

복잡계의 개관

최무영 · 박형규

이끄는 말

우리가 감각기관으로 경험하는 자연의 모든 대상들은, 분자 또는 원자와 같은 구성원들이 수많이 모여 이루어진 몰알갱이계(many-particle system)이다. 이러한 몰알갱이계에서 구성원끼리 적절히 상호작용하면 이른바 협동현상(cooperative phenomenon)에 의해 구성원 하나하나의 성질과는 관계가 없는, 계 전체로서의 집단성질(collective property)이 생겨날 수 있다. 예를 들어 컵에 담긴 물은 10^{24} 개 정도라는 엄청난 수의 H_2O 분자들로 이루어진 몰알갱이계이다. 온도가 낮아지면 물이 얼게 되는데, 이러한 현상이 분자들 사이의 협동현상이라 할 수 있다. 여기서 얼음도 물과 똑같은 H_2O 분자로 구성되어 있는데 만일 H_2O 분자가 서너 개 정도만 있다면 그것은 분자들일 뿐이지 물이나 얼음이냐를 구분한다는 것은 무의미하다. 그러나 컵의 물처럼 H_2O 분자가 많이 모이면 분자들끼리의 상호작용에 의해 전체적으로 집단성질이 드러나게 되며, 이에 따라 성질이 매우 다른 물이나 얼음이 될 수 있는 것이다.

생명현상도 마찬가지로 생각할 수 있다. 생명체는 세포로 이루어져 있고 세포는 많은 수의 단백질 분자 등으로 이루어진 것인데, 생명체의 구성원인 분자 하나하나에 대해 생명현상을 이야기할 수는 없다. 하지만 수많은 분자들이 모여서 형성한 세포라고 하는 몰알갱이계에서는 생명이라고 부르는 신비로운 현상이 생겨나게 된다. 이처럼 협동현상에 의해 나타나는 집단성질은 구성원 하나하나의 성질과는 관계없이 새롭게 생겨난다는 점을 강조해서 떠오르는 성질(emergent property)이라고 부른다.

근래에는 더 나아가서 이러한 논의를 사회현상에도 적용하

저자약력

최무영 교수는 Stanford University 박사(1984)로서, Ohio State University 박사후 연구원(1985-1986)을 거쳐 1987년부터 현재까지 서울대학교 물리천문학부 교수로 재직 중이다. (mychoi@snu.ac.kr)

박형규 교수는 University of Washington 박사(1988)로서, Carnegie Mellon University, Boston University 박사후 연구원(1988-1992), 인하대학교 물리학과 교수(1992-2002)를 거쳐, 2002년부터 현재까지 고등과학원 물리천문학부 교수로 재직 중이다. (hgpark@kias.re.kr)

려는 시도가 있다. 곧 사회를 개개인들이 모여서 이루는 집단으로 간주하고, 그 개개인들이 서로 상호작용하여 이루어내는 협동현상이 바로 그 사회의 집단적 성질을 만들어 낸다는 관점에서 경제 현상을 비롯한 다양한 사회 현상을 이해하려 한다.

물리학에서는 통계역학(statistical mechanics)을 이용해서 이러한 몰알갱이계의 협동현상을 탐구한다. 통계역학은 깁스(Gibbs)와 볼츠만(Boltzmann) 등에 의해 그 기본이 세워졌으며, 이후 현대물리학의 중요한 요소로 발전해 왔는데 거시적(macroscopic) 관점이라는 특징에서 고전역학과 양자역학으로 대표되는 동역학(dynamics)과 구분된다. 거시적 관점에서 중요한 개념이 엔트로피(entropy) 및 정보(information)인데 이러한 정보의 전달 과정에서 질서가 떠오르고 생명도 탄생한다. 특히 생명체는 해로부터 자유에너지를 받아서 엔트로피가 늘어나지 않도록 유지하며, 정보를 늘려서 성장하고 진화한다.

몰알갱이계는 흔히 질서와 무질서의 경계에서 매우 커다란 변이성(variability)을 보이는 이른바 복잡성(complexity)을 지니는 경우가 많으며, 이에 따라 다양한 복잡계(complex system)의 이해가 중요한 과제로 자리매김하고 있다. 이는 전자계나 초전도체 등 물리계에서도 볼 수 있으며, 궁극적으로 생명 현상을 보이는 생체계가 복잡계의 전형이라 할 수 있다. 이러한 관점에서 생명 현상을 탐구하는 생체물리(biological physics)가 생겨났으며, 복잡계로서 사회적 현상을 다루려는 시도로서 이른바 경제물리(econophysics)나 사회물리(socio-physics)도 제안되었다.

복잡계란 무엇인가

일반적으로 자연현상은 완전한 질서나 완전한 무질서를 보이지 않고, 그 사이에 존재하는 경우가 많다. 완전한 질서는 예측 가능하므로 간단하다고 할 수 있으며, 마찬가지로 완전한 무질서, 곧 이상적인 마구잡이는 균일한 확률로 기술된다는 의미에서 역시 간단하다고 할 수 있다. 반면에 대부분 몰알갱이계가 보이는 자연현상은 많은 경우에 변이

가능성이 매우 커서 예측할 수 없고 균일한 확률로 나타낼 수도 없다는 점에서 복잡성을 지닌다. 예를 들면 규칙적인 (질서 있는) 살창이나 마구잡이로 무질서한 기체와는 달리 지표면은 산, 강, 들, 바다, 섬 등으로 이루어진 매우 복잡한 복합물이다. 이러한 자연의 경관은 복잡성을 보이며, 이 때문에 우리는 길을 잃지 않을 수 있다. 만일 경관이 완전히 질서가 있거나 또는 무질서하다면 집에 가는 길을 구분할 수 없을 것이다. 따라서 고분자, 세포, 기관 등으로 이루어진 유기체와 이들로 다시 이루어지는 생태계는 대표적인 복잡계이다.

이러한 계들은 수많은 요소들로 구성되어 있으며 그들 사이의 비선형 상호작용에 의해 집단성질이 떠오르는 못알갱이계이다. 특히 복잡계는 세세히 또는 멀리 들여다보면 각 단계마다 새로운 상세함과 다양성을 발견하게 되며 모든 크기의 구조들이 존재하게 되고, 흔히 구성원 사이의 상관관계가 거리나 시간에 대해 대수적으로 감소하는 눈금잡기 불변성(scale invariance)을 보이기도 한다. 공간에서 이러한 눈금잡기 불변성을 보이는 대표적인 것으로 스스로 닮음(self-similarity) 성질을 지닌 쪽거리(fractal) 구조를 들 수 있다. 스스로 닮음이란 일부분의 구조를 확대하면 전체의 구조가 다시 얻어지는 성질을 말하는데, 이러한 구조는 자 눈금에 관계없이 같은 모양을 보이게 되며, 복잡한 해안선, 눈송이, 나무의 모양, 은하의 분포, DNA 구조, 도시의 성장, 고속도로 교통 등에서 볼 수 있다. 한편 시간에서 눈금잡기 불변성을 가진 대표적 현상으로는 $1/f$ 신호가 있다. 이는 신호를 여러 진동수들의 성분으로 분석할 때 각 성분의 세기, 곧 일률빔띠(power spectrum)가 진동수에 대략 반비례하는 경우를 말하며, 대부분의 전자흐름길과 강물의 흐름, 별의 밝기, 염통의 박동, 뇌전도, 생태계의 진화, 교통의 흐름, 주식 시세, 고전음악, 박수갈채 등에서 널리 나타난다.

단순한 계에서도 이와 유사한 고비성질(critical property)을 볼 수 있는데, 예를 들어 액체와 고체의 구분이 없어지는 고비점에서 물질은 눈금불변성을 보이며 외부의 자극에 매우 예민하게 반응하고 전체가 결맞게 응답한다. 이러한 성질들은 복잡계가 보이는 성질과 비슷하지만 스스로 짜이지(self-organized) 않고 온도 등 외부변수를 미세 조정해야 나타나는 점에서 차이가 있다. 또한 혼돈(chaos)계는 예측할 수 없는 행동을 나타내는데 스스로 짜이지 않고 일반적으로 하얀 잡음(white noise)을 보이며 변이 가능성이 크지 않으므로 역시 복잡계는 아니다.

복잡계는 질서와 무질서 사이에서 어느 정도 안정된 구조를 구축하며 새로운 가능성을 탐구해 나가는 유동성을 지닌

다. 열역학 둘째법칙이 나타내듯이 외떨어진 계는 점점 더 무질서해지는 반면 복잡계는 열려있는 흠어지기 구조(open dissipative structure)를 지녀서 외부 영향 아래서 스스로 짜이며 점점 더 복잡해지는 경향을 가진다. 이러한 현상을 이해하기 위해서는 복잡성을 미시적 관점에서부터 고찰할 필요가 있다. 복잡계는 기본적으로 단순한 물리법칙의 지배를 받는 수많은 구성원들로 이루어져 있는데, 이로부터 엄청난 변이 가능성, 곧 복잡성이 어떻게 떠오르는가는 매우 흥미로운 문제이다. 현재로서는 계를 기술하는 동역학의 끝개로서 복잡성이 얻어진다는 스스로 짜인 고비성(self-organized criticality)이 관심을 끌고 있으며, 환경과의 정보 교류가 핵심적인 역할을 한다는 정보전달 동역학(information transfer dynamics)도 제안되었다.

더욱 고차원적인 복잡성을 보이기 위해서 마구잡이와 함께 찢찢땀(frustration)이 핵심적인 요소로 여겨진다. 찢찢땀을 보이는 아주 간단한 예로서 서로 적인 A, B, C의 세 사람을 생각하자. 곧 A와 B가 서로 적인데 B와 C도 적이므로 A 입장에서 볼 때 적의 적은 같은 편이라고 생각하면 A와 C가 친해야 좋겠지만 A와 C도 역시 적이다. 이러한 난처한 상황을 찢찢땀이라고 부르는데 자연 현상에서 흔히 나타나며, 연극에서 긴장도(tension)를 주기도 한다. 못알갱이계에서 구성원끼리 찢찢땀이 많아지면 변이가능성이 커져서 이른바 복잡성을 보이게 된다.

자연현상을 가져오는 모든 물질계는 에너지(일반적으로는 자유에너지)라고 하는 양을 지니고 있고 그것을 최소화하려는 경향이 있다. 다시 말해서 자연 현상은 계의 전체 (자유)에너지를 최소화하는 방향으로 일어나게 된다. 간단한 계에서는 이러한 진행이 빠르게 일어나서 안정한 평형상태에 도달하게 된다. 이러한 평형 상태는 다양성과 변화가 없는 “죽은 상태”라고 할 수 있다. 그러나 찢찢땀이 많은 복잡계에서는 구성원 하나의 에너지를 최소화하는 방향이 전체 에너지를 최소화하는 방향과 다를 수 있고, 특히 전체에너지가 최소인 상태가 매우 여러 가지일 수 있다. 이에 따라 에너지가 최소인 평형 상태에 도달하는 것은 매우 어렵고 극히 오랜 시간이 걸리므로 일반적으로 계는 평형이 아닌 준안정 상태에 있는 경우가 많다. 잘 알려진 복잡계인 유리(glass)가 바로 그러한 경우로서 유리의 에너지가 최소가 되는 데에는 우주의 나이 이상의 시간이 걸린다. 따라서 우리가 보고 있는 유리는 가장 안정한 평형 상태에 있는 것이 아니다. 생체계도 마찬가지로 비평형상태를 유지함으로써 생명이라는 놀라운 스스로 짜임 현상을 보일 수 있다.

이들 사회현상에 대비시켜 본다면 사회현상은 최대 다수의 행복이라는 쪽으로 나아간다고 할 수 있다. 그런데 때로

는 나의 행복을 최대화하는 방향이 사이가 나쁜 다른 사람에게는 그의 행복을 적게 하는 것일 수가 있고, 따라서 전체의 행복이라는 관점에서 보았을 때 바람직한 방향이 아닐 수가 있다. 곧 개인의 이익이 서로 상충하는 관계는 찢찢뿔뿔을 주게 되고 복잡계 현상을 보이게 된다. 이러한 경우에 최대 다수의 행복이라는 안정한 상태에 스스로 도달하려면 너무 오랜 시간이 걸리므로 사회현상에서는 현실적으로 불가능할 수 있다. 이때 외적인 강제력을 사용하면 그 시간을 크게 단축할 수 있다. 일반적으로 가만히 놓아두면 안정한 상태로 되는데 매우 오랜 시간이 걸리는 복잡계에 적절한 건드림(perturbation)을 주면 빨리 안정한 상태에 이르게 할 수 있다.

전통적인 복잡계

이러한 복잡계 중 대표적으로 가장 많이 연구되어 온 것으로 스핀유리(spin glass)를 들 수 있다. 스핀유리는 비자성체에 자성을 띤 불순물을 섞은 계로서 무질서가 있고 스핀, 곧 자기모멘트 사이에 찢찢뿔뿔은 서로작용이 있다. 보통 강자성 바꿈상호작용(exchange interaction)과 반강자성 바꿈상호작용의 경쟁이 있으면 모든 스핀 사이의 상호작용 에너지를 최소로 할 수 없어서 찢찢뿔뿔게 된다. 찢찢뿔뿔이 있으면 모든 짝의 상호작용 에너지가 최소화되지 못하기 때문에 무수히 많은 비슷한 성질의 상태들이 가능해져서 계의 바닥 상태는 아주 많이 겹치게 된다. 스핀유리는 강자성체나 반강자성체와 같은 보통의 긴버림 정돈 상태를 가질 수 없으나 낮은 온도에서 스핀들이 마구잡이 방향으로 정렬하여 얼어버리는 새로운 종류의 정돈 상태를 가지게 된다. 이러한 전이에서 자기 응답은 겪음 현상을 보이고 남은자기화(remanent magnetization)는 비정상적으로 아주 천천히 풀리게 된다.

이러한 전이가 새로운 종류의 상전이인지, 아니면 관측시간 안에 완전한 열평형에 도달하지 못해서 나타나는 현상인지에 대한 논란이 있다. 몇 가지 예를 들면 다음과 같다. 일반적으로 정돈된 상은 정돈되지 않은 상보다 줄어든 대칭성을 보이는데 스핀유리에도 대칭성 깨짐이 있는가? 담금질한 무질서가 있는 계를 다루는 방법으로 베끼기 방법과 동역학적 방법의 관계 및 베끼기대칭성 깨짐(replica-symmetry breaking)의 의미는 무엇인가? 풀림시간이 관측가능 시간보다 큰 경우에 안에르고드성(non-ergodicity)이 실제 문제가 되는데 이 경우에 평형통계역학을 어떻게 일반화할 것인가?

이러한 스핀유리는 복잡계의 한 규범의 역할을 한다고 할

수 있으며, 유사한 성질을 보이는 계로는 강유전체에서의 쌍극자유리(dipole glass), 초전도계에서 나타나는 소용돌이유리(vortex glass) 및 게이지유리(gauge glass), 전자계에서 전하유리(charge glass) 등과 함께 두뇌의 모형인 신경그물열개와 최적화(optimization) 문제 등이 있다.

복잡계의 핵심 요소인 찢찢뿔뿔 효과를 연구하기에 편리한 계로서 널리 알려진 초전도 배열(superconducting array)은 기판 위에 전형적으로 크기 1 μm , 두께 10 nm 정도의 초전도 낱알을 10^6 개 가량 규칙적으로 살창을 이루도록 늘어놓아서 낱알 사이에는 초전도체가 있지 않지만 조셉슨 효과(Josephson effect) 또는 가까움 효과(proximity effect)에 의해 이웃한 낱알들이 결합해서 여러 흥미로운 집단 성질이 나타난다. 이러한 초전도 배열에서는 찢찢뿔뿔 효과를 마구잡이 효과와 나누어 고찰할 수 있고, 그 크기도 자기마당으로 손쉽게 조절할 수 있으므로 매우 편리하다. 초전도 배열의 평형 및 비평형 성질은 널리 연구되어 왔으며, 이차원에서 베레진스키-코스털리츠-사울리스(Berezinskii-Kosterlitz-Thouless; BKT) 전이와 이징 형태(Ising-type) 전이 등 대칭성 깨짐, 되들어감(reentrance) 및 유리 전이(glass transition)의 가능성 등 고비 성질과 함께 전류-전압 특성, 동역학적 저항, 전압 요동, 교류 전류로 물 경우에 장다리 샤프로 계단(giant Shapiro step), 몰이 전류(driving current)와 잡음과의 미묘한 관계에 의한 확률 꺼울림(stochastic resonance) 등의 동역학적 성질이 조사되었다. 초전도 배열은 복잡계로 가는 길목이라 할 수 있어서 이러한 평형 및 비평형 성질은 복잡계의 성질 이해에 길잡이 역할을 하기도 한다.

또한 미세 제작 기법(microfabrication technique)의 발달에 의해 만들어진 매우 작은 초전도 낱알의 배열에서는 양자역학적 성질이 중요해지는데, 이러한 양자 초전도 배열은 중간보기 전하밀도파(charge density wave)와 다양하게 응용되는 보오즈-허바드 모형(Bose-Hubbard model) 및 양자 스핀 모형(quantum spin model)과도 밀접한 관련을 지닌다. 특히 이를 통해 양자 상전이(quantum phase transition) 등 매우 다양하고 흥미로운 현상들을 연구할 수 있다. 이는 특히 양자역학적 현상과 복잡계 현상이 만나는 흥미로운 가능성을 제시하며, 앞으로 연구할 과제이다.

생명현상과 사회현상

생명이라는 놀라운 현상을 보이는 생체계는 궁극적인 복잡계라고 할 만하다. 다른 복잡계와 마찬가지로 생체계를 이루는 구성원으로서 분자들은 “간단한” 물리법칙을 따르지만

이들이 많이 모여서 구성한 유기체의 거동은 매우 복잡하다. 다시 말해서 생명 현상은 그 본질이 생체계를 이루는 개개 요소에 있는 것이 아니라 그들 사이의 특별한 짜임으로부터 떠오른다고 할 수 있다. 따라서 세포막에서 화학적 신호를 받는 분자라든가 유기체의 성장을 제어하는 특정한 유전자 등 기본적인 생화학적 과정에 대한 이해가 곧바로 생체계 전체의 성질에 대한 이해를 가져다주지는 않는다. 이같이 생명현상을 생체계의 구성원 사이의 협동에 의해 떠오르는 것으로 간주하면 그 본질의 이해를 위해서는 당연히 복잡계로서의 탐구가 중요하다. 이 경우에 구성원들의 다양성과 이것이 수 만년 동안의 자연선택을 통하여 합당한 기능을 가지도록 선택되었음을 고려해야 한다는 어려움이 있다. 그러나 또한 생체계에는 유전자 정보 등에 의해 완전히 결정적이기 보다는 확률적인 요소가 포함되어 있는 경우가 많다. 예를 들어 일란성 쌍둥이의 뇌도 겉보기로는 같지만 미시적으로 살펴보면 각 신경세포나 그들 사이의 연결 등은 어느 정도 마구잡이로 이루어져 있으므로 통계역학적 방법이 타당할 수 있다. 이러한 생체계에서 그동안 연구되어 온 주제들로는 단백질의 구조 및 동역학, 효소의 작용, DNA의 상전이와 정보 저장, 세포막과 이온채널, 내분비와 조절 기능, 심전도, 뇌전도, 생체주기 등에서의 집단때맞춤, 두뇌의 모형으로서 신경그물알개, 면역계 및 진행성 질병의 진행, 생태계와 진화 등이 있다.

두뇌는 신경조직이 발달하여 이루어지는데 구성단위인 신경세포는 비교적 단순한 비선형 작용을 하지만 수많은 신경세포가 연결되어 발휘되는 뇌의 집단작용은 매우 신비롭고 생체계에서도 궁극적인 복잡계 현상이라 할 수 있다. 신경세포는 많은 가치를 가지고 있는데 이들은 시냅스(synapse)를 통하여 서로 연결되어 거대한 신경그물알개(neural network)를 이룬다. 시냅스는 생화학적 신호를 전달할 때 적당하게 세기를 조절하는데 이 세기는 긴 시간 활동에 따라서 조절될 수 있다. 이러한 시냅스의 빛음성(plasticity) 때문에 두뇌는 새로운 지식을 받아들여서 저장할 수 있다. 두뇌의 각 부위가 하는 작용은 다양하지만 해부학적으로는 유사한 구조를 가지고 있으므로 뇌는 일종의 범용 컴퓨터로 볼 수 있으며, 더 나아가서 기억 및 연상, 운동 제어, 감각 처리 등과 같은 특정 작용은 해부학적 상세함에 관계없는 통계역학적 모형으로 이해할 수 있다. 기억 작용의 모형으로는 홉필드 모형(Hopfield model)이 널리 알려져 있으며, 스핀유리와의 유사성을 이용한 통계역학적 분석을 통해 기억 및 학습 작용을 상전이 현상으로 해석하고 있다. 생물학적 두뇌를 이해하기 위해서는 분자 수준에서부터 행동 및 인지의 수준에 이르기까지 다양한 정보의 통합이 요구되므로 물리학 뿐 아니라 생물학, 화

학, 심리학, 신경과학 등 다양한 분야가 포함된 학제간 연구가 필요하다.

진화는 아주 다양한 생명체를 야기하는 어떤 보편적인 과정이라 볼 수 있다. 지구는 처음에 생명체가 없이 시작했다고 생각되므로 현재 생명체의 다양성을 설명할 필요가 있다. 전통적으로 진화는 먼저 분자들로부터 자기복제가 가능한 상대적으로 단순한 유기체의 형성 단계와 이런 단순한 유기체로부터 보다 복잡한 유기체의 형성 단계로 나눈다. 유기체의 진화는 본질적으로 생물체의 청사진에 해당하는 DNA의 변화에 의해서 일어나는데, DNA가 마구잡이 돌연변이에 의해 진화해 왔다고 본다면 지구의 수명으로는 DNA의 모든 가능한 배열 중 극히 일부분만이 탐구되었다고 볼 수 있다. 진화의 과정은 유전자 공간에서의 상호작용이 포함된 퍼짐 현상으로서 유기체와 자원 두 요소로 구성된 퍼짐-반응계로 모형화할 수 있다. 특히 유전자 수준에서 마구잡이 변이(random mutation)과 표현(phenotype) 수준에서 자연선택(natural selection)을 고려하고 환경과 정보전달을 강조하는 모형에서 화석 자료와 일치하는 눈금불변성을 보여서 관심을 끌고 있으며, 앞으로 보다 더 정밀한 통계역학적 모형을 통한 진화의 이해가 기대된다.

복잡계의 과제로 연구된 문제로 교통흐름(traffic flow)과 주식시세 요동 및 시계열 분석 등 사회과학적 문제도 있다. 교통흐름에서는 주로 고속도로에서 차량의 흐름을 띄엄띄엄한 날칸자동기계(cellular automaton) 또는 연속적인 흐름체로 보고 여러 가지 맷음변수에 따른 정상 소통과 체증 등의 다양한 상을 고찰하였다. 주식시세 요동 분석은 과생상품과 관련하여 이른바 경제물리를 낳았으며 확률방정식(stochastic equation) 등 통계역학 및 비선형동역학의 기법들을 이용한다. 현실적인 중요성으로 이러한 분야는 앞으로 더욱 많이 연구될 것으로 보인다.

최적화 문제란 어떤 양의 최소값 및 그 양을 최소화하는 짜임새를 찾아내는 문제로 널리 알려진 외판원 문제(traveling salesman problem)를 비롯해서 그림 나누기(graph partitioning), 차량 대기(vehicle queuing) 등이 있는데 물리학 뿐 아니라 공학과 사회과학에서 매우 중요한 문제이다. 이를 찾아내는 풀이법은 일반적으로 계의 크기에 지수적으로 의존해서 시간이 증가하므로 현실적으로 큰 계에서 풀이를 찾아내는 것은 매우 어렵다. 흥미롭게도 이러한 최적화 문제는 통계물리에서 스핀유리 같은 복잡한 못알갱이계의 바닥상태 및 그 에너지를 찾아내는 것과 동등하며, 따라서 통계역학적 방법을 사용할 수 있다.

각 구성원과 그들 사이의 상호작용을 꼭지점과 연결선으로 나타내면 못알갱이계는 일반적으로 그물알개의 구조를

가진다. 이는 결정(crystal) 등에서 보듯이 질서가 있는 경우에는 규칙적인 살창이 되며, 완전히 무질서하면 마구잡이 그물알개(random network)로 주어진다. 복잡그물알개(complex network)는 이러한 질서와 무질서 사이에서 복잡성을 보이는 구조를 지녔으며, 이른바 작은세상 그물알개(small-world network)와 눈금없는 그물알개(scale-free network)가 널리 연구되었다. 이러한 그물알개 구조의 예로서 인터넷 및 웹 연결, 교통망, 사회적 관계, 단백질 상호작용, 신진대사, 신경그물알개 등이 제시되었고, 그 구조적 특성이 연구되었다.

맺는 말

지난 20세기의 물리학은 기본원리를 구성하였고 주로 환원주의(reductionism)와 결정론(determinism)적 관점에서 비교적 간단한 자연 현상을 이해하는데 주력했다. 이에 반해 21세기의 물리학은 자연의 해석에 중점을 두게 되리라 예상된다. 특히 자연에서 다양하고 근원적인 복잡한 현상을 다루게 될 터인데 이를 위해서는 예측불가능성을 인정하고 전체론(holism)적 관점을 고려해야 하고 해석에서 정보가 중요한 역할을 하며, 통계역학, 비선형동역학, 전산물리 등의 방법에 의한 통계물리가 주된 역할을 하리라 생각한다. 전통적인 물리학의 범주 뿐 아니라 화학, 생물, 지구과학, 사회과학 분야 등에서 나타나는 현상이 포함되며 이에 따라 물리학의 지평이 넓어지리라 예상된다. 특히 복잡계 및 복잡성의 관점에서 생

명 현상의 보편지식 체계를 구축하려는 노력이 어느 정도 성과를 얻는다면 생명이라는 가장 신비로운 현상을 근원적으로 이해하는데 중요한 기여를 하게 될 것이다.

일반적으로 복잡계에서는 매우 커다란 변이가능성 때문에 처음 조건의 조그만 차이로 완전히 다른 결과를 얻을 수 있기 때문에, 환경 등 상황의 변화에 따른 적응에 유연성을 보일 수 있다. 따라서 복잡성은 본질적으로 생명 현상의 존재에 필요할 뿐 아니라 유지, 곧 상황의 변화에 대처하는 데에도 중요한 역할을 한다. 복잡성이 내포하고 있는 수많은 새로운 가능성과, 외부 환경과의 상호작용으로 또 다른 가능성을 끊임없이 추구해 나간다는 점이 정체가 없고 최적의 방향으로 나갈 수 있는 원동력을 제공한다.

예측불가능성(unpredictability)을 지닌 복잡성이 떠오르는 성질로서 자연계, 사회계 전체에 나타나고 있다는 사실이, 20세기를 주도했던 결정론과 환원주의에 대한 비판과 더불어 전통적인 자연관을 재검토할 필요성을 제시한다. 따라서 질서와 무질서의 사이라는 관점에서 “혼돈의 경계(border of chaos)”에 있다고 표현하는 복잡성에 대한 연구는 21세기 들어 중요한 문제로 자리매김하고 있다.

결론적으로 인간은 자연의 한 부분이면서 동시에 자연을 파악하고 해석한다. 다시 말해서 인간은 생명 현상 탐구의 대상이면서 동시에 활동의 주체이다. 이는 복잡계 현상의 진정한 궁극으로서, 서로 얽혀있는 생명과 삶의 의미에 대한 성찰이 필요함을 시사한다.