

X선에 의한 물의 표면장력 감소현상 밝혔다

글 | 제정호 _ 신소재공학과 교수 jnje@postech.ac.kr

사람의 경우 몸의 70% 정도를 차지하는 물은 생명체의 중요한 구성요소일 뿐 아니라 바닷물, 강물, 구름 등으로 존재하는 지구상에서 없어서는 안 될 필수물질이다. 물은 공장에서 제품을 생산하는데 꼭 필요할 뿐 아니라 가정에서 음료수로, 또 음식을 만들고 빨래를 하거나 식물을 가꾸는 데도 없어서는 안 될 기본적인 물질이다.

액체 중 수은 다음으로 물 표면장력 높아

물의 가장 중요한 특성 중 하나는 표면장력이다. 표면장력이란 액체표면의 분자들이 서로 잡아당기어 가능한 한 작은 면적을 취하려는 힘의 성질을 말한다. 소금쟁이가 물 위를 걸을 수 있는 것도 물의 표면장력 때문이다. 또한 땅 속의 뿌리에서 빨아들여진 물이 나무의 높은 꼭대기까지 올라갈 수 있는 이유도 표면장력에 기인한다.

물의 표면장력(72 mN m⁻¹)이 액체 중에서 수은 다음으로 가장 높다는 것은 매우 흥미로운 사실이다. 물을 이용한 여러 가지 응용에서, 높은 표면장력을 크게 감소시켜서 작용을 일으키는 사례가 우리 주변에서도 쉽게 관찰할 수 있다. 예를 들어 땀이나 옷의 때를 씻기 위해 사용하는 비누나 합성세제도 결국은 계면활성제가 물의 표면장력을 낮추는 역할을 하여 기름성분인 때를 떨어져 나오게 하는 것이다. 공장에서도 계면활성제를 사용하여 물의 표면장력을 낮추어 반응을 촉진하는 경우가 매우 많다. 그러나 이러한 화학적인 계면활성제는 친환경적이지 못한 경우가 종종

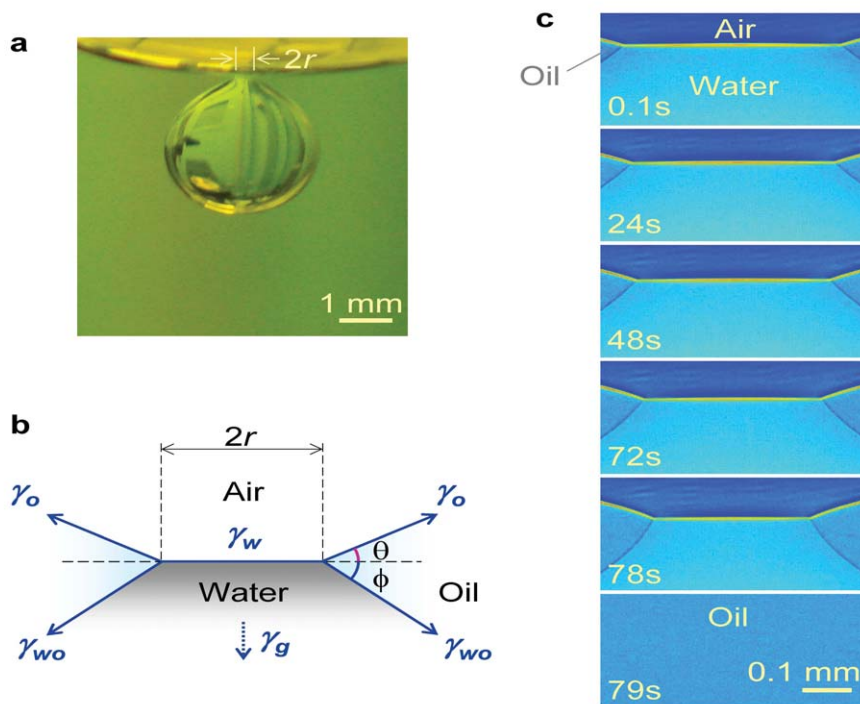
있다.

화학적인 계면활성제를 전혀 사용하지 않고 순수한 물의 표면장력을 감소시키는 방법은 이제까지 알려진 바로는 전혀 없었다. 그런 중에 포스텍 X선영상연구단에서 화학적인 계면활성제를 전혀 사용하지 않고, X선을 이용하여 순수한 물의 표면장력을 감소시키는 방법을 세계 최초로 발견한 것이다.

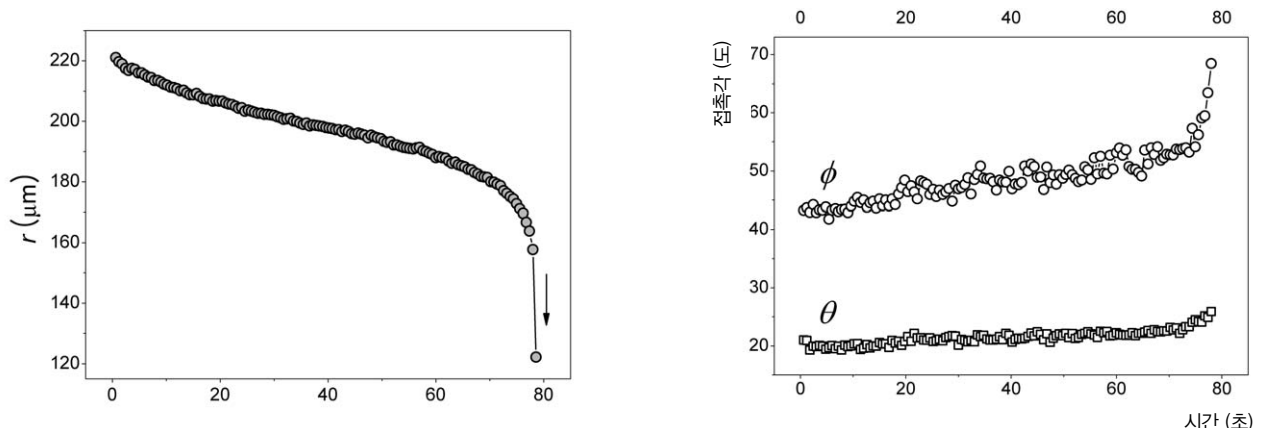
X선은 액체, 특히 물에 대한 실험적 연구에 다양하게 사용되어 왔다. 그렇지만 X선이 물의 표면장력을 변화시키리라고는 아무도 생각해 내지 못했다. 오히려 많은 과학자들은 액체의 표면장력이 X선에 의해 전혀 변화되지 않는다는 전제하에 연구를 수행해 왔다. 최근 X선원으로 많이 사용되고 있는 방사광 X선은 그 강도가 매우 높아서, 표면 장력과 같은 기본적인 특성과 그로 인한 효과를 크게 변화시킬 가능성이 없지 않았다. 그러한 가능성이 매우 중요할 수 있지만, 아무도 그러한 관점에서 연구를 수행하지 않았다.

'X선이 물방울의 표면장력 감소시킴 세계 최초 발견

이런 중에 포스텍 X선영상연구단에서 위상대비 X선현미경기술을 이용하여 고강도의 X선이 물, 특히 물방울의 표면장력을 크게 감소시킨다는 사실을 세계 최초로 발견한 것이다. 그 실험은 포항방사광 가속기 7B2 빔라인에서 행해졌다. 물에 조사시키기 위해 사용한 X선은 '결맞는' 방사광 X선으로 에너지 범위는 10~60keV였다. 이 X선은 표면장력의 변화를 X선현미경으로 관



〈그림 1〉 물의 표면장력 변화의 첫 번째 실험 : (a)실험 시점으로 물방울이 기름과 공기 사이의 계면에 매달려 있음. (b)힘의 균형. (c)X선 조사동안 물-공기 계면의 변화를 보여주는 대표적 X선현미경사진

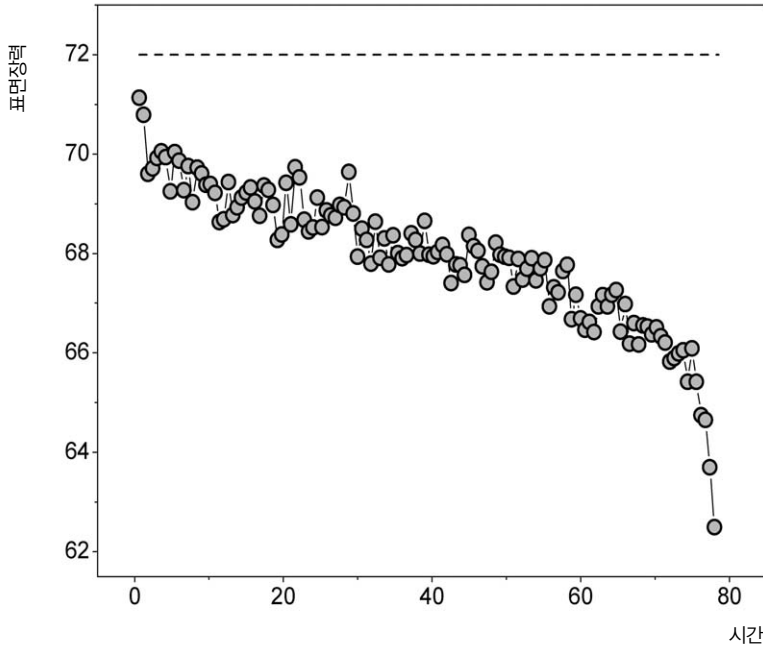


〈그림 2〉 X선 조사 시간에 따른 접촉반경 및 접촉각의 변화

찰하는데도 동시에 사용되었다.

첫 번째 실험은 〈그림 1-a〉의 사진에 나타난 바와 같이, 올리브기름 내에 순수 물방울을 넣어서 행하였다. 물방울 크기를 적당히 조절하면 중력에 의해 물방울이 떨어지지 않고 기름 표면 상단에 매달리게 할 수 있다. 그러면 〈그림 1-b〉에 도식된 바와 같이 물-공기의 계면이 만들어진다. 이 계면에 X선을 조사시키면서 동시에 이 물방울을 X선현미경기술로 촬영하였다.

〈그림 1-c〉는 X선을 조사하는 동안 공기와 물방울 간의 접촉면 반지름 R 가 점차로 감소되는 것을 보여 주고 있다. 79초 간 조사시켜주면 물방울은 중력을 견디지 못하고 떨어져버렸다. 접촉면 반지름의 감소결과가 의미하는 것은 물방울에 X선이 조사되게 되면 물-공기 사이의 표면장력 γ_w 이 감소된다는 것이다. 〈그림 2〉는 접촉면 반경 r , 그리고 기름-공기 및 물-기름 사이의 접촉각 θ 및 ϕ 값이 X선 조사시간에 따라 어떻게 변화하는지를 보여



〈그림 3〉 X선에 의해 유도된 물-공기 계면장력의 감소를 보여주는 실험적 증거. 출발은 순수물의 표면장력인 72mNm⁻¹ 값임

주고 있다. X선이 θ 값에는 별로 영향을 주지 않고 있는데 이는 기름-공기 사이의 표면장력은 거의 변하지 않고 있음을 말한다. 반면에 ϕ 값은 현저하게 증가하고 있다.

각 표면장력과 중력에 의한 수평적 및 수직적 힘의 균형을 고려하면 X선현미경으로 촬영한 물방울의 접촉각들로부터 물의 표면장력 및 물-기름 사이의 표면장력을 실험적으로 구할 수 있다. 〈그림 3〉은 X선 조사시간에 따른 물방울의 표면장력 변화를 보여준다. 놀라운 것은 X선의 조사에 의해 물방울의 표면장력이 매우 크게 감소한다는 것이다. 계면활성제를 전혀 사용하지 않았는데도 순수한 물의 표면장력이 감소한 것을 보여주는 이 데이터는 이전에 전혀 보고되지 않은 매우 중요한 결과이다.

X선영상연구단은 또 두 번째 실험으로, 〈그림 4-a〉에서 볼 수 있는 것처럼 X선 조사에 따른 물의 미세관현상 변화 연구를 수행하였다. 순수한 물을 친수성의 모세관 유리튜브(반경:300 μ m)에 넣고, X선을 조사하면서 동시에 X선현미경으로 물의 오목면을 촬영하였다.

물의 오목면 곡률반경 R를 측정하면, 영-라플라스 식을 이용하여 표면장력을 구할 수 있다. 〈그림 4-b〉는 곡률반경 R이 X선 조사시간에 따라 감소하고 있음을 보여 준다. 이는 곧 물의 표

면장력이 감소하고 있음을 말해 준다. 〈그림 4-c〉는 조사 시간에 따른 곡률반경 R 및 표면장력의 변화를 보여 준다. X선 조사시간이 증가할수록 표면장력이 크게 감소함을 알 수 있다.

안정된 자립성의 순수 물 막 제조 성공

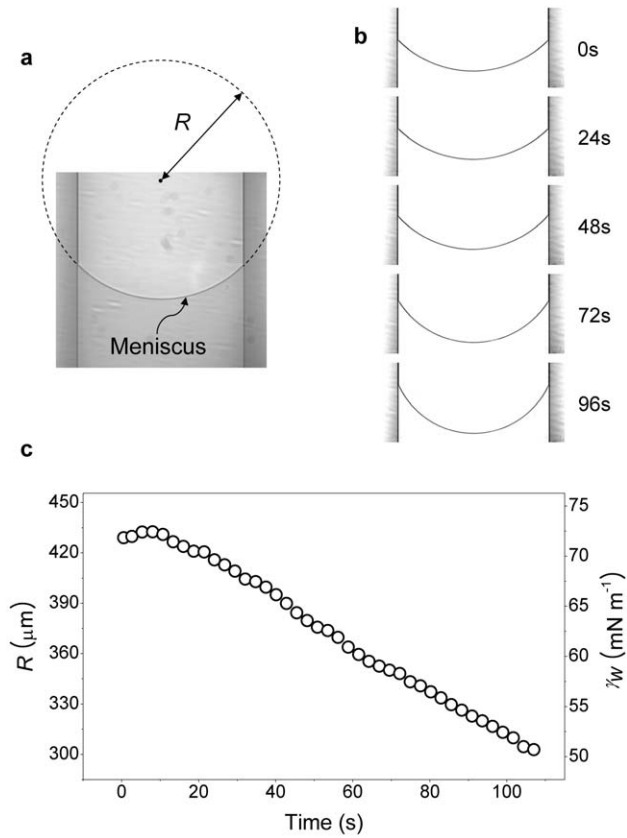
그러면 물방울의 표면장력이 감소한 현상의 원인은 무엇일까? 이 문제에 대한 답의 출발은 X선에 의한 광전효과에 있다. X선이 물에 조사되면 물의 표면에서 광전자가 떨어져 나가고, 그 결과 전자가 부족하게 되어 물의 표면이 상대적으로 양전하가 되는 것이다. 이렇게 형성된 표면전하가 표면장력에 영향을 미치리라는 것이 핵심 아이디어였다. 다음의 리프만 방정식은 표면전하, 전위차, 표면장력 사이의 상관관계를 보여준다.

여기서 ϕ 는 전위차, σ 는 표면전하밀도를

나타낸다. 연구단은 이 리프만의 방정식을 출발점으로 하고, 영-라플라스 방정식과 레일리의 불안정 한계를 고려하여, 표면장력의 변화를 X선의 조사시간의 함수로 나타내는 고전적인 모델을 만드는데 성공하였다. 다음 식은 최종적으로 구한 표면장력을 나타낸다.

여기서 w_i 는 표면장력의 초기값, σF 는 σ 의 점근선값, σR 은 레일리의 불안정 한계를 나타낸다. 〈그림 4-c〉에서 실선은 고전 모델과 실험데이터와의 최상위 맞춤에 의한 표면장력 변화를 나타낸다. 이 결과로부터 고전적 모델, 즉 표면전하 효과가 X선 조사에 의한 물의 표면장력 감소의 실험결과를 얼마나 잘 설명하고 있는지를 잘 알 수 있다.

X선영상연구단은 이 현상을 이용하여 세계에서 최초로 순수한 물로 안정한 자립성의 물막을 만드는데 성공하였다. 물의 미세구조에 대한 기초 및 응용에서의 높은 관심에도 불구하고 지금까지 안정된 자립성의 순수 물막을 만드는데 성공하지 못했다. 설명 만들었다 하더라도 그 수명이 1천분의 1초 이내로 대부분의 응용에 적합하지 못했다. 주된 이유는 물의 점성이 매우 낮은 반면, 표면장력은 매우 높아서 바로 파열해 버리기 때문이다. X선영상연구단은 모세관 유리튜브 내에서 작은 양의 물을 X선으로 조사

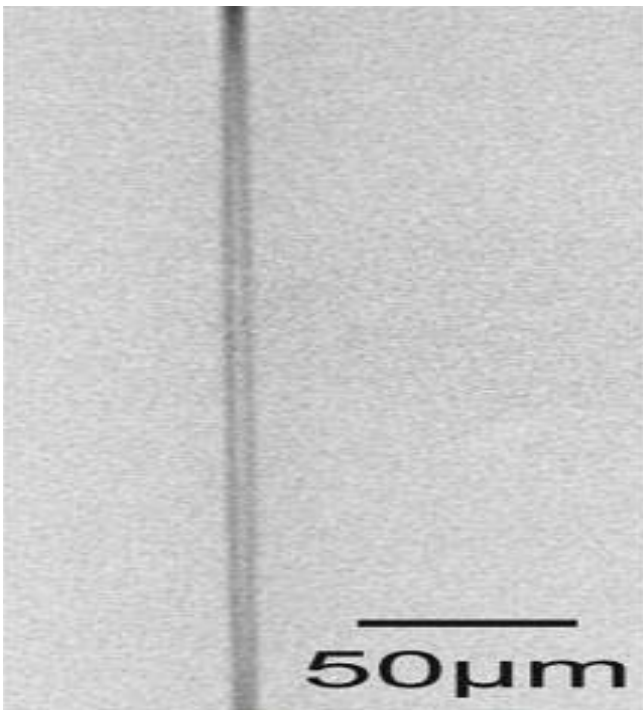


〈그림 4〉 물의 표면장력 변화의 두 번째 실험 : (a)반경 300µm 인 모세관 유리튜브 내에 물의 오목면을 보여 주는 X선현미경 사진으로 모세관의 밑은 막혀 있고 위는 열려 있음. (b)X선 조사 동안 오목면의 반경 변화. (c)X선 조사시간에 따른 오목면 반경 R 및 물-공기 표면장력의 변화. 실선은 이론적 방정식에 의한 최상위 맞춤

시켜서 순수한 물로 된 안정한 자립성의 물막을 만들 수 있었다. 〈그림 5〉는 X선영상연구단이 제작한 마이크로미터 두께(직경 : 0.5mm)의 자립성 물막의 X선현미경사진을 보여준다. X선영상연구단은 아무런 화학적 안정제를 사용하지 않고도 수명이 1시간 이상인 안정한 자립성 물막을 만드는데 성공한 것이다. 여기서도 핵심 아이디어는 X선 조사에 의한 물의 표면장력 감소현상이다.

물리, 화학, 생물학 등 광범위한 응용 기대

이번에 처음으로 발견한 'X선 조사에 의한 물의 표면장력 감소' 효과는 향후 수많은 다른 실험에 커다란 영향을 끼칠 가능성이 있다. 이번 실험에서 그 효과가 매우 컸던 한 이유는 방사광 X선의 높은 강도에 기인했다. 그러나 강도가 감소하더라도 이 효



〈그림 5〉 모세관 유리 튜브에서 X선을 조사시켜 만든 안정한 자립성 순수 물막의 X선현미경사진

과는 방사광 X선과 물의 상호작용을 포함하는 그 밖의 실험적 방법의 연구에도 적지 않은 영향을 끼칠 수 있을 것으로 보인다. 이러한 문제는 특히 차세대 방사광 가속기 및 '자유전자레이저광원'의 경우 더욱 중요하게 될 것이다.

나아가 X선 조사에 의해 표면장력을 조절할 수 있다는 가능성은 매우 광범위한 응용을 가능하게 한다. 물리, 화학, 생물학 등에서 이 효과에 의해 영향 받을 수 있는 수많은 현상의 연구를 생각해 볼 수 있다. 예컨대 기름과 물이 분리되는 경향이 있는 환경은 모두 포함이 된다. X선영상연구단이 발견한 현상은 또한 번개 부근에 있는 뇌우 구름과 같이 극도로 대전된 대기물방울에도 중요한 역할을 할 가능성이 있다. X선영상연구단이 발견한 이 현상은 X선과 물의 상호 작용을 포함하는 모든 연구에 있어서 반드시 고려되어야 할 것이다. ㉓



글쓴이는 연세대학교 금속공학과 졸업 후 KAIST 재료공학과에서 석사 및 박사학위를 받았다. 미국 엑손연구소·아르곤국립연구소 방문 연구원, NRL 연구책임자 등을 지냈으며, 현재 교과부 창의적연구진 흥사업단 X선영상연구단장 등을 겸임하고 있다.