레이저로 적층 제조된 STS316L에 대한 직접에너지적층 응용 보수 시 공정 중 후열처리 (In-Situ Post Heating) 효과

오욱진¹ · 손용² · 심도식^{1,*}

¹한국해양대학교 해양신소재융합공학과
²한국생산기술연구원 디지털제조공정그룹

Effect of In-Situ Post Heating on Repairing STS316L Built by Laser Powder Bed Fusion Using Direct Energy Deposition

Wook Jin Oh¹, Yong Son², and Do Sik Shim^{1,*}

¹Department of Ocean Advanced Materials Convergence Engineering, Korea Maritime and Ocean University,
Busan 49112, Republic of Korea

²Digital Manufacturing Process Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Siheung 15014, Republic of Korea

Abstract: The repairing parts were fabricated by PBF (powder bed fusion) using direct energy deposition (DED), interfacial cracks can occur at the interface between the substrate and the area to be repaired. Such interfacial defects are due to the thermal stress induced by the temperature gradient which results from repeated melting and solidification during the powder deposition by laser. These cracks degrade the mechanical properties of the repaired parts. Therefore, in this study, in-situ post heating is proposed to lower the cooling rate of deposited layers directly after repairing, in which several layers are additionally deposited onto the repair zone. To investigate the effect of the in-situ post heating, we have studied the microhardness, microstructure, and tensile properties according to the post heating, as well as the occurrence of cracks. The experimental results showed the formation of macro-scale cracks in the absence of post heating, whereas only micro-scale cracks (10 μm or less) were observed in the repaired sample with a low repair depth in the presence of post heating. Meanwhile, regardless of the use of in-situ post heating, complex dendritic structures (columnar and cellular shapes) were found on the deposited layer, which also appeared in the substrate built by PBF. Similar to the microstructure, no hardness changes were observed in the deposited layer; however, the hardness of the DED repaired zone tended to be slightly lower compared to that of the PBF substrate. For a specimen with a repair depth 1 mm, the tensile strength and elongation of the specimen repaired with the in-situ post heating increased by 8 and 13%, respectively, compared to the specimen repaired without the in-situ post heating. However, in the specimen with a large repair depth (2mm), macro-scale cracks occurred, which led to degradation of tensile properties.

(Received March 28, 2019; Accepted June 11, 2019)

Keywords: direct energy deposition (DED), crack, post heating, microhardness, tensile test

1. 서 론

적층 제조 공정(additive manufacturing, AM)은 폴리머, 금속, 세라믹 등 다양한 소재를 이용하여 3차원 형상

에 대한 단면 형상을 높이 방향으로 적층하여 제작하는 공정이다. 이러한 적층 제조 공정은 항공, 의료, 자동차 등 다양한 산업 분야에 적용되는 부품을 제조하는데 사용되고 있다. 금속을 재료로 하는 적층 제조 공정은 대표적으로 직접에너지적층(direct energy deposition, DED)과 분말베드융합(powder bed fusion, PBF) 공정으로 분류가 된다. 이 중 DED 공정은 모재 또는 적층 대상 부품 표면이나 국부 영역에 금속 와이어나 분말을 공급하

- 오욱진: 석사과정, 손용: 연구원, 심도식: 교수

*Corresponding Author: Do Sik Shim

[Tel: +82-51-410-4354, E-mail: think@kmou.ac.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

고, 여기에 레이저(laser) 또는 전자빔(electron beam)을 이용하여 용융 및 급속 응고를 거쳐 적층하는 공정을 말한다. 특히, 최근에는 부품 표면에 이중 소재를 적층하여 기계적 특성을 강화시키거나, 손상된 부품의 보수를 위해 사용되고 있다.

금형이나 기계 부품이 사용 중에 국부적으로 마모되거나 파손될 경우에 이를 교체해서 사용하기도 하지만, 일반적으로 비용 및 제작 시간을 고려하여 현장에서 바로 보수되어 재사용하기도 한다. 부품 보수를 위해 용접(welding)이나 용사(thermal spray)와 같은 공정들이 적용되어 왔으며, 이외에도 다양한 공정을 이용한 보수에 관한 연구들이 진행되어왔다 [1-4]. 용접, 용사 그리고 전기스파크 적층(electrospark deposition)과 같은 기존 공정을 이용하여 보수된 부품의 경우, 큰 열영향부(heat affected zone, HAZ)로 인해 기존 부품보다 취약한 기계적 성질을 갖게 되는 한계가 있다. 이러한 점을 보완하기 위해, 최근에는 DED 공정을 이용한 부품 보수에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. Lin 등은 레이저 적층 공정을 이용하여 모재 부피 대비 보수 부피의 비율에 따라 보수 연구를 진행하였다 [5]. 그 결과, 60% 보수 비율을 가진 시편이 보수 전 소재와 유사한 기계적 강도를 가진다는 것을 밝혔다. Zhuang 등은 티타늄 합금(TC4)을 소재로 하여 동종 소재의 분말을 이용하여 레이저 적층 공정을 이용해 보수를 진행하였다 [6]. 그 결과 보수 비율이 50%인 시편의 인장강도와 항복강도가 40%인 시편 보다 높은 것으로 보고하였다. 또한 열영향부의 경도가 모재부와 보수부보다 높게 나타났다는데, 이는 2차상(secondary phase)의 존재에 의한 것임을 밝혀냈다. Liu 등은 반응표면분석(surface response method)을 통해 공정 변수에 따른 기공, 밀도 그리고 경도에 대해 분석하였고, 최적화된 공정조건을 얻었다 [7]. 최적화된 공정조건으로 보수된 TC17 소재의 인장특성은 보수 전과 비교하여 10% 이내로 감소됨을 밝혔다.

이러한 다양한 연구에도 불구하고, 특정 재료에 있어서 DED 공정을 이용하여 제조된 부품과 보수된 부품에는 균열(crack)과 같은 결함이 존재하기도 한다. 균열이 발생하는 이유는 용융된 재료가 급속 응고되어 적층 되는 과정에서 발생하는 열응력(thermal stress) 때문이며 [8-12], 이러한 균열을 제거하기 위해 다양한 방법들이 적용되고 있다. Hidouci 등은 레이저 클래딩 시 예열(preheating)을 적용하여 발생될 수 있는 균열을 줄였고, Ni+WC 클래딩부의 미세조직과 기계적 특성을 연구하였다 [13]. Shim 등은 DED 공정을 이용한 고속도 공구강 M4 분말 적층 시 예열 온도에 따른 미세조직 관찰과 기계적 특성을 연구하였

고, 적층 품질과 기계적 특성을 동시에 만족할 수 있는 최적의 예열 조건을 제시하였다 [14]. Wang 등은 모재부와 적층부 사이에 낮은 항복강도와 높은 연성(ductility)을 갖는 316L 스테인리스 망(net) 구조물을 적층하여, 균열이 억제되는 효과를 확인하였다 [15]. Fuxing 등은 레이저 클래딩 시 균열 발생의 물리적 메커니즘을 이론적으로 분석하였고, 레이저 출력이 커질수록 균열이 적어지고, 레이저 구경이 커질수록 균열 발생이 많아짐을 확인하였다[16]. Yoo 등은 Al 모재 위에 Fe계 합금 분말의 적층 가능성을 보였으며, 균열을 억제하기 위해서는 분말 공급량이 적어야 함을 밝혔다 [17]. 이와 같이, 균열 발생을 억제하기 위해 모재 예열, 중간체 삽입, 공정조건 최적화와 같은 방식이 시도되어 왔다.

하지만, 최근까지 레이저 용융 적층 공정을 이용한 보수 관련 연구는 기존의 전통적인 방식으로 제조된 부품이나 소재들에 대한 것들이며, 아직까지 AM기술로 제조된 부품에 대한 DED공정 적용 보수에 관한 연구는 없다. 본 연구의 저자들은 PBF공정으로 스테인리스 부품 제작 시 발생될 수 있는 국부 영역에서의 결함(치수/형상 불량, 표면 기공, 국부 파손 등) 그리고 PBF 부품 사용 중 국부 파손 등을 가정하여, PBF 부품에 대한 DED 공정 적용 보수에 대한 사전 연구를 수행하였다. 이 과정에서 보수부와 모재부의 경계면에서 균열이 발생하였으며, 이에 따라 기계적 특성이 보수 전 소재에 비해서 크게 저하됨을 확인하였다. 이중 또는 동종 소재의 적층 과정에서 발생하는 균열이나 박리(delamination) 등의 결함들은 적층이 종료된 후 냉각되는 과정에서 발생하는 것이 보편적이다. 따라서 본 연구에서는, 적층이 종료된 직후에도 적층부의 냉각속도를 늦추기 위해 공정 중 후열처리(in-situ post heating) 방법을 적용하였다. 공정 중 후열처리는 보수에 필요한 영역에 대한 적층이 완료된 후에, 보수부의 상부에 다수의 레이어를 추가 적층하여 보수부의 냉각속도를 늦추는 방법이다. 따라서, 본 연구를 통해 공정 중 후열처리를 통해 보수된 시편의 균열 발생을 관찰하였으며, 후열처리에 따른 시험편의 경도 및 인장특성을 비교 분석하였다. 이외에도, 적층부 주변에 형성된 미세조직(microstructure)과 인장 시험편의 파단면을 관찰하였다.

2. 실험 방법

2.1 재료

본 연구에서는 모재와 금속 분말 소재로써 오스테나이트계 스테인리스강인 316 L을 사용하였으며, 모재는 PBF 공정으

Table 1. Chemical composition of powder materials [wt%]

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N
316 L stainless-steel	0.019	0.68	1.23	0.013	0.004	17.8	12.8	2.36	0.05	0.1

Table 2. Parameters for DED Processing

Laser beam power (W)	Slicing layer height (mm)	Overlap width (mm)	Powder flow rate (g/min)	Laser traverse speed (mm/min)	Powder gas (ℓ /min)	Coaxial gas (ℓ /min)
900	0.25	0.5	4.5	850	2.5	6.0

로 제작되었다. PBF 공정에서는 상용 장비인 OPM250L (Sodic 社)을 사용하였으며, 적층 시에는 레이저 출력 370 W, 이송속도 800 mm/min 그리고 레이저 직경 0.2 mm의 조건을 이용하였다. 또한, 공정 중 발생한 내부 응력을 제거하기 위해, 적층 완료 후에는 열처리 후에 적층 베이스 (build plate)로부터 모재를 제거하였다. 모재는 가로, 세로, 그리고 높이가 각각 100 mm, 80 mm, 그리고 10 mm 인 직육면체이고, 파손을 가정하여 보수를 위한 전처리 가공 (premachine)으로 사다리꼴 그루브(groove)를 와이어 가공 (wire cutting)하였다. DED공정에 사용된 분말은 45~150 μ m 크기의 구형 분말을, 그리고 PBF 공정에는 22~53 μ m 크기의 구형 분말을 사용하였다. 실험에 사용된 금속 분말에 대한 화학적 조성비는 표 1에 나타난 바와 같다.

2.2 직접에너지적층 (direct energy deposition)

본 연구에 사용된 레이저 용융 적층 장비인 DMT(direct metal tooling) MX3 장비는 Insstek社(대한민국)에서 개발되었으며, 공정 개념도(그림 1)와 함께 실제 장비 사진을 그림 2에 나타내었다. 장치는 4 kW의 CO₂ 레이저 시스템

을 포함하며, 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. 공정 중 산화를 방지하기 위한 보호가스 및 주입된 분말의 운반 가스로 아르곤(Argon)을 사용한다. 분말 공급 장치가 장착된 헤드에는 광학비전(optical vision) 시스템과 통합되어 있으며, 모재 표면으로부터 9 mm 떨어진 노즐에서 직경 1.0 mm의 레이저 빔과 함께 분말을 공급한다. 모재 표면으로 공급된 분말에 고출력 레이저 빔이 조사되어 모재와 분말을 함께 용융시켜 용융 풀(melting pool)을 형성한다. 빔이 조사되고 난 뒤 용융된 소재는 빠르게 응고되어 적층 비드를 형성하고, 이를 특정 경로를 따라서 하나의 적층면을 만들고, 이러한 과정을 반복하여 각 레이어를 높이 방향으로 적층시키게 된다. DED 공정의 주요 공정 매개 변수로는 레이저 출력, 레이저 빔의 크기, 파우더 공급 속도, 레이저 이송 속도가 있다. 이러한 매개 변수들의 조합은 적층된 소재의 기하학적 및 기계적/야금학적 특성, 즉 적층 레이어의 폭, 높이, 적층 표면 거칠기, 경도 및 미세 구조에 대해 상이한 영향을 줄 수 있다.

Fig. 1. Schematic diagram of the laser metal deposition with the coaxial powder feeder **Fig. 2.** DMT MX3 machine used for experiments

Fig. 3. In-situ post heating through excess deposition of dummy volume

2.3 공정 중 후열처리(In-situ post heating)

본 연구에서는 계면에서 발생하는 균열을 억제하기 위한 방법으로 공정 중 후열처리(in-situ post heating)를 적용하였다. 보수 공정뿐만 아니라 일반적인 금속 적층 후에 레이저로 용융된 금속은 급속한 냉각 과정을 거치게 되며, 이 과정에서 소재 내부에 다양한 형태의 열응력(thermal stress)을 야기시킨다. 따라서, 본 연구에서 적용되는 공정 중의 후열처리는 보수부에 대한 적층이 끝난 후에도 임의의 체적을 가지는 더미(dummy)를 추가적으로 적층함으로써, 보수부의 냉각속도를 낮추는 방법이다. 이는, 적층 공정 후 별도의 열처리로서 수행되는 후열처리와는 달리, 적층 공정 직후에 동일 장비와 환경에서 공정 중에 수행하는 후열처리 기법이라고 할 수 있다. 그림 3에 나타난 바와 같이, 후열처리를 위한 추가 적층 형상은 보수부 바로 윗면에 직육면체 형태로 적층된다. 한편, 선행 연구를 바탕으로 적층 및 냉각시간을 고려하여 추가 적층되는 형상의 부피는 3375 mm^3 이다.

2.4 시험편 전처리 및 시험 방법

보수 깊이에 따른 적층 및 인장 특성 분석을 위해, 그림 4(a)와 같이 모재의 상부에 각각 깊이 1.0 mm와 2.0 mm로 사다리꼴 모양의 그루브를 와이어 가공하였다. 이는 부품에 마모나 칩핑(chipping)과 같은 손상이 발생하였을 경우, 손상 영역에 대한 보수를 위해 전처리 가공(pre-machining)이 선행되어야 하므로, PBF로 적층된 모재에 이러한 과정을 모사하였다. 전처리 가공된 영역에는 DED 공정을 이용하여 STS316L 분말이 용융되어 채워진다.

보수영역에 대한 적층에 이어 더미 파트에 대한 추가 적층까지 완료가 되면, 그림 4(b)와 같이 모재의 상부 표면을 기준으로 과적층된 부분을 연삭 가공으로 제거한 후, 와이어 가공을 통해 인장 시험편을 제작하게 된다. 인장시험은 단축인장시험기(SHIMADZ, AG-IS)를 사용하였으며, 인장 속도는

Fig. 4. (a) Premachined substrate for repairing and (b) repair and fabrication of tensile specimens

2 mm/min으로 설정하였다. 인장 시험 후에는 주사전자현미경(scanning electron microscope(SEM), TESCAN, MIRA 3)을 이용하여 시험편의 파단면을 관찰하였다.

경도 관찰을 위해 시험편의 단면을 절단하여 경면 연마 후에 ASTM 시험 규격 E384에 준하여 마이크로 비커스 경도계(Mitutoyo, HM-122)를 사용하여 미세 경도를 측정하였다. 하중 0.3 kgf으로 10초간 압입하여 생긴 압흔의 면적을 측정하였으며, 보수부 표면에서 0.1 mm 떨어진 지점부터 일정한 간격으로 수직 아래 방향으로의 경도 변화를 관찰하였다.

적층 후에는 액상침투시험(liquid penetrant dye test)을 통해 보수부 표면에 생길 수 있는 균열을 확인하였다. 미

세조직 관찰을 위해서는 #200~#2400의 SiC 연마지와 3, 1 μm 연마천을 사용하여 시편의 표면을 연마하였으며, 에칭액($\text{HNO}_3:6, \text{HCl}:1, \text{H}_2\text{O}:3$)을 이용하여, 전압 3 V, 전류 2 A의 조건에서 전해에칭하였다. 에칭된 단면에서의 미세한 균열과 금속 조직을 광학현미경(Nikon, ECLIPSE LV150) 그리고 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였으며, EBSD(electron back scatter diffraction)를 이용하여 결정립 크기와 집합조직을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 균열 및 적층 특성

그림 5(a)에 PBF로 제작된 모재의 보수 영역에 DED 공정으로 분말 용융 적층된 시편의 사진을 나타내었다. 그림에서와 같이 공정 중 후열처리를 적용하여 설계된 보수 영역의 상부에 보수부의 부피보다 큰 더미 파트 적층이 추가되었다. 모재와 적층부의 계면, 그리고 적층부 표면에 대한 균열 발생을 확인하기 위해 침투탐상을 실시하였으며, 그 결과를 그림 5(b)에 나타내었다. 적층부 표면에서는 보수 깊이와 관계없이 균열 뿐만 아니라 다른 어떠한 결함도 관찰되지 않았다. 한편, 보수부와 모재의 경계면에서는 보수 깊이 1 mm 시편에 대해서 균열이 발생하지 않으나, 2 mm 보수 시편의 경우에는 경사진 경계면에서 균열로 의심되는 결함이 나타남을 확인하였다. DED 보수에 따른 그림 5(b) 그리고 보수 조건에 따른 적층 특성을 관찰하기 위해 시편들에 대한 단면을 관찰하였으며, 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 공정 중 후열처리를 적용하지 않았을 경우에는 보수 깊이와 상관없이 경사진 계면에서 균열이 관찰되고 있으며, 2 mm 보수 깊이 시편의 경우에는 그 크기가 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 이에 반해, 공정 중 후열처리를 적용하였을 경우에는 큰 균열($200 \mu\text{m}$ 이상)은 관찰되고 있지 않으나, 미세 크랙(microcrack)이 관찰되고 있다. 이러한 결과는, 공정 중 후열처리가 보수부 적층 후에도 추가 적층을 통해 보수부 주변의 온도를 일정 시간 동안 높은 온도를 유지하게 함으로써, 보수부와 모재부 간의 온도구배(temperature gradient)와 냉각속도를 낮추는데 효과가 있음을 보여주는 결과라고 할 수 있다.

하지만, 공정 중 후열처리를 통해 보수부 주변의 온도구배를 낮추었음에도 불구하고, 균열이 완전히 제거되지 않음을 알 수 있다. 이에 대한 자세한 원인 분석을 위해 단면에 대한 전자현미경 사진을 그림 7에 나타내었으며, 이는 미세한 균열이 관찰된 공정 중 후열처리를 적용한 시편에 대한 결과이다. 보수 깊이 2 mm 시편에서의 경계면에

나타난 바와 같이, 경사면 주변으로 미세 크랙과 함께 용융되지 않은 분말이 관찰되었다. 이러한 결과로부터 경사진 경계면에서 발생하는 균열의 원인은 융합 부족(lack of fusion)이라는 것을 알 수 있다. 융합 부족은 적층비드(bead) 또는 적층 레이어(layer)가 용융되더라도 인접한 비드 또는 이전 레이어(혹은 기판)와 완전히 융합되지 않아서 발생하는 결함이다. 이는 용융풀이 만들어지더라도 충분한 에너지가 공급되지 못할 경우에 나타나는 현상으로, 에너지가 더욱 작아질 경우에는 용융풀 또는 적층 비드가 인접 비드 그리고 레이어(혹은 기판) 안으로 깊이 융합되지 못해서 발생하는 침투 부족(lack of penetration)으로 이어지게 된다. 이로 인해 적층부가 적층 중 혹은 후에 기판에서 분리되거나 또는 적층된 소재 내의 레이어 사이에서 분리가 일어날 수 있다 [18]. 이러한 결과로부터, 경사진 경계면에서 발생하는 균열의 원인은 1차적으로 보수부

Fig. 5. (a) Repaired specimens and (b) results of liquid dye penetrant tests

Fig. 6. Images of cross-sections of specimens repaired at different conditions

Fig. 7. SEM micrographs of cross-sections of specimen employed in-situ post heating during repairing

주변의 냉각속도에 의한 열응력 때문이며, 경사면에서의 에너지 공급 부족으로 인한 용합 부족을 2차 원인으로 볼 수 있다.

용합부족을 2차 원인으로 추측하는 또 다른 이유는 다음과 같다. 보수 깊이와 상관없이 후열처리를 적용할 경우, 보수부의 평행부(바닥면)에서는 관찰되지 않은 균열이 경사부에서 나타나는 이유는 평행부와 경사부의 용융풀 주변의 온도 분포가 다르기 때문이다. 평행부의 경우, 이전에 적층된 레이어들로 인해 용융풀 주변은 어느 정도 높은 온도를 유지하고 있음에 반해, 경사면에서는 이전 레이어 보다는 경사진 모재의 영향을 더욱 많이 받아 용융풀 주변의 온도가 상대적으로 낮은 수준일 것이다. 따라서, 경사면의 모재와 이전 적층 레이어, 그리고 분말을 용융시키기 위해서는 평행부보다는 더욱 높은 에너지가 필요하게 된다. 따라서 동일한 에너지를 평행부와 경사부에 적용할 경우, 경사부에서는 상대적으로 낮은 에너지가 용융풀에 공급됨으

로써 용합부족 혹은 침투부족이 발생하게 되는 것이다. 한편, Eltawahni 등은 레이저가 조사되는 기관의 기울기에 따라 기관에 투입되는 에너지가 달라짐을 보고하였다 [19]. 이는 경사부에서는 레이저의 반사율이 높아져 용융풀에 공급되는 에너지가 감소하게 된다는 것이다. 따라서, 경사면 용융풀 주변의 낮은 온도와 경사면에서의 높은 반사율에 의해 용합 부족이 발생하게 된다. 또한, 보수 깊이 1 mm에서는 상대적으로 낮은 열응력에 의해 균열이 관찰되지 않았지만, 2 mm에서는 보수 깊이가 깊어져 작용하는 열응력이 커지기 때문에 균열이 발생하였다. 결과적으로, 크랙의 원인은 에너지 공급 부족으로 인한 용합 부족과 높은 열응력에 의한 것으로 판단된다.

3.2 미세조직(Microstructures)

공정 중 후열처리를 적용하여 보수된 시편의 미세조직 특성을 관찰하기 위해, 모재와 적층부의 미세조직 사진을 그림 8에 나타내었다. 미세조직은 적층부(excess deposition, repair zone), 모재부(substrate) 그리고 희석부(dilution)로 구분된다. 희석부는 DED 공정으로 첫번째 레이어 적층 시 모재와 적층 분말이 함께 용융되는 부분이다. 그림 9(a)는 적층부의 미세조직을 보여주고 있으며, 비드 중앙((b) 부분)과 하단((c) 부분)의 확대 사진을 각각 그림 9(b)와 그림 9(c)에 나타내었다. 적층 비드의 중앙에서는 세포상(cellular)의 덴드라이트가 형성되어 있음을 알 수 있다. 하지만, 비드 하단은 수지상정(columnar)의 덴드라이트가 형성되어 있다. 적층 비드 혹은 레이어의 중앙과 상부는 다음 레이어

Fig. 8. SEM images of microstructures of deposited 316 L stainless steel: (a) low-magnification image of deposited zone, (b) low-magnification images of dilution and (d) low-magnification image of substrate

Fig. 9. SEM images of microstructures of deposited 316 L stainless steel: (a) low-magnification image of deposited zone, (b) and (c) high-magnification images of deposited zone and (d) low-magnification image of dilution, (e) and (f) high-magnification images of dilution

Fig. 10. SEM images of cellular dendrite of deposited 316 L stainless steel at different locations: (a) excess deposition, (b) repair zone and (c) dilution, and (d) substrate

적층 과정에서 재용융(remelting)되어 다시 냉각되는 과정을 거치기 때문에 비드의 하단과는 다른 형태의 미세조직이 형성된다. 그림 9(d)-(f)는 희석부 주변의 미세조직을 보여주고 있다. 희석부 하단에는 DED 공정 시 빠르게 가열되었다가 냉각되는 열영향부(heat affected zone, HAZ)가 약 30 μm 이하로 두께로 형성되어 있다. 모재의 경우 PBF 공정으로 제작이 되었으나, DED로 적층된 보수부의 미세조직과 뚜렷한 차이점은 관찰되지 않는다. 모재부 역시 세포상과 수지상정의 덴드라이트가 형성되어 있으며, PBF 공정 시 레이저 입열 또는 냉각 방향에 따라 덴드라이트들은

제각기 다양한 방향을 가지면서 성장이 되었다. 한편, 그림 10에 위치별(과적층 최상부, 적층부 중앙, 희석부, 모재부)로 세포상 덴드라이트를 나타내었고, 관찰된 덴드라이트 크기는 서로 유사한 것을 알 수 있다. 하지만, 보수부에 형성된 세포상 덴드라이트에 비하여, PBF로 제조된 모재부에서의 미세조직의 크기가 작은 것을 알 수 있다.

적층부와 모재에 대한 EBSD 분석을 수행하였고, 그 결과를 그림 11에 나타내었다. 그림 11(a)는 적층부의 CI+IPF map과 결정립 크기를 보여주고 있다. 분석 결과, building direction (BD) 방향으로 미세조직이 성장한 것으로 나타났다. 또한, 특정 방위를 갖는 집합 조직이 나타나지 않고 무작위한 방향으로 이뤄진 것을 알 수 있다. 이러한 특성은 DED 공정 동안 높은 온도구배에 의해 발생하며, 이는 IPF의 최대 세기(intensity)가 1.61로 작게 나타난 것을 통해 알 수 있다. 또한, 평균 입자 크기가 67 μm 로 이뤄진 것을 알 수 있었다. 기존 압연 공정으로 제조된 STS316L 소재의 평균 입자 크기가 83 μm 인 것과 비교해 볼 때 [20,21], 적층부는 조금 더 미세한 조직으로 이뤄져 있음을 알 수 있다. PBF 공정으로 제조된 모재의 CI+IPF map과 결정립 크기를 그림 11(b)에 나타내었다. 그 결과, DED 공정과 마찬가지로 BD 방향으로 미세조직이 성장한 것을 알 수 있었다. DED 공정과 달리, PBF 공정으로 제조된 모재의 미세 조직은 오스테나이트 상이 지배적으로 나타났고, [101] 방향의 집합 조직이 나타났다. 또한, 평균 입자 크기가 35 μm 인 것으로 보아, DED 적층부 미세조직

Fig. 11. EBSD analysis results of (a) repair zone (TD) and (b) PBF-fabricated substrate (BD)

보다 PBF 모재가 더 미세한 조직으로 구성되어 있었다. 이러한 결과로부터, 모재부가 적층부보다 높은 기계적 특성을 가질 것이라고 추측할 수 있다.

3.3 마이크로 경도 (Microhardness)

그림 12는 공정 중 후열처리 적용에 따른 보수부와 모재부의 경도 변화를 나타내고 있으며, 보수부 상부 표면에서부터 아랫방향으로 일정 간격으로 측정한 값이다. 보수

부 상단을 후열처리를 통해 일정 시간 동안 높은 온도를 유지함으로써 경도에 변화가 있을 것으로 예상하였으나, 후열처리 적용 전후의 경도에는 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 보수부 최상부의 경도값은 후열처리를 적용할 경우 소폭 상승하였는데, 이는 측정 위치에서의 재용융(remelting) 여부에 의한 것으로 판단된다. 후열처리를 적용하지 않은 시편의 경우, 경도를 측정한 최상층은 적층이 끝난 직후 공기 중에서 빠르게 냉각이 된다. 하지만 후열처리를 적용

Fig. 12. Vickers hardness distribution along vertical direction

한 시편의 경우, 경도가 측정된 레이어는 그 다음 레이어 적층 과정에서 재용융되기 때문에 결정립의 성장 방향과 결정립 크기에 변화가 있었기 때문에, 경도 차이가 나는 것으로 분석된다. 또한 적층부에서 멀어질수록 감소하는 경향을 보이고 있는데, 이는 후열처리가 적용될 경우 모재로 전달되는 열량이 많아지고 비교적 낮은 온도에 지속적으로 노출되어 나타난 어닐링(annealing)의 효과로 보여진다.

한편, 모재의 경도값은 보수부에 비해 높게 나타나고 있다. 이는 그림 11에서 알 수 있듯이, PBF로 제조된 모재부의 결정립 크기가 DED로 적층된 보수부보다 작기 때문이다. 뿐만 아니라, PBF로 제조된 모재는 적층이 끝난 후 빌드 플레이트(build plate)로부터 제거하기 전에 열처리(annealing)를 통해 잔류응력(residual stress)을 제거하게 된다. 일반적으로 금속 적층으로 제조된 소재 내부에는 인장(tensile)의 잔류응력이 생기게 되는데 [22,23], PBF 모재에서는 이러한 잔류응력이 열처리를 통해 제거가 되지만, 본 연구에서 DED로 적층된 보수부는 특별한 열처리를 거치지 않았다. 따라서 결정립의 크기와 인장 잔류응력의 영향으로 DED로 보수된 적층부에서는 PBF로 적층된 모재보다 낮은 경도를 가지는 것으로 분석된다.

3.4 인장 특성

그림 13은 보수 깊이와 후열처리 적용에 따른 인장시험 결과로 나온 응력-변형률 곡선을 나타내고 있다. 보수 적층이 없는 PBF로 제조된 소재에 대한 인장강도(tensile strength)는 약 709 MPa 그리고 연신율(elongation)은 약 44%이다. 이에 반해, 후열처리를 적용하지 않은 보수 깊이가 1.0 mm인 시편에서는 300 μ m 이상의 큰 균열이 발

Fig. 13. Engineering stress-strain curves of without post heating and with post heating according to repair depth

생하였기 때문에 인장강도는 18% 그리고 연신율은 64% 감소하였다. 후열처리를 적용하지 않은 보수 깊이가 2.0 mm인 시편에서도 경사진 보수부 경계면에서 심각한 크랙이 발생하였기 때문에, 1.0 mm 보수 시편에 비해 인장강도와 연신율이 더 크게 하락하였다. 후열처리를 적용할 경우에는 적용하지 않은 시편에 비해, 1.0 mm 보수시편의 경우 인장강도는 8% 그리고 연신율은 13% 상승하였음을 알 수 있다. 2.0 mm 보수 시편의 경우에는 인장강도와 연신율이 각각 16% 그리고 64% 정도 상승하였다. 하지만, 후열처리를 적용하더라도 여전히 보수 전 소재에 비해 인장강도와 연신율은 감소하였다. 이는 경계면에 존재하는 미세균열 때문으로 볼 수 있다. 특히, 보수 깊이가 2 mm인 경우에는 PBF 제조된 소재에 비해 인장 특성이 현저히 저하되었는데, 이는 보수 깊이가 깊어질 경우에는 후열처리 적용과는 상관없이 보수 경계면에서 나타나는 균열의 크기가 커지기 때문에 인장 특성의 저하는 불가피한 것으로 판단된다.

그림 14에서는 인장 시편의 파단면을 나타내고 있다. 후열처리를 적용하지 않은 시편의 파단면은 그림 14(a)에서 알 수 있듯이 짧은 연신 과정을 거쳐 보수부의 경사 경계면에 존재하는 균열에 의해 파단되었음을 알 수 있다.

Fig. 14. Fractured surfaces of tensile specimen: (a) without in-situ post heating and (b) with in-situ post heating

PBF로 제조된 모재의 파단면에서는 연성파괴 흔적이 관찰되고 있으며, 보수부 경계면에서 시작된 균열이 모재부를 통과하여 급격히 파단 되었음을 알 수 있다. 후열처리를 적용한 시편의 경우에는, 보수부 경계면에서 발생한 미세 균열과, 연신이 되는 과정에서 생성되는 공극(void)이 성장하면서 최종 파단에 이르는 연성파괴로 분석될 수 있다. 특히, 모재부에서 전단 덩굴(shear dimple)이 나타난 것으로 보아 모재부에서도 일부 균열이 성장한 것으로 판단되며, 따라서 보수부 경계면에서 성장된 균열과 모재부에서 성장된 균열이 열영향부 부근에서 만나 최종 파단된 것으

로 보여진다. 특히, 그림 13에 보여진 후열처리가 적용된 보수 깊이 2 mm 시편의 인장 곡선에서도 이러한 후열처리된 시편의 파단 특성을 추측할 수 있다. 즉, 인장 하중이 증가하면서 보수 경사 경계면에 존재하는 균열들이 성장하여 보수부 경계면에서 1차적으로 큰 균열이 생성되는 순간 응력은 급격히 떨어지게 된다. 이후 다시 응력이 증가하면서 모재부에서 생성된 균열이 성장하게 되고, 이것이 보수부 경계면에서 성장된 균열과 만나는 순간 파단에 이르게 된다. 위와 같이, 후열처리 적용에 따라 시편의 파단면에 나타나는 차이는 결국 경계면에 존재하는 균열의 크기 때문이다.

한편, 레이저로 인한 용융풀의 생성과 냉각이 반복되는 횟수가 증가함에 따라 보수부 주변에서 나타나는 열응력은 높아지게 되는데, 이는 보수의 깊이가 증가할수록 더욱 크게 나타난다. 결국, 보수의 깊이가 깊어질수록 보수에 필요한 적층 레이어 수가 증가하게 되어 균열 발생의 가능성이 높아지며, 이로써 보수 시편의 기계적 특성 저하는 더욱 두드러지게 된다. 하지만 본 연구로부터, 보수 깊이가 낮은 경우에는 공정 중 후열처리의 효과가 있음을 확인하였고, 실제 부품 보수 시에 이러한 사실에 근거하여 보수 전처리(premachining)에 대한 계획을 세워야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 PBF로 제작된 모재에 DED 공정을 이용한 보수 과정에서 균열을 억제하기 위해 공정 중 후열처리를 적용하였다. 후열처리 적용과 보수 깊이에 따른 보수 시편을 제작하여 미세조직 분석, 경도와 인장시험을 수행하였으며, 파단 과정을 분석하였다. 이에 따른 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 보수 공정 후 냉각과정에서 발생하는 응력을 최소화하기 위해 보수 영역에서의 적층을 완료한 후에도 보수부 상면에 추가 레이어 적층을 통해 냉각시간을 증가시켰으며, 이러한 결과로 보수부 경계면에서 큰 균열은 나타나지 않았고, 30 μm 이내의 미세균열만이 관찰되었다.

(2) 미세조직 관찰 결과, 적층부에서는 복잡한 모양과 방향의 덴드라이트 조직이 관찰되었다. 또한 적층 비드 외곽에서는 수지상정이, 중앙에서는 세포상의 결정립이 관찰되었으며, 이러한 특징은 후열처리 적용과는 관계없이 동일하게 나타났다. 이외에도, PBF로 제조된 모재의 결정립 크기는 보수부보다 작은 것을 알 수 있었다. 경도 또한 후열처리 적용에 따라 큰 차이점을 보이지는 않았으며, 보수부 최상면과 모재부 하단에서 미소한 차이를 보였다.

(3) 후열처리를 적용한 1 mm 보수된 시편의 경우, 인장 강도와 연신율이 각각 적용하지 않은 시편 보다 8%, 13% 높게 나타났다. 보수 깊이가 깊은 경우에도 인장강도와 연신율이 후열처리에 의해 상승하였으나, 경계면에서 생성된 균열에 의해 보수되지 않은 시편에 비해서 인장 특성이 저하되었다.

(4) 후열처리를 적용할 경우의 파단면은 보수부, 열영향부, 모재부 전체에서 연성파괴인 딴플이 관찰되었다. 파단은 경계면에 존재하는 미세균열들의 성장으로 시작되고, 이후 모재부에서 성장된 균열과 합쳐지면서 최종 파단이 일어남을 알 수 있었다. 후열처리를 적용하지 않은 시편은 경계면에서 성장된 크랙이 급격히 모재로 전파되어 파단에 이르게 된다.

위와 같은 연구결과를 통해, 후열처리를 적용할 경우 1 mm 보수된 시편은 인장 특성이 향상됨을 알 수 있었다. 하지만, 보수 깊이가 깊어지게 되면 후열처리를 이용하더라도 기계적 특성을 향상시키기에는 한계가 있는 것으로 관찰되었다. 후열처리를 위한 초과 적층 레이어를 늘리게 되면 냉각속도를 더욱 낮출 수 있겠지만, 그만큼의 적층 시간이 늘어나게 된다. 이외에도 모재에 전달되는 열량이 더욱 많아져, 모재의 경도는 더욱 낮아질 수도 있을 것이다. 이러한 이유들로 후열처리를 위한 초과 적층량을 증가시키는 데에는 한계가 있음을 알 수 있다. 향후에는 보수부 경사면에서 발생하는 균열의 또 다른 원인인 융합부족에 집중할 계획이며, 따라서 적층 보수를 위한 보수부의 형상을 변화시켜 이에 따른 결과를 관찰할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by KITECH (Korea Institute of Industrial Technology) internal project. Additional support through by the National Research Foundation of Korea (NRF) under grant number 2017R1C1B5076047 from the Ministry of Science and ICT is gratefully acknowledged.

REFERENCES

1. M. Reimann, J. Goebel, and J. F. dos Santos, *Mater. Des.* **132**, 283 (2017).
2. M. R. Mirzadeh Rahni, B. Beidokhti, and M. Haddad-Sabzevar, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* **27**, 507 (2017).
3. P. D. Enrique, Z. Jiao, N. Y. Zhou, and E. Toyserkani, *Mater. Sci. A* **729**, 268 (2018).
4. J.C. Tan, L. Looney, and M. S. J. Hashmi, *J. Mater. Sci. Tech.* **92-93**, 203 (1999).
5. X. Lin, Yongqing Cao, X. Wu, H. Yang, J. Chen, and W. Huang, *Mater. Sci. A* **553**, 80 (2012).
6. Z. Zhuang, C. Jing, T. Hua, Z. Xiaolin, and H. Weidong, *Rare Metal. Mat. Eng.* **46**, 1792 (2017).
7. Q. Liu, Y. Wang, H. Zheng, K. Tang, H. Li, and S. Gong, *Opt. Laser Tech.* **82**, 1 (2016).
8. Y. Chew, J. H. L. Pang, G. Bi, and B. Song, *J. Mater. Process. Tech.* **224**, 89 (2015).
9. M. Krzyzanowski, S. Bajda, Y. Liu, A. Triantaphyllou, W. M. Rainforth, and M. Glendenning, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* **59**, 404 (2016).
10. D. Wang, Q. Hu, and X. Zeng, *Surf. Coat. Tech.* **274**, 51 (2015).
11. C. Lee, H. Park, J. Yoo, C. Lee, W. Woo, and S. Park, *Appl. Surf. Sci.* **345**, 286 (2015).
12. G. Y. Baek, G. Y. Shin, K. Y. Lee, and D. S. Shim, *Korean J. Met. Mater.* **56**, 430 (2018).
13. A. Hidouci, J. M. Pelletier, F. Ducoin, D. Dezert, and R. El Guerjouma, *Surf. Coat. Tech.* **123**, 17 (2000).
14. G. Y. Baek, K. Y. Lee, S. H. Park, and D. S. Shim, *Met. Mater. Int.* **23**, 1204 (2017).
15. F. Wang, H. Mao, D. Zhang, and X. Zhao, *Appl. Surf. Sci.* **255**, 8846 (2009).
16. F. Fu, Y. Zhang, G. Chang, and J. Dai, *Optik* **127**, 200 (2016).
17. Y. G. Yoo, N. H. Kang, C. H. Kim, J. H. Kim, and M. S. Kim, *J. Weld. Join.* **25**, 30 (2007).
18. D. S. Shim, K. Y. Lee, and S. H. Park, *Mater. Sci. A* **744**, 548 (2019).
19. H. A. Eltawahni, K. Y. Benyounis, and A. G. Olabi, *Review, Mater. Sci. Mater. Eng.* (2016).
20. W. A. Poling, *MS thesis*, Colorado school of Mines, Colorado (2012).
21. Z. N. Li, F. A. Wei, P. Q. La, and F. L. Ma, *Met. Mater. Int.* **24**, 633 (2018).
22. J. Y. Chen, K. Conlon, L. Xue, and R. Rogge, *Mater. Sci. Eng. A* **527**, 7265 (2010).
23. A. Suárez, J. M. Amado, M. J. Tobar, A. Yáñez, E. Fraga, and M. J. Peel, *Surf. Coat. Tech.* **204**, 1983 (2010).