

## 작은 세계를 위한 CAD (CAD for smaller world)

신 하 용

(KAIST 산업공학과)

10억분의1( $10^{-9}$ )을 뜻하는 나노(Nano)라는 접두사는 요즘 너무 자주 들어서 마치 우리에게 나노기술이 보편화된 듯 한 착각에 빠지게 한다. 나노기술을 이용했다는 화장품과 샴푸 광고가 종종 등장하고, 모 전자업체에서는 60나노미터의 선폭을 갖는 기억소자의 상용화에 성공했다는 기사가 눈길을 끈다. 대부분의 연구비가 NT-BT로 몰리는 현상에 대하여, 어떤 분은 자조적인 말투로 자신은 Mega-Nano 급의 연구를 한다고 농담을 하기도 한다. 도대체 나노기술이란 무엇일까? Mark Ratner의 "Nanotechnology : the next big idea"라는 책에서의 설명을 빌어오면 다음과 같다 [1] : "나노과학(NanoScience)이란, 단순히 말하자면, 어느 한 쪽의 길이가 1~100나노미터쯤 되는 분자 또는 구조물의 기본 원리를 연구하는 학문이다. 이런 구조물을 나노구조(NanoStructure)라 하며, 나노기술(NanoTechnology)이란 이러한 나노구조를 적용하여 나노크기의 유용한 소자(device)를 만드는 것이다." 이러한 나노규모의 물질들은 우리가 나노기술에 관심을 갖기 훨씬 전부터, 아니 태초에부터 있어왔다. 하지만 그것은 우리의 의지에 의해 만들어진 것이 아니라, 그냥 존재해왔던 것이다. 나노기술에서 관심을 갖는 궁극적인 목표는 "어떻게 하면 유용한 나노구조물을 다루고 만들 수 있겠는가"라 할 수 있겠다. 나노규모가 특별한 관심을 갖는 이유는 우리가 만들 수 있는 가장 작은 크기라는 점 뿐 아니라, 물질의 전도성, 경도, 녹는 점등의 일상적인 성질이 파동-입자 이중성이니 양자효과니 하는 '이상한' 현상과 만나는 경계 지점이기 때문이다.

\*E-mail: hyshin@kaist.ac.kr

이 글은 나노기술 자체의 소개가 목적이 아니고, MEMS나 나노영역과 같은 작은 세계에서의 구조물의 설계를 위한 도구에 대한 이야기를 하고자 한다. 하지만, 작은 세계의 이해에 필요한 약간의 역사와 몇 가지 개념과 용어들을 필요에 따라 설명하고자 한다.

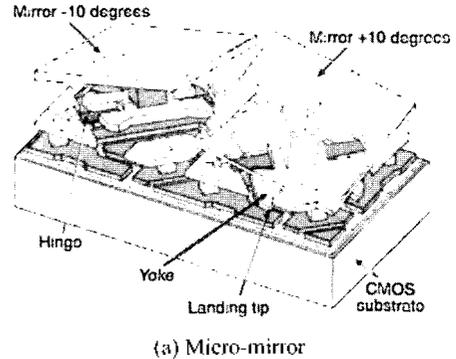
### ◎ There's Plenty of Room at the Bottom

나노기술이라는 용어를 처음 사용한 것은 1974년 동경대학의 노리오 다니구찌이지만, 그 중요성을 언급한 기념비적 이정표는 그보다 훨씬 전 Richard Feynman이 1959년 12월 26일 (신의 영역에 도전을 선포하기에 좋은 날은 아닌 듯 하다.) 미국 물리학회에서 한 유명한 연설 "There's Plenty of Room at the Bottom"이라고 할 수 있다. Feynman은 CalTech 물리학과 재직시절의 명망의로도 유명하고 (그의 강의록이 후에 "물리학 강의(Lectures on Physics)"라는 이름으로 출간됨), 또 양자전기역학 이론으로 1965년에 노벨 물리학상을 수상하기도 하였지만, 현대에 그가 가장 많이 언급되고 기억되는 부분은 바로 이 연설에서 그가 예측하고 주장한 나노기술 때문일 것이다. 이 연설에서 Feynman은 핀의 머리에 브리태니커 백과사전 전체를 써 넣을 수 있는 방법에 대한 이야기로 연설을 시작하였다. 그는 또 원자단위의 구조를 시각적으로 파악할 수 있는 현미경의 필요성을 역설하였고, 컴퓨터의 소형화 가능성에 대하여 언급하였고, 이러한 작은 구조물의 생성에 관한 연구에 경쟁하여 줄 것을 제안하였다. 오늘날 나노기술의 발전에 공헌한 사람에게 그의 이름을 따서 Feynman상을 수여하고 있다. 그는 2000년대에 돌이켜보면 왜 1960년에 나노기술을 연구하지 않았을까를 의아해 할 것

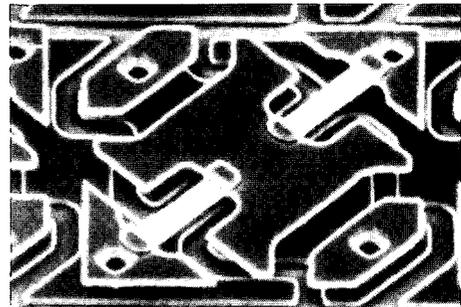
이라고 덧붙였다. 물론 그의 예측이 다소 성급했던 면은 있지만, 오늘날 과학기술계의 가장 큰 화두는 나노기술이라 해도 과언이 아니다. 미국 정부는 나노기술의 연구프로그램인 NNI(National Nano Initiative)에 2001년 한해 동안 4억 달러의 연구비를 쏟아 부었으며, 2002년에는 5억 달러를 신청하였으나 국회에서 6억 달러로 증액이 되었으며, 2003년에는 7억 달러가 배정되었다고 한다 [2]. (이것은 NNI를 통한 정부출연연구비이고 민간부문의 연구비 또한 그 이상이 될 것으로 보인다.) 당분간 나노기술의 연구비는 계속 늘어날 것으로 보인다. 나노기술에 대한 투자는 미국뿐 아니라 유럽과 일본에서도 그러하며, 한국도 예외가 아니다(그렇게 작은 규모의 연구에 이런 엄청난 예산이 투입될 수 있다니 Feynman의 "There's plenty of room at the bottom"이라는 말이 진정 맞는 것 같다). 이러한 집중적인 투자로 나노구조의 연구에 많은 진전을 이루고 있기는 하지만, 이러한 기술이 우리의 실생활에 직접 영향을 미치기에는 몇몇 경우를 제외하고는 아직 많은 거리가 있는 듯 하다.

◎ MEMS를 위한 CAD

우선은 나노규모보다는 조금 더 큰 대상을 다루는 MEMS(Micro Electro-Mechanical System)에 대한 이야기부터 하고자 한다. 나노기술과 MEMS는 둘 다 아주 작은 구조를 다루고는 있지만, 이 둘이 지향하는 규모에서는 차이가 많이 난다 [1,3]. MEMS는 첫 글자 M이 뜻하는 바와 같이 마이크로미터 규모의 구조물을 대상으로 한다(물론 그보다 더 작은 나노규모의 electro-mechanical system에 대한 연구도 포함하기도 하며, 그런 규모의 시스템은 특히 NEMS라고 불리기도 한다). 그만큼 MEMS는 나노기술에 비하여 우리 일상에 가까이 있다고 볼 수 있다. 먹는 내시경이나 혈관 속을 타고 다니는 치료용 로봇이나 허는 이야기를 대중매체를 통하여 들어 보았겠지만, 그보다 더 현실에서 활용되고 있는 MEMS 기술은 정교한 구조를 통하여 잉크를 원하는 위치에 분사하는 잉크젯 프린터의 헤드이다. 또 다른 예는 DLP(Direct Laser Projection)의 핵심 부품인 Micro-mirror이다. 아래의 [그림 1-7]은 MEMS 기술을 이용하여 만든 소자 및 제품들의 예이다. 아래의 예에서 보듯이 MEMS 기술은



(a) Micro-mirror



(b) Micro-mirror의 구동부

그림 1. Micro-mirror(a)와 그 구동부(b)

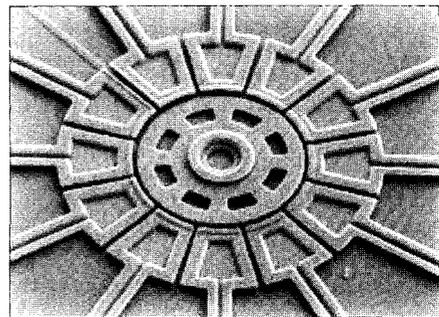


그림 2. Micor-motor



그림 3. Inductor

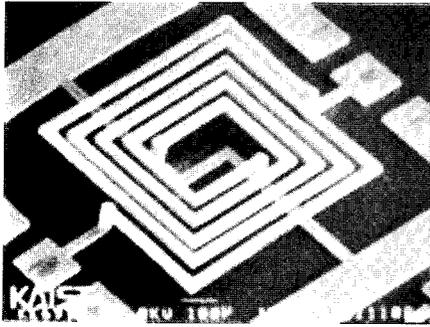


그림 4. Transformer



그림 7. 먹는 내시경

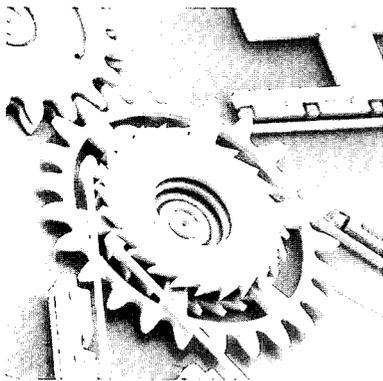


그림 5. Gear train

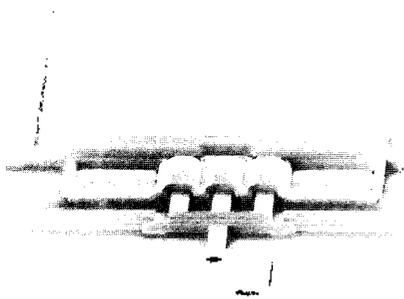


그림 6. 초소형 증기기관

다양한 센서, 구동부, 구조물 등을 만드는 데에 사용될 수 있다. 또한 반도체 칩 위에 구현하기 어려운 inductor, variable capacitor 등의 전기 소자를 만드는 데에도 사용된다.

MEMS 구조물의 설계는 크기가 좀 작을 뿐, 거시세계의 구조를 설계하는 것과 별반 차이가 없다고 생각하기 쉬우나, 이와는 좀 다른 면이 있다. MEMS 구조물을 설계함에 있어서 고려해야 할 요

소들을 열거해 보면 다음과 같다.

- 가공 공성을 고려한 설계 : 거시구조에 비하면 MEMS 구조물을 제작하는 데에 사용될 수 있는 공정은 매우 제한적이다. 현재 MEMS 구조물의 제작에 활용되는 공정들은 주로 반도체 제작공정에 사용되는 기술들과 유사한 lithography, etching, deposition 등의 공정이 많이 활용된다. 이러한 공정들로 만들어 낼 수 있는 형상에는 큰 한계가 있으며 그림에서 보듯 2.5차원 형상들이 주종을 이루고 있음을 알 수 있다. 현 단계의 MEMS 제품 설계는 제조성을 고려한 설계(Design for manufacturing) 정도가 아니라, 가공공정에 의한 설계(Design by manufacturing process)라 할 수 있으며, 이러한 기능을 지원해주는 CAD 시스템이 필요하다. 향후 MEMS에 적용될 수 있는 공정 선택의 폭이 더 넓어지면, 거시세계에서와 마찬가지로 제품설계자가 모든 생산공정요소를 이해하고 설계하기 어려워질 것이다. 따라서, 제품설계와 공정계획이 분리될 것이며, 이들이 원활하게 협업할 수 있는 동시공학적 설계환경이 필요하게 될 것이다.
- 공정 시뮬레이션 : MEMS 제품을 설계할 때에, substrate의 재질, 공정, 그리고 공정 parameter에 따라 얻어지는 형상이 크게 바뀌게 된다. 따라서, 따라서 자신의 공정계획에 따라 얻어질 형상을 검증해 보는 공정 시뮬레이션 기능은 설계자의 가장 중요한 도구라 하겠다.
- CAE와의 긴밀한 연결 : CAD-CAE의 긴밀한 연결의 필요성은 거시세계에서와 마찬가지로 하겠다. 현재의 CAD-CAE간에는 CAE해

석의 전처리단계인 mesh 생성에 많은 시간이 걸리는 것이 큰 걸림돌이기에, 이를 줄이고 설계와 해석을 통합하는 것이 필요하다. MEMS에서 설계하는 형상들은 대부분 비교적 형상이 단순하기에 자동 생성된 mesh가 그대로 사용될 수 있을 것으로 예견된다.

- 개념설계와 상세설계의 연결 : MEMS 제품은 그 이름에도 들어있듯이 전자적 기능부와 기계적 기능부가 결합되어 있는 경우가 많다. 따라서 전자기계 통합시스템에 대한 개념설계를 지원하는 것이 필요하다. 아울러, 개념설계로 얻어지는 schematic layout과 상세설계로 얻어지는 형상이 연동된다면 더욱 좋을 것이다.
- MEMS용 Feature 및 부품 Library: MEMS에 활용되는 특징형상(Feature)들은 거시구조물의 그것과 사뭇 다른 형태일 것이다. 이러한 feature들과 부품을 parameter화 하여 library로 제공하는 것이 필요하다.

현재 MEMS용 CAD로 판매되는 대표적인 상용 시스템으로는 미국 Coventor 사의 CoventorWare를 들 수 있다. CoventorWare는 다음과 같은 모듈들로 구성되어 있다 [4].

- ARCHITECT: 초기 concept design용 module로 schematic layout 및 simulation 기능을 제공한다.
- DESIGNER: 2D 및 3D 형상 상세 설계 기능을 제공한다.
  - MEMulator라고 하는 모듈을 통하여 MEMS 및 반도체 제작에 사용되는 각종 공정 시뮬레이션 기능이 함께 사용될 수 있다.
- ANALYZER: MEMS에 특화된 CAE solver 및 전/후 처리기를 제공한다. 자동 mesh생성 기능을 가지고 있으며, 구조해석, 열해석, 유동해석, 전기-자기 해석 등의 해석 기능을 제공한다.
- INTEGRATOR: MEMS의 전자구조 부분의 상세 설계를 위해 필요한 Cadence나 Synopsys와 같은 상용 EDA tool과의 interface를 담당한다.

### ◎ 나노 구조를 위한 CAD

이제 좀 더 작은 세계로 이야기를 돌려보자. 나

노구조물의 제작은 물질을 일정한 표면에서 필요 없는 부위를 제거하여 나가는 방식으로 제작하는 하향식 나노제작(Top-down nanofabrication)과, 반대로 개개의 원자나 분자를 조립하여 나노구조를 만드는 상향식 나노제작(Bottom-up nanofabrication)으로 구분된다. 하향식 나노제작의 대표적인 방법으로는 반도체 제작공정에 활용되는 Lithography를 들 수 있으며, 보다 작은 구조를 만들기 위하여 가시광선보다 파장이 짧은 전자선이나 X선, 극자외선을 이용하고 있다. 하지만, 그러한 방법으로 만들 수 있는 크기는 수십 나노미터가 한계가 될 것으로 보인다. 또 다른 방법으로는 STM, AFM과 같은 스캐닝 프로브 방식의 원자현미경의 Tip을 이용하여 나노입자를 개별적으로 움직여 원하는 패턴으로 배열시킬 수 있다. 이러한 방법을 Dip-Pen Nanolithography (DPN)라고 하며, [그림 8]은 DPN의 원리를 보여주고 있으며, [그림 9]는 Feynman의 1960년 연설문을 DPN 방법으로 쓴 것이다.

상향식 나노제작은 만들고자 하는 대상의 특성에 따라 화학반응을 면밀히 제어·조작함으로써 이루어

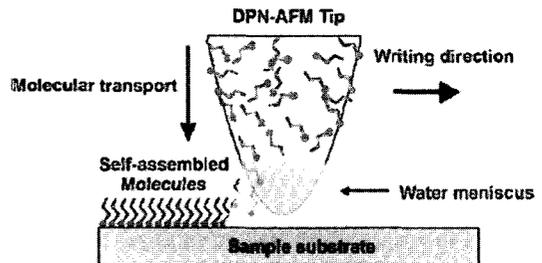


그림 8. DPN의 원리

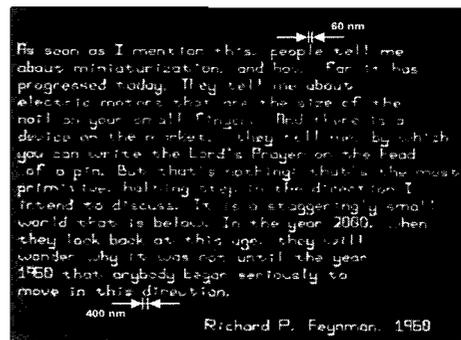


그림 9. DPN으로 쓰여진 Feynman의 연설문

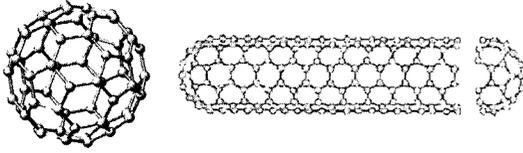


그림 10. Bucky ball과 탄소나노튜브

진다. 이러한 방식으로 만들 수 있는 나노구조물의 대표적인 예는 [그림 10]의  $C_{60}$ (Buckminster Fullerene 혹은 Bucky ball 이라고도 불린다)와 탄소나노튜브이다.

상향식 방법에 의하여 우리가 원하는 나노 구조물을 만드는 일의 대표적인 것으로는 박테리아와 같은 생물을 이용하여 분자들을 조립하는 것이다. 하지만 생물학적 복제를 넘어서 원하는 원자들을 하나씩 조작하여 선택한 위치에 넣을 수는 없을까? 이런 일을 하는 관하여 분자기계(Molecular machine)에 관한 많은 개념을 고안해 낸 사람은 K. Eric Drexler라는 사람이다 [5]. 그의 책 “Engines of Creation”, “Nanosystems: Molecular machinery, Manufacturing, and Computation”에서 그는 [그림 11]과 같은 나노규모의 기계장치들과 그것을 제

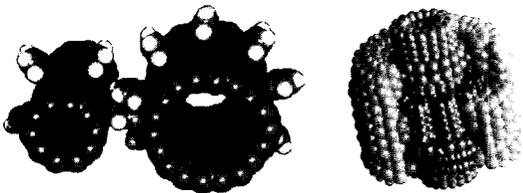


그림 11. 나노규모의 기어와 축/베어링

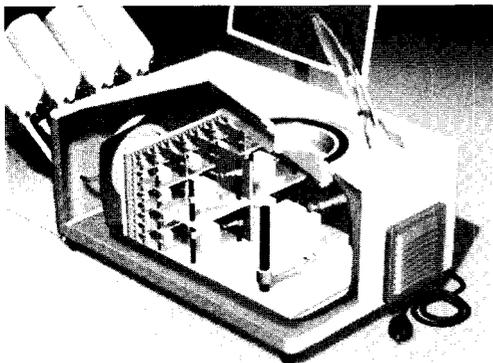


그림 12. 분자조립기계의 개념도

조하기 위한 방안 [그림 12]들을 제안하였다. 하지만, 그의 개념과 같은 진정한 상향식 나노제조 방안은 다음과 같은 두 가지 이유로 현실화되기 어렵다고 보는 것이 일반적인 견해이다.

■ Fat finger problem : 원자나 분자 하나하나를 잡고 다룰 수 있는 기계구조를 만들기 어렵다.

■ Sticky finger problem : 그런 조작기가 있다고 해도, 조작기 자체와 대상물이 서로 쉽게 결합하게 된다.

미래학자인 K. Eric Drexler는 또 그의 책에서 나노구조를 위한 CAD의 모습에 대해서 PostScript로 된 명령을 받아서 수없이 많은 작은 pixel들을 인쇄하여 원하는 인쇄물을 만들어내는 프린터와 비유하여 설명하고 있다. 그는 분자기계는 프린터에 해당하고 사람이 내리는 명령은 원자단위의 명령이 아니라 high level의 명령이어야 하며, 나노 CAD는 그런 high level의 명령을 원자단위의 명령으로 번역해 주는 compiler의 역할을 해야 한다고 주장하고 있으며, 이는 대단히 설득력 있는 설명으로 여겨진다. 이는 우리가 고밀도 집적회로를 설계할 때, VHDL을 이용하여 설계하는 것과 유사하다고 하겠다. 하지만 필자가 아는 범위 내에서는, 이러한 수준의 나노 CAD는 아직 존재하고 있지 않으며, 향후 CAD를 연구하는 사람들이 도전해 볼 만한 영역으로 여겨진다.

한편, 인터넷에 NanoCAD라는 용어로 검색을 해보면 수도 없이 많은 문헌들이 검색된다. 이들 대부분은 Will Ware가 90년대 초반에 만든 Scheme (혹은 CommonLisp)으로 만들었다가 후에 Java applet으로 바꾸어 만든 단순한 분자모델링 프로그램을 지칭하고 있다 [6]. 거창한 (혹은 아주 작은!) 이름과 달리 이 프로그램을 이용하여 할 수 있는 일은 다음과 같이 대단히 제한되어 있다 [그림 13] :

- 산소, 수소, 탄소, 질소와 같은 원자들의 배치
- 배치된 원자간의 결합 (bond)
- Text file에서 분자구조를 읽어서 보여주거나, Text로 출력하기
- 저장되어 있는 aspirin, bucky ball, diamond 등의 단순한 분자를 불러 올리기
- 회전, 이동, 확대 등의 Graphic interaction
- 구성 원자들간의 energy 최소화 변형

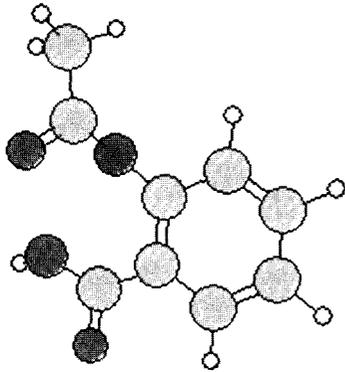


그림 13. Will Ware의 NanoCAD applet 화면

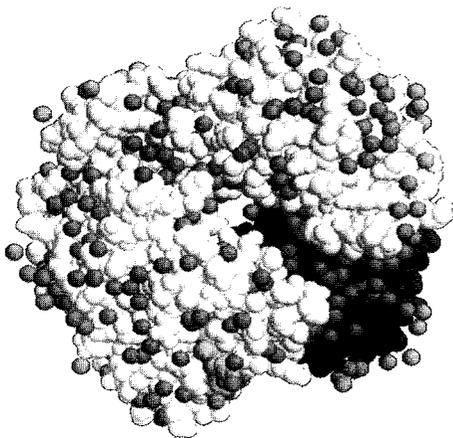


그림 14. RasMol에서 시각화 한 헤모글로빈 단백질

이와는 별도로 화학, 생물학 쪽에서는 분자구조를 가시화하고 DB화하는 노력이 계속되어 왔는데, 분자 구조 모델링 및 가시화에 가장 많이 사용되고 있는 software는 Roger Sayle에 의해 개발된 RasMol 이다 [7]. Open source로 개발되고 있는 RasMol은, 특히, PDB(Protein DataBase; 여러 가지 방법으로 밝혀진 단백질의 구조를 저장하여 공유할 수 있는 database) 형식으로 된 file을 시각화할 수 있어서 생화학분야의 연구용 software의 기반으로 많이 활용되고 있다. 예를 들면 PDB에 저장된 단백질을 구조를 탐색해보는 Protein Explorer (molvis.sdsc.edu)와

같은 software가 있으며, DNA sequence로부터 생성될 단백질의 형상을 예측해 보는 단백질 접힘 (Protein folding) 연구에도 많이 활용되고 있다.

### ◎ 맺음말

MEMS와 나노구조를 위한 CAD에 관련된 활동들을 살펴보았다. NT가 받고 있는 주목에 비하면, CAD for MEMS, CAD for Nanostructure는 아직 이렇다 할만한 진보를 보이지 못하고 있는 듯하다. 이러한 현상의 큰 원인은 아직 상향식 나노제작기술이 어떤 형태가 될 것인지에 대한 현실적인 예견이 어렵기 때문으로 보인다. 즉, 어떤 형상의 분자를 설계하여도 그러한 분자를 만들 방법이 없는 상태에서의 설계는 무의미하기 때문이다. 현 단계에서 가능한 노력은 어떻게 하면 제작할 수 있는 차치해 두고(혹은 나노구조의 설계와 제작 간의 interface 층을 가정해 두고), 화학적으로 가능하고 안정한 구조물을 어떻게 하면 쉽게 설계할 것인가에 초점을 맞추어 나노 CAD를 발전시킬 수 있을 것으로 생각된다. 하지만 설계된 대상을 제작할 수 있는 방법에 한계가 나노규모에서는 더욱더 뚜렷하기에 제조성을 고려한 설계가 더욱 중요하다는 것이 큰 딜레마라 하겠다.

### 참고문헌

- [1] M. Ratner & D. Ratner, Nanotechnology: a gentle introduction to the next big idea, Prentice-Hall, 2003.
- [2] 박성근 편역, 작은 나노의 큰 세상, 과학과문화, 2002.
- [3] 윤준보 외, MEMS 이야기, KAIST Press, 2004.
- [4] Coventor website: www.coventor.com
- [5] K. E. Drexler, Nanosystems: Molecular machinery, manufacturing, and computation, John Wiley, 1992.
- [6] Will Ware's website: <http://willware.net:8080/mcad.html>
- [7] Rasmol website: www.openrasmol.org