

# Stiffness analysis according to support design variables in the metal additive manufacturing process

In Yong Moon and Yeonghwan Song<sup>†</sup>

Korea Institute of Industrial Technology, Gangneung 25440, Korea

(Received December 6, 2023)

(Revised December 14, 2023)

(Accepted December 14, 2023)

**Abstract** This paper delves into the crucial realm of support structures in metal additive manufacturing (AM) processes and their direct impact on the stiffness of printed components. With the continuous evolution of AM technologies, optimizing support structures has become imperative to enhance the overall quality and performance of manufactured metal parts. Therefore, in this study, tensile specimens were manufactured using various representative support design variables such as support type, spacing, and penetration depth, and the differences in displacement-load curve were analyzed through tensile test. Using additively manufactured support shaped tensile specimen, the paper presents a comprehensive examination of the effect of support parameters on their stiffness. The findings contribute to advancing the understanding how to design supports to suppress thermal deformation of metal parts during AM process, thereby paving the way for enhanced design freedom and functional performance in the ever-expanding field of AM.

**Key words** Additive manufacturing (AM), Powder bed fusion (PBF), Support design, Tensile test

## 금속 적층제조에서의 서포트 설계변수에 따른 강성 분석

문인용, 송영환<sup>†</sup>

한국생산기술연구원, 강릉, 25440

(2023년 12월 6일 접수)

(2023년 12월 14일 심사완료)

(2023년 12월 14일 게재확정)

**요약** 적층제조 기술의 지속적 발전 및 적용 산업의 확대에 따라 제조된 금속 부품의 전반적인 품질 및 성능을 향상시키기 위한 서포트 최적 설계 수행은 필수적이 되었다. 따라서 본 논문은 금속 적층제조 공정에서의 서포트 설계변수가 서포트 강성에 미치는 영향을 분석하였다. 대표적인 서포트 설계변수인 서포트 종류, 간격, 침투 깊이를 다양하게 적용한 인장시편을 적층제조를 통해 제작하고, 이에 대한 인장시험을 통해 변위-하중 곡선의 차이를 분석하였다. 그 결과를 바탕으로 서포트 설계변수가 지지 강성에 미치는 영향에 대한 포괄적인 분석을 제시하였다. 이를 통해 적층제조 공정 중 금속 부품의 열 변형을 억제하기 위한 서포트 최적설계 수행을 효과적으로 할 수 있을 것이라 기대된다.

### 1. 서론

적층제조(additive manufacturing) 기술은 지난 10년간 기계 및 재료 공학분야에서의 주요 연구 주제로 많은 관심을 받아왔다[1]. 적층제조 기술이 많은 관심을 받게 된 이유 중 하나는 전통적인 제조 공법으로는 제작할 수 없는 복잡한 형상을 3차원 도면으로부터 비교적 쉽게 제작할 수 있다는 장점 때문이다. 특히 구조의 복잡성은

층의 너비로 정해지는 정밀도에만 제한되며 위치상 제약이 없다는 특징을 갖는다[2]. 또한 제조 공정 중 디자인을 언제든지 수정할 수 있어 디자인 오류의 즉각적 수정이 가능하다는 장점이 있으며, 이러한 장점에 의해 최근 자동차 산업, 항공우주, 국방, 그리고 의료분야에까지 적층제조 공법에 대한 적용이 활발히 이루어지고 있다[3,4].

금속 분말을 선택적으로 용융(melting)시켜 부품을 제조하는 방식 중 하나인 Powder bed fusion(PBF)의 경우, 금속 용융에 의한 높은 열 발생 및 냉각으로 인해 부품의 열변형(thermal deformation)이 발생되며 이에 따라 적층 대상품의 치수 정밀도 하락이 발생할 수 있다[2].

<sup>†</sup>Corresponding author  
E-mail: yhsong0105@kitech.re.kr

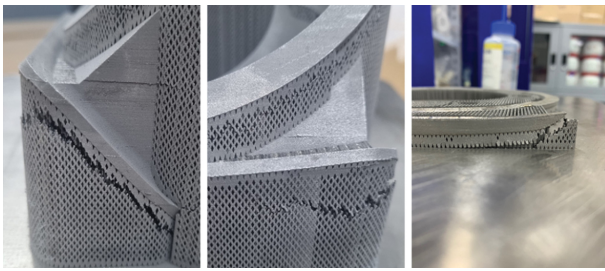


Fig. 1. Fracture of support during PBF type metal additive manufacturing.

따라서 적층공정으로 제조된 금속 부품의 전반적인 품질 향상 및 성능 확보에 대한 요구수준이 높아짐에 따라 열변형에 의한 치수 정밀도 하락을 개선하고자 하는 노력이 지속적으로 이루어지고 있다.

열변형에 의한 치수 정밀도 하락을 개선하기 위한 방법으로는 열변형 보상설계, 파트의 구조 최적화, 파트 오리엔테이션(part orientation) 최적화, 그리고 서포트 최적 설계 등의 방안이 제시되고 있다. 이중 서포트 최적 설계의 경우 열 변형(warping)이 심하게 발생할 부위 및 레이저에 의해 가열된 부위의 열전달이 효과적으로 이루어지지 않는 부위에 서포트를 적용하여 제품의 건전성을 향상시키는 방안이다[5-7]. 하지만 성형하고자 하는 파트의 크기가 증가함에 따라 열변형의 정도 또한 증가되며 이에 따라 Fig. 1과 같이 서포트 자체의 파괴에 의해 공정 중단 및 치수정밀도 하락이 발생하기도 한다. 따라서 서포트 최적설계는 파트의 위치별 서포트 적용 유무 뿐만 아니라 서포트 자체가 적절한 강성을 갖을 수 있도록 서포트 설계변수 최적화를 수행해야 함을 알 수 있다[8-10].

따라서 본 논문에서는 서포트 설계변수가 지지 강성에 미치는 영향에 대한 포괄적인 분석을 수행하였다. 타이타늄 합금과 순수 타이타늄 분말을 적용하여 설계변수에 따른 서포트 인장시편을 제작하였으며, 설계변수로는 서포트 타입, 간격(spacing), 침투 깊이(intrusion), 봉 지름(rod diameter)을 선정하였다. 인장시험을 통해 변위-하중 곡선을 측정하였으며, 파단 후의 인장시편 형상을 분석하여 설계변수별 파단 특성을 분석하였다. 그 결과 서포트 설계변수 및 재료에 따라 파단 특성의 차이 및 강성의 차이가 발생함을 확인하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1. 설계변수에 따른 서포트 설계 및 제작

인장시험을 수행할 서포트의 종류로는 서포트 설계 시 가장 많이 사용되는 블록 타입과 봉 타입으로 선정하였다. 일반적으로 블록 타입은 강한 지지력을 갖는 반면 적층 제조 완료 후 후처리시 서포트 제거가 어렵다는 특징을 갖고 있으며, 봉 타입은 후처리를 통한 서포트 제거가 쉽게 되지만 지지력이 약하다는 특징을 갖는다.

Figure 2는 각 종류별 서포트 형상 및 설계변수에 대한 설명을 나타내고 있다. 서포트 설계변수로는 블록 타입에는 침투 깊이와 간격을, 봉 타입에는 침투 깊이와 봉 지름을 적용하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 침투 깊이는 서포트와 파트의 경계면에서 두 모델이 중첩되게 적층 되는 양을 의미하며, 해당 변수 값을 통해 서포트와 파트가 강하게 결합되게 하여 열변형에 의한 파트의 뒤틀림 시 서포트가 파트로부터 분리되는 현상을 방지할

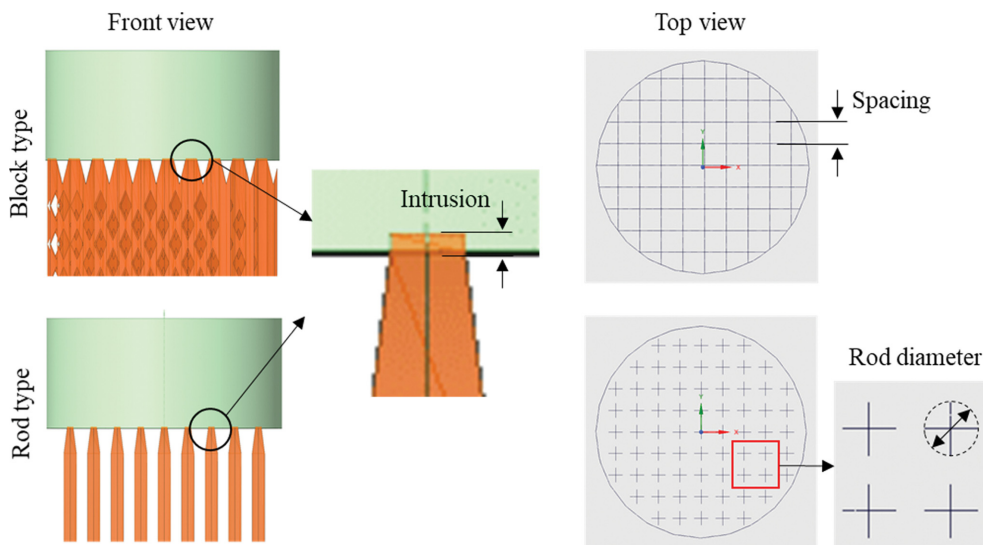


Fig. 2. Schematic presenting design variable for support.

Table 1  
Parameter set for block and rod support design

Support type	Parameter	Value
Block (Ti-6Al-4V, CPTi)	Intrusion	0.1, 0.3, 0.5 mm
	Spacing	0.5, 1.0, 1.5 mm
Rod (Ti-6Al-4V, CPTi)	Intrusion	0.1, 0.3, 0.5 mm
	Rod diameter	0.5, 0.8, 1.0 mm

Table 2  
Process parameters according to materials

	Lasertec 30	SLM 280
Powder	Ti-6Al-4V Grade 5	CPTi Grade 4
Power	279 W	350 W
Scan speed	1,117 mm/s	1,400 mm/s
Layer thickness	0.05 mm	0.03 mm
Hatch space	0.12 mm	0.12 mm

수 있다. 블록 타입의 설계변수인 간격은 격자패턴의 블록 타입 서포트의 형상에서의 피치를 의미하며, 간격이 작을수록 더 높은 서포트 강성을 얻을 수 있다. 봉 타입의 설계변수인 봉 지름은 십자 모양의 하나의 봉의 등가 지름을 의미하며, 봉 지름이 커질수록 강성이 높아질 거라 예상할 수 있다.

각각의 서포트 종류별 설계변수 적용안을 Table 1에 정리하여 나타내었다. 타이타늄 합금 소재와 순수 타이타늄 소재 두 종에 대한 실험을 수행하였으며 침투 깊이, 간격, 봉 지름에 해당하는 변수를 각각 3가지씩 설정하여 설계변수와 재료의 차이가 강성에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

타이타늄 합금과 순수 타이타늄 소재에 대한 적층제조에는 Lasertec(DMG MORI, Bielefeld, Germany)과 SLM 280(SLM Solutions, GmbH, Germany)이 각각 사용되었으며 상세 공정조건은 Table 2와 같다.

2.2. 실험 방법

Figure 3은 서포트 형상을 적용한 인장시편 형상과 이에 대한 인장시험 방안을 나타내고 있다. 인장시편은 길이, 폭, 두께를 각각 145, 22, 5 mm로 설계하였으며, 상, 하부에는 판상형 구간을 두어 인장시험시 그리퍼에 장착될 수 있도록 하였다. 따라서 서포트 형상이 존재하는 구간은 75 mm로 설계되었다.

인장시험에는 최대 10 ton까지 측정 가능한 로드셀이 장착된 만능시험기가 사용되었으며, 그림과 같이 인장시편의 상, 하단의 판상형 구간을 그리퍼로 고정된 뒤 잡아당기는 방식으로 시험을 진행하였다. 인장 속도는 모든 시험편에서 분당 3 mm로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Ti-6Al-4V 소재에 대한 인장시험 결과

Figure 4는 타이타늄 합금 블록 타입에 대한 서포트 설계변수별 인장시험 후 시편의 파단 형상을 나타내고 있다. 침투 깊이 0.1 mm의 경우, 서포트 파단은 상부 판상부와의 경계면에서 주로 발생함을 확인할 수 있으며 그 외의 침투 깊이 조건에서는 서포트 구간에서 파단이 발생하였다. 따라서 침투 깊이의 증가가 서포트와 파트 경계면에서의 파단을 방지할 수 있음을 확인할 수 있다.

서포트와 파트 경계면에서의 파단 현상은 경계면의 좌우 외곽부위에서 주로 발생하며, 이는 상부 판상부 적층시 열변형에 의해 좌우가 위로 휘어짐으로써 서포트 중첩 적층이 상대적으로 미미하게 적용되었기 때문이라 판단된다.

Figure 5는 타이타늄 합금 봉 타입에 대한 서포트 설

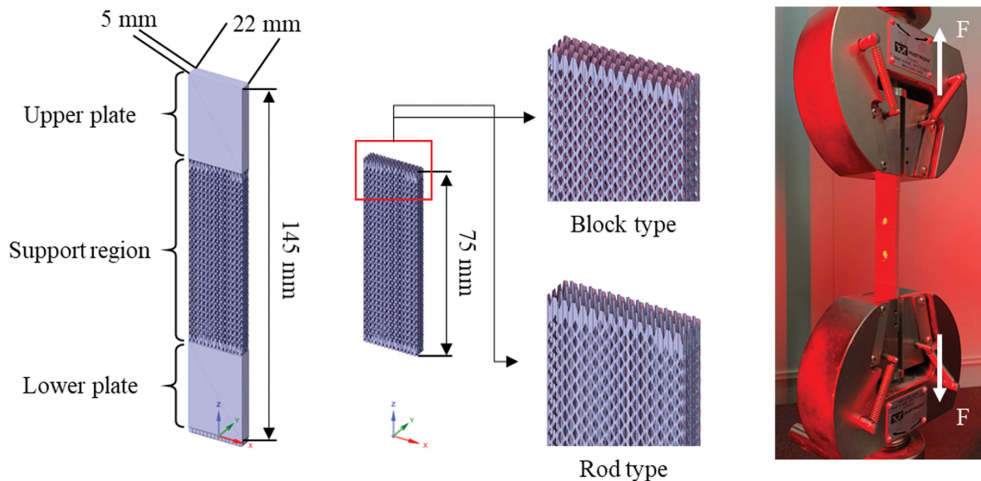


Fig. 3. Support shaped tensile specimen for support strength measurement.

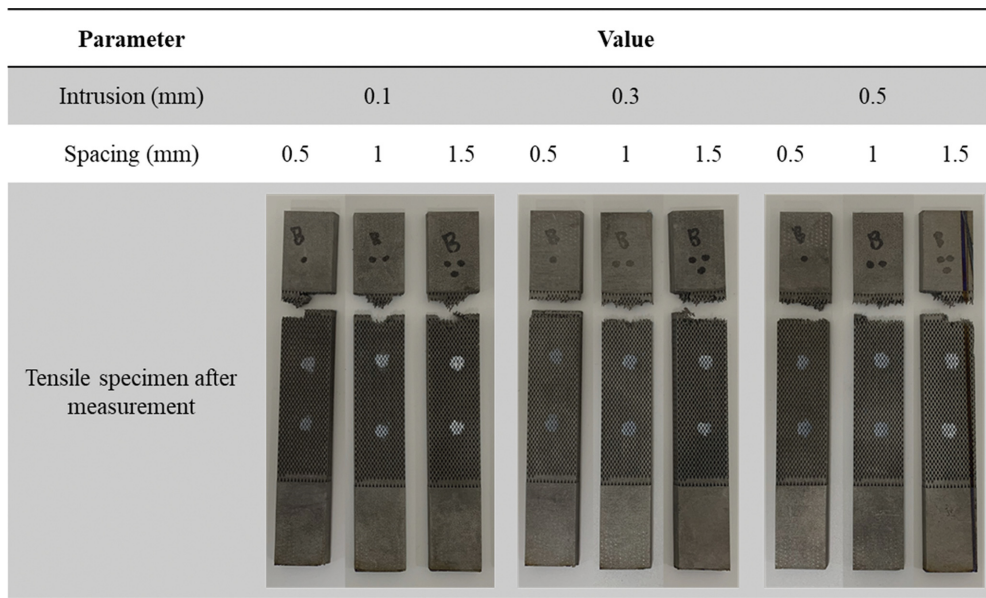


Fig. 4. Block type Ti-6Al-4V tensile specimen after measurement.

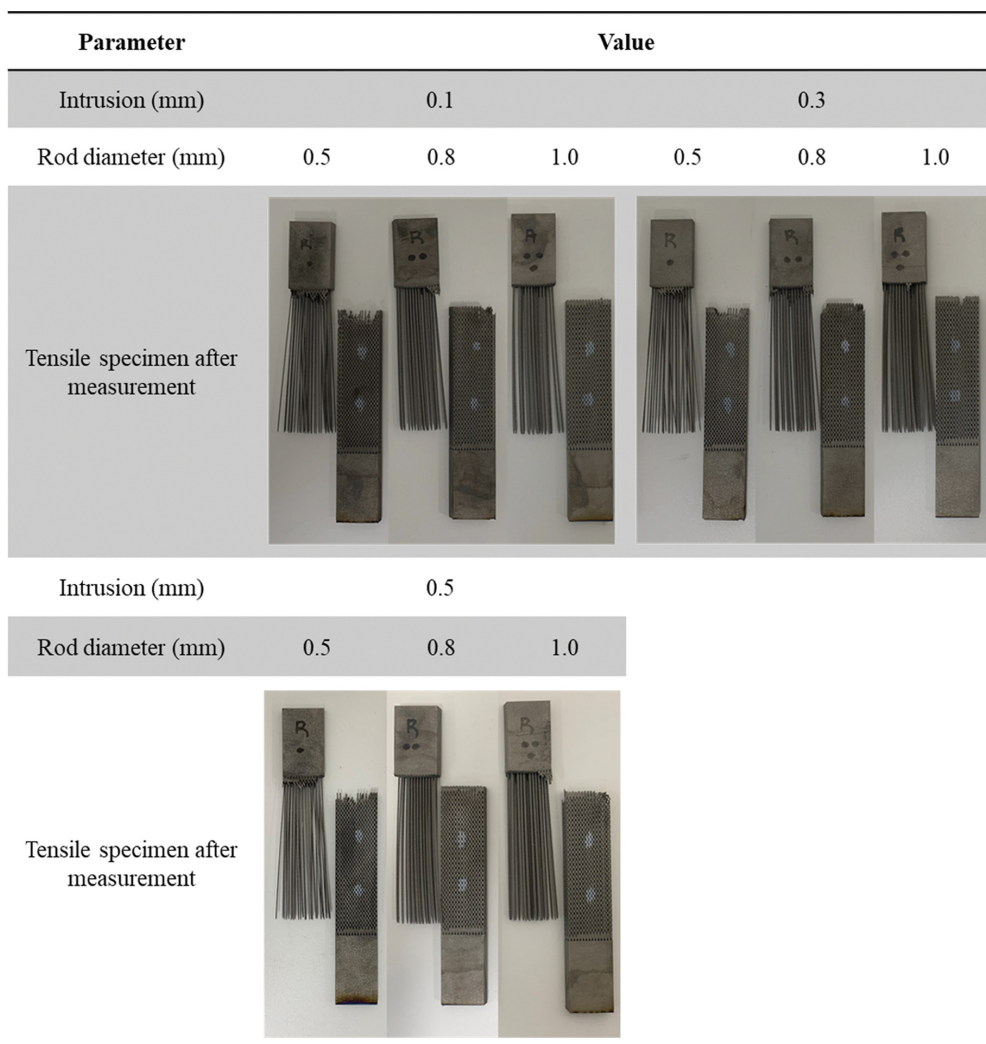


Fig. 5. Rod type Ti-6Al-4V tensile specimen after measurement.

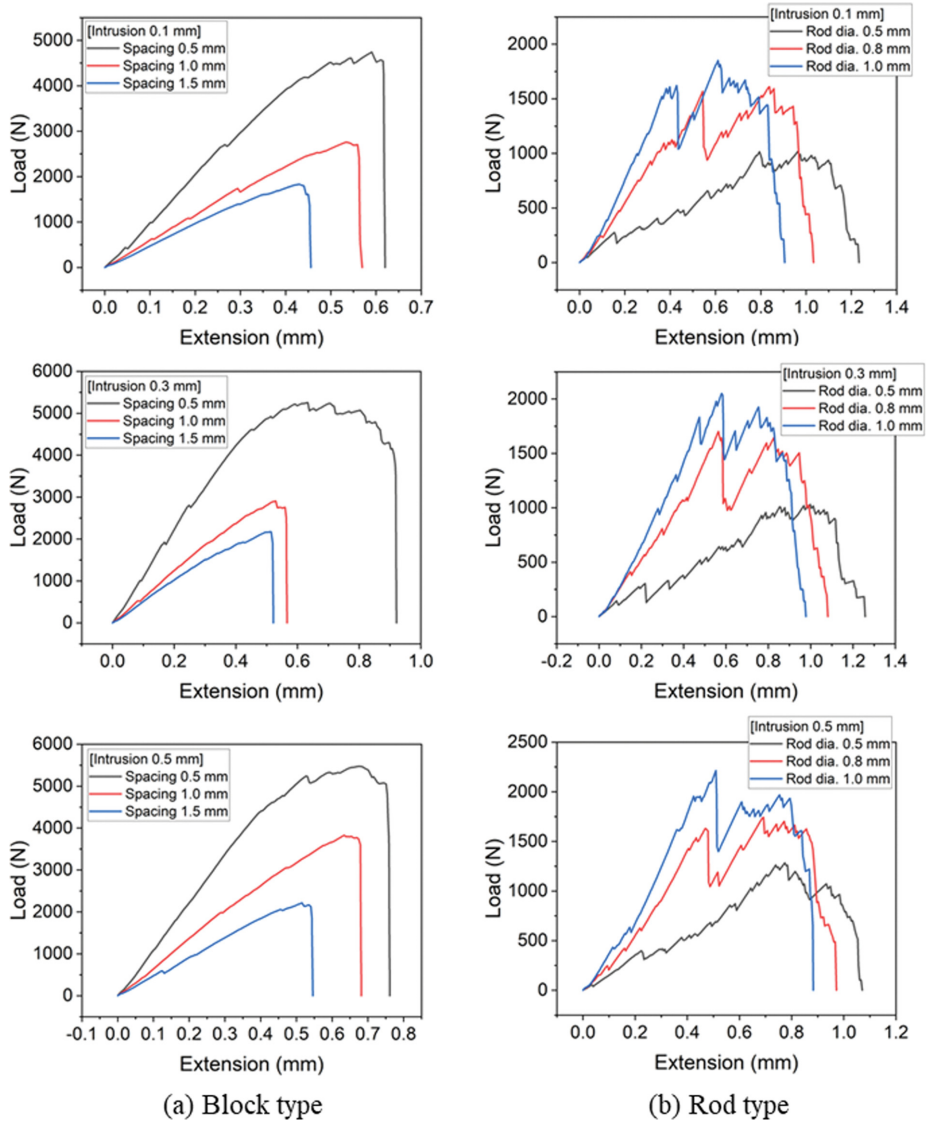


Fig. 6. Result of tensile test measured by Ti-6Al-4V tensile specimen (a) block type, (b) rod type.

계변수별 인장시험 후 시편의 파단 형상을 나타내고 있다. 사진에서 알 수 있듯이, 모든 설계변수 조건에서 서포트와 파트부의 경계면에서 파단이 발생되었으며, 기타 특이점은 관찰되지 않았다.

타이타늄 합금 소재로 제작된 설계변수별 인장시험의 변위-하중 그래프를 Fig. 6에 나타내었다. 블록 타입의 경우(Fig. 6(a)), 간격이 증가함에 따라 인장거리의 증가가 뚜렷이 관찰되었으며, 이에 따른 최대 하중 또한 큰 폭으로 증가함을 확인할 수 있다. 반면 침투 깊이의 경우, 해당 값의 증가에 따라 인장 거리 및 최대 하중이 미미하게 증가됨을 확인할 수 있으며, 이에 따라 침투 깊이의 경우 서포트와 파트 사이의 파단을 방지하는 것에는 효과가 있지만 서포트 강성 증대 효과는 미미한 것으로 판단된다.

타이타늄 합금 블록 타입에서의 인장하중 최대값은 침

투 깊이 0.5 mm, 간격 0.5 mm에서 약 5470 N으로 측정되었으며, 최소값은 침투 깊이 0.1 mm, 간격 1.5 mm에서 약 1830 N으로 측정되었다.

봉 타입의 경우(Fig. 6(b)), 모든 침투 깊이에서 봉 지름의 증가에 따라 최대 하중은 증가하지만 인장 거리는 감소하는 경향이 관찰되었다. 특히 봉 타입의 그래프는 블록 타입과는 확연히 다른 양상의 변위-하중 곡선의 형태를 나타냄을 알 수 있다. 블록 타입의 경우 변위가 증가됨에 따라 하중이 서서히 증가하다 파단 발생 시점에서 급격한 하중 감소가 발생하는 반면, 봉 타입의 경우 불안정한 곡선을 보임을 알 수 있다. 이는 봉 타입 서포트의 경우 각각의 봉 형상이 서로 연결되지 않은 형태로 존재하기 때문에 서포트 파단 또한 각각의 봉에서 순차적으로 발생되기 때문이라 판단된다. 이러한 개별로 존재하는 특성은 봉 지름의 증가가 인장하중의 증가를 야기

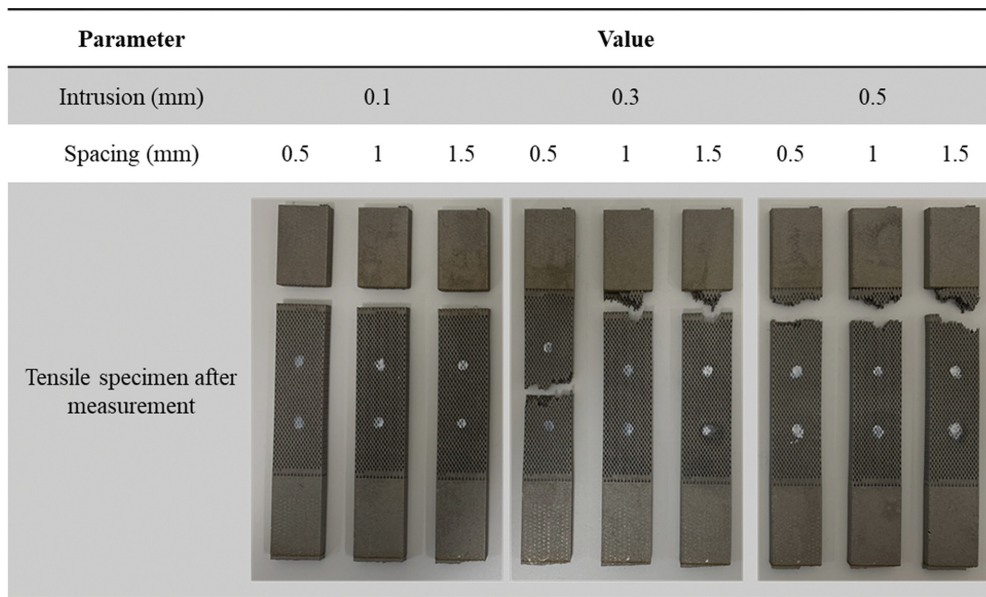


Fig. 7. Block type CPTi tensile specimen after measurement.

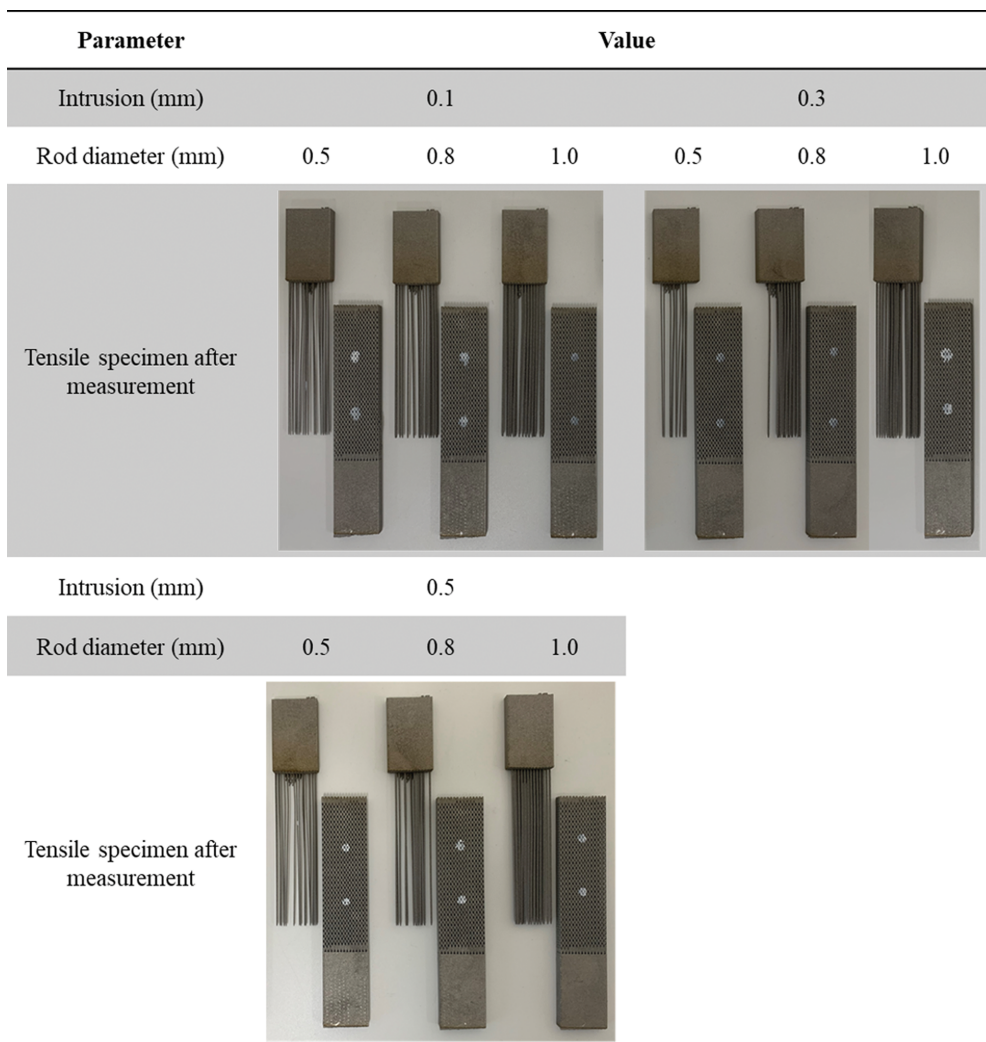


Fig. 8. Rod type CPTi tensile specimen after measurement.

하지만 인장거리는 오히려 작아지는 원인이라 판단된다.

타이타늄 합금 봉 타입에서의 인장하중 최대값은 침투 깊이가 0.5 mm, 봉 지름 1.0 mm에서 약 2200 N으로 측정되었으며, 최소값은 침투 깊이가 0.1 mm, 봉 지름 0.5 mm에서 약 1020 N으로 측정되었다.

3.2. 순수 타이타늄 소재에 대한 인장시험 결과

Figure 7은 순수 타이타늄 블록 타입에 대한 서포트 설계변수별 인장시험 후 시편의 파단 형상을 나타내고 있다. 사진에서 알 수 있듯이, 침투 깊이가 0.1 mm에서의 서포트 파단은 타이타늄 합금 블록 타입 결과와 유사하게 상부 판상부와외의 경계면에서 발생하였다. 이 외의 침투 깊이가 조건에서는 서포트 구간에서의 파단이 발생되었음을 알 수 있으며, 상부 판상부의 좌우 외곽에서의 파

단 또한 관찰되었다. 이 또한 상부 판상부 적층시 열변형에 의해 좌우가 위쪽으로 변형됨에 따라 서포트와 파트의 중첩 적층 정도가 약화되었기 때문이라 판단된다. 하지만 순수 타이타늄 소재의 경우 타이타늄 합금에 비해 열변형이 심하지 않기 때문에 좌우 경계부 파단 특성은 상대적으로 적게 관측되었다.

봉 타입(Fig. 8)의 경우 또한 타이타늄 합금 소재와 동일하게, 모든 설계변수 조건에서 서포트와 파트 경계면에서 파단이 발생하였으며, 기타 특이점은 관찰되지 않았다.

순수 타이타늄 소재로 제작된 설계변수별 인장시험의 변위-하중 그래프를 Fig. 9에 나타내었다. 블록 타입의 경우(Fig. 9(a)), 간격이 증가함에 따른 인장거리의 증가 및 최대 하중의 증가 경향을 보였으며 반면 침투 깊이는 인장거리 및 최대 하중에 큰 영향을 미치지 않았다. 따

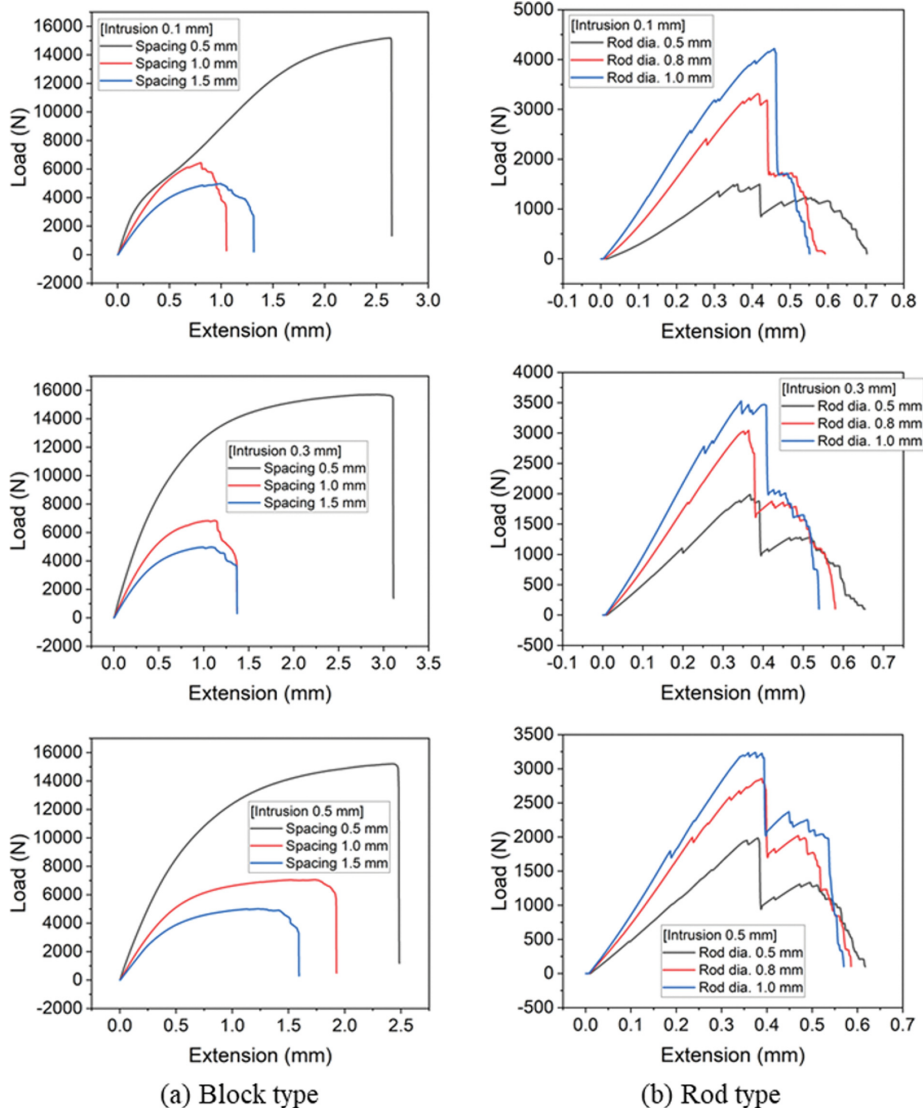


Fig. 9. Result of tensile test measured by CPTi tensile specimen (a) block type, (b) rod type.

라서 타이타늄 합금 소재의 경우와 같이 침투 깊이의 경우 서포트와 파트 사이의 파단을 방지하는 것에는 효과가 있지만 서포트 강성 증대 효과는 미미한 것으로 판단된다.

순수 타이타늄 블록 타입에서의 인장하중 최대값은 침투 깊이 0.5 mm, 간격 0.5 mm에서 약 15200 N으로 측정되었으며, 최소값은 침투 깊이 0.1 mm, 간격 1.5 mm에서 약 4940 N으로 측정되었다. 두 값은 타이타늄 합금 블록 타입의 하중(최대 5470 N, 최소 1830 N)에 비해 큰 값으로 상대적으로 열변형이 많은 타이타늄 합금의 경우 상부 판상부의 심한 열변형에 의한 서포트와 파트간 중첩 적층이 불안정하게 적용되었기 때문이라 판단된다.

봉 타입의 경우(Fig. 9(b)), 타이타늄 합금 봉 타입과 동일하게 모든 침투 깊이에서 봉 지름의 증가에 따라 최대 하중은 증가하지만 인장 거리는 감소하는 경향이 관찰되었으며 불안정한 변위-하중 곡선을 보였다. 타이타늄 합금 봉 타입에서의 인장하중 최대값은 침투 깊이 0.5 mm, 봉 지름 1.0 mm에서 약 3230 N으로 측정되었으며, 최소값은 침투 깊이 0.1 mm, 봉 지름 0.5 mm에서 약 1500 N으로 측정되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 금속 적층제조에서 빈번히 사용되는 블록 타입과 봉 타입 서포트의 설계변수에 대한 실험적 분석을 수행하였다. 블록 타입은 강한 지지력을 제공하지만 후처리에서 서포트 제거가 어렵고, 봉 타입은 쉽게 제거할 수 있지만 지지력이 낮은 특성을 갖는다. 따라서 타이타늄 합금과 순수 타이타늄 두 재료에 대해 서포트 설계에 있어 다양한 설계변수를 설정하여 강성에 미치는 영향을 분석하였다.

그 결과, 블록 타입의 경우 간격(spacing)이 증가함에 따라 인장거리와 최대 하중이 증가하는 경향을 보였다. 반면에 봉 타입은 봉 지름(rod diameter)의 증가에 따라 최대 하중이 증가하지만 인장 거리는 감소하는 경향을 나타냈다. 블록 타입과 봉 타입 간의 서포트 파단 특성은 서로 다르게 나타났으며, 봉 타입의 경우에는 불안정한 곡선 형태의 변위-하중 곡선을 보였다.

또한, 서포트 설계변수를 적용한 인장시험에서는 침투 깊이(intrusion)가 서포트와 파트 경계면에서의 파단을 방지하는 효과가 있었으며, 서포트와 파트 중첩 정도는 열변형에 의한 영향이 크음을 확인할 수 있었다. 타이타늄 합금과 순수 타이타늄의 경우 열변형 정도에 따라 파단 특성이 상이하게 나타났으며, 각 재료에 따른 최대 하중 값도 차이를 보였다.

종합적으로, 서포트 설계변수는 금속 적층제조 과정에서 서포트의 강성 및 파단 특성에 영향을 미치며, 이러한 결과는 서포트 설계 최적화 및 부품 품질 향상에 기여할 수 있을 것이라 판단된다.

#### 감사의 글

본 논문은 한국생산기술연구원 자체연구 무용접 일체형 초전도 고주파 공동 제조를 위한 요소 기술 개발(과제번호 UR230011)의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다.

#### References

- [1] J. Smith, W. Xiong, W. Yan, S. Lin, P. Cheng, O.L. Kafka and W.K. Liu, "Linking process, structure, property, and performance for metal-based additive manufacturing: computational approaches with experimental support", *Comput. Mech.* 57 (2016) 583.
- [2] G. Allaire and B. Bogosel, "Optimizing supports for additive manufacturing", *Struct. Multidiscipl. Optim.* 58 (2018) 2493.
- [3] K.P. Lee, K.M. Kim, S.H. Kang, J.H. Han and K.H. Jung, "Optimization for high speed manufacturing of ti64 alloy by a selective laser melting technique", *J. Korean Cryst. Growth Cryst.* 28 (2018) 217.
- [4] P. Didier, G. Le Coz, G. Robin, P. Lohmuller, B. Piotrowski, A. Moufki and P. Laheurte, "Consideration of SLM additive manufacturing supports on the stability of flexible structures in finish milling", *J. Manuf. Process.* 62 (2021) 213.
- [5] L.D. Bobbio, S. Qin, A. Dunbar, P. Michaleris and A.M. Beese, "Characterization of the strength of support structures used in powder bed fusion additive manufacturing of Ti-6Al-4V", *Addit. Manuf.* 14 (2017) 60.
- [6] G. Strano, L. Hao, R.M. Everson and K.E. Evans, "A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 66 (2013) 1247.
- [7] J.P. Järvinen, V. Matilainen, X. Li, H. Piili, A. Salmiinen, I. Mäkelä and O. Nyrhilä, "Characterization of effect of support structures in laser additive manufacturing of stainless steel", *Phys. Procedia.* 56 (2014) 72.
- [8] P.N.J. Lindecke, H. Blunk, J.P. Wenzl, M. Möller and C. Emmelmann, "Optimization of support structures for the laser additive manufacturing of TiAl6V4 parts", *Procedia CIRP* 74 (2018) 53.
- [9] J. Jiang, X. Xu and J. Stringer, "Support structures for additive manufacturing: a review", *J. Manuf. Mater. Process.* 2 (2018) 64.
- [10] S. Weber, J. Montero, C. Petroll, T. Schäfer, M. Bleckmann and K. Paetzold, "The fracture behavior and mechanical properties of a support structure for additive manufacturing of Ti-6Al-4V", *Crystals.* 10 (2020) 343.