

핀 구조 기반 냉각성능 향상을 위한 증발냉각의 해석적 연구

강현성^{*,**}, 문경룡^{*}, 신유희^{*}, 오세두^{*}

^{*}한국자동차연구원

^{**}고려대학교 기계공학과

e-mail:sdoh@katech.re.kr

Numerical Study on Evaporative Cooling for Enhancing Cooling Performance of Fin Structures

Hyun Sung Kang^{*,**}, Kyeong Ryong Moon^{*}, Yoon Hyuk Shin^{*}, Se-Doo Oh^{*}

^{*}Korea Automotive Technology Institute

^{**}Department of Mechanical Engineering, Korea University

본 연구에서는 수소전기자동차용 라디에이터의 열관리 성능 향상을 위해 드리즐링 기반 증발냉각 기술을 적용하고, 핀 형상 및 운전 조건에 따른 열교환 특성을 수치해석적으로 평가하였다. Plate-fin과 Louver-fin 구조를 대상으로 액적 거동, 수막 형성 및 증발잠열 효과를 모사하였다.

해석 결과, 드리즐링 적용 시 모든 조건에서 열교환 성능이 향상되었으며, 특히 고온 냉각수 및 저속 공기 조건에서 증발잠열에 의한 추가적인 열 제거 효과가 크게 나타났다. 본 연구를 통해 드리즐링 기반 증발냉각 기술이 기존 냉각 방식의 한계를 보완할 수 있는 효과적인 열관리 방안을 확인하였으며, 향후 분사 조건 및 시스템 적용을 위한 최적 설계 연구가 필요함을 제시하였다.

1. 서론

최근 지구 온난화로 인한 기후 변화 대응의 필요성이 증대됨에 따라, 탄소 배출 저감을 위한 친환경차의 중요성이 크게 부각되고 있다. 특히 수소분야 배출가스에서 높은 비중을 차지하는 중대형화물치의 친환경 전환이 요구되는 가운데, 이를 대체하기 위해 연료전지가 적용되어 유해 배출가스가 없는 수소전기자동차가 차세대 모빌리티로 각광받고 있다[1].

그러나 고부하 운전 특성을 갖는 수소전기자동차의 경우 연료전지 스택 및 전력변환 장치에서 발생하는 높은 발열로 인한 연료전지 스택의 성능 및 내구성 저하가 발생할 수 있기 때문에 효과적인 열관리 기술 확보가 필수적이다[2]. 기존의 공냉 및 수냉 기반 냉각 시스템은 열관리 성능 및 응답성에 한계가 존재한다.

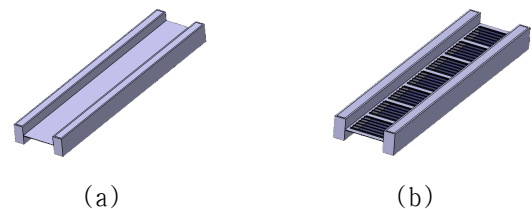
이러한 한계를 극복하기 위한 방안으로, 액체의 상변화 과정에서 발생하는 증발잠열을 활용하는 증발냉각 기술이 주목받고 있다. 증발냉각은 동일 질량 대비 높은 방열 성능을 가지며, 특히 라디에이터 또는 핀 구조 표면에서의 액적 분사(Spray) 및 드리즐링(Drizzling)을 통해 열전달 성능을 극대화할 수 있는 장점이 있다[3].

따라서 본 연구에서는 수소전기자동차용 핀 구조 기반 라디에이터 표면에 물을 드리즐링하는 방식의 증발냉각 기술을 적용하고, 구조 및 유동 조건에 따라 증발잠열이 냉각성능에 미치는 영향을 해석적으로 예측 및 분석하고자 한다. 이를 통해 고부하 운

전 조건에 대응 가능한 증발냉각용 라디에이터 설계 인자 도출을 목표로 한다.

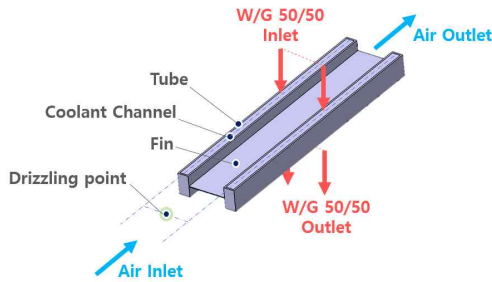
2. 모델 구성 및 경계조건

수소전기자동차 대상 200kW급 대형 라디에이터 형상을 기반으로 핀 단위 모델을 구성하였으며, 핀 구조에 의한 드리즐링 효과를 비교하기 위해 그림 1과 같이 Plate-fin과 Louver-fin을 모델화하였다. 또한, 드리즐링 효과를 구현하기 위해 Lagrangian Multiphase 모델과 핀 표면의 수막 현상을 구현하기 위한 Fluid film 모델, 표면 증발 잠열에 대한 현상을 분석하기 위한 Evaporation/Condensation - Raoult's Law 모델을 적용하였다.



[그림 1] 수소전기자동차용 라디에이터 핀 모델 (a) Plate-fin (b) Louver-fin

그림 2와 같이 핀 한 개 단위의 모델을 구성하였으며, 핀을 중심으로 Air 측과 Coolant 측 도메인을 구성하였다. 해당 모델은 연료전지 스택 발열에 의한 고온의 냉각수를 라디에이터 핀과 외기의 열교환을 통해 냉각하는 방식을 모델링하였다. 또한, 냉각 성능을 극대화하기 위해 라디에이터 전면으로부터 3cm 거리에 드리즐링 포인트를 정의하여 Lagrangian Multiphase에 의해 Droplet을 흘려주는 현상을 모사하였다.



[그림 2] 드리즐링 적용 핀 모델 개념도

[표 1] 드리즐링 적용 핀 모델 적용 메쉬

Parameters	Values
Mesh type	Polyhedral
Number of mesh	1,438,103
Average mesh quality	0.742 (1 is the best)
The first layer Height in the Prism [mm]	0.06 ($Y^+ \sim 1$)
Number of prism layer	5

핀 모델의 유체 측 메쉬는 다면체(Polyhedral) 타입을 적용하였으며 핀 고체 측 메쉬는 Thin mesher를 사용하여 표면의 다면체 구조를 스윙하였다. 핀 표면의 수막 두께 및 열교환량을 계산하기 위해 표 1과 같이 프리즘 메쉬 층을 구현하여 $Y^+ \sim 1$ 을 만족하는 높이를 구성하였다. 핀 모델에 적용된 물성 정보는 표 2와 같이 나타내었으며 냉각수(G50/W50)의 물성값은 온도에 따른 함수를 적용하였으며 공기(Air)와 고체(Al)측 물성값은 상수를 적용하였다.

[표 2] 핀 모델 적용 파트 별 물성 정보

Material Properties		Values
Solid	Density [kg/m ³]	2702
	Specific heat [J/kg·K]	903.05
	Thermal conductivity [W/m·K]	237
	Al (Solid domain)	

Fluid	Density [kg/m ³]	Function(T_{fluid}) (Ref. REFPROP Data)
	Specific heat [J/kg·K]	
	Dynamic viscosity [kg/m·s]	
	Thermal conductivity [W/m·K]	
Ethylene glycol/Water 50/50 (Fluid domain)		
Fluid	Density [kg/m ³]	1.18415
	Specific heat [J/kg·K]	1003.62
	Dynamic viscosity [kg/m·s]	1.85508E-5
	Thermal conductivity [W/m·K]	0.026
Air (Fluid domain)		

드리즐링 적용 핀 모델의 열교환량 분석을 위해 표 3과 같이 냉각수 및 공기의 입구단 온도 및 유량에 따른 해석을 진행하였다. 또한, 드리즐링 조건을 적용하여 표면 증발량을 분석하기 위해 라디에이터 전면으로부터 3 cm 거리에서 드리즐링 유량 0.00012 kg/s를 분사하였다. 수소전기화물차의 운전조건을 고려하여 냉각수 측 유속 0.3 ~ 1 m/s, 냉각수 측 입구 온도 55 ~ 85 °C, 공기 측 유속 1 ~ 8 m/s, 공기 측 입구 온도 10 ~ 45 °C를 경계조건으로 선정하였다.

[표 3] 핀 모델 적용 경계 조건

Parameters		Values	
Water/Glycol 50/50	Inlet	velocity [m/s]	0.3 ~ 1
		Temperature [°C]	55 ~ 85
	Outlet	Pressure [barg]	0
Air	Inlet	velocity [m/s]	1 ~ 8
		Temperature [°C]	10 ~ 45
	Outlet	Pressure [barg]	0

3. 해석 결과

참고문헌

본 연구에서는 Plate-fin과 Louver-fin 구조에 대해 드리즐링 적용 유무에 따른 열교환 성능 변화를 비교 분석하였다. 해석 결과, 모든 운전 조건에서 드리즐링을 적용한 경우가 미적용 조건 대비 열교환량이 증가하는 경향을 나타냈다

특히 공기 유속이 낮고 냉각수 온도가 높은 조건에서 드리즐링에 의한 성능 향상이 크게 나타났으며, 이는 액적이 핀 표면에 도달하여 형성된 수막이 증발하면서 잠열을 통해 추가적인 열 제거가 발생했기 때문이다. 반면, 공기 유속이 증가할수록 일부 액적이 핀 표면에 충분히 부착되지 못하고 비산됨에 따라 증발 효율이 감소하는 경향이 확인되었다

Fluid film 모델을 통해 계산된 핀 표면의 수막 두께 분포를 분석한 결과, 드리즐링 조건에서 핀 전단부에 상대적으로 두꺼운 수막이 형성되었으며, 유동 방향으로 갈수록 점진적으로 감소하는 경향을 보였다. 이와 같은 수막 분포는 국부적인 증발량 차이를 유발하며, 결과적으로 열전달 성능의 공간적 비균일성을 발생시키는 주요 요인으로 작용한다.

증발량 분석 결과, 전체 열교환량 증가분 중 상당 부분이 액적의 현열 교환이 아닌 증발잠열에 의해 기인하는 것으로 확인되었으며, 이는 드리즐링 기반 증발냉각이 고부하 열관리 조건에서 효과적인 대안이 될 수 있음을 의미한다.

- [1] Staffell, Iain, et al. "The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system." *Energy & Environmental Science*, 12(2), 463–491, 2019.
- [2] He, Liange, et al. "A review of thermal management of proton exchange membrane fuel cell systems." *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 15(1), 2023.
- [3] Cheng, Wen-Long, et al. "Spray cooling and flash evaporation cooling: The current development and application." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 614–628, 2016.

4. 결론

본 연구에서는 수소전기화학차용 라디에이터 핀 구조를 대상으로 드리즐링 기반 증발냉각 기술을 적용하여 열교환 성능 향상 효과를 수치해석적으로 분석하였다.

또한, 핀 표면에 형성되는 수막의 두께 분포와 증발 거동이 열전달 성능에 중요한 영향을 미치는 것을 확인하였으며, 드리즐링 유량 및 분사 조건의 최적화의 필요성을 확인하였다. 따라서 드리즐링 기반 증발냉각 기술은 기존 공냉 및 수냉 방식의 한계를 보완할 수 있는 유효한 열관리 기술로 판단되며, 향후 수소전기화학차 열관리시스템 적용을 위한 최적 설계 인자 도출에 기여할 것으로 사료된다.

5. 사사

이 연구는 2026년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원 (KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(미래차 전동화부품 설계·검증 지원 기반구축사업(P0024188))