

대형 수소전기상용차용 브레이크 레지스터에 대한 해석적 연구

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

^{*}한국자동차연구원

^{**}고려대학교 기계공학과

^{***}(주)자화전자

e-mail:yhshin@katech.re.kr

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

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

^{*}Korea Automotive Technology Institute

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

^{***}Jahwa Inc.

요약

본 논문에서는 대형 수소전기상용차용 브레이크 레지스터의 내부 냉각수의 온도, 유량 및 내부/외부 코어의 발열 비율 변화를 통해 코어의 표면온도 최소화를 위한 해석적 연구를 진행하였다. 헤리컬 형상의 구조 갖는 브레이크 레지스터의 내부/외부 코어를 활용하여 유로를 구성하였으며 냉각수 입구 온도 및 유량 변화를 통해 운전조건 별 코어 표면온도를 비교하였다. 또한, 브레이크 레지스터의 내부 코어와 외부 코어의 발열량 비율 변화를 통해 전체 코어의 표면온도 편차를 확인하였다.

1. 서론

최근 지속적인 대기온도 상승 및 급격한 기후 변화에 따라 온실 가스 감소에 대한 국제적인 관심이 높아지고 있다. 또한, 국제 에너지기구의 자료에 따르면 운송 관련 온실 가스 배출량은 전체 온실 가스 배출량의 4분의 1을 차지하는 만큼 운송 차량에 대한 개선이 시급하다[1]. 이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 기존의 내연기관 상용차를 수소전기상용차로 전환하기 위한 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있다[2-3].

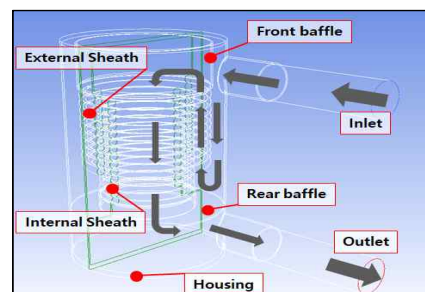
수소전기차는 회생제동을 통해 제동력을 얻으며 생성된 전력을 배터리 충전에 의한 소비를 통하여 제동력을 유지한다. 그러나 슬로프 구간 및 지속적인 제동이 필요한 운전영역에서 허용치 이상의 전력이 생성될 경우, 제동력을 상실할 수 있는 위험이 발생할 수 있으며, 이를 방지하기 위해 생성된 전기에너지를 열에너지로 변환 및 소모시킬 수 있는 브레이크 레지스터를 대형 수소상용차에 적용한다.[4].

기존의 대형수소화물차는 열관리 시스템 이외에 안전상 문제로 브레이크 레지스터와 라디에이터를 포함한 별도의 냉각 루프가 구성되어 있으나 최근 시스템 복잡성이 증대됨에 따라 새시 레이아웃을 추가 구성할 수 있는 공간이 부족하다. 따라서, 협소한 공간적 문제를 해결하고 브레이크 레지스터의 폐열을 활용하기 위해 브레이크 레지스터의 냉각루프와 기존의 열관리시

스템을 결합하고자 본 연구에서는 열관리시스템의 운전범위를 적용한 브레이크 레지스터의 해석적 연구를 진행하였다.

2. 모델 구성 및 경계조건

대형 수소전기상용차용 브레이크 레지스터는 그림 1과 같이 발열체인 내부 코어(Internal sheath)와 외부 코어(External sheath), 유로 형성을 위한 전면 격벽(Front baffle)과 후면 격벽(Rear baffle) 등으로 모델을 구성하였다. 발열체 냉각을 위한 냉각수는 입구부를 통해 하우징 내부로 유입되며, 전면 격벽에 의해 외부 코어와 하우징 사이의 유로를 원심 방향으로 순회하여 후면 격벽에 의해 내부 코어와 외부 코어로 구성된 유로를 통과하여 내부코어 중심을 통해 출수부로 순환한다.



[그림 1] 브레이크 레지스터 모델 개념도

[표 1] 브레이크 레지스터 모델 적용 메쉬

Parameters	Values
Mesh type	Tetrahedron
Number of mesh	9,879,232
Average mesh quality	0.786 (1 is the best)
The first layer Height in the Prism [mm]	0.2 (Y+~1)
Number of prism layer	5

[표 2] 브레이크 레지스터 모델 적용 파트 별 물성 정보

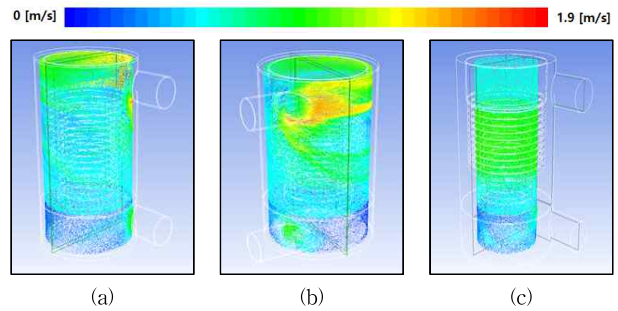
Material Properties		Values
Fluid	Density [kg/m ³]	Function(T _{fluid}) (Ref. REFPROP Data)
	Specific heat [J/kg·K]	
	Dynamic viscosity [kg/m·s]	
	Thermal conductivity [W/m·K]	
Ethylene glycol/Water 50/50 (Fluid domain)		
Solid	Density [kg/m ³]	8000
	Specific heat [J/kg·K]	500
	Thermal conductivity [W/m·K]	16.2
	STS304 (Front baffle, Rear baffle, External sheath, Internal sheath, Housing)	

[표 3] 브레이크 레지스터 모델 적용 경계 조건

Parameters		Values
Inlet	Volumetric flow rate [LPM]	80, 100, 120
	Temperature [°C]	80, 90
Outlet	Pressure [barg]	0
Sheath	Heat generation [kW]	40
	Ratio (External : Internal)	7:3, 6:4, 5:5, 4:6, 3:7
Housing	Wall convection [W/m ² K]	8 (@60°C)

3. 해석 결과

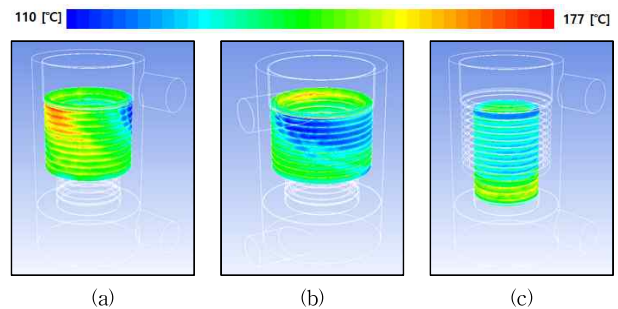
브레이크 레지스터의 내부 유동 및 코어 표면의 온도 분포를 확인하기 위해 유량 120LPM, 입구 온도 90°C 조건에서 해석된 결과를 그림 2와 그림 3과 같이 나타내었다. 그림 2 (a), (b)와 같이 하우징과 외부 코어 간 내부 유동은 편심된 입구 포트에 의해 헬리컬 형상의 주유동 방향을 형성하였으며 전면 격벽 부근에서 최대 유속을 보였다. 외부 코어와 내부 코어 간 내부 유동은 그림 2 (c)와 같이 후면 격벽에 의해 상부 방향의 균일한 유속을 보였다. 이러한 유동특성에 의해 외부 코어의 온도분포는 그림 3 (a), (b)과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



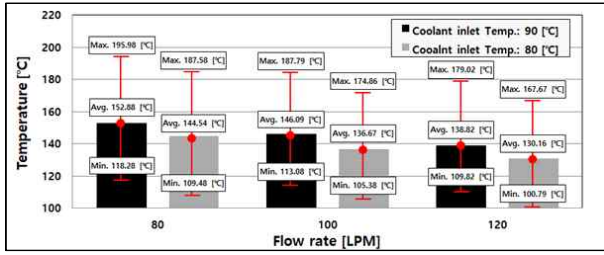
[그림 2] 브레이크 레지스터 유속 벡터 (a), (b) 하우징-외부 코어 간 내부 유동, (c) 외부 코어-내부 코어 간 내부 유동

브레이크 레지스터의 유체 측 메쉬는 사면체(Tetrahedron) 타입을 적용하였으며 코어 외벽의 유동을 계산하기 위해 표 1과 같이 프리즘 메쉬 층을 구현하여 Y+~1을 만족하는 높이를 구성하였다. 브레이크 레지스터 열유동 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.

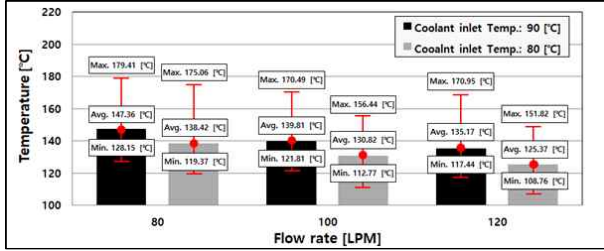
냉각수 입구단의 온도 및 유량에 따른 브레이크 레지스터 코어 표면의 온도 편차를 확인하기 위해 표 3과 같이 코어 발열량 40kW 기준, 냉각수 유량 및 입구 온도에 따른 해석을 진행하였다. 또한, 표 2의 조건 중 가혹 조건인 냉각수 유량 80LPM, 입구온도 90°C 기준, 외부 코어와 내부 코어에 발열 비율에 따른 코어 표면 온도 간 편차를 비교하였다.



[그림 3] 브레이크 레지스터 표면온도 분포 (a), (b) 외부 코어 표면 온도, (c) 내부 코어 표면 온도



(a)

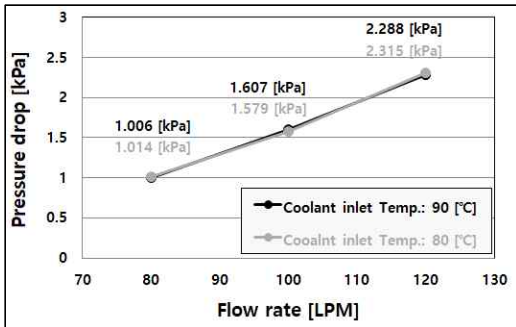


(b)

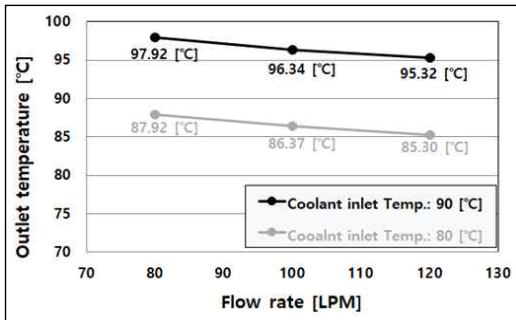
[그림 4] 냉각수 입구온도 및 유량에 따른 코어의 표면 평균, 최대, 최소 온도 (a) 외부 코어, (b) 내부 코어

냉각수 입구온도 및 유량에 따른 코어 표면 온도를 그림 4와 같이 나타내었으며 유량이 증가할수록 내부 및 외부 코어의 평균 온도가 감소하는 것을 확인하였다. 또한, 냉각수 유동 방향에 의해 외부 코어가 우선 냉각이 되었으나 내부 코어에 비해 높은 최대온도를 형성하는 것을 확인할 수 있었다.

브레이크 레지스터의 냉각수 유량 및 입구 온도에 따른 압력강하는 그림 5 (a)와 같이 나타내었으며 냉각수 입구 온도에 따른 압력강하 차이는 크지 않았다. 또한, 냉각수 출구 평균 온도는 그림 5 (b)와 같이 나타내었다.



(a)

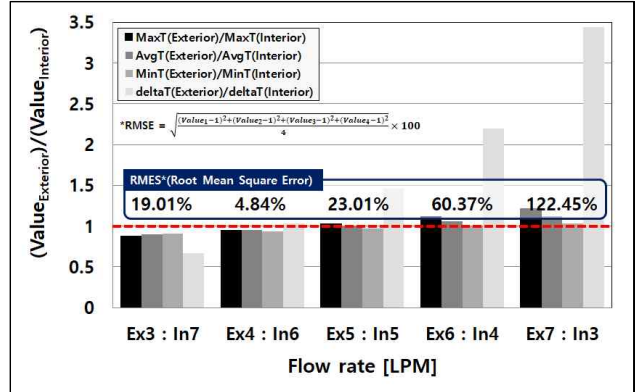


(b)

[그림 5] 냉각수 입구온도 및 유량에 따른 차압 및 출구 온도 (a) 냉각수측 차압, (b) 냉각수측 출구 온도

[표 4] 브레이크 레지스터 내부 및 외부 코어 발열 비율

heat generation rate	(Exterior core : Interior core)					
	7:3	6:4	5:5	4:6	3:6	
Exterior core	[kW]	28	24	20	16	12
	[kW/m ³]	49,938	42,804	35,670	28,536	21,402
Interior core	[kW]	12	16	20	24	28
	[kW/m ³]	23,220	30,960	38,700	46,440	54,180



[그림 6] 내부 및 외부 코어의 발열량 비율에 따른 해석 결과 비교

브레이크 레지스터의 내부 및 외부 코어 간 온도차와 각 코어의 최대/최소 온도차를 최소화하기 위해 총 40kW 발열량을 표 4와 같이 비율에 따라 분배하여 핫스팟을 최소화하고자 하였다. 해당 온도 편차를 정량화하기 위해 외부 및 내부 코어의 최대 온도, 최소 온도, 평균 온도, 최대/최소 온도차의 비율로 산출하여 그림 6과 같이 나타내었다. 해당 정량값은 1에 가까울수록 이상치이며 RMSE를 비교한 결과, 발열 비율 4:6 (외부 코어:내부 코어)이 4.84%로 가장 값에 가까웠다.

4. 결론

본 연구에서는 대형 수소전기상용차용 브레이크 레지스터의 열관리시스템 운전범위를 고려하여 코어 적정 표면온도 형성을 위한 해석을 진행하였다. 브레이크 레지스터 내부 및 외부 코어의 표면온도는 유량이 증가할수록 감소하였으나 우선 냉각되는 외부 코어가 헤리컬 형상의 유동특성에 의해 2차 냉각되는 내부 코어에 비해 국부적으로 높은 표면 온도를 갖는 것을 확인하였다. 또한, 각 코어의 표면 온도 편차를 최소화하기 위해 내부 코어와 외부 코어의 발열 비율을 변화하여 해석을 진행하였다. 그 결과, 외부 및 내부 코어의 발열 비율을 4:6으로 인가하였을 때 코어 간 가장 낮은 온도 편차를 보였으며 해당 결과를 통해 열관리 시스템 내 브레이크 레지스터 적용 시, 각 코어의 소비전력 독립제어를 통해 코어 간 온도 편차를 최소화 할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 사사

이 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원 (KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임('1415180408')

참고문헌

- [1] Jokela, T., Iraklis, A., Kim, B., and Gao, B., “Combined Sizing and EMS Optimization of Fuel-cell Hybrid Powertrains for Commercial Vehicles”, SAE Technical Paper 2019-01-0387, 2019.
- [2] Lee, H. S., Hwang, M. H., & Cha, H. R., “Development of an Optimal Power-Distribution-Management Algorithm for Four-Wheel-Drive Electric Vehicles.”, IEEE Access, 9, 99731-99741, 2021.
- [3] Cullen, D. A., Neyerlin, K. C., Ahluwalia, R. K., Mukundan, R., More, K. L., Borup, R. L., ... & Kusoglu, A., “New roads and challenges for fuel cells in heavy-duty transportation.”, Nature energy, 6(5), 462-474, 2021.
- [4] Li, Y., Zhang, J., Lv, C., Kong, D., & He, C., “Research of regenerative braking system for electrified buses equipped with a brake resistor.”, In 2013 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), pp. 1-5, 2013.