연료전지차용 100kW 전기구동시스템 냉각설계기술 개발

김유한, 이현동, 유기호
현대기아자동차 환경기술연구소 연료전지개발2팀

Development of Cooling System for 100kW Electric Power Train Applied to Fuelcell Vehicle

Yu-Han Kim, Hyeoun-Dong Lee, Ki-Ho Yoo
Fuelcell Vehicle Team 2, Eco-Technology Research Institute, Hyundai·Kia Motors

ABSTRACT

연료전지차 및 하이브리드차용 전기구동시스템의 냉각성능은 차량의 동력성능을 보장하기 위한 중요한 요소이다. 각 단품의 성능 확보를 위해 냉각수를 허용 온도 이하로 관리해야 하며 이때 라디에이터 방열량과 냉각수 유량이 중요 변수가 된다. 본 논문에서는 현대자동차 연료전지차량의 모터, 인버터를 포함한 100kW 전기구동시스템의 최적 냉각 설계를 위하여 차량 주행모드에 따른 전기동력부품의 발열량을 이론적으로 산출하고, 시험을 통하여 냉각시스템의 성능을 검증하였다.

1. 서론

친환경 에너지원인 수소를 이용하여 발생된 전기로 구동되는 수소연료전지자동차는 크게 수소를 이용하여 전기를 생산하는 연료전지스택과 생성된 전기를 이용하여 차량을 구동하는 전기구동시스템으로 구성되며, 냉각시스템 관점에서는 스택 냉각과 전기구동부 냉각으로 구분할 수 있다. 연료전지차량에서의 냉각수 온도조건은 스택 냉각이 80℃이하, 전기구동부 냉각이 65℃이하로 서로 달라 각 냉각시스템이 분리되어 있으며, 기존 내연기관의 냉각수 온도조건 120℃ 정도에 비해 낮고, 발열량이 많아 라디에이터 크기가 증대되어야하는 단점이 있다.

냉각성능에 따라 전기구동시스템의 정격 출력, 차량 최고 속도, 등판 능력과 같은 동력성능이 결정되며 인버터 내부 커패시터 등의 수명도 결정될 수 있다. 100kW 전기구동시스템에 있어 냉각시스템에 포함되는 부품은 구동모터, 인버터, 에어블로워 제어기, 역전류 방지 다이오드가 있다. 각 단품에 있어서 냉각수 온도와 유량 조건이 주어져 있으며 차량 주행시 이러한 조건을 만족해야 한다. 본 논문에서는 차량 주행모드별 전기구동부품의 발열량을 산출하고 이를 실제 차량의 부품 배치와 동일하게 제작된 장비를 활용한 시험을 통하여 검증하여 수소연료전지자동차의 냉각설계 기술을 개발하고자 한다.

2. 전기구동부품 냉각시스템

2.1 냉각시스템 구성도

냉각시스템을 구성하는데 있어 고려되어야 할 변수는 부품의 차량상태 레이아웃, 냉각수 압력강하, 유량 및 온도 등이 있다. 당사 수소연료전지자동차 전기구동부 냉각시스템은 차량 레이아웃을 고려하여 엔진룸에 위치한 역전류 방지 다이오드와 구동모터, 언더플로워에 위치한 에어블로워 제어기와 인버터의 2개 브랜치로 구성되었으며 차량에서 단품 위치와 냉각시스템 구성도는 각각 그림 1, 2와 같다.

2.2 펌프의 선정

유량에 따른 압력강하 데이터는 펌프 선정의 기초가 된다. 펌프 입출구의 압력강하를 측정하고 이를 펌프의 양정곡선과 비교하여 시스템에서의 작동 유량을 결정한다. 일반적으로 비압축성 유체에 대한 유량($\dot{m}$)과 압력강하(ΔP)는 연속방정식과 베르누이방정식으로부터 다음과 같은 관계가 있다.[1]

$$\dot{m} = \alpha A_t \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \qquad (1)$$

여기서 α는 유량계수, A_t는 유체흐름관의 단면적, ρ는 유체의 밀도를 의미한다. 이 식으로부터 유로 형상이 고정된다면 α, A_t는 일정하므로 차량에서의 냉각수 유량은 압력강하의 제곱근에 비례한다고 할 수 있다.

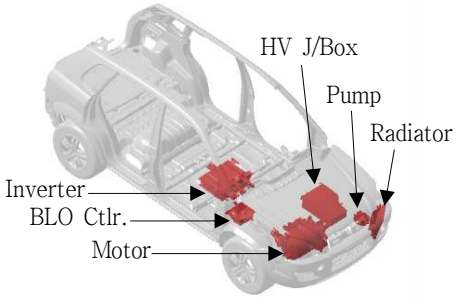

그림 1 투산 수소연료전지자동차 및 전기구동시스템 구성

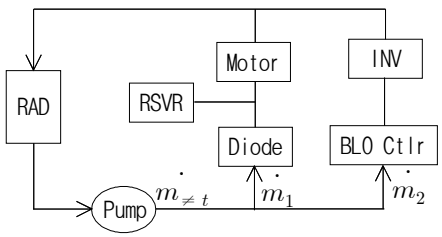

그림 2 전기구동 냉각시스템 구성도

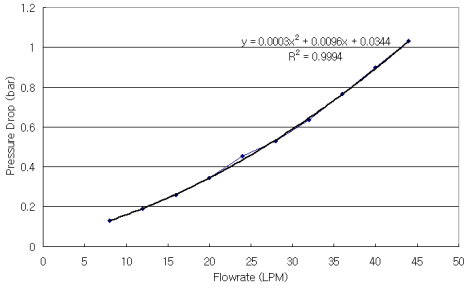

그림 3 펌프 전후단에서의 유량에 따른 압력강하

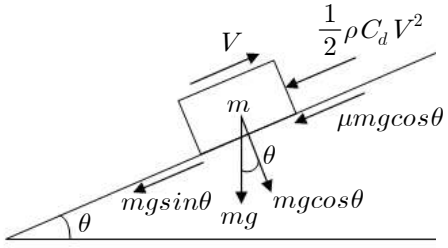

그림 4 차량에 작용하는 힘의 종류와 방향

그림 3은 펌프 전후단에서 유량에 따른 압력강하 측정치를 보여준다. 압력강하 값이 적을수록 적은 용량의 펌프를 사용할 수 있으며 이는 차량 연비와도 관계가 있으므로 초기 냉각시스템 구성시 압력강하가 최소가 되도록 구성하여야 한다. 각 단품에서의 최소 냉각수 기준인 12LPM을 만족시켜야 하므로 표 1을 기준으로 $\dot{m}_{\neq t}$을 30LPM 전후로 변동시켜가며 시험을 수행하였다.

2.3 주행모드별 발열량 산출

2.3.1 차량 출력 계산 및 발열량 산출 기준

차량 가속도 성분과 회전 등가 질량을 무시할 때 차량의 견인력($F_{traction}$)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.[2]

$$F_{roll} = \mu mgcos\theta \quad (2)$$

$$F_{climb} = mgsin\theta \quad (3)$$

$$F_{drag} = \frac{1}{2}\rho C_d V^2 \quad (4)$$

$$F_{traction} = F_{roll} + F_{climb} + F_{drag} \quad (5)$$

F_{roll}은 표면마찰력, F_{climb}는 등판력, F_{drag}은 항력을 나타내며, m, θ, μ, ρ, C_d, V, g는 각각 차량 중량, 경사각, 마찰계수, 공기밀도, 항력계수, 차속, 중력가속도를 의미하며 m, C_d는 차종에 따라 결정되는 고유 제원값이다.

전기구동시스템의 발열량은 당사 차량 냉각 시험 기준에 의거하여 발열량을 산출하였으며 표 2과 같이 크게 3개의 시험으로 구성된다. 이 경우 구동시스템 출력 또한 식(5)와 차속(V)로부터 표 2과 같다.

표 1 전기구동 냉각시스템 냉각수 유량 분배(LPM)

$\dot{m}_{\neq t}$	22	26	30	34	38
$\dot{m}_1$	8.9	10.4	12.0	13.5	15.0
$\dot{m}_2$	12.6	15.0	17.3	19.6	21.9

표 2 주행모드별 발열량 산출 기준

시험항목	외기온도(℃)	시험시간(min)	출력(kW)
100KPH	40	20	20.9
8% 50KPH	40	40	26.8
100KPH	40	20	20.9
6% 100KPH	40	20	53.7
140KPH	45	20	49.1

표 3 주행모드별 발열량(kW)

시험항목	Motor	INV.	Blo Ctlr.	Diode	Total
100KPH	0.92	0.13	0.22	0.08	1.35
8% 50KPH	0.44	0.88	0.28	0.09	1.69
100KPH	0.92	0.13	0.22	0.08	1.35
6% 100KPH	1.43	1.26	0.56	0.20	3.45
140KPH	2.11	0.61	0.51	0.18	3.41

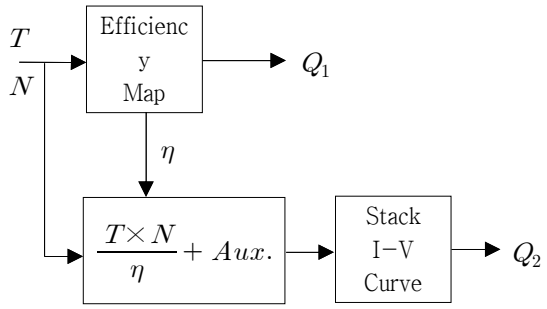

그림 5 발열량 산출 절차

2.3.2 발열량 산출

구동모터와 인버터의 발열량(Q_1)은 효율맵을 기준으로 손실된 에너지는 모두 열로 발생된다고 가정하여 구동모터의 토크(T)와 회전수(N)로부터 구할 수 있으며, 연료전지스택의 운전점은 연료전지스택 출력에 따라 정해져 있으므로 구동시스템의 효율(η)과 차량 보기류($Aux.$) 소모 동력을 고려하여 결정된 출력을 바탕으로 스택의 I-V 선도상에서 발열량(Q_2)을 계산할 수 있다. 이때 보기류 소모 동력은 스택출력의 30%로 가정하였다. 표 2, 3으로부터 외기온도 조건 및 발열량을 기준으로 보면 6% 100KPH, 140KPH의 경우 냉각 측면에서 가장 불리하다. 이 경우 냉각수 유량과 온도가 단품 설계기준인 12LPM 이상, 65℃ 이하를 만족하면 냉각 시험 기준을 만족한다고 할 수 있다.

2.3.4 라디에이터 및 풍속 결정

냉각성능에 영향을 미치는 변수는 냉각수 유량 및 온도, 외기온도, 라디에이터 풍량 및 방열량이 있다. 라디에이터 풍량 및 방열량의 경우 차속 및 차량 레이아웃에 따라 모두 달라지고 라디에이터로 공기가 균일하게 유입되지 않아서 실험적으로 구하기는 어려우며, 실험시 변수로 설정하여도 이 결과를 차량

표 4 주행모드별 라디에이터 풍속(m/s)

주행모드	50KPH	100KPH	140KPH
풍속(m/s)	2.61	2.99	3.17

표 5 단품 입구 냉각수 최대 온도(℃, 30LPM)

시험항목	Motor	INV.	Blo Ctlr.	Diode
100KPH 8% 50KPH Key-off	48.4	48.6	48.3	48.3
100KPH 6% 100KPH	58.0	58.1	57.8	57.8
140KPH Idle	63.7	64.3	63.6	63.6

에 반영하는데 한계가 있어 일반적으로 해석 결과를 주로 활용한다. 따라서 본 논문에서는 앞에서 산출한 발열량과 차량 레이아웃 및 냉각수 유량, 온도를 기준으로 라디에이터를 선정하였으며, 이에 따른 해석결과를 바탕으로 라디에이터 풍속을 결정하여 실험시 이 값을 반영하였다. 주행모드에 따른 라디에이터 풍속 해석치는 표 4와 같다.

3. 결 론

실제 차량의 부품배치와 동일하게 제작된 실험 장비를 통하여 각 주행모드별 및 외기온도 조건에서 냉각수 유량을 변동시켜 실험을 하여 냉각수 온도 변화를 관찰하였다.

실험 결과 각 주행모드에 따라 단품 입구 냉각수 온도는 모두 65℃ 이하를 만족하였으며, 8% 50KPH, 6% 100KPH, 140KPH 순으로 냉각수 온도가 높은 것으로 나타났다. 8% 50KPH 주행시 Key-off후 냉각수 온도 상승은 냉각수 흐름이 없는 상태에서 인버터 및 에어블로워 제어기와의 열교환으로 인한 것으로 냉각수 온도는 상승하는 대신 단품의 온도는 하강하는 것으로 추정할 수 있다. 단품별 냉각수 입구 온도는 인버터가 가장 높았으며 단품별 편차는 최대 0.4℃이었다. 표 2, 3로부터 차량 출력 및 발열량은 6% 100KPH와 140KPH의 경우 가장 높으나 외기 온도 조건이 각각 40, 45℃로 5℃의 차이가 있다. 라디에이터의 방열 성능은 외기 온도와 냉각수 온도 차이에 의해 결정되므로 6% 100KPH 보다 140KPH 주행시 냉각수 온도가 높은 것이라고 할 수 있다. 또한 냉각수 유량 26, 30, 34LPM에 따른 동일 실험을 실시하였으며 유량에 따른 냉각수 온도 변화는 -0.11℃/LPM 이하로, 냉각수 유량이 냉각성능에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났다.

일반적으로 작동 냉각수 유량이 작을 수록 펌프의 양정을 줄일 수 있어 전자부하, 압력강하, 패키지 측면에서 유리하다. 그림 6으로부터 유량에 26LPM에서도 냉각수 온도가 65℃ 이하로 온도 기준을 만족하나, 표 1로부터 $\dot{m}_1$유량이 10.4LPM으로 단품 냉각수 유량 조건인 12LPM을 만족하지 않는다. 따라서 최종 냉각수 작동 유량을 30LPM으로 결정하였으며 이를 최종 설계에 반영하였다. 앞으로 샤시다이나모를 활용한 실차 상태 시험 및 검증이 남아있다.

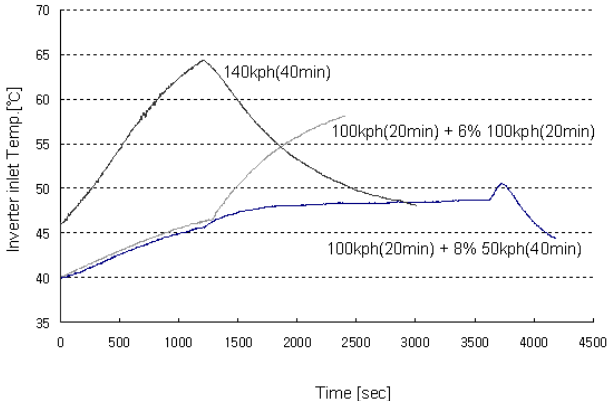

그림 6 주행모드별 인버터 입구 냉각수 온도 (30LPM)

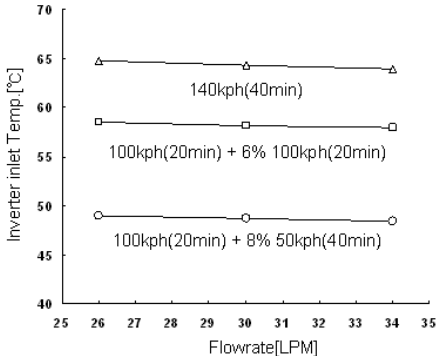

그림 6 냉각수 유량에 따른 인버터 입구 온도 변화

스택냉각 및 전기구동부 냉각으로 이원화된 연료전지차량의 냉각시스템은 낮은 냉각수 온도 조건 및 차량 패키지 문제로 인해 엔진의 냉각시스템에 보다 성능확보에 어려움이 있다. 이 문제에 대해 발열량을 감소시키거나 냉각수 온도 기준을 상향 조정하는 연구 및 냉각시스템 설계 관련 특허 등의 검토가 계속되고 있다.

참 고 문 헌

[1] Frank M. White, Fluid Mechanics : Fourth Edition, McGraw-Hill. pp. 397-398, 1999.

[2] Thomas D. Gillespie, Fundamentals of Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers, Inc. pp. 118-119, 1992.