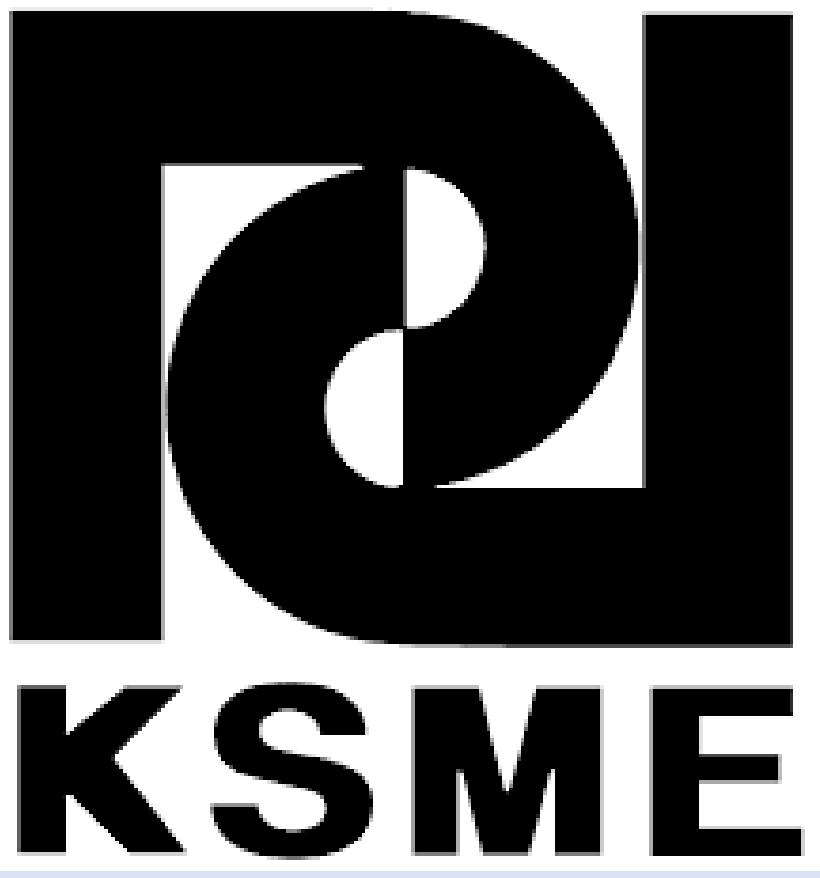




초저비용 3점 굽힘 시험기 개발 및 3D 프린팅 충전율에 따른 기계적 물성 효율 분석

서울대학교 기계공학부 박상원



1. 연구 배경 및 목적

- 연구 배경
 - 3D 프린팅 시 충전율은 강도와 경제성을 결정하는 핵심 변수임 [2].
 - 기존 만능재료시험기(UTM)는 고가이며 접근성이 낮아, 학생 연구용 간이 장비 개발이 필요함 [1].
 - 3점 굽힘 시험기는 보의 양단을 지지하고 중앙에 하중을 가해, 시편의 굽힘 강도와 강성을 평가하는 대표적인 기계 시험임 [1].
- 목적
 - 물 추 방식의 초저비용 3점 굽힘 시험기 설계 및 제작.
 - 충전율에 따른 PLA 시편의 최대굽힘응력, 강성(탄성계수) 비교.
 - 강도 대비 출력 효율(재료 소모량, 시간)이 좋은 최적 충전율 도출.

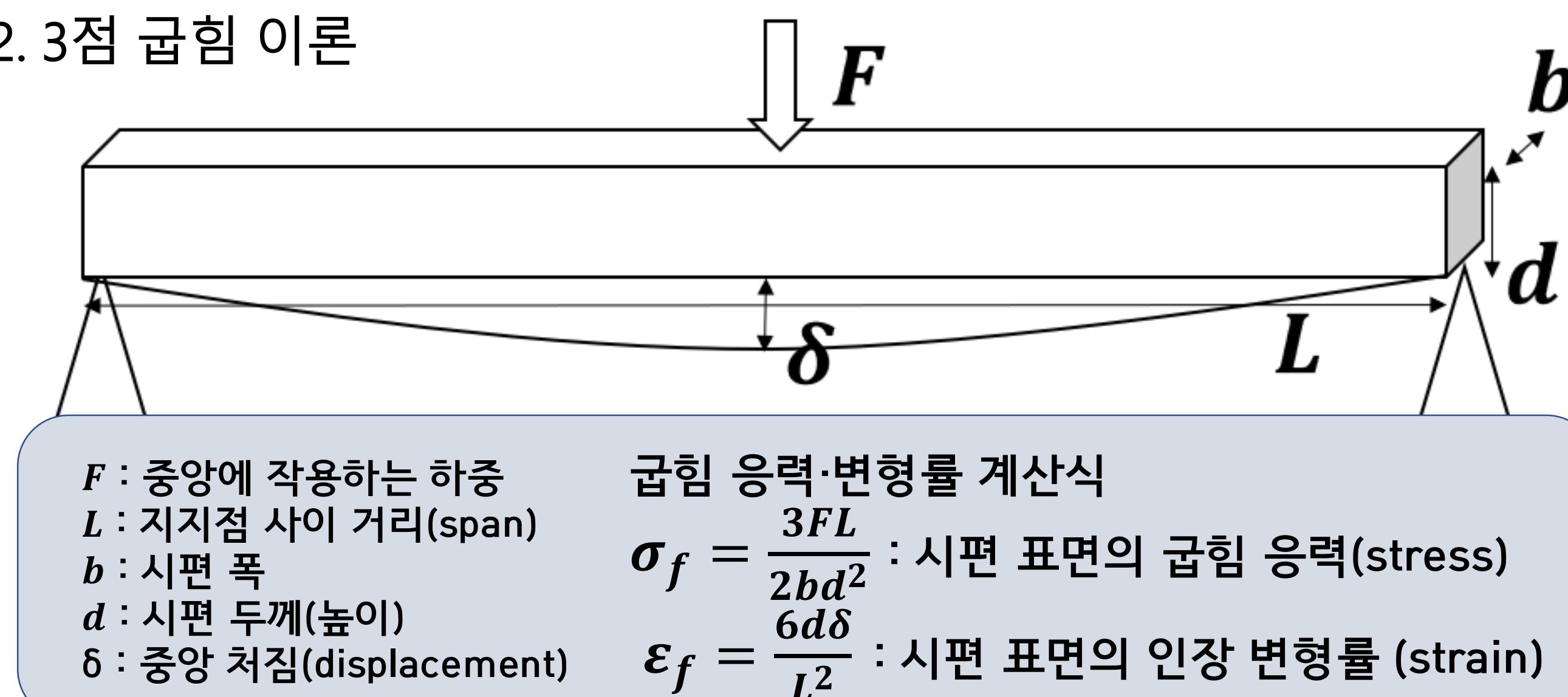
항목	상용 만형시험기 (UTM)	본 연구 (간이 시험기)
비용 (Cost)	수천만 원 ~ 수억 원	약 4만 원
접근성 (Access)	전문가 전용, 설치 공간 필요	학생 제작 가능, 탁상형
데이터 시스템	제조사 전용 S/W	ROS 2 기반 오픈 S/W
핵심 기능	고정밀 다양한 물성 측정	핵심 물성(탄성계수/항복강도) 측정

2. 연구 방법 및 이론

1. 실험 설계 (변인 통제)

- 조작변인: 시편 내부 채움 밀도(충전율) 4종
→ 40%, 60%, 80%, 100%
- 종속변인:
 - 최대 굽힘 응력 σ_y (기계적 강도)
 - 초기 탄성구간 기울기 E (굽힘 탄성계수, 강성)
 - 단위 질량당 강도(효율성, MPa/g)
- 통제변인
 - 소재(PLA), 시편 치수와 적층 방향, 내부 채움 패턴, 레이어 높이(0.4 mm), 출력 온도/속도 등은 동일하게 유지.

2. 3점 굽힘 이론

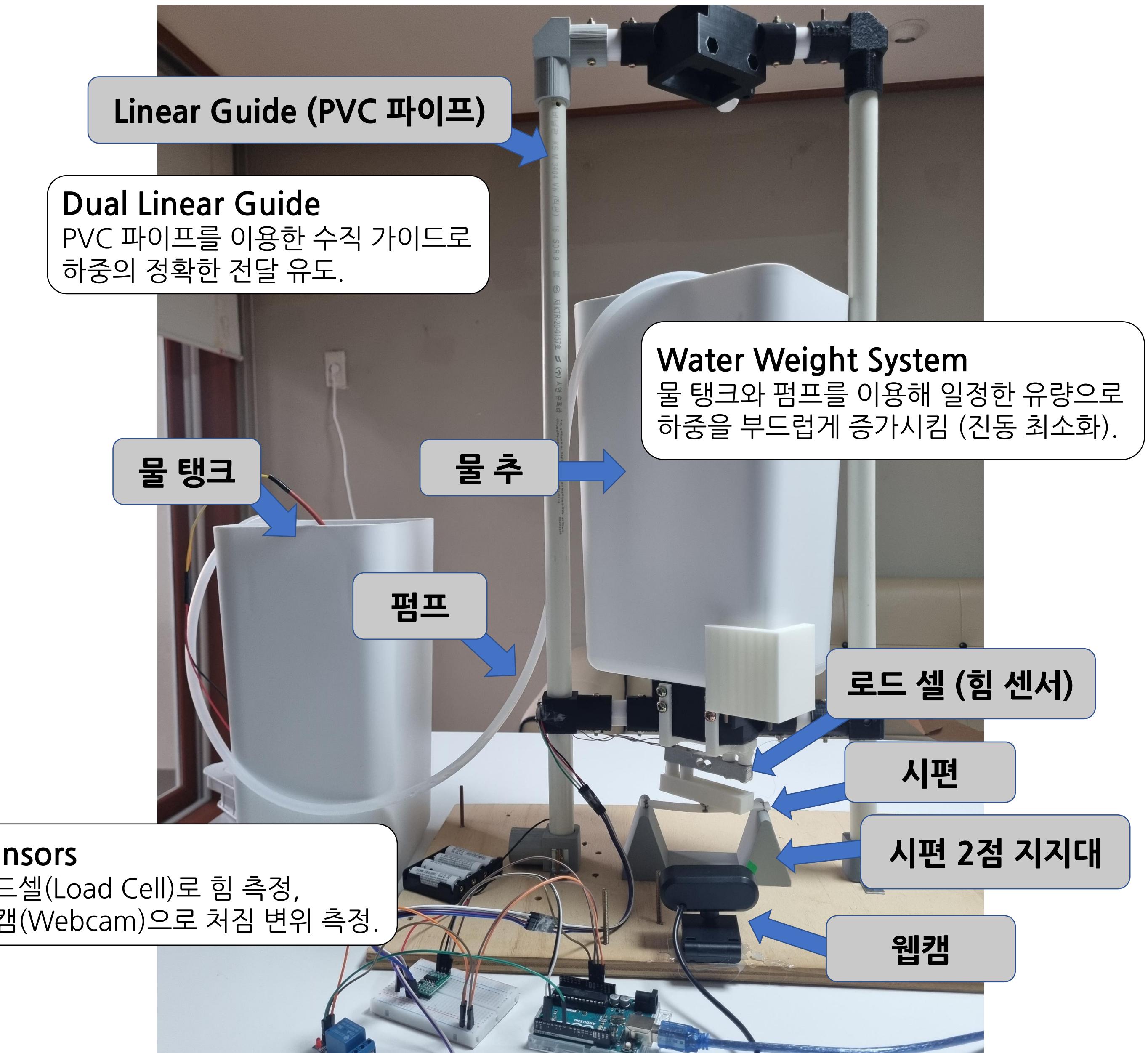


3. 데이터 처리 및 노이즈 제거

- 로드셀과 웹캠으로 얻은 시간-하중-변위 데이터를 3점 굽힘 식을 이용해 stress(응력)-strain(변형률) 데이터로 변환.
- 축을 일정 간격으로 나눠 각 구간의 중앙값을 사용하고, Savitzky-Golay 필터를 적용하여 노이즈를 줄인 stress-strain 곡선을 얻음.

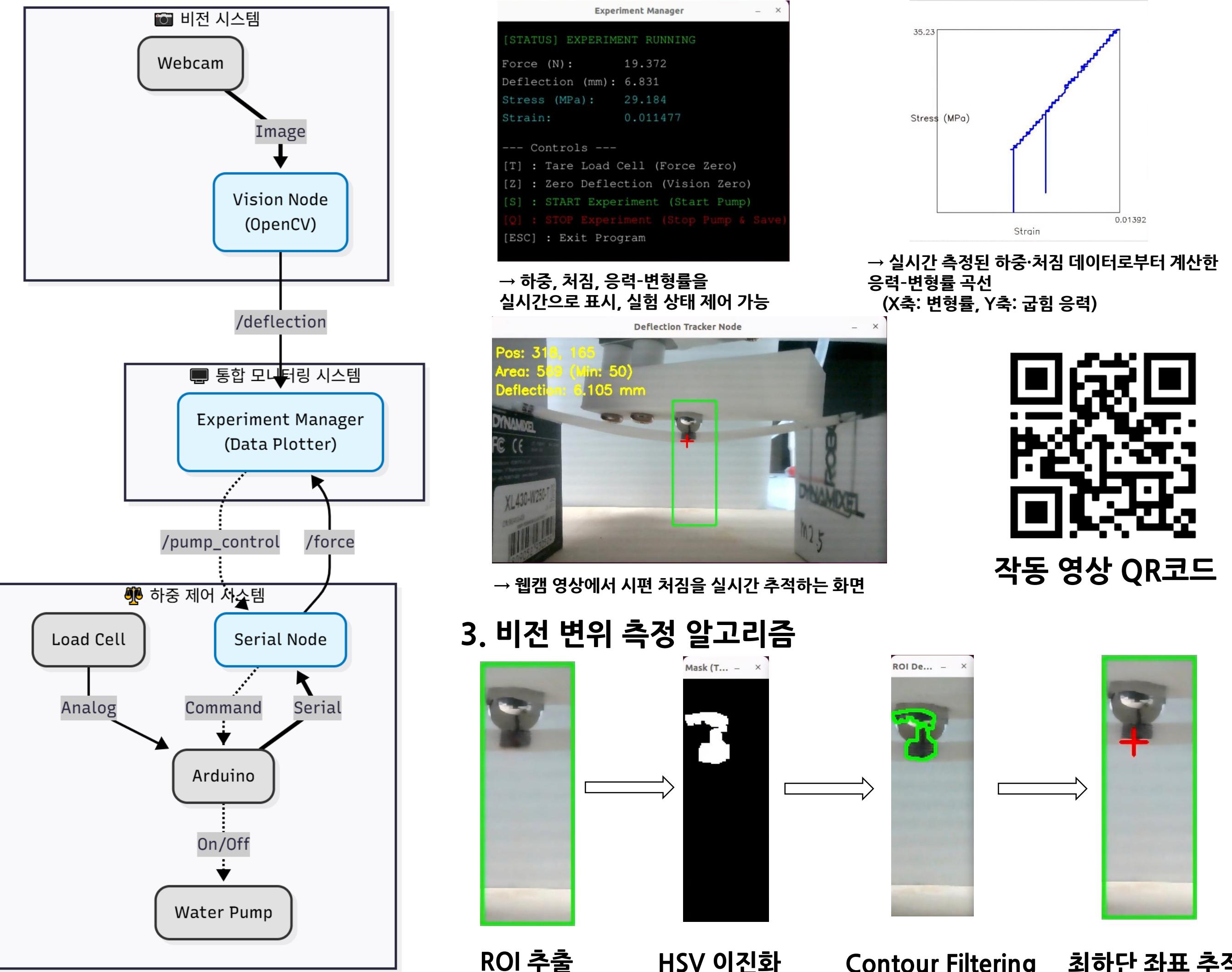
3. 3점 굽힘 시험기 시스템 개발

1. 하드웨어 : 물 중력 기반 3점 굽힘 시험기



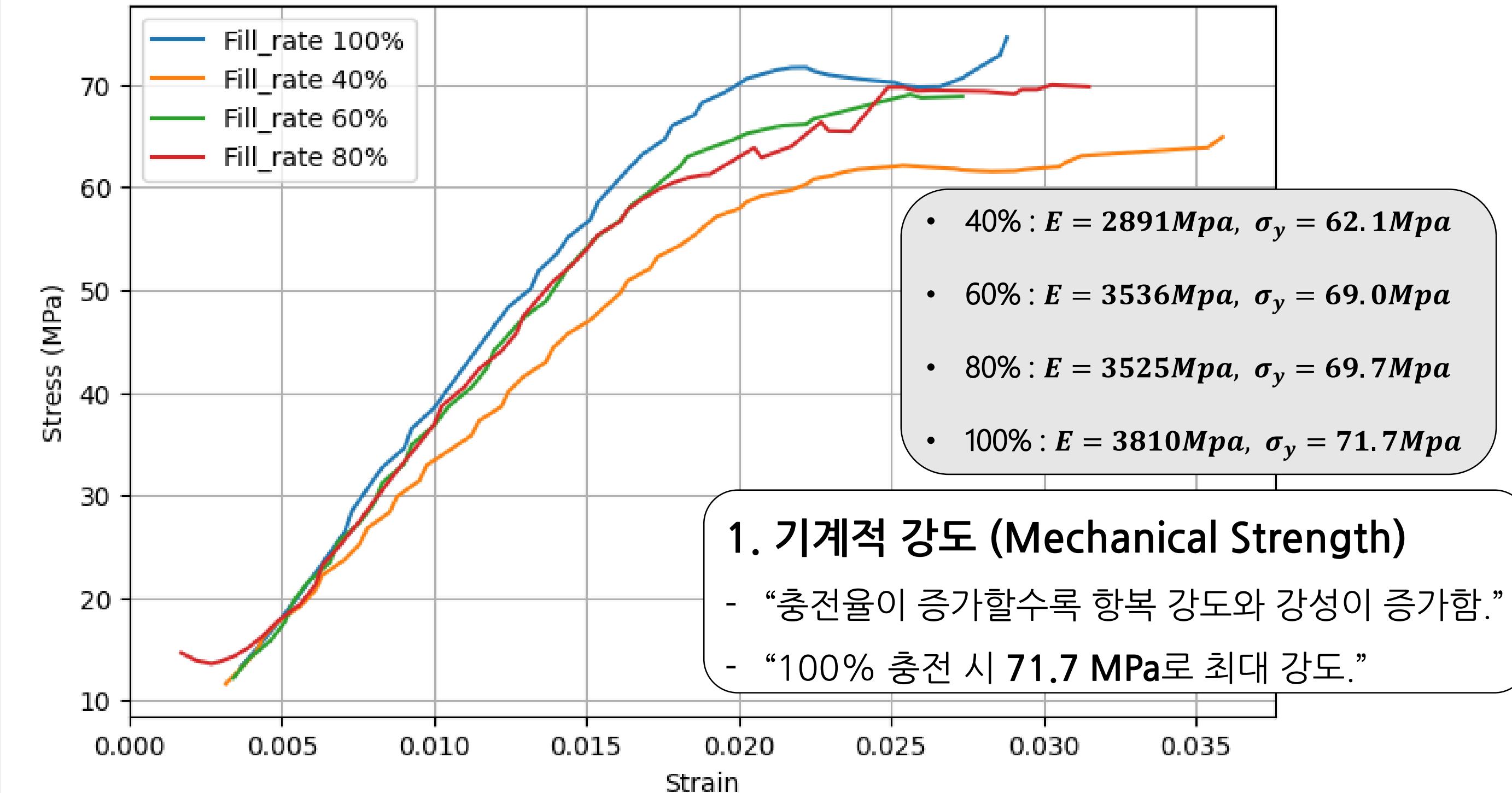
2. 소프트웨어 : ROS2 기반 3점 굽힘 실험 관리 시스템

1. 시스템 아키텍처 (Flow Chart)

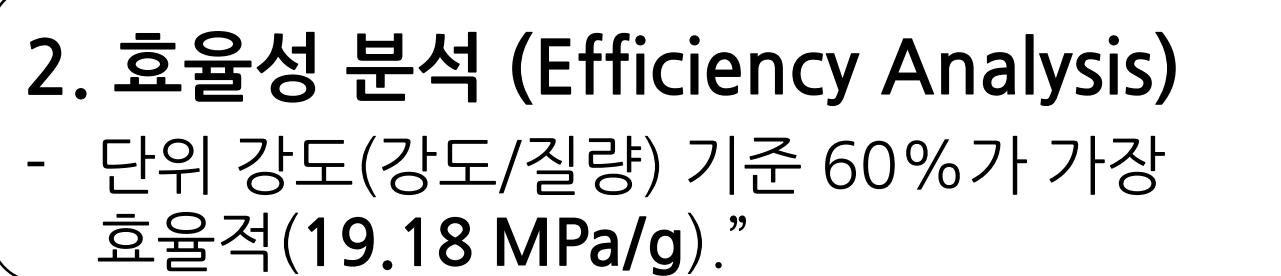


4. 연구 결과

충전율에 따른 Stress – Strain 곡선



충전율에 따른 재료 소모량 대비 강도



5. 결론 및 고찰

• 결론

- 충전율이 높을수록 굽힘 강도·강성이 증가하며, 100%에서 최대 강도를 보임.
- 단위 강도(MPa/g) 기준 60% 충전이 가장 효율적이었음.
- 약 4만 원과 ROS2 기반 오픈소스로 학생용 초저비용 3점 굽힘 시험기 구현함.
- 고찰
 - 지지대 마찰·고정력 부족으로 파괴 구간 이후 데이터 확보가 불가능해 지지 구조 개선이 필요함.
 - PLA·단일 인필 조건에 한정된 결과이므로, 재료·패턴·적층 방향을 확장한 추가 실험이 요구됨.

[1] J. Liu et al., “Effect of Infill Parameters on the Compressive Strength of 3D-Printed Nylon-Based Material,” Polymers, vol. 15, no. 2, p. 255, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/polym15020255>.

[2] Y.-G. Kang, H.-K. Kweon, and G.-S. Shin, “Strength Variation with Inter-Layer Fill Factor of FDM 3D Printer,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, vol. 18, no. 3, pp. 66–73, Mar. 2019, doi: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2019.18.3.066>.