

SMR 혁신 제작 기술

5월 12일, 2021년

두산중공업, 원자력 BG
조성우



- ① SMR 혁신제작기술 개발 필요성
- ② SMR 경쟁력 확보를 위한 혁신제작기술 LIST
- ③ SMR 경쟁력 확보를 위한 혁신제작기술 상세

1. SMR 혁신제조기술 개발 필요성

1.1 배경(미국 현황)

- 1) 미국은 SMR¹⁾ 및 GEN-IV 경쟁력 확보를 위한 설계당시부터 혁신제조기술 개발(5년이상) 중
- 2) 미국 정부(DOE), 연구기관(EPRI), 제작사(NuSclae/BWXT), 대학이 공동개발
- 3) 미국의 혁신제조기술 개발 목적
- 4) ‘안전성+가격경쟁력’ 있는 노형을 제작하여 SMR시장 지배
- 5) 혁신제조기술(개발비 약 300억 이상)을 통한 제작기간 및 비용 약 50% 절감
- 6) 미국 자체기술(국산화)를 통한 미국 제작사 육성 및 구축

* 해외 정부 지원 프로그램

- 미국: **Advanced Method of manufacturing**
- 영국: **Nuclear Innovation Program**

1.2 주요 기술 개발 항목(미국 기준)

- 1) Electron Beam Welding & Heat Treatment: 전자빔 + 용접열영향부 삭제
- 2) Diode Laser Cladding: 다이오드 레이저 클래딩
- 3) PM-HIP
- 4) 표면처리
- 5) AM(Additive Manufacturing)

1.3 혁신제조기술 개발 필요성

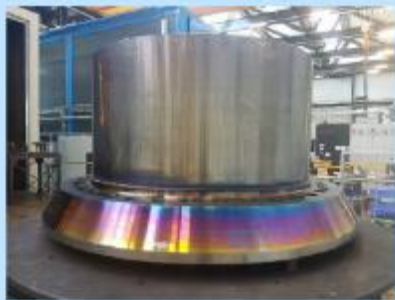
- 1) 최적설계를 통한 경쟁력 확보만큼, 혁신제조기술 경쟁력 확보 반드시 필요(국내 또는 수출용)
- 2) 현재의 국내 제작기술로는 미국 및 해외 SMR 대비 제작 경쟁력 부족
- 3) 한국도 미국과 같이 정부/연구기관/제작사/학교를 중심으로 기술 개발 필요
- 4) 미국과 같이 SMR 개발 초기(기획단계) 부터 혁신제조기술 계획이 반영되어야 함

2. SMR 경쟁력 확보를 위한 혁신제조기술 LIST

Three AMT Roadmaps

EPRI | ELECTRIC POWER
RESEARCH INSTITUTE

Primary Pressure Boundary (Class 1) Components



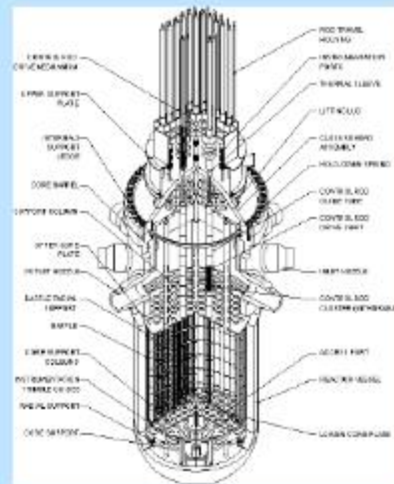
Reactor Internals



Courtesy of
Westinghouse Electric Company LLC



Photo credit:
Fred List - ORNL, US DOE



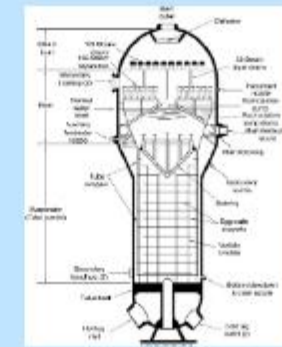
Other components (Obsolete parts, Classes 2 & 3, etc.)



Courtesy of
Siemens Power & Gas



Courtesy of
Westinghouse Electric Company LLC



Courtesy of
US NRC

2. SMR 경쟁력 확보를 위한 혁신제작기술 LIST

구분	혁신성	Risk	비고
전자빔 (EBW) 용접	<ul style="list-style-type: none"> 1패스 용접. 제작시간 단축 예열/후열/패스간 온도 삭제로 제작시간 단축 ISI(가동중검사) 연장 또는 삭제를 통한 운영 비용 절감 	<ul style="list-style-type: none"> 국내 기술 및 대형장비 없음 ASME CODE 개정 필요 규제기관 및 발전사 승인 필요 	<p>미국/영국 정부 주도로 개발 중</p> <p>* 제작시간 90%단축</p> <p>* ISI 검사 삭제</p>
다이오드 레이저 클래딩	<ul style="list-style-type: none"> 클래딩 두께 감소. 제작시간 단축 (10→2mm) 클래딩 무게 감소. 제품 무게 감소 표면 후처리 불필요. 제작시간 단축 자동화 용접. 제작시간 단축 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 설계사양서 변경 필요 (최소 3.2→1.5mm) 국내 적용 사례 없음 보수 방안 검토 필요 	<p>미국/영국 정부 주도로 개발 중</p> <p>* 제작시간 50%단축</p> <p>* 제품 무게 경량화</p>
PM-HIP (Powder Metallurgy- Hot Isostatic Pressing)	<ul style="list-style-type: none"> 원자로헤드와 같은 복잡형상 제작시간 약 90% 단축 용접부 최소화로 ISI 검사 비용 절감 	<ul style="list-style-type: none"> 제작CODE 필요 국내 적용 사례 없음 보수 방안 검토 필요 	<p>미국/영국 정부 주도로 개발 중</p> <p>* 제작시간 90%단축</p>
표면처리 (피닝 및 Cold Spray)	<ul style="list-style-type: none"> 응력부식균열(SCC) 방지를 통한 ISI 연장 SCC 원천 차단을 통한 혁신형 SMR 안전성 부각 	<ul style="list-style-type: none"> 제작 CODE 필요 전세계 최초 적용 SCC 관련 기술표준을 위한 시험 필요 	<p>미국/일본 검토중</p> <p>* ISI 50%이상 절감</p>
AM (Additive Manufacturing)	<ul style="list-style-type: none"> 원자로 내부구조물 제작시간 혁신단축 소형내즐 및 밸브류 제작 혁신단축 	<ul style="list-style-type: none"> 제작 CODE 필요 초대형 AM 장비 필요 	<p>미국/영국 정부 주도로 개발 중</p> <p>* 제작시간 50%단축</p>

3. 혁신형 SMR 경쟁력 확보를 위한 혁신제작기술 상세

3.1 전자빔용접(EBW)

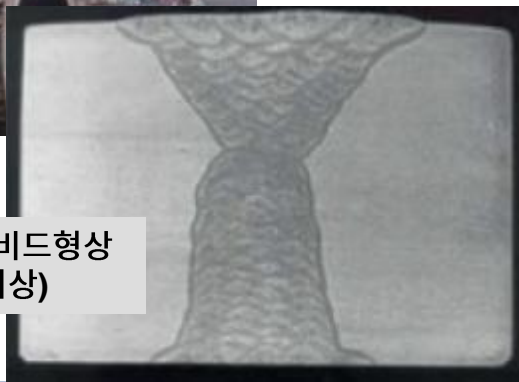
현재방식의 잠호용접(SAW)은 작업시간이 많이 소요되고 자동화가 어려워, 전세계적으로 혁신적인 전자빔용접이 개발되는 추세. 한국원전제조기술 경쟁력 확보를 위해 전자빔용접 국산화 개발이 반드시 필요

개발 전(현재 방식)

- ✓ 1개의 셀과셀 용접을 위해 수십패스 용접
- ✓ 용접재료(=용가재)를 용융시켜 이음부 용접

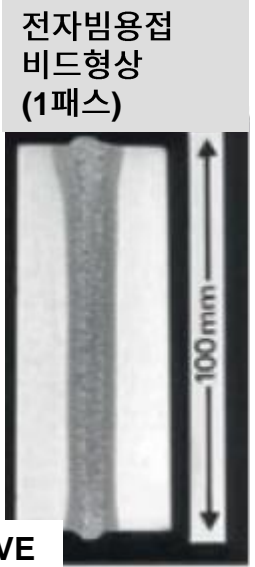
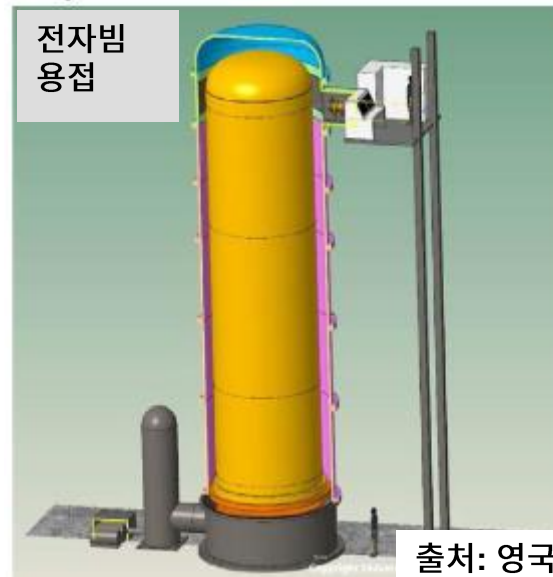


잠호용접 비드형상
(50패스 이상)



개발 후(개선 방식)

- ✓ 1개의 셀과셀 용접을 위해 한패스 용접
- ✓ 용접재료(=용가재) 불필요



출처: 영국CVE

개발 효과

- ✓ 소형 원자로 거스심 용접시간 90% 단축
- ✓ 용접부 소재열처리를 통한 가동중검사 50%이상 삭제(미국과 협조)

3. 혁신형 SMR 경쟁력 확보를 위한 혁신제조기술 상세

3.1 전자빔용접(EBW)

Electron Beam (EB) Welding

Why EBW?

- One-pass welding!
- No filler metal required
- EBW can produce welds w/ minimal HAZ
- Nuclear AMRC, TWI, Rolls-Royce & EPRI have demonstrated in-chamber and/or local vacuum on thick section alloys
 - Enables field/shop welding!
- RPV girth welds (110mm thick) in <60 min

Inspection, Costs?

- Huge savings in welding costs (up to 90%)
- Potential to eliminate in-service inspection coupled with heat treatment!



65mm (thick) x 3m length x 1.8m diameter

Welding time: <10 minutes

Photograph provided courtesy: TWI (UK)



Photograph provided courtesy: Nuclear AMRC (UK)

3. 혁신형 SMR 경쟁력 확보를 위한 혁신제조기술 상세

3.1 전자빔용접(EBW)

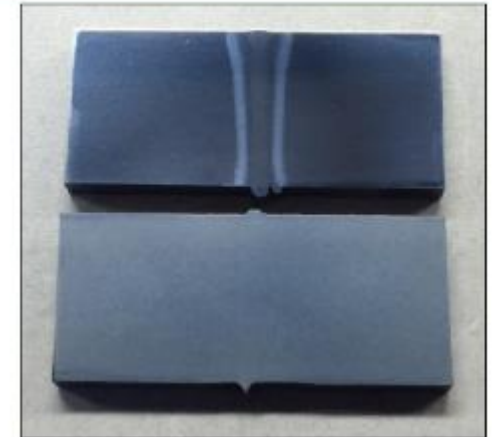
Elimination of Welds via Heat Treatment -Resetting the Clock

Eliminate the Weld through re-austenitization at high temperature. How?

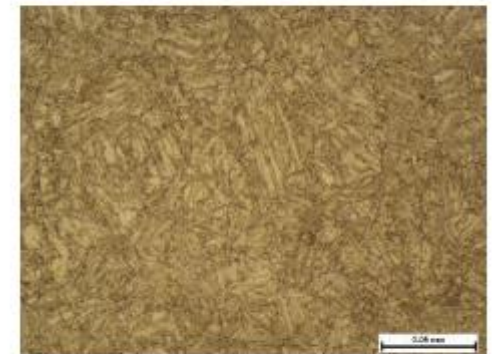
- Perform chamber EB weld of sub-assemblies
- Solution HT, quench; normalize; temper
- Resulting microstructure is same as base metal
- Fracture toughness comparable to base material

Inspection, Costs?

- Perform fabrication inspection prior to and following initial Solution Heat Treatment, plus Normalize & Temper (SQNT)
- Following HT, no weld is visible
- Potentially no weld inspection required at 10 year intervals



EBW+HT = 0 Weld



EB Weld after Heat Treatment
WCL microstructure @ 500X

3. 혁신형 SMR 경쟁력 확보를 위한 혁신제작기술 상세

3.2 다이오드 레이저 클래딩(DLC)

기존 SAW/ESW(잠호용접)에 의한 제품 내부 클래딩 방식을 광폭 다이오드레이저를 통해 클래딩 수행. 다이오드레이저클래딩은 용접희석율이 낮아 클래딩두께를 1~2mm정도로 줄일수 있음. 생산비용 절감 가능

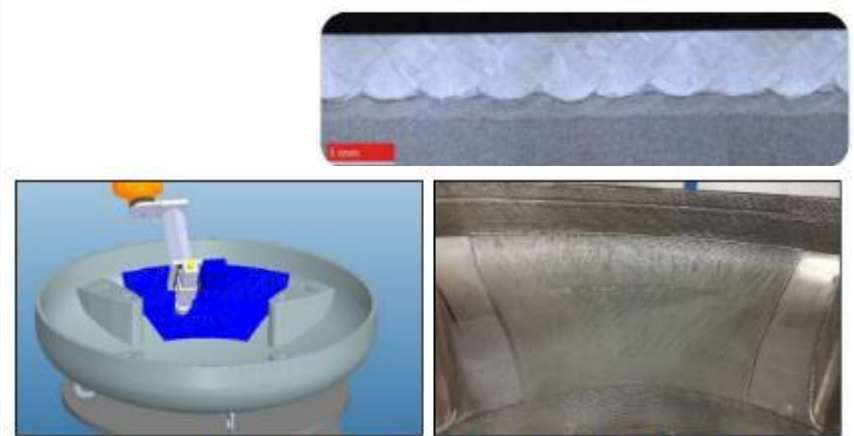
개발 전(현재 방식)

- ✓ SAW 또는 ESW의 의한 기계식 용접
- ✓ 클래딩 표면 기계가공 필요



개발 후(개선 방식)

- ✓ 다이오드레이저를 통한 자동 용접
- ✓ 클래딩 표면 기계가공 불필요



출처: 미국 EPRI 발표자료

개발 효과

- ✓ 소형 원자로 용접작업시간 50% 단축 가능
- ✓ 제품 경량화 가능

3. 혁신형 SMR 경쟁력 확보를 위한 혁신제조기술 상세

3.2 다이오드 레이저 클래딩(DLC)

Diode Laser Cladding

Why DLC?

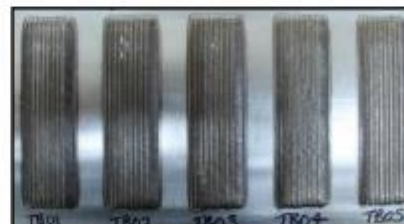
- Robotic machine & out-of-position welding
- Good deposition rates
- Significantly reduces cladding thickness required (~3-4mm)

Inspection, Costs?

- Lbs. (or kg) of material required is significantly reduced since thinner layers can be applied.
- No / minimal machining after cladding required



Diode Laser Cladding equipment setup
(images courtesy of NAMRC)



출처: 미국 EPRI 발표자료

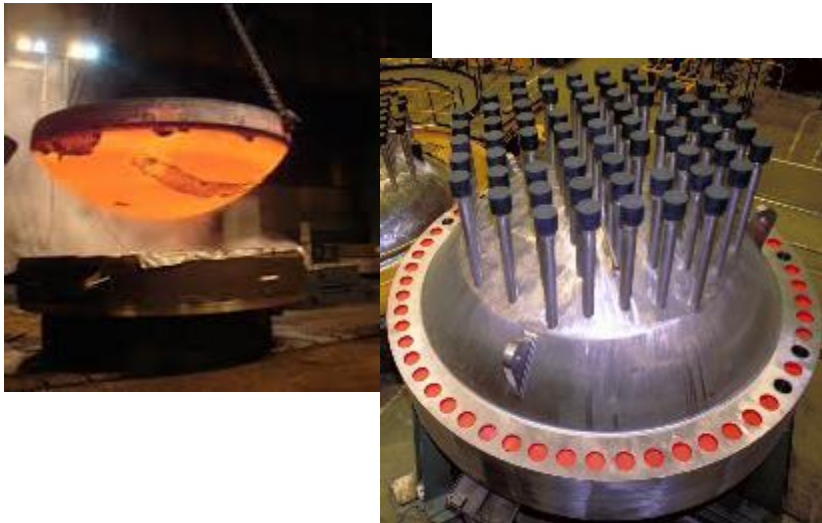
3. 혁신형 SMR 경쟁력 확보를 위한 혁신제조기술 상세

3.3 PM-HIP(Powder Metallurgy-Hot Isostatic Pressing)

기존 주조/단조/가공/용접/최종가공 등의 다수 공정을 HIP을 통하면 한번에 완제품을 제작할 수 있음.
제작시간이 현저히 단축되는 효과 있음

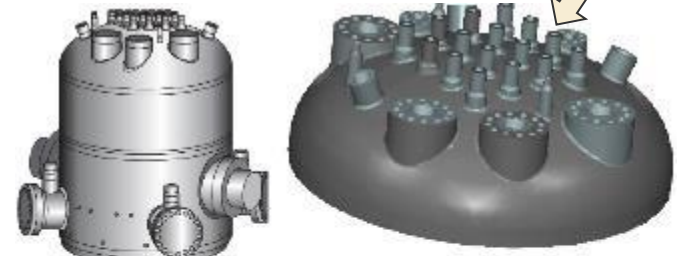
개발 전(현재 방식)

- ✓ 주조 및 단조를 통해 소재를 제작
- ✓ 주조/단조 후 가공공정이 많이 소요



개발 후(개선 방식)

- ✓ HIP을 통해 한번에 복잡형상 제작
- ✓ 소재 제작 후 가공공정이 최소화



Photographs courtesy of EPRI and NuScale Power



출처: 미국 EPRI 발표자료

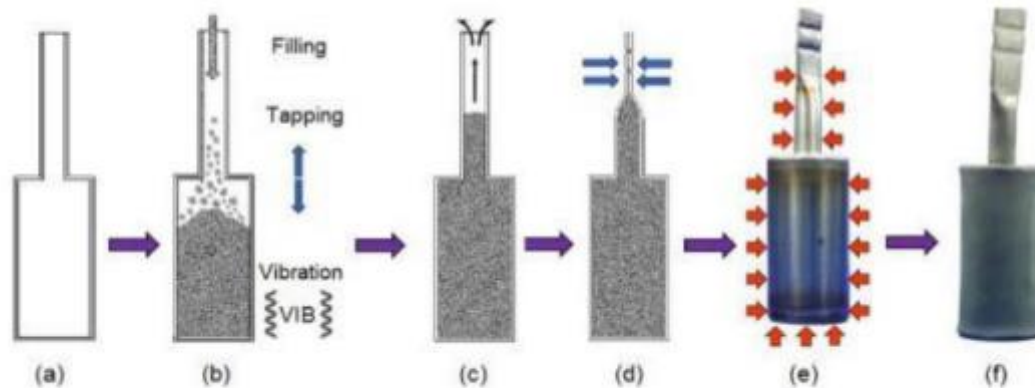
개발 효과

- ✓ 소형 원자로 용접작업시간 90% 단축 가능
- ✓ 기존 주조/단조 소재 대비 건전성 향상. 용접부 최소화 및 대체 가능

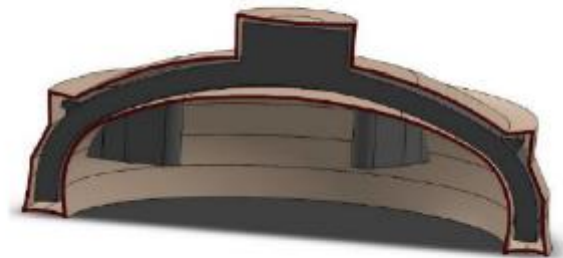
3. 혁신형 SMR 경쟁력 확보를 위한 혁신제조기술 상세

3.3 PM-HIP(Powder Metallurgy-Hot Isostatic Pressing)

Powder Metallurgy-Hot Isostatic Pressing (PM-HIP) Production Process



Courtesy of Aachen University,
IWM/IAPK Institute



출처: 미국 EPRI 발표자료

3. 혁신형 SMR 경쟁력 확보를 위한 혁신제조기술 상세

3.3 PM-HIP(Powder Metallurgy-Hot Isostatic Pressing)

Powder Metallurgy-Hot Isostatic Pressing (PM-HIP)

Why PM-HIP?

- Near-net shape and complex components (reduces materials cost and machining)
- Alternate supply route, shorter turn-around
- Considerable EPRI/Industry development over last 7 years
- Ideal for multiple penetration applications (RPV or CNV head) vs expensive forgings

Inspection, Costs?

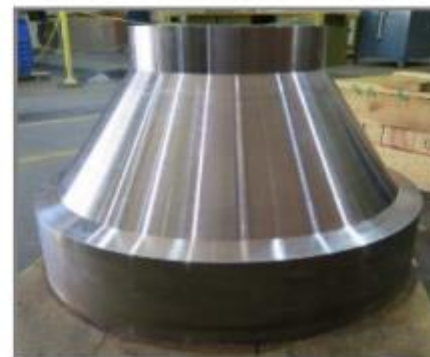
- Homogeneous – **Excellent inspection characteristics**
- Costs roughly equivalent to forging
- **Eliminates need for welds in some applications**



Large 316L SS Valve Body



Steam Separator Inlet Swirler



3700 lb BWR nozzle



NNS Reactor Coolant Pump Impeller
(courtesy Framatome and Albert & Duval)

3. 혁신형 SMR 경쟁력 확보를 위한 혁신제작기술 상세

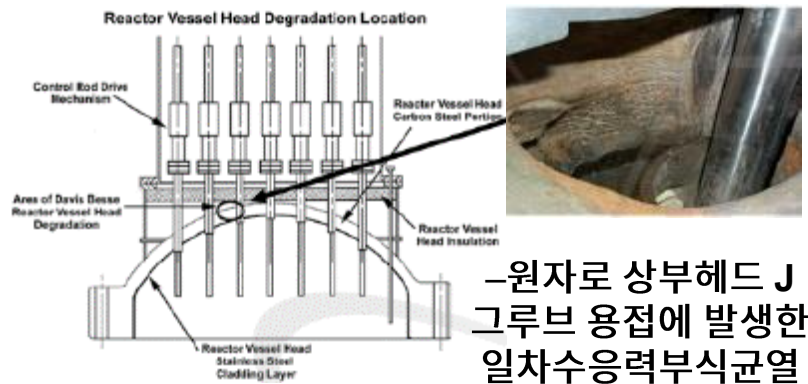
3.4 표면 처리

1. PWSCC: Primary Water Stress Corrosion Cracking (일차측 응력부식균열)
2. CISC: Chloride Induced Stress Corrosion Cracking (염화물 응력부식균열)

해외는 일차수응력부식균열 및 염화물유기응력부식균열 방지를 위해 원자로 및 사용후핵연료 건식저장 용기에 피닝 기술을 적용중. 레이저피닝은 용접표면에 레이저펄스를 사용해 압축응력을 부과하는 기술

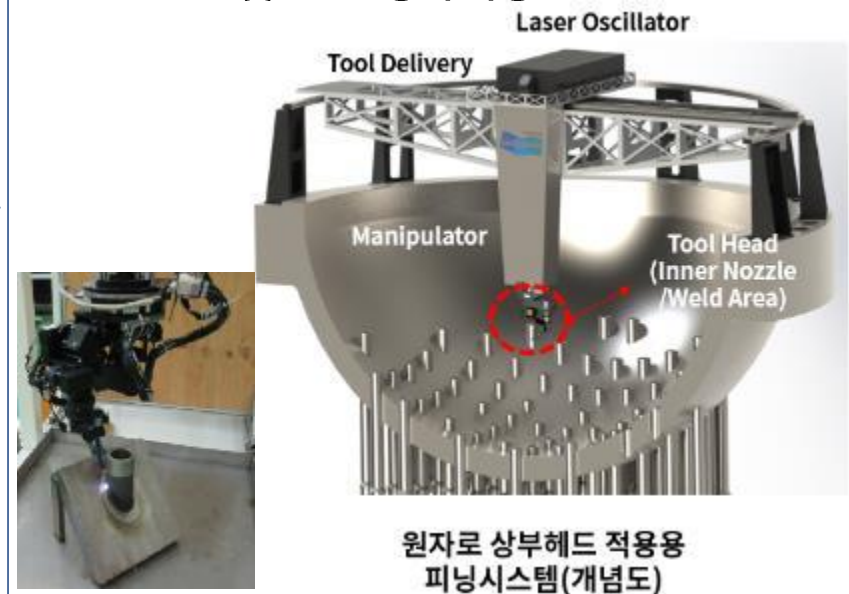
개발 전(현재 방식)

- ✓ 별도의 잔류응력 저감 기술 적용 안함
- ✓ PWSCC¹⁾ 및 CISC²⁾ 발생 우려 있음



개발 후(개선 방식)

- ✓ 잔류응력 저감을 위한 레이저피닝 기술 적용
- ✓ PWSCC 및 CISC 방지 가능

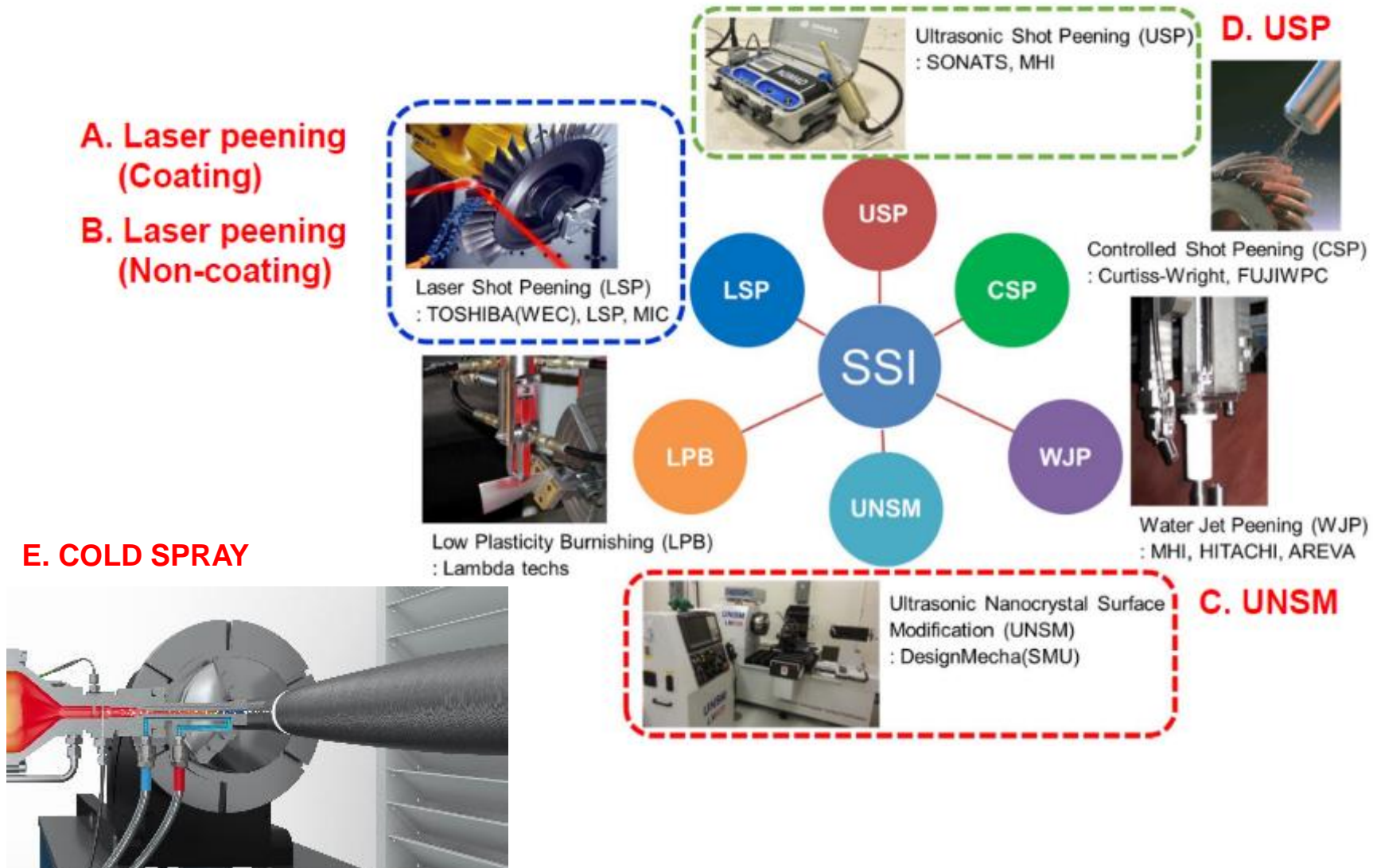


개발 효과

- ✓ 안전성 향상: 일차수응력부식균열 및 염화물유기응력부식균열 방지
- ✓ 가동중 검사 주기 50% 단축

3. 혁신형 SMR 경쟁력 확보를 위한 혁신제조기술 상세

3.4 표면 처리



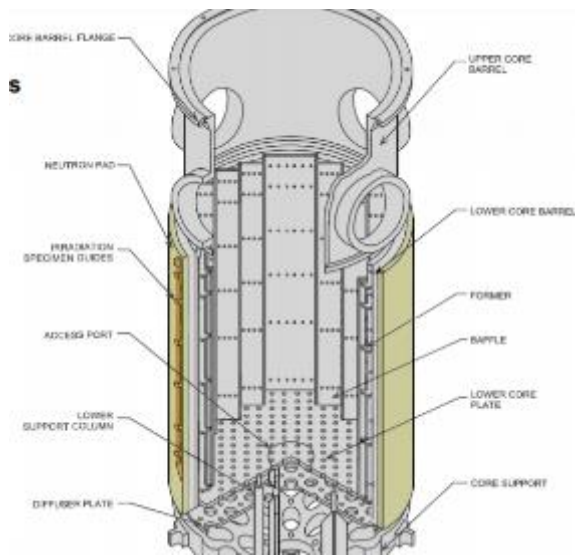
3. 혁신형 SMR 경쟁력 확보를 위한 혁신제조기술 상세

3.5 AM (Additive Manufacturing)

해외는 원자로내부구조물 및 소형 부품 제작을 위해 3D 프린팅기술을 개발하고 있음. 금속 파우더 또는 용접 와이어를 사용하여 3차원 형상의 제품 또는 부품을 만드는 기술

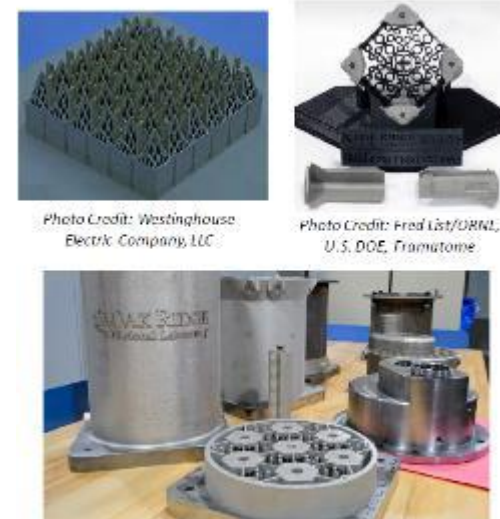
개발 전(현재 방식)

- ✓ 소재제작후 용접 및 제관 작업을 통해 제품 제작
- ✓ 제작시간이 길며, 용접후 변형이 자주 발생



개발 후(개선 방식)

- ✓ 3D 프린팅 기술을 통한 최종 제품 제작
- ✓ 용접 또는 제관 작업 불필요



출처: 미국 EPRI 발표자료

개발 효과

- ✓ 원자로 내부구조물 제작시간 혁신단축
- ✓ 소형내즐 및 밸브류 제작 혁신단축

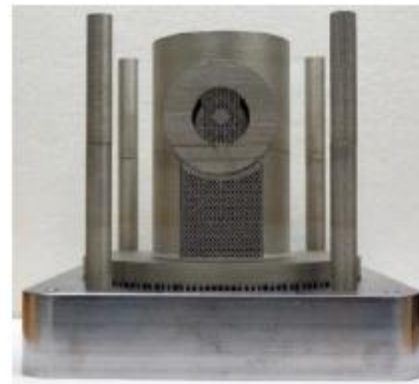
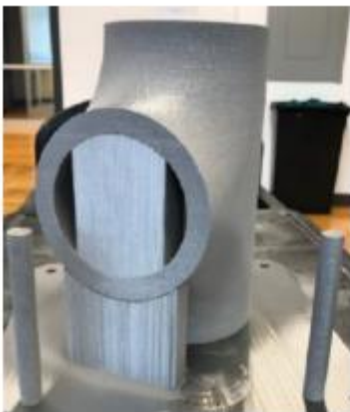
3. 혁신형 SMR 경쟁력 확보를 위한 혁신제조기술 상세

3.5 AM (Additive Manufacturing)

Additive Manufacturing Qualification for Nuclear Applications

- Develop and demonstrate innovative qualification strategy/approach
 - Incorporate Integrated Computational Materials Engineering (ICME) and in-situ process monitoring
- ASME Code Case for additively manufactured 316L
- Focused on laser powder bed fusion only

DOE Project
DE-NE0008521



EPRI | ELECTRIC POWER
RESEARCH INSTITUTE

Westinghouse

Rolls-Royce®

OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY
MANAGED BY UT-BATTELLE FOR THE U.S. DEPARTMENT OF ENERGY

THE UNIVERSITY of TENNESSEE | UT KNOXVILLE

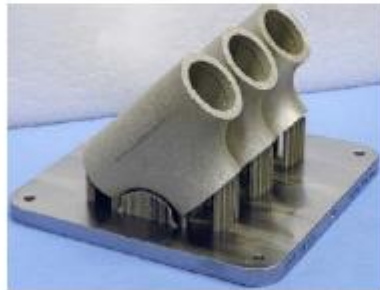
AUBURN UNIVERSITY
SAMUEL GINN
COLLEGE OF ENGINEERING

cerlikon
am

3. 혁신형 SMR 경쟁력 확보를 위한 혁신제조기술 상세

3.5 AM (Additive Manufacturing)

Advanced Manufacturing Processes



**Laser Powder Bed Fusion
Additive Manufacturing:**
<100 lbs (45kgs)



**Direct Energy Deposition
Additive Manufacturing:**
<500 lbs (225kgs)



Powder Metallurgy-HIP:
100-10,000 lbs (45-4500 kg)

감사합니다

두산중공업 원자력BG 용접기술팀
조성우

sungwoo1.cho@doosan.com

010-7732-5051