

대형 수소전기상용차용 브레이크 레지스터 모듈에 대한 해석적 연구

강현성^{***}, 신윤혁^{*}, 정호창^{*}, 이종인^{*}, 박성태^{***}, 지덕구^{***}, 이준석^{***}

^{*}한국자동차연구원

^{**}고려대학교 기계공학과

^{***}(주)자화전자

e-mail:yhshin@katech.re.kr

A Numerical Study on Brake Resistor Modules for Heavy Duty Fuel Cell Electric Vehicles

Hyun Sung Kang^{***}, Yoon Hyuk Shin^{*}, Ho Chang Jung^{*}, Jong In Lee^{*}, Seong Tae Park^{***},
Deok Gu Ji^{***}, Joon Seok Lee^{***}

^{*}Korea Automotive Technology Institute

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

^{***}Jahwa Inc.

본 논문에서는 단일 매니폴드로 구성된 대형 수소전기상용차용 브레이크 레지스터 모듈의 냉각수 온도 및 유량에 따른 코어 표면 온도의 균일한 분포를 위한 해석적 연구를 진행하였다. 각 브레이크 레지스터 모듈은 서펜타인(serpentine) 구조의 발열코어를 갖으며 유로 형성을 위한 서펜타인 구조 내 격벽을 형성하여 냉각수 유속을 확보하였다. 해당 유로 구조 및 단일 매니폴드 형상에 의한 냉각수 유량과 브레이크 레지스터 모듈의 발열코어 표면 온도 형성 구간이 각각 차이를 보임에 따라 냉각수 입구온도 및 유량 변화를 통해 운전 조건 별 코어 표면온도 분포를 비교하였다.

1. 서론

지속적인 화석 연료의 수요가 증가함에 따라 대기온도 상승 및 급격한 기후 변화가 가속화되고 있으며 이를 해결하기 위한 국제적 관심이 높아지고 있다[1]. 수송 분야에서 화석 연료를 대체하기 위해 연료전지 및 배터리를 적용한 전력이반 차량 개발이 활발히 이루어지고 있다[2]. 전력이반 차량은 도로 교통 시나리오의 변화에 따라 마찰형 제동과 회생형 제동 시스템에 의해 제동력을 발생시킨다[3]. 그러나, 마찰형 브레이크 작동 시 다량의 석면 먼지가 방출되어 인간 및 동물의 폐 내부층에 치명적인 문제를 발생시킨다[4]. 이러한 문제로 마찰형 브레이크 레지스터의 작동 빈도 최소화를 위해 회생 제동 적용 비율을 높이는 연구가 활발히 진행되고 있다.

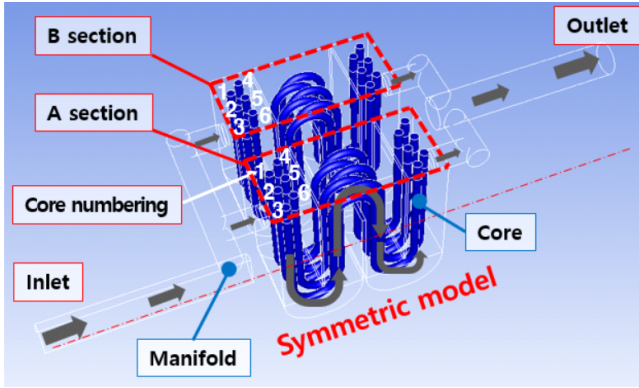
회생제동은 제동력을 얻기 위해 회생을 통해 생성된 전력을 배터리 충전에 의해 소비하여 제동력을 유지한다. 그러나 지속적인 슬로프 구간 및 균일 제동이 필요한 운전 영역에서 배터리 충전 이상의 전력이 생성될 경우, 제동력을 상실할 수 있는 위험이 발생한다. 이러한 문제를 방지하기 위해 유사시 전력 소비가 가능한 브레이크 레지스터를 도입하여 적용하고 있다.

최근 전동화 부품의 첨단화 및 모듈화가 진행됨에 따라, 브레이크 레지스터 또한, 모듈단위 개발이 진행되고 있다. 본 연구에서 적용된 수소전기화물차용 브레이크 레지스터는 총 4

개의 모듈로 구성되어 있으며, 각 모듈은 단일 매니폴드에 의해 냉각수가 공급된다. 매니폴드 구성 및 브레이크 레지스터 모듈 연결 구조에 의해 각 모듈의 유량 및 온도 분포 형성에 있어 차이를 보이며 이러한 특성은 브레이크 레지스터 발열코어 표면의 온도편차를 상승시킨다. 유속 균일도가 감소하면 코어의 국부적인 고온 환경이 형성되어 뭍음에 의한 차압 증가 문제가 발생한다. 이러한 문제를 개선하기 위해 수소전기화물차의 운전범위가 반영된 해석적 연구를 진행하였다.

2. 모델 구성 및 경계조건

대형 수소전기상용차용 브레이크 레지스터는 용량에 따라 모듈의 개수를 선정하며 대상 브레이크 레지스터는 모듈 4개가 적용되었다. 모듈당 최대 35kW 전력의 소비가 가능하며 총 140kW 전력의 소비가 가능한 브레이크 레지스터를 대상으로 하였다. 브레이크 레지스터의 코어 표면 온도 분석을 위한 모델을 구성하기 위해 그림 1과 같이 중심 기준 대칭 모델을 구성하여 시간적 비용을 최소화 하고자 하였다. 해당 브레이크 레지스터는 유량 특성에 따라 A Section과 B Section으로 분할하였으며 모듈당 6개의 코어를 갖는다. 각 코어에 그림 1과 같이 넘버링하여 코어 각각의 표면온도 분포를 분석하고자 하였다.



[그림 1] 브레이크 레지스터 모듈 모델 개념도

[표 1] 브레이크 레지스터 모듈 모델 적용 매쉬

Parameters	Values
Mesh type	Tetrahedron + Hexahedral
Number of mesh	12,549,214
Average mesh quality	0.692 (1 is the best)
The first layer Height in the Prism [mm]	0.2 (Y+~1)
Number of prism layer	5

브레이크 레지스터의 유체 측 매쉬는 유체측은 사면체 (Tetrahedron) 타입을 적용하였으며 코어는 육면체(Hexahedral) 기반 스윙 매쉬를 적용하였으며 코어 외벽의 유동을 계산하기 위해 표 1과 같이 프리즘 매쉬 층을 구현하여 Y+~1을 만족하는 높이를 구성하였다. 브레이크 레지스터 모듈 모델에 적용된 물성 정보는 표 2와 같이 나타내었으며 냉각수 (G50/W50)의 물성값은 온도에 따른 함수를 적용하였다. 또한, 고체측(STS303)은 각 물성에 따른 상수 값을 적용하였다.

[표 2] 브레이크 레지스터 모듈 모델 적용 파트 별 물성 정보

Material Properties		Values
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)	

Solid	Density [kg/m ³]	8000
	Specific heat [J/kg-K]	500
	Thermal conductivity [W/m-K]	16.2
	STS304 (Solid domain)	

브레이크 레지스터 코어 표면의 온도 편차를 확인하기 위해 표 3과 같이 냉각수 입구단의 온도 및 유량에 따른 해석을 진행하였다. 코어 발열량은 70kW, 냉각수 유량 80 ~ 220 LPM, 냉각수 입구 온도 80, 90 °C를 경계조건으로 선정하였다

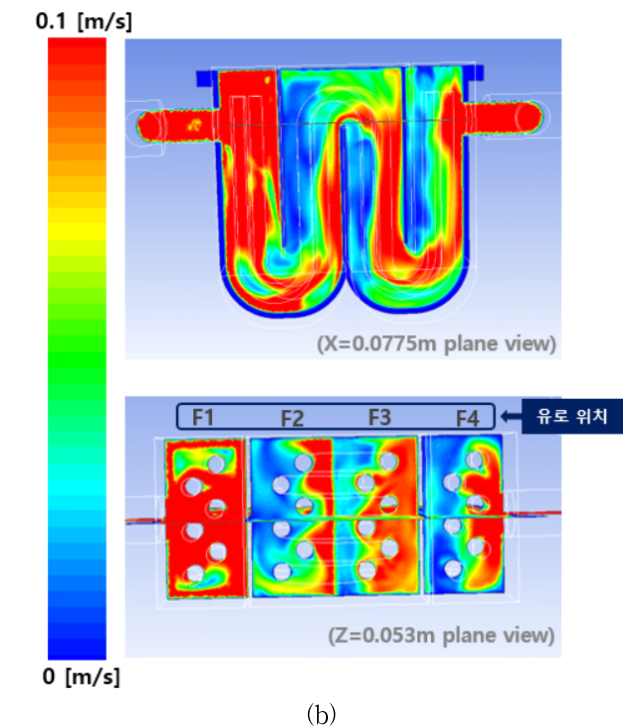
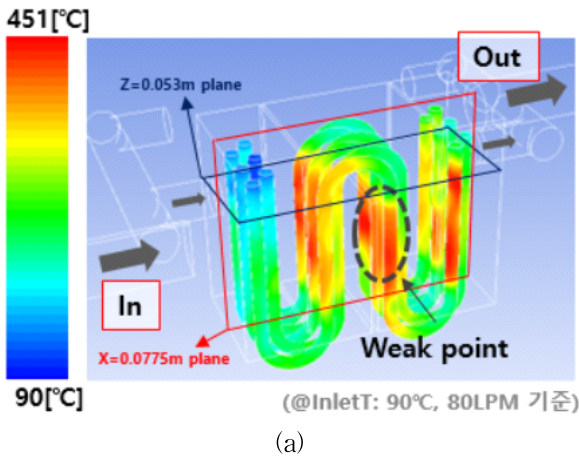
[표 3] 브레이크 레지스터 모듈 적용 경계 조건

Parameters		Values
Inlet	Volumetric flow rate [LPM]	80, 100, 120, 180, 200, 220
	Temperature [°C]	80, 90
Outlet	Pressure [barg]	0
Sheath	Heat generation [kW]	70
Housing	Wall convection [W/m ² K]	8 (@60°C)

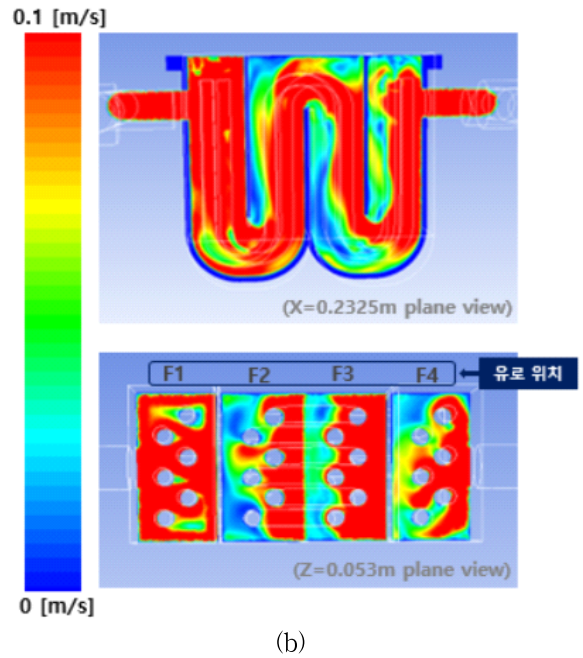
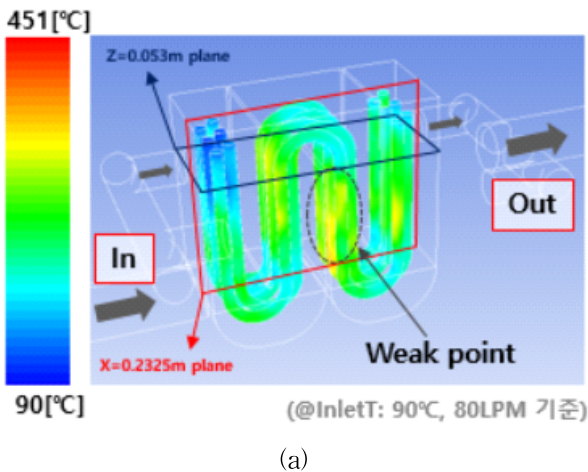
3. 해석 결과

브레이크 레지스터의 내부 유동 및 코어 표면의 온도 분포를 확인하기 위해 유량 120 LPM, 입구 온도 90°C 조건에서 해석된 결과를 그림 2와 그림 3과 같이 나타내었다. 그림 2 (a), (b)와 같이 하우징과 외부 코어 간 내부 유동은 편심된 입구 포트에 의해 헬리컬 형상의 주유동 방향을 형성하였으며 전면 격벽 부근에서 최대 유속을 보였다. 외부 코어와 내부 코어 간 내부 유동은 그림 2 (c)와 같이 후면 격벽에 의해 상부 방향의 균일한 유속을 보였다. 이러한 유동특성에 의해 외부 코어의 온도분포는 그림 3 (a), (b)과 같이 상대적으로 불균일하였으며, 내부 코어는 외부 코어에 비해 균일한 온도 분포를 보였다.

그림 2와 같이 A Section의 유속 분포를 분석한 결과, 입구부와 인접한 F1 유로는 상대적으로 균일한 유속을 형성하나 F2, F3, F4 유로는 U자 형식의 유로 형상에 의한 관성에 의해 우측 벽면의 유속이 높은 것을 확인할 수 있었다. 또한, 우측 벽면과 인접한 4, 5, 6번 코어는 상대적으로 높은 유속 분포에 의해 좌측 벽면과 인접한 1, 2, 3번 코어에 비해 낮은 표면 온도 분포를 형성하는 것을 확인하였다. 즉, A Section의 코어 표면온도는 F3 유로의 Weak point 영역에서 핫스팟(1, 2, 3번 코어)이 발생하였다.

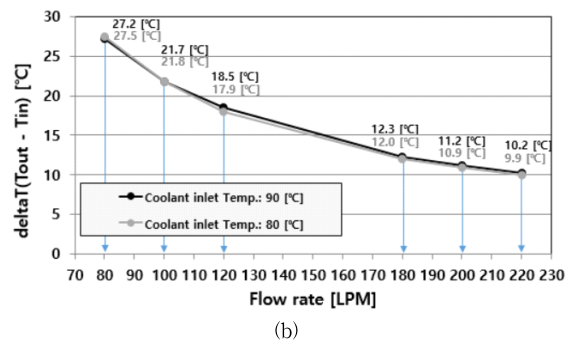
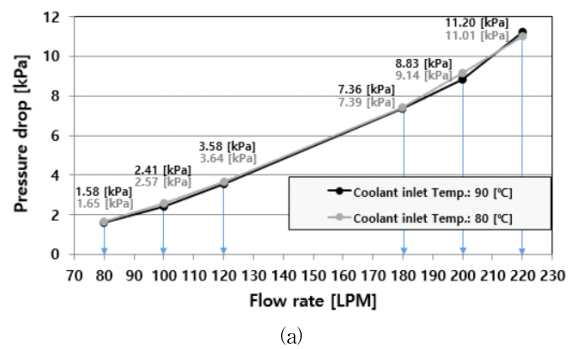


[그림 2] 브레이크 레지스터 모듈 A section 해석 결과 (a) 코어 표면 온도 (b) 모듈 내 유속 분포



[그림 3] 브레이크 레지스터 모듈 B section 해석 결과 (a) 코어 표면 온도 (b) 모듈 내 유속 분포

그림 3와 같이 B Section은 A Section과 유속 특성이 유사하나 A Section과 B Section에서 분기되는 유량의 비율이 약 2:3으로 B Section을 통과하는 유량이 A Section에 비해 70%가 높았다. 또한, 매니폴드를 통과한 유동의 관성에 의해 최대 유속이 A section에 비해 낮으나 유속 분포가 상대적으로 균일하였다. B Section은 A Section과 동일하게 코어 표면온도의 핫스팟은 동일한 Weak point 영역에서 발생하였으나, A Section에 비해 낮은 온도차를 보였다.



[그림 4] 냉각수 입구온도 및 유량에 따른 차압 및 출구 온도 (a) 냉각수측 차압, (b) 냉각수측 출구 온도

브레이크 레지스터 모듈의 냉각수 유량(80, 100, 120, 180, 200, 220 LPM) 및 입구 온도(80, 90 °C)에 따른 압력강하와 입출구 온도차는 그림 4 (a)와 (b)와 같이 나타내었으며, 냉각수 입출구 온도차가 10 °C 이하가 되기 위해 최소 220 LPM 이상의 유량 형성이 필요함을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 대형 수소전기상용차용 브레이크 레지스터 모듈의 단일 매니폴드 공유 구조에서 냉각수 온도 및 유량에 따른 발열코어 표면온도 편차 최소화를 위한 해석적 연구를 진행하였다. 각 모듈에 유입되는 유량은 매니폴드의 형상과 모듈의 배열에 따라 70% 이상의 차이를 보였으며, 이러한 유량 차이는 각 모듈의 코어 표면 온도차를 상승시키는 요인이 되었다. 이러한 문제를 개선하기 위해 각 브레이크 레지스터 모듈 내 동일한 유량이 유입되도록 매니폴드 최적 설계가 필요할 것으로 판단되었다.

5. 사사

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원 (KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(‘1415186139’)

참고문헌

- [1] Jeong, K. S., & Oh, B. S., “Fuel economy and life-cycle cost analysis of a fuel cell hybrid vehicle.” *Journal of Power Sources*, 105(1), 58-65, 2002.
- [2] İnci, M., Büyüç, M., Demir, M. H., & İlbey, G., “A review and research on fuel cell electric vehicles: Topologies, power electronic converters”, *energy management methods, technical challenges, marketing and future aspects. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110648, 2021.
- [3] Zhang, J., Lv, C., Qiu, M., Li, Y., & Sun, D. “Braking energy regeneration control of a fuel cell hybrid electric bus.” *Energy conversion and management*, 76, 1117-1124., 2013.
- [4] Jadhav, S. P., & Sawant, S. H. “A review paper: Development of novel friction material for vehicle brake pad application to minimize environmental and health issues.” *Materials Today: Proceedings*, 19, 209-212, 2019