

## 신경접속 기술을 위한 신경전극의 현황과 전망

백주열 · 이상훈(고려대학교), 이승해(단국대학교)

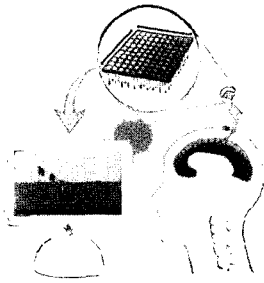
### 1. 서론

지난 1970년대의 TV 만화나 외화 시리즈는 모두 공상과학이라는 코드로 대중의 상상력을 사로잡으며 인기리에 방영되었다. 그 중 “은하철도 999”의 주인공 철이는 영원한 생명(극중에서는 기계인간을 뜻한다)을 찾아 우주 여행을 떠나며, “600만 불의 사나이”와 “소머즈”도 불의의 사고 후 신체의 일부를 기계로 대체하여 월등한 능력을 가진 ‘바이오닉 맨’으로 거듭나게 된다. 하지만 그 시절 일반 대중들에게 이러한 바이오닉 맨(혹은 기계인간)은 공상과학에 불과했고, 몇몇 소수의 연구자들에 있어서도 아직은 실험실의 연구 수준이었다. 그로부터 반세기도 지나지 않은 오늘날, 바이오닉 맨은 뇌·기계 접속기술(Brain-Machine Interface, BMI 혹은 Brain-Computer Interface, BCI)분야 연구자들의 노력으로 현실세계로 성큼 다가서게 되었다.

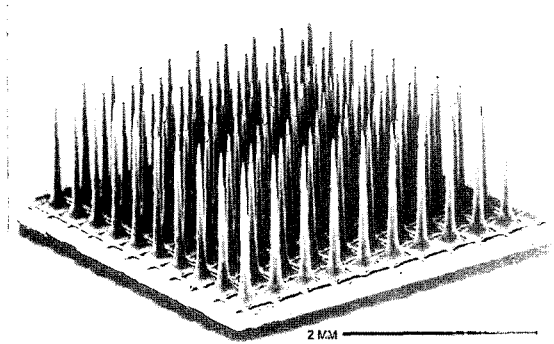
뇌·기계 접속기술(BMI 혹은, BCI)은 ‘뉴욕 타임즈’ 등 권위 있는 여러 기관에서 21세기의 8대 신기술 중 하나로 꼽고 있는 기술로서

수많은 대학과 회사들이 연구개발 및 상용화에 많은 노력을 기울이고 있는 분야이다. 최근 과학 기술의 발전은 손상된 인간의 감각기능의 회복(예를 들면 인공 눈이나 인공 귀 등)이나 BMI 등 과거에는 공상소설이나 영화에서나 가능했던 일들의 실현이 가능하게끔 하고 있다<sup>1-4)</sup>. 특히 근래 20여년 동안 급격히 발전한 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 기술의 생체로의 응용은 이러한 꿈의 실현이 더욱 가까워 지고 있도록 하고 있다. 인공 감각 기능이나 BMI에 있어 가장 중요한 기술적 요소는 인체로부터 나오는 여러 가지 전기적 신호를 측정하거나, 반대로 전기적 자극을 신경에 전달하는 전극의 개발이다. 최근의 이러한 전극의 소형화 기술과 조직 손상 없이 장기간 체내에 이식 가능한 전극의 개발은 BMI 기술의 핵심적인 기반기술로 각광 받고 있으며, 여러 기관에서 이에 대한 연구를 진행하고 있다<sup>5-8)</sup>.

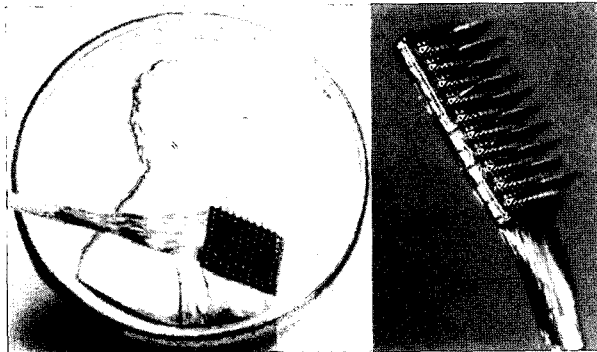
본 고에서는 BMI 혹은 더 넓은 의미에서의 신경접속기술(Neural Interface)을 위한 신경전극(Neural electrode)의 현황과 그 전망에 대해 알아보고자 한다.



〈그림 1〉 (a). 브레인게이트의 개념도



〈그림 1〉 (b). Utah Electrode Array(UAE)



〈그림 1〉 (c). 브레인 게이트전극

## II. 신경전극의 종류 및 분류

생체에서의 뇌조직 또는 신경 조직에 삽입하여 생체신호를 전기신호로 바꾸어 기록하거나 전기적 자극을 신경에 전달하여 신경 세포를 자극하는 장치를 넓은 의미로 신경전극이라 부른다. 특히 최근의 BMI 관련 연구가 활기를 띠면서 뇌활동의 전기적인 기록 및 분석의 필요성이 증가하고 있다. 생체신호의 측정 및 분석을 위해서 다양한 형태와 재료의 전극이 사용되고 있다.

### 1. 형태에 따른 분류

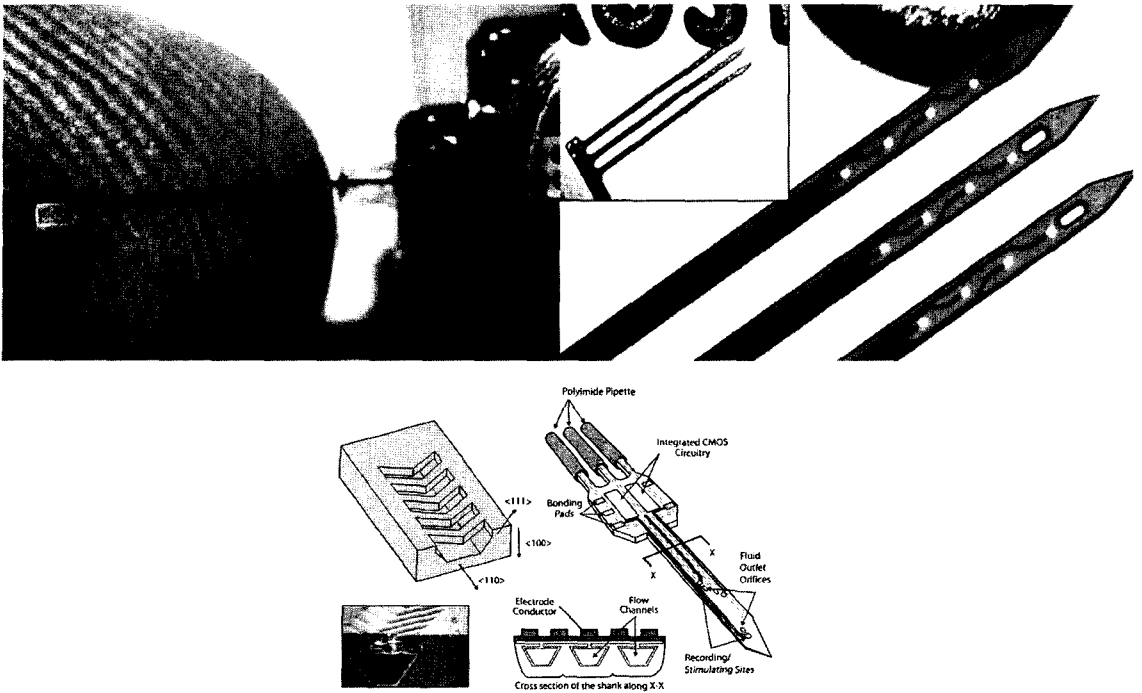
신경전극은 사용 목적에 따라 다양한 형태로 제작되는데, 그 형태에 따라 다음과 같이 분류된다.

- Depth type 전극 : 가장 대표적인 전극의 형태로서 신경조직에 직접 삽입하여 사용되는 전극을 말하며, Utah 전극과 Michigan 전극이 유명하다. Utah 전극은 일반적으로 Utah 대학의 미세전극 제조 기술에 의해 제작된 전극 어레이(Utah Electrode Array, UAE)를 말하며, Brown 대학의 John Donoghue 교수는 Cyberkinetics Neurotechnology Systems사를 설립하여 이 UAE를 이용한 신경 인터페이스 시

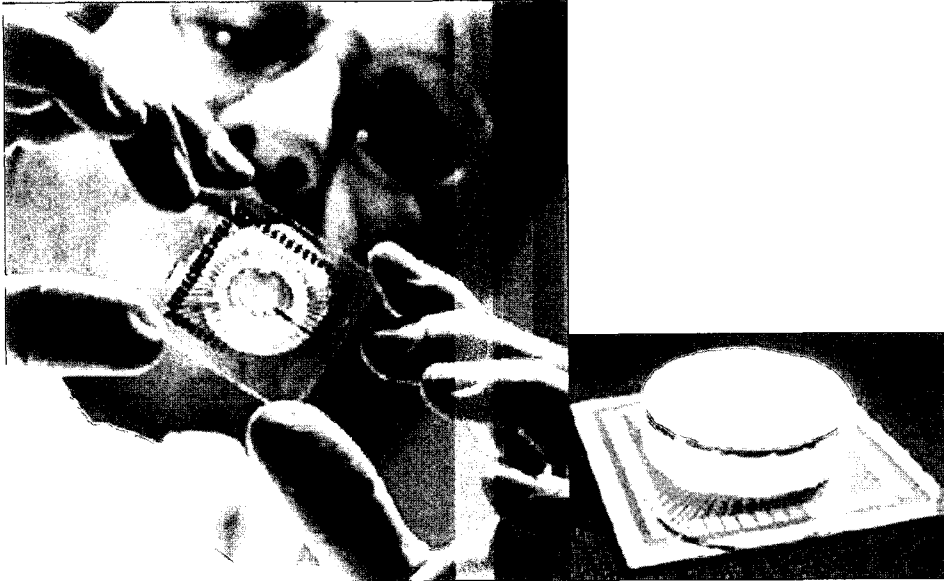
시스템인 '브레인게이트'(Brain Gate) 시스템을 개발하였다<sup>2-3, 9)</sup>. <그림 1>(a)는 브레인게이트의 개념도를 나타낸 것이며, <그림 1>(b)와 <그림 1>(c)는 각각 UAE와 이를 이용한 브레인게이트 전극을 나타낸 것이다. 브레인게이트는 과학저널 '네이처'의 표지(2006년 7월 12일자)에 등장하는 등 BMI 분야의 성공적인 사례로 꼽히고 있다. 브레인게이트는 100개의 마이크로 니들(10 X 10)로 구성되어 있으며, 이 장치는 뇌에서 운동기능을 담당하는 운동 피질(motor cortex) 표면에 이식됐다. 여기에서 전극은 주위의 뉴런으로부터 전기신호를 포착하고 환자의 두피에 돌출한 받침대를 통해 여기에 연결된 케이블을 타고 컴퓨터로 전송되어 원하는 동작을 이끌어낸다. 이때 브레

인게이트를 이식한 사용자는 원하는 움직임을 상상만 하면 된다. 예컨대 '허리를 펴라, 굽혀라' '두 손을 벌려라, 모아라' '팔꿈치를 펴라, 굽혀라' 등 16가지 동작을 상상만으로 취할 수 있다. 하지만 여기에 쓰인 UAE가 아직은 완벽한 것 같지는 않다. 전극을 뇌에 장기간 삽입 할 경우, 주변세포의 괴사 및 축적으로 신경의 활동신호를 안정적으로 측정하기 어렵다고 알려져 있으며, 이를 극복하기 위하여 Utah 대학의 전극은 별도의 표면처리 기술을 추가로 동원하여 해결하였다고 하나 아직은 그 결과의 신뢰성에 의문이 남아 있는 상태이다.

Michigan 대학의 전극 역시 전통적으로 미세전극 어레이로 명성을 얻고 있다. <그림 2>는 미시간 전극 어레이들을 나타낸 것이다<sup>6)</sup>.



〈그림 2〉 미시간 전극 어레이



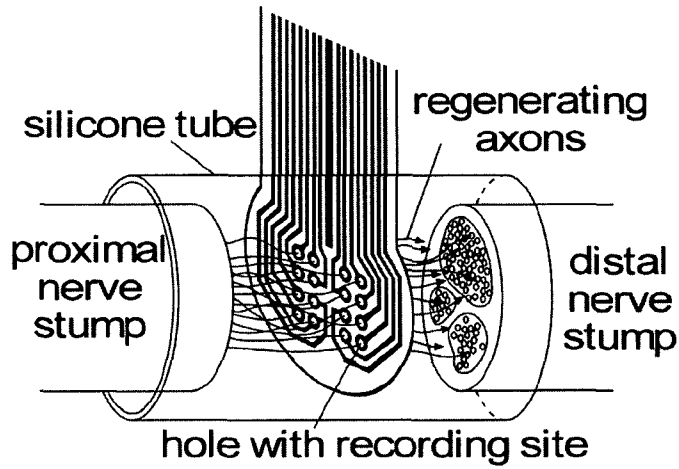
〈그림 3〉 MEA

미시간 대학의 관련 연구자들은 다양한 형태와 구조를 갖는 미세전극의 개발에 주력하고 있다. 이와 관련하여 측정과 자극을 위한 전극 뿐 아니라, 다양한 미세 구조물을 이용하여 약물주입 등 통합적인 응용에 필요한 기술을 개발하고 있으며, 이와 관련한 다양한 형태의 전극의 주문제작도 가능한 것으로 알려져 있다.

- Planar type 전극: Microelectrode Array (MEA) 라고도 불리 운다. 신경접속 기술에 있어서의 과제는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 첫 번째는 어떻게 신경계와 인공기기들(전극 등)을 접속하는가의 디바이스(device) 측면의 과제와 두 번째는 신경계의 신호를 어떻게 해석하는지, 그리고 어떻게 신경계에 정보를 입력할 것인가의 코딩(coding) 측면의 과제이다. MEA는 두 번째에서 언급한 코딩측면의 연구에 활용되고 있으며, 신경세포 배양을 통해서 신경 신호를 측정하는 목적으로 사용되고 있다. <

그림 3>은 MEA를 나타낸 것이다<sup>4)</sup>. 신경세포의 자극과 반응 메커니즘에 관해서는 일리노이 대학의 Bruce C. Wheeler등에 의해 연구되어 왔다. 이를 바탕으로 신경신호의 정보분석 기술과 모델링 기술 등이 개발되어 왔으며, 궁극적으로는 신경신호(혹은 뇌의) 정보처리 알고리즘을 규명해 나가고 있다.

- Sieve type 전극: 신경재생형 전극(Regeneration type nerve electrode)라고도 불리우며, 말초신경의 재생능력을 이용하여 체(sieve) 모양의 전극을 절단된 신경의 사이에 두면 신경세포의 축삭돌기(axon)가 체 모양의 전극 사이를 관통하여 재생되고 이로 인하여 신경신호를 측정하는 전극을 말한다. <그림 4>는 신경재생형 전극의 모식도를 나타낸 것이다. 최근의 전극의 개발추세는 복합적인 기능을 가지는 전극의 개발인데, 동경대학의 Shoji 교수 등에 의해 마이크로 유체 채널이 결합된 신경재생



〈그림 4〉 신경재생형 전극의 모식도

형 전극도 연구되고 있다<sup>8)</sup>.

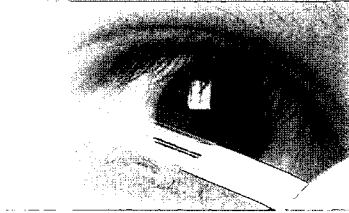
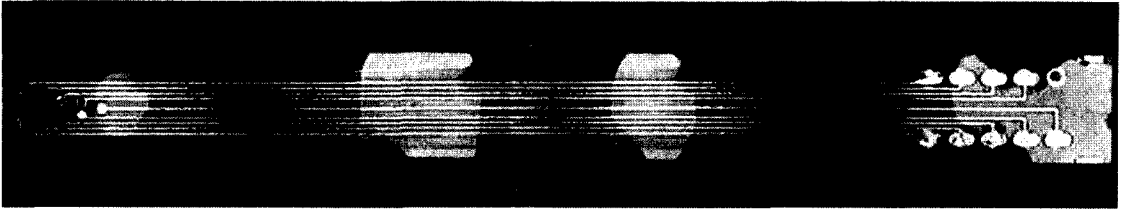
이외에도 시신경 자극 시스템에 사용되는 방식인 신경세포를 직접 감싸서 신경신호를 측정하는 Cuff 전극 등이 있다.

## 2. 재료에 따른 분류

- Hard materials : 주로 실리콘을 재료로 하여 반도체 공정을 이용하여 제작된 전극을 말한다. 앞 절에서 언급한 유타 전극과 미시간 전극이 여기에 속하며 반도체 공정을 이용하기 때문에 미세전극의 제작이 용이하여 정확성과 재현성, 그리고 다른 반도체 소자와의 결합이 용이하고 호환성을 가지는 등 여러 가지 장점을 가지고 있다. 물론 대량 생산도 가능하다. 반도체 공정을 이용한 실리콘 전극은 신경전극의 개발에서 가장 중요한, 목적에 부합하는 초소형 신경전극의 개발이 가능하나, 실리콘의 물질 자체의 특성으로 인해 장기간 조직에 삽입이 불가능하고 날카롭고 깨지기 쉬운

물질의 특성으로 유연성을 확보할 수 없기 때문에 생체에 삽입할 경우 운동 등에 의해 인접 기관이나 조직에 상처를 줄 수 있는 단점을 안고 있다. 이러한 실리콘을 모재로 하는 신경전극의 생체적합성을 개선하기 위하여 최근에는 나노 조직의 다공질 실리콘 코팅 기술을 개발 중에 있다. 이 기술은 다공질 실리콘이라고 불리는 나노조직을 가지는 형태의 실리콘을 가공하여 실리콘 신경전극을 개발하는 것으로, 이렇게 개발될 전극은 신경과 보다 우수한 접촉 특성을 가지며, 뇌의 기억장소에서 신경의 성장을 개선하고, 전극 이식장치로 인해서 받는 신경교(glia)의 손상을 최소화하고 마치 스카폴더(scaffold)로 작용하도록 한다. 이외에도 생체적합성을 개선하기 위하여 유타 대학의 연구진이 행하고 있는 표면 처리 기술 또는 표면 코팅 기술이 연구되고 있으며, 이 경우에는 새로운 코팅 물질의 개발이 중요한 변수이다.

- Soft materials : 아직까지는 주로 폴리이미드를 중심으로 연구되어 왔으며, 유연한 전극



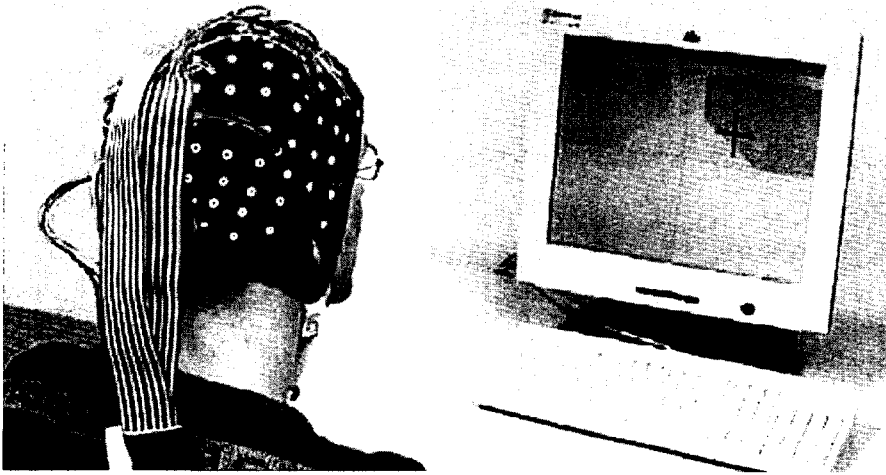
〈그림 5〉 인공시각용 PDMS 전극  
(<http://www.llnl.gov/str/November03/Davidson.html>)

(flexible electrode)이라고 부른다. 앞 절에서 언급한 신경재생형 전극이 주로 폴리이미드를 이용한 유연한 전극이었다. 유연한 전극은 실리콘의 단단하고 부러지기 쉬운(생체적합성이 떨어지는) 특성을 보완하고자 전극의 기판을 유연한 재료로 사용한 것이다. 이때 사용되는 유연한 전극 기판 재료로는 폴리이미드, 패럴린, PDMS 등이 있다. 폴리이미드는 유연한 전극 분야에서 가장 많은 연구가 이루어진 재료이며, 포토리소그래피(Photolithography) 공정이 가능한 PR(Photo Resist)로 개발되어 있어 실리콘 전극과 마찬가지로 비교적 정밀하고 재현성 있는 미세전극의 제작이 가능하다. 하지만 폴리이미드는 전극 기판으로서 유연(flexible)하기는 하지만, 단단하여(stiff) 실리콘 전극처럼 부러지지는 않지만 조직에 상처를 줄 수 있다. 반면 최근에 연구되기 시작한 실리콘 계열의 고무인 PDMS를 이용한 전극은 PDMS의 부드럽고 산소 투과성과 물 투과성이 좋은 특성으로 생체적합성이 좋아 이러한 문제점을 모두 해결하였지만, PDMS 표면과 금속층의 부착력 및 전극 패터닝의 어려움

으로 일정 크기 이하의 미세전극의 제작에 어려움을 겪고 있다. <그림 5>는 미국의 Lawrence Livermore National Lab.에서 개발한 인공시각용 PDMS 전극이다. 패럴린은 PDMS와 폴리이미드의 중간 정도의 단단함을 가지고 있는 물질로서 PDMS보다 전극의 패터닝이 용이하여 최근 유연한 전극 기판으로 연구가 이루어지고 있는 물질이다. 하지만 PDMS와 패럴린은 폴리이미드보다 최근에 연구되기 시작한 물질들이고 아직까지 PR형태로 완전하게 개발되어 있지 않아 공정이 복잡하고 정확성과 재현성이 좋지 않아서 아직까지는 소수의 연구자들에 의해서 연구가 진행되고 있다.

### III. 뇌파 전위 기록술 (Electroencephalogram, EEG)용 전극

미국 미시간 대학 연구팀의 한 관계자는 “지금은 인간의 생체신호를 인식하기 위해서 뇌에 전극을 이식해야 하는 수준에 머물고 있지만 미래에는 전극의 이식 없이도 뇌세포의 전



〈그림 6〉 정신적인 타자기의 시연 모습 (<http://technology.newscientist.com/article/dn8826.html>)

기신호를 정확하게 읽을 수 있는 기술이 개발 될 것”이라고 장담했다. 전극을 머리 근처의 피부에 붙이는 ‘뇌파 전위 기록술(EEG)’은 현재의 과학기술 수준에서 이를 구현할 수 있는 가장 근접한 방법으로 생각된다. 하지만 아직 EEG는 앞서 언급된 브레인게이트 전극 이식술에 비해 생체신호를 탐지하고 기록할 수 있는 성능이 저조한 단점이 있다. EEG로 인식할 수 있는 신호가 너무 미약하여 그에 따른 신호 처리에 어려움이 있다. 그럼에도 불구하고 이러한 비 이식형 전극기술은 외과적 수술이 필요 없고 윤리적 문제에서도 비교적 자유로울 수 있다는 점에서 주목 받고 있는 분야다. 이와 관련하여 최근에 뇌파를 이용한 고무적인 연구결과들이 속속 발표되고 있다. 2006년 3월 독일 하노버에서 열린 ‘세빛 전자쇼’에서는 ‘정신적인 타자기’(Mental Typewriter)가 전시되기도 했다. 독일 베를린의 프라운호퍼 연구소와 훔볼트대학 의과대 연구진이 공동

으로 개발한 이 장치는 컴퓨터의 커서를 마음으로 조정해 메시지를 컴퓨터 화면에 타이핑할 수 있도록 한다. 이때, 전극을 인체에 이식하지 않고 두뇌에서 발생하는 전기적 활동을 측정하는 모자를 쓰기만 하면 된다. 사용자가 움직이는 것을 상상만 해도 커서가 이리저리 움직인다. 이 장치는 전신마비 환자들이 인공관절을 제어하는 데 쓰일 전망이다. <그림 6>은 정신적인 타자기의 시연 모습이다. 또한, 2006년 12월 17일 콜롬비아 이스틀럴 시에서 열린 인간 뇌·컴퓨터 국제 학술 회의에서 뇌파를 이용한 로봇이 소개된 바 있다. 로봇 조정자는 인간의 대뇌와 접촉된 32개의 독립된 전극이 있는 모자를 착용하여 인간의 생각에 따른 뇌파 변화를 이용하여 로봇에게 명령을 내려 물건 줍기, 좌우 이동 등의 행위를 제어하였으며, 조정자와 로봇을 각각 격리시킨 다음 내린 명령에도 로봇은 정확하게 동작을 수행하였다. 이러한 비 이식형 전극 기술은 앞서

언급한 대로 아직은 성능이 저조하나 가까운 장래에 기술의 진보가 이루어질 것으로 생각되며, 현재 이 기술은 차세대 게임의 컨트롤러로도 연구가 진행되고 있다.

#### IV. 국내 현황

신경접속기술과 BMI와 관련한 국내 연구자는 상대적으로 적은 편이며, 특히 신경전극의 개발에 관련한 연구자는 손에 꼽을 정도이다. 서울대학교의 초미세 생체전자 시스템 연구센터가 1998년에 제 1세대 반도체 미세전극의 개발을 시작으로 3세대형 신경전극의 개발에 이르렀으며, 반도체 미세전극의 개발에 상당한 기술력을 갖추고 있는 것으로 사려된다. 또한 국내외 관련 연구자들에게 전극을 공급하고 있으며 해외의 유명 연구그룹과 공동연구가 진행되고 있다. 반도체 미세전극 이외에도 LCP(Liquid Crystal Polymer)나 폴리이미드를 이용한 전극도 개발하고 있다. 그밖에 인공와우용 전극과 인공시각용 전극의 개발 등 대부분의 신경접속용 전극의 개발에 일정 수준 이상의 기술력을 갖추고 있는 것으로 파악된다<sup>[10]</sup>. 이밖에 아주대와 고려대 등에서 각각 폴리이미드와 PDMS를 이용한 전극이 개발되고 있다. 국내 연구진의 전반적인 신경전극 제작 기술은 선진국과 커다란 차이가 나지 않지만, 임상실험이 거의 전무한 상태이며 연구개발 환경 및 기술적 노하우, 관련 연구자의 수 등 BMI 전반에 관한 통합 기술의 완성도 측면에서 극히 미진한 형편이다.

#### V. 향후 전망

신경전극의 개발은 신경접속기술 및 BMI기술의 시발점이 되는 중요한 핵심기술이다. 현재까지 개발된 대부분의 전극은 생체적합성과 유연성이 떨어지고, 단순한 기능을 수행했다. 이와 관련하여 향후에는 생체적합성이 우수하고 유연한 PDMS 등의 물질을 전극의 기판으로 사용하고, 전극의 표면을 bioactive한 물질로 코팅하는 방법이 연구되고 있으며, 각각의 기판 재료의 장점을 살린 hybrid형 전극의 개발도 이루어지고 있다. 또한 미소유체 기술을 이용하여 진단용 전극과 치료용 약물주입 장치가 결합된 다기능 전극의 개발도 이루어지고 있다. 이러한 신경전극의 개발은 난치병 및 장애의 극복을 현실화하여 인류의 삶의 질을 향상시키는데 이바지할 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

- [1] N. Pavešić, J. Gros, S. Dobrišek and F. Mihelić, "Homer II-man-machine interface to internet for blind and visually impaired people", *Comput. Commun.*, vol. 26, no. 5, pp. 438-443, 2003
- [2] Hochberg, L. R., M. D. Serruya, John P. Donoghue et al. "Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia." *Nature*, vol 442(7099): pp.164-71, 2006
- [3] <http://technology.newscientist.com/article/dn9540-brainimplant-enables-mind-over-matter.html>
- [4] Aileen Constans, "Mind over Machines", *The Scientist*, vol. 19, issue 3, 27, Feb. 14, 2005
- [5] K. D. Wise, D. J. Anderson, J. F. Hetke, D. R. Kipke, K. Najafi, "Wireless Implantable Microsystems



: High-Density Electronic Interfaces to the Nervous System” Proceedings of the IEEE, vol. 92, no. 1, pp. 76-97, January 2004

- [6] T. Schanzea, H. G. Sachs, C. Wiesenack, U. Brunner and H. Sailer, “Implantation and testing of subretinal film electrodes in domestic pigs”, Exp. Eye Res., vol. 82, pp.332-340, 2006
- [7] Mark Gassonn,y, Benjamin Hutt, Iain Goodhew, Peter Kyberd and Kevin Warwick, “Invasive neural prosthesis for neural signal detection and nerve stimulation”, Int. J. Adapt. Control Signal Process. Vol. 19, pp. 365-375, 2005
- [8] Takafumi Suzuki, Shoji Takeuchi et al, ”Flexible Rereneration-type nerve Electrode with Integrated Microfluidic Channels”, Proc. Of 2006 Int. Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology, Okinawa, Japan, pp. 303-305, May 2006
- [9] www.cyberkinetics.com
- [10] 이상민, “해외첨단기술 조사단 파견사업 최종 보고서(Dep Brain Stimulation 및 Brain Machine Interface)”, 과학기술부, 2006년 3월

### 저자소개



백 주 열

1992년 2월 단국대학교 자연과학대학 물리학과 학사  
 1994년 2월 단국대학교 일반대학원 물리학과 석사  
 1999년 2월 단국대학교 일반대학원 물리학과 박사  
 2001년 1월-2001년 7월 산업자원부 기술표준원  
 광전재료과 위촉연구원  
 2001년 8월-2006년 2월 단국대학교 의공학연구소  
 선임연구원  
 2006년 3월-현재 고려대학교 의과대학 의공학교실  
 연구강사

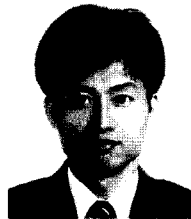
주관심 분야 : BioMEMS, Flexible Microelectrode.

### 저자소개



이 상 훈

1983년 2월 서울대학교 공과대학 전기공학과 학사  
 1987년 2월 서울대학교 대학원 제어계측공학과(의공학  
 전공) 석사  
 1992년 2월 서울대학교 대학원 제어계측공학과(의공학  
 전공) 박사  
 1992년 3월-2006년 2월 단국대학교 의과대학 교수  
 2006년 3월-현재 고려대학교 의과대학 교수  
 주관심 분야 : BioMEMS, Biomedical Engineering



이 승 하

1988년 2월 경북대학교 공과대학 전자공학과 학사  
 1990년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사  
 1995년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사  
 1995년 3월-1996년 2월 한국과학기술원 전기및전  
 자공학과 위촉연구원  
 1996년 3월-2005년 2월 경북대학교 전자공학과  
 국책계약교수/BK21교수  
 2005년 3월-현재 단국대학교 의과대학 의공학교실  
 조교수

주관심 분야 : 의공학 시스템