

# LS1P 마이크로폰 핵심측정표준 국제비교 결과

## Results of Key Comparison on LS1P Microphones

서 상 준\*, 서 재 갑\*, 조 문 제\*, 권 휴 상\*

(Sang Joon Suh\*, Jae Gap Suh\*, Moon Jae Jho\*, Hyu-Sang Kwon\*)

\*한국표준과학연구원 물리표준부 음향진동그룹

(접수일자: 2004년 8월 18일; 채택일자: 2005년 3월 14일)

국제적으로 음향·초음파·진동분야의 정밀계측 필요성이 점차 강조되고 있기 때문에 1998년도에 국제도량형위원회 (CIPM: International Committee for Weights and Measures) 산하에 음향·초음파·진동 자문위원회 (CCAUV; Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration)가 신설되어 활동을 시작하였다. 그 첫 번째 사업의 하나가 1999년부터 시작된 음향분야의 1" 표준 마이크로폰에 대한 핵심측정표준 국제비교 (Key Comparison)이다.

1" 표준 마이크로폰 핵심측정표준 국제비교는 1999년 4월부터 2001년 4월까지 진행되었으며 한국표준과학연구원을 포함한 12개 국가표준기관이 참여하였다. 주관기관 (pilot lab.)은 영국의 National Physical Laboratory (NPL)이 맡았다. 이동용 표준기는 IEC 61094-1에 명시된 1" 표준 음압형 마이크로폰 (LS1P Microphone: Laboratory Standard 1" Pressure Type Microphone) 두 개이며 교정 주파수 범위는 63 Hz부터 8 kHz까지이다. 본 논문에서는 최종 보고서에 수록된 분석 결과를 요약하여 정리하였다.

**핵심용어:** 핵심측정표준 국제비교, 표준 마이크로폰, 가역교정, 불확도, 음압감도

**투고분야:** 음향측정 및 센서분야 (14.1)

Since the necessity for the accurate measurement in the field of acoustics, vibration, and ultrasound was internationally increased, CCAUV (Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration) was created by the CIPM (International Committee for Weights and Measures) in 1998. One of the first activities of CCAUV is the key comparison on 1" standard microphones.

The key comparison was done from April, 1999 to April, 2001 and 12 NMIs (National Metrology Institutes) including KRISS (Korea Research Institute of Standards and Science) were participated. The pilot laboratory was the National Physical Laboratory(NPL). The traveling standards were two LS1P(Laboratory Standard 1" Pressure Type) microphones specified in IEC 61094-1 and the calibration frequency ranges covers from 63 Hz to 8 kHz. In this paper, the analyzed results in the final report were summarized.

**Keywords:** Key Comparison, Standard Microphone, Reciprocity Calibration, Uncertainty, Pressure Sensitivity

**ASK subject classification:** Acoustical Measurements and Sensors (14.1)

### I. 서 론

세계무역기구 (World Trade Organization; WTO) 체제의 출범과 더불어 무역의 기술적 장벽제거의 범세계적 요구가 높아지고 이를 위한 과학기술적 기반으로서 국가 측정표준의 국제적 일치를 확립하는 방안으로서 "국가측정표준 및 교정성적서 상호인정에 관한 협약 (Mutual Recognition Arrangement of National Measurement

Standards and of Measurement Certificates Issued by National Metrology Institutes; MRA)"이 1999년 38개국 국가표준기관 대표들이 서명하여, 정식으로 채택되었으며, 제 21차 국제도량형총회 (CGPM; General Conference on Weights and Measures)에서도 가장 중요한 결의사항의 하나로 다루어 졌다. 따라서 국가측정표준의 국제적 일치를 확립하기 위한 핵심측정표준 국제비교 (key comparison)가 활발하게 진행되고 있으며 이 결과는 한 나라의 국가표준 수준을 평가하는 하나의 척도가 될 것이다.

음향·초음파·진동분야도 이 분야의 정밀계측 필요

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

표 1. CCAUV.A-K1에 참여하는 국가 및 기관  
Table 1. Participants in CCAUV.A-K1.

순번	국가명	약어	기관명	참여시기	비고
1	Great Britain	UK	NPL	99/03/01~99/03/12	Pilot Lab.
2	Denmark	DK	DPLA	99/05/10~99/06/18	
3	USA	US	NIST	99/07/19~99/08/27	
4	Japan	JP	ETL	99/09/13~99/10/22	
5	Germany	DE	PTB	99/11/08~99/12/17	
6	Korea	KR	KRISS	00/01/17~00/02/25	
7	Australia	AU	CSIRO	00/03/13~00/04/21	
8	South Africa	ZA	CSIR	00/05/08~00/06/16	
9	Canada	CA	NRC	00/07/03~00/08/11	
10	Mexico	MX	CENAM	00/09/11~00/10/20	
11	Poland	PL	GUM	00/11/06~00/12/15	
12	Russia	RU	VINIFTRI	01/01/08~01/02/16	

성이 점차 강조되고 있기 때문에 1998년도에 국제도량형 위원회 (CIPM; International Committee for Weights and Measures) 산하에 음향·초음파·진동 자문위원회 (CCAUV; Consultative Committee for Acoustics, Ultrasound and Vibration)가 신설되어 활동을 시작하였다. 그 첫 번째 사업의 하나가 1999년부터 시작된 음향분야의 1° 표준 마이크로폰에 대한 핵심측정표준 국제 비교 (CCAUV.A-K1)이다.

1° 표준 마이크로폰 핵심측정표준 국제비교는 1999년 4월부터 2001년 4월까지 진행되었으며 한국표준과학연구원을 포함한 12개 국가표준기관이 참여하였다. 주관기관 (pilot lab.)은 영국의 National Physical Laboratory (NPL)이 맡았다. 이동용 표준기는 IEC 61094-1[1]에 명시된 1° 표준 음압형 마이크로폰 (LS1P Microphone; Laboratory Standard 1° Pressure Type Microphone) 두 개이며 교정 주파수 범위는 63 Hz부터 8 kHz까지이다. 최종 보고사항은 가역교정에 의한 음압감도이며 음압감도에 따른 교정 불확도, 마이크로폰 전면공동 (front cavity) 깊이, 등가체적, 측정 당시의 환경조건 등이다.

각 국가표준기관은 6주간에 걸쳐 모든 측정을 마쳐야 하며 측정 완료 후 2주 안에 결과를 보고하도록 규정되었다. 한국표준과학연구원은 2000년 1월 17일부터 2월 25일 사이에 측정을 완료하였다.

CCAUV.A-K1의 최종보고서는 장기간에 걸친 분석과 검토 끝에 2003년 8월에 발표되었으며[2] 한국표준과학연구원의 결과는 타 기관과 비교해 볼 때 매우 만족할만한 수준인 것으로 나타났다.

## II. 프로토콜(Protocol)

### 2.1. 참여기관

CCAUV.A-K1에 참여하는 기관은 12개이며 각 참여기관의 국가명과 시기는 표 1과 같다.

### 2.2. 측정

교정 대상 표준 마이크로폰은 Denmark, Brüel & Kjaer사의 1° Standard Microphone (B&K 4160) 두 개로서 serial number는 각각 2036126과 2036134이다.

마이크로폰의 음압감도는 전기음향 가역원리에 근거한 가역교정방법으로 결정하며 63 Hz부터 1 kHz까지는 옥타브 중심 주파수에 대해, 1.25 kHz부터 8 kHz까지는 1/3 옥타브 중심 주파수에 대해 교정한다. 음압감도는 IEC 61094-2[3]에 따라 기준환경(온도: 23 °C, 대기압: 101.325 kPa, 상대습도: 50%)일 때의 값으로 환산하여 제시하여야 한다.

### 2.3. 결과 보고

각 참여기관은 고객에게 발급하는 표준 교정성적서를 사용하여 결과를 보고하여야 하며 다음 사항을 포함한다.

- IEC 61094-2의 권장사항과 벗어나는 내용 및 이것이 교정 결과에 미치는 영향 평가
- 음압감도 계산에 사용된 마이크로폰 전면공동 체적, 깊이 및 음향 임피던스
- 계산에 사용된 마이크로폰의 온도 및 대기압 계수
- 불확도 계산 요약 및 포함인자 k=2에 대한 전체 불확도.

표 2. 두 마이크로폰의 통합결과

Table 2. Amalgamated results of two microphones.

f (Hz)	NPL UK	DPLA DK	NIST US	ETL JP	PTB DE	KRISS KR	CSIR ZA	CSIRO AU	NRC CA	CENAM MX	GUM PL	VNIIFTRI RU
63	0.02	0.00	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.01		-0.04	0.00	0.01	-0.01
125	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01		-0.04	0.00	0.01	0.00
250	0.01	0.00	-0.01	-0.01	0.01	0.00	0.02	0.02	-0.04	0.00	0.01	0.00
500	0.01	0.00	0.00	-0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	-0.04	0.00	0.01	0.00
1000	0.01	0.00	-0.02	-0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	-0.03	0.00	0.00	0.00
1250	0.01	0.01	-0.02	-0.02	0.01	0.01	0.02		-0.03	0.00	0.00	-0.01
1600	0.02	0.01	-0.02	-0.01	0.02	0.01	0.02		-0.03	0.01	0.01	-0.01
2000	0.01	0.00	-0.02	-0.02	0.01	0.01	0.01		-0.03	0.01	0.01	-0.01
2500	0.02	0.01	-0.01	-0.03	0.02	0.02	0.02		-0.03	0.01	0.01	-0.02
3150	0.02	0.01	0.00	-0.03	0.01	0.02	0.01		-0.03	0.01	0.01	-0.02
4000	0.02	0.01	0.00	-0.04	0.01	0.02	0.01		-0.04	0.01	0.02	-0.03
5000	0.01	0.02	0.00	-0.05	0.02	0.02	0.01		-0.04	0.02	0.01	-0.03
6300	0.02	0.03	0.00	-0.06	0.02	0.01	0.03		-0.04	0.01	0.02	-0.02
8000	0.03	0.01	-0.01	-0.05	-0.01	0.02	0.02		-0.05	-0.01	0.04	0.02

교정 결과는 이동용 표준기를 반환한 후 2주 내에 주관기관으로 우송되어야 한다. 주관기관은 교정결과를 수취하면 동등한 결과를 해당 참여기관에게 보낸다.

과 1999년에 각각 일본의 ETL (Electrotechnical Laboratory)과 Denmark의 DPLA (Danish Primary Laboratory of Acoustics)와의 비교교정을 통해 이의 음압감도 값을 알고 있다[5]. 마이크로폰의 음압감도 교정은 가역교정 시스템 (B&K 9699)을 이용하였다.

### III. 마이크로폰의 음압감도 교정

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

Laboratory Standard Microphone의 음압감도 결정 방법은 IEC 61094-2에 상세하게 기술되어 있다.

본 핵심측정표준 국제비교에서는 이동용 표준기인 두 개의 마이크로폰과 한국표준과학연구원 음향·진동 그룹에서 보유하고 있는 마이크로폰 중 하나 (B&K 4160, S/N: 1125956)를 이용하였다. 이 마이크로폰은 1998년

### IV. 참여기관의 교정결과 및 불확도

두 개의 표준 마이크로폰에 대한 결과를 절대값으로 나타내는 것은 다소 피상적일 수 있다. 따라서 참여기관이 제출한 결과로부터 각 참여기관의 수행능력을 나타내는 일반적인 척도로 환산하는 것이 중요하다. 이를 위해 두 마이크로폰에 대해 각 참여기관이 제출한 결과를 주파수별로 평균값을 취하였으며 각 참여기관의 결과는 평균값으로부터의 편차로 주어졌다. 그림 1과 2는 이들 결과를 보여준다.

그림 1과 2에서 보듯이 두 마이크로폰에 대해 각 참여기관의 결과가 보여주는 평균값으로부터의 편차 (방향과

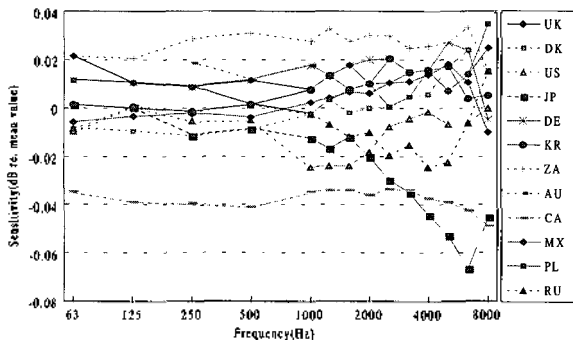


그림 1. 각 참여기관의 교정결과(B&K 4160, S/N: 2036126)  
Fig. 1. Results of participants(B&K 4160, S/N: 2036126).

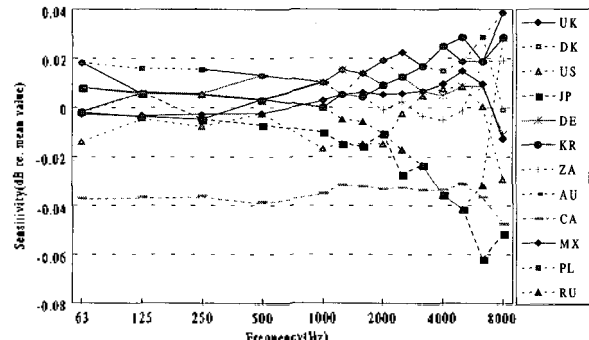


그림 2. 각 참여기관의 교정결과(B&K 4160, S/N: 2036134)  
Fig. 2. Results of participants(B&K 4160, S/N: 2036134).

표 3. 각 참여기관이 선언한 측정 불확도(k=2)

Table 3. Declared measurement uncertainties of each participant(k=2).

f (Hz)	NPL UK	DPLA DK	NIST US	ETL JP	PTB DE	KRISS KR	CSIR ZA	CSIRO AU	NRC CA	CENAM MX	GUM PL	VNIFTRI RU
63	0.03	0.04	0.04	0.05	0.03	0.03	0.05		0.04	0.04	0.03	0.08
125	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.05		0.04	0.04	0.03	0.05
250	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.05	0.04	0.03	0.04	0.03	0.05
500	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.05
1000	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.05
1250	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.05		0.04	0.03	0.03	0.05
1600	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.05		0.04	0.03	0.03	0.05
2000	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.05		0.04	0.03	0.03	0.05
2500	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.05		0.04	0.03	0.03	0.05
3150	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.05		0.04	0.03	0.03	0.05
4000	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.06		0.04	0.05	0.04	0.06
5000	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.03	0.07		0.04	0.05	0.05	0.09
6300	0.05	0.05	0.04	0.06	0.05	0.04	0.06		0.04	0.06	0.05	0.14
8000	0.05	0.06	0.12	0.06	0.05	0.04	0.07		0.04	0.10	0.05	0.23

(주) CSIR은 각 마이크로폰에 대해 서로 다른 불확도를 제시. 여기에서는 큰 값만 주었음

크기)가 비슷함을 알 수 있다. 이것은 모든 참여기관들이 일관된 수행능력을 보여주는 좋은 결과이다. 따라서 각 참여기관들의 수행능력을 나타내기 위한 하나의 값으로는 두 마이크로폰에 대한 결과의 평균을 취하는 것이 바람직하다고 판단된다. 이들 결과가 표 2에 주어졌다.

이와 같은 방법을 취할 경우, 이들 평균값과 관련된 불확도를 조심스럽게 고려하는 것이 중요하다.

동일한 형식의 서로 다른 마이크로폰이나 동일한 마이크로폰에 대한 교정에 있어 측정 불확도는 크게 변하지 않는다. 대부분의 교정기관들은 교정할 때마다 불확도를 새로 계산하기 보다는 정해진 불확도를 사용하며, 주어진 불확도를 달성하기 위한 반복성에 대한 한계를 명시하고 있다. 실제로 한 기관을 제외한 모든 참여기관이 각기 다른 마이크로폰에 대해 동일한 불확도를 표시하였다. 각기 다른 마이크로폰에 대해 서로 다른 불확도를 준 경우에도 반올림을 한 경우 그 차이는 0.01 dB 이하였다. 따라서 여러 번의 교정 결과의 평균에 대한 불확도는 각 교정의 불확도와 크게 다르지 않을 것으로 기대된다. 그러나 이 가정은 여러 번의 교정 결과에 대한 평균의 불확도를 정량화하기 위해 필요한 추가적인 통계해석에 적용해서는 안 된다.

특정한 참여기관이 특정 주파수에서 마이크로폰 감도에 대한 결과를  $M_A$ 와  $M_B$ 로, 그리고 관련 불확도를  $u(M_A)$ 와  $u(M_B)$ 로 표시하였다고 하자. 그러면 이 기관을 대표하는 결과  $M$ 은 다음과 같다.

$$M = M_A/2 + M_B/2 \tag{1}$$

한편 관련 불확도  $u(M)$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$u^2(M) = u^2(M_A)/4 + u^2(M_B) + \rho u(M_A)u(M_B)/2 \tag{2}$$

여기서 마지막 항은  $M_A$ 와  $M_B$  사이의 공분산(covariance)이며  $\rho$ 는  $M_A$ 와  $M_B$  사이의 상관관계를 나타내는 것으로서 -1과 1 사이의 값을 갖는다. 만약 두 결과가 전혀 무관한 상관관계이면  $\rho=0$ 이며, 완전한 상관관계이면  $\rho=1$ 이 된다. [ $\rho=-1$ 은 반(反) 상관관계(anticorrelation)에 해당]

그림 1과 2에서 보듯이 많은 경우 한 마이크로폰의 결과 추세는 다른 마이크로폰에서도 반복되는 것을 알 수 있다. 이것은 각 마이크로폰에 대한 결과 사이에 높은 상관관계가 있음을 나타내는 것으로서  $\rho \approx 1$ 이라 할 수 있다.  $\rho$ 에 대한 정확한 값은 계산하지 않았다. 그러나 대부분의 주파수 영역에서  $u(M_A)$ 가 0.4 dB이며  $u(M_A) \approx u(M_B)$ 이므로,  $\rho > 0.6$ 일 경우 유도된 불확도의 차이는 0.005 dB 이하가 된다. 따라서  $\rho=1$ 로 가정하더라도 전체적으로 많은 영향을 미치지 않으므로 타당한 근사로 볼 수 있다. 이 경우 식(2)는 다음과 같이 된다.

$$u(M) = u(M_A)/2 + u(M_B)/2 \quad (3)$$

그러므로 각 마이크로폰 감도의 평균값에 대한 불확도는 단순히 해당 불확도의 평균으로 주어진다.

따라서 한 기관을 제외한 모든 참여기관들의 평균 감도에 대한 불확도는 각 마이크로폰에 대해 제시한 불확도로 주어지며 이 결과가 표 3에 주어져 있다.

이들 불확도는 각 참여기관이 제출한 교정 성적서에 명시된 확장불확도 (expanded uncertainty)이다.

### V. 핵심측정표준 국제비교 기준값 (KCRV)

핵심측정표준 국제비교 기준값 (KCRV: Key Comparison Reference Value)은 관련 불확도에 가중을 둔 측정값의 평균이 가장 바람직하다. 그러나 불확도의 차이가 크지 않으므로 가중 평균이나 비가중 평균 사이의 차이가 크지 않을 것으로 기대된다. 따라서 단지 단순화를 위해 비가중 평균을 KCRV로 하자는 제안이 있었으며, 이는 협의를 통해 핵심측정표준 국제비교를 위해 채택되었다.

실제로 서로 다른 계산방법의 결과가 크지 않음을 보이기 위해 각 주파수별로 가중 평균과 중앙값 (median)에 근거하여 KCRV를 계산하였다. 이 결과가 그림 3과 4에 주어졌다.

각 그림에서 굵은 선은 새롭게 계산된 KCRV를 나타낸다. 이들 그림에서 보듯이 그 차이는 매우 작은 것으로 나타났다.

따라서 본 핵심측정표준 국제비교 (CCAUV.A-K1)의 KCRV는 각 주파수별로 모든 참여기관의 결과를 산술평균한 값으로 결정되었으며, 이 값을 규격화하여 0 dB로

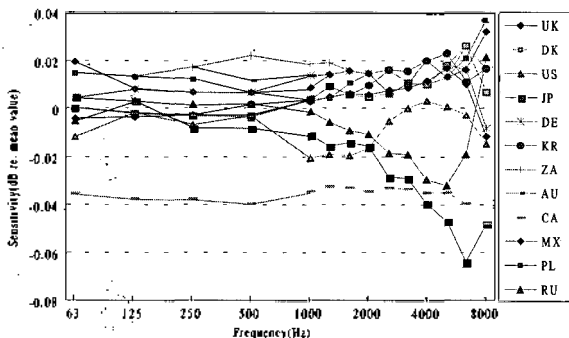


그림 3. 가중평균에 근거한 국제비교 기준값  
Fig. 3. KCRVs based on the weighted mean.

하였다. 이 경우 그림 3이 각 주파수별로 각 참여기관의 KCRV에 대한 상대적인 결과를 보여주는 것이다. 이들 결과를 좀 더 이해하기 쉽도록 하기 위해서는 불확도, KCRV와의 등가도 (degree of equivalence), 참여기관 간의 상호 등가성 (mutual equivalence) 등을 포함하여 야 하는데 이에 대한 내용은 다음 절에 주어져 있다.

### VI. 등가도 (Degree of Equivalence)

등가도란 측정값이 KCRV와 일치하는 정도를 나타내는 것으로서 KCRV와의 편차와 이 편차의 불확도로 주어진다.

표 4는 각 참여기관이 제출한 결과를 요약해서 보여준다. 여기에서  $M_i$ 는 각 참여기관의 결과와 KCRV ( $M_{ref} = 0$  dB)의 차이이며  $u_i$ 는 다음 식 (5)와 같이 계산된다.

각 참여기관의 측정 불확도를  $u(M_i)$ 이라고 하면 이들의 평균 불확도, 즉 KCRV의 불확도  $u_{ref}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$u_{ref} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_i^N u^2(M_i)} \quad (4)$$

여기서 N은 참여기관의 수이다.

KCRV의 불확도는 ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement의 5.1절[6]에 주어진 측정 데이터의 불확도 전파에 따라 계산하였다. 이를 위해 각 참여기관이 제시한 불확도 총괄표 (uncertainty budget)에 주어진 불확도를 사용하였다. 이러한 방법은 각 참여기관마다 다르게 적용하는 최종값에 대한 처리

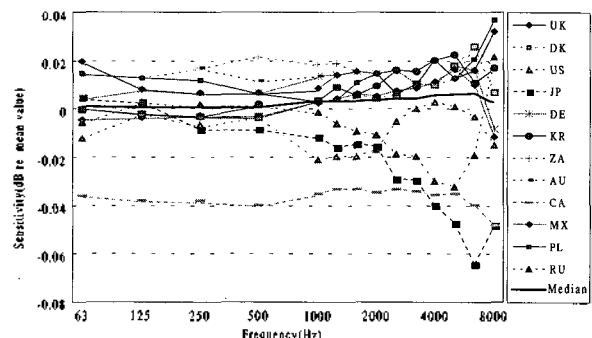


그림 4. 중앙값에 근거한 국제비교 기준값  
Fig. 4. KCRVs based on the median.

표 4. 규격화된 평균 음압감도 레벨에 대한 결과

Table 4. Reported results for the normalized mean pressure sensitivity level.

	NPL		DPLA		NIST		ETL		PTB		KRISS		CSIR		CSIRO		NRC		CENAM		GUM		VNIFTRI	
	$M_i$	$2u_i$	$M_i$	$2u_i$	$M_i$	$2u_i$	$M_i$	$2u_i$	$M_i$	$2u_i$	$M_i$	$2u_i$	$M_i$	$2u_i$	$M_i$	$2u_i$	$M_i$	$2u_i$	$M_i$	$2u_i$	$M_i$	$2u_i$	$M_i$	$2u_i$
63	0.02	0.03	0.00	0.04	-0.01	0.04	0.00	0.05	0.00	0.03	0.00	0.03	0.01	0.05	-	-	-0.04	0.04	0.00	0.04	0.01	0.03	-0.01	0.06
125	0.01	0.03	0.00	0.03	0.00	0.04	0.00	0.04	0.01	0.03	0.00	0.03	0.01	0.05	-	-	-0.04	0.04	0.00	0.04	0.01	0.03	0.00	0.05
250	0.01	0.03	0.00	0.03	-0.01	0.04	-0.01	0.04	0.01	0.03	0.00	0.03	0.02	0.05	0.02	0.04	-0.04	0.03	0.00	0.04	0.01	0.03	0.00	0.05
500	0.01	0.03	0.00	0.03	0.00	0.04	-0.01	0.04	0.01	0.03	0.00	0.03	0.02	0.05	0.01	0.04	-0.04	0.04	0.00	0.03	0.01	0.03	0.00	0.05
1000	0.01	0.03	0.00	0.03	-0.02	0.04	-0.01	0.04	0.01	0.03	0.00	0.03	0.02	0.05	0.01	0.04	-0.03	0.04	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.05
1250	0.01	0.03	0.01	0.03	-0.02	0.04	-0.02	0.04	0.01	0.03	0.01	0.03	0.02	0.05	-	-	-0.03	0.04	0.00	0.03	0.00	0.03	-0.01	0.05
1600	0.02	0.03	0.01	0.03	-0.02	0.04	-0.01	0.04	0.02	0.03	0.01	0.03	0.02	0.05	-	-	-0.03	0.04	0.01	0.03	0.01	0.03	-0.01	0.05
2000	0.01	0.03	0.00	0.03	-0.02	0.04	-0.02	0.04	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.05	-	-	-0.03	0.04	0.01	0.03	0.01	0.03	-0.01	0.05
2500	0.02	0.03	0.01	0.03	-0.01	0.04	-0.03	0.04	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.05	-	-	-0.03	0.04	0.01	0.03	0.01	0.03	-0.02	0.05
3150	0.02	0.04	0.01	0.03	0.00	0.04	-0.03	0.04	0.01	0.03	0.02	0.03	0.01	0.05	-	-	-0.03	0.04	0.01	0.03	0.01	0.03	-0.02	0.05
4000	0.02	0.04	0.01	0.03	0.00	0.04	-0.04	0.04	0.01	0.03	0.02	0.03	0.01	0.06	-	-	-0.04	0.04	0.01	0.05	0.02	0.04	-0.03	0.06
5000	0.01	0.05	0.02	0.04	0.00	0.04	-0.05	0.05	0.02	0.05	0.02	0.03	0.01	0.07	-	-	-0.04	0.04	0.02	0.05	0.01	0.05	-0.03	0.09
6300	0.02	0.05	0.03	0.05	0.00	0.04	-0.06	0.06	0.02	0.05	0.01	0.04	0.03	0.06	-	-	-0.04	0.04	0.01	0.06	0.02	0.05	-0.02	0.14
8000	0.03	0.05	0.01	0.06	-0.01	0.11	-0.05	0.06	-0.01	0.05	0.02	0.04	0.02	0.07	-	-	-0.05	0.04	-0.01	0.10	0.04	0.05	0.02	0.23

표 5. KCRV에 대한 등가도

Table 5. Degree of equivalence with the KCRV.

	NPL		DPLA		NIST		ETL		PTB		KRISS		CSIR		CSIRO		NRC		CENAM		GUM		VNIFTRI	
	$D_i$	$U_i$	$D_i$	$U_i$	$D_i$	$U_i$	$D_i$	$U_i$	$D_i$	$U_i$	$D_i$	$U_i$	$D_i$	$U_i$	$D_i$	$U_i$	$D_i$	$U_i$	$D_i$	$U_i$	$D_i$	$U_i$	$D_i$	$U_i$
63	0.02	0.03	0.00	0.04	-0.01	0.04	0.00	0.05	0.00	0.03	0.00	0.03	0.01	0.05	-	-	-0.04	0.04	0.00	0.04	0.01	0.03	-0.01	0.07
125	0.01	0.03	0.00	0.03	0.00	0.04	0.00	0.04	0.01	0.03	0.00	0.03	0.01	0.05	-	-	-0.04	0.04	0.00	0.04	0.01	0.03	0.00	0.05
250	0.01	0.03	0.00	0.03	-0.01	0.04	-0.01	0.04	0.01	0.03	0.00	0.03	0.02	0.05	0.02	0.04	-0.04	0.03	0.00	0.04	0.01	0.03	0.00	0.05
500	0.01	0.03	0.00	0.03	0.00	0.04	-0.01	0.04	0.01	0.03	0.00	0.03	0.02	0.05	0.01	0.04	-0.04	0.04	0.00	0.03	0.01	0.03	0.00	0.05
1000	0.01	0.03	0.00	0.03	-0.02	0.04	-0.01	0.04	0.01	0.03	0.00	0.03	0.02	0.05	0.01	0.04	-0.03	0.04	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.05
1250	0.01	0.03	0.01	0.03	-0.02	0.04	-0.02	0.04	0.01	0.03	0.01	0.03	0.02	0.05	-	-	-0.03	0.04	0.00	0.03	0.00	0.03	-0.01	0.05
1600	0.02	0.03	0.01	0.03	-0.02	0.04	-0.01	0.04	0.02	0.03	0.01	0.03	0.02	0.05	-	-	-0.03	0.04	0.01	0.03	0.01	0.03	-0.01	0.05
2000	0.01	0.03	0.00	0.03	-0.02	0.04	-0.02	0.04	0.01	0.03	0.01	0.03	0.01	0.05	-	-	-0.03	0.04	0.01	0.03	0.01	0.03	-0.01	0.05
2500	0.02	0.03	0.01	0.03	-0.01	0.04	-0.03	0.04	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.05	-	-	-0.03	0.04	0.01	0.03	0.01	0.03	-0.02	0.06
3150	0.02	0.04	0.01	0.03	0.00	0.04	-0.03	0.04	0.01	0.03	0.02	0.03	0.01	0.05	-	-	-0.03	0.04	0.01	0.03	0.01	0.03	-0.02	0.05
4000	0.02	0.04	0.01	0.03	0.00	0.04	-0.04	0.04	0.01	0.03	0.02	0.03	0.01	0.06	-	-	-0.04	0.04	0.01	0.05	0.02	0.04	-0.03	0.06
5000	0.01	0.05	0.02	0.04	0.00	0.04	-0.05	0.05	0.02	0.05	0.02	0.03	0.01	0.07	-	-	-0.04	0.04	0.02	0.05	0.01	0.05	-0.03	0.09
6300	0.02	0.05	0.03	0.05	0.00	0.04	-0.06	0.06	0.02	0.05	0.01	0.04	0.03	0.06	-	-	-0.04	0.04	0.01	0.06	0.02	0.05	-0.02	0.13
8000	0.03	0.05	0.01	0.06	-0.01	0.11	-0.05	0.06	-0.01	0.05	0.02	0.04	0.02	0.07	-	-	-0.05	0.04	-0.01	0.09	0.04	0.05	0.02	0.21

(반올림)와 관련된 오차를 줄일 수 있으며 체계적으로 결정된 데이터에 근거한 KCRV 불확도의 근간이 된다. 그러나 실제로 불확도 총괄표와 교정성적서에 주어진 불확도를 이용하여 KCRV 불확도를 계산한 결과는 약 0.005 dB 정도 차이가 나는데 이는 KCRV 불확도에 큰 영향을 미치지 않는다.

다른 모든 불확도에 대한 언급, 즉 등가도와 상호 등가도와 같은 참여기관의 결과에 대해서는 교정성적서에 주어진 불확도를 이용하였다. 각 참여기관의 불확도 결과 사이에는 어느 정도 상관관계가 있을 수 있다는 것이 밝혀졌지만 상호 등가도의 불확도에 이를 반영하지는 않았으며, 이는 약간의 과대평가 결과를 초래한다.

이와 같이 계산된 KCRV의 불확도로부터 각 참여기관이 제시한 불확도의 편차  $u_i$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$u_i = \sqrt{u^2(M_i) - u_{ref}^2} \quad (5)$$

한편 한 쌍의 값으로 주어지는 각 참여기관의 KCRV가 표 5에 주어져 있으며, 이 표에서  $D_i$ 와  $U_i$ 는 각각 다음 식으로 주어진다.

$$D_i = M_i - M_{ref} \quad (6)$$

$$U_i = 2\sqrt{(1-2/N)^2 u_i^2 + u_{ref}^2} \quad (7)$$

표 5에서 보듯이  $U_i$ 의 많은 값이 표 4의  $u_i$ 와 동일한 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이는 각 참여기관들 사이의 불확도 변화가 작으며  $u_{ref}$ 가  $u_i$ 에 비해 상대적으로 작기 때문이다.

표 6은 250 Hz에서의 상호 등가도를 보여준다.

이 표에서  $D_{ij}$ 와  $U_{ij}$ 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$D_{ij} = M_i - M_j \quad (8)$$

표 6. 250 Hz에서의 상호 등가도  
Table 6. Degree of mutual equivalence at 250 Hz.

	NPL		DPLA		NIST		ETL		PTB		KRISS		CSIRO		NRC		CENAM		GUM		VNIIFTRI			
	$D_{ij}$	$U_{ij}$	$D_{ij}$	$U_{ij}$	$D_{ij}$	$U_{ij}$	$D_{ij}$	$U_{ij}$	$D_{ij}$	$U_{ij}$	$D_{ij}$	$U_{ij}$	$D_{ij}$	$U_{ij}$	$D_{ij}$	$U_{ij}$	$D_{ij}$	$U_{ij}$	$D_{ij}$	$U_{ij}$	$D_{ij}$	$U_{ij}$		
NPL			0.01	0.04	0.01	0.05	0.02	0.05	0.00	0.04	0.01	0.04	-0.01	0.06	-0.01	0.05	0.04	0.04	0.01	0.05	-0.01	0.04	0.01	0.06
DPLA	-0.01	0.04			0.00	0.05	0.00	0.05	-0.01	0.04	0.00	0.04	-0.02	0.06	-0.02	0.05	0.03	0.04	0.00	0.05	-0.02	0.04	-0.01	0.06
NIST	-0.01	0.05	0.00	0.05			0.00	0.06	-0.01	0.05	0.00	0.05	-0.02	0.07	-0.02	0.06	0.03	0.05	0.00	0.06	-0.02	0.05	-0.01	0.07
ETL	-0.02	0.05	0.00	0.05	0.00	0.08			-0.02	0.05	-0.01	0.05	-0.03	0.06	-0.03	0.06	0.03	0.05	-0.01	0.06	-0.02	0.05	-0.01	0.06
PTB	0.00	0.04	0.01	0.04	0.01	0.05	0.02	0.05			0.01	0.04	-0.01	0.06	-0.01	0.05	0.04	0.04	0.01	0.05	-0.01	0.04	0.01	0.06
KRISS	-0.01	0.04	0.00	0.04	0.00	0.05	0.01	0.05	-0.01	0.04			-0.02	0.06	-0.02	0.05	0.03	0.04	0.00	0.05	-0.02	0.04	0.00	0.06
CSIRO	0.01	0.06	0.02	0.06	0.02	0.07	0.03	0.06	0.01	0.06	0.02	0.06			0.00	0.06	0.05	0.06	0.02	0.06	0.00	0.06	0.02	0.07
CSIRO	0.01	0.05	0.02	0.05	0.02	0.06	0.03	0.06	0.01	0.05	0.02	0.05	0.00	0.06			0.05	0.05	0.02	0.06	0.00	0.05	0.02	0.06
NRC	-0.04	0.04	-0.03	0.04	-0.03	0.05	-0.03	0.05	-0.04	0.04	-0.03	0.04	-0.05	0.06	-0.05	0.05			-0.04	0.05	-0.05	0.04	-0.04	0.06
CENAM	-0.03	0.05	0.00	0.05	0.00	0.06	0.01	0.06	-0.01	0.05	0.00	0.05	-0.02	0.06	-0.02	0.06	0.04	0.05			-0.01	0.05	0.00	0.06
GUM	0.01	0.04	0.02	0.04	0.02	0.05	0.02	0.05	0.01	0.04	0.02	0.04	0.00	0.06	0.00	0.05	0.05	0.04	0.01	0.05			0.01	0.06
VNIIFTRI	-0.01	0.06	0.01	0.06	0.01	0.07	0.01	0.06	-0.01	0.06	0.00	0.06	-0.02	0.07	-0.02	0.06	0.04	0.06	0.00	0.06	-0.01	0.06		

$$U_{ij} = 2\sqrt{u_i^2 + u_j^2} \quad (9)$$

이상의 표 4에 주어진 157개의  $M_i$  중 94개는 절대값에서 0.01 dB를 초과하지 않으며, 131개는 0.02 dB를 초과하지 않는다. 표 6에 주어진  $D_{ij}$  중 74개는 절대값에서 0.01 dB를 초과하지 않으며 106개는 0.02 dB를 초과하지 않는다.

그림 5는 250 Hz에서 각 참여기관의 등가도를 그림으로 보여준다.

### VII. 결론

각 참여기관의 측정 결과는 매우 잘 일치하며, 서로 다른 참여기관의 불확도 결과는 상대적으로 근사한 것을 알 수 있다. 따라서 KCRV에 대한 각 참여기관의 등가도 뿐만 아니라 참여기관 사이의 등가도 (상호 등가성)는 매우 작은 값으로 주어져 밀접한 등가성을 보여준다.

이러한 등가도는 여러 가지 요인들의 효과가 누적되어

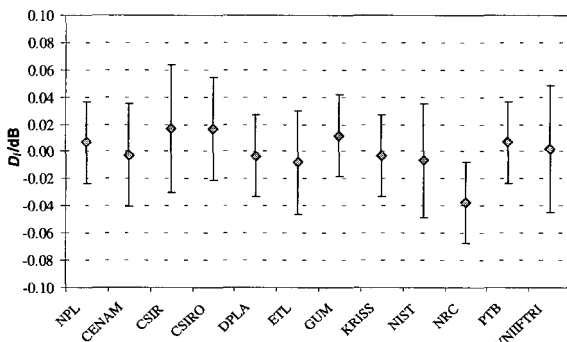


그림 5. 250 Hz에서 KCRV에 대한 등가도와 불확도(k=2)  
Fig. 5. Degrees of Equivalence with the KCRV at 250 Hz and the uncertainty(k=2).

영향을 받게 된다. 여러 가지 요인들로서는 표준 마이크로폰의 이송에서 발생하는 약간의 불안정성, 각 참여기관마다 적용하는 반올림 방법의 불일치, 이 보고서에 주어진 결과의 정밀 계산에 따른 최종 반올림의 영향에 따른 작은 효과, 참여기관 사이의 상관관계의 영향 등을 포함한다.

결과적으로 마이크로폰 교정에 대한 핵심측정표준 국제비교로 기술되는 본 과제는 음압의 현시를 의미한다. 그러나 특정한 방법론이 기술되어 있는 제한된 기술규약 (technical protocol)이 교정과정에 내포된 체계적인 가정으로 인해 KCRV에 영향을 줄 수 있다는 논쟁이 있을 수 있다. 음압을 현시하는 다른 방법이 있을 때에만 KCRV가 음압과 직접적으로 관련된다는 가정을 할 수 있다. 실제로 특정 주파수 영역에서 가역교정을 대체할 수 있는 다른 방법이 아직 확립되어 있지 않다. 따라서 음압을 결정하는 핵심측정표준 국제비교가 자동적으로 본 핵심측정표준 국제비교의 형태로 귀결된다. 이것이 현재 우리가 할 수 있는 최선의 방법이다.

### 참고 문헌

1. IEC 61094-1, Measurement Microphones-Part 1, Specifications for Laboratory Standard Microphones, 1991.
2. R. Barham, "Report on Key Comparison CCAUV.A-K1," NPL Report CAIR 02, 2003.
3. IEC 61094-2, Measurement Microphones - Part 2, Primary Method for Pressure Calibration of Laboratory Standard Microphones by the Reciprocity Technique, 1993.
4. 서상준, 조문제, "가역원리에 의한 1인치 표준 컨덴서 마이크로폰의 정밀 교정," 한국음향학회지, 8, 23-32, (1989).
5. 서상준, 서지갑, 조문제 "한국표준과학연구원 표준 마이크로폰의 음압감도 국제비교 결과," 새물리, 43 (4), 217-222, 2001.
6. ISO 1993, Guide to the Expression of Uncertainty of Measurements.

---

## 저자 약력

---

- 서상준 (Sang Joon Suh)

한국음향학회지 제22권 제6호 참조

- 서재갑 (Jae Gap Suh)

한국음향학회지 제22권 제6호 참조

- 조문재 (Moon Jae Jho)

한국음향학회지 제22권 제6호 참조

- 권휴상 (Huy-Sang Kwon)

한국음향학회지 제23권 제2호 참조