

## NTC 써미스터가 내장된 항온 제어용 소형 열전 냉각 모듈 제조

박종원<sup>a</sup> · 최정철<sup>a</sup> · 황창원<sup>a</sup> · 최승철<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>아주대학교 재료공학과 · <sup>b</sup>주식회사 세펠

### Fabrication of NTC thermistor embedded Miniature Thermoelectric Cooling Module for Temperature Control

J. W. Park<sup>a</sup>, J. C. Choi<sup>a</sup>, C. W. Hwang<sup>b</sup> and S. C. Choi<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Materials Science and Engineering, Ajou University

<sup>b</sup>Sepel Co., Ltd.

**초 록:** NTC 써미스터를 내장시킨 소형의 열전 냉각 모듈을 제작하고 LD와 같은 광통신부품에 적용하기 위한 온도 제어 및 항온 유지 특성을 분석하였다. BiTe계 열전반도체 21쌍으로 구성된 열전 모듈은 크기 7.2 mm × 9 mm × 2.2 mm이고, 내장된 써미스터의 빠른 응답속도로 인해 정밀온도제어가 가능하다. 열전 모듈은 성능 지수(Z)  $2.5 \times 10^{-3}/K$ , 300 K에서 최대 온도차( $\Delta T_{max}$ ) 72 K, 최대 흡열량( $Q_{max}$ ) 2.2 W 값을 나타내었으며 온도 제어 정밀도는 대기 중에서  $\pm 0.1^\circ C$ 내였다. 이는 광통신 부품의 작동 환경 안정성을 확보할 수 있는 항온제어용 소형 열전 모듈로서 적용이 가능하다.

**Abstract:** NTC thermistor embedded miniature thermoelectric module was fabricated for the precise temperature control of optical communication device such as laser diode (LD). The miniature thermoelectric module (7.2 mm × 9 mm × 2.2 mm) consists of 21 BiTe thermoelectric couples, the operating temperature is precisely controlled by embedded thermistor with quick response. The figure-of-merit (Z), maximum temperature difference ( $\Delta T_{max}$ ), maximum cooling capacity ( $Q_{max}$ ) of the miniature thermoelectric module were  $2.5 \times 10^{-3}/K$ , 72 K, 2.2 W respectively and temperature could be controlled in range of  $\pm 0.1^\circ C$  accuracy in air. The fabricated miniature thermoelectric module is suitable for applications of the optical communication packaging.

**Keywords:** BiTe thermoelectrics, miniature thermoelectric module, embedded thermistor, temperature control

### 1. 서 론

전자 기기 및 부품의 소형화, 디바이스 고성능화 기술에 있어서 열의 발생은 잡음의 생성과 성능의 저하, 출력 특성의 불안정 등을 유발하여 정밀 제어가 필요한 분야에서 디바이스 작동에 문제를 일으킬 수 있다. 이를 해결하기 위하여 열전 반

도체 소자에 의한 국부 냉각이나 항온 제어가 핵심 요소 기술로 주목되고 있다.<sup>1)</sup> 열전소자를 이용한 냉각방식은 냉각소자의 가격이 비싸고, 효율이 낮은 단점이 있으나 정밀온도제어가 가능하고, 저소음, 소형화 등의 장점으로 우주 항공, 컴퓨터 CPU 및 군사용등의 특별한 목적 등에 사용되어지고 있다.<sup>2,3)</sup> 특히, 광통신 네트워크 구축의 핵심인 LD(laser diode), 광 증폭기, 광 감쇄기, 광 스위치

\*Corresponding author  
E-mail: scchoi@ajou.ac.kr

등의 광통신 부품 소자에서는 일정한 레이저 공진이 필요하며 온도가 상승함에 따라 레이저 공진의 크기와 굴절율이 증가하고 에너지 밴드 폭의 감소로 광 스펙트럼의 분포가 장파장으로 이동하며 누설 전류값이 증가된다. 따라서 LD의 출력 안정성과 파장 정확도를 유지하기 위해서는 LD의 온도 환경을 25°C 부근으로 항온 제어가 필요하다.<sup>4)</sup> 일반적으로 열전 냉각 모듈(Peltier cooling device)은 직류 전원을 이용한 극성의 변화를 통하여 대상체를 냉각 또는 가열할 수 있다. 또한, 온도 제어회로를 구성하여 대상체의 온도를  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  이내로 정밀 제어가 가능하다. 현재 가전 및 산업용 냉각기에 적용되고 있는 열전 반도체 소자는 저온특성이 우수한  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  열전재료로 p형의  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$  계 단결정과 n형의  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Bi}_2\text{Se}_3$  계 단결정을 사용하며 모듈은 40 mm × 40 mm × 3.8 mm 또는 30 mm × 30 mm × 3.8 mm의 크기를 가지고 있는 것이 범용으로 사용되고 있다. 본 연구에서는 부품의 크기가 10 mm 내외로 작은 광통신부품의 항온 제어를 위해 2 W급 7.2 × 9 × 2.2 mm 정도의 소형 열전 모듈을 제작하여 그 항온 제어 특성을 평가하였다. 또한, 정밀온도 측정 모니터를 위해 소형 NTC 써미스터를 장착시켜 패키징 한 후 항온 제어를 수행하고 작동 환경의 안정성을 평가하고 제조된 소형 냉각 모듈 위에 LD를 탑재하였다.

## 2. 실험 방법

전자 냉각 모듈의 성능 평가, 항온 제어 성능 평가와 LD 패키징을 위해 우선 열전소자를 선택하고 Fig. 1과 같은 순서로 실험을 행하였다. 알루미늄 기판으로 사용하였으며 21쌍의 열전소자로 모듈 크기 7.2 mm × 9 mm × 2.2 mm로 제작, 특성을 평가하였다. NTC 써미스터를 내장시켜 열전 모듈용 온도 조절장치를 구성하여 온도 제어를 행하였다.

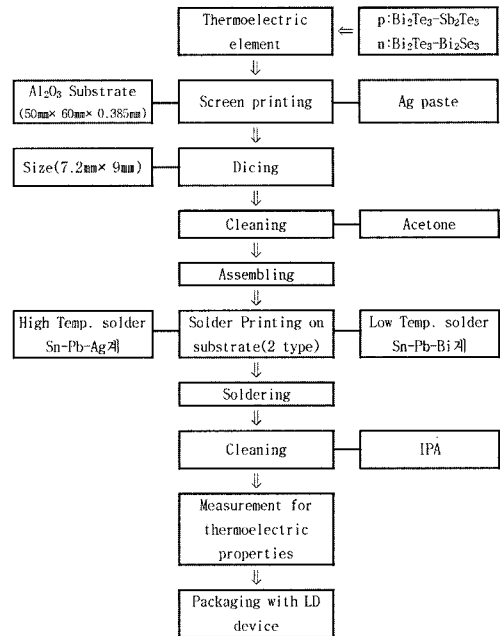


Fig. 1. Flow chart of TEC module fabrication.

### 2.1 열전 소자의 준비

$\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Sb}_2\text{Te}_3$ 계 p형 열전소자와  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{-Bi}_2\text{Se}_3$ 계 n형 열전소자를 0.64 mm × 0.64 mm × 1.27 mm 크기로 p-n 쌍을  $\Pi$ 형으로 접합, 열적으로는 병렬, 전기적으로는 직렬로 연결되게 구성하였다. 사용된 열전 반도체의 특성은 Table 1에 나타내었다. 전자 냉각 모듈의 성능은 사용된 소자의 성능지수(Z), 소자의 형상비(A/l) 및 p-n 쌍의 수에 의존하며 열용량, 전류량 등을 고려하여 결정하였다.<sup>5,6)</sup>

### 2.2 열전 모듈 제작 및 써미스터 실장

기판 재료로는 일반적으로 사용되고 있는 96%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  세라믹 절연 기판(50 mm × 60 mm × 0.385 mm)을 사용하였으며 전극은 Ag paste를 스크린 프린팅한 후 850°C에서 소성하여 Fig. 2와 같이 준비하였다. 이 기판을 모듈 크기 7.2 mm × 9 mm로

Table 1. Properties and physical dimension of Thermoelectric element

|        | Seebeck coefficient<br>$\alpha$ ( $\mu\text{V/K}$ ) | Electrical Conductance<br>$\sigma$ ( $/\Omega\text{cm}$ ) | Thermal Conductance<br>$k$ ( $\text{mW/cmK}$ ) | Figure of merit<br>$Z$ ( $\times 10^{-3} / \text{K}$ ) | Size<br>d (mm) | Number of element (N) |
|--------|---|---|--|--|----------------|-----------------------|
| n-type | 195   | 1100  | 15.5   | 2.69   | 0.64×0.64×1.27 | 21                    |
| p-type | 205   | 1050  | 14.5   | 3.04   | 0.64×0.64×1.27 | 21                    |

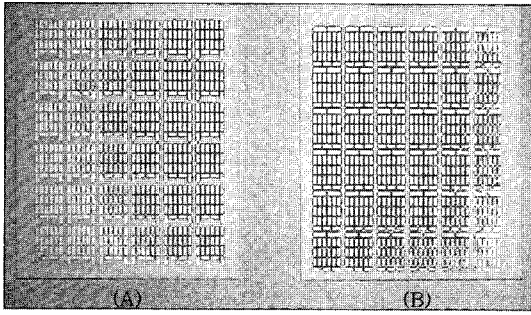


Fig. 2. Ag paste screen printed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Substrate. (A) Lower side (B) Upper side

정밀 가공하고 초음파 세척 후 사용하였다. 열전 소자는 조립 지그를 이용해 열전쌍 21개를 정밀하게 배열하여 준비된 알루미늄 기판에 솔더링한다. 이때 사용되는 솔더는 열전 반도체 디바이스의 온도구배를 고려하여 고온부에는 Sn-Pb-Ag계(mp : 184~185°C), 저온부에는 Sn-Pb-Bi계(mp : 176~178°C)를 사용하여 메탈 마스크로 프린팅한 후 솔더링하였다. 솔더링 온도는 각각의 솔더 용점에 +40°C 정도의 온도 영역에서 행하였으며 솔더링 후 브릿지 발생 여부 등의 불량을 검사한 후 실험에 사용하였다. 정밀한 온도 제어를 위해 소형 NTC 써미스터(규격 1.6 mm×0.8 mm×0.8 mm, Resistance(at 25°C): 68 kΩ, B constant(25/85°C): 4150 K)를 와이어 솔더를 사용하여 기판에 실장하였다.

2.3 열전 냉각 모듈의 특성 평가

Seebeck 계수란 모듈의 양단간에 온도차가 주어질 때 발생하는 전압과 온도차의 비로서 Open Voltage Tester(Seepel Co.)를 사용하여 측정하였다. 전자냉각 모듈의 윗면의 온도를 T<sub>h</sub>로 유지시키고, 윗면으로부터 p형 소자 및 n형 소자를 통하여 아랫면으로 전도되는 열을 수냉 chill을 이용하여 온도 T<sub>c</sub>의 외계로 방열시키면서 고온단과 저온단의 온도차 ΔT와 Seebeck 효과에 의해 발생하는 open voltage(V<sub>open</sub>)로부터 Seebeck 계수를 측정하였다.<sup>7)</sup> 관계식은 Eq. 1과 같다.

$$V_{open} = \alpha_M \cdot \Delta T = \alpha_M \cdot (T_h - T_c) \tag{1}$$

α<sub>M</sub>: Thermoelectric Power of Module

전자냉각 모듈의 전기저항, 열전도도, 성능지수

는 Harman법을 이용한 Z-meter(Seepel Co.)장치를 구성하여 평가하였다.<sup>8,9)</sup> 전자냉각 모듈에 직류를 흘려주면 Peltier 효과에 의해 전자냉각 모듈의 고온단은 가열되고 저온단은 냉각되는데 이때에 가열부와 반대방향으로의 열전도도에 의한 열흐름이 평형을 이루는 조건에서는 다음의 관계가 성립한다.

$$k_M \cdot \Delta T = \alpha_M \cdot I \cdot T \tag{2}$$

k<sub>M</sub>: Thermal Conductance of Module

한편 전자냉각 모듈에 교류를 흘려줄 때에 probe의 양단간에 걸리는 전압과 같고 직류를 걸어줄 때의 전압은 Seebeck 효과에 의한 전압상승으로 Eq. 3과 같이 나타난다.

$$V_{AC} = I_{AC} \cdot R_{AC}, V_{DC} = I \cdot R_{AC} + \alpha_M \cdot \Delta T \tag{3}$$

위식을 정리하면

$$\frac{R_{DC} - R_{AC}}{R_{AC}} = \frac{\alpha_M \cdot T}{k_M \cdot R_{AC}} \tag{4}$$

이로부터 전자냉각 모듈에 직류전류와 교류전류를 흘려주면서 전압을 측정하여 전자냉각 모듈의 성능지수 Z를 구하였다.

흡열량(Q<sub>C</sub>)의 측정은 Cooling Power Tester(Seepel Co.)를 통해 Eq. 5의 값과 비교하여 평가하였다.

$$Q_C = \alpha_M \cdot I \cdot T_c - \frac{1}{2} I^2 \cdot R_{AC} + k_M \cdot (T_h - T_c) \tag{5}$$

2.4 항온 제어 평가와 LD Packaging

Fig. 3과 같이 방열판을 고온단에 부착하고 온도

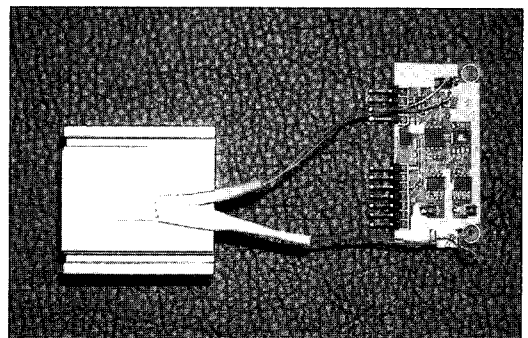


Fig. 3. TEC module on heat sink and circuit for temperature control.

제어 회로를 구성한 후 상온 영역(25°C)과 그 상하의 30°C, 20°C 영역에서의 온도 제어 및 유지 정도를 24시간 관찰하여 평가하였다. 열전대를 열전 모듈의 중앙과 네모서리에 연결하여 온도를 기록하고 동시에 주변 온도의 변화도 관찰하였다. 이 모듈을 이용하여 LD의 작동온도를 제어할 수 있는 디바이스를 구성하고 패키징하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 전자 냉각 모듈의 특성 분석

Fig. 4와 같이 제조된 열전 모듈은 전자 냉각 모듈에 의한 냉각 효율( $\phi$ ), 흡열량( $Q_c$ ), 최대 온도차( $\Delta T_{max}$ ) 등의 특성은 열전소자 양단의 온도  $T_h$  및  $T_c$ 가 주어진 조건에서 열전소자의 Seebeck 계수( $\alpha$ ), 전기 비저항( $\rho$ ), 열전도도( $k$ ) 및 성능지수( $Z$ ) 등의 열전 물성에 의존한다. 특히 모듈의 형태 즉 p-n 쌍에 의한 열전 특성은 열전쌍의 개수, 소자의 단면적( $A$ )과 길이( $l$ )의 비가 열전 물성 결정에 중요한 변수로 작용하게 된다. Eq. 6에서 11은 이론적인 특성값을 구하기 위한 기본식이다.<sup>10-12</sup> 열전소자의 흡열량은 다음과 같다.

$$Q_c = \alpha_M \cdot I \cdot T_c - \frac{1}{2} I^2 \cdot R_M - k_M \cdot (T_h - T_c) \quad (6)$$

$R_M$ : Resistance of module

$$I_{max} = \frac{\alpha_M \cdot T_c}{R_M} \text{ at } \frac{dQ_c}{dI} = 0 \quad (7)$$

$$Q_{max} = \frac{\alpha_M^2}{k_M \cdot R_M} \text{ at } I_{max} \quad (8)$$

$$Z_M = \frac{\alpha_M^2}{k_M \cdot R_M} \quad (9)$$

$$\Delta T_{max} = (T_h - T_c)_{max} = \frac{1}{2} \cdot Z \cdot T_c^2 \text{ at } Q_{max}=0 \quad (10)$$

$$V_{max} = \alpha_M \cdot T_h \text{ at } I_{max} \quad (11)$$

이론식을 근거로 계산된 값을 Table 2에 나타내었다. 이때 모듈을 구성하는 기판과 전극의 영향을 무시하였다.

열전 모듈 양단의 온도차  $\Delta T$ 에 따른 흡열량의 변화와 모듈의 실제 흡열량을 Fig. 5에 나타내었다.  $\Delta T = 0$ 일때 최대 흡열량이 관찰되며 최대 흡열량에서의 전류값은 최대 전류치가 된다.  $\Delta T$ 가 증가함에 따라 흡열량은 감소하게 되고  $\Delta T$ 가 최

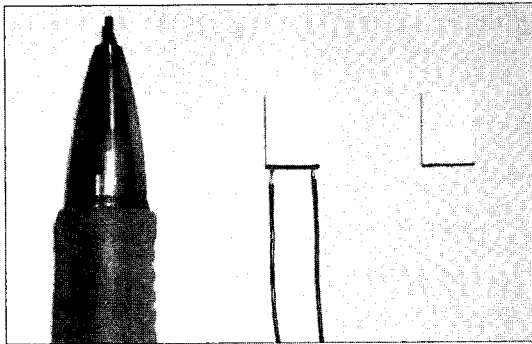


Fig. 4. Fabricated TEC modules (Size 7 mm×9.2 mm×2.2 mm).

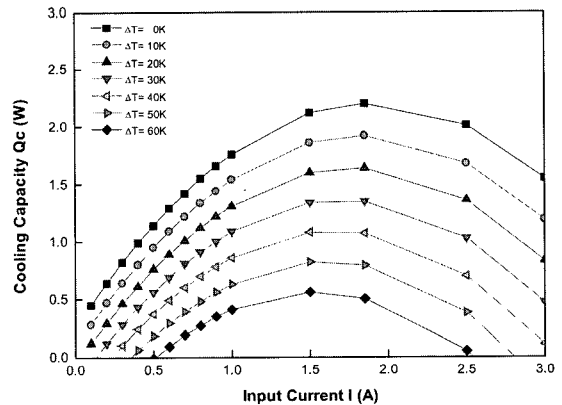


Fig. 5. Cooling capacities as a function of input current at various temperature difference in TEC module.

Table 2. Calculated and measured value of TEC module at  $T_h$  25°C

|                  | A<br>(mm <sup>2</sup> ) | l<br>(mm) | $\alpha_M$<br>(mV/K) | $R_M$<br>( $\Omega$ ) | $k_M$<br>(mW/K) | $Z_M$<br>( $\times 10^{-3}$ K) | $V_{max}$<br>(V) | $\Delta T_{max}$<br>(K) | $I_{max}$<br>(A) | $Q_{max}$<br>(w) |
|------------------|-------------------------|-----------|----------------------|-----------------------|-----------------|--------------------------------|------------------|-------------------------|------------------|------------------|
| Calculated value | 7.2×9                   | 2.2       | 8.4                  | 1.21                  | 20.3            | 2.87                           | 2.52             | 73.6                    | 1.57             | 2.46             |
| Sample           | A                       | 7.2×9     | 2.2                  | 7.85                  | 1.32            | 18.2                           | 2.36             | 71.2                    | 1.42             | 2.13             |
|                  | B                       | 7.2×9     | 2.2                  | 7.95                  | 1.41            | 17.9                           | 2.39             | 72.1                    | 1.44             | 2.21             |
|                  | C                       | 7.2×9     | 2.2                  | 7.88                  | 1.46            | 17.1                           | 2.48             | 71.5                    | 1.51             | 2.16             |

대가 되는 점에서 흡열량이 0에 근접한 값을 나타낸다. 고온단과 저온단의 온도 차이에 따른 흡열량의 변화는 Fig. 6에 나타내었다. 상온영역(25°C)에서 사용시 최대 효율 2 W 이상의 흡열량을 발휘할 수 있음을 보여주고 있다. 전류와 흡열량의 관계를 보면 최대 흡열량을 가지는  $I_{max}$ 를 기준으로 2차 음함수의 관계를 가지며  $I = 0$  A에서  $I_{max}$  값까지는 증가하고 이후에는 흡열량이 감소된다. 이로부터 최대 흡열을 위해서는 최적 전류값이 존재함을 알 수 있다. 또한  $\Delta T$ 에 따른 적정 전류  $I_{max}$  값은  $\Delta T$ 가 증가함에 따라 미세하게 증가한다. 이는 온도 차이에 따른 Seebeck 효과로 인한 자체 전압 상승, 열전도량의 증가등의 변화로 인해 발생하는 것으로 판단되어 진다. 또한 계산값과 실제 측정값과의 차이는 알루미늄 기판, Ag전극, 솔더 등의 열전도도, 저항 등의 변수에 대한 고려가 생략되었으므로 오차가 발생하였을 것으로 판단된다. 오차 범위는 약 10~15%정도로 계산한 값의 80% 이상을 얻을 수 있어 실용성에 문제가 없을 것으로 판단된다. 또한 냉각장치의 가장 중요한 성능 평가로서 효율을 고려해야 한다. 열전 냉각 모듈의 냉각 효율은 Eq. 6의 흡열량( $Q_c$ )과 소모전력(P)과의 관계로서 구할 수 있다. 관계식은 Eq. 12와 같다.

$$\Phi = \frac{Q_c}{P} = \frac{\alpha_M \cdot I \cdot T_c - \frac{1}{2} I^2 \cdot R_M - k_M \cdot (T_h - T_c)}{\alpha_M \cdot I \cdot \Delta T + I^2 \cdot R_M},$$

$$P = IV \tag{12}$$

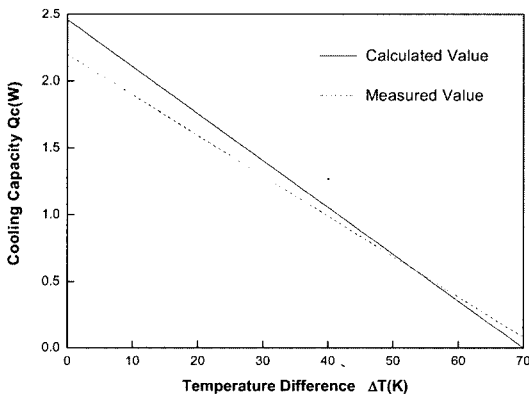


Fig. 6. The calculated and measured cooling power as a function of temperature difference between hot and cold side.

위 식을 근거로 계산된 열전 모듈의 효율은 Fig. 7에 나타내었다. 열전모듈의 단점으로 평가되는 효율상의 문제를 그래프를 통해 볼수 있다. 효율은 낮은 전류에서는 선형적으로 증가하다가 일정 전류 이상에서는 감소하는 경향을 보이고 있으며 고온부와 저온부의 온도차가 작을수록 낮은 전류에서 고효율을 보이고 있다. 그 이유는 Eq. 12에서 소비전력은 전류의 증가에 따라 선형적으로 증가하나 흡열량은 Fig. 5와 같이 최초 증가폭은 크나 차츰 그 증가폭이 감소되어 완만한 증가를 보이고 있기 때문이다. 또한 온도차가 적은 경우에서 보다 높은 효율을 나타내므로 방열판 또는 냉각 등의 장치를 방열부에 부착시키는 이유가 된다.

### 3.2 온도 제어능력 평가 및 LD packaging

열전 모듈의 가장 중요한 역할은 광학기기, 통신기기, 전산장비 등의 정밀 제어 부품에서의 온도 제어에 있다. 특히, 소형의 장치에서는 그 응용 분야가 넓다고 할수 있다. Fig. 8은 20°C, 25°C, 30°C에서 24시간 동안의 온도 제어 성능을 평가한 결과이다. 각각의 선택 온도대에서  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  내외의 온도 편차로 제어되고 있다. 이는 NTC 써미스터를 내장시키므로 온도 컨트롤러와의 응답신호처리 시간 및 정밀도가 별도의 온도센서에 의한 경우보다 우수하다는 것을 보여준다. 정밀온도제어의 경우 희망온도의  $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 정도의 편차로 정밀제어가 필요로 하는 경우가 많다. 그러나, 본 실험에서의 경우 대기중에 노출된 환경에서 실험을 행하여 주변 상황에 의해 많은 영향을 받았던 것으로 보

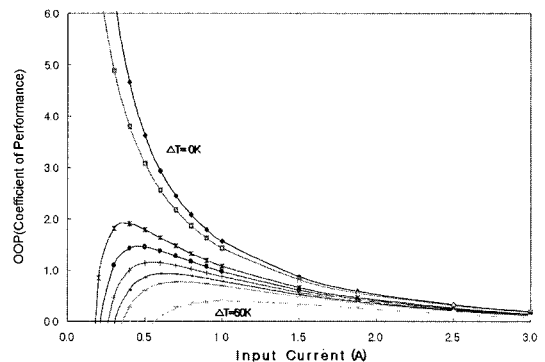


Fig. 7. Coefficient of performance as a function of input current at various temperature difference in TEC module.

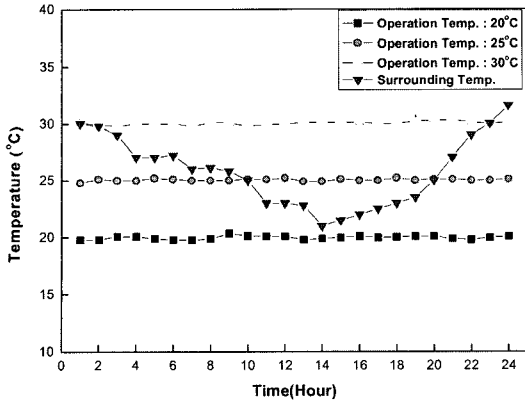


Fig. 8. The stability of temperature control of TEC module.

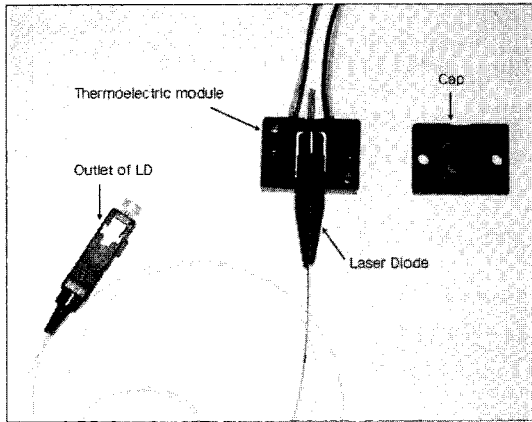


Fig. 9. The package of Laser Diode on TEC module.

여진다. 모듈과 정밀 부품과의 패키징은 작은 공간에서의 온도 제어를 행함으로써 보다 정밀한 온도제어가 가능할 것이다. 극한의 환경변화에서도 외부의 환경변화에 대한 반응을 지연할 수 있는 패키징 기술 또한 중요하다고 할 수 있다. LD를 열전 모듈기판위에 패키징한 것을 Fig. 9에 나타내었다. LD의 항온 제어를 위해 하부에 열전모듈을 구성하고 모듈 위에 LD를 패키징함으로써 하부 열전모듈을 통해 LD의 작동온도를 제어하는 구조로 이루어져 있다. 이것을 통하여 온도변화를 제어함으로써 LD에서 나오는 광파장을 일정하게 유지시킬수 있는 이상적인 정밀온도 패키징을 실현시킬 수 있다.

## 4. 결 론

NTC 써미스터를 내장시킨 소형의 열전 모듈을 제조한 후 항온 제어 특성을 분석하고, 그 위에 LD를 탑재시켜 패키징하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 흡열량 2 W급을 위한 소형 열전모듈은 열전 쌍 21개로 구성되며 크기는 7.2 mm×9 mm×2.2 mm, 최대 흡열량은 2.4 W 급, 최대 전류 1.5 A, 내장된 thermistor는 68 kΩ을 사용하여 제작하였다.

(2) 제작된 모듈은 최대 흡열량 2.2 W, 성능지수  $Z=2.5 \times 10^{-3}/K$  정도의 값을 가지며 최대 온도차는 72 K 정도의 값을 가졌다.

(3) 내장된 NTC 온도 센서를 통해서 20, 25, 30°C에서의 온도 제어폭은  $\pm 0.1^\circ C$  정도로 항온 제어에 우수한 특성을 보였다.

(4) 정밀 온도 제어가 필요한 LD, PD 등의 항온 제어 패키징에 열전 모듈의 적용은 매우 유망하다고 판단된다.

## 참고문헌

1. S. Onoda, N. Maeda and T. Yoshiya, "Fiberoptic components : Laser diode modules and transmission modules", Hitachi Review, 35(4), 201 (1986).
2. S. T. Ro and J. S. Seo, "Principle of thermoelectric refrigeration and system design", Kor. J. of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 19(3), 135 (1990).
3. Y. S. Yang, "R&D trend on the thermoelectric energy conversion technology", Kor. J. of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 23(5), 396 (1994).
4. H. Stermeier, "Future key technologies for telecommunications", Telecom Report, 11(1), 2 (1988).
5. J. E. Parrott and A. W. Penn, "The design theory of thermoelectric elements and units", Solid-State Electronics, 3, 91 (1961).
6. R. R. Heikes and R. W. Ure. Jr, Thermoelectricity, Interscience publishers, New York (1961).
7. C. W. Hwang, "Processing and applications of  $Bi_2Te_3$ - $Sb_2Te_3$  thermoelectrics", In Ph. D. Thesis, pp. 26-33, Ajou University, Suwon (2003).
8. T. C. Harman, "Special techniques for measurement of thermoelectric properties", J. Appl. Phys., 29, 1373 (1958).
9. T. C. Harman, J. H. Cahn and M. J. Logan, "Measurement of thermal conductivity by utilization of the

- Peltier effect”, J. Appl. Phys., 30, 1351 (1959).
10. D. M. Rowe, CRC handbook of thermoelectrics, CRC Press, New York (1995)
  11. J. E. Parrott and A. W. Penn, “The design theory of thermoelectric cooling elements and units”, Solid-State Electronics, 3, 91 (1961).
  12. M. Yamanashi, “A new approach to optimum design in thermoelectric cooling systems”, J. Appl. Phys., 80(9), 5494 (1996).