



1157

빛으로 입자를 잡았다! 직접 만든 소형·경량 광핀셋을 이용한 마이크로 입자의 물성 측정

작품 요약 설명

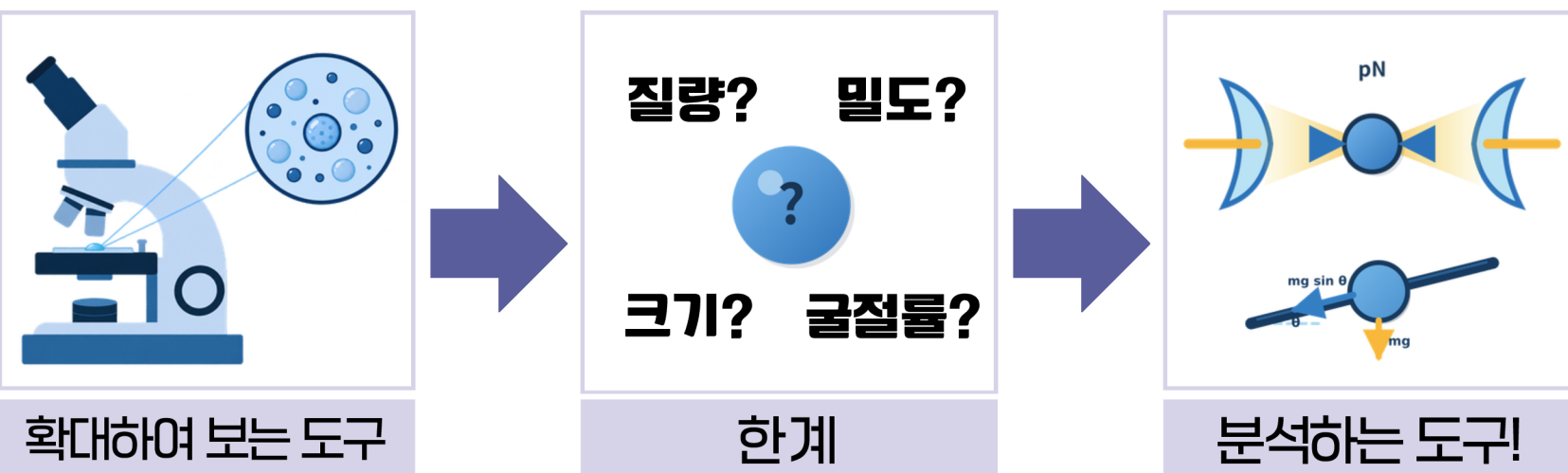
보는 현미경을 넘어선, 분석하는 현미경!

3차원 포획 양방향 광핀셋을 사용하여 빛으로 입자를 포획하고, 빛과 중력을 이용하여 입자의 크기·상대굴절률·밀도·질량을 분석한다!

출 품 자 : 박 서 현 (충북과학고등학교)
최 아 룬 (충북과학고등학교)
지도교사 : 정 도 일 (충북과학고등학교)

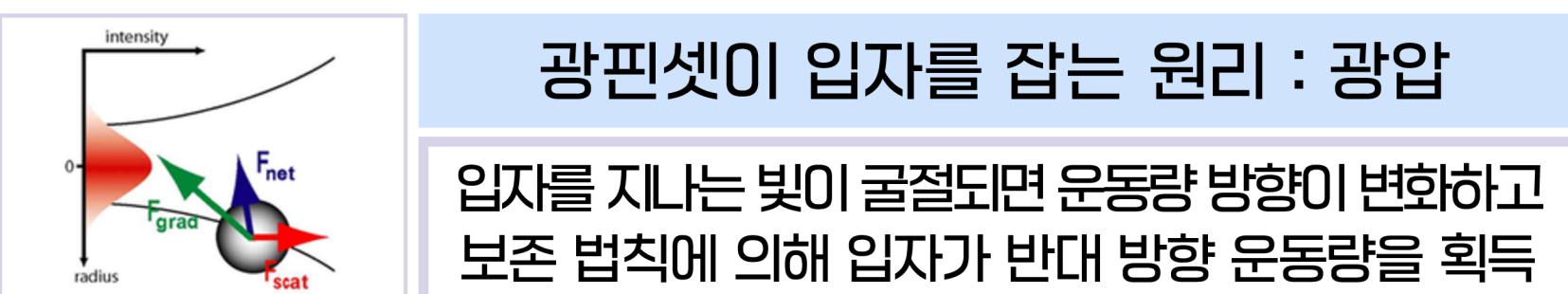
연구 내용

탐구 동기

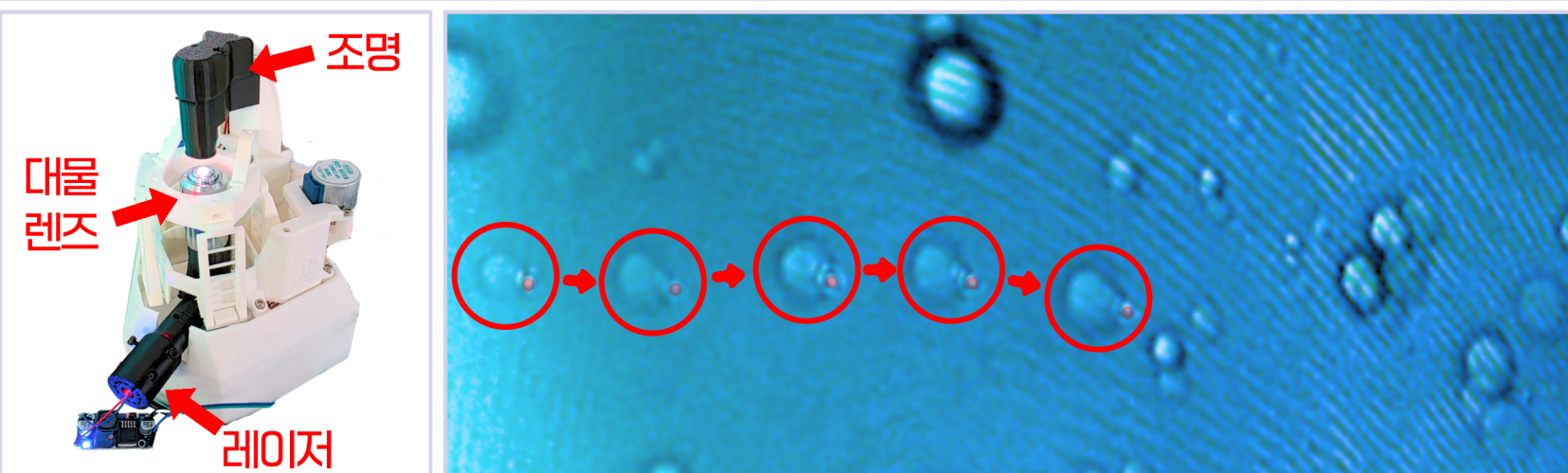


확대하여 보는 도구에 힘을 더해 분석하는 도구로 만들자!

과제 1 광핀셋 제작



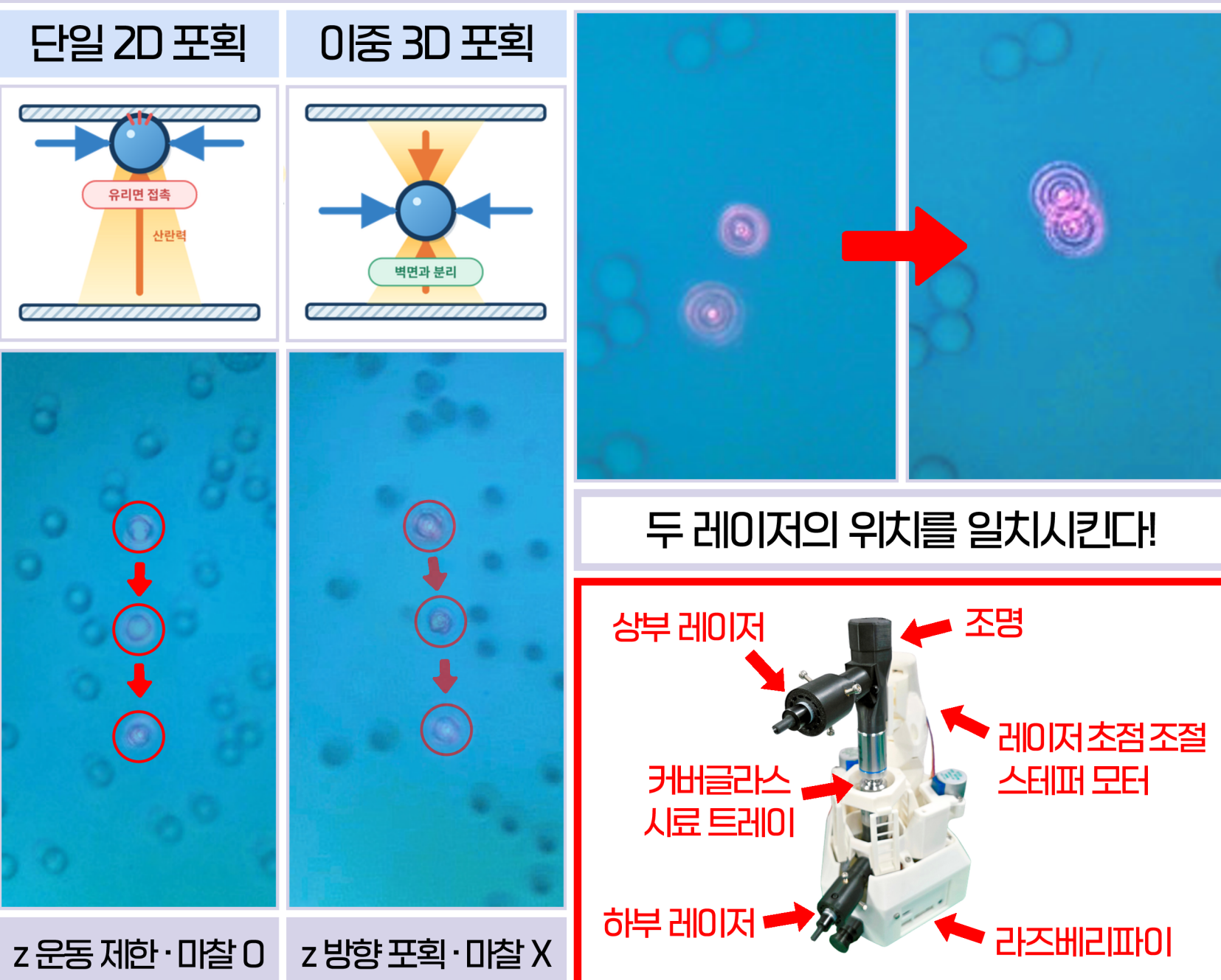
[1차] OpenFlexure 현미경 기반의 광핀셋 제작



다양한 크기의 입자를 포획하고 이동시킬 수 있는것을 확인!

[2차] 이중 레이저를 통한 3차원 포획 광핀셋 제작

벽과 마찰이 없도록 상하 대향 레이저 구조의 3차원 포집 광핀셋을 제작



과제 2 입자의 물성 측정

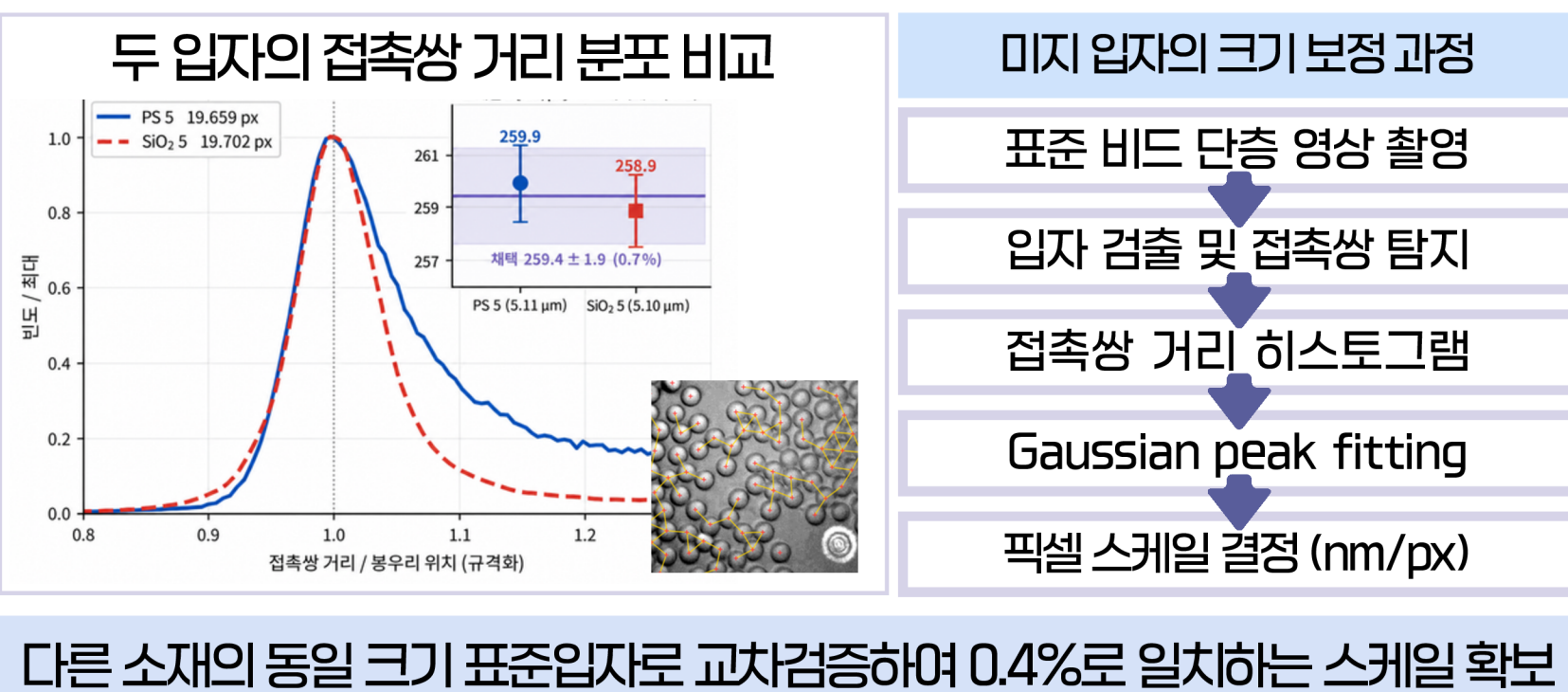
미지 입자의 크기 보정 및 측정

회절·초점 영향으로 결정하기 어려운 입자의 경계 대신 서로 접한 구형 비드의 중심 간 거리를 표준 지름으로 사용!

시료	인증 d [μm]	접촉 지름 [px]	s [nm/px]
PS 5	5.11	19.659	259.9
SiO2 5	5.10	19.702	258.9

두 소급 표준의 일치도 **0.4 %**

최종 스케일 **259.4 nm/px**
±1.9nm/px 95% 신뢰수준



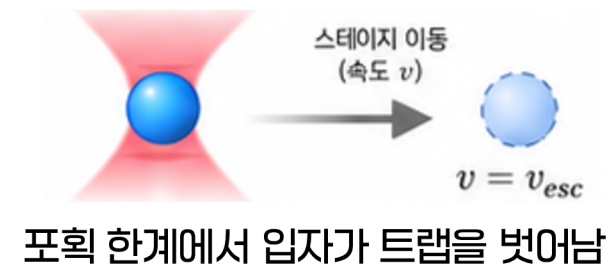
미지 입자의 굴절률 측정

탈출속도로부터 포획력 환산 및 상대 굴절률 비교

탈출속도로 최대 포획력 구하기

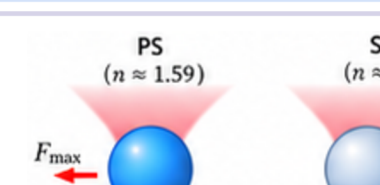
$$F_{\max} = 3\pi\eta d v_{\text{esc}}$$

η : 매질의 점도 Pa·s
 d : 입자 지름 m
 v_{esc} : 탈출 속도 m/s



Q 비와 상대 굴절률

$$F = Q \cdot n_m P / c$$



$$m = n_p / n_m$$

광학 반응과 포획력

Q : 무차원 광학 계수
 n_m : 매질의 굴절률
P : 레이저 출력 c : 빛의 속도

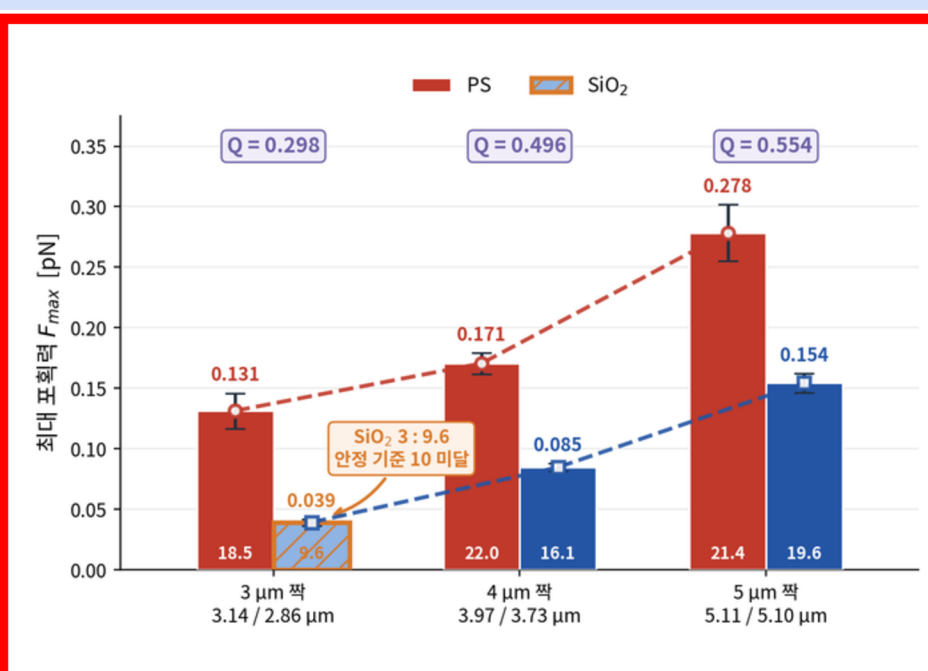
광학 반응 비 비교

$$\frac{Q_{\text{SiO2}}}{Q_{\text{PS}}} = 0.496$$

Q비와 상대굴절률

m : 상대 굴절률
 n_p : 입자의 굴절률
 n_m : 매질의 굴절률

6종 입자의 최대 포획력 정량 및 Q비 비교



핵심결과

Q=0.496 & 0.554
(이론값 = 0.5)

n=1.46 ± 0.02

같은 크기 입자 사이의 광학적 차이를 힘의 비로 비교했으며, 트랩이 얕아 안정하지 못한 SiO2 3 마이크로를 제외하면 실제 상대 굴절률과 11% 오차 안에 있음을 확인

미지 입자의 밀도 및 질량 측정

왜 새로운 측정법이 필요한가?

트랩 내부의 브라운 운동은 과감히 지배

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -\gamma \frac{dx}{dt} - kx + F_{th}(t)$$
$$\gamma \frac{dx}{dt} = -kx + F_{th}(t)$$

관성 유지 시간이 원하는 시간보다 10만배 짧다
관성항이 사라져 운동방정식에서 질량과 밀도의 정보 소실

중력을 새로운 측정 축으로 사용!

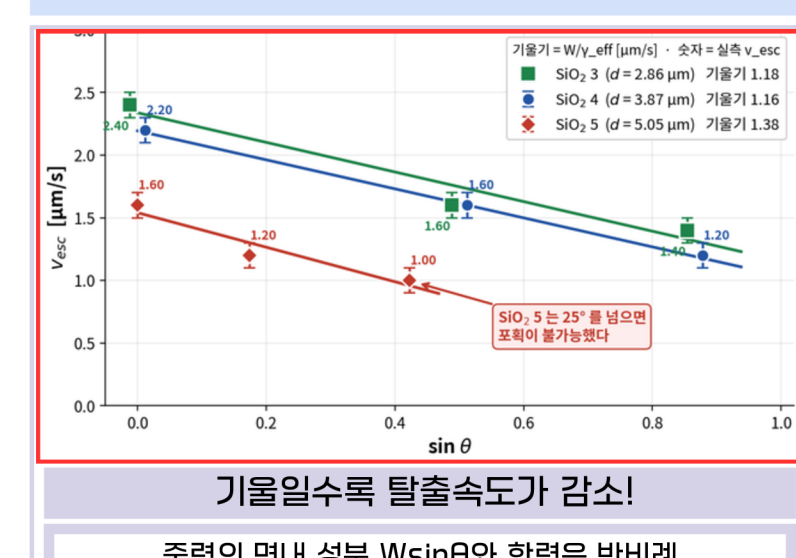
측정 원리 : 기울여서 탈출속도를 잰다!

$\theta = 0^\circ$: 중력 성분 0
 $\theta > 0^\circ$: 중력 성분 $W \sin \theta$
스테이지 이동 유체 항력 $\gamma_{\text{eff}} v_{\text{esc}}$

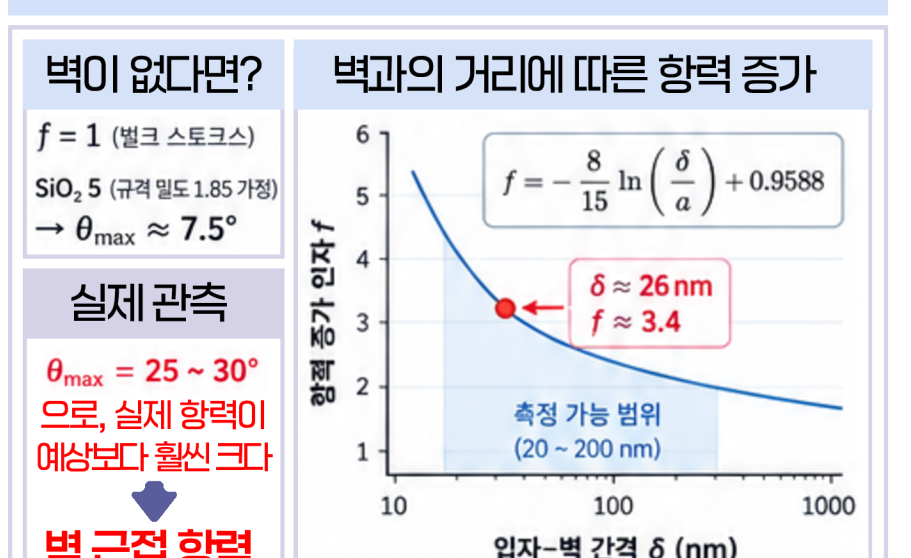
탈출 순간의 힘
 $\gamma_{\text{eff}} v_{\text{esc}}(\theta) + W \sin \theta = F_{\max}$
 $W = (\rho_p - \rho_f) V g, V = \pi d^3 / 6$
 v_{esc} : 탈출 속도

W : 부력 보정 무게
 γ_{eff} : 항력 계수
 $F_{\max}$: 트랩 최대 복원력

중력반전 분석 실험 결과



오차 발생 : 벽 근처 항력 발견



무엇을 구할 수 있는가?

$$v_{\text{esc}}(\theta) = \frac{F_{\max}}{\gamma_{\text{eff}}} - \frac{W}{\gamma_{\text{eff}}} \sin \theta = A - B \sin \theta$$

절편 $A = \frac{F_{\max}}{\gamma_{\text{eff}}}$ 기울기 $B = \frac{W}{\gamma_{\text{eff}}}$

트랩 세기 / 항력 입자의 중력 반응

탈출속도만으로 밀도를 확정할 수는 없지만 서로 다른 밀도·항력 상태를 구별할 수 있다

해석 결과

관측된 값
 $v_0(\theta = 0)$
1.60 μm/s

한계각 $\theta_{\max}$
25 ~ 30°

지름 d
5.05 μm

온도
21.1 ~ 21.9 °C

벽 근처 항력
 $f = 3.5 \pm 0.8$

벽 근처 항력
 $\rho_p = 1.75 \pm 0.3 \text{ g/cm}^3$

제조사 규격 1.85 g/cm³

다음에는 이렇게 더 정확하게!

초점 흐림으로 입자 높이 측정

입자를 멀리 띄워 한계각 재측정

유체 밀도를 바꿔 중성부력 찾기

$z \geq 10 \mu\text{m}$
 $\rightarrow f \approx 1.16$

$v = C(\rho_p - \rho_f)$
 $v = 0$ 에서 $\rho_p = \rho_f$

결론 및 활용방안

- 소형·경량 광핀셋을 직접 제작하고 입자 광포획과 탈출속도 측정
- 이웃한 입자들의 중심 간 거리를 분석하여 입자의 크기 측정
- 탈출속도로부터 환산한 포획력으로 입자의 굴절률 측정
- 중력반전 분석 측정법을 도입하여 입자의 질량·밀도 측정

저비용 단일 입자 계측

교육·연구용 소형 광핀셋 플랫폼 제공

재질 비교 및 광학 반응 분석

다양한 미세입자의 굴절률 추정 기능