



# 생체전자공학을 이용한 인류복지에의 기여 - 인공감각소자



김성준

서울대학교 전기공학부 교수  
초미세생체전자시스템 연구센터 소장

## I. Introduction

20세기 전자공학 기술의 급속한 발전은 연구 대상을 마이크로에서 나노미터 영역에 이르는 물체로 확대시켰다. 최근에는 이러한 미세제작(Microfabrication) 기술 혹은 미세조작(Micromanipulation) 기술을 의학-생물학 분야에 접목시켜, 인간의 손상된 신경 기능을 대체할 수 있는 인공감각 소자를 개발하거나, 세포, 단백질 등의 생물학 반응을 정밀하게 측정할 수 있는

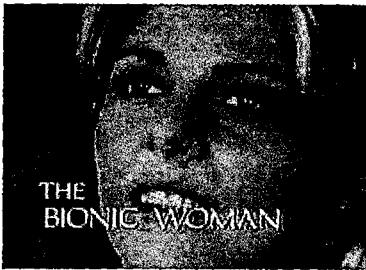


그림 1 1970년대 TV 시리즈로 인기를 누렸던 '소머즈', '600만불의 사나이'와 함께 '전자 인공 장기'의 미래를 제시하였다.

초소형 분석 시스템을 개발하는 연구가 전세계적으로 진행되고 있다. 본 기사에서는 대표적인 인공감각 소자로서, 청각계

손상에 활용될 수 있는 '인공와우(Cochlear Implant)'와, 시각계에 손상을 입은 환자들에게 적용되어 시기능 회복을 목적으로 하는 '인공망막(Artificial Retina)'에 대해 소개하고자 한다.

## II. 청각 장애인의 희망, 인공와우(Cochlear Implant)

현재 전세계적으로 인구 1,000명당 1명 정도의 선천적 청각장애 신생아가 태어나고 있다. 이들이 소리를 듣지 못하는 이유는 주로 유전적, 환경적 원인 등으로 인해 내이의 일부인 와우(달팽이관) 내의 유모세포(Hair Cell, 그림 2의 삽입그림)가 발현되지 않았거나 그 수가 매우 적기 때문이다.

유모세포는 체외에서 들어오는 소리 정보를 전기 신호로 바꾸어 주는 일종의 변환기(Transducer)이다. 이 유모 세포는 와우 내에 일렬로 배열되어 있으며 위치에 따라 반응하는 특정 주파수가 다르다. 유모세포에 의해 주파수별 전기 신호로 변환된 소리 정보는 신경절 세포(Ganglion Cell)를 거



쳐 청신경을 통해 뇌로 전달되어 소리로 인지된다. 청신경은 신경절 세포의 축삭돌기(Axon)의 모임이다.

정상인의 경우는 이 과정이 자연스럽게 이루어지지만, 유모세포가 없거나 파괴된 사람의 경우는 소리 자체를 청신경을 통해 뇌로 전달될 수 있는 전기 신호로 바꿀 수 없기 때문에 소리를 들을 수 없게 된다. 하지만 1970년대 초부터 전극을 와우에 삽입한 후(그림 2) 유모세포 다음 단계인 신경절 세포를 전기적으로 자극하여 잃어버린 청각기능을 회복시켜주는 장치에 대한 연구가 시작되어, 1980년대 중반에 결실을 거두게 되었는데 이것이 바로 인공와우(Cochlear Implant)이다. 즉, 유모세포의 기능을 전자장치로 대체시킨 것이 인공와우인 것이다.

인공와우 시스템은 외부 소리 신호를 취득하는 수화기(Microphone), 수화기로 들어온 소리 신호

를 정해진 자극 방식의 형태로 변환해주는 언어합성기, 변환된 음성 신호와 체내에 이식되어 있는 회로를 기동하는 데 필요한 파워를 전송하는

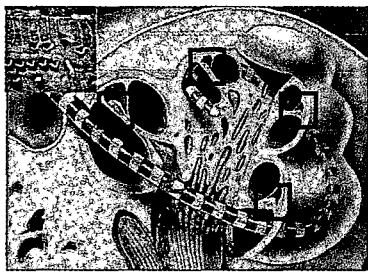


그림 2. 전극이 와우 내에 삽입된 그림 좌측 상단은 손상된 유모세포 사진. 시각 형은 유모세포가 위치해 있는 부위(Organ of Corti)를 표시하고 있음.

발신기, 수신된 신호로부터 자극 신호를 검출하여 전극으로 보내주는 자극칩 및 내부 회로부, 와우내에 삽입되어 자극 신호를 신경절 세포까지 전달하는 전극부, 내부에 이식된 회로부를 체액이나 이온으로부터 보호하는 완전 밀봉 패키지 등으로 이루어져 있다(그림 3).

하지만, 현재 인공와우가 사람의 청각능력을 100% 완전하게 회복시켜주지는 못하고 있다. 인공와우 시술자의 언어 인식이 정상인의 그것에 비하여 여전히 열세에 놓여 있어 이를 극복하고자 하는 연구가 다방면으로 진행되고 있다. 인공와우와 관련된 국제적인 연구 동향을 살펴보면 양쪽 인공와우 이식(Bilateral Implant), 소리와 전기의 동시 자극, 정상인과의 언어 인식을 차이 원인 규명, 완전이식형 인공와우 등이라고 할 수 있다.

양쪽 인공와우 이식은 기존의 한쪽 이식에서 기인하는 음원 위치 판단의 어려움을 개선하려는 연구이고, 소리와 전기의 동시자극에 관한 연구는 잔존하는 유모세포의 기능을 이용하고자 하는 연구이며, 완전이식형 인공와우는 기존 체내-외에 부착하던 시스템을 원칩(One-Chip)화하여 몸 안에 모두 이식하려고 하는 연구이다.

우리 나라의 경우 G7 과제의 일환으로 인공와우에 대한 연구를 서울대 의대에서 진행한 바 있으며, 현재는 2001년 5월경부터 과학재단이 지원하는 서울대학교 초미세생체전자시스템 연구센터를 중심으로 활발한 연구가 진행되고 있다. 또한, 상기 연구센터는 완전이식형 인공와우 개발의 핵심 기반 기술인 반도체 전극을 자체 개발한 바 있다.

현재까지 인공와우를 시술 받아 청각장애를 극복한 사람은 전 세계적으로 약 7만 여명에 이른다.

인공와우는 1990년대 초에 국내에 소개되어 8개 종합병원에서 시술되고 있으며, 1998년까지 약 230여명의 환자에게 시술되었고, 이후 해마다 약 50%씩 폭발적으로 증가하여 2001년 한해 약 200여명의 환자가 시술 받아 정상 생활을 영위하고 있다. 특히, 우리나라의 경우 전체 청각장애인의 85%가 사고나 질병으로 인한 후천적 청각장애인인 점을 감안하면 인공와우는 분명 이들에게 새로운 희망으로 자리잡고 있다고 할 수 있다.

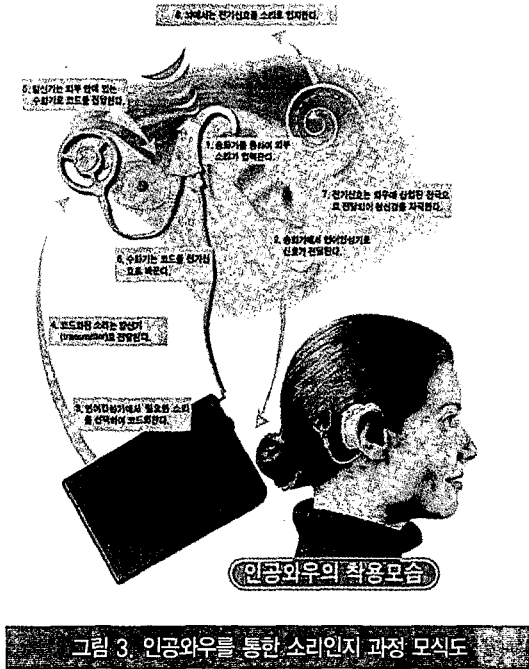


그림 3 인공외우를 통한 소리인지 과정 모식도

### III. 제2의 인공감각 성공 후보 - 인공망막 (Artificial Retina)

인간의 눈에 들어온 외부의 빛은 망막에서 전기신호로 바뀌며, 이것이 시신경을 통해 뇌로 전달되면 물체를 인식할 수 있게 된다. 눈의 질병은 시력의 소실로 이어지며, 인간이 외부 세계를 지각하는 데 심각한 장애를 초래하여 생활에 큰 지장을 주게 된다. 눈의 가장 외층인 각막(Cornea)이 손상된 경우, 장기기증자의 각막을 이식하거나 인공소재로 제작된 인공각막을 이식하여 시력을 되찾고 있으며, 각막 안쪽의 수정체 혼탁은 백내장 수술의 발전과 인공수정체의 개발로 해결이 되었다. 그러나 카메라의 필름에 해당하는 망막(Retina)의 병변은 일부 수술이 가능한 병을 제외

하고는 일단 시력을 상실한 경우 회복시킬 수가 없다. 이러한 질병에는 망막색소상피변성(Retinitis Pigmentosa)과 연령관련 황반변성(Age-related Macular Degeneration)이 대표적이며, 각각 정상인에서 4000분의 1, 20분의 1 정도의 확률로 발생하는데, 선진국에서는 성인시력 상실 원인의 약 30%가 이에 해당한다.

특히, 갈수록 노령화되는 현대 사회에서는 연령관련 황반변성의 빈도가 점차 증가하는 추세여서, 이들 질환으로 인한 사회적, 경제적 손실 역시 점차 증가하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 제안된 것이 인공시력전달장치, 즉 인공망막(Artificial Retina)이다. 인공망막의 역할은 시신경 기능을 잃은 망막을 대신하여 외부의 빛을 인지하고 전기신호로 변환하여 뇌에 전달시키는 것이다. 망막 부위에 삽입되는 방식 혹은 뇌로 연결되는 시신경계의 자극 부위에 따라 망막하/망막앞/시신경/시피질 자극기의 4가지 형태로 분류되며, 공통적으로 반도체 미세제작 기술을 이용하여 소자를 일체화 및 소형화시키고 있다.

또한, 인공망막의 성공적 개발을 위해서 소자의 공학적 기능성 외에도, 생체 내 적합성 및 생리학적 환경과의 친화성, 시술 상의 문제 등의 학-생물학적 문제점을 복합적으로 고려한 연구가 진행되고 있다.

현재 미국, 일본, 독일 등에서는 "뇌의 10년" 이후 가장 중요한 연구로 인공망막 개발을 지목하는데 주저하지 않고 있으며, 이는 지난 30여년 간의 연구 끝에 현재 상업화되어 널리 보급된 인공외우의 성공에 힘입음은 주지의 사실이다. 세계적으로 개발 중인 4가지 제작 모델 가운데, 망막앞 자극기는 미국 국립보건원(NIH)과 과학재단(NSF)의 지원 하에 Harvard-MIT, Doheny

Eye Institute(과거 Johns Hopkins-North Carolina State University) 연구팀, 독일 연방교육연구부(BMBF)의 지원 하에 Bonn-Duisburg-Koeln 연구팀이 연구를 수행 중이며, 망막질 자극기는 미국의 Optobionics사와 독일의 Tuebingen-Stuttgart 연구팀이, 시신경 자극기는 European Commission(Esprit project)의 지원을 받는 UCL(Universite Catholique de Louvain, Belgium) 연구팀이, 시피질 자극기는 미국의 Dobelle Lab.과 University of Utah 연구팀에서 경쟁적으로 개발을 하고 있다. 일본에서는 2001년부터 통산성을 주축으로 인공망막칩 연구 개발에 착수하였으며, 우리나라에서는 2000년 7월부터 과학재단

(KOSEF)에서 지원하는 서울대학교 초미세생체 전자시스템 연구센터를 중심으로 생체전자공학, MEMS, 안과학 등의 전문가가 모여 2009년 개발완료를 목표로 연구를 진행하고 있다. 하지만, 이러한 세계 각 연구그룹 간의 경쟁적인 연구에도 불구하고 인정할 만한 수준의 인공망막 성공 사례는 아직 없는 실정이다. 인체 이식을 통하여 사람이 섬광 혹은 나아가 알파벳 'E'자를 인식하였다는 보고가 있었으나, 체계적인 검증은 아직 부족한 상태이다. 대개 2010년 경을 시제품 개발의 성공 시점으로 보고 있으며, 인공와우와 같은 수준의 일반 보급화는 2020년 이후로 예상하고 있다.

외부의 빛이 눈으로 들어와 망막의 광수용체(Photoreceptor)에서 인지되어 뇌로 전달되기까지는 양극 세포 - 망막신경절 세포 - 시신경 -

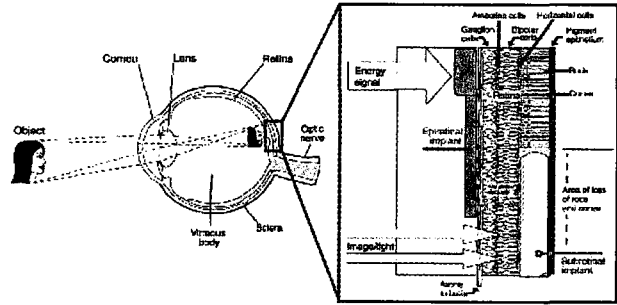


그림 4. 망막질과 망막앞 자극기. 각막(Cornea)과 렌즈(Lens)를 통해 망막에 맺힌 물체의 상은 망막의 광수용체 세포에서 전기적인 이미지로 변환되어 신경세포에 전달된다(왼쪽 그림). 망막질 방식의 경우, 광수용체 세포인 간체와 추체의 자리에 인공망막이 삽입된다. Microphotodiode 및 전극의 일체형으로 개발되고 있으며, 빛을 전류로 변환시켜 아직 손상되지 않고 남아있는 망막 신경세포에 전기적 정보를 공급한다. 망막앞 방식은 망막층, 앞쪽에 고정되어 망막신경절세포를 직접 자극한다. Photodiode를 내장하지 않는 경우, 몸 바깥에서 별도의 영상획득부와 영상처리부를 거쳐 전기신호로 정보를 전송한 후 신경세포 자극용 전극 어레이로 구성된 인공망막이 전기신호를 전달한다(오른쪽 그림). (Adapted from E. Zrenner, Science 295, 1022, (2002).)

외측 슬상핵 - 시피질의 여러 경로를 거쳐야 한다. 상기 언급한 4가지 모델 가운데, 망막질과 망막앞 자극 방식(그림 4)은 각각 망막의 바깥쪽, 안쪽 부분에 인공망막을 삽입하여 전달 경로의 가장 초기단계인 신경절세포 혹은 양극세포 부분을 자극하는 방식이며, 시신경 자극 방식은 신경절세포 다음 단계를 직접 자극하는 방식이다(시신경은 망막신경절세포의 축삭으로 형성된다).

시피질 자극 방식의 경우, '시각'에 대한 뇌의 지각 부위이자 시신경 전달 경로의 최종 단계인 대뇌 시피질을 자극하는 방식이다. 망막 근처에 삽입되는 망막질 혹은 망막앞 방식의 경우 Photodiode를 내장하여 자체적으로 빛을 인지하고 전류를 시신경 세포들에 직접 공급할 수 있는 장점이 있다. 또한 시각정보가 뇌로 전달되기까지의 복잡한 생체신호처리 과정을 고려할 필요가

없다는 큰 장점을 가지고 있다. 하지만, 삽입되는 Photodiode array에서 외부 Bias 없이 신경전달 세포층들을 자극하기 위한 충분한 양의 전류를 얻기가 쉽지 않은 것으로 알려져 있어서, Photodiode를 칩으로 일체화시키는 모델에 회의적인 견해가 제시되고 있다. 그 대신, 영상 획득부, 영상 신호처리부, 신경자극부를 기능별로 구분하고, 충분한 자극 전류를 생성할 수 있는 신경자극부를 제작하여 망막밑 혹은 망막앞 방식으로 삽입하는 방식의 연구가 최근 진행되고 있다. 시신경 및 시피질 자극 방식 역시 영상 획득부, 신호처리부, 신경자극부로 기능별로 구분되어 제작되는 방식으로, 이 두 가지는 시신경 전달 경로에 있어서 좀 더 뇌에 가까운 부분을 자극하려는 목적을 가지고 있다. 시신경 자극 방식은 광수용체를 비롯한 망막 신경세포 전체 손상에 시도하려고 있으나, 시신경 자체가 망막신경절세포 축삭의 집합체라는 점과 120만개나 되는 시신경섬유가 독특한 배열을 이루며 밀집되어 구분하여 자극하기가 힘들다는 점이 해결하기 힘든 숙제로 남아 있다. 시피질 자극 방식은 실제로 사람의 뇌에 삽입되어 섬광을 인지하였고, 글자, 영상 등의 모양까지도 인지하였다고 알려져 있지만, 그 인지의 재현성과 항구성에 대하여는 대다수의 학자들이 회의적이다. 이는 시신경 전달 과정에서 각 단계마다 '암호화'가 있어서 망막에 맺히는 영상과 시피질에 맺히는 정보가 1대 1로 대응되지 않기 때문이며, 다단계의 시신경 신호처리 과정을 명확하게 해석해내기 전에는 진전을 기대하기 어렵다는 것을 의미한다.

한편, 연구가 진행됨에 따라 발생하는 무수한 문제에도 불구하고 미세제작(Microfabrication) 기술의 급속한 발전은 많은 부분이 해결 가능한

것임을 보여주고 있다. 시신경 자극을 위해 보다 개선된 전기전달 효율을 갖는 신경전극 구조가 지금도 끊임없이 제안되고 있으며, 새로운 생체 적합성 물질을 적용하여 안구 내에서 보다 안정되고 시술이 용이한 구조의 인공망막을 개발하는 연구가 진행되고 있다. 또한 MEMS 기술을 이용하여 제작된 미세고정 못(Micro-tack)은 인공망막을 안구 내에 고정시키는 역할을 함으로써 안구 근육 운동 등으로 인한 소자 탈착의 가능성을 줄이는데 기여하고 있다. 더구나, 나노 제작으로 이어지고 있는 최근의 반도체 미세제작 기술은 인공망막 제작의 정교함과 효율성을 극대화시킬 것으로 기대되고 있다.

산업체 및 학계에서 축적해온 우리 나라의 미세 제작 기술은 이미 상당한 수준에 이르러 있다.

그 동안 쌓아온 기술 기반은, 반도체 미세공정 진행 상에서 발생하는 문제점들을 빠르게 개선할 수 있도록 해주고 있으며 이는 유사한 기술이 적용되는 인공망막 제작 공정에도 마찬가지로 적용될 수 있다. 또한 우리 나라의 인공각막, 백내장, 망막 수술 등 안과 계통의 각종 시술 능력 및 연구 기반 역시 세계적으로 인정받고 있는 상태여서, 제2의 인공각막 성공 후보로서 각광받고 있는 인공망막 개발에 더없이 좋은 환경을 가지고 있다. 미국, 유럽 등이 아닌 오스트레일리아에서 먼저 성공시킨 인공와우의 경우를 보더라도, 인공감각 소자의 개발이 적절한 시기적 투자, 제한점을 극복하려는 끊임없는 아이디어, 그리고, 각 분야별로 축적된 노하우의 효율적인 활용에 의한 결과임을 알 수 있다. 이러한 상황을 고려할 때 우리나라 역시 인공망막 개발에 있어서 유력한 성공 후보가 될 수 있음을 보여준다.