JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지 Vol. 22, No. 2: 330~337, Feb. 2018

열전압변환기와 교류측정표준을 사용한 감쇠기 평탄도 특성 분석 기법

차윤배[1] · 김부일[2*]

Flatness Characteristics Analysis Technique of Attenuator Using Thermal Voltage Converter and AC Measurement Standard

Yun-bae Cha[1] · Boo-il Kim[2*]

[1]Department of Weapon Systems Engineering, Pukyong National University. Busan 48513, Korea
[2*]Department of Electrical, Electronics and Software Engineering, Pukyong National University. Busan 48513, Korea

요 약

본 논문은 열전압변환기와 교류측정표준을 사용하여 10Hz에서 50MHz 대역의 감쇠기 평탄도 특성을 1kHz를 기준으로 분석하는 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 TVC를 사용하여 측정 주파수별 감쇠기의 입력전압을 1kHz와 동일하게 공급한 후, 교류측정표준에서 지시되는 전압 변화량으로 감쇠기의 평탄도 특성분석을 수행하였다. 감쇠기 평탄도 특성분석의 결과는 1dB에서 70dB까지 최대 866㎶/V의 불확도로 측정이 가능하며, 기존 회로망 측정방법을 사용한 2.31㎷/V 보다 약 37%의 불확도가 감소된 것을 확인하였다. 향상된 감쇠기 평탄도 특성 값은 교류측정표준의 저전압 2.2V에서 2.2mV까지 주파수 평탄도 교정에 적용할 수 있다.

ABSTRACT

This paper proposes a technique to analyze the flatness characteristics of the attenuator at 10Hz to 50㎒ on the basis of 1㎑ using a Thermal Voltage Converter and AC measurement standard. In the proposed technique, the input voltage of the attenuator for each measuring frequency is supplied at the same rate as 1㎑ using TVC, and the flatness characteristics of the attenuator are analyzed by the voltage variation indicated in the AC measurement standard. The results of the analysis of the attenuator flatness characteristics show that the maximum uncertainty of 866㎶/V can be measured from 10㏈ to 70㏈ and the uncertainty is reduced by about 37% compared to 2.31㎷/V using the network measurement method. The improved attenuator flatness characteristic values can be applied to the frequency flatness calibration from 2.2V to 2.2mV at the low voltage of the AC measurement standard.

키워드 : 열전압변환기, 교류측정표준, 감쇠기, 평탄도, 측정시스템

Key word : Thermal Voltage Converter, AC Measurement Standard, Attenuator, Flatness, Measurement System

Received 11 December 2017, **Revised** 22 December 2017, **Accepted** 27 December 2017

*** Corresponding Author** Boo-il Kim (E-mail:bikim@pknu.ac.kr, Tel:+82-51-629-7819)
Department of Electrical, Electronics and Software Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

Open Access http://doi.org/10.6109/jkiice.2018.22.2.330 pISSN:2234-4772

ⓒThis is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/li-censes/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright Ⓒ The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

Ⅰ. 서 론

교류 저전압 표준(low voltage standard)은 알고 있는 전류를 전압으로 변환하는 micro potentionmeter(μpot)와 저전압 열전압변환기 TVC(thermal voltage converter)를 사용하고, step-down 절차를 통해 10Hz부터 1MHz 대역에서 2mV에서 200mV까지 전압을 발생시킨다. 발생된 전압은 부하효과(loading effect)의 보정을 통해 14 ㎶/V에서 600㎶/V의 불확도(uncertainty)로 제공할 수 있다[1,2]. 대체방법으로는 TVC를 사용하여 200mV의 기준 전압을 설정하고, 저항 감쇠기(resistive attenuator)를 사용하여[3] 단계적으로 2mV까지 전압을 감소시켜 제공한다. 여기서, 저항 감쇠기는 10Hz에서 1MHz 대역의 AC-DC 차이가 없는 것으로 가정한다[2]. 이러한 교류 저전압 표준은 상업용 저전압 AC-DC 전달표준(LVTS, low voltage ac-dc transfer standard), 교류측정표준(AC Measurement Standard), 기준 멀티미터(reference multimeter) 등의 교정(calibration)에 사용되고 있다[2,4].

상업용으로 고 정밀의 저전압 교류측정표준은 Fluke 사의 5790B가 널리 사용되고 있으며, 10Hz에서 50MHz의 주파수 대역에서 300㎶/V에서 11㎷/V의 불확도로 측정할 수 있다[5]. 교류측정표준의 mV 수준의 저전압 교정은 μpot으로부터 소급(traceability)된 상업용 LVTS를 사용하고 있으나[6,7], LVTS의 주파수 특성의 한계로 1MHz이상의 광대역(wideband)에서는 1kHz의 기준 전압을 설정하고, 기준 전압으로부터 주파수를 변경하여 전압의 변화로 평탄도 특성(flatness characteristics)을 분석하고 있다. 임피던스(impedance)가 50Ω인 광대역 입력단자의 주파수 평탄도 분석 방법은 TVC를 사용하여 1kHz에서 3.2V의 기준 전압을 설정하고, 감쇠기를 사용하여 최소 1mV(약 70dB)까지 단계적으로 전압을 낮추어가며 주파수별 전압 변화량으로 측정한다[4]. 여기서, 10Hz에서 50MHz 대역의 주파수 평탄도 분석의 불확도를 향상시키기 위해서는 저항 감쇠기의 1kHz의 기준 전압 대비 주파수별 전압의 차이를 정확하게 분석하여 보정하는 것이 필요하다. 기존 감쇠기의 감쇠량 측정방법은 회로망(network) 측정방법을 사용하여 50Ω 임피던스의 회로망에서 최대 2.31 ㎷/V(0.020dB)까지 추정할 수 있으나[8], 교류측정표준의 제원(specification)보다 감쇠기 특성분석 값의 불확도가 4배 이상 좋아야 함으로[9], 회로망 측정기법은 적용할 수 없다.

본 논문에서는 TVC와 교류측정표준을 사용한 10Hz에서 50MHz 대역의 저항 감쇠기 평탄도 특성분석 기법을 제안하였으며, 측정시스템을 구성한 후 감쇠기의 주파수별 평탄도 특성을 분석하였다. 불확도의 주요 요인은 신호원의 정확도와 측정값의 변동량에 따른 것이며 이를 개선함으로써 감쇠기 평탄도 특성분석의 불확도를 향상하고자 하였고, 제안한 측정 기법에 대해 불확도 측정 평가 지침서 EA-4/02의 평가방법에 따라[10], 측정값에 대한 불확도 평가 및 결과 분석을 통해 검증하였다.

Ⅱ. 측정시스템 구성

1kHz 기준으로 감쇠기의 평탄도 특성을 분석하기 위해서는 주파수별 동일한 입력전압이 감쇠기 입력단자에 공급되는 것이 중요하다. 동일한 입력전압의 인가를 위해 단기 안정도(short-term stability)가 좋은 AC Calibrator를 선택하고, 그 출력을 모니터링할 수 있는 TVC와 Nano Voltmeter로 신호원을 구성하였다. 감쇠기의 전압 변화량에 대한 측정은 균등눈금(linear scale)이면서 100mV range에서 1㎶의 분해능(resolution)을 가지고 있는 교류측정표준으로 선정하였으며, 감쇠기를 연결할 경우 발생할 수 있는 부정합(mismatch) 불확도를 줄이기 위해 20dB의 마스킹 패드(masking pad)를 사용하였다[11]. 여기서 마스킹 패드는 주파수에 따른 50Ω 임피던스 변화가 작은 것으로 선택하였으며, 선정된 장비로 구성된 감쇠기 평탄도 특성분석에 대한 측정 시스템의 간략화한 연결도는 그림 1과 같다.

감쇠기의 평탄도 특성은 10Hz에서 50MHz의 주파수 대역에서 1kHz를 기준으로 측정 주파수별 감쇠기의 전압 변화량으로 나타낼 수 있다. 이때 1kHz와 측정 주파수별 감쇠기의 입력 전압은 동일한 것으로 가정한다. 1kHz를 기준으로 감쇠기의 평탄도 특성은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta V = \frac{(V_r - V_{ref})}{V_{ref}} \times 10^6 \qquad (1)$$

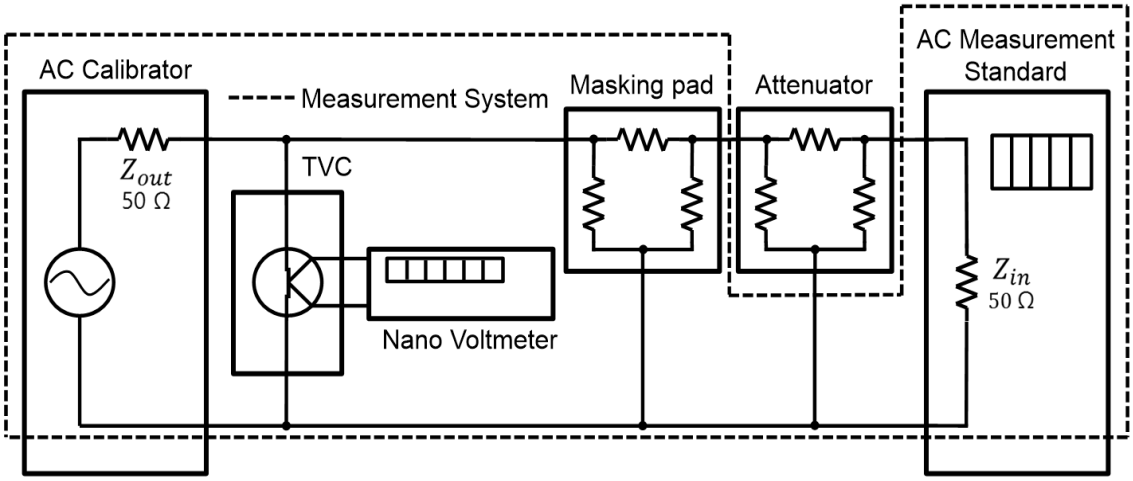

Fig. 1 Simplified diagram of measurement system for flatness characteristic analysis of attenuator

여기서 δV는 1kHz를 기준으로 측정 주파수에서 감쇠기의 전압 변화량, V_{ref}는 1kHz에서 감쇠기의 감쇠량에 대한 전압 값으로 기준점으로 설정하며, V_r은 측정 주파수에서 감쇠기의 순수 감쇠량에 대한 전압 값이다. V_r은 교류측정표준의 지시 값인 V_m과 측정시스템의 offset인 V_s의 차이로 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$V_r = V_m - V_s \tag{2}$$

V_m은 감쇠기의 순수 감쇠량에 대한 전압 값 V_r, 측정시스템의 구성품인 열전압변환기, 마스킹 패드, 교류측정표준들이 1kHz의 기준 전압으로부터 측정 주파수의 변화에 따른 전압 변화량이 모두 포함되어 지시되는 값으로 표현할 수 있다.

$$V_m = V_r + \delta TVC + \delta Pad + \delta ACMS \tag{3}$$

여기서 δTVC는 1kHz를 기준으로 열변환 전압의 차이 값, δPad는 1kHz를 기준으로 20dB 마스킹 패드의 감쇠량의 변화량이며, $\delta ACMS$는 1kHz를 기준으로 교류측정표준의 주파수 평탄도에 따른 전압의 변화량이다. 따라서 측정 주파수에서 감쇠기의 순수 감쇠량에 의한 전압 값인 V_r을 구하기 위해 측정시스템의 변화량들을 제거해 주어야 한다. 측정시스템의 offset인 V_s는 측정 주파수에서 측정시스템의 전압 지시 값인 V_{sr}과 1kHz에서 측정시스템의 기준 전압 지시 값인 V_{sref}의 차이로 얻어지며, 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_s = V_{sr} - V_{sref} \tag{4}$$

여기서 측정 주파수에 대한 측정시스템의 전압 지시 값인 V_{sr}은 V_{sref}와 시스템의 변화량을 모두 포함한 전압으로 식 (5)와 같이 표현될 수 있으며, V_{sref}을 제외할 경우 측정시스템의 순수 변화량인 offset을 식 (6)과 같이 얻을 수 있다.

$$V_{sr} = V_{sref} + \delta TVC + \delta Pad + \delta ACMS \tag{5}$$

$$V_s = \delta TVC + \delta Pad + \delta ACMS \tag{6}$$

교류측정표준 지시값 V_m에서 식 (6)에서 구한 V_s 값으로 V_r을 구할 수 있고, 식 (1)에 대입하여 1kHz를 기준으로 주파수의 변화에 따른 감쇠기의 전압 변화량을 구한다. 여기서 1kHz의 기준 주파수에서 감쇠기의 감쇠량에 대한 전압 값인 V_{ref}는 기준점으로써 추가적 보정은 고려하지 않으며, δV의 단위는 상대 전압 값으로 μV/V로 나타낸다. 측정시스템에 대한 분석결과는 측정시스템의 offset을 보정해 줌으로써 감쇠기의 전압 변화량인 δV의 유효성을 확인하였다.

Ⅲ. 평탄도 특성 및 불확도 평가

3.1. 평탄도 특성 분석

감쇠기의 평탄도 특성 값은 일정한 신호원의 전압을 주파수별 정확한 저전압으로 낮추어 제공하기 위해 사용하며, 분석절차는 크게 두 단계로 수행한다. 첫 번째 단계로 측정시스템의 offset인 V_s를 측정하기 위해 그림 1에서 감쇠기를 제외하고 연결한다. AC Calibrator를 1V, 1kHz로 설정한 후 교류측정표준에서 지시되는 전압을 V_{sref}로 기록한다. AC Calibrator의 주파수를 측정하고자 하는 주파수로 변경한다. 여기서 감쇠기의 입력단자에 동일한 전압이 공급되도록 AC Calibrator의 전압을 TVC와 Nano Voltmeter로 모니터링한 후 전압계의 지시 값이 1kHz의 입력 전압 값으로부터 10nV의 자릿수까지 동일하도록 조절한다. 감쇠기의 입력 전압이 유지된 상태에서 교류측정표준에서 변화되는 전압을 V_{sr}로 기록한다. 측정 주파수의 offset인 V_s는 V_{sr}에서 V_{sref}를 뺀 값이다.

두 번째 단계로 측정시스템에 감쇠기를 그림 1과 같이 연결한다. AC Calibrator를 10dB 증가된 약 3.16V, 1KHz로 설정하고, AC Calibrator의 출력을 이전 교류측정표준에서 지시된 V_{sref} 값이 되도록 미세 조정한다. 여기서 TVC는 동일한 주파수 안에서 전압의 변화에 따른 RF-DC 열전력 차이가 발생하지 않으므로 10dB 전압의 증가에 따른 δTVC는 없는 것으로 간주한다. 이때 교류측정표준에서 지시되는 전압을 V_{ref}로 기록하며, V_{sref}와 동일하다. 측정 주파수를 변경할 경우 감쇠기의 입력단자에 동일한 입력 전압이 공급될 수 있도록 AC Calibrator의 전압을 조절하여 전압계의 지시 값을 10nV의 자릿수까지 동일하게 유지한다. 측정 주파수를 변경한 후 교류측정표준의 전압을 V_m으로 기록한다. 측정 주파수에서 감쇠기의 순수 감쇠량에 대한 전압 값인 V_r은 교류측정표준의 지시 값인 V_m에서 측정시스템 offset인 V_s를 뺀 값이다. 1kHz를 기준으로 측정 주파수에서 감쇠기의 전압 변화량 δV은 V_r에서 V_{ref}를 뺀 값에서 V_{ref}로 나누고, 10^6을 곱하여 얻을 수 있다. 측정절차에서 주의할 점은 TVC의 DC 출력 전압이 지속적으로 drift가 발생하므로 TVC의 안정화 시간(최소 10분)을 충분히 가진다. 측정 주파수를 측정한 후 1kHz의 기준 전압 변화량을 지속적으로 확인하여 전압 값이 ±20㎶/V 이내로 유지되면 다음 주파수를 측정하고, 그렇지 않으면 기준 값을 재조정한 후 측정을 계속한다.

20dB 감쇠기의 특성분석은 TVC의 최대 입력전압이 3.4V이므로, 그림 1에서 마스킹 패드를 20dB와 특성을 알고 있는 10dB 감쇠기로 구성하여 측정시스템의 offset을 측정한다. 그리고 10dB 감쇠기를 빼고 교정대상 장비인 20dB 감쇠기를 연결하여 10dB 감쇠기 특성분석 절차와 동일하게 측정한다. 20dB 감쇠기의 평탄도 특성은 측정된 변화량과 알고 있는 10dB 감쇠기의 평탄도 특성분석 값을 합하여 얻어진다. 만약 입력전압이 3.2V일 경우 10dB 감쇠기와 20dB 감쇠기 3개로 총 70dB를 감쇠할 경우 1mV까지 전압을 낮출 수 있다.

3.2. 불확도 평가

감쇠기 평탄도 특성에 대한 측정값의 유효성을 확인하기 위해 EA4/02 지침에 따라[9] 불확도를 평가한다. 1㎑ 기준으로 주파수에 따른 감쇠기의 전압 변화량 δV에 대한 수학적 모델은 식 (1) ~ (6)을 사용하고, V_{ref}와 V_{sref}는 동일함으로 식 (7)과 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$\delta V = \frac{(V_m - V_{ref})}{V_{ref}} - \frac{(V_{sr} - V_{sref})}{V_{sref}} \tag{7}$$

$$\delta V = \delta V_m - \delta V_s \tag{8}$$

여기서 1kHz를 기준으로 δV_m은 교류측정표준으로 읽은 전압의 변화량이며, δV_s는 교류측정표준에서 읽은 측정시스템의 offset 변화량 값이다. 1kHz 기준으로 감쇠기의 전압 변화량의 합성표준불확도(combined standard uncertainty) $u_c(\delta V)$는 측정표준불확도(measurement standard uncertainty) $u_c(\delta V_m)$ 및 측정시스템의 표준불확도(standard uncertainty) $u_c(\delta V_s)$로 나타내면 다음과 같다.

$$u_c(\delta V) = \sqrt{u^2(\delta V_m) + u^2(\delta V_s)} \tag{9}$$

교류측정표준에서 읽은 감쇠기의 전압 변화량 δV_m에 대한 평균값과 표준불확도는 n번의 반복 측정으로

얻은 데이터를 이용하여 평균값을 구하고, 실험 표준편차(experimental standard deviation)를 계산한다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(V_i - \overline{V})^2}{n-1}} \tag{10}$$

여기서 V_i는 교류측정표준에서 읽어온 i번째 값이고, $\overline{V}$는 측정 데이터 n개의 평균값이다. 따라서 감쇠기의 전압 변화량 측정의 A형 불확도 $u_A(\delta V_m)$은 식 (11)과 같이 구할 수 있고, σ는 감쇠기의 전압 변화량의 표준편차, n은 데이터의 수이다.

$$u_A(\delta V_m) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \tag{11}$$

교류측정표준의 분해능에 의한 불확도 $u_B(\delta V_m)$은 디지털 지시 값의 확률분포를 직사각형으로 가정하여 식 (12)와 같이 구한다. 따라서 측정표준불확도 $u_c(\delta V_m)$는 반복 측정에 의한 불확도 $u_A(\delta V_m)$과 분해능 한계에 의한 불확도 $u_B(\delta V_m)$을 RSS(root-sum-of-square)하여 식 (13)을 통해 얻어진다.

$$u_B(\delta V_m) = \frac{resolution}{2\sqrt{3}} \tag{12}$$

$$u_c(\delta V_m) = \sqrt{u_A^2(\delta V_m) + u_B^2(\delta V_m)} \tag{13}$$

측정시스템의 offset δV_s는 감쇠기 입력 전압의 offset δV_{vref}와 교류측정표준의 offset δV_{sm}으로 식 (14)와 같이 나타낼 수 있으며, δV_{vref}는 Nano Voltmeter를 사용하여 10nV까지 일치 시켜 입력 전압을 공급함에 따라 δV_{sm}의 최소분해능이 1㎶인 것에 비해 매우 적은 값으로 δV_s에 미치는 영향은 없는 것으로 가정한다. 따라서 δV_s의 표준불확도 $u_c(\delta V_s)$는 δV_{vref}의 표준불확도를 제외하고 식 (15)와 같이 표현할 수 있다.

$$\delta V_s = -\delta V_{vref} + \delta V_{sm} \tag{14}$$

$$u_c(\delta V_s) = \sqrt{u_A^2(\delta V_{sm}) + u_B^2(\delta V_{sm})} \tag{15}$$

δV_s의 offset과 표준불확도를 추정하기 위해 그림 1에서 감쇠기를 제외하고 측정시스템을 구성한다. 교류측정표준을 사용하여 3회 반복 측정을 수행하고, 측정 평균값과 $u_A(\delta V_{sm})$, $u_B(\delta V_{sm})$을 동일한 방법으로 추정한다. 측정표준불확도 $u_c(\delta V_m)$과 측정시스템의 표준불확도 $u_c(\delta V_s)$의 합성표준불확도 $u_c(\delta V)$는 식 (9)를 사용하여 구해진다. 측정결과의 확률분포가 정규분포 또는 유효자유도(effective degree of freedom)가 10보다 큰 경우에 약 95% 신뢰수준 CL (confidence level)에서 포함인자(coverage factor) k=2를 적용하고, 유효자유도가 10보다 작으면 t-분포의 k를 구해 $u_c(\delta V)$에 곱하여 확장불확도(expanded uncertainty)를 구한다. 그러므로 확장불확도 U는 다음과 같다.

$$U = u_c(\delta V) \times k \tag{16}$$

Ⅳ. 실험 및 결과 분석

실험을 위하여 10dB 감쇠기의 1MHz에서 평탄도 특성에 대한 불확도 총괄표(uncertainty budget)의 작성 예를 표 1에 나타내었다. 측정값은 1kHz를 기준으로 -30 ㎶/V의 편차를 가지며, 합성표준불확도의 확률분포는 t-분포이므로 신뢰수준 약 95%에서 ±45㎶/V로 추정하였다. 불확도 분석결과로 지시값의 변화량이 가장 큰 불확도 요인으로 작용하였으며, 10Hz부터 50MHz까지 식 (7) ~ (16)을 사용하여 나머지 주파수의 평탄도 특성에 대한 불확도를 분석하였다. 분석한 결과는 표 2와 같으며, 10MHz부터 불확도가 증가하는 경향을 나타내고 있다.

Table. 1 Uncertainty budget(example 10dB, 1MHz)

Quantity (X_i)	Estimate x_i [μV/V]	$u(x_i)$	Probability Distribution	Standard Uncertainty [μV/V]	Sensitivity Coefficient C_i	Uncertainty Contribution $\lvert C_i \rvert\, u(x_i)$	degree of freedom
δV_m	-235	$u(\delta V_m)$	t	5.0	1	5.0	4.5
		$u_A(\delta V_m)$	t	4.1	1	4.1	2
		$u_B(\delta V_m)$	Rectangular	2.9	1	2.9	∞
δV_s	-205	$u(\delta V_s)$	t	12.6	-1	12.6	2.2
		$u_A(\delta V_s)$	t	12.2	-1	12.2	2
		$u_B(\delta V_s)$	Rectangular	2.9	-1	2.9	∞
δV_{avg}	-30	-	t	13.5	-	-	2.95
U				13.5 × 3.31 = 45 μV/V(CL ≒ 95%, k=3.31)			

Table. 2 Flatness characteristics of attenuator(10dB)

Freq.	10Hz	10kHz	1MHz	10MHz	30MHz	50MHz
δV [μV/V]	-35	5	-30	-260	-510	-578
$U_{95\%}$ [μV/V]	139	73	45	83	219	304

교류측정표준의 10Hz에서 50MHz까지 광대역 입력 단자의 평탄도 교정의 적용 가능성을 판단하기 위해 그림 2와 같은 측정시스템을 사용하여 실험을 수행하였다. 10dB와 20dB 감쇠기는 주파수 변화에 따른 입력 임피던스 변화가 작은 것으로 선택하였다.

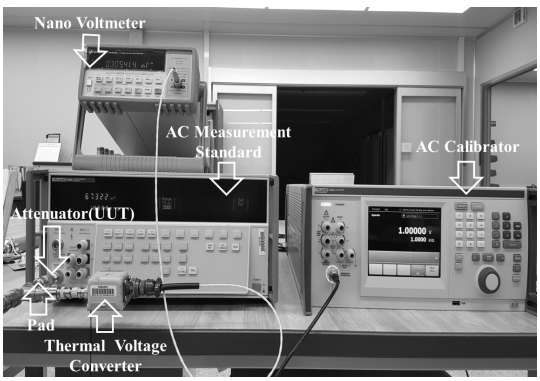

Fig. 2 Perform experiments for flatness characteristic analysis of attenuators

10dB와 20dB 감쇠기의 평탄도 특성은 그림 3과 같으며, 주파수별 평탄도의 측정값에 불확도를 바(bar)로 함께 나타내었다. 100Hz부터 1MHz까지 평탄도는 약 100μV/V 이내로 전압 변화량은 작으며, 1MHz이상부터 주파수의 증가에 따라 평탄도와 불확도가 같이 커지는 추세를 보여주고 있다. DC와 가장 근접한 10Hz에서 불확도가 139μV/V로 나타났으며, 이의 주요인은 TVC의 저주파수 특성에 따른 것이다[12].

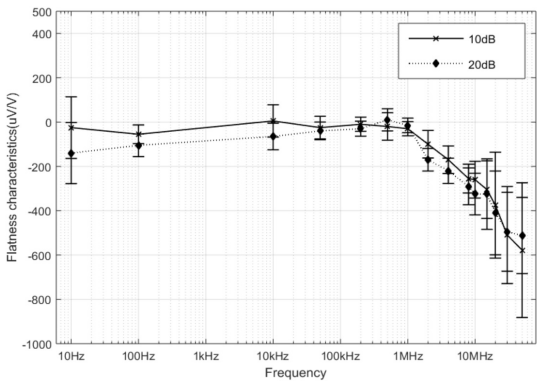

Fig. 3 Flatness characteristics of attenuators(10dB, 20dB)

교류측정표준의 10Hz에서 50MHz 주파수 대역에서 2.2mV와 22mV의 저전압 평탄도 특성분석을 위해 사용되는 감쇠기의 최소 요구 제원(minimum required spec.)과 제안한 감쇠기 평탄도 특성분석 기법으로 측정한 불확도 결과는 그림 4와 같다. 100Hz부터 50MHz까지 불확도는 최소 71μV/V에서 최대 866μV/V로 기존 회로망 측정방법의 2.31mV/V보다 약 37%의 불확도가 감소한 것을 확인하였으며, 최소 요구 제원을 만족하는

것으로 나타났다. 단, 2.2mV(70dB)의 10Hz에서 29㎶/V가 초과됨에 따라 TVC의 10Hz~1kHz 차이에 대한 보정 또는 측정회수의 증가를 고려할 필요가 있다.

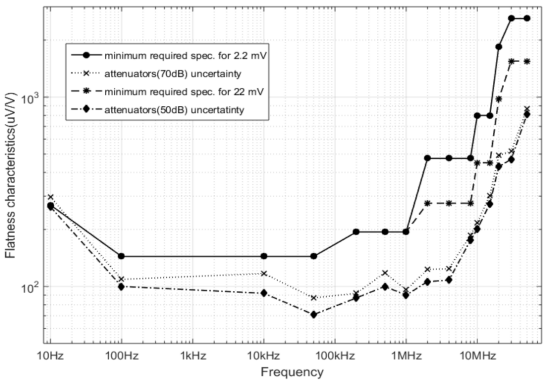

Fig. 4 Uncertainty for flatness characteristics of attenuators (70㏈, 50㏈) and minimum required specification for flatness calibration of AC Measurement Standard(2.2㎷, 22㎷)

Ⅴ. 결 론

열전압변환기와 교류측정표준을 사용하여 10Hz에서 50MHz 대역에서 감쇠기의 평탄도 특성을 분석하는 기법을 제안하였다. 감쇠기 입력단자에 동일한 전압을 공급하기 위해 TVC를 사용하여 신호원의 안정도를 향상시켰으며, 측정시스템의 오차를 보정해줌으로써 측정값의 신뢰도를 개선하였다. 제안한 기법을 적용하여 10dB에서 70dB까지 감쇠기의 특성분석 결과는 최대 866㎶/V까지 불확도 추정이 가능하며, 이는 회로망 측정방법을 사용한 2.31㎷/V보다 37%의 불확도가 감소되었다. 개선된 감쇠기의 평탄도 특성은 교류측정표준의 저전압 평탄도 교정에 적용할 수 있으며, TVC의 저주파수 특성에 따라 10Hz에서 보다 안정적인 측정을 위해 앞으로 추가적인 연구의 진행이 필요한 것으로 판단된다.

REFERENCES

[1] G. junwel, T. Zhiguo, H. Biao, and Z. Hui, “Research summarizes in traceability methods of low voltage ac-dc transfer standard,” in *Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, pp. 903-906, 2015

[2] N. M. Oldham and R. M. Henderson, “Low-voltage standards in the dc to 1MHz frequency range,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 40, pp. 368-372, April 1991.

[3] U. H. Park and G. C. Ahn, “A π-type variable attenuator and low phase shift,” *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 13, no. 10, pp. 2066-2070, Oct. 2009.

[4] H. Fujiki and Y. Amagai, “Low-voltage ac-dc transfer standards at NMIJ,” in *Proceedings of the Precision Electromagnetic Measurements*, Ottawa, pp. 1-2, July 2016.

[5] Fluke Corporation, *5790B Service Manual*, 2016

[6] I. Budovsky, “A micropotentiometer-based system for low-voltage calibration of alternating voltage measurement standard,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 46, no. 2, pp. 356-360, April 1997.

[7] N. Faulkner, “A new method for the calibration of the mV ranges of an AC Measurement Standard,” in *Proceedings of the NCSL International Workshop & Symposium*, Utah, pp. 1-16, 2004.

[8] P. C. A. Roberts and M. V. Ashcroft, “Achieving and improving level and attenuation uncertainties calibration,” in *Proceedings of the NCSL International Workshop & Symposium*, pp. 1-12, 2011.

[9] Technical Manual, *Air Force Metrology and Calibration Program*, US AFMC, 2017.

[10] Technical Manual, *Evaluation of Measurement of Uncertainty in Calibration*, EA-4/02, European Co-operation for Accreditation, 2013

[11] S. Joe, “Impact of VSWR on uncertainty analysis of harmonics for a scope calibrator instrument,” in *proceedings of the NCSL Workshop & Symposium*, pp. 663-670, 2002.

[12] Y. Amagai, M. Maruyama, and H. Fujiki, “Low-frequency characterization in thermal converters using AC-programmable Josephson Voltage Standard System,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 40, pp. 1621-1626, June 2013.

차윤배(Yun-Bae Cha)

2017 부경대학교 무기체계공학과 석사
2017~현재 부경대학교 무기체계공학과 박사과정
2014~2017 공군 군수사령부 제1표준측정시험소 품질책임자
2018~현재 공군 군수사령부 제85정밀표준정비창 창정비기술개발담당
※관심분야 : 전기측정, 정밀측정, 항공기 수명관리

김부일(Boo-il Kim)

1985 경북대학교 전자공학과 공학석사
2001 경북대학교 전자공학과 공학박사
1985~2013 국방과학연구소 수석연구원
2013~현재 부경대학교 전기전자소프트웨어공학과 부교수
※ 관심분야 : 능동소나, 합성개구면소나, 수중음향대응, 정밀측정