

음향교정기의 아시아·태평양 지역 국제비교 결과

APMP (Asia Pacific Metrology Programme) Regional Intercomparison Results of Acoustic Calibrators

서 상 준*, 서 재 갑*, 조 문 재*
(Sang-Joon Suh*, Jae-Gap Suh*, Moon-Jae Jho*)

* 한국표준과학연구원 물리표준부 음향진동그룹

(접수일자: 2003년 4월 10일; 수정일자: 2003년 6월 9일; 채택일자: 2003년 6월 20일)

본 논문에서는 아시아·태평양 지역에서 실시한 음향교정기의 국제비교 결과를 검토, 분석하였다. 국제비교에 사용된 음향교정기는 음압레벨교정기와 피스톤폰이었으며, 출력음압레벨을 측정하기 위해 사용된 마이크로폰은 1" 및 1/2" 표준마이크로폰 (LS1P, LS2P)과 1" 및 1/2" 기준 마이크로폰 (WS1P/F, WS2P/F)이다. 표준 마이크로폰을 이용하여 측정한 결과는 만족스러웠으나 기준 마이크로폰을 사용하여 측정한 결과는 E_n 값이 ± 1.0 이내에는 들었으나 상대적으로 큰 편차를 보였다. 이러한 결과는 기준 마이크로폰의 음압감도레벨의 부정확한 교정으로 나타났다. 새로이 제정된 기준 마이크로폰의 비교교정에 따라 정밀 교정한 값을 사용한 결과 외국 표준기관들이 측정한 출력음압레벨과 유사한 값을 얻을 수 있었다.

핵심용어: 음향 교정기, 핵심측정표준 국제비교, 국가측정표준, 음압레벨교정기, 피스톤폰

투고분야: 전기음향 분야 (3.1)

The results of the APMP (Asia Pacific Metrology Programme) regional intercomparison of acoustic calibrators were reviewed and analyzed. The artefacts used in intercomparison are a sound level calibrator and a pistonphone. The microphones used to measure the output pressure level are 1" and 1/2" standard microphones (LS1P, LS2P) as well as 1" and 1/2" reference microphones (WS1P/F, WS2P/F). The results obtained using standard microphones are satisfactory, but those obtained by the reference microphones, even though E_n values are within ± 1.0 , showed great deviations. Such results had come from the inaccurate calibration of reference microphones. By using the correct calibration results which were obtained by the recently established international standards, the new results were very similar to those of the foreign standard institutes.

Keywords: Acoustic calibrator, Key comparison, National measurements standards, Sound level calibrator, Pistonphone

ASK subject classification: Electro-acoustics (3.1)

I. 서론

측정표준이라 함은 산업 및 과학기술 분야에서 물상상의 양에 대하여 그 측정단위 또는 특정량의 값을 정의, 표시, 보존 및 재현하기 위한 기준으로 사용되는 물적척도, 측정기기, 표준물질, 측정방법 또는 측정시스템을 말한다. 또한 국가측정표준 (national measurement standards) 이란 관련된 양의 다른 표준들에 대한 값을 부여하기 위한 기준으로서 국가적으로 공인된 측정표준을 말한다.

이러한 국가측정표준은 국제적으로 공인된 국제측

정표준과도 동등성을 가져야 한다. 국가측정표준의 정확도에 신뢰성을 부여하고 교정, 측정 및 분석방법이 올바르게 수행되는지에 대한 객관적 평가를 하기 위함은 물론 국제측정표준과의 동등성을 유지하기 위해서는 국제비교에 참여하여 그 결과를 비교평가하는 방법이 흔히 사용된다. 실제로 기본단위의 측정표준은 오래 전부터 국제도량형위원회 (CIPM), 국제도량형국 (BIPM) 및 지역측정과학협력기구 (Regional Metrology Organization: RMO) 가 주관하는 핵심측정표준 국제비교 (Key Comparison: KC)에 참여하여 국가측정표준에 대한 국제적 동등성을 객관적으로 확인하여 왔다.

그러나 기본단위 이외의 측정표준에 대해서는 국제비교가 거의 이루어지지 않고 있었으며, 필요한 경우 몇몇

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

국가측정표준기관들 사이에 상호비교를 통해 신뢰성을 확보하여 왔다. 음향분야도 예외는 아니어서 그 동안 표준 마이크로폰 음압감도를 일본과의 상호비교를 통해 신뢰성을 유지하여 왔으나 이 역시 활발하게 이루어지지 않았다.

그러던 중, 1996년에 아시아·태평양 측정학 프로그램 (APMP: Asia Pacific Metrology Programme)이 주관이 되어 음향교정기 (acoustic calibrator)에 대한 국제비교 (Project Number: APMP-IC-2-96)를 처음으로 실시하게 되었다. 음향분야의 측정표준인 표준 마이크로폰의 감도에 대한 국제비교를 실시하지 못한 이유는 그 당시만 해도 아시아·태평양 지역에서 표준 마이크로폰 감도의 가역교정을 실시할 수 있는 국가가 극히 제한적이었기 때문이었다.

음향교정기에 대한 아시아·태평양 지역 국제비교는 1997년 11월부터 1999년 1월까지 실시되었으며, 국제비교의 대상은 피스톤폰 (pistonphone)과 음압레벨교정기 (sound level calibrator)였다. 국제비교의 내용은 상기 대상기기의 출력음압레벨을 표준 마이크로폰 (LSIP: Laboratory Standard 1" Pressure Type, LS2P: Laboratory Standard 1/2" Pressure Type)[1]과 기준 마이크로폰 (WSIP/F: Working Standard 1" Pressure/Free-field Type, WS2P/F: Working Standard 1/2" Pressure/Free-field Type)[2]을 사용하여 교정하는 것이다. 본 국제비교에 참여한 국가측정표준기관은 7개 기관이었으며, 호주의 NML (National Measurement Laboratory)이 선도기관 (pilot lab.)이었다. 한국표준과학연구원은 1998년 5월에 음향교정기를 인수받아 교정을 실시하였다.

음향교정기에 대한 아시아·태평양 지역 국제비교의 최종보고서는 2000년 11월에 발표되었다. 한국표준과학연구원의 비교교정 결과는 En 값이 -0.12 에서 0.92 사이로서 비교적 만족할 만한 결과를 얻었으며, 새로운 교정 시스템을 적용하여 교정한 감도값을 적용한 결과 좀 더 향상된 결과를 얻을 수 있었다.

II. 아시아·태평양 지역 음향교정기 국제비교

2.1. 음향교정기

피스톤폰: 많은 국가에서 오래 전부터 음향분야의 기준으로 사용하고 있는 피스톤폰 (B&K 4228)을 선정하였다. 피스톤폰은 사용하는 마이크로폰의 부하체적 (volume loading)에 따라 공동 (cavity)의 전체 체적이 변하므로 출력음압레벨이 변할 수 있다[3]. 피스톤폰은 공칭 출력음압레벨이 250 Hz에서 124 dB이다.

음압레벨교정기: 음향계측장비를 사용하기 전에 장비의 상태를 점검하거나 교정하기 위해 사용하는 음압레벨 교정기 (B&K 4231)를 선정하였다. 일반적으로 음압레벨 교정기는 마이크로폰의 특성에 비교적 둔감하다. 이 장비는 1 kHz에서 94 dB과 124 dB을 출력할 수 있는 절환 스위치가 있으나 본 국제비교에서는 94 dB만을 선택하였다. 본 국제비교를 위해 출력음압레벨을 약간 하향 조정하였다.

2.2. 참여기관

당초 8개 기관이 참여하기로 하였으나 한 기관이 기구 개편으로 참여를 포기하였다. 음향교정기에 대한 아시아·태평양 지역 국제비교에 참여한 7개 기관과 각 기관의 교정 시기는 표 1에서 보는 것과 같다.

2.3. 측정 및 보정

음향교정기 국제비교의 주된 목적은 피스톤폰과 음압레벨교정기의 출력음압레벨을 측정하는 것이다. 이 외에도 전체 고조파 왜음 (total harmonic distortion)과 측정 결과의 확장 불확도 (expanded uncertainty)[4]를 산출하여 제출하도록 하고 있다.

음향교정기의 국제규격인 IEC 60942 (1988)[5]에 의하면 기준 환경조건을 표 2와 같이 규정하고 있다.

표 1. 음향교정기 APMP 국제비교의 참여기관 및 일정

Table 1. Participants and schedule of APMP intercomparison for sound calibrators.

Country	Participant	Calibration Date	Comparison Date	Send Results to Coordinator
CMS/ITRI	Taiwan	15 Dec. 1997	24 Dec. 1997	12 Jan. 1998
ETL	Japan	19 Jan. 1998	2 Feb. 1998	16 Feb. 1998
NPL	India	23 Feb. 1998	9 Mar. 1998	30 Mar. 1998
CSIRO	Australia	6 Apr. 1998	20 Apr. 1998	
KRISS	Korea	11 May 1998	25 May 1998	8 Jun. 1998
SIRIM	Malaysia	15 Jun. 1998	29 Jun. 1998	13 Jul. 1998
TISTR	Thailand	24 Aug. 1998	7 Sep. 1998	28 Sep. 1998
CSIRO	Australia	5 Oct. 1998	19 Oct. 1998	

표 2. 기준 환경조건

Table 2. Reference environmental conditions.

Environment	Reference Value
Pressure	101.325 kPa
Temperature	20°C
Relative Humidity	65%

피스톤폰의 출력음압레벨은 대기압에 민감하기 때문 이 참여기관들은 다음 식으로 주어지는 보정량 Δ_P 를 사용하여 기준 대기압 (101,325 kPa)에서의 출력음압레벨로 환산하여야 한다.

$$\Delta_P = 20 \log_{10} \left(\frac{P_{amb}}{101.325} \right) \quad (1)$$

이거서 P_{amb} 는 측정 당시의 대기압 (kPa)이다.

피스톤폰과 음압레벨교정기의 출력음압레벨 역시 기준환경조건에서의 값으로 환산하여야 하는데 제조사 (I&K)가 준 보정인자는 표 3에 주어져 있다.

표 3. 대기압, 온도 및 습도의 보정량

Table 3. Corrections for ambient pressure, temperature and humidity.

Source	Pressure Correction	Temperature Coefficient, dB/°C	Humidity Coefficient, dB/%RH
B&K 4228 Pistonphone	Δ_P in Eq. (1)	-0.0005 (estimated)	-0.0001 (at reference)
B&K 4231 Calibrator	8×10^{-4} dB/kPa	± 0.0015 (indeterminate)	0.001

표 4. B&K 4228 피스톤폰에 대한 마이크로폰 부하체적 보정

Table 4. Corrections for microphone volume loading for B&K 4228 pistonphone.

IEC Microphone Type	B&K Microphone Model	Listed Correction, dB
LS1P	4160	-0.28
LS2P	4180	-0.08
WS1P/F	4144/5 (with DB 0111 ring)	-0.25
WS2P/F	4134/3	0.0

피스톤폰은 마이크로폰의 전면공동과 등가체적에 의한 부하체적에 민감하므로 공칭 부하체적에 대한 출력음압레벨로 환산하기 위해 제조사가 주는 보정값을 이용한다. 본 국제비교를 위한 보정값은 표 4에 주어져 있다.

III. 출력음압레벨과 의음 측정 및 계산

피스톤폰과 음압레벨교정기의 출력음압레벨은 마이크로폰과 결합시킨 후 마이크로폰의 개방회로 전압 (open circuit voltage)을 측정하여 마이크로폰의 음압감도 (pressure sensitivity)를 이용하여 계산한다. 그림 1은 개방회로 전압을 측정하기 위한 측정 시스템의 개략도를 보여준다.

전체 고조파 의음은 Spectrum Analyzer (HP 35670A)를 이용하여 기본 주파수 및 고조파 성분의 크기를 측정

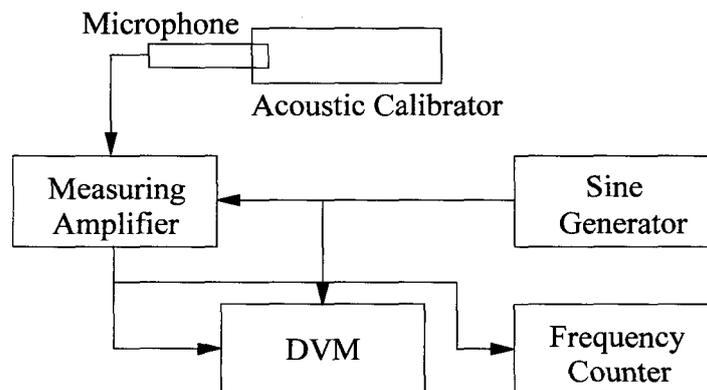


그림 1. 개방회로전압 측정 개략도

Fig. 1. Schematic diagram of open circuit voltage measurement.

하여 계산한다.

개방회로 전압으로부터 음향 교정기의 출력음압레벨, SPL은 다음 식으로 주어진다.

$$SPL = 20 \log_{10} \frac{E_{oc}}{M p_{ref}} \quad (2)$$

여기서 E_{oc} 는 마이크로폰의 개방회로 전압, M 은 마이크로폰의 음압감도, p_{ref} 는 기준음압으로 2×10^{-5} Pa이다.

한편 전체 고조파 의율, THD는 다음 식으로 계산된다.

$$TDH = \frac{\sqrt{p_2^2 + p_3^2 + p_4^2 + \dots}}{\sqrt{p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + \dots}} \quad (3)$$

여기서 p_i 는 i 번째 고조파 성분의 크기를 나타낸다.

IV. 결과 및 평가

모든 참여 기관들은 측정 결과의 확장 불확도를 산출하

여 제시하도록 되어 있다. 확장 불확도는 참여 기관들의 결과를 평가하는데 필요한 E_n 값을 산출하기 위한 기본 변수로 사용된다. E_n 값은 다음 식으로 정의된다.

$$E_n = \frac{Lab - Ref}{\sqrt{U_{Lab}^2 + U_{Ref}^2}} \quad (4)$$

여기서 Lab 는 참가 기관의 결과 값, Ref 는 기준값 (일반적으로 평균값), U_{Lab} 은 참가 기관의 측정 결과의 불확도, U_{Ref} 는 불확도의 기준값이다.

본 음향교정기 국제비교에서 기준값은 각 기관의 값을 단순 평균한 값이다. 불확도의 기준값 역시 각 기관에서 제시한 불확도의 단순 평균값이다. 그러나 India의 NPL에서 제시한 불확도는 상대적으로 너무 크기 때문에 이 값을 포함하여 평균값을 취하면 E_n 값이 전반적으로 작아지기 때문에 NPL의 불확도를 제외한 평균값을 취하였다.

일반적으로 E_n 값이 $-1 \leq E_n \leq 1$ 이면 만족스러운 결과라고 받아들여진다.

표 5와 6은 각 기관이 제출한 결과를 정리한 것이다.

표 5. B&K 4231에 대한 APMP 국제비교 결과

Table 5. Summary of APMP acoustic calibrator intercomparison results for B&K 4231.

NM	LS1P				LS2P			
	Result (dB)	U95% (dB)	Outlier	E_n	Result (dB)	U95% (dB)	Outlier	E_n
CSIRO-1	93.75	0.06		-0.12	93.74	0.10		-0.20
ITRI	93.84	0.08		0.75	-	-		-
ETL	93.80	0.05		0.46	93.80	0.08		0.28
NPL	93.70		0.24	-0.25	93.64		0.26	-0.46
CSIRO-2	93.75	0.06		-0.12	93.81	0.10		0.33
KRISS	93.76	0.06		-0.01	93.81	0.06		0.41
SIRIM	93.78	0.11		0.14	-	-		-
TISTR	-	-		-	-	-		-
CSIRO-3	93.71	0.06		-0.56	93.80	0.10		0.25
Mean	93.76	0.07			93.77	0.09		
NM	WS1P/F				WS2P/F			
	Result (dB)	U95% (dB)	Outlier	E_n	Result (dB)	U95% (dB)	Outlier	E_n
CSIRO-1	93.68	0.06		-0.57	93.80	0.10		0.16
ITRI	93.84	0.09		0.75	93.82	0.09		0.31
ETL	93.80	0.08		0.46	93.83	0.08		0.40
NPL	93.70		0.32	-0.13	93.65		0.34	-0.35
CSIRO-2	93.76	0.06		0.15	93.79	0.10		0.09
KRISS	93.77	0.09		0.21	93.76	0.09		-0.12
SIRIM	93.79	0.13		0.29	93.77	0.14		-0.04
TISTR	93.60	0.17		-0.74	93.78	0.17		0.02
CSIRO-3	93.75	0.06		0.06	93.79	0.10		0.09
Mean	93.74	0.09			93.78	0.11		

표 6. B&K 4228에 대한 APMP 국제비교 결과

Table 6. Summary of APMP acoustic calibrator intercomparison results for B&K 4228.

NMI	LS1P				LS2P			
	Result (dB)	U95% (dB)	Outlyer	E_n	Result (dB)	U95% (dB)	Outlyer	E_n
CSIRO-1	124.00	0.06		-0.29	124.00	0.10		-0.16
ITRI	124.04	0.07		0.14	-	-		-
ETL	124.03	0.06		0.04	124.02	0.08		-0.01
NPL	124.05		0.20	0.11	124.00		0.20	-0.10
CSIRO-2	124.00	0.06		-0.29	124.00	0.10		-0.16
KRISS	124.05	0.08		0.23	124.12	0.06		0.92
SIRIM	124.03	0.09		0.03	-	-		-
TISTR	-	-		-	-	-		-
CSIRO-3	124.01	0.06		-0.18	123.99	0.10		-0.24
Mean	124.03	0.07			124.02	0.09		

NMI	WS1P/F				WS2P/F			
	Result (dB)	U95% (dB)	Outlyer	E_n	Result (dB)	U95% (dB)	Outlyer	E_n
CSIRO-1	123.98	0.06		-0.25	124.00	0.10		-0.21
ITRI	124.03	0.08		0.20	124.04	0.08		0.08
ETL	124.03	0.08		0.20	124.03	0.08		0.00
NPL	124.06		0.30	0.17	124.06		0.30	0.09
CSIRO-2	123.98	0.06		-0.25	124.00	0.10		-0.21
KRISS	124.08	0.10		0.55	124.15	0.09		0.89
SIRIM	124.03	0.12		0.16	124.03	0.12		0.00
TISTR	123.88	0.14		-0.77	123.94	0.14		-0.52
CSIRO-3	123.99	0.06		-0.16	124.02	0.10		-0.07
Mean	124.01	0.09			124.03	0.10		

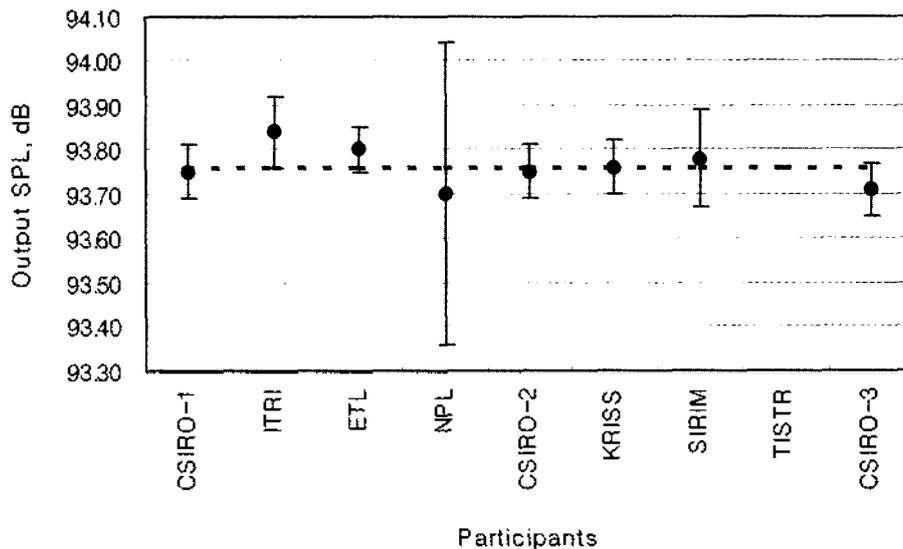


그림 2. LS1P 마이크를 사용한 경우, B&K 4231의 출력 결과
 Fig. 2. Output of type B&K 4231 when using a type LS1P microphone.

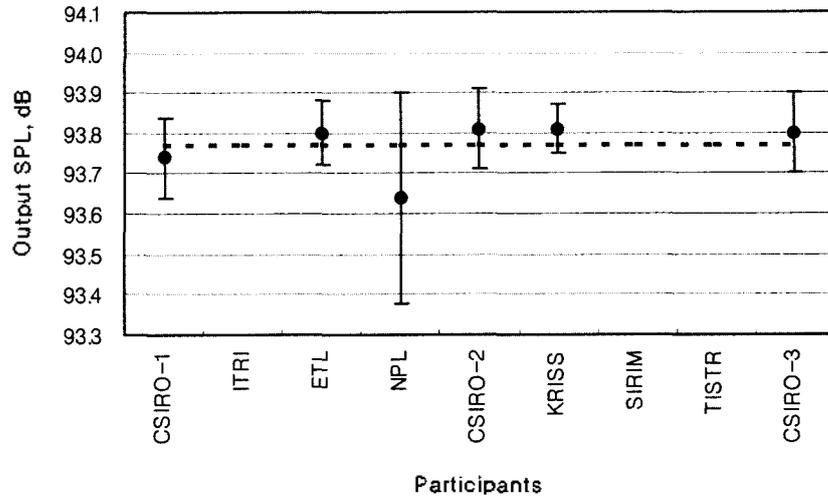


그림 3. LS2P 마이크로폰을 사용한 경우, B&K 4231의 출력 결과
 Fig. 3. Output of type B&K 4231 when using a type LS2P microphone.

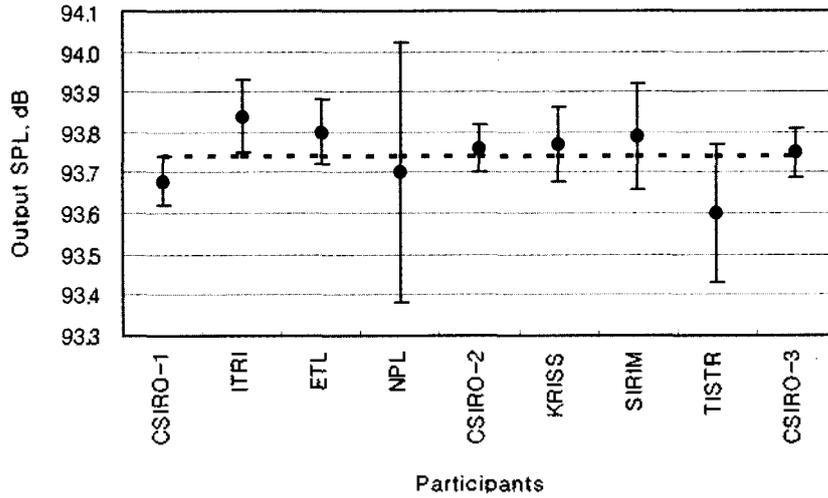


그림 4. WS1P/F 마이크로폰을 사용한 경우, B&K 4231의 출력 결과
 Fig. 4. Output of type B&K 4231 when using a type WS1P/F microphone.

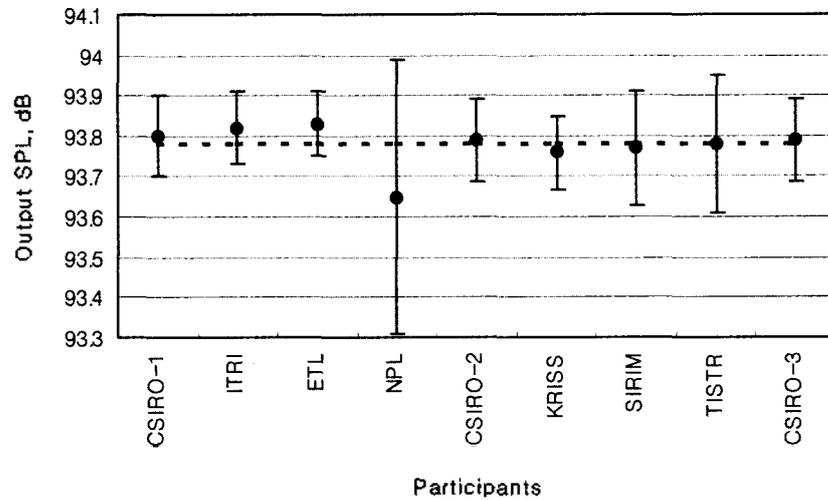


그림 5. WS2P/F 마이크로폰을 사용한 경우, B&K 4231의 출력 결과
 Fig. 5. Output of type B&K 4231 when using a type WS2P/F microphone.

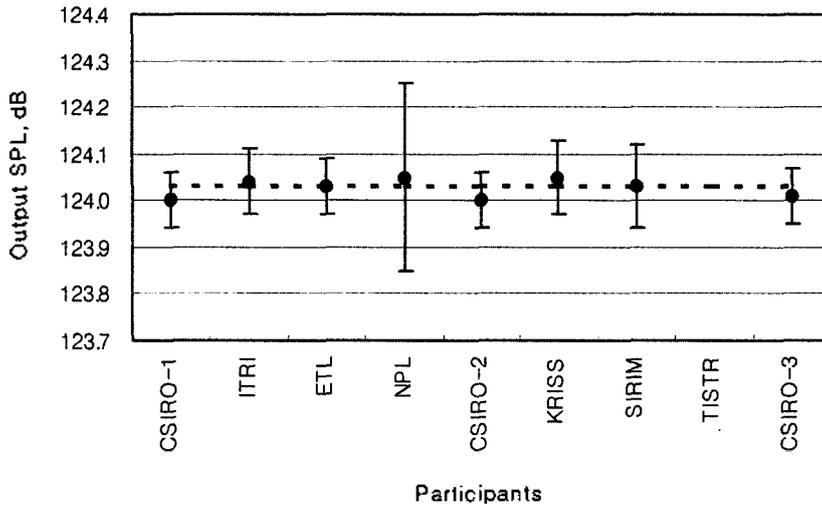


그림 6. LS1P 마이크로폰을 사용한 경우, B&K 4228의 출력 결과
 Fig. 6. Output of type B&K 4228 when using a type LS1P microphone.

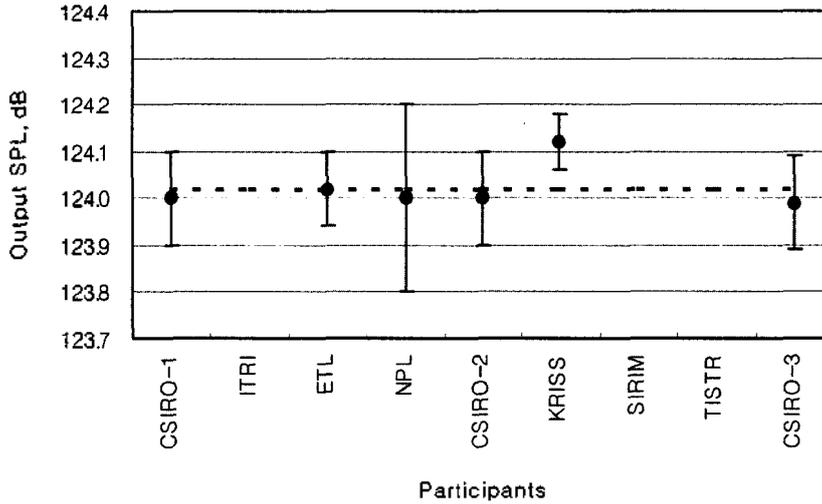


그림 7. LS2P 마이크로폰을 사용한 경우, B&K 4228의 출력 결과
 Fig. 7. Output of type B&K 4228 when using a type LS2P microphone.

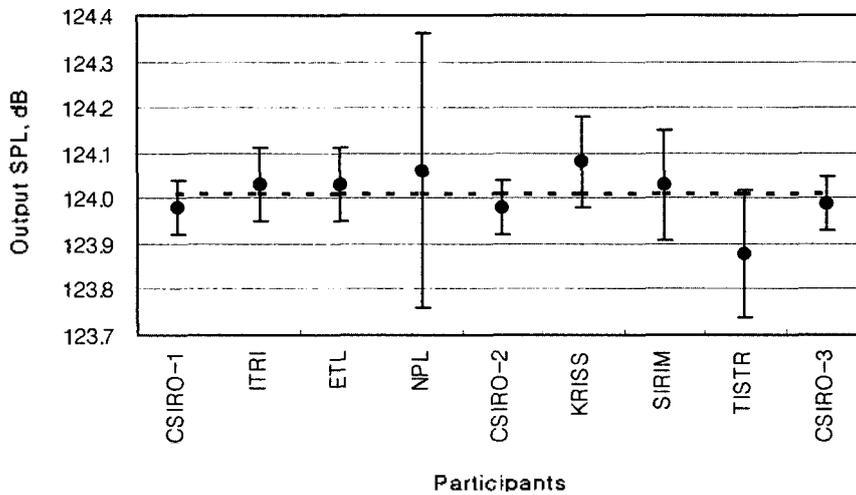


그림 8. WS1P/F 마이크로폰을 사용한 경우, B&K 4228의 출력 결과
 Fig. 8. Output of type B&K 4228 when using a type WS1P/F microphone.

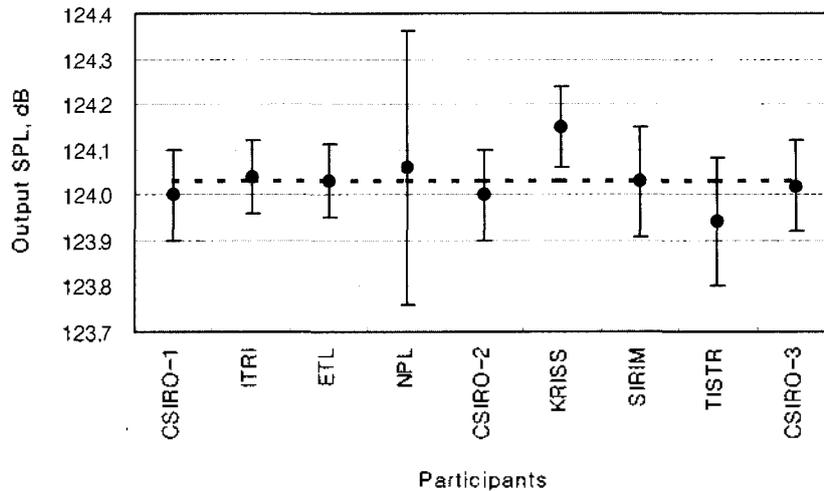


그림 9. WS2P/F 마이크론을 사용한 경우, B&K 4228의 출력 결과
 Fig. 9. Output of type B&K 4228 when using a type WS2P/F microphone.

이들 표에서 전체 고조파 의율 (THD)은 제시되지 않았다.

그림 2부터 9까지는 표 5와 6의 결과를 그림으로 나타낸 것이다. 이들 그림에는 평균값과 확장불확도가 같이 주어져 있다.

이들 그림에서 보듯이 한국표준과학연구원의 결과는 LS2P와 WS2P/F를 사용하여 B&K 4228을 교정한 경우를 제외하면 비교적 다른 표준기관들의 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 7과 9에는 교정결과가 평균값에 비해 많이 높게 나오는 것을 알 수 있다. 이러한 결과에 대해서는 다음 절에서 논하기로 한다.

V. 국제비교 결과에 대한 고찰

음향교정기의 국제비교에서 계산한 체적보정은 제조 회사에서 제시한 공칭값을 이용하여 계산하였다. 또한 국제비교를 수행할 당시 본 연구원의 정밀한 마이크로폰 음압감도 교정 시설 및 능력의 미비로 비교교정에 사용한 마이크로폰의 음압감도가 부정확한 것으로 확인되었다. 이전의 교정시설과 새로운 교정시설을 사용하여 측정된 마이크로폰의 음압감도레벨이 표 7에 주어져 있다.

표 7에 주어진 마이크로폰의 음압감도레벨과 표 4에 주어진 체적 보정값을 이용하여 음압레벨교정기와 퍼스톤폰의 출력음압레벨을 다시 계산한 결과가 표 8에 주어

표 7. 마이크로폰의 음압감도레벨 (dB re. 1 V/Pa)
 Table 7. Pressure sensitivity level of microphones (dB re. 1 V/Pa).

Microphone	Old		New	
	250 Hz	1 kHz	250 Hz	1 kHz
LS1P	-27.05	-27.02	-27.02	-26.99
LS2P	-37.54	-37.53	-37.53	-37.53
WS1P/F	-27.01	-26.91	-26.93	-26.90
WS2P/F	-39.39	-39.26	-39.26	-39.26

표 8. B&K 4231과 4228에 대한 출력음압의 재계산 결과
 Table 8. Recalculated results of sound pressure output for B&K 4231 and 4228.

Microphone	B&K 4231			B&K 4228		
	New Result (dB)	Mean (dB)	E_N	New Result (dB)	Mean (dB)	E_N
LS1P	93.74	93.76	-0.23	124.03	124.02	0.04
LS2P	93.77	93.76	0.03	124.06	124.01	0.36
WS1P/F	93.76	93.74	0.13	124.04	124.00	0.25
WS2P/F	93.76	93.78	-0.12	124.04	124.02	0.07
Average	93.76	93.76		124.04	124.01	

저 있다. 표에는 이들 값을 이용하여 다시 계산한 E_n 값도 같이 주어져 있다.

표 8에서 보듯이 음압레벨교정기와 피스톤폰의 출력 음압레벨이 참여기관이 제시한 값의 평균값 (Mean)과 매우 근사한 것을 알 수 있다. E_n 값도 ± 0.4 이내로서 종전보다 향상된 값을 보이고 있다.

VI. 결론

음향교정기는 정확한 음향계측을 위한 현장 교정용 교정기로서 출력음압레벨을 정확하게 알고 있어야 한다. 이들의 출력음압레벨은 정밀한 교정을 통해 음압감도레벨을 정확하게 알고 있는 표준 마이크로폰 (LS1P, LS2P) 또는 기준 마이크로폰 (WS1P/F, WS2P/F)을 이용하여 교정을 한다.

표준 마이크로폰의 음압감도레벨은 국제규격에서 정한 가역방법[6]을 이용하여 교정을 하며 기준 마이크로폰의 음압감도레벨은 비교법[7]을 이용하여 교정한다. 마이크로폰 교정에 있어 가역방법은 이미 오래 전부터 사용되어 온 방법으로 체계가 잘 갖추어져 있다. 그러나 비교법은 비교적 최근에 제정된 것으로서 그동안은 방법이나 절차 등 제반 규격이 명확하게 규정되어 있지 않았다.

따라서 표준 마이크로폰의 가역교정에는 많은 관심과 노력을 기울인 결과 정밀 교정이 가능하였으나 기준 마이크로폰의 비교교정은 소홀히 취급하여 하위급 장비의 교정에도 주로 표준 마이크로폰을 사용하여 왔다. 현재는 기준 마이크로폰의 비교교정 방법도 확립되어 표준 마이크로폰은 음향분야의 국가표준을 유지하는데 사용되며, 기준 마이크로폰이 하위급 장비의 교정에 주로 사용된다.

새로운 비교교정 시스템을 사용하여 기준 마이크로폰의 음압감도레벨을 정밀하게 교정한 후, 이 값을 음향교정기의 국제비교에 적용한 결과 표준 마이크로폰을 사용한 경우는 물론 외국의 표준 기관들이 측정한 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

이러한 결과와 절차를 토대로 국제적 신뢰도는 물론 관련 산업체와 학계에 음향분야 정밀계측 능력을 향상시킬 수 있는 음향 교정 체계를 확립하게 되었다.

참고 문헌

1. IEC 61094-1, *Measurement Microphones-Part 1, Specifications for Laboratory Standard Microphones*, 1992.
2. IEC 61094-4, *Measurement Microphones-Part 4, Specifications for Working Standard Microphones*, 1995.
3. Operating Manual for the B&K 4228 Pistonphone.
4. ISO, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, 1993.
5. IEC 60942, *Acoustic Calibrators*, 1988.
6. IEC 61094-2, *Measurement Microphones-Part 2, Primary Method for Pressure Calibration of Laboratory Standard Microphones by the Reciprocity Technique*, 1992.
7. IEC 61094-5, *Measurement Microphones-Part 5, Methods for Pressure Calibration of Working Standard Microphones by Comparison*, 2001.

저자 약력

● 서 상 준 (Sang-Joon Suh)



1975년 2월: 서강대학교 물리학과 (이학사)
 1977년 2월: 한국과학기술원 물리학과 (이학석사)
 1990년 8월: 한국과학기술원 물리학과 (이학박사)
 1999년 11월~현재: APM TCAUV (Technical Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration) Chairman
 1977년 3월~현재: 한국표준과학연구원

● 서 재 갑 (Jae-Gap Suh)



1991년 3월: 국립 한밭대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
 1997년 6월: 국립 한밭대학교 전자공학과 졸업 (공학석사)
 2000년 5월: 기술사 (소음·진동)
 2001년 2월: ISO TC-29 전자음향분야 전문위원
 1981년 3월~1988년 3월: (주)국제종합기계
 1988년 3월~현재: 한국표준과학연구원 음향진동 그룹/신원기술원

● 조 문 재 (Moon-Jae Jho)



1979년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
 1981년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1990년 8월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
 1982년 4월~현재: 한국표준과학연구원