



## 1. 머리말

음향계측에 사용되는 센서, 즉 마이크로폰은 음향신호를 전기적인 신호로 변환시켜 준다. 현재 사용되고 있는 마이크로폰은 콘덴서 마이크로폰, 압전 마이크로폰, 탄소 마이크로폰 등 여러 가지가 있다.

측정의 기준이 되는 표준(측정표준)은 장소나 시간에 구애받지 않고 여러 가지 다른 조건 하에서도 가급적 일정한 특성이나 양을 가져야 한다. 음향분야의 표준은 마이크로폰의 감도를 정확하게 결정하는 방법에 대한 것으로서 일반적으로 가역교정 방법을 사용하며 이는 국제전기기술위원회(IEC)의 규격인 IEC 61094-2에 규정되어 있다.<sup>(1)</sup>

가역교정 방법을 이용하여 감도를 결정하기 위한 대상 마이크로폰이 표준기로 사용되기 위해서는 몇 가지 조건을 충족시켜야 한다.<sup>(2)</sup> 이들 조건 중에는 마이크로폰의 외형적인 치수뿐만 아니라 기본적인 특성들이 포함되어 있으나 표준기로서 갖추어야 할 가장 중요한 것은 무엇보다도 시간에 따른 특성의 안정성이다.

\* E-mail : sjs@kriss.re.kr

가역교정 방법은 많은 시간과 세심한 주의를 요하기 때문에 필요할 때마다 이 방법을 적용하여 감도를 결정하는 것이 용이하지 않다. 따라서 시간적으로 안정되어 있는 표준기를 대상으로 일년에 한번 또는 그 이상 특성을 파악한 후 이를 대상으로 하위 기준기에 대한 교정을 통하여 표준을 보급하게 된다. 이와 같이 표준기가 갖추어야 할 가장 중요한 요소 중의 하나가 시간에 따른 안정성이다.

마이크로폰의 경우, 현재 여러 가지 종류의 마이크로폰이 개발되어 사용되고 있지만 시간적인 안정성 측면에서는 콘덴서 마이크로폰이 가장 우수하기 때문에 오래 전부터 표준 마이크로폰과 정밀 음향 계측에 사용되고 있는 것이 콘덴서 마이크로폰이다. 역사가 오래된 외국 표준기관의 자료에 따르면 20여년 동안 감도값이  $\pm 0.05$  dB 이내에서 일정하게 유지되고 있는 것으로 보고되고 있다.<sup>(3)</sup>

한국표준과학연구원의 경우 역사가 일천하고 마이크로폰의 정밀한 교정 능력 또한 급변하는 국제적 요구사항에 부응하기 위해 비교적 최근인 1999년 말경에 갖추었기 때문에 표준 마이크로폰에 대한 충분한 자료

를 확보하지 못하고 있는 것이 현실이다. 그러나 시작은 늦더라도 정밀 교정 능력이 갖춰진 이후 주기적으로 표준 마이크로폰의 감도를 측정하여 그 변화 추세를 조사하였다. 이러한 일련의 작업은 표준 마이크로폰 감도의 안정성 확인은 물론 우리의 교정 능력이 시간과 환경조건에 따라 변화하는 지에 대한 확인을 위해서도 중요하다.

비록 역사는 일천하지만 표준 마이크로폰에 대한 그 동안의 교정 결과를 보았을 때 한국표준과학연구원이 보유하고 있는 표준 마이크로폰의 안정성과 국제규격에 따른 교정 능력이 안정적으로 유지되고 있는 것으로 확인되었다.

## 2. 컨덴서 마이크로폰

컨덴서 마이크로폰은 높은 안정성, 넓은 주파수 대역에 걸친 평탄한 주파수 특성, 비교적 높은 감도와 작은 내부잡음을 갖는 특성을 가지고 있다. 이러한 특성과 음장에 최소의 영향을 주도록 한 구조적 특성을 충족시키면 정밀 음향측정에 적합할 것이다.

컨덴서 마이크로폰은 그림 1에서 보는 것과 같이 얇은 금속 진동막(diaphragm)과 단단한 배면판(back plate)으로 구성되어 있으며, 이 두 금속판이 공기층을 갖는 축전기(capacitor)의 전극을 형성한다. 직류전압(분극전압)에 의해 축전기에 일정한 전하를 공급해주면 얇은 진동막에 가해지는 입력 음압에 의해 용량이 변하여 결국 전압 변화가 발생하게 된다. 일반적으로 대기압에 의한 압력 변화는 음압에 비해 상대적으로 크기 때문에 등압용 공기구멍(pressure equalization vent)을 두어 마이크로폰 외부와 내부의 압력

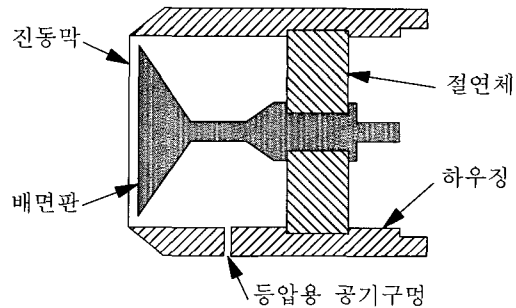


그림 1 컨덴서 마이크로폰의 구조

이 갖도록 한다.

용량값의 상대적인 변화를 증가시키면 감도가 커진다. 이를 위해 컨덴서 마이크로폰의 표유용량(stray capacitance)과 이어지는 증폭기의 입력부하를 가능한 한 작게 하여야 한다. 그러므로 마이크로폰과 1차 증폭단, 즉 전치증폭기는 최대한 근접해야 한다. 또한 마이크로폰의 작은 용량은 최저 주파수 한계(lower frequency limit)를 낮추기 위해 매우 큰 부하저항을 요구한다. 따라서 전치증폭단은 전선에 의해 신호를 음향분석 시스템의 1단계에 전달하기 위해 요구되는 낮은 출력 임피던스를 제공하는 임피던스 변환기로 설계되었다.

마이크로폰과 전치증폭기의 등가회로는 그림 2에 주어졌다. 직류전압(분극전압)을 큰 임피던스 값을 갖는 충전회로 저항  $R_c$ 를 통해 마이크로폰에 연결함으로써 진동막-배면판의 축전기에 일정한 전하  $Q$ 를 가해준다. 분극전압  $E_0$ 와 전하는 다음의 관계식을 갖는다.

$$E_0 = \frac{Q}{C_t} \quad (1)$$

여기서  $C_t$ 는 마이크로폰의 용량이다.

축전기의 용량을 일정하게 유지하기 때문

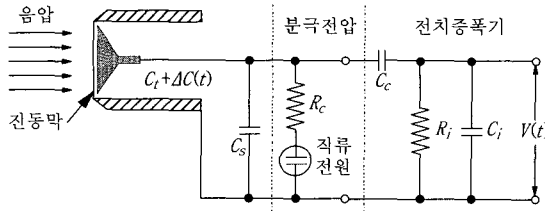


그림 2 컨덴서 마이크로폰과 전치증폭기의 등가회로

에 음압 변화에 의한 용량의 변화는 전압 변화로 나타난다. 입력 음압에 따른 마이크로폰 용량의 변화량을  $\Delta C(t)$ 라고 하면 일반적으로  $C_t \gg \Delta C(t)$ 의 조건을 만족시키기 때문에 마이크로폰에 부하를 가하지 않은 상태의 개방회로전압(open circuit voltage)(III절 참조)  $V_0(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$V_0(t) = \frac{\Delta C(t)E_0}{C_t + \Delta C(t)} \approx \frac{\Delta C(t)E_0}{C_t} \quad (2)$$

마이크로폰은 그림 2에서 보는 것과 같이 직류 분극전압을 차단하기 위해 결합 용량  $C_c$ 를 갖는 결합 축전기(coupling capacitor)를 통해 전치증폭기와 연결된다. 표유용량  $C_s$ 는 작기 때문에 마이크로폰 용량  $C_t$ 의 한 부분으로 볼 수 있으며 결합 용량  $C_c$ 는 전치증폭기의 입력 용량  $C_i$ 에 비해 매우 크기 때문에 무시할 수 있다. 따라서 그림 2의 등가회로는 그림 3과 같이 단순화할 수 있다.

이 그림에서 저항  $R$ 은 다음 식과 같이 충전회로 저항  $R_c$ 와 전치증폭기의 입력 저항  $R_i$ 의 결합으로 주어진다.

$$R = \frac{R_c R_i}{R_c + R_i} \quad (3)$$

그림 3과 같은 단순화한 등가회로에서 출력

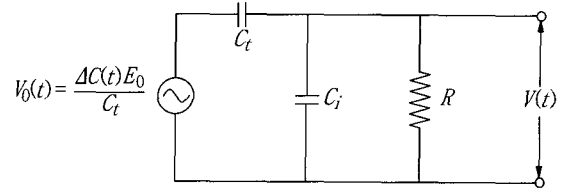


그림 3 컨덴서 마이크로폰과 전치증폭기의 단순화한 등가회로

전압  $V(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} V(t) &= \frac{\Delta C(t)E_0}{C_t} \frac{C_t}{C} \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} \\ &= \frac{\Delta C(t)E_0}{C_t} \frac{j\omega RC_t}{1 + j\omega RC} \quad (4) \end{aligned}$$

여기서  $\omega$ 는 교류 전원, 즉 마이크로폰에 입사되는 음파의 각주파수이며  $C = C_t + C_i$ 이다.

입사된 음파의 시간에 따른 음압 변화량  $\Delta p(t)$ 는 마이크로폰 용량의 변화량  $\Delta C(t)$ 와 다음의 관계식을 갖는다.

$$\Delta p(t) = K_1 \Delta C(t) \quad (5)$$

여기서  $K_1$ 은 상수이다.

따라서 마이크로폰의 감도  $S$ , 즉 입력 음압과 출력 전압의 비는 다음과 같이 주어진다.

$$S = \frac{V(t)}{\Delta p(t)} = \frac{\Delta C(t)E_0}{C_t \Delta p(t)} \frac{j\omega RC_t}{1 + j\omega RC} \quad (6)$$

이 식을 다시 정리하면 다음과 같이 된다.

$$S = K_2 \frac{E_0}{C_t} \frac{j\omega RC_t}{1 + j\omega RC} \quad (7)$$

여기서  $K_2$ 는 상수이다.

만약  $\omega RC \gg 1$ 이면 식 (7)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S = K_2 \frac{E_0}{C} \quad (8)$$

이 경우 감도는 분극전압  $E_0$ 에 비례하며 전체 용량  $C$ 에 반비례한다. 따라서 전치증폭기의 용량과 같이 마이크로폰의 용량에 추가되는 용량은 마이크로폰에 부하를 가해 감도를 저하시키는 결과를 초래한다. 그러므로 회로 내의 전체 용량은 마이크로폰의 용량에 비해 크지 않아야 된다.

한편  $\omega RC \ll 1$ 인 경우에 식 (7)은 다음과 같이 주어진다.

$$S = K_2 \frac{E_0}{C_i} j\omega RC_i \quad (9)$$

이 경우 감도는 주파수에 비례한다. 감도가 주파수에 비례하기 시작하는 주파수를 차단 주파수(cut-off frequency)  $f_c$ 라고 하면 이는  $\omega RC = 1$ 일 때의 주파수로 정의되며 이 때 감도는 3 dB가 감소하게 된다. 따라서 차단 주파수는 다음과 같이 주어진다.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (10)$$

이 식에서 보아 알 수 있듯이 매우 작은 최저 주파수 한계를 갖기 위해서는 전치증폭기의 입력 저항  $R$ 을 크게 해주어야 한다.

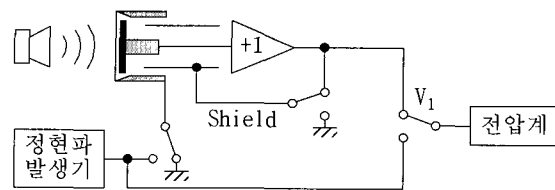
### 3. 개방회로 전압의 측정

마이크로폰 음압감도의 정확한 정의는 마이크로폰 진동막에 균일하게 가해지는 음압과 마이크로폰 출력단의 개방회로전압과의 비이다.

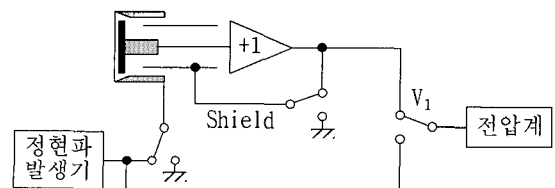
일반적인 컨덴서 마이크로폰의 출력 임피던스는 매우 높다. 따라서 높은 출력 임피던

스를 갖도록 특별히 설계된 마이크로폰 전치증폭기라도 마이크로폰에 부하를 가하게 되며 부하의 크기에 따라 전치증폭기의 출력값이 달라지기 때문에 감도를 정의하기 위해서는 변하지 않는 양인 개방회로전압을 사용하게 된다. 삽입전압기법은 이와 같은 부하에 의한 영향을 배제한 상태에서 마이크로폰에 전기적 부하가 가해졌을 때 개방회로전압을 측정하는 방법이다.

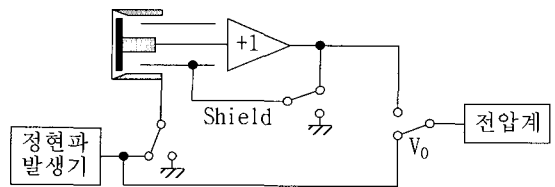
개방회로전압을 측정하기 위해서는 부하 임피던스보다 작은 임피던스를 갖는 교정전압을 마이크로폰과 직렬로 연결한 후, 음압과 교정전압을 교대로 가해주면서 부하 임피던스 양단의 전압이 동일한 값을 갖도록 교정전압을 조절한다. 두 값이 동일할 때 개



(a) 음압이 가해질 때의 전치증폭기 출력전압 측정



(b) 교정전압이 가해질 때 전치증폭기 출력전압 측정



(c) 교정전압 측정

그림 4 삽입전압기법에 의한 개방회로전압 측정 방법

방회로전압은 교정전압의 크기와 같다.

임의의 주파수에서 삽입전압기법을 이용하여 개방회로전압은 다음과 같은 절차로 측정한다.

(1) 마이크론에 음압을 가했을 때 마이크로폰 전치증폭기의 출력전압을 측정한다.(그림 4(a) 참조)

(2) 음압을 가하지 않은 상태에서 위의 출력 전압과 동일한 값을 갖도록 교정전압을 조절한다.(그림 4(b) 참조)

(3) 전압계를 정현파 발생기에 연결하여 교정전압의 출력전압을 측정한다.(그림 4(c) 참조)

이와 같이 측정한 전압이 마이크로폰의 개방회로전압이다.

### 4. 마이크로폰의 교정

#### 4.1 가역교정 장치

마이크로폰을 교정하기 위한 가역교정 시스템은 그림 5에서 보는 것과 같다. 가역교정 시스템은 발신용 마이크로폰에 신호를 가해주기 위한 정현파와 신호 발생장치(B&K 1051)와 전기 신호의 잡음을 제거하기 위한 대역통과 필터(B&K 1617), 수신용 마이크

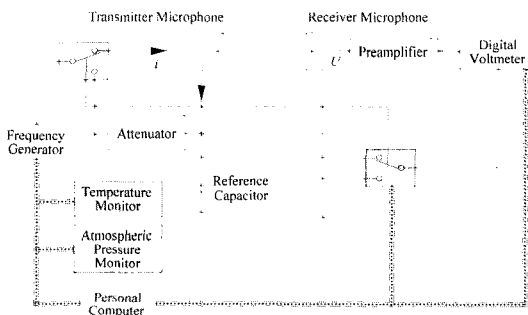


그림 5 마이크로폰 가역교정 시스템

로폰 출력단자의 전압측정을 위한 전압계(Wavetek 1281) 및 각종 control 기능과 삽입전압기법(insert voltage technique)에 의한 개방회로전압(open circuit voltage)을 측정하기 위한 가역교정장치(B&K 5998)로 구성되어 있다.

#### 4.2 가역교정 방법

마이크로폰의 음압감도 절대교정은 세 개의 마이크로폰을 결합기를 이용하여 쌍으로 결합한 후, 하나는 발신기로, 다른 하나는 수신기로 이용하여 각 마이크로폰의 입력 전류와 출력 전압을 측정한다.<sup>(4)</sup> 세 쌍에 대해 각각 측정한 입력 전류와 출력 전압의 비를 이용하여 음압감도를 계산하며 각종 보정을 통하여 최종 음압감도의 값을 결정한다.

대부분의 마이크로폰은 가역적이며 이러한 마이크로폰의 2-단자 방정식은 다음과 같이 주어진다.<sup>(5)</sup>

$$\begin{aligned} z_{11}i + z_{12}q &= U \\ z_{21}i + z_{22}q &= p \end{aligned} \tag{11}$$

여기서  $p$ 는 마이크로폰 음향단자(진동막)에 균일하게 가해지는 음압,  $U$ 는 마이크로폰 전기단자에서의 신호 전압,  $q$ 는 마이크로폰 음향단자(진동막)에서의 체적속도,  $i$ 는 마이크로폰 전기단자를 흐르는 전류,  $z_{11} = Z_e$ 는 진동막을 막았을 때 마이크로폰의 전기 임피던스,  $z_{22} = Z_a$ 는 전기단자가 무부하일 때 마이크로폰의 음향 임피던스,  $z_{12} = z_{21} = M_p Z_a$ 는 순방향과 역방향의 전달 임피던스이며,  $M_p$ 는 마이크로폰의 음압감도이다.

위의 표현을 이용하면 식 (11)은 다시 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_e i + M_p Z_a q &= U \\ M_p Z_a i + Z_e q &= p \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)를 마이크로폰의 가역 방정식이라 한다.

음압감도  $M_{p,1}$ 과  $M_{p,2}$ 를 갖는 마이크로폰 ①과 ②를 결합기를 이용하여 음향적으로 결합하였다고 하자. 식 (12)로부터 마이크로폰 ①의 전기단자를 흐르는 전류  $i_1$ 은 폐쇄 회로 체적속도(진동막에서  $p=0$ )  $M_{p,1}i_1$ 을 발생시켜 결국 마이크로폰 ②의 음향단자에  $p_2 = Z_{a,12}M_{p,1}i_1$ 의 음압을 발생시킨다. 여기서  $Z_{a,12}$ 는 이 시스템의 음향전달 임피던스이다.

따라서 마이크로폰 ②의 개방회로 전압은 다음과 같이 주어진다.

$$U_2 = M_{p,2}p_2 = M_{p,1}M_{p,2}Z_{a,12}i_1 \quad (13)$$

이 식을  $M_{p,1}M_{p,2}$ , 즉 두 마이크로폰 감도의 곱에 대해 풀면 다음과 같다.

$$M_{p,1}M_{p,2} = \frac{1}{Z_{a,12}} \frac{U_2}{i_1} \quad (14)$$

이 식에서 보듯이 출력 전압과 입력 전류의 비와 음향전달 임피던스를 알면 두 마이크로폰 감도의 곱을 알 수 있다. 이와 같은 방법으로 마이크로폰 세 쌍에 대한 감도의 곱을 알면 각 마이크로폰의 감도값을 계산할 수 있다. 마이크로폰의 진동막과 직경이 동일한 원통형 결합기를 이용하여 두 마이크로폰을 결합한 경우, 두 마이크로폰 사이의 음향전달 임피던스는 이론적으로 계산이 가능하다.

가역교정 시스템을 이용하여 기본적인 측

정을 하더라도 음압감도를 결정하기 위해서는 마이크로폰에 대한 각종 parameter 값을 알아야 한다. 이들 중 대표적인 것이 마이크로폰 전면공동(前面空洞; front cavity)의 깊이와 등가체적(equivalent volume)이다. 전면공동의 깊이는 광학적인 방법으로 측정하거나 현미경을 이용하는 방법이 있는데 본 교정에서는 현미경을 이용하여 진동막과 마이크로폰 전면 테두리에 초점을 맞추어 이동 거리를 측정하여 결정하였다. 등가체적은 체적이 서로 다른 결합기를 이용하여 저주파 대역(250 Hz)에서의 값을 결정하였다.<sup>(6)</sup>

이 외에도 결합기의 길이 및 직경을 길이 그룹의 협조를 얻어 정밀하게 측정하였으며 마이크로폰 전치증폭기의 series capacitor의 용량값도 전기그룹의 협조를 얻어 정밀 측정을 실시하였다.

### 4.3 음향전달 임피던스

음향전달 임피던스  $Z_{a,12} = p_2 / (M_{p,1}i_1)$ 은 그림 6과 같은 등가회로로부터 구할 수 있다. 이 그림에서  $Z_{a,1}$ 과  $Z_{a,2}$ 는 각각 마이크로폰 ①과 ②의 음향 임피던스이다.

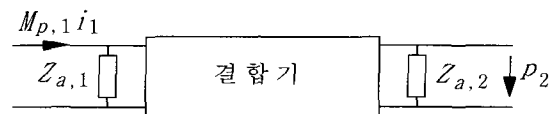


그림 6 음향전달 임피던스  $Z_{a,12}$ 를 구하기 위한 등가회로

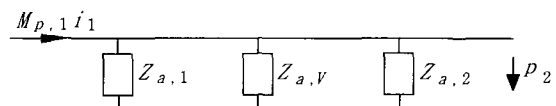


그림 7 결합기 크기가 파장에 비해 작을 때  $Z_{a,12}$ 를 계산하기 위한 등가회로

기하학적 구조가 단순한 경우에  $Z_{a,12}$ 는 이론적으로 구할 수 있다. 결합기 내의 모든 점에서 음압이 동일하다고 가정하자(이는 결합기의 크기가 파장에 비해 작으면 가능하다). 그러면 결합기 내의 기체는 순수 컴플라이언스(pure compliance)와 같이 작용하여, 그림 7의 등가회로부터  $Z_{a,12}$ 는  $Z_{a,12}$ 로 주어진다(기체의 단열 수축과 팽창을 가정).

$$\frac{1}{Z_{a,12}} = \frac{1}{Z_{a,v}} + \frac{1}{Z_{a,1}} + \frac{1}{Z_{a,2}}$$

$$= j\omega \left( \frac{V}{x p_s} + \frac{V_{e,1}}{x_r p_{s,r}} + \frac{V_{e,2}}{x_r p_{s,r}} \right) \quad (15)$$

여기서

- $V$ 는 결합기의 전체 기하학적 체적 ( $m^3$ )
- $V_{e,1}$ 은 마이크로폰 ①의 등가체적( $m^3$ )
- $V_{e,2}$ 는 마이크로폰 ②의 등가체적( $m^3$ )
- $Z_{a,v} = x p_s / j\omega V$ 는 결합기 내의 기체의 음향 임피던스( $Pa \cdot s/m^3$ )
- $\omega$ 는 각주파수(rad/s)
- $p_s$ 는 대기압(Pa)
- $x$ 는 측정조건에서의 비열비
- $x_s$ 는 표준대기상태에서의  $x$ 이다.

결합기의 크기가 파장에 비해 충분히 작지 않은 고주파에서  $Z_{a,12}$ 의 계산은 일반적으로 매우 복잡하다. 그러나 결합기의 형태가 원통형이고 직경이 마이크로폰 진동막의 직경과 동일하면 평면파 전달을 가정할 수 있다. 이 경우 전체 시스템을 균일 전송선(homogeneous transmission line)으로 고려할 수 있으며(그림 8 참조),  $Z_{a,12}$ 는  $Z_{a,12}$ 로 주어진다(기체의 단열 수축과 팽창을 가정).

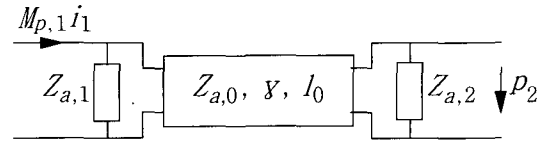


그림 8 결합기 내에서 평면파 전달을 가정하였을 때,  $Z_{a,12}$ 를 계산하기 위한 등가회로

$$\frac{1}{Z_{a,12}} = \frac{1}{Z_{a,0}} \left[ \left( \frac{Z_{a,0}}{Z_{a,1}} + \frac{Z_{a,0}}{Z_{a,2}} \right) \cosh \gamma l_0 + \left( 1 + \frac{Z_{a,0}}{Z_{a,1}} \frac{Z_{a,0}}{Z_{a,2}} \right) \sinh \gamma l_0 \right] \quad (16)$$

여기서

- $Z_{a,0} = \rho c / S_0$
- $\rho$ 는 기체의 밀도( $kg/m^3$ )
- $c$ 는 기체 내에서 음파의 속도( $m/s$ )
- $S_0$ 는 결합기의 단면적( $m^2$ )
- $l_0$ 는 결합기의 길이, 즉 두 진동막 사이의 거리( $m$ )
- $\gamma = \alpha + j\beta$ 는 복소전파계수( $m^{-1}$ )이다.

식 (16)을 이용할 때  $\alpha = 0$ ,  $\beta = \omega/c$ 로 놓아  $\gamma$ 를 근사화 할 수 있다.

위 식에서 결합기의 체적을 고려할 때 결합기의 벽면과 두 진동막 사이에 포함되지 않은 마이크로폰과 관련된 등가체적도 고려하여야 한다.

#### 4.4 보정

##### (1) 열전달 손실

앞에서  $Z_{a,12}$ 를 계산할 때 결합기 내에서 단열조건을 가정하였다. 그러나 실제로는 결합기 벽으로 열전달이 일어나므로 특히 작은 결합기와 저주파 영역에서는 열전달 영향으로 인해 순수한 단열조건을 충족시키지

못한다.

결합기 벽면이 일정한 온도를 유지한다는 가정과 단순한 형태의 결합기에 대해 열전달 손실의 영향을 계산할 수 있으며, 이 영향은 식 (15)의 기하학적 체적  $V$  또는 식 (16)의 단면적  $S_0$ 에 복소 보정인자  $\Delta H$ 로 주어진다. 복소 보정인자  $\Delta H$ 의 표현은 다음과 같다.<sup>(1)</sup>

$$\Delta H = \frac{x}{1 + (x-1)E_V} \quad (17)$$

여기서  $E_V$ 는 음압과 관련된 정형 온도변화의 공간평균과 벽면이 완전한 절연체일 때 발생된 정형 온도변화의 비로 정의되는 복소 온도전달함수이다.

유한한 원통형 결합기의 경우 다음과 주어지는 복소량  $E_V$ 의 근사값을 이용할 수 있다.

$$E_V = 1 - S + D_1 S^2 + (3/4)\sqrt{\pi} D_2 S^3 \quad (18)$$

여기서

$$S = \left[ -j \frac{1}{2\pi X} \right]^{1/2} = \frac{1-j}{2\sqrt{\pi X}}$$

$$D_1 = \frac{\pi R^2 + 8R}{\pi(2R+1)^2}$$

$$D_2 = \frac{R^3 - 6R^2}{3\sqrt{\pi}(2R+1)}$$

$R$ 은 결합기의 길이와 직경의 비

$$X = fl^2 / (\chi \alpha_i)$$

$f$ 는 주파수(Hz)

$l$ 은 결합기의 체적과 표면적 비(m)

$\alpha_i$ 는 결합기 내 기체의 열확산도(m<sup>2</sup>/s)이다.

식 (18)을 이용하여 계산한  $E_V$ 의 크기는

0.125 <  $R$  < 8과  $X > 5$ 일 경우 0.01 %의 정밀도를 갖는다.

(2) 모세관 보정

결합기에는 결합기 안과 밖의 압력을 동일하게 하기 위한 두 개의 모세관이 있다. 두 모세관은 공기 이외의 다른 기체를 결합기 내에 주입하기 위해서도 사용된다.

개방된 모세관의 음향 입력 임피던스는 다음과 같이 주어진다.<sup>(1)</sup>

$$Z_{a,c} = Z_{a,t} \tanh \gamma l_c \quad (19)$$

여기서  $Z_{a,t}$ 는 무한히 긴 모세관의 복소 음향 파동 임피던스(Pa · s/m<sup>3</sup>)

$l_c$ 는 모세관의 길이(m)이다.

$Z_{a,t}$ 와  $\gamma$ 는 다음과 같은 관계식을 갖는다.<sup>(7)</sup>

$$\begin{aligned} \gamma Z_{a,t} &= j \frac{\omega \rho}{\pi a^2} \left[ 1 - \frac{2J_1(ka)}{kaJ_0(ka)} \right] \\ \frac{\gamma}{Z_{a,t}} &= j\omega \frac{\pi a^2}{\rho c^2} \left[ 1 + \frac{2}{Bka} (x-1) \frac{J_1(Bka)}{J_0(Bka)} \right] \end{aligned} \quad (20)$$

여기서  $J_0(\ )$ ,  $J_1(\ )$ 는 각각 0차 및 1차 1종 원통 Bessel 함수이며

$a$ 는 모세관의 반경(m)

$k = (-j\omega\rho/\eta)^{1/2}$ 는 복소 파수(m<sup>-1</sup>)

$B = (\eta/\rho\alpha_i)$

$\eta$ 는 기체의 점성(Pa · s)

$\rho$ 는 기체의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)

$\alpha_i$ 는 기체의 열확산도(m<sup>2</sup>/s)이다.

모세관의 분로효과(shunting effect)는 식 (15)와 (16)으로 주어지는 음향전달 임피던스에 복소 보정인자  $\Delta C$ 를 더해줌으로써 고려된다.



$$\Delta C_{12} = 1 + n \frac{Z''_{a,12}}{Z_{a,C}} \quad (21)$$

여기서

$n$ 은 동일한 모세관의 수

$Z''_{a,12}$ 은 열전달 보정된 음향전달 임피던스  $Z_{a,12}$ 이다.

결합기를 사용하지 않을 경우에는 일반적으로 결합기와 마이크론을 체결한 후, 모세관을 적절한 철사로 전체 길이를 막아주어도 된다. 이 경우 보정인자  $\Delta C$ 는 1이 된다.

### 5. 교정 결과 및 교정 불확도

#### 5.1 교정 결과

마이크로폰의 감도교정은 1/3 옥타브 중심 주파수에 대해 시행한다. 다음의 그림 9와 10은 한국표준과학연구원 음향진동그룹에서 보유하고 있는 1"(LS1P) 및 1/2" (LS2P) 표준 마이크로폰의 음압감도 교정결과이다.

한 국가의 정밀 음향계측 능력은 표준 마이크로폰의 교정능력과 직결되며, 이는 현재 국제간의 상호인증협정(MRA)을 위해 국제도량형국(BIPM)이 주도하는 핵심측정국제

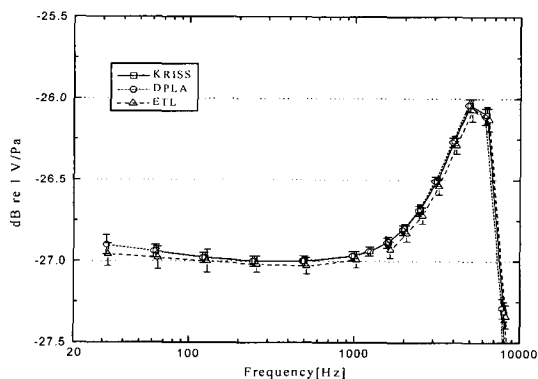


그림 9 1" 표준 마이크로폰의 음압감도 교정 결과

비교(key comparison)를 통한 국가간의 음향분야 측정 능력의 기본 척도가 된다. 따라서 외국의 교정 능력과 우리 나라의 교정 능력을 비교하기 위해 위의 그림에는 동일한 마이크론을 외국의 교정기관에서 교정한 결과를 같이 보여준다. 음압감도 값은 소수점 아래 두 자리로 하였으며 95 %의 신뢰수준을 갖는 음압감도 교정에 대한 확장 불확도(expanded uncertainty)<sup>(8)</sup> 값도 동시에 주어져 있다.

#### 5.2 교정 불확도

마이크로폰 교정 결과의 불확도에 영향을 미치는 요인에는 여러 가지가 있다. 각종 불확도 요인은 각 요인별 불확도를 계산 또는 측정하여 식 (22)와 같이 전체 음압감도에 미치는 불확도를 주파수별로 계산한다.

$$\Delta M_p(f) \text{ [dB]} = \left[ \sum_{i=0}^N \left( \Delta Q_i \cdot \frac{dM_p(f)}{dQ_i} \text{ [dB]} \right)^{1/22} \right] \quad (22)$$

여기서

$\Delta M_p(f)$ 는 마이크로폰 음압감도의 불확도,

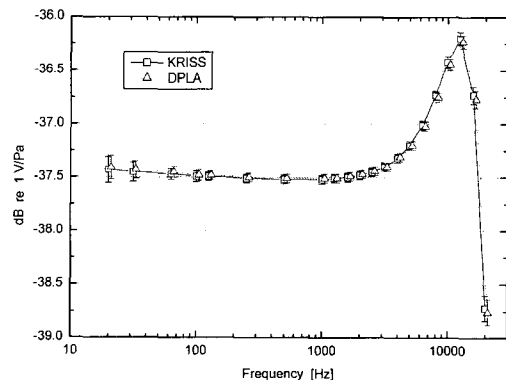


그림 10 1/2" 표준 마이크로폰의 음압감도 교정 결과

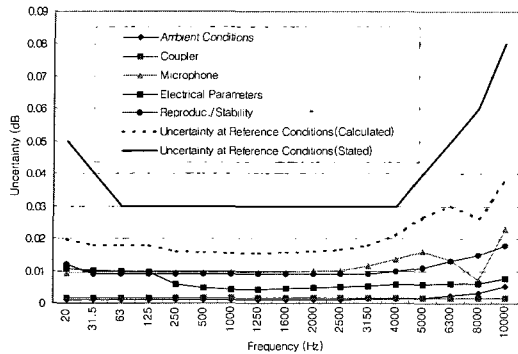


그림 11 각 요인별 마이크로폰 교정 불확도

$\Delta Q_i$ 는 입력량  $i$ 의 불확도  
 $dM_p(f)/dQ_i$ 는 입력량  $i$ 의 변화에 따른 음압감도의 변화량이다.

그림 11은 1“(LSIP) 표준 마이크로폰의 감도교정에 영향을 미치는 각 요인별 불확도를 계산한 결과를 보여준다.

이 그림에서 최종적으로 주어지는 불확도 (stated uncertainty-굵은 실선)는 고려하지 못한 인자의 효과(residual effect)를 감안하여 충분한 여유를 갖고 주어진 것이다.

### 6. 맺음 말

정밀 음향계측을 위해서는 적절한 마이크로폰의 선택도 중요하지만 무엇보다도 정밀한 교정을 통해 마이크로폰의 감도를 정확하게 알아야 한다. 이를 위해 국가표준 대표기관인 한국표준과학연구원에서는 마이크로폰의 정밀 교정을 위해 꾸준한 연구를 수행하고 있으며 외국의 음향분야 교정기관들과 유기적인 협력체계를 유지하며 상호 비교를 통해 마이크로폰의 교정 능력을 세계적인 수준으로 향상시키고자 부단한 노력을 하고 있다.

또한 국제간의 상호인증협정(MRA)의 일

환으로 국제도량형국(BIPM)이 주도하는 핵심측정국제비교를 통해 우리의 수준을 외국의 수준과 비교하는 사업에도 적극참여하고 있다. 지난 1999년 3월부터 2001년 2월까지 선진 12개국이 참여하여 진행된 제1차 1 “마이크로폰 핵심측정국제비교(CCAUV, A-K1)의 중간 보고서에 의하면 우리 나라의 마이크로폰 감도교정 결과는 선진국에 비해 결코 뒤지지 않으며 아시아 지역에서는 단연 선두의 자리를 차지하고 있는 것으로 밝혀졌다.

우리는 여기에 만족하지 않고 세계 최고의 수준을 지향하기 위해 지속적인 연구와 노력을 아끼지 않을 것이다.

### 참고 문헌

- (1) IEC 61094-2, 1993, Measurement Microphones-Part 2, Primary Method for Pressure Calibration of Laboratory Standard Microphones by the Reciprocity Technique.
- (2) IEC 61094-1, 1991, Measurement Microphones-Part 1, Specifications for Laboratory Standard Microphones.
- (3) Frederiksen, E. and Christensen, J. I., 1991, “Pressure Reciprocity Calibration-Instrumentation, Results and Uncertainty,” B&K Technical Review, No. 1, pp. 5~26.
- (4) 서상준, 조문재, 1989, “가역원리에 의한 1인치 표준 컨덴서 마이크로폰의 정밀교정,” 한국음향학회지, 제 8 권 p. 23.
- (5) Beranek, L. L., 1988, Acoustical Measurements (Acoustical Society of America).
- (6) Instruction Manual of B&K 4143.
- (7) Zwicker, C., and Korsten, C. W. Sound Absorbing Materials (Elsevier, 1949).
- (8) ISO, 1993, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.