

과학의 눈

Gyeonggi MoMA Lectures
eyes of science

2010 하반기
경기도미술관
렉처스

9. 16 ~ 10. 28
매주 목요일
오후3시~5시

우주와 세포 universe & cell



2010 하반기 경기도미술관 렉처스

과학의 눈_우주와 세포

2010. 9. 16 ~ 10. 28

© 2010 Gyeonggi Museum of Modern Art

2010 하반기 경기도미술관 렉처스 과학의 눈

• 우주와 세포 universe & cell



Gyeonggi MoMA Lectures

eyes of science

경기도미술관은 <과학의 눈_우주와 세포>라는 주제아래 과학자의 눈을 통해 최신의 과학이슈를 소개함으로써 미술가/이론가들에게 새로운 인식의 지평을 자극하고 상상력을 북돋는 과학인문학 강좌를 진행 하였습니다.



LECTURES

CONTENTS

- 1 이수종 | 서울대 물리천문학과 교수
우주의 생성 - 초끈이론, M이론
- 2 안도열 | 서울시립대 전자전기컴퓨터공학부 교수
꿈의 컴퓨터 - 양자컴퓨터
- 3 김범준 | 성균관대 물리학과 교수
카오스와 복잡계
- 4 신희섭 | 한국과학기술연구원(KIST) 신경과학센터 센터장
뇌과학의 이해
- 5 김성규 | 성균관대 물리화학과 교수
나노의 세계
- 6 임태연 | 한양대 생명공학과 교수
생명공학의 이해



과학의 눈

Gyeonggi MoMA Lectures
eyes of science

우주와 세포 universe & cell

제1강

우주의 생성 –

초끈이론, M이론



이수종 | 서울대 물리천문학과 교수

서울대 물리학과 졸업 후 미국 캘리포니아공과대에서 박사학위를 취득하였다. 빅뱅이론을 대체하는 우주의 생성과 기원에 관한 새로운 생성이론인 초끈이론에 대한 연구활동으로 2001년 유네스코 젊은 과학자상(CTP), 2004년 독일 훔볼트 재단의 베셀상, 2008년 한국과학상을 수상하였다.



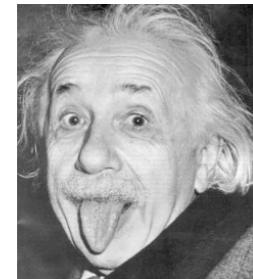
아인슈타인도 다 틀리네!

끈이론, M이론과 홀로그래피 원리

서울대학교 물리천문학과 교수 이수종



* 미시세계(micro-cosmos)와 거시세계(macro-cosmos)



아인슈타인 박사께.

오늘은 당신이 베를린대학의 물리학 교수 시절, 여름휴가를 보내던 포츠담(Potsdam)의 카푸초(Caputh) 호수앞 공원벤치에서 편지를 씁니다. 이곳 천문대에서 당신은 불후의 업적인 '일반상대성이론'(general relativity)을 입증하려 직접 관측하기도 했었다죠? 그렇지만, 나는 오늘 당신의 '일반상대성이론'이 불완전하며 '끈이론'(string theory)이 보다 완벽한 이론임을 입증하고자 당신과 의견을 나누고자 합니다.

1905년, 3편의 논문에서 당신이 밝혀낸 새로운 원리들로 말미암아 20세기의 엄청난 기술문명의 발달이 이어졌고, 전세계 인류는 너무나도 편해진 세상을 만끽하며 살고 있답니다. 당신이 취리히공과대학에서 물리학을 전공한 후, 대학교 시 간강사 고등학교 과학교사 등 여러 직장을 구하려 했지만 모두 낙방하고 간신히 특허국 심사업무를 담당하는 말단직원으로 겨우 취직된 암담한 상황에도 개의치 않고 이런 획기적인 업적을 배출할 수 있었다는 것이 매우 놀라울 뿐이죠. 제가 파악하기로는 당시 당신의 공통관심사는 거시세계와 미시세계 사이에 나타나는 부조화를 설명하는 새로운 관점의 정립이었다고 봅니다.

1. 미시세계(micro-cosmos)와 거시세계(macro-cosmos)*

"삼라만상을 구성하는 우주만물들은 무엇으로 구성되었을까? 이들은 어떻게 단단히 뭉치게 될까? 우주는 어떻게 탄생하여 지금에 이르렀을까?" 이런 질문들은 고대에서부터 동서양을 막론하고 건강한 사람들의 호기심을 자극한 가장 중요한 문제였지요. 밤하늘 은하수나 우주의 환상적인 사진을 보았다면, 또 백만분의 일 나노미터에서 아주 빠른 소립자들이 충돌하며 만들어낸 찬란한 파편의 궤적사진들을 보았다면 이런 질문은 누구나 한번 해보지 않았겠습니까? 물론 심오한 과학적 질문이면서 동시에 철학적, 종교적 영역에 접근하는 질문이어서 인류 역사이래 무수히 많은 그럴듯한 주장과 역설들로 점철되어 온 것도 사실이지요.

우리는 세상만사를 인간의 관점에서 거시세계(macro-world)와 미시세계(micro-world)를 구분지어 비교하지 않습니까? '거시세계'란 오감(五感)으로 느낄 수 있는 대상들을 말하는데, 사람들이 맨눈으로 확인할 수 있을만한 크기를 가진 먼지, 모래알, 흙, 돌, 물, 바람, 불, 지구, 달, 태양계, 은하, 은하단 그리고 우주까지 모두를 포함합니다. '미시세계'는 크기가 너무 작아 현미경과 같은 관찰도구가 없이는 존재를 알 수 없는 대상들인데 분자(molecule), 원자(atom), 원자핵(atomic nucleus), 양성자(proton), 중성자(neutron), 전자(electron) 그리고 뉴트리노(neutrino), 쿼크(quark) 등이 이에 포함됩니다. 관찰도구가 없었던 19세기

이전에는 사람들은 거시세계가 세상의 전부라고 믿었죠. 기술문명이 발달하면서 전자기장을 이용한 도구들의 발전이 이어지고 이를 이용하여 미시세계가 존재함을 알게되었습니다. 특히, 거시세계는 무수히 많은 미시세계의 구조가 쌓여 모인 결과라고 이해하게 되었죠.

20세기 초로 되돌아가 위의 질문들은 다시 정리한다면 “미시세계가 어떤 기본 단위로 구성되어 있을까?” “이들 기본단위는 어떤 기본힘의 법칙에 따라 운동하는가?” “미시세계는 어떤 상호작용으로 결합하여 더 커다란 구조물인 거시세계를 만드는가?”로 압축, 요약할 수 있다고 봅니다. 첫째 질문인 기본단위의 정체는 언제나 가장 중요한 질문이었지요. 이에 답하고자 노력한 인류의 역사를 살펴보면, 만물의 기본단위에 대한 해석은 “그 당시의 과학기술로 관찰할 수 있었던 가장 작은 크기가 어느정도인가”와 밀접하게 관련되어 있었음을 알 수 있습니다. 현미경이 없었던 중세의 시절에는 먼지정도가 관찰할 수 있는 가장 작은 크기였겠죠. 상황은 지금도 비슷합니다. 21세기의 찬란한 기술문명으로도, 앞의 쉼표의 천만분의 1밀리미터 크기를 가진 나노입자 하나를 다시 1억분의 1 이상으로 잘라 크기를 관찰하는 것은 불가능한 상황입니다. 두 번째와 세 번째 질문에 대해 당신이 타계한 이후 발전을 거듭한 현대물리학이 제시하는 답에 따르면, 미시세계에는 중력(gravity), 전자기힘(electromagnetism), 강한힘(strong interaction) [2004년 노벨물리학상 수상], 약한힘(weak interaction) [1979년 노벨물리학상 수상] 네가지 기본힘이 작용한다고 보고 있습니다. 이중 중력과 전자기힘은 힘이 미치는 거리가 워낙 길어서 거시세계에서도 작용하는 힘들이지요. 강한힘과 약한힘은 원자핵의 크기인 백만분의 1 나노미터 혹은 더 짧은 거리에서만 나타나고 먼 거리에서는 아주 약해집니다. 거시세계에는 중력과 전자기힘, 미시세계에는 이에 더불어 약한힘, 강한힘이 함께 작용한다고 보면 되겠습니다. 이들 힘이 물체들 사이에 작용하는 방법은 자못 흥미롭습니다. 두 사람이 마주서서 농구공을 주고 받으면 몸이 뒤로 쓸리는 힘을 느끼지 않습니까? 즉, 농구공이 두사람 사이를 왔다갔다하며 힘을 전달하고 있습니다. 마찬가지로 각각 기본힘에는 농구공과 유사한 ‘힘 전달단위’가 존재합니다. 약한힘은 W, Z 입자들 [1984년 노벨물리학상 수상], 강한힘은 부착입자(gluon) [2004 노벨물리학상 수상]. 전자기힘은 빛입자(photon), 그리고 중력은 중력입자(graviton)가 힘을 전달한다고 이해하고 있습니다. 이들 중 빛입자와 중력입자는 질량이 0이어서 당신의 특수상대성이론

(special theory of relativity)에 따르면 항상 우주최대속력인 1초마다 30만킬로미터를 달려나가죠. 이 때문에 거시세계는 전자기힘과 중력이 지배합니다. 따라서, 기본단위와 힘 전달단위가 어우러져 세상을 구성한다고 보고 있습니다.

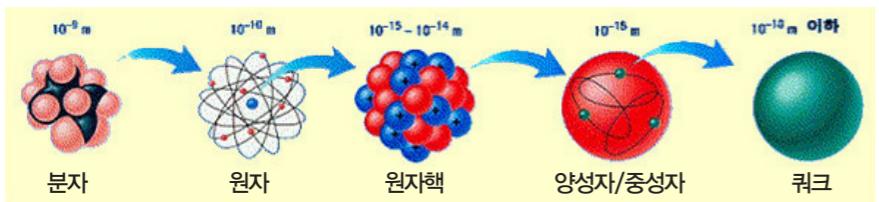
그런데 이들 구성단위를 찾고자 끊임없이 노력한 인간의 착상과정들을 살펴보면 재미있는 공통점을 발견할 수 있다고 봅니다. 매번 가장 기본이라고 여겨지는 구성단위를 발견할 때마다 그 단위는 공처럼 둥글둥글하고 점과 같이 크기가 없는 것이라고 상상해왔습니다. 기술문명이 발전하여, 더 정밀한 관찰을 통하여 더 작은 기본단위가 있음이 밝혀질 때마다 새 모양도 전과 같이 ‘공모양’ 형태를 가지고, 그 내부에는 다시 크기가 없는 점모양의 기본단위가 존재한다고 생각했던 것이지요. 아인슈타인 박사께서 활동하시던 20세기 초반까지도 사람들은 이러한 관점을 항상 옳다고 받아들였으며, 이에 대하여 의문을 제기한 사람은 하나도 없었습니다. 왜 하필이면 기본단위는 항상 크기가 없는 점모양이라고 반복하여 가정해 왔을까? 생각해보면 단지 가장 간단한 기하학적 구조를 가진다는 것 이외에는 그리 특별한 이유가 있었던 것도 아니었다고 봅니다.

2. 중력과 시공간

아인슈타인 박사께서도 잘 기억하시겠지만 당신이 많은 사람들에게 유명해진 계기는 1907년에 벌어졌었죠. 특허국에서 무료한 오후를 보내고 있던 당신이 창가 너머 건물 옥상에서 작업하던 인부가 실수로 떨어져 많이 다치는 사고를 목격하였다고요. “사람이 왜 떨어질까? 그건 지구가 사람을 잡아당기는 중력때문 아닌가? 그렇다면 중력이란 어떤 현상일까? 만일 빛과 같이 아주 빠르게 움직이면서 중력을 관찰해보면 똑같이 보일까?” 그후 10년간 끈질기게 “도대체 중력이란 무엇인가?”에 대하여 연구를 거듭한 후 완성한 ‘일반상대성이론’은 실로 엄청난 업적이었습니다.

당신이 타계한 이후, 현대물리학은 미시세계에서 거시세계는 어떤 과정을 거쳐 만들어지는지 거의 완벽하게 이해하였습니다. 미시세계의 쿼크와 전자로부터 시작해보겠습니다. 쿼크들은 3개씩 강한힘으로 뭉쳐 양성자, 중성자를 만들

고 이들은 다시 강한힘과 약한힘의 복합작용으로 뭉쳐서 여러 종류의 원자핵들을 만듭니다. 그래서 강한힘과 약한힘을 핵력(nuclear force)이라고도 부르죠. 태양을 비롯한 별들의 에너지 발생, 원자력 발전소, 당신이 극구 반대하였던 원자폭탄, 수소폭탄 이런 것들이 모두 핵력의 원리를 이용한 것들이지 않습니까? 또 원자핵들은 전자들과 전자기힘으로 결합하여 원소주기율표에서 찾아볼 수 있는 109가지 다양한 원자들을 구성합니다. 원자들은 모여 더욱 다양한 분자들, 분자들은 모여 거시세계의 삼라만상들을 만드는 과정들은 모두 전자기힘의 영향이지요. 삼라만상들이 모여 달이나 지구 혹은 더 커다란 거시세계 구조를 만들어 가는 과정에는 중력의 영향이 지배적이지요. 우주 진화 역시 중력의 상호작용 결과이지 않습니까?

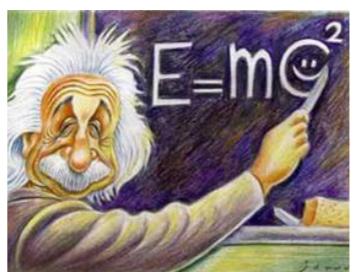


거시세계의 가장 중요한 기본힘이 중력, 중력에 어떻게 당신은 관심을 가지게 되었나요? 방금 이야기하였듯이 중력은 기본단위로부터 사람키만한 돌덩어리 정도까지 만드는데에는 그렇게 중요하지 않습니다. 사실 그 이유는 중력이 네가지 기본힘 중 가장 미약한 힘이기 때문이죠. 웬만큼 덩치가 크지 않고서는 그리고 웬만큼 질량이 크지 않고서는 중력효과는 나타나지 않습니다. 보통 덩치가 큰 물체는 질량도 크기 때문에 중력효과가 쉽게 나타나는 경우는 인간이 쉽게 관찰할 수 있는 거시세계(macro-world) —— 예를 들자면 태풍, 바다, 지구, 달, 태양계, 은하, 우주 —— 에서 중력의 영향은 절대적입니다. 또한 하늘에서 빛방울이 떨어지는 것이나, GPS 신호를 전송하는 인공위성이 지구 주변 궤도를 따라 운동하는 것. 태양같은 별들이 백만개 이상 모여 은하를 만드는 것 모두 중력의 작용 때문이지요. 당신의 일반상대성이론 이전, 중력의 이러한 성질을 만유인력법칙으로 이해한 사람은 뉴턴(Newton)이었습니다. 그에 따르면, 중력이란 두 물체들의 사잇거리를 반으로 줄이면 세기가 꼭 4배 증가하며, 각 물체 질량값들의 곱에 비례하여 증가하는 잡아당기는 힘입니다. 특히, 물체를 구성하는 기본단위의 구성분포에는 전혀 관계없으며, 오직 질량값으로만 힘의 크기가 결

정된다는 것을 바탕으로 중력을 만유인력, 즉 보편성을 가진 힘임을 밝혀냈습니다. 중력의 또다른 특성은 항상 잡아당기는 힘만 있다는 것입니다. 전자기힘과 같이 밀치는 힘은 없죠.

뉴턴의 만유인력법칙은 이후 19세기 말까지 가장 중요한 아니 유일한 운동원리로 자리잡았습니다. 물체들의 운동이란 시간이 흐름에 따라 3차원 공간에서 힘을 받아 위치가 변화하는 과정을 말하죠. 당신이 100년 전 발표한 ‘특수상대성이론’(special relativity)은 시간과 공간이 독립적인 개념이 아니고 4차원 시공간(spacetime)으로만 존재한다는 심오한 사실을 밝혀냈습니다. 그런데 특수상대성이론은 운동상태가 변화하지 않는 경우에 물리현상들을 다루는, 말 그대로 특수한 상대성이론이었죠. 당연히 당신은 물체의 운동상태가 바뀌는 경우, 즉 운동방향이나 속력이 바뀌는 일반적인 경우의 물리현상들을 이해하려 했겠죠. 왜냐하면 뉴턴의 법칙에 따르면 물체의 속도변화운동은 어떤 힘이 작용하여 나타나는 현상이지만, 상대성에 따라 단순히 물체는 가만히 있고 대신 내가 계속 속도를 바꾸면서 움직이며 물체를 관찰하면 물체가 속도변화운동하는 것으로 느낄테니까요. 어린이 놀이터에 빙글빙글 돌아가는 뻥뻥이를 타보면서 우리 모두 이런 상대성을 경험하지 않습니까? 10여년간의 각고 끝에 당신은 이런 현상을 모두 4차원 시공간이 균일한 것이 아니라 물체의 속도변화와 질량에 따라 마구 휘어지는 것을 발견하기에 이르렀죠. 그리고 이런 시공간에서 움직이는 물체가 느끼는 중력이란 이런 휘어진 시공간에서 움직이는 물체는 똑바로 진행하지 못하고 휘어진 시공간을 따라서 포물선 혹은 곡선운동하는 현상이라는 엄청난 사실을 발견하지 않았습니까? 시공간의 형태가 고정된 것이 아니고 마구 바뀌며 바뀌는 정도가 바로 중력이라는 당신의 해석이 바로 ‘일반상대성이론’(general theory of relativity)이지요. 구불어진 시공간에서 운동하는 물체는 볼링공처럼 직선으로 운동하지 못하고 시공간의 구불어진 모양에 따라 휘어진 궤적을 그리며 움직입니다. 지구 주변을 빙글빙글 돌고있는 달이나 인공위성의 경로를 예로 들어보죠. 일반상대론에 따르면 지구는 주변의 시공간을 구불어지게 만들고, 이 구불어진 시공간에서 달이나 인공위성이 가장 짧은 거리를 따라 움직입니다. 이 최단경로는 시공간이 구불어져 있으므로 직선이 아니고 휘어진 경로이겠죠. 시공간의 구불어짐 즉 평평한 상태에서 벗어난 정도는 물체의 질량이 클수록, 또 속도변화가 클수록 커집니다.

당신의 두 가지 상대성이론들을 조합하면 새로운 현상을 예측할 수 있습니다. 질량을 가진 모든 물체들은 중력의 영향을 받죠? 그렇다면, 질량이 없는 빛입자는 중력의 영향을 받지 않나요? 당신은 너무나도 간단히 빛도 중력힘을 느낀다는 사실을 밝혀냈습니다. 요즘 티셔츠나 카페 벽에도 자주 등장하는 그 유명한 $E = Mc^2$ 라는 식이 중요한 근거를 제시하죠. 이는 에너지가 질량과 같음을 나타내고 있습니다. c 는 1초당 30만 킬로미터 움직이는 빛의 속력이죠. 따라서, 에너지를 가진 빛입자는 사실 에너지를 빛속도 제곱으로 나눈 값만큼 질량을 가지고 있다고 볼 수 있겠죠. 아인슈타인은 멀리서 지구로 오는 별빛이 태양 주변을 스치며 지나올 때 태양의 중력 영향을 받아 휘어질 것이라고 예측하였으며, 이는 즉시 천문학자들에 의하여 정확히 맞음이 검증되었습니다.



3. 그런데 아인슈타인박사님, 틀렸습니다! – 양자세계와 일반상대성이론

거시세계의 중력을 설명하는 일반상대론의 가장 심오한 내용은 4차원 시공간의 구조가 질량 혹은 에너지의 존재로 인하여 마구 휘어지고 요동한다는 사실입니다. 그렇다면, 원자 혹은 그보다 더 작은 미시세계에서 중력의 작용은 어떠리라고 생각하십니까? 앞서 미시세계의 기본단위들은 주로 강한힘, 약한힘 그리고 전자기힘으로 말미암아 서로 뭉쳐 거시세계의 복잡한 구조를 만든다고 하지 않았습니까? 이 설명을 그대로 받아들이면 중력은 미시세계에서는 전혀 중요한 역할을 하지 못하는 듯 보입니다. 당신이 철썩같이 믿었듯 말이죠. 그런데, 역사가 항상 보여주듯이, 불변의 진리나 당연하다고 믿는 상식들은 흔히 틀린 구석이 발견되고 이를 바꾸면서 새로운 진리와 상식들이 만들어지지 않습니까? 당신의 위대한 3편의 논문과 일반상대론 역시 그러하였죠. 그런데, 이제와서 이야기지만, 당신이 20세기 후반 새로운 물리학의 발전과 함께 있었더라면, 중력은 극히 작은 미시세계에서 다시 강해지기 시작하며,

이 경우 당신의 일반상대론이 여러 문제점을 가지고 있어서 완벽하지 못한 틀린 이론이라는 사실을 발견할 수 있었을텐데 그렇지 못한 것이 아쉽습니다.

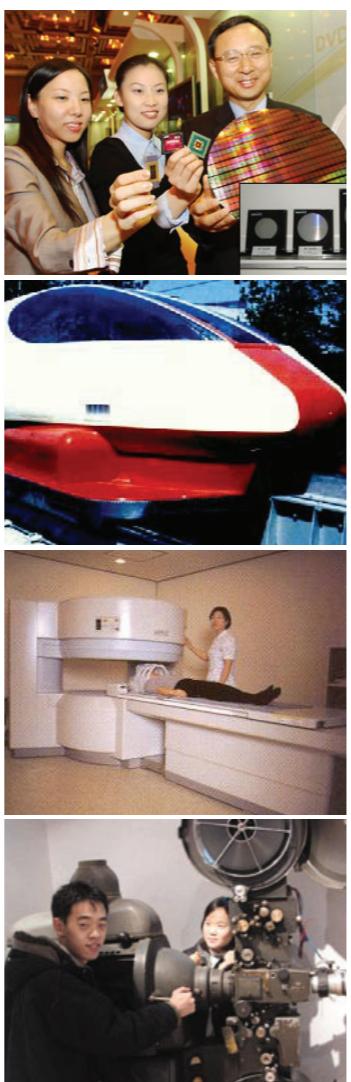
물론 이런 나의 주장을 당신이 쉽사리 받아들이지 않을 것이라고 생각합니다. 자존심도 상하실테니까요. 그렇지만, 당신이 타계한 이후 지난 50년간 여러 천재적인 물리학자들이 끊임없이 연구한 결과 이러한 결론에 도달하였으므로, 당신이 반론을 펴기에는 그리 만만하지 않을 듯 싶습니다. 중력이 미시세계에서 고려되지 않는 이유는 사실 기본단위인 퀴크나 전자의 질량이 아주 작아서 이들끼리의 중력이 다른 3가지 힘보다 워낙 약하기 때문이죠. 그런데, 이들 기본단위가 빛속도에 가깝게 아주 빨리 움직이거나 사잇거리가 현재의 분해능(resolving power)보다 엄청나게 작은 영역을 고려하면 이야기는 달라집니다. 중력크기는 거리를 줄이면 사잇거리의 제곱에 반비례하여 급격히 커지지만, 다른 3가지 힘은 거리를 더 줄여보아도 힘의 세기가 별로 변하지 않습니다. 따라서 극미의 세계에서 점점 더 거리를 좁혀가면 언젠가는 중력이 다른 기본힘들보다 훨씬 더 강해져 가장 중요한 힘이 되겠죠. 얼마나 짧은 거리에서 이런 반전이 나타날까요? 계산에 따르면 양성자 크기의 100경분의 1정도, 정말로 짧은 거리입니다. 나도 ‘경’이라는 단위가 있다는 것은 학교에서 배웠지만, 실제로 써 본 적은 거의 없습니다. 그렇지만 에너지는 아주 높아 당신의 그 유명한 $E = Mc^2$ 공식으로 환산하여 질량을 재어보면 약 백만분의 1 그램 정도입니다. ‘경’은 ‘만’보다는 ‘엄청나게’ 큰 숫자단위입니다. 즉, 크기에 비하여 질량은 엄청 높다고 하겠죠. 이 에너지를 물리학자들은 ‘플랑크(Planck) 에너지’라고 부릅니다. 지금까지 논의를 정리해보면 미시세계와 거시세계를 통틀어 중력이 다른 힘보다 중요해지는 영역은 아주 작은 미시세계와 아주 큰 거시세계입니다. 광활한 우주의 끝이나 원자내부의 너무나도 작은 부분은 우리의 감성이 가질수 있는 직관의 극치를 요구하는 영역 아닙니까? 중력이 이런 영역에서 중요해진다는 사실이 너무나도 흥미롭게 느껴진 적이 한두번이 아니었습니다.

원자 혹은 그보다 작은 미시세계를 지배하는 물리법칙은 양자법칙을 따라야 합니다. 양자현상이란 입자(particle)와 파동(wave)의 성질이 같아져 구별할 수 없음을 뜻합니다. 거시세계에서는 입자와 파동이 엄연히 구별되지만 미시세계에서는 동일하다는 것이지요. 이 두 가지 특성을 연결시키는 물리상수를 플랑크 양

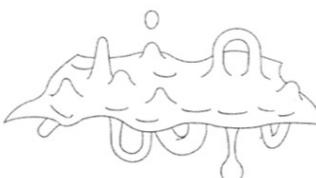
자상수(\hbar)라고 부릅니다. 아, 당신은 이런 양자법칙을 전혀 믿지 않아요. “신은 주사위를 던지지 않는다”라고 강변하면서, 양자법칙을 정립하였던 보어(Bohr)와 벌인 여러번의 논쟁들을 익히 잘 알고 있습니다. 그렇지만, 상황은 당신에게 그리 유리해보이지 않는군요. 20세기 후반 이후 지금까지 놀랍게 발달한 문명들은 바로 이 양자법칙 때문에 가능해졌으니까요. 지금 내가 MP3로 노래를 들으면서 이 편지를 쓰고있는 노트북 내부에는 수많은 반도체들이 양자법칙에 따라서 작동하고 있습니다. 그 외에도 X선 촬영, 양전자 단층촬영기, 반도체, 도난방지기 등 양자현상을 이용한 기술^{*}은 주변에서 많이 찾을 수 있습니다.

당신이 태계한 이후, 1950년대 후반부터 극미세계에 작용하는 중력현상을 양자법칙에 따라 설명할 수 있는지 연구하기 시작하였습니다. 미시세계의 전자기힘을 설명하는 양자전기역학(quantum electrodynamics)을 훌륭하게 완성시킨 이후 [1964년 노벨물리학상 수상], 이에 고무된 물리학자들은 당신의 일반상대성이론을 양자법칙과 결합시켜 미시세계에서의 중력원리를 설명하는 양자중력(quantum gravity) 이론을 완성시키고자 시도하였답니다.

그 결과는 참담한 실패였습니다. 전자기힘과는 달리, 중력의 경우, 일반상대론의 법칙들과 양자현상의 법칙들이 서로 수학적 모순을 일으켜 공존할 수 없음을 알게되었기 때문이지요. 그 이유는 사실 쉽게 이해할 수 있답니다. 시공간이 질량값에 따라 구부러지는 일반상대론의 법칙이 극미의 세계에도 적용된다고 가정하면, 짧은 거리로 갈수록 시공간의 요동은 점점 더 커집니다. 왜냐하면 당신과 친분이 깊은 드브로이(de Broglie), 하이젠베그(Heisenberg)가 완성한 양자법칙인 불확정성원리(uncertainty principle)에 따르면 더 짧은 거리는 더 높은 에너지에 해당하고 $E = Mc^2$ 공식으로부터 더 무거운 질량에 해당하여, 시공간이 더욱 구부러지기 때문이죠. 더 짧은 거리에서는 더욱 높은 에너지, 더욱 무거운 질량에 해당하여 결국 거리를 0으로 보내면 무한대의 에너지, 무한대



*양자현상을 이용한 기술의 사용 –
반도체 / 자기부상열차 / MRI / 영사기



** 양자요동으로 심하게 찌그러진 시공간

의 질량에 해당합니다. 그런데, 바로 당신의 일반상대성이론에 따르면 이 경우, 시공간은 구부러짐이 무한대로 날뛰며 요동할 것입니다. 무한히 구부러진 시공간^{**}은 당신의 일반상대성이론에서 사용되는 수학적 방법이 적용될 수 있는 영역을 벗어나는 시공간입니다. 즉, 당신의 일반상대성이론이 극미의 미시세계에서는 틀리게 되는 것이지요.

거시세계에서는 훌륭히 잘 성립하는 당신의 일반상대론이 미시세계에서는 양자원리와 정면배치되어 틀린 이론이라는 사실은 무엇인가 미시세계의 중력을 우리가 잘못 이해하고 있음을 보여주는 것입니다. 그래서 1950년대 이후, 물리학의 가장 중요한 미해결문제 중 하나는 옳은 양자중력이론이 무엇인지 찾는 문제였습니다. 이 문제는 너무나도 어려워 무수히 많은 물리학자들이 도전해 보았으나 번번히 모두 참담한 실패만 맛보았습니다.

4. 끈이론의 출현



*끈이론 (string theory)
아이작타인의 ‘일반상대성이론’보다 우수한 미시세계 중력이론 발견(1984) ⇒ 작은 크기의 단위는 점이 아니라 끈이다.

답보상태에 놓여있던 궁극적인 양자중력이론을 찾는 문제에 극적인 해결을 제시한 이론이 바로 ‘끈이론’(string theory)^{*}이었습니다. 다양한 원자핵들을 설명하기 위하여 처음 도입되었던 끈이론은 1974년 잠깐 유망한 양자중력이론으로 제안되었습니다. 그러나, 이 이론의 구조를 제대로 알고있지 못하였던 이유로 10여년을 더 기다려야 했습니다. 주요이론구조가 밝혀진 후 1984년에 극적으로 대두된 끈이론은 양자법칙과 미시세계의 중력을 모순없이 통합하였을 뿐 아니라, 부수효과로 미시세계의 나머지 세가지 힘인 전자기힘, 약한힘 그리고 강한힘들을 중력과 함께 통합된 하나의 원리로 간결히 묶을 수 있음을 보여주었습니다. 정말 놀라운 결과이지요. 그래서 끈이론을 우주만물이론(Theory of Everything)이라고 부르기도 합니다. 도대체 끈이론이 무엇인데 이렇듯 중력의 문제점을 해결할 뿐 아니라, 네가지 기본힘들을 통합할 수 있는 것

인지 설명드리겠습니다.

끈이론의 출발점을 두가지로 압축한다면 다음과 같습니다. 첫째, 모든 자연의 기본단위는 0차원의 점이 아니라 고무밴드와 같이 1차원의 선이라는 것이죠. 물론 지금까지 밝혀진 쿼크나 전자 등 미시세계의 기본단위는 이제 모두 끈으로부터 설명할 수 있어야겠죠. 이는 기타줄에 비유하여 보면 쉽게 이해할 수 있답니다. 기타줄은 연주자가 어떤 코드를 잡고 텅기느냐에 따라 여러 가지 다양한 음높이의 소리를 만듭니다. 음높이들을 하나하나 구별하기 위하여 ‘도레미파솔라시도’와 같이 계명을 이름으로 붙여놓았죠. ‘도’의 음높이는 기타줄이 특별한 모양으로 진동할 때 나는 소리이죠. 그래서 기타줄의 진동모양만 보아도 분명 ‘도’는 어떤 다른 음높이와 구별될 수 있습니다. 끈이론의 방법 역시 마찬가지입니다. 끈을 고리모양의 고무줄이라고 생각해보세요. 기타줄과 마찬가지로 수많은 모양으로 진동하겠죠. 놀랍게도 각각 다른 진동은 전자, 쿼크, 빛, W, Z, 중력자 등과 질량이나 전기전하, 스피ن(spin) 등 여러 가지 성질들이 똑같음을 밝힐 수 있었습니다. 전자나 쿼크는 현재의 분해능 범위안에서는 점이며 크기가 없으므로 끈의 직경 역시 아주 작아야 하겠죠. 사실 직경은 엄청나게 작아서 약 10조개의 끈을 연결한 것들을 다시 약 10조개 합쳐 놓아야 머리카락 하나 정도되는 굵기를 만들 수 있을 정도입니다. 양성자로는 천만개를 다시 천만번 쌓으면 같은 굵기가 되는 것에 비하면 끈의 직경이 얼마나 작은지 알 수 있겠죠.

끈의 크기는 끈의 직경 정도입니다. 따라서 미시세계에서 기본단위를 점이 아니라 끈으로 취급하면 끈 사이의 거리를 직경보다 작게 만들 수 없겠죠. 바로 이런 특성 때문에 앞서 설명했던 양자중력의 문제 즉 에너지와 질량이 무한히 커지는 문제를 피할 수 있답니다. 참으로 간단하면서도 놀라운 착안아닙니까? 중력의 세기는 기껏해봐야 거리가 끈의 직경 정도에서의 값이고 따라서 유한하므로, 끈이 가지는 에너지와 질량 역시 항상 유한하다는 놀라운 결론에 도달합니다. 또한 끈이론의 이런 특성은 앞으로 미래에 기술문명이 발달하여 무한히 높은 해상도의 현미경장치를 만든다 하여도 끈의 직경이하의 거리에서 시공간의 구부러짐을 기껏해보아야 드문드문 보여줄 뿐임을 시사합니다. 끈이론이 가지는 또 다른 놀라운 특성은 시공간의 차원이 10차원, 즉 9차원의 공간과 1차원의 시간으로 결정된다는 점입니다.

끈은 당신의 특수상대성이론에 따라 항상 빛속도로 운동합니다. 이 운동을 조사해보면 고무밴드와 같이 닫힌끈에는 항상 회전스핀값이 2이고 질량은 0인 특

성을 가지는 진동상태가 존재함을 알 수 있습니다. 이는 다름아닌 중력힘의 전달단위 즉 ‘중력입자’(graviton)가 가지는 특성이지요. 같은 방법으로 구두끈과 같은 열린끈에는 항상 회전스핀값이 1이고 질량이 0인 특성을 가지는 진동상태가 존재함을 알 수 있습니다. 이들은 나머지 3가지 힘의 전달단위인 빛입자, 부착입자, W, Z입자들이 가지는 특성입니다. 사실 열린끈과 닫힌끈은 별개의 것이 아닙니다. 닫힌끈들은 서로 만나 부딪히면서 결합과 분리를 반복합니다. 가장 간단한 과정은 끈의 한 지점이 잘라져 닫힌끈이 열린끈으로 바뀌는 과정이지요. 열린끈은 다시 두 끝점이 만나 결합하여 닫힌끈으로 바뀔 수 있습니다. 혹은 닫힌끈 두개가 한점에서 접촉하여 닫힌끈 하나로 바뀌는 과정도 있습니다. 이런 여러과정들이 바로 끈의 입장에서 기본상호작용이겠지요. 왜 끈이론이 ‘우주만물의 법칙’이라고 불리는지 납득이 되시지 않습니까?

그런데 알쏭달쏭한 문제가 생겼습니다. 1985년에, 물리학자들은 끈이론은 모두 다섯 종류가 있음을 발견하였답니다. 끈이론의 특성을 개선하기 위하여 보즈(Bose)단위입자와 페르미(Fermi)기본입자들을 서로 맞바꾸는 교환대칭 특성을 가지도록 요구하면 5가지 끈이론들(열린끈이론, 두가지 형태의 닫힌끈이론들, 두가지 형태의 복합끈이론들)이 가능하다는 것을 알게되었습니다. 각각의 끈이론은 모두 모순이 없는 완벽한 이론이며 이중 어떤 것이 다른 것보다 더 우수한 이론이라고 판가름할 근거는 전혀 없었습니다. 끈이론이 정말로 궁극적인 우주만물의 법칙(Theory of Everything)이라면 도대체 어떻게 하나로 결정되지않고 5가지 다른 법칙들이 가능하단 말입니까? 당신의 어귀를 인용하자면 “신은 5가지 자연법칙을 만들지 않는다”라고 하겠지요.

6. 끈이론의 눈부신 발전과 M-이론

1990년대에 이르러 끈이론학자들은 5가지의 끈이론이 서로 다른 이론이 아니고 사실 모두 연결되어있음을 밝혀내게 되었습니다. 이 실마리의 시발점은 끈이론을 양자법칙에 따라 연구하기 시작하면서 제시되었는데, 제가 1990년 처음 제창한 끈이론의 S-양면성(兩面性)을 확장, 더욱 깊이 연구하면서 시작되었습니다. S-양면성이란 끈사이의 결합힘이 약한 경우와 강한 경우가 똑같아 구별할 수 없다는 기상천외한 특성입니다. 예를 들면 약하게 충돌하는 열린끈은 강

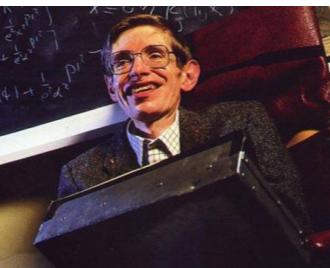
하게 충돌하는 복합끈과 같다는 것이지요. 끈이론의 또 다른 특성은 T-양면성(兩面性)입니다. 즉, 끈의 에너지를 높이는 두 가지 방법인 진동과 길이 늘임이 똑같아 구별할 수 없다는 특성입니다. 1990년대 중반 S-양면성과 T-양면성을 동시에 결합시키면 5가지 끈이론들이 서로 동등하다는 놀라운 사실을 발견할 수 있습니다. 이렇게 5가지 끈이론을 모두 하나로 통합하는 이론을 M-이론이라고 합니다. 놀랍게도 이런 통합과정이 이루어지려면, 끈의 양자효과를 나타내는 플랑크의 양자상수(\hbar)가 그냥 숫자가 아니라 새롭게 나타나는 1차원 공간의 범위로 표현된다는 발견입니다. 이 새로운 차원은 끈이 운동하는 10차원과 합해져 새로이 11차원의 시공간에서만 M-이론이 존재합니다. 바로 끈이론이 미시세계의 기본법칙인 양자원리와 시공간이라는 전혀 별개로 인식되던 종전의 개념을 바꾸어 모두 통합된다는 새로운 관점을 제시한 것이지요.

시공간의 차원은 거시세계는 분명 4차원이며 미시세계 역시 쿼크, 전자의 범위까지 분명 4차원입니다. 그런데 극미의 세계에서 끈이론은 10차원의 시공간을 가지고 있습니다. 어떻게 10차원에서 4차원으로 줄일 수 있을까요? 끈이론학자들이 고안한 한가지 방법은 10차원중 6차원 공간의 크기를 엄청나게 작게 줄이는 것입니다. 당연히 쿼크나 전자보다 훨씬 작게 만들어야 하겠죠. 6차원 공간의 모양이나 비틀림에 따라 4차원의 물리현상이 바뀌므로, 아무렇게나 택할 것이 아니라, 아주 특별한 6차원 공간을 선택해야 합니다. 다행히 요구하는 조건들을 충족시키는 6차원 공간의 종류는 수학자들에 의하여 분류되어 있어서 이런 방법을 통하여 4차원 시공간을 구성할 수 있겠습니다.

최근 끈이론학자들은 이와는 다른 방법으로 4차원 시공간을 구성하는 방법을 고안하였습니다. 거시세계의 중력이 4차원에서 작용한다는 근거는 사실 1밀리미터 이상의 거리에서만 실험으로 확인되었습니다. 거꾸로 말하면, 1밀리미터 이하의 거리에서는 시공간이 4차원이 아니라 다른 차원이어도 무방하다는 뜻이지요. 물론 중력을 제외한 나머지 3가지 힘은 극미의 세계까지 항상 4차원임이 실험으로 정밀하게 확인되었습니다. 놀랍게도 끈이론에서는, 이런 실험결과와 같이, 중력은 10차원에서 나머지 힘들은 4차원에서 작용하도록 만들 수 있습니다. 그 방법은 닫힌끈은 10차원에서 운동하도록 허용하되 열린끈의 두 끝은 10차원 중 4차원에서만 움직이도록 끈이론을 바꾸는 것입니다. 닫힌끈에서는 10차원 중

력을 열린끈에서는 4차원의 강한힘, 약한힘, 전자기힘을 만드는 것 이지요. 이런 관점에서 보면 우리가 살고있는 4차원 우주는 사실은 10차원안에 놓여있는 구속면이라고 해석할 수 있겠습니다. 주변에서 관찰할 수 있는 모든 자연의 구조물들은 강한힘, 약한힘, 전자기힘들로 뭉친 것들입니다. 이에 비하여 중력은 4차원에만 국한된 것이 아니라 10차원에 퍼져있으며 힘이 미약하여 구조물들이 생성되는 과정 자체에는 특별히 영향을 미치지 못합니다. 따라서 전통적인 우주관과는 달리 끈이론의 새로운 우주관에 따르자면 우주는 10차원이지만, 인간은 4차원에 구속되어 살고 있어서 중력이외의 모든 힘은 3차원의 법칙으로 지배되고 오직 중력을 통해서만 10차원임을 감지할 수 있다고 보는 것이지요. 새로운 우주관은 인간으로 하여금 자연에 대하여 다시 한번 경외감을 느끼도록 만듭니다. 우리 인간은 10차원 안에 떠돌아 다니는 4차원의 시공간 부분에 구속되어 살고 있는 미미한 존재에 불과하니까요.

7. 호킹*의 블랙홀, 홀로그래피 원리



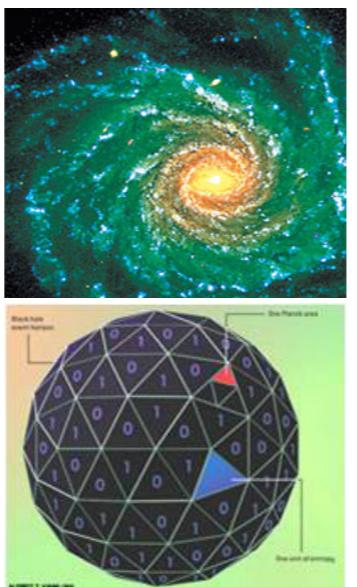
* 스티븐 호킹 (Stephen William Hawking)
영국의 우주물리학자. '블랙홀은 검은 것이 아니라 빛보다 빠른 속도의 입자를 방출하며 뜨거운 물체처럼 빛을 발한다'는 학설을 내놓았으며, '특이점 정리', '블랙홀 증발', '양자우주론' 등 현대물리학에 3개의 혁명적 이론을 제시하였고, '양자중력론' 연구에 몰두하고 있다.

박사님이 그렇게 싫어하시던 양자원리가 시공간과 마찬가지로 1차원의 공간을 구성한다는 것을 말씀드렸습니다. 그래서, 양자영역에서 끈이론은 10차원이 아니라 11차원처럼 보이며, 이 이론을 M-이론이라고 부르고 있죠. 그런데, 저희가 끈이론을 연구하면서 더욱 놀라운 현상을 발견하게 되었습니다. 바로 '홀로그래피 원리'입니다. 박사님, 신용카드를 꺼내보시죠. 뒷면에 보시면 은박으로 반짝거리는 네모난 칸이 보이시죠? 그곳에 빛을 비추면 신기하게도 3차원 영상이 보입니다. 신용카드는 2차원인데 말이죠. 과학관에 가시면 더 근사한 홀로그램을 보실 수 있답니다. 분명 사람이나 물체의 모습이 보이는데 손으로 만지면 아무것도 없는, 마치 허깨비 같은 형상이죠. 이 홀로그램 현상에서 가장 중요한 점은 실체의 정보는 2차원에 숨어있는데, 보이는 현상은 3차원에 있다는 것입니다.

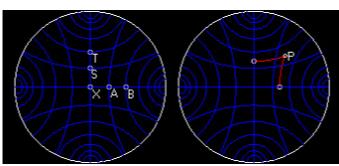
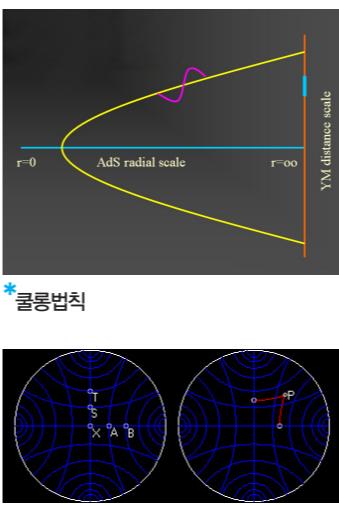
끈이론이 고전적으로는 10차원인데, 양자요동으로 11차원의 M-이론으로 기술된다는 착안도 이 훌로그램과 너무나도 비슷하죠? 양자요동의 세기는 저나 박사님이 마음대로 정할 수 있는 것은 아니고, 모두 끈이론 내에서 자발적으로 정해지는 것 입니다. 따라서, 상황에 따라 어떤 경우에는 10차원 어떤 경우에는 11차원으로 우리한테 보여지는 것 입니다.

이 뿐만 아닙니다. 박사님의 이론에서 나타나는 블랙홀 잘 아시죠? 물질들이 중력으로 서로 잡아당기다 마지막에 모두 한점에 모여서 만드는 엄청난 시공간의 휘어진 구조가 블랙홀이죠. 박사님께서 돌아가신 후, 블랙홀에 대하여 엄청난 발전이 이루어졌습니다. 특히, 영국의 호킹박사가 발전을 주도하셨는데요, 그 중 가장 현저한 발견은 블랙홀이 모든 빛과 물체를 빨아들여서 깜깜하게 보인다는 박사님의 주장은 고전적인 경우에만 맞는 이야기이고, 양자요동을 고려하면 블랙홀이 마치 뜨거운 용광로같이 빛을 방출하고 있다는 것입니다. 용광로와 마찬가지로 블랙홀도 뜨겁게 불타고 있으므로, 열역학의 법칙들은 만족할 것입니다. 그런데, 이게 문제를 발생하게 되었습니다. 블랙홀은 분명 3차원 공간에 퍼져있는 물질들이 뭉쳐서 만들어진 결과인데, 신기하게도 호킹박사의 계산결과에 따르면 마치 2차원 공간의 물질처럼 행동한다는 것이죠. 더군다나 이 2차원은 다른 아닌 블랙홀의 지평선(horizon) 그 자체입니다. 왜 3차원 중력의 물체가 2차원 물질들처럼 행동할까요? 70년대 초반 이후, 이 질문은 중력과 블랙홀 전문가들을 괴롭혀왔습니다만, 어느 누구도 해답을 얻지 못하였습니다. 심지어, 호킹박사는 이로부터 세상의 모든 물리법칙이 틀려야만 한다는 확장한 주장까지 내놓게 되었습니다. 블랙홀이 정보를 없앤다는 주장과 함께 말이죠. 이 문제가 얼마나 사람들을 괴롭혀 왔는지, 박사님도 짐작하시겠죠?

그런데, 이 문제의 해답이 끈이론에서 발견되었습니다. 박사님 이론의 중요한 특성인 ‘등가원리’(equivalence principle)에 따르면



그런데... 블랙홀은... 몇차원??
모든 기본 자유도는 블랙홀 표면(2차원)에 살고 있다. 3차원 현상은 훌로그램의 '영상'이다.



* 쿠лон법칙
** 훌로그래피의 원리
밀안장과 같이 (-) 곡률 D차원 공간에서 발생하는 물리현상은 (D-1)차원에서 발생하는 물리현상의 '훌로그램' 허상으로 이해가능

중력이란 아무것도 아니고 관찰하는 사람이 가속운동을 하기 때문에 나타나는 현상일 뿐이라고 하셨죠? 마치 엘리베이터에 있는 사람이 바라본 바깥 풍경처럼 말이죠. 끈이론에 따르면 중력, 그 중력으로 만들어진 블랙홀도 마찬가지입니다. 끈이론은 열린끈과 닫힌끈이 있는데, 열린끈은 물질과 전자기힘, 닫힌끈은 중력을 나타내고 있다고 앞서 설명드렸습니다. 그런데, 열린끈이 있으면 그 양쪽 끝을 서로 붙여서 닫힌끈을 만들 수 있으므로, 닫힌끈을 열린끈과 별개로 취급할 필요가 없겠습니다. 붙느냐, 떨어지느냐는 양자요동의 세기로 결정됩니다. 양자요동이 커지면 열린끈이 붙어서 닫힌끈으로 행동하는 것이 아주 쉽겠죠. 이로부터, 물질과 전자기힘의 현상은 중력 현상은 서로 독립적인 것이 아니라, 서로 밀접하게 연결되어 동등한 것이라는 결론을 낼 수 있습니다. 따라서, 야누스의 형상처럼 하나의 대상이 보는 관점에 따라서 물질과 전자기힘으로, 혹은 중력으로 우리에게 보인다는 것입니다. 그런데, 아까 끈이론에서는 양자요동이 1차원의 공간을 구성한다고 설명드렸죠? 이로부터, 끈이론에서는 물질과 전자기힘이 1차원 더 높은 공간의 중력으로 구현된다는 결론을 이끌어 낼 수 있답니다! 정말로 놀라운 현상이죠?

이를 극명하게 보여주는 예는 제가 10년 전 발표하여 커다란 반향을 일으켰던 연구결과로, 두 전기전하가 3차원에서 서로 잡아당기는 쿠лон(Coulomb) 법칙*이 사실은 4차원에서 중력이 서로 잡아당기는 만유인력법칙과 동일하다는 것을 끈이론을 통하여 간결하게 보일 수 있었습니다. 이 뿐만 아닙니다. 그 이후, 많은 물리학자들이 다양한 현상들을 중력의 현상으로 이해할 수 있음을 보일 수 있었고, 그래서 지금은 끈이론에서, 물질–전자기힘과 중력 혹은 열린끈과 닫힌끈이 서로 동등함을 ‘훌로그래피 원리’(holographic principle)**라고 부르게 되었습니다.

이 원리는 참으로 놀랍고 충격적입니다. 이 원리에 따르면 중력은 세상을 구성하는 기본힘이 아니고 훌로그램의 허깨비 영상처럼 다

른 물질과 전자기힘으로부터 만들어 낼 수 있는 가짜힘이라는 것 입니다. 블랙홀도 마찬가지입니다. 중력으로 만들어진 이 블랙홀도 사실은 1차원 낮은 세상에서 중력이 포함되지 않은 물질과 전자기힘으로 완벽하게 이해할 수 있다는 것을 발견하게 되었습니다. 박사님, 놀랍지 않으신가요?

그 뿐 아닙니다. 우리가 살고 있는 이 광활한 우주 역시 중력으로부터 만들어진 결과입니다. 그 안에 살고있는 은하, 별, 지구 그리고 모든 삼라만상이 그렇습니다. 그런데 이 중력이 알짜가 아니고 허깨비라는 것이 끈이론의 홀로그래피 원리의 주장입니다. 은하가 살고있는 4차원 시공간도 그렇고요. 실제(reality)는 3차원 시공간에 살고있는 다른 물질과 다른 전자기힘이라는 것입니다. 즉, 우리는 모두 허깨비이고 허깨비 지구 위에서 허깨비를 따라서 아등바등 살고 있을 뿐입니다. 박사님께서 이런 연구결과에도 놀라지 않으신다면 정말 담력이 대단하신 분입니다.

현재 저를 포함하여 전세계 끈이론 학자들은 이 홀로그래피 원리의 현상이 ‘왜’ 나타나는 것인지 이해하기 위하여 모든 심혈을 기울이고 있습니다. 조만간, 중력의 실제와 그로부터 블랙홀의 비밀, 우주의 비밀들을 모두 밝혀낼 수 있다고 생각하면 흥분되는 마음을 감출 수 없는 것이 사실입니다.

8. 우주의 암흑물질과 암흑에너지

끈이론은 지난 30년동안 그야말로 충격적인 발전을 거듭하여 왔습니다. 전세계 젊은 학자들이 이 이론의 구조에 매료되어 우주만물의 법칙을 완성하는데 동참하고 있습니다. 특히 내부모순으로 가득찬 당신의 일반상대론을 대치하는 끈이론의 특성은 앞으로도 계속 충격적인 발전을 거듭 우리에게 보여줄 것이라고 확신합니다. 물론 아직 완벽하게 완성하여야 할 부분이 도처에 남아있습니다. 특히, 강한 상호작용 영역의 물리현상은 흥미로운 비밀들이 많이 숨어있는 부분입니다. 끈이론을 완벽하게 완성하는 순간, 인간은 역사 아래 꿈꾸어왔던 우주만물의 법칙(Theory of Everything)을 구현하게 되는 것 아닙니까?

앞으로 남은 부분은 우주만물의 법칙(Theory of Everything)으로서 우주의 기원과 지금까지의 진화과정을 설명하는 작업입니다. 우주가 대폭발 이후 팽창을 거듭하여 130억년 이후 현재에 이르렀음을 잘 알려져 있습니다. 그러나, 우주의 나이 1초 이전의 역사는 아직 완벽하게 밝혀진 바 없습니다. 특히 우주탄생의 비밀 —— 도대체 우주가 어떻게 생겨났는지, 우주가 태어나기 이전은 무엇이었는지 —— 은 앞으로 21세기의 물리학이 풀어야 할 가장 중요한 숙제입니다. 우주의 여러 신호 중 가장 오래전에 만들어진 신호는 중력파동 즉 ‘중력입자’ 자신들의 운동입니다. 중력파동은 우주가 극히 미시세계와 엇비슷한 크기이었을 때 양자원리에 따라 시공간의 양자에너지가 요동을 만들어내고 이 요동이 퍼져서 거대한 현재의 우주 곳곳에 퍼져있는 신호입니다. 그런데, 이 중력파동을 확인하는 것은 극히 까다로운 작업입니다. 왜냐하면 극미의 세계에서 발생된 신호를 광활한 우주의 크기로 늘여 퍼뜨리면서 신호세기가 엄청나게 줄어들기 때문이죠. 따라서, 중력파동을 확인하려면, 강력한 성능과 분해능을 가진 망원경이 필요합니다. 현재, 전세계에서는 미약한 중력파동을 검출하려는 거대한 우주망원경을 건설 중이며, 이는 초기우주가 만들어낸 특이한 중력신호를 탐색하는 가장 적합한 실험을 제공할 것입니다. 이러한 연구에는 물리학자들 뿐 아니라, 관심 있는 일반인 누구라도 인터넷에 연결된 컴퓨터를 사용하여 Einstein@home 프로젝트에 참여할 수 있게 되었습니다. (<http://www.physics2005.org>) 물론 아인슈타인 박사님도 참여하실 수 있습니다. 아, 먼저 컴퓨터를 빨리 배우셔야 겠군요. 뭐, 제가 걱정을 안해도 뭐 워낙 빨리 배우시겠지만요. 컴퓨터 장만하시면 편지대신 이메일로 연락하면 더 좋겠군요. 제 이메일 주소는 sjrey@snu.ac.kr입니다. 그럼, 그때까지....



제2강

꿈의 컴퓨터 — 양자컴퓨터



우주와 세포 universe & cell



안도열 | 서울시립대 전자전기컴퓨터공학부 교수

서울대 전기공학과와 동대학원 졸업 후 미국 일리노이주립대 아바나 삼페인에서 전자엔지니어링 박사학위 취득. 1998~9년 미국 IBM 토마스왓슨연구소 연구원을 거치면서 물리학과 전자공학을 연결하는 미래형 컴퓨터인 양자컴퓨터 연구에 집중했다. 2003년 SF역사소설<임페리얼 코리아>를 발표하기도 했으며, 2005년도 미국전기·전자공학회인 IEEE의 2005년도 펠로(석좌회원)에 선정됐다. 현재 양자정보처리연구단 단장으로 양자컴퓨터와 반도체 산업을 결합시킨 연구를 선도하고 있다.

양자컴퓨터와 양자정보처리에 관하여

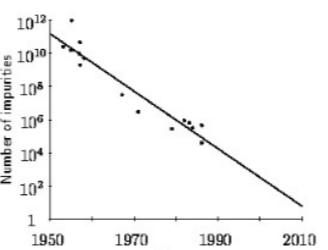
서울시립대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수 안도열

1. 서론

미래는 대용량 초고속 정보처리 기술에 바탕을 둔 정보화 사회가 될 것이라는 것은 주지의 사실이다. 이러한 추세를 잘 나타내어 주는 현상이 인터넷 및 가상현실에 기초한 멀티미디어의 확산이다. 이러한 정보처리기술의 근간은 컴퓨터와 통신이며 이들은 대규모 집적회로에 바탕을 두고 있다. 더 많은 정보를 더 빨리 처리하기 위하여 집적회로는 점점 더 소형화를 이루고 있으며, 인텔의 설립자인 Gordon Moore에 의하면 집적회로에 들어가는 트랜지스터의 수는 약 2년마다 배로 증가한다는 Moore의 법칙을 말하였다[1]. 이 법칙에 따르면 약 2020년경에는 칩의 고집적화로 양자현상을 피할 수 없게 된다. 또한 Robert Kyeses [2]는 한 비트의 정보를 저장하는 데 필요한 전자의 수를 시간의 흐름에 대하여 분석하였으며 그 결과는 〈그림 1〉과 같다.

〈그림 1〉은 bipolar 트랜지스터의 베이스에 도핑된 불순물의 숫자와 해당연도를 점찍은 것으로 한 개의 정보를 저장하기 위해 필요한 전자의 갯수를 보여준다고 생각할 수 있다.

〈그림 1〉에 의하면 다음 20년 내에 1개의 원자에 1개의 비트를 저장할 수 있는 수준에 도달할 수 있으리라 예상할 수 있다. 위에서 열거한 두 가지 경향을 보면 집적회로를 구성하는 소자들에서 양자현상은 불가피 할 것으로 예상되며 오히려 이러한 양자현상을



〈그림 1〉

잘 이용하여 연산이나 정보전송에 이용하기 위한 연구가 바람직 할 것으로 판단된다.

이러한 예측에 따라 비교적 최근에 양자역학을 이용한 정보처리, 특히 양자컴퓨터[3,4]에 대한 관심이 증대되고 있다. 양자컴퓨터는 기존의 컴퓨터로는 풀기 어려운 계산들을 비교적 빠른 시간내에 풀 수 있을 것으로 예측되고 있다. 여기서 말하는 시간이란 계산이 진행되는 동안을 말하는데 기존의 컴퓨터로는 이 우주가 끝날 때까지 계산을 해야만이 풀리는 문제도 있을 수 있다. 양자컴퓨터는 이런 어려운 문제들에 많은 희망을 주고 있다. 많은 계산과정을 필요로 하는 문제의 한 예로 소인수분해 문제 [5]가 있다. 소인수분해가 중요한 이유는 인터넷 등에 많이 쓰이고 있는 암호체계가 바로 이 소인수 분해에 기초를 두고 있기 때문이다. 현재 잘 알려진 소인수분해 알고리즘은 $O(\exp[(64/9)1/3(\ln \ln N)^{2/3}])$ 의 단계를 필요로 한다. 그러므로 이 알고리즘은 입력크기인 $\log N$ 의 지수승에 비례해서 많은 시간이 걸린다. 예를 들면 1994년 RSA129로 알려진 129 digit number를 소인수분해 하는데에는 이 알고리즘을 이용하여 세계에 있는 1600여 대의 워크스테이션을 병렬연결하여 8개월이 걸렸다. 250 digit라면 800,000년이 걸릴 것이며, 1000 digit라면 10^{25} 년이 걸릴 것이다. 이것은 우주의 나이보다 더 많은 시간이다. 큰 숫자에 대한 소인수분해의 어려움은 공개키 방식의 암호화에 있어서 필수적인 것이었다. 은행에서 이용하는 암호코드는 약 250 digit의 소인수분해에 의존하고 있다.

반면에 양자컴퓨터에서 사용할 수 있는 소인수분해 알고리즘의 경우는 오직 $O(\log N^{2+X})$ 의 단계를 필요로 한다. 이것은 대략 입력크기의 4승 정도가 된다. 따라서 1000 digits를 소인수 분해하는데 단지 수만 단계만 필요하며 충분히 빠른 (Pentium PC 정도의 속도를 갖는) 양자컴퓨터가 존재한다면 수시간내에 풀릴 수 있는 문제가 된다. 이것은 소인수분해에 근거를 둔 공개키 암호시스템 (public key crypto system)이 더 이상 유효하지 않을 수도 있음을 예측하게 한다.

2. 양자컴퓨터의 기초

Quantum computation은 양자역학의 중첩의 원리에 의해 수행된다[6]. 간단한

quantum system은 스핀 1/2의 입자이다. 이것의 basis는 스핀다운 $| \downarrow \rangle$ 과 스핀업 $| \uparrow \rangle$ 은 각각 $| 0 \rangle$ 와 $| 1 \rangle$ 로 재표현할 수 있다. 그러한 입자의 상태는 다음과 같이 기술 될 수 있다.

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

각 계수의 제곱인 $|\alpha|^2$ 와 $|\beta|^2$ 는 입자가 그에 해당하는 상태에 있을 확률을 말한다. 기존의 컴퓨터의 1비트인 0와 1은 1개의 값(value)을 나타낸다. quantum computer에서 1비트에 대응하는 것은 ‘quantum bit’(‘qubit’)이며 이것은 $| 0 \rangle$ 과 $| 1 \rangle$ 의 중첩된 상태이다. 1 byte는 8개나 16개의 qubit들이 모여 이루어진다. 이것을 스핀 1/2인 입자가 k개 있을때로 일반화 시키면 2^k 의 가능한 bit-string에 대응하는 2^k 개의 basis states가 존재하게 된다. 이 basis vector들은 Hilbert space를 전개하게 된다. k가 증가함에 따라 Hilber space의 차원은 exponential하게 증가한다. 어떤 의미에서보면 quantum computation은 매우 작은 시스템이면서도 그안에 존재하는 바로 이 무한히 큰 사이즈를 이용하는 것이다. quantum computer는 중첩상태인 byte에 unitary operation을 수행하여 결과(output)를 만들어낸다. unitary operation은 중첩된 states에 작동한다는 것을 제외하면 기존의 디지털컴퓨터의 작동과 비슷하다. 한 예로 8개의 qubit로 된 1byte를 생각하자. 각각의 qubit는 $\frac{1}{\sqrt{2}}(| 0 \rangle + | 1 \rangle)$ 상태로 있다고하자. 각각의 qubit에 대한 측정(measurement)결과는 $| 0 \rangle$ 또는 $| 1 \rangle$ 이 각각 확률 0.5로 나타날 수 있다. 8개의 qubit로 구성된 이 레지스터는 매번 측정시 측정결과가 0부터 255까지 같은 확률로 나올 수 있다. 따라서 완벽한 random number register라고 할 수 있다. 레지스터는 0부터 255까지 모든 숫자를 한 번에 나타낼 수 있고 측정했을때는 단 한 개의 값이 도출된다. 이 8 bit register는 0부터 255까지 모든 숫자를 표현할 수 있으며 quantum computer는 단 한 번에 모든 숫자의 연산을 수행할 수 있다. 이것을 ‘quantum parallelism’이라한다. 부연하면 입력은 0부터 255까지의 서로 다른 수의 중첩으로 되어 있다는 것이다. quantum computer는 ‘processor’를 딱 한 번 지나면서 모든 숫자(0~255)에 대한 계산을 수행할 수 있다. 반면에 기존의 디지털 컴퓨터는 0부터 255까지 각각의 숫자를 한 번에 한 개씩 수행할 수 있으므로 양자컴퓨터에 비해 더 많은 과정을 거쳐야 함을 알 수가 있다. 한 예로, 64비트 컴퓨터의 경우 한 번에 1개의 64비트 숫자를 처리할 수 있지만 양자컴퓨터는 모든 64비트 숫자 들을 단 한번에 처리한다. 즉 2^{64} 가지의 숫자를 모두 처리한다.

이제 양자 비트를 위한 임의의 논리게이트를 어떻게 구성하는지를 생각해 보자. 우선 one bit unitary operation으로 시작하여 Controlled NOT를 구성할 수 있다. 이들의 조합만으로도 양자비트를 위한 Toffoli 게이트[7]를 만드는데 충분하다. 단 한개의 양자비트를 생각하자. 즉 벡터 $| 0 \rangle$ 과 $| 1 \rangle$ 을 고려해 보자. 그러면 2×2 matrix에 대응하는 가장 일반적인 unitary transformation은 다음과 같은 꼴이다.

$$U_\Theta \equiv \begin{pmatrix} e^{i(\delta + \sigma + \tau)\cos(\theta/2)} & e^{-i(\delta + \sigma + \tau)\sin(\theta/2)} \\ -e^{i(\delta + \sigma + \tau)\sin(\theta/2)} & e^{i(\delta + \sigma + \tau)\sin(\theta/2)} \end{pmatrix}$$

위에서 특별히 $\delta = \sigma = \tau = 0$ 으로 택하자. 이 연산자를 이용하여 우리는 다음과 같이 비트를 on off 시킬수 있다.

$$U_\pi|0\rangle = -|1\rangle, \text{ 그리고 } U_\pi|1\rangle = |0\rangle$$

위의 minus sign은 phase factor일뿐 실제 게이트들의 논리적 operation에 영향을 끼치지 않으므로 제거시켜도 상관 없다. 위의 one-bit computation을 양자회로로 도식화하면 다음과 같다.

$$| A \rangle \xrightarrow{U_\Theta} | A \rangle$$

또다른 중요한 1비트 게이트는 $U_{-\pi/2}$ 이다.

$$U_{-\pi/2}|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$$

이것은 스핀다운인 입자를 동일한 확률의 up과 down으로 투사시키는 역할을 한다. 스핀 1/2인 입자 k개가 초기상태에서 모두 스핀다운인 경우를 생각해보자. 각각의 입자마다가 이 게이트를 가한다면 길이가 k인 모든 가능한 있을 수 있는 비트열의 superposition을 얻게 된다.

$$| 0 \rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{q}} \sum_{\alpha=0}^{q-1} | \alpha \rangle$$

여기서 $q=2k$ 이다. 이 컴퓨터는 이제 0부터 $2k-1$ 까지 매우 큰 숫자의 중복상태에 있는 a 이다. 이제 한쌍의 비트열 $|\alpha;0\rangle$ 를 어떤 함수 $f(\alpha)$ 에 대한 한쌍의 $|\alpha;f(\alpha)\rangle$ 로 매핑시키는 unitary operation을 만들 수 있다고 가정하자. 그러면 중첩된 states에 작용하는 unitary operator는 다양한 입력값 α 에 대해서 $f(\alpha)$ 를 병렬로 계산해낼 수 있다.

$$\frac{1}{\sqrt{q}} \sum_{\alpha=0}^{q-1} |\alpha;0\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{q}} \sum_{\alpha=0}^{q-1} |\alpha;f(\alpha)\rangle$$

지금까지 우리는 힐버트 공간내의 단위벡터들의 중첩을 이용하여 주어진 정보를 처리하는 방법에 대하여 알아보았다. 1935년에 Einstein, Podolsky, Rosen (EPR) [8]은 entangled quantum system의 성질에 대하여 연구하던 중, 공간적으로 떨어져 있는 pair들간의 상관관계가 상대론적 인과율과 어긋나게 되는 현상을 발견하였다. 1960년대에 Bell [9]은 이 현상에 대하여 연구를 진행하여 entangled pair의 reality는 비국소현상 (nonlocal event)임을 보여주었다. 1990년대에 들어서 IBM의 Bennett 등에 의하여 이들 entangled pair의 nonlocality를 이용하면, 주어진 입자의 양자상태를 공간적으로 떨어져 있는 제3자가 재현해 낼 수 있음을 보였다 [10]. 이 현상을 소위 양자전송(quantum teleportation)이라고 부르는 데, 공상과학영화에서 보는 것처럼 실제 물체를 전송하는 것하고는 다르다. 우리는 이 양자전송현상을 이용해서 큐비트를 물리적 전송채널 없이 양자컴퓨터내의 게이트들간에 전송하는 데 사용할 수 있다. 한 예로 Alice가 임의의 상태 $|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ 를 공간적으로 떨어져 있는 Bob에게 전송하려 한다고 가정하자. Alice는 이를 위하여 entangle된 입자 2와 입자3을 준비해야 한다.

$$|\Psi_{23}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [|1\rangle \otimes |0\rangle - |0\rangle \otimes |1\rangle]$$

Alice는 이들 입자들과 본래의 입자 $|\Psi\rangle$ 를 entangle 시킨후 입자2를 보유하고 나머지 입자3을 Bob에게 보낸후, 남아있는 입자계를 측정하고 그 측정결과를 통상적인 통신방식을 이용하여 Bob에게 보낸다. Bob은 Alice의 측정결과와 입자3의 양자상태의 역변환을 거쳐서 $|\Psi\rangle$ 의 상태를 알게 된다. 이 과정에서 Alice가 갖고 있던 원래의 상태는 파괴된다.

3. 문제점

양자컴퓨터를 구현하게 위해서는 우선적으로 컴퓨터 로직을 구현할 수 있는 양자게이트와 게이트의 입력이나 결과를 저장할 수 있는 양자 레지스터의 구현이 우선적으로 필요로 한다. 그리고 이러한 양자게이트나 양자 레지스터가 완전한 구동을 하기 위해서는 주변의 노이즈로부터 완전히 차단된 상태의 환경을 만들어야 한다. 실제적인 양자컴퓨터는 주변의 노이즈로부터 완전히 차단시키는 것이 불가능하여 항상 오동작할 수 있는 요인을 안고 있다. 그래서 양자컴퓨팅에서의 여러 보정을 위한, 다양한 양자에러 보정코드(QECC) [11,12]나 Decoherence Free Subspace(DFS) [13,14]를 이용한 코딩 등 많은 이론적인 방법들이 제안이 되었다. 이러한 방법들은 한 개의 에러 free인 qubit를 구현하기 위해서는 여러 개의 qubit을 이용해야 하는 등의 주어진 resource의 효용성에 어느 정도의 문제점을 안고 있다. 또 다른 방법으로는 주어진 양자상태를 유지하는데 있어서 QECC나 DFS에 처럼 redundancy를 이용하지 않고, 양자상태에 능동적으로 rf-펄스를 가해서 decoherence를 줄이는 방법이 있다 [15]. 이것은 rf-펄스를 가한 경우의 양자레지스터의 진화연산자를 정확히 계산하여 decoherence를 일으키는 항들이 많은 수의 충분히 짧은 펄스를 가한 경우 어떻게 행동하는지 살펴봄으로써 가능하다.

한 예로 주로 양자 레지스터를 구성하는 qubit들이 노이즈를 일으키는 하나의 주변환경과 결합하고 있는 경우에 qubit의 decoherence time보다도 충분히 짧은 π -펄스를 연속적으로 가하는 경우에서 decoherence를 일으키는 mechanism을 역으로 행하는 것과 같은 효과를 얻을 수 있어서 양자상태를 온전하게 보존하는 방법이 있다. 이 방법에 의해서 양자 레지스터의 상태를 기술하는 density 연산자의 시간에 따른 진화가 다음과 같이 변형됨을 보일 수 있다.

$$\rho(t_N) = \sum_{\alpha, \beta} \rho_{\alpha\beta}(t_0) |\alpha\rangle \langle \alpha| \exp[-(S_a^z - S_b^z)^2 \Gamma_p(N, \Delta t)] \exp(i[(S_a^z)^2 - (S_b^z)^2] \varphi_p(N, \Delta t))$$

여기서 $2N$ 은 가해진 π -펄스의 수이고 Δt 는 펄스간의 간격이다. 위 결과에서 $N \rightarrow \infty, \Delta t \rightarrow 0 (N \Delta t = const)$ 의 극한에서 decoherence의 요인인 Γ_p 와 φ_p 가 사라짐을 보일 수 있다. 이 방법은 기존의 양자에러 보정방법과 비교해서 근본적으로 두 가지 다른 점이 있다: 우선은 양자정보를 보관하기 위해서 여

분의 qubit이 필요로 하지 않기 때문에 보다 효율적인 coding이 가능하고, 또한 중간과정에서 어떠한 양자측정도 하지 않기 때문에 양자계산 속도면에서도 보다 효율적인 면이 있다. 특히 하나의 양자상태 decoherence에서는 나타나지 않고 multi-qubit 상태에서만 보이는 상호작용에의 에너지 준위의 변동에 의한 Lamb–phase shift, ϕ_p 에 의한 decoherence도 효과적으로 보정이 가능하다.

그러나 위의 방법으로 양자계의 decoherence를 완전히 없애기 위해서는 수학적으로 무한히 짧은 π -펄스를 무한히 많은 수를 가해야 한다. 하지만 펄스의 폭이 qubit의 decoherence time보다도 작은 경우에는 원하는 에러한계까지는 충분히 decoherence를 줄일 수 있다. 이러한 방법이 실제 양자시스템에 적용될 수 있도록 하기 위해서는 기술적으로 충분히 짧은 pulse의 구현하는 방법이 마련되어야 한다.

양자계를 다루는데 있어서 decoherence는 피할 수 없는 현상이고 신뢰할 수 있는 양자컴퓨터를 구현하기 위해서는 우선적으로 양자계의 decoherence mechanism를 파악해야한다. 특히 양자게이트에서의 decoherence는 양자컴퓨터의 구현에 있어서 결정적으로 중요한 요소이므로 이의 이해가 반드시 필요하다. 지금까지 여러 가지의 양자게이트 모델들이 제안되어 있는데 그것의 decoherence에 대한 연구는 정성적인 수준에 머물러 있거나, 특별한 model를 도입해서 연구하는 정도이다. 앞으로 여러 양자게이트에서의 다양한 decoherence 현상에 대한 보다 정량적인 연구가 수행되어져야 할 것이다. 특히 양자게이트에서의 intrinsic decoherence와 nonlinear decoherence 등에 대한 연구가 필요하다[16].

4. 양자게이트의 구현

양자 컴퓨터에 대한 알고리즘이 제안된 이후에, 양자정보 처리를 위한 기본 단위인 양자 소자의 개발에 많은 관심이 모아지고 있다. 현재까지 양자소자의 모델로, 간혀진 이온, 원자핵의 스핀 등을 이용한 것들이 제안되었다. 우선 지금까지 제안된 여러 가지 양자컴퓨터에 대해 간단히 알아보고 장단점을 비교해 보기로 한다[4].

(1) Photon quantum computer

포톤의 분극이나 공간상의 위치를 양자화시켜 큐비트를 구현하며, unitary transformation은 phase shifter, beam splitter, 또는 비선형 Kerr 효과를 이용하며, 상태벡터는 단광자를 발생시켜 얻는다. 단점으로는 크기가 크며, 비선형 Kerr 효과가 큰 배질을 찾기가 힘들다는 점이다.

(2) Cavity Quantum Electrodynamics

큐비트의 구현방법은 위와 동일하며, 수개의 원자가 구속된 Fabry–Perot QED Cavity를 phase shifter 및 beam splitter와 함께 양자게이트로 사용하는 점이 Photon quantum computer와 다르며, 단점으로는 스케일링이 곤란하고 크기를 줄이기 힘들다는 점이다.

(3) Ion Trap

Trap 된 원자의 진동모드와 핵자기상태를 큐비트로 이용하며, 게이트의 역할은 레이저 펄스로 Jaynes–Cummings상호작용을 유발시켜 원자의 상태를 제어 한다. 단점으로는 진동모드의 수명이 극히 짧고, 이온의 기저상태를 만들기가 힘들다는 점이다.

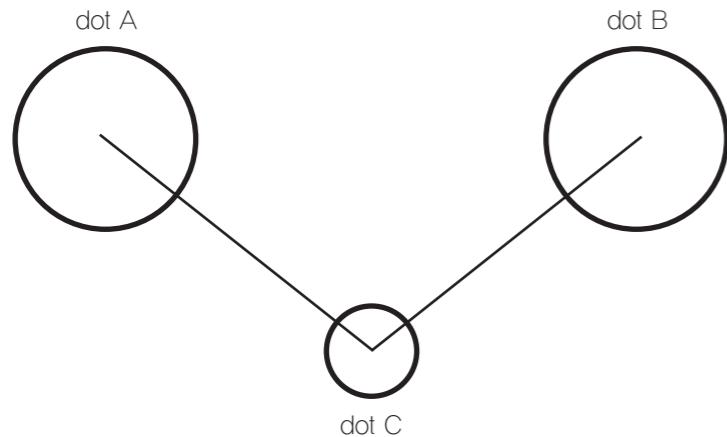
(4) NMR

분자의 수소고리에 있는 원자의 핵자기스핀을 큐비트로 이용하며, 외부에서 인가된 자장이 양자게이트의 역할을 한다. 현재 양자컴퓨터의 가능성은 보여주기 위해 가장 많이 연구된 분야 중의 하나이다. 단점으로는 pure state를 만들기가 어렵고 스케일링이 거의 불가능하다는 점이다. 이외에도 조셉슨 쿠퍼쌍을 이용한 큐비트 등이 제안되었다.

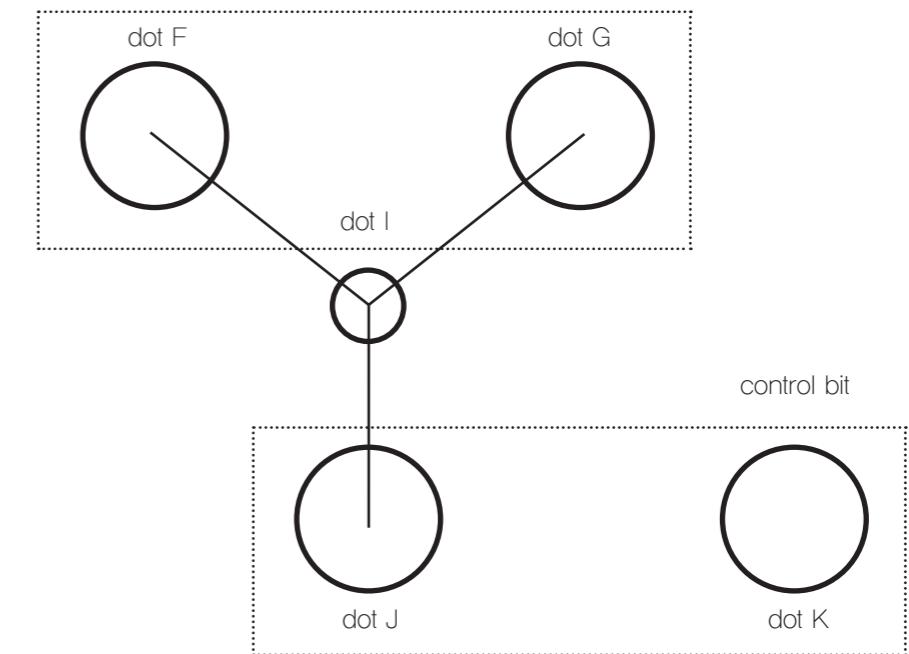
최근에는 양자점(Quantum dot)을 이용한 양자소자 구현은 반도체를 이용한 나노구조를 만들 수 있는 기술이 발전하면서 많은 연구가 이루어지고 있다. 이를 위해서, 양자 비트에 대한 기초를 정하고 그에 대한 제어방법과 controlled NOT gate같은 기능을 수행할 수 있는 모델을 양자점을 이용하여 구현하고자 하는 것이다. 이를 위해 여러 가지 모양의 양자점의 에너지 준위를 계산하고, 이 에너지 상태에 전자가 갇혀 있을 때, 우리가 원하는 상태로 전자를 제어할 수 있는지를 수치적인 방

법을 통해 시험해 볼 수 있다.

양자점의 기저상태는 다른 상태와 잘 분리되어있기 때문에 전자가 그 곳에 채워지면 오랜 시간동안 coherence를 유지할 수 있어서 좋은 양자 비트의 기초로 써 사용될 수 있다. 따라서 두 개의 양자점을 이용하면 그 곳을 채우는 전자의 위치로써 $|0\rangle$ 와 $|1\rangle$ 상태를 정의할 수 있다. 전자를 제어하기 위해서는 빛을 사용하는 방법을 이용하였다. 즉 양자점의 크기를 적당히 잘 조절하면, 기저상태뿐만 아니라 처음 들뜬상태까지 양자점에 생기게 된다. 여기에 빛을 쏘여주게되면 전자는 기저상태에서 들뜬상태로, 또는 들뜬상태에서 기저상태를 돌아가게 된다. 이 성질을 잘 이용하면 빛에 의해 양자점속에 전자의 위치뿐만 아니라 위상까지도 조정할 수 있다. 하나의 양자상태를 조절할 때는 <그림 2>와 같은 구조가 적당하다는 것을 알 수 있다. 가운데 작은 양자점은 들뜬상태의 전자의 파동이 빛의 polarization에 의존하게 하는 역할을 해 빛의 polarization만으로도 전자의 위상을 조절할 수 있도록 한다. 두 개의 양자 비트를 제어하는 controlled NOT 게이트는 <그림 3>으로 이루어진 양자점 구조로 시험하였다. 계산 결과, 만약 각 양자점에 위치에 있는 전자와 전자사이의 상호작용이 작으면 controlled NOT 게이트 역할을 할 수 있는 것으로 밝혀졌다 [17].



<그림 2> Arti

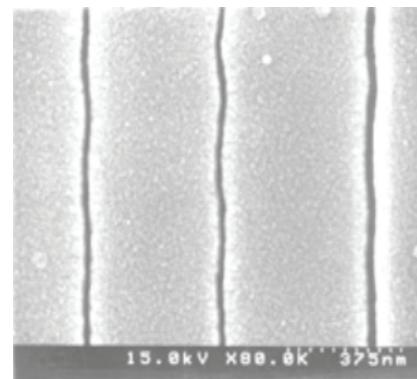


<그림 3>

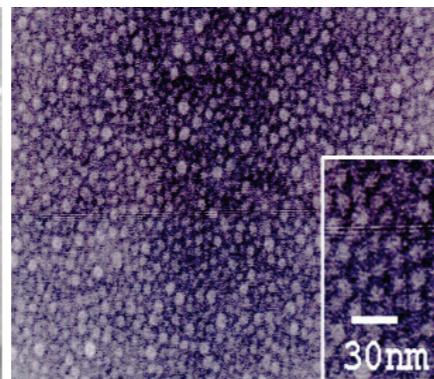
위와 같은 구조를 사용했을 때 나타날 수 있는 문제점은 첫 번째로 원자의 떨림에 의해 나타나는 양자상태의 동요이다(decoherence). 특히 LA phonon에 의한 decoherence가 가장 커서 1psec당 한 번정도 전자가 산란되는 것으로 계산되었다. 그러나 이러한 산란은 단지 전자가 들뜬상태에서만 일어나므로 충분히 큰 세기의 빛을 사용한다면 해결될 수 있는 문제임이 밝혀졌다. 두 번째는 양자점의 크기를 정확히 조절해야 한다는 것이다. <그림 2>에서 큰 양자점들의 크기는 모두 같지만 조금이라도 다르게 만들면 또다른 decoherence의 원인을 제공할 수 있다. 이것은 큰 양자점에 갇혀 있는 전자의 dipole moment의 크기가 작기 때문이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 역시 빛의 세기가 충분히 커야한다.

위와 같이 양자점에 기초한 양자게이트의 구현을 위하여 필요한 양자점들을 에칭으로 선택하고 나노 게이트들을 양자점 근처에, 주어진 설계에 맞추어 적층할 수 있는 패터닝 기술이 필요하다. <그림 4>는 현재 양자정보처리 연구단이 보

유하고 있는 SEM mode의 20~30 nm급의 전자빔 lithography 기술을 보여주고 있다 [18,19]. 앞으로는 field emission beam (TEM mode)을 이용하여 minimum resolution을 5 nm급으로 향상시킬 수 있을 것으로 예상하고 있다. <그림 5>는 현재 우리가 형성하고 있는 실리콘 quantum dot들의 SEM 사진이다. 이미 최소 지름 6 nm 이하의 dot들을 만들 수 있으며 dot들의 분포도 매우 homogeneous 함을 알 수 있다.

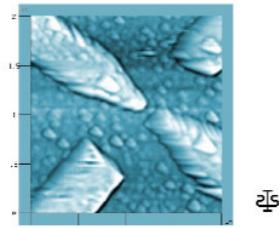


<그림 4> 양자정보처리 연구단이 보유중인 20~30 nm급의 나노패턴 형성



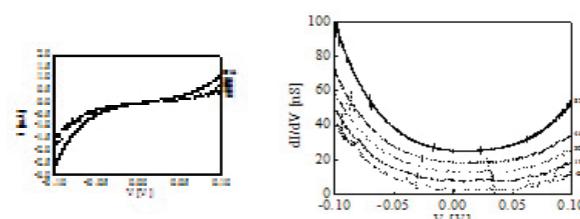
<그림 5> 제작된 실제 quantum dot의 SEM 사진

<그림 6>은 본 연구단에서 제작한 실리콘 quantum dot 트랜지스터의 모습을 보여준다.



<그림 6> 제작된 quantum dot 트랜지스터

현재 양자정보처리 연구단에서는 20nm급의 나노 게이트와 5nm내외의 크기를 갖는 양자점들을 구현할 수가 있다. 하지만 실제로 qubit을 구현하고 quantum gate의 동작을 확인하기 위해서는 양자점들의 간격이 수 나노미터 내외가 되어 져야 하는 데, 통상적인 self-assembly 공정을 이용해서는 이정도의 간격을 갖는 양자점들의 성장이 매우 힘든 것으로 나타났다.



<그림 7> I-V and dI/dV characteristics from the Schottky diode with stacked InAs SAQDs

이를 극복하기 위해서 우리는 양자점들을 GaAs층과 InAs층을 번갈아 쌓으면서 양자점을 수직으로 배열하는 적층구조를 시도하였다[20]. 이경우의 양자점들 간의 평균간격은 나노미터정도가 되어 양자점에 구속된 전자들간의 양자역학적인 상호간섭이 가능한 것으로 판단된다. <그림 7>은 적층된 양자점들간의 전자 수송현상을 보여준다. 이때 구속된 양자상태들간의 간격이 50–60 마이크로 전자볼트가 됨을 알 수 있었다. 양자상태들간의 간격이 매우 작으므로 20 mK에서 10 tesla 이상의 자기장 상태하에서 pulse RF측정을 한 결과 구속된 전자들의 스핀 분극이 생겨남을 발견하였다 [21]. 이는 반도체 양자점을 이용해 qubit을 구현할 수가 있다는 점을 시사해 주는 것으로 앞으로 반도체구조를 이용해 quantum gate와 quantum computer의 구현이 가능할 수 있다는 것을 암시해 준다.

5. 앞으로의 전망

지금까지 우리는 양자컴퓨터가 어떻게해서 논리적 연산을 수행하고 계산을 하는지에 대하여 생각해 보았다. 전에 언급했던 Quantum parallelism을 이용하는 알고리즘을 사용하면, 매우 긴 수열의 주기를 아주 효율적으로 찾을 수 있다는 것을 최근에 Shor가 증명하였다. 이 결과는 앞에서 언급한 소인수분해에 바로 적용할 수 있으며, 양자컴퓨터의 첫 번째 응용이 암호해독과 관련될 것이라는 예측을 하게 만들어 주었다. 양자컴퓨터의 비약적인 속도의 향상을 가능하게 하는 중요한 요소가 바로 Quantum parallelism이라고 할 수 있다. Shor의 연구 이후 과학선진국에서는 모두 국가적 차원에서 지원하고 있다. 이 분야 연구비는 1995년부터 지수적으로 증가하고 있는데 미국의 경우 2006년에 공식적인 지원비만 1억 달러였다. 미국의 경우 국익 차원에서 국방성을 비롯하여 CIA, NSA 등

에서 더 많은 지원이 있으며 이 돈들은 비공개되어 있는 경우가 많다. 유럽 쪽은 말할 것도 없고 일본, 이스라엘, 인도, 중국, 호주 등도 국가적 차원에서 지원하고 있으며 호주의 경우 올해의 연구비가 천 만불 단위로 알려져 있다.

현재는 Shor 알고리즘과 Search 알고리즘이 양자컴퓨터를 이용하였을 때 기존의 컴퓨터보다 획기적으로 속도를 향상시킬 수 있는 유일한 알고리즘이지만 여러 연구자들이 또 다른 알고리즘을 찾고 있는 중이다. Quantum parallelism이 속도 향상에 효과가 있기 위한 전제 조건이 있다. 풀려고 하는 문제의 구조가 매우 많은 해답을 갖는 구조이어서는 안된다. 따라서 NP-Problems처럼 복잡한 문제를 양자컴퓨터로 풀려고 한다면 성공하지 못할 것이다.

실제로 양자컴퓨터를 구현하는 데 있어서의 어려운 점은 다음과 같다. 양자컴퓨터의 연산은 작은 원자스케일의 시스템내의 Hilbert Space라는 수학적인 공간에서 이루어 진다. 양자연산(quantum computation)은 초기의 잘 정의된 상태에서 복잡한 마지막상태까지의 궤적을 알아내는 것과 관련이 있다. 그런 궤적을 계속 추적하는 것은 가능하기는 하지만 상당히 어렵다[22]. 또한 문제가 되는 것은 양자컴퓨터가 섭동(perturbation)에 대해 대단히 민감하다는 것이다. 이것은 연산상의 궤적을 이탈시키게 한다. 섭동의 원인은 외부의 노이즈에 의해 생긴다. 그러나 외부의 노이즈에 대하여 양자컴퓨터를 고립화 시키는 데에 대한 근본적인 제한은 없다. 양자 로직 게이트들은 최근에 들어 구현되기 시작하였으며, 이제 세 개 이상의 양자 시스템을 동시에 연결하는 것을 연구하고 있는 실정이지만 가까운 시일내에 수십개의 qubit을 처리할 수 있는 quantum computer는 만들 수 있을 것으로 예측된다. 특히 2002년 미국물리학회장이 21세기 물리학의 주요연구과제로 꼽았으며 세계 주요 언론에서도 양자컴퓨터 기술이 미래의 인류 문명에 중요한 부분이 될 것으로 간주하고 있다.

참고문헌

- [1] G. E. Moore, Electronics, 38, 114 (1965).
- [2] R. W. Keyes, IBM. J. Res. Dev., 32, 24 (1988).
- [3] J. Preskill, Lecture Notes for Physics 229: Quantum Information and Computation, <http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/ph229> (1998).
- [4] M. A. Nielsen and I. L. Chuang, Quantum Computation and Quantum Information (Cambridge, Cambridge University Press, 2000).
- [5] P. W. Shor, Proc. 35th Ann. Symp. Found. Comp. Sc., 1994.
- [6] R. P. Feynman, Int. J. Theor. Phys. 21, 467 (1982).
- [7] E. Fredkin and T. Toffoli, Int. J. Theor. Phys. 21, 219 (1982).
- [8] A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, Phys. Rev. 47, 777 (1935).
- [9] J. S. Bell, Physics1, 195 (1964).
- [10] C. H. Bennett and S. J. Wiesner, Phys. Rev. Lett. 69, 2882 (1992).
- [11] C. H. Bennett and P. W. Shore, IEEE Trans. Inf. Theory 44, 2724 (1998).
- [12] W. Y. Hwang, D. Ahn and S. W. Hwang, Phys. Rev. A63, 022303 (2001).
- [13] P. Zanardi and M. Rasetti, Mod. Phys. Lett. B11, 1085 (1997).
- [14] W. Y. Hwang, H. Lee, D. Ahn and S. W. Hwang, Phys. Rev. A62, 062305 (2000).
- [15] K. Kim, H. Lee, D. Ahn, and S. W. Hwang, J. Korean. Phys. Soc. 37, 496 (2000).
- [16] D. Ahn, J. H. Oh, K. Kimm and S. W. Hwang, Phys. Rev. A61, 052310 (2000).
- [17] J. H. Oh, D. Ahn, and S. W. Hwang, Phys. Rev. A62, 052306 (2000).
- [18] C. K. Hyon et al., Appl. Phys. Lett. 77, 2607 (2000).
- [19] B. H. Choi et al., Appl. Phys. Lett. 78, 1403 (2001).
- [20] 안도열, 창의적연구진흥사업 양자정보처리연구 연구보고서 (2007).
- [21] S. W. Hwang et al., Phys. Rev. Lett., to be submitted.
- [22] D. Ahn, J. Lee, and S. W. Hwang, LANL e-print quant-ph/0105065; Phys. Rev. Lett., submitted.





과학의 눈

Gyeonggi MoMA Lectures
eyes of science

우주와 세포 universe & cell

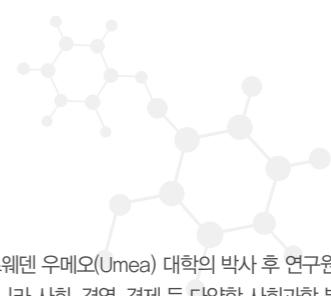
제3강

카오스와 복잡계



김범준 | 성균관대 물리학과 교수

서울대 물리학과 졸업 후 동대학원에서 석·박사를 취득하고 스웨덴 우메오(Umea) 대학의 박사 후 연구원·교수를 거쳤다. 복잡계의 자연과학 방법론을 이용하여 복잡한 물리현상뿐만 아니라 사회, 경영, 경제 등 다양한 사회과학 분야와 결합을 시도하는 경제물리학, 사회물리학에 대한 활발한 연구 활동을 펼치고 있다.



카오스와 복잡계

성균관대학교 물리학과 교수 김범준

I. 복잡하다는 것

살다보면, 특히 이해하기 힘든 얘기를 들을 때면, ‘뭐가 그렇게 복잡해?’ 라고 되뇌울 때가 있다. 우리가 그런 말들을 자주 쓰는 것을 보면 ‘복잡하다’는 것이 어떤 것인지에 대해서는, 사람마다 차이는 있겠지만, 어느 정도의 공통된 무엇인가는 있다고 할 수 있다. 이처럼 일상에서 부지불식중에 친숙하게 사용되는 말임에도 불구하고, 복잡한 것과 복잡하지 않은 것이 무엇이 다른 것인지, 또, 그 다른 점을 어떤 정량적인 방법으로 측정할 수 있는지는 상당히 심오한 과학적인 문제가 된다. 20세기 중반이후에 등장한 1970년대의 Catastrophe theory (파국이론), 1980년대의 Chaos theory (흔돈 혹은 카오스 이론), 그리고 1990년대 후반의 Complexity theory (복잡성 이론)를 세 단어의 앞 글자를 따서 사회의 과학 (science of society)을 향한 3C로 일컫는데, 본 강연에서는 이중 뒤에 등장한 두 개의 C, 즉, chaos와 complexity (카오스와 복잡성)대한 이야기를 주로 하게 된다.

“동해물과 백두산이”로 시작하는 애국가를 끝으로 티브이 방송이 끝나면 ‘지지직’하는 잡음과 함께 까맣고 하얀 점들이 마구잡이로 섞여 있는 화면을 볼 수 있다. 이렇게 마구잡이로 뒤죽박죽의 모양을 갖고 있는 화면도 복잡하다고 할 수 있을까? 이에 대한 과학자들의 답은 당연히 ‘그렇지 않다’가 될 텐데, 왜냐하면 이러한 티브이 화면에는 우리가 이해하고자 노력해야 할 정보가 거의 없기 때문이다. 반대의 극단으로 단순한 네모모양을 규칙적으로 늘어놓아서 채운 서양

장기판을 생각해 보자. 이러한 규칙적인 모양의 단순한 반복도 결코 복잡성을 보이는 예가 될 수는 없을 것이다. 이러한 두 극단의 비교로부터, ‘복잡성’에는 그 안에 들어있는 ‘정보의 양’이 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 아직도 모든 과학자가 동의하는 ‘복잡성’의 정량적인 정의는 요원하지만.

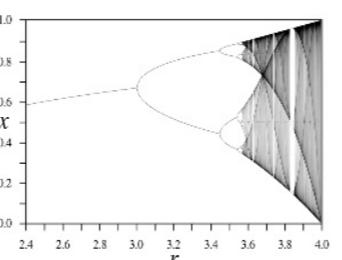
II. 카오스이론과 복잡계 과학

전통적인 물리학의 연구방법은 환원론에 기반 해 있다. 즉, 연구 대상으로서의 물리계 (physical system)를 구성 성분들로 나누고, 이들의 미시적인 동역학에 대한 이해를 먼저 달성하고자 한다. 일단 이러한 기본적인 구성요소들과 이들의 상호작용의 형태를 이해한 후에는, 이로부터 전체로서의 물리계에 대한 이해를 이끌어 내려는 시도이다. 이와 같은 환원적인 방법은 20세기의 대부분 기간 동안 눈부신 성공을 거두었고, 현재 우리가 누리고 있는 많은 현대 과학기술의 산물들이 가능하게 되었다. 그러나 환원론적인 방법에 대한 무조건적인 신뢰는 20세기 중반이후 놀라운 사실들이 새롭게 재인식됨으로 인해 근본부터 흔들리게 된다. 즉, 단지 몇 개의 자유도로 이루어진 단순한 역학계의 경우에도 초기 조건의 아주 작은 차이가 시간이 지나면서 점점 더 증폭되어서, 결국은 전체 역학계의 예측 불가능성을 만들어 낸다는 것이 새롭게 인식된 것이다. 북경에서 나비 한 마리가 날개를 퍼덕이면 뉴욕의 날씨가 변한다는 것을 의미하는 ‘나비효과’는 동명의 영화가 등장한 것에서도 알 수 있듯이 이제는 일반 상식이 된 듯하다. 또한, 이러한 비선형 현상을 보이는 시스템이 선형 방정식으로 간단하게 기술되는 물리계 보다 훨씬 더 빈번하게 자연계에 존재한다는 것이 널리 받아들여지기 시작하였다. 전통적인 물리학의 테두리 안에서 다루어진 다양한 교과서에서 소개되는 선형 물리계들이 오히려 예외적인 경우에 속한다는 것이 알려진 것이다. 예를 들어, 한 생물종의 개체수가 시간이 지나면서 어떻게 변하는지를 기술하는 *병참분뜨기(logistic map) :

n 번째 기간의 개체수를 x_n 이라하면 ($0 < x_n \leq 1$) 병참분뜨기는 단 하나의 식 $x_{n+1} = rx_n(1-x_n)$ 으로 간단히 적힐 수 있다.

map)를 살펴보자. 너무나도 단순한 식임에도 불구하고, 초기조건의 아주 약간의 차이로 인해 최종적인 개체수가 엄청나게 달라질 수 있다는 것이 알려졌다. 〈그림1〉을 보면 병참분뜨기의 매개변수 r 이 변하면서 다양한 최종값 x 가 존재함을 볼 수 있다. 또, r 의 값이 3부근에서 커지면 x 가 두 갈래로 갈라지는 것(bifurcation)을 볼 수 있는데, 이때 둘 중 어떤 값을 최종적으로 갖을지는 처음의 값이 약간만 변해도 다르게 된다. 더 이상 단순할 수 없을 것처럼 너무나 간단한 시스템이 보여주는 현상이 이처럼 복잡할 수 있다는 것에 당시의 연구자들이 매혹된 것은 지금 돌이켜 봐도 당연해 보인다. 1980년대를 풍미한 카오스이론은 이처럼, 구성은 단순한 시스템이 보여주는 복잡한 현상에 그 초점이 놓여있었다. 카오스 현상을 보여주는 많은 시스템들이 위상공간상에서는 스스로가 스스로를 닮은 프랙탈의 기하학을 보여주고, 또한 이 경우 시간이 지나면서 어떻게 위상공간을 움직이는지를 보면, 소위 기묘한 끌개라 불리는, 위상공간을 촘촘히 채우면서도 결코 만나지는 않는 궤적을 그리게 된다는 것이 알려져서, ‘카오스’, ‘프랙탈’, ‘비선형 동역학’, ‘기묘한 끌개’ 등의 개념들이 큰 관심을 끈 바 있다. 이러한 카오스이론에 기반한 연구방법은 1990년대까지도 이어지면서, 주식시장, 기상현상, 그리고 사람의 뇌파 등의 연구에 성공적으로 적용된 바 있다.

앞서 언급한 것처럼 1980년대에 태동한 카오스이론에서 이야기된 복잡성(complexity)은 시스템의 구성의 복잡성이 아닌, 시스템이 보여주는 현상의 복잡성이 주된 관심이었다. 20세기가 저물어 가던 1990년대의 후반부터, 이 분야의 연구자들의 관심이, 구성이 복잡한 시스템(complex system)으로 이동하게 되며 최근, 소위 ‘복잡계과학(science of complexity)’이라는 새로운 학제간 성격을 갖는 학문 분야의 눈부신 발전이 이루어지고 있다. 이러한 복잡계의 경우라도 구성성분들의 상호작용의 형태 자체는 단순한 경우가 많다. 즉, 두 개의 구성요소간의 상호작용은 단순한 수식 혹은 간단한 규칙으로 적용될 수 있을 정도로 단순하지만, 구성요소들 간



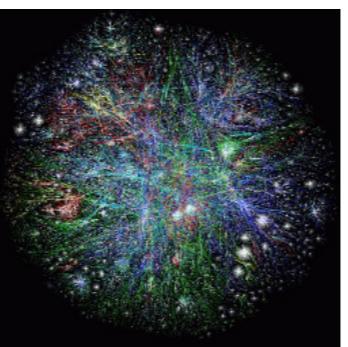
〈그림 1〉 병참분뜨기에서 개체수의 최종값의
매개변수에의 의존성

의 상호작용의 종체적인 결과로서 다양한 집단 현상을 보이는 경우가 주된 연구대상이 되고 있다. 물리학의 한 분야로서의 통계물리학은 바로 이와 같은 많은 수의 자유도를 갖는 물리계에 대한 연구 분야이다. 전통적인 통계물리학에 익숙한 물리학자들이 현재 다양한 복잡계에 대한 연구를 수행하고 있음은 어찌 보면 당연한 일이라고 할 수 있다. 복잡계 물리학, 혹은 이를 넘어 복잡계 과학(science of complexity)에 대한 최근 몇 년간의 눈부신 발전도 통계물리학자들의 기여에 힘입은 바가 크다. 특히, 1990년대 말부터 출판되기 시작한 복잡한 연결망(complex network)에 대한 일련의 논문들의 역할이 중요했는데, 복잡계의 모든 것을 고려하는 연구의 실질적인 어려움을, 복잡계를 이루고 있는 요소들의 상호작용의 연결 구조에만 우선적인 관심을 두어 극복해보자는 취지이다. 이와 같은 방법을 택함으로 인해, 인터넷, 항공로, 그리고 사회연결망과 같이 일견 완전히 동떨어져 보이는 시스템들을 ‘복잡한 연결망’이라는 공통된 개념의 틀로 이해할 수 있게 되었다. 통계물리학의 주된 개념 중에 보편성(universality)이 있다. 아주 판이하게 다른 물리계라고 하더라도 그 물리계가 놓여있는 공간의 차원이나, 자유도가 가지고 있는 대칭성(symmetry)이 같으면 동일한 거시적인 현상을 보인다는 것이다. 예를 들어, 철이 자석이 되는 현상과 기체가 액체로 변하는 현상이 동일한 형태의 상전이라는 것이 그 대표적인 예다. 이와 같은 ‘보편성’의 관점에서도 사회, 생물, 그리고 정보흐름의 연결망들이 ‘무엇’의 연결망인지에 관계없이, 정성적으로 동일한 집단적인 창발 현상(collective emergent behavior)을 보일 수 있다는 점을 이해할 수 있다. 복잡한 연결망은 복잡계의 뼈대와 같은 것이어서 일단 복잡계의 기본적인 골격에 대한 이해를 줄 수는 있지만, 인체의 뼈들을 모았다고 사람이 될 수는 없듯이, 전체로서의 복잡계에 대한 이해는 당연히 이보다는 훨씬 더 나아가야 할 것이다. 물리학자들의 용어로 비유개의, 복잡계를 복잡한 연결망으로 보는 것은, 연구대상을 연구하기 위해 처음 택할 수 있는 아주 초보적인(native) 수준의 첫 이해어림방법(first approximation)이다. 이와 같은 제약에도 불구하고, 최근의 연구들을 돌아보면, 연결망으로서의 복잡계 연구가 성공적이라는 데에 많은 사람들이 동의할 것으로 믿는다. 일반적인 복잡계 물리학에서 얻고자하는 지식은, 복잡계를 구성하는 구성요소들의 미시적인 정보가 결코 아니다. 통계물리학에서 물이 얼음이 되는 상전이를 연구할 때, 개개의 물분자들의 위치와 속도가 관심의 대상이 아니라, 전체로서의 물 혹은 얼음이 어떠한 거시적인 특징을 보여주는 지가 주된 관심이듯이, 복잡계 물

리학에서는 전체로서의 복잡계가 어떠한 거시적인 집단 거동을 보이는지가 관심이라는 것을 항상 염두에 둘 필요가 있다. 예를 들어, 경제물리학은 개별 주식의 내일 주가를 예측하는 것과는 아무런 관계가 없으며, 전체로서의 주식 시장이 어떠한 특징을 발현하는지가 연구의 관심이다. 복잡계 과학을 미시적인 예측의 문제와 연결지으려는 시도도 마찬가지로 복잡계 과학에 대한 몰이해에서 비롯된 것이다. 이러한 맥락에서 통계물리학자인 Nigel Goldenfeld 가 이야기한 “Complexity starts when causality breaks down”라는 말을 이해할 수 있다.

III. 복잡한 연결망

최근 몇 년간 자연계에서 발견되거나 혹은 인위적으로 만들어지는 여러 다양한 복잡계(complex system)를 연결망(network)이라 는 구조적인 관점에서 연구를 하려고 하는 시도들이 물리학, 생물학, 사회학 등의 개별 과학의 범주를 넘어 다양하게 이루어지고 있다. 연결망은 교점(node)들과 이들 교점들을 서로 연결해주는 연결선(link)으로 이루어진 개념적으로는 아주 간단한 구조를 갖는 시스템이지만, 실제적인 연결은 아주 복잡한 구조를 가질 수 있다. 이산 수학의 한 주제로서 Euler에 의해 시작된 그래프 이론(Graph theory)은 그 긴 역사에도 불구하고, 물리학 등의 다른 학문 분야의 연구자들에게는 널리 알려져 있지 않았지만, 약 10년 전부터는 물리학자들, 특히 통계물리학의 전공자들 사이에서 폭발적인 연구활동이 시작되어, 이제는 누구나 공감할정도로 물리학에서 가장 뜨거운 연구주제 중의 하나로 자리매김하였다. 복잡한 연결망의 개념들로 기술할 수 있는 연결망은 우리주변에서 많이 찾아 볼 수 있는데, 예를 들어 컴퓨터들의 연결망인 인터넷에서는 컴퓨터들이 교점에, 그리고 컴퓨터들을 연결하는 네트워크 케이블이 연결선에 해당하며, 사람들의 사회적인 연결망에서는 사람들이 교점에 그리고 사람들 사이의 사회적인 친분관계가 연결선에 해당한다. 이 외



〈그림 2〉 인터넷의 구조

에도 생물학적인 요소들이 생화학적인 반응들에 의해 서로 연결되어 있는 생물 세포, 그리고 항로를 통해 연결되어있는 공항들로 이루어진 비행기 운행의 연결망 등 매우 다양한 복잡계들이 복잡한 연결망(complex network)의 관점에서 연구되어질 수 있다. 이와 같은 여러 다양한 복잡한 연결망들이 어떠한 구조적인 공통점을 갖는지를 규명하고 나아가서 실용적인 응용가능성까지 탐구하려고 현재 국내외의 수많은 연구그룹들이 활발하게 연구를 진행시키고 있다.

1960년대에 사회학자 Milgram의 실험을 통해 전세계의 임의의 두 사람이 놀라울 정도의 짧은 경로를 통해 연결될 수 있다는 것이 알려졌다. 원래의 실험에서는 미국 Boston과 Kansas의 임의의 두 주식 중개인을 택한 후에, Boston의 사람에게 자신이 직접 알고있는 (first name을 부를 수 있는 사람으로 국한함) 사람에게 편지를 전달하는 방법으로 Kansas의 상대방에게 편지를 전달하도록 하였다. 이렇게 first-name basis로 연결되어 있는 사회 연결망을 통해 편지가 최종 목적지에 도달할 때까지 과연 몇 단계의 사람을 중간에 거치게 되는지를 조사한 결과, 평균적으로 5단계정도만 거치면 된다는 사실이 알려졌다. 이와 같은 사회학자들에 의한 선구적인 연구에 힘입어, 사회를 이루는 사람들의 연결망이 (i) 아주 짧은 연결거리를 갖는다는 것과 (ii) 자신의 두 친구도 서로 친구일 가능성이 높다는 두 가지 특징을 갖는다는 것을 알게 되었으며, 이 두 가지 특징을 갖는 연결망을 ‘좁은 세상 연결망’(small-world network)이라고 부르게 되었다.

최근에 Watts와 Strogatz라는 두 물리학자가 좁은 세상의 성질을 보이는 간단한 모형을 제안한 것이 복잡한 연결망에 대한 물리학자들의 관심을 촉발시키는 계기가 되었다. Watts와 Strogatz (WS)의 연결망은 다음과 같이 구성된다. (1) 먼저 규칙적인 살창구조를 갖는 연결망을 만든다. 교점들을 연결하는 연결선은 두 교점사이의 거리가 r 보다 작을 때만 존재한다. 예를 들어 $r = 2$ 라면 두 교점이 한 칸 떨어져서 서로 옆에 있을 때와 두 칸만큼 떨어져 있을 때(nearest neighbors and next-nearest neighbors)만 두 교점 사이에 연결선이 있다. (2) 위에서 만들어진 국소적인 연결선 (local link)을 p 의 확률로 택해서 연결선의 한 쪽 끝을 끊어서 임의의 다른 교점으로 옮긴다. 이 과정을 통해서 멀리 떨어져있던 교점들도 연결될 수 있게 되며 새로 만들어지는 연결선을 ‘지름길(shortcut)’이라고 부른다. 만약 $p = 0$ 이면 지름길들이 전혀 없는 국소적인 연결선만을 갖는

연결망이 되며, 일반적인 p 에 대해서는 연결망을 구성하는 교점들의 수가 N 인 경우에 지름길의 수는 Nrp 가 된다. 이와 같이 구성되는 Watts와 Strogatz의 연결망(이하 줄여서 WS연결망이라 부름)에서는, 임의의 두 교점들을 연결하는 여러 연결선들로 이루어진 경로를 생각하고, 그 경로상에 있는 연결선들의 수를 경로의 길이로 정의할 때, 경로의 평균길이 d 가 $\log N$ 에 비례한다는 것이 알려졌다. 즉, WS 연결망은 인간사회와 마찬가지로 좁은 세상 효과를 보이게 되는 것이다.

Watts-Strogatz의 연구가 복잡한 연결망에 대한 최근의 관심을 처음 일으킨 일이었다면 뒤이어 제안된 Barabasi-Albert(BA)에 의한 ‘척도없는 연결망’(scale-free network)에 대한 연구는 최근의 Internet의 발달 등에 힘입어, 물리학의 범위를 넘어 엄청난 학술적/대중적 관심을 폭발적으로 일으킨 계기가 되었다. BA 모형에서는 실제 인터넷 혹은 WWW의 시간에 따른 발전에 대한 고려로부터 (i) 연결망의 크기가 멈추어 있지 않고 계속 증가한다는 사실과 (ii) 새로 추가된 연결망의 교점이 기존의 연결망과 연결선을 만들 때, 임의로 택해진 교점과 연결을 맺는 것이 아닌, 기존의 중요한 교점들(즉, 연결선이 많았던 교점들)에 새로운 연결선을 만들 확률이 높다는 것을 생각했다. 보다 구체적으로는 BA모형은 아래와 같이 구성되어 진다. (1)시간 $t = 0$ 에서 m_0 개의 교점으로부터 시작하여 (2)매 시간마다 m 개의 연결선이 있는 교점을 하나씩 추가한다. (3)새로운 교점이 기존의 교점과 연결선을 만들 때, 연결선이 연결될 확률은 $P \propto k$ 로 준다(k 는 연결선수). 이와 같이 아주 간단한 규칙을 반복적으로 적용하면, 그 결과로 만들어지는 연결망은 마치 실제의 인터넷처럼 아주 복잡한 형태를 갖게 된다. BA모형의 중요성은, 아주 간단한 규칙만으로 실제의 많은 수의 연결망들이 공통적으로 보이는 ‘척도없는 연결망’의 특성을 보이게 된다는 것인데, 척도 없는 연결망에서는 연결선수 k 의 분포함수를 그려보면, 특정한 척도가 없는 면함수의 꼴이 된다는 것이다.

위에서 기술한 복잡한 연결망의 두 가지의 대표적인 모형 이외에도 다양한 연결망의 모형이 제안/이용되고 있는데, 최근의 연구 경향은 새로운 모형의 제시보다는 실제 연결망과 흡사한 성질을 갖는 연결망위에서 벌어지는 다양한 물리적 혹은 생물학적/사회학적인 process들을 살펴보는 쪽으로 연구의 관심이 이동하고 있는 상황이다.



과학의 눈

Gyeonggi MoMA Lectures
eyes of science

우주와 세포 universe & cell

제4강

뇌 과학의 이해



신희석 | 한국과학기술연구원(KIST) 신경과학센터장

서울대 의대 졸업 후 미국 코넬대 의대 유전학 박사학위를 취득했다. 미국 슬론케터링 연구소 박사 후 선임연구원을 거쳐 MIT 생물학과 조교수, 포항공대 생명과학과 교수, 학습 및 기억현상연구단 단장을 역임하였다. 2001년부터 연구에 집중하기 위해 한국과학기술연구원(KIST)으로 옮겼으며, 2006년에는 과학기술분야에 대표과학자를 선정해 집중 지원하는 제1호 국가과학자로 선정되었다.

뇌 연구를 통한 마음의 이해 : 불교와 뇌과학

한국과학기술연구원 신경과학센터장 신희섭

1. 뇌과학과 불교는 같은 주제를 다루고 있다.

마하반야바라밀다심경은 “觀自在菩薩 行深般若波羅蜜多時 照見五蘊皆空 度一切苦厄”로 시작된다. 대학생활 중에 이 경에 대한 특강을 들으면서 신비스러움을 느끼면서도 오리무중에 빠지던 기억이 난다. 10여 년간의 외국생활 끝에 포항공대로 돌아와서 뇌과학 연구를 하면서 이 경을 다시 읽게 되면서, 이 경이 결국 인간의 마음에 대한 이야기를 하고 있다고 생각하게 되었다. 그 후로 불교에 더 접하면서, 불교 자체가 뇌과학이 추구하는 바와 동일한 주제, 즉 마음을 대상으로 하고 있음을 알게 되었다.

반야심경에서는 뇌 기능을 두 가지 축으로 갈라서 다루고 있다. 뇌에 정보가 생성되는 경로로서의 「色聲香味觸法」과 이 정보로 인하여 나타나는 뇌의 반응으로서의 「受想行識」이 그 두 가지이다. 따라서 6가지 감각 정보 각각에 따라서, 五蘊이 형성된다. 예를 들면, 色의 정보에 의하여 「色受想行識」이 형성되는 식이다. 즉 육입(六入)과 오온은 뇌 기능의 매트릭스(matrix)를 구성하는 세로-가로의 요소이다. 이는 뇌/마음의 작동상태를 보는 대단히 탁월한 관점이라고 생각된다. 왜냐하면, 뇌의 근본 기능이 생명체가 환경 속에서 살아가기 위하여 환경으로부터의 정보를 받아들이고 분석하고, 그에 대한 가장 적절한 대응책을 정하여 이를 몸으로 하여금 실행하게 하는 것이기 때문이다. 뇌가 개체의 생존에 필수적인 이유이다.

여기에서, 언뜻 생각하기에 석연치 않을 수도 있는 점: 뇌 밖의 환경으로부터 뇌 안으로 들어오는 정보로부터 비롯되는 안이비설신(眼, 耳, 鼻, 舌, 身)에 의존하는 전5식(前五識)과 뇌 내부에서 축적된 정보로부터 생성되는 제6의식(意識)을 함께 6식(六識)이라는 한 그룹에 속하는 요소로 취급한다는 점이다. 자세히 생각해 보면, 그러나, 이는 뇌과학적으로 볼 때에 매우 뛰어난 통찰이다. 왜냐하면, 정보는 그것이 외부로부터 들어온 것이건, 내부에서 생성된 것인 구분 없이 뇌에서 비슷한 반응을 유도하기 때문이다. 예를 들어서, 매실을 생애 처음 입에 넣어 씹어 먹으면 시큼달콤한 맛을 느끼고 입에 침이 돌게 된다. 그 다음에는 매실을 보기만 해도 입에 침이 돈다. 더 나아가서, 매실을 머리에 떠올리는 것만으로도 입에 침이 돌게 된다. 즉 매실을 씹을 때의 자극정보(香, 味, 觸)가 매실을 보거나(色) 매실을 상상하는(法) 것만으로도 뇌에 생성된 것이다. 그리고 어떠한 방식으로 생성되었건 간에 이 정보에 대하여 뇌는 비슷한 반응을 보인 것이다. 이는 가상현실 기술을 가능하게 하는 기본 원리이기도 하다.

2. 모든 존재 행위에는 뇌의 작동이 필요하다.



우리가 보고, 듣고, 느끼고, 생각하고, 행동하는, 모든 존재 행위는 우리에게 뇌가 있어서 가능하다. ‘마음’이라고 지칭하는 것도 마찬가지이다. 뇌가 기능을 멈추면 이러한 모든 존재 행위도 끝이 난다. 따라서 뇌를 연구하는 것은 곧 우리의 마음을 연구하는 한 방법이 된다.

어느 분야의 전문가가 되는 데는 10년간의 각고의 노력이 필요하다는 ‘10년 법칙’이라는 것이 있다. 심리학적 증거에 의하면 전문성은 타고나는 것이 아니고, 만들어 지는 것이라고 한다. (예: 김연아 선수) 전문가가 되었다고 할 때에, 우리 몸의 어느 부분이 전문가가 되었을까? 손가락 하나를 사고로 인하여 잃어버린 후에도 재즈피아니스트 Bud Powell은 계속 훌륭한 연주를 했던 예가 있는

반면에, 철로연주자 자클린느 뒤 프레*와 같이 뇌질환으로 인하여 모든 것을 마감하게 된 안타까운 경우도 있다. 즉, 뇌가 바로 '전문가'가 되는 부분의 핵심이다.

뇌에 대한 이해를 하기 위해서는 우선 뇌와 몸의 관계에 대한 고찰이 필요하다. 뇌와 몸의 관계를 인간의 경우에서 살펴보면 뇌가 몸의 주인이 아닐까 하는 생각이 들 수 있다. 이러한 문제를 다루는 경우에 다양한 동물을 진화적 관점에서 비교해보는 관찰방법이 유효할 수 있다. 예를 들어서, 아메바나 짚신벌레와 같이 단세포 동물에는 뇌는 고사하고 신경도 없다. 이의 필요성이 없기 때문이다. 단세포의 개체로서 환경의 정보를 세포 표면에서 받아들이고 이 정보가 세포내에 전달되어 그에 따른 생화학적인 반응이 일어나고, 그 반응은 세포생물학적 반응으로 연결되어 단세포인 개체의 행동이 정해진다. 예를 들어, 먹이가 탐지되면 먹이 쪽으로 가고, 해로운 독이 감지되면 반대쪽으로 도망가게 된다. 단세포에서 이러한 정보의 전달은 쉽게 이루어지지만, 다세포동물로 진화되면서 개체를 이루는 여러 개의 세포들이 이와 같은 정보를 신속하게 공유하기 위해서는 신경이 필요하게 되었다. 그러나 신경의 존재는 활동성이 있는 동물의 특성이다. 바다 속 바닥에 붙어서 사는 해면동물은 1m가 넘는 크기로 자랄 수도 있는 다세포 동물임에도 불구하고 신경을 가지고 있지 않다. 가운데가 텅 비어 관처럼 생긴 몸의 중간 중간에 물이 스며들어 가는 구멍이 있어서, 이리로 물이 들어와서 가운데의 관을 통해서 위쪽 출구로 나가게 되는데, 이 과정에서 물에 휩쓸려 운반되는 먹이를 걸리는 대로 잡아 먹고 산다. 식물이 신경을 가지고 있지 않는 것과 유사하다. 식물이 공기 중의 햇볕과 탄소를 받아서 사는 것처럼 수동적인 생존 방식이다. 신경이 필요 없는 이유이다. 좀 더 적극적인 먹이 사냥을 하는 동물에서 처음으로 신경이 나타나는데, 해파리, 말미잘 등의 원통형으로 생긴 동물들이다. 이들은 펼쳐 늘어뜨리고 있던 촉수의 하나에 먹이가 접촉하면 그 정보를 온몸의 세포에 전달하여, 촉수들이 함께 움직이어 먹이를 확보한다. 하지만 여기까지에서도 뇌가



*자클린느 뒤 프레 (1930~1972)

5살 : 첼로시작
16살 : 런던에서 공식 데뷔
20살 : 뉴욕무대 제복
23살 : Daniel Barenboim과 결혼
27살 : 은퇴(뇌질환 발병)
42살 : 사망

발달되지는 않았다. 받은 정보를, 복잡하게 분석해야 할 필요 없이, 몸 전체로 빨리 전파하기 위한 신경그물 만으로 충분하다. 뇌를 필요로 하는 것은 편형동물처럼 움직이며 이동할 수 있을 뿐 아니라 몸에 좌우의 구분이 생긴 때부터이다. 환경의 정보를 분석하여 왼쪽으로 갈지 오른쪽으로 갈지를 결정할 필요가 생기면서 '뇌'가 생겼다. 이 결정이 생존에 긴요한 것이고, 이 정도의 분석에는 복잡한 계산이 필요한 듯하다. 아직은 뇌이라기보다는 신경세포들이 여러 개가 한 덩어리로 모여 있는 '신경절'에 불과하지만, 이 신경절이 하는 역할은 더 발달한 동물에서 뇌가 하는 역할을 수행하고 있다. 이 미니 뇌는 편형동물로 하여금 학습, 기억까지도 가능하게 한다. 뇌와 이동성의 관계는 명게에서 잘 드러난다. 명게는 어린 유충 시기에는 물고기처럼 생겨서 헤엄쳐 다니다가 때가 되면 바위에 내려앉아 고착되어 명게로 분화하여 자란다. 헤엄쳐 다니는 시기에는 뇌가 있다가, 고착되어 명게로 자라면서 이 뇌는 없어져 버린다. 좌우 구분하면서 헤엄칠 때에는 뇌가 필요했으나 고착 생활하면서 더 이상 뇌가 필요 없어진 것이다. 이후의 다세포 동물의 진화는 다양한 방향으로 진행되면서 수많은 동물로 발달하기에 이른다. 동물의 구조, 기능이 복잡화 할수록 뇌신경계는 따라서 복잡해지며, 결국 인간의 뇌에 도달하게 된다.

여기서 한 가지 질문이 제기된다. 진화의 관점에서 보자면 뇌는 분명 운동성 다세포 동물이 환경에서 살아가기 위하여, 환경에 대한 정보를 분석하여 이에 대한 적절한 대책을 세우고 수행하기 위한 필요성에 의하여 생긴 것 같다. 즉, 몸의 필요에 따라서 뇌가 발달/진화된 것처럼 보인다. 그렇다면, 뇌는 몸의 주인인가 아니면 몸의 수단인가? 간단한 답이 있을 수 없다. 둘은 함께 더불어 발달한 것이기 때문이다. 세포들이 모이고 나서 필요에 입각하여 뇌를 만들어 낸 것도, 뇌가 자기의 존재를 실현하기 위하여 세포들을 모아 몸을 만든 것도 아니다. 이러한 관점에서 생각할 때, 뇌가, 따라서 마음이, 몸의 주인이라고 단언하기는 쉽지 않을 것이다. 이 질문에 답하기 어려움은 인간에서도 마찬가지라고 생각한다.

3. 신경회로의 전기적 작동으로서의 뇌기능

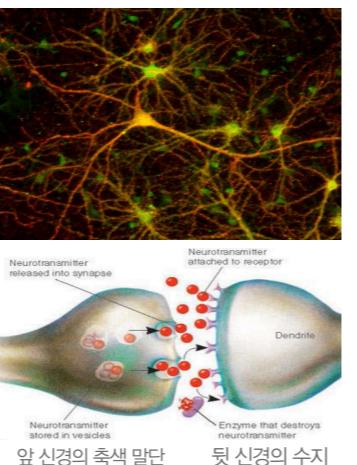
오온개공(五蘊皆空): 오온, 색수상행식이 모두 공이라고 한다. 항상하는 실체가

없으나, 또한, 완전한 텅 빈 것은 아니라고 한다. 이러한 서술은 바로 뇌 기능에도 해당 된다. '전기적인 회로의 작동'이 뇌기능의 존재방식이다. 활동할 때에는 전기적인 회로의 작동으로 존재하는 뇌기능. 그러나 회로가 쉬고 있을 때에는 존재하고 있는지를 찾기 어렵다. 물위로 번져가는 파도와도 같다. 파도가 존재하는 것인가? 파도를 비데오로 기록할 수 있고, 말로 서술할 수 있지만, 파도는 사과, 하늘, 강아지처럼 늘 손으로 가리킬 수 있는 대상이 아니다. 물과 바람이 지니고 있는 에너지가 합치어 작용하여 생성되는 현상이다. 물론 사과, 하늘, 강아지마저도 항상하는 존재는 아님으로, 결국 모든 것이 항상하는 것이 아니라고 말하게 된다. 그러나, 파도는 없다고 말한다면 깊은 산속에서만 살았거나 머리가 돈 사람으로 여길 것이다. 뇌기능도 마찬가지이다. 눈으로 볼 수 없을 뿐이다. 다른 관찰 방법이 필요할 뿐이다.

색수상행식은 곧 뇌가 환경으로부터 오는 정보를 받아들이면서 나타내는 반응을 종합적으로 보여주는 말이다. 자극정보에 접하여 감각이 일어나고(受), 그를 인식하고(識), 그로 인하여 느낌이 생기고(想), 그에 관하여 어떤 의도/의욕을 일으키게(行) 된다. 이것이 모두 전기적 신경회로의 작동에 의존하는 현상이다.

사람의 뇌에는 약 천 억 (100×10^9) 개의 신경세포가 있고, 이들이 서로 연결되어 다양하고 복잡한 회로를 이루고 있다. 신경과 신경의 연결점은 시냅스*라고 부르는 특수한 구조로 되어있는데, 사람의 뇌에는 약, 백 조 (100×10^{12}) 개의 시냅스가 있다고 추정한다. 즉, 뇌는 거대한 신경 네트워크이라고 볼 수 있다. 복잡성에서 우주에 비견하는 이유이다. 뇌 기능은 이 거대한 네트워크를 이루고 있는 신경세포의 전기적인 활동에 의한 신경회로의 작동을 기본 바탕으로 한다. 이에 대한 연구, 특정 뇌기능을 만들어 내는 신경회로의 구조와 작용 원리를 밝히는 것이 뇌 과학의 주요 주제이다.

예를 들어서 뇌는 외부 자극을 어떻게 인식하나? 오감(色, 聲, 香,



* 시냅스의 구조

味, 觸)의 자극은 해당 감각기관에 존재하는 수용체 세포를 흥분시킨다. 각 기관의 수용체는 해당 자극에 전문적으로 민감하게 반응하는 특수화된 안테나에 비유된다. 수용체의 흥분은, 신경세포의 전기적 신호로 바뀌고, 이 전기신호는 신경 회로를 따라서 뇌의 상응하는 부위로 전달되어 그곳에 있는 신경세포들을 흥분시킨다. 즉, 외부의 신호는 뇌의 특정한 부위에 있는 신경세포의 전기적인 흥분으로 통역이 되어서 인식된다. 각종 감각에 상응하는 감각 피질의 지도가 밝혀져 있다. 자기공명영상기술(fMRI) 기술을 통하여 인간의 여러 가지 뇌기능에 관여하는 뇌 부위가 알려지게 되었다. 실험동물에서는 더욱 다양한 기술을 동원하여 분자/세포/회로 수준에 달하는 연구를 수행할 수 있다. 이에 따라서 우리가 흔히 인간이 나타내는 고등기능이라고 생각하던 뇌기능도 자세히 들여다 보면 생존에 필요한 기능임을 알 수 있고, 따라서 인간에게만 있는 기능이 아니고, 생쥐처럼 사회생활을 하는 다른 포유류에서도 발견되는 기능임을 알게 되었다. 감각뿐 아니라, 기억, 언어, 정서, 동작, 판단, 상상, 계획 등의 작용에 필수적인 역할을 하는 뇌의 부위가 큰 구도로 밝혀져 있다. 이러한 다양한 뇌기능의 세밀한 뇌 회로와 그 작용원리를 밝히는 것이 현대 뇌과학의 주요 과제이다.

4. 오온(五蘊)의 뇌 회로

색수상행식(色受想行識)의 각각의 과정을 담당하는 뇌회로의 존재에 대하여 살펴보자.

예를 들어서, 통증이 있을 때에 그 통증이 몸의 어느 부위에 있고, 어떤 종류의 자극이고, 얼마나 강한 자극인지 등을 감지하고 아는 것과, 그 통증으로 인하여 고통 받는 것은 뇌에서 구별되어 있을까? 직접 당하는 통증으로 고로워할 때에, 뇌에는 어떠한 변화가 일어날까? 한 편, 사랑하는 이가 당하는 통증을 옆에서 보면서 진심으로 고통을 함께 하는 경우에, 뇌에는 어떠한 변화가 일어날

까? 즉, 통증고통과 공감고통(共感苦痛, Empathy Pain) : 두 경우에 뇌기능에는 어떠한 차이가 있을까?

특정 마음 작용이나 그에 따른 행동을 하는 개체에서 자기공명영상기술을 이용하여 뇌의 상태를 분석함으로써, 그 마음 작용이나 행동을 일으키는 뇌의 작용부위를 알아낼 수 있다. 이 실험을 통증고통/공감고통에 대하여 수행한 결과에서 보면: 공감고통 시에는 통증을 겪을 때 활성화 되는 뇌의 부분들이 역시 활성화되고 있으나, 단, 체 감각 피질은 활성화되지 않았다. 즉, 실제의 통증 감각에 상응하는 부분인 체 감각 피질은 활성화됨이 없이, 그 이후 단계의 (괴로워하는 데에 관여하는) 뇌 부분들이 활성화됨으로써 공감고통을 겪게 된다. 통증을 느끼기(受)와 통증으로 괴로워하기(想)의 두 기능에 관여하는 뇌 회로가 구분되어 있음을 보여준다.

타인의 고통, 감정, 의도 등을 이해하는 공감능력은 사회생활, 즉, 생존에 필수적인 요소이다. 흔히 정신분열증, 자폐증, 사이코패스 등의 정신질환자에서 공감능력이 현저히 저하되었다는 보고가 있다. 생존에 필수적인 기능임을 알 수 있다.

또 한 예로서 본다는 것은 무엇인가? 비디오감시시스템과 파수꾼은 둘 다 수상한 침입자의 출현 유무를 감시하는 역할을 한다. 파수꾼이 침입자를 발견하는 것은 침입자의 모습에서 반사된 빛의 특정한 패턴이 파수꾼의 눈동자를 통하여 망막에 도달하면서 시작된다. 침입자의 정보를 지니고 있는 이 빛 신호는 망막에 분포되어 있는 빛 수용체(photoreceptor)들을 흥분시킴으로써 특정한 패턴의 전기 신호로 바뀐다. 이렇게 하여 생성된 전기 신호에 들어있는 침입자 정보는 시 신경을 통하여 뇌로 들어가고, 적절한 회로를 거쳐서 시각피질에 도달하여 그 곳의 신경세포들을 특정한 패턴으로 흥분시킨다. 이는 시각 인식을 유도하게 된다. 즉 파수꾼이 침입자의 출현을 인식하게 된다.

감시 비디오 시스템에서도 이와 어느 정도는 비슷한 현상이 일어난다. 침입자 정보를 지니고 있는 빛 신호가 카메라의 렌즈를 거쳐 감광판에서 전기적 신호로 바뀌고, 이 전기 신호는 전선을 통하여 모니터로 전달되고, 여기에서 다시 빛의 패턴으로 전환되어 투사된다. 여기 까지는 사람 뇌의 시각피질에 전달된 신경 흥

분과 비슷한 점이 있다. 하지만, 아무도 비디오시스템이 침입자를 본다고 말하지 않는다. 모니터에 떠오른 영상을 보고서 침입자의 존재를 인식하는 경비원이 필요하다. 비디오시스템에 갖추어 있지 않은, 그러나, 파수꾼은 갖추고 있는 이 기능, '본다'는 기능은 불교에서 안식(眼識)이라고 부른다. 이 기능의 뇌과학적 원리는 무엇일까? 시각중추에 생겨난 신경세포의 전기적 흥분 패턴을 '보고'서 이를 해석하는 어떤 존재가 뇌 속에 있는 것인가? 마치 감시 비디오 모니터에 떠오른 영상을 보고 해석하는 경비원과 같은 역할을 하는 '꼬마 경비원'이 뇌 속에 존재하는 것인가? 그렇게 되면 이 꼬마 경비원의 뇌 속에는 또 다른, 더 작은 꼬마 경비원이 있어야 되고, 이 과정은 무한한 사슬처럼 반복되어야 할 것이다. 명백한 오류이다. 물체를 보고, 인식할 때에 뇌에는 무슨 일이 일어나고 있는 것인가? 여기에서 한 발자국 더 나아가서, 보이는 대상이 도둑이라고 판단하는 뇌 기전은 무엇인가? 이는 뇌 과학의 근본 질문이다. 물체를 보는 놈, 이놈이 뭐고?

5. 주체와 객체는 구분될 수 있나?

'너와 내가 둘이 아니다'는 말은 불교에서 흔히 듣는 표현이다. 또한, 내가 있으므로 네가 있고, 너로 인하여 내가 있다는 연기론(緣起論)적인 논의도 불교의 핵심적인 견해이다. 내 앞에 2m 떨어져서 네가 앉아있는데, 너와 내가 둘이 아니라고 한다. 이 말을 뇌 과학적으로 살펴보면 흥미 있는 점을 보게 된다.

앞에서 든, 파수꾼과 침입자의 예에서 살펴보자. 파수꾼이 침입자를 본다고 할 때에 피상적으로 생각하면 파수꾼이 주체이고 침입자가 객체가 된다. 그러나 '본다'는 과정을 자세히 살펴서 주체와 객체의 경계가 어디에 있는 것인지 가려보자. 침입자의 몸에서 특정 패턴으로 반사된 빛의 신호는 파수꾼의 눈동자를 거쳐서 망막의 빛 수용체에서 특정한 패턴의 전기신호로 전환되고, 이 전기신호는 시신경 ⇒ 시교차(optic chiasma) ⇒ 시작(optic tract) ⇒ 외측슬상체(lateral geniculate body) ⇒ 시방선(optic radiation)을 거쳐서 시각피질(visual cortex)에 도달한다.

침입자에 대한 정보를 지닌 빛의 신호는 그나마 객체의 변형된 형태라고 볼 수도 있겠다. 그런데, 이 빛의 신호가 망막에서 전환되어 생겨난 전기신호가 시신

경을 따라서 이동할 때에 이는 객체일가? 만일 이 전기신호를 객체라고 부르면, 내 뇌 안에 있는 시신경의 전기적 활동이 나에게 속한 것이 아니라고 말하는 셈이다. 시신경이 주체라고 말한다면 이 또 한 인식의 주체에 대한 지나치게 단순한 이해일 것이다. 불교적인 표현으로 안근(眼根)에 가까운 것일 뿐이다. 위에서 이미, 시각피질에 신경세포의 흥분이라는 형태로 도달한 침입자에 대한 정보가 어떻게 시각 인식으로 연결 되는가, 즉, 시각 인식의 주체가 뇌과학적으로 무엇인가를 밝히는 것은 아직 해결되지 않은 뇌과학의 근본 질문이라고 언급하였다. 이곳에 도달한 전기신호에 대해서도 주체/객체 논의는 무의미하다. 주체와 객체를 구분하려는 시도 자체가 잘못된 것임이 드러난다. 주체와 객체는 본래 구분이 되지 않는 것, 둘이 아닌 것임을 확인할 수 있다.

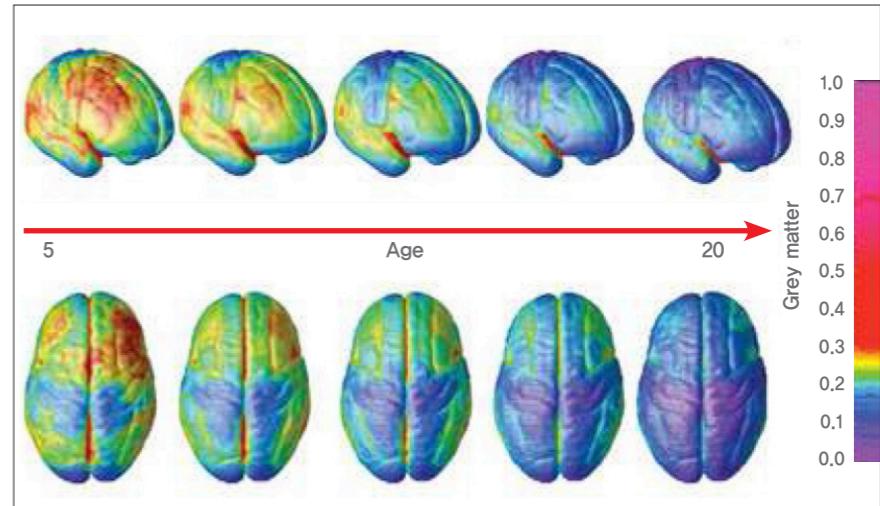
이 논의를 한 발자국 더 밀고 나아가면 연기론(緣起論)의 주제로 확장된다. 예를 들어서, 대상이 없으면, 즉, 색(色)이 없으면, 안식(眼識)은 생겨나지도 않고, 거꾸로 안식이 없을 때에 색은 이미 정보가 되지 못한다. 이 둘은 떼어내어 각각으로 성립할 수 없는, 상호 의존하는 연기의 관계를 맺고 있다.

한 결론을 내리고 이를 출력한다는 점에서 비슷한 면이 있다. 그러나 비슷함은 여기에서 끝난다. 둘 사이에 근본적인 차이가 존재한다. 컴퓨터에는 소프트웨어(Software)와 하드웨어(Hardware)가 구분되어 있어서, 필요에 따라서는 사용하던 소프트웨어를 몽땅 새 것이나, 또는 전혀 다른 것으로 바꾸어 버릴 수도 있다. 또는 한 컴퓨터에 있던 소프트웨어, 콘텐츠(Contents)를 뽑아서 다른 컴퓨터에 옮길 수도 있다. 반면에, 뇌에는 이 둘의 구분이 명확하지 않다. 경험의 결과로 뇌의 특정 회로에 구조적인 변화가 생기게 되고, 이 변화로 인하여 회로의 작동 양식에 변화가 생긴다. 즉, 학습의 결과는 특정 뇌 회로의 기능 강화라는 형태로 저장되고, 이 회로는 다음에 동일한 정보가 들어왔을 때에 정보 처리를 훨씬 빠르고 효과적으로 하게 된다. 그리고 이 변화가 계속 유지되면 기억이 된다. 우울증 환자의 뇌를 검사해 보면, 해마의 크기가 줄어들었다는 연구도 있다. 임신한 동물이 심한 스트레스를 계속 받게 되면 태아의 뇌 발달에 영향을 주어, 태어난 새끼가 성장 후에 행동장애를 일으킨다는 연구결과도 있다. 즉, 소프트웨어가 하드웨어에 통합(Integration)되어 있다. 결과적으로, ‘뇌가 겪어온 과거의 경험이 뇌의 구조를 바꾸어 현재의 뇌의 작동 방법을 변화시킨다.’ 컴퓨터와 매우 다른 점이다.

6. 뇌의 구조와 기능은 유전과 환경의 공동작품

유전자는, 우리 몸의 기본 구조와 대체적인 기능을 지정한다는 점에서, 건축 설계 도면에 비유할 수 있다. 뇌의 구조와 기능도 이에 해당된다. 이러한 기본 설계 위에 환경이 작용하면서 다양성이 생긴다. 태어날 때에 겨우 ~400g정도이던 신생아의 뇌가 성장하면서 ~1400g의 성인의 뇌로 자라난다. 그 동안에 일어나는 많은 변화에 환경이 영향을 미치게 된다. 이러한 변화는 엄마의 배속에서부터 시작된 작업이며, 전 생애 동안 계속되는 변화이다. 이러한 관점에서 볼 때, 현재 작동하고 있는 뇌는 유전과 환경의 합작품이다. 이렇게 하여 만들어진 다양한 뇌가 다양한 방법으로 환경에 대응한다. 여기에서 말하는 환경이란, 기후나 음식처럼 물리화학적인 것뿐 아니라, 경험, 학습 등 유전자 이외의 모든 것을 포함하는 개념이다. 즉, 육식(六識)을 통하여 도입, 생성된 모든 정보를 포함한다.

뇌를 컴퓨터에 비유하기도 한다. 외부에서 입력된 정보를 분석/처리하여 적절



10대 젊은이의 뇌의 작동 방식은? 'very different from adults'
J. GIEDD : Brain wave ; how adolescents lose grey matter. (Pruning) Nature 24 August 2006, pp865-867

7. 뇌과학으로 본 업(業), 업보(業報), 업장(業障)

위에서 설명한, 컴퓨터와 다른 뇌의 특성과 연관하여, 불교에서의 중요한 개념인 업(業), 업보(業報), 업장(業障)의 문제를 뇌과학에 적용하여 설명하는 것이 가능하다고 생각한다. 업–업보가 만사의 연기적인 인과 관계를 의미한다고 할 때에, 뇌가 유전과 환경의 합작품이라는 말은, 곧, 한 개인의 독특한 뇌는 그 뇌가 태아에서 만들어질 때부터 끊임없이 작용한 유전과 환경이라는 업을 통하여 이루어진 업보라고 볼 수 있게 된다. 태어난 후의 경험, 학습도 뇌에 업보로서 녹아들어 있고, 그 업보가 현재의 뇌의 작동 방식에 영향을 주고 있는 것이다. 한 인간의 개성이란 곧, 이 모든 것의 총화로서의 업보라고 봐도 될 것이다. 문제는 특정 회로의 변화가 때로는 이 회로의 작동에 부정적인 영향을 미치게 될 때이다. 이는 곧, 업으로 인한 장애, 업장이라고 부를 수 있다. 동일한 정보에 대하여 보는 이(정보에 접하는 뇌)에 따라서 다른 반응(다른 정보 처리 방식)을 나타낼 수 있다. 예를 들어서, 물 반 컵을 보고서, 아직도 많이 남았다고 흐뭇해 할 수도 있고, 겨우 반 밖에 안 남았다고 비관적인 상태에 빠져서 괴로워할 수도 있다. 전쟁에서의 극도로 괴로운 경험으로 인하여 발병된 외상후스트레스증후군(PTSD, post-traumatic stress disorder) 환자의 경우에서처럼, 더 이상 위험이 없는 후방의 환경에 돌아와서도 없어지지 않는 불안, 초조, 우울 증상으로 고통 받을 수도 있다.

생쥐를 이용한 실험을 통하여, 이러한 뇌과학적 업보, 업장이 어떻게 하여 생기는지를 생각해 보자. 생쥐에서 ‘공포 조건화 반응(fear conditioning)’이라는 학습 실험의 수행이 가능하다. 이 실험을 하기 위한 조건화 반응 상자의 바닥에는 전기 충격을 줄 수 있는 철망이 깔려 있고, 상자의 위쪽에는 일정한 음의 소리를 내 줄 수 있는 스피커가 있다. 공포 학습은 생쥐를 이 상자에 넣어 두고서 스피커에서 연속적 단음(monotone)을 30초 정도 주다가 마지막 순간에 전기 충격을 주면서 소리와 전기 충격을 함께 멈추는 것으로 구성된다. 생쥐는 물론 전기 충격을 매우 싫어한다. 그래서 이와 같은 경험을 한 생쥐는 나중에 다른 환경에서 공포 조건화 때에 들은 것과 똑 같은 음의 소리를 듣게 되면 “이 소리가 나면 잠시 후에 전기 충격이 올 것”이라는 것을 학습했기 때문에 곧 닉칠 전기 충격에 대한 공포감에 사로잡히어서 동작이 얼어붙어 버린다(freezing response). 또는,

소리 자극은 없이 조건화 실험을 하던 상자에 다시 넣어주기만 해도 상자의 환경과 전기 충격의 연계에 대한 기억으로 인하여 마찬가지의 공포 반응을 나타낸다. 이러한 공포조건화 반응은 매우 효과적인 학습으로서, 그 기억이 강력하게 형성되고 오래 유지 된다. 이러한 학습을 경험한 생쥐의 뇌 회로를 검사해 보면, 공포, 불안, 등의 정서를 관장한다고 알려진 편도핵의 신경 회로 기능이 매우 강화되어 있음이 발견되었다. 뚜렷하고 강한 업보가 형성된 것이다.

조건화 학습을 한 생쥐가 공포 반응을 나타내게 되는 상황에서 주의 깊게 볼 점은, 이제 더 이상 전기 충격은 없는데도, 학습 시에 제시된 조건화 자극(소리, 또는 상자의 환경)만 있는 것으로도 학습된 공포 기억이 되살아난다는 점이다. 속담에, 자라에게 혼난 놈 솔뚜껑 보고 놀란다는 말과 비슷한 경우이다. 그런데, 이 생쥐에 전기 충격 없이 소리 자극을 주는 실험을 반복하다 보면, 이 생쥐의 공포 기억 반응 정도는 점차 줄어들어, 결국에는 같은 소리 자극에 대하여 더 이상 공포 반응을 보이지 않게 된다. 이 현상을 ‘공포 기억 소거(消去)’라고 부른다.

그런데, 문제는 공포 기억 소거가 잘 이루어지지 않을 때이다. 이 소거에 관여하는 뇌 기능에 문제가 생긴 경우이다. 생쥐의 경우에, 공포 기억 소거에 장애를 보이는 유전자 변이들이 알려지고 있다. 이 유전자 변이 생쥐는 반복적인 소거 실험(전기 충격 없이 주는 소리 자극)에도 불구하고 같은 소리 자극이 주어질 때마다 공포 반응을 나타낸다. 소거가 어떠한 뇌 회로에 의하여 수행되는지에 대한 연구는 현재 뇌과학의 활발한 연구 주제이다. ‘소리와 전기 충격의 밀접한 관계’에 대하여 편도핵의 공포 기억 회로에 새겨진 구조적인 변화가 소거를 통하여 사라져서 원상으로 돌아가는 것인가? 아니면, 소리와 전기 충격의 관계에 대한 새로운 해석, 즉 “그 둘이 반드시 함께 오는 것은 아니다.”는 해석이 학습되어 새로운 회로에 기억되고, 이 새로운 기억이 기존의 기억의 작동을 억제하는 것인가? 이 경우, 뇌 회로 간의 경쟁인 셈이다. 더 많은 연구가 필요한 주제이다. 너무나 강력한 부정적인 기억을 잊지 못하는 경험 하나쯤은 누구나 있을 것이다. 그리고 이로 인하여 심리적으로 위축 되거나, 절망에 빠지거나 등등으로 정상적인 생활을 영위하지 못하는 경우도 드물지 않다. 위에서 예를 든 외상후스트레스증후군도 그 한 예일 뿐이다. 이러한 장애는 경험(업)의 결과로 뇌에 생긴 변화(업보)가 뇌의 작동 방법을 부정적인 방향(업장)으로 이끈 예가 될 것이다.

8. 이러한 지식이 나와 무슨 상관이 있을까?

현대의 뇌과학 연구는 종래의 ‘마음’에 대한 개념을 많이 바꾸어 놓고 있다. 행동을 관찰하고 분석하여 ‘마음’에 대한 해석을 할 수 밖에 없던 종래의 전통적인 심리학의 입장으로부터 나아가서, 뇌 기능에 대한 실험적 관찰을 할 수 있게 되면서, 모든 마음 작용에 뇌 기능이 작동하고 있음을 알게 되었다. 인간에서 적용하는 자기 공명 영상기술, 뇌자도 (MEG, magnetoencephalography) 등의 기술은 인간의 뇌 속에서 일어나고 있는 현상을 행동과 실시간으로 관찰할 수 있게 되었다. 동물에서는 훨씬 다양한 기술을 사용하여 뇌에서 일어나는 현상을 잡아내고 있다. 특정한 행위, 감정 등에 어떤 뇌 부위의 어느 신경 세포가 어떠한 기능을 하는지를 짚어 낼 수 도 있다. 이러한 다양한 연구를 통하여 모든 존재 행위에 뇌의 작용이 바탕을 이루고 있음을 알게 되었다.

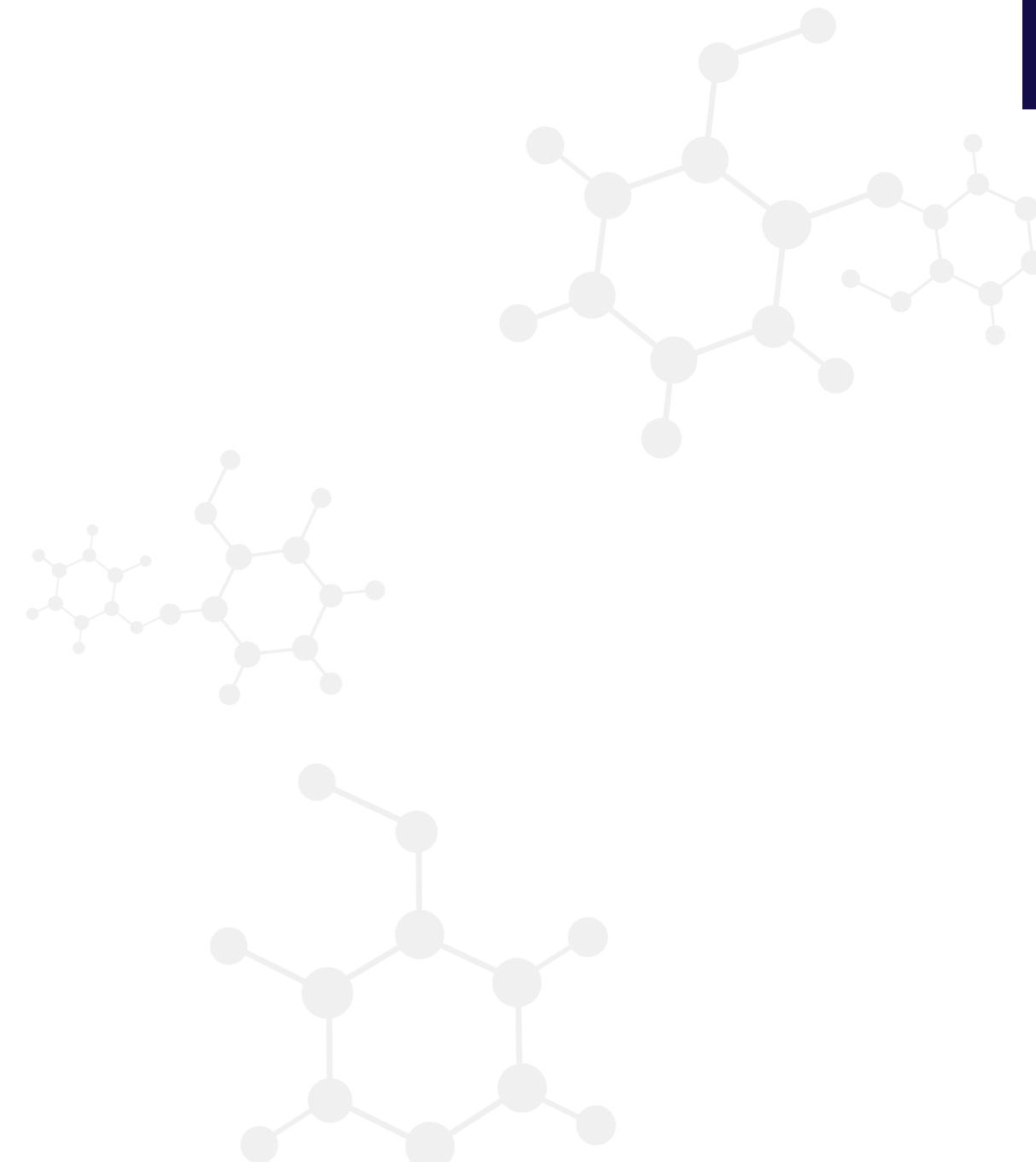
여기에서 한 가지 질문이 생길 수 있다. 이러한 지식을 아는 것이 나에게 무슨 실제적인 도움을 줄 수 있을까? 종교처럼 안식을 줄 수도 있을까? 이에 대하여 두 가지 생각을 낼 수 있을 것 같다.

우선, 내 몸이 접하는 모든 것은 내 뇌에 들어가는 것임을 아는 것이다. 음식이 건, 오감을 통한 정보이건 내 뇌는 환경과 소통을 한다. 운동을 하건, 술을 마시건, 이 모든 것은 뇌에 입력된다. 무엇을 나의 뇌에 들어가게 허락하고 무엇을 금지시킬 것인가는 나의 결정에 달린 일이다.

그 다음에는, 뇌는 스스로의 작동 방법을 조정할 수 있음을 아는 것이다. 이는 제6식을 조정하는 것이기도 하다. 불교를 포함하여, 다양한 심신 수행 방법은 바로 이 현상에 의지함으로써 가능하다. 그리고 이는 모든 것이 마음이 지어내는 것(一切唯心造)이라는 말의 근거가 된다. 어느 회로를 작동하도록 선택할 것인가? 회로 선택의 문제이기도 하다. 때로는 심장과 숨쉬기를 제외하고 대부분의 회로를 쉬게 할 수도 있을 것이다.

끝으로, 이러한 것을 선택하는 자가 무엇인가? 이 질문에 대한 뇌과학적인 답은 아직 없다. 뇌과학 연구가 이러한 선(禪) 질문에 답을 줄 수 있는지는 두고 보아야겠다.

(본 글은 「불교평론」 2010 여름 제12권 제2호, 76–92쪽에 발표한 글을 재수록한 글입니다.)



과학의 눈

Gyeonggi MoMA Lectures
eyes of science

우주와 세포 universe & cell

제5강

나노의 세계



김성규 | 성균관대 화학과 교수

서울대 화학과와 동대학원 졸업 후 미국 시카고대학에서 박사학위를 취득했다.
콜로라도대학교에서 박사 후 연구원, NRC Research Associate 연구원을 거쳐 나노과학공학 협동과정 주임교수,
나노튜브 및 나노복합구조 연구센터 총무를 역임하였다.

나노의 세계

성균관대학교 화학과 교수 김성규

1. 소개

● 나노는 원래...

‘나노’는 원래 그리스어에서 난장이라는 뜻을 가진 말이었는데, 과학적 수치의 접두어로서 사용되어져 왔던 것입니다. 서양에서는 1,000마다 수치 앞에 접두어를 붙여서 사용합니다. 예를 들어, 10억(1,000,000,000)을 나타내는 기가(Giga-), 100만(1,000,000)을 나타내는 메가(Mega-), 1,000을 나타나낸 킬로(Kilo-) 등이 그것입니다. 1 이하에서는 1,000분지 일 ($1/1,000$ 또는 10^{-3})을 나타내는 밀리(milli-), 100만분지 일 ($1/1,000,000$, 또는 10^{-6})을 나타내는 마이크로(micro-), 10억분지 일 ($1/1,000,000,000$, 또는 10^{-9})을 나타내는 나노(nano-) 등이 있습니다. 그러므로 1 나노미터 (1 nm)라는 것은 1 m의 10억분지 일 또는 10^{-9} m를 의미합니다. 유사하게 1 나노초 (1 ns)는 1 초의 10억분지 일 또는 10^{-9} s에 해당하는 짧은 시간을 의미하겠습니다 (1 나노초 동안에 빛은 30 cm 날아갑니다.). 1 나노와트 (1 nW)는 1 와트의 10억분지 일 또는 10^{-9} W에 해당하는 에너지 효율을 의미합니다. 기타 나노뉴튼, 나노쥬울, 나노그램 등 어떤 물리양의 단위에도 적용될 수 있는 접두사였었습니다.

그런데, 언제부터인가 사람들은 ‘나노’라는 단어에 열광을 하기 시작했고, 그 나노의 의미는 물체의 크기를 나타내는 나노미터에 국한되게 되었습니다.

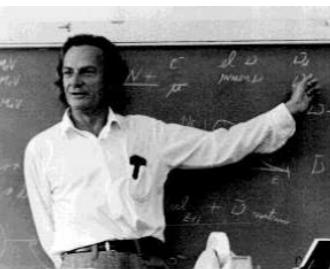
● 여기도 나노 저기도 나노...

나노미터 크기의 세계를 다루는 과학이 발달함에 따라 과학자들은 나노를 수치

가 아닌 일반 과학 용어에도 접두사로 붙여 수많은 신생어들을 탄생시켰습니다. Nanotechnology(나노기술), Nanoscience(나노과학), Nanoscale(나노스케일), Nanoengineering(나노공학), Nanochemistry(나노화학), Nanodevice(나노소자), Nanocatalyst(나노촉매),, 이들을 나열하는 것은 상당한 공간이 필요하군요...

‘나노’관련 공인된 국제학술지는 전세계적으로 34종이 있는데, 대부분 2000년 이후에 창간된 것들입니다. 2종의 학술지만 예외인데, 그 하나는 1993년 발간된 Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures라는 학술지인데, 창간 당시는 풀러렌(탄소 60개가 축구공 형태로 배열된 분자)의 대량합성이 가능하여지고 곧이어 탄소나노튜브가 발견되었으며, 이들 두 물질만으로도 연구할 것들이 엄청났었던 시대적 배경이 있었습니다. 또 하나는, 1990년 창간된 Nanotechnology로서 나노기술이라는 신조어를 탄생시키고 그 봄을 일으켰던 사람들이 주도하여 최초의 나노관련 학술지로 탄생시켰던 것입니다. 그 외에는 모두 2000년 이후 출간되었는데, 그것은 2000년 전후의 나노과학 기술에 대한 사람들의 인식과 대접이 크게 달라졌음을 의미하겠지요.

<http://www.nanonet.info>은 우리나라를 중심으로 전세계 나노관련 뉴스, 정책, 행사, 데이터베이스 등 모든 것을 보아 놓은 곳입니다. 이곳에서 검색하여 보니, 대한민국 대학/대학원에 78개 나노관련 학과, 대학원에 87개 나노과학연구실, 출연연구소에 25개의 나노관련 연구실이 있음을 알 수 있습니다. 이들은 대부분 2000년 이후에 만들어졌을 것입니다.



*Richard P. Feynman (1918–1988) :
1965년 노벨물리학상 수상

● 나노의 등장

이렇게 ‘나노’가 주목을 받기 시작한 배경을 추적해 보면, 1959년 12월 29일 미국 물리학회 미팅에서 Richard Feynman* 교수(1918–1988)의 강연에서 찾을 수 있습니다. Richard Feynman 교수는 양자전자학의 최고 권위자로서 1965년 노벨 물리학상을 수상한 바

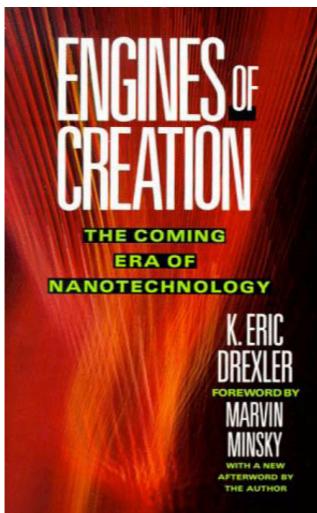
있습니다. 과학자로서의 저명도 못지 않게 과학을 일반대중에서 소개하기 위한 많은 저술과 강연으로도 유명하신 분입니다. 이 분께서 1959년 ‘저 아래 충분한 공간이 있다.(There is a Plenty of Room at the Bottom)’라는 제목의 강연 내용 일부분을 적어보면 다음과 같습니다. “이제 우리가 알고 있는 기본 물리학의 지식과는 다른 오묘한 현상이 등장하고 그것을 많이 응용하게 될텐데, 그것들은 매우 작은 스케일에서 다루어지는 것들입니다. ... 이런 현상들에 의해, 대영백과사전 24권을 조그마한 편의 대가리 정도의 공간에 새길 수도 있지 않겠습니까?”

이 연설은 머지않은 미래에 나노과학기술 시대가 도래할 것을 예측한 것이었고, 마이크로 미터 이하의 물체도 볼 수 없었던 당시를 생각한다면 정말 놀랄만한 예측이었습니다.

그 이후 Feyman 교수께서는 1988년 돌아가셨고, 시간이 흘러 2000년 1월 Bill Clinton 미국 대통령은 Feyman 교수가 재직하셨던 Cal. Tech.을 방문하여 유명한 연설을 하셨습니다. “40여년 전에 Feyman 교수께서는 원자를 마음대로 하나씩 움직일 수 있다면 어떤 일이 일어나게 될지 상상해 보라고 하였습니다.... 강철보다 10배나 강하면서 무게는 몇 분의 일에 불과한 물질을 상상해 보세요. 미국 국회 도서관의 방대한 정보를 각설탕만한 공간에 전부 기록할 수 있다고 생각해 보세요.... 이러한 기술들이 완성될 때까지 20년이 걸릴지도 모르겠지만... 그것이 바로 우리 연합정부가 기여해야 하는 부분입니다.”

이와 같은 Clinton 대통령의 연설 몇 달 후 ‘국가나노기술선도방안 (National Nanotechnology Initiative, NNI)’이 국회에서 통과하여 향후 49.5억 불의 미연합정부 예산이 나노기술 분야에 투자되도록 하였습니다. (그리고 보면 금년은 NNI가 출범한지 10년이 되는 해입니다.) 또한 2003년 George Bush 대통령은 ‘21세기 나노기술 연구개발 법안’에 서명함으로써 4년간 36.3억불의 미연합정부 예산을 투자하였습니다. (현재도 매년 NNI에 약 15억불의 정부 예산이 투자되고 있습니다.)

그와 같이 미국의 대통령 등 유력 정치인들이 나노기술에 대규모 투자를 하도록 유도한 배경에는 Eric Drexler 등 초기의 나노기술 주창자들이 있었습니다. Eric



* Eric Drexler 저서, 1986 초판

Drexler는 항공공학 분야에서 박사학위를 받으신 분으로서 1959년 Feyman 교수의 연설에 영감을 얻었고, 현재의 과학기술 수준을 바탕으로 미래를 예측하는 저술을 많이 남겼습니다. 그중에 하나는 1986년 초판이 발행된 *Engines of Creation**입니다.

‘분자 나노기술’이라는 내용으로 책을 쓰고 강연하던 중, 1992년 6월 미국국회 ‘통상과학운송 상원위원회 과학기술 및 우주 소위원회’에 분자 나노기술에 관한 보고서를 내고 상원위원들을 만나 진술을 하였습니다. 그중에서 후에 부통령이 되는 앨 고어 상원위원회의 대화가 어느 책에 있길래 여기에 옮겨 적습니다. (주: 본 대화는 사실이 아닐 수도 있음.)

AI core : 박사께서 말씀하시는 분자 나노테크놀로지는 바로 조립과 제조 등에 관한 새로운 접근이죠 …(중략)… 박사의 주장에 따르면, 하나의 분자로부터 물건을 만들기 위한 기초연구는 비약적인 성과를 거두고 있습니다. 따라서 우리에게 정말 필요한 것은 그 연구들의 응용입니다.

…(중략)…

AI core : 시간이 얼마나 걸리겠습니까? 예를 들어, 지난 10년간 바이오테크놀로지 분야에 쏟은 정도의 정부와 개인의 지원을 나노테크놀로지에 투자한다면, 2010년경에는 어떤 종류의 진척이 있겠습니까?

Drexler : 이런 분야에서 그런 질문은 대답하기 가장 곤란한 질문 중의 하나입니다. 분자기계의 행동을 계산하는 방법은 알고 있지만, 극복해야 할 많은 어려움이 남아있는 연구계획의 발전속도를 계산하는 법은 모르겠습니다.

…(중략)…

Drexler : 15년 정도라면 주요한 대규모의 응용을 실현하는데 길지 않은 시간이라고 생각합니다.

Eric Drexler가 미국 상원위원들을 만나 어떤 이야기를 했길래 헛

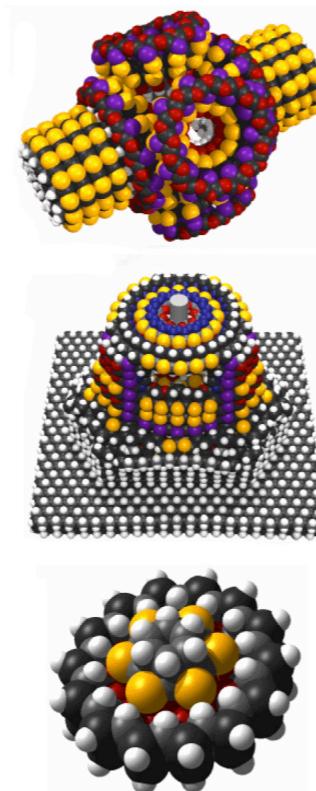
날 대통령들이 어마어마한 정부 예산을 나노기술에 투자하게 되었을까요? 저도 잘 모르겠습니다마는, Eric Drexler를 비롯하여 몇몇 탐구공학을 한다는 나노기술 추종자들이 저술한 책들을 살펴보면, 우리의 미래는 꿈과 같은 세계입니다.

거기에는 “원자나 분자를 자유롭게 조작할 수 있을 때”라는 전제 조건 아래, 나노기기, 나노컴퓨터, 나노로보트가 자주 등장합니다. 이들이 중심이 되어 분자 나노기술이 완성이 된 세계를 제작 요약 정리하다면 다음과 같습니다.

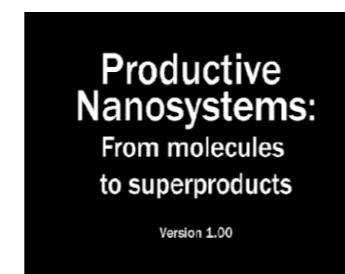
나노기술이 완성된 미래 세계에서는, 스스로 복제 할 수 있는 나노기기들에 의해, 인간의 모든 병을 간단하게 진단하여 전부 고칠 수 있을 것이고, 식량 문제, 에너지 문제 등도 자동 해결될 것이고, 환경 오염을 발생시키지 않는 산업 구조에 살게 될 것이며, 잃어버린 생물체 종 복원도 가능할 것이며, 이들 모든 것들이 너무나 값싼 비용으로 이루어질 것입니다.

Eric Drexler는 저술 및 강연 활동 외에 연구소를 설립하여 주로 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 나노기기의 구조 설계와 작동원리를 탐구합니다. 여기에 보여드리는 것은 Eric Drexler 등이 디자인한 나노기기들*인데, 대부분 일반 텁니바퀴 모양을 하고 있지만 그 구성요소들은 원자들입니다. 그런데 이들 작품이 언급된 논문을 살펴보아도 이들이 어떤 원자인지 제대로 기술된 것을 저는 보지 못했습니다. Eric Drexler와 같은 탐구공학을 하시는 분들과 실제로 정통한 방법으로 물리나 화학 연구하시는 과학자들간의 논쟁도 많았습니다. 정통 물리나 화학을 하시는 과학자들의 눈에는 Eric Drexler가 내놓는 나노기기들은 그저 상상에 불과할 뿐입니다.

여기에 Eric Drexler도 관여한 바 있는 NanoRex라는 연구소에서 제작하였다는 Nanofactory라는 만화 비디오**를 한번 보시길 바



* Institute of Molecular Manufacturing
(<http://www.imm.org>)의 작품들



** Nanofactory라는 만화 비디오

랍니다.

(출처 : http://www.dailymotion.com/video/x10gr1_nanofactory_tech)

2. 조금 더 자세히

● 물체의 크기 지도

나노 세계를 보다 정확히 이해하기 위해서는 사물의 크기를 나타내는 잣대를 중심으로 살펴보는 것이 필요할 것 같습니다.



우리 인간의 눈은 1 mm까지는 잘 구분하는 것 같은데 0.1 mm로 내려가면 잘 구분하지 못합니다. 그래서 1 mm부터 그 아래로 물체의 크기 지도를 그릴 때, 이들은 모두 우리 눈으로 직접 볼 수는 없는 것들입니다.

머리카락의 굵기가 대략 0.1 mm입니다. 정자는 5 마이크로미터 정도의 머리와 수십 마이크로미터의 꼬리를 가졌습니다. 적혈구는 지름 8 마이크로미터 지름과 2~3 마이크로미터의 두께를 가진 원판 모양이고 백혈구는 7 마이크로미터의 구형입니다. 박테리아는 다양한 모양을 가졌지만, 흔한 것은 수백 나노미터의 지름과 수 마이크로미터의 길이를 갖는 것들입니다.

이들 물체들 즉, 크기가 대략 1 마이크로미터 안팎의 것들은 광학 현미경으로 관측할 수 있습니다. (주: 그림의 백혈구, 적혈구 이미지의 색깔은 현미경으로 직접 보인 것이 아니고 후에 도색한 것이 틀림 없음.) 그 이유는 광학 현미경은 빛을 이용한 것인데 눈에 보이는 빛의 파장은 0.4 마이크로미터 – 0.7 마이크로미터이고 이들보다 더 세밀하게는 빛으로 구분할 수 없기 때문입니다. 그렇기 때문에 오래전부터 원가 작은 것은 마이크로라고 했습니다. 현미경의 영어 단어는 마이크로스코프 (microscope)입니다. 즉, 원래 마이크로미터까지는 볼 수 있는

기기라는 것입니다. 생물학에도 미생물을 microbiology라고 하고, 경제학에도 미시경제학을 microeconomics라고 합니다.

이번에는 물체지도의 반대쪽으로 가서 아주 작은 분자를 볼 것 같으면, 메탄 (CH_4)과 같은 분자는 약 0.15 나노미터 정도의 크기를 갖습니다. 풀러렌 (C_{60})은 비교적 큰 분자인데, 약 1.1 나노미터의 크기를 갖습니다. 우리 몸에서 산소를 운반해 주는 헤모글로빈은 단백질이라는 거대한 생체 고분자인데 수 나노미터의 크기를 갖습니다.

그런데 이들 작은 분자들은 현미경을 이용해서도 도무지 볼 수 없는 것들입니다. 그럼에도 불구하고 이들 분자들이 어떻게 생겼는지. 즉, 어떤 원자들이 어떤 간격과 각도로 그 분자를 구성하는지 매우 정확하게 알고 있습니다. 그 이유는 각종 분광학적 방법과 양자화학적 계산 방법이 있기 때문입니다. 헤모글로빈과 같은 단백질의 경우, 고체 결정으로 만들 수 있다면 X-ray를 사용하여 그 단백질을 구성하는 수천개의 원자들의 위치를 정확하게 알 수 있습니다. 이러한 일들은 과학자들에 의해 거의 100년전부터 해 오던 일입니다.

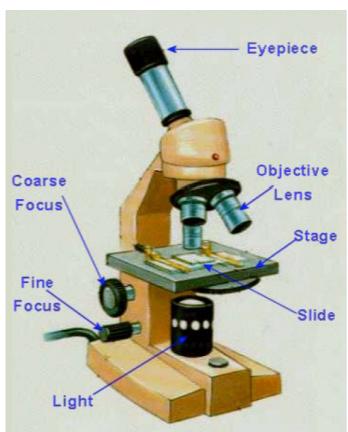
나노기술이 주로 다루는 물체의 크기는 대략 1~100 나노미터 영역이라고 합니다. 그렇다면, 광학 현미경으로 형태를 살필 수도 없고, 각종 분광학 기법이 잘 통하지 않는 영역이기도 합니다. 이 영역의 연구가 잘 이루어질 수 있었던 것은 전자 현미경 덕택입니다. 그래서 바이러스와 같은 나노미터 영역의 생명체나 나노브(자기증식 여부에 대해 논란 등)와 같은 물질의 형태를 전자 현미경으로 확인할 수 있습니다.

전자 현미경은 간편하고 매우 쓸모있는 기기임에는 틀림없으나 단점도 있습니다. 그것은 전자가 공기 분자와 부딪히는 것을 막기 위해 시료를 진공 챔버에 넣고 관측해야 한다는 것입니다. 그렇기 때문에 전자 현미경으로 관측되는 것은 죽은 생명체 뿐입니다. 또한 전자 현미경으로 관측되는 이미지에는 그 물체의 색깔 정보가 없습니다. (본 바이러스 이미지처럼 색깔이 나타난 것은 전자 현미경으로 얻은 흑백 이미지를 추후에 도색 작업한 것임.)

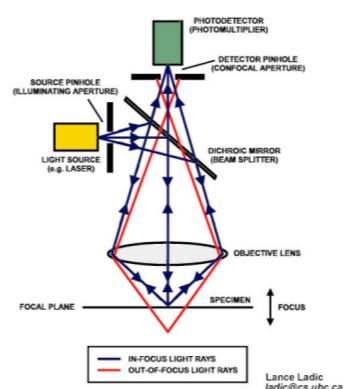
현대의 반도체 산업 등에서는 쓸모 있는 구조물의 크기를 점점 작게 만드는데 주력하여 왔습니다. 이제 선의 굵기가 40 나노미터에 불과한 반도체 메모리나 트랜지스터가 그 좋은 예일 것입니다. 이들은 주로 커다란 크기의 고체 물질을 자르고 깎아서 나노미터 수준까지 내려 온 것들입니다. 그러한 방법을 Top down 방식입니다. 그러나 이제는 그러한 Top down 방식이 한계점에 도달하지 않았나 생각이 듭니다. 반면 Eric Drexler 등이 분자 나노기술이라고 이야기하는 것은 원자나 분자를 원하는대로 조작하여 조립하여 쓸모 있는 나노구조물을 제작한다는 것으로서 Bottom up 방식이라고 합니다. Bottom up 방식으로 잘 만들어지는 구조들이 물론 있습니다마는 Bottom up 방식은 최첨단 과학을 모두 동원해야 하는 쉽지 않은 기술입니다.

● 직접 보고 싶다.

나노미터 영역 혹은 마이크로미터 영역에서는 물체의 형태를 확인하는 것이 무엇보다도 중요합니다. 물체의 크기가 0.1 mm 이하로 내려가면 우선 돋보기를 생각할 수 있겠습니다. 돋보기는 물체의 크기를 대략 5~10배 확대 시켜 줍니다.



*보통 광학 현미경 (Microscope)



**공총점 현미경 (Confocal Microscope)

광학 현미경 (Microscope)*은 돋보기를 고급 기기로 만든 것이라고 할 수 있습니다. 광학 현미경에는 대물렌즈와 대안렌즈가 있어서 각 렌즈 배율이 100배라면 물체를 10,000배 확대하여 볼 수 있습니다. 그런데 일반 광학 현미경은 아무리 높은 배율을 갖는 렌즈를 사용하더라도 대략 2~3 마이크로미터 수준까지가 한계입니다. 그 이유는 일반 광학 현미경에서는 램프 빛을 시료에 비추고 그 반사된 이미지를 보려는 것인데, 램프의 하얀 빛은 빨주노초파 남보 색깔을 모두 합쳐 놓은 것이라 조그마한 영역에 촛점을 형성하기 어렵습니다.

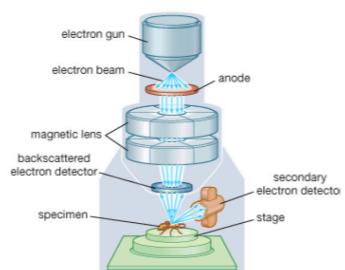
그 반면 레이저를 광원으로 사용하여 빛의 간섭에 의한 촛점 한계 (대략 빛의 파장의 1/2 정도)까지 분해능을 높인 기기인 공총점 현미경(Confocal Microscope)**라고 합니다. 레이저는 퍼지지 않

고 직진하기 때문에 렌즈로서 좁은 공간에 촛점을 잘 형성합니다. 공촛점 현미경을 사용하면 대략 250 나노미터까지 물체를 확인할 수 있지만 두 가지 단점이 있습니다. 첫째, 일반 광학 현미경에서는 백색 광원을 사용하여 그 물체의 색깔을 직접 확인할 수 있지만 공촛점 현미경은 레이저의 파장이 하나이기 때문에 물체의 색깔에 대한 정보를 얻을 수 없습니다. (즉, 빨간색 레이저로 비춰주면 그 물체는 빨간색의 명암으로만 나타남.) 둘째, 레이저를 아주 좋은 영역에 촛점을 맞추고 그 부분을 스캔하는 방식이기 때문에 한번에 물체의 이미지가 얻어지는 것이 아니고 2차원적으로 스캔하여야 하므로 이미지를 얻는데 시간이 좀 걸립니다.

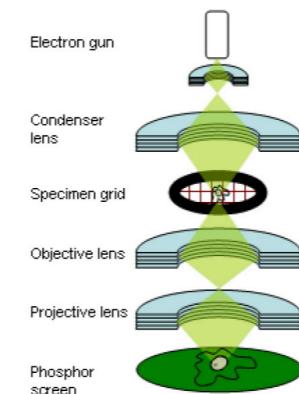
확인하려는 물체의 크기가 약 0.5 마이크로미터 이하가 되면 전자 현미경에 의존할 수밖에 없습니다. 전자 현미경은 두 종류가 있습니다. 주사 전자 현미경(Scanning Electron Microscope, 일명 SEM이라고 함.)과 투과 전자 현미경(Transmission Electron Microscope, 일명 TEM)이 것입니다. 현대 나노과학 기술에서 가장 중요한 기기들이라고 할 수 있습니다.

주사 전자 현미경(SEM)*은 전자를 가속시켜서 시료에 때려주고 반사되는 전자들의 공간 분포를 카메라로 이미지화하는 기기입니다. 이 기기는 1935년부터 Max Knox 등에 의해 개발되기 시작하여 1965년부터 상용화되어 최대 50만배까지 확대가 가능합니다. 몇 년전부터 국내 기업에서도 생산하기 시작하였습니다. 성균관대학교에도 몇 대나 있는데 사용 예약을 따내기 힘들 정도로 사용 빈도가 높은 기기입니다.

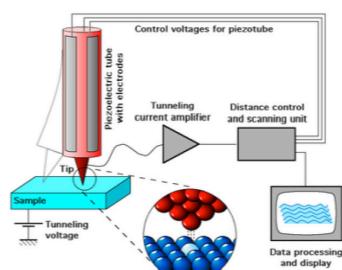
투과 전자 현미경(TEM)**은 가속된 전자를 시료에 보낸 뒤 시료를 투과한 전자의 공간 이미지를 보는 것입니다. 마침 빛을 쪼여주었을 때 형성되는 그림자의 원리와 비슷합니다. 또한 우리가 병원에서 촬영하는 X-레이 이미지와도 비슷한 원리입니다. 전자가 시료를 통과하여야 하므로 매우 얇은 시료만 관측이 가능하고 TEM



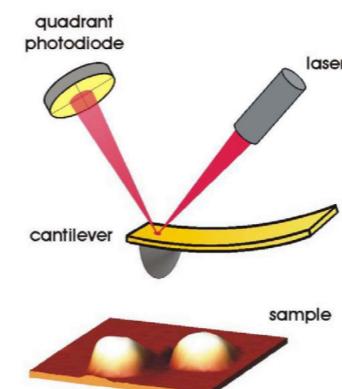
*주사 전자 현미경
(Scanning Electron Microscope, SEM)



**투과 전자 현미경
(Transmission Electron Microscope, TEM)



*주사 터널링 현미경
(Scanning Tunneling Microscope, STM)



**원자힘 현미경
(Atomic Force Microscope, AFM)

중에서 최고의 것은 시료의 원자 관측까지도 가능합니다. 이 TEM 개발은 독일 과학자 Max Knox와 Ernst Ruska 등이 주도하였는데, Ruska는 1986년에 Binning과 Rohrer와 함께 노벨 물리학상을 받았습니다. Max Knox가 먼저 돌아가셨기 때문에 Ruska는 전자 현미경을 개발한 사람이 아니고 STM, AFM을 개발하였던 Binning과 Rohrer와 함께 노벨상을 받은 것입니다.

전자 현미경은 아니고 아주 뾰족한 탐침을 사용하여 고체의 표면 구조를 원자 수준으로 살필 수 있는 기기법이 있습니다. 그것은 주사 터널링 현미경(STM)*과 원자힘 현미경(AFM)**입니다.

STM은 매우 뾰족한(원자수준으로 뾰족) 탐침을 금속성 고체의 표면에 아주 가깝게(1 나노미터 이내) 가져가면, 고체표면 원자로부터 전자가 튀어나와 탐침쪽으로 옮겨가서 전체적으로 전기가 흐르는 현상을 바탕으로 한 것입니다. 그래서 탐침을 고체 표면을 따라 스캔하면 고체 표면의 구조를 원자 수준으로 이미지화 할 수 있습니다.

1983년 STM 방법으로 실리콘 표면 위의 원자배열구조를 확인한 것은 물리학의 큰 성과였습니다. 그리고 나서 1990년 IBM의 과학자들이 STM 탐침을 이용하여 35개의 제논 원자를 니켈 표면 위에서 움직여서 IBM이라는 글씨를 쓴 것도 획기적인 사건이었습니다. 그것은 바로 1959년 Feynman의 강연에서 언급했던 ‘원자를 자유자재로 조작하는 기술’이 가능하다는 것을 보여준 사건이고 Eric Drexler 등이 원자를 자유자재로 조작할 수 있다는 확신을 바탕으로 유력 정치인들을 설득할 수 있었던 계기를 만들어 준 것입니다. 그 이후에도 STM 탐침으로 원자를 고체 표면에 배열시키는 연구는 여러 곳에서 성공적으로 수행되었습니다. 그러나 몇몇 원자들을 자유로이 움직였다고 해서 우리의 미래가 크게 바뀔만한 발전을 가져온 것 같지는 않습니다. STM 탐침을 이용하여 원자를 움직이는 것이 진공 속에서 깨끗이 청소한 고체 결정 표면 위에 영하

200도 이하에서나 가능한 지극히 어려운 기술이기 때문입니다.

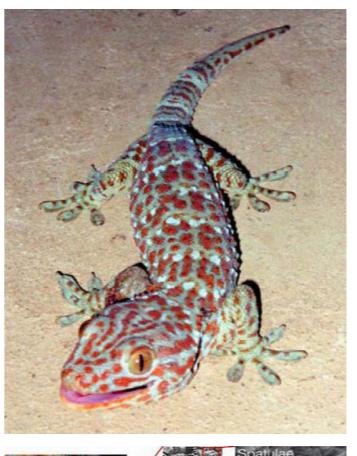
STM과 유사한 방법으로 고체 표면의 구조를 거의 원자 수준으로 관찰할 수 있는 장비로 AFM이 있습니다. 이것은 고체 표면과 탐침사이의 약한 힘에 의해 탐침 지지대가 휘는 정도를 통해 고체 표면의 이미지를 기록하는 것입니다. AFM과 STM은 모두 Binning과 Rohrer에 의해 개발되었으며 이들은 전자 현미경을 개발했던 Ruska와 함께 1986년 노벨 물리학상을 받았습니다.

AFM은 또한 뾰족한 탐침을 이용하여 기판에 각종 패턴을 새길 수 있게 합니다. 그러한 방식으로 제 연구실에서는 DNA를 바둑판 모양으로 정렬하기도 하였습니다.

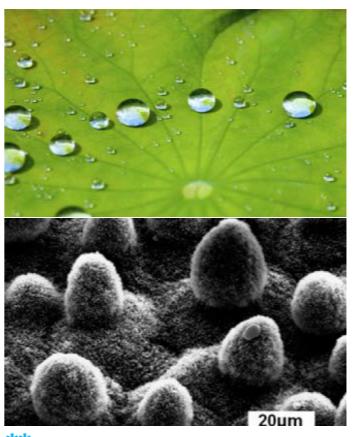
● 자연에 존재하는 나노의 세계

과학자들은 자연에서 발견되는 현상을 배우고 그것들을 응용하여 가치있는 것들을 만들어내기도 합니다. 전자 현미경 등으로 자연을 살피면 마술같은 나노과학 현상을 발견하고 합니다. 예를 들어 게코 도룡용은 벽 위에 손쉽게 붙어서 그 몸무게의 수십 배에 달하는 힘을 견디어 낼 수 있습니다. 그러한 부착력의 비밀은 게코 도마뱀* 발바닥에 형성된 100 나노미터 굵기의 수 많은 성모입니다. (칙칙이의 강한 부착력을 상상해 보십시오.) 이 미세하고 유연한 성모들은 넓은 접촉면을 만들어 강하게 물체에 접목할 수 있게 합니다. 이를 응용한다면, 접촉에 예민한 물건을 옮길 수 있는 장비를 개발한다든지 할 수 있을 것입니다.

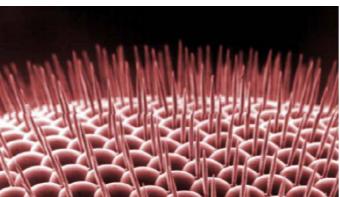
또한 연꽃 잎**은 물에 전혀 젖지 않습니다. 대개의 물체 표면에 작은 물방울을 떨어뜨리면, 그 물방울은 넓게 퍼집니다. 그것은 물체와 물 분자간의 인력이 있기 때문입니다. 그러나 물체 표면이 물 분자를 싫어하는 분자들로 코팅되어 있다면 물방울은 동그런 모양을 유지할 것입니다. 그러한 분자를 소수성(hydrophobic)이라고 합니다. 연꽃 잎도 소수성 분자가 코팅되어 있는데 그것만 가



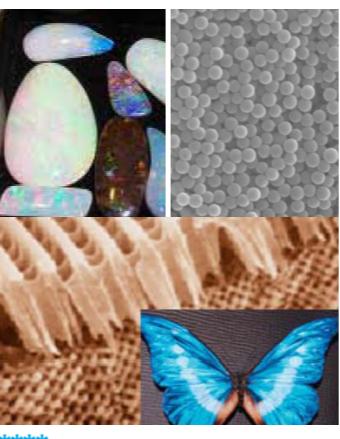
* 게코 (Gecko) 도마뱀의 발바닥 성모



** 물에 젖지 않는 연꽃잎 (Lotus leaf)



*** 노랑초파리 (Fruit Fly)의 눈



**** 오팔 (opal), 나비 날개의 현란한 색깔

지고서는 연꽃 잎에 초소수성(superhydrophobicity)이 충분히 설명되지 않습니다. 연꽃 잎의 구조가 수백 나노미터 크기의 돌기가 나있기 때문에 초소수성이 될 수 있는 것입니다. 이러한 연꽃 잎의 나노구조를 응용하여 물에 젖지 않는 섬유, 유리 등의 개발이 이루어지고 있습니다.

노랑 초파리***의 눈알을 보면 760개의 단위세포 눈으로 만들어져 있습니다. 각 단위 세포 눈은 약 1マイ크로미터의 크기입니다. 이들이 어떤 원리에 의해 빛을 받아들이고 인식하는지 과학자들은 탐구하고 있습니다.

아마 광결정(photonic crystal) 물질이 빛을 받아들이는 원리가 적용되지 않을까 생각하는데, 광결정 물질의 수백 나노미터 크기의 구멍이나 입자가 주기적으로 3차원 배열을 갖는 물질을 일컫습니다. 그러한 주기는 가시광선의 파장과 비슷합니다. 이때에 입사하는 빛의 각도에 따라서 특정한 파장의 빛은 반사하고 다른 파장의 빛은 투과를 시킵니다. 그러므로 광결정 물질은 색깔을 띠게 되는데 그 색깔은 어떤 각도에서 보느냐에 따라 달라집니다.

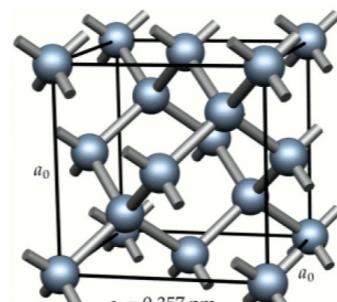
그 예가 오팔 보석의 신비한(보는 각도에 따라 달라지는) 빛깔에 있습니다. 오팔을 구성하는 물질을 전자 현미경으로 살펴보면 수백 나노미터의 원형 입자들이 주기적인 배열을 하고 있음을 알 수 있습니다.

또한 일부 나비의 날개를 살펴보면 수백 나노미터의 주기적 패턴을 갖고 있어 광결정 물질의 법칙에 따라 특정각도에서 특정 파장의 빛을 반사하기 때문에 보는 각도에 따라 색깔이 달라지는 날개를 가지고 있습니다.****

3. 나노분야 연구들

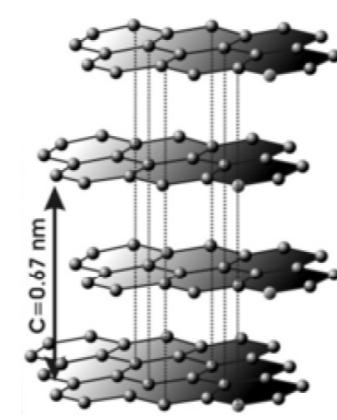
● 탄소나노가족

제가 대학교를 다닐 때만 하더라도 탄소는 다이아몬드 구조를 갖는 것과 흑연 구조를 갖는 것 밖에 없다고 배웠습니다. 탄소는 다른 원자가 4개 방향으로 결합하려고 합니다. 그래서 다이아몬드 구조에서 한 탄소는 다른 4개의 이웃 탄소와 결합한 구조입니다. 각 탄소는 정사면체의 중심에 놓이고 4개의 이웃 탄소가 그 꼭지점에 놓이게 됩니다. 각 탄소-탄소 결합은 강한 공유결합이기 때문에 충격이나 열로 깰 수 없는 강한 결합을 하고 있습니다. 또한 다이아몬드의 탄소-탄소 공유결합을 구성하는 전자들은 단단히 묶여 있기 때문에 전기가 통하지 않습니다..



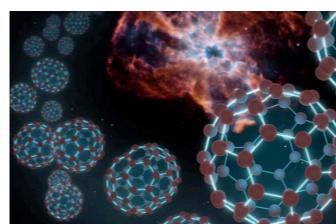
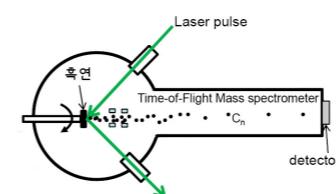
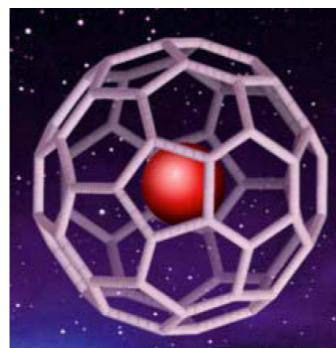
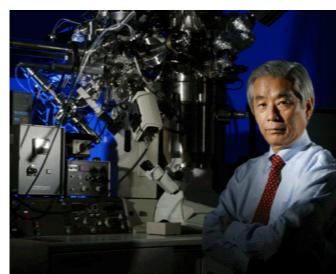
다이아몬드의 구조

그런데 흑연 구조에서는 하나의 탄소가 3개의 이웃 탄소와 결합합니다. 그렇기 때문에 한 평면 내에서 120도씩의 결합각을 나타내며 따라서 벌집처럼 육각형 모양을 나타냅니다. 그렇다면 각 탄소는 한 개씩 더 결합을 할 수 있겠는데, 이 여분의 결합(파이 결합이라고 함)은 3개의 원래 결합을 하나씩 건너뛰면서 보조결합을 형성합니다. 그래서 흑연의 이중결합과 일중결합으로 벌집모양 육각형 구조를 됩니다. 한 층내서 이러한 결합은 강학 공유결합이므로 충격이나 열로 깰 수 없습니다. 또한 파이결합에 있는 전자들은 흑연이 전기를 잘 통하는 물질로 작동하게 기여합니다. 흑연은 이와 같은 벌집모양의 층들이 쌓여서 만들어진 것입니다. 층과 층 간의 결합은 약하여 충격에 의해 쉽게 부숴집니다.



흑연의 구조

1985년 11월 Nature지 발표된 Rice 대학 연구팀의 발표는 탄소로 구성된 물질이 다이아몬드나 흑연 구조가 아닌 다른 구조를 가질 수 있음을 제안한 것입니다. Smalley 교수 (1943–2005) 연구팀은 진공 챔버 속에서 흑연 막대를 레이저로서 때려 증발하여 발생하는 탄소 기체 뭉치들을 질량분석기로 살펴보니 특별히 탄소 60개가 뭉친 물질이 비교적 매우 높은 수율로 발생하는 것을 발견하였습니다. 그것은 축구공 형태로 60개의 탄소원자가 결합한 구조를 갖는다고 제안한 바 있고, 추후에 이름은 Buckminsterfullerene 또

*플러렌 (C_{60})

**슈미오 이지마 박사

는 플러렌(fullerene)*이라고 불린 것입니다. 탄소나노 가족의 맨형이 태어난 것입니다.

그러나 Smalley 등이 만든 플러렌은 진공 챔버 속에서 아주 소량 만들어졌다가 사라지는 것이기 때문에 따로 수집하여 그 특성을 파악할 수는 없는 것이었습니다. 그리고 나서 6년 후, 독일의 D. Huffman과 Kratschmer는 플러렌을 대량 합성할 수 있는 방법을 찾았는데, 이 업적으로 말미암아 플러렌이 진짜 축구공 모양을 하고 있다는 것을 확인할 수 있었고, 전세계 과학자들이 들러붙어 여러 가지 특성을 파악할 수 있게 만든 계기가 되었습니다. 그래서 1990년대는 그야말로 플러렌 연구가 봄을 일으켰습니다. 플러렌은 광물에서도 발견되기도 하였고 최근의 NASA 보고에 의하면 6500광년 떨어진 우주 먼지 속에서도 발견이 되었다는 것은 매우 흥미로운 사실이었습니다.

1996년, 플러렌을 처음 실험적으로 발견한 Smalley, Kroto, Curl에게 노벨 화학상이 주어졌는데, Smalley는 당시 Rice 대학의 신진 교수로서 실험을 지휘하고 있었기 때문에 당연히 노벨상을 받을 자격이 있었겠지만, Curl 교수는 당시 Rice 대학의 중견 교수로서 어느 정도 실험에 관여했는지 알 수 없고, Kroto는 캐나다 국립 연구센터, Bell 연구소 등에서 분광 연구를 수행하다가 Rice 대학의 Smalley 그룹에서 레이저 증발장치로서 탄소 뭉치덩어리 실험을 한다기에 관심을 가지고 방문하던 중이었습니다. 이들에게 노벨상이 주어진 반면, 실제 실험을 수행했던 학생이었던 J. Heath (후에 UCLA 교수), O'Brien (후에 Texas Instrument사 취업)에게는 아무런 상이 주어지지 않았습니다.

1990년 많은 사람들이 플러렌에 대한 많은 연구를 하였으나 과학적인 호기심을 넘어 실용적으로 중요한 내용이 별로 없어서 과학자들의 관심에서 벗어나기 시작하는 가운데 1991년 11월 일본 NEC 사의 책임연구원이었던 슈미오 이지마 박사**는 세계에서 가장 좋은 전자 현미경(TEM)을 가지고 흑연을 방전시켜 얻은 탄소 검댕이

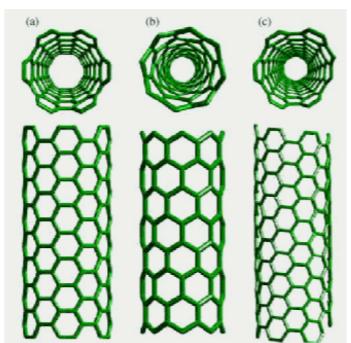
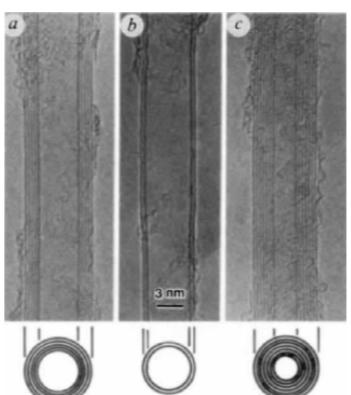
에서 겹겹이 형성된 탄소나노튜브***를 발견하였습니다. 이것이 바로 탄소 나노 가족의 둘째인 탄소나노튜브인 것입니다.

탄소나노튜브의 새로운 특성과 응용 가능성은 플라렌에 비할 바가 아니었습니다. 1990년대 중반 이후 모든 나노물질 중에서 탄소나노튜브 만큼 많은 사람들이 연구하고 응용하려했던 것은 없다고 할 수도 있습니다. 또한 이지마 교수는 Smalley 등이 플라렌을 최초로 발견하기보다 5년이나 앞서, 전자 현미경으로 양파 모양의 탄소구조체가 있음을 보인 바가 있었습니다. 즉, 다이아몬드나 흑연 외에 다른 구조의 탄소 물질은 이지마 박사가 최초로 발견한 셈이기도 합니다. 그러므로 이지마는 노벨상이 거의 유력했었습니다. 이런 점을 감안하여 성균관대학교는 성균관 고등나노과학기술 연구소(SAINT)를 설립하고 이지마 교수를 원장으로 모신 바가 있습니다.

탄소나노튜브는 벌집 모양 육각형 배열의 탄소 층을 말아서 만들어졌다고도 볼 수 있습니다. 그 말아지는 각도에 따라, 금속성이기도 하고, 반도체성이기도 합니다. 또한 그 지름에 따라 특성이 약간 바뀝니다. 합성하는 방법에 따라 단일다발의 나노튜브(single wall nanotube, SWNT)가 되기도 하고 다중다발 나노튜브(multiwall nanotube, MWNT)가 되기도 합니다. 문제는 대개의 합성법에 의해서는 이들이 섞여있기 때문에 고급 응용을 위해서 이들을 분리해야 하는 어려움도 있습니다.

탄소나노튜브를 합성하는 방법은 대개 수 나노미터 크기의 철, 니켈 입자 등을 기판에 형성시키고, 이를 진공 챔버에 넣어준 후, 600도 이상의 고온에서 탄화수소 화합물(메탄, 아세틸렌, 알코올 등)을 흘려주면, 이들이 분해되어 탄소 원자들만 금속입자 표면에서 (마치 씨앗에서 줄기가 피어나듯) 탄소나노튜브가 수직 성장하는 방식을 택합니다.

탄소나노튜브의 응용은 무궁무진합니다. 그중에 몇 가지만 소개



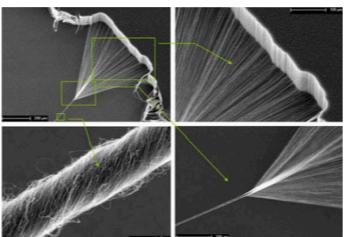
***탄소나노튜브



*탄소나노튜브-금속 복합체



**삼성이 개발한 CNT e-paper 디스플레이
(2008년 10월)



***탄소나노튜브실 (CNT-yarn)

하겠습니다. 탄소나노튜브의 일부는 전기를 잘 통합니다. 또 끝이 뾰족해서 전압을 걸어주면 끝부분에서 전자가 튀어나갑니다. 이를 이용하여 각종 기기의 전자총으로 씌일 수 있을텐데, 이러한 것을 전계방출소자(field emission device)라고 합니다. 그 대표적인 것이 탄소나노튜브를 전자총으로 채택한 평면 TV입니다. 이는 2000년 이전부터 소니, 삼성, 모토롤라 등에서 개발하여 왔습니다. 삼성에서도 2005년경 개발을 완료하여 시제품까지 선보였으나 결국 시장에 내놓지 않았다고 합니다. 그 이유는 LCD TV가 워낙 값이 싸고 품질이 우수해서 탄소나노튜브 TV의 시장성이 보장되지 않았기 때문이었을 것입니다.

탄소나노튜브는 현존하는 물질 중에서 최고의 인장강도와 탄성도를 보이기 때문에, 금속에 섞어서 복합체로 만들면 그런 우수한 특성을 발휘할 수 있습니다. 예를 들어, 탄소나노튜브와 알루미늄을 섞은 복합체*를 이용하여 훨씬 가벼우면서도 튼튼하고 탄성이 큰 자동차 타이어 휠, 골프채, 야구 방망이 등을 생산할 수 있습니다.

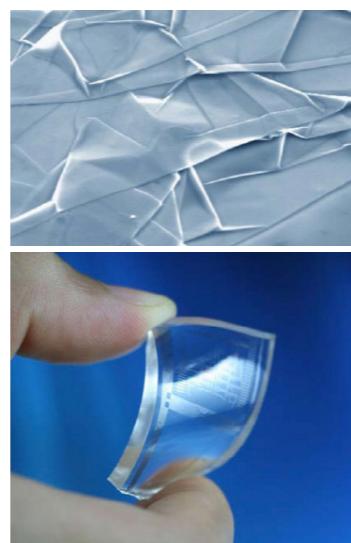
또한 탄소나노튜브를 고분자 물질과 섞어서 복합체를 만들면, 전기가 잘 통한다는 탄소나노튜브의 특성과 유연하다다는 고분자 물질의 특성을 모두 갖는 재료를 만들 수 있습니다. 대표적인 것이 전기를 통하는 투명 필름입니다. 이를 이용하여 삼성에서는 2008년 전자종이(e-paper)**라는 것을 내놓기도 하였습니다. 즉, 구부러질 수 있는 플라스틱 판이 컴퓨터 화면처럼 작동하는 것입니다. 그러나 단점은 전기를 잘 통하기 위해서는 탄소나노튜브 주입량을 늘려야 하는데 그러면 화면이 어두워지는 경향이 있습니다. 이 부분은 좀더 연구하면 개선되지 않을까 합니다.

탄소나노튜브는 여러 가닥을 꼬아서 뜨개질 실처럼 만들 수도 있습니다. 이와 같은 탄소나노튜브실 (CNT-yarn)***은 끊어지지 않는 실로서 많은 응용이 있으리라 여겨집니다.

탄소나노튜브의 연구가 절정기를 있던 중, 벌집모양 육각형 탄소 배열이 갖게 되는 물리학적 호기심과 응용 가능성이 제기되었고,

2004년 가을 러시아의 과학자 Geim과 그 제자 Novoselov는 흑연에서 한 층을 베껴내어 그래핀을 선보였습니다. 탄소나노가족의 막내가 탄생한 것입니다. 그리고 이들에게 금년도 노벨 물리학상이 주어졌습니다. Geim과 Novoselov가 노벨 물리학상을 받으면서 정말 애석한 사람은 두 사람이 있다고 하였습니다.

그중 한 사람은 탄소나노튜브의 선구자셨던 이지마 교수일 것입니다. 이제 탄소나노 가족의 막형과 막내에게 노벨상이 주어졌으니 둘째에게 돌아갈 뜻은 날아갔을 것 같습니다. 또 한 사람은 콜롬비아 대학 물리학과에 재직 중인 김필립 교수입니다. 김필립 교수는 지난 수년간 그래핀의 전기적 성질에 대해서 매우 중요한 업적을 많이 내신 분입니다. 실제로 Geim과 Novoselov가 그래핀*을 선보이기 직전까지, 흑연에서 스카치테이프로 그래핀을 떼어내어 실험하고 있던 상태였다고 합니다. Geim의 발표가 몇 달만 늦어졌다면 한국인 최초로 노벨 물리학상이 나오지 않았을까 생각합니다. 김필립 교수는 2008년 후반기에 약 6개월간 성균관대에 교환교수로 있으면서 홍병희 교수 등과 함께 그래핀 연구가 정착되도록 도왔습니다. 그러고 보면 금년도 노벨 물리학상이 Geim에게 주어짐에 따라 성균관대학교는 두 명의 노벨상 후보를 놓친셈입니다.

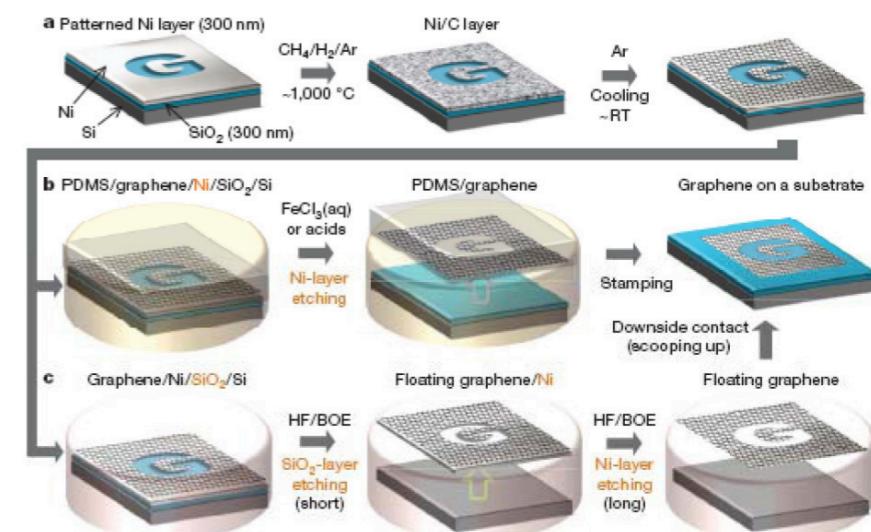


* 2004년, A. Geim, K. Novoselov, 흑연에서 베껴낸 그래핀 (2010, 노벨 물리학상)

흑연에서 베껴낸 그래핀은 워낙 작은 조각들이라 응용하려는데 제한이 많습니다. 이 조각들을 이어서 크게 만들면 누더기 그래핀이 되어서 고유의 특성이 많이 줄습니다. 그래서 과학자들은 대면적의 그래핀 합성을 고민해 왔는데 마침내 성균관대 홍병희 교수 그룹에서 그 일을 해 내었습니다. 홍병희 교수는 김필립 교수 밑에서 3년간 포스트닥을 하다가 성균관대에 신임교수가 된 후 1년여 만에 큰 업적을 내게 된 것입니다. 2009년 2월에 Nature지에 발표되었던 이 논문은 2009년도가 가장 많이 인용되었던 논문이었습니다.

대면적 그래핀의 합성 방법은 탄소나노튜브를 성장시키는 방법과 거의 같습니다. 차이점이 있다면 금속 나노입자를 촉매로 사용하지 않고 넓은 면적의 금속(니켈 또는 구리) 필름을 이용했던 것입니다. 그래서 형성된 손 바닥만한 그래핀 조각을 투명플라스틱에 그대로 옮길 수 있었습니다.

그래핀은 응용 가능성이 많습니다. 그중에서 전기를 잘 통한다는 점과, 자체로 투명하다는 점, 그리고 휘거나 잡아당겨서 그 특성이 유지된다는 특성입니다.



2009년 2월, 대면적 그래핀 합성 성공 – 홍병희 외, Nature 457권, p706 (2009).

홍병희 교수 그룹에서는 현재 A4 크기보다 큰 그래핀을 생산합니다. 이 그래핀은 터치스크린으로 작동할 수 있음을 보인 바 있고, 향후 휘어지는 각종 전자 기기의 핵심 소재가 되리라고 기대하고 있습니다. 현재 유튜브에 올라있는 동영상 한 편을 보기로 권합니다.

(출처 : <http://www.youtube.com/watch?v=-YbS-YvVCI4>)

● 나노입자의 세계

금속, 반도체의 크기를 줄여나가서 나노미터 영역이 되면 현저히 다른 특성들이 나타나기 시작하는데 그중에 하나는 색깔입니다. 나노미터 크기의 금속, 반도체 입자들은 그들의 모양과 크기에 매우 민감한 색깔을 띕니다.

예를 들어 구형 금 입자의 지름*을 수 나노미터에서 100 나노미터까지 변화시키면 수용액 상태의 색깔이 붉은색에서 점점 검포도주 색으로 변합니다. 은 입자의 지름을 변화시키면 가시광선의 모든 색들이 재현됩니다. 이와 같은 나노 금속 입자의 색깔 변화는 실은 오래전 중세기의 교회 유리창이나 도자기를 장식한 색깔들의 주요 원인이었습니다.

반도체 나노입자의 경우에는 입자의 크기에 따라 다른 색깔의 강렬한 형광을 내놓습니다. 이러한 반도체 나노입자를 특정 화학물질로 감싸서 생체물질의 특정 부위에 붙이면 그 부분이 밝게 빛나서 각종 의료용 표지 물질로 사용될 수도 있습니다. (이때 유해성 있는 반도체 입자는 피해야 함.)

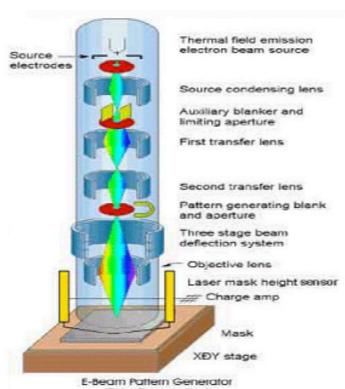
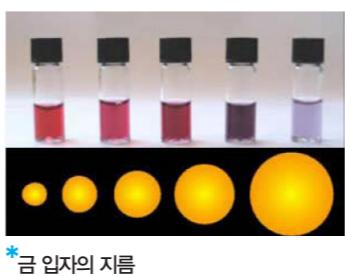
산화철 나노입자의 경우 입자의 크기에 따라 다른 색깔의 형광을 내기도 하지만 자석에 끌리는 물질입니다. 그렇기 때문에 우리 몸의 특정 부위에 산화철 나노입자를 부착시키고 자기공명영상 촬영장치로 관찰하는데 사용이 될 수 있겠습니다.

● 나노공작 미술의 세계

과학자들은 큰 물질을 깎아서 작은 조각품을 만들기도 합니다. Focused ion beam**이라는 장비는 가속된 이온 (Ga 이온 등)을 시료에 집중하면서 깎아내는 기기입니다. 마치 조각가가 작업하는 것과 유사합니다. 현재의 Focused ion beam은 약 100 나노미터의 정밀도로서 조각 작업을 할 수 있는데, 세계에서 가장 좋은 기기는 10 나노미터 이하도 가능하다고 합니다.

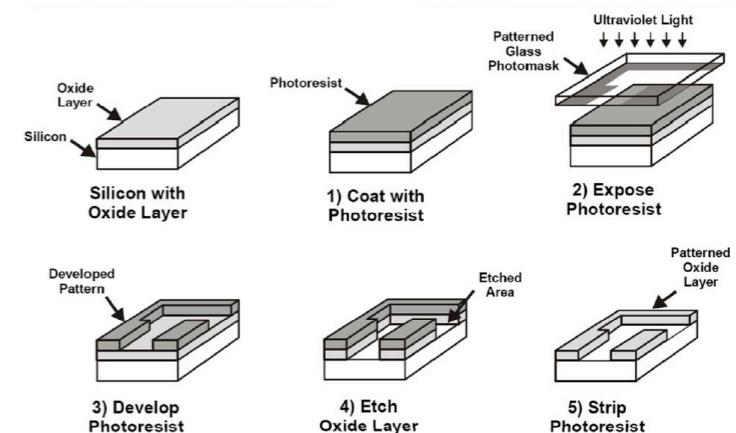
이온보다 전자는 훨씬 작습니다. 따라서 전자빔을 사용하여 기판을 2차원적으로 식각을 하기도 합니다. 전자에 식각이 잘되는 물질 몇 개에 국한되겠지요. 이러한 방법을 전자빔 리쏘그래피***라고 하고 1 nm의 정밀도까지 식각 가능하다고 합니다.

빛을 이용하여 식각하고 패턴을 만드는 방법을 포토 리쏘그래피

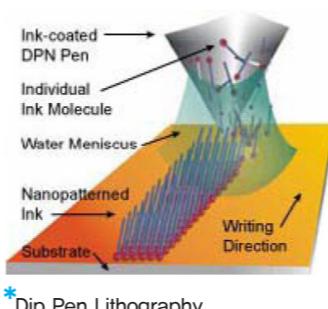


***전자빔 리쏘그래피 (e-beam lithography) : 약 1 nm 까지의 정밀도로 식각 가능

라고 합니다.



포토 리쏘그래피 : 빛을 쪼여주어 마스크 패턴대로 식각한다. 40 nm 까지의 정밀도



* Dip Pen Lithography

As soon as I mention this, people tell me about miniaturization, and how far it has progressed today. They tell me about electric motors that are the size of the nail on your small finger. And there is a device on the market... they tell me, by which you can write the Lord's Prayer on the head of a pin. But that's nothing; that's the most primitive, halting step in the direction I intend to discuss. It is a staggeringly small world that is below. In the year 2000, when they look back at this age, they will wonder why it was not until the year 1950 that anybody began seriously to move in this direction.

Richard P. Feynman, 1960

Dip Pen Lithography를 이용하여 새긴 문구

포토 리쏘그래피에서는 빛을 가려주는 마스크 패턴이 있어야 합니다. 마스크 패턴은 전자빔 리쏘그래피를 이용하여 세밀하게 만들 수 있고, 한번 제작된 마스크를 반복하여 사용하여 포토 리쏘그래피로 다수의 패턴된 기판을 만들 수 있습니다. 포토 리쏘그래피에서는 아무리 마스크를 세밀하게 만들었다고 하더라도 빛의 초점 한계 때문에 파장의 반 정도까지의 정밀도까지 패턴이 가능합니다. 보통 램프의 빛을 사용한다면 대략 1マイ크로미터, 자외선 레이저를 사용한다면 150 나노미터의 정밀도까지 가능할 것이고, X-선을 사용하여 현재 40 나노미터의 정밀도를 갖는 모양을 만들어낼 수 있습니다. 최근 삼성전자가 발표한 40 나노미터 금 메모리라는 것이 그렇게 만들어진 것입니다.

또한 AFM의 탐침을 이용하여 기판에 무늬를 새길 수도 있습니다. AFM 탐침에 분자를 붙여서 마치 펜에 잉크를 묻혀 글씨 쓰듯이 하는 것은 Dip pen 리쏘그래피*라고 합니다. 뾰족한 탐침에 전압을 가해져서 기판을 산화시켜 가면서 패턴을 새기는 경우도 있습니다.

4. 나노의 미래

● 나노의 규제

최근 얻은 정보에 의하면 나노물질이 우리 몸과 환경에 미치는 해로운 영향에 대한 평가를 우려하여 유럽과 미국에서 규제가 논의되는 듯합니다.

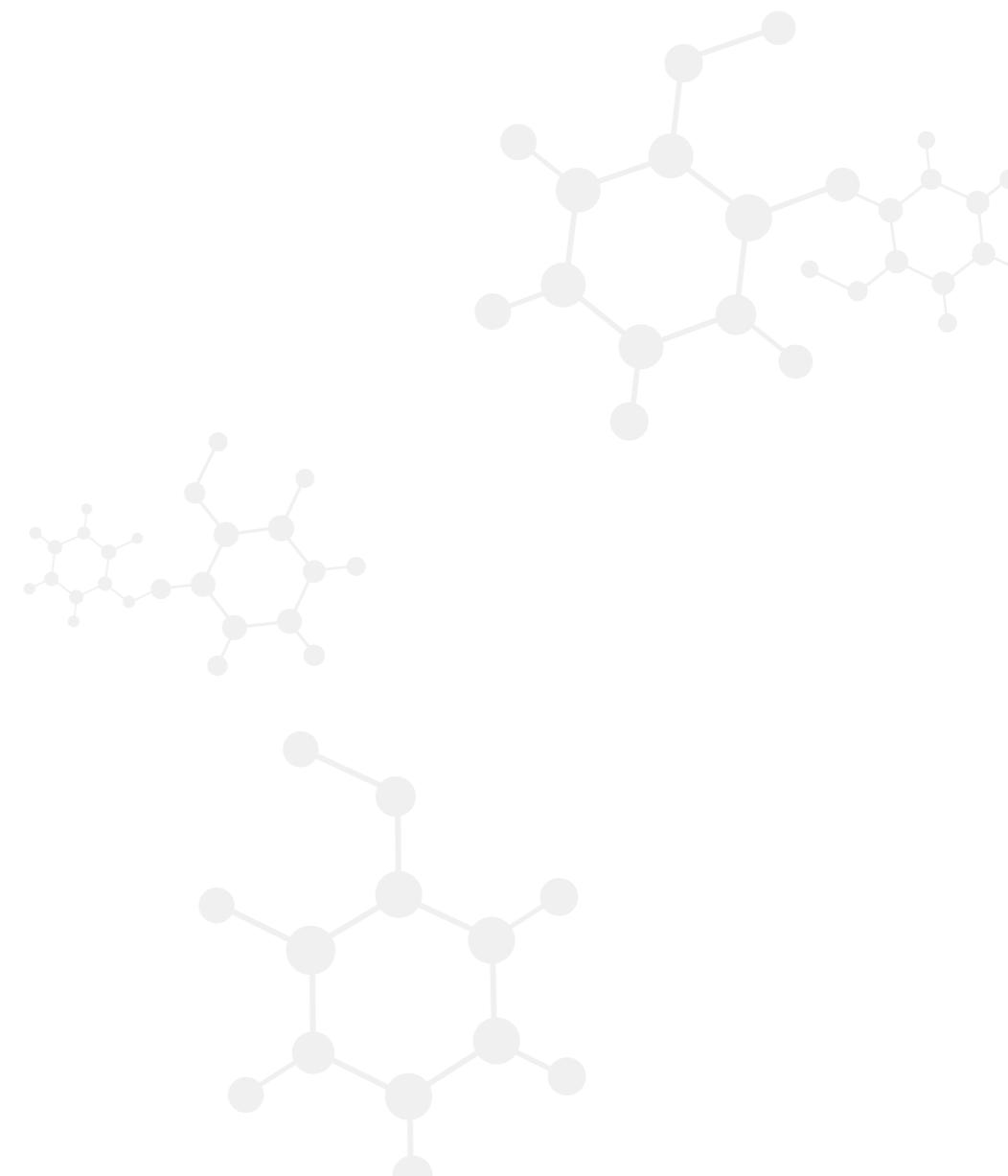
유럽공동체 국회에서는 나노물질 규제에 대한 법안을 준비하는 중입니다. 현재 나노물질의 범위 (크기, 분포, 비표면적, 표면개질, 반응성, 복합구조측면 등)에 대한 다양한 검토 진행 중인 것으로 알고 있습니다.

미국에서도 환경보호청(EPA) 등을 중심으로 몇몇 나노물질에 대한 규제 방안이 마련 중입니다. 예를 들어, 세제, 세탁기, 도료 등에 나노은 사용을 금지한다든지, 초고용량 충전기에 탄소나노튜브 사용을 금지한다든지의 방안이 검토되는 것으로 알고 있습니다.

● 나노기술은...

마지막으로 나노 기술에 대해 결론을 낸다면, 나노과학 기술은 물리학, 화학, 공학, 생물학 등 과학 거의 전분야의 발전 측면에 있는 요소기술입니다. 즉, 나노과학 기술을 독립적인 학문 영역으로 보기 곤란하다는 것이 제 관점입니다. 마치 현미경이 독립적인 학문 영역이 아니고 모든 과학 공학이 필요한 요소 기술인 것과 비슷합니다.

나노과학 기술이 부각되면서 물리학-화학-생물학-공학 간의 학제간 연구 활동이 활발해진 긍정적인 측면이 있습니다. 그리고 분명 인류의 문명 발전에 큰 기여를 하고 있습니다. 그러나 저는 Eric Drexler 등이 제시하였던 분자 나노기술이 주도하는 꿈과 같은 미래를 만들어낼 것으로는 생각하지 않습니다. 다만, 발전된 미래 과학기술에는 나노과학 기술이 숨은 공로로 기여를 할 것임에는 틀림 없습니다.



제6강

생명공학의 이해

과학의 눈
Gyeonggi MoMA Lectures
eyes of science

우주와 세포 universe & cell



임태연 | 한양대 생명공학과 교수

연세대 생화학과 졸업 후 동대학원에서 석·박사를 취득하고 순천향대 임상시험센터 교수를 역임하였다.
현재 생물정보학을 이용한 모델링과 네트워킹 분석과정을 통하여 질환에 대한 메커니즘과 질병의 진단·예방·
치료 연구 및 다양한 호흡기 질환과 난치질환의 효과적인 치료방법 개발 등 활발한 연구 활동을 하고 있다.

유전체 연구의 과거, 현재, 그리고 미래

“엄마 소는 얼룩소 엄마 닮았네”.. “고놈 참 지 아비 쓱 뺐네.”

어릴 적부터 무심코 불러온 동요에서, 또 생활 속에 많이 이야기 하거나 들어봤을 말 속에서 우리는 이미 ‘유전’이라는 현상을 이해하고 있음을 알 수 있다. DNA나 RNA하는 어려운 말은 몰랐을 어릴 때부터 말이다. 과학자들 역시 이러한 ‘유전’이라는 현상을 보다 과학적인 근거로 설명하려 노력하였고 1940년대 말 DNA라는 물질이 우리 몸 안에서 ‘유전’이라는 현상을 책임지는 기본 물질이라는 사실을 알아내게 되었다. 이후 많은 연구자들은 DNA라는 유전물질이 어떤 방식으로 우리 몸을 이루는 물질을 만들어내고 또 어떻게 조절하는지에 대하여 집중하여 연구하기 시작하였다.

사실, 이 과정이 그리 쉽지만은 않았다. 특정한 유전자를 분리하기 위하여 단백질을 찾아내야 했고, 화학적인 분석으로 단백질의 부분적인 서열을 결정해야 했으며 그를 이용하여 수많은 유전자를 뒤져서 원하는 유전자를 분리하여야 했다. 너무나 오랜 시간이 걸리는 작업이었지만 애써 하나의 유전자를 분석한다 하여도 하나의 유전자로 그 동안 알고 있던 ‘유전’을 설명할 수는 없었다. 하여 연구자들은 약 30억 개의 핵산으로 이루어진 우리 몸의 유전물질인 DNA를 분석하기 시작하였다.

1990년부터 미국을 중심으로 영국·일본 등 18개 국가가 참여하여 시작한 이 프로젝트가 바로 인간지놈프로젝트(Human Genome project)이다. 하나의 유전자를 분리하고 분석하는 것도 힘든데 전체 DNA를 모두 분석한다는 일이 당시

에는 불가능한 목표로 보이기도 하였다. 그러나, 시험관 안에서 유전자를 증폭할 수 있는 기술이 1986년 개발되고, 자동으로 DNA의 염기서열을 분석할 수 있는 기계가 1990년대 말 개발되었으며, 대량의 정보를 처리할 수 있는 컴퓨터의 개발에 힘입어 인간지놈프로젝트는 당초 계획보다 빨리 2000년 6월 드래프트를 발표하였으며 2003년 초 프로젝트의 종료를 선언하게 된다.

그렇다면, 인간지놈프로젝트 이후에 과학분야에는 어떠한 변화가 올 것인가?

대다수의 연구자들은 ‘DNA의 기능과 상호 작용에 대한 연구’가 될 것이라 이야기 하고 있다. 즉, 인체를 이루는 DNA의 염기 서열이 모두 공개된 만큼 그 염기 서열이 무슨 의미를 가지며 어떠한 생체 작용과 연관이 되는지에 대한 연구를 해야 한다는 것이다. 그렇다면 보다 구체적으로 무엇을 어떻게 해야 할까?

새로운 시대 새로운 패러다임의 요구

과거 생명과학분야의 연구는 거의 대부분 가설중심의 과학(hypothesis-driven science)이라 이야기 할 수 있었다. 당시까지의 결과를 중심으로 하나의 가설을 세우고 그것을 하나씩 입증해 가는 형태의 연구였다고 할 수 있다. 그러다 보니 대부분 연구자의 경우 아래 삽화에서 보는 것처럼 몇몇 가지의 유전자 혹은 단백질을 목표로 하여 자신의 가설을 확인하고 또 그것으로 각종 생리 현상을 설명하고자 하였다. 이러한 연구 방법들은 대상을 지극히 단순화 할 수밖에 없다는 단점을 내포 함으로서, 실험실에서는 잘 되는데 산업화하거나 실생활에 응용하는데 한계를 보이는 경우가 매우 많았다. 이러한 의미에서 인간지놈프로젝트는 이러한 연구 방향의 획기적인 전환을 알리는 획기적인 사건이라고도 이야기 할 수 있다.

데이터중심의 과학(Data-driven Science). 즉, 오류의 가능성성을 항시 가지고 있는 가설을 배제하고 현재까지의 알려진 모든 데이터를 망라하여 유용한 정보를 찾아내는 것(data mining)이 과학분야의 특히 생명과학분야의 새로운 패러다임이라 할 수 있을 것이다. 이전까지는 충분히 많은 데이터가 없었지만, 이제는

인간 유전체의 정보가 데이터베이스화 되었으며 또 앞으로도 지속적으로 데이터베이스는 보완되고 있으므로 이러한 데이터베이스를 무슨 목적으로 어떻게 활용하는지 여부에 따라 좋은 결과를 얻을 수 있는 시대가 도래하였다라는 것이다. 이러한 데이터 중심의 과학은 첫째, 가설이 가질 수 있는 오류부분이 적으며, 둘째, 연구 대상을 단순화 하지 않아도 되기 때문에 종체적인 생물학(holistic biology)이 가능하게 됨으로써 산업화가 용이하다는 점을 들 수 있다. 일례로 다인성 질병은(multifactorial disease) 여러 가지 유전자 및 단백질이 질환과 조금씩 모두 관련이 되어있어서 기존의 방식으로는 연구가 어려웠으나, 지놈프로젝트 이후의 새로운 접근 방법은 특정한 몇몇 유전자나 단백질로 연구의 대상을 제한하지 않고 전체를 분석함으로서 다인성 질환을 보다 합당하게 추적할 수 있는 기반을 제공하고 있다는 것이다.

인간지놈프로젝트의 완성

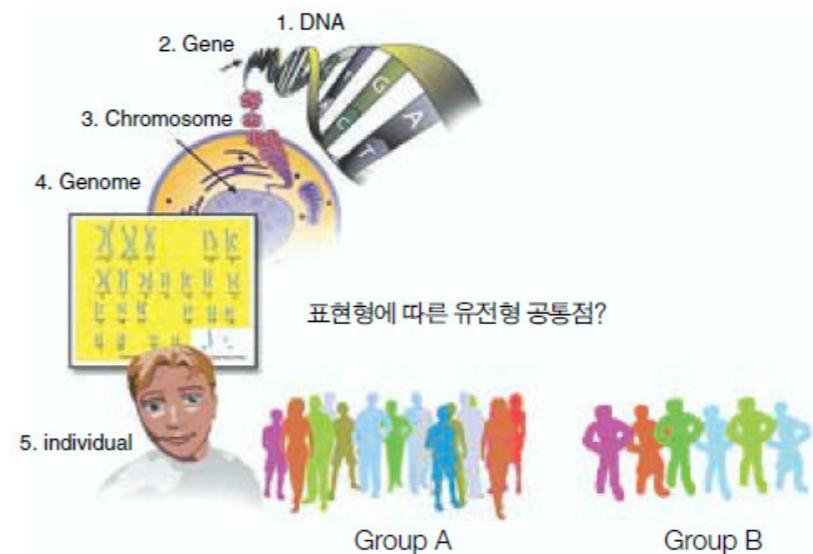
그러나, 인간지놈프로젝트의 결과물인 데이터베이스만으로는 결코 어떠한 유용한 정보를 뽑아낼 수 없다. ATGC 네 가지의 염기서열만으로 가득한 데이터베이스로 과연 무엇을 얻어낼 것인가? 이것은 마치도 초고속 통신망을 구축했다고 정보대국이 되었다라고 말하는 것과 같다. 진정한 인터넷 정보 대국이 되기 위해서는 초고속 통신망과 같은 인프라의 구축도 물론 중요하지만 그 안에 채워질 컨텐츠가 더욱 중요하듯, 인간 지놈의 염기서열을 알아내어 데이터베이스를 구축하는 것보다 그러한 유전물질의 기능 및 생리작용에 대한 정보를 채워나가는 일이 더욱 더 중요한 일이라 할 수 있다.



“이제는 인간 유전체의 정보가 데이터베이스화 되었으며, 또 앞으로도 지속적으로 데이터베이스는 보완되고 있으므로 이러한 데이터베이스를 무슨 목적으로 어떻게 활용하는지 여부에 따라 좋은 결과를 얻을 수 있는 시대가 도래하였다.”

염기서열만으로 무엇을 할 수 있을까?

인간지놈프로젝트가 밝혀낸 지놈의 염기서열을 분석했을 때, 인간 지놈에는 발현이 되어 어떤 구체적인 기능을 할 것으로 생각되는 유전자가 25,000개 정도 있을 것으로 추정하고 있다. 그러나, 이 가운데 구체적인 기능이 알려진 유전자는 고작 7,000개 정도에 불과하며 그나마도 질환과의 관련성이 밝혀진 것은 훨씬 그 수가 적은 현실이다. 인간지놈프로젝트의 기대효과가 각종 질환의 발병 예측, 조기진단으로부터 개개인에 맞는 맞춤 약물 및 재생 장기의 생산이라고 한다. 그러나 이러한 기대효과가 현실이 되기 위해서는 지놈을 이루는 DNA의 염기서열과 더불어 그러한 염기서열이 어떠한 기능을 가지고 있으며 또 그 기능은 생리적으로 어떠한 기능과 연관되어있는지를 먼저 밝혀내야만 한다. 즉, 진정한 의미의 인간지놈프로젝트의 완성은 기능 및 생리 작용을 밝혀내는 작업이 이루어진 이후에 가능한 것이다.



질환관련 대규모 데이터베이스 구축의 필요성

2004년 6월, 영국 보건부는 앞으로 몇 년간 영국에서 태어나는 모든 신생아의 유전자를 검사하고 이 아이들의 성장을 follow up하겠다는 야심찬 계획을 발표

했다. 새롭게 태어나는 자국민을 대상으로 유전자 검사를 통하여 유전자에 대한 데이터베이스를 구축하고, 이들 아이의 성장을 계속 모니터링하면서 피부색이나 체모의 색, 키, 몸무게의 변화 등 기본적인 표현형은 물론, 혈압, 아토피 여부 등 각종 질병과 관련된 정보와 더불어 바이러스 및 세균에 대한 감염정도에 이르기 까지 모든 데이터를 수집하겠다는 것이다.

우리는 매스컴을 통하여 “담배를 많이 피우면 폐암이 걸릴 확률이 높다.” 라든지, “술을 많이 마시면 간질환이 생기기 쉽다.”는 식의 역학정보를 많이 볼 수 있었다. 그러나 이러한 역학정보의 대부분은 지나치게 상식적이거나, 또한 반대로 상식적으로 믿기 어려운 경우가 많아 그 근거에 의심을 갖는 경우가 많았다. 특히, 담배를 많이 피워도 건강하게 잘 사는 노인을 보게 되는 등, 역학정보에 반하는 많은 실제 예를 보게 될 때 역학정보를 어디까지 믿어야 하는가 하는 의문이 드는 것 또한 사실이었다.

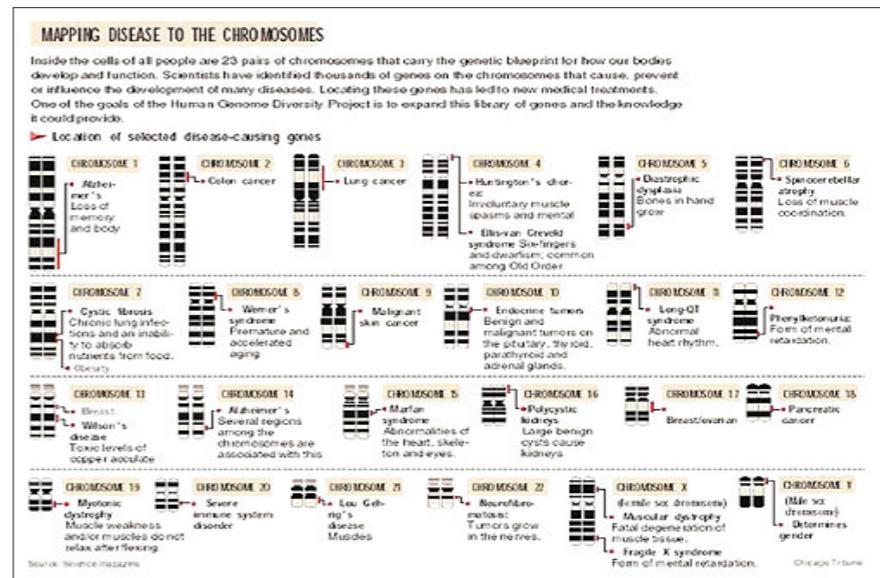
영국정부에서 기획하고 있는 이러한 대규모 유전 역학조사는 그 효과가 의심스럽던 역학조사에 확실한 종지부를 찍을 것으로 예측되고 있다. 즉, 담배를 많이 피는 사람과 그렇지 않은 사람간 유전자상의 유의한 차이는 있는지, 또 담배를 많이 피워도 폐암이 발생하지 않은 사람과 그렇지 않은 사람간의 유전자상의 유의한 차이는 있는지.. 이러한 모든 정보를 망라함으로서 현재까지의 역학정보와는 차원이 다른 정보를 얻을 수 있게 된다. 즉, 이전까지의 역학연구는 몇 가지에 불과한 임상데이터와 특정한 질환간의 관련성을 봄으로 하여 한계를 가지고 있었으나, 앞으로의 유전 역학연구는 정확히 세분화된 표현형과 32억개 염기에 달하는 유전형과의 연관성을 봄으로서 보다 정확하고 구체적인 정보를 얻어낼 수 있다는 것이다. 바로 이러한 정보를 위하여 필요한 또 한 축의 데이터베이스, 바로 그것을 구축하기 위하여 영국에서는 성인 50만명에 대한 임상정보와 유전 정보를 데이터베이스화 하는 동시에 3년간 새로이 태어날 모든 신생아의 유전 정보와 follow up 연구를 수행하고 있는 셈이다.

정확한 데이터베이스가 생성되면 실용도 높은 양질의 정보는 데이터마이닝(data-mining)으로 얻어낼 수 있다. 새로운 데이터베이스가 구축된 상태에서 다시 담배와 폐암에 대한 역학 연구를 수행해보자. 먼저 데이터베이스를 이용해 우

선 흡연자와 비 흡연자를 나누며 두 커다란 그룹은 흡연량으로 다시 세분화 한다. 흡연자 그룹은 또 다시 폐암환자와 어딘가 질환이 있는 환자군 그리고 아주 정상적인 군으로 나눈다. 나뉘어진 각 그룹의 사람들의 유전 정보 중에 표현형에 의하여 나뉘어진 그룹과 통계적으로 유의한 상관관계를 갖는 것이 있는지를 검색한다. 이러한 방법으로 어떠한 결과를 얻을 수 있을까?

아마도 우리는 아래와 보도를 접하게 될 것이다. “조사 결과 흡연양이 많은 사람은 A유전자의 몇 번째 위치가 어떠한 경우가 많은 것으로 밝혀져 그것과 같은 유전형을 가진 사람은 각별히 흡연에 주의하여야 하겠습니다. 특히, B 유전자의 유전형이 X이신 분들은 각별히 금연에 힘쓰셔야 할 것 같습니다. B 유전자 유전형이 X이신 분들은 담배를 태웠을 때 폐암환자가 될 확률이 97%이상인 것으로 밝혀졌습니다.”

이와 같이 각 질환, 생활 패턴과 유전형이 연결되면 현재까지 만들어지고 있는 아래 그림과 같은 유전정보와 표현형은 보다 자세해지고 정확해 질 것으로 생각된다. 그렇게 된다면 각종 질환의 발생 예측과 조기 진단으로부터 개개인에 맞는 맞춤 약물이나 조직의 재생에 이르기까지 인간지놈프로젝트의 기대효과라고 했던 일들이 비로소 가능하게 될 것이다.



질환군별 유전체 사업.. KSNP 컨소시움

이러한 배경 하에서 영국을 비롯한 전세계 각국은 국가적인 사업으로 유전체 사업을 벌이고 있다. 한 축으로는 자국민을 대상으로 한 유전정보를 모으고 또 한 축으로는 임상데이터베이스를 구축하는 작업을 기획하여 다가오는 바이오 혁명 시대를 대비하고 있다. 우리나라에서도 1999년 12월 과학기술부에서 인간유전체기능연구사업단을 지정하여 한국인 호발형 간암 및 위암에 대한 유전체 연구를 시작하였으며, 보건복지부에서도 2000년부터 12개의 질환군별 유전체 센터를 지정하여 연구비를 지원하기 시작하였다. 특히, 보건복지부에서 시작한 유전체 사업은 대표적인 만성질환을 아우를 수 있는 12개 질환센터와 (질환별 코호트 운영) 질병관리본부 국립보건원 유전체연구부를 (지역적인 코호트 운영) 유기적인 틀로 묶어 보다 조직적이고 통합적인 데이터베이스를 만들 수 있는 근간을 구축함으로서 선진 외국의 데이터베이스와 견줄만한 좋은 결과를 만들어 낼 수 있을 것으로 기대되고 있다.

1. SNP을 이용한 질병유전자 연구

왜 우리집안 사람들은 나이가 갓 마흔만 넘게 되면 다른 집안 사람이 육십은 되어야 날만한 흰머리가 나고, 또 나이가 서른도 안되었는데 머리가 빠지고 벗겨져서 고민을 해야 하나? 어떤 사람은 간염에 걸리고도 쉽게 치유가 되는 반면, 또 어떤 사람들은 간경화, 간암과 같은 치명적인 질병으로 진행되는데 왜 그럴까? 왜 저 집안 사람들은 대체적으로 다른 집안 사람보다 잘생기고 머리도 좋아 자식들이 모두 일류대학을 쉽게 들어가는데 그 비밀이 어디에 있을까? 이러한 질문의 해답은 ‘개인적 다양성’과 ‘유전’으로 설명될 수 있다.

모든 사람들이 동일한 유전자를 가지고 있지만 이 유전자내 염기서열이 사람들 간에 차이가 있는데, 인간유전체에 존재하는 변이의 대부분은 다양성이 차지하고 있다. 모든 인간은 유전체에 고유한 다양성의 조합을 가지고 있으며 이러한 유전적 다양성의 조합은 우리가 쉽게 발견할 수 있는 개인간의 외모 차이 등의 차이를 나타내는 원인으로 알려져 있다. 유전적 다양성은 더 나아가 왜 어떤 사

람은 다른 사람보다 특정 질병에 더 잘 걸리는지, 혹은 특정 질병에 대해 더 저항성이 있는가를 잘 설명할 뿐 아니라 사람들이 동일한 약품에 다르게 반응하는 가를 결정하기도 한다. 인간 유전체상에 가장 많이 존재하는 형태의 다양성은 유전체 상의 특정 염기서열 하나의 변화이며 소위 단일염기 다양성 또는 SNP(Single Nucleotide Polymorphism, 발음은 일반적으로 스닙(snip)이라고 함)이라 불리운다. 인간 유전체에 존재하는 다양성의 90% 이상을 차지하는 SNP의 특징을 살펴보면 같은 인구집단 내에서는 약 0.1%의 개인간의 차이(즉, 약 1,000염기마다 한 개의 SNP)를 나타내고 있으며 전체 인류의 유전체에서 약 0.3% 정도의 차이를 나타내는 것으로 예상되고 있다. 많게는 약 1,000만 개 이상 존재할 것으로 예측되는 SNP 중 약 300만 개 이상이 현재까지 밝혀져 있다.

The SNP consortium을 비롯하여 JSNP 등 각국에서 SNP발굴을 진행하여 왔으며, 이를 바탕으로 지난 수년간 예방 목적의 유전자 진단을 위하여 다양한 질환에서 SNP를 이용한 질병유전자연구가 진행되고 있으며 국내에서도 각 질환 유전체연구센터를 중심으로 질병유전자 발굴을 위한 SNP연구가 활발히 진행되고 있다.

질병 관련 유전자발굴을 위해 가장 중요하고 기본적인 것은 좋은 임상자료를 가진 대규모의 질환 모델 확보라 할 수 있다. 각 개인의 질환 발생과 진행에 관련된 임상자료가 확보되어야만 비로소 유전적 소인을 찾는 연구가 시작될 수 있다. 따라서 임상의와 유전학 전문가들의 적극적인 협력이 필수적이라 할 수 있다.

최근 유전자발굴을 위한 high-throughput technology는 지속적으로 발전되고 있기 때문에 수년 내 유전자 정보가 실제로 이용될 수 있을 것으로 기대하고 있다.

그리고 이와 같은 연구가 단순히 학문적 관심만을 해결하기 위한 것이 아니고 각종 유전자 정보에는 필연적으로 ‘특허와 경제적 이득’이라는 동기가 제공되고 있다. 미국을 중심으로 추진된 유전체사업은 당초 인류의 먼 미래를 위한 기초 투자였다. 그러나 이제는 여기에 치열한 경제논리가 작용하고 있다. 여러 제약 회사, 유전자 연구 전문 회사들은 이러한 질병관련 유전자 발굴에 막대한 연구

비를 투자하여 궁극적으로는 질병의 유전적 소인을 발굴하여 질병 예방 및 치료에 도움을 주고자 연구를 진행하고 있지만 동시에 막대한 경제적 이득을 기대하고 있는 것이다.

2. 약물유전체 연구 (Pharmacogenetics)

다양한 질환에서 각 개인에 따른 약물 치료 효과는 다양한 형태로 나타나게 되는데, 약물유전체연구는 환자의 유전적 환경적 요인을 고려하여 각 개인에 가장 적합한 약물치료를 하고자 하는 시도이다. 유전적 표지자 분석을 통하여 약물효과를 예측하고 부작용의 위험이 있는 환자를 미리 예측할 수 있다면 각 개인에 알맞은 치료가 가능하게 되며 많은 직간접적 손실을 줄일 수 있게 된다. 이러한 유전적 표지자의 개발 등은 그 유용성 때문에 선진국의 연구기관과 제약회사 등 관련 산업체가 많은 투자를 하고 있다. 약물유전체학 연구는 약리학적 지식에 근거(knowledge-based)하여 표적 유전자를 선택하여 접근하는 방법과 유전학적 표지자를 이용하여 약물 반응과 관계 있는 유전자를 찾아나가는 두 가지 방법으로 접근하고 있는데 약동학관련 유전자인 약물대사 효소계와 약물수송단백에 관한 유전자 연구가 최근 집중적인 조명을 받고 있다.

경제자문 연구소인 Price-Waterhouse-Coopers는 2010년경이면 맞춤약물 요법이 실용화 단계에 들어설 것으로 예견하고 있으며, 이는 질병유전체 연구나 줄기세포연구보다 훨씬 이른 시기이다. 실제로 현재 미국의 경우 Affimetrix사에서는 약물대사효소인 CYP450에 대한 DNA chip을 출시하였으며, 많은 병원이 항암제인 6-MP를 사용하기 전에 효과예측 및 부작용 방지를 위하여 대사효소인 TPMT의 환자 유전형을 분석하고 있다.

FDA는 최근 pharmacogenomics 데이터를 제출하는 방식에 대한 가이드라인을 발표했는데 이 가이드라인에는 INDs(시험용 신약신청), NDAs(신약신청), BLA(생물학적 제품 허가 신청)를 신청하는 업체들이 pharmacogenomics 데이터를 언제 제출해야 하는지 권장사항을 담고 있으며, FDA는 약물에 대한 허가 결정을 하는데 이를 이용하게 될 것으로 보인다. 그리고, 이러한 과정을 통해 제

약관련 업체들이 보다 안전하고 효과적인 제품을 빠르게 시판할 수 있을 것으로 전망된다.

개인 간에 약물반응의 차이를 초래하는 유전체 특성의 차이는 많은 경우 종족 간에도 차이를 보이고 있다는 점에서, 국내 환자들에게 가장 안전하고 효과적인 약물치료기술을 제공하기 위하여 앞으로 한국인들을 대상으로 한 약물유전체학 연구가 더욱 활성화 되어야 할 것이다.

3. Microarray를 이용한 질병유전자연구

우리의 몸 속에 있는 대부분의 세포들은 같은 유전자들을 가지고 있지만 각각의 세포에서 모든 유전자들이 발현되는 것은 아니며, 필요에 따라 어떤 특정 유전자가 발현된다. 예를 들면, 간세포에서는 해독작용을 하는 효소를 위한 유전자들이 발현되어지는 반면, 췌장세포에서는 인슐린을 만드는 유전자가 발현된다. 이와 같이 유전자는 세포, 조직에 따라 그 유전자발현 양상이 다르게 나타나게 되며, 이러한 유전자의 발현양상에 대한 연구는 질병관련 유전자발굴 뿐 아니라 신약개발을 위한 표적물질 발굴에 중요한 역할을 한다.

유전자발현을 분석하기 위해서는 기존에 northern blot, RT-PCR 등이 이용되어 왔으나 인간 지놈 프로젝트에 의해 많은 유전자에서의 염기서열이 공개되고, high-throughput tech의 발달로 다양한 유전자발현에 대한 실험을 짧은 시간 내 시행할 수 있게 되었으며 이렇게 발달된 microarrays 기술로 우리는 한번에 많은 양의 유전자가 하나의 특정 세포에서 어떻게 발현되는지를 결정할 수 있게 되었다.

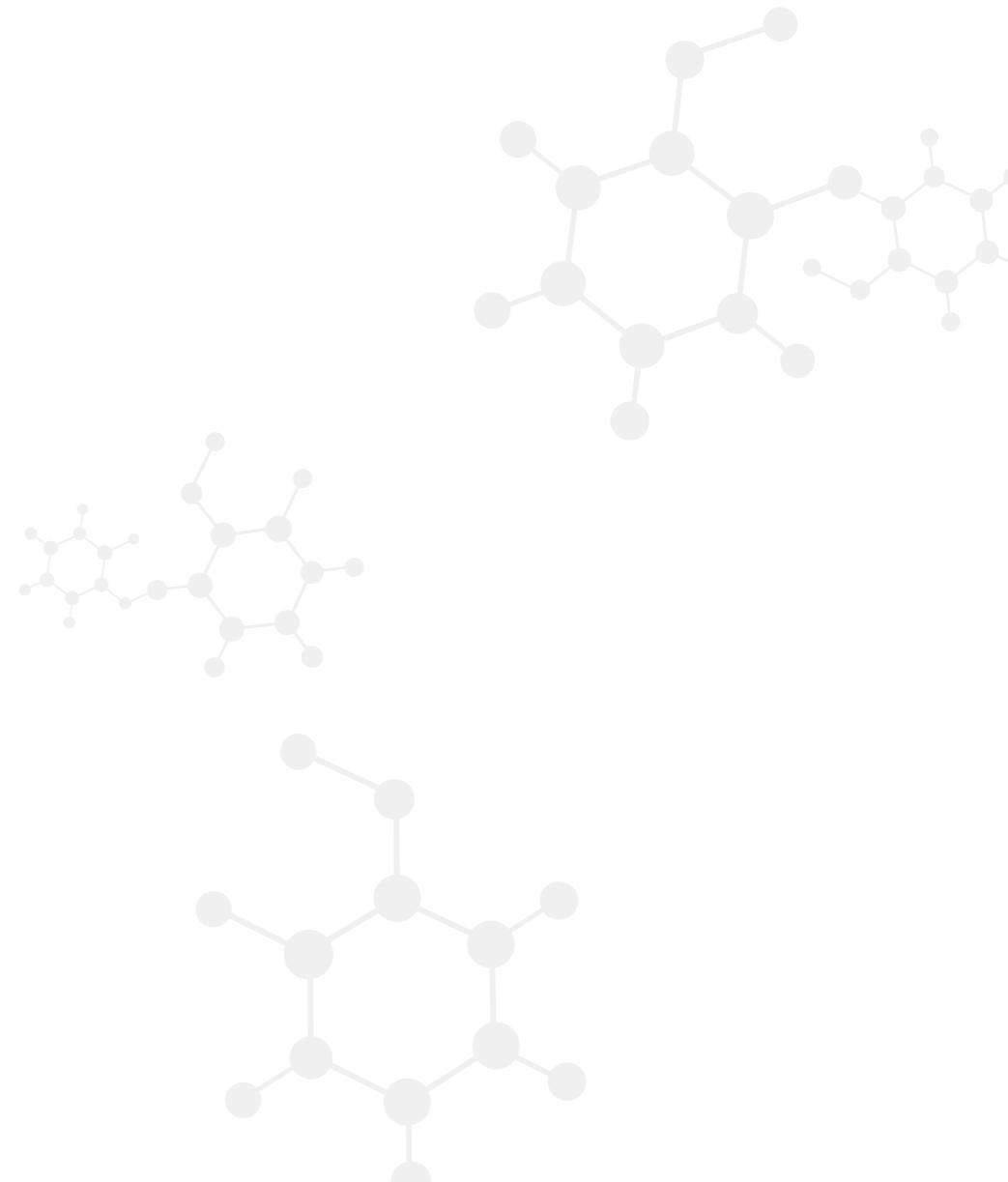
DNA microarrays에는 기존의 분자 생물학적 지식과 전자 및 기계공학의 결합으로 작은 공간에 수만 개의 DNA를 집적시킬 수 있다. 유전자 검색용으로 DNA microarrays는 수많은 종류의 DNA를 고밀도로 붙여놓아 최소한 수백 개 이상의 유전자를 한 번의 실험으로 빠른 시간 내에 검색할 수 있다. 그리고 DNA microarrays는 유리와 같은 고형체를 사용하기 때문에 아주 적은 양의 유전물

질을 고밀도로 볼 수 있다. 현재 세계의 여러 나라에서 DNA microarrays에 대한 연구를 수행하고 있고, post genome 시대에 경쟁력을 지니기 위해 부단히 노력하고 있다. 대표적인 선두주자는 단연 미국이고, 유럽의 영국이나 프랑스, 독일, 그리고 일본 등이 이 분야를 이끌어가고 있다. 국내에서도 유전자 발현 변화를 근거로 하여, 질병 또는 문화관련 유전자를 발굴하는 연구가 진행되고 있는데, 생명공학연구소, 포항공대, 경북대 등에서 진행되어온 인체 조직 관련 EST연구가 이에 해당되며, 현재 여러 질환 특히 암질환에서 유전자 발현 변화분석을 통한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 여러 벤처회사에서 다양한 형태의 DNA chip을 개발, 생산하고 있다. 그러나 외국에 비하여 기술, 인력, 재원 면에서 많이 뒤지고 있는 실정이다.

4. 프로테옴 분석을 이용한 질병유전체연구

프로테옴이란 세포나 조직에서 발현되는 단백질의 총체를 의미하는데 1995년에 이태리 Siena에서 열린 2-D Electrophoresis meeting에서 처음으로 Marc Wilkins에 의해서 사용되기 시작하였는데, 프로테옴 연구는 현재 기능 유전체연구의 중요한 부분을 차지하고 있다. 인간 유전체 염기서열이 밝혀지긴 하였으나 염기서열만 가지고는 이 유전자 산물의 기능을 알 수 없고, 이것이 전사되고 최종적으로 완벽한 모양이 갖추어진 단백질 분석이 함께 이루어져야만 그 기능을 이해할 수 있기 때문이다. 즉, 유전자는 생명활동의 기본물질인 단백질을 만드는 일종의 설계도이다. 유전자를 이용한 질병의 예방과 치료를 위해서는 특정 단백질을 만드는 데 어떤 유전자가 작용하고, 단백질이 생체 내에서 어떻게 작용하는지를 알아야 한다. 현재까지 알려진 단백질은 전체 단백질의 1% 수준에 불과한 1만 여종에 불과하며, 새로운 단백질의 구조와 기능을 낸다면 이는 산업화와 연계가 가능하다. 현재 세계 각국은 프로테옴 연구에 적극적인데, 네덜란드, 미국, 영국, 일본 등 10여 개국 민간 대표들을 중심으로 2001년 2월에 인간프로테옴기구(HUPO, Human Proteom Organization)가 결성되어 HPP를 주도하고 있다. 최근 프로테오믹스는 약물 표적연구 뿐 아니라 질병의 바이오표지자 발굴에도 많은 연구가 진행되고 있는데, 분석장비의 발전 및 바이오인포매틱스의 발전으로 혈액, 뇨로부터 단백질 구성을 알아냄으로써 질병에 대한 새로운 표지를 찾는 것

을 도와주고 있다. 이러한 바이오표지를 이용함으로서 이제 병리학적 변화를 보다 일찍 그리고 매우 정확하게 발견해 낼 수 있을 것으로 기대되고 있다.



2010 하반기 경기도미술관 렉처스
과학의 눈_우주와 세포

2010. 9. 16 ~ 10. 28
 경기도미술관 1층 세미나실

경기도미술관 렉처스 주최 및 기획_경기도미술관
 담당_여경환

교육총괄_양월모(교육팀장)
 교육지원_김금미, 최혜경
 홍보_윤가해
 디자이너_김태용

행정지원_임재옥(행정지원팀장), 곽병길, 정승희, 채정민
 기획강좌 어시스턴트_최지원

자료집 디자인_그래픽앤북스 김혜림
 사인물제작설치_B&B디자인 김대유

편집인_김홍희 경기도미술관 관장

발행인_권영빈 경기문화재단 대표이사

발행처_경기도미술관

발행일_2010. 11. 20

©2010 경기도미술관
 본 자료집은 경기도미술관 렉처스〈과학의 눈_우주와 세포〉를 위해 경기도미술관이 발행하였습니다.
 본권에 실린 글과 도판은 경기도미술관 등의 없이 무단으로 사용할 수 없습니다.

경기도미술관_425-866 경기도 안산시 단원구
 동산길 36 (초지동 667-1)
 T.031-281-7000
 F.031-481-7053

www.gmoma.org

2010 Gyeonggi MoMA Lectures
〈eyes of science_universe & cell〉

16 sep. 2010–28 oct.
 seminar room, Gyeonggi Museum of Modern Art

Lectures Organized by Gyeonggi Museum of Modern Art
 Education in Charge_Kyung Hwan Yeo

Education in Charge_Won mo Yang
 Education_Kum Mi Kim, Hye kyong Choi
 Communication_Ka Hye Yoon
 Designer_Tae Yong Kim

Administrative Support_Jae Ok Lim(Senior Manager,
 Administrative Support Team), Byeong Gil Kwac,
 Seung Hee Jung, Jung Min Chae
 Communication Assistant_Ji Won Choi

Design_Graphic&Books Hye Lim Kim
 PR Signs_B&B design Dae Yoo Kim

Editor_Hong Hee Kim, Director of Gyeonggi Museum of
 Modern Art

Published_Young Bin Kwon, President of Gyeonggi Cultural
 Foundation

Date of Publishing_2010.11.20

©2010 Gyeonggi Museum of Modern Art
 This publication is published in conjunction with 2009
 Gyeonggi MoMA Lectures 〈Eyes of Science_universe&cell〉
 by Gyeonggi Museum of Modern Art.
 All Rights Reserved. No Part of this book may be
 reproduced or utilized in any form or by any means without
 permission of Gyeonggi Museum of Modern Art

Gyeonggi Museum of Modern Art_
 (452-866) 36 Donsangil, Danwongu, Ansan, Gyeonggido
 T.031-281-7000
 F.031-481-7053

www.gmoma.org