

## 유전자재조합 단백질로 구성된 생물전자 소자

서강대학교 화학공학과 최 정우교수 연구실에서 수행된 유전자재조합 단백질로 구성된 생물전자 소자에 대한 연구내용을 소개합니다.

### [ 연구배경 ]

- 현재 상업적으로 이용되고 있는 메모리반도체의 최고 집적밀도는 제곱 인치당 1 Gb이며 실험실 수준으로는 10 Gb까지 개발된 상태이지만, 100 Gb 이상의 집적은 고밀도에 의한 구성 요소의 발열 현상과 단열 물질의 두께 감소로 인한 주변 회로 사이의 전자 유출과 전자의 통계적 흔들림 등에 의하여 전자의 운동 방향이 무질서해지는 등, 물리적 한계로 인하여 기존의 기술로는 더 이상 집적 밀도를 높이는 것이 한계인 것으로 인식되고 있다.
- 이러한 집적 기술의 한계를 극복하기 위한 대안으로 제시되고 있는 것이 분자 단위의 소자를 제작하고자 하는 분자전자기술이며, 분자전자기술로써 생물분자를 사용하는 생물전자소자 기술이 제창되었다. 생물전자소자 기술 중 바이오 메모리소자 기술은 생물분자를 이용하여 메모리를 구현하는 기술이다. 분자전자소자의 궁극적인 목표인 분자 한 개를 기억 매체로 하는 소자를 구현할 경우 최고 1테라비트까지 기억 밀도를 높일 수 있다. 따라서 생물전자소자 기술은 기가 바이트의 저장용량을 넘어 테라급 이상의 고집적 메모리 개발을 위한 필수적인 요소 기술로 제시되고 있다.
- 유전자 재조합 기술은 생물공학 분야에서 유용 대사산물의 생산에 응용되어 왔다. 최근 유전자 재조합 기술에 의하여 전자전달 기능이 향상된 전자전달 단백질을 생산할 수 있으며, 서로 다른 두 종류의 단백질이 결합된 새로운 형태의 융합단백질도 생산할 수 있다.
- 생물전자소자 기술은 현재 세계적으로 연구가 진행 중인 상태이며, 우리나라에서는 아직 기술개발 단계가 미진한 단계이다. 따라서 전자소자 분야에서 차세대 원천 기술의 확보를 위하여 생물전자소자 기술의 연구가 필요하다.
- 생물전자소자 기술은 전자산업의 국제 경쟁력을 강화시키고, 연계 분야간 상승효과를 제공하며 고부가가치 산업 창출을 통해 국제사회에서 기술선진국으로 발돋움할 수 있는 기반을 마련할 수 있다.

### [ 연구내용 ]

- 본 연구에서는 생물체의 전자전달 현상을 모방한 생물분자로 구성된 생물전자 소자를 개발하기 위해서 전자전달능력이 우수한 생물분자를 이용하여 생물전자소자를 제작하였다. 본 연구에서는 생체내 전자전달 현상에 직접적으로 작용하는 cytochrome 단백질과 높은 형광 양자수율을 갖는 녹색형광단백질(GFP)을 이용하였으며, cytochrome 단백질은 전자수용체로 GFP는 빛에 의한 전자여기체로 사용하였다. cytochrome과 유전자

재조합 기술로 생산된 GFP를 이용하여 단백질의 복합 박막화를 수행하였다. 생물분자를 이용한 박막 형성 기법으로는 Langmuir-Blodgett(LB)기법과 자기조립기법(SA)을 이용하였다. 제작된 생물분자 박막위에 금속전극을 증착하여 생물분자 광다이오드를 제작하였다 (그림1).

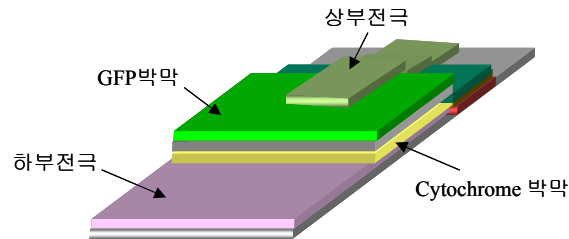


그림.1 생물분자 광다이오드의 구조

○생물분자 광다이오드소자는 광조사에 의해 여기체에서 전자수용체로 전자의 흐름이 생기며, 이로 인해 전류가 발생하는 광전특성과 정류특성을 갖고있다. 본 연구에서는 생물분자 광다이오드소자의 생물분자박막을 응용하여 분자단위의 메모리 기능을 구현하였다 (그림 2). 외부에서 광조사에 의해 발생한 전자와 주사 터널링현미경(STM)에 의해 주입된 전자는 생물박막에 저장되어지며 (메모리의 쓰기 기능) 저장된 전자에 의한 전하변화는 정전기힘 현미경(EFM)에 의해 분석되어 진다 (메모리의 읽기 기능)(그림3). 제시되는 소자는 생물분자 단위로 정보의 저장과 읽기가 가능하여 광메모리 소자로 사용될 수 있으며 이를 이용하면 분자단위의 메모리 기능에 의한 테라비트급 메모리가 가능하다.

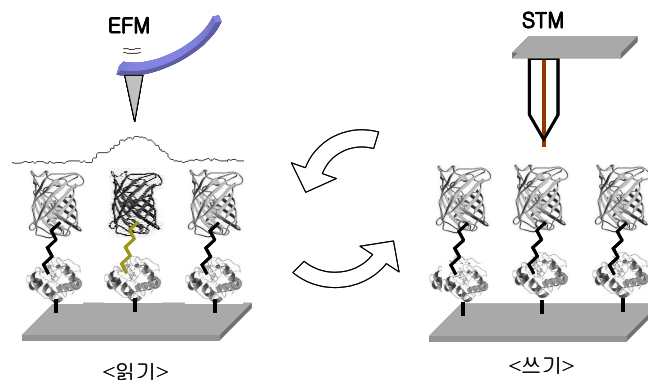
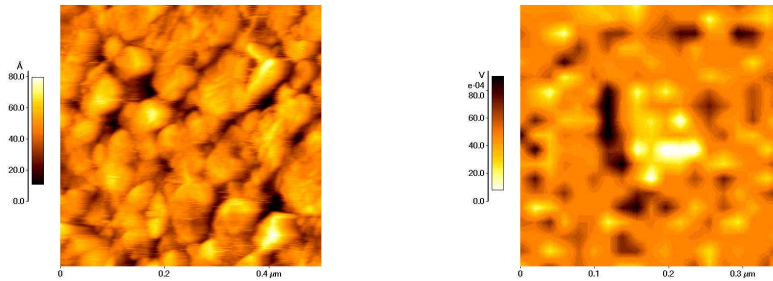


그림.2 생물분자 박막의 메모리 기능



(1)

(2)

그림.3 단백질 박막의 STM (1) 및 EFM (2) 표면 형상

### [ 기대효과 ]

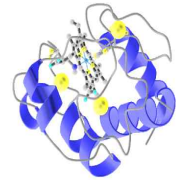
○기존의 실리콘칩에 근거한 전자소자의 현 시장 수요와 앞으로의 전망을 고려할 때, 고 집적도의 분자전자소자의 시장점유율은 21세기에 급성장할 것으로 전망되어 진다. 가능성 생물분자 생산은 정밀화학산업 및 반도체산업의 새로운 시장을 개척할 것으로 전망되고 있다. 또한 생물분자전자소자를 구현하기 위해 선행 연구되는 유전공학 기법에 의한 생물소재 개발, 나노기술에 의한 초미세 패턴 제작을 위한 공정 기술은 생물, 화학, 물리 및 전자 산업을 연계시킨 새로운 첨단 분야를 개척하는 것은 물론 차세대 기술에서 선진국과의 기술격차를 줄일 수 있는 계기가 되리라 생각된다.

○본 연구에서 제시되는 생물전자소자 기술은 국내 분자소자 및 나노테크놀로지 관련 연구의 질적 양적 수준을 향상시킬 수 있는 토대를 마련할 것이며, 새로운 학문 분야를 개척하여 국제적으로 새로운 기술의 우월적 지위를 확보할 수 있을 것이다.

○미국, 일본, 유럽등 선진국의 과학자들은 본 연구에서 제시되는 생물전자소자 기술이 2020년경에 완성될 것으로 전망하고 있으며, 본 기술이 완성되면 기존의 실리콘칩을 이용한 전자소자시장의 일부를 대체할 것으로 전망하고 있다.

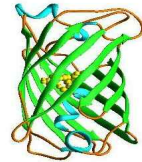
## 1. 용어설명

○시토크롬(Cytochrome): 세포의 산화/환원에 작용하는 색소단백질로써, 본 연구에서는 시토크롬의 한 종류인 시토크롬 b562 및 시토크롬 c를 전자수용체로써 사용하였다.



시토크롬 c

○녹색형광 단백질(Green Fluorescent Protein, GFP): 원통형 구조를 가지며, 490nm파장의 빛을 흡수하고, 510nm파장에서 형광을 발하는 특징이 있다. 본 연구에서는 전자여기체로써 사용하였다.



녹색형광단백질

○융합단백질(fusion protein): 유전공학적으로 만들어진 두 개의 상이한 종류의 단백질이 결합된 단백질을 지칭한다.

○랑뮤어 블러젤 기법(Langmuir Blodgett, LB): 기/액 계면상에 양친매성 분자의 단분자막을 형성한 후 이를 고체기판 표면에 물리적으로 적층시켜 단분자막을 형성시키는 기술이다.

○자기조립기법(Self-Assembly, SA): 특정 작용기를 가진 분자를 금, 실리콘 기판위에 화학적으로 흡착시켜 단분자막을 형성시키는 기술이다.

○주사 탐침 현미경(Scanning Probe Microscope, SPM): 물질의 표면특성을 원자단위까지 측정할 수 있는 현미경을 총칭한다.

○주사 터널링 현미경(Scanning Tunnelling Microscope, STM): SPM의 일종으로 터널링 전류를 이용하여 물질의 표면을 분석하는 장비이다.

○정전기 힘 현미경(Electrostatic Force Microscope, EFM): SPM의 일종으로 표면의 전하차이에 의해 표면을 분석하는 장비로써, 박막표면의 전하분포를 파악할 수 있다.

## 2. 연구배경

○현재 상업적으로 이용되고 있는 메모리반도체의 집적밀도는 고밀도에 의한 구성 요소의 발열 현상과 단일 물질의 두께 감소로 인한 주변 회로 사이의 전자 유출과 전자의 통계적 흔들림 등에 의하여 전자의 운동 방향이 무질서해지는 등, 물리적 한계로 인하여 기술 개발의 한계에 도달하고 있다. 이러한 집적 기술의 한계를 극복하기

위한 대안으로 제시되고 있는 것이 분자 단위의 소자를 제작하고자 하는 분자전자소자 기술이다. 분자전자소자 중에 생물분자가 갖고 있는 다양하고 우수한 기능을 이용하기 위하여 생물분자로 구성된 생물전자소자 기술이 제창되고 있다. 생물전자소자의 궁극적인 목표라 할 수 있는 생물분자 한 개를 기억 매체로 하는 소자를 구현할 경우 최고 1Tb까지 기억 밀도를 높일 수 있다. 따라서 이 기술은 기가 바이트의 저장용량을 넘어 테라급 이상의 고집적 메모리소자 개발을 위한 필수적인 요소 기술로 각광을 받고 있다.

- 테라바이트급(Tb) 생물전자소자 제작기술 확립에 따른 전자산업의 국제 경쟁력을 강화시키고, 연계 분야간 상승효과를 제공하는 고부가가치 산업 창출을 통해 국제사회에서 기술선진국으로 발돋움할 수 있는 기반을 마련하고, 이를 바탕으로 경제 및 산업발전의 고도성장을 유도하리라 예상된다.

### 3. 주요 연구내용 및 결과

- 전자수용체로 사용되는 생물분자로서 세포대사 과정중 전자전달계에 관여하는 cytochrome을 선정하였고, 전자여기체로서 유전자 재조합기법에 의해 생산된 GFP를 사용하였다. 금속기판위에 두 단백질 분자의 복합박막을 제작하기 위해 가교분자를 이용한 자기조립기법과(SA) 및 LB(Langmuir-Blodgett)기법을 이용하였다.
- GFP와 cytochrome으로 복합박막을 형성하고, 박막위에 금속전극을 증착함으로써 생물분자 광다이오드를 제작하였다. 제작된 생물분자 광다이오드의 전기적 특성을 측정하였다. 제작된 전자소자는 광전특성 및 일방향 전자전달 특성, 다이오드특성을 나타내었다.
- 생물분자 광다이오드소자의 생물분자박막을 응용하여 분자단위의 메모리 기능을 구현하였다. 외부에서 광조사에 의해 발생된 전자와 주사 터널링현미경(STM)에 의해 주입된 전자는 생물박막에 저장되어 지며 (메모리의 쓰기 기능) 저장된 전자에 의한 전하변화는 정전기힘 현미경(EFM)에 의해 분석되어 진다 (메모리의 읽기 기능). 제시되는 소자는 생물분자 단위로 정보의 저장과 읽기가 가능하여 광메모리 소자로 사용될 수 있으며 이를 이용하면 분자단위의 메모리 기능에 의한 테라비트급 메모리가 가능하다.
- 본 기술을 더 발전시켜 유전자 재조합 기술을 이용하여 두 단백질을 결합한 융합 단백질을 일본 동경대학교와 공동으로 개발하고 있으며, 복합 단백질 박막의 특성에 대하여 영국 Durham대학교 분자 및 나노전자 센터와 공동연구를 수행하고 있다.

#### 4. 기대효과

- 국내에서 생물전자소자의 개발 기술을 개발함으로써 유전자 재조합 기술에 의한 생물 분자 생산기술, 나노테크놀로지에 의한 기능성 생물분자의 박막제작 공정기술 및 분자소자 구동기술등 차세대 원천기술을 확보할 수 있다.
  
- 생물전자소자의 개발은 고집적도의 메모리 기능을 갖는 분자소자에 대한 전자 산업의 신분야를 창출할 수 있으리라 예상된다. 기존의 실리콘칩에 근거한 전자소자의 현시장 수요와 앞으로의 전망을 고려할 때, 생물전자소자의 시장점유율은 21세기에 급성장할 것으로 전망되고 있으며, 궁극적으로 테라바이트급 분자메모리소자 제작기술 확립에 따른 전자산업의 국제 경쟁력을 강화시키고, 연계분야간 상승효과를 제공하는 고부가가치 산업 창출을 통해 국제사회에서 기술 선진국으로 발돋움할 수 있는 기반을 마련하고, 이를 바탕으로 경제 및 산업발전의 고도성장을 유도하리라 예상된다.
  
- 본 연구진이 개발한 생물전자소자는 고집적도를 가능케 하여 현재의 메모리소자의 한계를 극복한 차세대 기억소자로 응용 가능하다. 차세대 기술로써 생물전자소자 개발 기술은 테라비트급 소자를 가능케 하여 대용량의 정보처리에 의한 정보통신, 전자, 컴퓨터등의 기술분야에 파급효과가 크리라 예상된다. 생물전자 메모리 기술은 더욱 발전되면 바이오 프로세서 개발 기술로 연계되어 바이오 컴퓨터의 개발을 가능케 하리라 사료된다.

### III. 이력서

#### 1. 인적사항



성명: 최정우 (Jeong-Woo Choi)

생년월일: 1959년 11월 12일

주소 : (집) 경기도 고양시 일산구 대화동

대명APT 403-1502 (우)411-410

(직장) 서울특별시 마포구 신수동 1번지

서강대학교 화학공학과 (우) 121-742.

연락처 : Tel : 02-705-8480, Fax : 02-711-0439

E-mail : jwchoi@ccs.sogang.ac.kr

Homepage : <http://www.sogang.ac.kr/~biotech/>

#### 2. 학력사항

1982 : 서강대학교 공과대학 화학공학과 (학사)

1984 : 서강대학교 공과대학 화학공학과 (석사)

1990 : 미국 Rutgers University 생물화학공학과 (공학박사)

#### 3. 경력사항

1990 ~ 현재: 교수, 서강대 화학공학과

2000 ~ 2000: 객원교수, 영국 University of Durham, 분자 및 나노 전자 센터

1998 ~ 1998: 객원교수, 일본 동경대, 화학 및 생명공학과

1997 ~ 1997: 객원교수, 일본 동경공업대, 생물분자공학과

1996 ~ 1996: 객원연구원, 일본 Mitsubishi전기 중앙연구소

1993 ~ 1994: 객원연구원, 미국 IBM Almaden Research Center

#### 4. 수상경력

1998 신인학술상, 한국생물공학회

1998 범석논문상, 한국화학공학회

2000 Best Poster Presentation Award, Young Asian Biochemical Engineering's Community