

원자력학회 추계학술대회

민간 주도 원자력 산업과 소통 패러다임 전환을 위한 과제 워크숍

차세대원자로 공급망 이슈 및 극복방안

(용접기술분야)

2024.10.23

두산에너지빌리티
원자력용접기술팀

목차

서론
제조환경
용접기술
결론

서론

두산 에너지

전세계 유일의 소재부터 제작까지 One Stop Solution을 보유하고 있으며, 최초 설계된 원전노형의 성공적인 초도호기 제작경험과 최근의 SMR 시장에서의 기술/가격 경쟁력으로 다양한 개발사와 협력중임

One Stop Solution

- 두산은 주단소재부터 기기 제작, 출하까지 전역량을 보유한 **전세계 유일의 원자력 기자재 제작 전문업체**

소재



제작



출하



초도설계 제작 경험

- 두산은 미국 Westinghouse사의 AP1000 노형의 개발단계 설계 참여부터 **초도호기 제작 성공 경험**을 보유



PJT	원자로 제작사
Sanmen #1,2 (중국)	두산, 중국업체 ¹
Haiyang #1,2 (중국)	두산, 중국업체 ¹
V.C.Summer#2,3 (미국)	두산
Vogtle #3,4 (미국)	두산

1. 현지화 요건으로 두산이 기술 전수하여 중국 현지 업체 수행

기술/가격 경쟁력

- 두산은 NuScale의 공급권 경쟁에서 자국 업체인 BWXT와 경쟁하였으나, **기술/가격 경쟁 우위로 공급권 확보**



↓ 자국 업체 선정 요구



↓ 초기 원자로
공급 업체 선정

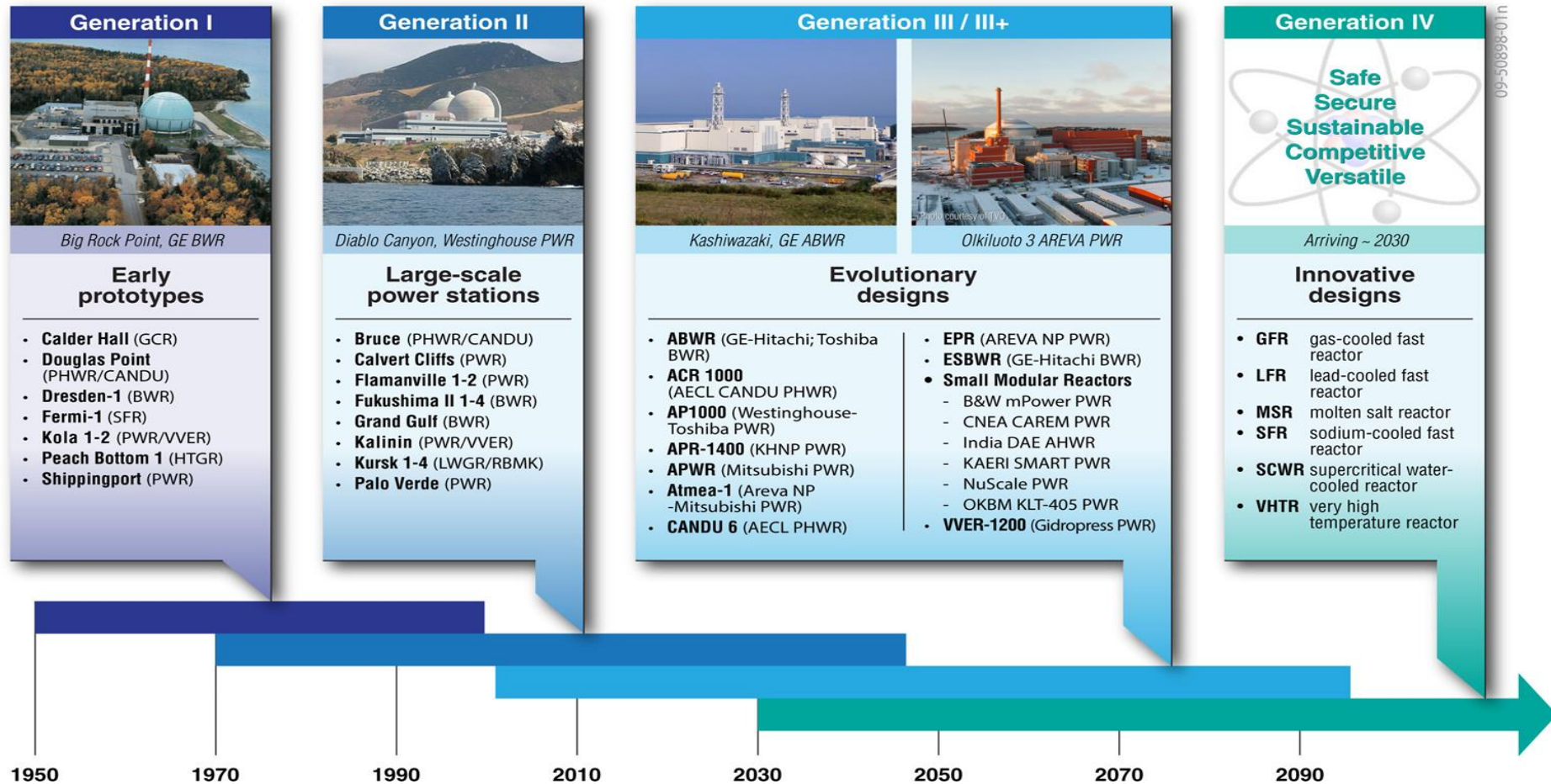


최종 공급
업체 선정

DOOSAN

- * 두산은 NuScale 외 해외 10여개 SMR 개발사로부터 협력 제안 접수

Generation I, II, III, IV



자료 출처 : https://gif.jaea.go.jp/about/index_eng.html

북미, 유럽을 중심으로 70여개 업체에서 모듈형, 선박형, Off-Grid형 등 다양한 노형 개발 중

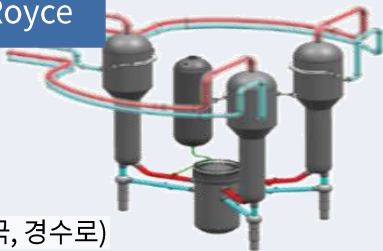
경수로

NuScale



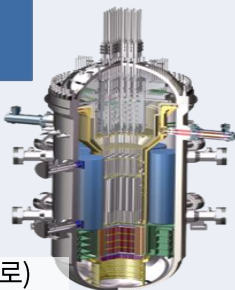
(미국, 경수로)

Rolls-Royce



(영국, 경수로)

SMART



(한국, 경수로)

USNC



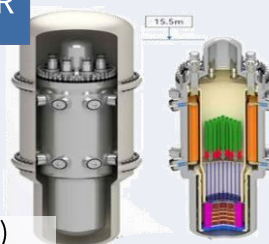
(미/캐, 고온가스로)

Seaborg



(덴마크, 용융염원자로)

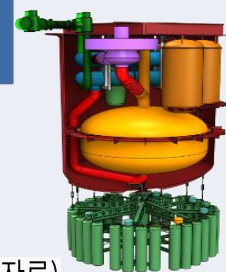
혁신형SMR



(한국, 경수로)

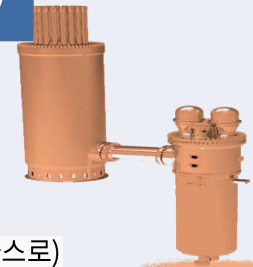
4세대 원전

Thorcon



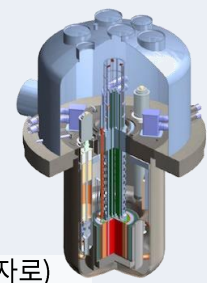
(미, 용융염원자로)

X-energy



(미국, 고온가스로)

TerraPower



(미국, 진행파원자로)



제조
환경

[급격한 인건비 상승] 우리나라의 임금 상승률이 G5 평균의 2.6배

국가	연간평균급여(2020년 기준년 PPP적용 달러)		임금상승률 ('00~'20년)	임금상승률 순위 • OECD 국가 중 인구 3천만명 이상인 11개국 대상
	2000년	2020년		
미국	55,366	69,392	25.3%	4위
일본	38,365	38,515	0.4%	9위
독일	45,584	53,745	17.9%	5위
영국	40,207	47,147	17.3%	7위
프랑스	38,782	45,581	17.5%	6위
G5평균	43,661	50,876	16.5%	-
한국	29,238	41,960	43.5%	2위

자료출처 :

<https://www.donga.com/news/Economy/article/all/20230203/117716759/1>

※ 주 : 인구 수가 적은 국가의 경우, 근로자 1인당 임금상승률이 과도하게 높게 산출되는 오류가 발생할 수 있음
※ 자료 : OECD.stat

한국과 G5의 연간평균급여 비교./ 한경인 제공

저임금
구조의 원가
경쟁력 상실

[급격한 노동생산성 저하]

자료출처 :

https://m.dnews.co.kr/m_home/view.jsp?idxno=202206260939092190210

이아람 | 경제

韓 노동생산성 美의 57%... “노동시장 경직, 혁신성도 떨어져”

이아람 기자

입력 2023-10-23 03:00 | 업데이트 2023-10-23 03:32

읽어보기 | 가 |

시간당 생산 韓 43달러 < 美 75달러
규제 개혁지수 韓 1.10 < G5 1.43
“혁신성과지수” 韓이 韓의 1.8배
전경련 “규제 풀어 민간활력 제고”

같이 본 뉴스 | 히스토리 뉴스

1. 저지출 주력, 실과, 재고선착차... 위기 외출
2. 韓 ‘모범수’ 韓, 노년층 연금 못 받고 은퇴 못 한다
3. 선방을 고를 실수유주 김성태, 네 번째 韓 유력직관 29명대 30% 지급



중소/중견기업
기술력 및 미래
성장동력저하

[제조업 근로자 평균 연령대 상승]

<https://www.joongang.co.kr/article/25112288#home>

[기술인력난 가중]

2022.12, 산업통상자원부 “2022년도
「산업기술인력 수급 실태조사」 결과”

● 전통적인 제작방식 고수

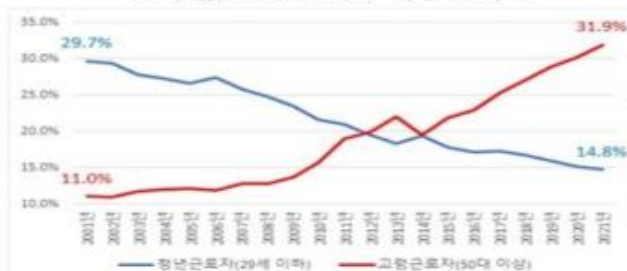
경제 : 경제일반 | 저출산 고령화

한국 제조업 30%가 50대 이상... "근로자 평균연령 곧 日 추월"

중앙일보 | 입력 2022.10.26 09:45 업데이트 2022.10.26 09:50

장구술 기자 (구독)

< 청년, 고령 근로자 비중 추이 >



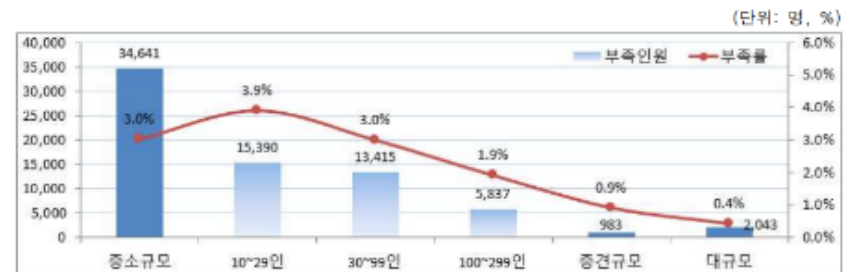
※ 자료 : 고용노동부 「고용형태별근로실태조사」

□ (규모별) 전체 부족인원 중 중소기업에서 92.0% 비중으로 대다수 발생.
나머지 2.6%는 중견규모에서, 5.4%는 대규모 사업체에서 발생

○ 사업체 규모가 작아질수록 부족률도 높아 중소기업의 산업기술인력
확보 및 조달에 애로

- 사업체 규모별 부족률: (대규모)0.4% < (중견규모)0.9% < (중소규모)3.0%
- 중소기업 내 규모별 부족률: (100~299인)1.9% < (30~99인)3.0% < (10~29인)3.9%

<사업체 규모별 산업기술인력 부족인원 및 부족률 현황>



선진국의 다양한 국가 기술개발 지원

미국, 영국 등 주요 국가들은 정부 차원에서 최신 기술 개발을 적극 지원

미국

- 바이든 및 민주당은 원자력을 Clean Energy로 인정하고 SMR 및 차세대 원전개발 지원 정책 발표
 - 원자력 포함 발전 설비 개선 및 R&D에 \$2,000억 투자
- 미국에너지부는 Advanced Methods of Manufacturing 이라는 프로그램으로 약 500억원 규모로 원자력 제작기술 개발을 지원 중이며 향후 700억원까지 확대 예상
 - 대형 PM-HIP 도입을 위한 컨소시엄(ATLAS)을 구성하고 미 해군과 함께 funding 추진
- Inflation Reduction Act 승인 ('22.8월)
 - 가동 원전에 저탄소 세금혜택 지원
 - 4세대 SMR에 필요한 차세대 핵연료 개발에 \$700m 지원

일본

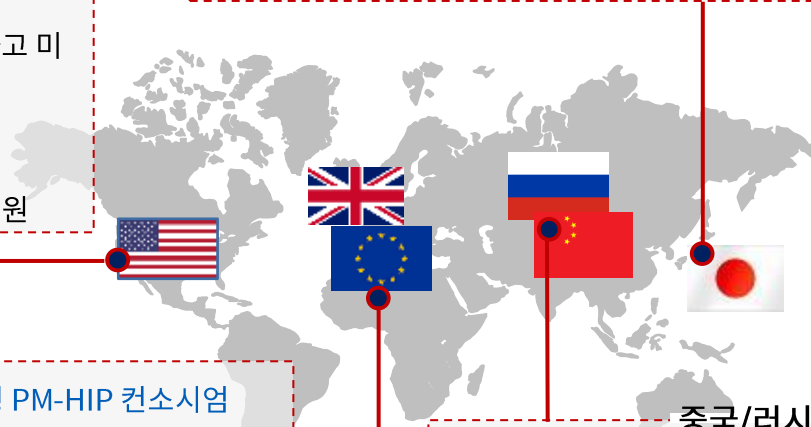
- Net-zero 달성을 위한 그린성장 전략을 통해 해외 원자력 사업에 일본 제조기업들이 참여하도록 지원하는 전략 포함
 - JPIC, IHI, JGC 등은 연합체를 구성하여 NuScale 사업 참여를 추진

유럽

- 유럽연합은 프랑스 국영기업 EDF 주관하에 유럽 내 대형 PM-HIP 컨소시엄 구축등을 포함한 SMR 제조기술 개발 추진 중
- 영국 에너지부(BEIS)는 Advanced Manufacturing and Material 이라는 프로그램으로 약 1,200억원을 들여 전자빔 용접 등 핵심 제작기술을 지원

중국/러시아

- 중국/러시아는 주요 원자력 제작사들이 국영기업으로 정부 주도하에 제작기술 확보 중으로 알려짐





Reducing the time and cost

1. Electron Beam Welding (**Welding Times 90% ↓ , Cost 85% ↓**)
2. Hot Isostatic Pressing (Reduce machining and welding, achieve complex shapes)
3. Diode Laser Cladding (Reduce amount of cladding material, faster process and high-quality)
4. Additive Manufacturing (=3D Printing) (Less material, reduce the cost) - Direct Energy Deposition (DED), Powder Bed Fusion (PBF), Cold Spray

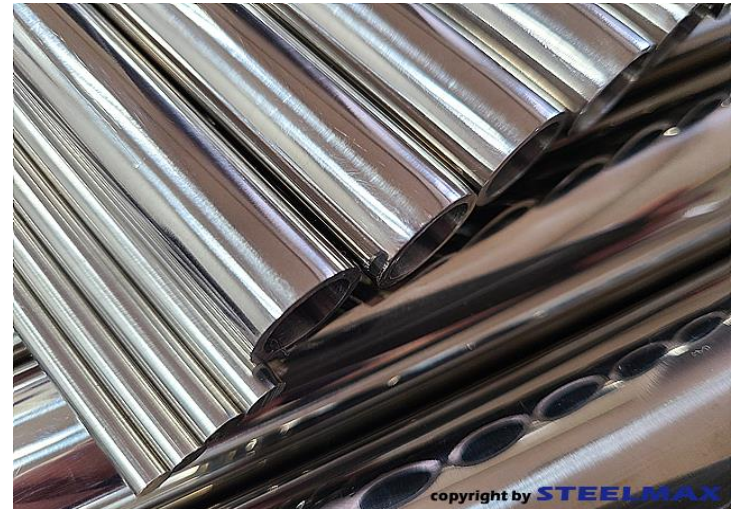
수입 의존도 높은 소재

전량 해외 수입되는 부가가치 높은 소재 (예시)

- Inconel 690
(경수로 SMR 증기발생기 Tube)
- Alloy 800H (고온가스로)



<https://www.nuscalepower.com/en/About/Research>



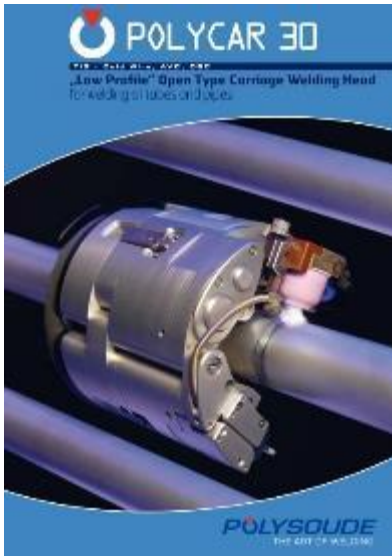
용접소재

- 질소강화 고강도 오스테나이트계 스테인리스강
- 초내열 내산화 니켈 합금 - 초고온가스로 (VHTR)
- 내 고온균열성이 개선된 용접재료 - Alloy 690
- 마르텐사이트계 스테인리스강
- 타이타늄 합금

해외업체 의존도가 높은 특수 용접장비

- 원자력 용접장비는 약 90% 해외장비에 의존
(고정밀 자동 GTAW 용접기는 전량 해외수입)
- 특히, **제품에 맞도록 Customizing 필요**

- 국내 중소기업 중심 장비 국산화 필요
 - ✓ 설비 및 부품 구매비 30~40% 절감
 - ✓ 용접 작업지연 해소



Polysoude사(프랑스)



Liburdi사 (캐나다)

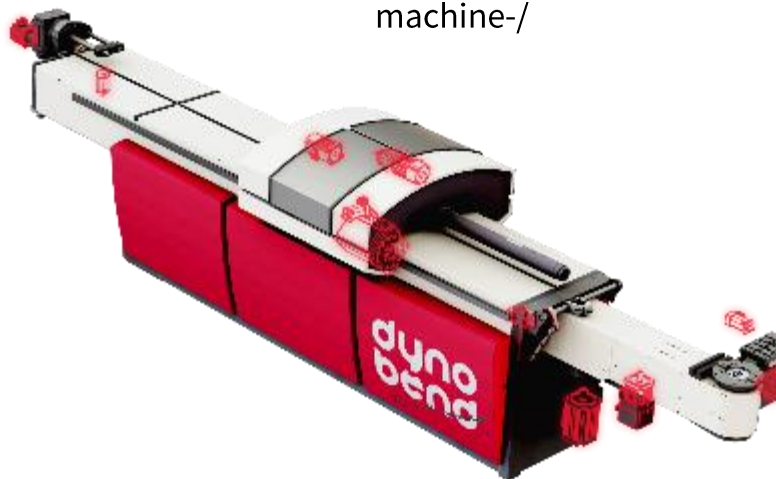
- 국산화 개발 문제점 (원자력 적용)
 - ① 소규모 중소기업 중심 개발
 - 재무안정성 취약
 - 지속적인 장비개발 투자 불가
 - ② 취약한 기술기반
 - ③ 전문인력 부족
 - ④ 원자력용 소량 공급 (규모의 경제 불가)
 - ⑤ 개발장비 국내외 판로개척 어려움

기술집약 장비의 해외 수입



<https://apexpiping.com/capabilities/shop-fabrication/pipe-bending-forming/>

<https://www.dynobend.com/en/products/combi-bending-machine-/>





용접 기술

(소재, 부품, 장비)

최근 원자로 설계요구조건의 특징

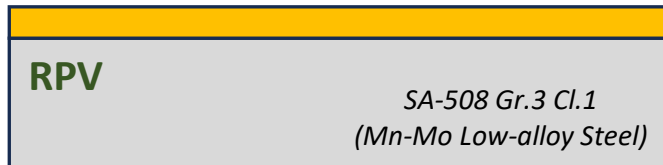
- 기존 경수로 대형원전에서 접하지 않은 생소한 재료의 사용
 - 경량화를 위한 고강도 소재 사용 : 원자로 노심대에 SA508 Gr. 3 Cl.2
 - 마르텐사이트계 스테인리스강 : F6NM → 압력용기 사용 사례 없음
 - 질소강화 스테인리스강 : XM-19 → Core Region 사용 사례 없음
 - 고온가스로의 경우 내열소재 사용 : 니켈계 합금 SA718 → 용접 경험 전무
Alloy 800H → 튜브 소재 사용 전무
- SMR의 경우 운송 및 설치를 위해 모듈화
(1개의 용기 안에 RV, SG, PP, Pump가 들어 있음)
 - Cladding을 위한 공간이 매우 좁아짐 (사람 또는 장비 접근 불가)
 - 가공할 수 없는 부위가 발생
 - 조립공차가 까다롭고 주변 간섭이 많음

SMR 및 차세대 원자로 등의 적용 소재 (예시)

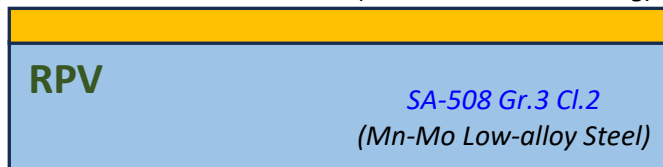
- 동일 두께 대비 더 높은 기계적 성질과 내식성을 가지는 재료의 선정
- 해당 재료 제작 경험 부족 및 용접성과 가공성이 좋지 않아 제작에 어려움

경수로

309L / 308L
(Stainless Steel Cladding)



309L / 308L
(Stainless Steel Cladding)



Containment Vessel

SA-182 FXM-19, UNS S20910
(High – Strength Austenitic Stainless Steel)
SA-182 F6NM (UNS S41500)
(Martensitic Stainless Steel)

(예) 고온가스로, 초고온가스로

RPV

SA-508/533
(Cr-Mo Low-alloy Steel)

고온가스로

* 내열소재 사용 : SA718

* 증기발생기 Tube : Alloy 800H

- 원자력 Code 및 규제 요건에 부합하는 용접재료 확보 (재료+용접)
- 용접품질과 생산성 향상을 위해 기계화나 자동화로 전환 필요
- 엄격한 제작치수 관리를 위해 경험과 기억에 의존하지 않고 과학적인 기법을 사용한 제작방식 적용 (용접부 및 제품의 변형/응력 해석 능력)

특수한 용접재료 공급망 부족 (국산화 미흡)

- SMR 및 HTGR 대상 고강도, 내열/내식성 합금 적용
 - 저합금강 SA508 Gr.3 Cl.2 & 4N
 - 스테인리스강 : XM-19¹, F6NM²
 - 초내열/내산화 합금 : Alloy 617³
 - 내고온균열성 용접재료 : ERNiCrFe-15⁴, 52XL⁵

각종 신소재 대상
방사선조사 환경에서
적용 가능한 용접재료와
용접공정 개발 필요

[Note]

1. 질소강화 고강도 오스테나이트계 스테인리스강 – NuScale Lower RPV 및 CNV 소재 / X-energy 후보 소재
2. 마르텐사이트계 스테인리스강 – NuScale Upper CNV 소재, 수력발전기기용 재료
3. 초내열 내산화 니켈 합금 – 초고온가스로 (VHTR) 후보소재
4. 내 고온균열성이 개선된 용접재료 – RR-SG 의 Alloy 690 용접용 후보 용접재료
5. 내 고온균열성 및 작업성이 개선된 용접재료 – EPRI에서 기존 Alloy 690 용접재료를 대체하기 위해 개발된 재료

소규모 특수용접자재 생산
및 시험이 가능한
국내업체 및 기반시설 필요
(해외수입 의존도 100%)



용접 원소재 Ingot 생산
(100kg급
진공유도용해로)

선제 압연 및 용접봉 생산
(Φ5.5mm 중간선재 압연)

재료물성시험

용접성
Test

원자력 Code 및 규제요건 부합하는 용접재료 국내 공급망 부족

- ASME B&PV Code (KEPIC)

- ① ASME B&PV Code Section II, Part C, Specification for Welding Rods, Electrodes, & Filler Metals
 - SFA-5.01, Welding Consumables – Procurement of Filler Materials and Fluxes (CMTR 발행요건)
 - SFA-5.XX, 재료별 용접재료 형태별 규격 (원자력용 재료의 P, V, Cu 함량 특별 제한)
- ② ASME B&PV Code Section III, Division 1, NB~NG
 - NX-2400, Welding Material (용접재료 평가방법, 화학/기계적성질 합격요건)
- ③ ASME B&PV Code Section III, NCA (General Requirement for Division 1 & 2)
 - NCA-3300, Metallic Material Organization's Quality System Program (재료공급사 품질 시스템 확보 요건)
 - NCA-4250, Quality System Program Requirement (용접재료 및 원소재의 추적성 관리)

- U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.99, Radiation Embrittlement of Reactor Vessel Materials, Revision 2

- ① Chemistry Factor for Weld (방사선 조사 취화 예방을 위한 용접재료의 Cu & Ni 함량 제한 규제요건)

- 설계요건

- ① 용접후열처리(PWHT) 온도 및 유지시간 : 595~620°C / 25시간, 40시간, 48시간
- ② 방사선조사취화구역내 사용될 용접재료 추가 화학성분 분석원소 및 함량 규제
 - Low Co (0.05wt.% max.) / N, Al, As, B, Pb, Sn, Nb, W, Zr, Sb
- ③ 기계적 성질 평가온도, 최소 기계적 성질 요구값, RTNDT (기준 무연성 천이온도) 요건

- 제작사의 용접 작업성 확보를 위한 요구사항

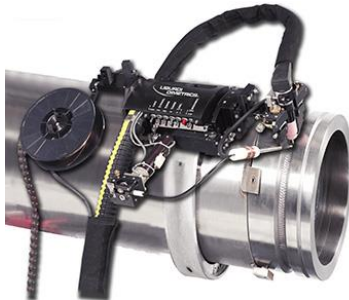
- ① 용접중 아크 안정성 확보를 위한 Wire 표면처리 (Cu 도금이 되지 않은 Wire, 방청성 확보)
- ② 용접금속내 고온균열 발생 방지를 위한 Wire 표면 청정 (선제 인발가공시 표면에 남은 잔류 윤활제)

고정밀 기술집약적 기계화 및 자동화 용접장비 국산화 필요성

- 원자력 용접장비는 약 90% 해외장비에 의존 (고정밀 자동 GTAW 용접기는 전량 해외수입)
 - 대량 연속생산이 아닌 소량 단품 생산구조 → 1~2대 장비 구매 후 재구매까지 장기간 소요
 - 제품별로 특화된 별도의 용접 System 개발 필요
- 높은 투자비, 부품수급기간 장기화, A/S 지연으로 인한 생산단가 증가 및 제작일정 지연 발생



Polysoude사(프랑스)



Liburdi사 (캐나다)



Lincoln Electric
(미국)



IGM Robot (오스트리아)



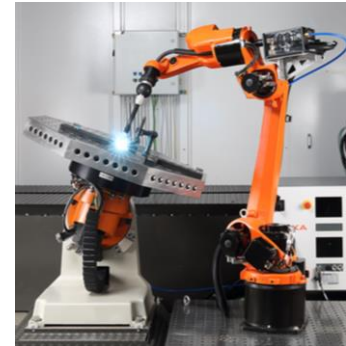
Fronius (독일)



AMI (미국)

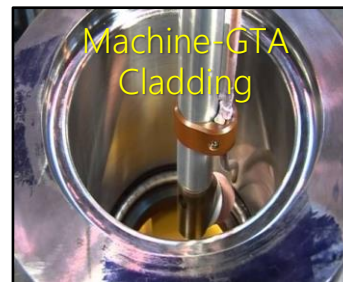
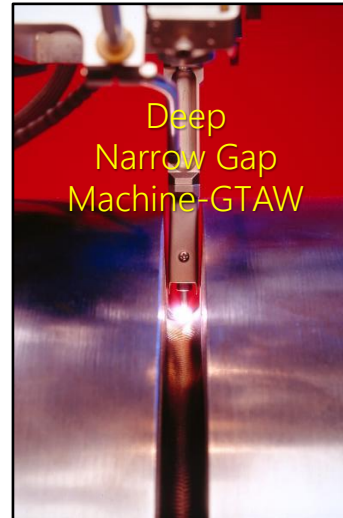


Miller (미국)



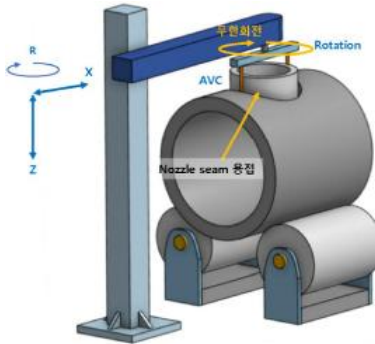
KUKA (독일)

고정밀 기술집약적 기계화 및 자동화 용접장비 국산화 필요성

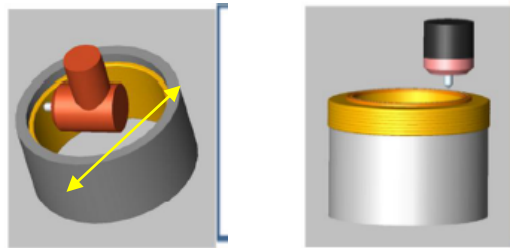


대형 및 특수목적 용접장비 국산화 필요성

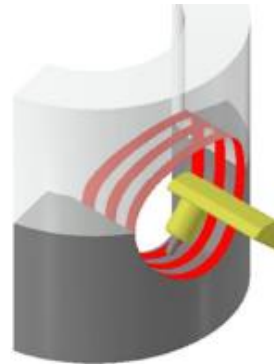
Nozzle to Shell 자동용접장비



소구경 및 3차원 Cladding & Buttering 용접

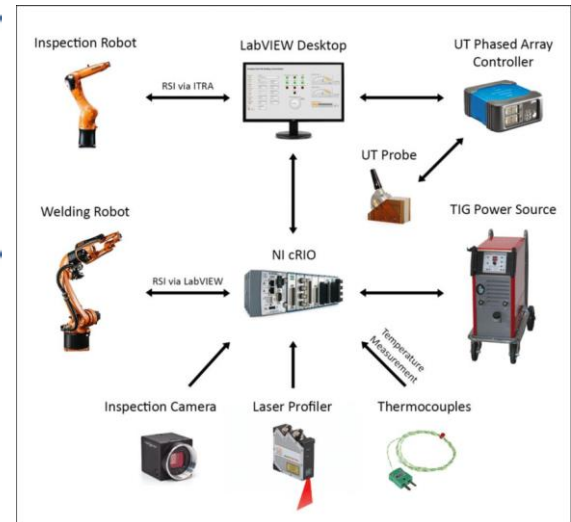


초소구경 내면 Cladding & Buttering



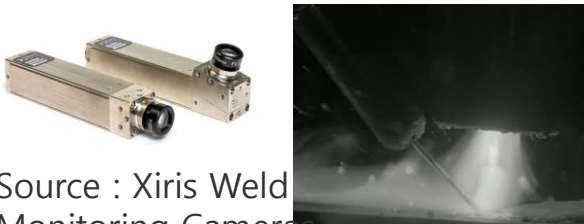
3차원 내면 용접

Robot Welding System Integration



Source : [Continuous monitoring of an intentionally-manufactured crack using an automated welding and in-process inspection system](#)

용접용 초소형 특수 카메라 (고온환경 내구성 및 운영 SW)

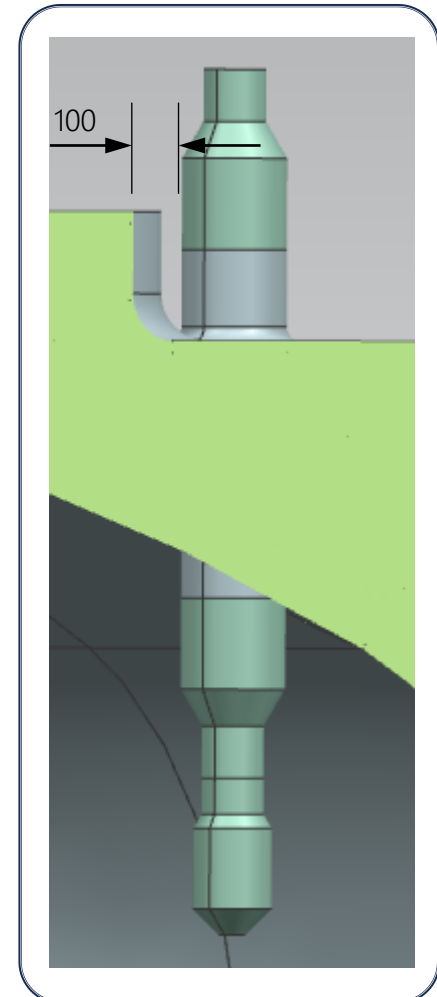
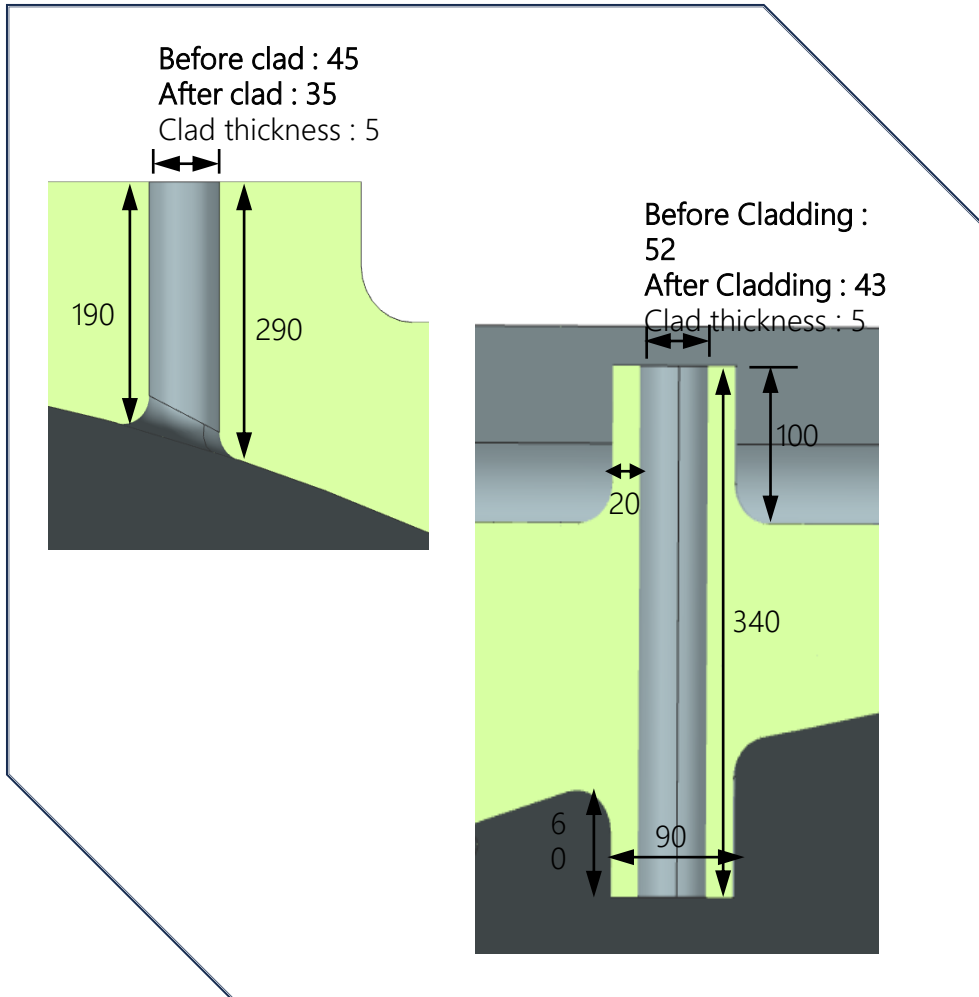


Source : Xiris Weld Monitoring Cameras

대형 및 특수목적 용접장비 국산화 필요성

접근성이 제한, 용접 후 변형

(Unit : mm)

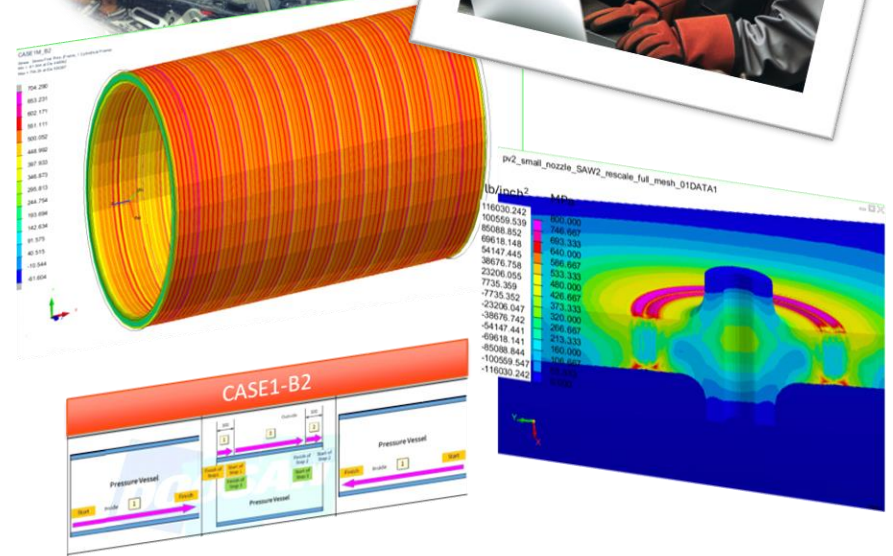


수동용접의 기계화 및 자동화로의 전환



과학적 기법을 사용한 용접공정 설계

용접공정 시뮬레이션 활용



과학적 기법을 사용한 용접공정 설계

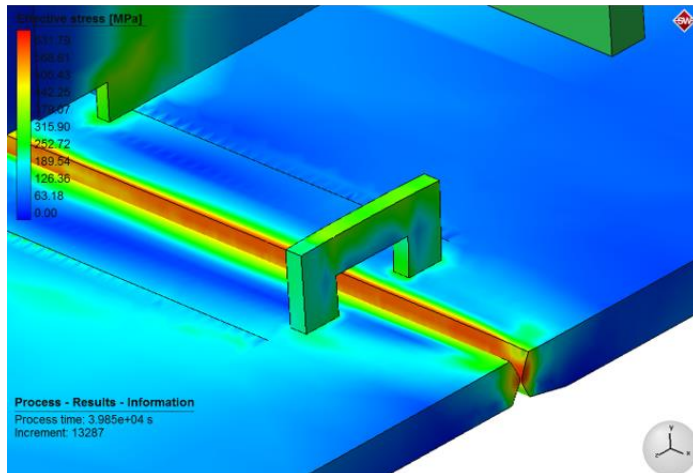
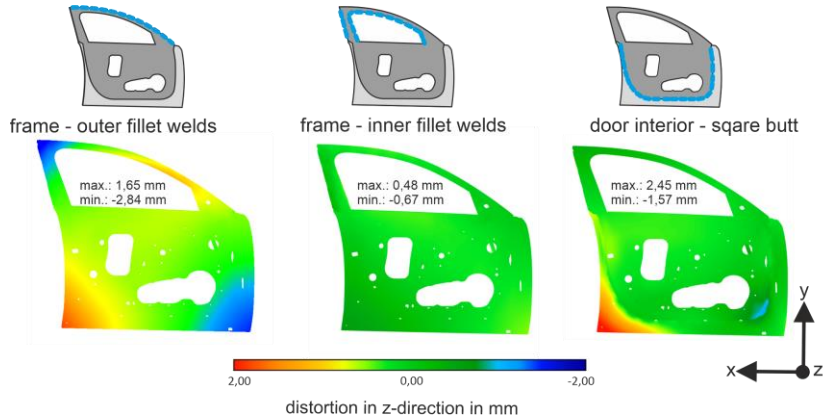
100mm 이상 두꺼운 압력용기의 금속재료, 용접방법, 용접부 적층방법, 용접조건, 예열 및 후열조건, 용접후열처리조건, 구속조건을 유사하게 반영한 사례가 거의 없음

- Simulation Program이 보유한 SMR 압력용기 금속재료에 대한 열적/기계적 성질 DB
- 용접종류와 방법별 실제 용접조건(입열량, 비드적층모양)을 반영한 모델링 및 해석방법 보유
 - Groove Welding : SAW, Machine-GTAW (Girth seam, Nozzle seam)
 - Cladding : SAW & ESW Strip Cladding, Machine-GTAW, PAW (대면적)
- 클래딩 순서, 160Pass/80Layer 이상 다층용접 용접순서
- Deep Narrow Gap 내 용접 Pass 순서
- 예열용 화구 위치와 압력용기의 온도구배를 감안한 열적 효과
- PWHT 온도, 공정별 적용시간 (누적시간)
- 용접 및 PWHT시 제품의 위치 및 용접장치의 위치
- Turning Roller 위치나 고임블록에 의한 구속조건
- Tack welding, 임시부착물과 같은 구속조건



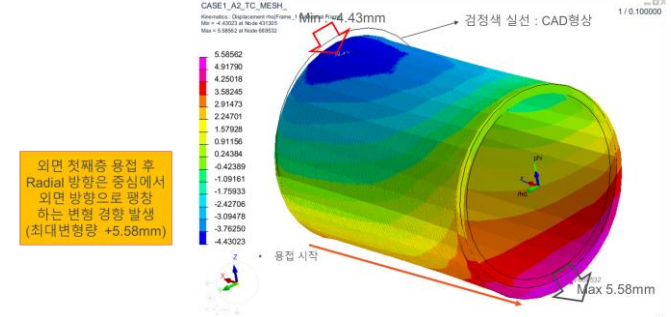
과학적 기법을 사용한 용접공정 설계

자동차, 조선분야 사례

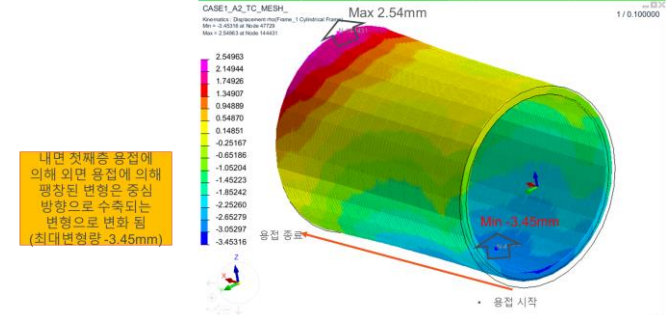


원자력 압력용기 대면적 클래딩 사례

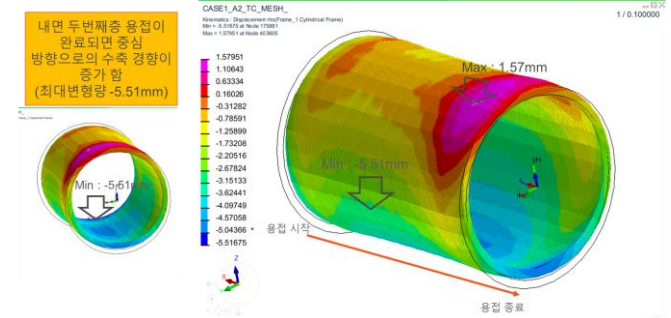
외면 첫번째 층 용접 후 Radial 방향 변형 분포 (30배 과장)



내면 첫번째 층 용접 후 Radial 방향 변형 분포 (30배 과장)



내면 두번째 층 용접 후 Radial 방향 변형 분포 (30배 과장)



결론

용접기술 연계 국내 공급망 변화 필요성

- 유기적인 생산체계 변화 (주문생산 및 다품종/단일소량생산)
- 경제성 확보를 위한 설비 및 기자재 제작기간 혁신적 단축
(꾸준한 기술개발을 통한 경쟁우위 유지)
- 다양한 소재, 부품 생산 기반
(안정적이고 기술력 있는 중소/중견기업 존재와 지속성)
- 기술 집약적이고 높은 수준의 첨단 설비 및 장비
(장기간의 투자와 개발기간 소요)
- 경험에 의존한 기술이 아닌 과학적 기법을 사용한 용접공정의 개발
(국내 전문기업 필요, 용접과 해석을 모두 보유한 인력양성)
- 원자력 용접기술은 타 산업에도 확대 적용 가능 (방산, 조선, 자동차, Plant 건설 등)

감사합니다.!