

열전냉각 모듈을 이용한 국소 냉각에 관한 연구

김 옥 중*, 이 공 훈

한국기계연구원 에너지기계연구본부

A Study on the Hot Spot Cooling Using Thermoelectric Cooler

Ook Joong Kim, Kong Hoon Lee

ABSTRACT: An experimental apparatus to show the hot spot cooling of an IC chip using a thermoelectric cooler is developed. The spot heating in very small area is achieved by the applying CO₂ laser source and temperatures are measured using miniature thermocouples. The active effects of thermoelectric cooler on the hot spot cooling system such as rapid heat spreading in the chip and lowering the peak temperature around the hot spot region are investigated. The experimental results are simulated numerically using the TAS program, which the performance characteristics such as Seebeck coefficient, electrical resistance and thermal conductivity of the thermoelectric cooler are searched by trial and error. Good agreements are obtained between numerical and experimental results if the appropriate performance data of the thermoelectric cooler are given.

Key words: Hot Spot Cooling(국소 냉각), Thermoelectric Cooler(TEC, 열전냉각)

1. 서 론

단위면적당 발열량이 매우 큰 고성능 IC칩에서 효과적으로 열을 제거하는 문제는 열전달 분야에서 매우 중요한 도전과제로서 다양한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.⁽¹⁻³⁾ 이들 연구결과에 따르면 IC칩의 경우 신뢰성 확보를 위해서는 junction부분의 최대 온도가 100°C이하를 유지해야 하며 칩 표면 전체를 통한 평균 발열량 보다 국소적인 발열부분 즉 hot spot에서의 열 소산 문제가 더 중요함을 알 수 있다.

이와 같은 국소 발열 문제를 해결하기 위한 하나의 방안으로서 초소형의 열전냉각 모듈을 이용하는 여러 가지 연구가 시도되었다. Zhang 등⁽⁴⁾과 Yang 등⁽⁵⁾의 연구결과에 따르면 열전냉각 장치를 이용할 경우 각각 최대 600 W/cm²와 1,250

W/cm²의 높은 국소 냉각 효과를 얻을 수 있음을 보였으며 Solbrekken⁽⁶⁾는 열전냉각에 따른 유효 열전도율의 증가 효과로 국소 발열 부분의 온도를 최대 50%까지 감소시킬 수 있음을 발표하였다. 이와 같은 결과는 열전냉각 모듈을 기존의 방법이 아닌 MEMS 공정에 의해 초소형으로 제작이 가능함에 따라 얻을 수 있는 결과로서 최근 MicroPelt사⁽⁷⁾에서는 스퍼터링(sputtering) 공정을 이용하여 p 혹은 n형 열전 leg의 높이가 약 20 μm가 되는 초소형 열전냉각 모듈 상용화를 발표하였다. MicroPelt사의 초소형 열전냉각 모듈은 약 5 mm x 7 mm x 0.5 mm 인 크기에 240개의 열전 leg가 있으며 이상적으로 진공하에서 약 60 K의 최대 온도차를 얻을 수 있음을 보고하였다.

본 연구에서는 칩의 국소 냉각에 이러한 초소형 열전냉각 시스템의 적용이 가능한지를 검토하기 위한 목적을 가지고 CO₂ 레이저를 이용한 국소 가열과 초소형 열전모듈을 냉각 장치로 적용한 실험을 수행하였다. 또한 실험 결과를 열전냉

† Corresponding author

Tel.: +82-42-868-7326; fax: +82-42-868-7335

E-mail address: ojkim@kimm.re.kr

각 모듈 적용이 가능한 상용 소프트웨어인 TAS(Thermal Analysis System)⁽⁸⁾로 계산한 결과와 비교함으로써 냉각 시스템의 성능 예측과 중요 변수의 영향 등에 대해 조사하였다.

2. 국소냉각 실험장치

2.1 실험장치

컴퓨터용 IC칩의 국소 가열 및 냉각을 위한 실험 장치를 Fig. 1과 같이 구성하였다. 그림에 보인 바와 같이 국소 가열을 위하여 평균 출력 10 W 용량의 CO₂ 레이저시스템(SYSRAD, Model 48-1)을 사용하였으며 발생된 레이저 소스는 초점거리가 110 mm인 렌즈로 유도되어 그림에 표시된 직경 1.5 mm의 hot spot hole을 통과한 다음 최종적으로 직경 약 0.6 mm의 범위(hot spot)에 조사된다. 레이저의 세기는 별도로 제공된 제어기(SYNRAD, Morel UC-2000)로 조절된다.

컴퓨터용 IC칩은 Fig. 2에 보인 바와 같이 아크릴을 사용하여 모사하였으며 그 중앙부에 초소형 열전냉각 모듈(MicroPelt, Model MPC-D901)을 방열컴파운드(장암엘에스(주), CASMOLY HC-300)를 사용하여 부착하였다. 상부의 가열을 위해서 4개의 전기히터를 알루미늄 블록에 설치하였으며 PID 제어기(Yokogawa, UT550)와 전압조정기(Sanup Electornic, SPR Pro)로써 블록의 가열온도를 조절하였다. 히터로 가해진 열과 열전냉각으로 생성된 열은 알루미늄 블록과 히트파이프 및 쉘으로 구성된 히트싱크 시스템을 사용하여 제거하였다. 냉각용 쉘과 열전 모듈의 전력공급을 위해서 정밀한 전력공급장치(Agilent, Model E3634A, E3633A)를 사용하였으며 국소 가열 및 냉각의 효과를 보기 위해 모사용 칩에 Fig. 2에 보인 바와 같이 직경 0.9 mm의 구멍을 가공하여 T형의 열전대를 설치하였다. Table 1은 실험장치 각 구성품에 대한 규격이며 문헌⁽⁹⁾과 제작사로부터 입수한 재료의 열전도율을 함께 나타내었다. 표에서 back plate는 칩 모사용인 아크릴과 동일한 재질을 사용할 경우 너무 낮은 열전도율로 인해 열전모듈의 사용 여부에 따른 온도변화를 거의 측정할 수 없어 히트싱크 시스템의 열전달을 향상시키기 위하여 다른 재질을 사용한 것을 나타낸다. 가열온도와 레이저 세기, 열전냉각 모듈용 전압 크기의 조정과 온도 등의 데이터

처리 및 저장을 위해 Fig. 3에 보인 바와 같이 LabView 프로그램을 활용하였다.

2.2 실험방법

실험에서 가장 중요한 사항 중의 하나는 항상 일정한 범위에서 국소 가열이 이루어져야 하는 것으로서 측정전에는 항상 레이저의 조사상태를 검사용 종이로써 확인하였다. 가열 부분의 온도와 냉각용 쉘의 공급 전압을 입력하여 정상상태에 도달하게 되면 레이저로써 국소 가열을 시작하며 일정시간 경과 후에 열전냉각 모듈에 전압을 가하였다. 레이저 세기와 열전냉각 모듈에 가해지는 전압의 크기를 주요 실험 변수로 정하였으며 이들 변수 변화에 따른 모사용 칩의 온도변화를 측정하여 분석하였다. 하나의 조건에 대해 상당시간이 경과한 정상상태 측정을 기대했으나 전체의 열용량에 비해 매우 작은 초소형의 열전냉각 모듈을 사용함에 따라 비교적 냉각 효과를 볼 수 있는 시간 범위의 데이터를 취득하였다.

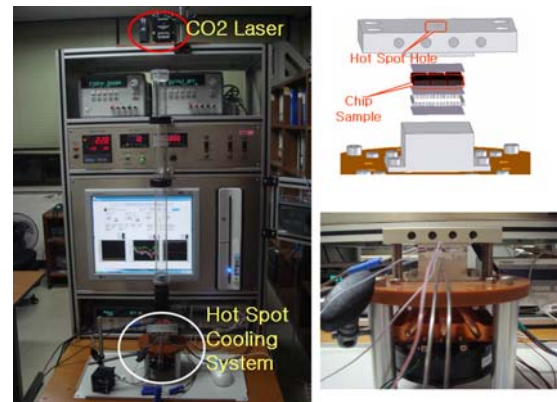


Fig. 1 Overview of experimental set-up.

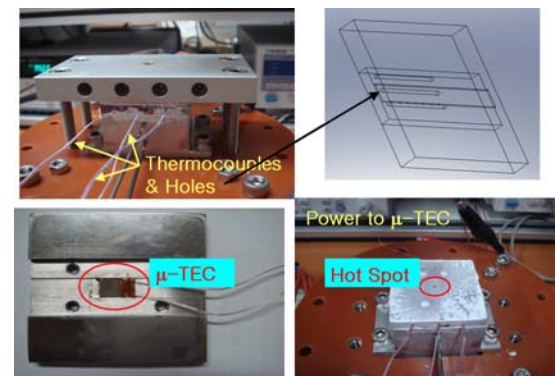


Fig. 2 View of cooling block and micro-TEC.

Table 1. Specifications of experimental set-up

	Geometry (L x W x H) (unit : mm)	Material or Model	Thermal conductivity (W/m-K)
Chip	40 x 40 x 1.9	Acrylic	0.2
TEC	5 x 5 x 0.5	D901	-
Back Plate	15 x 40 x 2.6	Cu	380
TIM	0.1	HC-300	0.84
Interface	0.01	-	0.015
Hot Spot	0.6 (diameter)	CO ₂	-

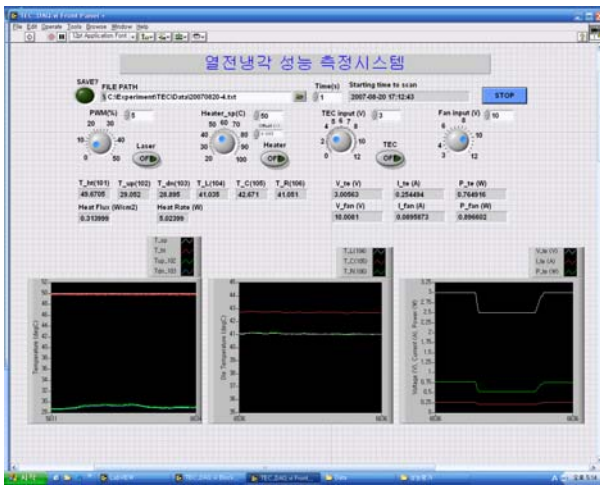


Fig. 3 View of LabView program running.

3. 국소냉각 시스템 시뮬레이션

실험 결과와의 비교를 위한 국소 냉각시스템의 시뮬레이션은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 냉각시스템의 일부에 대해서 수행하였다. 그림에 보인 바와 같이 초소형 열전 모듈이 모사용 칩에 방열컴파운드로써 부착이 되어 있는 형태이며 상부로부터 가해진 열이 하부로 전달된다.

시뮬레이션을 위한 상부와 하부의 경계 조건으로는 실험에서 측정된 가열부 및 히트싱크부의 온도를 이용하였으며 나머지 부분은 자연대류 열전달 경계조건을 사용하였다. 국소 가열은 모사용 칩 상부의 중앙 node에 열유속을 가하는 방법으로 모사하였으며 칩과 back plate, 열전모듈과의 접촉저항은 Table 1에 보인 바와 같이 interface의 유효열전도율에 포함시키는 방법을 취하였다. 열전모듈의 성능은 TAS 프로그램 내에 포함된 다음의 식들을 이용하여 계산하였다.

$$Q_h = 2N[aIT_c + (I^2r/2G)] \quad (1)$$

$$V = 2N[(Ir)/G + (a\Delta T)] \quad (2)$$

$$i_{\max} = (kG/a)[(1 + (2ZT_h))^{0.5} - 1] \quad (3)$$

여기서,

i_{\max} : 최대전류

T_h : 방열부 온도

T_c : 냉각부 온도

ΔT : $T_h - T_c$

G : 열전 leg의 면적/길이

N : 열전 leg의 pair 수

I : 전류

a : 제백계수(Seebeck Coefficient)

r : 전기비저항

k : 열전도율

Z : 성능지수($=a^2/rk$)

열전모듈의 성능을 결정하는 변수는 Table 2에 보인 바와 같이 이전의 연구⁽¹⁰⁾와 제조사⁽⁷⁾로부터 구한 값을 이용하였다. 그러나 표에서 제백계수는 실험결과와의 비교를 통하여 시행착오적으로 구한 값이다. 계산영역에 약 70만개의 node를 형성하였으며 node간의 분해능은 0.1~0.5 mm가 유지되었다.

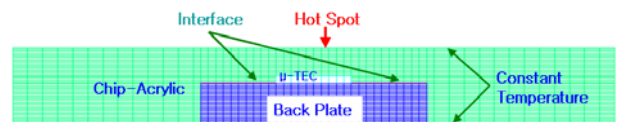


Fig. 4 Structure of hot spot cooling system.

Table 2 Specifications or properties of μ -TEC

Specifications or Properties	Unit	Values
a	V/K	90×10^{-6}
r	Ω -m	2.34×10^{-5}
k	W/ m-K	1.5
G	μ m	245
Number of pairs	-	240
Substrate thickness	mm	0.25

4. 실험 및 계산 결과 검토

Fig. 4는 가열부의 온도를 50°C로 조정하여 일정 시간 동안 국소 가열에 따른 칩의 온도 변화를 측정된 결과를 보인 것으로서 열전모듈에 가

해진 전압과 전류를 동시에 나타내었다. 이 때 레이저의 세기는 평균 출력의 5%로서 hot spot의 면적을 고려한 열유속은 약 175 W/cm^2 에 해당한다. 그림에 표시된 온도 센서의 위치는 Fig. 5에 보인 바와 같으며 T_{center} 는 hot spot과 일치하게 설치되어 있다. 그리고 T_{left} 와 T_{right} 는 T_{center} 로부터 각각 좌우 방향으로 4 mm 간격을 두고 있으며 따라서 T_{left} 와 T_{right} 는 열전모듈의 설치 범위 밖에 위치하게 된다. 모든 온도센서는 칩의 표면으로부터 0.85 mm 깊이에 위치하고 있다.

Fig. 4에 나타낸 바와 같이 국소 가열이 있는 상태에서 열전모듈에 일정한 전력이 가해지면 hot spot 부분의 온도는 강하한 반면 주변의 온도는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 열전모듈과 직접 접촉하고 있는 hot spot 부분은 열전모듈에 의해 국부적인 냉각이 발생한 반면 아크릴의 낮은 열전도율로 인해 이 냉각 효과가 매우 제한된 범위에서만 나타남을 시사하고 있다. 그림에 보인 바와 같이 열전모듈에 2 V의 전압과 0.2 A의 전력 공급을 통하여 1.0°C 의 온도 강하를 얻을 수 있었다. 이와 같은 온도 강하는 제조사⁽⁷⁾에서 제시한 열전모듈의 성능으로부터 얻을 수 있는 값에 비하면 매우 미미함을 알 수 있는데 이는 열전모듈 부착을 위해 사용한 방열 컴파운드의 낮은 열전도율과 큰 접촉저항 등에 의한 영향이라 판단된다.

Fig. 6은 Fig. 4와 동일한 조건에서 열전 모듈에 가해진 전압을 4 V로 증가시킨 경우로서 Fig. 4와 거의 동일한 변화를 보이며 이 때 온도강하는 1.3°C 로 나타났다.

Fig. 7은 Fig. 6의 경우 보다 열전모듈에 가해진 전압을 6 V로 증가시킨 결과로서 전압이 증가했음에도 불구하고 온도 변화가 Fig. 6과 거의 동일하게 나타났으며 실제 최대 온도 강하량도 1.3°C 로 같았다. 이와 같은 경향은 전압의 증가에 따라 포물선 모양의 성능을 나타내는 열전모듈의 특성을 반영한 것으로 보이며 구성된 실험장치에서 최대 성능은 3~4 V 범위에서 발생함을 예상할 수 있었다.

Fig. 8은 Fig. 6과 동일한 조건에서 레이저의 세기를 7%(약 250 W/cm^2 의 열유속에 해당)로 증가시킨 결과로서 hot spot 부분의 온도가 약 2°C 정도 상승하였으나 온도 강하 특성은 거의

동일하게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 9는 가해진 레이저의 세기에 따른 hot spot 부분의 온도 상승을 보인 것으로 최대 7%에서 약 5°C 의 국부적인 온도 상승이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 10은 열전모듈에 가해진 전압의 크기에 따라 hot spot 위치에서 실험적으로 얻은 최대 온도강하와 TAS 프로그램을 이용하여 구한 계산 결과를 비교한 것이다. 그림에 보인 바와 같이 계산과 실험 결과가 잘 일치하며 전압의 증가에 따라 온도강하량도 증가하나 최대값이 존재하고 이후에는 감소하는 경향을 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 11은 TAS로 계산한 냉각시스템의 온도분포를 나타낸 것으로 국소 가열과 열전모듈에 전력이 공급되지 않았을 때의 결과이다. 구리로 구성된 back plate의 영향으로 열전모듈을 포함한 부분의 온도가 아크릴 부분의 온도보다 낮은 온도를 유지함을 볼 수 있다.

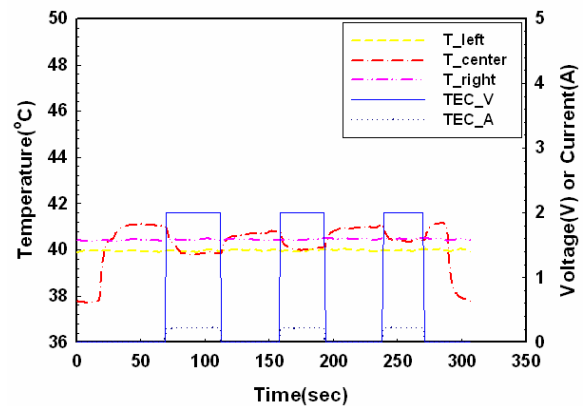


Fig. 4 Variations of temperature and voltage and current with time. (TEC=2V)

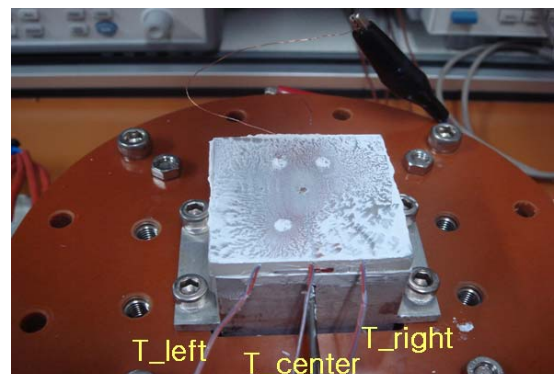


Fig. 5 Location of temperature sensors.

그림에서의 단면은 아래로부터 10, 20, 30 mm 에 위치한 것으로서 20 mm 단면에는 그림의 아래에 보인 바와 같이 열전모듈이 설치되어 있으며 상부 표면에 hot spot이 존재하게 된다.

Fig. 12는 레이저의 세기가 5%이고 열전모듈에 4 V의 전압이 가해졌을 경우의 계산 결과를 보인 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 국소가 열로 인해 hot spot의 온도가 가열부의 조절 온도인 50°C 보다 24°C 이상 상승하며 이와 같은 국부적인 온도 상승에도 불구하고 열전냉각 효과에 의해 열전모듈의 상부부분의 온도가 강하함에 따라 앞의 실험결과와 같이 측정 위치에 따른 온도분포를 보임을 알 수 있다.

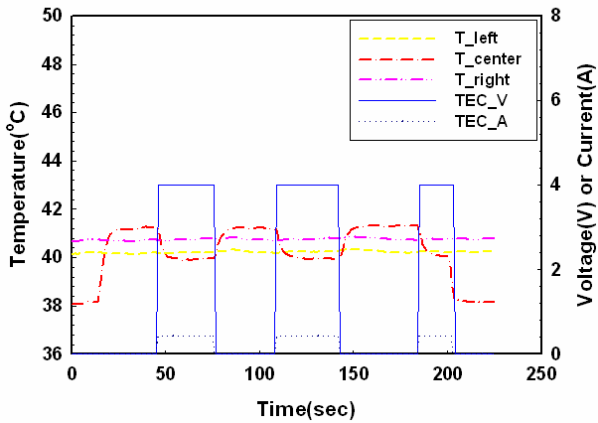


Fig. 6 Variations of temperature and voltage and current with time. (TEC=4V)

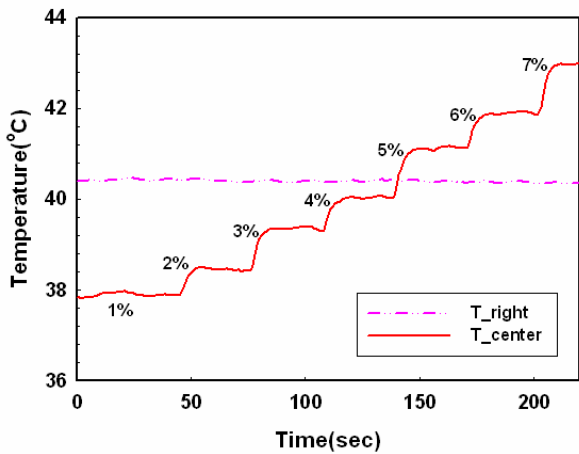


Fig. 9 Temperature rise in the hot spot with the applied laser power.

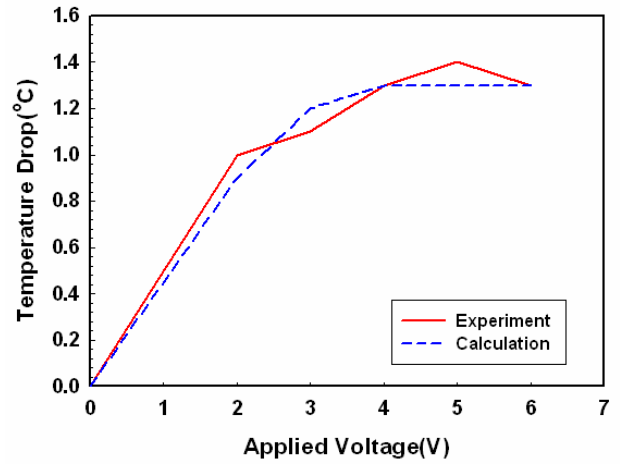


Fig. 10 Comparison of temperature drop in the hot spot with the applied TEC voltage.

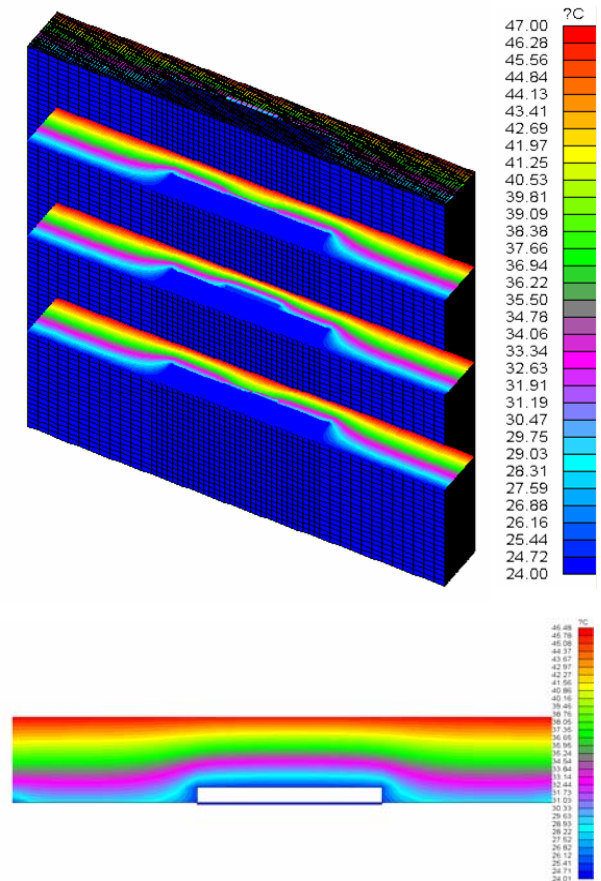


Fig. 11 Temperature contours without hot spot and 0 V is applied to the TEC.

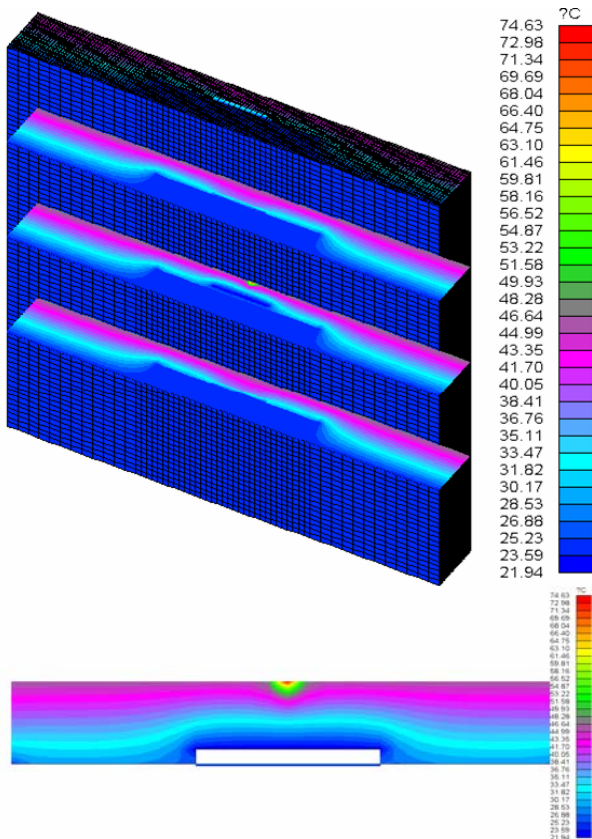


Fig. 12 Temperature contours with hot spot (5%) and 4 V is applied to the TEC.

5. 결론

초소형 열전냉각 시스템을 칩의 국소 냉각에 적용하기 위한 실험과 계산을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 아크릴과 구리로 칩을 모사하고 CO₂ 레이저와 초소형 열전모듈을 국소 가열과 냉각에 적용하여 국소냉각 시스템을 구현할 수 있었다.

2) 열전모듈의 부착을 위한 방열컴파운드와 접촉저항의 영향이 열전모듈의 성능에 크게 영향을 미치며 이 열저항 감소가 매우 중요함을 알 수 있었다.

3) 실험 범위 내에서 열전모듈에 가해진 전압이 증가함에 따라 hot spot에서의 온도강하는 증가하였으나 열전모듈의 특성으로 인해 최대값이 존재하였으며 이후에는 감소하였다.

4) 열전모듈의 중요 물성치의 결정으로 시뮬레이션 결과가 실험 결과와 잘 일치하였으며 실제 실험으로 얻을 수 없는 정보를 계산을 통하여 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 국무총리산하 산업기술연구회가 지원하는 협동연구사업인 “차세대 냉각시스템 기술 개발”의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- Gurram, S. P. et al, 2004, Thermal Issues in Next-Generation Integrated Circuits, IEEE Trans-DMR, Vol. 4, No. 3, pp. 709-714.
- Prasher, R. S. et al, 2005, Nano and Micro Technology-Based Next-Generation Package-Level Cooling Solutions, Intel Technology Journal, Vol. 9, Issue 4, pp. 285-296.
- Sauciuc, I. et al, 2005, Thermal Performance and Key Challenges for Future CPU Cooling Technologies, Proc IPACK2005, San Francisco, CA, July, pp. 1-12.
- Zhang Y. et al, 2006, On-Chip High Speed Localized Cooling Using Superlattice Microrefrigerators, IEEE Trans-CAPT, Vol. 29, No. 2, pp. 395-401.
- Yang B. et al, 2006, Therelectric Mini-Contact Cooler for Hot-Spot Removal in High Power Devices,” Proc 2006 Electronic Components and Technology Conference, pp. 997-1002.
- Solbrekken, G. L., 2005, Peltier Enhanced Heat Spreading for Localized Hot Spot Thermal Management, Proc IPACK2005, San Francisco, CA, July, pp. 1-7.
- <http://www.micropelt.com>
- <http://www.ansys.com/products/tas.asp>
- Kaviany M, 200, Principles of Heat Transfer, John Wiley & Sons, Inc, New York.
- Lee, K. H. and Kim, O. J., 2007, Analysis on the cooling performance of the thermoelectric micro-cooler, Int. J. of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, pp. 1982-1992.