

Updates in Prognostic Factors of Cochlear Implantation

Jeong Hun Jang¹ and Sang-Heun Lee²

¹Department of Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery, Kyungpook National University College of Medicine, Daegu; and

²Department of Otorhinolaryngology-Head and Neck Surgery, Daegu Veterans Hospital, Daegu, Korea

와우이식술의 예후인자에 대한 최신지견

장정훈¹ · 이상훈²

경북대학교 의학전문대학원 이비인후과학교실,¹ 대구보훈병원 이비인후과²

Received March 26, 2014

Accepted May 28, 2014

Address for correspondence

Sang-Heun Lee, MD, PhD

Department of Otorhinolaryngology-

Head and Neck Surgery,

Daegu Veterans Hospital,

60 Wolgok-ro, Dalseo-gu,

Daegu 704-802, Korea

Tel +82-53-200-5777

Fax +82-53-423-4524

E-mail leeshu@knu.ac.kr

Cochlear implantation has become the standard method for the rehabilitation of patients with profound sensorineural hearing loss. The degree of auditory benefit following cochlear implantation is affected by pre-, per-, and postoperative variables and shows individual variability. Since various studies about the predictive variables have been reported, efficacy of some variables is proven and new prognostic variables are being suggested as device technology and surgical/medical technique is developed. The comprehensive pre-implant assessment by identifying potentially limiting variables could be fundamental to counseling of candidacy and prediction of outcome with cochlear implant. Korean J Otorhinolaryngol-Head Neck Surg 2014;57(11):738-47

Key Words Cochlear implantation · Speech perception · Variables.

서 론

와우이식은 1984년 3M/House 단채널 인공와우가 미국에서 처음으로 임상에 도입된 이후, 30여 년간 고도 이상의 난청 환자들의 청각을 복원하는 데 큰 역할을 담당해왔다. 현재 와우기기는 비약적으로 발전한 상태로 전세계적으로 호주의 Cochlear Corporation(Lane Cove, NSW, Australia), 미국의 Advanced Bionics Corporation(Sylmar, CA, USA), 그리고 오스트리아의 MED-EL Corporation(Innsbruck, Austria) 3개 회사에 의해 와우기기가 제작되어 환자들에게 시술되고 있다. 와우이식은 고도난청환자의 재활치료에 필수적인 방법으로, 전 세계적으로 약 200000건의 와우이식이 시술되었다. 우리나라의 경우, 1988년에 처음 와우이식이 시술된 이후 매년 시술 환자수가 증가하였고, 특히 2005년에 의료보험에 적용되기 시작하면서 환자수가 급격히 증가하였다. 건강보험심사평가원의 보고에 의하면 약 7500여 명의 고도난청환자가 시술을 받은 상태이다.¹⁾ 와우이식의 성공적인 수술 여부는 술 후 청각수행능을 평가하여 이루어지게 되는데 고도난청환자들의 재활수단

으로 와우이식이 보편화가 되면서 이러한 수술 결과에 대한 연구는 술자들의 주된 관심 분야가 되었다. 와우이식은 고도의 기술을 요하는 시술로서, 와우내로 전극이 삽입되고 외부의 소리신호가 전기신호로 변환되어 와우내 청신경을 자극하여 소리를 인지하게 되는 복잡한 과정이 이루어지게 된다. 와우이식술의 결과는 이와 관련된 여러가지 요인들에 의해 달라질 수 있는데, 지금까지 문헌상으로 보고된 와우이식 결과에 영향을 미치는 인자들에 대해 정리하면 Table 1과 같다.

이와 같은 여러 예후 인자들을 바탕으로 와우이식의 효과에 대해 이득을 예측하는 모델을 개발하는 대규모 연구도 진행되었고,^{2,3)} 수학적 모델을 제시하고자 하는 시도도 있었다.^{4,5)} 방법론적 관점에서 와우이식술의 결과에 영향을 미치는 인자들을 분석하고자 하는 기초 및 임상연구들이 최근에 보고되고 있는 추세이다. 본 내용에서는 와우이식의 예후에 영향을 미치는 것으로 보고된 인자들에 대해 지금까지 보고된 연구결과를 간략하게 살펴보고 국내 연구동향, 그리고 최근에 부각되고 있는 인자들에 대해서 소개하고자 한다.

Table 1. Variables affecting CI performance reported in previous studies

Prognostic factors		
Device factor	CI technology	Coding strategy Electrode design
Patient factor	Physiology and function	Onset of deafness Length of deafness Age of implantation Auditory neuroplasticity
	Multiple disabilities Perinatal morbidity Medical/surgical issues Preoperative function Education/rehabilitation	Comorbidity Meningitis Anatomic abnormality Residual hearing Mode of communication Education and postimplantation rehabilitation service
Socioeconomic factor	Social factor	Family support Socioeconomic status
Recent issues		Preoperative use of hearing aid in CI side Surgical approach Brand of CI Percentage of active electrode Bony cochlear nerve canal Insertion depth angle Genetic mutation Duration of CI experience

CI: cochlear implant

문현상으로 검증된 와우이식의 예후인자들

와우기기 인자

앞서 기술된 예후인자들은 크게 와우기기 인자, 환자 인자, 그리고 사회경제적 환경 인자로 나누어 볼 수 있으며, 환자 인자는 다시 술 전 인자와 술 중 인자, 그리고 술 후 인자로 분류할 수 있다. 와우기기 자체인자로 speech coding strategy의 발전이 가장 중요한 인자로 간주할 수 있다. 앞서 기술한 3개 회사의 경우, continuous interleaved sampling(CIS)을 기본으로 spectral peak(SPEAK), Hires Fidelity 120(HiRes 120), fine structure(FS4) 등의 독자적인 기술을 추가하였고 이를 통해, 소음환경에서의 언어인지, 음악지각 등에서 와우기기의 수행 능은 술 후 향상된 결과를 보이고 있다.⁶⁾ 와우기기의 발달과 함께 전극의 형태도 와우 손상을 최소화하도록 점점 가늘어지거나 신경자극을 좀 더 선택적으로 가능하도록 개발되었다. Nucleus 512(Sydney, Australia)의 modiolar-hugging 형태의 전극은 와우내로 삽입되면서 나선신경질 방향으로 자동으로 가까워지게 됨으로써 신경을 자극하는 데 최소한의 에너지를 필요로 하게 되고, 와우 손상을 감소시켜서 와우이식 결과를 향상시키는 용도로 개발되었는데 그 효용성에 대한 연구가 지

속되고 있다. 이에 반해, Hybrid L24 전극을 이용하여 정원창 개방법으로 전극을 삽입하여 와우첨부의 저주파수 대역을 보존하고자 하는 연구가 Lenarz 등⁷⁾에 의해 이루어져 소음 환경에서의 언어인지도의 향상이 입증되었다.

환자 인자

사람의 청각 경로 발달에 있어서 중요한 시기에 대한 연구는 뇌가소성(brain plasticity)에 대한 연구와 더불어 지속되고 있는데, 이는 와우이식의 결과와 와우이식술의 시기 및 난청의 기간과 연관성을 분석하는 데 중요하다.⁸⁾ 12개월 이전에 와우이식술을 시행하는 것이 청각 및 언어 발달에 더욱 효과적이라는 연구들과,^{9,10)} 출생 후 2세까지 언어발달에 민감한 시기라는 연구들은,¹¹⁾ 조기 와우이식술의 중요성을 보여준다. 특히 Dettman 등¹²⁾의 연구와 Nott 등¹³⁾의 연구에서는 12개월 이전에 와우이식술을 받은 경우, 12개월에서 24개월 사이에 와우이식술을 받은 환아들에 비해 정상 청력을 가진 같은 연령의 소아와 동등한 수용언어 및 표현언어의 발달을 보여주었다는 점은 주목할 만하다. 소아에서의 와우이식술의 최적연령에 대한 연구는 다양하게 보고되고 있지만, 이러한 와우이식술의 시기와 난청의 기간이 와우이식술의 결과에 중요한 영향을 미친다는 점은 확실하다. Zwolan 등¹⁴⁾도 와우이식술을 받는 연령

의 중요성에 대해 보고하였는데, 와우이식술을 받은 295명의 환아를 5개의 연령군(1~3세, 3~5세, 5~7세, 7~9세, 9~11세)으로 분류하여 술 후 1년, 2년, 3년째의 언어지각점수를 the Early Speech Perception test, the Northwestern University-Children's Perception of Speech test, the Minimal Pairs test, the Glendonald Auditory Screening Procedure-word(GASP-W), GASP-sentence(GASP-S)를 사용하여 비교하였다. 그 결과 5개의 연령군 모두에서 술 전에 비해 언어지각력이 향상되는 것을 알 수 있었다. 특히 Minimal Pairs, GASP-W, 그리고 GASP-S 점수는 와우이식술을 받은 연령이 어릴수록 시간이 지날수록 향상되는 정도가 더 커지는 상관관계를 보이는 것을 알 수 있었고, 이를 통해 12개월에 와우이식술을 시행하는 것이 바람직할 것으로 제시하였다.

Gordon 등¹⁵⁾은 와우이식술 후 2년이 경과한 소아환자들 중 언어수행능이 떨어지는 환자군(n=5)과 무작위 대조군(n=10)을 대상으로 와우이식 예후인자들과 언어수행능과의 관계를 분석하였다. 술 전 예후인자 14개의 항목과 술 후 예후인자 4개의 항목을 점수로 등급화시켜서 비교한 결과, 환자군의 경우 술 전 및 술 후 인자들의 점수가 무작위 대조군의 점수와 각각 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 특히 술 전 예후인자로 5년 이상의 전농기간을 가지면서 5세 이후에 와우이식술을 받은 경우, 술 후 언어수행능이 성취되기 어렵다고 제시하였다. 또한 술 후 예후인자로 기기의 작동(device programming, equipment integrity)과 언어 재활치료(appropriate therapy, school placement)와 관련된 인자들은 와우이식술에 대한 상담과 더불어 이에 대한 충분한 준비를 하는 경우, 충분히 개선될 수 있음을 강조하였다.

와우이식술을 받는 시기에 대한 연구로 전농성인을 대상으로 한 연구도 보고되었는데, Teoh 등¹⁶⁾은 와우이식술을 받은 언어습득기 전 전농성인 103명을 대상으로 청각수행능을 기준에 보고된 연구결과의 언어습득기 후 와우이식술을 받은 환자군의 청각수행능 결과와 비교하였는데, 언어습득기 전 전농성인 103명의 청각수행능이 인공와우의 기종과 상관없이 와우이식술 후 1년 이내에 의미있는 언어수행능의 수준에 도달하는 것을 확인하였으나 언어습득기 후 와우이식술을 받은 환자군에 비해서는 정점에서의 평균 수행능의 수치가 유의하게 낮았다.

감각신경성 난청을 가진 소아의 30~40%는 인지기능장애, 운동장애, 시각장애, 행동/감정장애를 보인다고 한다.¹⁷⁾ 이러한 중복장애는 와우이식술 후 수행능력에 좋지 않은 영향을 끼치게 되지만, 언어 발달, 환경인지, 삶의 질 측면에서 와우이식술을 받는 것은 이득이 있는 것은 분명하다. Berrettini 등¹⁸⁾은 와우이식술을 받은 23명의 중복장애 환아들을 와우이식술을

받은 중복장애가 없는 소아와 비교할 때 언어지각력이 낮고 습득하는 속도도 느리지만 와우이식 전에 비해 언어지각력이 향상되고 53%에서 개방형 언어를 인지하는 능력을 습득하였다고 하였고, 부모를 대상으로 시행한 설문지 조사에서 와우이식의 긍정적인 효과를 확인할 수 있었다. 발달장애가 있는 경우, 기준에 알려진 와우이식의 예후인자를 통해 와우이식술의 예후를 평가하는 것은 어렵고 차별화된 예후척도가 필요하다는 보고가 있었다. Meinzen-Derr 등¹⁹⁾은 the Nonverbal Cognitive Quotient(NVCQ)가 발달장애가 있는 와우이식술을 받은 환아들의 언어 발달을 예측할 수 있는 가장 강력한 인자로 소개하였는데, 15명의 발달장애가 있는 와우이식술 환아들을 연령 및 NVCQ를 일치시킨 대조군과 비교하였을 때 대조군에 비해 수용 언어 및 표현 언어가 뒤쳐지고, 특히 이러한 언어발달 지연이 잠재된 인지기능과 상응하지 않게 훨씬 뒤떨어진다고 하였다. 이는 이러한 중복장애가 있는 와우이식 환아들은 개별화된 언어재활과정이 필요함을 의미한다.

뇌수막염에 의해서 가장 흔하게 발생하는 와우 골화의 경우, 골화의 정도가 와우이식술의 예후에 영향을 미치게 되는데, 와우 골화 환자의 약 8%에서 방사선학적 검사에서 기저부의 폐쇄를 확인할 수 있어서, 술 전 방사선학적 검사가 수술 계획 및 전극형태의 선택에 중요하다고 하겠다.²⁰⁾ 와우 골화가 있는 환자의 경우, 와우이식술의 결과에 대해 술 전에 환자 및 보호자와 충분한 상의가 이루어져야 하며, 와우 골화는 시간이 경과함에 따라 진행하기 때문에, 조기에 와우이식술을 시행함으로써 활성 전극의 개수를 최대한 늘릴 수 있고, 예후도 향상시킬 수 있다. 뇌수막염으로 인해 발생한 와우 골화 자체가 와우이식술의 나쁜 예후인자로 간주할 수 없고 와우 골화로 인해 삽입되는 활성 전극의 개수가 7~8개 이하가 되는 경우 술 후 언어인지능력에 차이를 보인다는 기존의 연구결과를 고려할 때,²¹⁾ 와우내로 삽입되는 활성 전극의 수가 예후에 중요함을 시사한다고 하겠다.

와우이식술 과정에서 전극을 고실계를 손상시키지 않으면서 최적의 위치로 삽입하는 것은 성공적인 와우이식술의 선결 조건이다. 특히 와우공동강, Mondini 기형, 와우저형성 등과 같은 선천성 와우기형의 경우, 전극을 삽입하는 데 어려움이 있고, 그에 따른 술 후 예후가 달라질 수 있다. Papsin²²⁾은 내이기형을 가진 103명의 소아의 와우이식술 결과를 분석하였는데, 내이도 협착이 동반된 경우를 제외하고 언어수행능이 정상 와우를 가진 소아의 와우이식술 후의 언어수행능과 유의한 차이를 보이지 않았다고 하였다. 다른 보고에서도 와우공동강, 와우저형성, 내이도 협착과 같이 심한 기형의 경우, 와우이식술 후 언어수행능이 떨어지거나 그 외의 경우에는 정상와우에서의 와우이식술 후의 결과와 유사하다고 하였다.²³⁾

Vlahović과 Sindija²⁴⁾는 총 11명의 와우이식 환자들을 대상으로 와우이식의 나쁜 예후인자들의 술 후 언어수행능에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 11명의 환자를 4군(복합장애 4명, 와우기형 3명, 재이식술 3명, 후미로병변 1명)으로 분류하여 언어수행능력과 설문지를 통한 주관적 만족도를 비교하였는데, 후미로병변 환자를 제외한 모든 환자에서 정도의 차이는 있으나 상당한 언어수행능의 향상이 확인되었다. 특히 성공적인 와우이식술을 판단하는 데 비록 청력과 무관하더라도 주관적 만족도 또한 중요한 척도로 간주되어야 함을 제시하였다.

술 전 청력상태와 언어인지도의 상태가 술 후 예후에 중요한 영향을 미치게 된다. Arisi 등²⁵⁾은 45명의 언어습득기 전 전농 청소년 환자를 대상으로 와우이식술 후 청각 수행능이 좋은 군(n=30)과 나쁜 군(n=15)으로 구분하여 분석하였다. 두 군에서 청각수행능이 모두 유의하게 향상되었고, 특히 좋은 군이나쁜 군에 비해 유의하게 조기에 난청이 진단되었고(18.07 ± 6.25 개월 vs. 34.4 ± 10.26 개월), 진단 당시의 난청의 정도에서도 좋은 군의 경우, 56.7%의 환자가 71~100 dB HL의 역치를 보였으나 나쁜 군의 경우, 모든 환자가 101~119 dB HL의 역치를 보이며 유의한 차이가 확인되었다. 유사한 연구로 Osberger 등²⁶⁾은 잔존청력이 더 많은 소아가 와우이식술을 더 받게 된다고 보고하였고, Gantz 등²⁷⁾은 다기관 센터의 자료를 통합하여 술 전 개방형 언어 검사결과가 좋을수록 더 높은 술 후 언어지각 수준을 보인다고 하였다. 종합적으로 어린 연령에 청각 자극이 완전히 소실되기 전에 가능한 조기에 와우이식술이 시행되는 것이 예후에 중요하다고 할 수 있다. Cheng과 Niparko²⁸⁾는 1966년 이후 보고된 44편의 연구결과에 대해 메타분석을 시행하였는데 조기에 와우이식술이 시행될수록 술 후 언어수행능이 지속적으로 발달하게 되고, 약 75%의 소아에서 술 후 3년 후부터 뚜렷한 언어인지도의 향상을 보인다고 하였다.

술 전 의사소통 수단의 영향에 대해 O'Donoghue 등²⁹⁾은 40명의 와우이식술을 받은 소아들을 대상으로 connected discourse tracking을 이용하여 언어지각력을 분석하여 술 후 예후인자들을 평가한 결과, 와우이식술을 받은 연령 외에 술 전 의사소통 수단으로 구화의 사용여부가 언어지각력의 차이에 유의한 영향을 미쳤다고 하였다.

이외에, 소아의 경우, 조기 교육이 와우이식 후 언어 발달에 영향을 미친다고 하면서, 특히 유치원에서 정상 동급생과 유사한 어휘력을 보인다는 보고도 있다.³⁰⁾

사회 경제적 인자

Niparko 등³¹⁾은 와우이식술 결과와 사회 경제적 수준에 대한 분석에서 높은 사회 경제적 환경의 소아들이 와우이식술 후

언어수행능에서 더 빠른 향상도를 보였으나 이는 다변수분석 상에서 모성의 교육수준, 의사소통에서의 모성의 참여 정도 등과 상호 작용을 보이면서 사회 경제적 환경의 영향이 크지 않다고도 하였다. 또 다른 연구로 사회 경제적 환경이 낮은 경우, 와우이식술 후 합병증의 빈도가 높고 추적관찰의 순응도가 떨어진다고 보고되기도 하였다.³²⁾ 부모의 동기부여와 기대감이 와우이식술의 결과에 미치는 영향은 간과될 수 없는 부분이라고 할 수 있는데, 앞서 언급한 Niparko 등의 연구는 의사소통에서의 모성의 조기 참여, 보호자의 멘토링, 조기 구화노출 등이 와우이식술에 대한 긍정적 효과를 제시하였다.

와우이식술 결과 예측인자에 대한 국내 연구

국내 인공와우센터에서도 많은 환자들이 와우이식술을 시행받으면서 와우이식술의 예후와 관련된 연구들이 다양하게 이루어져 왔다.

Kim 등³³⁾은 와우이식술을 받고 3개월간 청각재활이 이루어진 19명의 환자들을 대상으로 음소분별력에 영향을 미치는 인자를 분석하였는데, 난청의 기간, 술 전 언어발달 수준, 기기의 사용기간, 그리고 기기의 역동범위(dynamic range)가 예후와 유의한 상관성을 보였다고 하였다. 다른 연구로 Heo 등³⁴⁾은 와우이식술을 받은 37명의 학령기 환아의 개방형 언어지각력의 향상 정도를 분석하였고 문장 지각력(평균 75.9%)이 술 후 1.5~2년에 걸쳐 술 전 언어지각력(평균 18.8%)에 비해 유의하게 향상되었으나 더 이상 발달을 보이지 않았고 이러한 결과와 관련되어 술 전 언어지각력, 언어발달 정도, 그리고 술 전 청력이 와우이식술의 영향인자로 제시되었다.

Kim 등³⁵⁾은 뇌수막염으로 인해 전농이 발생한 10명의 환자들을 대상으로 술 후 언어수행능을 분석하였는데, 전체 전극을 삽입한 5명과 10~13개의 전극을 삽입한 5명을 수술 연령을 일치시킨 20명의 언어습득기 전 전농환자들과 술 후 18개 월째의 언어수행능에 대해 비교하였고 세 군에서 유의한 차이는 보이지 않았다고 하면서 와우 골화가 존재하여도 10개 이상의 전극이 삽입된다면 술 후 말소리 인지능력에는 차이가 없다고 제시하였다.

Kim 등²³⁾은 방사선학적으로 입증된 내이기형을 가진 46명의 소아에서의 와우이식술 결과를 보고하였다. 앞서 기술한 바와 같이 내이도 협착을 제외한 나머지 내이기형의 경우, 점진적인 언어지각능의 호전을 보였고 술 후 2년째 언어지각능은 정상 와우에서의 언어지각능과 유의한 차이가 없었다고 하면서 내이기형이 있는 경우에도 와우이식술은 비교적 안전한 술식으로서 청각재활을 위해 적극적으로 시술되는 것이 바람직하

다고 제시하였다.

Shin 등³⁶⁾은 전농환아의 와우이식술 전 인지기능과 가족의 심리요인의 와우이식 결과에 미치는 영향을 보고하였다. 16명의 전농환아를 대상으로 지능(intelligence), 주의 운동 협동(attention and motor coordination)에 대한 검사가 시행되었고, 전농자녀를 둔 100명의 부모에게 전농자녀의 병력 및 교육 상태, 부모의 전농자녀에 대한 태도, 정서적 문제 등에 대한 설문지 검사가 진행되었다. 전농환아의 경우, 사회성숙도 검사(Social Maturity Scale)에서 높은 사회적응도를 보였고 비언어적 지능검사에서 경계성 수준의 지능을 보였으나 시각운동 협동 능이 떨어져 있는 것을 확인하였다. 또한 17명의 부모가 Beck 우울척도(Beck Depressive Inventory)에서 우울증 기준을 만족하였고, 이는 전농자녀의 언어 및 인지 기능 발달과 부정적 상관관계를 보였다. 이러한 전농환아의 술 전 인지기능 발달 상태를 고려하여 와우이식 결과에 대한 술 전 상담 및 술 후 재활이 필요하다고 제시하였다.

Moon 등³⁷⁾은 와우이식술을 받은 61명의 성인 환자들을 대상으로 술 후 3개월, 6개월, 12개월째 언어수행능력을 평가하여 술 전 예후인자들을 보고하였다. 난청의 원인에 따라 언어 습득기 전 난청군(n=9), 뇌수막염군(n=6), 진행성 난청군(n=31), 돌발성 난청군(n=15)으로 분류하였고, 난청 발생연령, 난청의 기간, 중등도 및 고도난청 상태의 기간과 술 후 언어수행능력과의 상관관계를 분석하였다. 이 연구에서는 전농으로 진행하기 전의 중등도 및 고도난청의 기간이 환자의 연령에서 차지하는 분율을 분석에 포함시켰다. 언어처리는 감각, 언어, 인식 과정의 통합이 필요한 과정으로 연령 및 교육수준이 중요한 역할을 하게 되고, 특히 교육수준이 와우이식술 결과에 영향을 끼친다는 연구도 보고된 바가 있어서,³⁸⁾ 이러한 환자별 언어 수행능력의 편차를 보정하기 위해 the Western Aphasia Battery의 Z-score가 사용되었다. 연령과 교육수준이 보정되었을 때 난청발생 연령과 와우이식술 후 언어수행능 간에는 유의한 상관성이 보이지 않았고, 중등도 및 고도난청 기간이 환자의 연령에서 차지하는 분율이 언어수행능과 유의한 상관관계를 보이는 것을 고려할 때, 사회활동을 통해 얻는 언어의 경험치를 반영하는 중등도 및 고도난청 기간의 분율이 언어습득기 후 성인난청 환자의 와우이식술 후 언어수행능에 중요한 예후인자라고 제시하였다.

경북대학교병원 이비인후과에서는 와우이식술 후 언어수행능력이 좋지 않은 환자들의 영향인자를 알아보기 위한 연구를 보고하였다.³⁹⁾ 경북대학교병원 이비인후과에서 와우이식술을 받은 환자들 중 술 후 3년째 시행한 categories of auditory performance(CAP) 점수가 4점 이하인 54명의 연구군과 CAP 점수가 5점 이상인 108명의 대조군을 대상으로 후향적

분석을 시행하였다. 영향인자로는 언어습득기 전 전농성인(16세 이상), 소아기의 와우이식술 지연(5세 이상), 주산기 문제, 내이 기형, 술 전 보청기 착용력, 동반질환, 술 중 합병증, 장기간의 난청기간(10년 이상), 골성와우신경관(bony cochlear nerve canal)의 폐쇄, 술 전 잔존청력 등이 포함되었다. 주산기 문제($p=0.008$), 내이기형($p=0.002$), 그리고 골성와우신경관의 폐쇄($p=0.008$) 항목에서 두 군 간에 유의한 차이를 보였고, 언어습득기 전 전농성인($p=0.065$), 동반질환($p=0.065$), 그리고 술 중 합병증($p=0.056$)의 경우, 차이를 보이는 경향이 있었다. 이는 기존에 보고된 연구들과 비교할 때 유사한 것을 알 수 있다. 두 군 간의 영향인자의 평균 개수에서도 유의한 차이를 보였고(연구군 2.04 ± 1.045 , 대조군 1.19 ± 1.115 ; $p=0.001$), 골성와우신경관의 평균 너비에서도 연구군이 유의하게 좁은 것을 확인하였다(연구군 1.78 ± 0.74 , 대조군 2.05 ± 0.56 ; $p=0.029$). 여러 영향인자 간의 상호 영향력을 배제하기 위해 다중회귀분석을 시행하였고, 주산기 문제(OR value 2.703)와 내이기형(OR value 3.058)이 대조군에 비해 연구군에서 유의하게 높은 것이 확인되었다.

와우이식술 결과 예측모델

와우이식의 결과를 예측하는 모델은 여러 연구에서 제시되었는데 일반적으로 다음과 같은 환자변수와 기기변수를 이용한 와우이식술을 받은 성인환자들에서의 예측모델들을 제시하여 예후인자를 분석하였다. 와우이식술을 받은 연령은 예후인자로 영향이 미미하거나 거의 없고, 난청의 기간, 술 전 언어지각검사 결과가 예후를 예측하는 데 중요하다는 결과가 보고되고 있다.^{4,40,41)}

환자 변수: 난청 발생 연령, 와우이식술을 받은 연령, 난청의 기간, 난청의 원인, 술 전 청력, 나선신경절 세포의 생존정도 및 위치(survival and location of spiral ganglion cells), 고실계의 개방성(patency of the scala tympani), 인지 기술(cognitive skills), 인성, 시각 주의력(visual attention), 동기화, 참여도(engagement), 의사소통 방식(communication mode), 청각 기억(auditory memory)

기기 변수: 프로세서, 이식기, 전극의 기하학적 구조, 전극 개수, 기기 사용 기간 및 패턴, speech coding strategy

Roditi 등⁴⁾은 이러한 변수를 이용하여 다음과 같은 모델을 제시하였다.

$$\text{predCNC score} = 76.05 + (-0.09 \times \text{DurHL}_{\text{Cl ear}}) + (0.38 \times \text{preHINTQ}) + (0.04 \times \text{long sev/prof HL}_{\text{either ear}})$$

DurHL_{Cl ear}, the duration (in months) of any degree of HL in the Cl ear; preHINTQ, preoperative HINT score obtained in quiet;

long sev-prof HL_{either ear}, longest duration (in months) of severe to profound HL of either ear.

Semenov 등⁵은 기존의 난청 기간, 술 전 언어지각검사 결과를 바탕으로 예측모델을 정리하여 다음과 같은 수학적 구조식으로 설명하였다.

$$\text{Predicted percentage of words in everyday sentences} = k - (\text{Dur Yrs df}) + (\% \text{ words pre-Cl})$$

K, constant value; Cl, cochlear implant; Dur Yrs df, duration of deafness in years from onset; % words pre-Cl, consonant-nucleus-consonant monosyllabic word score before implantation.

와우이식술의 결과를 예측하기 위한 대규모 연구가 1996년부터 진행되었는데 당시 Blamey 등⁴²⁾에 의해 처음 보고되었다. 당시 예측 모델은 와우이식술을 받은 800명의 언어습득기 후 전농성인을 대상으로 이루어졌는데, 고도 이상의 난청 기간, 와우이식술을 받은 연령, 고도 이상의 난청 발생 연령, 이식기기의 사용기간, 난청의 병인 등이 포함되어 3단계 모델로 와우이식술 후의 청각수행능을 설명하고자 하였다. 1단계는 전농이 발병하기 전의 기간으로 언어인지검사상 100%의 수행능을 보이는 단계이다. 2단계는 고도 난청이 발생하면서 청각수행능이 떨어지는 기간으로 난청의 병인, 청각박탈에 따른 말초 및 중추 청각계의 변화, 그리고 전농 기간 등의 인자들이 이 기간에 포함된다. 3단계는 와우이식 후 재활의 기간으로 와우기기, speech coding strategy, 전극의 배열, 재활의 유무 및 방법, 중추 재조직화 등의 인자들에 의해 이 기간의 학습곡선(learning curve)이 형성된다고 하였다. 이후 전세계적으로 15개의 인공와우센터에서 와우이식술을 받은 2251명의 언어습득기 후 전농환자를 대상으로 기존모델을 이용하여 재분석이 이루어졌고 각 인자들의 예후인자로서의 타당성이 입증되었다.²⁾

Lazard 등³⁾은 앞서 기술한 예측모델에 이용된 2251명의 동일한 와우이식 환자들을 대상으로 새롭게 분석하였는데, 와우기기의 착용기간과 중증 및 고도난청이 발생한 연령의 중요성이 부각되고, 중증 및 고도난청의 기간이 예후에 미치는 영향이 감소한다는 연구경향이 반영되어 이루어졌다. 이 연구에서는 중등도 난청이 시작되면서 중추 청각계의 재구성이 시작된다는 가정하에 중등도 난청이 예후인자로 추가되었고, 잔존 청력의 중요성이 강조되고 전기청각자극(electroacoustic stimulation), bimodal 자극의 효과가 입증되면서 술 전 보청기의 착용유무가 새로이 예후인자로 추가되었다. 정원창 접근법, 전극의 삽입각도 및 깊이, 활성 전극의 개수 등 예후인자로서의 영향에 대해서도 기존에 보고된 결과를 확실히 입증하기 위해 예후인자에 포함되었다. 그 외에 성별, 교육수준, 순음청력역치, 500 Hz의 청력역치, 술 전 언어인지검사 결과, 수술시

기, 와우이식이 시행된 귀(better ear or worse ear), 그리고 와우기기의 브랜드가 분석에 포함되었다. 새로이 추가된 인자를 포함한 예후인자들에 대해 통계적 분석이 시행되었고, 1) 중증 및 고도난청의 발생연령, 2) 병인, 3) 와우기기의 사용기간, 4) 청력이 좋은 귀의 순음청력역치, 5) 술 전 보청기의 사용유무, 6) 와우기기의 브랜드, 7) 활성전극의 개수, 8) 중증 및 고도난청의 기간, 9) 수술시기 중등도 난청의 기간, 10) 전극의 삽입각도, 그리고 11) 수술 접근법이 의미있는 예후인자로 보고되었고 이 중 1)~9)번의 항목들이 술 후 예후 변화량의 22%를 설명할 수 있다고 제시되었다. 이 연구에서는 앞서 기술된 3단계 모델을 수정하였는데 2단계에서 중등도 난청 기간동안 언어수행능의 감소가 시작되고, 고도난청 시기에 수행능의 감소가 가속되는 모델을 제시하였고, 이 시기에 양측 귀에 보청기를 착용함으로써, 청각수행능의 감소를 유발할 것으로 생각되는 중추 재조직화의 속도를 늦춰줄 수 있다고 제시되고 있다. 이 연구에서 기존의 보고와 다르게 제시된 사항들은 다음과 같다. 교육 수준이 언어습득기 후 전농성인의 경우, 의미있는 예후인자가 아니라고 하였고, 술 전 청력이 좋은 귀와 나쁜 귀 중 어느 쪽에 와우이식술이 시행되어도 언어수행능의 차이는 없다고 하였다. 또한 순음청력검사상 좋은 귀가 항상 유용한 음향학적 청력을 의미하지는 않으며 전농 기간에 의한 영향을 고려해야 한다고 하였다. 와우개창술 혹은 정원창 접근법에 의한 전극삽입 방법의 차이에 대해서는 경계성으로 유의한 결과를 보인다고 하였다. 전극의 삽입각도 또한 경계성의 유용한 예후인자라고 이 연구는 제시하였다. 흥미로운 것은 와우이식술을 받은 시기(와우이식술 받은 날짜)가 경계성으로 유의한 예후인자라고 하였는데 이는 와우기기의 coding strategy의 발달에 의한 것이라고 하였다. 술 전 와우이식을 받은 귀의 순음청력역치의 중요성을 강조하였는데, 단순히 보청기를 착용하기 전의 청력보다는 중추청각처리과정이 술 후 언어수행능 결과에 중요한 영향을 끼치게 되는 점을 고려할 때 보청기를 착용한 상태의 청력역치가 중요하다고 하면서 보청기 착용의 중요성을 주장하였다. 또한 청각박탈에 따른 중추 가소성을 늦추기 위해서라도 술 전 보청기 착용이 중요하다고 제시하였다. 와우기기의 브랜드마다 술 후 언어수행능의 차이를 보인다고 하였는데(실제 회사는 공개되어 있지 않음), 회사마다 coding strategy, 전극 형태 등의 차이와 언어수행능 검사를 위한 조건 등의 차이가 영향을 끼쳤을 수 있다고 제시되었다. 활성 전극의 개수는 기기회사마다 차이가 있기 때문에 85%의 전극이 삽입되는 경우 언어수행능의 유의한 향상을 보인다고 하였으며, 마지막으로 중등도 난청의 기간이 길수록 술 후 언어수행능이 떨어진다고 하면서(중등도 난청기간 1년마다 0.23%의 언어수행능이 감소), 중등도 난청의 경우, 보청기의 효

과가 증증 및 고도 난청에 비해 뛰어나기 때문에 이 기간에 보청기를 착용함으로써 언어수행능의 감소 정도를 줄일 수 있다고 이 연구는 제시하였다.

와우이식술 결과 분석에 대한 최신지견

최근에 골성와우신경관이 부각되면서 감각신경성 난청과의 관련성에 대한 연구가 보고되었다. 골성와우신경관 너비는 측두골 전산화단층촬영의 축상면에서 측정하는데, 와우축(modiolus)이 보이는 단면에서 신경관 입구 골벽 중간의 양측 내측 면 사이의 거리를 측정하여 얻을 수 있다(Fig. 1). Fig. 1A는 정상 너비의 골성와우신경관을 보여주고 있고, Fig. 1B는 Fig. 1A 와 비교할 때, 좁아진 너비를 확인할 수 있다. Pagarkar 등⁴³⁾은 25명의 전농환자를 대상으로 자기공명영상을 촬영한 결과, 22 귀에서 청신경이 확인되지 않았으나 이 중 5명에서 측두골 전산화단층촬영상 골성와우신경관이 존재하였고, 이 중 3명에서는 청성뇌간반응검사상 반응이 확인되면서 청신경이 존재 할 수 있다고 하여, 여러가지 영상자료와 청력검사 결과를 종합적으로 판단하는 것이 필요하다고 하였다. 이는 골성와우신경관 자체가 청신경 유무와 관련성이 있을 수 있음을 제시하고 와우이식술 결과에 영향을 미칠 수 있는 가능성은 보여준다고 하겠다.

와우이식술 결과와 골성와우신경관과의 상관성에 대한 연구가 보고된 적이 있는데, 와우이식술을 받은 56명의 소아를 대상으로 골성와우신경관의 너비가 1.4 mm 이하인 군(1군, n= 17), 1.4~2.0 mm에 속하는 군(2군, n=14), 2.0 mm 이상인 군(3군, n=25)으로 분류하여 골성와우신경관, 전산화단층촬영상의 내이도(internal auditory canal) 너비, 자기공명영상의 constructive interference in steady state 영상에서의 청신경 상태를 비교하였다.⁴⁴⁾ 내이도의 너비는 3.0 mm보다 작은 경우 좁다고 하였고, 청신경의 경우, 안면신경과 비교하여 작거나 보이지 않는 경우, 청신경 결핍으로 정의되었다. 1군에서 다른 군에 비해 내이도가 좁거나 청신경 결핍의 빈도가 유의하게 높았다. 언어수행능의 경우, 1, 2군에서 3군에 비해 개방형 문장검

사에서 낮은 수행능이 확인되었고, 좁은 골성와우신경관 너비와 청신경 결손이 와우이식술의 좋지 않은 결과와 관련되어 있었고 골성와우신경관 너비가 좁을 때 동시에 내이도 너비가 좁거나 청신경 결손이 유의하게 많았다. 특히 이 연구에서는 청신경이 존재하면서 골성와우신경관 너비가 다른 대상만으로도 분석하였는데, 골성와우신경관의 너비가 좁은 경우, 언어수행능이 유의하게 떨어지는 것을 확인하였으며, 골성와우신경관의 너비와 양의 상관관계를 보였다.

전극이 와우내로 깊게 삽입될수록 저주파수 대역을 담당하는 나선신경절 세포가 자극될 것이라는 가설하에 전극의 삽입 깊이는 와우이식술 후 단어 인지능력과 상관성이 있을 것이라는 연구들이 보고되어왔다. Tong과 Clark⁴⁵⁾은 좀 더 자연스러운 말소리를 인지하게 된다고 하였고, Blamey 등⁴⁶⁾은 보존된 와우 첨부에 좀 더 접근함으로써 언어 인지가 향상된다고 주장하였다. Hochmair 등⁴⁷⁾은 MED-EL COMBI 40+(Innsbruck, Austria)를 착용한 10명의 환자들을 대상으로 전극 삽입깊이와 언어지각능의 관련성을 보고하면서, 기저부를 자극 한 경우 와우전체를 자극한 경우보다 단음절 지각점수가 의미 있게 떨어진다고 보고하고 와우첨부의 자극이 언어이해도에 중요하다고 제시하였다. 이와 같은 전극 삽입깊이와 술 후 언어지각능의 상관성을 직접적으로 평가하는 방법으로 수술 기록지를 바탕으로 평가하거나,⁴⁸⁾ modified Stenver's view와 같은 단순 방사선영상을 이용하여 분석하였는데 상관관계가 높지 않았다.⁴⁹⁾

전극의 삽입 깊이각(insertion depth angle, IDA)은 다른 관점에서 중요성이 설명되기도 하는데, 술 전 저주파수 잔존청력이 좋은 경우, 전극을 깊게 삽입하여 잔존청력을 손상시킬 가능성이 있고 사람마다 와우 크기의 개인차를 보일수 있어서 전극의 삽입 깊이각도 상당한 차이를 보일 수 있으므로 와우이식술 전에 전극의 삽입 깊이각을 정확히 평가하는 것이 중요하다는 보고도 있다.⁵⁰⁾ Franke-Trieger 등⁵⁰⁾은 flat panel computed volume tomography(FPCT)를 이용하여 10명의 사체의 측두골에 길이가 서로 다른 4종류의 전극(20-, 24-, 28-, 31 mm)을 삽입한 후 와우의 크기와 전극의 삽입 깊이각

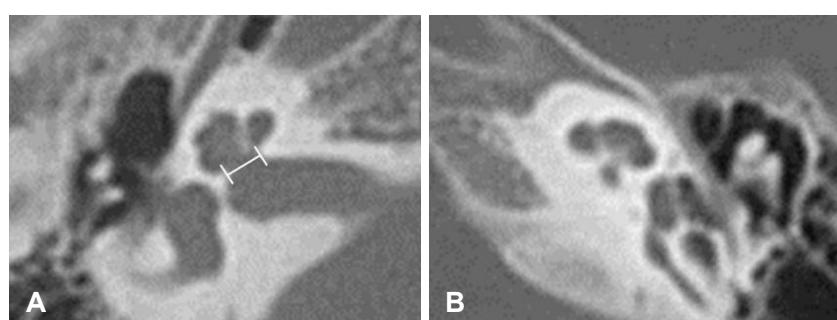


Fig. 1. Measurement of the width of the bony cochlear nerve canal (BCNC). Axial slice of the temporal bone computed tomography where the width are maximal among contiguous sections. The width was obtained by measuring the distance between the inner margins of bony walls at mid-portion (white long line between short two vertical lines)(A). The width of BCNC is narrow and cochlea is slightly hypoplastic (B).

을 측정하였다. 전극 종류에 따른 전극의 삽입 깊이각이 의미 있는 차이를 보였으며 특히 20 mm와 31 mm의 경우, 전극의 삽입 깊이각과 와우기저부의 직경 사이에 의미있는 음의 상관관계를 보여서, 와우이식술 전 와우의 크기, 전극의 형태 등에 대한 충분한 분석을 통해 술 후 결과가 달라질 수 있음을 제시하였다.

FPCT, cone beam computed tomography(CBCT) 등은 측두골의 형태학적 평가를 하는 데 있어서 유용한 도구로 최근 그 사용빈도가 증가하고 있는 추세이다. 고해상도 단층촬영(high resolution computed tomography, HRCT)에 비해 CBCT는 공간 해상도가 높기 때문에(약 18 μm), 금속전극으로 인한 번짐효과에도 불구하고 나선판(spiral lamina)이 정확히 관찰될 수 있으며, HRCT에 비해 방사능 노출 정도도 8~22배 정도 낮은 장점이 있다. 또한, Cushing 등⁵¹⁾은 와우내로 삽입된 활성 전극의 개수를 정확히 파악할 수 있고, 전극이 와우내에서 꼬여 있거나 꺾여 있는 상태를 확인하는 데 CBCT가 유용하다고 주장하였다. Jiang 등⁵²⁾은 정원창 접근법으로 와우이식술을 받은 환자들에서 전극의 위치를 CBCT를 이용하여 평가하였는데 15명의 환자들 중 90%에서 고실계에 전극이 위치한 것을 확인할 수 있었다고 하였다. 또 와우이식술의 예후 인자로 전극의 삽입 깊이각을 이용한 다른 연구로, Frijns 등⁵³⁾은 HiFocus MidScala electrode array(Advanced Bionics, Valencia, CA, USA)를 삽입한 13명의 환자와 HiFocus 1J electrode array를 삽입한 75명의 환자들을 대상으로 전극의 삽입 깊이각과 언어지각능 간의 상관관계를 분석하였다. 술 후 6개 월째 시행한 언어지각능 검사에서 HiFocus MidScala electrode array를 삽입한 환자들의 언어지각능이 높은 반면에, 전극의 삽입 깊이각의 경우, HiFocus MidScala electrode array(418°)가 HiFocus 1J electrode array(481°)보다 작고 주파수 불일치(frequency mismatch)도 더 큰 것을 확인하고, 이러한

주파수 불일치는 언어지각능과는 상관관계를 보이지 않았다. 이러한 영상학적 검사를 통해 전극의 삽입 깊이각, 와우기저부의 크기 등을 측정함으로써, 전극의 과다삽입을 예방하고, 고실계로 전극을 삽입하는 접근법(와우개창술 vs. 정원창 접근법)을 결정하는 데 도움이 되고, 전기청각자극 와우이식에서 잔존청력의 영역을 보존할 수 있으며 place pitch match를 개선시킬 수 있다.

Fig. 2A는 경북대학교병원에서 MED-EL concerto(MED-EL Corporation, Innsbruck, Austria)를 이식받은 환자의 CBCT 영상으로 28 mm Flex 전극이 정원창을 통해서 와우 고실계를 따라 위치하고 있다. Fig. 2B는 같은 환자의 전극의 삽입 깊이각을 측정하는 방법을 보여주는 것으로 약 460°의 각도가 측정된다. Fig. 2C는 정상청력을 가지는 정상인의 CBCT 소견으로 정원창 입구에서 와우공(helicotrema)을 연결한 연장선이 와우의 외측벽과 만나는 접까지의 거리를 측정할 수 있고 이를 이용하여 와우의 크기를 분류할 수 있다.

와우이식술 전의 잔존청력의 중요성이 최근 부각되고 있는데, 잔존청력을 보존함으로써 bimodal hearing과 전기청각자극을 환자들에게 적용하는 경우, 청각수행능이 개선된다는 연구결과들이 보고되고 있다. 이와 더불어 와우이식술 과정에서 와우내 손상을 최소화하면서 전극을 삽입하는 “soft surgery”가 중요하게 되었다. D’Elia 등⁵⁴⁾은 와우이식술을 받은 41명의 환자들을 술 전 잔존 청력의 상태에 따라 두 군으로 나누어 술 후 1년째에 청력검사, 언어지각능, 전기생리학적 검사를 시행하여 비교하였다. 두 군 사이에 술 후 언어지각능의 차이는 없었으나 잔존청력이 술 후 보존된 군에서, 전기생리학적 검사상 역동범위가 의미있게 넓은 것을 확인하였고 최대한 잔존청력을 보존하는 것이 중요하다고 주장하였다. “Soft surgery”的 중요한 부분인 정원창 접근법을 통한 전극삽입은 여러 가지 장점이 있다. 첫째, 드릴링의 최소화로 와우내 손상을 줄이고,

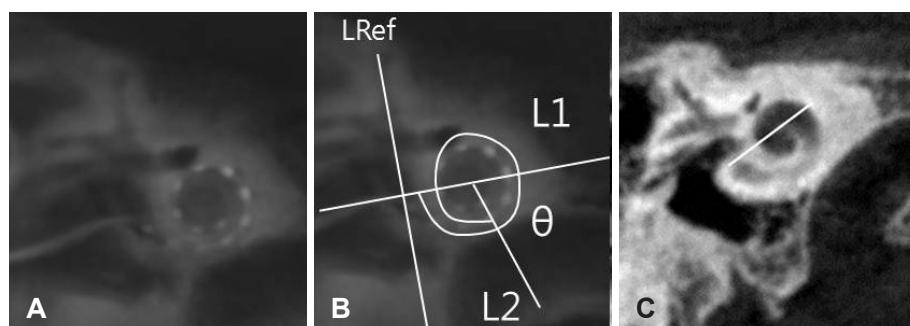


Fig. 2. The measurements of insertion depth angle and cochlear width using cone beam computed tomography (CBCT) data. Superimposed view onto a CBCT slice through the basal turn. The round window reference point is defined by the crossing of the implanted electrode array with an imaginary reference line (L_{ref}) from the apex of the superior semicircular canal through the center of the vestibule. The insertion depth angle (θ) is defined as the angle between L_1 (a line perpendicular to L_{ref}) and L_2 (the extrapolation of an imaginary line from helicotrema through the tip of the electrode array)(A and B). Cochlear duct width is defined as the largest distance from the round window, through the modiolar axis, to the lateral wall (C).

전극이 고실계로 자연스럽게 삽입되게 하여 좀 더 와우축에 근접하게 위치시킬 수 있으며, 와우개창술에 비해 나선판을 전극이 약 2 mm 이상 더 자극을 줄 수 있게 된다. 정원창 개방을 위해서는 후고실개방술을 통해 접근하게 되는데, 와우의 배치와 정원창 지붕(round window niche)의 변이로 인해 환자마다 접근성이 달라지게 된다. Leong 등⁵⁵⁾은 후고실개방술 및 정원창 지붕 제거 후 정원창의 접근성을 분류하였는데, 전체 정원창이 관찰되는 경우에 제I형, 50% 이상 관찰되는 경우에 제IIa형, 50% 이하로 관찰되는 경우에 제IIb형, 그리고 정원창이 관찰되지 않는 경우에 제III형으로 나누어 분석하였다. 74명의 성인환자와 54명의 소아환자를 분석한 결과, 제I형과 제IIa형이 89%, 78%를 차지하였고, 제IIb형과 제III형은 소아에서 성인에 비해 유의하게 빈도가 높았다. 이러한 분류는 와우이식술 중 전극 삽입방식을 결정하는 데 유용하며 술 전 영상검사 평가를 통해 성공적인 와우이식이 이루어지는 데 도움이 될 수 있다.

Eppsteiner 등⁵⁶⁾은 유전자변이와 와우이식술의 결과 간의 상관성을 알아보고자 하였는데, 와우이식술을 받은 29명의 언어습득기 후 전농성인환자들을 대상으로 언어수행능의 정도에 따라 세 군(good, intermediate, poor)으로 분류하여 유전자 변이 여부 및 위치를 분석하였다. 3명의 환자에서 유전자 변이가 확인되었고 언어수행능이 떨어지는 2명의 환자는 나선신경절에서 표현되는 *TMPRSS3*의 변이가 확인되었고, 언어수행능이 좋은 1명의 환자는 막성미로에서 표현되는 *LOXHD1*의 변이가 확인되었다. 또한 체계적 문헌고찰(systematic review)을 통해 70편의 연구결과를 분석하였는데 언어수행능이 좋은 경우 막성미로에서 표현되는 유전자의 변이와 관련이 있는 반면, 언어수행능이 떨어지는 경우 나선신경절에 표현되는 유전자의 변이와 연관성이 있는 것으로 보고하면서 와우이식의 경우, 전극을 통한 신호가 막성미로를 우회하여 나선신경절에 전달되는 것과 일치하는 결과라고 제시하였다.

결 론

전농환자에서의 와우이식술은 이제 전세계적으로 보편화된 청각재활방법으로 자리잡은 상태로 이와 관련된 술 후 언어수행능에 대한 예후인자들에 대한 연구들은 현재에도 지속적으로 이루어지고 있으나 아직까지도 밝혀지지 않은 인자들은 많다고 할 수 있다. 하지만 이러한 분석 결과들은 와우이식술을 시행하는 데 있어서 술 후 청각학적 이득에 대한 환자별 분석을 통한 결과 예측에 중요한 역할을 할 것이며 술 전 환자의 상담에 있어서 실질적인 도움을 줄 수 있을 것이다.

REFERENCES

- Lee SH, Lee KY, Jang JH. Cochlear implant present and future. Proceedings of the 10th Dong-A hearing symposium;2013 November 13. p.7-24.
- Blamey P, Artieres F, Baskent D, Bergeron F, Beynon A, Burke E, et al. Factors affecting auditory performance of postlinguistically deaf adults using cochlear implants: an update with 2251 patients. *Audiol Neurotol* 2013;18(1):36-47.
- Lazard DS, Vincent C, Venail F, Van de Heyning P, Truy E, Sterkers O, et al. Pre-, per- and postoperative factors affecting performance of postlinguistically deaf adults using cochlear implants: a new conceptual model over time. *PLoS One* 2012;7(11):e48739.
- Roditi RE, Poissant SF, Bero EM, Lee DJ. A predictive model of cochlear implant performance in postlingually deafened adults. *Otol Neurotol* 2009;30(4):449-54.
- Semenov YR, Martinez-Monedero R, Niparko JK. Cochlear implants: clinical and societal outcomes. *Otolaryngol Clin North Am* 2012;45(5):959-81.
- Skinner MW, Fourakis MS, Holden TA, Holden LK, Demorest ME. Identification of speech by cochlear implant recipients with the multipeak (MPEAK) and spectral peak (SPEAK) speech coding strategies II. Consonants. *Ear Hear* 1999;20(6):443-60.
- Lenarz T, Stöver T, Buechner A, Lesinski-Schiedat A, Patrick J, Pesch J. Hearing conservation surgery using the Hybrid-L electrode. Results from the first clinical trial at the Medical University of Hannover. *Audiol Neurotol* 2009;14 Suppl 1:22-31.
- Lee DS, Lee JS, Oh SH, Kim SK, Kim JW, Chung JK, et al. Cross-modal plasticity and cochlear implants. *Nature* 2001;409(6817):149-50.
- Waltzman SB, Roland JT Jr. Cochlear implantation in children younger than 12 months. *Pediatrics* 2005;116(4):e487-93.
- Holt RF, Svirsky MA. An exploratory look at pediatric cochlear implantation: is earliest always best? *Ear Hear* 2008;29(4):492-511.
- Connor CM, Craig HK, Raudenbush SW, Heavner K, Zwolan TA. The age at which young deaf children receive cochlear implants and their vocabulary and speech-production growth: is there an added value for early implantation? *Ear Hear* 2006;27(6):628-44.
- Dettman SJ, Pinder D, Briggs RJ, Dowell RC, Leigh JR. Communication development in children who receive the cochlear implant younger than 12 months: risks versus benefits. *Ear Hear* 2007;28(2 Suppl):IIS-8S.
- Nott P, Cowan R, Brown PM, Wigglesworth G. Early language development in children with profound hearing loss fitted with a device at a young age: part I--the time period taken to acquire first words and first word combinations. *Ear Hear* 2009;30(5):526-40.
- Zwolan TA, Ashbaugh CM, Alarfaj A, Kileny PR, Arts HA, El-Kashlan HK, et al. Pediatric cochlear implant patient performance as a function of age at implantation. *Otol Neurotol* 2004;25(2):112-20.
- Gordon KA, Daya H, Harrison RV, Papsin BC. Factors contributing to limited open-set speech perception in children who use a cochlear implant. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol* 2000;56(2):101-11.
- Teoh SW, Pisoni DB, Miyamoto RT. Cochlear implantation in adults with prelingual deafness. Part I. Clinical results. *Laryngoscope* 2004;114(9):1536-40.
- Chilosí AM, Comparini A, Scusa MF, Berrettini S, Forli F, Battini R, et al. Neurodevelopmental disorders in children with severe to profound sensorineural hearing loss: a clinical study. *Dev Med Child Neurol* 2010;52(9):856-62.
- Berrettini S, Forli F, Genovese E, Santarelli R, Arslan E, Chilosí AM, et al. Cochlear implantation in deaf children with associated disabilities: challenges and outcomes. *Int J Audiol* 2008;47(4):199-208.
- Meinen-Derr J, Wiley S, Grether S, Choo DI. Language performance in children with cochlear implants and additional disabilities. *Laryngoscope* 2010;120(2):405-13.
- Jackler RK, Luxford WM, Schindler RA, McKerrow WS. Cochlear

- patency problems in cochlear implantation. *Laryngoscope* 1987;97(7 Pt 1):801-5.
- 21) Kiefer J, von Ilberg C, Rupprecht V, Hubner-Egner J, Knecht R. Optimized speech understanding with the continuous interleaved sampling speech coding strategy in patients with cochlear implants: effect of variations in stimulation rate and number of channels. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 2000;109(11):1009-20.
 - 22) Papsin BC. Cochlear implantation in children with anomalous cochleovestibular anatomy. *Laryngoscope* 2005;115(1 Pt 2 Suppl 106):1-26.
 - 23) Kim LS, Jeong SW, Huh MJ, Park YD. Cochlear implantation in children with inner ear malformations. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 2006;115(3):205-14.
 - 24) Vlahović S, Sindija B. The influence of potentially limiting factors on paediatric outcomes following cochlear implantation. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol* 2004;68(9):1167-74.
 - 25) Arisi E, Forti S, Pagani D, Todini L, Torretta S, Ambrosetti U, et al. Cochlear implantation in adolescents with prelinguistic deafness. *Otolaryngol Head Neck Surg* 2010;142(6):804-8.
 - 26) Osberger MJ, Zimmerman-Phillips S, Koch DB. Cochlear implant candidacy and performance trends in children. *Ann Otol Rhinol Laryngol Suppl* 2002;189:62-5.
 - 27) Gantz BJ, Rubinstein JT, Tyler RS, Teagle HF, Cohen NL, Waltzman SB, et al. Long-term results of cochlear implants in children with residual hearing. *Ann Otol Rhinol Laryngol Suppl* 2000;185:33-6.
 - 28) Cheng AK, Niparko JK. Cost-utility of the cochlear implant in adults: a meta-analysis. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg* 1999;125(11):1214-8.
 - 29) O'Donoghue GM, Nikolopoulos TP, Archbold SM. Determinants of speech perception in children after cochlear implantation. *Lancet* 2000;356(9228):466-8.
 - 30) Moog JS, Geers AE. Early educational placement and later language outcomes for children with cochlear implants. *Otol Neurotol* 2010;31(8):1315-9.
 - 31) Niparko JK, Tobey EA, Thal DJ, Eisenberg LS, Wang NY, Quittner AL, et al. Spoken language development in children following cochlear implantation. *JAMA* 2010;303(15):1498-506.
 - 32) Chang DT, Ko AB, Murray GS, Arnold JE, Megerian CA. Lack of financial barriers to pediatric cochlear implantation: impact of socioeconomic status on access and outcomes. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg* 2010;136(7):648-57.
 - 33) Kim HN, Shim YJ, Chang MS, Lee JJ, Park HJ. Contributing factors of the phoneme recognition ability in nucleus 22-channel cochlear implantees. *Korean J Otolaryngol* 1995;38(6):809-17.
 - 34) Heo MJ, Jeong SW, Ahn SW, Boo SH, Kim LS. Open-set speech perception performance and its contributing factors for children received cochlear implantation at older age. *Korean J Otorhinolaryngol-Head Neck Surg* 2008;51(2):130-5.
 - 35) Kim CS, Chang SO, Oh SH, Koo JW, Hwang CH, Ahn SH, et al. Outcome of cochlear implantation in postmeningitic children. *Korean J Otolaryngol-Head Neck Surg* 2002;45(1):13-7.
 - 36) Shin MS, Kim SK, Oh SH, Lee HJ, Kim CS. A preliminary study of predictive factors for language and cognitive development after cochlear implant in congenital deaf children. *Korean J Otolaryngol-Head Neck Surg* 2004;47(11):1095-101.
 - 37) Moon IJ, Kim EY, Jeong JO, Chung WH, Cho YS, Hong SH. The influence of various factors on the performance of repetition tests in adults with cochlear implants. *Eur Arch Otorhinolaryngol* 2012;269(3):739-45.
 - 38) Philippon D, Bergeron F, Ferron P, Bussières R. Cochlear implantation in postmeningitic deafness. *Otol Neurotol* 2010;31(1):83-7.
 - 39) Jang JH, Na KJ, Kang DH, Cho IJ, Lee MJ, Lee KY, et al. Comparative analyses of the limiting factors in cochlear implant outcome. Proceedings of 18th Combined Congress of Otorhinolaryngology Head and Neck Surgery 2012 October 19-20, p.125.
 - 40) Friedland DR, Venick HS, Niparko JK. Choice of ear for cochlear implantation: the effect of history and residual hearing on predicted postoperative performance. *Otol Neurotol* 2003;24(4):582-9.
 - 41) Leung J, Wang NY, Yeagle JD, Chinnici J, Bowditch S, Francis HW, et al. Predictive models for cochlear implantation in elderly candidates. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg* 2005;131(12):1049-54.
 - 42) Blamey P, Arndt P, Bergeron F, Bredberg G, Brimacombe J, Facer G, et al. Factors affecting auditory performance of postlinguistically deaf adults using cochlear implants. *Audiol Neurotol* 1996;1(5):293-306.
 - 43) Pagarkar W, Gunny R, Saunders DE, Yung W, Rajput K. The bony cochlear nerve canal in children with absent or hypoplastic cochlear nerves. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol* 2011;75(6):764-73.
 - 44) Chung JY, Jang JH, Cho SW, Suh MW, Lee JH, Oh SH, et al. Outcomes of cochlear implantations in patients with narrow bony cochlear nerve canal. Proceedings of 20th World Congress of the International Federation of Oto-Rhino-Laryngological Societies 2013 June 1-5, abstract e-book.
 - 45) Tong YC, Clark GM. Absolute identification of electric pulse rates and electrode positions by cochlear implant patients. *J Acoust Soc Am* 1985;77(5):1881-8.
 - 46) Blamey PJ, Pyman BC, Gordon M, Clark GM, Brown AM, Dowell RC, et al. Factors predicting postoperative sentence scores in postlinguistically deaf adult cochlear implant patients. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 1992;101(4):342-8.
 - 47) Hochmair I, Arnold W, Nopp P, Jolly C, Müller J, Roland P. Deep electrode insertion in cochlear implants: apical morphology, electrodes and speech perception results. *Acta Otolaryngol* 2003;123(5):612-7.
 - 48) Hartrampf R, Dahm MC, Battmer RD, Gnadeberg D, Strauss-Schier A, Rost U, et al. Insertion depth of the Nucleus electrode array and relative performance. *Ann Otol Rhinol Laryngol Suppl* 1995;166:277-80.
 - 49) Yukawa K, Cohen L, Blamey P, Pyman B, Tungvachirakul V, O'Leary S. Effects of insertion depth of cochlear implant electrodes upon speech perception. *Audiol Neurotol* 2004;9(3):163-72.
 - 50) Franke-Trieger A, Jolly C, Darbinjan A, Zahnert T, Mürbe D. Insertion depth angles of cochlear implant arrays with varying length: a temporal bone study. *Otol Neurotol* 2014;35(1):58-63.
 - 51) Cushing SL, Daly MJ, Treaba CG, Chan H, Irish JC, Blaser S, et al. High-resolution cone-beam computed tomography: a potential tool to improve atraumatic electrode design and position. *Acta Otolaryngol* 2012;132(4):361-8.
 - 52) Jiang D, Connor SE, O'Connor AF. Assessing Advanced Bionic HiFocus Mid-Scala electrode cochlear placement with cone beam CT scan. The 9th Asia Pacific Symposium on Cochlear Implants and Related Sciences 2013 November 26-29, abstracts e-book.
 - 53) Frijns JH, Klop WM, Bonnet RM, Briare JJ. Evaluation of the tonotopy of insertion and speech perception for the Hi-Focus IJ and the new Hi-Focus midscalp electrode arrays. The 9th Asia Pacific Symposium on Cochlear Implants and Related Sciences 2013 November 26-29, abstracts e-book.
 - 54) D'Elia A, Bartoli R, Giagnotti F, Quaranta N. The role of hearing preservation on electrical thresholds and speech performances in cochlear implantation. *Otol Neurotol* 2012;33(3):343-7.
 - 55) Leong AC, Jiang D, Agger A, Fitzgerald-O'Connor A. Evaluation of round window accessibility to cochlear implant insertion. *Eur Arch Otorhinolaryngol* 2013;270(4):1237-42.
 - 56) Eppsteiner RW, Shearer AE, Hildebrand MS, Deluca AP, Ji H, Dunn CC, et al. Prediction of cochlear implant performance by genetic mutation: the spiral ganglion hypothesis. *Hear Res* 2012;292(1-2):51-8.