인간의 청력

산업안전보건연구원 직업병연구센터 / 김 규 상

글 싣는 순서

① **인간의 청력** ② 일반인의 소음 노출 ③ 환경소음과 도시소음의 문제
④ 일상생활에서의 저주파음의 노출과 건강영향 ⑤ 소음환경 하에서의 어음인지와 청력손실
⑥ 소음 노출과 일시적 난청 ⑦ 소아 아동의 소음 노출과 청력영향
⑧ 취미 및 스포츠 활동에 따른 소음 노출과 청력영향 ⑨ 청력의 연령효과와 노인성 난청
⑩ 건강행태(음주, 흡연 등)와 청력영향 ⑪ 일반 질병(당뇨, 신장질환 등)에 의한 청력영향
⑫ 화학물질의 이독성 ⑬ 소음 이외 물리적 요인(진동, 라디오파, 방사선 등)에 의한 청력영향
⑭ 특수 종사자의 청력영향(공공 근무 종사자, 군인, 음악가, 기타 등) ⑮ 청력보존프로그램의 평가
⑯ 소음성 난청의 청능재활

1. 소음과 청각

현대 산업화된 사회에서는 소음으로부터 벗어나기 힘들다. 소음이 현대 사회에서 중요한 문제로 대두됨에 따라 소음 노출로부터 건강 보호와 소음 저감을 위한 대책이 중요하다고 볼 수 있다. 산업장의 소음은 여러 작업 공정에서 필연적으로 발생하여 소음성 난청의 원인으로 작용한다.

이러한 소음에 의한 청력장애를 예방하기 위한 체계적인 활동이 청력보존 프로그램이다. 산업장의 소음은 소음성 난청뿐만 아니라 재해의 발생이나 작업능률의 저하 등 직접적으로 각종 피해를 야기시킨다. 이러한 청각장애 이외에도 심혈관계 질환과 고혈압의 발생에 영향을 미치고, 높은 소음 수준은 급격한 스트레스를 유발시키는 요인으로 작용하며 수행행동 능력장애, 수면장애, 대화방해 등 건강과 일상생활에 영향을 준다. 또 이와 같은 소음으로 인한 청력장애로 신체적, 정서적, 행동학적, 사회적 기능에 영향을 미친다.

이 글은 원래 『산업청각학 산책』 제목으로 기획하였으나 산업청각학이라는 용어가

낯설고 독자에게 의미 전달에 어려움이 있어 제목을 『소음과 청각』으로 변경하였다. 산업청각학은 소음, 소음의 건강영향, 소음성 난청의 발생기전과 특성, 소음성 난청의 진단과 장해보상을 중심으로 연구하는데, 소음성 난청을 예방하기 위한 청력보존 프로그램의 주요 구성 내용인 소음측정 평가, 청력보호구, 공학적 관리, 청력평가를 다루고 있다. 그러나 산업장에서의 소음 노출에 의한 건강영향은 소음에 의한 청각학적 영향 · 비청각학적 영향에만 한정되지 않는다. 난청 장애도 소음 이외에 진동, 기압 등의 물리적 요인, 중금속 · 유기용제 등 중추신경 독성물질 등의 화학적 요인과 외상 등 사고에 의한 직업성 난청이 있다.

산업청각학은 이렇게 소음으로 인한 난청, 소음성 난청의 진단을 위한 청각학적 검사, 평가 및 관리, 작업 환경상의 소음 노출의 측정 및 평가, 노출 소음의 저감을 위한 개인적 보호구와 공학적 대책, 소음성 난청의 보상 그리고 소음성 난청의 예방을 위한 제반 행정적 관리 대책 및 제도를 중심으로 발전해왔다.

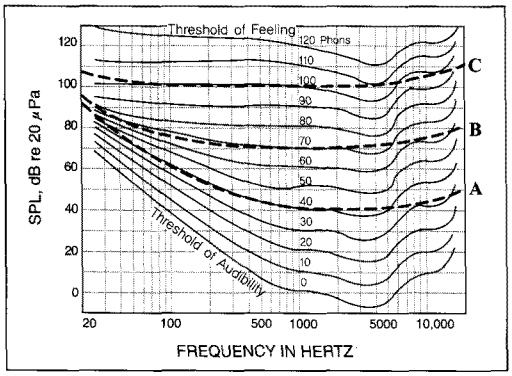
따라서 산업청각학은 산업장에서 소음에 노출되는 근로자를 대상으로 한 청력보존 프로그램의 토대가 되었다. 그러나 소음만이 아니라 근로자가 작업 환경상 노출되는 제반 위해 위험 환경으로부터 기인하는 청각학적 장애도 산업청각학에서 다룰 수 있을 것이다.

이 글은 이러한 작업 환경으로부터 기인한 직업성 난청의 주요 원인인 소음뿐 아니라 다양한 소음 환경과 그로 인한 청력 영향, 청각에 영향을 미치는 다양한 요인(음주와 흡연 등의 건강행태, 당뇨 등의 질병, 화학물질과 기타 소음 이외의 물리적 인자 등)과 일반 근로자 이외에 일반 인구집단, 소아 아동(청소년 포함), 노인 및 특수종사자의 청력영향, 그리고 마지막으로 청력보존을 위한 프로그램과 청능재활에 대해 살펴보고자 한다.

2. 소리와 소음, 단위

음(소리, sound)은 탄성과 점성을 가진 매개체의 진동으로 인해 일어나는 대기의 압력변화에 의해 발생하며, ANSI, S1.1-1994에서는 압력 내 진동에 의해 발생되어 청감각을 자극하는 소리(auditory sensation)를 말하며 고체에서 발생되는 진폭은 진동(vibration)이라 한다. 즉, 소리는 발생원의 진동면에서 공기압력이 높고 낮은 파동이 생겨서 이것이 발생원으로부터 전파되면서 귀에 닿아 청각을 자극할 때에 느끼는 청감각을 말한다.

소리는 3요소로 이루어져 있고 주파수에 따라 차이가 발생하는데 피아노 건반의 낮은 음과 높은 음의 차이와 같은 소리의 고저, 음압에 따른 차이로 동일한 건반을 타격



〈그림 1〉 Fletcher-Munson 곡선에서 추정된 보정 특성

하는 힘의 차이와 같은 소리의 크기, 파형의 시간적 변화에 따른 차이로 피아노음과 바이올린음의 차이와 같은 음색으로 나눌 수 있다. 즉, 음의 물리적 성상은 음압파동의 진폭, 주파수, 파형에 의하여 결정된다.

소리의 파장은 공기와 같은 매질(medium) 내에서 압축과 이완을 주기적으로 변화하는 것으로 구성된다. 이 압력 차이의 정도는 주관적으로 소리 크기를 자각하는 것과 일치한다. 공기 중에서 소리의 진폭은 대개 주위 대기압 상하의 압력 변화를 말하고 압력의 진폭을 음압이라고 말한다.

인간이 듣는 소리를 dynes/cm^{2}의 단위로 소리 압력 레벨(Sound Pressure Level, SPL)로 측정하는 것은 하나의 귀에서도 여러가지 주파수에 따라 느끼는 것이 서로 다르기 때문에 곤란하다. 이런 이유로 해서 개인과 주파수에 따라 쉽게 비교할 수 있는 척도를 개발하게 되었다. 데시벨(decibel, dB) 단위는 기준음 세기와의 비를 대수 값으로 변환한 것이다. 데시벨(dB)은 다음과 같이 L=10 log (A/B) dB로, 이때 기준음의 세기는 1000 Hz의 최소가청음인 10^{-12} W/m^{2}을 사용한다. 기준음압은 20 μPa 혹은 20 μN/m^{2}로 나타내고 이러한 기준음은 대략 1000 Hz에서 보통 인간의 가청 역치와 비슷한 수준에서 선택한다. 음압수준에 대한 방정식은 다음과 같다.

Lp 혹은 SPL
=20 log(P/P$_0$) dB re 20 μPa,
P:음압(rms), P$_0$:기준음압

인간의 귀는 0 부터 120 dB까지 상당히 다양한 범위의 소리를 들을 수 있는데, 이는 아주 작은 소음에서부터 통증을 느낄 정도의 소리까지 다양하다.

정상인의 달팽이관(cochlea)은 대략 20 Hz부터 20000 Hz까지의 주파수 범위를 지각할 수 있다. 인간의 언어를 자각하기 위한 가장 중요한 영역은 500 Hz에서 3000 Hz 범위이다.

한 사이클(cycle)을 형성하는 동안 음파나 진동파의 이동거리를 파장(λ)이라고 하고 주파수(f)는 1초 동안 발생하는 사이클의 수를 말하는데 1 Hz는 1 cycle/sec와 같다. 주파수는 파형에서 물리적 진동수를 객관적으로 측정하는 반면, 음의 높이(pitch)는 그에 상응하는 청자의 주관적인 반응이다. 음의 높이는 보통 주파수에 따라 좌우되

는데, 주파수가 높아질수록 음의 높이도 높아진다.

dBA는 환경소음과 산업장의 소음규제에 사용되고 있다. 이것은 A-보정 주파수 특성(A-weighting frequency network)에 의해 얻어진 값으로 옥타브 혹은 1/3옥타브 밴드 값과는 달리 단일한 값으로 저주파수(약 500 Hz 이하)의 영향을 줄인다. 소음측정기의 대표격인 지시소음계는 청감보정회로로서 Fletcher-Munson 곡선에 추정된 A, B, C의 3가지 특성 중 낮은 소음수준에서의 음의 크기 반응인 40-phon 등감청감곡선의 필터보정에 의한 근사치인 A 특성치로, 통상 전 주파수역 음압을 측정 평가한다. 여기서 적용되는 A 보정곡선이란 기준인 1 kHz에서 40 dB 음압수준(SPL)과 비교하여 같은 음의 크기로 감지되는 순음을 나타낸다. 소음의 노출 평가와 기준을 대부분 dB(A)로 규정하고 있으며, 우리나라의 노동부도 A특성에 의한 전 주파수역 평균음압(dB(A))을 실제 소음의 노출기준 단위로 이용하고 있다.

3. 청력 역치

사람들마다 청력 민감도(hearing sensitivity)는 각기 다르지만 사람의 귀로 들을 수 있는 최소한의 소리의 크기를 가청역치(hearing threshold)라 한다.

청각적 절대역치는 조용한 환경에서, 일반적으로 50% 감지할 수 있는 소리의 수준으로 정의되어 진다. 청력역치는 사용된 검사방법, 청자의 역치에 대한 이해, 명확하지 않을 때 청자가 추측하는 경향, 검사음의 지속시간 등의 검사방법, 검사음을 차폐할지도 모르는 내부와 외부 배경소음의 수준 등 모든 검사 환경에 의존한다. 청력 민감도와 관련된 가청역치 측정방법은 1860년 Fechner에 의해 처음 소개되었는데, 청력손실의 정도, 종류, 형태를 측정할 수 있는 방법으로 개인별 가청역치 레벨을 확인하기 위해 주로 사용되는 검사방법이 순음청력검사(pure tone audiometry)이다.

귀의 가청역치의 기준이 되는 레벨은 주로 ISO 226(2003)에 기술된 등감곡선의 최소가청 레벨을 사용한다. 이는 자유음장에서 스피커를 통해 전방 입사한 순음신호를 두 귀로 들리는 음압레벨에서 측정하여 최소가청음역(Minimum Audible Field, MAF)을 형성하는 것이다.

정상청력을 가진 사람의 귀는 주파수영역에 따라 동일한 에너지의 소리도 각각 다른 크기로 듣게 된다. 주파수 변화에 따라 동일하게 들리는 소리의 크기를 주파수에 따라 연결한 곡선을 등감곡선(Equal Loudness Contour)이라 한다. 이 곡선에서 사람이 들을 수 있는 최소한의 소리 크기를 나타내는 가청역치를 포함한다. 여기서, 가청역치는

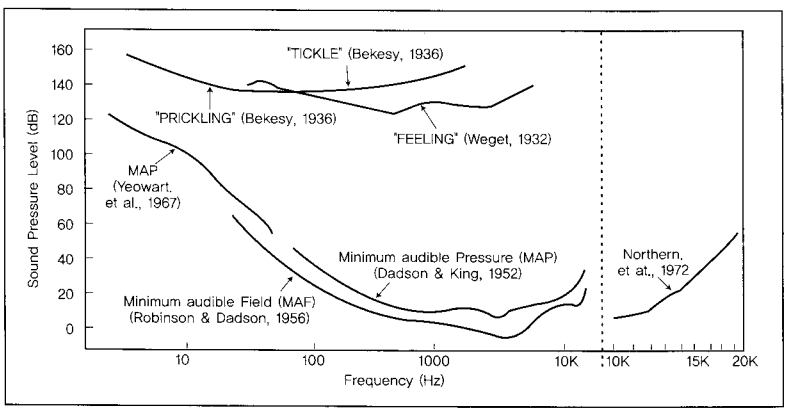
최소가청음역(MAF) 또는 JNL(Just-Noticeable sound pressure level)로 불리기도 한다.

인간의 청감은 극도로 높고 낮은 주파수에서는 보다 덜 민감하기 때문에, 그 주파수 영역에서 들을 수 있는 소리들의 크기(loudness)는 일반적으로 같은 소리압력 수준을 가진 중간-주파수 소리들의 크기보다 작게 느낀다.

등감곡선은 자유음장에서 순음에 대한 동일 강도곡선으로 실제 생활에서 소음의 강도에 대한 대부분의 판단은 이어폰을 낀 상태에서 이루어지는 것이 아니기 때문에, 이들은 open-ear field data이다. 각 곡선은 특정한 SPL의 1000 Hz 음에 대해 동일한 크기라고 평가한 소리를 나타낸다. 예를 들어, 40 phons의 loudness level은 1000 Hz는 40 dB SPL, 4000 Hz는 32 dB SPL, 8000 Hz는 48 dB SPL, 100 Hz는 51 dB SPL, 64 Hz는 70 dB SPL이다.

가청역치를 포함하는 등감곡선은 1933년 Fletcher와 Munson의 실험을 시작으로, 1937년 Churcher과 King, 1956년 Robinson과 Dadson이 등감곡선에 대한 연구 결과를 발표하였고 이 연구 결과는 이후 ISO R 226에 등재되었다. 상위 실험들은 자유음장(free-field)에서 순음을 음원으로 이용하여 정면에서 피험자들에게 들려주고 측정한 결과이다.

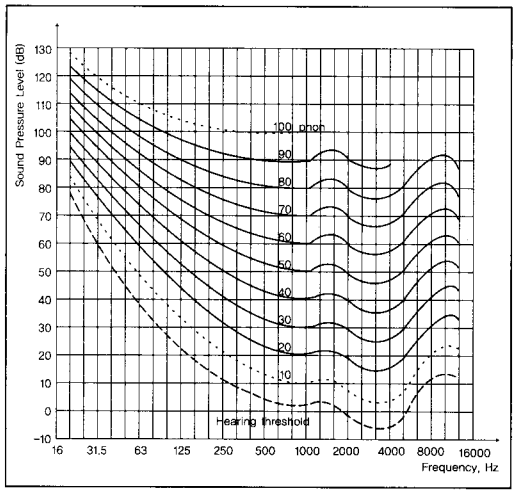
〈그림 4〉는 2003년도에 개정된 가청역치와 개정되기 이전의 가청역치를 비교한 결과이다. 개정된 등감곡선은 International Joint Research Group에서 기존 12개의 연구들을 정리하여 반영한 것으로, 정상청력을 가진 18~30세의 피험자들을 대상으로 실시한 결과이다.



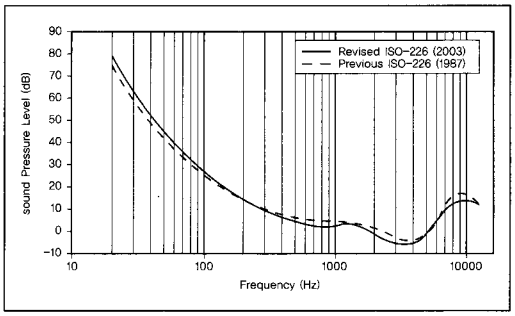
〈그림 2〉 인간 가청역치와 이상감각역치 연구

절대가청역치(Absolute Threshold of Hearing, ATH)는 정상청력을 가진 피험자들이 조용한 환경에서 들을 수 있는 순음의 최소음압 레벨로 정의할 수 있다.

ATH를 측정하는 방법은 주로 2가지를 사용한다[① 최소가청음압(Minimum Audible Pressure,



〈그림 3〉 정상인의 양이 자유음장에서의 순음에 대한 등감곡선

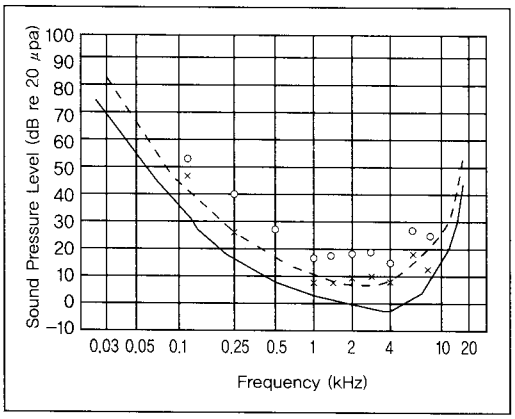


〈그림 4〉 개정 전(1987)/후(2003)의 가청역치(MAF)

MAP), ② 최소가청음역(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. 이어폰 대신 헤드폰을 사용하는 경우도 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.

MAP와 MAF의 결과는 서로 차이를 나타낸다. 우선, MAP는 가청시 한쪽 귀만 사용한다. 그리고 이어폰의 경우 귀를 폐색시킬 수 있으며, 이로 인해 신체 소음(심장 박동수 등)이 신호음를 마스킹할 수 있다. 또한 머리, 귓바퀴, 외이도의 영향을 고려할 수 없다. 이 중 가장 큰 차이를 나타내는 원인은 모노럴(한쪽 귀)로 듣느냐, 바이노럴(양쪽 귀)로 듣느냐의 차이다. 기존 연구결과에서는 바이노럴로 듣는 것이 모노럴로 듣는 것보다 약 2배 정도 크게 들린다고 제시하였다. 이후 여러 연구들에서 모노럴과 바이노럴 가청에 대한 라우드니스 관계를 보다 정확하게 밝혀냈다. 또한, MAP를 모노럴과 바이노럴로 측정한 연구 결과에서도 주파수별로 그 차이는 뚜렷하게 나타났다.

다음 〈그림 5〉는 젊은 정상 성인의 청력역치를 나타낸 것으로 제일 하단의 실선(solid curve)은 양이가 개방된 상태에서 순음에 대한 역치이다(minimum audible field, MAF). MAF는 머리와 외이의 공명특성들에 의해 제공된 신호의 증폭에 영향을 받는다. 헤드폰의 착용은 소리에 있어서



〈그림 5〉 정상 청력과 관련되 청력역치

머리와 귓바퀴의 영향을 이끌어 낼 뿐만 아니라, 외이도의 공명 특성들을 변화시킨다.

그리고 바로 위의 점선(dashed curve)은 헤드폰(earphones)을 착용한 청자들을 대상으로 한 순음에 대한 역치이다(minimum audible pressure, MAP). 작은 원(circles)은 과거의 청각적 표준(ASA, 1951)하에서 0 dB를 나타내는 SPL값이고, 가위표(crosses)는 현재 기준 값(ANSI, 1969; ISO, 1964)하에서의 0 dB를 나타내는 SPL값이다.

고막에서의 음압(sound level)은 측정하기 어렵고, MAF 측정은 커다란 자유음장실(sound-free room)을 요구하기 때문에, 역치 측정은 다소 간접적인 방법이긴 하지만 MAP의 측정으로 표현되어 진다. 개인의 청력역치는 hearing level(HL)의 용어로 표현된다.

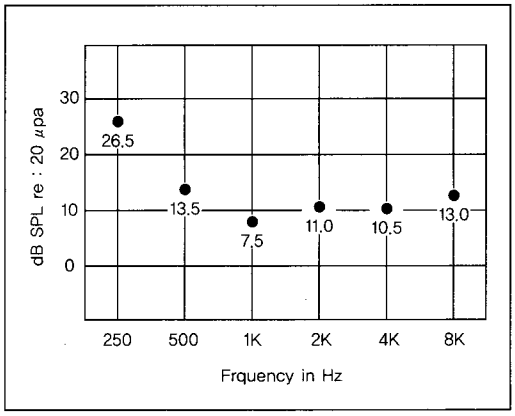
0 dB HL을 결정짓기 위한 첫 번째 시도는 1934년에 실시한 미국 국민의 임의추출 표본으로 20세에서 29세의 평균 역치 SPL의 값을 사용하였다(Beasley, 1938). 그 결과는 1951년에 미국표준협회(American Standards Association)에 의해 승인을 받아 0 dB HL로 언급되어 졌다(ASA, 1951). 그러나 결과적으로 대부분의 젊은 성인들은 음(negative)의 값의 HL을 나타냈다. 즉 그들은 청력계 다이얼에서 0 dB보다 좋은(보다 민감한) 청력을 가졌다. 1954년에 British Standards는 ASA 1951보다 약 10 dB정도 더 낮은 새로운 기준 SPLs을 제안했다. 이들은 약간의 변화를 거쳐 1964년에 국제표준기구(International Standards Organization, ISO)에 의해 채택되었고, 1969년에는 미국표준연구원(American National Standards Institute, ANSI)에 의해 채택되었다. ASA와 ISO/ANSI 값 둘 다 TDH-39 earphones과 MX41/AR cushions에 의해 실시된 결과이다.

ISO/ANSI 기준은 매우 우수하게 선택된 즉, 젊고 건강한 집단을 대상으로 최적의 실험 조건하에서 수집된 역치값이다. 심사에서 제외된 사람은 질문지로 확인될 수 있는, 유전적 청력 손실로 고통을 겪고 있거나, 높은 강도의 소음에 노출되었다거나 때때로 청력의 악화를 가져오는 다양한 질병을 가진 사람들과 알 수 없는 이유로 민감도가 다른 사람들보다 나쁜 사람들이 포함되

었다. 그 결과 ISO의 청각표준(audiometric standard)은 ASA가 비현실적으로 느슨한 반면 비현실적으로 엄격하였다. 따라서 산업장의 소음에 노출된 적이 없는 전형적인 젊은 성인은 양의 값(positve value)을 갖는 HL을 나타낸다.

0 dB HL 수준은 청력검사 자료(audiometry survey data)가 특정한 직업 환경이 청력의 손상을 유발하는지 아닌지를 평가하기 위해 사용되어 질 때 특히 중요하다. 또한 나이 든 근로자의 경우에서는 더욱 더 강조되어 진다. 청각 민감도의 손실은 산업적 소음 외에 다른 원인들로부터 발생될 수 있는데, 즉 근로자의 나이가 많을수록 이러한 다른 요인들의 영향이 커질 것이고, 산업적 소음 노출이 위험하다고 평가되기 위해서는 보다 평균 HLs이 보다 커야만 한다.

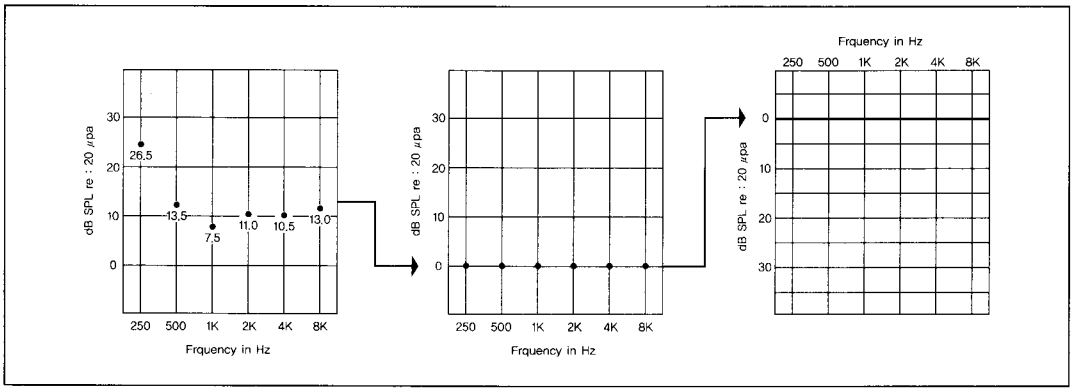
청력검사기의 0 dB은 0 dB HL로 잘 훈련된 사람이 겨우 들을 수 있는 정도의 음



〈그림 6〉 0 dBHL(audiometric zero)에 해당하는 물리적 음압(SPL)

크기로 이 표준화된 audiometric zero의 값들은 reference equivalent threshold sound pressure level(RETSPL)로 〈그림 5〉의 가위표에 해당하는 값에 해당된다.

인구학적으로 종족, 성별, 연령에 따른 청력의 영향은 다르다. 백인과 흑인 근로자의



〈그림 7〉 SPL에서 HL로 변환되는 과정

〈표 1〉 정상 건청인의 연령에 따른 기도 청력역치 (ISO 1999 standard, 1990)

Age (years)	Frequency in Herz							
	250	500	1000	2000	3000	4000	6000	8000
Men								
25	0	0	0	0	1	1	1	1
30	0	1	1	1	2	2	3	3
35	1	1	1	2	3	5	5	6
40	1	2	2	3	6	8	9	10
45	2	3	3	5	8	12	13	16
50	3	4	4	7	12	16	18	23
55	4	5	5	10	16	22	25	30
60	5	6	7	12	20	28	32	39
65	7	9	9	15	25	35	40	49
70	8	9	11	19	31	43	49	59
75	10	11	13	23	37	52	59	71
Women								
25	0	0	0	0	0	0	1	1
30	0	1	1	1	1	1	2	2
35	1	1	1	2	2	3	3	4
40	1	2	2	3	4	4	6	7
45	2	3	3	4	5	7	9	11
50	3	4	4	6	6	9	12	15
55	4	5	5	8	10	12	16	21
60	5	6	7	10	13	16	21	26
65	7	8	8	13	17	20	27	33
70	8	9	10	16	20	24	32	41

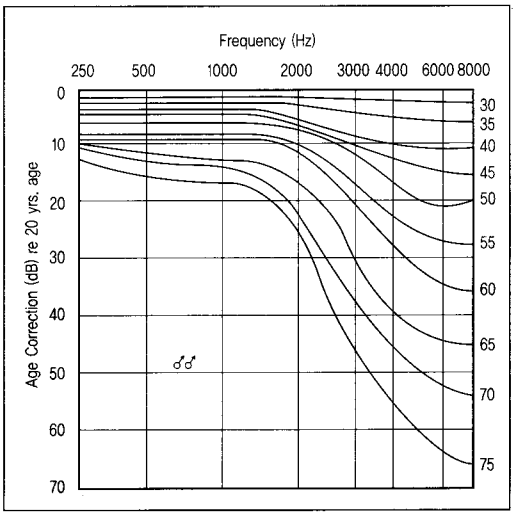
청력에 대한 비교 결과, 흑인이 유의하게 더 좋은 평균청력을 보이고 있다. 이 차이가 사회음향적 노출에 있어서의 차이인지, 피부색소와 마찬가지로 인종에 따른 와우의 색소형성과 관련이 있는지는 명확하지 않다. 남성과 여성이 일하는 사업장에서의 청력연구는 변함없이 평균적으로 여성이 유의하게 남성보다 좋은 청력을 가지고 있음을 보여준다. Garstecki와 Erler(1995)의 노인들에 대한 연구에서는 남성의 청력 역치가 여성보다 연령에 따라 높게 나타났는데, 남성은 여성보다 1,000 Hz 이상의 주파수역에서 보다 점진적으로 청력손실을 크게 보이나 1,000 Hz 이하 주파수역에서는 여성이 더 역치가 높게 나타났다. 이는 남성의 소음노출 등의 환경적 요인과 여성의 높은 혈관성 질환(stria vascularis의 위축 등)의 생리적 요인으로 설명하고 있다.

연령의 증가에 따라 청력 역치는 증가하며, 고주파수역의 역치손실이 저주파역보다 더 크게 나타난다.

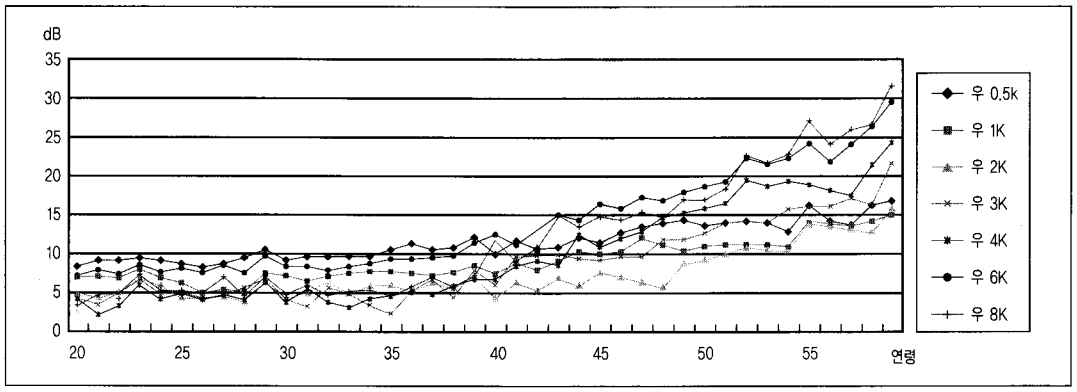
Spoor(1967)는 특정한 연령대의 평균 청력(median hearing)을 20대의 평균청력과 비교함으로써, 산업적 소음에 노출되지 않은 사람들의 여러 연구에 기초한 평균 '연령 보정(age correction)' 곡선을 얻었다. 이 곡선은 종종 '20대와 비교한 연령보정'이 아닌 연령대별 '청력역치(Hearing Levels)'로 잘못 언급되기도 한다. 이 곡선들은 때때로 '노인성 난청 보정(presbycusis correction)'으로 불리지만, 어느 정도의 사회성 난청(sociacusis) 등의 요인을 포함한다. 산업적 소음에 노출되지 않은 사람들에 대한 이와 같은 연구는 국제적으로도 채택되었다(ISO, 1984).

〈표 1〉은 ISO 1999(1990)에 의한 남녀 정상 건청인의 기준역치이다.

이정학 등(2003)의 연구에서 우리나라 일반 성인의 성별, 연령별 및 주파수별 청력역치를 조사하여 자연적으로 발생하는 역치의 변화, 즉 표준역치(standard threshold shift)의 기준치를 제시하였다. 이러한 기준치는 성, 연령에 따른 역치 증가를 소음으로 인한 청력손실에 보정하여 소음 노출 근로



〈그림 8〉 남성에서 청력의 연령 보정곡선



〈그림 9〉 우리나라 정상 건청인의 연령별 우측 귀의 주파수별 청력역치

자들에 대한 보다 효율적인 청력관리를 도모하는데 유용한 자료로 이용될 수 있다.

우리나라의 연령별, 성별, 주파수별 청력손실 보정표를 마련하기 위해 20-59세의 남성과 여성 모두 각 연령마다 30명 전후로 총 2,492명(남성 1,250명, 여성 1,242명)의 청력역치 자료를 조사하였다. 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 좌측귀와 우측귀의 비교 시 우측귀의 청력 역치가 낮았으며, 남성에 비해 여성에서 전반적으로 청력 역치수준이 낮았다.
2. 연령증가에 따른 청력 역치의 변화 양상은 40대 초반까지는 전 주파수 대역이 모두 비슷한 수준으로 관찰되었으나, 40대 중반 이후부터는 6000 Hz와 8000 Hz에서 기도 청력역치 수준이 다른 주파수에 비해 높아지기 시작하였다.
3. OSHA의 청력보정 기준자료는 우리나라의 청력보정 기준 자료와는 차이점이 있었다.