

공공수영장 열공급을 위한 연료전지 배열활용 사업의 실증 운영성과 분석

김주현^{1†} · 김성민² · 전계원³

¹한국동서발전(주), ²강원대학교 그린에너지공학과, ³강원대학교 방재전문대학원

Analysis of the Demonstration-Scale Operational Performance of a Fuel Cell Waste-Heat Utilization Project for Heat Supply to a Public Swimming Pool

JU-HUN KIM^{1†}, SUNG-MIN KIM², KYE WON JUN³

¹Korea East-West Power Co., LTD. 145, Gondan 9-ro, Donghae-si, Gangwon State, 25797, Korea

²Kangwon National University, Department of Green Energy Engineering, 346 Jungang-ro, Samcheok-si, Chunchun-dong Janan-gu, Gangwon State, 25913, Korea

³Kangwon National University, Graduate School of Disaster Prevention, 346 Jungang-ro, Samcheok-si, Chunchun-dong Janan-gu, Gangwon State, 25913, Korea

†Corresponding author :
person@ewp.co.kr

Received 18 June, 2026

Revised 24 June, 2026

Accepted 24 June, 2026

Abstract >> This study evaluates a 4.2 MW solid oxide fuel cell (SOFC)-based waste heat supply system for a public swimming pool in Bukpyeong, Donghae, Korea. Design-stage feasibility results and operating data from 2024 to 2025 were analyzed to compare predicted and actual performance. The design-stage analysis estimated 1,853.6 MWh of annual recoverable waste heat against an annual heating demand of 746.53 MWh. Actual operation achieved annual energy-cost savings of KRW 141.6 million in 2024 and KRW 148.1 million in 2025. Although heat supply was maintained, system utilization declined because of equipment degradation, increased balance-of-plant (BOP) maintenance, field replaceable unit (FRU) replacement needs, and corrective maintenance following system trips. The results confirm the suitability of public swimming pools for fuel-cell waste heat utilization and emphasize the importance of equipment reliability and preventive maintenance.

Key words : SOFC(고체산화물연료전지), waste heat utilization(폐열활용), public swimming pool(공공수영장), heat supply(열공급), operating performance(운영성능), energy cost savings(에너지 비용절감)

1. 서 론

탄소중립 실현과 에너지 이용 효율 향상에 대한 요구가 증가함에 따라 건물 부문의 에너지 전환이

중요한 과제로 부각되고 있다. 건물 부문은 전 세계 최종에너지 소비의 약 30%를 차지하며, 에너지 관련 CO₂ 배출량의 약 28%가 건물 에너지 사용 과정에서 발생하는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 건물 부문

의 열 공급을 저탄소화하기 위한 다양한 기술이 검토되고 있으며, 그중 수소 기반 연료전지 열병합 발전 시스템(Combined Heat and Power, CHP)은 전기와 열을 동시에 생산할 수 있는 고효율 분산형 에너지 기술로 주목받고 있다¹⁾.

연료전지는 사용되는 전해질의 종류에 따라 알칼라인 연료전지(Alkaline Fuel Cell, AFC), 고분자전해질 연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC), 인산형 연료전지(Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC), 용융탄산염 연료전지(Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC), 고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) 등으로 구분되며, 각 연료전지는 작동 온도와 발전 특성에 따라 다양한 분야에 적용되고 있다²⁾. 이 중 고체산화물 연료전지(SOFC)는 약 600~1,000°C의 고온에서 작동하는 대표적인 고온형 연료전지로, 높은 발전효율과 우수한 열 회수 특성을 동시에 확보할 수 있어 CHP에 적합한 기술로 평가된다. 특히 발전 과정에서 발생하는 고온의 배열을 활용할 수 있어 전기와 열을 동시에 필요로 하는 건물 부문에서 높은 에너지 이용효율을 기대할 수 있다.

국내에서는 연료전지 발전배열의 활용 가능성에 대한 논의가 지속되어 왔으나 실제 공공시설과 연계된 상용 운영사례에 대한 분석은 아직 제한적이다. 기존 연구들은 주로 설계단계의 열부하 산정, 배열 회수 가능량 추정, 경제성 검토와 같은 사전 타당성 평가에 초점을 두었으며, 실제 구축 이후의 운영 성과와 유지관리 문제를 함께 다룬 연구는 많지 않았다. 특히 설계단계의 예측 결과와 실제 운영단계의 실적을 연계하여 분석한 실증 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

한편 공공수영장은 수조 가열, 급탕 및 실내 난방 수요가 연중 지속적으로 발생하며 일정 수준 이상의 열 부하가 안정적으로 유지되는 특성을 가진다. 따라서 연료전지 발전 과정에서 발생하는 배열을 효과적으로 활용할 수 있어 일반 공공건물보다 연료전지 CHP 적용 효과가 높은 수요처로 평가된다. 특히 SOFC에서 발생하는 고온 배열을 활용하기에 적합하여 에너지 이용효율 향상 가능성이 높은 시설로 볼

수 있다.

동해 북평지역의 공공수영장 열공급형 연료전지 사업은 이러한 개념이 실제 적용된 사례 중 하나이다. 본 사업은 설계단계에서 공공수영장을 핵심 열 수요처로 설정하여 배열 활용 타당성을 검토하였으며, 그 결과 4.2 MW 규모의 SOFC 기반 열공급형 연료전지 시스템이 구축되었다. 이후 해오름스포츠센터 수영장에 배열을 공급하면서 공공시설 운영비 절감 효과를 확인하였으나, 동시에 발전 이용률 저하 및 성능 저하와 같은 운영상의 문제도 나타났다.

이에 본 연구에서는 해당 사업의 설계 검토 결과와 운영 실적을 체계적으로 정리하고 분석하고자 한다. 구체적으로 첫째, 공공수영장 열공급형 SOFC 시스템의 설계단계 타당성 검토 결과를 정리한다. 둘째, 2024년과 2025년 운영 실적을 바탕으로 실제 열 공급 성과와 에너지 절감 효과를 분석한다. 셋째, 최근 운영자료를 활용하여 발전 이용률 저하의 원인을 검토하고 향후 운영 고도화 방향을 제시한다. 이를 통해 공공수영장 열공급형 연료전지 사업의 실질적인 성과와 한계를 평가하고, 향후 유사 사업의 계획 및 운영을 위한 기술적·운영적 시사점을 도출하고자 한다.

2. 선행연구 검토

연료전지 기반 열병합발전 시스템은 전기화학 반응을 통해 전력을 생산하는 동시에 발생하는 배열을 난방, 급탕, 공조 및 냉방에 활용할 수 있는 분산형 고효율 에너지 공급기술로 평가된다. 기존 CHP 기술이 내연기관이나 가스터빈을 중심으로 발전해 온 것과 달리, 연료전지 CHP는 높은 전기효율과 낮은 오염물질 배출 특성, 부분부하 운전 가능성 및 건물 단위 분산전원 적용성 등의 장점을 가진다. Arsalis³⁾는 연료전지 기반 micro-CHP 연구를 종합적으로 검토하며 연료전지 종류, 열관리, 에너지 저장 및 재생 에너지 연계가 주요 연구 주제임을 제시하였다.

연료전지 CHP 연구는 우선 연료전지 종류별 배열 특성과 활용 가능성을 규명하는 방향으로 진행되어

왔다. PEMFC는 상대적으로 낮은 온도의 배열을 생산하여 주거용 급탕 및 난방에 적합한 반면, SOFC는 고온 배열을 활용한 열통합, 흡수식 냉방 및 추가 발전사이클과의 연계 가능성이 높은 것으로 보고되었다. PAFC는 중온 배열을 활용할 수 있어 공동주택, 상업시설 및 공공시설 등 중규모 열병합 분야에 적합한 기술로 평가되어 왔다. 또한 Gandiglio 등⁴⁾과 Adam 등⁵⁾은 연료전지 CHP의 성능이 단순한 배열 발생량보다 열수요 특성, 축열설비, 저장 용량 및 부하 패턴과의 적합성에 크게 좌우됨을 제시하였다.

건물 적용 측면에서는 상업 및 공공건물을 대상으로 한 연구가 수행되었다. Naimaster와 Sleiti⁶⁾는 상업건물에 SOFC-CHP를 적용하여 HVAC 시스템과의 통합 효과를 분석하였으며, Chahartaghi와 Kharkeshi⁷⁾는 PEMFC 기반 CCHP 시스템에서 배열을 냉방, 난방 및 전력 생산에 복합적으로 활용할 수 있음을 제시하였다. 이들 연구는 건물의 열수요 특성과 배열 활용 방식이 시스템 성과를 결정하는 핵심 요소임을 보여준다.

운전전략에 관한 연구도 활발히 수행되었다. Mago 등⁸⁾은 CHP 및 CCHP 시스템에서 전기부하추종과 열부하추종 운전전략을 비교하여 운전방식에 따라 에너지 절감, 비용 및 온실가스 배출 성과가 달라질 수 있음을 제시하였고, 최근에는 Navarro 등⁹⁾이 PEMFC 기반 micro-CHP의 에너지관리전략을 비교하는 등 운영 최적화 연구가 진행되고 있다.

경제성 및 환경성 측면에서는 연료전지 CHP의 초기 투자비, 유지관리비, 연료가격 및 제도적 지원이 주요 영향요인으로 보고되고 있다. Ito¹⁰⁾는 공동주택에 적용된 PAFC-CHP 시스템의 경제·환경성을 분석하였으며, L bberding과 Madlener¹¹⁾는 연료전지 열병합 및 저장시스템의 기술경제성을 평가하였다. 또한 Mago와 Smith¹²⁾는 건물 유형별 배출저감 효과를 분석하여 열수요 특성이 환경성 평가 결과에 중요한 영향을 미침을 제시하였다.

공공수영장과 같은 고열수요 시설에 대한 연구는 상대적으로 제한적이다. Liu 등¹³⁾은 실내수영장이 포함된 종합체육시설을 대상으로 PAFC 기반 CHP 시

스템의 설계 및 경제성을 분석하고, 배열 활용, 에너지 절감 및 환경적 효과를 평가하였다. 그러나 기존 연구는 대부분 설계 및 시뮬레이션 단계의 타당성 검토에 초점을 두고 있으며, 실제 구축 이후의 운영 자료를 기반으로 열공급 성과, 배열 회수량, 계절별 열수요 대응성 및 설비 성능 변화를 분석한 사례는 많지 않다.

따라서 본 연구는 실제 운영 중인 공공수영장 열공급형 SOFC 시스템을 대상으로 설계단계의 검토 결과와 운영 실적을 종합적으로 분석함으로써, 기존의 설계 중심 연구를 실증 기반 운영성과 평가로 확장한다는 점에서 차별성을 가진다.

3. 연구방법

3.1 연구대상

본 연구의 대상은 동해 북평지역에 구축된 공공수영장 열공급형 연료전지 시스템과 해오름스포츠센터의 열공급 계통이다. 대상 설비는 총 4.2 MW 규모의 SOFC 발전설비로 구성되며, 300 kW급 설비 14세트가 설치되어 있다. 이 중 1.8 MW는 열공급형으로 운영되고 있으며, 나머지 2.4 MW는 발전 전용 설비로 운영된다. 사용 연료는 LNG이며, 발전 과정에서 발생하는 배열은 회수장치를 통해 열에너지로 활용된다.

Fig. 1은 연료전지 배열을 활용한 열공급 계통의 개념도를 나타낸다. 연료전지에서 발생한 배열은 1차 및 2차 열교환기를 거치면서 수영장 열공급 계통

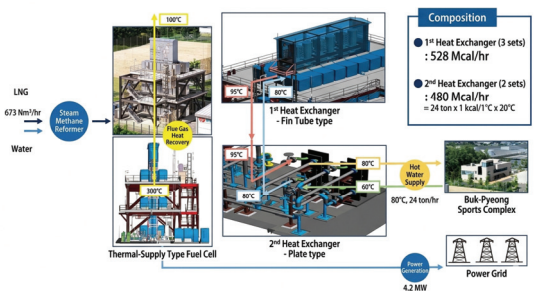


Fig. 1. Overview of the SOFC-based power generation and waste heat utilization system

의 주요 원인을 검토하였다.

3.2.1 설계단계 배열활용 가능성 분석

설계단계 배열활용 가능성 분석에서는 대상 공공수영장의 열수요와 연료전지에서 회수 가능한 배열량을 비교하였다. 분석의 목적은 연료전지 배열이 수영장 및 부대시설의 난방·급탕 부하를 어느 정도 대응할 수 있는지를 검토하는 데 있다. 주요 분석항목은 연간 배열회수 가능량, 연간 난방부하, 수영장 난방부하, 일반 공간 난방부하, 축열조 설계용량 및 예상 에너지 절감액으로 설정하였다.

배열활용 가능성은 단순히 연간 회수열량의 크기만으로 판단하지 않고, 전체 난방부하 중 수영장 부하가 차지하는 비중과 계절별 열수요 지속성을 함께 검토하였다. 공공수영장의 배열활용 적합성은 최대 난방부하보다 연중 지속적으로 발생하는 기저 열수요에 의해 크게 좌우되기 때문이다.

설계단계의 배열공급 여유율은 다음과 같이 산정하였다.

$$R_{WH} = \frac{Q_{WH,des}}{Q_{H,des}}$$

여기서 R_{WH} 는 설계단계 배열공급 여유율, $Q_{WH,des}$ 는 연간 배열회수 가능량, $Q_{H,des}$ 는 연간 난방부하를 의미한다. R_{WH} 가 1보다 클 경우 연간 총량 기준으로 배열공급 가능량이 난방부하를 초과함을 의미한다.

또한 전체 난방부하 중 수영장 부하가 차지하는 비중은 다음과 같이 산정하였다.

$$S_{pool} = \frac{Q_{pool}}{Q_{H,des}} \times 100$$

여기서 S_{pool} 은 수영장 부하 비중, Q_{pool} 은 수영장 난방부하, $Q_{H,des}$ 는 연간 난방부하를 의미한다. 이 지표는 대상 시설의 주요 열수요가 일반 건물공간보다

수영장 수조 가열 및 급탕 수요에 의해 형성되는지를 판단하기 위해 사용하였다.

3.2.2 운영실적 기반 배열활용 성과 분석

2024년 1월부터 2025년 12월까지의 운영자료를 활용하여 연료전지 배열의 열공급 성과와 에너지 절감 효과를 분석하였다. 주요 분석자료는 월별 열공급량, 연료사용량, 도시가스 대체량 및 에너지 절감액으로 구성하였다.

배열활용 성과는 연료전지 배열이 실제 공공수영장의 열원으로 활용되어 기존 도시가스 보일러 사용량을 어느 정도 대체하였는지를 기준으로 평가하였다. 월별 열공급량은 운영자료에서 제시된 Gcal 단위 값을 사용하였으며, 필요한 경우 다음 식을 이용하여 MWh 단위로 환산하였다.

$$Q_{th,m}(MWh) = Q_{th,m}(Gcal) \times 1.1628$$

여기서 $Q_{th,m}$ 은 월별 공급열량을 의미한다.

도시가스 대체량은 운영자료에서 적용된 열량-도시가스 환산계수를 이용하여 산정하였다. 즉, 월별 공급열량에 환산계수를 적용하여 동일한 열량을 보일러가 공급할 경우 필요한 도시가스 사용량을 계산하였다.

$$V_{NG,m} = Q_{th,m}(Gcal) \times \alpha_{NG}$$

여기서 $V_{NG,m}$ 은 월별 도시가스 대체량, α_{NG} 는 단위 열량당 도시가스 환산계수를 의미한다. 에너지 절감액은 산정된 도시가스 대체량에 도시가스 단가를 적용하여 계산하였다.

$$C_{sav,m} = V_{NG,m} \times P_{NG}$$

여기서 $C_{sav,m}$ 은 월별 절감액, P_{NG} 는 도시가스 단가를 의미한다. 연간 절감액은 월별 절감액의 합으로 산정하였다.

$$C_{sav,y} = \sum_{m=1}^{12} C_{sav,m}$$

본 분석은 실제 열공급량을 기준으로 도시가스 대 체효과와 경제적 절감효과를 평가하는 방법으로, 공공수영장 운영자의 관점에서 체감 가능한 운영성과를 파악하는 데 목적이 있다. 다만 실시간 보조보일러 운전량, 축열조 충·방열 특성, 배관 열손실 및 열교환기 성능변화 등을 직접 계측한 정밀 열수지 분석은 수행하지 못하였으므로, 본 연구에서는 이를 실증 운영성과 평가를 위한 정량적 지표로 활용하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 설계단계 타당성 분석결과

설계단계 검토 결과, 연료전지 1기(440 kW) 기준 연간 배열 회수 가능량은 1,853.6 MWh로 산정되었다(Table 2). 반면 대상 복합시설의 연간 난방부하와 냉방부하는 각각 746.53 MWh와 48.73 MWh로 분석되었다. 이는 연료전지에서 회수 가능한 배열량이 건물의 연간 열부하를 충분히 상회하는 수준임을 의미하며, 설계단계에서 공공수영장 연계 열공급 모델의 기술적 적용 가능성이 확보되었음을 보여준다.

열부하 구성 측면에서는 전체 난방부하 중 수영장 난방부하가 601.10 MWh로 약 80.5%를 차지하는 것으로 나타났다. 반면 일반 공간 난방부하는 145.43 MWh 수준에 머물렀다. 이는 본 사업의 주요 열수요

가 일반 건축물 난방이 아닌 수영장 수조 가열 및 관련 부하에 의해 형성됨을 의미한다. 따라서 공공수영장은 연료전지 배열 활용의 핵심 수요처로 기능할 수 있으며, 열수요 특성상 배열 활용 효과가 높은 시설로 평가할 수 있다.

특히 수영장은 동절기뿐만 아니라 하절기에도 수온 유지와 급탕 수요가 지속적으로 발생한다. 설계단계 분석 결과 7월과 8월의 열수요는 각각 40.37 MWh와 40.73 MWh로 나타났으며, 이는 일반 건물과 달리 연중 안정적인 기저 열수요가 존재함을 보여준다. 이러한 특성은 계절에 따른 수요 변동이 큰 일반 건물보다 연료전지 배열을 지속적으로 활용할 수 있는 유리한 조건으로 작용한다.

설계 시에는 수영장 운영시간(06:00~21:00)과 최대 급탕부하를 고려하여 80 m³ 규모의 축열조가 적용되었다. 축열조 운전 시뮬레이션 결과에서도 난방부하, 축열량 및 배열 공급량 간의 균형이 유지되는 것으로 나타나 설계조건에서 열공급 안정성을 확보할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한 기존 보일러 및 EHP 중심의 열원체계를 연료전지 배열 활용 방식으로 대체할 경우 연간 약 196.2백만 원의 에너지 비용 절감 효과가 기대되는 것으로 예측되었다.

종합하면 설계단계에서는 연료전지 배열의 공급 잠재량이 대상 시설의 열수요를 충분히 대응할 수 있는 것으로 평가되었으며, 특히 공공수영장의 연중 지속적인 열수요가 배열 활용의 핵심 전제조건으로 작용하는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 공공수영장이 연료전지 배열 활용사업의 적합한 수요처가 될 수 있음을 시사하며, 이후 실제 운영성과 분석을 통해 설계단계 예측 결과가 어느 정도 구현되었는지를 검증할 필요가 있다.

4.2 운영실적 기반 배열활용 성과 분석

실제 운영단계에서는 설계단계에서 제시된 연료전지 배열 활용 개념이 공공수영장 운영환경에서 상당 부분 구현된 것으로 나타났다. Table 3은 2024년부터 2025년까지의 월별 연료사용량, 열공급량, 도

Table 2. Analysis results of heat demand and waste heat utilization during the design phase

Applications	Volume
Annual heat recovery capacity	1,853.6 MWh
Annual heating load	746.53 MWh
Annual cooling load	48.73 MWh
Swimming pool heating	601.10 MWh
Load general space heating	145.43 MWh
Load thermal storage tank	80 m ³
Design capacity estimated annual savings	196.2 million won

시가스 절감량 및 에너지 절감액을 정리한 결과이며, Fig. 3은 동일 기간의 연료사용량과 열공급량 변화를 나타낸다.

분석 결과, 연료전지 배열을 활용한 열공급을 통해 2024년과 2025년에 각각 약 141.6백만 원과 148.1백만 원의 에너지 비용 절감 효과가 발생한 것으로 나타났다. 이는 연료전지 배열이 실제 공공수영장의 열원으로 활용되어 기존 도시가스 보일러 사용량을 지속적으로 대체하였음을 의미한다. 특히 두 연도 모두 연간 140백만 원 이상의 절감효과가 확인되어 연료전지 배열 활용이 단순한 설계 개념이나 시뮬레이션 결과에 머무르지 않고 실제 공공시설 운영비 절감에 기여할 수 있음을 보여준다.

월별 열공급량은 계절에 따라 차이를 보였으나 연중 지속적으로 유지되는 경향을 나타냈다. 동절기에는 난방 및 급탕 수요 증가에 따라 월 150 Gcal 내외의 열공급이 이루어졌으며, 하절기에도 약 80~100 Gcal 수준의 열공급이 유지되었다. 이는 설계단계에서 제시된 바와 같이 수영장 수온 유지와 급탕 수요가 계절과 관계없이 지속적으로 발생하기 때문으로 판단된다. 따라서 공공수영장은 일반 건물과 달리 연중 안정적인 기저 열수요를 제공함으로써 연료전지 배열 활용의 적합한 수요처가 될 수 있음을 실제 운영자료를 통해 확인할 수 있었다.

다만 실제 운영성과는 설계단계 예측치에 비해서는 다소 낮은 수준으로 나타났다. 설계단계에서 예측된 연간 에너지 절감효과는 약 196.2백만 원이었으나, 실제 운영실적은 2024년과 2025년에 각각 예측치의 약 72%와 75% 수준에 해당하였다. 그러나 이러한 차이를 단순히 설계예측의 오차로 해석하기는 어렵다. 설계단계 분석은 표준 기상자료와 가정된 운영조건을 기반으로 수행된 반면, 실제 운영단계에서는 이용객 수, 시설 운영시간, 외기조건, 급탕 사용패턴, 시운전 기간 및 설비 가동상태 등 다양한 현실적 요인이 복합적으로 작용하기 때문이다.

주목할 점은 발전 이용률이 점진적으로 감소하는 상황에서도 열공급 기능 자체는 유지되었다는 점이다. 실제 운영자료에서는 일부 기간 동안 발전량 감

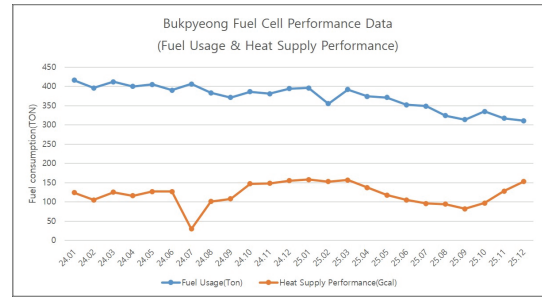


Fig. 3. Monthly fuel consumption and heat supply for the bukpyeong SOFC system

Table 3. Monthly waste heat supply and energy cost savings of the bukpyeong SOFC system

Monthly	Fuel (ton)	Monthly heat supply (Gcal)	City gas Saving (m ³)	Savings (1,000 KRW)
• 24.01	416	124	12,524	12,423
• 24.02	396	105	10,605	10,519
• 24.03	412	125	12,625	12,523
• 24.04	400	116	11,716	11,622
• 24.05	405	127	12,827	12,724
• 24.06	390	127	12,827	12,724
• 24.07	406	30	3,030	3,007
• 24.08	383	101	10,201	10,119
• 24.09	371	108	10,908	10,821
• 24.10	386	147	14,847	14,728
• 24.11	381	148	14,948	14,828
• 24.12	394	155	15,655	15,529
Total				141,567
• 25.01	396	158	15,958	15,829
• 25.02	355	153	15,453	15,328
• 25.03	392	157	15,857	15,729
• 25.04	374	137	13,837	13,725
• 25.05	371	118	11,918	11,822
• 25.06	352	105	10,605	10,519
• 25.07	349	96	9,696	9,618
• 25.08	324	94	9,494	9,418
• 25.09	314	82	8,282	8,215
• 25.10	335	97	9,797	9,718
• 25.11	317	128	12,928	12,824
• 25.12	311	153	15,453	15,329
Total				148,079

※ '24. 7 수영장 휴관으로 열공급량 저하

소와 설비 이용률 저하가 확인되었음에도 불구하고 공공수영장에 대한 열공급은 지속적으로 이루어졌으며, 이에 따른 도시가스 절감효과 또한 유지되었다. 이는 본 시스템이 단순한 발전설비가 아니라 전력 생산과 열공급이 결합된 열병합 시스템으로서 기능하고 있음을 보여준다. 따라서 공공수영장 연계형 연료전지 배열 활용 모델은 설계단계에서 기대한 열공급 기능을 실제 운영환경에서도 일정 수준 구현한 것으로 평가할 수 있다.

4.3 이용률 저하 원인 분석

운영자료 분석 결과, 공공수영장에 대한 열공급 기능은 전반적으로 유지되었으나 발전량과 이용률은 점진적으로 감소하는 경향을 나타냈다(Fig. 4). 이에 본 연구에서는 운영기록, 정비이력 및 설비 운전자료를 종합적으로 검토하여 이용률 저하의 원인을 분석하였다.

우선 발전설비의 출력 저하와 일부 성능보증 항목 미달 사례가 확인되었다. SOFC는 장기 운전 과정에서 스택 성능 열화(degradation)가 발생할 수 있으며, 이는 발전효율 감소와 출력 저하로 이어진다. 또한 실제 시스템에서는 스택뿐만 아니라 다양한 보조설비(Balance of Plant, BOP)의 상태가 전체 운전성능을 결정하기 때문에, 설비 노후화가 누적될 경우 발전량 감소와 이용률 저하가 동시에 나타날 수 있다.

특히 보조설비의 정비 빈도 증가는 이용률 저하와 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다. Fig. 5는 주요 보조설비의 분기별 정비 이력을 나타낸 것으로, 연료송풍기(Fuel Blower), 배기팬(Exhaust Fan), 공기송풍기(Air Blower)를 중심으로 정비 건수가 점진적으로 증가하는 경향이 확인된다. 특히 2025년 하반기에는 정비 건수가 급격히 증가하였으며, 이는 장기 운전에 따른 부품 노후화와 설비 신뢰도 저하가 누적되었음을 시사한다. 연료전지 시스템은 스택 자체보다 보조설비 고장에 의해 가동 중단이 발생하는 경우가 많으며, 보조설비의 신뢰도 확보는 시스템 가용도 유지 측면에서 매우 중요한 요소로 알려져 있다.

또한 일부 주요 부품에서는 현장교체형 부품(Field Replaceable Unit, FRU)의 교체 수요가 증가한 것으로 확인되었다. 장기 운전 과정에서 특정 부품의 성능 저하가 누적되었으며, 예비품 확보와 계획 교체가 적시에 이루어지지 않을 경우 설비 고장 이후의 대응 중심 운영으로 전환될 가능성이 높다. 이러한 운영 방식은 설비 정지시간 증가와 이용률 감소를 초래할 수 있다.

유지보수 체계 측면에서도 개선이 필요한 것으로 나타났다. 운영기록 검토 결과 일부 설비는 비정상 정지(Trip) 발생 이후 복구 중심으로 관리되는 경향을 보였으며, 이는 예방정비보다 사후정비의 비중이 높은 운영 형태를 의미한다. 일반적으로 연료전지 시스템의 장기 신뢰도 확보를 위해서는 상태기반 유지관리(condition-based maintenance) 또는 예지보전(predictive maintenance) 체계의 적용이 권장된다. 따라서 향후 안정적인 열공급 및 발전 성능 유지를 위해서는 예방적 유지관리 중심의 운영체계 구축이

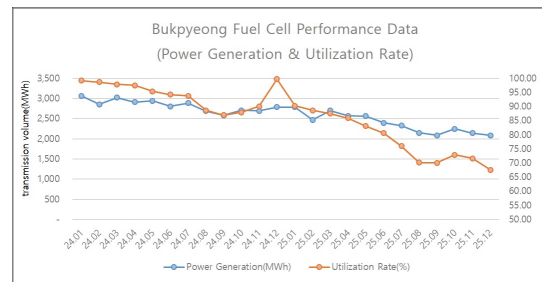


Fig. 4. Monthly power generation and utilization rate of the bukpyeong SOFC system

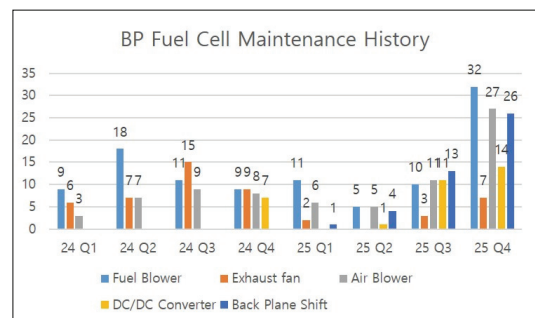


Fig. 5. Maintenance history of major BOP components

필요할 것으로 판단된다.

한편 출력제어 및 급전지시의 영향도 함께 검토하였다. 그러나 출력제어를 수행하지 않은 설비에서도 유사한 출력 저하가 확인되었으며, 급전지시 이행 여부에 따른 이용률 변화 역시 일관된 차이를 보이지 않았다. 따라서 본 사례에서 나타난 이용률 저하를 외부 계통운영 요인의 영향으로만 해석하기는 어렵다. 오히려 장기 운전에 따른 설비 신뢰도 저하, 보조 설비 정비 증가 및 유지보수 체계의 한계가 이용률 감소의 주요 원인으로 작용한 것으로 판단된다.

4.4 종합고찰

본 연구 결과를 종합하면 공공수영장은 연료전지 배열 활용에 적합한 열수요처이며, 실제 운영 환경에서도 의미 있는 경제적 효과를 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 설계단계에서는 연료전지 배열 회수 가능량이 대상 시설의 연간 열부하를 충분히 상회하는 것으로 분석되었으며, 실제 운영단계에서도 연간 140백만 원 이상의 에너지 비용 절감 효과가 확인되었다. 이는 연료전지 배열 활용이 단순한 설계 개념이나 시뮬레이션 결과에 그치지 않고 실제 공공시설 운영비 절감에 기여할 수 있음을 보여준다.

특히 본 사례는 설계단계에서 제안된 배열 활용 모델이 실제 공공시설에 적용되어 일정 수준 이상의 열공급 성과를 달성하였다는 점에서 실증적 의미를 가진다. 기존 연구가 주로 설계 및 경제성 검토에 집중된 반면, 본 연구는 실제 구축 이후의 운영성과를 분석함으로써 설계단계 예측과 운영단계 실적 간의 관계를 확인하였다는 점에서 차별성을 가진다.

한편 본 연구는 연료전지 배열 활용사업의 성과가 단순한 열공급 기능 확보만으로 평가될 수 없음을 보여준다. 실제 운영자료에서는 열공급 기능이 유지되는 상황에서도 발전 이용률과 설비 성능이 점진적으로 감소하는 현상이 확인되었다. 이는 연료전지 기반 열공급 시스템의 장기 성과가 배열 활용 자체보다 설비 신뢰도, 보조설비 상태, 유지관리 전략과 같은 운영요인에 크게 영향을 받을 수 있음을 시사한

다. 따라서 향후 유사 사업의 확대를 위해서는 열공급 성과뿐 아니라 설비 가용도, 예방정비 체계 및 장기 성능관리 전략을 함께 고려할 필요가 있다.

본 연구는 몇 가지 한계를 가진다. 운영성과 평가는 2024년과 2025년의 운영자료를 기반으로 수행되었으므로 장기적인 성능 열화 특성을 분석하기에는 한계가 있다. 또한 에너지 절감효과는 실제 공급열량을 도시가스 대체효과로 환산하여 산정하였기 때문에 보조보일러 운전량, 축열조 충·방열 특성, 배관 열손실 및 열교환기 성능변화와 같은 세부 요인을 직접 반영하지 못하였다. 향후에는 실시간 계측자료와 장기 운영데이터를 활용하여 열수지 분석, 설비 열효율 변화, 온실가스 감축효과 및 경제성 평가를 통합적으로 수행할 필요가 있다.

5. 결 론

본 연구는 동해 북평지역에 구축된 공공수영장 열공급형 SOFC 시스템을 대상으로 설계단계 타당성 검토 결과와 실제 운영성과를 비교·분석하고, 운영과정에서 나타난 이용률 저하 원인을 검토하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

첫째, 공공수영장은 연료전지 배열 활용에 적합한 열수요처로 확인되었다. 설계단계 분석 결과 연간 난방부하 746.53 MWh 중 수영장 부하가 601.10 MWh로 약 80.5%를 차지하였으며, 하절기에도 수온 유지와 급탕 수요로 인해 지속적인 열부하가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 공공수영장이 계절 변동성이 큰 일반 건물과 달리 연중 안정적인 기저 열수요를 제공함으로써 연료전지 배열 활용에 유리한 조건을 갖고 있음을 의미한다.

둘째, 설계단계에서 제안된 배열 활용 개념은 실제 운영단계에서도 유효한 것으로 나타났다. 설계단계에서는 연간 약 196.2백만 원의 에너지 비용 절감 효과가 예측되었으며, 실제 운영에서는 2024년과 2025년에 각각 약 141.6백만 원과 148.1백만 원의 절감 효과가 확인되었다. 이는 설계 예측치 대비 약 72~75% 수준에 해당하지만, 실제 공공시설 운영 환경

에서도 연료전지 배열을 활용한 열공급이 지속적으로 이루어지고 있음을 보여준다.

셋째, 이용률 저하의 주요 원인은 외부 계통운영 요인보다 설비 신뢰도와 유지관리 체계의 한계에 있는 것으로 분석되었다. 운영자로 검토 결과 보조설비(BOP) 정비 증가, 현장교체형 부품(FRU) 교체 수요 증가, 비정상 정지(Trip) 이후의 사후정비 중심 운영 등이 주요 원인으로 확인되었다. 반면 급전지시 및 출력제어의 영향은 상대적으로 제한적인 것으로 나타났다. 따라서 장기 안정운전을 위해서는 예방정비 및 예지보전 기반의 유지관리 체계 구축이 필요할 것으로 판단된다.

넷째, 본 연구는 설계단계의 기술적 타당성과 실제 운영성적을 연계하여 분석함으로써 공공수영장 열공급형 연료전지 시스템의 실증적 성과와 운영상의 과제를 함께 제시하였다. 특히 기존 연구가 주로 설계 및 경제성 검토에 머물렀던 것과 달리, 실제 운영자료를 기반으로 열공급 성과와 이용률 저하 원인을 분석하였다는 점에서 의의를 가진다.

종합하면 본 사례는 공공수영장을 활용한 연료전지 배열 활용 모델이 기술적으로 실현 가능하고 경제적 효과를 확보할 수 있음을 보여주는 동시에, 장기적인 성과 확보를 위해서는 설비 신뢰도와 유지관리 체계가 핵심 요소임을 시사한다. 본 연구 결과는 향후 공공시설 대상 연료전지 배열 활용사업의 계획, 운영 및 성능관리 체계 구축을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

1. U.S. Department of Energy, "Comparison of fuel cell technologies", 2016, Retrieved from https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f32/fcto_fuel_cells_comparison_chart_apr2016.pdf. (accessed on 15 March 2021)
2. Y. D. Lee, J. Y. Kim, D. J. Yoo, H. Ju, and H. Kim, "Review of research trend in fuel cell: analysis on fuel-cell-related technologies in electrode, electrolyte, separator plate, stack, system, balance of plant, and diagnosis areas", Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 31, No. 6, 2020, pp. 530-545, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.6.530>.
3. A. Arsalis, "A comprehensive review of fuel cell-based micro-combined-heat-and-power systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 105, 2019, pp. 391-414, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.013>.
4. M. Gandiglio, A. Lanzini, M. Santarelli, and P. Leone, "Design and optimization of a proton exchange membrane fuel cell CHP system for residential use", Energy and Buildings, Vol. 69, 2014, pp. 381-393, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.022>.
5. A. Adam, E. S. Fraga, and D. J. L. Brett, "Options for residential building services design using fuel cell based micro-CHP and the potential for heat integration", Applied Energy, Vol. 138, 2015, pp. 685-694, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.005>.
6. E. J. Naimaster IV and A. K. Sleiti, "Potential of SOFC CHP systems for energy-efficient commercial buildings", Energy and Buildings, Vol. 61, 2013, pp. 153-160, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.045>.
7. M. Chahartaghi and B. A. Kharkehi, "Performance analysis of a combined cooling, heating and power system with PEM fuel cell as a prime mover", Applied Thermal Engineering, Vol. 128, 2018, pp. 805-817, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.072>.
8. P. J. Mago, N. Fumo, and L. M. Chamra, "Performance analysis of CCHP and CHP systems operating following the thermal and electric load", International Journal of Energy Research, Vol. 33, No. 9, 2009, pp. 852-864, doi: <https://doi.org/10.1002/er.1526>.
9. S. Navarro, J. M. Herrero, X. Blasco, and A. Pajares, "Rule-based energy management strategies for PEMFC-based micro-CHP systems: a comparative analysis", Heliyon, Vol. 10, No. 18, 2024, pp. e37685, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37685>.
10. H. Ito, "Economic and environmental assessment of phosphoric acid fuel cell-based combined heat and power system for an apartment complex", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 42, No. 23, 2017, pp. 15449-15463, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.038>.
11. L. Löbberding and R. Madlener, "Techno-economic analysis of micro fuel cell cogeneration and storage in Germany", Applied Energy, Vol. 235, 2019, pp. 1603-1613, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.023>.
12. P. J. Mago and A. D. Smith, "Evaluation of the potential emissions reductions from the use of CHP systems in different commercial buildings", Building and Environment, Vol. 53, 2012, pp. 74-82, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.01.006>.
13. J. Liu, S. C. Kim, and K. Y. Shin, "Feasibility study and economic analysis of a fuel-cell-based CHP system for a comprehensive sports center with an indoor swimming pool", Energies, Vol. 14, No. 20, 2021, pp. 6625, doi: <https://doi.org/10.3390/en14206625>.