사회물리학

DOI: 10.3938/PhIT.20.023

정 우 성

Social Physics

Woo-Sung JUNG

Social physics is an interdisciplinary research field, applying theories and methods originally developed by physicists, usually statistical physicists, in order to solve problems in social system.

들어가는 글

물리학자의 눈에는 세상 모든 것이 물리로 보인다. 특히 최근에는 지금까지 물리학자들의 탐구 대상이었던 자연 현상의 범위를 확장하여, 사람들이 살아가는 세상까지도 물리학의 탐구 영역으로 삼으려는 움직임이 활발하다. 어찌 보면 사람들이 살아가는 세상 또한 자연의 일부이니, 세상 모든 것이 물리일 수밖에 없는 물리학자들의 탐구 대상이 되는 것은 당연한 일일지도 모른다. 이러한 탐구 영역을 일컫는 ‘사회물리학’은 통계물리학자들의 연구가 활발한 편이다. 통계물리학이 추구하는 것이 여러 물질에서 보편적으로 나타나는 성질인 ‘보편성’이라는 점을 감안하면, 사회 현상에서도 물리학의 보편성을 찾으려는 노력이 사회물리학이라고 생각하면 쉬울 듯하다.

약 20년 전부터 경제물리학이라는 분야가 세간의 뜨거운 관심을 받아오고 있다. 경제 현상도 지금까지 물리학이 탐구해 온 일반적인 영역이 아니라는 점에서, 경제물리학 역시 물리학의 보편성을 다른 분야에 확장시킨 것에 해당한다. 그렇다면 경제물리학과 사회물리학은 어떻게 구별이 되는 것일까? 이에 대해서는 여러 논란이 있었지만 두부를 칼로 자르듯이 명쾌하게 구별되지는 않는다는 시각이 우세하다. 하지만 대략적인 특징을 살펴보면 초창기의 경제물리학은 대체로 금융 시장의 시계열 자료 분석과 금융상품 설계 등을 중심으로

발전하여 왔다. 이 때문에 경제물리학이 아니라 ‘금융물리학’이라고 불려야 한다는 비판도 있었다. 하지만 최근의 경제물리학은 주식 가격과 같은 금융 시계열 형태로 표현되는 결과물의 껍질을 벗기고, 그 내부에서 일어나고 있는 기작을 살펴보고 결과물을 만들어내는 열개를 이해하려는 움직임이 활발하다. 즉 시장에서 이루어지는 보다 미시적인 현상에 관심을 가지고 있는데, 이러한 습성은 물리학자들에게는 너무나도 자연스러운 것이다. 시장의 미시구조 탐구를 위해 이루어지는 노력의 대표선수는 금융 시장을 컴퓨터 속에서 구현하는 인공 주식시장이다. 인공 주식시장 속에는 사람들이 정보를 주고받는 형태, 이들 정보의 신뢰도를 판단하고 개인의 투자 전략에 따라 의사결정을 내리는 과정, 이후 사거나 팔기 위한 주문을 내고 이를 체결하는 규칙 등이 포함된다. 바로 여기에 경제물리학과 사회물리학의 뚜렷하지 않은 경계가 자리 잡고 있다.

복잡계와 사회물리학

사회물리학의 시작은 곧 ‘복잡계 물리’라고 해도 과언이 아니다. 흔히 복잡계라 하면 수많은 구성요소가 하나의 계(system)를 이루면서 단순하지 않은 방식으로 서로 얽히고설킨 것을 이야기한다. 따라서 이들 구성요소 간의 상호작용이 대단히 중요하며, 특히 상호작용으로부터 미처 예상하지 못했던 현상이 발생하게 되는 ‘창발(emergence)’ 현상을 중요하게 생각하는 것이 복잡계 이론이다. 흔히 ‘전체는 부분의 합보다 크다’는 명제로 창발 현상을 설명하곤 하는데, 부분들이 만들어 내는 상호작용으로부터 생기는 합이 결국 부분들의 단순 합산보다 더 큰 전체를 만들어내는 것이다. 앞서 설명한 인공 주식시장을 다시 떠올려 보자. 기관 투자자와 개인 투자자라는 입자들이 주식시장이라는 계를 구성하고 있다. 그리고 이들 입자는 서로에게 정보를 제공하고 설득하는 등의 상호작용을 하고 있다. 물론 이들 정보의 정확도가 천차만별이다. 더군다나 어떤 이는 공격적인 투자로 일관하지만 또 다른 사람은 겁쟁하기 그지없는 소극적인 투자를 일삼기도 한다. 정보가 넘쳐서 주체하지 못하는 투자자가 있는 반면, 거의 로또 당첨을 바라는 수준으로 마구잡이 투자를 하는 사람도 있다. 이렇게 다양한 투자자들 사이에 이루어지고 있는 거대하

저자약력

정우성 교수는 KAIST에서 이학박사 학위(2006)를 취득한 후 Boston University 박사후연구원과 POSTECH 연구교수를 거쳐 POSTECH 물리학과와 기술경영대학원 조교수로 재직 중이며, 복잡계와 경제/사회물리학을 연구 중이다. (wsjung@postech.ac.kr)

고 복잡한 정보의 흐름, 이것은 경제물리학인 동시에 사회물리학의 탐구 대상이 된다. 물론 경제물리학이 금융 시계열에서 시작하여 시장의 미시구조까지 발전하였다는 것을 생각하면 사회물리학도 복잡계의 영역에서 벗어나 앞으로 어디까지 발전할지 예측하기 힘들긴 하다.

사회 동역학

사회물리학이 알고 싶어 하는 열개 중 대표적인 것은 금융 시장에서 일어나는 정보 흐름과 같은 ‘사회 동역학’^[1]이며, 이러한 동역학은 거대한 용트림에서부터 아기자기한 소용돌이까지 다양하다. 사회 동역학의 시작은 통계물리학의 상전이와 임계현상에서 다루는 이징 모형(Ising model)에서 출발한다. 자석을 가열하면 어느 시점부터는 쇠붙이를 끌어당기는 자성을 잃게 되는데, 이런 현상을 자석을 이루는 입자들의 상호작용으로 이해하고자 만든 모형이 이징 모형이다. 이징 모형은 양자역학에서 밝혀낸 입자의 스핀(spin)이라는 성질에서 시작하는데, 입자의 회전을 시계 방향과 반시계 방향의 회전으로 구분하고 이를 위 스핀(up spin)과 아래 스핀(down spin)으로 부른다. 두 종류의 스핀은 사회 현상에서 서로 상반되는 의견을 나타내는데 절묘하게 사용된다. 금융시장에서는 ‘사자(buy)’와 ‘팔자(sell)’ 의견으로, 찬반 투표에서는 ‘찬성’과 ‘반대’로 표현된다. 오래 전부터 사회학의 영역에서 사회 전체에 영향을 미치는 요소를 표현하기 위해 사회적 온도(social temperature)라는 개념을 사용하였는데, 이것은 이징 모형에서 물질의 성질을 조절하는 온도(temperature)의 개념과 연결된다. 물질의 상태가 변하는 상전이(phase transition), 전이가 일어나는 순간을 표현하는 임계점(critical point) 등은 금융시장의 폭락이나 민란의 발생 등으로 자연스레 연결된다. 물론 세상이 ‘예’와 ‘아니요’의 이분법적 사고로 이루어지지 않는다. 따라서 위 스핀과 아래 스핀만 존재하는 이징 모형은 보다 다양한 상태를 갖는 사회 현상을 설명하기 힘든 한계를 갖는다. 하지만 물리학의 세상 또한 우리가 상상하는 이상으로 광활하여, 이미 다양한 상태를 갖는 현상을 기술하는 포츠 모형(Potts model)도 존재한다. 물리학자들은 이미 사회 현상을 간단하게 설명할 수 있는 많은 모형과 이로부터 파생된 상전이와 임계현상(critical phenomena)에 관한 통찰력을 가지고 있으며, 이것이 사회물리학이라는 탐구를 가능하게 하는 원동력이 된다.

또한 사회 동역학은 ‘복잡계 연결망(complex network)’ 이론과도 인연이 깊다. 복잡계 연결망은 상호작용이 이루어지는 계의 토폴로지(topology)를 다룬다. 물론 연결망 이론 역시 사회학에서 사회 연결망(social network) 이론이라는 이름으

Fig. 1. The random rewiring procedure of the Small-world network model, which interpolates between a regular ring lattice and a random network without altering the number of nodes.^[1]

로 많은 연구가 이루어져 왔다. 특히 사회 연결망 이론은 어떤 사람이 인간관계의 중심에 있는지, 사람과 사람의 관계가 어떻게 맺어지는지에 대한 문제를 중요하게 다루어 왔다. 하지만 지금까지의 연결망 연구는 방대한 양의 연결망 정보를 수집하고 처리하는 데 한계가 있어서 발전의 속도가 그다지 빠르지 못했다. 이런 과거와 달리 최근에는 급속하게 발전하고 있는 컴퓨터 기술과 인터넷의 발달로 인해 예전에는 상상할 수 없었던 수준의 자료를 확보하고 계산할 수 있게 되었다. 이로 인한 복잡계 연결망 이론 분야의 발전은 과거와 비교하면 가히 상전이이라 불릴 만한 변화를 겪으며 초고속 성장을 거듭하고 있다. 10여 년 전 발표된 좁은 세상 연결망^[2](small-world network)와 척도 없는 연결망^[3](scale-free network)은 물리학자의 눈과 손, 머리를 빌려 연결망 이론을 설명하고 이해하는 노력의 효시를 열었다. 가끔 우리가 사는 세상이 너무나도 좁다는 생각을 할 때가 있다. 특히 우연히 길을 가다가 만난 사람이 몇 다리만 건너면 나와 연결된다는 것을 알게 되어 놀라는 경우가 종종 있다. 이러한 특성을 좁은 세상 현상(small-world behavior)이라고 하는데, 연결구조의 열개에서 좁은 세상 현상이 존재하는 이유는 멀리 떨어져 있을 것 같은 사람들을 단번에 연결시켜 주는 지름길(shortcut) 연결이 몇 개 존재하기 때문이라고 한다. 가령 내가 미국의 오바마 대통령과 연결되는 과정에는 태평양을 건너 오바마 대통령과 나를 연결시켜 주는, 뉴욕에 살고 있는 내 친구 알렉스라는 지름길이 존재하기 마련이다.

인간관계를 유심히 살펴보면 유난히 많은 사람과 친분을 맺고 있는, 소위 ‘마당발’이 존재한다는 것을 알 수 있다. 이런 마당발이 생기는 이유를 연결망의 진화 관점에서 설명한

REFERENCES

- [1] C. Castellano, S. Fortunato and V. Loreto, Rev. Mod. Phys. **81**, 591 (2009).
- [2] D. Watts and S. H. Strogatz, Nature **393**, 440 (1998).
- [3] A.-L. Barabasi and R. Albert, Science **286**, 509 (1999).

물리학과 첨단기술의 세계

Fig. 2. An example power law graph, being used to demonstrate ranking of popularity. To the right is the long tail, and to the left are the few that dominate. (From Wikipedia and Wikimedia Commons).

것이 척도 없는 연결망이다. 척도 없는 연결망에서는 마당발이 존재할 뿐만 아니라, 우리가 생각했던 것보다 더 많은 수의 마당발이 존재한다. 즉 얼마나 많은 친구를 가지고 있는지를 확률분포 함수로 그려보면, 일반적인 정규분포가 아닌 거듭제곱 분포(power-law distribution)의 꼴을 갖는다. 이런 거듭제곱 분포는 실로 다양한 곳에서 목격할 수 있는데, 20%의 소수가 80%의 부를 차지한다는 파레토(Pareto) 분포를 비롯하여 논문의 인용 회수, 낱말의 사용 빈도, 도시의 인구 분포 등에서 쉽게 관찰할 수 있다. 정규분포에서는 평균값을 중심으로 표준편차 범위 이내에 대부분의 값들이 분포하고 있다. 하지만 거듭제곱 분포에서는 표준편차가 평균값과 비슷하거나 훨씬 큰 경우가 빈번하다.

행위자 기반 모형(agent-based model) 역시 사회 동역학을 이루는 중요한 요소이다. 행위자 기반 모형은 행위자 수준의 관점에서 현상을 설명하는 모형을 가리키며, 스핀을 갖고 있는 전자의 수준에서 계를 설명하려는 이징 모형을 생각하면 된다. 계(system)를 구성하는 작은 단위인 행위자에서부터 시작한다는 점에서 이러한 연구 방법을 생성적 접근법(generative approach), 혹은 구성적 접근법(constructive approach)이라고 표현하는데, 가장 작은 단위에서부터 쌓아간다는 행위자 기반 모형의 철학을 이해한다면 굳이 이런 어려운 용어를 기억할 필요는 없다. 대개 행위자 기반 모형에서의 행위자는 다음과 같은 요소를 갖추게 된다. 먼저 행위자의 상태를 표시하는 변수와 이를 수정하는 기능을 갖게 된다. 전자의 경우는 위 스핀, 아래 스핀 같은 스핀이 상태 변수에 해당하며, 외부의 자기장 등에 의해 스핀이 변화하는 기능이 추가된다. 그리고 상태를 수정하기 위한 법칙을 설정하게 되는데, 이징 모형에서는 임계점의 설정, 온도의 변화 등이 이에 해당한다. 특히 복잡계에서의 행위자 기반 모형은 상태 수정의 법칙에 다른 행위자와의 상호작용과 정보 교환이라는 요

소가 반영되며, 행위자들이 위치하고 있는 공간 구조 역시 격자 공간보다는 복잡계 연결망 구조를 고려하는 경우가 많다. 간단하게 행위자 기반 모형을 연습할 수 있는 프로그래밍 도구(NetLogo, Repast 등을 추천한다. 마찬가지로 연결망 이론을 위한 소프트웨어는 pajek, NetMiner 등이 있다.)도 여럿 나와 있으니, 이를 활용하여 간단한 행위자 기반 모형의 예제를 살펴보는 것도 좋을 것이다.

이러한 기본 구성 요소를 가지고 있는 사회 동역학의 여러 세부 분야 중 가장 유명한 것은 ‘의견 동역학(Opinion Dynamics)’이다. 우리는 매 순간 의견을 수렴하고 의사결정을 내리는 과정을 반복한다. 어찌 보면 우리 사회를 구성하는 가장 기본적인 함수가 바로 의견 동역학일지도 모른다. 특히 각자가 가지고 있는 생각이 다르고 행동 양상이 다르기 때문에 세상의 복잡함을 만들어내고 있다는 점을 생각하면 이 분야가 많은 학자들의 탐구 대상이 될 수밖에 없는 당위성을 이해할 수 있다. 사회물리학자들은 이러한 의견 상태를 정량적으로 기술하고 의견의 확산 및 의사결정 과정을 구체적인 모형으로 표현하려는 노력을 기울이고 있다. 물론 의사 결정 과정의 모든 것을 물리학의 모형으로 설명할 수는 없다. 특히 모형을 설계하는 과정에서 너무 많은 요소를 고려할 경우 모형의 자유도가 거의 무한대에 가까워지게 되며, 이러한 자유도는 물리학자들이 더 이상 설명할 수도 없고 관심도 없는 영역에 해당한다. 따라서 사회물리학에서는 복잡한 세상을 가장 단순화하여 설명하려는 노력을 기울이게 된다. 물론 지나친 단순화는 반드시 필요한 것까지 무시하기 십상이니 언제나 주의를 기울여야 한다. 아인슈타인은 “모든 것은 가능한 한 단순해야 한다. 하지만 더 단순해서는 안 된다.”는 말로 이 과정의 어려움을 표현하였다.

공간 연결망과 사회물리학

사회물리학이 각광받게 된 계기 중 하나가 방대한 자료의 확보와 처리가 가능해진 컴퓨터 기술의 발전이라는 것은 이미 앞서 밝힌 바 있다. 교통망, 전력망, 인터넷망 등의 공간 연결망^[4] 역시 방대한 자료가 존재하며 사회 현상을 설명한다는 점에서 사회물리학자들의 관심을 피할 수 없는 분야이다. 특히 복잡계 연결망 이론의 발전과 더불어 이 분야에서 물리학이 기여할 수 있는 부분은 아직 무궁무진하다고 할 수 있다. 복잡계 연결망 이론이 태동한 초창기에는 주로 대중교통망 자체의 구조에 관한 연구가 활발하였다. 하지만 이후 화

REFERENCES

- [4] M. Barthelemy, Phys. Rep. **499**, 1 (2011).

Fig. 3. Cumulative degree distribution for the North American network shows a power-law distribution.^[10]

폐의 유통 경로,^[5] 휴대폰 위치 정보,^[6] 교통카드 사용 정보^[7,8] 등을 바탕으로 실제 사람들이 움직인 경로를 추적하는 연구도 이루어지고 있다. 특히 도로망^[9]과 전력망, 대중교통 노선의 최적화 등에 응용될 것으로 기대하고 있으며, 연결망 구조의 최적화와 관련된 연구도 활발히 진행되고 있다.

한국의 도로망이나 대중교통망의 경우 사회물리학에서 연구하기에 좋은 조건을 갖추고 있다. 특히 고속도로 진출입, 혹은 지하철 승하차 때마다 하이패스와 같은 비접촉식 카드를 사용하여 요금을 징수하는 체계 때문에 모든 차량과 승객의 이동 경로를 상당히 자세하게 파악할 수 있다. 이를 통해 한국 고속도로의 교통량은 도시의 인구에 비례하고 거리의 제곱에 반비례한다는 중력 법칙을 찾아내기도 했으며,^[7] 퇴근 후 곧장 집으로 돌아가지 않는 회식 문화 또한 관찰할 수 있었다.^[8]

이외에도 전염병의 확산을 사람들 간의, 혹은 동물들 간의 접촉 양상을 활용하여 이해하려는 노력도 있으며, 시장에서 절대적인 점유율을 차지하고 있는 선두 기업을 따라잡기 위한 경영기법^[11]이나 성공의 법칙^[12]을 물리 이론으로 설명하려는 노력도 있다.

사회물리학 연구의 필수 조건

사회물리학은 물리학이 추구하는 보편성에서 시작되었다. 하지만 이러한 출발 때문에 사회물리학이 극복해야 할 점도 있다. 물리학자의 눈에는 모든 것들이 물리와 연결되어 보이지만, 자칫 잘못하면 모든 것이 물리 그 이상도 그 이하도 아니게 보일 수도 있다. 즉 사회물리학이 연구하는 대상은 대개 그동안 사회과학이 꾸준히 관찰하며 탐구해 온 대상이다. 따

Fig. 4. Gravity model in the Korean highway system.^[7]

라서 물리학이 보지 못하는 특징이 존재하며, 이러한 점에 대한 이해 없이 물리 이론만으로 사회 현상을 이해한다는 것은 불가능하다. 후자는 물리학자들이 기존의 물리학 이론을 사회 자료에 단순 적용하여 물리학에서 주로 관찰되는 현상이 나타난다는 단순한 결과를 바탕으로, 물리학이 기존의 사회과학 이론보다 우월하며 모든 학문을 대체할 수 있다는 시각을 경계하며 이를 ‘물리 제국주의’라고 표현하기도 한다. 사회물리학은 학제간 연구(interdisciplinary study)의 대표적인 분야이다. 학제간 연구의 시작점은 여러 학문에 대한 깊은 이해도와 높은 전문성에 있다. 사회물리학의 미래와 사회물리학자의 요건 모두 여기에서 출발한다는 점을 항상 유념해야 할 것이다.

REFERENCES

- [5] D. Brockmann, L. Hufnagel and T. Geisel, *Nature* **439**, 462 (2006).
- [6] P. Wang, M. Gonzalez, C. A. Hidalgo and A.-L. Barabasi, *Science* **324**, 1071 (2009).
- [7] W.-S. Jung, F. Wang and H. E. Stanley, *Europhys. Lett.* **81**, 48005 (2008).
- [8] K. Lee, J. S. Park, H. Choi, M. Y. Choi and W.-S. Jung, *J. Korean Phys. Soc.* **57**, 823 (2010).
- [9] H.-J. Youn, M. Gastner and H. Jeong, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 128701 (2008).
- [10] A. Barrat, M. Barthélemy and A. Vespignani, *J. Stat. Mech.* P05003 (2005).
- [11] W.-S. Jung, H.-T. Moon and H. E. Stanley, *J. Econ. Interact. Coord.* **3**, 81 (2008).
- [12] A. M. Petersen, W.-S. Jung, J.-S. Yang and H. E. Stanley, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **108**, 18 (2011).