

• 특집 • 나노마이크로기술의 최근 연구동향

## MEMS 열전소자를 이용한 교류실효전압 측정표준

# Accurate Measurement Standard of AC RMS Voltage Using MEMS Electrothermal Devices

이형규<sup>1,#</sup>  
Hyung-Kew Lee<sup>1,#</sup>

<sup>1</sup> 한국표준과학연구원 전자기표준센터 (Center for Electromagnetic Standard, Korea Research Institute of Standards and Science)  
# Corresponding Author / E-mail: [hyungkew.lee@kriss.re.kr](mailto:hyungkew.lee@kriss.re.kr), TEL: +82-42-868-5165  
ORCID: 0000-0002-1346-9057

KEYWORDS: MEMS electrothermal device (멤스 열전소자), AC RMS voltage (교류실효전압), Measurement standard (측정표준)

*Measurement standard for AC RMS voltage has been realized, by using thermal converters as AC-DC transfer standards in every country. AC-DC transfer standards provide a link for AC RMS voltage to DC voltage. Since thermal converters are physical artefacts, they have characteristic error defined by AC-DC difference. By adopting MEMS technology, a high performance thermal converter, called planar multi-junction thermal converter (PMJTC), with low AC-DC transfer difference and high output voltage has been successfully developed, and widely used as primary AC-DC transfer standard in many countries. In the Republic of Korea, AC-DC transfer standards 10 Hz to 1 MHz in frequency for 2 mV<sub>rms</sub> to 1000 V<sub>rms</sub> have been established by using PMJTC.*

Manuscript received: August 20, 2018 / Revised: September 28, 2018 / Accepted: October 1, 2018

## NOMENCLATURE

TC = Thermal Converter  
DC = Direct Current  
AC = Alternating Current  
 $V_{dc}$  = Actual DC input voltage to a TC  
 $V_{dcset}$  = DC Root Mean Square (RMS) voltage displayed  
 $V_{ac}$  = Actual AC Root Mean Square (RMS) voltage  
 $V_{acset}$  = AC Root Mean Square (RMS) voltage displayed  
 $E_{dc}$  = Output EMF voltage from a TC with DC input voltage  
 $E_{ac}$  = Outout EMF voltage from a TC with AC input voltage  
 $\delta$  = AC-DC Transfer Difference

## 1. 서론

지난 40여년간 MEMS 기술은 압력센서, 관성센서 등 다양한 센서 시장에서 주류 기술로 확고히 자리를 잡았다. MEMS 기술은 반도체 회로 제조공정에서 사용하는 장비 및 기술을 응용하여 다양한 기판(주로 실리콘) 위에 작은 미세구조체를 형성하는 기술이다. MEMS 기술로 제작한 미세구조체는 작은 크기로 인해 에너지 소비가 적고 여러 물리적(기계, 전기, 열) 특성이 환경에 민감하게 반응하기 때문에 감도가 높은 우수한 센서의 구현에 많은 장점을 가진다. 또한 이들 MEMS 미세구조체는 반도체 회로 제조기술과 같이 높은 집적도와 대량생산의 이점도 가지고 있다. 현재 ST microelectronics,<sup>1</sup> Analog devices,<sup>2</sup> NXP<sup>3</sup>와 같은 반도체 대기업을 비롯해 MEMSIC<sup>4</sup>과 같은 작은 MEMS 센서 전문기업들이 가속도계(Accelerometer), 각속도계(Gyroscope), 압력센서 등, 다양한 센서를 상용화하여 판매하고 있다.

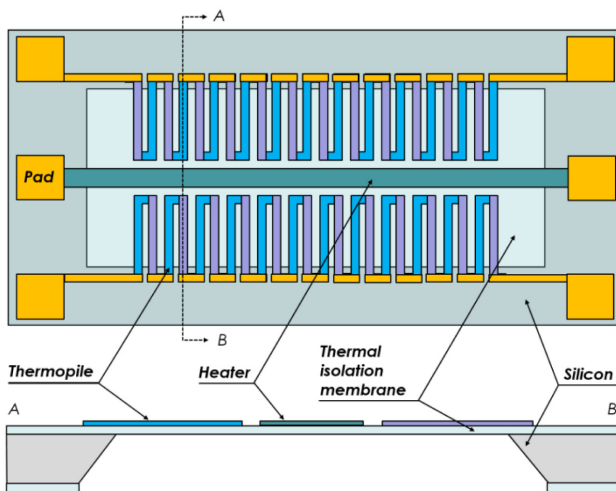


Fig. 1 An example of MEMS electrothermal structure consisting of thin thermal isolation membrane on which a heating resistor and thermopile temperature sensors are placed

다양한 MEMS 센서들 중에서 유량센서(Flow Sensor),<sup>5</sup> 가속도계,<sup>6</sup> 미소열량계(Micro-Calorimeter)<sup>7</sup> 미세구조체의 열적특성을 이용하는 센서이다. 이들은 일반적으로 Fig. 1과 같은 구성의 열전소자(Electrothermal Device)를 가진다. 열전소자는 소자 외부로 빠져나가는 열손실을 최소화하기 위해 형성한 얇은 멤브레인(Membrane)과 같은 열고립 구조(Thermal Isolation Structure) 위에 형성된 발열체(Heater) 및 온도센서로 이루어진다. 발열체는 전기 저항체로 외부에서 가하는 전류를 줄 발열(Joule Heating)을 통해 열로 전환하여 멤브레인의 온도를 높이는 역할을 한다. 온도센서는 주로 온도계수(Temperature Coefficient of Resistance)가 높은 저항체이거나 제벡효과(Seebeck Effect)가 큰 열전대(Thermopile)를 이용하여 제작하며, 각각 센서의 저항변화, 또는 열전대에서 발생하는 기전력(Electromotive Force)을 이용하여 발열체의 온도를 측정한다. 보편적으로 열전소자를 이용한 센서들은 저항 발열체에 전류를 가하여 발열체의 온도를 올리고 유량, 가속도 등 외부 환경의 변화에 따른 발열체 온도의 변화를 센서가 측정하는 방법으로 외부 물리량의 변화를 측정한다.

일부 연구는 MEMS 열전소자를 기준전압원(Voltage Reference),<sup>8</sup> 저주파 필터,<sup>9</sup> RMS-DC 변환기<sup>10</sup> 등의 회로에 응용하였다. MEMS 열전소자는 열시정수(Thermal Time Constant)가 비슷한 크기의 저항체 및 전기용량으로 구성된 전자회로의 시정수 보다 월등히 크기 때문에( $> 10^4$ ) 일반적인 집적회로 크기에서 구현이 매우 어려운 큰 시정수( $> 0.1$  s)를 가지는 회로의 구현에 강점을 가진다.

위와 같은 MEMS 열전소자의 일반적인 응용분야 이외에, 잘 알려지지 않은 않았지만 MEMS 열전소자가 국가의 필수 기능에서 중요한 기여를 하고 있는 분야가 교류실효전압 측정표준이다. 본 논문은 대한민국의 교류실효전압 측정표준의 구현에 MEMS 열전소자가 어떻게 기여하고 있는지 기술하고자 한다.

## 2. 교류실효전압 표준체계

이 장에서는 이해를 돕기 위해 MEMS 열전소자에 대한 기술에 앞서 교류실효전압 표준체계의 구성에 대해 설명하고자 한다.

### 2.1 국가측정표준

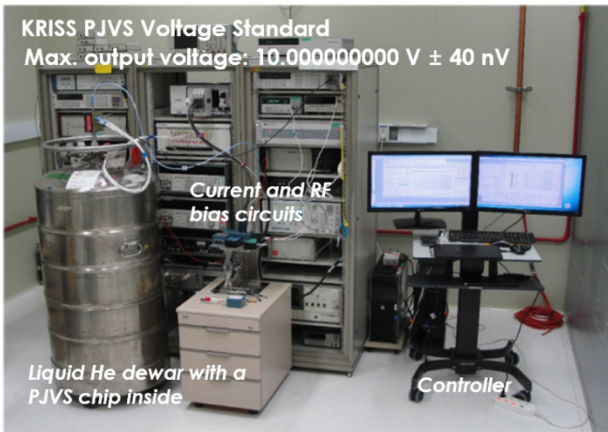
한국표준과학연구원(Korea Research Institute of Standards and Science, KRISS)은 국가표준기본법 제 13조에 국가측정표준 대표기관으로 지정되어 있으며 그에 따른 역할 중 하나는 “측정표준 및 측정과학기술의 연구·개발 및 보급”이다.<sup>11</sup> 국가표준기본법은 “측정표준”은 “산업 및 과학기술 분야에서 물상상태의 양의 측정단위 또는 측정량의 값을 정의하고, 현시하며, 보존 및 재현하기 위한 기준으로 사용되는 물적척도, 측정기기, 측정방법 또는 측정체계”로 정의하고 있다. 국가측정표준은 관련된 양의 다른 표준들에 값을 부여하기 위한 기준으로서 국가적으로 공인된 측정표준을 말한다.

국가표준기본법은 또한 연구개발 및 산업생산 현장의 물리량 측정 결과가 국가측정표준과 일치하도록 국가측정표준을 측정기기 또는 표준기의 교정(Calibration)을 통해 측정결과의 동등성을 보장하는 교정체계를 확립하는 것을 정부의 역할로 규정하고 있다. 현실적으로 단일 국가측정표준이 국내의 수많은 측정기기를 대상으로 교정서비스를 제공하는 것은 물리적으로 불가능하다. 따라서 정부는 국가표준기본법 시행령에서 국가교정기관을 지정하여 측정표준으로 교정된 측정기구나 표준기를 하위 측정표준으로 이용하여 교정서비스를 제공함으로써 측정표준과 현장 측정기기를 연결하는 일련의 교정사슬을 형성하는 교정체계를 확립하도록 명시하고 있다. 이때 측정표준은 대부분 국가측정표준이지만 필요시 해외의 측정표준이 될 수도 있다. 국가표준기본법은 이러한 측정표준까지 연결된 교정사슬을 “소급성”이라는 용어로 표현한다. 따라서 어떤 측정기기가 소급성을 보유하고 있다는 것은 일련의 교정사슬을 통해 측정기기의 측정결과가 측정표준의 측정값과 불확도(Uncertainty)범위 내에서 같은 측정결과를 보장한다는 의미이다.

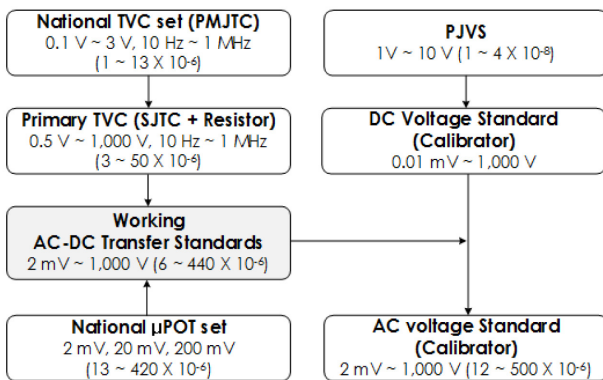
한국표준과학연구원은 국가표준기본법에 따라 각각의 물리량을 측정하는 기본이 되는 단위의 원기 및 이를 이용하여 다른 표준의 값을 측정하는 측정기기를 연구개발하고 이를 측정기구나 원기의 교정(Calibration)서비스를 통해 필요한 곳에 보급한다. 따라서 한국표준과학연구원은 대한민국의 모든 물리량 측정의 정점에 있으며 대한민국에서 가장 정확한 원기와 측정기술을 보유하고 있다.

### 2.2 교류실효전압표준

현재 국제적인 전압 측정표준의 최상위 원기는 조셉슨효과(Josephson Effect)라고 불리는 양자현상을 거시적으로 구현하여 양자물리적으로 계산된 직류전압을 출력하는 Programmable Josephson Voltage Source (PJVS)라 불리는 직류양자전압원이다.<sup>12</sup>



(a)



(b)

Fig. 2 (a) A photograph of PJVS voltage standard developed at KRISS and (b) a simplified traceability diagram of AC rms voltage established at KRISS

한국표준과학연구원은 미국 국가표준연구소인 NIST에서 도입한 조셉슨소자(Josephson Chip)와 자체적으로 개발한 소프트웨어 및 하드웨어를 이용하여 개발한 PJVS를 최상위 전압 원기로 사용하고 있다. Fig. 2(a)는 한국표준과학연구원이 개발하여 운영중인 PJVS 시스템의 사진이다. 조셉슨소자의 동작 온도조건(< 4 K)을 보장하기 위해서는 조셉슨소자를 Fig. 2(a)와 같이 액체 헬륨용기(Liquid He Dewar)안에 설치해야한다. 조셉슨 소자에 외부 바이어스 회로를 이용해 직류전류와 RF(20 GHz) 전력을 공급하면 조셉슨소자는 양자역학적으로 계산된 절대전압을 출력한다. 사진의 한국표준과학연구원 PJVS는 최대 10.000000000 V의 전압을 40 nV이내의 정확도(Accuracy)로 발생시킬 수 있다. Fig. 2(b)는 PJVS로부터 이어지는 직류전압 및 교류전압소급성 구현의 한 예를 보여주는 그림이다. PJVS에서 양자적으로 구현된 1 - 10 V의 표준전압은 직류전압분할기 (DC Divider)와 미터교정기(Calibrator)를 이용하여 0.01 mV 부터 1000 V까지 확장된다.

교류전압은 시간에 따른 순간적인 전압의 변화에 대한 표준을 정의하기 어렵기 때문에 실용적으로 단일 톤(Tone) 사인파(Sinusoidal Wave)의 실효값(RMS Value)을 표준으로 정의하여

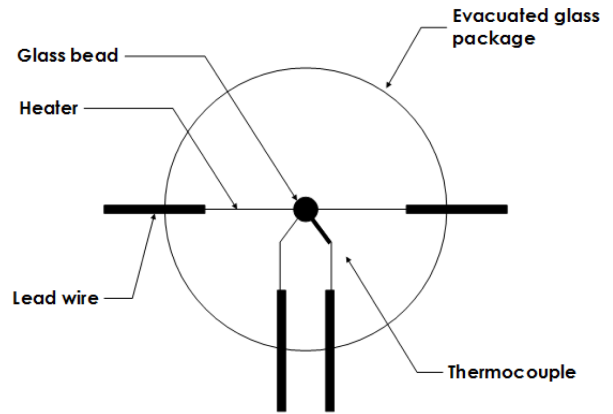


Fig. 3 Schematic diagram of a SJTC

사용한다. 사인파 교류전압에 존재하는 왜곡(Distortion)은 하모닉스(Harmonics)의 형태로 실효값에 반영된다. 보통 표준기로 사용하는 교류전압 발생원의 왜율은 -40 dB 정도로 고주파 하모닉스의 전력이 실효값 측정에 미치는 영향은 미미하다. 이 실효값이 소급성을 갖추려면 Fig. 2(b)에 묘사한 바와 같이 직류전압과 교류실효전압 사이에 양 전압의 비교측정이 가능한 AC-DC 전달표준(AC-DC Transfer Standard)을 구현해야 한다. 따라서 측정학(Metrology) 연구에서는 다양한 방법으로 AC-DC 전달표준을 구현하려 노력하였고 현재는 모든 국가에서 Thermal Converter(TC)로 알려진 열전소자를 이용하여 구현한 AC-DC 전달표준을 이용하여 교류실효전압의 소급성을 구현하고 있다. AC-DC 전달표준도 1 V PMJTC부터 시작하여 상용 AC-DC 전달표준을 이용하여 2 mV부터 1000 V까지 확장된다. 두 측정표준을 이용하여 미터교정기의 교류실효전압으로 소급이 연결된다.

### 3. AC-DC 전달표준으로서 TC의 특성

#### 3.1 TC를 이용한 교류실효전압 측정

1952년 미국 NBS(NIST의 전신)의 Francis Hermach이 최초로 제안한 이래 현재까지 가장 편리하고 정확한 AC-DC 전달표준은 TC이다.<sup>13</sup> TC는 일종의 전력측정소자로 소급성을 갖춘 직류전압과의 비교측정을 통하여 정확한 교류실효전압을 측정하는 소자이다. 가장 간단한 형태의 TC는 Fig. 3과 같은 구조로 되어있다. 진공상태의 유리포장(Glass Package)안에 열전효과가 낮은 합금인 에바놈(Evanhom)으로 제작된 발열체가 있고 그 가운데에 열전쌍(Thermocouple)이 유리구를 통해 발열체와 접합되어 있다.<sup>14</sup> 열전쌍과 발열체는 전기적으로는 절연되어 있지만 열적으로는 연결되어 있어 발열체의 중간의 온도를 열전쌍의 출력 기전력으로 측정할 수 있다. Fig. 3과 같은 형태의 TC는 열전쌍이 하나이기 때문에 SJTC (Single Junction Thermal Converter)라고 불린다. SJTC는 비교적 구조가 간단하고 고주파 특성이 좋기 때문에 초창기부터 현재까지 70년동안 AC-DC 전달표준의 구현에 광범위하게 사용되고 있는 소자이다.

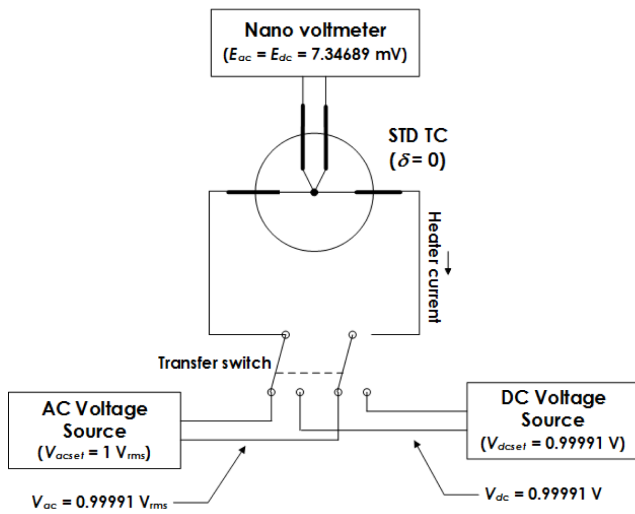


Fig. 4 Schematic diagram of a circuit for measurement of AC RMS voltage by using a TC

Fig. 4는 TC를 이용해 교류실효전압을 직류전압과 비교 측정하는 기본적인 회로구성의 한 예를 보여주는 그림이다. TC는 일반적으로 열시정수가 크기(> 1 s) 때문에 대부분의 교류전압에서 전력에 비례하는 직류전압을 출력한다. Fig. 4에서 TC의 입력은 직류전압원과 교류전압원에 아날로그 스위치를 통해 연결되어 있고 TC출력은 나노볼트미터(Nanovoltmeter)와 연결되어있다. Fig. 4와 같이 교류전압원을 1 V<sub>rms</sub>의 출력을 발생하도록 조정했을 ( $V_{acset} = 1 V_{rms}$ ) 때 교류전압원의 실제 출력 유효전압을 정확하게 측정하는 상황을 가정하자. 먼저 Fig. 4의 스위치가 교류전압원을 TC와 연결하여 출력된 TC의 출력기전력(ex.  $E_{dc} = 7.34689 mV$ )를 기록한다. Fig. 3에 묘사된 일반적인 SJTC의 열전쌍의 1 V 정격 출력전압은 대략 7 mV 정도이다. 그 후 TC를 직류전압원과 연결하고 출력기전력이 교류전압원에 의한 출력기전력과 같은 값이 될 때까지( $E_{ac} = E_{dc} = 7.34689 mV$ ) 표시 출력전압( $V_{dcset} = 0.99991 V$ )을 조절한다. 이 상태는 TC가 이상적인 소자라고 가정할 때(교직차 = 0, 3.2절에서 설명), 직류전압원의 실제 출력전압과 교류전압원의 실제 출력전압( $V_{dc} = V_{ac}$ )이 같다는 것을 의미한다. 그러나 두 전압원의 표시 출력전압( $V_{dcset}, V_{acset}$ )과 실제 출력전압이 일치한다는 보장이 없기 때문에 그 정확한 실제 출력전압의 값이 얼마인지는 알 수 없다. 직류전압원이 교정이 되어 표시 출력전압과 실제 출력전압의 오차가 없다고 가정하면( $V_{dcset} = 0.99991 V = V_{dc}$ ) 직류전압원의 표시전압을 기준전압으로 사용하여 비로소 교류전압원의 출력전압을 직류전압원의 표시전압 값으로( $V_{dcset} = 0.99991 V = V_{dc} = V_{ac} = 0.99991 V_{rms}$ ) 결정할 수 있다. 따라서 교정된 직류전압원과 이상적인 TC를 이용하여 측정된 교류전압원의 표시값 1 V<sub>rms</sub>의 정확한 실제 출력전압은 0.99991 V<sub>rms</sub>이다. 이때 교류전압의 표시값과 실제값의 차이가 교류전압원의 오차이며 이를 결정하는 과정이 교류전압원의 교정이다. 위의 방법으로 교류실효전압을 1 V<sub>rms</sub>에서  $1 \times 10^{-6}$  (1 Part Per Million, ppm)정도의 정확도로 측정이 가능하다.

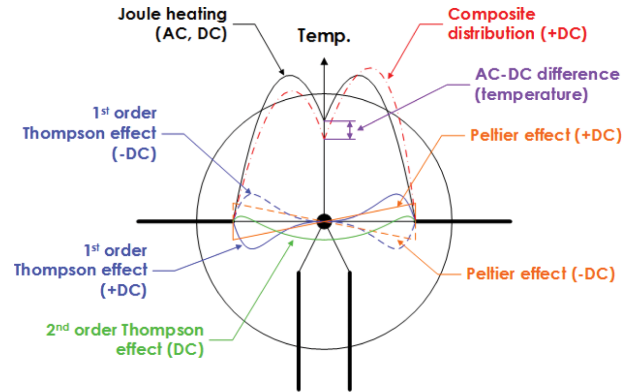


Fig. 5 Temperature distribution in the heater in SJTC due to Joule heating and accompanying thermoelectric effects depending on the current direction

### 3.2 TC의 교직차(AC-DC Difference)

3.1절에서 가정한 것과 다르게 실제 TC는 앞으로 기술할 여러 요인으로 인해 같은 전력의 직류전압과 교류전압에 대한 출력기전력에 차이를 보인다. 이 차이를 TC의 교직차 또는 전달오류라고 명명하며 식(1)과 같이 정의한다.

$$\delta = \frac{V_{ac} - V_{dc}}{V_{dc}}, E_{dc} = E_{ac} \tag{1}$$

식(1)에서  $V_{dc}$ 는 같은 출력기전력을 발생하는 양 극성의 직류전압의 절대값의 평균이다. TC 소자가 완벽하게 대칭적인 구조로 제작되지 않았을 경우 뒤에 설명할 열전효과에 의해 같은 크기의 직류전압에서도 극성에 따른 출력기전력의 오차가 발생한다.

TC에서 교직차가 발생하는 원인은 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째 원인은 주로 직류전압 입력에서 발생하는 두 열전효과, 펠티에 효과(Peltier Effect) 및 톰슨효과(Thompson Effect)에 의한 교직차로 TC의 전 주파수 영역에서 보인다. 펠티에 효과는 다른 종류의 두 전도체의 접합에 전류가 흐를 때 접합에서 발열이나 흡열이 발생하는 현상으로 TC에서는 Fig. 3의 구조에서 보이듯이 다른 물질로 되어있는 발열체와 신호선(Lead Wire)의 경계에서 발생하며 전류의 방향에 따라 발열과 흡열이 결정된다. 톰슨효과는 온도분포가 있는 전도체에 전류가 흐를 때 전류의 방향과 온도분포의 방향에 따라 발열 또는 흡열이 일어나는 현상으로 TC에서는 발열체의 출발열에 따른 온도분포에 의해 발생한다. Fig. 5는 SJTC의 발열체의 온도분포와 각 열전효과가 온도분포에 미치는 영향을 간단하게 묘사한 그림이다. 열전쌍으로 인한 열손실로 인해 전체적인 온도분포는 열전쌍을 중심으로 양쪽으로 쌍봉의 형태를 보인다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 온도센서인 열전쌍 양쪽으로 TC의 구조와 온도분포가 대칭을 이룬다면 1차적인 열전효과(1st Order Effect)는 전류의 양극성을 평균함으로서 상쇄할 수 있다. 그러나 제조오차에 의한 비대칭성을 완전히 제거할 수가 없고, 2차적인 열전효과(2nd Order Effect)도 발생하기 때문에 잘 만들어진 SJTC도 대략 1 ppm 수준의 열전효과에 의한 교

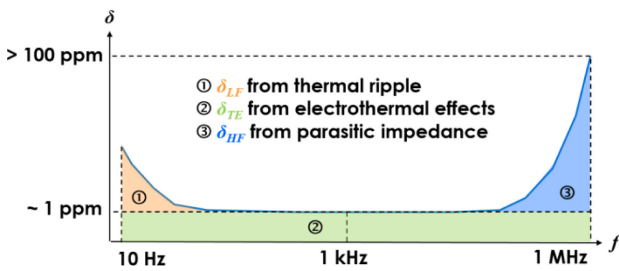


Fig. 6 Characteristic AC-DC transfer difference of a TC

직차가 발생한다.<sup>15</sup>

교직차의 두 번째 원인은 저주파 교류전압 입력에서 발생하는 TC 발열체 온도의 리플(Ripple)현상이다. 입력 교류전압의 변화 속도가 TC의 시정수에 근접하는 수준으로 느려지면 TC의 출력 기전력은 입력전압의 전력에 비례하기 때문에 두 배의 주파수로 리플현상을 보인다. 이 때 TC의 출력기전력이 이상적으로 전압의 제곱에 비례한다면 출력기전력의 주기별 평균은 입력전압의 평균전력을 나타내므로 이 평균값을 측정값으로 사용하면 교직차는 발생하지 않는다. 그러나 실제 TC의 출력기전력은 내부에서 발생하는 열손실 및 제조오차로 인해 정확하게 입력전압의 제곱에 비례하지 않는다. 때문에 일반적인 TC출력기전력의 주기별 평균값은 평균전력에서 벗어나고 이에 따라 교직차가 발생한다.<sup>15</sup>

교직차의 세번째 원인은 고주파에서 보이기 시작하는 기생 임피던스 성분 및 스킨효과(Skin Effect)이다. 주파수가 높아지면 TC의 구조로 인해 필연적으로 발생하는 유도용량(Inductance) 및 전기용량(Capacitance) 성분으로 발열체에 가해지는 전력이 입력전력과 달라지게 되고 이 차이가 교직차를 야기한다.

Fig. 6은 일반적인 SJTC의 교직차 특성을 보여주는 그림이다. 가청주파수 영역에서 교직차가 가장 작고 저주파 및 고주파로 갈수록 교직차가 증가하는 특성을 보여준다. 전 주파수 영역에서 열전효과에 의한 교직차가 나타나고 온도 리플 및 기생 임피던스 성분에 의한 교직차가 각각 그 위에 추가되는 형상이다. 실제 교류실효전압을 위와 같은 특성의 TC를 이용하여 측정할 때는 기준 같은 전력을 가지는 기준 직류전압을 결정한 후 TC의 교직차를 이용하여 식(2) 같이 보정한다.

$$V_{ac} = V_{dc}(1 + \delta), E_{dc} = E_{ac} \tag{2}$$

식(2)는 식(1)의 교직차 정의를 교류전압의 관점으로 다시 정리한 식이다.

### 3.3 TC의 교직차 측정

3.2절에서 언급했듯이 TC는 AC-DC 전달표준이고 교직차라는 고유의 오차를 가지기 때문에 TC도 교정을 해야한다. 이론적으로는 정확한 직류전압원과 교류전압원이 있으면 식(1)의 정의에 입각하여 TC의 교직차를 쉽게 측정할 수 있다. 그러나 교류전압의 소급성이 TC를 통하여 직류전압에 연결되기 때문에 표준체

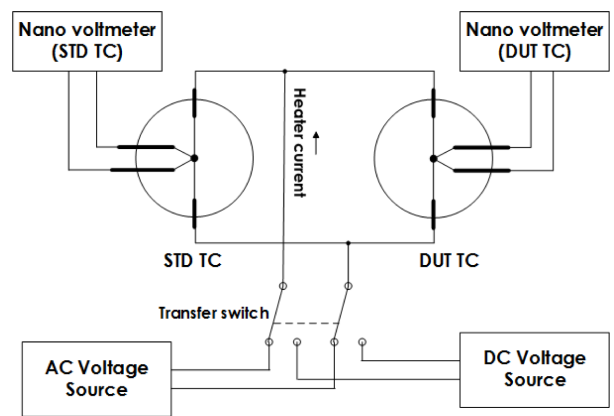


Fig. 7 Circuit schematic for the measurement of AC-DC transfer difference of a DUT TC by comparing to a STD TC in KRIS

상 이 방법은 사용할 수 없다. 따라서 TC는 교직차를 알고 있는 기준 TC와의 비교를 통하여 측정하여 교정한다. 현재 최상위 기준 TC의 교직차는 3.2절에서 설명한 교직차의 모든 원인을 고려하여 TC를 최대한 정확하게 묘사하도록 개발된 모델로부터 계산하여 얻는다. Fig. 7은 TC의 교직차 비교측정 회로의 예를 도시한다. Fig. 3의 회로의 TC를 기준으로 하여 측정할 TC를 병렬로 연결한 구성이다. Fig. 7의 교직차 비교측정 회로는 STD TC의 교직차를 기준으로 DUT TC의 교직차를 측정하는 회로로 교류전압원과 직류전압원의 출력전압을 정확하게 알지 못해도 정확한 교직차 측정이 가능하다.

### 4. MEMS Planar Multi-Junction Thermal Converter (PMJTC)

1990년대 말부터 선진국의 국가대표측정기관(National Metrology Institute, NMI)을 중심으로 MEMS 기술을 도입하여 기존의 TC가 가지는 교직차를 획기적으로 줄이려는 연구가 본격적으로 수행되었다. MEMS 기술은 미세한 구조체를 보통의 기계 가공으로 제작이 불가능한 높은 정밀도로 대량생산할 수 있는 기술이다. 따라서 MEMS 기술을 적용하면 교직차가 작고 출력이 큰 TC를 비교적 쉽게 구현할 수 있다.

MEMS 기술을 이용한 TC를 개발하여 교류실효전압표준을 구현한 대표적인 기관이 독일의 연방기관인 PTB이다. PTB는 MEMS 소자를 구현하는데 널리 사용되는 실리콘 기판 및 ONO (Oxide-Nitride-Oxide) 멤브레인을 이용하여 PMJTC를 개발하였다.<sup>16</sup> 서문에서 언급한 다른 열전소자들과 마찬가지로 PMJTC에서도 발열체로부터 주변으로 빠져나가는 열손실을 최소화하는 것이 중요하다. PTB PMJTC는 1.3 mm × 5.2 mm 크기의 멤브레인 위에 100개 이상의 접합을 가지는 열전대와 발열체가 형성되어 있다. 멤브레인의 두께는 800 nm이고 발열체는 Ni45Cr50Si5 (Ni 45%, Cr 50%, Si 5%) 합금을 스퍼터(Sputter)를 이용하여 형성하

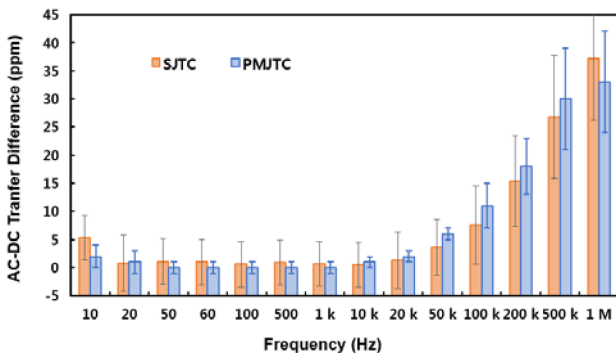


Fig. 8 AC-DC transfer difference of a SJTC and a IPHT PMJTC calibrated at PTB

였다. 합금으로 형성한 발열체의 장기안정도 와 온도계수는 각각 0.1%/년, 수 ppm/K 수준으로 아주 우수한 특성을 보인다.<sup>16</sup> 열전대는 100 개의 Bi-Sb (Bismuth-Antimony) 접합으로 형성하여 10 mW입력으로 공기중에서 160 mV의 기전력을 발생시킨다. 이는 일반적인 SJTC의 출력 전압인 7 mV보다 20배 이상 큰 값으로 같은 나노볼트미터와 조합할 경우 MJTC가 SJTC보다 더 작은 입력전압을 측정할 수 있다는 것을 의미한다. 멤브레인의 발열체 아래에는 TC의 시정수를 증가시키기 위해 실리콘 덩어리(Silicon Thermal Mass)를 남겨두었다. 이 실리콘 덩어리는 멤브레인 아래의 실리콘 기판을 이방성으로 식각할 때 실리콘 덩어리가 식각되지 않도록 특별히 고안된 마스크(Mask)를 이용하여 형성하였다.<sup>15</sup> PTB는 개발한 PMJTC를 AC-DC 전달표준의 최상위 기준으로 활용하기 위해 수치해석 기반의 모델을 개발하여 교직차를 계산하는데 활용하고 있다.<sup>17</sup> 이런 과정을 거쳐 개발된 실리콘 PMJTC는 현재 세계 여러나라에서 10 Hz 부터 1 MHz까지 교류실효전압을 측정하는데 사용되고 있다. Fig. 8은 SJTC와 실리콘 PMJTC의 교직차 주파수 특성을 보여주는 그래프이다.<sup>18</sup> 그래프의 오차(Error bar)는 각 교직차의 측정불확도(Uncertainty)를 나타낸다. Fig. 8에서 보이는 바와 같이 PMJTC는 불확도가 존재하긴 하지만 50 Hz - 1 kHz 영역에서는 교직차가 0으로 MEMS 기술을 도입함으로써 향상된 교직차를 보여준다. 10 Hz의 교직차도 2 ppm 이하로 MEMS 기술의 도입으로 기존의 SJTC의 교직차(5 ppm)보다 대폭 향상되었다. MEMS로 제작한 PMJTC는 SJTC보다 열차단 성능이 좋고 출력이 커서 소자의 동작 온도가 낮다(20°C vs. 150°C). 이 때문에 PMJTC는 상대적으로 저주파 온도 리플이 적으며 이에 따라 향상된 (작은) 교직차를 보인다. 100 kHz 이상의 주파수 영역에서는 실리콘 기판에서 발생하는 손실에 의해 SJTC의 교직차에 비해 그다지 향상된 교직차를 보이지 않는다. 그러나 10 Hz - 1 MHz 주파수 영역에서는 실리콘PMJTC로 AC-DC 전달표준 구현하는데 큰 무리가 없기 때문에 많은 국가에서 실리콘기판의 PMJTC로 전달표준을 구현하고 있다. 그러나 PTB나 NIST같은 일부 NMI에서는 석영(Quartz) 기반의 고주파 PMJTC 소자를 개발하여 100 MHz까지 전달표준을 구현하였다.<sup>19</sup>

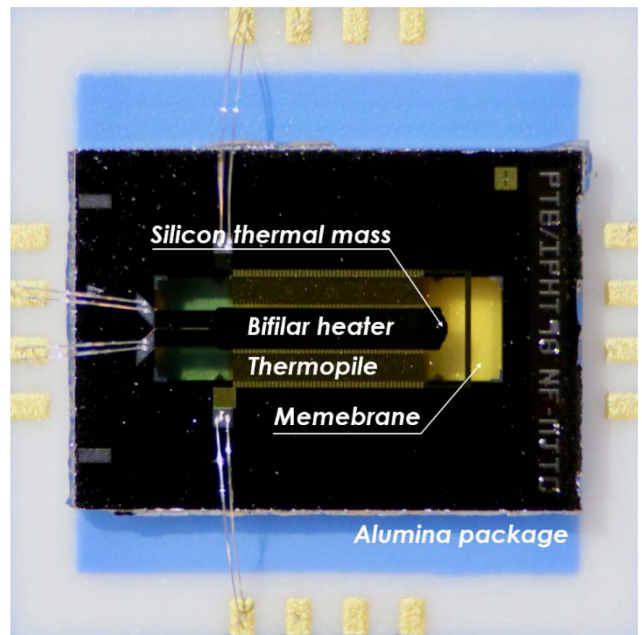


Fig. 9 Photograph of a PMJTC developed at PTB/IPHT which is being used as a primary AC-DC transfer standard at KRISS

PTB는 실리콘 PMJTC 관련 기술을 IPHT에 이전하여 현재 이 회사에서 PMJTC를 공급하고 있다.<sup>20</sup> Fig. 9는 IPHT에서 판매하고 있는 실리콘 PMJTC 소자의 사진이다. 멤브레인의 중앙에 발열체가 ‘ㄷ’자 형태로 자리하고 좌우로 열전대가 형성되어 있다. 사진에서 보이지는 않지만 발열체의 아래에는 시정수 증가를 위한 실리콘 덩어리가 남아있다. 사진의 PMJTC 소자는 알루미늄 포장(Package)안에 밀봉되어 제공된다.

### 5. 대한민국의 AC-DC 전달표준 현황

현재 우리나라의 AC-DC 전달표준의 최상위 원기는 PTB에서 교정받은 IPHT 사의 PMJTC이다. 2000년대에 경북대학교와 한국표준과학연구원이 공동으로 PMJTC를 개발하는 연구가 진행되어 그 결과를 논문으로 보고한 적이 있다.<sup>21</sup> 그러나 아쉽게도 그 결과가 양산 가능한 제품의 개발로 이어지지 못했다.

1 V<sub>rms</sub> AC-DC 전달표준을 실용영역인 1000 V<sub>rms</sub>까지 확장하기 위해서는 TC에 직렬 동축저항을 연결하여 제작한 열전압변환기(Thermal Voltage Converter, TVC)를 이용해야 한다. 한국표준과학연구원에서는 Fig. 2(b)의 소급도와 같이 PMJTC와 직렬 동축저항과 SJTC를 조합한 TVC (Thermal Voltage Converter)를 이용하여 2 mV<sub>rms</sub> 부터 1000 V<sub>rms</sub>까지 AC-DC 전달표준을 구현하고 국가교정기관 및 산업체에 교정서비스를 제공하고 있다. 한국표준과학연구원에서 구현한 전달표준의 불확도는 국제도량형총국(BIPM)에 대한민국의 AC-DC 전달표준 CMC (Calibration and Measurement Capabilities)에 등재되어 있다.<sup>22</sup>

6. 향후 계획

현재 우리나라는 아직 자체적으로 AC-DC 전달표준을 구현하지 못하고 있다. AC-DC 전달표준을 자체적으로 구현하려면 TC의 교직차를 정확히 측정하는 기술을 개발하거나 TC의 정확한 모델을 개발해야 한다. 한국표준과학연구원 앞으로 TC의 정확한 모델의 개발을 통해 자체적으로 AC-DC 표준을 구현하고자 한다. 또한 측정학 분야에서 현재 세계적인 추세인 교류양자전압원을 통한 교류실효전압 표준을 직접 구현하는 방법도 검토 중에 있다.

7. 요약

본 논문은 국가측정표준에서 중요한 기여를 하고 있는 MEMS 열전소자에 대해 기술하였다. 교류실효전압은 MEMS 기술로 제작된 PMJCT와 기준 직류전압을 이용하여 정확하게 측정할 수 있으며 이 때문에 MEMS기술로 제작된 PMJTC는 교류실효전압과 직류전압을 연결하는 AC-DC 전달표준으로 사용된다. PMJTC는 교직차로 정의되는 고유 오차를 가지고 있으며 이는 기준 PMJCT와 비교측정을 통해 교정한다. 현재 우리나라는 PMJTC를 이용하여 10 Hz - 1 MHz 주파수 대역에서 2 mV<sub>rms</sub> 부터 1000 V<sub>rms</sub>에 이르는 AC-DC 전달표준을 구현하고 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 한국표준과학연구원의 기관고유사업인 “전자기 측정표준 기술 고도화”과제의 지원으로 작성되었다.

REFERENCES

1. ST Microelectronics, “MEMS and Sensors,” <https://www.st.com/en/mems-and-sensors.html> (Accessed 22 OCT 2018)
2. Analog Devices, “Sensors & MEMS,” <http://www.analog.com/en/products/sensors-mems.html> (Accessed 10 OCT 2018)
3. NXP semiconductor, “Sensors,” <https://www.nxp.com/products/sensors: SNSHOME> (ACCESSED 10 OCT 2018)
4. MEMSIC, “Accelerometers,” <http://www.memsic.com/accelerometers/> (Accessed 22 OCT 2018)
5. Kuo, J. T., Yu, L., and Meng, E., “Micromachined Thermal Flow Sensors - A review,” *Micromachines*, Vol. 3, No. 3, pp. 550-573, 2012.
6. Fennelly, J., Ding, S., Newton, J., and Zhao, Y., “Thermal MEMS Accelerometers Fit Many Applications,” *Sensor Magazine*, Vol. 3, pp. 18-20, 2012.

7. Yu, S., Wang, S., Lu, M., and Zuo, L., “Review of MEMS Differential Scanning Calorimetry for Biomolecular Study,” *Frontiers of Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 4, pp. 526-538, 2017.
8. Klaassen, E. H., Reay, R. J., Storment, C., and Kovacs, G. T., “Micromachined Thermally Isolated Circuits,” *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 58, No. 1, pp. 43-50, 1997.
9. Lee, K.-H., Lee, H.-K., Byun, H.-J., Cho, I.-J., Bu, J.-U., et al., “An Audio Frequency Filter Application of Micromachined Thermally-Isolated Diaphragm Structures,” *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 89, Nos. 1-2, pp. 49-55, 2001.
10. Yoon, E. and Wise, K. D., “A Wideband Monolithic RMS-DC Converter Using Micromachined Diaphragm Structures,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 41, No. 9, pp. 1666-1668, 1994.
11. Korea Ministry of Government Legislation, “13- National measurement standard representative organization,” <http://www.law.go.kr/Laws/Standards of National Standards> (Accessed 10 OCT 2018)
12. Burroughs, C. J., Dresselhaus, P. D., Rufenacht, A., Olaya, D., Elsbury, M. M., et al., “Nist 10 V Programmable Josephson Voltage Standard System,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 60, No. 7, pp. 2482-2488, 2011.
13. Hermach, F. L., “Thermal Converters as AC-DC Transfer Standards for Current and Voltage Measurements at Audio Frequencies,” *Journal Research of the National. Bureau of Standards*, Vol. 48, No. 2, pp. 121-138, 1952.
14. Hermach, F. and Williams, E., “Thermal Converters for Audio-Frequency Voltage Measurements of High Accuracy,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 15, No. 4, pp. 260-268, 1966.
15. Inglis, B., “Standards for AC-DC Transfer,” *Metrologia*, Vol. 29, No. 2, pp. 191-200, 1992.
16. Klonz, M., Laiz, H., and Kessler, E., “Development of Thin-Film Multijunction Thermal Converters at PTB/IPHT,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 50, No. 6, pp. 1490-1498, 2001.
17. Laiz, H. and Klonz, M., “Dynamic Non-Linear Electro-Thermal Simulation of a Thin-Film Thermal Converter,” *Microelectronics Journal*, Vol. 30, No. 11, pp. 1155-1162, 1999.
18. IPHT, “PTB Calibration Certificate,” IPHT.
19. Scarioni, L., Klonz, M., Janik, D., Laiz, H., and Kampik, M., “High-Frequency Thin-Film Multijunction Thermal Converter on a Quartz Crystal Chip,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 52, No. 2, pp. 345-349, 2003.
20. IPHT, “IPHT PMJTC Data Sheet,” IPHT.
21. Kim, J.-S., Lee, H.-C., Lee, J.-H., Lee, J.-H., Park, S. I., et al., “A Planar Bi-Sb Multijunction Thermal Converter with Small AC-DC Transfer Differences,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 51, No. 1, pp. 115-119, 2002.

22. BIPM, "Calibration and Measurement Capabilities," <https://kcdb.bipm.org/appendixC/default.asp> (Accessed 22 OCT 2018)



**Hyung-Kew Lee**

Principal research Scientist in the Center for  
Electromagnetic Standards, Korea Research  
Institute of Standards and Science.

E-mail: [hyungkew.lee@kriss.re.kr](mailto:hyungkew.lee@kriss.re.kr)