

제3장 복잡성의 과학이란?

복잡함은 단순한 것의 반대이다. 그런데 복잡한 것은 무질서한 것과는 다르다. 사실은 아주 질서 있는 것과 아주 무질서한 것의 경계에 있는 것이 복잡하다고 한다. 또 복잡한 것들은 단순한 것들로 이루어져 있으면서도 결코 단순한 것들의 성질만으로 전체의 성질을 이해할 수 없는 것이다. 한편 다른 정의로는 어떤 것을 기술하는 말이 복잡할수록 그것이 보다 복잡하다고 말하기도 한다. 이런 서두의 말로 복잡성을 다 이해할 수 없을 것이지만 이 글을 읽어나가다 보면 조금씩 복잡성에 대해 감을 잡을 수도 있을 것이다. 그런데 21세기 과학의 가장 중요한 연구분야의 하나가 복잡성의 과학이 될 것이라고 보는 학자들이 많이 있다. 그래서 우리 모두 복잡성의 과학이 무엇인지 대략은 알아두는 것도 괜찮을 것 같다.

1. 미분과 미분방정식. 선형성과 비선형성.

과학은 자연현상을 설명하려고 하고 또 그 미래를 예측하려고 한다. 어떤 양이 시간에 따라서 변하는 것을 설명하는 학문을 동역학(dynamics)이라 한다.

여러분들이 이미 알고 있는 경우는 직선 위를 움직이는 운동이다. 이런 경우 위치 x 가 시간 t 에 따라 변하는 것을 기술하고 왜 변하는지 뉴턴의 운동방정식으로 설명할 수가 있다. 이 경우 아주 짧은 시간 간격 dt 동안에 위치가 dx 만큼 변했다면 이 순간의 속도 v 는 dx 를 dt 로 나누면 될 것이다. 이를

$$v = \frac{dx}{dt} \quad \dots (1)$$

라 쓸 수 있다. 이것이 바로 여러분들이 고등학교에 진학한 후 수학시간에 배우게 되는 미적분에서의 도함수이다. 그래서 여러분들은 x 가 t 의 함수로 주어져 있을 때 속도를 구하는 방법을 배우게 될 것이다. 한편 거꾸로 dx/dt 가 주어져 있을 때 x 를 구하는 것을 일반적으로 적분한다 또는 미분방정식을 푼다고 말한다. 그래서 변화를 설명하는 동역학은 주로 미분방정식을 푸는 경우가 많다. 가장 간단한 경우로 t 가 독립변수이고 x 가 종속변수일 때 가장 간단한 미분방정식은 다음과 같은 꼴이 된다.

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t) \quad \dots (2)$$

이 미분방정식은 선형일 수도 있고 비선형일 수도 있다. 수학에서 선형성과 비선형성이 무엇을 의미하는지 우선 알아보자. 변수 x 의 함수인 $g(x)$ 가 다음의 두 성

질을 만족할 때 선형이라고 한다.

$$g(x+y) = g(x) + g(y)$$

$$g(ax) = ag(x). \quad a \text{는 상수.}$$

일차함수 $g(x) = Ax$ 는 선형이다. 그러나 이차함수나 삼차함수는 비선형이다. 이를테면 $g(x) = x^2$ 이라 하면 $g(ax) = a^2x^2$ 이고 $ag(x) = ax^2$ 이므로 이 둘이 같지 않다. 따라서 위의 조건이 만족되지 않는다. 간단한 미분방정식 식(2)의 경우는 우변의 함수가 x 에 대해 선형이면 선형미분방정식이 된다.

2. 혼돈(chaos)

수도꼭지를 아주 조금 열 때 나오는 물줄기는 단면이 둥글고 그 흐름이 규칙적이다. 그런데 수도꼭지를 좀 더 열면 물줄기가 가닥을 이루며 그 모양이 불규칙적이며 예측하기 어려운 거동(행동을 보여 준다). 앞의 규칙적인 흐름을 층류(laminar flow)라 하고 뒤의 불규칙적인 흐름을 난류(turbulent flow)라 부른다. 이 흐름을 기술하는 미분방정식은 비선형인데 흐름의 속도가 커지게 되면 방정식 속의 비선형항의 역할이 커져서 난류가 나타나는 것으로 알려져 있다.

난류는 비선형항의 역할을 보여주는 혼돈(chaos) 현상의 한 예이다. 혼돈은 혹독한 기상 상태, 하천의 급류, 사람의 심장에서 나타나는 불규칙적인 리듬, 주식가격의 난데없는 폭락과 같이 우리 주변에서 불시에 나타난다. 1963년 미국 기상학자인 에드워드 로렌츠(1917-)가 날씨의 변화를 설명하는 모형을 컴퓨터로 계산했을 때 처음의 조건(초기조건)이 조금만 달라도 이후의 변화가 판이하게 달라짐을 발견하였다. 그래서 좀 익살스럽게 얘기하자면 우리나라에서 나비 한 마리가 날아서 생기는 대기의 변화가 얼마 후 미국에 큰 폭풍을 일으킬 수도 있다고 해서 이 초기조건에의 민감성을 흔히 ‘나비효과’라고 부른다. 그런데 언뜻 보기에 무질서하기만 해 보이는 혼돈적인 거동 속에서도 계의 변수들은 시간이 흐른 후 그들의 공간 속에서 어떤 모양(pattern)을 보이고 있다. 다음 그림은 바로 그 구조인데 이것이 나비모양인 것이 ‘나비효과’라고 부르는 다른 이유이다.

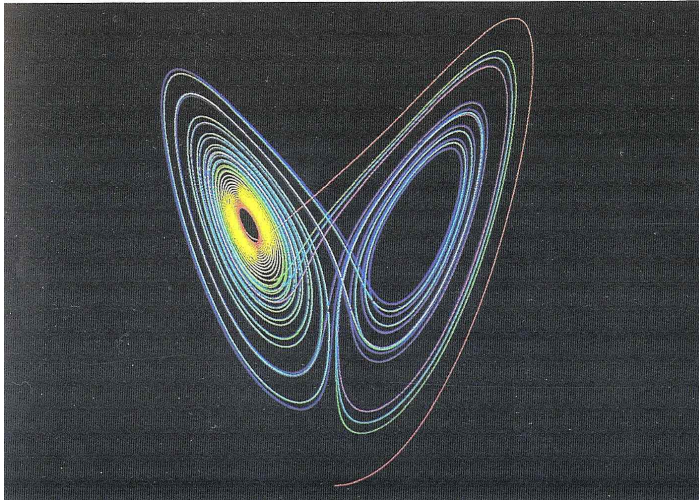


그림 1 로렌츠의 기상 모델이 보이는 혼돈 속의 구조

3. 질서와 무질서

일상 생활에서 우리는 질서가 있다 없다는 표현을 가끔 사용한다. 이를테면 군인들이 줄을 맞추어 그리고 발을 맞추어 행진하는 것은 질서가 있다고 말하고 이에 비해서 등산할 때 아무렇게나 걷는 것은 보다 무질서하다고 이야기한다.

자연과학 특히 물리학이나 정보이론에서 말하는 질서와 무질서의 개념은 이를 포함하는 것인데 이를테면 동전 1000개가 모두 같은 면이 위를 향하고 있다면 질서가 있다고 하고 아무런 규칙 없이 마구잡이로 다른 면이 위를 향하고 있다면 보다 무질서하다고 말한다.

과학에서 무질서의 정도를 나타내는 개념이 엔트로피(entropy)이다. 엔트로피는 계가 처한 상황에서 가질 수 있는 배열의 수를 Ω 라 하면 여러분이 고등학교에서 배우게 될 로그 함수를 잘 모르겠지만 $\log \Omega$ 에 비례하는 것으로 정의한다. (예를 들면 주사위를 한 개 던질 때 가능한 배열의 수는 6가지이고 두 개 던질 때는 36가지인 것은 여러분들도 다 알 것이다.) 물리학이나 정보이론에서 엔트로피의 음의 값을 정보(information)이라고 정의한다. 동전을 두 개 던질 때의 경우의 수보다 주사위를 두 개 던질 때가 엔트로피가 크고 정보는 작다. 즉 우리는 그 결과에 대해 예측할 때, 맞을 확률이 적은 것이다.

물질이 열을 흡수하면 물질을 구성하고 있는 분자들은 보다 활발하게 운동한다. 모두 정지해 있는 것은 질서가 있는 것이고 운동이 보다 활발할수록 보다 무질서하며 엔트로피가 높으므로 열의 흡수하면 엔트로피가 증가한다는 것을 알 수 있다. 또 구성원이 많아지면 보다 무질서할 것이다. 그래서 입자 수가 증가해도 엔트로피는 증가한다.

엔트로피와 관련해서 자연계에는 유명한 열역학 제2법칙이란 것이 있는데 이는 고립된 계의 엔트로피는 변함 없거나 증가하지, 결코 줄지 않는다는 것이다. 열이

온도가 낮은 데서 높은데로 흐르거나, 물질이 농도가 낮은 데서 높은 데로 확산되는 일이 없는 것은 그 과정이 엔트로피를 감소시키기 때문이다. 그림 2에서 (b)처럼 퍼진 기체가 저절로 (a)와 같이 한 쪽으로 모이는 일은 없다.

여기서 조심할 것은 열이 온도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐를 때 높은 곳의 엔트로피는 당연히 줄어든다. 증가하는 것은 전체 계의 엔트로피이며 이 경우 온도가 낮은 곳의 엔트로피의 증가량이 크기가 높은 곳의 감소량보다 크다.

그런데 생명현상은 완전히 물질이 마구잡이로 분포되어 있지 않아서 질서가 있다. 이는 생명체가 고립계가 아니기 때문에 가능한 것으로 생명체는 물질과 에너지를 들이고 낼 수 있는 열린 계이다.

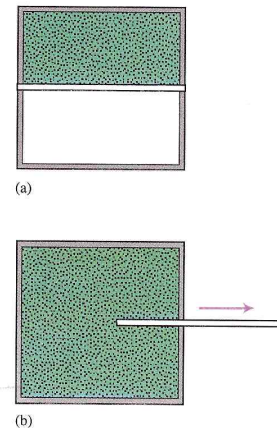


그림 2 (a) 칸막이 위
쪽에만 기체가 있다.
(b) 칸막이를 열 때.

4. 혼돈 주변의 복잡성

그런데 비선형인 동역학으로 설명할 수 있는 계에는 혼돈 대신에 질서를 형성하는 복잡성(complexity)의 세계가 존재한다. 이 때의 복잡성은 단순한 질서와 완전한 혼돈 사이에 있는 상태를 말한다. 인간의 뇌나 생태계 같은 자연현상과 주식시장이나 세계경제 같은 사회현상은 결코 완전히 고정된 침체상태나 완전히 무질서한 혼돈상태에 빠지지 않고 혼돈과 질서가 균형을 이루는 경계면에서 항상 새로운 질서를 형성한다.

복잡성에 도전하여 학문적 성과를 거둔 대표적 인물은 벨기에의 화학자인 일리아 프리고진(1917-)이다. 그는 1977년 열린 계를 기술할 수 있는 비평형 열역학의 비선형 과정에 대한 연구업적으로 노벨상을 받았다. 열역학에서 비평형 상태의 계는 외부로부터 유입되는 에너지의 양에 따라 평형에 가깝거나 또는 평형에서 먼 상태가 된다. 계에 작용하는 열역학적 힘이 선형적이면 평형에 가까운 상태가 되고, 비선형적이면 평형에서 멀리 떨어진 상태가 된다.

프리고진은 열역학적으로 평형에서 먼 상태에 있는 계에서 질서가 갑자기 자연발생적으로 나타나는 현상의 기초가 되는 것은 비선형성이라는 결론을 얻고 ‘요동을 통한 질서’ (order through fluctuation)라고 명명된 이론을 발표했다. 비평형 상태의 계는 불안정하므로 끊임없이 요동한다. 작은 요동은 비선형과정에 의해 거대한 요동으로 증폭된다.

요동이 증폭되는 것은 바로되먹임(positive feedback)의 결과이다. 바로되먹임이란 어떤 원인의 결과인 어떤 양의 증가가 다시 새로운 원인이 되어 어떤 양을 커지게 하는 방향으로 작용하는 경우라고 일단 대략 알아두자. 증폭된 요동이 격심해지면 종래의 구조는 파괴되지만 자기조직화(self-organization)과정을 통해 혼돈으로부터

새로운 질서가 자발적으로 출현한다. 프리고진은 이와 같이 미시적 요동이 평형에서 먼 계에서는 새로운 거시적 질서를 만들어내는 것을 발견하고, 요동을 통한 질서이론을 발표한 것이다. 그리고 비평형 상태에 있는 계에서 비선형 과정에 의해 자발적으로 형성되는 구조를 무산구조(dissipative structure)라고 명명했다.

무산구조는 함축적인 의미를 지닌 명칭이다. 무산과 구조는 양립될 수 없는 뜻을 갖고 있기 때문이다. 생물이나 사회처럼 열린 계는 생존을 위해 밖으로부터 에너지를 받아들이고 엔트로피를 생산하여 주위환경으로 무산시킨다. 요컨대 열린 계는 에너지를 소모(무산)하여 자기의 질서(구조)를 지킨다. 엔트로피가 단순히 무질서를 향하는 것이 아니라 적어도 비평형 조건에서는 엔트로피 그 자체가 질서의 씨앗이 된다는 의미이다.

프리고진이 무산구조를 보여주기 위해 제시하는 자기조직화의 사례는 유체역학, 아메바의 활동, 무기화학 작용, 그리고 생물학에 이르기까지 그 종류가 다양하다. 특히 생명의 본질을 무산구조로 설명함에 따라 찬반논쟁이 일어났으며 프리고진은 일개 과학자가 아니라 사상가로 주목을 받기에 이르렀다. 그가 펴낸 ‘혼돈으로부터의 질서’ (1984)와 ‘확실성의 종말’ (1996)에는 결정론적 세계관에 대한 비판과 아울러 우연을 근거로 하는 확률론적 입장에서 자연을 이해하는 패러다임이 제시되어 있다. 프리고진의 표현을 빌리면, “이제 우리는 전환기를 맞이하고 있다. 더 이상 과학이 확실성을 의미할 필요도 없고, 확률이 무지를 뜻하지도 않는 새로운 합리주의가 출현하고 있다.”

5. 복잡성의 과학

사람의 뇌나 증권거래소처럼 복잡성을 지닌 계의 행동은 인간의 능력으로 파악이 불가능한 수많은 변수에 의해 결정된다. 컴퓨터가 등장할 때까지 비선형계의 연구가 지지부진했던 이유이다. 컴퓨터를 사용하여 복잡성을 지닌 계로부터 골라낸 수 천가지의 변수로부터 과학자들은 하나의 획기적인 사실을 발견했다. 단순한 구성요소가 수많은 방식으로 상호작용하기 때문에 복잡성이 발생한다는 사실이 확인된 것이다.

복잡성은 단순성이 그 기초를 이루고 있다는 뜻이다. 예컨대 뇌는 수백억 개의 신경세포가 연결되어 있고 증권거래소는 수많은 투자자들로 들끓고 있다. 이러한 복잡한 계는 환경의 변화에 수동적으로 반응하지 않고 구성요소를 재조직하면서 능동적으로 적응한다. 따라서 복잡적응계(complex adaptive system)라 일컫는다.

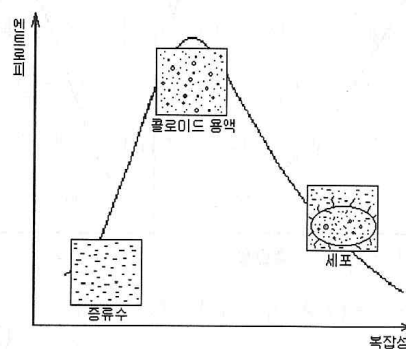
복잡적응계는 자기조직화 능력을 갖고 있으므로 단순한 구성요소가 상호간에 끊임없는 적응과 경쟁을 통해 보다 높은 수준의 복잡한 구조를 형성할 수 있다. 예컨대 단백질 분자는 생명체를, 기업이나 소비자는 국가 경제를 형성한다.

여기서 반드시 유의해야 할 대목은 구성요소가 개별적으로 갖지 못한 특성이나 행동을 복잡적응계가 보여준다는 것이다. 가령 단백질은 살아 있지 않지만 그들의 집합체인 생물은 살아 있다. 질서와 혼돈 사이에 완벽한 평형이 이루어지는 영역에

서 생명의 복잡성이 비롯된다는 것이다. 이와 같이 혼돈과 질서를 분리시키는 극도로 얇은 경계선을 ‘혼돈의 가장자리’ (edge of chaos)라고 한다. 요컨대 생명은 혼돈의 가장자리에서 출현하는 것이다. 생명은 혼돈의 가장자리에서, 한 쪽으로는 너무 많은 질서, 다른 한 쪽으로는 너무 많은 혼돈 속으로 언제든지 빠져들 위험을 간직한 채 나름의 항상성을 지키려는 유기체의 특성이라 할 수 있다.

이와 같이 구성요소를 함께 모아놓은 전체 구조에서 솟아나는 새로운 행동을 창발적(emergent)행동이라 한다. 창발성은 복잡성 과학의 기본 주제이다.

여기서 이런 지식을 가지고 다시 한번 무질서와 복잡성에 대해서 상기해 보겠다. 그림 3에서 보듯이 증류수와 콜로이드 용액, 그리고 세포를 비교해 보자. sol 상태인 콜로이드는 분산매와 분산질이 섞인 것으로 물보다 무질서하다. 즉 엔트로피가 높다. 세포는 여러 가지 세포기관으로 조직화되어 있으므로 엔트로피가 낮은 편이다. 그러나 세포는 가장 복잡하다. 복잡성을 정의하는 또 다른 방법에 의하면 증류수나 콜로이드를 기술하는 것은 비교적 간단하다. 증류수는 순수한 물이라고 하면 되고 콜로이드는 어떤 분산매에 어떤 분산질이 섞여 있다고만 하면 된다. 그러나 세포 하나를 기술하는 것은 아주 말이 길어질 것이다.



복잡성 과학을 모든 과학자가 인정하는 것은 아니다. 일부에서는 복잡성이라는 말 자체를 부정하면서 모든 현상을 아우르는 자기 조직화 이론을 찾는 일은 끝내 도로에 그칠 것으로 보고 있다. 물론 복잡성 과학의 장래가 반드시 낙관적인 것만은 아니다. 그러나 한가지 분명한 사실은 자연을 해석하는 새로운 틀을 제공하고 있다는 것이다. 지

그림 3 복잡성과 엔트로피와의 관계. 물은 가장 단순하고 질서가 있으며 콜로이드 용액은 가장 무질서하지만 복잡하지는 않다. 생명체는 콜로이드 용액보다는 질서가 있으나 가장 복잡하다.

난 3세기 동안 서양과학은 환원주의에 의존했다. 환원주의라 하면 커다란 계를 간단한 구성요소로 나누어 이해하면 그것들을 조합하여 전체를 이해할 수 있다는 생각이다. 결정론적인 선형계는 그것이 가능하다. 그러나 복잡적응계와 같은 비선형계는 전체가 그 부분들을 합쳐놓은 것 이상의 집단적인 특성을 보이므로 분석적인 틀로는 도저히 이해할 수 없다. 대부분의 자연 및 사회현상은 성질상 종합적이고 전체론적이다. 따라서 복잡성 과학의 등장으로 사물을 하나의 통합된 전체로 이해하는 전체론(holism)이 부상하게 되었다. 이는 동양에서 자연을 이해하던 방식으로 새로운 밀레니엄을 맞아 동양과 서양이 만나는 접점이 복잡성의 과학이 될지도 모른다.