



2026-1학기 학생자율연구(I) 랩 소개

지능형 적층제조 연구실 (지도교수 박상후) 소개자료

Metal additive manufacturing and surface post-processing for higher mechanical properties

2026. 3. 17

Prof. Sang-Hu Park

**School of Mechanical Engineering,
Pusan National University**

sanghu@pusan.ac.kr



00

발표자 소개



박상후 교수
부산대학교 기계공학부
sanghu@pusan.ac.kr

학력

- 1987. 3. ~ 1994. 2. 부산대학교 생산기계공학과, 공학사
- 1994. 3. ~ 1996. 2. KAIST 기계공학과, 석사
- 2001. 9. ~ 2006. 8. KAIST 기계공학과, 박사

경력사항

- 1996. 3. ~ 2001. 1. LG생산기술원 CAE 센터, 주임연구원
- 2006. 9. ~ 2007. 2. 한국기계연구원 나노공정장비센터, 박사후연구원
- 2007. 3. ~ 현재 부산대학교 기계공학부, 조교수/부교수/교수
- 2012. 9. ~ 2013. 8. 영국 Oxford university 방문교수
- 2013. 7. ~ 2014. 8. 부산대학교 본부, 기획부처장
- 2015. 2. ~ 2017. 3. 창의형상제작센터, 센터장
- 2018. 2. ~ 2019. 3. 경량부품가공센터 센터장 / 공대 부속공장장
- 2019. 3. ~ 2020. 3. 부산대학교 산학협력단, 기획부단장
- 2021. 6. ~ 현재 부산대학교 제조혁신엔지니어링센터, 센터장 (교육부 핵심연구센터)
- 2023. 4. ~ 현재 지능형 적층제조 국방특화연구실, 연구책임자 (방사청 지정)
- 2024. 6. ~ 현재 부산대학교 미래정책실, 실장
- 2025. 1. ~ 현재 부산대학교 대외·전략부총장

수상내역

- 2017, 2021 부산대학교 공과대학 논문상
- 2021 대한기계학회 효석학술상 수상
- 2022 가헌학술상 (가헌신도재단) 수상
- 2024 부산과학기술상 공학상
- 2024 한국기계가공학회 기계가공대상 (이외 26회 대외 수상)

대외활동

- 2024. 1. ~ 현재 한국정밀공학회, 부회장
- 2024. 1. ~ 현재 부산과학협의회, 정회원
- 2023. 1. ~ 2023. 12. 한국기계가공학회, 회장
- 2020. 1. ~ 2022. 10. 한국연구재단 공학단, 전문위원
- 2019. 4. ~ 2021. 12. 부산상공회의소, 정책자문교수
- 2019. 3. ~ 현재 육군군수사령부, 지능형 적층가공 과학기술 자문위원
- 2018. 6. ~ 2019. 5. 국가기술표준원 적층제조 ISO/TC261, 전문위원

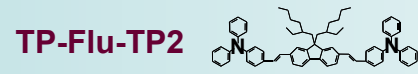


00

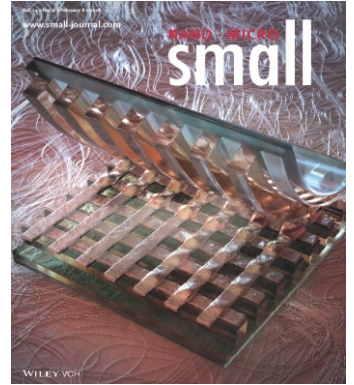
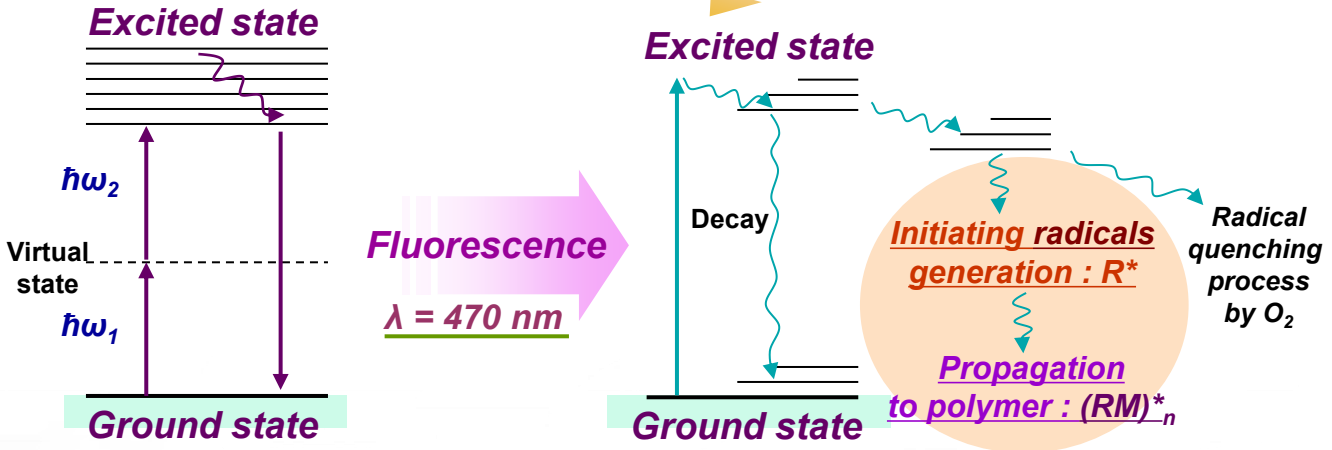
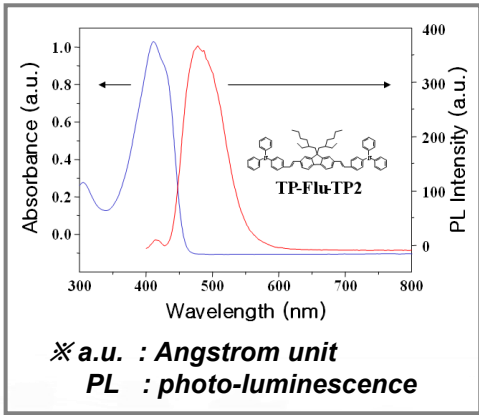
실험실 소개 (박상후 교수 전공분야 소개)

❖ 지능형 적층제조 실험·PNU Intelligent AM Lab

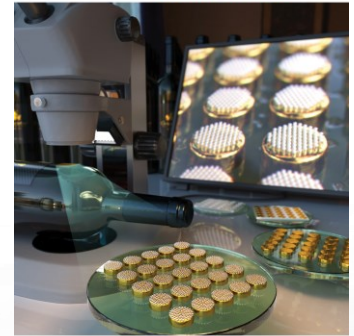
Two-Photon Polymerization Resin : Photosensitizer (0.1 wt%) + SCR500 (Japan Rubber Co.)



Photoinitiator + Monomer/Oligomer
(Urethane-acrylate 계열)

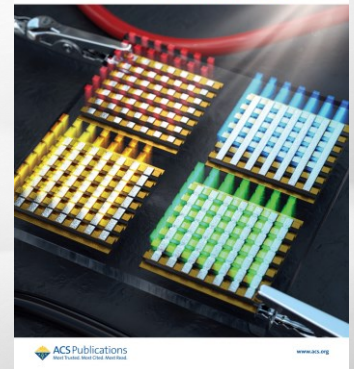


ACS APPLIED MATERIALS & INTERFACES

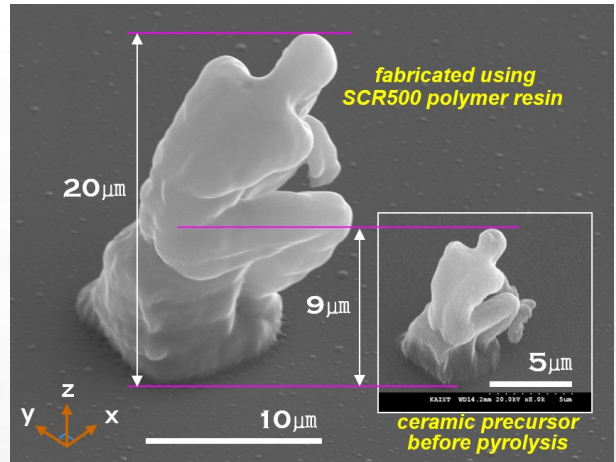
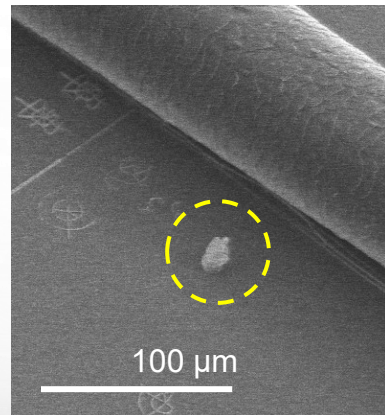
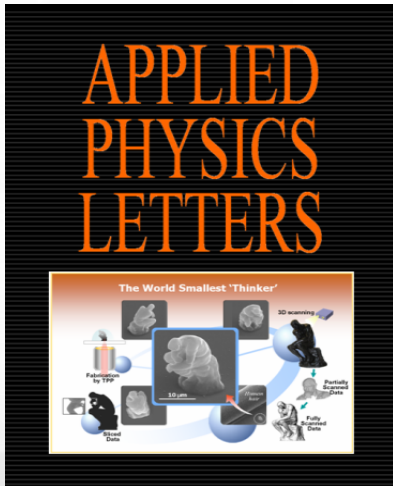
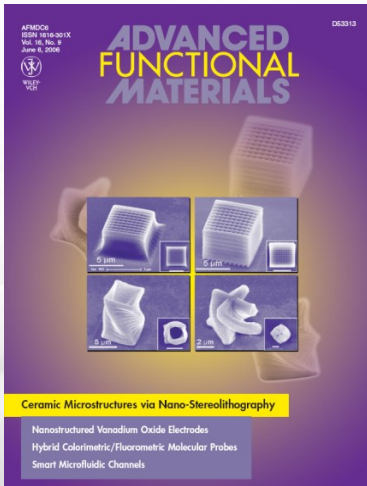


ACS Publications

ACS APPLIED MATERIALS & INTERFACES



ACS Publications



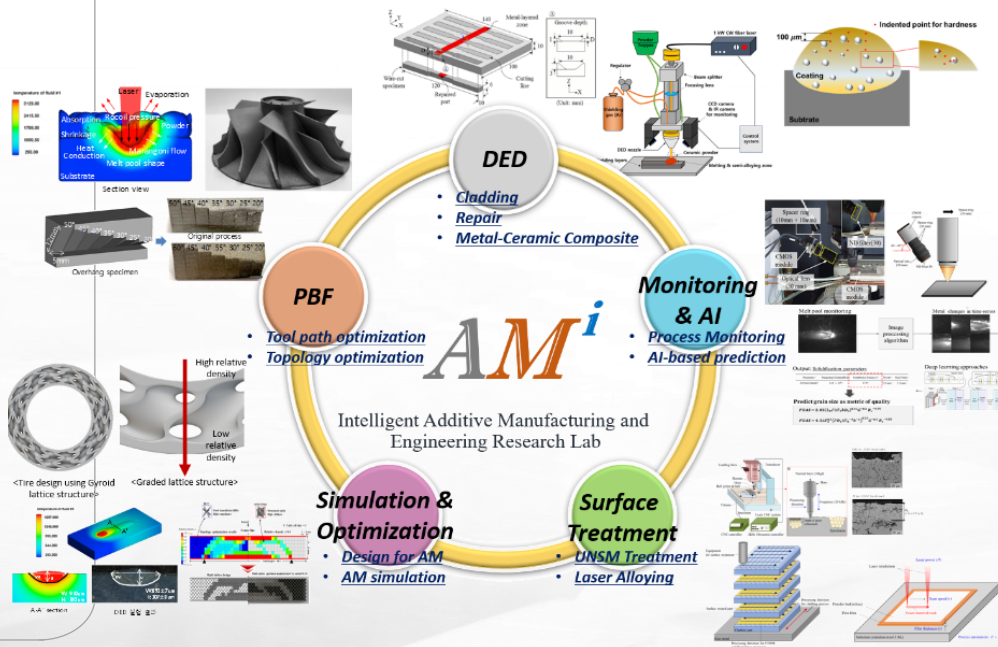
00 실험실 소개

❖ 지능형 적층제조 실험실 PNU Intelligent AM Lab

지능형
적층제조
연구실

연구분야

- DED process** Cladding, Remanufacturing, Metal-Ceramic composite (고기능성 표면처리)
- PBF process** Tool path optimization, Topology optimization
- Monitoring & AI** Process monitoring, AI-based prediction
- Simulation & Optimization** Design for AM (DfAM), AM process simulation
- Surface treatment** UNSM treatment



연구과제

적층제조 관련 대표과제

- 2019 ~ 2026 극한환경 스마트 기계부품 설계/제조 혁신 센터 (RLRC) (총 100억원)
- 2023 ~ 2027 지능형 적층제조 특화연구실 (방사청/국방기술진흥원, 총 45억원)
- 2023 ~ 2027 고품질 하이브리드 금속-세라믹 복합체 클래딩 공정개발 (연구재단 중견연구자, 총 5억원)
- 2023 ~ 2025 알루미늄 엔진블럭 재제조 공정연구 (중기청/현대차, 총 3억원)
- 2018 ~ 2020 극한환경용 열교환기 성능향상을 위한 3D 프린팅 제조혁신기술 개발 (산업부, 총 6억원)

실험실원

연구원/대학원생

전임연구원: 2명 박사과정: 2명 석사과정: 2명

졸업생

석사졸업생: 32명 박사졸업생: 5명

실적

논문 실적

학술재단등재지(국내) 논문: 83건 SCI 논문: 138건

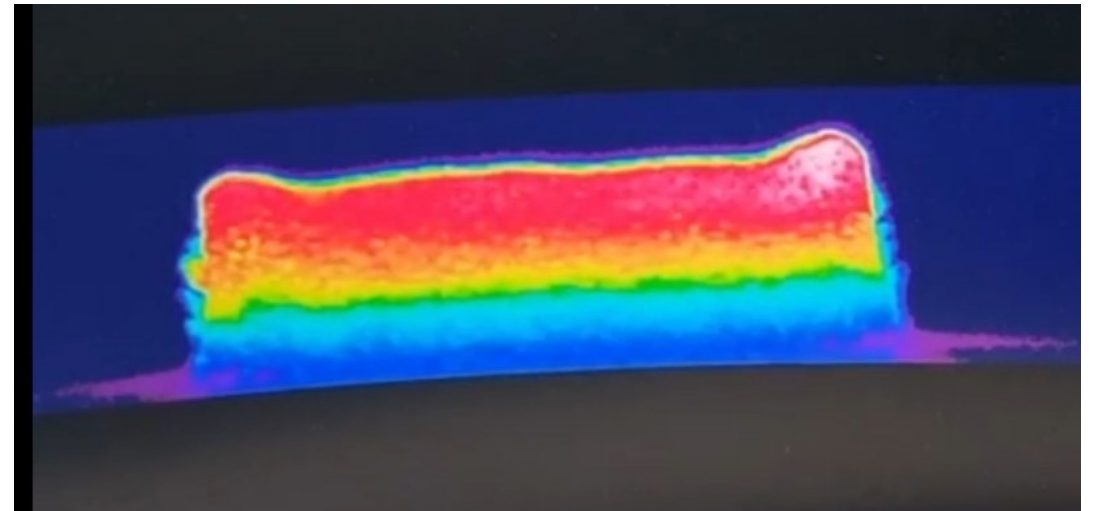
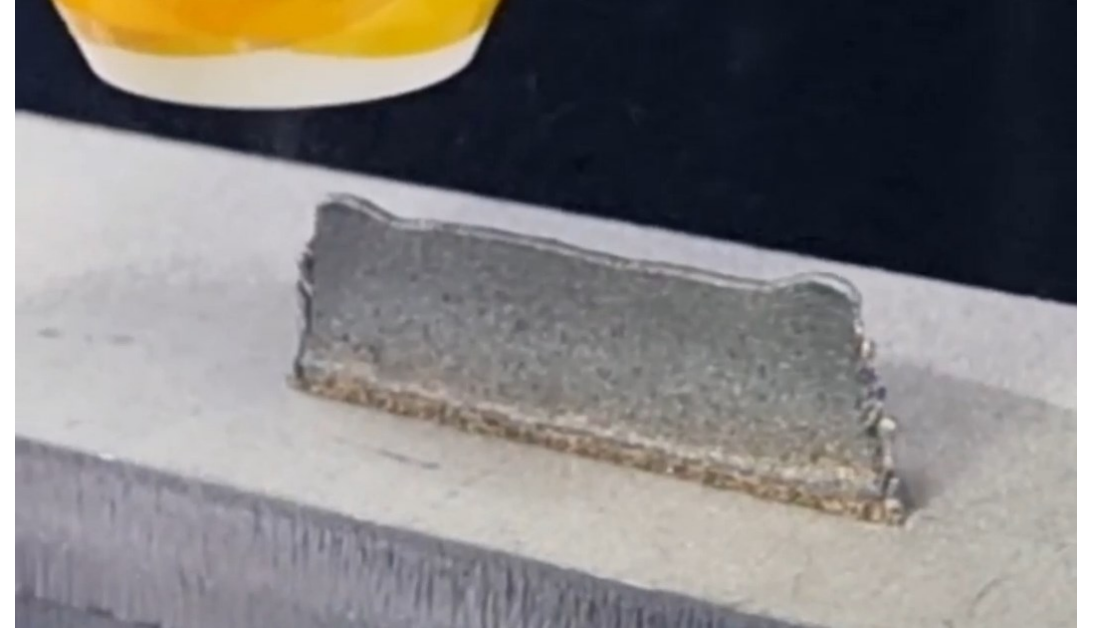
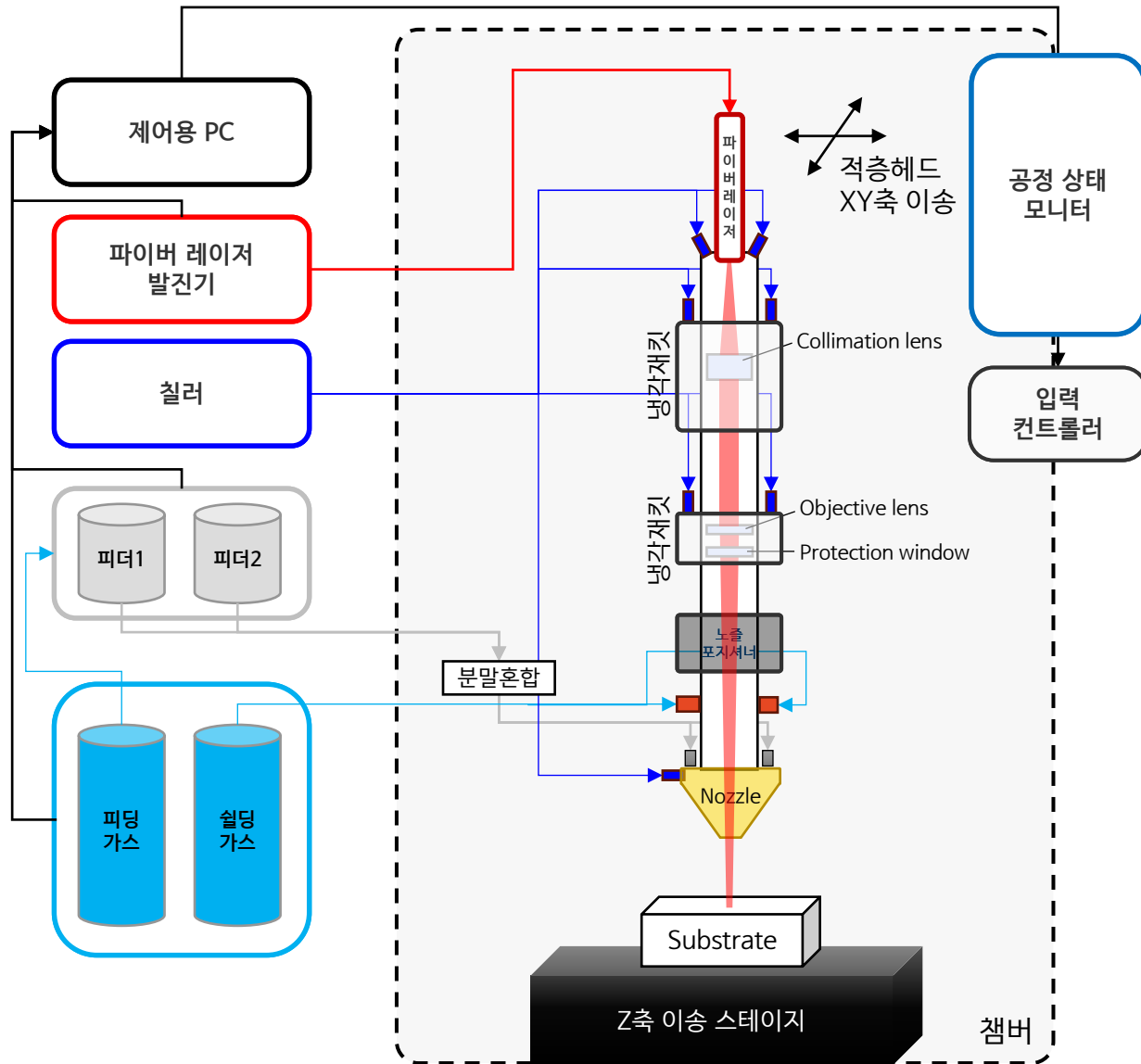
특허

국내 특허: 등록 43건, 출원 6건 국제 특허: 등록 9건

저서

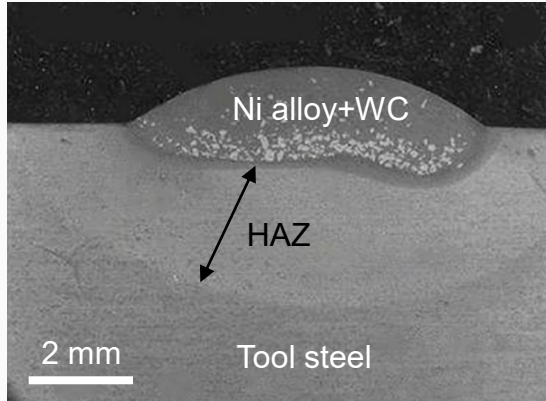
대학교재, 최신 적층제조공학 외 5권 공동집필

L-DED 시스템 구성



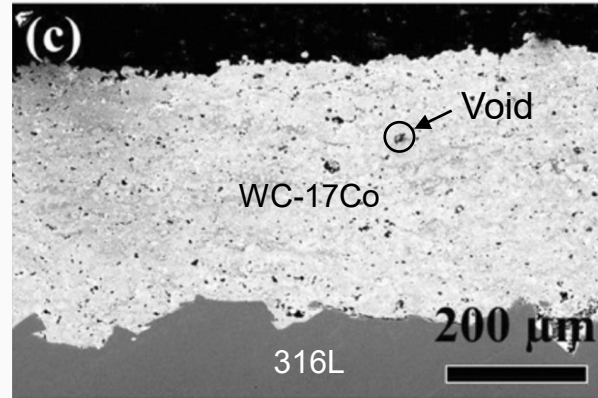
L-DED 하드페이싱의 우수성

아크 용접 (Arc Welding)



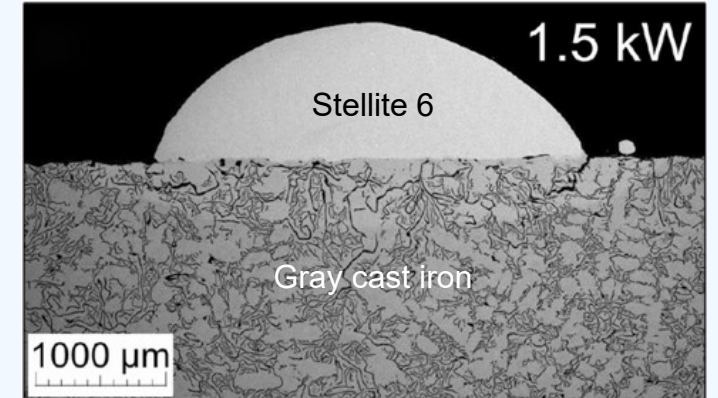
- 깊은 용입 및 넓은 열영향부(HAZ)
- 높은 희석률
- 심각한 열변형 발생

용사 코팅 (Thermal Spray)



- 기계적 결합 (Mechanical Bonding)
- 다량의 기공
- 낮은 결합력 및 박리 위험

L-DED 하드페이싱 (Proposed)

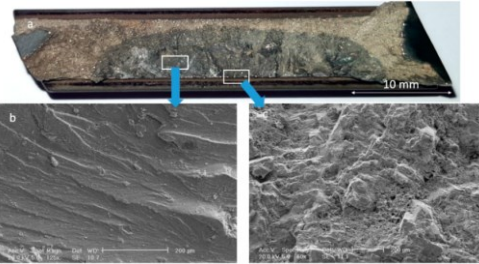


- 완전한 야금학적 결합 (Metallurgical)
- 정밀 입열 제어
- 설계 자유도 및 확장성

연구 배경

산업 문제 (Industrial Challenges)

터빈 블레이드 (열피로 균열, 고속입자 침식)



출처: Gas turbine blade erosion

브레이크 디스크 (히트체크킹 및 연마마모)



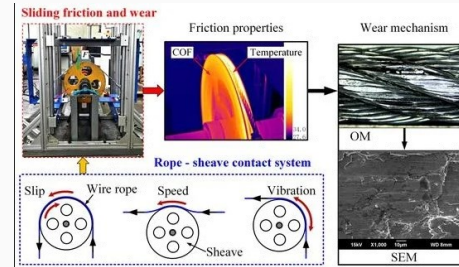
출처: Worn brake disc heat cracking

샤프트/저널부 (프레팅 및 점착마모)



출처: Shaft journal bearing fretting wear

어선용 대형 롤러 (깊은 그루브 및 연마마모)

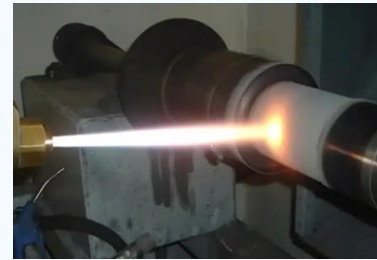


출처: Fishing net hauler roller wear

- 핵심 산업군: 조선해양, 항공우주, 자동차, 방산 등
- 가혹 환경: 고온·고압·고속·고충격·고마찰 → 부식·마모·균열
- 파급 효과: 설비 중단, 조달 및 교체 → 천문학적 운휴 비용

하드페이싱 기술 (Hardfacing Solution)

내마모 용사 코팅 (샤프트)



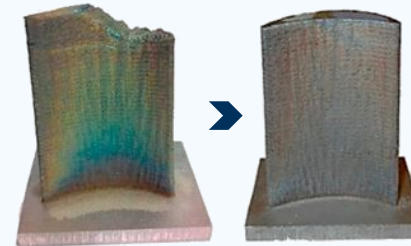
출처: Flame Spray INC

텅스텐 카바이드 PTA 하드페이싱 (임펠러)



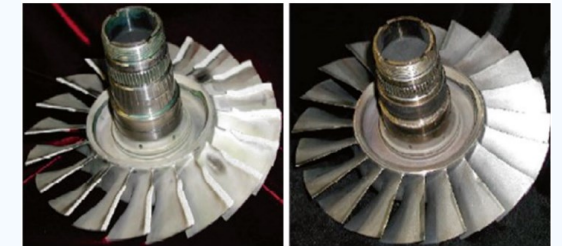
출처: avweld.com.au/technology

손상부 DED 수리 (터빈 블레이드)



Wilson, J.M et al. (2014) J. Clean. Prod.

리딩엣지 DED 수리 (블레이드 디스크)



출처: [Optomec LENS Blisk Repair](http://Optomec.com)

- 기술 정의: 고기능성 소재 적층을 통한 표면 강화
- 핵심 가치 1: 부품 수명 연장
- 핵심 가치 2: 고가 부품의 재생 및 재제조

국내 DED 부품 수리·재생·제작 사례

- 서울경제TV, 2025-03-17 HMM, 부품 3D프린팅으로 제작...유지보수 시간·비용 ↓
- 지디넷코리아, 2025.03.20 부품 수급 280일→30분...해병대 군수단, 금속 3D 프린터 도입
- 아세안문화, 2024.09.20 한국타이어, 금속 3D 프린팅 기술로 '타이어 몰드' 정밀 금형 개선
- MoneyS, 2024.07.18 정비기간 '1년→1주일'...해군 필수품 된 금속 3D프린터
- 한경비즈니스, 2024.02.26 두산에너지빌리티, 금속 적층제조(3DP) 사업 조선 분야로 확대
- 머니투데이, 2023.04.10 3200톤 광개토태왕함, 손상 부품 3D 프린팅으로 긴급수리
- 동아사이언스, 2023.01.19 티타늄 합금 블레이드 손상부위, 3D프린팅으로 복구해 원가절감
- 전자신문, 2022.07.04 인스텍, 인공관절 FDA 승인·다중소재 로켓 노즐 생산
- 철강금속신문, 2022.05.30 공작기계업계, 금속 3D프린터·로봇으로 신성장 동력 확보
- 경향신문, 2021.08.18 '3D 프린팅' 기술로 군함 부품도 보수
- 로봇신문, 2021.06.24 생기원, 금속 3D프린팅 기술로 우주 발사체용 추진제 탱크 시제품 제작
- 경상일보, 2019.10.14 3D프린팅 활용한 선박 프로펠러 제작·장착 추진
- 철강금속신문, 2019.06.11 현대위아, '3D프린팅 하이브리드 가공기' 개발



[HD현대중공업, 운항 선박 내 부품 유지보수]



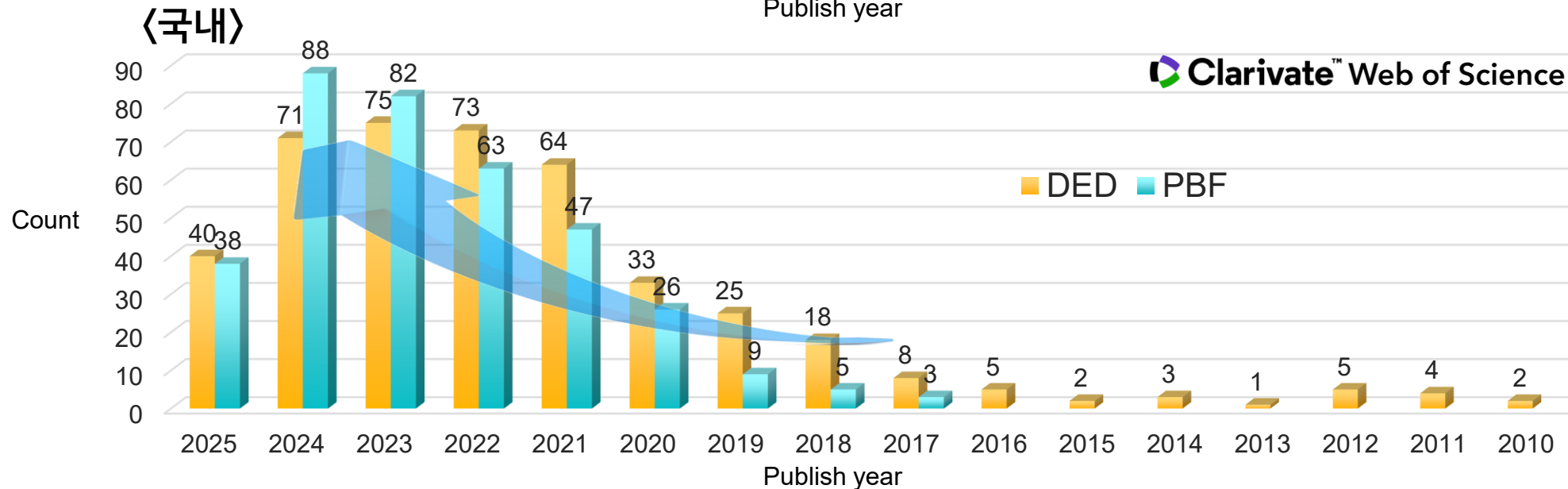
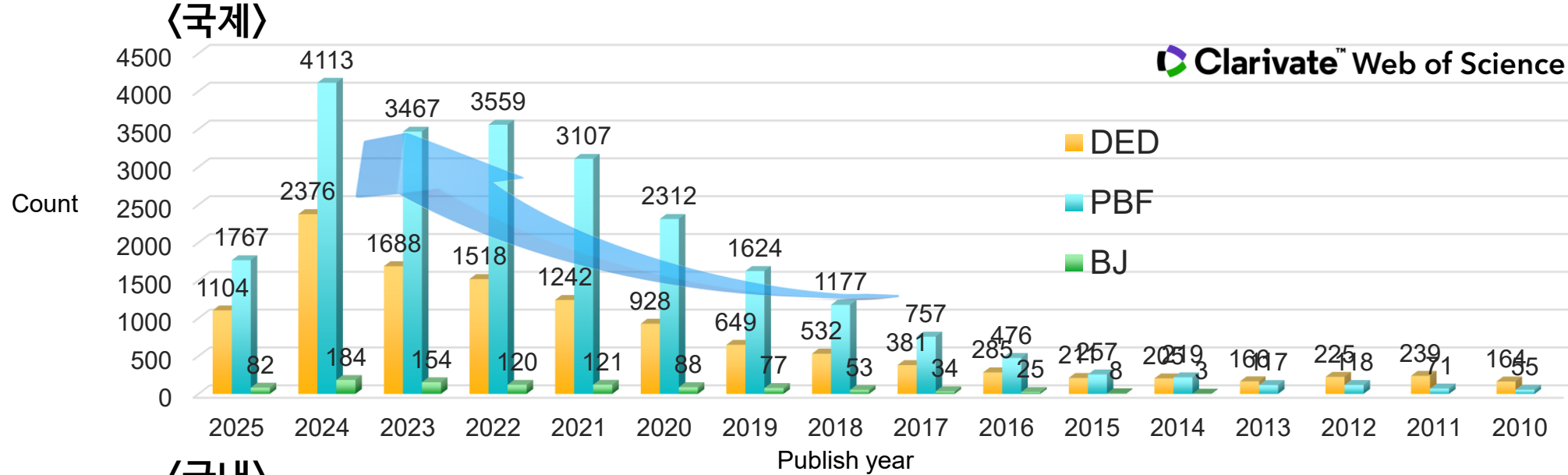
[공군, F-15k 전투기 수리]

→ **방산, 항공우주, 조선해양 극한환경 고부가가치 기계부품 적용**

하드페이싱 공정 비교

공정	열원	소재 형태	모재 용융	결합 메커니즘	희석률	열 영향	생산성 (속도)	주 용도	키워드	
L-DED	레이저	분말	O	야금학적	낮음	낮음	중간	극한환경 기계부품 보수/재생	#적층제조	
용접	SMAW (Stick)	아크	봉(Rod)	O	야금학적	높음	매우 낮음	농기계 현장 보수	#현장보수	
	MIG/ FCAW	아크	와이어	O	야금학적	높음	높음	굴착기 버킷	#생산성	
	SAW	아크	와이어	O	야금학적	높음	매우 높음	제철소 롤러	#대형육성	
	TIG	아크	봉(Rod)	O	야금학적	중간	높음	정밀 금형 보수	#정밀보수	
	PTA	플라즈마 아크	분말	O	야금학적	중간	높음	중간	엔진 밸브 시트	#저희석
용사	Flame Spray	화염	분말/와이어	X	기계적	없음	낮음	저가 부품 보수	#저비용	
	Arc Spray	아크	와이어	X	기계적	없음	낮음	가장 높음 (용사 중 1위)	마모된 축(Shaft) 복원	#고속용사
	Plasma Spray	플라즈마 제트	분말	X	기계적	없음	낮음	중간	항공기 터빈 블레이드	#세라믹
	HVOF	초음속 화염	분말	X	기계적	없음	최소	높음	유압 실린더 로드	#치밀한코팅
	Cold Spray	운동 에너지	분말	X	기계적	없음	없음	높음	알루미늄 부품 보수	#비열(NoHeat)
박막증착	PVD	플라즈마	고체	높음*	원자 부착	없음	높음	매우 낮음	절삭 공구 (드릴 비트)	#박막
	CVD	가스 반응	가스	가장 높음*	화학 결합	없음	매우 높음	매우 낮음	초경 인서트 팁	#고온

금속 적층제조, 연도별 SCI 논문 수 추이 (2025.5 update)



L-DED 공정의 특성

L-DED is a Multiphase and Multiscale Process

01. Multiphysics

다물리 상호작용

4 Phases

- 다상 공존 (Coexistence)
 - 고체 (분말), 액체 (용융풀), 기체 (증기)
 - 에너지 (레이저)
- 복합적 질량 & 에너지 전달
 - 레이저 흡수 및 다중 반사
 - 마랑고니 (Marangoni) 대류

02. Spatial Scale

공간적 스케일

$\mu\text{m} \leftrightarrow \text{m}$

- 극단적 스케일 차이
 - 분말: 수십 μm
 - 용융풀: 수 mm
 - 적층부품: 수십 cm
- 급격한 온도 구배 (G)
 - $10^3 \sim 10^5 \text{ K/m}$
 - 국부적 열응력 및 변형 유발

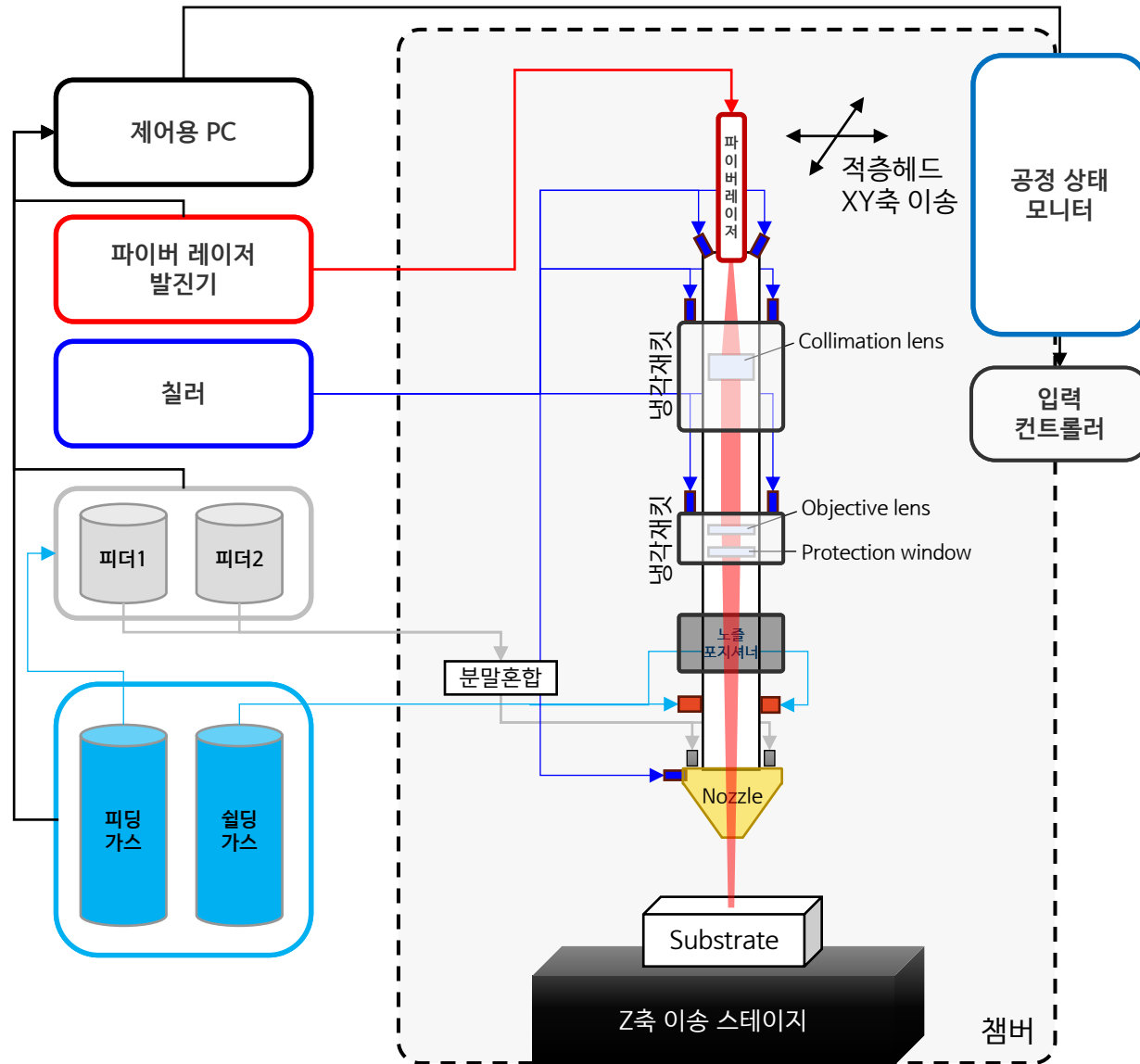
03. Time Scale

시간적 스케일

$\mu\text{s} \leftrightarrow \text{Hours}$

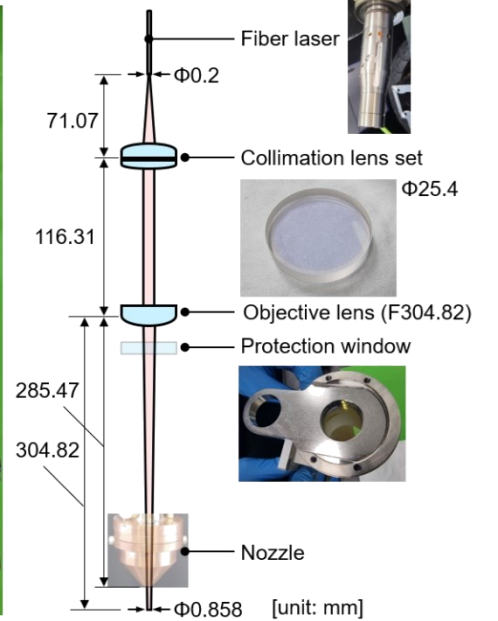
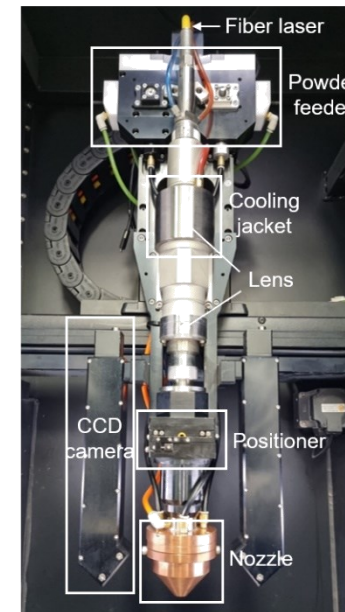
- 초고속 동적 거동
 - 레이저-물질 상호작용: μs
 - 입자 비행 및 용융: ms
- 초고속 냉각 속도
 - $10^3 \sim 10^5 \text{ K/s}$ (비평형 응고)
- 장시간 열 축적
 - 적층 공정 시간: 수 시간

L-DED 시스템 구성



레이저 및 광학 시스템 (Laser & Optics)

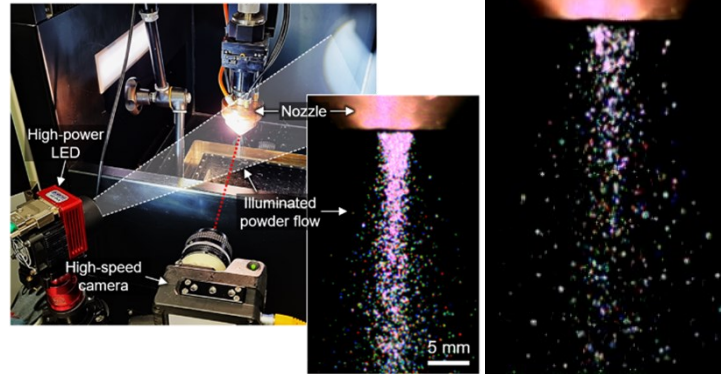
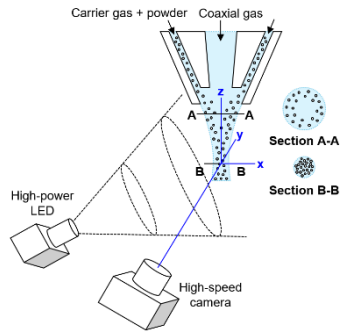
- 레이저 소스: 1 kW Yb-fiber Laser (Raycus)
 - 파장 (Wavelength): 1080 nm (가우시안, CW 모드)
 - 빔 스팟: \varnothing 0.9 mm (@ SOD 10 mm)
- 광학계
 - Collimation Lens Set + Objective Lens
 - Protection Window



고속 이미징 기반 유동 가시화 방법

1. 이미징 시스템 셋업

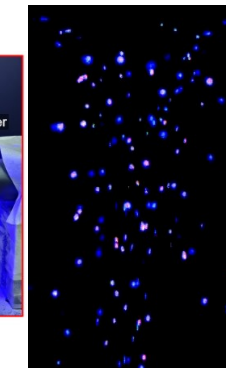
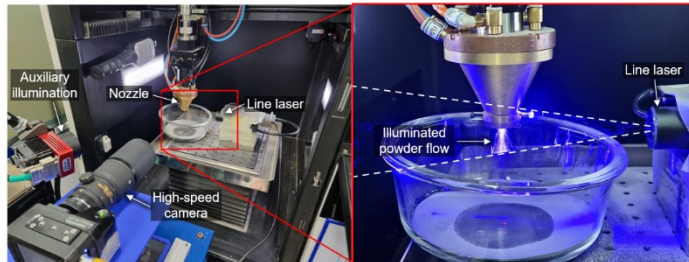
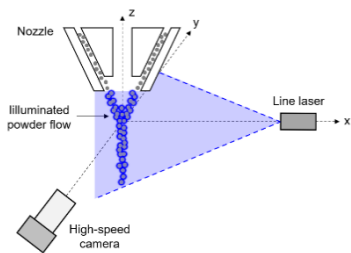
Method A. 면 조명 가시화 (Area Illumination)



[촬영한 분말유동]

■ 목적: 입자 비행 궤적 분석

Method B. 수직 라인 레이저 (Vertical Line Laser)

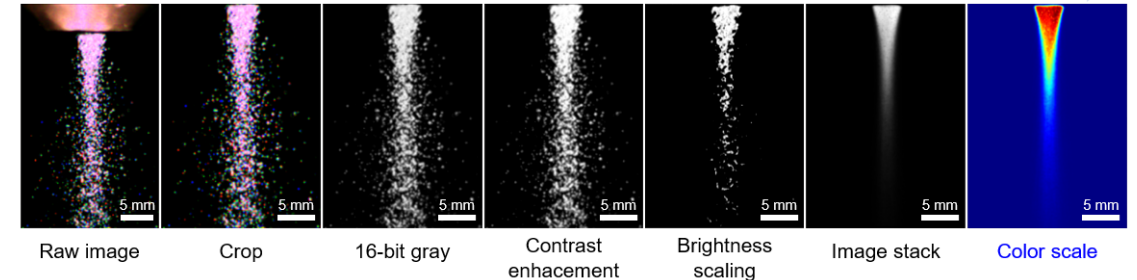


[촬영한 분말유동]

■ 목적: 분말 수렴성 분석

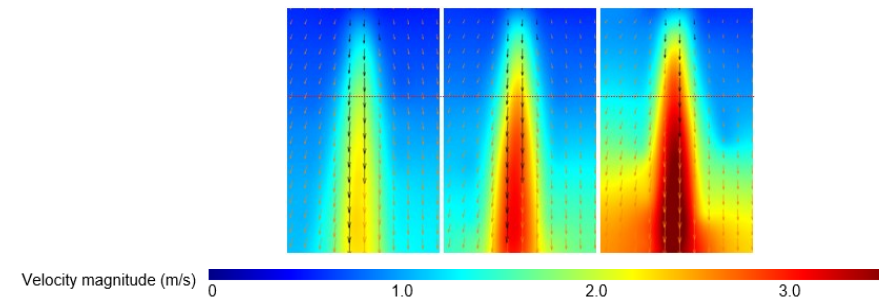
2. 데이터 처리 및 정량화

Step A. 이미지 전처리



■ Stacking: 5,000장 중첩 → 평균 픽셀강도 분포 (입자 농도분포) 도출

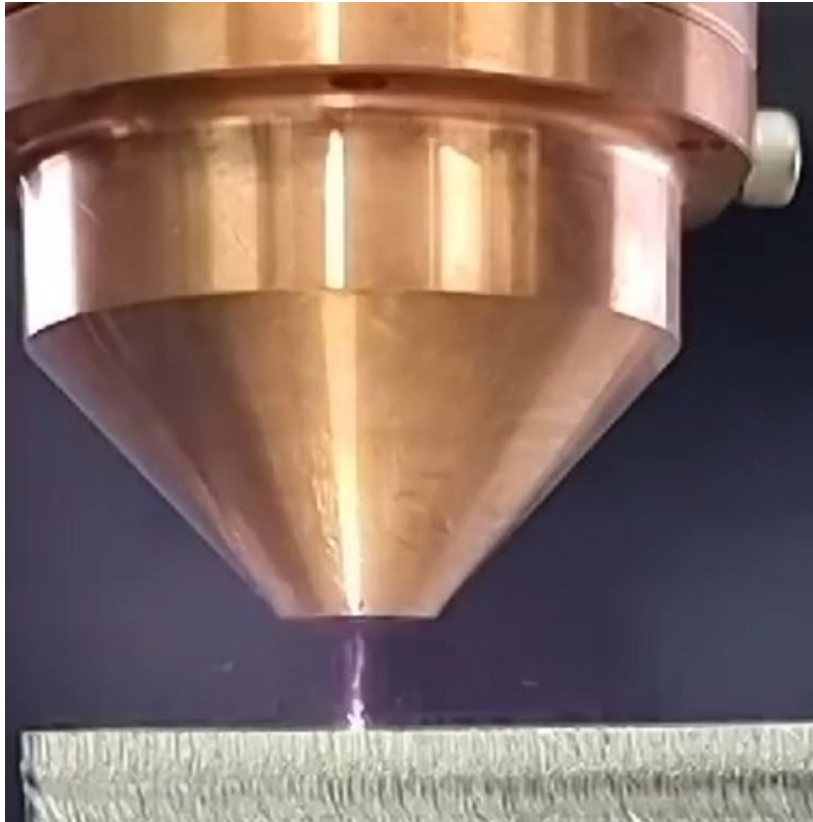
Step B. PIV 유속장 분석 (Particle Image Velocimetry)



■ 입자-가스 간 운동량 교환(Momentum Exchange) 효과 확인

L-DED 공정 동영상

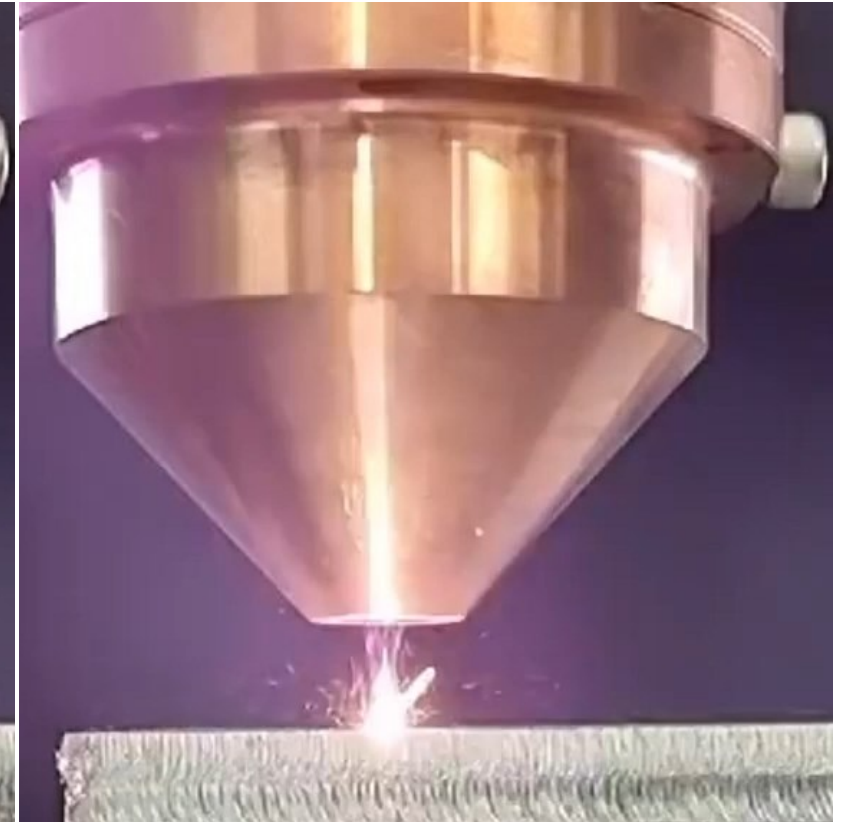
금속 분말의 in-flight thermal evolution이 왜 중요한가?



[레이저 빔 출력 : 500 W]



[레이저 빔 출력 : 700 W]

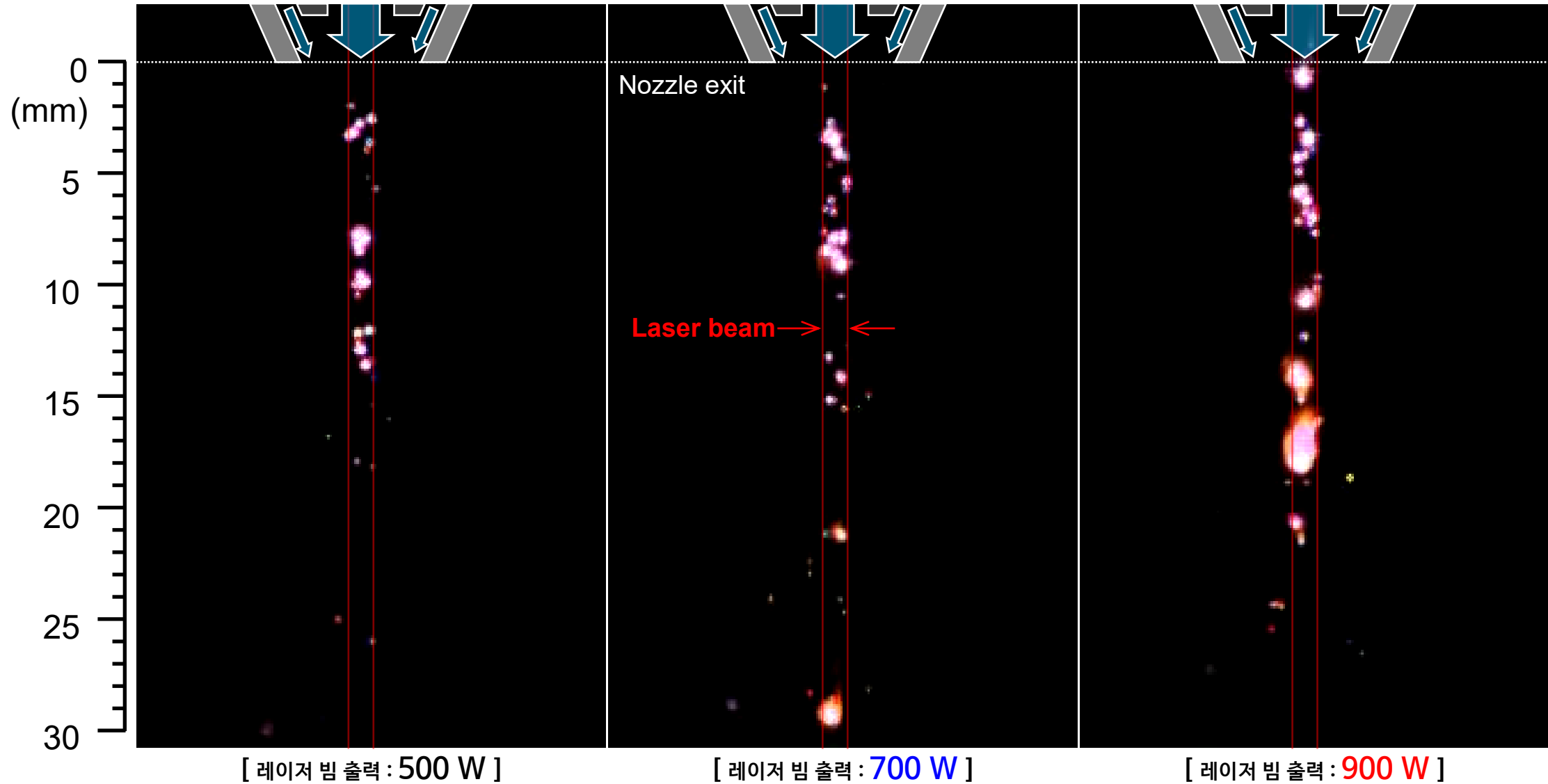


[레이저 빔 출력 : 900 W]

→ 비행 입자의 용융/기화, 금속 증기, 스패터 발생

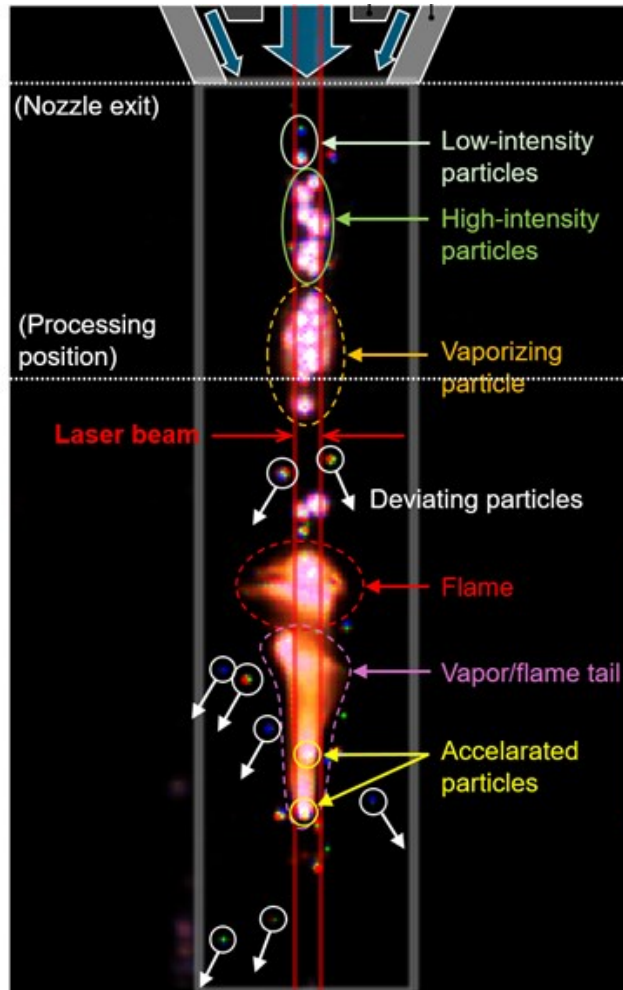
L-DED 공정 동영상

비행입자의 용융 및 기화 거동 고속카메라 촬영 ※약 0.003배속



분말-레이저 상호작용

1. 입자의 열적 진화 (Evolution Stages)



Phase I. 가열 (Heating)

- 고체 상태 (Solid)
- 레이저 에너지 흡수

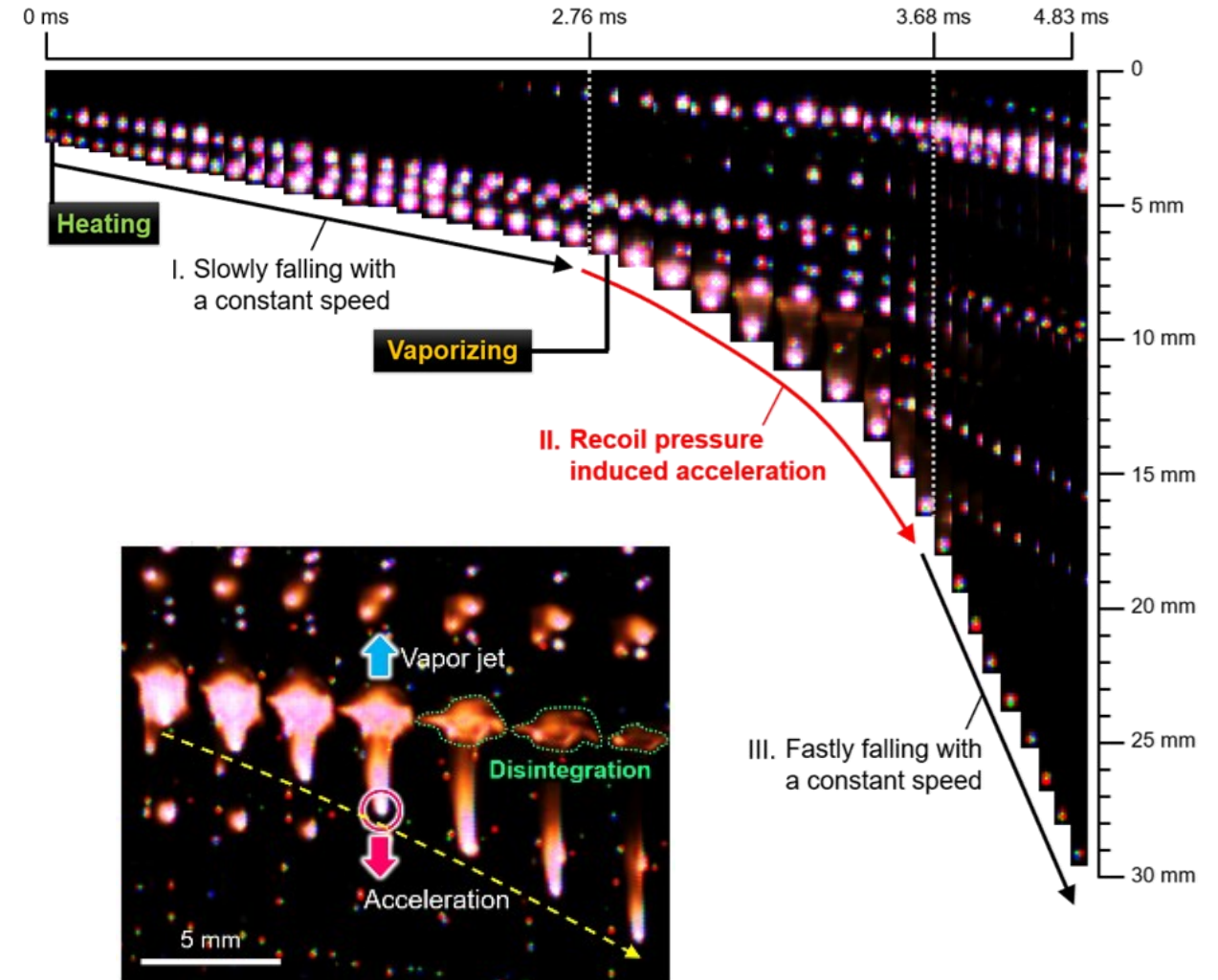
Phase II. 용융 (Melting)

- 액체 상태 (Liquid)
- 흡수율 급증

Phase III. 기화 (Explosion)

- 반동압
- 입자 가속 및 스퍼터

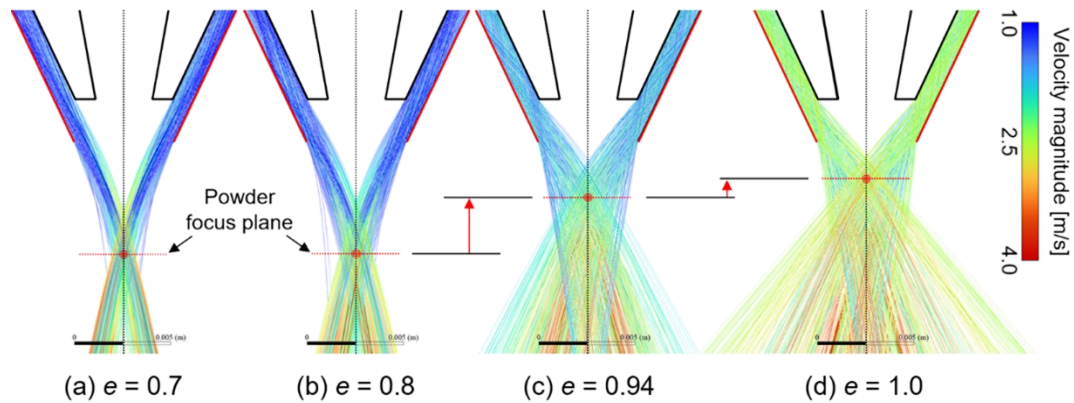
2. 입자의 낙하 궤적 (반동압에 의한 입자 가속)



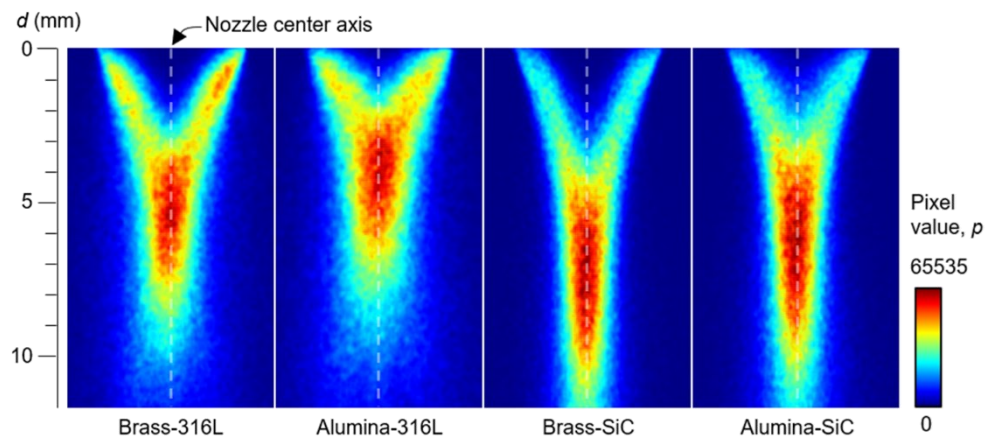
분말유동에서 반발계수의 중요성

1. 반발계수(e)에 따른 유동 거동 (Flow Behavior)

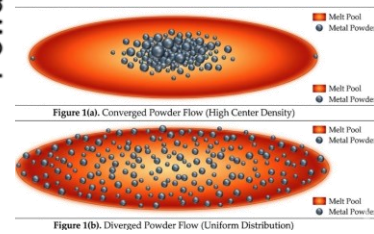
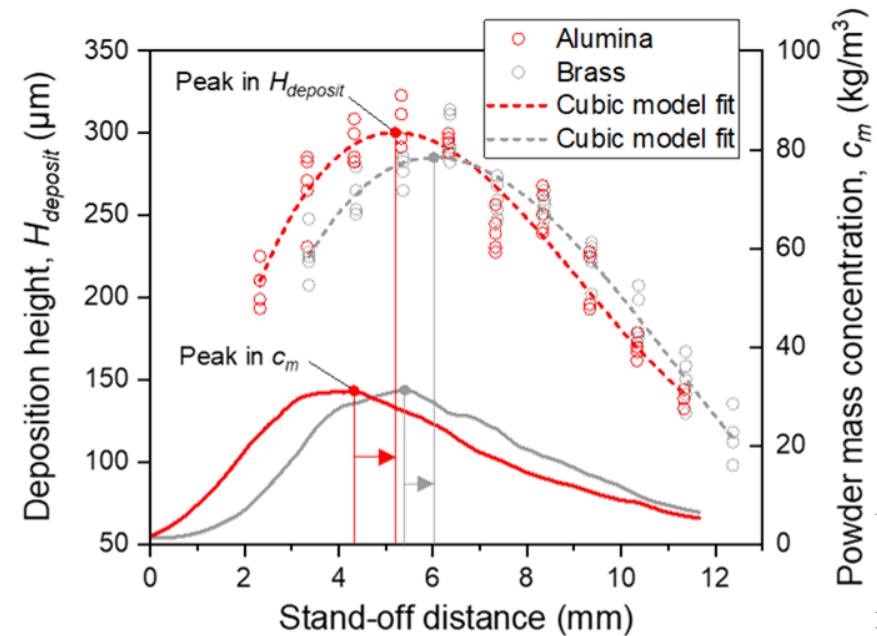
CFD-DPM 입자 궤적 시뮬레이션 (Effect of increasing ' e ')



분말 유동 이미징 (Brass vs. Alumina)



2. 적층 효율 분석 및 최적화



Trade-off 분석

- 알루미나 팁은 높은 반발계수(e)로 인해 유동이 **발산(Divergence)** 하는 경향이 있음
- 그러나, 최적의 SOD(Stand-off Distance)를 선정하면 발산된 유동이 더 **넓은 용융풀을 효과적으로 커버** 가능