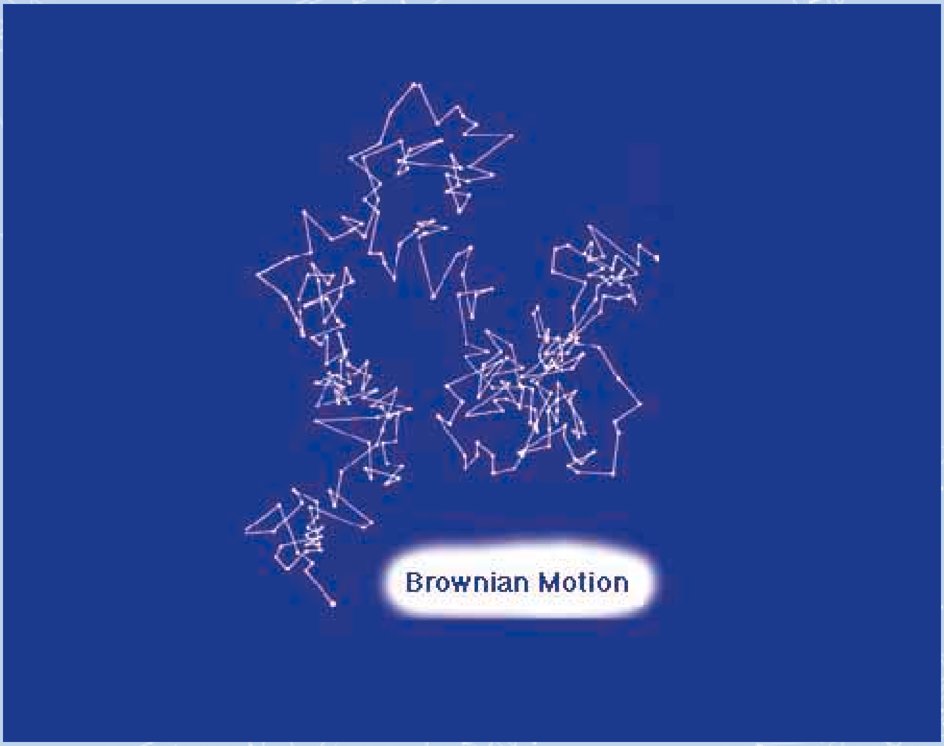


③ 브라운운동과 원자론

'볼 수 없는 원자'의 존재 처음 밝혀

글 _ 이공주복 이화여대 물리학과 교수 kjblee@ewha.ac.kr

1773년경, 벤저민 프랭클린은 수면에 형성되는 기름막에 관심을 가진 적이 있었다. 수면 위의 기름막을 더 넓게 퍼뜨리려고 하자 기름막이 조각으로 나눠지는 것을 보고, 일정 양의 기름으로 얼마나 넓은 수면을 덮을 수 있는지 실험하여 보았다. 이 실험에서 프랭클린은 일정 양의 기름이 수면을 덮을 수 있는 최대면적은 항상 같다는 결론을 얻었다. 이를 수치적으로 보면, 약 5㎤의 기름이 약 2천㎡까지의 수면을 덮을 수 있다는 것이었다. 프랭클린은 기름막이 끊어지지 않으면서 더 이상 커질 수 없는 이유로, "만일 기름이 더 줄일 수 없는 아주 작은 입자로 이루어졌다면, 기름은 이 작은 입자들이 한 층을 만들 때까지만 퍼질 수 있을 것이다"라고 생각했다.

1800년, "불멸의 입자 존재한다" – 원자론 등장

1800년초, 기상 관측자였던 존 달톤은 어떻게, 그리고 왜 원소들이 고정된 비율로 서로 결합하는지를 설명하기 위해 "원자는 아주 작고, 나눠지지 않고, 불멸의 입자로 유한한 질량과 크기를 갖는다"라는 원자론을 내놓았다.

그러나 19세기말까지도 그 당시 꽤 영향력을 행사하던 일부 과학자들은 물질이 불연속적이고, 불변인, 실존하는 입자들로 이루어졌다는 가설은 철학적으로 받아들일 수 없는 것이라고 강도 높게 비판하였다. 한편, 많은 물리학자들은 이상기체법칙($pV=Nk_BT$, 여기서 p는 압력, V는 부피, N은 분자수, k_B는 볼츠만상수, T는 온도)이나 다른 현상들을 설명하기 위해서는 원자가설을 받아들일 수밖에 없다고 생각했었지만, 압력, 부피, 그리고 온도를 알고 있는 이상기체에 얼마나 많은 입자가 들어있는지를 이상기체법칙으로도 알 수 없다는 것은 원자가설을 완전히 받아들이는데 걸림돌이 되기도 했다. 즉, 이상기체법칙에 의하면 거시적으로 측정 가능한 압력, 부피, 온도를 측정하여도 항상

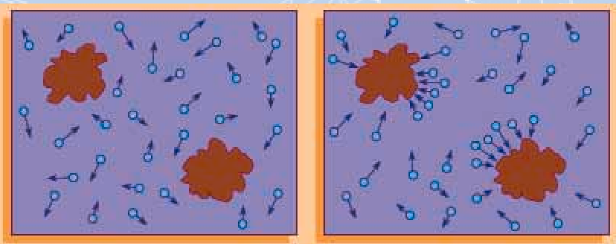
Nk_B 만을 구할 수 있지, 입자수 N과 볼츠만상수 k_B를 독립적으로 구할 수 있는 것이 아니다. 이는 1몰의 이상기체에 들어있는 입자수, 즉, 아보가드로수를 정확히 구할 수 없다는 것을 의미한다. 아보가드로수를 정확하게 구할 수 없다는 것은 입자의 크기를 알 수 없다는 것으로 유한한 크기로 실존하는 원자 (또는 분자)를 인정하기 어렵다는 것을 의미한다.

이러한 의구심은 만일 분자를 볼 수만 있었다면 모두 해결될 수 있었겠지만, 가시광선을 이용한 당시의 광학현미경으로는 도저히 불가능한 일이었다. 위에서 언급한 프랭클린의 수면 위의 기름막 실험을 좀더 깊이 살펴보자. 만일 $5cm^3$ 기름에 들어있는 입자들이 촘촘히 붙어서 2천m^2 넓이의 층 하나를 만든다고 하면, 이 입자 하나의 지름은 2.5 ㎚가 된다. 따라서 약 500 나노미터의 파장을 갖는 가시광선을 이용하여 몇 ㎚의 입자를 관측하는 것은 불가능함을 알 수 있다.

1천㎚ 꽃가루 알갱이의 운동 첫관측

1828년 식물학자인 로버트 브라운은 물에 떠있는 꽃가루 알갱이들이 끊임없이 움직이고 있는 것을 현미경을 통해 관측하였다. 꽃가루 알갱이들의 크기는 대략 1㎛(또는 1천㎚)여서 광학현미경으로 관측할 수 있었던 것이다. 브라운은 이 끊임없는 움직임이 뭔가 생명현상과 관계가 있을 것이라고 가정하고, 이를 확인하기 위하여 여러 가지 실험을 하였다. 먼저, 꽃가루 알갱이들이 생명현상을 지속하지 못하도록 하기 위해 밀봉한 용기 속에 충분히 오랫동안 넣어두었다가 실험을 했으나, 여전히 꽃가루의 끊임없는 운동이 관측되었다. 다음으로 브라운은 생명현상과 관계없는 그을음이나 심지어 스핑크스의 돌가루를 가지고 같은 실험을 해보았다. 그 결과, 마찬가지로 끊임없는 움직임을 관측하였다. 여러 번의 실험을 통해, 같은 온도에서 같은 크기의 알갱이들은 (이런 알갱이를 지금은 브라운입자 또는 콜로이드입자라고 부른다) 같은 운동을 한다는 결론에 도달하여, 브라운은 생명현상과 관계가 있을 것이라는 자신의 초기 가정을 포기해야만 했다.

그 후, 많은 사람들이 다양한 실험을 한 결과, 브라운 운동이 다음과 같은 특성을 갖는 것으로 알려졌다. (1)매우 불규칙적이다. (2)두 입자가 충분히 가까이 있게 되어도 서로 독립적으로 움직인다. (3)작은 입자일수록 더 활발하다. (4)입자의 종류나



밀도와 무관하다. (5)점성이 적은 유체에서 더 활발하다. (6)온도가 높을수록 활발하다. (7)운동이 결코 멈추지 않는다.

이러한 특성들은 브라운입자와 열에너지에 의해 요동하는 유체분자간의 끊임없는 충돌에 의한 것이라는 운동론을 뒷받침해 주는 것들이다. 그러나 분자운동에 의한 설명은 "어떻게 매우 작아서 볼 수도 없는 유체분자와 이보다 훨씬 큰 브라운입자와의 충돌이 브라운입자를, 관측할 수 있을 만큼, 움직이게 할 수 있을까?" 라는 문제를 풀어야했다. 또한, 분자운동론이 맞는다면, 그래서 유체분자들이 나노미터의 크기로 조밀하게 놓여져 있다면 충돌을 하지 않고 갈 수 있는 거리도 대략 나노미터 정도인데, 여기에 초속 수백미터에 달하는 분자의 빠른 속력을 고려하면 각 분자들은 매초 1조번씩이나 (10^{12}) 충돌을 한다는 것을 의미한다. 어떻게 이렇게 빠른 미시적 현상을 거시적으로 관측할 수 있는가? 이 또한 해결해야할 문제였다.

아인슈타인, 1904년까지 '열의 운동론' 확인

1902년에서 1904년까지 아인슈타인은 원자와 역학을 기반으로 한 그만의 '통계역학'을 구축하는데 주력하였고, 그 결과 '열에 관한 일반적인 운동론'으로 기존의 열역학법칙들을 확인하였다. 1905년 취리히대학에 제출한 박사학위 논문에서 아인슈타인은 액체의 통계분자론을 다루었고, 동시에 또 다른 논문에서 열의 분자론을 액체에 적용하였는데, 이것이 바로 브라운운동에 관한 것이었다. 이 유명한 논문의 첫문단은 다음과 같다. "이 논문에서, 열의 분자운동론에 따라 액체에 떠있는 그리고 볼 수 있는 크기의 물체는, 열적인 분자운동의 결과로, 현미경을 통해 쉽게 관측될 수 있는 크기의 운동을 한다는 것을 보이고자 한다. 여기서 논의되는 운동이 소위 말하는 브라운 분자운동과 동일할 수 있으나 내가 브라운운동에 대해 정확하게 알고 있지

않아 판단을 내릴 수 없다."

이 당시 아인슈타인은 브라운운동에 대하여 전혀 모르고 있었고, 이 논문을 쓸 때 처음 들었다고 한다. 이 논문이 중요한 이유는 아인슈타인이 광학현미경으로 관측될 수 있는 크기의 운동을 예측했다는 것이다. 아인슈타인 전의 많은 사람들이 브라운 운동에 관해 연구하고 실험을 하였지만, 이와 같은 결정적인 결과를 얻지는 못하였다.

1905년 아인슈타인이 얻은, 지금은 '아인슈타인 관계식(Einstein Relation)' 이라고 불리는 결과를 이해하기 위해서 우리는 마구잡이 걷기 문제(Random Walk Problem), 확산, 그리고 점성마찰 등을 알아야 한다. 먼저, 가장 간단한 1차원 마구잡이걷기 문제를 생각해보자. 즉, 출발점에서 오른쪽이나 왼쪽으로 한번에 한걸음씩만 갈 수 있고, 매걸음의 보폭은 일정하며, 오른쪽으로 갈 확률과 왼쪽으로 갈 확률이 걸음마다 같은 경우를 생각하자. 매번 오른쪽과 왼쪽으로 갈 확률이 동일하여, 마구잡이걷기를 계속한 뒤 임의의 시간에 물체가 있을 평균 위치는 출발점과 동일하겠지만, 실제 출발점에 있는 것을 관측할 확률은 매우 적다.

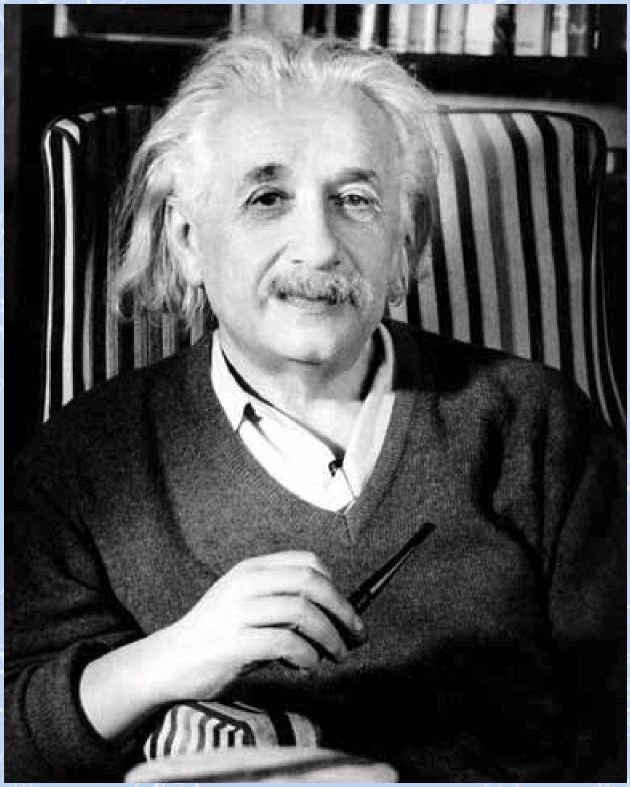
예를 들어 총 100걸음을 이동한 후 출발점에 있으려면, 50걸음은 왼쪽으로, 나머지 50걸음은 오른쪽으로 이동해야 하는데, 오른 걸음과 왼 걸음의 순서에는 관계없으므로 이와 같은 경우의 수는 100!/(50!50!)이 된다. 한편, 총 100걸음을 오른 걸음이나 왼 걸음의 조합으로 이동할 경우의 수는 2^{100}이니 출발점에서 관측될 확률은 약 8% 정도다. 물론 100걸음 모두가 왼쪽이나 오른쪽으로만 향할 확률은 거의 영에 가깝다. 걸음수가 많아질수록 이 확률들은 더욱 낮아진다.

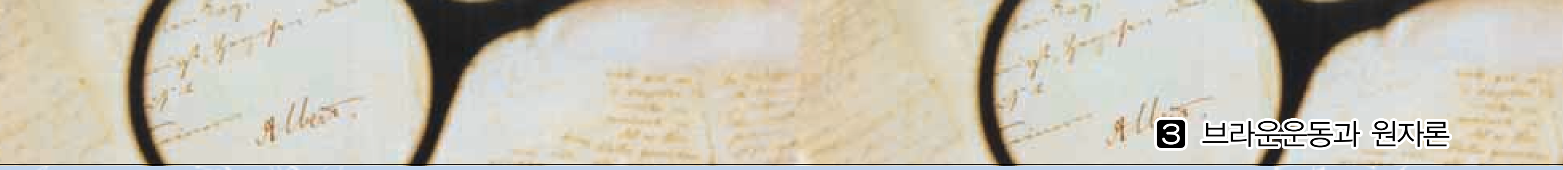
즉, 대부분의 경우 마구잡이걷기를 하는 물체는 관측할 때마다 출발점으로부터 어느 정도 떨어진 위치에서 방황하고 있는 것으로 보일 것이다. 이처럼 마구잡이걷기를 하는 물체가 주어진 시간에 출발점으로부터 어느 정도 떨어진 위치에서 관측되느냐에 대한 정보는 위치분포에 대한 표준편차로부터 얻을 수 있고, 출발점을 원점이라 할 때 그 값은 $(총걸음수)^{1/2}$ x(보폭)이 된다.

분자운동으로 브라운운동 정의

확산은 열에너지에 의한 운동으로 분자나 작은 입자들이 마구잡이로 이동하는 것이다. 따라서 확산상수(D)를 (주어진 시간에 이동한 $거리)^2$/(2x주어진 시간)로 정의하면, 시간 t가 지났을 때 마구잡이로 이동하는 입자의 위치분포에 대한 표준편차의 제곱은 2Dt가 된다. 이를 1차원 확산법칙이라고 한다. 브라운입자에 확산법칙을 적용하면, 거시적으로 관측되는 크기(L)의 브라운분자가 아주 작은 유체분자와의 충돌로 한번에 움직일 수 있는 거리(마구잡이걷기문제에서의 한 걸음의 보폭)는 너무 작아서 관측할 수 없지만, 충분히 오랜 시간 L^2/(2D) 후 관측하면 거시적인 거리만큼의 이동을 관측할 수 있다는 것을 의미한다. 아인슈타인은 실제 약 1㎛ 크기의 입자가 5㎛ 정도 분포를 갖는 것을 관측하기 위해서는 약 1분 정도만 기다리면 된다고 예측하여 실제 실험가능한 영역이라는 것을 주장하였다. 또한, 브라운입자와 유체분자와의 수없이 많은 각 충돌에 의한 움직임을 현미경으로 볼 수는 없지만, 실험적으로 확산상수를 측정함으로써 주어진 시간에 얼마나 확산되는가는 알 수 있음을 의미한다.

확산상수를 측정하기 위해 필요한 것은 단지 주어진 시간내의


연합포토



브라운입자의 위치변화이다. 즉, 두 위치 사이의 거리의 제곱을 주어진 시간의 2배로 나누면 그 순간의 확산상수가 되고, 이를 여러 번 반복하여 평균을 구하면 브라운입자의 평균적인 확산상수를 얻게된다. 이렇게 구한 확산상수는 시간에 의존하지 않으므로, 확산법칙에 따라 브라운입자의 위치분포는 시간이 지날수록 넓어지게 된다. 이로써 앞에서 분자운동론으로 브라운운동을 이해하려 했을 때 제기되었던 두 가지 문제점이 동시에 해결되었다.

그러면, 원자가설을 강력하게 뒷받침해주었던 이상기체법칙에서의 문제점은 어떻게 해결할 수 있을까? 아인슈타인은 이 논문에서 2개의 미시적 변수들을 3개의 거시적 변수들과 연관지었는데, 미시적 변수라고 함은 브라운입자가 유체분자와 충돌한 뒤 다음 충돌까지 이동할 수 있는 거리(또는 마구잡이걷기에서 한 걸음의 보폭)와 이에 걸리는 시간이고, 거시적 변수들은 확산상수(D), 유체의 점성에 의한 점성마찰계수(μ), 그리고 유체의 온도(T)이다. 여기서 점성마찰계수는 브라운입자 질량의 두 배를 미시적 시간변수로 나눈 것으로, 일반적으로 입자가 클수록, 유체의 점성이 클수록 마찰이 커져서 큰 값을 갖고, 실험적으로 측정가능하며, 구형의 입자의 경우는 정확히 계산되기도 한다.

미시적 변수들과 온도와의 관계는 브라운입자의 평균운동에너지가 유체의 열에너지와 비례한다는 것으로, 이는 속력의 제곱 평균이 열에너지 k_BT에 비례하고 질량에 반비례한다는 것을 의미한다. 2개의 미시적 변수가 3개의 거시적 변수와 연관된다는 것은 미시적 변수를 거시적 변수로 표현할 수 있음은 물론, 동시에 거시적 변수만의 관계식 하나가 만족돼야 한다는 것인데, 이 식이 바로 아인슈타인관계식 '$\mu D=k_BT$'이다. 이 관계식은 비슷한 시기에 전혀 다른 방법으로 폴란드 물리학자 마리안 스몰루호프스키에 의해서도 구해져서 아인슈타인-스몰루호프스키 관계식이라고 불리기도 한다.

아인슈타인관계식, '미세한 크기의 분자' 존재 입증

아인슈타인관계식은 여러 측면에서 주목할 만한데, 그 첫번째는 볼츠만상수 k_B를 점성마찰계수, 확산상수, 온도 등의 거시적 측정만으로 구할 수 있게 함으로써 이상기체법칙에서의 문제, 즉, k_B와 입자수를 독립적으로 구할 수 없다는 문제를 해결하여 주었다. 그 결과 1몰에 들어있는 분자수를 구했고, 보지 않고서도 분자가 얼마나 작은지를 비로소 믿게 하였다. 두 번째로 아인슈타인 관계식은 점성마찰계수와 확산상수의 곱이 브라운입자의 크기나 유체의 점성 등에 관계없이 온도가 같기만 하면 항상 같다는 보편성을 제시한다. 즉, 같은 온도에서 작은 입자는 작은 점성마찰을 받지만 그만큼 확산이 잘 일어난다는 것이다. 또한, 점성마찰계수나 확산상수는 온도와 아주 복잡하게 연관되어 있지만, 이 두 양의 곱은 온도에 대해 아주 간단한 선형비례 관계에 있다는 것이다. 아인슈타인은 이 논문에서 자신이 제안하는 모든 실험이 충분히 실현가능하다는 것을 주장하였고, 이 논문이 발표된 직후 프랑스의 물리학자 장 페랭은 바로 실험을 하여 아인슈타인의 예측을 성공리에 확인하였다. 그 공으로 1926년 페랭은 노벨물리학상을 수상하였다.

1905년 아인슈타인에 의해 연구발표된 다른 주제들과 마찬가지로, 브라운운동이 열적 요동에 의한 것이라는 것을 처음 제안한 사람은 아인슈타인이 아니다. 하지만, 아인슈타인은 분자의 실체를 밝히는 것이 문제의 핵심이고, 만일 분자가 실존한다면, 분자는 유한한 크기를 가져야 하고 이를 결정하는 방법은 일반적으로 한 가지가 아닌 여러 가지여야 한다고 생각하였다.

아인슈타인은 1905년 이후 몇 년 동안 아보가드로수를 결정하는 서로 다른 방법에 관한 4편의 논문을 더 발표하였다. 만일 분자가 실존하는 것이 아니라면, 이렇게 여러 가지 방법들에 의해 측정된 아보가드로수가 모두 같은 값을 갖는다는 것을 받아들이기는 매우 어려운 일이다. 물질이 뭔가 작은 입자로 이루어졌을 것이라는 가설은 아인슈타인이 미시세계와 거시세계를 명확하게 연결시켜줌으로써 비로소 가설이 아닌 과학적 사실로 자리바꿈하게 된 것이다. '물질이 입자들로 이루어졌다'라는 것은 아인슈타인이 '빛도 마찬가지로 입자로 이루어졌다'라는 것을 입증할 수 있도록 한 밑거름이 되었다. 브라운운동에 관한 연구에 연이어 광전효과에 관한 연구결과가 발표된 것은 결코 우연이 아닌 것이다. ST

글쓴이는 이화여대 물리학과를 졸업 후, 미국 템플대학교에서 박사학위를 받았다.