

분자 소자의 전망과 연구 동향

이 창 진, 강 영 구, 최 정 우*

한국화학연구소 화학소재연구부 *서강대학교 화학공학과

I. 서 론

컴퓨터가 얼마나 빠르고 강력해질 수 있는가에 대한 대답은 컴퓨터 칩을 얼마나 고집적도화할 수 있는가와 직결된다고 볼 수 있다. 실제로 컴퓨터 회로를 작고 조밀하게 만들 수 있는 기술이 현재와 같은 속도로 계속 발전한다면 인식력과 교육이 가능한 인공 지능을 가지는 컴퓨터도 언젠가는 제조할 수 있을 것이다. 그러나 이러한 상상도 그 한계를 극복하여야 현실화가 가능할 것으로 생각되는데 이는 100나노미터 이하의 선폭 크기에 도달하면 양자화 효과가 크게 나타나며 또한 고집적으로 압축되어 있는 소자들에서 방출되는 열의 영향으로 인해 소자의 신뢰성을 잃기 때문이다.

위와 같은 문제점을 무시하더라도 100nm이하 선폭을 갖는 소자를 제작할 수 있는 기술은 아주 어려운 기술이므로 고집적화 속도는 현재와 같은 속도로 개발되지는 않을 것이다. 더욱이 보다 더 심각하게 고려되어야 할 문제는 이러한 기술적인 문제가 해결되더라도 초고집적도를 갖는 반도체 칩을 생산하는데 천문학적인 경비가 소요된다는 것이다. 2015년 정도에 반도체 공장을 짓는데 들어가는 경비로 약 2000억 달러 이상이 소요될 것으로 많은 전문가들이 예상하고 있다. 결국 칩의 성능 향상에 그만큼 돈을 지불해야 된다는 것이며 결국 경제성의 논리로 소자의 고집적화도는 어떤 평형점을 찾을 것으로 생각된다.

인간은 속성상 더욱 빠른 속도와 소형이며 여러 가지 기능을 가진 기기를 원하고 있으며 이를

뒷받침하는 전자 산업의 발전을 위해 과학자들은 여러 가지 대안에 대해 연구해오고 있었으며 본고에서 소개하는 분자 소자는 이러한 대안의 하나이다. 초기의 분자소자에 대한 연구는 매우 미미하였으며 개념적으로 어떻게 고집적화도를 갖는 소자를 제조할 것인지에 대한 구체적인 방안이 없이 다만 유기 분자로 소자를 제작할 수 있다는 것에만 초점이 맞추어져 있었다. 그러나 최근 2-3년 동안 이루어진 연구로 초고집적화가 가능한 분자소자에 대해 여러 가지 방면에서 상당한 진척이 있었으며 이 분야가 상당한 가능성을 가지고 있다는 것을 보여주고 있다.

본 총설에서는 분자 소자에 대해 최근에 발표된 여러 결과를 소개하며 앞으로의 전망을 조명하고 이와 덧붙여 생물분자를 이용한 바이오 소자에 대한 소개를 하고자 한다.

II. 유기 분자 소자

1970년대 초반에 생체 시스템에서의 정보 처리의 기능에 근거한 새로운 컴퓨터 아키텍처가 제안되었는데^[1] 이는 자연에서의 생체 조직이 정보를 처리, 전달 저장하는 기능을 이용하자는 것이었으며 이어서 Aviram과 Ratner는 하나의 유기 분자로 전기회로를 설계할 수 있다는 제안을 하였다.^[2] 결국 이러한 아이디어는 탄소를 기본으로 하는 분자 소자를 이용한 컴퓨터나 생체분자 컴퓨터의 개발을 뜻한 것이었다. 합성에 의한 유기 분자나 생체 분자를 이용하는 소자는 그 최소

소자 단위가 분자가 될 것이므로 그 자체가 나노미터 크기의 소자로 nanoelectronics에 직접 사용될 수 있다.

분자를 소자로 사용할 경우, 분자의 크기는 아주 작아서 현재 사용되고 있는 반도체 칩의 트랜지스터를 이 원고의 페이지 크기로 확대한다면 분자의 크기는 이 문장의 끝에 보이는 마침표의 크기 정도밖에 되지 않는다. 즉, 현재 사용하고 있는 실리콘에 기초한 소자보다 훨씬 더 많은 소자를 같은 면적에 집적화 할 수 있다는 것이다. 또한 이론적으로는 유기 합성 방법으로 10^{23} 개 분자를 플라스크 내에서 한번에 제조할 수 있으므로 각 분자를 소자로 사용할 경우 매우 용이하게 10^{23} 개의 소자를 생성시킬 수 있다는 장점이 있다. 물론 용액 상에 존재하는 이들 분자를 기질 상에 원하는 위치에 고정시키고 이를 전기적으로 연결하는 것이 얼마나 용이하며 가격적으로 장점이 있는지는 아직 판단할 수 없지만 분명 새로운 패러다임의 접근 방법이다.

분자를 소자로 사용할 때의 특징을 설명하기 위해서 먼저 분자 내에 전자가 어떻게 한정되어 있는가를 살펴볼 필요가 있다. 일반적으로 자유 전자는 연속적인 에너지 준위를 가질 수 있으나 분자 내에 존재하는 전자는 양자화된 에너지 준위만을 가질 수 있다. 이러한 에너지 준위는 양자 이론에 근거한 것이며 분자 내에서 전자는 오비탈이라고 부르는 전자 구름 내에서 원자간의 결합에 참여하던지 아니면 원자 내에서 정렬되어 있다고 볼 수 있다. 이러한 양자화 된 에너지 준위는 독특한 것으로 분자 내에 전자를 한정하는 역할을 한다고 볼 수 있다. 반면 현재 사용되고 있는 전통적인 마이크로트랜지스터의 경우에는 소자 내에 전자를 양자화하기에는 그 크기가 너무 크며 소자의 크기가 100나노미터 이하로 줄어들면 소자내의 밴드 구조에 한정되어 있는 전자는 다른 근접한 소자로 쉽게 이동할 수 있다. 이는 밴드내 전자의 이동이 허용된 에너지 준위가 상당히 많으며 주변에서 흡수되는 에너지로도 이동이 가능하기 때문이다. 따라서 하나의 소자에 저장해둔 정보가 다른 소자로 새나가는 것을 막

기가 매우 어렵다.

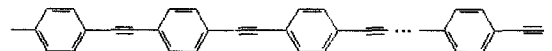
이와 같이 분자 소자 내의 전자를 한정지어주는 특징 외에 분자의 구조를 변화시킴으로써 새로운 양자역학적인 현상을 구현할 수도 있다. 특히 지난 15년 간 비교적 값이 싼 SPM(Scanning Probe Microscopy) 등과 같은 분석 장비를 이용하여 나노미터크기의 물질을 조작하고 조사하는 여러 가지 방법이 발표되었고 과학자들은 분자 수준에서 크기와 모양을 제어할 수 방법에 대해서도 습득하였다. 결국 이러한 연구 결과들이 오늘의 분자 소자 연구에 크게 기여하였다고 볼 수 있다.

1. 전도성 분자 전선(conducting molecular wire)의 제조와 전도도 측정

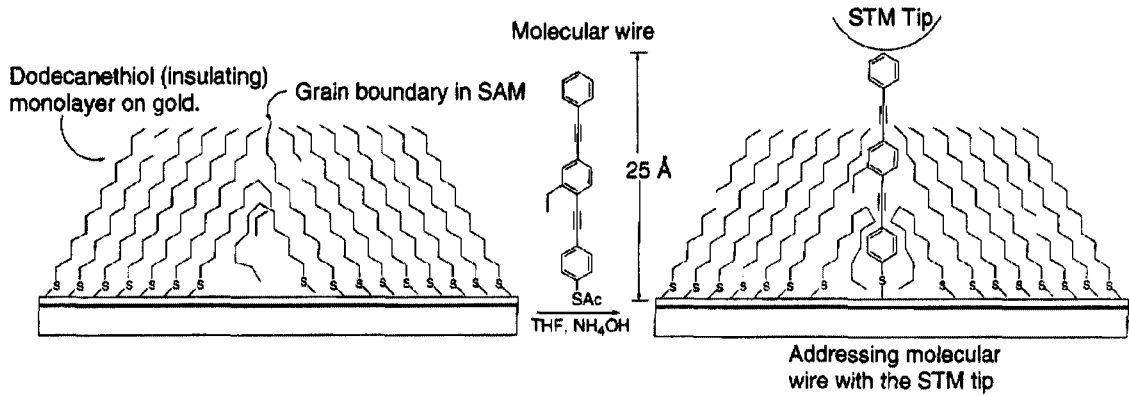
폴리아세틸렌, 폴리피롤 및 폴리아닐린과 같은 π -공액 결합을 갖는 고분자들은 높은 전도도를 갖는 유기고분자로 알려져 있다. 이들이 전기전도성을 갖는 이유는 π -오비탈이 서로 겹쳐져 전자들이 쉽게 이동할 수 있는 경로를 만들어주기 때문이다. 이러한 π -공액 결합을 갖는 단분자 사슬들을 분자 전선으로 사용하려는 시도들이 진행되었다.

분자 전선으로는 벤젠, 티오펜 등과 같은 방향족 작용기들이 연결되어있는 분자들이 주로 연구되어왔다. 최근 Tour 등은 3중 결합이 방향족 작용기 사이에 삽입되어 분자의 뒤틀림이나 휘어짐이 없이 π -공액 결합을 가질 수 있는 최적의 구조를 제안하였으며, 분자의 나노 구조제어 및 분자의 사슬의 길이를 조절하여 합성할 수 있는 방법을 발표하였다.^[3,4] 이들이 제안한 분자의 구조는 <그림 1>과 같다.

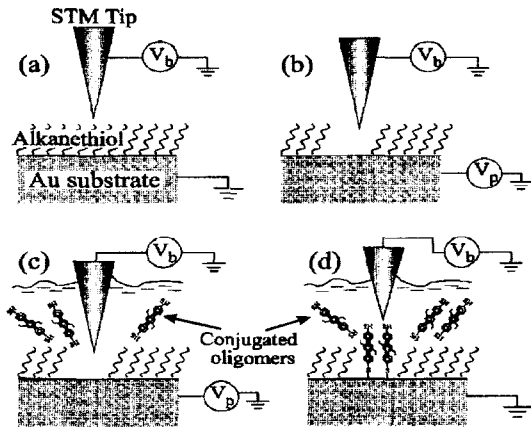
분자 전선을 금 전극 위에 자기조립된 알칸티올의 박막의 격자 계면(grain boundary)에 삽입할 수 있음을 발견하였고 (<그림 2> 참조) 또한 이 단 분자 전선을 STM 팁을 이용하여 어드레싱(addressing)이 가능함이 보고되었다.^[5,6]



<그림 1> 분자 전선용 π -공액 화합물



〈그림 2〉 STM을 이용한 분자전선의 Addressing.



〈그림 3〉 STM을 이용한 분자 전선의 리소그래피

또한 〈그림 3〉에서 보여주는 것과 같이 알칸티올 자기조립 박막에 STM 팁을 사용하여 원하는 위치에 전압펄스를 가하여 자기조립된 분자를 분자 전선으로 바꿀 수 있다고 보고하였다.^[7] 즉, 이러한 기술은 분자 전선을 원하는 패턴이나 위치에 삽입할 수 있다는 방법을 제시한 것으로 볼 수 있다.

이와 같은 방법으로 자기조립된 분자전선의 전류 밀도는 약 10^{11} electrons/sec- nm^2 로 카본 나노튜브와 거의 동일한 정도의 매우 높은 전류 밀도를 가지며, 기존의 구리 전선에 비해 약 백만 배 큰 값을 가지는 것으로 보고되었다.^[8] 이외는 다른 시도로 nm 크기의 기공을 갖는 기질을 형

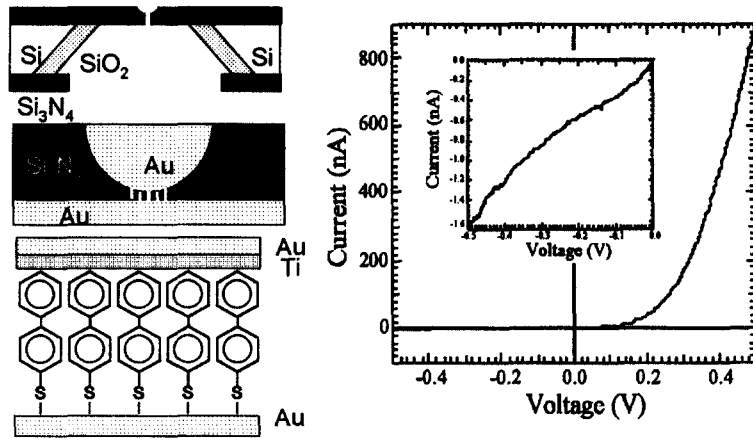
판(template)으로 사용하여 기공 내에서 전도성 고분자를 중합하여 약 3nm 정도의 직경을 갖는 고분자 전선을 제조할 수 있는 방법도 발표되었다.^[9,10]

2. 분자 정류 다이오드(Molecular rectifying diode)와 트랜지스터(transistor)

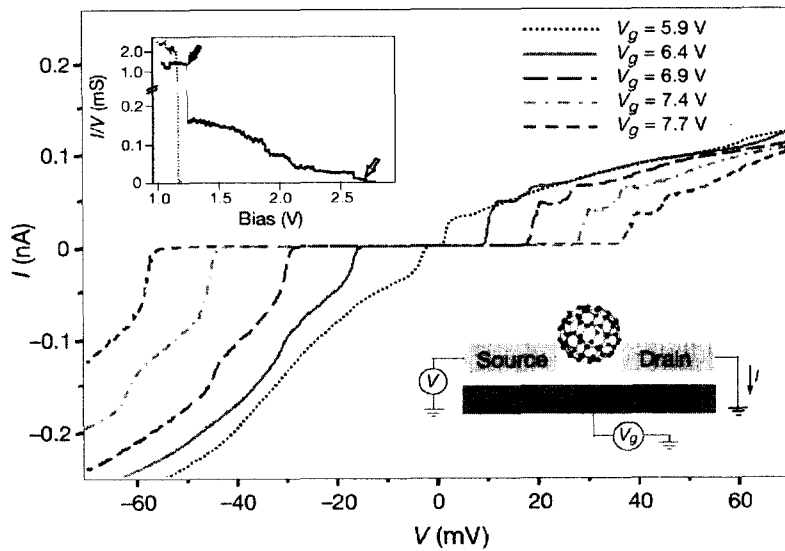
Aviram과 Ratner는 1974년 유기분자를 이용하여 실리콘계 고체소자를 이용한 것과 같은 정류현상이 가능한 소위 Molecular Rectifier를 제안하였다. 즉, 분자의 구조가 비대칭적이어서 어느 한쪽 방향에 비해 그 역방향의 전류흐름이 매우 작아지는 현상이다.^[2] 이러한 제안은 1990년대 말에 Metzger와 Reed 연구그룹에 의하여 실험적으로 증명되었다.

Metzger 등은 분자의 각각 한쪽 끝에는 전자주개(electron donor) 작용기를, 다른 쪽에는 전자받개(electron acceptor) 작용기를 가진 hex-adeacylquinolinium tricyanoquino-dimethanide(HDQ-3CNQ)를 Langmuir-Blodgett 방법으로 한층 또는 다층 박막으로 배열한 소자를 제작하여 정류 특성을 확인하였다. 이 분자정류 다이오드의 정류률(rectification ratio)은 최고 26.4로 측정되었다.^[11]

이후 Reed 등은 4-thioacetylbiphenyl을 자기조립(self assembly) 방법으로 금전극 위에



〈그림 4〉 자기조립 박막을 이용한 분자 정류 다이오드



〈그림 5〉 C₆₀ 단분자 트랜지스터의 구조 및 전압-전류 특성 곡선

배열한 후 Au-Ti 전극을 증착하여 소자를 제작하였는데 이 소자는 1V에서의 전류가 -1V에서의 전류와 비교하여 약 500배정도 크게 나타나는 정류 특성을 보였다.^[12](〈그림 4〉)

최근 H. Park 등은 실리콘 기판 위에 SiO₂ 절연층을 형성한 후 e-beam 식각법 및 break-junction 방법으로 10nm 정도의 간격을 가지는 소스(source)와 드레인(drain) 전극을 제조하였으며, 이 전극 사이에 C₆₀ 분자를 도포하여 단

분자 트랜지스터를 제작하였다.^[13] 〈그림 5〉에는 이 단분자 트랜지스터의 간략한 구조와 전압-전류 특성 곡선을 나타내었다. 이 방법은 크기가 아주 잘 조절된 분자를 전극 사이에 삽입하여 단전자 트랜지스터를 제조할 수 있는 방법을 보여준 것으로 π-공액 결합을 갖는 덴드리머 형태의 유기 분자가 합성된다면 같은 방식의 트랜지스터가 제조될 수도 있을 것이다.

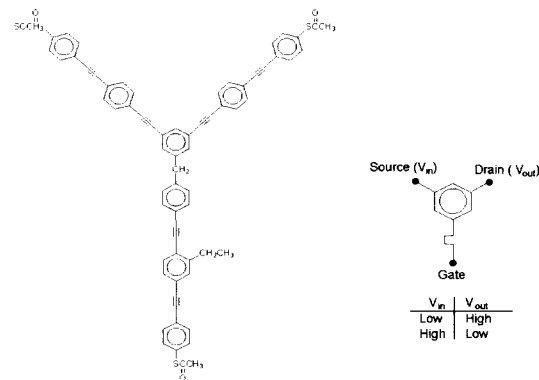
2. Molecular resonant tunneling diode, transistor 및 이를 이용한 논리소자

Resonant tunneling diode는(RTD) 에미터와 컬렉터 사이에 나노미터 크기의 양자 우물(quantum well)를 포함하는 이중 터널 장벽(double tunnel barrier)이 있는 구조를 가지는데 이 경우 quantum well은 5-10nm의 아주 좁은 폭을 가지므로 양자역학적으로 하나의 공명 에너지 준위(resonant energy level)를 갖는다. RTD는 에미터의 전자 에너지 밴드가 quantum well의 resonant energy level과 같을 시에 전자가 에너지 장벽을 투과하여 흐른다. 이러한 RTD는 실리콘계 고체 소자에서 이미 잘 알려진 소자이다. 그러나 고체 소자의 경우 터널링 장벽을 nm 크기로 일정하게 만드는 것이 매우 어려우며 또한 소자의 동작도 저온에서만 가능한 점 등의 문제점을 해결하여야 한다.

분자 소자에서도 이와 같은 RTD가 가능하다는 것이 발표되었다. <그림 6>에서 보인 화합물은 π -공액 구조를 갖는 전도성 분자 전선 사이에 전자를 통과하지 않는 약 1nm 정도의 이중 터널 장벽을 가진 구조로 molecular resonant tunneling device로 작동함이 관측되었다.^[14] 이러한 분자 소자의 경우 화학적인 합성을 통하여 동일한 nm 크기의 양자 우물을 갖는 분자를 대량으로 쉽게 만들 수 있다는 장점이 있다. 또한, 분자 양자 우물 내에서의 에너지 준위가 연속적이지 않고 수eV 이상의 비교적 큰 차이를 가져 상온에서도 작동이 가능하다. 이 소자의 전압-전류

특성을 <그림 7>에 나타내었으며, 296K에서의 peak-to-valley비가 1.3:1로 관측되었다.

이러한 분자 단위의 소자로 transistor의 구성도 가능하다는 것이 제안되었으며, <그림 7>에 보인 분자 구조로 우측에 보인 회로와 동등한 분자 소자를 구현할 수 있을 것이라고 Tour 등은 제안하고 있다. J. C. Ellenbogen 등은 <그림 7>과 같은 polyphenylene을 근간으로 molecular rectifier 및 logic gate가 제작 가능할 것이라고 제안하였다.^[8]

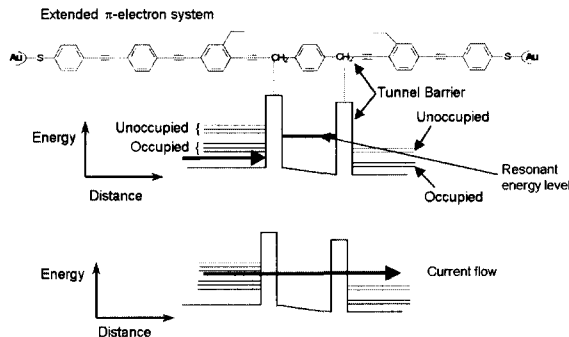


<그림 7> Molecular logic gate(이 분자는 NOT logic gate로 design됨.)

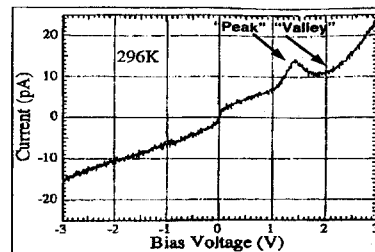
3. Molecular Switch 소자

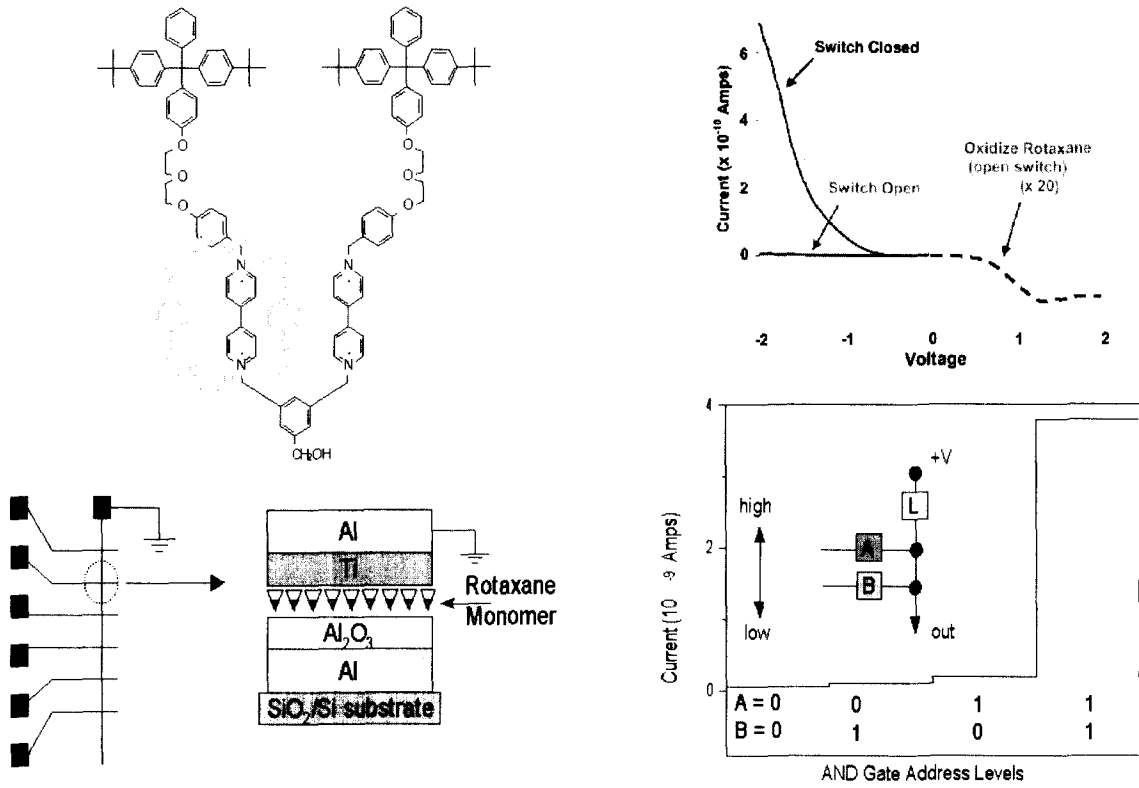
분자 switch 소자는 크게 다음의 4가지 방향으로 연구되고 있다.

- 전기장(electrical-field)에 의해 조절 가능



<그림 6> 분자 RTD(Resonant Tunneling Diode)의 원리 및 전압-전류 특성 곡선





〈그림 8〉 분자 switch용 rotaxane 분자 구조 및 이로부터 제조된 분자 switch의 전압-전류 특성 곡선

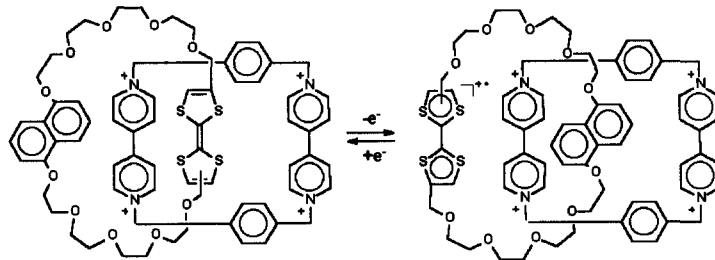
한 Molecular Switch 소자 : RTD, 분자 transistor 등

- Electromechanical Molecular Switch 소자 : 전기적 또는 역학적 힘이 분자에 작용하여 분자의 conformation 변화시키거나 분자내의 일정한 작용기의 위치를 변화시키는 switch 소자.
- Photoactive/photochromic Molecular Switch 소자 : 빛에 의해 분자의 모양, orientation 또는 전자의 configuration이 변하는 switch 소자
- Electrochemical Molecular Switch 소자 : 전기화학적 반응에 의해 분자의 모양, orientation 또는 전자의 configuration이 변하는 switch 소자

이 중 처음 두 종류의 분자 switch 소자는 고체 소자로 제작이 가능하며 nanoscale로 제작이

가능할 것으로 예상되어 그 전망이 매우 밝다. 그러나 광을 이용한 switch의 경우 빛을 나노 수준으로 제한시키기가 매우 어려운 단점이 있으며, 전기화학적 반응을 이용한 switch 소자의 경우 전해질이 필요하다는 단점이 있어 이를 극복해야 나노 수준의 소자로 제작 가능할 것으로 예상된다.

최근 미국의 HP사와 UCLA의 연구팀은 rotaxane 고리구조를 가진 분자가 전기장에 의해 스위칭이 가능하며 이러한 유기 분자를 이용하여 고체 논리 소자가 가능하다는 것을 보였다.^[15] 이들 분자 스위치는 〈그림 8〉에 보인 것과 같이 rotaxane 고리가 또 다른 분자의 축에 끼여져 있는 형태로 되어있으며, 전압 인가에 따라 rotaxane 고리가 분자 축 위에서 위치를 변화하며 "0" 또는 "1"의 상태를 표시하는 분자 스위치로 작동이 가능하다. 〈그림 8〉에 나타낸 분자를

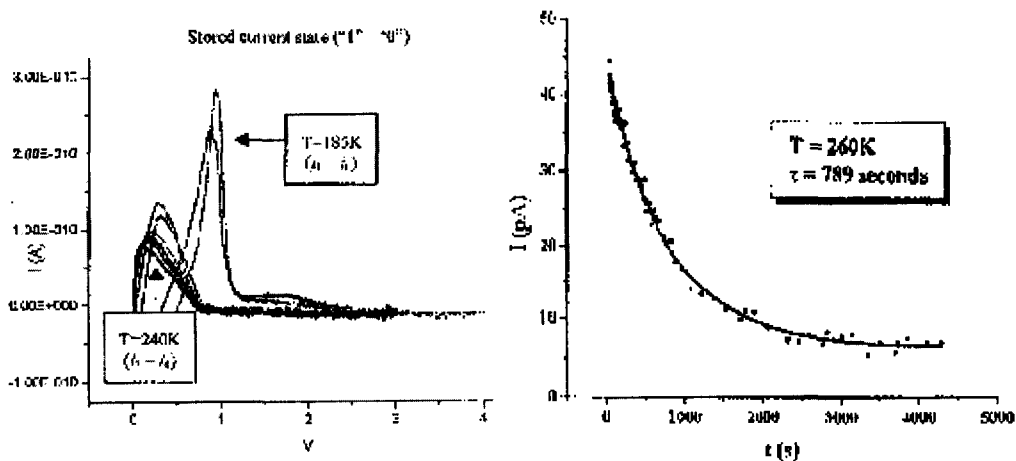
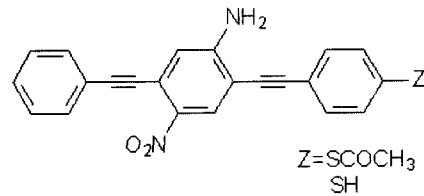


〈그림 9〉 분자 스위치용 Catenane 분자의 구조 및 산화 상태에 따른 분자 구조의 변환 도식도

두 금속 전극 사이에 단분자 박막으로 제조하여 전기적으로 조작이 가능한 분자 switch를 제작하였고, 이로부터 논리 연산 소자를 제작하는 것이 가능함을 보고하였다. 그러나 이 분자 논리소자는 단 한번만 기록이 가능하며 스위칭에 걸리는 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 최근 이들은 〈그림 9〉에 나타낸 catenane계의 분자 스위치를 사용하여 비슷한 논리소자를 제작하였으며, 상온에서 여러 번 기록이 가능한 논리연산 회로 제작이 가능하다고 보고하였다.^[16] 이 catenane 분자는 산화 전압이 가해지면 tetrathiafulvalene 작용기가 산화되어 양이온이되고 따라서 양이온 특성을 가지는 cyclophane과 정전기적 반발로 분자고리가 이동하여 새로운 구조를 가지게되며, 환원될 경우 가역적으로 원래 모양으로 되돌아와서 분자 스위치로 작동하게 된다. 산화

환원 센터를 둘러싼 고리의 영향으로 산화될 때와 환원될 때의 전압이 달라질 것이므로 이를 이용하여 분자 메모리 소자로 응용이 가능할 것으로 본다.

또한 Yale 대학의 Reed 및 Rice 대학의 Tour 등은 아래에 보인 것과 같은 phenylene acetylene 올리고머에 전자주개 (electron donor) 및 전자받개 (electron acceptor) 작용기가 도입된 유기분자를 금 전극에 자기조립 단분자 박막을 형성하여 peak-to-valley 비율



〈그림 10〉 NDR 분자의 구조 및 전압-전류 특성 곡선

(PVR)이 1000:1 이상인 NDR(negative differential resistance)를 갖는 소자를 제작할 수 있음을 보고하였다.^[17](〈그림 10〉) 이 분자 NDR은 기존의 Ga-As NDR소자 PVR이 100:1 이하인 것에 비해 매우 우수한 특성을 나타내었다. 이들은 이 단분자 박막 소자를 이용하여 분자 switch가 가능함을 보고하였다. 또한 전도도가 높은 상태를 260K에서 10분 이상 유지할 수 있어 메모리 소자로도 응용 가능 할 것으로 보고하였다.

III. 생물 전자 소자

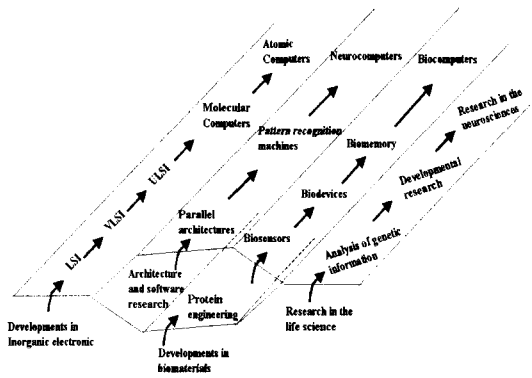
생물은 생명현상의 기본 단위인 세포에서부터 고차원의 정보를 이용하는 뇌에 이르기까지 정보, 에너지의 전달 및 변환, 전달 정보의 기억, 스위칭의 기능이 서로 어울려서 구성된 거대한 기능 시스템이다.^[18] 이와 같은 생체 기능의 다양성을 응용하여, 1개의 생물분자가 전자소자의 요소로서 기능을 갖도록 생물분자를 설계하여 조합하고 분자 배선을 하며, 이들 분자를 접합시켜 생물 전자소자를 만들어 기존 전자소자의 한계를 극복하고자 하는 연구가 활발하게 진행되고 있다.^[19,20] 생명체내의 신호전달 및 전환기능은 분자수준에서 수행되며 picosec 이내의 빠른 전달 속도, 높은 에너지 효율이 있으므로, 이를 구현한 신호전환 생물전자소자는 기존의 무기물을 이용한 신호전환 전자소자에 비하여 성능이 우수하리라 판단되고 있다.^[21,22]

생물분자를 이용한 분자전자소자는 종래의 photolithography 기술을 이용하여 실리콘에 배선을 하던 기존의 반도체소자와 비교하면 다음의 특징이 있다. 첫째, 크기가 수십Å~수nm 단위인 생물 분자를 이용하면 집적화 밀도가 기존 실리콘 칩의 천만배 이상 향상될 수 있으므로 이러한 집적화는 더욱 좁은 공간에 더욱 많은 정보를 저장할 수 있고, 열발생이 매우 적기 때문에 고밀도의 집적이 가능하다. 둘째, 생물 분자의 자

기 조립 및 배향성에 의해 극미소의 가공이 가능하며 제작비용이 절감된다. 셋째, 신경계에서 사용되는 병렬 방식의 신호 처리가 가능하다. 넷째, 분자간에 정보 전달을 수행함으로써 정보 전달의 속도를 향상시키고 정보 교환시의 오차를 줄일 수 있으며, 전자에 의한 정보 전달 이외에 광을 정보 전달 수단으로 응용하여 속도를 향상시킬 수 있다.

생물전자소자에 대한 연구의 시작은 1972년 Carter에 의해 제시된 분자전자소자와 1981년에 개최된 IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)의 LSI기술에 관한 심포지움에서 MacLear에 의한 생체분자로 구성된 moleton으로 명명된 바이오칩의 제안에서부터라고 볼 수 있다. MacLear는 생체물질을 이용한 집적회로 형성과 논리 디바이스의 구성개념을 제안하였다. 그러나 제안된 바이오칩은 개념뿐이었고 실용화를 위해서는 생물공학과 전자공학의 연구가 필요한 실정이었다. 이 제안을 기초로 하여 세계적으로 생물전자소자의 연구가 시작되었다. 최근에는 생물전자소자의 개발과 응용을 다루는 생물공학과 전자공학이 결합된 생물전자공학(Bioelectronics)분야의 연구가 활발히 진행되고 있다. 생물전자소자의 실현을 위해서는 첫째, 생물분자간의 정보전달 및 처리 메커니즘, 생물분자의 에너지 전환과 전자전달시스템, 생체막 단백질 분자의 반응 기구 및 상호관계 등을 밝혀 생체 기능성의 원리의 규명, 둘째, 집적회로 형성에 생체물질을 이용한 식각 기술 개발로서 생체계의 생체막 형성과 같은 단분자막을 조합시키는 Langmuir-Blodgett(LB)기법과 자기조립(Self-Assembly; SA)기법의 생물분자재의 응용기술 확립, 셋째, 생물분자의 분자 스위칭 메커니즘 및 작동개념 등의 확립과 이의 인공적인 구성을 위한 소자의 설계와 제작이 제시되고 있다. 그러나 무엇보다도 생물전자소자의 실현을 위해서는 많은 연구 투자가 절실히 필요하다.

생명공학과 전자공학의 급속한 발전에 기인하여 2000년대의 개발을 목표로 하는 첨단 기술로서 생물전자소자의 실현화를 위한 연구가 수행되



〈그림 11〉 생물전자소자의 발전방향

고 있는데 미국, 영국, 이탈리아 등에서는 대학과 기업연구소에서 실험적인 연구개발이 수행되고 있으며, 특히 기본 원리 및 생물분자막의 특성 등이 활발히 연구되고 있다.

일본에서는 1986년부터 일본 통산성에서 10년 장기 프로젝트로서 생물전자소자를 선정하여 1백억엔을 투자해 왔다. 또한 신에너지 산업 종합개발 기구(NEDO)에 의해 생물분자 전자소자의 연구개발로서, 첫째, 바이오 아키텍처의 해명과 그 공학적 모방, 둘째, 생물분자 전자소자 기술이란 두 가지 주제의 연구개발이 수행되어지고 있다. 일본은 차세대 기술로서 2005년부터 2010년 내에 생물 전자소자가 완성되리라 예상하고, 첨단기술로서 집중 투자하고 있다.

생물 전자소자로는 뇌에서의 정보처리, 신경에서의 정보전달, 생물분자의 전자전달 및 에너지 변환, 생체막의 정보수령 및 전달 그리고 유전물질의 자기조립 기능을 모방하여 생물분자로 구성되는 정보와 에너지 전달의 효율적인 시스템, 신호전환소자, 정보전달소자, 바이오센서, DNA칩, 단백질 칩 그리고 바이오 컴퓨터 등의 생물전자소자가 연구되고 있다. 국내외에서 생물전자소자의 구성을 위한 개념의 제시, 생물분자의 전자전달 기본 원리 및 생물분자막의 특성 등에 대한 연구 결과는 많이 있으나, 개념의 실증 단계인 생물전자소자의 구성과 작동에 대한 연구는 시작단계로 사례가 매우 적다.

1. 생물 분자 메모리 소자

생명체의 기능성을 전기재료 또는 소자의 관점에서 보았을 때, 자기조합과 분자인식을 통한 분자수준에서의 구조형성시의 기초가 되는 전자전달, 광에너지 전달 및 전환, 이온수송은 새로운 기능소자의 개발에 응용될 수 있다. 즉 분자수준에서의 전자전달, 광에너지 전달 및 전환, 이온수송을 인공적으로 구현함으로써 분자소자를 제작할 수 있다. 이러한 우수한 생명체내의 신호전달 및 전환기능을 모방하여 인공시스템으로 구현하는 생물분자 메모리 소자가 개발되고 있다.^[24]

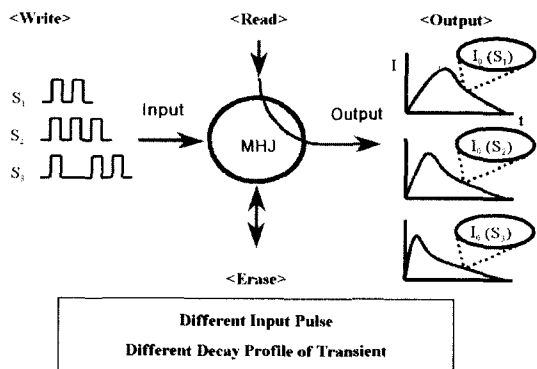
생물분자 메모리 소자는 전자장치 구성 시에 광스위칭 소자, 광다이오드 그리고 메모리 소자로 사용될 수 있다. 컴퓨터는 전기적 신호에 의해 상태를 구분하고 지정된 주소에 할당함으로써 정보를 저장한다. 전기적 신호에 의한 상태 구분은 생명체 안에서도 존재한다. 생화학반응에 참여하는 생체분자들은 인접한 분자들과 산화-환원 상태가 다르다. 이것을 구동력으로 생체분자사이에 전자를 전달하면서 미세한 전류를 일정한 방향으로 흘려보낸다. 이를 고려해 생체 내에서 전자전달 반응에 관여하는 생체분자를 일정한 방향으로 배열시킴으로써 기능성 생체분자막을 제작한다. 각각의 구성 성분을 배열한 후, 전기나 빛으로 자극하면 상태 구분이 가능한 전기적 응답신호를 보낸다. 이것이 컴퓨터의 전자소자와 같은 역할을 수행하는 생물분자 메모리 소자이다. 세포내의 전자전달계가 지닌 특성을 모방해서 서로 다른 산화-환원 전위를 지닌 단백질들을 실리콘 칩위에 배열하면, 산화-환원 전위가 높은 생물분자에서 산화-환원 전위가 낮은 생물분자로 전자전달이 일어난다. 이러한 일방적 전자전달 특성은 기존의 실리콘 칩의 기본요소인 다이오드의 특성과 일치한다. 이것은 전자의 흐름에 따라 전기적 신호를 구분할 수 있는 스위칭 특성을 제공한다. 빛이나 전기 같은 외부 자극을 이용해 단백질 복합체의 산화-환원 상태를 조절하고, 구분이 가능한 상태를 규정함으로써 정보를 저장하고 전달하는 메모리 소자로 사용할 수 있는 것이다.

일본 Mitsubishi electronics 중앙연구소의

Isoda연구팀은 flavin-porphyrin복합 LB막으로 구성된 분자 광다이오드를 제작하였으며, 동경공업대학의 Fujihira 연구팀은 ferrocene/pyrene/viologen으로 구성된 분자 광다이오드를 제작하였다.^[24,25] 최근에는 4가지 생체분자로 구성된 분자 광다이오드가 제작되었으며, 많은 과학자들이 이를 발전시켜 새로운 개념의 메모리 특성을 갖는 전자소자를 구성하는데 응용하려 하고 있다. 이처럼 단백질을 메모리 소자로 응용하기 위해 Fractal Memory라는 새로운 방식의 메모리 기능이 주목받고 있다.

일정 전압 하에서 펄스 빛의 조사에 의해 일정 신호가 분자 광다이오드에 가해지면, 소자로부터 나오는 신호는 시간에 따라 감소하는 전류의 형태를 띄게 된다. 이 전류의 형태는 input되는 신호에 따라 어느 시간까지 감소하는 전류의 크기와 패턴이 변하게 된다. 이것을 Fractal time response라고 하고, 그 변하는 현상을 Plasticity가 있다고 한다. 이러한 소자는 현재 사용되는 디지털 방식(2진법)과 비교하면, 한 소자당 할당되는 메모리 크기가 거의 무한대까지 가능하다. 예를 들어, 소자가 256진수 크기의 용량을 갖는다면, 2진법(1비트)의 소자가 8개 필요한 1바이트 용량의 메모리는 256진법의 소자 하나만으로 구현할 수 있다는 것이다. 따라서 좀 더 실질적인 상황을 구현하는데 훨씬 적은 양의 소자가 쓰일 수 있다.

이 외에도 단백질의 메모리 기능을 수행하기



<그림 12> fractal-memory의 원리

위한 다양한 방법들이 존재하며, 이를 위해 다양한 연구가 수행되고 있는 중이다. 최근에는 복합 NSOM/STM을 이용하여 분자 광다이오드에 빛과 전류를 가하고(Write), EFM을 이용하여 표면 전하를 측정하는(Read), Charge trapping memory에 대한 연구도 활발히 수행되고 있다.

뉴욕대의 Seeman 교수 연구팀에서는 DNA를 이용하여 나노크기의 구조물이나 이를 나노소자에 응용하고자 하는 연구를 진행하고 있다. 이들은 최근 네 개의 DNA 소선들을 이용하여 세 개의 이중 나선 소선이 타일이라 부르는 이차원 배열을 갖도록 하는데 성공하였다.^[26] 이러한 나선들은 그 교차점에서 정보를 교환할 수 있으며 논리 연산에 응용될 수 있다고 발표되었다.^[27] 이와 같은 생물전자소자의 메모리 기능은 실리콘 메모리소자의 한계를 극복할 수 있는 대안이 될 것으로 생각되며 현재에도 수많은 과학자들이 이를 연구하고 있다. 가까운 미래에는 지금 사용하고 있는 컴퓨터 속에 실리콘 칩이 아닌 단백질이 들어간 바이오 컴퓨터의 등장도 예측해 볼 수 있다.

2. 인공 광 수용 소자

인간은 외부정보의 80% 이상을 시각 정보로부터 받아들이고 있는데, 인간의 시각계는 뇌세포보다 밀집된 세포 배열을 가지고 있고 방대한 양의 정보 처리 및 전달을 위해서 정보의 처리 방식이 직렬이 아닌 병렬 처리로 수행된다. 생체내의 시각정보 처리 능력을 모방하여 시각정보 입력소자를 개발하기 위해서는 입력층으로 사용될 하드웨어와 정보처리를 수행하는 소프트웨어 분야뿐만 아니라 시각계의 기본적인 원리 규명을 위한 여러 분야들이 유기적으로 연계되어 연구가 수행되어야 하므로, 인공 시각계의 개발에 이용되는 기술은 여러 분야의 기술발전에 대한 상용 효과를 제공할 수 있다.

시각정보 입력소자에 관한 연구들은 인간이나 동물의 시각시스템을 연구하는 것으로부터 시작되었다. 동물의 망막 세포는 광에 의해 정반응을

하는 excitatory phase가 광에 의해 역반응을 하는 inhibitory phase에 감싸여져 있거나 쌍을 이루고 있기 때문에, 밀집된 세포 내에서 개개의 화소가 신호의 손실이나 혼동없이 고밀도의 신호를 뇌로 전달할 수 있다는 것을 의학이나 심리학의 기초 연구 분야에서 밝혀냈다. 이러한 연구들은 이미 여러 나라에서 공동 연구로 진행되고 있으며 심도 있는 연구 결과가 도출되기 시작하였다. 동물의 시각세포에 존재하는 광수용기는 retinal chromophore를 가지고 있는 단백질로서, 이는 여러 다른 생물체가 가지고 있는 광수용기의 물질과 거의 흡사한 구조를 가지고 있을 뿐만 아니라 반응 역시 흡사하기 때문에, 여러 생물체의 광수용기 중에서 그 구조가 비교적 간단한 박테리아로부터 연구가 선행되었다.

일본의 Fuji photo film 회사의 Miyasaka 박사 연구팀은 박테리아의 purple membrane fragment들을 이용하여, 256개의 화소를 구성하여 움직이는 물체의 운동방향을 결정 할 수 있는 인공 광수용소자를 개발함으로써 상용화를 위한 첫걸음을 시작하였다.

최근에는 박테리오토신과 스피로피란을 감광소자와 노이즈 필터로 사용하여 화상추출기능을 지닌 인공 광수용소자와 박테리오토신과 Flavin을 이용한 색채인식 인공 감광소자가 본 연구진에 의해 개발되었다. 제작된 인공 광수용소자는 약 25%의 화상추출효율과 40분의 처리 시간을 나타내었으며, 스피로피란 막을 2개 사용할 경우 화상추출효율은 40%로 증가한다. 제작된 광수용소자를 3×3배열로 구성하여 화상추출기능의 생물전자소자를 제작하였고, 여러 가지 형상의 마스크를 통해 입사된 광에 의해 제작된 소자로부터 원하는 화상을 추출 할 수 있었다.^[28,29]

현재 여러 연구팀에서 단백질의 배향된 박막 제작기법과 단백질 환경에 대한 영향, 그리고 모델에 대한 연구가 계속 진행되고 있고, 광전류를 이용한 다양한 이론들이 배출되고 있는 것으로부터 기본 원리 및 현상 규명을 위한 연구가 선행되어야 함을 알 수 있다. 특히 광응답에 대한 정

확한 이해와 생물학적인 원리를 열역학적으로 구현한 수학적 모델의 확립을 통한 광응답의 해석에 대한 연구는 미비한 실정이며 많은 연구가 진행되어야 할 것이다. 또한 안정성 있는 인공 생체막을 구현하기 위한 연구는 아직도 많은 부분이 해결되지 않은 상태이며 어려운 현안으로 제시되고 있다. 고밀도의 생체 박막소자를 구성하기 위해서는 궁극적으로 하나의 단백질 분자를 이용하는 시각정보 입력소자의 개발을 위한 연구가 필요하다.

IV. 결 언

유기분자 또는 생물분자를 이용하여 전자 소자를 제작하는 것은 매우 흥미롭고 보람이 있는 연구일 것이나, 분자 단위 소자를 원하는 위치에 배열하거나 신호의 입출력을 위한 회로 배선과 시스템 운영체계에 대한 문제에 대해서는 아직까지는 매우 제한적인 아이디어 밖에 없다.

이러한 제한적인 아이디어를 극복하기 위하여서는 화학, 생물, 물리, 재료공학, 전자공학, 컴퓨터 공학 등 모든 기술이 집약된 공동연구가 필요할 것이다. 이를 위하여 각분야의 전문가들의 자유로운 의견 제시와 이를 바탕으로 한 새로운 전자소자에 대한 새로운 패러다임을 창출되어야 할 것이다.

또한 이러한 연구는 단기간에 이루어질 수 있는 것이 아니므로 장기간의 학제간의 공동 및 산학연 간의 공동 연구가 필요하다. 생물전자소자의 개발 기술은 산. 학. 연의 협동에 의한 연구가 절실히 요구된다.

참 고 문 헌

- [1] M. Conrad, Biosystems, 5(1972) 1.
- [2] A. Aviram and. M. A. Ratner, Chem. Phys. Lett., 29(1974) 277.

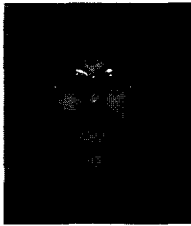
- [3] S. Huang and J. M. Tour, *J. Org. Chem.*, 64(1999) 8898
- [4] J. M. Tour, *Chem. Rev.*, 96(1996) 537
- [5] L. A. Bumm, J. J. Arnold, M. T. Cygan, T. D. Dunbar, T. P. Burgin, L. Jones II, D. L. Allara, J. M. Tour and P. S. Weiss, *Science*, 271(1996) 1705.
- [6] M. T. Cygan, T. D. Dunbar, J. J. Arnold, L. A. Bumm, N. F. Shedlock, T. P. Burgin, L. Jones, D. L. Allara, J. M. Tour, P. S. Weiss, *J. Am. Chem. Soc.*, 120(1998) 2721.
- [7] J. Chen, M. A. Reed, C. L. Asplund, A. M. Cassell, M. L. Myrick, A. M. Rawlett, J. M. Tour, P. G. Van Patten, *Appl. Phys. Lett.*, 75(1999) 624.
- [8] J. C. Ellenbogen and J. C. Love, *Proceed. of IEEE*, 88(2000) 386.
- [9] J. S. Beck et al., *J. Am. Chem. Soc.*, 114(1992) 10834
- [10] Z. Cai, *Supramolecular Effects Chem. Mater.*, 3(1992) 960.
- [11] R. M. Metzger et al., *J. Am. Chem. Soc.*, 119(1997) 10445.
- [12] C. Zhou, R. M. Deshpande, R. M. Reed and J. M. Tour, *Appl. Phys. Lett.*, 71(1997) 611.
- [13] H. Park, J. Park, A. K. L. Lim, E. H. Anderson, A. P. Alivistos and P. L. McEuen, *Nature*, 407(2000) 57.
- [14] M. A. Reed, *Proceed. IEEE*, 87(1999) 652.
- [15] C. P. Collier, E. W. Wong, M. Belohardsky, F. M. Raymo, J. F. Stoddart, P. J. Kuekew, R. S. Williams and J. R. Heath, *Science*, 285(1999) 391.
- [16] C. P. Collier, G. Mattersteig, E. W. Wong, Y. Luo, K. Beverly, J. Sampaio, F. M. Raymo, J. F. Stoddart and J. R. Heath, *Science*, 289(2000) 1172.
- [17] J. Chen, M. A. Reed, A. M. Rawlett and J. M. Tour, *Science*, 286(1999) 1550.
- [18] D. Harrer, *Nature*, 355, 297(1992).
- [19] F. Carter, *Molecular Electronic Device*, North Holland, Amsterdam (1988).
- [20] F. Hong, *Molecular Electronics : Biosensors and Biocomputers*, Plenum Press, New York (1989).
- [21] J. Varl Brunt, *Biotechnology*, 3, 209 (1985).
- [22] R. Hughes, A. Ricco, M. Butler and S. Martin, *Science*, 254, 74-80(1991).
- [23] J. W. Choi, S. W. Chung, S. Y. Oh, W. H. Lee and D. S. Shin, *Thin Solid Films*, 327-329, 671(1998).
- [24] S. Isoda, S. Nishikawa, S. Ueyama, Y. Hanazato, H. Kawakubo and M. Maeda, *Thin Solid Films*, 210/211, 290 (1992).
- [25] M. Fujihira, K. Nichiyama and K. Aoki, *Thin Solid Films*, 160, 317 (1988).
- [26] T. H. LaBean, H. Yan, J. Kopatsch, F. R. Liu, E. Winfree, J. H. Reif, N. C. Seeman, *J. Am. Chem. Soc.*, 122, 1848 (2000).
- [27] J. H. Reif, T. H. LaBean, C. Mao, J. Kopatsch, F. R. Liu, E. Winfree, N. C. Seeman, *Nature*, 407, 493(2000).
- [28] J. W. Choi, J. Min, J. W. Jung, H. W. Rhee and W. H. Lee, *Thin Solid Film*, 327-329, 676(1998).
- [29] J. Min, J. W. Choi, W. H. Lee and U. R. Kim, *Biosensors and Bioelectronics*, 13, 1069(1998).

저 자 소 개



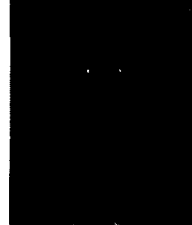
이 창 진

1959년 8월 25일생, 1981년 2월 서울대학교 화학과 학사, 1983년 2월 서울대학교 화학과 석사, 1989년 6월 미네소타 대학(미) 화학과 박사, 1989년 2월~1991년 2월 : Univ. of Texas at Austin 박사후연수원, 1991년 3월~현재 : 한국화학연구소 책임연구원, 1993년 3월~1996년 6월 : Molecular Electronics Symposium 조직위원회 총무, 1996년 1월~1996년 12월 : 대한화학회 고분자 화학 분과 운영위원, 1998년 1월~1998년 12월 : 한국고분자학회 운영이사, 2000년 1월~현재 한국고분자학회 분자전자부문위원회 총무, <주관심 분야 : 전기 및 광학 특성 고분자, 디스플레이용 고분자 재료 합성, 반도체용 고분자 재료 합성>



강 영 구

1984 서강대학교 화학과(학사), 1986 서강대학교 화학과(석사), 1991 한국화학연구소 (연구원), 1997 Texas A&M University 화학과(박사), 1997~현재 : 한국화학연구소 선임연구원



최 정 우

1978년 4월~1982년 2월 서강대학교 화학공학과 공학사, 1982년 3월~1984년 3월 서강대학교 화학공학과 공학석사, 1987년 1월~1990년 5월 Rutgers University 화학공학과 공학박사, 1990년 9월~현재 : 서강대학교 화학공학과 교수, 1999년 7월~1999년 8월 : 동경대학교 객원교수, 1997년 1월~1997년 9월 : 동경공업대학교 객원교수, 1996년 1월~1996년 4월 : Mitsubishi Electronics Advanced Technology R&D Center 객원 연구원, 1993년 12월~1994년 3월 : IBM Almaden Research Center 객원연구원