

▲ 나뭇잎에서 떨어진 빗방울은 자기조립개념을 설명하는데 전형적인 보기가 된다.

첨단과학현장

스스로 조립하는 재료와 기계

玄 源 福 (과학저널리스트/본지 편집위원)

햄버거에서 기관차에
이르기까지 무엇이든지 분자수준부터 조립하는
'조립용 초미니 로봇'이 등장한다. 이 로봇은 또 스스로의
복제지시에 따라 세균의 번식보다 더 빠른
속도로 복제하기 시작한다

자연에서 배운다

오늘날 세계는 사람이 만든 부품을 사용하여 사람이 조립한 기계들로 넘쳐 흐른다. 자동차와 컴퓨터에서 전화와 토스터오븐과 스크루드라이버에 이르기까지 기계와 장치의 수는 60억에 가까운 세계인구보다 훨씬 많다. 기계들은 이렇게 번식해 나가고 있으나 사람의 도움없이 스스로 복제할 수 있는 기계는 아직도 없다.

그러나 21세기에는 스스로를 복제하는 기계와 재료를 바탕으로 하는 새로운 생산전략이 등장할 것으로 보인다. 이른바 '자기조립공정'이라고 불리는 이 생산과정에서는 원자와 분자 그리고 분자와 부품의 집합체가 사람의 개입없이 스스로 질서정연하게 배열되어 제기능을 발휘하는 기계로 형성된다.

따지고 보면 자기조립이라는 개념은 새로운 것은 아니다. 우리는 자연에서 이런 현상을 오래전부터 보아 왔다. 가장 간단한 보기로서 나뭇잎에 떨어진 빗방울을 들 수 있다. 이 빗방울은 광학렌즈에서나 볼 수 있을 정도로 매끄러운 표면을 가졌다.

그런데 액체와 공기사이의 표면분자는 내부의 분자보다 덜 안정하다. 그래서 안정성을 최대한으로 유지하려면 불안정한 표면의 넓이를 최소한으로 줄여야 하기 때문에 그런 모습을 하게 된다.

인간은 자연에서 배운 이런 생산법을 이미 일반제품을 만드는데 이용하고 있다. 예컨대 오늘날 우리가 사용하는 대부분의 청유리는 녹은 금속 용덩이에 녹은 유리를 띄워서 만든 이른바 플로트유리(플로트법으로 제조하는 고급 판유리)다. 이때 금속은 표면적

을 최소한으로 줄이려는 경향이 있어 표면이 매끄럽고 납작해지는데 이런 금속표면 위의 유리도 매끄럽고 납작해질 수 밖에 없다.

이 방법은 다른 공정으로 만든 유리를 갈고 닦는 것보다 훨씬 비용이 덜 드는 반면 표면의 질은 월등하게 우수하다. 한편 화학자들은 세라믹복합재료를 만들 때 높은 열과 주형을 사용하여 이웃한 분자들을 특별한 모양으로 융합시키지만 대합(조개의 일종)은 이와는 대조적으로 매우 우아한 방법을 선택한다. 이들은 일련의 단백질들이 스스로 형틀 속에 모이게 해서 작은 세라믹조각들로 정교한 층을 형성함으로써 밝고 단단한 조개껍질을 만든다.

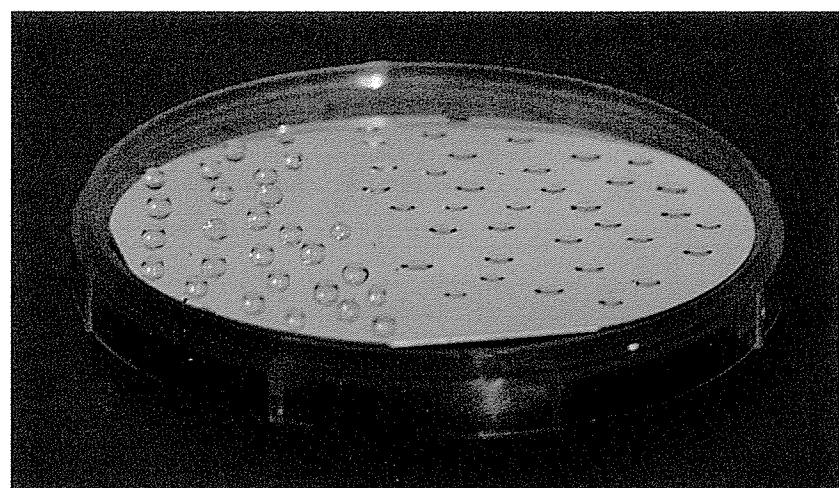
스스로 조립하는 소재

만약에 대합의 이런 자기조립법을 모방할 수 있는 길이 열리기만 한다면 우리는 경제적으로 엄청난 이익을 얻을 수 있을 것이다. 예컨대 오늘날 마이크로칩을 만들자면 클린룸(청정실)

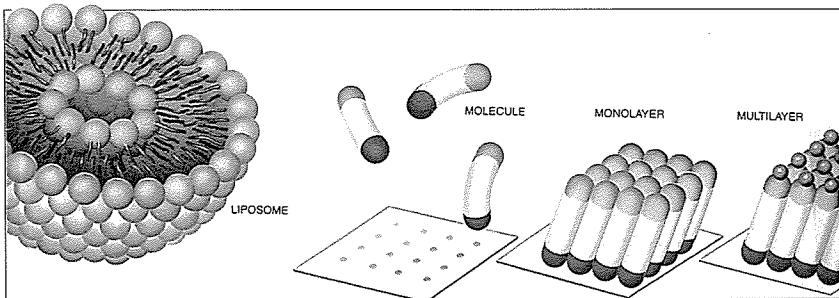
과 진공실을 갖춘 10억달러대의 공장이 필요하지만 대합처럼 자기조립방법을 이용하면 이론적으로는 거의 비용을 들이지 않고 만들 수 있게 된다.

재료과학자들은 앞으로 20~30년 내에 자기조립원리를 내포한 기계와 생산시스템을 설계하기 시작할 것으로 보인다. 자기조립기계의 설계는 자기조립재료의 설계로 시작된다. 이런 재료중에서 가장 먼저 성공한 것은 리포좀(인지질의 혼탁액에 초음파진동을 가하여 생기는 미세한 퍼막입자)으로 알려진 공모양의 미세한 캡슐이다. 생의학연구자들은 벌써 1960년대부터 우리의 몸 속에서 약물을 실어 나르는 이를테면 '택시'의 역할을 하는 리포좀을 실험해 왔다. 이 캡슐은 이를테면 '화물'인 약물을 효소로부터 보호하기 때문에 리포좀을 외피로 하는 약물은 이런 외피가 없는 약물보다 더 오랫동안 효력을 간직할 수 있다.

그런데 리포좀은 자연에 있는 가장 좋은 자기조립재료의 보기인 세포막을 본떠 만든 것이다. 세포막은 대부분이



▲ 자기조립분자막 연구에서 흔히 사용되는 금박의 실리콘웨이퍼. 이 실험에서 왼쪽 반은 소수성(疏水性) 표면을 가진 분자막 그리고 오른쪽 반은 친수성(親水性) 표면을 가진 분자막으로 덮였다. 물방울은 친수성 표면에서는 납작해지지만 소수성표면에서는 표면과의 접촉을 최소한으로 만들어 둥그런 구체를 만들었다.



▲ 최근 관심을 모으고 있는 자기조립재료중의 하나인 리포좀(원쪽)의 미세한 캡슐은 몸 속에서 약을 운반하는 시스템으로 임상실험중이다. 현재 연구의 초점은 소시지모양을 한 분자로 만든 자기조립 층에 집중되고 있다. 각 분자의 한쪽 끝의 원자는 표면과 강력하게 상호작용하고 다른 끝에는 여러 가지의 다른 원자집단이 있다. 이 분자들은 스스로 한쪽 표면에서 조직할 수 있어 표면 다른 끝에 특성이 다른 표면을 만들어 낼 수 있다.

일종의 2중성격을 가진 인지질(분자 안에 인산을 함유한 복합지질의 총칭)이라고 불리는 분자로 되어 있는데 인지질의 한쪽 끝은 물에게 끌려 가는 반면 다른 한쪽은 물로부터 배척당한다.

그래서 이 분자들은 물을 가진 환경 속에 놓아 두면 자연히 2중의 층을 형성하게 되고 그 중에서 친수성(親水性: 물과 가까이 하는 성질)을 가진 한쪽 끝은 물과 접촉하는 반면 소수성(疏水性: 물을 멀리하는 성질)을 가진 다른 한쪽은 반대쪽을 가리킨다.

과학자들은 같은 인지질을 사용하여 리포좀을 만든다. 이때 인지질의 2중 층은 약물분자를 충분히 수용할 수 있는 구멍을 가진 구체로 자란다. 이 리포좀을 사람의 몸 속으로 주사하면 속의 약물이 새어 나오거나 또는 구체가 파열되어 방출된다. 현재 리포좀 약품 송달시스템은 임상시험중이다.

자기조립을 이용하여 전자재료를 만들어 보려는 과학자들이 있다. 예컨대 레이저 다이오드와 같은 장치의 반도체재료를 만드는데 원자두께의 층을 연속적으로 깔자면 1백만달러짜리의 분자선에피택시기계(에피택시: 결정이 다른 결정면 위로 일정방향의 성장을

하는 것)를 사용하여 분자층을 분사해야 한다. 그러나 자기조립은 그런 장치가 필요없다. 분자구성불력을 적절하게 설정하면 단층배열로 결합할 수 있다. 자기조립은 질서가 잡히고 잘 제어된 것을 만드는데도 많은 노력을 할 필요가 없어 이를테면 '빈자의 기술'과 같은 것이라고도 말하고 있다.

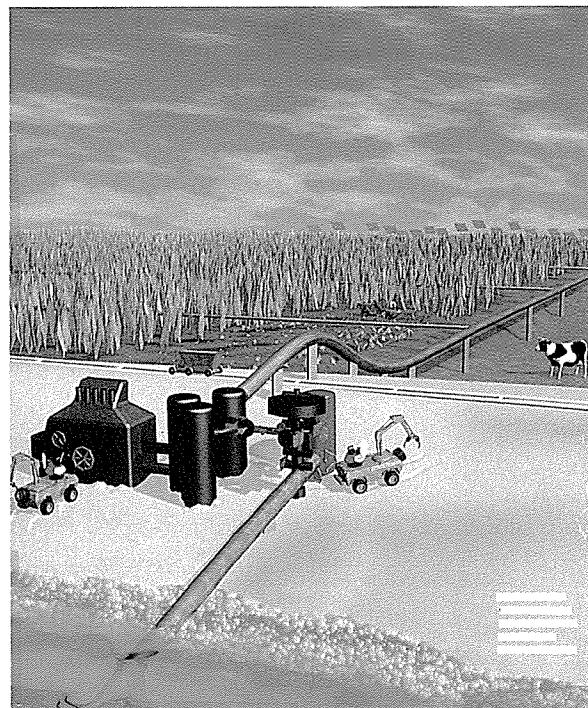
미국 펜실베이니아주립대학의 화학자 톰 말루크와 그의 동료과학자들은 이 '빈자의 기술'을 이용하여 태양전지와 LED(발광다이오드)와 같은 장치용으로 전기적으로 활성적인 재료의 층을 만들고 있다. 1988년 말루크는 처음으로 금을 도금한 실리콘기판 위에 일련의 분자로 층을 쌓아 올렸다. 그는 한쪽 끝에는 황원자, 중간에는 탄화수소의 체인 그리고 끝쪽에는 포스포늄그룹을 가진 분자들을 내포

한 용액 속에 이 기판을 적시는 일부 터 시작했다. 황의 원자는 금표면과 단단히 결합하고 순 마이너스전하의 포스포늄그룹은 표면에 튀어 나왔다.

그래서 말루크는 이 구조물을 플러스전하를 가진 지르코늄 이온을 담은 탕 속에 적셨다. 이때 지르코늄은 포스포늄그룹과 결합하여 원자두께의 층을 가진 판금을 형성했다. 말루크는 다시 양쪽 끝에 포스포늄그룹을 가진 분자를 담은 탕 속에 이 구조물을 적신 결과 쉽게 지르코늄과 결합하고 결합하지 못한 포스포늄의 다른 그룹은 꼭대기에 튀어 나왔다. 이런 공정을 되풀이 하면서 층을 쌓아 올라갔다.

새로운 돌파구

일반적으로 서로 다른 층 사이의 반대되는 전하를 분리함으로써 작동하는 반도체소자는 반드시 층을 가진 구조가 필요하다. 예컨대 종래의 태양전지



▲ 해안의 옥손이 비단물을 담수화하여 농장에 물을 공급하고 있다.

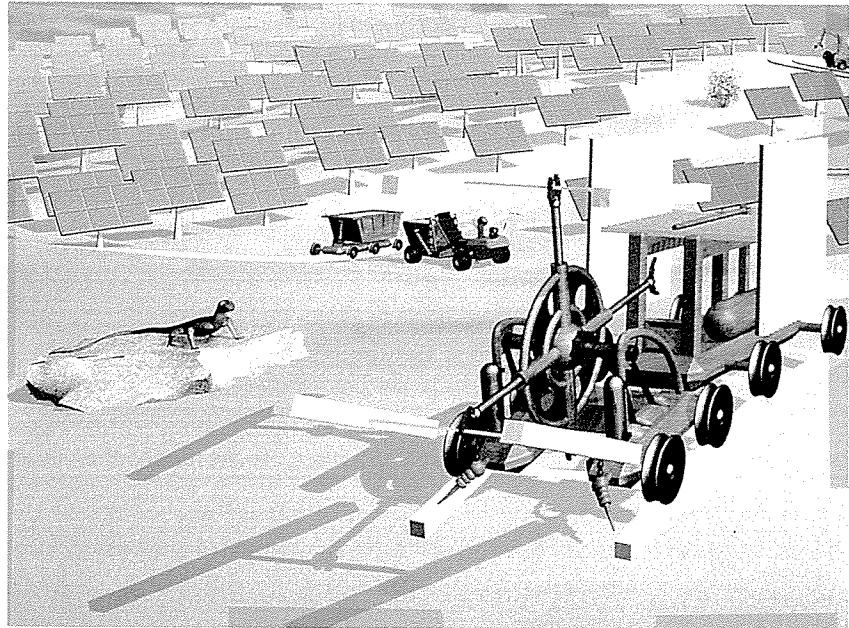
에서는 실리콘원자가 광자를 잡으면서 마이너스전하의 전자와 플러스전하의 '정공'을 방출한다. 서로 반대되는 이 전하들은 실리콘층의 위와 아래로 이동하면 수집되어 배터리로 옮겨져 저장된다. 만약에 전하가 배터리에 도달하기 전에 재결합하면 그 결과는 전기 대신 열이 생긴다.

1992년 미국 AT&T사의 호워드 카츠와 그의 동료 과학자들은 말루크의 자기조립시스템을 이용하여 태양전지의 부품을 만들기로 했다. 이들은 먼저 포르피린과 바일로겐으로 알려진 유기분자의 층을 침전시키는 작업부터 시작했다. 실리콘과 마찬가지로 포르피린분자는 햇빛을 포착하고 전자와 정공을 방출한다.

카츠의 장치에서는 포르피린이 바일로겐에게 전자를 제공한다. 카츠와 그의 동료과학들은 현재 이 전자를 모아 배터리로 보내는 방법을 찾고 있다. 이런 문제가 해결된다면 자기조립층은 태양전지의 생산가를 극적으로 떨어뜨릴 수 있게 된다. 자기조립기술을 이용하면 접시를 세탁하는 물통과 행구는 물통 속에 연속적으로 담그는 것처럼 간단히 여러 층의 전자구조를 만들 수 있기 때문이다. 한편 프린스턴 대학의 마크 톰슨을 포함한 여러 과학자들은 태양전지만 아니라 액정 디스플레이도 자기조립기술로 만들 수 있다고 생각하고 있다.

그런데 이런 응용의 길이 상업화까지 연결될 수 있을까 하는 것은 두고 보아야 할 일이다. 항암제 운반용의 리포좀은 현재 방사선과 전통적인 화학요법 등 재래식 요법으로부터의 치열한 경쟁에 직면하고 있다.

또 전자장치에 응용하면 비용효과를



▲ 생산 옥손이 만든 태양패널이 사막을 덮고 있다.

볼 수 있다고 밝혀진다고 해도 그것만 가지고는 상업화의 요건으로서 충분하지 않다. 메이커들은 실리콘기판의 마이크로칩을 생산하는 장비를 마련하는데 이미 수십억달러를 지출했기 때문이다. 그러나 일부 과학자들이 비용효과를 입증하기 위해 현재의 기술을 같고 닦는 동안에도 자기조립의 새로운 응용이 솔솔 나타날 것으로 보인다.

스스로 조립하는 로봇

한편 로봇전문가들이 바라는 미래의 이상적인 로봇은 무엇이든지 스스로 조립할 수 있는 이른바 '조립용 로봇'이다.

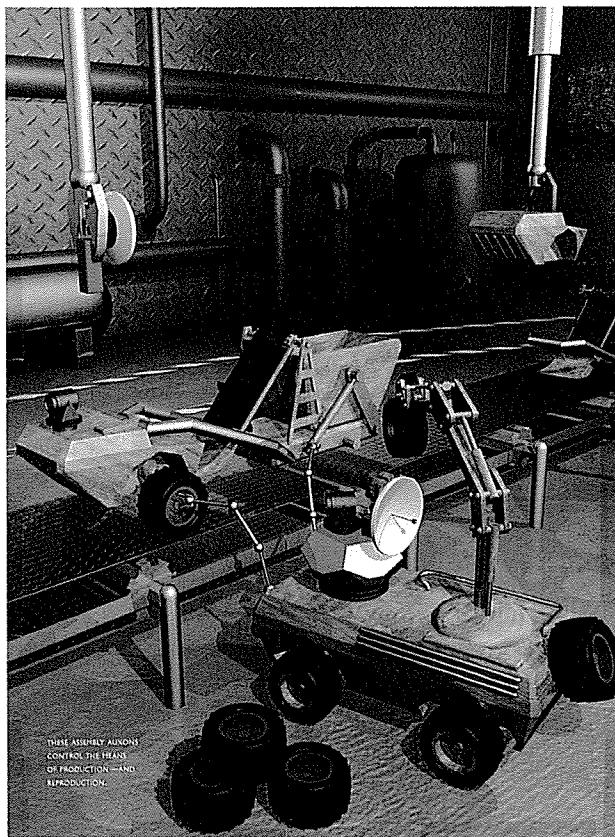
이런 로봇으로 광전자패널을 제작하여 광대한 사막을 메운다면 깨끗한 에너지를 무제한 얻을 수 있어 에너지와 지구온실효과문제를 한꺼번에 해결할 수 있다는 구상이 발표되어 관심을 모으고 있다. 최근 미국 로스알라모스국립연구소의 물리학자 크로스 래크너와 위스컨신대학의 물리학자 크리스토퍼

웬트가 미국의 한 수학 및 컴퓨터학술지(Mathematical and Computer Modeling)에 발표한 자가조립로봇의 구상은 언뜻 황당무계한 것 같으나 냉철한 과학자의 머리에서 나온 치밀한 계산에 바탕을 둔 것이어서 주목을 끌고 있다.

이들의 논문에 따르면 먼저 여러 종류의 '옥손' ('성장한다'는 뜻의 그리스말에서 따온 것)이라는 이름의 로봇들을 제작한다. 예컨대 채굴용 옥손은 사막바닥에서 흙을 파내고 운반용 옥손은 이 흙을 전기오븐까지 운반한다.

이 오븐에서는 컴퓨터칩을 만드는데 필요한 실리콘이나 철 그리고 알루미늄과 같은 금속이 나온다. 생산용 옥손은 이런 재료를 가지고 기계부품과 태양전지패널을 만들면 조립옥손은 이것으로 기계나 패널을 조립한다. 이렇게 탄생된 한 무리의 자기복제 옥손들이 흙을 파기 시작하면 앞서의 모든 과정은 다시 되풀이 된다.

처음에는 축구장 크기로 시작된 태



▲ 조립용 옥손이 생산방법을 제어하고 있다.

양전지단지는 매 6개월마다 두배로 커져서 10년이면 북미대륙을 온통 덮게 된다. 그러나 북미대륙면적의 4%만 이런 단지를 조성해도 현재 세계가 생산하는 전력의 25배를 생산할 수 있다. 흑은 일단 금속으로 분해되면 이것을 막대, 패널, 톱니바퀴, 도전체, 절연체, 컴퓨터칩 그리고 그밖의 현대식 기계연장으로 만드는데 필요한 나머지 기술에는 조금도 어려운 것이 없다.

오늘날 로봇은 금속의 주괴를 압연(壓延)하여 금속판을 만든 뒤 기계부품으로 깎아 쓸모있는 연장으로 만드는데 익숙해져 있다. 따라서 옥손을 만드는데 필요한 모든 자동화공정은 이미 산업계에 존재한다는 것이 래크너의 주장이다.

로봇은 거의 독자적으로 16시간에

주국(NASA)연구팀이 달 표면에 스스로 성장하는 채광모듈을 제작하자고 제의할 때 구상하던 것과 같이 두뇌나 또는 자동화행정센터를 갖지 않는다.

자율적인 행동

당시 NASA의 공상가들은 30억의 로봇을 가지고 달의 산업기지를 완성할 생각을 하고 있었다. 그러나 래크너와 웬트는 이런 통제시스템은 번거롭고 불필요하다고 생각하고 있다. 대신 이들은 반사로 작동하는 원격의 국지화된 센서를 사용하여 옥손을 관리할 것을 제안하고 있다.

옥손은 저마다 바로 이웃에서 어떤 일이 진행되고 있다는 것을 감지하고 예컨대 생산속도를 끌어 올리거나 또는 내리면서 간단하고 적절한 방법으

로 응할 수 있다.

차 한대를 만들 수 있고 애플컴퓨터가 제어하는 로봇은 애플컴퓨터의 부품을 조립한다. 래크너와 웬트가 구상중인 옥손 시스템은 이미 있는 자동화방법을 연장한 것에 지나지 않고 다만 종래의 것과 다른 것이 있다면 로봇이 어떻게 일하는가 하는 것이 아니라 이들이 더 많은 '자신'을 만드는 점이라고 생각하고 있다. 이 옥손 시스템은 1980년 미 항공우

로 응할 수 있다.

이 시스템은 내버려두면 자동화된 칠처럼 사막을 가로질러 번져 나간다. 옥손이 자기복제를 하는 동안 외부의 옵저버들은 인공위성을 통해 이 시스템을 감시한다. 가끔 인간이 현장에 나타나서 일부의 기계의 프로그램을 수정하거나 옥손이 허용된 자기구역을 벗어나는 것을 감시한다. 로봇에 대한 마지막 제어는 물론 에너지생산을 중단하는 것이다. 물론 이 시스템에도 제어해야 할 일이 있다.

예컨대 에너지생산을 중단할 경우 태양패널을 닫으라는 무선신호가 방송되면 이에 호응할 수 있게 설계되어 있다. 또 행정옥손은 이리저리 돌아다니면서 생산이 시방대로 지켜지고 있는가 감시하고 돌연변이를 막는 일을 맡고 있다. 이 시스템의 전략을 예컨대 성장으로부터 현상유지로 바꿀 수도 있다. 이런 경우에는 조립로봇에게 새로운 컴퓨터칩을 다시 장착하거나 프로그램을 바꿔 주면 된다.

두 과학자는 이들의 구상이 보다 많은 기술보다는 보다 적은 기술을 요망하는 오늘날의 시대적인 정서에서는 벗어난다는 점은 시인하고 있다. 그러나 래크너와 웬트는 산업혁명 이전으로 돌아갈 수는 없는 것이라고 주장하면서 날이 갈수록 에너지에 짚주리는 세계에서 살기 위해서는 새로운 기술이 필요하게 될 것이라고 전망하고 있다. 이들은 곧 원형의 옥손설계에 착수하는 한편 토양화학연구도 시작할 계획이다. 아무튼 스스로 만드는 기계와 재료의 연구가 열매를 맺게 되면 새로운 제조전략이 도입되어 생산방법에는 일찍이 없었던 큰 변화가 일 것으로 보인다. ST