

# 레이저 분말 베드 용융법으로 제작된 Hastelloy X 적층 소재의 시편 두께 및 서포트 구조에 따른 잔류응력 변화

장지은<sup>1</sup>, 박성혁<sup>2</sup>, 김다혜<sup>3,#</sup>

## Variation in the Residual Stress of Hastelloy X Superalloy Fabricated by the Laser Powder Bed Fusion Process with Sample Thickness and Support Structure

J. E. Jang, S. H. Park, D. H. Kim

(Received April 18, 2022 / Revised May 11, 2022 / Accepted May 16, 2022)

### Abstract

The purpose of this study was to investigate the effects of sample thickness and support structure on the residual stress of Hastelloy X superalloy samples fabricated by laser powder bed fusion (LPBF), which is an additive manufacturing process. The residual stresses of LPBF samples with different thicknesses and support structures were measured using X-ray diffraction. The results revealed that as the thickness of sample increased from 2.5 mm to 20 mm, its tensile residual stress gradually decreased from 443.5 MPa to 182.2 MPa. Additionally, the residual stress in the bottom region of sample was higher than that in the top region, and the residual stress difference in the bottom and top regions became more pronounced as the sample thickness decreased. The residual stress of LPBF sample also varied depending on the structure of support. The residual stress of sample decreased with increasing contract area between the sample and the support, because the larger contract area led to smaller temperature gradient throughout the sample.

**Keywords:** Additive manufacturing, Hastelloy X, Residual stress, Sample thickness, Support structure

### 1. 서 론

레이저 분말 베드 용융법(Laser Powder Bed Fusion, LPBF)은 복잡한 형상의 제품을 제조할 수 있다는 장점으로 인해 다양한 산업 분야에서 활용되는 급속 3D 프린팅 기술 중 하나이다 [1]. LPBF 공정은 도포된 분말층에 고에너지 레이저 빔을 포인트 영역으로 조사하여 해당 국소 부위의 분말을 용융 시

켜 비드(bead)를 형성한다. 비드들은 용접과 유사한 원리로 서로 접합되며, 접합된 비드들이 모여 원하는 형상으로 제조된다. 마이크로 크기의 비드는 매우 빠른 용융·응고 과정에 의해 형성되는데 이러한 과정에서 발생하는 급격한 온도구배는 잔류응력(residual stress)을 초래한다. 적층 제조 과정 중에 발생하는 잔류응력은 일반적으로 인장 잔류응력으로 알려져 있다 [2]. 인장 잔류응력은 균열, 기공 등과 같은 미세 결함을 생성시키기 때문에 적층 소재의 기계적 물성을 저하시키는 요인으로 작용한다. 또한, 누적된 인장 잔류응력은 적층 레이어(layer) 사이에 균열, 뒤틀림 및 박리를 유발하여 공정 실패 요인이 되기도 한다 [3]. 이러한 잔류응력은 제조된 적층 소

1. 경북대학교 신소재공학부, 박사과정

2. 경북대학교 신소재공학부, 교수

3. 한국생산기술연구원 스마트제조기술연구그룹, 수석연구원

# Corresponding Author : Smart Manufacturing Technology R&D Group,

Korea Institute of Industrial Technology.

E-mail: dahye.kim@kitech.re.kr

ORCID : 0000-0003-3650-4094

재의 두께에 따라 달라질 수 있으나 LPBF로 제조된 시편에 대한 이러한 연구는 미미하다. LPBF로 제작된 부품의 잔류 응력을 제어하기 위한 방법으로는 대부분 레이저 스캔 전략 및 기판(baseplate) 가열과 같은 방법들이 주로 제안되었다 [4–6]. 반면, LPBF로 제작되는 부품의 오버 행(over hang) 또는 브릿지(bridge) 구조면에 적용되는 서포트(support)의 구조와 부품 내부에 발생하는 잔류응력 사이의 관계에 대한 연구는 많지 않다.

따라서 본 연구에서는 LPBF공정과 Hastelloy X 소재를 활용하여 다양한 두께를 가지는 시편을 제작한 뒤 두께 변화에 따른 적층 소재의 잔류응력 변화를 분석하고 적층 공정에서의 잔류응력 발생 메커니즘을 이해하고자 하였다. 또한 hatch pattern, perforation structure, support volume을 변경한 다양한 서포트를 시편에 적용하여, 각 서포트 구조에 따른 잔류응력의 변화를 분석하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 니켈기 초내열합금 중 내산화성이 우수하다고 알려진 Hastelloy X 분말을 사용하였다. 사용된 분말은 에너지분산형 분광분석법(EDS)과 탄소-유황 분석기(CS)를 통해 조성분석을 실시하였으며, 측정된 결과가 Hastelloy X의 조성 기준인 ASTM B435의 기준에 적합함을 확인하였다.

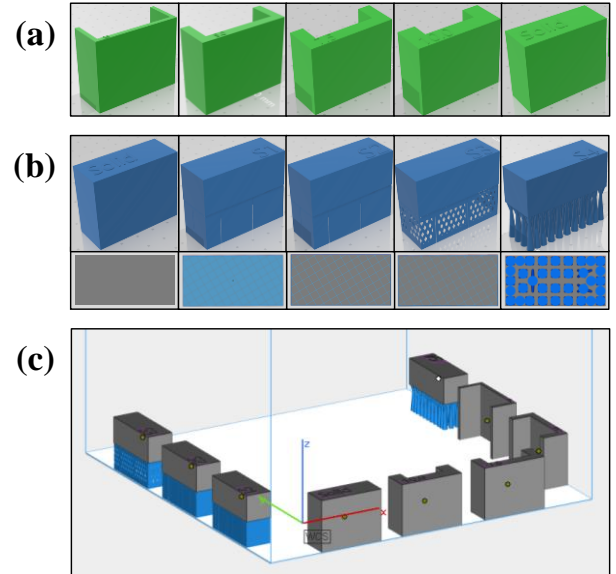
**Table 1** Composition of Hastelloy X powder that are processed using LPBF (wt.%)

| Ni    | Cr    | Fe    | Mo   | Co   | W    |
|-------|-------|-------|------|------|------|
| 46.34 | 22.82 | 18.83 | 8.57 | 1.67 | 1.02 |
| Si    | Al    | Ti    | Nb   | Etc. |      |
| 0.14  | 0.48  | 0.04  | 0.02 | 0.1  |      |

LPBF 적층 공정은 진공 챔버 내에 질소(N<sub>2</sub>)가스를 채워 산소 농도를 0.3% 미만까지 낮춘 상태에서 진행되었으며, SM45C로 제작된 기판은 150 °C 가열된 상태로 사용되었다. 적층 세부 조건은 레이저 출력 240 W, 레이저 스캔 속도 800 mm/s, 레이저 빔 지름 크기 100 μm, 스캔 라인 거리 간격 115 μm으로 설정하였다.

시편 두께에 따른 잔류응력 변화를 분석하기 위해서, 높이 40 mm, 가로 50 mm, 세로 두께 2.5 mm, 5.0 mm, 7.5 mm, 10.0 mm, 20.0 mm를 가지는 시편을 적층 제조하였다. 해당 시편들은 각각 2.5T, 5T, 7.5T, 10T, 20T라 명명하였다. 20T를 제외한 시편들은 적층 안정성을 높이기 위해 Fig. 1a와 같이 양 옆으로 지지면을 두었다. 서포트 구조에 따른 잔류응력 변화 측정을 위한 시편은 높이 40 mm, 가로 50 mm, 세로 20 mm의 직육면체 시편 아래에 20 mm 높이의 서포트를 적용하여 제작하였다. 서포트는 Fig. 1b와 같이 총 5가지 종류로 설계하였다. 각 시편들은 Fig. 1c와 같이 한 기판에 동시 적층 제작되었다.

시편의 잔류응력은 비파괴 검사 중 X선법으로 잔류응력을 측정하는 PULSTEC사의 μ-X360 FULL 2D장비를 사용하였다. 사용된 콜리메타(collimators)의 직경은 1.0 mm이며 X선 관구 측정 조건은 전압 30 kV에 전류 1.5 mA이다. 각 시편은 5 point 구간으로 나누어 여러 위치에서 측정하였으며, 각 위치 별 5회 측정 후 25회 측정값의 평균을 구하였다.



**Fig. 1** 3D modeling schematic diagrams of LPBF samples: (a) 2.5T, 5T, 7.5T, 10T, and 20T samples with different thicknesses, (b) Solid, Shd0.2, Shd3.0, Shd3.0P, and Tree samples with different support structures, and (c) overall build position of fabricated samples.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 시편 두께에 따른 잔류응력 변화

Fig. 2는 2.5T, 5T, 7.5T, 10T, 20T 시편의 평균 잔류응력을 보여준다. 시편의 두께가 20 mm에서 2.5 mm로 감소함에 따라 평균 인장 잔류응력은 182.2 MPa에서 443.5 MPa로 크게 증가하며, 시편 내 위치 별 잔류응력 값의 편차 또한 증가한다. 적층 소재는 높은 잔류응력으로 인해 가공경화 되어 소재의 강도는 향상되지만 연성은 크게 감소된다 [7]. 또한 이러한 인장 잔류응력은 피로 균열 형성을 용이하게 하여 피로수명을 저하시키고 응력 부식 균열을 유발하여 적층 소재 물성 저하의 요인으로 알려져 있다 [2, 3, 8]. 따라서 적층 소재의 경우, 제작된 두께가 얇아질수록 피로 및 응력 부식 특성이 저하될 것임을 예상할 수 있다. 또한, 시편 내 잔류응력 값의 편차가 증가하게 되면 공정 중 시편의 뒤틀림(distortion)과 같은 변형이 발생하게 되어 시편의 박리가 일어나게 되고 이는 리코터(recoater)의 손상으로 이어지므로, 두께가 얇은 시편을 LPBF 공정으로 제작하는 경우에는 공정의 위험성이 증가하게 된다 [9].

Fig. 3은 2.5T, 5T, 7.5T, 10T, 20T 시편의 높이 위치에 따른 잔류응력 분포를 보여준다. 모든 시편에서 기관과 가까운 하단부에 잔류응력 최대값이 존재하며, 두께가 증가할수록 잔류응력이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 박판형의 부품을 제작할 때에는 기관과 적층 소재 사이에서의 박리현상으로 인한 적층부와 리코터 사이의 충돌을 주의해야 하며, 이러한 위험성을 감소하기 위해서 적절한 서포트 구조물의 적용이 필요하다 [10]. 기관과 연결된 적층 소재 하단부에서의 잔류응력은 적층에 사용된 소재인 Hastelloy X와 기관 소재인 SM45C 사이의

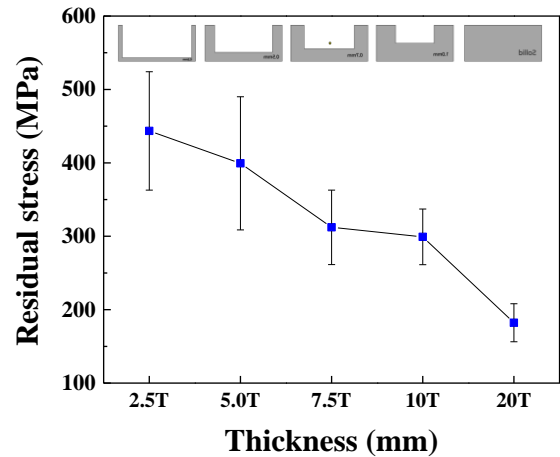


Fig. 2 Residual stresses of LPBF samples with different thicknesses

온도 및 열 특성 차이로 인한 것으로 예상된다. Hastelloy X 분말이 레이저 빔으로 용융되는 순간 온도는 Hastelloy X의 용융점인 1260 °C 보다 높은 온도이지만, 기관은 150 °C로 낮은 온도를 유지하고 있기 때문에 적층 소재와 기관 사이에 큰 온도구배가 형성되고 이로 인해 높은 잔류응력이 발생된다. 또한 Hastelloy X와 SM45C의 열전도도는 각각 27.4 W/m·K와 49.8 W/m·K으로, 보다 높은 열전도도를 가지는 SM45C가 Hastelloy X 보다 빠르게 열 수축이 발생한다 (Fig. 4). 이로 인해 높은 온도구배가 형성되면서 기관과 근접한 부분의 적층 소재에 인장 응력이 가해진다 [11-13]. 실제로 기관의 잔류응력을 측정된 결과, -267 MPa의 높은 압축 잔류응력을 나타내었다.

Fig. 5는 2.5T, 5T, 7.5T, 10T, 20T 시편의 데바이링(Debye-ring)과 반치전폭(Full width at half maximum, FWHM)의 결과를 보여주는 그래프이다. 데바이링은 X선을 등방성 다결정 재료에 방사하였을 때 다양한 결정학적 방위를 가지는 결정입자에서 회절하여 나

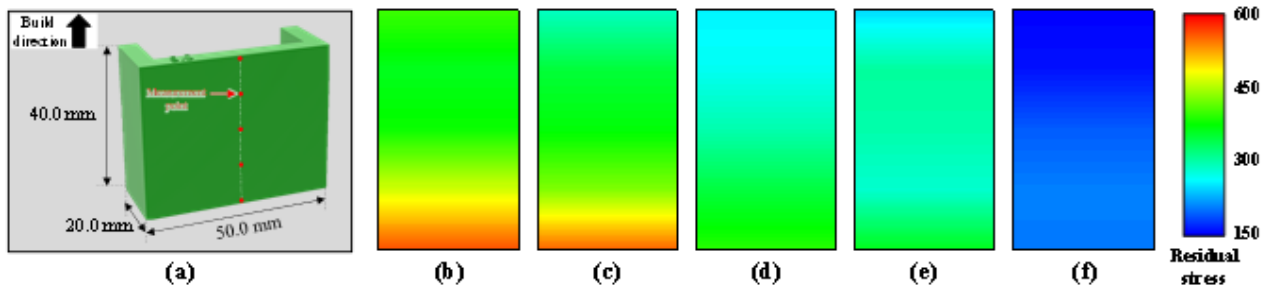


Fig. 3 (a) Schematic illustration showing XRD measurement points. (b-f) Residual stress distribution maps of (b) 2.5T, (c) 5T, (d) 7.5T, (e) 10T, and (f) 20T samples.

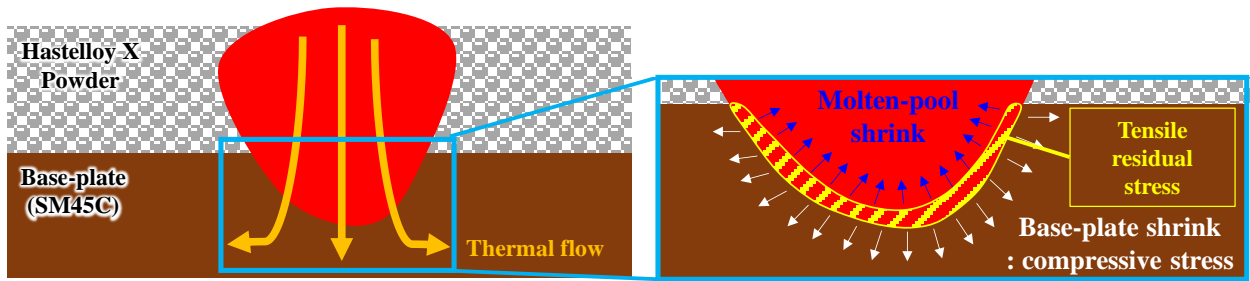


Fig. 4 Schematic images showing formation of tensile residual stress between sample and baseplate due to molten-pool solidification.

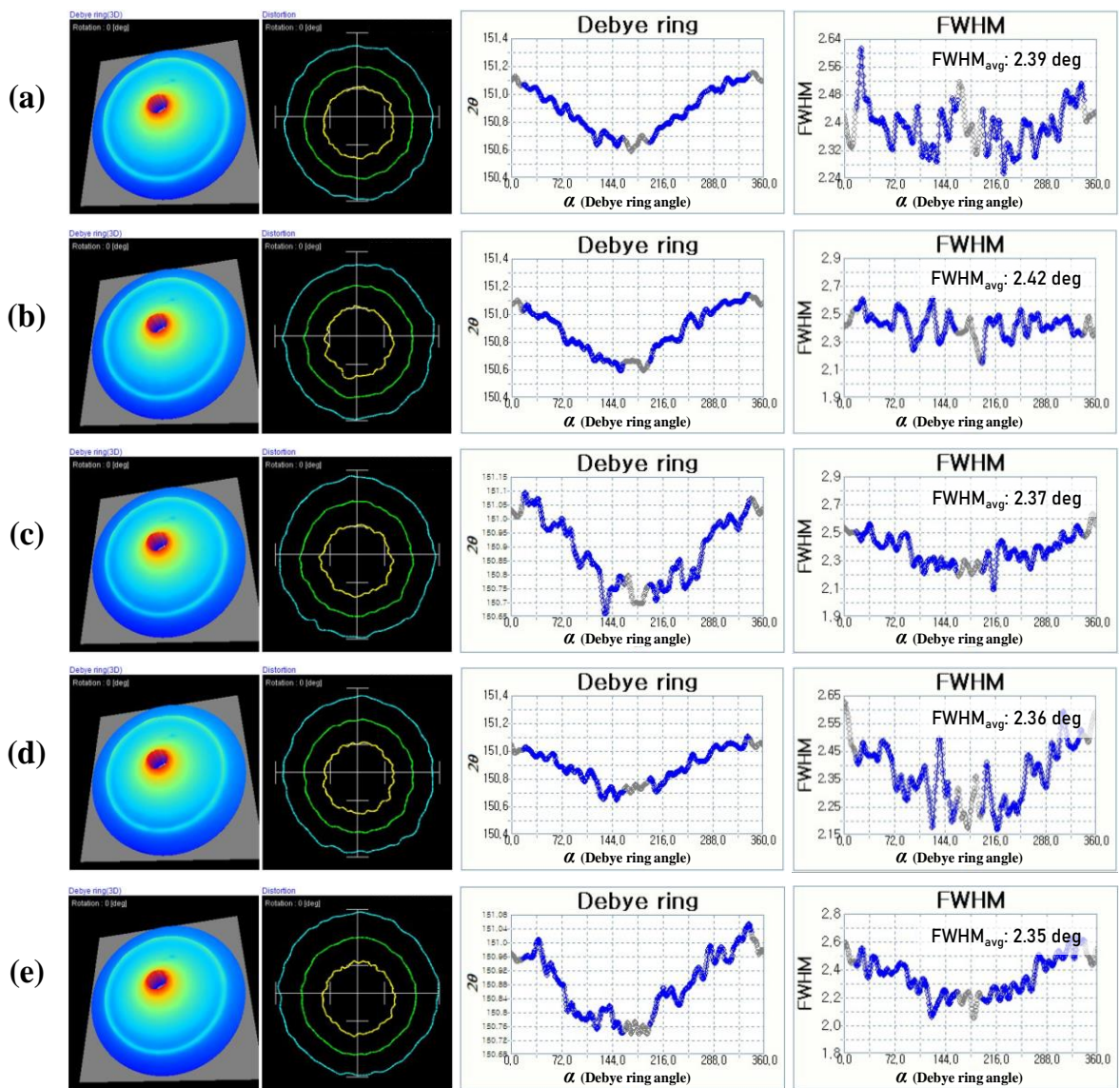


Fig. 5 3D Debye rings and distortion map, and Debye ring and FWHM distribution of (a) 2.5T, (b) 5T, (c) 7.5T, (d) 10T (e) 20T specimens.

오는 수많은 회절 X선이 입사 X선을 축으로 하여 원주형태로 방출되는 고리를 말한다. X선 회절기법을 이용한 잔류응력 측정은 무응력 시료에서의 데바이링을 기준으로, 측정 시료의 데바이링과의 각도 차이를 구해서 잔류응력을 산출하게 된다. 이러한 데바이링은 왜곡이 심할수록 결정립의 크기가 크고 균일하지 않다는 것을 의미하며 또한 특정 집합조직을 가지고 있다는 것을 의미한다 [14, 15]. Fig. 5에서 보이는 바와 같이 모든 시편의 데바이링은 유사하며 왜곡되지 않은 형태를 보인다. 이는 시편 두께와 무관하게 모든 시편이 균일한 크기의 등방형 결정립을 가지며 집합조직을 가지지 않는 것을 의미한다. FWHM은 회절 X선 피크 강도의 1/2 지점에서의 폭을 의미하며, 다음과 같은 Debye-Scherrer 식을 통해 구할 수 있다 [16-18].

$$\text{FWHM} = (K \cdot \lambda) / (L \cdot \cos\theta) \quad (1)$$

식(1)에서  $\lambda$ 는 회절에 사용된 X선의 파장(CrK  $\alpha$ : 2.29)이며,  $L$ 은 결정립 크기,  $\theta$ 는 피크 강도의 위치  $2\theta$ 의 1/2의 라디안 값,  $K$ 는 상수를 나타낸다. 따라서 FWHM은 결정립의 크기와 반비례 관계를 가지므로 FWHM 값을 통해 각 시편의 결정립 크기를 비교할 수 있다. FWHM은 잔류응력의 크기에도 영향을 받으며, 일반적으로 FWHM은 잔류응력의 크기와 반비례하는 경향을 보인다 [19, 20]. Fig. 5(b)에서와 같이 2.5T, 5T, 7.5T, 10T, 20T 시편의 FWHM 결과 값은 2.35-2.42 deg로 두께가 증가할수록 미세하게 감소하나 유사한 값을 보였다. 반면 잔류응력은 적층 시편의 두께가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 두께가 증가함에 따라 잔류응력의 감소와 결정립 크기의 증가가 상호작용함으로써 FWHM의 크기 차이가 보이지 않음을 유추할 수 있다.

### 3.2 서포트 구조에 따른 잔류응력 변화

복잡하고 정교한 형상의 부품을 제작할 수 있는 LPBF 공정은 홀, 오버행, 그리고 브릿지와 같이 기관과 부품사이의 지지대가 없는 적층 구조물에 ‘서포트(support)’라는 지지대 역할의 구조물을 적용하여 적층 중 파단의 위험성을 줄이고, 적층 소재의 형상자유도를 향상시킨다 [10]. 또한 기관과 적층 소재 사이의 지지대가 없는 구조면은 분말과 바로 맞닿게 되는데, 이때 분말은 입자 사이의 빈 공간으로

인해 열전도도가 적층 부품보다 크게 감소하므로 적층 중 부품 내부에 형성되는 열의 배출이 원활하지 않게 된다. 따라서 해당 부분에 잔존하는 높은 열이 부품의 열변형을 유도하고 표면에 분말이 일부 녹아 달라붙는 down skin을 유도하여 적층 소재의 조도 및 치수 정확성을 저하시킨다 [21, 22]. 따라서 서포트의 설계는 중요하며 각 서포트의 구조에 따른 특성을 파악하는 것이 필요하다.

Fig. 1b에서 왼쪽 첫번째 시편은 서포트가 적용되지 않은 경우이며, 두번째와 세번째 그리고 네번째는 각각 라인 서포트를 적용한 경우로, 해칭 간격이 좁은 Shd0.2과 상대적으로 해칭 간격이 넓은 Shd3.0, 그리고 Shd3.0에 서포트 옆면에 작은 구멍이 뚫려 있는 퍼포레이션(perforation) 구조가 적용된 Shd3.0P이다. 퍼포레이션 구조물은 서포트 제거 및 서포트 사이 남아 있게 되는 분말 회수를 용이하게 하는 역할을 한다. 마지막으로 시편 표면에 맞닿는 면적이 좁아 실제 공정에서 많이 활용되는 나뭇가지 모양의 tree 솔리드 서포트를 준비하여 각각의 서포트에 따른 적층 소재의 잔류응력을 측정하여 Fig. 6에 나타내었다.

서포트의 형태를 라인과 솔리드 타입으로 나누어 비교해 보았을 때, 라인 타입의 서포트가 적층 시편의 잔류응력을 감소시키는 데에 더 효율적인 구조체임을 알 수 있다 (Fig. 6). 라인 서포트 중에서도 해칭 간격에 따라 잔류응력이 상이하였다. 해칭 간

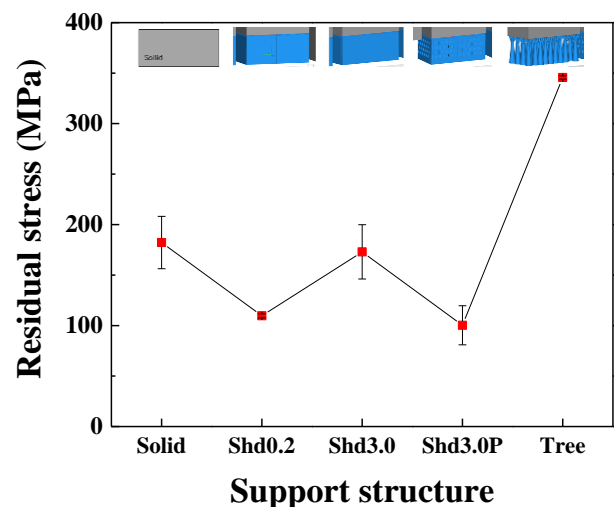


Fig. 6 Residual stresses of LPBF samples with different support structures.

격이 좁은 Shd0.2 시편이 상대적으로 넓은 해칭 간격을 가지는 Shd3.0 보다 낮은 잔류응력을 가지는 것을 확인할 수 있다. 해당 결과들은 서포트와 시편 사이의 맞닿는 면적이 좁을수록 시편 내 높은 잔류응력이 존재하는 것으로 볼 수 있다. 서포트와 시편이 접합되는 면적이 넓을수록 시편 내부에 형성된 열이 기관으로 빠져나가기 용이하므로 시편 내부의 온도구배가 감소하여 잔류응력 크기가 감소하게 된다. 하지만 Shd3.0과 tree 서포트의 경우에는 서포트와 시편 사이의 맞닿는 면적이 Shd0.2 보다 훨씬 좁기 때문에 시편과 아래층의 용융되지 않은 분말과의 접촉 면적이 증가하여 열의 배출이 원활히 진행되지 못하고 소재 내 온도구배가 증가하여 높은 잔류응력이 형성된 것으로 판단된다. 하지만, 예외적으로 Shd3.0P의 경우에는 서포트와 시편 사이의 접합 면적이 상대적으로 좁은 경우임에도 불구하고 5개의 시편 결과 중 가장 낮은 잔류응력을 나타내었다. 해당 원인은 본 실험을 통해서 밝혀지지 않았으며, 추가적인 실험을 통해 이에 대한 원인 해석이 필요하다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 LPBF 적층 공정을 이용하여 다양한 형태의 Hastelloy X 시편을 제조하여 시편의 두께와 서포트 구조에 따른 적층 소재의 잔류응력 변화에 대하여 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) LPBF 공정에서 발생하는 인장 잔류응력은 적층 소재의 두께가 얇아질수록 증가하며 시편 하부와 상부의 잔류응력 편차가 커져 적층 중 시편 변형의 위험이 높아진다.

(2) 적층 소재는 기관 소재 사이 영역에서 가장 높은 잔류응력을 나타낸다. 이는 두 소재의 서로 다른 열 전도도로 인해 야기되는 응고 속도 차이로 인한 것으로, 이러한 국소 부위의 높은 잔류응력으로 인한 시편의 박리 현상이 발생할 수 있다.

(3) 데바이링 및 FWHM 분석 결과, 두께 변화에 따른 적층 소재의 미세조직적 차이는 미미하며 모든 시편에서 집합조직은 형성되지 않았다.

(4) 시편과 서포트 사이의 접촉면적이 클수록 공정 중 발생하는 열의 방출이 더 잘 되어 시편의 잔류응력은 낮아진다. 또한, 외각 서포트에 퍼포레이션 구조 적용 시 잔류응력이 감소한다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (No. 20206700000010)

#### REFERENCES

- [1] X. Wu, A review of laser fabrication of metallic engineering components and of materials, 2007, Mater. Sci. Technol., Vol. 23, pp. 631–640.  
<https://doi.org/10.1179/174328407X179593>
- [2] A.Salmi, E. Atzeni, L. Iuliano, M. Galati, 2017, Experimental analysis of residual stresses on AISi10Mg parts produced by means of Selective Laser Melting (SLM), Procedia CIRP, Vol. 62, pp. 458–463.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.030>
- [3] S.B. Lee, J. W. Kim, J.H. Choe, S.W. Kim, J.K. Hong, Y.S. Choi, 2021, Understanding crack formation mechanisms of Ti–48Al–2Cr–2Nb single tracks during laser powder bed fusion, Met. Mater. Int., Vol. 27, pp. 78–91.  
<https://doi.org/10.1007/s12540-020-00770-1>
- [4] H. Ali, H. Ghadbeigi, K. Mumtaz, 2018, Effect of scanning strategies on residual stress and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 712, pp. 175–187.  
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.103>
- [5] I. Serrano-Munoz, A. Ulbricht, T. Fritsch, T. Mishurova, A. Kromm, M. Hofmann, R.C. Wimpory, A. Evans, G. Bruno, 2021, Scanning manufacturing parameters determining the residual stress state in LPBF IN718 small parts, Adv. Eng. Mater., Vol. 23, 2100158.  
<https://doi.org/10.1002/adem.202100158>
- [6] X. Lua, X. Lin, M. Chiumenti, M. Cervera, Y. Hu, X. Jia, L. Ma, H. Yang, W. Huang, 2019, Residual stress and distortion of rectangular and S-shaped Ti-6Al-4V parts by directed energy deposition: modelling and experimental calibration, Addit. Manuf., Vol. 26, pp. 166–179.  
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.02.001>
- [7] R. Ghiaasiaan, M. Muhammad, P. R. Gradl, S. Shao, N. Shamsaei, 2021, Superior tensile properties of

- Hastelloy X enabled by additive manufacturing, *Mater. Res. Lett.*, Vol. 9, pp. 308-314.  
<https://doi.org/10.1080/21663831.2021.1911870>
- [8] G. Totten, M. Howes, T. Inoue, 2002, *Handbook of residual stress and deformation of steel*, ASM International, pp. 331-423.
- [9] A. Chakraborty, R. Tangestani, R. Batmaz, W. Muhammad, P. Plamondon, A. Wessman, L. Yuan, É. Martin, 2022, In-process failure analysis of thin-wall structures made by laser powder bed fusion additive manufacturing, *J. Mater. Sci. Technol.*, Vol. 98, pp. 233-243.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.05.017>
- [10] A. Salmi, F. Calignano, M. Galati, E. Atzeni, 2018, An integrated design methodology for components produced by laser powder bed fusion (L-PBF) process, *Virtual Phys. Prototyp.*, Vol. 13, pp. 191-202.  
<https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1442229>
- [11] J.H. Lee, J.H. Hwang, D.H. Bae, 2018, Welding residual stress analysis and fatigue strength assessment at elevated temperature for multi-pass dissimilar material weld between alloy 617 and P92 steel, *Met. Mater. Int.*, Vol. 24, pp. 877-885.  
<https://doi.org/10.1007/s12540-018-0086-7>
- [12] J.R. Davis, 1996, *ASM specialty handbook: Carbon and alloy steels*, ASM International
- [13] Haynes-International, inc., 1997, *Hastelloy® X alloy*, pp. 10.
- [14] M.D. Barath Kumar, M. Manikandan, 2022, Assessment of process, parameters, residual stress mitigation, post treatments and finite element analysis simulations of wire arc additive manufacturing technique, *Met. Mater. Int.*, Vol. 24, pp. 54-111.  
<https://doi.org/10.1007/s12540-021-01015-5>
- [15] J.S. Wang, C.C. Hsieh, H.H. Lai, C.W. Kuo, P.T.Y. Wu, W. Wu, 2015, The relationships between residual stress relaxation and texture development in AZ31 Mg alloys via the vibratory stress relief technique, *Mater. Charact.*, Vol. 99, pp. 248-253.  
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.09.019>
- [16] J.I. Goldstein, C.E. Lyman, D.E. Newbury, E. Lifshin, P. Echlin, L. Sawyer, D.C. Joy, J.R. Michael, 1992, *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*, Springer New York, pp. 312-316.
- [17] E. Maleki, O. Unal, K.R. Kashyzadeh, 2019, Efficiency analysis of shot peening parameters on variations of hardness, grain size and residual stress via taguchi approach, *Met. Mater. Int.*, Vol. 25, pp. 1436-1447.  
<https://doi.org/10.1007/s12540-019-00290-7>
- [18] E. Maleki, O. Unal, M. Guagliano, S. Bagherifard, 2022, Analysing the fatigue behaviour and residual stress relaxation of gradient nano-structured 316L steel subjected to the shot peening via deep learning approach, *Met. Mater. Int.*, Vol. 28, pp. 112-131.  
<https://doi.org/10.1007/s12540-021-00995-8>
- [19] W. Yutanorm, P. Juijerm, 2016, Diffusion enhancement of low-temperature pack aluminizing on austenitic stainless steel AISI 304 by deep rolling process, *Kovove Mater.*, Vol. 54, pp. 227-232.  
[https://doi.org/10.4149/km\\_2016\\_4\\_227](https://doi.org/10.4149/km_2016_4_227)
- [20] M. Chen, S. Xing, H. Liu, C. Jiang, K. Zhan, V. Ji, 2020, Determination of surface mechanical property and residual stress stability for shot-peened SAF2507 duplex stainless steel by in situ X-ray diffraction stress analysis, *J. Mater. Res. Technol.*, Vol. 9, pp. 7466-7654.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.028>
- [21] T. Yang, T. Liu, W. Liao, H. Wei, C. Zhang, X. Chen, K. Zhang, 2021, Effect of processing parameters on overhanging surface roughness during laser powder bed fusion of AlSi10Mg, *J. Manuf. Process*, Vol. 61, pp. 440-453.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.11.030>
- [22] Y. Tian, D. Tomus, P. Rometsch, X. Wu, 2017, Influences of processing parameters on surface roughness of Hastelloy X produced by selective laser melting, *Addit. Manuf.*, Vol. 13, pp. 103-112.  
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.10.010>