

열전모듈 냉장고의 에너지 효율에 미치는 설계인자의 영향

이태희[†] · 김진호

수원과학대학교 건축기계설비과

The Effect of Design Parameters on the Energy Efficiency of a TEM Refrigerator

Tae-Hee Lee[†] and Jin-Ho Kim

Department of Building Technology, Suwon Science College, Hwasung, Kyonggi 18516, Korea

Abstract

To present the design direction of the thermoelectric module (TEM) refrigerator, analysis of the effect of the design parameters on the energy efficiency and performance of the refrigerator is performed. The design parameters considered are the cooling capacity of the TEM and the heat transfer performance of the heating and cooling surface of the TEM. The heat transfer performance is the most effective design parameter for improving cooling power. The smaller ΔT and cooling capacity of the TEM make the higher efficiency of the refrigerator.

Key words: Thermoelectric module(열전모듈), Refrigerator(냉장고), COP(성적계수)

기호 설명

A : 면적 [m^2]
 COP : 성적계수
 h : 열전달계수 [W/m^2K]
 i : 전류 [A]
 k : 열전도계수 [W/mK]
 P : TEM 소비전력 [W]
 Q_c, Q_h : TEM 흡열량 및 방열량 [W]
 Q_L : 냉장고의 열부하 [W]
 R_e : TEM 전기 저항 [ohm]
 R_f : TEM 열저항 [$^{\circ}C/W$]

T : 온도 [$^{\circ}C$]
 t : 두께 [m]
 U : 총합열전달계수 [W/m^2K]
 V : 전압 [V]
 Z : TEM 장치 계수 [K^{-1}]

그리스 문자

α : TEM의 제백계수 [V/K]

하첨자

c, h : TEM의 저온부 및 고온부
 i, o : 냉장고 내부 및 외부
 R : 냉장고

[†]Corresponding author

Tel: +82-31-350-2308, Fax: +82-31-350-2305

E-mail: thlee@ssc.ac.kr

접수일: 2018년 08월 07일

심사일: 1차:2018년 08월 30일

채택일: 2018년 08월 31일

1. 서 론

가정용이나 상업용으로 사용되는 소형 냉동기에 적용되는 냉동시스템은 증기압축 방식이 주류를 이루고 있다. 증기 압축식은 압축기를 사용하기 때문에 소음과 진동을 필수적으로 동반한다. 반면, 열전 모듈(Thermoelectric Module, TEM)은 구동부 없이 냉동시스템을 구성할 수 있어 저소음과 소형 경량화가 가능하다. 이러한 장점을 이용하여 숙박시설용 소형 냉장고, 화장품 냉장고, 와인 냉장고, 차량용 냉장고 등에 널리 응용되고 있다. 반면 열전모듈을 이용할 경우 성적계수가 낮는데, 고온부와 저온부의 온도차가 커질수록 성적계수가 급속히 감소하는 한계가 있어 냉동에 응용하는 것은 매우 제한적으로 이루어지고 있다.

열전모듈 또는 열전모듈을 이용한 냉동시스템에 대한 연구는 이미 많은 연구자들에 의해 수행된 바 있다. 이러한 연구들은 열전모듈의 최적화와 관련된 연구와 열전모듈을 응용한 시스템에 대한 연구로 크게 분류될 수 있다.

노승탁 등[1]은 열전 소자에서 발생하는 각종 현상 및 그와 관련된 원리에 대해서 정리하였다.

정은수[2]는 열전 냉동기에 사용되는 열전요소에 대한 해석모델을 제시하고, 성적계수를 최대화 하는 최적 설계 과정을 제시하였다. 열전소자를 이용한 차량용 냉난방시스템에 대한 실험적 연구도 수행되었다[3, 4]. 열전모듈을 냉방시스템에 적용할 경우 열전모듈의 개수 및 전원 배열 등이 냉방성능, 소비 전력 및 성적계수에 미치는 영향에 대해 실험적으로 규명하는 연구도 수행되었다[5]. 임창학 등[6]은 냉동과 냉장이 동시에 필요한 냉동냉장고에 열전소자를 적용하는 방식에 따른 성능 비교를 수행하여 냉동실에는 캐스캐이드 시스템을 적용하는 것이 유리하다고 주장하였다.

기존의 압축식 냉동시스템을 적용한 냉장고의 설계에 있어서 가장 중요한 것은 압축기의 용량 선정과 증발기와 응축기 성능이라고 할 수 있다. 열전모듈을 적용한 냉장고에 있어서 압축기는 열전모듈에 해당하고, 증발기와 응축기의 성능은 저온부와 고온부의 열전달 성능에 대응된다.

이 연구에서는 열전모듈의 용량, 저온부와 고온부의 열전달 성능이 열전모듈 냉장고의 성능과 에너지 효율에 미치는 영향을 분석한다.

2. 이론 해석

2.1 냉장고의 열부하 계산

이 연구에서 설계의 대상으로 사용된 냉장고는 외측 변의 길이가 300 mm인 정육면체이고, 단열 벽은 폴리우레탄 폼이다. 단열 벽의 두께는 30 mm로 가정하였는데, 이는 냉장고의 냉장실 단열벽 두께와 유사한 수치이다. 열전도계수는 일반적 냉장고 단열재의 열전도계수 0.02 W/mK를 적용하였다. 냉장고 내·외벽의 열전달 계수는 냉장고 설계 시 실시하는 간략한 열부하 분석에 사용되는 값인 8 W/m²K를 사용하였다.

냉장고의 열부하 Q_L 은 식 (1)로 표현된다.

$$Q_L = U_R A_{R,o} \cdot (T_o - T_i) \quad (1)$$

U_R 는 냉장고 내부와 외부 사이의 총합 열전달계수이며 식 (2)와 같다.

$$\frac{1}{U_R A_{R,o}} = \frac{1}{h_o A_{R,o}} + \frac{t_R}{k_R A_{R,o}} + \frac{1}{h_i A_{R,o}} \quad (2)$$

여기서 t_R 와 k_R 는 냉장고 단열 벽의 두께와 열전도 계수이다. 계산의 편의를 위해 모든 면적 항에 냉장고 외부 벽면의 면적 $A_{R,o}$ 를 적용하였다.

2.2 열전모듈

열전모듈은 저온부에서 열을 흡수하여 고온부로 열을 이동시키는 역할을 수행한다. Fig. 1에 열전모듈이 적용된 냉장고에서 일어나는 열 흐름을 개략적으로 나타내었다.

열전모듈이 흡수하는 열량, Q_c 는 식 (3)과 같다.

$$Q_c = i\alpha T_c - \frac{1}{2}i^2 R_e - \frac{T_h - T_c}{R_t} \quad (3)$$

위 식의 첫 번째 항은 Peltier 효과에 의한 흡열량, α 는 제백계수(Seebeck coefficient)이다. 두 번째 항은 열전모듈을 통과하는 전류에 의한 발열량, 즉 Joule 열의 50%이고, R_e 는 열전모듈의 전기저항이다. 세 번째 항은 열전모듈의 고온부와 저온부 사이에서 발생하는 전도열(Fourier effect)이고, R_t 는 열전모듈의 고온부와 저온부 사이의 열저항이다.

열전모듈에 인가되는 전압 V 는 제백(Seebeck) 효

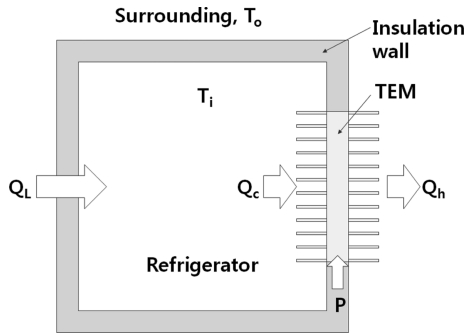


Fig. 1. Schematic of the TEM refrigerator.

과에 의한 것과 열전모듈의 전기 저항에 의한 것의 합으로써, 식 (4)와 같다.

$$V = \alpha \Delta T + iR_e \quad (4)$$

여기서, $\Delta T = T_h - T_c$ 로써, 열전모듈의 고온부와 저온부 온도차이다. 그리고 열전모듈의 입력 전력은 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$P = iV = i\alpha \Delta T + i^2 R_e \quad (5)$$

열전모듈의 고온부에서 방출되는 열량, Q_h 는 다음의 식 (6)과 같다.

$$Q_h = Q_c + P = i\alpha T_h + \frac{1}{2}i^2 R_e - \frac{T_h - T_c}{R_t} \quad (6)$$

한편, 냉장고의 성적계수는 식 (7)과 같다.

$$COP = \frac{Q_c}{P} \quad (7)$$

2.3 열전모듈 냉각시스템

식 (3)으로 표현되는 열전모듈의 흡열량은 다음의 조건, 즉 식 (8)도 만족시켜야 한다.

$$Q_c = U_c A_c (T_i - T_o) \quad (8)$$

여기서, $U_c A_c$ 는 열전모듈 저온부의 총합열전달계수와 열전달 면적이다.

식 (6)의 열전모듈 고온부의 방열량은 식 (9)의 조건도 만족시켜야 한다.

$$Q_h = U_h A_h (T_h - T_o) \quad (9)$$

여기서, $U_h A_h$ 는 열전모듈 고온부의 총합열전달계수

와 열전달 면적이다.

열전모듈 냉각 시스템의 해석을 위해 Q_c 의 계산을 위한 식 (3)과 식 (8), 그리고 Q_h 의 산출을 위한 식 (6)과 식 (9)를 연계하여 풀이하였다.

2.4 열전모듈 냉각시스템과 냉장고의 매칭

냉장고 주변의 외기온도, T_o 가 증가하고 냉장고 내부 온도, T_i 가 감소하면 열전모듈에서 흡수하는 열량 Q_c 는 줄어드는 반면 외기로부터 냉장고로 흘러들어오는 열부하 Q_L 은 증가한다.

냉장고 온도 유지를 위해서 Q_c 는 Q_L 보다 크거나 최소한 같은 값을 가져야 한다. 이를 식으로 표현하면 식 (10)과 같다.

$$Q_c(T_i, T_o) \geq Q_L(T_i, T_o) \quad (10)$$

식 (10)은 일반적인 사용 조건에서 뿐만 아니라 극단적 상황에서도 만족되어야 한다. 일반적으로 냉장고의 내부온도는 1°C까지 설정이 가능하고, ISO에서 정한 열대조건(Tropical condition)의 외기온도는 43°C이다. 따라서 Q_c 가 가장 작고 Q_L 이 가장 커지는 최대 열 부하 조건의 T_i 와 T_o 를 각각 1°C와 43°C로 선택하였으며 이때의 열부하 Q_L 은 식 (1)에 의해 13.0 W이다.

냉장고는 KS ISO 15502에서 정한 냉장고의 소비 전력 시험 조건(T_i 와 T_o 가 각각 5°C와 25°C)과 유사한 환경 하에서 주로 운전되며 이때의 열부하 Q_L 은 식 (1)에 의해 6.2 W이다. 냉장고의 운전 조건을 Table 1에 정리하여 나타내었다.

3. 수치 해석 결과 및 고찰

열전모듈 냉장고 설계에 가장 큰 영향을 미치는 것은 열전모듈의 용량과 열전모듈의 저온부와 고온

Table 1. Refrigerator operation conditions

Parameter	Max. thermal load condition	Power consumption test condition
Environment Temp., T_o , °C	43	25
Refrigerator Temp., T_i , °C	1	5
Thermal Load, Q_L , W	13	6.2

Table 2. Design parameters of TEM cooling system of the refrigerator

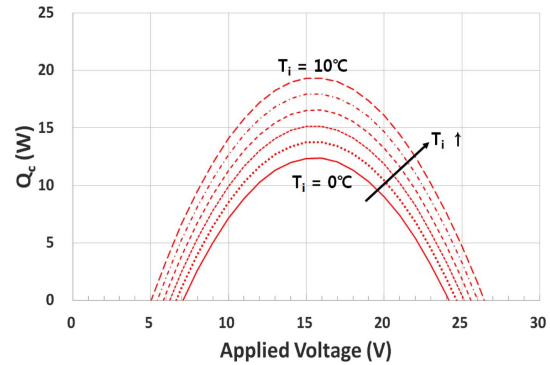
Parameter	Case 1 (Baseline)	Case 2 (Enhanced TEM)	Case 3 (Enhanced Heat transfer)	Case 4 (Enhanced TEM & Heat transfer)
Seebeck coefficient, α , V/K	0.054	0.054	0.054	0.054
Electric resistance, R_e , Ω	2.267	1.1335	2.267	1.1335
Thermal resistance, R_t , K/W	1.765	0.8825	1.765	0.8825
Figure of merit, Z , $10^{-3}/K$	2.27	2.27	2.27	2.27
Max. current, i_{max} , A	6.0	12.0	6.0	12.0
Max. voltage, V_{max} , V	17.5	17.5	17.5	17.5
Max. temp. difference, ΔT_{max} , K	72	72	72	72
Max. cooling capacity, $Q_{c,max}$, W	57	114	57	114
Cold side heat transfer performance, $U_c A_c$, W/K	4.608	4.608	9.216	9.216
Hot side heat transfer performance, $U_h A_h$, W/K	7.200	7.200	14.40	14.40

부에 부착된 열교환 장치의 성능, 즉 $U_c A_c$ 와 $U_h A_h$ 의 값이다. 이 연구에서는 열전모듈의 용량, 저온부와 고온부의 열전달 성능이 열전모듈 냉장고의 성능과 에너지 효율에 미치는 영향을 분석한다.

이를 위하여 먼저 임의의 상용 열전모듈을 선정하였다. 열전모듈이 부착된 냉장고 벽면의 내부 표면적의 10배를 저온부측 열전달 면적 A_c 의 기본 값으로 하고, 자연대류를 가정하여 대략적으로 선택한 $8 \text{ W/m}^2\text{K}$ 를 U_c 의 값으로 한다. 따라서 A_c 는 0.576 m^2 , $U_c A_c$ 는 4.608 W/K 이다. 열전모듈이 부착된 면의 외부 표면적의 10배를 A_h 의 기본 값으로 하고, 저온부와 동일하게 $8 \text{ W/m}^2\text{K}$ 를 U_h 의 값으로 한다. 따라서 A_h 는 0.900 m^2 , $U_h A_h$ 는 7.200 W/K 이다. 이 내용을 요약하면 Table 2의 Case 1과 같다. Table 2는 이 연구를 통하여 분석하는 냉장고의 설계 조건이다. Table 2의 Case 1은 기본 설계 조건이며, Case 2는 Case 1 대비 열전모듈의 용량이 2배이며, Case 3은 흡열 및 방열 성능이 2배, 그리고 Case 4는 열전모듈의 용량, 흡열 및 방열 성능 모두 Case 1 대비 2배이다. 여기서 모든 Case의 열전모듈 장치계수 (figure of merit), Z 는 동일하다.

3.1 최대 열부하 조건 성능 분석

Case 1 에서 $T_o = 43^\circ\text{C}$ 일 때, 열전모듈에 인가된 전압에 따른 열전모듈의 흡열량을 Fig. 2에 도시하였다. 이 그림에는 냉장고 내부 온도가 0°C 부터 2°C 간격으로 10°C 까지의 결과를 나타내었다.

**Fig. 2.** The variation of cooling capacity of TEM with applied voltage at max. thermal load condition (Case 1).

냉장고 내부 온도가 높아지면 열전모듈의 흡열량이 증가하는데, 이는 내부 온도의 증가에 따라 식 (3)의 우변 두 번째 항, 즉 Joule 열이 커졌으나 펠티에 효과를 나타내는 첫 번째 항이 증가하고, 전도열 (푸리에 효과)을 의미하는 세 번째 항 절대 값이 감소한 결과이다. 인가전압이 최대 냉력을 보이는 16V 이고 고내 온도가 0°C 와 10°C 일 때, 식 (3) 각

Table 3. Effect of on cooling mechanism of TEM

T_i	Q_c	iaT_c	$-\frac{1}{2}i^2R_e$	$-\frac{T_h - T_c}{R_t}$
0°C	12.4W	82.2W	-35.9W	-33.9W
10°C	19.3W	87.4W	-38.1W	-29.9W
Difference	7.0W	5.1W	-2.2W	4.0W

항의 값을 Table 3에 나타내었다.

고내 온도가 0°C에서 10°C로 증가함에 따라 펠티에 효과는 82.2W에서 87.4W로 5.1W가 증가하였으나 Joule 열의 증가가 2.2W로 펠티에 효과의 43%를 상쇄 시켰다. 그러나 고내 온도 증가가 가져 온 열전모듈 양단 온도차 감소에 따른 푸리에 효과 감소(4.0W)에 의해 총 냉각능력은 7.0W가 증가하였다. 즉 고내 온도가 증가하면 펠티에 효과의 증가와 푸리에 효과 감소로 인한 냉각능력 증가와 Joule 열 증가에 따른 냉각능력 감소가 복합적으로 작용하여 흡열량은 증가하였다.

Table 2의 4가지 설계 조건에 대하여 냉장고 내부 온도, T_i 에 따른 열전모듈의 최대 냉각 열량, Q_c 와 냉장고의 열부하, Q_L 을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 2의 각 그래프의 극대점을 이은 선이 Fig. 3의 Case 1이다. 이 그림에 나타난 각 Case별 Q_c 와 Q_L 의 교차점이 각 Case의 최대 냉각 가능 온도이며, 이것을 냉각력이라고 정의한다. 각 Case의 냉각력을 Table 4에 나타내었다. Case 1 대비 열전모듈의 용량을 증가시킨 Case 2는 0.3°C, 열전달성능만 증가시킨 Case 3은 4.4°C, 그리고 둘 다를 증가시킨 Case 4는 냉각력이 7.6°C 증가하였다. Case 4는 Case 2와 Case 3을 합친 것과 같은 설계 조건이지만 그 둘의 효과를 합한 것보다 더 큰 냉각력 증대 효과를 보였다.

냉각력 증가를 위해서는 열전모듈 용량 증가 보다는 흡열 및 방열부의 열전달 성능 증가가 효과적이며 열전모듈 용량 증가와 흡열 및 방열 성능 증가를 동시에 적용하는 것이 각각의 효과를 합친 것 보다 62%의 추가적인 효과를 가져왔다.

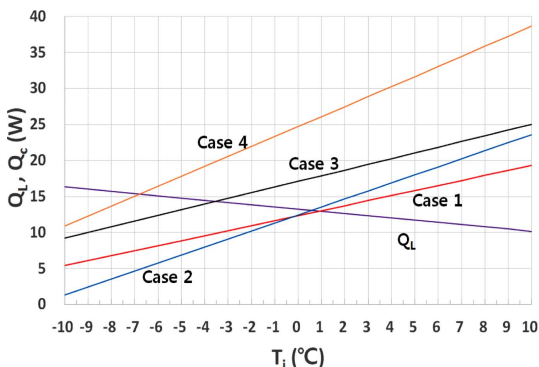


Fig. 3. Thermal load of refrigerator and max. cooling capacity of TEM at $T_o = 43^\circ\text{C}$.

Table 4. Cooling power (lowest T_i) of refrigerator at $T_o = 43^\circ\text{C}$

Case	1	2	3	4
T_i	0.9°C	0.6°C	-3.5°C	-6.7°C
Improvement	-	0.3°C	4.4°C	7.6°C

3.2 소비전력 측정 조건 성능 분석

이 절에서는 냉장고 소비전력 측정 조건에서 각 Case 별 성능 및 효율을 해석하고 결과를 분석한다.

Fig. 4에는 인가전압에 따른 Q_c 의 변화를 도시하였다. 4가지 경우 모두 약 3V에서 냉각 능력이 나타나기 시작하여 인가전압과 함께 증가하여 최댓값을 보인 후 감소하였다. 각 Q_c 그래프와 열부하량 Q_L 의 교차점은 각 Case의 운전 전압이다.

Fig. 5에는 인가전압과 성적계수(COP)의 상관 관계를 나타내었다. Case 1과 Case 4의 그래프가 겹쳐지는 것을 볼 수 있는데, 이는 열전모듈 용량비와 흡열 및 방열 성능의 비가 정확히 일치하기 때문이다. 그러나 Fig. 4의 Case 1과 Case 4의 Q_c 가 다르고 운

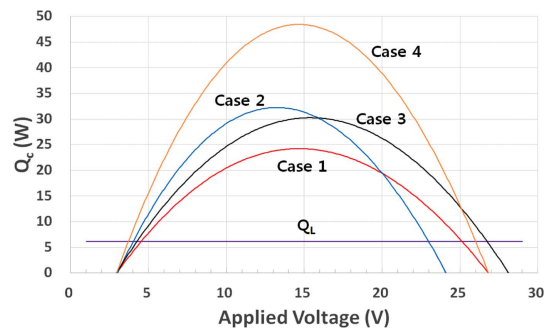


Fig. 4. Variation of cooling capacity with applied voltage at power consumption test condition.

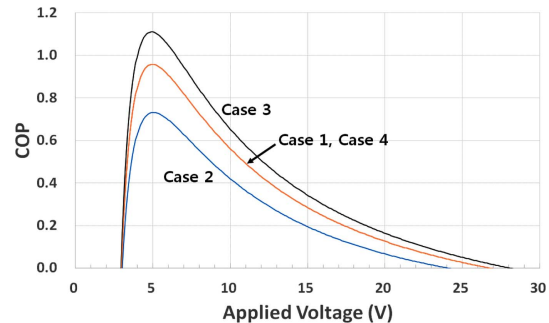


Fig. 5. Variation of COP with applied voltage at power consumption test condition.

Table 5. Operation voltage and COP at power consumption test condition

Case	1	2	3	4
Voltage, V	4.53	4.01	4.26	3.71
COP	0.941	0.635	1.060	0.742
$\Delta T/\Delta T_{case 1}$	1	2	0.5	1
$Q_{c,max}/Q_{c,max,case 1}$	1	2	1	2

전 전압이 상이하기 때문에 실제 운전 시의 성적계수는 서로 다른 값을 가진다.

각 Case 별 운전 전압과 COP를 Table 5에 나타내었다. 이 표의 $\Delta T/\Delta T_{case 1}$ 는 식 (11)과 같다.

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_{case 1}} = \frac{Q_{c,max}}{UA} / \frac{Q_{c,max,case 1}}{UA_{case 1}} \quad (11)$$

식 (11)의 $\Delta T/\Delta T_{case 1}$ 는 실제 운전 시의 고온부와 저온부 온도 차의 비는 아니다. 그러나 이 값이 가장 작은 Case 3가 가장 높은 성적계수를 보였으며, 성적계수와 반비례하는 경향을 보인다. 그리고 온도 차의 비가 동일한 Case 1과 Case 4는 열전모듈 용량 비($Q_{c,max}/Q_{c,max,case 1}$)가 작은 Case 1이 더 큰 COP를 가진다. 즉 식(11)의 온도차의 비가 작을수록, TEM 용량이 상대적으로 작을수록 높은 성적계수를 보인다.

따라서 냉각력을 만족하는 범위 내에서 열전모듈의 용량은 최소화하고 식 (11)의 온도차의 비를 최소화시키면 효율 높은 시스템을 얻을 수 있다.

4. 결 론

열전모듈 관련 설계인자가 열전모듈 냉장고의 성능 및 효율에 미치는 영향에 대한 수치해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고내 온도가 증가하면 펠티에 효과의 증가와 푸리에 효과의 감소로 인한 냉각능력 증가와 줄열

(Joule heat) 증가로 인한 냉각능력 감소가 복합적으로 작용하여 흡열량은 증가한다.

(2) 냉각력 개선에는 열전모듈 용량 개선 보다는 흡열 및 방열부의 열전달 성능 개선이 효과적이며, 두 가지를 모두 적용할 경우 각각의 개선 효과를 합친 것보다 더 큰 효과를 얻을 수 있다.

(3) 냉각력을 만족하는 범위 내에서 열전모듈의 용량은 최소화하고 식 (11)의 온도차의 비를 최소화시키면 높은 시스템 효율을 얻을 수 있다.

References

1. Ro, S. T., and Seo, J. S., 1990, Principle of thermoelectric refrigeration and system design, Korean J. of Air-Conditioning and Refrigeration Eng., Vol. 19, No. 3, pp. 135-145.
2. Jeong, E. S., 2012, Optimization of thermoelectric elements for thermoelectric coolers, Korean J. of Air-Conditioning and Refrigeration Eng., Vol. 24, No. 5, pp. 409-414.
3. Lee, D. W., 2014, An experimental study on the supplemental cooling and heating performance using 1kW thermoelectric module for vehicle, Korean J. of Air-Conditioning and Refrigeration Eng., Vol. 26, No. 5, pp. 224-230.
4. Lee, D. W., 2014, Experimental study of standalone cooling and heating system using thermoelectric element for vehicles, Korean J. of Air-Conditioning and Refrigeration Eng., Vol. 26, No. 8, pp. 375-380.
5. Hwang, J., and Kang, B. H., 2007, Effects of thermoelectric module arrangement on the performance of a thermoelectric air-cooling system, Korean J. of Air-Conditioning and Refrigeration Eng., Vol. 19, No. 2, pp. 162-168.
6. 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 J. of Air-Conditioning and Refrigeration Eng., Vol. 25, No. 12, pp. 641-646.