

## Auditory Rehabilitation – Cochlear Implantation

Jun Ho Lee

Department of Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery, Seoul National University Hospital, Seoul, Korea

The first cochlear implant was approved about 30 years ago. It just provided a limited sensation of sound and facilitated lip-reading based communication. Recent advances in the cochlear implant system and surgical techniques have enabled the majority of recipients to communicate orally without visual cues. The cochlear implantation has become a standard means of auditory rehabilitation for profound sensorineural deafness. To evaluate candidacy for cochlear implantation, an objective and behavioural audiological test, imaging and functional studies to identify the status of the cochlea and the auditory nerve, and evaluation of additional medical conditions are needed. Although the cochlear implantation can restore auditory function, sound perceived with the cochlear implant is different from normal hearing. Therefore postoperative rehabilitation is crucial for good speech performance. Nowadays, the indications for cochlear implantation have been extended. Hearing loss patients with residual low-frequency hearing could be candidates for cochlear implantation. Therefore, residual hearing preservation during cochlear implantation has been an important issue. In addition, bilateral cochlear implantation, cochlear implantation for single-sided deafness and fully implantable cochlear implant systems have been receiving more attention. The purpose of this article is to review current knowledge concerning the cochlear implantation.

**Key Words:** Cochlear Implants; Deafness; Rehabilitation; Hearing Loss, Sensorineural

Correspondence to: Jun Ho Lee  
우110-744, 서울시 종로구 대학로 101,  
서울대학교병원 이비인후과  
Department of Otorhinolaryngology-Head  
and Neck Surgery, Seoul National  
University Hospital, 101 Daehak-ro,  
Jongno-gu, Seoul 110-744, Korea  
Tel: +82-2-2072-2445  
Fax: +82-2-745-2387  
E-mail: junlee@snu.ac.kr

Received 3 March 2015  
Revised 7 March 2015  
Accepted 16 March 2015

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

### 서 론

감각신경성 난청은 흔히 발생하는 감각기관 질환으로, 500명의 신생아 중 약 1명의 신생아에서 발생한다[1-3]. 난청의 유병률은 나이가 증가함에 따라 더 증가하여 65세 이상에서는 50% 이상의 유병률을 보이고, 80세 이상에서는 95%의 유병률을 보인다[4-6]. 경도 및 중등도의 감각신경성 난청의 경우 보청기를 통해 이득을 얻을 수 있으나, 고도 난청의 경우 보청기를 통해서도 큰 이득을 얻을 수 없고, 와우이식을 통해 청각재활을 할 수 있다. 인공와우는 소리 자극을 전기 자극으로 바꾸어 유모세포를 거치지 않고, 나선신경절세

포나 말초 청신경을 직접 자극하여 대뇌 청각중추에서 소리를 인지하도록 한다. 지난 10년간 와우이식은 혁신적인 발전을 이룩하여 많은 난청 환자들의 청각 재활 수단으로 사용되고 있다. 여기에서는 와우이식의 전반에 대해 살펴보고, 최근 이슈가 되고 있는 양측 와우이식, 와우이식술 중 잔존 청력 보존에 대해 대해 기술하였다.

### 와우이식의 역사

인공와우는 1790년 이탈리아의 Alessandro Volta가 자신의 귀에 전극을 삽입하고, 전기 자극을 가한 후 소리를 느낄 수 있음을 발견

함으로써 그 역사가 시작되었다. 이후 1957년 프랑스의 Djournio와 Eyric는 청력이 완전히 소실된 환자의 내이에 전극을 삽입하고 전기 자극을 주어 전농 환자가 음을 감지한 것을 보고하였다[7]. 이후 본격적인 인공와우 개발이 진행되어 미국의 House는 1961년 단일 채널을 이용한 와우이식수술을 처음으로 시행하였고, 1972년에는 단일 채널 인공와우에 사용할 수 있는 언어처리기를 개발하였다[8]. 이후 인공와우 기술은 더 발전하여 1978년 호주의 Clark는 10개 채널을 가진 인공와우를 이식하여 전극의 위치에 따라 인지되는 음의 높이가 달라짐을 보고하였다[9]. 그 후 1984년에는 House 3M의 단채널 인공와우, 1985년에는 22채널 인공와우, 그리고 1998년에는 Nucleus 24채널 인공와우가 FDA로부터 인가를 받았다.

## 인공와우의 구성 및 작동

인공와우는 크게 머리에 부착하는 외부 장치와 머리 속에 이식되는 내부 장치로 이루어져 있다. 외부 장치는 소리를 처음 받아들이는 송화기(microphone), 소리를 전기신호로 바꾸어 내부 장치로 전달하는 어음처리기(speech processor)로 구성되어 있다. 내부 장치는 외부 장치에서 보내는 전기 신호를 받아들여 와우에 삽입된 전극으로 신호를 보내는 수신기/자극기(receiver/stimulator), 전기 신호를 받아 와우의 나선신경절을 직접 자극하는 전극(electrode)으로 이루어져 있다. 따라서 인공와우는 소리 자극을 전기 자극으로 변환시켜 나선신경절을 자극하고 이는 청신경을 통해 뇌로 전달되어 소리로 인지된다. 따라서 인공와우는 정상 와우를 대신하여 소리를 증폭하고 와우 내 적절한 위치에서 전기신호를 발생시킴으로써 다양한 세기와 주파수의 소리를 인지할 수 있도록 한다. 하지만 이렇게 인지되는 소리는 정상 와우를 통해 전달되는 소리에 비해 한계를 가지고 있어, 소리의 세기와 주파수를 인지하는 데 있어 제약점이 있다. 이를 극복하기 위해 여러 가지 sound processing strategy가 사용되고 있다.

## 와우이식 대상자

양측 청력이 70-90 dB 이상의 고도 감각신경성 난청 환자는 와우이식의 대상자가 될 수 있으며, 와우이식을 시행할 수 있는 병원에서 검사를 받아야 한다. 검사에는 객관적 청력 검사, 주관적 청력 검사, 내이, 청각 신경에 대한 영상 검사 그리고 와우이식에 문제가 없는지에 대한 내과적, 신경과적, 정신과적 검사가 포함된다. 와우기원의 양측 감각신경성 난청으로 와우이식에 관한 청력 기준을 만족하며 기존의 보청기로는 만족할만한 청각 재활을 할 수 없는 경우 와우이식의 대상자가 된다. 와우이식의 결과에 대한 현실적인 기대를 가지게 하고, 수술 후 원활한 언어 치료를 하기 위해서는 수술 전 검사와 충분한 상담이 필요하다. 와우이식 대상자에 대한 수

술 전 검사와 상담은 이비인후과 의사뿐만 아니라 청각사, 언어치료사, 사회사업사, 언어병리학자, 교육전문가가 팀을 이루어 진행되어야 한다. 와우이식의 목표는 와우이식 전에 사용하던 기존의 보청기를 사용할 때보다 인공와우를 통해 언어를 더 잘 이해하고 의사소통이 가능하도록 하는 것이다[10].

인공와우 시스템이 발전하고 와우이식의 결과가 좋아짐에 따라 와우이식 대상자의 기준도 넓어지고 있다. 최근에는 저음부(1 kHz 이하)에 잔존 청력이 있는 난청 환자에게도 electro-acoustical stimulation (EAS)라는 와우 이식이 시행되고 있다. EAS는 고음부의 청력 저하는 와우이식을 통해 청력을 복구하고, 잔존 청력이 있는 저음부는 기존의 보청기를 이용하는 시스템이다. 이 외에도 2008년부터 일측에 정상 청력을 가지고 있고 일측만 전농인 환자에게도 와우이식술이 시행되고 있으며, 초기 결과는 뇌가 양측 귀로부터의 정보를 효과적으로 통합할 수 있음을 보였다[11].

## 수술 전 평가

와우이식 전 평가는 환자의 난청 정도와 의학적 상태뿐만 아니라 사회/경제적 상태, 교육, 가족/환경에 대한 여러가지 요소를 평가하여야 한다.

### 1. 청력검사

청력검사는 주관적 청력검사와 객관적 청력검사로 나뉘어진다. 대표적인 주관적 청력검사는 순음청력검사이며, 환자가 보청기를 착용하는 경우에는 보청기를 착용한 상태에서 검사도 시행하여야 한다. 환자가 소아인 경우는 행동반응검사(behavioral audiometry)나 시각강화 청력검사(visual reinforcement audiometry)를 시행하게 된다. 객관적 청력검사로는 청성뇌간유발반응검사(auditory brainstem response audiometry)나 청성지속반응검사(auditory steady state response)를 시행하게 된다. 이 외에도 와우이식 후 결과를 예측을 위해 전기자극 청성뇌간유발반응검사(electrically evoked auditory brainstem response audiometry)나 와우감각검사(promontory stimulation test)를 시행하기도 한다.

### 2. 언어 평가

언어 평가는 환자의 소리 자극에 대한 인지 능력을 측정하는 검사로, 와우이식 전 환자의 상태를 평가하고 와우이식 후 청각 재활의 기초자료로 이용하게 된다. 언어 평가 방법은 여러 개의 보기가 주어진 상태에서 진행되는 말소리 변별능력검사(closed set speech perception test)와 보기가 주어지지 않은 상태에서 시행되는 말소리 이해능력검사(open set speech perception test)가 있다. 언어 평가는 와우이식 후에도 환자의 언어 능력 발달을 평가하기 위해 정기적으로 시행되어야 한다.

### 3. 영상의학적 검사

와우이식 전 시행하는 영상검사로서는 측두골 고해상도 단층촬영과 자기공명영상이다. 고해상도 단층촬영은 와우이식 수술을 시행함에 있어 필요한 기본적인 해부학적 정보를 제공해주고, 난청을 유발한 내이 기형이 있는지 확인할 수 있다. 자기공명영상은 청신경을 비롯한 청각전도로에 대한 해부학적인 정보를 제공해 준다.

### 수술 및 합병증

와우이식은 대개 전신마취하에서 진행되며, 피부절개의 경우 과거에는 역 U형이나 C형의 절개를 많이 사용했으나 최근에는 귀 뒤 1 cm 정도에 최소한의 피부절개만 가하는 경우가 점점 많아지고 있다. 피부 절개 후 폐쇄형 유양동절제술을 시행하고 수용/자극기의 밑부분이 위치할 공간을 만든다. 이후 안면신경과 고삭신경 사이의 공간인 안면신경와(facial recess)를 개방하여 정원창에 이르는 통로를 확보한다. 과거에는 정원창을 노출시킨 후 정원창의 전하방에 구멍을 뚫는 와우개창술(cochleostomy)을 시행하고 이 구멍을 통해 인공와우 전극을 삽입하였다. 하지만 최근에는 잔존 청력 보존을 위해 와우개창술을 시행하지 않고 정원창으로 전극을 직접 삽입하는 방법이 주로 이용되고 있다. 이 후 절개선을 봉합하고 수술을 마친다. 수술 중 기기의 이상 유무를 확인하기 위하여 임피던스 검사, electrical stapedial reflex test (ESRT), electrical compound action potential (ECAP) 검사 등을 하기도 한다.

와우이식 후 발생하는 합병증은 수술적 치료가 필요한 중한 합병증(major complication)과 보존적 치료만 필요한 경한 합병증(minor complication)으로 분류된다[12]. 중한 합병증으로는 기기 고장, 수술 후 감염 등이 있으며 발생률은 2.3%에서 6.6% 정도로 보고되어 있다[13-19]. 경한 합병증으로는 어지러움증, 이명, 미각 변화 등이 있으며 발생률은 10.3%에서 18% 정도로 보고되어 있다[14,15,20,21].

### 인공와우 조율(Mapping) 및 언어재활치료

수술 후 5주부터 인공와우를 사용하게 되는데 최상의 소리를 들을 수 있도록 언어처리의 프로그램을 조절하여야 한다. 소리자극을 감지할 수 있는 가장 작은 소리자극의 크기인 최소가청역치(T-level)와 불쾌감을 느끼지 않는 최대 자극 강도인 최적가청역치(C-level)를 조절하게 되는데 이를 조율(mapping)이라고 한다. 조율은 한 번 시행하는 것으로 끝나지 않고 정기적으로 반복하여 최소가청역치와 최적가청역치를 재조정하여야 한다.

조율과 더불어 와우이식 후에 정기적인 언어재활치료를 시행하여야 한다. 청각의 회복은 인공와우 장치이식만으로 끝나는 것이 아니라, 장치 이식 후 3-4년간의 반복적인 언어재활치료를 통해서만 가능하다. 언어재활치료는 다양한 방법을 이용하여 말소리에

대한 인지능력을 향상시키고, 이를 통해 인공와우를 이용한 듣기 능력 및 구어 의사소통능력을 최대화하고자 한다. 언어재활치료를 통하지 않을 경우는 청각재활의 효과가 미미하며 인공와우 이식 후 청각 재활훈련의 필요성은 많은 연구에서 입증되어 있다[22-26].

### 와우이식의 발전

#### 1. Electroacoustic Stimulation과 잔존 청력 보존

저음역에는 잔존 청력이 있지만 고음역에는 고도 난청을 가진 환자의 경우, 기존의 보청기로 충분한 청각재활을 얻을 수 없음에도 불구하고 와우이식 수술 중 발생하게 되는 저주파수대 청력소실로 인해 일반적인 와우이식의 대상이 되지 못했다[27-29]. 하지만 최근 들어 잔존 청력을 보존하며 와우이식을 시행하여, 잔존 청력이 있는 저음부는 보청기를 이용하여 잔존 청력을 사용하고, 잔존 청력이 없는 주파수대는 전극을 통한 전기 자극으로 청력을 이용하려는 EAS가 개발되어 시행되고 있다. 따라서 EAS를 시행함에 있어 잔존 청력을 보존하는 것이 중요한데, 와우이식에서 사용하는 일반적인 길이와 두께의 전극을 기존의 방식으로 와우에 삽입하게 되면 와우의 기저막과 유모 세포가 파괴되어 잔존 청력을 보존할 수 없음이 알려져 있다[30,31]. 그래서 기존 인공와우의 전극보다 짧은 전극이 개발되어 EAS에 이용되고 있다.

EAS에 사용되는 전극의 최적 길이에 관해서는 아직 논란이 있다. 전극의 길이가 길수록 전극 삽입 시 저음부의 잔존 청력이 손상될 가능성이 높아지지만, 긴 전극을 사용할 경우 저음부의 잔존청력이 손상되더라도 EAS를 기존의 인공와우처럼 사용하여 잔존청력을 대체할 수 있다. 하지만 짧은 전극을 사용할 경우 전극이 와우의 기저부에만 닿아 고음부에만 전기 자극을 가할 수 있고 와우의 저음부대에 전기자극을 가할 수 없다. 따라서 전극 삽입 시 저음부 잔존 청력이 손상될 경우 저음부 청력을 복구할 방법이 없다. 하지만 짧은 전극을 사용한 EAS에서 전기 자극만을 이용하여 소리들을 때도 자음 인식에 있어서는 긴 전극을 사용한 경우와 비슷한 결과를 얻었다는 연구가 있었다[23]. 이에 반해 짧은 전극을 사용하였을 때는 소리 인지가 좋아지기까지 12개월 이상이 걸렸고, 긴 전극을 사용하였을 경우 6-12개월 정도의 시간이 걸렸다는 연구도 있었다[32,33].

긴 전극 사용을 주장하는 또 다른 근거는 전극 삽입 당시는 저음부의 잔존 청력이 보존되었더라도 이후에 저음부 청력이 서서히 저하될 수 있기 때문이다. 하지만 Yao 등은 짧은 전극을 사용하였을 경우 저음부 청력 저하가 1년에 1.05 dB에 불과함을 보고하여 처음 전극 삽입 당시 저음부 청력이 보존된다면 저음부 청력 저하는 심하지 않을 것이라고 예측하였다[34]. EAS에 사용되는 전극의 최적 길이에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

## 2. 양측 와우이식

청각재활에 있어 양측 와우이식이 일측 와우이식보다 우수한 결과를 얻을 수 있음이 알려져 있다[35]. 특히 양측 인공와우를 시행하였을 경우 소리의 위치 파악 능력이 향상됨은 여러 연구에서 일관되게 입증되었다[36-39]. 그뿐만 아니라 언어 발달에 있어서도 양측 인공와우가 도움이 됨이 알려졌고[40,41], 소음 상황에서의 언어인지도 향상됨이 보고되었다[38,42-44]. 조용한 환경에서의 언어인지도 향상됨이 보고되었는데, 양측 인공와우를 사용한 경우가 일측 인공와우를 이용하는 경우에 비해 단음절 단어 인지가 평균적으로 10% 향상되었다[45]. 이에 많은 나라에서 양측 고도난청 치료에 있어 양측 와우이식을 표준치료로 지정하고 있다[42]. 양측 와우이식은 양측을 동시에 시행할 수도 있고, 순차적으로 시행할 수도 있다. 순차적으로 시행할 경우 와우이식 간격을 최대한 짧게 하는 것이 좋고 1년을 넘기지 않는 것이 좋다[46].

## 3. 일측 고도 난청 환자에서의 와우이식

최근 여러 연구에서 반대측에 정상 청력을 가지고 있는 일측 고도 난청 환자에서도 와우이식이 많은 도움을 줄 수 있음이 밝혀지고 있다[11,47,48]. 일측 고도 난청 환자에서 와우이식을 시행받은 환자는 contralateral routing of signal (CROS) 보청기나 bone-anchored hearing aid (BAHA)를 사용하는 환자에 비해 소음 환경에서의 언어 인지와 소리의 위치 파악에 있어 우수한 결과를 보였다. CROS 보청기나 BAHA의 경우 난청이 있는 귀를 사용하지 않고 모든 소리를 정상 청력의 귀로 보내지만, 와우이식을 시행하게 되면 소리를 들을 수 있는 새로운 귀가 생기므로 청각재활에 있어 더 우수한 결과를 얻을 수 있는 것으로 생각된다[46].

## 4. 완전 이식형 인공와우

완전 이식형 인공와우는 환자의 미용과 편이성 면에서 커다란 도움을 줄 수 있다. 하지만 완전 이식형 인공와우 개발에 있어 가장 큰 문제는 신체의 잡음에 영향을 받지 않는 이식형 마이크로폰 개발이다. 현재 식약처의 승인을 받은 완전 이식형 인공와우는 없으나, 시제품이 임상 시험 중에 있다[49].

## 결 론

와우이식은 전농 환자들의 청각 재활을 위한 훌륭한 수단으로 자리잡았다. 현재의 인공와우는 전농 환자들이 시각적 도움 없이도 언어를 이해할 수 있을 정도로 청력을 회복시킬 수 있게 되었다. 따라서 인공와우가 환자들의 삶에 미치는 영향은 막대하다. 또한 와우이식수술도 커다란 부작용 없이 안전하게 시행될 수 있게 되었다. 하지만 인공와우에는 완전 이식형 인공와우 개발 등 아직 발전되어야 할 부분이 남아있어 앞으로도 더 많은 연구가 진행되어야 할 것이다.

## REFERENCES

- Marazita ML, Ploughman LM, Rawlings B, Remington E, Arnos KS, Nance WE. Genetic epidemiological studies of early-onset deafness in the U.S. school-age population. *Am J Med Genet* 1993;46:486-91.
- Morton NE. Genetic epidemiology of hearing impairment. *Ann N Y Acad Sci* 1991;630:16-31.
- Smith RJ, Bale JF Jr, White KR. Sensorineural hearing loss in children. *Lancet* 2005;365:879-90.
- Mazelova J, Popelar J, Syka J. Auditory function in presbycusis: peripheral vs. central changes. *Exp Gerontol* 2003;38:87-94.
- Olusanya BO. "The right stuff": the global burden of disease. *PLoS Med* 2007;4:e84.
- Stach BA, Spretnjak ML, Jerger J. The prevalence of central presbycusis in a clinical population. *J Am Acad Audiol* 1990;1:109-15.
- Djourno A, Eyries C. Auditory prosthesis by means of a distant electrical stimulation of the sensory nerve with the use of an indwelt coiling. *Presse Med* 1957;65:1417.
- House WF. Cochlear implants. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 1976;85 suppl 27:1-93.
- Tong YC, Black RC, Clark GM, Forster IC, Millar JB, O'Loughlin BJ, et al. A preliminary report on a multiple-channel cochlear implant operation. *J Laryngol Otol* 1979;93:679-95.
- Eisenberg LS, House WF. Initial experience with the cochlear implant in children. *Ann Otol Rhinol Laryngol Suppl* 1982;91:67-73.
- Arndt S, Aschendorff A, Laszig R, Beck R, Schild C, Kroeger S, et al. Comparison of pseudobinaural hearing to real binaural hearing rehabilitation after cochlear implantation in patients with unilateral deafness and tinnitus. *Otol Neurotol* 2011;32:39-47.
- Cohen NL, Hoffman RA. Complications of cochlear implant surgery in adults and children. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 1991;100:708-11.
- Arnold W, Brockmeier SJ. Medical, surgical, and technical complications with the COMBI-40. *Am J Otol* 1997;18:S67-8.
- Bhatia K, Gibbin KP, Nikolopoulos TP, O'Donoghue GM. Surgical complications and their management in a series of 300 consecutive pediatric cochlear implantations. *Otol Neurotol* 2004;25:730-9.
- Cohen NL, Waltzman SB, Roland JT, Jr., Staller SJ, Hoffman RA. Early results using the nucleus CI24M in children. *Am J Otol* 1999;20:198-204.
- Gibbin KP, Raine CH, Summerfield AQ. Cochlear implantation--United Kingdom and Ireland surgical survey. *Cochlear Implants Int* 2003;4:11-21.
- Johnson JJ, Gibbin KP, O'Donoghue GM. Surgical aspects of cochlear implantation in young children: a review of 115 cases. *Am J Otol* 1997;18:S69-70.
- Kempf HG, Johann K, Lenarz T. Complications in pediatric cochlear implant surgery. *Eur Arch Otorhinolaryngol* 1999;256:128-32.
- Kronenberg J, Migirov L, Dagan T. Suprameatal approach: new surgical approach for cochlear implantation. *J Laryngol Otol* 2001;115:283-5.
- Fayad JN, Wana GB, Micheletto JN, Parisier SC. Facial nerve paralysis following cochlear implant surgery. *Laryngoscope* 2003;113:1344-6.
- Kempf HG, Stover T, Lenarz T. Mastoiditis and acute otitis media in children with cochlear implants: recommendations for medical management. *Ann Otol Rhinol Laryngol Suppl* 2000;185:25-7.
- Fu QJ, Galvin JJ, 3rd. Perceptual learning and auditory training in cochlear implant recipients. *Trends Amplif* 2007;11:193-205.
- Fu QJ, Galvin JJ, 3rd. Maximizing cochlear implant patients' performance with advanced speech training procedures. *Hear Res* 2008;242:198-208.
- Nogaki G, Fu QJ, Galvin JJ 3rd. Effect of training rate on recognition of

- spectrally shifted speech. *Ear Hear* 2007;28:132-40.
25. Sweetow R, Palmer CV. Efficacy of individual auditory training in adults: a systematic review of the evidence. *J Am Acad Audiol* 2005;16:494-504.
  26. Tremblay KL, Shahin AJ, Picton T, Ross B. Auditory training alters the physiological detection of stimulus-specific cues in humans. *Clin Neurophysiol* 2009;120:128-35.
  27. Gantz BJ, Turner C, Gfeller KE, Lowder MW. Preservation of hearing in cochlear implant surgery: advantages of combined electrical and acoustical speech processing. *Laryngoscope* 2005;115:796-802.
  28. Mowry SE, Woodson E, Gantz BJ. New frontiers in cochlear implantation: acoustic plus electric hearing, hearing preservation, and more. *Otolaryngol Clin North Am* 2012;45:187-203.
  29. von Ilberg CA, Baumann U, Kiefer J, Tillein J, Adunka OF. Electric-acoustic stimulation of the auditory system: a review of the first decade. *Audiol Neurotol* 2011;16 Suppl 2:1-30.
  30. Kiefer J, Gstöttner W, Baumgartner W, Pok SM, Tillein J, Ye Q, et al. Conservation of low-frequency hearing in cochlear implantation. *Acta Otolaryngol* 2004;124:272-80.
  31. Rizer FM, Arkis PN, Lippy WH, Schuring AG. A postoperative audiometric evaluation of cochlear implant patients. *Otolaryngol Head Neck Surg* 1988;98:203-6.
  32. Reiss LA, Gantz BJ, Turner CW. Cochlear implant speech processor frequency allocations may influence pitch perception. *Otol Neurotol* 2008;29:160-7.
  33. Reiss LA, Turner CW, Erenberg SR, Gantz BJ. Changes in pitch with a cochlear implant over time. *J Assoc Res Otolaryngol* 2007;8:241-57.
  34. Yao WN, Turner CW, Gantz BJ. Stability of low-frequency residual hearing in patients who are candidates for combined acoustic plus electric hearing. *J Speech Lang Hear Res* 2006;49:1085-90.
  35. Hodges AV, Balkany TJ. Cochlear implants in children and adolescents. *Arch Pediatr Adolesc Med* 2012;166:93-4.
  36. Beijen JW, Snik AF, Mylanus EA. Sound localization ability of young children with bilateral cochlear implants. *Otol Neurotol* 2007;28:479-85.
  37. Grieco-Calub TM, Litovsky RY. Spatial acuity in 2-to-3-year-old children with normal acoustic hearing, unilateral cochlear implants, and bilateral cochlear implants. *Ear Hear* 2012;33:561-72.
  38. Lovett RE, Kitterick PT, Hewitt CE, Summerfield AQ. Bilateral or unilateral cochlear implantation for deaf children: an observational study. *Arch Dis Child* 2010;95:107-12.
  39. Murphy J, Summerfield AQ, O'Donoghue GM, Moore DR. Spatial hearing of normally hearing and cochlear implanted children. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol* 2011;75:489-94.
  40. Boons T, Brokx JP, Frijns JH, Peeraer L, Philips B, Vermeulen A, et al. Effect of pediatric bilateral cochlear implantation on language development. *Arch Pediatr Adolesc Med* 2012;166:28-34.
  41. Tait M, Nikolopoulos TP, De Raeve L, Johnson S, Datta G, Karltorp E, et al. Bilateral versus unilateral cochlear implantation in young children. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol* 2010;74:206-11.
  42. Lammers MJ, van der Heijden GJ, Pourier VE, Grolman W. Bilateral cochlear implantation in children: a systematic review and best-evidence synthesis. *Laryngoscope* 2014;124:1694-9.
  43. Ramsden JD, Gordon K, Aschendorff A, Borucki L, Bunne M, Burdo S, et al. European Bilateral Pediatric Cochlear Implant Forum consensus statement. *Otol Neurotol* 2012;33:561-5.
  44. Sparreboom M, Snik AF, Mylanus EA. Sequential bilateral cochlear implantation in children: development of the primary auditory abilities of bilateral stimulation. *Audiol Neurotol* 2011;16:203-13.
  45. Muller J, Schon F, Helms J. Speech understanding in quiet and noise in bilateral users of the MED-EL COMBI 40/40+ cochlear implant system. *Ear Hear* 2002;23:198-206.
  46. Brand Y, Senn P, Kompis M, Dillier N, Allum JH. Cochlear implantation in children and adults in Switzerland. *Swiss Med Wkly* 2014;144:w13909.
  47. Arndt S, Laszig R, Aschendorff A, Beck R, Schild C, Hassepas F, et al. Unilateral deafness and cochlear implantation: audiological diagnostic evaluation and outcomes. *HNO* 2011;59:437-46.
  48. Jacob R, Stelzig Y, Nopp P, Schleich P. Audiological results with cochlear implants for single-sided deafness. *HNO* 2011;59:453-60.
  49. Briggs RJ, Eder HC, Seligman PM, Cowan RS, Plant KL, Dalton J, et al. Initial clinical experience with a totally implantable cochlear implant research device. *Otol Neurotol* 2008;29:114-9.