

열병합발전 공급온도에 따른 탄소 배출권 산정 연구

최상미*, 김민성**†, 김소연*, 임지훈*, 정상훈**

*중앙대학교 에너지시스템공학과, **중앙대학교 에너지시스템공학부

A study on the calculation of carbon credit according to the supply temperature of cogeneration

SangMi Choi*, Minsung Kim**†, Soyeon Kim*, JiHun Lim*, SangHun Jeong**

*Department of energy systems Engineering, Chung-Ang University,

**School of Energy Ssystems Engineering, Chung-Ang University

ABSTRACT : As GHG reduction becomes a major global issue, the importance and interest of ETS is increasing. Korea experienced positive effects of the system since the introduction of ETS in 2015, but also faced various problems. The focus of this study is on the issue of applying the ETS system to the group energy of industrial complexes. The group energy of industrial complexes is a unique industrial form of Korea that cannot be found in the world. Therefore, if the system is implemented in the same way as the preceding countries, it will inevitably cause problems. In particular, the group energy of industrial complexes has the characteristic that the conditions and amount of heat supplied are determined according to the demands of customers and the amount of power generation is determined accordingly. We investigated how different temperatures of heat produced in cogeneration affect carbon credit calculations.

초록 : 온실가스 감축이 전세계 주요 이슈가 됨에 따라 ETS에 대한 중요성과 관심이 높아지고 있다. 한국은 2015년 ETS 도입 이후 제도의 긍정적 효과와 함께 다양한 문제점에 직면하게 되었다. 본 논문에서 주목하는 점은 산업단지 집단에너지의 ETS 제도 적용에서의 이슈이다. 산업단지 집단에너지라는 산업형태는 세계에서 찾아볼 수 없는 한국의 독특한 산업 형태이다. 따라서 선행된 나라들과 같은 방식으로 제도를 시행할 경우 여러 문제점을 야기할 수밖에 없다. 특히 산업단지 집단에너지는 수요처의 요구에 따라 공급하는 열의 조건과 양이 결정되고 그에 따라 발전량이 결정된다는 특징이 있다. 따라서 수요에 의해 열병합 발전에서 생산하는 열의 온도가 달라지면 탄소배출권 산정결과에 어떠한 영향을 주는 지 알아보았다.

Key words : ETS(배출권거래제), Group energy of industrial complex(산업단지 집단에너지), Cogeneration (열병합발전), Heat demand(열수요)

† Corresponding Author, minsungk@cau.ac.kr

열병합발전 공급온도에 따른 탄소 배출권 산정 연구

-기호설명-

f_o : 열 할당계수

f_E : 전기 할당계수

Q_{cm} : Cogeneration mode에서 열 생산량 (GJ)

$E_{el,cm}$: Cogeneration mode에서 발전량(GJ)

$\eta_{ait heat}$: 대체시설 열효율

$\eta_{ait elec}$: 대체시설 발전효율

E_f : 연료 투입 열량 (GJ)

$f_{P,el}$: 전기 PRF계수

$f_{P,F,i}$: 연료(석탄) PRF계수

T_o : 주변환경 온도 (°C)

T_{CHP} : CHP 생산 스팀 온도 (°C)

EX_g : 전기 비역서지 생산량 (GJ)

EX_q : 열 비역서지 생산량 (GJ)

$\psi_{ait heat}$: 대체시설 역서지 열효율

$\psi_{ait elec}$: 대체시설 역서지 발전효율

EX_f : 연료 투입 역서지 (GJ)

1. 서론

1.1 한국의 배출권 거래제 (KETS)

배출권 거래제란 정부가 온실가스를 배출하는 사업장을 대상으로 연단위로 배출권을 할당하여 할당범위내에서 배출행위를 할 수 있도록 하고, 할당된 사업장의 실질적 온실가스 배출량을 평가하여 잉여분 또는 부족분에 대하여 사업장 간 거래를 허용하는 제도를 말한다. 한국의 배출권 거래제는 2015년 출범하여 3기에 접어들고 있는 과정이다. 이 과정에서 긍정적인 전망이 있지만 동시에 많은 시행착오와 문제점도 발생되고 있다. 현재 가장 먼저 ETS를 시행한 EU 또한 시행과정 중 많은 시행착오를 겪었고 이를 극복하기 위해 노력하고 있다. 한국은 EU-ETS의 경험을 통해 좀더 빠른 발전을 도모하고 있지만 EU와 한국의 여건이 동일하지 않기 때문에 EU의 방식을 그대로 적용하는 것은 어려움이 있다.

현재 ETS에서 큰 쟁점이 되고 있는 사항은 배출권 할당방식의 변화이다. 기존의 배출권 할당방식은 GF(Grand Fathering)방식으로 과거 온실가스 배출실적을 기준으로 그 수준에 상응하거나 그 이하로 배출권을 할당하는 방식을 말한다. 하지만 이 방식은 조기감축 업체에 대한 불이익이 예상됨에 따라 형평성에 대한 의문이 제기되어 왔다. 이에 변화한 할당방식은 BM(Bench Mark)방식으로 제품 생산량, 설비효율성 등 과거 활동자료를 근거로 업종별로 배출권을 할당하는 방식이다. 이 BM할당방법론에는 대표적으로 Alternative Generation Mehtod와 Power Bonus Method등이 있으나 한가지 방법론이 보편적으로 받아들여지고 있지는 않다. 어떤 방법론을 사용하는지에 따라 배출권 산정 결과는 달라지게 된다. 배출권이 화폐적 가치를 가지고 있는 만큼 이에 따른 논쟁은 피할 수 없을 것으로 예상되며 그만큼 합리적인 할당방식 선정이 필요하다.

1.2 산업단지 집단에너지

집단에너지는 크게 지역난방과 산업단지로 나누어진다. 그중 산업단지 집단에너지는 한국의 독특한 산업형태로 기존 ETS 제도를 선행한 나라들과는 다른 특징을 가지고 있다. BM 방식으로 할당방식이 전환되면서 업종 간의 비교가 중요해진 가운데 지역난방의 경우 해의 사례에 의해 비교적 잘 정립되어 있지만, 산업단지의 경우에는 그 특이성을 충분히 반영하지 못했다. 산업단지 집단에너지에서 가장 주목할 특징은 수용가의 요구에 따라 사업자가 공급하는 열의 압력과 온도 그리고 생산량이 달라진다는 점이다. 즉 열수요에 따라 발전소가 설계, 작동되는데 이 또한 입주 기업의 업종에 따라 달라진다. 본 논문에서는 산업단지의 열병합발전소가 공급하는 열의 온도가 배출권을 산정할 때 어떤 영향을 미치는지 그리고 이를 고려할 때 가장 적절한 방법론은 무엇인지에 대해 연구해보았다.

2. 본론

2.1 산업단지 열 수요

산업단지 집단에너지는 입주기업에 따라 공급 열의 조건이 변화하게 된다. 따라서 각 산업 부문별 열 수요 특성을 조사하였다. 2012년 EU-27 산업부문별 온도 구간에 따른 열 생산량 데이터⁽¹⁾를 통해 열병합발전소의 생산열품질과 수요를 근사하여 Table 1에 나타내었다. 열병합 발전에 적합한 온도범위로 데이터를 자르면 화학, 일반기계, 펄프산업만 남게 된다. 3가지 산업의 열수요 특징을 비교해보면 화학산업은 고온의 열 수요가 많고 펄프산업은 저온의 열 수요가 많으며 일반기계산업의 경우 비교적 고온 열 수요 분포를 가지고 있다.

2.2 할당방법론

2.2.1 엔탈피 기반 방법론

현재 주로 사용되는 방법론은 엔탈피 기반의 방법론이다. 그 중 가장 많이 사용되고 본 연구에 적용한 2가지 방법론은 아래와 같다.

Alternative Generation Method(AGM)은 chp에서 생산된 열과 전기 생산량을 개별시설의 효율로 나누어 각각 사용된 연료량을 추산하고 이에 따라 co2할당 비율을 결정하는 방법이다. 그 식은 다음과 같다.

$$f_Q = \left(\frac{Q_{cm}}{\eta_{alt_heat}} \right) / \left(\frac{Q_{cm}}{\eta_{alt_heat}} + \frac{E_{el,cm}}{\eta_{alt_elec}} \right) \quad (1)$$

$$f_E = \left(\frac{E_{el,cm}}{\eta_{alt_elec}} \right) / \left(\frac{Q_{cm}}{\eta_{alt_heat}} + \frac{E_{el,cm}}{\eta_{alt_elec}} \right) \quad (2)$$

Power Bonus Method(PBM)은 EU standard⁽²⁾에서 권장하는 방법으로 열을 주요 생산품으로 생산하고 전력생산량은 모두 보너스로 간주하여 할당하는 방법이다. 그 식은 다음과 같다.

$$f_Q = \frac{E_f f_{P,P,i} - E_{el,cm} \cdot f_{P,el}}{E_f f_{P,P,i}} \quad (3)$$

$$f_E = \frac{E_{el,cm} \cdot f_{P,el}}{E_f f_{P,P,i}} \quad (4)$$

Table 1 Heat quality and demand ratio approximation

	Boiler outlet	HP steam	MP1 steam	MP2 steam	LP steam
Temperature (°C)	538.00	483.84	357.39	230.10	145.38
Pressure (Mpa)	16.67	12.05	5.09	1.72	0.42
Chemical	100	68.70	4.47	9.55	17.28
Other	100	0.00	19.49	14.29	66.23
Pulp	100.00	0.00	0.00	3.79	96.21

AGM은 개별시설의 효율로 열과 전기 생산에 사용된 연료의 양을 추산하여 할당하기 때문에 에너지의 질적인 측면을 어느정도 고려한 방법이라고 할 수 있다. PBM은 외부영역으로의 생산을 피하는 방법론으로 열생산을 우선으로 하는 지역난방과 산업단지 집단에너지의 취지에 적합한 방법론이라고 할 수 있다. 하지만 PBM의 경우 전기BM에 비해 열BM에 영향을 끼치는 인자가 많아 사업장별 편차가 크고 따라서 민감도 또한 크다⁽³⁾고 알려져 있다.

2.2.2 엑서지 기반 방법론

엔탈피 기반 방법론이 널리 사용되고 있지만 에너지의 질적인 측면을 제대로 고려하기 위해서는 가용에너지인 엑서지를 기반으로한 방법론이 필요하다. 특히나 산업단지 집단에너지의 경우 수요에 따라 열과 전기를 생산하기 때문에 엑서지 기반의 방법론이 더욱 필요할 것으로 보인다. 질 높은 고온의 열 수요가 많은 사업장의 경우 같은 양의 에너지를 투입하였을 때 저온의 열을 생산할 때 보다 전기 생산량이 줄어들 수밖에 없다. 엔탈피 관점에서는 고온의 열과 저온의 열 사이의 에너지 품질차이를 반영이 어렵다고 판단된다. 따라서 엑서지 기반 방법론을 엔탈피 기반 방법론과 함께 열병합 발전 시나리오에 적용하여 분석하고자 한다. 먼저 논문에 사용할 엑서지 기반 방법론을 아래에 설명하였다.

2.2.2 엑서지 기반 방법론

Carnot Method는 기준에 엑서지 기반 방법론으로 가장 많이 알려져 있는 방법론으로 그 식은 다음과 같다.

$$f_Q = \frac{Q_{cm} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{CHP}}\right)}{Q_{cm} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{CHP}}\right) + EX_e} \quad (5)$$

$$f_E = \frac{EX_e}{Q_{cm} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{CHP}}\right) + EX_e} \quad (5)$$

Carnot Method는 주변환경 온도와 생산 스팀온도를 통해 열 엑서지를 산출한다. 열역학 관점에서 전기는 100% 엑서지로 이루어지므로 엔탈피와 같은 값을 가진다. 가장 널리 알려져 있으나 본 논문에서 대상으로 하는 열병합 사업자들에게는 적합하지 않은 부분이 있다. 열 엑서지에 온도와 압력 중 온도만이 반영되어 질적인 측면을 완벽히 반영하지 못한다. 또한 지역난방과 같이 일정한 열을 생산하는 것이 아니라 열병합 발전소에 따라 다른 온도의 과열증기를 생산하는 경우에는 적합하지 않을 것으로 보인다.

Exergy Efficiency Method(EEM)는 AGM과 같이 대체

열병합발전 공급온도에 따른 탄소 배출권 산정 연구

시설 효율로 연료를 추산하는 방법론이다. 다른 점은 열과 전기를 비엑서지(specific exergy)로 대체효율을 엑서지 효율로 변환한 점이다.

$$f_Q = \left(\frac{EX_q}{\psi_{alt_heat}} \right) / \left(\frac{EX_q}{\psi_{alt_heat}} + \frac{EX_e}{\psi_{alt_elec}} \right) \quad (6)$$

$$f_E = \left(\frac{EX_e}{\psi_{alt_elec}} \right) / \left(\frac{Q_{CTM}}{\psi_{alt_heat}} + \frac{EX_e}{\psi_{alt_elec}} \right) \quad (7)$$

Exergy Power Bonus Method(EPBM)는 PBM과 동일하게 전력생산을 모두 보너스로 간주하나 연료와 전기 생산량을 비엑서지(specific exergy)로 변환하여 사용하였다.

$$f_Q = \frac{EX_f - EX_e \cdot f_{P,el}}{EX_f} \quad (8)$$

$$f_E = \frac{EX_e \cdot f_{P,el}}{EX_f} \quad (9)$$

2.3 열병합 발전 시나리오 분석

앞서 설명한 5가지 방법론을 열병합 발전 시나리오에 적용하여 배출권을 산정하고 CO₂인정량 대비 초과량을 비교해 보았다.

Table 2 Parameter of CHP plant

Parameter	Value
Coal HHV	5920 kcal/kg
Co2 emissions	22.42 tco2
Turbine isentropic efficiency	0.9
Ref environment temperature	15 °C
Ref environment pressure	0.101 MPa
Ref heat efficiency	0.84
Ref electricity efficiency	0.39
PRF factor fuel(coal)	1.3
PRF factor electricity	2.56

CHP 발전소의 해석 조건은 Table2에 나타내고 schematic은 Fig.1에 나타내었다. Schematic 각 지점의 물성값은 REFPROP10.0과 EXCEL을 이용하여 계산하였

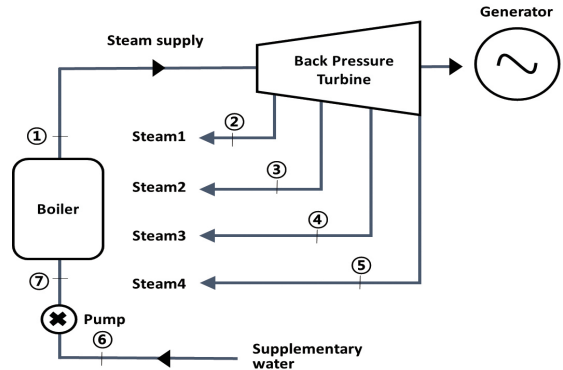


Fig. 1 Schematic of CHP plant

다. 모든 발전소가 같은 양의 연료를 사용하여 같은 CO₂배출량을 가질 때 수용가의 업종에 따라 배출권에 어떤 변화가 있는지 분석해보았다. 총 6개의 플랜트를 Table3과 같이 구성하였고 플랜트별 방법론에 따른 CO₂ 인정량 대비 초과량은 Fig.2와 같다. 모든 plant의 CO₂ 배출량이 같음에도 불구하고 인정량에 편차가 있음을 확인할 수 있다. 이는 열병합 발전소의 열 공급온도에 따라 배출권 산정 결과가 달라짐을 의미한다. 편차가 적은 방법론은 EPBM, PBM, EEM, AGM, Carnot Method 순이다.

Table 3 Percentage of the industry sector by plant

	Chemical	Other	Pulp
Plant 1	100	0	0
Plant 2	50	50	0
Plant 3	50	0	50
Plant 4	0	100	0
Plant 5	0	50	50
Plant 6	0	0	100

경향성을 살펴보면 고온공정이 많은 chemical의 비율이 높을수록 CO₂ 인정량 대비 배출량이 많다는 것을 알 수 있다.

다음으로 앞서 진행한 기본 열병합 발전 시나리오 분석에서 다른 조건은 동일하게 하되 유용도에 변화를 주고 결과를 비교해보았다. 이번 분석에서는 앞선 분석에서 편차가 크게 나타났던 Carnot method를 제외하고 나머지 네가

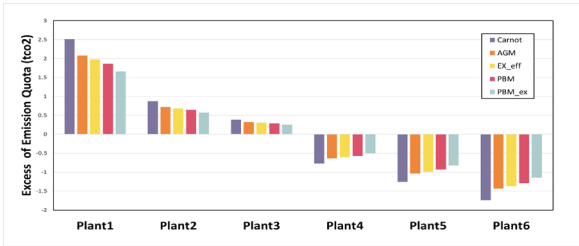


Fig. 2 Excess CO₂ emissions by plant according to methodology

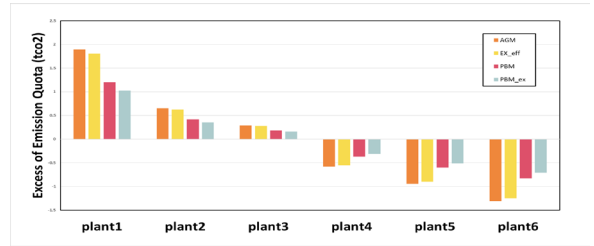


Fig. 3 Excess CO₂ emissions by plant according to methodology at utilization factor =0.76

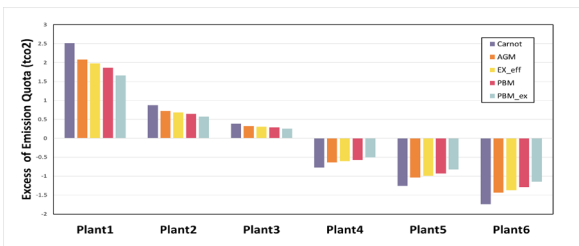


Fig. 4 Excess CO₂ emissions by plant according to methodology at utilization factor =0.58

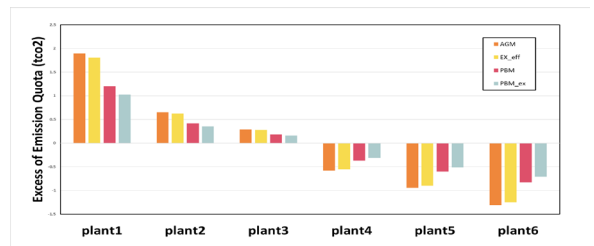


Fig. 5 Excess CO₂ emissions by plant according to methodology at utilization factor =0.48

지 방법론만을 비교하였다. 유용도 0.76, 0.58, 0.48에서의 결과를 Fig.3,4,5에 나타냈다. 결과는 마찬가지로 EPBM, PBM, EEM, AGM, 순으로 편차가 작았다. 하지만 PBM과 EPBM의 경우 유용도가 변함에 따라 결과값이 크게 변화하였다. 특히 유용도가 작아질수록 열의 영향을 크게 받아 결과가 왜곡되는 현상이 나타났다. 이를 통해 PBM의 민감도 문제를 확인할 수 있었다.

열병합 발전 시나리오 분석을 통해 열 공급온도에 따라 배출권에 영향을 준다는 사실을 알 수 있었다. 같은 양의 CO를 배출하는 경우에도 배출권에 편차가 나타나는 것을 확인했고 그 편차가 가장 적은 방법론은 PBM과 EPBM이었다. 하지만 이 두 방법론은 변수에 대한 큰 민감도를 보였다. Carnot method의 경우 편차가 클뿐더러 앞서 언급했듯이 산업단지 적용에 문제점이 있다. 이러한 점을 고려할 때 본 논문에서 소개한 방법론들 중 가장 적절한 방법론은 AGM과 EEM이다. 두 방법론 중 열의 품질을 더 잘 반영할 수 있는 것은 배출권에서 더 적은 편차를 보여주고 가용에너지를 기반으로한 EEM이다. 따라서 EEM이 열병합 발전의 공급온도에 따른 배출권 이슈에 가장 적절한 방법론이라고 생각된다.

3. 결론

본 논문은 열병합 발전의 공급온도에 따른 배출권 변화를 알아보기 위해 열병합 발전 시나리오 분석을 진행하였다. 결론은 다음과 같다.

- (1) 동일한 조건에서도 열병합 발전소의 열 생산온도에 따라 배출권 산정 결과가 달라진다.
- (2) 방법론 별 편차는 EPBM, PBM, EEM, AGM, Carnot 순으로 작다.
- (3) EPBM과 PBM의 경우 변수에 대한 민감도가 크다.
- (4) Carnot method의 경우 편차가 가장 크고 산업단지의 특성에 적합하지 않은 방법론이다.
- (5) AGM과 EEM중 열의 품질을 더 잘 반영하는 방법론은 EEM이다.

후기

본 연구는 산업통상자원부(KETEP No. 2019205010060, No. 2019205010060), 한국에너지기술연구원

열병합발전 공급온도에 따른 탄소 배출권 산정 연구

(KIER C0-2412-0), 한국 연구재단(NRF No. 2019R1A2C108869412), 환경부(KEITI No. 2020003060005)의 지원으로 수행한 연구과제입니다.

참고문헌

- (1) Schierning, 2018, G. Bring on the heat. *Nat Energy* 3, 92-93
- (2) European Standard, 2007, EN 15316:2007. Heating Systems in Buildings e Method for Calculation of System Energy Requirements and System Efficiencies
- (3) T. Tymofii, N. Nord, 2015, Uncertainty of the allocation factors of heat and electricity production of combined cycle power plant, *Applied Thermal Engineering*
- (4) H. Holmberg, M. Tuomaala, T. Haikonen, P. Ahtila, 2012, Allocation of fuel costs and CO₂-emissions to heat and power in an industrial CHP plant: case integrated pulp and paper mill, *Applied Energy*
- (5) M.A. Rosen, An exergy-based method for allocating carbon dioxide emissions from cogeneration systems - part I: comparison with other methods, 2006, Engineering Institute of Canada (EIC) Climate Change Technology Conference