

레이저다이오드 모듈 냉각용 TEC 소비전력 특성

이종진* · 유정희 · 강현서 · 고재삼

한국전자통신연구원 광통신부품연구센터

The Characteristic of TEC Power Consumption of Laser Diode Module

Jong Jin Lee*, Chong Hee Yu, Hyun Seo Kang and Jai Sang Koh

ETRI OCC in K-JIST Campus 1 Oryong-dong, Buk-gu, Gwang-ju, 500-712 Korea

초 록: 레이저다이오드 냉각을 위해 사용되는 TEC의 소비전력을 3차원 유한요소해석으로 예측하고 실험을 통해 해석결과의 타당성을 검증하였다. 레이저다이오드의 소비전력, 제어온도, 외기온도, 열전달 경로의 열저항 등이 고려되었다. 저소비전력 모듈의 설계를 위해 해석결과를 바탕으로 Pellet의 숫자와 치수로 결정되는 TEC 형태에 따른 소비전력특성을 고찰한 결과 Pellet의 숫자가 적으며 접지면적이 작고 길이가 길수록, 즉 열저항이 증가할수록 소비전력은 감소하였다.

Abstract: The power consumption of TEC for Laser diode cooling was predicted by 3-D FEM simulation and verified by experiment. The operating conditions such as power consumption of Laser diode, set temperature, ambient temperature, resistance of thermal path was considered to estimate the TEC power consumption. Using 3-D FEM simulation, the relation between TEC configuration defined by the pellet dimension and the number and power consumption was investigated for low power consumption scheme. As a result, as the thermal resistance of the pellet increased, the power consumption decreased.

Keywords: Cooled Laser diode module, TEC, Power consumption, Seebeck effect

1. 서 론

초소형 고집적 모듈의 온도 제어를 위해 CPL (Capillary Pumped Loop)과 같은 소형 냉각기 개발이 진행되고 있으며 현재는 TEC(Thermoelectric Cooler)가 주류를 이루고 있다.¹⁾ TEC는 소형화가 가능하고, 제어가 용이하며, 고체상태의 냉각소자로서 타 부품에 화학적인 영향을 주지 않는 장점을 가지고 있어 레이저다이오드 모듈과 같은 광부품 및 전자부품의 냉각에 많이 사용되고 있다.

통신방식에 따라 개발되고 있는 레이저다이오드 모듈중에서 DWDM(Denssed Wavelength Division

Multiplexing)용 모듈 같이 과장제한이 엄격한 모듈에 대해서는 TEC가 필수적으로 요구된다. 현재 가장 많이 사용되고 있는 DFB(Discrete Feedback) 레이저다이오드 칩은 온도변화 1°C에 대한 중심파장의 변화가 약 0.09nm이며 DWDM통신의 경우 국제 통신규격 ITU-T의 10Gbps 급의 속도 사양에 요구되는 레이저다이오드의 중심파장의 변화폭은 약 0.04 nm로써 DWDM용 레이저 다이오드 모듈은 약 0.5°C 이하의 온도제어가 요구된다. 이는 통신속도가 N배로 증가할 경우 중심파장 변화폭은 1/N배로 감소하기 때문에 앞으로 전개될 고속 통신시장의 추이에 따라 온도 제어사양은 매

*Corresponding author
E-mail: jongjin@etri.re.kr

우 까다로워질 전망이다. 또한 칩온도 10°C 상승에 대해 수명은 50% 가 감소되므로 신뢰성 확보가 필요한 경우에도 많이 사용되고 있으며²⁾, 통신속도를 결정짓는 선풍변화도 온도의 영향이 크기 때문에 TEC를 이용한 냉각시스템은 레이저다이오드 모듈에 지속적으로 사용될 전망이다.³⁾ 아울러 레이저다이오드 모듈의 소비전력의 대부분을 차지하는 TEC의 소비전력을 줄이기 위해 온도변화에 따른 파장변화가 미소한 uncooled 레이저다이오드 칩의 개발이 진행 되고 있으며, 중심파장을 상온 25°C 에서 40°C 로 옮겨 고온에서 냉각부하를 줄인 semi-uncooled 레이저다이오드 칩의 개발도 진행 중이다. 또한 전자소자의 발열부만을 국부적으로 냉각 시켜 불필요한 냉각 부하를 줄이기 위해 레이저다이오드 칩에 반도체 박막공정을 이용한 임베디드TEC기술도 개발되고 있다.⁴⁾

본 연구에서는 25°C 에서 중심파장 1550 nm을 갖는 DFB 레이저다이오드가 실장된 모듈에 대해 외기온도(T_a), 레이저다이오드 발열량, TEC의 면적, 기관의 형상 및 재료의 조건을 고려하여 TEC 소비전력 변화를 3-D FEM((3 Dimensional Finite Element Method) 해석으로 예측하고 실험적 타당성을 검증하였다.^{5,6)} 또한 검증된 모델을 통해 TEC 형태에 따른 전력소비에 대한 경향을 분석하였고 레이저다이오드 모듈의 저전력화를 위한 방안에 대해 고찰하였다.

2. FEM 해석

2.1 레이저다이오드 모듈의 열전달

Fig. 1의 레이저다이오드 모듈의 발열소자는 레이저다이오드 칩, 저항, 서미스터 등이 있고 발생된 열은 기관을 통해 TEC냉각부에서 흡수되며 흡수된 열과 TEC 주열열은 패키지 밑면을 통해 히트싱크로 전달되고 히트싱크로 전달된 열은 강제대류에 의해 외기로 방출된다.

Table 1은 본 연구에서 고려한 레이저다이오드 모듈의 부품사양이다. 발열 소자인 레이저다이오드 칩은 약 120 mW의 전력을 소비하며 기타 소자의 발열은 무시하였다. 냉각소자인 TEC는 RMT사의 IML06-023-09AN 모델을 이용 하였다.

레이저다이오드 모듈 내부의 대류 열전달의 경우 패키지 내부의 부피는 1cc 이하로 매우 작아 자

연대류에 의한 대류 열전달은 무시할 수 있다. 또한 금속재료의 패키지는 케이스온도(Case temperature)와 외기온도 T_a 의 차이가 미미하여 패키지 외부의 자연대류에 의한 열전달은 무시할 수 있다.

TEC의 동작상태는 패키지 내부온도와 외부온도에 따라 냉각모드와 가열모드로 분류 할 수 있다.

1) 냉각모드(Cooling mode)

Fig. 2의 (a)와 같이 외기온도가 25°C 이상일 경우 레이저다이오드 모듈 내부의 레이저다이오드 온도는 25°C 를 초과한다. 이때 레이저다이오드의

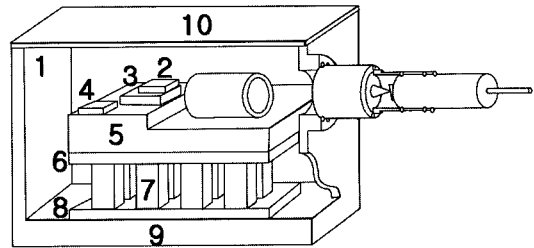


Fig. 1. The structure of LD module 1: Package wall (Kovar), 2: LD(Laser diode) 3: Submount (SiC), 4: Thermistor, 5: Submount(CuW), 6: TEC Submount (Al_2O_3), 7: TEC Pellet (Bi_2Te_3), 8: TEC Submount (Al_2O_3), 9: Package base(CuW), 10: Lid (Kovar).

Table 1. The specifacaton of components

Components (Material)	k (W/mK)	Dimension (mm)
*LD(InGaAsP)		0.3×0.65×0.1
Submount(SiC)	125	1.08×0.75×0.27
Submount(CuW)	115	6×12×0.5
Submount (Al_2O_3)	39	6×12×0.35
TEC Pellet (Bi_2Te_3)	1.5	Foot print : 0.6×0.6 Length : 0.9(h) **N : 70
Submount (Al_2O_3)	39	6×12×0.35
***BTF PKG base(CuW)	115	21×13×1
BTF PKG Lid(Kovar)	16	21×13×0.2
BTF PKG wall(Kovar)	16	21×10×1 13×10×1

*LD: Laser diode, **N: Number of pellets, ***BTF PKG: Butterfly Package

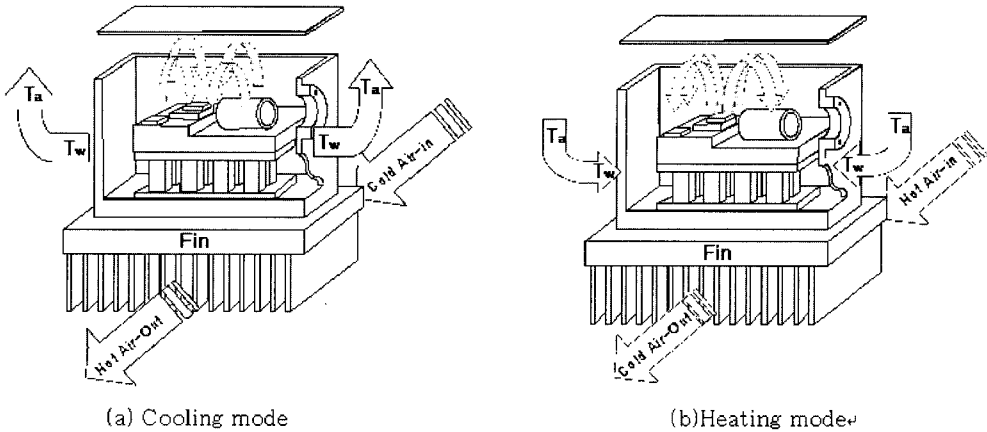


Fig. 2. Heat transfer of Laser diode module

온도를 유지하기 위해 레이저다이오드에서 발생하는 열과 패키지 외부에서 전달되는 열을 TEC의 냉각부에서 흡수한다.

2) 가열모드(Heating mode)

Fig. 2의 (b)와 같이 외기온도가 25°C이하 일 경우 레이저다이오드에서 발생하는 열은 기관과 TEC를 거쳐 외부 히트싱크로 방출되며 레이저다이오드는 과냉각 된다. 이때 TEC는 레이저다이오드의 온도를 25°C로 유지하기 위해 주울열을 발생시켜 레이저다이오드의 온도를 유지한다.

2.2. TEC 모델링

TEC 냉각부(Cold junction)에서 흡수된 냉각부하(Qc)는 TEC소비 전력(W)과 함께 TEC 발열부(Hot junction)에서 Qc+W만큼 발열된다. TEC의 모

델링을 위해 Fig. 3의 냉각부에서의 냉각부하(Qc)와 가열부의 발열량(Qc+W)을 열유속(Heat flux)으로 변환하였다.

모델링에 적용된 TEC는 폭6 mm, 길이12 mm, 높이 1.6 mm이며 내부는 높이0.9 mm, 폭0.6 mm, 길이 0.6 mm인 70개의 Pellet으로 구성된다. TEC 소비전력 시뮬레이션을 위해 레이저다이오드의 소비전력은120mW, 외기온도는 -20~70°C까지 변화시켰다. 이때 냉각핀에 의해 외기와 열교환이 이루어지는 패키지 밀면의 온도는 계산의 단순화를 위해 외기온도(Ta)로 가정하였다. 여기서 TEC pellet, 기관, 패키지 등의 열전달계수는 온도변화에 상관없이 일정하다고 가정하고 아래의 과정을 따라 계산을 수행한다.

a) TEC 가열부의 초기 발열부의 발열량 (Qh)을 1W로 가정하고 열유속으로 입력, b) 레이저다이

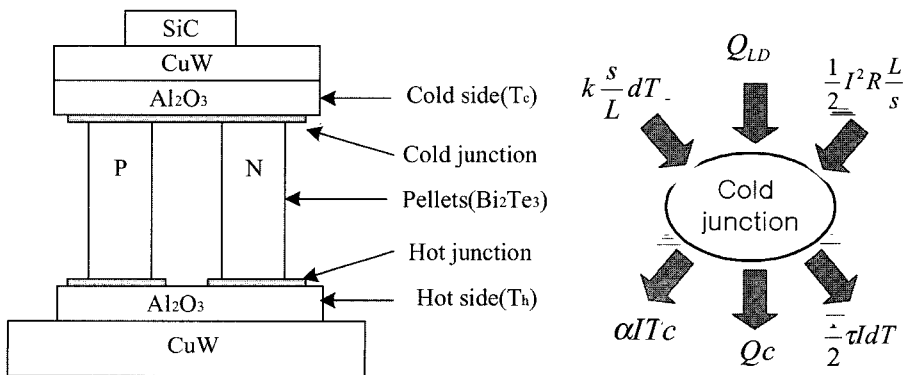


Fig. 3. TEC Structure and thermal equilibrium in cooling mode.

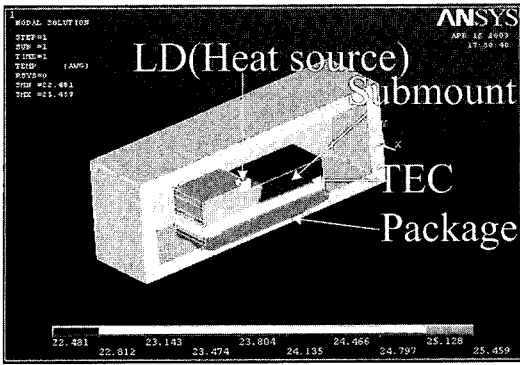


Fig. 4. 3-D FEM modeling of Laser diode module.

오드 발열량(Q_{LD})을 열유속으로 입력, c) 패키지 바닥에 외기온도(T_a)와 같은 온도하중 입력, d) 서미스터의 온도가 25°C로 유지되기 위한 냉각부의 냉각부하(Q_c) 계산, e) 냉각부온도(T_c)와 가열부온도(T_h)차 $dT(T_h-T_c)$ 계산, f)계산된 Q_c , dT , T_c 를 아래 Eq.1에 대입하여 TEC 전류(I)와 전압(V)을 계산함,⁷⁾ h) $W + Q_c$ 를 a)의 $Q_h(Q_h = Q_c + W)$ 에 입력 하고 TEC 소비전력(W)이 수렴 할때까지 b)~h) 과정 반복함

$$Q_c = N \left(-\alpha I T_c - \frac{1}{2} \tau I dT + \frac{1}{2} I^2 R_s^L + k \frac{s}{L} dT \right) + Q_{LD}$$

$$V = N \left(\alpha I dT + I R_s^L \right) \quad (Eq.1)$$

$\alpha I T_c$: Seebeck 효과에 의해 흡수되는 열량

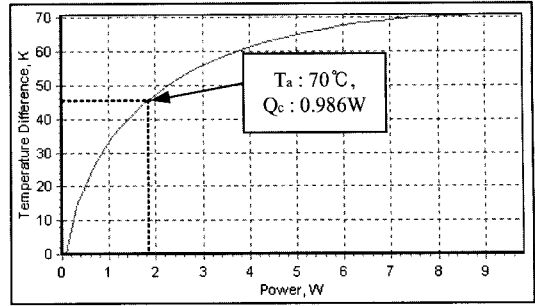
$\frac{1}{2} \tau I dT$: Thomson 효과에 의해 흡수되는 열량

$\frac{1}{2} I^2 R_s^L$: TEC 주울열

$k \frac{s}{L} dT$: TEC 발열부에서 전달되는 열량

Q_{LD} : LD 발열량

여기서, N: Pellet 개수, α : Seebeck 상수, τ : Thomson 상수, R: TEC 전기저항(Ohm-cm), s: Pellet footprint area(mm²), L: Pellet length(mm), k: pellet의 열전달 계수(W/m·K) 이다. 하지만 Eq.1의 α , τ 등은 온도 의존함수로서 일정한 상수로 가정할 경우 오차를 발생하게 된다. 따라서 TEC 제작사는 데이터의 정확성을 확보하기 위해 실험결과



($dT:46.3K, T_a:70^\circ C, Q_c:0.986 W \rightarrow$ TEC power consumption:1.8W)

Fig. 5. TEC performance curve(6X12X1.65, 70 pellets).

를 토대로 Fig. 5와 같은 성능곡선을 제시하며 이를 이용하여 Q_c , dT , T_a 의 해석결과로 TEC 소비전력(W)을 추정한다.

가열모드의 경우 냉각모드의 냉각부가 발열부로 전환되며 레이저다이오드의 온도를 25°C로 유지하기 위해 필요한 발열부의 발열량을 계산하였다. 계산의 편의성을 위해 Eq.1에서 패키지 밀면과 접한 TEC 냉각부는 패키지 밀면으로부터 전달되는 열량과 발열부에서 전달되는 열량, Seebeck 효과와 Thomson 효과에 의한 흡수열량을 무시할 수 있다고 가정하였고 이에 따라 발열부에 요구되는 발열량(Q_c)은 TEC 주울열, 즉 소비전력(W)이 된다.

Table 2는 TEC의 소비전력 산정을 위해 외기온도조건(T_a)에서 가열부와 냉각부의 온도차(dT), 위의 과정에서 계산된 냉각부하 혹은 발열량 (Q_c)을 이용하여 Fig. 5의 TEC 성능곡선에서 TEC의 소비전력을 계산하였다.

Table 2. Simulation result(Q_c & dT)

T_a (°C)	Q_c (W)	$dT(T_h-T_c)$ (°C)
-20	0.83	44.4
-10	0.63	34.5
0	0.28	24.7
10	0.13	15.1
25	-0.09	0.2
30	-0.16	5.3
40	-0.30	15.2
50	-0.46	25.4
60	-0.77	35.9
70	-0.99	46.3

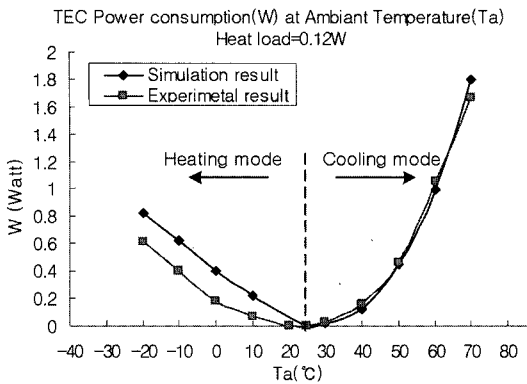


Fig. 6. TEC power consumption simulation result and experimental result.

3. 실험방법

제작된 레이저다이오드 모듈은 TEC 제어기와 레이저다이오드 전류제어기에 의해 제어되고 이때 A/D 변환기를 통해 레이저다이오드의 소비전력 및 온도정보를 실시간으로 측정하였다. 온도테스트를 위해 -20~70°C까지 온도변화가 가능한 챔버를 사용하였고, 온도구간을 10°C간격으로 변화시켰으며 챔버 내부온도가 설정 온도에 도달한 후 30분 후에 소비전력을 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

실험결과 Fig. 6과 같이 냉각모드에서는 해석결

과와 매우 잘 일치한다. 하지만 Fig. 6의 가열모드에서 해석결과와 실험결과사이에는 오차가 발생하였으며 이는 발열부에서 전달된 열량과 Seebeck 효과에 의한 흡수열량의 영향으로 판단된다. 하지만 TEC 최대 전력 소비는 최고온도에서 발생하고 따라서 레이저다이오드 모듈의 작동온도 사양에 따른 TEC 선정은 최고온도에서의 최대 소비전력을 고려하여야 한다.

이상의 해석 및 실험결과에서 외기온도에 따른 TEC 소비전력의 변화는 포물선 형태이며 최대 소비전력은 최고온도에서 발생하였다. 실험을 통해 입증된 TEC 소비전력 예측 모델을 이용하여 TEC 선정에 따른 영향을 알아 보기 위해 Table 3, 4와 같이 TEC 형상에 따른 소비전력의 변화를 분석하였다. 소비전력 산정 결과 Table 3과 같이 동일한 레이저다이오드 칩의 발열량에 대해 Pellet의 총 접지면적이 클수록, 다시말해 개별Pellet의 면적과 숫자가 많을수록 최대 냉각부하($Q_{c,max}$)는 증가하지만 이와 비례하여 TEC 소비전력이 증가한다. 그 이유는 냉각부하의 상당 부분이 패키지 바닥면에서 TEC의 Pellet을 통해 냉각부로 전달되기 때문이다. 따라서 TEC pellet의 면적이 증가할수록 레이저다이오드 칩의 발열에 대한 냉각효율은 감소한다. 또한 TEC pellet의 길이가 짧은 경우 열전자(Carrier)들의 이동거리가 짧아지고 Table 4와 같이 최대 냉각부하($Q_{c,max}$)는 증가한다. 하지만 열저항이 감소하여 패키지 바닥면에서 에서 냉각부로 전달되는 열량도 증가한다. 따라서 동일한 발열량에

Table 3. Power consumption according to Pellet foot print area

TEC size (mm)	Pellet Height (mm)	Pellet Number	Total Foot print area (mm ²)	$Q_{c,Max}$ (W)	Q_c Ta=70°C (W)	TEC power (W)
6×8×1.6	0.9	46	16.56	3.32	0.68	1.2
6×10×1.6	0.9	58	20.88	4.24	0.85	1.5
8×8×1.6	0.9	62	22.32	4.45	0.91	1.6
6×12×1.6	0.9	70	25.20	4.91	0.99	1.8

Table 4. Power consumption according to Pellet length

TEC size (mm)	Pellet Height (mm)	Pellet Number	Total Foot print area (mm ²)	Q_c Max (W)	Q_c Ta=70°C (W)	TEC power (W)
6×12×1.2	0.5	70	25.2	8.82	1.76	3.5
6×12×1.6	0.9	70	25.2	4.91	0.99	1.8
6×12×1.9	1.2	70	25.2	3.85	0.76	1.4

대해 Pellet의 길이가 짧을수록 소비전력이 증가하고 이에 따라 냉각효율도 감소하게 된다.

5. 결 론

이상에서 레이저다이오드 모듈의 온도 안정화를 위해 사용되는 TEC의 소비전력을 외기온도조건, 레이저다이오드 발열량, TEC 형태 등의 조건을 고려하여 이론적, 실험적으로 검증 하였다. 외기온도 변화에 대한 TEC 소비전력의 변화는 포물선 형태로 고온에서의 소비전력이 급격하게 증가하였고 최대 전력 소비는 최고온도 조건에서 발생하였다. 또한 TEC 냉각부하의 대부분이 전자소자의 발열이 아닌 패키지 밑면에서 TEC pellet을 통해 전달되는 열량이기 때문이다. 따라서 레이저다이오드 모듈의 저전력화와 냉각효율을 증가시키기 위해서는 레이저다이오드 모듈의 전체적인 형태를 규정하는 제한조건을 고려하여 열저항이 큰 TEC를 선정해야 하며 냉각 영역을 레이저다이오드, 아이솔레이터와 같은 온도변화에 민감한 부품에 국한시키거나 서브마운트에 실장되는 광학 및 전자부품을 소형화 하여 TEC면적을 줄이는 것이 유리하다.

참고문헌

1. Petrick E. Phelan, "Current and Future Miniature Refrigeration Cooling Technologies for High Power Microelectronics", IEEE 7th SEMI-THERM symposium, pp 158-167 (2001).
2. S. S. Tonapi, et al., "An Overview of Thermal Management for Next Generation Microelectronic Devices", IEEE SEMI Advanced manufacturing Conference, pp, 250-254 (2003).
3. J. Zoz, et al., "Linewidth enhancement in laser diodes caused by temperature fluctuations" IEE Proc-Optoelectron, 141(3), pp. 191-194, June (1994).
4. Chris LaBounty, et al., "Design of Integrated Thin Film Coolers", IEEE 18th International Conference on Thermoelectronics, pp. 23-26 (1999).
5. H. Van., et al., "Thermal aspect of pump-laser packaging," Electronic Components and Technology Conference, pp. 848-852 (1992).
6. Koji Terada. et al., "Isolator-free DFB-LD Module with TEC Control Using Silicon Wafer board," Electrical Performance of Electronic Packaging, 1996., IEEE 5th Topical Meeting, pp. 71-73 (1996).
7. 고기탁, 김귀순, 주영수 "TEC의 열전달 특성에 관한 실험적 연구" 한국항공우주학회 춘계학술대회, pp. 211-214 (1998).