

논문 2001-10-3-07

**유한 요소법에 의한 평면형 다중접합 열전변환기의 온도분포 해석**

황찬순\*, 조현덕\*\*, 권재우\*\*\*, 이정희\*\*\*, 이종현\*\*\*, 김진섭\*, 박세일\*\*\*\*, 권성원\*\*\*\*

**Finite Element Method Analysis for Temperature Profile of a Planar Multijunction Thermal Converter****Chan-Soon Hwang\*, Hyun-Duk Cho\*\*, Jae-Woo Kwon\*\*\*, Jung-Hee Lee\*\*\*, Jong-Hyun Lee\*\*\*, Jin-Sup Kim\*, Se Il Park\*\*\*\* and Sung-Won Kwon\*\*\*\*****요 약**

열 영상 촬영에 의한 평면형 크로멜-알루멜 다중접합 열전변환기(TC 1)의 실제 온도분포를 측정하였다. 또한 유한 요소법에 의한 3차원 ANSYS 프로그램으로 열전변환기를 컴퓨터 시뮬레이션하여 열전변환기(TC 1~TC 6)의 입력전력에 따른 온도분포를 예측하였다. TC 1의 고온 접합부 온도와 저온 접합부 온도의 차이가 가장 작고 TC 6의 고온 접합부 온도와 저온 접합부 온도의 차이가 가장 크게 나타나기 때문에 TC 1의 전압 감응도는 가장 작은 3.09 mV/mW로 측정되었고 TC 6의 전압 감응도는 가장 큰 4.03 mV/mW로 측정되었다.

**Abstract**

Real temperature profiles of a planar chromel-alumel multi-junction thermal converter(TC 1) were measured by thermal image. Temperature profiles as a function of input power of thermal converters(TC 1~TC 6) were simulated by 3-dimensional ANSYS program based on finite element method. Temperature difference between the hot junction and the cold junction for TC 1 was smallest and largest for TC 6 and correspondingly, the voltage response for TC 1 and TC 6 showed the smallest value of 3.09 mV/mW and the largest value of 4.03 mV/mW, respectively.

**I. 서 론**

교류의 실용표준을 설정하기 위한 교류-직류 변환기로서 정전형, 전기력형 및 열전형 변환기 등이 연구되어 왔다. 이들 중 Seebeck 효과를 이

용한 열전형 변환기는 교류의 파형 및 주파수에 따른 특성변화가 비교적 작은 장점을 갖기 때문에 여러 나라에서 교류-직류 변환기로 사용되고 있다<sup>[1]</sup>. 또한 열전형 변환기는 교류-직류 변환기로서 뿐만 아니라, 전자식 실효치 전류계 및 전압계, 고주파 전력계, 파형을 측정기, 진공 게이지 및 잡음 측정기 등에서 다양하게 사용된다.

열전변환기는 오래 전부터 사용되어 온 진공관 형태의 3차원 단일접합 열전변환기(3-D SJTC : 3-dimensional single junction thermal converter), 단일 접합 열전변환기의 성능을 개선시킨 3차원 다중 접합 열전변환기(3-D MJTC : 3-dimensional multi-junction thermal converter) 및 최근에 와서 3차원 다중접합 열전변환기의 제작공정상의 어려움 때문에 반도체 공정기술로 제작되는 평면형 다중접합 열전변환기(PMJTC : planar multi

\* 인제대학교 전자정보통신공학부(School of Electronic and Telecommunication Engineering, Inje University)

\*\* 삼성전자주식회사 반도체연구소(Semiconductor R &amp; D Center, Samsung Electronics Co., Ltd.)

\*\*\* 경북대학교 전자전기공학부(School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University)

\*\*\*\* 한국표준과학연구원 전자기표준부(Division of Electromagnetic Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science)

&lt;접수일자 : 2001년 3월 20일&gt;

-junction thermal converter)의 순서로 발전되어 왔다<sup>[2-4]</sup>. 3차원 단일접합 열전변환기는 교류-직류 변환오차가 10 ppm 정도로 너무 크고, 3차원 다중접합 열전변환기는 직경이 약 10  $\mu\text{m}$ 인 미세한 와이어를 다루어야 하기 때문에 공정수율이 매우 낮은 문제점이 있었다. 최근까지 여러 연구자들에 의해 반도체 공정기술을 이용한 평면형 다중접합 열전변환기의 제작 및 특성에 대한 연구는 활발하게 수행되어 왔으나, 열전변환기의 동작 특성에 가장 큰 영향을 미치는 온도분포에 대한 해석 및 검토는 거의 이루어지지 않았다<sup>[5-8]</sup>.

본 논문에서는 열 영상 촬영에 의한 평면형 크로멜-알루미늄 다중접합 열전변환기의 실제 온도분포를 측정하였고, 또한 유한 요소법(finite element method)에 의한 상용 3차원 ANSYS 프로그램으로 열전변환기를 컴퓨터 시뮬레이션하여 열전변환기의 입력전력에 따른 온도분포를 예측하고자 하였다.

## II. 열전달 이론

열전달은 열이 이동할 때 열의 전달을 예측하는 것, 즉 평형상태간의 에너지 이동과정을 산출하는 것이다. 물질내의 온도 기울기가 있으면 언제나 열 흐름이 발생한다. 이러한 열전도에는 전도, 대류 및 복사의 세가지 방식이 있다. 열전변환기의 온도분포 해석에 사용된 열전달 원리 및 열전달 방정식은 다음과 같다<sup>[9]</sup>.

전도는 어떤 물체와 다른 물체 또는 동일 물체의 서로 다른 부분의 접촉에서 온도차이 때문에 생기는 내부 에너지 전달로 생각할 수 있다. 일반적으로 열전도에 관한 법칙은 Fourier 법칙으로 알려져 있고, 전도에 의한 열전달율은 열유속(heat flux)에 수직한 면적과 열유속 방향의 온도 기울기의 곱에 비례한다.  $x$  방향으로의 열유속은 다음의 식(1)과 같이 표현된다.

$$q'' = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

여기서  $q''$ 은 면적  $A$ 를 통한  $+x$  방향으로의 열전달이고,  $k$ 는 열전도도이다.

온도분포 시뮬레이션에 사용된 3차원 열 고체 모델(3-dimension thermal solid model)에 사용

된 방정식은 아래의 식(2)와 같다.

$$q'' = -kA \left( i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (2)$$

대류는 서로 다른 온도의 움직이는 유체와 물체의 경계면 사이에서 발생하고, 유체의 상태에 따라 자연대류, 강제대류 및 혼합대류로 분류된다. 자연대류는 유체의 밀도변화 때문에 생기는 유체의 운동이고, 강제대류는 물체의 표면 위를 강제로 흐르게 되는 유체의 운동이다. 그리고 혼합대류는 자연대류와 강제대류가 섞인 경우이다. 시뮬레이션에서는 강제대류나 혼합대류가 존재하지 않기 때문에 자연대류만을 고려하였다. 대류 효과는 Newton의 냉각법칙에 의해 다음의 식(3)과 같이 표현되며, 이 법칙은 고온의 물체로부터 저온의 유체까지 흐름을 통하여 열을 제거하는데 관여한다.

$$q'' = hA(T_w - T_\infty) \quad (3)$$

여기서  $T_w$ 는 물체의 표면온도이고,  $T_\infty$ 는 물체 위를 흐르고 있는 유체의 온도이다.  $h$ 는 대류계수이고, 이것은 물체표면의 기하학적 형상, 유동의 성질, 유체의 열역학적 물성값 및 열전달 물성값에 의해 영향을 받는 경계층 내부의 조건에 의존한다.

대기압에서 수평판으로부터의 층류(laminar flow)에 의한 자연대류의 경우 대류계수는 다음의 식(4), 식(5) 및 식(6)으로 각각 표현된다. 식(4)는 위로 향한 가열판의 경우이고, 식(5)는 위로 향한 냉각판이며, 식(6)은 아래로 향한 냉각판의 경우이다<sup>[10]</sup>.

$$h = 1.32 \left( \frac{\Delta T}{L} \right)^{0.25} \quad (4)$$

$$h = 0.59 \left( \frac{\Delta T}{L} \right)^{0.25} \quad (5)$$

$$h = 1.32 \left( \frac{\Delta T}{L} \right)^{0.25} \quad (6)$$

여기서  $\Delta T = (T_w - T_\infty)$ 는 물체의 표면온도와 물체의 위를 흐르는 유체의 온도차이다.  $L = A/P$ 로 정의되는  $L$ 은 특성길이 이고,  $A$ 는 면적이며,  $P$ 는 면적을 감싸고 있는 표면의 둘레이다.

모든 물체는 고온이 되면 그 물체를 구성하고

있는 원자나 분자가 격렬한 진동을 하게 된다. 이와 같이 입자들이 진동하는 주위에 전자기파가 발생하고, 이 전자기파는 각 방향으로 퍼져 방출된다. 물체를 구성하고 있는 원자나 분자의 진동에 의해 생기는 전자기파를 통해 열을 전달시키는 방법을 복사라 한다. 전도나 대류에 의한 열전달은 매질이 필요한 반면에 복사에 의한 열전달은 진공 중에서 가장 잘 이루어진다. 두 물체사이 또는 표면에서의 복사는 Stefan-Boltzmann 법칙에 의해 다음의 식(7)로 주어진다.

$$q'' = F_{12} \epsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (7)$$

여기서  $\epsilon$ 는 복사율로서 어떤 물체의 표면이 이상적인 복사체에 비해 얼마나 효과적으로 복사하는가를 나타낸다.  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수 ( $5.67 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{K}^{-4}$ )이고,  $F_{12}$ (radiation shape factor)는 표면 1에서부터 표면 2로 전달되는 에너지의 비율이며, 또한  $T_1$ 은 표면 1의 절대온도이고  $T_2$ 는 표면 2의 절대온도이다. 열전변환기에서  $T_1$ 은 열원인 히터의 온도이고,  $T_2$ 는 히터 이외의 다른 부분의 온도이다. 그리고 ANSYS 프로그램으로 온도분포를 구할 때 보통  $F_{12}$ 는 1로 가정한다.

지금까지 언급한 전도, 대류 및 복사가 동시에 일어날 경우, 히터를 통해서 전도된 열은 대류와 복사에 의해서 판의 표면으로부터 주위로 흘러나가게 될 것이고, 에너지 평균으로부터 아래의 식(8)을 얻는다.

$$-kA \left( i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = hA(T_w - T_\infty) + F_{12} \epsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (8)$$

### III. 열전변환기의 설계 및 제작

열전변환기 제작에 사용된 기판은 결정면이 (100), 비저항이 7~12  $\Omega \cdot \text{cm}$ , 두께가 약 600  $\mu\text{m}$ 인 양면이 경면으로 연마된 직경 5인치의 n형 실리콘 웨이퍼를 사용하였다.

그림 1(a)에 나타난 단면도와 같이 실리콘 기판 앞면에서는 히터 및 열전퇴의 고온 접합부와 실리콘 기판 사이의 열차단용 멤브레인으로 사용되고, 기판 뒷면에서는 실리콘 기판의 이방성 식각 마스크로 사용될 150 nm-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/300 nm

-SiO<sub>2</sub>/150 nm-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>(N/O/N) 박막을 기판의 양면에 증착시켰다. Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 박막의 경우 고온 LPCVD 방법으로 증착하였고, SiO<sub>2</sub> 박막의 경우는 저온 LPCVD 방법으로 증착하였다.

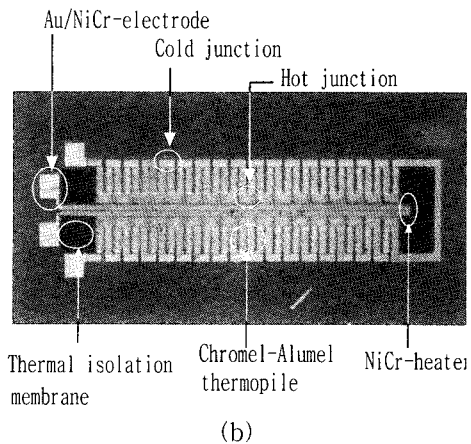
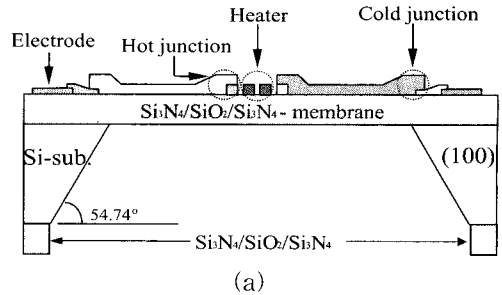


그림 1. 열전변환기의 (a) 단면도 및 (b) 사진  
Fig. 1. (a) cross-sectional view and (b) photograph of a thermal converter.

그 다음 기판의 앞면에서는 와이어 본딩용 전극으로 사용되고, 뒷면에서는 실리콘 기판의 이방성 식각 마스크로 사용되는 N/O/N 박막의 패턴형성시 N/O/N 박막의 식각 마스크로 사용되는 Au/NiCr 박막의 패턴형성을 위해 기판의 양면에 약 40 nm 두께의 NiCr 및 약 200 nm 두께의 Au를 각각 진공증착하였다. 여기서 NiCr 박막은 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>와 Au 박막 사이에 접착력 개선을 위한 것이다. Au/NiCr 박막의 증착후 1번 마스크와 2번 마스크를 양면 정렬하여 감광액 패턴을 형성하고, 이를 NiCr 및 Au 식각액을 이용하여 와이어 본딩패드 및 N/O/N 식각 마스크 패턴을 각각 형성하였다. 기판 뒷면에 있는 N/O/N 박막은 반응성 이온식각으로 패턴을 형성하였다.

기판 뒷면의 N/O/N 박막을 식각한 후 기판의

앞면에 3번 마스크를 사용하여 감광액 패턴을 형성하고, 그 위에 NiCr을 약 400 nm의 두께로 DC 마그네트론 스퍼터링한 후 감광액 lift-off 공정으로 bifilar NiCr 히터의 패턴을 형성하였다. 그 다음 4번 및 5번 마스크를 사용하여 감광액 패턴을 형성하고, 알루미늄 및 크로멜을 각각 약 500 nm의 두께로 DC 마그네트론 스퍼터링한 후 감광액 lift-off 공정으로 알루미늄 및 크로멜의 패턴을 각각 형성하여 열전퇴를 제작하였다. 히터 및 열전퇴의 고온 접합부는 열차단용 N/O/N 다이아프램 위에 놓여지고, 열전퇴의 저온 접합부는 방열판 역할을 하는 실리콘 림(rim)에 의해 지지되는 N/O/N 위에 형성하기 위해서, 시편을 지그(jig)에 장착한 후 실리콘 기판을 약 85 °C의 25 wt.%-KOH 수용액으로 이방성 식각하였다. 여기서 실리콘 기판에 대한 수직방향의 식각율은 분당 약 1.6  $\mu\text{m}$ 였다. 그림 1(b)는 제작된 열전변환기를 나타내고 있다.

표 1에서는 본 논문에서 제작한 TC 1에서 TC 6까지 열전변환기의 주요 설계규격을 나타내었다. bifilar 히터 사이의 간격, 히터와 열전퇴의 고온 접합부 사이의 거리 및 크로멜-알루미늄 열전쌍의 간격은 모두 15  $\mu\text{m}$ 로 하였다. 또한 열전퇴의 저온 접합부와 다이아프램의 가장자리가 일치하도록 하였다. TC 1에서부터 TC 6까지 히터 및

열전퇴의 저항과 다이아프램의 기하학적 크기를 나타내었고, 다이아프램 면적에 대하여 열전퇴 면적의 비를 구하여 표시하였다.

#### IV. 기하학적 모델 및 요소망 형성

열전변환기의 온도분포 해석을 위해 CGS 단위계를 사용하였고, 해석 모드로서는 static 모드를 선택하였다. 열전도 및 열대류에 필요한 요소로는 Solid70을 선택하였고, 열복사에 필요한 요소는 SURF152을 선택하였다<sup>[11]</sup>. 표 2에 나타낸 열전도도 및 복사율과 표 3에서 나타낸 대류계수 등의 각 재료에 대한 열전달 계수를 지정해 주어야 하는데, 재료의 열전달 계수를 지정하기 위해서는 ANSYS 프로그램의 GUI(graphical user interface) 메뉴 시스템을 이용하였다<sup>[11,12]</sup>. 표 2에서 나타낸 각 재료의 열전도도는 300 K의 벌크 값을 나타내었는데, 이것은 히터에 전력이 입력되었을 때 박막재료 각각에서의 정확한 온도 및 온도에 따른 열전도도를 정확하게 알 수 없기 때문이다.

대류는 열전달에 대한 기여가 극히 작기 때문에 전적으로 열손실로 작용하는 것으로 가정하였다. 히터의 입력전력에 따라 실제 측정된 재료의

표 1. 열전변환기의 설계규격

Table 1. Design specifications of thermal converters.

Specifications	TC 1	TC 2	TC 3	TC 4	TC 5	TC 6
Heater width [ $\mu\text{m}$ ]	60	60	50	40	30	20
Heater length [ $\mu\text{m}$ ]	3,950 $\times$ 2	3,385 $\times$ 2	3,055 $\times$ 2	2,495 $\times$ 2	1,855 $\times$ 2	1,470 $\times$ 2
Input resistance of TC [ $\Omega$ ]	300	248	270	280	270	320
Thermocouple width [ $\mu\text{m}$ ]	L <sub>Ch</sub> = 70	60	50	40	30	20
	L <sub>Al</sub> = 65	55	45	35	25	15
Thermocouple length [ $\mu\text{m}$ ]	350	350	350	350	350	350
Ratio of width to length in thermocouple	1/5	1/5.8	1/7	1/8.8	1/11.7	1/14
No. of thermocouple	40	38	38	36	30	28
Output Resistance of TC [ $\Omega$ ]	460	500	600	700	800	900
Diaphragm area [ $\text{mm}^2$ ]	3.71	3.21	2.85	2.31	1.73	1.37
Thermocouple area [ $\text{mm}^2$ ]	1.96	1.68	1.32	1.00	0.63	0.39
Ratio of thermocouple area to diaphragm area	0.53	0.52	0.47	0.44	0.36	0.29

표 2. 재료들의 열전도도 및 복사율

Table 2. Thermal conductivities and emissivities of materials.

	NiCr	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	SiO <sub>2</sub>	Si	Alumel	Chromel	Au
Thermal conductivity (W · cm <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	0.12	0.21	0.01	1.50	0.95	0.90	3.23
Emissivity	0.35	0.70	0.80	0.30	0.37	0.35	0.14

표 3(a). TC 1의 왼쪽 영역에서 대류계수(W · cm<sup>-2</sup> · °C<sup>-1</sup>)

Table 3(a). Convection coefficients in the left side of TC 1.

입력전력 (mW)	10	24	70.8	120.4	152.8	196.2	244
Heat generation rate (W · cm <sup>-3</sup> )	421.4	1,011.4	2,983.6	5,073.7	6,439.1	8,268.0	9,439.5
NiCr(heater)	8.61	8.92	10.09	11.26	11.86	12.47	13.05
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (Si-sub.)	2.30	2.32	2.44	2.69	2.71	2.82	2.87
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (back-side)	1.74	1.77	1.95	2.16	2.24	2.35	2.44
Chromel(center)	3.87	3.97	4.36	4.84	5.02	5.27	5.47
Alumel(hot junction)	4.08	4.23	4.78	5.34	5.62	5.91	6.18
Alumel(center)	3.91	4.00	4.40	4.89	5.07	5.32	5.52
Alumel(cold junction)	3.91	3.94	4.14	4.56	4.59	4.78	4.86
Au-pad(thermopile)	2.84	2.87	3.01	3.32	3.34	3.48	3.53
Au-pad(heater)	3.00	3.03	3.18	3.51	3.53	3.67	3.74

표 3(b). TC 1의 중앙 영역에서 대류계수(W · cm<sup>-2</sup> · °C<sup>-1</sup>)

Table 3(b). Convection coefficients in the middle of TC 1.

입력전력 (mW)	10	24	70.8	120.4	152.8	196.2	244
Heat generation rate (W · cm <sup>-3</sup> )	421.4	1,011.4	2,983.6	5,073.7	6,439.1	8,268.0	9,439.5
NiCr(heater)	8.61	8.92	10.09	11.26	11.86	12.47	13.05
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (Si-sub.)	2.27	2.29	2.41	2.65	2.67	2.78	2.83
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (back-side)	2.03	2.08	2.28	2.54	2.64	2.76	2.87
Chromel(center)	3.87	3.97	4.36	4.84	5.02	5.27	5.47
Alumel(hot junction)	4.08	4.23	4.78	5.34	5.62	5.91	6.18
Alumel(center)	3.91	4.00	4.40	4.89	5.07	5.32	5.52
Alumel(cold junction)	3.91	3.94	4.14	4.56	4.59	4.78	4.86

표 3(c). TC 1의 오른쪽 영역에서 대류계수( $W \cdot cm^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ )

Table 3(c). Convection coefficients in the right side of TC 1.

입력전력 (mW)	10	24	70.8	120.4	152.8	196.2	244
Heat generation rate ( $W \cdot cm^{-3}$ )	421.4	1,011.4	2,983.6	5,073.7	6,439.1	8,268.0	9,439.5
NiCr(heater)	8.53	8.85	10.00	11.17	11.76	12.37	12.94
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (Si-sub.)	2.15	2.17	2.28	2.51	2.53	2.63	2.68
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (back-side)	1.54	1.58	1.73	1.93	1.99	2.10	2.17
Chromel(center)	3.87	3.97	4.36	4.84	5.02	5.27	5.47
Alumel(hot junction)	4.08	4.23	4.78	5.34	5.62	5.91	6.18
Alumel(center)	3.91	4.00	4.40	4.89	5.07	5.32	5.52
Alumel(cold junction)	3.91	3.94	4.14	4.56	4.59	4.78	4.86

표 4. 열전변환기의 실제 크기 및 시뮬레이션 크기

Table 4. Real and simulated dimensions of thermal converters.

	TC 1	TC 2	TC 3	TC 4	TC 5	TC 6
실제 크기 (mm <sup>2</sup> )	1.230×0.325	1.230×0.325	0.670×0.325	0.595×0.325	0.595×0.325	0.520×0.325
시뮬레이션 크기 (mm <sup>2</sup> )	0.4825×0.1490	0.4280×0.1490	0.3910×0.1490	0.3395×0.1490	0.2765×0.1490	0.2395×0.1490

표면 온도와 분위기(공기) 온도 사이의 차이로부터  $\Delta T$ 를 구한 후 식(4), 식(5) 및 식(6)으로부터 대류계수  $h$ 를 구해야 하지만, 표 3에서 나타난 대류계수는 열전변환기(TC 1)의 열 영상에 의해 측정된 온도와 공기 온도를 사용하여 식(4), 식(5) 및 식(6)의 계산으로 구한 값이다. 열 영상에 의해 측정된 NiCr 히터의 온도와 크로멜-알루미늄 열전퇴 고온 접합부의 온도가 서로 동일한 것으로, 실리콘 기판의 온도와 열전퇴 저온 접합부의 온도가 서로 같은 것으로 하였으며, 또한 열전퇴 재료의 중간부분 온도는 고온 접합부와 저온 접합부 온도의 평균온도로 하였다. 이 때 열전변환기를 둘러싸는 분위기 온도는 23 °C였고, 실리콘 기판 뒷면의 온도는 25 °C였다. 대류계수는 열전변환기를 왼쪽, 중앙 및 오른쪽의 세 영역으로 나누어 계산하였다.

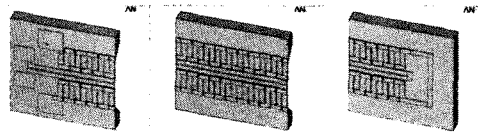


그림 2. 열전변환기의 기하학적 모델

Fig. 2. Geometrical model of a thermal converter.

열전변환기 모델을 생성하는 단계에서 GUI 기능을 이용할 수 있으나, 열전변환기의 온도분포 해석에 필요한 구조를 정밀하게 구성할 수 없다. 따라서 열전변환기 제작공정용 마스크의 설계에 사용된 AutoCAD 도면의 좌표 값을 ANSYS 명령어로 변환하여 그림 2와 같은 보다 정밀한 기하학적 모델을 생성하였다. ANSYS 프로그램에서 사용이 가능한 절점 수 및 요소 수의 제한과 컴퓨터 메모리의 부족 때문에 열전변환기의 기하

학적 모델을 왼쪽, 중앙 및 오른쪽의 세 영역으로 나누어서 해석하였다.

표 4에서 나타낸 바와 같이 시뮬레이션에 사용한 열전변환기의 크기는 실제의 크기보다 작게 하고, 실리콘 기판의 두께도 실제 열전변환기의 600  $\mu\text{m}$ 보다 작은 200  $\mu\text{m}$ 로 하였는데, 이는 실리콘 기판이 열차단막 내부의 온도분포에 큰 영향을 주지 않는 것으로 생각되기 때문이다.

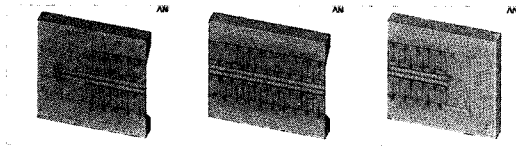


그림 3. 요소망이 형성된 열전변환기  
Fig. 3. Finite element model of a thermal converter.

생성된 열전변환기의 기하학적 모델에 유한 요소해석에 필요한 요소망을 생성한다. 이 과정은 생성된 기하학적 모델에 절점 및 요소를 생성하는 단계이고, 이들 요소의 집합을 요소망이라 한다. 절점 및 요소의 생성에는 GUI 기능을 이용하였고, 요소망이 형성된 열전변환기의 구조를 그림 3에 나타내었다. ANSYS에서는 자동으로 요소망 밀도가 조절되기 때문에 요소망 밀도의 조정과정은 반드시 거쳐야 하는 단계는 아니다.

마지막으로 열전변환기의 히터에 입력전력을 적용하고 온도분포를 해석하는 단계로서, 아래의 식(9)로 표현되는 단위체적당 전력을 NiCr 히터에 인가하여 열전변환기의 동작온도를 높이는 방식을 선택했다<sup>[11]</sup>.

$$q = \frac{P}{V} \quad (9)$$

여기서  $q$ 는 열 생성율(heat generation rate)이고,  $P$ 는 히터에 가해지는 전력이며, 또한  $V$ 는 히터의 체적이다.

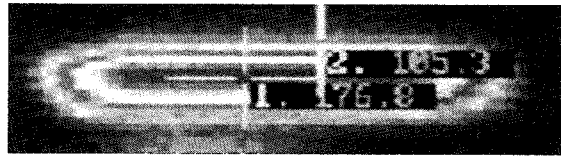
### V. 온도분포 시뮬레이션 및 측정

그림 1에서 나타낸 열전변환기의 단면도에 의하면 NiCr 히터가 열전변환기의 중앙에 배치되어 있고, 크로멜-알루멜 열전퇴가 히터를 중심으로 대칭을 이루고 있다. 따라서 히터에서 발생한 열

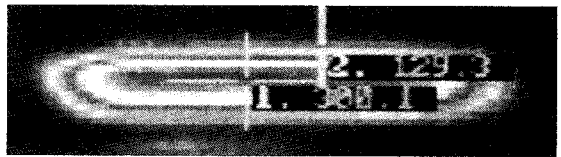
이 열전퇴의 고온 접합부에서 저온 접합부로 전달되는 구조이다.



(a) Input Power = 10 [mW]  
 $T_H = 75.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_S = 67.2 \text{ }^\circ\text{C}$



(b) Input Power = 120.4 [mW]  
 $T_H = 176.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_S = 105.3 \text{ }^\circ\text{C}$



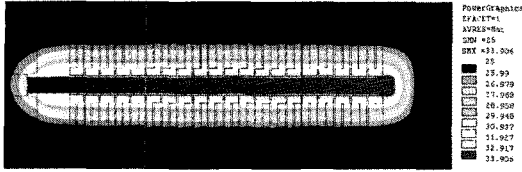
(c) Input Power = 244 [mW]  
 $T_H = 300.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_S = 129.3 \text{ }^\circ\text{C}$

그림 4. TC 1의 히터 입력전력에 따른 열 영상  
Fig. 4. Thermal image as a function of heater input power of TC 1.

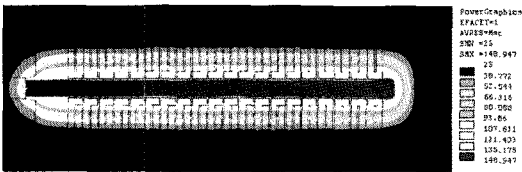
히터의 입력전력에 따른 열전변환기(TC 1)의 열 영상을 촬영하여 얻은 온도분포를 그림 4에 나타내었다. 열 영상의 촬영에는 검지파장 범위가 8~12  $\mu\text{m}$ 이고, 온도측정 분해능이 0.1  $^\circ\text{C}$ 인 MCT(HgCdTe) 적외선 검지기가 사용되었다. 그림 4로부터 히터에 인가된 전력에 따라 측정된 히터 온도와 실리콘 기판의 온도가 시뮬레이션한 것보다 크게 증가함을 알 수 있다. 이것은 열 영상 촬영시 열전변환기의 기판 뒷면을 25  $^\circ\text{C}$ 로 냉각시키지 못하여 시뮬레이션과 동일한 기판 온도 또는 냉각조건을 유지시키지 못했기 때문이다.

표 2에서 나타낸 열전도도 및 복사율과 표 3에서 나타낸 대류계수를 사용하여 시뮬레이션으로 얻은 열전변환기(TC 1)의 NiCr 히터 입력전력에 따른 온도분포를 그림 5에 나타내었다. 그림 5로부터 왼쪽, 중앙 및 오른쪽의 세 영역으로 나누어진 히터의 온도 중 오른쪽 히터의 온도가 약간

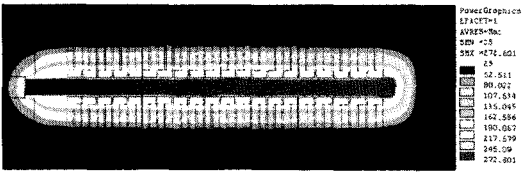
더 높음을 알 수 있는데, 이것은 오른쪽 히터에서의 열손실이 나머지 두 영역보다 약간 더 작기 때문이다.



(a) Input Power = 10 [mW]  
 $T_{HL} = 33.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{HC} = 33.9 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{HR} = 34.1 \text{ }^\circ\text{C}$



(b) Input Power = 120.4 [mW]  
 $T_{HL} = 147.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{HC} = 148.9 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{HR} = 151.5 \text{ }^\circ\text{C}$



(c) Input Power = 244 [mW]  
 $T_{HL} = 272.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{HC} = 272.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{HR} = 280.0 \text{ }^\circ\text{C}$

그림 5. TC 1의 히터 입력전력에 따른 온도분포  
 Fig. 5. Temperature profile as a function of heater input power of TC 1.

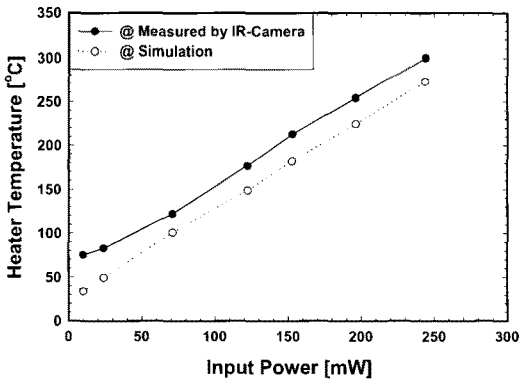


그림 6. TC 1의 입력전력에 따른 히터 온도  
 Fig. 6. Heater temperature as a function of input power of TC 1.

공기 중에서 전도, 대류 및 복사에 의한 열전달이 모두 존재하는 경우에 대해 열전변환기(TC 1)의 중앙에 있는 히터의 입력전력에 따른 온도 시뮬레이션 결과를 열 영상으로부터 구한 히터 온도와 더불어 그림 6에 나타내었다. 시뮬레이션으로 얻은 공기 중의 히터 온도는 열 영상으로 측정된 히터 온도보다 최소 약  $21.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 최대 약  $41.5 \text{ }^\circ\text{C}$  더 낮다는 것을 알 수 있다.

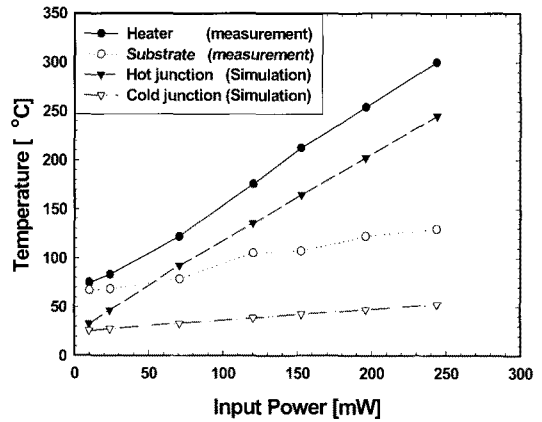


그림 7. TC 1의 입력전력에 따른 히터, 기판, 고온 접합부 및 저온 접합부의 온도  
 Fig. 7. Heater, substrate, hot junction and cold junction temperatures as a function of input power of TC 1.

공기 중에서 열 영상으로 측정된 열전변환기(TC 1)의 히터 입력전력에 따른 히터 온도 및 기판 온도와 시뮬레이션으로 얻은 열전퇴의 고온 접합부 및 저온 접합부 온도를 그림 7에 나타내었다. 그림 7로부터 열 영상으로 측정된 히터 온도 및 기판 온도와 시뮬레이션으로 얻은 열전퇴 고온 접합부 온도 및 저온 접합부 온도가 서로 비슷한 히터의 입력전력 의존성을 나타냄을 알 수 있다.

그림 8 및 그림 9는 TC 1부터 TC 6까지의 열전변환기에 대해 히터의 입력전력에 따른 히터의 온도, 고온 접합부 온도 및 저온 접합부 온도를 시뮬레이션하여 나타내었고, 그림 10은 히터의 입력전력에 따른 열전퇴의 출력전압을 측정하여 나타낸 것이다. 그림 9에서 TC 1의 고온 접합부 온도와 저온 접합부 온도의 차이가 가장 작고, TC 6의 고온 접합부 온도와 저온 접합부 온도가 가장 크기 때문에, 그림 10에서 TC 1의 전압 감응도가 제일 작게( $3.09 \text{ mV/mW}$ ), TC 6의 전압 감응도가 제일 크게( $4.03 \text{ mV/mW}$ ) 나타내고 있다.



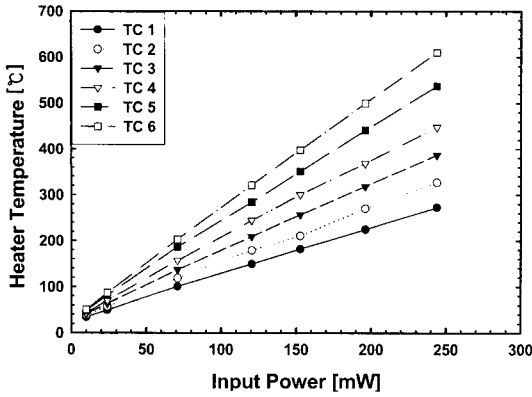


그림 8. TC 1~TC 6의 입력전력에 따른 히터 온도  
 Fig. 8. Heater temperature as a function of input power of TC 1~TC 6.

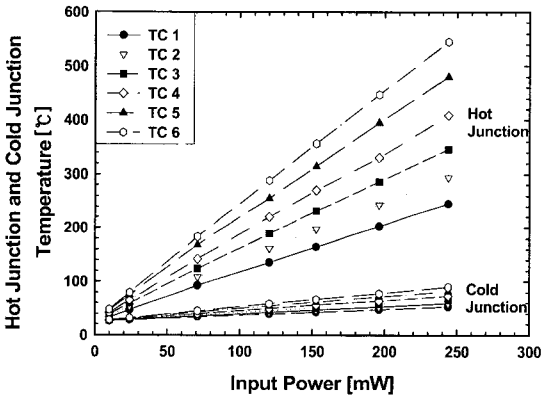


그림 9. TC 1~TC 6의 입력전력에 따른 고온 접합부 및 저온 접합부의 온도  
 Fig. 9. Hot junction and cold junction temperatures as a function of input power of TC 1~TC 6.

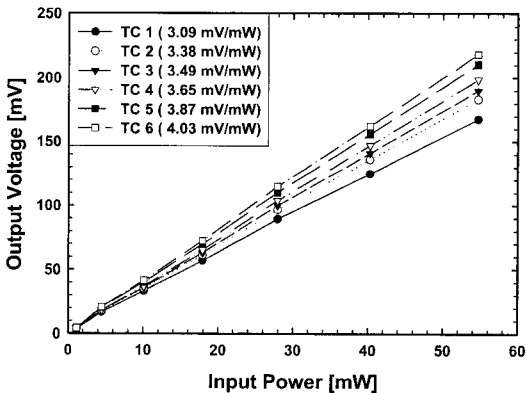


그림 10. TC 1~TC 6의 입력전력에 따른 출력전압  
 Fig. 10. Output voltage as a function of input power of TC 1~TC 6.

## VI. 결론

본 논문에서는 열 영상 촬영에 의한 시제작한 평면형 크로멜-알루멜 다중접합 열전변환기의 실제 온도분포를 측정하였고, 또한 유한 요소법에 의한 3차원 ANSYS 프로그램으로 열전변환기를 컴퓨터 시뮬레이션하여 열전변환기의 입력전력에 따른 온도분포를 예측하고자 하였다.

열전변환기를 구성하는 여러 가지 박막재료의 열전도도는 300 K의 벌크 값을 사용하였다. 대류는 전적으로 열손실로 작용하는 것으로 보았고, 대류계수의 계산에는 열 영상 촬영한 열전변환기의 온도가 사용되었다. 복사는 복사형상계수를 1로 가정하고 복사율도 벌크 값을 사용하였다. 측정 결과와 시뮬레이션 결과를 비교해 보면, 열손실이 제일 큰 TC 1의 고온 접합부 온도와 저온 접합부 온도의 차이가 가장 작고, 열손실이 제일 작은 TC 6의 고온 접합부 온도와 저온 접합부 온도의 차이가 가장 크게 나타나기 때문에, TC 1의 전압 감응도는 가장 작은 3.09 mV/mW로 측정되었고, TC 6의 전압 감응도는 가장 큰 4.03 mV/mW로 측정되었다.

열 영상으로 측정한 히터의 온도와 시뮬레이션으로 구한 히터 온도 사이의 차이는, 열 영상 촬영시 열전변환기의 기관을 냉각시키지 못하여 시뮬레이션과 동일하게 25 °C의 기관 온도를 유지시키지 못한 것, 열 영상 촬영시 적외선 검지기의 배정온도를 더 정확하게 보정하지 않은 것, 또한 재료의 열전도도로서 300 K에서 벌크일 때의 일정한 값을 사용한 것, 등으로부터 생기는 것으로 생각된다.

본 연구는 2000년도 한국표준과학연구원의 위탁연구비에 의해 수행되었음.

## 참고 문헌

- [1] F. J. Wilkins et al., "Multi-junction thermal converter-accurate d.c./a.c. transfer instrument," *Proc. of the IEE*, Vol. 112, No. 4, pp. 794-805, 1965.
- [2] Barry D. Inglis, "A method for the deter-

- mination of ac-dc transfer errors in thermoelements," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. IM-27, No. 4, pp. 440-444, 1978.
- [3] Manfred Klonz, "AC-DC transfer difference of the PTB multijunction thermal converter in the frequency range from 10 Hz to 100 kHz," *IEEE Trans. on Instrument and Measurement*, Vol. IM-36, No. 2, pp. 320-329, 1987.
- [4] Manfer Klonz and Thomas Weimann, "Accurate thin-film multijunction thermal converter on a silicon chip," *IEEE Trans. Instrument and Measurement*, Vol. 38, No. 2, pp. 335-337, 1989.
- [5] 이현철 등, "백금 히터가 내장된 평면형 Bi-Sb 다중접합 열전변환기의 특성," 한국센서학회지, 제7권 제3호, pp. 154-162, 1998.
- [6] 김진섭 등, "Bi-Sb 다중접합 열전변환기의 교류-직류 변환 특성," 전자공학회논문지, 제35권 D편, 제11호, pp. 46-54, 1998.
- [7] 정인식 등, "박막형 크로멜-알루멜 다중접합 열전변환기," 전자공학회논문지, 제36권 D편, 제9호, pp. 37-45, 1999.
- [8] 조현덕 등, "저출력저항의 박막 크로멜-알루멜 다중접합 열전변환기," 한국센서학회지, 제9권, 제4호, 2000.
- [9] 홍준표, 열전도·확산의 수치 해석, pp. 13-20, 반도출판사, 1991.
- [10] 이정오 등, 열전달, pp. 348-349, 범한서적주식회사, 1992.
- [11] 정상진, 열전달 해석, pp. 8-219, (주)태성에스앤이, 2000.
- [12] *Handbook of Chemistry and Physics(68 ed.)*, CRC Press, 1988.

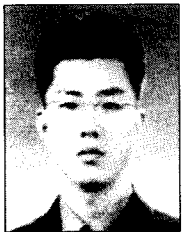
## 著 者 紹 介



**황 찬 순(Chan-Soon Hwang)**

1971년 8월 6일생.  
1999년 2월 부경대학교 전자공학과 졸업(공학사).  
2000년 3월~현재 인제대학교 대학원 전자공학과 석사과정 재학중.

주관심분야: MEMS, 열전변환기 및 반도체 공정기술 등임.



**권 재 우(Jae-Woo Kwon)**

1977년 10월 27일생.  
2000년 2월 위덕대학교 전자공학과 졸업(공학사).  
2000년 3월~현재 경북대학교 대학원 전자공학과 석사과정 재학중.

주관심분야: MEMS, RF MEMS 및 센서 응용 등임.

**조 현 덕(Hyun-Duk Cho)**

1974년 5월 27일생.  
1999년 2월 경북대학교 전자전기공학부 졸업(공학사).  
2000년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사).  
2001년 3월 ~ 현재 삼성전자주식회사 반도체연구소 공정개발팀.

주관심분야: MEMS, 적외선 검지기 및 열전변환기 등임.

**이 종 현(Jong-Hyun Lee)**

1949년 6월 26일생.  
1972년 2월 경북대학교 공과대학 전자공학과 졸업(공학사).  
1976년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사).  
1981년 11월 Institute National Polytechnique de Grenoble 반도체공학(공학박사).

현재 경북대학교 전자전기공학부 교수 및 재단법인 대구테크노파크사업단 단장.

주관심분야: 반도체 공정기술, SOI 기술, 실리콘 마이크로머시닝 기술 및 센서 응용기술 등임.

**이 정 희(Jung-Hee Lee)**

1957년 6월 30일생.

1979년 2월 경북대학교 공과대학 전자공학과 졸업(공학사).

1983년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사).

1986년 6월 Florida Institute of Technology 전기 및 컴퓨터공학과 졸업(공학석사).

1990년 3월 North Carolina State University 전기 및 컴퓨터공학과 졸업(공학박사).

1990년 9월 ~ 1993년 2월 한국전자통신연구원 반도체기술연구단 선임연구원.

1993년 3월 ~ 현재 경북대학교 전자전기공학부 부교수.

주관심분야 : 3족 질화물 반도체 성장, GaN 전자 및 광 소자, 진공 미세전자공학 및 원자층 에피택시 등임.

**김 진 섭(Jin-Sup Kim)**

1957년 1월 23일생.

1979년 2월 경북대학교 공과대학 전자공학과 졸업(공학사).

1982년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사).

1985년 8월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사).

1985년 9월 ~ 1992년 4월 한국전자통신연구원 반도체연구단 실장(선임연구원).

1992년 4월 ~ 현재 인제대학교 전자정보통신공학부 부교수.

주관심분야 : 반도체 소자 및 공정, 열 센서, 적외선 센서, 열전변환기 및 MEMS 등임.

**박 세 일(Se Il Park)**

1961년 9월 30일생.

1985년 2월 서울대학교 자연과학대학 물리학과 졸업(이학사).

1987년 2월 한국과학기술원 물리학과 졸업(이학석사).

1990년 2월 한국과학기술원 물리학과 졸업(이학박사).

1990년 3월 ~ 현재 한국표준과학연구원 전자기표준부 책임연구원.

주관심분야 : 초전도 전자공학 응용소자, 센서 및 MEMS 등임.

**권 성 원(Sung-Won Kwon)**

1952년 1월 19일생.

1974년 2월 한국항공대학교 전자공학과 졸업(공학사).

1974년 ~ 1977년 공군정밀측정시험소 전기전자시험과장.

1978년 ~ 현재 한국표준과학연구원 전자기표준부 책임연구원.

주관심분야 : 교류 전압 및 전류 정밀측정, 센서 및 MEMS 등임.