

# 마이크로 열전냉각기의 열성능에 대한 열전소자 두께의 영향

이 공 훈<sup>†</sup>, 김 옥 중  
한국기계연구원 에너지연구센터

## Effect of the Thermoelectric Element Thickness on the Thermal Performance of the Thermoelectric Micro-Cooler

Kong Hoon Lee<sup>†</sup>, Ook Joong Kim

Energy Systems Research Center, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 305-343, Korea

(Received December 21, 2005; revision received January 9, 2006)

**ABSTRACT:** The three-dimensional numerical analysis has been carried out to figure out the effect of the thermoelectric element thickness on the thermal performance of the thermoelectric micro-cooler. The small-size and column-type thermoelectric cooler is considered. It is known that tellurium compounds currently have the highest cooling performance around the room temperature. Thus, in the present study, Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> and Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> are selected as the n- and p-type thermoelectric materials, respectively. The thermoelectric leg considered is less than 20 μm thick. The thickness of the leg may affect the thermal and electrical transport through the interfaces between the leg and metal conductors. The effect of the thermoelectric element thickness on the thermal performance of the cooler has been investigated with parameters such as the temperature difference, the current, and the cooling power.

**Key words:** Thermoelectric micro-cooler(마이크로 열전냉각기), Peltier effect(펠티어 효과), COP (성적계수)

### 기 호 설 명

$A_{te}$  : 열전소자의 단면적 [m<sup>2</sup>]  
COP : 성적계수(coefficient of performance)  
 $J_e$  : 전류 [A]  
 $j_e$  : 전류밀도 [A/m<sup>2</sup>]  
 $k$  : 열전도율 [W/mK]  
 $L_{te}$  : 열전소자의 두께 [m]  
 $P$  : 전자-양자 상호작용의 강도 [W/m<sup>3</sup>K]  
 $P_e$  : 전력 [W]

$q$  : 열유속 [W/m<sup>2</sup>]  
 $Q_c$  : 냉각부의 냉각열량 [W]  
 $Q_h$  : 방열부의 방열량 [W]  
 $R_c$  : 열전도 저항 [K/W]  
 $R_e$  : 전기적 저항 [Ω]  
 $T$  : 온도 [°C 또는 K]  
 $V$  : 전압 [V]

### 그리스 문자

$\alpha_b$  : 경계면 제벡계수 [V/K]  
 $\alpha_{bulk}$  : 벌크 제벡계수 [V/K]  
 $\rho_e$  : 전기 비저항 [Ωm]

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-42-868-7291; fax: +82-42-868-7335  
E-mail address: konghoon@kimm.re.kr

1. 서 론

열전기들은 펠티어(Peltier) 효과와 제벡(Seebeck) 효과를 이용하여 냉각과 발전용으로 사용된다.<sup>(1)</sup> 마이크로 열전냉각기는 종래의 벌크형 열전냉각기에 비하여 냉각시 발열밀도가 높아서 마이크로 기기의 냉각을 위한 유망한 후보이다.<sup>(2,3)</sup> 마이크로 열전냉각기는 쉽게 마이크로 기기에 결합될 수 있고 기계적인 구동부가 없으므로 효율적인 냉각에 적합한 장치라 할 수 있다.

마이크로 열전냉각기는 종래의 방법으로는 제작하기 어려운 구조를 가지고 있어서 MEMS 기술을 이용하여 제작하는 시도가 이루어져 왔다. Yao et al.<sup>(4,5)</sup>은 점 냉각(spot cooling)을 위한 평면형 마이크로 열전냉각기의 해석적 모델을 개발하고 Si/Ge 초격자(superlattice)와 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>로 열전냉각기를 제작하였다. Snyder et al.<sup>(6)</sup>은 PR 물질을 가지고 전기화학적 증착(electrochemical deposition) 방법으로 마이크로 열전장치를 제작하였다고 보고하였다. Böttner et al.<sup>(7)</sup>은 4인치 웨이퍼를 사용하는 새로운 제작방법을 사용하여 마이크로 냉각기를 제작하였는데, 3개의 p-n 쌍과 약 800 mA의 전류로 11 K의 온도차로 냉각이 가능하다고 발표하였다. Da Silva and Kaviany<sup>(8)</sup>는 가스센서의 냉각을 위한 기둥형(column type) 마이크로 열전냉각기에 대한 이론적 해석을 수행하고, 그 해석에 근거하여 마이크로 냉각기를 제작

하고 성능을 측정하였다.<sup>(9)</sup>

국내에서도 열전냉각기 최적설계를 위한 열전달 해석,<sup>(10)</sup> 열전냉각기의 성능에 관한 연구<sup>(11)</sup>들이 이루어져 왔으나 마이크로 열전냉각기에 대한 연구는 찾아보기 어렵다.

마이크로 열전냉각기의 성능을 파악하기 위하여 본 연구에서는 3차원 수치해석을 수행하였다. 열전재료로는 현재까지 Tellurium 화합물이 상온 근처에서 가장 높은 냉각성능을 가지는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>와 Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>를 각각 n-형과 p-형 열전재료로 선정하였다. 고려된 열전소자는 5~20 μm의 두께이고, 열전소자의 두께는 에너지전달에 영향을 미친다. 본 연구에서는 온도차, 전류, 열전소자의 두께들이 마이크로 열전냉각기의 성능에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 해석모델

해석모델은 Fig.1에 보인 바와 같이 두 개의 실리콘 기판과 두 기판 사이에 위치한 6개의 열전소자로 구성된다. 해석은 기판과 연결판, 그리고 열전소자에 대하여 서로 다른 지배방정식을 사용한다. 열전 특성을 가지지 않는 소재에서는 자유전자의 전도에 의한 열전달이 이루어지고, 열전소자에서는 금속과 열전소자 계면에서 전자와 양자의 경계저항에 기인하여 전자와 양자(phonon)의 전도에 대한 열적인 비평형이 존재한다.<sup>(8)</sup> Joule 가열과 펠티어 냉각/가열과 같은 에너지 변환기구가 열적인 비평형에 관련된다.<sup>(12)</sup>

2.1 열전소자에 대한 해석모델

열전소자에 대한 해석모델은 da Silva and Kaviany<sup>(8)</sup>의 1차원 해석모델을 3차원 환경으로 확장하여 사용하였다. 지배방정식들은 전기장 또는 온도장에서 전자와 양자의 운동이론으로부터 얻을 수 있고 전자와 양자에 대하여 연립된 Boltzmann 방정식들에 의하여 표현된다.<sup>(8,12)</sup>

$$-\nabla \cdot (k_p \nabla T_p) = P(T_e - T_p) \tag{1}$$

$$-\nabla \cdot (k_e \nabla T_e) = \rho_e j_e^2 - P(T_e - T_p) \tag{2}$$

여기에서 P는 전자/정공과 양자 사이의 상호작용

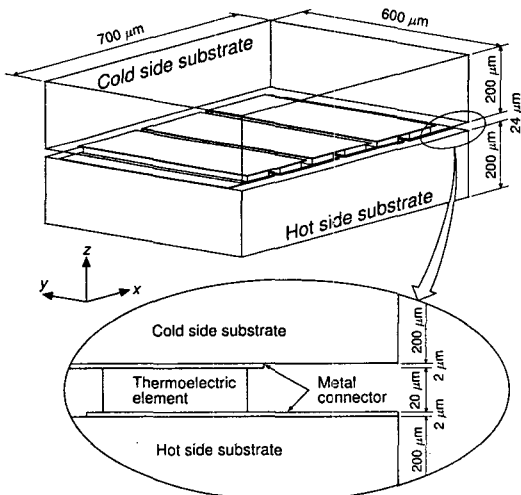


Fig. 1 Schematic of the thermoelectric cooler.

의 강도를 나타내고 전자/정공의 밀도, Boltzmann 상수, 그리고 전자/정공의 에너지 완화시간(relaxation time)을 이용하여 구할 수 있다.<sup>(8,12)</sup>

해석모델에서는 열전소자와 계면 사이의 전기적, 열적 접촉저항을 고려하였다. 양자의 열전도에 대한 계면조건은 다음과 같다.

$$\frac{T_h - T_p}{(A_{te} R_c)_{b,p}} \Big|_{-L_u/2} = -k_p \frac{\partial T_p}{\partial z} \Big|_{-L_u/2} \quad (3)$$

$$\frac{T_p - T_c}{(A_{te} R_c)_{b,p}} \Big|_{L_u/2} = -k_p \frac{\partial T_p}{\partial z} \Big|_{L_u/2} \quad (4)$$

전자에 의한 열전도의 계면조건은 다음과 같다.

$$\frac{T_h - T_e}{(A_{te} R_c)_{b,e}} \Big|_{-L_u/2} = -k_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \Big|_{-L_u/2} \quad (5)$$

$$+ \Delta \alpha j_e T_e \Big|_{-L_u/2} - (A_{te} R_e)_b \frac{j_e^2}{2}$$

$$\frac{T_e - T_c}{(A_{te} R_c)_{b,e}} \Big|_{L_u/2} = -k_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \Big|_{L_u/2} \quad (6)$$

$$+ \Delta \alpha j_e T_e \Big|_{L_u/2} + (A_{te} R_e)_b \frac{j_e^2}{2}$$

여기에서  $\Delta \alpha = \alpha_{bulk} - \alpha_b$ 이고,  $\alpha_{bulk}$ 와  $\alpha_b$ 는 Table 1에 주어져 있다. 식(3)~(6)에 나타난 계면조건들을 제외한 열전소자의 모든 경계에는 단열조건을 적용하였다.

## 2.2 실리콘 기판과 금속연결판의 해석모델

실리콘 기판과 금속연결판에서 열전달은 Fourier 법칙으로 나타낼 수 있다.

$$-\nabla \cdot (k_i \nabla T) = \rho_c j_e^2 \quad (7)$$

여기에서  $k_i$ 는 금속연결판에 대해서는  $k_c$ , 위쪽의 냉각부의 기판에 대해서는  $k_{cold}$ , 아래쪽의 방열부 기판에 대해서는  $k_{hot}$ 으로 치환한다. 우변의 Joule 가열과 관련된 항은 상하 실리콘 기판이 전기적 절연체로 사용되므로 금속연결판에 대해서만 고려한다.

냉각부와 방열부의 표면에 대한 경계조건은 필

요에 따라 일정 온도 또는 일정 열유속조건을 적용하였다. 연결판과 열전소자 사이의 계면에 대한 조건은 다음과 같다.

$$-k_{hot} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{-L_u/2} = \frac{T_h - T_p}{(A_{te} R_c)_{b,p}} \Big|_{-L_u/2} \quad (8)$$

$$+ \frac{T_h - T_e}{(A_{te} R_c)_{b,e}} \Big|_{-L_u/2}$$

$$-k_{cold} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{L_u/2} = \frac{T_p - T_c}{(A_{te} R_c)_{b,p}} \Big|_{L_u/2} \quad (9)$$

$$+ \frac{T_e - T_c}{(A_{te} R_c)_{b,e}} \Big|_{L_u/2}$$

경계조건으로서 냉각부 윗면, 방열부의 아래면, 그리고 열전소자와의 계면을 제외한 모든 경계면에는 단열조건을 적용하였다.

## 2.3 해석방법

앞 절에서 설명된 식들을 이용하여 해석하기 위하여 상용 해석 소프트웨어인 FEMLAB을 사용하였다. FEMLAB은 유한요소법(Finite Element Method)에 기반한 소프트웨어로 다중물리 현상의 해석에 유용하게 사용할 수 있다.

열전소자와 관련된 열물성치들은 da Silva and Kaviany<sup>(8)</sup>의 연구결과를 참조하여 사용하였다. 금속연결판의 재질은 편의상 구리로 가정하였고, 상하 기판은 MEMS 공정에서 많이 사용되는 실리콘 웨이퍼를 가정하여 실리콘으로 가정하였다. 구리와 실리콘에 대한 물성치들은 FEMLAB 소프

Table 1 Properties for thermoelectric elements<sup>(8)</sup>

Property	Unit	n-Type	p-Type
$P$	W/m <sup>3</sup> K	$8.61 \times 10^{23}$	$1.76 \times 10^{13}$
$\alpha_{bulk}$	V/K	$-228 \times 10^{-6}$	$171 \times 10^{-6}$
$\alpha_b$	V/K	$187 \times 10^{-6}$	$-252 \times 10^{-6}$
$\rho_e$	$\Omega$ m	$1.30 \times 10^{-5}$	$1.04 \times 10^{-5}$
$(A_{te} R_e)_b$	$\Omega$ m <sup>2</sup>	$2.6 \times 10^{-12}$	$6.8 \times 10^{-12}$
$k_p$	W/mK	1.5	1.5
$(A_{te} R_c)_{b,p}$	K/(W/m <sup>2</sup> )	$9.2 \times 10^{-8}$	$8.0 \times 10^{-8}$
$k_e$	W/mK	0.5	0.6
$(A_{te} R_c)_{b,e}$	K/(W/m <sup>2</sup> )	$3.5 \times 10^{-7}$	$9.3 \times 10^{-7}$

트웨어에서 제공하는 값들을 사용하였다.

열전소자의 계면 근처에서 나타나는 열적 비평형을 고려하기 위하여 계산영역을 2개로 나누었다. 하나의 계산영역은 열전소자들만을 포함하는 영역으로 식(1)과 식(2)을 이용한다. 따라서 이 영역에서는 서로 다른 2개의 종속변수( $T_p$ ,  $T_e$ )를 가진다. 이 영역에서 식들은 n-형과 p-형 열전소자에 대하여 서로 분리해서 적용되며 각 열전소자에는 Table 1에 나타난 각각의 물성치들을 사용한다. 다른 하나의 영역은 상하 실리콘 기판과 금속연결판들을 위한 것으로 식(7)을 이용하며 하나의 종속변수  $T$ 를 가진다. 두 계산영역의 온도들은 계면조건들, 식(3)~(6), 식(8)과 식(9)에 의하여 연결되어 연속성을 가지게 된다.

### 3. 해석결과

#### 3.1 해석방법의 검증

해석방법의 타당성은 우선 문헌에 보고된 1차원 해석결과<sup>(6)</sup>를 이용하여 검증하였다. 검증을 위한 해석은 2차원 형상을 가정하여 수행하였고 그 결과를 1차원 해석결과와 비교하였다.

1차원 해석결과는 Fig. 2에서 기호로 나타내었는데 두께  $4\mu\text{m}$ , 폭  $7\mu\text{m}$ 인 1차원 형상에 대한 결과이다. 사용된 재료들의 물성치들은 Table 1에 나타난 값들을 사용하였다. 본 연구에서 예측된 온도는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 1차원 해석의 결과와 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 또한

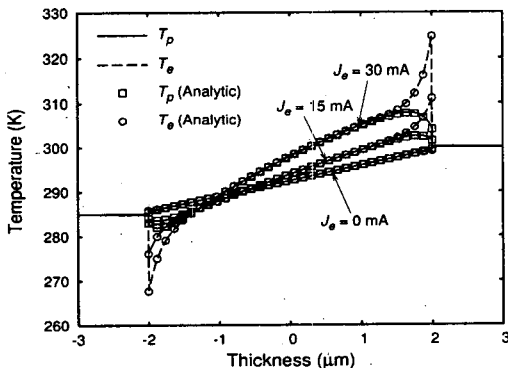


Fig. 2 Comparison of the predicted temperature distributions with the one-dimensional analytic solutions.

이 결과는 계면 근처의 열적 비평형이 전자와 양자에 대하여 서로 다른 온도분포를 가지게 하는 것을 보여주고 있다. 전자의 열전도에 의한 온도 상승이 양자에 의한 것보다 더 크게 나타나는 데 이는 전자에 의한 전달의 경우에 상대적으로 더 큰 경계저항  $(A_{te}R_c)_{b,e}$ 을 가지는 것에 기인하고 이는 또한 전류의 흐름에 영향을 받는다. 그리하여 전류가 흐르지 않을 때, 전자와 양자의 전도에 의한 온도는 서로 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.

#### 3.2 3차원 해석의 결과

마이크로 열전냉각기의 성능을 분석하기 위하여 Fig. 1에 보인 형상에 대하여 3차원 해석을 수행하였고, 두께변화에 따른 열전냉각기의 특성을 조사하기 위하여 열전소자의 두께를 변화시키면서 해석을 수행하였다.

우선, 열전냉각기의 최대 성능을 파악하기 위하여 경계조건으로 냉각부에는 단열조건, 방열부에는 일정한 온도조건을 사용하여 해석을 수행하였다. 이러한 조건에 대한 해석을 통하여 열전냉각기의 최대 전류, 최대 온도차, 최대 냉각성능을 구할 수 있다.<sup>(1)</sup> 여기에서 최대 전류는 전류의 최대값이 아니라 온도차가 최대가 되는 경우의 전류를 의미한다. 냉각부가 단열되고 방열부의 온도가  $25^\circ\text{C}$ 로 일정한 경우, Fig. 3은 열전소자의 두께가 작을 때 최대 전류가 더 큰 것을 보여준다. 최대 전류에서 최대 온도차는 열전소자의 두께의 감소

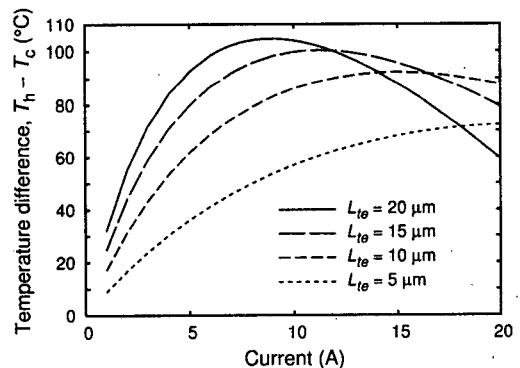


Fig. 3 Temperature difference between hot and cold sides for  $q_c=0$  and  $T_h=25^\circ\text{C}$ .

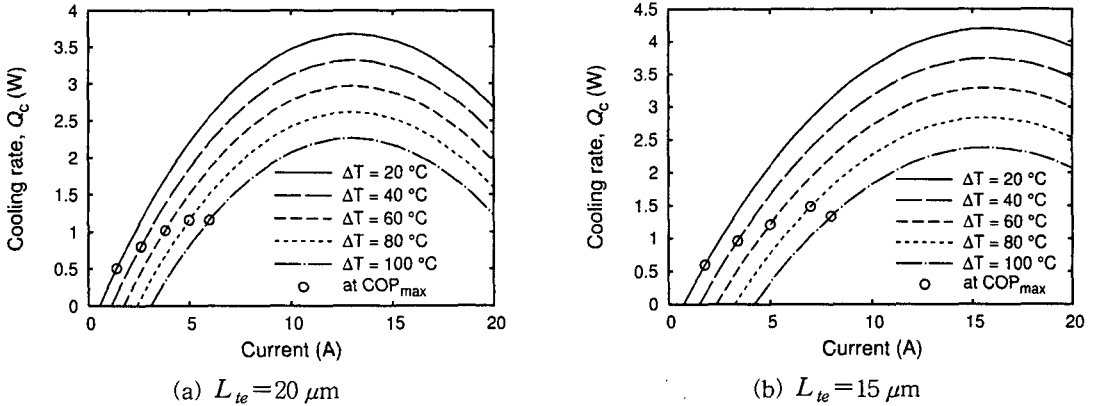


Fig. 4 Cooling rate at the cold side substrate.

에 따라 감소하고 그 두께가  $15 \mu m$  이상일 때 최대 온도차는  $100^\circ C$ 보다 크다.

제안된 마이크로 열전냉각기의 성능을 파악하기 위하여 냉각부의 온도를  $25^\circ C$ 로 고정하고, 방열부의 온도를  $45^\circ C$ 에서  $125^\circ C$ 로 변화시키면서 해석을 수행하였다. 이에 따라 냉각부와 방열부의 온도차는  $20^\circ C$ 에서  $100^\circ C$ 까지 변한다.

Fig. 4는 냉각부의 냉각열량이 전류의 증가에 따라 증가하나 특정 전류에서 최대값이 나타나고 그 후에는 감소하는 것을 보여준다. 그리고 냉각열량은 방열부의 온도가 증가함에 따라 감소한다.  $L_{te} = 20 \mu m$ 와  $15 \mu m$ 일 때, 최대 냉각열량은 각각  $J_e = 13 A$ 와  $16 A$ 에서 나타나고 이는 방열부의 온도에 무관한 경향을 보인다.  $L_{te} = 20 \mu m$ 일 때 최대 냉각열량은 방열부의 온도가  $20^\circ C$ 씩 증가할 때 약  $0.35 W$ 씩 감소한다. 그러나 방열량은 최대

냉각열량이 나타나는 전류 이후에도 전류의 증가에 따라 방열량이 계속 증가하고 따라서 전류의 증가에 따라 필요한 전력도 지속적으로 증가하게 된다. 최대 냉각열량은 두께의 감소에 따라 조금씩 증가하는 경향을 보이지만, 최대 냉각열량이 나타나는 전류는 열전소자의 두께가 감소할수록 큰 폭으로 증가한다.

Fig. 5는 전류에 따른 열전냉각기의 COP( $COP = Q_c/P_e$ )의 변화를 보여준다. 냉각열량과 비교할 때 COP는 상대적으로 작은 전류에서 최대값을 보인다. 최대 COP는 열전냉각기의 온도차에 따라 2.9에서 0.33까지 변하고 최대값이 나타나는 전류는 1.4 A에서 6.0 A로 온도차의 증가에 따라 증가한다. 최대 COP는 방열부의 온도가 상대적으로 낮을 때 방열부의 온도 증가에 따라 빠르게 감소한다. 최대 COP가 나타나는 전류에서 방열부

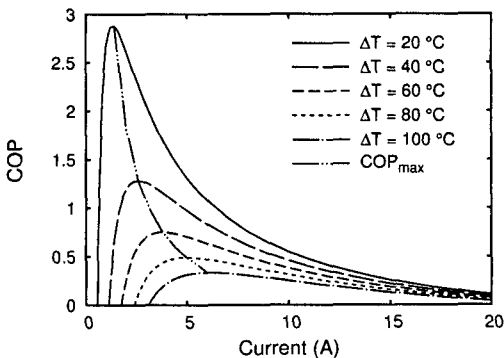


Fig. 5 Variation of the COP of the cooler for  $L_{te} = 20 \mu m$ .

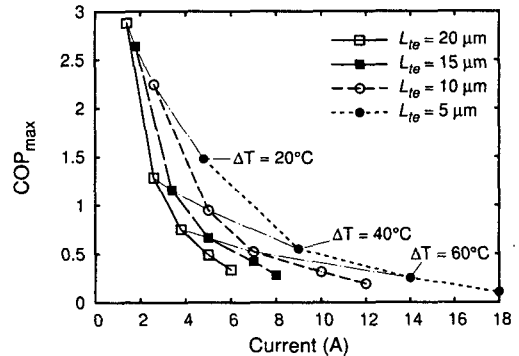


Fig. 6 Variation of the maximum COP with the thickness of thermoelectric elements.

의 온도에 따라 냉각열량은 0.5 W에서 1.2 W로 변하고 이 값들은 Fig. 4(a)에 보인 최대 냉각열량보다는 작다. 하지만 열전냉각기의 에너지효율을 높이기 위해서 냉각기는 최대 냉각열량보다는 최대 COP를 얻을 수 있는 조건에서 작동되는 것이 바람직하다. 최대 COP를 얻을 수 있는 전류에서의 냉각열량들이 Fig. 4에 기호로 표시되어 있다.

Fig. 6에 서로 다른 두께의 열전소자를 가지는 열전냉각기에 대한 COP들을 비교하여 나타내었다.  $\Delta T=20$  K일 때,  $L_{te}=20, 15, 10, 5 \mu\text{m}$ 에 대하여 최대 COP는 전류가 1.4, 1.8, 2.6, 4.8 A일 때 각각 2.9, 2.6, 2.2, 1.5이고, 열전소자의 두께 감소에 따라 COP가 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7(a)에 나타낸 수직 단면의 온도분포는 냉각부와 가열부 기판 내의 온도변화가 작은 것을 확인시켜 주고, 이는 Fig. 2의 2차원 해석의 결과와 같은 경향이다. 열전소자와 냉각부 쪽의 연결판 사이의 계면의 온도는  $20.4^\circ\text{C}$ 인데 이는 냉각

부의 온도  $25^\circ\text{C}$ 보다 낮은 값으로 펠티어 냉각에 기인한 결과이다. 반대로 열전소자와 방열부 연결판 사이의 계면의 온도는  $95.5^\circ\text{C}$ 로 펠티어 가열효과에 기인하여 방열부 표면의 온도  $85^\circ\text{C}$ 보다 높아진다. Fig. 7(b)는 방열부쪽 연결판의 단면에서의 온도분포를 보여주는데, 온도가 높은 영역이 중심부(2번째 연결판의 오른쪽 가운데 부분 및 3번째 연결판의 왼쪽 가운데 부분)에 나타난다. 그러나 온도가 높은 영역과 낮은 경계면 영역 사이의 온도차는 약  $4^\circ\text{C}$ 로 열전냉각기의 냉각부와 방열부 사이의 온도차( $\Delta T=60^\circ\text{C}$ )보다는 훨씬 작다. 냉각부쪽 연결판에서는 이와 반대의 경향을 보인다.

#### 4. 결론

마이크로 열전냉각기의 성능을 예측하기 위하여 FEMLAB 소프트웨어를 이용하여 3차원 해석을 수행하였다. 작은 크기의 기동형 열전냉각기를 고려하였고  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ 와  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ 를 각각 n-형과 p-형 열전재료로 선정하였다. 열전소자의 두께는  $5 \mu\text{m}$ 에서  $20 \mu\text{m}$ 로 변화시켰고 이 두께는 열전냉각기의 성능에 영향을 미친다. 본 연구에서 얻어진 결과는 실제 마이크로 열전냉각기의 설계 및 제작에 반영할 예정이다.

최대 온도차는 열전소자의 두께가 두꺼울 때 작은 전류에서 더 크게 나타나고, 최대 냉각열량은 두께가 얇을 때 다소 증가하는 것을 알 수 있었다. 그러나 두께가 얇은 열전소자에서 얻을 수 있는 최대 냉각열량의 증가폭은 크지 않고, 이때 상당히 높은 전류를 필요로 한다. 두꺼운 열전소자의 경우에는 상대적으로 작은 전류에서 최대 냉각열량을 얻을 수 있으므로 실제의 응용을 고려하면 두꺼운 소자가 보다 더 실용적이라고 판단된다.

해석결과 COP는 특정한 전류에서 최대값을 보이고 그 값은 온도차의 감소 또는 두께의 증가에 따라 증가하는 경향을 보였다. 예측결과는 두께가 두꺼운 열전소자( $L_{te}=20 \mu\text{m}$ )를 사용할 때 작은 온도차( $\Delta T=20^\circ\text{C}$ )와 작은 전류에서 열전냉각기의 성능이 더 향상되는 것을 보여주었다.

#### 후 기

본 연구는 국무총리 산하 산업기술연구회가 지

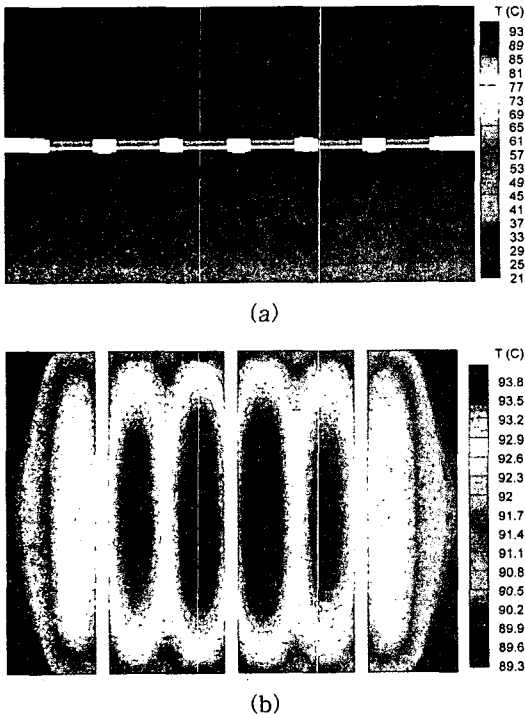


Fig. 7 Temperature distributions of the cross sections in a vertical plane and the hot-side connector ( $L_{te}=20 \mu\text{m}$ ,  $\Delta T=60^\circ\text{C}$ ,  $J_e=3.8$  A).

원하는 협동연구사업인 “차세대 냉각시스템 기술 개발”의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Rowe, D.M., 1995, Handbook of Thermoelectrics, CRC Press, Boca Ration.
2. Böttner, H., 2002, Thermoelectric micro devices: Current state, recent developments and future aspects for technological progress and applications, Proc. of 21th Int. Conf. on Thermoelectrics, Long Beach, CA, pp.511-518.
3. Lim, J.R., Snyder, G.J., Huang, C.-K., Herman, J.A., Ryan, M.A. and Fleurial, J.-P., 2002, Thermoelectric microdevice fabrication process and evaluation at the jet propulsion laboratory (JPL), Proc. of 21st Int. Conf. on Thermoelectrics, Long Beach, California, pp. 535-539.
4. Yao, D.-J., Kim, C.-J., Liu, J.L., Wang, K. L., Snyder, J., Fleurial, J.-P. and Chen, G., June 2001, MEMS thermoelectric microcooler, Proc. of 20th Int. Conf. on Thermoelectrics, Beijing, pp. 401-404.
5. Yao, D. J., Chen, G. and Kim, C.-J., 2001, Low temperature eutectic bonding for in-plane type micro thermoelectric cooler, Proc. of ASME IMECE, Paper No.IMECE2001/MEMS-23901.
6. Snyder, G. J., Lim, J.R., Huang, C.-K. and Fleurial, J.-P., 2003, Thermoelectric micro-device fabricated by a MEMS-like electro-chemical process, Nature Materials, Vol.2, pp.528-531.
7. Böttner, H., Nurnus, J., Gavrikov, A., Kühner, G., Jägle, M., Künzel, C., Eberhard, D., Plescher, G., Schubert, A. and Schereth, K.-H., 2004, New thermoelectric components using microsystem technologies, Journal of Microelectromechanical Systems, Vol.13, pp. 414-420.
8. Da Silva, L. W. and Kaviany, M., 2004, Micro-thermoelectric cooler: Interfacial effects on thermal and electrical transport, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 47, pp. 2417-2435.
9. Da Silva, L. W., Kaviany, M. and Asheghi, M., 2004, Measured performance of a micro thermoelectric cooler, Proc. of ASME HT-FED, Paper No. HT-FED2004-56412.
10. Kim, J., Park, C. H., Kang, Y. T. and Choi, C. K., 2003, Heat transfer analysis for optimum design of a thermoelectric cooler, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol.15, No.11, pp. 889-894.
11. 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.
12. Bartkowiak, M. and Mahan, G. D., 2001, Heat and electricity transport through interfaces, Semiconductors and Semimetals, Vol. 70, Academic Press, New York, pp.245-271.