

2022 KEPIC-Week 금속 3DP 워크숍

원전 부품의 3D프린팅 기술 활용 및 현장 적용성 검토

2022. 7. 15

한국수력원자력(주) 중앙연구원
장경남 선임연구원, 양승한 책임연구원



- 「3D프린팅(적층제조)」기술은 제조공정 혁신을 주도하는 4차 산업기술임
- 일부 산업분야(항공, 국방, 의료 등)에서 활용 추진 중이나 원전분야는 미흡
 - 원전 산업은 상대적으로 기술적 보수성이 강함(현재도 아날로그 방식 사용)
 - 경제성 보다는 안전성을 우선시 하므로 기술기준에 근거하여 기기/부품 제작
- 원전에 3D프린팅 기기/부품 활용 분야
 - 다품종 소량 생산이 필요한 원전 단종품의 대체품 생산

- 단종의 원인
 - 기기의 수요 감소로 인한 생산 포기(미국 원전 건설 중단 → 미국내 업체가 생산 포기)
 - 고비용이 소요되는 원자력 품질관리 체계 포기(일반 상용품으로는 생산)
 - 신규 노형 또는 SMR(Small Modular Reactor) 설계 시 기존 방법으로 제작이 불가능한 설계 부품 제작
- 3D프린팅을 이용한 원전 기기/부품 제작 지속적으로 시도 및 성능 평가 필요

비금속/금속 3D프린팅을 이용한 원전부품 제작 현황 및 현장 적용 방향

비금속 3D프린터

- 제작사 : Stratasys
- 모델명 : FOCUS F900
- 방 식 : FDM(Fused Deposition Modeling)
- 제작크기 : 900 × 600 × 900 mm
- Layer : 0.254 mm(0.01")



금속 3D프린터

- 제작사 : DMG MORI
- 모델명 : Lasertec 65 3D hybrid
- 방 식 : DED(Directed Energy Deposition)
- 제작크기 : $\Phi 500 \times 400$ mm
- Layer : 0.8~1.5 mm



비금속 3D프린팅 제작 부품

- 비금속 3D프린팅으로 제작할 수 있는 부품은 제한적
 - 한정적인 재료(PP, ABS, PC 등), 비금속 부품 원전 활용성 낮음
- 시제품, 케이스, 목업(Mock-up), 모형 등 제작

High Performance 소재(Nylon 12 CF) 사용 사례



월성3호기 SG
2단 습분분리기
검사장비 시험용 목업



인체 모의 피폭제 시제품용
인체 주요 장기 모형



다족보행로봇 다리 부품

비금속 3D프린팅 제작 부품

Engineering 플라스틱 소재(PC) 사용 사례



해수배관점검 로봇
부품 시제품



ICI 가이드 튜브 검사
프로브 바디 시제품



핵종분석기 검출기
시료받침대



밸브 바디
시제품



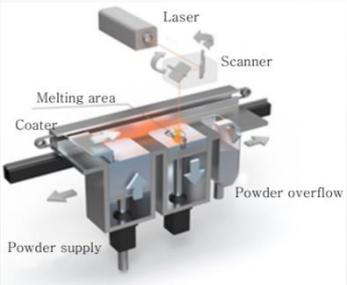
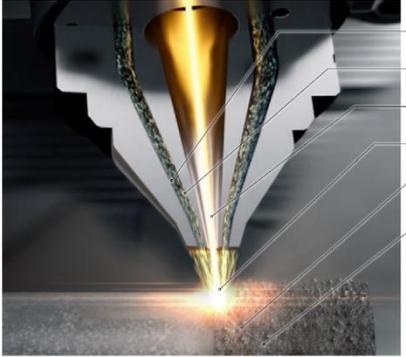
APR1400 원자로 냉각재 계통 모형



계측기기 역설계 품목 시제품 케이스

금속 3D프린팅 제작 부품

- 금속 3D프린팅 제작품은 원전산업에 유용하게 활용될 가능성 높음
 - 다품종 소량 생산이 필요한 원전 단종품의 대체품 생산
 - 신규 노형 또는 SMR(Small Modular Reactor) 설계 시 기존 방법으로 제작이 불가능한 설계 부품 제작
 - FGM(Functionally Graded Material) 활용 코팅, 이종용접부 제작
- 금속 3D프린팅 종류

종류	PBF(Powder Bed Fusion)	DED(Directed Energy Deposition)
내용	일정영역에 도포된 금속분말에 레이저를 선택적으로 조사하여 금속분말을 국부적으로 용융 또는 소결	실시간으로 공급되는 금속분말을 고출력 레이저로 즉시 용융시켜 적층
	 	 

해외 원전 적용 현황



- **Westinghouse**
- **Thimble Plugging Device**
- **Constellation(Exelon) Byron #1 in 2020**



Secondary
Machining
and Heat
Treatment



Final
Assembly



- **Framatome**
- **Channel Fastner**
- **TVA Browns Ferry #2 in 2021**



- **Siemens**
- **Impeller**
- **Slovenia Krsko before 2017**



- **ENGIE Laborelec**
- **Pressure relief valve body**
- **Belgium Doel#3 in 2019**

금속 3D프린팅 제작 부품

○ 대상 품목

- 품명 : 게이트 밸브
- 용도 : 습분분리재열기 하단 응축수 배출
- 사양 : 1.5인치, 1500lb, S등급
- 작동환경 : 497°F, 482psi 증기
- 구동방식 : 모터구동



현장 설치 사진



밸브 셋트

3D프린팅 기술 적용한 단종 기기/부품 제작을 위해서는
설계정보를 복원하는 **리버스 엔지니어링(Reverse Engineering)** 필요

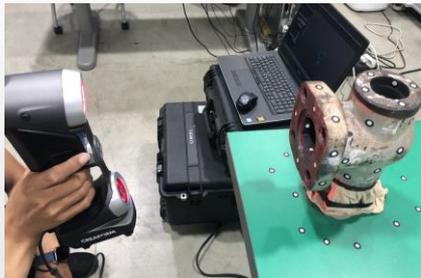
금속 3D프린팅 제작 부품

- 대상 품목 리버스 엔지니어링

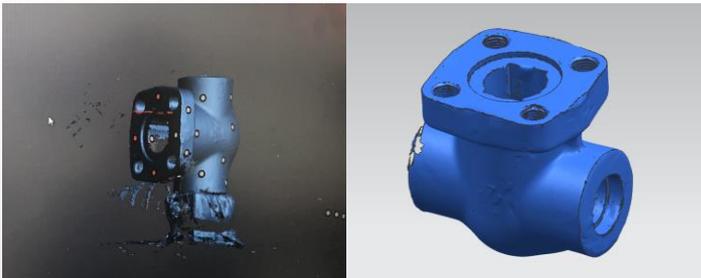
- 밸브 재질 분석-XRF Analyzer(Oxford instruments X-MET 7500)



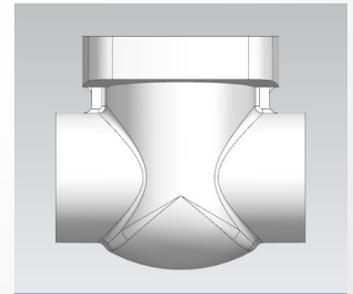
- 3D 스캐닝-HandySCAN 700 레이저 스캐너



밸브 바디 스캔



스캐닝 결과



3D 도면 제작

○ 적용 금속 3D프린터

- 제작사 : DMG MORI(독일)
- 모델명 : Lasertec 65 3D Hybrid
- 출력방식 : DED(Directed Energy Deposition)
- 레이저 출력 : 2,500W
- 출력가능크기 : $\phi 500\text{mm} \times 400\text{mm}$
- 특징 : 3D프린팅(적층)과 5축 기계가공 동시 수행



○ 3D프린팅을 위한 프로그램

- 기본 5축 가공기에 3D프린팅을 위한 레이저 노즐을 추가한 형태
- 3D프린팅 시 레이저 노즐은 프로그램된 툴 패스(Tool Path)에 따라 이동
- 3D프린팅 및 기계가공 모두 G-Code로 구동
- 툴 패스 및 G-Code 프로그램 생성을 위해 NX CAM(Computer Aided Manufacturing) 사용



○ 재료 : Stainless Steel 316L

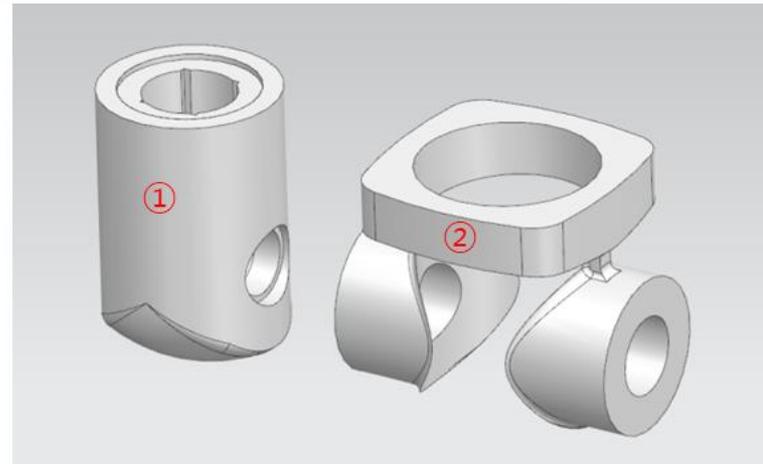
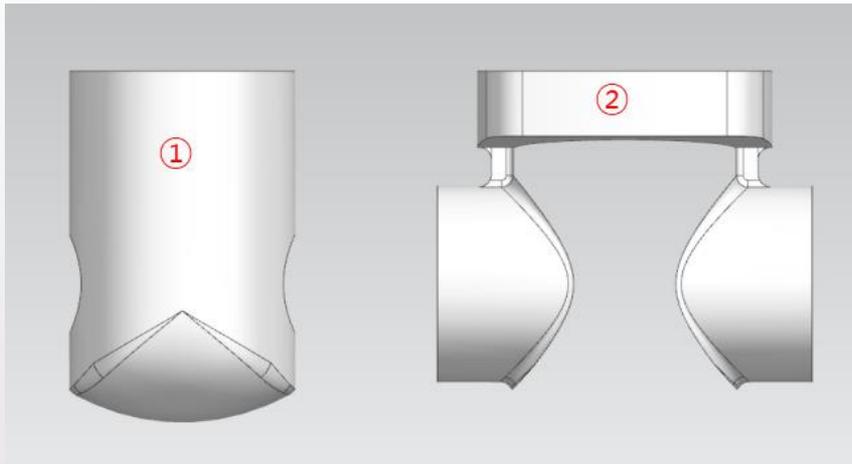
- 원 밸브의 재질은 Carbon Steel(ASTM A105)이나 동일한 재질의 분말이 부재
- DED방식의 금속 3D프린팅에 주로 사용되어 검증된 Stainless Steel 316L 사용

DED 방식 금속 3D프린팅 시 고려사항

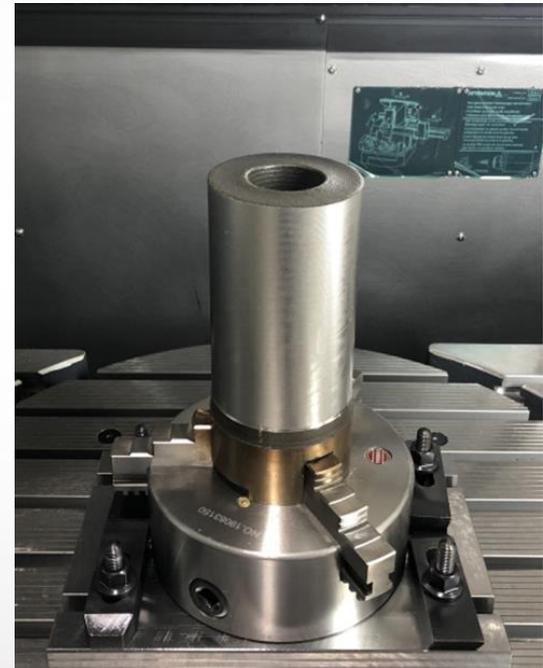
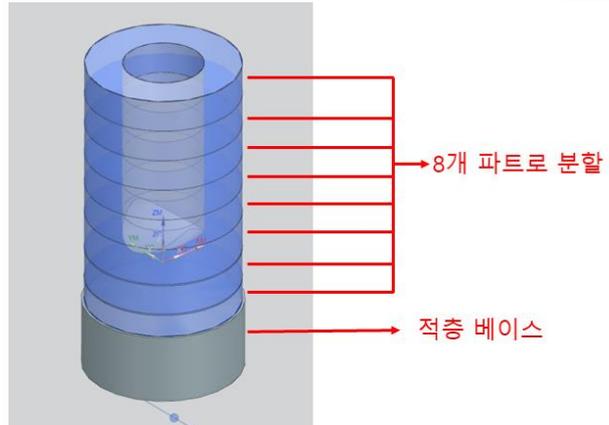
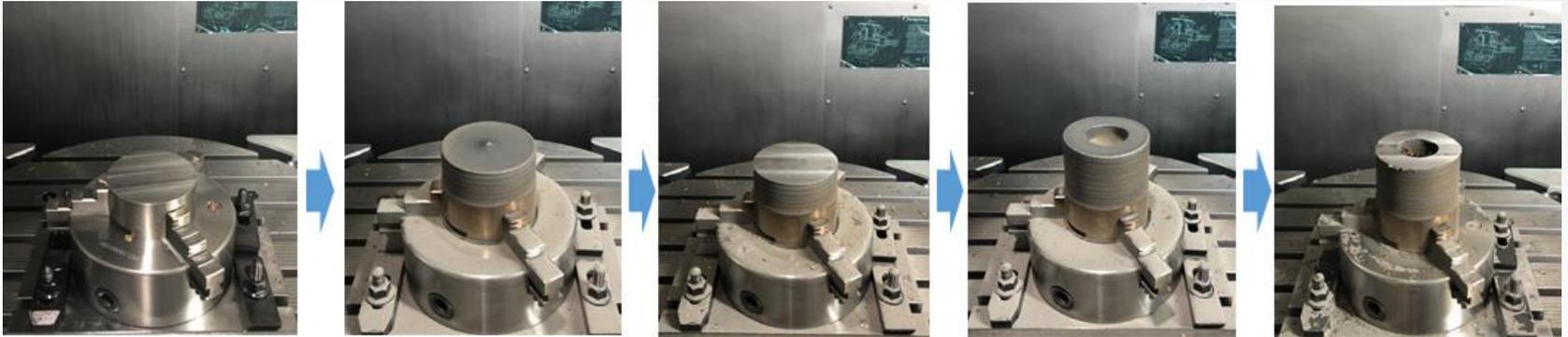
- DED방식의 특성 상 하부 구조물위에서만 적층 가능
 - ➔ 적층 베이스면이 있어야 하며 레이저 노즐과 수직이 되어야 함
- 적층 시 치수 정확도 및 표면 조도(Surface Roughness) 좋지 않음
 - ➔ 1~2mm 정도 크게 적층 후 5축 기계가공
- 적층방향에 홀(Hole)이 있는 경우 적층 불가능
 - ➔ 홀이 없는 상태로 적층 후 홀 기계가공



필요한 적층 및 가공 공정 파악 후 제작 계획 수립 필요

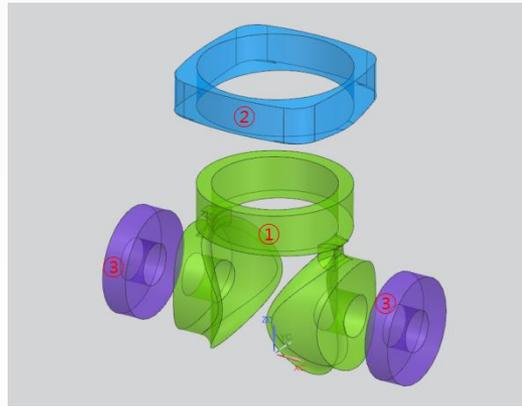
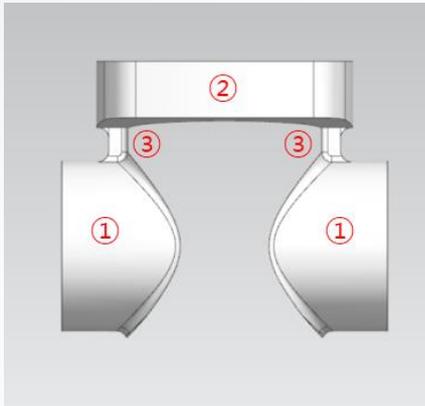


밸브 몸통 적층



배관 및 보닛 연결부 적층

- 3개 부분으로 나누어 적층



①번 적층



②번 적층



추가 적층위한 밀링 가공



③번 적층

후처리 및 정밀가공



기존 밸브바디



금속 3D프린팅 밸브 바디

3D 프린팅 밸브 조립체 제작

- 3D 프린팅 밸브 바디의 성능시험을 위해 밸브 조립체 제작
 - 밸브 구동부, 시트링, 디스크 등은 상용 밸브에서 분해 및 추출
 - 시트링은 밸브 바디에 용접, 디스크와 접촉면 교정 작업 수행
 - 플랜지는 ASME B16.5-2017 2인치 Class 1500급 규격으로 제작 후 소켓 용접



상용 밸브 분해

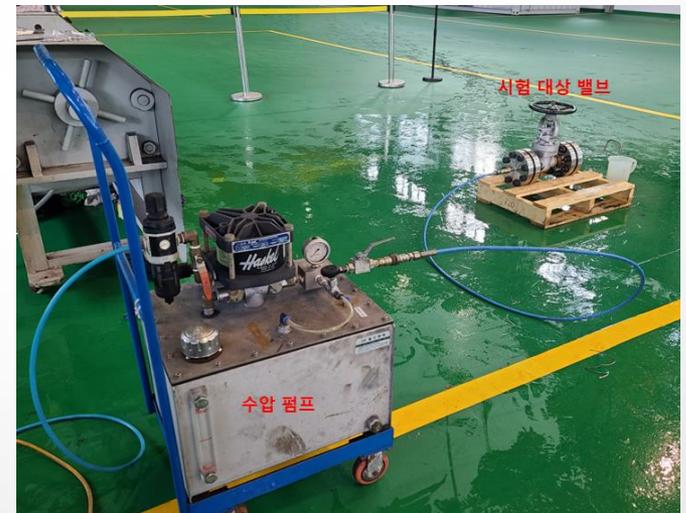


금속 3D프린팅 밸브 조립체

3D 프린팅 밸브 성능시험

● 시험 규격 : ASME B16.34, KEPIC-MGG 7.1장 몸통시험(Shell Test)

- 목적 : 고압의 유체(물)를 가압하여 밸브 바디의 누설여부 검사
- 시험압력 : 압력정격의 1.5배 → **383 bar(390.6 kg_f/cm²)**
 - 1.5인치, Class 1500, A105 재질 : (압력정격)255.3 bar → (시험압력)383 bar
 - 1.5인치, Class 1500, A182 Grade F316L 재질 : (압력정격) 206.8 bar → (시험압력) 311 bar
- 시험시간 : 시험압력 도달 후 **15초**(2인치 이하 밸브)
- 허용기준 : 압력경계부를 통한 누설은 허용되지 않음



3D 프린팅 밸브 성능시험

● 시험 규격 : ASME B16.34, KEPIC-MGG 7.2장 밸브폐쇄시험

- 목적 : 밸브를 닫았을 때 유체의 차단 여부를 검증
- 시험압력 : 압력정격의 1.1배 → **281 bar(386.3 kg_f/cm²)**
 - 1.5인치, Class 1500, A105 재질 : (압력정격)255.3 bar → (시험압력)281 bar
 - 1.5인치, Class 1500, A182 Grade F316L 재질 : (압력정격) 206.8 bar → (시험압력) 227 bar
- 시험시간 : 시험압력 도달 후 **15초**(2인치 이하 밸브)
- 허용기준 : 1.1mm³/s 이하 누설(KS B ISO 5208:1993 기술기준 준용)



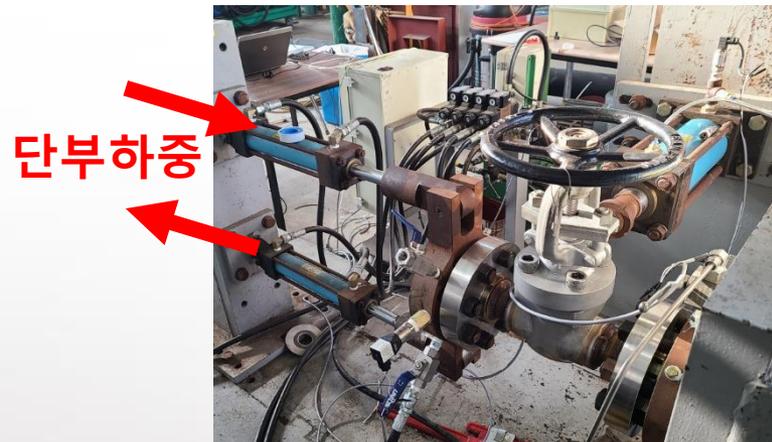
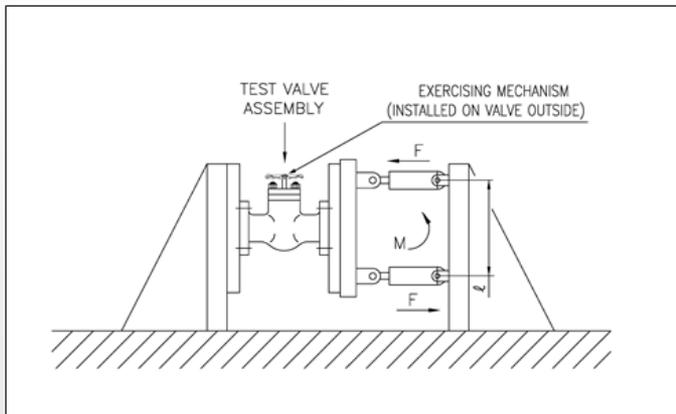
3D 프린팅 밸브 성능시험

● 시험 규격 : ASME QME-1 Sec.QV, KEPIC-MFC 4470 단부하중시험

- 목적 : 정상사용 하중과 모든 배관 단부하중을 받는 동안 시험밸브의 작동성 증명

시험 조건			
CWP (상온사용압력)	Initial Moment	Initial Pressure	Design Pressure
psig	lb _f ·in.	psig	psig
3,000	25,127	5,300	3,000

- 시험방법 : 밸브 Open → 모멘트 하중 작용 → 밸브 Close 후 주 시트 누설시험(5분)
- 허용기준 : 1.1mm³/s 이하 누설(KS B ISO 5208:1993 기술기준 준용)



3D 프린팅 밸브 성능시험

- 시험 규격 : ASME QME-1 Sec.QV, KEPIC-MFC 4480 내진시험

- 목적 : 밸브가 지진하중 검증 수준을 받고 있을 동안 시험밸브의 작동성 증명

시험 조건			
CWP (상온사용압력)	Initial Force	Initial Pressure	Design Pressure
psig	lb _f	psig	psig
3,000	881.5	5,300	3,000

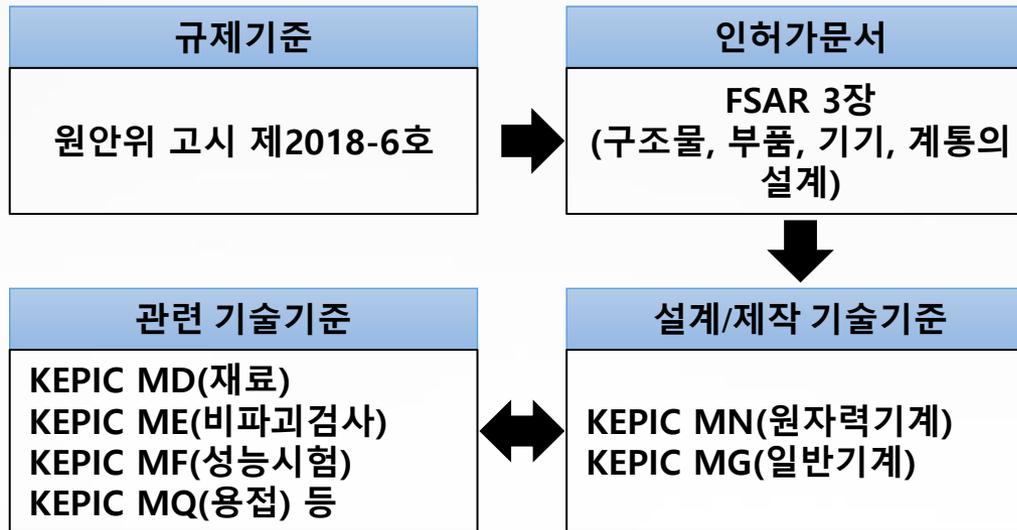
- 시험방법 : 밸브 Open → 지진 하중 작용 → 밸브 개폐 3회 수행
- 허용기준 : 밸브의 원활한 개폐

지진하중



원전 기기 및 부품 적용 체계

- 원안위 고시 제2018-6호 '원자력시설의 안전등급과 등급별 규격에 관한 규정'에 따라 KEPIC 또는 ASME 코드 적용(원자력발전소의 설계, 제작, 검사, 시험, 환경, 화재방호 등)



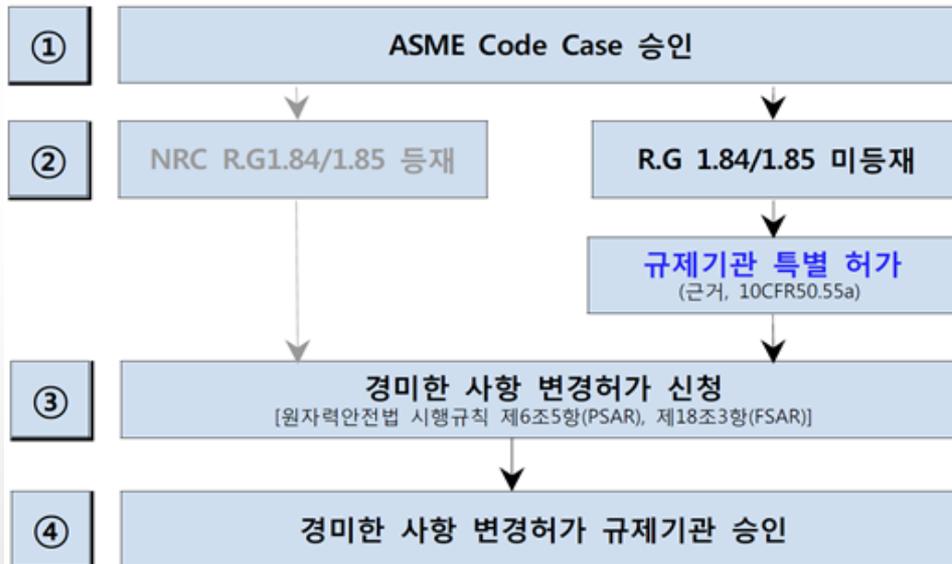
압력유지 재료 규격

분류	규격	내용
안전등급	KEPIC-MNX	KEPIC-MDP 부록 IIA 및 IIB에 수록 및 허용응력 내 설계
비안전등급	KEPIC-MGG	KEPIC-MGG 표 1에 인용한 ASTM 규격의 재료 또는 동일 KEPIC-MD 재료

● 안전등급 압력유지재료에 대한 ASME Code Case 추진 현황

- Draft ASME Sec.III Code Case for LPBF AM Stainless Steel 316L 제출(EPRI)
 - ASTM F3184-16 기반하여 설명과 추가적인 요건 추가
 - 열처리는 HIP과 Solution Anneal 사용 제안
- Stainless Steel 316L 재질에 대한 DED AM Code Case 제출 준비 중(KIWG)
- 기타 재질(Alloy 718, Alloy 690, 17-4 PH 등)의 Code Case 데이터 패키지 생성 중

● ASME Code Case 등재 후 원전 적용 절차



3D프린팅 제품 원전 적용

**3D프린팅 제품
원자력 품질보증 기준 만족**

규제기관의 기술기준 승인, 원전 운영자 FSAR 개정 인허가

원자력 산업 적용 기술기준 등재 (ASME Sec. II, Part D)

재질별 3D프린팅 제조방법 표준화
3D프린팅 제조품 재료특성 시험방법 및 요건 표준화
3D프린팅 제조품 검사방법(결함평가) 표준화

기술기준(ASTM, ASME, KEPIC) 위원회

원자력 기술기준 적용 3D프린팅 제품 제작

3D프린팅 최적화 설계 및 기능 개선 설계
기술기준에 따른 3D프린팅 제품 제작 및 시험
3D프린팅 제품의 기능적 성능 및 열화 특성(내구성) 보증

원자력 산업계

3D프린팅 품질 향상 및 평가 기술 개발

3D프린팅 재료특성 향상(후처리 등) 방안 연구
3D프린팅 재료특성 시험 방법 연구 및 기존 제작방법과 비교
3D프린팅 재료특성 요건 정립을 위한 기초 데이터 생성
3D프린팅 제품의 방사선 영향 및 완화방안 연구

연구기관

3D프린팅 신기술 개발 및 신뢰도 향상

3D프린팅 구조적 성능 향상 위한 신기술 개발
3D프린팅 재료의 다양한 지속적인 개발
3D프린터 장비 신뢰도 및 반복성 향상

3D프린터 장비/재료 제작 산업계

3D프린팅 기술 적용 계획



- 안전등급이 아니더라도 안전등급 수준의 품질문서 및 백업 데이터 필요

3D프린팅 부품 수요기업의 역할

- 원전 기기·부품 중 3D프린팅 적용 대상 지속적 발굴 및 산업계 전파
- 3D프린팅 기술의 원전 산업에의 적용을 위한 지속적인 기술개발 협력
- 원전 산업계의 3D프린팅 제품 공급망(Supply Chain) 구축 유도

3D프린팅 기술 원전 산업에 적극 적용

- 비금속 3D프린팅
 - 시제품, 목업, 케이스, 모형 제작에 활용
 - 신규 노형 또는 SMR 설계 시 설계 검증을 위해 축소 모형 제작
- 금속 3D프린팅
 - 다품종 소량 생산이 필요한 원전 단종품의 대체품 생산
 - 신규 노형 또는 SMR설계 시 기존 방법으로 제작이 불가능한 설계 부품 제작

3D프린팅 부품 현장 적용 방향

- 3D프린팅 기술 기준기준화 필요
 - 원전에 설치되는 모든 기기는 해당 기술기준에 근거하여 설계·제작·시험 필요
 - 금속 3D프린팅 재료의 원전 적용을 위해서는 해당 ASME 규격에 등재 필요
- 3D프린팅 기술 적용
 - 연구기관, 원자력/3D프린팅 산업계, 규제기관 협업 필요
 - 기술기준 미적용 품목부터 순차적으로 현장 적용(품질 및 백업 자료 생성)
 - 수요부품 발굴 및 적극적인 활용 노력 필요

**THANK
YOU**

