

대형 차량용 PEMFC의 냉각성능 향상을 위한 2유체 분무 냉각의 기초 특성 연구

이준영¹ · 우종빈¹ · 최유라¹ · 유상석^{2†}

¹충남대학교 일반대학원 기계공학과, ²충남대학교 공과대학 기계공학부

Fundamental Characteristics of Two-Fluid Spray Cooling for Enhanced PEMFC Cooling Performance in Heavy-Duty Vehicles

JUNYEONG LEE¹, JONGBIN WOO¹, YOORA CHOI¹, SANGSEOK YU^{2†}

¹Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

²Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34134, Korea

[†]Corresponding author :
sangseok@cnu.ac.kr

Received 8 July, 2026
Revised 23 July, 2026
Accepted 23 July, 2026

Abstract >> When high-capacity proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) systems are applied to heavy-duty commercial vehicles, including 48–60-ton-class vehicles, the heat load generated by the stack increases significantly because of the high power demand. Consequently, conventional radiator systems may not provide sufficient cooling performance. Insufficient cooling can accelerate performance degradation. In this study, two-fluid spray evaporative cooling was experimentally investigated using a uniformly heated plate. The surface temperature was measured using an infrared camera under independently controlled air and water supply conditions. Compared with air-only cooling, two-fluid spray cooling provided approximately twice the cooling performance and resulted in a plate temperature approximately 6–9°C lower at the end of spraying, depending on the operating conditions.

Key words : PEMFC Thermal Management(고분자전해질막 연료전지 열관리), Spray Cooling(분무 냉각), Evaporation Cooling(증발 냉각), Latent Heat(잠열), Two fluid spray(2유체 분무)

1. 서 론

1.1 배경

48–60톤급 대형 차량과 같은 고하중 상용차에 대용량 고분자전해질막 연료전지(Proton Exchange Membrane

Fuel Cell, PEMFC)를 적용할 경우, 높은 출력 요구에 따라 스택에서 발생하는 열 또한 크게 증가하게 된다^{1,2)}. 이러한 조건에서는 기존의 라디에이터 기반 공랭 및 수랭 방열 시스템만으로는 요구되는 냉각성능을 충분히 만족시키기 어려우며, 특히 차량 패키징 제약과 주행 조건 변화에 따른 공기 유동 한계로 인

해 방열 성능 확보에 구조적 한계가 존재한다^{3,4)}. 또한 급가속, 고하중, 경사 주행과 같은 고부하 운전 조건에서는 순간적인 열 발생 증가로 인해 기존 방열계의 응답 속도가 부족하여 국부적인 온도 상승 및 핫스팟 발생 가능성이 증가한다⁵⁾. 따라서 대형 상용 PEMFC 시스템에서는 기존 방열 방식의 한계를 보완할 수 있는 고효율·고응답 열관리 기술의 도입이 필요하다⁶⁾.

이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로서 분무 냉각(spray cooling)은 액체의 증발잠열을 활용하여 높은 열유속 조건에서도 효과적인 열 제거가 가능한 기술로 주목받고 있다⁷⁾. 분무 냉각은 액적이 표면에 충돌하여 형성되는 액막과 증발 과정에서 발생하는 잠열 효과를 통해 기존의 단상 대류 냉각 방식 대비 우수한 냉각성능을 제공할 수 있으며, 분무 위치 및 분무량 제어를 통해 국부적인 열부하에 대응할 수 있는 장점을 가진다⁸⁾. 특히 2유체(공기-물) 분무 방식은 공기 보조(atomizing air)를 이용하여 비교적 낮은 액체 압력에서도 미립화를 구현할 수 있으며, 공기와 물의 공급을 독립적으로 제어함으로써 분무량과 액적 크기 분포를 정밀하게 조절할 수 있다^{9,10)}.

1.2 선행연구

Sovani 등¹¹⁾은 2유체 분무 과정에서 공기와 액체 간 상호작용이 액적의 생성 및 거동을 지배하며, 이러한 미립화 특성이 열전달 성능에 중요한 영향을 미친다고 보고하였다. 또한 Panão와 Moreira¹²⁾는 간헐 분무(intermittent spray) 방식이 표면 온도 제어 측면에서 효과적인 수단이 될 수 있음을 제시하였으며, 이는 과도 열부하 조건에서의 온도 응답 제어에 유리한 특성을 가진다. Freund 등¹³⁾은 스프레이 냉각에서 국부 열전달 특성이 분무 조건 및 표면 상태에 따라 크게 변화함을 보고하였으며, 다양한 열유속 조건에서의 적용 가능성을 제시하였다.

한편, PEMFC 시스템에 스프레이 냉각을 적용하기 위해서는 단순한 평균 열 제거 성능뿐만 아니라 과도 운전 조건에서의 온도 응답 특성과 온도 분포

균일도를 함께 고려할 필요가 있다. Somasundaram과 Tay¹⁴⁾는 펄스 분무 조건에서의 과도 온도 거동을 정량적으로 평가할 필요성을 제시하였으며, Faghri와 Guo¹⁵⁾는 실제 시스템 환경에서 주변 공기 유동이 액막 형성 및 증발 과정에 중요한 영향을 미칠 수 있음을 보고하였다. 또한 Mudawar와 Deiters¹⁶⁾는 온도 응답 기반 평가가 열관리 시스템 설계 및 제어 측면에서 실용적인 지표가 될 수 있음을 제안하였다.

1.3 실험 목적

본 연구에서는 2유체 분무 냉각 장치가 PEMFC 열관리 시스템에 적용 가능성이 있는지 확인하기 위한 기초 연구를 수행하고자 한다. 분무 냉각에 의한 특성 평가를 위해 등온 가열 평판을 구성하고, 2유체(공기-물) 분무 냉각의 과도 냉각 거동을 실험적으로 확인하며 냉각성능의 지배 인자를 도출하고자 한다. 평판은 200 mm × 200 mm, 두께 5 mm의 알루미늄을 채택하여 목표 온도까지 가열한 후, 공랭 조건과 2유체 분무 조건에서의 표면 온도 변화를 적외선(IR) 카메라를 이용하여 측정하였다. 또한 2유체 분무 조건에서는 공기압 및 공기 유량, 물 유량, 공기-물 비율(ALR), 분사 지속 시간 및 간격, 주변 공기 유속 등의 변수를 변화시키며 표면 온도와 냉각 속도, 그리고 온도 균일도를 비교하였다. 이를 통해 2유체 분무 냉각의 변수 설정에 따라서 냉각에 미치는 영향을 체계적으로 정리하고, 연료전지 열관리 관점에서 유효한 운전 전략을 제시하고자 하였다.

2. 실험적 접근법

2.1 분무증발냉각 실험장치구성

본 연구에서는 연료전지 열관리 환경을 단순화하고 관찰하기 위해 Fig. 1과 같이 시스템을 구성하였다. Fig. 2는 200 mm × 200 mm 알루미늄 평판을 이용한 방열판의 조립도이며 판형 가열기(plate heater)를 이용하여 상온 조건에서 목표 온도까지 가열한

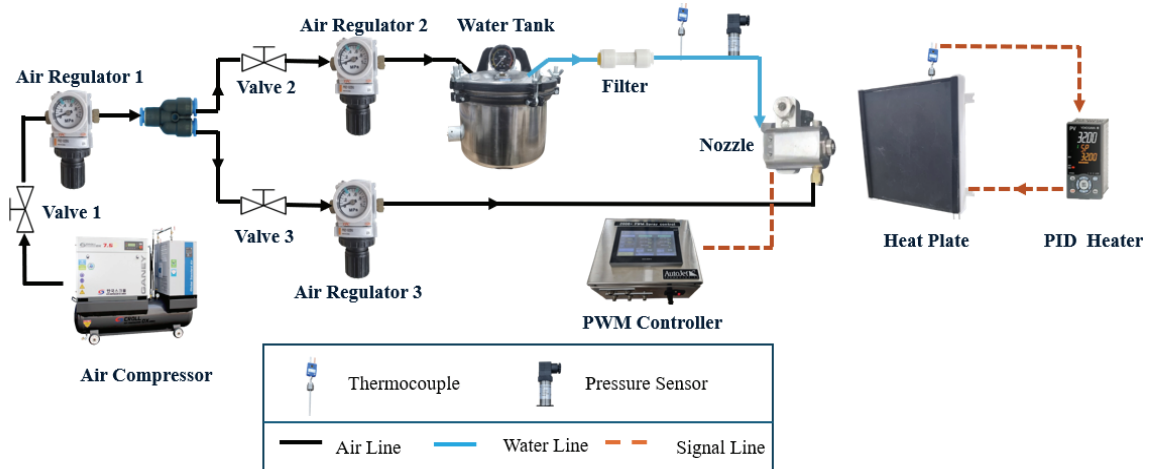


Fig. 1. Schematic diagram of the two-fluid spray cooling experimental apparatus

뒤 분무 냉각 실험을 수행하였다. 실험 시 평판의 초기 조건을 일정하게 맞추기 위해 정상 상태 도달 후 300초 동안 온도 변화가 2°C 이내이고, 평판 전체의 온도 분포가 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 이내일 때 분무를 시작하였다. 본 연구에서는 PEMFC 출구 냉각수 온도를 고려하여 평판 표면 온도를 70°C 로 설정하고, 분무수 온도는 20°C 로 설정하였으며, 각각은 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 진행하였다.

사용한 노즐은 2유체 분무 노즐을 채택하여 평판 표면 분무 특성을 평가하였다. 2유체 분무 시스템은 공기 공급부와 물 공급부로 구성되며, 레귤레이터를 통해 공급 압력을 제어하였다. 압력 센서를 통해 운전 중 물 공급부에 전달되는 압력을 확인하였으며, 분무 장치의 특성상 물 분무를 유도하는 공기 공급 장치의 압력 변화에 따라 분무량이 변할 수 있음을 확인하였다. 따라서 정량 분무를 위해 실험 전 각각의 조건마다 밀폐 용기에 분무하여 전자저울을 통해 무게를 측정하는 방식으로 분무량을 확인하였다.

2유체 분무 노즐은 실험 평판을 향해 수직으로 설치하고, 노즐과 평판 사이 거리를 조절하기 위해 고정 장치를 구성하였다. 분무 각 및 분무 영역은 노즐 사양과 설치 거리에 따라 결정되므로, 각 조건에서 분무가 평판 중앙을 기준으로 재현성 있게 형성되도록 노즐 중심을 정렬하였다.

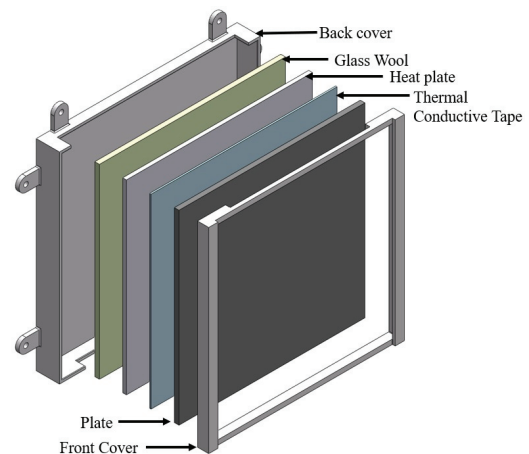


Fig. 2. Exploded view of the aluminum heated-plate assembly

평판 표면 온도는 적외선(IR) 카메라로 계측하여 시간에 따른 온도 변화(냉각 곡선)를 획득하였다. 공기 측은 공압 및 유량을 기록하였고, 노즐 출구 조건이 평판 전면 유동장에 미치는 영향을 파악하기 위해 노즐 입구 및 평판 전방 0.2 m 지점에서 풍속을 계측하였다.

2유체 분무는 공압 변화뿐 아니라 전자 제어 기반 PWM (Pulse Width Modulation) 제어를 통해 분사 지속 시간과 분사 간격을 설정하여 분무량을 정밀하게 조절하였으며 주요 실험 조건은 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Main experimental conditions

Parameter	Condition
Initial plate temperature	70 ± 1°C
Spray-water temperature	20 ± 1°C
Nozzle-to-plate distance, (L)	0.2 m
Air supply pressure	0.25 ~ 1.0 bar
Plate-front air velocity	3.4 ~ 6.3 m/s
Total water spray mass	2 g, 3 g
Duty cycle	12%, 20%
Total observation time	100 s
Spray mode	Continuous: Continuous spray for 10 s
	Intermittent: 1 s spray / 3 s pause × 10 cycles

특히 듀티비(Duty Cycle)를 이용해 펄스 주기를 조절하였고, 듀티비 증가에 따라 분무량이 증가하는 경향을 확인하였다. 펄스 분사 조건은 노즐이 켜진 시간과 꺼진 시간으로 정의되는 듀티비로 정량화하였으며, 이는 다음과 같이 정의하였다.

$$Duty(\%) = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \times 100 \quad (1)$$

공기-액체 질량비(air-to-liquid mass ratio, ALR)는 노즐이 분무되는 ON 구간에서 공급되는 공기와 물의 질량유량비로 정의하였다.

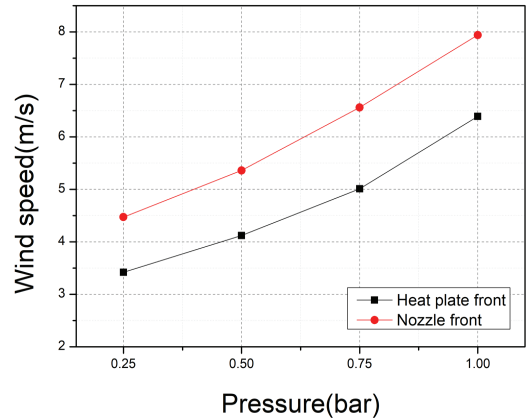
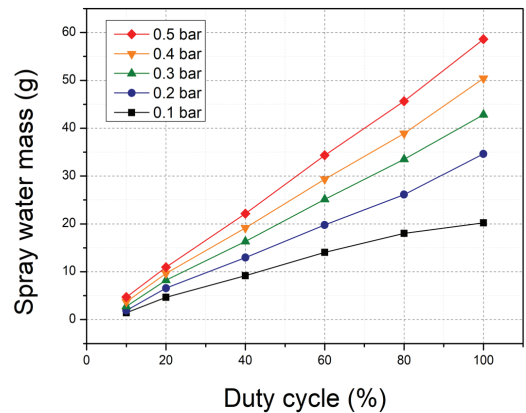
$$ALR = \frac{\dot{m}_{a,on}}{\dot{m}_{w,on}} \quad (2)$$

여기서 $\dot{m}_{a,on}$ 과 $\dot{m}_{w,on}$ 은 각각 노즐 ON 구간에서의 공기 및 물의 질량유량이다. 본 연구에서 ALR은 체적 유량비가 아닌 질량유량비이며, 공기와 물의 질량유량은 동일한 단위인 kg/s로 환산하여 계산하였다.

2.2 분무증발냉각 실험절차

수소 전기차용 라디에이터 표면에 2유체 분무 시

공랭 대비 냉각성능을 평가하는 것이 필요하다. 본 연구는 이러한 증발 냉각 특성을 확인하는 기초 실험 단계로 평판을 목표 온도로 가열 후 그 표면에 2 유체를 분무하여, 증발 특성을 평가하고자 하였다. 이를 위해, 실험용 평판은 판형 가열기를 이용해 목표 실험 온도인 70°C까지 가열한 후 목표 온도 도달 후 일정 시간 동안 조건 안정화를 확보한다. 설정된 공압/물 유량/분사 거리 조건에서 2유체 분무를 시작하면 적외선 카메라로 온도 이력을 기록하며, 공기 풍속/유량/압력 및 수온을 동기 기록한다. 종료 기준은 사전 정의된 분사 절차 종료와 관찰 시간 100초

**Fig. 3.** Measured air velocities at the nozzle front and heat-plate front under different air supply pressures**Fig. 4.** Total spray-water mass for ten 1-s spray events as a function of PWM duty cycle at different atomizing-air supply pressures

종료로 정의한다. 각 실험 조건은 재현성 확보를 위해 반복 시험으로 진행하고, 냉각 곡선의 반복 간 편차를 비교하였다. 또한 분무량은 공압 및 듀티비에 따라 변동될 수 있으므로, 조건 간 비교 시 분무량을 기준으로 조건을 정렬하거나 동일 분무량 조건에서 공압-듀티비 조합의 차이를 비교하여 분무량 지배성을 검토하였다. 냉각성능 평가는 초기 평균 온도 대비 시간에 따른 온도 저감량으로 정의하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 공기압-풍속-분무량 특성

2유체 분무 장치에서 공기 공급 압력 증가에 따라 노즐 출구 및 평판 전방에서의 풍속이 증가하였다. Fig. 3에서 공기압이 0.25 bar $\rightarrow$ 1.0 bar 조건으로 증가할 때, 노즐 입구 풍속은 약 4.4 m/s $\rightarrow$ 7.9 m/s, 평판 정면 풍속은 약 3.4 m/s $\rightarrow$ 6.3 m/s로 증가하였다. 이는 공압 상승이 노즐 출구에서의 공기 유속을 증가시켜 강제 대류 열전달을 강화함을 의미한다. 또한 물 분무량은 듀티비에 비례하여 증가하였다.

Fig. 4에서 1초 분무, 10회 반복하였을 때를 측정하였고, 듀티비 100% 조건 기준으로 분무량은 압력 증가에 따라 총 분무량이 약 20 g $\rightarrow$ 58 g 수준으로 증가하는 경향을 보였다. 또한 PWM 제어를 통해 듀

티비를 증가시키면 분무량이 선형적으로 증가함을 확인하였다.

3.2 공기압 공급 변화에 따른 공랭 조건의 냉각곡선

평판에서 증발 냉각을 정량화하기 위해, 공기만 냉각에 참여한 경우와 분무 냉각의 경우를 비교하였다. Fig. 5는 공랭 조건에서 공기 공급 압력 변화에 따른 표면 온도 변화를 나타낸다.

공기 공급 압력이 증가함에 따라 평판 전방의 풍속은 또한 증가하였고, 이에 따라 냉각 곡선의 단위 시간당 기울기가 증가하는 경향을 확인하였다. 즉, 공압이 높아질수록 동일 시간 동안의 온도 감소량이 증가하였으며, 이는 공기 유속 증가에 의해 평판 표면과 주변 공기 사이의 강제 대류 열전달이 증가된 것으로 보인다.

따라서 이후 2유체 분무 냉각성능을 해석할 때에는 분무 효과만이 아닌, 공압 증가에 의해 동반되는 공랭 성분의 증가 역시 함께 고려할 필요가 있다.

3.3 공랭과 증발 냉각성능 비교

Fig. 6은 기준 조건에서 2유체 스프레이 분무 냉각과 공기 분사에 의한 강제 대류 냉각을 비교한 것이

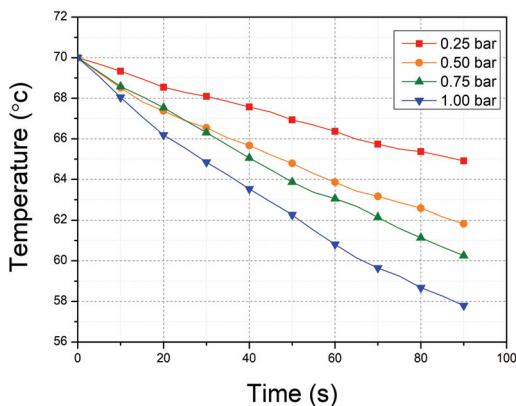


Fig. 5. Plate temperature under air-cooling conditions over air supply pressures

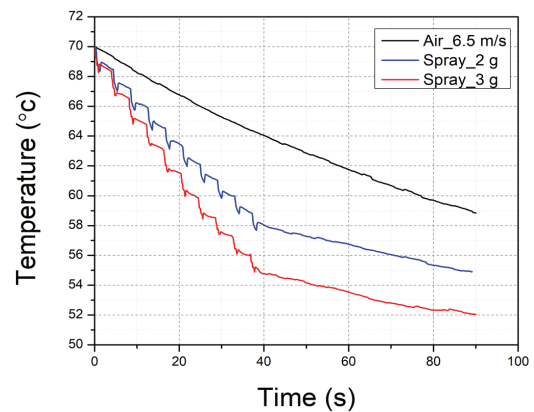


Fig. 6. Comparison of the area-averaged plate temperatures under air-only cooling and pulsed two-fluid spray cooling with total water masses of 2 and 3 g

다. 분무 냉각의 경우 시간당 온도 감소량이 공랭 대비 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다.

2유체 냉각의 경우 설정된 듀티비에 따라 펄스 분무를 40초 간 진행하며, 이때 분무 냉각 곡선이 주기적으로 진동하는 것을 확인할 수 있다. 이는 분무 펄스와 펄스 사이에서 증발이 진행되며, 분무 → 증발 및 공랭에 의한 냉각 → 액막 재형성/열회복이 반복되어 나타나는 것이다.

스프레이 종료 시점부터는 공랭 대비 분무량에 따라 6°C~9°C의 온도 차이를 확인할 수 있으며, 이후 잠열 효과 종료 및 표면 온도 저하로 강제 대류 열전달량이 감소하면서 온도 차이가 약 1°C 감소한 뒤 유지된다.

3.4 풍속에 따른 냉각성능 영향

Fig. 7은 1회당 물 분무량을 0.3 g으로 고정하고, 1초 분무 후 3초 정지를 10회 반복하여 총 3 g의 물을 공급한 조건에서, 평판 전방 공기 유속을 4.0 m/s 및 6.5 m/s로 변화시킨 결과이다. 풍속 차이에 의해 평균 약 3°C의 온도 강하를 추가로 얻을 수 있었으며, 그 원인으로는 공기 속도를 높임으로써 분무 표면에 형성된 액막이 더 얇게 형성되면서, 동시에 풍속 증가로 증발량과 강제 대류 열교환량이 증가한 것으로 보인다.

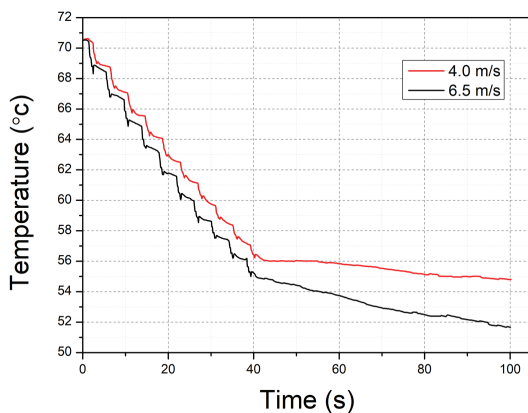


Fig. 7. Effect of plate-front air velocity on the area-averaged plate temperature under intermittent two-fluid spray cooling with 0.3 g of water per spray event

3.5 물 분사량에 따른 냉각성능 영향

Fig. 8은 2유체 펄스 분무가 아닌 지속 분무 조건에서 물 분사량에 따른 평판 표면의 온도 변화를 비교한 결과이다. 물 질량유량은 각각 0.2 g/s와 0.3 g/s로 설정하였으며, 10 s 동안 지속적으로 분무하여 총 분무량은 각각 2 g과 3 g이 되도록 하였다. 두 조건 모두 공기 공급 압력은 1.0 bar로 유지하였고, 이에 대응하는 평판 전방 공기 유속은 약 6.5 m/s였다.

지속 분무가 이루어지는 0~10 s 구간에는 공기 중 액적이 적외선 카메라와 가열 평판 사이의 광학 경로에 존재하며, 평판 표면에 형성된 액막 또한 표면의 유효 방사율과 반사 특성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 해당 구간에서 측정된 적외선 온도는 건조한 평판의 실제 표면 온도라기보다 액적, 액막 및 평판의 복사 신호가 함께 포함된 겉보기 온도로 해석하였다. 이에 따라 분무 중 측정값은 과도 응답의 경향을 정성적으로 확인하기 위한 용도로만 사용하였으며, 건조 평판의 절대 표면 온도 또는 정량적인 온도 저장량으로 직접 해석하지 않았다.

분사 종료 시점에서 측정된 겉보기 온도는 총분무량 2 g 조건에서 약 68.0°C, 3 g 조건에서 약 65.7°C로 나타났으며, 두 조건 사이에는 약 2.3°C의 차이가 확인되었다. 해당 값 역시 건조 표면의 절대 온도가

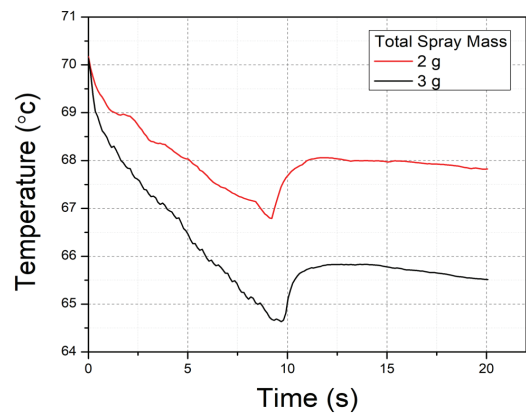


Fig. 8. Comparison of two-fluid spray cooling at water mass flow rates of 0.2 and 0.3 g/s, corresponding to total water masses of 2 and 3 g supplied continuously for 10 s

아니라 동일한 측정 시점과 실험 조건에서 분무량의 영향을 비교하기 위한 상대적인 겉보기 온도로 해석하였다. 따라서 본 결과는 총분무량이 2 g에서 3 g으로 증가함에 따라 분사 종료 시점의 상대적인 냉각 응답이 증가하는 경향을 보여준다.

분무량 증가에 따라 더 낮은 겉보기 온도가 나타난 것은 평판 표면에 공급되는 물의 양이 증가하면서 젖음 면적과 액막 형성량이 증가하고, 현열 및 증발잠열에 의해 제거될 수 있는 열량이 함께 증가하였기 때문으로 판단된다. 그러나 분무량이 과도하게 증가할 경우 두꺼운 액막 형성이나 잔류수 발생으로 인해 공기와 표면 사이의 대류 열전달이 저해될 가능성도 있으므로, 분무량 증가가 항상 냉각 성능 향상으로 직접 이어진다고 단정하기는 어렵다. 본 실험 범위에서는 3 g 조건이 2 g 조건보다 분사 종료 시점에서 더 낮은 겉보기 온도를 나타냈으며, 이는 동일한 공기 공급 조건에서 물 공급량이 상대적인 냉각 응답에 영향을 미치는 주요 인자임을 보여준다.

3.6 공가물 비(ALR) 및 분무 형태의 영향

2유체 노즐 특성상 공압과 듀티비 조합에 따라 동일 분무량임에도 ALR의 상태 차이가 존재할 수 있

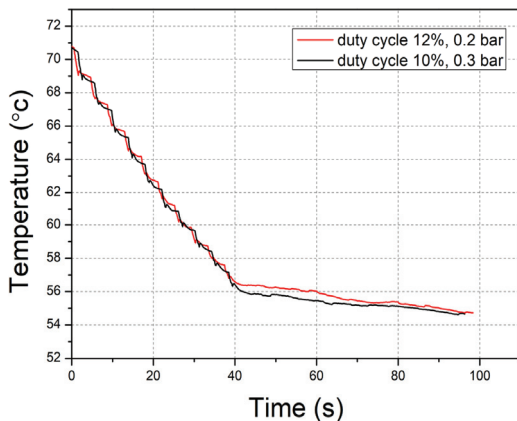


Fig. 9. Comparison of plate temperature histories for different duty-cycle and air-pressure combinations at the same total water spray mass

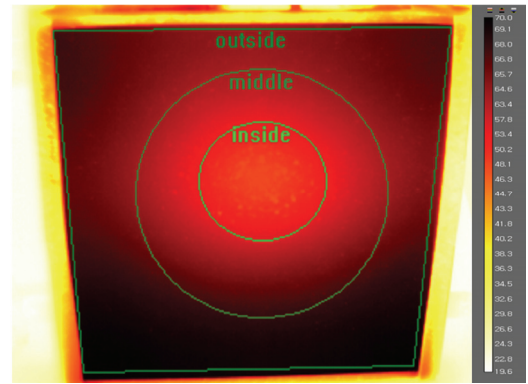


Fig. 10. Thermal image with definition of concentric analysis regions (inside, middle, and outside)

다. 이는 물 공급압력과 듀티비를 반비례하게 조절하였을 때 나타나는 현상이다. Fig. 9는 이러한 특성을 비교한 것으로, 동일 분무량을 유지하는 경우 듀티비 - 분무압 사이의 관계는 냉각성능에 미치는 영향이 매우 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 냉각성능은 분무 방식보다 분무량 자체에 더 민감하다는 것을 알 수 있으며, 2유체 증발 냉각에서는 물 공급량에 의한 잠열과 현열 제거가 주요 방열 인자임을 알 수 있다.

3.7 분무 영역별 냉각 특성

분무 분포에 따른 국부 냉각 특성을 정량적으로 평가하기 위해 Fig. 10과 같이 분무 중심을 기준으로 중심(inside), 중간(middle), 외곽(outside)의 세 영역을 설정하였다. Fig. 11과 Fig. 12는 분무 분포에 따른 표면 냉각 특성을 정량적으로 평가하기 위해, 열화상 이미지 상에서 분무 중심을 기준으로 각각의 세 영역의 평균 온도를 비교하였다. 중심부를 포함하는 누적 영역의 평균 온도를 먼저 구한 뒤, 인접 영역 간 차이를 이용하여 중간 영역의 평균 온도를 산정하는 방법을 적용하였다.

열화상 이미지에서는 각 픽셀의 면적이 동일하다고 볼 수 있으므로, 면적 A 대신 픽셀 개수 N을 사용한 가중 평균 개념으로 영역 평균 온도를 계산할 수 있다. 즉, 더 큰 누적 영역 2의 평균 온도를 T_2 , 그 내부에 포함되는 작은 누적 영역 1의 평균 온도를 T_1 , 각 영역의 픽셀 수를 각각 N_2 , N_1 이라고 하면, 두 영

역의 차집합에 해당하는 환형 영역의 평균 온도는 다음과 같이 계산된다.

$$\overline{T}_{21} = \frac{\overline{T}_2 N_2 - \overline{T}_1 N_1}{N_2 - N_1} \quad (3)$$

여기서 $\overline{T}_{21}$ 는 영역 2 전체에서 영역 1을 제외한 부분, 즉 중간 영역의 평균 온도를 의미한다. 같은 방식으로 outside 영역 역시 더 바깥쪽 누적 영역과 그 내부 누적 영역의 평균 온도 및 픽셀 수를 이용하여 계산할 수 있다.

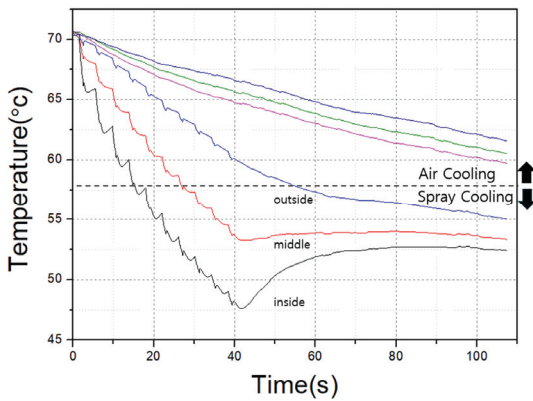


Fig. 11. Comparison of regional cooling curves under air cooling and spray cooling conditions

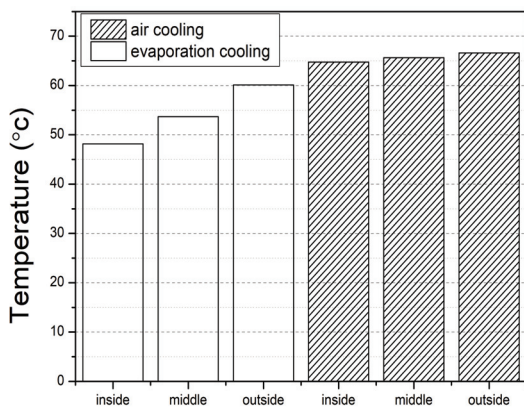


Fig. 12. Area-averaged temperatures for each zone under air cooling and evaporative cooling conditions

이와 같이 계산된 영역별 평균 온도를 비교한 결과, 공랭만 적용한 경우에는 평판 전반에 걸쳐 비교적 완만하고 균일한 온도 분포가 형성된 반면, 2유체 분무 냉각의 경우에는 분무 중심부와 외곽 영역 사이의 냉각 강도 차이로 인해 영역별 평균 온도 편차가 뚜렷하게 나타났다. 이는 분무가 평판 전체에 균일하게 작용하는 방식이 아니라, 노즐 중심부를 기준으로 액적 도달량과 젖음 정도가 공간적으로 다르게 분포하기 때문이다.

특히 본 연구와 같이 노즐이 평판 중심을 향해 분사되는 조건에서는 중심부에 가까울수록 분무수가 집중되면서 냉각 효과도 크게 나타나고, 외곽으로 갈수록 분무수의 분포가 줄어들며 냉각 효과도 약화되는 경향을 보였다.

결과적으로 분무 냉각 조건에서 중심 영역의 평균 온도가 가장 낮고, 바깥 영역으로 갈수록 평균 온도가 증가하는 경향이 나타났다. 반면 공랭 조건에서는 각 영역 간 평균 온도 차이가 상대적으로 작아, 전체 평판에 걸쳐 보다 균일한 냉각이 이루어졌다. 이러한 차이는 공랭이 평판 전면에서 비교적 고르게 작용하는 강제 대류 지배 냉각 방식인 반면, 분무 냉각은 액적 충돌, 국부 젖음, 액막 형성 및 증발이 주로 분사 중심 영역에서 집중적으로 일어나기 때문으로 볼 수 있다. 따라서 공랭은 평판 전체를 균일하게 냉각하는 데에는 효과적이지만, 그 속도가 빠르지 않고 동일 조건의 스프레이 냉각은 특정 영역의 온도를 빠르게 낮추는 데에는 유리하나 평판 전체에 걸쳐 동일한 냉각 강도를 형성하지는 않는 특성을 가진다.

이러한 결과는 라디에이터 외부 분무 냉각 시스템 설계 시 노즐 배치, 분무각, 분무 거리, 분무량 및 공기 유동 조건을 함께 최적화할 필요가 있음을 보여준다. 예를 들어 단일 노즐의 중앙 집중 분무 방식은 국부 냉각성능은 우수할 수 있으나, 전체 면적 활용 측면에서는 한계를 가질 수 있다. 반면 분무 패턴을 조정하거나 다중 노즐을 적용하여 분무가 더 넓은 영역에 분포되도록 설계하면, 단위 물 소비량당 라디에이터 전체 방열 성능을 더욱 효과적으로 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

3.8 PEMFC 라디에이터 적용 가능성 및 한계

본 연구의 가열 평판은 실제 수소차량용 열교환기를 직접 모사하기 위한 것이 아니라, 라디에이터 공기측 표면에서 발생하는 액적 충돌, 표면 젖음, 액막 형성, 강제대류 및 증발 냉각 현상을 단순화하여 평가하기 위한 기초 모델이다. 평판 실험은 가열된 고체 표면에 외부 공기 유동과 물 분무가 동시에 작용한다는 점에서 라디에이터 외부 분무 냉각과 일차적인 물리적 유사성을 가진다.

그러나 실제 라디에이터는 핀 및 루버 구조, 큰 표면적비, 좁은 유로, 불균일한 공기 유동, 액막의 모세관 유지, 배수 및 재비산 특성을 가지므로 평판과 기하학적으로 동일하지 않다. 또한 실제 시스템에서는 냉각수 유동과 공기측 열전달이 결합되며, 차량 속도, 팬 유동, 외기 온도 및 습도가 동시에 변화한다¹⁷⁾. 따라서 본 연구에서는 실제 라디에이터와의 완전한 기하학적 및 동적 상사성이 확보되었다고 볼 수 없으며, 결과는 분무량, 풍속 및 펄스 조건이 과도 증발 냉각에 미치는 상대적인 영향을 평가하기 위한 기초 자료로 해석해야 한다.

실제 적용 시에는 라디에이터 전방 공기측에 복수의 2유체 노즐을 배치하고, 냉각수 출구 온도 또는 스택 부하 신호에 따라 PWM 방식으로 분무량을 제어하는 구성이 가능하다. 단일 노즐의 중앙 집중 분무는 국부 냉각에는 유리하지만 전체 코어 면적을 균일하게 활용하기 어렵기 때문에, 실제 시스템에서는 다중 노즐 배치, 분무각, 노즐-라디에이터 거리 및 공기 유동 분포의 최적화가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 200 mm × 200 mm × 5 mm 알루미늄 가열 평판을 대상으로 2유체 공기-물 분무 냉각의 과도 냉각 특성을 실험적으로 평가하였다.

- 1) 본 연구의 실험 범위에서 2유체 분무 냉각은 동일한 공랭 조건보다 빠른 과도 온도 저감 성능

을 나타냈으며, 분사 종료 시점에서 약 6–9°C의 온도 차이가 확인되었다.

- 2) 공기 유속 증가는 강제대류와 액막 증발을 촉진하였으며, 물 분무량 증가는 표면 젖음 면적과 증발 가능한 물의 양을 증가시켜 냉각성능을 향상시켰다. 동일한 총 분무량 조건에서는 듀티비와 공기압 조합에 따른 성능 차이가 상대적으로 제한적으로 나타났다.
- 3) 분무 냉각은 분무 중심부에서 국부적으로 큰 온도 저감 효과를 나타냈으나, 외곽 영역에서는 냉각 효과가 감소하였다. 따라서 실제 라디에이터 적용 시에는 단일 노즐의 국부 냉각성능뿐 아니라 전체 코어에 대한 분무 균일도를 함께 고려해야 한다.
- 4) 본 결과는 실제 라디에이터 공기측에 적용되는 보조 증발 냉각 시스템의 분무량, 공기 유속 및 펄스 제어 조건을 설계하기 위한 기초 자료로 활용될 수 있다. 향후에는 실제 라디에이터 코어 형상, 불균일한 공기 유동, 외기 습도, 액적 크기 및 배수 특성을 고려한 추가 검증이 필요하다.

후 기

이 논문은 2022년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구이다 (No. KRIT-CT-22-035, 차세대 전차용 저소음 동력 장치 및 대구경 무장 설계 기술).

References

1. J. Woo, Y. Kim, and S. Yu, "Performance of fuel cell system for medium duty truck by cooling system configuration", Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 32, No. 4, 2021, pp. 236-244, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2021.32.4.236>.
2. Q. Chen, G. Zhang, X. Zhang, C. Sun, K. Jiao, and Y. Wang, "Thermal management of polymer electrolyte membrane fuel cells: a review of cooling methods, material properties, and durability", Applied Energy, Vol. 286, 2021, pp. 116496, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116496>.

3. S. G. Kandlikar and Z. Lu, "Thermal management issues in a PEMFC stack: a brief review of current status", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 7, 2009, pp. 1276-1280, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.05.009>.
4. U. Soupremanien, S. Le Person, M. Favre-Marinet, and Y. Bultel, "Tools for designing the cooling system of a proton exchange membrane fuel cell", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 40, 2012, pp. 161-173, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.02.008>.
5. G. Maranzana, O. Lottin, T. Colinar, S. Chupin, and S. Didierjean, "A multi-instrumented polymer exchange membrane fuel cell: observation of the in-plane non-homogeneities", *Journal of Power Sources*, Vol. 180, No. 2, 2008, pp. 748-754, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.03.002>.
6. G. Zhang and S. G. Kandlikar, "A critical review of cooling techniques in proton exchange membrane fuel cell stacks", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 3, 2012, pp. 2412-2429, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.11.010>.
7. E. A. Silkk, E. L. Golliher, and R. P. Selvam, "Spray cooling heat transfer: technology overview and assessment of future challenges for micro-gravity application", *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, No. 3, 2008, pp. 453-468, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.07.046>.
8. J. Kim, "Spray cooling heat transfer: the state of the art", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 28, No. 4, 2007, pp. 753-767, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2006.09.003>.
9. A. H. Lefebvre, "Airblast atomization", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 6, No. 3, 1980, pp. 233-261, doi: [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(80\)90017-9](https://doi.org/10.1016/0360-1285(80)90017-9).
10. G. Ferreira, J. A. García, F. Barreras, A. Lozano, and E. Lincheta, "Design optimization of twin-fluid atomizers with an internal mixing chamber for heavy fuel oils", *Fuel Processing Technology*, Vol. 90, No. 2, 2009, pp. 270-278, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.09.013>.
11. S. D. Sovani, P. E. Sojka, and A. H. Lefebvre, "Effervescent atomization", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 27, No. 4, 2001, pp. 483-521, doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(00\)00029-0](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(00)00029-0).
12. M. R. O. Panão and A. L. N. Moreira, "Intermittent spray cooling: a new technology for controlling surface temperature", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 30, No. 1, 2009, pp. 117-130, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.10.005>.
13. S. Freund, A. G. Pautsch, T. A. Shedd, and S. Kabelac, "Local heat transfer coefficients in spray cooling systems measured with temperature oscillation IR thermography", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 9-10, 2007, pp. 1953-1962, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.09.028>.
14. S. Somasundaram and A. A. O. Tay, "An experimental study of closed loop intermittent spray cooling of ICs", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 14-15, 2011, pp. 2321-2331, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.03.030>.
15. A. Faghri and Z. Guo, "Challenges and opportunities of thermal management issues related to fuel cell technology and modeling", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, No. 19-20, 2005, pp. 3891-3920, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.04.014>.
16. I. Mudawar and T. A. Deiters, "A universal approach to predicting temperature response of metallic parts to spray quenching", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 3, 1994, pp. 347-362, doi: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(94\)90070-1](https://doi.org/10.1016/0017-9310(94)90070-1).
17. M. Y. Lee, J. P. Won, C. W. Cho, and H. S. Lee, "Experimental study on the mutual influence of thermal management system for hydrogen fuel cell vehicle", *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 22, No. 6, 2011, pp. 852-858, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2011.22.6.852>.