

## Coalescence Preference Depends on Size Inequality

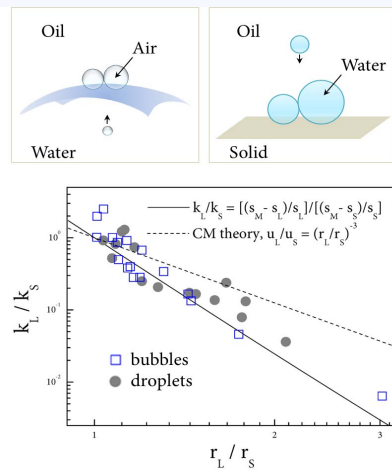
연성물질(soft matter)은 그 특성이 액체와 고체의 중간으로 쉽게 구부러지거나 변형이 가능한 물질로서, 콜로이드, 액정, 고분자, 생체재료 등 자연계와 산업계의 수많은 재료가 이에 해당한다. 연성물질의 물리적 특성을 연구하는 학문 분야가 연체물리학(soft condensed matter physics)이며, 물리, 화학, 생명과학 외에 관련된 공학 분야에서 활발하게 연구되고 있다. 특히 연성물질은 최근에 재료공학 및 화학공학 분야에서 첨단 소재로 각광받고 있다.

합체(coalescence)는 연성물질의 물리적 현상 중 하나로서, 접촉한 두 입자가 표면에너지지를 낮추기 위해 물질이동이 일어나 하나의 입자로 융합하는 현상이다. 오랜 동안 물리학 및 공학에서는 합체과정에서 일어나는 물질이동에 대해 주목해 왔다. 예를 들어 두 입자의 크기가 다르면 압력차가 발생한다. 일반적으로 작은 입자의 압력이 큰 입자의 압력보다 높아 압력차에 의해 물질이 작은 입자로부터 큰 입자로 이동하게 됨을 쉽게 예상할 수 있다. 그 결과로서 합체된 입자는 큰 입자 쪽으로 치우친 위치에 놓일 수 있으며 이러한 특이 현상을 합체선호성(coalescence preference)이라고 한다. 하지만 압력차의 정보만으로는 합체과정에서 물질이동의 동역학과 합체된 입자의 위치를 예측하는 것은 불가능했다.

입자의 크기 차이에 의한 합체선호성 관계를 입증하기 위해서는, 우선 합체 전후의 입자가 자유로운 상태에 있어야 하며, 또한 합체 전후에 정확한 입자의 크기와 위치를 실시간으로 정밀하게 측정해야 한다. 대표적인 연성물질인 기포(bubble)나 액적(droplet)은 이러한 이상적인 조건을 만들어 주는 것이 쉽지 않으며 실시간 측정 또한 어렵다.

포스텍 신소재공학과 원병목 연구교수와 제정호 교수는 2005년부터 엑스선 영상으로 기포의 움직임을 실시간으로 정밀하게 관찰하는 연구를 수행해 왔다. 엑스선영상은 투과력과 시공간 분해능이 뛰어나 연성물질의 물리적 거동을 관찰하는데 이상적인 영상기법이다. 두 기포 간의 합체에 대한 이상적인 조건은 물/기름 계면에 갇힌 기포를 이용하였다. 특히 친수성의 큐벳(cuvette)을 이용하면 물/기름 계면이 언덕 모양으로 형성되어 기포가 자연스럽게 그 꼭대기로 이동하게 된다. 그러면 일정한 위치에서 합체가 일어나 합체과정을 영상으로 담을 수 있었다. 영상으로부터 크기 및 위치 정보를 정밀하게 분석하여 기포의 합체선호성을 연구하였다.

합체 전후 입자의 크기와 위치의 기하학적 관계를  $(a_L/a_S) = (r_L/r_S)^p$ 의 멱함수 관계로 나타낼 수 있다. 여기서 L은 큰 입자, S는 작은 입자를 나타내며,  $(a_L/a_S)$ 는 합체 전후의 입자중심의 이동거리 비율,  $(r_L/r_S)$ 는 입자의 반경 비율, p는 합체선호성 지수이다.



▲ 연성물질 합체과정을 엑스선영상과 광학영상으로 관찰(상), 합체 전 입자 크기 차이가 운동에너지 차이로 발현(하). 무게중심으로 예측되는 것(점선)보다 큰 입자 쪽으로 더욱 치우쳐 합체된다(실선).

기포의 경우, 합체선호성 지수는 5.08 ( $\pm 0.43$ )로 얻어졌다. 합체된 입자가 합체 전 입자 사이의 무게중심으로 이동한다면 이 지수는 3.0으로 예측되며 실험으로 얻은 값과 매우 달랐다. 연구팀은 합체과정에서 표면에너지가 운동에너지로 전환되어 물질의 이동거리를 결정한다는 새로운 원리를 제시하였으며, 운동에너지 비율( $k_L/k_S$ )과 입자 반경 비율( $r_L/r_S$ )의 관계에서 이론적으로 지수 5.3을 얻었다. 이는 기포 실험 결과와 매우 잘 일치하였다.

연구팀은 추가로 기름이 두껍게 담겨 있는 접시(Petri dish, 물접촉각  $\sim 90^\circ$ ) 안에 물을 주사기로 뿌려 물 액적을 형성시킨 후, 액적의 합체과정을 광학영상으로 관찰하였다. 액적의 경우 합체선호성 지수는 4.33( $\pm 0.54$ )으로 측정되었다. 이 지수 역시 무게중심 이론으로 예측되는 값보다 훨씬 크며 기포 경우보다는 조금 작았다. 이 실험에서 액적은 완전한 구의 상태가 아니며 고체표면과의 접촉력에 의한 영향을 받으므로 이론과 약간의 차이가 발생하였다.

두 실험과 이론으로부터 연구팀이 얻은 결론은 매우 흥미로웠다. 두 입자가 합쳐져 커지게 되면 합체된 입자의 위치가 ‘공평하게’ 두 입자의 무게중심에 놓이는 것이 아니라, ‘선택적으로’ 큰 입자 쪽에 더욱 가깝게 놓이는 것이다. 연성물질의 합체과정에서 이른바 ‘빈익빈 부익부’ 원리가 작용하는 것이다.

연성물질의 합체선호성은 일상에서도 쉽게 관찰할 수 있으며, 표면장력이 지배적으로 작용하는 모든 경우에 보편적으로 나타날 수 있고, 마이크로 및 나노 세계에서 물질의 융합 현상을 이해하고 제어하는데 활용될 수 있다.

원병목, 제정호(포스텍), Phys. Rev. Lett. **108**, 224501 (2012).