

Audiometric Calibration of Pure Tone Audiometers

Jin-Dong Kim

Department of Speech and Hearing Therapy, College of Health Science, Catholic University of Pusan, Busan, Korea

순음청력검사기의 교정

김진동

부산가톨릭대학교 보건과학대학 언어청각치료학과

Purpose: This review is to introduce the performance characteristics of pure tone audiometer specified in the standards and necessary basic calibration instrumentations, explain the electroacoustic calibration among calibration procedures in order to determine if the pure tone audiometer which is being used currently satisfy the standards. **Methods:** Audiometric calibration consists of three parts; measurement of audiologic equipment performance characteristics, comparison of the measurements to a standard specified in the international or national standards, and adjustment as needed. Calibration checks and adjustments are an essential process for reducing a measurement errors between audiologic equipment and improving the reliability and accuracy of audiologic test result. **Results:** Specific calibration items that should be checked from audiologic equipment are summarized in International Electrotechnical Commission, International Organization for Standardization, and American National Standards Institute standards. Audiologists should use audiologic equipment which meets appropriate standards and carry out the calibration in order to determine whether the result of calibration check satisfies current standards and exists in the range of a specific tolerances. Reliable test results obtained with audiology equipments calibrated support best audiology practice leading to increased confidence of audiologists. **Conclusion:** Audiologists have a responsibility to either check its calibration personally or to arrange for periodic calibration of the equipment by an outside service in order to maintain the accuracy of audiologic equipment. For this, audiologists should have proper ability to check whether audiologic equipment meets to the standardized performance characteristics. However, the performance characteristics and calibration methods vary according to the type of audiologic equipment.

Key Words: Audiometric calibration, Standards, Pure tone audiometer, Electroacoustic calibration.

Received: November 12, 2015 / **Revised:** December 28, 2015 / **Accepted:** January 3, 2016

Correspondence: Jin-Dong Kim, Department of Speech and Hearing Therapy, College of Health Science, Catholic University of Pusan, 57 Oryundae-ro, Geumjeong-gu, Busan 46252, Korea

Tel: +82-51-510-0844 / **Fax:** +82-51-510-0848 / **E-mail:** jdkim@cup.ac.kr

INTRODUCTION

청력검사기의 교정(audiometric calibration)은 검사 결과의 정확성과 신뢰성을 보장하고 청각장애인을 위한 서비스의 질을 향상시킬 수 있는 필수 조건이다. 미국 직업안전위생관리국(Occupational Safety and Health Administration, OSHA) (1996)의 청력보존프로그램 및 산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)(1998)에서는 청력검사기를 정기적으로 점검하도록 요구하고 있다. 국내의 경우 고용노동부 산업재해보상보험법 시행령(대통령령 제

26196호) 별표3(개정 2014. 6. 30) “업무상 질병에 대한 구체적인 인정 기준(제34조제3항 관련)”에서 소음성 난청은 국제표준화기구(International Organization for Standardization, ISO) 기준으로 보정된 순음청력검사기(pure tone audiometer)를 사용해야 한다고 규정하고 있으며, 산업통상자원부 국가기술표준원(Korean Agency for Technology and Standards, KATS)에서는 국가표준기본법 제14조 및 동법 시행령 12조 ③항의 규정에 의거 “교정대상 및 주기 설정을 위한 지침(KOLAS-G-013-2015)”에서 청력계(audiometers)뿐 아니라 청력검사기의 음향교정(acoustic calibration)을 위해 사용되는 다양한 장비예, 음압측

정기(sound level meter, SLM), 기준 음원(reference sound source), 마이크로폰(microphone), 모의 귀(ear simulator), 음향교정기(acoustic calibrator)]를 교정 대상에 포함시키고 있다. 또한 한국산업안전보건공단의 순음청력검사에 관한 지침(KOSHA CODE H-56-2014), 청력보존프로그램의 수립·시행 지침(KOSHA CODE H-61-2012), 청력보존프로그램의 시행을 위한 청력평가 지침(KOSHA CODE H-55-2012)에서 청력검사기의 적절성을 정기적으로 평가하도록 요구하고 있다.

교정점검(calibration check)은 청력검사기가 적정한 표준을 충족하고 있는지 여부와 해당 청력검사기가 시간이 경과함에 따라 변화되었는지 여부를 확인할 수 있게 한다. KATS 웹사이트(<http://www.kats.go.kr/content.do?cmsid=23>)에 따르면 표준(standard)은 과학적 증거와 인정 사례를 기반으로 전문가로 구성된 위원회에서 개발된 기술문서로 다양한 장비의 측정 및 성능 특성(performance characteristics) 등과 관련된 사양(specifications)뿐 아니라 용어 및 정의를 포함하고 있다. 이러한 표준은 장비 사용자 간 일관성(uniformity) 및 호환성(compatibility)을 제공할 목적으로 개발되었다. 따라서 동일한 표준으로 교정된 모든 청력검사기를 이용하여 유사한 청력검사 조건 하에서 동일한 피검자에게 실시된 검사기관 내 및 검사기관 간 청력검사 결과는 동일하게 나타날 것이다. 국가 간 상업적 상호 교류를 증진시키기 위해 청력검사에 관한 국가표준(KATS)과 미국표준[미국표준협회(American National Standards Institute, ANSI)]은 주로 국제전기기술위원회(International Electrotechnical Commission, IEC)와 ISO에서 개발한 국제표준(international standards)을 기반으로 작성되어 호환 가능하며, 일치하도록 만들었기 때문에 기술적인 측면에서 매우 유사하며 다수의 수치[예, “0” dB 청력레벨(hearing level, HL)]이 동일하다. 특히 한국산업규격인 KS C IEC 60645-1(2014)과 KS I ISO 8253-1(2014)은 각각 대응 국제표준인 IEC 60645-1(2012)과 ISO 8253-1(2010)을 한국표준협회에서 번역한 국가표준으로 내용은 동일하다. 또한 KS I ISO 389 등의 표준도 대응하는 국제표준인 ISO 389 등과 일치한다. 1990년대 초반 이후 미국음향학회(Acoustical Society of America, ASA) 및 ANSI는 국제적 일관성을 촉진하기 위해 새로운 모든 표준 및 기존 표준의 개정을 유사한 ISO 및 IEC 표준과 호환 가능하며 일치하도록 만들어 왔다. 예를 들어, ANSI S3.6-2010, 청력검사기의 사양(Specification of Audiometers)은 청력검사기가 어떤 나라에서 제조되거나 또는 사용되는지 여부에 관계없이 모든 종류의 청력검사기가 동일한 사양을 충족하도록 보장하기 위해 다수의 ISO 및 IEC 표준과 일치한다.

청각전문가는 표준에 부합하는 청력검사기를 사용해야 하며, 교정점검 결과가 현재의 규정을 충족시키고 특정한 허용오

차(tolerances) 범위 내에 존재하는지 확인하기 위해 교정을 반드시 수행해야만 한다. 청력검사에서 점검해야 하는 특정한 교정점검 항목은 IEC, ISO, ANSI에서 제공되는 표준에 요약되어 있다. 따라서 본 종설에서는 주로 다양한 종류의 국제표준(ISO 389 series & IEC 60318 series) 및 미국표준(ANSI S3.6) 등을 참조하여 기술할 것이다. 그러나 청력검사기의 종류에 따라 표준화된 성능 특성 및 교정점검 방법이 다르기 때문에 청력검사기의 교정을 직접 실시하려는 청각전문가는 해당 청력검사기와 관련된 최신 표준을 참조해야 한다. 특히 순음청력검사기는 가장 기본적인 청력검사장비이므로 순음청력검사기의 성능 특성에 관한 최신 표준과 실제 사용 중인 순음청력검사기가 표준에 부합하여 작동하고 있는지 여부를 객관적으로 확인할 수 있는 전기음향교정(electroacoustic calibration)에 대한 이해는 가장 중요하다고 할 수 있다. 또한 순음청력검사기의 교정은 향후 다양한 청력검사기의 교정에 대한 교육 및 인증 평가를 국내에 도입하는 데 있어 가장 기본적인 내용을 포함하고 있기 때문에 반드시 숙지해야 할 필요가 있다. 따라서 본 종설에서는 순음청력검사기의 교정에 대해 다음과 같은 순서로 기술할 것이다. 1) 표준에서 규정하고 있는 순음청력검사기의 성능 특성(performance characteristics of pure tone audiometer)과 2) 실제 사용 중인 순음청력검사기가 표준을 충족하고 있는지 여부를 확인하기 위해 필요한 교정점검장비(calibration instrumentation)에 대해 소개하고, 3) 교정점검 방법 중 특히 전기음향교정 절차에 대해 중점적으로 설명하고자 한다.

PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF PURE TONE AUDIOMETERS

Pure tone output levels

순음 출력강도(pure tone output levels)를 의미하는 청력레벨은 출력력사용 출력장치의 종류와 적절한 커플러(coupler)에 따라 표준화된 기준역치강도(reference threshold levels) 또는 기준 영점(reference zero)으로 교정되어 있다[ANSI S3.6-2010; ISO 389-1(1998); ISO 389-2(1994); ISO 389-3(1994); ISO 389-5(2006); ISO 389-7(2005); ISO 389-8(2004), ISO 8253-2(2009); IEC 60645-1(2012)]. 기준역치강도는 기도전도 출력장치의 경우 기준등가역치음압강도(reference equivalent threshold sound pressure levels, RETSPLs)라 부르며, 골도전도 출력장치의 경우 기준등가역치힘강도(reference equivalent threshold force levels, RETFLs)라 한다. 즉 이어폰의 기준등가역치음압강도는 음향 커플러(acoustic coupler)로 측정된 음압강도이며, 기준등가역치힘강도는 역학 커플러(mechanical coupler)로 측정된 힘강도로 각각 정상 또는 0 dB HL과 동일

한 음압강도와 힘강도이다. 기도전도 출력장치 중 확성기의 출력강도는 일측 귀 또는 양측 귀 청취에 대한 기준등가역치음압강도로 규정되어 있다. 일측 귀 청취에 대한 기준등가역치음압강도는 확성기와 환자와의 상대적 위치를 의미하는 각도[입사각(incidence) 또는 방위각(azimuth)]에 따라 규정되어 있다.

모든 종류의 출력장치와 청력검사장비가 해당 기능을 항상 정확하게 수행하는 것은 사실상 불가능하기 때문에 각 장비들의 성능 특성에 대해 수용할 수 있는 편차(acceptable variation), 즉 허용오차를 규정하고 있다. ANSI S3.6-2010에 열거되어 있는 모든 기준역치강도에 대한 허용오차는 125~5,000 Hz 주파수 범위까지 ± 3 dB이며, 6,000 Hz 이상의 주파수에서는 ± 5 dB이다.

Attenuator linearity

청력레벨 조절단자(HL control) 또는 감쇠기(attenuator)를 변화시킬 때 출력장치의 출력강도도 동일한 크기만큼 변화해야 한다. 만약 감쇠기의 변화량과 실제 출력강도가 동일하게 변화한다면 감쇠기의 선형성(attenuator linearity) 또는 출력강도의 선형성이 있다고 말할 수 있다. ANSI S3.6-2010에서는 연속된 두 청력레벨 설정 사이의 출력강도 차이는 5 dB 간격을 초과할 수 없으며, 해당 출력강도 차이의 3/10 또는 1 dB를 초과하여 벗어나지 말아야 하며, 어느 기준을 선택하든지 더 작은 기준을 선택해야 하며 모든 청력레벨 설정에서 선형성의 최대 편차는 ± 2 dB를 초과하지 말아야 한다고 규정하고 있다. 감쇠기의 선형성이 ANSI 사양을 충족하지 않는 경우 문제의 원인을 확인한 후 해당 청력검사를 수리하고 재조정해야 한다.

Frequency

순음청력검사는 주파수 조절단자(frequency control)에 표시된 주파수를 정확하게 생성해야 한다. 주파수 정확도(frequency accuracy)는 순음청력검사에서 출력시킨 주파수가 출력장치에서 어느 정도 수준으로 정확하게 출력되고 있는지를 의미한다. ANSI S3.6-2010에서 규정하고 있는 주파수 정확도는 진단용 및 임상용 순음청력검사의 경우 $\pm 1\%$ 까지 오차를 허용한다. 예를 들어, 표준 진단용 청력검사기인 GSI 61(Grason-stadler, Eden Prairie, MN, USA) 및 AD629(Interacoustics, Middelfart, Denmark)의 경우 주파수 조절단자에서 1,000 Hz를 선택하였다면 출력장치의 실제 출력 주파수는 990~1,010 Hz 사이에 존재해야 한다.

음장용 청력검사는 주파수 변조(frequency modulation, FM) 신호를 생성할 수 있어야 한다. FM 신호는 일반적으로 음장 검사할 때 정재파(standing wave)를 피할 목적으로 주로 사용한다. FM 신호는 전송주파수(carrier frequency), 변조 속도

(modulation rate), 주파수 편차(frequency deviation)로 알려져 있는 세 가지 특성으로 정의할 수 있다. ANSI S3.6-2010은 전송 주파수를 정현파 또는 삼각파로 변조시킬 수 있다고 규정하고 있다. 변조 속도 또는 반복률은 초당 FM 신호의 변화 횟수로 4~20 Hz 범위까지 지정할 수 있고 허용오차는 제조업체가 지정한 수치의 $\pm 10\%$ 이내이다. 주파수 편차는 각 변조에 의해 발생하는 변화의 전체 주파수 범위를 의미한다. ANSI S3.6-2010에서는 전송 주파수 주위의 %로 규정하고 있는데, 주파수 편차는 5~25% 범위까지 지정할 수 있고 허용오차는 제조업체가 지정한 수치의 $\pm 10\%$ 이내이다. 일반적으로 정기적인 교정 과정(routine calibration)에서는 FM 신호의 특성을 측정하지 않는다.

Harmonic distortion

고조파 왜곡(harmonic distortion)은 순음청력검사에서 생성시킨 검사 음의 주파수 이외에 검사 음의 배음(overtone)이 어느 정도 수준으로 발생하는지를 의미한다. 왜곡은 특히 90 dB HL 이상의 높은 출력강도에서 선형적 감쇠의 양이 부족할 경우 발생할 수도 있기 때문에 감쇠기의 선형성 측정 또한 청력검사용 출력장치 또는 청력검사기 자체의 왜곡을 감지하는 데 도움을 줄 수 있다. 고조파 왜곡은 주로 총 고조파왜곡(total harmonic distortion, TDH)을 측정하는 데 출력시킨 신호 강도와 비교하여 % 또는 dB로 나타낸다. ANSI S3.6-2010에서 허용하고 있는 최대 총 고조파왜곡은 이어폰의 경우 125~16,000 Hz 범위에서 최소 $\leq 2.5\%$ 또는 ≤ 32.0 dB이며, 골진동기(bone vibrators)의 경우 최소 250~5,000 Hz 범위에서 $\leq 5.5\%$ 또는 ≤ 25.0 dB이다. ANSI S3.6-2010은 또한 청력검사 주파수 전반에서 저조파(subharmonic)뿐 아니라 제2고조파, 제3고조파, 제4고조파 및 그 이상의 고조파의 허용 가능한 최대 왜곡도 나타내고 있다.

Signal switching

수동식 청력검사기(manual audiometers)의 경우 순음은 일반적으로 꺼져 있으며 단속기(interrupter) 또는 음 스위치(tone switch)를 누르는 경우 생성된다. 대부분의 청력검사는 또한 음을 지속적으로 생성시키는 스위치를 가지고 있는데, 이 경우 단속기 스위치를 누르면 음이 꺼진다. ANSI S3.6-2010에서는 환자가 다른 소리에 반응하지 않고 순음에만 반응하도록 보장하기 위해 점멸비(on/off ratio), 혼선(cross-talk), 상승/하강시간(rise/fall times) 등의 성능 특성을 규정하고 있다.

On/off ratio

점멸비는 음을 생성시킨 상태에서 측정된 이어폰의 출력강도와 음을 끈 상태에서 측정된 이어폰의 출력강도의 차이 값이

다. ANSI S3.6-2010는 이어폰의 경우 ≤ 60 dB HL에서 음이 꺼져 있을 때 기준등가역치음압강도보다 10 dB 더 낮거나 또는 60 dB HL을 초과하는 경우 10 dB를 증가시킬 때마다 10 dB 미만으로 증가해야 한다고 규정하고 있다.

Cross-talk

혼선 또는 교차(crossover)는 불필요한 잡음(unwanted noise)의 한 형태로 한쪽 방향의 이어폰으로 신호를 출력하였지만 다른 방향의 이어폰에서 이 신호가 들리는 것을 의미한다. 비검사측 이어폰에서 측정된 신호 강도는 검사측 이어폰으로 출력시킨 신호 강도보다 최소한 70 dB보다 작아야 한다.

Rise/fall times

상승시간(rise time)은 신호를 발생시킬 경우 꺼져 있는 음이 최종 안정상태의 수치의 -20 dB에서 -1 dB(10~90%까지)까지 증가하는 데 소요되는 시간이다. 하강시간(fall time)은 이 신호의 안정상태 수치를 기준으로 -1 dB에서 -20 dB(90%에서 10%)까지 감소하는 데 소요되는 시간이다. 초과(overshoot)는 음을 생성시키거나 또는 중단시킬 경우 안정상태의 강도가 일시적으로 증가되는 것을 의미한다. ANSI S3.6-2010에서는 음의 상승 및 하강시간을 20 msec 이상 200 msec 이하로 규정하고 있다. 초과는 음을 생성시키거나 중단시킬 때 안정상태의 강도보다 단지 1 dB 높은 경우까지만 허용된다. 또한 음이 꺼져 있을 때의 강도가 음을 생성시켰을 때보다 최소한 60 dB 더 낮아야 한다고 요구하고 있다.

Pulsed tone

순음청력검사는 역치를 구하거나 또는 역치상 측정을 위해 사용할 수 있는 단속음(pulsed tone)을 발생시킬 수 있어야 한다. 일반적으로 단속음은 정상적으로 계속 생성되고 있는 음을 자동적으로 펄스화시키는 스위치로 활성화시킨다. ANSI S3.6-2010에서는 단속음의 경우 -20 dB에서 안정상태 강도인 -1 dB까지 상승하는 데 걸리는 상승시간과 -1 dB에서 안정상태 강도인 -20 dB까지 감소하는 데 걸리는 하강시간이 20~50 msec 이내에 존재해야 한다고 규정하고 있다. 단속음의 지속시간(plateau)은 ≥ 150 msec이어야 하며, 안정상태의 강도보다 5 dB 낮게 측정된 단속음의 점멸 순환주기(duty cycle)는 225 ± 35 msec 이내에 존재해야 한다. 또한 음이 생성되지 않는 위상(off phase) 동안의 신호 강도는 음이 생성되고 있는 위상(on phase) 동안의 신호강도보다 20 dB 낮아야 한다.

Narrowband masking noise generator

차폐잡음(masking noise)은 한쪽 귀로 제시한 검사 음(test

tone)이 다른 쪽 귀로 들리는 가능성을 막기 위해 사용하며, 차폐잡음레벨 조절단자는 최소 5 dB 단위로 조절할 수 있어야 한다. 골진동기를 지원하는 모든 종류의 청력검사기의 경우 협대역잡음(narrowband noise, NBN)을 지원해야 한다. 이것은 기준등가역치음압강도를 비검사귀에 제시한 40 dB의 유효차폐(effective masking, EM)로 표준화시켰기 때문이다(Frank, 1982). ANSI S3.6-2010은 125~16,000 Hz 범위에서 각 협대역잡음의 대역폭을 1/3 옥타브 대역 및 1/2옥타브 대역으로 규정하고 있으며, 협대역잡음의 출력강도는 유효차폐강도(EM level)로 교정하도록 요구하고 있다. 0 dB 유효차폐강도는 차폐신호와 순음을 같은 귀에 제시하였을 때 0 dB HL로 제시된 순음을 50%의 시간 동안 차폐할 수 있는 차폐신호의 음압강도이다.

ANSI S3.6-2010은 모든 유형의 이어폰에서 125~8,000 Hz 범위까지 순음의 주파수별 기준등가역치음압강도에 교정 계수를 추가시킨 값을 0 dB 유효차폐에 해당하는 협대역잡음의 음압강도라고 규정하고 있다. 이 교정 계수는 ISO 389-4(1994)에서 직접 인용하였으며, 임계 대역폭(critical bandwidth)(Zwicker & Terhardt, 1980)을 가지는 협대역잡음은 -4 dB의 신호대잡음비(signal-to-noise ratio)에서 해당 협대역잡음과 동일한 주파수의 순음만을 차폐할 것이라는 가정 하에 유도되었다. 협대역잡음의 경우 차폐잡음 대역폭은 적절해야 하며 측정된 음압강도 값이 기하학적 중심 주파수에 대한 기준등가역치음압강도의 -3~+5 dB 이내에 존재해야 한다.

Reference signals

일부 청력검사는 청력검사기의 두 번째 채널에서 독립적으로 제어할 수 있는 기준 신호를 사용해야 한다. 진단용 청력검사기는 검사 음과 함께 교대로 제시할 수 있는 기준 음(reference tone)을 가지고 있어야 하며, 때로는 다른 채널에서 생성된 검사 음과 동시에 제시시킬 수 있는 기준 음도 지원해야 한다. ANSI S3.6-2010은 두 번째 채널에서 생성된 기준 신호의 성능 특성으로 주파수 범위, 청력레벨 범위, 출력강도 증가 단위(increments), 출력강도 등을 규정하고 있다. 기준 신호의 필요 주파수 범위는 250~6,000 Hz, 청력레벨 범위는 250 Hz에서 0~80 dB HL, 500~6,000 Hz에서 0~100 dB HL까지 지원해야 하며, 출력강도 증가량 단계(increment step)는 진단용 및 임상용 순음 청력검사기의 경우 2.5 dB 이내 단계를 지원해야 한다. 기준 음 출력강도는 검사 음과 동일한 기준등가역치음압강도로 교정해야 하며, 500~4,000 Hz에서 검사 음 출력강도의 ± 3 dB 이내에 존재해야 하며, 250 Hz와 6,000 Hz에서는 ± 5 dB 내에 존재해야만 한다. 또한 두 번째 채널을 작동시켜 기준 신호를 생성할 때, 첫 번째 채널에서 생성된 검사 신호의 출력강도는 ± 1 dB를 초과하여 변화되면 안된다.

CALIBRATION INSTRUMENTATION

청력검사의 교정점검 절차를 좀 더 잘 이해하기 위해서는 점검해야 하는 청력검사의 성능 특성뿐 아니라 교정점검을 실시하기 위해 사용되는 장비를 이해해야만 한다. 기본적인 전기음향교정장비에는 1) 커플러, 2) 마이크로폰(microphone), 3) 1/3 옥타브 대역 필터를 가지고 있는 음압측정기, 4) 음향교정기, 5) 전압계(voltmeter), 6) 전자 계수기/시간 기록기(electronic counter/timer), 7) 오실로스코프(oscilloscope) 등이 포함된다. 그 외 스펙트럼 분석기, 왜곡 측정기(distortion meter) 및 초과, 상승/하강시간, 포락선 검출기(envelope detector)와 같은 장비 또한 사용할 수 있다. 일부 제조업체들은 개별 장비 또는 통합 장치로 패키지화된 장비를 포함하는 청력검사 교정용 장비 세트(audiometer calibration kit)를 개발하여 판매하고 있다(Audiometer Calibration & Electroacoustic Test Systems, Larson Davis, Depew, NY, USA).

Coupler

커플러는 청력검사용 출력장치의 출력을 측정하기 위해 출력장치와 음압측정기를 연결하는 표준 장치이다. 커플러는 음향 커플러와 역학 커플러로 구분하며, 모양과 체적이 표준화되어 있고 교정된 마이크로폰이 포함되어 있다. 음향 커플러는 인공귀(artificial ear)라고도 하며, 이어폰으로 출력된 음압을 측정하기 위하여 사용된다. 기도전도 출력장치 중 귀걸이형 이어폰(supra-aural earphone)의 출력은 National Bureau of Standards(NBS) 9-A coupler, IEC 60318-3 coupler[IEC 60318-3(2014)] 등을 이용하여 측정한다. 귀덮개형 이어폰(circumaural earphone)의 출력은 IEC 60318-1 coupler[IEC 60318-1(2009)]에 유형 1 및 2 평판형 어댑터를 추가시켜 측정하는데, 단독으로 사용할 경우 귀걸이형 이어폰의 출력 또한 측정할 수 있다. 삽입형 이어폰(insert earphone)의 경우에는 hearing aid (HA) type 1, 2 coupler[ANSI S3.7-1995(R2008)]와 폐쇄형 귀모의장치(occluded ear stimulator)[ANSI S3.25-2009(R2014); IEC 60318-4(2010)]를 이용한다.

역학 커플러는 골진동기의 출력 힘강도를 측정하는 데 사용되는 장치로 표준화된 역학 임피던스를 가지고 있고, 전기기계식 변환기(electromechanical transducer)를 포함하고 있다. 골진동기는 일반적으로 유양돌기 위에 위치시키기 때문에 역학 커플러를 종종 인공 유양돌기(artificial mastoid)라고 부른다. 인간 귀의 음향 임피던스를 커플러로 복제하기 어려운 것처럼 머리의 역학 임피던스를 인공유양돌기로 복제하기 어렵다. 상업적으로 이용 가능한 인공유양돌기가 ANSI(S3.13-1972) 또는 IEC[IEC 60373(1971)] 표준의 역학 임피던스 요구사항을 충족

하고 있지 않고 있기 때문에(Dirks et al., 1979) 이용할 수 있는 Brüel & Kjaer(B&K; Nærum Denmark) 4930 인공유양돌기에 더욱 밀접하게 부합되도록 ANSI 및 IEC 표준은 모두 개정되었다[ANSI S3.13-1987(R2012); IEC 60318-6(2007)]. 비록 B&K 4930 커플러의 역학 임피던스가 ANSI 및 IEC 표준에 완전히 부합되지는 않지만 골진동기의 출력 측정용으로 가장 일반적으로 사용되는 장치이다.

Microphone

모든 종류의 커플러 측정에는 압력 콘덴서 마이크로폰(pressure condenser microphone)을 사용해야 하며, 모든 종류의 확성기 측정에는 음장 콘덴서 마이크로폰(sound field condenser microphone)을 사용해야 한다. 콘덴서 마이크로폰은 1/8", 1/4", 1/2", 1"로 4가지 표준 크기(마이크로폰의 직경을 의미함)로 제공되며, 자체의 잡음 강도가 낮고 넓은 주파수 범위에서 평탄한 주파수 반응을 가지고 있으며, 넓은 강도 범위에 걸쳐 선형 방식으로 작동한다. ANSI S3.6-2010에서는 마이크로폰의 민감도 때문에 귀걸이식 이어폰의 교정용으로 1"와 1/2"를 사용하도록 규정하고 있다. 일반적으로 마이크로폰의 크기가 더 작을수록 마이크로폰의 상위 차단 주파수가 더 높아지고 민감도는 낮아진다. 민감도는 음압(sound pressure)을 전압으로 변환시키는 마이크로폰 효율성의 척도로 일반적으로 pascal 당 millivolts 또는 dB re: 1 V/Pa로 보고된다. 콘덴서 마이크로폰은 온도 및 습도에 민감하므로 음압측정기를 교정할 때 온도와 습도를 고려해야 한다.

Sound level meter

ANSI S1.4-1983(R2006)에서는 음압측정기가 포함하고 있는 기본적인 기능에 기초하여 여러 가지 종류로 규정하고 있는데, 청력검사의 교정점검용 음압측정기는 1/3 옥타브 필터를 가지고 있는 유형 1 음압측정기[ANSI S1.11-2004(R2009)] 및 콘덴서 마이크로폰을 사용해야 한다. 음압측정기는 마이크로폰, 증폭 회로, 시간 가중 회로, 필터링 회로 등을 하나의 장치에 통합시킨 측정기로 실질적으로 여러 계측 장비의 기능을 단일 장비에서 제공한다. 예를 들어, Larson Davis에서 제공하는 청력검사 교정 시스템(Audiometer Calibration & Electroacoustic Test Systems)에 포함되어 있는 정밀 또는 유형 1 음압측정기(System 824 SLM)는 순음의 출력강도, 출력강도의 선형성, 고조파 왜곡, 주파수 정확도, 혼선, 주파수 변조음, 펄스음의 점멸비, 상승/하강시간 등과 협대역잡음의 출력강도 등을 측정할 수 있다. 유형 1 음압측정기는 50~4,000 Hz의 범위에서 ± 1 dB의 허용오차를 가지고 있는 정밀 음압측정기로 느린 반응(slow response) 및 빠른 반응(fast response)이라 불리

는 두 가지 종류의 반응 통합시간(response integration times)을 가지고 있다. 느린 반응 설정은 차폐신호 또는 주변 소음처럼 일반적으로 강도가 4 dB보다 더 크게 변동하는 신호를 측정하는 데 유용하다. 빠른 반응 설정은 순음처럼 강도의 변화가 거의 없는 신호를 측정하는 데 사용된다. A 가중치(dBA)는 저주파수에 대한 청각 민감도가 저하되어 있는 인간 청각 시스템의 주파수 반응 특성과 거의 일치하는 가중치를 제공하기 위해 사용된다. 1/3 옥타브 대역 필터링은 해당 필터 대역폭의 매우 좁은 주파수 범위의 소리만을 측정하고 대역폭 외부의 주파수를 가지고 있는 다른 소리를 측정하지 않기 때문에 사용하며 순음의 주파수를 측정하는 데 적용할 수 있다. 따라서 순음청력검사의 성능 특성을 점검하기 위해서는 음압측정기의 시간 가중 회로는 느린 반응으로, 필터링 회로는 dBA와 1/3 옥타브 대역 필터로 설정해야 한다.

Acoustic calibrator

음향교정기는 한 가지 종류 이상의 주파수에서 이미 알고 있는 특정 강도의 순음(예, 114 dB SPL@251Hz)을 발생시키는 장치로 음압측정기의 교정을 위해 사용된다[ANSI S1.40-2006(R2011)]. 음압측정기의 증폭 이득은 각 마이크로폰의 민감도를 고려하여 조정해야 하는데, 음압측정기의 증폭 이득을 변경하지 않고 마이크로폰만 교체하는 경우 음압측정기는 정확한 음압강도를 표시할 수 없을 것이다. 따라서 음압측정기를 이용하여 음향교정점검을 실시할 경우 순음청력검사의 성능 특성을 점검하기 전에 음향교정기를 이용하여 음압측정기를 교정해야 한다. 가장 이상적인 음압측정기 교정 방법은 다양한 주파수에서 다양한 음압강도를 생성할 수 있는 음향교정기를 이용하는 것이다.

Voltmeter

전압계는 전자기기의 출력을 측정하기 위해 사용된다. 음향 출력장치의 출력은 파형으로 나타나며 비선형적인 범위를 제외하고는 입력 전압(input voltage)에 정비례하므로 전압계는 청력검사용 출력장치, 전선, 청력검사에 문제점이 존재하는지 여부를 확인하는 데 사용할 수 있다. 일부 음압측정기는 또한 전압계로서의 기능을 할 수 있다.

Oscilloscope

오실로스코프는 여러 가지 목적(예, 전압계, 시간 기록기, 주파수 모니터)으로 사용할 수 있지만 주요 용도는 상승/하강 시간, 초과, 단속음의 지속시간 등의 성능 특성을 측정하는 것이다. 또한 오실로스코프는 매우 낮은 강도의 전압을 측정할 수 있기 때문에 한쪽 출력단자로 보낸 신호가 다른 출력단자로 교

차되고 있는지 여부를 측정하는 데 사용할 수도 있다.

Electronic counter/timer

전자 계수기/시간 기록기는 주파수 및 시간을 측정하기 위해 사용된다. 이 장치는 일반적으로 1 Hz 이내로 주파수를 측정할 수 있으며 수백 분의 1초 이내로 시간 간격을 측정한다.

CALIBRATION PROCEDURE

순음청력검사의 교정점검은 기능점검(functional check), 음향교정(acoustic calibration), 정밀교정(exhaustive calibration) 등으로 구분할 수 있다(OSHA, 1996). 기능점검은 특별한 장비를 사용하지 않고 검사를 시작하기 전 청각전문가의 시각점검과 듣기점검을 통해 평가하는 방법으로 매일 또는 주간 단위로 실시한다. 기능점검에는 청각전문가 자신이나 청각역치를 이미 알고 있는 사람을 대상으로 순음의 역치 변동을 점검하는 생물학적 점검도 포함되어 있다. 생물학적 점검에서 10 dB HL 이상의 역치 변동이 관찰되는 경우 음향교정점검을 실시해야 하고, 음향교정점검 결과와 표준에서 규정하고 있는 출력강도와 의 차이가 15 dB 이상인 경우 정밀교정점검을 실시해야 한다.

순음청력검사의 전기음향교정은 다양한 종류의 전기음향 장비 및 전자장비로 청력검사나 각각의 청력검사용 출력장치의 성능 특성을 측정하고, 측정된 수치가 표준에서 규정하고 있는 표준 수치와 일치하거나 표준 사양 범위 내에서 작동하는 있는지 여부를 점검하고 일치하지 않을 경우 조절하는 과정을 의미한다. 전기음향교정점검 항목에는 순음 및 차폐잡음의 출력강도, 감쇠기의 선형성, 주파수 정확도, 왜곡, 신호 전환 등의 특성이 포함된다. 전기음향교정점검으로 측정된 수치가 표준의 허용오차 범위 내에 존재한다면 해당 청력검사는 교정되어 있다고 말할 수 있다.

순음청력검사의 음향교정점검에 필요한 전기음향장비에는 1/3 옥타브 밴드 필터를 지원하는 유형 1 음압측정기, 커플러, 마이크로폰, 전치증폭기(preamplifier), 음향교정기 등이 있다. 음향교정을 실시할 경우 출력장치의 종류에 따라 적절한 커플러 마이크로폰을 음압측정기에 연결하고 가장 먼저 음향교정기를 이용하여 음압측정기를 교정해야 한다. 음향교정기를 사용하는 방법은 매우 간단하다. 음압측정기의 전원을 켜고 주파수 응답 반응을 광대역(수평형 가중치 또는 수평형 가중치를 이용할 수 없는 경우 dBC)으로 설정하고 마이크로폰 위에 음향교정기를 위치시킨 후 작동시킨다. 음압측정기에 음향교정기의 출력(예, 114 dB SPL)이 표시될 때까지 음압측정기의 이득을 조정한다.

일단 음압측정기가 교정된 경우 음향교정기를 제거하고 측정

할 청력검사용 출력장치에 따라 마이크로폰 위에 적절한 커플러를 장착한다. 예를 들어, TDH-39, TDH-49/50과 같은 귀걸이형 이어폰의 경우 6 cc 커플러(NBS 9-A or IEC 60318-3 or 60318-1 coupler), 삽입형 이어폰(예, Etymotic ER-3A earphones)의 경우 2 cc 커플러(ANSI HA-1 or HA-2 coupler or IEC occluded ear simulator), 귀덮개형 이어폰 중 Koss HV/1A 경우 60318-1 coupler에 유형 2 평판 어댑터를 함께 장착시킨다. 골진동기의 경우 6 cc 커플러 상단에 역학 커플러를 추가 장착한다. 청력검사용 출력장치의 교정점점은 이어폰 및 골진동기를 적절한 커플러의 상단에 위치시키거나 또는 연결한 후 각 출력장치를 착용시켰을 때의 헤드밴드 고정력(static headband force)에 해당하는 적절한 힘을 제공하기 위해 출력장치 상단에 적절한 중량을 가지고 있는 무게추 등을 이용하여 부하를 가한 상태에서 측정한다. 청력검사용 출력장치에 따른 커플러 선택 지침과 헤드밴드 고정력, 출력장치 상단에 인가해야 할 부하 중량을 Table 1에 나타내었다.

출력장치의 위치는 125 Hz 또는 250 Hz의 연속 순음을 70 dB HL로 출력시켜 점검하며, 이때 음압강도가 가장 높게 생성되는 위치로 출력장치를 조절한다. 이후 앞서 기술한 전기음향 교정점점 항목을 좌/우측 출력장치에서 측정한 후 표준에서 규정하고 있는 순음청력검사의 성능 특성과 비교하여 점검한다. 청력검사가 두 개의 채널을 가지고 있는 경우 다른 채널도 동일한 과정으로 측정을 반복해야 한다.

Calibration checks and adjustments of pure tone output levels

청력검사용 출력장치의 순음 출력강도 점검은 음압측정기의 측정 가능 범위 내에 존재하고 주변 소음에 영향을 받지 않도록 기준등가역치음압강도의 경우 일반적으로 70 dB HL, 기준등가역치힘강도의 경우 250 Hz에서 20 dB HL, 500~4,000 Hz에서는 50 dB HL에서 주파수별 음압강도 및 힘강도를 측정하고 교정 양식지에 측정 결과를 기입한다. 청력검사의 출력강

도인 청력레벨 단위는 실제 청력검사의 출력강도에 주파수별 기준등가역치강도를 합산하여 음압강도 또는 힘강도 단위로 변환한다. 이와 같이 두 개의 채널에서 모두 측정한 이후 이어폰의 출력강도가 교정되어 있는지 여부를 판단하기 위해 음압 측정기에서 측정된 음압강도를 측정 과정 동안 사용된 출력장치의 종류 및 커플러를 고려하여 출력강도에 해당하는 기준등가역치음압강도와 비교하여 점검한다.

이어폰의 경우 주파수별로 측정된 음압강도를 표준에서 규정하고 있는 강도[청력검사기 출력레벨 설정 값(HL setting) + 기준등가역치음압강도]와 비교한다. 예를 들어, 2,000 Hz에서 TDH 49/50 이어폰을 NBS 9A coupler로 측정한 기준등가역치 음압강도는 11.0 dB SPL이다. 청력검사의 출력강도를 70 dB HL 설정하여 출력하였기 때문에 음압강도는 81.0 dB SPL로 측정되어야 한다.

확성기의 출력강도를 측정하기 전에 확성기의 출력을 일측 귀 청취에 대한 기준등가역치음압강도로 교정할 것인지 아니면 양측 귀 청취에 대한 기준등가역치음압강도로 교정할지를 결정해야 한다. 일측 귀 청취에 대한 기준등가역치음압강도로 교정하기로 결정하였다면 이후 각도라고 규정되어 있는 확성기와 환자와의 상대적 위치에 대해 결정을 내려야 한다. 일반적으로 한 개의 확성기를 사용하는 경우 확성기를 0° 방위각, 두 개의 확성기를 사용하는 경우라면 각 확성기는 환자의 양측 45° 방위각에 위치시켜야 한다. 음장 교정 과정에서 주변 소음에 영향을 받지 않도록 청력검사의 검사 신호 출력강도가 70 dB HL로 생성되도록 설정해야 한다. 각각의 확성기에서 각 주파수별 음압강도 또는 1/3 옥타브 대역 음압강도를 측정하고 검사 동안 사용되고 있는 모든 신호 유형을 교정양식지에 기록한다. 모든 측정이 완료된 후 측정된 강도를 “기준등가역치음압강도 + 70 dB”과 비교하여 점검한다.

골진동기의 출력강도 점검은 주파수별로 측정된 강도를 “기준등가역치힘강도 + 청력검사기 출력레벨 설정 값”과 비교하여 점검한다. 예를 들어 골진동기를 유양돌기에 배치하여 청력검

Table 1. Coupler selection guide and static headband force and weight according to audiometric transducers type

Audiometric transducer type	Examples	Coupler	Static headband force	Weight
Supra-aural earphone	Telephonics TDH 39, TDH 49/50	NBS 9-A or IEC 60318-1 or IEC 60318-3 coupler	4.5 ± 0.5 N	500 g
Insert earphones	Etymotic ER-3A or ER-5A, E-A-RTone 3A or 5A	HA-1, HA-2 coupler, occluded ear stimulator		
Circumaural earphone	Sennheiser HDA200, Koss HV/1A	IEC 60318-1 coupler with type 1 adapter plate (HDA200) or 2 adapter plate(Koss HV/1A)	9.5 ± 0.5 N	900-1000 g
Bone vibrator	Radioear B-71	Mechanical coupler (B&K 4930 artificial mastoid) with NBS 9-A or IEC 60318-1	5.4 ± 0.5 N	550 g

TDH: Telephonics Dynamic Headphone, NBS: National Bureau of Standards, IEC: International Electrotechnical Commission, ER: etymotic research, HA-1: hearing aid type 1 coupler, HV: high velocity

사기의 출력레벨을 1,000 Hz에서 50 dB HL로 설정한 경우 힘강도는 1,000 Hz의 기준등가역치힘강도가 42.5 dB이며, 청력검사기의 출력레벨을 50 dB HL로 출력하였기 때문에 92.5 dB re: 1 μN으로 측정되어야 한다.

각 출력장치에서 측정된 순음의 주파수별 기준등가역치강도(기준등가역치음압강도 또는 기준등가역치힘강도)가 원하는 출력강도(기준등가역치음압강도 또는 기준등가역치힘강도 + 청력검사기의 출력레벨 설정 값)의 ± 3 dB 이내에 존재하지 않는 경우 청력검사기 내부 교정 모드를 이용하여 각 출력장치의 순음의 출력강도를 조절해야 한다. 현재 시판 중인 대부분의 청력검사기는 청력검사용 출력장치의 출력강도를 쉽게 변경할 수 있는 내부 교정 모드(calibration mode)를 가지고 있다. 구형 청력검사기는 조절 가능한 전위차계(potentiometer)를 가지고 있거나 또는 원하는 출력강도를 얻기 위해 일부 내부 저항기를 교체해야 한다.

Calibration checks and adjustments of attenuator linearity

감쇠기의 선형성 측정은 청력검사기 청력레벨 조절단자를 변화시킬 때 청력검사기의 출력강도도 동일한 크기만큼 변화시키는지 확인하기 위해 수행하며 청력검사기를 전기적으로 직접 점검하거나 청력검사기의 출력장치를 통해 음향적으로 점검할 수도 있다. 2채널 청력검사기의 경우 각 채널별로 감쇠기의 선형성을 측정해야 한다. 음향적인 방법으로 감쇠기의 선형성을 측정하는 경우 음압강도는 1,000 Hz 순음을 이용하며 음압측정기의 필터를 1,000 Hz로 설정한 후 청력레벨 조절단자를 최대강도로 설정하고 5 dB 단계로 감소시키거나 또는 70 dB HL을 기준 강도로 이용하는 경우 양방향으로 5 dB 단계씩 변화시켜 측정하고 기록해야 한다.

ANSI S3.6-2010 표준을 충족하기 위해서 감쇠기는 간격 단계의 0.3 이내 또는 1 dB 중 더 작은 선형성을 가져야만 한다. 즉, 출력강도를 5 dB 간격으로 변경한 경우 청력검사기는 출력강도 간격 당 4~6 dB 사이에서 감쇠되어야 한다. 감쇠의 간격이 2 dB인 경우 판독은 간격당 1.4~2.6 dB 사이에 존재해야 한다(0.3 × 2 dB = 0.6 dB, 이 수치는 1 dB보다 작은 수치이다). 또한 ANSI S3.6-2010에 규정되어 있는 것처럼 감쇠기의 모든 출력레벨 설정 값에서 기도전도 출력장치의 음압강도 및 골전동기의 힘강도는 125 Hz에서 5,000 Hz 범위까지 ± 3 dB 이내, 6,000 Hz 이상의 주파수에서는 ± 5 dB 이내에 존재해야 한다. 감쇠기의 선형성은 매년 점검해야 한다. 청력검사기를 1 또는 2 dB 간격으로 감쇠하여 임상적 목적으로 사용하는 경우 이러한 작은 량의 감쇠 단계도 점검해야 한다.

Calibration checks and adjustments of frequency accuracy

순음청력검사기에서 출력된 신호의 주파수를 정확하게 측정하기 위해서는 전자식 주파수 계산기를 이용하여 점검해야 한다. 주파수는 출력장치보다 청력검사기의 발진기(oscillator)에 의해 결정되기 때문에 청력검사기의 전기적 출력을 주파수 계산기에 직접 연결시켜야 한다. 즉, 청력검사기의 출력단자에서 이어폰을 뺐은 후 주파수 계산기의 입력단자를 청력검사기의 출력단자에 연결한 후 청력검사기의 출력 신호가 공칭 주파수(nominal frequency)와 일치하는지 여부를 전자식 주파수 계산기를 이용하여 확인한다. 일부 음압측정기는 음향적으로 주파수 정확도를 점검할 수 있도록 지원하고 있다.

청력검사기의 유형에 따라 필수적인 검사 주파수를 요구하고 있는 것 이외에, 부가적으로 1/2 옥타브 대역 주파수, 1/3 옥타브 대역의 주파수를 지원할 수도 있다. 주파수의 정확성은 순음청력검사기의 주파수 조절단자에서 지원하는 모든 주파수에서 측정하여 교정 양식지에 기록한다. 측정된 주파수가 청력검사기에 표시된 주파수와 비교하여 표준에서 규정하고 있는 허용오차 범위에 존재해야 한다. 주파수 정확도는 청력검사기를 최초로 설치한 후와 그 이후 매년 확인해야 한다. 그럼에도 불구하고 이들 주파수가 합리적으로 양호한 정확도를 유지하고 있는지 여부를 판단하기 위해 매일 청력검사기에 대한 등기점검을 시행하는 것이 바람직할 것이다.

Calibration checks and adjustments of harmonic distortions

각 이어폰 유형의 고조파 왜곡은 1/3 옥타브 대역 필터를 가진 음압측정기를 커플러 마이크로폰을 가진 적절한 커플러와 연결한 후 커플러 위에 이어폰에 장착하여 측정한다. ANSI S3.6-2010에서는 귀걸이형 이어폰에 대한 고조파 왜곡을 125 Hz에서 75 dB HL, 250 Hz 및 6,000~16,000 Hz 범위에서 90 dB HL, 500~4,000 Hz 범위에서 110 dB HL 또는 최대 청력레벨 중 더 낮은 중 낮은 강도로 측정하도록 규정하고 있다. 삽입형 이어폰의 경우에는 귀걸이형 이어폰보다 10 dB 낮은 강도에서 측정한다. 이어폰의 음압강도는 청력검사기를 적절한 청력레벨로 조절한 후 음압측정기의 1/3 옥타브 대역 필터를 검사 주파수로 조정하여 측정하고 기록한다. 이후 청력검사기의 설정을 변경하지 않은 상태에서 음압측정기의 필터를 검사 주파수의 제2고조파로 변경하여 이어폰의 음압강도를 측정하고 기록한다. 음압측정기 필터의 중심 주파수가 제2고조파의 주파수와 일치하지 않는 경우 음압측정기 필터의 중심주파수를 한 단계 더 높은 값으로 변경하여 재측정한다. 이러한 절차를 더 높은 주파수의 모든 고조파를 측정할 때까지 반복한다. 이러한

방법으로 한 주파수에 대한 고조파 왜곡을 측정한 이후 다음 주파수의 고조파 왜곡 및 모든 고조파를 측정하며, 청력검사기의 각 이어폰 유형별 모든 검사 주파수에서 고조파 왜곡을 측정할 때까지 계속된다.

골진동기의 고조파 왜곡은 청력레벨을 250 Hz에서 20 dB, 500 Hz와 750 Hz에서 50 dB, 1,000~5,000 Hz 범위에서 60 dB로 설정하는 것을 제외하고는 기도전도 출력장치의 고조파 왜곡 측정 절차와 유사한 절차를 사용하여 측정한다. ANSI S3.6-2010에서는 5,000 Hz를 초과하는 주파수의 고조파 측정은 음향학적 제한점과 역학 커플러의 제한점 때문에 부정확한 것을 인정하여 전기적 측정 방법을 허용하고 있다.

Calibration checks and adjustments of on/off ratio

점멸비의 점검은 음이 꺼져 있는 경우 들리지 않도록 보장하기 위해 수행한다. 점멸비는 음향적인 방법으로 점검할 수 있다. 음향적으로 점멸비를 점검하는 경우 청력레벨을 최대로 설정한 후 이어폰으로 음을 출력시킨 상태와 출력시키지 않은 상태에서 커플러의 출력을 음압측정기로 측정해야 한다. 음을 생성시킨 상태와 음을 끈 상태에서 측정한 두 값의 차이는 ≥ 70 dB이 되어야 하며 이 결과를 교정용 양식지에 기록해야 한다.

Calibration checks and adjustments of corss-talk

혼선은 점멸비 점검 방법처럼 음향적 방법으로 측정할 수 있다. 혼선은 청력검사기의 청력레벨을 ≥ 70 dB HL로 설정하여 검사측 이어폰으로 출력시켜 출력강도를 측정한 후 다른 쪽 이어폰, 즉 비검사측 이어폰에서도 출력을 측정한다. 검사측 이어폰에서 측정된 출력강도와 비검사측 이어폰에서 측정된 신호강도의 차이가 70 dB 이내인 경우 교정을 해야 한다.

Calibration checks and adjustments of rise/fall times

음의 상승/하강시간은 일반적으로 60 dB HL 이하에서 1,000 Hz 순음으로 점검한다. 상승/하강시간 및 초과에 검증은 음향적 방법으로 측정할 수 있으며, 또한 청력검사기가 이어폰으로 부하를 주도록 청력검사기의 출력단자를 오실로스코프에 연결하여 전기적으로 실시할 수 있다.

Calibration checks and adjustments of pulsed tones

단속음의 측정은 일반적으로 오실로스코프를 이용하여 전기적으로 실시하지만 일부는 전자 계수기/시간기록계 및 음향적 방법으로 측정할 수 있다.

Calibration checks and adjustments of NBN

협대역잡음의 출력강도 점검은 순음 출력강도 점검 방법과

동일하다. 그러나 협대역잡음의 출력강도는 기도전도 출력장치의 주파수별 순음의 기준등가역치음압강도와 유효차폐강도 설정 값을 추가시킨 값과 동일해야 한다. 예를 들어, TDH 49 이어폰을 NBS 9A coupler로 측정한 경우 70 dB의 유효차폐강도로 설정한 1,000 Hz 협대역잡음의 음압강도는 83.5 dB SPL 이어야 한다. 그 이유는 1,000 Hz 협대역잡음의 교정 계수가 6 dB이며, TDH 49 이어폰에서 1,000 Hz의 기준등가역치음압강도는 7.5 dB이며, 유효차폐강도를 70 dB로 설정했기 때문이다. 따라서 모든 주파수에서 측정된 협대역잡음의 음압강도가 원하는 음압강도(교정 계수 + 이어폰의 기준등가역치음압강도 + 유효차폐강도 설정 값)의 ± 3 dB 이내에 존재하지 않는 경우 청력검사기 내부 교정 모드를 이용하여 각 출력장치에서 협대역잡음의 출력강도를 조절해야 한다.

협대역잡음의 대역폭 교정점검용으로 가장 이상적인 장비는 주파수 영역 평균화 및 저장 기능이 있는 스펙트럼 분석기이다.

DISCUSSIONS

순음청력검사 결과의 정확도와 신뢰도는 순음청력검사기의 교정 상태, 검사실 환경, 청력 측정 방법, 청각전문가의 숙련도, 피검자의 협조 등에 의해 영향을 받을 수 있다. 특히 교정점검 및 검사실 환경에 대해서는 다양한 국제표준 및 국가표준과 더불어 국가규정에서 중요하게 다루고 있다. 청력검사기의 교정은 정기적으로 실시해야 하며 청력검사 측정 환경은 검사실을 규정하고 있는 표준을 충족시켜야 한다.

국내 특수건강진단기관에서 사용 중인 순음청력검사기의 교정에 대한 연구를 살펴보면 전혀 교정을 하지 않는 경우가 약 30% 정도로 교정에 대한 중요성을 간과하고 있었으며, 교정을 하는 경우에도 약 70% 정도는 검사자가 음향교정점검 방법을 이해하지 못하고 있는 실정이었다(Kim et al., 1994). 특히 음향 교정은 최근까지도 체계적으로 수행하고 있지 않고 있었다(Kim et al., 2004; Kim, 2007, 2009). 또한 병원에 근무하는 청각전문가 및 보청기 판매자 대부분도 청력검사기 교정점검의 중요성은 알고 있으나 교정점검 방법을 정확하게 알고 있지 않으며 주로 외부 업체의 전문가에게 위탁하고 있는 실정이다.

청력검사기의 교정은 세 부분으로 구성되어 있다. 즉, 청력검사기 성능 특성을 측정하고, 측정치와 표준에서 규정하고 있는 표준 값의 비교하며, 측정치가 표준의 허용오차에서 벗어날 경우 조정해야 한다. 특히 전기음향교정점검 및 조정은 청각전문가 또는 전문적으로 청력검사장비를 판매하거나 정비하는 회사에 고용되어 있는 숙련된 기술자가 실시한다. 교정을 실시하려는 전문가가 일반적으로 교정을 실시하는 가장 효율적인 방법을 찾고 교정 결과를 기록한다. 궁극적으로 장비 설명서 및

청력검사기의 교정과 관련된 국제표준 및 국가표준을 대체할 방법은 없다. 이러한 문제를 해결하기 위한 노력의 일환으로 최근 연구에서는 순음 및 차폐음의 출력강도를 ANSI S3.6-2004 표준에 부합되게 교정할 수 있는 자동 음향 보정 시스템을 개발하여(Kim et al., 2010), 컴퓨터 기반 순음청력검사 시스템(Kim et al., 2009; Song et al., 2010)과 다양한 청력검사 소프트웨어(Kang et al., 2010a, 2010b, 2011)에 적용하였다.

ANSI S3.6-2010에 열거되어 있는 모든 기준역치강도에 대한 허용오차는 125~5,000 Hz 주파수 범위까지 ± 3 dB이며, 6,000 Hz 이상의 주파수에서는 ± 5 dB이다. 이론적으로 양측 이어폰 사이의 출력강도의 차이는 125~5,000 Hz 주파수 범위까지 6 dB, 6,000 Hz 이상의 주파수에서는 10 dB까지도 여전히 허용오차 범위 내에 존재할 수 있을 것이다. 그러나 이 상황은 동일한 사람에서 양측 귀의 청력역치 차이를 해석하는 경우와 서로 다른 검사에서 청각 민감도의 변화를 판단하는 데 불리한 점이 될 수도 있을 것이다. 이렇게 극단적인 상황이 발생하는 경우 또는 청력검사용 출력장치의 출력강도가 허용오차를 벗어난 경우 청력검사기의 출력이 너무 강하거나 또는 너무 작으므로 해당 청력검사기의 출력강도를 교정해야 한다.

원칙적으로 주파수에 관계없이 청력검사용 출력장치의 출력이 기준등가역치강도와 비교해서 ± 2.5 dB 이내에 존재하지 않거나 내부 교정 모드로 정정할 수 없는 경우 청각전문가는 교정 카드를 개발해야 한다. 교정 카드는 각 주파수에서 우수리를 떼고 가장 근처에 있는 5 dB로 조정해서 청력레벨 단위로 설정한다. 표준에서 규정하고 있는 기준역치강도보다 청력검사용 출력장치의 출력강도가 낮은 경우 낮게 나온 dB 만큼 차감시키고, 출력강도가 높은 경우 높게 나온 dB 만큼 추가시켜 청력도에 기입해야 한다. 만약 10 dB 이상의 정정이 필요한 경우에는 해당 청력검사기를 수리하고 재교정해야 한다.

순음 출력강도의 선형성 측정에서 저자는 일부 청력검사기는 1,000 Hz의 출력이 선형적임에도 불구하고 4,000, 6,000, 8,000 Hz의 출력은 선형적이지 않을 수도 있음을 경험하였다. 따라서 다양한 주파수에서 감쇠기의 선형성을 점검하는 방법이 이상적이다. 또한 청력검사기의 청력레벨 조절단자에서 너무 낮게 출력시킨 경우 커플러 음압강도가 음압측정기의 바닥 잡음(noise floor)과 유사하거나 또는 실내 주변소음에 의해 측정값이 영향을 받을 수도 있기 때문에 정확한 출력강도를 얻을 수 없을 수도 있다.

순음청력검사에서 정확한 주파수를 생성하지 못하는 경우 피검자는 청각전문가가 제시하고 있다고 생각하는 주파수가 아닌 다른 주파수의 순음에 반응하게 될 것이므로 정확한 역치를 얻을 수 없을 수도 있다. 또한 순음청력검사는 다른 주파수가 포함되어 있지 않은 순수한 신호만을 제시할 수 있어야

피검자는 검사 음의 배음이 아닌 검사 음의 주파수만을 듣고 반응할 것이다. 예를 들어, 500 Hz 음이 과도한 배음을 가지고 있는 경우 경사형 청력도를 가진 환자는 과도한 배음을 가지고 있지 않은 500 Hz 음에 반응해야 하는 청취 강도보다 더 낮은 청력레벨에서 1,000 Hz 또는 1,500 Hz 배음에 반응할 수도 있을 것이다. 과도한 고조파 왜곡은 일반적으로 청력검사에서 생성되는 입력신호의 문제가 아니라 청력검사용 출력장치의 문제 때문에 발생한다. 과도한 고조파 왜곡 문제를 해결하는 첫 번째 단계는 사용 중인 청력검사용 출력장치를 동일한 유형의 출력장치로 교체하여 다시 측정정보는 방법이다. 청력검사용 출력장치 때문에 과도한 왜곡이 발생하는 경우 새로운 출력장치에 맞게 해당 청력검사기를 완벽하게 재교정해야 한다.

협대역잡음의 출력강도와 감쇠 특성은 적절한 커플러와 1/3 옥타브 대역 필터를 가지고 있는 음압측정기를 이용하여 순음 교정점검과 동일하게 수행해야 한다. 그러나 출력장치 및 커플러 자체의 한계점 때문에 5,000 Hz를 초과하는 주파수에서는 정확하게 측정되지 않을 수도 있다. 협대역잡음의 출력강도가 허용오차를 벗어나는 경우 청력검사기의 내부 교정 모드를 이용하여 교정해야 한다. 이 방법이 불가능하다면, 협대역잡음을 이용하여 차폐 역치를 구할 때 유효차폐강도 조절단자에 적용해야 할 조절 값을 나타내는 교정용 카드를 개발해야 한다.

교정에 사용되는 전기음향장비에 대한 이해도 중요하다. NBS 9-A coupler의 상단에 귀걸이형 이어폰을 위치시키는 경우 이어폰과 커플러 하단의 교정된 마이크로폰 사이의 밀폐된 공기의 내재 용적은 6 cc로 귀걸이형 이어폰의 진동판과 고막 사이의 공기 용적이 거의 동일하다고 생각했기 때문에 선택되었다(Corliss & Burkhard, 1953). 그러나 체적의 변위는 음향 임피던스의 한 가지 구성 성분에 지나지 않기 때문에 6 cc 커플러가 실제로 인간의 귀를 나타낸다고 가정할 수 없다. Burkhard & Corliss(1954)는 6 cc 커플러의 임피던스 특성은 단지 좁은 주파수 범위에서 인간 귀의 임피던스를 흉내내고 있다고 지적하였다. 또한 NBS 9-A coupler는 전체 주파수 범위에서 인간 귀의 음향 임피던스를 흉내낼 수 없기 때문에(Corliss & Burkhard, 1953) 측정된 음압강도가 실제 귀에서 측정된 음압강도와 다르다는 사실이 여러 연구를 통해 증명되었다(Hawkins et al, 1990; Killion, 1978; Zwillocki, 1970, 1971). 또한 NBS 9-A coupler는 크기, 모양, 경질의 벽 때문에 6,000 Hz 부근에서 자연 공명 현상이 일어나며, 6,000 Hz보다 높은 주파수의 경우 커플러 내에서 정지파가 발생할 수 있다(Rudmose, 1964). 이러한 단점에도 불구하고 NBA 9-A coupler는 재현성이 매우 높은 결과를 제공하기 때문에 ANSI S3.6-2010 표준에서 청력검사기의 귀걸이형 이어폰을 통한 음향 출력 측정용으로 허용하고 있다.

상기 언급한 NBA 9-A coupler의 문제를 해결하기 위한 시

도의 일환으로 IEC 60318-3 coupler[IEC 60318-3(2014)]가 개발되었다. IEC 60318-3 coupler는 6 cc 용적을 가지고 있으며 음향적으로 연결된 3개의 금속 공동과 교정된 마이크로폰을 포함하고 있으며, 20~10,000 Hz까지 평균적인 인간 귀를 흉내 낼 수 있어 125~8,000 Hz 범위까지 귀걸이형 이어폰의 출력을 측정하는데 사용될 수 있다. 따라서 IEC 60318-3 coupler는 NBS 9-A coupler보다는 분명히 더 정확하다. IEC 60318-3 coupler는 커플러 상단에 유형 1 또는 2 평판 어댑터를 장착시켜 귀덮개형 이어폰의 출력을 측정하는 IEC 60318-2 coupler [IEC 60318-2(1998)]가 되도록 적용할 수 있지만, IEC 60318-3 coupler의 임피던스 특성 또한 실제 인간 귀의 임피던스 특성을 정확하게 반영하지 않기 때문에 정확도에 몇 가지 이견은 존재하여 현재 이 표준은 철회되었고, IEC 60318-1(2009)으로 대체되었다. IEC 60318-1 coupler[IEC 60318-1(2009)]는 20 Hz에서 10 kHz의 주파수 범위까지 음향 누설 없이 귀에 인가할 수 있으며, 추가적으로 16 kHz 주파수까지 음향 커플러로 사용할 수 있는 귀 모의 장치이다.

B&K 4930 역학 커플러는 특히 고주파수에서 출력이 온도에 따라 달라진다는 문제점을 가지고 있다(Frank & Richter, 1985). ANSI 및 IEC 표준은 B&K 4930 역학 커플러를 이용하여 골진동기의 출력을 교정할 경우 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ (71.6~75.2°F)에서 실시하도록 규정하고 있다.

모든 표준은 새로운 과학적 정보, 절차, 장비가 표준에 통합될 수 있도록 정기적으로 검토되고 있다. 실무 그룹은 해당 표준을 검토한 후 표준의 개정(revised), 재확인(reaffirmed), 철회(withdrawn)를 권고할 수 있다. 표준이 개정되는 경우 해당 표준의 번호 및 명칭은 유지하지만 발행년도는 개정이 완료되는 년도로 변경된다. 예를 들어, ANSI 표준인 S3.6-1996, American National Standard Specification for Audiometers는 2004년도에 개정된 후 2010년도에 다시 한번 개정되었다. 이 표준은 해당 표준의 제목은 유지하고 있지만 현재는 ANSI S3.6-2010로 지정되어 있다. 표준이 변경되지 않고 재확인된 경우 해당 표준은 다시 사용될 것이며 이러한 예는 ANSI S3.39-1987 (R2012)이 있다. 이것은 해당 표준이 1987년도에 승인되었으며 가장 최근 2012년도에 재확인 되었다는 것을 의미한다. 표준의 준수 여부는 자발적이어야 하지만 전문가 협회 및 기타 공인기관의 인증을 위해서는 일반적으로 청력검사장비 및 청력검사실이 국제표준 및 국가표준을 준수할 것을 요구하고 있다. 따라서 청력검사장비의 교정을 실시하려는 청각전문가는 점검해야 하는 정확한 성능 특성과 각 성능특성에서 허용되는 변화의 범위를 확인하기 위해 최신 표준을 참조해야 한다.

청력검사는 정확하게 제어된 신호를 생성할 수 있는 다양한 종류의 청력검사장비를 이용하여 음향적으로 통제된 환경에서

실시해야만 한다. 이러한 조건은 환자의 청각 민감도(hearing sensitivity), 어음처리능력(speech-processing ability) 및 중이 상태(middle ear status)에 관한 측정 결과 해석의 신뢰성과 타당성을 확보하기 위해 반드시 필요하다. 청력검사기 제조업체는 정확하고 신뢰할 수 있는 장비를 설계할 의무가 있지만 제조업체가 제공하는 청력검사기 초기 교정은 시간이 경과함에 따라 해당 청력검사기의 기능이 정확하게 작동하고 있는지 여부를 보장하기에는 충분하지 않다. 즉 구입 당시 완벽하게 교정되었던 청력검사기도 음압 강도, 주파수, 왜곡 등이 변동될 수도 있다. 청력검사기의 초기 교정이 유지되지 못하는 이유는 대부분 청력검사용 출력장치와 관련되어 있지만, 전자 부품 또한 가능하다.

청력검사기의 교정은 청력검사장비가 국제표준 또는 국가표준에서 규정하고 있는 청력검사기의 성능 특성에 부합하는지 여부를 점검하고, 일치하지 않을 경우 교정하는 작업을 의미한다. 청력검사기의 교정점검은 청력검사장비 간 측정 오차를 감소시켜 결과의 신뢰성과 정확도를 향상시키기 위해 반드시 필요한 절차이다. 실제 사용 중인 청력검사장비가 교정되었다고 확신할 수 있는 청각전문가는 측정된 청력검사 결과를 보고하는 데 자신감을 느낄 수 있다. 청각전문가는 청력검사기의 정확성을 유지시키기 위해 청력검사기의 교정 상태를 직접 점검하거나 또는 청력검사기의 정기적인 교정을 외부 업체에 맡겨야 할 책임을 가지고 있다. 모든 청각전문가는 청력검사기가 표준화된 성능 특성을 어느 정도로 준수해야 하는지와 해당 청력검사가 적절한 환경에서 수행되었는지의 여부를 파악할 수 있을 뿐 아니라 전기음향교정장비를 다룰 수 있는 능력도 보유하고 있어야 한다. 또한 청력검사기의 전기음향교정에 사용되는 다양한 장비도 정기적으로 교정을 해야 한다는 사실도 숙지해야 할 것이다. 국내의 경우 한국표준과학연구원에서 전기음향교정장비의 교정을 담당하고 있다. 현재 국내에는 청력검사기의 교정을 담당하는 공인인증기관이 없기 때문에 청각 관련 학회에서는 조속히 인증 제도를 마련하여 청력검사기의 교정에 대한 교육 및 인증 평가를 시행하여야 할 것이다.

중심 단어 : 청력검사기의 교정 · 표준 · 순음청력검사기 · 전기음향교정.

Acknowledgments

This paper was supported by RESEARCH FUND offered from Catholic University of Pusan in 2012.

REFERENCES

ANSI standard. (1972). ANSI/ASA S3.13-1972, Method for Coupler Calibration of Earphones. New York: American National Standard Institute.
 ANSI standard. (2006). ANSI/ASA S1.4-1983 (R2006), Specification For Sound Level Meters. New York: American National Standard Institute.
 ANSI standard. (2008). ANSI/ASA S3.7-1995 (R2008), Method for Coupler

- Calibration of Earphones. New York: American National Standard Institute.
- ANSI standard. (2009). ANSI/ASA S1.11-2004 (R2009), Specification For Octave-Band And Fractional-Octave-Band Analog And Digital Filters. New York: American National Standard Institute.
- ANSI standard. (2010). ANSI/ASA S3.6-2010, Specification for Audiometers. New York: American National Standard Institute.
- ANSI standard. (2011). ANSI/ASA S1.40-2006 (R2011), Specifications and Verification Procedures for Sound Calibrators. New York: American National Standard Institute.
- Burkhard, M. D. & Corliss, E. L. R. (1954). The response of earphones in ears and couplers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 26, 679-685.
- Corliss, E. L. R. & Burkhard, M. D. (1953). A probe tube method for the transfer of threshold standards between audiometer earphones. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 25, 990-993.
- Dirks, D. D., Lybarger, S. F., Olsen W. O., & Billings, B. L. (1979). Bone conduction calibration: Current status. *The Journal of Speech and Hearing Disorders*, 44(2), 143-155.
- Frank, T. (1982). Influence of contralateral masking on bone-conduction thresholds. *Ear and Hearing*, 3(6), 314-319.
- Frank, T. & Richter, U. (1985). Influence of temperature on the output of a mechanical coupler. *Ear and Hearing*, 6(4), 206-210.
- Hawkins, D. B., Cooper, W. A., & Thompson, D. J. (1990). Comparisons among SPLs in real ears, 2 cm³ and 6 cm³ couplers. *Journal of the American Academy of Audiology*, 1(3), 154-161.
- IEC 60318-1. (2009). IEC 60318-1:2009 Electroacoustics - Simulators of human head and ear - Part 1: Ear simulator for the measurement of supra-aural and circumaural earphones.
- IEC 60318-3. (2014). Electroacoustics - Simulators of human head and ear - Part 3: Acoustic coupler for the calibration of supra-aural earphones used in audiometry.
- IEC 60318-4. (2010). Electroacoustics - Simulators of human head and ear - Part 4: Occluded-ear simulator for the measurement of earphones coupled to the ear by means of ear inserts.
- IEC 60318-6. (2007). Electroacoustics - Simulators of human head and ear - Part 6: Mechanical coupler for the measurement on bone vibrators.
- IEC 60645-1. (2012). Electroacoustics - Audiometric equipment - Part 1: Equipment for pure-tone audiometry.
- ISO 389-1. (1998). Acoustics -- Reference zero for the calibration of audiometric equipment -- Part 1: Reference equivalent threshold sound pressure levels for pure tones and supra-aural earphones.
- ISO 389-2. (1994). Acoustics -- Reference zero for the calibration of audiometric equipment -- Part 2: Reference equivalent threshold sound pressure levels for pure tones and insert earphones.
- ISO 389-3. (1994). Acoustics -- Reference zero for the calibration of audiometric equipment -- Part 3: Reference equivalent threshold force levels for pure tones and bone vibrators.
- ISO 389-4. (1994). Acoustics -- Reference zero for the calibration of audiometric equipment -- Part 4: Reference levels for narrow-band masking noise.
- ISO 389-5. (2006). Acoustics - Reference zero for the calibration of audiometric equipment. Part 5 - Reference equivalent threshold sound pressure levels for pure tones in the frequency range 8 kHz to 16 kHz.
- ISO 389-7. (2005). Acoustics - Reference zero for the calibration of audiometric equipment. Part 7 - Reference threshold of hearing under free-field and diffuse-field listening conditions.
- ISO 389-8. (2004). Acoustics - Reference zero for the calibration of audiometric equipment. Part 8 - Reference equivalent threshold sound pressure levels for pure tones and circumaural earphones.
- ISO 8253-1. (2010). Acoustics -- Audiometric test methods -- Part 1: Pure-tone air and bone conduction audiometry.
- ISO 8253-2. (2009). Acoustics -- Audiometric test methods -- Part 2: Sound field audiometry with pure-tone and narrow-band test signals.
- Kang, D. H., Kim, J. D., Song, B. D., Shin, B. J., & Wang, S. G. (2010a). Development of an auto ABLB test software. *Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 11(12), 5120-5126.
- Kang, D. H., Song B. D., Shin, B. J., Lee, K. H., Kim, J. D., Jeon, G. R., et al. (2010b). Development of SISI test software based on PC. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 11(4), 1325-1332.
- Kang, D. H., Song, B. D., Shin, B. J., Kim, J. D., & Wang, S. G. (2011). Development of a Békésy audiometry system based on PC. *Journal of the Korea Society of Computer and Information*, 16(7), 77-84.
- Killion, M. C. (1978). Revised estimate of minimum audible pressure: Where is the "missing 6 dB"? *The Journal of the Acoustical Society of America*, 63(5), 1501-1508.
- Kim, H. W., Chung, C. K., Kim, H. A., Roh, Y. M., & Chang, S. S. (1994). Current medical examination practices for the determination of occupational noise induced hearing losses. *Korean Journal of Occupational And Environmental Medicine*, 6(2), 276-288.
- Kim, J. D., Kang, D. H., Song, B. D., Lee, I. W., Kong, S. K., Kwon, S. B., et al. (2010). Development of automatic calibration system for PC-based pure tone audiometer. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 11(7), 2586-2594.
- Kim, J. D., Shin, B. J., Jeon, G. R., & Wang, S. G. (2009). Development of Auto-Masking Puretone Audiometer supporting Multiple Modes. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 10(6), 1229-1236.
- Kim, K. S. (2007). Development of Korean audiometric quality control program for the special health examination. *Audiology*, 3(1), 9-16.
- Kim, K. S. (2009). Audiometric quality assurance program in Korea. *Korean Journal of Audiology*, 13, 91-107.
- Kim K. S., Won, Y. L., Chung, S. Y., & Kang, S. K. (2004). Acoustic calibration of clinical audiometers used for special periodic health examination. *Korean Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 16(4), 381-390.
- KS C IEC 60645-1. (2005). Audiometers - Part 1: Pure-tone audiometers. Korean Standards Association.
- KS I ISO 8253-1. (2014). Acoustics - Audiometric test methods - Part 1: Basic pure tone air and bone conduction threshold audiometry. Korean Standards Association.
- Larson Davis. (2013). Larson Davis, Audiometer calibration & electroacoustic test systems. Retrieved from <http://www.larsondavis.com/Products/AudioMeterCalibrationSystems.aspx>.
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (1998). Criteria for a Recommended Standard Occupational Noise Exposure: Revised Criteria 1998. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH). Cincinnati, OH.
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (1996). Occupational Safety and Health Standards, Occupational Safety and Health Standards, Occupational Health and Environmental Control, Occupational noise exposure, Hearing Conservation Amendment. OSHA Regulations(Standards - 29 CFR 1910.95 App E)-Acoustic calibration of audiometers. Washington, DC: Federal Register, United States Government Printing Office.
- Rudmose, W. (1964). Concerning the problem of calibrating TDH-39 earphones at 6 kHz with a 9A coupler. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 36(5), 1049.
- Song, B. D., Kang, D. H., Lee, W. J., Shin, B. J., Kim, J. D., Kong, S. K., et al. (2010). Development of PC-based client/server puretone audiometer supporting multiple subject concurrently. *The Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 11(6), 2225-2233.
- Zwicker, E. & Terhardt, E. (1980). Analytical expressions for critical band rate and critical bandwidth as a function of frequency. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 68(5), 1523-1525.
- Zwislocki, J. J. (1970). An acoustic coupler for earphone calibration. (Special Report LSC-S-7). Syracuse, NY: Laboratory of Sensory Communication, NY: Syracuse University.
- Zwislocki, J. J. (1971). An ear-like coupler for earphone calibration. (Special Report LSC-S-9). Syracuse, NY: Laboratory of Sensory Communication, NY: Syracuse University.