

열전소자를 이용한 싱글 및 캐스케이드 냉동시스템의 냉각 성능에 관한 연구

Study on the Cooling Performance of Single and Cascade Refrigeration Systems Using Thermoelectric Modules

임창학(Changhak Lim)¹, 김동우(Dongwoo Kim)¹, 김용찬(Yongchan Kim)^{2*}, 서국정(Kookjeong Seo)³

¹고려대학교 기계공학과 대학원, ²고려대학교 기계공학과, ³삼성전자 생활가전사업부

¹Graduate School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Republic of Korea

²Department of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Republic of Korea

³Samsung Electronics Co, Ltd, Suwon 442-742, Republic of Korea

(Received August 13, 2013; revision received October 1, 2013)

Abstract The purpose of this study is to improve the cooling performance of single and cascade refrigeration systems using thermoelectric modules. The system consists of a heat sink, fan, and thermoelectric module. The operating parameters considered in this study include power distribution between the first- and second-stage thermoelectric modules, air flow, and variable condensing unit. The cooling capacity increased with decreases in the temperature difference between hot and cold surfaces, but decreased with increases in the condensing temperature. The COP decreased with increasing electric power of the thermoelectric module because of the increased Joule heat. The cooling performance improvement using the thermoelectric module is represented by the freezer temperature.

Key words Thermoelectric module(열전소자), Heat sink(방열판), Cooling capacity(냉각용량), Thermal resistance(열저항), COP(성능계수)

† Corresponding author, E-mail: yongckim@korea.ac.kr

기호설명

COP : 성능계수(Coefficient of performance)
DT : 고온부와 저온부의 온도차 [K]
F : 냉동실(Freezer)
I : 전류 [A]
k : 열전도계수 [W/m·K]
P : 열전소자의 인가전력 [W]
Q : 열전달량 [W]
R : 열저항 [K/W]
Ref : 냉장실(Refrigerator)
T : 온도 [°C]
V : 인가 전압 [V]
a : Seebeck 계수 [V/K]

하첨자

c : 열전소자 저온부
h : 열전소자 고온부
f : fin

1. 서론

기존의 가정용 냉동 냉장고는 냉매를 이용한 증기압축식 방식을 주로 사용하였다. 그러나 이러한 냉매를 사용한 냉각방식은 오존층을 파괴하거나, 지구온난화를 촉진시켜 환경오염을 일으킬 수 있으므로 국제적으로 그 사용을 감축하고 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해, 열전소자를 이용한 전자냉각 방식이 제안되었으며, 이 방식은 냉매를 사용하지 않으므로 환경오염이 없는 친환경적인 냉각 방식이다.

전자냉각에 관한 이론은 1821년 Seebeck이 Cu와 Bi 또는 Bi와 Sb의 양쪽 끝을 연결하고 접합부의 한쪽을 가열하였을 때, 온도차에 의해 열기전력(thermoelectromotive force)이 발생하여 폐회로 내에서 전류가 흐르는 것을 발견하였다.⁽¹⁾ 이것이 열전발전의 원리이며 Seebeck 효과로 불린다. 1843년 프랑스의 Peltier는 동일한 형상을 한 두 개의 서로 다른 금속으로 이루어진 회로에 직류전기를 흘리면 한 접합부에서는 흡열이 일어나고 다

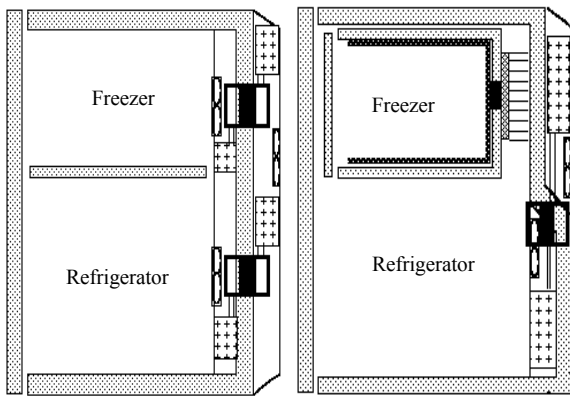
른 접합부에서는 발열이 일어나는 현상을 발견하였다.⁽²⁾ 이 현상은 일종의 heat pumping 현상으로써 전자 냉각의 원리가 되며, 이것을 Peltier 효과라 한다. 1851년 영국의 Thomson은 Seebeck 효과와 Peltier 효과의 가역성을 열역학적으로 이론화하던 중 온도 기울기가 있는 도체에 전류를 흘리면 열역학 제 2법칙에 의해 도체 내부에서 열이 흡수 또는 열이 발생할 수 있음을 증명하였는데 이 현상을 Thomson 효과라 한다.⁽³⁾ 이러한 Seebeck 효과, Peltier 효과, Thomson 효과를 통틀어 열전현상이라 한다.

최근에는 열전소자를 이용하여 화장품 냉장고, 와인 셀러, 차량용 냉장고, 칠리, 의료장비 등 다양한 분야에 사용되고 있다. 열전소자는 고온부와 저온부의 온도차가 커지게 되면, 흡열량이 줄어들게 되어, 냉동실 구현이 어려워 이러한 대다수의 제품들은 냉장 기능만 구현하였다.^(4, 5) 따라서 본 연구에서는 열전소자를 이용한 캐스케이드 냉동시스템을 적용하여 냉동실과 냉장실의 열전소자의 인가전력비를 최적화 하였다. 또한 방열 시스템 및 냉각부의 효율 최적화를 통해 고온부와 저온부의 온도차를 최소화시켜 열전소자의 흡열량을 최대화하여 냉동 및 냉장기능을 동시 구현하고자 한다.

2. 이론해석

2.1 열부하 계산

싱글 및 캐스케이드 시스템의 냉장고를 Fig. 1에 나타내었다. 냉동시스템은 냉장실, 냉동실에 열전소자, 히트싱크, 냉각팬으로 구성되어 있다. 싱글 시스템의 냉동실은 냉장실과 동일하나, 캐스케이드 시스템의 냉동실은 방열부에서 발생하는 열을 외부로 방출하지 않고 냉장실 내부의 냉기를 사용하여 방열한다.



(a) Single system (b) Cascade system

Fig. 1 Refrigeration system using the thermo-electric module.

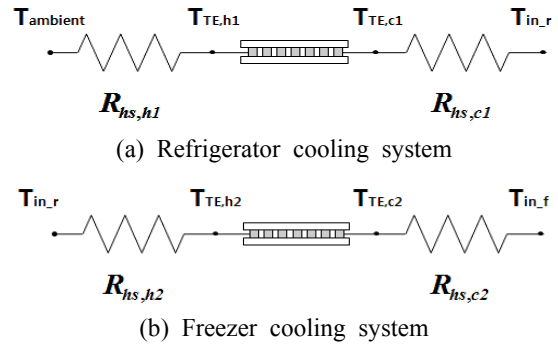


Fig. 2 Thermal circuit of the thermoelectric cooling system.

싱글 및 캐스케이드 시스템의 냉장고 열부하를 분석하기 위하여, 냉장고의 시스템의 열저항들을 Fig. 2와 같은 열회로로 대응하여 분석하였다. 냉장고의 각 개별 냉장실 및 냉동실 총합열전달계수(UA)는 열전소자의 양단면에 부착된 냉각 및 방열 히트싱크(heat sink)의 전도 및 대류 열저항($R_{hs,c}$, $R_{hs,h}$)으로 나타냈다. 싱글 및 캐스케이드 냉동시스템의 개별 열부하는 식(1)을 이용하여 계산하였다. UA 값은 내부 부피 혹은 단열두께 등의 요소에 따라 결정된다.

$$Q_{Heat\ load} = UA(T_o - T_i) \quad (1)$$

2.2 열전소자

열전소자의 저온부의 흡열량은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_c = \alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - k(T_h - T_c) \quad (2)$$

식(2)에서 R은 열전소자의 내부저항을 의미한다. 우변의 첫 번째 항은 Peltier 효과에 의한 흡열량으로 α (Seebeck coefficient)와 비례하고, 두 번째 항은 열전소자에서 발생하는 Joule 열이다. 세 번째 항은 고온부에서 저온부로 전도열량이다. 냉각시스템에서 열전소자의 흡열량을 향상시키기 위해서는 고온부와 저온부의 온도차를 줄여서 고온부에서 저온부로 이동하는 전도열량을 최소화하여야 한다. 고온부의 온도(T_h)를 감소시키기 위해서는 외부 공기와 열교환하는 방열부의 열교환기를 최적화하여야 하며, 풍량 저항을 최소화하여야 한다. 방열부 열교환기로는 히트싱크 및 열사이펀(thermosyphon) 등이 있다.

열전소자의 방열량은 식(3)와 같이 나타낼 수 있다. 첫 번째 항은 Peltier 효과에 의한 발열량, 두 번째 항은 Joule 열, 세 번째 항은 고온부에서 저온부로 전도

열이다. Joule열의 경우 전류의 제곱근에 비례하여 증가하므로 최적 전류 이상으로 인가시에는 방열량이 증가하여 흡열량 및 성능계수도 감소하게 된다.

$$Q_h = \alpha T_h I + \frac{1}{2} I^2 R - k(T_h - T_c) \quad (3)$$

열전소자에 인가되는 전력과 성능계수는 각각 식(4), 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P = [IR + \alpha(T_h - T_c)]I = VI \quad (4)$$

$$COP = \frac{Q_c}{P} \quad (5)$$

2.3 히트싱크

히트싱크의 방열용량과 핀효율은 단면적이 균일한 핀으로 가정하고, 온도분포를 이용하여 식(6)~식(8)와 같이 나타낼 수 있다.⁽⁶⁾

$$q_f = \sqrt{hPkA_c} \Theta_b \frac{\sinh mL + (h/mk) \cosh mL}{\cosh mL + (h/mk) \sinh mL} \quad (6)$$

$$m = \sqrt{hP/kA_c}$$

$$\eta_f = \frac{q_f}{q_{\max}} = \frac{q_f}{hA_f \Theta_b} = \frac{\tanh mL_c}{mL_c} \quad (7)$$

$$L_c = L + t/2$$

$$\eta_o = \frac{q_t}{q_{\max}} = \frac{q_t}{hA_t \Theta_b} = 1 - \frac{NA_f}{A_t} (1 - \eta_f) \quad (8)$$

3. 실험장치

열전소자 냉동시스템의 실험장치는 크게 온·습도 조건을 유지하는 항온항습챔버, 직류전원공급장치, 자료수집장치, 싱글 및 캐스케이드 시스템 실험장치로 구성되어 있으며, Fig. 1과 같은 실험장치를 항온항습챔버 내

Table 1 Specification of thermoelectric module

Parameter	Value
R(Electrical resistance, Ω)	1.956
k(Conductivity, W/K)	0.464
α(Seebeck coefficient, V/K)	0.0508
Z(Figure of merit, 1/K)	0.00297
I _{max} (amps)	7.3
V _{max} (volts)	14.5
ΔT _{max} (K)	69.0
Q _{max} (W)	53.1

부에 설치하여 열부하 및 냉장고 내부온도를 측정하였다.

본 연구에서는 40×40×2 mm 규격의 Bi2Te3계 열전소자를 사용하였고, p-n 소자 127쌍이 직렬로 연결되어 있으며, Table 1에 측정된 열전소자의 특성을 나타내었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 열전소자 성능 및 열부하

열전소자의 고온부와 저온부의 온도차이에 따른 소자의 냉각성능을 Fig. 3에 나타내었다. 열전소자는 고온부와 저온부의 접점온도차가 작아질수록 흡열량은 증가하게 되어, 양단면 접점온도차가 0℃일 때 흡열량은 최대가 되었다. 이는 접점온도차가 작아지면 고온부에서 저온부로 전도열량이 감소하기 때문이다. 각 접점온도차에 대한 흡열량은 전압의 증가에 따라 증가하다가 전압 13 V 이상에서는 점차 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 Joule열이 전류의 제곱근에 비례하여 증가하므로 상대적으로 흡열량은 감소하기 때문이다.

Fig. 4에 나타낸 열전소자의 성능계수는 인가전력이 아주 낮은 영역에서는 인가전력의 증가에 따라 성능계수도 증가하지만 인가전력이 점차 증가함에 따라 성능

Table 2 Test conditions of the refrigeration system

Condition	Value
Ambient temp.(℃)	30
Refrigerator temp.(℃)	5
Freezer temp.(℃)	-15
Refrigerator evaporator temp.(℃)	0
Freezer evaporator temp.(℃)	-20

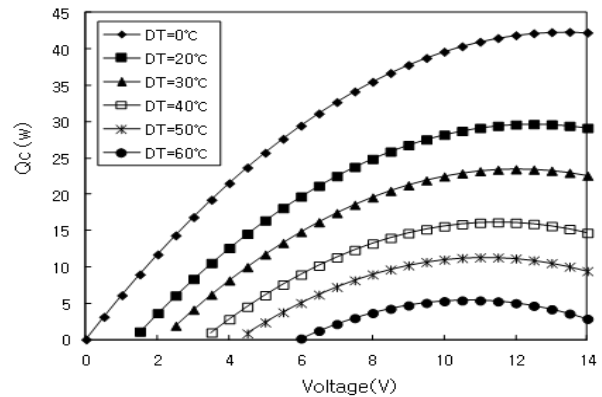


Fig. 3 Cooling capacity according to input voltage and temperature difference for thermoelectric module.

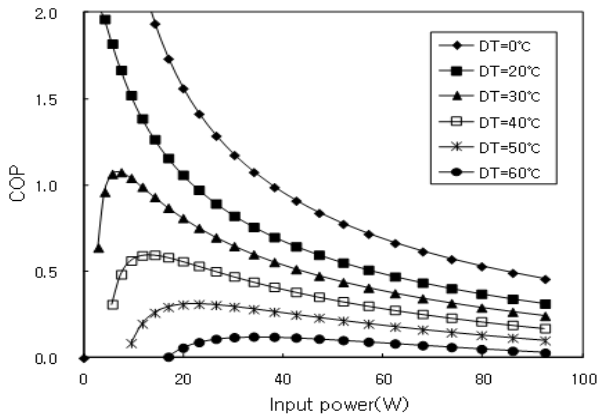


Fig. 4 COP according to input power and temperature difference for thermo-electric module.

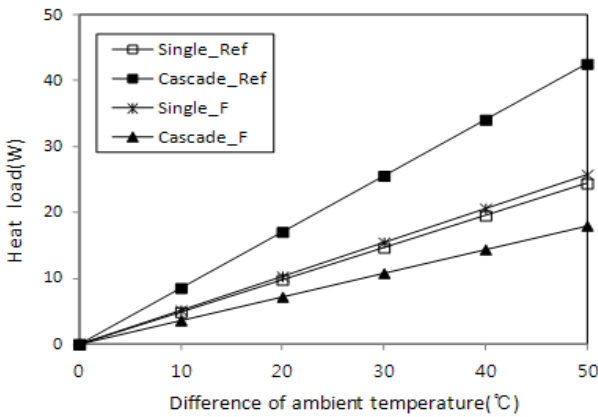


Fig. 5 Heat load of refrigeration systems according to the ambient temperature difference.

계수가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 식(5)에서 보면 인가전력은 전류의 증가에 따라 선형적으로 증가하지만 흡열량은 Fig. 3에서 보이는 것처럼 인가전력이 낮은 영역에서는 증가폭이 크다가 인가전력이 증가함에 따라 완만하게 증가한다. 이러한 경향은 인가전력이 증가함에 따라 Joule열은 전류의 제곱에 비례하여 증가하므로 상대적으로 흡열량 증가폭은 적어지기 때문이다. 또한 각 접점온도차에 대한 성능계수의 최대치는 접점온도차가 감소할수록 낮은 인가전력에서 나타났다. 이는 인가전력 증가 대비하여 흡열량은 낮은 인가전력에서 흡열량 증가폭이 크고 접점온도차가 낮을수록 고온부에서 저온부의 전도열량이 감소하여 흡열량이 증가하기 때문이다.

열전소자 냉동시스템에서 냉장실 및 냉동실의 외기온도 차이에 따른 열부하조건을 Table 2에 나타내었다. 냉장실 및 냉동실 내부에 열부하장치를 설치하여, 열을 가했을 때의 외기온도차이를 측정하였다. Fig. 5에

서 보면 외기온도 차이가 증가할수록 냉장고의 열부하는 비례하여 증가한다. 냉장실의 경우에는 싱글 시스템은 고내온도와 외기온도 차이에 비례하여 증가하나, 캐스케이드 시스템은 외기온도 차이에 따른 열부하와 냉동실 열전소자의 방열량이 부가되므로 싱글 시스템 대비하여 열부하가 높게 된다. 냉동실의 경우에 싱글 시스템은 외기온도 차이에 따라서 열부하가 결정되나, 캐스케이드 시스템은 냉장실 내부온도가 외기조건이 되므로 싱글 시스템 대비하여 열부하가 크게 감소된다. 싱글 시스템에서 열부하 측정결과, 냉장실은 외기온도차 25°C 조건에서 열부하 12.2 W이고, 냉동실은 외기온도차 45°C 조건에서 열부하 21.3 W로 나타났다. 캐스케이드 시스템에서는 냉장실 외기온도차 25°C 조건에서 열부하는 23.2 W이며, 냉동실은 외기온도차 20°C 조건이므로 7.2 W로 나타났다. 따라서 캐스케이드 시스템이 싱글 시스템에 비하여 외기온도차가 같은 조건에서 냉장고 열부하는 9.3% 감소하였다.

4.2 시스템별 성능특성 비교

싱글 및 캐스케이드 시스템의 냉장실과 냉동실 열전소자의 냉각부와 방열부의 접점 온도차를 Table 3에 나타내었다. 캐스케이드 시스템의 냉동실은 방열부가 냉장실 고내냉기와 열교환하게 되므로 싱글 시스템과 비교하여 접점온도차가 60°C에서 30°C로 크게 감소하게 된다.

Fig. 6에서 싱글 시스템과 캐스케이드 시스템의 흡열량을 비교하였다. 인가전력이 증가할수록 흡열량은 증가하다가 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 최적전력 이상 인가시 Joule열이 크게 증가하여 흡열량이 감소하기 때문이다.

흡열량은 접점온도 차이에 비례하여 나타나는데 싱글 및 캐스케이드 시스템의 냉장실의 접점 온도차가 40°C

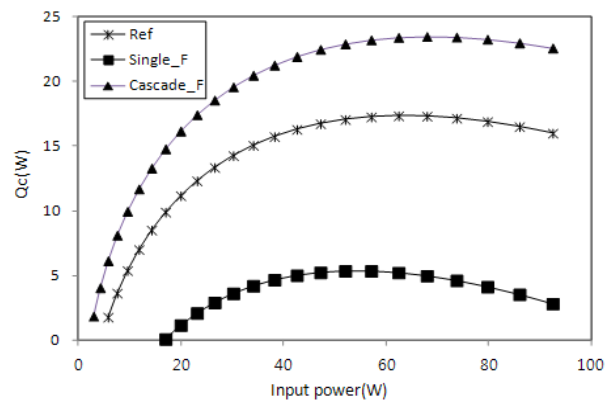


Fig. 6 Comparison of the cooling capacity between the single and cascade systems.

Table 3 Temperature difference between hot and cold side of the thermoelectric module for refrigeration systems

Condition	Value
Temp. difference of single_Ref(°C)	40
Temp. difference of single_F(°C)	60
Temp. difference of cascade_Ref(°C)	40
Temp. difference of cascade_F(°C)	30

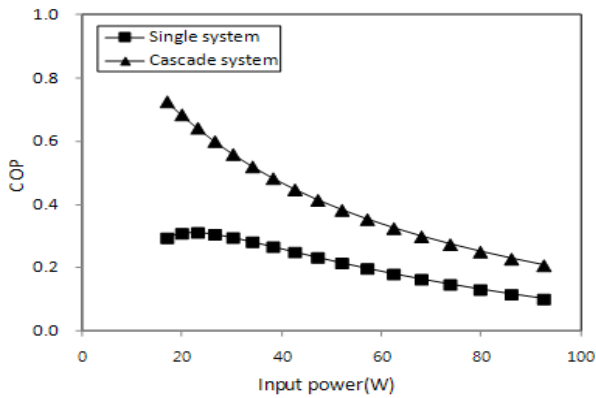


Fig. 7 Comparison of the COP between the single and cascade systems.

로 동일하므로 냉장실의 흡열량은 동일하게 나타났다. 냉동실의 경우에는 캐스케이드시스템의 점점온도 차이가 30°C로서 싱글 시스템과 비교하여 점점온도 차이가 낮기 때문에 열전소자의 고온부에서 저온부로 이동하는 전도열량이 감소하며 흡열량은 증가하게 된다. 인가전력에 따른 흡열량의 최대치는 냉장실은 17.3 W, 싱글 시스템 냉동실은 5.4 W, 캐스케이드 시스템 냉동실은 23.4 W로 나타났다. 캐스케이드 시스템의 냉동실 흡열량이 싱글 시스템과 비교하여 4.3배 높게 나타났다.

Fig. 7은 싱글 시스템과 캐스케이드 시스템의 인가전력에 대한 성능계수를 비교하고 있다. 인가전력이 증가할수록 성능계수는 감소하는 경향을 보이는데, 이는 인가전력 증가에 따른 흡열량과 비교하여 Joule열 증가가 점차 커지기 때문이다. 흡열량 최대치인 인가전력 65 W 조건에서 싱글 시스템의 성능계수는 0.18, 캐스케이드 시스템의 성능계수는 0.31을 나타내어 캐스케이드 시스템이 싱글 시스템 대비하여 1.7배 우수한 성능을 나타냈다.

4.3 캐스케이드 시스템의 입력 최적화

캐스케이드 시스템에서 냉장실에 대한 냉동실 열전소자의 입력비율에 따른 고내온도를 Fig. 8에 나타내

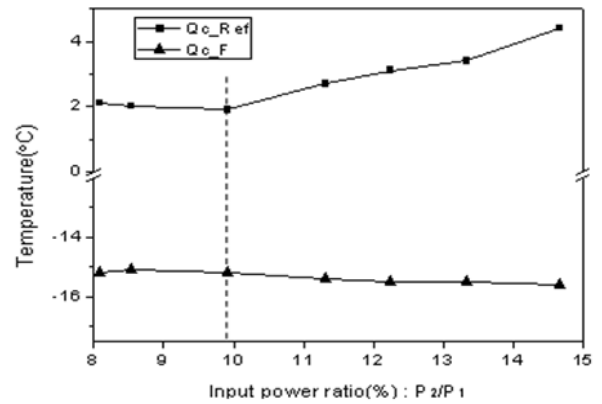


Fig. 8 Cooling temperature of the cascade system according to freezer and refrigerator input power rate.

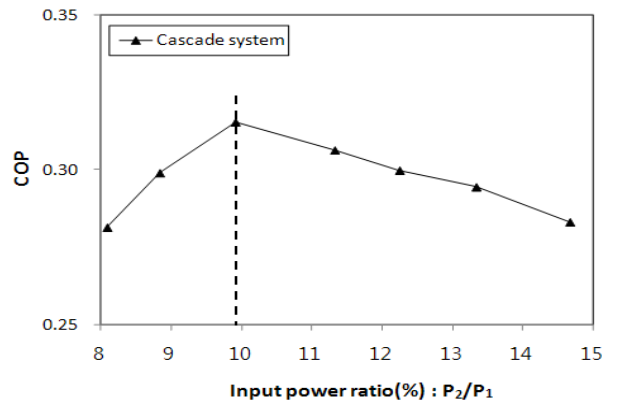


Fig. 9 COP of the cascade system according to freezer and refrigerator input power rate.

었다. 열전소자의 입력비율이 증가함에 따라 냉동실 열전소자의 인가전력이 증가하게 되므로 냉동실의 고내온도는 낮아지나 냉장실은 온도가 상승하는 경향을 나타냈다. 이는 인가전력에 비례하여 증가한 냉동실 열전소자의 방열량을 냉장실에서 냉각하므로 냉장실의 열부하가 같이 상승하기 때문이다. 냉장고의 냉장실과 냉동실의 냉각온도를 동시에 만족하는 운전조건은 열전소자의 입력비율이 9.9% 이하 조건이며 냉장실은 1.9°C, 냉동실은 -15.2°C로 나타났다.

열전소자의 입력비율에 따른 성능계수 변화를 Fig. 9에 나타내었다. 입력비율이 증가함에 따라 성능계수도 증가하다가 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 냉동실 열전소자의 인가전력이 증가함에 따라 냉동실의 흡열량이 증가하게 되어 냉장고의 성능계수가 증가하다가, 입력비율 10% 이상 조건에서는 냉동실의 열전소자의 Joule열이 제공근에 비례하여 증가하지만 상대적으로 냉동실의 흡열량 증가폭은 감소하게 된다. 냉동

실의 증가한 방열량에 의해 냉장실의 열부하가 증가하여 냉장고의 성능계수는 감소하기 때문이다. 열전소자의 입력비율이 9.9% 조건에서 성능계수는 0.32로 최대치로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 열전소자를 적용한 싱글 및 캐스케이드 냉동 시스템의 성능에 대한 최적화를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 열전소자의 흡열량은 접점온도차가 작아질수록 증가하며, 접점온도차가 0°C 조건에서 최대치가 된다. 또한 각 접점온도차에 대한 흡열량은 인가전압이 증가함에 따라 증가하다가 인가전압 13 V 이상에서는 감소하는 경향을 나타냈다.
- (2) 열전소자의 접점온도차가 작아질수록 성능계수는 증가하고, 각 접점온도차에 대한 성능계수의 최대치는 낮은 인가전력에서 나타났다. 이는 인가전력의 증가는 일정하지만 흡열량은 상대적으로 낮은 인가전력에서 흡열량 증가폭이 크기 때문이다.
- (3) 캐스케이드 시스템이 싱글 시스템에 비하여 외기온도차가 같은 조건에서 냉장고의 열부하가 9.3% 감소하였다.
- (4) 캐스케이드 시스템은 싱글 시스템과 비교하여 냉동실의 접점온도차가 60°C에서 30°C로 크게 감소하여 흡열량 및 성능계수가 싱글 시스템보다 1.7배 우수한 성능을 나타냈다.
- (5) 캐스케이드 시스템의 입력비율이 9.9%인 조건에

서, 성능계수는 0.32로 최대치가 되며, 냉장실은 1.9°C, 냉동실은 -15.2°C로 나타났다.

Reference

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. 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. Yoo, S. Y., Hong, C. P., and Shim, W. S., 2004, A Study on the performance of thermoelectric module and thermoelectric cooling system, Korean J. of Air-Conditioning and Refrigeration Eng., Vol. 16, No. 1, pp. 62-69.
4. Chen, J., Zhou, Y., Wang, H., and Wang, J. T., 2002, Comparison of the optimal performance of single-and two-stage thermoelectric refrigeration systems, Applied Energy, Vol. 73, No. 3/4, pp. 285-298.
5. Chen, L., Li, J., Sun, F., and Wu, C., 2008, Performance optimization for a two-stage thermoelectric heat-pump with internal and external irreversibilities, Applied Energy, Vol. 85, pp. 641-649.
6. Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., 2011, Fundamentals of heat and mass transfer, 4th., John Wiley and Sons, Inc.