

열전소자를 이용한 차량용 독립 냉난방시스템에 대한 실험적 연구

Experimental Study of Standalone Cooling and Heating System using Thermoelectric Element for Vehicles

이 대 웅(Dae-Woong Lee)[†]

한라비스테온공조 연구본부

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

(Received April 30, 2014; revision received May 20, 2014; Accepted: May 22, 2014)

Abstract The purpose of this paper is to investigate the cooling and heating performance of a standalone-type thermoelectric system equipped with a thermoelectric module. The system consists of a blower and two thermoelectric modules with a fin, which is soldered onto both sides of the thermoelectric module and a courtesy light. The thermoelectric system experiment is conducted with the intake voltage to find the optimum cooling and heating performance of each. The results showed that the cooling capacity and coefficient of performance (COP) were 22 W and 0.31, and the heating capacity and COP were 147 W and 1.1, respectively. In the vehicle cooling and heating performance test in a climate wind tunnel, the results showed that the standalone thermoelectric system's cooling performance was slightly better than the base system; and the heating performance of the standalone thermoelectric system was 54.1°C and the COP was 1.3, compared to the base system.

Key words Thermoelectric module(열전소자), Standalone thermoelectric system(독립형 열전 냉난방시스템), Seebeck effect(제벡 효과), Coefficient of performance(성적 계수)

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

기호설명

c_p : 정압비열 [kJ/kg · K]
 G : 풍량 [m^3/h]
 \dot{m} : 질량유량 [kg/h]
 P : 전력 [W]
 Q : 열량 [W]
 T : 온도 [°C]

하첨자

a : 공기
 c, h : 냉방, 난방
 i, o : 입구, 출구

1. 서 론

자동차 산업에서 지구환경을 보호하기 위하여 이산화탄소 배출량 규제들이 시작되면서 연비와 효율은 매우 중요한 개발척도가 되고 있다. 차량의 공조시스템은 과거에는 단순히 선택 사양이었지만, 현재는 운전

자에게 쾌적성과 안락감을 제공하는 필수 요소로 적은 에너지로 냉방과 난방을 달성하기 위한 여러 노력들이 경주되고 있는 가운데, 열전소자를 이용한 냉난방시스템은 인체의 특정한 부위에 대하여 국부적으로 공조가 가능하기 때문에 환경보호와 더불어 에너지를 절약할 수 있다는 점에서 다시 관심이 집중되고 있다.

전자냉각은 제벡 효과(Seebeck effect), 펠티어 효과(Peltier effect) 및 톰슨 효과(Thomson effect)를 통칭하는 열전현상에 의하여 전류의 극성에 따라 열을 흡수, 방출하는 열전소자를 이용한 냉방방식으로 기존의 증기 압축식 냉방시스템과는 달리 냉매순환을 위한 기계적인 구동부가 없기 때문에 고장이 적고, 소음이 없고, 소형화가 가능하며, 냉매의 누출이나, 폐기시 환경오염을 유발하지 않는 장점이 있다.^(1,2)

열전 냉각시스템은 오래전부터 많은 연구들이 진행되어 왔으며, 연구된 내용들을 보면, 인가전압이나 전류의 변화, 열전소자 양단의 온도차 변화에 따른 성능 차이, 냉각성능 향상을 위하여 열 저항을 최소화하기 위한 설계방법, 냉각수를 이용하여 방열을 하는 방법 등이 연구되었고, 열전소자의 성능지수(figure of merit, ZT) 향상을

위하여 재료에 대한 연구들도 많이 수행되어 왔다.⁽³⁻⁵⁾

Yoo et al.⁽⁶⁾은 열전소자에 대하여 이론식을 바탕으로 성능을 해석하고, 인가전류를 변화하면서 실험을 하여 전류가 증가하면 흡열량과 성능계수는 증가하다가 어느 시점에서 다시 감소함을 밝혔다. 또한 열전소자를 이용한 냉각장치를 구성하여 인가전류와 주위온도를 변화하면서 성능실험을 하여 고온부와 저온부의 온도차가 작을수록 흡열량과 성능계수는 증가하며, 온도차 0℃일 때 흡열량과 성능계수는 모두 최대가 되고, 5 A의 인가전류에서 최저 냉각온도를 얻을 수 있었다.

Yoon and Oh⁽⁷⁾는 열전소자를 이용한 냉각장치에서 냉각효율 향상을 위하여 압전구동기(piezoelectric actuator)를 이용하여 성능에 미치는 영향을 연구하였다. 압전구동기에서 발생한 진동에 의하여 음향흐름이 냉각영역에서 열전달을 촉진하여 성능이 향상되고, 고른 온도분포를 형성하는 것을 볼 수 있었다.

Lim et al.⁽⁸⁾은 싱글 타입(single type)과 캐스케이드 타입(cascade type)의 냉동시스템에 열전소자를 적용하여 냉방성능을 비교하였다. 캐스케이드 타입은 냉동실의 폐열을 외부로 배출하지 않고 냉장실의 차가운 공기를 이용하여 냉각하는 방식으로, 열전소자의 흡열량과 성적계수는 점점온도가 작아질수록 증가하였다. 동일한 외기온도에서 캐스케이드 시스템이 싱글 시스템 대비 냉장고의 열부하가 9.3% 감소하였고, 흡열량 및 성능계수가 싱글 시스템 대비 1.7배 우수하게 나타났다.

본 연구에서는 차량용 국부 냉난방시스템으로 열전소자를 적용한 독립형 열전 냉난방시스템을 연구하였다. 독립형 열전소자 냉난방시스템 시제품에서 인가전압별 시험하여, 최적 성능을 찾아내고 독립형 열전 냉난방시스템을 실차에 장착하여 실차 냉난방 성능을 비교하여 독립형 열전 냉난방시스템이 실차 냉난방 성능에 미치는 영향을 살펴보고 차량의 적용 가능성에 대하여 검토하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 시험에 사용된 실차환경제어풍동(climate wind tunnel)의 개략도와 제어범위이다. 환경제어풍동은 자동차가 200 km/h까지 다이내모위를 주행할 수 있으며, 보일러와 냉동장치가 설치되어 온도와 습도조절을 통하여 여러 가지 기후를 모사할 수 있으며, 천정에는 태양을 모사한 광원이 설치되어 다양한 환경조건의 변화를 고려하여 시험을 할 수 있다. 또한 차량이 주행할 때, 주행풍과 평지와 언덕길 주행시 차량에 가해지는 부하들을 각각 제어할 수 있어 차량의 상태에 따라 냉난방 성능에 미치는 영향을 고려한 시험이 가능하다.

먼저 차량의 공조장치에서 냉방과 난방으로 작동될

Chamber temp	-40 ~ 60℃
Wind speed	0 ~ 200 km/h
Humidity	20 ~ 90%, RH
Dynamo absorbtion	210 HP
Sun load	300 ~ 1,400 W/m ²



Fig. 1 Specification and diagram of climate wind tunnel.

Table 1 Test conditions of standalone thermo-electric system cooling and heating performance in climate wind tunnel

Cooling performance test		
Ambient temperature		35℃
Sun load		800 W/m ²
Driving condition		Idle
HVAC control	Intake air Temperature	Recirculation
	Air discharge	Max. Cool
	Blower speed	Vent Max. Hi
Heating performance test		
Ambient temperature		-15℃
Sun load		100 W/m ²
Driving condition		50 km/h
HVAC control	Intake air Temperature	Fresh
	Air discharge	Max. Hot
	Blower speed	Mix Max. Hi

때 차 실내 온도의 변화를 측정하기 위하여 T형 열전대를 차실내 전석과 후석 가슴부분에 각각 8개씩, 발 부분에도 각각 8개씩 설치하였다. 그리고 독립형 열전 냉난방시스템을 실차에 장착후 냉방과 난방성능을 확인하기 위하여 입구와 출구에 각각 3개의 열전대를 설치하였다. T형 열전대의 측정 오차는 ±0.3℃이다.

환경제어풍동에서 시험한 냉난방 성능 시험조건을 Table 1에 나타내었다. 냉방성능(cooling performance) 시험의 경우 외기온도가 35℃, 일사는 800 W/m²이고, 공조장치의 조작은 에어컨을 작동하면서 최대 송풍량에 내기순환, 최대냉방, 얼굴(vent)로 토출되는 모드이다. 난방성능(heating performance) 시험은 외기온도가 -15℃, 일사는 100 W/m², 외기유입, 최대난방 및 혼합(mix) 모드이고 차량은 50 km/h로 주행하고 있다.

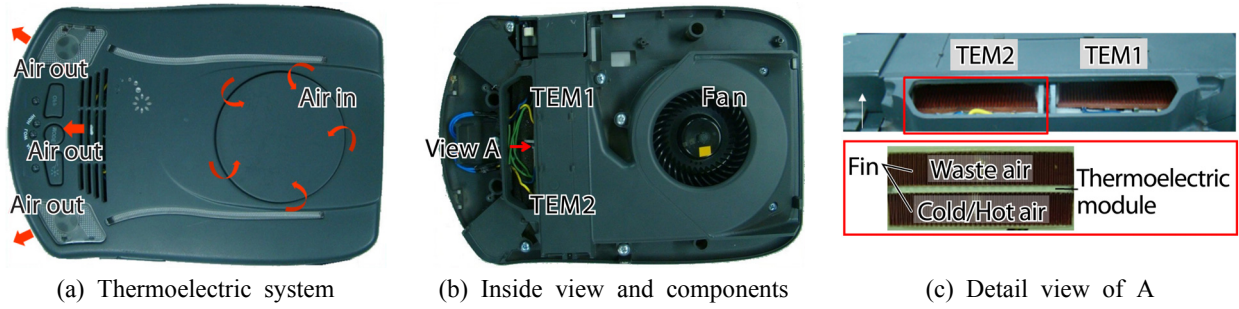


Fig. 2 Photo of standalone thermoelectric system.

2.2 실험 방법

Fig. 2는 독립형 열전 냉난방시스템의 구조이다. 독립형 열전 냉난방시스템은 실내등과 일체이며 주요구성품은 팬과 열전소자 2개로 이루어져 있다. 가운데 있는 팬은 차 실내공기를 흡입하여 각각의 열전소자로 송풍을 하게 되며, 열전소자 양면에는 구리재질의 핀이 납땀(soldering)으로 부착되어 있고 열전소자에 인가되는 전원의 전환에 의하여 한면의 핀으로 냉풍과 온풍이 토출되고, 반대편 핀으로는 폐열 공기가 배출되도록 구성되어 있다.

독립형 열전 냉난방시스템은 성능은 입구와 출구 공기온도의 변화량과 풍량의 함수로 나타낼 수 있고, 이는 식(1)과 같으며, 냉방능력은 $Q_{a,c}$ 로 표현되고 난방능력인 경우에는 $Q_{a,h}$ 로 표현된다.

$$Q_a = \dot{m} c_p (T_{a,i} - T_{a,o}) \quad (1)$$

열전 냉난방시스템에 인가되는 전력은 식(2)와 같이 정의되며, 여기에는 열전소자에 인가되는 전력과 송풍기 작동 전력까지 포함하고 있다. 독립형 열전 냉난방시스템의 성적계수는 식(3)과 같이 투입전력에 대한 냉난방 능력의 비로 표현된다. 이때 냉방인 경우에는 COP_c 로, 난방은 COP_h 로 표현된다.

$$P_i = VI \quad (2)$$

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

Fig. 3은 독립형 열전 냉난방시스템이 차실내에 장착되어 온도측정을 위한 열전대가 부착된 사진을 보여주고 있다. 설치 위치는 앞좌석과 뒷좌석의 중간 천정이고, 전석의 바람을 팬으로 흡입하여 열전소자를 지난 바람이 뒷좌석 승객의 얼굴부위로 토출되는 구조이다. 이때 열전소자의 폐열은 천정의 차체와 루프 패널(roof panel)사이로 배출하였다.

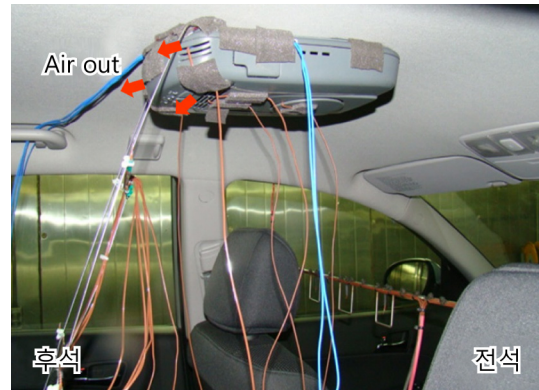


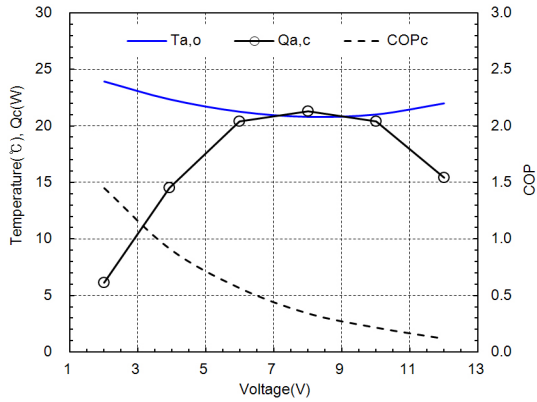
Fig. 3 Photo of standalone thermoelectric system position in vehicle.

실험은 독립형 열전 냉난방시스템의 작동유무에 따라 Table 1의 조건으로 시험하여 냉방과 난방성능에 미치는 영향을 살펴보았고, 열전소자에 의한 냉방과 난방성능을 분석하였다. 시스템에 인가되는 전압의 측정오차는 ± 0.1 V이고, 소모전류는 ± 0.1 A이다.

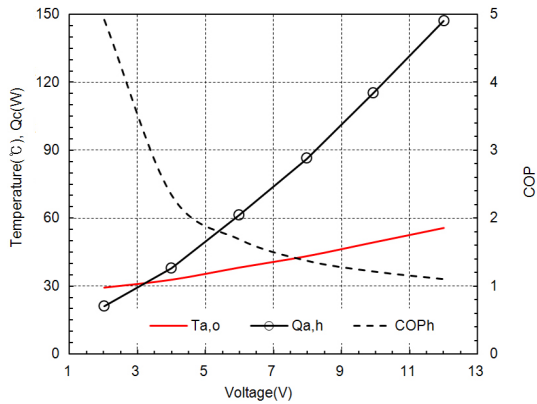
3. 실험결과 및 고찰

3.1 열전 냉난방시스템 단품시험

Fig. 4는 독립형 열전 냉난방시스템에서 인가되는 전압을 변경하면서 냉방성능과 난방성능을 시험한 결과이다. 시험은 열전소자로 유입되는 공기온도가 25°C 이고, 열전소자의 폐열로 배출되는 풍량은 $16.4 \text{ m}^3/\text{h}$ 이고, 냉방 또는 난방으로 사용되는 풍량은 $18.3 \text{ m}^3/\text{h}$ 이다. 풍량시험기는 Torrington사에서 제작한 FM150 모델로 측정오차는 $\pm 0.3\%$ 이고, 국제 규격인 ANSI/ASHRAE 51-1985, ANSI/AMCA 210-85를 만족하는 설비이다. Fig. 4의 (a)는 냉방성능 시험 결과로 시스템에 인가되는 전압이 증가함에 따라 냉방능력은 증가하고, 토출온도는 저감하다가 8 V를 지난 후에는 냉방능력은 다시 감소하고, 토출온도도 다시 상승하고 있다. 열전소자에 인가되



(a) Cooling performance test



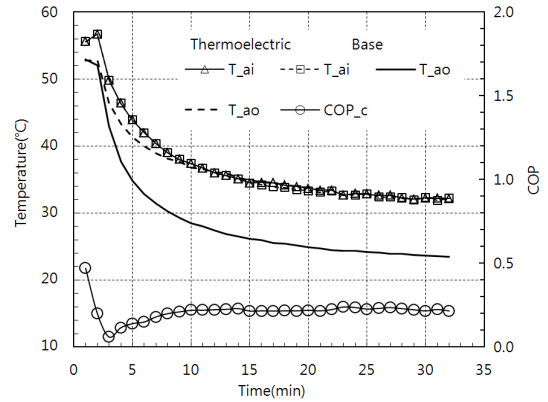
(b) Heating performance test

Fig. 4 Test results of thermoelectric system performance at various input voltage.

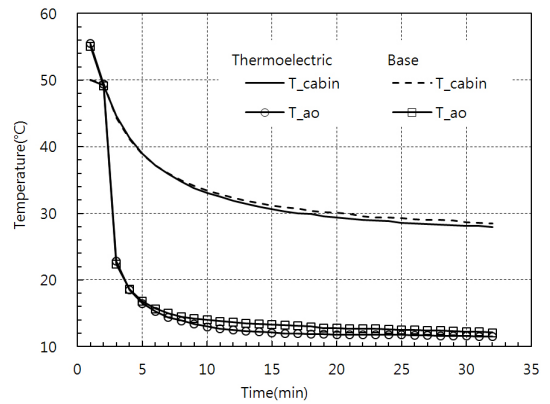
는 전압이 8 V에서 최대 냉방성능을 나타내고 있으며, 이때 토출 온도는 4.3°C 하강하고, 냉방능력은 약 22 W, 성적계수는 0.31이다. Fig. 4(b)는 열전소자에 인가되는 전압을 변경하면서 난방성능을 시험한 결과이다. 인가 전압의 증가에 따라 난방능력과 토출온도는 계속 증가하고 있으며, 12 V에서 토출온도는 28.3°C가 상승되었고, 난방능력은 140 W, 성적계수는 1.1로 나타났다.

3.2 실차 열전 냉방시스템 성능시험

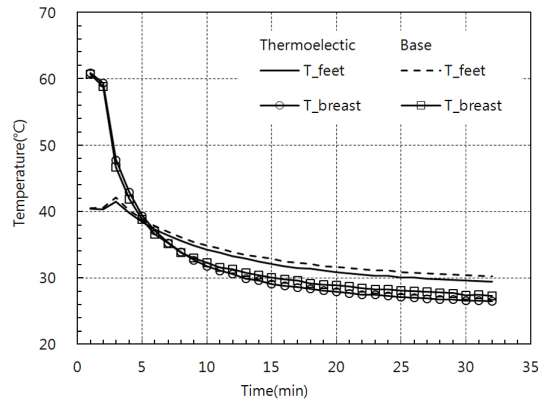
Fig. 5는 차량의 에어컨 시스템을 가동하면서, 독립형 열전 냉방시스템이 실차 냉방성능에 미치는 영향에 대하여 시험한 것이다. 환경풍동시험기에 현대자동차에서 생산한 중형승용차를 설치한 후 독립형 열전 냉방시스템의 작동유무에 따라 Table 1의 조건으로 30분간 시험하였다. Fig. 5의 (a)는 열전 냉방시스템의 입구와 출구의 공기온도를 비교한 것이다. 열전 냉방시스템을 가동하지 않았을 때에는 입구와 출구 공기의 온



(a) Thermoelectric system performance



(b) Cabin and air discharge temperature



(c) Average feet and breast temperature

Fig. 5 Experimental results of cooling performance of thermoelectric system in climate wind tunnel.

도는 차이가 거의 없으나, 열전 냉방시스템을 작동한 경우에는 입구공기는 별 차이가 없으나, 시간이 지남에 따라 출구 공기온도는 점차로 내려가 약 30분 시점에서 출구 공기온도는 입구공기 온도보다 8.4°C 낮게 토출되고 있으며, 이때 성적계수는 0.2이다. Fig. 5의

(b)는 차량 공조장치의 토출 공기온도와 실내 평균온도를 비교한 것이다. 차 실내 평균온도는 50℃까지 상승한 후 차량 에어컨이 가동됨에 따라 급격히 떨어지고 있다. 초반 10분까지는 열전 냉방시스템을 작동할 때와 하지 않았을 때가 차이가 없으나, 시간이 지날수록 독립형 열전 냉방시스템을 작동한 경우가 실내 평균온도가 1.1℃ 정도 더 떨어졌다. 토출되는 공기온도도 동일한 경향을 보이며, 30분 시점에서 약 1.0℃ 정도 온도가 더 떨어지는 것을 알 수 있다. Fig. 5(c)는 실내 평균온도를 가슴(breast)부위와 발(feet)부위의 온도 변화로 세분화 하여 살펴본 것이다. 가슴부위 온도는 60℃까지 상승하였으나, 시간이 지나면서 급격히 온도가 떨어지고, 열전 냉방시스템을 가동하였을 경우가 역시 온도가 더 떨어지는 것을 볼 수 있다. 냉방성능 시험 시에는 공조장치의 작동모드가 얼굴(vent)모드로 향하고 있기 때문에 차량 바닥의 유동변화는 거의 없어 발부위의 온도변화는 없는 것이 일반적이다. 하지만 열전 냉방시스템을 작동하였을 때 발부위의 온도도 낮게 나타나고 있었다. 이는 열전 냉방시스템에 의한 실내 온도저감과 기류 변화의 효과로 보인다.

Fig. 6은 독립형 열전 난방시스템이 실차 난방성능에 미치는 영향에 대하여 시험한 결과이다. 시험은 Table 1의 조건으로 45분간 시험하였다. Fig. 6의 (a)는 열전 난방시스템의 입구와 출구 공기온도를 비교한 것으로 열전 난방시스템을 작동하지 않았을 때에는 입구와 출구의 공기온도 차이가 거의 없으나, 열전 난방시스템을 작동한 경우, 입구 공기온도는 열전 난방시스템을 작동하지 않았을 때와 별반 차이가 없으나, 출구 공기온도는 급격히 상승하여 약 45분 시점에서는 입구 공기온도 대비 약 36.4℃가 상승하였다. 이때 성적계수는 1.3 정도이다. Fig. 6의 (b)는 차실내 평균온도와 공조장치에서 토출되는 공기온도를 비교한 것이다. 차량이 주행함에 따라 냉각수(coolant) 온도가 상승하게 되므로 토출 공기온도도 상승하고 있다. 독립형 열전 난방시스템을 작동하였을 경우, 약 15분이 지난 시점부터 열전 난방시스템을 작동하지 않았을 때 보다 토출 공기온도가 조금씩 더 상승하였으며, 45분 시점에서 토출 공기온도는 약 1.5℃, 실내 평균온도는 1.6℃ 정도 상승하였다. Fig. 6의 (c)는 실내 평균온도를 가슴부위와 발부위로 나누어 온도변화를 살펴본 것으로, 약 5분이 지나가는 시점부터 독립형 열전 난방시스템을 작동하였을 때가 시스템을 작동하지 않았을 때보다 발부위는 약 3.0℃ 높게 나타났으며, 가슴부위는 거의 차이가 없다. 45분 시점에서 2.4℃ 정도 상승하였다. 이는 공조장치의 조작모드가 혼합(mix)모드로 공조장치에서 토출되는 바람의 방향이 주로 발쪽과 전면 유리창으로 향하기 때문에 가슴부위의 온도 상승폭은 작게 나타난 것으로 판단된다.

4. 결 론

차량용 보조 냉난방장치로 열전소자를 이용한 독립형 냉난방시스템을 제작하여 실차 냉난방 성능시험을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 독립형 열전 냉난방시스템의 냉방성능은 인가전압에 따라 달라지지만, 8 V에서 냉방능력은 최대 22 W, 온도강하는 4.3℃, 성적계수는 0.34로 나타났다.
- (2) 열전 난방시스템으로 가동하였을 경우 성능은 인가전압이 증가함에 따라 계속 증가하며, 12 V에서 난방능력은 최대 147 W, 28.3℃의 온도 상승, 성적계수는 1.1로 나타났다.
- (3) 환경제어풍동에서 독립형 열전 냉방시스템을 차량에 장착하여 냉방성능을 시험한 결과, 약 30분 시점에서 토출 공기온도는 8.4℃ 저감되었고, 성적계수는 0.2로 나타났다.
- (4) 실차에서 열전 난방시스템을 가동할 때, 가동하지 않았을 때 보다 45분 시점에서 토출 공기온도는 36.4℃ 상승하였고, 성적계수는 1.3으로 나타났다.

이상으로 차량에서 냉난방 성능시험 결과를 바탕으로 독립형 보조 열전 냉난방시스템의 타당성을 살펴보면, 난방성능 향상에는 어느 정도 효과가 있는 것으로 나타났으며, 냉방성능은 그 효과는 미미하지만, 차 실내의 고른 온도분포와 온도저감 효과가 있는 것으로 보인다.

References

1. Ro, S. T. and Seo, J. S., 1990, Principle of thermoelectric refrigeration and system design, Korean Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 19, No. 3, pp. 135-145.
2. Yang, Y. S., 1994, R&D trend on the thermoelectric energy conversion technology, Korean Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 23, No. 5, pp. 396-402.
3. Yamanashi, M., 1996, A new approach to optimum design in thermoelectric cooling systems, Journal of Applied Physics, Vol. 80, No. 9, pp. 5494-5502.
4. Huang, B. J., Chin, C. J., and Duang, C. L., 2000, A design method of thermoelectric cooler, International Journal of Refrigeration, Vol. 23, No. 3, pp. 208-218.
5. Kang, B. H., Chang, H. J., Kim, S. Y., and Kim, S. H., 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.
6. 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.
 7. Yoon, H. S. and Oh, Y. K., 2008, A study on cooling effect improvement of thermoelectric cooling device using thermoelectric module by piezoelectric actuator, Proceedings of the KSAE 2008 Annual Conference, p. 523.
 8. Lim, C. H., Kim, D. W., Kim, Y. C., and Seo, K. J., 2013, Study on the cooling performance of single and cascade refrigeration systems using thermoelectric modules, Korean Journal of Air Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 25, No. 12, pp. 641-646.