

# 가역방법에 의한 표준 마이크로폰 음압교정의 불확도

## Uncertainties in Pressure Calibration of Laboratory Standard Microphones by Reciprocity Technique

서 상 준\*, 권 휴 상\*, 이 용 봉\*, 서 재 갑\*  
(Sang-Joon Suh\*, Hyu-Sang Kwon\*, Yong-Bong Lee\*, Jae-Gap Suh\*)

\* 한국표준과학연구원 물리표준부 음향진동그룹  
(접수일자: 2004년 1월 5일; 채택일자: 2004년 2월 6일)

교정 및/또는 시험기관은 국제상호인증협정 (Global Mutual Recognition Arrangement)에 따라 ISO 17025[1]의 경영요건 및 기술요건의 제반 조건 또는 이와 동등한 조건을 충족시켜야 한다. ISO 17025의 기술요건을 기술한 제 5장, 제 5.10.4 절은 교정성적서 (Calibration Certificate)에 대한 요구사항을 제시하고 있는데, 이들 중 하나가 측정 불확도 (Uncertainty of Measurement)를 교정성적서에 명시하여야 하는 것이다. 본 논문에서는 표준 마이크로폰의 가역교정에 따른 제반 불확도 요인을 측정 또는 계산하여 표준 마이크로폰의 교정에 대한 측정 불확도를 계산하였다. 중간 주파수 영역에서 1인치 및 1/2 인치 마이크로폰의 경우 확장불확도는 0.03 dB였으며 20 Hz에서는 각각 0.10 dB과 0.11 dB, 고주파에서는 각각 0.07 dB와 0.08 dB까지 증가한다.

**핵심용어:** 표준 마이크로폰, 가역교정, 음압감도레벨, 상호인증협정, 확장불확도

**투고분야:** 전기음향 분야 (3.1)

According to the Mutual Recognition Arrangement (MRA), the calibration and/or test laboratories should satisfy the management and technical requirements ISO 17025 or equivalent. Chapter 5, Section 5.10.4 of the technical requirement of ISO 17025 suggests the required informations for calibration certificates, one of them is to state the uncertainty of measurement. The uncertainties of measurement in reciprocity calibration of standard laboratory microphone were calculated. The expanded uncertainties for 1 and 1/2 inch microphones were 0.03 dB in the middle frequency range and they increased up to 0.10 dB and 0.11 dB at 20 Hz, 0.07 dB and 0.08 dB at high frequency, respectively.

**Keywords:** Standard microphone, Reciprocity calibration, Pressure sensitivity level, Mutual recognition arrangement (MRA), Expanded uncertainty

**ASK subject classification:** Electro-acoustics (3.1)

### 1. 서론

국제무역기구 (WTO; World Trade Organization)의 무역기술장벽 (TBT; Technical Barrier of Trade)에 대한 협정이 체결됨에 따라 국가측정표준의 확립과 운용에서 과거의 국내 중심에서 탈피하여 국제 일치성과 신뢰성을 제고할 것을 요구하고 있으며 상호인증협정 (MRA; Mutual Recognition Arrangement)이 필수적인 과제로 대두되고 있다.

이에 따라 각종 측정기기의 교정 또는 시험기관은 ISO

17025[1]의 경영요건 및 기술요건의 제반 조건 또는 이와 동등한 조건을 충족시켜야 한다. ISO 17025의 기술요건을 기술한 제 5장, 제 5.10.4절은 교정성적서 (Calibration Certificate)에 대한 요구사항을 제시하고 있는데, 이들 중 하나가 측정 불확도 (Uncertainty of Measurement)를 교정성적서에 명시하여야 하는 것이다.

측정 불확도란 측정결과에 관련하여, 측정량을 합리적인 추정한 값의 분산상태를 나타내는 파라미터로서 표준편차 (또는 그의 배수), 또는 명시된 신뢰구간의 반 너비 등이 될 수 있다. 측정 불확도는 일반적으로 여러 성분으로 구성되어 있으며, 크게 두 분류로 나눌 수 있다. 한 부류는 여러번 측정된 결과의 통계적인 분포로부터 값이 결정되는 것으로 실험 표준편차로 나타낼 수 있고, 다

책임저자: 서상준 (sjs@kriss.re.kr)  
305-340 대전시 유성구 도룡동 1번지  
한국표준과학연구원 물리표준부 음향진동그룹  
(전화: 042-868-5300; 팩스: 042-868-5643)

른 부류는 마찬가지로 표준편차로 나타낼 수 있지만, 경험이나 다른 정보에 근거하여 가정한 확률분포로부터 그 값이 결정되는 것이다. 측정과 관련된 불확도의 표현 지침은 ISO 지침서[2]에 잘 기술되어 있다.

교정과 관련된 측정 불확도의 크기는 교정 결과 못지 않게 국가표준기관의 교정 능력을 대변해주는 중요한 요소이다.

본 논문에서는 표준 마이크로폰의 가역교정에 따른 제반 불확도 요인을 측정 또는 계산하여 표준 마이크로폰의 교정에 대한 측정 불확도를 계산하였다. 계산된 측정 불확도는 음향 교정분야의 선도기관이라고 할 수 있는 덴마크의 음향분야 국가표준기관인 DPLA (Danish Primary Laboratory of Acoustics) 및 영국의 국가표준기관인 NPL (National Physical Laboratory)이 제시한 불확도와 근사한 값을 갖는 것으로 나타났다.

## II. 표준 마이크로폰의 가역교정

표준 마이크로폰은 크기에 따라 두 가지로 나뉘어 진다. 그 중 하나는 1 인치 음압형 표준 마이크로폰 (LS1P; Laboratory Standard 1" Pressure Microphone)이며 다른 하나는 1/2인치 음압형 표준 마이크로폰 (LS2P; Laboratory Standard 1/2" Pressure Microphone)이다[3]. 표준 마이크로폰의 음압감도를 결정하는 방법은 IEC 61094-2[4]에 기술되어 있으며 이에 따른 가역교정 시스템은 그림

1에서 보는 것과 같다. 가역교정 시스템은 발신용 마이크로폰에 신호를 가해주기 위한 정현파 신호 발생장치 (B&K 1051)와 전기 신호의 잡음을 제거하기 위한 대역통과 필터 (B&K 1617), 수신용 마이크로폰 출력단자의 전압 측정을 위한 전압계 (Wavetek 1281) 및 각종 제어 기능과 삽입전압기법 (insert voltage technique)에 의한 개방회로전압 (open circuit voltage)을 측정하기 위한 가역교정장치 (B&K 5998)로 구성되어 있다.

마이크로폰의 음압감도 절대교정은 세 개의 마이크로폰을 결합기를 이용하여 쌍으로 결합한 후, 하나는 발신기로, 다른 하나는 수신기로 이용하여 각 마이크로폰의 입력 전류와 출력 전압을 측정한다. 입력 전류는 발신용 마이크로폰 전치증폭기에 내장된 직렬 전기용량 양단의 전압차를 측정하여 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$i_i = U_i \cdot j \cdot \omega \cdot C \tag{1}$$

여기서  $i_i$  : 발신용 마이크로폰에 가해지는 전류,

$U_i$  : 직렬 전기용량 양단의 전압차,

$j = \sqrt{-1}$

$\omega$  : 각주파수,

$C$  : 전기용량값이다.

세 쌍에 대해 각각 측정된 입력 전압과 출력 전압의 비와 사용한 결합기의 체적을 이용하여 다음 식과 같이 음압감도레벨을 계산한다[5].

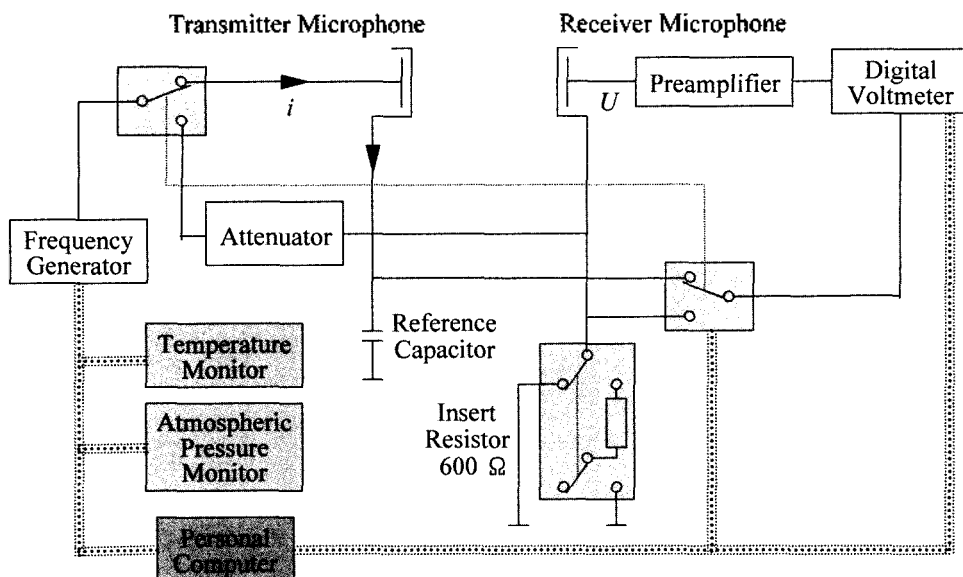


그림 1. 마이크로폰 교정 시스템 구성도  
Fig. 1. Block diagram of microphone calibration system.

$$20 \log |M_{p,i}| = 10 \log \frac{1}{C} + 10 \log \frac{R_{ij} \cdot R_{jk}}{R_{jk}} + 10 \log \frac{V_{ij} \cdot V_{jk}}{V_{jk}}$$

$$= 10 \log \frac{P_{s,ij}}{P_{s,ij} \cdot P_{s,ik}} + 10 \log \frac{x_{jk}}{x_{ij} \cdot x_{jk}} + 10 \log \frac{\Delta_{ij} \cdot \Delta_{jk}}{\Delta_{jk}} \quad (2)$$

- 여기서  $M_{p,i}$  : 마이크로폰  $i$ 의 음압감도,  
 $R_{ij} = U_j / U_i$  : 마이크로폰  $j$ 의 개방회로전압  $U_j$   
 와 마이크로폰  $i$ 에 가해지는 전압  
 $U_i$ 의 비,  
 $V_{ij}$  : 마이크로폰  $i$ 와  $j$  및 결합기로 이루어진 체적,  
 $P_{s,ij}$  : 마이크로폰  $i$ 와  $j$ 의 가역교정 시 대기압,  
 $x_{ij}$  : 마이크로폰  $i$ 와  $j$ 의 가역교정 시 결합기 내  
 부 기체의 비열비,  
 $\Delta_{ij}$  : 마이크로폰  $i$ 와  $j$ 의 가역교정 시 열전달 및

파동운동[6] 보정량이다.

### III. 불확도 요인

표준 마이크로폰의 음압감도에 영향을 미치는 인자는 사용된 계측기, 측정 및 환경요인에 의한 불확도 등이 있다. 이 외에도 마이크로폰의 물리적 변수, 사용된 결합기의 치수 등도 측정 불확도에 많은 영향을 미친다. 표 1은 IEC 61094-2 (Unpublished first draft for a new clause 7 of IEC 61094-2)에 주어진 각종 불확도 요인을 정리한 것이다.

표 1에 주어진 요인 외에도 몇 가지가 더 있으나 사용하는 교정 시스템 및 방법에 따라 선택적으로 적용되므로

표 1. 불확도 요인  
 Table 1. Uncertainty components.

측정량	요약 설명
<b>Electrical Transfer Impedance</b>	
Series Impedance	마이크로폰 전치 증폭기에 내장된 Series Capacitance의 불확도
Voltage Ratio	전압비 측정 불확도
Cross-talk	Cross-talk의 영향
Inherent Noise	고유 잡음 영향
Distortion	외곡에 의한 영향
Frequency	주파수 측정 불확도
Receiver Ground Shield	수신측 접지 차폐의 영향
Transmitter Ground Shield	발신측 접지 차폐의 영향
<b>Acoustic Transfer Impedance</b>	
<b>Coupler Properties</b>	
Coupler Length	결합기 길이의 불확도
Coupler Diameter	결합기 직경의 불확도
Coupler Volume	결합기 체적의 불확도
Coupler Surface Area	결합기 표면적의 불확도
Static Pressure	대기압 측정 불확도
Temperature	온도 측정 불확도
Relative Humidity	상대습도 측정 불확도
<b>Microphone Parameters</b>	
Front Cavity Depth	마이크로폰 전면공동 깊이 불확도
Front Cavity Volume	마이크로폰 전면 체적 불확도
Equivalent Volume	등기체적 불확도
Resonance Frequency	마이크로폰 공진주파수의 불확도
Loss Factor	마이크로폰 진동막의 손실계수 불확도
Polarization Voltage	분극전압 측정 불확도
<b>Processing of Results</b>	
Rounding Error	반올림에 따른 불확도
Repeatability of Measurements	반복성에 따른 불확도
Static Pressure Corrections	대기압 보정에 따른 불확도
Temperature Corrections	온도 보정에 따른 불확도

여기에서는 한국표준과학연구원이 보유하고 있는 가역 교정 시스템에 적용되는 인자들만 수록하였다.

### IV. 요인별 불확도 계산

#### 4.1. 직렬 전기용량 (Series Capacitance)

발신용 마이크로폰에 가해지는 전류는 발신용 마이크로폰과 직렬로 연결된 교정된 전기용량 (capacitance)의 양단 간 전압을 측정하여 결정한다. 따라서 전기용량의 정확한 교정이 필수적이다. 직렬 전기용량은 Auto LRC Meter (Electro Scientific Industries, Inc., Model 2160)로 측정하였다. 각 주파수별로 4회 측정된 결과 측정값의 편차는 없었다. 측정한 전압으로부터 전류를 계산할 때 전기용량은 일반적으로 4,760 nF의 공칭값을 사용한다.

제조사 매뉴얼에 주어진 측정 정밀도를 고려한 전기용량 및 음압감도의 불확도는 표 2와 같다. 여기서 음압감도의 불확도는 전기용량의 불확도를 식 (2)에 대입하여 구한 것이다.

#### 4.2. 전압 비 (Voltage Ratio)

전압측정에 사용된 전압계는 Wavetek (Model 1281)이다. 이 장비의 매뉴얼에 주어진 10 V 측정 범위에서 1년간의 정밀도와 교정성적서에 주어진 불확도를 감안한 전체 불확도는 표 3과 같다.

가역교정에서는 4번의 전압측정이 이루어진다. 또한 음압감도는 세 전압 비의 제곱근으로 주어지기 때문에 전압 비의 불확도는 전압 측정의 전체 불확도에  $\sqrt{4} \cdot \sqrt{3}/2$ 를 곱해주어야 한다. 따라서 전압 비의 불확도는 표 4와 같이 주어진다.

표 2. 전기용량의 불확도  
Table 2. Uncertainties of capacitor.

f (Hz)	C (nF)	Measurement Accuracy (nF) <sup>(1)</sup>	Sensitivity Uncertainty (dB)
20	4.7609	0.0105	0.0096
31.5	4.7609	0.0102	0.0093
63	4.7609	0.0099	0.0090
125	4.7609	0.0097	0.0089
250	4.7609	0.0049	0.0044
500	4.7599	0.0029	0.0026
1000	4.7599	0.0019	0.0017
2000	4.7599	0.0029	0.0026
4000	4.7599	0.0048	0.0044
8000	4.7609	0.0048	0.0044
10000	4.7609	0.0048	0.0044
12500	4.7609	0.0048	0.0087
16000	4.7609	0.0048	0.0087
20000	4.7609	0.0048	0.0087

(1) Capacitance measurement accuracy (from manual) Reading x accuracy(%) + [0.01 pF/f (kHz) + 0.01 pF].

표 3. 전압계의 불확도  
Table 3. Uncertainties of voltmeter.

Frequency Range (Hz)	ppm read	ppm range	Sum (ppm read + ppm range) (ppm)	Calibration Uncertainty <sup>(1)</sup> (ppm)	Total Uncertainty <sup>(2)</sup> (ppm)
10 ~ 40	120	20	140	75	158.82
40 ~ 100	100	20	120	75	141.51
100 ~ 2k	100	10	110	75	133.14
2k ~ 10k	100	20	120	75	141.51
10k ~ 30k	300	40	340	75	348.17

(1) From Calibration Certificate (worst case)

(2) Total Uncertainty = [Sum (ppm)<sup>2</sup> + Calibration Uncertainty<sup>2</sup>]<sup>1/2</sup>

표 4. 전압 비 측정 불확도

Table 4. Uncertainties in voltage ratio measurement.

Frequency Range (Hz)	Uncertainty in Voltage Ratio (ppm)	Uncertainty <sup>(1)</sup> (dB)
10~40	275.08	0.0024
40~100	245.10	0.0021
100~2k	230.61	0.0020
2k~10k	245.10	0.0021
10k~30k	603.05	0.0052

(1) dB = 20log[1 + Uncertainty in Voltage Ratio/1,000,000]

4.3. 누화 (Cross-talk)

누화는 수신용 마이크로폰 대신 마이크로폰과 동일한 전기용량으로 대체시킨 후, 마이크로폰의 출력과 전기용량의 출력 차이로부터 구한다.

4.4. 고유 잡음 (Inherent Noise)

고유 잡음은 발신용 마이크로폰에 전기적인 신호를 가하지 않았을 때, 수신용 마이크로폰에 나타나는 잡음이다.

4.5. 왜곡 (Distortion)

왜곡은 각 주파수마다 고조파 왜곡을 측정하여 결정한다.

4.6. 주파수 (Frequency)

마이크로폰 교정에 사용된 신호발생기의 주파수를 측정하여 불확도를 결정한다.

4.7. 접지 차폐 (Ground Shield)

제조사 (B&K)에서 제시한 불확도 값을 사용하였다.

4.8. 결합기 길이와 직경 (Coupler Length and Diameter)

결합기 길이와 직경의 불확도는 본 연구원에서 발급한 교정성적서에서 제시한 값을 이용하였으며 그 값은 표 5와 같다.

이들 불확도로부터 감도의 불확도는 식 (2)를 이용하여 계산한다.

4.9. 결합기 체적과 표면적 (Coupler Volume and Surface Area)

결합기의 체적  $V_{coup}$ 과 표면적  $S_{coup}$ 은 각각 다음 식과 같이 계산된다.

$$V_{coup} = \frac{\pi}{4} \cdot d_{coup}^2 \cdot l_{coup}, \quad S_{coup} = \frac{\pi}{2} \cdot d_{coup}^2 + \pi d_{coup} \cdot l_{coup} \quad (3)$$

여기서  $d_{coup}$ 은 결합기의 직경,  $l_{coup}$ 은 결합기의 길이이다.

이들의 불확도는 불확도 전파 법칙[2,7]에 따라 각각 다음 식으로 계산하며 그 결과는 표 6과 같다.

$$u(V_{coup}) = \left[ \left( \frac{\pi}{2} \cdot d_{coup} \cdot l_{coup} \right)^2 \cdot u^2(d_{coup}) + \left( \frac{\pi}{4} \cdot d_{coup}^2 \right)^2 \cdot u^2(l_{coup}) \right]^{1/2} \quad (4)$$

표 5. 결합기 길이와 직경의 불확도

Table 5. Uncertainties of coupler length and diameter.

Coupler	LS1P		LS2P	
	5 cc	3 cc	0.7 cc	0.4 cc
Length (m)	15.005x10 <sup>-3</sup>	7.497x10 <sup>-3</sup>	9.396x10 <sup>-3</sup>	4.700x10 <sup>-3</sup>
Uncertainty (m)	0.001x10 <sup>-3</sup>	0.001x10 <sup>-3</sup>	0.001x10 <sup>-3</sup>	0.001x10 <sup>-3</sup>
Diameter (m)	18.607x10 <sup>-3</sup>	18.606x10 <sup>-3</sup>	9.313x10 <sup>-3</sup>	9.306x10 <sup>-3</sup>
Uncertainty (m)	0.0015x10 <sup>-3</sup>	0.0015x10 <sup>-3</sup>	0.0015x10 <sup>-3</sup>	0.0015x10 <sup>-3</sup>

표 6. 결합기 체적과 표면적의 불확도

Table 6. Uncertainties of coupler volume and surface area.

Coupler	LS1P		LS2P	
	5 cc	3 cc	0.7 cc	0.4 cc
Volume (m <sup>3</sup> )	4.080x10 <sup>-6</sup>	2.038x10 <sup>-6</sup>	0.640x10 <sup>-6</sup>	0.320x10 <sup>-6</sup>
Uncertainty (m <sup>3</sup> )	0.712x10 <sup>-9</sup>	0.427x10 <sup>-9</sup>	0.217x10 <sup>-9</sup>	0.123x10 <sup>-9</sup>
Surface Area (m <sup>2</sup> )	1.421x10 <sup>-3</sup>	0.982x10 <sup>-3</sup>	0.411x10 <sup>-3</sup>	0.273x10 <sup>-3</sup>
Uncertainty (m <sup>2</sup> )	0.169x10 <sup>-6</sup>	0.136x10 <sup>-6</sup>	0.093x10 <sup>-6</sup>	0.072x10 <sup>-6</sup>

$$u(S_{coup}) = \left[ \left( \pi(d_{coup} + l_{coup}) \right)^2 \cdot u^2(d_{coup}) + \left( \pi d_{coup} \right)^2 \cdot u^2(l_{coup}) \right]^{1/2} \quad (5)$$

여기서  $u(l_{coup})$ 은 결합기 길이의 불확도,  $u(d_{coup})$ 는 직경의 불확도이다.

마찬가지로 이들 불확도로부터 감도의 불확도는 식 (2)를 이용하여 계산한다.

#### 4.10. 대기압, 온도, 상대습도 (Static Pressure, Temperature, Relative Humidity)

음향전달 임피던스는 결합기 내의 기체 특성을 기술하는 물리량에 의존한다. 기체의 특성을 결정하는 물리량 중의 대표적인 것이 환경조건, 즉 대기압과 온도 및 상대

습도이다. 따라서 마이크로폰 교정 시, 이들 환경조건을 정밀하게 측정하여야 하며, 측정 불확도 역시 감도의 불확도에 영향을 미치게 된다. 표 7~9는 각각 대기압, 온도 및 상대습도 측정의 불확도를 보여준다.

각 환경인자들의 불확도로부터 감도의 불확도는 식 (2)를 이용하여 계산한다.

#### 4.11. 전면공동 깊이와 체적 (Front Cavity Depth and Volume)

표준 마이크로폰은 진동막 전면에 공동을 가지고 있다. 식 (2)에서 체적  $V_v$ 는 두 마이크로폰의 전면공동 체적을 포함하며 결합기의 길이에서도 두 마이크로폰의 전면공동 깊이를 포함한다.

표 7. 대기압 측정 불확도

Table 7. Uncertainty of static pressure measurement.

	Uncertainty	Remarks
Calibration of Barometer	0.0034	Certificate
Drift and Stability of Barometer	0.0066	Manual
Rounding of Barometer Reading	0.0003	
Variation of Static Pressure During Calibration <sup>(1)</sup>	0.0115	
Total Uncertainty	0.0137	

(1) Drift of ambient pressure during one series of reciprocity measurement: Maximum allowed drift is  $\pm 0.02$  kPa. Therefore, 0.02 kPa is considered as the maximum deviation (box distribution).

표 8. 온도 측정 불확도

Table 8. Uncertainty of temperature measurement.

Temperature (Unit: K)	Uncertainty	Remarks
Calibration of Thermometer	0.0500	Certificate
Rounding of Thermometer Reading	0.0289	
Variation of Temperature During Calibration <sup>(1)</sup>	0.1155	
Deviation between Measured Microphone Temperature and Gas Temperature <sup>(2)</sup>	0.1155	B&K
Total Uncertainty	0.1733	

(1) Drift of temperature during one series of reciprocity measurement: Maximum allowed drift is  $\pm 0.2$  K. Therefore, 0.2 K is considered as the maximum deviation (box distribution).

(2) The temperature applied for the calculation is the average of the temperatures measured on the two microphones. This may deviate from the gas temperature. The temperature uncertainty is set to 0.2 K (box distribution).

표 9. 상대습도 측정 불확도

Table 9. Uncertainty of relative humidity measurement.

Relative Humidity (Unit: %RH)	Uncertainty	Remarks
Calibration of Hygrometer	1.000	Certificate
Rounding of Hygrometer Reading	0.289	
Variation of Relative Humidity During Calibration <sup>(1)</sup>	1.155	
Principle of Determination of Relative Humidity of Enclosed Gas <sup>(2)</sup>	1.155	B&K
Total Uncertainty	1.937	

(1) Drift of relative humidity during one series of reciprocity measurement: Maximum allowed drift is  $\pm 2$  %RH. Therefore, 2%RH is considered as the maximum deviation (box distribution).

(2) The principle applied for the determination of the relative humidity of the enclosed gas might be wrong by 2%RH (maximum).

마이크로폰의 전면공동 길이는 광학 현미경을 이용하여 비접촉식으로 측정한다. 전면공동의 길이를 결정하기 위하여 네 지점에서 길이를 측정하여 평균값을 취한다.

전면공동의 체적을 계산하기 위해서는 전면공동의 직경을 알아야 하는데, 실제로 직경을 측정하는 것은 쉽지 않다. 따라서 제조사에서 주어진 전면공동 체적 계산 공식을 이용하였다[5].

측정된 전면공동 길이의 평균값과 체적 및 이들의 불확도는 표 10에 주어졌다.

감도의 불확도는 역시 식 (2)를 이용하여 계산한다.

**4.12. 등가체적, 공진주파수, 손실률 (Equivalent Volume, Resonance Frequency, Loss Factor)**

유한한 임피던스를 갖는 진동막의 컴플라이언스는 저주파 영역에서 마이크로폰의 등가체적으로 실수부 (real part)로 주어진다. 마이크로폰의 등가체적을 측정하는 방법에는 여러 가지가 있으나 여기에서는 크기가 다른 결합기를 이용하여 측정한 데이터를 fitting하는 방법을 사용하였다. 이 경우 결정되는 체적은 등가체적과 전면공동 체적을 합한 값이다. 측정된 마이크로폰의 등가체

적과 불확도는 표 11과 같다.

등가체적의 불확도를 이용하여 감도의 불확도는 식 (2)를 이용하여 계산한다.

한편 마이크로폰 진동막의 공진주파수와 손실률을 측정하는 것은 매우 어렵다. 따라서 대부분의 가역교정에서는 제조사가 제시한 공칭값을 사용한다. 제조사가 제시한 마이크로폰 진동막의 공진주파수와 손실률 및 각각의 불확도는 표 12와 같다.

역시 이들 불확도로부터 감도의 불확도는 식 (2)를 이용하여 계산한다.

**4.13. 분극전압 (Polarizing Voltage)**

분극전압은 마이크로폰의 감도에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 분극전압을 일정하게 유지해야 하는 것은 물론, 정확한 값을 알아야 한다. 분극전압의 불확도 계산은 표 13에 주어져 있다.

분극전압에 따른 마이크로폰 감도의 변화량은 7 dB/100 V이다[8]. 따라서 분극전압 불확도에 의한 감도의 불확도는 다음과 같이 주어진다.

$$7 \text{ dB}/100 \text{ V} \times 0.0064 \text{ V} \approx 0.0005 \text{ dB} \quad (6)$$

표 10. 마이크로폰 전면공동의 길이와 체적의 불확도  
Table 10. Uncertainties of microphone front cavity length and volume.

	LS1P	LS2P
Front Cavity Length (m)	$1.953 \times 10^{-3}$	$0.505 \times 10^{-3}$
Uncertainty (m)	$0.0025 \times 10^{-3}$	$0.0023 \times 10^{-3}$
Front Cavity Volume (m <sup>3</sup> )	$535.90 \times 10^{-3}$	$35.00 \times 10^{-3}$
Uncertainty (m <sup>3</sup> )	$0.686 \times 10^{-9}$	$0.159 \times 10^{-9}$

표 11. 마이크로폰 등가체적의 불확도  
Table 11. Uncertainties of microphone equivalent volume.

	LS1P	LS2P
Equivalent Volume (m <sup>3</sup> )	$132.02 \times 10^{-9}$	$9.28 \times 10^{-9}$
Uncertainty of Measurement (m <sup>3</sup> )	$0.690 \times 10^{-9}$	$0.075 \times 10^{-9}$
Uncertainty of Front Cavity Volume (m <sup>3</sup> )	$0.686 \times 10^{-9}$	$0.159 \times 10^{-9}$
Uncertainty of Coupler Volume (m <sup>3</sup> )	$0.427 \times 10^{-9}$	$0.123 \times 10^{-9}$
Total Uncertainty (m <sup>3</sup> )	$1.062 \times 10^{-9}$	$0.215 \times 10^{-9}$

표 12. 마이크로폰 진동막의 공진주파수와 손실률의 불확도  
Table 12. Uncertainties of resonance frequency and loss factor of diaphragm.

		LS1P	LS2P
Resonance Frequency (Hz)	Nominal Value	8200	22000
	Uncertainty	510	1220
Loss Factor	Nominal Value	1.05	1.05
	Uncertainty	0.08	0.09

표 13. 분극전압의 불확도

Table 13. Uncertainty of polarizing voltage.

Polarizing Voltage (Unit: V)	Uncertainty	Remarks
Calibration of Voltmeter	0.0020	Certificate
Rounding of Voltmeter Reading	0.0003	
Drift and Stability of Voltmeter <sup>(1)</sup>	0.0059	Manual
Variation of Polarizing Voltage During Calibration <sup>(2)</sup>	0.0012	
Total Uncertainty	0.0064	

(1) Drift and stability: 10.2 ppm/year (max.) x 1000 V = 10.2 mV (box distribution).

(2) Drift of polarizing voltage during one series of reciprocity measurement: Maximum drift is ±0.002 V. Therefore, 0.002 V is considered as the maximum deviation (box distribution).

표 14. 기준환경 조건

Table 14. Reference environmental conditions.

Environment	Reference Value
Static Pressure	101.325 kPa
Temperature	23.0°C
Relative Humidity	50 %RH

#### 4.14. 반올림 오차 (Rounding Error)

표준 마이크로폰의 음압감도는 소수점 아래 셋째 자리에서 반올림한다. 따라서 반올림에 따른 오차는 다음과 같이 계산된다.

$$0.005 \text{ dB} / \sqrt{3} = 0.0029 \text{ dB} \quad (7)$$

#### 4.15. 측정 반복성 (Repeatability of Measurements)

측정 반복성은 5회 또는 그 이상의 측정을 통해 얻은 결과로부터 각 주파수별로 표준편차를 구해 불확도를 계산한다.

#### 4.16. 대기압과 온도 보정 (Static Pressure and Temperature Corrections)

표준 마이크로폰 음압감도의 최종 결과는 기준환경 조건에서의 값으로 주어져야 한다. 마이크로폰 교정의 기준환경 조건은 표 14와 같다[4].

따라서 측정된 마이크로폰의 음압감도를 측정 당시의 환경 조건으로부터 기준환경에서의 값으로 환산해야 한다. 이에 따른 보정량은 여러 문헌에 제시되어 있다[9~11]. 한국표준과학연구원 음향진동 그룹에서는 참고문헌 [10]의 기준을 채택하고 있다.

표준 마이크로폰 음압감도를 기준환경으로 변환할 때에도 불확도가 발생된다. 불확도 계산에 필요한 기본적인 변수는 제조사의 값을 사용하였으며 그 결과는 표 15와 같다.

표 15. 기준환경 조건 적용에 따른 불확도

Table 15. Uncertainties in sensitivity corrections for reference environment conditions.

f (Hz)	불확도 (dB)			
	LS1P		LS2P	
	대기압 보정	온도 보정	대기압 보정	온도 보정
20	0.0032	0.0011	0.0011	0.0009
31.5	0.0032	0.0011	0.0011	0.0009
63	0.0032	0.0011	0.0011	0.0008
125	0.0032	0.0010	0.0011	0.0008
250	0.0032	0.0010	0.0011	0.0008
500	0.0032	0.0011	0.0012	0.0008
1000	0.0031	0.0014	0.0012	0.0009
2000	0.0027	0.0020	0.0011	0.0012
4000	0.0015	0.0051	0.0009	0.0021
8000	0.0020	0.0093	0.0006	0.0051
10000	0.0141	0.0023	0.0020	0.0083
12500	-	-	0.0032	0.0123
16000	-	-	0.0004	0.0143
20000	-	-	0.0107	0.0143

#### 4.17 누설현상 (Leakage)

가역교정에 의한 표준 마이크로폰의 음압감도 교정에 관한 이론은 잘 정립이 되어 있다. 따라서 기본적인 방법에서 크게 벗어나지 않는 한 약간의 변화를 주고 교정하였을 때 동일한 마이크로폰에 대한 음압감도는 일정하게 결정되어야 한다. 그 한 예로 두 마이크로폰을 음향적으로 결합하는 결합기의 길이를 약간 변화시켰을 때에도 두 결과는 동일하게 나타나야 한다.

실제로 표준 마이크로폰의 가역교정에서는 길이가 서로 다른 두 결합기 (9.4 mm, 4.7 mm for LS2P)를 이용하여 교정한 음압감도의 평균을 제시한다. 만약 부정확한 마이크로폰의 변수를 이용하였을 경우, 고주파 영역에서 두 값에 상당한 차이를 보인다. 마이크로폰의 변수 (공진 주파수, 감쇠계수, 등가체적 등)를 정확하게 측정하는 것



은 쉽지 않다. 따라서 대략적인 변수값을 대입하여 교정한 후, 고주파 영역에서 두 결과가 서로 다르면 입력시킨 마이크로폰 변수를 약간씩 조정하여 두 결과를 서로 일치 시킴으로써 정확한 마이크로폰의 변수를 결정하기도 한다.

그렇더라도 저주파 영역에서는 많은 차이를 보이는데 이러한 현상은 마이크로폰을 결합기에 결합할 때 발생하는 여러 가지 부주의로 인한 것이다. 이러한 부주의에 의한 결과 중의 하나가 결합기와 마이크로폰의 접촉면에서 발생하는 내부 압력의 누설현상이다. 누설현상은 표 1에 언급되어 있지 않지만 결합기에 관한 불확도의 특성 중 하나로 간주되며 덴마크의 DPLA 등에서도 저주파 영역에서의 주요 불확도 요인으로 고려된다.

일반적으로 마이크로폰 전면 접촉면에는 미세한 요철이 있다. 따라서 아무리 주의를 기울인다고 해도 누설현상은 발생하게 된다. 누설현상은 압력의 시간적 변화가 비교적 느린 저주파 영역으로 갈수록 커진다.

그림 2는 서로 다른 길이를 갖는 두 결합기를 이용하여 마이크로폰 (LS2P)을 교정한 결과 저주파 영역에서의 편차를 보여준다. 이 그림에서 보듯이 20 Hz 대역에서 두 결과의 차이는 약 0.02 dB 이상이 되는 것을 알 수 있다. 이러한 편차가 저주파 영역에서 음압감도 결정의 불확도로 작용한다.

30여 회 측정된 결과로부터 누설현상에 의한 편차의 평균값이 표 16에 주어져 있다.

### V. 확장불확도

이상에서 구한 여러 가지 불확도 성분을 이용하여 다음 식으로부터 측정량 Y에 대한 합성표준불확도 (combined

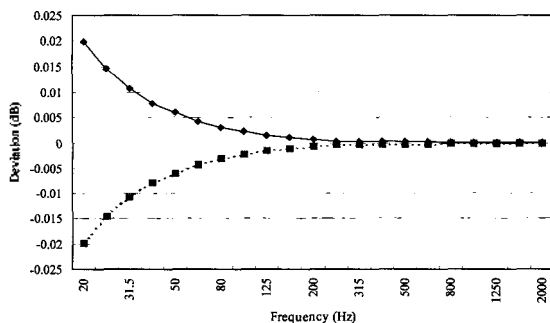


그림 2. 서로 다른 길이를 갖는 두 결합기를 이용하여 교정한 결과의 편차  
Fig. 2. Differences of calibration results using two couplers with different length.

standard uncertainty)  $u_c(y)$ 를 구한다.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u^2(x_i)} \quad (8)$$

여기서  $u(x_i)$ 는 변수  $x_i$ 의 불확도이다.

확장불확도는 측정량의 합리적인 추정값이 이루는 분포의 대부분을 포함할 것으로 기대되는 측정결과 주위의 어떤 구간을 정의하는 양이다. 일반적으로 확장불확도는 합성표준불확도에 포함인자 (coverage factor)  $k$ 를 곱함으로써 주어진다. 포함인자를 구하기 위해서는 합성표준 불확도의 유효자유도를 추정하여야 한다. 유효자유도는 합성표준불확도가 측정량의 표준편차를 얼마나 잘 추정하는가를 나타내는 것으로서 '합성표준불확도의 불확도 척도'라고 할 수 있다.

유효자유도 (effective degrees of freedom)  $\nu_{eff}$ 는 다음의 Welch-Satterthwaite 공식을 이용하여 추정한다.

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{[c_i u(x_i)]^4}{\nu_i}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (9)$$

여기서  $c_i = \partial f / \partial x_i$ 는 감도계수,  $\nu_i$ 는  $u(x_i)$ 의 자유도로써 불확도 평가 방법에 따라 구하는 절차가 다르다[2,7].

표 16. 누설현상에 의한 불확도  
Table 16. Uncertainties due to leakage.

주파수 (Hz)	불확도 (dB)	
	LS1P	LS2P
20	0.0071	0.0236
25	0.0054	0.0163
31.5	0.0040	0.0113
40	0.0030	0.0078
50	0.0023	0.0054
63	0.0017	0.0037
80	0.0013	0.0026
100	0.0010	0.0018
125	0.0007	0.0012
160	0.0006	0.0009
200	0.0004	0.0006
250	0.0003	0.0004
315	0.0002	0.0003
400	0.0002	0.0002
500	0.0001	0.0001
630	0.0001	0.0001
800	0.0001	0.0001
1000	0.0001	0.0000





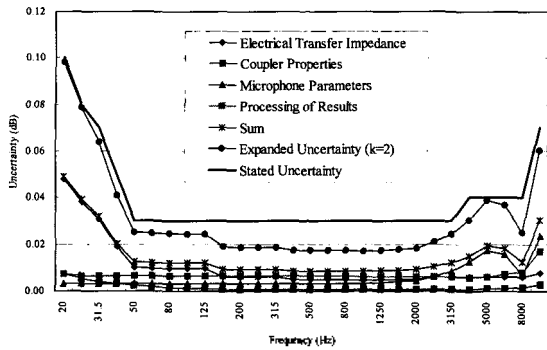


그림 3. 주파수에 따른 불확도 요인별 크기 (LS1P)  
Fig. 3. Frequency dependence of uncertainty components (LS1P).

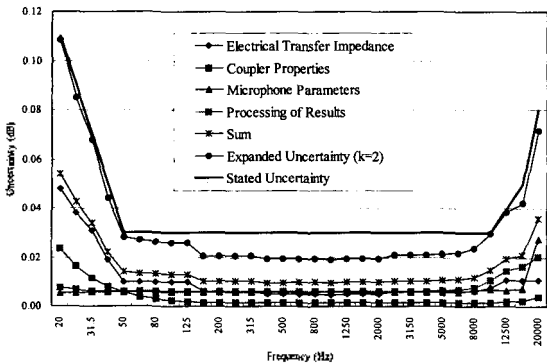


그림 4. 주파수에 따른 불확도 요인별 크기 (LS2P)  
Fig. 4. Frequency dependence of uncertainty components (LS2P).

실제 유효자유도를 구하여 신뢰수준에 따라 포함인자를 결정하는 것이 가장 바람직하다. 그러나 유효자유도가 100 이상인 경우, 95%의 신뢰수준을 갖는 포함인자 값은  $k=1.96$ 이 되어 2에 근사한 값을 갖는다. 요구조건이 이미 설정되어 있거나 문서화되어 있는 경우에는 다른  $k$ 값을 사용하지만, 현재 국제적 실무 관행에 따라 확장불확도를 계산할 때 포함인자  $k$ 의 값으로 2를 채택하므로 여기에서도  $k=2$ 를 적용하여 확장불확도를 계산하였으며 그 결과는 표 17 및 18과 같다. 이들 표에서 선언 불확도 (stated uncertainty)는 각 주파수별로 계산한 확장불확도에서 유효숫자 (소수점 아래 셋째 자리) 아래 자리를 올려주거나 외국의 예와 주파수에 따른 불확도의 경향 등을 판단하여 충분한 여유를 갖도록 최종 결정한 확장불확도로서 교정성적서에 기록되는 값이다.

표 17과 18에는 참고로 영국의 NPL과 덴마크의 DPLA에서 선언하는 마이크로폰 감도교정의 확장불확도가 주어져 있다.

그림 3과 4는 표 17과 18에 주어진 불확도 요인 중 굵은 글자로 표시된 각 그룹별 불확도의 크기를 그림으로

보여준다.

## VI. 결론

ISO 17025의 기술요건 중 하나가 교정성적서 (Calibration Certificate)에 측정 불확도 (Uncertainty of Measurement)를 명시하는 것이다. 교정과 관련된 측정 불확도의 크기는 교정 결과 못지않게 국가표준기관의 교정 능력을 대변해주는 중요한 요소이다.

본 논문에서는 표준 마이크로폰의 가역교정에 따른 제반 불확도 요인을 측정 또는 계산하여 표준 마이크로폰의 교정에 대한 측정 불확도를 계산하였다. 중간 주파수 영역에서 1 인치 마이크로폰의 경우 KRISS (Korea Research Institute of Standards and Science)와 NPL의 확장불확도가 0.03 dB, DPLA가 0.025 dB인 반면, 1/2 인치 마이크로폰의 경우 KRISS, NPL, DPLA가 0.03 dB이었다.

미국의 NIST (National Institute of Standards and Technology), 일본의 NMIJ (National Metrology Institute of Japan), 독일의 PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt), 캐나다의 NRC (National Research Council) 등 많은 선진국의 마이크로폰 감도교정 확장불확도가 0.04 ~ 0.06 dB인 것[12]에 비하면 한국표준과학 연구원의 음향분야 국가표준 수준은 상당히 진보한 수준이다. 이러한 이유 중의 하나는 교정에 사용되는 모든 측정 장비를 연구원 내의 관련 부서의 자원을 받아 최고의 수준으로 교정을 받은 후 사용하기 때문인 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

1. ISO 17025, *General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories*.
2. ISO, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, 1993.
3. IEC 61094-1, *Measurement Microphones - Part 1, Specifications for Laboratory Standard Microphones*, 2001.
4. IEC 61094-2, *Measurement Microphones - Part 2, Primary Method for Pressure Calibration of Laboratory Standard Microphones by the Reciprocity Technique*, 1992.
5. B&K Technical Documents of Reciprocity Calibration System Type 9699.
6. Rasmussen, K., "Radial wave-motion in cylindrical plane-wave couplers," *Acta Acustica*, 1, 145-151, 1993.
7. 측정불확도 표현 지침, 한국표준과학연구원, KRISS-99-070-SP, 1999.

8. Instruction Manual of B&K 4160 and 4180.
9. Rasmussen, K., "The static pressure and temperature coefficients of laboratory standard microphones," *Metrologia*, 36, 265-273, 1999.
10. Rasmussen, K., "The influence of environmental conditions on the pressure sensitivity of measurement microphones," *B&K Technical Review*, (1), 1-13, 2001.
11. Wong, G. S. K. and Wu, L., "Controlled environment for reciprocity calibration of laboratory standard microphones and measurement of sensitivity pressure correction," *Metrologia*, 36, 275-280, 1999.
12. BIPM website (<http://www.bipm.fr>) 중 KCDB (Key Comparison Data Base)의 Appendix C, Calibration and Measurement Capability (CMC) 참조.

---

## 저자 약력

---

● 서 상 준 (Sang-Joon Suh)

한국음향학회지 제22권 제8호 참조

● 권 휴 상 (Hyu-Sang Kwon)



1990년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 (공학사)  
 1992년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)  
 1997년 2월: 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)  
 1997년 3월~1998년 3월: Purdue University (Post-doc)  
 1998년 3월~ 현재: 한국표준과학연구원 선임연구원

● 이 용 봉 (Yong-Bong Lee)

한국음향학회지 제21권 제8호 참조

● 서 재 갑 (Jae-Gap Suh)

한국음향학회지 제22권 제6호 참조