

A Longitudinal Study of Frequency Specific Electrical Stimulation Levels in Cochlear Implant Users

Pyung Kon Thak¹, Jiwon Chang², Euy Hyun Park², Sangheon Park², Kwang Jin Jung² and Gi Jung Im²

¹Department of Speech-Language Therapy and Aural Rehabilitation, Woosong University, Daejeon; and

²Department of Otolaryngology-Head and Neck Surgery, College of Medicine, Korea University, Seoul, Korea

인공와우 조율에서 주파수별 전기자극수준의 변화양상

탁평곤¹ · 장지원² · 박의현² · 박상현² · 정광진² · 임기정²

우송대학교 언어치료청각재활학부,¹ 고려대학교 의과대학 이비인후과학교실²

Received January 2, 2013

Revised March 21, 2013

Accepted March 21, 2013

Address for correspondence

Gi Jung Im, MD
Department of Otolaryngology-
Head and Neck Surgery,
College of Medicine,
Korea University,
73 Inchon-ro,
Seongbuk-gu, Seoul 136-705,
Korea
Tel +82-2-920-5345
Fax +82-2-925-5233
E-mail logopas@korea.ac.kr

Background and Objectives The purpose of the study was to evaluate the changes in electrical stimulation levels, i.e. threshold (T) levels, comfortable (C) levels, dynamic range (DR), and electrode impedance values (EIVs) during the first year in cochlear implant users.

Subjects and Method The maps of 49 cochlear implant users (at least 1 year mapping), using the Nucleus device, were examined at the time of initial connection, and at 6 and 12 months post-initial stimulation. T levels, C levels, DR and EIVs were analyzed according to three frequency levels.

Results During the first 6 months of implant use, C levels and DR increased significantly whereas T levels were stable. EIVs of current carrying electrodes decreased significantly from the connection to the 12-month visit. The changes of electrical stimulation levels did not differ among three frequency levels during the entire follow-up.

Conclusion During the first 6 months of implant use, C levels and DR increased significantly. Thus, an appropriate mapping in the first 6 month is critical to setup hearing capacity in implant users. The mapping should be performed under the best communication environment between the audiologist and the patient, and it makes correct setting of T levels from the initial connection period.

Korean J Otorhinolaryngol-Head Neck Surg 2013;56:201-5

Key Words Auditory threshold · Cochlear implants · Electric impedance · Hearing.

서 론

인공와우 시술은 한국에서 2005년부터 건강보험에 적용되면서 폭발적으로 시행되었다. 매년 600여건의 인공와우 수술이 이루어지고 있으며 2013년 현재까지 7000여명이 인공와우를 시술받았다. 음향적인 신호를 전기적인 신호로 변환하는 와우의 기능이 없는 고도 난청자에게 인공와우는 이러한 결점을 보완하여 주는 최고의 청각재활기제로 자리매김되어 있다. 건강보험 초기에 인공와우 시술 술기에 치중하던 경향이 있었다면 점차 인공와우 시술자가 많아지고 와우 이식 기간이 길어지

면서 인공와우의 관리, 맵핑, 그리고 재활이 중요시 되고 있다.

맵핑(mapping)이란 인공와우 이식 환자 개개인에 맞추어 인공와우의 전극별, 주파수별 입력신호와 출력신호를 조절함으로써 최대한 자연 음에 가까우면서 좀더 사용자에게 부드럽고 편한 소리를 구현하고자 하는 모든 노력과 관리기술을 총칭한다. 따라서 성공적인 인공와우 수술도 중요하지만 이후의 청각재활과 더불어 적절한 맵핑이야말로 인공와우 이식에 있어서 가장 중요한 요소라 하겠다. 한국에서는 수술과 재활이 분리되어 있어서 맵핑에 대한 기초적인 지식과 연구가 부족한 실정이다. 따라서 여러 환자 집단과 이식 조건에 따른 맵핑 및 재활 연

구가 필요하다.

맵핑에서 임피던스(electrode impedance values)를 확인하는 것이 인공와우 전극의 항상성을 확인하는 가장 기본적인 시작점이다. 대개 수술 중 확인하는 첫 임피던스 값보다 외부장치인 어음처리기를 장착하는 인공와우 이식 이후 한 달 경의 임피던스 값은 낮아지면서 안정화되는 경향을 보인다. 이는 수술 중의 경우에는 와우 내에 피가 차거나, 힐론(Healon®, sodium hyaluronate, Pharmacia, Piscataway, NJ, USA)과 같은 점탄물질이 있는 상태에서 전극의 임피던스를 측정하기 때문에 좀 더 높게 나온다고 알려져 있다.^{1,2)}

인공와우 사용자에게 있어서 소리의 음역대(dynamic range, DR)는 두 가지 요소에 의하여 결정된다. 사용자가 들을 수 있는 최소한의 소리 자극 한계값을 최소가청역치(threshold level, T level)라 말하며, 비교적 크고 선명하면서 듣기 편한 소리 자극 크기를 최적가청역치(comfortable level, C level)라 정의한다. 따라서 최적가청역치와 최소가청역치 사이의 음역대를 DR로 정의하게 된다.³⁾

시간변화에 따른 전기자극수준의 양상을 연구한 논문들이 발표되었다. 대개 C level의 경우에는 맵핑과 재활이 진행됨에 따라 지속적으로 증가하게 되어 2년까지도 증가하는 모습을 보인다. 주로 주파수별 C level의 조절이 인공와우 적응기에 중요한 요소이다. T level의 경우에는 다른 연구가 많아 술 후 증가하거나, 증감을 반복하거나, 안정적인 양상을 보이는 등 다양한 결론을 내고 있다.⁴⁻⁸⁾ 이러한 다양한 결론의 이유는 첫째, 인공와우 사용자가 반응에 대한 확인이 비교적 수월한 성인인지 그 렇지 않은 유아인지에 따라 다르고, 둘째, 인공와우 사용자가 소리에 익숙한 언어습득기 후 전농(post-lingual)인 경우와 그렇지 않은 언어습득기 전 전농(pre-lingual)에 따라 다르기 때문이다. 세째, 맵핑을 시행하는 청각사의 경험 또는 성향에 따라 음역대를 선택하고 관리해 나가는 양상이 틀릴 수 있기 때문이다.

이에 본 연구에서는 맵핑에 있어서 주파수별 C level과 T level의 시간에 따른 변화양상을 살펴보고 임피던스와 DR의 변화양상도 관찰함으로써 인공와우 맵핑에서 주파수별 전기자극수준의 변화양상을 밝히고자 하였다.

대상 및 방법

대상

2005년 1월에서 2011년 12월 사이에 본원에서 nucleus(Cochlear Limited, Lane Cove, Australia) 인공와우를 이식하여 맵핑 및 재활치료를 받고 있는 환자 104명 중, 내이 기형이 없으며 맵핑시 의사소통이 자유로운 최소한 1년 이상의 맵핑과 재활치료가 이루어진 5세 이상의 인공와우 사용자 49명을 대

상으로 연구를 시행하였다. 남자는 27명, 여자가 22명이었으며 언어습득기 전 전농이 21명, 언어습득기 후 전농이 28명이었다. 이식된 인공와우는 모두 Nucleus사의 제품이었고(CI24M: 11, CI24R: 11, CA: 12, CAre: 15) 사용된 음성처리기는 4종이었다(Freedom: 21, 3G: 18, Sprint: 4, N5: 6). 맵핑 및 재활의 평균기간은 56.2개월이었으며, 수술시 평균연령은 31.2세였다. 연구된 모든 환자는 동일한 술자에 의하여 동일한 시술방법을 통하여 시술되었으며 모두 힐론이 사용되었다. 수술에 따른 합병증이 없었으며, 22개의 전극이 모두 삽입된 상태였다. 모든 환자의 연구 결과는 후향적으로 분석되었으며 고려대학교 의료원 임상시험심사위원회의 관리로 수행되었다(ED09162-1301).

맵핑

모든 환자는 수술 당시 Cochlear view로 전극이 제대로 삽입되었다는 것을 확인하였으며, 항상 임피던스 원격 측정법(impendance telemetry)을 시행하여, 각 전극의 이상여부를 파악하여 정상 범위임을 확인하였다. 또한 술 중 신경반응 원격 측정법(neural response telemetry) 역치를 측정하고, 이를 술 후 한 달 경 인공와우 외부 장치를 처음 장착하여 조율할 당시 다시 신경반응 원격 측정치와 비교하였다.

성인 및 아동에게 loudness scale을 보여주고 소리를 정확하게 100% 들을 수 있는 소리 중 가장 작은 소리를 T level로 정하였다. 또한 검사자가 청각반응을 관찰하면서, 전기 자극을 증가시켜 가장 꽤적하다고 반응한 소리 자극을 찾아 이를 C level로 정하였다. 맵핑 주기는 1주, 2주, 1개월, 3개월, 6개월 간격으로 실시하였다.⁹⁾ 술 후 한 달 이후에 첫 맵핑을 실시하였으며, 1주 간격으로 3~4회 실시하되 반응이 안정되면 2주 간격으로 맵핑 주기를 넓히지만 반응이 안정되지 않으면 안정이 될 때까지 좀 더 맵핑을 실시하였다. 그래서 일반적으로 2주 간격으로 3~4회, 1개월 간격으로 3~4회, 3개월 간격으로 3~4회를 실시한 후 모든 프로그램이 안정화가 되면 그 이후부터는 6개월 간격으로 맵핑을 정기적으로 실시하였다. 맵핑시 인공와우 사용자와 부모 또는 언어치료사의 보고를 참고로 하여 소리 자극에 대한 반응여부를 지속적으로 확인하였고, 특히 작은 말소리와 불쾌한 큰 소리 등을 상세히 관찰하여 T와 C level을 재조정하였다. 임피던스도 수시로 확인하여 술 중에 실시한 임피던스 값과 술 후 1년 후의 임피던스 값을 측정하여 서로 비교하였다. 위의 모든 측정은 Custom Sound 3.2와 Custom Sound EP(Cochlear Limited, Lane Cove, Australia) 프로그램을 이용하였으며 이 모든 측정은 한 명의 청각사에 의하여 동일한 방법으로 시행하였다.

통계적 분석

인공와우 사용자의 첫 맵핑(술 후 1개월), 6개월, 그리고 1년

의 기간 동안 변화한 T level과 C level 그리고 DR의 평균을 비교 분석하였다. 특히 T level과 C level의 경우 좀더 정확한 변화의 추이를 파악하기 위해 주파수별로 크게 저 주파수(22~16번 채널), 중간 주파수(15~8번 채널), 고 주파수(7~1번 채널) 영역으로 나누어 비교 분석하였다. 그리고 common ground의 임피던스 평균 값과 신경반응 원격 측정치는 수술 중 측정된 값과 1년 후 측정한 값을 서로 비교하였다. 통계방법은 paired t test 및 repeated measure One-Way analysis of variance를 사용하였으며, 통계적으로 유의할 경우 post-hoc Turkey test를 사용하였다.

결 과

임피던스와 신경반응 원격 측정치

인공와우 사용자의 첫 임피던스 값은 9.4 ± 3.3 (단위: K Ω), K Ω 이었으며, 1년 후 측정된 전극의 임피던스 측정값은 7.4 ± 2.9 K Ω 이었다(Fig. 1). 이는 통계적으로 유의하게 낮아져서 안정된 수치이다(paired t test, $p < 0.0001$). 인공와우 사용자의 첫 신경반응 원격측정치는 182.8 ± 20.2 clinical units(CU)이었으며, 1년 후 측정된 값은 173.6 ± 20 CU였다(Fig. 2). 신경반응 원격측정치도 역시 통계적으로 유의하게 낮아져서 안정되는 양상을 보였다(paired t test, $p < 0.0001$).

최소가정역치(Threshold level, T level)의 주파수별 변화

저주파수(1 kHz 이하)에서의 T level은 첫 맵핑시 143.6 CU이며, 6개월 당시가 141.6 CU, 1년 때가 141.7 CU로 관찰되었다. 중간 주파수 대역(1~3 kHz)의 T level은 순서대로 147.7, 147.1, 146.0 CU였으며, 고주파수 대역(3~8 kHz)의 T level은

순서대로 149.7, 148.2, 147.1 CU였다(Table 1). 모든 주파수 대역의 T level은 맵핑시기에 크게 영향을 받지 않는 모습으로, 통계적으로 차이가 없는 양상을 보였다(Figs. 3, 4 and 5).

최적가정역치(Comfortable level, C level)의 주파수별 변화

저주파수(1 kHz 이하)에서의 C level은 첫 맵핑시 166.1 CU이며, 6개월 당시가 185.7 CU, 1년 때가 189.2 CU로 관찰되었다. 중간 주파수 대역(1~3 kHz)의 C level은 순서대로 175.1, 192.9, 194.5 CU였으며, 고주파수 대역(3~8 kHz)의 C level은 순서대로 172.8, 189.3, 191.1 CU였다(Table 1). 모든 주파수 대역의 C level은 첫 맵핑때의 C level보다 6개월과 1년의 맵핑에서 측정된 값이 통계적으로 유의하게 증가되었다. 이는 대체적으로 안정되어 있는 T level에 비하여 C level의 값은 초기 맵핑 때부터 상승하여 6개월과 1년에 걸쳐서는 초기보다 유의

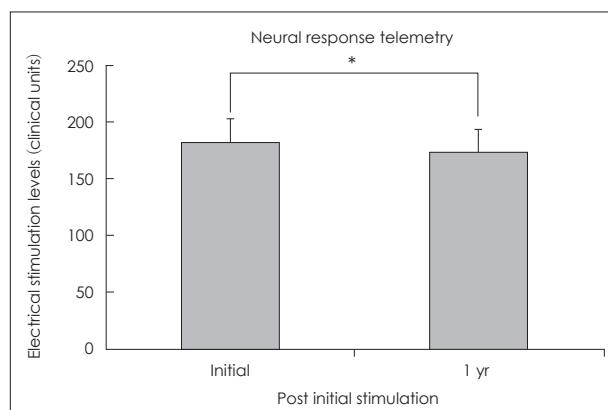


Fig. 2. Comparison of the neural response telemetry (NRT) between initial and post-stimulation 1 year. The mean of Initial NRT is 173.6 ± 20 CU, and one year later 173.6 ± 20 CU. The values of NRT was significantly decreased with time (paired t test, $*p < 0.0001$). CU: clinical units.

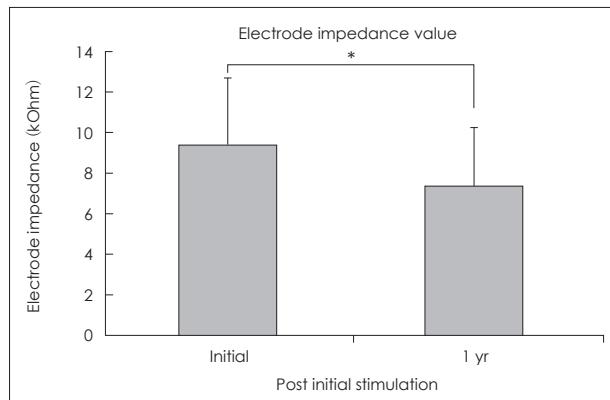


Fig. 1. Comparison of the electrode impedance values (EIVs) between initial and post-stimulation 1 year. The mean of initial EIVs is 9.4 ± 3.3 kOhm, and one year later 7.4 ± 2.9 kOhm. EIVs are significantly decreased after cochlear implantation, because negative factors (blood or lubricants) were removed (paired t test, $*p < 0.0001$).

Table 1. Over-time changes of frequency specific electrical stimulation levels in cochlear implant users

ESL	Electrical stimulation levels (clinical units)				
	Initial	6 mon	12 mon		
C level	Low	166.1 ± 22.6	185.7 ± 19.1	189.2 ± 17.7	
	Middle	175.1 ± 22	192.9 ± 15.6	194.5 ± 14.5	
	High	172.8 ± 20	189.3 ± 16	191.1 ± 14.2	
T level	Low	143.6 ± 19.8	141.6 ± 19.6	141.7 ± 18.3	
	Middle	147.7 ± 21.1	147.1 ± 20.3	146.0 ± 18.8	
	High	149.7 ± 20.5	148.2 ± 19.5	147.1 ± 19.2	
DR	Low	22.6 ± 17.8	44.2 ± 16.1	47.6 ± 11.7	
	Middle	27.4 ± 17.1	45.8 ± 13.6	48.5 ± 10.8	
	High	23.1 ± 15.9	41.1 ± 14.8	44.0 ± 11.6	

During the first 6 months of implant use, C levels and DR increased significantly whereas T levels were stable ($*p < 0.001$, compared with initial values using paired t test, $n=49$). C level: comfortable level, T level: threshold level, DR: dynamic range

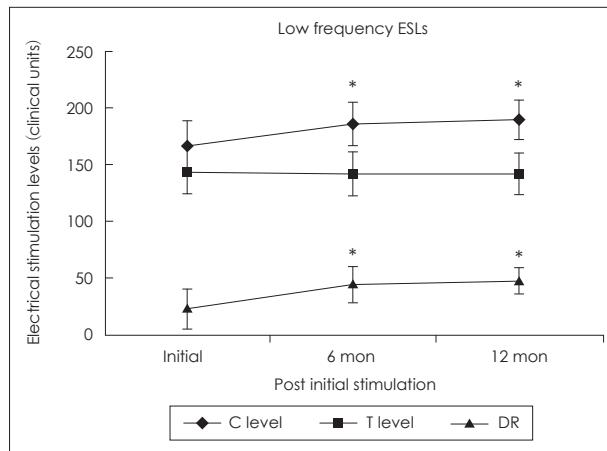


Fig. 3. In low frequency electrical stimulation levels (ESLs), C level, T level, dynamic range (DR) in the course of time. During the first 6 months of implant use, C levels and DR increased significantly whereas T levels were stable (* $p<0.001$, compared with initial values using ANOVA, n=49). T: threshold, C: comfortable, ANOVA: analysis of variance.

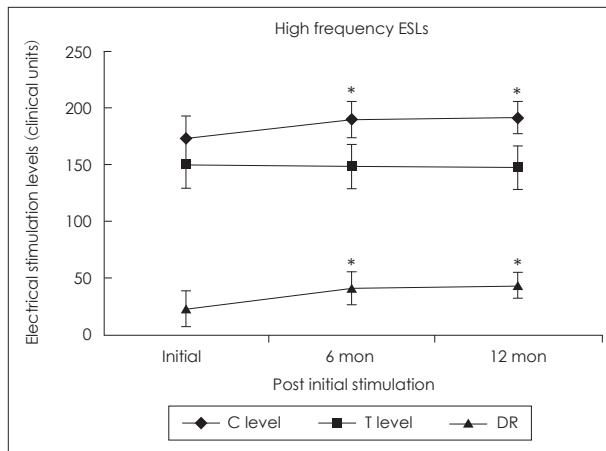


Fig. 5. In high frequency electrical stimulation levels (ESLs), C level, T level, dynamic range (DR) in the course of time. During the first 6 months of implant use, C levels and DR increased significantly whereas T levels were stable (* $p<0.001$, compared with initial values using ANOVA, n=49). T: threshold, C: comfortable, ANOVA: analysis of variance.

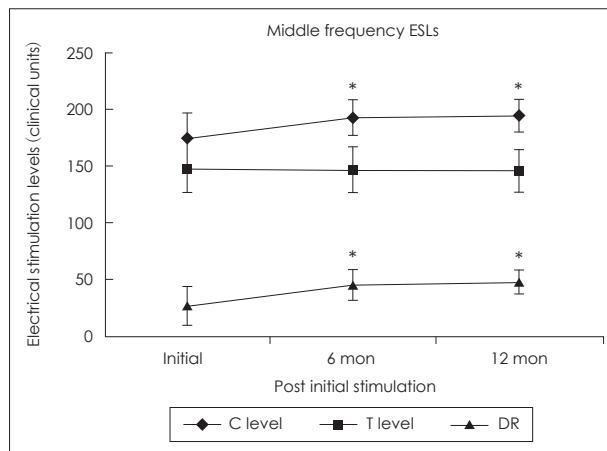


Fig. 4. In middle frequency electrical stimulation levels (ESLs), C level, T level, dynamic range (DR) in the course of time. During the first 6 months of implant use, C levels and DR increased significantly whereas T levels were stable (* $p<0.001$, compared with initial values using ANOVA, n=49). T: threshold, C: comfortable, ANOVA: analysis of variance.

하게 상승된 모습을 보였다(Figs. 3, 4 and 5).

음역대(Dynamic range, DR)의 주파수별 변화

최적가청역치와 최소가청역치 사이의 음역대는 저주파수의 경우 첫 맵핑시 22.6 CU에서 수술 후 6개월시 44.2 CU로 증가하고, 1년 뒤에도 47.6 CU로 안정된 모습을 보였다. 중간주파수의 경우 순서대로 27.4, 45.8, 48.5 CU의 모습을 보이며 고주파수의 경우 순서대로 23.1, 41.1, 44.0 CU의 측정치를 보였다 (Table 1). 모든 주파수 대역의 DR은 첫 맵핑 때의 DR보다 6개월과 1년의 맵핑에서 측정된 값이 통계적으로 유의하게 증가되었다(Figs. 3, 4 and 5).

고찰

본 연구에서는 인공와우이식자에 있어서 술 중 측정된 임피던스와 신경반응 원격측정치는 수술 후 유의하게 안정되어 있음을 관찰할 수 있었다. 이는 전에 기술한 바, 수술 중의 혈액과 윤활액 등이 흡수되어 전극의 상태 및 신경자극반응이 점차 안정화된다는 것을 의미한다.^{1,2)} 따라서 수술 이후에 이러한 측정치가 유의하게 증가하는 모습을 보인다면, 전극의 이상 또는 부적절한 신경반응을 예측하여, 향후의 맵핑과 재활에 좀 더 주의를 기울여야 한다.

본 연구에서 인공와우 사용자의 T level은 1년에 걸쳐 매우 안정된 모습을 보였다. 시간에 따른 T level의 변화양상은 여러 논문에서 서로 다르게 기술되는 바,^{7,10,11)} 이번 연구에 있어서는 와우에 기형이 있거나, 수술시 전극의 삽입이 완전하지 않거나, 맵핑시 의사소통이 적절치 않아 소리반응을 제대로 알기 어려운 환자의 경우를 제외하였기에 처음부터 안정된 T level의 결정이 가능하였다고 본다. 이에 반하여 와우 기형이 있거나 언어습득기 전 전동 또는 유아의 경우와 같이 맵핑시 원활한 의사소통이 방해되고 소리자극 반응을 맵핑 상담자와 효과적으로 공유할 수 없는 경우에는 T level을 정확하게 잡기 힘든 경우도 존재한다. 이와 같은 어려운 경우 첫 맵핑에서는 신경반응 원격측정치를 이용하여 T level을 설정하고, 인공와우 사용자가 점차 청각 경험에 많아지면서 작은 소리도 알아듣게 되면 시간이 지날수록 T level이 낮아지고 DR이 넓어지는 양상이 예견된다. 본 연구에서도 T level이 시간에 따라 전 주파수 영역에서 낮아지는 경향을 보여 일부에서는 시간이 흐름에 따라 좀 더 작은 소리도 알아듣는 경우가 있다는 사실이 반영된다고 생각된다.

다. 하지만 이러한 T level의 변화가 통계적으로 유의하지 않으며 대체적으로 계속 안정된 반응 수치 구간을 유지하였다.

이번 연구에서 C level은 첫 맵핑시보다 6개월째 유의하게 상승되는 모습을 보이며, 이에 따라 DR도 유의하게 넓어지는 모습을 보인다. 이는 인공와우를 사용함에 따라 신경반응이 점차 향상되어 처음에는 적응하지 못하던 큰 소리도 차후에는 듣기 좋고 안정된 소리로 적응되는 것이라 생각된다. 이는 인공와우 초기 3개월간 C level이 유의하게 상승한다는 타 논문과 맥락을 같이 하며, 이러한 C level의 상승은 향후 2~3년간 지속적으로 상승한다는 논문 결과도 있어 지속적인 맵핑 재활의 근거가 된다.^{1,2,5,12)}

주파수별로 연구된 T level과 C level은 크게 유의한 차이를 보이지 않았다. 따라서 인공와우의 이득은 전 주파수에 걸쳐 유의하게 적용되며 향상되는 것이라 해석할 수 있다. 특히 첫 6개월간의 전 주파수에 걸친 C level의 향상 및 DR의 확대는 인공와우 수술로 얻어진 가장 큰 청각이득의 변화라 말할 수 있다. 따라서 인공와우수술 후 맵핑과 재활에 있어서 이 부분을 정확하게 측정하여 부족한 부분이 있다면 그 음역대에 걸친 집중적인 재활치료와 맵핑의 재설정이 필요할 수 있다.

본 연구에서 18세 이하의 25명과 19세 이상의 24명으로 나누어서 분석을 해보고, 또한 언어습득기 전 전농 21명과 언어습득기 후 전농 28명으로 나누어서 분석을 시행하여도 안정된 C level, 첫 6개월간의 전 주파수에 걸친 C level의 향상 및 DR의 확대가 동일하게 보였다(data not shown). 다만 일부 언어습득기 전 전농 및 유아의 경우 처음에는 T level이 높게 잡히다가 나중에는 T level이 낮아지면서 DR이 더욱 넓어지는 양상을 보이는데 이러한 경우가 맵핑시 소리자극 반응을 맵핑 상담자가 T level을 정확하게 잡을 수 없는 경우라 하겠다. 따라서 맵핑시 의사소통이 어렵거나 소리자극 반응을 맵핑 상담자와 효과적으로 공유할 수 없는 경우에 환자분석이 이루어지면 T level이 변하면서 점차 낮아진다는 결론이 도출될 수도 있다.^{4~8)}

다른 연구들이 전 주파수대의 T와 C level을 종합하여 분석한 것과는 달리 본 연구는 주파수별로 이를 분석하였으며, 특히 인공와우 이식 초기의 폭발적인 C level 증가의 중요성을 부각시킨 데 의의가 있다. 본 연구는 술 후 1년까지만 분석하였으나, DR은 술 후 5년까지도 증감을 반복하며 변화를 보일 수 있기에 장기간에 걸친 조율은 반드시 지속되어야만 할 것이다.^{13~15)} 본 연구의 결과처럼 인공와우 초기 6개월까지의 기간 동안 전 주파수대역에 걸친 C level의 상승과 안정을 관찰하고 세심한 맵핑과 지속적인 재활치료로 인공와우의 이득을 극대화해야 할 것으로 사료된다.

결론적으로 인공와우 사용자에 있어서 맵핑은 정확한 소리 반응 해석과 소통을 통하여 이루어져야 안정화된 T level을 유

지할 수 있다. 인공와우 첫 6개월간 C level의 지속적인 상승은 DR 확대의 주요 요소이고, 이는 전체 주파수대역에서 동일하게 유의한 이득을 보이는 인공와우 재활 및 맵핑의 가장 중요한 요소이다. 따라서 인공와우 사용자에게 초기 재활치료의 중요성이 강조되어야 하고, 정기적이며 지속적인 맵핑을 시행하는 것이 바람직하며, 사용자와 맵핑청각사 간의 반응공유 및 소통은 이에 필수불가결한 요소가 된다.

REFERENCES

- Mens LH, Oostendorp TF, Hombergen GC, den Broek P. Electrical impedance of the cochlear implant lubricants hyaluronic acid, oxycellulose, and glycerin. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 1997;106(8): 653-6.
- Huang CQ, Tykocinski M, Stathopoulos D, Cowan R. Effects of steroids and lubricants on electrical impedance and tissue response following cochlear implantation. *Cochlear Implants Int* 2007;8(3): 123-47.
- Oh SH, Shin JE, Lee KS. Comparison of neural response telemetry threshold with behavioral response in cochlear implant. *Korean J Otolaryngol-Head Neck Surg* 2006;49(3):274-8.
- Henkin Y, Kaplan-Neeman R, Kronenberg J, Migirov L, Hildesheimer M, Muchnik C. A longitudinal study of electrical stimulation levels and electrode impedance in children using the Clarion cochlear implant. *Acta Otolaryngol* 2006;126(6):581-6.
- Henkin Y, Kaplan-Neeman R, Muchnik C, Kronenberg J, Hildesheimer M. Changes over time in the psycho-electric parameters in children with cochlear implants. *Int J Audiol* 2003;42(5):274-8.
- Shapiro W, Waltzman S. Changes in electrical thresholds over time in young children implanted with the Nucleus cochlear prosthesis. *Ann Otol Rhinol Laryngol Suppl* 1995;166:177-8.
- Hughes ML, Vander Werff KR, Brown CJ, Abbas PJ, Kelsay DM, Teagle HF, et al. A longitudinal study of electrode impedance, the electrically evoked compound action potential, and behavioral measures in nucleus 24 cochlear implant users. *Ear Hear* 2001;22(6):471-86.
- Henkin Y, Kaplan-Neeman R, Muchnik C, Kronenberg J, Hildesheimer M. Changes over time in electrical stimulation levels and electrode impedance values in children using the Nucleus 24M cochlear implant. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol* 2003;67(8):873-80.
- Wolfe J, Schafer EC. Programming Cochlear Implants. Plural Pub.; 2010.
- Kubo T, Iwaki T, Ohkusa M, Doi K, Uno A, Yamamoto K, et al. Auditory plasticity in cochlear implant patients. *Acta Otolaryngol* 1996;116(2):224-7.
- Butts SL, Hodges AV, Dolan-Ash S, Balkany TJ. Changes in stimulation levels over time in nucleus 22 cochlear implant users. *Ann Otol Rhinol Laryngol Suppl* 2000;185:53-6.
- Vargas JL, Sainz M, Roldan C, Alvarez I, de la Torre A. Long-term evolution of the electrical stimulation levels for cochlear implant patients. *Clin Exp Otorhinolaryngol* 2012;5(4):194-200.
- Oh SH, Lee MA, Chung JW, Yoon TH, Lee KS. Long term changes of electrical stimulation levels in children with cochlear implant. *Korean J Otorhinolaryngol-Head Neck Surg* 2008;51(3):217-20.
- Kim SJ, Kim LS, Cho MJ, Rhee KS. Evaluation of speech perception abilities in children with cochlear implants. *Korean J Otolaryngol-Head Neck Surg* 1998;41(11):1391-9.
- Suh MW, Cho EK, Kim BJ, Chang SO, Kim CS, Oh SH. Long term outcomes of early cochlear implantation in Korea. *Clin Exp Otorhinolaryngol* 2009;2(3):120-5.