

이산화탄소 에어컨 시스템을 이용한 연료전지 자동차의 스택 냉각성능에 대한 실험적 연구

김 성 철¹⁾ · 김 민 수^{*2)} · 원 종 필¹⁾

자동차부품연구원 열제어연구팀¹⁾ · 서울대학교 기계항공공학부²⁾

Experimental Studies on the Stack Cooling Performance Using a CO₂ Air Conditioning System in Fuel Cell Vehicles

Sung Chul Kim¹⁾ · Min Soo Kim^{*2)} · Jong Phil Won¹⁾

¹⁾Thermal Management Research Team, Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjeong-ri, Pungse-myeon, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea

²⁾School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

(Received 16 August 2007 / Accepted 19 November 2007)

Abstract : The CO₂ air conditioning system installed in fuel cell vehicles could be used either for stack cooling or for cabin cooling, and thus was used for the stack cooling when additional stack heat release was required over a fixed radiator capacity for high power generation. This study investigated the performance of the stack cooling system using CO₂ air conditioner at various operating conditions. Also, the heat releasing effectiveness and mutual interference were analyzed for the stack cooling system using an air conditioner and compared with the conventional radiator cooling system with/without cabin cooling. The heat release of the stack cooling system with the aid of CO₂ air conditioner increased up to 36% more than that of the conventional radiator cooling system with cabin cooling. Furthermore, the heat release of the stack cooling system using CO₂ air conditioner increased more by 7% than that of the conventional radiator cooling system without cabin cooling.

Key words : Fuel cell vehicles(연료전지 자동차), Heat release(열방출), Stack cooling system(스택 냉각 시스템), Carbon dioxide(이산화탄소), Air conditioning system(에어컨 시스템), Radiator(라디에이터), Stack cooler(스택 쿨러)

Nomenclature

D : depth, mm

H : height, mm

L : length, mm

P : pressure, MPa

ΔP : pressure difference, kPa

\dot{Q} : heating capacity/heat transfer rate, kW

RH : relative humidity, %

T : temperature, °C

V : volume flow rate, L/min

v : air speed, m/s

W : width, mm

\dot{W} : compressor power/stack power, kW

Subscripts

c : coolant

i : inlet

ind : indoor

*Corresponding author, E-mail: minskim@snu.ac.kr.

out : outdoor
 rad : radiator
 sc : stack cooler

1. 서론

최근 화석에너지 자원의 사용 증대와 환경 문제의 발생으로 인하여, 자동차 분야에서는 수소를 연료로 사용하는 연료전지 자동차가 각광을 받고 있다. 이러한 연료전지 자동차의 개발에 있어서, 동력원인 연료전지 스택이 최적의 효율을 내도록 하기 위해서는 반응 온도를 적절하게 유지하는 것이 매우 중요하다. 그러나 연료전지의 전기화학 반응은 필연적으로 열의 발생을 수반하게 된다. 발생된 열의 일부는 반응이 끝난 수소와 공기 및 생성된 물의 방출에 의해 외부로 전달되기도 하지만, 대부분의 열은 라디에이터를 통해 대기로 방출시켜야만 반응 온도를 적정하게 유지할 수 있다. 만약, 지나치게 반응 온도가 상승하게 되면 스택 출력이 오히려 줄어들게 되고,^{1,2)} 연료전지 차량의 경우 차량 운전이 정지되는 경우가 발생하기도 한다. 이러한 이유로 인해, 스택 냉각을 위한 열 제어 기술은 연료전지 차량의 개발에 있어서 핵심적인 분야이며, 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다.³⁻⁸⁾

스택 발생 열을 제거하기 위해 일반적으로 스택 내부에 냉각수 유로를 별도로 구성하며, 라디에이터를 통하여 외부로 방출하도록 열관리 시스템이 구성되어 있다. 그런데 연료전지 자동차의 경우, 스택 냉각수 온도가 65°C 정도로 일반 가솔린이나 디젤 엔진 자동차의 냉각수 온도보다 훨씬 낮다. 따라서 냉각수와 대기와의 온도차가 감소하여 일반 라디에이터와 실외 환을 가지고 스택에서의 발생 열을 모두 방출하는 것이 어려울 경우가 있다. 또한, 스택 룸의 라디에이터 장착 공간의 제약으로 열전달 면적을 늘리기 위해 라디에이터 크기를 확대하는데 한계가 있고, 실외 환의 회전속도를 증가시키기 위한 고성능 환의 도입도 소음문제로 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 스택 냉각을 위한 별도의 시스템을 장착한다면 비용 및 공간상의 문제가 발생하기 때문에, 차량에 냉방 장치로 장착되

어 있는 시스템을 이용하여 추가적인 스택 냉각을 하려는 것이 본 연구의 목적이다. 에어컨 시스템의 스택 냉각용량에도 한계가 있으나 경사로 주행 또는 급가속 등 운전 부하가 순간적으로 증가하는 경우 단시간 내에 스택의 발생 열을 제거하여 연료전지 차량의 운전 성능 저하를 막는데 효과가 있다. 그래서 이산화탄소 에어컨을 이용한 스택 냉각 시스템은 스택 냉각 모드에서의 열방출을 향상시킬 수 있는 하나의 방안이며, 이러한 스택 냉각 시스템의 성능을 다양한 차량 운전조건에서 살펴보고자 한다. 또한 라디에이터를 통한 열방출량과 냉방 시스템을 이용한 열방출 효과 및 상호관계에 대해서도 분석하고자 한다.

2. 시스템 설계 및 실험 장치

2.1 스택 냉각 시스템 설계

이산화탄소 에어컨을 이용한 스택 냉각 시스템은 Fig. 1에서와 같이, 에어컨 시스템 냉방/냉각 회로와 스택 방열 회로로 구분된다. 에어컨 시스템 냉방/냉각 회로는 압축기, 가스 쿨러, 팽창 밸브, 증발기, 내부열교환기 및 스택 쿨러 등으로 구성되어 있고, 스택 방열 회로는 스택, 라디에이터, 바이패스 밸브, 펌프 및 스택 쿨러 등으로 구성되어 있다.

하절기, 평상시에는 차실 내 냉방을 위해 실내 환이 작동되고, 바이패스 밸브 2가 닫히게 되어 스택 쿨러로의 냉각수 유입을 막는다. 하지만 차량의 운전 부하가 순간적으로 급증하는 경우 스택 방열량을 증대시키기 위해 실내 환의 작동을 멈추고, 바이패스 밸브 2를 열어 스택 쿨러로 냉각수가 흐르게

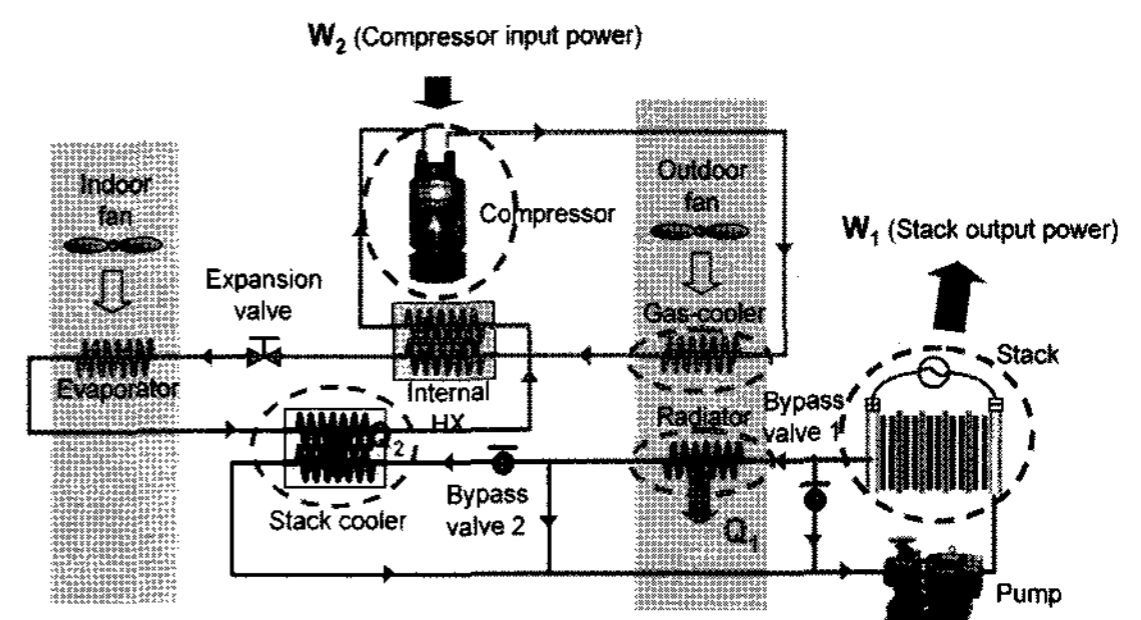


Fig. 1 Schematic diagram of a stack cooling system using CO₂ air conditioner

한다. 이 때는 에어컨 시스템이 스택 열방출을 돕는 역할을 수행하게 된다.

설계된 이산화탄소 에어컨 시스템은 차실 내 냉방과 스택 냉각을 동시에 하기에는 용량이 작기 때문에, 스택 냉각 시에는 증발기 측 공기 유로를 차단하여 에어컨 시스템이 스택 냉각에만 쓰이도록 하는 것이 필요하다. 실제로 고온 외기조건에서 경사로 주행 또는 급가속 등 일시적으로 차량 부하가 급증하는 경우 급격한 스택 운전온도 상승으로 차량이 정지되는 것을 방지하도록 에어컨 시스템이 스택 냉각에 전용되고, 차량부하 급증 상황이 해소된 경우 다시 냉방 운전으로 전환되는 시스템으로 에어컨 시스템을 설계하였다.

2.2 실험 장치 구성 및 실험 방법

실험 장치는 냉각수, 공기 및 냉매의 상태를 측정하여 스택 냉각 시스템과 에어컨 시스템의 성능을 평가하도록 제작하였다. 이러한 시스템 성능 데이터를 얻기 위해서 기본적으로 온도, 압력, 질량유량 및 습도를 측정하였다.

Fig. 2에 나타낸 바와 같이 실험 장치는 냉매 회로

인 이산화탄소 냉방/냉각 시스템, 공기 회로인 차실 내외 온습도 조건을 구현하기 위한 풍동, 그리고 냉각수 회로인 스택 방열 시스템으로 구성되어 있다. 주요한 시스템 구성요소로는 연료전지 차량용 전동식 압축기, 스택 열원 모사용 스택 시뮬레이터, 가스쿨러와 라디에이터가 장착되어 있는 실외 열교환기 시험부, 그리고 스택 냉각용 열교환기인 스택 쿨러 등이 있다.

Table 1에서는 이산화탄소 에어컨을 이용한 스택 냉각 시스템을 구성하는 각 요소들의 제원을 나타내었다. 압축기로는 Dorin 회사의 이산화탄소용 TCS113 모델을 사용하였고, 열교환기 등은 작동압력과 용량에 맞도록 제작하였다. 라디에이터로 들어가는 스택 냉각수의 유량 및 온도는 스택 시뮬레이터로 조절하였다.

스택 냉각 성능을 파악하고자 라디에이터 및 스택 쿨러 용량, 압축기 소요동력을 계산하였다. 라디에이터와 스택 쿨러 용량은 냉각수가 잃은 열량을 계산하여 얻어지고, 압축기 소요동력은 인버터 손실을 제외하고 압축기로 들어가는 동력을 전력계(Yokogawa, WT230)로 측정하였다.

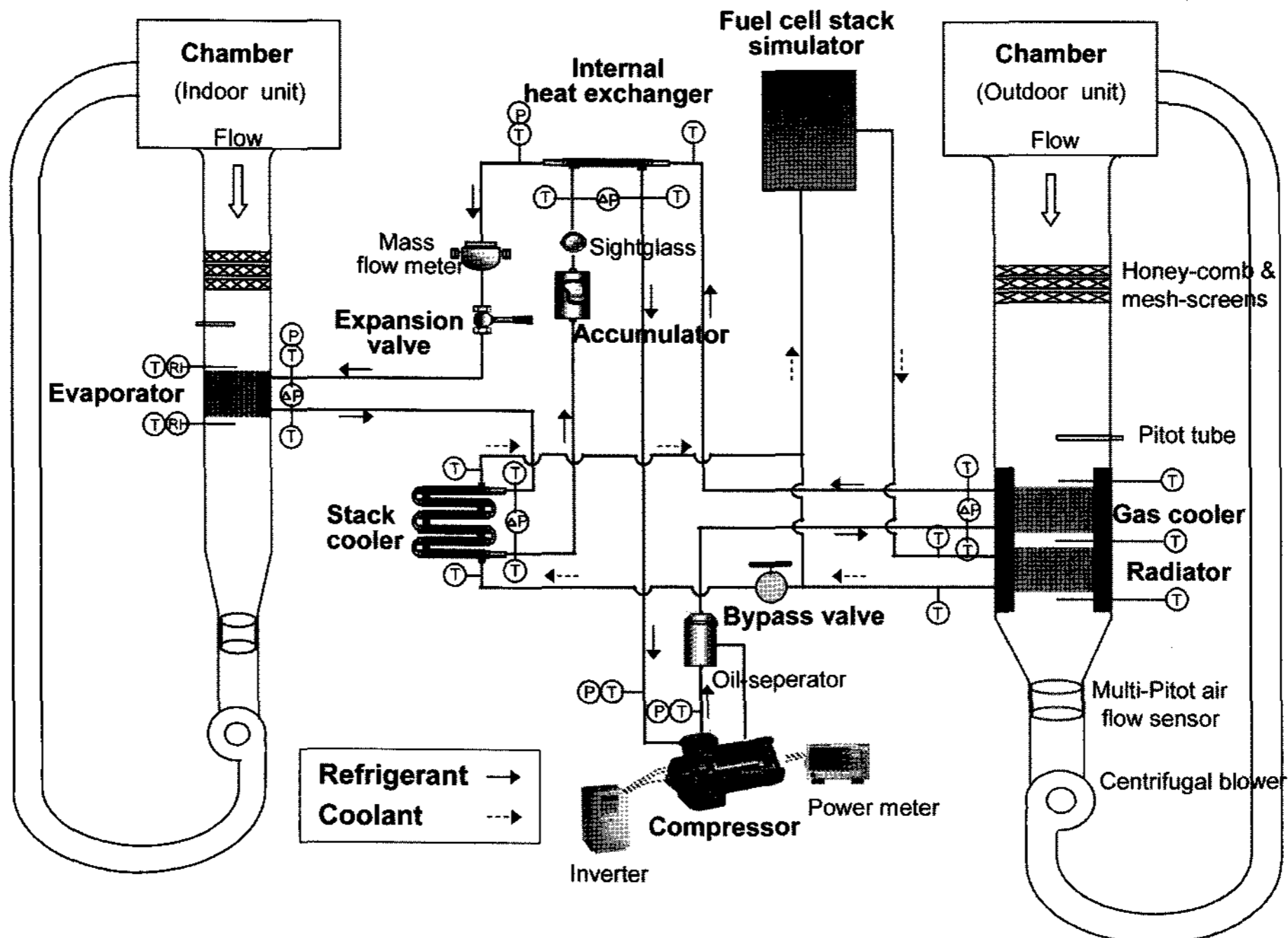


Fig. 2 The layout of the test facility of a stack cooling system using CO₂ air conditioner

Table 1 System specification

Component	Specification
Compressor	Electricity-driven 3 kW power consumption 2.7 m ³ /h at 3500 rpm
Stack simulator	Heating capacity 30 kW Coolant flow rate 120 L/min
Stack cooler	Coaxial tube, counter flow I.D. 7.3, O.D. 15.9, L 4800 mm
Radiator	Commercial W640×H460×D18 mm ³
Gas cooler	Microchannel H.X., 1 slab, W692×H367×D14.55 mm ³
Evaporator	Microchannel H.X., 4 slabs, W248×H235×D87.5 mm ³
Internal heat exchanger	Coaxial tube, counter flow I.D. 5.5, O.D. 21, L 1500 mm
Expansion valve	Manual metering valve Max. 24.2 MPa at 38°C
Accumulator	400 cc

3. 결과 및 토의

3.1 라디에이터 방열량

차량의 부하 변동에 따른 라디에이터 방열량의 파라미터들에는 냉각수 온도 및 유량, 그리고 실외 웬 속도가 있다. 라디에이터로 유입되는 외기 온도가 40°C이고, 스택이 적정온도로 반응하기 위해서 라디에이터 냉각수 입구온도가 65°C로 일정하게 유지되는 경우, 다양한 라디에이터 냉각수 유량 조건에서 외기 풍속의 증가가 라디에이터 방열량에 미치는 영향을 Fig. 3에 나타내었다. 이 때 라디에이터 냉각수 유량은 20~80 L/min, 외기 풍속은 2~6 m/s로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 외기 풍속이 증가됨에 따라 라디에이터 방열량은 증가율이 감소하며 증가하는 경향을 보였다. 냉각수 유량이 40

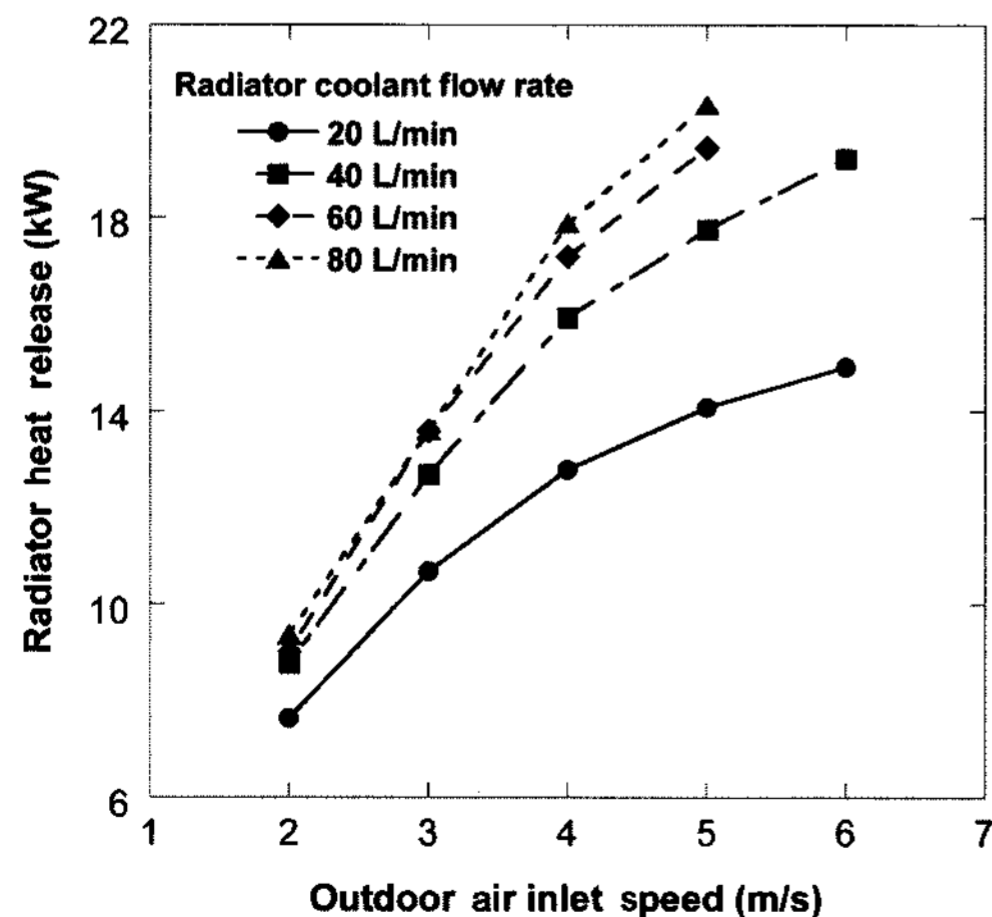


Fig. 3 Effect of outdoor air inlet speed on the radiator heat release at various radiator coolant flow rates ($T_{out,i} = 40^{\circ}\text{C}$, $T_{c,rad,i} = 65^{\circ}\text{C}$)

L/min일 때 외기 풍속이 2 m/s에서 6 m/s로 증가되면, 라디에이터 방열량은 119% 증가하였다. 또한 냉각수 유량의 증가에 따른 라디에이터 방열량은 외기 풍속이 증가될 때와 비슷한 변화 추이를 보였다. 외기 풍속이 5 m/s일 때 냉각수 유량이 20 L/min에서 80 L/min으로 증가되면, 라디에이터 방열량은 44% 증가하였다. 물보다 공기의 물성이 큰 열저항을 갖기 때문에 외기 풍속에 의한 라디에이터 방열량에 미치는 영향이 매우 큰 것을 알 수 있다.

3.2 스택 방열량

3.2.1 스택 냉각 운전

스택 방열량은 라디에이터와 스택 쿨러에서 방출한 총 열량이고, 스택 쿨러로의 냉각수 유량은 4 L/min으로 일정하게 유지시켰다. 외기 온도가 40°C, 외기 풍속이 5 m/s, 그리고 라디에이터 냉각수 입구 온도가 65°C일 때, 라디에이터 냉각수 유량을 변화시키면서, 차실 냉방 정지시 라디에이터 냉각 시스템, 차실 냉방 가동시 라디에이터 냉각 시스템(증발기 냉방용량=2.7 kW), 차실 냉방 가동시 라디에이터 냉각 시스템(증발기 냉방용량=4.3 kW), 에어컨 이용 스택 냉각 시스템(스택 쿨러 냉각용량=4.3 kW), 그리고 에어컨 이용 스택 냉각 시스템(스택 쿨러 냉각용량=4.3 kW, 가스쿨러에서 라디에이터로의 열 전달 무시)의 각각의 경우에 대해 스택 냉각 시스템의 총 방열량을 Fig. 4에 나타내었다.

라디에이터 냉각수 유량의 증가에 따라 스택 방열량은 모든 시스템 경우에 대해, 거의 동일한 변화 추이를 보이면서 증가함을 알 수 있다. 냉방 용량 4.3 kW로 차실 내 냉방 운전을 하는 경우의 스택 방

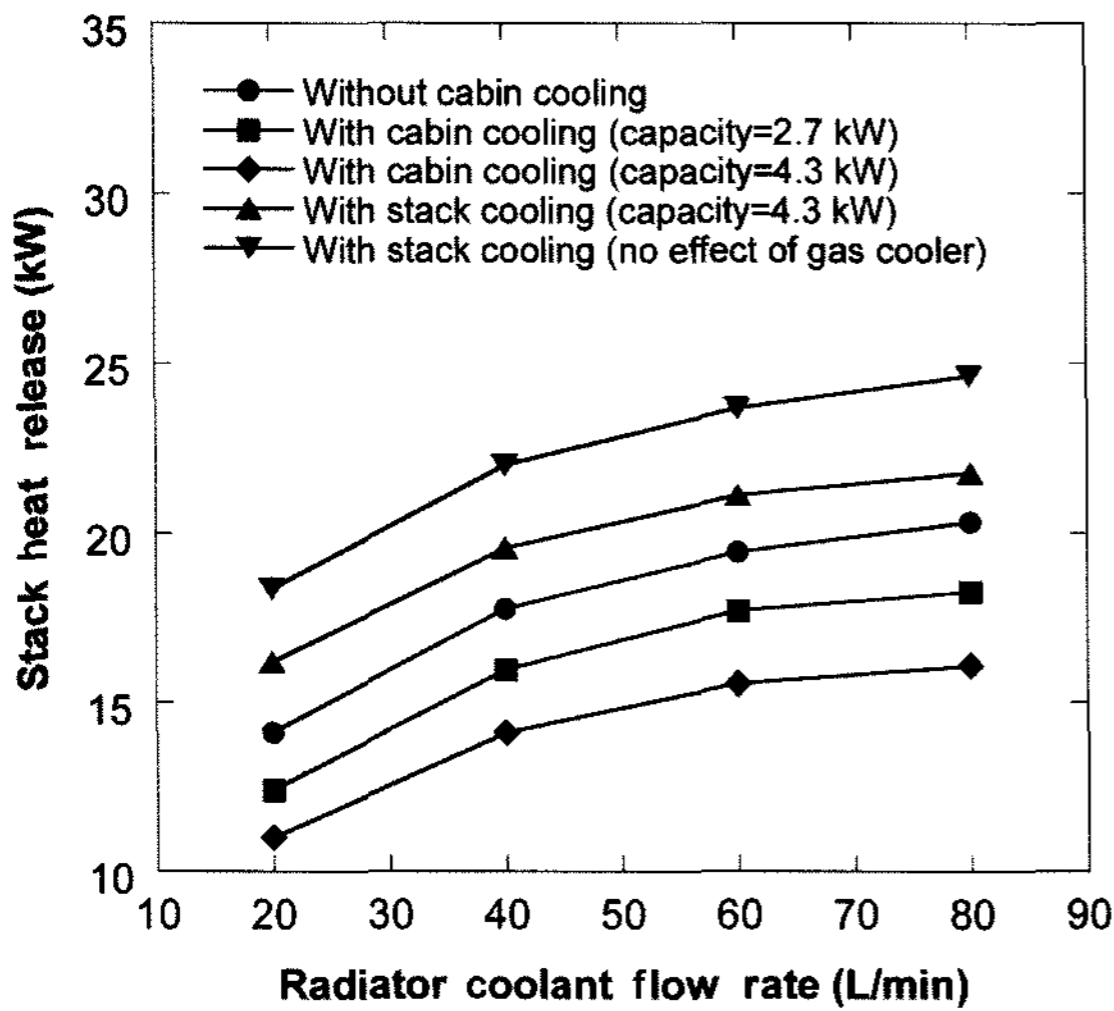


Fig. 4 Effects of the conventional radiator cooling system with/without cabin cooling and the stack cooling system using air conditioner on the stack heat release with the variation of the radiator coolant flow rate ($T_{out,i} = 40^{\circ}\text{C}$, $v_{out,i} = 5 \text{ m/s}$, $T_{c,rad,i} = 65^{\circ}\text{C}$, $V_{c,sc} = 4 \text{ L/min}$)

열량은 냉각수 유량이 20 L/min일 때 11.0 kW이었고, 유량이 80 L/min으로 증가하게 되면, 열방출량도 16.1 kW로 46% 향상되었다. 또한 냉방 시스템이 스택 냉각 모드로 전환되어, 냉각 용량 4.3 kW로 스택 냉각 운전 중인 경우의 스택 방열량은 냉각수 유량이 20 L/min일 때 16.2 kW이었고, 유량이 80 L/min으로 증가하게 되면 열방출량도 마찬가지로 21.8 kW까지 증가하여 35% 향상되었다.

차실 내 냉방을 안 하는 경우보다는 냉방을 하게 되면 스택 방열량은 당연히 감소하게 된다. 그러나 냉방 시스템을 이용하여 스택 냉각을 한 경우에는 오히려 스택 방열량이 증가함을 Fig. 4를 통해서 알 수 있다. 특히, 실외 열교환기들(가스쿨러와 라디에이터)의 배열에 있어서, 일반 배열인 경우 가스쿨러가 라디에이터 전면에 위치하여 그 간섭으로 인해 에어컨을 이용한 스택 냉각 시스템의 열방출 효과가 줄어들었으나, 열교환기 배열을 변경하여 그러한 간섭을 없앤다면 스택 방열량은 더욱 증가함을 알 수 있다. 고부하 조건인 라디에이터 냉각수 유량이 80 L/min일 때, 이산화탄소 에어컨을 이용한 스택 냉각 시스템은 동일한 용량으로 차실 내 냉방 운전하는 경우와 비교하여 스택 방열량이 36% 만큼의

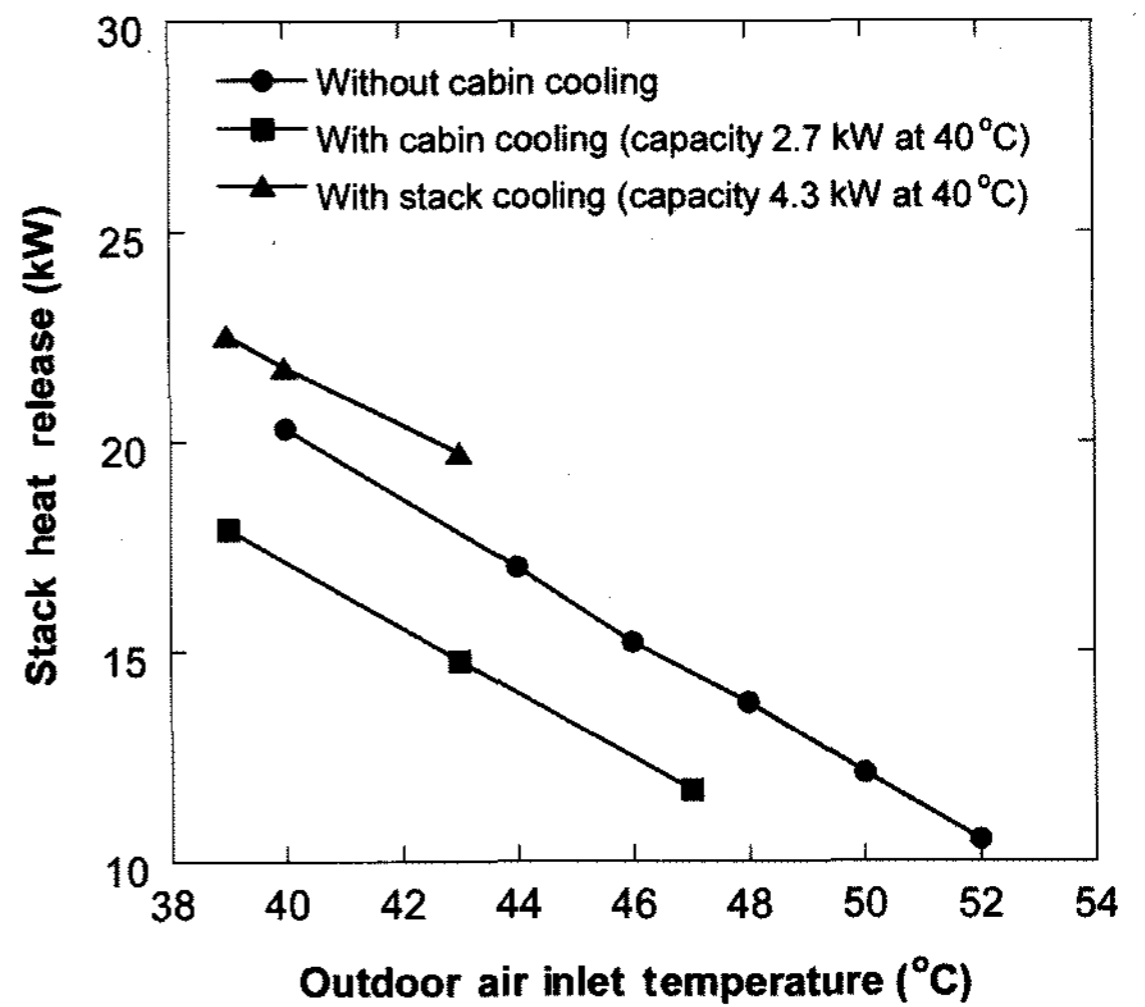


Fig. 5 Effects of the cabin cooling and the stack cooling using air conditioner on the stack heat release with variation of the outdoor air inlet temperature ($v_{out,i} = 5 \text{ m/s}$, $T_{c,rad,i} = 65^{\circ}\text{C}$, $V_{c,rad} = 80 \text{ L/min}$, $V_{c,sc} = 4 \text{ L/min}$)

상승효과를 얻었다. 그리고 냉방 운전을 안 하는 경우와 비교해서는 7%의 스택 방열량이 증가하였으나, 이 때 사용된 스택 냉각 시스템의 압축기 소요동력이 2.1 kW이었기 때문에 에어컨을 이용한 열방출 성능이 낮았다. 하지만 가스쿨러의 간섭이 없다면, 소요동력 2.1 kW로 방열량 4.3 kW를 증가시킬 수 있으므로 열방출 성능이 매우 우수하였다.

Fig. 5에서는 외기 풍속이 5 m/s이고, 라디에이터 냉각수 유량이 80 L/min으로 고부하 운전조건에서, 외기 온도의 변화가 스택 방열량에 미치는 영향을 살펴보았다. 차실 냉방 정지시 라디에이터 냉각 시스템, 차실 냉방 가동시 라디에이터 냉각 시스템(증발기 냉방용량=2.7 kW), 그리고 에어컨 이용 스택 냉각 시스템(스택 쿨러 냉각용량=4.3 kW)인 각각의 경우에 있어서, 외기 온도의 증가에 따라 스택 방열량은 거의 선형적으로 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 예를 들면, 일반 라디에이터 및 실외 팬을 장착한 차량이 외기 온도 47°C에서 냉방 운전을 하는 경우 라디에이터에서의 가능한 열방출량은 11.7 kW에 불과하였다. 그렇다면 고온 외기조건에서는 차량 부하가 큰 운전 범위에서 기존 방열 시스템을 가지고 열을 방출하는 것이 매우 심각해질 수 있다. 그러나 에어컨을 이용한 스택 냉각 시스템에서는 외기 온도 43°C에서도 스

택 방열량 19.8 kW 확보가 가능하고, 냉방 운전의 경우보다 방열량이 34% 향상됨을 알 수 있다.

3.2.2 실내 냉방 및 스택 냉각 동시운전

에어컨을 이용한 스택 냉각 시스템을 가지고 차 실내 냉방 부하에 대응하기 위해, 실내 환을 작동시킴으로써 차 실내 냉방 운전과 스택 냉각 운전을 동시에 하는 경우의 성능 실험을 수행하였다. Fig. 6은 실내 풍량의 변화가 냉방/냉각 성능 및 스택 열방출에 미치는 영향을 나타내었다. 에어컨 시스템을 이용하여 차 실내 냉방을 하지 않고 스택 냉각 운전만 하는 경우(실내 풍량=0 m³/min)와 비교하여, 실내 풍량이 4 m³/min으로 냉방 운전을 겸하게 되면 증발기 냉방 용량 0.62 kW를 확보하였다. 그러나 스택 쿨러에서의 냉각 용량이 감소하고 가스쿨러의 라디에이터 간섭으로 인해 스택 방열량이 1.09 kW 만큼 감소하였다. 또한 실내 풍량이 8 m³/min 인 경우에는 냉방 용량 1.15 kW를 확보하였으나, 라디에이터 방열량 3% 감소와 스택 쿨러 냉각량 22% 감소로 인해 스택 방열량은 1.42 kW 만큼 감소하였다. 결과적으로, 얻은 실내 냉방 용량과 감소한 스택 냉각 용량의 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 이는 에어컨 시스템의 실내 냉방 및 스택 냉각 동시운전인 경우 성능 감소가 적게 나타남을 의미한다. 더구나 실내 냉방 용량

의 증가는 실내 풍량의 변화뿐만 아니라 스택 쿨러의 냉각수 유량을 조절함으로써 가능하다.

4. 결론

본 연구에서는 연료전지 차량에서 기설치된 이산화탄소 에어컨 시스템을 이용한 스택 냉각시스템의 적용가능성을 검토하였다. 또한, 차량 부하에 따른 스택 냉각 시스템의 열방출 성능을 정량화하고, 라디에이터를 통한 열방출량과 냉방시스템을 이용한 열방출 상호관계를 분석하였다.

- 1) 고부하 조건, 즉 외기 풍속이 5 m/s이고 라디에이터 냉각수 유량이 80 L/min 일 때, 이산화탄소 에어컨을 이용한 스택 냉각 시스템은 동일한 용량으로 차 실내 냉방 운전하는 경우와 비교하여 스택 방열량이 36% 증가하였다. 그리고 냉방 운전을 안 하는 경우와 비교해서는 7% 향상되었다.
- 2) 에어컨 시스템을 이용하여 실내 풍량이 8 m³/min의 차 실내 냉방 운전과 스택 냉각 운전을 동시에 하는 경우, 증발기 냉방 용량 1.15 kW를 확보하였다. 그러나 라디에이터 방열량 3% 감소와 스택 쿨러 냉각량 22% 감소로 인한 스택 방열량은 1.42 kW 만큼 감소하였다.
- 3) 연료전지 차량 부하가 큰 운전 범위에서 기존 방열시스템을 가지고서는 열방출이 매우 심각해질 수 있다. 그러나 에어컨 시스템을 이용한 스택 냉각 시스템을 사용할 경우 차량 고부하 영역에서도 스택 출력을 안정적으로 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 차세대 성장동력산업 미래형자동차 기술 개발 사업, 국가지정연구실 사업 및 마이크로열시스템연구센터의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사하는 바이다.

References

- 1) S. C. Kim, M. S. Park, S. H. Jung, S. H. Yoon and M. S. Kim, "Design of a Heat Release System for Fuel Cell Vehicles," Korean Soc. New & Renewable Energy, Vol.1, No.4,

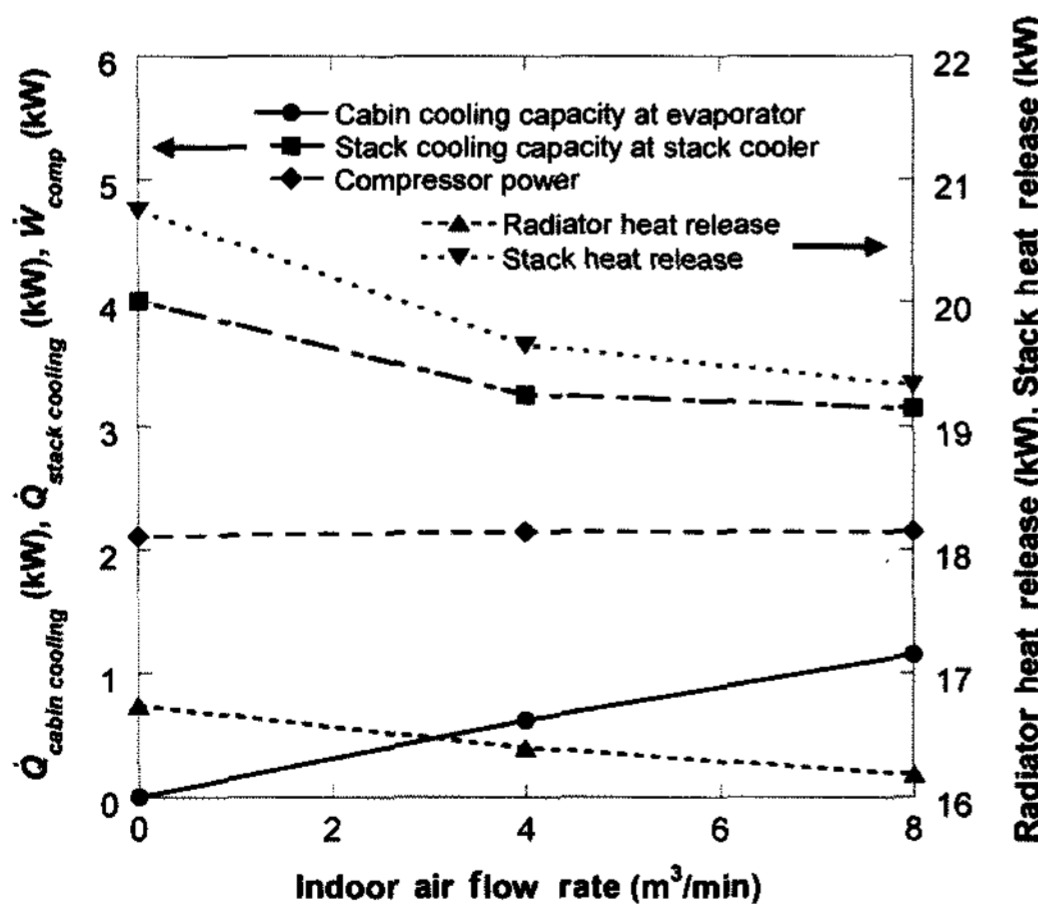


Fig. 6 Effect of simultaneous cabin cooling and stack cooling operation using air conditioner on the compressor power, stack/cabin cooling capacities, the radiator heat release and the stack heat release with respect to the indoor air flow rate ($v_{out,i} = 5$ m/s, $T_{c,rad,i} = 65^{\circ}\text{C}$, $V_{c,rad} = 80$ L/min, $V_{c,sc} = 4$ L/min, $T_{ind,i} = 27^{\circ}\text{C}$, RH = 40%)

- pp.49-54, 2006.
- 2) M. S. Park, S. C. Kim, M. S. Kim and K. D. Min, "Studies on the Heat Release Using CO₂ Heat Pump System for Fuel Cell Vehicles," Fuel Cell Seminar, Palm Springs, CA, USA, No.612, 2005.
 - 3) J. Gover, "Circumventing the Challenges of Fuel Cell Powered Automobiles," Fuel Cell Science, Engineering and Technology, ASME, 2003.
 - 4) Y. J. Zhang, M. G. Ouyang, J. X. Luo, Z. Zhang and Y. J. Wang, "Mathematical Modeling of Vehicle Fuel Cell Power System Thermal Management," SAE 2003-01-1146, 2003.
 - 5) R. Andrew and X. G. Li, "Mathematical Modeling of Proton Exchange Membrane Fuel Cells," J. Power Sources, Vol.102, pp.82-96, 2001.
 - 6) X. Yu, B. Zhou and A. Sobiesiak, "Water and Thermal Management for Ballard PEM Fuel Cell Stack," J. Power Sources, Vol.147, pp. 184-195, 2005.
 - 7) Y. J. Zhang, M. G. Ouyang, Q. Lu, J. X. Luo and X. Li, "A Model Predicting Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack Thermal Systems," Appl. Therm. Engng. Vol. 24, pp. 501-513, 2004.
 - 8) C. Bao, M. Ouyang and B. Yi, "Analysis of the Water and Thermal Management in Proton Exchange Membrane Fuel Cell Systems," Int. J. Hydrogen Energy, Vol.31, pp.1040-1057, 2006.