



SMR 제작 필요 요소기술 개요

2021.10.28
원자력품질/EHS 허남열

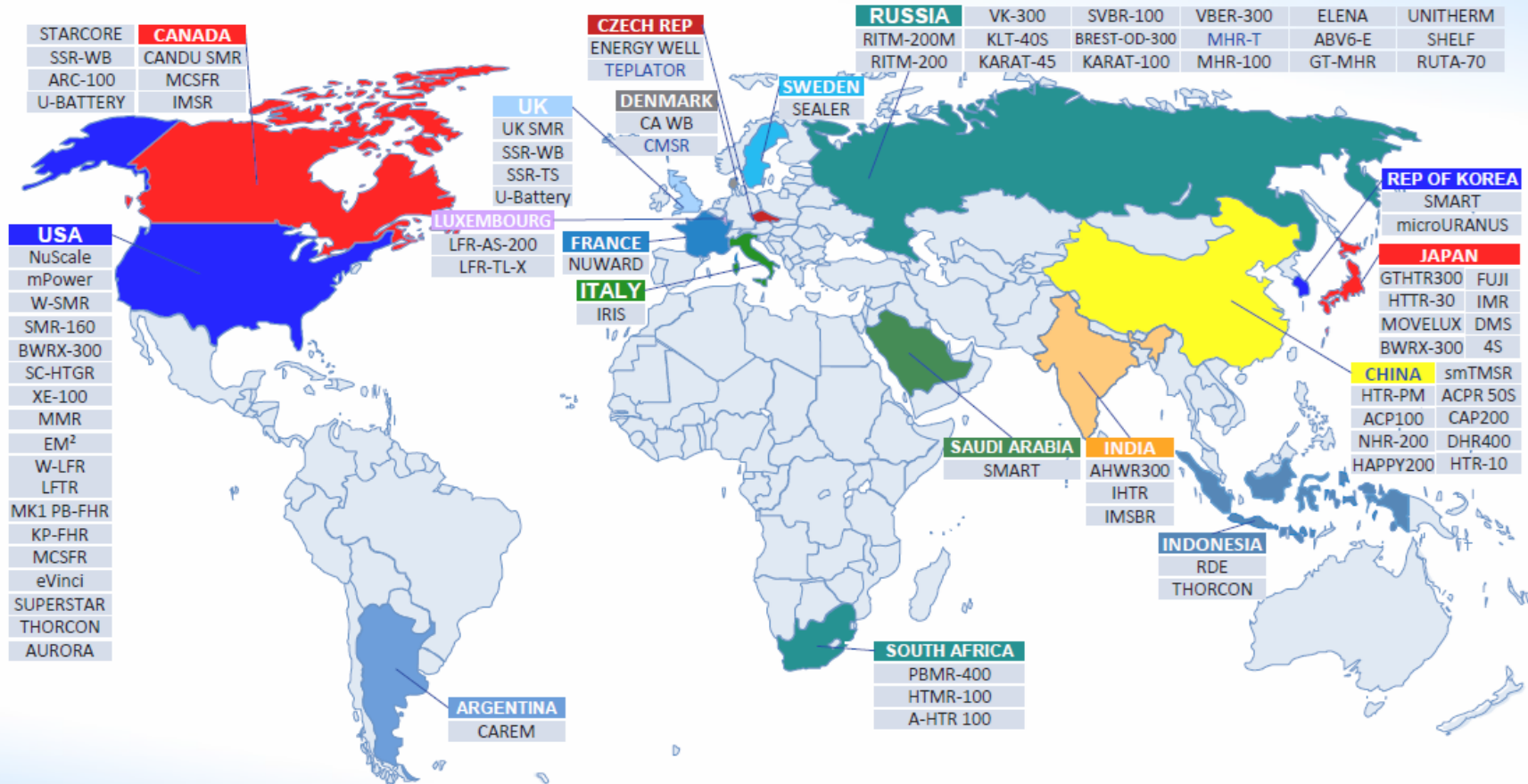
1. SMR의 Global Map
2. SMR 기술개발 Background
3. SMR 제작 요소기술 현황
4. SMR의 필요성과 혁신성
5. SMR 제작요소기술
6. 맺음말

1. SMR의 Global Map

Global Map of SMR Technology Development



[원전의 패러다임 변화 : 여러분 생각은?]



2. SMR 기술개발 Background

배경(미국 현황)

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

주요 기술 개발 항목(미국 기준)

- 1) Electron Beam Welding & Heat Treatment : 전자빔 + 용접 열영향부 삭제
- 2) Diode Laser Cladding: 다이오드 레이저 클래딩
- 3) PM-HIP(Powder Metallurgy-Hot Isostatic Pressing)
- 4) 표면처리
- 5) AM(Additive Manufacturing)

*해외 정부 지원 프로그램

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

3. SMR 제작 요소기술 현황

| 번호 | 과제명 | 개발목표/목적 |
|----|------------------------------|--|
| 1 | 전자빔용접(EBW) | <ul style="list-style-type: none"> ● 제작시간 90%단축 ● 250mm 두께 용접 가능한 장비 구축 |
| 2 | 다이오드 레이저 클래딩 | <ul style="list-style-type: none"> ● 제작시간 50%단축 ● 클래딩 두께를 줄일 수 있는 용접 장비 구축 |
| 3 | PM-HIP | <ul style="list-style-type: none"> ● 제작시간 90%단축 ● 주조/단조 대체할 수 있는 소재 제작 장비 구축 |
| 4 | 표면 피닝 | <ul style="list-style-type: none"> ● 제작시간 단축 효과 없음 ● 응력부식균열(SCC) 방지를 통한 ISI 연장 목적 ● ISI 검사 연장을 위한 DATA 확보 및 인허가 |
| 5 | AM (3D 프린팅) | <ul style="list-style-type: none"> ● 제작시간 50%단축 ● RVI 및 노즐 제작이 가능한 3D 프린팅 장비 구축 |
| 6 | Helical Tube Bending 및 검사 기술 | <ul style="list-style-type: none"> ● 제작기간 단축 효과 없음 ● 단, Helical Tube Bending 및 검사를 위한 필수 기술 ● 제작 장비 구축 및 검사 장비 개발 |
| 7 | 로봇 용접 | <ul style="list-style-type: none"> ● 제작시간 50%단축 ● 수동용접을 대체할 수 있는 로봇 용접 자동화 장비 구축 |

✓ **참조 동영상**, Global Forum Top 4 Innovation Story: Advanced Manufacturing

<https://youtu.be/gSAAa7S-M>



4. SMR의 필요성과 혁신성

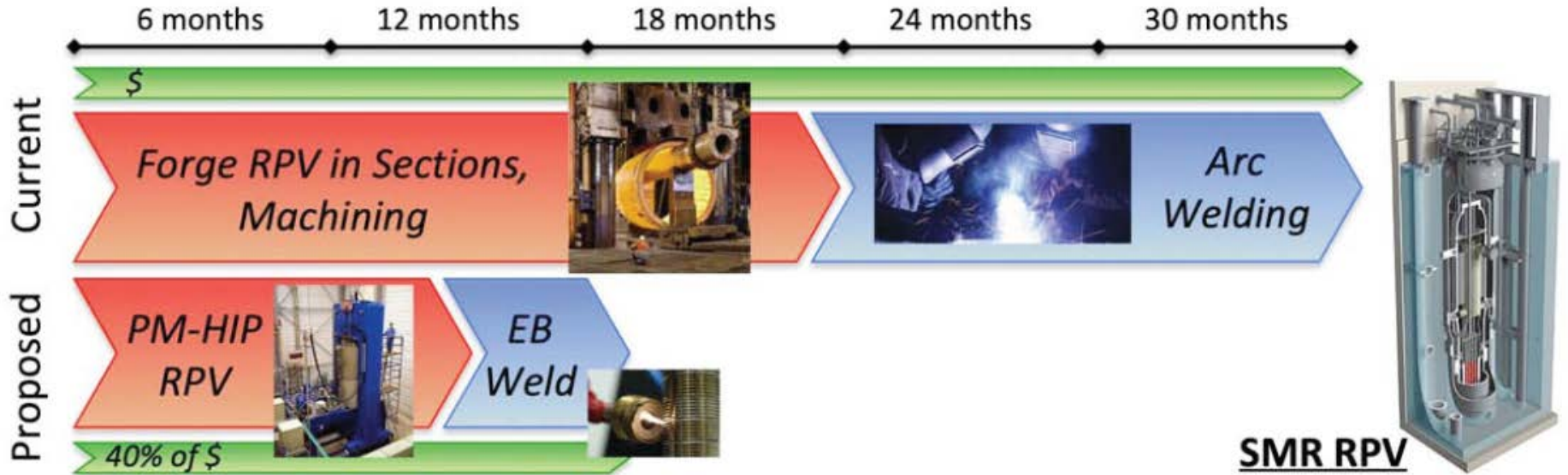


Figure 3: This project will enable the revolutionary combination of PM-HIP and EB welding to reduce pressure vessel fabrication time and cost.

출처: 미국 DOE AMM letter

안전성

친환경

경제성

5. SMR 제작요소기술 - 전자빔용접(EBW) (1/2)

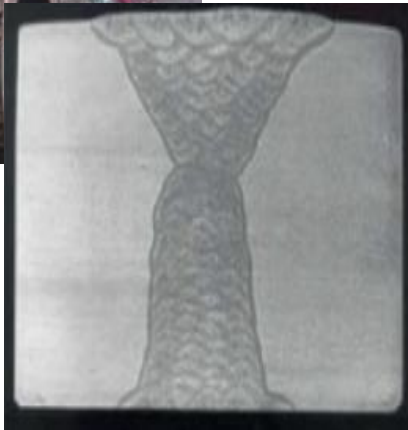
현재방식의 잠호용접(SAW)은 작업시간이 많이 소요되고 자동화가 어려워, 전세계적으로 혁신적인 전자빔용접이 개발되는 추세. 혁신형 경쟁력 확보를 위해 전자빔용접 개발이 반드시 필요

개발 전(현재 방식)

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



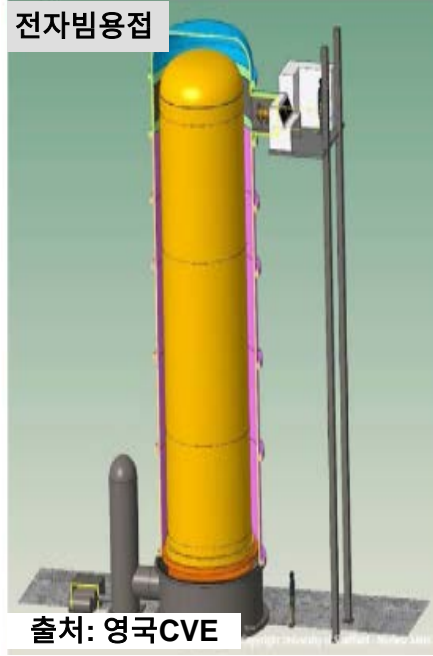
잠호용접



잠호용접
비드형상
(50패스 이상)

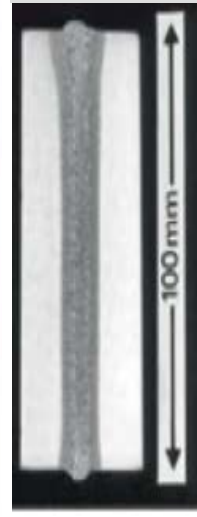
개발 후(개선 방식)

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



전자빔용접

전자빔용접
비드형상
(1패스)



출처: 영국CVE

개발 효과

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

5. SMR 제작요소기술 - 전자빔용접(EBW) (2/2)

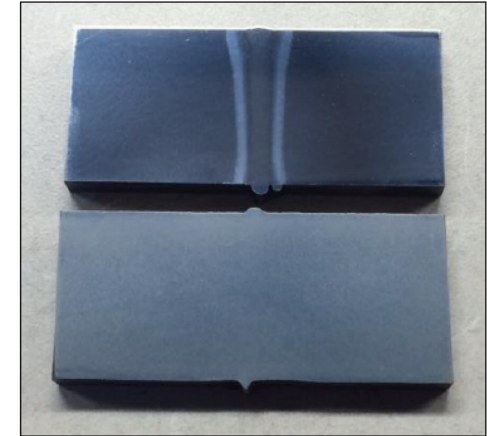
Elimination of Welds via Heat Treatment -Resetting the Clock

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

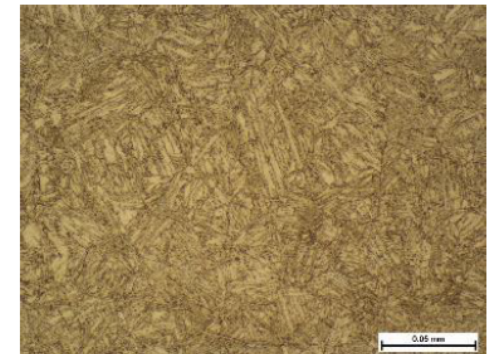
- Perform chamber EB weld of sub-assemblies
- Solution HT, quench; normalize; temper
- Resulting microstructure is same as base metal
- Fracture toughness comparable to base material

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

5. SMR 제작요소기술 - 다이오드 레이저 클래딩(DLC)

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

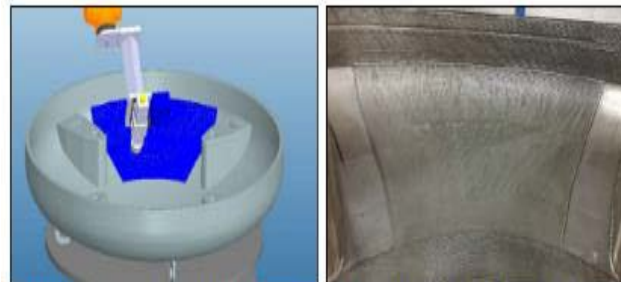
개발 전(현재 방식)

- ✓ 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

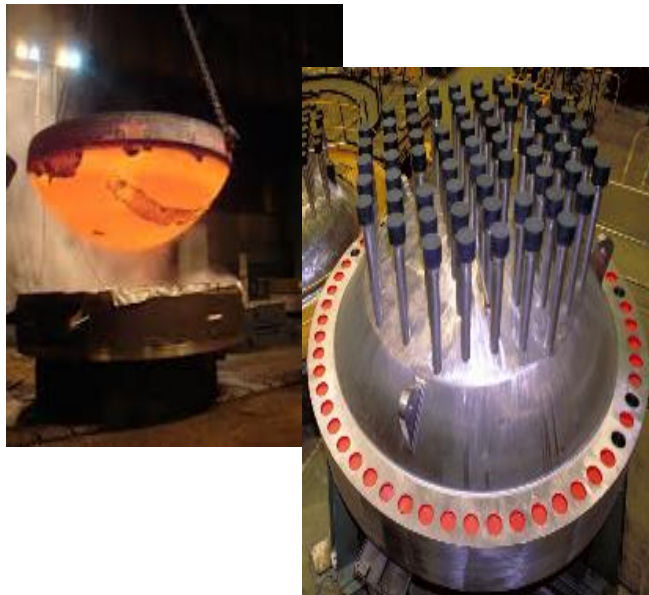
- ✓ 소형 원자로 용접
작업시간 50% 단축
가능
- ✓ 제품 경량화 가능

5. SMR 제작요소기술 - 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)

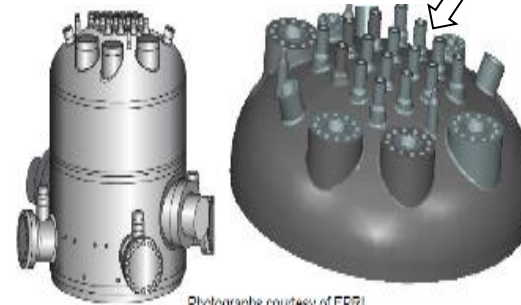
- ✓ 주조 및 단조를 통해 소재를 제작
- ✓ 주조/단조 후 가공공정이 많이 소요



개발 후(개선 방식)

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

효과
극대화



Photographs courtesy of EPRI and NuScale Power



출처: 미국 EPRI 발표자료

개발 효과

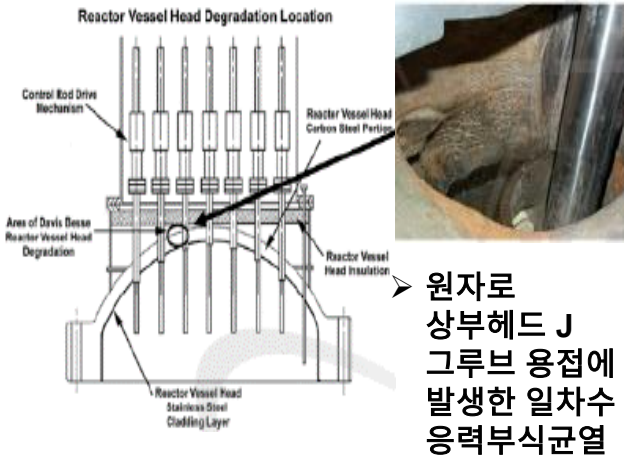
- ✓ 소형 원자로 용접
작업시간 90% 단축
가능
- ✓ 기존 주조/단조 소재
대비 건전성 향상·용
접부 최소화 및
대체 가능

5. SMR 제작요소기술 - 표면 피닝

해외는 일차수 응력부식균열 및 염화물 유기응력 부식균열 방지를 위해 원자로 및 사용 후 핵연료 건식저장 용기에 피닝 기술을 적용 중. 레이저 피닝은 용접표면에 레이저 펄스를 사용해 압축응력을 부과하는 기술.

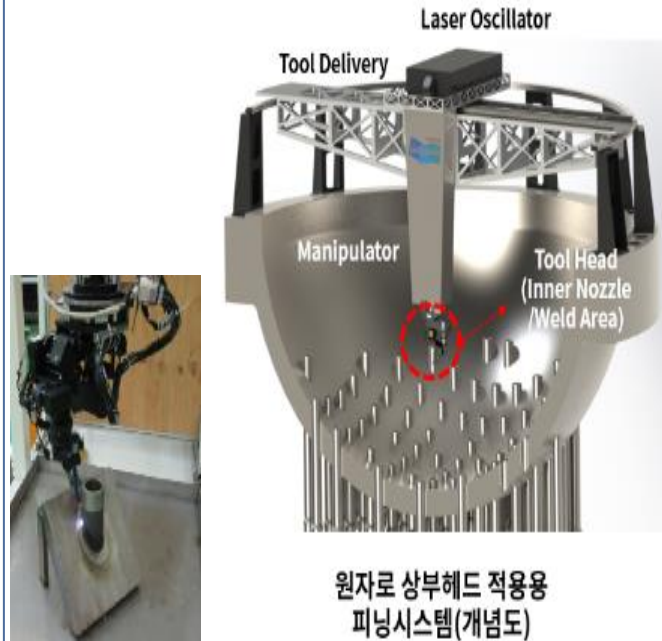
개발 전(현재 방식)

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



개발 후(개선 방식)

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



개발 효과

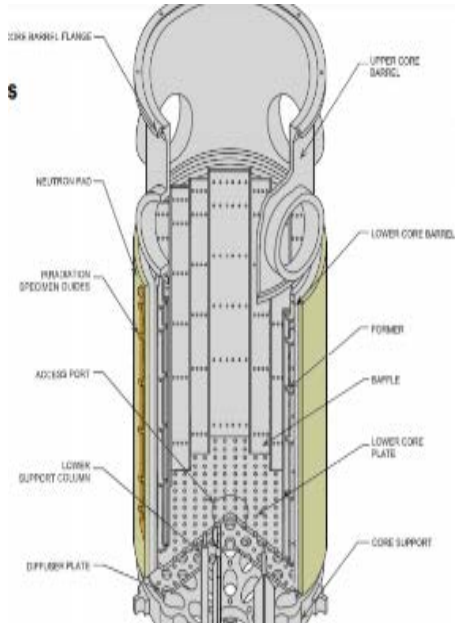
- ✓ 안전성 향상 : 일차수 응력부식균열 및 염화물 유기응력 부식균열 방지
- ✓ 가동 중 검사 주기 50% 단축

5. SMR 제작요소기술 - AM (Additive Manufacturing)

해외는 원자로내부구조물 및 소형 부품 제작을 위해 3D 프린팅 기술을 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, 용접 후 변형이 자주발생



개발 후(개선 방식)

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

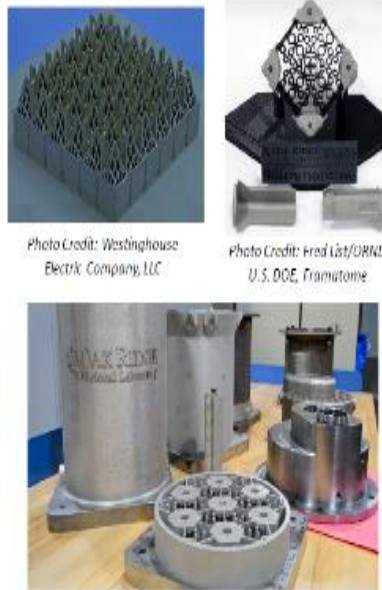


Photo Credit: Westinghouse Electric Company, LLC

Photo Credit: Fred List/ORNL, U.S. DOE, Framatome

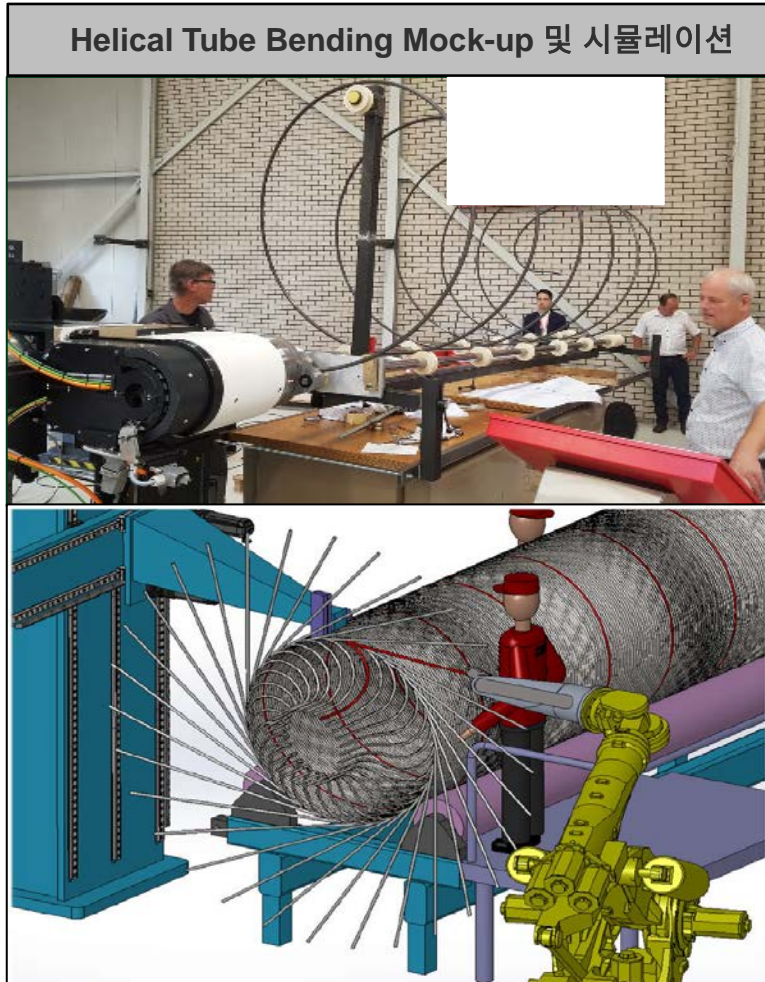
Photo Credit: ORNL 출처: 미국 EPRI 발표자료

개발 효과

- ✓ 원자로 내부구조물 제작시간 혁신단축
- ✓ 소형 노즐 및 밸브류 제작 혁신단축

5. SMR 제작요소기술 - Helical Tube Bending 및 검사 기술

Free Form Bending 장비를 이용하여 복잡한 3차원 형상의 Helical Tube의 치수를 정밀 제어하여 Bending 작업을 수행하는 기술 및 검사 기술 개발.



개발 효과

- ✓ SMR 원자로 필수 핵심 제작 기술 확보
- ✓ 다양한 Type의 SMR Helical Tube 제작 및 검사 기술 확보

5. SMR 제작요소기술 - 로봇 용접

기존에 사람에 의해 수행하던 용접/그라인딩/핸들링 등을 로봇용접시스템을 개발하여 적용. 무인화 자동화가 가능 하며, 제작시간과 비용을 획기적으로 줄일 수 있음.

개발 전(현재 방식)

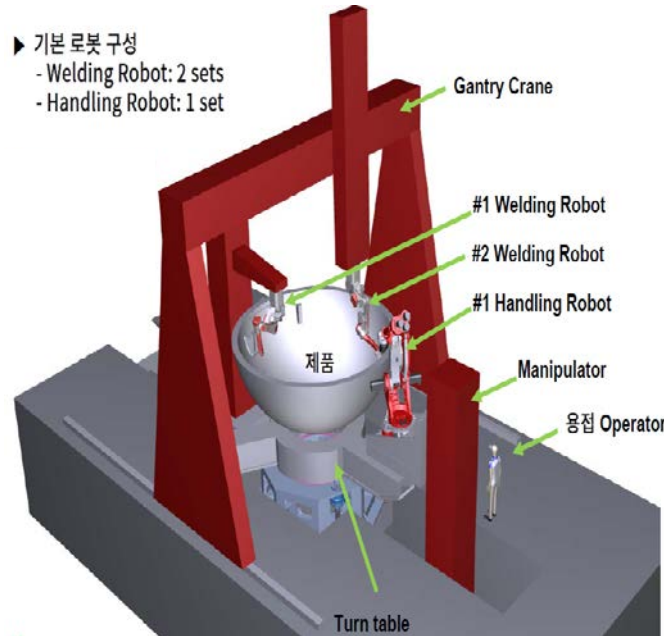
✓ 용접사의 의한 수동용접



개발 후(개선 방식)

✓ 무인화 및 자동화가 가능한 로봇용접

- ▶ 기본 로봇 구성
 - Welding Robot: 2 sets
 - Handling Robot: 1 set



개발 효과

- ✓ 소형원자로 주기기 용접작업시간 50% 단축 가능
- ✓ 품질 표준화 및 무인화/자동화 가능

6. 맺음말

- ✓ 최적설계를 통한 경쟁력 확보만큼, 제작기술 경쟁력 확보 반드시 필요 (국내 또는 수출용)
- ✓ 현재의 국내 제작기술로는 미국 및 해외 SMR 대비 제작 경쟁력 부족
- ✓ 한국도 미국과 같이 정부/연구기관/제작사/학교를 중심으로 기술 개발 필요
- ✓ 미국과 같이 SMR 개발 초기(기획단계) 부터 혁신제작기술 계획 반영
- ✓ 미국 NuScale 의 경우 5년 내에 혁신기술을 제품에 적용 계획

경청해 주셔서 감사합니다.

