

온실 냉난방을 위한 연료전지 기반 열병합 발전 시스템

박진영^{1†} · 뚜안앵¹ · 박승용¹ · 이동근¹ · 배용균¹ · 김영상^{1,2} · 이상민¹

¹한국기계연구원 무탄소연료발전연구실, ²과학기술연합대학원대학교 융합기계시스템 전공

Fuel Cell-based Cogeneration System for Greenhouse Cooling and Heating

JIN YOUNG PARK^{1†}, TUANANH BUI¹, SEUNGYONG PARK¹, DONGKEUN LEE¹, YONGGYUN BAE¹, YOUNGSANG KIM^{1,2}, SANG MIN LEE¹

¹Department of Zero-carbon Fuel and Power Generation, Korea Institute of Machinery & Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

²Department of Mechanical Engineering, University of Science and Technology, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

†Corresponding author :
zeragon@kimm.re.kr

Received 14 November, 2023
Revised 4 December, 2023
Accepted 8 December, 2023

Abstract >> This study proposes polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) based cogeneration system for greenhouse heating and cooling. The main scope of this study is to examine the proposed cogeneration system's suitability for the 660 m²-class greenhouse. A 25 kW PEMFC system generates electricity for two identical air-cooled heat pumps, each with a nominal heating capacity of 70 kW and a cooling capacity of 65 kW. Heat recovered from the fuel cell supports the heat pump, supplying hot water to the greenhouse. In cooling mode, the adsorption system provides cold water to the greenhouse using recovered heat from the fuel cell. As a result, the cogeneration system satisfies both heating and cooling capability, performing 175 and 145 kW, respectively.

Key words : Tri-generation system(3중 열병합 발전), Polymer electrolyte membrane fuel cell(고분자 전해질막 연료전지), Green house(온실), Thermal management (열관리)

1. 서론

파리협정에 따라 우리나라는 2030년까지 business as usual 대비 37%에 해당하는 온실가스를 저감하기로 하였다. 국내 농축산 부문의 온실가스 배출량은 2022년 기준 5백만 톤(잠정)으로 전환, 산업, 수송,

건물에 이어 5번째로 많다. 국내 농업 부문 최종 에너지 소비 현황을 살펴보면 직접적인 탄소 배출의 원인이 되는 유류 사용은 감소하는 반면 전력 사용은 증가하고 있다¹⁾. 다행히도 국내 농업 생산량이 가장 많은 호남 지방에는 이미 신재생에너지 보급이 활발히 이루어져 2021년 기준 신재생에너지 발전량

(7.6 GWh)이 판매량(5.5 GWh)을 초과하는 상황도 때때로 발생하고 있다.

이러한 배경에서 최근 수전해 수소 생산 및 저장 실증 사업들이 활발히 진행되고 있으며, 국내 신재생 에너지 트렌드에 발맞추어 농림축산식품부 산하 농촌진흥청에서는 ‘그린수소 기반 농업시설 에너지 공급 시스템 개발 및 실증 사업’을 진행하고 있다. 이는 향후 그린수소 공급 환경이 조성된다는 가정하에 수소에너지를 이용해 전기, 냉열 및 온열을 농업 시설에 공급하는 기술을 확보한다는 계획이다.

본 연구에서는 25 kW급 연료전지 시스템을 도입하여 수소에너지를 전기에너지로 변환시키고 공기열원 히트펌프를 구동시켜 온열 및 냉열을 생산하는 시스템을 소개하고자 한다. 제안하는 시스템의 핵심 부품인 연료전지는 작동 온도, 전해질, 전달이온 등에 따라 크게 5가지 타입(용융탄산염, 고체산화물, 인산염, 알칼리, 고분자 전해질막)이 있으나, 본 연구에서 고려한 고분자 전해질막 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)는 60-80°C 사이의 저온 운전 및 시동 정지 용이성 등의 장점을 기반으로 전 세계적으로 가장 널리 보급된 것이 특징이다. 대표적으로 차량용 및 발전용으로 가장 많이 보급되어 있으며, 물 이외에는 환경오염 물질을 배출하지 않기 때문에 친환경 발전 장치로 인정받고 있다.

연료전지는 발전 과정에서 열이 발생하는데, 이 배열을 활용하여 온열을 확보하거나 흡착식 냉동기 및 히트펌프와 연계하여 추가적인 냉열을 발생시킬 수 있다²⁾. 본 연구에서는 연료전지, 공기열원 히트펌프, 흡착식 냉동기 및 히트펌프로 구성된 수소 연료전지 기반 열병합 발전 시스템을 제안하였다. 열병합 발전 시스템은 대상 농업 시설인 200평 규모의 반밀폐형 온실(Fig. 1) 적용에 적합한지 여부를 최대 냉난방 부하 기준으로 검토하였고, 외부 전력으로부터의 자립 가능 여부, 냉난방 효율 및 추가 전력 사용량을 계산하였다.

2. 시스템 구성 및 운전 조건

2.1 시스템 구성 및 운전 조건

열병합 발전 시스템의 구성 및 냉난방 모드에서의 열 흐름도는 Fig. 2와 같다. 25 kW급 연료전지는 Fig. 3과 같이 10 kW급 도시가스 연료전지 2기와 5 kW급 수소 연료전지로 구성된다. 연료전지는 주 히트펌프(main heat pump) 및 승온용 히트펌프(sub-heat pump)에 전력을 공급한다. 냉난방 설비의 필요 전력이 발전량보다 작을 경우, 온실 및 외부 전력망에 전력을 공급한다. 30톤 규모의 주 대형 축열조에는 온열 및 냉열이 축적되고 직접적으로 온실에서 필요로 하는 온열 및 냉열을 공급한다. 난방 모드에서 대형 축열조는 공기열원 히트펌프 및 연료전지 배열을 활용하



Fig. 1. Green house for demonstration in Jeonju

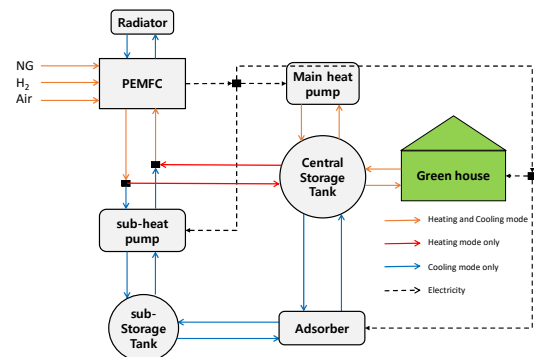


Fig. 2. Schematic diagram of cogeneration system

여 약 40-50°C 사이의 온도를 유지한다. 냉방 모드에서 대형 축열조는 공기열원 히트펌프 및 흡착식 냉방기로부터 냉열을 공급받아 8-10°C 사이의 온도를 유지한다. 이때 50°C의 연료전지 배열은 승온용 히트펌프를 거쳐 70°C 이상으로 승온되고, 0.5 톤급 부축열조를 거쳐 온수가 축적된다. 흡착식 냉방기는 온열을 활용해 냉열을 생산한다.

시스템 구성품에 대한 정보 및 운전 조건은 Table 1과 같다. 두 가지 타입 연료전지 모두 활성화 면적은 400 cm², 운전점은 0.4 A/cm², 셀 전압 0.7 V, 작동 온도는 65°C로 설정하였다. 이는 일반적으로 알려진 발전용 연료전지의 최대 출력 운전 범위와 유사하다. 수소 연료전지의 경우 별도의 개질이 필요하지 않은 점을 고려하여 50%의 발전 효율을 산정하였고, 도시가스 연료전지의 경우 개질기의 탑재를 고려하여 40% 효율을 산정하였다.

연료전지에서 발생한 전기는 공기열원 히트펌프 구동에 이용되며, 공기열원 히트펌프는 농업 시설에 공급될 온수 및 냉수를 직접적으로 생산하는 장치이다. 본 연구에서는 냉각 65 kW급, 가열 70 kW급 공랭식 인버터스크롤 타입의 공기열원 히트펌프 (ACHH020LET; LG Electronics, Seoul, Korea) 2대 도입을 고려하였다. 제품의 냉난방 성능계수는 각각 3.2 및 3.1이다.

연료전지에서 발생하는 배열을 활용해 냉열을 생산하기 위해 17 kW급 흡착식 냉동기의 도입을 고려

하였다. 흡착식 냉동기는 제올라이트 및 metal organic framework 흡착제를 이용하여 70°C의 저온 열원으로도 냉수를 생산할 수 있는 장치이며, 삼중테크에서 개발한 흡착식 냉동기(SAU-AD005P; Seoul, Korea)를 고려하였다. 제품의 성능계수는 0.51 수준이다³⁾.

2.2 승온용 히트펌프

상용 연료전지 제품의 배열 온도가 대부분 55°C 미만이다. 이는 연료전지의 열화를 지연시키면서도 성능을 확보할 수 있는 운전 온도가 65°C 수준이며, 열교환을 통해 회수할 수 있는 온도에 제약이 있기 때문이다. 다만, 70°C 미만의 온수로는 흡착식 냉방기의 성능을 확보할 수 없는 점을 고려하여 저온 열원의 온도를 효과적으로 올릴 수 있도록 승온용 히트펌프(부 히트펌프)를 개발하였다. 관련 배경 사항은 선행 연구⁴⁾에서 자세히 다루었다. Fig. 4는 승온용 히트펌프의 성능 그래프이다. 저온 열원은 연료전

Table 1. Component specification and working conditions

Component	Parameter	Value
NG fueled PEMFC system	Active cell area (cm ²)	400
	Number of cells	100
	Current density (A/cm ²)	0.4
	Cell voltage (V)	0.7
	Working temperature (°C)	65
	System net electrical efficiency (%)	40
Hydrogen fueled PEMFC system	Active cell area (cm ²)	400
	Number of cells	50
	Current density (A/cm ²)	0.4
	Cell Voltage (V)	0.7
	Working temperature (°C)	65
	System net electrical efficiency (%)	50
Air cooled scroll chiller	Cooling Capacity (kW)	65.0
	Heating Capacity (kW)	70.0
	Cooling COP (-)	3.2
	Heating COP (-)	3.1
Adsorption chiller	Cooling Capacity (kW)	17
	Cooling COP (-)	0.51

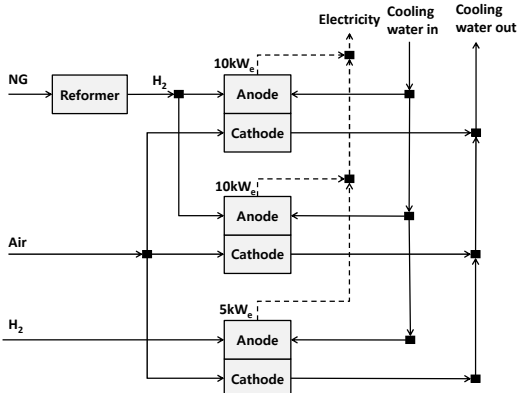


Fig. 3. Schematic diagram of 25 kW PEMFC system

지 배열과 동등한 50°C, 고온부는 2차 유체가 승온되어 약 70°C를 유지하도록 조작하며 투입된 전력 대비 성능(coefficient of performance, COP) 및 열량을 측정하였다.

2.3 적정 냉난방 설계 용량

200평 규모의 반밀폐형 온실의 적정 설계 용량 산정 결과는 선행 연구에서 차용하였다^{5,6)}. 기존의 연구에서는 2012-2021년 동안의 최대 냉난방 부하 평균값을 분석하고, 관류 열손실 등을 고려하였다. 결론적으로, 최근 5년 냉난방 최대 부하 평균값의 80% 수준인 난방 용량 449,578 kJ/h 및 냉방 용량 431,187 kJ/h를 제시하였으며, 이는 각각 124.88, 119.77 kW에 대응하는 난방 및 냉방 용량이다.

3. 검토 결과

3.1 난방 모드

연료전지 열병합 시스템으로 대응할 수 있는 난방 부하 능력에 따른 성능 및 추가 전력 사용량을 Fig. 5에 나타내었다. 난방 부하가 35 kW 미만인 경우 연료전지 배열만으로도 대응 가능하며, 연료전지에서 발생하는 전력(25 kW)은 모두 온실 및 외부로 전송 가능하다. 난방 부하가 35 kW를 초과하는 순간부터

는 주 히트펌프를 이용한 온수 생산이 필요하며, 열병합 시스템의 난방효율계수는 점차 감소한다.

연료전지 시스템의 발전량이 모두 주 히트펌프에 쓰일 때, 즉 외부의 추가 전력 공급 없이 대응 가능한 난방 부하는 112.5 kW이며, 시스템 난방효율계수는 4.50이다. 이후 난방 부하가 증가함에 따라 필요한 주 히트펌프 전력은 외부에서 공급되어야 한다. 2.3 절에 제시된 적정 최대 난방 용량(약 125 kW)을 만족시키기 위해서는 4.03 kW의 추가 전력이 외부로부터 공급되어야 한다. 또한, 20.16 kW의 추가 전력을 공급받을 때 열병합 시스템은 최대 175 kW의 난방 부하를 제공할 수 있으며, 이때 난방효율계수는 3.88이다.

3.2 냉방 모드

연료전지 열병합 시스템으로 대응할 수 있는 냉방 부하 능력에 따른 성능 및 추가 전력 사용량을 Fig. 6에 나타내었다. 냉방 부하가 27.2 kW 미만인 경우 연료전지 배열을 승온하여 흡착식 냉방기에 투입하고 냉수를 생산하는 것이 계산상으로는 높은 효율을 보였다. 이는 흡착식 냉방기의 효율(0.51)과 승온용 히트펌프의 효율(6.41)을 곱하여 주 히트펌프의 효율(3.2)보다 높은 구간이 존재하기 때문이다. 냉방 부하가 27.2 kW 이후 구간부터 최대 냉방 부하인 130 kW까지는 주 히트펌프만을 사용하여 효율이 3.2로

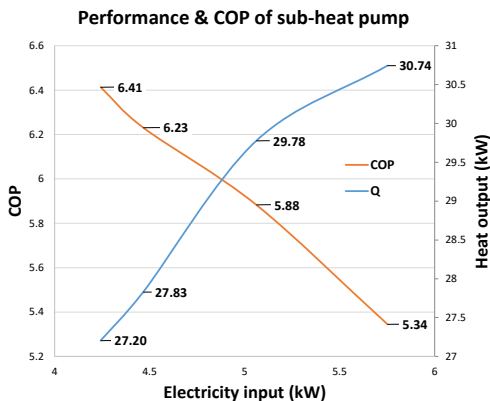


Fig. 4. Sub-heat pump performance and COP

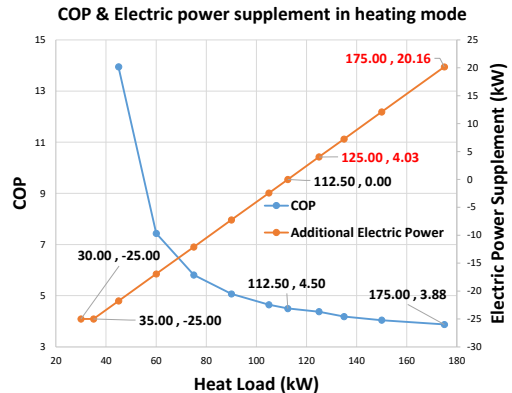


Fig. 5. Cogeneration system COP in heating mode

동일한 수준을 유지한다.

130 kW 이후 구간에서는 흡착식 냉방기를 이용한 냉수 생산이 필요하며 외부 전력 20.16 kW를 투입하여 최대 145.76 kW의 냉열 생산이 가능하다. 흡착식 히트펌프에 공급되는 온수 열량은 승온용 히트펌프의 최대 용량(30.74 kW)에 따라 제한되기 때문에 최대 냉열 생산 능력(17 kW)보다 작은 냉동 능력을 받

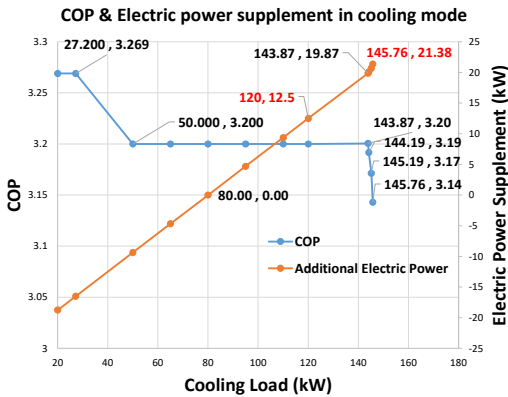


Fig. 6. Cogeneration system COP in cooling mode

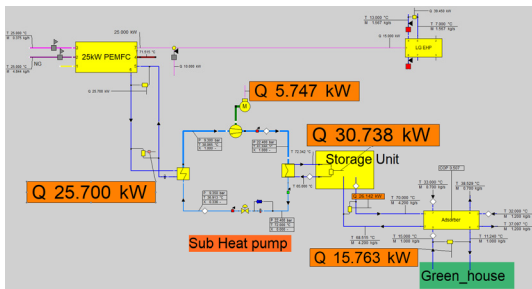


Fig. 7. System analysis at maximum cooling mode

휘한다. 때문에 시스템 전체 COP는 승온용 히트펌프의 효율이 감소함에 따라 소폭 감소하는 경향을 띤다. Fig. 7은 EBSILON Professional 공정 해석 소프트웨어(Iqony, Essen, Germany)를 이용해 최대 냉방 부하에서 열병합 시스템을 해석한 결과이다. 승온용 히트펌프는 연료전지로부터 25.7 kW의 온수를 받고, 5.75 kW의 전력을 사용하여 0.5톤의 부 축열조에 70°C의 온수 30.74 kW를 공급한다. 흡착식 냉방기를 이를 이용해 냉수 15.76 kW를 생산한다.

연료전지 시스템의 발전량이 모두 주 히트펌프에 쓰일 때, 즉 외부의 추가 전력 공급 없이 대응 가능한 최대 냉방 부하는 80 kW이다. 2.3절의 적정 최대 냉난방 용량(약 120 kW)을 만족시키기 위해서는 외부로부터 12.5 kW의 추가 전력 공급이 필요하다.

냉방 및 난방 모드에서의 에너지 자립, 적정 용량 및 최대 용량에 대한 성능계수 및 외부 전력 필요량을 Table 2와 같이 정리할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 25 kW급 PEMFC 시스템 기반 열병합 발전 시스템을 제안하고, 전주 덕진구에 위치한 200평 규모의 반밀폐형 플라스틱 필름 온실에 적용 가능성 여부를 검토하였다. 온실에 적정 난방 및 냉방 용량은 각각 125, 120 kW이며, 4 kW 내외의 외부 전력망의 보조를 받아 제안한 시스템으로 대응 가능함을 확인하였다. 시스템의 최대 난방 및 냉방 용량은 각각 175, 145.76 kW로, 45, 25 kW 이상의 설계 용량상 여유가 있음을 확인하였다.

Table 2. Component specification and working conditions

Mode	Load(kW)	Additional Electric Power (kW)	COP
Heating	112.5 (Energy Independence)	0	4.50
	125 (Recommended)	4.03	4.38
	175 (Maximum)	20.16	3.88
Cooling	80 (Energy Independence)	0	3.20
	120 (Recommended)	12.5	3.20
	145.76 (Maximum)	21.38	3.14

후 기

본 연구는 농촌진흥청의 농업과학기술 연구 개발 사업(No. PJ016288, 수소연료전지 3중 열병합 시스템 농업모델 개발)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

1. G. H. Kim, J. G. You, and Y. J. Jang, "Final energy consumption in the agricultural sector and future challenges", National Assembly Research Service, 2021. Retrieved from <https://www.nars.go.kr/report/view.do?cmsCode=CM0155&brdSeq=36390>.
2. J. D. Ahn, K. Y. Lee, and S. H. Seo, "Economic analysis study on the R&D effect of performance improvement of the tri-generation fuel cell system", *New & Renewable Energy*, Vol. 18, No. 2, 2022, pp. 26-39, doi: <https://doi.org/10.7849/ksnre.2022.0011>.
3. S. M. Woo, S. Y. Lee, D. H. Kim, and H. S. Kim, "Study on the development of low temperature water driven adsorption chiller", 2020 Summer Annual Conference, Vol. 2020, No. 6, pp. 1016-1019. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10513464>.
4. T. Bui, Y. S. Kim, D. K. Lee, and K. Y. Ahn, "PEMFC based cogeneration system using heat pump", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 32, No. 5, 2021, pp. 324-330, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2021.32.5.324>.
5. S. H. Lee, R. W. Kim, C. M. Kim, H. W. Seok, and S. Yoon, "Optimal capacity determination of hydrogen fuel cell technology based trigeneration system and prediction of semi-closed greenhouse dynamic energy loads using building energy simulation", *Journal of Bio-Environment Control*, Vol. 32, No. 3, 2023, pp. 181-189, doi: <https://doi.org/10.12791/KSBEC.2023.32.3.181>.
6. T. Bui, Y. S. Kim, D. K. Lee, K. Y. Ahn, and S. M. Lee, "Tri-generation system configuration selection based on energy and exergy analyses", *Energies*, Vol. 15, No. 21, 2022, pp. 7958, doi: <https://doi.org/10.3390/en15217958>.