8 - Allocating Emissions from Co-Generation. June 2006. CCAR guidelines based in -part on the guidance provided in the previous version of the GHG Protocol calculation tool "Direct Emissions from Stationary Combustion" , October 2004 version.
 6. California Climate Action Registry General Reporting Protocol, Version 2.0, October 2003, <http://www.climateregistry.org>.
 7. www.epa.gov/climateleaders/index.html
 8. Direct Emissions from Stationary Combustion Sources, Climate Leaders Greenhouse Gas Inventory Protocol Core Module Guidance, U.S. Environmental Protection Agency, October 2004.
 9. Indirect Emissions from Purchases/Sales of Electricity and Steam, Climate Leaders Greenhouse Gas Inventory Protocol Core Module Guidance, U.S. Environmental Protection Agency, October 2004.
 10. GHG calculation tool, Calculating CO2 emissions from stationary combustion, Feb. 2004, V2.0, www.ghgprotocol.org
 11. Guidelines for the Measurement and Reporting of Emissions by Direct Participants in the UK Emissions Trading Scheme, June 2003, Department for Environment Food and Rural Affairs
 12. Digest of UK Energy Statistics 2000, DTI