

헤드폰을 이용한 가청역치레벨의 측정 방법 비교

Comparison of a hearing threshold level using a headphone

김득성[†] · 장서일* · 김동준** · 이연수***

Key Words : Hearing Threshold(가청역치), Loudness Curve(라우드니스 곡선), Minimum Audible Field(MAF, 최소가청음역)

ABSTRACT

This research presents a laboratory study about a comparison between two methods that measure a hearing threshold of the Subjects who participated in an experiment of the Jury test. The Subjects heard a signal by a headphone. The Subjects of total 63 persons (man=42, woman=21 persons) participated in an experiment. A test of hearing was divided into two (Top-Down, Bottom-Up) methods. Total time of hearing test was about 80 minute(40min/day). As a results of the hearing test, a hearing threshold of the Subjects who used to wear a headphone was higher than that of the Subjects who not used to wear a headphone. A hearing threshold of a man was higher than that of a woman. The result of hearing test was showed that ISO's hearing threshold(MAF) was lower than a result that get from an experiment.

1. 서론

우리 주변에서는 다양한 소리가 발생되고 혼합되며, 소멸된다. 이러한 현상을 사람들이 감지할 수 있는 이유는 소리를 들을 수 있는 청력기관을 가지고 있기 때문이다. 사람의 귀는 소리를 감지할 수 있는 능력뿐만 아니라 평형감각에도 영향을 준다. 사람들마다 청력 민감도(hearing sensitivity)는 각자 다르지만 사람의 귀로 들을 수 있는 최소한의 소리의 크기를 가청역치(hearing threshold)라 한다. ISO 규정에 따르면, 자유음장 상태에서, 반복된 실험을 통해 사람들이 50% 인지 반응을 나타내는 사운드 레벨¹⁾이라 정의하였다. 인체의 귀는 외이, 중이, 내이로 구성되며, 내이의 달팽이관에서 소리 신호의 주파수 성분과 소리의 크기 정도를 분석하여 신호를 신경신호로 변환시켜 뇌에 전달한다.²⁾³⁾ 사람마다 서로 다른 환경이나 체질 및 생활습관을 가지고 있기 때문에 귀가 감지할 수 있는 소리의 크기(Loudness)는 서로 다르다.

청력 민감도와 관련된 가청역치 측정 방법은 1860년 Fechner⁴⁾에 의해 처음 소개되었다. 가장 고전적인 방법으로 한계법(Method of limits), 지속자극법(Method of a constant stimuli), 조절법(Method of adjustment) 등⁵⁾

이 있으며, 이 방법들을 수정한 방법이 PTA(Pure tone audiometry)이다. PTA 방법은 청력손실의 정도, 종류, 형태를 측정할 수 있어 개인별 가청역치레벨을 확인하기 위해 주로 사용되는 청력테스트 방법이다. 또 다른 방법으로 강제선택법(Forced-choice methods)이 있다. 고전적인 방법들의 단점들을 보완시킨 방법에는 적응법 또는 순음법(Adaptive methods)이 있으며, Staircase-method(Up-down)⁶⁾와 Békésy-tracking method⁵⁾가 포함된다.

그렇다면, 귀의 가청역치의 기준이 되는 레벨은 어떤 것을 사용할까? 주로 ISO 226(2003)에 기재된 등라운드니스 곡선의 최소가청레벨¹⁾을 사용한다. 이는 자유음장에서 스피커를 통해 전방 입사한 순음신호를 두 귀로 들리는 음압레벨에서 측정하여 최소가청음역(MAF, Minimum Audible Field)을 형성하는 것이다. 또한 ISO 389-7(2005)⁷⁾에서 제공하는 가청역치도 있다. 이 규격의 측정 방법과 주파수별 음압레벨은 ISO 226과 동일하지만, 주파수 영역이 18kHz까지 확장되어 제공하고 있기 때문에 본 연구에서는 ISO 389-7의 자유음장 가청역치를 주로 사용하였다.

본 연구는 충격성 소음의 주관적 반응 연구 과정에서 실험에 참여하는 피험자들의 난청 정도를 판단하기 위해 실시된 청력테스트(hearing test) 과정의 결과이다. 이 실험은 계속 진행 중에 있다. 본 연구에서는 ISO 규격¹⁾⁷⁾에서 제공하고 있는 최소가청역치를 비교 대상으로, 청감실(listening room)에서, 실험에 참여한 피험자들의 최소가청역치를 헤드폰을 이용하여 측정하고, 그 결과를 ISO 규격과 비교해 보았다.

† 서울시립대학교 환경공학과 대학원
E-mail : kgrz@naver.com
Tel : (02) 2210-2986, Fax : (02) 2210-2877

* 서울시립대학교 환경공학과
** 서울시립대학교 환경공학과 대학원
*** 서울시보건환경연구원

2. 이론적 배경 및 실험방법

2.1 등라우드니스 곡선과 가청역치레벨

정상청력을 가진 사람의 귀는 주파수영역에 따라 동일한 에너지의 소리도 각각 다른 크기로 듣게 된다. 주파수 변화에 따라 동일하게 들리는 소리의 크기를 선으로 주파수에 따라 연결한 곡선을 등라우드니스곡선⁸⁾(Equal Loudness Contour)이라 한다. 이 곡선에서 사람이 들을 수 있는 최소한의 소리 크기를 나타내는 가청역치(hearing threshold)를 포함한다. 여기서, 가청역치는 최소가청음역(MAF) 또는 JNL (Just-Noticeable sound pressure Level)로 불리기도 한다.⁹⁾

가청역치를 포함하는 등라우드니스곡선은 1933년 Fletcher와 Munson의 실험¹⁰⁾을 시작으로, 1937년 Churcher과 King¹¹⁾, 1956년 Robinson과 Dadson¹²⁾이 등라우드니스곡선에 대한 연구 결과를 발표하였고 이 연구 결과는 이후 ISO R 226 등재되었다. 상위 실험들은 자유공간(free-field)에서 순음을 음원으로 이용하여 정면에서 피험자들에게 들려주고 측정한 결과이다. 이런 과정은 매우 힘들기 때문에 자유음장 상태를 보정한 이어폰을 사용하게 된다.

하지만, 실제 사람들이 있는 환경은 자유음장보다는 확산음장에 가깝고, 연속적으로 변하는 주파수 영역과 빠르게 변하는 소음 레벨에 노출되어 있다고 판단한 Stevens¹³⁾는 복합소음의 라우드니스 계산 방법을 제안하였다. 이 결과는 확산음장(diffuse-field)에서 화이트노이즈(White Noise)를 사용하였고, 보정된 이어폰을 사용하여 옥타브 밴드로 나타낸 결과이다. 1961년에 Stevens¹⁴⁾는 등라우드니스 인덱스 곡선(Equal Loudness Index Contours)과 이를 이용한 라우드니스 레벨의 계산과정을 제안하였다. 현재 이 결과는 ISO 532¹⁵⁾ Section 1에 등재되어 있으며, 단일수치 라우드니스 레벨 계산에 사용되고 있다. 또 다른 라우드니스의 계산 방법으로는 ISO 532¹⁵⁾ Section 2에 등재되어 있는 Zwicker가 제안한 1/3옥타브 밴드를 이용한 방법이다. 이 방법은 적용 대상 범위가 폭넓고, 자유음장과 확산음장에 대한 결과가 각각 제시되어 있으며, 불연속 소음에도 적용가능하다. 특히 임계대역폭(Critical Bandwidth) 개념을 적용한 "Bark" 단위를 사용하였다.¹⁶⁾

Figure 1은 2003년도에 개정된 가청역치¹⁾와 개정되기 이전¹⁷⁾의 가청역치를 비교한 결과이다. 개정된 라우드니스 곡선은 International Joint Research Group에서 기존 12개의 연구들을 정리한 연구 결과¹⁸⁾를 반영한 것으로, 정상청력을 가진 18~30세의 피험자들을 대상으로 실시한 결과이다.

Figure 2는 ISO 389-7에서 제공하는 가청역치를 나타낸 것으로, 개정 전·후 및 음장에 따라 비교해 놓은 것이다.

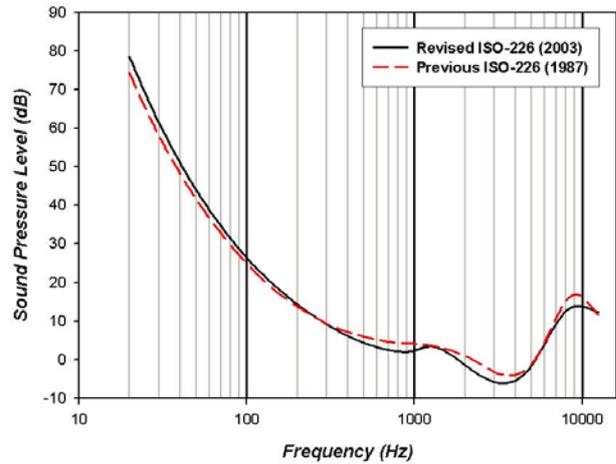


Figure 1. Comparison of the hearing threshold between revised¹⁾ and previous ISO 226(1987). (binaural free-field listening, frontal incidence)

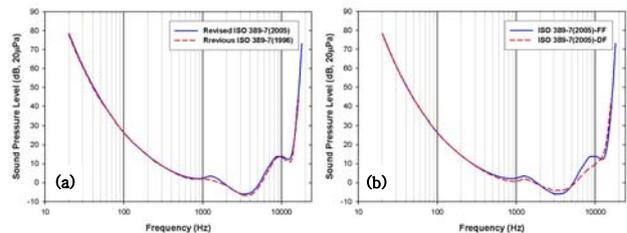


Figure 2. Comparison of the hearing threshold by ISO 389-7 : (a) revised⁷⁾ vs. previous(1996), (b) free-field vs. diffuse-field⁷⁾.

2.1 절대가청역치 (ATH)

절대가청역치(Absolute Hearing Threshold, ATH)는 정상청력을 가진 피험자들이 조용한 환경에서 들을 수 있는 순음의 최소음압레벨로 정의¹⁹⁾할 수 있다. ATH를 측정하는 방법은 주로 2가지를 사용한다. ① 최소가청음압(Minimum Audible Pressure, MAP), ② MAF 첫 번째 MAP 방법은 외이도 입구 부분이나 외이도 내에서 음압을 측정하는 방법으로, 대부분 소형 마이크로폰을 장착한 이어폰을 한쪽 귀에 설치하여 이어폰으로 들리는 소리의 음압을 측정한다. 이어폰²⁰⁾ 대신 헤드폰을 사용하는 경우⁵⁾도 있다. 두 번째로 MAF 방법은 MAP와는 달리 확성기(loudspeaker)를 이용하며 소리를 발생시킨다. 자유음장에서 음원은 순음을 사용하며, 측정은 두 귀로 들리는 음압레벨을 피험자 머리 중심에서 측정한다. 다만 사운드레벨은 피험자를 음장에서 내보내고 피험자가 없는 상태에서 측정한 결과이다. 확산음장에서는 음원을 핑크 또는 화이트노이즈(1/3 옥타브 밴드)를 사용하며, 측정방법은 자유음장과 동일하다.

MAP와 MAF의 결과는 서로 차이를 나타낸다. 우선, MAP는 가청시 한쪽 귀만 사용한다. 그리고 이어폰의 경

우 귀를 폐색시킬 수 있으며, 이로 인해 신체 소음(심장 박동수 등)이 신호를 마스킹할 수 있다. 또한 머리, 귓바퀴, 외이도의 영향⁵⁾을 고려할 수 없다. 이 중 가장 큰 차이를 나타내는 원인은 모노럴로 듣느냐, 바이노럴로 듣느냐의 차이이다. 기존 연구결과에서는 바이노럴로 듣는 것이 모노럴로 듣는 것보다 약 2배 정도 크게 들린다고 제시¹¹⁾하였다. 이후 여러 연구들²¹⁾²²⁾에서 모노럴과 바이노럴 가청에 대한 라우드니스 관계를 보다 정확하게 밝혀냈다. 또한, MAP를 모노럴과 바이노럴로 측정된 연구 결과²³⁾에서도 주파수별로 그 차이는 뚜렷하게 나타났다.

3. 실험 과정 및 결과

3.1 실험조건 및 방법

실험은 청감실에서 실행하였다. 청감실의 재원 및 사양은 AES 기준²⁴⁾ 및 SAE 가이드라인²⁵⁾과 비교하여 다음 Table 1에 정리해 놓았다. Table 1에 제시된 기준 또는 가이드라인은 서로 대상이 다르다. AES는 라우드스피커에 대한 주관적 평가를 위한 기준이고, SAE 가이드라인은 자동차 소리에 대한 주관적 평가를 위한 가이드라인을 제시하고 있다. 실험에 사용된 청감실은 두 기준에 대부분 만족하고 있기 때문에, 청감테스트에 적당한 장소로 판단된다.

Table 1. Comparison of the characteristic between listening room and ASE standard²⁴⁾ or SAE guideline²⁵⁾.

항 목	AES	SAE	청감실
Test 공간 면적(m ²)	20 이상	-	19.7
최소 천장 높이(m)	2.1	-	2.445
체적(m ³)	50~150	-	63.4 ^[비고1]
NRC ^[비고4]	-	-	0.835
배경소음	dB(A)	35 이하	22.6
	dB(C)	50 이하	45.4
	NCB ^[비고5]	-	20 이하
NR(dB) ^[비고6]	-	-	20
측정 장비	Type 1 or 0	-	Type 1
온도	-	72~75°F ^[비고3]	22~24°C ^[비고2]
습도	-	45~55% ^[비고2]	45~55%
공기순환	-	-	흡배기시설
실험 장비	스피커	헤드폰 권장	헤드폰 사용

비 고 : 1. 체적은 컨트롤 룸(15.3m³) 체적을 포함한 값임.
 2. 온도는 에어컨으로, 습도는 가습기로 유지시킴.
 3. 72~75°F는 22.2~ 23.9°C에 해당함.
 4. NRC=Noise Reduction Coefficient
 5. NCB=Balanced Noise Criterion²⁶⁾
 6. NR=Noise Reduction.

실험은 음을 들려주는 방법에 따라 두 가지로 분류하여 실시하였다. 첫 번째는 하향식(Top-Down, TD) 방법으로, 두 번째는 상향식(Bottom-Up, BU) 방법으로 실험을 진행하였다. TD 방법은 소리가 들리지 않는 단계에서 체

크를 하고 BU 방법에서는 소리가 들리는 단계에 체크하도록 하였다. 피험자들에게는 음원을 보여주지 않았으며, 개인별로 총 2회 실시하였다.

청력테스트 음원은 호주의 University of New South Wales의 Web-site에서 제공하는 음원²⁷⁾을 사용하였다. 음원의 주파수 영역은 30~16kHz로 순음 성분이며, 레벨 간격은 3dB이고, 지속시간은 1초이다.

Figure 3은 Dummy(HEADacoustics사, HMS III.0)를 이용하여 사용 음원의 레벨 확인 과정과 청력 test를 실행하고 있는 과정을 나타낸 것이다.



Figure 3. Process of preparation and operation for hearing test

Figure 2에 제시된 Dummy는 사람의 형상을 하고 있으나 귀 구조는 사람의 귀와는 다르게 설계되어 있다. 즉, 외이도 입구부분에 사람의 고막 역할을 하는 마이크로폰이 장착되어 있다. 따라서 Dummy에서 듣는 소리는 귓바퀴와 공명에 의한 효과를 고려하지 못하고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해, 이 장비는 ID(Independent of Direction)라는 FIR(Finite Impulsive Response) 필터를 제공하고 있다. 이 필터는 사람이 헤드폰을 통해 음을 들었을 때, 헤드폰으로부터 고막까지 전달되는 과정(귓바퀴 효과와 공명 현상 고려)을 전달함수(transfer function)로 구성하여 외부에서 Dummy의 마이크로폰까지 전달되는 음과 이 전달 함수를 보정하여 사람이 듣는 음과 Dummy에서 듣는 음이 같도록 만든 필터이다.²⁸⁾²⁹⁾³⁰⁾ FIR 필터는 위상차가 발생하지 않는 장점을 가진 필터이다.

본 연구에서는 음원 레벨 확인 과정에서 위에서 설명한 ID 필터를 적용하였다. 또한, 피험자에게 동일한 음원을 들려주기 위해, 헤드폰을 사용하였다. 실험인원은 한 번에 3명 또는 4명씩 그룹을 지어 동시에 실행하였으며, 실험하기 전에 간단한 설문지를 작성하도록 하였다. 본 연구는 충격성 소음의 주관적 평가와 관련된 실험 결과로, 총 실험 시간은 4시간(청력테스트+SDM+PCM)이며, 하루에 약 2시간 정도로 이틀(2hr/day)에 걸쳐 진행되었다. 청력테스트에 걸린 시간은 약 80분 정도(40min/day)이다.

3.2 피험자(Subject)

실험하기 전 여러 문항들에 대한 설문조사를 실시하였

다. 실험에 참여한 총 인원수는 63명(여자 : 21명, 남자 : 42명)이며, 실험 대상 평균연령은 22.4세(18~29세)였다. 헤드폰 또는 이어폰 착용에 대한 질문에서는 51명(81%)이 항상 착용을, 12명(19%)이 미착용하는 것으로 응답했다. 헤드폰 또는 이어폰을 착용하는 피험자들의 평균 시간은 약 2~2.5시간 정도로, 대부분 3시간미만 착용하는 것으로 응답했다. 청력실험에 소요된 시간은 총 80분 정도로 하루에 40분 정도씩 이틀에 걸쳐 진행하였다. 결과는 모두 청력손실이 없는 정상청력으로 판명되었다.

3.3 실험 결과

본 연구에서는 충격성 소음의 청감실험을 실행하기 이전에 피험자들의 난청 정도를 판단하기 위해 ISO 389-7⁷⁾의 가청역치와 피험자들의 가청역치 실험결과를 비교해 보았다. Figure 4는 실험방법(TD와 BU)에 따른 총인원의 가청역치레벨 분포와 ISO 389-7(2005)의 결과를 비교해 놓은 것이다.

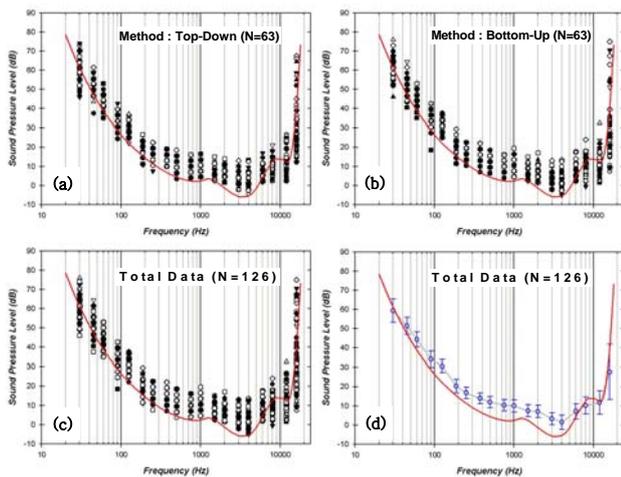


Figure 4. Results of hearing test : (a) Top-Down(TD), (b) Bottom-Up(BU), (c) Total, (d) S.D.

Figure 4 결과는 ISO 규격의 가청역치보다 대부분 상위에 존재하고 있다. Figure 4(c)와 (d)는 모든 자료를 종합하여 나타낸 것으로, Figure 4(d)는 평균과 표준편차를 이용하여 나타낸 것이다. 그리고 8kHz 이상에서는 가청역치의 범위가 점차 확장되는 것을 알 수 있다. 이러한 이유를 찾기 위해 본 연구에서는 사용 음원과 청감실 환경에 대해서 검토해 보았다. Figure 5는 청감실의 PDP, 흡배기 시설 및 조명등을 모두 켜놓은 상태에서 측정된 배경소음(Narrow & 1/3 Octave Band)으로, 저주파 영역에서는 룸모드의 영향이, 2k~8kHz까지의 영역에서는 흡배기 소리의 영향이 청감역치레벨에 영향을 주는 것으로 보인다. 또한, 12, 16kHz 음원은 음원의 소리와 재생시 소리가 끊기는 잡음을 혼동하여 발생한 결과로 판단된다.

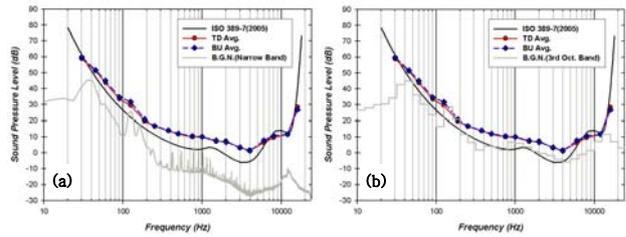


Figure 5. Effect of background noise : (a) Narrow Band, (b) 1/3 Octave Band.

Figure 5의 결과를 감안한다면, 청감실 환경에서 ISO 389-7(2005)의 가청역치와 직접 비교하는 것은 어렵다. 따라서 본 연구에서 청감실험실 기준(Table 1 참고)에 해당하는 환경에서 실행된 상대 가청역치와 음의 재생 방법에 따른 차이에 대한 결과를 제시하고자 한다.

위의 결과를 감안하여 실시된 가청역치 결과는 Figure 6에 제시하였다. 이 결과는 청력테스트 방법에 따라 그리고 성별에 따라 구별한 결과를 나타낸다. 청력테스트 방법에서는 TD 방법이 BU 방법보다 더 낮은 가청역치를 나타냈다. 여기서, 남성의 가청역치의 경우, 1k~4kHz 영역에서는 TD 방법이 조금 더 높았다. 여성의 경우는 대다수의 주파수 영역에서 BU 방법이 더 높은 가청역치를 나타냈다. 또한, BU 방법에서, 남성이 1k~8kHz 영역 내에서는 여성보다 더 낮은 가청역치를 가지는 것으로 나타났다. 하지만 전반적으로 여성이 남성보다 더 낮은 가청역치를 나타냈다.

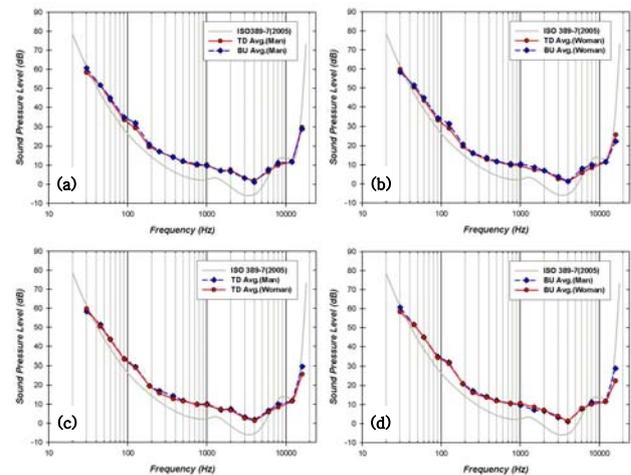


Figure 6. Comparison of hearing threshold results by sex((a) man and (b) woman) according to hearing test methods, and test methods according to sex((c) man and (d) woman).

Figure 7은 성별에 따른 결과를 정리해 놓은 것으로, TD와 BU의 결과를 종합하여 성별로 구분하고, 성별에 따른 가청역치 레벨의 차이를 나타낸 것이다. Figure 7(b)를 보면, 1k와 1.2kHz를 제외하면, 모두 여성이 가청역치가 더 낮다는 것을 한번 확인할 수 있다.

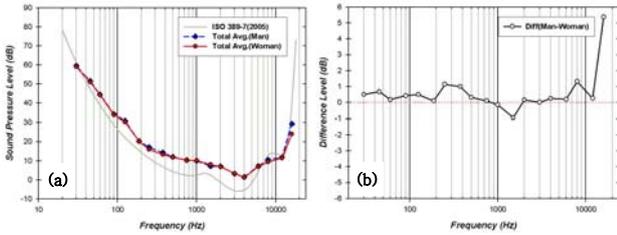


Figure 7. Results of hearing threshold by a sex : (a) comparison, (b) difference level.

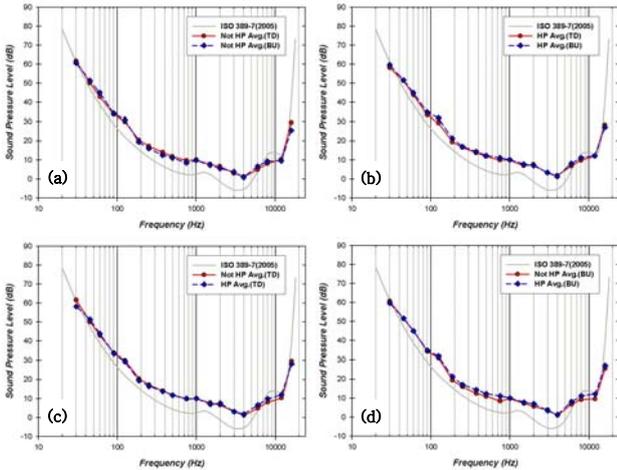


Figure 8. Results of hearing threshold : (a) Not headphone, (b) a headphone, (c) Top-Down and (d) Bottom-Up.

Figure 8은 평상시 헤드폰을 착용하지 않는 피험자 군 (12명)과 헤드폰을 착용(51명, 착용시간 1~6hr)하는 피험자 군을 나누어 분석한 결과이다. 이 결과에서 헤드폰을 평상시 자주 착용하는 피험자 군은 TD 방법에서 더 낮은 가청역치를 나타냈다. 반면, 착용하지 않는 피험자 군에서는 BU 방법에서 가청역치가 더 낮게 나타났다. 이 결과는 Figure 6에서 제시한 테스트 방법에 따른 결과와 상반된 결과를 나타낸다. 이는 헤드폰을 착용하지 않는 피험자 군이 작은 소리를 더 쉽게 감지할 수 있다는 것을 의미한다. 또한, 헤드폰 착용 여부에 따라 테스트 방법의 결과를 살펴 보면, TD 및 BU 방법에서는 헤드폰을 착용하지 않는 피험자 군이 더 낮은 가청역치를 나타냈다. 다만, TD 방법의 경우, 90~4kHz까지 거의 비슷한 결과를 나타냈다. Figure 8의 결과에서는 전체적으로 헤드폰을 착용하지 않는 피험자 군이 더 낮은 가청역치를 나타냈다.

Figure 9는 TD와 BU 방법과 성별, 헤드폰 유무에 관계 없이 모든 자료(N=63×2=126)를 종합하여 단일 곡선으로 나타낸 단일 종합 곡선이다. 본 연구의 실험 결과는 ISO 389-7(2005)의 가청역치보다 더 높은 가청역치 결과를 나타냈다. 청감실 환경이 나쁜 것은 아니지만, 가청역치 측정에서는 실내 환경의 영향 등으로 자유 음장 형성이 구현되지 못하고, 개인이 아닌 단체(3~4명)로 실험하여 인접 피험자들의 영향도 원인들 중의 하나라고 사료된다.

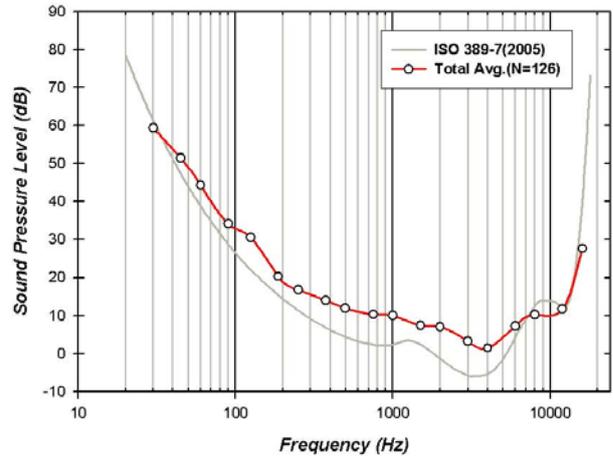


Figure 9. Experimental result of hearing threshold (all average, N=126)

5. 결론

본 연구에서는 청감실험을 실행하기 전에 전체 실험의 일부분으로 피험자들의 가청역치를 측정하였다. 이는 정상 청력의 유무를 판단하기 위함이다. 실험인원은 총 63명이었고, 실험방법은 하향식(Top-Down, TD)과 상향식(Bottom-Up, BU)의 두 가지 방법으로 진행하였다.

또한, 성별에 따라 비교해 보면, 남성과 여성 모두 BU 방법보다는 TD 방법에서 더 낮은 가청역치를 나타냈다. 청력 테스트 방법으로 남성과 여성을 비교해 보면, TD 방법에서는 여성이 더 낮은 가청역치를 나타낸 반면, BU 방법에서는 일부구간(1~8kHz)에서 남성이 여성보다 낮은 가청역치를 보였지만, 전체 결과로 본다면, 여성이 남성보다 더 낮은 가청역치를 지닌 것으로 나타났고 BU 방법보다는 TD 방법으로 측정한 가청역치 결과가 더 낮았다. 이 결과는 사람들이 소리가 들리기 시작하는 크기를 감지하는 것보다 소리가 들리지 않는 크기를 감지하는 능력이 더 예민하다 할 수 있다.

그리고 헤드폰 착용시 청력에 영향을 줄 수 있다는 사실도 확인하였다. 헤드폰을 착용하지 않는 피험자 군에서는 BU 방법에서 더 낮은 가청역치를 나타낸 반면 헤드폰을 착용하는 피험자 군에서는 TD 방법에서 더 낮은 가청역치를 나타냈다. 또한, 테스트 방법에서는 TD 및 BU 방법에서 모두 헤드폰을 착용하지 않는 피험자 군의 가청역치가 더 낮게 나타났다.

이 결과를 이용하여 실험에 참여한 피험자들의 난청 정도를 살펴본 결과, 모두 정상 청력으로 판명되었다.

본 연구는 아직 진행 중에 있어 판단하기에는 이른 시점이지만, 가청역치를 측정하기 위해서는 우리에게 잘 들리지 않는 배경소음(흡배기, 조명, 룸모드 등)과 실험에 참여하는 인원수 및 음장 형성에 좀 더 주의해야 할 것이다.

후 기

본 연구는 과학재단 특정기초과제 “폭발성 충격소음의 생성 및 전파 시뮬레이션과 위해성 분석” (R01-2006-000-10301-0)을 수행하면서 얻어진 결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) ISO 226, 2003, "Acoustics—Normal equal-loudness level contours".
- 2) 김정태, 1992, "소음이 인체에 미치는 영향(I) - 청감의 신비", 한국소음진동공학회 제2권 제4호, pp. 243~252.
- 3) Aras, V. P., 2003, "Audiometry techniques, circuits, and systems", M Tech. Credit Seminar Report, Electronic Systems Group, EE Dept, IIT Bombay, Nov 03.
- 4) Fechner, G., 1960, "Elements of psychophysics", Holt Rinehart & Winston.
- 5) Gelfand, S. A., 2004, "Hearing: An introduction to psychological and physiological acoustics(4th Ed.)", Informa Healthcare.
- 6) Levitt, H., 1971, "Transformed up-down methods in psychoacoustics," J. Acoust. Soc. Am., 49(2), pp.467-477.
- 7) 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.
- 8) John E. K. Foreman, 1990, "Sound Analysis and Noise Control", VAN NOSTRAND REINHOLD.
- 9) Larsen, E., and Aarts, R. M., 2004, "Audio Bandwidth Extension—Application of Psychoacoustics, Signal Processing and Loudspeaker Design", John Wiley & Sons Ltd.
- 10) Fletcher, H. and Munson, W. A., 1933, "Loudness, its definition, measurement and calculation", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 5, pp. 82~108.
- 11) Churcher, B. G. and King, A. J., 1937, "The performance of noise meters in terms of the primary standard", J. IEE(London), Vol. 81, p. 57.
- 12) Robinson, D. W. and Dadson, R. S., 1956, "A re-determination of the equal-loudness contours for pure tones", Brit. J. Appl. Phys., Vol. 7, pp.166~181.
- 13) Stevens, S. S., 1956, "Calculation of the loudness of a complex noise", J. Acoust. Soc. Am., vol. 28, pp. 807~832.
- 14) Stevens, S. S., 1961, "Procedure for calculating loudness", J. Acoust. Soc. Am., vol. 33, pp. 1577~1585.
- 15) ISO 532, 1975, "Acoustics—Method for calculating loudness level “.
- 16) Zwicker. E. and Fastl, H., 2007, "Psychoacoustics—Facts and Models", Springer.
- 17) ISO 226, 1987, "Acoustics—Normal equal-loudness level contours".
- 18) Suzuki, Y. et al., 2000~2003. "Precise and Full-range Determination of Two-dimensional Equal Loudness Contours".
- 19) Moore, B. C. J., 1984, "Noise and Society(Chap 2.)", John Wiley & Sons Ltd.
- 20) Durrant J. D., Lovrinic J. H., 1984, "Bases of Hearing Sciences(2nd Ed.)", Williams & Wilkins.
- 21) Reynolds, G. S., and Stevens, S.S., 1960, "Binaural summation of loudness", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 32, pp. 1337~1344.
- 22) Hellman, R. P. and Zwislocki, J. 1963, "Monaural loudness function at 1000cps and interaural summation", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 35, pp. 856~865.
- 23) Killion, M. C., 1978, "Revised estimate of minimum audible pressure : Where is the "missing 6 dB" ?", J. Acoust. Soc. Am. Vol. 63(5), pp. 1501~1508.
- 24) AES20-1996, 1996, "AES recommended practice for professional audio - Subjective evaluation of ludspeakers", Audio Engineering Society Standard, New York.
- 25) Otto, N. and Amman, S. et al., 1999, "Guidelines for Jury Evaluations of Automotive Sounds", SAE 1999-01-1822, 1999 SAE Noise and Vibration Conference, May 1999, Traverse City, MI, USA.
- 26) Baranek, L. L., 1989, "Balanced noise-criterion (NCB) curves", J. Acoust. Soc. Am. 86(2), pp. 650~664.
- 27) The University of New South Wales (<http://www.phys.unsw.edu.au/jw/hearing.html>).
- 28) Genuit, K., 2005, "Artificial Head with simplified Mathematical Describable Geometry", ICA2004, Kyoto, Japan.
- 29) Gierlich, H. W., 1992, "NEW MEASUREMENT METHODS FOR DETERMINING THE TRANSFER CHARACTERISTICS OF TELEPHONE TERMINAL EQUIPMENT", IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Vol 4S, pp. 2069-2072.
- 30) HEAD Application Note - Binaural Measurement, Analysis and Playback : Equalization.