

와우내 선형 전극의 위치와 삽입 손상에 대한 측두골 연구

서울대학교 의과대학 이비인후과학교실,¹ 의학연구원 감각기관 연구소,² 공과대학 전기공학부,³ 초미세 생체전자시스템 연구센터,⁴ 보라매병원,⁵ (주)뉴로바이오텍,⁶
박민현^{1,5} · 이호선^{1,6} · 박세익^{3,4,6} · 전상범^{3,4,6} · 김성준^{3,4} · 오승하^{1,2,4}

A Temporal Bone Study of Insertion Trauma and Intracochlear Position of Straight Type Electrode for Cochlear Implant

Min-Hyun Park, MD^{1,5}, Ho-Sun Lee, MS^{1,6}, Se-Ik Park, PhD^{3,4,6},
Sang Beom Jun, PhD^{3,4,6}, Sung June Kim, PhD^{3,4} and Seung-Ha Oh, MD^{1,2,4}

¹Department of Otorhinolaryngology, College of Medicine; ²Research Center for Sensory Organs, Medical Research Center, College of Medicine; ³School of Electrical Engineering and Computer Science; ⁴Nano Bioelectronics and System Research Center; ⁵Seoul Metropolitan Government-Seoul National University Boramae Hospital, Seoul Natinoal University, Seoul; and ⁶Nurobiosys Corporation, Seoul, Korea

ABSTRACT

Background and Objectives : The goal of this study was to examine insertion depth, intracochlear position and insertion trauma with the stimulation electrode of the Nurobiosys cochlear implant. **Subjects and Method** : Four electrodes were implanted in fresh temporal bones of the human cadavers using realistic surgical procedures. Plain film X-ray images were taken from the electrode inserted in the specimens to estimate the insertion depth. After the electrode implantation, all human temporal bones were trimmed to extract the cochleae. The extracted cochleae from the temporal bone were immersed in acrylic resin to fix the position of electrode placed in the scala tympani. The resin treated cochleae were cut in radial section and polished. All cross-sections were imaged with a microscope to assess the trauma by the electrode implantation. **Results** : The mean insertion depth was about 300° with the cochlea angle. The insertion trauma was observed in one section of a temporal bone. The mean distance from electrode to modiolus was about 0.75 millimeter. **Conclusion** : The incidence, severity of trauma and insertion depth of the studied electrode showed similar results with that of other straight type electrode in literature. (Korean J Otorhinolaryngol-Head Neck Surg 2008;51:999-1003)

KEY WORDS : Cochlear implant · Temporal bone · Trauma · Insertion depth.

서 론

와우이식은 현재 심도난청환자의 재활에 가장 중요한 방법으로 사용되고 있으며 전세계적으로 10만 명 정도가 시술을 받은 것으로 알려져 있다. 인공와우 시술 건수는 지속적으로 증가하는 추세에 있으며, 최근에는 잔존 청력을 가진 환자들에 대해서도 이식이 시도되어 어느 정도 좋은 결과들을 보고하고 있다.^{1,2)} 이식 후의 결과도 지속적으로 향상되는 모습을 보여 주고 있는데, 이는 어음처리기 등 기기의 발달과 새로운 기술의 도입, 맵핑(mapping) 방법의 변화 등에 기인한 것이다.

논문접수일 : 2008년 6월 18일 / 심사완료일 : 2008년 9월 16일
교신저자 : 오승하, 110-744 서울 종로구 연건동 28
서울대학교 의과대학 이비인후과학교실
전화 : (02) 2072-2442 · 전송 : (02) 2072-2537
E-mail : shaoh@snu.ac.kr

그러나 와우이식이 청각장애인 재활에 크게 기여하였지만, 장치 가격이 약 2,500만 원 정도에 달하기 때문에 와우이식이 필요한 환자들 중 많은 수가 그 혜택을 보지 못하고 있는 것도 현실이다. 다행히 국내에는 의료보험에서 일정 수준 보장을 해 주고 있으나 많은 개발도상국에서는 그렇지 못하고 있다.

현재 인공와우의 구성 요소들 중에서 와우내 전극에 대한 연구가 활발히 이루어 지고 있는데, 이는 와우내에 이식된 전극의 위치나 전극 이식시 발생할 수 있는 손상이 환자의 음성인지도에 영향을 미치기 때문이다. 현재 와우전극은 1) 저주파수 대역을 담당하는 와우내의 침부에 가까이 이식이 가능한 얇고 긴 선형 전극이나, 2) 와우축에 가깝게 전극을 위치시켜 청신경을 자극하는데 필요한 전력 소모를 줄여주는 구부러진 형태의 두 가지 전극이 상용화 되어 있

다. 와우내에 이식된 전극의 위치나 손상 정도는 측두골에 대한 조직병리검사를 통해서 확인이 가능한데 대부분의 측두골 병리검사는 사후에 이루어지는 문제가 있으며 또한 삽입된 전극을 제거한 후에 이루어지므로 정확한 손상의 위치와 인과관계를 확인하기 어려운 문제가 있다.⁴⁻⁶⁾ 이식 받은 환자에서 삽입손상에 대한 연구 결과들이 발표되었으나 이는 후향적 연구이고 손상 후 재형성(remodeling)을 거친 이후라는 단점이 있다.⁷⁾

본 연구는 국내에서 개발한 와우이식시스템의 전극을 이용하여 와우내 전극이 와우내 위치와 전극 이식에 따른 와우내 손상 정도를 객관적으로 평가하고자 하였다. 이를 위해 인간 측두골 조직을 이용하여 연구를 진행하였다. 연구는 전극삽입 후 와우에서 삽입된 정도를 전극의 회전각도를 이용하여 측정하였으며 또한 전극과 와우나선 신경절간의 거리를 측정하였다. 그리고 와우 외벽과 와우기저막의 손상 정도를 평가하였다.

대상 및 방법

두 명의 술자에 의해 전극의 삽입이 이루어졌으며 한 명의 술자가 측두골을 다듬고 정리하였다. 전극은 모두 4개의 측두골에 이식되었으며, 측두골 1개당 1개의 전극을 사용하였다. 사용한 전극은 (주)뉴로바이오시스의 직선형 전극이며 이 전극은 16개의 자극 단자를 포함하고 있고, 각 자극 단자는 구의 일부가 실리콘 외피로부터 약 130 μm만큼 돌출된 형상을 가지고 있다. 각 자극 단자 및 연결선은 Platinum/Iridium의 합금이 사용되었으며 silicon elastomer로 싸여 있다. 전극은 단면이 원형인 형태이며 끝부분의 직경이 0.5 mm이고 기시부는 0.7 mm의 직경을 가지고 있다. 인접 전극간의 거리는 1.25 mm이며 와우내 전극의 길이는 전체 24.5 mm로 되어 있어 삽입 시 360도를 돌 수 있도록 설계되어 있다(Fig. 1).

측두골은 사망 후 24시간이 지나지 않은 사체에서 적출하였으며 24시간 동안 10% formaldehyde에서 고정하였

다. 이후 조직을 0.1 M phosphate buffer에서 세척한 후 냉동 보관하였다. 이 단순 고정방식은 장기간 aldehyde에 보관할 때의 기계적 성질의 변화를 최소화하기 위한 방법으로 사용되었다. 냉동된 상태로 이동 후에 실온에서 해동 후 실험을 시행하였다. 전극 삽입은 와우전극 이식시 사용되는 동일한 수술방법을 따라서 유양동 삭개술 후 후고실 절개를 시행하였다. 정원창에서 전하방 1 mm 되는 지점에 직경 1~2 mm의 와우절개(cochleotomy)를 시행하였다. 전극을 삽입하고 아크릴 접착용제를 사용하여 고정한 후 남은 전극은 이후 조직 처리과정에서 움직이지 않게 남은 부위를 최소화하여 잘라내었다.

삽입하여 고정한 후에 주변의 골조직 및 연부조직을 제거하고, 와우 주변의 골조직은 드릴을 이용하여 blue line이 보일 때까지 제거하였다. Embedding은 탈수화 과정을 거쳐서 epoxy 용액(Epoxy technology, Billerica, MA, USA)에 시행하였다.⁸⁾

단순 방사선촬영을 시행하여 전극의 위치와 배열을 확인하고 처리과정에서의 움직임이 없음을 확인하였다. 최종적으로 만들어진 조직 블록을 diamond wafering blade(Beuhler, Inc, lake Bluff, IL, USA)를 이용하여 mid-modiolar plane으로 절단하여 4등분을 시행하였다. 각 단면은 연마기를 사용해서 최종적으로 조직을 완성하였다(Fig. 2).

조직이 고정된 후에 촬영한 방사선 단순 사진에서 전극의 삽입 정도와 각도를 측정하였다. 또 각 조직블록을 현미경하에서 절단면을 관찰하였으며 이때 각 블록의 단면에서 와우 신경절과 전극간의 거리를 광학현미경하에서 측정하였다.

삽입 손상은 각각의 절단면에서 와우내 구조물의 손상을 평가하였다. 와우내 세부 구조를 기저막(basal membrane, BM), 나선 인대(spiral ligament, SL), 골성 나선판(osseous lamina, OL), 라이스너 막(Reisner's membrane, RM)으로 나누어서 각각의 손상 정도를 0(손상없음), +(경도손상), ++(중등도 손상), +++(고도손상)으로 평가하였다. 경도는 위치의 변화가 있을 때, 고도손상은 완전히 구조물이 파괴되었거나 뚫렸을 때로 하였으며 중등도는 구조물의 손



Fig. 1. A : Wearable-type Speech Processor of Nurobiosys cooperation. B : Receiver-stimulator implant of Nurobiosys cooperation C : Array of intracochlear electrodes of Nurobiosys cooperation.

상이 있으나 형태가 잘 유지되며 막성 구조물의 천공이 있을 때로 정의하였다.

결 과

전극의 삽입 정도는 Fig. 3에서 보이는 것처럼 방사선 필

름에서 삽입된 정도를 각도로 표현하였다. 4개의 전극이 280°에서 330°의 삽입각도를 보였으며 모두 12개 이상의 전극이 삽입되었다. 평균 삽입각도는 300°, 평균 삽입 전극 수는 13.8개였다(Table 1).

와우 나선축과 전극간의 거리는 절단면에서 광학 현미경을 보면서 거리를 측정하였다. 거리는 0.44 mm에서

Fig. 2. A : Simple x-ray view of cochlea Number 3. It shows inserted electrode array and ball-type electrode in cochlea. B : Cut surface of cochlea number 1. It shows position of electrode in scala tympani.

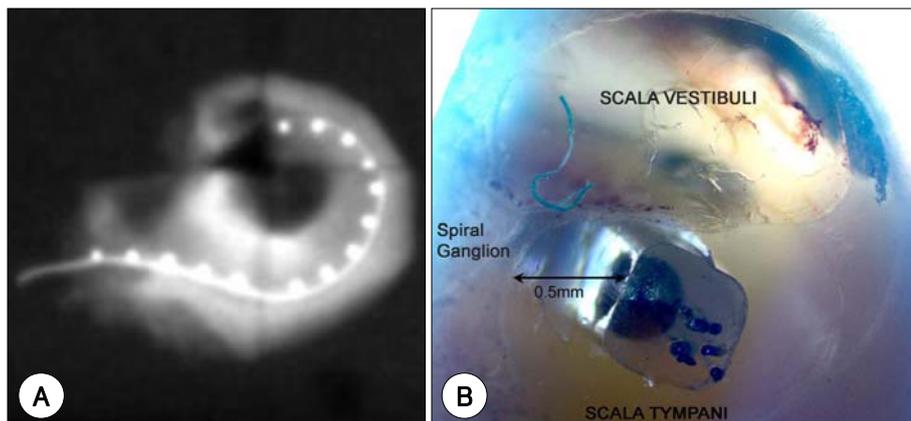


Fig. 3. A : Cochlear diagram for cutting and measuring of insertion depth. B : Insertion depth measurement of cochlea Number 3.

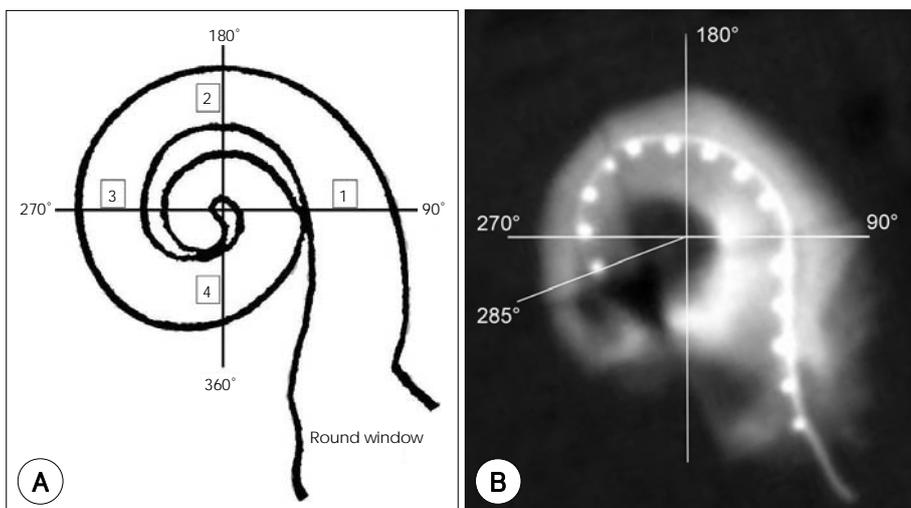


Table 1. Insertion depth, distance between modiolus and electrode and degree of insertion trauma

Electrode number	Inserted electrodes numbers.	Insertion depth	Distance*/Insertion trauma			
			1†	2†	3†	4†
1	13	280°	0.44	0.50	—	—
			0	0	—	—
2	12	300°	0.70	0.92	1.00	—
			0	0	0	—
3	15	285°	0.65	0.76	0.70	—
			0	0	0	—
4	15	330°	1.15	1.13	0.60	0.48
			0	0	0	BM (++) SL (++)

*Distance from modiolus to electrode (The unit is millimeter), †Number of cutting surface at cochlear diagram (Fig. 1). BM : basilar membrane, SL : spiral ligament. 0 : no trauma, + : mild trauma, ++ : moderate trauma, +++ : severe trauma

1.15 mm의 범위를 보였으며 평균 0.75 mm의 간격을 보였다(Table 1).

모두 4개의 측두골 12개의 단면 중 1개의 단면에서 와우의 손상을 발견할 수 있었다. 이는 4번 측두골의 마지막 단면이었으며 기저막과 나선인대에 중등도의 손상을 보였다. 이외 다른 단면들에서는 와우내 구조물의 손상이 관측되지 않았다.

고 찰

와우 이식시 삽입 전극에 의한 와우의 손상 정도를 평가하기 위한 노력은 여러 방법을 통해 시도되어 왔다. 삽입된 전극의 위치를 보기 위해 전정계의 윗부분을 모두 제거하기도 하였으나 이 방법은 전극이 움직일 가능성을 배제하지 못한다.⁹⁾ 고해상도 측두골 단층촬영을 시행하고 이를 3차원적으로 재구성하여 와우내 전극의 위치를 in vivo에서 측정하는 방법도 발표되었으나 이는 모든 사람에게 시행하기 어려우며 와우내 손상은 파악할 수 없는 단점이 있다.¹⁰⁾ 최근에는 micro-CT나¹¹⁾ 64채널 multi-detector CT(MDCT)를 이용하여¹²⁾ 전극의 위치를 파악하는 방법이 소개되고 있으나 이는 전극의 위치파악에는 유용하지만 와우내 구조물의 손상을 파악하지 못하는 한계가 있다. 주로 많이 쓰이는 방법은 전통적인 측두골 고정을 통해 절단면에서 관찰하는 것이다.^{7,8)} 이 방법은 전극의 움직임이 없으며 정확하고 세밀한 관찰이 가능하나 조직을 처리하는데 오랜 시간이 걸리는 단점이 있다. 본 연구에서는 epoxy를 사용하여 조직 표본을 제작하여 절단면을 관찰하는 방법을 시행하였다.¹³⁾ 이는 비교적 간단하고 제작시간이 짧으며 전극이 움직이지 않고 와우내 구조물의 변화 정도를 파악할 수 있는 장점이 있다.

일반적으로 와우이식기의 전극삽입시 수술하는 사람의 숙련도에 따라 손상이 달라질 가능성이 제기되고 있다. 본 연구의 경우 한 명은 숙련된 이비인후과 전문의였으며 다른 한 명의 전문의는 와우이식의 시술 경험은 없으나 숙련된 전문의의 감독하에 전극을 삽입하였다. 전극의 삽입각도를 숙련도에 따라 비교한 논문을 보면 Nucleus Contour의 경우는 숙련도에 따라 큰 차이를 보이지 않지만 선형 전극의 경우는 숙련도에 따라서 삽입 정도가 차이를 보일 수 있다고 한다.¹³⁾

전극삽입시에 발생하는 와우의 손상을 평가하는 것은 중요한 의미를 가지는데 이는 와우의 기능뿐 아니라 기기 고장이나 소아에서 성장 후에 기기 교체가 필요할 때 와우의 추가적 손상이 야기될 수 있으며 삽입손상 자체가 와우이식 후의 결과에 영향을 줄 가능성이 있기 때문이다. 또한 잔존 청력이 있을 때의 와우이식의 경우는 특히 와우가 손상되

지 않는 것이 잔존청력의 보존을 위해 더욱 중요하다. 동물 실험에서는 전극삽입시 골성 나선판(osseous spiral lamina)의 손상이 있을 때 나선신경절의 신경세포수가 감소함을 보고하기도 하였다.¹⁴⁾

본 연구에서는 한 개의 단면에서만 기저막의 손상이 있었으며 전극의 끝부분이 기저막을 손상시키며 중간계(scala media)로 침투한 양상을 보였다. 이 결과는 이전에 발표된 다른 형태의 선형전극과 유사한 결과를 보인다. Nucleus의 경우 이전에 발표된 측두골 연구의 결과들을 보면 Contour 전극과 선형의 Banded 전극에서 본 연구와 같은 현상을 볼 수 있었는데 한 연구에서는 Contour의 경우 12개 중에서 2개의 전극이 전정계로 올라가서 16.6%의 확률을 보였으며⁹⁾ 또 다른 연구에서는 Contour의 경우 18개 중 7개(38.9%)에서, 선형 전극에서는 8개 중 2개에서 기저막의 손상을 관찰할 수 있었다고 하였다.¹³⁾ 또 다른 선형 전극의 연구에서도 20개 중 5개에서 손상을 보여 약 25%정도에서 발생하였다.¹⁰⁾ Clarion의 경우는 순수 선형전극에 대한 연구 결과는 없으며 2005년에 나선형 전극(Spiral Clarion™)과 Positioner가 붙어 있는 HiFocus II™ 전극을 이용한 연구가 있는데 두 전극 모두 삽입각도가 커질수록 기저막의 손상이 커지는 현상을 보였다.¹⁵⁾ 이러한 현상은 일반적으로 전극의 강직도(stiffness)와 관련이 있는데 수직면에 대해 강직도를 높이고 수평면에 대해 강직도를 최소화 하는 경우 이런 손상을 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다.¹⁶⁾ 또한 실리콘 내부의 전극의 배열을 어떻게 하는가에 따라 전극의 강직도가 방향에 따라 달라지기도 한다.¹⁷⁾ 본 연구에 사용된 전극은 수직강직도와 수평강직도의 비가 1.77로 알려져 있는데 이는 수직 강직도가 높아서 전극의 상하 움직임이 제한되어 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 와우나선축 쪽의 손상은 발견할 수 없었으며 손상은 와우 외벽에서 발견하였는데 이는 선형 전극의 특징으로 생각할 수 있다. 나선형 전극의 경우 주로 손상을 받는 부위가 골성 나선판을 비롯한 와우축에 인접한 구조물인 점들과는 차이가 있으며 이는 선형전극이 나선형 전극에 비해 와우손상이 적게 일어날 수 있는 장점이다. 전극의 와우내 삽입 정도도 평균 300°를 보여 Nucleus의 선형 전극의 경우 평균 285°를 보인 것과 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 선형전극의 경우는 수술자의 숙련도에 따라 삽입 정도가 차이가 나는 것으로 알려져 있으며 숙달되지 않은 술자와 숙련된 술자가 각각 평균 242°와 329°로 차이가 있음이 보고된 바 있다.¹³⁾ 본 연구에서는 두 술자 간에 차이는 보이지 않았다. 기존에 보고된 선형전극들의 평균 삽입각도도 유사한 결과를 보인다.^{6,10)}

와우 나선축과 전극간의 거리는 평균 0.75 mm를 보였으며 와우내 위치에 따른 차이는 보이지 않았다. 일반적으로 와우축과의 거리가 가까우면 좀더 적은 전력소모로 좁은 부위를 자극할 수 있을 것으로 생각되며 거리가 멀어지게 되면 자극을 위해 많은 전력이 소모되며 넓은 부위가 자극이 되는 단점이 있다.¹⁸⁾ 그러나 환자를 대상으로 방사선학적으로 와우축과 전극과의 거리에 따라 와우이식 후의 언어기능의 차이를 본 논문에서는 연관성을 찾을 수 없었는데 아마도 이는 다른 많은 요소들이 섞여 있어서 구분하기 어려웠을 것으로 생각된다.¹⁹⁾ 또한 전극이 전정계 쪽으로 돌출되어 이동한 경우는 그 지점의 와우축의 나선 신경절 세포가 아니라 와우 기저부인 경우는 와우의 중간회전부의 신경세포가 더 가깝게 위치하는 경우가 생겨 원하지 않는 부위를 자극할 수도 있다. 이는 전극의 맵핑에서 장애요소가 될 수 있는 부분이다.

이와 같은 실험에서 어떤 측두골을 써야 하는지에 대해서는 여러가지 방법들이 있다. 적절한 상태에서 고정을 시키는 것은 내부 구조물의 조직 강도를 다르게 할 수 있지만 사망 후 몇 시간이 지나면 조직에서 자가분해가 일어나기 때문에 고정은 피할 수 없는 과정이므로 최소화 하는 방법을 택해야 한다. 가장 이상적인 측두골 실험은 사망한 지 몇 시간 이내에 적출하여 바로 전극을 삽입해야 한다.⁸⁾ 하지만 이러한 방법은 사용하기가 어려운 단점이 있다.

결 론

선형전극을 이용한 삽입손상 실험에서 전극의 와우내 위치와 손상을 파악할 수 있었으며 사용된 전극이 다른 형태의 선형전극과 유사한 정도의 손상을 일으키는 것을 확인할 수 있었다. 또한 절단면에서 고실계에서의 전극의 위치와 거리를 측정하였으며 와우내 전극이 삽입되는 각도도 다른 상용화된 선형전극과 같은 정도를 보임을 확인할 수 있었다. 본 실험은 사용한 측두골과 전극의 수가 적은 문제점이 있지만 국내에서 생산된 선형전극의 와우내 위치와 손상에 관한 경향을 알 수 있었으며 이후 더 많은 측두골에 대한 실험이 이루어져야 할 것으로 생각한다.

중심 단어 : 와우이식 · 와우내 전극 · 삽입손상 · 삽입깊이.

■ 감사문

전극을 제공한 Nurobiosys와 측두골 제작에 도움을 주신 Epstein Laboratory at University of California측에도 감사를 드립니다.

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터 육성 사업의 지원으로 수행되었음(R11-2000-075-01005-0).

REFERENCES

- 1) von Ilberg C, Kiefer J, Tillein J, Pfenningdorff T, Hartmann R, Sturzebecher E, et al. *Electric-acoustic stimulation of the auditory system. New technology for severe hearing loss. ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec* 1999;61 (6):334-40.
- 2) Gantz BJ, Turner CW. *Combining acoustic and electrical hearing. Laryngoscope* 2003;113 (10):1726-30.
- 3) An SK, Park SI, Jun SB, Lee CJ, Byun KM, Sung JH, et al. *Design for a simplified cochlear implant system. IEEE Trans Biomed Eng* 2007;54 (6 Pt 1):973-82.
- 4) Welling DB, Hinojosa R, Gantz BJ, Lee JT. *Insertional trauma of multichannel cochlear implants. Laryngoscope* 1993;103 (9):995-1001.
- 5) Kennedy DW. *Multichannel intracochlear electrodes: Mechanism of insertion trauma. Laryngoscope* 1987;97 (1):42-9.
- 6) Shepherd RK, Clark GM, Pyman BC, Webb RL. *Banded intracochlear electrode array: Evaluation of insertion trauma in human temporal bones. Ann Otol Rhinol Laryngol* 1985;94 (1 Pt 1):55-9.
- 7) Nadol JB Jr, Shiao JY, Burgess BJ, Ketten DR, Eddington DK, Gantz BJ, et al. *Histopathology of cochlear implants in humans. Ann Otol Rhinol Laryngol* 2001;110 (9):883-91.
- 8) Gstoettner W, Franz P, Hamzavi J, Plenck H Jr, Baumgartner W, Czerny C. *Intracochlear position of cochlear implant electrodes. Acta Otolaryngol* 1999;119 (2):229-33.
- 9) Tykocinski M, Saunders E, Cohen LT, Treaba C, Briggs RJ, Gibson P, et al. *The contour electrode array: Safety study and initial patient trials of a new perimodiolar design. Otol Neurotol* 2001;22 (1):33-41.
- 10) Ketten DR, Skinner MW, Wang G, Vannier MW, Gates GA, Neely JG. *In vivo measures of cochlear length and insertion depth of nucleus cochlear implant electrode arrays. Ann Otol Rhinol Laryngol Suppl* 1998;175:1-16.
- 11) Postnov A, Zarowski A, De Clerck N, Vanpoucke F, Offeciers FE, Van Dyck D, et al. *High resolution micro-CT scanning as an innovative tool for evaluation of the surgical positioning of cochlear implant electrodes. Acta Otolaryngol* 2006;126 (5):467-74.
- 12) Lane JJ, Witte RJ, Driscoll CL, Shallop JK, Beatty CW, Primak AN. *Scalar localization of the electrode array after cochlear implantation: Clinical experience using 64-slice multidetector computed tomography. Otol Neurotol* 2007;28 (5):658-62.
- 13) Wardrop P, Whinney D, Rebscher SJ, Roland JT Jr, Luxford W, Leake PA. *A temporal bone study of insertion trauma and intracochlear position of cochlear implant electrodes. I: Comparison of Nucleus banded and Nucleus Contour electrodes. Hear Res* 2005;203 (1-2):54-67.
- 14) Leake PA, Hradek GT, Snyder RL. *Chronic electrical stimulation by a cochlear implant promotes survival of spiral ganglion neurons after neonatal deafness. J Comp Neurol* 1999;412 (4):543-62.
- 15) Wardrop P, Whinney D, Rebscher SJ, Luxford W, Leake P. *A temporal bone study of insertion trauma and intracochlear position of cochlear implant electrodes. II: Comparison of Spiral Clarion and HiFocus II electrodes. Hear Res* 2005;203 (1-2):68-79.
- 16) Rebscher SJ, Heilmann M, Bruszewski W, Talbot NH, Snyder RL, Merzenich MM. *Strategies to improve electrode positioning and safety in cochlear implants. IEEE Trans Biomed Eng* 1999;46 (3):340-52.
- 17) Lim YS, Park SI, Kim YH, Oh SH, Kim SJ. *Three-dimensional analysis of electrode behavior in a human cochlear model. Med Eng Phys* 2005;27 (8):695-703.
- 18) Braiaire JJ, Frijns JH. *Field patterns in a 3D tapered spiral model of the electrically stimulated cochlea. Hear Res* 2000;148 (1-2):18-30.
- 19) Marrinan MS, Roland JT Jr, Reitzen SD, Waltzman SB, Cohen LT, Cohen NL. *Degree of modiolar coiling, electrical thresholds, and speech perception after cochlear implantation. Otol Neurotol* 2004; 25 (3):290-4.