

연료전지 차량의 열 및 물 균형 유지를 위한 냉각 시스템 개발

김 성균*, 이 승용, 김 치명, 박 용선

(현대자동차 연료전지시스템개발팀)

Development of Cooling System for Thermal Management and Water Balance in Fuel Cell Vehicle

Seong Kyun Kim, Seung Yong Lee, Chi Myung Kim, Yong Sun Park

(Fuel Cell Vehicle Team, Hyundai Motor Company)

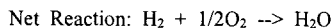
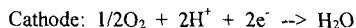
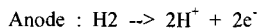
Key words : Fuel Cell, Thermal Management, Water Balance, Cooling Module, Cooling System

Abstract : This paper is for development of cooling module in order to maintain heat and water balance in fuel cell vehicle. Thermal management system for fuel cell is disadvantage because the temperature of coolant is lower than that of ICE and heat duty of radiator is higher. By CFD simulation, cooling module was developed for water balance of system. Hot chamber test and hot area/high altitude test on cooling module was completed.

1. 서 론

연료전지는 석유 자원 고갈과 같은 에너지 측면이나 배기가스에 의한 환경 오염으로 인한 지구온난화 같은 환경적인 측면에서 유리하여 많은 관심을 갖고 있다.

연료전지는 연료(수소, 메탄올 등)의 화학적 에너지를 전기화학반응에 의해서 전기에너지로 변환하는 발전장치이다. 연료전지의 반응은 다음과 같다.



고분자 전해질 연료전지(Proton-Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)는 수소이온교환특성을 갖는 고분자막을 전해질로 사용한다. Anode에서 생성된 수소이온은 이온교환막(membrane)을

통해서 Cathode로 이동하게 된다. Cathode로 이동한 수소이온은 산소와 반응하여 물을 생성하게 된다.

고분자 전해질 연료전지에서는 수소이온 이동을 위해서는 이온교환막 내에 일정량의 물이 존재해야만 수소이온이 이동할 수 있다.

이온교환막 내 물 평형을 유지하기 위해서는 수소와 산소의 반응이 일어날 때 방열하므로 스택 내 온도를 일정 온도(약 80도 정도)이하로 유지시켜야 한다.

연료전지 냉각은 기존 ICE엔진 냉각에 비해서 불리하다. 연료전지 냉각수 온도는 최대 80℃정도(상압형일 경우 약 60℃정도)로 ICE 엔진 냉각수 온도에 비해서 40℃정도 낮은 편이다. 또한 연료전지에서 발생하는 열 대부분을 냉각 모듈이 부담해야 하기 때문에 냉각 모듈의 열부하(Heat Duty)가 많다.

Table 1. ICE vs FCS 냉각 시스템

	Power	Heat by Coolant	Heat by Exhaust Air
ICE	33%	33%	33%
Fuel Cell	40%	50%	10%

본 논문에서는 상압형 연료전지 시스템의 열 및 물 평형(Heat and Water Balance)을 유지하기 위한 차량 내 열유동 해석 및 고온 냉각 성능 시험을 통한 연료전지 차량용 냉각 모듈을 개발하고자 한다.

2. 본 론

2.1 연료전지 열 및 물 평형 예측

연료전지 시스템은 상압형 연료전지시스템으로 TMS (Thermal Management System) 구성은 냉시동성을 갖기 위해서 증류수 냉각 루프와 부동액 냉각 루프를 별도로 구성하는 2루프 냉각 방식을 채택하였다.

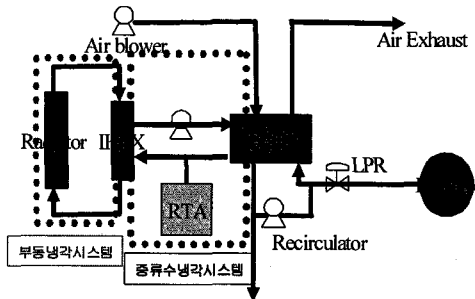


Fig.2 연료전지 시스템 구성도

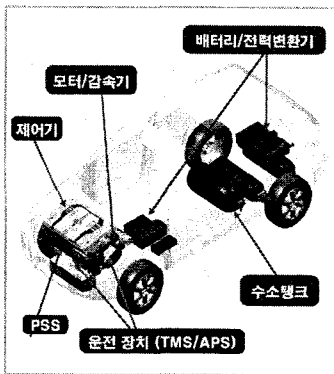


Fig.3 투싼 연료전지차량 및 시스템 구성

상압형 연료전지 시스템에서 물 평형(Water Balance)은 운전 온도 및 공기 양론비 (Stoichiometric Ratio, λ), 상대습도(RH%) 등에 의해서 좌우된다. 상압형 연료전지 경우 운전 압력은 대기 압력과 거의 동일하다.

연료전지 반응에 의한 물 생성(kg/s)은,

$$\text{Water Production} = 9.34 \times 10^{-8} \times \frac{P_e}{V_{\text{cell}}} \quad (\text{식1})$$

배기되는 공기(kg/s)는,

Exit Air =

$$(3.57 \times 10^{-7} \times \lambda - 8.29 \times 10^{-8}) \times \frac{P_e}{V_{\text{cell}}} \quad (\text{식2})$$

여기에서 반응에 의해서 생성된 물이 모두 기화한다고 가정하면,

$$P_w = \frac{0.421}{\lambda + 0.188} P_t \quad (\text{식3})$$

P_w : partial pressure of water
 P_t : total air pressure(상압형 연료전지에서는 대기압임)

그러므로 증기압(Vapor Pressure)은 온도의 함수이기 때문에 배기되는 공기 온도 및 공기 양론비가 연료전지 물 평형에 많은 영향을 끼친다. 배기되는 공기 온도는 냉각수 온도에 의해서 결정된다.

연료전지 발열량은 스택 효율과 관련되어 있다.

$$Q(\text{Watts}) = P_e \times \left(\frac{1.25}{V_{\text{cell}}} - 1 \right) \quad (\text{식4})$$

(1.25 volts는 연료전지에서 물이 기체로 생성될 경우 전압임)

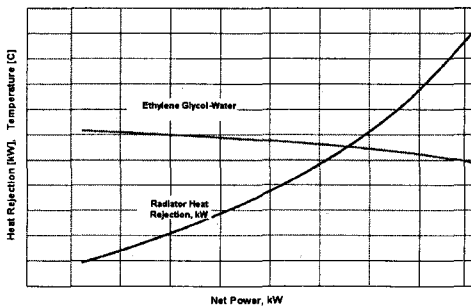


Fig.4 스택 출력별 냉각 요구량

상압형 연료전지 시스템에서 연료전지 스택의 성능에 따른 물 평형을 맞추기 위한 스택 출력별 냉각 열량 및 라디에이터 냉각수 출구 온도를 Fig. 4와 같이 예측할 수 있다.

2.2 열유동 해석 결과

복잡한 형상을 갖는 엔진 룸 내의 유동 특성 파악, radiator grille이나 front bumper opening 등을 통해 엔진 룸 내부로 유입되는 공기 유량을 예측 및 라디에이터 출구부 냉각수 온도 예측하기 위하여 CFD simulation을 수행하였다.

2.2.1 열유동 해석 조건

차량 주행 조건은 50KPH이며, Air Conditioner 및 cooling fan은 작동상태이다.

Turbulent model and Numerical Scheme은 Standard k- ϵ , MARS을 적용했다. Mesh generation 및 solving은 ES-UHOOD와 STAR-CD를 이용하였다.

2.2.2 열유동 해석 결과

기본 차량 모델 (Fan: 180W)로 해석(Case I)을 수행한 결과, 엔진 룸 내부로 유입되는 공기 유량은 radiator grille을 통해서는 약 0.315 kg/sec (25.3%)이고, front bumper opening을 통해서는 약 0.931kg/sec (74.7%)가 유입되고 있었다.

라디에이터 전면에서의 균일도 지수(Uniformity Index)는 약 0.682이며 균도 1인 완전 균일 유동 대비 약 23%정도의 방열 성능 저하를 나타낼 것으로 예측된다.

라디에이터 냉각에 기여하는 공기 접촉면이 증가하였지만 front bumper와의 짧은 이격과 형상 영향으로 effective area가 충분치 않음을 확인 할 수 있다. 라디에이터 통과한 냉각수 온도는 약 64.3℃로 예측된다.

Base 모델해석에서 front bumper opening으로 유입된 공기는 라디에이터를 통과하기보다는 다른 부분으로 유출되어서 냉각에 영향을 주지 못해서 air guide 등을 설치하였다. 이 경우(Case II)에 radiator grille 및 front bumper opening으로 유입되는 공기 유량은 각각 약 0.315kg/sec(25.3%)이고, 약 0.93kg/sec(74.7%)이다. 라디에이터 주변부의 공간으로 통한 공기 유출은 나타나지 않았다.

라디에이터를 통과하는 공기 유량은 약 0.59kg/sec으로 전체 유입 공기량의 48%정도이며 균일도 지수는 약 0.712가 예측되었다. 이때 라디

에이터 출구 냉각수 온도는 약 62.8℃로 예측된다. Air Conditioner를 OFF할 경우, 라디에이터 출구 냉각수 온도는 약 62.35℃로 예측되었다.

연료전지 냉각 성능을 향상시키기 위해서 front bumper opening을 69% 증대시켰고, radiator core size를 5% 증대시켰다.

이 경우(Fan: 400W, Case III) 해석 결과는 라디에이터를 통과하는 net air mass flow rate는 0.917kg/sec이고 균일도 지수는 0.754으로 예측되었다. 라디에이터 출구 냉각수 온도는 62.0℃이었다.

냉각 모듈과 PSS (Power Section System, Stack) 과 거리를 추가로 확보하기 위해서 라디에이터 두께는 8mm 축소했다. 냉각 팬 용량을 250W를 적용하였다.(Case IV)

해석 결과로 라디에이터를 통과하는 공기 유량은 2.802m/s이고 균일도 지수는 0.841이로 예측되었다. 라디에이터 출구 냉각수 온도는 62.1℃이었다.

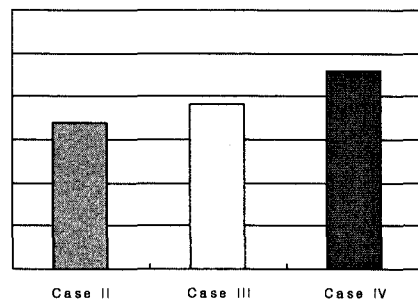


Fig.5 Case 별 냉각 모듈 성능(kW)

또한 차량 속도별로 냉각성능을 보면 기존 ICE보다 라디에이터를 통과하는 공기 유입량이 매우 적음을 알 수 있었다. 또한 냉각수 온도가 낮기 때문에 냉각 모듈의 방열량도 상대적으로 적음을 알 수 있다.

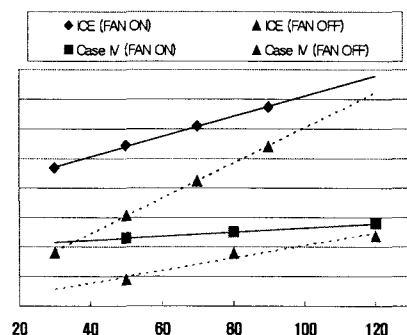


Fig.6 연료전지 차속별 방열량 (kW)

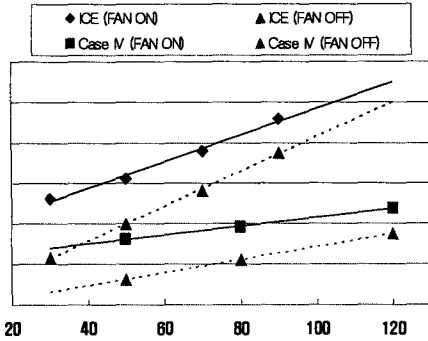


Fig.7 연료전지 차속별 냉각 용량(CMH)

냉각 모듈 후단에 위치하고 있는 부품의 Blocking 정도를 변경하여 공기 유량을 해석하였다.(Case V)

라디에이터 출구 냉각수 온도가 62.1℃로 냉각 성능에 많은 영향을 주지 못했다. 하지만 차량 속도가 증가하면 냉각 성능 향상에 도움을 줄 것으로 예상된다.

부품 크기를 줄여도 부품 후단에 있는 구동모터에 의해서 배기되는 공기 통로를 막고 있어서 부품 크기가 냉각 성능에 많은 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

또한 냉각 팬 용량별로 해석(Case IV와 Case V 경우)을 진행하였다.(Case VI)

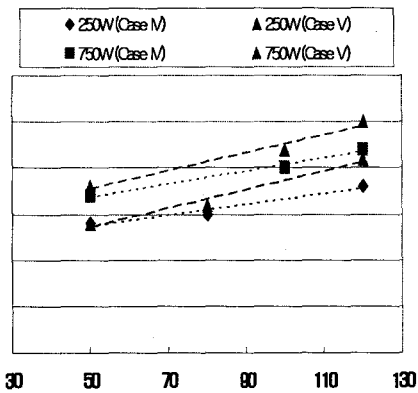


Fig.8 팬 모터 용량별 냉각 성능(kW)

750W 냉각 팬 모터를 적용했을 경우 유입 공기 유량은 Case V 경우 34%정도 향상되었고, Case IV 경우 35%가 향상되었다. Case IV 경우에는 차속이 증가할 수록 냉각 성능폭이 더 커지는 것을 알 수 있었다.

2.3 실차 냉각 성능 시험

2.3.1 고온 냉각 시험

외기온도 40℃ 및 Air Conditioner ON, 주행 조건별로 실차에 대한 냉각 모듈 성능 시험을 수행하였다.

연료전지 차량의 냉각 모듈 구성은 다음과 같다.

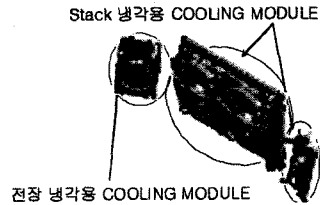


Fig.9 연료전지 냉각 시스템 구성

냉각 시스템 구성은 위와 같이 2개의 냉각 모듈을 사용하였다. 각 시험별 냉각수 온도 및 물 평형 (Water Balance)를 확인하였다.

시험 결과로는 평지에서 주행할 경우 140KPH 까지는 물 평형이 유지되었다. 라디에이터 입구 냉각수 온도는 63℃이었고 출구 냉각수 온도는 56℃이었다. 등판각도에서 50KPH로 주행할 경우에도 물 평형이 유지되었다. 이때 냉각 모듈 성능은 약 24kW으로 물 평형을 유지하기 위한 냉각 성능 요구량과 거의 유사하다.

Table 2. 고온 냉각 시험 결과

	차량 속도 (KPH)	RAD 입구 냉각수 온도 (°C)	RAD 출구 냉각수 온도 (°C)
평지	80	55	52
	100	56	53
	120	60	55
	140	63	56
등판	50	68	65

2.3.2 고온 고지 냉각 성능 시험

상압형 연료전지 시스템은 대기압력에 의해서 운전 압력이 결정된다. 즉 (식3)에 의하면 배기되

는 공기의 Vapor Pressure (Pw)는 Pt(total pressure) 함수이기 때문에 고지로 갈수록 대기 압력은 떨어지기 때문에 고온/고지 냉각 성능 시험을 수행하였다.

고온/고지 시험은 캘리포니아 데스밸리 (Death Valley)에서 수행하였다. 주행 도로는 Townes Pass 이다.

외기 온도는 약 40℃정도이며 고도는 약1600m 이다. 평균적인 등판각도는 약 7%정도이다. 고도가 상승하면서 대기압력은 1bar에서 0.85bar로 감소하였다.

고온/고지 냉각 성능 시험 결과, 부동액 냉각수 온도는 거의 비슷하나 증류수 냉각수 온도가 2~3℃정도 상승으로 인해서 물 평형이 소량 부족해졌다.

Table 3. 고온/고지 냉각 시험 결과 (Towness Pass 주행)

차량 속도 (KPH)	RAD 입구냉각수 온도 (℃)	RAD 출구 냉각수 온도 (℃)
50	68	65

이는 고지로 올라가면서 대기압 압력이 계속적으로 떨어지면서 압력을 온도로 보상해서 떨어뜨려 주어야 하는데 냉각 성능이 부족하여 냉각수 온도가 상승하게 되었다.

4. 결 론

연료전지 시스템에 대한 분석하였고 열유동 해석을 통하여 냉각 모듈의 성능 예측하였다. 또한 고온 및 고온/고지 실차 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 연료전지 물 평형을 위한 스택 출력별 냉각수 온도를 계산하였다. 연료전지 물 평형은 냉각수 온도에 영향을 받으므로 물 평형을 위한 냉각수 온도와 방열량 결정으로 냉각 모듈 사양을 결정할 수 있었다.

(2) 열유동 해석을 통하여 냉각 모듈에 대한 사양을 결정할 수 있었으며 Package Layout에 대하여 결정할 수 있었다.

(3) 고온 시험 결과 평지 및 등판 주행시 물 평형이 이루어졌다. 하지만, 고온/고지 시험 결과로 상압형 연료전지 시스템에서는 대기압이 낮아질 경우 압력을 냉각수 온도로 보상해야 하기 때문에 물 평형이 소량 부족해졌다.

(4) 연료전지 차량의 냉각 성능 확보를 위해서

는 고용량 냉각 팬 모터 개발 및 고효율 라디에이터 개발이 필요하다.

References

- [1] Matthew H. Fronk, David L. Wetter, David A. Masten, Andrew Bosco " PEM Fuel Cell System Solutions for Transportation" SAE 2000-01-373, 2000
- [2] James Larminie, Andrew Dicks, " Fuel Cell Systems Explained", John Wiley & Sons, Ltd. 2000
- [3] 차일남, 박준철, 조은애, 임태훈, 손지원, 김민수, 이관영, 김세훈, 임태원, 홍성안, "연료전지 자동차 - 이론과 실제-" 아진, 2005
- [4] Hideyuki Tamura, Mikio Ura, Masafumi Sasaki, Takashi Imaseki, Katsunori Oshiage, Toshio Hirota, " Development of the Nissan Fuel Cell Vehicle" SAE 2000-01-1584, 2000
- [5] David J. Friedman, Anthony Eggert, P.Badrinarayanan, Joshua Cunningham, " Balancing Stack, air supply, and water/thermal management demands for an indirect methanol PEM fuel cell system", SAE 2001-01-0535, 2001
- [6] P.Badrinarayanan, S.Ramaswamy, A. Eggert, R.M. Moore, " Fuel cell stack water and thermal management: Impact of variable system power operation", SAE 2001-01-0537, 2001