

용융염 원자로용 내식성 피복기기 부품 제작 기술

황성식[†] · 김태우 · 김상지

한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 988-111, 34057
(2026년 5월 28일 접수, 2026년 7월 01일 수정, 2026년 7월 18일 채택)

Fabrication Technologies of Corrosion Resistant Cladded Components for Molten Salt Reactors

Seong Sik Hwang[†], Tae Woo Kim, and Sang Ji Kim

Korea Atomic Energy Research Institute, 989-111 Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34057, Korea

(Received May 28, 2026; Revised July 01, 2026; Accepted July 18, 2026)

Molten Salt Reactors (MSRs) are a promising Generation IV nuclear system for maritime and small modular applications. However, a critical challenge remains: ensuring the structural integrity of reactor vessels in extremely corrosive environments. While ASME-qualified materials like Type 316H stainless steel offer excellent high-temperature mechanical properties, their long-term resistance to molten chloride salts is insufficient. This study proposes the Ni forming technique as a strategic fabrication solution to create a robust corrosion barrier. Unlike conventional thin-film plating, this technique enabled the deposition of a thick (~1.0 mm), high-purity (99.38%) nickel layer on 316H SS substrates with minimal thermal impact. Microstructural analysis revealed an exceptionally thin interfacial dilution transition zone of approximately 1.5 μm , indicating a sharp concentration gradient that maximizes corrosion resistance. The mechanical integrity of the interface was further validated through guided bend tests, performed in accordance with ASME Section IX QW-160. The cladding maintained its structural bond without any delamination or significant discontinuities, meeting the acceptance criteria. These results demonstrate that Ni forming technology offers a viable and reliable pathway for fabricating cladded components in MSRs.

Keywords: Molten salt reactor, Ni forming, Cladded components, Bonding strength, ASME Section III Div.5

1. 연구배경

용융염 원자로(Molten Salt Reactor, MSR)는 현재 미국 오크리지 국립연구소(ORNL)를 비롯한 국가 연구기관과 테라파워(TerraPower)와 같은 민간 기업을 중심으로 활발히 개발되고 있는 차세대 원자로이다. MSR은 고체 연료봉 대신 용융된 염에 핵연료를 섞어 사용하므로, 노심 용융과 같은 중대 사고를 원천적으로 배제할 수 있으며 소형화, 안전성, 경제성 면에서 기존 대형 가압경수로(PWR)보다 우수한 것으로 알려져 있다. 특히 한국에서는 MSR을 화물선, 해상 구조물 등의 동력원으로 활용하기 위한 연구가 활발히 진행 중이며, 이는 해양 탄소 중립 달성을 위한 핵심 기술로 주목받고 있다.

그러나 MSR은 고온에서 가동될 뿐만 아니라, 용융염에 의한 부식과 강한 중성자 조사 환경이 공존하는 가혹한 조건에 노출된다. 대부분의 상용 고온 재료는 이러한 용융염 부식과 조사 취화에 의해 심각한 손상을 입을 수 있으며, 이는 원자로 용기 및 배관의 건전성을 위협하여 부품의 주기적 교체, 잦은 운전 정지, 방사성 폐기물 발생량 증가 등의 문제를 야기한다.

원자로 설계의 실질적 국제 표준인 ASME Section III, Division 5 규정에 따르면, 고온 원자로 구조용 재료로 허용되는 합금은 2.25Cr-1Mo강, 9Cr-1Mo강, Type 304 및 316 스테인리스강, Alloy 800H, Alloy 617 등으로 매우 제한적이다 [1]. 이들 재료는 고온 기계적 특성은 만족하지만, 가혹한 용융염 환경에서의 내식성 검증 데이터는 여전히 불충분한 실정이다 [2].

이러한 재료적 한계를 극복하기 위해, 기계적 하중은 ASME 인증을 받은 모재(Base metal)가 담당하고, 용융

[†]Corresponding author: sshwang@kaeri.re.kr

황성식: 책임연구원, 김태우: 선임연구원, 김상지: 책임연구원

염과 직접 접촉하는 내면은 내식성이 뛰어난 니켈(Ni) 또는 Alloy 625와 같은 재료로 피복(Cladding)하는 설계 방식이 모색되고 있다.

본 논문에서는 피복기술로 고려되고 있는 기술현황을 분석하고 그 중에서 기존 전기도금 기술의 두께 한계를 극복하고 원자로 용기의 내식성을 획기적으로 향상시킬 수 있는 Ni forming 기술을 제안하며, 이를 통해 제작된 피복 부품의 미세조직 특성과 ASME 기술 기준에 따른 계면 건전성 평가 결과를 기술하고자 한다.

2. ASME 표준 및 피복 제작 기술

2.1 ASME Section III, Division 5 설계 규칙 및 MSR 적용성

ASME Section III, Division 5는 고온에서 가동되는 차세대 원자로의 설계 및 제작을 규정하는 사실상의 국제 원자로 설계규격이다 [3]. MSR과 같이 가혹한 환경에서 가동되는 원자로는 크립, 피로 및 환경 조장 균열에 대한 엄격한 관리가 필수적이나, 현재 Div. 5에서 승인된 Type 316H stainless steel, Alloy 800H 등의 재료들은 고온 기계적 건전성에는 특화되어 있으나 용융염 환경에서의 장기적인 내식성 데이터가 부족한 상태이다. 이러한 재료적 한계를 보완하기 위해 ASME 규정은 특정 조건 하에서 비인증 재료를 피복재로 사용하는 설계 방식을 허용하고 있다 [4].

특히 HBB-2121 규정에 따르면 피복층의 두께가 모재 두께의 10% 미만일 경우, ASME 코드 미인증 재료라도 내식 목적으로 피복하는 것이 가능하며, 이때 피복층은 구조적 하중을 분담하지 않는 것으로 간주한다. 즉, 모든 기계적 응력 해석은 ASME 인증을 받은 모재를 기준으로 수행하며 피복층은 오직 화학적 부식 방벽으로서의 역할만을 수행하게 된다. 이러한 설계 전략은 복잡한 인증 절차 없이도 고순도 니켈(Ni)과 같은 우수한 내식 재료를 실제 원자로 설계에 도입할 수 있는 근거가 된다. 다만, 구조적 하중은 받지 않더라도 운전 중 발생하는 열팽창 차이나 열사이클 조건에서 피복층이 모재로부터 박리되지 않는 계면 건전성을 확보하는 것이 제작 공정의 핵심이며, 이를 검증하기 위해 ASME Section IX QW-160에 따른 굽힘 시험 등이 필수적으로 요구된다.

2.2 피복 제작 기술의 종류 및 MSR 기기 적용 전략

MSR 기기 제작 시 내식성 피복층을 형성하기 위해 다양한 기술이 검토되고 있으며, 고온의 용융염 극한 환경에서의 적용 가능성에 대한 연구가 활발히 진행 중이다 [5]. 그 기술의 종류에는 용접 오버레이(Weld overlay),

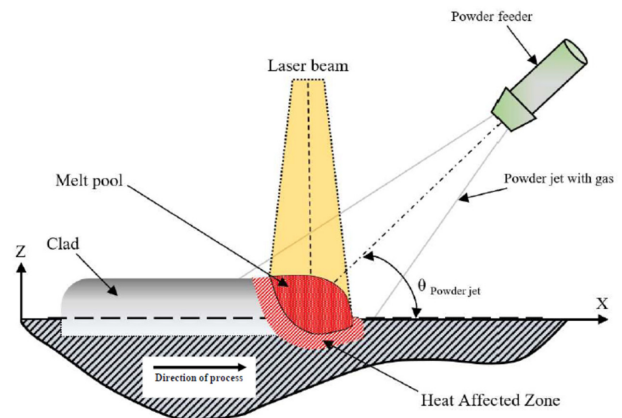


Fig. 1. Concept of weld overlay for cladding. Reproduced from [6]

열용사(Thermal spray), 폭발 접합(Explosion bonding), 확산접합(Diffusion bonding) 등 다양한 기술이 검토되고 있다.

Fig. 1과 같은 용접 오버레이는 모재와 용가재를 용융시켜 강력한 야금학적 결합을 형성하는 대표적인 방식이다 [6]. 이 기술은 모재와 용가재를 녹여 결합하므로 접착 강도는 매우 뛰어나지만, 용접 과정에서 모재의 성분이 피복층으로 섞여 들어가는 희석(Dilution) 현상이 발생하여 피복층의 부식 저항성이 저하될 우려가 있다. 이 공정은 모재표면의 이물질을 제거하는 세척 공정부터 시작된다. 이후 TIG 또는 SAW와 같은 용접 방식을 이용해 내식성이 우수한 용가재(Filler metal)를 모재 위에 녹여 붙인다. 용접 토치가 이동하며 비드(Bead)를 형성하고, 인접한 비드와 일정 부분 겹치게 적층하여 균일한 피복층을 만든다. 다층 용접을 통해 원하는 두께를 확보하며, 용접 후열처리를 통해 잔류 응력을 제거하고 미세조직을 안정화하여 최종 피복 부품을 완성하는 공정이다.

Fig. 2에서 보여주는 열용사 기술은 고속 분사를 통해 대형 부품에 신속하게 피복층을 형성할 수 있는 장점이 있으나, 코팅층 내부의 기공 및 기계적 결합 방식에 따른 박리 저항성 확보가 핵심적인 과제이다 [5]. 이 공정은 피복할 금속(Ni 등)을 분말이나 와이어 형태로 공급하여 연소 가스나 아크 등의 열원으로 가열 및 용융시킨다. 용융된 미세 입자들을 고속의 압축 가스를 이용해 전처리된 모재 표면에 분사된다. 입자들이 표면에 충돌하며 편평하게 퍼지고 층을 이루어 적층되면서 물리적 결합을 형성한다. 냉각 후 필요에 따라 기공을 메우는 봉공 처리(Sealing)나 표면 연마 공정을 거치며, 이를 통해 복잡한 형상의 대형 부품 표면에 빠르게 내식층을 형성할 수 있다. 이 공정은 속도가 매우 빠르고 열 영향이 적어 모재 변형이 거의 없으며, 대형 부품 및 현

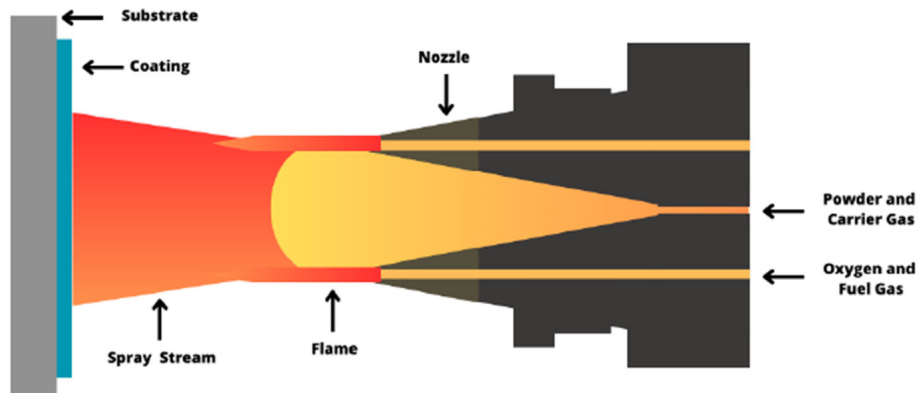


Fig. 2. Concept of thermal spray for cladding. Reproduced from [7]

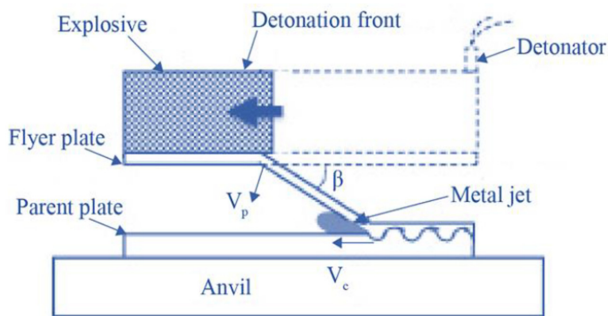


Fig. 3. Concept of explosion bonding. Reproduced from [8]

장 시공에 경제적이다. 그러나 기계적 결합 방식이므로 결합력이 상대적으로 낮아, 원자로의 반복적인 열충격 환경에서 박리될 위험이 크다.

Fig. 3의 개략도에서 보는 바와 같은 폭발 접합 기술은 폭발 압력을 이용해 두 금속 계면에서 산화막을 제거하고 원자 단위의 결합을 유도하여, 희석층이 거의 없

는 고강도 접합 계면을 형성한다 [8]. 이 공정은 모재와 내식 피복재판을 일정 간격을 두고 평행하게 배치하는 단계부터 시작된다. 피복재 위에 폭약을 설치하고 한쪽 끝에서 기폭시키면, 폭발 압력에 의해 피복재가 모재에 초고속으로 충돌한다. 충돌 지점에서 금속 제트(Jet) 현상이 발생하여 표면 산화막을 제거하고 두 금속을 원자 단위로 밀착시킨다. 이 과정에서 파상(Wavy) 모양의 계면이 형성되며 강력한 야금학적 결합이 이루어진다. 접합 후에는 평판을 원하는 형상으로 가공하거나 열처리를 통해 연성을 회복시킨다. 이 공정은 이중 금속 간에도 희석층 없이 매우 높은 접합 강도를 얻을 수 있으며, 넓은 면적의 평판 제작에 효율적이다. 그러나 폭발을 이용하므로 공정 제어가 까다롭고, 복잡한 곡면이나 좁은 배관 내부를 피복하기에는 한계가 명확하다.

Fig. 4와 같은 확산 접합은 모재와 피복재를 밀착시킨 후, 재료의 용점 이하(보통 용점의 0.5~0.7배)의 고온과 고압을 가하여 접합면에서 원자의 확산을 유도하는 고

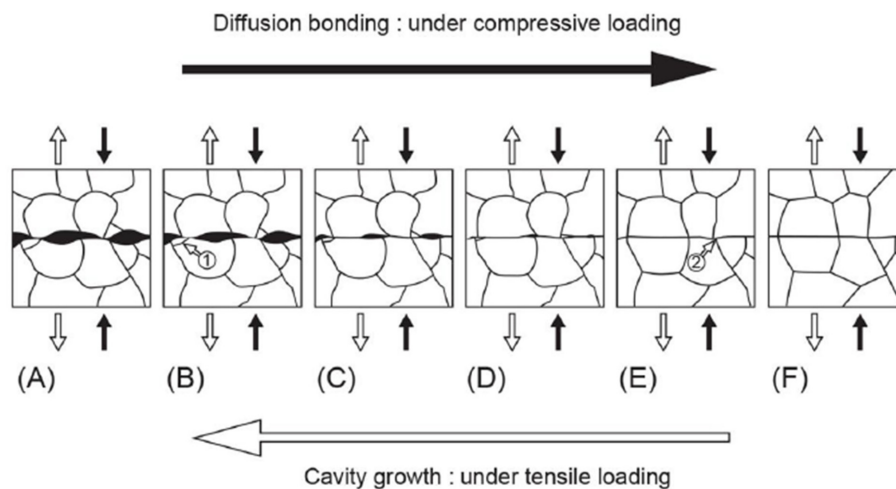


Fig. 4. Concept of diffusion bonding. Reproduced from [9]

상 접합(Solid-state bonding) 기술이다 [9]. 이 공정은 재료를 용융시키지 않으므로 용접 방식에서 발생하는 기공이나 편석과 같은 결함이 거의 없으며, 모재의 미세조직 변화를 최소화할 수 있다는 장점이 있다.

MSR 부품 제작 시 이 확산 접합을 적용하면, 니켈(Ni) 피복재와 316H SS 모재 사이의 원자 확산을 통해 매우 강력한 금속학적 결합을 형성할 수 있다 [10]. 특히 이 방식은 접합 계면이 매우 치밀하여 고온, 고압의 용융염 환경에서도 기밀성을 유지하는 데 유리하며, 정밀한 공정 제어를 통해 희석 영역(Dilution zone)을 나노미터 또는 수 마이크로미터 단위로 극소화할 수 있다. 다만, 균일한 압력 전달을 위해 고도 기술이 적용된 지그(Jig) 설계가 요구되며, 대형 원자로 용기보다는 열교환기(PCHE) 등 정밀한 적층 구조를 가진 핵심 부품의 피복 및 접합에 주로 활용되는 전략적 기술이다. 그 개략적 공정은 아래와 같다.

우선 Assembly 제작과정으로 시작되는데 이는 구조적 지지체인 외부 배관(316H SS) 내부에 내식성 라이너(Ni)를 삽입하거나 분말 충전하는 과정이며 2단계는 양 끝단을 밀봉하고 내부를 진공 상태로 만들어 공기를 제거하는 과정이 이어진다. HIP Processing을 통해 아르곤 등의 불활성 가스를 매개체로 모든 방향에서 균일한 등압(Isostatic Pressure)과 고온을 가한다. 이 과정에서 라이너가 외벽으로 밀착되며 원자가 상호 이동하는 확산 접합이 일어난다. 최종적으로 냉각 후 외벽과 내벽이 물리적 경계 없이 금속학적으로 일체화된 내식성 피복 배관이 완성된다.

이에 반해 Terrani 등은 Ni 도금에 의한 용융염에서 내식성 향상을 위한 연구를 제안하고 있다 [11]. Ni 도금 기술에 기반하여 Ni forming 기술은 기존 전기도금의 원리를 고도화하여 [12] 1.0 mm 이상의 두꺼운 층을 형성할 수 있으며, 열 영향부가 거의 없어 모재의 기계적 성질을 보존하면서도 복잡한 형상의 내면에 고순도 Ni 층을 균일하게 형성할 수 있다. 특히 염화물 기반의 용융염 환경에서 기존 스테인리스강의 한계를 극복하기 위해서는 고순도 니켈과 같은 부식 방벽의 적용이 필수적이다 [13]. 따라서 MSR 설계에서는 ASME 인증을 받은 316H SS를 구조재로 채택하고 그 내면에 Ni forming을 통한 두꺼운 내식층을 적용하는 것이 가혹한 부식 환경과 엄격한 설계 코드를 동시에 만족시킬 수 있는 가장 유망한 제작 전략으로 평가된다.

3. 실험 방법

3.1 Ni Forming 공정

본 연구에서는 MSR 환경에서의 내식성 확보를 위해

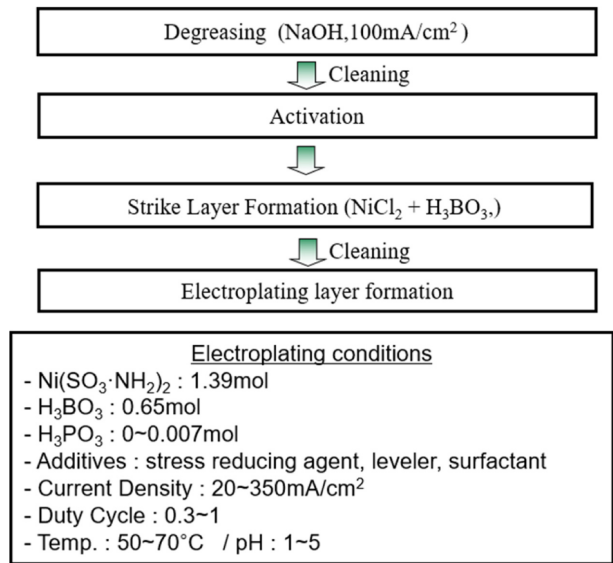


Fig. 5. General process flow diagram for Ni forming

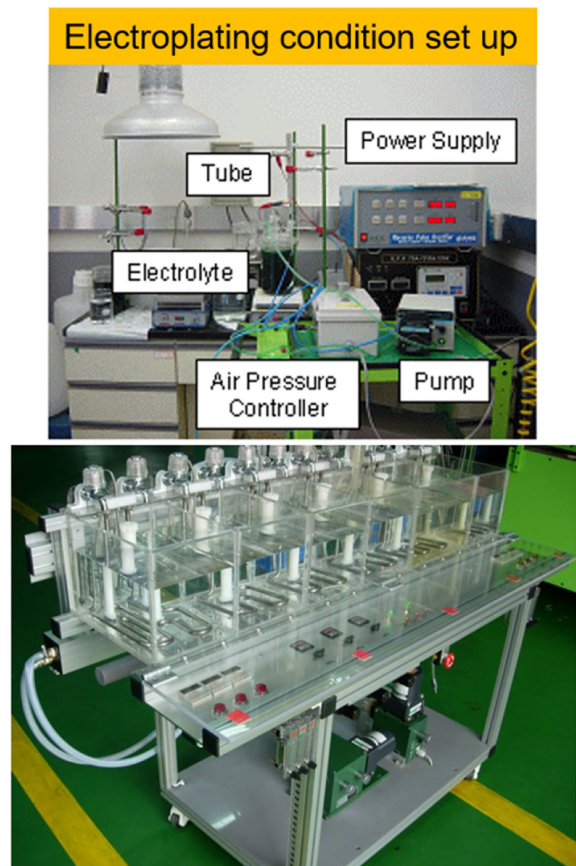


Fig. 6. Typical equipment configuration used in the general Ni forming process

Type 316H 스테인리스강(SS)을 모재로 선정하고, 표면 탈지(Degreasing) 및 에칭(Etching) 전처리 후 니켈 설과

메이트(Nickel sulfamate) 전해액을 이용한 전기도금 방식의 Ni forming 공정으로 고순도 니켈 피복층을 형성하였다. 전류 밀도, 온도, 양극 배치 및 전해액 순환 조건을 최적화하여 1.0 mm 이상의 두꺼운 피복층을 안정적으로 형성하면서 내부 잔류응력을 최소화하였으며, 형성된 피복층은 후속 열처리를 통해 모재와의 확산 결합을 강화하였다. 세부 공정 흐름과 도금 조건은 Fig. 5 및 Fig. 6에 제시하였다.

3.2 계면 분석 및 건전성 평가

316H SS 모재와 Ni 피복층 간의 계면 건전성을 평가하기 위하여 절단, 마운팅, 정밀 연마된 시편을 대상으로 주사전자현미경(SEM) 단면 관찰 및 에너지 분산형 X선 분광법(EDS) Line Profile 분석을 수행하여 계면의 기공, 균열, 미결합 여부, 희석층(Dilution zone) 두께, 그리고 피복층 내 니켈 순도를 정량화하였다. 또한 모재-피복층 간 기계적 결합력을 검증하기 위해 ASME Section IX, QW-160 (Guided-Bend Tests) 규정에 따른 굽힘 시험을 수행하였으며, 판정 기준은 굽힘 후 외측 인장면에서의 박리(Delamination) 미발생 및 1.5 mm(1/16 inch)를 초과하는 개방성 불연속부(Open discontinuities)의 부재 여부로 하였다. 시험의 정량적 수치확보를 위해 시편 수는 방향별(표면/뒷면/측면) 각 2개씩 총 6개 시편으로 시험하였고 굽힘각은 180°로 하였으며 ASME BPVC.IX:2023 (QW-160) 준용한 시편조건을 적용하였다.

결합 크기의 정량은 측정 가능한 미세 균열 길이로서 “검출한계 이하”로 정의하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 피복층의 특성 분석 및 계면 희석층 평가

EDS Line Profile 분석을 적용한 것은 모재 구성 원소인 철(Fe)과 크롬(Cr)이 Ni 피복층 내부로 상호 확산된 영역, 즉 계면 희석층(Dilution zone)의 깊이를 정량적으로 측정하고 피복층의 최종 니켈 순도를 산출하기 위함이며, 이를 통해 피복층의 내식 성능을 미세조직 수준에서 객관적으로 검증할 수 있다.

Ni forming 기술을 통해 제작된 피복층의 화학적 조성 및 계면 특성을 분석한 결과, MSR용 내식성 장벽으로서의 탁월한 건전성이 확인되었다. Fig. 7과 같은 SEM 및 EDS를 이용한 미세조직 성분 분석 결과, 형성된 피복층 내부의 Ni 함량은 평균 99.38%로 측정되었으며, 이는 불순물에 의한 국부적 부식 가능성을 최소화할 수 있는 매우 순수한 니켈 층이 성공적으로 형성되었음을 의미한다.

특히 모재인 316H SS와 Ni 피복층 사이의 원소 상호 확산에 의해 발생하는 희석 이행 구역(Dilution transition zone: Ni 함량이 10% 이하로 떨어지는 구역)은 매우 얇게 잘 생성되었다. Fig. 8에서 보듯이 3개의 EDS Line Profile 분석을 통해 희석층 두께 측정의 신뢰도를 확보하였으며 이렇게 확인된 Dilution zone의 두께는 약 1.5 mm 수준으로 매우 얇게 형성되었다.

이는 기존의 용접 오버레이(Weld overlay) 방식이 수 밀리미터(mm) 단위의 넓은 희석 영역을 형성하여 표면 내식성을 저하시키는 것과 대조적이다. 1.5 mm 라는 극 미세 희석층은 Ni forming 공정이 열영향을 최소화하면

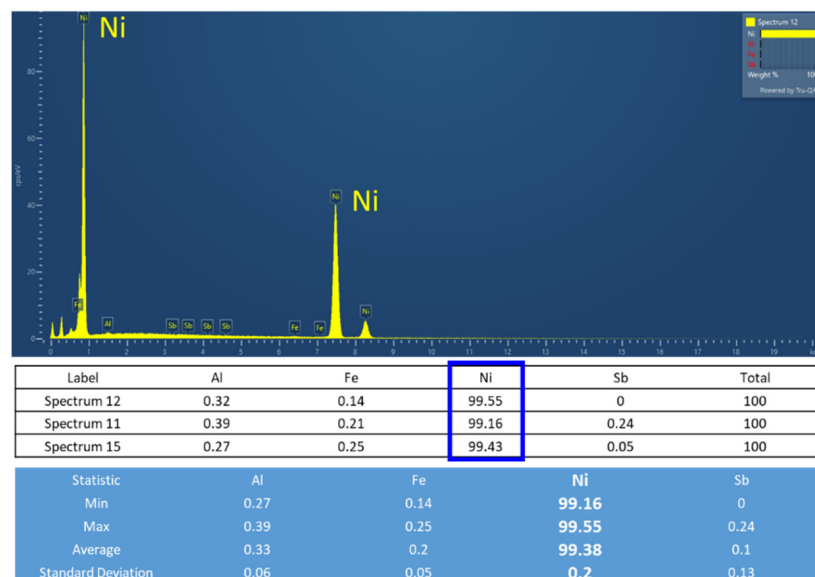


Fig. 7. Cladding layer qualification-chemical composition

서도 원자 단위의 견고한 확산 결합을 유도했음을 입증하며, 이를 통해 MSR의 가혹한 염화물 환경에서도 모재 성분(Fe, Cr)의 용출 없이 장기적인 내식성을 유지할 수 있을 것으로 판단된다 [14]. 이러한 결과는 관련 선행 연구들과 비교했을 때 매우 우수한 수치이다. B. Barua 등의 연구 [4]에 따르면, 고온 원자로용 피복재의 계면 건전성은 모재 성분의 희석률에 의해 결정되는데, 본 연구에서 확보한 1.5 mm의 이행 구역은 일반적인 열적 접합 방식보다 훨씬 급격한 농도 구배를 보여주어 내식층의 기능을 극대화한다. 또한, M. C. Messner 등 [15]이 지적한 바와 같이, 계면 희석층이 얇을수록 열팽창 계수 차이에 의한 계면 응력 집중을 완화하는 데 유리하므로, 고온 MSR 운전 조건에서 피복재의 구조적 안정성을 확보하는 데 결정적인 역할을 할 것으로 기대된다.

4.2 굽힘 시험을 통한 건전성 검증

본래 ASME Section IX의 굽힘 시험은 용접부(Welds)의 연성 및 접합 건전성을 평가하기 위한 표준 기술로 널리 사용되지만, 모재와 이종 재료 간의 강력한 금속학적 결합이 요구되는 피복(Cladding) 또는 도금층의 박리 저항성을 평가하는 데에도 매우 유효한 기술로 간주된다. 특히 MSR과 같이 운전 중 열팽창 및 기계적 변형이 빈번하게 발생하는 환경에서 사용되는 기기 내부의 피복층은 단순한 부착력을 넘어 용접부 수준의 일체성을 확보해야 하므로, 본 연구에서는 이 절차를 준용하여 계면의 건전성을 확인하였다.

합격 판정에 있어서는 굽힘된 시편의 볼록한 외측 인장면에서 피복층 내부나 모재와의 계면을 따라 어떠한 형태의 박리도 허용하지 않는 것을 원칙으로 하였으며, 1.5 mm (1/16 inch)를 초과하는 개방성 불연속부가 없을

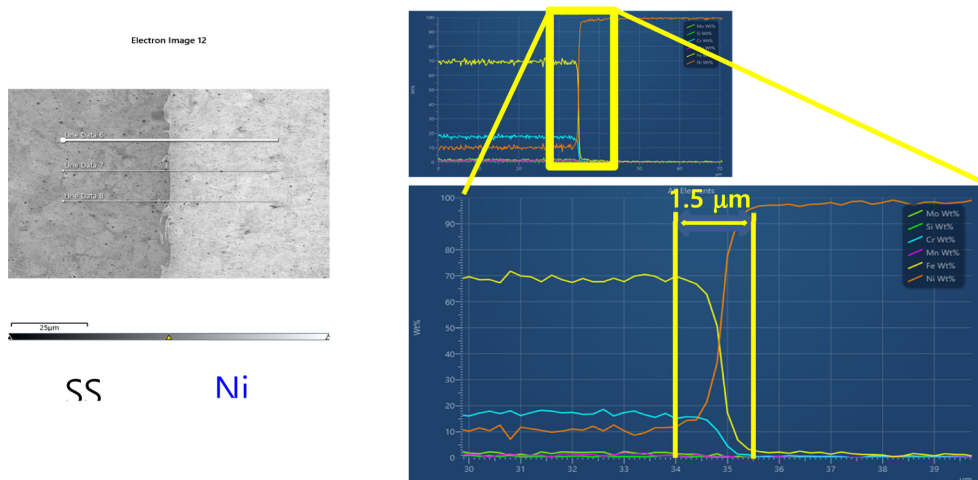


Fig. 8. Thin transition layer formation by Ni forming

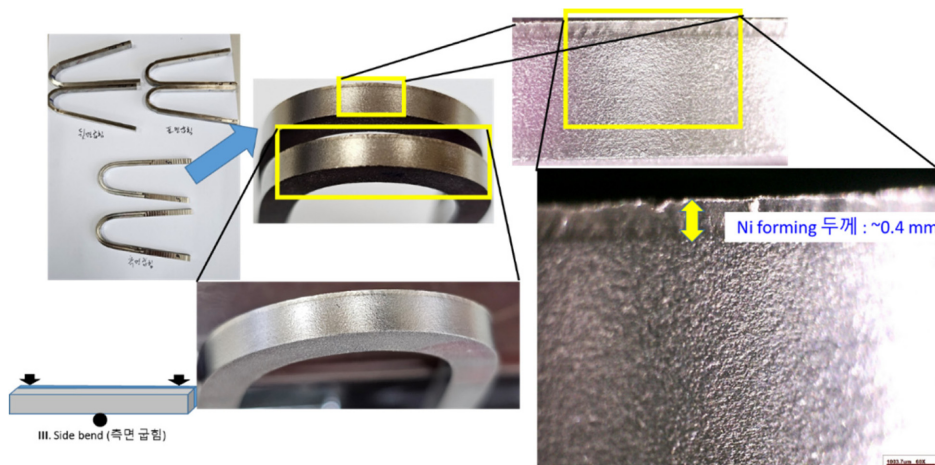


Fig. 9. Side bend test specimen showing no evidence of delamination defects

Table 1. Test results for bending test on Ni clad stainless steel plate

시험항목	결과치	시험방법
횡방향 표면굽힘시험-No.1	Acceptable(터짐없음)	ASME BPVC.IX:2023(준용)
횡방향 표면굽힘시험-No.2	Acceptable(터짐없음)	ASME BPVC.IX:2023(준용)
횡방향 뒷면굽힘시험-No.1	Acceptable(터짐없음)	ASME BPVC.IX:2023(준용)
횡방향 뒷면굽힘시험-No.2	Acceptable(터짐없음)	ASME BPVC.IX:2023(준용)
횡방향 측면굽힘시험-No.1	Acceptable(터짐없음)	ASME BPVC.IX:2023(준용)
횡방향 측면굽힘시험-No.2	Acceptable(터짐없음)	ASME BPVC.IX:2023(준용)

경우 합격으로 판정하였다. 다만 시편 모서리(Edges)에서 발생하는 미세 균열은 시험 중 국부적 응력 집중에 의해 나타날 수 있는 현상이므로 다른 결함이 없다면 합격 여부에 영향을 주지 않는 것으로 간주하였다. 이러한 기준은 Ni forming 층이 실제 원자로 운전 조건에서 가해지는 극한의 인장 및 전단 응력 하에서도 구조적 일체성을 유지할 수 있음을 보증하는 핵심 지표가 된다.

Fig. 9에서 보는 바와 같은 Ni forming 기술로 제작된 피복 부품의 실제적인 기계적 건전성을 확인하기 위해 수행된 Guided-Bend Test 결과, 본 연구에서 제시한 공정의 우수성이 객관적으로 입증되었다. 특히 0.4 mm 두께의 Ni 피복층이 형성된 시편을 대상으로 ASME Section IX 규격에 따른 측면 굽힘(Side bend), 뒷면 굽힘(Root bend) 및 표면굽힘(Face bend) 시험을 실시한 결과, 모재와 피복층 사이의 계면뿐만 아니라 피복재 자체에서도 어떠한 균열이나 박리 등의 결함이 발견되지 않았다.

이러한 결과는 단순히 육안 검사에 그치지 않고, 국가 공인 시험기관의 정밀 분석 및 공인성적서(Official Test Report)(Table 1 참고)를 통해 그 신뢰성이 뒷받침되었다는 점에서 기술적 의미가 크다. 공인성적서에 기록된 시험 결과에 따르면, 굽힘 반경(Radius)에 따른 가혹한 변형 조건 하에서도 316H SS 모재와 Ni 피복층은 견고한 금속학적 결합 상태를 유지하였으며, 결합 크기가 ASME 합격 기준인 1.5 mm를 훨씬 하회하는 ‘결함 없음’ 상태임을 공식적으로 확인하였다. Table 1에 시편별 개별 결과(No.1, No.2)를 구분하여 표기하고, 6개 시편 모두에서 동일하게 결함이 없음을 확인하여 통계적 재현성을 보여주었다.

특히 0.4 mm라는 비교적 얇은 두께의 도금층에서 결함이 전혀 발견되지 않았다는 점은, Ni forming 공정 중 발생하는 잔류 응력이 효과적으로 제어되었으며 피복층 자체의 연성(Ductility)이 충분히 확보되었음을 시사한다. 이는 일반적인 전기도금 층이 두께가 두꺼워질수록 내부 응력에 의해 쉽게 균열이 발생하거나 박리되는 고질적인 문제를 해결한 결과로 볼 수 있다. 따라서 공인성적서로 검증된 본 연구의 굽힘 시험 결과는 Ni forming

기술이 MSR 원자로 용기와 같은 고신뢰성 기기 제작에 직접적으로 적용될 수 있는 충분한 기계적 건전성을 확보했음을 증명하는 핵심 지표로 활용될 수 있다.

5. 결론

MSR은 고온·고압의 용융염 부식 환경과 강한 중성자 조사가 공존하는 가혹한 조건에서 운전되므로, ASME 인증 구조재만으로는 장기 내식성을 확보하기 어렵다. 이에 본 연구는 ASME Section III, Division 5의 비인증 피복재 허용 규정(HBB-2121)에 근거하여, 구조 하중은 인증 모재(316H SS)가 담당하고 내식 성능은 별도의 Ni 피복층이 담당하는 설계 개념 하에, 기존 박막 전기도금의 두께 한계를 극복할 수 있는 Ni forming 기술을 제안하고 그 계면 건전성을 실증하는 것을 목적으로 하여 연구하고 아래의 결론을 도출하였다.

- ASME Section III, Division 5 규정에 근거하여, 구조적 하중은 인증 모재인 316H SS가 담당하고 내식성은 10% 미만 두께의 Ni 피복층이 담당하는 설계 방안을 수립함으로써 코드 기반의 실질적 원자로 적용 가능성을 확인하였다.

- 기존 전기도금의 한계를 극복하여 1.0 mm 이상의 두꺼운 피복층을 형성하였으며, 성분 분석 결과 평균 99.38%의 고순도 니켈 층을 성공적으로 구현하여 용융염 부식에 대한 신뢰성 있는 차단벽을 형성하였다.

- Ni forming 공정의 정밀 제어를 통해 모재 성분의 확산을 최소화함으로써, 기존 용접 방식 대비 획기적으로 얇은 1.5 mm 수준의 희석 이행 구역을 형성하여 내식층 고유의 화학적 특성을 유지하였다.

- ASME Section IX QW-160 기준에 따른 굽힘 시험을 수행한 결과, 0.4 mm 이상의 도금층에서 박리 현상이 전혀 발견되지 않았으며, 공인성적서를 통해 결합 크기가 합격 기준(1.5 mm)을 만족하는 ‘결함 없음’ 상태임을 공식적으로 검증하였다.

- 본 연구를 통해 검증된 Ni forming 기술은 별도의 공정최적화를 통해 복잡한 형상의 원자로 용기 및 내부

부품에도 균일한 내식층을 형성할 수 있는 최적의 제작 공정임을 입증하였으며, 이는 향후 해양용 MSR 및 SMR의 상용화 단계에서 핵심 제작 기술로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술평가연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-22-017, 차세대다목적고출력전력생산기술(열원공급모듈설계기술)).

References

1. ASME BPVC.III.5, Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 5 (2022).
2. U. Lee, M. W. Kim, J. Na, M. Lee, S. J. Kim, D. J. Kim and Y. S. Yoon, A study on the corrosion behavior of Fe/Ni-based structural materials in unpurified molten chloride salt, *Materials*, **18**, 1653 (2025). Doi: <https://doi.org/10.3390/ma18071653>
3. R. I. Jetter, M. Mitchell and D. K. Morton, 17 Division 5 High Temperature Reactors, in Online Companion Guide to the ASME Boiler & Pressure Vessel Codes, ASME Press, New York (2020). Doi: https://doi.org/10.1115/1.861981_ch17
4. B. Barua, M. C. Messner, A. Rovinelli, T. -L. Sham, Acceptance Criteria for the Mechanical Integrity of Clad/Base Metal Interface for High Temperature Nuclear Reactor Cladded Components, ASME 2020 Pressure Vessels & Piping Conference (PVP2020-21494), p. 1, ASME, Virtual Conference (2020). Doi: <https://doi.org/10.1115/PVP2020-21494>
5. N. H. Faisal, V. Rajendran, A. Prathuru, M. Hossain, R. Muthukrishnan, Y. Balogun, K. Pancholi, T. Hussain, S. Lokachari, B. A. Horri, M. Bankhead, Thermal spray coatings for molten salt facing structural parts and enabling opportunities for thermochemical cycle electrolysis, *Engineering Reports*, **6**, e12947 (2024). Doi: <https://doi.org/10.1002/eng2.12947>
6. M. Rezayat, A. Aboutorabi Sani, M. T. Noghani, M. S. Yazdi, M. Taheri, A. Moghanian, M. A. Mohammadi, M. Moradi, A. M. M. Garcia and H. Besharatloo, Effect of lateral laser-cladding process on the corrosion performance of Inconel 625, *Metals*, **13**, 367 (2023). Doi: <https://doi.org/10.3390/met13020367>
7. V. C. Campideli, H. H. Koga, D. C. Sicupira and Vanessa F. C. Lins, A review on corrosion protection of metals and alloys by thermal spraying coatings, *International Journal of Engineering Research and Applications*, **15**, 46 (2025). Doi: <https://doi.org/10.9790/9622-15014674>
8. S. Bhat, Y. Khedkar, P. Prasad, Advances in explosive welding of dissimilar metals: a mini literature survey, *International Journal of Engineering Trends and Technology*, **72**, 69 (2024). Doi: <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V72I2P108>
9. M. Khedr, A. Hamada, A. Jarvenpaa, S. Elkatatny, and W. Abd-Elaziem, Review on the solid-state welding of steels: diffusion bonding and friction stir welding process, *Metals*, **13**, 54 (2023). Doi: <https://doi.org/10.3390/met13010054>
10. S. Pianese, A. P. Marcone, F. X. Nuiry, M. Calviani, K. A. Szcurek, G. A. Izquierdo, P. Avigni, S. Bonnin, J. Busom Descarrega, T. Feniet, K. Kershaw, J. Lendaro, A. Perez Fontenla, T. Schubert, S. Sgobba, and T. Weißgärber, Hot isostatic pressing assisted diffusion bonding for application to the Super Proton Synchrotron internal beam dump at CERN, *Physical Review Accelerator and Beams*, **24**, 043001 (2021). Doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.043001>
11. J. -H. Yoon, J. H. Kim, G. S. Shin and C. W. Kim, Characterization of nickel cladding on type 316H stainless steel for enhanced corrosion resistance in molten chloride salts, *Nuclear Engineering and Technology*, **57**, 103276 (2025). Doi: <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.10.038>
12. D. M. Zellele, G. Sh. Yar-Mukhamedova and M. Rutkowska-Gorczyca, A review on properties of electrodeposited nickel composite coatings: Ni-Al₂O₃, Ni-SiC, Ni-ZrO₂, Ni-TiO₂ and Ni-WC, *Materials*, **17**, 5715 (2024). Doi: <https://doi.org/10.3390/ma17235715>
13. S. S. Hwang, G. H. Koo, S. J. Kim, *Proc. Korean Nuclear Society Autumn Meeting*, p. 1, Korean Nuclear Society, Changwon, Korea (2025). https://www.kns.org/files/pre_paper/54/25A-078-%ED%99%A9%EC%84%B1%EC%8B%9D.pdf
14. L. Pellicot, N. Gruet, J. Serp, R. Malacarne, S. Bosonnet, G. Touze, J. Grzonka and L. Martinelli, Corrosion of a nickel-based alumina-forming alloy in molten NaCl-MgCl₂ at 600 °C for the development of a molten salt nuclear reactor, *High Temperature Corrosion of Materials*, **101**, 1041 (2024). Doi: <https://doi.org/10.1007/s11085-024-10264-9>
15. M. C. Messner, T. -L. Sham, and B. Barua, Identifying Limitations of ASME Section III Division 5 for Advanced SMR Designs, Report ANL-21/27, Argonne National Laboratory, Lemont, IL (2021).