

직접 에너지 적층 공정을 이용한 보수 공정에서 보수 폭에 따른 기계적 특성 관찰

오욱진*, 신광용**, 손용***, 심도식*.#

*한국해양대학교 해양신소재융합공학과, **한국생산기술연구원 스마트가공공정그룹

***한국생산기술연구원 디지털제조공정그룹

Effect of Repair Width on Mechanical Properties of 630 Stainless Steel Repaired by Direct Energy Deposition Process

Wook-Jin Oh*, Gwang-Yong Shin**, Yong Son***, Do-Sik Shim*.#

*Dep. of Ocean Advanced Materials Convergence Eng., Korea Maritime and Ocean Univ.,

**Smart Manufacturing Process Group, Korea Inst. of Industrial Technology(KITECH),

***Digital Manufacturing Process Group, Korea Inst. of Industrial Technology(KITECH)

(Received 2 December 2019; received in revised form 13 December 2019; accepted 7 January 2020)

ABSTRACT

This study explores the effects of repair width on the deposition characteristics and mechanical properties of stainless steel samples repaired using direct energy deposition (DED). In the DED repair process, defects such as pores and cracks can occur at the interface between the substrate and deposited material. In this study, we changed the width of the pre-machined zone for repair in order to prevent cracks from occurring at the inclined surface. As a result of the experiment, cracks of 10–40 μm in length were formed along the inclined slope regardless of the repair width. Yield and tensile strength decreased slightly as the repair width increased, but the total and uniform elongation increased. This is due to the orientation of the crack. For specimens with a repair width of 20 mm, yield and tensile strength were 883 MPa and 1135 MPa, respectively. Total and uniform elongations were 14.3% and 8.2%, respectively. During observation of the fracture specimens, we noted that the fracture of the specimen with an 8 mm repair width occurred along the slope, whereas specimens with 14 mm and 20 mm repair depths fractured at the middle of the repaired region. In conclusion, we found that tensile properties were dependent upon the repair width and the inclination of the crack occurred at the interface.

Key Words : Direct Energy Deposition(DED), Repair(보수), Crack(균열), Tensile Properties(인장 특성), Fractured(파단)

1. 서 론

금속 재료를 이용한 적층 제조 공정(additive

manufacturing, AM) 중 직접에너지적층(direct energy deposition, DED) 공정은 부품 표면에 고경도 소재를 적층하여 기계적 특성을 강화시키는 하드페이싱(hardfacing), 부품의 일부 형상을 변경하는 리모델링(remodeling) 그리고 손상된 부품의 보수(repair)

Corresponding Author : think@kmou.ac.kr

Tel: +82-51-410-4354, Fax: +82-51-410-4350

등을 위한 용도로 활용되고 있다.

한편, 금형이나 기계 부품이 사용 중에 과도한 하중, 마모, 피로 등에 의해 손상이 발생하는데, 이러한 경우 새로운 부품으로 교체되기도 하지만, 비용 및 제작 시간을 고려하여 일부 현장에서는 보수를 통해 재사용되기도 한다. 부품 보수를 위해 기존에는 용접(welding)이나 경납땜(brazing)과 같은 공정들이 적용되어 왔으며, 이외에도 다양한 공정을 이용한 보수 연구들이 진행되어 왔다^[1-3]. 특히, 용접은 숙련된 작업자가 필요하며, 용접된 소재는 열영향부가 두껍게 형성되어 기계적 성질의 저하가 불가피하다^[4].

반면에 레이저를 열원으로 하는 DED 기술은 에너지 밀도가 높은 레이저를 사용하기 때문에, 기존의 육성용접을 통한 보수 후 모재와 용접 부위 간에 경도 편차와 얼룩무늬의 발생, 그리고 기계적 성능 저하와 같은 문제점들을 수반하지 않는다. 따라서 최근에는 DED 공정을 이용한 보수 연구가 활발히 진행되고 있다. Graf 등^[5]은 보수를 위해 가공되는 그루브 형상이 보수 전처리 공정에서 고려되어야 할 중요한 요인임을 밝혔다. Sun 등^[6]은 적층 트랙 사이의 유휴 시간(idle time)을 주어 공정 중 열처리를 수행하여, 원소재의 기계적 특성 대부분을 복구할 수 있었으며 열처리를 추가로 수행하지 않기 때문에 시간적, 비용적 측면에서 효율적일 것으로 분석하였다.

또한, 기존 전통적인 공법(주조, 단조 등)으로 제조된 부품 외에도 적층 제조 공정으로 제조된 부품에 대한 보수/재생에 관한 관심도 높아지고 있다. 이와 관련하여, Shim 등^[7]은 또 다른 금속 적층제조 기술 중의 하나인 PBF(powder bed fusion) 공정으로 제조된 소재를 그루브 깊이에 따라 보수를 진행하였으며, 적층 특성과 미세조직학적 분석 그리고 기계적 특성에 대해 관찰하였다. 이를 통해, 원소재 뿐만 아니라 PBF로 제조된 소재에 대해서도 DED를 응용한 보수 가능성을 검증하였다.

이러한 다양한 연구에도 불구하고, DED 공정을 이용하여 제조된 부품이나 이를 이용해 보수된 부품에는 균열(crack)과 같은 결함이 발생하기도 한다. 이러한 결함은 적층이 종료된 후 냉각되는 과

정에서 발생하는 것이 보편적이며, 그 원인은 용융된 재료가 급속 응고되는 과정에서 발생하는 열응력(thermal stress) 때문이다^[8-10]. 균열을 제거하기 위해 공정조건 최적화, 모재 예열 등 연구가 활발히 진행되고 있다^[11,12]. Shim 등^[13]은 PBF로 제작된 모재에 DED 공정을 이용한 보수 과정에서 균열을 억제하기 위해 공정 중 후열처리(보수 영역 상면에 추가 레이어를 적층)를 적용하였고, 후열처리를 적용한 시편의 인장강도와 연신율이 적용하지 않은 시편보다 각각 8%, 13% 가량 향상된다고 보고하였다.

본 연구의 저자들은 DED를 이용한 스테인리스강의 보수 깊이에 관한 선행 연구를 진행하였고, 그 결과 보수부와 모재부 계면에서 발생한 균열에 의해 기계적 특성이 크게 저하됨을 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 보수 폭에 따른 보수 특성을 관찰하고, 보수 경계면에서 발생하는 결함을 분석하여 이들이 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 재료

본 연구의 실험에서는, 모재와 금속분말로 석출경화형 스테인리스강(stainless steel) 630을 사용하였으며, 이는 한 번의 석출 경화 열처리를 통해 재료 특성이 충분히 향상되므로 단일 열처리 마르텐사이트강으로도 불린다. 모재는 고용화 열처리와 석출경화 열처리된 소재를 사용하였으며, 분말은 가스 분무법으로 제조된 45~150 μ m의 구형 분말을 사용하였다(Fig. 1). 실험에 사용된 금속 분말과 모재에 대한 화학적 조성비는 Table 1에 나타난 바와 같다.

2.2 직접 에너지 적층(Direct energy deposition)

본 연구에 사용된 레이저 용융 적층 장비인 DMT(Direct Metal Tooling) MX3 장비는 Instek社(Daejeon, South Korea)에서 개발되었으며, 공정 개

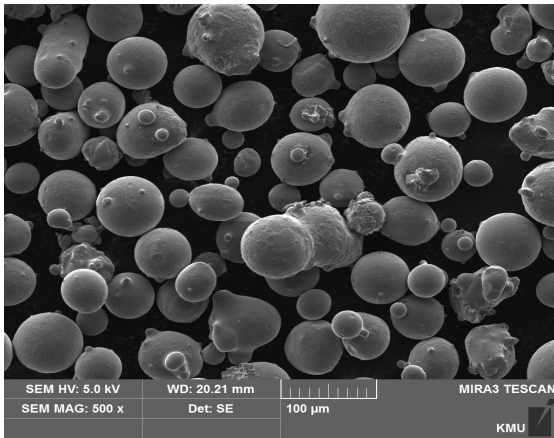


Fig. 1 SEM image of 630 stainless steel powder

Table 1 Chemical composition of materials [wt%]

Element	Substrate	Powder
Fe	Bal.	Bal.
C	0.017	0.019
Si	0.67	0.68
Mn	0.61	1.23
P	0.037	0.013
S	0.001	0.004
Cr	16.44	17.8
Ni	10.01	12.8
Mo	2.05	2.36
Cu	0.33	0.05
N	0.011	0.1

념도(Fig. 2)와 함께 실제 장비 사진을 Fig. 3에 나타내었다. 모재 표면에 고출력 레이저 빔이 조사되어 용융풀(melt pool)을 형성하고, 실시간으로 공급된 분말은 빠르게 응고되어 적층 비드를 형성하고, 이를 특정 경로를 따라서 하나의 적층 면(deposited layer)을 만들고, 이러한 과정을 반복하여 각 레이어를 높이 방향으로 교차하여 적층시키게 된다.

실험에 사용된 장치는 4kW의 CO₂ 레이저 시스템이 포함되어 있으며, MX-CAM 소프트웨어에 의해서 운영되는 5축 NC(numerical control) 장비이다. 3개의

분말 호퍼(hopper)와 함께, 분말 공급을 위한 파우더 노즐과 공정 가스로 구성된 파우더 공급 시스템으로 이루어져 있다. 또한, 형성되는 용융풀의 형상을 관찰할 수 있는 CCD 카메라가 헤드에 장착되어 있다. 공정 중 산화를 방지하기 위한 코액셀(coaxial) 가스와, 주입된 분말의 운반 가스로 아르곤(Argon)을 사용한다. 모재 표면으로부터 9mm 떨어진 노즐에서 직경 1.0mm의 레이저 빔과 함께 분말이 공급된다.

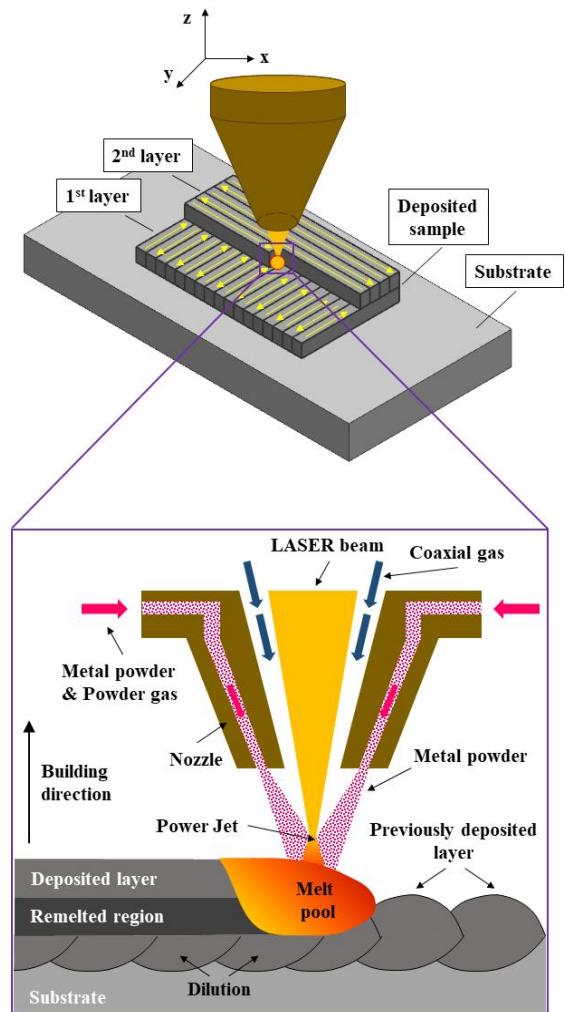


Fig. 2 Schematic diagram of laser metal deposition with the coaxial powder feeder

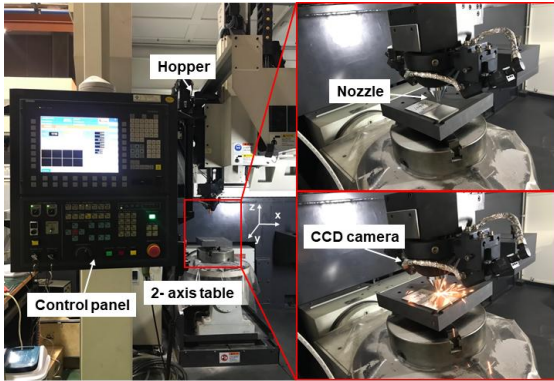


Fig. 3 DMT MX3 machine used for experiments

Table 2 Parameters for DED processing

Process parameter	Value
Lase power (W)	1000
Powder flow rate (g/min)	3.5
Laser traverse speed(mm/min)	850
Powder gas (ℓ/min)	2.5
Coaxial gas (ℓ/min)	7

2.3 보수 방법

Fig. 4는 파손된 부품의 보수 과정과 보수 폭에 따른 그루브(groove) 형상을 보여주고 있다. 부품이 과도한 하중, 마모, 피로 등에 의해 손상(damage)이 발생할 경우(I), 손상된 영역을 원형 그루브를 갖도록 기계가공한 후(II), DED를 이용하여 보수 적층을 실시하고(III), 연삭 공정으로 표면 후가공을 실시한다(IV). 본 연구에서는 그루브의 높이는 2mm로 고정하고, 폭을 8mm, 14mm, 그리고 20mm로 변화시켜(Fig. 4(b)) 보수 실험을 수행하였다.

2.4 시편 전처리 및 시험 방법

Fig. 5는 보수된 샘플의 인장시편 제작 과정을 나타내고 있다. 인장 시험에는 단축 인장시험기(Instron 4469)를 사용하였고, Crosshead의 속도는 1mm/min이고 항복 강도는 변형률 0.2% 오프셋법에 의하여 결정하였다. 인장강도는 최대 하중점을 이

용하여 구하였으며 연신율은 변위를 백분율로 나타내었다. 또한 인장실험은 각 조건 당 3회의 반복 실험을 하였으며, 평균값을 가지는 시험편 결과를 선택하였다. 또한, 주사전자현미경(SEM, TESCAN, MIRA3)을 이용하여 인장시험편의 파단면을 관찰하였다. 경도시험은 마이크로 비커스 경도기(HM-122)를 이용하였으며, 깊이별로 3개의 위치에서 측정하여 중간값을 선택하였다. 하중은 0.1kgf, 하중시간은 15초로 설정하였다.

적층된 시편의 표면 균열 확인을 위해, 침투탐상 시험(penetrating test, PT)을 실시하였다. #220~#2000의 SiC 연마지와 3, 1μm 연마천을 사용하여 시편의 표면을 연마하였으며, CuCl2 50g, HCl 50ml, Ethanol 100ml의 혼합액을 이용하여 에칭하였다. 에칭된 단면의 미세조직과 균열은 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 정밀 관찰하였다.

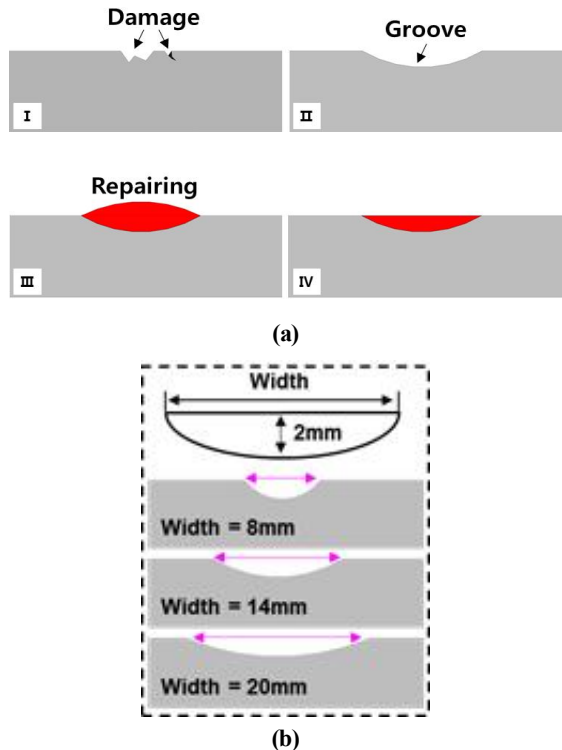


Fig. 4 (a) Repairing procedures for damaged parts and (b) different groove widths

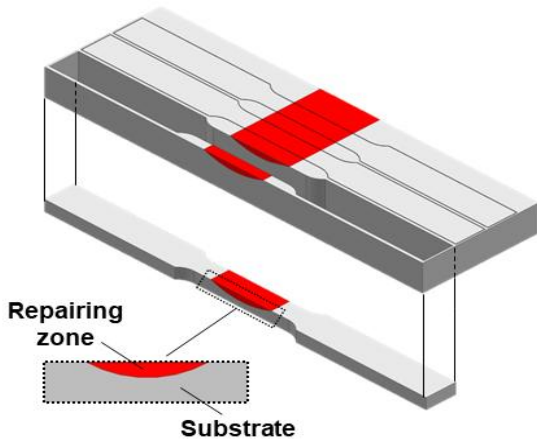


Fig. 5 Preparation of tensile specimens

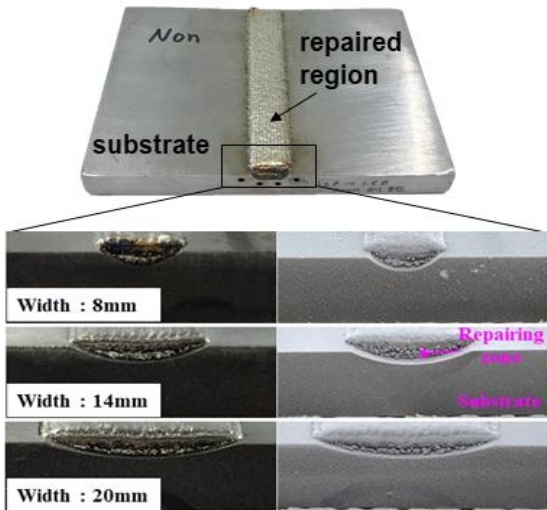


Fig. 6 Repaired substrates and PT results

3. 실험결과 및 고찰

3.1 균열 관찰

보수 후 표면에 발생한 결함을 관찰하기 위해 침투탐상을 실시하였으며, 그 결과 육안으로 관찰되는 표면 결함은 발생하지 않았다(Fig. 6). Fig. 7은 보수 폭에 따라 제작된 샘플 단면의 전자현미경사

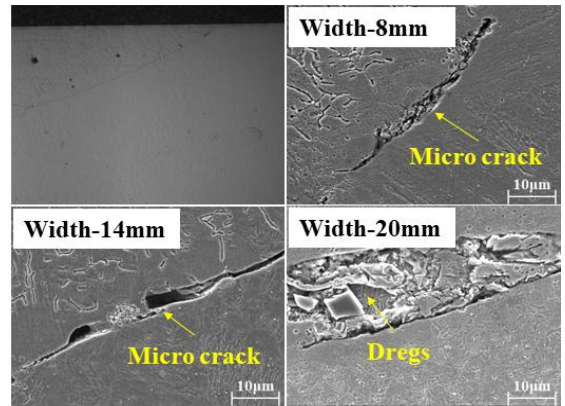


Fig. 7 Cross-section images of samples with different repair widths

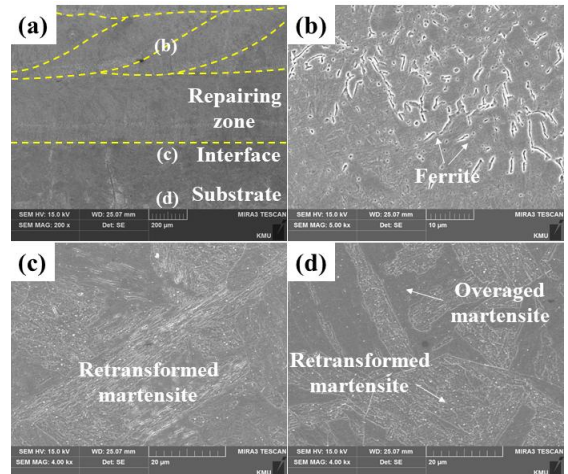


Fig. 8 Microstructures of repaired 630stainless steel samples: (a) low magnified image, (b) perimeter of deposited bead, (c) top region of the substrate, and (d) bottom region of the substrate

진을 보여주고 있다. 보수 폭과 관계없이, 모든 시편에는 10~40µm 크기의 미세 균열이 존재하였다. 앞서 Fig. 4에 나타낸 바와 같이, 보수 폭에 따라 경사면의 기울기는 달라지게 되며, 이로 인해 보수 부와 모재부 경계면에 발생하는 균열 또한 방향이 달라짐을 확인 할 수 있다. 한편, 균열 주위에 분쇄

된 형태의 잔재(dregs)가 존재하는 것으로 보아, 급속 냉각되는 과정에서 발생한 응력에 의해 생긴 균열임을 알 수 있다. 이러한 미세 균열은 인장 특성에 영향을 미칠 것이며, 보수 폭에 따른 경사면의 기울기에 의해서도 영향을 받을 것으로 예상된다.

3.2 미세조직

Fig. 8은 보수 폭이 20mm인 샘플의 미세조직을 보여주고 있다. Fig. 8(a)에서와 같이 보수된 샘플의 단면은 보수부(repairing zone), 경계부(interface) 그리고 모재부(substrate)로 구분된다. 비드의 외곽에서는 페라이트(ferrite)가 형성된 것을 알 수 있으며(Fig. 8(b)), Fig. 8(c)와 (d)에 나타난 바와 같이 모재부 상단과 모재부 하단의 미세조직이 다른 것을 알 수 있다. 상단에서는 역변태 마르텐사이트(retransformed martensite)가 존재하였으나, 하단에서는 역변태 마르텐사이트와 과시효된 마르텐사이트(overaged martensite)가 존재하고 있다. 이는 모재부 상단과 하단의 냉각속도가 다르기 때문인 것으로 판단된다^[14].

3.3 경도

Fig. 9는 보수 폭에 따른 깊이별 경도 분포를 보여주고 있다. 경도 측정 결과, 보수 폭에 관계없이 경도는 유사한 것으로 나타났다.

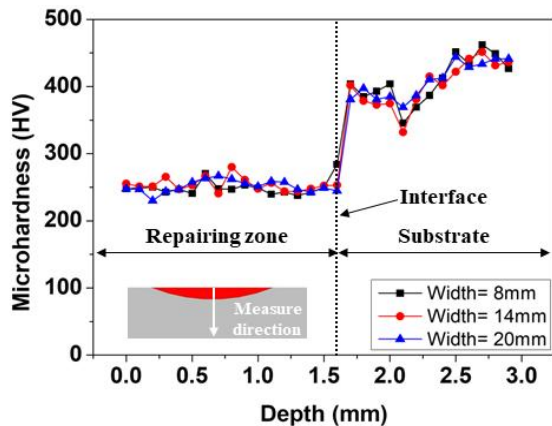


Fig. 9 Microhardness distribution in cross section along vertical direction

보수부의 경도는 250HV으로, 모재부의 평균 경도인 400HV보다 낮게 나타났다. 모재의 경우, 고용화 열처리와 석출경화 열처리를 통해 마르텐사이트 상분율이 높아지고 Cu상이 석출되었기 때문에 높은 경도를 가지는 것으로 고찰된다^[15].

또한, 모재 상단부의 경도는 360HV이고 하단부의 경도는 435HV로 75HV 차이가 나타났는데, 이는 보수 전 과시효와 석출경화된 모재의 상부에서는 레이저 적층 시 흡수된 에너지에 의해 열처리가 되어 경도가 감소된 반면, 하단부에서는 상대적으로 낮은 온도가 유지되어 열처리 효과가 나타나지 않았기 때문인 것으로 판단된다^[13].

3.4 인장 특성

Fig. 10은 보수 폭이 다른 시편의 응력-변형을 곡선과 시편에 작용하는 예상 응력 분포도를 보여주고 있다.

Fig. 10 (a)와 Table 3에서 보여주듯이, 보수 폭이 커질수록 인장강도와 항복강도는 소폭 감소한 반면, 균일 연신율(uniform elongation)과 총 연신율(total elongation)은 크게 증가한 것을 알 수 있다. 이는 보수된 영역의 부피와 균열의 기울어진 각도에 따른 차이로 판단된다. 파단된 시편에서도 알 수 있듯이, 보수 폭이 8mm인 시편은 경사면에 파단면이 위치하고 있는 반면에 보수 폭이 14mm, 20mm인 시편에서는 상대적으로 경도가 낮은 보수부 중앙에서 파단이 일어난 것을 알 수 있다. 보수 폭이 20mm인 시편의 인장강도와 항복강도는 각각 1169MPa와 883MPa이고, 균일 연신율과 총 연신율은 각각 8.16%와 14.1%로 인장특성이 가장 우수한 것을 알 수 있다. 위 결과는 예상 응력 분포도에서 나타내었듯이(Fig. 10 (b)), 보수 폭이 넓은 경우 균열의 기울기가 완만해지며 이로 인해 인장시험 시 균열 양단에서 걸리는 응력집중(stress concentration) 효과가 적게 나타나기 때문이다. 반면에, 보수 폭이 좁은(경사면 기울기가 가장 급한) 시편에서 가장 높은 응력집중이 발생하며, 이로 인해 낮은 연신율이 나타나는 것으로 판단된다.

한편, Fig. 11은 보수 전후 시편의 응력-변형률 곡선을 나타내고 있다. 보수 전 소재(wrought)와 비교하였을 때 보수된 시편(repaired specimen)의 인장강도와 항복강도는 각각 290MPa, 402MPa로 크게 감소하였다. 하지만, 보수된 시편의 균일 연신율은 4.41% 증가한 것을 알 수 있다. 이는 보수부와 모재부의 미세조직 차이에 의한 것으로 볼 수 있다. 모재의 미세조직은 열처리에 의해 Cu, Nb 등이 석출되어 전위(dislocation)의 움직임을 방해하기 때문에 경화된 반면, 보수부의 미세조직은 후열처리(post heat treatment)를 수행하지 않았기 때문에 페라이트상으로 대부분 구성되어 있다. 이와 같이, DED 공정에 따른 열처리 효과에 의한 미세조직 차이로 보수 전과 후의 기계적 특성 차이가 발생하게 된다.

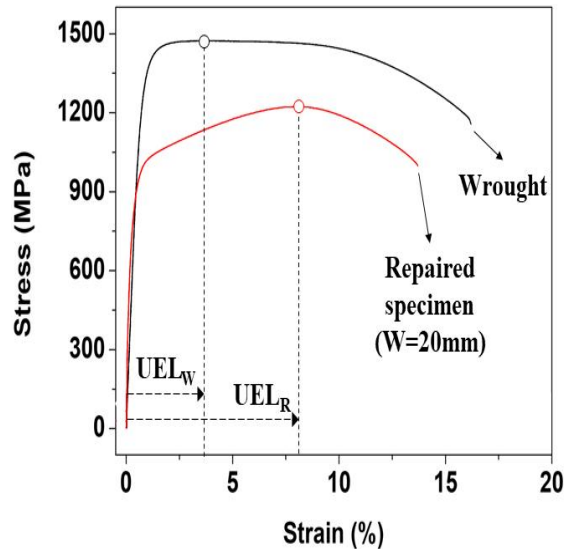
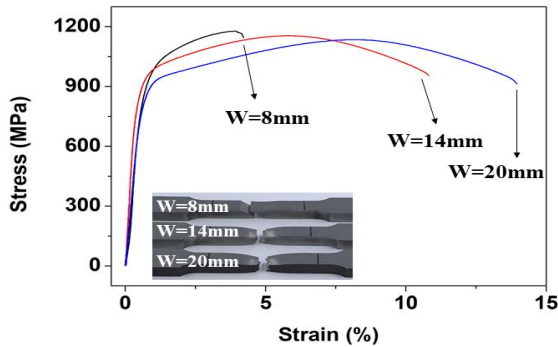
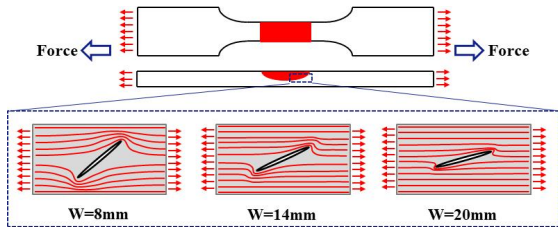


Fig. 11 Comparison of wrought and repaired specimen



(a)



(b)

Fig. 10 (a) Stress-strain curves at different repair widths and (b) schematic of expected stress profile near the crack at different widths

Table 3 Tensile properties of specimens at different groove widths

Groove width	TS (MPa)	YS (MPa)	UEL (%)	EL (%)
W=8mm	1178	830	3.85	4.3
W=14mm	1154	893	5.83	10.5
W=20mm	1169	898	8.16	14.1
Wrought	1459	1300	3.75	16.1

Fig. 12는 보수 폭에 따른 파단 시험편의 파단면 분석 결과이다. 보수 폭과 관계없이, 모재부에서는 물결 형상(river pattern)과 일부 딴플(dimple)과 같은 취성파괴(brittle fracture)와 연성파괴(ductile fracture)가 관찰되었다. 반면에, 보수 폭이 8mm인 시편의 파단면에서는 균열에 의해 형성된 잔재와 취성파괴가 관찰되었다. 보수 폭 14mm, 20mm의 시편은 모두 연성파괴가 관찰되었고, 보수 폭이 20mm인 시편에 형성된 딴플이 깊은 것으로 보아 연신율이 향상된 것을 알 수 있다.

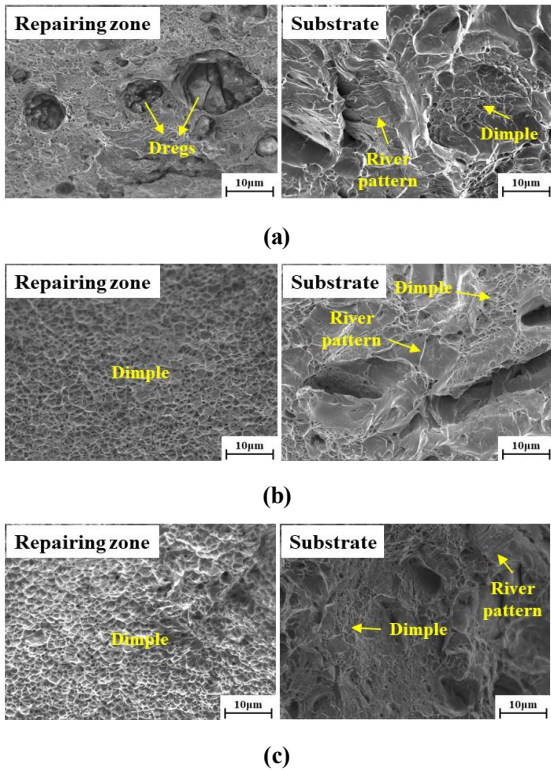


Fig. 12 Fractured surfaces of tensile specimens at different repair widths: (a) width 8mm, (b) width 14mm, and (c) width 20mm

4. 결론

본 연구에서는 손상된 부품을 모사하여 모재를 원형 그루브 형상으로 기계 가공한 후 DED로 보수 적층하였다. 보수 폭이 기계적 특성에 미치는 효과를 알아보기 위해, 그루브 폭 크기를 달리하여 시편을 제작하여 적층 특성을 관찰하였으며, 경도와 인장시험을 수행한 후 파단면 분석을 진행하였다. 이에 따른 연구 결과는 다음과 같다.

1. 보수 폭 크기에 따른 적층 특성을 비교하기 위해, 8mm, 14mm, 20mm의 크기를 가지는 모재에 DED 공정을 이용하여 보수 적층을 진행하였다. 그 결과 표면 균열은 관찰되지 않았으나, 미세 균열이 경사진 경계면을 따라 존재하는 것을 확인하였다.

- 보수된 샘플은 보수부, 경계부 그리고 모재부로 구분될 수 있으며, 적층된 비드 외곽에서는 페라이트 조직이 관찰되었다. 또한, 모재부의 상단과 하단에서는 상이한 열이력에 의해 다른 형태의 마르텐사이트 조직이 형성되었다.
- 보수부와 모재부에 대한 경도 측정 결과, 보수 폭에 따른 경도 차이는 발생하지 않았다. 하지만, 보수부는 열처리 효과에 의해 모재부 보다 낮은 경도를 나타내었으며, 모재부의 상단과 하단에도 경도차이가 있음을 확인하였다.
- 인장시험 결과, 보수 폭이 커질수록 강도는 다소 감소하였지만, 연신율은 크게 증가함을 알 수 있었다. 이는 균열의 기울어진 정도에 기인한 것으로 판단된다. 하지만, 보수 전 소재에 비해 인장 특성이 많이 감소하는 경향을 보였는데, 이는 내부에 존재하는 균열과 미세조직의 차이인 것으로 판단된다. 파단면 관찰 결과 보수 폭이 8mm 인장 시편은 경사면을 따라 파단 되었으며, 보수 부에서 취성과파괴가 관찰되었다. 반면에 보수 폭이 14mm, 20mm인 인장시편은 중앙에서 파단되었으며, 보수부에서는 연성파괴가 관찰되었다.

위와 같은 연구결과를 통해, 보수 폭이 커짐에 따라 균일 연신율이 증가하였으므로 실제 보수 공정을 위한 그루브 가공 시에 보수 폭을 가급적 크게 설계하는 것이 효과적일 것으로 판단된다. 향후에는 보수부와 모재부 경사면에 발생하는 미세 균열을 완전히 제거하기 위한 추가 연구를 진행할 계획이다.

후 기

본 연구는 한국생산기술연구원 기술용역과 부산 산학융합지구조성사업단 산학협력 R&D과제의 지원을 통해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Reimann, M., Goebel, J., dos Santos, J. F., "Microstructure and mechanical properties of

- keyhole repair welds in AA 7075-T651 using refill friction stir spot welding,” *Materials & Design*, Vol. 132, pp. 283-294, 2017.
2. RAHNI, M. M., Beidokhti, B., HADDAD-SABZEVAR, M., “Effect of filler metal on microstructure and mechanical properties of manganese–aluminum bronze repair welds,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 27, No. 3, pp. 507-513, 2017.
 3. Kadoi, K., Murakami, A., Shinozaki, K., Yamamoto, M., Matsumura, H., “Crack repair welding by CMT brazing using low melting point filler wire for long-term used steam turbine cases of Cr-Mo-V cast steels,” *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 666, pp. 11-18, 2016.
 4. Yu, J. H., Choi, Y. S., Shim, D. S., Park, S. H., “Repairing casting part using laser assisted additive metal-layer deposition and its mechanical properties,” *Optics & Laser Technology*, Vol. 106, pp. 87-93, 2018.
 5. Graf, B., Gumenyuk, A., Rethmeier, M., “Laser metal deposition as repair technology for stainless steel and titanium alloys,” *Physics Procedia*, Vol. 39, pp. 376-381, 2012.
 6. Da Sun, S., Fabijanic, D., Barr, C., Liu, Q., Walker, K., Matthews, N., Brandt, M., “In-situ quench and tempering for microstructure control and enhanced mechanical properties of laser clad AISI 420 stainless steel powder on 300M steel substrates,” *Surface and Coatings Technology*, Vol. 333, pp. 210-219, 2018.
 7. Oh, W. J., Lee, W. J., Kim, M. S., Jeon, J. B., Shim, D. S., “Repairing additive-manufactured 316L stainless steel using direct energy deposition,” *Optics & Laser Technology*, Vol. 117, pp. 6-17, 2019.
 8. Chew, Y., Pang, J. H. L., Bi, G., Song, B., “Thermo-mechanical model for simulating laser cladding induced residual stresses with single and multiple clad beads,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 224, pp. 89-101, 2015.
 9. Krzyzanowski, M., Bajda, S., Liu, Y., Triantaphyllou, A., Rainforth, W. M., Glendenning, M., “3D analysis of thermal and stress evolution during laser cladding of bioactive glass coatings,” *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, Vol. 59, pp. 404-417, 2016.
 10. Wang, D., Hu, Q., Zeng, X., “Residual stress and cracking behaviors of Cr13Ni5Si2 based composite coatings prepared by laser-induction hybrid cladding,” *Surface and Coatings Technology*, Vol. 274, pp. 51-59, 2015.
 11. Liu, Q., Wang, Y., Zheng, H., Tang, K., Li, H., Gong, S., “TC17 titanium alloy laser melting deposition repair process and properties,” *Optics & Laser Technology*, Vol. 82, pp. 1-9, 2016.
 12. Zhang, K., Wang, S., Liu, W., & Long, R., “Effects of substrate preheating on the thin-wall part built by laser metal deposition shaping,” *Applied Surface Science*, Vol. 317, pp. 839-855, 2014.
 13. Oh, W. J., Son, Y., Shim, D. S., “Effect of In-Situ Post Heating on Repairing STS316L Built by Laser Powder Bed Fusion Using Direct Energy Deposition,” *Korean Journal of Metals and Materials*, Vol. 57, No. 8, pp. 543-553, 2019.
 14. Balajaddeh, M. B., Naffakh-Moosavy, H., “Pulsed Nd: YAG laser welding of 17-4 PH stainless steel: Microstructure, mechanical properties, and weldability investigation,” *Optics & Laser Technology*, Vol. 119, pp. 105651, 2019.
 15. Rack, H. J., Kalish, D., “The strength, fracture toughness, and low cycle fatigue behavior of 17-4 PH stainless steel,” *Metallurgical Transactions*, Vol. 5, No. 7, pp. 1595-1605, 1974.