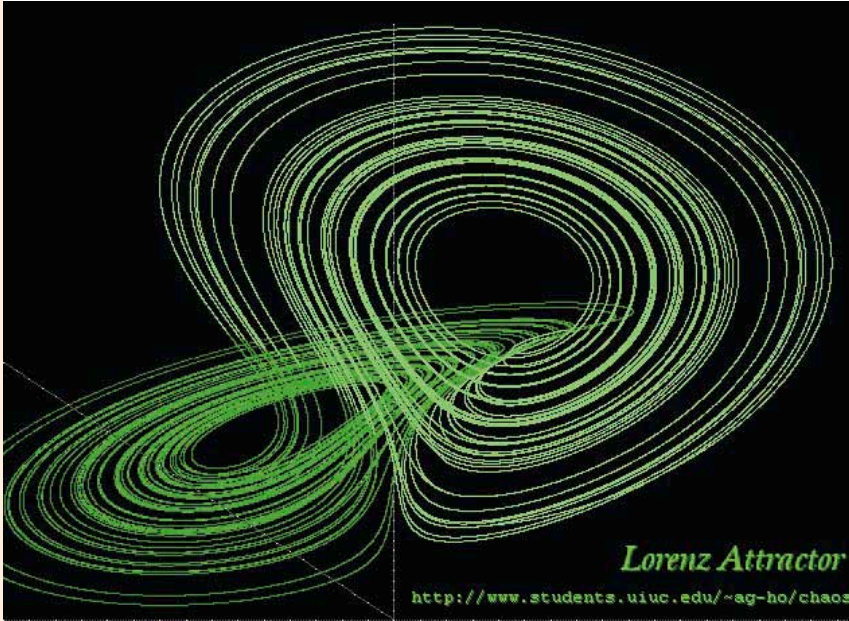


포스트지놈시대 신(新)패러다임 선도하는 ‘복잡성의 과학’

“전체는 부분의 합보다 더 크다”

글_ 김승환 포항공대 물리학과 교수 swan@postech.ac.kr



로렌즈 끌개

가 뇌와 생체 등 점점 더 크고 복잡한 구조에 적용되고 있다. 복잡계는 모래탑, 뇌, 진화, 면역, 생물집단, 생태계 등 생물계, 인구문제, 지구온난화, 산림감소 등 지구환경계, 더 나아가 주식시장, 환율 등 시장경제계와 사회 문화 현상에 이르기까지 넓은 영역에서 발견된다. 그러나 복잡계는 평형에서 멀리 떨어져 있어 어떤 물리적 원리가 적용되는지는 아직 명확하게 이해되고 있지 않다. 이러한 복잡계의 비평형 현상을 어떻게 보편적으로 기술하느냐 하는 것은 현대 과학의 도전적 과제 중 하나로 남아있다.

사실 복잡성은 과학뿐 아니라 현대사회의 새로운 키워드로도 빠르게 부각되고 있다. 21세기 현대 사회는 물질, 자본 중심에서 지식, 정보 중심으로 옮겨가며 질서에서 혼돈으로, 정상성에서 역동성으로, 수직성에서 수평성으로, 대립에서 융합으로 패러다임의 전환이 이루어지고 있다. 특히 정보의 저비용 무한 확산성, 다원화와 예측불가능성이 부각되며 경쟁원리 자체도 개체간 상호 협력을 토대로 한 생태계적 역동성이라는 새로운 복잡계 틀의 도입을 요구하고 있다.

카오스이론과 비평형계 과학에서 출발

복잡성은 자연의 잘 이해되지 않은 숨겨진 얼굴이다. 그러나 우리 주위의 자연을 잘 살펴보면 복잡성은 사실 어디에나

최 근 다양한 과학 분야의 발전이 복잡성의 이해에 달려있다는 인식이 점차 확산되고 있다. 복잡계는 물리학뿐 아니라 분자생물학, 신경생물학, 생물정보학, 생태학, 화학, 지질학, 공학, 경제학에 이르기까지 중요한 역할을 담당하게 되었다. 이러한 시스템은 많은 수의 상호작용을 하는 부분들로 이루어져 있으며, 외부 환경에 노출되어 특정한 기능을 수행하고 있다. 복잡계는 각 부분의 자기조직화 현상을 통해 전혀 새로운 형태의 창발성을 거시적 시스템 수준에서 만들어 내게 된다.

물리로부터 시작된 복잡계의 아이디어

기획연재순서

- ④ 21세기의 수학
- ⑤ 21세기의 천문학
- ⑥ 21세기의 해양학
- ⑦ 21세기의 지질학
- ⑧ 21세기의 생태학
- ⑨ 21세기의 기상학
- ⑩ 21세기의 생명과학
- ⑪ 21세기의 생물정보학
- ⑫ **복잡성의 과학**
- ⑬ 21세기의 우주학
- ⑭ 21세기의 고고학
- ⑮ 21세기의 인류학
- ⑯ 21세기의 생물분류학

존재하고 있다는 것을 발견하게 된다. 하늘의 흘러가는 구름, 계곡의 급류와 폭포 흐름, 태풍의 불규칙한 진로, 기상이변, 지진의 불규칙성, 눈사태의 불안정성, 산과 숲의 불규칙한 모습, 번개의 갈라진 궤적 등에 복잡성이 존재한다. 사실 자연은 단순하고 반복적인 모습이 아니라 엄청난 역동성과 변동성 속에서도 기묘한 안정성과 규칙성을 가진 복잡성 구조를 유지해 나간다.

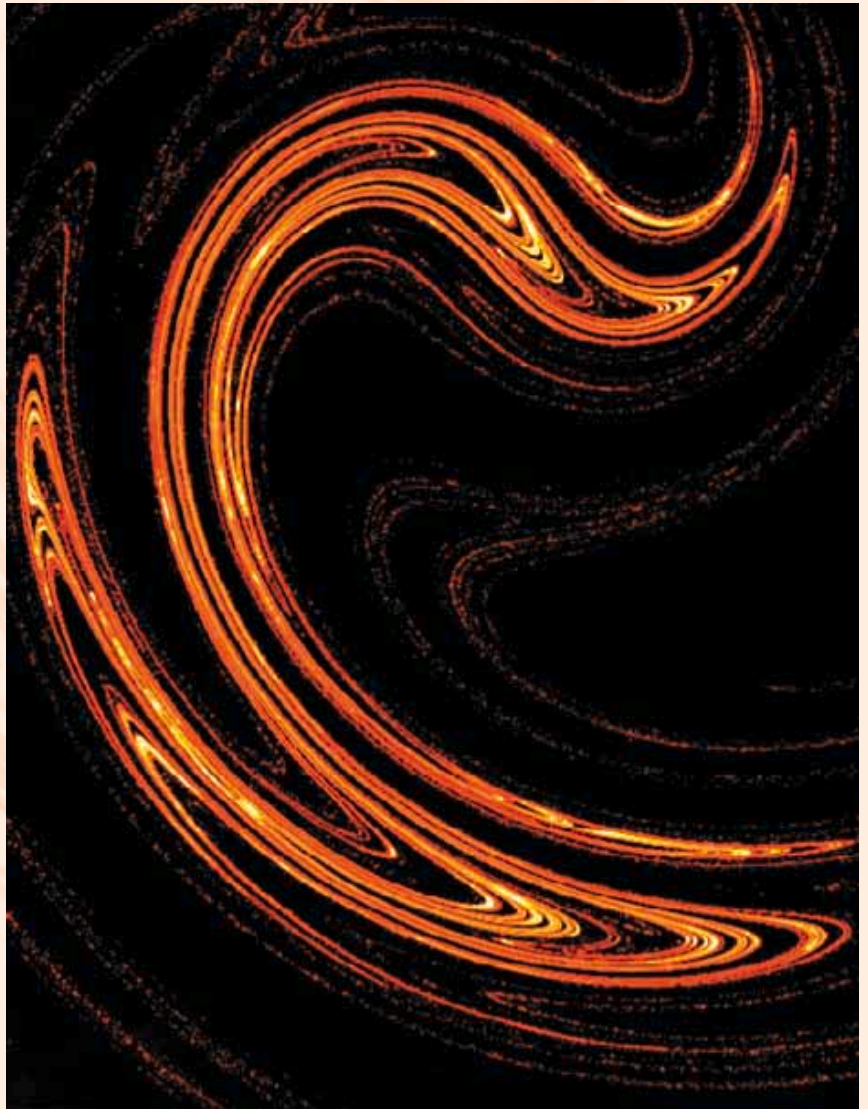
이러한 자연의 복잡성을 연구하는 과학은 1970년대 이후 폭발적으로 성장해온 카오스이론과 비평형계 과학에 그 뿌리를 두고 있다. 고전역학으로 대변되는 결정론적 세계관과 20세기초에 크게 발전한 양자역학에 기초한 확률론적 세계관 사이의 내재적 갈등구조를 가지고 있다. 초기 복잡성의 연구는 이를 해결하려는 시도에서 시작되었다. 질서적 세계는 결정론적이고 따라서 예측가능한 데 반해, 무질서적인 세계는 확률적이고 무작위적이며 따라서 비예측적이다. 그러나 사실 자연에는 완전한 질서와 무질서는 존재하지 않는다. 자연은 항상 질서와 무질서의 양면성을 가지며 결정론적 예측성과 확률론적 무작위성은 서로 불가분의 관계에 놓여있다.

진자는 주기적인 운동을 하는 단순한 시스템이다. 그러나 이 진자를 주기적으로 흔들어 주면 복잡성이 발현될 수 있으며, 이는 카오스라는 외관상 불규칙적, 비예측적 현상을 통해 나타난다. 최근 개봉된 '나비효과'라는 영화에서는 주인공이 과거로 돌아가 만든 미세한 변화가 미래를 송두리째 바꾸는 것이 나온다. 카오스는 이러한 나비효과에 의하여 생성된다. 그러나 카오스는 그 이면에 새로운 질서 구조가 숨어있다는 점에서 완전한 무질서

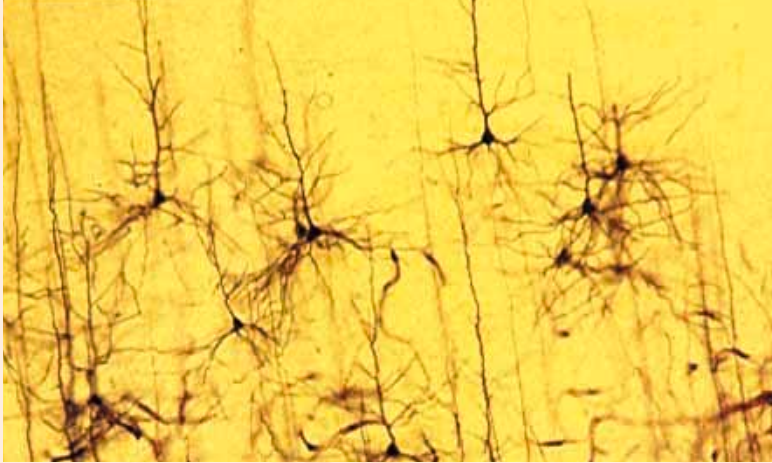
와는 다르다고 볼 수 있다.

이 카오스 현상은 20세기초 헨리 푸인카레가 태양, 달, 지구와 같이 세 개의 물체로 이루어진 삼체문제의 운동에서 처음 인지되었다. 푸인카레의 선구적 연구에도 불구하고 카오스 연구는 초기에 자연과학의 주변적 분야에 머물렀다. 1963년 에드워드 로렌츠라는 MIT의 기상학자가 기상현상의 한 모형에서 카오스 이면의 규칙성 구조를 발견한 것은 기상현

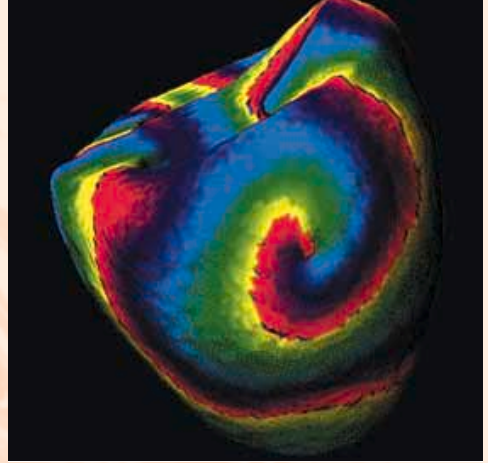
상의 비예측성의 근원을 밝히고 카오스 연구의 돌파구를 마련한 놀라운 사건이었다. 또한 1970년대말 피자 물리학자인 미첼 파이젠바움이 생태계의 간단한 모형에서 발견된 카오스의 보편성과 규칙성을 엄밀하게 보여준 것은 획기적 업적이었다. 그 후 카오스 전이와 동역학에 대한 폭발적인 실험과 이론 연구가 세계적으로 확산되며 카오스연구는 주류과학에 편입되게 되었다.



유체섞임의 복잡성



뇌의 복잡한 뉴런구조



심장박동의 복잡한 패턴

뇌는 복잡계의 대표적인 예

복잡계는 수많은 구성요소가 상호작용을 통해 특정한 기능을 보여준다. 이 경우 어떻게 개체간 상호 협동에 의하여 집단적 패턴이 창발적으로 생성되는가는 시스템의 기능적인 측면에서 매우 중요한 과제이다. 한 예로 태국의 밀립에서 수많은 반딧불이 무리가 함께 만들어내는 자연의 리듬은 밤하늘의 장관을 이룬다. 밀립의 강가에 모인 수많은 반딧불이가 처음에는 무질서한 깜박임을 보인다. 그러나 밤이 깊어감에 따라 반딧불이는 스스로 각자의 깜박임을 동기화해나가며 궁극적으로는 거대한 섬광의 리듬을 함께 만든다. 이러한 자기조직에 의한 동기화가 얼마나 어려운가는 사람들에게 운동장으로 나가 조교 없이 발을 맞춰 행진해보라고 하면 쉽게 알 수 있다.

이러한 복잡계의 현상과 원리는 많은 생체계와 생태계에서도 공통적으로 관찰된다. 예를 들어 심장박동 리듬, 박테리아 군집, 물고기떼, 생태계, 면역계, AIDS역학, 생체대사망, 단백질 접힘, 유전학, 동물의 무리짓기, 신경신호전달망 등에서

자기조직화 현상이 주로 연구되고 있다. 또한 초전도 배열계, 중간보기 양자계, 전하밀도파, 레이저와 플라스마, 무정질 물질, 화학반응계, 알갱이흐름, 기후변화, 난류와 같이 자연계의 다양한 문제에서도 복잡계 원리의 연구가 수행되고 있다.

복잡계의 경우 근본적으로 비선형 및 비평형적 성질을 가지고 있으며, 질서와 무질서의 경계에서 전체 시스템이 기묘한 균형과 새로운 질서구조를 유지한다. 특히 이러한 자연계에서의 광범위한 복잡성의 발견과 보편성, 변동성의 규칙성, 환경으로부터의 자극과 요동, 적응과 진화를 규명하는 것은 매우 중요한 과제로 복잡계 연구는 이미 세계적인 추세로 자리잡았다. 영국 물리학회가 20세기를 마감하며 “아직까지 풀리지 않은 10대 물리학의 문제” 중 하나로 ‘복잡성’을 꼽았다. 미국 과학재단에서는 3대 과제 중 하나로 ‘환경 속에서의 생체 복잡성’ 과제를 추진해 오고 있으며, 지구상의 다양한 환경에서의 물리적, 생물학적, 사회적인 동역학 상호작용을 통해 어떻게 생체가 주위 환경과 조화를 이루며 생명을 유지, 변화, 적

응해나가는지를 밝혀내고자 한다.

복잡계의 대표적인 예로 뇌를 들 수 있다. 뇌는 그 구성단위인 신경소자(뉴런) 약 1천억 개가 1천조 개의 시냅스로 연결된 복잡한 네트워크이다. 각 신경소자는 반딧불이의 깜박임과 마찬가지로 활동전위라고 불리는 신경 전기신호의 깜박임을 시냅스에 의해 연결된 주위의 신경소자들에게 보내 상호 의사소통을 한다. 신경소자가 함께 만들어내는 신경신호의 거대한 집단적 리듬은 우리가 보고, 듣고, 기억하고, 생각하는 모든 고급 인지활동의 기저에 자리하고 있다. 특히 복잡계는 뇌와 같이 집단적이며 창발적인 특성으로 인해 “전체가 부분의 합보다 크다”는 특성을 갖는다. 즉 단순한 신경소자들의 집합이 뇌가 되는 것은 아닌 것이다. 그래서, 뇌와 같은 복잡계는 구성요소보다는 시스템 전체의 전일적 시각에서, 창발적인 패턴의 발견과 자기조직화, 그리고 복잡성과 기능과의 관련성을 탐구하여야 한다.

따라서 복잡계 과학은 전통적인 과학에서의 환원적 분석과는 달리 합성적이고도



반딧불이의 동기화

전체적인 접근의 시도를 통해 포스트 지능 시대의 새로운 과학의 패러다임 구축을 선도하고 있다. 뇌의 동기화 리듬은 보편적 문제로 간질 발작 뇌신호의 동기화, 화학 반응계의 진동, 초전도 조셉슨 접합 배열계의 전류전압특성, 반딧불이의 집단적 깜박임, 박수의 동기화, 월경 동기화 등 다양한 자연과 생태계, 사회 현상에서 공통적으로 적용된다. 이러한 동기화된 리듬 형성의 보편적 기전에 대한 연구는 비선형 동역학, 통계물리, 생리학, 계산 인지과학의 방법론적 융합이 필요하다.

인문 사회 분야 · 과학철학에까지 영향 줘

한편 복잡성은 자연이나 생체계에서만 발견되는 것이 아니며, 시장경제계의 환율과 주식의 변동, 사회, 정치적 급변 등 사회 현상 속에서도 근원적으로 존재한다. 따지고 보면 사회라는 것도 인간이란 개체가 모여 다양한 사회적 상호작용 속에서 네트워크를 이루고 자기조직의 원리에 따라 창발적으로 질서구조를 만들어내

는 것으로 볼 수 있다. 한 예로 최근 복잡계의 관점에서 경제학과 물리학을 연결하는 새로운 학제간 분야가 태동되고 있다. 일단의 물리학자들이 시장경제를 비선형 복잡계로 보고 경제 물리, 복잡계 경제, 경제시계열 분석 등 몇 가지 갈래로 시장경제 현상을 연구하고 있다. 최근의 통계물리 및 비선형동역학, 복잡계 등의 물리학적 방법론을 이용한 시장경제 연구들은 복잡계적 관점에서 시장이 ‘효율적인 시장 가정’과는 달리 마구잡이 성질을 가지지 않는다는 것을 보여주고 가격 요동의 이면에 자리한 보편적 상관성을 찾아내고 있다.

그러면 과연 금융시장의 가격지표는 예측 가능한 것인가? 또 예측 가능한 조건은 무엇인가? 환율과 같은 시장지표가 보이는 복잡한 불규칙적 등락의 원인을 간단하게 파악하기는 매우 어렵다. 오랫동안 경제학 모형은 신고전학파라고 불리는 주류경제학의 수확체감, 음의 되먹임에 의한 평형과 안정성, 양과 가격, 환원주의적 요소 분석에 의해 지배되어 왔다. 그러나 비정상성, 비예측성을 가진 복잡한 금융지표 변화를 통해 나타나는 역동적 실물 경제 현상은 새로운 접근 방식을 요구한다. 최근의 복잡계 접근에 의한 경제학은 수확체증, 양의 되먹임에 의한 비평형성과 불안정성, 패턴 형성과 기능성, 통합주의적 전체의 원리에 초점을 두고 있다. 이 복잡계의 경제학에서는 시장, 조직, 기관, 투자자들이 서로 비선형적으로 상호작용하며 경쟁, 적응하는 네트워크 속에서 경제학적 선택에 의하여 동역학적인 진화를 하는 모델을 추구한다. 특히 복잡계에 기초한 인자기반 경제 모형은 좀 더 실제적인 시장, 전략, 정보 구조에 기초하

여 시장의 복잡한 학습과 적응 행동 동역학을 구현하고 있다.

우리는 이제 복잡계 과학이란 새로운 눈으로 세상을 바라보기 시작하였다. 복잡계의 과학은 전통적인 과학관에 대한 단순한 반란에서 나아가 새로운 방법론으로 무장하여 주류과학의 대안으로 대두되고 있다. 다양한 현상에서 공통적으로 발견되는 복잡성에 대한 이해와 제어를 위해서는 인접 학문뿐 아니라 학문간 분야의 융합적 연구가 필수적으로 물리학자, 수학자, 생명과학자, 공학자, 인지과학자 더 나아가 경제학자 및 금융공학자의 학문간 공동작업에의 참여가 가속되고 있다. 또한 복잡계 과학을 통해 창출된 새로운 복잡성의 개념과 도구들은 이미 과학의 경계를 벗어나 신과학운동, 뇌와 인지기전, 진화 적응 경제학, 시스템 과학, 포스트모더니즘, 생태주의 사상 등 인문 사회 분야, 과학철학에 이르기까지 깊은 영향을 미치고 있다. 복잡계 과학의 신봉자들은 복잡성의 연구가 21세기의 주도적 흐름이 될 것이라고 믿고 있다. 그러나 복잡계 연구는 아직 태동기로 실제적이고 구체적인 응용이 많지 않고, 이 실험에 대한 평가는 이르다고 할 수 있다. 복잡계의 자기조직화 원리와 같이 복잡계 연구 방향도 다양한 흐름 속에서 궁극적으로 어떤 질서 구조를 스스로 만들어 낼지 자못 궁금하다. ㉓



글쓴이는 서울대 물리학과를 졸업 후, 펜실베이니아대에서 박사학위를 받았다. 국제물리올림피아드 조직위 실무간사를 지냈으며, 현재 아태이론물리센터 사무총장, 아태물리학회연합회 평의원을 겸임하고 있다. 포항공대 수학과 겸임교수, 생명과학과 겸임교수이기도 하다.