

# 연료전지 자동차 열방출 시스템의 설계

김민수\*, 김성철, 박민수, 정승훈, 윤석호

## Design of a Heat Release System for Fuel Cell Vehicles

Sungchul Kim, Minsu Park, Seunghun Jung, Seokho Yoon, Min Soo Kim

**Abstract** There is a close relation between the heat generation in the fuel cell stack and the fuel cell performance. In PEM fuel cell vehicles, the stack coolant temperature is about 65°C, which is far lower than that for general automobile engine. Therefore, it is hard to release heat generated in the stack by using a radiator of limited size because of the reduced temperature difference between the coolant and the ambient air. In this study, indirect stack cooling system using CO<sub>2</sub> heat pump was designed and its stack cooling performance in releasing heat to the ambient was investigated. This work focuses on a series of processes that grasp the relation among the fuel cell power, the radiator capacity and the stack temperature. The purpose of this work is to find out a way to properly release sufficient amount of heat through the finite sized radiator, so that the stack power generation can not be deteriorated due to the stack temperature increase. The optimization between the compressor power consumption and the fuel cell output power can be carried out to maximize the performance of fuel cell system.

**Key words** PEMFC(고분자 전해질막 연료전지), 멤브레인(Membrane), RH(상대습도), TMS(열관리 시스템), Heat Release System(열방출 시스템), Radiator(라디에이터), Coolant(냉각수), Stack Cooler(스택쿨러), CO<sub>2</sub>(이산화탄소), Heat Pump(열펌프), Gas Cooler(가스쿨러)

\* 서울대학교 대학원 기계항공공학부  
 ■ E-mail : minskim@snu.ac.kr ■ Tel : (02)880-8362 ■ Fax : (02)883-0179

### subscripts

APS : air providing system  
 CCS : cooling control system  
 FPS : fuel providing system  
 PEMFC : proton exchange membrane fuel cell

### Nomenclature

RH : relative humidity  
 $T_{ei}$  : evaporator input air temperature  
 $T_o$  : outdoor air temperature

## 1. 서론

연료전지의 기본 메커니즘은 공기와 수소가 반응하여 물이 생성되면서 전기가 발생하는 것이다. 이 과정 중에 연료전지 스택에서는 전기뿐만 아니라 열도 함께 발생하며, 스택 온도를 일정하게 유지하기 위해서 스택에서 발생된 열을 방출하는 것은 매우 중요하다. 만약, 열방출이 원활하지 않은 상태에서 계속하여 운전하게 되면 스택 온도가 증가하여 멤브레인의 상대 습도가 감소, 그로 인해 이온 전도도가 감소하여 스택에서 반응이 잘 이루어지지 않게 된다. 따라서 멤브레인의 이온 전도

도를 유지하기 위해 가습 장치가 반드시 필요하다. 어느 조건에서든지 충분한 가습이 가능하다면, 멤브레인의 상대습도가 항상 적절하게 유지되어 이온 전도도가 감소하지 않게 된다. 하지만, 차량에 설치되는 가습장치는 그 용량에 제한이 있어 가습만으로는 상대 습도를 유지하기가 힘들기 때문에, 스택을 냉각함으로써 스택 온도가 상승하지 않도록 하는 것이 매우 중요하다.<sup>1)</sup> 그런데 PEMFC 자동차의 경우, 스택 냉각수 온도가 65°C 정도로 일반 가솔린이나 디젤 엔진 자동차의 냉각수 온도보다 훨씬 낮다. 따라서 냉각수와 대기와의 온도차가 감소하여 제한된 크기의 라디에이터만을 사용하여 스택에서 발생된 열을 방출하는 것이 어렵게 된다. 따라서 PEMFC 자동차는 추가적인 스택 냉각 장치가 필요하게 된다. 연료전지 차량의 경우 이산화탄소 열펌프를 냉난방 장치로 채택하고 있기 때문에, 이산화탄소 열펌프를 추가적인 스택 냉각 장치로 사용한다면 별도의 시스템이 설치되지 않아도 기존의 시스템만으로 스택 냉각을 할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는, 이산화탄소 열펌프를 사용하는 간접 스택 냉각 시스템을 설계하고 열펌프 소비 동력과 열펌프를 사용하지 않을 때의 스택 출력 감소를 비교함으로써 연료전지 시스템의 성능을 살펴보았다.

## 2. 자동차용 PEMFC 시스템의 구성요소 및 모델링

자동차용 PEMFC 시스템은 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 스택, 공기 공급 장치(APS), 연료 공급 장치(FPS), 열관리 시스템(TMS) 및 열펌프로 구성되어 있다. APS와 FPS에는 각각의 공기와 연료를 가습하기 위한 가습 챔버가 설치되어 있다. 스택에서 나오는 공기 측 배기가스는 폐열 회수 열교환기를 통해 들어오는 공기와 연료의 온도를 증가시키는 데 사용된 후 대기로 배출되고, 수소는 터보-블로어에 의해 재순환된다. 스택은 라디에이터와 열펌프 방열 회로에 의해 냉각된다. 우선, 냉각수가 라디에이터를 통해 흐르게 되어 냉각수와 대기와의 열교환이 이루어짐으로써 스택에서 발생된 열이 방출된다. 이 때, 라디에이터에 의해 충분한 열이 방출되지 않는다면, 라디에이터를 지난 냉각수가 열펌프 시스템에 의해 재차 냉각되어 스택 온도를 특정값 65°C 이하로 유지시킨다. 라디에이터 용량은 외기 온도가 43°C일 때 약 40kW가 되도록 설계하였고 열펌프 시스템은 압축기, 가스 쿨러, 팽창 장치, 증발기로 구성하였으

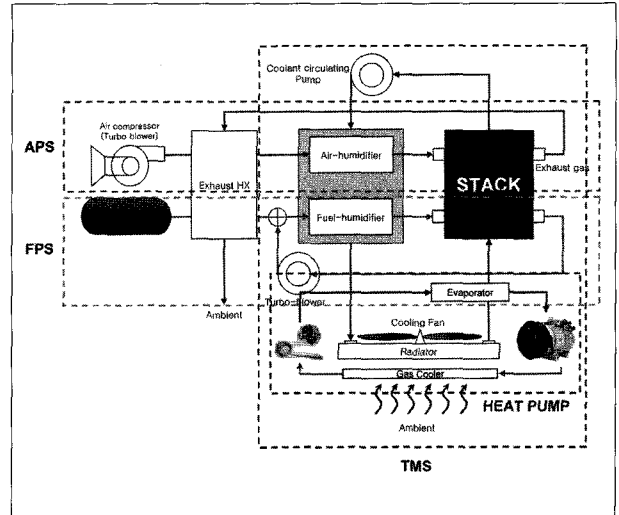


Fig. 1 Schematic diagram of a PEMFC system

며 가스 쿨러는 라디에이터 전면에 위치하는 것으로 하였다. 스택은 다음과 같은 가정 하에 모델링하였다. 단위 셀 전체에 대해 전류 밀도는 균일하고, 모든 단위 셀은 동일하며 분리판은 기체와 액체에 대해 비투과성으로서 전기 삼투 현상과 물의 역확산은 서로 상쇄되는 것으로 가정하였다. 스택은 250cm<sup>2</sup>의 MEA면적을 갖는 400개의 셀로 구성되어 있고, 80kW의 출력을 낼 수 있도록 설계하였다.

## 3. 열방출 시스템의 설계 및 모델링

### 3.1 열방출 시스템의 설계

열펌프를 이용한 스택 열방출 시스템은 Fig. 2에서와 같이 열펌프 냉각 회로와 스택 방열 회로로 구성되어 있다. 기존 라디에이터만을 이용한 열방출 시스템과 비교하여 추가적으로 사용된 열교환기(스택 쿨러)와 밸브(bypass 2) 중에서 스택 쿨러는 열펌프 냉각 회로에서 사용된 내부열교환기와 비교하여 고려하고 있다. 시스템 작동은 냉방 시에는 밸브(bypass 2)를 닫아 스택 쿨러로 냉각수 유량을 막음으로써, 스택 쿨러를 사용할 경우의 압축기 입구 과열도가 지나치게 상승하여 내부 열교환기의 기능을 상실하고 차실 내 냉방능력이 급격히 감소하는 것을 막는다. 반면 열펌프를 이용하여 스택을 냉각하는 경우에는 밸브(bypass 2)를 열어 스택 쿨러로 냉각수를 흘려

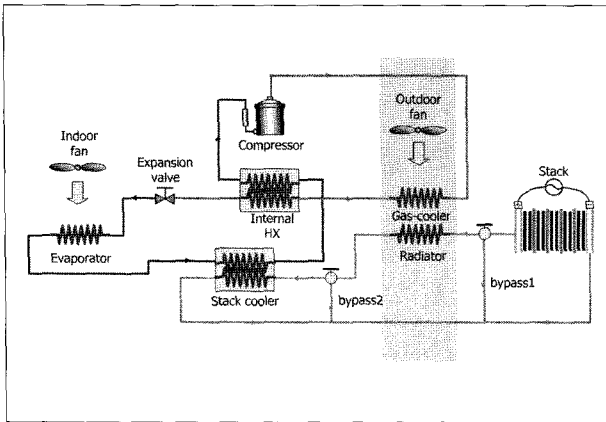


Fig. 2 Design of a heat release system

보낸다. 그리고 차실 내 증발기에서 냉방작용을 하지 못하게 실내 팬을 작동시키지 않는다.

고온의 외기조건에서 차량의 냉방을 위해 열펌프를 가동시키면 외부유입 공기가 가스쿨러를 지나면서 온도가 상승하게 되므로 라디에이터의 용량이 줄어들게 된다. 이 때 경사로 주행 또는 급가속 등 일시적으로 차량 부하가 급증하게 되면 열균형(heat balance)이 파괴되면서 스택 운전온도 상승으로 출력이 급저하된다. 이를 막기위해 스택냉각으로 전환하여 스택의 열균형을 맞추어주고 출력감소를 줄일 수 있도록 열방출 시스템을 설계하였다.

### 3.2 열방출 시스템의 모델링

기존 열방출 시스템과 비교하여 연료전지 차량에 보다 효과적인 열방출 시스템을 설계하고, 실제 시스템에 가까운 조건으로 시뮬레이션을 수행하기 위해 스택 열방출 시스템과 열펌프 냉각 시스템을 결합시켜 모델링을 하였다. 가스쿨러-라디에이터 모델링은 라디에이터가 최대 용량을 내도록 가스쿨러에 유입되는 외기의 풍량을 최대로 하여 해석을 하였고, 가스쿨러와 라디에이터 간의 영향도 해석을 위해 해석격자를 일치시켰으며, 각각의 형상 및 크기는 현재 개발된 열교환기와 동일하게 하였다. 또한 스택 냉각을 위해 추가적으로 사용되는 열교환기 증발기-스택 쿨러의 모델링은 대항류 이중관 열교환기 형상으로 하여 해석하였다.

## 4. 시뮬레이션 과정 및 결과

### 4.1 시뮬레이션 과정

시뮬레이션은 다음의 과정을 거쳐 수행하였다. 우선 실내·외기 상태(온도, 상대 습도)와 차량 운전 온도, 요구 부하 및 열펌프 냉매충전량을 입력하고 그 값을 토대로 열펌프의 가스쿨러를 지난 유입공기의 온도를 계산한다. 그리고 이를 이용하여 라디에이터 용량을 계산하고 스택 열방출량을 통하여 스택에서 열펌프를 이용하여 제거해야 할 열방출량을 계산한다. 열펌프의 스택 쿨러를 해석하여 제거해야 할 열방출량과 맞지 않을 경우 압축기 회전수를 조정하여 맞추게 된다. 이러한 과정을 반복하여 열펌프 냉각 시스템과 스택 열방출 시스템의 용량을 일치시켜 최종적으로 스택 출력, 스택 열방출량, 라디에이터 용량, 열펌프 냉방 용량, 압축기 소비동력, 및 성능계수(coefficient of performance)를 구하였다. 반면 열펌프를 통한 스택 냉각을 수행하지 않는 경우에는 스택으로부터 제거되지 않은 열에 의한 온도 상승과 그로 인한 상대 습도 및 이온 전도도의 변화를 예측하여 스택 출력을 구하였다.

### 4.2 시뮬레이션 결과

스택 운전 온도가 65℃일 때, 차량의 요구부하에 따른 열균형의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 열펌프로 차실 내 냉방을 하는 경우 그렇지 않은 경우에 비해 열균형이 빨리 깨지는 것을 알 수 있는데, 이는 외부에서 유입된 공기가 가스 쿨러를 지나면서 온도가 상승하여 라디에이터 용량이 감소되기 때문이다. 또한 증발기 유입온도가 높을수록 냉방 부하가 커지기 때문에 열균형이 더 빨리 깨지게 된다. 이 사실로부터, 고부하를 요구하는 운전 조건에서는 스택 열균형이 깨지게 되므로 이를 막기 위한 추가적인 스택 냉각이 필요하고 열펌프의 차실 내 냉방부하가 높을수록 그 필요성은 증대됨을 알 수 있다. Fig. 4에서는 차량의 고부하 시 열펌프를 사용해 스택을 냉각할 경우와 그렇지 않은 경우의 출력을 비교하였다. 열균형이 깨지지 않는 이상적인 조건(스택 온도 65℃ 유지)에서는 요구 부하가 클 때에도 안정적인 출력을 확보할 수 있다. 그러나 실제 운전 상황에서는 높은 부하가 요구될 때, 열균형이 깨지는 것을 Fig. 3을 통해 확인하였다. 이러한 열균형을 유지하기 위해 열펌프를 사

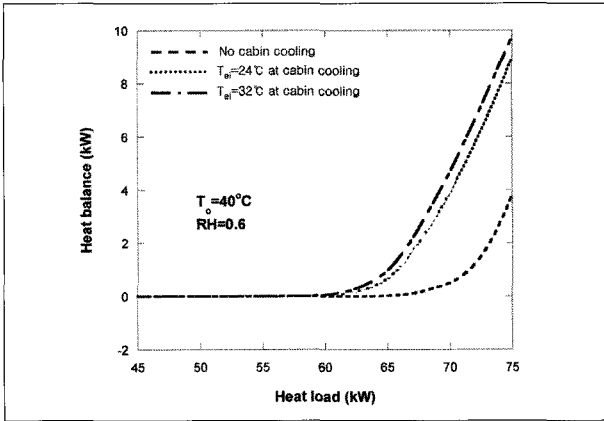


Fig. 3 Heat balance(=amount of stack heat release-radiator capacity) with respect to the heat load of a vehicle

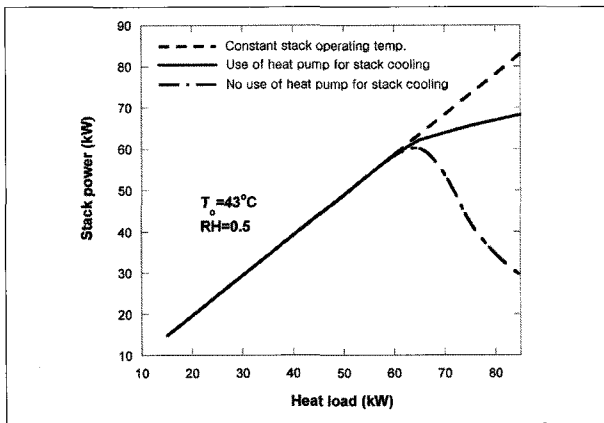


Fig. 4 Stack power with respect to the heat load of a vehicle

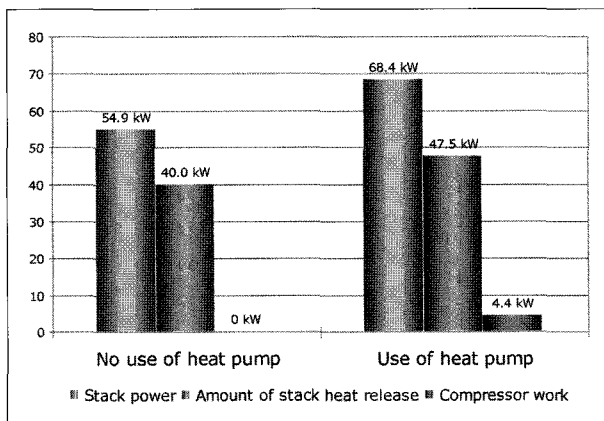


Fig. 4 Stack power with respect to the heat load of a vehicle

용하여 스택을 냉각하는 경우에는 압축기에 동력이 소비되어 스택 출력의 증가율이 감소하기는 하지만 고부하에서도 안정적으로 출력을 확보할 수 있음을 Fig. 4를 통해 알 수 있다. 그러나 열펌프를 사용하여 스택 냉각을 하지 않는 경우에는 스택 온도가 증가하여 상대 습도가 감소하게 된다. 그로 인해 멤브레인의 이온 전도도가 감소하여 스택 출력이 현저하게 감소하게 된다.<sup>2)</sup> Fig. 4의 고부하영역에서 요구 부하가 높을수록 오히려 실제출력은 더 많이 저하되는 것을 알 수 있는데, 이는 라디에이터 용량은 제한되어 있는데 반해 스택 열방출량은 차량의 부하가 커질수록 증가하기 때문이다. Fig. 4에서 열펌프를 사용하지 않는 경우의 그래프는 차량의 고부하 영역에서 스택 열균형이 깨진 채로 열펌프를 사용하지 않고 30초 간 운전했을 경우의 출력 감소를 나타내었다. 이러한 결과를 토대로 70kW의 열부하를 갖는 연료전지 차량에서 라디에이터 용량 40kW만으로 스택 열방출을 하는 경우와 부족한 열방출량을 열펌프를 이용해 부가적으로 열을 방출하는 경우의 스택 출력을 Fig. 5에 비교하여 나타내었다. 열펌프 압축기의 소요동력 4.4kW를 사용하여 스택 쿨러에서 7.5kW의 스택 열을 방출하게 되면 스택 성능은 13.5kW 만큼 상승하였다. 결과적으로 차량의 고부하영역에서 열펌프를 사용하여 추가적으로 열방출을 하여 스택에서 볼 때 9.1kW 만큼의 스택 출력 증가효과를 얻을 수 있었다.

## 5. 결론

연료전지 자동차에서 외기 온도가 높거나 높은 부하가 요구될 때, 제한된 면적의 라디에이터만으로는 충분한 양의 열을 방출하기가 매우 어렵게 되고 스택으로부터 열이 원활하게 방출되지 않는다면, 스택 출력은 급격하게 저하되며 결국, 스택은 그 기능을 상실할 수도 있다. 이러한 문제를 해결하고자 제안된 열펌프를 이용한 스택 냉각 시스템은 평상시에는 차량의 냉방운전을 위해 사용되지만 고온다습한 외기조건과 고부하를 요구하는 운전조건에서는 일시적으로 스택냉각 모드로 전환하여 스택 열방출을 돕고 스택 출력을 안정적으로 확보할 수 있으리라 본다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 차세대 성장동력 연구 개발 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사하는 바이다.

## References

- (1) J. C. Lin, H. R. Kunz and J. M. Fenton, 2003, "Membrane/electrode additives for low-humidification operation", Handbook of Fuel Cell, Vol. 3, pp. 456-463
- (2) H. R. Kunz, J. M. Fenton, "Development and demonstration of a higher temperature PEM fuel cell stack", Journal of Power Sources, Vol. 114, pp.107-112, 2005
- (3) James Larminie and Andrew Dicks, 2003, "Fuel Cell System Explained 2nd edition", Appendix 1-2, John Wiley & Sons, 2003
- (4) Hossein Ghadadian, Yadolah Saboohi, "Quantitative analysis of irreversibilities causes voltage drop in fuel cell (simulation & modeling)", Electrochimica Acta, Vol. 50, pp. 699-704, 2004
- (5) Ruichun Jiang, H. Russell Kunz, James M. Fenton, "Investigation of membrane property and fuel cell behavior with sulfonated poly(ether ether ketone) electrolyte: Temperature and relative humidity effects", Journal of Power Sources Vol. 150, pp. 120-128, 2005
- (6) Joon-Ho Koh, Andrew T. Hsu, Hasan U. Akay, May-Fun Liou, "Analysis of overall heat balance in self-heated proton-exchange-membrane fuel cells for temperature predictions", Journal of Power Sources Vol. 144, pp.122-128, 2005
- (7) Galip H. Guvelioglu, Harvey G. Stenger, "Computational fluid dynamics modeling of polymer electrolyte membrane fuel cells", Journal of Power Sources, Vol. 147, pp.95-106, 2005
- (8) Maher A. R. Sadiq Al-Baghdadi, "Modelling of proton exchange membrane fuel cell performance based on semi-empirical equations", Renewable Energy, Vol. 30, pp.1587-1599, 2005

**김성철**



1999년 고려대학교 기계공학과 공학사  
2001년 고려대학교 기계공학과 공학석사  
2004년 서울대학교 기계항공공학부 공학박사수료

현재 서울대학교 기계항공공학부 박사과정  
(E-mail ; ksc35@reflab.snu.ac.kr)

**박민수**



2004년 서울대학교 기계항공공학부 공학사

현재 서울대학교 기계항공공학부 석사과정  
(E-mail ; minsu727@reflab.snu.ac.kr)

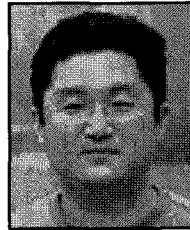
**정승훈**



2001년 서울대학교 기계항공공학부 공학사

현재 서울대학교 기계항공공학부 석사과정  
(E-mail ; stratus@reflab.snu.ac.kr)

**윤석호**



1996년 서울대학교 기계항공공학부 공학사  
1998년 서울대학교 기계항공공학부 공학석사  
2002년 서울대학교 기계항공공학부 공학박사

현재 서울대학교 마이크로열시스템연구센터 연수연구원  
(E-mail ; metallaw@reflab.snu.ac.kr)

**김민수**



1985년 서울대학교 기계공학과 공학사  
1987년 서울대학교 기계공학과 공학석사  
1991년 서울대학교 기계공학부 공학박사

현재 서울대학교 기계항공공학부 교수  
(E-mail ; minskim@snu.ac.kr)