

가역원리에 의한 1인치 표준 컨덴서 마이크로폰의 정밀교정

Precision Calibration of 1-Inch Standard Condenser

Microphone by Reciprocity Technique

서 상 준*, 조 문 재*

(Sang Joon Suh, Moon Jae Jho)

요 약

표준 컨덴서 마이크로폰의 정밀 교정은 가역원리를 이용한 가역교정에 의해 이루어진다. 본 연구에서는 가역교정 중에서도 결합기를 이용하는 음압교정(pressure calibration)을 수행하여 세계의 1인치 컨덴서 마이크로폰의 음압감도를 결정하였다. 마이크로폰의 음압감도를 정밀하게 결정하기 위해서는 전압이나 결합기의 치수를 정밀하게 측정하여야 하며 결합기의 구조상 발생하는 계반 현상들에 대한 보정을 정확하게 해 주어야 한다. 이와같은 사항들을 정확하게 고려할 경우 가역교정에 의한 교정정밀도는 저주파와 중간 주파수 영역에서 0.05dB이며 10kHz 이상에서는 0.1dB가 된다.

ABSTRACT

The calibration of 1 inch standard condenser microphone is done by the reciprocity calibration method. There are two kinds of reciprocity calibration, free-field calibration and pressure calibration. The pressure sensitivities of the three 1 inch condenser microphones are determined by pressure calibration. The accuracy of the pressure sensitivity of the microphone depends on the accuracies of the voltage and dimension measurements as well as the various corrections for the coupler. If the individual accuracies for the measurements and corrections are achieved, it is estimated that the over-all accuracy is approximately 0.05dB at low and middle frequencies decreasing to about 0.1dB over 10kHz.

I. 서 론

정밀한 음향계측을 위해서는 사용되는 마이크로폰의 감도(sensitivity), 즉 입력되는 음압과 이때 마이

크로폰에서 발생하는 전압의 비를 정확하게 알아야 한다. 이러한 과정, 즉 감도를 결정하는 것을 마이크로폰의 교정(calibration)이라고 한다.

마이크로폰의 감도를 정확하게 결정하기 위해서는 마이크로폰의 진동판(diaphragm)에 가해지는 음압과 이때 출력되는 전압을 정밀하게 측정하여야 한다. 그러나 일반적으로 마이크로폰에서 발생하는 전기적 신호는 정확하게 측정할 수 있으나 마이크로폰에 가해

* 한국표준연구원, 음향진동연구실

지는 음압을 정확하게 결정하기는 쉽지 않다. 이와같은 이유로 마이크로폰의 감도를 정밀하게 결정하기 위해서는 음압의 절대값을 측정하지 않고도 전기적인 양과 부피 또는 길이만 정밀하게 측정함으로써 감도를 결정할 수 있는 가역교정방법 (reciprocity calibration technique)⁴⁾을 이용한다. 이 방법은 전기회로에서 흔히 사용되는 가역원리(reciprocity principle)를 이용하는 것으로서 일반적으로 세계의 마이크로폰을 교대로 쌍을 이루어 하나는 발신, 다른 하나는 수신을 하게 하여 이때 입력 및 출력되는 전기적 양을 측정함으로써 감도를 결정하는 방법이다.

정밀한 음향계측을 위해서는 주기적인 교정을 통하여 마이크로폰의 감도를 정밀하게 유지하여야 하며 이를 위해 일반적으로 표준 마이크로폰(standard microphone)을 선정하여 이의 정확한 특성을 파악하고 있어야 한다. 표준 마이크로폰이 갖추어야 할 조건은 여러가지 환경변화에 가급적 예민하지 않을 것과 제반 특성이 시간에 따라 가급적 변하지 않아야 한다. 흔히 사용되고 있는 마이크로폰에는 여러 종류가 있으나 현재까지 알려진 바에 의하면 표준 마이크로폰으로 사용하기에 가장 적합한 것이 컨덴서 마이크로폰이다. 특히 컨덴서 마이크로폰 중에서도 진동판의 구경이 비교적 큰 1인치 컨덴서 마이크로폰을 표준으로 사용하고 있다.

현재 마이크로폰의 교정에 있어서 가역교정방법이 마이크로폰의 절대교정방법으로 국제적으로 통용되는 방법이며⁶⁾ 무향실(anechoic chamber)을 이용하는 자유음장 교정(free-field calibration)과 결합기를 이용하는 음압교정(pressure calibration)이 있다. 본 논문에서는 마이크로폰의 음압교정에 대한 원리와 방법 및 여러가지 보정치와 교정결과에 대하여 기술하기로 한다.

II. 전기음향 가역원리

만약 선형적이고 수동소자(passive element)로 구성된 전기회로에서 일정한 임피던스를 갖고있는 전원으로 부터 발생한 전압 U가 회로의 다른 부위에 동일한 임피던스를 갖고있는 전류계에 전류를 흐르게 하면 이들의 위치를 바꾸어 놓더라도 전류계에는 동일한

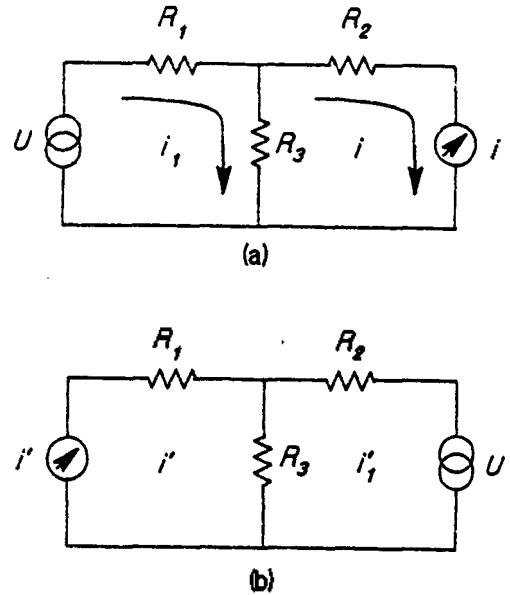


그림 1 2-mesh, 4-단자회로.

전류가 흐르게 된다. 그림1(a)에 주어진 2-mesh, 4-단자 회로에서 이 회로의 mesh 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$(R_1 + R_2)i_1 - R_2i = U \tag{1}$$

$$-R_2i_1 + (R_2 + R_3)i = 0$$

이 식을 전류i에 대해 풀면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$i = \frac{UR_2}{\begin{vmatrix} (R_1 + R_2) & -R_2 \\ -R_2 & (R_2 + R_3) \end{vmatrix}} = UZ \tag{2}$$

한편 그림1(b)에서와 같이 전원과 전류계의 위치를 바꾸어 놓을 경우 동일한 방법으로 전류 i'을 구하면 다음과 같이 주어진다.

$$i' = \frac{UR_2}{\begin{vmatrix} (R_2 + R_3) & -R_2 \\ -R_2 & (R_1 + R_2) \end{vmatrix}} = UZ' \tag{3}$$

식(2)와 식(3)에서 분모에 있는 행렬식에서 행과 열을 각각 한번씩 교환하면 동일한 결과를 얻을 수 있기 때문에 결국 Z=Z', 즉 i=i'을 얻게 된다. 이와같은 조건을 만족시키는 회로를 가역회로라고 한다. 선형적이고 수동소자로 이루어진 4-단자 회로는 아무

리 복잡하더라도 이 조건을 만족시키게 된다.

가역원리는 전기회로 뿐만 아니라 대부분의 수동적인 전기역학(electromechanical) 또는 전기음향(electroacoustical) 변환기에도 적용된다.^{10) 11)} 이것은 이들 변환기에 관한 전기역학 상수가 4-단자 회로의 임피던스소자로 나타내어질 수 있기 때문이다. 이러한 회로에서 임피던스 행렬식은 항상 대칭적이다. 그러나 가역관계에서 이들이 항상 동일한 부호를 가져야할 필요는 없다. 즉 $Z_{21} = \pm Z_{12}$ 을 만족시키면 가역적이라고 한다.

이와같이 수동적인 전기역학 또는 전기음향 변환기에 적용되는 가역원리가 전기음향 가역원리(electroacoustical reciprocity principle)이다. 전기음향 가역원리를 다시 표현하면 다음과 같다.

“전기음향 변환기를 수신용으로 사용할 때 변환기 출력단자의 개방회로 전압(open circuit voltage)과 변환기에 인접한 임의의 기준점에서의 자유음장 음압의 비를 변환기를 발신용으로 사용할 때 기준점에서 일정한 거리 d만큼 떨어진 위치에서의 음압과 변환기 입력단자에 흐르는 전류의 비로 나누어준 값은 상수가 된다.” 이 상수를 가역상수(reciprocity constant)라 하며 그 값은 $2d\lambda / \rho c$ 가 된다. 여기서 λ 는 전달되는 음파의 파장, ρc 는 매질의 특성 임피던스이다.

그러나 선형적이고 수동소자로 이루어진 모든 변환기가 가역원리를 만족시키는 것은 아니다¹²⁾. 가역원리를 만족시키는 변환기를 가역 변환기(reciprocal transducer) 라고 한다.

일반적으로 마이크로폰의 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} z_{1i} + z_{1a}q &= U \\ z_{2i} + z_{2a}q &= p \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 i 는 마이크로폰의 전기단자에 흐르는 전류, q 는 진동판의 체적속도(volume velocity), U 는 전기단자에서의 전압, p 는 진동판에 균일하게 가해지는 음압이다. 또한 z_{1i} 은 진동판을 막았을 때 마이크로폰의 전기 임피던스이며 z_{2i} 는 전기단자에 부하를 걸지 않았을 때 마이크로폰의 음향 임피던스이다. 식(4)에서 z_{1a} 와 z_{2a} 은 변환상수(transduction constant)로서 이들

이 $z_{1a} = \pm z_{2a}$ 의 관계를 만족시키면 이 마이크로폰을 가역적이라고 한다.

음향계측에 흔히 사용되는 컨덴서 마이크로폰의 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} Z_{ei} + M_p Z_a q &= U \\ M_p Z_{ai} + Z_a q &= p \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $Z_e = Z_{11}$, $Z_a = Z_{22}$ 이며 M_p 는 마이크로폰의 음압감도(pressure sensitivity)이다. 식(5)에서 보듯이 컨덴서 마이크로폰은 가역조건을 만족시키는 것을 알 수 있다.

III. 마이크로폰의 가역교정 원리

마이크로폰의 교정방법 중 지금까지 알려진 바에 의하면 가역교정방법이 가장 정밀한 방법으로 알려져 있다. 가역교정 방법은 다른 방법과는 달리 기체나 액체 내에서도 이용될 수 있으며 교정주파수 영역에 제약을 받지 않는다. 또한 이 방법은 길이 또는 체적과 전기적 양만을 측정함으로써 교정이 가능하며 이론적인 측면에서도 불필요한 요약이나 가정없이 간단 명료하게 기술된다.

가역원리를 이용하여 마이크로폰을 교정하는 데는 크게 자유음장 교정(free-field calibration)과 음압교정(pressure calibration)이 있다. 자유음장 교정은 무향실과 같은 특수 시설을 필요로 하지만 음압교정은 두 마이크로폰을 연결시켜 주는 결합기(coupler)만 있으면 때와 장소에 제약을 받지 않기 때문에 본 논문에서는 음압교정에 국한하여 기술하기로 한다.

결합기를 이용하는 마이크로폰의 음압교정에서 고려하여야 할 두가지 중요한 사항은 다음과 같다. 첫째, 결합기 내에서의 파동운동(wave motion)은 피할 수 없는 현상이기 때문에 이에 대한 효과를 명확하게 고려해 주어야 한다. 둘째, 교정주파수를 충분히 높여주기 위해 결합기 내에 공기 이외의 기체를 주입시킬 수 있도록 하여야 한다. 그러나 만약 저주파에서의 교정이나 마이크로폰의 크기가 파장에 비해 작은 경우에는 별도의 기체 주입장치를 필요로 하지 않는다.

마이크로폰의 가역교정을 위해서는 세개의 마이크

로폰(이중 두개는 가역적이어야함)을 이용하는 방법과 두개의 마이크로폰(이중 하나는 가역적이어야함)과 보조음원을 이용하는 방법이 있다. 본 논문에서는 일반적으로 사용되는 세개의 마이크로폰을 이용하는 방법에 대해 기술하기로 한다.

세개의 마이크로폰 중 두개를 결합기를 이용하여 그림 2와 같이 결합한다. 결합된 상태에서 하나를 발신용으로 사용하고 다른 하나를 수신용으로 사용하여 수신용 마이크로폰의 개방회로 전압과 발신용 마이크로폰에 가해지는 입력전류의 비를 측정한다. 이와같이 측정된 전기적 양과 결합된 시스템의 음향전달 임피던스(acoustic transfer impedance)를 알면 두 마이크로폰의 음압감도의 곱을 결정할 수 있다. 동일한 방법으로 세개의 마이크로폰을 두개씩 짝지어 각각의 음압감도의 곱을 구하면 이들 값으로부터 각 마이크로폰의 음압감도를 결정할 수 있다.

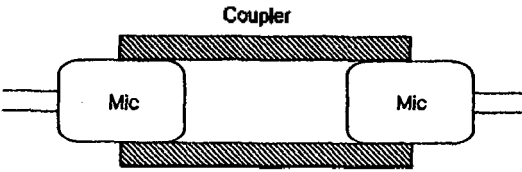


그림 2. 결합기로 연결한 두 마이크로폰

이에대한 내용을 수식적으로 기술하면 다음과 같다. 음압감도 $M_a^{(b)}$ 와 $M_b^{(a)}$ 를 갖는 두개의 마이크로폰 a와 b가 결합기에 의해 결합되어 있으면 식(2)로 주어지는 가역방정식에서 $M_b = Z_{ab} / Z_{aa}$ 가 되는 것을 알 수 있으며 마이크로폰 a의 전기단자에 흐르는 전류 i_a 는 폐회로 체적속도(short-circuit volume velocity), 즉 진동판에서의 음압 p가 0 일때의 체적속도 $M_a^{(a)} i_a$ 를 발생시킨다. 따라서 이 시스템의 음향전달 임피던스를 Z_{ab} 라고 하면 마이크로폰 b의 음향단자(acoustical terminal)에 음압 $p_b = Z_{ab} M_a^{(a)} i_a$ 를 발생시키게 되며 개방회로 전압 U_b 는 다음과 같이 주어진다.

$$U_b = M_b^{(a)} p_b = M_b^{(a)} M_a^{(a)} Z_{ab} i_a \quad (6)$$

식(6)으로부터 두 마이크로폰의 음압감도의 곱은 다음과 같이 주어진다.

$$M_a^{(b)} M_b^{(a)} = \frac{1}{Z_{ab}} \frac{U_b}{i_a} \quad (7)$$

식(7)에서 알 수 있듯이 발신용 마이크로폰에 가해지는 전류 i_a , 수신용 마이크로폰의 개방회로 전압 U_b 와 이 시스템의 음향전달 임피던스 Z_{ab} 만 알면 두 마이크로폰의 음압감도의 곱을 알 수 있다.

만약 전기전달 임피던스 U_b / i_a 를 R_{ab} 로 나타내고 두개의 다른 전기전달 임피던스도 동일한 방법으로 표현하면 마이크로폰 a의 음압감도 레벨은 다음과 같이 주어진다.

$$20 \log_{10} | M_a^{(b)} | = 10 \log_{10} \frac{R_{ab} R_{ca}}{R_{bc}} + 10 \log_{10} \left| \frac{Z_{bc}}{Z_{ab} Z_{ca}} \right| + \Delta \quad (8)$$

여기서 Δ 는 보정량이다.

IV. 음향전달 임피던스의 계산

결합기로 결합된 두 마이크로폰 사이의 음향전달 임피던스는 실험을 통해서도 측정이 가능하지만 많은 경우에 이론적으로 계산이 가능하다.

마이크로폰 a와 b의 음향 임피던스를 각각 $Z_a^{(a)}$ 와 $Z_b^{(b)}$ 라고 하면 결합기로 결합된 두 마이크로폰 시스템의 등가회로는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 만약

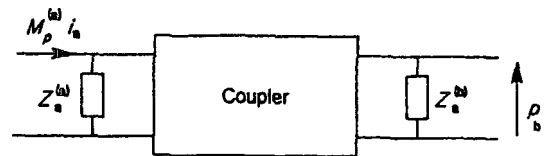


그림 3. 결합기로 연결된 두 마이크로폰 시스템의 등가회로

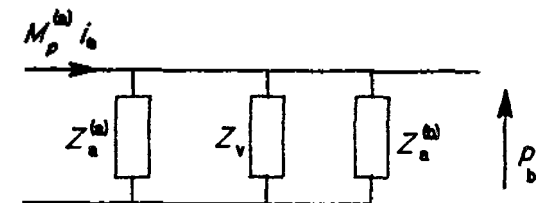


그림 4. 결합기의 크기가 파장에 비해 작은 경우 음향 전달 임피던스를 계산하기 위한 등가회로

결합기의 크기가 음파의 파장에 비해 매우 작다면 결합기 내의 모든 점에서 음압이 균일하다고 가정할 수 있다. 이 경우 결합기는 순수 쿠플플라이언스와 같이 볼 수 있으므로 그림3의 등가회로는 그림4의 등가회로로 대체할 수 있다. 따라서 그림4로부터 음향전달 임피던스 Z_{ab} 는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{1}{Z_{ab}} = \frac{1}{Z_v} + \frac{1}{Z_a^{(a)}} + \frac{1}{Z_a^{(b)}} = j \frac{\omega}{k p_s} (V + V_a^{(a)} + V_a^{(b)}) \approx j \frac{\omega}{k p_s} V_{ab} \quad (9)$$

여기서 V 는 결합기의 기하학적 체적, $V_a^{(a)}$ 와 $V_a^{(b)}$ 는 각각 마이크로폰 a와 b의 등가체적, V_{ab} 는 $V + V_a^{(a)} + V_a^{(b)}$ 의 실수부, $Z_v = k p_s / j \omega V$ 는 결합기 자체의 음향 임피던스이며, k 는 비열비, p_s 는 대기압이다.

한편 고주파 영역, 즉 결합기의 크기가 음파의 파장에 비해 작지 않은 주파수 영역에서는 음향전달 임피던스의 계산이 복잡하다. 그러나 결합기가 원통형으로 이루어져 있고 결합기의 직경이 마이크로폰 진동판의 직경과 동일하면, 평면파가 전달된다고 가정할 수 있는 주파수 영역에서는 전체 시스템이 균일 전송선로(homogeneous transmission line)로 간주할 수 있기 때문에 그림 5와 같은 등가회로로 나타낼 수 있다. 따라서 이 경우 음향전달 임피던스는 다음과 같이 주어진다.

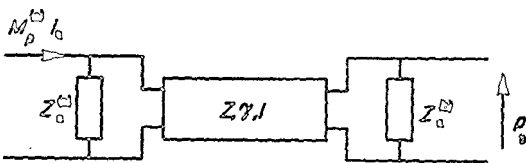


그림 5. 결합기 내에 평면파가 전달되는 경우 음향전달 임피던스를 계산하기 위한 등가회로

$$\frac{1}{Z_{ab}} = \frac{1}{Z} \left[\left(\frac{Z}{Z_a^{(a)}} + \frac{Z}{Z_a^{(b)}} \right) \cosh \gamma l_0 + \left(1 + \frac{Z}{Z_a^{(a)}} \cdot \frac{Z}{Z_a^{(b)}} \right) \sinh \gamma l_0 \right] \quad (10)$$

여기서 $Z = \rho c / S$ 이며 ρ 는 결합기 내부 기체의 밀도, c 는 음파의 속도, S 는 결합기의 단면적, $\gamma = \alpha + j\beta$ 는 전달계수(propagation coefficient), l_0 은 결합기의 길

이, 즉 두 마이크로폰 진동판 사이의 거리이다.

만약 $l_0 = V_{ab} / S$ 와 $l_0 = V_{ab} / S$ 로 표현할 때 $\beta(l_0 + l_0)$ 의 값이 작고 결합기 내에서 음향에너지 손실을 무시할 수 있다면 식(10)은 다음과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{Z_{ab}} \approx j \omega \frac{S l_{ab}}{k p_s} \cdot \frac{\sin(\beta l_{ab})}{\beta l_{ab}} = j \frac{S c}{k p_s} \sin(\beta l_{ab}) \quad (11)$$

여기서 $l_{ab} = l_0 + l_0 + l_0$ 이다.

V. 가역교정 장치 및 가역교정 방법

마이크로폰의 가역교정을 위한 장치의 개략도는 그림6에서 보는 것과 같다. 이 장치에서 기본적으로 측정되는 양은 III절에서도 언급하였듯이 수신용 마이크로폰의 개방회로 전압 U 와 발신용 마이크로폰에 가해지는 신호의 전류 i 이다.

발신용 마이크로폰에 흐르는 전류 i 는 발신용 마이크로폰과 직렬로 연결되어 있는 정밀 기준 전원에서 (C_{ref}) 양단의 전압 U_i 를 측정함으로써 알 수 있다. 한편 수신용 마이크로폰의 전압은 차동 전압계를 이용하여 정밀 기준 전원 양단의 전압과 비교함으로써 측정이 가능하다. 그런데 앞서도 언급하였듯이 음압 감도는 개방회로 전압에 대한 감도이므로 수신용 마이크로폰의 개방회로 전압을 측정하여야 한다. 이를 위해 그림 6에서 보듯이 수신용 마이크로폰의 출력단

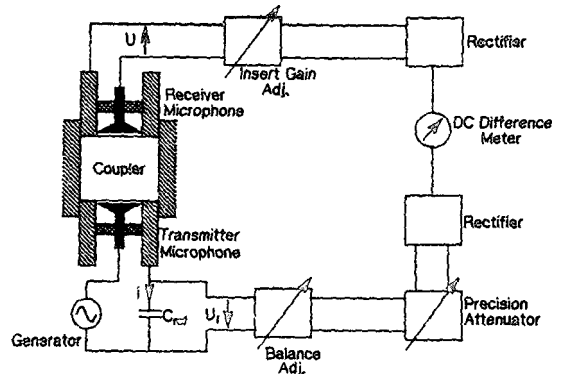


그림 6. 마이크로폰 가역 교정 장치의 개략도

에는 Insert Gain Amplifier를 달아 전압삽입기법(insert voltage technique)을 이용하여 개방회로 전압을 측정할 수 있도록 하였다(5-1절 참조).

발신용 마이크로폰 측에 연결된 정밀 감쇄기를 이용하여 차동 전압계에 가해지는 두 전압이 동일하도록 조절해 주면 감쇄된 값으로부터 dB로 주어지는 두 전압의 비를 구할 수 있다. 이와같이 세계의 마이크로폰을 차례로 짚어서 측정한 결과를 각각 B_{ab} , B_{bc} , B_{ac} 라고 하면 각 마이크로폰의 음압감도는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} M_{p^a} &= B_{ref} - 1 / 2(B_{ab} + B_{ac} - B_{bc}) + \Delta \\ M_{p^b} &= B_{ref} - 1 / 2(B_{ab} + B_{bc} - B_{ac}) + \Delta \\ M_{p^c} &= B_{ref} - 1 / 2(B_{bc} + B_{ac} - B_{ab}) + \Delta \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 B_{ab} 는 마이크로폰 a를 발신용으로 사용하고 마이크로폰 b를 수신용으로 사용하였을 때 얻은 전압의 비, B_{ref} 는 정밀 기준 컨덴서와 결합기에 의해 결정되는 값이며 Δ 는 열전도 보정과 모세관 보정 및 환경 조건에 따른 보정값이다.

5-1. 개방회로 전압의 측정

컨덴서 마이크로폰은 매우 큰 전기 임피던스를 갖고 있기 때문에 일반적인 방법으로 개방회로 전압을 측정할 수 없다. 이러한 이유로 컨덴서 마이크로폰의 개방회로 전압을 측정하기 위해서는 전압삽입기법을 이용하며 그 방법은 다음과 같다.

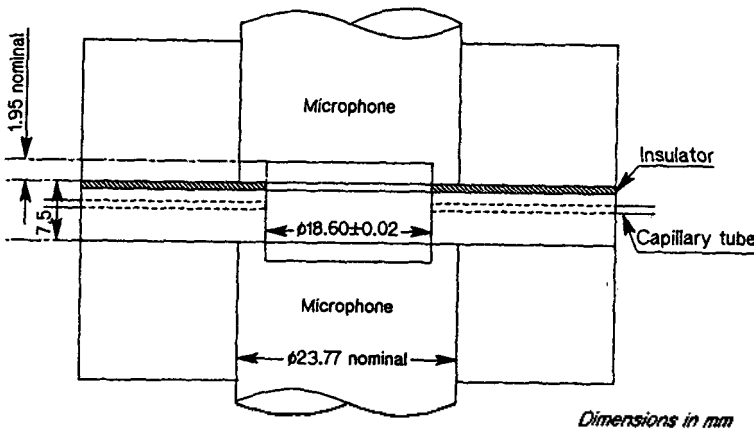
일정한 크기의 내부 임피던스와 개방회로 전압을

갖는 마이크로폰이 부하 임피던스와 연결되어 있다고 하자. 이 시스템에서 마이크로폰의 개방회로 전압을 측정하기 위해서는 부하 임피던스에 비해 작은 값을 갖는 임피던스를 마이크로폰과 직렬로 연결한 후 이 양단에 교정전압을 가해준다. 마이크로폰의 진동판에 일정한 크기를 갖는 음압과 이와 동일한 주파수를 갖는 교정전압을 교대로 가해주면서 부하 임피던스에 동일한 크기의 전압강하가 일어나도록 교정전압을 조절해 주면 이 교정전압의 크기가 바로 마이크로폰의 개방회로 전압과 같게 된다.⁽¹³⁾

5-2. 결합기

마이크로폰의 가역교정에 사용되는 결합기 내에서는 균일한 음압이 형성되어 마이크로폰의 진동판에 균일한 음압을 가해줄 수 있어야 한다. 그러나 반경방향의 파동운동에 의해 이상적인 균일 조건을 만족시키지 못하고 근사적으로만 이 조건을 만족 시키게 된다. 반경방향의 파동운동에 의한 영향을 최소화하기 위해서는 반경방향의 공진주파수를 가급적 높여 주어야 하며 이러한 조건을 만족시키기 위해서는 직경이 작은 결합기를 사용하는 것이 바람직하다.

일정한 크기의 결합기에서 반경방향의 공진주파수를 높이기 위한 방법중의 하나가 결합기 내부에 공기 대신 수소나 헬륨 기체를 주입시키는 것이다. 이 경우 수소 또는 헬륨 기체 내에서의 음파의 속도와 대기중에서의 음파의 속도 비만큼 공진주파수를 증가시킬 수 있다.



(a)

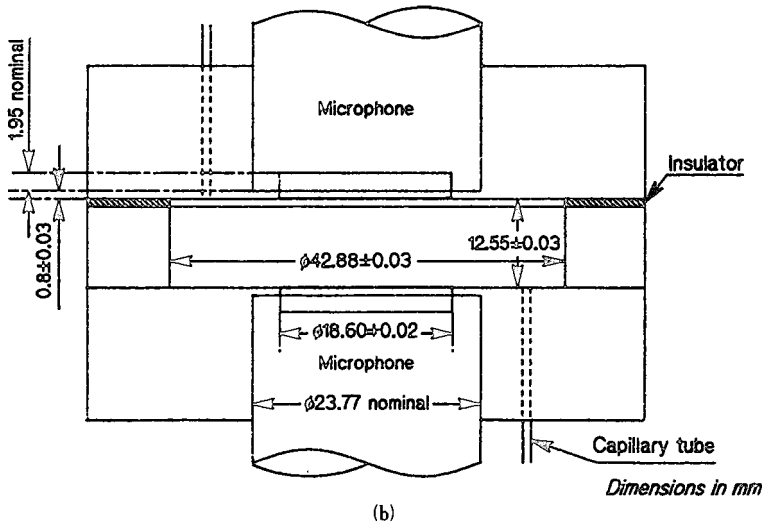


그림 7. 마이크로폰 음압교정용 결합기, (a) 3cc 결합기, (b) 20cc 결합기

일반적으로 가청주파수 영역에서 1인치 컨덴서 마이크로폰의 교정을 위해서는 두개의 결합기를 필요로 한다. 하나는 결합기의 공칭 체적이 20cc로서 저주파 교정에 이용되며 다른 하나는 3cc 결합기로 고주파 교정에 이용된다. 본 연구에 사용된 결합기의 부위별 치수는 그림 7에서 보는 것과 같으며 이는 IEC 327에서 권장하는 규격과 같다. 20cc 결합기는 공기를 이용할 경우 2.8kHz까지 교정이 가능하며 수소를 이용할 경우에는 파동운동 효과를 고려해 주면 10kHz까지 교정이 가능하다. 한편 3cc 결합기는 공기를 이용할 경우 10kHz까지 교정이 가능하며 수소를 이용하면 20kHz까지 교정이 가능하다. 따라서 이들 두 결합기를 이용하면 가청주파수의 모든 영역에서 마이크로폰의 음압교정이 가능하다.

5-3. 열전달 보정

제IV장에서 계산한 음향전달 임피던스는 결합기 내에서 단열조건을 가정한 경우이다. 그러나 저주파 영역에서는 등온조건이 지배적이며 결합기의 체적이 비열비만큼 증가하게 된다. 따라서 음향전달 임피던스 값에 이에 대한 보정을 해주어야 한다.

원통형 결합기의 반경을 a, 길이를 l이라 하고 결합기가 완전한 열전도체이며 일정한 온도에 있다고 하면 보정치는 다음과 같이 주어진다⁽⁴⁴⁻⁴⁷⁾.

$$\Delta_H = 10 \log_{10} \left| k - (k-1) \frac{32}{\pi^2} \sum_{m=1,3,5,\dots} \sum_{n=1,2,3,\dots} \frac{j\delta}{m^2 \xi_n^2 \left[\left(\frac{m\pi}{l} \right)^2 + \left(\frac{\xi_n}{a} \right)^2 + j\delta \right]} \right| \quad (13)$$

여기서 δ 는 $\omega \rho C_p / K$ 이며 C_p 는 등압비열, K는 기체의 열전도율, ξ_n 은 $J_0(\xi) = 0$ 의 해이다.

5-4. 모세관 보정

결합기는 일반적으로 내부와 외부를 연결시켜주는 가느다란 두개의 모세관을 갖고 있다. 모세관은 결합기의 내부 압력과 대기압을 같게 해주는 역할을 하며 필요에 따라서는 수소나 헬륨 기체를 결합기 내부에 공급해 주기 위해서도 사용된다.

결합기의 임피던스가 큰 저주파 영역에서는 두 모세관의 shunt 효과를 반드시 고려하여야 한다. 직경과 길이가 동일한 두 모세관이 평행으로 배치된 경우 이의 음향 임피던스는 다음과 같이 주어진다.

$$Z_c = \frac{4\pi\eta l}{(\pi r^2)^2} + j \frac{2\omega\rho l}{3\pi r^2} \quad (14)$$

여기서 l과 r은 각각 모세관의 길이와 반경이며 η 는 기체의 점성계수이다. 모세관에 의한 보정량을 데시벨로 나타내면 다음과 같다.

$$A_c = 10 \log_{10} \left| 1 + \frac{Z_{ab}}{Z_c} \right| \quad (15)$$

5-5. 마이크로폰 등가체적

제VI장의 음향전달 임피던스 계산식에서 마이크로폰의 등가체적은 일반적으로 매우 작기 때문에 무시될 수 있다. 그러나 두 마이크로폰의 등가체적 합이 결합기 체적의 0.4% 이상인 경우에는 마이크로폰의 등가체적을 음향전달 임피던스 계산식에 고려해 주어야 한다. 마이크로폰의 등가체적을 측정하는 방법은 여러 참고문헌에 소개되어 있으므로⁽¹⁸⁻²²⁾ 본 논문에서는 생략하기로 한다.

VI. 교정결과 및 논의

마이크로폰의 교정에 필요한 제반 물리상수가 표1에 주어져 있다. 이들 상수와 그림 7에 주어진 결합기의 치수를 이용하여 열전달 보정량과 모세관 보정량을 계산한 결과가 표2와 3에 주어져 있다. 모세관 보정량에서 모세관의 직경은 0.5mm, 길이는 10cm로 하였다.

본 연구에서는 한개의 1인치 표준 컨덴서 마이크로폰(B&K 4160; S/N: 873942)과 두개의 1인치 정밀 컨덴서 마이크로폰(B&K 4144; S/N 891288, B&K 4145; S/N: 89211)을 이용하여 가역교정을 수행하였다.

일반적으로 20cc 결합기는 2kHz까지의 교정에 사용되며 3cc 결합기는 1kHz부터 10kHz까지의 교정에 사용된다. 이중 서로 중첩되는 1kHz와 2kHz 사이의 교정값은 상호 비교하는데 이용되며 두 값에 약간의

표 1 마이크로폰의 교정에 필요한 물리상수 (at 20°C, 1 atm.)

상 수	공 기	수 소
음속 c (cm/s)	343.59×10^2	1309.5×10^2
밀도 ρ (g/cm ³)	1.205×10^{-3}	0.0837×10^{-3}
비열비 k	1.402	1.408
정압비열 C_p (cal/g deg)	0.240	3.40
열전도율 k (cal/cm s deg)	6.11×10^{-6}	4.44×10^{-6}
점성계수 η (g/s cm)	1.827×10^{-4}	8.04×10^{-4}

표 2 20cc 결합기의 열전달 보정량과 모세관 보정량 (dB)

주파수 (Hz)	공 기		수 소	
	열전달 보정량	모세관 보정량	열전달 보정량	모세관 보정량
500	0.080	-0.029	-	-
100	0.057	-0.027	-	-
200	0.040	-0.017	-	-
300	0.033	-0.010	-	-
500	0.025	-0.003	0.070	-0.007
700	0.021	0.000	0.059	-0.006
1000	0.018	0.002	0.049	-0.005
1500	0.014	0.002	0.040	-0.003
2000	0.013	0.000	0.034	-0.001
2500	0.011	-	0.031	0.000
3000	0.010	-	0.028	0.001
4000	-	-	0.024	0.002
5000	-	-	0.022	0.003
6000	-	-	0.020	0.000
7000	-	-	0.019	-
8000	-	-	0.017	-
9000	-	-	0.016	-
10000	-	-	0.016	-

차이가 있을 때에는 평균값을 취한다. 10kHz 이상에서는 3cc 결합기 내에 수소 기체를 주입시켜 교정한다.

마이크로폰 가역교정 결과의 정밀도 (accuracy)는 결합기 치수와 전압측정의 정밀도뿐만 아니라 교정에 사용되는 보조기구의 정밀도에도 좌우된다. 따라서 교정결과의 정밀도를 높이기 위해서는 교정에 필요한 각 사항들의 정밀한 측정이 요구되며 이에 대한 요구조건은 표4에 주어져 있다.

표 5는 본 연구에서 사용한 세개의 마이크로폰에 대한 교정결과를 보여준다. 표5에는 10kHz까지의 음압감도만 주어져 있는데 이는 고주파 영역의 교정에 필요한 수소 기체 주입장치가 미비되어 있어 10kHz 이상에서의 교정을 수행하지 못하였기 때문이다.

표4에 제시한 각 사항들의 정밀도가 모두 충족되고 마이크로폰과 결합기를 세심한 주의를 기울여 결합하였을 경우 가역교정에 의한 음압감도의 정밀도는 저주파와 중간 주파수 영역에서 0.05dB가 되며 10kHz에서는 0.1dB로 낮아진다. 이러한 정밀도는 현재 가역교정

표 3 3cc결합기의 열전달 보정량과 모세관 보정량 (dB)

주파수 (Hz)	공 기		수 소	
	열전달 보정량	모세관 보정량	열전달 보정량	모세관 보정량
1000	0.028	0.005	0.077	0.004
1500	0.023	0.002	0.063	0.004
2000	0.020	0.000	0.054	0.004
2500	0.018	-	0.048	0.004
3000	0.016	-	0.044	0.005
4000	0.014	-	0.038	0.004
5000	0.012	-	0.034	0.003
6000	0.011	-	0.032	0.001
7000	0.010	-	0.029	0.000
8000	0.010	-	0.027	-
9000	0.009	-	0.026	-
10000	0.009	-	0.024	-
11000	-	-	0.023	-
12000	-	-	0.022	-
13000	-	-	0.021	-
14000	-	-	0.021	-
15000	-	-	0.020	-
16000	-	-	0.019	-
17000	-	-	0.019	-
18000	-	-	0.018	-
19000	-	-	0.018	-
20000	-	-	0.017	-

표 4 정밀 마이크로폰 교정을 위한 조건

측 정 사 항	정 밀 도
분극전압	<0.05%
대 기 압	<0.1%
주 파 수	<0.1%
전기전달 임피던스	<0.1%
열전달 보정량	<0.1%
모세관 보정량	<0.1%
결합기 단면적	<0.2%
결합기의 유효길이	<0.3%
결합기의 유효체적	<0.3%
결합기와 마이크로폰의 온도	< 1°C
음향손실 β_{lab}	< 2

표 5 마이크로폰의 음압감도

주파수 (Hz)	음 압 감 도 (dB re 1V/Pa)		
	4160	4144	4145
50	-26.44	-26.82	-25.50
100	-26.47	-26.86	-25.59
200	-26.52	-26.90	-25.68
300	-26.53	-26.92	-25.72
500	-26.53	-26.92	-25.79
700	-26.51	-26.91	-25.91
1000	-26.51	-26.90	-26.10
1500	-26.45	-26.89	-26.46
1000	-26.35	-26.80	-26.89
1500	-26.24	-26.70	-27.40
3000	-26.14	-26.61	-27.95
4000	-25.87	-26.31	-29.06
5000	-25.70	-26.21	-30.15
6000	-25.75	-26.29	-31.17
7000	-26.19	-26.11	-31.48
8000	-27.15	-27.26	-32.55
9000	-28.55	-28.87	-33.52
10000	-30.20	-30.31	-34.03

방법으로 얻을 수 있는 최고의 정밀도이며 미국의 NIST(National Institute of Standards and Technology, 구NBS), 독일의 PTB(Physikalisch-Technische Bundesanstalt), 일본의 ETL(Electrotechnical Laboratory) 등과 같은 표준기관에서도 동일한 수준의 마이크로폰 교정정밀도를 유지하고 있다.

현재 본 연구소에서는 10kHz 이상의 마이크로폰 교정을 위해서는 가역교정에 비해 정밀도가 낮은 Electrostatic Actuator 방법을 이용하고 있으나 고주파에서의 정밀교정을 위해 수소 기체 주입장치를 설치할 계획이다.

Ⅷ. 결 론

가역원리를 이용한 표준 컨덴서 마이크로폰의 음압 교정은 마이크로폰의 교정에 있어 가장 정밀한 방법이다. 가역교정 방법은 미국, 독일, 일본 등의 표준기관에서도 사용되는 국제적인 방법으로 전기적인 양과 길이

또는 체적만을 측정함으로써 마이크로폰의 교정이 이루어 진다.

본 논문에서는 마이크로폰의 가역교정 중에서도 간단한 음압교정 방법에 대해 기술하였으며 제반 보정량과 정밀도에 대해 고찰하였다. 한국표준연구소 음향진동연구실에서는 현재 국제수준의 마이크로폰 교정 정밀도를 유지하고 있으나 정밀도가 높은 가역교정의 주파수 영역은 10kHz로 제한되어 있으며 이 이상의 높은 주파수 영역에서는 정밀도가 낮은 교정방법을 이용하고 있다. 10kHz 이상의 주파수 영역에 대한 가역교정을 위해 결합기 내에 수소 기체를 주입할 수 있는 장치를 곧 마련할 계획으로 있어 이 장치만 준비되면 가청주파수의 전 영역에서 정밀도가 높은 가역교정이 이루어질 것이다.

참 고 문 헌

1. L.J. Sivian, "Absolute Calibration of Condenser Microphones," Bell Syst. Tech. J., Vol.X, pp.96, (1931)
2. S.Ballantine, "Technique of Microphone Calibration," J.Acoust.Soc.Am, Vol.3, pp.319-360, (1932)
3. W.R.McLean, "Absolute Measurement of Sound without a Primary Standard," J.Acoust. Soc.Am., Vol. 12, pp. 140-146, (1940)
4. R.K.Cook, "Absolute Pressure Calibration of Microphones," J, Res. Nat. Bur. Std., Vol.25, pp.489-505, (1940)
5. A.L. Dimattia and F.M. Wiener, "On the Absolute Pressure Calibration of Condenser Microphones by the Reciprocity Method," J.Acoust. Soc. Am., Vol. 18, pp. 341-344, (1946)
6. Interantional Electrotechnical Commission IEC 327-19 71, "Precision Method for Pressure Calibration of One-Inch Standard Condenser Microphones by the Reciprocity Technique"
7. International Electrotechnical Comission IEC 402-197 2, "Simplified Method for Pressure Calibration of One-Inch Standard Condenser Microphones by the Reciprocity Technique"
8. International Electrotechnical Commission IEC 486-19 74, "Precision Method for Free-Field Calibration of One-Inch Standard Condenser Microphones by the Reciprocity Technique"
9. American National Standard ANSI S1.10-1966(R1976), "Method for Calibration of Microphones"
10. W. Schottky, "The Concept of Reciprocity in Acoustics and Electro-Acoustics," Z. Phys., 36, pp. 689-736, (1 926)
11. S.Ballantine, "Reciprocity in Electromagnetic, Mechanical, Acoustical, and Interconnected Systems," Proc. Inst. Radio Eng., 17, pp.929-951, (1929)
12. E.McMillan, "Violation of the Reciprocity Theorem in Linear, Pasive Electromechanical Systems," J. Acoust. Soc. Am., 18, pp.344-347, (1946)
13. L.L. Beranek, Acoustic Measurements, Wiley, New York (1949); reprinted by Acoustical Society of America (1988), Chap. 13
14. F.B. Daniels, "Acoustical Impedance of Enclosures," J.Acoust. Soc. Am., 19, pp.569-571, (1947)
15. F.Biagi and R.K.Cook, "Acoustic Impedance of a Right Circular cylindrical Enclosure," J. Acoust. Soc.Am., 26, pp.506-509, (1954)
16. H. Gerber, "Acoustic Properties of Fluid-Filled Chambers at Infrasonic Frequencies in the Absence of Convection," J.Acoust. Soc.Am., 36, pp. 1427-1434, (1964)
17. H.Gerber, "Calculation of Dynamic-Pressure Changes in the Presence of Free Convection," J.Acoust. Soc. Am., 36, pp.1435-1441, (1964)
18. R.K.Cook, "Laboratory Standard Microphones," Acoustica, 4, pp.101-103, (1954)
19. B.D.Simmons and F.Biagi, "Pressure Calibration of Condenser Microphones above 10,000cps," J.Acoust. Soc. Am., 26, pp.693-695, (1954)
20. T.F.W. Embleton and I.R. Dagg, "Accurate Coupler Pressure Calibration of Condenser Microphones at Middle Frequencies," J.Acoust. Soc. Am., 32, pp. 32 0-326, (1960)
21. M.D. Bukhard, E.L.R. Corliss, W.Koidan, and F. Biagi, "Calibration for Carrier Operated Microphones and Other Reversible Transducers," J.Acoust. Soc.Am., 32, pp. 501-504, (1960)
22. W. Koidan, "Microphone Diaphragm Null Method for Sound Pressure Measurement," J.Acoust. Soc.Am., 32, pp.505-507, (1960)

▲서 상 준 : 제 8 권 1 호 참조

▲조 문 재 : 제 8 권 1 호 참조