Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 13, No. 3 pp. 986-993, 2012

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.3.986

수소연료전지 자동차의 열관리시스템 성능특성에 관한 연구

이호성[1], 원종필[1], 조중원[1], 이무연[1*]
[1]자동차 부품 연구원 열제어시스템 연구센터

Performance Characteristics of the Thermal Management System for Passenger Hydrogen Fuel Cell Vehicle

Ho-Seong Lee[1], Chung-Won Cho[1], Jong-Phil Won[1] and Moo-Yeon Lee[1*]
[1]**Thermal Management System Research Center, KATECH**

요 약 본 연구의 목적은 수소연료전지 자동차의 열관리시스템 성능특성을 알아보기 위하여 다양한 운전조건 변화에 따른 열전달 성능특성을 고찰하는 것이다. 수소연료전지 자동차의 열관리시스템으로 스택 냉각시스템, 전자장비 냉각시스템, 그리고 냉방시스템의 성능특성 및 상호영향도를 파악하기 위하여 자동차 실 도로 운전조건 변화에 따른 냉방성능 및 전자장비 냉각시스템에 미치는 영향을 파악하였다. 결과적으로, 고속도로 조건에서 냉방시스템 작동 시 수소연료전지 자동차의 스택 냉각시스템의 방열성능은 냉방시스템이 꺼진 경우보다 평균 28.8% 감소하였고, 시내주행 조건에서 수소연료전지 자동차의 전자장비 냉각시스템의 냉각부하는 고속주행 조건보다 약 65.6% 상승하였다.

Abstract The objective of this study is to investigate performance characteristics of the thermal management system for passenger hydrogen fuel cell vehicle under various operating conditions. The thermal management systems comprised of a stack cooling system, an electric device cooling system and an air conditioning system for a passenger room were tested with driving conditions. As a result, in highway driving mode, the cooling performance of the stack cooling system with air conditioning on condition was 28.8 % lower than that of the air conditioning off condition. And cooling load of the electric cooling system in the city driving mode was 65.6% higher than that of the highway driving mode.

Key Words : Cooling Performance, Fuel Cell Vehicle, Stack, Thermal Management System

기호설명

ITD : 입구온도차 (Inlet temperature difference, °C)
KPH : 주행속도 (km/h)
LPM : 냉각수 유량 (*l*/min)
TMS : 열관리시스템 (Thermal management system)
H : 가로 (Horizontal, mm)
V : 높이 (Vertical, mm)
D : 깊이 (Depth, mm)

1. 서론

현재까지 개발된 운송수단 중 가장 많이 사용되는 것 중 하나가 내연기관 자동차다. 이렇게 편리한 내연기관 자동차는 근래에 들어 석유에너지 고갈, 화석에너지 연소 시 발생하는 환경규제 대상인 이산화탄소, 그리고 배기가스의 유해한 성분으로 인한 대기오염 등의 심각한 문제를 유발하고 있다. 특히 이산화탄소 등 온실가스에 대한 규제 및 관련 법규들은 자동차는 물론 항공기, 발전소등 산업계 전반에 걸쳐 반드시 지켜야 할 필수항목이 된지 오래되었다. 이러한 규제활동 등은 선진국의 온실가스 감

본 논문은 지식경제부에서 지원하는 개발사업의 일환으로 수행되었음.
*교신저자 : Moo-Yeon Lee
Tel: +82-10-5440-8421 e-mail: mylee@katech.re.kr
접수일 11년 12월 28일 수정일 12년 03월 05일 게재확정일 12년 03월 08일

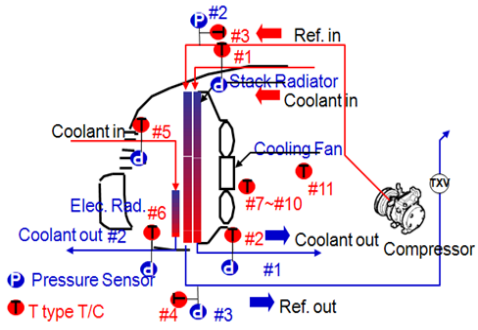
축목표치를 규정하는 교토의정서가 1997년 채택된 이후 활발히 진행 중에 있으며, 2008년 UN사무총장 주도하에 개최된 기후 변화 총회에서 채택된 발리 로드맵에서는 선진국은 물론 개발도상국가도 온실가스 감축대상국에 포함시키는 등 이전의 환경규제를 훨씬 뛰어넘는 내용을 담고 있다. 우리나라의 경우 온실가스 배출량이 세계에서 9번째로 많은 나라이며, 2013년까지 온실가스 감축량을 10% 이상 달성해야 하는 상황이다. 이러한 상황에서 이산화탄소 배출량이 많은 자동차, 철강, 석유 화학 등 제조업기반 회사들은 근본적인 해결방안을 찾으려고 노력해야만 한다. 특히 자동차 제조회사들은 현재까지 널리 사용되고 있는 화석연료 기반의 에너지를 사용하는 자동차를 대신하여 친환경연료를 사용하는 무공해자동차에 대한 연구를 꾸준히 진행하고 있다.[1-3]

이러한 노력의 일환으로 내연기관 자동차 수준의 주행거리를 확보할 수 있는 무공해자동차 중 수소연료전지 자동차에 대한 연구는 우리나라 및 선진자동차 업체들을 중심으로 활발히 연구되고 있다. 수소연료전지 자동차는 내연기관 자동차와 비교하여 열효율이 우수한 장점이 있지만 배기손실이 적기 때문에 냉각손실이 비교적 큰 단점이 있으며, 일반적으로 연료전지 스택에서 발생되는 허용수온은 내연기관과 비교하여 낮기 때문에 라디에이터의 냉각수 입구온도와 공기측 입구온도의 온도차를 크게 할 수 없다.[4] 이러한 이유로 인하여 수소연료전지 자동차에 적용되는 라디에이터는 일반적으로 내연기관 자동차의 엔진냉각을 위한 라디에이터에 비하여 2배 이상의 방열량이 요구되고 있다. 이와 더불어 수소연료전지 자동차를 구성하는 모터, 배터리 및 전력변환기(Inverter)등과 같은 고발열 전자장비들에 대한 고효율 냉각시스템에 대한 연구가 필요한 실정이다.[5] 즉 수소연료전지 자동차에서 필요한 열관리는 내연기관 자동차에 기본적으로 적용된 공조장치(냉방시스템)는 물론 수소와 산소의 화학반응을 통하여 전기를 발생시키는 스택에 대한 냉각시스템과 전자장비 냉각시스템 등에 대하여 추가적으로 고찰해야 한다.[6,7]

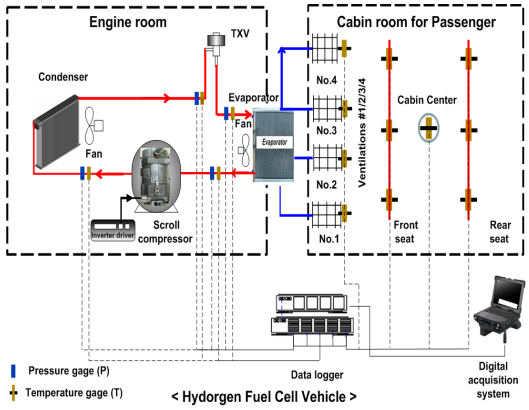
따라서 본 연구에서는 다양한 운전조건에서 수소연료전지 자동차의 열관리시스템에 대한 성능특성을 고찰하고 이를 통하여 얻은 결과를 바탕으로 수소연료전지 자동차의 열관리시스템 성능 및 연비 향상을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치



(a) Test set-up of the cooling systems for the stack and electric devices



(b) Test set-up for an electric air conditioning system

[그림 1] 수소연료전지 자동차의 열관리시스템의 개략도
[Fig. 1] Schematic of the thermal management systems for the hydrogen fuel cell vehicle

수소연료전지 자동차의 냉각 및 냉방 측면에서 열관리시스템은 크게 3가지 부분으로 구분되며, 자동차 승차공간의 냉방시스템, 수소와 산소의 화학반응을 통하여 전기를 발생시키는 스택(stack) 냉각시스템, 그리고 모터 및 인버터 등으로 구성된 전자장비 냉각시스템이다. 이러한 열관리시스템은 자동차의 운행 및 사용환경에 따라 개별 및 연속적으로 운전되기 때문에 스택 냉각시스템과 전자장비 냉각시스템 및 냉방시스템에 대하여 통합적으로 열관리 성능평가가 진행되어야 한다. 이러한 수소연료전지 자동차의 통합 냉각성능 평가를 위하여 그림 1과 같이 실험장치를 구축하였다. 그림 1 (a)는 스택 및 전자장비 냉각시스템을 모사하기 위한 개략도이며, 냉각시스템 각 부의 온도 및 압력을 측정하기 위하여 불확실도 ±0.1 °C의 T-type 열전대와 불확실도 ±0.1%의 PI3H 압력센서를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 스택의 용량은 115 kW이고 자동차 구동 모터는 110 kW이다. 스택 냉각용 방열기

는 가로/세로/폭이 각각 626/675/36 mm인 핀-튜브 열교환기를 사용하였고, 전자장비 냉각용 방열기는 가로/세로/폭이 각각 540/105/26 mm인 핀-튜브 열교환기를 사용하였다. 각 방열기의 크기는 자동차 전면부(FEM, front end module)에 위치해야 하기 때문에 스택 및 전자장비 냉각용량은 응축기 크기 등을 고려하여 설계하였다.

그림 1 (b)는 수소연료전지 자동차 승차공간의 냉방을 위한 전동식 냉방시스템을 모사하기 위한 개략도이다. 전동식 냉방시스템 구성은 엔진부에 위치한 전동식 스크롤 압축기, 응축기, 그리고 팽창장치인 TXV(thermostatic expansion valve)와 승차공간의 냉방을 위하여 자동차 운전석 전면에 위치한 증발기로 구성된다. 이렇게 구성된 냉방시스템 및 측정 장비들은 다양한 실 도로 주행조건에서 평가를 위하여 실제 수소연료전지 자동차에 장착되었으며 수소연료전지 자동차에서 발생되는 다양한 전자파들로 인하여 오작동 되지 않도록 모든 시스템들을 절연시켰다. 또한 수소연료전지 자동차가 운행될 때 전동식 냉방시스템의 냉방성능 및 승차공간의 온도 하강효과(cool down)를 관찰하기 위하여 압축기, 응축기, 팽창장치, 그리고 증발기 입/출구에 온도와 압력을 측정하였다.

[표 1] 시스템 사양
[Table 1] Specifications of the tested system

Components	Specifications
Stack capacity of the fuel cell vehicle (kW)	115
Motor capacity (kW)	110
Compressor (RPM, kW)	Electric-driven / Scroll type (max speed 8000 rev/min, max 3 kW)
Condenser (mm, kW)	Fin-tube heat exchanger (H*V*D : 564*471*12, 10 kW at 5 m/s)
Evaporator	Fin-tube heat exchanger (H*V*D : 240*220*50, 5.5 kW at 3 m/s)
Expansion device	Thermostatic expansion valve (TXV)
Refrigerant	R-134a
Working fluid	Air
Radiator for a stack Size (mm)	Fin-tube heat exchanger (H*V*D:626*675*36)
Radiator for an electric devices Size (mm)	Fin-tube heat exchanger (H*V*D:540*105*26)

표 1은 본 연구에서 사용된 냉방시스템과 냉각시스템을 포함한 열관리시스템의 사양 및 수소연료전지 자동차의 스택 용량을 나타내고 있다. 압축기는 기존의 왕복동식이나 사판식 압축기에 비하여 구조가 간단하고 체적효율이 우수한 전동식 스크롤압축기를 사용하였다. 전동식 스크롤압축기는 고전압인 240 V로 구동되며 인버터로 압축기의 회전수를 제어하도록 설치되었다. 응축기 및 증발기는 평판핀과 튜브로 구성된 평판핀-튜브 열교환기를 사용하였다. 응축기는 전자장비 냉각용 방열기와 동일한 배열을 갖으며 크기는 가로/세로/폭이 각각 564/471/12 mm인 핀-튜브 열교환기로 자동차 전면부에 설치되었다.

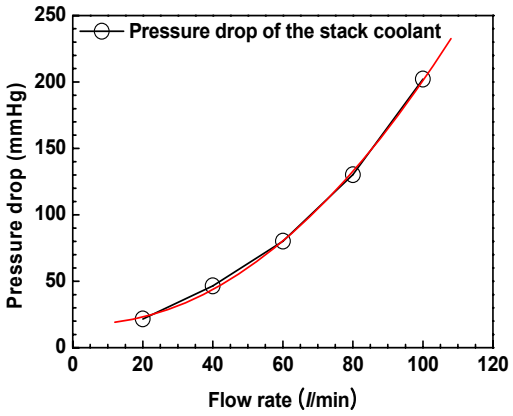
2.2 실험방법

스택 냉각시스템의 냉각성능 평가를 위하여 스택 방열기 입구 및 출구에 열전대를 설치하였다. 스택을 통과하는 냉각수 유량의 측정은 간접적인 방법을 이용하여 계산하였다. 즉 스택 방열기 입구 및 출구에서 측정된 차압과 단품 성능평가를 통하여 얻어진 유량별 차압특성과 비교하여 그림 2 (a)와 같은 방법으로 냉각수 유량을 예측하였다. 전자장비 냉각시스템의 냉각수 유량도 스택 냉각시스템과 동일한 방법을 이용하여 그림 2 (b)와 같이 진행하였고 각 방열기에서의 냉각수 유량변화에 대한 차압특성을 유량과 차압 상관식으로 제시하였다. 본 연구에서는 제시된 스택 및 전자장비 냉각수 유량 상관식은 회귀분석 결과 실험데이터와 99.91% 및 99.95%의 정확도를 나타냈다.

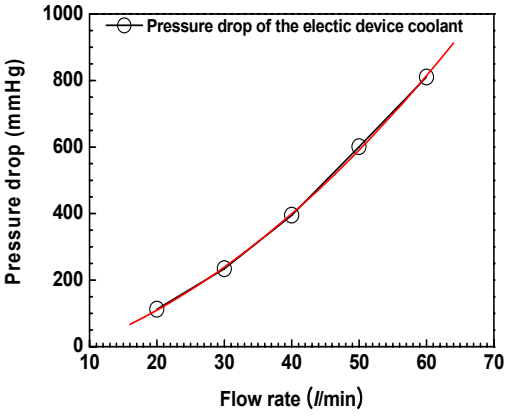
$$\dot{V}_{stack} = 18.171 - 0.1503 \times \Delta P + 0.0198 \times (\Delta P)^2 \quad (1)$$

$$\dot{V}_{elec} = -54.96 + 5.0794 \times \Delta P + 0.1569 \times (\Delta P)^2 \quad (2)$$

수소연료전지 자동차의 열관리시스템에서 냉각시스템의 작동과 상호 영향을 줄 수 있는 냉방시스템 작동에 따른 성능을 분석하기 위하여 응축기 입구 및 출구, 압축기 입구 및 출구, 팽창장치 입구 및 출구, 그리고 응축기 전면부의 유입공기 온도측정을 위하여 T-type 열전대를 이용하였고 압축기의 고압 및 저압 배관에 압력계를 설치하여 압력을 측정하였다. 마지막으로 수소연료전지 자동차의 운행조건에 따른 열관리시스템의 성능특성을 분석하기 위하여 고속주행 조건, 시내주행 조건, 그리고 등판주행 조건에서 실험을 진행하였다. 본 연구에서 사용한 3가지 조건들은 Lee et al. (2011)에서 제시한 무공해 자동차들을 위한 실 도로 조건에서 냉방성능 특성을 고찰하기 위한 실험방법이다.[8] 표 2는 본 연구에서 사용한 계측장치들의 불확실도를 나타내고 있다.



(a) heat exchanger for a stack cooling



(b) heat exchanger for electric devices cooling

[그림 2] 유량에 따른 냉각수 압력강하량

[Fig. 2] Coolant pressure drop characteristic with the flow rate

[표 2] 실험 조건

[Table 2] Test equipments and uncertainty of the experimental parameters

Items	Accuracy
Thermocouples (T-type)	±0.1℃
Pressure gage (Sensors, PI3H)	±0.1%
Mass flow meter (Coriolis type)	±0.15%, Max 680 kg/h
Data logger (Gantner)	E. Gate IP (V3) (2.93W @ 12.06 V)
Flow rate for stack radiator (LPM)	5 ~ 100 l/min
Flow rate for radiator of the electric devices (LPM)	20 ~ 60 l/min

2.3 실험계산

스택 및 전자장비 냉각시스템의 방열량은 식 (1)과 같이 냉각수 입출구의 온도차 및 유량을 이용하여 계산하였다.

$$\dot{Q}_c = \rho \cdot Q_c \cdot C_{p,c} \cdot (T_{c,in} - T_{c,out}) \quad (1)$$

냉방시스템의 응축기의 방열량은 응축기를 통과하는 냉매의 질량유량 및 엔탈피차를 이용하여 식 (2)과 같이 계산하였다.

$$\dot{Q}_r = \dot{m}_r \cdot (h_{r,in} - h_{r,out}) \quad (2)$$

3. 실험결과 및 고찰

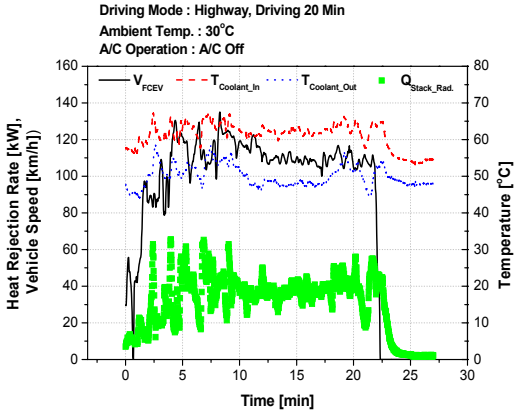
수소연료전지 자동차는 기존의 내연기관 자동차와는 달리 엔진이 없기 때문에 기존의 엔진과 연결된 벨트로 구동되는 압축기를 사용하는 기계식 냉방시스템과 다른 별도전원을 이용하여 압축기를 구동하는 전동식 냉방시스템과 스택 및 전자장비를 위한 냉각시스템이 필요하다. 본 연구에서는 수소연료전지 자동차의 실 도로 운행조건에서의 열관리시스템의 냉각 및 냉방성능 특성을 분석하기 위하여 주행조건별 평가를 수행하였고 그 결과에 대한 분석을 다음과 같이 진행하였다.

3.1 고속주행 조건에서 TMS 성능특성

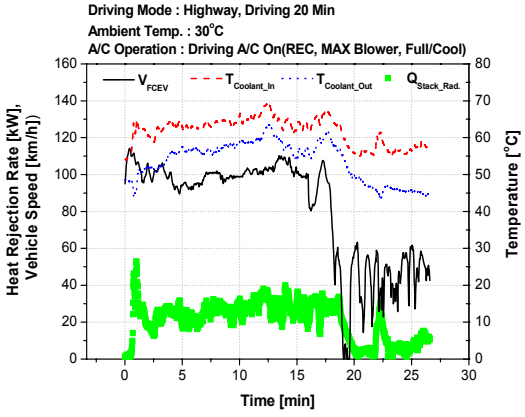
본 연구에서 사용된 수소연료전지 자동차의 냉각모듈은 2열로 구성되어 있다. 자동차 전면부기준 1열에는 응축기 및 전자장비 냉각용 열교환기가 상하로 위치해 있고, 2열에는 스택 냉각용 열교환기가 위치해 있다.

그림 3은 수소연료전지 자동차가 고속으로 주행시 냉방시스템 작동여부에 따른 스택 냉각시스템의 성능특성 변화에 대하여 나타내고 있다. 이를 위하여 시험 자동차를 일반적인 여름철 외기온도인 30℃ 및 자동차 주행속도 110 km/h에서 20 min 주행 후 냉방시스템 작동여부에 따른 스택 냉각시스템의 온도 및 방열량 특성을 고찰하였다. 먼저 스택 냉각시스템의 방열성능은 냉방시스템 작동 시 평균 28.8% 감소하였다. 이러한 이유는 냉방시스템이 작동하게 되면 응축기 (condenser) 주변의 공기가 온도가 상승하여 스택 냉각용 라디에이터 입구로 들어가는 냉각수 온도 및 주변 공기 온도를 상승시키기 때문이다. 냉방시스템 작동시 스택 냉각용 라디에이터의 냉각수

입구 및 출구 온도는 냉방시스템을 작동하지 않을 경우보다 각각 평균 1.7% 및 11.5% 증가하였다.



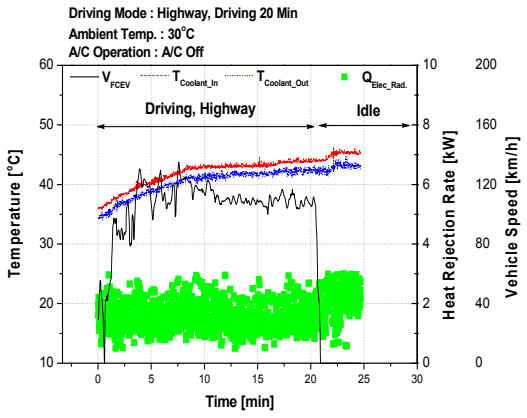
(a) air conditioning system off



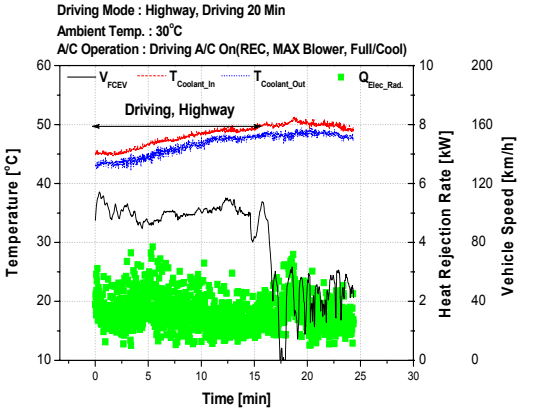
(b) air conditioning system on

[그림 3] 고속주행 조건에서 스택 냉각시스템의 성능특성
[Fig. 3] Performance characteristic of the stack cooling radiator during highway driving mode

그림 4는 수소연료전지 자동차가 고속으로 주행시 냉방시스템 작동여부에 따른 전자장비 냉각시스템의 성능특성 변화에 대하여 나타내고 있다. 여름철 외기온도 30℃및 자동차 주행속도 110 km/h에서 20 min 주행 후 냉방시스템 작동여부에 따른 전자장비 냉각시스템의 온도 및 방열량 특성을 고찰하였다. 전자장비 냉각시스템의 방열성능은 냉방시스템 작동여부에 따라 거의 변화가 없었다. 이러한 이유로는 그림 1(a)에서 보는 것처럼, 전자장비 냉각용 라디에이터와 응축기는 1열에 상하에 위치해 있기 때문에 냉방시스템의 작동여부에 따라 상호영향을 크게 받지 않기 때문이다.



(a) air conditioning system off

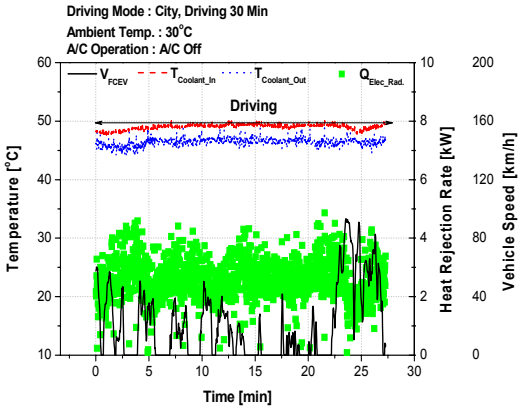


(b) air conditioning system on

[그림 4] 고속주행 조건에서 전자장비 냉각시스템의 성능특성
[Fig. 4] Performance characteristic of the electrical device cooling radiator during highway driving mode

3.2 시내주행 조건에서 TMS 성능특성

그림 5는 수소연료전지 자동차의 전자장비 냉각시스템의 성능특성을 정지와 주행을 반복하는 시내주행 조건에서 고찰하였다. 이를 위하여 시험 자동차를 일반적인 여름철 외기온도인 30°C 및 자동차 평균 주행속도 35 km/h에서 30 min 주행 후 냉방시스템이 꺼진 상태에서 전자장비 냉각시스템의 온도 및 방열량 특성을 고찰하였다. 전자장비 냉각시스템 측면에서 시내주행 조건은 자동차의 가속과 감속을 빈번하게 작동하므로 전자장비 냉각부하는 110km/h로 일정하게 주행하는 고속주행 조건보다 약 65.6% 상승함을 확인할 수 있었다.



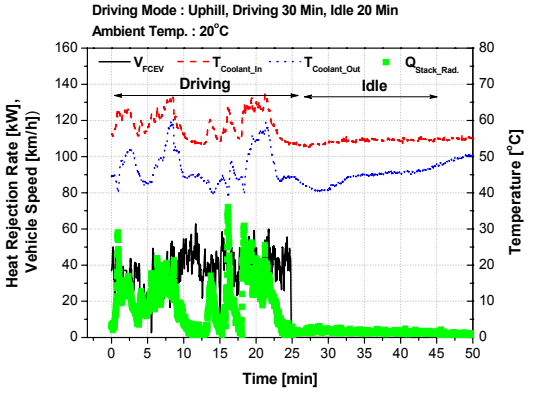
[그림 5] 시내주행 조건에서 전자장비 냉각시스템의 성능특성

[Fig. 5] Performance characteristic of the electrical device cooling radiator during city driving mode

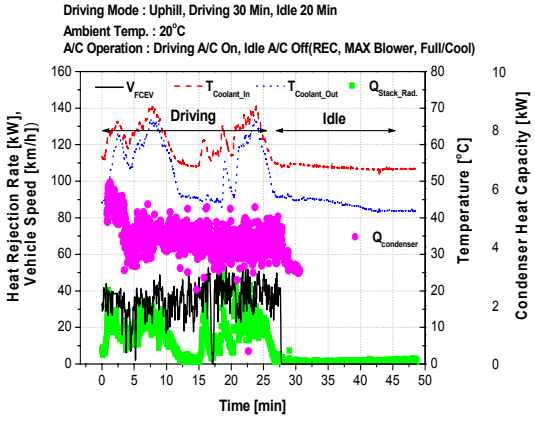
3.3 등판주행 조건에서 TMS 성능특성

일반적으로 수소연료전지 자동차의 등판주행 조건은 고속주행 조건과 유사한 출력을 요구하지만 자동차가 저속으로 운전하기 때문에 냉각성능 측면에서는 불리한 조건이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 수소연료전지 자동차의 등판주행 조건에서 스택 냉각 및 전자장비 냉각시스템의 성능특성 변화를 고찰하였다. 이를 위하여 외기온도 20℃ 조건에서 평균 주행속도 45 km/h에서 30분 동안 6% 경사 등판주행 후 20분 동안 idle 조건으로 냉방시스템 작동유무에 따른 열관리시스템의 성능특성 변화를 고찰하였다.

그림 6은 수소연료전지 자동차의 등판주행 조건에서 스택 냉각시스템의 성능변화를 보여주고 있다. 냉방시스템의 작동유무와 상관없이 스택 출구에서의 냉각수 온도는 적정수준을 유지하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 이유로는 등판도로를 따라 자동차가 올라감에 따라 외기온도가 떨어지기 때문이다. 즉 이렇게 감소된 공기온도는 열교환기 방열성능에 큰 영향을 미치는 공기 및 냉각수의 입구 온도차 (ITD, inlet temperature difference)를 상승시켜 궁극적으로 냉각효율이 증가하였기 때문이다. 또한, idle 조건에서 냉방시스템 작동여부에 따른 수소연료전지 자동차의 스택 냉각성능의 특징을 살펴보았다. 일반적으로 연료전지 자동차뿐만 아니라 내연기관 자동차는 일정시간 주행 후 자동차가 정지한 상태인 idle 조건에서 엔진 및 모터 출력 부하는 없어진다. 하지만 내연기관 자동차는 일정시간 주행으로 인하여 높아진 엔진 폐열에 의해서 냉각수 온도는 지속적으로 상승하는 경향을 나타내지만, 수소연료전지 자동차는 idle 조건이 되면 스택의 출력이 바로 감소하여 스택 입구의 냉각수 온도는 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 그러나 스택 냉각용 열교환기의 출구온도는 냉방시스템 작동여부에 따라 다른 경향을 나타내고 있다. 그림 6 (a)에서 보는 것처럼, 냉방시스템을 작동하지 않을 경우 스택 냉각수 출구온도가 지속적으로 상승하는데, 이러한 이유로는 냉방시스템 적용유무와 냉각팬의 작동형식이 다르기 때문이다. 즉 idle조건에서 냉방시스템이 작동하지 않는 경우 냉각팬이 작동하지 않기 때문에 스택 냉각용 열교환기 출구온도는 상승하게 된다. 그러나 그림 6 (b)에서 보는 것처럼, 냉방시스템이 작동하는 경우 냉각팬이 작동하게 되고, 이로 인하여 스택 냉각시스템의 방열성능은 증가하여 스택 냉각용 열교환기 출구온도는 감소하게 된다. 따라서 Idle 조건에서 냉방시스템이 작동될 경우 응축기의 방열 및 냉각성능 유지를 위한 냉각팬이 작동하여 스택 냉각용 열교환기의 출구온도가 냉방시스템 작동여부에 따라 달라진다.



(a) air conditioning system off



(b) air conditioning system on

[그림 6] 등판주행 조건에서 스택 냉각시스템 및 응축기의 성능특성

[Fig. 6] Performance characteristic of the stack cooling radiator and condenser during up-hill (6%) driving mode

4. 결론

본 연구에서는 실 도로 운행조건인 고속, 등판, 그리고, 시내주행 조건에서 수소연료전지 자동차의 열관리시스템의 평가를 수행하였고, 각 주행조건에서 얻어진 열관리시스템 성능특성을 분석하였다. 또한 실 도로 운행조건(고속, 등판, 시내주행)에서 수소연료전지 자동차의 열관리시스템은 자동차 주행성능에 영향이 없으면서 승차공간의 냉방용량을 충분히 만족하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 고속도로 조건에서 냉방시스템 작동 시 수소연료전지 자동차의 스택 냉각시스템의 방열성능은 냉방시스템이 꺼진 경우보다 평균 28.8% 감소하였다. 또한, 냉방시스템 작동시 스택 냉각용 라디에이터의 냉각수 입구 및 출구온도는 냉방시스템을 작동하지 않을 경우보다 각각 평균 1.7% 및 11.5% 증가하였다.
2) 시내주행 조건에서 수소연료전지 자동차의 전자장비 냉각시스템은 자동차의 가속과 감속을 빈번하게 작동하므로 전자장비 냉각부하는 고속주행 조건보다 약 65.6% 상승하였다.
3) 등판주행 조건에서 냉방시스템의 작동유무와 상관없이 스택 출구에서의 냉각수 온도는 적정수준을 유지하였다.

References

[1] Cho, C. W., Lee, M. Y., Lee, H. S., Lee, D. Y., Oh, S. T. and Won, J. P., "Heating Performance Characteristics of a Coolant Source Heat Pump using Wasted Heat of Electric Devices for an Electric Bus", Int. J. of JMST, In Revie, 2011.

[2] Lee, M. Y., Cho, C. W., Lee, H. S. and Won, J. P., "Performance Characteristics of the Electrical Air Conditioning System for Zero Emission Passenger Vehicle", Trans. of the KAIS, 2011, In Press.

[3] Lee, M. Y., Cho, C. W., Lee, H. S., Lee, D. Y., Park, Y. C. and Won, J. P., "Performance Characteristics of a Hybrid Heat Pump for an Electric Bus", Int. J. of Energy, 2011, In Review.

[4] Lee, M. Y., Won, J. P., Cho, C. W. and Lee, H. S., "Experimental Study on the Mutual Influence of Thermal Management System for Hydrogen Fuel Cell Vehicle", Trans. of the KHNES, In Review, 2011.

[5] Mattew, H. F., David, L. W., David, A. M. and Andrew, B., "PEM Fuel Cell System Solutions for Transportation", SAE 2000 World Congress, No. 2000-01-0373,2000, 2000.

[6] Toshihiro, Y., Takayuki, I., Hitoshi, S., Minoru, Y. and Mitsuru, I., "The Development of the Cooling System for FCV", 2004 JAMA annual conference, No. 88-04, 2004.

[7] Hager, J. and Schickmair, L., "Fuel Cell Vehicle Thermal Management System Simulation in Contrast to Conventional Vehicle Concepts", 2005 SAE International, 2005.

[8] Lee, M. Y., Won, J. P., Lee, D. Y. and Cho, C. W., "Study on the Performance Characteristics of the Roof Mounted Electrical Air Conditioning System Using Inverter Scroll Compressor", Trans. of the KAIS, Vol. 12, No. 10, pp. 4308-4313, 2011.

[9] Lee, H. S, Won, J. P., Kim, S. C, Cho, C. W., Park, Y. S. and Kim, S. K., "A Study on Analytic Approach for Stack Cooling Performance Improvement of Fuel Cell Electric Vehicle", KSAE Conference, pp. 3007-3013, 2009.

[10] Hong, J. P., "HEV traction motor modeling and analysis", KSAE Conference, pp. 44-58, 2007.

이 호 성(Ho-Seong Lee) **[정회원]**

- 2006년 2월 : 고려대학교 기계공학부 (공학석사)
- 2007년 9월 ~ 현재 : 자동차부품 연구원 선임연구원

<관심분야>
자동차 냉각시스템 해석 및 평가, 자동차 열관리

조 중 원(Cho, Chung-Won) **[정회원]**

- 2005년 2월 : KAIST 기계공학과 (공학박사)
- 2008년 5월 : 에너지기술연구원 고분자 연료전지 연구단
- 2008년 7월 ~ 현재 : 자동차부품 연구원 열제어시스템 연구센터

<관심분야>
친환경 자동차 열관리 시스템 , 연료전지 및 BOP

원 종 필(Won, Jong-Phil) **[정회원]**

- 1999년 2월 : 경희대학교 기계공학 과 (공학박사)
- 1993년 2월 ~ 현재 : 자동차부품 연구원 열제어시스템 연구센터 책임연구원

<관심분야>
자동차 냉각장치, 열교환기, 연료전지

이 무 연(Lee, Moo-Yeon) **[정회원]**

- 2010년 2월 : 고려대학교 기계공학부 (공학박사)
- 2011년 1월 : 고려대학교 기계공학과 (연구교수)
- 2011년 2월 ~ 현재 : 자동차부품 연구원 선임연구원

<관심분야>
친환경 자동차 열관리, 전동식 히트펌프, 신재생에너지 변환시스템, 열/물질전달, 연료전지