

건물용 연료전지 기반 하이브리드 제습냉방시스템 성능 및 에너지 절감 분석

인정현¹ · 이울호¹ · 강상규² · 박성진^{1,†}

¹홍익대학교 기계시스템디자인공학과 동력및에너지기술연구소, ²한국기계연구원 청정연료발전연구소

Analysis of Performance and Energy Saving of a SOFC-Based Hybrid Desiccant Cooling System

JUNGHYUN IN¹, YULHO LEE¹, SANGGYU KANG², SUNGJIN PARK^{1,†}

¹Power & Energy Science Laboratory, Mechanical Engineering, Hongik University, 94 Wowsan-ro, Mapo-gu, Seoul 04066, Korea

²Korea Institute of Machinery and Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

†Corresponding author :
parksj@hongik.ac.kr

Received 23 November, 2018
Revised 1 April, 2019
Accepted 30 April, 2019

Abstract >> A solid oxide fuel cell (SOFC) based hybrid desiccant cooling system model is developed to study the effect of fuel utilization rate of the SOFC on the reduction of energy consumption and CO₂ emission. The SOFC-based hybrid desiccant cooling system consists of an SOFC system and a Hybrid desiccant cooling system (HDCS). The SOFC system includes a stack and balance of plant (BOP), and HDCS. The HDCS consists of desiccant rotor, indirect evaporative cooler, electric heat pump (EHP), and heat exchangers. In this study, using energy load data of a commercial office building and SOFC-based HDCS model, the amount of ton of oil equivalent (TOE) and ton of CO₂ (tCO₂) are calculated and compared with the TOE and tCO₂ generation of the EHP using grid electricity.

Key words : Desiccant cooling(제습냉방), Waste heat of fuel cell(연료전지 폐열), System modeling(시스템 모델 개발), Indirect evaporative cooler(간접 증발 냉각기), Hybrid desiccant cooling(하이브리드 제습냉방), Ton of oil equivalent(석유환산톤), Ton of CO₂ (이산화탄소 배출량)

Nomenclature

COP	: Coefficient of performance	m	: Mass flow, kg/s
C _p	: Heat capacity, J/(kg·K)	Q	: Thermal power, kW
I	: Specific enthalpy, J/kg	T	: Temperature, °C
h	: Time (hour)	TOE	: Ton of oil equivalent, kcal
M	: Water mass in hot water tank	tCO ₂	: Ton of CO ₂ , tCO ₂
		W _{SOFC}	: Power generation of SOFC, kW
		W _{fuel}	: Low Heat Value of fuel, kW

W_{Saved} : Electric power saved by Hybrid Desiccant Cooling System compared to Electric Heat Pump Cooling System, kW

PAFC : Phosphoric Acid Fuel Cell
 PEMFC : Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell
 SOFC : Solid Oxide Fuel Cell

Greek symbols

ε : Effectiveness
 ω : Humidity ratio, kg/kg
 η : Efficiency

Subscripts

0 : Standard condition
 1, 2, etc. : State numbers
 cool : Cooling
 DR : Desiccant rotor
 deh : dehumidification
 dew : dew point temperature
 elec : Electricity
 fuel : Fuel consumption of SOFC
 h : Heat exchanger
 in : Inlet
 out : Outlet
 reg : Regeneration
 temp : Temperature
 water : Water in the hot water storage tank
 wb : Wet-bulb temperature

Abbreviation

AFC : Alkaline Fuel Cell
 BOP : Balance of Plant
 CHP : Combined Heat and Power
 EHP : Electric Heat Pump
 HDCS : Hybrid Desiccant Cooling System
 HWST : Hot water storage tank
 IEC : Indirect Evaporative Cooler
 MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell

1. 서론

한국의 전력사용량은 냉방기구 사용량이 많은 여름철과 난방기구 사용량이 많은 겨울철에 집중되어 있다. 이런 계절에 따른 전력사용량의 차이로 인해 전력수급 불균형이 발생하고 있다¹⁾. 전력이 부족한 상황이 발생하지 않기 위해서는 전력사용량이 최대인 여름과 겨울의 전력수요에 맞춰서 발전시스템을 구축해야 하며, 예비 전력을 추가로 준비해야 한다. 이런 과정에서 전력 수요가 낮을 경우에는 불필요한 전력을 생산하게 된다.

하절기 및 동절기 전력사용량 차이로 인한 전력수급 불균형을 해소하는 방안으로 열병합 발전시스템(combined heat and power, CHP)이 있다. 기존 열병합 발전시스템은 발전하고 나온 폐열을 이용하여 난방만을 수행하는데 이때 난방수요가 적은 하절기에는 사용할 수 없다. 따라서 발전과정에서 발생하는 폐열을 활용하여 냉방도 수행할 수 있도록 열구동 냉방시스템을 적용하면 냉방수요가 많은 하절기에도 폐열을 사용할 수 있다. 탄력적으로 에너지를 냉난방 수행에 사용하므로 시스템효율을 80% 이상으로 높일 수 있다²⁾.

또한 열병합 발전시스템 도입은 온실가스를 줄이는데도 효과적이다. 2030년 세계 온실가스 배출량은 65 GtCO₂에 이를 전망이며, 기온 상승을 2°C 미만으로 억제하기 위하여 2015년 파리협약에서 온실가스 감축목표를 수립하였다. 한국은 2020년까지 온실가스 배출전망치의 30%를 감축해야 한다³⁾. 이런 점에서 1990-2005년 유럽의 온실가스 감축 성과는 주목할 만하다. 유럽의 온실가스 배출 감소량에서 열병합 발전시스템이 15%로 3위를 차지할 만큼 상당한 온실가스 감축 효과를 보였다⁴⁾.

발전시스템 중 연료전지는 발전효율이 40-60%로 높고, 발전과정에서 유해한 배출물질이 없어 열병합

발전시스템으로 주목받고 있다. 연료전지는 전해질의 성분에 따라 크게 다섯 종류로 나눌 수 있다. 인산형 연료전지(PAFC), 고분자 전해질 연료전지(PEMFC), 알칼라인 연료전지(AFC), 용융 탄산염 연료전지(MCFC), 고체 산화물 연료전지(SOFC) 등이 있다. 그중 SOFC는 600-800°C 인 높은 작동온도로 인하여 고온의 폐열이 발생하며, 도시가스를 연료로 사용할 수 있어 열병합 발전시스템으로 이점을 갖는다.

열을 이용하는 냉방시스템은 크게 흡수식과 흡착식이 있으며, 흡착식 시스템도 액체 제습과 고체 제습냉방시스템으로 분류할 수 있다. 그중 하이브리드 제습냉방시스템(hybrid desiccant cooling system, HDCS)은 기존의 고체 제습냉방시스템의 부족한 냉방성능을 보완하기 위하여 현열교환기 대신 전기식 압축증발냉각기(electric heat pump, EHP)를 추가한 시스템이다. 재생에 필요한 열에너지가 부족할 경우에도 EHP의 용량을 늘려서 전력을 사용하여 냉방수요에 맞춰 냉방을 수행할 수 있다.

높은 발전효율과 유해한 배출물질이 없고, 발전과정에서 열구동 냉방에 적합한 양질의 폐열이 나오는 장점 등으로 인하여 연료전지의 폐열을 사용하는 열구동 냉방시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다⁵⁻⁸⁾. Jo과 Jeong⁵⁾은 PEMFC가 적용된 제습증발 냉각 공조시스템의 에너지 절감량을 분석하였으며, Malico 등⁶⁾은 병원의 에너지 부하 데이터를 사용하여 SOFC와 흡수식 냉방시스템으로 구성된 삼중열병합발전시스템을 설계하여 시스템의 경제성을 분석하였다. Medrano 등⁷⁾은 분산 발전 기술인 연료전지, 소형 터빈 발전, 태양광 패널과 흡수식 냉방시스템 통합시스템을 캘리포니아의 상업용 건물에 적용하여, 발전 기술 유형에 따른 경제성과 에너지 효율성을 분석하였다. Fong과 Lee⁸⁾는 습한 기후에 있는 고층 건물의 전기수요에 따른 흡수식 냉방을 사용한 SOFC 기반 삼중열병합 발전시스템 설계를 제안하였으며, 탄소배출량과 전력 사용량 감소를 분석하였다. 하지만 제습냉방시스템을 사용한 SOFC 기반 열병합 발전시스템의 연구는 충분히 이루어지지 않았으며, 한국의 건물 에너지 부하에서 연료전지 기반 열병합

발전시스템의 효율과 온실가스 감축 효과에 대한 연구가 더 필요하다.

본 논문에서는 10 kW SOFC의 운전 조건에 따른 HDCS의 에너지 사용량과 이산화탄소 배출량의 감소량을 분석하였다. HDCS의 성능을 분석하기 위하여 열역학적 모델을 개발하였으며, 10 kW급 SOFC 시스템 모델을 이용하여 SOFC의 폐열량에 따른 HDCS의 소비전력을 비교하였다. HDCS의 냉방용량에 적합한 국내 업무용 건물의 에너지 부하 데이터를 활용하여 10 kW SOFC를 사용하여 발전과 냉방을 수행하는 경우와 그리드의 전기를 사용하는 경우에 대하여 에너지 사용량과 이산화탄소 배출량을 산정하여 비교하였다.

2. 10 kW SOFC 기반 HDCS 모델링

10 kW SOFC 기반 HDCS는 Fig. 1과 같이 연료전에서 발전을 하고 남은 폐열을 온수탱크에 저장하며, 냉방수요가 발생할 때 HDCS에 공급한다.

시스템을 모델링을 하는 과정에서 다음과 같은 가정을 하였다. 1) 기하학적 조건이 없는 0-D 모델이다. 2) 시스템의 열역학적 결과 및 성능을 분석하기 위해 제습로터의 제습, 열전달 효율을 상수로 가정하였다. 3) 제습로터의 재생부와 제습부의 면적비는 1:1이라

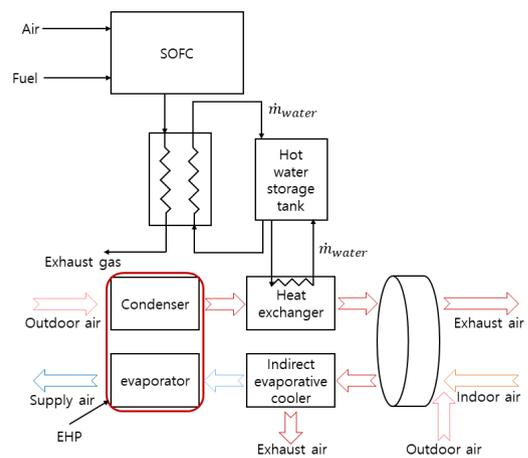


Fig. 1. Schematic of hybrid desiccant cooling system based solid oxide fuel cell

합 공기는 제습로터를 통과하면서 고온 저습해진다(② → ③). 고온 저습한 공기는 EHP의 증발기를 통해서 냉각된다(③ → ④). 간접 증발 냉각기를 통하여 냉각 후 실내로 공급되며, 습식 채널을 통과한 공기는 외부로 배출된다(④ → ⑤, ⑥). 외부공기는 EHP의 응축기를 통하여 1차 가열된 후(⑦ → ⑧) SOFC에서 나온 폐열을 이용하여 2차 가열된다(⑧ → ⑨). 가열된 공기는 제습로터를 재생시킨 후 외부로 배출된다(⑨ → ⑩).

간접증발 냉각기는 건조한 공기의 증발열을 이용한 냉각기로 증발된 물과 간접적으로 열교환하기 때문에 공급공기의 습도를 증가시키지 않고 냉각이 가능한 냉각기이다. Fig. 4에서 위쪽으로 뜨겁고 건조한 공기가 들어오면 오른쪽의 습하고 차가운 공기와 열교환을 통하여 냉각되는데 냉각된 건조한 공기의 일부분인 30%는 증발과정을 거치기 위하여 추기된다. 추기된 건조한 공기는 물이 증발되면서 냉각되고 여기서 냉각된 공기와 좌측의 뜨거운 공기가 냉각된다. 여기서 추기율에 따른 냉각 성능이 달라지는데 추기율이 너무 높으면 증발되는 물의 양은 많지만 공급공기의 양이 줄어 냉각능력이 감소하고 반대로 추기율이 너무 낮으면 증발되는 물의 양이 적어 냉각능력이 감소한다. 적절한 추기율은 Riangvilaikul과 Kumar¹⁰⁾의 결과를 따라 30%로 결정하였다. 간접 증발 냉각기의 출구온도는 Riangvilaikul과 Kumar¹⁰⁾의 실험식을 사용하였다. 간접 증발 냉각기의 출구온도는 식 (1)로 나타내었다.

$$T_{IEC,o} = 7.65 + 0.152 T_{IEC,i} + 681\omega_{IEC,i} \quad (1)$$

열교환기의 효율은 다음과 같이 나타낸다.

$$\epsilon_h = \frac{T_{Hot,out} - T_{Hot,in}}{T_{cold,in} - T_{Hot,in}} \quad (2)$$

제습로터는 온도차인 현열뿐만 아니라 습도 차이로 인한 잠열 열전달이 일어난다. 열교환과 제습이 동시에 일어나기 때문에 열교환 효율과 제습 효율로 나누어 정의하였다¹¹⁾. 제습로터의 열교환 효율은 열교환기의 효율과 같이 나타낼 수 있다. 제습로터의 제습 효율은 입구 공기의 절대습도와 이상적으로 제습되어 나간 출구 공기의 절대습도차 대비 입구 공기의 절대습도와 실제 제습로터에서 제습되어 나간 출구공기의 절대습도차로 나타낸다. 이상적인 제습로터는 공기를 완전히 제습하기 때문에 이상적인 출구 공기의 절대습도는 0으로 가정할 수 있다. 제습로터의 열교환 효율과 제습 효율은 식 (3)과 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_{DR, Temp.} = \frac{T_{DR,out} - T_{DR,in}}{T_{reg} - T_{DR,in}} \quad (3)$$

$$\epsilon_{DR, deh.} = \frac{\omega_{DR,in} - \omega_{DR,out}}{\omega_{DR,in} - \omega_{DR,ideal}} \quad (4)$$

여기서 EHP는 냉매는 R134a이며, 응축온도 60℃, 증발온도 10℃, 압축기 단열 효율 0.75로 가정하였다.

2.3 온수탱크 모델

SOFC에서 발생하는 열은 열교환기를 통하여 온수탱크에 저장된 온수의 온도를 높이게 된다. 온수탱크의 저장된 온수는 냉방수요가 발생한 경우 HDCS에 공급되어 재생공기와 열교환 후 다시 온수탱크로 저장된다. 온수탱크의 온도와 유량은 다음과 같이 나타낼 수 있다¹²⁾. 식 (5)에서 온수탱크의 온도 변화는 연료전지 시스템의 폐열과 제습로터의 재생에 사용

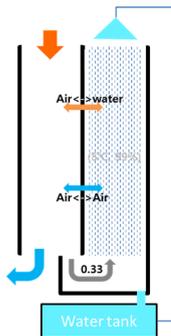


Fig. 4. Schematic of an indirect evaporative cooler

된 열량의 차로 나타낼 수 있다. 온수탱크의 유량은 재생열량과 온도차에 의하여 결정되며 식 (6)으로 나타내었다.

$$MC_p \frac{dT_{HWST}}{dt} = \dot{Q}_{SOFC} - \dot{Q}_{reg} \quad (5)$$

$$\dot{m}_{water} = \frac{\dot{Q}_{reg}}{C_p(T_{out} - T_{in})} \quad (6)$$

3. 시뮬레이션 조건

실내온도 27°C, 50%RH, 외부온도 35°C, 40%RH 인 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다. 연료전지는 24시간 운전되며, 연료전지에서 나오는 폐열은 온수 탱크에 저장된다. HDCS는 온수탱크의 저장된 열을 사용하여 8시간 가동한다고 가정하였다. 시뮬레이션 조건은 Table 1에 정리하였다.

제습로터의 재생온도는 60°C이며, 제습/재생 면적 비는 1:1로 하였다. 이 조건에 의하여 재생과 제습측의 공기의 풍량은 동일하게 된다. 간접 증발 냉각기의 추가비용은 30%로 가정하였다. 간접 증발 냉각기에서 30%의 유량이 외부로 배출되기 때문에 제습로터 제습부에서 실내 공기와 외부 공기를 70:30으로 혼합해서 유입한다. Hwang 등¹³⁾의 연구에서 전체 냉방용량 중 EHP의 비율이 30-40%를 차지할 때 최적 구성이므로 연료이용률 60%에서 EHP의 비율로 40%를 택하였다. 연료전지의 연료이용률에 따라서 폐열의 발생량이 변하므로 냉방용량을 일정하게 유지하기 위하여 EHP의 용량도 바뀌게 된다.

시스템에서 소비되는 에너지는 열량과 전력 두 가지이다. 재생열량은 제습로터를 재생하기 소비된 열량이다. 공기의 질량유량과 입구와 출구의 엔탈피 차이의 곱으로 계산되며 식 (7)로 나타낸다. 소비전력은 송풍기와 압축기에서 사용되며, 송풍기의 소비전력은 최대유량에서의 소비전력을 기준으로 공기 유량에 비례한다고 가정하였으며 식 (8)로 나타낸다. HDCS의 소비전력은 송풍기의 소비전력과 압축기의 소비전력의 합이므로, 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$Q_{reg} = \dot{m}_{air}(i_{out} - i_{in}) \quad (7)$$

$$W_{fan} = \frac{m_{air}}{m_{air,0}} W_0 \quad (8)$$

$$W_{elec} = W_{comp} + W_{fan} \quad (9)$$

냉방용량은 실내공기의 질량유량과 입구와 출구의 엔탈피 차이의 곱으로 계산된다. 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$Q_{cool} = \dot{m}_{air}(i_4 - i_1) \quad (10)$$

냉방시스템의 성적 계수는 소비전력과 재생열량을 포함한 총 사용에너지와 냉방용량의 비로 정의하며 식 (11)로 계산된다.

$$COP = \frac{Q_{cool}}{Q_{reg} + W_{elec}} \quad (11)$$

Table 1. System operation condition¹¹⁾

Desiccant rotor	Area fraction deh./reg.	1:1	
	Regeneration temp.	60°C	
	Heat exchange effectiveness	0.409	
	Dehumidification effectiveness	0.337	
Hot water tank	Water mass	4,000 kg	
	Water temp.	85-95.5°C	
Heat exchanger	Effectiveness	0.85	
Indirect evaporative cooler	Ext. ratio	0.3	
Fan	W_0	85 W	
	$m_{air,0}$	0.0676	
Heat pump	Refrigerant		R134a
	Evaporator	Evaporating temp.	10°C
	Condenser	Condensing temp.	60°C
	Compressor	Adiabatic eff.	0.75
SOFC system	Recycling ratio	0.66	
	Stack temp.	809°C	
	Fuel	Natural gas	

4. 시뮬레이션 결과

4.1 연료전지 운전 조건이 HDCS의 소비동력에 미치는 영향

연료전지 시스템의 재순환율 66%, 스택온도가 809°C일 때 연료이용률에 따른 폐열을 Table 2에 나타내었다. 연료전지 시스템에서 연료이용률이 증가

Table 2. Effect of fuel utilization on performance of 10 kW SOFC⁹⁾

Fuel utilization	0.55	0.6	0.65
System power (kW)	10.16	10.46	10.65
Efficiency	0.5474	0.5762	0.5944
Exhaust gas temperature (°C)	247.9	232.8	220.7
Fuel flow rate (kg/s)	0.0245	0.0231	0.0221
Waste heat (kW)	5.087	4.409	3.928

Table 3. Performance of hybrid desiccant cooling system

Air flow rate (kg/s)		0.279
Cooling capacity (kW)		14.89
Power consumption (kW)	Compressor	2.08
	Fan	1.00
	Total	3.08
Regeneration heat (kW)		12.3
COP		0.968
Power save (kW)		1.88
Power saving rate (%)		37.97

Operation condition: Indoor temp. 27°C, Relative hum. 50%
Outdoor temp. 35°C, Relative hum. 40%

Table 4. Effect of fuel utilization on performance of HDCS

Fuel utilization	Cooling capacity (kW)	Regeneration heat (kW)	Power consumption (kW)			Air flow rate (kg/s)
			Fan	Compressor	Total	
0.55	14.89	14.3	1.063	1.891	2.954	0.592
0.60	14.89	12.3	1.001	2.078	3.079	0.558
0.65	14.89	10.85	0.957	2.213	3.170	0.533

하면 전류밀도가 증가하여 시스템 효율과 출력은 증가하지만 버너에서 연소되는 연료가 적어지므로 폐열은 감소하게 된다. 연료이용률이 0.55에서 0.65로 증가할 때 시스템 출력은 10.16 kW에서 10.65 kW로 0.4 kW 증가하지만, 배기가스의 온도는 247.9°C에서 220.7°C로 감소하였으며 유량 또한 0.0245kg/s에서 0.0221 kg/s로 감소하였다. 이에 따라서 폐열은 5.087 kW에서 4.409 kW로 감소하였다.

연료이용률 60%에서의 HDCS의 성능을 Table 3에 나타내었다. 연료이용률 60%에서의 HDCS의 냉방용량은 14.89 kW이며 송풍기와 압축기의 소비전력은 3.08 kW이고, 온수탱크에서 공급받아 쓰는 폐열의 용량은 12.3 kW이다. COP가 3.0인 EHP의 소비동력과 비교하였을 때 1.88 kW가 감소하여 약 37.97%의 소비동력을 절감할 수 있다.

연료이용률에 따른 HDCS의 성능은 Table 4와 같다. 연료전지 시스템 모델에서의 연료이용률은 연료의 양을 제어하였다. 연료이용률을 제외한 스택의 운전조건을 동일하게 하기 위하여 공기의 유량제어를 통해 스택의 온도를 809°C로 일정하게 유지하였다. 냉방용량이 14.89 kW로 동일할 때 연료이용률의 증가에 따른 소비전력을 비교하였다. 연료이용률이 60%에서 55%로 감소하였을 때 소비전력은 3.079 kW에서 2.954 kW로 감소한다. 연료전지에서 나오는 폐열이 4.409 kW에서 5.087 kW로 증가하므로 HDCS가 사용할 수 있는 재생열량이 증가하였기 때문에 EHP 압축기의 소비동력을 줄였기 때문이다. 공기유량의 증가로 송풍기의 소비전력이 증가하지만, 전체 냉방용량에서 EHP의 비중이 감소하였기 때문에 압축기 소비동력의 감소량보다 작아 전체 소비전력은 감소한다. 반대로 연료이용률이 60%에서 65%

로 증가하면 연료전지의 폐열이 4.409 kW에서 3.928 kW로 감소하게 된다. 따라서 HDCS가 사용할 수 있는 폐열이 감소하므로 냉방용량을 유지하기 위해서는 EHP의 압축기 소비동력을 키워야 한다. 따라서 압축기 소비동력의 증가로 소비전력이 3.079 kW에서 3.170 kW로 증가한다. 공기유량의 감소로 송풍기 소비전력이 감소하지만, EHP의 압축기 소비동력 증가량에 비하여 작으므로 전체 소비동력은 증가한다. 제습냉방시스템에 소비된 열량과 전력을 합한 총 소비동력은 연료이용률이 증가할수록 감소한다. 연료이용률이 55%에서 65%로 증가하였을 때 소비동력은 17.25 kW에서 14.02 kW로 감소하였다. 연료이용률이 증가할수록 소비동력은 감소하지만 소비전력은 증가하므로 소비동력에서의 전력비중이 증가한다.

4.2 연료전지 운전 조건이 에너지 효율에 미치는 영향

연료전지 기반 HDCS의 열적 효율은 소비된 연료 대비 생산된 전기와 냉방용량으로 정의한다. 시스템에 필요한 에너지는 모두 연료전지에서 생산하고 발생된 전기와 열에너지의 일부를 이용하여 냉방을 하게 되므로 전체 시스템의 열효율은 투입된 연료에너지(저위발열량)와 발전된 전기와 냉방용량의 비로 나타낼 수 있다. 이는 식 (12)에 나타나 있으며, 연료전지는 24시간 운전되며, HDCS는 더운 낮 시간에 8시간 가동된다고 가정하였다¹⁴⁾.

$$\eta_{thermal} = \frac{W_{SOFC} \times 24h + Q_{cool} \times 8h}{W_{fuel} \times 24h} \quad (12)$$

연료이용률에 따른 시스템 열적 효율비교는 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 연료전지의 폐열을 HDCS에서 사용하여 냉방을 구동하면 약 27%의 효율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 연료이용률이 증가하면 연료전지의 출력 증가로 인하여 효율이 증가한다.

연료전지 기반 HDCS의 전기적 효율은 소비된 연료 대비 생산된 전기와 같은 냉방용량을 가진 EHP의 소비동력 대비 절감된 HDCS의 소비전력으로 정

의한다. 이때 EHP의 COP는 3.0으로 가정하였다. 연료전지는 24시간 운전되며, HDCS는 8시간 가동하므로 식 (13)으로 나타낼 수 있다.

$$\eta_{electrical} = \frac{W_{SOFC} \times 24h + W_{saved} \times 8h}{W_{fuel} \times 24h} \quad (13)$$

연료이용률에 따른 시스템 전기적 효율은 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 연료전지의 폐열을 HDCS에서 사용하여 냉방을 구동하면 약 3-4%의 효율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 연료이용률이 증가할수록 연료전지의 출력은 증가하지만 EHP 대비 절감된 소비전력은 HDCS의 소비전력 증가로 인하여 감소한다. 따라서 연료이용률이 증가하면 시스템의 전기적 효율은 증가하지만, 효율의 증가폭은 감소한다.

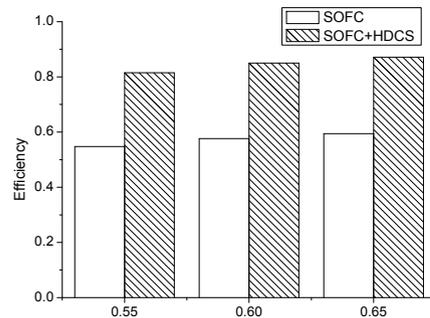


Fig. 5. Effect of fuel utilization on thermal efficiency

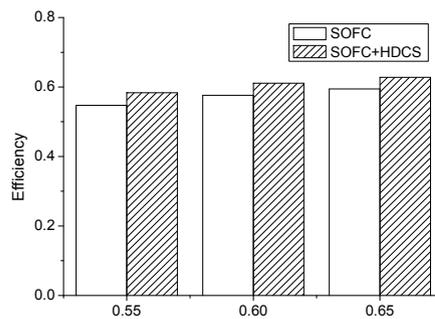


Fig. 6. Effect of fuel utilization on electrical efficiency

4.3 연료전지 사용 시와 그리드의 전기 사용 시의 에너지 사용량 및 이산화탄소 배출량 비교

냉방부하를 14.89 kW로 사용하는 업무용 건물의 면적은 384.75 m²이며, 해당 면적에서 업무용 건물의 1일 일반전력부하는 178.95 kWh이다¹⁵⁾. 연료전지를 24시간 구동하고, HDCS를 8시간 사용하므로 연료전지 기반 HDCS를 적용한 업무용 건물의 24시간 기준 소비전력과 잔여전력은 Table 5와 같다. 환산계수를 사용하여 업무용 건물의 전기와 냉방 부하에 따른 일반전기+HDCS 시스템과 연료전지+HDCS의 석유 환산톤(Toe)과 이산화탄소 배출량(tCO₂)을 비교하였다. 연료전지는 천연가스를 사용하므로 에너지를 LNG로, 그리드의 전기를 사용하는 경우는 소비기준, 잔여전력은 발전기준으로 계산하였다. 연료전지를 사용하는 경우, 발생하는 잔여전력은 전력그리드에 판매하는 경우로 가정하였다. 연료전지의 석유 환산톤(Toe)과 이산화탄소 배출량(tCO₂)은 식 (14) 과 식 (15)로 나타낼 수 있다. 계산 결과는 Fig. 7와 Fig. 8에 나타냈다.

$$TOE_{SOFC} = TOE_{LNG} - TOE_{residual} \quad (14)$$

$$tCO_{2_{SOFC}} = tCO_{2_{LNG}} - tCO_{2_{residual}} \quad (15)$$

연료전지의 연료이용률이 높아지면 폐열 감소를 보상하기 위한 EHP의 용량 증가로 HDCS의 소비전력이 증가하지만, 생산되는 전력의 증가량보다 작아 잔여전력이 증가한다. 그리드의 전기를 사용하는 경우는 석유환산톤과 이산화탄소 배출량은 증가량이

Table 5. Effect of fuel utilization on electric consumption and residual electricity of commercial office building in Korea¹⁵⁾

Fuel utilization	generated electricity (kWh)	Electric consumption (kWh)		Residual electricity (kWh)
		Building	HDCS	
0.55	243.84	178.95	23.63	41.26
0.60	251.04	178.95	24.63	47.46
0.65	255.60	178.95	25.36	51.29

작으므로 거의 일정하며, 연료전지를 사용하는 경우는 연료전지의 효율 증가에 따른 연료사용량 감소와 잔여전력 증가로 인하여 감소하였다. 석유환산톤과 이산화탄소 배출량은 연료이용률 55%에서 27.95%, 23.37%로, 연료이용률 65%에서는 36.17%, 31.96%로 감소하였다. 따라서 연료이용률이 증가할수록 에너지사용량과 이산화탄소 배출량 감소량이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

업무용 건물에 연료전지 기반 하이브리드 제습냉방시스템의 도입에 따른 에너지사용량과 이산화탄소 배출량 비교를 위하여 열역학적 모델을 개발하였다. 연료전지의 연료이용률에 따른 소비전력과 효율을 살펴보았으며, 연료전지를 사용하여 발전과 냉방을

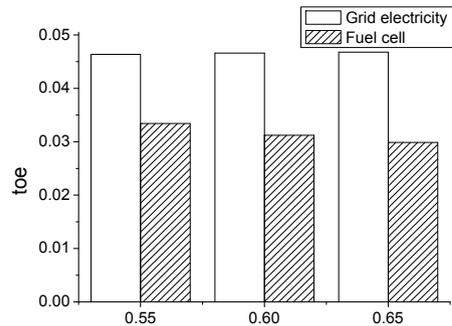


Fig. 7. TOE of both systems at different fuel utilization

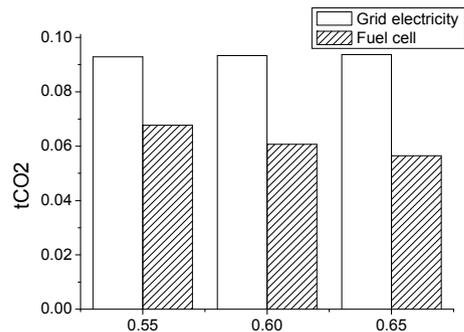


Fig. 8. tCO₂ of both systems at different fuel utilization

수행하는 경우와 그리드의 전기를 사용하는 경우에 대하여 에너지 사용량과 이산화탄소 배출량을 TOE와 tCO₂로 산정하여 비교하였다. 그 결론은 다음과 같다.

1) 연료이용률이 높아지면 제습냉방시스템에 소비된 열량과 전력을 합한 총 소비동력은 감소한다. 하지만 연료이용률이 증가할수록 연료전지의 폐열 감소로 인하여 소비전력이 증가하므로 소비동력에서의 소비전력의 비중이 증가한다.

2) 제습냉방시스템을 추가하였을 때 시스템의 열적 효율은 기존 연료전지의 발전 효율에서 약 27%가 증가하였으며, 전기적 효율은 약 3-4% 증가하였다. 연료이용률이 증가할수록 시스템의 열적 효율과 전기적 효율이 증가하지만, HDCS의 소비전력 증가로 인해 전기적 효율의 증가폭은 감소한다.

3) 연료전지를 사용하여 발전과 냉방을 수행하는 경우 그리드의 전기를 사용하는 경우보다 석유환산톤은 27.95-36.17%, tCO₂는 23.37-31.96% 감소하였다. 연료이용률이 증가할수록 연료전지의 잔여전력이 증가하여 석유환산톤과 tCO₂가 감소한다.

후 기

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국 에너지기술연구원(KIER)의 지원을 받은 “On-site 삼중열병합 건물에너지 네트워크용 차세대 고체산화물 연료전지 핵심원천기술 개발(No.2018M1A2A2040670)” 과제 일환으로 수행되었다.

References

1. S. W. Yoon, “Korea Energy Vision 2050”, WWF-korea, 2018.08. Retrieved from <https://www.wwfkorea.or.kr/?231250/energy-vision-2050>.
2. M. Iradi and S. Riffat, “Tri-generation system: Energy policies, prime movers, cooling technologies, configurations and operation strategies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 32, 2014, pp. 396-415, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.039>.
3. A. Körner, C. Tam, S. Bennett, and J. F. Gagné, “Technology Roadmap-Hydrogen and Fuel Cells”, OECD/IEA, France, 2015.
4. T. Kerr, “Combined heat and Power : Evaluating the benefits of greater global investment”, IEA Publication, France, 2008.
5. S. Y. Jo and J. W. Jeong, “Analysis of primary energy saving for PEM fuel cell with a liquid desiccant and evaporative cooling-assisted all outdoor air system”, *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, Vol. 9, No. 4, 2015, pp. 292-297. Retrieved from <http://www.dbpia.co.kr/Journal/ArticleDetail/NODE06519064>.
6. I. Malico, A. P. Carvalhinho, and J. Tenreiro, “Design of a trigeneration system using a high-temperature fuel cell”, *International Journal of Energy Research*, Vol. 33, No. 2, 2009, pp. 144-151, doi: <https://doi.org/10.1002/er.1430>.
7. M. Medrano, J. Brouwer, V. McDonell, J. Mauzey, and S. Samuelsen, “Integration of distributed generation systems into generic types of commercial buildings in California”, *Energy and Buildings*, Vol. 40, No. 4, 2008, pp. 537-548, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.04.005>.
8. K. F. Fong and C. K. Lee, “Investigation on zero grid-electricity design strategies of solid oxide fuel cell trigeneration system for high-rise building in hot and humid climate”, *Applied Energy*, Vol. 114, 2014, pp. 426-433, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.001>.
9. Y. Lee, C. Yang, C. Yang, S. Park, and S. Park, “Optimization of Operating Conditions for a 10 kW SOFC System”, *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 27, No. 1, 2016, pp. 49-62, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2016.27.1.049>.
10. B. Riangvilaikul, S. Kumar, “An experimental study of a novel dew point evaporative cooling system”, *Energy and Buildings*, Vol. 42, No. 5, 2010, pp. 637-644, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.034>.
11. M. Kanoğlu, M. Ö. Çarpınlioğlu, and M. Yıldırım, “Energy and exergy analyses of an experimental open-cycle desiccant cooling system”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, No. 5-6, 2004, pp. 919-932, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.10.003>.
12. S. D. Oh, K. Y. Kim, S. B. Oh, and H. Y. Kwak, “Optimal operation of a 1-kW PEMFC-based CHP system for residential applications”, *Applied Energy*, Vol. 95, 2012, pp. 93-101, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.019>.
13. W. B. Hwang, Y. C. Kim, and D. Y. Lee, “A Study on the Performance Evaluation of a Hybrid Desiccant Cooling System”, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 24, No. 2, 2012, pp. 121-128, doi: <https://doi.org/10.6110/KJACR.2012.24.2.121>.
14. Z. Yu, J. Han, X. Cao, W. Chen, and B. Zhang, “Analysis of

total energy system based on solid oxide fuel cell for combined cooling and power applications”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 35, No. 7, 2010, pp. 2703-2707, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.04.043>.

15. H. C. Park and M. Chung, “Building Energy Demand

Models for Offices in Korea”, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 29, No. 5, 2009, pp. 1-7. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/Journal/ArticleDetail/NODE01271249>.