

## 열적 요동과 생물물리학

언제부터인가 나노테크놀로지라는 말이 과학계에서 유행이다. 리처드 파인만은 1959에 “There’s Plenty of Room at the Bottom”이라는 제목의 강연에서 미래에는 분자와 원자를 우리가 원하는대로 조작함으로써 나노스케일의 기계장치를 고안해 낼 수 있을 것임을 시사한 바가 있다.<sup>1</sup> 그로부터 50여년이 지나는 동안 과학기술은 괄목할만한 성장을 이루었고, 실제로 자유자재까지는 아니더라도 STM(Scanning Tunneling Microscope)과 같은 장치를 사용해서 원자들을 원하는 위치에 배열하거나 나노미터 크기의 단일 생체분자에 힘을 가해서 분자구조를 변형시킬 수 있게 된 지 벌써 10년 이상이 지났다. 하지만 파인만이 제안한 나노스케일의 기계장치를 실제로 만들기 위해서는 근본적으로 해결을 해야하는 여러가지 난관이 존재한다. 우선 물체의 크기와 질량이 점점 작아지게 되면 ( $l \rightarrow 0$ ) 물체 사이에 작용하는 중력의 크기는 작아지고 정전기적 인력이 물리를 지배하게 된다. 또한 물체가 수용액 속에 존재하는 경우, 표면적 ( $\sim l^2$ ) 대 부피( $\sim l^3$ )의 비율이 늘어남으로써 물체 주변을 둘러싼 물분자들과의 상호작용이 증가함으로써 물체는 일정한 열에너지( $k_B T \approx 4.1 \times 10^{-21} J$ )를 가진 물분자로부터 끊임없이 공격을 당하는 환경에 놓이게 된다. 따라서, 나노스케일에서는 물체의 동역학적 과정이 일반적인 거시역학계에서 관측이 되는 것과는 매우 다른 양상으로 진행이 된다고 보면 되겠다. 정확성과 정밀성에 기반을 두고 매끈하고 유일한 경로를 따라 작동을 하는 거시계의 기계장치에게 열적 요동은 측정오차를 일으키는 불청객인 셈이다. 하지만 거시계에서 오차의 근원이 되는 열적 요동이 생체분자의 동역학에서는 중요한 역할을 한다. 지난 수십여년 동안 생명체의 근간이 되는 많은 과정들이 열적 요동을 효과적으로 이용할 수 있는 방향으로 진화되어왔다. 한 가지 주목할 사실은 최근 들어서 구체적으로 제안된 몇몇 기초적인 인공나노로봇은 열적 요동을 근간으로 작동하는 생체분자모터의 구조적 모티프를 채택하고 디자인을 모방하고 있다는 점이다.

생물물리학이 다루는 범위는 생물계가 존재하는 범위가 광범위한 만큼 다양하지만, 이 글에서는 우선 열적 요동이 지배하는 나노스케일에서의 분자운동의 특징을 소개를 하고, 이어서 생체분자의 접힘 전이 동역학, 광학집계를 사용한 단일분자실험에서 측정의 문제를 설명하고자 한다. 마지막으로 나노스케일의 환경에서 생체분자 및 분자모터가 열적 요동 이외에 어떤 방법을 통해서 자기조직화하고 작동하는지에 대해서도 간략하게 언급하겠다.

**부유하는 미세먼지와 콜로이드:** 중력장에서 물체는 가속이 되면서 낙하한다. 질량에 상관없이 물체가 갖는 가속도는 동일하기 때문에 1kg짜리 가벼운 쇠공이나 10 kg짜리 무거운 쇠공을 높은 탑에서 떨어뜨리면 동시에 바닥에 닿는다는 사실은 고전역학의 기초다. 하지만 낙하하는 물체의 크기가 주변 공기 입자의 요동을 느낄 수 있을 정도로 작아지면 물체가 중력장에서 낙하한다는 기본적인 사실이 더 이상 굳이곧대로 관측되지 않는다. 예를 들어 공기 중에 있는 미세먼지는 중력장에서 바닥으로 쉬이 가라앉지 않고 부유한다. 먼지 입자들 집합의 무게중심은 밑으로 천천히 낙하하겠지만 개개의 입자들 중에는 중력이 작용함에도 불구하고 윗 방향으로 움직이는 것들도 존재한다.<sup>2</sup> 이는 외부의 공기입자가 끊임없이 부딪치면서 입자에 가해진 중력보다 더 큰 힘을 가하기 때문이다. 평형상태에 도달했을

<sup>1</sup> “But I am not afraid to consider the final question as to whether, ultimately – in the great future – we can arrange the atoms the way want; the very atoms, all the way down!” – Richard Feynman, *There’s Plenty of Room at the Bottom*

<sup>2</sup> 중력장에서 높이  $y_0$ 에 형성된 먼지입자들의 시간  $t$ 에 따른 분포는

$$P(y,t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left(-\frac{[y - y_0 + (mg/\zeta)t]^2}{4Dt}\right)$$

로 기술할 수 있다. 이때  $\zeta$ 는 먼지입자가

공기중에서 느끼는 마찰계수이며 이는 먼지 입자의 크기에 비례하는 양이다.  $D$ 는 확산계수로서 마찰계수와  $D = k_B T / \zeta$ 와 같은 관계를 갖는다. 시간이 지남에 따라 먼지입자의

중심( $h - \frac{mg}{\zeta}t$ )은 하강을 하고 입자들은  $2Dt$ 의 분산을 가지고 위아래로 확산해 나간다.

때조차도 모든 먼지 입자들이 바닥에 곱게 쌓이는 것이 아니라 높이( $y$ )에 따라 볼츠만 분포( $P_{eq}(y) \sim e^{-mgy/k_B T}$ )를 하게 된다. 자갈과 같이 무거운 물체인 경우에는 평형상태에서 모든 입자가 기저상태인 바닥에 쌓여 있겠지만, 물체가 먼지처럼 가벼워서 열에너지에 의해 끊임없이 섭동이 되는 경우( $mgy \ll k_B T$ )에는 바닥으로 침전되지 않고 끊임없이 떠다니게 된다. 물체의 크기가 작음으로 인해서 열적 요동이나 외부력에 민감하게 반응하는 경우 콜로이드로 통칭이 되는 재미있는 물질의 상태가 만들어지는데 안개, 구름, 헤어스프레이는 작은 액체 방울이 공기 매질에 떠다니는 “에어로졸”에 해당하며, 우유나 마요네즈는 액상의 물질이 수용액에 퍼져있는 “에멀전”, 그리고 잉크나 혈액은 고체시료가 수용액상에 골고루 퍼져있는 “졸”에 해당한다. 콜로이드는 이와 같이 두 상이 서로 분리되지 않고 균일하게 퍼져있는 혼합물의 상태를 일컫는 용어다 (표1은 다양한 콜로이드 상태를 보여준다). 콜로이드 입자들은 기본적으로 무작위적인 힘에 반응하여 브라운 운동을 하며 확산을 통해 매질 속을 이동한다. 마찬가지로 세포 내 환경에서 분자들의 이동은 기본적으로 확산을 통해 이루어진다. 참고로 4nm 반지름을 가진 단백질이 수  $\mu\text{m}$ 의 크기의 세포를 확산을 통해 횡단하는 데 걸리는 시간은 약 10 ms 정도이다.

Table 1: 다양한 콜로이드의 상태

Medium/Phase		Dispersed phase		
		Gas	Liquid	Solid
Continuous medium	Gas	N/A (All Gases are mutually miscible)	Liquid aerosol (fog, mist, hair sprays)	Solid aerosol (smoke, cloud, air particulate)
	Liquid	Foam (whipped cream, shaving cream)	Emulsion (milk, mayonnaise, hand cream)	Sol (pigment ink, blood)
	Solid	Solid Form (aerogel, styrofoam)	Gel (gelatin, jelly, silicagel)	Solid Sol (cranberry glass)

**비공유결합에너지와 열적요동:** 생명현상의 기본단위인 세포는 70%가 물로 구성이 되어 있고 나머지 30%는 단백질, 지질, 그리고 핵산(DNA, RNA)과 같은 물질로 이루어져 있다.

이들 분자들은 수  $\text{\AA}$  크기의 단위체(monomer)들이 1차원구조로 연결이 되어 만들어진 사슬분자로서 생리학적 조건(1atm, 섭씨 37도, pH 6-8, 150mM NaCl, 5mM Mg, 등)에서 자기조직화하여 수 nm 크기의 특정한 3차원구조를 형성한다. 이 3차원구조 형성에 기여하는 주요 에너지는 정전기적 인력 혹은 소수성 인력(hydrophobic interaction)에 해당하는 비공유결합 에너지로서 사슬분자를 이루는 단위체 사이에 결합이 형성되는 경우 그 세기가 보통 수  $k_B T$  정도이다. 주목할 점은 단위체간의 비공유결합 에너지의 크기가 주변에서 끊임없이 공급되는 열에너지와 크게 다르지 않다는 점이다. 따라서 단위체 간 비공유결합은 형성과 분해를 반복하며, 열적 요동 속에서 확률적으로 형성이 된다.<sup>3</sup> 반면에 분자간의 화학 반응 혹은 전자의 수송과 같이 전자구조로부터 비롯되는 계의 특성 혹은 공유결합과 연관이 되는 에너지 스케일은 보통 수  $eV$  ( $1eV \approx 40k_B T$ ) 로 열에너지보다 월등히 크다. 즉 열에너지로 인해서 공유결합이 깨지고 전자구조가 기저상태에서 들뜬 상태로 바뀔 확률은  $\exp(-40) \approx 10^{-17}$  보다도 작다. 따라서 원자나 분자의 전자구조 혹은 화학반응과 관련된 계의 특성을 계산해 내기 위해서는 기저상태에 대한 정보만 얻으면 충분하다. 반면에 질량과 크기가 큰 거시적인 계( $N \gg 1$ )의 경우에는 계가 갖는 에너지의 요동은 계를 이루는 입자의 갯수에 대해  $\sim N^{-1/2}$ 로 감소하기 때문에 실질적으로 열에너지에 의한 요동은 고려의 대상에

<sup>3</sup> 비공유결합이 형성됐을 경우와 그렇지 않을 경우의 에너지의 차가  $\Delta\epsilon = \epsilon_b - \epsilon_u$  으로

주어졌을 때 결합이 형성될 확률은  $P = (1 + e^{\Delta\epsilon/k_B T})^{-1}$  이다.

넣지 않아도 된다. 거시적인 역학계에서는 포텐셜에너지와 운동에너지로 구성된 Lagrangian의 궤적에 따른 적분값 즉 action을 최소화하는 함으로서 계가 어떤 경로를 따라 변화할 것인지를 결정할 수 있다.<sup>4</sup> 단백질이나 DNA와 같은 생고분자의 경우에는 계를 이루는 입자의 수가 한정되어 있고 주어진 온도에서 무수히 많은 상태가 사실상 연속적으로 존재한다. 이들 상태들 사이의 에너지 차는 열에너지와 비교해서 대동소이하기 때문에 전이 과정이 무수한 에너지 상태들 사이에서 이루어 진다. 즉 생고분자의 구조는 미시적 상태 사이를 지속적으로 누비다가 가끔씩 에너지 장벽을 넘음으로써 커다란 구조변화를 일으키기도 하는데 이 때 이들 전이 동역학(transition dynamics)에 긴요하게 이용되는 것이 주위환경에서부터 공급이 되는 열에너지이다.<sup>5</sup> 상대적으로 미약한 열적 요동을 무시할 수 있는 거시계는 에너지적으로 불안정한 상태를 오랫동안 정지된 상태를 유지할 수 있는 반면, 나노스케일에서는 주위로부터 계의 상태를 변화시키기에 충분한 열에너지가 끊임없이 공급되기 때문에 일정한 시간 스케일 이후에는 에너지 장벽을 넘어 불안정한 상태에서 안정한 상태로 옮겨갈 수 있다.

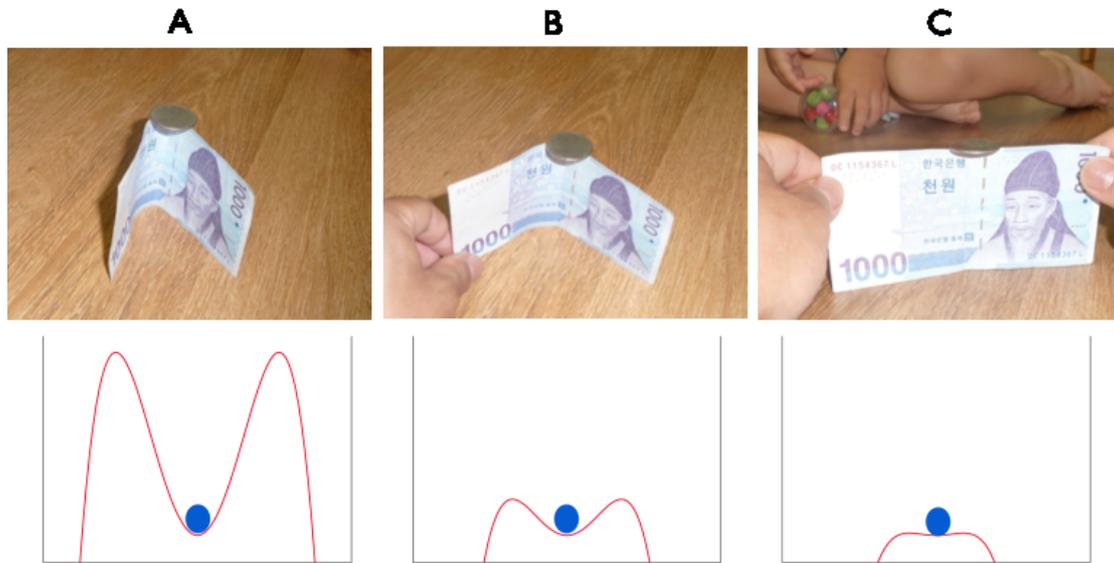


그림 1: 지폐 위에 동전 올리기. C에서처럼 날이 선 지폐 위에 처음부터 동전의 무게중심을 제대로 잡고 올리는 무척 어렵다. 하지만 A에서와 같이 동전을 올려 놓은 후에 C로 모양을 바꾸기는 쉽다. A에서 C로 지폐를 점차적으로 잡아당기면 동전과 지폐가 구성하는 에너지포텐셜의 양쪽장벽은 차츰 낮아지지만 동전은 저절로 무게중심의 균형을 유지하면서 지폐 위를 움직인다. C에서 동전은 여전히 에너지포텐셜의 얇은 극소점에 있기 때문에 가까스로 안정하지만 주위에서 동전을 둘러싼 에너지장벽보다 약간이라도 큰 흔들림(섭동)이 있는 순간 지폐에서 떨어진다.

**수용액 속에서의 정전기적 힘:** 열에너지  $k_B T$  는 앞에서 얘기한 콜로이드나 생고분자를 3차원구조로 이루게하는 힘의 예 이외에도 수용액 내에서의 정전기적 힘을 이해하고자 할 때 매우 중요해진다. 수용액 내의 열적 요동 속에서 두 전하사이의 정전기적 인력 혹은 척력이 효과적으로 작용하기 위해서는 입자 사이의 거리가 최소한 Bjerrum 거리( $l_B$ )라고

<sup>4</sup> Action  $S = \int_{t_1}^{t_2} L(q_1, q_2, \dots; \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dots; t) dt$  을 궤적에 대해 최소화 ( $\delta S = 0$ ) 하는 경우

얻어지는 운동방정식은 다음과 같다.  $\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0$  ( $i=1,2,3 \dots$ ).

<sup>5</sup> 에너지 장벽을 넘고 전이를 일으키는 속도는 소위 말하는 아뢰니우스 식,

$k = A \exp(-E^\ddagger / k_B T)$  을 따른다. 생고분자의 접힘동역학과 관련을 지을 때  $A$  는

접힘동역학의 한계속도로서 단백질이나 RNA의 경우  $A^{-1} \sim (0.1-1)\mu s$  정도의 값을 갖는 것으로 실험적으로 알려져 있다.

불리는 간극보다 작아야 한다. 이때 Bjerrum 거리( $l_B$ )는 열에너지와 정전기적 에너지가 균형을 이루는 점에서 결정이 된다.<sup>6</sup> Bjerrum 거리의 개념이 중요하게 사용되는 구체적인 예를 들어보자. ds-DNA는 이중나선의 골격을 따라 평균  $3.4 \text{ \AA}$ 의 간격으로 두개의 음전하를 가지고 있다. 이 때 주지할 부분은 음이온들 사이의 간극인  $b(= 3.4 \text{ \AA}/2 = 1.7 \text{ \AA})$  값은 고정되어 있는 반면 양이온들은 수용액 속을 자유롭게 움직일 수 있으며 열적 요동이 음이온을 중성화할 때 중요한 요인으로 작용할 수 있다는 점이다.  $\xi = l_B/b$ 를 Manning 상수라고 일컫는데,  $\xi < 1$ 인 경우에는 DNA 골격에 있는 음이온 사이에 작용하는 척력은 열적 요동에 의해서 가려져 버리지만,  $\xi > 1$ 인 경우는 골격에 있는 음이온의 전자밀도가 수용액내에서 양이온들에 의해 구현이 되는 전자밀도보다 크기 때문에 이를 상쇄시키기 위해서 DNA의 이중나선 골격 근처 음이온의 전자밀도  $e/b$ 와  $e/l_B$ 가 동등해질 때까지 즉  $\xi = 1$ 이 될 때까지 양이온들이 DNA 골격 주위로의 응집을 통해 실질적인  $b$  값을 증가시킨다. 이러한 현상을 짝이온 응집(counterion condensation) 현상이라고 일컬으며 실제로 음이온의 밀도가 큰 DNA나 마이크로튜블 주변에는 많은 짝이온들이 응집해 있다.

**생고분자의 접힘 전이동역학과 상전이 현상의 유사성:** 수증기가 물로 응축이 되고 물이 수증기로 증발하는 상전이 현상과 단백질이나 RNA와 같은 생체고분자의 접힘 전이 동역학 사이에는 많은 유사성이 존재한다. 생분자의 각 단위체를 자기스핀계의 스핀에 대응시켜서 사고해 볼 수 있는데, 주어진 실험조건에서 단위체의 평균 접힘정도를  $f_F$  ( $0 < f_F < 1$ )라고 할 때  $f_F$ 를 자기스핀계에서 각 스핀이 갖는 평균 자기모멘트  $m$ 에 대응시킬 수가 있다 ( $f_F \sim m$ ). 온도( $T$ )와 외부력( $f$ )을 변화시켜가면서 생체고분자의 접힘정도를 표현할 수 있는  $Q$  ( $Q$ 는 fraction of native contacts) 혹은  $R$  ( $R$ 은 end-to-end 거리) 값의 변화를 관찰하는 단일분자실험과 온도( $T$ )와 자기장( $H$ )의 값에 따라 자기스핀계에서 자기모멘트 값을 측정하는 실험은 정성적으로 유사한 결과를 준다. 그림2A에서 보이는 상전이 다이어그램은 임의의  $(T, f)$  조건에서 RNA hairpin이 어떤 구조를 채택하는지를 order parameter  $Q$ 와  $R$ 을 통해서 계산해 낸 결과이다. 비슷한 상전이 다이어그램을 임의의  $(T, H)$  조건에서 자기스핀계에 대해서도 계산해 볼 수가 있겠다. 주지할 점은 생고분자 시스템이 갖는 유한한 시스템의 크기로 인해 계산의 대상으로 사용한 RNA hairpin은  $f = 0$ ,  $T = T_F$ 의 조건에서 약한 1차 상전이(weak first order transition)의 패턴을 보여준다는 점이다. 생체고분자가 좋은 접힘체(good folder)인 경우, 계의 온도가 접힘온도(folding temperature,  $T_F$ )에 접근하게 되면 분자를 구성하는 모든 단위체들이 협동적으로 접힘현상에 참여하도록 고안되어있다. 이러한 접힘동역학의 협동성은 특히 한개의 도메인으로 이루어진 작은 단백질에 고유하게 나타나는 현상으로 지난 수십여년의 세월동안

축적이 되어 온 진화의 산물이다. 실험적으로 이러한 협동성은  $\Omega_c = \frac{T_F^2}{\Delta T} \left( \frac{df_F}{dT} \right)_{T=T_F}$  와 같은

식을 통해서 구하는데, 여기서  $\Delta T$ 는  $(df_F/dT)$ 의 곡선의 폭(full width at half maximum)을 의미한다. 다시 자기스핀계에 대응시켜서 생각해 보면, 계의 온도( $T$ )가 임계온도 ( $T_c$ )로 접근을 할 때 계를 구성하는 자기스핀(혹은 유체에서는 밀도)의 상관거리( $\xi$ )가 임계온도 주변에서 다음과 같이 무한대로 발산하는 특성을 지닌다  $\xi \sim |T - T_c|^{-\nu}$ . 생고분자의 전이 현상에 있어서의  $\xi$ 는 다름아닌 단백질의

<sup>6</sup>  $k_B T \approx e^2 / 4\pi\epsilon l_B$ 로부터 결정된  $l_B = e^2 / 4\pi\epsilon k_B T$ 를 유전상수  $\epsilon = 80$ 를 갖는 물에 대해서 계산해보면  $l_B \approx 7 \text{ \AA}$ 을 얻는다. 수용액 상에서 동종 전하간의 정전기적 에너지를

$$E_{elec}(r) = k_B T \frac{l_B}{r}$$

크기( $R_G \sim N^\nu$ )로 대응되고  $T_c = T_F$  임을 착안했을 때  $\Delta T \sim N^{-1}$ 와 같은 관계식을 얻을 수 있다. 즉 전이 곡선의 폭은 단백질 크기에 반비례 관계를 갖는다. 또한  $T \left( \frac{df_F}{dT} \right) \sim T \left( \frac{d\langle m \rangle}{dT} \right) \sim T \left( \frac{d\langle m \rangle}{dH} \right) = \langle m^2 \rangle - \langle m \rangle^2 = \chi$ 로 이어지는 생고분자와 자기스핀계 사이의 일련의 식에서부터  $T \left( \frac{df_F}{dT} \right)$ 는  $\chi$  즉 magnetic susceptibility에 대응이 됨을 제안해 볼 수 있다. 한편 임계온도 근처에서  $\chi \sim \Delta T^{-\gamma}$  ( $\gamma = 1.22$ )임이 상전이 이론에서 잘 알려져 있기 때문에  $\Omega_c \sim N^{1+\gamma} = N^{2.22}$ 의 스케일링 관계식을 최종적으로 제안해 볼 수 있다. 그림2에서  $\Delta T \sim N^{-1}$ 와  $\Omega_c \sim N^{2.22}$ 의 예측이 실험에서 얻은 데이터를 통해서 확인이 됨을 확인할 수가 있다.

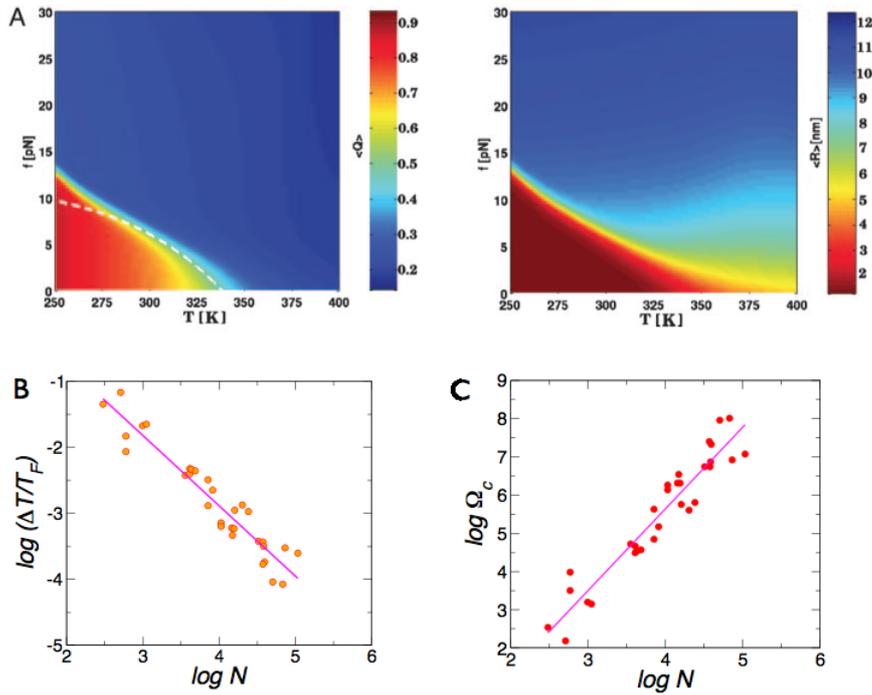
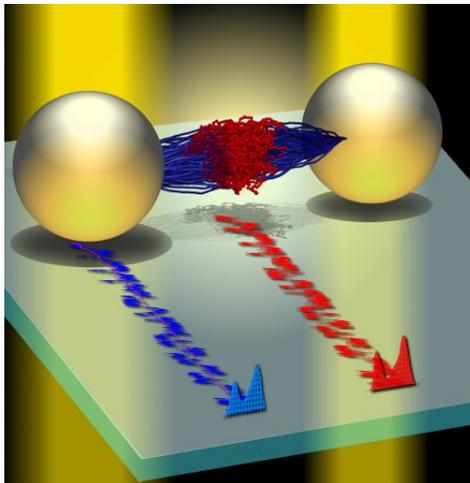


Figure 2: A.  $Q$ 와  $R$ 의 order parameter를 사용하여 계산한 RNA hairpin의 상전이 다이어그램. B, C. 실험에서 얻어진 32개의 다양한 단백질을 바탕으로 얻어진 (B)  $\log(\Delta T / T_F)$ 와  $\log N$  그리고 (C)  $\log \Omega_c$ 와  $\log N$  사이의 관계. 선형회귀법에 따르면 각각 0.95이상의 상관계수를 가지고  $\Delta T / T_F \sim N^{-\lambda}$ 에서  $\lambda = 1.08 \pm 0.04$  그리고  $\Omega_c \sim N^\zeta$ 에서  $\zeta = 2.17 \pm 0.09$ 가 됨을 확인할 수 있다.

**분자헨들의 열적 요동과 광학집계실험의 역설:** 생물학을 연구함에 있어서 실험과 이론은 뿔뿔히 떨어져 있을 수 없는 밀접한 관계를 가지고 있다. 특히 단일분자 수준에서 생체 분자의 동역학을 측정하고자 할 때에는 사용되는 기기가 실제로 어떤 양을 측정하는지를 생체 분자와 기기 사이에 어떤 상호작용이 존재하는지에 대한 면밀한 검토가 요구된다. 생체고분자에 대한 단일분자실험은 어디까지나 고전역학에 기반을 둔 실험으로서 양자역학의 불확정성 원리하고는 본질적으로 구별되어야 하겠지만, 실험을 함에 있어서도 측정에 이용되는 기기 자체가 측정하고자 하는 대상의 동역학에 직간접적으로 영향을 미칠 수 있는 점을 지적하고자 한다. 대표적인 예를 광학집계를 통한 단일분자실험에서 찾을 수가 있다. 광학집계 실험에서는 관측하고자하는 분자의 동역학을 광학구의 움직임을 통해 관측한다. 두개의 광학구 중 한쪽은 레이저의 중심에 고정하고 다른 한쪽에는 힘을 가하면서 두 광학구 사이에 연결이 된 생분자의 외부 힘에 대한 반응을 읽어낼 수 있다. 이 실험에서 분자헨들은 무한히 길지 않고 보통은 뻗뻗하기 때문에 분자헨들에 장력이 걸렸을 때 헨들

구조의 장력에 반응하는데 걸리는 이완시간은 생분자의 동역학이 일어나는 시간과 비교해서 무시할 정도로 짧다. 따라서 이 실험에서 나타나는 핸들의 이완시간 혹은 광학구의 반응시간과 관련된 비평형효과는 고려하지 않아도 좋다. 광학구와 관측 분자 사이에는 상호작용이 있기 마련인데 이를 최소화하기 위해서 ds-DNA와 같은 분자 핸들을 연결한다. 이 때 유연한(flexible) 분자 핸들을 사용하게 되면 관측대상이 되는 분자거동의 신호 자체가 주변의 열에너지로 말미암은 핸들의 커다란 열적 요동에 가려서 제대로 관측할 수 없게 되고, 이와 같은 핸들의 요동을 줄이고 생분자의 거동을 더욱 자세히 보기위해서 뻣뻣한(stiff) 분자 핸들을 사용하게 되면 관측하고자하는 생분자의 거동자체에 제한이 가해져서 실제와는 왜곡된 운동을 보게 되는 딜레마에 빠지게 된다. 또한 모든 생물실험은 단일분자실험인 경우에도 수용액내에서 수행이 되는데, 한 광학구가 움직이면 유체를 통해 광학구사이의 거리에 반비례하는 힘이 전달돼서 다른 광학구 또한 움직이게 된다. 그렇다고 광학구간의 유체역학적 상호작용을 줄이기 위해서 광학구 사이의 간격을 긴 분자 핸들을 통해서 분리하게 되면 위에서 언급한 대로 분자 핸들의 요동을 더욱 증가시키게 되는 결과를 초래하게 된다. 광학집계를 사용할 때 벌어지는 이와 같은 역설적인 상황을 어떻게 극복할 것이며, 과연 분자 자체의 순수한 동역학을 측정하기 위해서는 어떠한 방법을 취해야 할 것인가?



**Figure 3:** 광학집계실험. 분자자체의 순수한 동역학(빨간 꺾적)과 광학구를 통해서 측정이 되는 동역학(파란 꺾적) 사이에는 분자 핸들의 요동, 두 광학구 사이의 유체역학적 상호작용으로 인해서 차이가 있을 수 있다.

### 맺음말

이 글에서 필자는 거시적 역학계와는 달리 생물계를 분자 수준에서 보면 열적 요동이 세포내 분자의 확산을 통한 거리 이동이나 전이동역학을 통한 구조변화에 유용하게 쓰인다는 점에 초점을 두고 글을 전개했으나, 실제로 세포 내 대부분의 동역학적 과정들은 위에서 기술한 바대로 그렇게 수동적으로만 이루어지지는 않는다. 흔히 효소작용을 하는 것으로 알려져 있는 단백질 혹은 RNA는 자신의 구조와 특정하게 상호작용을 할 수 있는 상대 리간드나 생고분자를 만나면 에너지적으로 너무 높아서 생물계에서 의미를 갖는 시간스케일 내에 일어날 수 없는 반응을 가능케 만들어준다. 앞에서 언급한  $>40k_B T$  에 달하는 공유결합의 분해가 효소단백질 혹은 효소RNA (ribozyme)을 통하는 경우 수 초내에 가능해 진다. 또한 효소중에는 리간드나 기질단백질 구조에 변화를 일으키는 것이 목적이라기 보다는 이들 분자들과의 상호작용을 통해 일어나는 화학적 에너지를 역학적인 일로 변환시켜 세포에 유용한 일을 공급하는 분자모터들이 존재한다. 대표적인 예로 키네신이라고 하는 단백질은 ATP 분자를 가수분해함으로써 매 사이클마다 5-7pN정도에 해당하는 힘을 발생시킨다. 이 힘은 세포내 물질을 일방향으로 운반하는데 쓰이기도 하고 세포를 분열시키는 데 쓰이기도 한다. 키네신은 매 ATP를 소모할 때마다 8nm의 거리를 일방향으로 이동함으로써  $(10-12)k_B T$  의 일을 하는 셈인데 이와 같은 일은 세포로 하여금 무작위한  $k_B T$  열적 요동을

극복해 내고 특정한 방향으로 동역학이 일어나게 해 준다. 키네신 외에도 세포 내에서 DNA 복제, RNA 및 단백질의 합성, 세포막에서의 이온의 전달 등을 비롯한 중요한 세포내 동역학적 과정에서 replicase, RNA polymerase, ribosome, molecular chaperonin, ion channel과 같은 수많은 분자모터들이 작동하고 있다. 외부 및 내부에서 전달이 되는 신호에 따라 세포는 분자모터들을 발현 및 활성화시키고 필요한 일이 마무리될 때까지 ATP와 같은 분자연료를 공급한다. 더 커다란 스케일에서 본다면 생물계는 평형상태에서 벗어나기 위해 영양분 섭취를 통한 생체 내의 연료를 생성하고 노폐물을 배출하는 비평형 정상상태(non-equilibrium steady state)를 생명이 연장되는 동안 지속적으로 유지하도록 작동한다.