

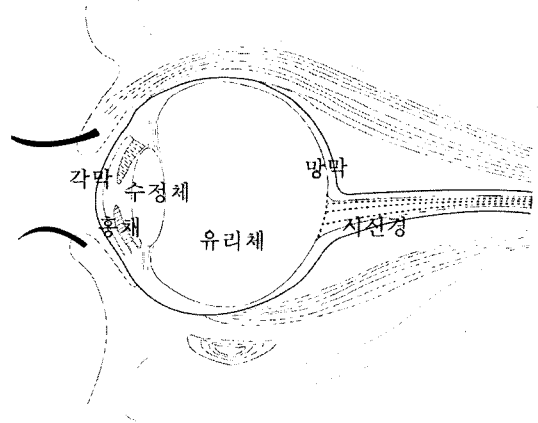
# 인공 시각 전달장치

서종모(동국대학교 의과대학 일산병원 안과), 정 흠(서울대학교 의과대학 안과)

## I. 서론

의학의 발달로 많은 환자들이 질병을 극복하고 건강한 삶을 살게 되었으며, 안과학의 진보 역시 백내장, 녹내장, 망막박리 등 다양한 질환들로부터 시력을 회복시켜 환자들에게 새로운 세상을 열어주었다. 하지만, 아직도 돌이킬 수 없는 시각 장애로 인하여 어둠 속에서 지낼 수 밖에 없는 환자들이 많다. 최근 전자공학이 급속히 발전하면서 생물학과 전자공학을 결합한 바이오닉스 기술을 이용하여 시력을 회복시키려는 인공 시각 전달장치의 개발이 시도되고 있는데, 이 장치의 핵심은 외부의 빛을 인간의 신경계가 해석할 수 있는 생체전기신호로 바꾸어서 전달해 주는 망막 기능을 흉내내는 것이며, 이러한 의미에서 인공 시각 전달장치를 ‘인공 망막(artificial retina)’ 이라고 말하기도 한다.

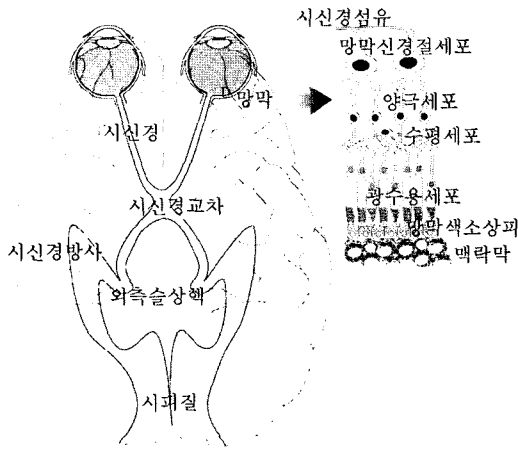
인공망막을 이해하기 위하여 먼저 사람의 시각경로와 각 부분의 기능을 살펴보고, 인공망막의 작동 원리와 구성 요소를 알아본다. 인공망막 개발에 대한 역사적인 고찰과, 현재 진행되고 있는 인공망막 연구들을 살펴보고, 국내의 인공망막 연구 동향을 소개한다.



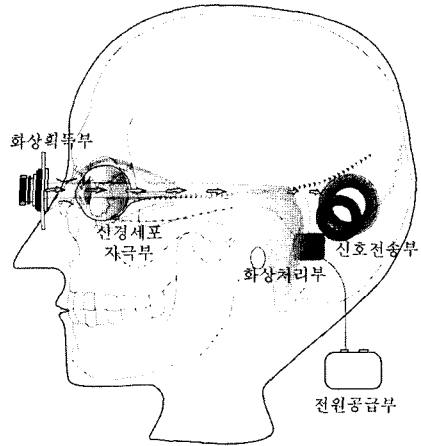
〈그림 1〉 눈의 구조

## II. 시각 경로

사람의 눈은 카메라와 비슷한 구조인데, 카메라의 렌즈에 해당하는 각막과 수정체, 조리개에 해당하는 홍채, 필름에 해당하는 망막이 있다. 외부의 빛은 각막을 통과하며 모아지고, 홍채에 의해서 양이 조절된 뒤, 수정체의 두께



<그림 2> 시각경로



<그림 3> 인공망막의 모식도

가 조절되어 망막에 정확한 상이 맺혀진다 <그림 1>. 망막의 제일 아래쪽에 있는 광수용세포는 빛의 신호를 신경계가 해석 가능한 생체 전기신호로 바꾸어 주며, 이 신호는 다음 단계의 세포인 양극 세포와 수평 세포를 통하여 망막신경절세포로 전달된다. 신경절세포에서 시작되는 시신경섬유는 시신경유두에서 모여 시신경을 만들고, 시신경은 시신경교차에서 코쪽 신경섬유를 교차시키며 외측 슬상핵까지 전달된다. 외측 슬상핵에서 신경연접을 이룬 신경들은 시신경방사를 거쳐서 시피질로 전달되면 시각을 느끼게 된다<그림 2>. 각막이 손상된 경우에는 각막 이식으로, 수정체가 흐려진 백내장은 인공수정체로 그 기능을 복원할 수 있으나, 광수용세포가 손상되거나 시신경이 손상되는 경우에는 치료가 불가능하여 결국 시력을 잃게 되는데, 망막색소변성이나 연령관련황반변성이 대표적인 예이다. 인공망막 연구는 이렇게 시력을 잃은 사람들의 시력을 되살리고자 하는 노력이다.

### III. 인공망막의 구성 요소

인공망막의 구성은 기능에 따라 화상 획득부, 화상 처리부, 신호 전송부, 신경 세포 자극부, 전원 공급부로 나누어 생각할 수 있다<그림 3>.

화상 획득부는 광수용세포의 역할을 대신하며, 외부의 빛 신호를 전기적인 영상신호로 바꾸어 준다. 대개 CCD나 CMOS를 이용한 소형 카메라를 안경에 장착한 형태로 만든다.

화상 처리부는 영상 신호를 실제 신경세포 자극에 필요한 형태로 바꾸는 부분인데, 해상도 조정, 윤곽선 강조, 대비감도 강조 등 망막 내부에서 일어나는 신호처리과정을 흉내낸다.

화상 획득부와 화상 처리부를 아무리 소형화, 경량화 한다 하더라도 현재까지의 기술로는 직경 2.4cm 정도밖에 되지 않는 눈 안에 삽입하여 장기간 안전하게 유지시킬 수 있을 정도로 작게 만들기는 힘들다. 따라서, 화상 획득부와 화상 처리부는 눈 밖에 두고, 처리된

영상 신호만 눈 안으로 보내어 망막 자극이 가능하도록 해 주는 신호 전송부가 필요하다. 안구 내부와 외부를 직접 도선으로 잇거나, 상호 유도전류 혹은 레이저를 이용하여 무선으로 신호를 전송하는 방법이 시도되고 있다.

신경세포 자극부는 광수용세포가 손상된 후 남아있는 망막의 신경 세포와 직접 접촉하여 신경 세포를 전기적으로 활성화시키는 역할을 하는데, 자극기의 위치에 따라 망막밑, 망막앞 자극기와 망막 이후의 부분을 자극하는 시신경 자극기, 시피질 자극기로 나눌 수 있다. 신경세포와 직접 접촉하여 장기간 유지되어야 하므로, 생체적합성이 높은 물질을 전극 재료로 사용하며, 폴리이미드, 실리콘고무 등의 재질에 금, 백금 등으로 도선을 만들어 사용한다.

전원 공급부는 이러한 모든 부분들에 필요한 전원을 전달하는 부분으로, 처리해야 하는 정보량이 많고, 자극신호도 인공외우나 인공 심박 조율기보다 훨씬 다양하고 많아서 오랫동안 안정적으로 작동할 수 있는 대용량의 전원이 필요하다.

#### IV. 인공망막의 역사

인공 망막에 대한 최초의 고안으로는 1956년에 Tassicker가 신청한 망막 자극기 특허가 있다<그림4>. 그러나, 당시의 기술로는 사람의 눈 안에 이식이 가능할 정도로 작은 크기의 망막 자극기를 만드는 것은 불가능하였다. 이후 1967년 영국의 Brindley와 Lewin이 상호유도전류를 이용한 무선 시피질 자극기를 개발하여 녹내장으로 시력을 상실한 52세의 환자

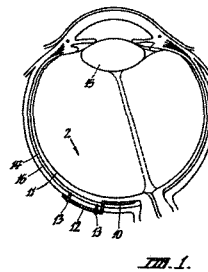
에게 이식하였다. 80개의 수신용 코일에 시피질 자극용 전극이 일대일 대응된 형태인데, 상호유도전류로 머릿속의 수신용 코일에 개별 신호를 전달함으로써 원하는 시피질부위를 전기적으로 자극하여 '인광(phosphene)'을 유발하였다. 인광은 뒤통수를 맞았을 때 느껴지는 번쩍임과 유사한 것으로, 망막의 광수용세포가 빛을 생체전기신호로 바꾸어 만들어지는 시각과는 다른, 시각 관련 신경 세포의 직접적인 자극으로 얻어지는 시각 형태이다. 미국의 Dobbelle은 Mladejovsky와 함께1970년부터 자원자들을 모집하고 자신이 고안한 시피질 자극기를 시술하여, 1974년 Science 지에 'Artificial vision for the blind'라는 제목으로 임상실험 결과를 발표하였다.

1977년에는 Dawson과 Radtke가 망막을 전기적으로 자극하였을 때에도 시피질을 전기적으로 자극했을 때와 유사한 인광을 유발할 수 있음을 소개하였고, 1980년대부터는 미국의 Massachusetts Eye and Ear Infirmary (MEEI) - Massachusetts Institute of Technology

Aug. 28, 1956

G. E. TASSICKER  
RETINAL STIMULATOR  
Filed Oct. 20, 1954

2,760,483

INVENTOR  
GRAHAM EDWARD TASSICKER  
BY *Handwritten signature*  
Attys.

<그림 4> Tassicker의 인공망막 특허



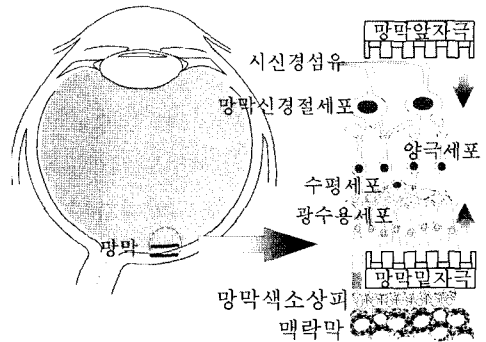
(MIT) 연구진, Johns Hopkins Wilmer Eye Institute 연구진이 암 등의 질환으로 인하여 안구를 반드시 제거하여야 하는 환자들의 동의를 얻어 망막 전기 자극에 대한 인체 실험을 시행함으로써 본격적인 인공망막 연구가 시작되었다. 벨기에의 Universite Catholique de Louvain 연구진은 1998년에 시신경을 자극하는 옷소매형 전극을 자원자에게 시술하였고, 일부 형태를 인지시키는 데 성공하였다. 이와 비슷한 시기에, 미숙아 망막병증으로 시력을 잃었던 미국의 팝 가수 Stevie Wonder는 Johns Hopkins Wilmer Eye Institute에서 인공 망막 수술 상담을 받음으로써 전세계를 흥분시켰고, 그 결과로 완제품 이외의 기기를 이용한 인체 실험은 미국 내에서 금지되었다. 하지만, 이후에도 독일, 미국, 벨기에, 일본의 연구진들이 꾸준히 연구를 진행하고 있으며, 2000년도부터는 국내에서도 인공망막 연구를 시작하였다.

### V. 연구동향

현재까지의 연구 동향을 정리하자면 신경세포 자극 부위에 따라 망막밑, 망막앞, 시신경, 시피질 자극 연구로 분류할 수 있다. 이 분류에 따라서 각 연구팀의 내용을 살펴보기로 한다.

#### 1. 망막밑 자극

독일의 SUB-RET 연구진, 미국의 Optobionics 연구진에서 시도하고 있는 방법으로 망막 밑에 신경 자극기를 넣는 방법이다 <그림 5>. 망막의 가장 아래쪽에 위치한 광수용세포가 손



<그림 5> 망막자극기

상된 환자들이 인공망막을 필요로 하므로, 단순히 광수용세포의 기능을 대체하는 것을 목표로 삼았으며, 양극 세포를 1차적인 전기자극 대상으로 삼고자 하였다. 이를 위하여 빛을 감지하는 광다이오드(photodiode)와 자극용 전극을 일체화하고, 광다이오드에서 나오는 전류가 바로 전극으로 흘러서 망막신경세포를 자극할 수 있도록 설계하였다.

구성이 매우 간단하여, 이론적으로는 자극기 삽입만으로 모든 시술이 마무리될 뿐만 아니라, 양극세포-수평세포-망막신경절세포 사이에서 일어나는 망막 내의 신경처리 과정도 활용할 수 있어서 화상 처리부를 생략할 수도 있겠지만, 실제로는 눈 안에 도달하는 빛만으로는 광다이오드에서 만들어지는 전류의 양이 너무 적어서 망막신경세포를 자극할 수 없었다. 또한, 이 방법은 망막과 맥락막의 접촉을 방해하고, 그 결과로 망막바깥층의 영양 공급과 노폐물 제거를 차단하여 망막 조직에 손상을 줄 가능성이 있다. 그리고, 광수용세포가 줄어든 환자의 망막을 연구해본 결과, 양극세

포, 수평세포, 망막신경절세포가 많이 보존되어 있기는 하지만 정상적인 신경연결상태가 아닌 매우 흐트러진 모습을 보여서, 망막내 신경처리과정을 기대하기 어려울 것이라는 추정도 있다.

1995년부터 독일 연방 교육 연구부(BMBF)의 지원을 받는 SUB-RET 연구진은, 초기 연구에서 생체내에 장착한 미세 광다이오드판(MPDA : microphotodiode array)이 70kLux의 강한 빛 자극에서도 망막신경세포 자극에 충분한 전류를 만들어내지는 못하지만, 직접 전류를 흘려주는 경우에 망막밀 자극기는 망막 앞 자극기보다 더 작은 전류에서도 망막신경절세포를 자극할 수 있음을 밝혔다. 또한, 자극되는 신경세포의 수는 자극 범위나 자극 강도와 비례함을 밝혔다. MPDA에 대한 생체 적합성 연구에서는 TiN과 Au재질의 전극은 시험관 내에서나 생체 내에서 모두 안정적이었으나, SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 재질의 전극은 보호용 산화막층이 생체 이식 후 6개월에서 12개월 사이에 상당히 부식되어 원래의 성능을 발휘하지 못함을 보고하였다.

빛 자극만으로는 MPDA가 망막 자극에 충분한 전류를 만들어주지 못하므로, 최근에는 외부에서 자극용 전류를 공급하고, 내부에 삽입되는 MPDA는 빛 자극에 따라 전극에 흘러드는 전류량을 조절해주는 형식의 능동-수동형 폴리이미드 소재 전극을 개발하여 임상시험을 진행하고 있다. 처음에는 유리체 절제술 후 귀쪽 망막에 조그마한 망막 박리를 만들고, 망막 밀 자극기를 삽입한 후 가스를 주입하여 망막을 재유착시키는, 어렵고 복잡한 방법을 사용하였었는데, 최근 섬모체 평면부를 절개하고 맥락막 혈관을 지혈한 뒤 망막과 맥락막

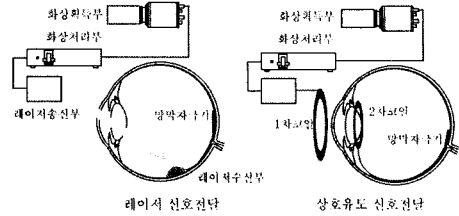
사이에 아주 작은 틈을 만들고, 그 틈을 통하여 가늘고 긴 망막 자극용 전극을 천천히 망막 밑으로 밀어넣는 방법을 개발하여 2005년부터 현재까지 7명의 환자를 대상으로 임상 실험을 진행 중이다. 유리체 절제술이나 망막 박리의 과정이 없으므로 수술 시간이 짧았고, 수술 중간이나 수술 후에 중대한 합병증이 발생하지 않았으며, 전기자극의 형태에 따라 환자들은 밝은 점 혹은 직선을 느낀다고 보고하였다.

미국의 벤처 회사인 Optobionics는 1990년대 중반부터 미국 국립 보건원(NIH)의 지원 하에 연구를 진행하였고, 2000년에 3명의 환자에게 3,500여개의 광다이오드가 집적된 'ASR(Artificial Silicon Retina)'을 시술하였다. 이후 9명의명의 자원자들에게 추가로 수술을 시행하여 총 12명의 환자에서 임상 실험을 진행 중이다. ASR은 2mm 직경의 원판 형태이며, 20 x 20 μm 크기의 광다이오드-전극 복합 회로 5,000여개가 집적되어 있다. 유리체 절제술 후 귀쪽 수평 망막 절개를 만들어 ASR을 망막 밑에 넣고 가스를 주입하여 망막을 재유착시켰다. 삽입된 ASR은 잘 유지되고 있으나, 이의 작동 여부는 현재까지도 논란이 되고 있다. 최근에는 Optobionics 연구진 역시 삽입한 ASR이 망막 자극을 일으킬 정도의 전류는 만들어내지 못하지만, 미세한 전류를 계속 생성함으로써 남아있는 망막 세포들을 보호하거나 재생시켜 시력 증진을 이룰 수 있다는 '신경보호설(Neuroprotection theory)'을 내세우고 있어 인공망막 본연의 기능과는 멀어지고 있다.

## 2. 망막앞 자극

망막앞 자극은 미국의 MEEI - MIT 연구진, Doheny Eye Institute - Second Sight 연구진, 독일의 EPI-RET 연구진에서 시도하고 있는 방법으로 망막 위에 신경세포 자극기를 붙이는 방법이다<그림 5>. 자극 대상은 망막신경절세포이며, 눈 안으로 전극을 넣는 것은 비교적 쉽지만, 망막이 매우 얇고 연약하므로 전극 고정 어렵다. 또한, 망막의 윗면에서 전기자극을 줄 경우 망막신경섬유층이 자극되어 신호가 퍼지거나 망막 여러층의 세포가 한꺼번에 자극되어 공간 해상도를 높이기 어려울 수 있다. 망막내 신호처리과정을 활용하지 못하므로 자극하는 전극 격자의 모양과 실제로 환자가 느끼는 모양이 다를 수 있기 때문에 환자개개인에 따른 맞춤형 화상처리가 필요하다. 따라서, 망막밑 자극기보다 다양한 부분들과 이들을 연결해 주는 신호 전달부가 필요하다.

1988년부터 연구를 진행하여 온 미국 MEEI - MIT 연구진은 안구 내부로 자극 신호를 전달하기 위하여 시도되고 있는 상호유도 신호 전달과 레이저 신호전달을 가상 실험으로 비교하였는데, 상호유도를 이용한 방법으로는 최대 47개의 안구 내부 전극을 동시 자극할 수 있지만, 레이저를 이용하면 208개의 전극을 자극할 수 있어서 레이저를 이용한 신호전달이 더 효율적일 것이라고 하였다<그림 6>. 이를 토대로 안경에 카메라를 부착하여 영상을 얻고, 처리한 영상 신호를 820nm 레이저에 실어서 눈 안으로 전달하는 형태의 인공망막을 제안하였다. 또한, 망막앞 자극기의 가장 큰 단점인 고정 문제와 자극기 말림 현상을 줄이기 위하여 풍차 날개 모양으로 폴리이미드 전



<그림 6> 레이저 신호전달과 상호유도 신호전달

극을 고안하였다. 각 날개에는 미세 공법을 이용하여 가느다란 공기통로를 만들고, 이를 정가운데에 있는 집결관으로 연결시켰다. 눈 안에 삽입할 때에는 날개들을 동그랗게 말아서 넣고, 눈 안에서 집결관에 공기를 넣어서 날개를 편 뒤 망막못으로 망막 위에 고정함으로써, 매우 작은 수술용 구멍을 통해서도 큰 전극을 넣을 수 있도록 하였다. 자원자를 대상으로 한 전기적 망막 자극 실험에서는 일정한 신호 및 모양에 대하여 환자들마다 느끼는 반응이 다르고, 심지어 동일한 자원자에서도 다르게 느껴지는 경우가 있어서, 인공망막의 개발이 결코 쉬운 것이 아님을 강조하였다.

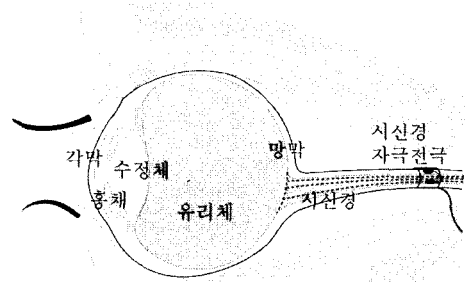
현재까지는 Doheny-Second Sight 연구팀이 제일 앞서가는 연구 결과들을 발표하고 있는데, 상호유도 방식의 신호전달을 사용하고 있는데, 안경에는 소형 카메라와 1차 유도코일을 장착하고, 눈 안에 2차 유도코일을 삽입하는 것이 목표이다<그림 6>. 2차 유도 코일로 전달된 신호는 눈 안에 넣은 MARC(Multiple-unit Artificial Retina Chipset)에 의하여 해석되어 망막자극용 전극으로 전달된다. 종양으로 인하여 눈을 제거해야 하는 자원자들을 대상으로 임상실험을 하였는데, 레이저를 이용하여 제거하려는 눈의 광수용세포를 파괴한

뒤, 눈 제거 수술 중에 눈 안에 전극을 삽입하여 망막을 전기적으로 자극하고, 수술 후 환자에게 자극 당시 느꼈던 시각자극을 설명하게 하였다. 또한, 망막색소변성으로 인하여 광수용세포가 사라져 시력을 잃은 자원자들에서 비슷한 실험을 진행하여, 인공망막을 실제 환자에 적용할 수 있음을 증명하였다. 2001년 12월부터 10명의 자원자에게 실리콘고무 재질의 망막 자극용 16채널 백금 전극을 시술하였는데, 자극 형태에 따라 기초적인 알파벳 혹은 상자 형태를 환자들이 인식할 수 있었다고 보고하였다.

BMBF의 지원을 받는 또 다른 팀인 EPI-RET 연구진도 자체적으로 개발한 폴리이미드 망막 자극기의 생체 적합성을 실험하여 안정적임을 증명하였고, 최근 자원자에게 시술하여 전기적 망막 자극에 성공하였음을 보고하였다. 망막자극용 영상처리를 위하여 감수야(receptive field) 이론과 인공시신경을 응용함으로써, 저해상도 변환 및 경계선 검출을 기반으로 하는 다른 연구진들의 영상처리보다 더 나은 결과를 얻을 수 있다고 하였다.

### 3. 시신경 자극

1996년부터 European Commission (Esprit project)의 지원을 받고 있는 Universite Catholique de Louvain 연구진이 채택한 방법으로 안구 뒤에 있는 시신경 주위에 옷소매형(cuff) 전극을 감아서 시신경을 직접 자극하는 것이다<그림 7>. 이론적으로는 망막이 심하게 손상되어 망막신경절세포의 배열까지 흐트러진 환자들에게도 적용할 수 있으나, 시신경섬유는 망막에 비하여 훨씬 조밀하고 독특하게



〈그림 7〉 시신경자극전극

배열되어 있을 뿐 아니라, 두꺼운 시신경외막(뇌경막의 연장)으로 싸여 있어 원하는 신경 섬유만을 선택적으로 자극하기 어렵다. 1998년에 첫 인체 이식을 시행하였는데, 일단 시신경외막을 제거하고, 4개의 백금전극이 들어있는 실리콘 고무 재질의 옷소매형 전극으로 감싼 뒤 전극의 도선을 끌어내어 뇌경막 밑에 고정하였다. 수술이 안정적으로 시행되었음을 확인하고, 1년이 지난 뒤 2차 수술을 시행하여 인공와우 이식과 비슷한 방법으로 측두골 부위에 생체내 수신기를 고정하고 수술을 마무리하였다. 2차 수술의 결과도 안정적임을 확인한 뒤 그림 3과 유사하게 생체내 수신기와 생체외 송신기를 상호유도로 동기화하고 자극 실험을 하였는데, 환자는 실험실 내의 상황에서 삼각형과 사각형 등의 기본적인 도형을 감지할 수 있었고, 고개를 움직이며 천천히 훑어봄으로써 사물의 형태를 어렵듯이 알아볼 수 있었다. 2002년에는 또 다른 자원자에게 8개의 백금전극이 들어있는 옷소매형 전극을 시신경외막 제거 없이 이식하였는데, 두꺼

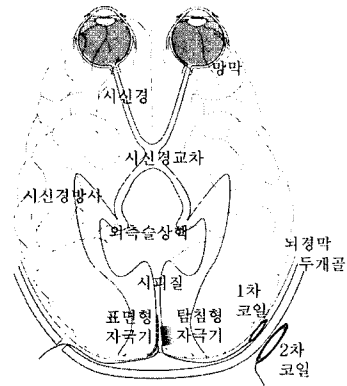
운 외막에 의해 자극 전류가 차단되어서인지 결과가 만족스럽지 못하였다.

#### 4. 시피질 자극

1968년 Brindley와 Lewin의 첫 시피질 자극 시도 이후 Dobbelle이 1970년대부터, Utah대학 연구진이 1990년대부터 시피질 자극기를 개발하고 있다<그림 8>. 시피질을 자극함으로써 망막 손상뿐 아니라 시신경 손상 환자에서도 적용할 수 있겠으나, 신경외과적 수술이 필요하고, 아직도 잘 알려져 있지 않은 시각정보처리 과정을 외부에서 흉내내어 시피질에 전달하여야 하기 때문에 매우 어렵다.

1978년에 Dobbelle 연구진이 시술한 두 명의 자원자는 20여년이 지난 현재까지도 시피질 자극기를 가지고 있는데, 안경에 장착된 카메라에서 얻은 화상 정보를 휴대용 컴퓨터에서 해석하여 머릿속 대뇌 시피질 표면에 얹은 자극기까지 직접 유선으로 자극 신호를 전달한다. 발표에 따르면 환자는 옷걸이에 걸려 있는 모자를 알아보고 스스로 쓸 수 있으며, 전철을 타는 것과 같은 간단한 일상 생활이 가능하다고 하였다. 2002년 6월에는 새로이 시술받은 자원자가 운전을 하는 모습까지 언론에 공개하였으나, 환자들의 행동이 마치 특정 상황에 대한 반복 학습을 받아 생기는 조건반사처럼 보여서 결과를 그대로 믿기는 어렵다.

Utah대학 연구진은 미세 전자 시스템(MEMS)기술을 이용한 탐침형 전극렬을 제작하였다. 각 탐침은 1.5mm 길이이며 0.4mm 간격으로 10개씩 배열되어 총 100개의 탐침이 하나로 묶여있다. 이 탐침형 전극렬을 시피질에 삽입함으로써 시피질 수직 기둥 내의 신경



〈그림 8〉 시피질 자극기

세포들을 자극하려는 계획을 가지고 있다. 또한, 신호 전달에 상호유도를 이용함으로써 체내외 직접 연결에 의한 중추신경계 감염의 위험성을 낮추었다.

#### 5. 새로운 시도들

기존과는 다른 접근을 시도하는 연구진들도 있는데, 일본 정부의 지원을 받는 Osaka 대학 - Nidek 연구진은 ‘Hybrid retina implant’ 라는 목표를 가지고 연구를 시작하였다. 신경자극 회로 위에 신경 세포를 키우고 이를 눈 안에 이식할 때 좌골 신경과 같이 이식하여, 이식한 신경세포가 신경돌기를 뻗어 외측 슬상핵과 신경 연결을 이루게 함으로써 시신경까지 손상된 환자들의 시각 재활을 돕겠다는 계획이다. 실제로 신경자극회로 위에 신경 세포를 키워서 회로와 신경세포가 물리적 연결을 이루는 데까지는 성공시켰으나, 회로와 신경세포 망 사이의 기능적 결합을 이루지는 못하였다. 최근에는 Osaka 대학 Tano 교수의 주도하에 맥락막 바깥에서 망막을 전기적으로 자극하

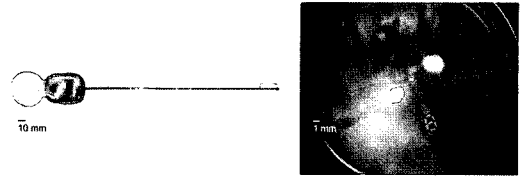


는 형태의 망막 자극기를 개발하고 있다.

미국의 Kresge Eye Institute와 Wayne State University에서는 전혀 다른 개념의 망막 자극기를 제시하였다. 이들은 망막 내 흥분성 신경 신호 전달 물질 중의 하나인 glutamate를 조금씩 뿌림으로써 남아있는 망막 신경 세포를 자극하려고 하였는데, 이를 위하여 'caged glutamate'라는 개념을 제시하였다. Glutamate를 C60 buckminsterfullerene과 같은 상자형 분자 내에 넣거나 다른 분자와의 결합형태로 만들어서 비활성화시킨 후, 가늘고 정밀한 관을 이용하여 망막 바로 앞까지 전달하고, 그곳에서 광섬유로 유도된 EXCIMER 레이저 혹은 Ga : N UV LED 등으로 상자형 분자를 파괴하거나 결합된 분자를 분리시켜 glutamate를 활성화시킴으로써 망막 신경 세포를 자극한다는 것이다. 나노 기술의 발전에 힘입은 개념으로, 눈 안에 전류를 보낼 필요가 없기 때문에 자극용 전극의 산화나 부식을 염려할 필요가 없고, 세밀하게만 만든다면 원하는 대로 공간 해상도를 높일 수 있으며, 어떤 신경전달물질을 선택하느냐에 따라서 원하는 종류의 신경 세포만을 자극할 수도 있다. 그러나, 신경 전달 물질을 계속 보충해 주어야 하고, 세밀한 유체 조절 기술이 필요하며, glutamate를 이용하여 신경세포 자극을 반복하면 신경세포가 쉽게 죽는 흥분성 독작용이 있기 때문에 성공 가능성은 미지수이다.

## 6. 국내 연구

이러한 다양한 연구와 시도들에 힘입어 2000년부터 서울대학교 의과대학 안과학교실과 서울대학교 공과대학 전기컴퓨터공학부는



〈그림 8〉 서울대학교 연구진의 완전이식형 동물망막 자극기(좌)와 이를 토끼눈의 맥락막바깥에 삽입한 모습(우)

공동으로 한국 과학재단의 지원을 받아서 인공 망막에 대한 연구를 시작하였다. 2001년부터는 서울대학교 의과대학 의공학교실, 충북대학교 의과대학 생리학교실의 참여로 진도를 더해 나가고 있으며, 2010년대에는 생체이식형 인공 망막의 첫 임상 시험을 목표로 하고 있다. 폴리이미드 재질의 망막 자극용 전극을 망막밑, 망막앞, 맥락막바깥에 안정적으로 삽입할 수 있는 수술법들을 개발하였고, 2년 이상의 장기간 동물 생체 실험을 통하여 안전성을 검증하고 있다. 또한, 완전이식형 동물망막 자극기 개발을 완료하여 장기간 전기자극에서의 망막 변화를 관찰하고 있다<그림9>.

## VI. 맺음말

청각장애인들을 위한 인공와우의 경우, 1960년대 초에 시작된 연구가 1970년대 말에 서야 초기 결실을 얻을 수 있었고, 수많은 검증 과정을 거친 후에 1990년대에 비로소 환자에게 적용할 수 있었으며, 2000년대에 이르러서야 활발한 이식 수술이 이루어지고 있다. 인

공와우가 수천개의 청신경절세포를 자극하는 것에 비하여 인공망막이 자극하여야 할 시신경절세포는 수백만개이며, 본격적인 연구 경쟁은 1990년대에 들어서서야 시작되었음을 고려한다면, 안정성과 효용성을 공인받아서 널리 보급되기까지는 20-30여년 정도의 시간이 더 필요할 것이라 추정할 수 있다. 그렇지만, 최근의 기술 발전 속도를 고려한다면, 2010년대 후반에는 인공망막이 본격적으로 보급되어 많은 시각장애인들을 어둠에서 해방시켜줄 수 있을 것이라고 기대한다.

사사: 이 글은 보건복지부 나노인공시각개발센터 (A050251)과 한국과학재단 나노바이오시스템연구센터(R11-2000-075-01002-0)의 지원을 받았음

참고문헌

[1] Rizzo JF 3rd, Wyatt J, Humayun M, de Juan E, Liu W, Chow A, Eckmiller R, Zrenner E, Yagi T, Abrams G. Retinal prosthesis: an encouraging first decade with major challenges ahead. *Ophthalmology*. 2001 Jan;108(1):13-4.

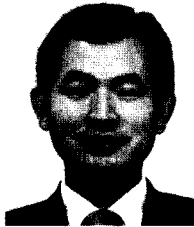
[2] Zrenner E. Will retinal implants restore vision? *Science*. 2002 Feb 8;295(5557):1022-5.

[3] Weiland JD, Humayun MS. Intraocular retinal prosthesis. Big steps to sight restoration. *IEEE Eng Med Biol Mag*. 2006 Sep-Oct;25(5):60-6.

[4] Veraart C, Duret F, Brelen M, Oozeer M, Delbeke J. Vision rehabilitation in the case of blindness. *Expert Rev Med Devices*. 2004 Sep;1(1):139-53.

[5] Ohta J, Tokuda T, Kagawa K, Furumiya T, Uehara A, Terasawa Y, Ozawa M, Fujikado T, Tano Y. Silicon LSI-based smart stimulators for retinal prosthesis. *IEEE Eng Med Biol Mag*. 2006 Sep-Oct;25(5):47-59.

저자소개



서종모

1996년 서울대학교 의과대학 의학과 학사  
 1996년-2002년 서울대학교병원 수련의/전공의 (안과)  
 2002년 서울대학교 의과대학 의학과 석사 (의공학전공)  
 2002년-2005년 서울대학교병원 전임의 (안과/의료정보실)  
 2005년 서울대학교 의과대학 의학과 박사 (의공학전공)  
 2005년-2007년 서울대학교병원 임상전임강사 (안과)  
 2007년-현재 동국대학교 의과대학 일산병원 안과 조교수

주관심 분야 : vision prosthesis, mathematical and geometric analysis of ocular surgery and motility, optical system analysis, medical image database, image mapping and warping, image registration, computer-aided diagnosis, electronic medical recording system, picture archiving and communication system

## 저자소개



정훈

- 1974년 서울대학교 의과대학 의학과 학사  
 1977년 서울대학교 의과대학 의학과 석사  
 (안과학전공)  
 1982년 서울대학교 의과대학 의학과 박사  
 (안과학전공)  
 1982년-1984년 서울대학교 의과대학 안과학  
 교실 전임강사  
 1984년-1989년 서울대학교 의과대학 안과학  
 교실 조교수  
 1985년-1987년 Massachusetts Eye &  
 Ear infirmery Fellow  
 1989년-1994년 서울대학교 의과대학 안과학  
 교실 부교수  
 1990년-1992년 대한안과학회 총무이사  
 1994년-1996년 대한안과학회 학술이사  
 2004년-2005년 대한망막학회 회장  
 1994년-현재 서울대학교 의과대학 안과학교실  
 교수  
 1990년-현재 대한안과학회 용어제정위원
- 주관심 분야: vision prosthesis, diabetic  
 retinopathy, uveitis, signal  
 transduction and angiogenesis  
 in retina