

MED-EL 인공와우 시스템의 최신 기술

우리난청센터

진 인 숙

ABSTRACT

Recent Technology in MED-EL Cochlear Implant System

In-Sook Jin

Uri Hearing Center, Seoul, Korea

Today's cochlear implant recipients show relatively good performances in speech understanding, especially in quiet listening environments. Particularly, however, other areas such as music appreciation and speech understanding in noise and tonal languages, remain challenged for the cochlear implant industry. To address these challenges, MED-EL has recently worked with leading scientists to develop FineHearing and SmartSystem technologies. These are two groups of innovative technical capabilities suited for greater sound clarity and precision than those from previous ones. The details of current technological aspects on MED-EL system were reviewed in this article.

KEY WORDS : Cochlear implant system · MED-EL.

INTRODUCTION

인공와우는 시술을 통해 청신경에 전기적 자극을 직접 제 공함으로써 손상되거나 상실 된 와우 내 유모세포의 기능을 대행하는 전기적 장치로써 특수보청기의 한 형태라고 할 수 있다. 일반 보청기로 도움이 되지 않는 양측성 고심도의 감각신경성 난청 혹은 농 상태에 이른 난청자를 주 대상으로 한다. 방법은 와우 내 정원창을 거쳐서 고실계 내부에 전극을 삽입하여 소리자극을 받지 못하는 청신경을 전기적 에너지로 직접 자극하는 것이다. 최근까지 인공와우 이식을 받은 난청자의 수는 전 세계적으로 10만명 정도이며, 그 수는 증가 추세에 있다. 또한 최근 인공와우 이식술에 대해 보험이 적용되어 인공와우를 원하는 환자의 수는 더욱이 늘어나고 있다.¹⁾ 세계적으로 여러 가지 모델들이 있지만 본 논문에서는 오스트리아 MED-EL의 최신 기술에 대해 살펴보고자 한다.

1975년 MED-EL의 설립자 Ingeborg와 Erwin Hoc-

hmaire에 의해 Implant가 개발되기 시작하였다.¹¹⁾ 단채널에서 다채널로, 아날로그 방식의 신호에서 디지털 방식으로 다양하게 도입되어 오늘날 MED-EL 인공와우 기술력은 놀라운 속도로 발전하고 있다. 최근에는 PULSARci¹⁰⁰ Cochlear Implant가 새롭게 발표되었다.¹¹⁾

오늘날 대부분의 인공와우 사용자들은 좋은 어음이해도 를 보여주고 있다. 특히 조용한 상황에서는 높은 수행력을 보여준다. 그러나 아직까지 인공와우 기술에서 가장 커다란 도전은 소음 환경에서의 어음이해력과 음악청취력 향상을 위한 것이다. 이를 위한 MED-EL의 최신 기술 동향에 대해 알아보하고자 한다.

METHODS AND RESULTS

Cochlear implant system

PULSARci¹⁰⁰ Cochlear Implant는 10여 년의 연구 결과 21세기 첨단과학이 결집된 의학과 전자공학의 결정체이다. 이전 제품에 적용되었던 풍부한 과학기술에 더해 혁신적인 I¹⁰⁰ 컴퓨터 칩을 적용하여 인공와우 대상자에게 현재뿐만 아니라 미래에서도 최선의 기술을 적용할 수 있는 특별한 기회를 제공한다.

PULSARci¹⁰⁰는 SmartSystemTM과 FineHearingTM을

논문접수일 : 2006년 11월 6일

심사완료일 : 2006년 12월 18일

교신저자 : 진인숙, 110-835 서울 종로5가 70번지 유니온빌딩
우리난청센터

전화 : (033) 248-2210 · 전송 : (033) 256-3420

E-mail : lacvert0228@hanmail.net

지원하도록 설계되었다. MED-EL은 이러한 기술을 통해 이전보다 더 선명하고 세밀한 소리를 제공하도록 하여 음악 청취나 소음 속 어음이해를 향상시킨다.¹⁰⁾

New Generation I¹⁰⁰ electronics

PULSARci¹⁰⁰는 새롭게 개발된 I¹⁰⁰ 컴퓨터 칩을 통해 청신경으로 소리의 정보를 더욱더 정확하게 전달하도록 고안되었다. 인체에 이식되는 인공와우 내부 장치는 미래 기술 발전까지 수용할 수 있어야 한다. PULSARci¹⁰⁰에 적용된 I¹⁰⁰ 컴퓨터 칩은 현재까지 개발된 가장 빠르고 효과적인 어음처리기법을 적용할 수 있을 뿐 아니라 미래에 개발될 혁신 기술의 적용까지 감안하여 설계되었다.

100% On-Chip design

PULSARci¹⁰⁰는 첨단 전자 부품으로 배열된 하나의 마이크로 칩을 사용하여 적은 에너지로 많은 양의 정보를 전달하도록 설계되었다. 초정밀 집적회로인 I¹⁰⁰ 컴퓨터 칩은 이전보다 더 높은 에너지 효율성을 가능하게 한다.

Precision stimulation

PULSARci¹⁰⁰의 전극은 각 채널 당 2개의 접점을 가지고 있어 달팽이관 전체를 정확하게 자극하도록 설계되었다. 각 전극은 초당 50,704 pps의 자극 속도로 청신경을 정확하게 정밀하게 자극할 수 있다.

Power efficient

많은 양의 정보처리는 필연적으로 많은 양의 에너지 소모를 수반한다. 에너지 소모를 최소화한 초정밀 집적회로인 I¹⁰⁰ 컴퓨터 칩은 50,704 pps의 높은 자극 속도에서도 귀 결이형 어음처리기의 경우 평균 3~5일 간의 배터리 수명을 달성하여 사용자의 비용 절감을 제공하는 특징이 있다.

Safe & reliable implant design

인체에 적용되는 제품은 인간 친화적이어야 한다는 것이 MED-EL의 기본 철학이다. PULSARci¹⁰⁰는 오랜 기간의 임상 결과에 따른 신뢰성에 기초한 높은 안전 기준에 따라 설계되었다.

Proven reliability

하우징의 재질은 뼈와 비슷한 강도의 세라믹으로 제작되어 충분한 견고성과 함께 지나친 강도로 인한 인체와의 부조화를 방지한다.¹¹⁾ 또한 4 mm 두께의 PULSARci¹⁰⁰는 현존하는 임플란트 중 가장 얇은 형태의 인공와우이며 무게 또한 가장 가볍다. 초소형 초경량의 제품 설계는 시술

후 인체에 최적의 상태로 유지될 수 있도록 하며 특히 유소아에게 이상적이다.

인체에 최적의 하우징으로 제작된 PULSARci¹⁰⁰는 의료용품에 대해 적용되는 안전성 측정 지표인 Cumulative Survival Rate(CSR)이 99.19%에 불과하다. 2004년 3월부터 2006년 10월까지 유럽과 미국 200명의 PULSARci¹⁰⁰ 사용자를 대상으로 측정하였다. CSR 데이터는 기술적 그리고 사고적인 결함을 포함하여 측정되었으며, ISO 5841-2 : 2000에 의해 인가 받았다(Fig. 1).⁸⁾

Unique implant ID

PULSARci¹⁰⁰는 개별적 임플란트를 확인하는 기능을 가지고 있다. 이를 통해 개인의 임플란트와 어음처리기를 자동적으로 확인하여 다른 사람의 어음처리에 의한 잘못된 프로그램으로부터 보호해준다.

MRI safe without magnet removal

인공와우 사용자의 일생에 있어 MRI 촬영이 요구되는 순간이 있을 수 있다. 그러므로 인공와우를 선택함에 있어 MRI의 촬영가능성은 중요한 요소이다. PULSARci¹⁰⁰는 0.2, 1.0, 1.5 Tesla에서 MRI 촬영이 가능하며 MRI 안전성은 미국의 FDA에 의해 공인되었다.

Future technology

오늘날 인공와우 기술에서 가장 커다란 도전은 소음 환경에서의 어음이해력과 음악청취력 향상을 위한 것이다. 이를 위해 MED-EL은 기존의 기술력에 FineHearing과 Smart-System 기술을 더해 더 명료하고 세밀한 소리를 제공한다.

SmartSystem

정상적 소리전달은 달팽이관의 여러 영역을 동시에 자극하여 이루어지며 이러한 자극방식을 동시적 또는 병렬식 자극이라고 한다. 그러나 지금까지의 인공와우는 전극간의 간

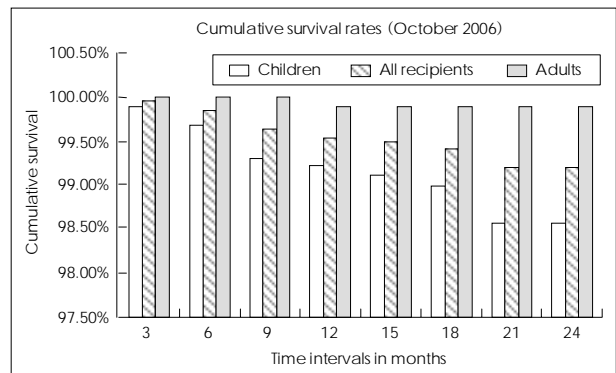


Fig. 1. Cumulative survival rates.

섭현상으로 인해 동시자극방식을 효과적으로 실현할 수 없었다. 달팽이관 내 전극은 계속해서 자극되어 전기장이 발생하게 된다. 그러나 몇몇의 전극이 동시에 자극될 때 전기장이 중첩되어 채널간섭현상이 발생하게 된다. 이러한 현상은 전달되는 소리의 질을 떨어뜨리며, 특히 음악청취와 소음 속 어음이해도 저하를 초래한다.

PULSARci¹⁰⁰는 최초로 채널간섭현상 없이 동시적 자극이 가능한 Intelligent Parallel Stimulation(IPS)을 고안하였다. IPS는 Channel Interaction Compensation과 Sign-Correlated Stimulation을 통해 자동적으로 전기장의 중첩현상을 조절한다.⁷⁾

Channel Inter Interaction Compensation

Channel Interaction Compensation(CIC)는 채널간섭현상을 효과적으로 다루기 위해 Sign-Correlated Parallel Stimulation(SCS)과 조합하여 어음을 처리하는 알고리즘이다. CIC는 채널간섭현상을 자동적으로 감소시키고 실시

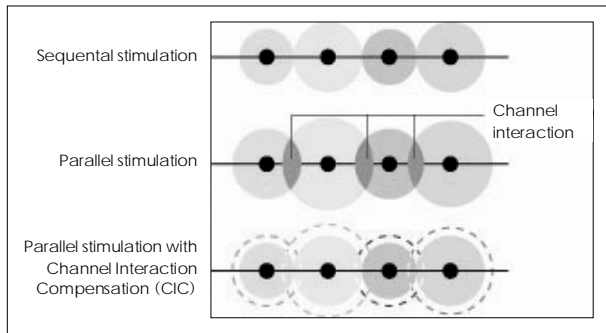


Fig. 2. Channel Interaction Compensation (CIC).

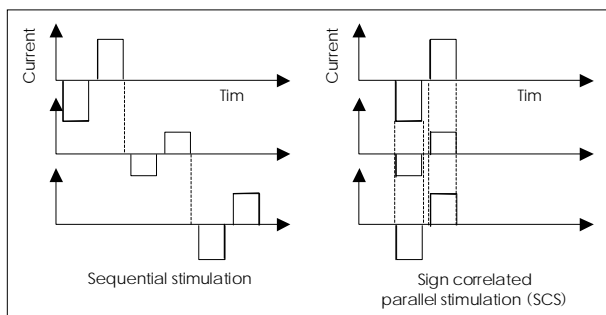


Fig. 3. Sign-Correlated Stimulation (SCS).

간 전기적 흐름을 정확하게 조절한다(Fig. 2).

Sign-Correlated Stimulation

Sign-Correlated Stimulation은 몇몇의 전극이 병렬적으로 자극되는 것을 말한다. 이때 펄스는 같은 극성을 가지고 있고, 시작과 끝이 동시에 이루어진다.

각 펄스의 시작과 끝의 시간이 불일치를 이룬다면 “current tearing”을 야기하고, 채널간섭현상을 조절하기 어려워진다. MED-EL의 Sign-Correlated Stimulation technology는 여러 채널에서 동시에 발생하는 각 전기적 펄스 시작의 time-lock을 고안하였다. Sign-Correlated Stimulation은 reference electrode 위의 병렬적 흐름에서 모든 전극의 가중된 자극 전류를 확보한다. 소위 말하는 monopolar stimulation은 채널간섭현상을 조절하는 동시에 병렬적 자극을 허용하는 에너지 효율성이 가장 좋은 방법이다(Fig. 3).

Triphasic pulses

기존의 인공와우 시스템은 Biphasic electrical pulses를 사용하여 전기적 자극을 제공하였다. 그 결과 각 자극 펄스에 따라 달팽이관에 잔여 전기장이 발생하게 된다. 이는 채널간섭현상에 영향을 주게 된다. PULSARci¹⁰⁰는 Triphasic pulses를 사용하여 잔여 전기장을 줄여주고 채널간섭현상을 최소화 시킨다(Fig. 4).

FineHearing

FineHearing technology는 Fine structure 또는 Fine frequency information이라고 알려진 기술로, 미세한 소리의 제공에 초점을 두었다. 소리의 신호는 Envelope과 Fine structure 두 가지 구성요소로 전달된다. Envelope 단서는 조용한 상황과 어느 정도 소음이 있는 상황에서 CI 사용자에게 말소리 이해를 위한 충분한 정보를 제공한다. 그러나 소음 상황에서 말소리 이해나 음악감상은 fine structure에 포함된 더욱더 정교한 pitch와 세부적인 timing을 필요로 한다. FineHearing은 CI 사용자들에게 더욱더 향상된 소리의 정보를 제공하는 것이다. 고주파수는 tonotopicity에

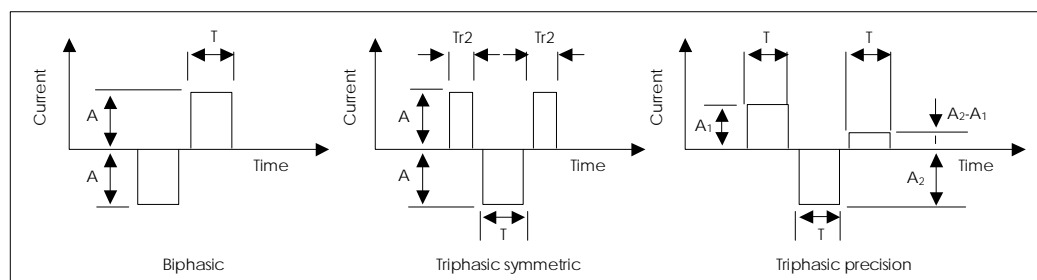


Fig. 4. Triphasic pulses.

의해 부호화되는 반면 저주파수는 tonotopicity와 periodicity에 의해 부호화 된다. 즉, 저주파수는 spatially를 통해 고주파수는 spatially와 temporally를 통해 부호화 되는 것이다.⁷⁾¹⁰⁾

Temporal fine frequency coding

Channel Specific Stimulation으로 알려져 있는 temporal coding은 MED-EL의 독특한 컨셉으로 음파의 phase(timing)로부터 얻어진 단서를 사용하여 빠르게 변화하는 신호의 세부적 주파수 정보를 표현하도록 한다. 이 컨셉은 자연스러운 소리 전달의 phase-locking과 흡사하다.

Spatial fine frequency coding

MED-EL의 FineHearing은 전극 간의 추가적인 pitch information을 제공하고 그에 더해 fine structure information을 제공하여 principle of tonotopicity와 흡사하도록 고안되었다. 이는 중간적 pitch를 생산하는 순차적 자극 방식 또는 가상 채널을 생산하는 병렬적 자극방식 어느 것을 통해서도 행해질 수 있다.

Expanded frequency range

소리의 미세한 정보 제공에서 또 다른 중요한 요소는 넓은 주파수 범위의 사용이다. PULSARci¹⁰⁰는 기존의 200~8,500 Hz에 비해 70~8,500 Hz로 저주파수 범위를 확장하였다. 더 넓은 주파수 범위는 음악 감상과 어음이해도를 개선시키며, 특히 성조언어에서는 더욱 중요한 요소로 작용한다.

Advanced electrode design

PULSARci¹⁰⁰는 섬세한 내이 구조물을 최대한 보호하기 위해 부드럽고 유연한 형태로 설계되었다. 또한 다양한 전극을 통해 개인의 달팽이관 상태나 잔존청력에 따라 적절하게 선택할 수 있다.

Soft and flexible electrode

가늘고 유연한 구조로 설계되어 시술과정이나 시술 후에도 달팽이관에 대한 예기치 않은 부담을 최소화하며, 달팽이관의 섬세한 조직을 안전하게 보호한다.

Deep insertion

달팽이관은 위치에 따라 담당하는 주파수 대역이 달라진다. 달팽이관의 기저막은 고막에서 가까운 쪽일수록 고음에 잘 반응하고 먼 쪽일수록 저음에 잘 반응한다는 것이 알려져 있다. 또한 이 기저막 상에 위치한 유모세포와 이와 연

결된 청신경 세포들이 음의 고저 주파수 순서에 따라 비교적 규칙적으로 분포되어 있다.³⁾ 따라서 달팽이관에 삽입되는 인공와우의 전극은 달팽이관 전체에 분포된 청신경 전부를 활용할 수 있을 만큼 충분히 길어야 한다.

PULSARci¹⁰⁰의 전극은 달팽이관 전체를 활용할 수 있도록 충분히 길어 전 주파수 대역의 소리를 조화롭게 청취할 수 있으며 보다 더 자연음에 가까운 소리를 제공한다.¹⁾²⁾

Large interchannel

임상연구결과 달팽이관에 삽입된 전극을 통해 청신경을 자극할 경우, 인접한 전극에서 발생하는 전기장이 중첩되어 발생하는 간섭현상은 음성정보를 왜곡하거나 어음의 명료도를 떨어뜨리는 것으로 밝혀졌다. PULSARci¹⁰⁰는 채널간섭현상을 최소화 할 수 있도록 전극 간의 간격을 충분히 넓게 배치하여 어음명료도에서 탁월한 효과를 보장한다.

Wide variety of electrodes

Standard electrode array

Standard Electrode Array는 가장 기본적인 형태의 전극으로, 12쌍의 접점으로 이루어져 있다. 2.4 mm의 넓은 전극 간의 간격을 가지고 있으며 약 31 mm의 깊은 삽입을 통해 달팽이관 전체를 활용할 수 있다.

Compressed electrode array

달팽이관의 부분적 골화나 기형을 위해 고안된 형태의 전극이다. 12쌍의 접점이 1.1 mm의 좁은 전극 배열로 이루어져 있다.

Split electrode array

달팽이관의 심한 골화를 위해 고안된 형태의 전극이다. Split Electrode Array는 전극이 두 개로 나누어져 5쌍의 접점과 7쌍의 접점으로 이루어져 있다. 두 개의 전극을 달팽이관의 첨단부와 기저부에 부분적으로 삽입한다.

Medium electrode array

Medium Electrode Array는 인공와우와 보청기의 결합 형태인 EAS 시스템을 위해 고안되었다. 12쌍의 접점이 1.9 mm로 짧게 배열되어있어 고주파수는 전기적인 자극을 통해, 저주파수는 음향학적인 자극을 통해 소리를 전달하도록 한다.

FLEXsoft electrode array

Standard Electrode Array와 비슷한 FLEXsoft Elec-

trode Array는 달팽이관의 침단부까지 깊은 삽입이 가능하며 달팽이관 전체를 활용할 수 있다. 이 전극은 더욱 유연한 구조로 이루어져 적은 힘으로도 삽입이 가능하다.

FLEXeas electrode array

FLEXeas Electrode Array는 Standard Electrode Array를 통해 침단부까지 깊은 삽입이 불가능 한 경우 사용하도록 고안되었다. 이 전극은 더욱 유연한 구조로 이루어져 적은 힘으로도 삽입이 가능하다.

Auditory Brainstem Implant(ABI)

Auditory Brainstem Implant는 전형적으로 Neurofibromatosis Type II (NF2)로 인해 청신경의 이상을 가지고 있는 환자에게 이식되는 임플란트 형태이다.

Comprehensive diagnostic toolkit

PULSARci¹⁰⁰는 임플란트와 청신경 사이의 상호작용을 모니터링하고 임플란트의 기능 평가한다.

Telemetry

임플란트와 전극의 기능을 평가하며, 각 전극의 임피던스와 활동전위를 측정한다.

Auditory Nerve Response Telemetry(ART)

이 시스템을 이용하여, 인공와우의 전기적 자극을 통한 청신경의 반응을 확인할 수 있다. Triphasic precision pulses를 통해 artifact를 줄여 정확한 반응을 측정하도록 한다 (Fig. 5).

MED-EL and research

MED-EL Medical Electronics에 의해 새롭게 개발된

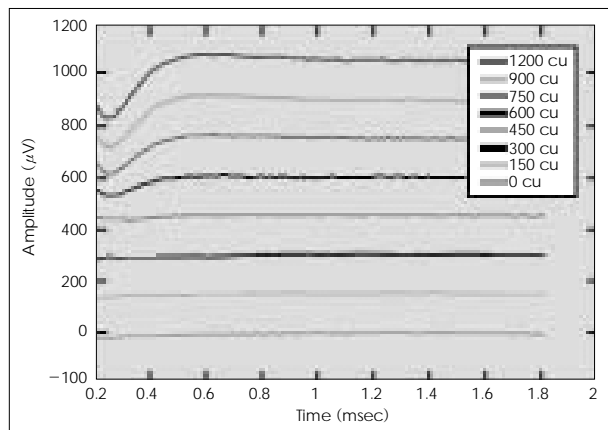


Fig. 5. Auditory nerve response telemetry.

PULSARci¹⁰⁰는 기존의 COMBI 40+와 비교하여 빠른 자극속도, 병렬적 자극방식, Triphasic pulses 등을 제공한다. 기존의 COMBI 40+는 12채널의 임플란트로, 모노폴라 방식을 통해 자극을 전달하였다.¹²⁾ COMBI 40+의 효과적인 어음인지에 대해 많은 연구결과가 보고되었다.²⁾⁹⁾ 심지어 15 dB의 신호대 잡음비에서도 높은 어음인지력이 보고되었다.³⁾ 초기 연구결과에 따르면 COMBI 40+ 임플란트 수술 후 TEMPO+ BTE speech processor를 착용했을 때, 이전의 박스형 CIS PRO+ speech processor와 비교하여 단음절 인지가 개선되었음이 보고되었다.⁵⁾

PULSARci¹⁰⁰는 TEMPO+ speech processor와 호환이 가능하며 CIS+ 어음처리 기법을 통해 신호를 처리한다. 또한 새롭게 준비될 어음처리기의 호환까지 고려하여 설계되었다. 이러한 새로운 형태의 PULSARci¹⁰⁰는 조용한 상황 뿐 아니라 소음 속 상황에서의 어음이해도 및 음악청취력을 향상시킬 것이다.

이러한 PULSARci¹⁰⁰의 어음이해도 및 음악청취력 향상을 통한 소리의 질을 객관적으로 평가하기 위해 다음과 같은 연구가 시행되었다.

PULSARci¹⁰⁰를 통해 시술된 남자 16명, 여자 27명 총 43명을 대상으로 실시되었다. 이 중 6명은 양이 착용자이나 이 연구에서는 한쪽 귀를 통해서만 어음이해도를 평가하였다. 대상자들의 연령은 22~81세로 평균 52세이며, 난청 기간은 5~60년으로 평균 29년이다. 수술 전 보청기 착용 후 청력을 평가하여 기초로 하였다. 수술 후 초기 fitting, 그 후 1, 3, 6, 12개월을 주기로 평가하였다. 먼저 조용한 상황에서 70 dB의 단음절과 문장 검사를 실시하였으며 70, 65, 60, 55 dB의 소음상황에서 0, 5, 10, 15 dB의 신호대 잡음비를 기준으로 70 dB의 문장 검사를 실시하였다. 또한 음악청취력 향상을 평가하기 위해 수술 전, 수술 후 6, 12개월을 주기로 Munich Music (MuMu) 설문조사를 실시하였으며, 초기 fitting 후 1, 3, 6, 12개월을 주기로 음질에 관한 설문조사를 실시하였다.¹¹⁾ 그 결과는 다음과 같다.

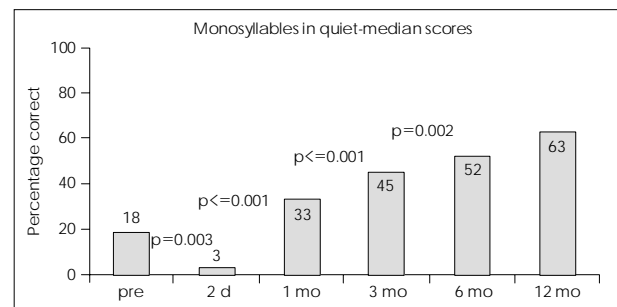


Fig. 6. Monosyllables in quiet.

Monosyllables

조용한 상황에서 Monosyllables test는 시간이 지남에 따라 매우 큰 향상을 보였다($p < 0.001$). 수술 전 18%의 결과가 초기 fitting 12개월 후 최대 63%로 크게 향상되었다(Fig. 6).

Sentences in quiet

조용한 상황에서 Sentence test 또한 시간이 지남에 따라 큰 향상을 보였다($p < 0.001$). 수술 전 1%의 결과가 초기 fitting 12개월 후 89%로 향상되었다(Fig. 7).

Sentences in noise

소음 상황에서 Sentence test는 15, 10, 5, 0 dB의 신호대 잡음비에서 실시되었다. 시간이 지남에 따라 15, 10, 5 dB에서 크게 향상되었으나, 0 dB의 신호대 잡음비에서는 시간의 흐름과 관계없이 0%의 결과를 나타내었다(Fig. 8).

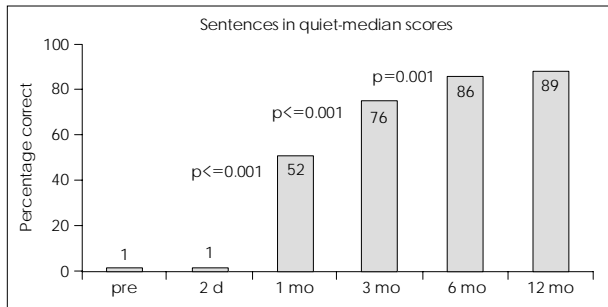


Fig. 7. Sentences in quiet.

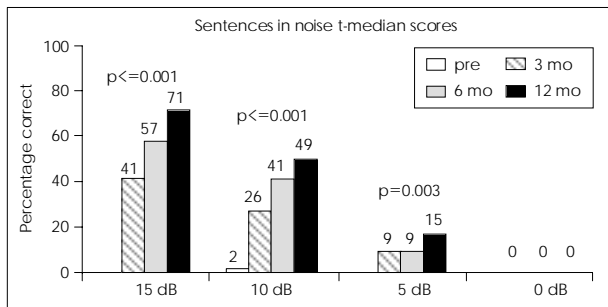


Fig. 8. Sentences in noise.

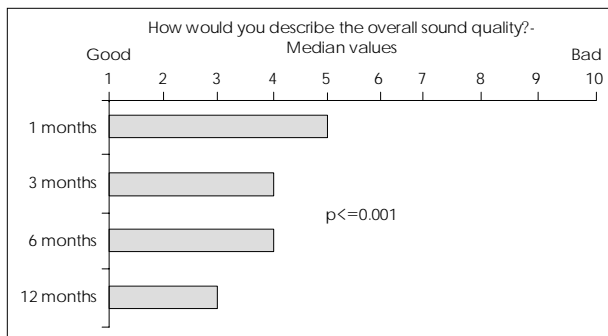


Fig. 9. Sound quality questionnaire.

Sound quality questionnaire

음질에 관한 설문조사의 내용은 다음과 같다.

- 1) 목소리의 음질
- 2) 다양한 장소에서의 음질
- 3) 전반적 소리의 강도와 음질

모든 상황에서 전반적으로 음질이 향상되었다(Fig. 9).

Music questionnaire (MuMu)

인공와우 수술 전과 후의 음악청취 성향에 대해 설문조사

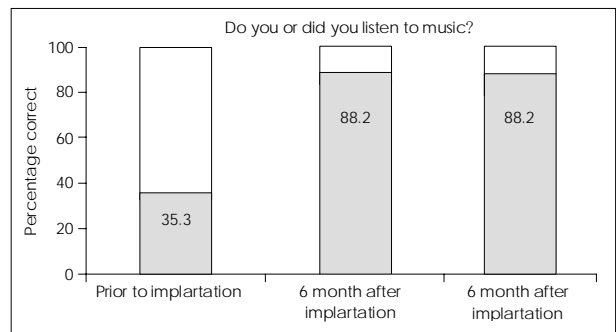


Fig. 10. Music questionnaire.

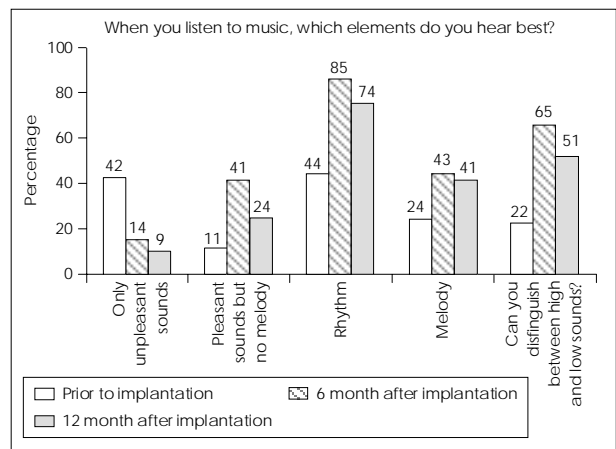


Fig. 11. Music questionnaire.

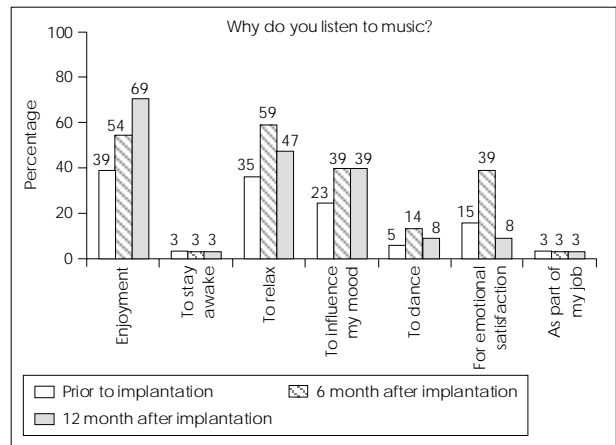


Fig. 12. Music questionnaire.

를 실시하였다. 수술전과 비교했을 때, 수술 후 대다수 사람들의 음악청취력이 향상되었다(Figs. 10-12).

연구 결과, PULSARci를 통해 인공와우 수술 후 시간이 지남에 따라 조용한 상황에서의 단음절 및 문장의 이해도, 소음 상황(SNR 15, 10, 5 dB SNR)에서의 문장 이해도가 크게 향상되었으며, 수술 후 1~12개월 동안 목소리와 장소에 따른 음질이 크게 향상되었다. 또한, 음악 청취력에 있어 대다수의 사람들이 수술 후 향상되었음을 보고하였다.

DISCUSSIONS AND CONCLUSIONS

최근까지 인공와우 이식을 받은 난청자의 수는 전 세계적으로 10만 명 정도에 이르며, 성인에서 소아에 이르기까지 증가 추세에 있다. 최근 인공와우 이식술에 대해 보험이 적용되어 인공와우를 원하는 환자의 수는 더욱이 늘어나고 있다. 이러한 흐름에 맞춰 인공와우의 기술력도 빠르게 발전하고 있다.

지금까지 MED-EL cochlear implant system의 최신 동향에 대해 살펴보았다. 인체에 적용되는 제품은 인간 친화적이어야 한다는 것이 MED-EL의 철학이다. 우수한 안전성과 신뢰성을 바탕으로 현재 세계 70개국 이상에서 사용되고 있다. MED-EL은 인공와우 업계에서 쾌속성장을 거듭해 온 회사로서 혁신적인 기술, 제품 성능 및 탁월한 서비스를 제공할 것이다.

중심 단어 : 인공와우 시스템 · MED-EL.

REFERENCES

1. Dowell RC, Dawson PW, Dettman SJ, Sherpherd RK, et al. Multichannel cochlear implantation in children: a summary of current work at the University of Melbourne. *Am J Otol.* 1991;12:137-143.
2. Gstottner W, et al. Sprachdiskrimination bei postlingual erlaubten Cochlear-implant Patienten. *Wien Klin Wochenschr.* 2000;112 (11) :487-491.
3. Hamzavi J, et al. Hearing performance in noise of cochlear implant patients versus severely-profoundly hearing-impaired patients with hearing aids. *Audiology.* 2001;40(1) :26-31
4. Hamzavi J, Arnoldner C. Effect of deep insertion of the cochlear implant electrode array on pitch estimation and speech perception. *Acta Oto Laryngologica.* 2006;126:1182-1187.
5. Helms J, et al. comparison of the TEMPO+ ear-level speech processor and the CIS PRO+ body-worn processor in adult MED-EL cochlear implant users. *ORL J Otorhinolaryngol Relat spec.* 2001;63 (1) :31-40.
6. Hochmair I, Arnold W, Nopp P, Jolly C, Muller J, Roland P. Deep electrode insertion in cochlear implants : apical morphology, electrodes and speech perception results. *Acta Otolaryngol.* 2003;123:612-617.
7. MED-EL Technical Update. Newsletter for CI Professionals;2005.
8. MED-EL Technical Update. Newsletter for CI Professionals;2007.
9. Ovchinnikov LM, Borodin AA. Cochlear implantation with implant COMBI 40+ produced by MED-EL. *Vestn Otorinolatingol.* 2002;1: 33-36.
10. Wilson BS, Sun X, Schatzer R, Wolford RD. Representation of fine structure or fine frequency information with cochlear implants. *International Congress Series;2004.* p.3-6.
11. www.medel.com
12. Zierhofer C, Hochmair IJ, Hochmair ES. The advanced COMBI 40+ cochlear implant. *Am J Otol.* 1997;18 (suppl 6) :537-538.