

청각장애인을 위한 인공이식기 개발 및 임상응용(I)

박상희, 신중인, 박현규, *김희남, *이호기, **김중선, **장선오,
임덕환, **오승하, **정원호, **변성완, *이강희, ***최경암
연세대 공대 전기공학과, *연세대 의대 이비인후과,
서울대 의대 이비인후과, *(주)광우메딕스

Development of Implant Devices for the Hearing Impaired and Their Clinical Applications

S.H.Park, J.I.Shin, H.G.Park, *H.N.Kim, *H.K.Lee, **C.S.Kim, **S.O.Chang,
D.H.Lim, **S.H.Oh, **W.H.Jung, **S.W.Byun, *K.H.Lee, ***K.A.Choi
Dept. of Electrical Engineering, *Dept. of Otolaryngology, Yonsei Univ.,
Dept. of Otolaryngology, Seoul National Univ., *Kwangwoo International Inc.

요 약

본 연구는 G7 의료공학기술개발사업의 1차년도 연구결과이다. 본 연구의 최종목표는 청각계통중 내이의 손상에 의한 감각성 난청환자에게 소리를 인식할 수 있게 하는 한국형 인공와우의 개발, 전 음성 난청환자의 음성인식 효율을 높일 수 있는 한국형 인공이소골의 개발 그리고 인공와우 시술환자에게 적합한 재활용 프로그램을 개발하는데 있다. 이를 위하여 지난 1차년도에는 코클리어의 전기생리학적 현상을 규명하고, 이식전극시스템과 그 주변장치를 설계, 평가하였다. 그리고 한국인의 성인 사체의 16귀를 측정하여 한국인 체형에 적합한 인공이소골의 설계기준을 확립하였다. 또한, 인공와우 시술 후 청력회복에 필요한 한국형 재활프로그램의 개발을 위하여 인공와우의 coding strategy에 따른 언어분별력 조사, 유소아의 어음특성분석등을 행하였다. 이 연구결과를 토대로 차기년도에는 상용화에 근접한 프로토타입의 제품개발과 임상실험이 진행되리라 생각된다.

서 론

청각계통중 내이의 손상에 의한 감각성 난청환자에게 소리를 인식할 수 있게 하는 인공와우의 최종목표는 음성의 완전한 인식에 있다. 그러나 이를 실제로 상용화하기 위해서는 청각생리학, 청음물리학, 신호처리, 유무선 통신등의 학문과 기술이 융합되어야 하며, 전체 시스템을 휴대용, 소형화등이 가능하도록 설계하기 위한 하드웨어설계 및 제작기술 또한 매우 중요하다. 또한 인공와우 시술후 청력회복을 위한 재활 프로그램이 필수적으로 수반됨은 물론이다. 그러나 현재, 인공와우는 고도의 기술축적을 한 일부 선진국에서만 개발되어 매우 고가로 시판하고 있으며 국내개발은 전무한 실정이고, 국내기술은 겨우 개념정립 단계라고 할 수 있지만, 외국의 기술정보는 거의 노출되지 않고 있으므로 국내의 독자적인 기술축적과 개발을 하지 않을 수 없다. 현재 이 부분의 국내 연구동향은 일부 대학

을 중심으로 신호코딩 및 전극시스템 개발에 관한 연구로 이론적 측면의 연구가 진행되어 왔는데, 이와 같은 연구의 결과를 바탕으로 시작품을 제작하여 인공와우를 저가격으로 개발할 경우 장애인의 복지증진에 큰 혁신을 이룰 것이며, 기술축적은 물론 수입대체 효과에 크게 기여할 것이다. 이외에 이소골 손상에 의한 전음성난청 환자에 대한 이소골 재건술을 위한 인공이소골은 전량 수입에 의존하고 있지만, 한국인의 체형에 적합하지 않은 단점이 있으므로, 이 부분의 국산화도 시급한 실정이라 할 수 있다.

이러한 목표를 기초로 한 본 연구가 G7 의료공학기술개발과제로 선정되어 수행한 1차년도의 연구결과를 다음과 같이 보고하고자 한다.

연구내용 및 결과

1. 청각계통의 전기생리학적 특성 분석

귀의 구성은 크게 외이, 중이, 내이로 나뉜다. 외이와 중이의 역할은 증폭과 filtering, 내이의 역할은 시간지연이 된 filter bank 및 transducer로 생각할 수 있다. 외이로 들어온 음파는 고막을 진동시키고 이 진동은 중이의 3뼈에 의해 내이의 코클리어에 전달된다. 전달된 신호는 기저막을 따라 진행하게 되는데 이 기저막은 위치에 따른 물리적 성질이 달라 입력신호의 주파수에 따라 진동하는 폭이 다르다. 내이의 기저막 위 코르티 기관에는 헤어셀이라고 불리는 유모세포들이 약 30,000개 정도 분포되어 있어 이 세포들이 기저막의 운동에 의해 자극을 받아 신경 발화하여 중추 신경을 거쳐 뇌로 전달하게 된다. 본 연구주제는 내이의 헤어셀이 파괴되어 소리를 인식하지 못하는 감각성 난청환자들을 위한 인공귀의 중요부분인 음성신호처리기의 개발이 목적이다. 그 핵심은 외이, 중이의 역할 및 내이 기저막의 filter bank 역할을 대신 할 수 있는 장치의 개발이므로 청각계통의 음성 주파수 특성에 대한 보다 많은 연구가 선행되어야 한다.

내이의 코클리어는 달팽이 모양으로 되어있으며 전정창에 유입된 입력음성신호는 코클리어 경계를 따라 진행하면서 헬리코트레마를 거쳐 와우창에서 소멸된다. 이때 코클리어 경계를 구성하는 기저막은 위치에 따라서 질량, 탄성계수 등이 달라 입력 신호의 주파수에 따라 진동하는 폭이 다르다. 고주파 성분은 등골쪽에서 최대 공진을 일으키고 저주파로 갈수록 헬리코트레마 근처의 공진이 커지게 된다. 이때 기저막이 최대 공진을 일으키는 위치를 특성위치(characteristic place)라 하고 이 때의 주파수를 특성주파수(characteristic frequency)라 하며, 특성위치는 특성주파수의 log값과 비례한다. 이때의 주파수 간격은 bark scale이라고 한다. 1 bark의 간격은 기저막 상의 약 1.5mm의 간격에 해당한다. 기저막의 위치에 따른 주파수 선택도의 상승 기울기와 감쇠 기울기의 특성에 대한 측정이 여러 학자들에 의해 이루어졌으며 이 측정 결과에 의하면 기저막의 한 점은 시간지연 특성과 대역 통과 필터와 같은 특성을 가지며, 고주파 영역에서의 기울기가 저주파 영역에서의 기울기보다 가파른 특성을 가진다. 이러한 특성은 전기적으로는 filter bank 특성으로 모델링이 가능하다. 즉 기저막의 특성 위치에 해당하는 부분에 특성 주파수를 갖는 자극신호를 가하면 소리의 지각이 가능하다.

연구 내용을 토대로 한 인공귀의 전체 시스템 구성방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 정보추출방식이고, 두 번째는 청각모델방식이다. 정보추출방식은 음성신호의 중요한 부분만을 추출하여 정보를 분석한 후 자극신호를 코딩하는 방식이다. 전체 시스템의 순서는 다음과 같다. 먼저 음성신호를 입력으로 받아 유성음, 무성음을 판별한다. 무성음인 경우는 intensity만을 추출하여 자극신호를 합성한다. 유성음인 경우는 pitch, formant, 그리고 intensity를 차례로 추출하여 자극신호를 합성한다. 이 방법은 이미 분석되어 알고 있는 음성신호에 대해서만 자극신호를 줄 수 있다는 한계가 있다. 청각모델방식은 귀의 외이, 중이, 내이의 각각의 특성에 대한 모델링을 하여 역할을 대신하게 하는 방식으로 개별적인 입력신호의 분석이 필요없으며 다양한 소리에 대한 전달이 가능하여, 귀의 생리학적 특성에 더욱 근접한 방식이다.

본 연구에서는 청각모델방식을 채택하여 알고리즘을 만들고 시스템에 대한 모의실험을 하였다. 전체 시스템은 음성신호 전처리부와 음성신호 후처리부이다. 이 방식에서 특히 중요한 부분은 음성신호 후처리부인 filter bank의 구현이다. 위 알고리즘의 핵심은 filter bank에서 주파수 대역별로 신호를 추출하여 에너지를 계산하는 것이다. 대역의 수 및 대역폭은 전기자극을 줄 채널수와 코클리어의 특성에 따라 결정하는 것이며 정해진 것은 아니고 가변 가능하다. 대역폭은 일정한 비율의 대역폭으로 설정할 수도 있고 코클리어의 특성에 따라 log 함수적인 대역폭으로 설정할 수도 있다.

최종적으로 filter bank를 22개의 대역으로 설정하여 22채널의 데이터를 추출하였다. 앞으로는 추출된 음성데이터에 대한 각 채널별 자극신호를 변조기로 입력한 후, 적절한 자극패턴으로 변조하여 전극에 입력하는 후속실험과 임상실험이 진행되어야 할 것이다.

2. 한국인의 이소골 계측

이소골 재건술의 결과에 미치는 요소로는 수술방법과 술기, 이소골의 재료, 병변의 상태 등이 있으며, 이 중 이소골 재료에 대하여는 아직도 완전한 인공 이소골이 개발되지 않은 상태이다. 현재 우리나라에서는 인공 이소골을 수입에 전적으로 의존하는 실정이며, 현재 상품화된 인공 이소골의 치수는 일부분이 한국인에 맞지 않아 개선할 필요성이 있는 상태이다. 따라서 정상 한국인 이소골의 수치를 측정함으로써 한국인 체형에 맞는 인공이소골 개발의 기초 자료로 활용하고자 한다.

재료는 한국인의 성인 사체 8구(16귀)를 사용하였으며 현미경하에서 유양동삭개술을 시행한 후 Zeiss 수술현미경과 오차 0.05mm의 버니어캘리퍼를 이용하여 다음의 측정변수를 측정하였다.

<측정 변수>

- 망치뼈-길이 : 머리, 목, 짧은 돌기, 자루
직경 : 머리, 목, 자루의 긴직경과 짧은직경
- 모루뼈-길이 : 몸통의 긴측과 짧은 돌기, 긴 돌기, 두상돌기
직경 : 몸통과 짧은 돌기 및 긴 돌기의 짧은 직경 및 긴 직경, 두상돌기
- 등자뼈-높이 : 목, 다리
직경 : 앞, 뒷다리 및 바닥판의 짧은 직경과 긴 직경, 머리, 목
두께 : 바닥판
- 망치뼈자루의 중심과 등자뼈 목의 아래 끝점 사이의 직선길이(C)
- 망치뼈자루의 중심과 등자뼈 바닥판의 아래 끝점 사이의 직선길이(C')
- C와 수직선이 이루는 각도(α)
- C'와 수직선이 이루는 각도(β)

중이의 이소골은 망치뼈와 모루뼈 및 등자뼈로 구성되어 있으며, 망치뼈의 자루 부분은 고막의 긴장부에 부착되어 고막에 전달된 소리 에너지를 받아 모루뼈의 긴다리 사이와 지렛대의 원리로 소리를 증폭시켜 등자뼈 바닥판 즉 난원창으로 전달하는 Impedance transformer의 역할을 한다. 따라서 전 음성 난청의 재활을 위하여 개발하려는 이소골은 고막 긴장부와 적합한 접촉과 이소골간에 소리에너지의 역학적 작용이 중요하다.

본 연구에서 측정한 이소골의 길이 및 각도에 대하여 Mills(1991)의 연구에 의하면 α 는 14-71도(평균 47도)로 보고하고 있으며, Wengen 등(1995)의 연구에 의하면 등자뼈 머리의 직경은 0.91-1.49mm(평균 1.14mm), 길이는 0.65-1.08mm(평균 0.83), 목 길이는 0.81-1.07mm(평균 0.93mm), 다리 길이 1.15-1.39mm(평균 1.26), 앞다리 직경 0.41-0.74mm(평균 0.58mm), 뒷다리 직경 0.46-0.77mm(평균 0.65mm)등으로 본 연구와는 비교적 다른 결과를 보인다. 즉 한국인과 외국인 이소골 간에 기하학적 계측의 차이를 보이므로 한국형 인공 이소골의 개발이 필요하리라 사료된다.

3. 임상데이터 수집 분석

3.1 인공와우의 coding strategy에 따른 언어분별력 조사

인공와우의 전기신호 발체방법(coding strategy)은 어떻게 음성을 적절한 전기신호로 변환시키는데 대한 공식이라 할 수 있다. 따라서 이 부분이 인공와우의 기술 중 가장 중요한 부분인데 공학기술이 발달함에 따라 점차로 많은 음성정보를 보다 적절히 추출할 수 있도록 발전되어 왔다. 즉 초기의 F0/F2와 F0/F1/F2 방식, 그다음 Multispectral peak coding strategy, 그리고 최근의 SPEAK까지 개발이 되어왔다. 이러한 개발은 물론 영어권에서 적합하도록 연구된 것이어서 과연 우리나라의 언어 구조에서도 똑같이 적용될 것인가에 대한 의문이 있어왔다. 이를 알아보기 위하여 한 환자에서 서로 다른 strategy를 이용하였을 때의 재활성적을 비교하여 보았다. 대상은 서울대학교 이비인후과에서 96년 7월까지 인공와우이식술을 받고 재활 중인 성인환자 18명중에서 두가지 이상의 coding strategy를 경험한 사람의 언어분별력을 후향적으로 분석하였다. 또한 연세대학교 이비인후과에서 13명의 성인환자에서 재활후 각각 MPEAK와 SPEAK의 방법을 이용하여 언어분별력의 차이를 보았다. 하지만 아직까지 두 대학에서의 어음지각능력 조사표가 일치하지 않아 양쪽의 데이터를 직접 합쳐서 비교하는 것은 불가능하였다. 연구결과 고주파의 정보를 보다 많이 전달하는 strategy 일수록 first fricative의 명료도가 증가하는 이유로 인해 어음의 분별력도 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 같은 strategy를 쓰는 환자들 중에도 전농기간이 길다든지, 이용되는 전극의 수가 제한 되어 있다든지 등의 개별적인 특징에 따라 수술 후 재활의 한계에 차이를 볼 수 있었다. 각 strategy에 따른 검사결과 비교는 한 사람에서 수술 후 충분한 재활기간이 경과한 후 시행한 어음지각능력을 비교하여 두가지 이상의 상이한 strategy간에 어떠한 차이를 보이는지 분석하려는 것인데, 이는 환자가 전적으로 검사의 의도를 이해하고 협조를 해 주어야만 가능한 것으로 앞으로 보다 많은 성인환자를 검사하고 검사항목도 각 병원간에 통일할 필요가 있다고 생각된다.

3.2 유소아의 어음특성분석

어음지각능력 검사법을 비교, 제작하기에 앞서 한국어의 어음학적 특성을 살펴 보았다. 본 연구에서는 3세 아동의 언어발달에 따른 어음학적 특성을 연구하였다. 그 이유는 점차 증가하는 소아 환자의 평가를 위하여 상대적으로 잘 연구되어있지 않은 소아군의 어음연구가 필요하였기 때문이다. 정상 유소아에서 그 어머니와 소통하는 자발적 발화 샘플을 수집하여 그 발음대로 음성기호로 전사한 후 18자음의 어두위치에서의 빈도수와 7자음의 어말위치에서의 빈도수를 구하였다. 이를 기준으로 만 3세 이전에 습득되는 수용어휘(receptive vocabulary)중 1음절로 된 50개의 단어를 선정하여 각각에 대한 3개씩의 보기들을 정하였다. 만들어진 검사표의 타당성을 조사하기 위하여 정상소아군 3세와 5세군을 대상으로 검사를 시행중에 있다.

3.3 인공와우 수술시 곤란증 및 수술 후 합병증의 증례수집 및 분석

본 연구에서는 1988년 11월부터 1995년 12월까지 서울대학교병원에서 시행되었던 인공와우 수술의 45례를 분석하여 수술중 곤란증 및 수술 후 합병증을 보였던 19예의 원인, 처치방법등을 연구하여 보았다. 결과 와우폐색이 11례, 개방공동 3례, 이식기결함 1례등 문제점을 관찰할 수 있었다. 와우폐색은 미리 CT등을 통하여 진단 할 수 있었고 대부분의 경우 별 문제 없이 전극을 삽입할 수 있었다. 만성 중이염의 수술로 인해 생기거나 선천적으로 아주 작은 유양동을 가지고 있어 발생한 개방공동의 경우 두터운 근피판을 이용하여 유양동을 막아주는 1차수술을 한 후 2차수술에서 근피판 아래로 안전하게 전극을 위치시킬 수 있었다. Takayasu 질환을 가지고 있었던 한 환자에서 이식기 결함이 발견되었고 재이식을 하여 별 문제없이 재활할 수 있었다. 또한 각각 안면신경과 설인신경이 자극되는 환자가 있어 해당 전극의 활성을 중지시켜야 했던 경우가 있었다.

4. 자극신호추출 알고리즘 개발

1차년도에는 한국어처리에 적합한 인공와우 시스템을 만들기위한 이식전극 시스템과 그 주변장치의 설계개발을 시작하였다. 그 일차단계로 감각신경과 학이론에 근거한 효과적인 와우전극배열을 설계, 검토 하였다. 우선, 음성신호 전달과정에 관한 최근의 청신경 관련자료들을 이용해서, 설계된 인공와우 전극배열의 효율성 및 설계의 타당성을 모델시스템을 통해서 평가하였다. 이를 위해, 인공와우 전극배열에서 적절한 주파수와 시분할대를 설정하고, 각 채널간 전위분포에 대해서 청각 생리학적으로 연관된 변수들의 분석을 통해 그 효과를 검증하였다.

우선, 환자의 이용가능한 청신경세포들의 분포가 다양함을 고려해서 주어진 길이에 음성 주파수대역을 분할하는 연구를 했다. 이때, 각 전극배열이 와우에서의 tonotopy와 언어음성대역 특징에 맞도록 설계되었다. 이들에 대한 성능분석을 위해 생화학적 모델시스템을 이용해서 효과적인 전극분할방식을 설정하고, 주파수대역 안배와 시분할적인 면을 특히 자극장소 및 방법에 따라 각 해당 와우전극배열 설계에서 평가하였다. 이때, 고려된 주요 사항들은 다음과 같다

- 자극신호를 전달하는 매체에 대한 채널간의 전기적 상호영향을 분석하였다.
- 전극배열방식의 효율성을 모뮬레이션 오디오 실험을 통해서 객관적으로 분석하였다.
- 전극간 주파수 및 시분할대 할당지침을 설정하였다.
- 전극배열 주형 처리과정을 마련하였다.

이러한 연구들을 통해서 다음과 같은 결과들이 얻어졌다.

- 채널간의 분리 한계점이 있음이 확인되었고 여기서 얻어진 전극상호간 전달 전하량 및 전류분포 특

성을 전극배열 설계에 응용하였다.

-전극배열성능에 관한 실험결과에서 양전극 변조신호, 양전극 무변조, 단전극 무변조 순으로 그 자극 효율성이 있음이 나타나, 이를 신호처리에 이용하고자 한다.

-고자극율을 이용해서 신경생리학적으로 자리와 빈도에 의한 피치를 조절할 수 있음이 확인되었다.

-채널수 및 주파수대 분할(최대20채널, 균일, 압축, 신장)이 설정되었고 음성 신호표본주기와 펄스(주기, 스텝크기, 폭) 조절등이 검토되었다.

-밴드화된 전극제작시 silastic과 catalyst를 이용하는 방식을 평가 하였다(LEICO, A-M방식).

이상의 결과들을 통해서, 객관적자료에 의한 전극배열 설계가 이루어졌고, 인공와우 시스템은 다음과 같은 기능이 포함되었다.

-설계된 배열에서 알려져 있는 여러 피치인식기전의 활용이 가능하다.

-환자마다 다른 청신경세포 분포에 따른 자극방식의 효율적 변환이 용이하다.

-신경생리학적 근거에 의한 자극변수 범위 및 조정이 정량화될 수 있게 되었다.

-여러 신호처리 방식에 대해 유연성이 있어서, 특히 한국어에 적합한 여러가지 신호처리 방식의 구현에 유리하다.

위와 같이 인공와우를 이용한 음성인식 기능에 큰 영향을 미치는 전극배열 설계를 청각생리학적 근거하에서 효율적으로 이루게 되어 앞으로의 원활한 과제수행에 큰 도움이 되리라 생각된다.

결 론

G7 의료공학기술개발사업 과제인 '청각장애인을 위한 인공이식기 개발 및 임상응용'의 1차년도 연구결과를 소개하였다.

청각계통의 전기생리학적 특성 분석에서는 청각계통을 청각모델방식을 이용한 filter bank로 해석하여 입력된 음성신호를 다중채널의 신호로 분리하는 방법을 사용했으며, 자극신호추출 알고리즘 개발에서는 우선 감각신경과학이론에 근거한 효과적인 와우전극배열을 설계, 검토 하였다. 이를 토대로 2차년도에는 실제의 하드웨어 프로토타입의 설계가 가능하리라고 생각된다. 그리고 임상데이터 수집 분석에서는 제작된 하드웨어를 임상실험할 때에 적용할 수 있는, 환자에 대한 한국형 재활 프로그램

설계를 위한 언어분별력 조사등의 사전연구가 이루어졌으며, 또한 인공이소골 개발에서는 한국인과 외국인 이소골 간에 기하학적 계층의 차이를 보여서 한국형 인공 이소골의 개발이 필요하리라는 결론을 얻을 수 있었다.

*본 연구는 1995년 보건복지부에서 시행한 G7 의료공학기술개발사업의 1차년도 연구결과임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

1. 백승화, "청각동조 수학적 모델에서의 음성신호에 대한 패턴 추출", 연세대학교 대학원 박사학위논문, 1987.
2. 김희남등, "Nucleus 22채널 와우이식 환자의 어음변별력에 미치는 요소", 한이인지 38, pp.809-817, 1995.
3. G.V.Bekey, "Experiment in hearing", Robert E. Krieger Publishing Company, Huntington, New York, 1980.
4. E.Zwicker, E.Terhardt, "Analytical expressions for critical band rate and critical bandwidth as a function of frequency", J. Acoust. Soc. Am. 68, pp.1523-1525, 1980.
5. R.C.Black, G.M.Clark, "Differential electrical excitation of the auditory nerve", J. Acoust. Soc. Am. 67, pp.868-874, 1980.
6. D. O'Shaughnessy, "Speech communication, Human and Machine", Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
7. M.Bellanger, G.Bonnerot, M.Coudreuse, "Digital filtering by polyphase network, Application to sample rate alternation and filter bank", IEEE Trans. on ASSP. ASSP-24, pp.109-114, 1976.
8. J.M.Goldstein, H.Moise, "Auditory Periphery As Speech Signal Processor", IEEE EMB Magazine, 13, pp.186 - 196, April/May, 1994.
9. Brackman, "The Cochlea Implant : basic principles" Laryngoscope, 86, pp.373-88, 1976.
10. Hochmair, "An implantable current source for electrical nerve stimulation", IEEE Trans. Biomed. Eng. BME-27, pp.278-280, 1980.