

論文2001-38SD-10-4

평면형 다중접합 열전변환기의 특성

(Characteristics of a Planar Multijunction Thermal Converter)

趙顯德*, 金鎮燮**, 李鍾玄***, 李正熙***,
朴世一****, 權聖遠****

(Hyun-Duk Cho, Jin-Sup Kim, Jong-Hyun Lee, Jung-Hee Lee,
Se Il Park, and Sung-Won Kwon)

요약

교류의 실용 표준기로 사용하기 위해 TC 1에서 TC 6까지 6개의 평면형 열전변환기를 설계 및 제작하였다. 공기중 및 진공중의 전압 감응도는 TC 6의 경우 열손실이 가장 작아 약 4.03 mV/mW 및 약 6.38 mV/mW의 가장 큰 값을 나타내었다. 열시정수는 히터의 열관성이 가장 부족한 TC 6을 측정하여 약 8 ms를 얻었다. FRDC(fast reversed DC) 방법에 의한 교류-직류 전압 및 전류 변환오차는 40 Hz~10 kHz 주파수 범위에서 1 V 및 5 mA의 정현파 실효전압 및 실효전류를 인가하였을 때 약 ±0.41~±0.85 ppm 및 약 ±0.15~±1.16 ppm으로서 실용표준으로 사용하기에 적합하였다.

Abstract

Six types of planar thermal converters from TC 1 to TC 6 were designed and fabricated for the purpose of being used as practical standards to alternating current. The respective voltage responses in air and in a vacuum of TC 6, which has the smallest thermal loss, were about 4.03 mV/mW and about 6.38 mV/mW. Thermal time constant of TC 6, which has also the smallest heater thermal inertia, was about 8 ms. The respective variations of AC-DC voltage and current transfer errors from sample to sample, which were measured by FRDC(fast reversed DC) method, were about ±0.41~±0.85 ppm and about ±0.15~±1.16 ppm in the frequency range of 40 Hz~10 kHz with applying 1 V and 5 mA rms sine waves to the converters. All converters investigated exhibited sufficiently low AC-DC transfer errors to be used as practical standards.

* 正會員, 三星電子株式會社 半導體研究所
(Semiconductor R & D Center, Samsung Electronics Co., Ltd.)

** 正會員, 仁濟大學校 電子情報通信工學部
(School of Electronic and Telecommunication Engineering, Inje University)

*** 正會員, 慶北大學校 電子電氣컴퓨터學部
(School of Electrical Engineering and Computer

Science, Kyungpook National University)

**** 正會員, 韓國標準科學研究院 電磁氣標準部

(Division of Electromagnetic Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science)

※ 본 연구는 2000년도 한국표준과학연구원의 위탁연구비 지원에 의해 수행되었음.

接受日字:2001年1月22日, 수정완료일:2001年9月28日

I. 서론

직류의 경우 절대 측정방법에 의해 표준전지 및 표준저항으로부터 전압, 전류 및 전력에 대한 실용표준이 정해지지만, 교류의 경우에는 표준기가 없기 때문에 이들의 정확한 측정이 쉽게 이루어질 수 없다. 주파수가 1 MHz 이하의 교류에 대해 실용표준을 위한 교류-직류 변환기로서 Seebeck 효과를 이용하는 열전형 변환기가 교류의 파형 및 주파수에 대한 의존성이 비교적 작은 장점을 갖기 때문에 열전형 변환기를 교류의 실용표준을 위한 교류-직류 변환기로서 응용하고자 하는 연구가 수행되어 왔다^[1].

열전형 교류-직류 변환기는 가장 단순한 3차원 단일 접합 열전변환기(3-D SJTC: 3-dimensional single junction thermal converter)로부터 출발하여 3차원 다중접합 열전변환기(3-D MJTC: 3-dimensional multijunction thermal converter)와 평면형 다중접합 열전변환기(PMJTC: planar multijunction thermal converter)로 발전해왔다^[2-4]. 3차원 단일접합 열전변환기는 교류-직류 변환오차가 10 ppm 정도로 너무 크고, 3차원 다중접합 열전변환기는 직경이 약 10 μm인 미세한 와이어를 다루어야 하기 때문에 공정수율이 매우 낮은 문제점이 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 현재는 반도체 공정기술을 응용한 평면형 다중접합 열전변환기를 교류-직류 변환기로 사용하고 있다.

본 논문에서는 NiCr을 히터로 하고 크로멜-알루멜 열전퇴를 변환기로 하는 평면형 다중접합 열전변환기를 교류의 실용표준기로서 사용할 수 있도록 설계 및 제작하고, 또한 제작된 열전변환기의 히터 및 열전쌍의 특성, 입력-출력 관계, 전압 감응도, 열시정수, 기판 온도에 따른 전압 감응도, 그리고 교류-직류 변환오차를 평가하였다.

II. 열전변환기의 제작

열전변환기 제작에 사용된 기판은 결정면이 (100), 비저항이 5~10 Ω·cm, 두께가 약 600 μm인 양면이 경면으로 연마된 직경 5인치의 n형 실리콘 웨이퍼를 사용하였다.

그림 1(a)에 나타낸 단면도와 같이 실리콘 기판 앞면에서는 히터 및 열전퇴의 고온 접합부와 실리콘 기판

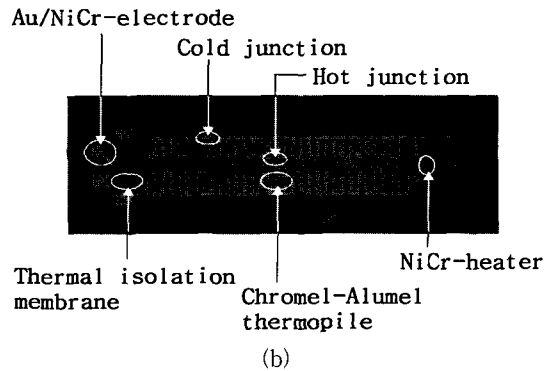
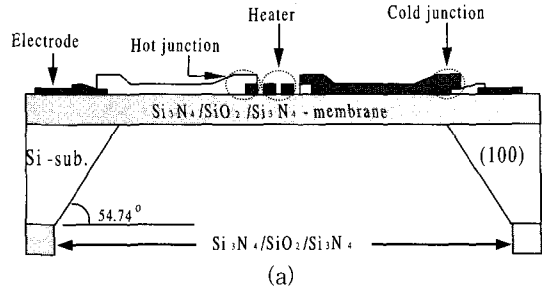


그림 1. (a) 열전변환기의 단면도, (b) 열전변환기의 사진
Fig. 1. (a) cross-sectional view of a thermal converter, (b) photograph of a thermal converter.

사이의 열차단용 멤브레인으로 사용되고, 기판 뒷면에서는 실리콘 기판의 이방성 식각 마스크로 사용될 150 nm-Si₃N₄/300 nm-SiO₂/150 nm-Si₃N₄(N/O/N) 박막을 기판의 양면에 증착시켰다. Si₃N₄ 박막의 경우 LPCVD 방법으로 780 °C 및 290 mTorr로 SiH₂Cl₂와 NH₄의 혼합가스를 사용하여 증착하였고, SiO₂ 박막의 경우는 저온 LPCVD 방법으로 440 °C 및 250 mTorr로 SiH₄와 O₂의 혼합가스를 사용하여 증착하였다^[5].

그 다음 기판 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 Si₃N₄와 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 식

각 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 방법으로 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.

그림 1(a)의 단면도와 같이 히터 및 열전퇴의 고온 접합부는 열차단용 N/O/N 다이아프램 위에 놓여지고, 열전퇴 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 μm였다. 그림 1(b)는 제작된 열전변환기를 나타내고 있다.

표 1. 열전변환기의 설계 규격

Table 1. Design specifications of thermal converters.

Specifications	TC 1	TC 2	TC 3	TC 4	TC 5	TC 6
Heater width [μm]	60	60	50	40	30	20
Heater length [μm]	3,950×2	3,385×2	3,055×2	2,495×2	1,855×2	1,470×2
Input resistance of TC [Ω]	300	248	270	280	270	320
Thermocouple width [μm]	L _{C1} =70	60	50	40	30	20
	L _{A1} =65	55	45	35	25	15
Thermocouple length [μm]	350	350	350	350	350	350
Ratio of width to length in thermocouple	1/5	1/5.8	1/7	1/8.75	1/11.7	1/14
No. of thermocouple	40	38	38	36	30	28
Output resistance of TC [Ω]	460	500	600	700	800	900
Diaphragm area [mm ²]	4.26×0.87 =3.71	3.69×0.87 =3.21	3.35×0.85 =2.85	2.78×0.83 =2.31	2.13×0.81 =1.73	1.73×0.79 =1.37
Thermopile area [mm ²]	1.96	1.68	1.32	1.00	0.63	0.39
Ratio of thermopile area to diaphragm area	0.53	0.52	0.47	0.44	0.36	0.29

Bifilar 히터 사이의 간격, 히터와 열전퇴의 고온 접합부 사이의 거리 및 크로멜-알루미늄 열전쌍의 간격은

모두 15 μm로 하였다. 또한 열전퇴의 저온 접합부와 다이아프램의 가장자리가 일치하도록 하였다. 표 1에서는 본 논문에서 제작한 TC 1에서 TC 6까지 열전변환기의 주요 설계규격을 나타내었다. TC 1에서부터 TC 6까지 히터 및 열전퇴의 저항과 다이아프램의 기하학적 크기를 나타내었고, 특히 다이아프램 면적에 대하여 열전퇴 면적의 비를 구하여 표시하였다.

III. 열전변환기의 특성

1. NiCr 히터 및 Chromel-Alumel 열전쌍의 특성

공기중에서 NiCr 히터의 온도에 따른 저항을 그림 2에 나타내었다. 그림 2의 기울기 및 다음의 식(1)로부터 구한 NiCr 히터의 저항온도계수 α는 약 1.81×10⁻⁴ /°C로서 Pt 히터의 약 3.78×10⁻³/°C보다는 작고, EVANOHM-S 히터의 약 1.4×10⁻⁴/°C보다는 큰 값이었다^[6].

$$R_T = R_0(1 + \alpha T) \tag{1}$$

여기서 R_T 및 R₀는 각각 온도 T °C 및 0 °C에서의 저항값이다.

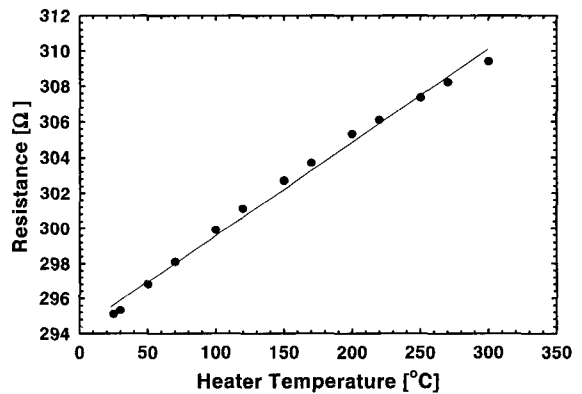


그림 2. 히터 온도에 따른 저항
Fig. 2. Resistance as a function of heater temperature.

히터의 온도에 따른 열전퇴의 열기전력을 그림 3에 나타내었다. 그림 3 및 식(2)로부터 구한 크로멜-알루미늄 열전쌍의 Seebeck 계수차(α_A - α_B)는 약 38 μV/K로서 벌크 열전쌍의 약 41 μV/K보다 약간 작은 값을 나타내었다^[7].

$$\Delta V = N(\alpha_A - \alpha_B)\Delta T \tag{2}$$

여기서 ΔV 는 열전퇴에서 발생하는 열기전력이고, N 은 열전퇴를 구성하는 열전쌍의 개수이며, 또한 ΔT 는 열전퇴의 고온 접합부와 저온 접합부의 온도차이다.

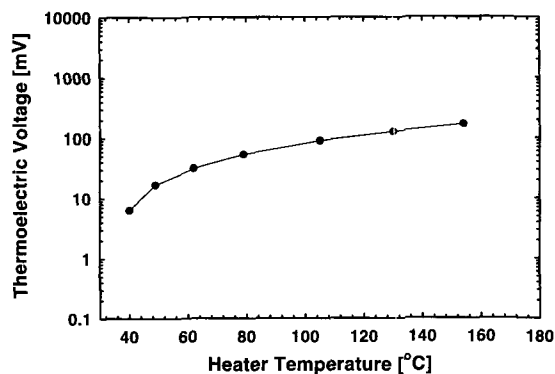


그림 3. 히터 온도에 따른 열기전력
Fig. 3. Thermoelectric voltage as a function of heater temperature.

2. 입력-출력 관계

열전변환기의 출력전압은 기본적으로 입력전력의 지수 승에 비례한다. 이러한 관계를 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$E \propto V^n \tag{3}$$

여기서 E 는 열전변환기의 출력전압이고, V 는 히터의 입력전압이며, 또한 $n = (\Delta E/E) / (\Delta V/V)$ 이다.

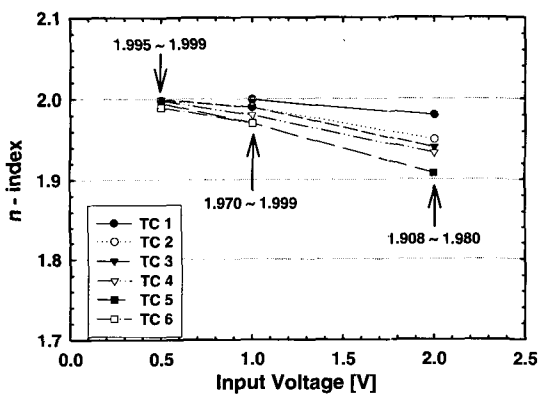


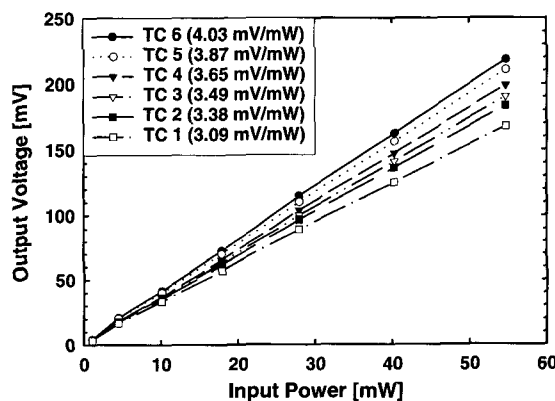
그림 4. 입력전압에 따른 n값
Fig. 4. n-index as a function of input voltage.

히터의 온도에 따른 저항변화 및 열손실이 없는 이상적인 조건하에서 열전변환기의 출력전압은 히터의

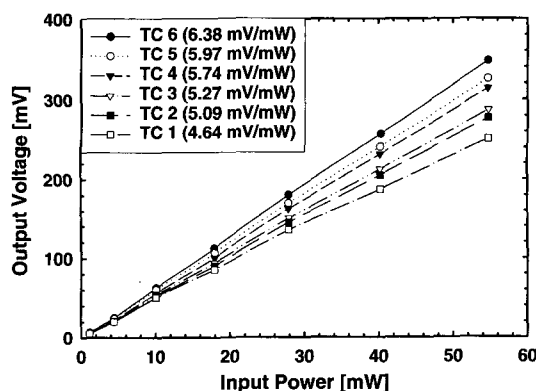
온도에 선형적으로 비례하고, 히터의 온도는 히터의 입력전압 V 의 제곱에 비례하므로, n 는 2이다. 그러나 실제의 열전변환기에서는 열차단용 N/O/N 멤브레인을 통한 수평방향의 열전도에 의한 히터의 열손실은 무시될 수 있다고 하더라도, 히터의 온도에 따른 저항변화와 열대류 및 열복사에 의한 히터의 열손실에 의해서 그림 4와 같이 n 값이 히터의 입력전압이 증가함에 따라 감소하고, 또한 표 1에 의하면 TC 1에 비해 TC 6으로 패턴이 변화함에 따라서 히터의 부피가 작아지므로 히터의 열손실이 증가하여 n 이 2보다 더 작아지고 있음을 알 수 있다.

3. 전압 감응도

열전변환기 TC 1에서 TC 6까지의 공기중 및 약 10^{-5} Torr의 진공중에서 입력전력에 따른 출력전압 특



(a)



(b)

그림 5. 입력전력에 따른 출력전압 : (a) 공기중, (b) 진공중

Fig. 5. Output voltage as a function of input power : (a) in air, (b) in a vacuum.

성을 각각 그림 5(a) 및 그림 5(b)에 나타내었다. 그림 5의 기울기 즉 히터의 입력전력 변화에 대한 열전퇴의 출력전압 변화의 비($\Delta V/\Delta P$)로서 정의되는 전압 감응도는 공기중 및 진공중에서 각각 약 3.09 mV/mW~4.03 mV/mW 및 약 4.64 mV/mW~6.38 mV/mW였다.

표 1을 참고한다면 TC 1에서 TC 6으로 갈수록 열전쌍의 폭이 감소하므로 열전퇴의 열전도가 TC 1에서 TC 6으로 갈수록 작아지고, 다이어프램 면적에 대한 열전퇴의 면적이 TC 1에서 TC 6으로 갈수록 작아지므로 TC 1에 비해서 TC 6으로 갈수록 대류에 의한 열손실이 줄어들게 된다. 따라서 TC 6의 전압 감응도가 TC 1보다 큰 값을 가진다. 그리고 진공중에서는 공기에 의한 히터의 열손실이 현저히 감소되기 때문에 진공중에서의 전압 감응도가 공기중에서의 전압 감응도보다 더 크게 나타났다.

4. 열시정수

열전변환기 열시정수를 측정하기 위해서 TC 6을 사용하였다. 54.7 mW의 전력을 히터에 인가하여 출력전압이 218.2 mV로 일정하게 유지하게 한 후, 그 다음 히터에 공급되는 전력을 차단한 직후부터 출력전압이 정상상태 출력전압의 약 37%까지 감소하는데 걸리는 시간을 측정하여 그림 6에 나타내었다. 측정한 열시정수는 약 8 ms로서 매우 작은 값을 나타내었다.

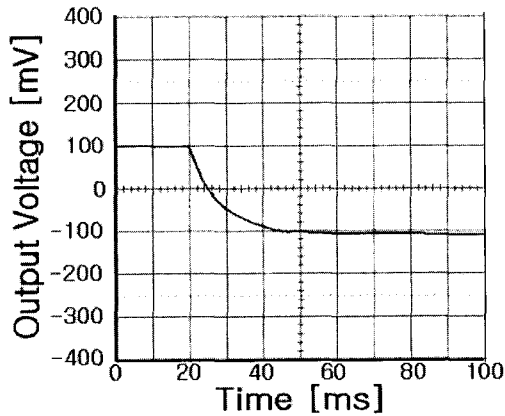


그림 6. 시간에 따른 출력전압
Fig. 6. Output voltage as a function of time.

표 1에 의하면 TC 6의 히터의 폭이 20 μm 로서 제일 좁고 히터의 길이도 제일 작다. 그러므로 TC 6의 히터가 열관성이 가장 부족하여 제일 작은 열시정수를 나타낸다^[8].

5. 기판 온도에 따른 전압 감응도

그림 7은 공기중에서 TC 2의 기판 온도에 따른 전압 감응도로서 약 $-6 \times 10^{-3} \text{ mV} \cdot \text{mW}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 이다. 기판의 온도가 증가할수록 열전퇴의 저온 접합부 온도가 증가하게 되고 따라서 고온 접합부와 저온 접합부 사이의 온도 차이가 감소하여 열전퇴의 전압 감응도가 감소한다.

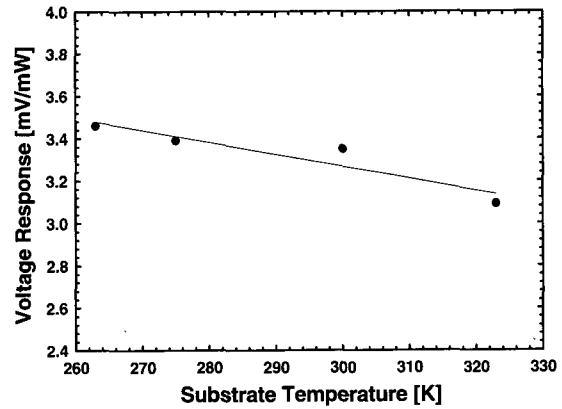


그림 7. 기판 온도에 따른 전압 감응도
Fig. 7. Voltage response as a function of substrate temperature.

6. 교류-직류 변환오차

FRDC(fast reversed DC) 방법은 교류-직류 변환오차중 주파수에 의한 의존성을 배제하고 열전효과에 의해 발생하는 오차만을 측정하는 방법이다^[9]. 입력에 정확도가 0.1 ppm이상인 직류 표준전원이 내장된 KST 003 FRDC 소스를 연결하고, 출력에 KEITHLEY 182 nano-volt meter를 연결하여 입력신호의 주파수에 따른 교류-직류 변환오차를 FRDC 방법으로 자동 측정하였다. 실효전압 및 실효전류가 각각 1 V 및 5 mA인 정현파 교류를 입력으로 하여 40 Hz~10 kHz의 주파수 범위에서 측정한 열전변환기의 교류-직류 전압 및 전류 변환오차를 그림 8(a) 및 그림 8(b)에 각각 나타내었다.

전압변환 오차범위는 약 $\pm 0.41 \sim \pm 0.85 \text{ ppm}$ 이었고 전류변환 오차범위는 약 $\pm 0.15 \sim \pm 1.16 \text{ ppm}$ 이었다. 일반적으로 열전변환기가 교류의 실용표준으로 사용되어지기 위해서는 교류-직류 변환오차의 범위가 1 ppm이하여야 한다. 따라서 이 값들은 실용표준으로 사용되기에 충분한 오차범위를 가지고 있음을 알 수 있었다.

교류-직류 전압 변환오차 평가장치는 열전효과를 포함한 열전변환기에서 일어나는 모든 오차요인에 의해서 발생하는 오차를 측정하는 방법으로서, 본 연구에서

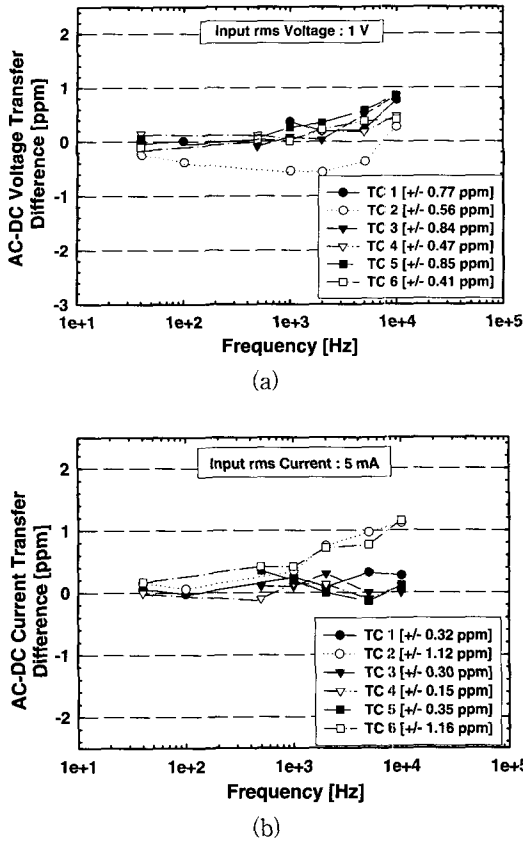


그림 8. 주파수에 따른 교류-직류 변환오차 : (a) 전압, (b) 전류
 Fig. 8. AC-DC transfer difference as a function of frequency : (a) voltage, (b) current.

는 이중 채널방식의 자동 측정시스템을 사용하였다^[10]. 40 Hz~1 MHz의 주파수 범위에서 실효전압이 2.0 V인 경우에 교류-직류 전압 변환오차를 그림 9에 나타내었다. 40 Hz의 저주파에서는 약 $\pm 276 \sim \pm 1,377$ ppm의 변환오차를 나타내었다. TC 1에서 TC 6으로 갈수록 전압 변환오차가 증가하고 있는데, 이는 TC 1에서 TC 6으로 갈수록 열전변환기의 히터 부피가 작아지게 설계되어 있으므로 히터가 가지는 열용량이 작아지기 때문이다. 즉 TC 6의 경우 그림 6에서 알 수 있듯이 열시정수가 약 8 ms의 작은 값을 가지고 있기 때문에 125 Hz이하의 저주파에서는 히터의 열관성 부족으로 전압 변환오차가 크게 나타난다^[8].

500 Hz~10 kHz의 중간 주파수에서는 FRDC 방법에 의해 측정된 변환오차와 비슷한 정도의 변환오차를 나타내었다. 10 kHz~1 MHz의 고주파에서는 전압오차가 약 ± 0.6 ppm에서 약 ± 40.1 ppm으로 증가하는 경향을 나

타내고 있는데, 이는 고주파에서의 주된 교류-직류 오차의 원인인 열전변환기의 용량성 및 유도성 임피던스에 의한 것이다^[11].

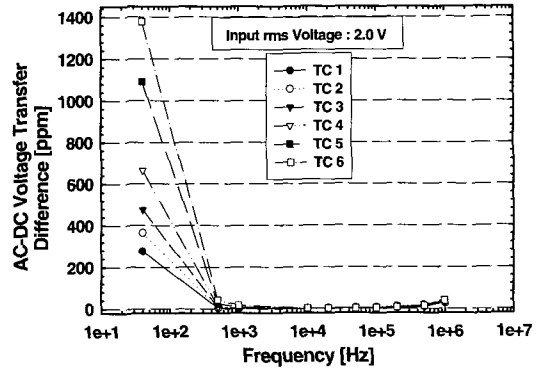


그림 9. 주파수에 따른 교류-직류 전압 변환오차
 Fig. 9. AC-DC voltage transfer difference as a function of frequency.

IV. 결론

본 연구에서는 평면형 열전변환기를 교류의 실용 표준기로 응용하기 위해 교류-직류 전압 및 전류 변환오차를 최소화 하고자 하였다. 실리콘 벌크 마이크로머시닝을 이용하여 NiCr 히터와 크로멜-알루멜 열전퇴의 고온 접합부를 N/O/N 멤브레인 위에, 열전퇴의 저온 접합부는 실리콘 림에 의해 지지되는 N/O/N 멤브레인 위에 놓이게 하여 열전변환기를 제조하였다. 열전변환기는 TC 1에서 TC 6까지 모두 6개를 설계하였다.

열전변환기의 입력-출력 관계에서 TC 6이 히터 체적이 가장 작아지므로 n이 1.91의 작은 값을 나타내지만, 출력전압이 대체로 입력전압의 제곱법칙을 따른다. 공기중 및 진공중의 전압 감응도는 TC 6이 열손실이 가장 작아 약 4.03 mV/mW 및 약 6.38 mV/mW로서 가장 큰 값을 나타내었고, 열대류에 의한 열손실이 없는 진공중의 전압 감응도가 공기중의 것보다 크게 나타났다. 열시정수는 히터의 열관성이 가장 부족한 TC 6을 측정하여 약 8 ms를 얻었다. 기판 온도에 따른 전압 감응도는 약 $-6 \times 10^{-3} \text{ mV} \cdot \text{mW}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 으로서 비교적 우수한 기판의 온도에 따른 전압 감응도를 나타내었다.

TC 1에서 TC 6에 걸쳐 FRDC 방법에 의한 교류-직류 전압 및 전류 변환오차는 40 Hz~10 kHz의 주파수 범위에서 실효전압과 실효전류가 1 V 및 5 mA인 정현파 교류를 입력으로 하였을 때 약 $\pm 0.41 \sim \pm 0.85$ ppm

및 약 $\pm 0.15 \sim \pm 1.16$ ppm으로서 실용 교류표준으로 사용하기에 적합하였다. 실효전압이 2.0 V인 경우 이중 채널방식 자동 측정시스템으로 측정된 교류-직류 전압 변환오차는 40 Hz의 저주파에서 약 $\pm 276 \sim \pm 1,377$ ppm로서 히터의 열시정수가 가장 작은 TC 6가 제일 큰 변환오차를 나타내었고, 10 kHz~1 MHz의 고주파에서는 열전변환기의 용량성 및 유도성 임피던스에 의해 약 ± 0.6 ppm에서 약 ± 40.1 ppm으로 증가하였다. 저주파의 영역에서 교류-직류 전압 변환오차를 줄이기 위해서는 히터의 열관성을 크게 하는 설계를 하여야 할 것이다

참 고 문 헌

[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 determination 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 Instrumentation and Measurement, Vol. IM-36, No. 2, pp. 320~329, 1987.

[4] Manfred Klonz and Thomas Weimann, "Accurate thin-film multijunction thermal converter on a silicon chip," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 38, No. 2, pp. 335~337, 1989.
 [5] 김명규 등, "스트레스 균형이 이루어진 Si₃N₄/SiO₂/Si₃N₄ 유전체 멤브레인의 제작," 센서학회지, 제4권, 제3호, pp. 51~59, 1995.
 [6] 정인식 등, "박막형 크로멜-알루멜 다중접합 열전 변환기," 전자공학회논문지, 제36권 D편, 제9호, pp. 37~45, 1999.
 [7] 조현덕 등, "저출력저항의 박막 크로멜-알루멜 다중접합 열전변환기," 센서학회지, 제9권, 제4호, pp. 288~295, 2000.
 [8] Manfred Klonz and Thomas Weimann, "Increasing the time constant of a thin film multijunction thermal converter for low frequency application," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 40, No. 2, pp. 350~351, 1991.
 [9] Manfred Klonz et al., "Measuring thermoelectric effects in thermal converters with a fast reversed DC," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement. Vol. 44, No. 2, pp. 379~382, 1995.
 [10] 권성원 등, "교류-직류 변환오차 자동 측정시스템," 센서학회지, 제7권, 제6호, pp. 401~408, 1998
 [11] B. D. Inglis, "Standards for AC-DC transfer," Metrologia, Vol. 29, pp. 191~199, 1992.

저 자 소 개

趙顯德(正會員)
 1999년 2월 : 경북대학교 전자전기공학부 졸업(공학사).
 2001년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 2001년 3월~현재 : 삼성전자주식회사 반도체연
 구소 공정개발팀 연구원

李鍾玄(正會員) 第37卷 SD編 第2號 參照.
 현재 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수 및 재단법
 인 대구테크노파크사업단 단장

金鎮燮(正會員) 第38卷 SD編 第3號 參照.
 현재 : 인제대학교 전자정보통신공학부 부교수

李正熙(正會員) 第38卷 SD編 第3號 參照.
 현재 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 부교수

朴世一(正會員) 第37卷 SD編 第2號 參照.
 현재 : 한국표준과학연구원 전자기표준부 책임연구원

權聖遠(正會員) 第37卷 SD編 第2號 參照.
 현재 : 한국표준과학연구원 전자기표준부 책임연구원