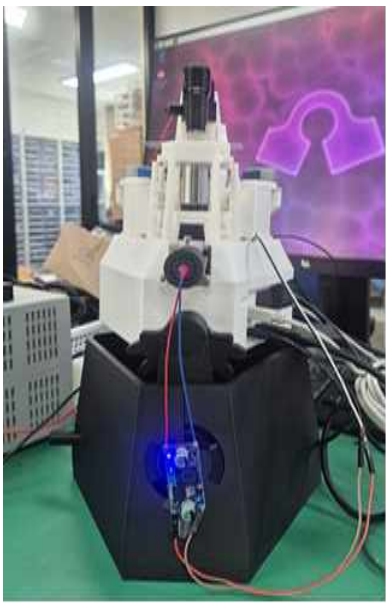
출품번호
1157

제72회 전국과학전람회

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



2026. 8. 12.

출품학생	,
지도교원	
구 분	학생부
출품부문	물리

목 차

Ⅰ. 탐구 동기 및 목적 ····· 1

Ⅱ. 이론적 배경 및 선행연구 조사 ····· 2

1. 이론적 배경 ····· 2

가. 광핀셋 (optical tweezers) ····· 2

나. 트랩 내 열적 평형 ····· 5

다. 물 속 입자의 항력과 벽 효과 ····· 6

라. 중력장에서의 침강 (침강과 확산의 관계) ····· 7

2. 선행연구 조사 ····· 9

Ⅲ. 탐구 내용 ····· 10

탐구 Ⅰ. 광핀셋 장치 제작 ····· 10

탐구 Ⅱ. 입자의 측정 물리량 선정 및 측정 방법 정립 ····· 14

1. 초기 측정법 ····· 14

2. 수정 측정법 ····· 18

탐구 Ⅲ. 이중 레이저 중력반전 광핀셋 장치 제작 ····· 24

Ⅳ. 결론 및 추가 실험 계획 ····· 27

1. 결론 ····· 27

2. 추가 실험 계획 ····· 29

Ⅴ. 참고문헌 ····· 30

표 차례

[표 1] 입자에 작용하는 힘 ····· 2
[표 2] 입자 크기에 따른 영역 구분 ····· 3
[표 3] 입자의 크기에 따른 강성과 최대복원력 ····· 4
[표 4] 초기 측정법 ····· 14
[표 5] 시료 목록 ····· 20
[표 6] nm/pixel 교정 ····· 22

그림 차례

[그림 1] 굴절에 의한 운동량 변화 ····· 2
[그림 2] 세기 구배에 의한 알짜힘 ····· 2
[그림 3] 벽까지의 거리에 따른 항력의 증가 ····· 7
[그림 4] Smith의 광핀셋 ····· 9
[그림 5] 최종 광핀셋 모듈 ····· 9

I 탐구 동기 및 목적

현미경 중 가장 쉽게 접할 수 있는 광학현미경으로 작은 물체들을 관측하다 보면 당연한 호기심이 떠오른다. '내가 보고 있는 이 물체는 무엇인가?', '얼마나 큰가?', '어떤 특성을 지니고 있는가?' 하나 단순한 구조의 광학현미경으로는 입자의 형태나 표면 특성과 같은 단편적 정보들을 확대하는 관측을 넘어서는 활동을 하기 어렵다.

왜 우리는 단순 광학현미경으로는 입자의 모습 이외의 물성을 측정할 수 없는가?

빛으로 입자의 물성을 재는 방법은 이미 놀랄 만큼 많다. 동적 광산란(DLS)은 산란광이 깜빡이는 빠르기에서 확산 속도를 읽어 입자의 크기를 알아내고, 유세포 분석기는 스쳐 지나가는 세포 하나하나의 산란과 형광을 재어 종류를 가른다. 광핀셋은 빛으로 입자를 붙잡아 힘을 측정할 수 있으며, 홀로그래피 현미경은 간섭무늬 한 장에서 굴절률과 지름을 동시에 뽑아내고, 라만 분광은 산란된 빛의 파장 변화만으로 그 물질이 무엇인지 말해 준다. 전부 빛을 쓰는 방법들이다.

그런데 정작 우리 곁에 가장 가까이 있는 광학현미경은 이 중 어느 것도 하지 못한다. 같은 빛을 쓰는데 무엇이 다른 것인가?

차이는 빛을 어느 방향으로 쓰느냐에 있다. 현미경의 빛은 일방통행이라 '어떻게 통과했는가'라는 모양과 위치의 정보만을 남긴다. 반면 질량·밀도·강성은 모양이 아니라 반응이다. 무거운지는 흔들어 봐야 알고 단단한지는 눌러 봐야 안다. 우리가 물성을 못 재는 것은 렌즈가 나빠서가 아니라 **힘을 걸 수단이 없기 때문**이며, 앞서 나열한 방법 중 광핀셋만이 '재는' 도구인 이유도 여기에 있다. 빛을 한 점에 모으면 pN 단위의 힘이 되고, 보는 도구에 힘이 더해지는 순간 현미경은 저울이 된다.

본 탐구에서는 개별 입자의 물성을, 수용액 상태에서, 저렴하게, 언제 어디서나 측정할 수 있는 시스템을 구축하고자 한다. 우리가 주목한 것은 고정밀 광핀셋 기술이었다. 본래 이 기술은 입자 하나를 잡아 정밀한 진동 분석이 가능한 만큼, 외부 진동에 매우 민감하여 제진 광학 테이블이 갖추어진 수억 원대의 전용 실험실에서만 사용할 수 있다. 이에 양방향 이중 빔으로 유리면에서 떨어진 3차원 포획을 구현하고, 장치 전체를 기울여 중력 성분을 반전시키는 차동 분석으로 진동·표류 같은 공통 오차를 상쇄하는 경량 광핀셋을 고안하였다.

Ⅱ 이론적 배경 및 선행연구 조사

1. 이론적 배경

가. 광핀셋 (optical tweezers)

광핀셋(optical tweezers)은 고도로 집속된 레이저 빔이 미세 입자에 가하는 힘을 이용해, 접촉 없이 입자를 포획·조작하는 장치다.

빛은 에너지뿐 아니라 운동량을 가진다. 광자 하나가 같은 운동량은 다음과 같다.

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

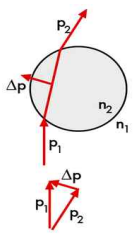
빛이 입자에 부딪혀 굴절되거나 반사되면 광자의 운동량 방향이 바뀐다. 운동량 보존 법칙에 의해 빛이 잃은 운동량만큼 입자가 반대 방향의 운동량을 얻으므로, 결과적으로 빛이 입자에 힘을 가한다. 이 힘을 광압이라 하며 다음과 같다.

$$F = \frac{dp}{dt}$$

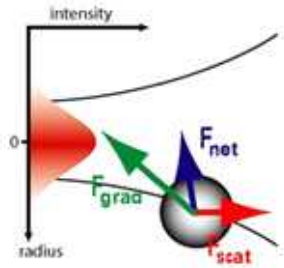
레이저 빔은 빔 중심에서 세기가 가장 강하고 가장자리로 갈수록 약해지는 정규분포를 가진다. 이 빔을 *수치구경(NA)이 큰 대물렌즈로 한 점에 집속하면 초점 주변에 급격한 빛의 세기 구배가 형성되며, 이 구배 안에 놓인 유전체 입자에는 서로 경쟁하는 두 가지 힘이 작용한다.

[표 1] 입자에 작용하는 힘

힘의 종류	발생 원인	방향 및 역할
기울기 힘 (gradient force)	빛의 세기 구배에 의해 유도 쌍극자가 받는 힘 $\vec{F} \propto \alpha \nabla \vec{E}^2$	굴절률이 매질보다 큰($n_p > n_m$) 유전체 입자를 **빛의 세기가 강한 쪽, 즉 빔 초점으로 끌어당긴다.** 포획을 만들어내는 힘이다.
산란 힘 (scattering force)	입자에 의한 광자의 산란 및 운동량 전달	빛의 **진행 방향으로 입자를 밀어낸다.** 포획을 방해하는 힘이므로, 안정적인 광 포획을 위해서는 기울기 힘이 산란 힘보다 커야 한다.



[그림 1] 굴절에 의한 운동량 변화



[그림 2] 세기 구배에 의한 알짜힘

두 힘의 구체적인 형태는 입자의 크기와 빛의 파장의 비에 따라 달라진다. 입자가 파장보다 훨씬 작은 영역에서는 입자를 하나의 유도 쌍극자로 볼 수 있으며, 이때 쌍극자의 세기를 나타내는 편극률 α는 다음과 같이 주어진다.

$$\alpha = \frac{4\pi\epsilon_0 n_m^2 r^3 (m^2-1)}{(m^2+2)}$$

($m = \frac{n_p}{n_m}$=상대굴절률, r=입자의 반지름)

위 식(Clausius-Mossotti 관계)에서 기울기 힘은 r^3, 즉 **부피에 비례**하고, 굴절률 차이가 클수록 커진다는 것을 읽을 수 있다. 입자가 파장보다 훨씬 큰 영역에서는 반대로 빛을 광선으로 취급하여, 광선이 입자에서 굴절되는 기하로 힘을 계산한다. 세 영역을 정리하면 다음과 같다.

[표 2] 입자 크기에 따른 영역 구분

영역	조건	힘의 형태	특징
레일리 영역	$r \ll \lambda$	산란 힘$\propto \frac{r^6}{\lambda^4} \cdot I$ 기울기 힘$\propto r^3 \nabla I$	편극률 α로 기술. 산란 힘이 r^6으로 급감
중간 (Mie) 영역	$r \sim \lambda$	일반화 Mie 이론 필요	두 근사가 모두 부정확한 어려운 영역
광선광학 영역	$r \gg \lambda$	광선의 굴절 기하로 계산 (효율 Q)	지름 수 μm의 마이크로 입자가 해당

본 탐구에서는 가시광($\lambda \approx 0.5$~0.7μm)으로 지름 수 마이크로미터의 입자를 다루는 경우로 광선광학 영역에 속하므로, 이후의 정량적 논의는 광선광학의 효율 인자 Q를 중심으로 전개된다.

두 힘이 평형을 이루면 입자는 빔 초점에 형성된 광학 우물에 갇힌다. 다만 우물이 너무 얕으면 입자가 열에너지에 의해 우물을 탈출하므로, 안정적인 포획을 위해서는 우물 깊이(U)가 열에너지 보다 충분히 커야 한다.

$$\frac{U}{k_B T} \gg 1$$

(U=광학 우물의 깊이, k_B=볼츠만 상수)

입자가 우물 바닥에서 작은 변위 x만큼 벗어났을 때 복원력은 훅의 법칙으로 근사되며, 이때의 비례상수를 트랩 강성 k라 한다.

$$F = -k \cdot x$$

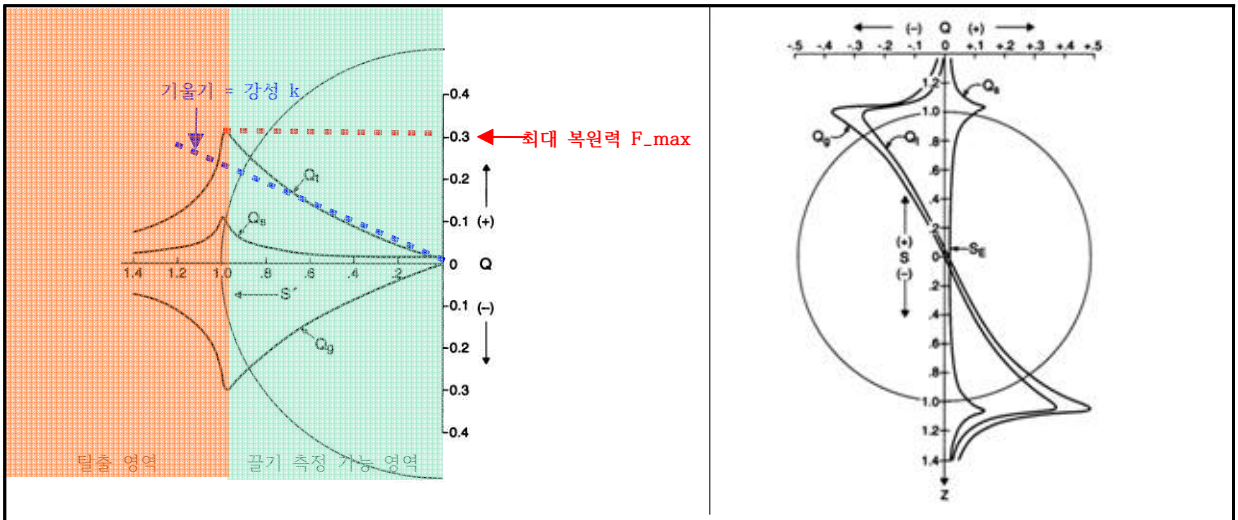
훅의 법칙은 우물 바닥 부근의 근사일 뿐이며, 힘 곡선 전체를 보면 더 많은 정보가 들어

있다. 광선광학 영역에서 트랩이 입자에 가하는 힘은 무차원 효율 Q를 써서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F(x) = \frac{n_m P}{c} \cdot Q(\frac{x}{r}, m)$$

(n_m =매질의 굴절률, P=레이저 출력, c광속)

위 인자 $\frac{n_m P}{c}$는 빛이 낼 수 있는 힘의 규모로 **장치(레이저 출력)가 정하고**, 효율 Q는 **입자(크기・굴절률)가 정한다.** 예컨대 P=5 mW이면 $\frac{n_m P}{c} \approx 22$ pN이고, Q가 수 퍼센트인 장치에서 힘은 pN 규모가 된다. 이 힘 곡선의 두 지점에서 서로 성질이 다른 두 물리량이 나온다.



출처. Ashkin (1992), "Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime", Biophysical Journal 61, 569-582

[표 3] 입자의 크기에 따른 강성과 최대복원력

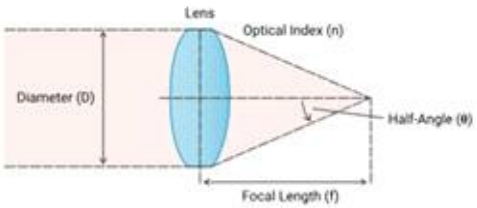
	식	특징
강성	$k = \frac{\frac{n_m P}{c} \cdot Q_0}{r}$	원점의 기울기, 크기에 반비례
최대 복원력	$F_{\max} = \frac{n_m P}{c} \cdot Q_{\max}$	꼭짓점, 크기를 포함하지 않음

즉 **강성 k는 입자가 클수록 작아지지만, 최대 복원력 $F_{\max}$는 크기와 무관**하다. 힘 곡선의 기울기와 꼭짓점이 서로 다른 정보를 담고 있다는 이 성질은, 트랩을 교정하는 여러 방법이 서로 다른 조합을 주는 이유가 된다.

또한 빔이 대물렌즈에 의해 집속될 때 형성되는 회절 한계 초점 반지름 w_0는 트랩의 공간적 크기를 결정하며, 트랩의 최대 복원력을 산정하는 기준 길이로 사용된다.

$$w_0 = 0.61 \cdot \frac{\lambda}{NA}$$

*수치구경(Numerical Aperture, NA)
대물렌즈가 빛을 얼마나 넓은 각도로 모을 수 있는지를 나타내는 값으로, 매질의 굴절률 n과 집광 반각 θ에 대해 $NA = n \cdot \sin\theta$로 정의된다. **NA가 클수록 초점이 작아져 세기 구배가 급해지고, 따라서 기울기 힘이 커진다.** 광핀셋에 고배율, 고NA 대물렌즈가 필요한 이유이다.



나. 트랩 내 열적 평형

트랩에 갇힌 입자는 정지해 있지 않다. 주변 물 분자와 끊임없이 충돌하여 무작위한 힘을 받는다. 트랩의 복원력과 이 무작위 충돌이 평형을 이루면 입자는 통계적으로 일정한 범위 안에서 진동한다. 이 진동의 크기는 **등분배 법칙**으로부터 정량적으로 예측할 수 있다. 열적 평형 상태의 계에는 각 자유도마다 평균적으로 $\frac{1}{2}k_BT$의 에너지가 할당된다. 따라서 1차원 조화 진동자의 평균 총에너지는 다음과 같다.

$$\langle E \rangle = \langle U \rangle + \langle K \rangle = \frac{1}{2}k_BT + \frac{1}{2}k_BT = k_BT$$

입자가 트랩 내에서 작은 변위로 운동할 때 복원력이 $F = -k \cdot x$로 근사되므로, 트랩의 포텐셜 에너지는 $U(x) = \frac{1}{2}k \cdot x^2$이며 이는 **1차원 조화 진동자의 포텐셜과 같은 꼴**이다. 여기에 등분배 법칙을 적용하면 위치 분산을 얻는다.

$$\langle U \rangle = \frac{1}{2}k \cdot \langle x^2 \rangle = \frac{1}{2}k_BT \Rightarrow \langle x^2 \rangle = \frac{k_BT}{k}$$

따라서 트랩 내 입자의 위치 변위의 표준편차(RMS 변위)는 다음과 같이 트랩 강성만으로 결정된다. 즉 **트랩이 단단할수록, k가 클수록 입자의 떨림은 작아진다.**

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{k_BT}{k}}$$

또한 트랩에 갇힌 입자는 트랩 강성 k와 점성 항력 계수 $\gamma = 6\pi\eta r$사이의 경쟁에 의해 특정한 **코너 주파수** f_c를 가지며, 이에 대응하는 *브라운 운동의 **상관 시간** τ가 정의된다. 이 두 값은 떨림 패턴을 직접 관측하기 위해 필요한 카메라의 시간 해상도를 결정하는 지표가 된다.

$$f_c = \frac{k}{2\pi 6\pi\eta r} \quad \tau = \frac{1}{2\pi \cdot f_c}$$

(η = 매질의 점성계수, r = 입자의 반지름, $\gamma = 6\pi\eta r$ = 점성 항력 계수)

***브라운 운동**

꽃가루와 같은 작은 입자가 주변 용매 분자의 충돌을 받아 지속적으로 흔들리는 열운동이다. 입자 반지름(r)이 작을수록 확산계수(D)가 커져 평균 제곱 변위 $\langle x^2(t)\rangle$가 증가하므로, 입자가 작을수록 빠르게 운동함을 알 수 있다. 따라서 작은 입자의 떨림을 직접 추적하려면 그만큼 빠른 시간 해상도가 요구된다.

Einstein-Smoluchowski equation	Stokes-Einstein relation
$\langle x^2(t)\rangle = 2dDt$	$D = \frac{kT}{6\pi\mu r}$
d = 차원 t = 시간 D = 확산계수	k = 볼츠만 상수 T = 온도 μ = 점도

다. 물 속 입자의 항력과 벽 효과

트랩 속 입자의 떨림과 확산을 정량적으로 다루려면, 물이 입자에 가하는 저항을 알아야 한다. 마이크로미터 입자가 물속에서 움직일 때의 *레이놀즈 수는 10^{-5}수준으로 극히 작다. 이 영역에서는 관성이 아무 역할을 하지 못하고, 항력은 속도에 정비례하는 스토크스 법칙을 따른다.

$$F_{\text{drag}} = 6\pi\eta r \cdot v = \gamma \cdot v$$

(η = 매질의 점성계수, r = 입자의 반지름, $\gamma = 6\pi\eta r$ = 점성 항력 계수)

*레이놀즈 수(Reynolds number, Re)

흐름에서 관성과 점성의 상대적 크기를 나타내는 무차원 수로, $Re = \frac{\rho v L}{\eta}$로 정의된다.

사람이 수영할 때는 $Re \approx 10^4$으로 관성이 지배하지만, 물속 마이크로 입자는 $Re \approx 10^{-5}$으로 점성이 완전히 지배한다. **같은 물이라도 작은 입자에게는 꿀처럼 끈적한 세계**가 되는 셈이며, 이 극한에서는 정지·등속이 즉시 이루어져 힘의 평형만으로 운동을 기술할 수 있다.

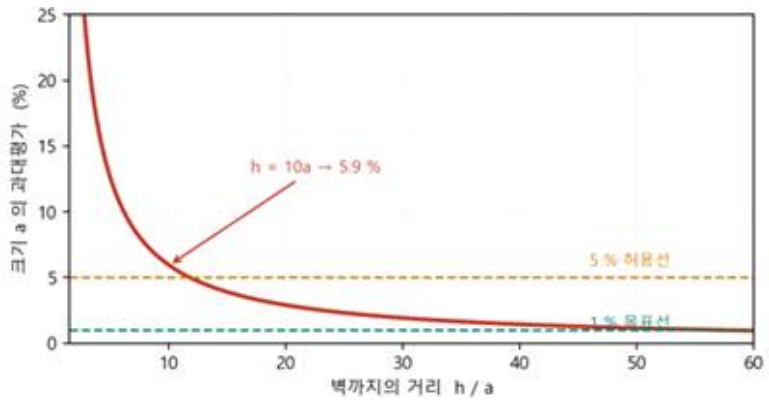


여기서 중요한 사실은, **지금 이 순간의 힘이 지금 이 순간의 속도를 결정한다**는 점이다. 미는 힘을 끊는 순간 입자는 나노초 안에 멈추며, 과거의 운동: 관성을 기억하지 못한다. 질량은 운동 방정식에 오직 관성항으로만 들어오므로, 관성이 사라진 이 세계에서는 **방정식에서 질량도 함께 사라진다** (Purcell, 1977). 힘과 속도를 아무리 정밀하게 재어도 γ만 얻을 뿐, 질량이나 밀도는 원리적으로 나타나지 않는다.

또 하나의 조건은 벽이다. 입자가 시료실 유리벽 가까이에 있으면 벽과 입자 사이의 물이 흐르기 어려워져 항력이 커진다. 이를 Faxén 보정이라 하며, 벽과 나란한 운동에 대해 다음과 같이 알려져 있다.

$$\gamma_{\parallel} = \frac{6\pi\eta r}{1 - \frac{9}{16}\frac{r}{h} + \frac{1}{8}\left(\frac{r}{h}\right)^3 - \cdots}$$

(h = 입자 중심에서 벽까지의 거리)



[그림 3] 벽까지의 거리에 따른 항력의 증가

라. 중력장에서의 침강 (침강과 확산의 관계)

물속 입자는 자기 무게에서 부력을 뺀 만큼만 아래로 당겨진다. 이 힘을 부력 무게 W라 하면, 반지름 r인 구형 입자에 대해 다음과 같다.

$$W = (\rho_p - \rho_m) \cdot \frac{4}{3}\pi r^3 \cdot g$$

(ρ_p = 입자의 밀도, ρ_m = 매질의 밀도, g = 중력가속도)

이 힘이 항력과 균형을 이루면 입자는 등속으로 가라앉는다. 관찰면이 기울기 θ만큼 기울어 있으면 화면 안에서는 면내 성분만 보이므로, 침강 속도는 다음과 같다.

$$v_s = W \cdot \frac{\sin\theta}{\gamma}$$

(θ = 관찰면의 기울기)

여기서 침강 속도와 확산계수를 나란히 놓으면 흥미로운 구조가 드러난다. **항력계수 γ가 침강 속도(분모)에도, 확산계수(분모)에도 같은 형태로 들어 있다.** 따라서 두 관측량의 비를 취하면 γ가 약분되어 사라진다.

$$\frac{v_s}{D} = W \cdot \frac{\sin\theta}{k_B T} \quad \Leftrightarrow \quad W = k_B T \cdot \frac{\frac{v_s}{D}}{\sin\theta}$$

γ가 사라졌다는 것은, **점도를 몰라도, 입자 크기를 몰라도, 벽까지의 거리를 몰라도** 이 비 하나로 부력 무게가 결정된다는 뜻이다. 벽에 가까워져 γ가 커지더라도 v_s와 D가 같은 비율로 변하기 때문이다.

2. 선행연구 조사

저비용 광핀셋

Smith 1999, Bechhoefer · Wilson 2002, Appleyard 2007 · Collins 2020

Smith는 약 $6,500 부품으로 학부 실험실 광핀셋이 가능함을 보였고, Bechhoefer는 저출력 가시광 다이오드로 비용과 안전성을 개선했다. Appleyard는 QPD를 도입해 등분배 · 스펙트럼 · 항력 세 교정을 상호 비교했고, Collins 등은 3D 프린팅 오픈소스 현미경 OpenFlexure 를 공개했다.

그러나 30년에 걸친 이 계열의 **측정 목록은 포획 · 브라운 운동 · 강성 · 힘에서 멈춘다.**



[그림 4] Smith의 광핀셋

본 연구

본 연구의 의의는 **가격이 아니라 측정 프로토콜의 개선**에있다.

하드웨어는 OpenFlexure 계열의 3D 프린팅 몸체를 토대로 삼되, 여기에 **두 번째 레이저(3차원 포획)와 기울임 기구**를 얹는다.

이를 통해 입자의 다양한 물성을 측정가능한 기기를 제작한다.



[그림 5] 최종 광핀셋 모듈

광핀셋으로 밀도 측정

Life at low Reynolds number (Purcell, AJP 1977)

마이크로 세계에서는 **관성이 소멸**한다. 미는 힘을 끊으면 입자는 원자 반지름보다 짧은 거리에서 멈추고, 정지까지 걸리는 시간은 마이크로초 이하다.

따라서 운동방정식에서 질량항이 사라지며, **항력을 이용한 어떤 실험도 질량 · 밀도에 반응하지 않는다.**

Power spectrum analysis for optical tweezers (Berg-Sørensen · Flyvbjerg, RSI 2004)

트랩 속 요동을 초당 수만 번 기록해 코너 주파수에서 강성을 읽는 정밀 교정법을 완성하였다. 필터 · 앨리어싱 · 유체역학적 기억 · 벽 효과까지 보정해 1 % 수준을 달성한다.

그러나 **수십 kHz 광검출기(QPD)** 가 전제이며, 얻는 값은 결국 $f_c = \frac{k}{2\pi\gamma}$: **항력 γ와 결합된 조합**이다.

본 연구

이 한계를 '검출기로 극복할 문제'로 바라보지 않는다.

1.**측정의 장벽**으로 받아들이고, 항력과 무관한 외부 힘인 **중력**을 실험에 들여와 우회한다.

장치를 기울여 중력의 가로 성분 $W\sin\theta$를 만들면, 질량이 관측에 등장한다.

2. **관측의 종류를 바꾼다.** 나노미터 떨림 대신 「있다/없다」 문턱 판정(탈출)과 마이크로미터 규모의 장시간 관측(자유 확산)을 쓴다

중력을 힘의 기준으로 쓰기

(Perrin 1909 · Svedberg 1940)

중력에 의한 침강과 열운동에 의한 확산을 함께 재고 **그 비를 취하면 마찰계수가 소거**된다. 페랭은 이 방법으로 아보가드로 수를, 스베드베리는 단백질 분자량을 얻었다.

다만 페랭은 **수천 개 입자의 앙상블 평균**을 썼고, 스베드베리는 수십만 g 를 만드는 **초원심분리기**가 필요했다.

본 연구

같은 소거 구조를 **단일 마이크로 입자**에 적용한다. 지구 중력 1 g 를 기울임으로 조절해 쓰므로 거대 장비가 필요 없다.

광핀셋으로 한 입자를 붙잡아 놓은 채 침강 · 확산 · 탈출을 연속으로 시켜, **입자 하나의 밀도값**을 내놓는다.

Ⅲ 탐구 내용

탐구 Ⅰ. 광핀셋 장치 제작

탐구 목표

• OpenFlexure Microscope 오픈 소스를 기반으로 3D 프린팅 경량 전동 현미경을 제작한다.
• 여기에 레이저 광경로를 추가하여, 수용액 속 마이크로 입자를 포획할 수 있는 광핀셋을 구축하고 실제 포획 여부를 검증한다.

탐구 과정

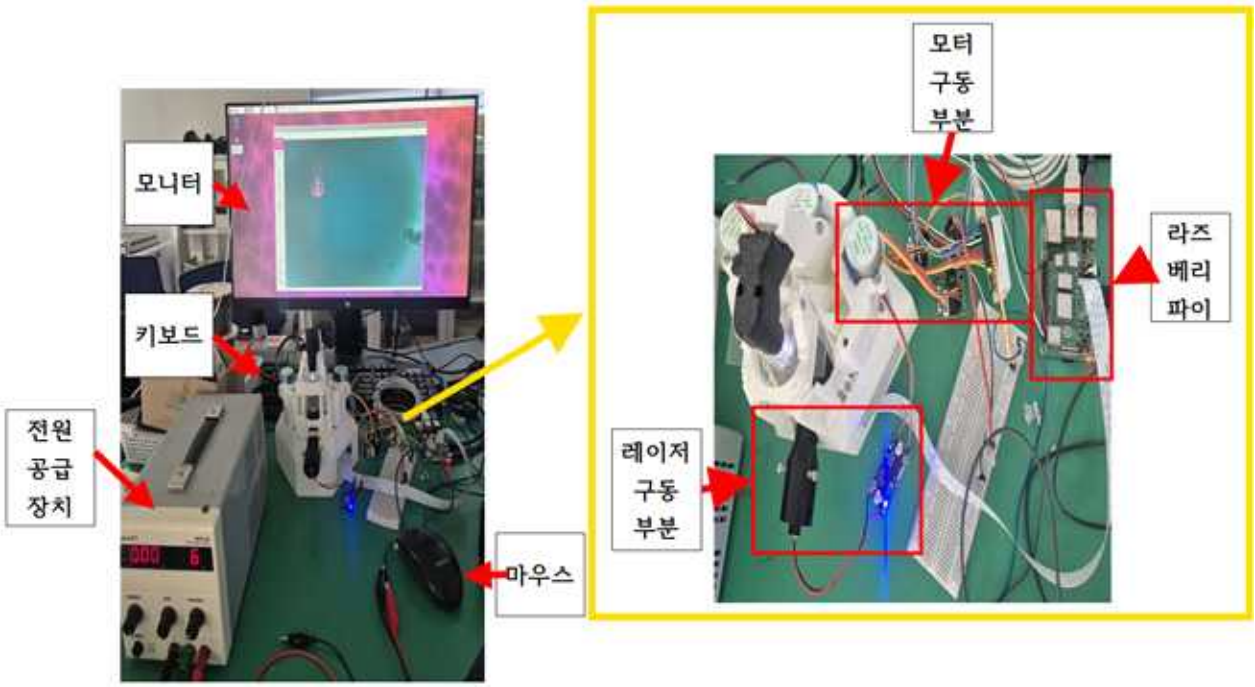
① *OpenFlexure Microscope 오픈 소스를 이용한 광핀셋 제작 및 작동 확인

*OpenFlexure Microscope
: 3D 프린팅과 오픈소스 기술을 기반으로 제작되어, 시료 이동·초점 조절·촬영이 가능한 저비용 고정밀 디지털 현미경이다. 본 탐구에서는 해당 현미경을 기반으로 광핀셋 모듈을 추가하였다.
이는 다음과 같은 이점을 제공한다.
- 라즈베리파이를 통한 카메라·모터 제어 통합
- 3D 프린팅으로 부품을 자유롭게 수정 가능
- 광핀셋의 전체 부품비를 수십만 원대로 절감

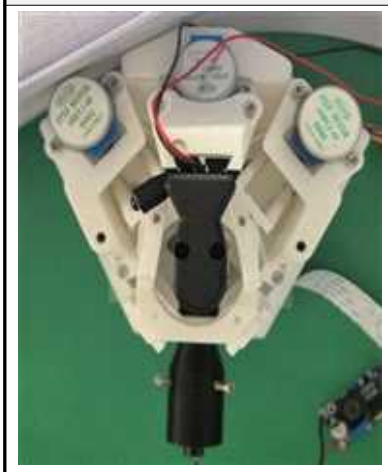


② 광경로를 설계·조립하고, 레이저 초점을 카메라 초점면에 정렬한다.
③ 트랩을 이동시키며 연속 촬영하여, 입자가 트랩을 따라 끌려오는지로 포획을 확인한다.

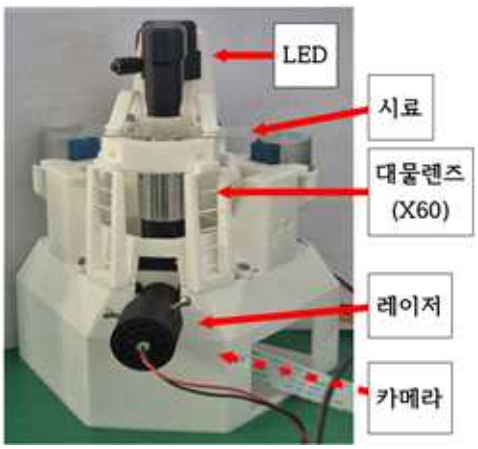
초기 제작품의 모습



전체 현미경 작동 모습



위에서 내려다본 모습



정면에서 바라본 모습



측면에서 바라본 모습

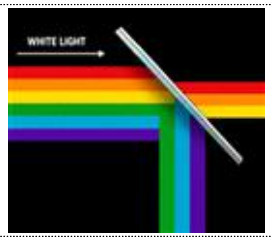
본 현미경의 구조는 일반적인 광학 현미경과는 달리 직접 눈을 대고 볼 필요가 없다. 이에 대물렌즈와 카메라 모듈이 시료 아래쪽에 위치한다. 가장 핵심이 되는 기작은 모터 가동부로, 모터의 움직임을 통해 현미경의 초점과 xy축 동이을 구현한다. 초점의 경우 현미경 몸체는 고정한 상태에서 카메라 모듈이 부착된 기둥이 마치 직사각형의 위아랫변을 뒤틀어 평행사변형을 만들듯이 상하로 움직이며 상을 찾는다. xy축 이동도 같은 원리로 이번에는 시료가 놓여진 받침대가 뒤틀리며 움직인다. 이러한 기작을 통해 실제 광학 현미경과 같은 수준의 미세한 움직임을 3D 프린터와 모터 셋, 라즈베리파이만으로 구현한다.

레이저 모듈은 세개의 나사를 통해 초기 발사 위치를 조작하고, 내부에 위치한 두 조정 나사를 통해 레이저가 반사되는 각도를 보정할 수 있다. 최종적으로는 레이저의 초점도 카메라의 초점과 같은 시점에서 상에 맺히게 된다.

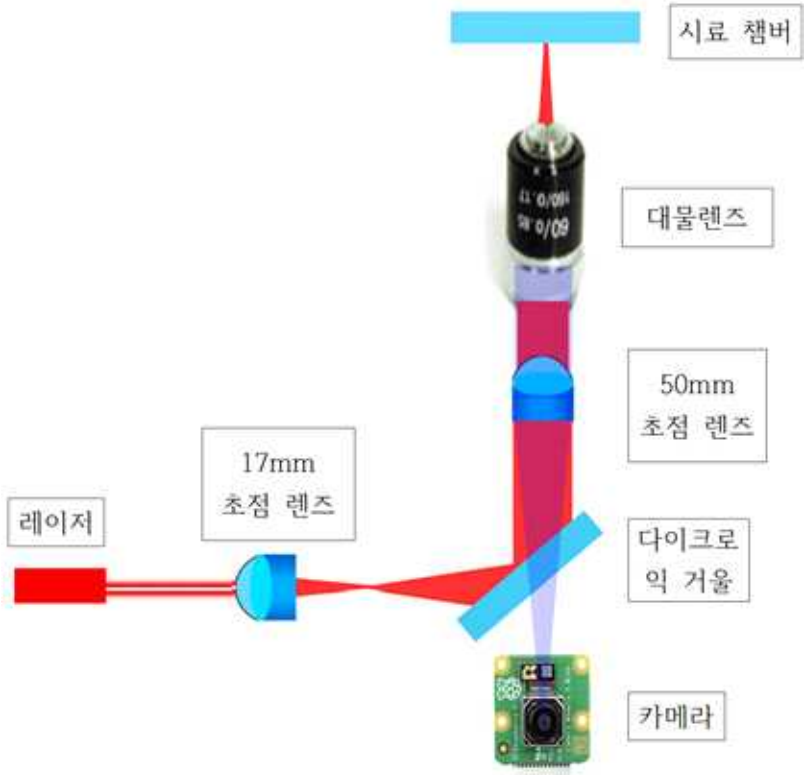
광경로 설계 및 조립

레이저에서 나온 빛은 초점 17mm 의 렌즈를 통과한다. 이후, *다이크로익 거울을 통해 경로가 꺾이게 되고, 초점 50mm 렌즈를 통과하며 평행광이 된다. 이 평행광은 대물렌즈를 가득 채우는 크기가 되며, 대물렌즈는 이 빛을 더 강하게 모아, 시료에 초점이 맞을 때 광핀셋을 형성할 수 있게 한다.

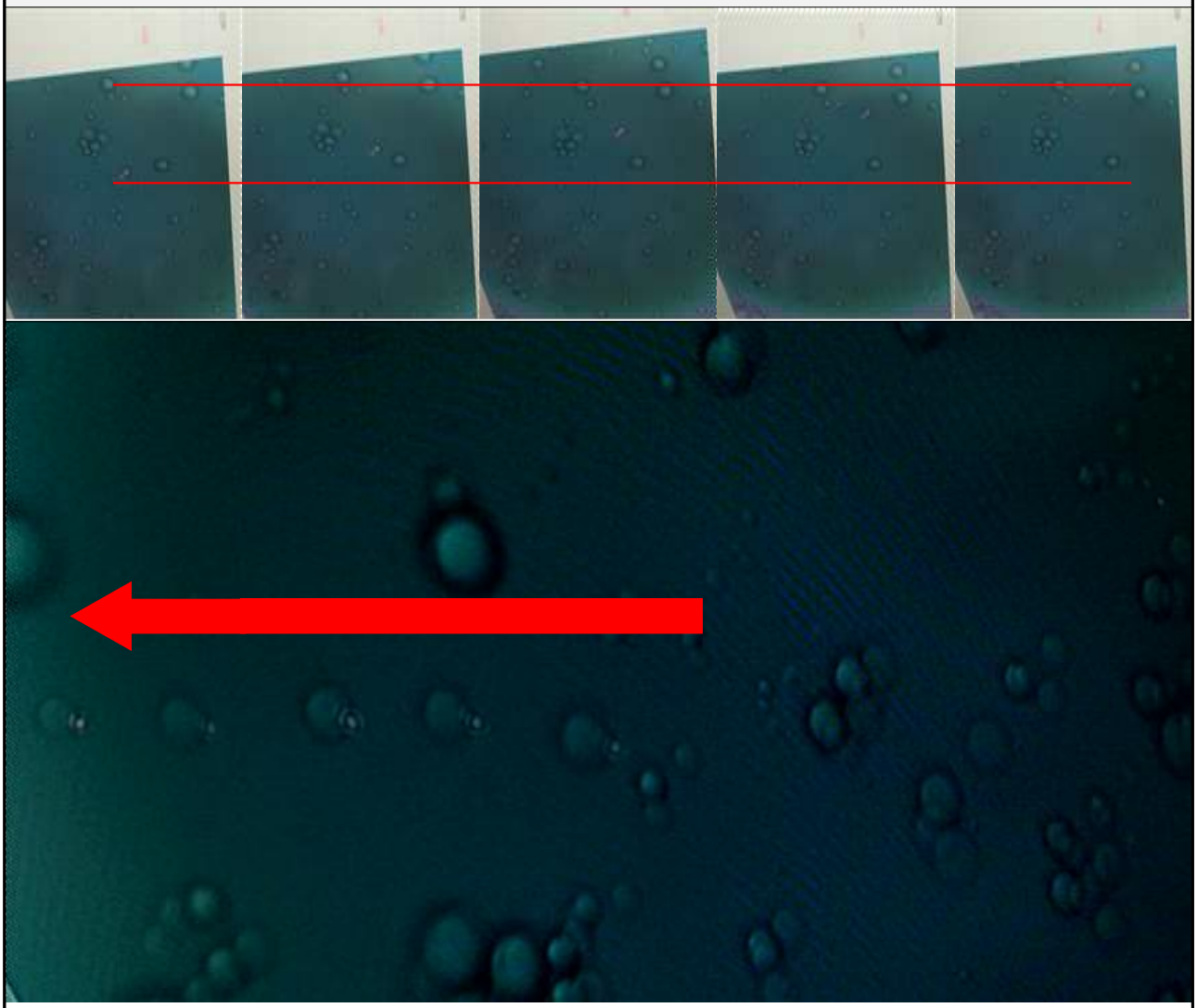
*다이크로익 거울(dichroic mirror)
: 굴절률이 다른 물질의 많은 박층으로 이루어지는 반사경으로, 특정한 색의 빛을 반사하고, 다른 색의 빛을 모두 투과하는 성질을 가지고 있다. 본 탐구에서는 붉은 파장 (635nm) 의 빛을 반사하는 성질의 다이크로익 거울을 사용하였다.



레이저(650 nm, 5 mW)
→ 17 mm 초점거리 렌즈
(볼록면이 레이저 측)
→ 첫 번째 다이크로익 거울
(수직 반사)
→ 50 mm 초점거리 렌즈
(볼록면이 시료 측)
→ 60배 대물렌즈
(NA 0.85, 시료에 빔 집속)
→ 시료 (입자 포획)
← 시료로부터의 가시광
(역방향)
→ 라즈베리파이 HQ 카메라



제작 기기 입자 포집 확인



집속된 빛 (광 트랩)의 상대적인 움직임에 따라 입자도 끌려가는 것을 관측할 수 있다
➜ **광핀셋이 제대로 입자를 포획함을 알 수 있다.**

탐구 결과

- OpenFlexure Microscope의 3D 프린팅 굴곡 기구부에 레이저·다이크로익 거울·릴레이 렌즈계를 추가하여 광핀셋을 제작하였다.
- 광 트랩을 이동시킬 때 입자가 함께 끌려오는 것이 관측되어 실제 포획이 이루어짐을 확인하였다.

탐구 Ⅱ. 입자의 측정 물리량 선정 및 측정 방법 정립

1. 초기 측정법

탐구 목표

- 표준 방법인 **트랩 내 요동 측정**이 우리 검출계로 가능한지 판정한다.

탐구 과정

① 떨림의 크기(σ_x)와 시간 규모(f_c, τ)를 계산한다.
② 카메라 사양(60 fps, 서브픽셀 10~50 nm)과 비교해 판정한다.

[표 4] 초기 측정법

내용		분석	기기 및 카메라 성능과 비교
운동 방정식	$ma = -\gamma v - kx + F_{th}(t)$ ($\gamma = 6\pi\eta r$ = 점성 항력 계수, $F_{th}(t)$ 분자 충돌에 의한 무작위 힘)	*과감쇠 운동으로, 관성시간이 약 60ns이다. 따라서 질량 m이 식에서 사라진다.	프레임 간격 16.7 ms 는 관성 시간의 **약 28만 배** 16.7 ms / 60 ns ≈ 2.8×10^5 → 카메라로는 관성 운동을 **원리적으로 볼 수 없다.** **검출기를 아무리 개선해도 질량·밀도는 나오지 않는다**
떨림의 크기	등분배 법칙에 따른 입자의 떨림 $\sigma_x = \sqrt{\frac{k_B T}{k}}$	T = 298 K k=1.45 pN/μm=1.45×10^{-6} N/m 기준 약 53 nm	시료면 환산 화소 = 1.55 μm ÷ 60배 = **25.8 nm/px 즉,** 떨림 전체가 **약 2 픽셀** 안에서 일어난다. 서브픽셀 추적 오차 $\sigma_{loc} \approx$ 10~50 nm 오차값과 측정값이 비슷함
떨림의 속도	*과감쇠 랑주뱅 방정식에 따른 트랩에 갇힌 입자의 코너 주파수 $f_c = \frac{k}{2\pi \cdot 6\pi\eta r}$ 브라운 운동의 상관 시간 $\tau = \frac{1}{2\pi f_c}$	k=1.45 pN/μm=1.45×10^{-6} N/m r = 1 μm 기준 $f_c \approx 245Hz$ $\tau \approx 6.5ms$	현미경 내의 카메라는 60 fps 로 245 Hz 보다 4배 부족 현미경 내의 카메라는 16.7ms의 노출시간을 가져, 한 프레임에 약 2.6회의 떨림이 반복된다.

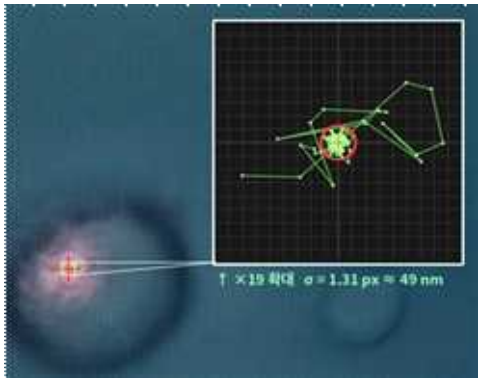
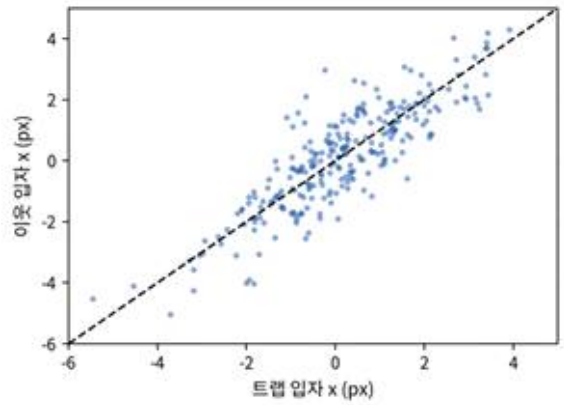
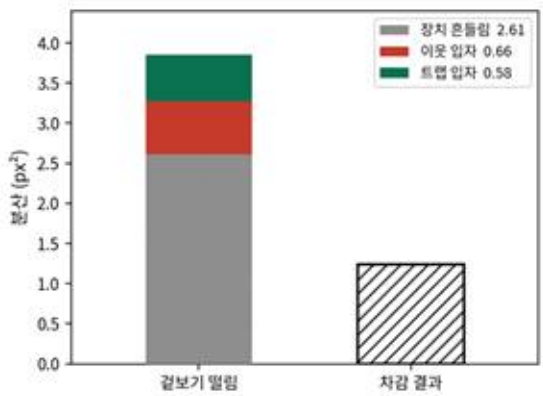
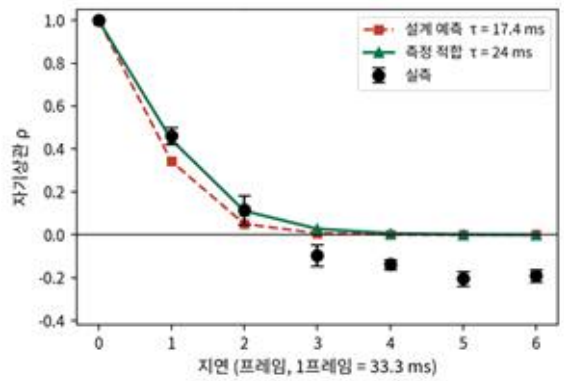
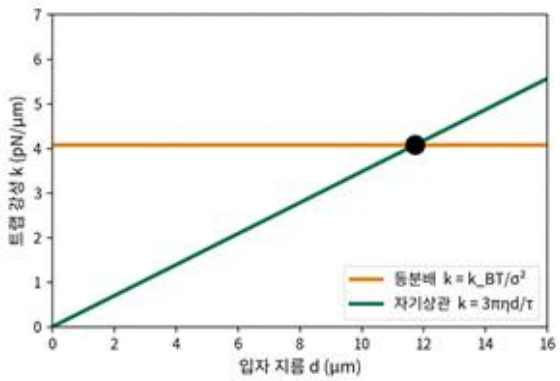
*과감쇠(overdamped) 운동

관성이 유지되는 시간 규모는 $\tau_m = \frac{m}{\gamma}$ 인데, 지름 1 μm 물속 입자의 경우 약 60 나노초로, 아래에서 볼 완화 시간(수~수십 밀리초)보다 10만 배 이상 짧기 때문이다. 따라서 마이크로 세계의 운동은 **힘의 순간 평형** $-\gamma\dot{x} - kx + F_{th} \approx 0$으로 기술되며, 이를 과감쇠(overdamped) 운동이라 한다

*과감쇠 랑주뱅 방정식(overdamped Langevin equation)

트랩에 갇힌 입자에는 트랩의 복원력, 물의 점성 항력, 물 분자의 무작위 충돌의 세가지 힘이 작용한다. 이를 뉴턴의 운동 방정식으로 쓴 것을 **랑주뱅 방정식**($ma = -\gamma v - kx + F_{th}(t)$) 이라 하고, 과감쇠 운동이므로 좌변의 관성항을 무시한 식이 과감쇠 랑주뱅 방정식이다. $\gamma v = -kx + F_{th}(t)$

코너 주파수(corner frequency)	상관시간(correlation time)
$f_c = \frac{k}{2\pi \cdot 6\pi\eta r}$	$\tau = \frac{1}{2\pi f_c}$
요동의 주파수 분포가 꺾이는 지점.	요동이 이전 상태를 잊고 새로워지는 시간. 이보다 짧은 간격으로 찍어야 떨림이 분해된다.

<table>
<tr><th colspan="3">실제 측정 과정 및 결과</th></tr>
<tr><th></th><th>측정 과정</th><th>측정 결과</th></tr>
<tr><td rowspan="2">포획
및
추적</td><td></td><td>
</td></tr>
<tr><td>3μm 입자 를 포획하고, 화면 안의
이웃 입자를 흔들림 기준으로 함께 추적했다.</td><td>서브픽셀 추적으로 트랩 중심 주위의 떨림 궤적을 얻었다. 겉보기 떨림 σ = 1.79 px</td></tr>
<tr><td rowspan="2">보정</td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>카메라는 ‘입자가 움직인 것’과 ‘장치가 흔들린 것’을 구분하지 못한다. 그래서 이웃 입자를 함께 추적해 그 좌표를 빼 주었다. 두 입자의 좌표 상관은 r = +0.81 으로 비슷한 경향성을 보였다.</td><td>σ가 1.79 → 1.11 px로 줄었다.
겉보기 떨림의 2/3(2.61 px²)는 입자가 아니라 장치 흔들림이라고 판단했지만, 이웃 입자도 떠 있어 자기 운동(0.66 px²)을 하고 있음을 고려했다.
차감 후 남은 것의 53 %가 이 오염분이다.</td></tr>
<tr><td>검증
(강성
계산)</td><td>
</td><td>
</td></tr>
</table>

검증 (강성 계산)	*자기 상관 함수의 $\rho(s)=e^{-\frac{s}{\tau}}$ 를 실측과 비교하였다. 적색 점선이 자기 상관 함수($d=3$ μm, $k=1.45$)를 통한 설계값, 흑색 점이 실측값이며, 보정 과정에서 존재하면 안되는 음수 값을 제거한것이 녹색 실선이다.	좌측의 그래프를 분석하였다. (*그래프 분석하는 법) 등분배법은 식에 항력이 없기 때문에 강성을 단독으로 준다. 자기상관의 $\tau=24$ ms 를 곱하면 $\gamma=k\tau$가 되고, $\gamma=3\pi\eta d$에서 지름이 나온다. d = k · τ / 3 π η ≈ 11 μm
결과	입자의 크기, 강성을 알 수 있지만 3μm와는 약 4 배 차이가 나는 결과가 나왔다.	

*자기상관 함수(autocorrelation function)

입자의 지금 위치와 시간 s뒤의 위치가 얼마나 닮았는지를 나타내는 함수로, 두 순간의 위치를 곱해 평균낸 것으로 정의한다. 과감쇠 랑주뱅 방정식에서 열 충격 F_{th}의 평균이 0이므로, 지금 x_0에 있는 입자의 **평균 궤적**은 $\gamma\dot{x}=-kx$의 해를 따른다.되돌아오는 속도가 남은 거리에 비례하므로 그 해는 지수함수가 되고, 따라서 자기상관도 지수적으로 감소한다.

$$\langle x(s)\rangle = x_0\cdot e^{-\frac{s}{\tau}} \quad\Rightarrow\quad C(s)=\langle x(t)\cdot x(t+s)\rangle=\langle x_0^2\rangle\cdot e^{-\frac{s}{\tau}} \quad \sigma_x=\sqrt{\frac{k_BT}{k}}$$

자기상관 함수	상관시간(correlation time)
$C(s)=\frac{k_BT}{k}\cdot e^{-\frac{s}{\tau}}$ $s=0$ 의 높이가 위치 분산 σ^2	$\tau=\frac{\gamma}{k}=\frac{3\pi\eta d}{k}$ 요동이 이전 상태를 잊는 시간

*그래프 분석하는 법

등분배법은 곡선의 **높이** C(0) =k_B T/k 에서, 자기상관법은 곡선의 **감쇠율** τ = γ/k 에서 강성을 얻는다. 둘은 서로 다른 실험이 아니라 같은 자기상관 함수의 서로 다른 특징이므로 **이론상 같은 k를 주어야 한다.** 두 값이 어긋난다면 측정된 곡선이 이론 모양 e^(−s/τ)가 아니라는 뜻이다.

등분배법(equipartition)	자기상관법(autocorrelation)
$k=\frac{k_BT}{\sigma^2}$ 곡선의 높이에서 얻는다 길이의 제곱 → 스케일 s^2이 들어감	$k=\frac{\gamma}{\tau}=\frac{3\pi\eta d}{\tau}$ 곡선의 감쇠율에서 얻는다 시간만 재므로 스케일과 무관

탐구 결과

- 스케일을 알면 등분배법이 강성을 단독으로 도출되며, 여기에 자기상관의 τ 를 곱해 지름까지 구할 수 있다.
- 하지만 약 4배의 크기 오차가 발생하였다. 따라서 이 방식으로는 검증 불가임을 알 수 있다.

전환 ➜ 오차를 줄이기 위해 카메라를 업그레이드하는 대신, 정밀한 카메라가 필요 없는 큰 신호를 본다.

2. 수정 측정법

탐구 목표

- 나노미터 떨림 대신 **마이크로미터 신호**만 쓰는 측정법을 세워, 개별 입자의 **밀도** ρ 와 트랩의 **절대 최대 힘** F_max 를 얻는다.

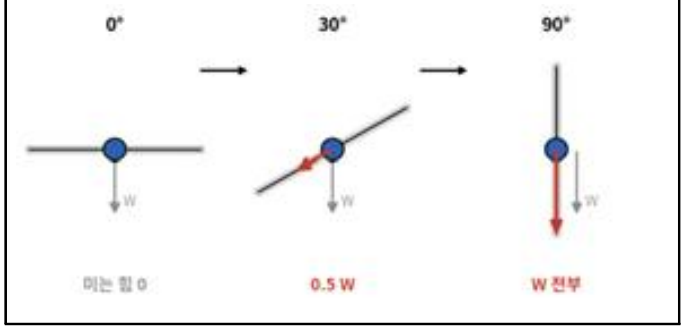
경량화, 소형화 기기이기에 가능한 핵심발상!

기울임은 눈금을 바꿀 수 있는 저울이다.

물속 입자에는 항상 부력 무게 W 가 아래로 걸려 있다. 레이저 출력·검출기 감도와 무관하게 **입자의 밀도가 정하는 절대 힘**이지만, 평소에는 바닥이 받쳐 주어 보이지 않는다. 장치를 기울이는 순간 이 힘의 가로 성분이 입자를 시야 안에서 옆으로 민다.

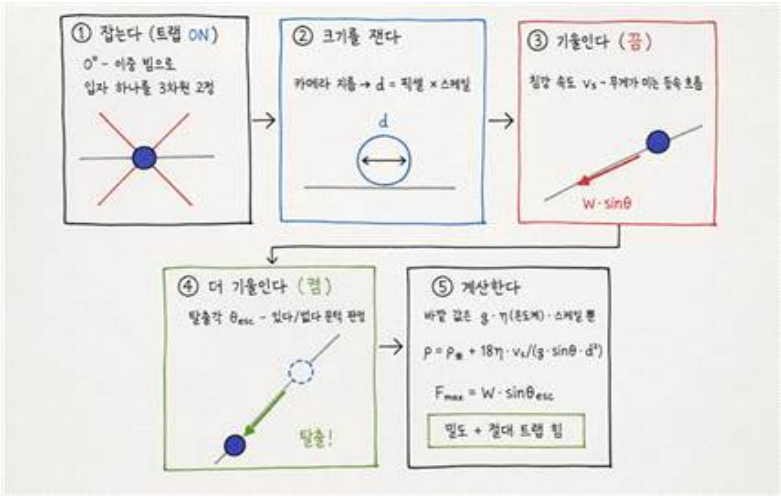
$F = W\sin\theta$

힘을 0%~100%까지 연속 조절 가능



기울임은 힘을 조절 할 수 있을 뿐만 아니라 신호의 세기도 커진다. 따라서 측정에 유리하다.

측정법 설명



① 잡는다

광핀셋을 활용해 측정하고자 하는 입자를 잡는다.

② 크기를 잰다

카메라는 픽셀로만 재므로 실제 지름은 스케일을 곱해 얻는다.

$$d = s \cdot d_{px} \quad (s = 259\text{nm/px}), \qquad \delta(\rho - \rho_{물})/(\rho - \rho_{물}) = 2\delta d/d$$

③ 기울인다 (트랩 끔)

기울이면 물속 무게 W의 빗면 성분이 입자를 민다. 마이크로 세계는 관성이 없어 입자는 가속하지 않고, 미는 힘과 물 저항(스토크스 항력)이 비긴 **일정 속도**로 흐른다. 힘 평형을 쓰고 $W = \frac{\pi}{6} d^3(\rho - \rho_{물})g$를 대입하면 밀도가 속도 하나로 표현된다.

$$W\sin\theta = 3\pi\eta d \cdot v_s \quad \Longrightarrow \quad \rho = \rho_{물} + \frac{18\eta v_s}{g\sin\theta d^2}$$

④ 더 기울인다 (트랩 켬)

트랩을 켠 채 기울이면 무게 성분과 트랩의 한계 힘이 겨룬다. 경사판 위 물건이 어느 각도에서 미끄러지듯, $W\sin\theta$가 $F_{\max}$를 넘는 문턱에서 입자가 떨어져 나간다. 이 한 줄이 **트랩 힘의 절대 교정**이다(중력이 자(尺)이므로 레이저 출력을 알 필요가 없다. 실제 탈출은 열 요동 때문에 문턱보다 조금 일찍, 확률적으로 일어난다). 이에, 반복해 평균한다.

$$F_{\max} = W\sin\theta_{esc} \quad (W \text{ 는 ③의 결과 재사용})$$

⑤ 계산한다

③의 직선 기울기와 ②의 지름을 식에 넣으면 밀도, ④의 문턱 각도를 넣으면 트랩 힘이다. 오차는 지름(×2 증폭, 10 %)이 지배하고 속도·점성·각도·스케일이 몇 % 를 보태 — 합성 약 11 % 로 예상된다.

$$\rho = \rho_{물} + \frac{18\eta v_s}{g\sin\theta d^2}, \qquad F_{\max} = W\sin\theta_{esc}$$

탐구 과정

① **크기 재기 (트랩 ON, 0°)**

포획한 입자의 겉보기 지름을 카메라로 잰다. 최적 초점에서 여러 프레임을 평균해 픽셀 지름 d_px 를 얻고, 스케일 s 를 곱해 d = s · d_px 로 환산한다.

② **침강 속도 재기 (트랩 OFF)**

장치를 θ = 15 · 30 · 45 · 60° 로 기울이고 트랩을 꺼서, 입자가 시야를 가로질러 흘러가는 속도 v_s 를 각도마다 잰다. 같은 각도를 **+θ 와 −θ 양쪽**에서 재어 평균한다 — 시료 자체의 흐름 · 표류는 부호가 안 바뀌므로 차동에서 지워진다(중력반전 차동분석).

③ **탈출각 재기 (트랩 ON, 저출력)**

입자를 다시 잡고 천천히 기울이면, 어느 각도에서 중력 성분이 트랩 최대 힘을 이겨 입자가 빠져나간다. 그 문턱 각도 θ_esc 를 «있다/없다»로 판정한다 — 위치 정밀도가 전혀 필요 없다.

④ **계산**

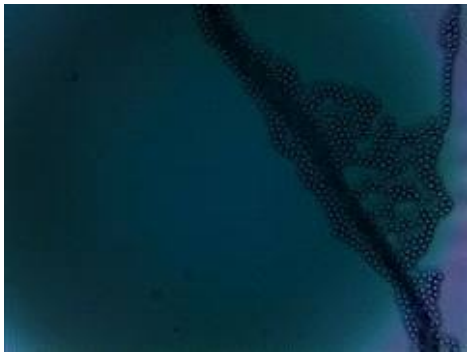
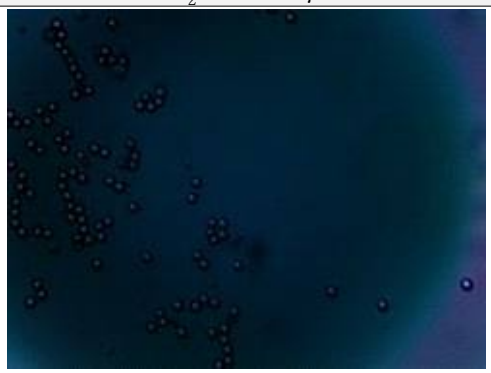
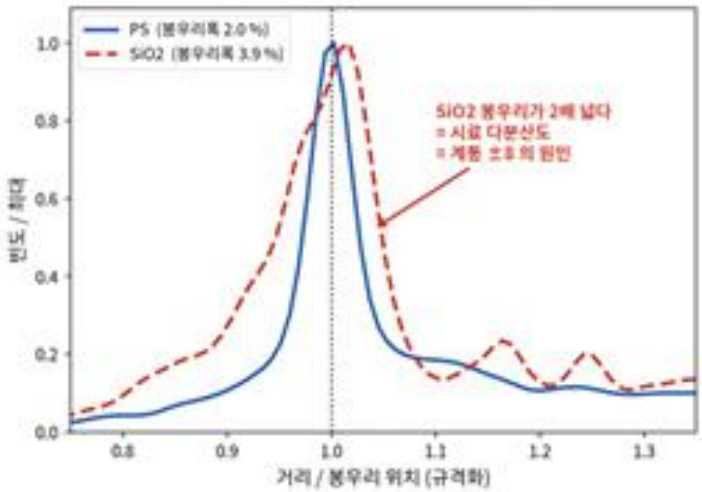
②의 기울기에서 밀도를, ③의 문턱에서 트랩 힘을 얻는다.

[표 5] 시료 목록

종류 / 특징	Polystyrene beads			SiO_2 beads		
	3μm	4μm	5μm	3μm	4μm	5μm
실측 평균 직경[μm]	2.94	0.404	-	2.94	3.97	-
SD (Standard Deviation), 표준편차[μm]	0.09	0.009	<0.1	0.09	0.06	≤0.35
CV (Coefficient of Variation), 변동계수[%]	3.0	2.2	< 2	3.0	1.5	-
고형분 함량[wt%]	10			5		
희석 매질	H_2O					
입자의 밀도(g/cm^3)	1.05			1.85		
입자의 굴절률	1.59			1.45 (0.589 μm ¦ 25 ° C)		

① **크기 재기**

<table>
<tr><td colspan="3">nm/pixel 교정</td></tr>
<tr><td colspan="3">s = 259 ± 1(통계) ± 8(계통) nm/pixel

입자 하나의 겉보기 지름은 초점에 따라 수백 nm 변하므로 자로 쓸 수 없다. 대신 맞닿은 두 입자의 중심 간 거리는 정확히 지름(3.00 μm)이다. 따라서 물이 어느정도 증발한 후, 모인 입자들을 관찰한 사진을 바탕으로 nm/pixel 교정을 진행하였다.</td></tr>
<tr><td></td><td>Polystyrene beads $3\mu m$</td><td>SiO_2 beads $5\mu m$</td></tr>
<tr><td>분석
사진
예시</td><td>
약 173개의 사진</td><td>
약 90개의 사진</td></tr>
<tr><td>분석
결과</td><td>• 입자 4.1만 개, 접촉쌍 4.8만 개
• 접촉 거리 11.57 px = 지름 3.00 μm
• 스케일 258.7 nm/px</td><td>• 입자 1.0만 개, 접촉쌍 5.6천 개
• 접촉 거리 18.89 px = 지름 5.00 μm
• 스케일 268.7 nm/pxa</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">Si02의 스케일이 Polystyrene의 스케일보다 +3.9 % 이다.</td></tr>
<tr><td>해석</td><td colspan="2">

분포 왼쪽의 절벽 같은 절단이 입자가 서로 실제로 접촉했다는 증거이고, 빨간 점선으로 표시된 SiO_2 봉우리가 2배 넓은 것이 계통 오차 ±8 의 이유이다.</td></tr>
<tr><td></td><td>주 표준.
쌍이 많아 통계 오차가 ±0.14 nm/px까지 내려간다. 봉우리도 좁다.</td><td>교차 검증용.
서로 접촉한 입자의 쌍이 polystrene 보다 확연히 적고, 사진의 개수 역시 적다. 따라서 스케일이 +3.9 % 차이나며, 이는 계통 오차 산정의 근거가 된다.</td></tr>
</table>

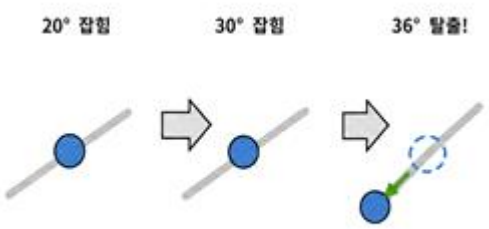
nm/pixel 교정	
활용	[표 6] nm/pixel 교정

측정	스케일 지수	식	오차	판정
트랩 강성 k (능동 구동)	0	$x = \frac{3\pi\eta v p}{\Delta x}$에서 분자·분모의 s가 약분	**±0.4 % (통계만)**	가능
침강 속도	1	$v_s = \frac{\mathrm{px}}{s} \times s$	3.1 %	충분
밀도	1	$\Delta\rho \propto W/d^3$에서 d가 s와 무관 → s^{-1}	3.1%	가능
무게	1	$W = \frac{k_B T(v_s D)}{\sin\theta}$에서 v_s와 D가 상쇄되어 s^{-1}	3.1%	충분
확산계수 D	2	MSD는 길이의 제곱 → s^2	6.2 %	다소 부정확
밀도	5	$W(s^{-1}) \div d^3(s^{-6})$ ⇒ s^5	15.6 %	매우 부정확 (스케일이 최대 오차원)

- 상대오차는 3.1%이다.
- 스케일 지수 0·1·2·3에 따라 오차 **0 → 9.6 %**
- 각도·비율 측정에서는 **소거**

② 침강 속도 재기

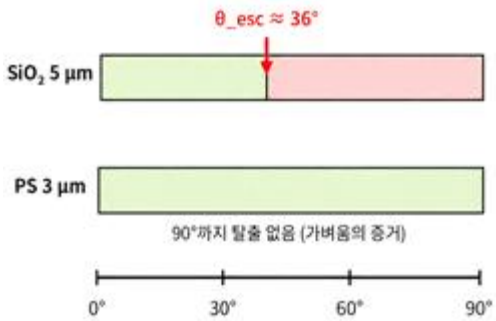
실험 방법 – 트랩을 켠채로 천천히 기울인다.



판정은 아직 트랩에 [밥혀있는가? / 탈출했는가?]로 본다. 여러번 반복하여 평균낸다.

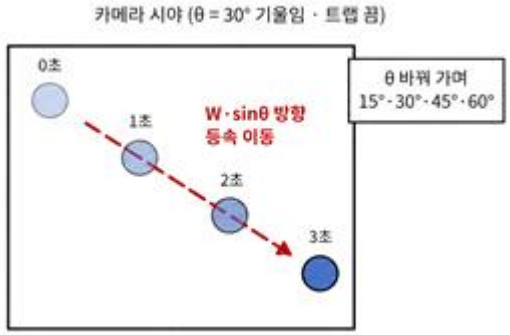
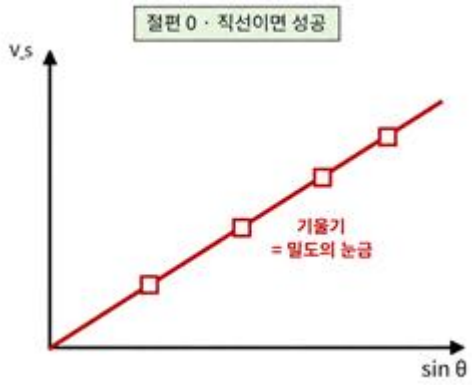
→

본 연구



$F_{\max} = W \cdot \sin\theta_{esc}$
탈출각을 찾아낸다.

③ 탈출각 재기

실험 방법 - 기울인 후, 트랩을 끄고, 침강을 확인한다.		본 연구
	→	
속도 V_s = 이동거리 % 시간 (±θ 로 양쪽 모두 여러번 측정후 평균낸다.)		

탐구 결과

측정법 확립 - 크기(카메라) → 침강(기울임, ± θ 차동) → 탈출(문턱) 세 관측을 통한 입자의 물성(크기, 굴절률, 밀도, 질량) 측정 가능

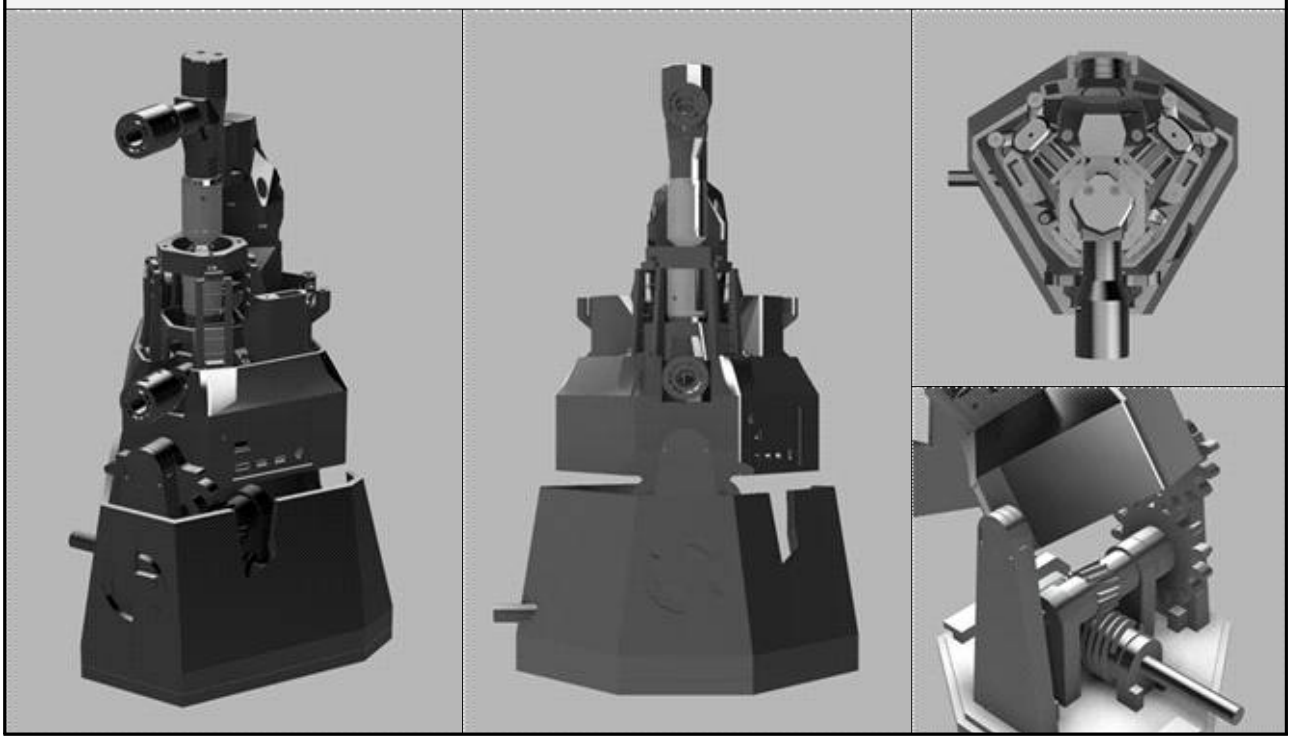
침강은 초당 수십~수백 픽셀, 탈출은 있다/없다 판정으로 모든 신호가 카메라 성능에 비해 안정적이다.

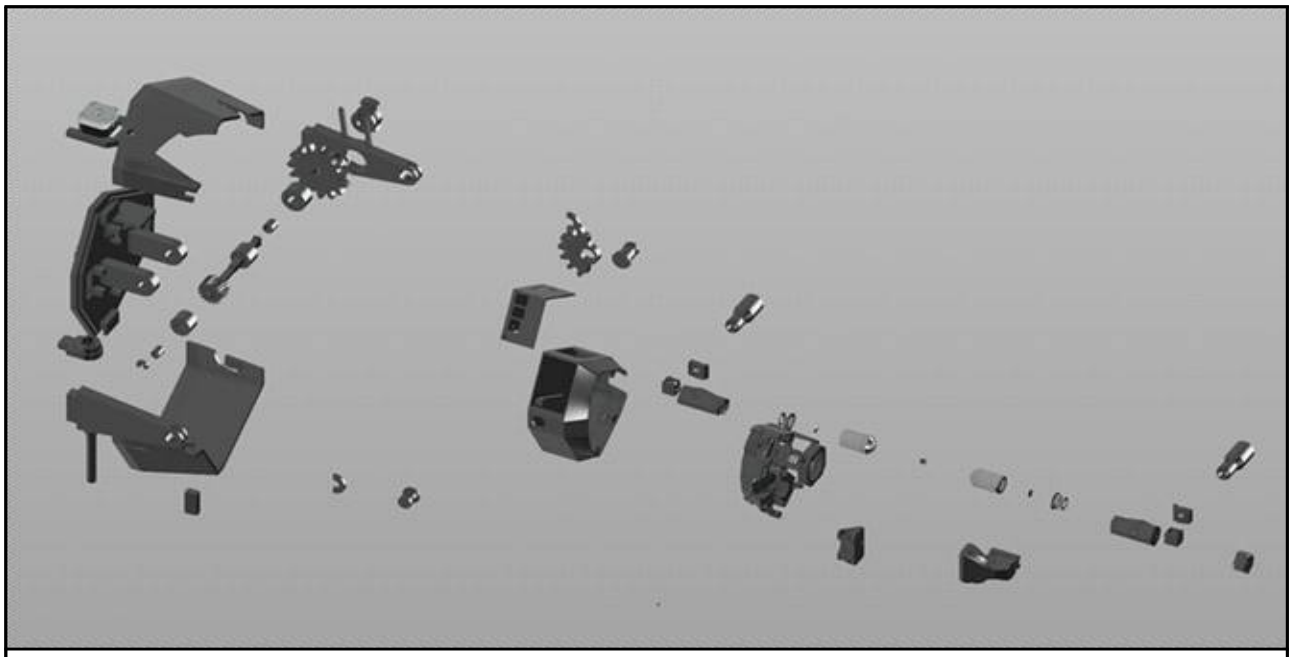
탐구 Ⅲ . 이중 레이저 중력반전 광핀셋 장치 제작

수정 제작품의 모습



설계도

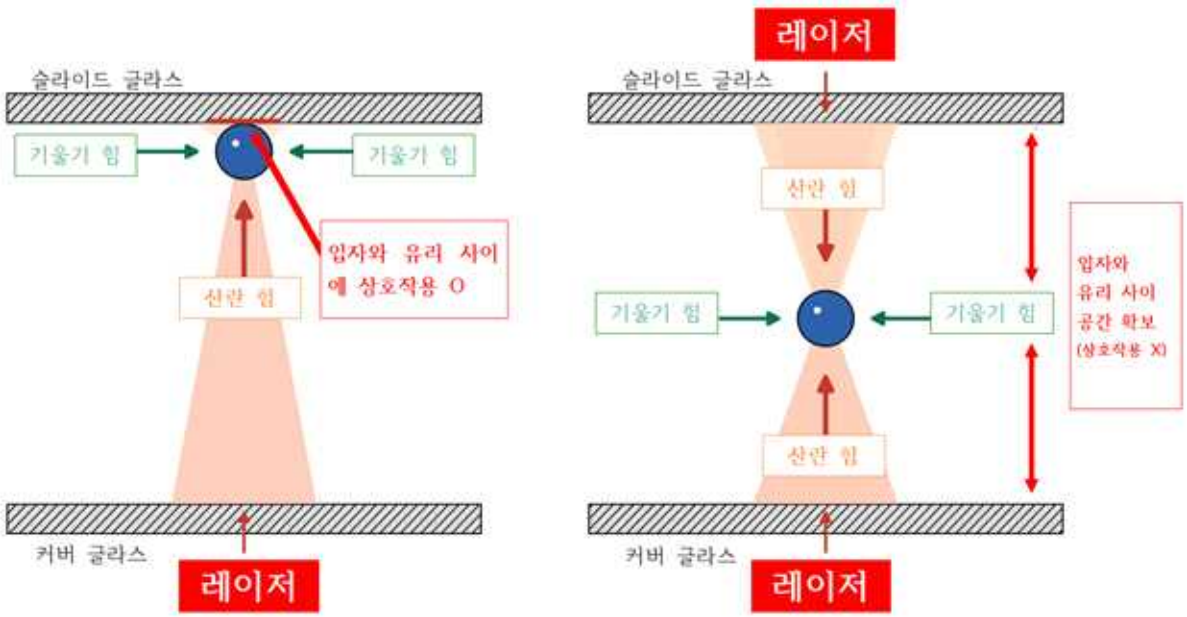




웜기어로 구성된 하단부의 조작을 통해 현미경 전체를 기울이는 구조를 증설하였다. 스테퍼 모터를 통해 정밀하게 각도를 조절할 수 있도록 하였고, 모터를 구동시킬 수 없는 상황을 대비하여 수동으로 각도를 조절할 수 있는 봉을 부착하였다. 조명이 있던 위치에 레이저를 하나 더 장착하였다.

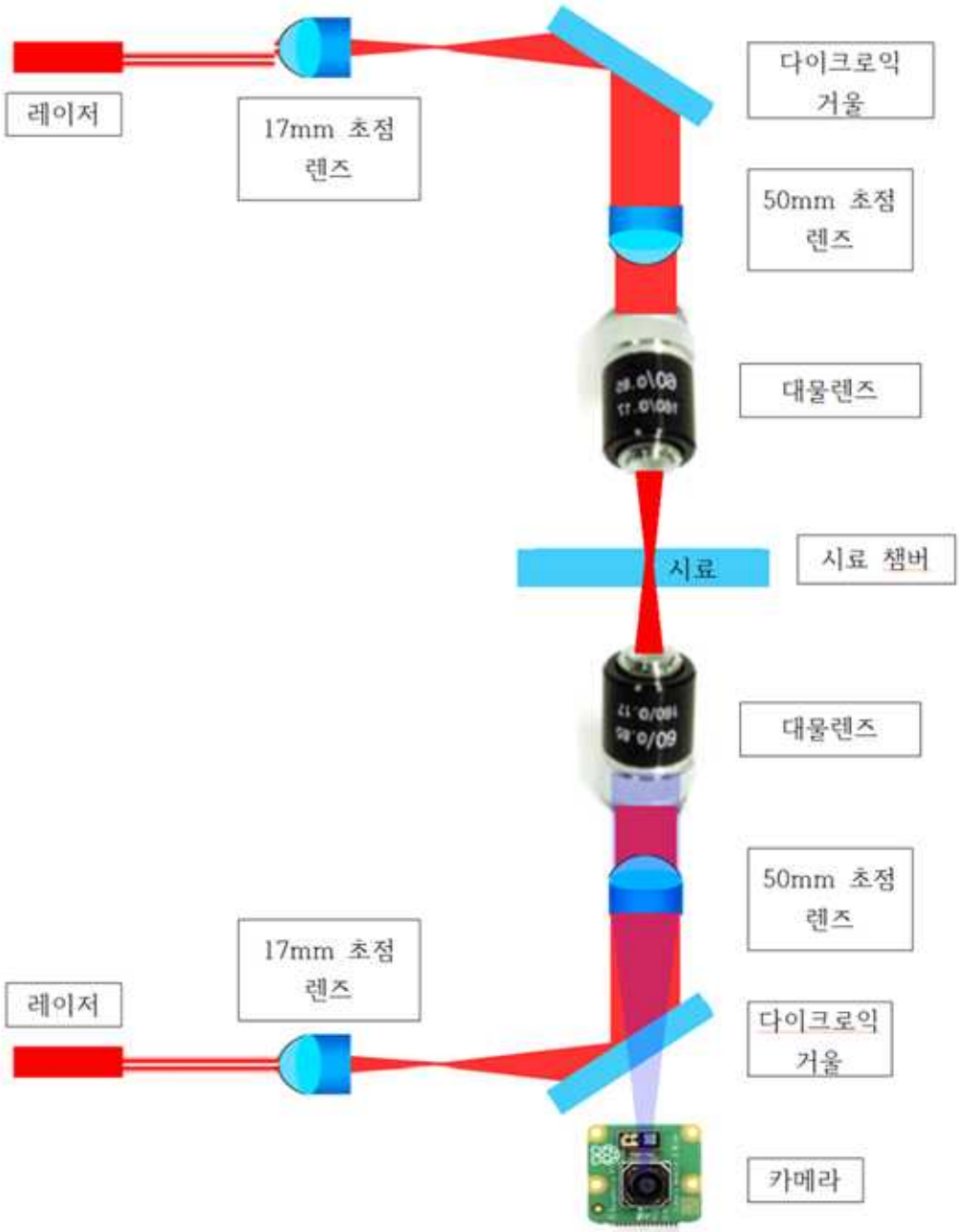
3차원 포집의 필요성

초기 제작품 (단일 빔)	수정 제작품 (양방향 이중 빔)

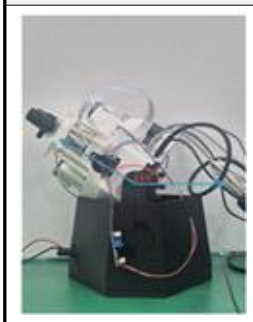
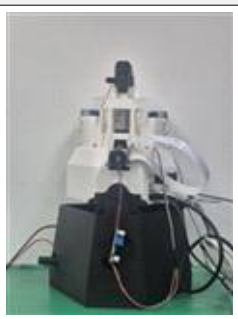


하나의 레이저만을 사용할 경우 명확한 상관관계를 계산하기 어려운 마찰이 발생하므로 물성을 파악하기 어렵다. 이에 양방향 이중 레이저 빔을 사용하여 2차원 포획에서 나아간 3차원 포획을 설계하였다.

3차원 포집을 위한 광경로 설계 및 조립



중력반전 차동분석을 위한 기기의 모습

				
-60°	-30°	0°	+30°	+60°

Ⅳ 결론 및 추가 실험 계획

1. 결론

가. 본 탐구에서는...

본 탐구에서는 **상용 광핀셋이 원리적으로 할 수 없는 측정인** 수용액 속 단일 입자의 밀도를 목표로, 측정 원리의 설계부터 장치 제작을 수행하였다.
트랩 속 브라운 운동을 실측하여 표준 방법(등분배・자기상관)을 활용한 입자의 반지름 측정은 우리 검출계에서는 약 4배 어긋나며 **판정할 수 없음**을 확인하였고, 이를 해결하기 위해 검출기의 성능을 더 좋게하는 것이 아닌 과감쇠 운동에서 질량이 사라지는 **물리적 축퇴를 해결하고자 했다.**
이에 **관측 자체를 바꾸어**, 장치를 통째로 기울여 중력을 '눈금을 바꿀 수 있는 저울'로 쓰는 새로운 측정 사슬 [크기(카메라) → 침강 속도(기울임・$\pm\theta$ 차동) → 탈출각(문턱 판정)] 을 설계하였다. 이 사슬은 밖에서 가져오는 값이 중력가속도・점성・픽셀 스케일 셋뿐인 **자기완결 측정**으로, 레이저 출력이나 검출기 감도의 교정이 필요 없다.
원리가 요구하는 두 조건(기울일 것, 3차원으로 잡을 것)에 따라 양방향 이중 빔과 0~±60° 기울임 기구를 갖춘 소형 광핀셋을 3D 프린팅으로 제작하였다.

30년간 이어진 저비용 광핀셋 연구의 측정 목록은 [포획・브라운 운동・강성・힘]에서 멈춰 있었고, 밀도를 잰 사례는 없었다. 본 탐구는 중력을 활용하여 그 목록에 **[밀도와 질량]이라는 새 줄을 추가하는 프로토콜**을 제시한다.

기존의 길	본 탐구의 길
진동을 막기 위해 제진 테이블 위에 고정한다	**가볍게 만들어 통째로 기울인다** 고정하지 않아서 가능한 측정을 연다
나노미터 떨림을 정밀 검출기로 읽는다	**마이크로미터 흐름과 «있다/없다» 문턱**을 읽는다 60 fps 카메라로 충분
힘은 레이저 출력・감도를 교정해 환산한다	**중력이 자의 역할을 한다.** $F_{max} = W \cdot \sin\theta_{esc}$ 로 힘 교정 가능
시료 «집단»의 평균 물성을 잰다	광학적으로 붙잡은 **입자 «하나»의 밀도**를 잰다

➜ 우리는 비싼 장비를를 소형화 및 경량화 하는 것에게 그치지 않았다.
싼 장비여야만 할 수 있는 측정을 설계했다. 약점 (가볍다・느리다) 을 그대로 측정 원리의 조건이 된 것이 본 탐구의 가장 큰 독창성이다.

나. 본 탐구의 확장 가능성

- **미세플라스틱의 개별 식별**

해양 미세플라스틱 분야는 이미 밀도(포화 소금물 부유 선별)를 판별 기준으로 쓰지만, «뜬다/가라앉는다»의 집단 선별에 머문다. 본 장치는 입자 **한 개의 밀도값**을 내놓으므로, 현미경 눈 식별의 오인률 문제를 정량 판별로 전진시킬 수 있다.

- **살아 있는 단일 세포의 상태 진단**

세포는 질량·부피가 제각각이어도 밀도는 0.001 g/mL 수준으로 몰려 있어, 감염·질병에 의한 미세한 변화가 밀도에서 가장 뚜렷하게 드러난다(Grover 등, PNAS 2011). 고가의 미세유로 공진기가 하던 이 측정을 열린 시료실에서 시도할 수 있다.

- **측정 교육 플랫폼**

전 부품이 공개 설계·시판품이고 모든 교정이 장치 안에서 끝나므로, «힘·크기·밀도를 스스로 교정해 재는» 학교 실험 플랫폼으로 활용 가능하다.

2. 추가 실험 계획

가. **이중 빔 광정렬**

위·아래 두 레이저의 초점을 시료면에서 정확히 겹치는 정렬을 완성한다. 아래 빔만으로 2차원 포획을 먼저 확인하고, 위 빔을 더해 입자가 유리면에서 떨어진 높이에 뜨는 것(3차원 포획)으로 정렬 완료를 판정한다. 기울였을 때 초점이 어긋나지 않는지 ±60° 전 구간에서 점검한다.

나. **입자 크기를 더 정밀히 측정할 방법의 고안**

현재는 카메라 겉보기 지름을 쓰지만, 명시야 경계는 초점에 따라 수백 nm 흔들리는 것을 스케일 보정에서 확인했다. 지름은 밀도에 두 배로 증폭되는 최대 오차원이므로, **접촉 거리 통계의 개별 입자 적용, 초점 스택을 이용한 경계 보정, 단분산 표준입자와의 비교** 등 여러 방법을 시험해 가장 정확한 크기 측정법을 계속 탐구한다.

다. **침강 속도 측정**

장치를 기울이고 트랩을 끈 뒤, 입자가 시야를 가로질러 흘러가는 영상에서 속도 v_s 를 얻는다. 같은 각도를 $+\theta$ 와 $-\theta$ 양쪽에서 재어 시료 자체의 흐름을 차동으로 지우고, v_s 대 $-\sin\theta$ 그래프가 원점을 지나는 직선이 되는지 확인한 뒤 그 기울기에서 밀도를 계산한다.

라. **탈출각 측정**

같은 입자를 저출력으로 다시 잡고 1°/s 로 천천히 기울이며, 입자가 트랩에서 빠져나가는 문턱 각도 θ_esc 를 기록한다. 탈출은 열 요동 때문에 확률적으로 일어나므로 5~10회 반복해 평균하고, F_max = W·sinθ_esc 로 트랩의 절대 힘을 얻는다. 무거운 SiO_2 만 탈출하고 가벼운 PS의 대조를 함께 확인한다.

마. **재현성 확인**

위 측정을 **같은 입자로 반복**했을 때와 **같은 로트의 다른 입자로 바꿨을 때** 결과가 일치하는지 확인한다. 날을 바꿔 재측정하여 온도·정렬 상태가 달라져도 밀도값이 유지되는지 보고, 최종적으로 표준 시료 2종(PS 1.05 · SiO_2 1.85 g/cm³)의 규격값이 오차 범위 안에서 재현되면 측정법이 확립된 것으로 판정한다.

V 참고문헌

[1] Perrin, J. (1909). Mouvement brownien et réalité moléculaire. *Annales de Chimie et de Physique*, 18, 5–114.

[2] Svedberg, T., & Pedersen, K. O. (1940). *The Ultracentrifuge*. Oxford: Clarendon Press.

[3] Ashkin, A. (1970). Acceleration and trapping of particles by radiation pressure. *Physical Review Letters*, 24(4), 156–159. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.24.156

[4] Ashkin, A., & Dziedzic, J. M. (1971). Optical levitation by radiation pressure. *Applied Physics Letters*, 19(8), 283–285. https://doi.org/10.1063/1.1653919

[5] Purcell, E. M. (1977). Life at low Reynolds number. *American Journal of Physics*, 45(1), 3–11. https://doi.org/10.1119/1.10903

[6] Ashkin, A. (1992). Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime. *Biophysical Journal*, 61(2), 569–582. https://doi.org/10.1016/S0006-3495(92)81860-X

[7] Smith, S. P., Bhalotra, S. R., Brody, A. L., Brown, B. L., Boyda, E. K., & Prentiss, M. (1999). Inexpensive optical tweezers for undergraduate laboratories. *American Journal of Physics*, 67(1), 26–35. https://doi.org/10.1119/1.19187

[8] Bechhoefer, J., & Wilson, S. (2002). Faster, cheaper, safer optical tweezers for the undergraduate laboratory. *American Journal of Physics*, 70(4), 393–400. https://doi.org/10.1119/1.1445403

[9] Berg-Sørensen, K., & Flyvbjerg, H. (2004). Power spectrum analysis for optical tweezers. *Review of Scientific Instruments*, 75(3), 594–612. https://doi.org/10.1063/1.1645654

[10] Appleyard, D. C., Vandermeulen, K. Y., Lee, H., & Lang, M. J. (2007). Optical trapping for undergraduates. *American Journal of Physics*, 75(1), 5–14. https://doi.org/10.1119/1.2366734

[11] Grover, W. H., Bryan, A. K., Diez-Silva, M., Suresh, S., Higgins, J. M., & Manalis, S. R. (2011). Measuring single-cell density. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(27), 10992–10996. https://doi.org/10.1073/pnas.1104651108

[12] Collins, J. T., Knapper, J., Stirling, J., Mduda, J., Mkindi, C., Mayagaya, V., et al. (2020). Robotic microscopy for everyone: the OpenFlexure microscope. *Biomedical Optics Express*, 11(5), 2447–2460. https://doi.org/10.1364/BOE.385729

[13] AI 활용에 관하여: 본 탐구는 여러 가지 AI 도구를 적극적으로 활용하였다. 자료 조사 뿐만 아니라 이론 공부, 공식 유도, 그래프 작성, 실험 결과 분석 등 탐구 전반에 걸쳐 매우 적극적으로 ai를 활용하였고 필요한 도구를 ai 코딩 에이전트의 도움을 받아 제작하여 활용하였다. 최종 문서 작성에 있어서도 초안 작성과 필요한 그림 생성에 ai를 활용하였다. 그러나 이 모든 작업은 탐구자의 주도적인 요구로 이루어졌으며 ai가 제공한 결과물을 검증하고 신뢰성을 판단하고 선택해서 사용하고 우리탐구의 맥락에 맞게 수정을 요구하는 등 일련의 행동은 탐구자의 몫이었다.