



# 포스트게놈(Postgenomics) 시대의 기계공학

글 ■ 유 정 열 / 서울대학교 기계항공공학부, 교수 e-mail ■ jyoo@plaza.snu.ac.kr  
■ 김 중 경 / 서울대학교 대학원 이용생체공학 협동과정, 박사과정

이 글에서는 생명현상을 이해하는 데 공학적인 연구방법이 어떻게 활용될 수 있는가에 관해서 살펴보고, 구체적으로 생물학 연구에서 기계공학의 역할과 향후 과제에 대해 기술하고자 한다.

## ○ 생물학과 공학

미국의 국방 관련 과학기술 정책을 수립하고 예산을 집행하는 DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)가 2000년 1월에 주최한 한 과제 책임자 모임에서 생물학자와 공학자의 효과적인 협동 연구 방안에 관해 논의를 하면서, 생물학자와 공학자의 특성에 관한 차이점을 비교하여 표 1과 같이 정리하였다.

표 1에서 비교된 바와 같이 그 동안 생물학과 공학은 대상을 이해하는 방법이나 접근 방법에 있어서 매우 다른 길을 걸어왔으나, 최근에 생물학과 공학은 점점 공생적인 관계로 변화하고 있는 추세이다. 21세기에 들어서면서 생물 시스템의 기능 해명이라는 목표를 위해 모든 과학기술 분야가 융합되고 있다. 과학의 진보는 기술의 발전을 이끌어 주는 계기가 되었고, 기술의 발전에 따라 보다 효과적인 과학적 연구가 가능하게 되

표 1 생물학자와 공학자의 특성 비교

생물학자	공학자
가설에서 출발한다. 항상 무엇인가를 이해하려는 동기가 있으며, 응용 방안에 관해서는 잊어버리는 경우가 종종 있다.	응용을 위해 연구를 한다. 항상 작동하는 무엇인가를 만들기 위한 목표가 있으며, 가설을 잊어버리는 경우가 종종 있다.
관련된 모든 변수가 제어되는 시스템을 이해하는 데 어려움이 있기 때문에 모델링이나 이론을 신뢰하지 않는 경우가 종종 있다. 직접 눈으로 관찰한 사실조차 믿지 않기도 한다.	거의 모든 생물학적 시스템에 존재하는 수많은 변수들을 고려하지 못한다. 결함이 있는 생물학적 자료나 문헌을 순진하게 그대로 믿는 경우가 종종 있다.
10번 중에 7번 정도 반복되는 결과를 얻으면 재현성이 있다고 본다.	오차율이 1/109 이하 정도는 되어야 재현성이 있다고 본다.
현상에 대한 이해와 실험이 항상 계획대로 이루어지는 것이 아니므로, 시간 계획을 세우는 것이 매우 어렵다.	각 부분이 작동하도록 만드는 데 걸리는 시간을 대강 예측할 수 있으므로 현실적인 계획을 세울 수 있다.
무엇인가를 이해했다는 사실에 흥분하게 되며, 적절하게 특성을 살피고 재현성 있게 작동되게 하는 일은 불필요하게 여긴다.	재현성 있게 작동하는 것을 만들었다는 사실에 흥분하며, (완전히 이해를 못했다 하더라도) 그것의 특성을 분석하는 일이 사전에 필요하다고 생각한다.

었다. 이 글에서는 생명현상을 이해하는 데 공학적인 연구방법이 어떻게 활용될 수 있는가에 관해서 살펴보고, 구체적으로 생물학 연구에서 기계공학의 역할과 향후 과제에 대해 기술하고자 한다.

### ○ 포스트게놈(Postgenomics) 시대의 생물학

2000년도를 전후로 인간유전체사업(Human Genome Project)에 의해 인간 유전체의 서열이 완전히 밝혀지면서, 생물학 분야는 비약적인 발전을 이루게 되었다. 포스트게놈 시대에는 이렇게 축적된 유전자 서열에 관한 방대한 정보를 이용해서 각 유전자의 기능과 구조를 밝히는 기능 유전체학(Functional Genomics)이 중심이 되고 있다. 생물학의 궁극적인 목표 중 하나는 살아있는 세포의 생리현상을 완전하게 이해하는 것이다. 이를 위해서는 단일 세포 수준에서 세포 내 단백질의 구조와 기능을 연구하기 위한 실험 도구 및 기법과 함께 컴퓨터를 활용한 시뮬레이션 및 자료 처리 기술을 필요로 한다. 언론 매체를 통해 접하게 되는 유전체학(Genomics), 단백질학(Proteomics), 생물정보학(Bioinformatics), 구조생물학(Structural biology) 등의 생명공학 관련 용어들은 모두 세포 내 단백질의 구조와 기능의 이해를 위한 복합적인 정보를 도출하고자 진행되고 있는 각 세부 학문 분야를 의미한다.

### ○ 시스템 생물학(Systems Biology)

생명과학자들은 이제 시스템 생물학(Systems Biology)에 관심을 가지게 되었

다. 2002년도에 과학 분야의 최고 권위자인 Science(3월 1일자)와 Nature(11월 14일자)는 시스템 생물학을 특집 기사로 소개한 바 있다. 그 동안 생물학자들은 개별 유전자 또는 단백질의 특성을 이해하려는 노력을 해왔다. 인간유전자 염기서열 완성에 의한 분자생물학의 비약적인 발전과 최근 고효율 측정법의 등장에 따라 시스템에 관한 방대하고 종합적인 정보를 얻을 수 있게 되면서 시스템 차원에서 생물학을 이해하려는 시도를 하고 있다. 시스템 생물학의 궁극적인 목표는 시스템을 구성하는 인자들간의 연관성을 파악하고 이를 수학적으로 모델링하여 시스템의 구조와 동적 거동을 정확히 예측하는 것이다. 생물학 시스템의 수학적 모델에서 출발하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 시스템 해석과 이론적 예측, 이를 바탕으로 한 실험적 검증 작업, 그리고 실험 결과를 이용한 이론적 모델의 수정이라는 반복적인 과정을 거치게 된다. 그림 1은 시스템 생물학의 연구과정을 도식적으로 나타낸 것이다.

사실 이런 시스템 생물학의 방법론은 공학자들에게는 새로운 것이 아니다. 특히 기계공학자들은 자동차와 같은 복잡한 시스템을

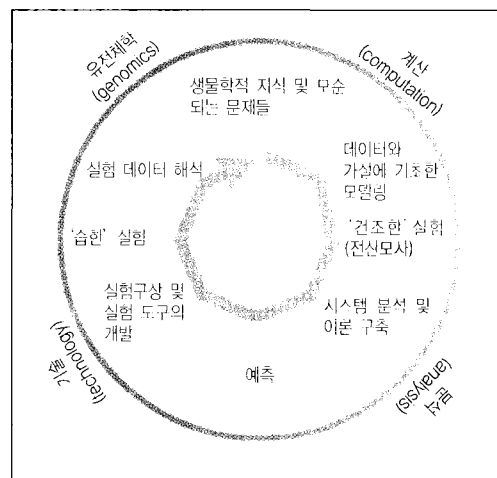


그림 1 시스템 생물학의 연구 과정<sup>1)</sup>

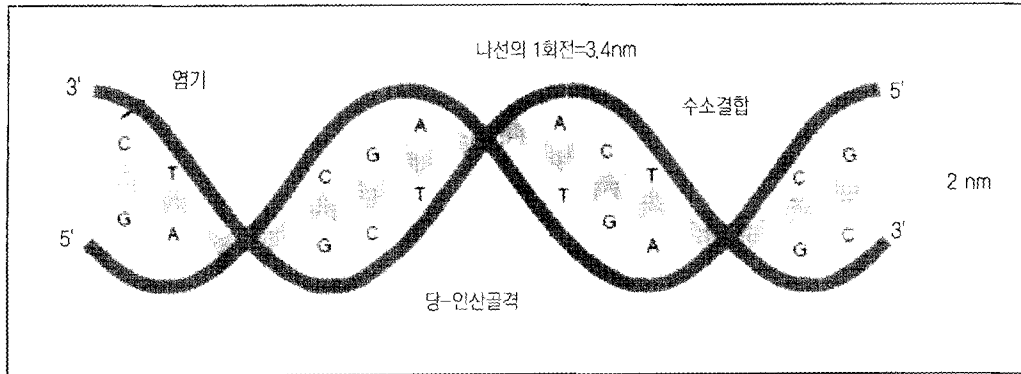


그림 2 DNA의 구조

직접 개발하였고, 시스템을 이루는 각 부품과 그 기능을 완전하게 파악하고 이들의 연관성과 전체 시스템에 미치는 영향을 잘 이해하고 있다. 생물학적 시스템은 공학적인 시스템에 비해 보다 복잡하고, 각 구성 요소들간의 연관성이 더욱 심화되어 있으며, 여러가지 상황에 따라 변화하는 동적 시스템이다. 공학자들이 생물학 분야에 공학적인 지식과 연구 방법을 접목시키기 위해서는 우선 공학자들이 생명현상에 대해 깊은 이해를 할 필요가 있다.

### ○ 생체 분자의 역학<sup>(2)</sup>

핵산은 DNA와 RNA를 포함한다. DNA는 A(adenine), T(thymine), G(guanine), C(cytosine)의 네 가지 기본 염기로 구성되며, A와 T, G와 C 사이의 수소 결합으로 이루어진 이중 나선 형태를 지닌다. 이러한 염기 짝짓기(base pairing)는 유전 정보 전달을 위해 새로운 DNA 가닥과 결합하는 데 이용되고, 어떤 단백질이 언제 생성되는지를 DNA가 제어하기 위해 RNA 가닥과 결합하는 데 이용되기도 한다. 이러한 기능들은 유전자 조절 단백질과 다른 DNA 연계 단백질

이 DNA와의 상호작용을 하면서 실현되고 조절되는데, 이때 DNA의 비틀림(twisting), 신장(stretching), 굽힘(bending)이 발생하게 된다. DNA와 RNA의 탄성은 매우 중요한 생물학적 관련성을 지닌다. 중력, 전단력, 표면장력 등의 기계적인 힘은 세포의 성장, 분화, 이동, 흡착 과정에 영향을 주게 되며, 세포의 신호 전달과 유전자 발현과도 관련성이 있다고 알려져 있다. 그러나 세포가 어떠한 방식으로 이러한 기계적인 힘을 감지하여 생물학적 반응으로 변환시키는지, 화학적 에너지가 세포 내에서 어떻게 운동과 기계적 힘으로 변환되는지, 역학과 생화학이 세포 및 분자 수준에서 어떻게 관련되어 있는지 등에 관한 정보는 아직도 완전하게 알려져 있지 않다. 이러한 질문에 대한 답을 얻기 위해서는 생체분자의 움직임과 기계적 힘에 의해 유도되는 생체분자의 구조변화에 관한 연구가 필요하다.

단백질은 신호를 전달하고, 구조를 유지하며, 생체분자를 이동시키고, 생물학적 반응을 조절하고, 대사를 위한 화학 반응을 촉진시키는 기능을 수행한다. 단백질은 해당되는 유전자에 기록된 정보에 따라 20개의 아미노산이 특정한 서열로 배열되어 형성된다. 단백질은 네 개의 다른 구조 조직을 갖게

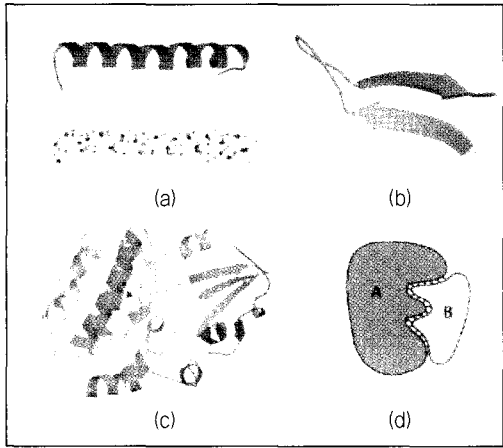


그림 3 단백질의 구조: (a)  $\alpha$ -helice, (b)  $\beta$ -sheet, (c) domains, (d) 자물쇠-열쇠 형태로 인식하는 단백질간의 결합 방식

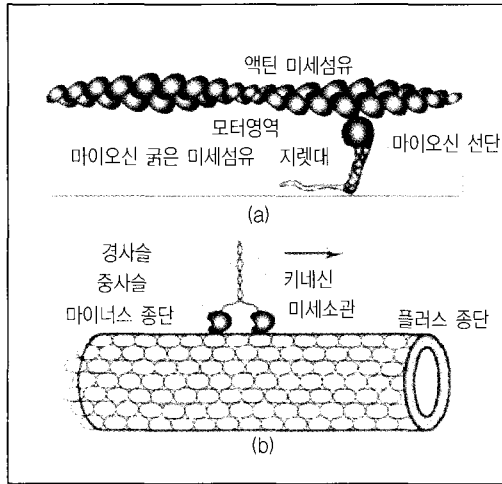


그림 4 키네신과 마이오신 분자 모터

된다. 아미노산 서열을 일차 구조, 단백질의 수소결합으로 이루어진  $\alpha$ -helice와  $\beta$ -sheet는 이차 구조,  $\alpha$ -helice와  $\beta$ -sheet로 구성된 단백질 영역(domain)을 3차 구조, 폴리펩타이드 또는 이차 구조로 연결된 다중 영역을 4차 구조라고 한다.

단백질의 기능은 3차원 입체 형태에 따라 결정된다. 기계적 힘에 의해 변화된 단백질의 입체 형태는 단백질-단백질 또는 단백질-DNA의 인식, 결합 및 풀림에 영향을 미치고 세포의 거동과 기능을 제어하는 생화학적 과정에 변화를 일으킨다. 단백질 분자의 운동과 변형은 가해지는 힘에 따라 영역의 힌지 운동, 영역의 변형 및 퍼짐, 2차 구조의 퍼짐과 같은 방식으로 구분할 수 있다. 단백질 변형에 관한 연구는 최근에 시작되었으며, 단백질의 변형과 3차원 입체 형태와의 관련성, 변형 메커니즘, 단백질 변형과 단백질 기능과의 연관성, 단백질의 동적 거동에 관한 의문은 아직 해결되지 않았다. 이와 관련된 단일 분자 연구 외에도 두개 또는 그 이상의 단백질 결합체의 변형에 관한 연구도 필요하다.

모터 분자는 단백질의 한 부류이며, 근육 수축, 세포 이동, 세포 분화, 소포 전달, 신호 전달, DNA의 복제, 축합, 전사 과정에서 중요한 역할을 담당한다. 모터 분자는 ATP 가수분해에 의한 구조적 변화를 통해서 화학적 에너지를 기계적 일로 변환시킨다. 모터 분자들이 어떻게 움직이는지, 그들의 구조적 변화가 ATP 가수분해와 어떻게 관련되는지, 힘의 발생이 그들의 구조적 강도와 어떻게 연관되는지에 관한 정보는 아직 완전하게 알려져 있지 않다. 그 동안 가장 많이 연구된 모터 분자는 마이오신(myosin)과 키네신(kinesin)이다. 마이오신은 두 개의 머리를 가지며, 액틴과 마이오신 필라멘트 사이를 미끄러지듯이 이동한다. 이때 ATP 가수분해에 의해 화학적 에너지가 기계적 운동으로 변환되어 힌지운동을 일으킨다. 한번에 4~11nm 정도를 움직인다고 알려져있다. ATP가 가수분해될 때마다 몇 단계를 움직이는지, 마이오신이 발생시키는 힘은 어느 정도인지, 마이오신의 구조적 변화가 ATP 가수분해 및 액틴 결합과 어떤 관련성이 있는지에 대해서는 아직 알려져 있지 않은 상

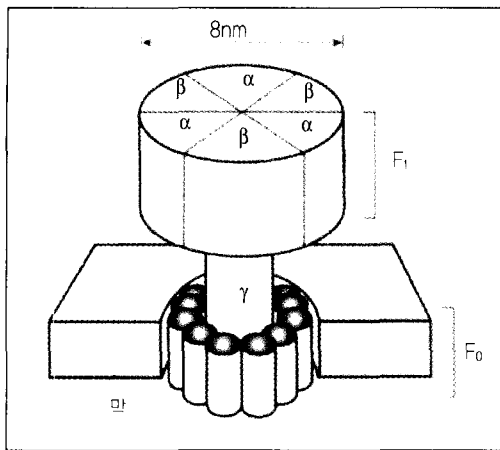


그림 5 ATP 합성효소의 구조

태이다. 키네신 역시 두개의 머리를 가지며, 미세관(microtubule)을 따라 소포를 이동시킨다. 키네신은 한번에 8nm씩 이동하는 것으로 알려져 있다.

ATP 합성효소(synthase)는 특별한 모터 효소로서 전기화학적 농도구배가 존재할 때 절연막 사이로 양자(proton)를 펌핑한다. ATP가 가해지면 F1-ATPase는 시계 방향으로 120도씩 회전하게 되며 단계마다 하나의 ATP 분자가 가수분해된다. 이러한 원리를 이용하여 코넬 대학에서는 나노스케일의 회전 모터를 개발한 바 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 기계적 힘과 운동이 어떻게 세포에 의해 감지되고 생화학적, 생물학적 반응으로 전달되는가와 화학 반응이 어떻게 분자 모터와 분자 기계를 통해서 기계적 힘과 운동을 발생시키는지에 관해서는 많은 부분이 아직 알려져 있지 않다. 세포 및 분자에 관한 생체역학은 실제로 상처 치료나 면역학, 세포 및 조직공학, 암 연구 등에 있어 매우 중요하다. 또한, 기능성 유전체학, 단백질학, 나노기술 등의 분야에서도 중요하게 여겨지고 있다. 지난 10여년 동안 인간유전체사업을 통해 축적된 단

백질과 핵산에 관한 서열 및 구조 정보와 다른 기술들의 발전은 생체분자의 역학에 관한 종합적, 정량적 연구를 가능하게 하는 밑거름이 되었다. 이러한 사실은 생명과학과 의학 분야에서 역학이 중요한 역할을 수행할 수 있다는 것을 의미한다.

### ○ 생물학과 기계공학

세포 내 단백질의 역할을 파악하기 위해서는 DNA, 단백질, 대사물질 간의 상호작용 및 반응에 대한 이해가 필요하므로, 특정한 단백질이나 다른 세포 내 물질을 형광 라벨링(labeling)하는 방법과 함께 현미경을 이용한 다양한 광학적 관찰 기법이 사용된다. 마이크로유체공학(microfluidics)과 바이오멤스(Bio-MEMS) 기술은 이러한 단일 세포 수준에서의 생물학 연구를 위한 강력한 도구로 발전하고 있다. 최근에는 나노유체공학(nanofluidics)과 바이오넬스(Bio-NEMS)라는 용어가 등장하고 있으며, 이러한 기술은 단일 생체분자 수준에서의 조작과 측정을 가능하게 할 것이다. 실제로 기계공학에서는 오랜 기간 동안 기술적 경험을 축적해 오고 진보된 연구 도구들을 개발해왔다. 최근 광학 기술 및 컴퓨터 성능의 발전에 힘입어 개발된 정량적인 가시화 기술들은 생물학의 실험적 연구에 매우 폭 넓게 활용 가능하고, 다양한 수치해석 기법들은 단백질의 구조와 동역학을 밝히는 작업에 응용될 수 있을 것이다. 바이오칩과 같은 마이크로/나노스케일 도구를 활용해서 얻은 생명현상에 대한 이해를 통해서, 자연의 원리를 응용한 시스템을 개발하게 될 수도 있다. 앞에서 예로 든 생체분자 모터의 작동 메커니즘을 이용해서 개발한 나노 모터는 생체의 기능과 원리를 나노 기기 개발에 적용한 좋은

예이다.

○ **맺음말**

살아있는 세포의 생리현상을 이해하기 위해서는 다양한 각도에서의 연구를 통해 얻는 복합적인 정보가 필요하며, 이러한 연구를 가속시킬 수 있는 새로운 첨단 기술이 개발되어야 한다. 따라서, 생물학, 물리학, 화학, 수학, 광학 등의 협력 연구가 필요하며, 기계공학 역시 이러한 인접 학문 영역과의 교류 방법을 모색하여 적절한 역할을 수행할 수 있을 것이다.

이를 위해서는 바이오 분야의 학제간 연구와 교육이 필요하며 국내 대학교의 공대 차원에서 구체적으로 다음과 같은 일의 추진이 시급한 것으로 보인다.

**연구 분위기 조성**

- 융합 기술 연구를 위한 관련 분야 연구자간의 네트워크 구축
- 자연대, 의대 등 타 단과 대학과의 세미나 정례화
- 바이오 관련 산업체와의 산학 협동 연구 추진
- 고가의 연구 기기 공동 활용 방안 마련

**인력 양성**

- 생물학, 생화학 등의 바이오 분야 기초 소양 과목을 학부 필수 이수 과목으로 지정
- 기존 전통적인 공학 기술 교육 시간에 바이오 응용 분야 소개
- 다양한 학문적 배경을 가진 신입 교수 채용 및 상호 교류
- 학생들을 대상으로 하는 바이오 분야 외부 인사 강연 및 세미나 활성화

이러한 노력들과 함께 2000년대 들어서 정부에서 막대한 지원을 하고 있는 IT, BT, NT 관련 국책연구과제에 기계공학자들의 적극적인 참여가 요구된다.

[참고문헌]

[1] Kitano, H., 2002, "Systems Biology : A Brief Overview", Science, Vol. 295, pp. 1662 ~ 1664,

[2] Gang, B., 2003, "Mechanics of Biomolecules", Journal of Mechanics and Physics of Solids, Vol. 50, pp. 2237 ~ 2274, 2003.



**판 크라운(Strip Crown)**

강판의 압연시 롤은 압연반력에 의해 휨변형을 일으키며, 압연된 강판의 프로파일 즉 판폭방향의 두께 분포는 롤의 형상을 따라서 가장자리가 얇고 중심부가 두꺼운 형태를 갖는다. 이를 판 크라운이라 하며, 그 크기는 중심부의 두께와 가장자리의 두께차로 정의한다.