

연료전지 기반 시설원예용 삼중 열병합 시스템 운전 전략

두안앵¹ · 박진영^{1†} · 이동근¹ · 배용균¹ · 김영상^{1,2} · 이상민³

¹한국기계연구원 무탄소발전연구소, ²과학기술연합대학원대학교 융합기계시스템전공, ³한국기계연구원 도시환경연구소

Fuel Cell-based Tri-generation System Operating Strategy for Horticulture

TUANANH BUI¹, JIN YOUNG PARK^{1†}, DONGKEUN LEE¹, YONGGYUN BAE¹, YOUNGSANG KIM^{1,2}, SANG MIN LEE³

¹Department of Carbon-free Power Generation, Korea Institute of Machinery & Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

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

³Department of Urban Environment, Korea Institute of Machinery & Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34103, Korea

[†]Corresponding author :
zeragon@kimm.re.kr

Received 31 October, 2024
Revised 20 November, 2024
Accepted 3 December, 2024

Abstract >> This study proposes operating strategy of 25 kW fuel cell based tri-generation system for horticulture. Firstly, typical summer and winter out door temperature, target control temperature and required heating and cooling load information are suggested. Secondly, thermal energy generation rate of an electrical heat pump (EHP), an adsorption chiller and the fuel cell are shown in 24 hours time domain. The fuel cell and the EHP should mainly be operated at different time bands of the day. Lastly, system's behavior change under fuel cell 30% degraded state is analyzed. Suggested system seems to compensate electrical efficiency decrement from the degradation.

Key words : Tri-generation system(삼중 열병합 발전), Polymer electrolyte membrane fuel cell(고분자 전해질막 연료전지), Horticulture(시설원예), Thermal management(열관리), Optimization(최적화)

1. 서론

지구온난화를 막기 위한 탄소 감축 공감대가 이루어지며 대한민국은 전 세계에서 14번째로 탄소중립 비전을 법제화하였다. 장기적으로는 2050년까지 탄소중립을 달성하고, 단기적으로는 2030년까지 국가 온실가스를 2018년 배출량 대비 40% 감축하는 것이 현재 목표이다. 국내 농축수산 부문에서도 탄소 감

축에 대한 노력이 꾸준히 이루어지고 있다. 국내 농축수산 부문의 온실가스 배출량은 2023년 기준 25.0백만 톤(잠정)으로 국내 총 배출량의 4%가량을 차지하고 있다. 다만 타 부문(전환, 산업, 건물, 수송, 폐기물, 탈루)은 2018년 대비 온실가스 배출량을 감축한 것에 반해 농축수산 부문은 오히려 배출량이 증가하며(2018년 24.7백만 톤) 탄소 감축 기술 개발에 대한 필요성이 더욱 증가하고 있는 상황이다.

이러한 배경에서 최근 농축수산 분야에서도 무탄소 연료를 활용하는 그린수소 기반 농업시설 에너지 공급 시스템 개발 및 실증 사업이 진행되고 있다. 향후 10년 이내에 태양열 및 풍력발전을 통해 초과 전력 수요가 발생하고 그린수소를 생산 및 공급할 수 있는 환경이 조성된다는 판단하에 수소에너지를 이용하여 전기, 냉열 및 온열을 농업시설에 공급하는 기술을 선행 확보한다는 계획이다.

위 사업의 지원을 받은 선행 연구에서는 25 kW 연료전지 시스템, 공기열원 히트펌프 및 흡착식 냉방기가 연계된 열병합 발전 시스템을 제안하였고 200평 규모 반밀폐형 온실 냉난방 부하 대응 적합성 여부를 중점적으로 평가하였다^{1,2)}. 본 연구에서는 열병합 발전 시스템의 냉난방 운전 전략을 제안하고 평가하고자 한다. 평가 대상이 되는 시스템은 Fig. 1과 같이 전주 농촌진흥청 내 첨단디지털온실부지 설비실 내에서 2025년 1년간 운용되며 수소에너지를 가스 저장실로부터 공급받아 200평 규모 반밀폐형 온실의 난방 및 냉방 에너지를 공급하도록 설계되었다.

제안하는 시스템의 핵심 부품인 연료전지는 전해질 막의 종류에 따라 크게 5가지 타입(용융탄산염, 고체산화물, 인산염, 알칼리, 고분자 전해질막)이 있으며 본 연구에서는 고분자 전해질막 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)를 도입하였다. PEMFC는 65°C의 저온 운전이 가능한 동시에 시동 정지를 용이하게 할 수 있으며 발전 과정에서 발

생하는 배열을 온실 난방에 이용할 수 있다^{3,4)}.

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. 냉온수를 생산하는 주요 장치는 공기열원 전기 히트펌프(electrical heat pump, EHP)이며 본 연구에서는 냉각 65 kW급, 가열 70 kW급 공랭식 인버터스크롤 타입의 EHP (ACHH020LET; LG Electronics, Seoul, Korea) 2대 사용을 가정하였다. 다만 실제 운용에서는 외기온에 따른 EHP의 냉난방 열효율계수(coefficient of performance, COP)의 차이가 있음을 감안하여 외기온 T (°C)를 변수로 하는 COP를 다음의 식 (1) 및 식 (2)와 같이 가정하였다⁵⁾.

$$\text{Heating COP} = 3.3584 + 0.1166 T + 0.0008 T^2 \quad (1)$$

$$\text{Cooling COP} = 4.385 - 0.0467 T - 0.0005 T^2 \quad (2)$$

25 kW급 연료전지(fuel cell, FC)는 설비실 및 온실에 필요한 전력을 생산 및 공급하며 45-50°C의 배열을 생산한다. 그림상에서 배터리는 온실 보광 및 제어를 위하여 시간당 평균 3 kWh의 전력이 소비되는 것을 표현하였다. 연료전지는 50%, 75%, 100% 전력 부하 조건에서 각각 56.4%, 53.85, 51.9%의 전기 효율을 가지며 on/off 운전만을 고려하였다. 흡착식 냉방기(adsorption chiller)는 70-75°C의 저온 열원으로 냉수를 생산하는 장치이며 본 연구에서는 17 kW급 냉열 생산 능력을 가정하였다. 승온용 맞춤형 히트펌프(designed heat pump)는 연료전지 배열을 COP 5 이상의 조건에서 효과적으로 승온시켜 흡착식 냉방기를 운전하기 위하여 도입하였으며 관련 내용은 선행 연구에서 자세히 다루었다¹⁾.

겨울철에는 EHP를 효율이 좋은 낮 시간대에 운전하여 축열 및 소비하고 추가적으로 연료전지의 배열을 활용하여 200평 온실에 난방수를 공급한다. 여름철에는 EHP 효율이 좋은 밤 시간대에 운전하여 축

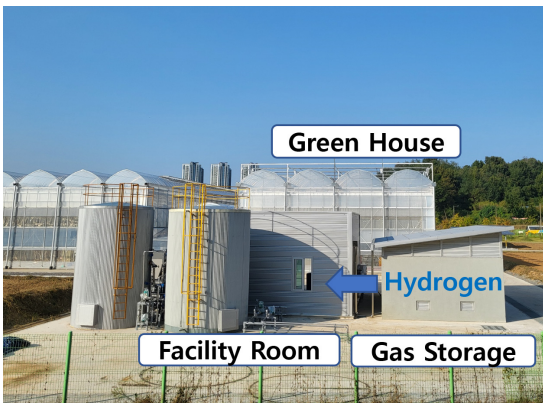


Fig. 1. Hydrogen fuel cell test bed in Jeonju

열 및 소비하고 흡착식 냉방기를 활용하여 200평 온실에 냉방수를 공급한다. 이때 흡착식 냉방기는 연료전지 배열은 열원으로 하되 연료전지 배열은 낮은 온도를 높이기 위하여 COP 5 이상의 승온용 맞춤형 히트펌프로 승온시켜 사용한다.

본 논문에서는 선행 연구와 같이 Epsilon 공정해석 프로그램(Iqony, Essen, Germany)을 이용하여 시스템을 모델링하고 분석하였다¹⁾. 개별 컴포넌트의 성능은 연료전지의 경우 KGS 인증이 끝난 개발품의 성능 결과값을 차용하였으며 승온용 히트펌프와 흡착식 냉방기는 선행 연구에서 제시된 실험 결과들을 사용하였다. 공기열원 히트펌프는 식 (1)과 식 (2)의 값을 차용하였다.

2.2 온실 제어

실증처의 일간 기온, 온실 제어 온도 및 대응 냉난방 용량을 Fig. 3에 나타내었다. 여름철과 겨울철 일간 대표 온도(normal hot/cold day temperature)는 최근 5년 전주 지역 날씨 데이터를 바탕으로 산출하였다. 일간 온실 온도 제어(normal hot/cold control temperature)는 토마토의 재배 실증 온도에 맞추어 설정하였다. 일간 냉난방 수요 peak를 분산시키고자 냉온수용 30톤 축열조를 각각 구비하였으며 내부 온

도는 각각 10-15°C 및 40-50°C를 유지하며 축열/방열 운전된다. 이때 필요한 냉방 및 난방 에너지는 TRYNYSYS 프로그램(Thermal Energy System Specialists, LLC, Madison, WI, USA)을 이용하여 산출하였으며 열에너지 생산 및 공급 과정에서 외기온과의 열온도차를 감안하여 손실분 5-10%를 반영하였다.

겨울철 일간 기온은 일출 전 최저이며(영하 4.1°C) 오후 2시경 제일 높다(영상 5.5°C). 이때 온실 내부 온도는 15-20°C 범위 내에서 제어되도록 열병합 발전 시스템이 온열을 생성한다. 온열은 일출 전 6-8시경 시간당 49.4 kWh 수준으로 필요하며 오후 2-3시경에는 수요가 37.5 kWh 수준으로 제일 낮다. 이러한 에너지 수요 패턴은 재배 작물과 지역별 날씨에 따라 다르게 산출될 수 있다.

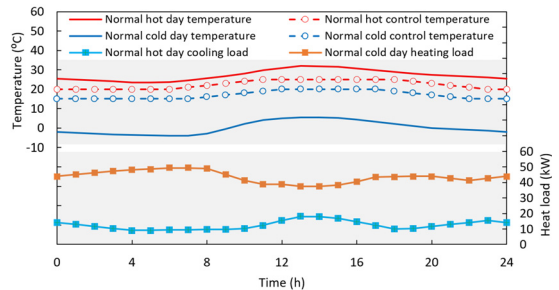


Fig. 3. Typical hot and cold day temperature and corresponding heating and cooling load in greenhouse

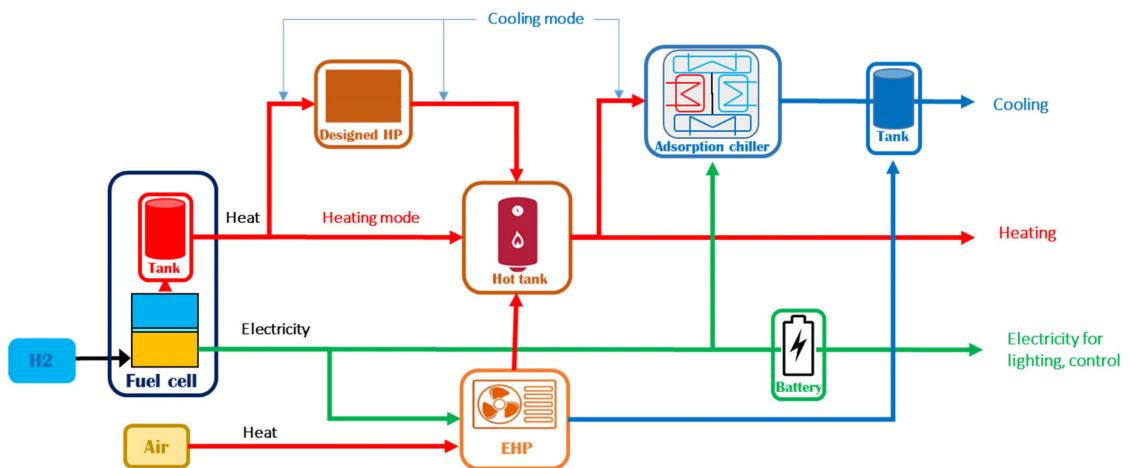


Fig. 2. Schematic diagram of tri-generation system for horticulture

여름철 일간 기온 역시 일출 전 제일 낮고(23.5°C) 오후 2시경 제일 높다(32°C). 이때 온실 내부 온도는 20-25°C 범위 내에서 제어되도록 열병합 발전 시스템이 냉열을 생성한다. 냉열은 온열과 반대로 오후 2시경 시간당 18.1 kWh 수준으로 가장 많이 필요하며 새벽 4시경 9.1 kWh 수준으로 가장 적게 필요하다.

전지를 운전하였다. 이때 연료전지 발전 용량에 따른 효과를 관찰하기 위하여 각각 100%, 75%, 50%의 발전 조건에서 수요에 따라 on/off하는 조건에서 운전 전략을 비교하였다. 일간 필요 에너지 수요 및 조건 별 각 기기의 냉열/온열에너지 생산량은 Table 1과 같이 정리하여 나타내었다.

3. 결 과

3.1 운전 전략

실제 시설원에 운전이 있어 가장 큰 관심사는 운영 비용이다. 따라서 1차적으로는 온실 냉난방 수요에 대응하는 주 기기인 EHP의 COP가 극대화되는 시간대에 주로 EHP를 운전하며 일간 총 전력 사용량을 줄이는 운전 전략을 수립하였다. 2차적으로는 무탄소 연료로부터 얻은 전기에너지, 즉 연료전지 일간 발전량이 일간 전력 사용량을 상쇄하는 조건에서 연료

3.2 난방 모드

겨울철 온열 생산 조건에서 EHP의 성능은 외기온이 높을수록 유리하다. 식 (1)을 참고하여 외기온이 높은 주간에 EHP를 주로 운전하며 축열하고 반대로 외기온의 영향을 거의 받지 않는 연료전지는 야간에 운전하며 배열을 생산하는 것이 경제적인 관점에서 유리하다. 그 결과 Fig. 4에서 외기온과 EHP에서 생산하는 온열의 일간 그래프 양상이 유사한 것을 확인할 수 있다. 주간 13-18시경에 초과 생산한 온열을 축열 후 야간에 사용한다. Fig. 4에서 FC heat와 EHP

Table 1. Energy generation of each component during the normal cold and normal hot day

Mode	Unit	Normal cold day			Normal hot day		
		Fuel cell 100% load	Fuel cell 75% load	Fuel cell 50% load	Fuel cell 100% load	Fuel cell 75% load	Fuel cell 50% load
Heat load/cooling power load	kWh	1047.8			298.3		
Fuel cell operating time	Hrs.	12.1	16.4	24	7.2	9.6	14.4
Net heat generated	kWh	1,049.3	1,047.8	994.6	178.6	164.2	146.1
By fuel cell + designed HP		280.9	264.1	231.5	198.1	183.2	164.6
By EHP	kWh	813.9	829.2	806.9	-	-	-
Heat loss	kWh	45.5	45.5	43.8	19.5	19.0	18.5
Net cooling power generated	kWh	-	-	-	298.5	298.5	298.5
By adsorption chiller	kWh	-	-	-	89	82	73.1
By EHP	kWh	-	-	-	213.8	220.8	229.7
Cooling loss	kWh	-	-	-	4.3	4.3	4.3
Electricity generated	kWh	302.5	307.5	300.0	180.0	180.0	180.0
Electricity consumed	kWh	302.5	307.5	300	180	180	180
By lighting, monitoring,controlling	kWh	72	72	72	72	72	72
By EHP		230.5	235.5	228	76	78.5	81.5
By designed HP		-	-	-	31	28.6	25.7
By adsorption chiller	kWh	-	-	-	1	0.9	0.8

heat의 일간 총합은 heat load와 일치한다.

연료전지 발전 용량에 따른 EHP 및 연료전지 운전 전략 변화는 Fig. 5에 나타내었다. EHP는 주요 온열 생산 기기로써 운전 양상에 큰 변화는 없으나 연료전지의 경우 발전 용량이 줄어들수록 운전 시간이 늘어났다. 특히 연료전지 발전 용량 50% (12.5 kW)의 경우 상시 발전에도 불구하고 일간 온열 생산 필요량 (1,048 kWh/day)을 충족하지 못하였다(995 kWh/day).

3.3 냉방 모드

여름철 냉열 생산 조건에서 EHP의 성능은 외기온이 낮을수록 유리하다. 식 (2)를 참고하여 난방 모드와는 반대로 EHP는 야간에 운전하며 축열하고 연료전지는 주간에 발전하며 배열을 발생시키며 승온 히트펌프를 사용하여 흡착식 냉방기를 운전한다. 그

결과 Fig. 6과 같이 외기온과 EHP에서 생산하는 냉열의 일간 그래프 양상이 반대로 나타난다. 흡착식 냉방기는 냉방 peak에 대응하기 위하여 12-17시에 주로 운전되며 흡착식 냉방기에 열원을 공급하기 위하여 연료전지 역시 이 시간대에 함께 운전된다. Fig. 6에서 EHP cooling power와 adsorption chiller cooling power의 일간 총합은 cooling power load와 일치한다.

연료전지 발전 용량에 따른 EHP 및 흡착식 냉방기 운전 전략 변화는 Fig. 7에 나타내었다. 온열 생산과는 달리 냉열 생산은 수요량 자체가 적어 연료전지 50% 발전 시 전력 및 냉열 생산 부족은 나타나지 않았다.

다만 연료전지 출력의 경우 낮은 구간(저전류 구간)에서 운전할수록 전기 효율이 증가하고 대신 배열 생산 효율이 감소하면서 연계된 흡착식 냉방기를 가동할 수 있는 시간이 짧아졌다. 이 때문에 연료전

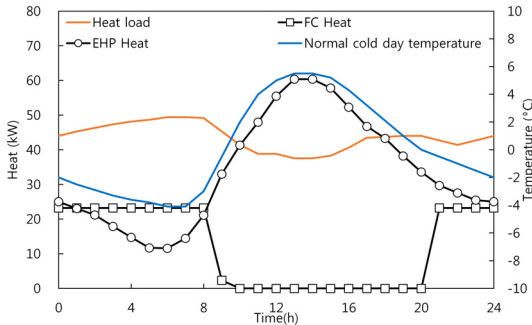


Fig. 4. Normal cold day tri-generation system operating strategy with fuel cell 100% capacity

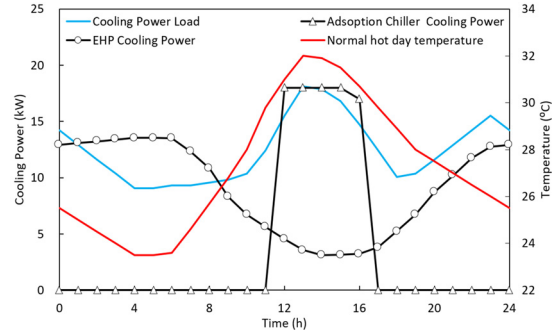


Fig. 6. Normal hot day tri-generation system operating strategy with fuel cell 100% capacity

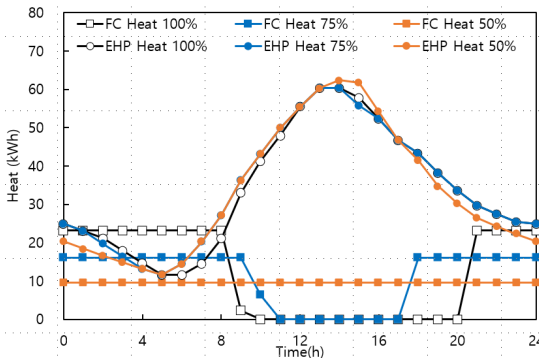


Fig. 5. Normal cold day tri-generation system operating strategy with fuel cell 50%, 70%, and 100% capacity

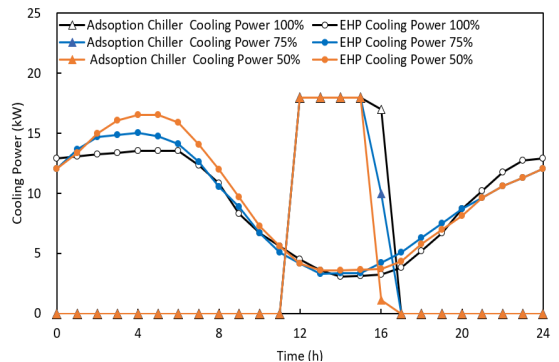


Fig. 7. Normal hot day tri-generation system operating strategy with fuel cell 50%, 70%, and 100% capacity

지 50% 출력 운전 시 냉방 COP가 높은 새벽 시간에 사전 냉열 축열이 필요하여 Fig. 7의 EHP 냉열 생산량 peak 값에 차이가 발생하였다.

3.4 연료전지 열화 시 운전 전략 변화

연료전지 시스템은 사용에 따라 열화가 일어나며 전기 효율이 감소하고 배열 효율이 상승한다. 그러나 대부분의 연료전지 시스템의 농업 분야 적용 연구는 이러한 열화 효과를 감안하지 않았다. 본 연구에서는 연료전지 열화가 30% 진행된 상황을 가정하여 시스템 운전 전략 변화를 추가적으로 분석하였다. 본 논문에서는 대부분의 발전용 연료전지 시스템이 고정 온도를 가지고 운용되는 점을 감안하여 효율 감소분이 모두 배열로 배출된다고 가정하였다. 즉 열화에 따른 성능 감소분은 모두 배열 생산 증가로 반영된다.

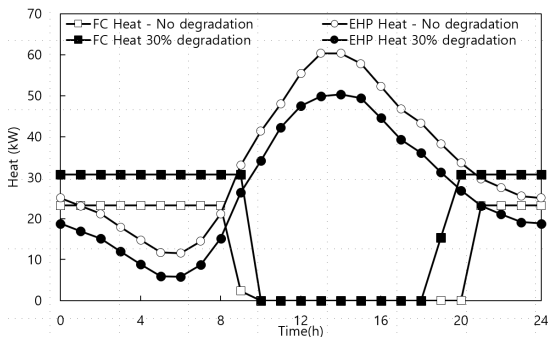


Fig. 8. Normal cold day system operating strategy comparison between fuel cell 100% and 30% degraded state

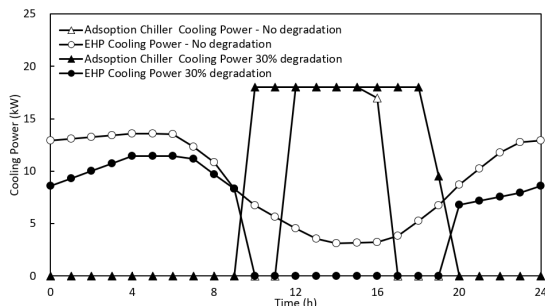


Fig. 9. Normal hot day system operating strategy comparison between fuel cell 100% and 30% degraded state

Fig. 8은 연료전지 Fig. 4 조건에서 연료전지의 전기 효율이 30% 감소된 경우 일간 연료전지 배열 및 EHP 온열 생산량 변화를 나타낸다. 이를 보면 연료전지 열화로 출력이 감소함에 따라 EHP 사용 전력 보상을 위한 연료전지 운전 시간이 증가한다. 다만 배열 발생량은 증가하여 EHP가 부담하는 온열 생산량 자체는 전반적으로 감소하는 추세를 보인다. 결론적으로 난방 모드에서 연료전지 열화는 전기 효율 및 에너지 효율을 감소시키지만 배열이 늘어남에 따라 효율 감소분을 일부 보상하는 효과가 있다.

Fig. 9는 연료전지 Fig. 6 조건에서 연료전지의 전기 효율이 30% 감소된 경우 일간 EHP 및 흡착식 냉방기 냉열 생산량 변화를 나타낸다. 연료전지 열화로 운전 시간과 배열이 증가하면서 흡착식 냉방기의 운전 시간 및 냉열 생산이 증가한다. 이로 인하여 야간 시간대의 EHP 냉열 생산 필요성이 줄어든다. 결론적으로 냉방 모드에서 역시 연료전지 열화는 전기 효율을 감소시켜 전반적인 에너지 효율을 감소시킬 것으로 예상되지만 배열을 활용하는 흡착식 냉방기의 사용으로 효율 감소분을 일부 보상하는 효과가 있다.

4. 결론

본 연구는 Park 등¹⁾의 연구의 후속 연구로 시설원예용 25 kW급 연료전지 기반 열병합 발전 시스템의 운전 전략을 검토하였다. 발전용 연료전지 시스템은 주변 환경에 의해 영향을 거의 받지 않으므로 외기 온에 민감한 공기열원 히트펌프의 최적 운전에 우선순위를 둔 결과 연료전지와 히트펌프는 일간 서로 상반된 시간대에 운전되어야 한다는 결론을 얻었다. 이 과정에서 연료전지 출력에 따른 시스템 변화 양상을 분석하였고 50%의 연료전지 출력 조건에서는 온실 난방 수요를 충족할 수 없음을 확인하였다. 추가적으로 연료전지 열화에 의한 난방 운전 전략 변화를 분석하였고 그 결과 제시한 열병합 시스템이 연료전지 열화로 인한 전반적인 에너지 효율 감소분을 일부 상쇄시키는 것을 확인하였다.

후기

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

References

1. J. Y. Park, T. Bui, S. Park, D. Lee, Y. Bae, Y. Kim, and S. M. Lee, "Fuel cell-based cogeneration system for greenhouse cooling and heating", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 34, No. 6, 2023, pp. 667-672, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2023.34.6.667>.
2. 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>.
3. 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>.
4. T. Bui, Y. S. Kim, 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>.
5. M. S. Zadeh, "Theoretical and experimental analyses of a solar/waste heat assisted air-conditioning system for applications in tropical climates [Doctoral Dissertation]", Singapore: National University of Singapore, 2015.