

Driven Pair Contact Process with Diffusion

미시세계의 상호작용에 의해서 거시세계에 나타나는 재미있는 현상으로 상전이(phase transition)가 있다. 일상생활에서 흔히 접하는 물의 온도에 따른 상태 변화가 한 예이다. 특히 물리학적 관심을 끄는 연구주제는 연속상전이가 발생하는 고비점(critical point)에서 나타나는 축척불변(scaling invariance) 현상이다. 축척불변은 쪽거리(fractal) 구조처럼 멀리서 바라보나 가까이서 바라보나 그 차이를 알 수 없음을 의미한다. 이러한 축척불변을 정량화한 고비지수(critical exponent)를 결정하는 것이 이 분야의 주 연구방향이다. 특히 재미있는 것은 여러 가지 다른 계들이 같은 고비지수를 갖는다는 사실이다. 다시 말해, 미시적으로 다른 상호작용을 하는 두 개의 계가 고비점에서 별반 달라 보이지 않는다는 것이다. 이처럼 같은 고비지수를 갖는 여러 계를 묶어서 보편군(universality class)이라고 부른다. 정량적인 연구를 바탕으로, 어떤 특징이 보편군을 결정하는지에 대한 정성적인 이해가 궁극적인 연구의 목표이다.

평형계 연구에서 도입된 상전이, 축척불변, 보편군 등의 개념은 비평형계에서도 유용하다. 흔히 흡수 상전이(absorbing phase transition)라 일컬어지는 비평형 통계물리 연구 분야에서 이러한 개념에 기초한 연구가 활발히 진행되고 있다. 흡수 상전이를 보이는 대표적인 예로 접촉 과정(contact process: CP)이 있는데, 이는 전염병의 확산과 박멸을 가장 단순화시킨 모형이다. 구체적으로 이야기하면, d 차원 격자구조로 이루어진 세계의 각 격자점에 사람이 살고 있어서, 아픈 사람이 자체 면역기능에 의해서 치료될 확률 p 와 주변에 전염병을 전파시킬 확률 $1-p$ 의 경쟁에 의한 상전이가 발생한다(물론 세계는 이렇게 단순하지 않다). p 가 크면 전염병은 결국 사라지게 될 것이고, p 가 작으면 전염병은 사람사이에서 자가 치료와 전파가 지속적으로 이루어질 것이다. 전염병이 사라지면 더 이상

아무 일도 일어나지 않게 되는데, 이러한 상태를 흡수 상태(absorbing state)라고 부르고, 지속적인 상태변화가 가능한 경우를 활성 상태(active state)라 칭한다. 이 모형이 d 차원에서 보여주는 상전이는 $d+1$ 차원에서의 방향 스미기(directed percolation: DP)와 관계가 있다는 것이 알려졌고, DP 보편군이 존재한다는 사실이 밝혀졌다.

물리학자들, 특히 통계물리학자들은 일반화되거나 변형된 형태의 모형을 만들어 연구하기를 즐긴다. Ising model에서 Potts model로의 일반화가 대표적인 예이다. 물론 이러한 변형 혹은 일반화는 보편군의 정성적 이해에 아주 중요한 역할을 한다. 흡수 상전이 분야에서도 연구자들은 접촉 과정의 변형인 쌍 접촉 과정(pair contact process: PCP)을 만들어 연구하기 시작했다. 이 모형은 CP와 달리 두 인접한 이웃이 동시에 병에 걸렸을 경우에만 병을 전파하거나 병에서 치료가 된다는 조건이 추가된다. 주변에 건강한 사람 뿐인 환자는 치료되지도, 병을 전파하지도 못하고 그냥 아픈 상태로 계속 유지가 될 뿐이다. PCP의 경우는 고립된 환자만 있으면 더 이상 상태변화가 발생하지 않는 흡수상태가 된다. 따라서 흡수상태의 수는 무한히 많으며, 이 모형 역시 상전이가 발생하는데, 흥미롭게도 이 또한 DP 보편군에 속함이 밝혀졌다.

물리학적 호기심은 PCP에 주변 건강한 사람 누군가와 아픈 사람의 자리바꿈을 포함시킨 모형(pair contact process with diffusion: PCPD)을 만들어냈다. 이 모형은 PCP와 다르게 고립된 환자도 자리바꿈을 통해서 다른 환자와 만날 수 있어서 흡수상태는 환자가 없거나 한 명의 환자만 있는 경우로 줄어든다. 놀랍게도 이 단순한 변형이 흡수 상전이 연구자들을 당황하게 만들었다. 7년 여의 수치적, 해석적 연구에도 불구하고 PCPD의 보편군에 대한 논쟁은 여전히 이어지고 있다. 이 논쟁의 쟁점은 PCPD가 DP 보편군에 속하느냐 아니냐 하는 것이다. 이 질문에

대한 답을 위한 연구 결과물이 이 논문이다.

아픈 사람을 입자가 있는 상태로, 건강한 사람을 입자가 없는 상태로 해석을 하면, 입자의 밀도를 장(field)으로 하는 장론(field theory)을 통한 흡수 상전이 연구가 가능하다. DP의 경우는 과거 고에너지 물리에서 다루었던 Reggeon field theory와 똑같은 action으로 기술된다는 것이 밝혀졌으며, 이 action은 갈릴레이 변환에 의해 공간의 좌우 대칭성 파괴가 고비행동에 아무런 역할을 하지 않음을 해석적으로 보일 수가 있다. 앞의 CP나 PCP의 경우에서 전염병의 확산이 오른쪽의 사람에게만 이루어진다고 하면 공간의 좌우 대칭성은 깨지지만, 여전히 DP 보편군에 속한다는 것을 수치적으로도 확인할 수가 있다.

여기에 착안하여, 이 논문에서는 PCPD에 입자(아픈사람)의 자리바꿈을 오른쪽으로만 허용하면 어떤 고비행동을 보이는지 연구했다. 이 모형의 이름이 이 논문의 제목이고, 간략히 DPCPD라 칭하겠다. 상식적으로 생각하면, 입자의 편향된 확산속도와 똑같은 속도로 지나가는 관성계에서 바라보면 별 다를 것이 없을 것 같지만, 우리의 수치적 결과는 놀랍게도 1차원 DPCPD가 2차원 PCPD와 같은 고비행동을 한다는 것을 보여주었다. 이 결과는 고립되어 돌아다니는 입자와 쌍으로 이루어진 입자가 독립적인 “excitation”으로 해석되어야 함을 시사한다. 만약 그렇지 않다면, Reggeon field theory의 경우처럼 편향된 확산이 보편군에 아무런 영향을 미치지 않아야 하기 때문이다. 또한 편향된 확산에 의한 차원 축소는 두 종류의 다른 입자가 있는 경우에서 종종 나타나는 현상이기도 해서, PCPD는 한 입자로만 정의된 모형이지만, PCPD의 장론은 두개의 독립된 장으로 기술해야만 한다고 결론내리고, 따라서 PCPD는 하나의 장으로만 기술할 수 있는 DP와 전혀 다른 보편군에 속해야 한다고 결론지었다.

박수찬, 박형규(고등과학원), Phys. Rev. Lett. **94**, 065701 (2005).