Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 36, No. 6, 2025, pp. 657~663
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2025.36.6.657

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

공랭식 PEMFC의 팬 구성에 따른 냉각 성능 및 온도 분포 특성 실험적 연구

윤상현[1] · 한재영[1,2,3] · 임석연[4†]

[1]국립공주대학교 일반대학원 기계공학과, [2]국립공주대학교 미래자동차공학과, [3]국립공주대학교 지능형자동차연구소, [4]충남대학교 기계공학교육과

Experimental Investigation of Cooling Performance and Temperature Distribution in Air-Cooled PEMFC under Different Fan Configurations

SANGHYUN YUN[1], JAEYOUNG HAN[1,2,3], SEOK YEON IM[4†]

[1]Department of Mechanical Engineering. Kongju National University, 1223-24 Cheonan-daero Seobuk-gu, Cheonan 31080, Korea
[2]Department of Future Automotive Engineering. Kongju National University, 1223-24 Cheonan-daero Seobuk-gu, Cheonan 31080, Korea
[3]Institute of Intelligent Vehicle. Kongju National University, 1223-24 Cheonan-daero Seobuk-gu, Cheonan 31080, Korea
[4]Mechanical Engineering Education Department, Chungnam National University, 99 Daehak-ro Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

†Corresponding author :
imsy@cnu.ac.kr

Received 22 October, 2025
Revised 4 November, 2025
Accepted 10 November, 2025

Abstract >> Air-cooled Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC) features a simple and lightweight structure suitable for small-scale mobility applications. However, reliance on ambient air for cooling often causes local hotspots and temperature non-uniformities, reducing performance and durability.This study investigates the surface temperature distribution of an air-cooled PEMFC using sixteen sensors and compares two cooling configurations: distributed cooling with dual small fans and centralized cooling with a single large fan. The small-fan setup improved temperature uniformity and suppressed hotspots, while the large-fan setup delivered approximately 5% higher output with 37% lower power consumption. These findings provide insights into optimal fan configurations, demonstrating trade-offs between thermal uniformity, reliability, and power performance in air-cooled PEMFC system.

Key words : Air-Cooled PEMFC(공랭식 고분자 전해질 막 연료전지), Cooling Performance (냉각 성능), Fan Configuration(팬 구성), Multi-Temperature Sensor(다중 온도 센서), Temperature Distribution(온도 분포)

1. 서 론

1.1 연구 배경

산업화 및 기술 발전의 가속화로 에너지 소비가 급격히 증가하면서, 환경오염과 교통체증 문제가 전 세계적인 과제로 대두되고 있다. 특히 기존 내연기관 운송 시스템의 무분별한 사용은 이산화탄소 배출을 증가시켜 기후 변화와 대기 오염을 초래하였으며, 이에 따라 친환경 에너지원의 필요성이 더욱 부각되고

있다. 친환경 에너지원 중 수소 연료전지는 높은 에너지 밀도 및 효율, 빠른 응답 특성 등의 특징으로 다양한 분야에서 연구가 활발히 이루어지고 있다.

연료전지는 일반적으로 전력을 발생시키는 스택과 안정적인 성능 확보를 위한 보조 시스템으로 구성된다. 수소 및 공기를 공급 압력으로 공급하는 수소 공급계 및 공기 공급계, 스택에서 발생하는 열을 제거하는 열 관리계 등이 있으며, 각각의 하위 시스템은 스택의 성능과 내구성 등에 직결된다. 그 중 열 관리계의 경우 적정 운전 온도 범위를 유지함으로써 막 수분 상태, 전기화학 반응의 효율 및 성능 등을 결정짓는 핵심 요소이다. 열 관리가 미흡할 경우, 막 건조와 국부 과열(Hot Spot)이 발생하여 전압 강하, 성능 저하, 나아가 장기적인 내구성 저하로 이어진다. 따라서 스택 온도를 정밀하게 계측하고 균일한 냉각을 확보하는 기술이 필수적이다.

이러한 열 관리 시스템은 일반적으로 공랭식과 수냉식으로 구분되며, 수냉식의 경우 우수한 냉각 성능을 제공하지만, 복잡한 구조로 시스템 중량이 증가한다. 반면 공랭식 구조는 단순하고, 유지보수 비용이 저렴하고, 또한 경량화가 가능하다는 장점이 있다[1,2]. 하지만 대부분의 연구는 수냉식 연료전지를 대상으로 이루어져 있으며, 공랭식 연료전지의 열 관리 성능과 최적화된 팬 구성에 관한 연구는 부족한 실정이다. 또한 공랭식 PEMFC는 냉각 팬을 통한 냉각 메커니즘으로 외부 환경에 의존적인 냉각 특성을 지닌다. 이에 스택 표면에 국부 과열이 발생하고, 위치별 온도 편차가 증가하는 문제가 발생한다. 이러한 온도 불균일은 전압 불균형, 막 건조, 효율 저하 및 내구성 감소로 이어지므로, 열 관리 시스템의 고도화가 필수적이다. 따라서 공랭식 연료전지의 열 분포 균일성과 냉각 효율을 확보하기 위한 기초 연구가 필요하다.

1.2 문헌 조사 및 연구 목적

기존 연구는 주로 수냉식 연료전지를 중심으로 수행되어 왔으나, 최근 공랭식 연료전지에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다.

Wu 등[3]은 공랭식 연료전지의 소재 개발, 구조 설계, 시스템 최적화 등에 대한 최근 발전 및 연구에 대해 검토하였다. Tu 등[4]은 공랭식 연료전지의 입·출구 모두 팬을 적용하여 송풍과 흡입을 동시에 수행하도록 설계하여 작동의 안정성 및 효율 상승을 확인하였다. Zhao 등[5]은 난류 격자를 통해 공랭식 연료전지 공기 흐름의 난류를 증가시켜 열 전달 효율 및 산소 물질 전달률을 향상시켰다. Shen 등[6]은 듀얼 공랭식 연료전지에 대해 다양한 전류 부하 변화에 따른 동적 반응을 실험하였으며, 열 및 물 관리의 중요성을 제시하였다. Zhao와 Wang[7]은 스택 구조 및 팬 작동 조건에 따른 공랭식 연료전지의 다중 물리 분포에 대한 연구를 수행하였다. Strahl 등[8]은 공랭식 연료전지 시스템의 열 관리 최적화를 위한 동적 모델을 개발하였으며, 모델을 통해 온·습도 상태에 따른 안정성 및 효율 향상을 분석하였다. Ondrejička 등[9]은 공랭식 연료전지의 열 모델링과 실험적 분석을 수행하였으며, 실험 결과와 비교하여 온도 분포 예측 및 모델 타당성을 검증하였다. Deng 등[10]은 공랭식 연료전지의 애노드 유로 설계에 따른 성능을 실험적으로 분석하였으며, 결과적으로 수소 분포 균일성, 출력 밀도 및 안정성 향상에 기여하는 것으로 확인하였다.

이와 같이 기존 연구들은 공랭식 연료전지의 소재, 유로 설계, 냉각 구조, 모델링 기법 등을 중심으로 수행되어 왔으며, 이를 통해 성능 향상과 열 관리 전략을 제시하였다. 하지만 스택 표면의 세밀한 온도 분포를 다점 센서를 활용하여 계측하고, 다양한 팬 구성에 따른 냉각 성능 차이를 실험적으로 분석한 사례는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 16개의 온도 센서를 활용하여 공랭식 연료전지 스택의 표면 온도 분포를 계측하였다. 또한 두 개의 소형 팬을 이용한 분산 냉각 방식과 하나의 대형 팬을 이용한 집중 냉각 방식을 비교·분석하였다. 이를 통해 팬 구성에 따른 열 관리 특성, 성능 안정성 및 냉각 효율을 정량적으로 평가하였다.

2. 본 론

2.1 시스템 구성

본 연구에서 사용된 연료전지 시스템은 Fig. 1을 통해 확인할 수 있다. 시스템은 수소 공급 시스템, 공기 공급 및 열 관리 시스템, 연료전지 스택, 부하 제어 및 데이터 수집 장치로 구성된다. 수소 공급 시스템은 고압 수소 탱크에서 공급 밸브를 통해 스택 애노드로 공급되고 잔류 수소는 퍼지 밸브를 통해 배출된다. 연료전지 스택은 Horizon사의 2 kW급 공랭식 연료전지로 구성하였으며, 스택 사양은 Table 1을 통해 확인할 수 있다. 스택의 활성 면적은 100 cm^2이며, 정격 출력은 2 kW, 정격 운전 전압은 28.8 V @ 70 A이며, 수소 공급 압력 범위는 0.45~0.55 bar이다.

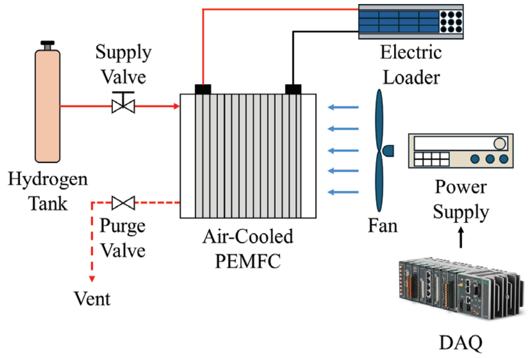

Fig. 1. Schematic diagram of air-cooled PEMFC system

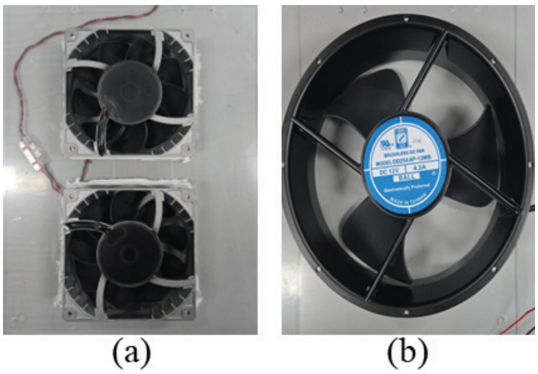

Fig. 2. Fan configurations; (a) two small fan, (b) a large fan

냉각 방식은 팬을 통한 냉각 방식으로, 최대 운전온도는 65℃이다. 냉각 시스템은 스택 전면에 장착된 팬을 이용하여 열을 외부로 방출하며, 팬 구성에 따라 Fig. 2와 같이 두 가지 실험 조건을 적용하였다. Fig. 2(a)는 두 개의 소형 팬을 통한 분산 냉각 방식이며, Fig. 2(b)는 하나의 대형 팬을 통한 집중 냉각 방식을 적용하였다. 팬의 작동 전압 및 속도는 외부 전원 공급 장치를 통해 제어되도록 구성하였다. 또한 스택 표면의 온도 분포는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 16개 채널의 k-type thermocouple을 스택 전면부(Cathode) 가스 유로판 표면에 4x4 격자 형태로 부착하여 측정하였다. 센서는 셀 간 온도 편차가 균등하게 측정되도록

Table 1. Fuel cell stack specification

Parameter	Value	Unit
Number of cells	48	ea
Active Area	100	cm^2
Rated power	2	kW
Rated current	70	A
Rated voltage	28.8	V
Max stack temperature	65	℃
Hydrogen pressure	0.45~0.55	bar

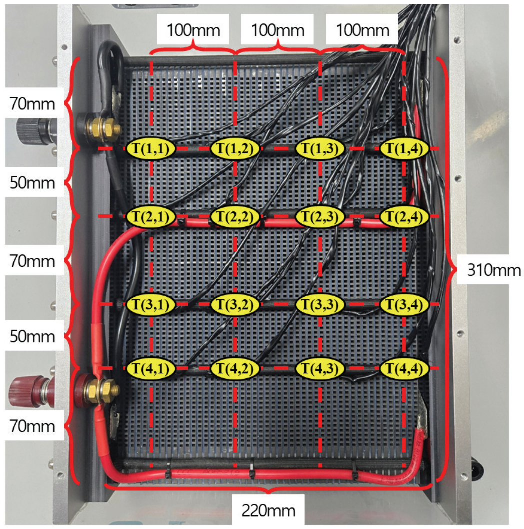

Fig. 3. Arrangement of 16-point thermocouples on PEMFC stack surface

동일 간격으로 배치하였으며, 측정 위치의 상대적 좌표는 Fig. 3을 통해 확인할 수 있다. 측정 온도 데이터는 데이터 수집 장치(Data Acquisition System, DAQ)를 통해 LabVIEW기반 데이터 로깅 프로그램으로 1Hz의 샘플링 속도로 실시간 기록하였다.

2.2 실험 방법 및 조건

본 연구에서는 공랭식 연료전지의 냉각 성능 및 온도 분포 특성을 정량적으로 비교·분석하기 위해 두 가지 팬 구성 조건에 따른 실험을 수행하였다. 실험 환경은 실내 온도 25±2℃, 외부 환기 장치를 통해 일정한 공기 순환이 이루어지는 동일한 환경에서 수행하였다. 스택은 팬에 의해 냉각되는 구조로 별도의 수분 공급 장치는 사용하지 않고 자체 가습 조건에서 운전하였다. 부하 조건은 전자 부하 장치를 통해 부하 전류를 0∼70 A까지 2 A씩 단계적으로 증가시키며 설정하였다. 온도 측정은 각 부하 전류에 따른 정상 상태가 확보된 후 진행하였으며, 부하 증가에 따른 온도 분포 및 성능을 비교·분석하였다. 스택 표면 온도는 오차범위 ±0.5℃의 k-type thermocouple을 이용하였으며, 각 조건별 실험을 3회 반복하여 데이터의 재현성을 확인하였다. 또한 팬 제어는 스택 표면 온도 데이터를 통해 온도 피드백 기반 제어 로직을 적용하였다. 16개의 센서 중 최대 온도를 기준으로 45℃ 이하의 경우 최소 전압으로 운전되며, 45℃를 초과할 경우 최대 전압으로 운전된다. Small fan은 7∼12 V에서 동작하며, 이때 유량은 0.066∼0.088 kg/s범위에 해당된다. Large fan은 8∼12 V에서 운전되며, 유량은 0.132∼0.218 kg/s이다. 이 제어 전략은 실험 조건의 단순성 및 과도한 냉각으로 인한 불필요한 전력 소비를 방지하기 위한 목적으로 설계되었다.

2.3 성능 평가 지표

공랭식 연료전지의 팬 구성에 따른 시스템 성능 및 냉각 성능의 차이를 정량적으로 비교하기 위해 스택 성능, 온도 분포 균일성 및 팬 평균 소비 전력을 분석하였다.

2.3.1 연료전지 스택 성능

스택의 전기적 성능은 전자 부하기를 이용하여 부하 전류 변화에 따라 측정된 전압 특성을 통해 평가하였다. 팬 구성에 따라 측정된 전압과 부하 전류를 통한 스택의 출력 전력은 다음과 같이 계산된다.

$$P_{stack} = V_{stack} \times I_{stack} \tag{1}$$

여기서 P_{stack}는 스택에서 발생되는 전력을 나타내며, V_{stack}, I_{stack}는 스택의 전압 및 전류를 나타낸다. 계산된 전력은 활성 면적을 반영한 전류밀도를 기준으로 정규화하여 스택의 전압과 전력 곡선으로 전기적 출력 특성을 비교하였다.

2.3.2 온도 분포 균일성

스택 표면의 온도 분포 균일성은 16개의 k-type thermocouple로 측정된 데이터를 기반으로 평가하였다. 측정된 각 온도(T_i) 데이터를 통해 평균 온도($\overline{T}$), 표준편차(σ_T), 그리고 최대-최소 온도차(△T)를 산출하였으며, 아래와 같이 계산된다.

$$\overline{T} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} T_i \tag{2}$$

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(T_i - \overline{T}\right)^2} \tag{3}$$

$$\Delta T = T_{\max} - T_{\min} \tag{4}$$

계산된 표준 편차 및 온도차가 작을수록 냉각이 균일하며, 이는 스택 내의 막 수분 유지와 전기화학 반응의 안정성 확보에 유리하다.

2.3.3 팬 평균 소비 전력

스택에서 전력을 생산하기 위해서는 냉각 팬이 운전

되며, 팬에서 소비되는 에너지는 일정한 샘플링 간격으로 측정된 데이터를 통해 계산하였다. 또한 전체 운전시간을 통해 평균 소모 전력을 아래와 같이 계산하였다.

$$E_{fan} = \sum_{k=1}^{n} V_k I_k \Delta t_k \tag{5}$$

$$\overline{P}_{fan} = \frac{E_{fan}}{t} \tag{6}$$

여기서 V_k, I_k는 각각 k 샘플 시간에 대한 전압 및 전류를 나타낸다.

3. 결과 및 토의

공랭식 연료전지의 팬 구성에 따른 전기적 성능, 열 분포 균일성 및 팬 소비 전력을 비교 분석하였다. 특히 냉각 팬의 구성에 따른 냉각 효율 및 열관리 성능의 차이를 정량적으로 분석하였다.

3.1 전기적 성능

팬 구성에 따른 스택의 성능은 전자 부하기를 통해 측정하였으며, Fig. 4를 통해 확인할 수 있다. 두 구성 모두 전류 밀도가 증가함에 따라 전압이 감소하며, 활성화 손실 및 저항 손실에 의한 전형적인 PEMFC의 분극 특성을 나타낸다. 전 구간에서 대형 팬 구성의 전압이 소형 팬 대비 높게 측정되었으며, 부하 전류가 증가함에 따라 그 차이가 확대되는 경향을 나타내었다. 저부하(0.1 A/cm^2)에서는 약 0.5%, 중부하(0.4～0.5 A/cm^2)에서는 0.8～0.9%, 고부하(0.7 A/cm^2)에서는 대형 팬 33.08 V, 소형 팬 31.62 V로 약 4.4% 높은 성능을 나타내었다. 이는 부하 증가에 따른 반응 면적 내의 전기화학적 반응이 보다 활발하게 이루어진 결과로 판단된다. 결과적으로, 대형 팬 구성이 동일 부하 조건에서 소형 팬 대비 우수한 성능을 보였다. 이러한 차이는 팬 구성에 따른 유량 분포 및 운전 온도의 차이에 기인한 것으로 판단된다.

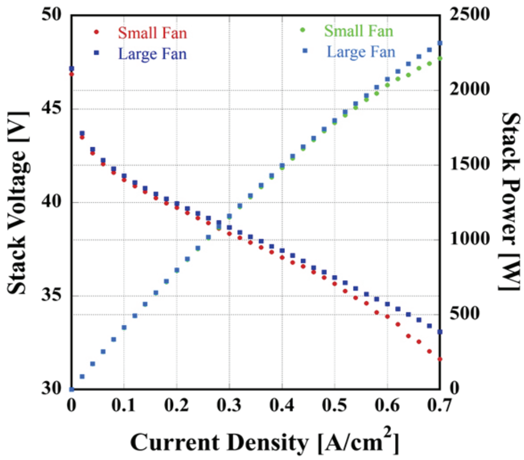

Fig. 4. Polarization curve of PEMFC stack

3.2 온도 분포 특성

부하 전류 변화에 따라 스택 표면에서 적용된 16 지점의 온도 분포 결과를 Fig. 5를 통해 확인할 수 있다. Fig. 5는 소형 팬 2개를 통한 스택의 온도 분포 결과이며, Fig. 6은 대형 팬을 통한 스택의 온도 분포를 나타낸다. 부하 전류가 증가함에 따라 스택의 운전온도는 상승하였으며, 특히 50 A 이상 구간에서는 고온 영역이 스택 중심에서 하단 방향으로 이동하는 경향이 나타났다. 이러한 분포 변화는 스택 내부의 공기 흐름 및 수소 유동 특성에 기인한다. 반응이 지속됨에 따라 중심부에서 하부로 온도와 수분 농도가 증가하고, 높은 수분 농도는 막의 수화를 높여 전기화학 반응을 더욱 활성화시킨다. 그 결과 발열 반응이 하부 영역에 집중되면서 중심 및 하단부의 온도가 상대적으로 상승하였다. 이는 Jian과 Zhao[11]가 보고한 바와 같이, 하부 셀 영역에서 수분 축적과 반응 활성화가 열 발생을 가속시킨다는 결과와 동일하다. 또한 수소는 우측 상부 매니폴드를 통해 공급되어 하부 배기 라인을 통해 배출된다. 이에 우측 상·하단은 비교적 저온 영역이 형성되며, 이는 수소 공급·배출에 따른 국부 냉각 효과로 사료된다.

Table 2는 부하 전류에 따른 평균 온도, 표준 편차 및 최대-최소 온도차에 대한 결과이다. 소형 팬의 경

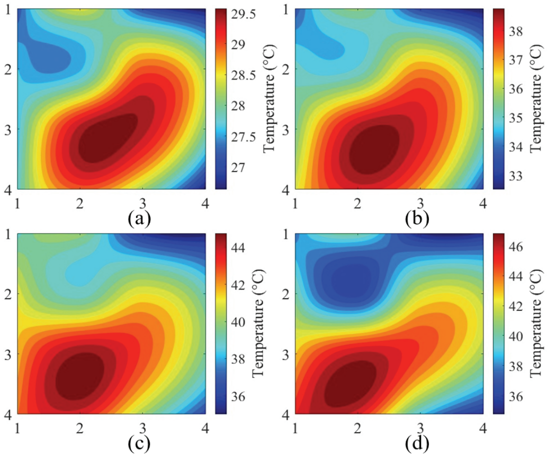

Fig. 5. Surface temperature distribution of PEMFC stack with small fan configuration under different load current; (a) 10 A, (b) 30 A, (c) 50 A, (d) 70 A

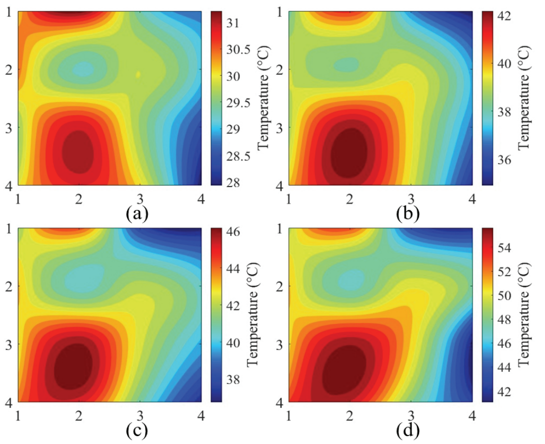

Fig. 6. Surface temperature distribution of PEMFC stack with large fan configuration under different load current (a) 10 A, (b) 30 A, (c) 50 A, (d) 70 A

우 전류 증가에 따라 평균온도가 28.04°C에서 40.73°C로, 표준편차는 0.88°C에서 3.69°C로 증가하여 온도 분포의 불균일성이 증가하였다. 대형 팬 또한 평균 온도는 29.78°C에서 49.38°C로, 표준편차는 0.9°C에서 3.94°C로 증가하였다. 이는 대형 팬을 통한 집중 냉각 방식이 냉각 효율을 저하시켜 국부 과열 및 온도 편차 확대를 초래한 결과로 해석된다. 결과적으로, 2개의 소형 팬 구성이 대형 팬 대비 평균적으로 평균온도는 9.91%, 표준편차는 5.67%, 온도차는 14.38% 감소하였다. 이는 소형 팬을 통한 분산 냉각

Table 2. Comparison of stack surface temperature characteristics with fan configuration and load current

		Average temperature $(\bar{T})$ [°C]	Standard deviation (σ_T) [°C]	Max-min temperature difference (△T) [°C]
Small fan	10 A	28.04	0.88	2.87
	30 A	35.70	1.79	6.13
	50 A	40.28	2.70	9.60
	70 A	40.74	3.69	11.04
Large fan	10 A	29.78	0.90	3.41
	30 A	38.77	2.05	7.25
	50 A	41.74	2.68	9.25
	70 A	49.38	3.94	13.68

방식이 공기 분포의 균형을 개선하고 열적 불균일성을 완화하는 데 유리함을 확인하였다.

3.3 팬 전력 특성 및 성능 분석

팬 구성에 따른 평균 소비 전력은 소형 팬의 경우 26.55 W, 대형 팬의 경우 16.62 W로, 대형 팬이 37% 낮은 전력 소모를 보였다. 전기적 성능 측면에서 스택의 전류-전압 특성이 대형 팬 구성의 경우 동일 전류 밀도에서 소형 팬 대비 약 5% 이상 높게 측정되었다. 이는 대형 팬에 의한 낮은 냉각 성능으로 초래된 높은 운전 온도에 따른 성능 향상으로 판단된다. 반면, 소형 팬 구성은 소비 전력은 증가하였지만, 균일한 냉각유동으로 온도 편차와 불균일성이 감소하였다. 결과적으로 전기화학 반응이 일정하게 유지되어 장기 운전 시 열적 부하를 완화하는 데 유리하다.

따라서 공랭식 PEMFC 시스템에서는 운전 조건과 요구 성능에 따라 팬 구성 간의 특성을 상호 보완적으로 활용하는 설계 접근이 요구된다. 특히, 팬에 대한 적응형 속도 제어를 적용할 경우, 전기적 효율 및 열적 균일성을 동시에 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 공랭식 연료전지의 냉각 특성과 팬

구성에 따른 스택의 전기적·열적 성능 및 온도 분포 변화를 분석하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

1) 공랭식 연료전지의 온도 분포 및 열적 거동을 분석하기 위해 16개의 온도 센서를 4x4격자로 배치한 계측 시스템을 구축하였다.
2) 냉각 성능 비교를 위해 듀얼 소형 팬과 대형 팬 두 가지 구성을 대상으로, 부하 전류 0~70 A 범위에서 실험을 수행하였다.
3) 실험 결과, 대형 팬은 동일 부하 조건에서 약 5% 높은 스택 출력과 약 37% 낮은 팬 소비 전력으로 전기적 효율에서 우수한 성능을 나타내었다.
4) 반면, 소형 팬은 평균 온도와 표준편차가 낮아 국부 과열 발생을 억제하며, 온도 분포의 균일성과 열적 안정성 측면에서 더 유리하였다.
5) 결과적으로 공랭식 연료전지 시스템에서 전기적 효율과 열적 균일성 간 상충관계가 존재함을 확인하였다. 추가적으로 향후 운전 조건에 따라 팬 구성을 상호 보완적으로 적용하는 균형적 냉각 설계 기준 수립이 필요함을 시사한다.

후 기

본 논문은 2025년도 교육부 및 대전광역시의 재원으로 대전RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다.(과제관리번호: 2025-RISE-06-012)

References

1. M. Song and K. Kim, "Numerical study on heat transfer of air-cooling PEMFC in HALE UAV", Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 28, No. 2, 2017, pp. 150-155, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.2.150.
2. D. Yoo, H. Kim, S. Oh, and K. P. Park, "Durability evaluation of air-cooled proton exchange membrane fuel cells stacks by repeated start-up/shut-down", Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 32, No. 5, 2021, pp. 315-323, doi: https://doi.org/10.7316/KHNES.2021.32.5.315.
3. X. Wu, S. Xing, J. Luo, H. Wang, F. Huang, and C. Zhao, "Progress and challenges on air-cooled open-cathode proton exchange membrane fuel cells: materials, structures, and systems", Energy Reviews, Vol. 4, No. 2, 2025, pp. 100130, doi: https://doi.org/10.1016/j.enrev.2025.100130.
4. X. Tu, J. Lv, J. Wu, X. Luo, and Z. Tu, "Experimental investigation of a novel open cathode air-cooled fuel cell stack design featuring simultaneous inlet blowing and outlet suction", Energy, Vol. 314, 2025, pp. 134308, doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.134308.
5. J. Zhao, X. Cheng, Y. Ma, Z. Zhong, C. Zhou, Y. Lv, B. Xie, and C. Li, "Experimental study on heat and mass transfer enhancement of open cathode proton exchange membrane fuel cells using turbulence grids", Applied Energy, Vol. 385, 2025, pp. 125542, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125542.
6. J. Shen, C. Du, F. Yan, B. Chen, and Z. Tu, "Experimental study on the dynamic performance of a power system with dual air-cooled PEMFC stacks", Applied Energy, Vol. 326, 2022, pp. 120025, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120025.
7. C. Zhao and F. Wang, "Optimal performance and modeling study of air-cooled proton exchange membrane fuel cell with various bipolar plate structure", Applied Energy, Vol. 345, 2023, pp. 121360, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121360.
8. S. Strahl and R. Costa-Castelló, "Model-based analysis for the thermal management of open-cathode proton exchange membrane fuel cell systems concerning efficiency and stability", Journal of Process Control, Vol. 47, 2016, pp. 201-212, doi: https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2016.09.004.
9. K. Ondrejička, V. Ferencey, and M. Stromko, "Modeling of the air-cooled PEM fuel cell", IFAC-PapersOnLine, Vol. 52, No. 27, 2019, pp. 98-105, doi: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.740.
10. Z. Deng, B. Li, S. Xing, C. Zhao, and H. Wang, "Experimental investigation on the anode flow field design for an air-cooled open-cathode proton exchange membrane fuel cell", Membranes, Vol. 12, No. 11, 2022, pp. 1069, doi: https://doi.org/10.3390/membranes12111069.
11. Q. Jian and J. Zhao, "Experimental study on spatiotemporal distribution and variation characteristics of temperature in an open cathode proton exchange membrane fuel cell stack", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 44, No. 49, 2019, pp. 27079-27093, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.177.