

한국형 SMR 제작경쟁력 확보를 위한 혁신제작기술개발 필요성



조성우

두산중공업 원자력용접기술팀 차장

• 공학박사

• 두산중공업 원자력BG 용접기술팀

가. 소형원자로 경쟁력 확보를 위한 해외 동향

최근 전 세계적으로 소형원자로 및 4세대원전에 대한 개발을 활발하게 진행하고 있으며 미국, 영국, 러시아, 캐나다 및 중국이 이 분야에 대한 선두주자로 평가받고 있다(표 1) 참조). 또한, 소형원자로의 설계와 함께 혁신적인 제작기술개발도 병행하여 추진하고 있으며 미국과 영국에서는 해당 기술개발을 완료하여 제품에 적용할 수 있는 수준에 이르고 있다.

미국과 영국 등의 정부지원을 받은 해외 선진사들의 소형원자로에 적용하는 '혁신제작기술'의 개발목표는 안전성과 경제성을 확보하고 실제적으로 제작에 적용하여 새로운 원자력산업의 부흥을 이끌려는 것이다. 특히, 소형원자로 제작원가를 약 40% 정도 절감하겠다는 혁신적인 목표가 달성될 경우 소형원자로의 원가 경쟁력을 기존 원자로 대비 동등 이상으로 가져갈 수 있을 뿐만 아니라 다른

경쟁국 및 기업에 대해 제조경쟁력 우위를 확보할 수 있기 때문이다. 따라서, 해외 선진사들은 소형원자로 개념 설계 때부터 혁신제작기술을 동시에 개발하기 시작하였고, 실제 제품에 적용 가능할 수준의 혁신제작기술 완성을 위해 최소 5~10년 정도가 개발을 꾸준히 진행하고 있다.

미국과 영국 등은 기존에 실현이 불가능하다고 판단했던 많은 혁신적인 제작기술들을 실제 제품에 적용할 수 있도록 현실화하고 있으며, 최근에는 다양한 시험을 통해 안전성과 신뢰성 문제도 검증을 해 나가고 있다.

미국과 영국 등은 원자력 기기제조 혁신기술개발에 수백억을 장기 투자하였으며, 2020년말 기준 거의 상용화 단계에 도달한 것으로 보인다. 미국과 영국 등이 혁신기술개발을 5~10년 사이에 완성할 수 있었던 것은 대규모의 정부지원을 통한 투자와 기술개발이 있었기 때문이다. 그리고 미래를 위한 개발이 더욱 가속화 될 것이다.

〈표 1〉 Small reactors for near-term deployment - development well advanced

Name	Capacity	Type	Developer
VBER-300	300 MWe	PWR	OKBM, Russia
NuScale	60 MWe	Integral PWR	NuScale Power + Fluor, USA
SMR-160	160 MWe	PWR	Holtec, USA + SNC-Lavalin, Canada
ACP100/Linglong One	125 MWe	Integral PWR	NPIC/CNPE/CNNC, China
SMART	100 MWe	Integral PWR	KAERI, South Korea
BWRX-300	300 MWe	BWR	GE Hitachi, USA
PRISM	311 MWe	Sodium FNR	GE Hitachi, USA
Natrium	345 MWe	Sodium FNR	TerraPower + GE Hitachi, USA
ARC-100	100 MWe	Sodium FNR	ARC with GE Hitachi, USA
Integral MSR	192 MWe	MSR	Terrestrial Energy, Canada
BREST	300 MWe	Lead FNR	RDIFE, Russia
RITM-200M	50 MWe	Integral PWR	OKBM, Russia
BANDI-60S	60 MWe	PWR	Kepeco, South Korea
Xe-10	75 MWe	HTR	X-energy, USA

(출처 : <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>, Nov. 2020)

해외 선진사와 비교하면, 아직 한국은 원자력분야의 혁신제작기술개발은 거의 진행되지 않고 있는 실정이며, 과거의 전통적인 제조방법을 답보하고 있는 상태이다. 따라서, 한국도 소형원자로 시장에 진입하여 소형원자로 제작 경쟁력 확보를 위해서는 시급하게 연구개발이 필요하다. 그리고, 국내 업체가 부담하기 어려운 기초기술 연구개발비와 개발 기간의 장기화에 대한 경쟁력 약화 등에 대하여 정부의 지원이 필수적이다. 지금 시작하지 않으면 향후 소형원자로 세계 시장에서 한국은 경쟁력을 상실할 수도 있다.

1) 미국의 혁신 제작 기술 개발 동향

현재 미국이 가장 빠르게 소형원자로 관련 혁신 제작기술을 개발하고 있는 것으로 분석된다. 그리고 미국은 EPRI(Electric Power Research Institute)와 미국 에너지부(DOE, Department of

Energy)를 통해서 많은 혁신제작기술 결과들을 공개되고 있다.

DOE 주도의 대표적인 개발프로그램은 Advanced Methods for Manufacturing(AMM)이며 국책 과제 형태로 진행되고 있다. 주요 참여 연구기관과 기업체는 DOE, EPRI, Nuclear-AMRC(Advanced Manufacturing Research Centre), NuScale Power, Carpenter, Synertech-PM, TWI, Sheffield Forgemasters, Sperko 등이다. 개발 예산은 약 300억 이상으로 추정되며, 현재 미국이 보유하고 있는 기초기술을 기반으로 연구를 진행하기 때문에 300억 정도로 개발이 가능한 것으로 추정된다. 만약, 기초기술이 부족한 국가 또는 기관이 개발을 진행한다면 약 2배 이상의 개발비용이 필요하리라 판단된다.

혁신 제작기술을 통해 얻고자 하는 목적은 크게 2가지로 구분할 수 있다. 첫째는 소형원자로

제작기간을 12개월 단축하는 것이고, 둘째는 소형원자로 제작비용을 약 40% 절감하는 것이다. 아래 [그림 1]은 DOE Advanced Methods for Manufacturing Newsletter, October 2019에 언급된 내용이다. 혁신기술을 통해 제작기간과 비용을 현저히 줄인다는 목표를 가지고 있다. [그림 1]에 표현되어 있는 PM-HIP(Powder Metallurgy-Hot Isostatic Pressing) 기술과 EB 용접(EBW, Electron Beam Welding) 기술에 대해서는 뒷절에서 추가 설명할 예정이다.

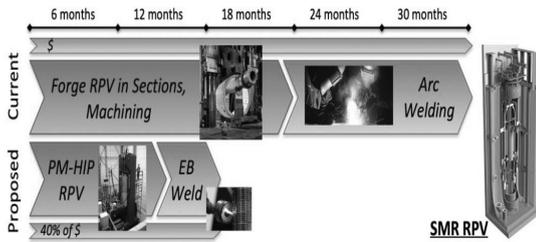


Figure 3: This project will enable the revolutionary combination of PM-HIP and EB welding to reduce pressure vessel fabrication time and cost.

[그림 1] 미국에서 추진중인 혁신기술 및 개발 효과

(출처: Advanced Methods for Manufacturing Newsletter, October 2019)

2) 영국의 혁신 제작 기술 개발 동향

영국은 '영국 비즈니스·에너지·산업전략부(Department for Business, Energy and Industrial Strategy)'에서 혁신 제작 기술개발을 주관으로 연구소 및 각 기업체를 전폭적으로 지원하고 있다. 그리고 기술 대부분은 미국과도 상호 협조를 하여 개발하고 있다. 구체적인 기술 항목들도 미국이 개발하고 있는 항목과 유사하다.

3) 기타 국가의 혁신 제작 기술 개발 동향

일본, 프랑스 및 유럽의 다양한 국가에서도 혁신 기술개발을 진행하고 있으나, 앞에서 언급한 미국과 영국 기술과 유사한 기술 수준으로 평가된다. 그리고 대부분의 기술들은 기술보안으로 인해 외부 노출이 거의 되지 않고 있다.

나. 소형원자로 제작을 위한 해외 혁신 제작 기술 소개

소형원자로 경쟁력 확보를 위한 혁신제작기술에는 다양한 기술이 있으나, 본 보고서에서는 미국과 영국을 중심으로 개발되는 기술 중에서 현재 가장 효과가 있고 실현 가능성이 높은 전자빔용접(EBW), 분말 열간등방압성형(PM-HIP)과 다이오드 레이저 클래딩(Diode Laser Cladding) 등의 3가지 기술을 소개하고자 한다.

1) 전자빔 용접(EBW, Electron Beam Welding)

전자빔용접은 기존의 아크용접인 SAW(Submerged Arc Welding) 또는 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)을 대체할 수 있는 혁신적인 제작용접기술이다. 기존의 SAW 또는 GTAW용접 방식으로는 약 150mm 두께의 소형원자로 셀을 용접하기 위해 수십패스와 수십층 이상을 용접해야 한다. 그러나, EBW 방식을 사용하면 단 한패스로 용접할 수 있다 ([그림 2] 참조). 따라서 용접작업 시간을 기존대비 약 90% 정도 절감할 수 있다. 그리고 전자빔용접을 적용하려는 또 하나의 목적은 원자력발전소 가동중

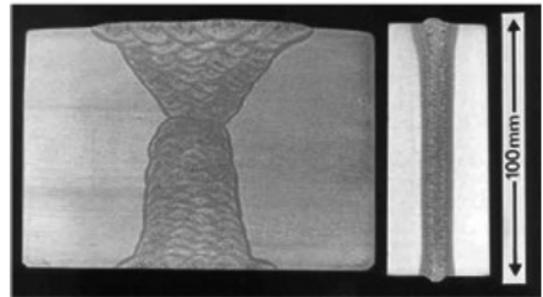
검사를 생략하기 위함이다(그림 3) 참조). EBW 용접부의 용가재를 사용하지 않기 때문에, EBW 용접부 및 열영향부를 용접후 용체화 열처리를 하면 모재와 동일한 조직으로 만들 수 있기 때문이다. 즉, 용체화 열처리를 하면 [그림 3]과 같이 용접부 및 열영향부가 사라지기 때문에, 발전소에서 수행하는 가동중 검사를 하지 않아도 된다는 것이다. 원자로 가동중 검사에 주기적으로 사용되는 엄청난 검사비용과 일정을 삭제할 수 있게 되는 것이다.

전자빔 용접은 기존 용접과 다른 특성이 있다. 대부분의 아크(Arc) 용접은 아크열을 이용하여 모재와 용가재(Filler Metal)를 녹이는 방식이다. 이때 두 모재와 용가재가 같이 응고되며 용접 접합이 되는 방식이다 ([그림 3] 왼쪽 참조).

반면, 전자빔 용접은 아크열을 이용하지 않고, 전자빔을 이용하여 두 모재를 녹이는 방식이나 현재 산업계에서는 주로 Al, Ti, Cu 등의 용가재 사용이 어려운 특수소재에 많이 적용을 하고 있으며, 일반적으로 두꺼운 탄소강이나 저합금강 소재 용접에는 적용하지 않고 있다. 그러나, 최근의 고전압 전자빔의 경우는 직진도가 좋아 100~200mm 모재 두께도 한 번에 용융시킬 수 있으므로 별도의 용가재 없이도 한 번에 전체 두께를 용접할 수 있다. [그림 2]는 SAW 용접과 EBW 용접부 단면을 비교한 사진이다. 동일한 100mm 두께 용접을 하더라도, SAW 용접은 수십패스 용접을 하지만, EBW는 한 패스 용접으로 용접이 완료됨을 확인할 수 있다.

이러한 장점을 기반으로 미국과 영국에서는 대형 압력용기의 150mm 이상 두꺼운 저합금강 재질을

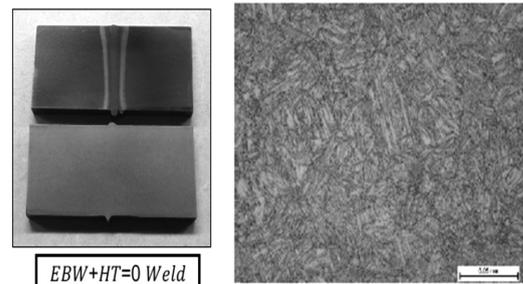
용접하는 EBW 기술을 개발하고 있다. ([그림 4] 및 [그림 5] 참조). EBW 용접을 위해서는 반드시 고진공 분위기 필요한데, 미국은 모듈형 챔버를 이용하여 진공분위기를 만드는 방식이고 영국은 국부 챔버를 사용하여 진공을 만드는 방식이다. 각 방식별로 장단점이 있으므로 추가적인 비교 검토가 필요할 것으로 판단된다. [그림 6]은 실제 미국과 영국이 모의시험을 한 결과 사진이다. 모의시험 결과에 따르면, 약 150mm 두께의 저합금강 소재 용접은 문제가 없었다.



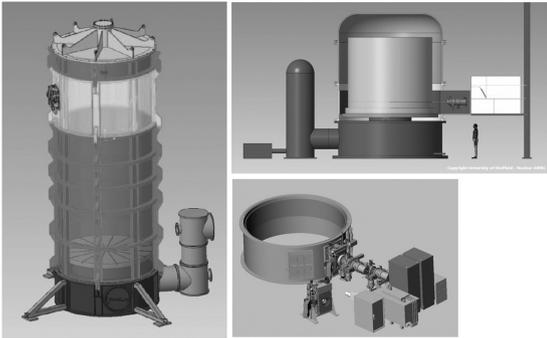
Submerged Arc Welding
90 passes at 500mm/min
= 6mm/min

LWEBW Welding
single pass at 100mm/min
= 18 times faster

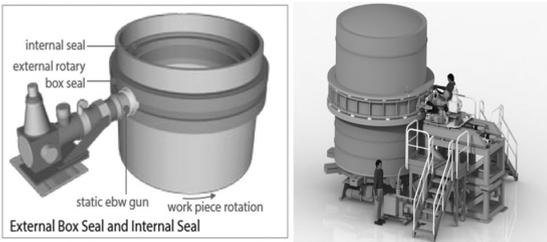
[그림 2] SAW와 EBW의 용접부 단면 비교 (출처: 영국 CVE)



[그림 3] EBW 용접부 & 용체화열처리후 단면사진(왼쪽) 과 용체화열처리후 미세조직사진, 500배(오른쪽)
(출처: 미국 EPRI-ANT)



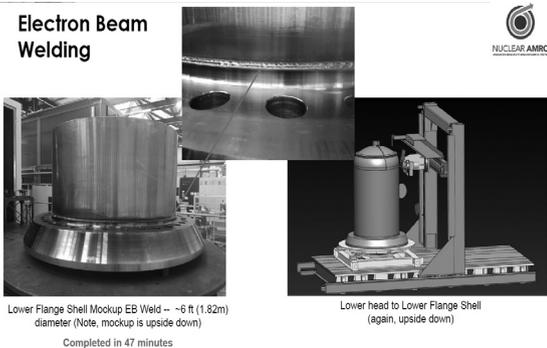
[그림 4] 미국에서 개발중인 EBW 용접방식
(출처: 미국 EPRI-ANT)



[그림 5] 영국에서 개발중인 EBW 용접방식
(출처: 영국 CVE & Sheffield Forgemasters)

있는 기술이며, 소재 제작에 필요한 주조/단조/가공/용접/최종가공 등의 다수 공정이 삭제 가능한 획기적인 기술이다. 단, 현재의 장비기술은 약 2m 이내에 제품만 제작 가능한 수준이다. 즉, 해외 선진사도 소형원자로와 같은 대형 소재 제작을 위한 PM-HIP 장비 개발은 필요할 것으로 판단된다.

PM-HIP의 간단한 원리는 다음과 같다. 최종형상과 유사한 형태의 캡슐(그림 7 참조) 또는 캔을 만들고 그 내부에 금속 분말을 주입하고 내부의 가스를 뽑아낸다. 이후 약 100MPa의 높은 압력과 약 1200°C의 높은 온도를 가한다. 높은 압력과 온도에서 수 시간을 유지함으로써 금속 분말은 고상 확산으로 서로 접합하게 된다. 이후 외부의 캡슐 또는 캔을 제거하면 최종 제품 형상과 같은 소재가 제작되는 것이다. [그림 7]과 [그림 8]은 실제 미국에서 모의시험을 한 결과이며, 제작에 문제가 없음을 확인하였다.



[그림 6] 소형원자로 모의시험 제품에 대한 EBW 적용 사례
(출처: 미국 EPRI-ANT)

2. 분말 열간등방압성형(PM-HIP, Powder Metallurgy-Hot Isostatic Pressing)

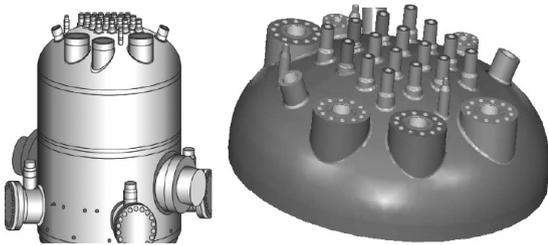
PM-HIP은 복잡한 형상을 가지는 단품 및 제품을 최종형상(Near-net shape)으로 한번에 만들 수

3. 다이오드 레이저 클래딩(DLC, Diode Laser Cladding)

일반적으로 원자로에 사용되는 헤드 또는 셸 등은 내부식성을 위해 스테인스틸 클래딩(=오버레이)용접이 수행된다(그림 10 참조). 주로 사용되는 용접방식은 SAW(Submerged Arc Welding) 또는 ESW(Electro Slag Welding)이다. [그림 9]는 SAW의 실제 작업 사진이다. 기존 용접방식(SAW)은 자동화가 어렵고, 용접재료가 많이 사용되는 단점이 있다. 그러나, 다이오드 레이저 클래딩 방식을 적용하면 자동화도 가능하고 용접재료 사용량도 약



[그림 9] 소형원자로 모의시험 제품 제작을 위한 PM-HIP용 캡슐
(출처: 미국 EPRI-ANT)

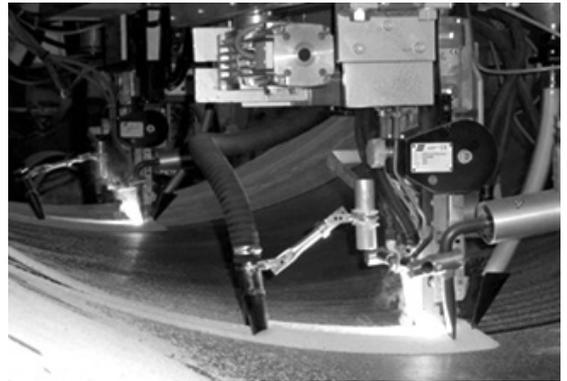


[그림 8] 미국 소형원자로 제품 형상(a) 및 PM-HIP 형상도(b)
(출처: 미국 EPRI-ANT)

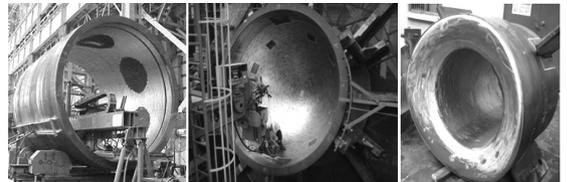
75%가량 줄어드는 효과가 있다. 가장 핵심적인 부분은 다이오드 레이저클래딩은 모재의 희석이 작아서 클래딩 두께를 약 5mm에서 1mm로 줄일 수 있다. 따라서 작업 시간을 현저히 줄일 수 있는 큰 장점이 있다.

다이오드 레이저 클래딩은 레이저빔을 이용하여 금속분말 또는 와이어(Wire)를 녹이는 방식이다. 레이저빔은 입열이 매우 높아 용가재(금속분말 또는 와이어)를 빨리 녹일 수 있어서 빠른 속도로 용접이 가능하다. 그리고, 기존 SAW 또는 ESW는 아래보기 자세에만 가능하였으나, 레이저 클래딩은 전자세로 작업이 가능하므로 자동화가 가능하다. [그림 11]은 다이오드 레이저 클래딩 모의시험 사

진이며, 전체적인 개념을 확인할 수 있다. [그림 12]는 레이저클래딩을 통한 시뮬레이션과 실제 작업을 한 모습을 비교한 것이다. 시뮬레이션 데이터를 로봇에 입력하고, 로봇은 실제 입력된 프로그램으로 작업을 한 것이다. 즉, 로봇자동화 작업이 이론적으로 실제품에 잘 반영된 것을 확인할 수 있다.



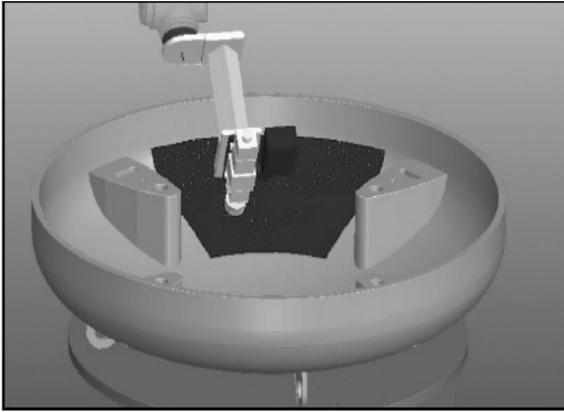
[그림 9] SAW(Submerged Arc Welding)을 이용한 원자로 셀 내부 클래딩



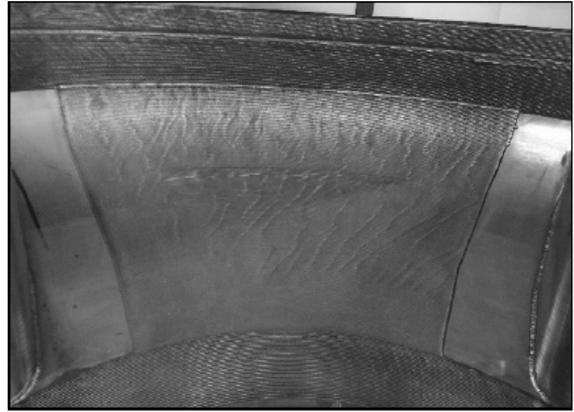
[그림 10] 클래딩 적용 부위 및 클래딩(=오버레이) 후 제품



[그림 11] 다이오드 레이저 클래딩 모의시험
(출처: 미국 EPRI-ANT 발표자료)



a. Cladding profile developed in SKM for fill sections between support structures



b. Actual clad surface of fill sections between support structures

[그림 12] 다이오드 레이저 클래딩 시뮬레이션(a) 및 실제 클래딩 작업후 표면(b)
(출처: 미국 EPRI-ANT 발표자료)

다. 혁신제작기술 국산화 개발 필요성

현재 미국과 영국 등 해외 선진국은 소형모듈형 원자로(Small Modular Reactor)를 차세대 원전노형으로 홍보하고 기술개발을 도전적으로 진행하고 있다. 특히, 혁신적인 제작기술은 기존의 국가 및 제작사가 따라가기 힘든 수준에 이르고 있다. 그리고 그들의 노형과 혁신제작기술을 통합적으로 세계표준화 하고 있다. 만약, 이 상태로 기술 격차가 계속 발생한다면 한국은 소형원자로 시장에 진입

이 어려울 뿐만 아니라, 장기적으로 한국의 원자력 분야 제조 경쟁력을 상실 할 수 있다.

지금이라도, 한국 자체적인 혁신제작기술개발이 시급하게 시작되어야 한다. 세계 원전시장에서 한국의 경쟁력을 지속하기 위해서는 미국 및 영국 등과 같이 정부 주도의 기술 혁신개발에 대한 지원이 반드시 필요할 것이다. 장기적인 개발전략 하에 정부/연구소/대학/기업 등이 한팀이 되어 기술개발이 추진되어야 할 것이다. **KMIF**