

격음 노출 전후의 기니픽 N1-N2 오디오그램의 비교¹⁾

장순석

=Abstract=

Comparison between N1-N2 Audiograms of Guinea Pigs pre and post loudtone exposure

Soon Suck Jarng

The modification of N1-N2 Audiograms before and after loudtone exposure onto the tympanic membrane of guinea pigs was examined. The exposure was a loud continuous tone of 106 dB SPL intensity at 10 KHz for 10 minutes. The comparison between N1-N2 Audiograms pre and post loudtone exposure indicates that the exposed cochlea permanently lost its normal hearing function. The largest threshold shifts were found between 12-13.2KHz. The functional change of the cochlea after the loudtone exposure depends on the state of the cochlea before the trauma. More sensitive cochlea is more critically damaged in its function after the trauma than less sensitive cochlea.

Key words : Guinea Pig, Cochlea, N1-N2 Audiograms, Loud Tone Exposure, Acoustic Trauma

서 론

산업 현장에서의 소음 문제는 작업 능률을 저하시키는 요인 중의 하나이다. 이 문제 해결을 위해 공장 자동화 시스템의 도입으로 격음 노출을 방지하고 있다. 그런데 대부분의 공장 자동화 설비들이 또 다른 고정 소음을 야기시키고 있어, 만성적인 소음 공해로 인한 청각 상실이 우려되고 있다. 따라서 공장에서는 소음 감쇠를 위한 적절한 흡음 장치들을 필요로 하며, 그와 같은 장치들의 개발을 위해서 장기적으로 소음 노출에 의해 발생하는 청각 상실을 의공학적 관점에서 병행되어 연구되어야 할 필요성을 가진다.

소음 노출뿐만 아니라 약물 주입 그리고 외과적 수술 과정에서 발생하는 청각 기능 쇠퇴에 관한 생리학적 연구는 오래 전부터 수행되고 진전되어 왔다. 일찍이 달팽이관의

청각 기능을 정량적으로 모니터링하기 위해 Derbyshire and Davis¹⁾는 귀신경의 활동 전위를 측정하고, 이 활동 전위가 외부 소음에 의해 약화될 수 있음을 보여줬다. 개별적인 신경 활동 전위들의 상호 관계를 규명하기 위해 Dallos and Cheatham²⁾는 총체적인 신경 활동 전위 즉, 복합 활동 전위(Compound Action Potential or Gross Neural Action Potential)를 측정하여 개별적인 신경 활동 전위와의 관계를 분석하였다. Brown et. al.³⁾은 기니픽에 대한 CAP 측정을 위한 실험에서 기니픽 달팽이관이 마취에 의한 영향은 크지 않은 반면에, 측두골 부위의 뼈와 조직을 겹자로 제거하는 외과적 수술 과정에서 고주파수의 입력 음에 대한 CAP 한계치가 증가됨을 보여줬다. 1978년 Kemp⁴⁾에 의해 이음향 방사가 측정되어지면서 달팽이관 자체의 기능에 대한 관점이 달라지고 달팽이관 기능에 대한 폭넓은 실험 연구가 진행되기 시작했다. 1980년대에는

조선대학교 공과대학 제어계측공학과

Dept. of Control and Instrumentation Chosun University

*이 연구는 1996년 한국과학재단 지정 지역협력연구센터인 수송기계부품공장자동화센터의 지원을 받아 수행 되었음.

통신저자: 장순석, (151-759) 광주직할시 동구 서석동 375, Tel. (062) 230-7107, Fax. (062) 675-4544

실험 방법

소음 노출에 대한 청각 기능의 상실 측정이라는 연구보다는, 의도적 소음 노출로 야기되는 달팽이관의 기능 저하를 역추적하여 달팽이관의 역학적 기능을 분석하는 실험 방법에 더 많은 연구 투자가 이루어지고 있다⁹⁾. 1990년 이후의 달팽이관 기능 연구는 실험적 관찰과 생역학적 기능에 대한 수치해석적 모델링과 병행하여 이루어지고 있다^{6, 7)}. 국내에서의 달팽이관에 관한 전기생리적 연구는 대한이과 연구회에 주로 보고되고 있으며, 김종선과 홍성화⁸⁾는 각기 다른 마취 방법에 의해 달라지는 CAP의 변화를 관찰하였다.

본 연구는 기존의 격음 노출에 따른 CAP 동조 곡선 변화에 관한 실험 연구를 수행하면서 실험 방법과 과정에 따른 문제점들을 발견하고 개선하고자 하였다. Goulios and Robertson⁹⁾와 같이 격음 노출 실험 대상으로 기니피크를 사용하였으며 격음 주파수를 10KHz로 하였다. Goulios and Robertson⁹⁾의 경우 격음 노출이 10KHz 연속음이며 110 dB SPL의 음강도로 30분 동안 노출시킨 반면에, 본 연구는 10KHz tone pip이며 106 dB SPL의 음강도로 10분 동안만 노출시켰다. 이는 본 연구의 목적이 극심한 격음 노출에 의한 절대적 청각 기능 상실보다는 비교적 중등도의 격음 노출에 의한 청각 기능의 저하를 분석하고 노출 이후의 청각 기능의 회복 가능성을 알아보려고 했기 때문이다.

앞에서¹⁰⁾ 청각 기능의 정상 여부를 달팽이관에서의 전위 측정으로부터 만들어지는 N1-N2 오디오그램을 통해 실험 분석해 보았다. 이 논문에서는 격음 노출로 발생시킨 달팽이관의 청각 기능 감쇠를 N1-N2 오디오그램의 측정으로 정량화하고 그 결과를 비교 분석하였다. 고막에의 격음 노출로 달팽이관에 음향 손상을 주고 그에 따른 기능 변화를 비교 분석하는 실험적 연구 방법은 달팽이관 생체 역학의 원리를 밝혀내는데 매우 유용하다. 음향 손상으로 인한 달팽이관의 기능 변화를 정량적으로 비교 분석하기 위한 자료로써 N1-N2 오디오그램이 적합하게 사용될 수 있다⁹⁾. 이는 동물의 생리 상태를 장시간 정상으로 유지하면서 실험할 수 있는 장점 때문이다. 자극과 반응의 관계에서 얻어지는 전기 생리적 실험 고찰은, 계속해서 전자 현미경을 사용한 형태학적 연구와 병행되어 질때, 그 생리적 기능에 대한 원리를 체계적으로 밝혀낼 수 있다. 달팽이관에서의 음향 손상은 그 내부의 미세적 구조체들을 파괴하게 되며 이러한 파괴를 형태학적으로 관찰하면 그 생리 기능을 간접적으로 알아낼 수 있기 때문이다^{11, 12)}.

본 연구에서 수행한 실험은 기니피크의 고막에 격음을 노출시키고 그에 따라 발생하는 총체적 신경 활동 전위 (GNAP)의 변화를 정량적으로 측정하는 것이었다. 격음 노출 전후의 달팽이관의 기능에 대한 정량적 비교 분석이 가능하도록, 격음 노출 전후에 N1-N2 오디오그램을 측정 작성하고 N1-N2 오디오그램의 변화를 비교하였다. 실험 과정은 5 부분으로 분리해볼 수 있으며, 다음에 간략히 정리하였다.

1. 기니피크 마취 및 외과적 수술 그리고 음향 결합기 설치

기니피크를 25% 우레탄(5.5ml/kg)의 복강내주사로 마취 시켰다. 기관절개술로 호흡의 정상 유지가 가능토록 하였다. 음향 결합기가 고막 가까이 접근되도록 이를 위해 필요한 외이에 대한 외과적 수술을 수행하였다¹⁰⁾. 외이도로 부터 후측으로 5mm 떨어진 얇은 측두골을 천공하였다. 이 구멍을 통하여 구리 전극선이 정원창 가장자리에 놓여지도록 하였다. Bruel & Kjaer 1/2" 콘텐서 마이크로폰(type 4134)을 음향 발진기로 사용하고, 여기서 발생하는 음향 압력이 고막에 전달되도록 결합시켜주는 음향 결합기는 머리 받침대안에 포함되도록 구성하고 제조하였다. 자동 체온 조절 장치로 기니피크의 체온을 언제나 38℃로 유지시켰다.

2. 음향 압력의 주파수 보정

기니피크의 고막에 정확한 진폭과 주파수의 음 압력이 전달되도록 하는 것이 이 연구에서 매우 중요하였다. 이를 위해 음향 발진기와 동일한 종류의 1/2" 보정용 콘텐서 마이크로폰(type 4134)을 음향 보정을 위해 사용하였다. 1/2"의 지름을 가지는 마이크로폰을 직접 고막 가까이 접근시킬 수 없기 때문에, 주파수 보정을 거친 길이 5cm의 가느다란 스테인레스 프로브관을 구입하여 한쪽 끝은 고막에 접근시키고 다른 한쪽은 보정용 마이크로폰에 연결하여 고막 위의 음 압력을 측정하였다. 그리고 그에 따른 전체적인 음 압력 보정을 주파수에 따라 수행하였다.

3. 입력 자극음 발생 및 전달 그리고 출력 반응 전위 수집

입력 자극음은 파형 발생기에서 생성되는 정현파의 연속 순음을 0.6msec 길이로 게이트시키고 그 진폭을 programmable 감쇄기로 조절한 뒤, 파워어 앰프를 통해 음향

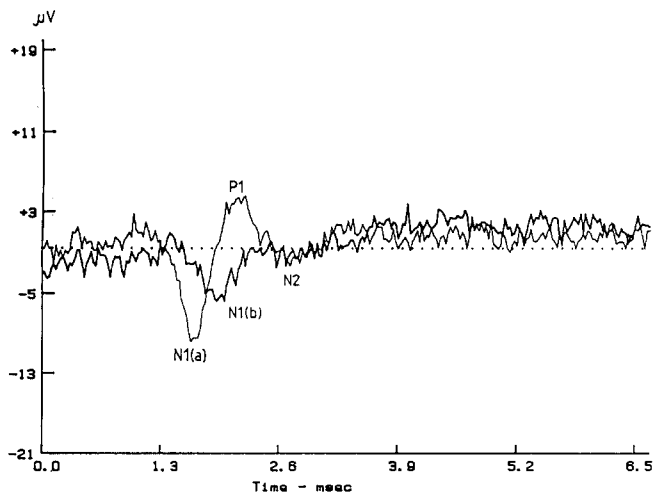


그림 1. 같은 기니픽 달팽이관으로의 격음 노출 전후(각각 a와 b)에 10KHz 주파수의 tone pip을 입력시켰을 때에 측정된 총 신경 활동 전위
Fig. 1. The gross unfiltered potentials with a 10KHz input tone pip frequency before (a) and after (b) the loud tone exposure to the same cochlea.

발진기로 전달되도록 하였다. 입력되는 순음 자극에 대한 반응으로 정원창으로부터 총 신경 활동 전위(N1-N2 전위)를 측정하였다(그림 1 참조). 이 과정은 정원창에 놓여진 구리 전극선을 통해 입력되는 신경 전위를 프리 앰프를 거쳐 증폭시키고, 여기서 얻어지는 신호를 A/D 변환기를 통해 컴퓨터로 입력시키는 것이다. 생체 실험의 신속한 수행을 위해 실험 과정을 자동화하였고, 개별적인 실험 검증은 수동적으로 처리하였다.

4. N1-N2 오디오그램 작성

자극 초기 시간(0msec)에서 P1(전위 이온의 충전)까지의 시간을 전위 잠복기(Latency)로 정의하였다. N1(전위 이온의 1차 방전)에서 P1 사이의 전위 크기를 임계치로 정하고, 각각의 입력 주파수에 대해 일정한 임계치의 N1-N2 전위가 발생하도록 입력 음의 강도를 조절하였다. 이렇게 조절된 입력 음강도는 각각의 입력 주파수에 대한 음강도 한계치이며, 이 한계치를 주파수에 대한 함수 형태로 나타낸 것이 N1-N2 오디오그램이다.

5. 격음 노출 제어

격음 노출은 10KHz의 주파수에 106dB SPL의 음강도를 가지는 연속 순음이 고막에 전달되도록 하였다. 노출 시간은 10분으로 제한하였으며, 정확한 주파수와 음강도 그리

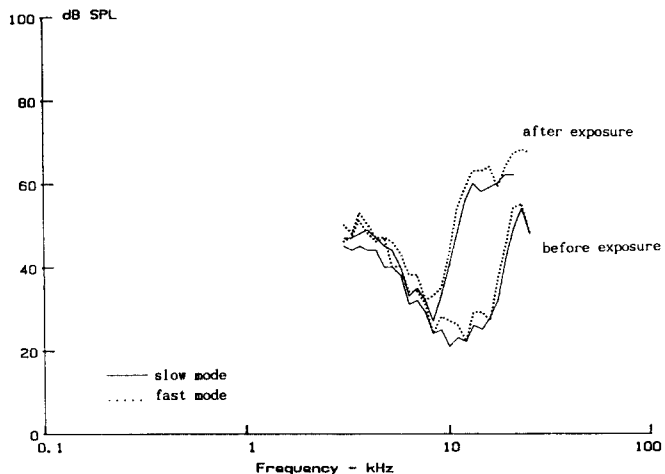


그림 2. 격음 노출 전후(각각 아래쪽 선들과 위쪽 선들에 fast mode(점선)과 slow mode(실선)으로 측정된 N1-N2 오디오그램
Fig. 2. The N1-N2 audiograms recorded in the fast(dotted lines) and slow(continuous lines) modes before(lower lines) and after(upper lines)the loud tone exposure.

고 노출 시간이 가능하도록 전체적인 실험 과정을 자동화 하였다. 격음 노출 직전에 그리고 직후에 N1-N2 오디오그램을 측정하였다.

결 과

그림 1은 같은 동물에 대한 격음 노출 전후의 총 신경 활동 전위를 보여준다. 그림 1(a)는 노출 이전에 10KHz 주파수와 46dB SPL 음강도의 입력 자극에 대한 반응이며 그림 1(b)는 노출 이후에 같은 자극에 대한 반응이었다. 격음 노출 이후의 총 신경 활동 전위는 그 이전의 전위보다 크기가 감소하고 시간적으로도 지연되고 있음을 보여 준다.

격음 노출 전후의 N1-N2 오디오그램은 매우 달라진다. 그림 2에서 아래쪽 실선과 점선은 노출 이전의 N1-N2 오디오그램이고 위쪽 실선과 점선은 노출 이후의 N1-N2 오디오그램이다. 노출 전후의 시간 간격은 1시간이었다. 격음 노출 이후에 N1-N2 오디오그램의 9KHz 이상의 주파수 영역에서 한계치 곡선이 상승한 것은 달팽이관 청각 기능의 감퇴를 의미한다. 격음 주파수가 10KHz이었음에도 불구하고 그림에서 한계치 곡선의 변화 정도가 12~13.2KHz 주파수 영역에서 가장 심하게 나타났다. 달팽이관 기저부가 침부보다 고주파수 공명 특성을 가지는 사실에

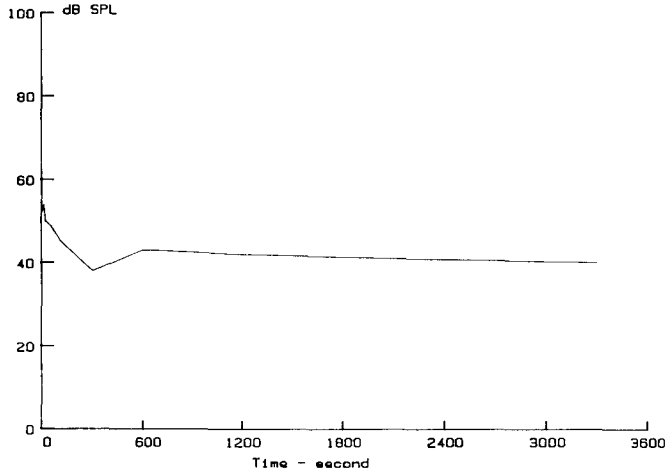


그림 3. 10KHz 주파수의 tone pip 입력에 대한 한계치 이동의 시간 응답 곡선. 한계치 이동의 시간응답은 격음 노출 직후 달팽이관의 기능이 얼마나 빠르게 회복되는 가를 보여준다.

Fig. 3. The transient threshold shift for 10KHz input tone pips plotted against time. The time response of the threshold shift shows how rapidly the cochlea recovers its function as soon as the noise exposure is finished.

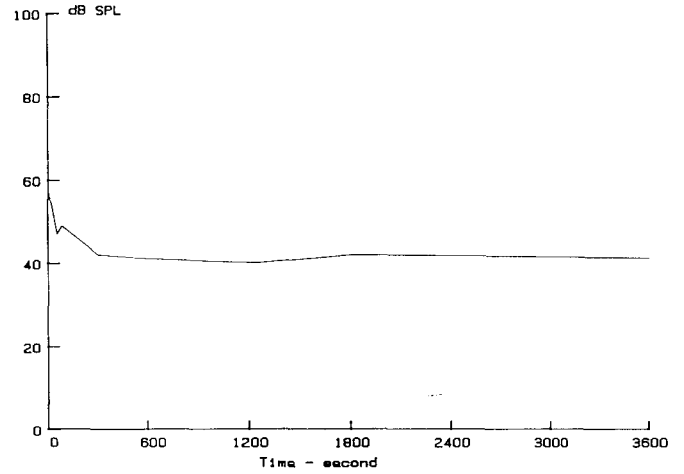


그림 5. 10KHz 주파수의 tone pip 입력에 대한 한계치 이동의 시간 응답 곡선. 격음 노출 직후 달팽이관의 기능이 초기 5분 동안 신속히 회복됨을 보여준다.

Fig. 5. The transient threshold shift for 10KHz input tone pips plotted against time. The cochlea rapidly recovers its function during the first 5 minutes after the loud tone exposure.

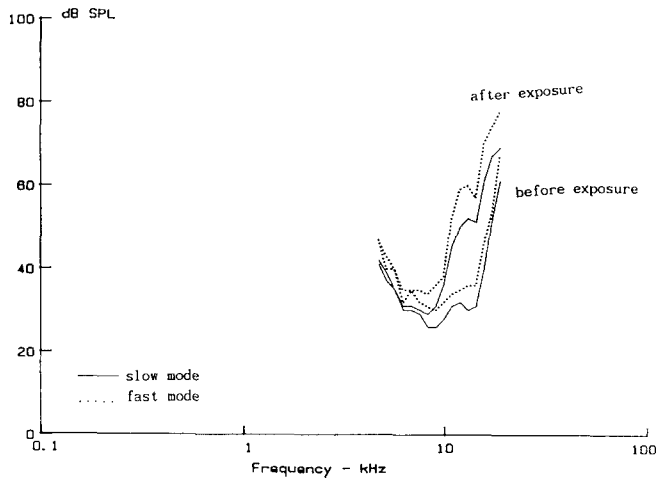
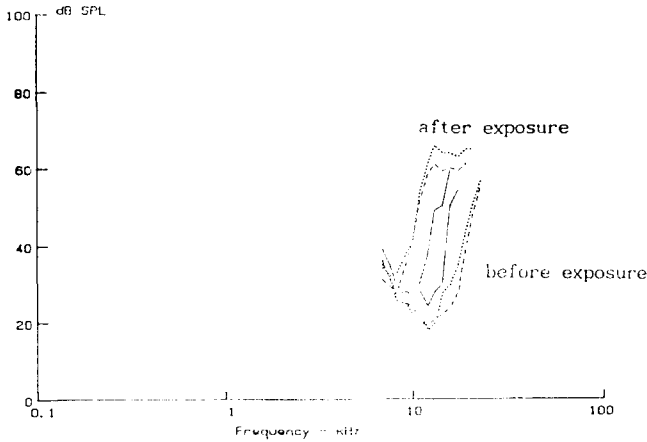


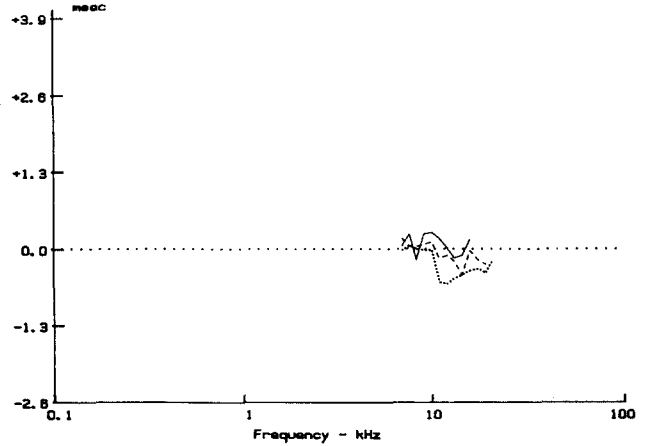
그림 4. 격음 노출 전후(각각 아래쪽 선들과 위쪽 선들)에 fast mode(점선)과 slow mode(실선)으로 측정된 N1-N2 오디오그램의 다른 실험 결과

Fig. 4. An example of N1-N2 audiograms recorded in the fast (dotted lines) and slow (continuous lines) modes before (lower lines) and after (upper lines) the loud tone exposure.

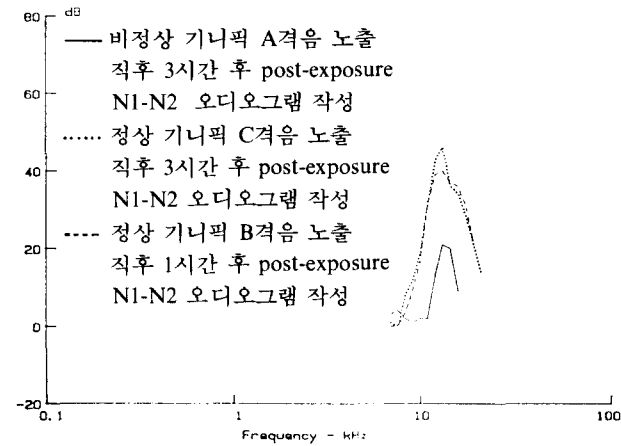
서 유추해보면, 격음 주파수에 대응하는 공명 특성 위치보다 기저부 방향으로 더 심한 음향 손상이 발생됨을 의미한다. 106dB SPL의 매우 큰 강도의 격음에 노출되었어도 상대적으로 침부 방향으로는 음향 손상이 매우 경미하였다. 격음 노출에 의한 청각 감쇠는 기저부에서 침부 방향으로 확산되어 감을 알 수 있다. 그림 2에서 실선과 점선의 차이점은 총 신경 활동 전위의 측정 속도를 다르게 한 차이점이다. 느린 속도의 측정(Slow mode)에서는 각각의 입력 주파수에 대해 N1-N2 전위 측정을 100msec 간격으로 128번 반복하여 평균값을 구하였고, 빠른 속도의 측정(Fast mode)에서는 각각의 주파수에 대해 N1-N2 전위 측정을 35msec 간격으로 8번 반복하여 평균값을 구하였다. Fast mode의 측정에서는 측정된 전위 신호의 잡음이 증가하기 때문에 N1-N2 오디오그램 작성에 필요한 N1-N2 전위 임계치를 높여야한다. 따라서 Fast mode의 N1-N2 오디오그램은 N1-N2 전위 임계치를 6.4V로 높였고, Slow mode의 경우는 임계치를 2.4V로 낮추었다. 그림 2에서 실선은 Slow mode로 만들어진 N1-N2 오디오그램들이고 점선은 Fast mode로 만들어진 N1-N2 오디오그램들이다. 격음 노출 전후로 각각의 Mode로 만들어진 N1-N2 오디오그램이



a



c



b

그림 6. 격음 노출 이후의 달팽이관 기능 변화는 음향 손상 이전의 달팽이관 상태에 따라 달라짐을 알 수 있다. 각각의 선들은 서로 다른 동물들의 결과이다(실선, 점선, 쇠선). 그림 6(c)의 수평 점선은 격음 노출 이후의 P1 잠복기가 제로임을 나타낸다.

(a) NI-N2 오디오그램 (b) 한계치 손실 곡선 (c) P1 잠복기 이동

Fig. 6. The functional change of the cochlea after the loud tone exposure depends on the state of the cochlea before the trauma. Each line type represents its corresponding cochlea. The dotted horizontal line indicates zero P1 latency shift after the loud tone exposure.

(a) NI-N2 audiograms (b) threshold loss curves (c) P1 latency shifts

실질적으로 일치하고 있다. 보편적으로는 Slow mode로 NI-N2 오디오그램을 측정하여 분석하고 있다. Fast mode의 NI-N2 전위 측정의 필요성은 격음 노출 직후에 달팽이관의 기능 회복이 매우 급속히 나타나기 때문에, 이 초기 회복을 측정하기 위해서이다^{13, 14)}.

그림 3은 격음 노출 직후 5초 후부터 3300초까지 NI-N2 전위 한계치의 변화를 Fast mode로 측정할 시간 응답이다. 입력 주파수는 10KHz로 고정시키고 전위 임계치도 4V로 고정하였다. 노출 직후 5초 후에는 한계치가 56dB SPL이었다가, 다음 5분까지는 급속히 한계치가 감소한 뒤, 그 후 1시간에 걸쳐 약 40dB SPL로 오르내리었다. 격음 노출 전후의 10KHz 한계치를 정량적으로 비교해보면, 노출 직후 5초 후의 한계치 변화가 29dB까지 이동되었다가 그 후 1시간이 지난 후에 한계치 변화는 13dB로 일정해졌다.

그림 4와 5는 또 다른 기니피크에 대한 실험에서 얻어진 결과로써 그림 2와 3과 동일한 조건에서 측정된 것이다. 그림 5에서 보여주는 것처럼 격음 노출 직후 5초 후에는 초기 한계치가 57dB SPL이었다가 5분 동안 급속히 감소한 뒤 1시간에 걸쳐 41dB SPL에서 오르내리었다. 10KHz 한계치는 노출 직후 5초 후에 한계치 변화가 25dB까지 이동되었다가 그 후 1시간이 지난 후에 한계치 변화는 9dB로 일정해졌다.

그림 6은 세 마리의 서로 다른 기니피크에 대한 격음 노출 실험의 결과이다. 그림 6(a)는 격음 노출 전후의 NI-N2 오디오그램들을 보여주며 각각의 동물은 실선, 점선 그리고 쇠선으로 그려져 있다. 점선과 쇠선은 정상적인 기능의 달팽이관을 가진 기니피크를 가리키며 실선은 기능이 약해진 달팽이관을 가진 기니피크를 가리킨다. 이 NI-N2 오디오그램들은 Slow mode로 측정되어졌다. 앞에서와 같이 아래쪽

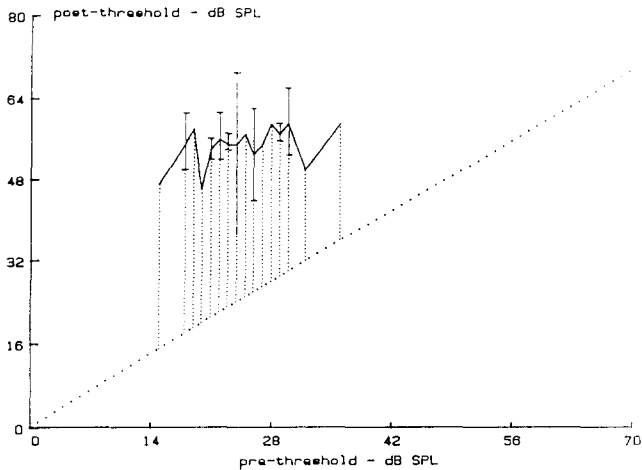


그림 7. 27마리의 서로 다른 기니픽 달팽이관들로부터 얻어진 post-exposure 한계치들의 평균값을 12KHz 주파수의 tone pip 입력에 대해 pre-exposure 한계치의 함수 형태로 그렸다(굵은 실선). post-exposure 한계치의 최대, 최소값을 각각의 pre-exposure 한계치에 대해 수직의 가는 실선으로 표시했다. 대각 점선은 기울기 1임을 보여준다.

Fig. 7. The averaged post-exposure thresholds from 27 different cochleas plotted against pre-exposure threshold for 12KHz input tone pips(thick continuous line). The maximum and minimum of the post-exposure thresholds are indicated by the vertical thin line for each pre-exposure threshold. The slope of the dotted diagonal line is one.

세 선들은 격음 노출 이전의 N1-N2 오디오그램들이고 위쪽 세 선들은 노출 이후의 것들이다. 또 점선과 실선의 경우 격음 노출 직후 3시간이 지난 후에 Post-exposure N1-N2 오디오그램을 측정하였고, 쇄선의 경우 노출 직후 1시간 후에 Post-exposure N1-N2 오디오그램을 측정하였다. 그림 6(b)는 격음 노출 전후의 N1-N2 오디오그램들의 변화를 비교해준다. 가장 두드러진 한계치 변화는 2KHz사이에서 나타난다. 격음 노출 직후 1시간 후에 측정된 N1-N2 오디오그램(쇄선)의 변형은 노출 직후 3시간 후에 측정된 N1-N2 오디오그램(점선)의 변형과 거의 질적 차이가 없다. 이러한 한계치 손실의 패턴은 격음 노출 직후 1시간 후에 측정된 Post-exposure N1-N2 오디오그램이 거의 영구적인 손상임을 의미한다. 그림 6(b)의 실선이 보여주듯이 청각 기능이 이미 감쇠된 달팽이관은 정상적인 달팽이관보다 같은 정도의 격음 노출에 대해 상대적으로 적은 음향 손상을 받고 있음을 알 수 있다. 이는 격음 노출로 기인하는 달팽이관의 기능 변화의 정도가 노출 이전의 기능 상태에 따라 달라짐을 의미한다. 그림 6(c)는 각각의

동물로부터 전위 잠복기의 변형을 보여준다. 여기서 가장 두드러진 잠복기 변형은 한계치 손실이 가장 큰 주파수 영역에서 발생함을 알 수 있다. 즉 한계치 손실의 크기가 증가함에 따라 잠복기가 작아지고 있다. 이는 입력 음강도의 증가에 따라 잠복기가 작아지기 때문이다. 여기서 유추할 수 있는 해석은 다음과 같다. 격음 노출은 그 격음 주파수에 상응하는 공진 특성 주파수 영역보다 기저부 방향으로 더 심한 음향 손상을 가져온다. 이 손상은 달팽이관의 능동적 생체 기능의 감퇴를 의미하며, 이는 역으로 달팽이관의 능동적 생체 역학의 발생 위치가 입력 음향 주파수에 상응하는 공진 특성 주파수 영역보다는 약간 기저부 방향의 지점임을 의미할 수 있다.

격음 노출 전후의 N1-N2 오디오그램들의 관계를 27마리의 기니픽에 대한 실험 측정 자료로부터 평균화하여 정리하였다(표 1 참조). 이 결과들은 각각의 기니픽에 대해 먼저 slow mode로 pre-exposure 한계치들을 주파수에 따라 측정된 뒤에, 격음 노출 직후부터 약 3시간 후에 똑같은 slow mode로 post-exposure 한계치들을 주파수에 따라 측정하여 얻어진 것이다. 표 1은 다음과 같이 작성하였다. 예를 들어 15dB SPL Pre-exposure 한계치 행과 12.0KHz 시험 주파수 열이 교차하는 도표의 행렬 지점에서는, 격음 노출 이전의 N1-N2 오디오그램으로부터 12KHz 입력 주파수에서 15dB SPL 음강도의 한계치를 가졌던 동물들만 고려하였다. 즉 그러한 Pre-exposure 한계치를 가졌던 모든 동물들의 격음 노출 이후의 Post-exposure 한계치들에 대한 평균값을 도표의 행렬 지점에 기입하였다. 이와 같은 방법으로 도표의 다른 행렬 지점에도 평균화된 Post-exposure 한계치를 기입하였다. 표 1에서 점 “·” 표시는 그 Pre-exposure 한계치에 해당하는 실험 결과가 없었음을 의미하며, 각각의 Post-exposure 한계치 옆 괄호 안에 기입한 숫자는 해당하는 Pre-exposure 한계치를 가졌던 동물들의 개수를 기입하였다.

그림 7은 표 1로부터 12KHz 시험 주파수의 평균 Post-exposure 한계치들을 각각의 Pre-exposure 한계치에 대해서 굵은 선으로 나타냈다. 점선의 대각선은 기울기가 1임을 보여준다. 각각의 Pre-exposure 한계치에 대한 가는 수직선은 Post-exposure 한계치의 최대값과 최소값을 보여준다. 또 그림 8은 7.6KHz에서 20.9KHz에 이르는 다른 시험 주파수에 대한 평균화된 Post-exposure 한계치를 그림 7과 같이 나타냈다. 그림의 이해를 돕기 위해 각각 3개의 주파수에 해당하는 pre-exposure에 대한 post-exposure 한계치 곡선들을 나타냈다. 그림 7과 8의 노출 이전 한계치에 대한 노출 이후 한계치의 함수 형태가 의미하

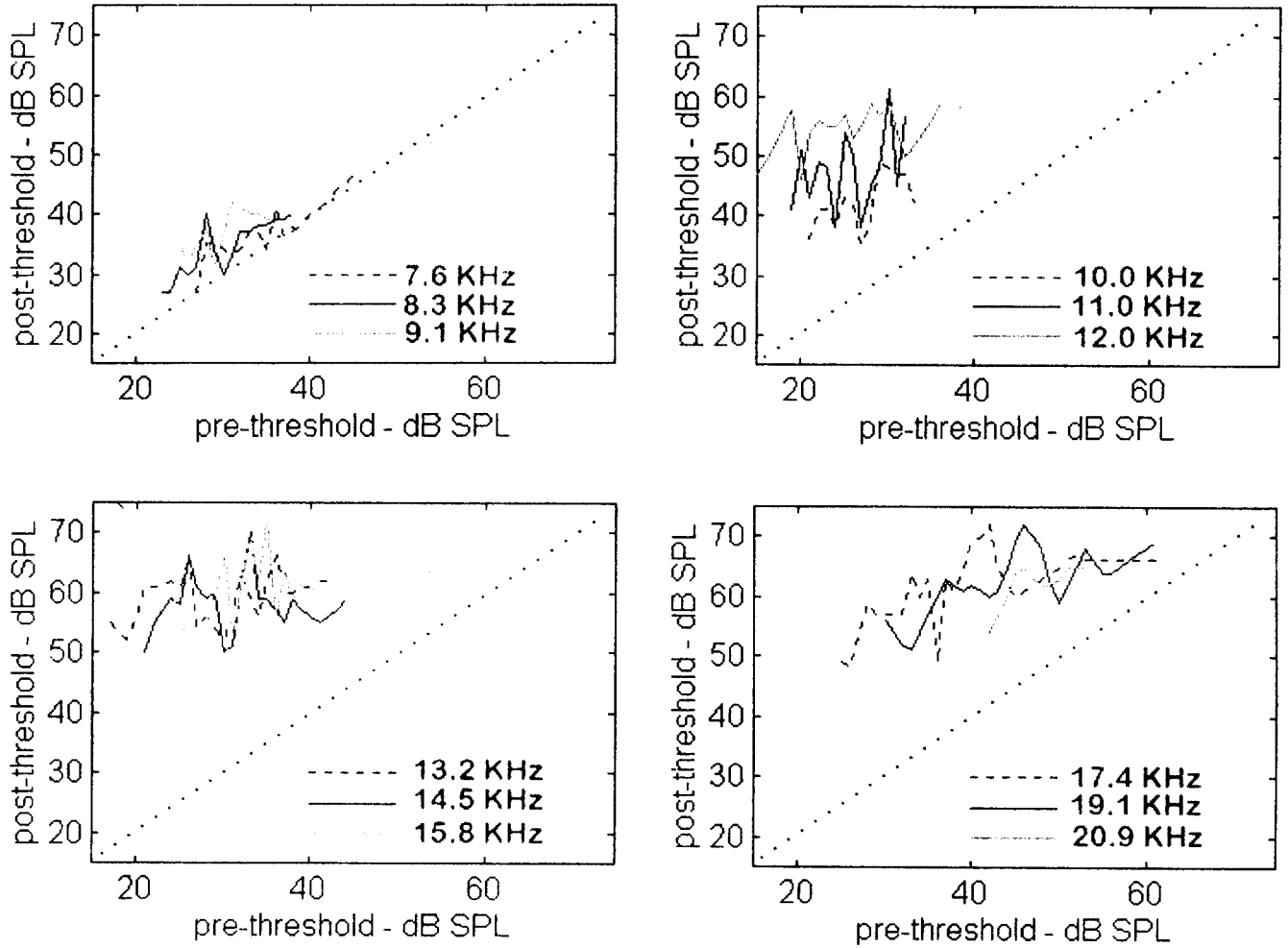


그림 8. 27마리의 서로 다른 기니픽 달팽이관들로부터 얻어진 post-exposure 한계치들의 평균값을 각기 다른 주파수의 tone pips 입력에 대해 pre-exposure 한계치의 함수 형태로 그렸다.

Fig. 8. The averaged post-exposure thresholds from 27 different cochlear plotted against pre-exposure threshold for different input tone pip frequencies indicated on curves

는 것은, 앞에서 언급한 대로, 격음 노출 이후의 한계치 손실이 노출 이전의 N1-N2 오디오그램 형태에 밀접한 관계가 있다는 것이다. 노출 이전의 N1-N2 오디오그램 한계치가 클수록 노출 이후의 한계치 손실의 정도가 상대적으로 작아짐을 알 수 있다.

이번에는 각각의 Pre-exposure 한계치에 대해서 평균 Post-exposure 한계치 손실들을 주파수의 함수 형태로 그렸다(그림 9). 예를 들어 표1로부터 Pre-exposure 한계치가 8.3~17.4KHz 주파수 사이에서 25dB SPL 일 때, 격음 노출 이후의 한계치 손실의 최대값은 13.2KHz 주파수 영역에서 36dB이다(그림 9(a) 참조). 그림 9(b)는 각기 다른 Pre-exposure 한계치에 대한 Post-exposure 한계치 손실들

을 나타냈다. 5개의 점선들은 21dB SPL에서 25dB SPL까지의 Pre-exposure 한계치들에 대한 결과이고 3개의 실선들은 41dB SPL에서 43dB SPL까지의 Pre-exposure 한계치들에 대한 결과이다. 그림 9가 의미하는 것은 Pre-exposure 한계치가 낮은 경우, 달팽이관은 12~13.2KHz 사이의 영역에서 가장 심한 손상을 가진다는 것이다. Pre-exposure 한계치가 증가함에 따라, 최대 음향 손상이 고주파수 영역으로 이동하고 있다.

결 론

기니픽 고막으로의 격음 노출로 인해 발생하는 달팽이

표 1. 가장 왼쪽 열에 표시된 pre-exposure 한계치들을 가졌던 기니피그들로부터 얻어진 post-exposure 한계치들의 평균값. 이 평균값들을 가장 위쪽 행에 표시된 주파수에 따라 나열하였다.

Table 1. Mean post-exposure thresholds for all animals with pre-exposure thresholds listed in column on left, at all test frequencies (along top).

dB SPL	7.6 KHz	8.3 KHz	9.1 KHz	10.0 KHz	11.0 KHz	12.0 KHz	13.2 KHz	14.5 KHz	15.8 KHz	17.4 KHz	19.1 KHz	20.9 KHz
15	.	.	.	.	.	47(1)	.	.	.	.	.	.
16	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
17	.	.	.	.	.	.	55(1)	.	.	.	.	.
18	.	.	.	.	.	55(2)	.	.	.	.	.	.
19	.	.	.	.	41(1)	58(1)	52(1)	.	.	.	.	.
20	.	.	.	.	51(1)	46(1)	56(2)	.	.	.	.	.
21	.	.	.	36(2)	43(1)	54(3)	61(1)	50(2)	.	.	.	.
22	.	.	32(2)	41(3)	49(4)	56(3)	.	55(2)	.	.	.	.
23	.	27(1)	.	41(2)	48(3)	55(2)	.	.	.	.	.	.
24	.	27(1)	35(3)	38(3)	38(1)	55(3)	62(1)	59(2)	60(1)	.	.	.
25	.	31(3)	35(4)	43(3)	54(4)	57(1)	61(1)	58(1)	.	49(1)	.	.
26	.	30(2)	31(1)	42(3)	50(4)	53(2)	66(4)	66(1)	52(1)	48(1)	.	.
27	27(1)	31(5)	35(4)	35(4)	38(1)	55(1)	54(1)	61(2)	56(1)	.	.	.
28	35(1)	40(3)	37(6)	39(3)	45(3)	59(1)	56(4)	59(2)	56(4)	59(1)	.	.
29	35(5)	34(4)	31(2)	49(2)	48(1)	57(2)	.	60(3)	60(2)	57(1)	.	.
30	.	30(2)	37(2)	.	61(1)	59(2)	52(1)	50(1)	66(2)	.	56(2)	.
31	33(3)	.	42(2)	.	45(1)	.	.	51(1)	53(2)	57(2)	.	.
32	34(2)	37(5)	.	47(1)	57(1)	50(1)	63(2)	61(2)	.	57(2)	.	.
33	37(5)	.	.	42(1)	.	.	.	70(1)	69(1)	64(3)	51(1)	.
34	37(2)	.	.	.	.	.	56(2)	59(1)	62(3)	60(1)	.	.
35	34(3)	.	.	.	.	.	62(1)	59(1)	72(1)	63(5)	.	.
36	41(2)	.	39(1)	.	.	59(1)	66(2)	.	56(3)	49(1)	.	.
37	36(1)	.	.	.	.	.	60(2)	55(1)	64(1)	63(1)	63(1)	.
38	.	40(1)	.	.	.	.	.	59(1)	59(1)	61(1)	.	.
39	.	.	.	.	.	.	.	.	62(1)	.	61(1)	.
40	.	.	.	.	.	.	.	.	61(1)	69(1)	62(1)	.
41	.	.	.	.	.	.	.	55(1)	.	.	.	.
42	.	.	.	.	.	.	.	.	.	72(1)	60(3)	54(1)
43	.	.	.	.	.	.	63(1)	.	.	65(1)	61(3)	.
44	.	.	.	.	.	.	.	59(2)	.	.	65(1)	.
45	47(2)	.	.	.	.	.	.	.	.	60(1)	69(2)	64(1)
46	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	72(1)	65(1)
47	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
48	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	68(1)	62(2)
49	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	62(1)
50	.	.	.	.	.	.	.	.	59(1)	.	59(1)	.
51	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	65(1)
52	.	.	.	.	.	.	.	.	.	67(1)	.	.
53	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	68(2)	.
54	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	66(1)
55	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	64(1)	.
56	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
57	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
58	.	.	.	.	.	.	.	.	69(1)	.	.	.
59	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
60	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
61	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	69(1)	.
62	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

관 기능 감쇠를 N1-N2 오디오그램을 측정 자료를 사용하여 비교 분석해 보았다. 10KHz의 주파수와 106dB SPL의 음강도의 연속 순음을 격음으로 하여 10분 동안 노출시켰다. 이러한 강도의 격음은 달팽이관의 청각 기능을 손상시

키기에 충분하였다. 격음 노출의 시간을 10분으로 제한한 것은 기저부에서 첨부에 이르는 달팽이관 기저막의 일부에만 기능 손상이 발생하기 위함이었다. 노출 시간이 길어 질수록 기능 손상 부위가 커지기 때문에 지역적 기능 분석

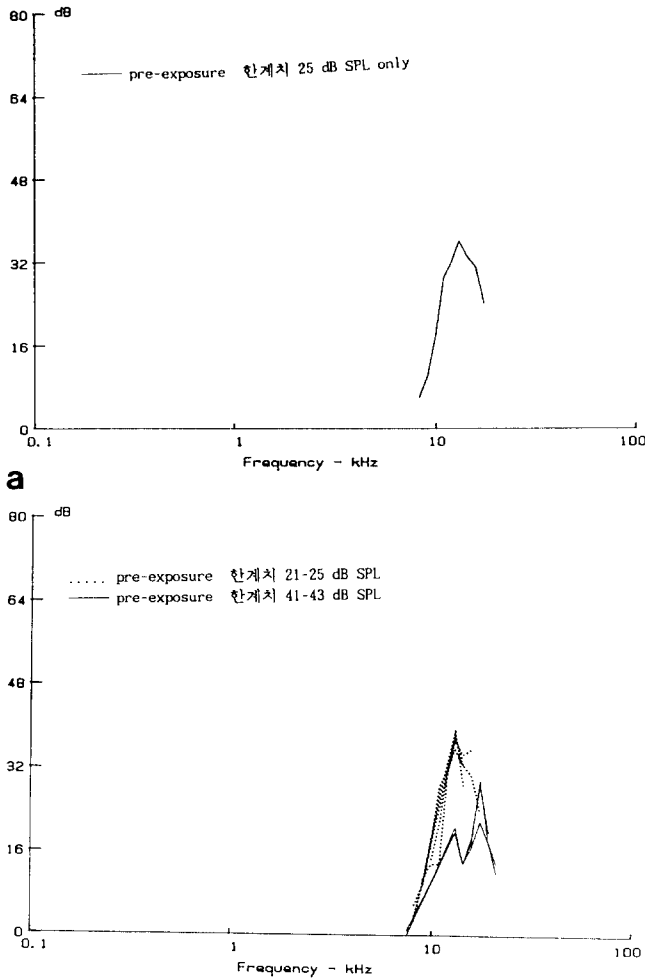


그림 9. pre-exposure 오디오그램의 한계치가 (a) 25dB SPL 그리고 (b) 21-25dB SPL (점선)과 41-43dB SPL (실선)이었을 때의 평균화된 한계치 손실을 주파수의 함수로 나타냈다.

Fig. 9. The averaged threshold losses plotted as a function of frequency when the thresholds of the pre-exposure N1-N2 audiograms are (a) 25dB SPL (b) 21, 22, 23, 24 and 25dB SPL (dotted lines), and 41, 42, and 43dB SPL (continuous lines) within the same frequency region.

이 어려워진다. 청각 기능 손상의 정량적인 측정은 격음 노출 전후의 N1-N2 오디오그램의 변형을 비교함으로써 구하였다. 실험 결과를 정리하면 다음과 같이 요약된다.

1. 비록 10분간의 비교적 짧은 노출 시간이었지만, 그 격음 노출의 결과는 달팽이관의 영구적인 기능 손상으로 나타났다. 이는 106dB SPL의 음강도가 기니픽 달팽이관에는 매우 치명적임을 보여준다.
2. 그림 6에서 청각 기능이 이미 감쇠된 달팽이관은 정상적인 달팽이관보다 같은 정도의 격음 노출에 대해 상대

적으로 적은 음향 손상을 받고 있음을 알 수 있다. 이는 격음 노출로 기인하는 달팽이관의 기능 변화의 정도가 노출 이전의 기능 상태에 따라 달라짐을 의미한다.

3. 그림 6에서 보여주듯이 음향 손상 이후 N1-N2 오디오그램의 한계치 곡선의 가장 심한 이동은 약 12~13.2KHz 범위에서 나타났다. 달팽이관 기저막의 길이에 따른 공진 특성 주파수 대역은 고주파수 대역에서 저주파수 대역까지가 기저부에서 첨부에까지 이른다. 따라서 격음의 주파수가 10KHz임을 감안할 때, 이는 격음 주파수에 상응하는 기저막 위치에서 기저부 방향으로 이동한 지점에서 가장 심한 음향 손상이 발생됨을 의미한다. 달팽이관은 낮은 음강도의 소리가 귀를 통해 자극해오면 이 미세한 입력 음의 크기를 스스로 증폭하는 능동적 에너지 발생 기능을 가지고 있다¹⁵⁻¹⁷⁾. 이러한 달팽이관의 능동적 생체 역학의 진원지가 입력 음의 주파수에 상응하는 기저막의 공진 특성 위치보다 오히려 기저부 방향으로 약간 이동한 지점임을 보여준다. 그 이동의 거리가 정확히 어느 만큼인 지는 아직까지 잘 알려지지 않고 있다. 또 격음 노출로 기인하는 달팽이관 구조체들의 손상이 구체적으로 무엇이며 달팽이관의 능동적 생체 역학으로의 연계는 어떻게 이루어지는 지에 관한 많은 연구들은 현재 진행 중인 관심사이다^{18, 19)}.

참고 문헌

1. A. J. Derbyshire and H. Davis, "The action potential of the auditory nerve", *Am. J. Physiol.*, vol. 113, pp. 476-504, 1935.
2. P. Dallos and M. A. Cheatham, "Compound action potential (AP) tuning curves", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 59, No. 3, pp. 591-597, 1976.
3. M. C. Brown, D. I. Smith and A. L. Nuttall, "Anesthesia and surgical trauma: their influence on the guinea pig compound action potential", *Hearing Research*, vol. 10, pp. 345-358, 1983.
4. D. T. Kemp, "Stimulated acoustic emissions from within the human auditory system", *J. Neurophysiol.*, vol. 34, pp. 802-816, 1978.
5. J. O. Pickles, M. P. Osborne and S. D. Comis, "Vulnerability of tip links between stereocilia to acoustic trauma in the guinea pig", *Hearing Research*, vol. 25, pp. 173-183, 1987.
6. E. de Boer, "The inverse problem solved for a three-dimensional model of the cochlea. I. Analysis", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 98, No. 2, pp. 896-903, 1995.
7. E. de Boer, "The inverse problem solved for a three-dimensional model of the cochlea. II. Application to experimental data sets", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 98, No. 2, pp. 896-903, 1995.
8. 김종선, 홍선화, "정상 기니픽에서 마취가 전기자극에 의한 유발 전위 중간잠복기 반응에 미치는 영향에 관한 연구", *한이인지*, 36권, 4호, pp. 601-611, 1993.

9. H. Goulios and D. Robertson, "Noise-induced cochlear damage assessed using electrophysiological and morphological criteria : an examination of the equal energy principle", *Hearing Research*, vol. 11, pp. 327-341, 1983.
10. 장순석, "기니아피그 달팽이관의 N1-N2 오디오그램", 대한의용생체공학회, vol. 16, No. 1, pp. 77-83, 1995.
11. D. Robertson, "Combined electrophysiology and ultrastructure changes in acoustic trauma in the guinea pig cochlea", *Arch. Otorhinolaryngol.*, vol. 230, pp. 257-263, 1981.
12. D. Robertson and Johnstone B. M., "Acoustic trauma in the guinea pig cochlea: early changes in ultrastructure and neural threshold", *Hearing Res.*, vol. 3, pp. 167-179, 1980.
13. M. T. Mulroy and E. A. Whaley, "Structural changes in auditory hairs during temporary deafness", *Scan. Electron. Microsc.*, Part 2, pp. 831-840, 1984.
14. P. R. Thorne and J. B. Gavin, "Changing relationships between structure and function in the cochlea during recovery from intense sound exposure", *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.*, vol. 94 (1 Part 1), pp. 81-86, 1985.
15. J. O. Pickles, "An Introduction to the Physiology of Hearing", Academic Press, London and New York, 1982.
16. P. M. Sellick, R. Patuzzi and B. M. Johnstone, "Measurement of Basilar Membrane Motion in the Guinea Pig using the Mossbauer Technique", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 72, pp. 131-141, 1982.
17. S. M. Khanna and D. G. B. Leonard, "Basilar Membrane Tuning in the Cat Cochlea", *Science*, vol. 215, pp. 305-306, 1982.
18. P. R. Thorne and J. B. Gavin, "Changing relationships between structure and function in the cochlea during recovery from intense sound exposure", *Ann. Otol. Rhinol. Laryngol.*, vol. 94 (1 part 1), pp. 81-86, 1985.
19. M. C. Liberman and L. W. Dodds, "Chronic ultrastructural changes in acoustic trauma: Serial-section reconstruction of stereocilia and cuticular plates", *Hearing Res.*, vol. 26, pp. 65-88, 1987.

=국문초록=

기니픽 고막에의 격음 노출 전후에 N1-N2 오디오그램의 변화를 검사하였다. 격음 노출은 106 dB SPL의 세기와 10KHz의 주파수를 가진 연속 격음을 10분 동안 노출시키는 방법이었다. 격음 노출 전후의 N1-N2 오디오그램들을 비교한 결과, 격음 노출된 달팽이관이 그의 기능을 영구적으로 상실하고 있음을 보여줬다. 가장 두드러진 한계치의 이동이 12-13.2KHz 사이에서 발생하였다. 격음 노출 후의 달팽이관 기능의 변화는 격음 손상 이전의 달팽이관 상태에 따라 달라졌다. 좀 더 예민한 달팽이관이 덜 예민한 달팽이관 보다 격음 손상 이후 그 기능면에서 더욱 심각하게 손상되었다.