

기준음원의 교정 절차 개발 및 불확도 평가 사례

Development of the calibration procedure of the reference sound source and case study on the uncertainty evaluation

서재갑,¹ 조완호^{1†}

(Jae-Gap Suh¹ and Wan-Ho Cho^{1†})

¹한국표준과학연구원 물리측정본부 음향진동초음파측정그룹
(Received March 25, 2024; accepted May 7, 2024)

초 록: 기준음원은 음향파워 측정에 활용되는 중요한 기준기로, 국제 표준으로 그 사양이 규정되어 있으며, 측정 표준 분야에서 주요 교정 품목으로 분류되고 있다. 이러한 기준음원은 공급 전압에 의하여 그 출력이 영향을 받기 때문에 각국에서 자체적으로 교정 서비스 체계를 확보할 필요가 있다. 본 연구에서는 잔향실 조건에서 기준음원을 교정하는 절차를 수립하고 불확도를 평가하였다. 교정 절차는 기본적으로 음향파워의 정밀급 측정과정을 적용할 수 있으며, 여기서는 ISO 3741의 잔향실을 활용한 측정 방법을 검토하였다. 이를 위한 측정 시스템을 구성하고 실제 2종의 기준음원에 대하여 측정을 수행하고 측정 불확도를 산출하였다. 측정 예를 통하여 잔향실 내 음압 분포의 불균일성과 체적 측정 불확도가 전체 불확도에 기여가 큰 것을 확인하였다. 추가적으로 입력 전압에 대한 영향을 실험적으로 검토하여 음향 파워 측정에서 반영할 수 있는 불확도 기여량을 검토하였다.

핵심용어: 기준음원, 음향파워, 교정, 불확도 평가

ABSTRACT: A Reference Sound Source (RSS) is an important standard device employed in measuring sound power. The specifications of RSS is specified in international standards, and it is classified as a major calibration item in the field of acoustic metrology. Since the output power of RSS is affected by the supply voltage, each country needs to secure its own calibration service system. In this study, a procedure for calibrating a RSS is established based on the reverberant room conditions and uncertainty evaluation is conducted. Basically, the calibration procedure can apply a precision measurement process of acoustic power, and here, the measurement method using the reverberation chamber of ISO 3741 is applied. For this purpose, a measurement system is constructed, measurements are conducted with two types of RSS, and measurement uncertainty is evaluated. Through measurement examples, it is confirmed that the non-uniformity of the sound pressure distribution in the reverberation room and the volume measurement uncertainty contributed significantly to the overall uncertainty. Additionally, the influence of input voltage is experimentally examined to examine the uncertainty contribution that can be reflected in acoustic power measurements.

Keywords: Reference sound source, Sound power, Calibration, Uncertainty evaluation

PACS numbers: 43.20.Ye, 43.58.Vb

I. 서 론

기준음원(Reference Sound Source, RSS)은 비교법에 의한 음향파워 측정에 사용되는 기준기로, 그 기본

적인 요구 사양은 ISO 6926에 규정되어 있다.^[1] 기준음원은 국제 도량형국(Bureau International des Poids et Mesures, BIPM), 음향진동초음파 자문위원회(Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration,

†Corresponding author: Wan-Ho Cho (chowanho@kriss.re.kr)

Korea Research Institute of Standards and Science, 267 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Republic of Korea

(Tel: 82-42-868-5872)



Copyright©2024 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

CCAUV)에서 제시하고 있는 교정 서비스 대상 품목에 포함되어 있다. 그렇지만 기준음원에 대해서는 비공식적인 국제 비교가 진행된 사례가 있을 뿐,^[2] 공식적으로 BIPM에 등재된 국제비교가 진행된 사례나, 공식적인 측정 능력(Capability of Measurement and Calibration, CMC)를 선언한 사례도 부재한 상황이다.

ISO 6926에서는 기준음원의 동작 구조를 명시적으로 규정하고 있지는 않으나, 일반적인 형태로 전기 음향 또는 공력 음원을 제시하고 있으며, 실제 제품은 공력 음원을 사용하는 것이 널리 보급되어 있다. 이러한 기준음원의 출력음압을 결정하는 요소로는 기본적인 설계외에도 음향학적인 환경 요인이나 공급 전원 특성들이 영향을 주게 된다. 특히 전원 특성의 경우 국가마다 다른 규격을 사용하고 있기 때문에, 기준음원에 대한 교정 체계는 각국에서 자체적으로 확보할 필요가 있다.

본 연구에서는 기준음원을 교정하기 위한 절차를 제시하고 이에 대한 검토를 수행한다. 또한 구성된 절차에 대한 불확도 평가를 수행하여, 최종적으로 음향 파워 측정에 미치는 영향에 대하여 검토하였다. 기준음의 교정과정은 기본적으로 기준음원에서 출력되는 음향파위를 측정하는 과정이다. 이를 위해서는 정밀급 음향 파워 측정법을 이용하며, 무향실,^[3] 반무향실,^[3] 잔향실^[4]을 이용하는 방법이 모두 적용이 가능하다. 본 연구에서는 ISO 3741에 규정된 잔향실에서의 직접법^[3]을 적용하였다.

II. 교정시스템 구성을 위한 준비사항

교정을 진행하기 위한 준비사항은 측정 조건 및 환경에 관한 부분과 시스템 구성에 관한 부분으로 구분 할 수 있다. 측정 조건에 관련 부분은 잔향실의 요구사항 확인, 환경 조건(기상조건)의 확인이 있으며, 시스템 구성과 관련된 내용은 대상 음원(Device Under Test, DUT)의 동작 조건과 음원 및 마이크로폰 위치 결정이 있다.

측정에 사용되는 잔향실은 ISO 3741에 규정된 요구조건을 만족하여야 한다. 공간의 체적은 측정 하한 주파수 100 Hz를 만족하기 위해서는 200 m³ 이상이 되어야 하며, 최소 6개 지점에서 측정된 음압 분포

의 표준편차가 ISO 3741에 규정된 허용치(0.5 dB ~ 1.5 dB 이하) 이내가 되어야 한다.

권장되는 환경(기상) 조건은 측정에 사용되는 교정 장비에 대한 일반적인 환경 조건을 고려하여 설정되며, 특별한 경우가 아니라면 온도는 (23.0±3.0) °C, 대기압은 (101.325±3.0) kPa, 상대습도는 (50±20) % 범위에서 측정을 수행한다.

추가적으로 측정 공간이 결정되면 잔향 시간 측정을 수행한다. 측정방법은 ISO 3382-1^[5] 또는 ISO 354^[6]의 방법을 따르며, 최소 3개의 음원 위치 및 6개의 측정 위치에서 잔향 시간을 측정한다. 한 측정 위치에서는 최소 5회 반복 측정하고 그 평균을 취한다.

음원의 위치는 잔향실 벽면에 대해 가장 가까운 벽면으로부터 1.5 m 떨어진 바닥 위에 설치한다. 적어도 서로 2 m 이상 떨어진 4개의 위치를 선정한다.

측정 위치의 선정은 크게 2가지 방법을 이용할 수 있다. 첫 번째는 ISO 3741에 규정된 조건을 만족하는 6개의 지점에서 측정점을 선정하는 것으로, 마이크로폰과 기준 음원 간의 거리가 최소 아래의 식보다 먼 점을 선정한다.

$$d_{\min} = D_1 \sqrt{\frac{V}{T_{60}}} \tag{1}$$

이 때, V 는 잔향실의 체적, T_{60} 은 잔향시간이다. D_1 의 권장치는 0.16이며, 최소 0.08이 되도록 한다. 선정된 모든 측정점은 벽면으로부터 1.0 m 이상 떨어져 있어야 하며, 측정점간의 거리는 관심 주파수 대역의 하한주파수의 반파장보다 멀어야 한다. 6개 측정점의 결과에 대한 표준편차는 각 대역에서 1.5 dB 이하가 되어야 하며, 이를 만족하지 못할 경우에는 측정점을 늘려 1.5 dB 이하가 되도록 한다.

이산된 고정 위치 측정방법이외에도 연속 이동하는 이송장치를 이용하여 측정할 수 있다. 이 때 이동 경로상의 모든 지점에서 d_{\min} 을 만족하여야 하며, 이동하는 모든 지점은 잔향실 표면에서 1.0 m 이상 떨어져 있어야 한다. 또한 확산판을 추가적으로 활용하는 경우에는 0.5 m 이상 거리가 유지되어야 한다. 이동하는 경로는 직선, 원호 또는 원으로 구성될 것으로 경로의 길이는 관심주파수 하한의 파장의 3배

이상이거나 10.3 m 이상이 되도록 하며, 경로가 구성하는 평면은 모든 잔향실 면과 10도 이내의 경사를 가져서는 안된다.

측정 전에 DUT에 대하여 제조사의 설명서에 따른 음원의 동작 방법을 숙지하여야한다. 기계 또는 전기 구동에 의한 음원의 주요 특성(전압, 주파수, 기계 구동의 경우 회전수)을 기록하고 실험실 전원특성(전압, 주파수)를 기록한다.

III. 교정 및 불확도 산출예

측정 예제로 Fig. 1과 같이 기준음원에 대한 교정 시스템을 구성하고 측정을 수행하였다. 앞장에서 기술한바와 같이 잔향실 조건에 DUT 및 마이크로폰 회전 이송 시스템(B&K Type 3923)을 설치하고, 1/3옥타브 밴드 대역 출력 음압레벨을 측정하였다. 마이크로폰의 회전반경은 1.7m, 바닥면에서 15도 경사로 설치하였으며, 32 s간 1회전 하도록 하여 평균하였다. 그 외 음원과의 최소 거리는 2 m, 벽면으로 부터의 거리는 1.5 m 이상이 되도록 설치하였다. 대상은 B&K Type 2850 및 Norsonic Nor278의 두 개 모델을 선정하였다.

기준 기상 조건에서 각각의 1/3 옥타브대역 음향 파워 레벨은 ISO 3741의 9절의 직접법에 의해 다음과 같이 계산된다.^[3]

$$L_W = \overline{L_{p(S_T)}} + 10 \log_{10} \frac{A}{1 \text{ m}^2} + 4.34 \frac{A}{S} + 10 \log_{10} \left(1 + \frac{cS}{8Vf} \right) + C_1 + C_2 - 6, \text{ dB.} \quad (2)$$



Fig. 1. (Color available online) Example of the measurement setup for calibrating the reference sound source.

$\overline{L_{p(S_T)}}$: 시험 대상 작동시 1/3 옥타브대역 시간평균 음압레벨의 평균, dB

A : 실험실의 등가 흡음면적(m^2),

$$A = \frac{55.26}{c} \left(\frac{V}{T_{60}} \right)$$

S : 잔향실의 총 표면적(m^2)

c : 측정시 기온 θ °C일 때의 음속,

$$c = 20.05 \sqrt{273 + \theta} \text{ (m/s)}$$

f : 측정대역의 중심주파수(Hz)

$$C_1 = -10 \log_{10} \frac{p_s}{p_{s,0}} + 5 \log_{10} \left(\frac{273.15 + \theta}{314} \right), \text{ dB}$$

$$C_2 = -10 \log_{10} \frac{p_s}{p_{s,0}} + 15 \log_{10} \left(\frac{273.15 + \theta}{296} \right), \text{ dB}$$

p_s : 측정시 대기압(kPa)

$p_{s,0}$: 기준 대기압, 101.325 kPa

이 때, C_1 은 음압레벨과 음향파워 레벨의 기준값을 계산하는 데에 사용하는 서로 다른 기준 값을 고려하기 위한 기준량 보정으로, 측정시 기상 조건하에 서공기의 특성 임피던스의 함수이다. C_2 는 측정 조건에서 기준 기상 조건으로 변환하기 위한 음향 방사 임피던스 보정이다.

일반적인 음향 파워 측정에서는 배경 잡음에 대한 보정을 수행하나, RSS의 경우 기본적으로 높은 음압을 갖기 때문에 ISO 3741의 절대 기준 이하^[3]를 만족하거나 신호대 잡음비가 40 dB 이상인 잔향실 조건에서는 무시할 수 있다.

음향 파워는 100 Hz~10,000 Hz 범위에서 1/3 옥타브 밴드 대역 스펙트럼 및 전 대역 음향 파워 레벨을 기록한다. 전 대역 음향 파워 레벨의 경우 주파수가 중합수 적용 여부도 함께 보고한다. 추가적으로 측정시의 환경 조건 및 인가전압 정보도 기록하여야 한다.

음향 파워에 대한 불확도는 ISO3741:2010 Annex G의 지침을 따라 추정할 수 있다.^[3] 주요 변수들에 의한 음향 파워의 합성표준불확도는 아래식과 같이 구해지며,^[7] 각 인자에 대한 감도계수는 Table 1과 같이 계산된다.^[3]

$$u_c^2(L_W) = \sum c_i^2 u^2(x_i) = c_{\delta_{method}}^2 u^2(\delta_{method}) + c_{L_p}^2 u^2(\overline{L_{p(S_T)}}) + c_{V/S}^2 u^2(V/S) + c_{V}^2 u^2(V) + c_{T_{60}}^2 u^2(T_{60}). \quad (3)$$

Table 1. Sensitivity coefficient for the model of calibrating the reference sound source.^[3]

Quantity	Sensitivity coefficient
Measurement method (δ_{method})	1
Repeatability ($\overline{L'_{p(ST)}}$)	1
Ratio of volume and surface area (V/S)	$\frac{240}{T_{60}c} \frac{4.3c}{(V/S)(8fV/S+c)}$
Volume (V)	$4.3/V$
Reverberation time (T_{60})	$-\frac{4.3}{T_{60}} - \frac{240V}{T_{60}^2Sc}$
Measured SPL (L_{mea})	1

측정 방법(δ_{method})에 의한 불확도는 모델링의 불완전성 등의 방법이 갖는 불확도 성분을 의미하며, ISO 3741에 제시된 경험치는 100 Hz 이상에서 0.3 dB이다.

반복성($\overline{L'_{p(ST)}}$)은 음압레벨의 측정 과정에서 서로 다른 측정점 및 음원 위치에서의 표준편차로부터 도출할 수 있다.

$$u(\overline{L'_{p(ST)}}) = \frac{1}{\sqrt{N_M N_S}} \times \sqrt{\sum_{j=1}^{N_S} \sum_{i=1}^{N_M} \frac{\{L'_{p(ST),i,j} - L'_{p(ST),mean}\}^2}{N_M N_S - 1}} \quad (4)$$

이 때, N_S 및 N_M 은 각각 음원 및 마이크로폰의 측정 회수를 의미한다.

잔향실 체적(V) 및 잔향실 체적 대 표면적 비(V/S)의 경우, 사용된 부정형 잔향실에서 측정된 체적은 292.6 m³, 면적은 269.2 m²이다. 대형 부정형 방에 대하여 정확한 불확도를 산출하는 것이 용이하지 않으므로 약 5% 수준의 불확도를 가정한다.^[8]

잔향시간(T_{60})의 측정 불확도는 ISO 354에 다음과 같이 제시되어 있다.^[6]

$$u(T_{60}) = \sqrt{\frac{2.42 T_{60}}{f} + \frac{s_T^2}{N_T}} \quad (5)$$

이 때, s_T 는 측정된 잔향시간의 표준 편차이며, N_T 는 잔향시간의 측정 회수이다. 실제 측정된 잔향시간 및 확장 불확도($k=2$)는 Fig. 2와 같다.

음압 레벨의 측정 불확도는 전압 측정 불확도와

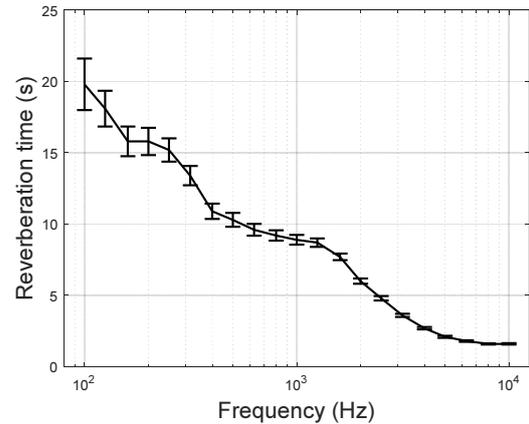


Fig. 2. Measured reverberation time and its expanded uncertainty ($k = 2$).

마이크로폰 감도 불확도의 합성 불확도로 다음과 같이 구해진다.

$$u(L_{mea}) = \sqrt{u^2(E_{mea}) + u^2(M) + u^2(M_{env})} \quad (6)$$

이 때, $u(E_{mea})$ 는 전압 측정에 대한 불확도, $u(M)$ 는 마이크로폰의 감도 교정 불확도, $u(M_{env})$ 는 환경 영향에 의한 감도 불확도를 의미한다.

전압 레벨 측정에 대한 불확도는 측정값의 표준편차와 장치의 전압 측정 불확도를 합성하여 구한다. 표준 절차에 의하여^[9] 자체적으로 교정한 0.1 kHz ~ 10 kHz 범위에서의 측정 장비(B&K Type 3160) 전압 측정 불확도는 0.05 dB 이하이다. 한국표준과학연구원서 CMC로 선언한 비교법에 의한 마이크로폰 감도 측정의 확장 불확도는 100 Hz ~ 10 kHz 범위에서 0.07 dB 이하(신뢰의 수준 약 95%, $k=2$)이다.^[10] 그러므로 이 성분에 대한 표준불확도는 0.035 dB이다.

마이크로폰의 감도 교정 결과는 기준 환경 조건에 대하여 주어지기 때문에, 실제 환경 조건에 따라서 달라지게 된다. 작업용 표준 마이크로폰의 감도 변화에 대한 허용값은 IEC 61094-4에 규정되어 있다.^[11] 이에, II장에서 제시한 환경 조건 내에서 이루어진 측정에 대하여 불확도 기여량은 아래와 같이 주어진다.

$$u(M_{mic,T}) = \frac{3K}{\sqrt{3}} \cdot \frac{0.03 \text{ dB/K}}{\sqrt{3}} = 0.03 \text{ dB}, \quad (7a)$$

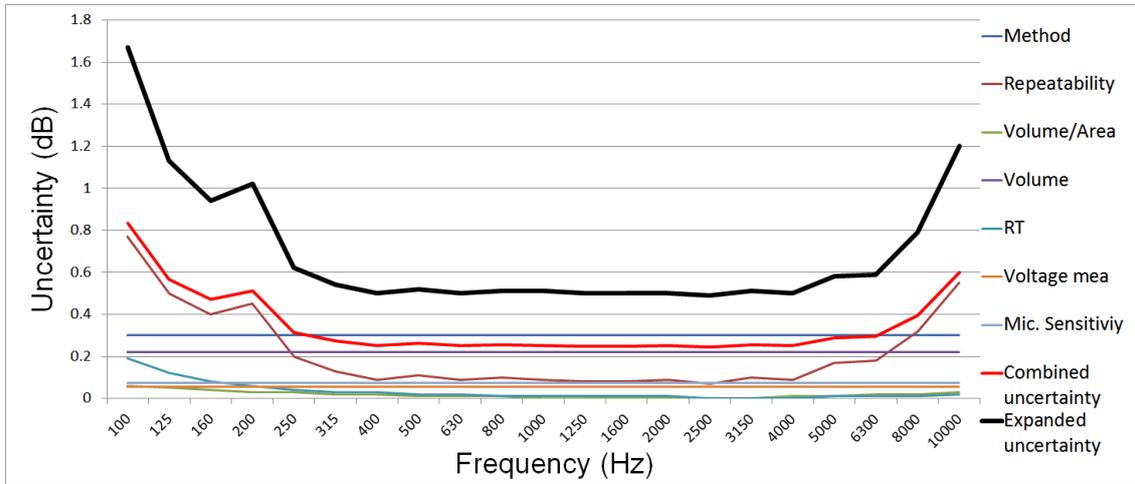


Fig. 3. (Color available online) Example of the uncertainty budget of reference sound source calibration.

$$u(M_{mic,P}) = \frac{3 \text{ kPa}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{0.03 \text{ dB/kPa}}{\sqrt{3}} = 0.03 \text{ dB}, \quad (7b)$$

$$u(M_{mic,H}) = \frac{20 \%}{\sqrt{3}} \cdot \frac{0.001 \text{ dB/\%}}{\sqrt{3}} = 0.007 \text{ dB}, \quad (7c)$$

$$u(M_{env}) = \sqrt{0.03^2 + 0.03^2 + 0.007^2} = 0.043 \text{ dB}. \quad (7d)$$

상기 과정을 통하여 추정된 음향 파워에 대한 합성표준불확도는 주파수 별로 Fig. 3과 같이 도출되며, 확장 불확도는 아래의 식으로 구해진다.

$$U = k u_c. \quad (8)$$

이 때, 최소 반복 측정 회수(24회)를 고려할 때, 유효 자유도는 10이상이 되기 때문에, 신뢰의 수준 약 95%에서 확장불확도는 포함 인자(k)를 2로 한다.

추정된 불확도에서 보면, 250 Hz 이하의 저주파수 대역에서 가장 큰 영향을 미치는 불확도 요인은 측정의 반복도이며, 이는 잔향실 내 음장의 균일도에 영향을 받는 것으로 볼 수 있다. 이외에는 전반적으로 측정 방법과 체적의 영향이 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

B&K Type 2850의 경우 사용 전원의 제한이 없기 때문에 직접 공급되는 220 V 전원을 이용하였으며, Norsonic Nor278은 슬라이더스 변압기를 사용하여, 110 V 전원을 공급하였다. Fig. 4에 기준음원에 대한 교정 결과를 도시하였으며, 두 DUT 모두 ISO 6926의

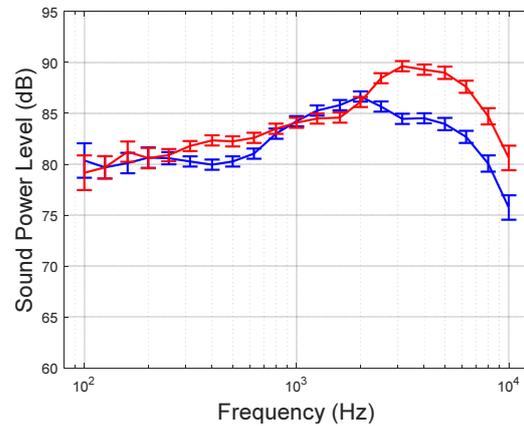


Fig. 4. (Color available online) Measured sound power level of reference sound source: (red) Norsonic Nor278, (blue) B&K Type 2850.

스펙트럼 요구사항인 12 dB 범위 이내에 분포하는 것을 확인 할 수 있다.

추가적으로 공급 전압의 영향을 파악하기 위하여, Norsonic Nor278에 대하여 105 V, 110 V, 120 V의 세 가지 입력 전압에 대하여 측정을 수행한 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 전반적으로 유사한 경향을 보여주고 있는 것을 알 수 있으며, 110 V 기준으로 한 차이는 Fig. 6과 같으며, 전체 파워 레벨의 차이는 Table 2와 같다.

교정 단계에서는 입력 전원을 제어하여 기준에 맞추는 것이 가능하지만, 실제 사용 조건에서는 이러한 조정이 어려운 경우가 존재할 수 있다. 이 경우 음향 파워의 측정 불확도에 반영하는 것이 현실적이라고 할 수 있다.

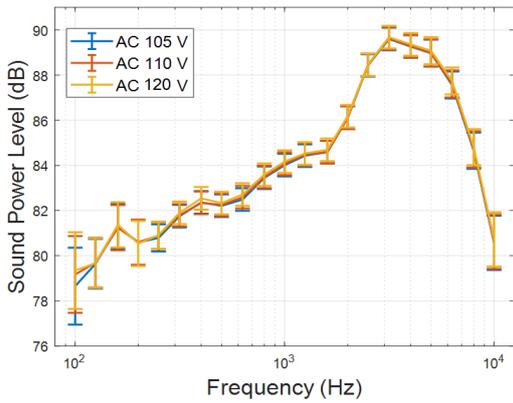


Fig. 5. (Color available online) Measured sound power level of reference sound source (Norsonic Nor278) according to the supplied AC power.

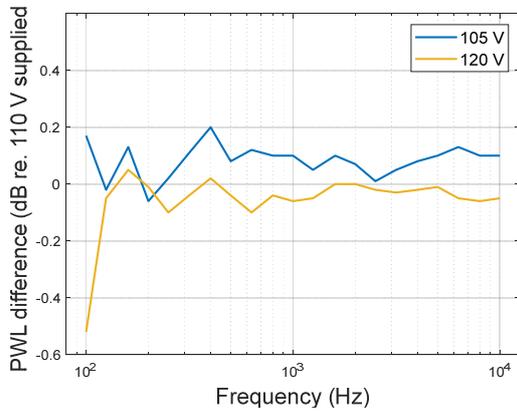


Fig. 6. (Color available online) Difference of the sound power level of reference sound source (Norsonic Nor278) according to the supplied AC power.

Table 2. Overall difference of the sound power level according to the supplied AC power.

Supplied voltage	105 V	110 V	120 V
A-weighted PWL	98.39 dB	98.42 dB	98.51 dB

실제 전원의 변동폭이 10 V 이내라고 가정할 때, 이는 직사각형 분포로 볼 수 있으므로, Fig. 6의 결과로부터 100 Hz에서는 $0.6 \text{ dB} / \sqrt{3} = 0.35 \text{ dB}$, 그 이외 주파수에서는 약 $0.2 \text{ dB} / \sqrt{3} = 0.12 \text{ dB}$ 수준으로 추정할 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 기준음원에 대한 교정 절차를 구성하고 이에 대한 불확도 평가를 수행하였다. 교정 절차

차는 기본적으로 음향 파워의 정밀급 측정과정을 적용할 수 있으며, 여기서는 ISO 3741의 잔향실을 활용한 측정 방법을 검토하였다. 이를 위한 측정 시스템을 구성하고 실제 2종의 기준음원에 대하여 측정을 수행하고 측정 불확도를 산출하였다. 측정 예를 통하여 잔향실 내 음압 분포의 불균일성과 체적 측정 불확도가 전체 불확도에 기여가 큰 것을 확인하였다. 추가적으로 입력 전압에 대한 영향을 실험적으로 검토하여 음향 파워 측정에서 반영할 수 있는 불확도 기여량을 검토하였다.

감사의 글

본 논문은 한국표준과학연구원 물리 측정표준기술 고도화(KRISS-2024-GP2023-0002) 및 한국산업기술기획평가원 시장선도를 위한 한국주도형 K-Sensor 기술개발 사업(RS-2002-00154837) 재원으로 지원을 받아 수행된 연구임.

References

1. ISO 6926:2016, *Acoustics - Requirements for the Performance and Calibration of Reference Sound Sources used for the Determination of Sound Power Levels*, 2016.
2. M. Vorländer M., and G. Raabe, "Calibration of reference sound sources," *Acustica*, **81**, 247-263 (1995).
3. ISO 3741:2010, *Acoustics - Determination of Sound Power Levels and Sound Energy Levels of Noise Sources using Sound Pressure - Precision Methods for Reverberation Test Rooms*, 2010.
4. ISO 3745:2012, *Acoustics - Determination of Sound Power Levels and Sound Energy Levels of Noise Sources using Sound Pressure - Precision Methods for Anechoic Rooms and Hemi-anechoic Rooms*, 2012.
5. ISO 3382-1:2009, *Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces*, 2009.
6. ISO 354:2003, *Acoustics - Measurement of Sound Absorption in a Reverberation Room*, 2003.
7. ISO/IEC ISO/IEC Guide 98-3:2008, GUM: 1995, *Uncertainty of Measurement - Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, 2008.
8. J.-G. Suh and S.-J. Suh, "Calculation and uncertainty estimation of the volume of reverberation chamber

- with indeterminate form” (in Korean), *J. Acoust. Soc. Kr.* **26**, 375-380 (2007).
9. KASTO 19-40419-138, *Standard Calibration Procedure of Digital Multimeter*, 2019.
 10. BIPM, KCDB, <https://www.bipm.org/kcdb/cmc/advanced-search?area=1> (Last viewed May 04 2024).
 11. IEC 61094-4:1995, *Measurement Microphones - Part 4: Specifications for Working Standard Microphones*, 1995.

저자 약력

▶ 서재갑 (Jae-Gap Suh)



1991년 3월 : 국립한밭대학교 전자공학과 (공학사)
 1997년 6월 : 국립한밭대학교 전자공학과 (공학석사)
 2000년 5월 : 기술사(소음진동)
 2018년 3월 : Tohoku University(공학박사)
 1998년 3월 ~ 현재 : 한국표준과학연구원 책임기술원

▶ 조완호 (Wan-Ho Cho)



2002년 2월 : KAIST 기계공학과(공학사)
 2004년 2월 : KAIST 기계공학과(공학석사)
 2008년 2월 : KAIST 기계공학과(공학박사)
 2008년 9월 ~ 2010년 2월 : KAIST 기계기술연구소 박사후연구원
 2010년 4월 ~ 2012년 2월 : Chuo University, Japan, 임기제조교
 2012년 3월 ~ 현재 : 한국표준과학연구원 책임연구원