



금속 적층제조품 신뢰성 평가를 위한 시험·검사 기술

2022.07.15



김영주*, 장용훈*, 이동민*, 김낙점*

* 한전KPS(주) 종합기술원 전략기술개발센터



한전KPS주식회사
KEPCO PLANT SERVICE & ENGINEERING CO., LTD

- 1 적층 제조 R&D 현황
- 2 적층 제조 산업 적용 필수 요건은 ?
- 3 AWS D20.1 (적층 제조 산업 적용 필수 요건)
- 4 ASTM, ISO 적층제조 Test Methods 표준 현황
- 5 시험·검사 기술의 적층제조 산업계 활용 방안
- 6 결론

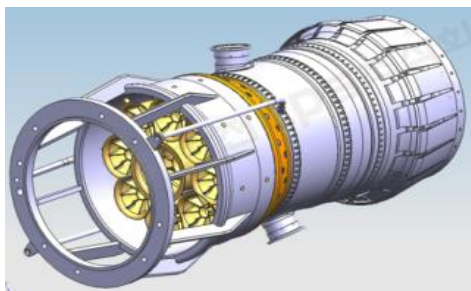
1. 적층제조 R&D 현황

□ R&D 목적 : 적층제조 기반기술 습득 및 고도화 ('18.07~현재)

○ “발전수요부품 국산화를 위한 3D프린팅 상용화 기술개발” 한국산업기술평가원 과제 수행 ('18.07 ~ '21.03, 33개월)

▣ 정부과제 참여기관

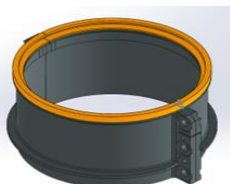
- * 산업기술평가원
- * 발전5사
- * 한국수력원자력
- * **한전KPS**
- * 생산기술연구원
- * 두산중공업, 한화
- * 카이스트
- * Z3DFAB
- * 대건테크(주관)



가스터빈 연소실



스월러 (PBF제작)

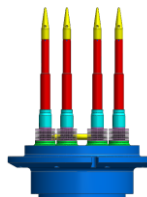


클램프셸 (DED보수)

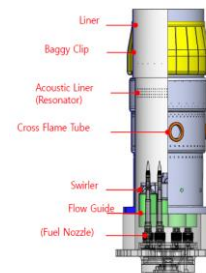
○ “연료다변화 대응 연소기 핵심부품 AM 제작 공정기술 개발” 한국에너지기술평가원 과제 수행 ('20.10 ~ '25.09, 60개월)

▣ 정부과제 참여기관

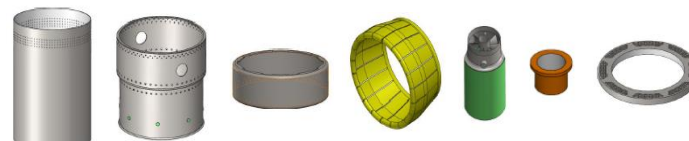
- * 에너지기술평가원
- * 동서발전
- * 서부발전
- * **한전KPS**
- * 생산기술연구원
- * KAMI



가스터빈 연소기



가스터빈 연소실

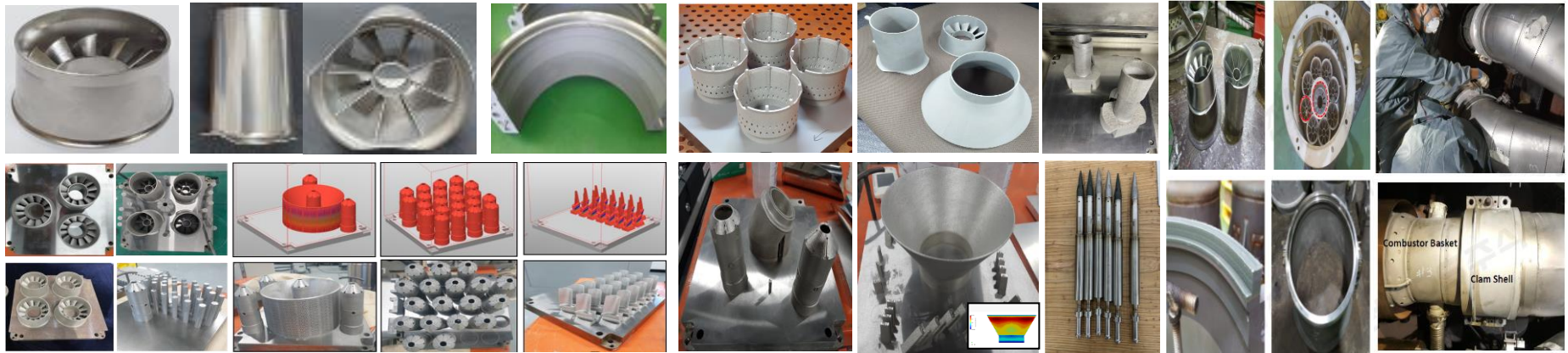


가스터빈 연소실, 연소기 부분품 (PBF제작)

1. 적층제조 R&D 현황

□ R&D 성과 ('18.07~현재)

추진계획	추진실적	목표대비 추진 성과
<ul style="list-style-type: none"> ◆ 적층제조 상용화 R&D ◆ 적층제조 시제품 제작 ◆ 적층제조 시제품 실장 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 3D프린팅 적층공정 및 후처리 개발, 신뢰성 평가 (Hast-X, SUS321, Inconel718) ◆ G/T 연소실 부품 3D프린팅 제작 (스왈러 2종, 클램프셸 1종) ◆ G/T 실증 장착 평가 완료 ('20.11~'22.06) 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 회사 경영평가 기여 ◆ 뉴딜사업 과제 등 참여 ◆ 新기술 네트워크 강화 <ul style="list-style-type: none"> - KEPIC, KWJS 위원회 참여 - 벨기에 Materialise (S/W 세계1위) ◆ 우수기술 대내외 홍보 <ul style="list-style-type: none"> - 발표 6건, 강연 6건, 신문 10건 ◆ 사내 3D프린팅 기술 Needs 확대



2. 적층 제조 산업 적용 필수 요건은 ?



- 적층 제조 품목의 설계 요건
- 적층 제조 적격성 인정(Qualification)
 - 기기(Machine)
 - 절차(Procedure)
 - 기기 오퍼레이터(Operator)
- 제조 요건 (Fabrication)
- 시험·검사 요건 (Inspection)

3. AWS D20.1 (적층 제조 산업 적용 필수 요건)

□ AWS D20.1 개요 (2013년~2019년 개발, 항공우주산업 요청에 따라 AWS D20 위원회 구성)

- 발행 : American Welding Society, AWS

- 적층제조 산업 적용을 위한 필수 요건 발행

- * 적층제조로 제조된 품목의 설계 요건
- * 기기 인정 기록 (Machine Qualification Records)
- * 절차 인정 기록 (Procedure Qualification Records)
- * 기기 오퍼레이터 인정 (Operator Performance Qualification)
- * 제조 요건 (Fabrication)
- * 검사 요건 (Inspection)



- 미국국가표준위원회(ANSI)에서 승인 [공신력 갖추]

- 미국기계학회(ASME) 내 BPTCS (Board on Pressure Technology Codes and Standards) 산하 BPTCS/BNCS Special Committee on Use of Additive Manufacturing for Pressure Retaining Equipment 에서도 AWS D20.1의 적용을 전제로 적극적으로 검토하고 있음.

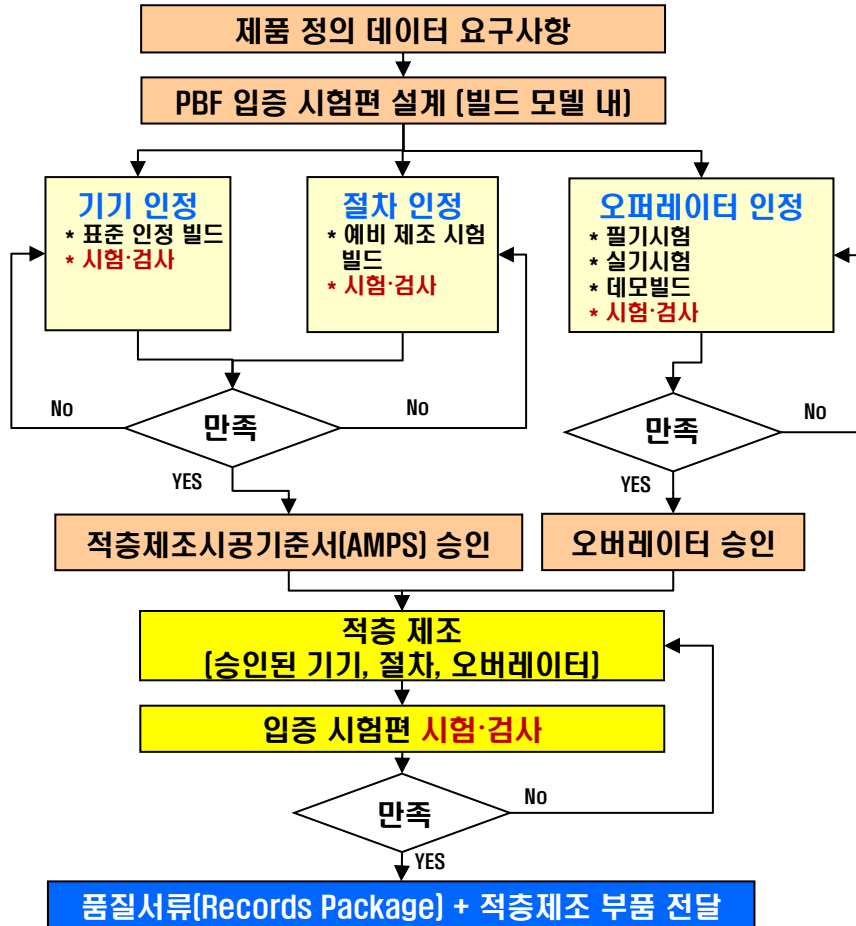
출처(KEPIC 금속3DP 위원회) : 금속 3D프린팅 KEPIC 표준화를 위한 조사분석 보고서 참조

3. AWS D20.1 (적층 제조 산업 적용 필수 요건)

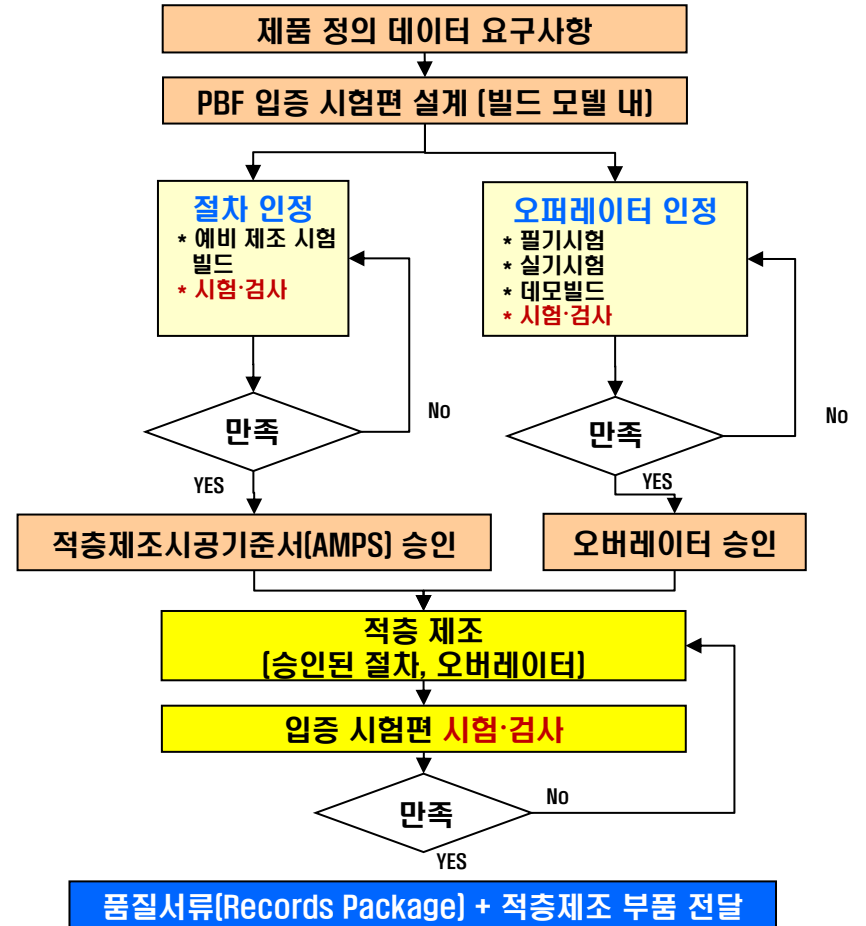
(인명/운전/계통/중요도 따라 분류)
 - Class A : Critical Application
 - Class B : Semi-Critical Application
 - Class C : Noncritical Application

□ 적층제조 프로세스 흐름도 (부록E)

Class A, Class B



Class C



3. AWS D20.1 (적층 제조 산업 적용 필수 요건)

□ 일반 요구 사항 (1절)

○ 적용 범위 (1.1절) : 제조공정 7종, 재료 2종

- 제조 공정 (7종)
 - * L-PBF (Laser-Powder Bed Fusion)
 - * EB-PBF (Eletro Beam-Powder Bed Fusion)
 - * L-DED (Laser-Directed Enenergy Deposition)
 - * EB-DED (Eletro Beam-Directed Enenergy Deposition)
 - * PA-DED (Plasma Arc-Directed Enenergy Deposition)
 - * GTA-DED (Gas Tungsten Arc-Directed Enenergy Deposition)
 - * GMA-DED (Gas Metal Arc-Directed Enenergy Deposition)
- 재료 (2종) : 분말, 와이어

○ 품목 분류 (1.4.1절) : Class A, Class B, Class C

(인명/운전/계통/중요도 따라 분류)

- Class A : Critical Application
 - * 파손시 인명에 중대한 위험을 끼치거나, 운전, 계통 또는 중요기기의 불능, 또는 운용상 별착을 초래하는 경우
- Class B : Semi-Critical Application
 - * 파손시 기기 및 계통 전체의 내구력을 감소시키거나 원래의 기능 또는 기기의 사용을 방해하는 경우. 단 계통의 불능 또는 인명에 위험을 미치지 않는 경우.
- Class C : Noncritical Application
 - * 파손시 계통의 운전에 영향이 없고 인명에 위험을 초래하지 않는 경우

□ 적층제조 설계 요건 등 (4절)

○ 구성 요소 및 설계 요구 사항 (4.1절)

- 구성 요소 요구사항 설계 및 정의
- 필수 프로세스 제어 정의
- 자격, 제조, 검사 요구사항에 따라 제작된 구성요소가 설계 요건을 충족함을 입증

○ 재료 요구 사항 (4.2절)

- 공급원료 사양 요구 사항
- 적절한 재료 속성 요구 사항 개발 및 획득
- 재료 속성은 최종 상태에 확인 (열처리, 가공 완료 후)

○ 입증(Witness) 시험편 (4.3절)

- Class A : Min. 4개 (인장 3개 + 예비 1개)
- Class B : Min. 2개 (인장 1개 + 예비 1개)

○ 제품 정의 데이터 요구사항 (4.4절)

- 제품 분류 (Class A, B, C)
- 최종 필수 구성 요소 치수의 도면 또는 모델
- 구성 요소의 재료 종류 및 물성 요구사항
- 허용 가능한 AM 프로세스
- 구성 요소 후처리 요구사항 (표면처리, 열처리 등)
- 검사 요건 (검사 방법 및 허용 기준)

3. AWS D20.1 (적층 제조 산업 적용 필수 요건)

□ 적층 제조 기기 및 절차 인정 (5절)

○ 기기 인정 기록 (MQR) 및 절차 인정 기록 (PQR)

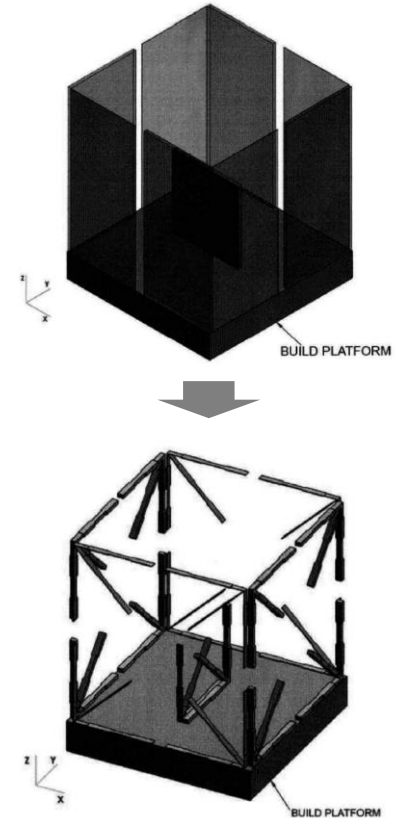
구분 (7 분류)	내용 (74-요소)
General (8)	회사명, 장비오퍼레이터, MQR/PQT No. AM 공정, Build Model 파일명, 최근유지보수일, 기록일시
Build Platform (9)	Type/Grade, 두께, 상태, 예열온도, 준비/청결 방법, 시작위치(Z), 종료위치(Z)
Feedstock (8)	Type/Grade, 분말 Lot, 분말 제조공정, 분말 보관환경, 화학조성/입도/유동성
Machine (10)	장비 제조사/모델명/S-No, Laser 제조사/모델명/S-No, S/W version, Recoater Type/재질/거리 (RTBPD)
Environment (12)	챔버가스 Type/Grade, 챔버 산소농도/습도, 재순환필터유량, 여과기종류, 부가가스 Type/Grade/유량, 실드가스 Type/Grade/유량
Build Parameters (17)	File Name, Part 설명, Part ID, Laser Power, Beam Offset/Profile/Orientation, Focal Length, Recoater Travel Speed, Layer Thickness, Laser Travel Pattern, Overlap Distance, Beam Travel Speed, Pulse Frequency, Pulse Waveform, Interlayer Time, Maximum Interpass Temperature
Post-Processing (10)	Build Platform Temp.(챔버오픈), 열처리온도, 열처리유지시간, 열처리분위기, 표면처리방법, Platform에서 Part제거방법, HIP 온도, HIP 유지시간, HIP분위기, 표면마감방법

3. AWS D20.1 (적층 제조 산업 적용 필수 요건)

□ 적층 제조 기기 및 절차 인정 (5절)

○ 기기 인정(MQ) 및 절차 인정(PQ)를 위한 시험·검사 요건

시험 방법		Powder Bed Fusion			Directed Energy Deposition		
		Class A	Class B	Class C	Class A	Class B	Class C
기기 인정 (MQ) : 표준 인정 빌드 Standard Qualification Build(s)	육안 검사	YES	YES	-	YES	YES	-
	치수 검사	YES	YES	-	YES	YES	-
	방사선 투과 검사	YES	YES	-	YES	YES	-
	밀도 시험	YES	YES	-	YES	YES	-
	인장 시험	54	54	-	36	36	-
	금속 조직 시험	YES	YES	-	YES	YES	-
절차 인정 (PQ) : 예비 제조 시험 빌드 Preproduction Test Build(s)	육안 검사	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	치수 검사	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	침투 탐상 검사	YES	YES	-	YES	YES	-
	방사선 투과 검사	YES	YES	-	YES	YES	-
	밀도 시험	YES	YES	YES	YES	YES	YES
	인장 시험 (입증 시험편)	3	1	-	-	-	-
	인장 시험 (부품)	3	3	-	3	3	-
	금속 조직 시험	YES	YES	YES	YES	YES	YES
화학 성분 분석	YES	YES	-	YES	YES	-	



54개 인장 시험편

(기기 인정 인장 시험편 채취)

3. AWS D20.1 (적층 제조 산업 적용 필수 요건)

□ 적층 제조 Operator 자격 부여 (6절)

- 특정 기기 제조업체, 모델 번호에 대해 수행
- 자격 수준 : Class A > Class B > Class C
- 자격 요건 : 필기시험, 실기시험, 데모빌드
- 교육(최소 40시간) 및 시험 주제
 - 공급원료 물질 보관
 - 원료 물질의 안전성
 - 공급 원료 재료 설정
 - 장비 및 구성 요소 세척 요구사항
 - 기계 교정 수행
 - 일반적인 빌드 결함, 원인 및 예방조치
 - 환경 제어 (차폐가스 요구사항, 빌드챔버 환경)
 - 적정 빌드 매개변수
 - 기기 예방정비
 - AM 빌드 주기 데이터 기록
 - 빌드 주기 중단으로부터 재작업
 - 빌드 완료 후 제거, 플랫폼 설치
 - 기기 및 하위 구성 요소 안전
- 자격 유지 : 6개월 내 1회 이상 AM 장비 사용

□ 적층 제조 제조 요건 (7절)

- 디지털 제어 계획 (Digital Control Plan)
 - 개별 구성 요소 Surface 모델 이름/개정 (ex.STL)
 - 빌드 파라미터 파일 이름/개정
 - 빌드 파일 프로세싱 S/W 및 버전
 - 적층제조 기기 S/W 및 버전
 - 절차 인정에 사용된 같은 빌드 파라미터 파일
- 교정 제어 계획 (Calibration Control Plan)
 - 교정이 요구되는 주전원 또는 주요 장비 하위 구성요소
 - 최대 교정 주기, 보정된 성능에 대한 허용 범위
 - 유지보수 체크리스트
- 공급 재료 및 빌드 플랫폼
 - 공급 원료와 빌드 플랫폼 식별 (문서화)
 - 보관, 사용 및 준비 (세척 등 오염 물질 제거)
 - 빌드 플랫폼 요건 충족 (두께, 표면마감, 평행도)
 - 공급원료 분말 (조성, 입자크기 분포, 입자형태, 밀도)
 - 예열 및 패스간 온도 유지
- 적층 제조 환경
 - 제품과 접촉하는 도구/장비 : 오염 불가 (오일 등)
 - 가스 사양 : AWS A5.32M/A5.32 요구사항 충족

3. AWS D20.1 (적층 제조 산업 적용 필수 요건)

□ 적층 제조 제조 요건 (7절)

○ 적층 제조 빌드

- 적층제조시공기준서(AMPS)에 따라 제조 (기기 인정, 절차 인정, 기기 오퍼레이터 인정 기반)
- 기기 오퍼레이터 장비 조정 및 수정 불가
- 입증(Witness) 시험편 표본 제작 및 시험결과 문서화
- 적층 제조 구성 요소 식별 및 승인 검사
- 열처리, 기계가공, 표면 마무리 등 AMPS에 따라 수행

○ 적층 제조 빌드 중단

- 계획된 빌드 중단 문서화 : 내부온도, 공급재료 적재, 청소
- 계획되지 않은 빌드 중단 : 정전, 유지보수, 인터록 트립
→ 공정 중 교정 수행 (야금학적/물리적 상태 변경 불가)
→ 문서화 및 엔지니어는 수용 가능성 결정

○ 문서화 요건

- 제품 정의 데이터 세트
- 공급 원료 및 빌드 플랫폼 재료 사양, 로트 및 인증
- 빌드 플랫폼 치수, 빌드 모델
- 기기인정기록, 절차인정기록, 적층제조시공기준서
- 제조 기록 (계획된/비계획된 빌드 중단, 수정기록, 후처리)
- 검사 기록, 기기오퍼레이터인정기록
- 디지털 제어 계획, 교정 제어 계획

□ 적층제조 검사 (8절)

○ 비파괴 검사 자격 부여

- 업계에 적합한 NDE 표준에 따라 자격 부여

○ 비파괴 검사

- 육안 검사자 요건 : AWS QC1 or AWS B5.2
- 치수 검사 (인장시험편, ASTM E8/E8M)
- 침투 탐상 검사 (ASTM E1417/E1417M)
- 자분 탐상 검사 (ASTM E1444)
- 방사선 투과 검사 (ASTM E1742/E1742M)
- 3D-CT (ASTM E1570)
- 밀도 테스트 (ASTM B962)

○ 파괴 평가

- 인장 시험 (ASTM E8/E8M)
- 금속 조직 검사 (ASTM E3, ASTM E407)
- 화학 성분 (ISO, ASTM)

○ 허용 기준

- 불연속부 허용기준
- 인장 시험 허용 기준

4. ASTM, ISO 적층제조 Test Methods 표준 현황

구분	발행된 표준 (5건)
ASTM	<ul style="list-style-type: none"> ○ F2971-13 : 적층제조로 제작된 시험편 시험 데이터들의 Reporting을 위한 표준 ○ F3133-14 : 적층제조 공정으로 제작된 금속의 기계적 물성평가에 대한 표준 가이드
ISO/ASTM	<ul style="list-style-type: none"> ○ ISO/ASTM 52902-19 : 적층제조-시험결과물-적층제조 기하학적 평가체계 ○ ISO/ASTM 52907-19 : 적층제조-공급원료재료-금속분말을 특성화하는 방법 ○ ISO/ASTM 52921-13 : 적층제조 표준용어 - 좌표계 및 테스트 방법론

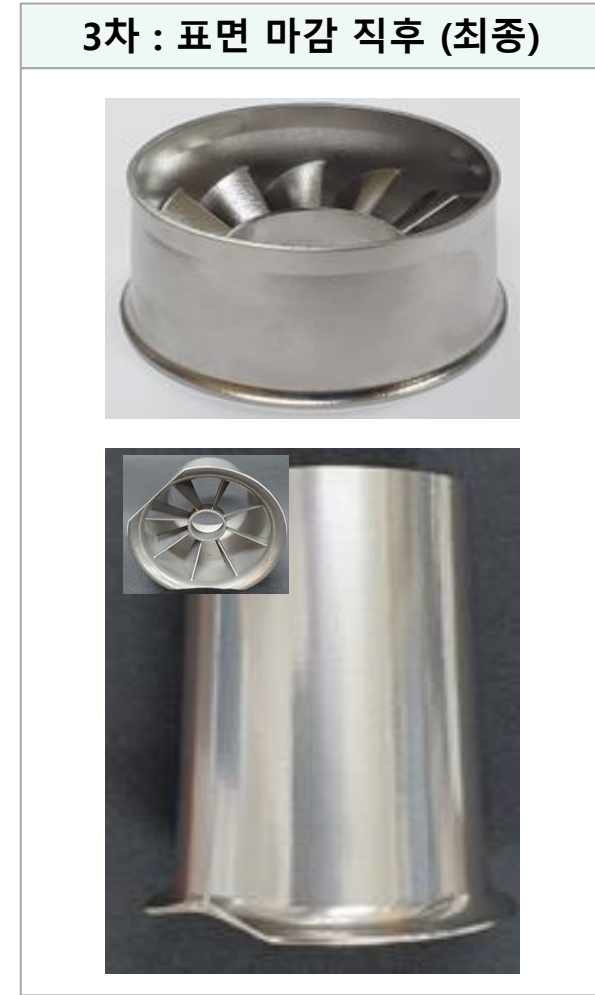
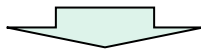
구분	개발 중인 표준 (14건)
ISO/ASTM	<ul style="list-style-type: none"> ○ WK55610 : 적층제조 적용 - 분말 유동성의 특성화 ○ WK67454 : 적층제조 - 공급원료 재료 - 금속 분말을 특성화하는 방법 ○ WK71393 : 적층제조 - PBF 공정에 대한 분말 퍼짐성 평가 ○ WK49229 : 금속 적층제조 - 기계적 특성에 미치는 방향과 위치 ○ WK69371 : 일반적인 기계적 성능에 관한 표준 관행 ○ WK71395 : 적층제조 - PBF 공정에 대한 적층상태에 대한 가속 품질 검사 ○ WK69731 : DED 적층제조 공정에 사용하기 위한 비파괴 검사(NDT) ○ WK71268 : 적층제조 - 자격 사항 - 레이저 기반 PBF - 파트 1 : 일반 사항, 시편 준비 ○ WK72237 : 적층제조 - 자격 사항 - 파트 2 : 산업용 적층제조 현장에 대한 요구사항 ○ WK56649 : 적층제조 부품 - 의도적으로 결함을 생성하기 위한 표준 관행/가이드 ○ WK70206 : 적층제조 - 금속 주물용 샌드 몰드의 시험 방법 - 파트 1 : 기계적 특성 ○ WK70207 : 적층제조 - 금속 주조용 샌드 몰드의 시험 방법 - 파트 2 : 물리적 특성 ○ WK71391 : 적층제조 - 폴리머 적층제조에 대한 정적 특성 ○ WK66029 : 폴리머 적층 제조 재료의 기계적 테스트

출처(KEPIC 금속3DP 위원회) : 금속 3D프린팅 KEPIC 표준화를 위한 조사분석 보고서

5. 시험·검사 기술의 적층제조 산업계 활용 방안

5.3 육안/외관 검사

구분	내용
비파괴 검사	육안 검사
	외관 검사
	표면조도 검사
	치수 검사
	PT, MT, RT 검사
파괴 검사	밀도 검사
	단면공극률 검사
	3D-CT 검사
	상온 인장 시험
	고온 인장 시험
	고온 크립 시험
허용 기준	불연속부 허용기준
	인장 시험 허용기준



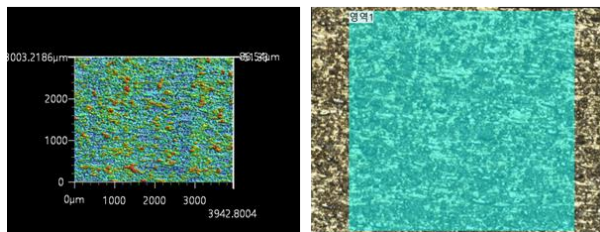
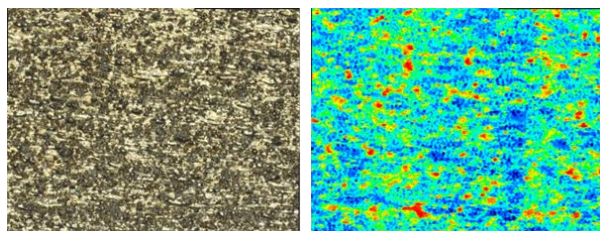
5. 시험·검사 기술의 적층제조 산업계 활용 방안

5.4 표면조도 검사

구분	내용
비파괴 검사	육안 검사
	외관 검사
	표면조도 검사
	치수 검사
	PT, MT, RT 검사
파괴 검사	밀도 검사
	단면공극률 검사
	3D-CT 검사
	상온 인장 시험
	고온 인장 시험
허용 기준	불연속부 허용기준
	인장 시험 허용기준

표면거칠기 측정 (레이저현미경)

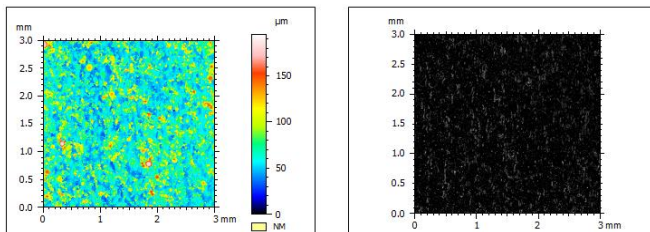
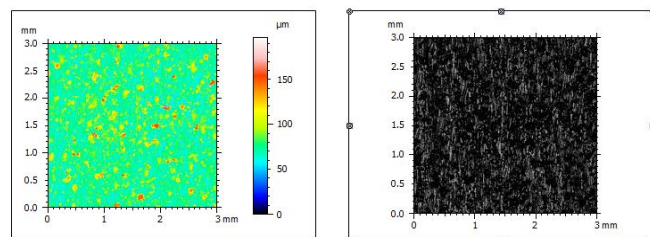
시험편 A



- 측정 배율 = x 120,
- 측정 영역 = 약 3mm x 3mm
- 측정값
 - Ra : 8.9 μ m
 - Rstr : 0.610 μ m

표면거칠기 측정 (공초점현미경)

시험편 B

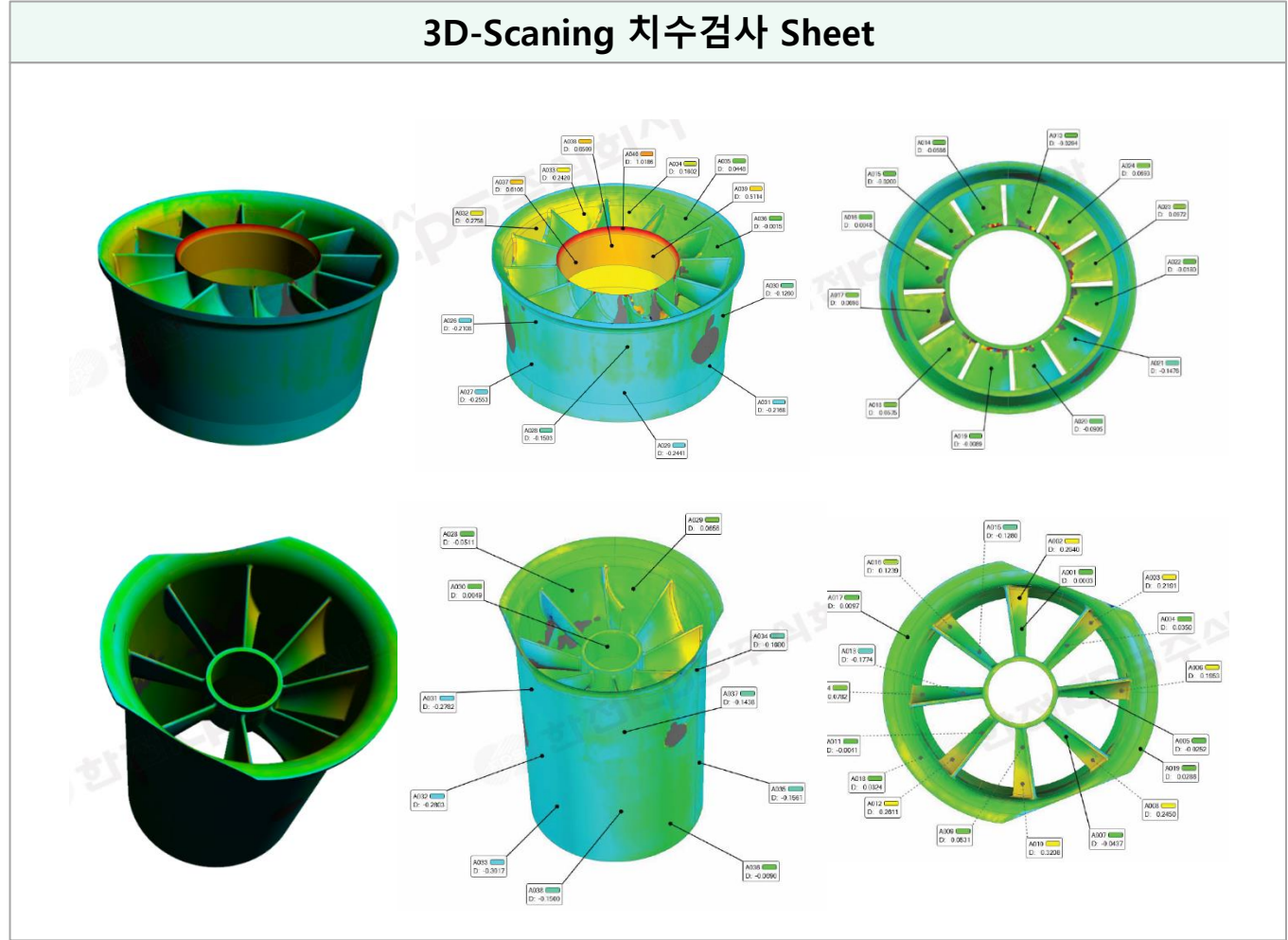


- 측정 배율 = x 120,
- 측정 영역 = 약 3mm x 3mm
- 측정값
 - Ra : 10.4 μ m
 - Rstr : 1.77 μ m

5. 시험·검사 기술의 적층제조 산업계 활용 방안

5.5 치수 검사

구분	내용
비파괴 검사	육안 검사
	외관 검사
	표면조도 검사
	치수 검사
	PT, MT, RT 검사
파괴 검사	밀도 검사
	단면공극률 검사
	3D-CT 검사
	상온 인장 시험
	고온 인장 시험
	고온 크립 시험
허용 기준	불연속부 허용기준
	인장 시험 허용기준



5. 시험·검사 기술의 적층제조 산업계 활용 방안

5.6 밀도, 단면공극률 검사

구분	내용
비파괴 검사	육안 검사
	외관 검사
	표면조도 검사
	치수 검사
	PT, MT, RT 검사
파괴 검사	밀도 검사
	단면공극률 검사
	3D-CT 검사
	상온 인장 시험
	고온 인장 시험
	고온 크립 시험
허용 기준	불연속부 허용기준
	인장 시험 허용기준

기술기준 및 표준 시험편

기술 기준	명칭
ISO 2738	Sintered metal materials, Excluding hardmetals – Permeable sintered metal materials –determination of density, oil content and open porosity
ASTM E562(Ref.)	Standard test method for determining volume fraction by systematic manual point count

밀도



밀도 = $\frac{\text{질량}}{\text{부피}}$



단면 공극률



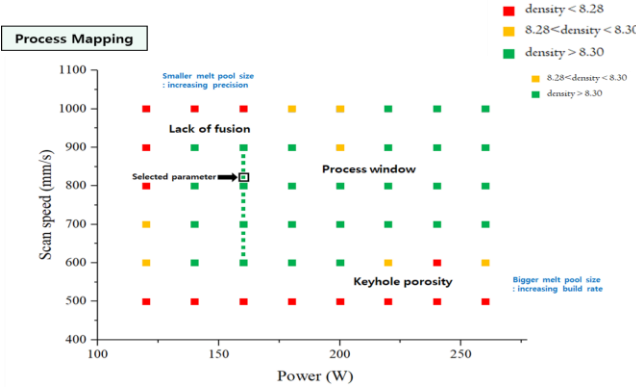
단면 공극률(%)
= $\frac{\text{측정된 공극 합계 면적}}{\text{시편 전체 면적}}$



안정적인 공정 범위 선정 활용

○ 밀도

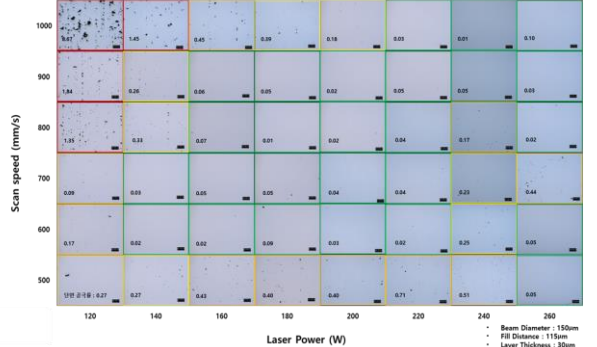
Process Mapping



Legend:
■ density < 8.28
■ 8.28 < density < 8.30
■ density > 8.30

○ 단면 공극률

Process Mapping



Legend:
■ 단면공극률 1.0 이상
■ 단면공극률 0.4 이상
■ 단면공극률 0.1 이상
■ 단면공극률 0.1 미만

5. 시험·검사 기술의 적층제조 산업계 활용 방안

5.7 3D-CT 검사

구분	내용
비파괴 검사	육안 검사
	외관 검사
	표면조도 검사
	치수 검사
	PT, MT, RT 검사
파괴 검사	밀도 검사
	단면공극률 검사
	3D-CT 검사
	상온 인장 시험
	고온 인장 시험
	고온 크립 시험
	금속 조직 시험
허용 기준	불연속부 허용기준
	인장 시험 허용기준

3D-CT 결함 사례

- 촬영 장비 : Phoenix Vtomex s240
- 촬영 조건 : 170kV, 130uA / Cone Beam
- 촬영 샘플 : 조건1, 조건2
- 촬영 조건 : Resolution 53μm / 49μm
- 촬영 결과 : 조건1 결함 발견 (동영상)

[동영상]

3D-CT 제공 데이터

- 3D-CT 이미지
- 3D-CT 결함 영상 (3D, 단면)
- 결함크기 및 Defect ratio %

NO1. Defect ratio 0.062%

 - Distance 1: 0.050 mm
 - Distance 2: 0.029 mm
 - Distance 3: 0.046 mm
 - Distance 4: 0.032 mm
 - Distance 5: 0.047 mm
 - Distance 6: 0.048 mm
 - Distance 7: 0.040 mm
 - Distance 8: 0.037 mm
 - Distance 9: 0.058 mm
 - Distance 10: 0.041 mm
 - Distance 11: 0.063 mm
 - Distance 12: 0.031 mm
 - Distance 13: 0.024 mm
 - Distance 14: 0.042 mm
- Defect 크기, 볼륨 (Raw Data)

id	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
1	837	0.20	0.00	76	200	342	0.00	2044	0.70	-0.14	0.00	0.00	70	200	342	0.00	2044	0.70	-0.14
4	837	0.11	0.20	69	159	536	0	427	0.10	-0.02	0.47	0.02	68	159	537	0.18	427	0.10	-0.02
5	755	0.06	0.12	127	107	524	0	723	0.25	-0.06	0.24	0.40	127	107	523	0.28	723	0.25	-0.06
6	754	0.12	0.24	80	140	520	0	484	0.16	-0.03	0.37	0.57	79	139	520	0.21	484	0.16	-0.03
7	74	0.16	0.30	483	86	542	0.01	965	0.10	-0.03	0.28	0.46	483	86	541	0.12	965	0.10	-0.03
8	737	0.14	0.27	209	69	539	0	566	0.19	-0.01	0.29	0.54	209	69	538	0.20	566	0.19	-0.01
9	701	0.17	0.34	76	133	519	0	795	0.26	-0.06	0.22	0.46	76	131	543	0.25	795	0.26	-0.06
10	699	0.13	0.26	200	131	57	0	477	0.19	0.00	0.26	0.49	200	132	57	0.21	477	0.19	0.00
11	688	0.12	0.24	88	480	542	0	492	0.17	0.09	0.34	0.54	88	487	541	0.21	492	0.17	0.09
12	677	0.12	0.42	78	48	532	0.01	1240	0.18	-0.09	0.18	0.44	78	48	530	0.19	1240	0.18	-0.09
13	642	0.13	0.27	143	143	327	0	548	0.18	0.18	0.29	0.52	143	143	329	0.18	548	0.18	0.18
14	614	0.11	0.22	143	143	327	0	548	0.18	0.18	0.29	0.52	143	143	329	0.18	548	0.18	0.18

5. 시험·검사 기술의 적층제조 산업계 활용 방안

5.7 상온 인장, 고온 인장, 고온 크립

구분	내용
비파괴 검사	육안 검사
	외관 검사
	표면조도 검사
	치수 검사
	PT, MT, RT 검사
파괴 검사	밀도 검사
	단면공극률 검사
	3D-CT 검사
	상온 인장 시험
	고온 인장 시험
허용 기준	고온 크립 시험
	금속 조직 시험
	불연속부 허용기준 인장 시험 허용기준

기술기준 및 표준 시험편

기술 기준	명칭
ASTM E8/E8M	Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials
ASTM E21	Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials
ASTM E139	Test Methods for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials

○ 상온 인장시험편 및 고온 인장시험편

※ 시험편 형상 변경 불가

○ 고온 크립시험편

※ 시험편 형상 변경 불가

물성에 미치는 영향 평가

○ 적층방향, 열처리 등

5. 시험·검사 기술의 적층제조 산업계 활용 방안

5.8 마크로 조직, 마이크로 조직

구분	내용
비파괴 검사	육안 검사
	외관 검사
	표면조도 검사
	치수 검사
	PT, MT, RT 검사
파괴 검사	밀도 검사
	단면공극률 검사
	3D-CT 검사
	상온 인장 시험
	고온 인장 시험
허용 기준	고온 크립 시험
	금속 조직 시험
	불연속부 허용기준 인장 시험 허용기준

마크로 조직

기술 기준	명칭
ASTM E340-15	Standard Practice for Macro etching Metals and Alloys

○ 결함의 유무 등

HIP SHT
[마크로 조직 64배 확대사진] [마크로 조직 64배 확대사진]

(참고) 파면

○ 취성파괴(Cleavage), 연성파괴(Dimple)

Cleavage Dimple
500 μm 20.0 μm
As-Built **HIP**

마이크로 조직

기술 기준	명칭
ASTM E407-07	Standard Practice for Micro etching Metals and Alloys

○ 결정립 크기

As-Built HIP#1 HIP#2 S/H HIP+S/H

○ 용융풀, 결정립방향, 상분율 등

❖ As-built



	OM	SEM	EBSD
Powder I (260W)		 Cell structure Columnar structure	 Grain size : 2416nm 상분율(%) γ 98.50 γ' 0.10 Cr3C2 0.19 Mn2C 0.01
Powder II (160W)			 Grain size : 455nm 상분율(%) γ 97.44 γ' 0.10 Cr3C2 0.22 Mn2C 0.01

5. 시험·검사 기술의 적층제조 산업계 활용 방안

5.9 허용기준

구분	내용
비파괴 검사	육안 검사
	외관 검사
	표면조도 검사
	치수 검사
	PT, MT, RT 검사
파괴 검사	밀도 검사
	단면공극률 검사
	3D-CT 검사
	상온 인장 시험
	고온 인장 시험
	고온 크립 시험
	금속 조직 시험
허용 기준	불연속부 허용기준
	인장 시험 허용기준

불연속부 허용기준
<ul style="list-style-type: none"> ○ 불합격 : 균열, 오버랩, 융합불량 ○ 기공(표면) 허용기준 <ul style="list-style-type: none"> - Class A : Max. 0.76mm(0.25T), 간격8배 - Class B : Max. 1.50mm(0.33T), 간격4배 - Class C : Max. 2.30mm(0.50T), 간격2배 ○ 기공(표면아래) 허용기준 <ul style="list-style-type: none"> - Class A : Max. 1.50mm(0.33T), 간격4배 - Class B : Max. 2.30mm(0.50T), 간격2배 - Class C : Not Applicable ○ 개재물 허용기준 <ul style="list-style-type: none"> - Class A : Max. 1.50mm(0.33T), 간격4배 - Class B : Max. 2.30mm(0.50T), 간격2배 - Class C : Not Applicable ○ 기타 허용기준 <ul style="list-style-type: none"> - Arc Strikes/Gouges/Color(Ti/CS/SS/Ni) <p>[MNB 5320 방사선투과검사의 합격기준]</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 불합격 : 균열, 융합불량, 용입불량 ○ 길이가 가늘고 긴 형상의 지시 <ul style="list-style-type: none"> - 두께 19mm 이하 : Max. 6mm <p>[MNZ 부록 VI 원형지시]</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 불합격 : 균열, 융합불량, 용입불량 <ul style="list-style-type: none"> - 두께 3mm 미만 : 0.25T - 두께 3mm~19mm : 0.80~4.00mm(Random) 1.10~6.40mm(Isolated)

인장 시험 허용기준
<ul style="list-style-type: none"> ○ 최소설계값 충족 (Y.S, T.S, Elongation) <ul style="list-style-type: none"> - Component material type and property value requirements. ① 표준 인정 빌드 (기기 인정) <ul style="list-style-type: none"> - Class A <ul style="list-style-type: none"> * Y.S 및 T.S : 통계적 95/95 하한치 → 최소설계값 충족 * Elongation : 최소설계값 충족 - Class B <ul style="list-style-type: none"> * Y.S, T.S, Elongation : 최소설계값 충족 ② 예비 제조 빌드 (절차 인정) 및 제조 빌드 Production Builds <ul style="list-style-type: none"> - Class A, B : 최소설계값 충족 <ul style="list-style-type: none"> * Class A : 입증(Witness) 시험편 최소 3개 * Class B : 입증(Witness) 시험편 최소 1개
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>얇은 두께는? → sub-Size 시험편</p> </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div>

5. 시험·검사 기술의 적층제조 산업계 활용 방안

5.10 입증(Witness) 시험편 인장 시험 사례

구분		기존품	개발품					
재질		STS321	Hastelloy-X					
		(UNS S32100)	(UNS N06002)					
제작방법		주조	3D프린팅 분말적층용융(PBF) 제작 + 열처리(HIP)					
기계적 특성	구분	한전KPS 기술규격서	인장시험 [한국SGS KOLAS 공인기관]				기존품 대비 개선 효과(%)	
			No.1	No.2	No.3	Ave.		
	인장강도(MPa)	620	738	742	735	738		119%
	항복강도(Mpa)	276	336	339	331	335		121%
	연신율(%)	40	53	55	54	54	135%	
적용 기술기준 (Code & Standard)		<ul style="list-style-type: none"> - ASTM E8 : Standard Methods of Tension Testing of Metallic Parts - ASTM E21 : Standard Recommended Practice for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials 						
3D프린팅 제작품 시험 과정		<p>3D프린팅 제작 (현물+시편) 시편 채취 열처리 시편 기계가공 공인기관 시험</p>						

6. 결론

- 적층제조에 대해 미국용접학회(American Welding Society, AWS)는 산업 적용을 위해 반드시 필요한 기기, 절차 및 작업자에 대한 인증 및 제조 요건인 **AWS D20.1** “Specification for Fabrication of Metal Components using Additive Manufacturing”을 2019년에 발행함.
- 이는 3D프린팅 제품 제작을 위해 **설계자가 제공해야 할 재료요건, 설계마진 등의 요건에 대한 기술기준의 수립에 아직 상당한 시간이 필요한 현 상황**에서 이와 무관하게 적용할 수 있는 기기, 절차 및 작업자에 대한 인정요건 및 제조요건에 대한 기술기준을 발행했다는 측면에서 관련 산업이 시급히 필요로 했던 적절한 기술기준으로 판단됨.
- 국내 원전 품목 중, 적용 가능한 Ni-계 합금인 인코넬 718(ASTM F3055-14a)과 오스테나이트계 스테인리스 316L(ASTM F3184-16) 재질에 대해서, 적층제조 R&D 수행 시 AWS D20.1 요건 중 기기 인정, 절차 인정 등을 문서화하고 관련 타당성 검증을 수행하여 향후 KEPIC 금속 3DP 표준화 개발에 기여할 예정임.

출처(KEPIC 금속3DP 위원회) : 금속 3D프린팅 KEPIC 표준화를 위한 조사분석 보고서 참조

경청해 주셔서 감사합니다!

E-mail : youngzoo894@kps.co.kr

(Tel : 061-345-0572, H.P : 010-2541-3608)

꿈과 희망을
만드는 기업

고객/의/행/복/을/함/께/만/들/어/감/니/다



한전KPS(주)

KEPCO PLANT SERVICE & ENGINEERING

