

가정용 열병합 시스템의 국내 도입에 따른 온실가스 저감효과 예측

Impact of Residential CHP Systems on Greenhouse Gas Emissions in Korea

강병하(Byung Ha Kang)¹, 윤창호(Chang Ho Yun)², 안준(Joon Ahn)^{1†}

¹국민대학교 기계시스템공학부, ²국민대학교 대학원 기계공학과

¹School of Mechanical Systems Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Republic of Korea

²Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kookmin University, Seoul 136-702, Republic of Korea

(Received August 8, 2013; revision received September 2, 2013)

Abstract The effects of applying the micro CHP system to the domestic sector in Korea were investigated using annual cooling and heating demand data. Four prime movers, micro gas turbine, PEMFC, gas engine and Stirling engine, were compared for three operational modes. Two way buy-back was assumed for both electricity and heat. The Stirling engine gave the lowest CO₂ emission per energy for 300kWh monthly electricity production. However, PEMFC became more effective when considering PURPA criteria. PEMFC generated the least greenhouse gas with higher electrical efficiency for cooling. The Stirling engine, however, became competitive for heating with higher total efficiency

Key words Residential CHP(가정용 열병합), Prime mover(원동기), CO₂ emissions(온실가스 배출)

† Corresponding author, E-mail: jahn@kookmin.ac.kr

기호설명

CEFG : LNG의 탄소배출계수(TC/TOE)
CEFE : 전력의 탄소배출계수(TC/MWh)
COPA : 흡수식 냉동기의 성능계수
COPE : 전기 냉방기의 성능계수
L : 냉난방 부하(kW)
PG : 가스 소비량(TOE)
PE : 전력 소비량(MWh)
Q : 냉난방을 위해 사용되는 에너지(kW)
RE : 열병합발전의 전기 생산 비율
RH : 열병합발전의 열 생산 비율
TCO_{2E} : 전력에 의한 CO₂ 발생량(TCO₂)
TCO_{2G} : 가스소비에 의한 CO₂ 발생량(TCO₂)

1. 서 론

에너지 자원의 고갈이 가시화되면서 2008년 원유 가격이 폭등하였고 2013년 현재까지 높은 수준을 유지하고 있다. 또한 지구 온난화로 인한 세계적인 기상 이변이 이어지는 가운데 2013년 서울을 비롯한 우리나라 중부지방은 50일에 이르는 기록적으로 긴 장마기간을 겪었다. 2013년 6월 원전부품 성능조작 사고로 우리나

라의 23기의 원전 중 10기의 가동이 중단되는 사건이 발생하면서 2011년 9월 닷더위로 인한 과부하에 의해 서울을 비롯하여 전국적인 혼란과 피해를 가져왔던 대규모 정전 사태의 재발을 우려하는 목소리가 나오고 있다. 이와 같은 배경에서 에너지 공급의 안전성 제고 및 계절적으로 발생하는 전력의 첨두(peak) 부하 문제 해소를 위해 에너지 수요처에서 에너지를 생산하는 분산에너지시스템⁽¹⁾의 확대가 요구되고 있다.

에너지 수요처에서 에너지를 생산할 경우 공급의 안정성을 확보하는 것과 동시에 에너지 이용 효율을 높일 수 있다. 즉, 냉난방이나 급탕 등 열수요가 있는 곳에서 에너지를 생산함에 따라 연료를 연소함으로써 발생한 고온의 열에너지를 1차적으로 전기 에너지로 변환하고 변환 후에 발생하는 배열을 냉난방에 활용하는 열병합 발전을 적용할 수 있게 된다.⁽²⁾ 열병합 발전 시스템은 기존의 화력발전과 열전용 보일러에서 이원화하여 생산하던 전기 및 열에너지 공급을 일원화하여 전체적으로 에너지 이용효율을 약 30% 정도 높일 수 있어 IEA(International Energy Agency)의 온실가스 저감 효과 분석에서도 열병합 발전의 보급에 의한 효과가 15%로 3번째로 큰 기여를 한 것으로 보고하고 있다.⁽³⁾

해외에서는 앞서 언급한 분산에너지시스템의 기본

단위가 되는 한 가구를 위한 발전용량 1 kW 수준의 가정용 열병합발전이 최근 상용화되어 보급되고 있다.⁽⁴⁾ 가정용 열병합발전은 마이크로 CHP로 부르기도 하는데, 기존의 공동 주택 규모의 열병합발전과 달리 소비자가 직접 선택하여 구매할 수 있고 소비자가 수요에 따라 에너지 생산을 조절할 수 있어 에너지 소비 형태를 합리적으로 이끌 것이라는 점을 보급 논리로 제시하고 있다.⁽⁵⁾ 그러나, 열병합발전은 원동기에 따라 열과 전기의 생산비율이 거의 고정되어 둘 중 한 쪽만 수요를 맞출 수 있는 문제점이 있다. 따라서 이용효율을 높이기 위해서는 전기 또는 열을 저장하거나 전력 계통에 연계하는 대책이 필요하다.⁽¹⁾

가정용 열병합발전의 원동기로는 내연기관이 가장 먼저 이용되었고⁽⁶⁾ 최근 연료전지나 스팀엔진이 상용화되었고⁽⁷⁾ 초소형 가스터빈이 개발되는 사례도 보고되고 있다.⁽⁸⁾ 각각의 원동기는 가격은 물론 열전비, 시동 특성, 부분부하 성능, 소음, 배가스 특성 등이 상이하여 사용처의 에너지 소비형태 및 기후 조건 등에 따라 경제성이 변화하게 된다. 가정용 열병합에 사용되는 4가지 원동기-내연기관, 연료전지, 스팀 엔진, 마이크로 가스터빈-의 일반적인 장단점⁽¹⁾ 및 영국, 네덜란드, 벨기에, 일본 등의 국가에서 도입했을 때의 경제성, 환경 효과를 검토한 논문들이 최근에 발표되고 있다.^(5-7, 9)

우리나라의 경우 2008년 이후 연료 가격은 급등한 데 비해 전기 요금은 크게 오르지 않아 연료를 이용하여 전기를 생산하는 열병합 발전의 경제성이 악화되어 보급이 담보상태에 있다.⁽¹⁰⁾ 유럽의 경우 가정용 열병합이 보일러를 대체하며 보급되고 있으며⁽⁶⁾ 그 과정에서 독일에서는 설치보조금(feed-in tariffs)을 지원하고 있는 것으로 보고되었다.⁽¹¹⁾ 미국의 경우에도 매릴랜드주와 메인 주의 경우 2009년부터 가정용 열병합 시스템에 운전비용(net metering)을 지원하고 있다.⁽¹¹⁾ 유럽에서는 가정용 열병합 시스템의 가격이 보일러의 2배 정도 가격으로 형성되어 있으나 우리나라의 경우 10배 이상의 차이를 보이고 있어 원동기의 국산화에 노력을 기울이고 있다.

원동기 국산화에 의한 초기 투자비 절감과 함께 가정용 열병합 시스템의 보급을 위해서는 가동율을 높이고 부분부하 운전시간을 줄이는 운전 형태를 찾아 경제성을 확보해야 한다.⁽¹⁰⁾ 또한 국가적 편익을 반영한 정책적 지원도 뒷받침되어야 할 것이다.⁽¹¹⁾ 이에 본 연구에서는 원동기의 국산화가 진행되고 있거나 시스템의 국내 실증이 이루어진 가정용 열병합 시스템에 대하여 중요한 국가적 편익의 하나인 온실가스 저감효과를 분석하고자 한다. 또한 하절기 전력의 첨두(peak)부하 완화 효과 및 가동율 제고효과를 파악하기 위하여 해외에서 수행된 선행 연구에서 고려하지 않았던^(4,5, 7)

열병합 배열을 이용한 냉방을 고려하여 분석을 수행하였다.

2. 온실가스 배출량 비교 방법

2.1 가정용 열병합 시스템의 원동기

가정용 열병합 시스템의 원동기들은 종류에 따라 가격도 차이가 나지만 열전비가 2:1에서 8:1까지 다양하게 분포하므로 운전 방식이나 부하 형태에 따라 온실가스 저감효과가 크게 달라진다.⁽⁵⁾ 본 연구에서는 국산화가 되었거나 국내에서 실증실험이 이루어진 마이크로 가스터빈(MGT), 고분자 연료전지 (PEMFC), 내연기관(ICE), 스팀 엔진의 4가지 원동기에 대하여 분석을 수행하였다. 마이크로 가스터빈은 1 kW급에서는 상용화된 제품이 없고 국산화 개발이 이루어진 65 kW급 원동기의 사양⁽¹²⁾을 바탕으로 분석하였다. 가정용 열병합을 위한 연료전지는 SOFC⁽¹³⁾와 PEMFC^(14, 15)가 개발된 사례가 보고되어 있는데 상용 제품이 출시된 PEMFC의 사양을 적용하여 분석하였다. 내연기관과 스팀엔진의 경우 국산화가 진행 중이어서 국내 실증에 사용에서 얻은 자료^(3, 16)를 적용하였다. 분석에 사용된 원동기의 사양은 Table 1에 정리하였다.

가정용 열병합의 국내 도입에 따른 온실가스 저감량을 평가하기 위한 비교 대상을 수전시설, 보일러, 냉방장치로 구성된 개별 전기 및 냉난방 시스템으로 설정하였다. 냉방에 사용되는 냉동기는 열병합 배열을 이용할 수 있는 증온수 흡수식 냉동기로 가정하였다. 수전시설의 효율, 보일러의 효율, 냉동기의 성능계수는 2009년 지역난방 협회에서 발표한 내용을 참고하여 값을 설정하였다. 수전시설의 효율은 45%, 보일러 열효율은 90%, 흡수식 냉동기의 성능계수(COP_A)와 전기 냉방기의 성능계수(COP_E)는 각각 0.64와 3이다.

Table 1 Specifications of the prime movers

	MGT ⁽¹²⁾	PEMFC ⁽¹⁵⁾	ICE ⁽¹⁶⁾	Stirling Engine ⁽³⁾
Manufacturer	N社	G社	H社	M社
Elec. (eff.)	65 kW (29%)	1 kW (36%)	1 kW (22%)	1 kW (13%)
Heat (eff.)	105 kW (47%)	1.3 kW (46%)	3 kW (65%)	6.3 kW (82%)
Total eff.	76%	82%	87%	95%

2.2 온실가스 배출량 산출

온실가스 배출량은 ton 단위의 연간 탄소 배출량(TC) 또는 연간 이산화탄소 배출량(TCO₂)으로 표시한다. 탄소배출량과 이산화탄소 배출량은 분자량을 기준으로 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$TCO_2 = \frac{44}{12} TC \quad (1)$$

에너지 사용량에 따른 온실가스 배출량을 계산하기 위해서는 에너지원에 따라 단위 에너지당 배출되는 탄소량을 표현한 탄소배출계수(CEF : Carbon Emission Factor)가 사용된다. 본 연구에서 고려하는 에너지원은 도시가스와 전력이다. 각각에 대한 배출계수는 에너지기본법 시행규칙 제5조 및 온실가스 에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침(환경부 고시 제2012-103호, 2012. 6. 21)에 의거하여 산정하였다.⁽¹⁷⁾ 전력의 경우 배출계수(CEFE)는 0.1213 TC/MWh이며 도시가스의 경우 0.637 TC/TOE로 주어진다. 여기서 TOE는 석유 1 ton을 연소시켰을 때 발생하는 열량으로 10⁷ kcal이다. 도시가스의 경우 발열량이 10,550 kcal/Nm³이므로 1 Nm³의 도시가스는 0.001055 TOE에 해당한다. 도시가스의 배출계수(CEFG)를 전기와 같은 단위로 환산해보면 0.0548 TC/MWh로서 전기의 절반이 채 되지 않는다. 본 연구에서는 열병합발전으로 발전 및 냉난방을 할 경우 연간 사용되는 열 및 전기에너지량을 계산하고 배출계수를 곱하여 탄소 배출량을 계산하였다.

2.3 월간 300 kWh의 전력을 생산하는 경우

가정용 열병합시스템을 설치한 세대의 월간 전력사용량을 300 kWh로 가정하여 전력사용량 기준으로 온

실가스 배출량을 산출하였다. 각 원동기마다 열전비가 상이하므로(Table 1 참조) 월 300 kWh의 전기를 생산하면서 함께 발생하는 열량도 각각 다르게 된다. 비교 기준이 되는 개별 에너지 체계의 경우 수전시설에서 전력을 받고, 가스를 이용하는 보일러로 필요 열을 충족하는 반면, 열병합 발전은 모두 가스를 이용하여 전력 및 열을 생산하기 때문에 필요한 전력량 및 열의 양을 구분해 주어야 한다. Table 2에 각 원동기별로 전력을 300 kWh 생산할 때 발생하는 열 및 소요에너지를 정리하였다.

원동기별 온실가스 배출량은 에너지 소비량에 배출계수를 곱하여 산출하였다. 즉, 전력소비량(P_E)에 따른 온실가스 배출량은 식(2), 가스소비량(P_G)에 따른 배출량은 식(3)을 이용하여 계산하였다.

$$TCO_{2E} = P_E \times CEF_E \quad (2)$$

$$TCO_{2G} = P_G \times CEF_G \quad (3)$$

2.4 부하량 6 kW로 냉방 또는 난방하는 경우

냉·난방 부하를 6 kW로 가정하여 가정용 열병합 시스템이 냉·난방 부하 감당할 때의 온실가스 배출량을 산출하였다. 흡수식냉동기를 사용하는 소형 열병합 발전의 경우, 공급되는 도시가스를 통해 생산되는 전기 및 열로 냉·난방을 감당하고, 개별 에너지 시스템의 경우, 소형 열병합 발전에서 전기로 냉·난방을 감당하는 비율과 열로 냉·난방을 감당하는 비율에 맞추어 각각 수전시설과 보일러가 감당한다고 가정하여 산출하였다. 소형 열병합 시스템으로 냉·난방을 할 경우 전기로 감당하는 부분과 열로 감당하는 부분은 다음의 식으로부터 산출하였다.

Table 2 Energy consumption for 300 kWh electricity generation

	MGT		PEMFC		ICE		Stirling engine	
	Seperate	CHP	Seperate	CHP	Seperate	CHP	Seperate	CHP
Elec. capacity	300 kWh		300 kWh		300 kWh		300 kWh	
Heat capacity	485 kWh		390 kWh		900 kWh		1890 kWh	
Energy consumption for electricity	667 kWh	-	667 kWh	-	667 kWh	-	667 kWh	-
Energy consumption for heat	539 kWh	-	433 kWh	-	1000 kWh	-	2100 kWh	-
Total energy consumption	1206 kWh	1034 kWh	1100 kWh	833 kWh	1667 kWh	1360 kWh	2767 kWh	2300 kWh
Efficiency(%)	65%	76%	63%	82%	72%	87%	79%	95%

$$L = (\text{COP}_{E,R_E} Q) + (\text{COP}_{A,R_H} Q) \quad (4)$$

$$L = R_E Q + R_H Q \quad (5)$$

냉방 또는 난방 부하를 $L (= 6 \text{ kW})$ 이라할 때 냉방에 사용되는 전기 및 열에너지는 식(4), 난방에 사용되는 에너지는 식(5)를 통하여 계산하였다. 냉방 또는 난방을 위해 사용되는 전체 에너지를 Q 라고 할 때, 식(4), 식(5)에서 우변의 첫 번째 항은 냉방 또는 난방에서 전기가 감당하는 부분, 두 번째 항은 열이 감당하는 부분을 의미한다. 식(4)와 식(5)를 이용하여 산출된 전기 감당분과 열 감당분을 Table 3에 정리하였다. 앞서 정리한 값을 바탕으로 하여, 소형 열병합 발전 에서는 LNG 사용에 따른 온실가스 배출량을 산출하고 개별 생산 방식에서는 수전시설의 전력 사용과 LNG 연소에 따른 온실가스 배출량을 산출하였다.

연간 온실가스 배출량을 산출하기 위해서는 냉·난방기 사용시간이 필요하다. 냉·난방기 기기별 사용시간은 전력거래소에서 발표한 '09 가전기기 보급률 및 가정용 전력 소비행태 조사결과⁽¹⁸⁾를 활용하였다. 전기식 냉방방식은 전기 에어컨 하나이기 때문에 본 내용을 토대로 활용하였고, 전기식 난방방식은 종류가 다양하여 전기식 난로와 히터의 내용을 토대로 시간을 도출하였다. Table 4에 본 분석에서 사용한 가정용 냉·난방기 월별 사용 시간을 정리하였다. 이 사용시간에 Table 3에

Table 3 Energy for heating and cooling

	MGT		PEMFC		ICE		Stirling engine	
	Cool	Heat	Cool	Heat	Cool	Heat	Cool	Heat
Q(kW)	5.12	7.89	4.37	7.32	5.58	6.90	6.56	6.32
Duty of elec(kW)	4.45	2.29	4.72	2.64	3.68	1.52	2.56	0.82
Duty of heat(kW)	1.54	3.71	1.29	3.37	2.32	4.49	3.44	5.18

Table 4 Operation hours of cooling and heating equipment

Unit : h	Cooling	Heating
January	-	72
February	-	53
June	60	-
July	70	-
August	126	-
October	-	38
November	-	52
December	-	66

제시한 전기 감당분 및 열 감당분의 값을 곱하면, 사용 전력량과 사용 열량이 산출된다. 열병합 발전 시스템을 사용하기 위한 가스량은 Table 5에 정리하였다. Table 6과 Table 7에는 개별 에너지 시스템에서 필요한 전력량과 가스량을 정리하였다.

Table 5 Monthly LNG consumption for CHP

Unit : Nm ³	MGT		PEMFC		ICE		Stirling engine	
	Cool	Heat	Cool	Heat	Cool	Heat	Cool	Heat
Jan.	-	46.31	-	42.96	-	40.5	-	37.09
Feb.	-	34.09	-	31.63	-	29.81	-	27.3
June	24.04	-	21.37	-	27.29	-	32.08	-
July	29.22	-	24.94	-	31.84	-	37.43	-
Aug.	50.59	-	44.88	-	57.31	-	67.38	-
Oct.	-	24.44	-	22.67	-	21.37	-	19.58
Nov.	-	33.44	-	31.03	-	29.25	-	26.79
Dec.	-	42.45	-	39.38	-	37.12	-	34.0

Table 6 Power consumption for separate-generation

Unit : kWh	MGT		PEMFC		ICE		Stirling engine	
	Cool	Heat	Cool	Heat	Cool	Heat	Cool	Heat
Jan.	-	164.88	-	190.08	-	109.44	-	59.04
Feb.	-	121.37	-	139.92	-	80.56	-	43.46
June	89.0	-	94.40	-	73.60	-	51.20	-
July	103.83	-	110.13	-	85.87	-	59.73	-
Aug.	186.90	-	198.24	-	154.56	-	107.52	-
Oct.	-	87.02	-	100.32	-	57.76	-	31.16
Nov.	-	119.08	-	137.28	-	79.04	-	42.64
Dec.	-	151.14	-	174.24	-	100.32	-	54.12

Table 7 LNG consumption for separate-generation

Unit : Nm ³	MGT		PEMFC		ICE		Stirling engine	
	Cool	Heat	Cool	Heat	Cool	Heat	Cool	Heat
Jan.	-	21.77	-	19.78	-	26.35	-	30.40
Feb.	-	16.03	-	14.56	-	19.40	-	22.38
June	11.77	-	9.86	-	17.73	-	26.29	-
July	13.73	-	11.50	-	20.68	-	30.67	-
Aug.	24.71	-	20.70	-	37.23	-	55.21	-
Oct.	-	11.49	-	10.44	-	13.91	-	16.05
Nov.	-	15.73	-	14.28	-	19.03	-	21.96
Dec.	-	19.96	-	18.13	-	24.16	-	27.87

3. 온실가스 배출량

3.1 월간 300 kWh의 전력을 생산하는 경우

열을 사용하면서 발생하는 온실가스는 사용한 열을 발생시키기 위해 입력되는 LNG의 에너지를 통해 산출하였다. Fig. 1에 월간 300 kWh의 전력을 생산할 때 배

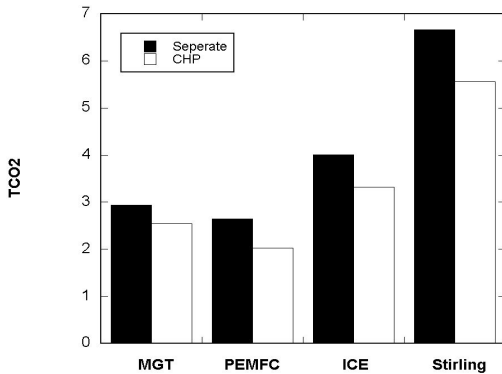


Fig. 1 CO₂ emission for 300 kWh monthly power generation.

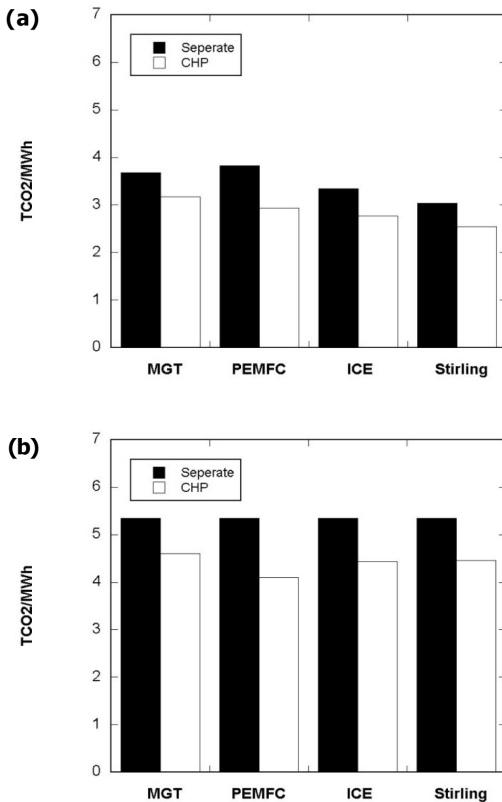


Fig. 2 CO₂ emission/MWh for 300 kWh monthly power generation; (a) for electricity-heat equivalent; (b) for PURPA⁽¹⁹⁾ condition.

출되는 연간 이산화탄소 배출량을 원동기별로 비교하였다. 이산화탄소 배출 저감량을 기존에 발표된 연구와 비교해 보면 동일한 연료전지에 대하여 분석한 선행연구⁽¹⁵⁾의 이산화탄소 저감량은 0.56 TCO₂로 제시되었고 월간 300 kWh 전력을 가정하여 계산한 결과 0.62 TCO₂로 10% 높은 값을 얻었다. 본 연구와 같은 1 kW급 스티어링엔진 가정용열병합에 대하여 영국에서 분석한 결과⁽⁵⁾에서 제시한 이산화탄소 저감량은 0.57 TCO₂이고 본 연구에서 분석한 결과는 1.1 TCO₂로 기존 문헌의 결과보다 다소 높게 예측되었다. 이와 같은 차이는 본 연구에서 배열을 모두 활용하는 것으로 가정하고 계산하여 발생한 것으로 보인다.

스틸링엔진의 열전비가 높아 같은 전력량을 생산할 경우, 다른 원동기에 비해 열 생산량이 크므로 총 에너지 생산량이 많아지면서 가장 배출량이 큰 것으로 보인다 (Fig. 1 참조). 따라서 단위 에너지 당 배출량을 비교할 필요가 있다. 열병합 배열의 가치에 대한 기준이 현재 명확하지 않다. 본 연구에서는 전기와 열의 가치가 같다는 기본적인 관점과 배열의 가치를 전기의 1/2로 보는 PURPA⁽¹⁹⁾의 관점으로 나누어 접근 하였다. 기본 관점에서는(Fig. 2(a) 참조) 스티어링엔진을 이용한 열병합 발전의 단위 에너지 당 이산화탄소 배출량이 가장 적다. 하지만 PURPA 기준을 적용하여(Fig. 2(b) 참조) 분석을 하면 열 생산량이 가장 많은 스티어링 엔진 열병합 발전의 단위 에너지 당 이산화탄소 배출량이 가장 많이 증가하여 연료전지(PEMFC) 열병합 발전의 단위 에너지 당 이산화탄소 배출량이 가장 낮은 것으로 나타난다.

3.2 부하량 6 kW로 냉방 또는 난방하는 경우

가정용 열병합 시스템을 냉난방에 적용하였을 때 얻을 수 있는 온실가스 저감효과를 Fig. 3에 비교하였다. 냉방의 경우(Fig. 3(a) 참조), 전기냉방기의 COP_E에 비해 흡수식 냉동기의 COP_A가 1/5정도로 작아, 열전비가 큰 스티어링 엔진과 가스엔진(ICE)이 마이크로터빈(MGT)이나 연료전지(PEMFC)에 비해 다소 높은 배출량을 보이고 있다. Fig. 3(b)에는 난방 시 원동기별 월평균 이산화탄소 배출량을 제시하였다. PEMFC 열병합 발전과 비교되는 개별발전 방식의 이산화탄소 배출량이 가장 높는데, 이는 PEMFC가 탄소배출량이 LNG보다 약 2배 높은 전기의 생산 비율이 다소 높아 나타난 결과이다. 열병합 발전 측면에서 보면 열 생산 비율이 높은 스티어링엔진 열병합 발전의 이산화탄소 배출량이 가장 낮게 산출된다.

Figure 4에는 냉·난방 시 원동기별로 이산화탄소 감축량을 비교하였다. 본 분석에 PEMFC의 감축량이 가장 높게 산출되었다. 이는 PEMFC의 높은 종합효율과 전기 생산율의 영향으로 냉·난방 시에 PEMFC 열병합 발전에 소비되는 LNG양이 가장 적기 때문이다.

4. 결 론

본 논문에서는 가정용 열병합 발전을 국내에 도입하여 월 300 kWh의 전력을 생산하는 경우와 6 kW의 냉난방 부하를 감당하는 경우에 대하여 원동기별 연간 이산화탄소 배출량을 비교하였다. 그 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

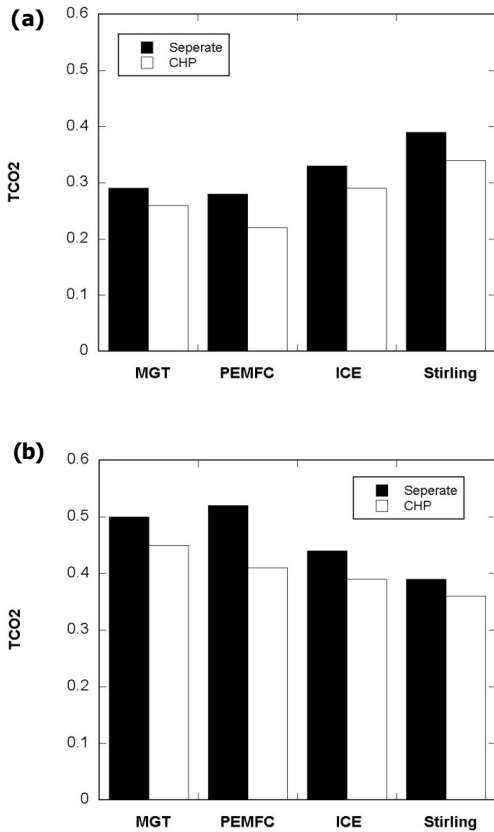


Fig. 3 CO2 emission for air-conditioning; (a) for cooling; (b) for heating.

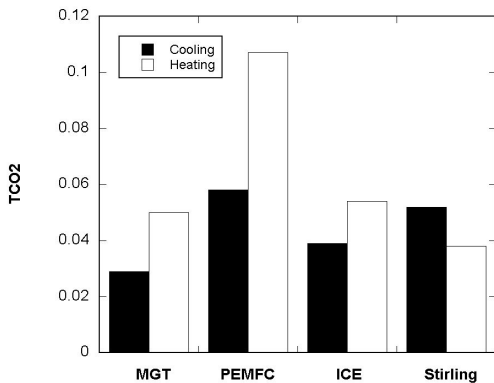


Fig. 4 CO2 reduction effect by CHP.

- (1) 가정용 열병합시스템으로 매월 300 kWh의 전력을 생산하는 경우 열과 전기를 등가로 보면 종합효율이 높은 스티어링엔진이 단위 에너지 당 이산화탄소 배출량이 가장 적은 것으로 계산되었다. 열과 전기의 가치를 1:2로 산정한 PURPA 관점에서는 상대적으로 종합효율이 높으면서 전기 생산을 높은 연료전지(PEMFC)의 단위 에너지 당 배출량이 가장 낮게 산출되었다.
- (2) 냉방에 활용할 경우 이산화탄소 배출량은 PEMFC 열병합 발전이 가장 적었다. 이는 스티어링엔진의 높은 종합 효율에도 불구하고, 흡수식 냉동기의 COP가 너무 낮아, 열전비가 낮을수록 냉방에 유리하기 때문이다.
- (3) 난방 때 배출되는 온실가스는 종합효율이 가장 높은 스티어링 엔진 열병합 발전이 가장 적었다. 이는 전체적인 에너지 생산량이 많아, 난방에 직접적인 효과를 주는 에너지가 많기 때문이다.
- (4) 모든 운전 조건에 대해 절대적으로 이산화탄소 배출량이 적은 원동기는 나타나지 않았다. 부하형태 및 운전 방식을 고려하여 원동기별 국가편익을 구해야 할 것이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 에너지·자원기술개발 사업에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Onovwiona, H. I. and Ugursal, V. I., 2006, Residential cogeneration systems : review of the current technology, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 10, pp. 389-431.
2. Ahn, J., Lee, Y. S., and Kim, H. J., 2012, Combustion characteristics of a premixed burner in a Stirling engine for a domestic cogeneration system, Trans. KSME B, Vol. 36, No. 2, pp. 211-216.
3. Choi, J., Park, B., Jung, D., Kim, H., Kang, S., Im, Y., and Song, D., 2010, The operation characteristics of two domestic Stirling engine Cogeneration systems, Proc. SAREK Winter Annual Meeting, pp. 535-539.
4. Dorer, V. and Weber, A., 2009, Energy and CO2 emissions performance assessment of residential micro-cogeneration systems with dynamic whole-building simulation program, Energy Conversion and Management, Vol. 50, pp. 648-667.
5. Peacock, A. D. and Newbrough, M., 2005, Impact of

- micro-CHP systems on domestic sector CO₂ emissions, *Applied Thermal Energy*, Vol. 25, pp. 2653-2676.
6. Voorspools, K. R. and D'haeseleer, W. D., 2002, The evaluation of small cogeneration for residential heating, *Int. J. Energy Research*, Vol. 26, pp. 1175-1190.
 7. De Paepe, M., D'Herdt, P., and Mertens, D., 2006, Micro-CHP systems for residential applications, *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, pp. 3435-3446.
 8. Lee, H. and Song, S., J., 2009, 1 kW class micro turbine development, *Proc. KSME Fall Annual Meeting*, pp. 2264-2268.
 9. Ashina, S. and Nakata, T., 2008, Energy-efficiency strategy in a residential sector in Japan, *Applied Energy*, Vol. 85, pp. 101-114.
 10. Im, Y. H., 2010, The development of operating indices for the cogeneration system in optimal operation aspects, *Proc. SAREK Winter Annual Meeting*, pp. 535-539.
 11. Ren, H. and Gao, W., 2010, Economic and environmental evaluation of micro CHP systems with different operating modes for residential buildings in Japan, *Energy and Buildings*, Vol. 42, pp. 853-861.
 12. Kim, K. S., Lee, S. W., and Kim, S. W., 2004, Development of micro-turbine for CHP, *Trans. KFMA*, Vol. 7, No. 3, pp. 88-91.
 13. Lee, T., Yoo, Y.-S., Park, J.-K., Yang S.-Y., and Oh, J.-Y., 2006, Operation performance of 1 kW class SOFC system, *Proc. KSME Fall Annual Meeting*, pp. 171-175.
 14. Choi, H. J., Park, S. J., Ha, M. H., Cha, I. S., Yoon, H. S., and Yoon, J. P., 2007, The characteristic of operating the cogeneration system of 1 kW PEMFC, *Proc. KIPE Fall Annual Meeting*, pp. 172-174.
 15. Ryu, S. and Kim S., 2011, An analysis on the optimal operation and economic feasibility of household fuelcell system for climate change, *Korean Energy Economic Review*, Vol. 10, No. 1, pp. 25-48.
 16. Choi, J., Park, B., Jung, D., Im, Y., Choi, Y., and Song D., 2009, The operation characteristics of domestic 1 kW gas fueled internal combustion engine cogeneration system, *Proc. SAREK Summer Annual Meeting*, pp. 321-324.
 17. Energy-heat conversion and carbon emission factor, <http://www.kemco.or.kr/>.
 18. KPX(Korea Power Exchange), Consumer electronics survey 2009, http://www.kpx.or.kr/newsletter/cover/sub_content.php?type=11&idx=2114.
 19. Public utility regulatory policies act of 1978 (PURPA), <http://energy.gov/oe/services/electricity-policy-coordination-and-implementation/other-regulatory-efforts/public>.