

PWHT 대체 원자로 냉각계통 예방정비를 위한 와이어 아크 적층 제조를 통한 용접부 상분율 제어

김준영¹, 김동진², 박정수^{3*}

¹조선대학교 기계공학과 대학원, ²한국생산기술연구원 접합적층연구부문, ³조선대학교 기계공학과

Phase Fraction Control of the Welded Component for PWHT Replacement Nuclear Reactor Cooling System Preventive Maintenance with Wire Arc Additive Manufacturing

Junyeong Kim¹, Dongjin Kim², Jungsoo Park^{3*}

¹Graduate school, Department of Mechanical Engineering, Chosun University

²Advanced Joining and Additive Manufacturing R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology

³Department of Mechanical Engineering, Chosun University

요약 이 연구는 원자력 발전소 냉각재 계통(Reactor Coolant System, RCS) 일차수응력부식균열(Primary Water Stress Corrosion Cracking, PWSCC)에 대응하기 위해 열처리 효과를 유도한 예방정비 와이어 아크 적층 제조(Wire-Arc Additive Manufacturing, WAAM)를 적용하여, 용접후열처리(Post Weld Heat Treatment, PWHT)를 대체하여 마르텐사이트 상분율 억제를 구현하기 위해 수행되었다. 이를 위해 총 3층 적층 용접이 수행되었으며, 반복적으로 용접 적층시 전개되는 열영향부의 미세구조가 광학현미경(Optical Microscopy, OM), 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM) 및 전자후방산란회절(Electron Back-scatter Diffraction, EBSD)을 통해 정량화되었다. 결과적으로, 1층 적층 HAZ에서 67.4 % 마르텐사이트로 구성되었던 상분율이, 3층 적층 HAZ에서는 26.8 %로 현저히 감소되는 열처리 효과가 구현되었다. 마르텐사이트 분율의 감소는 1층 적층 HAZ 경도 395.8Hv가 3층 적층 HAZ 경도 320.9Hv로 완화된데 지배적인 메커니즘으로 밝혀졌다. 이러한 결과를 바탕으로 WAAM 공정을 통해 용접부 상분율을 제어하고 경도의 변화를 발생시킬 수 있었으며, 이는 PWHT를 대체할 수 있는 기술로 간주될 수 있다.

Abstract This study was conducted to address PWSCC in the RCS of a nuclear power plant. WAAM was applied to induce a heat treatment effect and achieve suppression of martensite formation and replace PWHT. To replace the PWHT, three layers of additive welding were performed, and the HAZ that developed during each welding pass was quantified using OM, SEM, and EBSD. As a result, the heat treatment effect significantly reduced the martensite fraction from 67.4% in the first-layer HAZ to 26.8% in the third-layer HAZ. The reduction in martensite fraction was identified as the dominant mechanism for the decrease in hardness from 395.8 Hv in the first-layer HAZ to 320.9 Hv in the third-layer HAZ. Based on these results, it can be considered that controlling the martensite fraction and inducing hardness changes in the weld zone through WAAM processes can replace PWHT.

Keywords : EBSD, HAZ, Low Alloy Steel, Nuclear Power Plant, Wire Arc Additive Manufacturing

본 연구는 환경부 산하 한국환경산업기술원의 지원하에 수행된 환경기술개발사업의 연구 결과임. (과제번호 : 2020003060004)

*Corresponding Author : Jungsoo Park(Chosun Univ.)

email: j.park@chosun.ac.kr

Received July 27, 2023

Revised August 31, 2023

Accepted September 1, 2023

Published September 30, 2023

1. 서론

원자력 발전소는 경제 발전에 따른 에너지 수요를 충족 시킬 수 있는 신뢰성 높고 친환경적인 에너지 공급원 중 하나이다. 2022년 기준, 전세계적으로 440개의 원자로가 가동 중이고 56개의 원자로가 건설 중에 있다[1]. 원자력 발전소에 대한 수요-공급의 증가에 따라 원자력 발전소의 안전과 신뢰성에 대한 문제가 더욱 중요해지고 있다.

원자력 발전소의 가동연한이 증가되면서 수반되는 발전설비의 노후화로 인해 구조물 이슈가 필연적인데, 그 중 가장 대표적인 문제가 PWSCC이다. PWSCC는 저합금강 재질의 모재에 Alloy 600 계열의 용접재를 사용한 이종금속 용접부에서 발생하는 문제로, 잔류응력, 운전 응력, 환경인자 등의 이유가 복합적으로 작용할 때 일어난다[2-4]. OPR1000과 같은 가압경수로형 원자로에는 원자로의 헤드, 가압기, 냉각계통 등에 PWSCC가 발생할 수 있는 이종금속 용접부가 다수 존재한다[3]. Fig. 1에 OPR1000의 개요와 냉각계통에 존재하는 이종금속 용접부를 도식화하여 나타내었다.

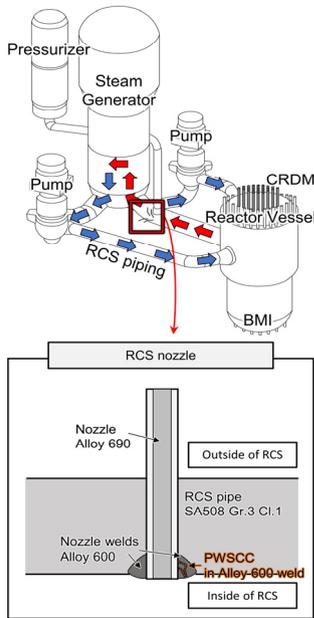


Fig. 1. Schematic design of PWR and RCS nozzle

Fig. 1에 나타난 바와 같이, Alloy 690 재질의 RCS 관통 노즐은 저합금강 SA508 Gr.3 Cl.1 재질의 메인 파이프에 Alloy 600 계열의 용접재로 이종금속 용접된다. 이 용접부에서는 경년열화로 인해 발생하는 PWSCC로

인한 RCS 냉각재의 누수가 발생할 수 있다.

이러한 PWSCC를 예방하기 위해서는 기존에 용접된 Alloy 600 계열의 용접재를, Cr 함량을 약 15 % 증가시켜 PWSCC에 대한 저항성이 높은 Alloy 690 계열의 용접재(Alloy 52M)로 교체하는 방법 등이 사용되고 있다 [2-8]. 원자로 정비에는 용접 공정이 필수적으로 사용되는데, 용접 과정에서 모재에 HAZ가 필연적으로 형성된다. 용접 공정에서 형성되는 HAZ에서는 마르텐사이트 상의 미세구조 전개로 인한 취성이 증가하여 파괴 인성이 저하되는 현상이 주요 이슈이다. 원자로를 구성하는 압력용기와 계통의 부품들에서는 안전과 신뢰를 위해 높은 강도와 인성이 동시에 요구되기 때문에, 원자로 부품에 형성된 HAZ는 마르텐사이트의 베이나이트화 미세구조 전개를 위한 ASME Sec.III NX-4620를 준용한 PWHT 공정이 필수적으로 적용되어야 한다[3,4,9,10]. 하지만, 원자력 설비 작업 환경의 물리적 간섭 및 열 손실로 인해 PWHT 수행이 어려운 구간이 있기 때문에, ASME codecase N-638에 의해 템퍼비드 용접법(즉, 와이어아크적층제조: WAAM)을 적용하면 PWHT를 대체할 수 있게 되어있다[2,3]. 템퍼비드 용접은 용접 비드를 중첩되게 반복 용접하여 CGHAZ (Coarse Grain HAZ), FGHAZ(Fine Grain HAZ)를 최소화해서 열처리 효과에 의한 HAZ의 야금학적 특성을 교정하려는 목적을 갖는 용접 기법이다[11,12].

이 연구에서는, PWSCC 예방정비에서 WAAM 공정에 템퍼비드 용접을 적용할 때 PWHT를 대체할 수 있는 열처리 효과 메커니즘을 고찰한다. 특히, 이 연구는 WAAM 공정을 통해 HAZ에서 형성되는 마르텐사이트 상변태를 억제하고 경도의 감소를 유도하는데 집중조명한다. 이를 통해 WAAM 공정을 통해 PWHT를 대체할 수 있는 원자력 발전소 유지보수와 관련된 코드 및 규격에서 요구하고 있는 사양을 충족시킬 수 있는 메커니즘을 체계적으로 규명하였다.

2. 실험방법

2.1 사용재료 및 용접공정

본 연구에는 저합금강 재질의 모재 ASME SA508 Gr.3 Cl.1과 Alloy 690 계열의 용접재인 Alloy 52M이 사용되었다. 모재와 용접재의 화학조성비는 Table 1에 나타내었으며, 기계적 특성에 대한 내용은 Table 2에 나타내었다.

Table 1. Chemical compositions of base materials

Material	SA508 Gr.3 Cl.1	Alloy 52M
C	0.18	0.04 Max
Mn	1.32	1.0 Max
Fe	Balance	7~11 Max
P	0.012	0.02 Max
S	-	0.015 Max
Si	0.19	0.50 Max
Cu	0.1	0.30 Max
Ni	-	Balance
Ti	0.002	1.0 Max
Cr	0.12	28~31.5
Mo	0.45	0.50 Max
Al	0.021	1.10 Max
Zr	-	0.02 Max
B	0.0002	0.005 Max
Nb	0.0004	0.5~1.0
Others	V 0.0001 Ca 0.0004	0.5 Max

Table 2. Mechanical properties of base materials

Material	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)
SA508 Gr.3 Cl.1	345	550 (Max.725)	18
Alloy 52M	-	552	30

Fig. 2는 시편 제작에 대한 설명으로 WAAM 적층 방법과 비드 겹침 조건에 대한 내용이다. Fig. 2 (a)와 같이 용접 비드를 이전 용접 비드 폭의 50%씩 겹치게 중첩하여 Fig. 2 (b)에 도식화한 형상으로, 시험편은 1층 5패스, 2층 3패스, 3층 2패스 용접하여 시편이 제작되었다.

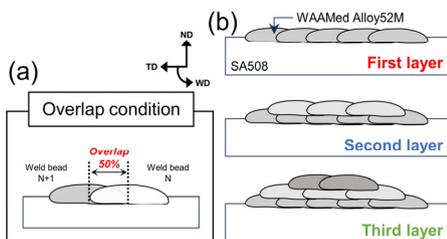


Fig. 2. Schematic description of WAAM process
(a) Overlay condition of WAAM process,
(b) Overlay design of WAAMed specimen

Table 3은 용접 변수표로 WAAM 공정은 ASME Sec.IX QW-409.29, ASME codecase N-638-4를 근거로 작성되었다. 특히 ASME codecase N-638-4에 의하면 1~3층 적층시 입열량은 각각 10% 증감 범위 내에

서 설정되어야 하며, 입열량은 1~3층은 45 kJ/inch 이하로 통제되어야 한다. 이러한 조건들을 모두 만족할 수 있게 1층 적층 용접시 입열량은 20 kJ/inch, 2층과 3층 적층 용접시 입열량은 22.4 kJ/inch, 4층~14층 적층 용접시 입열량은 20 kJ/inch로 통제되었다. 또한, 이 과정에서 ASME codecase N-648-4에 따라 1~3층의 층간 온도를 66 °C, 4층~14층의 층간 온도는 180 °C로 제한되었다.

Table 3. Welding parameters

Welding process	Gas tungsten arc welding
Welding current	180 A (layer 1, 4~14), 200 A (layer 2, 3)
Welding voltage	10.5 V
Welding speed	114.3 mm/min
Interpass temperature	66 °C (layer 1~3), 180 °C (layer 4~14)
Heat input	20.2 kJ/in. (layer 1, 4~14), 22.4 kJ/in. (layer 2, 3)

2.2 미세구조 및 기계적 특성 평가 방법

미세구조 평가를 위해 시편의 HAZ 영역이 관찰되었다. 광학 현미경(OLYMPUS, GX51)으로 시편 HAZ 단면부의 미세구조가 관찰되었으며, EBSD 분석을 통해 WAAM 공정에서 발생하는 HAZ 미세구조 변화가 관찰되었다. 시편 관찰을 위한 전처리 과정으로 SIC paper #4000까지 연마 후 diamond suspension 1μm로 표면이 연마되었다. 기계적 연마 후 10% perchloric acid와 90% acetic acid 용액으로 전해연마기(Struers, LectroPol-5)에서 15 V에서 60초 동안 전해연마가 실시되었다. 전처리가 완료된 후 EBSD 분석을 통해 얻은 Kikuchi 패턴이 OIM(Orientation Imaging Mapping) 소프트웨어를 통해 정량적으로 분석되었다.

기계적 특성을 평가하기 위해 Micro-Vickers 경도 시험이 진행되었다. Micro-Vickers 경도는 경도 시험기(Mitutoyo, HM-220D)를 통해 측정되었으며, 0.3 kgf 하중, 하중 유지 시간 10초 그리고 0.5 mm 측정 간격으로 측정되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세구조 발달 분석

Fig. 3은 SA508의 초기 상태를 OM, SEM을 사용하

관찰한 이미지이다. Fig. 3 (a)는 SA508 초기 상태 단면을 에칭하여 OM으로 관찰한 이미지로, 미세구조가 bainitic ferrite 기지상에 일부 carbide가 풍부한 영역으로 구성됨을 보여준다[13]. Fig. 3 (b)는 SEM 이미지로 OM 이미지보다 구 오스테나이트 결정립계(PAGB: prior austenite grain boundary, 이하 PAGB)가 명확히 관찰되며 이것은 모재가 AC3 온도 이상으로 가열되었다가 냉각되는 제조 과정에서 발달된 것으로 볼 수 있다.

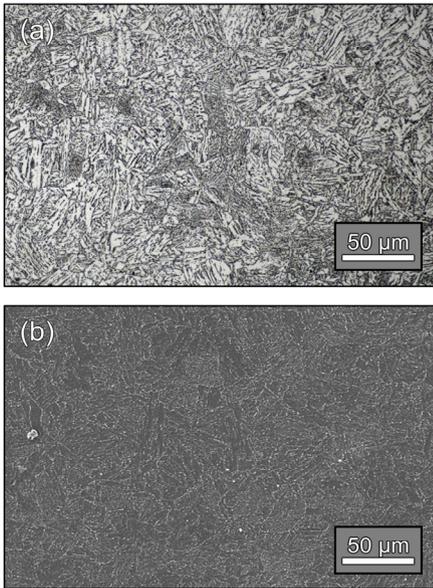


Fig. 3. Microstructure of SA508 Gr.3 Cl.1

Fig. 4는 SA508 Gr.3 Cl.1에 Alloy 52M 용접재로 3개 층을 적층 용접할 때 발생하는 HAZ의 변화를 SEM과 EBSD를 통해 분석한 결과이다. Fig. 4 (a)는 SEM 이미지로 적층 과정에 따른 HAZ의 미세구조 변화를 보여준다. 1층 WAAM 공정 후 HAZ에서는 침상형 마르텐사이트가 관찰된다. 패킷과 블록으로 구성된 PAGB가 뚜렷하게 관찰되며(빨간 점선) 결정립 크기가 모재에 비해 조대화 된 모습이 관찰된다. 평균 PAGS(prior austenite grain size)는 $46.8 \mu\text{m}$ 이며 평균 GS(grain size)는 $9.38 \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 2층 WAAM 공정 후 1층 HAZ에서 측정된 결정립보다 작은 크기의 결정립이 관찰된다. 평균 PAGS는 $18.75 \mu\text{m}$ 이며 평균 GS는 $6.09 \mu\text{m}$ 로 결정립 미세화가 진행되었다. 3층 WAAM 공정 후 HAZ에서는 SEM 이미지로 상변태 양상을 확실하게 판단하기 어려운 복합 상분율 조직이 관찰된다. 3층 WAAM 공정 후 평균 PAGS $6.25 \mu\text{m}$, 평균 GS는 3.75

μm 로 측정되었다. 결정립 크기 측정 결과는 Fig. 4 (e)에 정리되어 있으며 최초 1층 적층 용접 후 HAZ와 비교하여 3층 적층 용접 후 HAZ에서는 PAGS는 약 86.6 % 감소, GS는 약 60 % 감소로 결정립 미세화가 진행되었음을 알 수 있다.

Fig. 4 (b)는 HAZ가 EBSD를 통해 분석된 결과이다. Fig. 4 (c)는 각 층 적층 용접 후의 HAZ가 GAIQ(grain average image quality) map으로 분석된 결과로, α -ferrite와 α' -martensite의 상분율이 정량적으로 측정되었다. GAIQ는 결정립에 속하는 모든 측정 포인트의 image quality value의 평균이다. 기존 연구에 의하면 $0.5^\circ \sim 1.5^\circ$ 사이의 grain tolerance value를 사용하여 GAIQ를 계산하면 페라이트와 마르텐사이트를 구분할 수 있다[14]. 여기서 낮은 GAIQ는 마르텐사이트, 높은 GAIQ는 페라이트를 의미한다. Fig. 4 (d)는 각 적층 용접 후 HAZ에서 α -페라이트와 α' -마르텐사이트의 상분율이 정량적으로 측정된 결과에 대한 그래프로, WAAM 공정이 진행되면서 α -페라이트 분율은 증가하고 α' -마르텐사이트 분율은 감소하는 경향이 관찰되었다. WAAM 공정이 진행되며 α -페라이트 분율은 증가하고 α' -마르텐사이트 분율은 각각 약 40 %씩 증가-감소했음이 측정되었다.

SEM, EBSD 분석을 통해 1층 WAAM 공정 후 HAZ 미세구조는 마르텐사이트가 대부분인 상분율로 측정되었고, WAAM 공정 동안 페라이트 분율은 증가, 마르텐사이트 분율은 감소되는 것이 확인되었다. SA508과 같은 저합금강 일반적으로 마르텐사이트는 열처리를 통해 페라이트와 시멘타이트로 분해된다[15]. 따라서 Fig. 4의 미세구조 분석 결과는 WAAM 공정으로 상분율은 제어될 수 있고 PWHT를 대체할 수 있는 열처리 효과를 나타낼 수 있다는 것을 입증해준다. 이러한 상분율 제어를 통한 열처리 효과와 기계적 특성의 연관관계를 확인하기 위해 각 적층 시험편 HAZ의 경도가 측정되었으며, 경도 변화의 경향은 상분율 변화와 비교되었다.

3.2 미세구조 발달과 기계적 특성의 상관관계

WAAM 공정에서 발생하는 미세구조의 변화가 기계적 특성에 영향을 미치는지 확인하기 위해 시험편 HAZ의 경도가 측정되었다. Fig. 5 (a)는 각 층 적층 용접 후 HAZ 경도 측정 결과이다. 여기서 빨간 점선으로 표시된 380HV는 ISO 15614-1에 의해 P-No.3 강종(SA508)에 적용되는 최대 허용 경도 값이다. WAAM 공정이 진행되며 각 시험편 HAZ 경도 분포는 낮아지는 경향으로 측정

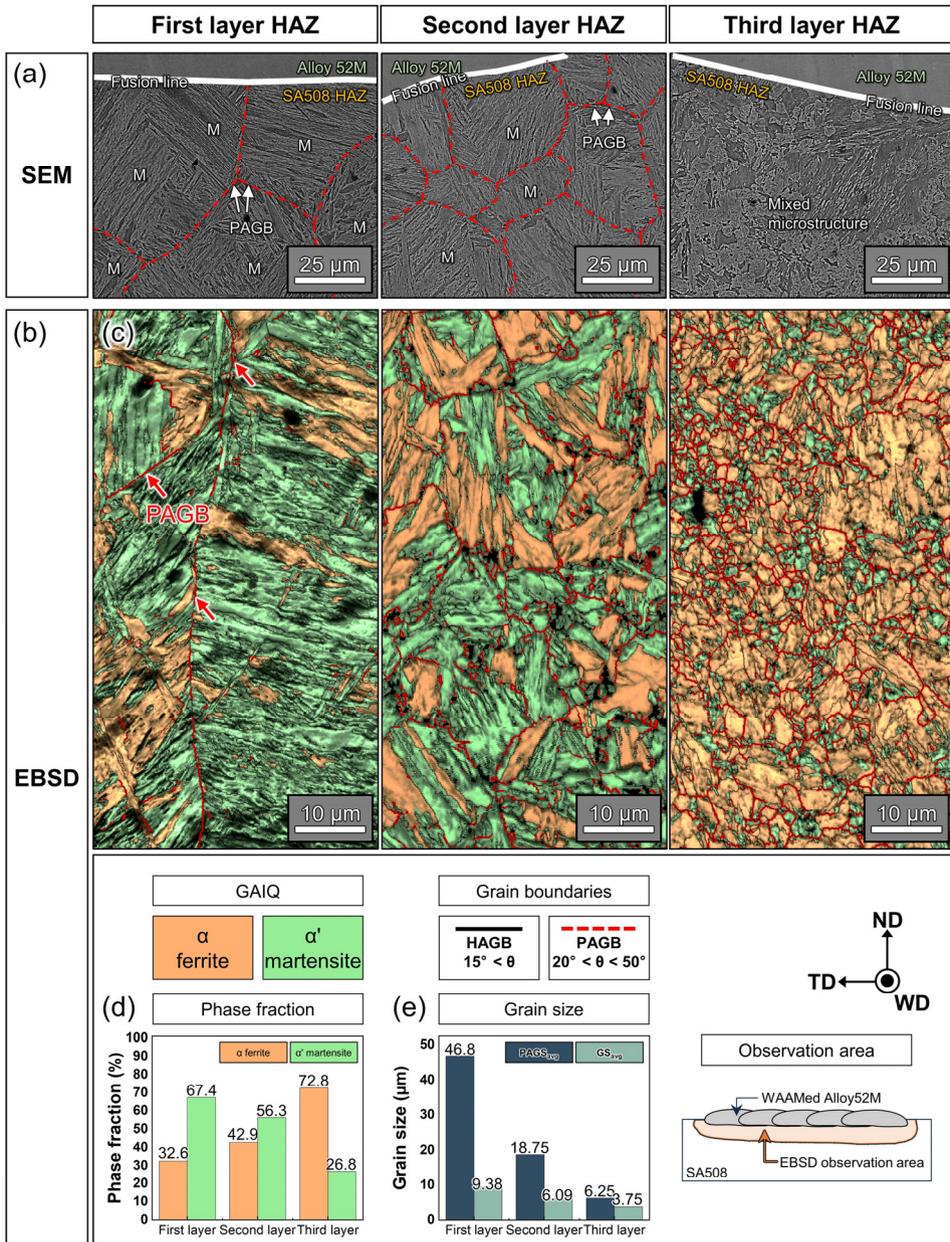


Fig. 4. Microstructure changes during WAAM process

(a) SEM image of HAZ (b) EBSD analysis (c) GAIQ map of HAZ (d) phase fraction of HAZ (e) grain size changes in HAZ

되었다. HAZ에서 평균 경도 값은 1층 HAZ 약 395.8Hv, 2층 HAZ 약 365.1Hv, 3층 HAZ 320.9Hv로 측정되었으며, 2층 HAZ 평균 경도 값부터 ISO 15614-1을 충족시킬 수 있음이 확인되었다. Fig. 5 (b)는 각 적층 시험편 HAZ에서 정량적으로 측정된 상분율과 경도 변화의 연관

관계를 설명하기 위한 그래프이다. 그래프의 주황색 영역은 페라이트, 녹색 영역은 마르텐사이트 분율로 WAAM 공정이 진행되며 마르텐사이트 분율과 경도 값이 같이 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이 그래프를 통해 마르텐사이트 분율을 제어될 수 있으며, 분율 제어를 통해 경

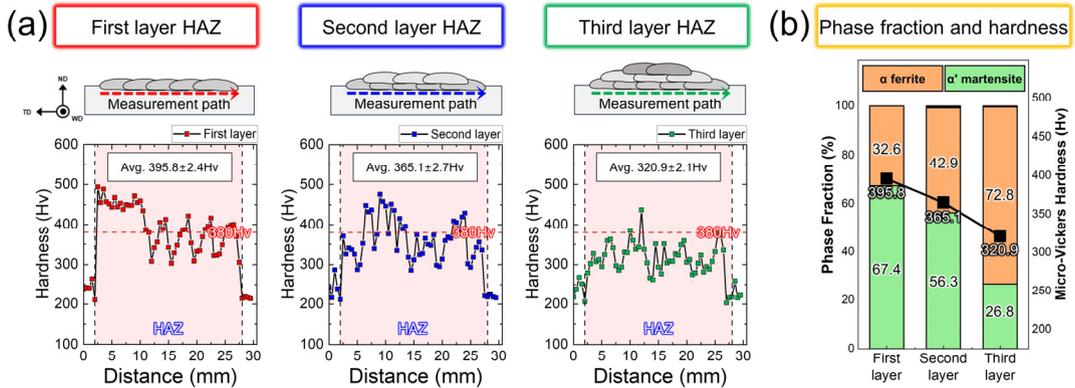


Fig. 5. Hardness distributions and phase fractions
(a) Hardness distributions of HAZ (b) Phase fraction and hardness

도 분포는 완화될 수 있음이 입증되었다. 따라서 WAAM 공정은 PWHT를 대체하여 경도를 완화하기 위한 수단이 될 수 있음이 확인되었다.

리한 공정의 단축 및 최적화를 통해 작업자의 안전과 생산성 향상, 더 나아가 원전에 대한 신뢰성 향상에도 기여할 것으로 기대된다.

4. 결론

Alloy 52M이 SA508 Gr.3 Cl.1에 적층 제조될 때, WAAM 공정에서 발생하는 용접 입열로 PWHT를 대신할 수 있는 열처리 효과가 HAZ에 부여될 수 있고 그 효과는 공정이 적용될 현장에 적용되는 국제적인 코드, 표준을 만족시킨다. 이 과정에서 발생하는 HAZ 미세구조 변화와 경도 완화 관계를 규명하기 위해 다층 적층 시험편이 사용되었고 적층 단계별로 비교 분석되었다. 이 연구를 통해 얻은 주요 결과는 다음과 같다.

1. 용접 비드, 용접 적층을 쌓을 때 HAZ에서 발생하는 마르텐사이트 상분율 변화는 기계적 성능, 특히 경도 분포 변화에 주요한 원인으로 작용했다.
2. WAAM 공정이 진행되며 적층 수가 증가할 때 HAZ 마르텐사이트 분율은 67.4%에서 26.8%로 대폭 감소했으며, 마르텐사이트 분율이 감소함에 따라 평균 경도 값은 395.8HV에서 320.9HV로 약 19% 완화되어 ISO 15614-1을 충족시키는 결과를 달성했다.
3. 이 연구를 통해 WAAM 공정의 도입이 PWHT를 대체하여 HAZ 건전성을 확보하는 효과를 보여 PWHT 공정을 대체할 수 있음이 확인되었다. 이

후기

본 연구는 환경부 산하 한국환경산업기술원의 지원하에 수행된 환경기술개발사업의 연구 결과임. (과제번호 : 2020003060004)

References

- [1] World Nuclear Association, World Nuclear Performance Report 2022, World Nuclear Association, United Kingdom, pp.58-59, 2022.
- [2] S. H. Hwang, "Review of PWSCC and mitigation management strategies of Alloy 600 materials of PWRs", *Journal of Nuclear Materials*, Vol.443, Issue 1-3, pp.321-330, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inucmat.2013.07.032>
- [3] H. S. Cho, I. K. Park, K. W. Jung, "A Study on optimization of welding process parameter for J-Groove dissimilar metal weld repair of pressurizer heater sleeve in nuclear power plants", *Journal of Welding and Joining*, Vol.33, Issue 1, pp.87-93, 2015. DOI: <https://dx.doi.org/10.5781/JWJ.2015.33.1.87>
- [4] Y. Z. Kim, K. W. Jung, K. M. Choi, D. C. Choi, S. B. Cho, H. S. Cho, "Study on Optimal Welding Processes of Half Nozzle Repair on Small Bore Piping Welds in Reactor Coolant System", *Transactions of the Korean*

Society of Pressure Vessels and Piping, Vol.14, Issue 1, pp.58-65, 2018.

DOI: <https://doi.org/10.20466/KPVP.2018.14.1.058>

- [5] Marriott G., "Conference on Vessel Penetration Inspection, Crack Growth and Repair", U. S. Nuclear Regulatory Commission, USA, p.540, 2005.
- [6] H. I. Ahn, S. H. Jeong, H. H. Cho, H. W. Lee, "Ductility-dip cracking susceptibility of Inconel 690 using Nb content", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol.783, pp.263-271, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.12.208M>
- [7] Yonezawa Toshio, Atsushi Hashimoto, "Evaluating the reliability of PWSCC resistance of TT Alloy 690 and associated welds to the end of anticipated PWR power plant life", *Journal of Nuclear Materials*, Vol.560, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2021.153461>
- [8] S. Kim, T. Ahn, D. Kim, "Analysis of dislocation density in strain-hardened alloy 690 using scanning transmission electron microscopy and its effect on the PWSCC growth behavior", *Nuclear Engineering and Technology*, Vol.53, Issue 7, pp.2304-2311, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.01.008>
- [9] S. Lee, Y. Kang, G. Kang, S. Kang, "Effect of Post-Weld Heat Treatment on the Mechanical Properties and Microstructure of P-No. 1 Carbon Steels", *Journal of Welding and Joining*, Vol.35, No.1, pp.26-33, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.5781/JWJ.2017.35.1.26>
- [10] Y. Kang, S. Park, C. Oh, S. Lee, S. Kang, "Effect of Post-Weld Heat Treatment Temperature on the Mechanical Properties and Microstructure of Weld Heat-Affected Zone of Low-Alloy Steel for Nuclear Reactor Pressure Vessel", *Journal of Welding and Joining*, Vol.38, No.1, pp.24-32, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.5781/JWJ.2020.38.1.2>
- [11] David Abson, Adrienne Barnes, Sayee Raghunathan, "Temper Bead Qualification Hardness Acceptance Criteria", ASME Standards Technology, LLC, USA, pp.108, 2013.
- [12] W. J. Sperko, "Exploring temper bead welding", *Welding Journal*, USA, 2005.
- [13] Rajwinder Singh, Amanjot Singh, Pawan K. Singh, Dhiraj K. Mahajan, "Effect of microstructural features on short fatigue crack growth behaviour in SA508 Grade 3 Class I low alloy steel", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol.185, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104136>
- [14] Ryde L., "Application of EBSD to analysis of microstructures in commercial steels", *Materials Sciences and Technology*, Vol.22, Issue 11, pp.1279-1306, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1179/174328406X130948>
- [15] K. H. Lee, M. J. Jhung, M. C. Kim, B. S. Lee, "Effects of Tempering and PWHT on Microstructures and Mechanical Properties of SA508 Gr.4N Steel", *Nuclear Engineering and Technology*, Vol.46, Issue 3, pp.413-422, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.5516/NET.07.2013.088>

김 준 영(Junyeong Kim)

[정회원]



- 2017년 2월 : 조선대학교 용접접합과공학학과 (공학석사)
- 2022년 8월 : 조선대학교 기계공학과 (박사수료)
- 2023년 4월 ~ 현재 : 오사카대학교 JWRI JIJReC 과장

<관심분야>

용접야금, 적층제조, 신뢰성평가

김 동 진(Dongjin Kim)

[정회원]



- 2020년 3월 : 일본 오사카 대학교 지능-기능창성공학 전공 (공학박사)
- 2020년 3월 ~ 2021년 9월 : LG 전자 생산기술원 선임연구원
- 2021년 9월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 접합적층연구부 선임연구원

<관심분야>

전력변환시스템, 전자후방산란회절, 유한요소해석

박 정 수(Jungsoo Park)

[정회원]



- 2014년 2월 : 연세대학교 기계공학과 (기계공학박사)
- 2014년 3월 ~ 2014년 8월 : 연세대학교 산학협력단 (박사이후과정)
- 2014년 9월 ~ 2016년 8월 : 두산중공업(현 두산 에너빌리티) 기술연구소 (선임연구원)
- 2016년 9월 ~ 2020년 8월 : 조선대학교 기계공학과 (조교수)
- 2020년 9월 ~ 2023년 8월 : 조선대학교 기계공학과 (부교수)
- 2023년 9월 ~ 현재 : 조선대학교 기계공학과 (교수)

<관심분야>

내연기관, 가스터빈, 에너지 저장장치