음향측정분야의 국가표준체계와 컨덴서 마이크로폰의 정밀가역교정

*서 상준, 조 문재, 김 연수

National Standard System in Acoustic Measurements and Precision Reciprocity Calibration of Condenser Microphone

*Sang Joon Suh, Moon Jae Jho, Youn Soo Kim

I. 서론

정밀하고도 정확한 측정을 하기 위해서는 측정의 기준이 되는 측정표준이 있어야 하며 이를 국가적 차원에서 다루고 있는 것이 국가측정표준이다. 국가측정표준이란 한 국가의 모든 측정행위의 기준이 되는 것으로서 가장 정확한 측정원기 또는 측정방법 등을 통칭하는 것으로서 국가 안에서 행해지는 모든 측정은 국가측정원기에 소급되어야 한다.

미국, 일본, 독일, 영국 등 선진각국은 일찍부터 정확한 측정이 과학기술의 발달은 물론, 생산활동과 교역통상등에 있어 매우 중요하다는 것을 인식하여 이미 100여년 전부터 국가적인 차원에서의 표준확립을 위해 노력하여 왔다. 그러나 우리나라는 1975년에 표준연구소가 설립되어 국가측정표준의 새로운 장을 열게 되었으며 각종 측정분야의 정밀정확도를 선진국수준으로 향상시키기 위해 선도적 역할을 담당하여 왔다.

그중의 하나가 음향측정분야의 국가표준이다. 음향측정분야의 국가표준은 측정원기가 아닌 측정원리를 표준으로 정하고 있으며 이것이 바로 마이크로폰의 정밀 가역교정이다.

본 논문에서는 음향측정분야의 국가표준을 중심으로 위로는 기본측정단위로의 소급성과 아래로는 산업체에 보급되는 음향표준체계를 간단하게 소개하고 현재 국제표준으로 정하고 있는 1인치 컨덴서 마이크로폰의 정밀가역교정원리와 방법에 대해 기술하기로 한다.

II. 음향측정분야의 국가표준체계

소리, 즉 음파를 측정하기 위해서는 마이크로폰을 이용한다. 마이크로폰이란 음향 에너지를 전기 에너지로 바꾸어 주는 변환기(transducer)로서 정밀한 음향측정을 위해서는 정밀 마이크로폰을 이용하여야 하며 음향 에너지가 전기 에너지로 변환되는 비, 즉 감도(sensitivity)를 정확하게 알아야 한다.

현재까지 사용되고 있는 각종 마이크로폰중에서 가장 정밀도가 높고 안정성이 우수하다고 알려져 있는 것이 컨덴서 마이크로폰으로서 정밀 음향계측에 사용되는 것은 물론, 각국의 표준기관에서 보유하고 있는 표준 마이크로폰도 모두 컨덴서 마이크로폰이다. 표준 컨덴서 마이크로폰은 주기적인 교정을 거쳐 그 감도를 항상 정밀하게 추적하고 있으며 국가간의 비교교정을 통해 국제수준의 정밀도를 유지하고 있다.

마이크로폰의 교정이라 함은 마이크로폰의 감도를 결정해주는 것이다. 마이크로폰의 감도를 좀더 엄밀하게 정의하면 다음과 같다.

$$\text{감도(Sensitivity)} = \frac{\text{마이크로폰의 출력전압}}{\text{진동판에 가해진 음압}} \quad (1)$$

이식에서 보듯이 마이크로폰의 감도를 정확하게 결정하기 위해서는 마이크로폰의 진동판에 가해지는 음압과 이때 출력되는 전압을 정밀하게 측정하여야 한다. 그러나 일반적으로 마이크로폰의 출력 전기신호는 정밀하게 측정할 수 있으나 마이크로폰에 가해지는 음압의 절대값을 정확하게 결정하기란 쉽지 않다.

이와같은 이유로 마이크로폰의 감도를 정밀하게 결정하기 위해서는 음압의 절대값을 측정하지 않고서도 전기적인 양과 길이 또는 부피만 정밀하게 측정함으써 감도를 결정할 수 있는 가역교정방법(1-3)을 이용한

한국표준연구소 음향진동연구실

다. 현재 마이크로폰의 교정에 있어 가역교정방법이 절대교정방법으로 사용되고 있으며 국제표준으로 채택되어 있다(4-6).

본 연구소에서도 가역교정방법을 이용하여 1인치 표준 컨덴서 마이크로폰을 주기적으로 교정하고 있으며 이를 기준으로 그림 1과 같은 표준체계를 구성하고있

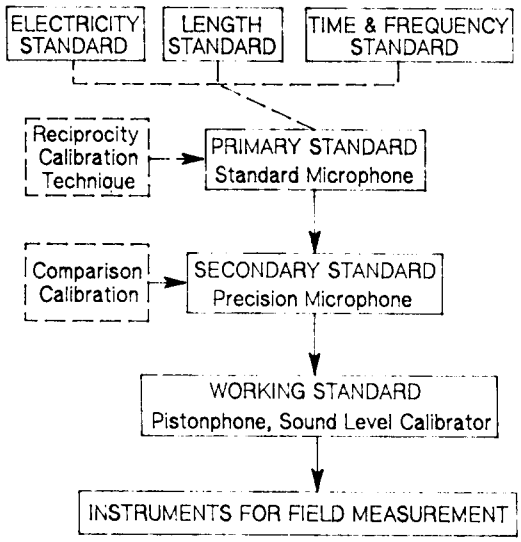

그림 1. 음향측정분야의 국가표준체계.

다. 이 그림에서 보듯이 가역교정에 의한 마이크로폰의 감도교정은 위로는 길이, 시간 및 주파수, 전기분야의 국가표준으로의 소급성을 유지하고 있으며 아래로는 몇단계의 중간과정을 거쳐 실제 현장에서 사용되고 있는 음향계측기기를 교정할 수 있는 체계를 갖추고 있다.

일반적으로 가역교정은 많은 시간과 노력을 요하기 때문에 2차 표준으로 사용되는 정밀 마이크로폰은 표준 마이크로폰과 비교교정을 통해 비교적 간단하게 감도를 결정한다. 비교교정된 2차 표준 마이크로폰으로부터 기준기인 pistonphone이나 sound level calibrator를 교정한 후 이를 이용하여 현장에서 사용되는 소음계 또는 기타 음향계측장비를 교정하게 된다.

이와같이 모든 음향계측장비는 상급 표준과의 주기적인 교정을 통해 측정 정밀도를 향상시켜야 하며 이렇게 함으로써 측정치의 신뢰도를 높일 수 있다. 또한 상급표준과의 주기적인 교정을 수행함으로써 국가표준으로의 소급성을 유지할 수 있으며 더 나아가 궁극적으로는 국제표준과 일치시킬 수 있다.

III. 마이크로폰의 가역교정 원리

전기음향 가역원리(7,8)를 이용하여 마이크로폰을 교정하는데는 크게 자유음장교정(free-field calibration)과 음압교정(pressure calibration)이 있다. 자유음장교정은 무향실(anechoic chamber)과 같은 특수한 시설을 필요로 하지만 음압교정은 두 마이크로폰을 연결시켜주는 결합기(coupler)만 있으면 때와 장소에 제약을 받지 않기 때문에 여기서는 음압교정에 국한하여 기술하기로 한다.

마이크로폰의 가역교정을 위해서는 세개의 마이크로폰(이중 두개는 가역적이어야 함)을 이용하는 방법과 두개의 마이크로폰(이중 하나는 가역적이어야 함)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 발신

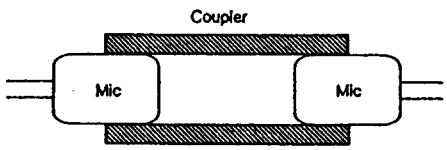

그림 2. 결합기로 결합된 두 마이크로폰.

용으로 사용하고 다른 하나를 수신용으로 사용하여 수신용 마이크로폰의 개방회로 전압(open circuit voltage)과 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 값으로 부터 각 마이크로폰의 음압감도를 결정할 수 있다.

이에대한 내용을 수식적으로 기술하면 다음과 같다. 음압감도 $M_p^{(a)}$와 $M_p^{(b)}$를 갖는 두개의 마이크로폰 a와 b

가 음향전달 임피던스 Z_{ab}를 갖는 결합기에 의해 결합되어 있을 때 마이크로폰 a에 전류 i_a를 가해주면 마이크로폰 b의 개방회로 전압 U_b는 다음과 같이 주어진다(9).

$$U_b = M_p^{(b)} p_b = M_p^{(a)} M_p^{(b)} Z_{ab} i_a \qquad (2)$$

따라서 이 식으로 부터 두 마이크로폰의 음압감도의 곱은 다음과 같이 주어진다.

$$M_p^{(a)} M_p^{(b)} = (U_b/i_a)(1/Z_{ab}) \qquad (3)$$

이 식에서 알 수 있듯이 발신용 마이크로폰에 가해지는 전류 및 수신용 마이크로폰의 개방회로 전압과 결합 시스템의 음향전달 임피던스만 알면 두 마이크로폰의 음압감도의 곱을 알 수 있다.

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

$$10\log_{10} M_p^{(a)} = 10\log_{10}(R_{ab} R_{ca}/R_{bc}) + 10\log_{10}\left|Z_{bc}/Z_{ab} Z_{ca}\right| + D \qquad (4)$$

여기서 D는 열전달 효과, 모세관에 의한 영향, 마이크로폰의 동가체적에 따른 보정량이다(9).

IV. 가역교정 장치 및 가역교정 방법

마이크로폰의 가역교정을 위한 장치의 개략도는 그림 3에서 보는 것과 같다. 이 장치에서 기본적으로 측

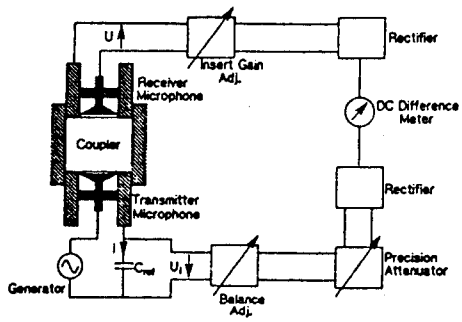

그림 3. 마이크로폰 가역교정장치의 개략도.

정되는 양은 앞에서도 언급하였듯이 수신용 마이크로폰의 개방회로 전압과 발신용 마이크로폰에 가해지는 전류이다.

발신용 마이크로폰에 가해지는 전류는 발신용 마이크로폰과 직렬로 연결되어 있는 정밀 기준컨덴서(C_{ref}) 양단의 전압을 측정함으로써 결정할 수 있다. 한편 수신용 마이크로폰의 전압은 차동 전압계를 이용하여 정밀 기준컨덴서 양단의 전압과 비교함으로써 측정이 가능하다. 그런데 마이크로폰의 음압감도는 개방회로 전압에 대한 감도이므로 수신용 마이크로폰의 개방회로 전압을 측정하여야 한다. 이를 위해 그림 3에서 보듯이 수신용 마이크로폰의 출력단에는 Insert Gain Amp를 달아 전압 삽입 기법(insert voltage technique)을 이용하여 개방회로 전압을 측정할 수 있도록 하였다.

발신용 마이크로폰 측에 연결된 정밀 감쇠기를 이용하여 차동전압계에 가해지는 두 전압이 동일하도록 조절해주면 감쇠된 값으로 부터 dB로 주어지는 두 전압의 비를 구할 수 있다. 이와같이 세개의 마이크로폰을 차례로 짝지어 측정한 결과를 각각 B_{ab}, B_{bc}, B_{ac}라고 하면 각 마이크로폰의 음압감도는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} M_p^{(a)} &= B_{ref} - 1/2(B_{ab} + B_{ac} - B_{bc}) + D \\ M_p^{(b)} &= B_{ref} - 1/2(B_{ab} + B_{bc} - B_{ac}) + D \\ M_p^{(c)} &= B_{ref} - 1/2(B_{bc} + B_{ac} - B_{ab}) + D \end{aligned} \qquad (5)$$

여기서 B_{ab}는 마이크로폰 a를 발신용으로 사용하고 마이크로폰 b를 수신용으로 사용하였을 때 측정된 전압의 비, B_{ref}는 정밀 컨덴서와 결합기에 의해 결정되는 값이다.

마이크로폰의 가역교정시 마이크로폰의 진동판에는 균일한 음압이 가해져야 한다. 그러나 결합기 내에서 반경방향(radial direction)의 파동운동에 의해 이상적인 균일조건을 만족시키지 못하고 근사적으로만 이 조건을 만족시키게 된다. 반경방향의 파동운동에 의한 영향을 최소화하기 위해서는 반경방향의 공진주파수를 가급적 높여주어야 하며 이러한 조건을 만족시키기 위해서는 직경이 작은 결합기를 사용하는 것이 바람직하다.

일정한 크기의 결합기에서 반경방향의 공진주파수를 높이기 위한 방법중의 하나가 결합기 내부에 공기대신 음속이 큰 수소나 헬륨 기체를 주입시키는 것이다. 이 경우 수소 또는 헬륨 기체 내에서의 음파의 속도와 대기중에서의 음파의 속도 비만큼 공진주파수를 증가시

킬 수 있다.

일반적으로 가청주파수 영역에서 1인치 컨덴서 마이크로폰의 교정을 위해서는 두개의 결합기를 필요로 한다. 하나는 결합기의 공칭체적이 20cc로서 저주파 교정에 이용되며 다른 하나는 3cc 결합기로 고주파 교정에 이용된다. IEC에서 권장하는 결합기의 표준규격은 그림 4에서 보는 것과 같다. 20cc결합기는 공기를 이

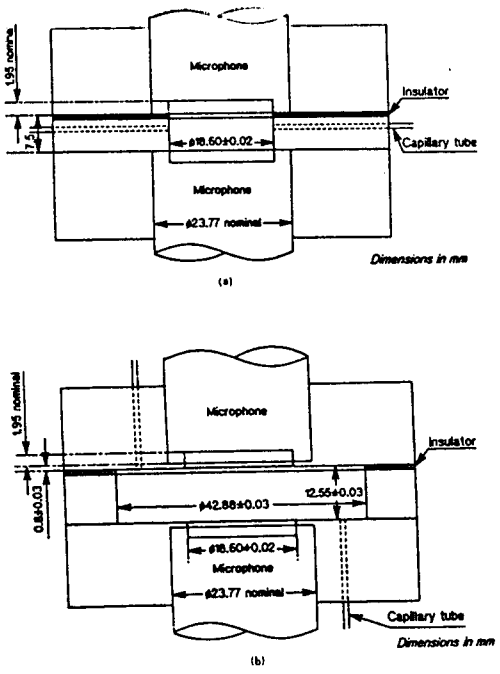

그림 4. 음압교정용 결합기, (a) 3cc, (b) 20cc.

용할 경우 2.8kHz까지 교정이 가능하며 수소를 이용할 경우에는 10kHz까지 교정이 가능하다. 한편 3cc 결합기는 공기를 이용할 경우 10kHz 까지 교정이 가능하며 수소를 이용하면 20kHz까지 교정이 가능하다. 따라서 이들 두 결합기를 이용하면 가청주파수의 모든 영역에서 마이크로폰의 음압교정이 가능하다.

V. 결론

가역원리를 이용한 표준 컨덴서 마이크로폰의 음압교정은 마이크로폰의 교정에 있어 가장 정밀한 방법이다. 가역교정 방법은 미국의 NIST(National Institute of Standards and Technology), 독일의 PTB(Physikalisch-Technische Bundesanstalt) 일본의 ETL(Electrotechnical Laboratory)등의 표준기관에서 사용되는 국제표준으로 전기적인 양과 길이 또는 체적만을 측정함으로써 마이크로폰의 교정이 이루어 진다.

마이크로폰 가역교정결과의 정밀도는 결합기 치수와 전압측정의 정밀도 뿐만 아니라 교정에 사용되는 보조기기의 정밀도에도 좌우된다. 따라서 교정결과의 정밀도를 높이기 위해서는 교정에 필요한 각 사항들의 정밀한 측정이 요구된다. 각 사항들의 정밀도가 모두 충족되고 마이크로폰과 결합기를 세심한 주의를 기울여 결합하였을 경우 가역교정에 의한 음압감도의 정밀도는 저주파와 중간주파수영역에서 0.05dB가 되며 10kHz 이상에서는 0.1dB 정도로서 현재 가역교정방법으로 얻을 수 있는 최고의 정밀도이다.

참고문헌

1. W.R.McLean, J.Acoust.Soc.Am., 12, p.140, 1940
2. R.K.Cook, J.Res.Nat.Bur.Std., 25, p.489, 1940
3. A.L.Dimattia and F.M.Wiener, J.Acoust.Soc.Am., 18, p.341, 1946
4. International Electrotechnical Commission IEC 327-1971
5. International Electrotechnical Commission IEC 486-1974
6. American National Standard ANSI S1.10-1966(R1976)
7. W.Schottky, Z.Phys., 36, p.689, 1926
8. S.Ballantine, Proc.Inst.Radio Eng., 17, p.929, 1929
9. 서상준,조문재, 한국음향학회지, 8, p.23, 1989