

통계물리학의 발전과 최신동향



글_ 박형규·고등과학원 물리학부 교수

주위 사람들이 필자에게 어떤 분야의 연구를 하냐고 물으면, 아직도 난감할 때가 많다. 사실상 일반 사람들이 아니라 대부분의 이공계 교수님들에게조차도 이걸 어떻게 설명을 드려야 할까 고민하게 된다. 그리고는 “통계물리학”이라는 걸 하는데...”라고 시작하면, 어김없이 ‘물리학은 엄밀한 거라고 알고 있는데, 통계물리학이란 마치 잘 맞지 않는 여론조사처럼 대충 통계적으로 처리하는 것이 아닌가?’라는 의심을 담은 듯한 시선을 느끼게 된다. 또한 많은 물리학자들의 연구대상이 끈, 입자, 고체, 유체, 은하, 우주 등 구체적인 데 비해 통계물리학자들의 연구대상은 그냥 많은 요소들이 모여 있는 다체계이기 때문에 무얼 꼭 짚어 이야기하기도 어렵다. 많은 사람들이 양자역학과 상대성 이론에 대해서는 그래도 익숙한 편인 반면, 20세기 초 같은 시기에 태동한 통계역학에 대해서는 잘 모르는 게 현실이며, 오히려 거시적이며 현상론적인 열역학이나 열역학 법칙들이 엔트로피(entropy)라는 신비한 존재로 인해 더 많이 알려져 있다. ‘과학의 지평’이 일반적으로 과학자들을 독자층으로 하지만, 아마도 필자가 이야기하려는 ‘비평형 통계물리학’의 최신 동향을 독자들이 좀 더 쉽게 이해하기 위해서는 먼저 간단하게나마 통계역학의 기본적인 바탕부터 시작해야 좋을 것 같다.

자연에서 일어나는 다양한 현상들을 물리학적으로 이해하기

위해서는 제일 먼저 환원주의적 연구 방식이 필요하다. 즉 대상 물체를 나눌 수 없을 정도까지 극단적으로 쪼개어서 그 근본 구성인자가 무엇인지를 알아보고, 그들 사이에 어떤 상호작용이 있는지를 알아보는 일이다. 이를 통해 우주에 존재하는 수많은 다양한 물질들이 단지 몇 가지 종류의 기본 요소(입자나 끈)들로 구성되어 있으며, 그들 간의 상호작용 또한 몇 종류 밖에 없다는 사실을 밝혀냄으로써, 복잡하게 보이는 수많은 현상들을 몇 가지 단순한 요소들과 상호작용들로서 재구성하고 또한 설명하려고 하는 시도이다. 미시적 세계에 대한 동역학체계는 상대론적 양자역학에 의해 지배된다고 알려져 있으며, 아직 완전하지는 않지만 모든 상호작용을 통일된 틀걸이로 설명하려는 노력을 계속하고 있다.

하지만 우리가 직/간접적으로 경험하고 있는 자연의 대부분 대상 물체들은 수많은 기본 요소들이 복잡한 상호작용을 통해 서로 얽혀있는 다체계이다. 또한 이러한 다체계들은 입자, 원자, 분자, 결정과 같이 여러 층의 조직단계를 가지는 계층적 구조를 가지고 있다. 이러한 복잡한 다체계의 동역학적 변화를 궁극적 기본 구성요소들과 그들 사이의 상호작용으로부터 출발하여 풀어낸다면 더욱 바랄 것이 없겠지만, 실제로는 먼 미래에 나타날 초슈퍼 컴퓨터를 동원하더라도 이것은 결코 불가능하다. 더욱이 카오스로 대표되는 비선형 동역학 연구로부터 우리가 배운 사실은, 이런 풀이가 가능하다고 하더라도, 많은 경우 초기조건에 대한 극도의 민감성 때문에 과연 실험실에서 측정된 결과와 얼마나 관련이 있는지 파악조차 하기 힘들다는 점이다. (또한 측정의 여러 가지 한계 때문에 실험 결과도 항상 근사적이고 평균적인 것이 된다.) 다체계의 동역학 속에 내포되어 있는 이러한 극도의 복잡성과 민감성 때문에 다체계를 구성하고 있는 각 기본 인자들의 움직임을 하나하나 정확히 예측한다는 것은 불가능하며, 유의미한 정보는 확률적으로 주어지게 된다. 이는 주사위를 던질 때, 위로 나오는 숫자에 대한 정보가 확률적으로만 주어지는 것과 유사하다. 따라서 다체계를 이해하기 위해서는 환원주의적 이해와 더불어 새로운 확률론적 접근방식이 필요하다. 통계역학이란 바로 이러한 확률론적 접근방식을 제공하는 역학체계이다. (여기에서 통계역학적 확률은 고전적인 것으로서 양자역학에서의 확률과는 근본적으로 다르다.)

다체계의 주요한 성질들은 대부분 미시적이고 세세한 것이 아닌, 거시적이고 평균적인 것이다. 예를 들어 H_2O 분자들이 엄청나게 모여 있는 물의 경우 거시적 출렁거림, 유체적 흐름, 밀도 등이 주요한 관심량이지 각각 H_2O 분자들의 운동량과 위치는 큰 관심사가 아니다. 이러한 거시적 물리량들과 그 변화는 확률론적 이론을 통해 기술할 수 있다. 약 한 세기 전에 볼츠만(Boltzmann)과 깁스(Gibbs)에 의해 세워진 가설인 앙상블이론은 물체가 ‘평형상태(equilibrium)’에 있을 때, 어떠한 확률분포를 가지는지에 대한 답을 제시하였다. 이로부터 세워진 평형 통계역학은 거시적 현상론인

열역학과 달리 미시적 해밀토니안(Hamiltonian)에서 시작하여 거시적인 물리량을 계산해 낼 수 있는 역학체계이며, 수많은 실험을 통하여 그 정당성이 입증되었다. 우리가 알고 있는 근본적 물리법칙들이 사실상 매우 간단한 가설로부터 출발하듯이, 평형통계역학의 근간은 ‘고립된 다체계의 모든 가능한 미시적 상태가 평형상태에서는 확률적으로 동일하다’는 간단한 가설이다. (여기에는 다체계의 동역학이 너무 복잡하여, 적어도 아무런 동역학적 방향성이 없는 평형상태에서는, 알아낼 수 있는 정보가 아무것도 없다는 생각이 바탕을 이루고 있다.) 이 가설로부터 출발하여 외부와 약한 상호작용을 하는 다체계의 경우에도 평형상태에서는 미시적 상태에 대한 확률분포를 유도해 낼 수 있으며, 대표적으로 열저장체와 접촉하고 있는 다체계의 경우에는 이 분포가 소위 볼츠만 분포를 따른다.

평형 통계역학의 성공은 약 반 세기 전에 발견된 상전이와 임계현상(phase transitions and critical phenomena)의 보편성(universality)으로 인해 꽃피우게 되었다. 다체계의 미시적 해밀토니안을 세우기 위해서는 어느 정도 근사가 불가피하다. 우리가 관심있는 다체계가 무엇으로 어떻게 구성되어 있는지 정확히 알 수도 없으며, 안다고 하더라도 모든 내용을 다 담고 간다면, 해석적인 해는 물론 의미있는 수치적인 해를 얻어낸다는 것은 거의 불가능하다. 하지만 임계점에서 발견된 축척현상(scaling phenomena)의 보편성은 해밀토니안의 세세한 내용과 관계가 없기 때문에 대칭성과 몇 가지 주요한 요소들만 포함된 간단한 모형을 연구한다고 하더라도, 실제 자연에서 일어나는 임계현상의 보편성을 정확하게 예측할 수 있다. 따라서 실험과의 매우 면밀한 정량적인 비교가 가능하며, 이를 통해 평형 통계역학의 타당성을 되짚어 볼 수 있게 되었다. 또한 새로운 보편군들을 찾으려는 많은 노력들이 성공을 거두었으며, 이를 통해 다체계가 보여주는 가장 흥미로운 현상인 떠오름 현상(emergent phenomena)에 대한 이해가 깊어지게 되었다.

하지만 이러한 평형 통계역학의 성공은 다체계가 보여주는 많은 자연 현상들의 극히 일부에만 적용된다. 즉 평형상태에 있는 경우나 평형상태에 매우 근접한 경우에만 해당된다. 생명현상을 포함하여 수많은 흥미로운 문제들은 평형상태와는 거리가 먼 매우 역동적인 비평형 변화이다. 최근에 들어서 많은 통계물리학자들이 기존에 연구해 왔던 평형문제에서 비평형 문제로 관심분야를 옮겨 갔으며, 필자 또한 약 20년 전부터 비평형 다체계가 보이는 떠오름 현상을 연구하기 시작했다. 이러한 통계물리학의 최신동향을 이야기하기 전에 먼저 평형과 비평형 상태의 구분부터 명확히 할 필요가 있다.

평형상태란 일반적으로 시간이 흘러감에 따라 거시적인 양들이 변하지 않는 상태로 알려져 있다. (물론 미시적인 요동은 매우 복잡하고 끊임없이 진행된다.) 하지만



그림 1. 인간은 레고다. 로봇도 레고다. 고로... ???

고립계가 아닐 경우에는 보다 명확한 정의가 필요하다. 동역학적으로 이를 미소균형 (detailed balance) 조건이라고 하는데, 이 조건이 만족되면 다체계의 한 미시적 상태에서 다른 미시적 상태로 흘러가는 확률흐름(probability current)이 균형을 이루게 되며, 따라서 거시적 양들은 자연스레 변하지 않게 된다. 하지만 미소균형 조건이 만족되지 않더라도 거시적인 양들이 시간에 따라 변하지 않을 수 있으며, 이러한 상태들을 평형상태와 구분하여 비평형 정상상태(steady state)라고 부른다. 예를 들어 일정한 속도로 흘러가는 강물이 가장 간단한 비평형 정상상태에 속한다.

이러한 비평형 정상상태에 대해 보편적으로 성립하는 앙상블 이론은 현재까지 알려지지 않았으며, 시간에 따라 거시적인 양들이 변화하는 일반적 비평형 동적상태에 대한 보편적 미시적 이론 또한 알려져 있지 않다. 단지 한 가지 현상학적으로 알려진 사실은, 비평형 상태에서는 시간이 흘러감에 따라 전체(고립된) 다체계의 엔트로피가 지속적으로 증가해야 한다는 점이다. 이를 열역학 제2법칙이라고 부른다. 이 법칙은 시간에 방향을 주기 때문에, 시간의 역대칭성을 가지고 있는 미시적인 이론으로부터 이를 이해한다는 것은 매우 어려운 문제이다. 이를 이해하기 위한 노력이 오랫동안 지속적으로 있어 왔지만, 아직 근본적인 수준에서 성공을 이뤄내지는 못하고 있다.

최근 들어 이러한 열역학 제2법칙을 뛰어 넘는 새로운 연구 결과들이 발표되었다. 1999년대 초부터, 에반스(DJ Evans), 시얼스(DJ Searles), 코헨(EGD Cohen), 갈라보티(G Gallavotti) 등에 의해 주도된 연구 결과에 따르면, 비평형 동적 변화에 대해서도 시간의 방향성만 알려주는 부등호가 아닌, 정확한 양을 계산 가능하게 해 주는 어떤 등식들이 존재한다는 것이다. 이러한 여러 가지 등식들을 총칭하여 요동정리(fluctuation theorem)라고 부른다. 이중 가장 대표적인 정리가 크룩스(Crooks) 요동정리이며, 이는 전형적인 비평형 물리량인 일 에너지(work)와 전형적인 평형 물리량

인 자유 에너지(free energy)를 연계해 주는 놀라운 정리이다. 이 정리의 간단한 형태가 소위 자진스키(Jarzynski) 관계식이며, 특히 이 관계식으로부터 열역학 제2법칙이 자연스럽게 유도된다. 이 요동정리들이 모든 가능한 비평형 과정에서 성립되는 것은 물론 아니지만, 꽤 광범위한 비평형 과정에 적용될 수 있다는 사실이 알려져 있다. 최근 들어 많은 통계물리학자들이 이 요동정리의 적용가능 범위와 타당성을 체계적으로 찾으려고 하고 있으며, 또한 새로운 요동정리의 발견하고 요동정리들이 내포하고 있는 물리적 의미에 대한 연구를 하고 있다. 과연 이 요동정리들이 비평형 다체계에 대한 이해에 결정적 기폭제 역할을 하게 될지, 아니면 작은 파문만을 일으킬지는 현재로서는 아무도 모른다. 국내에서도 이러한 연구주제에 대한 연구그룹이 최근에 고등과학원을 중심으로 형성되었으며, 활발한 공동연구가 진행 중이다. 요동정리에 대해 보다 자세한 내용은 뒷글에서 노재동 교수가 설명한다.

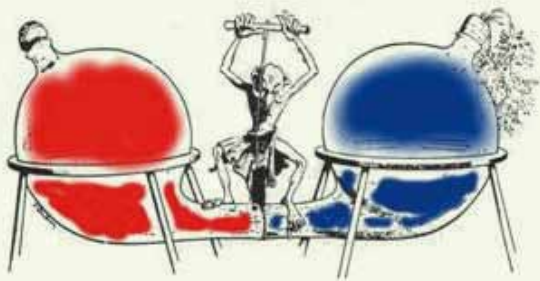


그림 2. 맥스웰의 악마도 가끔씩 실수를 한다. 얼마나 자주 할까? 요동정리가 답의 실마리를 알려준다. (<http://www.kawai.phy.uab.edu/ktlog2/index.html> 에서 가져옴)

비평형 과정을 주관하는 근본적 원리들을 이해하기 위한 노력 외에도, 다체계의 대표적인 성질인 떠오름 현상이 비평형계에서는 어떻게 나타나는지에 대한 연구도 최근 들어 매우 활발해 지고 있다. 평형계에서 나타나는 떠오름 현상의 보편성이 재규격화군 이론(renormalization group theory)과 등각불변성 이론(conformal field theory)으로 대부분 이해되었듯이, 비평형계에서는 보편성을 어떻게 이해할 수 있는지에 대한 연구가 시작되고 있다. 비평형계는 대부분 열린 계(open system)이기 때문에 외부 환경과의 상호작용이 매우 중요하며, 따라서 이를 어떻게 체계적으로 분

류할 수 있는지가 평형계에서는 고려하지 않았던 주요 요소이다. 또한 비평형계는 정상상태에서조차도 시간과 공간에 따라 변화할 수 있기 때문에 아주 다양한 떠오름 현상을 보여준다. 특히 생명현상은 전형적인 열린 비평형계의 떠오름 현상이며, 외부와의 상호작용에 매우 민감하며, 시공간에서 비균일한 동역학적인 상태이다. 하지만 이러한 현상을 이해하기 위해서는 아직 머나먼 길이 남아 있으며, 그 첫 걸음으로 가장 간단하지만 다양한 비평형계의 떠오름 현상의 근본적인 기작(mechanism)을 이해하는 것이 필요하다.

가장 흥미로운 비평형 떠오름 현상은 자기조직화 고비성(self-organized criticality: SOC)이다. 고비성은 일반적으로 상전이에서 일어나는 특수한 외부변수 값에서 관찰되는 쪽거리(fractal) 패턴, 복잡성, 민감성, 전체성으로 대표되는 성질로 알려져 있으나 많은 열린 비평형 계에서는 이러한 고비성이 외부변수 값에 관계없이 나타난다. 이런 SOC 연구는 이미 20여 년 전에 박(P Bak)을 중심으로 시작되었으

나, 아직도 그 근본 기작은 이해되지 못하고 있다. 최근 들어 흡수 상전이(absorbing phase transition)의 논점에서 SOC를 이해하려는 시도가 있어 왔으나, 아직 초보적인 이해 수준에 그치고 있다. 이러한 흡수 상전이 현상의 가장 간단한 예가 전염병 확산(epidemic spreading) 상전이 모형이다. 전염병의 전파 능력과 인간의 면역능력 사이의 경쟁으로 인해서 전염병이 창궐하는 상태에서 소멸되는 상태로의 상전이가 나타난다. 특히 소멸상태 상에서는 전염병균이 박멸되었기 때문에 어떠한 전염병 확산 동역학도 불가능하며, 전체 시스템은 동역학적으로 전혀 변하지 않는다. 따라서 이 상태를 상태 공간(state space)에서 흡수 상태(absorbing state)라고 부르며, 엔트로피는 최소화된다. 평형상태에서는 엔트로피가 최대화된다는 사실과 비교해 보면, 이러한 흡수상태는 비평형 성질이 극대화된 상태라고 해석할 수 있으며, 흡수 상전이 현상은 평형에서 아주 멀리 떨어진 비평형 상전이 현상이다. 이 비평형 상전이의 임계현상 보편군은 디렉티드 퍼콜레이션(directed percolation)군으로 알려져 있으며, 다른 수많은 다체계, 예를 들어 촉매반응계, 중입자 다체계, 다공성 물질에서 스미기 현상, 모래더미 무너짐 현상, 산불 번짐현상 등과 같이 전혀 다르게 보이는 다양한 다체계에 서 동일한 보편군을 찾아 볼 수 있다.

현재 활발히 연구되고 있는 대표적인 비평형 떠오름 현상을 키워드로만 소개하면,

- (1) SOC와 흡수 상전이 임계현상
- (2) 외부에서 구동된 확산계(driven diffusive system)
- (3) 때맞춤(synchronization)
- (4) 깔죽 톱니바퀴 구동(ratcheting)
- (5) 자발적 흐름(spontaneous current)과 역이동성(negative mobility)
- (6) 교통흐름(traffic flow) 등 수송현상(transport phenomena)과 막힘 상전이(jamming transition)

등이 있다.

또한 동역학적 비평형 현상을 다루는

- (1) 동역학적 거칠어짐(dynamic coarsening)
- (2) 나이듦(aging)과 풀림현상(relaxation dynamics)
- (3) 유리 동역학(glass dynamics)

등이 있다.

최근 들어서는 비평형 통계역학을 다양한 현실 시스템에 응용하려고 하는 시도가 매우 활발해지고 있다. 대표적으로 네트워크 분석기법과 비선형 동역학 기법을 이용하여 생명계, 사회계, 경제계 등에서 일어나는 복잡계 현상들을 이해하려고 하는 시도이다. 특히 생명계의 신진대사망, 세포의 기능과 활동 등을 최근에 급속히 발전한

네트워크 이론을 이용하여 분석하는데 적지 않은 성공을 이루고 있으며, 뇌파 등 생체신호를 비선형 동역학 기법을 사용하여 정량적인 이해를 높이고 있다. 또한 사회경제현상에 대한 응용으로 인공 금융시장 설계, 교통망 등 사회간접자본의 효율적 공간적 배치, 정보의 교류 및 확산, 집단적 사회 현상에 대한 이해, 집단 속에서 작은 공동체 식별 등 매우 다양한 주제들이 연구되고 있다.

이 글에서 지면문제로, 또 필자의 능력부족으로 통계물리학의 최근 동향을 자세히 모두 다 이야기할 수 없는 점이 아쉽지만, 가장 중요한 방향은 비평형 다체계에 대한 본질적인 이해라는 점에서 동일하다. 특히 비평형계를 근본적인 수준에서 이해하고 떠오름 현상을 체계적으로 이해하는 것은, 비평형계의 가장 전형적인 모습인 생명의 탄생과 유지, 그리고 진화와 같은 인류 최대의 궁극적 질문에 대한 첫 번째 발걸음이자 도전이라고 생각한다. 최근에 이 분야의 비약적인 발전을 볼 때, 21세기에는 이 문제에 대한 답이 기초적이거나 알려질 것을 기대한다. 아마도 이를 통해 생명현상의 궁극적 목적은 무엇이며, 인류의 생존을 위해서 우리가 무엇을 해야 하는가에 대한 대답도 얻어질지 모른다. [KIAS](#)

Profile

박형규 교수 1979년 서울대학교 물리학과를 졸업하고, 1988년 미국 워싱턴대학교에서 이론물리학으로 박사학위를 받았다. 상전이와 임계현상, 유한속척이론을 연구해 왔으며 최근에는 흡수 상전이, 때맞춤 상전이, 자발적 흐름, 요동정리 등 비평형계를 연구하고 있다. 2008년 물리학회 학술상을 수상하였다.