KISEP Special Articles
臨床耳鼻 : 第14卷 第2號 2003
J Clinical Otolaryngol 2003;14:221-231

보청기의 원리와 기본 구조

성균관대학교 의과대학 삼성서울병원 이비인후과학교실
홍 성 화

Basic Physics and Structure of Hearing Aid

Sung Hwa Hong, MD
Department ORL-HNS Sungkyunkwan University School of Medicine Samsung Medical Center, Seoul, Korea

진공관을 이용하여 보청기를 개발하기 전에는 여러 형태의 집음기에 의존하여 소리를 증폭시킬 수 밖에 없었다. 1930 년대 진공관을 이용한 보청기의 개발에 의해 소리 증폭의 방법이 개선되기는 하였으나 증폭기 부분이 매우 컸으며 현재의 증폭기에 비해 증폭 정도나 증폭 주파수 대역도 제한적이었고, 보청기의 작동을 위한 전원(배터리) 또한 매우 컸기 때문에 보청기를 착용하고 다니기에는 많은 무리가 따랐다. 이후 기술자들은 보청기를 착용 가능하도록 소형화하고, 소형화된 상태에서도 원하는 만큼의 출력을 낼 수 있고, 소형화된 보청기를 가동시킬 수 있는 소형 배터리의 개발에 주력하여 어떠한 전기, 전자 분야보다 먼저 보청기에 트랜지스터를 적용하였으며 현재의 고집적 회로 증폭기를 이용하여 소형 보청기에서 보다 양질의 증폭 출력을 얻을 수 있도록 기술을 축적하여 왔다. 아울러 와우 손상에 의한 청력 손실 시 나타나는 여러 병인생리를 이해함에 따라 이를 보상하기 위한 기술을 개발하여 보청기에 적용하고자 하는 노력이 지속되고 있다.

지속적으로 개발이 진행되고 있는 보청기의 지식을 따라가는 것은 쉽지 않으나 와우 손상에 의한 청력 손실의 병인생리와 이를 적용한 보청기의 기본 원리를 이해하고 이러한 원리를 구현하기 위하여 필요한 보청기 내의 구조물을 파악하고 이 들이 가지고 있는 알고리즘의 원리를 이해한다면 보청기의 전체적인 윤곽을 찾는데 매우 유용할 것이다.

교신저자 : 홍성화, 135 - 710 서울 강남구 일원동 50번지
성균관대학교 의과대학 서울삼성병원 이비인후과학교실
전화 : (02) 3410 - 3579 · 전송 : (02) 3410 - 3879
E - mail : shhong@smc.samsung.co.kr

보청기의 기본 원리

와우 손상에 의한 청력 손실 시 나타나는 psychoacoustics의 변화에 대해서 잘 알고 있지 못한 실정이지만 실제 언어 감지에 나타나는 효과는 크게 역치의 상승, 역동범위 감소와 loudness의 왜곡, 주파수 선별력의 감소, 시간적 요소 분석의 감소, 양측 귀를 이용한 음처리 기능의 감소 등 다섯 가지로 구분할 수가 있겠다. 처음 보청기가 개발이 된 이 후로 지금까지 역치 상승에 대해서는 적절한 만큼의 소리 증폭을 이용하여 충분히 해결할 수 있는 수준에 이르렀으며 정상적 와우에서 나타나는 압축 기능의 소실에 따른 loudness의 왜곡(누가현상)에 대해서는 지난 10여 년 동안 보청기에 압축의 개념이 첨가되어 상당한 부분이 해결되고 있다고 할 수 있겠다.

양측 귀의 손상에 의한 소리의 방향 인지 능력 저하와 환경 소음에서의 신호 인지 능력 저하는 양측 귀에 보청기를 착용하고 지향성 마이크로폰을 이용하여 점차 개선 중에 있다. 역치 상승에 대하여 증폭이 필요하며, 소실된 압축 기능을 극복하기 위하여 기계적인 압축 기능을 부가하고, 주파수 선별력의 손실에 대하여 주파수 대역을 강조하는 알고리즘을 개발하여 부가하고 주위 소

음으로부터 신호음을 구분하기 용이하게 주위 소음을 제거 또는 감소시키거나 방향성 마이크로폰을 이용하기도 한다(Fig. 1). 보청기 자체에서 생성되는 잡음을 감소시키거나 마이크로폰과 리시버 사이에 발생하는 feedback을 개선하는 알고리즘을 부가 시키기도 한다.

그러나 주파수 및 시간 분석에 대한 지식 및 보청기에서의 응용은 지극히 제한되어 있다. 또한 이 다섯 가지 요소들이 언어 감지에 서로 상관 관계가 있는 것으로 하나의 요소를 해결하고자 하는 시도가 다른 요소들에 대하여 예상하지 못 하였던 결과를 보일 수가 있기 때문에 기술적인 개발을 보청기에 바로 응용하기는 쉽지 않다.

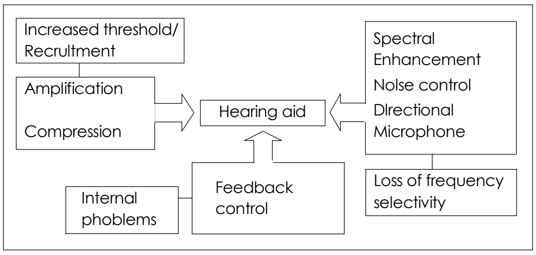

Fig. 1. Basic principle of hearing aid.

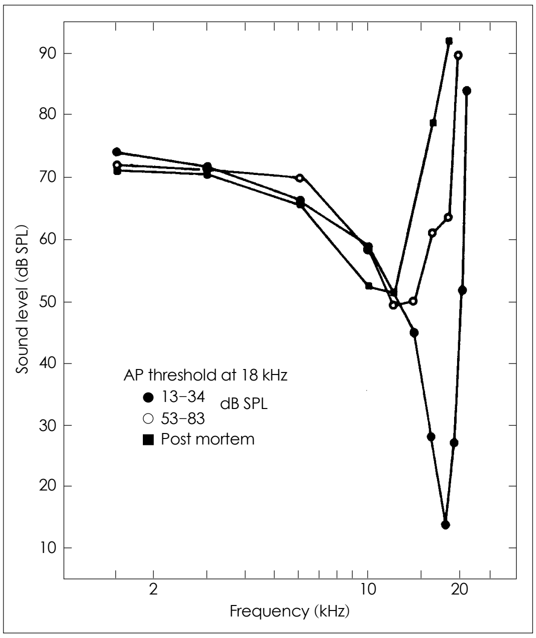

Fig. 2. Constant velocity tuning curves measured at a single point on the basilar membrane.

압축의 원리

감각성 난청에서의 역치 상승과 역동 범위의 감소에 따른 누가 현상

와우는 구조적으로 기저부의 기저막은 첨부의 기저막보다 상대적으로 좁고, 경직되어 있으며, 두껍고, 유모세포 및 윤모(stereocilia)는 첨부로 갈수록 길어지기 때문에 기저부는 경직성의 영향을 받고 첨부는 유모 세포 등에 의하여 질량의 영향을 받게 된다. 소리 에너지가 와우 내로 전달이 되면 기저부에서 파형이 시작이 되어 점차 진폭이 증대하면서 첨부 쪽으로 파형을 만들어 나가게 되다가 소리 에너지가 가지고 있는 주파수에 의해 특정 부위의 기저막이 최대의 진폭을 보이는 전형적인 진행파(traveling wave)의 파형을 그리고 난 후 급격히 소실되게 된다. 따라서 와우는 구조적으로 소리 에너지의 주파수에 따라 최대 파형을 만드는 부위가 달라지는 주파수 선별력을 가지고 있어 기저부는 고주파 영역을 담당하고 첨부로 갈수록 저주파를 담당하게 된다. 이와 같은 기저막의 경직성 및 질량의 관계를 이용한 수동적인 주파수 선별력만으로는 정상적인 청각에서의 섬세한 주파수 선별력을 보일 수가 없고 기저막의 진동에 의하여 외유모 세포가 탈분극을 하고 이 탈분극에 의하여 외유모 세포가 수축하면서 다시 기저막의 진동을 극대화시키는 일련의 능동적 과정(active process)으로 와우는 섬세한 주파수 선별력을 가질 수 있게 되며 이런 능동적 과정에 의해 아주 작은 소리도 들을 수 있게 역치를 낮추는 효과를 가질 수 있게 된다(Fig. 2에서 13~34 dB SPL 곡선).[1] 그러나 와우 내에 병변이 생겼을 경우 대개 외유모 세포 및 내유모 세포의 손상이 동반되며 특히 외유모 세포가 더 쉽게 손상을 받는데 외유모 세포가 손상을 받게 되면 일련의 능동적 과정에 대한 수행 능력이 떨어지거나 소실되어 작은 소리는 듣지 못할 정도로 역치가 높아진다.

이와 더불어 와우의 주파수 선별력도 사라지게 되어 (Fig. 2에서 53~83 dB SPL 곡선) von Bekesy가 사체를 이용하여 처음 실험하였을 때와 같은 정도의 수동적인 주파수 선별력(Fig. 2에서 post mortem 곡선)만 남게 된다.

외이도를 통해 들어온 소리를 청신경 회로에서 얼마

나 크게 느끼는가를 loudness라고 정의하는데 loudness 정도를 알아보기 위한 대표적인 방법이 순음의 자극음을 주고 그 음의 loudness가 1000 Hz 기준 주파수의 몇 dB SPL의 음과 같은 loudness를 가지는가를 알아보는 방법으로 여러 주파수에서 반복적으로 검사를 시행하면 1000 Hz 기준 음의 각각 다른 음압과 같은 loudness를 보이는 곡선들을 구할 수 있게 된다. 이를 equal loudness contour라고 하며 1000 Hz 음의 음압을 기준으로 phon이라는 단위로 표시한다(Fig. 3).[2]

그림에서 보면 음압이 높아질수록 저주파 영역에서는 loudness 증가가 중간 주파수 영역에서 보다 빨라져서(일종의 정상적인 누가 현상) 전 주파수 영역이 평평해지는 것을 볼 수 있다. 와우 손상에 의한 청력 손실이 동반되는 경우에는 많은 경우에서 중간 주파수 영역에서도 정상인보다 빠른 loudness의 증가를 보일 수 있다. 와우 손상을 받은 사람은 감음에 대한 가청 역치가 증가되어 있으나 불쾌청 역치는 90~100 dB SPL로 정상인의 불쾌청 역치와 거의 같으므로 정상인 보다 좁은 역동 범위를 보이게 된다. 이런 사람에게 역치보다 점점 큰 소리를 주었을 때 피검자가 받아들이는 loudness의 증가 속도는 정상인에 비하여 빠르게 되는데 이를 누가 현상(recruitment phenomenon)이라고 하며 더 많은 와우 손상에 의하여 역치가 더욱 높아진 사람에서 누가 현상이 더욱 뚜렷하게 나타나는 것으로 알려져 있다. 한편 불쾌청 역치보다 더 큰 소리를 주었을 때에는 검사자가 느끼는 음의 크기는 정상인과 와우 손상에 의한 청력 손실을 보이는 사람에서 거의 차이가 없다고 알려져 있다.[3]

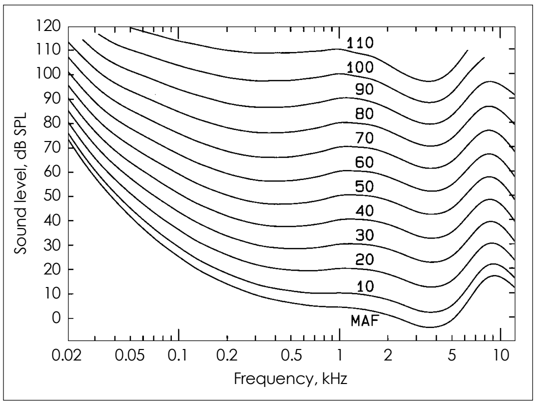

Fig. 3. Equal loudness contours for various loudness levels. The lowest curve is the absolute threshold curve.

이처럼 불쾌청 역치에 가까운 소리에 대해 정상인과 유사한 크기의 음으로 받아들이는 것을 완전 누가(complete recruitment), 정상 보다 음의 크기가 적다고 감지하는 경우를 부분 누가(partial recruitment)라고 하며 정상인 보다 더 크게 음을 감지하는 경우를 과누가(overrecruitment)라고 한다. 이러한 누가 현상은 앞에서 설명한 바와 같이 와우 손상에 따른 청성 필터의 대역이 넓어지고 주파수 선별력이 떨어져서 역치보다 큰 자극음을 주는 경우 정상적인 특이 주파수 영역 보다 넓은 기저막을 자극을 하게 되고 이에 따라 비정상적으로 신경 활동이 빨리 전달되어 자극이 커질수록 빠르게 loudness의 증가를 보인다.[4)5)] 그러나 필터를 이용한 psychoacoustic 연구에 의하면 누가 현상은 떨어진 주파수 선별력이 주요 원인은 아니며 감음에 대한 역치가 증가에 따른 정상인 보다 좁은 역동 범위를 갖게 되는 것이 주요 원인으로 손상된 와우에서는 외유모세포 등의 능동적 활동이 소실되거나 감소되어 입-출력 기능이 압축성 비선형화 되지 않고 압축 능력이 떨어져서 자극음이 커질수록 감지되는 음 크기가 훨씬 빨리

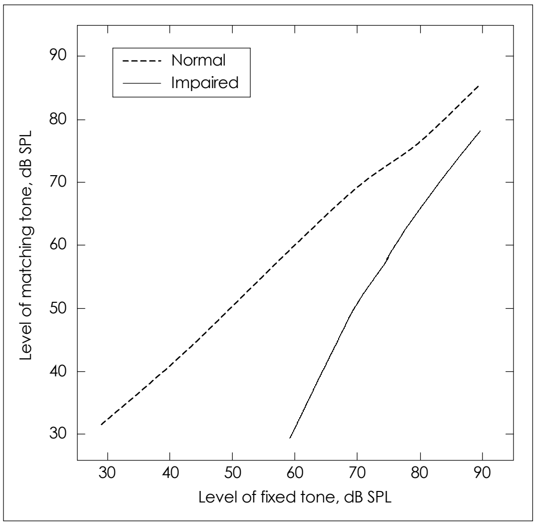

Fig. 4. Results of loudness matches between sinusoidal tone bursts presented alternately to the two ears for normally hearing subjects (dashed line) and subjects with uinlateral cochlear hearing loss (continuous line). The tone was fixed at a series of levels in one ear (the impaired ear of the subjects with unilateral impairment) and the level in the other ear was varied to determined the point corresponding to equal loudness.

증가하기 때문이라고 한다(Fig. 4).[6)]

정상인에서는 역치보다 어느 정도 이상 큰 소리를 주게 되는데 overall intensity가 고정되어 있으면 임계대역까지는 대역을 넓히더라도 듣는 음의 크기가 일정하고 대역이 critical bandwidth를 넘은 경우에는 loudness가 증가하는 것으로 알려져 있다(Fig. 5).[7)]

이것은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 대역이 임계대역(여기서는 140 Hz)만큼 증가할 때까지는 첨부가 낮아지고 아래 부분이 넓어지지만 전체의 면적은 같게 되어 loudness는 일정하게 되나 대역이 CB보다 넓어지는 경우에는 점차적으로 면적이 증가하게 되어 loudness가 증가하는 것으로 설명하고 있다. 이처럼 대역이 CB 보다 넓어지면서 점차 loudness가 증가하는 것이나 같은 잡음 밀도(noise density)를 가진 좁은 대역의 음과 넓은 대역의 음을 정상인에게 들려 줄 경우 넓은 대역의 음을 더 크게 듣게 되는 것을 loudness summation이

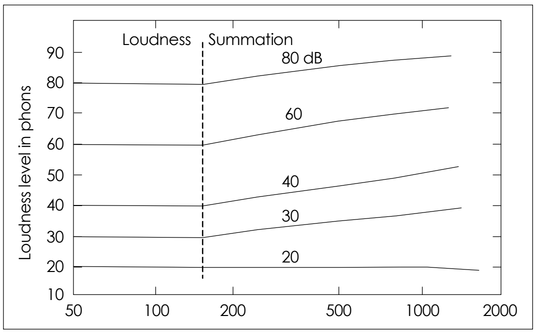

Fig. 5. The loudness level in phons of a band of noise centred at 1 kHz, measured as a function of the width of the band.

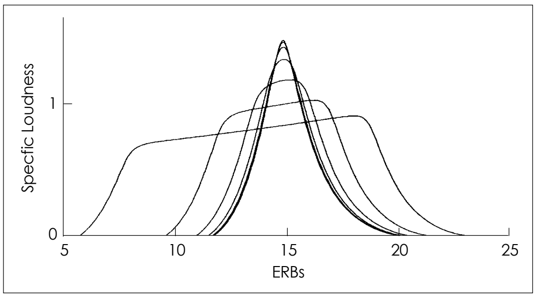

Fig. 6. Specific loudness patterns : For bandwidths up to 140 Hz, the area under the specific loudness patterns is constant. For greater bandwidths, the total area increases (ERBs : equivalent rectangular bandwidths).

라고 한다. 와우 손상에 의한 청력 손실이 있는 경우에는 기저막의 압축성 비선형 특성의 소실과 주파수 선별력의 감소에 의하여 loudness summation이 감소하는 것으로 해석하고 있는데 이에 따라 주파수 대역의 범위에 관계없이 loudness는 거의 같게 된다. 특히 언어나 음악과 같이 넓은 주파수 대역을 가진 음의 loudness summation의 감소가 좁은 주파수 대역을 가진 음에서보다 더욱 뚜렷하게 나타난다.[8)]

보청기에서 압축을 이용한 증폭

와우 손상이 있으면 소리에 대한 역치가 상승함에 따라 역동 범위가 좁아지고 이 범위 내의 입-출력 반응이 선형적으로 바뀌기 때문에 와우 손상을 받은 사람들은 작은 소리는 잘 듣지 못하고 큰 소리에 대해서 바로 큰 소리로 듣는 누가 현상이 일어난다. 이를 극복하기 위하여 보청기 자체에 큰 소리를 압축할 수 있는 기능을 내장시킬 수 있는데 이를 압축보청기라고 한다. 보청기의 일차 목적은 주파수 별로 음을 증폭시켜 청력 손실에 따른 청음 능력의 감소를 보완해 주는 것에 있으므로 처음 보청기가 개발되었을 당시에는 손상된 청력만큼 증폭시켜 주었다. 그러나 이런 보청기를 사용하면 dynamic range의 감소에 따른 누가 현상에 의하여 일상 생활의 대화에서도 매우 불편을 느낄 정도로 큰 소리로 들리기 때문에 그 후에 개발된 거의 모든 보청기에서는 출력에 제한을 두게 되었다.

그 중의 한 예로 peak clipping이 있으나 이러한 방법을 이용하는 경우 음의 왜곡을 초래하여 불편을 느끼게 된다(Fig. 7). 그 후 여러 가지 처방 공식을 이용하여 손실된 청력의 일정 부분을 증폭시키는 방법을 이용하였지만 이런 공식들이 어떤 특정한 상황에서만 적합하게 사용되기 때문에 실질적으로 많은 사람에게 도움을 주지는 못 하였다. 즉, 이런 선형 증폭은 처방 공식에 맞는 보청기를 구하기가 어렵거나 처방에 맞게 조절하기가 어려운 경우가 많고, 대개 고주파 영역에 대한 증폭에 부적절하며, 착용자들이 좁은 역동 범위를 가지고 있어 증폭에 의한 불쾌한 소리 감지나 소리 왜곡을 싫어하기 때문에 대체적으로 처방에 의한 증폭보다 적은 증폭을 선호하게 되며, 환경에 따라서 볼륨을 조절하여야 한다는 단점이 있다.

특히 와우 손상에 의하여 역동 범위가 좁아짐에 따라 나타나는 현상 중에 하나인 누가 현상을 극복하기 위하여 여러 형태의 압축형(비선형) 보청기가 개발이 되어 이용되고 있다. 이 보청기의 기본 목적은 정상인의 역동 역치에 들어오는 음을 압축하여 난청자들의 역동 역치 안으로 전이시켜 난청자들이 정상인이 듣는 것과 같게 느끼도록 해주는 것이다. 압축형 증폭의 종류에 대해서는 보청기의 기본구조에 언급된다.

잡음 환경에서의 언어 감지 향상

주파수 선별력의 소실로 인한 언어감지 능력 저하

Fig. 8에서 보여 주는 특징은 특이 주파수와 아주 인접한 주파수에서의 입-출력 곡선은 소리가 일정한 크기 이상으로 와우를 자극하는 경우 압축된 출력 반응을 보이는 비선형적 압축을 하며 나머지 주파수에서는 입-출력 곡선이 선형으로 나타난다는 것이다.[9] 이처럼 압

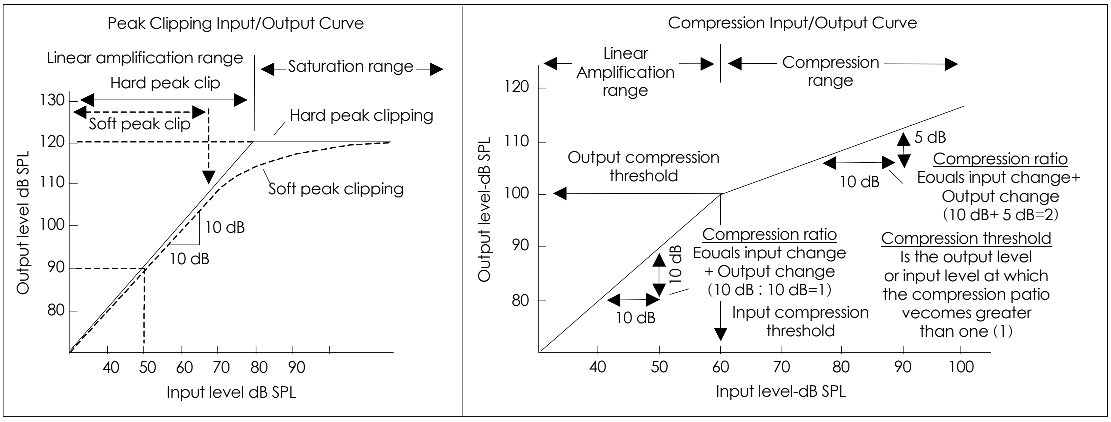

Fig. 7. Peak clipping and ncnlinear amplification.

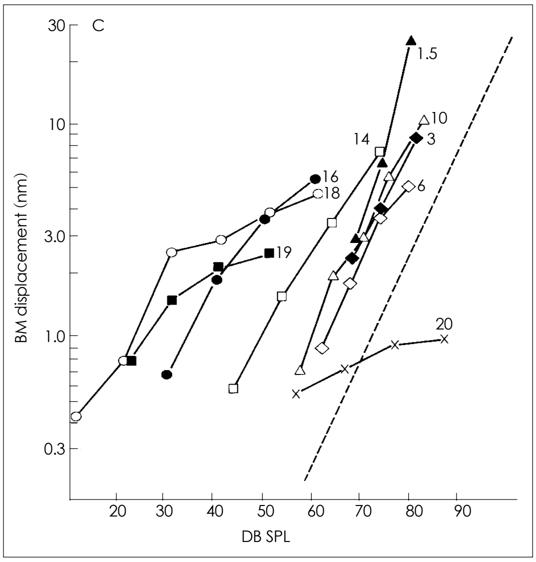

Fig. 8. Intensity functions for basilar membrane vibration show saturation near and above the best frequency (18 kHz), and linear responses at low frequencies. Frequency of stimulation id indicated by the numbers on the curves.

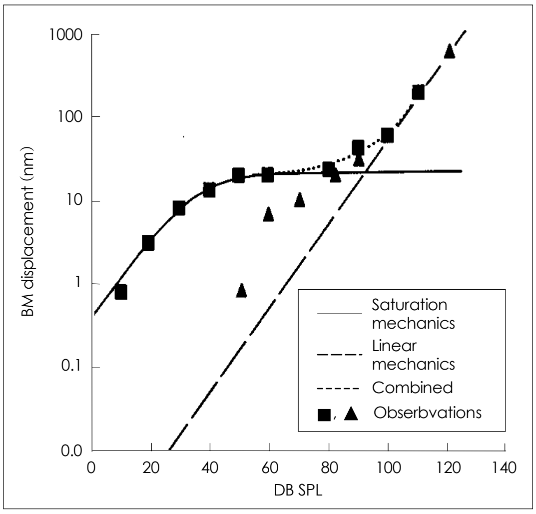

Fig. 9. Amplitude functions of the basilar membrane, showing theoretical contributions from the active process (solid line), and the passive process (long dashes), making a net function shown by the short-dashed line. ■ : Measured basilar membrane response when cochlea in good condition. ▲ : measured response after acoustic trauma.

축성 비선형 반응은 특이 주파수 근처에서만 관찰이 되는데 이는 그 부위에서 능동적 과정이 가장 왕성하기 때문으로 이해하고 있다. Fig. 9는 정상적인 경우 이러한 비선형적 입-출력 곡선을 소리의 강도 별로 나타낸 것으로(■) 역치부터 30~40 dB SPL까지는 선형적인 형태를 보이고 그 보다 큰 소리부터 약 80~100 dB SPL까지는 압축된 출력을 보여주고 있으며 이 보다도 큰 소리에 대해서는 다시 선형적인 출력 반응을 보여주고 있다. 이렇게 30~40 dB SPL보다 작은 소리에 대해 선형적 반응을 보이는 것은 소리가 커질수록 그 부위의 능동적 과정 자체가 선형적으로 활동이 증가하기 때문인 것으로 이해되고 있으며 그 보다 큰 소리에 대해서 외유모 세포 등의 능동적 과정이 비선형적인 반응을 보이다가 약 80~100 dB SPL 부근에서는 포화를 보이기 때문이며 그 보다 더 큰 소리에 대해서는 기저막의 수동적 활동이 선형으로 나타나기 때문이라고 이해한다. 한편 소음성 난청을 유발할 경우에는 이러한 능동적 활동이 소실되기 때문에 그림에서 보는 바와 같이 역치가 증가하고 선형적 입-출력 반응을 보이는 것이다(▲).[10)]

정상인과 와우 손상을 받은 난청자 사이에 주파수 선별력을 비교하는 것은 청성 필터의 모양에 어떠한 영향을 주는가를 이용하면 쉽게 이해된다. 와우 손상이 있는 난청자에게서 청성 필터의 모양을 구해보면 Fig. 10과 같이 전반적으로 필터의 대역이 넓어지고 청력의 손실이 더 많은 난청자에게서 더 넓은 대역을 보이는데 특히 저주파 영역으로 대역이 훨씬 넓어져서 주위에 주로 잡음을 이루고 있는 낮은 음에 의해서 훨씬 더 잘 차폐가 될 것을 시사하고 있다.[11)] 또한 음색의 구분도 주파수 선별력에 의존한다고 알려져 있어 와우 손상이 있는 경우 악기의 구분이나 모음 등의 구분이 쉽지 않다.

와우 손상이 있는 사람들이 호소하는 불평 중의 하나가 언어 소통에 어려움이 있다는 것이다. 경도나 중등도 난청자의 경우에는 조용한 곳에서는 한 명의 상대자와 비교적 언어 소통이 용이하지만 여러 사람이 같이 대화를 나누거나 주위에 소음이 많던지 방 자체의 울림이 큰 경우에는 언어 소통에 어려움을 겪게 되며 고도 난청자의 경우에는 조용한 곳에서 한 사람과 대화하는 것조차도 어렵게 된다.

Plomp의 연구에 의하면 지속적인 언어 형태의 잡음

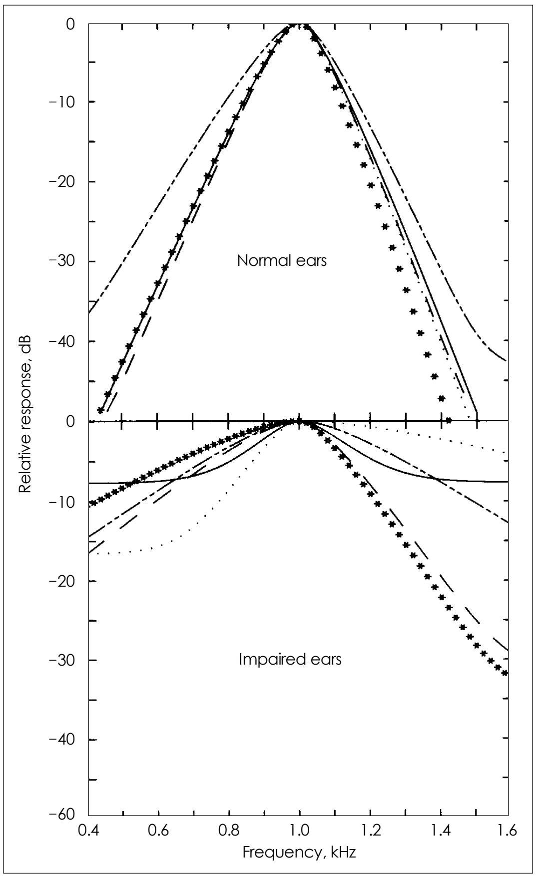

Fig. 10. Auditory filter shapes at a center frequency of 1 kHz for the normal (top) and impaired (bottom) ears of six subjects with unilateral cochlear impairments.

(speech-shaped noise)을 크게 주면서 SRT(speech reception threshold)를 측정하면 정상인에 비하여 경도 난청이 있는 사람은 약 2.5 dB만큼 상승을 하고 중등도 또는 중증도 난청이 있는 사람은 약 7 dB 만큼 상승한다고 한다.[12)]

Speech-to-noise ratio가 1 dB 변하면 역치 근처에서는 약 14~19%의 언어 감지 능력에 차이를 보인다는 것을 감안하면 이 수치 들은 충분히 언어 이해력에 지장을 줄 수 있다는 것을 알 수 있다. 한편 잡음이 fluctuating하거나 다른 한 사람이 말을 하는 것처럼 음의 강약이 수시로 바뀌는 상황에서는 정상인의 경우 시간적 또는 스펙트럼 상의 계곡부에 걸치는 단서들을 이용할 수가 있어 지속적인 배경 잡음이 있을 때보다 SRT가 7~

18 dB 정도 낮아지게 되지만 와우 손상에 의한 난청자는 이러한 단서를 이용할 수가 없어 배경 잡음의 형태 차이에 의한 SRT의 변화는 거의 찾아볼 수가 없기 때문에 이런 배경 잡음에서는 정상인과 더욱 큰 차이를 보이게 된다. 다시 말하면 감음성 난청이 있는 사람이 또 다른 사람이 말하고 있는 상황에서 어떤 사람과 대화를 하고자 하면 정상인보다 약 16 dB 이상의 speech-to-noise ratio가 필요하다. 이 것은 청력 손실에 따른 청음 능력(audibility)의 감소 외에도 역치보다 큰 소리에 대해서도 주파수 선별력의 감소 및 역동 범위의 감소에 의한 누가 현상 등 음 감지 자체에 변화가 생겼기 때문이라고 해석하고 있는데 Moore는 45 dB 미만의 청력 손실을 보이는 경우에는 청음 능력 손실 자체가 가장 주요 원인이 되겠지만 그 이상의 청력 손실을 보이는 경우에는 역치보다 큰 소리가 청신경계에 전달이 된다고 하더라도 선별 능력 자체가 떨어지는 것도 중요하다고 하였다.[13)]

음조(pitch)는 소리의 음악적인 요소, 즉 소리의 높낮이에 대한 특성을 말하는 것으로 순음의 경우에는 주파수에 관여하게 되고 주기적인 복합음의 경우에는 그 음의 기본 주파수(fundamental frequency)에 관여된다고 한다.

주파수 변별력은 서로 다른 주파수를 가진 두 개의 자극음을 순차적으로 듣고 어떤 소리가 높은 음을 가졌는지 분별할 수 있는 능력 또는 자극음이 시간이 지나면서 주파수가 변하는가를 판단할 수 있는 능력을 말하는데 순음에 대한 주파수 변별은 주로 음조의 변화로 느끼게 된다. 구별이 가능한 최소 크기의 변화를 difference limen이라고 하는데 주파수 변별력을 알아보기 위한 것을 DLF(difference limen for frequency)이라고 하는데 정상적인 청각을 가진 경우 주요 대화 영역인 0.5~2 kHz에서는 0.2~0.3%의 주파수 차이가 있어도 주파수 분별이 가능하다.

그러나, 와우 손상을 받은 난청자들을 대상으로 DLF를 측정한 여러 연구의 전반적인 결론은 결과에 대한 개인 간에 차이가 있고 청력 역치와의 관계는 뚜렷하지 않으나 주파수 변별력은 떨어진다고 한다. 이는 앞에서 언급한 것과 같이 와우 손상이 있게 되면 청성 필터는 훨씬 넓어지며 위상 고정에 대한 정확성이 떨어진 것과 깊은 관계가 있을 것이다. 음조는 언어를 이해하는데 매우 중요할 뿐 아니라 나이, 성별, 감정 상태 등 언어 외적인 정보를 얻는데도 아주 중요한데 와우 손상이 있는 경우 음조 감지 능력이 떨어져서 언어를 이해하는 데에 지장을 주게된다.

공간 감지 능력의 저하

양측 귀를 이용하는 것은 일측 귀를 이용하여 듣는 것보다 소리를 감지하고 선별하는데 더 유용하며 이를 ‘diotic summation’이라고 한다. 양측 귀를 이용하는 것은 주변에 잡음이 있을 경우 더욱 유용한데 Plomp와 Mimpen 등에 의하면 잡음이 있는 곳에서 양측 귀를 이용하는 것이 한 쪽 귀를 이용하는 것보다 언어감지 역치가 1.4 dB 떨어지며 언어감지도로 따지면 약 20%의 개선이 있다고 하였다.[14)] 이렇게 양측 귀를 이용하는 경우 소리를 보다 쉽게 감지하고 선별할 수 있을 뿐 아니라 소리가 들릴 때 소리의 근원이 어디인가를 아는 것에도 매우 유용하게 이용된다. 소리의 근원에 대한 공간적인 감지는 대개 두 가지 중요한 단서를 이용하게 된다. 저주파의 경우에는 머리의 크기에 비하여 파장이 길기 때문에 한 쪽에서 들려오는 소리가 머리를 도달할 때에 회절을 하게 되어 소리 에너지의 손실이 없이 다른 쪽 귀로 전달이 되므로 소리의 근원으로부터 각각의 귀에 도착하는 소리 강도의 차(interaural intensity difference, IID)는 좋은 단서가 될 수가 없으며 각각의 귀에 도착하는 시간의 차(interaural time difference, ITD)가 좋은 단서가 된다.

두 귀 사이의 거리가 약 23 cm이라고 하면 ITD는 정면에서 소리가 들려올 때인 0 μs부터 정확히 한 쪽 귀 선상에서 들려올 때인 690 μs까지 범위를 갖게 되는데 정면에서 들려오는 1000 Hz보다 낮은 주파수를 가진 소리에 대해서는 약 1도 이동하는 정도인 10 μs 정도의 차이도 감지할 수 있다. 한편 조건에 따라서 1 dB 정도의 ITD만으로도 양측 간의 강도 차이를 느낄 수 있는데 고주파의 경우에는 소리 에너지가 머리에 도달하게 되면 대부분 반사를 하여 반대 쪽 귀에는 소리 에너지가 적어지게 되므로 IID가 최고 20 dB까지 생기게 되므로 매우 좋은 단서가 되지만 1500 Hz보다 높은 주파수를 가진 순음에서는 ITD에 의한 위상차가 분명하지 않아 ITD는 좋은 단서가 될 수가 없다. 이렇게

ITD와 IID 두 가지를 이용하여 소리의 근원을 파악한다는 것이 'duplex theory'이다. 이 외에도 두상과 이개에 의한 spectrum의 변화 및 두상의 움직임 또는 소리 근원의 움직임에 의한 단서를 이용하기도 한다.

와우 손상에 의한 공간적 감지 능력의 변화에 대한 연구는 그리 많지 않지만 일반적으로 일정 강도 이상의 순음에 대해서 대칭적인 양측 와우 손상이 있는 경우에는 공간적 감지 능력이 크게 떨어지지 않으며 비대칭적인 와우 손상이 있거나 일측성 와우 손상이 있는 경우에는 좀 더 많은 경우에서 감지 능력이 떨어지는 것으로 알려져 있다.

보청기에서의 언어감지능력과 공간 감지능력의 향상

와우 손상이 있으면 외유모세포의 손실에 의해 주파수 선별력이 떨어지므로(와우 내 청성 필터의 주파수 대역이 넓어짐에 따라 주파수 선별력이 떨어짐) loudness 감지, 주파수 분별, 음 높이 감지, 음색 구분 및 언어 감지 영역(특히 소음에서의 언어 인지 능력) 등에 매우 다양하게 영향을 주므로 이를 극복하기 위하여 일부 보청기에서는 소리의 모음 부분을 분석한 후 이 부분을 강조하는 spectral enhancement라는 알고리즘을 쓰기도 한다. 주파수 선별력이 떨어짐에 따라 소음에서의 언어 인지 능력을 높혀주기 위하여 소음 자체를 줄여주는 알고리즘을 보청기에 내재시키거나, 방향성 마이크로폰을 이용하여 신호대잡음비를 올려주기도 한다.

많은 연구가 된 것은 아니지만 양측 와우 손상의 정도가 비슷할 경우에는 공간 감지 능력이 떨어지지는 않는다. 그러나, 보청기를 한 쪽을 하는 경우 비대칭적인 청력을 갖게 되므로 공간 감지 능력이 떨어지고 잡음이 있는 경우 언어 인지 능력이 떨어지게 된다. 따라서, 최근에는 양측 감각신경성 난청이 있는 경우 양측에 보청기를 착용하도록 권한다.

실제 잡음 환경에서 언어 감지 능력을 향상시키는 몇가지 방법 중에 하나가 지향성 마이크로폰을 이용하는 것이다. 일반적인 보청기에서 사용되는 마이크로폰은 정면에서 들어오는 소리에 대해서만 매우 민감하도록 제작되어 있어나 지향성 마이크로폰은 신호음의 위치 파악에도 도움을 줄 뿐 아니라 마이크로폰의 위치를 변화시킴으로써 원하는 방향의 소리에 대해 민감하도록 조절할 수 있다. Leeuw 등의 연구 결과에 따르면 지향성 마이크로폰을 장착하고 말이 정면에서 들어오도록 하고 다른 여러 각도에서 방해음이 들어오도록 하여도 일반 마이크로폰을 사용하였을 때보다 SRT가 약 2~3 dB 낮아지며 이 것은 잡음 환경 등 대화가 어려운 상황에서 약 20~45% 정도의 언어 인지 능력 향상을 보이는 것과 동일한 효과를 나타낸다고 한다.[15)]

그러나 소리가 울리는 공간에서는 반향에 의하여 잡음도 전방에서 들어올 수가 있으므로 지향성 마이크로폰의 효과는 감소되는 단점이 있다. 이 외에도 adaptive beamforming을 이용하거나 양측 귀에서의 신호처리 알고리즘의 응용 등으로 잡음 환경에서의 언어 인지 능력의 향상을 기대할 수가 있겠다.

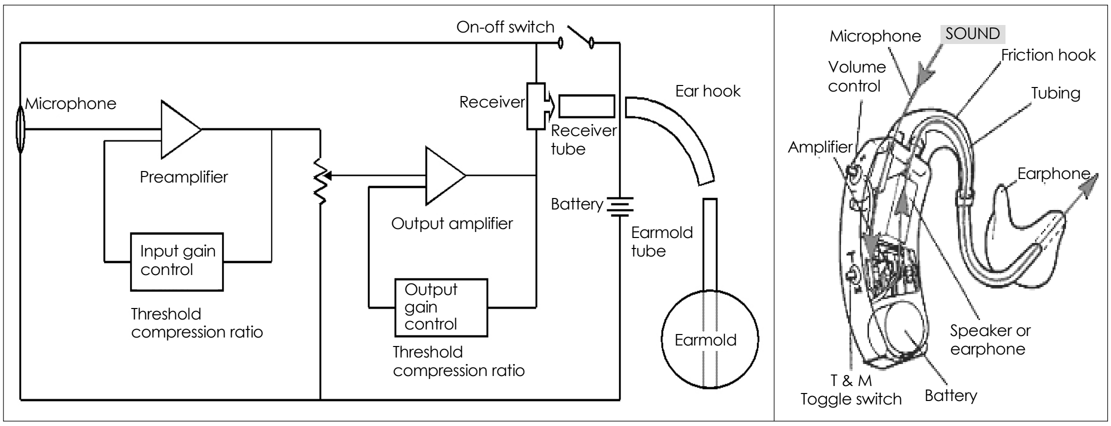

Fig. 11. Basic structure of BTE type hearing aid.

보청기의 기본 구조

현재의 보청기는 소리를 감지하는 마이크로폰, 입력된 소리를 증폭하는 증폭기, 증폭된 소리를 출력하는 리시버, 출력소리의 크기를 조절하는 조절기와 전원 등의 기본구조로 구성되어 있다(Fig. 11).

마이크로폰은 음향 신호를 전기 신호로 변환하는 장치로 모든 방향에서 소리를 받는 omnidirectional microphone과 특정 방향에서 들어오는 소리를 선택적으로 받는 directional microphone으로 구분되며 directional microphone의 경우 omnidirectional microphone 보다 SNR(sound noise ratio)을 3~5 dB만큼 증가시켜 소음 속에서의 어음명료도를 향상 시킨다. 최근에는 주위 잡음이 많은 장소에서 신호대잡음비를 증가시켜줄 수 있는 directional microphone의 사용이 늘고 있다.

증폭기는 마이크로폰에서 변환된 전기 신호를 증폭하는 장치로 이 증폭기의 특성에 따라 보청기를 분류하게 된다. 예를 들어 증폭기에서의 신호처리 방법에 따라 아날로그, 프로그래머블, 디지털 보청기로 분류할 수 있다.

보청기는 일반적으로 두단계 이상에서 증폭을 하게 되는데 입력단계(preamplifier)와 출력단계(power amplifier)에 증폭을 하게 된다 입력단계의 증폭은 상대적으로 작은 이득을 준다. 현재 보청기에서 많이 이용되는 출력단계의 증폭기는 여러 전기제품에서 사용되는 다양한 종류의 증폭기 중 주로 3가지가 사용되는데 class A, class B, class D라고 칭한다. 이 세가지의 증폭기는 전기신호의 처리방식과 전원 사용의 효율성에 차이를 가지고 있다.

Class A 증폭기

지금까지 가장 오래동안 많이 사용되어온 종류로 크기가 작으며 비용면에서 유리하다. 반면에 소리가 없는 상황에서도 지속적으로 전지를 소모하며 따라서 최대출력을 많이 높일수 없는 단점과 큰소리에 대한 왜곡현상이 있다. 따라서 낮은 이득과 낮은 출력의 보청기에 적합하다.

Class B 증폭기

이 종류는 class A증폭기의 단점을 보안하기 위해 고안되었다. 이 증폭기는 외부신호의 positive phase와 negative phase를 구분하여 증폭하기위해 두개의 증폭소자를 가지고 있으며 이러한 이유로 push - pull증폭기로 불린다. 각각의 증폭소자는 소리의 유입이 적을때는 전지 소모가 작지만 필요시에 높은 출력을 생산할 수 있다. class A에 비해 최대출력을 더 높게 할 수 있으며 큰소리의 왜곡이 적다. 그러나 두 증폭단자가 교대로 작동하는 과정에서 생기는 crossover distortion의 단점이 있으며 class A에 비해 많은 구성요소가 필요하여 과거에는 작은 보청기에 사용하기 어려운 부분이 있었다.

Class D 증폭기(class D output stage amplifier)

앞의 두가지 증폭기와는 다른 방식으로 처리하는 증폭기로서 carrier라는 사람이 들을수 없는 100 kHz의 고주파 신호를 발생시킨다. 이 carrier는 외부 음신호가 유입되면 음신호에 의해 변조되는데 두가지 신호가 합쳐져서 비교측정기(comparator circuit)에 입력신호로 작용한다.

이 비교측정기에서 진폭이 변조되어 진폭이 진폭이 넓은 경우 리시버로 흐르는 전류가 증가하고 좁은 경우 감소하는 방식으로 음향신호가 증폭된다. 이 방식은 전지를 효과적으로 사용할 수 있으며 크기가 작다는 장점이 있으며 대부분의 사람들에 의해 앞의 두가지 증폭기 보다 선호되고 있다.

증폭 방법에 따라 선형, 비선형(압축) 보청기로 분류하고 비선형 보청기는 압축의 시간적(또는 동적) 특성에 따라 다시 compression limiting, syllabic compression, automatic gain control증폭기로 분류할 수 있다. 증폭기를 통한 소리의 증폭이 왜곡됨이 없이 원래의소리로 리시버로 전달될 수 있게 하면서 증폭된 소리가 불쾌 역치 이상의 소리가 되지 않도록 출력에 대한 제한을 두는 등 증폭기의 소리에 대한 기계적 특성을 표준화하고 규격화하는 노력이 지속되고 있다. 보청기 회사들은 보청기 사용자의 청력 손실의 특성에 맞춰 서로 다른 종류의 압축시스템을 이용하고 있다.

Compression Limiting

Compression limiting 시스템은 1950 년대에 개발이 되어 아직까지 이용이 되는 것으로 압축 역치가 높

으며(대개 80 dB 이상), 압축율이 크며, attack time이 매우 짧은 특징을 가지고 있다. 따라서 일상적인 대화에서는 압축 시스템이 작동하지 않고 일반적인 선형 증폭 방식을 택하게 되고 아주 큰 소리가 들어오게 되면 높은 압축율을 이용하여 압축하게 된다. 이는 압축 시스템에서 초기에 이용하였던 출력 제한법인 peak clipping 보다는 왜곡 정도가 적은 것으로 알려져 있다.

Syllabic Compression

Syllabic compression은 단음절과 단음절 사이 또는 단음절 내의 구성 요소인 자음과 모음 사이를 구분하여 각각의 요소를 압축시킴으로써 음절의 각 단위 사이의 소리 크기 변화를 줄여서 보다 많은 언어를 불쾌감이 없이 들을 수가 있게 된다. 따라서 이 시스템은 이론적으로 dynamic range가 좁은 감각 신경성 난청을 가진 보청기 사용자에게 유용한 것으로 되어 있다.

이런 syllabic compression을 이용하는 보청기 압축 시스템의 특성은 낮은 압축 역치와 적은 압축율을 가지고 있으며 짧은 attack time과 짧은 release time를 갖고 있다. 낮은 역치를 갖게 함으로써 보다 많은 음절 또는 음소를 듣게 하였으며 짧은 attack time과 release time을 갖게 함으로써 많은 에너지를 가지고 있는 모음은 압축을 하고 적은 에너지를 가지고 있는 자음에 대해서는 압축을 하지 않게 만들었다. 이 시스템에서는 attack time은 대개 5 ms 보다 짧으며 release time는 일반적으로 대화에서의 음절의 길이인 200~300 ms 보다 짧은 50~150 ms 정도이다. 이 시스템의 단점 중에 하나는 작은 음의 증폭 때문에 pumping 현상이 나타나는데 이는 release time을 증가시킴으로써 어느 정도 이상의 조절이 가능한 것으로 알려져 있다.

Automatic Gain Control(AGC)

Automatic gain control은 주위의 환경이 바뀜에 따른 증폭 정도의 조절이 자동적으로 이루어질 수 있도록 만들어졌다. Automatic gain control은 낮은 압축 역치, 높은 압축율을 가지고 있으며, 비교적 빠른 attack time과 아주 긴 release time을 갖고 있는 특성이 있다. 1~2 초까지도 가능한 release time 때문에 입력되는 소리의 크기가 자주 바뀌어도 비교적 안정된 출력을 보이게 되므로 대부분의 경우에는 이득에 대한 조절이 필요 없게 된다. 이론적으로 약한 에너지를 가진 음절 등의 기본 단위가 압축된 소리가 긴 release time안에 있게 되면 보청기 사용자가 그 소리를 듣지 못하게 될 수가 있다. 그러므로 이 시스템은 언어 변별력이 좋은 사람에게 이용하는 것이 유리하며 각각의 언어의 단위를 압축하는 것이 아니므로 비교적 넓은 dynamic range를 가지고 있은 경우에 이용하는 것이 좋다. 위의 세 가지 서로 다른 압축 시스템의 정적 및 동적 요소의 특성을 Table 2에 간략하게 정리하였다.

리시버는 증폭기에서 증폭된전기 신호를 다시 음향 신호로 변환하여 음향 신호를 외부로 보내주는 장치이다. 대부분의 리시버는 외이도에 증폭된 음향 신호를 전달하는 기도형 리시버이나, 외이도의 폐쇄나 계속적인 이루가 있는 경우에는 골도형 리시버수화기인 경우도 있다.

Table 1. Expected battery life for representative high-powered class D, B, A linear hearing aids

Output stage type	HFA full on gain (dB)	HFA SSPL90 (dB SPL)	Current drain (mA)	Expected battery life (#13 battery)	Expected battery life (# 312 battery)
Class D	52	123	0.59	390 hours	204 hours
Class B	50	121	0.63	365 hours	190 hours
Class A	52	116	0.75	307 hours	160 hours

Table 2. 압축 보청기의 정적 및 동적 요소의 특성

Hearing aid type	Compression threshold (dB SPL)	Compression ratio	Attack time (msec)	Release time (msec)
AGC	<65	>5	10 - 50	150 - 2000
Syllabic compression	<60	<5	<5	10 - 100
Compression Limiting	>80	>5	<5	50 - 100

전원은 증폭기에 전기 에너지를 공급하는 장치이며 보청기의 크기가 작아지면서 건전지도 소형화되고 있다. 배터리의 종류에는 여러 가지가 있으나 최근 가장 많이 사용되는 zinc - air 배터리는 자연소모율이 적고 수명이 긴 장점이 있다. 배터리의 수명(h)은 배터리의 용량(capacity, mAh)을 배터리의 전류 유출(current drain, mA)로 나눈 값으로 표시한다.

조절기는 증폭기의 성능을 조절하는 장치로서 보청기에 따라 기능이 다양한 조절기를 부착할 수 있으며 보청기의 외부에 노출되어 부착되는 형태와 보청기의 내부에 내장되는 형태가 있다.

Earmold는 리시버에서 전환된 음향 신호를 외이도까지 전달하는 장치로 기본적으로 환자의 나이, 난청 정도, 외이의 모양 등을 고려하여 제작하여야 한다. 형태로는 크게 폐쇄형(occluding)과 개방형(non - occluding)으로 분류되는데 일반적으로 개방형은 보청기가 외이도를 폐쇄하여 저주파 음의 강조가 나타나는 occlusion effect를 줄이거나 만성적으로 이루가 있는 경우 사용된다.
이 외에도 보청기 자체에서 생기는 feedback 등을 해결하기 위한 알고리즘이나 기계 자체의 소음을 줄이거나 제거하기 위한 보조 장치, 보청기를 통해 얻은 증폭된 소리를 사용자에게 보다 적절히 들리게 하기 위한 보조 장치 등이 포함된다.

결　　론

최근 들어 보청기 개발의 가속화로 맞춤의 유연성과 자체적으로 다양한 기능을 가진 보청기를 비교적 쉽게 접할 수 있게 되었으며 특히 와우 손상에 따른 누가 현상을 보다 효과적으로 보상할 수 있는 압축형 보청기의 개발로 많은 청력 손실이 있는 사람들에게 큰 도움을 주었다고 하겠다.

그러나 아직도 보청기를 이용한 경우 정상인과 같은 음질의 소리를 들을 수 없으며 특히 잡음이 있거나 여러 사람이 동시에 대화를 하는 경우에는 많은 제한을 받게 된다. 이러한 제약은 지향성 마이크로폰 등의 방법과 디지털 보청기에서 가능한 주변 잡음의 제거 방법 등으로 언어 인지 능력의 향상을 가져올 수 있을 것으로 본다. 특히 디지털 보청기의 경우에는 적절한 알고리즘의 개발로 누가 현상에 대해 보다 섬세한 보상이 가능할 것으로 생각이 되며 주파수 선별 등의 요소에 대한 보상에 대한 연구 결과도 현실화되고 있어 감각신경성 난청자들에 대한 좋은 재활 기기가 될 것으로 생각한다.

중심 단어 : 보청기 · 압축 · 증폭.

REFERENCES

1) Prikles JO. *The neurophysiological basis of frequency selectivity. In : Moore BCJ. Frequency Selectivity in Hearing. London : Academic Press;1986. p.51-121.*
2) Robinson DW, Dadson RS. *A re-determination of the equal-loudness relations for pure rones. Brit J Appl Phys 1956;7:166-81.*
3) Fowler EP. *A method for the early detection of otosclerosis. Arch Otolatngol 1936;24:731-41.*
4) Kiang NYS. *A survey of recent developments in the study of auditory physioligy. Ann Otol Rhinol Laryngol 1970;77:656-75.*
5) Evans EF. *The sharpening of grequency selectivity in the normal and abnormal cochlea. Audiology 1975;14:419-42.*
6) Zeng FG, Turner CW. *Binaural loudness matches in unilaterally impaired listeners. Q J Exp Psychol 1991;43A:565-83.*
7) Zwicker E, Fastl H. *Psychacoustics-Facts and Models. Berlin : Springer-Verlag;1990.*
8) Moore BCJ. *An Introduction to the Psychology of Hearing. 4th ed. London : Academic press;1997.*
9) Sellick PM, Patuzzi R, Johnstone BM. *Measurement of basilar membrane motion in the guinea pig using the Mossbauer technique. J Acoust Soc Am 1982;72:131-41.*
10) Johnstone BN, Patuzzi R, Yates GK. *Basilar membrane measurements and the travelling wave. Hearing Res 1986;22:147-53.*
11) Glasberg BR, Moore BCJ. *Auditory filter shapes in subjects with unilateral and bilateral cochlear impairments. J Acoust Soc Am 1986;9:1020-33.*
12) Plomp R. *Noise, amplification, and compression : Consideration of three main issues in hearing aid design. Ear Hear 1994;15:2-12.*
13) Moore BCJ, Peters RW, Glasberg BR. *Detection of decrements and increments in sinusoid at high overall levels. J Acoust Soc Am 1996;99:3669-77.*
14) Plomp R, Mimpen AM. *Improving the reliability of testing the speech recption threshold for senteneces. Audiology 1979;18:43-53.*
15) Leeuw AR, Dreschler WA. *Advantage of directional hearing aid microphones related to room acoustics. Audiology 1991;30:330-44.*