

직접 에너지 적층을 통한 STS316L 소재의 보수 공정에서 그루브 형상이 기계적 특성에 미치는 효과

오욱진¹ · 손용² · 손종윤³ · 신광용⁴ · 심도식^{1, #}

Effect of Groove Shapes on Mechanical Properties of STS316L Repaired by Direct Energy Deposition

W. J. Oh, Y. Son, J. Y. Son, G. W. Shin, D. S. Shim

(Received August 16, 2019 / Revised January 16, 2020 / Accepted January 17, 2020)

Abstract

This study explores the effects of different pre-machining conditions on the deposition characteristics and mechanical properties of austenitic 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 varied the shape of the pre-machined zone for repair in order to prevent cracks from occurring at the slope surface. After repairs by the DED process, macro-scale cracks were observed in samples that had been pre-machined with elliptical and trapezoidal grooves. In addition, it was not possible to completely prevent micro-crack generation on the sloped interfaces, even in the capsule-type grooved sample. From observation of the fracture surfaces, it was found that the cracks around the inclined interface were due to a lack of fusion between the substrate and the powder material, which led to low tensile properties. The specimen with the capsule-type groove provided the highest tensile strength and elongation (respective of 46% and 571% compared to the trapezoidal grooved specimen). However, the tensile properties were degraded compared to the non-repaired specimen (as-hot rolled material). The fracture characteristics of the repaired specimens were determined by the cracks at the sloped interfaces. These cracks grew and coalesced with each other to form macro-cracks, they then coalesced with other cracks and propagated to the substrate, causing final fracture.

Key Words : Direct Energy Deposition (DED), Repair, Crack, Tensile Properties, Microhardness, Fracture

1. 서 론

적층 제조 공정(additive manufacturing, AM)은 폴리머, 금속, 세라믹 등 다양한 소재를 이용하여 3차원 형상에 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 공정 중 직접에너지적층(direct energy deposition, DED) 공정은 모재 또는 적층 대상 부품 표면이나 국부 영역에 금속 와이어나 분말을 공급하고, 여기에 레이저(laser) 또는 전자빔(electron beam)을 이용하여 용융 및 금속 응고를 거쳐 적층하는 공정을 말한다. 특히, 최근에는 부품 표면에 이종 소재를 적층하여 기계적 특성을 강화시키거나, 손상된 부품의 보수를 위해 사용되고 있다.

1. 한국해양대학교 해양신소재융합공학과, 대학원생, #교수

2. 한국생산기술연구원 디지털제조공정그룹, 수석연구원

3. 전남대학교 일반대학원 기계공학과, 대학원생

4. 한국생산기술연구원 스마트가공공정그룹, 연구원

Corresponding Author : Korea Maritime and Ocean University, E-mail: think@kmou.ac.kr, ORCID : 0000-0002-5133-1585

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 DED공정을 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. 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. 이종 또는 동종 소재의 적층 과정에서 발생하는 균열이나 박리(delamination) 등의 결함들은 적층이 종료된 후 냉각되는 과정에서 발생하는 것이 보편적이다. 균열이 발생하는 이유는 용융된 재료가 급속 응고되어 적층 되는 과정에서 발생하는 열응력(thermal stress) 때문이며[8-11], 이러한 균열을 제거하기 위해 다양한 방법들이 적용되고 있다. Hidouci 등은 레이저 클래딩 시 예열(preheating)을 적용하여 발생할 수 있는 균열을 줄였고, Ni+WC 클래딩부의 미세조직과 기계적 특성을 연구하였다[12]. Shim 등은 DED 공정을 이용한 고속도 공구강 M4 분말 적층 시 예열 온도에 따른 미세조직 관찰과 기계적

특성을 연구하였고, 적층 품질과 기계적 특성을 동시에 만족할 수 있는 최적의 예열 조건을 제시하였다[13]. Wang 등은 모재부와 적층부 사이에 낮은 항복강도와 높은 연성(ductility)을 갖는 316L 스테인리스 망(net) 구조물을 적층하여, 균열이 억제되는 효과를 확인하였다[14]. 이에 외도, 균열 발생을 억제하기 위해 모재 예열, 중간체 삽입, 공정조건 최적화와 같은 다양한 방식이 시도되어 왔다 [15-16].

본 연구의 저자들은 스테인리스 부품 제작 시 또 는 사용 중에 발생할 수 있는 국부 영역에서의 결함(치수/형상 불량, 표면 기공, 국부 파손 등) 등을 가정하여, DED 공정을 적용한 보수에 대한 사전 연구를 수행하였다. 이 과정에서 보수부와 모재부의 경계면에서 균열이 발생하였으며, 이에 따라 기계적 특성이 보수 전 소재에 비해서 크게 저하됨을 확인하였다. 통상적으로 보수를 하기 전에 불량 혹은 파손된 국부 영역을 기계가공을 통해 절삭하여, 그 영역에 동종 또는 이종소재분말을 적층하여 보수를 진행하게 된다. 따라서 본 연구에서는, 보수 영역의 형상에 따른 보수 특성을 관찰하고, 보수 경계면에서 발생하는 결함에 대한 원인 분석과 이것들이 기계적 특성에 어떠한 영향을 끼치는지에 대해서 분석하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 재료

본 연구의 실험에서는 모재와 금속 분말로 오스테나이트계 스테인리스강인 316L을 사용하였다. 특히, 보수에 사용된 모재는 1080°C에서 고용화 열처리된(solutionized annealing) 약 20 μ m 크기의 미세한 결정립 크기(grain size)를 가지는 열간압연재(hot-rolled)를 사용하였다. 모재는 가로, 세로, 그리고 높이가 각각 100mm, 80mm, 그리고 10mm 인 직육면체이고, 금속 부품의 사용 중 파손을 가정하여 보수를 위한 전처리 가공(pre-machining)으로 임의 형상의 그루브(groove)를 와이어가공(wire cutting)하였다(2.3 절 참조). 한편, 레이저 용융 적층 보수를 위해 사용된 316L 스테인리스 분말은 가스 분무법(gas atomized)으로 제조된 직경 45~150 μ m의 구형이다. 실험에 사용된 금속 분말과 모재에 대한 화학적 조성비는 Table 1에 나타난 바와 같다.

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

2.2 직접 에너지 적층 (Direct energy deposition)

본 연구에 사용된 레이저 용융 적층 장비인 DMT(direct metal tooling) MX3 장비는 Insstek社 (Daejeon, South Korea)에서 개발되었으며, 공정 개념도(Fig. 1)와 함께 실제 장비 사진을 Fig. 2에 나타내었다. 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 적층 면을 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.

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. 공정 중 산화를 방지하기 위한 보호가스와 주입된 분말의 운반 가스로 아르곤(Argon)을 사용한다. 분말 공급 장치가 장착된 헤드에는 광학비전(optical vision) 시스템과 통합되어 있

으며, 모재 표면으로부터 9mm 떨어진 노즐에서 직경 1.0mm의 레이저 빔과 함께 분말을 공급한다.

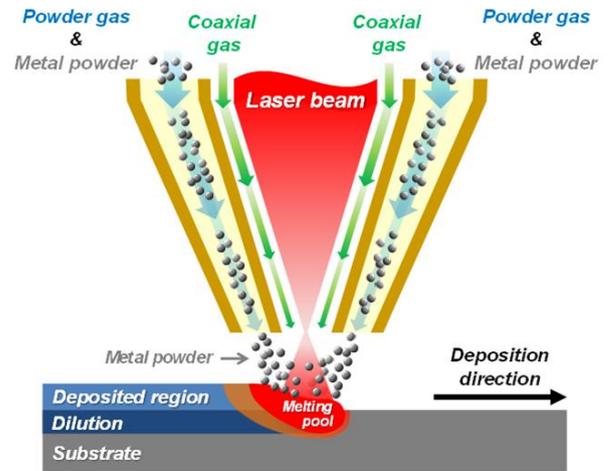


Fig. 1 Schematic diagram of the laser metal deposition with the coaxial powder feeder

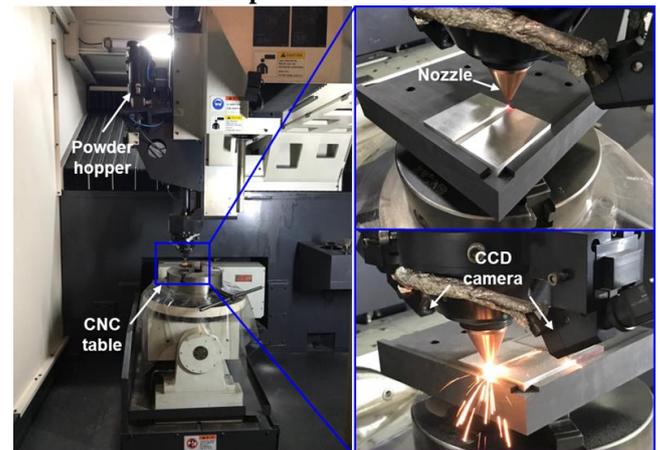


Fig. 2 DMT MX3 machine used for experiments

Table 2 Parameters for DED Processing

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

2.3 보수 방법 (Repair procedure)

Fig. 3은 파손된 부품의 보수 과정을 나타내고 있다. 사용 중 과도한 하중이나 마찰에 의해 부품의 표면에 크랙(crack), 칩핑(chipping) 혹은 마모 손상이 발생하였을 경우(i), 손상된 영역을 특정 형상의 그루브(groove)를 갖도록 기계가공한 후(ii), DED를 이용한 보수 적층이 완료되면(iii) 최종적으로 연삭공정으로 표면가공을 실시한다(iv). 본 연구에서는 (ii) 단계에서 보수 전처리 과정으로 기계가공되는 그루브의 형상에 따른 보수 특성을 관찰하고자 하였으며, 따라서 Fig. 4에서와 같이 사다리꼴 형상(trapezoidal groove), 타원 형상(elliptic groove) 그리고 캡슐 형상(capsule-type groove)으로 보수 형상을 구분하여 실험을 수행하였다. 세 가지 그루브 형상들 모두 동일한 폭과 높이를 갖도록 가공하였으며, 보수를 위한 DED 공정 조건도 동일하게 설정하였다.

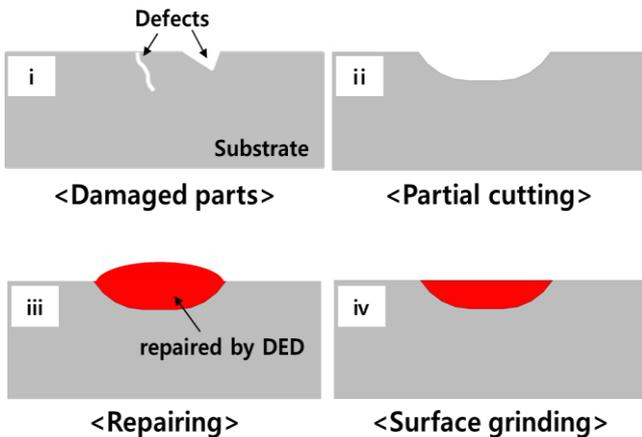


Fig. 3 Repairing procedures for damaged parts

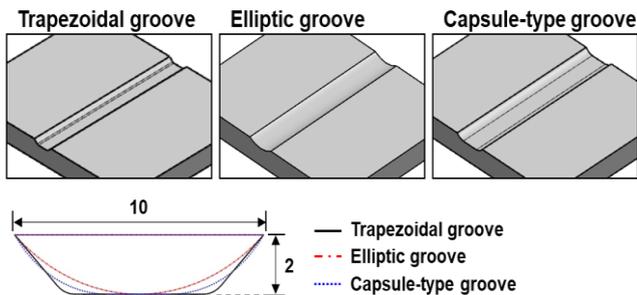


Fig. 4 Trapezoidal, elliptical and capsule-type grooves for repair

2.4 시험편 전처리 및 시험 방법

그루브 형상별로 보수 적층된 소재의 기계적 특성 평가를 위해 Fig. 5에 나타난 바와 같이, DED 공정으로 보수된 모재(Fig. 3 과정이 완료된)를 와이어 절단하여 인장시험편을 추출하게 된다. 인장시험은 단축인장시험기(SHIMADZ, AG-IS)를 사용하였으며, 인장 속도는 2mm/min으로 설정하였다. 인장 시험 후에는 주사전자현미경(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 0.1kgf으로 10초간 압입하여 생긴 압흔의 면적을 측정하였으며, 보수부 표면에서 0.1mm 떨어진 지점부터 일정한 간격으로 수직 아래 방향으로의 경도 변화를 관찰하였다.

미세조직 관찰을 위해서 #200~#2400의 SiC 연마지와 3, 1 μ m 연마천을 사용하여 시험편의 표면을 연마하였으며, 에칭액(HNO₃:6, HCl:1, H₂O:3)을 이용하여, 전압 3V, 전류 2A의 조건에서 전해에칭하였다. 에칭된 단면에서의 미세한 균열과 금속 조직을 광학현미경(Nikon, ECLIPSE LV150) 그리고 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다.

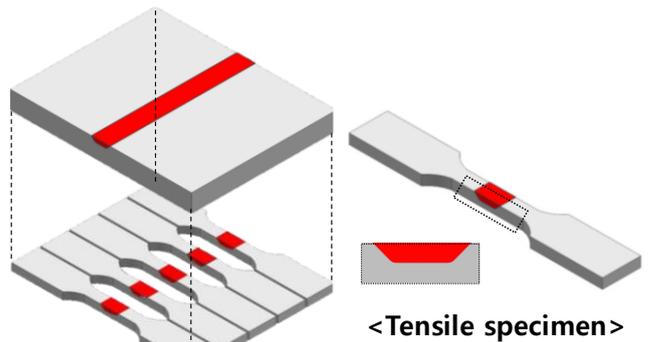


Fig. 5 Fabrication of tensile specimens

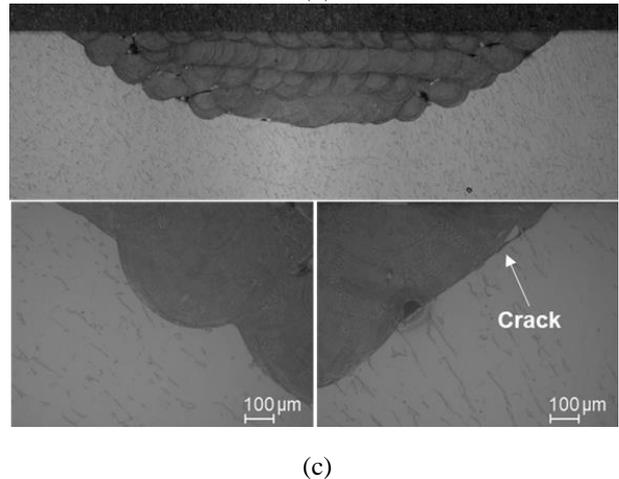
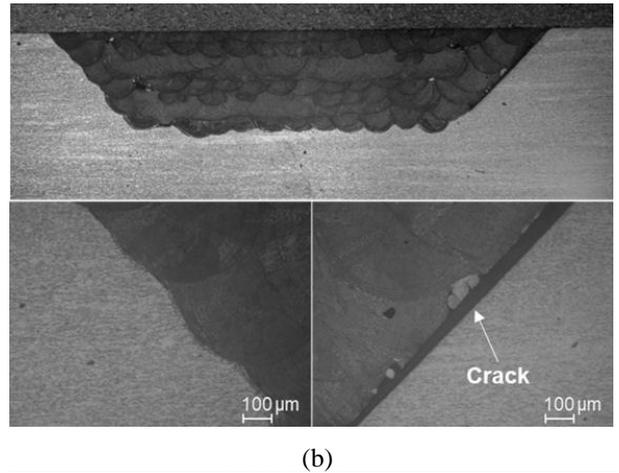
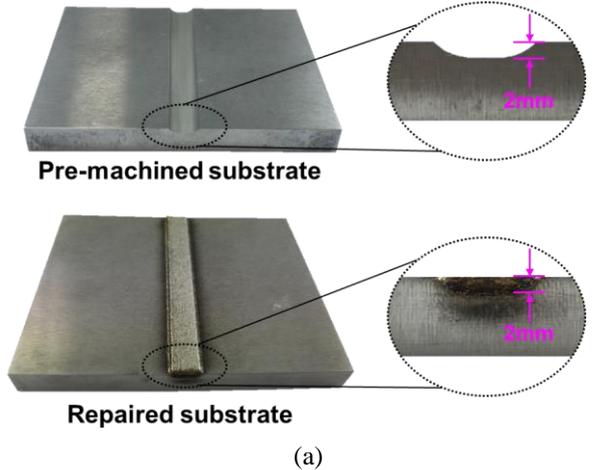
3. 결과 및 고찰

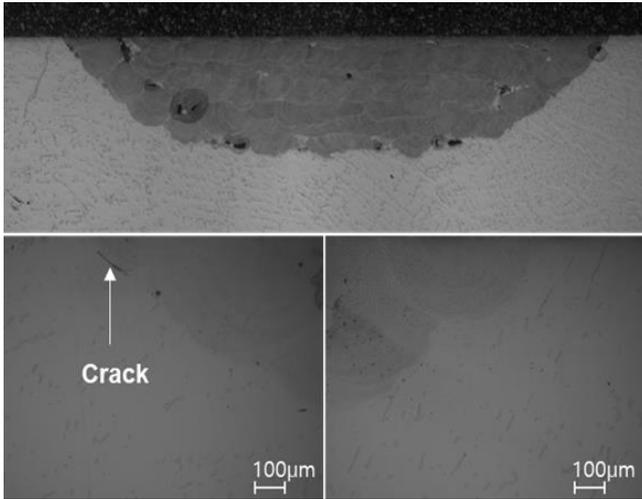
3.1 형상별 적층 특성 비교

Fig. 6(a)는 기계가공된 모재에 DED로 보수된 실험 결과를 보여주고 있다. 보수 형상에 따른 적층 특성을 비교하기 위해 각 샘플들에 대한 단면을 관찰하였다(Fig. 6). Fig. 6(b)는 사다리꼴 형상의 그루브

를 가진 보수 샘플로, 레이어(layer)별로 적층된 비드(bead)를 관찰할 수 있다. 보수 적층된 영역에서는 특별한 결함이 관찰되고 있진 않으나, 경사진 보수 계면(interface)에서 500 μ m 정도의 균열이 관찰되고 있다. 이에 반해, 타원 형상과 캡슐 형상의 샘플(Fig. 6(c), (d))에서는 적층 영역 내부에 기공(pore)이 관찰되었으며, 특히 비드간의 경계면에서 주로 나타난 것으로 보아 적층 비드간 간격이 적절치 못한 것으로 판단된다. 사다리꼴 형상의 샘플에서 나타난 균열들에 비해서, 나머지 두 가지의 샘플에서는 그 크기가 작은 것으로 확인되었다. 일반적으로, DED공정에서 균열이 발생하는 원인은 용융과 급속 냉각이 반복되기 때문에 발생하는 열응력과 높은 온도구배 때문이며, 적층 체적이 커질수록 균열 발생 가능성은 높아진다. 하지만 본 연구에서는 유사한 보수 체적을 갖는 형상임에도 불구하고 균열의 크기가 다른 것을 알 수 있는데, 이는 보수 적층되는 경사면의 기울어진 각도에 의한 것으로 예상된다. 다시 말해, 사다리꼴 형상에 발생한 균열의 크기가 큰 이유는 경사면의 기울기가 가장 급하기 때문인 것으로 유추할 수 있다. Jehnming 등[17]은 레이저가 조사되는 경사면의 각도가 커질수록 레이저 흡수율이 낮아진다고 보고하고 있으며, 이는 경사면 주변에서의 온도 분포와 경사 각도에 따른 레이저의 반사율에 따른 것으로 설명하고 있다. 결과적으로, 공급되는 분말과 모재를 녹이기 위해 용융풀로 전달되는 에너지가 경사면에서는 더욱 적어지게 되면서 융합 부족(lack of fusion)과 같은 결함이 발생하게 된다. 융합 부족은 적층 비드(bead) 또는 적층 레이어(layer)가 용융되더라도 인접한 비드 또는 이전 레이어(혹은 모재)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 모재) 안으로 깊이 융합되지 못해서 발생하는 침투 부족(lack of penetration)으로 이어지게 된다. 이로 인해 적층부가 적층 중 혹은 후에 모재에서 분리되거나 또는 적층된 소재 내의 레이어 사이에서 분리가 일어날 수 있다[18]. 이러한 결과로부터, 경사진 계면에서 발생하는 균열의 원인으로, 에너지 공급 부족으로 발생하는 융합 부족으로 보는 것이 타당할 것이다. 융합 부족을 크랙 원인으로 추측하는 또 다른 이유는, 보

수 형상과 상관없이 보수부의 평행부(바닥면)에서는 관찰되지 않은 균열이 경사부에서만 나타나는 현상으로 설명될 수 있다. 동일한 에너지를 평행부와 경사부에 적용할 경우, 경사부에서는 상대적으로 낮은 에너지가 용융풀에 공급되기 때문에 융합부족 혹은 침투부족은 경사부에서 두드러질 것이다.





(d)

Fig. 6 Images of cross-sections of specimens repaired at different groove shapes; (a) repaired substrate, (b) trapezoidal, (c) elliptic and (d) capsule-type sample

3.2 마이크로 경도 (Microhardness)

Fig. 7은 그루브 형상에 따른 보수부와 모재부의 경도 변화를 나타내고 있으며, 보수부 상부 표면에서부터 아랫방향으로 일정 간격으로 측정된 값이다. 3가지 샘플의 경우, 보수부와 모재부에서 나타나는 평균 경도값은 각각 210HV 그리고 190HV로 유사하게 나타났다. 3가지 보수 형상 모두 DED 공정 특성상 용융과 급속 냉각에 의해 형성되는 미세조직 (microstructure)을 가지게 되는데, 각 샘플별로 그 적층 부피가 유사하기 때문에 보수부에서 처리되는 열영향이 동일하다고 볼 수 있다. 또한, 보수부에서의 경도값이 모재부에 비해서 다소 높은 것을 알 수 있으며, 이를 다음 2가지 원인으로 이해할 수 있다. 한 가지는 DED 를 이용한 보수 형상 적층 동안 발생한 열은 모재를 통해 빠져나가게 되므로, 보수부의 냉각속도는 빠른 반면에 모재부에서의 냉각속도는 상대적으로 느리기 때문이다. 다른 한가지는 열간 압연으로 제조된 모재의 결정립 (grain) 크기는 평균 20µm이지만, 보수부의 미세조직은 DED 특성상 용융과 급속 냉각에 의해 형성된 덴드라이트 조직으로써 결정립 크기는 작다. 그 결과, 보수부의 경도값이 모재부보다 다소 높게 나타난다.

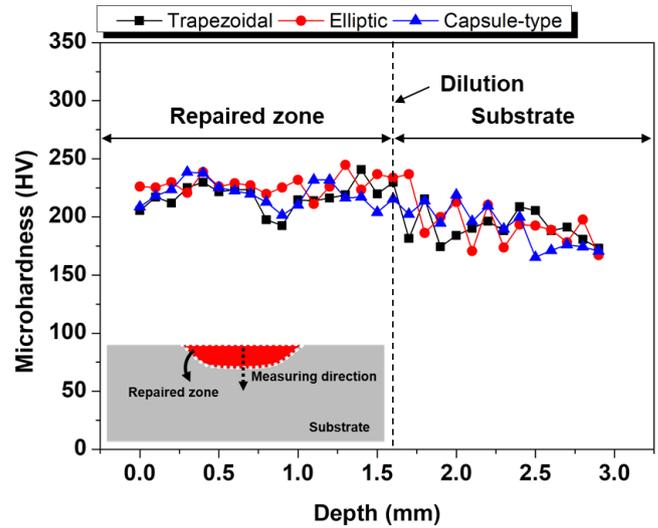


Fig. 7 Vickers hardness distribution along vertical direction

3.3 인장 특성

Fig. 8 은 그루브 형상에 따라 보수된 인장시험편을 사용하여 수행된 인장시험 결과를 나타내었으며, 보수되지 않은 소재와의 특성 비교를 위해 각 조건별 인장 특성을 Table 3 에 정리하였다. 파단 시험편 사진(Fig. 9(a))에서도 확인할 수 있는 것과 같이, 3 가지 시험편 모두 보수부와 모재부의 경사면에서 시험편이 파단된 것을 확인할 수 있으며, 이는 보수부 내부에 생성된 기공이 인장 특성에 영향을 미치지 않았음을 보여준다.

캡슐 형상으로 보수된 시험편(capsule-type groove)의 경우 인장강도(tensile strength)는 554MPa 그리고 연신율(elongation)은 40%로 나타났으며, 이는 3 가지 조건 중 가장 우수한 기계적 성질을 보이고 있다. 이는 보수되지 않은 시험편(non-repaired specimen)에 비해 인장강도와 연신율이 각각 24%와 38% 정도 감소한 결과이다. 이는 보수부와 모재부의 경사면 부근에 생긴 균열에 의한 것으로 판단될 수 있다. 타원 형상으로 보수된 시험편(elliptic groove)의 경우에는 캡슐 형상 시험편에 비해 다소 떨어진 기계적 성질을 보여주고 있다. 이에 반해, 사다리꼴 형상으로 보수된 시험편(trapezoidal groove)의 경우 인장강도는 381MPa 그리고 연신율은 7%로 보수되지 않은 시험편에 비해 크게 감소하였다. 이는 앞선 단면 관찰 결과에서 알 수 있듯이, 사다리꼴 형상 시험편에서는 500µm 이상의 큰 균열이 발생하였기 때문이다.

캡슐 형상 시험편의 경우 사다리꼴 형상 시험편에 비해 인장강도는 46% 그리고 연신율은 571% 상승하였음을 알 수 있다. 하지만, 보수를 위한 형상을 변경하더라도 여전히 보수 전 소재에 비해 인장강도와 연신율은 감소하였음을 확인하였다. 이는 경사진 경계면에 존재하는 미세균열로 인한 것으로 보이며, 보수 소재의 인장 특성을 개선시키기 위해서는 경사면에서의 균열을 방지할 수 있는 새로운 공정의 제안이 필요할 것으로 보인다.

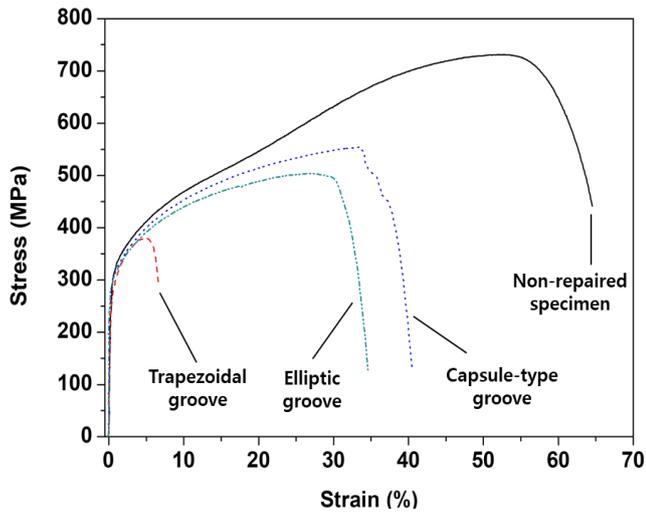
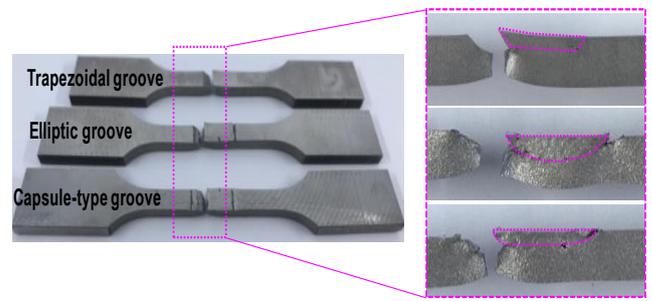


Fig. 8 Engineering stress-strain curves with respect to different groove shapes

Table 3 Tensile properties of specimens at different groove shapes

Repair depth	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Non-repaired specimen	724±7	64±0.6
Trapezoidal groove	377±17	7.6±1.5
Elliptical groove	482±15	28.6±5.1
Capsule-type groove	527±26.7	35±6.1

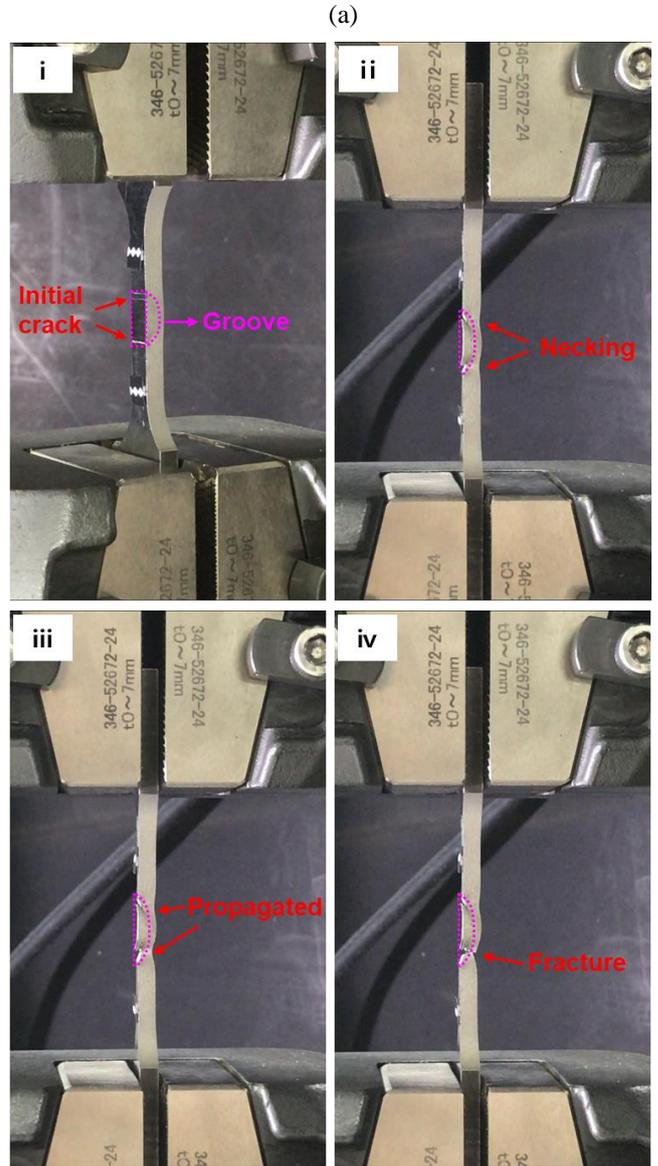


Fig. 9 (a) Fractured tensile specimens and (b) fracture behavior of specimen with elliptic groove

Fig. 10에 파단면에 대한 SEM 사진을 나타내었다. 사다리꼴 형상 시험편의 파단면은(Fig. 10(a)), 적층부에서는 연성파괴의 흔적이 그리고 모재부에서는 전단 딬플(sheared dimple)이 나타난 것으로 보아 경사면에서 성장된 균열이 모재부로 급속히 전파되어 파단된 것으로 판단된다. 이는 Fig. 9(a)의 사다리꼴 형상 시험편의 파단 사진을 통해서도 알 수 있다(모재 수직 방향으로 파단). 따라서 나머지 두 가지의 샘플에 비해서 가장 낮은 강도와 연신율을 응력-변형을 선도에서 확인할 수 있었다. 한편, 타원 형상 시험편에는, 파단면 전체 영역에서 연성파괴 거동 특성을 나타내는 딬플(dimple)이 관찰되고 있다(Fig. 10(b)). Fig. 9(b)에서 알 수 있듯이 짧은 연성과정을 거쳐 보수부의 경사진 경계면에 존재하는 균열이 성장하면서 모재부로 전파되어 전체 시험편이 파단되었음을 알 수 있다. 인장 하중이 증가하면서 보수부의 경사진 경계면에 존재하는 균열들이 성장하여 보수부 경계면에서 1 차적으로 큰 균열이 생성된다. 이후 응력이 증가하면서 모재부에서도 균열이 생성되어 성장하게 되고, 이것이 보수부 경계면에서 성장된 균열과 만나는 순간 파단에 이르게 된다. 이와는 달리 Fig. 10(c)의 캡슐 형상 시험편의 경우에는, 보수부 경계면에서 발생된 균열과 미세 공극이 연신이 되는 과정에서 성장 그리고 합쳐져(coalescence) 최종 파단에 이르는 것으로 분석될 수 있다. 위와 같이, 보수 형상에 따라 응력-변형을 곡선과 시험편의 파단면에 나타나는 차이는 결국 경계면에 존재하는 균열의 크기로 설명될 수 있다. 한편, 파단면 분석 과정에서 보수부의 경사면에서 용융되지 않은 분말들이 관찰되었는데(Figs. 10(b)과 (c)의 오른쪽 하단 사진), 이는 앞서 설명한대로 경사면에서의 낮은 에너지 입열량에 의해서 발생된 융합 부족의 결과라고 할 수 있을 것이다. 융합 부족에 의해 용융되지 않은 분말에 의해 빈 공간(pore) 또는 균열이 생성되며, 이는 경사면의 기울기가 클수록 입열량이 감소하여 더욱 심각한 결함을 만들게 된다. 이러한 이유로, 본 연구에서는 사다리꼴 형상 시험편에 대한 인장 특성이 가장 떨어지는 것을 알 수가 있었으며, 실제 부품 보수 시에 이러한 결과에 근거하여 보수 전처리(pre-machining)에 대한 계획을 세워야 할 것이다.

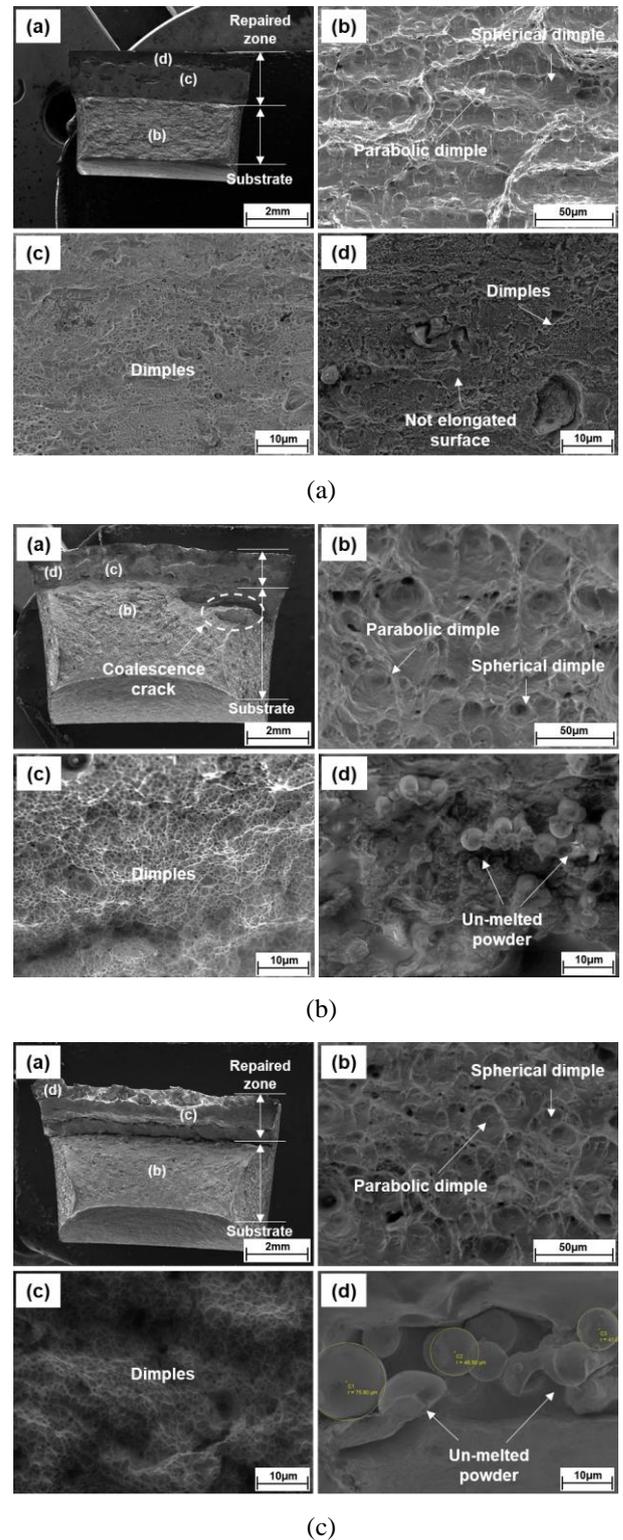


Fig. 10 Fractured surfaces of tensile specimens: (a) trapezoidal, (b) ellipse and (c) capsule-type groove

4. 결론

본 연구에서는 손상된 금속 부품에 대하여 DED 공정을 이용한 보수 과정을 가정하여, 적층 보수를 위한 기계가공 전처리 형상에 따른 적층 보수 특성과 기계적 특성을 비교하고자 하였다. 보수를 위한 그루브 형상에 따라 보수 시편을 제작하여 적층 특성을 관찰하였으며, 경도와 인장시험과 함께 파단면 분석을 수행하였다. 이에 따른 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 보수를 위한 그루브 형상에 따른 적층 특성을 비교하기 위해, 사다리꼴 형상(trapezoid groove), 타원형상(elliptic groove) 그리고 캡슐 형상(capsule-type groove)의 그루브를 가지는 모재에 DED 공정을 이용한 보수 적층을 수행하였다. 그 결과 보수 영역 내에서는 기공 결함이 관찰되었으며, 경사진 경계면에서 균열이 발견되었다. 이러한 균열은 경사면에서 감소된 에너지 입열량에 따른 융합부족이 그 원인을 확인하였다.

(2) 적층부와 모재부에 대한 경도를 관찰한 결과, 그루브 형상에 따른 차이는 나타나지 않았다. 이는 그루브 형상의 차이만 있을 뿐, 보수되는 적층 부피는 거의 유사하기 때문에 적층 공정 중 그리고 후에 나타나는 가열-냉각에 따른 온도 변화는 동일하다고 볼 수 있다. 인장시험 결과, 캡슐 형상의 시험편에서 가장 높은 인장 특성을, 그리고 사다리꼴 형상에서는 가장 낮은 특성을 보였다. 이는 보수 적층된 경사진 경계면에서 나타나는 균열의 크기에 따른 것으로 판단되며, 특히 사다리꼴 형상에서 경사면의 기울기가 가장 크기 때문에 융합부족에 의한 균열 결함이 가장 심각하게 나타난 이유라고 볼 수 있다.

(3) 각 시험편에서의 파단은 보수 경계면에 존재하는 미세균열들로부터 시작되고, 이것들이 성장하여 이후 모재부로 진전되어 파단에 이르는 공통적인 특성을 보인다. 하지만, 균열 결함이 심각한 사다리꼴 시험편에서는 모재부에서의 연신은 거의 나타나지 않은 상태에서 보수 경계면에서 생긴 균열과 기공이 동시에 성장하여 모재부로 급격히 전파되어 파단이 되는 것으로 확인되었다.

위와 같은 연구결과를 통해, 보수 적층 시 전처리로 기계가공되는 그루브 형상, 특히 경사면의 기울기에 따라 보수 시편의 기계적 특성이 크게 달라짐을 확인할 수 있었다. 향후에는 보수부 경사면에서

발생되는 균열의 원인인 융합부족에 집중할 계획이며, 융합부족을 최소화하기 위해 레이저 출력, 이송 속도 등과 같은 주요 공정변수에 대한 최적화를 진행할 계획이다.

후 기

본 연구는 한국생산기술연구원 기술용역과 한국연구재단의 기초지원사업(과제번호: 2017R1C1B5076047)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] M. Reimann, J. Goebel, J. F. dos Santos, 2017, Microstructure and Mechanical Properties of Keyhole Repair Welds in AA 7075-T651 Using Refill Friction Stir Spot Welding, Mater. Des. Vol. 132, pp. 283~294.
- [2] M. R. Mirzadeh rahni, B. Beidokhti, M. Haddad-sabzevar, 2017, Effect of Filler Metal on Microstructure and Mechanical Properties of Manganese-aluminum Bronze Repair Welds, Trans. Nonferrous Met. Soc. China. Vol. 27, No. 3, pp. 507~513.
- [3] P. D. Enrique, Z. Jiao, N. Y. Zhou, E. Toyserkani, 2018, Effect of Microstructure on Tensile Properties of Electrospark Deposition Repaired Ni-superalloy, Mater. Sci. Eng. A. Vol. 729, pp. 268~275.
- [4] J.C. Tan, L. Looney, M.S.J. Hashmi, 1999, Component Repair Using HVOF Thermal Spraying, J. Mater. Process. Technol. Vol. 92, pp 203~208.
- [5] X. Lin, Yongqing Cao, X. Wu, H. Yang, J. Chen, W. Huang, 2012, Microstructure and Mechanical Properties of Laser Forming Repaired 17-4PH Stainless Steel, Mater. Sci. Eng. A. Vol. 553, pp. 80~88.
- [6] Z. Zhuang, C. Jing, T. Hua, Z. Xiaolin, H. Weidong, 2017, Microstructure and Mechanical Properties of Laser Repaired TC4 Titanium Alloy, Rare Met. Mater. Eng. Vol. 46, No. 7, pp. 1792~1797.
- [7] Q. Liu, Y. Wang, H. Zheng, K. Tang, H. Li, S. Gong, 2016, TC17 Titanium Alloy Laser Melting Deposition Repair Process and Properties, Opt. Laser. Technol. Vol. 82, pp. 1~9.
- [8] Y. Chew, J.H.L. Pang, G. Bi, B. Song, 2015, Thermo-

- mechanical Model for Simulating Laser Cladding Induced Residual Stresses with Single and Multiple Clad Beads, *J. Mater. Process. Technol.* Vol.224, pp. 89~101.
- [9] M. Krzyzanowski, S. Bajda, Y. Liu, A. Triantaphyllou, W.M. Rainforth, M. Glendenning, 2016, 3DAanalysis of Thermal and Stress Evolution during Laser Cladding of Bioactive Glass Coatings, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* Vol. 59, pp. 404~417.
- [10] D. Wang, Q. Hu, X. Zeng, 2015, Residual Stress and Cracking Behaviors of Cr13Ni5Si2 Based Composite Coatings Prepared by Laser-induction Hybrid Cladding, *Surf. Coat. Technol.* Vol. 274, pp. 51~59.
- [11] C. Lee, H. Park, J. Yoo, C. Lee, W. Woo, S. Park, 2015, Residual Stress and Crack Initiation in Laser Clad Composite Layer with Co-based Alloy and WC + NiCr, *Appl. Surf. Sci.* Vol. 345, pp. 286~294.
- [12] A. Hidouci, J.M. Pelletier, F. Ducoin, D. Dezert, R. El Guerjouma, 2000, Microstructural and Mechanical Characteristics of Laser Coatings, *Surf. Coat. Technol.* Vol. 123, No. 1, pp. 17~23.
- [13] G. Y. Baek, K. Y. Lee, S. H. Park, D. S. Shim, 2017, Effects of Substrate Preheating During Direct Energy Deposition on Microstructure, Hardness, Tensile Strength, and Notch Toughness, *Met. Mater. Int.* Vol. 23, No. 6, pp. 1204~1215.
- [14] F. Wang, H. Mao, D. Zhang, X. Zhao, 2009, The Crack Control During Laser Cladding by Adding the Stainless Steel Net in the Coating, *Appl. Surf. Sci.* Vol. 255, No. 21, pp. 8846~8854.
- [15] F. Fu, Y. Zhang, G. Chang, J. Dai, 2016, Analysis on the Physical Mechanism of Laser Cladding Crack and its Influence Factors, *Optik.* Vol. 127, No. 1, pp. 200~202.
- [16] Y. G. Yoo, N.h. Kang, C. H. Kim, J. H. Kim, M. S. Kim, 2007, Effect of Process Parameters on Laser Overlay Behavior of Fe-based Alloy Powder on Aluminum Substrate, *J. Weld. Joining.* Vol. 25, No. 1, pp. 30~36.
- [17] J. Lin, B. C. Hwang, 1999, Coaxial Laser Cladding on an Inclined Substrate, *Opt. Laser. Technol.* Vol. 31, No. 8, pp. 571~578.
- [18] D. S. Shim, K. Y. Lee, S. H. Park, 2019, Bending Strength of Tool Steel Preheated to Various Temperatures and Layered by Direct Energy Deposition, *Mater. Sci. A.* Vol. 744, pp. 548~559.