

21세기 과학과 기술

김정한

연세대학교 공과대학 생명공학과 교수

1. 서론

현대 과학과 기술을 가능하게 만든 과학 혁명 이후 400여 년이 지났고, 특히 지난 100년 간의 눈부신 진전에도 불구하고 인간은 21세기와 세 번째 천년을 맞이하면서 아직도 다음과 같은 문제들에 대한 해답을 갖고 있지 않다.

1) 우주에서 발견된 소립자들과 힘들의 상호작용을 하나의 통일 이론으로 설명할 수 있을까? 물리상수와 자연법칙은 우연에 의한 것인가, 필연적인 것인가?

2) 우주의 존재, 그 시작과 끝은 어떻게 될 것인가? 우주는 단 한 개 뿐인가? 은하가 속해 있는 우주 이외에도 다른 우주들이 있는가?

3) 지구상에서 발견된 생명체는 어떻게 시작되었을까? 지구 이외에도 생명체가 존재하는가? 노화현상은 왜 생기며 죽음이라는 병을 극복하고 영생을 얻을 수 있을까?

4) 물질에서 정신이 생겨날 수 있나? 인공지능은 가능할 것인가?

상기한 질문들은 인류문명의 시작과 함께 지금까지 우리의 지적 호기심을 자극해 왔고 앞으로 21세기는 물론 새 천년 동안 인간 최고의 지성이 그 해답을 찾기 위하여 도전할 숙제로 남아있다.

20세기를 마감하면서 이제 인간은 가장 큰 것(우주의 구조, 시작, 종말), 가장 작은 것(분자, 원자, 소립자의 세계) 그리고 가장 복잡한 것(생명, 생명의 기원, 뇌, 인공지능) 등에 대한 본격적 탐색에 도전할 준비가 되어 있다. 또한 20세기 후반 이후 급속도로 성장하는 정보통신 및 유전공학과 생명공학 분야는 인류사회에 미치는 영향이 광범위하기 때문에 앞으로 100년 후는 말할 것도 없고 당장 10년 후에 일어날 일을 정확하게 예견할 수 없을 정도이다.

1990년 초에 미국에서는 두 개의 거대한 과학 프로젝트가 계획되었는데 그 중 하나는 텍사스에 건립 예정이었던 SSC (Superconductivity Super Collider, 초전도 충돌가속기)였고, 다른 하나는 30억 쌍의 인간 유전자 염기배열을 해독하는 인간 게놈 계획(Human Genome Project)이었다.

그러나 전자는 추가 경비 부담 때문에 1993년 그 계획이 중단되었고, 후자는 30억 달러의 예산으로 1991-2005년까지 15년 연구사업으로 시작되었는데, 서둘러 그 기간을 단축하여 1~2년 내에 완료될 전망이다. 이 중요한 과학 정책상의 선택은 20세기의 과학이 상대성 이론과 양자역학이란 양대 기둥으로 세워진 물리학의 세기였다면 21세기는 유전공학과 분자생물학을 기초로 하는 생명과학의 시대가 될 것임을 시사해준다.

20세기 후반 값싸고 성능이 뛰어난 개인용 컴퓨터(PC)가 보편화되면서 컴퓨터를 상호 연결하는 인터넷(Internet) 통신망이 전세계적으로 구축되었다. 1968년 미국 국방부에서 '아르 파넷' 이란 컴퓨터 통신망을 만들어서 처음으로 컴퓨터간 상호 통신 교환을 하였고, 1989년 주네브에 있는 유럽원자핵연구소(CERN)의 과학자들이 상호 정보교환과 자료를 공유하는 형식의 월드 와이드 웹(WWW)을 창안함으로

써 지금의 인터넷 멀티미디어 시대를 통한 정보화 사회가 출발하였다.

돌이켜보면 15세기 중엽 구텐베르크가 금속활판 인쇄기술을 발명하여 성경을 비롯해서 유클리드의 기하학 등을 인쇄하여 보급한 것, 즉 책을 통한 신속한 지식의 확산이 16, 17세기 서구의 종교개혁과 현대과학 혁명을 잉태시킨 가장 직접적인 동기가 된 것이다. 20세기 말 PC와 인터넷을 통하여 거의 광속에 가까운 속도로 새로운 지식과 정보의 교환이 가능하게 된 지금 앞으로 50년 또는 100년 후에 인간과 사회가 과연 어떤 모양으로 변할지는 아무도 예견할 수 없을 것이다.

20세기초에 도입된 양자역학은 뉴턴 역학체계에서 적용되어왔던 엄격한 인과율에 의한 결정론적 세계관을 퇴조시키면서 비결정론적 세계관을 등장시켰고, 계산능력이 뛰어난 슈퍼 컴퓨터를 사용하여 비선형 복잡성의 문제에 도전하였다. 21세기에는 라플라스식의 결정론적 물리세계가 아닌 비가역적이고 비결정론적이며 기본적으로 혼돈적인 자연현상들 속에서 질서를 찾는 카오스 이론이 뇌과학, 인공지능 그리고 생태계 연구분야 등에서 응용될 것이다.

현재로서 가장 똑똑한 컴퓨터는 지령이나 바퀴벌레 수준의 지능을 갖고 있지만 21세기중에 인간 두뇌와 유사한 정도의 복잡성을 지닌 지능 컴퓨터의 등장이 확실시된다.

지난 100년 동안 과학기술은 인간이 자연을 통제하고 지배하는 능력을 극대화하였다. 그러나 그 결과로 자연이 인간을 포함한 지구 생태계를 지지해주는 능력에 치명적인 손상을 입게 되었고 이것은 21세기와 미래에 인류의 지속적인 생존과 번영을 위한 결정적인 요인으로 부각되었다.

제2의 창세기를 예고하는 다양한 유전자 조작 - 변형 생명체의 양산과 함께 포유동물의 체세포 복제기술의 정립은 인간복제를 포함한 사회적 윤리적 문제로 등장하고 있다. 20세기를 마감하고 21세기와 새천년을 바라보면서 우리는 이제 자원을 절약하면서 환경친화적인 과학 기술문명의 창출과 생명윤리 문제를 진지하게 고려해 보아야 할 중

요한 전환점에서 있음을 명심해야 할 것이다.

과학기술과 물질문명으로 대변되는 지난 100년간의 모든 일들을 돌이켜 보면서 많은 사람들이 그 대안으로 정신적이고 종교적인 인간 내면세계에 관심을 갖기 시작하였다는 점을 주목할 필요가 있다. 기독교가 이 새로운 요구를 충족시키지 못하면 21세기에는 과학에 신비적인 체험과 미신적 요소를 혼합한 ‘뉴에이지’ 종교가 등장할 가능성이 매우 높을 것이다. 그리스도인들은 무엇이 과학이고 무엇이 과학이 아닌지를 분별할 수 있는 지혜를 가져야 할 것이다. 본 장에서는 21세기와 미래에 전개될 과학과 기술분야를 (1)물리학과 통일이론 (2) 우주과학 (3)유전공학과 인간의 미래 그리고 (4)미래의 과학기술 등으로 나누어서 살펴보고자 한다.

21세기에도 기초과학 분야에서는 자연의 어떤 새로운 법칙을 찾아내기보다 이미 알고 있는 이론을 더욱 확충하고 완성해 나가는 작업을 계속할 전망이다. 기초원리를 응용하여 새로운 것을 만들어내는 기술분야에서는 인간의 판단과 의지에 따라서 그 방향이 결정될 것이다.

2. 물리학과 통일이론

기원전 6세기 탈레스가 우주의 원질(原質)은 ‘물’ 이라고 선언한 이후 지금까지 자연철학자와 과학자들은 우주의 놀랍고도 다양한 자연현상들을 이해하려고 노력해 왔다. 이들의 모든 노력 뒤에 숨어있는 하나의 공통적인 길잡이가 있는데 그것은 자연현상의 표면적인 다양성에도 불구하고 이 모든 현상을 지배하는 단순하고 통일적인 하나의 원리가 있을 것이라는 믿음이다.

“세상에 변하는 것은 없다”고 선언한 파르메니데스에 대하여, “만물은 흐른다”고 맞선 헤라클레이토스 사이에, “만물은 불변하는 원자들로 이루어져있고 변하는 것은 단지 이들 사이의 결합 방식이다”라

는 제안으로 두 생각을 통합 발전시킨 ‘원자가설’은 통일 원리에 가장 성공적인 예이다. 데모크리토스의 원자설은 19세기 초 돌턴에 의해서 부활되었고 지금은 물질세계를 설명하는 가장 포괄적인 원리로 활용되고 있다. 노벨 물리학 수상자인 고(故) 리처드 파인만 교수는 “만약 인류가 다음 세대를 위하여 꼭 한 문장으로 된 유언만을 남기고 모두 죽어야 할 사태가 발생했을 때 무슨 말을 전해주는 것이 가장 유익할 것인가”라는 질문에 대하여, “만물은 원자로 구성되어 있다”라는 데모크리토스의 생각이라고 답하였다.

아리스토텔레스가 갈라놓은 월상(月上) 세계와 월하(月下) 세계는 그 구성요소는 물론이고 운동을 지배하는 역학의 체계도 달랐는데, 17세기에 와서 뉴턴에 의해 하나의 동일한 체계로 통합되었다.

그 후 19세기에는 천재 수학자 막스웰이 세 가지의 각각 다른 현상들로 생각되어 왔던 전기, 자기, 빛을 한 개의 전자기 현상으로 통합하는 데 성공하였다. 20세기에 화학과 원자 물리학이 양자역학으로 통합되었고, 아인슈타인은 자신의 시·공 기하를 뉴턴의 중력이론과 통합하여 일반상대성 이론을 도출하였다. 그 후 아인슈타인은 30여 년간의 여생을 당시 알려져 있었던 두 가지의 힘인 전자기력과 중력을 하나의 이론(통일장 이론)으로 통일하려고 노력했지만 성공하지 못하였다. 자신의 특수상대성 이론에서 유도된 $E=mc^2$ 이라는 공식이 말해주는 것처럼, “신은 단순한 원리를 좋아한다”는 지도원리를 굳게 믿었기 때문에 아인슈타인은 통일장 이론에 집요한 노력을 경주했다고 전한다.

2500년간 절대로 깨어질 수 없는 데모크리토스의 ‘원자(atom)’는 20세기에 들어오면서 깨어지기 시작하였고 전자, 양성자, 중성자, 중간자, 쿼크 등 다수의 소립자들을 쏟아내었다. 그리고 이들 소립자들 사이에 매우 짧은 거리(10^{-13}m)에서만 상호 작용하는 강력과 약력이라는 새로운 두 종류의 힘도 알려지게 되었다. 과학자들은 20세기 후반에 와서 지금까지 발견된 모든 소립자들과 4가지 자연의 힘(전자기력, 강력, 약력, 중력) 사이에 상호작용을 통하여 물질세계를 설명하려는

표준모델(Standard Model)을 만들었다. 통일이론을 추구하는 과학자들은 1960년대에 전자기력과 약력을 '전자기약력'으로 통합하였고 1980년대에 와서 전자 기약력과 강력을 통합하는 대통일 이론 'GUT(Grand Unified Theory)'에 근접하게 되었다. 이제 과학자들은 GUT의 완성과 함께 GUT와 4번째 힘인 중력을 통일하는 숙제를 가지고 21세기를 맞이하게 되었다. 사람에 따라 2050년 또는 2150년 쯤에야 그 성공을 예견한다. 이것이 성공하기 위해서는 표준모델의 기본이론인 양자장(Quantum Field Theory)이론과 중력의 기본이론인 일반상대성 이론을 통합하는 양자화된 상대성 이론(Quantum Relativistic Theory)을 유도할 수 있어야 한다. 이 과업이 성공하면 가장 작은 세계(10^{-13}m)와 가장 큰 세계(150억 광년)가 하나의 통일된 이론 'TOE(Theory of Everything)', 혹은 Superunified Theory)로 설명할 수 있게 될 것이다. 이 이론이 완성되면 현재 '과학적' 우주생성 이론 중 가장 대표적인 '빅뱅' 이론의 진실여부가 더욱 확실해질 것으로 보인다. 현재로서 가장 유망한 이론들은 11차원 시공간의 양자장 이론과 10차원 시공의 '끈(string)' 이론 등이 있다.

그러나 이와 같은 이론을 실험으로 증명해 볼 수 있는 고에너지 장치들을 지구상에서는 만들 수 없기 때문에 오로지 수학적 논리의 적합성에만 의존해야 하는 어려움이 있다. 과학자들은 이제 눈을 열어 하늘을 향해 자신의 이론을 테스트해 볼 수 있는 고에너지 실험장치를 찾아야 할 단계까지 와 있다.

3. 우주과학

인류의 전역사를 통털어 대부분의 기간 동안 인간이 알고 있었던 우주는 멀리 항성들을 배경으로 그 중심에 요지부동의 지구가 있고 그 주위를 몇 개의 천체들이 규칙적인 원운동을 반복할 뿐 특별한 변동

이 없는 매우 정적인 우주였다.

고대인들의 우주상은 물론, 아리스토텔레스-프톨레마이오스의 천동설, 그리고 16세기 중엽 천동설 모형에서 지구와 태양의 자리를 바꾸어 얻어진 코페르니쿠스의 지동설도 그 점에서는 마찬가지였다.

우리의 태양도 우리 은하수 은하계에 속하는 1500억 개의 별들 중에 하나이며 은하수 은하계도 지금까지 우주에서 발견된 1000억 개의 다른 은하계들 중에 하나에 불과하다는 것과 현재의 우주의 크기는 150-180억 광년 안에 우주가 정지해 있지 않고 공간이 팽창하기 때문에 은하계들 사이의 거리가 점점 멀어져 가고 있다는 사실을 확인한 것은 지난 100년 사이에 일어난 일이다.

지난 100년 동안 펄서, 퀘이사, 중성자별, 블랙홀 등 새로운 식구들이 등장했지만 솔직히 천문학자들은 우주가 무엇으로 되어있는지 잘 모르고 있다. 빛이나 방사선 등의 신호를 보내기 때문에 관측이 가능한 구성원은 우주전체의 추산 질량의 일부에 불과할 뿐 우주의 대부분을 구성하고 있는 '암흑물질'에 대해서는 알 길이 없다.

또한 현재 팽창하고 있는 우주가 영원히 팽창을 계속할 것인지, 아니면 어느 정도 팽창했다가 도로 수축할 것인지에 관해서도 지금으로서 정확하게 답할 수 없다. 그것은 우주의 총질량과 팽창속도에 달려있는데 현재 관측되는 질량밀도를 팽창을 정지시키는 데 필요한 질량밀도를 나눈 값에 달려있다. 만약 ≤ 1 면 수축할 것이고, $\ll 1$ 이면 영원히 팽창하고 $\ll 1$ 이면 팽창속도가 점점 줄어들다가 팽창도 수축도 하지 않는 상태로 유지될 것이다. 현재 관측된 것은 ≈ 0.3 으로 앞으로 특별한 형태로 숨어있는 질량이 더 이상 발견되지 않는 한 우주는 영원히 팽창할 것으로 보인다. 정적인 우주상은 오랜 세월동안 너무나 당연한 것으로 받아들여왔기 때문에 수백 년에 한번씩 나타나는 뉴턴, 아인슈타인과 같은 천재들도 달리 생각할 수가 없었다. 돌이켜보면 만유인력을 고안해낸 뉴턴이 편견 없이 조금만 깊이 생각했다더라면 정적인 우주가 불안정한 구조임을 깨달을 수 있었을 것이다.

아인슈타인은 여러 가지 우주모형에 자신의 일반상대성 이론을 적용했을 때 팽창하는 우주가 안정성이 있다는 답이 제시되었음에도 불구하고 동적인 팽창우주를 수용할 수 없었기 때문에 '우주상수'라는 별도의 항을 만들기까지 하면서 그것을 피하였다. 정적이고 변화가 없는 우주모형에 대해서는 그 시작과 끝에 관한 어떠한 과학적 접근도 불가능하다.

우주의 시작이나 종말에 관해서 물리학적 추론을 시도해 본 것은 20세기 천문학의 결과이다. 즉 은하계들에서 관측되는 적색편이와 우주의 모든 방향으로부터 고르게 관측되는 30K에 해당하는 우주복사선 등에 의해 팽창우주론이 등장했기 때문이다. 현재 팽창하고 있는 우주는 과거 우주 역사를 추적하는 실마리를 제공해준다. 시간을 거슬러 과거로 갈수록 우주는 점점 수축되어 농구공만 해지고, 야구공만 해지고.... 한 개의 원자만한 크기로 압축되고, 더욱 적어져 마침내 크기가 없는 한 개의 수학적 '점'으로 환언되기 때문이다. 빅뱅 우주생성 이론은 현재 우리가 관측하는 우주는 과거 어느 시점(약 150-180억년 전으로 추산)에서 이 '점이 원인을 알 수 없는 대폭발의 결과라는 것이다.

현재 우리가 가지고 있는 물리법칙과 이론들은 우주 나이 10^{-12} 초, 우주 온도 10^{15} K, 그리고 크기가 10^{-35} m까지만 적용될 수 있기 때문에 이론적으로 그 이상의 과거로 우주를 추적하려면 'TOE'가 완성되어야만 가능하다.

우주의 거대구조를 설명하는 데는 아인슈타인의 일반상대성 이론이 지배적이지만 우주 출발 초기 즉 그 크기가 원자보다도 작아지면 양자역학적 접근을 하기 때문에 결국 이 두 원리가 통합되어야 비로소 빅뱅 우주생성론의 전과정을 이론적으로 설명할 수 있게 될 것이다. 현재 우주에서 발견되는 4가지의 힘들 사이의 상호작용은 온도의 함수로 초기 우주의 매우 높은 온도에서 한 개의 힘(Quantum Gravity 양자중력)으로 통일되었지만 시간이 지나면서 팽창과 함께 온도가 내려감에 따라 중력, 강력, 약력, 전자기력으로 분리되었다는 것이다.

천문학에서 망원경의 도움보다 멀리 떨어져 있는 천체를 관측하는 것은 시간을 소급해서 과거로 되돌아가 보는 것이 된다. 2050년쯤 우주공간에 만들어질 관측소나 달의 이면에 세워질 이상적인 우주관측소가 완성되면 초기 우주나 우주의 종말에 관한 더욱 신빙성 있는 예측이 가능해질 것이다. 그때가 되면 우주 태초의 빛까지 소급해서 볼 수 있게 될 것이고 최초의 별, 은하, 퀘이사 등의 생성과정을 관찰할 수 있을 것이다. 가시광선 이외에도 적외선, 자외선, X-레이, 라디오파 등을 사용하는 다양한 방법으로 우주를 탐색할 것이며 특별히 지구 이외의 다른 천체들에 생명체가 있는지 본격적으로 조사할 것이다.

한편으로 슈퍼컴퓨터를 사용하여 여러 가지 '가상우주(Virtual Universe)'를 창조하고 150억 년의 우주시간 여행을 시뮬레이션 해보는 것도 천문학의 새로운 분야로 대두되고 있다.

현재로서는 우리가 발견해 놓은 우주가 우연의 산물로 보기에는 너무나 특별한 면모를 지니고 있다. 여러 가지 소립자들이 왜 그들의 고유한 무게를 갖는지, 우주에 존재하는 4가지 힘들 사이의 상대적 크기가 왜 지금과 같아야 하는지 모른다. 만약 빅뱅 이론에서 우주의 팽창 속도가 항상 일정했다면 물질의 밀도차이를 만들 수 없을 것이고 우주는 별도, 은하도 없는 캄캄하고 황량한 것이 되고 말았을 것이다.

만약 강력과 약력이 조금만 적었더라면 수소원자 이외의 안정된 원자핵이 만들어질 수 없었을 것이고 원소 주기율표에 나타나는 92가지의 다양한 원소 메뉴는 없을 것이며 유기화합도, 생명도, 인간도 존재할 수 없을 것이다. 그리고 중력이 지금보다 훨씬 컸더라면 인간 크기의 생명체는 지구표면에 납작하게 달라붙어서 움직일 수도 없을 것이고 별의 크기도 지금보다 훨씬 작아져서 핵연료를 빠르게 소진해 버릴 것이다. 빅뱅 우주생성론이 주장하는 것처럼 만일 우리 우주가 우연히 무에서 대폭발로 시작될 수 있었다면 우리의 우주 외에도 무수한 우주들이 존재할 가능성을 배제할 수 없을 것이다. 다른 우주들에서도 우리와 동일한 물리상수들과 자연법칙이 있을까? 생명체와 인간이 존재할

까? 만약 인간이 21세기 어느 시점에서 궁극적 이론인 'TOE'를 완성했다고 하자. 그러면 그 방정식이 과연 물질과 우주를 만들어 낼 수 있을까? 누가 그 방정식에 불을 붙혔는가? 라는 질문에 대하여 과학의 답변은 여전히 궁색할 것이다. 어떤 사람들은 TOE의 완성과 함께 물리학의 종말이 올 것이라고 말하지만 그때가 되면 오히려 지금보다 더 큰 도전이 우리 앞에 기다리고 있을 것으로 보인다.

4. 유전공학과 인간의 미래

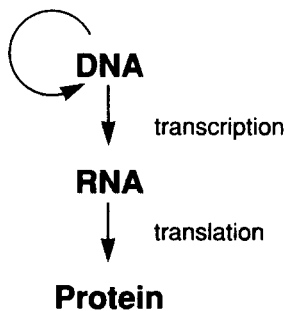
우리는 지금 인류 역사상 자연현상에 대해 가장 혁명적이고 비가역적인 실험을 진행하고 있는 중이다. 생명공학 혁명이 바로 그것이다. 산업혁명 이후 지난 400년간 용광로에서 쇠를 녹여 거대한 엔진을 제작하고 화학공장에서 플라스틱과 비료와 농약을 합성했던 소위 '굴뚝 산업' 시대를 뒤로하고 새로운 정보기술의 시대로 진입하고 있다. 우리는 이미 실리콘 원소를 기반으로 한 컴퓨터와 통신기술의 결합으로 급속도로 진행되고 있는 정보통신 혁명을 체험하면서 살고 있다. 정보통신 혁명이 010110100101110101001101...로 기술되는 디지털 정보 처리기술인 반면 생명공학 혁명을 주도하고 있는 유전공학은 탄소 원소에 기초한 A,T,G,C(DNA 분자의 염기서열을 구성하는 화학분자들) 등 4개의 화학 알파벳으로 짜여져 있는 ATCGAFTGCAA TGCAGCCA....의 생명유전 정보 처리 기술이다. 휴대전화, PC와 인터넷이 이미 생활화되고 있는 상황에서 정보화 기술시대의 양대 기둥 중의 하나인 정보통신 혁명에 대한 인지도와 관심이 매우 높고 대중화가 되어있는 반면, 생명공학 혁명에 관한 한 사람들이 아직도 잘 모르고 있거나 그다지 관심이 많은 것 같지 않다. 최근 문제가 되고 있는 유전자 조작 식품들의 등장이나, 얼마전 체세포 복제에 의해 탄생한 복제양 '돌리'가 공개되었을 때 인간복제의 가능성이 부각되면서 세간에 잠시

관심을 끌었던 일이 생각난다. 유전공학에 의한 생명공학 혁명이 인류와 자연 생태계에 가져다 줄 엄청난 변화들에 비해서 사람들이 유전공학의 잠재적 능력에 관해 잘 모르고 있거나 대개는 다소 부정적인 견해를 가지고 있는 것이 사실이다.

우리는 유전공학 기술의 현주소와 그것을 발판으로 앞으로 50년 내지 100년뒤에는 어디까지 나아갈 수 있을지 그 가능성에 대해 생각해 보아야 할 것이다. 여기서 분명히 해둘 것은 기술적으로 가능하다고 해서 꼭 그러한 일이 일어난다는 것은 아니고, 그것을 할 것인지 말 것 인지는 사람의 의지와 결정에 달려있다는 점이다.

이와 같은 가치와 생명윤리에 관한 문제에 대해서는 누구나 일정한 생각을 가지고 있을 것이다. 인간을 포함하는 지구 생태계의 미래를 좌우할 중요한 문제의 방향 결정을 몇 사람의 전문가나 정치인들에게 맡길 수는 없다. 우리 모두가 이 중요한 의사결정에 동참해야 할 것이며, 유전공학에 관한 정확한 정보와 예시가 필요하다. 본 장에서는 생명공학 시대의 문을 여는 데 기여한 핵심적 사건들을 중심으로 생명공학 기술의 현주소, 미래에 대한 전망 그리고 과연 어디까지 할 것인가를 결정하는 데 고려해야 할 점들을 살펴볼 것이다.

Replication



지난 1953년 왓슨과 크릭에 의해서 DNA의 이중나선 화학구조가 밝혀지면서, DNA의 자기복제(Replication) 및 DNA의 생명정보가 RNA로 전사(Transcription)되고, RNA의 메시지가 단백질로 번역(Translation)된다는 분자유전학의 '센트럴 도그마(The Central Dogma of Molecular Genetics)'가 크릭에 의해 제안되었다.

The Central Dogma of Molecular Genetics

그 후에 이 '도그마'는 많은 과학자들의 실험적 증거에 의해 생명의 중심원리로 정립되었다.

1973년 코헨과 보이어는 서로 다른 유기체에서 각각 DNA를 분리한 후 제한 효소(Restriction Enzyme : DNA의 특정 부위를 절단하는 가위와 같은 역할을 하는 효소)로 특정 부위를 절단한 다음, DNA 연결효소(DNA Ligase : 절단된 DNA조각을 이어주는 풀과 같은 역할을 하는 효소)를 사용해서 재조합(Recombination)하는 방법으로 재조합 DNA(Recombinant DNA)를 만드는 기술을 개발했다.

인슐린 결핍형 당뇨병 환자들에게 종전에는 소나 돼지의 췌장에서 분리한 인슐린을 사용해왔다. 그러나 1978년 미국의 젠엔텍(Genentec)회사에서 사람의 인슐린 유전자를 대장균 유전자에 삽입하여 재조합 DNA를 합성한 후에 대장균을 배양하는 방법으로 최초로 사람 인슐린을 대량생산할 수 있게 되었다.

어떤 유전자 조작을 수행하기 위해서는 그 유전자에 해당하는 DNA 조각들을 확보해야 하는데, DNA 염기서열을 아는 경우에는 화학적 합성에 의해서 만들거나(젠엔텍사의 인슐린 합성 경우), 또는 생물학적 원천으로부터 분리·정제해서 얻는다. 그런데 1984년 케리 물리스는 DNA 단편들을 시험관내에서 신속하게 증폭시킬 수 있는 종합 효소 연쇄반응(PCR, Polymerase Chain Reaction)을 발명하여 단 1개의 DNA 분자를 2~3 시간내에 조작에 충분한 만큼 복제할 수 있는 길을 마련했다. PCR 기술은 유라기 공원에 등장하는 공상과학적 이야기들을 실현가능한 일로 만들었을 뿐만 아니라 유전자 감식, 유전자 진단 및 치료의 현 실질적인 어려움을 제거하는 데 공헌하였다. 유전자 이식 또는 변형된 동물, 식물, 미생물, 바이러스 등을 만들어 농업, 축산업, 어업, 환경, 식품, 제약 등 다방면에서 이용하고 있다.

재조합 DNA 기술을 이용하여 사람의 인슐린, 성장호르몬, 혈액 응고인자(혈우병치료용), 인터페론(암치료) 및 소의 성장 호르몬 등을 미생물로부터 생산하고 있다. 지금까지 바닐라 향은 바닐라 열매로부

터 얻었지만 바닐라향을 생산하는 유전자를 분리하여 박테리아에 삽입, 유전자이식 박테리아를 배양함으로써 농사 없이도 바닐라향을 생산할 수 있게 되었다. 체초체에 강한 유전자가 삽입된 콩이나 옥수수가 등장하였고, 콜레스테롤을 저하시키는 계란, 고혈압에 좋은 쌀이 개발되었다. 해충을 죽이는 유전자 조작 목화가 이미 재배되고 있으며 딸기에 서식하는 진드기들을 선택적으로 잡아먹는 유전자 조작 곤충을 만들었다. 1983년에는 사람의 성장 호르몬 유전자를 쥐의 배(胚, embryo)에 삽입하여 보통 쥐보다 두 배 빨리 성장하고 두 배나 더 큰 슈퍼 마우스를 만들었다. 과학자들은 30% 이상 성장을 촉진하여 일주일 빠르게 시장에 팔 수 있는 돼지, 양모를 30%이상 더 빠르게 성장하게 하는 양을 개발하였다.

1984년에는 양과 염소의 배세포를 융합하여 양-염소 키메라(chimera : 두 개 이상의 다른 유전자를 가진 조직이 하나의 개체를 이룬 것)를 탄생시켰고, 1986년에는 반딧불로부터 분리한 발광유전자를 담배 식물유전자에 삽입하여 발광하는 담배나무를 선보였다.

여러 가지 유전자 이식 동물을 만들어서 고가의 의약품이나 영양제를 생산, 분비하는 '생물공장'이 종래의 화학공장을 대체하고 있다. 복합 항암 치료제의 하나인 단일 클론항체(monoclon antibody)를 생산하는 유전자 이식 염소가 있는가 하면 모유중의 필수 아미노산을 제공하는 알파 락토알부민을 생산하는 유전자이식 암송아지를 탄생시켰다. 미국의 소마 토젠 회사는 인간 헤모글로빈을 생산하는 유전자 이식 돼지를 만들었다. 인간 인슐린, 에리쓰 로포이에틴(적혈구 생성 촉진 호르몬), 베타인터페론 등 유전자 조각에 의하여 생산되는 바이오 의약품들이 종래 사용되어 왔던 많은 화학 의약품을 대체하고 있으며, 수천만 달러의 투자와 공해를 유발하는 화학공장들을 유전자이식 염소, 소, 돼지들이 대체할 것이다.

인간이 농업과 축산업을 시작한 이래 자신들의 목적에 맞도록 동식물의 특성을 개량해 보려는 노력을 계속해 왔다. 육종이란 주로 동

일 종(種) 내에서 인위적으로 선택적인 교배를 통하여 새로운 품종을 개발하는 데 활용되어 왔다. 재조합 DNA 기술은 동일 종 내의 유전자 교환이라는 종래의 벽을 뛰어 넘어서 인간을 포함한 모든 동물, 식물, 미생물 사이에서 가능하게 만들었다.

겸상적혈수 빈혈(Sickle Cell anemia)은 적혈구의 β - 글로빈 단백질에 단 한 개의 아미노산 돌연변이에 의한 치명적인 유전병이다. 아데노신 테아미나제(ADA)라는 효소를 생산할 수 없기 때문에 유발되는 선천성 중증 면역결핍증, 퓨린 뉴클레오시드 포스포리 자제 결손증에 의한 렛슈-나이한 증후군(Lesch-Nyhan Syndrome), 낭포성 섬유증(Cystic Fibrosis), 뒤센근육병, 헌팅턴병, 테이삭스증, 암 등 유전자 고장에 의한 4~5000개의 선천성 대사질환들이 알려져 있다. 유전자 치료법이란 고장난 유전자나 아예 빠져버린 유전자를 대신하여 정상적인 대사활동을 수행할 수 있는 건강한 유전자를 몸세포 또는 수정란에 삽입하는 기술이다. 당뇨병, 고혈압, 고지혈증, 파킨슨병, 에이즈, 암 등을 근본적으로 치료, 예방하는 유전자 치료법이 금세기에는 본격적으로 시도될 전망이다.

수정란으로부터 얻은 배자 복제기술에 의하여 소, 돼지, 염소 등 가축들을 복제하는 것은 이미 산업화되었고, 1993년 홀과 스틸만이 사람의 수정란으로부터 얻은 배아 복제 실험에 성공하였다. 이처럼 분화, 발생 능력을 아직도 유지하고 있는 배아기의 세포를 증식하여 다수의 복제동물을 얻는 기술은 일란성 쌍둥이, 세 쌍둥이 등 자연적인 방법으로 만들어지는 복제방법에서 크게 벗어난 기술은 아니다.

그러나 캠벨과 윌무트 등에 의하여 1997년 2월 27일 「네이처」지에 공개된 복제양 ‘돌리’는 사상 처음으로 성체의 몸세포 유전자 복제 기술에 의해서 만들어졌다는 점에서 하나의 획기적인 사건이다. 한 개의 수정란이 분화, 발생하여 일단 성체가 되면 분화 발생에 관여했던 유전자들의 스위치가 꺼지면서 몸세포들이 된다. 처음 수정란의 DNA 정보나 몸세포들이 가지고 있는 DNA 정보는 유전적으로 완전히 동일

한 내용이지만 발생과 세포분화를 조절하고 관장하는 유전자 신호들이 'off' 상태로 되어있기 때문에 몸세포 유전자 복제에 의한 개체의 복제는 오랫동안 불가능한 일로 생각되어져 왔다. 그러나 캠벨 등에 의한 핵치환 기술과 전기적 쇼크에 의한 체세포 복제기술은 아담의 갈비뼈로부터 하와를 만든 것과 비견되는 획기적 사건이었다.

곧 이어서 체세포 복제 원숭이, 소, 그리고 최근에는 5마리의 돼지가 만들어졌다. 복제인간을 만드는 데 필요한 기술적 어려움은 이제 다 제거된 셈이다.

지난 50년 동안 진행된 생명공학혁명의 마지막 사건, 그러나 그 중요성이나 영향력에서 가장 중요한 사건이 될 인간게놈계획(Human Genome Project)이 있다. 1990년 초에 미국의 NIH(National Institute of Health, 국립보건원)와 에너지청(DOE, Department of Energy)에 의해서 주도되었고, 몇몇 선진국들과 공동작업으로 30억 달러의 예산으로 1991~2005년간 15년 계획으로 인간의 전체유전자(Genome) 염기서열을 해독하는 금세기 마지막의 거대 국제 과학 프로젝트가 출범하였다. 도중에 여러 민간연구소들의 참여로 인한 인간 유전자 염기서열을 둘러싸고 지적소유권 문제가 대두되면서 미국 정부는 1,2년 내에 작업을 끝마칠 수 있도록 서두르고 있다. 이 작업이 완료되면 약 2m 길이에, 30억 쌍의 염기서열들로 짜여져 있는 인간유전자의 DNA정보가 인터넷을 통하여 공개될 전망이다. 이 방대한 정보를 책으로 만들면, 한 페이지 당 1000자(A,T,G,C 등으로 된)가 수록된 1000페이지 상당의 책으로 만들 경우 6000권($3,000,000,000 \times 2 \div 1000 \times 1000$)에 상당하는 분량이 될 것이다. 우리 몸은 60조 개의 세포들로 이루어져있는데 이것을 상기한 책으로 환산하면 360,000,000,000,000,000 권이 되는 셈이다.

그런데 인간게놈의 염기서열을 읽는 것은 이제 시작에 불과한 것이다. 지금부터 본격적으로 약 10만개에 달하는 유전인자들의 위치를 규명하여 각 염색체 상의 위치를 표시하는 유전자 지도를 만들어야

한다. 이어서 그 각각의 유전자들의 메시지에 따라서 만들어지는 단백질들을 분리하고 아미노산 서열, 3 차원 구조를 규명하고, 생리활성을 조사하는 작업이 수반될 것이다. 이상의 두 가지 작업이 완료되면 DNA와 단백질에 관한 자료들을 데이터베이스화하고, 정보를 종합·분석해서 생명의 발생, 성장, 질병, 노화 그리고 죽음에 이르는 전 과정이 밝혀지게 될 것이다. 그렇게 되면 질병의 예방, 노화의 지연은 물론 죽음이라는 병을 치료할 수 있는 길이 열릴지 모른다. 21세기에는 에이즈, 간염, 독감, 암 등에 유효한 백신의 개발, 유전자 치료, 면역체계의 강화 등의 방법으로 질병의 치료보다는 예방 쪽으로 더욱 발전하게 될 것이다.

수요가 공급을 창출한다는 말처럼 피부, 혈관, 뼈, 신장, 심장, 간, 허파 등 이식용 장기들을 생산할 수 있는 방법들이 다각적으로 검토되고 있다. 최근에 사람 장기와 크기가 비슷한 장기를 공급할 수 있는 복제돼지가 생산된 것도 이 일과 무관한 것은 아니다. 장기이식에서 최대의 장애물은 거부반응인데 과학자들은 유전자 조작으로 거부반응 없이 장기를 생산할 수 있는 방법을 시험 중에 있으며 복제인간의 생산에 계속 흥미를 가지고 있는 요인 중의 하나도 궁극적으로 가장 이상적인 이식용 장기의 공급 때문이 아닌가 생각한다.

PCR기술과 체세포 복제기술을 사용해서 마음만 먹으면 죽은 나폴레옹의 머리카락에 있는 유전자를 취하여 유전학적으로 나폴레옹과 동일한 복제 나폴레옹을 만들어낼 수 있게 된 것이다. 나폴레옹뿐 아니라 만약 우리가 아리스토텔레스, 사도 바울 등 과거에 지구상에 살았던 사람들의 전체 유전자를 입수할 수만 있으면 얼마든지 그들을 다시 살려낼 수 있게 되었다.

지금 인간은 마치 제2의 창세기를 만들어가고 있는 중이다. 21세기와 그 이후에는 인간 탄생에서 다양한 방법들이 시도될 수 있을 것이다. 남녀간의 성행위 또는 체외수정을 통하여 만들어지는 수정란이 여자의 자궁(본인), 대리모 또는 인공자궁의 도움으로 태어날 수가 있

는데 체외수정의 경우에는 난자, 정자 은행으로부터 다양한 선택이 가능할 것이다. 그 외에도 체세포 복제기술을 통하여 태어나는 인간이 등장할 수도 있을 것인데 이 경우에는 유전자 제공자, 핵이 제거된 난자의 제공자, 대리모 또는 인공자궁 등의 방법이 동원될 것이다. 아마 앞으로 100년 후에는 유전자 조작에 의해서 신체적 특성, 성격, 지능지수, 수명 등이 조절된 소위 유전자 보강 인간이 주문 생산될 수도 있을 것이다. 유전자가 보강된 이들 맞춤형 인간들은 유전자 변경 정도에 따라서는 모든 면에서 정상인들과 상당한 차이를 나타내면서 상호 결혼해도 임신이 불가능한 이종 인간이 될 수도 있을 것이다. 그 위에는 인공지능과 성능이 탁월한 각종 인공 센서들로 보강된 제3의 인종인 사이보그(cyborg)의 등장도 배제할 수 없을 것이다.

프로메테우스는 인간에게 불을 훔쳐다 준 대가로 신의 가혹한 벌을 받아야 했는데 생명의 암호를 해독해서 마음대로 새로운 생명체들을 만들어기는 인간에게는 장차 어떤 상벌이 기다리고 있을까? 원자탄의 제작과 사용에서 드러난 것처럼 몇몇 과학자나 정치가들에게 이 중요한 결정을 맡길 수는 없을 것이다.

우리는 지금까지 논의된 각종 기반 기술들을 이용하여 프랑켄슈타인의 괴물은 물론 가공할 생물학적 무기들을 만들어낼 수 있다는 점을 명심해야 할 것이다. 동일한 목적을 달성하기 위해서 이번에는 '맨하탄 계획(미국이 원자탄을 제작하기 위해 만든 비밀조직)' 과 같은 거대한 국가적 동원이 없이도 가능하다. 조그마한 벤처 스타일의 실험실과 연구 인력만 있어도 '맨하탄 계획' 이 성취하려고 했던 것을 조용하게 이룰 수 있다는 사실을 알아야 할 것이다.

우리는 지금 우리 주위에서 조용하게 그러나 엄밀하게 추진되고 있는 이 혁명에 관해서 정확히 알고 사회구성원 전체의 참여로 무엇을 할 것이며 무엇을 하지 말아야 할 것인지 신중하게 생각하고 결정해야 할 때가 온 것이다.

5. 21세기에 이루어질 중요 과학기술 분야와 전망

1) 인간 뇌 연구

인간의 의식(consciousness)은 어떻게 해서 생기는가? 이런 질문은 신경과학자, 인지과학자 그리고 철학자 들의 관심의 대상이 되어 왔다. 지난 1990-2000년까지 10년을 국제적인 '뇌연구의 10년'으로 정하고 여러 나라에서 집중적으로 인간 두뇌 연구를 실행한 결과 그 기간 동안에 얻은 연구 결과가 그전까지의 모든 연구를 합친 것보다 더 많은 성과를 올렸다. 인간 뇌는 1000억 개의 신경세포들로 구성되어 있는데 각각의 신경세포들은 2000-3000개씩 상호 연결되어 있으며, 신경세포들을 화학적으로 연결시켜주는 수십 개의 신경전달 물질들로 알려져 있다. 물질과 정신의 두 영역으로 분리한 데카르트의 이원론을 넘어서 21세기 중에는 과연 물질에서 정신이 생겨날 수 있는가, 라는 질문에 대한 답이 제시될 것 같다.

2) 인공지능과 지능로봇

인간 두뇌의 연구와 병행해서 실리콘에 기초한 인공지능 연구 또한 21세기에 가장 활발한 연구 분야가 될 것이다. 현재의 컴퓨터 지능은 지령이나 바퀴벌레 수준에 불과하지만, 2020년경에는 1000달러 짜리 컴퓨터가 인간 두뇌의 처리능력과 동일한 연산능력을 가지게 될 것이고, 2060년경에는 1000달러 짜리 컴퓨터 한 대가 전체 인류의 연산능력을 합친 것보다 더 큰 연산능력을 갖추게 될 전망이다.

2010년경에는 5,000MIPS(매초 당 100만 명령) 연산능력을 갖는 도마뱀 정도의 지능에 사람 체격에 준하는 '제1세대' 로봇이 등장하여 지금 사람이 하고 있는 대부분의 단순노동을 대신할 것이다. 이어서 100,000MIPS, 즉 쥐 정도의 지능을 가지고 훈련에 의해서 여러 가지

기능을 수행할 수 있는 '제2세대', 5,000,000MIPS 즉 원숭이 정도의 지능에 학습 가능한 '제3세대' 그리고 100,000,000MIPS, 즉 사람 수준의 지능을 가지고 추상화, 일반화 등의 지적 작업을 수행할 수 있는 인공지능 로봇이 만들어질 것이다. 궁극적으로는 2050년도 이후에 인간 두뇌를 능가하는 인공지능 로봇들이 등장하여 현재 인간의 두뇌로서는 알 수 없는 우주와 생명의 신비를 밝혀줄 것을 기대한다. 이와 같은 과업을 완수하는 데 공헌할 차세대 컴퓨터로서 광학컴퓨터, 양자컴퓨터, DNA컴퓨터 등이 검토되고 있다. 그리고 21세기에는 인간 뇌에 각종 바이오 칩을 이식하여 정보를 저장하거나, 외부로부터 데이터를 뇌에 주입하여 학습의 필요성을 줄이거나 없앨 수도 있을 것이다.

3) 나노 테크놀로지 기술

나노 테크놀로(Nano-Technolgy) 기술이란 물질이나 장치를 원자 혹은 분자 크기(10^9 수준)로 만드는 신기술을 지칭한다. 에너지 또는 전하의 양자화를 통한 단전자 트랜지스터(SET) 연구가 성공하면 전자 1개에 상응하는 게이트 전압 변화로 전류를 스위칭할 수 있게 된다.

SET가 만들어지면 고집적, 초고속, 저에너지 특성을 갖는 이상적 차세대 메모리 소자 등을 개발할 수 있다. 한편 반도체 성질을 나타내는 나노튜브 기술을 이용해 나노미터 크기의 고집적기억 소자, 회로를 만들고, 원자 수준 크기의 전자 장치들을 조립할 수 있을 것이다.

21세기에는 사람의 혈관이나 세포 내에 들어가서 여러 가지 고장난 부위나 질병을 치료하는 초소형 로봇들이 실용화될 전망이다.

4) 우주탐색 및 개발

1957년 최초의 인공위성, 스푸트니크호의 성공적인 발사와 함께 시작된 우주시대는 1969년 미국의 아폴로 11호가 최초로 인간을 달

에 상륙시킴으로써 인간의 오랜 꿈을 실현하였다. 그사이 무수한 통신, 측량, 첩보 위성들이 발사되었고 어떤 새들도 접근할 수 없는 하늘 위의 공간까지 인간들의 활동영역으로 확충되었다.

미국을 비롯한 16개국이 참여하고 1998~2003년에 완성예정인 국제우주정거장(ISS, International Space Station)은 축구경기장 두 개를 합친 것만한 구조물로서 354Km 상공에 떠 육안으로도 보일 것이다. ISS는 하늘에 떠있는 실험실, 우주관측소 및 21세기에 인간이 우주로 진출하는 도약판이 될 것이다.

또한 2007-2011년에는 달 기지가 건립되고 거기에 설치될 우주 관측 망원경은 지금까지 볼 수 없었던 먼 과거로 시간을 거슬러 올라가 초기 우주의 모습을 엿볼 수 있게 할 것이다. 2012년에는 인간이 최초로 화성에 착륙할 예정이고 2050년에는 유인(有人) 위성으로 목성과 토성 탐사에 나설 것이다.

이와 함께 21세기에는 우주에 인간 이외의 다른 생명체 특히 지능을 가진 생명체 탐사 (SETI, Search for Extraterrestrial Intelligence) 계획에도 박차를 가하여, 과연 “우리는 혼자인가?(Are we alone?)” 라는 질문에 해답을 추구할 것이다.

좁게는 금세기 중에 적어도 우리가 속한 태양계 내에 생명체가 존재하는가 아닌가에 대해서는 확실하게 말할 수 있을 것이다. 현재로서는 화성과 목성의 달 중에 하나인 유로파 (Europa) 등이 그 가능성이 있는 후보지로 지목을 받고 있다. 적어도 21세기 중에는 달 여행이 상업화될 것이며, 인간이 태양계 내에 제2의 서식처를 마련하고 자원개발 및 우주탐색을 계속해 나갈 것이 확실시된다.

5) 신소재 개발

21세기에도 지금의 관심분야인 형상기억합금, 초경량초강도 복합재료, 새로운 반도체 재료, 고온초전도체 그리고 생분해성 고분자물

질 등에 관한 연구개발이 지속될 것이다.

현재 165°k에서 사용될 수 있는 고온초전도체가 개발되었는데 이는 액체헬륨 대신 값싼 액체질소로 냉각이 가능한 온도 범위에 속한다. 앞으로 고온초전체가 실용화되면 선로 위를 떠서 달리는 자기부상 열차, 자기공명영상장치(MRI), 그리고 강력한 자장이 요구되는 핵융합 반응장치 등에 사용될 것이다. 또한 현재 널리 사용되는 난분해성 플라스틱, 폴리에틸렌 등 고분자 물질 대신 토양 미생물 등에 의해서 분해될 수 있는 생분해성 고분자 물질의 개발도 활발히 진행될 것이다.

6) 환경 및 신에너지 개발

과학기술 문명 사회를 운행하는 데는 지속적으로 에너지를 필요로 한다. 그동안 인간은 수력, 풍력, 동물, 사람, 석탄, 석유, 원자력 등 각종 에너지원을 이용해 왔다. 이들 중 원자력을 제외한 에너지의 궁극적인 원천은 태양이다. 특히 20세기 거대한 기계문명을 돌아가게 하는데 석탄, 석유등의 화석 원료와 원자력 등이 집중적으로 사용되었고 결과로 자원의 고갈, 공해 및 심각한 환경오염 등의 문제를 일으켰다.

21세기와 그 이후에 인류의 계속적인 번영에 에너지 문제와 환경과파라는 두 개의 숙명적인 병목이 가로놓여 있다. 지구의 장기적인 에너지원은 태양인데, 태양은 앞으로 50억 년 정도 계속해서 지구에 에너지를 공급할 것이다. 따라서 21세기에는 태양에너지 및 풍력, 조력(潮力), 바이오메스 등 환경오염이 적고 재순환이 가능한 에너지원의 개발에 주력할 것이다. 햇빛 또는 전기분해에 의해서 물을 산소와 수소로 분해하여 얻어지는 수소를 연료로 이용하는 기술도 활발히 추진될 것인데, 여기에 발맞추어 물 분해를 돕는 촉매 및 수소 저장용 합금 등에 관한 연구도 병행될 것이다.

한편 현재 우라늄, 플루토늄 등의 핵분열 반응으로 운용되는 원자력 발전은 이에 수반되는 핵폐기물의 처리 문제 등으로 차츰 퇴조할

것이며, 대신 바다나 호수, 물 속에 포함되어 있는 중수소를 이용한 핵융합에 의한 에너지 생산이 본격적으로 추진될 전망이다. 현재 개발 중에 있는 고온초전도체 및 초강력 펄스(10^{16})초 고출력레이저 등이 미래의 핵융합 장치에 성공적으로 이용될 것이다. 향후 50년 내에는 핵융합에 의한 에너지 생산이 가능할 것이고 금세기 안에 수소핵융합반응에 의한 인조태양의 제작 및 상업화가 이루어질 것이다.

이와 같이 인간이 새로운 에너지를 개발함으로써 석탄이나 석유가 고갈되더라도 현재 수준의 물질문명을 유지해 갈 수 있을지 몰라도 공해문제는 21세기에도 여전히 병목으로 남을 것이다.

따라서 21세기에는 환경친화적인 생산 및 소비활동의 실천을 위한 다각적인 재검토가 필요할 것이고, 만약 그것이 실패하면 금세기 중에 인간은 우주방주(space ark)를 타고 지구를 탈출해서 어디론가 새로운 피난처를 찾아 나서야 할지도 모른다.