

열전소자 및 열전냉각장치의 성능에 관한 연구

유 성 연[†], 홍 정 표^{*}, 심 우 섭^{*}

충남대학교 기계설계공학과, *충남대학교 대학원

A Study on the Performance of Thermoelectric Module and Thermoelectric Cooling System

Seong-Yeon Yoo[†], Chung-Pyo Hong^{*}, Woo-Sup Shim^{*}

Department of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

^{*}Graduate School, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received July 23, 2003; revision received November 27, 2003)

ABSTRACT: Thermoelectric module is a device that can produce cooling in a direct manner using the electrical energy. The purpose of this study is to investigate the performance of thermoelectric module and cooling system equipped with the thermoelectric module. The performance of a thermoelectric module is estimated using two methods; theoretical analysis based on one-dimensional energy equations and experimental tests using heat source, heat sink and brass conduction extenders. For the thermoelectric cooling system, the temperatures in the chamber are recorded and then compared with those of lumped system analysis. The results show that the cooling capacity and COP of the thermoelectric module increases as the temperature difference between hot and cold surface decreases, and there is particular current at which cooling capacity reaches its maximum value. The experimental results for the thermoelectric cooling system are similar to those of lumped system analysis.

Key words: Thermoelectric module(열전소자), Thermoelectric cooling system(열전냉각장치), Seebeck effect(Seebeck 효과), Coefficient of performance(성적계수)

기 호 설 명

C : 열전소자의 컨덕턴스 [W/°C]

COP : 성적계수

k : 열전도계수 [W/m·°C]

P_{in} : 열전소자의 인가전력 [W]

Q_c : 열전소자의 흡열량 [W]

T_c : 저온부의 온도 [°C]

T_h : 고온부의 온도 [°C]

U : 총합 열전달계수 [W/m²·°C]

그리스 문자

α : Seebeck 계수 [V/°C]

ΔT : 접점의 온도차 [°C]

ρ : 공기의 밀도 [kg/m³]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-821-6646; fax: +82-42-821-7366

E-mail address: syyooh@cnu.ac.kr

1. 서 론

기존의 냉각장치는 일반적으로 프레온 가스 또

는 암모니아와 같은 냉매를 압축기에 의해 강제 순환시켜 냉각하는 증기압축식 냉각방식을 사용하였다. 그러나 이와 같은 냉매들은 지구의 오존층을 파괴시키는 대표적인 물질들로서, 제품의 수명이 다하여 폐기처분시 심각한 환경오염을 야기시킬 수 있으므로 국제적으로 그 사용을 감축 또는 전면 폐기토록 규정하고 있다. 또한 소형 냉각장치의 경우 소정의 냉매와 냉각 시스템 및 압축기가 요구되는 종래의 냉각장치는 그 크기가 상대적으로 클 뿐만 아니라 에너지소비 측면에서도 비효율적이며, 불필요한 소음진동까지 발생한다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해, 전류의 극성에 따라 열을 흡수·방출하는 열전소자를 이용한 전자냉각방식은 종래의 냉각방식과는 전혀 다른 냉각방식으로 냉매순환을 위한 기계적인 구동부분이 필요 없고, 냉매의 폐기처분시 생기는 환경오염을 유발하지 않고, 국소적으로 목적하는 냉각을 수행하는 특수냉각방식이다. 이러한 냉각방식은 냉각소자의 가격이 비싸고, 냉각성능이 낮은 단점이 있다. 그러나 정밀온도제어가 가능하고, 저소음, 소형화 등의 장점으로 우주항공, 컴퓨터 CPU 및 군사용 등의 특별한 목적 이외에는 아직도 기술개발이 진행중인 분야이다.^(1,2)

최근에 Stockholm⁽³⁾은 열전소자의 응용제품을 설계할 때 열전소자의 이점보다는 경제적인 측면이 고려되어야 한다고 강조하였고, Gorodetskiy⁽⁴⁾는 열전모듈의 재료와 형상, 구조 등이 열전소자의 성능에 미치는 영향을 연구하였다. Huang et al.⁽⁵⁾은 열전냉각 시스템의 최적설계 파라미터로 Heat sink의 열저항을 사용하여 Heat sink를 냉각시켜 줌으로써 성능을 개선하였다. 또한, Attey⁽⁶⁾는 효과적인 Heat sink의 방열을 위해 열전달매체로서 공기 대신 액체를 사용하여 성능을 향상시켰고, Yamanashi⁽⁷⁾는 열전냉각시스템에서 Heat sink의 열저항이 성능지수와 냉각성능에 미치는 영향에 대해 연구하였고, Kang et al.⁽⁸⁾은 공기와 냉각수를 동시에 사용하는 증발냉각방법을 이용하는 실험을 수행하여 열전모듈이 자동차 에어컨 시스템의 성능에 미치는 영향을 규명하였다.

본 연구에서는 단일 열전소자에 적용된 이론식을 바탕으로 성능을 해석하고, 성능시험장치를 설치·제작하여 성능시험을 수행한 후 해석결과를 비교·검토하였다. 그리고, 열전소자를 이용한 열전냉각장치를 구성하여 시간에 따른 열전냉각 챔

버(chamber) 내부의 온도변화를 집중계(lumped system)를 사용하여 해석하고, 제작된 열전냉각장치의 성능시험을 수행하여 해석과 실험결과를 비교·검토하였다. 본 연구의 목적은 열전소자와 열전냉각시스템의 설계·제작에 필요한 성능자료를 확보하고, 이론해석의 효용성을 검증하는 것이다.

2. 이론해석

2.1 열전소자

열전소자에 대한 기본특성은 소자 내에서의 온도분포를 1차원으로 취급하여 고온부(hot side)와 저온부(cold side)의 온도 및 소자의 전류 혹은 전압에 대한 식으로 표현될 수 있으며,⁽⁹⁾ 열전소자의 흡열량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_c = \alpha T_c I - \frac{1}{2} I^2 R - C \Delta T \quad (1)$$

식(1)에서 우변의 첫번째 항은 Peltier 효과에 의한 흡열량, 두번째 항은 Joule 효과에 의한 발열량, 마지막 항은 고온부에서 저온부로의 전도에 의한 열전달량을 나타낸다. 한편, 열전소자의 인가전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{in} = (\alpha \Delta T + IR) I = VI \quad (2)$$

여기서 열전소자 양단에 걸리는 전압(V)은 Seebeck 효과에 의한 전압강하량과 전기저항에 의한 전압강하량의 합이 된다.

열전소자의 성적계수는 인가전력에 대한 흡열량의 비로 아래와 같이 표현된다.

$$COP = \frac{Q_c}{P_{in}} \quad (3)$$

2.2 열전냉각장치

열전소자에 전류를 인가하면 챔버 내부가 냉각되고, 챔버 내·외부의 온도차가 생겨 챔버 벽면을 통해 열이 침투한다. 이때 냉각열과 침투열의 차이가 챔버 내부의 에너지 변화량이 되므로 집

증열용량계로 가정하여 다음과 같은 에너지보존 방정식을 세울 수 있다.⁽¹⁰⁾

$$- [UA_c(T - T_\infty) - Q_c] dt = \rho V_c C_p dT \quad (4)$$

여기서, V_c 는 챔버 내부의 체적이고, A_c 는 표면적, ρ 는 공기의 밀도, C_p 는 비열, U 는 총합 열전달계수, T 는 챔버 내부온도, T_∞ 는 외기온도, Q_c 는 열전소자의 냉각열량이다. 식(4)를 초기온도 T_i 부터 적분하면 다음과 같은 챔버 내부의 온도 변화에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$T(t) = (T_i - T_\infty)e^{-bt} + T_\infty \quad (5)$$

여기서,

$$b = \frac{U \cdot A_c}{\rho \cdot V_c \cdot C_p - Q_c}$$

이며, 총합 열전달계수 U 는 챔버 내부의 온도가 정상상태로 유지될 때의 실험값으로부터 계산하였다. 따라서, 식(5)를 사용하여 시간 t 에서 챔버 내부의 온도 $T(t)$, 열전소자의 흡열량에 따른 평형 온도, 평형온도에 도달하는 데 걸리는 시간 등을 계산할 수 있다.

본 연구에 사용한 열전냉각장치의 Biot 수는 약 5이기 때문에 집중열용량계로 가정하는 것이 바람직하진 않지만 온도가 변화하는 경향을 파악하는 데는 무리가 없을 것으로 판단된다.

3. 성능시험장치 및 방법

3.1 성능시험장치

3.1.1 열전소자

본 연구에 사용한 열전소자는 크기가 $40 \times 40 \times 3.8$ mm이며, $1.4 \times 1.4 \times 1.6$ mm인 p-n 소자 127쌍이 직렬로 연결되어 있다. p-n 소자쌍의 Seebeck 계수, 비저항, 열전도계수는 각각 3.578×10^{-4} V/°C, 1.892×10^{-5} Ω·m, 2.657 W/m·°C이다.

열전소자의 성능시험을 위해 설계·제작된 실험장치는 열전소자, 실리콘 고무히터(Silicon rubber heater), 황동전도블럭(Brass conduction extender), 직류 전원공급장치, 디지털 파워미터, 항온조, 측정장치, 자료획득장치(Data acquisition system) 등으로 구성되어 있으며, Fig. 1은 성능시험장치의 개략도를 나타내고 있다. 열전소자와 황동전도블럭 사이, 황동전도블럭과 황동냉각수관 사이의 접촉저항을 줄이기 위해서 접촉하고 있는 면에 Thermal grease를 삽입하였고, 측면의 외부로 열손실을 방지하고자 두께 15 mm의 Bakelite 단열재를 사용하였다. 열전소자의 흡열량과 발열량의 측정을 위해 고온부와 저온부에 황동전도블럭을 부착시키고, 황동전도블럭에서 일정한 온도 분포를 얻기 위해 저온부 황동전도블럭에는 부착식 직류전원 실리콘 고무히터를 사용하여 저온부의 온도를 제어하도록 하였다. 고온부 황동전도블럭에는 항온조에서 온도제어를 통한 일정한 온도의 냉각수가 흐르는 황동 냉각수관을 사용하여 고온부의 온도를 제어하도록 하였다. 온도측정에 T-type 열전대가 사용되었으며, 열전소자 고온부

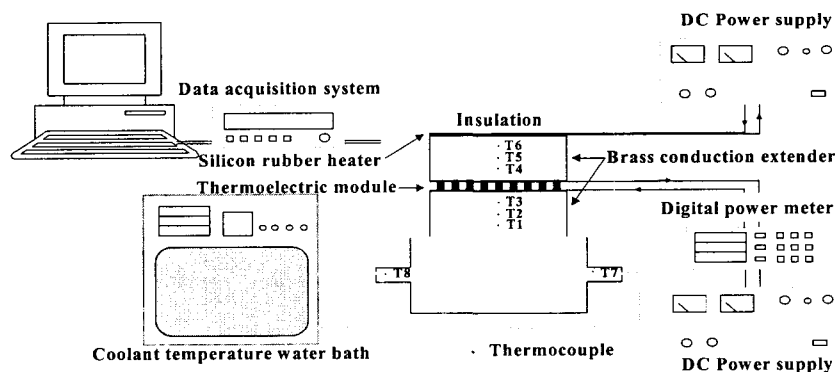


Fig. 1 Schematic of the performance test equipment for a thermoelectric module.

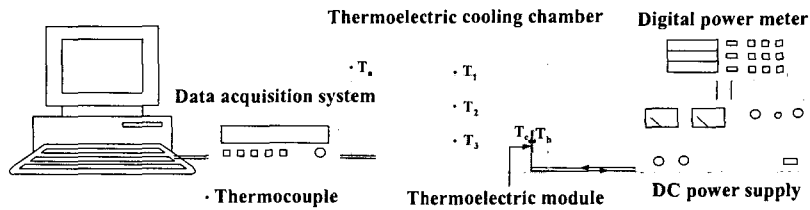


Fig. 2 Schematic of the performance test equipment for thermoelectric cooling system.

와 저온부의 황동전도블럭 상·중·하 3부분과 황동 냉각수관 입구와 출구에서 온도를 측정할 수 있도록 하였다.

온도, 전류, 저항, 전압의 측정 불확도는 각각 1.43%, 5.6%, 0.65%, 0.19%이고, 이들로부터 계산한 냉각열량의 불확도는 12.6%이다.

3.1.2 열전냉각장치

열전냉각장치의 성능을 시험하기 위해 사용한 실험장치는 열전소자, 챔버, 방열블럭, 팬, 직류 전원공급장치, 디지털 파워미터, 측정장치, 자료 획득장치 등으로 구성되어 있으며, Fig.2는 실험장치의 개략도이다. 챔버 내부의 온도가 상승하는 것을 방지하기 위해 열전소자의 고온부에 방열블럭을 부착하고, 그 위에 팬을 설치하여 강제대류를 시켰다. 열전소자와 방열블럭의 접촉저항으로 인한 열손실을 줄이기 위하여 소자의 표면과 알루미늄 사이에 Thermal grease의 열전달 재료를 삽입하였다. 온도측정에는 T-type 열전대가 사용되었으며 챔버 내부 중앙의 상·중·하 3부분과 열전소자의 저온접점, 고온접점, 그리고 외기온도를 측정할 수 있도록 하였다.

3.2 성능시험방법

3.2.1 열전소자

열전소자의 성능시험에서는 실리콘 고무히터의 입력전원을 5W로 고정하고, 냉각수의 온도를 0℃, 10℃, 20℃로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 각 조건에 따라 열전소자에 입력되는 전류를 2A~7A까지 변화시켜 가면서 고온부와 저온부 황동전도블럭의 중앙지점의 상·중·하 3부분에 구멍을 뚫어 T-type의 열전대를 이용하여 온도를 측정하였다. 황동전도블럭의 내부온도를 정상상태로 유지하기 위해 인가전류 변화 후 1시간 작동 후 2분간 1초 단위로 120회 측정한 온도를 평균

온도로 하였다. 열전소자의 흡열량과 방열량은 황동전도블럭의 상·중·하 3부분의 간격과 온도차와 황동전도블럭의 열전도계수를 사용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$Q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \tag{6}$$

열전소자에 입력되는 전원은 디지털 파워미터로 측정하여 입력전원과 흡열량의 비로 성적계수를 계산하였다.

3.2.2 열전냉각장치

열전냉각장치의 성능시험은 직류전원 공급장치를 이용하여 열전소자의 인가전류를 3A~6A로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 챔버 내부 상·중·하 3부분 온도와 외기의 온도, 그리고 흡열량(Qc)을 계산하기 위한 열전소자의 저온부와 고온부의 온도는 T-type 열전대를 사용하여 측정하였고, 열전소자에 입력되는 전원은 디지털 파워미터로 측정하였다. 집중열용량법을 적용하기 위해 챔버 내부 중앙의 상·중·하 3부분의 온도를 평균 온도로 하여 일정한 온도로 도달하는 데 걸리는 시간을 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 열전소자

열전소자의 냉각물성과 단위특성으로부터 계산된 p-n 소자쌍의 수, Seebeck 계수, 비저항, 열전도도를 식(1)과 식(3)에 대입하여 계산된 흡열량과 성적계수를 Fig.3과 Fig.4에 각각 나타내었다. Fig.3에서 보는 바와 같이 열전소자의 흡열량은 인가전류가 증가함에 따라 증가하다가 6A 이상 인가하면 소자에서 발생하는 Joule 열이 전류의 제

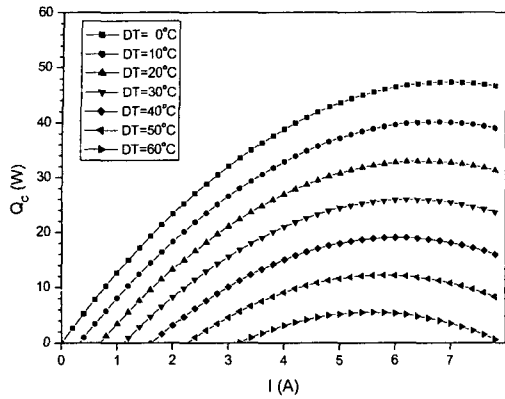


Fig. 3 Cooling capacity at various input currents and temperature differences for thermoelectric module.

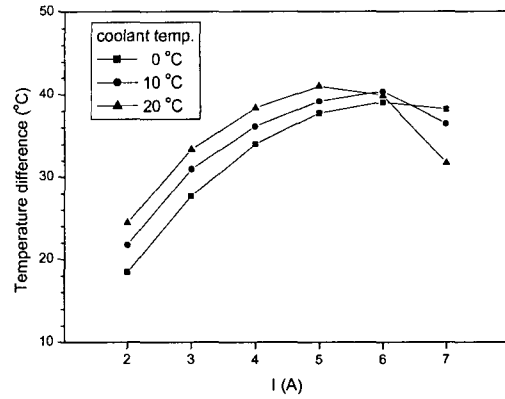


Fig. 5 Temperature difference across hot and cold sides of thermoelectric module at various coolant temperatures and input currents.

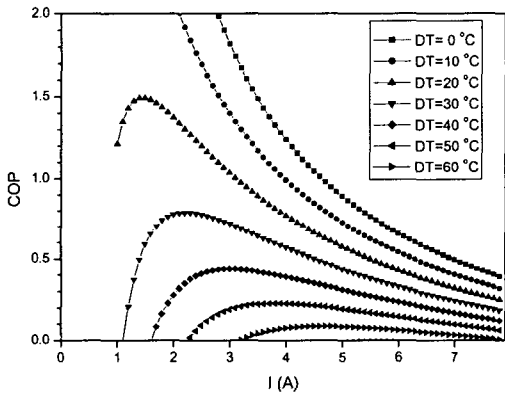


Fig. 4 Coefficient of performance at various input currents and temperature differences for thermoelectric module.

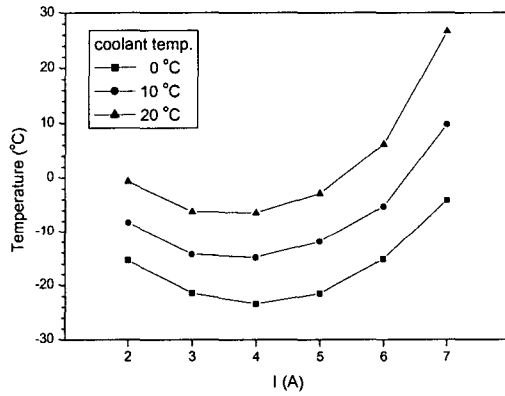


Fig. 6 Cold side temperature of thermoelectric module at various coolant temperatures and input currents.

곱에 비례하여 증가하므로 상대적으로 흡열량은 감소한다. 또한, 저온부와 고온부의 접점온도차가 작아질수록 흡열량이 증가함을 알 수 있으며, 온도차 0°C에서 최대의 흡열량을 얻을 수 있다. 이것은 접점의 온도차가 작아질수록 열전소자의 전도에 의한 열전달량이 작아지기 때문이다. Fig. 4에 나타낸 열전소자의 성적계수는 인가전류가 증가할수록 증가하다가 일정전류 이상에서는 감소하는 경향을 보이고 있으며, 최대 성적계수는 저온부와 고온부의 온도차가 작을수록 낮은 전류 쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 그 이유는 식 (3)에서 분모인 소비전력은 전류의 증가에 따라

선형적으로 증가함에 비해서 분자인 흡열량은 Fig. 3에 보는 바와 같이 처음에는 증가폭이 크다가 점차 완만하게 증가하기 때문이다. 일정전류에 대해서 저온부와 고온부의 접점 온도차가 작아질수록 성적계수는 증가한다.

Fig. 5는 열전소자의 인가전류와 냉각수 온도에 따른 접점의 온도차를 보여주고 있다. 냉각수의 온도가 낮아질수록 접점의 온도차도 낮아졌다. 또한, 인가전류가 증가함에 따라 접점 온도차가 증가하다가 인가전류가 6A 이상 증가하면 감소하는 경향을 보이고 있다. Fig. 6은 열전소자의 인가전류와 냉각수 온도에 따른 최저 냉각온도를

나타낸 것이다. 일정 사용전류에 대하여 냉각수 온도가 10°C씩 증가할 때 약 7°C 정도 일정하게 올라갔다. 또한, 인가전류가 증가할수록 최저 냉각온도가 낮아지지만, 4A 이후에는 증가하는 경향을 보이고 있다. 이것은 인가전류가 증가함에 따라 고온부의 방열 부족현상으로 고온부에서 저온부로 역열전달이 일어나 점점의 온도차는 감소하고 이에 따라 최저 냉각온도는 증가하였다.

열전소자의 성능시험에서 측정된 저온접점온도 (T_c)과 고온접점온도 (T_h), 저온부와 고온부의 접점온도차 (ΔT), 인가전류 (I)와 열전소자의 특성치 (α , R , K)를 식(1), (2), (3)에 대입하여 계산한 성능해석결과와 황동전도블럭과 디지털 파워미터로 측정된 흡열량, 성적계수의 성능시험결과

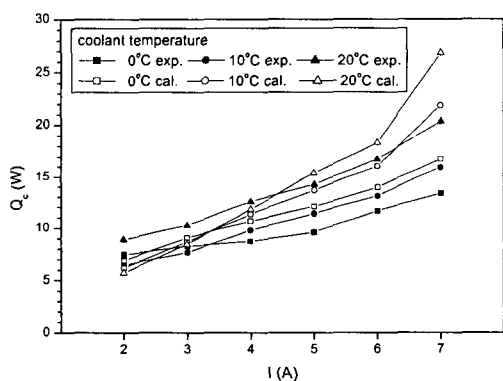


Fig. 7 Comparison of cooling capacity for thermoelectric module at various coolant temperatures and input currents.

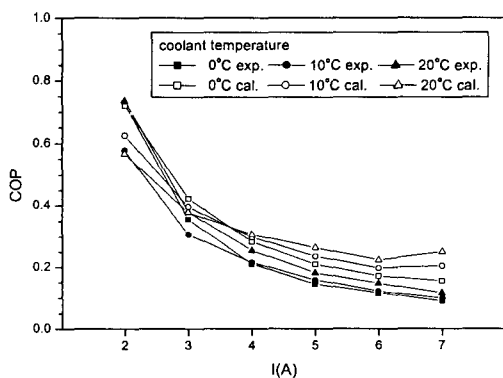


Fig. 8 Comparison of COP for thermoelectric module at various coolant temperatures and input currents.

를 비교하여 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7은 인가전류와 냉각수 온도에 따른 흡열량을 나타낸 것으로, 인가전류가 증가함에 따라 흡열량도 증가하고 일정 전류에서 냉각수 온도가 낮을수록 흡열량은 높게 나타났다. 이것은 냉각수 온도가 낮으면 열전소자의 고온부에 부착되어 있는 냉각수관에서 효과적인 방열이 일어나기 때문이다. Fig. 8은 인가전류와 냉각수 온도에 따른 성적계수를 나타낸 것으로 해석결과와 실험결과의 경향은 일치하고 있다. 인가전류가 증가할수록 흡열량 증가에 비해 상대적으로 열전소자에 인가되는 전력이 크기 때문에 성적계수는 낮아지고 있다.

또한 냉각수 온도가 낮을수록 성적계수가 상승함을 알 수 있다. Fig. 7과 Fig. 8에서 해석값이 실험값보다 큰 이유는 성능해석시에 열전소자 성능시험장치의 황동전도블럭과 열전소자 사이의 접촉열저항과 측면단열재에서의 열손실을 고려하지 않았기 때문이다. Fig. 7과 Fig. 8에서 인가전류가 증가할수록 흡열량은 증가하지만 성적계수는 감소하였다. 따라서 열전소자를 이용한 열전냉각장치를 설계할 때에는 냉각열량과 경제적인 측면은 동시에 고려하여 작동조건을 결정하여야 한다.

4.2 열전냉각장치

Fig. 9는 열전냉각장치에 사용된 열전소자의 인가전류에 따른 저온접점의 온도와 흡열량을 보여주고 있다. 흡열량은 열전소자에 인가된 전류가 증가할수록 증가하지만 최저 냉각온도는 5A일 때 나타났다. 인가전류가 5A 이상 증가하면 고온

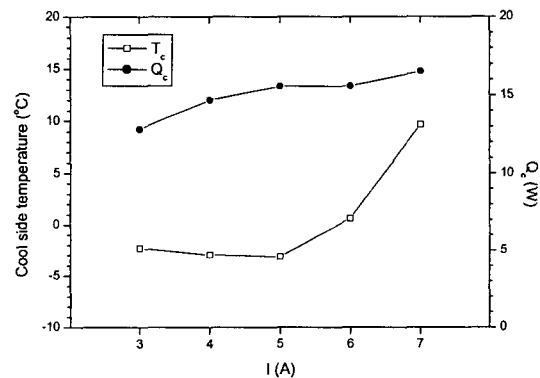


Fig. 9 Cold side temperature and cooling capacity at various input currents for thermoelectric cooling system.

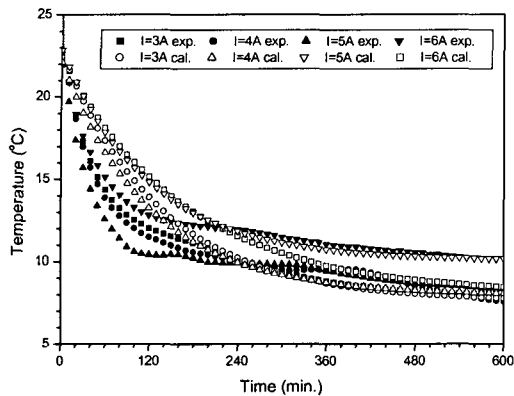


Fig. 10 Variation of inside temperature for the chamber of thermoelectric cooling system.

부의 방열팬이 방열블럭을 충분히 냉각하지 못하므로 저온부의 온도가 상승한다. 최저 냉각온도와 흡열량이 인가전류에 따라 변화하는 경향은 Fig. 6과 Fig. 7에 보인 단일소자의 경향과 비슷하다.

Fig. 10은 열전냉각장치의 열전소자에 전류를 3~6A로 인가하였을 때 챔버 내부의 온도변화에 대해 해석과 실험결과를 나타낸 것이다. 해석결과는 챔버온도가 지수함수 형태로 감소하여 일정 온도에 도달하지만 실험결과는 처음 120분 정도까지는 냉각속도가 빠르고 그 이후는 온도변화가 완만하게 나타나고 있다. 해석과 실험결과 다소 차이를 보이는 것은 실제 총합 열전달계수는 챔버 내부의 상태에 따라 달라지지만 본 해석에서는 챔버 내부의 온도가 정상상태로 유지될 때의 총합 열전달계수를 계산하여 상수로 취급하였기 때문이다. 챔버 내부의 온도는 열전소자의 인가전류가 5A일 때 냉각속도가 빠르고 정상상태에 가장 먼저 접근하였고, 6A 이상에서는 고온부의 방열 부족현상으로 흡열량 증가와 관계없이 냉각속도가 5A보다 느리게 나타났다.

5. 결 론

열전소자 및 열전냉각장치의 성능을 해석하고, 열전소자 성능시험장치와 열전냉각장치를 설계·제작한 후 성능시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 열전소자에 인가전류가 증가함에 따라 흡열량과 성적계수는 증가하다가 감소하고, 최대 흡

열량이 얻어지는 전류는 저온부와 고온부의 온도차가 작아질수록 커지지만 최대 성적계수가 얻어지는 전류는 온도차가 작아질수록 작아진다.

(2) 저온부와 고온부의 온도차가 감소할수록 흡열량과 성적계수가 증가하며, 온도차가 0°C에서 흡열량과 성적계수 모두 최대가 된다.

(3) 고온부 냉각온도가 일정할 때 열전소자의 인가전류가 증가함에 따라 저온부와 고온부의 온도차는 증가하다가 감소하여, 저온부 최저 온도는 반대로 감소하다가 증가한다.

(4) 열전냉각장치 성능해석 및 실험에서 열전소자의 인가전류 5A에서 최저 냉각온도를 얻었고, 냉각속도도 가장 빠르게 나타났다.

(5) 열전소자와 열전냉각장치의 성능해석과 성능시험 결과는 변화하는 경향은 비교적 잘 일치하고 있으나, 열손실 등의 영향으로 값은 약간의 차이를 보이고 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 전문대학교 공조기술연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

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. Stockholm, J. G., 1997, Current state of Peltier cooling, Proceedings of the 16th Int. Conference on Thermoelectrics, pp. 37-46.
4. Gorodetskiy, S. M., 1999, Determination of TE module parameters, Proceedings of the 18th Int. Conference on Thermoelectrics, pp. 519-524.
5. Huang, B. J., Chin, C. J. and Duang, C. L., 2000, A design method of thermoelectric cooler, Int. J. Refrigeration, Vol. 23, pp. 208-218.

6. Attey, G. S., 1998, Enhanced thermoelectric refrigeration system COP through low thermal impedance liquid heat transfer system, Proceedings of the 17th Int. Conference on Thermoelectrics, pp.519-524.
7. Yamanashi, M., 1996, A new approach to optimum design in thermoelectric cooling systems, J. Appl. Phys., Vol. 80, No. 9, pp. 5494-5512.
8. Kang, B.H., Chang, H.J., Kim, S.Y. and Kim, S., 2002, Cooling characteristics at hot side of the thermoelectric module for an air conditioner, Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 482-488.
9. Rows, D.M., 1995, CRC Handbook of thermoelectrics, CRC Press, Inc.
10. Incropera, F. P. and DeWitt, D. P., 1996, Fundamentals of heat and mass transfer, 4th ed., John Wiley & Son, New York.