볼츠만 - 통계역학의 아버지

DOI: 10.3938/PhiT.22.024

김 상 욱

Boltzmann - Father of Statistical Mechanics

Sang Wook KIM

Ludwig Eduard Boltzmann (1844–1906) was an Austrian physicist whose greatest achievement was the development of statistical mechanics by finding the microscopic description of entropy and its statistical meaning based upon the kinetic theory of gases. The Boltzmann Medal (or Boltzmann Award) is the most important prize awarded to physicists who obtain new results concerning statistical mechanics; it is named after the celebrated physicist Ludwig Boltzmann. The Boltzmann Medal is awarded once every three years by the Commission on Statistical Physics of the International Union of Pure and Applied Physics during the STATPHYS conference.

통계역학의 역사는 원자와 함께 시작된다. 원래 원자는 그리스 시대 철학자들이 생각한 가상의 존재였다. 하지만, 18세기를 거치며 화학에서는 빵이나 맥주만큼이나 당연한 것이 되었다. 의심 많은 물리학자들에게 원자는 여전히 가상의 존재에 불과했으나, 19세기 열 현상의 이해가 깊어짐에 따라 원자가 물리의 전면에 등장하게 된다.

대포 포신을 제조하던 림퍼드가 열이 물질의 한 형태가 아니라 운동이라는 것을 깨달은 이야기는 유명하다. 이 주장은 훗날 주울의 실험으로 사실임이 입증된다. 이로부터 자연스럽게 나오는 의문은 열이 '무엇'의 운동이나는 것이었다. 이에 대한 답을 준 사람은 클라우지우스다. 그는 기체원자들의 운동을

역학적으로 분석하여 열역학의 여러 현상들을 성공적으로 설명할 수 있었다. 이 과정에서 엔트로피라는 새로운 물리량을 정의하게 되는데, 이는 열을 온도로 나눈 값이다. 고립계의 엔트로피는 결코 감소하지 않는다. 하지만, 그 이유는 알 수 없었다.

클라우지우스의 논문이 원자들의 운동을 기술하는 데 있어, 오직 평균속도만을 고려한다는 것에 관심을 기울인 사람은 맥스웰이었다. 맥스웰은 평균속도에서 한 걸음 더 나아가 원자들의 속도분포를 생각하는데, 이로써 물리학에 확률이라는 개념이 도입된다. 이것은 사실 쉬운 일이 아니었다. 확률은 도박사들이나 연구하는 더러운 수학으로 간주되던 시대였기 때문이다. 자, 이제 여기서 이 글의 주인공인 볼츠만이 등장한다.

1868년 빈 대학을 갓 졸업한 24세의 볼츠만은 맥스웰의 논문에 깊은 감명을 받는다. 그의 이론을 보다 실제적인 상황-높이에 따른 대기압의 변화-에 적용한다. 이 과정에서 맥스웰의 공식을 퍼텐셜이 존재하는 경우로 일반화하는 데 성공한다. 오늘날 우리가 볼츠만 인자(Boltzmann factor)라 부르는 것이 탄생한 것이다.

세무공무원의 아들이었던 볼츠만은 부잣집 아들이 아닌데도 유복한 중산계층에 속해 있었다. 하지만, 15세가 되던 해에 아버지를 여의고, 다음 해에는 동생을 잃는 비극을 당한다. 그 이후 볼츠만의 어머니는 아들의 교육에 모든 재원과 정성을 쏟아 부었다고 한다. 하지만, 볼츠만은 어린 시절과 초급 학교 시절까지는 이렇다 할 천재성을 보이지 않았다.

1868년 논문으로 학계에 이름을 알린 볼츠만은 이듬해 원자의 운동, 전류, 수리물리 등에서 8편의 논문을 발표하게 되고, 1869년 볼츠만은 그라츠대학의 교수가 된다. 그라츠에 있는 동안 볼츠만은 하이델베르크의 수학자 쾨니히스베르거와 교류를 하고, 베를린 대학을 방문하여 키르히호프, 헬름홀츠 등을 만난다. 그라츠에서 볼츠만은 주위사람들을 만나는 일 없이 은둔자적 생활을 했다고 한다. 그래도 1872년 18세의 헨리에테를 만나 그녀의 적극적인 애정공세로 1876년 결혼에 골인한다.

저자약력

김상욱 교수는 1999년 KAIST에서 이학박사(물리학)를 받았으며, POSTECH (1999), KAIST(2000), Max Planck Institute(2001–2003)에서 연구원, 서울대 BK조교수(2003)를 거쳐 2004년부터 현재까지 부산대 물리교육과에 재직 중이다. (swkim0412@gmail.com)

1872년 볼츠만은 그의 기념비적인 업적인 H-정리¹⁾에 대한 논문을 발표한다. 속도분포의 함수로부터 얻어지는 H의 값은 속도분포가 맥스웰-볼츠만 분포일 때 최소가 되고, 그 값이 최소값보다 크면 원자들 간의 충돌을 통해 H의 값이 작아지는 방향으로만 진행된다는 것이다. 이것은 맥스웰-볼츠만 분포가 평형상태의 원자들이 가질 수 있는 유일한 분포이며, 엔트로피가 감소할 수 없다는 클라우지우스의 발견을 설명하는 듯이 보였다. 사실 H에 음의 부호를 붙인 것이 엔트로피다.

H-정리에 대한 학계의 반응은 부정적인 정도가 아니라 적대적이기까지 했다. 우선 맥스웰부터 동의하지 않았다. 로슈미트는 가역성의 문제라고 알려진 역설을 제기했다. 원자들의 운동을 기술하는 뉴턴역학은 시간에 가역적인데, 이를 바탕으로 어떻게 시간에 비가역적인 결과를 얻을 수 있느냐는 것이다. 오늘날 우리는 시간가역적인 계에서 H 또는 엔트로피같이 감소 또는 증가만 하는 양을 정의하는 것이 가능하다는 것을 안다. 포앙카레도 미묘한 지적을 한다. 고립계는 오랜 시간이 지나면 결국 초기조건에 아주 가까이 근접하는 것이 가능한데, 이 경우 엔트로피가 감소할 수도 있다는 것이다. 이러한 지적은 엔트로피의 증가조차 확률적으로 이해해야 한다는 사실을 간과하여 생긴 것이다. 볼츠만은 이에 대해 올바른 대답을 하지만, 그의 대답은 사람들에게 오히려 혼란을 주게 된다. 세상에 확률적으로 맞는 법칙이라니? 물론 볼츠만이 처음부터 모든 것을 다 이해하고 있었던 것 같지는 않고, 여러 비판들 속에서 자신의 생각을 다듬어 간 것으로 보인다. 볼츠만이 강연에는 능했지만 글을 쓰는 데는 뛰어나지 못했다는 점도 그의 불행을 증폭시켰다. 반면에 맥스웰은 강연은 서툴렀지만, 글은 정말 수려했다고 한다.

물리학계의 심오한 반발과는 별개로, 철학자 마흐의 공격은 볼츠만을 궁지로 몰아넣었다. 마흐는 볼츠만의 이론이 존재하지도 않는 원자를 기반으로 한 사변에 불과하다고 주장한 것이다. 마흐는 더구나 대중적으로 알려진 영향력 있는 학자였다. 아무튼 볼츠만은 그의 H-정리를 계속 연구했고, 결국 위대한 결론에 도달한다. 1877년 H-정리로부터 엔트로피를 기술하는 간단한 공식을 추출한 것이다.

$$S = k \ln W$$

여기서 k 는 볼츠만 상수, W 는 경우의 수를 나타낸다. 이 공식의 중요성은 뉴턴의 운동방정식이나 맥스웰 방정식, 슈뢰딩거 방정식에 비견될 만하다.

하지만, 학계의 무관심, 과도한 강의 및 행정업무 때문에 이후 그의 연구는 거의 중단된다. 특히, 1887년부터는 그라츠 대학의 총장을 맡게 되었고, 당시 합스부르크 왕국의 민족주의적 긴장에 따른 학생시위와 폭동사태와 같은 문제를 해결해야 했다. 매사에 최선을 다했던 볼츠만이었기에 아주 곤혹스런 일이 아닐 수 없었다. 1890년 뮌헨대학, 1893년 빈 대학으로 연거푸 자리를 옮긴 볼츠만은 인생의 남은 기간 동안 자신의 이론을 방어하며 살게 된다. 특히 마흐가 있는 빈 대학에서의 삶은 끊임없는 논쟁으로 점철된 기간이었다. 철학자와 논쟁을 해야 했기에 1890년대 중반에는 몇 편의 철학평론을 쓰기도 했다. 1895년 볼츠만이 <네이처>에 기고한 글에는 H-정리를 방어하는 그의 입장이 잘 나타나 있다.

“모든 가설은 역학적으로 잘 정의된 가정으로부터 시작해서 수학적으로 옳은 방법을 통해서 명백한 결과로 이어져야만 한다. 만약 그 결과가 많은 사실들과 잘 부합되면 그 본질이 모든 면에서 분명하게 밝혀지지 않는다고 하더라도 만족해야 한다.”

말년, 조울증을 보이던 볼츠만은 1906년 62세의 나이에 자살로 생을 마감한다. 1897년 이미 전자가 발견되었고 1911년 러더퍼드가 원자핵의 존재를 보인다. 이로써 원자의 구조에 대한 연구가 물리학의 가장 중요한 문제로 떠오른다. 따라서 그가 조금만 더 살았다면 그의 업적이 인정받는 것을 보았을 거란 아쉬움이 남는다.

엔트로피의 미시적 표현을 찾아내고 그 통계적 의미를 알아낸 볼츠만이야말로 통계물리의 아버지라 불려도 무리가 없을 것이다. 국제순수응용물리학회(International Union of Pure and Applied Physics; IUPAP)에서 수여하는 통계물리학 분야의 가장 영예로운 상이 볼츠만 메달인 것은 당연한 것이라 하겠다. 볼츠만 메달은 1975년부터 수여되기 시작했는데, 통계물리의 가장 큰 학회인 STATPHYS 기간 중에서 수여된다. 케네스 윌슨(Kenneth G. Wilson; 1982 노벨상), 료고 쿠보(Ryogo Kubo), 로드니 박스터(Rodney Baxter), 마이클 피셔(Michael Fisher), 레오 카다노프(Leo Kadanoff) 등이 수상자였다.