

열전모듈을 이용한 자동차용 1 kW급 보조 냉난방 시스템의 성능에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Supplemental Cooling and Heating Performance Using 1 kW Thermoelectric Module for Vehicle

이대웅(Dae-Woong Lee)[†]

한라비스테온공조 연구본부

Research Division, Halla-Visteon Climate Control Corp., 95 Sinil-sero, Daedeok-gu, Daejeon 306-230, Republic of Korea

(Received March 4, 2014; revision received March 24, 2014; Accepted: March 26, 2014)

Abstract The purpose of this paper is to investigate the performance of supplemental cooling and heating system equipped with the 1 kW thermoelectric module. The system consist of 96 thermoelectric modules, heat sink with louver fin and water cooling jacket which is attached on the hot side of the thermoelectric module. The cooling and heating performance test of the thermoelectric system is conducted with various conditions, such as intake voltage, air inlet temperature, air flow volume, water inlet temperature and water flow rate at calorimeter chamber in consideration of environmental conditions in realistic vehicle drive. The experimental results of a thermoelectric system shows that the cooling capacity and COP is 1.03 kW, and 1.0, and heating capacity and COP is 1.53 kW, and 1.5 respectively.

Key words Thermoelectric module(열전모듈), Coolant cooling(수냉식 냉각), Seebeck effect(제벡 효과), Louver fin(루버 핀), Coefficient of performance(성적계수)

[†] Corresponding author, E-mail: dlee6@hvccglobal.com

기호설명

c_p : 정압비열 [kJ/kg · K]
 G : 체적유량 [m^3/h]
 \dot{m} : 질량유량 [kg/h]
 P : 전력 [W]
 Q : 열용량 [W]
 T : 온도 [$^{\circ}C$]

하첨자

a : 공기
 c, h : 냉방, 난방
 i, o : 입구, 출구
 w : 냉각수

1. 서 론

자동차 산업에서 연비와 환경은 반드시 고려 되어야 할 필수적인 설계요소이며, 자동차 냉난방 시스템 기술은 차량 내부의 쾌적한 환경을 위해 온도, 기류, 청정도

를 제어하는 기술로 그 중요성은 날로 높아지고 있다. 에어컨 기술은 과거에는 단순히 냉난방을 제공하는 것으로 끝났지만, 지금은 에너지사용에 대한 규제대응에 준비를 해야만 한다. 유럽에서는 CO₂ 및 연비 측정시에 자동차 에어컨 시스템의 영향을 분석하여 제작사가 저 연비, 저소모 동력의 에너지 부품과 시스템을 개발하도록 유도하고 있다. 자동차에서 엔진의 효율이 점차로 향상되어 폐열로 버려지는 열원이 부족하게 되고, 디젤 차량과 같은 저열원 차량을 중심으로 부족한 난방성능을 보충하기 위하여 여러 가지 방식의 보조 난방장치들이 차량에 적용되고 있으나, 그중에서 대략 1 kW 내외의 PTC(Positive Temperature Coefficient) 전기히터가 많이 사용되고 있다.⁽¹⁾

열전냉각 시스템은 현재 자동차에서 사용되는 증기압 축식 냉방 시스템보다 성능과 효율이 많이 떨어지지만, 이용이 간편하고, 국부적으로 이용할 수 있는 장점이 있기 때문에 차량에 적용하기 위한 검토는 오래전부터 많은 연구자들에 의하여 진행되어 왔다.⁽²⁻³⁾

Yang et al.⁽⁴⁾은 열전소자를 이용하여 상용차용 무시동 냉난방 시스템을 개발하고자 56개의 열전모듈을 직

병렬로 연결하여 제작하였다. 24 V, 200 Ah의 배터리를 이용하여 차 실내에 무시동 냉난방 시스템을 장착한 후 실내의 온도와 열전모듈 유닛의 입출구 온도를 측정하여 1.77 kW 소비동력으로 282 kcal/h 냉방성능을 얻을 수 있었고, 난방은 1.44 kW의 소비 동력으로 282 kcal/h의 성능을 얻어 난방시가 냉방시 보다 약 3배 정도 우수한 성능을 얻을 수 있었고 소비동력은 냉방시가 난방시보다 약 23% 이상 추가로 소모됨을 확인하였다.

Yoo et al.⁽⁵⁾은 열전소자에 대하여 이론식을 바탕으로 성능을 해석하고 실험을 하여, 인가 전류의 영향에 따른 성능의 변화를 연구하였다.

현재 대부분의 열전냉각 시스템은 열전모듈에 방열판을 부착하고 그 위에 냉각팬을 설치하여 열전모듈로부터 열을 제거하는 방식을 적용하고 있으며, 이 방식은 정해진 설정온도까지 냉각하는데 시간이 많이 걸리고, 다른 방식의 냉각시스템에 비하여 냉각능력 및 효율이 매우 낮다.⁽⁶⁾ 따라서 이러한 문제점을 개선하기 위한 여러 가지 냉각방식에 대한 연구가 진행되고 있으며, Attery⁽⁷⁾는 물을 이용한 냉각시스템을 사용하여 기존의 방열판을 사용하는 것보다 성적계수를 2대 정도 향상시켰다.

Park et al.⁽⁸⁾은 열전냉각장치에서 고온면에서의 방열을 위하여 히트싱크 대신에 냉각재킷을 설치하여 성능에 미치는 영향을 연구하였다. 냉각재킷은 물이 순환되는 구조이고, 냉각재킷의 형상, 냉각 재킷 내부의 채널 수 및 유량을 변화하면서 실험하여 기존의 T형 유로의 냉각재킷 대비 냉각성능이 우수한 새로운 형태의 냉각재킷을 제안하였다. 새로운 형태의 냉각재킷은 열저항이 최대 32% 감소하고, 냉각재킷의 표면온도도 균일해 졌으며, 평균 표면온도도 약 1~2°C 낮아졌다.

방열판에서 열저항을 줄일 수 있는 방안에 대한 연구도 활발하다. Shin et al.⁽⁹⁾은 열전모듈 냉각시스템에서 열교환기 핀의 형상이 성능에 미치는 영향에 대하여 해석하였다. 평판핀과 루버핀, 두 핀에서 두께를 고정하지 않고 동일한 크기의 열교환핀을 최적화 하였을 경우, 루버핀이 평판핀 보다 약 10% 정도 낮은 열저항을 가지기 때문에 루버핀이 더 우수한 냉각성능을 나타냈다. 하지만 핀 두께를 제작 가능한 최소두께($t = 0.045$)로 고정하고 열교환핀을 최적화 하였을 경우, 평판핀이 루버핀보다 7% 낮은 열저항을 가지며 더 우수한 냉각 성능을 보였다.

본 연구에서는 저열원 차량을 중심으로 사용되고 있는 보조 난방장치인 PTC 전기히터의 대체로 열전모듈을 이용한 보조 냉난방장치의 성능에 대하여 연구하였다. 앞서 살펴본바와 같이 기존 연구자들의 연구결과를 바탕으로 냉난방 성능과 성적계수가 향상될 수 있도록 1 kW급 열전 냉난방 시스템의 시제품을 제작하여 성능에 미치는 영향들을 살펴보고, 차량의 보조 냉난방 시

스템으로의 가능성을 검토하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

열전 냉난방 시스템의 성능실험에 사용된 열량계(calorimeter chamber)의 개략도가 Fig. 1에 나타나 있다. 열량계는 전면에 풍량이 균일하게 유입되도록 안내깃이 부착되어 있으며, 주위 공기와의 열손실이 발생하지 않도록 주위를 단열 하였고, 복사열에 의한 열손실을 보상하여 정확한 실험이 되도록 구성되어 있다. 공기가 열장치는 밀폐된 연관형 전기히터에 의해 가열하며, 밀폐된 구조는 개방형 구조보다 낮은 열밀도를 가지므로 낮은 표면온도로 전체공기를 고르게 데울 수 있는 장점이 있다. 반대로 공기냉각을 위해서는 30마력의 압축기와 팽창밸브, 증발압력 조절기에 의하여 제어된다. 또한 냉각수측은 열손실에 의한 열량차이가 발생하지 않도록 모두 단열되어 있으며, 공기측과의 열량비율이 3% 이내가 될 수 있도록 자동으로 조절되고 있다.

온도는 열전냉난방 시스템의 입출구에 RTD 센서를 설치하여 측정하였으며, 풍량은 Brandt B-NZP1000 계열의 노즐로 고풍량과 저풍량이 따로 측정된다. 습도는 전기히터의 가열에 의해 약 180°C의 증기로 공급되며, 습도센서는 공기의 엔탈피차를 계산하는 밀러형태를 사용하였다. 순환하는 냉각수량은 질량유량계에 의하여 측정되며 냉각수온도도 실험부의 입출구 배관에서 측정된다.

2.2 실험 방법

Fig. 2는 열전 냉난방 시스템의 실험사진이다. 시제품으로 만들어진 1 kW급 열전 냉난방 시스템은 한변의 길이가 20 mm 정도의 정방형 크기이고, 40×40×3.5 mm의 크리스탈사(Cristal Co.) 열전모듈 96개가 직병렬로 연결

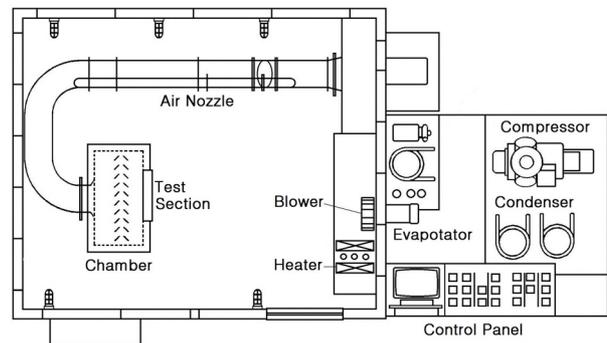


Fig. 1 Schematic diagram of calorimeter.

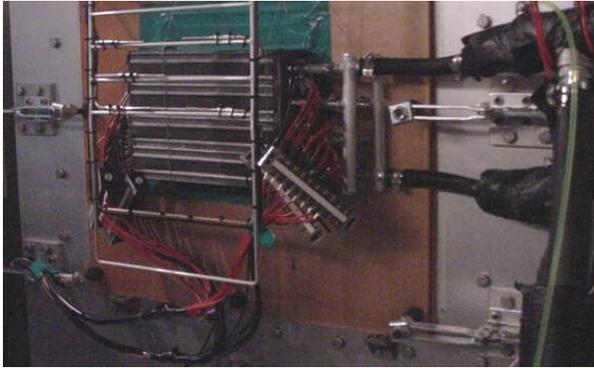


Fig. 2 Photo of thermoelectric system and test apparatus.

되어 있다. 보조 냉난방 장치로 사용될 경우를 기준으로 흡열부는 얇은 알루미늄 플레이트에 루버핀(louver fin)이 부착되어 있으며, 핀의 간격은 50 FPDM(Fin Pitch per decimeter)이다. 고온면은 냉각수 재킷으로, 냉각수가 각 재킷을 동시에 순환하는 구조이다. 열전모듈들 사이에 두고 흡열부의 루버핀과 발열부의 워터재킷은 각면에 써멀그리스(thermal grease)로 처리후 적층하여 작은 볼트로 체결하였다.

열전모듈에 대한 기본특성은 고온부(hot side)와 저온부(cold side)의 온도 및 소자의 전류 또는 전압에 대한 값으로 나타낼 수 있다. 하지만 1 kW급 보조 열전냉난방 시스템의 경우 냉난방 성능은 입구와 출구 공기온도의 변화량과 풍량의 함수로 나타낼 수 있고, 이는 식(1)와 같이 표현될 수 있다. 이때 냉방용량의 경우 Q_{ac} 로 표현되고 난방용량인 경우에는 Q_{ah} 로 표현된다.

$$Q_a = \dot{m} \cdot c_p (T_{ai} - T_{ao}) \quad (1)$$

열전 냉난방 시스템에 인가되는 전력은 식(2)과 같이 전압과 전류의 함수로 정의되며, 보조 열전 냉난방 시스템의 성적계수는 식(3)와 같이 투입전력에 대한 냉난방 열량의 비로 표현된다. 이때도 냉방인 경우에는 COP_c 로, 난방은 COP_h 로 표현된다.

$$P_i = V \cdot I \quad (2)$$

$$COP = \frac{Q_a}{P_i} \quad (3)$$

Table 1은 보조 열전 냉난방 시스템을 열량계에 장착하여 실험한 조건이다. 시험조건은 열전 냉난방 시스템의 핀으로 공급되는 공기온도와 풍량, 그리고 워터재킷으로 공급되는 냉각수온도와 유량을 변경하면서 실험하였다.

Table 1. Test conditions of thermoelectric system performance at calorimeter

Air flow volume	150~550±5 m ³ /h
Air temperature	-20~20±1℃
Water flow rate	0.2~1.2±0.1 m ³ /h
Water temperature	-15~45±1℃

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열전모듈 실험

Fig. 3은 한국세라믹기술연구원의 보유 장비로 실험한 크리스탈사 단위 열전모듈에 대한 성능 실험 결과이다. 고온측은 50℃로 고정된 상태에서 저온부의 온도를 변경하면서 열전모듈에 인가되는 전류별로 냉각 능력과 성적계수를 측정하였다. 고온부와 저온부의 온도차가 줄어들수록 성능은 향상되는 것을 볼 수 있으며, 온도차가 없을 때 최대 냉방능력은 54 W정도이고, 이때 성적계수는 0.7수준이다. 하지만 온도차가 40℃로 벌어지면 냉방능력은 21 W로 떨어지고, 성적계수도 0.3으로 급격히 저하된다.

Fig. 4는 열전 냉난방 시스템의 냉방성능과 난방성능 변화를 인가전압에 따라 나타내었다. Fig. 4(a)는 냉방 성능 실험결과로, 공기온도와 물온도는 21℃이고, 풍량은 300 m³/h, 유량은 0.6 m³/h에서 실험하였다. 인가 전압이 높아지면 냉방능력은 증가하고, 토출공기 온도도 같이 하강하지만, 성적계수는 급격히 저하된다. 시스템에 12 V의 전원을 인가할 시, 약 1.0 kW의 냉각 능력과 8.3℃의 온도 강하를 볼 수 있다.

Fig. 4(b)는 난방성능을 비교한 것이다. 공기와 냉각수 온도는 23℃이고, 풍량은 300 m³/h, 유량은 0.6 m³/h에

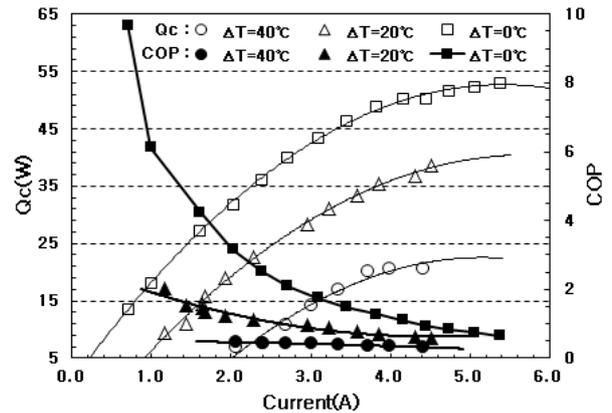
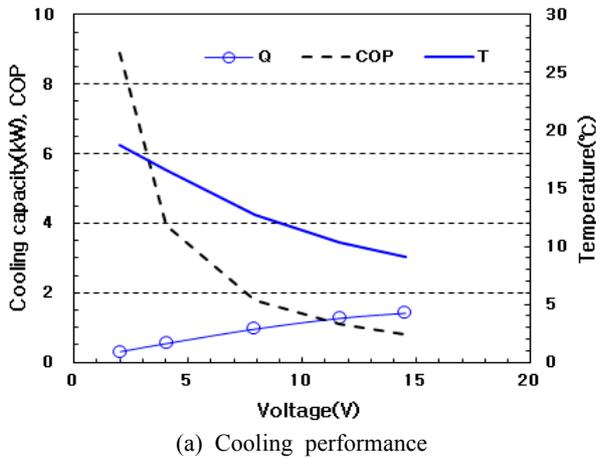
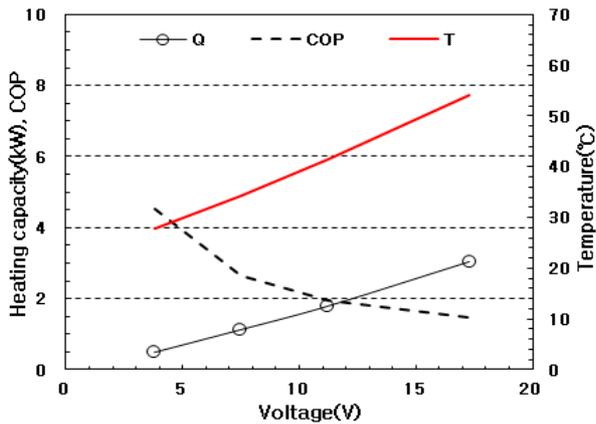


Fig. 3 Experimental results of thermoelectric module (Cristal Co.).



(a) Cooling performance



(b) Heating performance

Fig. 4 Experimental results of thermoelectric system with various intake voltage.

서 실험하였다. 인가전압이 증가하면 난방능력과 토출 공기온도는 계속 상승하지만 성적계수는 냉방실험시와 동일하게 급격히 저하되고 있다. 인가전압이 12 V 일 때 난방능력은 1.72 kW, 성적계수는 1.9이다.

3.2 열량계 실험

Fig. 5는 열량계에서 실험한 냉방성능 실험결과이다. 실험은 여름철 차량에서의 사용조건을 모사하여, 공기온도와 냉각수온도를 결정하였다. Fig. 5(a)는 열전 냉각시스템으로 공급되는 풍량을 변경하면서 성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 공기온도와 냉각수온도는 모두 35°C이고, 냉각수 유량은 1.5 m³/h이다. 풍량이 증가함에 따라 냉방능력과 성적계수도 약간씩 증가하고 있으나, 토출온도 역시 같이 상승하고 있다. 풍량 변화에 대한 냉방성능의 변화는 그다지 크게 나타나지는 않았고 토출 공기온도의 변화는 풍량이 증가하면서 발열부

에서 충분히 열이 제거되지 않기 때문에 보여 진다.

Fig. 5(b)는 입구 공기온도를 변경하면서 냉방성능의 변화를 살펴보았다. 냉각수온도는 여름철인 50°C로 가정하고, 냉각수 유량은 0.6 m³/h, 풍량은 300 m³/h이다. 공기온도가 증가함에 따라 냉방능력과 성적계수, 토출 공기온도 모두 증가하고 있다. 외기온도가 40°C일 때 토출되는 공기온도는 약 17°C 수준이었다.

Fig. 5(c)에 열전 냉각시스템의 수냉식 재킷으로 공급되는 유량을 변경하였을 때 냉방성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 열전 냉방시스템에 인가되는 전압은 6 V이고, 공기온도와 냉각수온도는 35°C, 풍량은 300 m³/h이다. 냉각수 유량이 증가함에 따라 냉방성능의 변화는 거의 없었다. 실험한 유량의 범위내에서는 유량이 냉방성능에 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있었다.

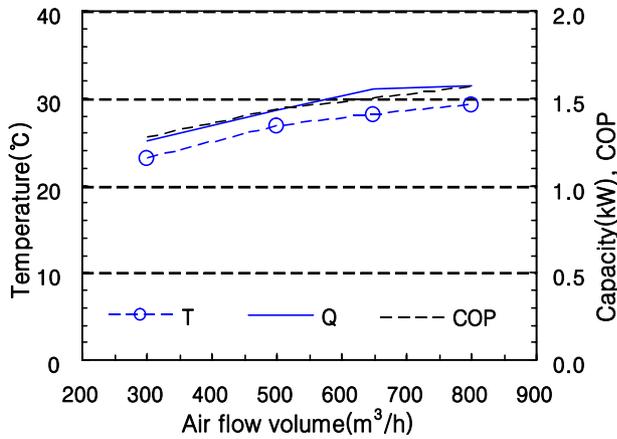
Fig. 5(d)는 시스템의 수냉식 재킷으로 공급되는 냉각수온도가 냉방성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 공기온도는 40°C이고, 풍량은 300 m³/h이다. 냉각수온도가 상승함에 따라 냉방능력과 성적계수는 급격히 저하되는 것을 볼 수 있다. 토출 공기온도도 충분한 방열이 이루어지지 않아 빠르게 상승하며 냉각수온도가 65°C에서는 약 12°C 이상 토출 공기온도가 높아졌다.

Fig. 6은 1 kW급 열전 난방시스템에 대하여 열량계에서 실험한 난방성능 결과이다. 실험은 겨울철 난방시스템의 사용조건을 감안하여, 외기온도와 냉각수온도를 결정하였다. Fig. 6(a)는 열전 난방시스템으로 공급되는 풍량을 변경하면서 성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 외기온도와 냉각수온도는 모두 -20°C이고, 냉각수 유량은 0.6 m³/h이다. 풍량이 증가함에 따라 난방능력과 성적계수도 모두 증가하고 있으며 영향은 냉방시 보다 적게 나타났다. 풍량 증가는 250 m³/h까지는 효과가 있으나, 그 이후에는 별로 효과가 크지 않았다. 난방 열량이 크기 때문에 풍량에는 큰 영향을 받지 않는 것으로 보여 진다.

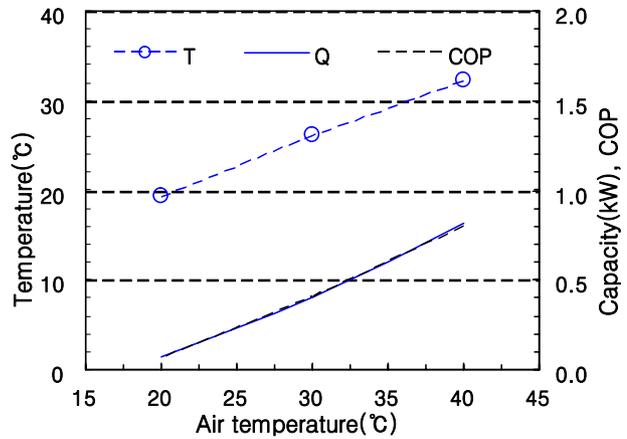
Fig. 6(b)는 입구 공기온도를 변경하였을 때 난방성능의 변화를 살펴보았다. 열전 난방시스템에 인가되는 전압은 6 V이고, 냉각수온도는 겨울철 조건이므로 -20°C로 하였고, 냉각수 유량은 0.6 m³/h, 풍량은 300 m³/h이다. 공기온도가 증가함에 따라 난방능력과 성적계수는 감소하며, 토출 공기온도는 상승하고 있다.

Fig. 6(c)는 열전 난방시스템의 수냉식 재킷으로 공급되는 유량이 난방성능에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 공기온도와 냉각수온도는 모두 -20°C이고, 풍량은 300 m³/h이다. 냉각수 유량이 증가함에 따라 난방성능은 약간씩 증가는 하나 0.7 m³/h 이후에는 거의 성능의 변화가 없었다.

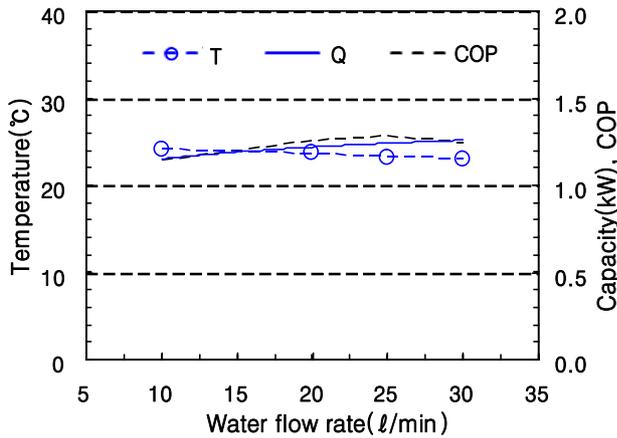
Fig. 6(d)는 열전 난방시스템의 수냉식 재킷으로 공급되는 냉각수온도가 난방성능에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 공기온도는 -20°C이고, 풍량은 300 m³/h, 냉각



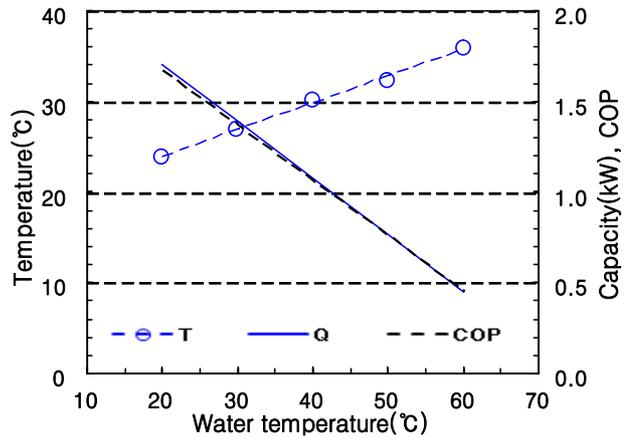
(a) Air flow volume ($T_a = 35^\circ\text{C}$, $T_w = 35^\circ\text{C}$, $G_w = 1.5 \text{ m}^3/\text{h}$)



(b) Air inlet temperature ($T_w = 50^\circ\text{C}$, $\dot{m}_w = 10 \text{ l}/\text{min}$, $G_a = 300 \text{ m}^3/\text{h}$)



(c) Water flow rate ($T_a = 35^\circ\text{C}$, $G_a = 300 \text{ m}^3/\text{h}$, $T_w = 35^\circ\text{C}$)



(d) Water temperature change ($T_a = 40^\circ\text{C}$, $G_a = 300 \text{ m}^3/\text{h}$, $G_w = 0.6 \text{ m}^3/\text{h}$)

Fig. 5 Experimental results of cooling performance for thermoelectric system.

수 유량은 $0.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 이다. 냉각수온도가 상승함에 따라 난방능력과 성적계수, 토출 공기온도 모두가 상승하는 것을 알 수 있다. 냉각수온도가 40°C 일 때 토출 공기온도는 15.5°C 이고, 난방능력은 3.7 kW , 성적계수는 3.7 이다. 난방시 열전 난방시스템의 성적계수가 높은 이유는 저항에 의한 발열과 열펌프 역할을 함께 하기 때문이다.

4. 결 론

차량용 보조 냉난방장치로 1 kW 급 열전 냉난방 시스템을 제작하고 환경조건을 변경하면서 실험하여 냉난방 성능에 미치는 인자들에 대하여 살펴보고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단위 열전모듈을 실험한 결과 고온부와 저온부의

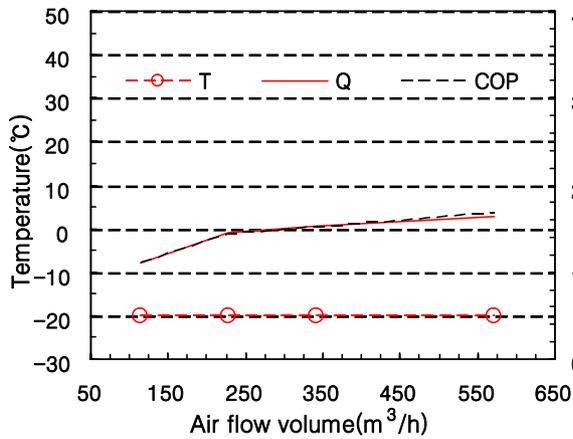
온도차에 따라 성능이 달라지는 것을 확인하였고, 온도차가 없을 때 최대 난방능력은 50 W , 효율은 0.9 정도였다.

(2) 열전 난방시스템의 난방성능은 공기와 냉각수온도가 40°C , 풍량은 $300 \text{ m}^3/\text{h}$, 인가전력 1 kW 에서 난방능력 1.03 kW , 성적계수는 1.03 , 토출공기 온도는 30.1°C 를 얻었다.

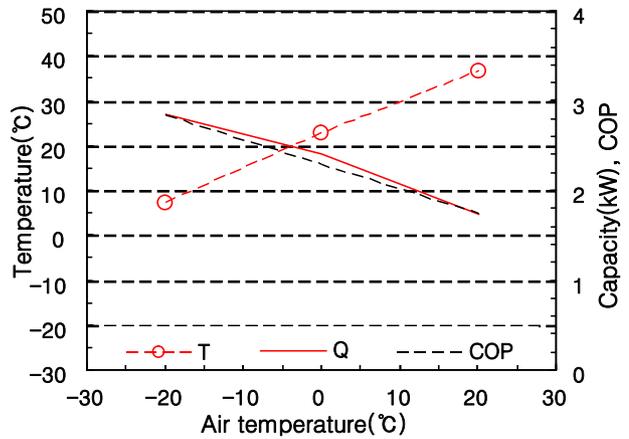
(3) 열전 난방시스템의 난방성능은 공기와 냉각수온도가 -20°C , 풍량은 $300 \text{ m}^3/\text{h}$, 인가전력 1 kW 에서 난방능력 1.53 kW , 성적계수는 1.5 , 토출공기 온도는 -5.5°C 를 얻었다.

(4) 냉방과 난방성능에 미치는 영향은 공기온도와 냉각수온도 변화가 가장 큰 영향을 미쳤으며, 풍량과 냉각수 유량순으로 나타났다.

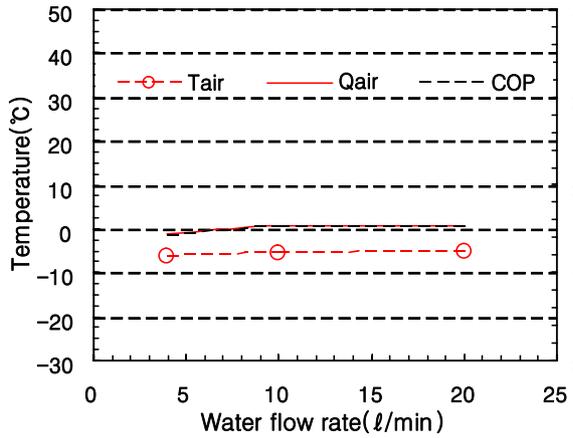
이상으로 1 kW 보조 열전 냉난방 시스템의 냉방과



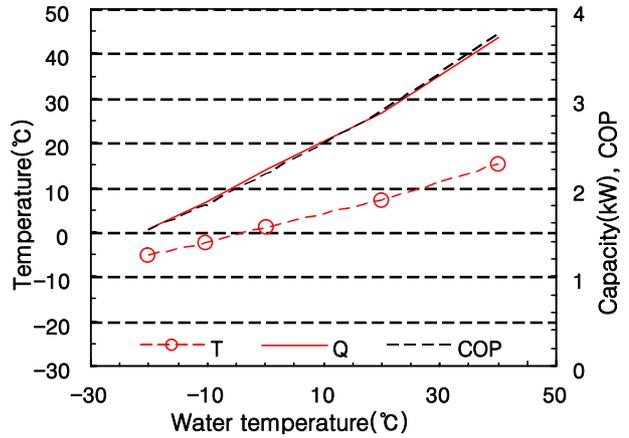
(a) Air flow volume ($T_a = -20^\circ\text{C}$, $T_w = -20^\circ\text{C}$, $G_w = 0.6 \text{ m}^3/\text{h}$)



(b) Air inlet temperature ($T_w = -20^\circ\text{C}$, $G_w = 0.6 \text{ m}^3/\text{h}$, $G_a = 300 \text{ m}^3/\text{h}$)



(c) Water flow rate ($T_a = -20^\circ\text{C}$, $G_a = 300 \text{ m}^3/\text{h}$, $T_w = -20^\circ\text{C}$)



(d) Water temperature ($T_a = -20^\circ\text{C}$, $G_a = 300 \text{ m}^3/\text{h}$, $G_w = 0.6 \text{ m}^3/\text{h}$)

Fig. 6 Experimental results of heating performance for thermoelectric system.

난방성능에 대하여 살펴본 결과, 난방시 성적계수는 1.9로 저열원 차량에서 보조 난방장치로 사용되고 있는 PTC 전기히터 대비 성능이 우수하였다. 또한 냉방시에도 효과적인 발열구조로 1 이상의 성적계수를 얻어 보조 냉방은 가능한 수준이나, 열전모듈의 가격과 크기, 중량 등은 향후 해결되어야 할 과제이다.

Reference

1. Lee, D. W., Jeong, H. H., An, J. C., Baek, C. H., Kim, J. H., Jeong, C. S., and Wang, Y. H., 2013, Experimental study of impact on the thermal comfort for three-dimensional air conditioning system, Proceedings of the KSAE Annual Conference, pp. 706-711.
2. Huang, B. J., Chin, C. J., and Duang, C. L., 2000, A design method of thermoelectric cooler, International Journal of Refrigeration, Vol. 23, pp. 208-218.
3. Kang, B. H., Kim, S. Y., Chang, H. J., and Kim, S. Y., 2002, Cooling characteristics at hot side of the thermoelectric module for an air conditioner, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 214-220.
4. Yang, D. G., Park, K. M., Lee, K. H., Ro, Y. S., Kim, S. W., and Kim, M. S., 2011, Experimental Study on operating characteristics of anti-start air-condition and heating system using thermo electric element, Proceedings of the KSAE Autumn Annual Conference, pp. 660-665.

5. Yoo, S. Y., Hong, C. P., and Shim, W. S., 2004, A study on the performance of thermoelectric module and thermoelectric cooling system, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 62-69.
6. Park, M. Y. and Lee, G. S., 2007, Cooling characteristics of a liquid cooler using thermoelectric module, Proceedings of the SAREK Winter Annual Conference, pp. 1156-1161.
7. Attey, G. S., 1998, Enhanced thermoelectric refrigeration system COP through low thermal impedance liquid heat transfer system, Proceedings of the 17th International Conference on Thermoelectrics, Nagoya, pp. 519-524.
8. Park, S. H., Lee, J. E., Kim, K. J. and Kim, D. J., 2009, A study on the performance of thermoelectric cooling system for design parameters of the cooling jacket, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 21, No. 3, pp. 149-156.
9. Shin, J. H., Han, H. S., Kim, Y. H., Kim S. Y. and Hyun, J. M., 2010, Cooling performance of thermoelectric module with air-cooled heat exchanger fins, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 22, No. 3, pp. 171-179.