

<연구논문>

스테인리스강 316L 재질의 PBF 및 DED 방식 금속 3D프린팅 시편 인장 시험 결과

장경남[†] · 양승한^{*}

Tensile Test Results for Metal 3D Printed Specimens of Stainless Steel 316L Manufactured by PBF and DED

Kyungnam Jang[†] and Seunghan Yang^{*}

(Received 15 May 2023, Revised 31 May 2023, Accepted 2 June 2023)

ABSTRACT

Additive manufacturing technology, called as 3D printing, is one of fourth industrial revolution technologies that can drive innovation in the manufacturing process, and thus should be applied to nuclear industry for various purposes according to the manufacturing trend change in the future. In this paper, we performed tensile tests of 3D printed stainless steel 316L as-built specimens manufactured by two types of technology; DED (Directed Energy Deposition) and PBF (Powder Bed Fusion). Their mechanical properties (tensile strength, yield strength, elongation and reduction of area) were compared. As a result of comparison, the mechanical properties of the PBF specimens were slightly better than those of DED specimens. In the same additive type of specimens, the tensile and yield strength of specimens in the X and Y direction were higher than those in the Z direction, but the elongation and ROA were lower.

Key Words : Additive manufacturing(적층제조), 3D printing(3D프린팅), Mechanical property(기계적 성질), Stainless Steel 316L(스테인리스강 316L), DED(에너지제어용착), PBF(분말베드용착)

1. 서 론

3D프린팅 기술은 적층제조(AM, Additive Manufacturing)라고도 하는 제4차 산업혁명기술로서 제조공정의 혁신을 주도하는 기술로 많은 주목을 받았다. 2013년 세계경제포럼(WEF, World Economic Forum)에서는 3D프린팅 기술이 10대 유망기술로 선정되었을 만큼 많은 투자와 연구가 이루어져 왔다⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾. 하지만 실제 산업현장에 활용되는 사례는 극히 제한적이다. 항공, 국방, 의료 등 일부 분야에서는 적극 활용되고 있으나, 일반 제조업, 플랜트 산업 분

야 뿐만 아니라 신기술 적용에 상대적으로 보수적이라 평가받는 원전 산업계에서도 아직 3D프린팅 제품을 활용하는 사례는 극히 드물다.

이는 여러 가지 이유가 있겠지만, 3D프린팅 제작품에 대한 신뢰도가 가장 큰 장애물로 작용하고 있다. ASTM(American Society for Testing and Materials), ISO(International Organization for Standardization)를 중심으로 3D프린팅 제작에 대한 기술 기준을 발행하고 있지만, 아직 현장에서 사용을 보증할 만큼 정밀하지는 않다⁽⁴⁾.

특히 원자력 산업 전반에 적용하기 위해서는 3D프린팅 재료 및 제작 방법이 ASME(American Society of Mechanical Engineers) 코드에 등재되는 게 가장

[†] 책임저자, 회원, 한국수력원자력(주) 중앙연구원
E-mail : Knamjang@khnp.co.kr
TEL : (042)870-5659, FAX : (042)870-5999

^{*} 한국수력원자력(주) 중앙연구원

중요하다. 미국 EPRI(Electric Power Research Institute) 등 여러 기관에서 ASME Code Case에 3D프린팅 재질의 안전등급 적용을 위한 코드를 등재하기 위해 노력하고 있다.

3D프린팅 제작품의 신뢰도를 확보하기 위해 가장 먼저 보증해야 하는 것이 재질의 기계적 성질이다. 기존 제작 방법(단조, 주조 등)으로 제작했을 때의 기계적 성질과 차이가 발생한다면 더욱더 현장 적용에 어려움이 있을 것이다.

본 논문에서는 금속 3D프린팅의 가장 대표적인 2가지 방법인 PBF(Powder Bed Fusion) 및 DED(Directed Energy Deposition) 방법으로 가장 널리 사용되는 스테인리스강 316L 금속분말을 시편을 제작하여 열처리를 하지 않은 As-Built 상태로 인장 시험을 수행하고, 비교한 결과를 기술하고자 한다.

2. 금속 3D프린팅 방법

2.1 DED 방식 금속 3D프린팅

DED 방식 금속 3D프린팅은 Fig. 1과 같이 실시간으로 공급되는 금속 분말을 고출력 레이저로 즉시 용융시켜 적층하는 방식이다⁽⁵⁾. 분말 또는 와이어(선재)가 공급재료가 될 수 있으며, 보통 금속이나 특정 분야 적용을 위해 세라믹 입자가 기반 재료에 첨가될 수 있다. 열원으로 레이저, 전자빔 또는 플라즈마 아크를 사용하며, 일반적으로 제작품 표면이 거칠어 후가공을 필요로 한다.

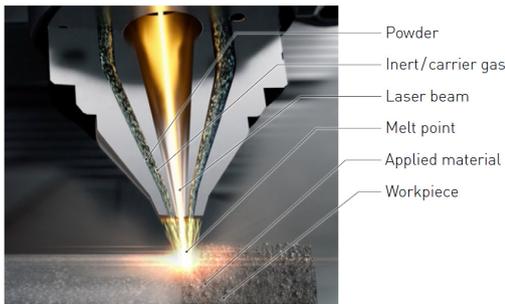


Fig. 3 DED metal 3D printing.⁽⁵⁾

2.2 PBF 방식 금속 3D프린팅

PBF 방식 금속 3D프린팅은 Fig. 2와 같이 일정 영역에 도포된 금속분말에 레이저를 선택적으로 조사하여 금속분말을 국부적으로 용융 또는 소결시키는

방식이다. 금속 뿐만 아니라 플라스틱, 세라믹과 같은 비금속 분말도 사용 가능하며. 공정에 따라 분말들은 충전재 및 접착제와 함께 사용될 수 있다. 열원으로는 레이저, 전자빔 또는 적외선 전등을 사용하며, 일반적으로 DED 방식보다 표면 거칠기는 좋은 편이어서 정밀가공이 필요한 부분이 아니라면 샌드 블라스트 등의 후처리 공정 후에 사용 가능하다.

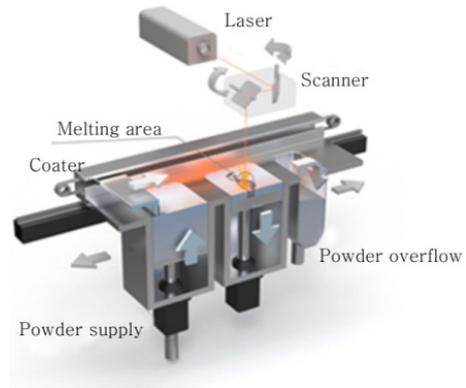


Fig. 4 PBF metal 3D printing.⁽⁴⁾

3. 금속 3D프린팅 시편 제작

3.1 금속 3D프린팅 시편 형상

인장 시험 시편의 형상은 인장 시험 기술 기준인 ASTM E8-21에 따라 제작하였다⁽⁶⁾. 이 기술 기준에는 여러 모양의 시편 형태를 제시하고 있으며, 본 시험에서는 ASTM E8 6.2장의 Plate 시편과 6.4장의 Round 시편을 선택하였다. Fig. 3과 같은 Round 시편은 인장 시험 시 일반적으로 사용하는 시편 형태라 선택하였으며, 그림 Fig. 4와 같은 Plate 시편은 한 수원에서 수행 중인 연구과제의 대상품이 1~1.5 mm 두께의 판재 형태로 되어 있어 최대한 유사한 형태의 시편으로 시험하기 위해 선택하였다. 시험 시편의 크기는 시험의 효율성을 위해 Round 시편은 Specimen 3을, Plate 시편은 Subsize specimen을 각각 선택하였다. Plate 시편의 두께는 1.5 mm로 설정하였다.

인장 시험을 위한 시편은 정확한 치수가 필요하며, 보통 3D프린팅 제작 후 형상은 그 공차를 만족하기 힘들다. 따라서 3D프린팅 제작 후 정밀가공을 통해 정확한 시편을 제작하기 위해 3D프린팅 제작 형상은 기준 시편의 크기보다 크게 제작하였다. 시편은

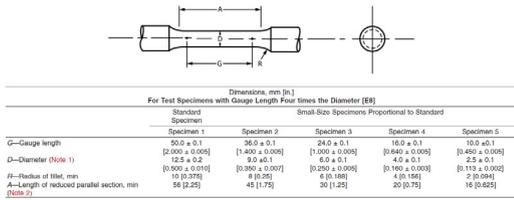


Fig. 3 Shape of round specimen

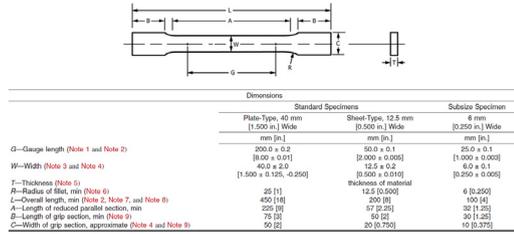


Fig. 4 Shape of plate specimen

Table 1. Dimension of 3D printed specimens

(Unit: mm)

Shape	Additive direction		
	X	Y	Z
Round	85 × 12 × 12	12 × 85 × 12	φ12 × 85
Plate	105 × 12 × 5	12 × 105 × 5	5 × 12 × 105

적층 방향별 기계적 성질을 파악하기 위해 ASTM F3184-16 11장에서 요구한 대로 X, Y, Z 방향으로 적층한 3종류로 제작하여, 3D프린팅 방식 별로 총 6종류(시편 형태 2종, 적층 방향 3종)의 시편을 제작하였다⁷⁾. 3D프린팅으로 제작한 시편의 크기는 Table 1과 같다.

3.2 금속 3D프린팅 시편 제작

DED 방식 금속 3D프린팅에 사용된 장비는 Fig. 5와 같은 한국수력원자력(주) 중앙연구원이 보유한 DMG MORI사의 Lasertec 65 3D Hybrid이다. 이 장비는 기본 형태가 5축 가공기이며, 여기에 3D프린팅을 위한 레이저 노즐 및 금속 분말 공급기를 추가한 형태로, 작동방식은 5축 가공기와 흡사하다. 5축 가공기의 공구대신 레이저 노즐이 장착되어 있다고 할 수 있고, 가공을 위해 절삭 공구가 가공 대상으로 이동하는 것처럼, 3D프린팅 시 레이저 노즐이 정해진 위치로 이동하여 적층한다. 따라서 일반 가공공정과 마찬가지로, 3D프린팅 시에는 레이저 노즐이 CAM(Computer



Fig. 5 DED Metal 3D printer(Laertec 65 3D hybrid).⁽⁵⁾

Table 2. Chemical composition of powder material (wt.%)

Fe	C	Cr	Ni	Mo	Si
69.79	0.018	16.7	10.7	2.13	0.66

Aided Manufacturing) 프로그램으로 생성한 정해진 틀 패스에 따라 이동하여 정해진 베이스면 위에 적층한다. DMG MORI는 NX CAM 프로그램을 지원하고 있으며, 본 3D프린팅 대상 품목의 적층 틀 패스 생성에도 NX CAM 프로그램을 사용하였다⁸⁾.

본 3D프린팅에 사용된 금속 분말은 Carpenter Additive 사의 DED용 Powder Range 316L이다. 분말 크기는 45~105 μm이며, 재료의 화학적 조성은 Table 2와 같다.

DED 방식 금속 3D프린팅을 위해서는 CAM 프로그램에서 적층 틀 패스를 설정해야 한다. 시편은 총 6종류(시편 형태 2종, 적층 방향 3종)를 5개씩 제작하고자 하였다. 시편 형태별로 한 베이스판 위에 제작하기 위해 베이스 판위에 Fig. 6과 같이 배열하였다. 베이스 판의 크기는 150 mm×150 mm×20 mm이고, 재질은 SS400 탄소강이다.

Plate 시편 적층 틀 패스 생성은 NX CAM 및 DMG MORI에서 제공하는 Freeform Additive Buildup 방법을 사용하였고, Fig. 7과 같이 X 방향 시편은 틀 패스

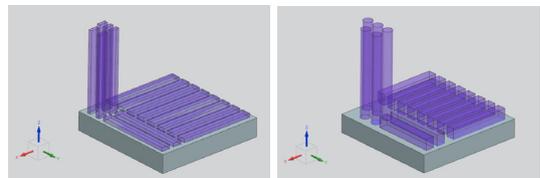


Fig. 6. Arrangement of DED 3D Printing Specimen.

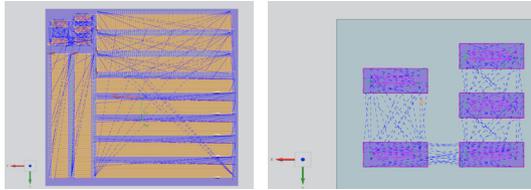


Fig. 7 Tool path of plate specimen.

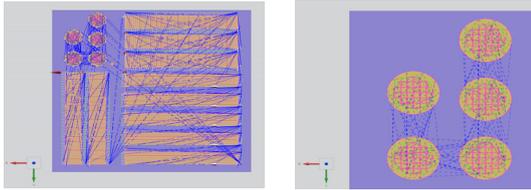


Fig. 8 Tool path of round specimen.

가 인장 시험 시 인장 방향(장축 방향)으로 이동하도록 하고, Y 방향 시편은 툴 패스가 인장 시험 시 인장 방향의 수직인 방향(단축 방향)으로만 이동하도록 하였다. Z 방향 시편은 시편의 형상대로 이동하도록 하였다.

Round 시편 적층 툴 패스 생성은 Plate 시편과 마찬가지로 Freeform Additive Buildup 방법을 사용하였고, Fig. 8과 같이 X 방향 시편은 툴 패스가 인장 시험 시 인장 방향으로 이동하도록 하고, Y 방향 시편은 툴 패스가 인장 시험 시 인장 방향의 수직인 방향으로만 이동하도록 하였다. Z 방향 시편은 X방향, Y방향 교차로 이동하도록 하였다.

시편 제작에는 중앙연구원이 보유한 DMG MORI 사의 Lasertec 65 3D Hybrid DED 3D프린팅 장비를 활용하였다. 장비 내에 베이스판을 거치 시키고 금속 분말 분사량을 12 g/min로 세팅하였고, Table 3과 같은 적층 파라미터 및 툴 패스를 적용하여 Fig. 9와 같이 제작하였다. Plate 시편의 제작 시간은 약 8시간 소요되었으며, 열팽창 및 수축에 따른 베이스판 휨 현상으로 인해 중간에 한차례 정지 및 표면 밀링 후 적층하였다. Round 시편의 제작 시간은 약 8시간 소요되었으며, 이 시편 또한 열팽창 및 수축에 따른 베이스판 휨 현상으로 인해 중간에 한차례 정지 및 표면 밀링 후 적층하였다.

PBF 방식 금속 3D프린팅에 사용된 장비는 Fig. 10과 같은 대건테크(주)가 보유한 M270이다. 이 장비는 대건테크에서 자체 개발한 장비이며, PBF 시편 제작은 대건테크에서 제작하였다. PBF 방식 금속

Table 3 AM process parameters

Working Diameter	2.7 mm
Initial Laser Power	1800 W
Powder Feed Rate	12 g/min
Layer Thickness	0.9 mm in X, Y direction 0.85mm in Z direction
Stepover	1.6 mm
Scanning Speed	1000 mm/min

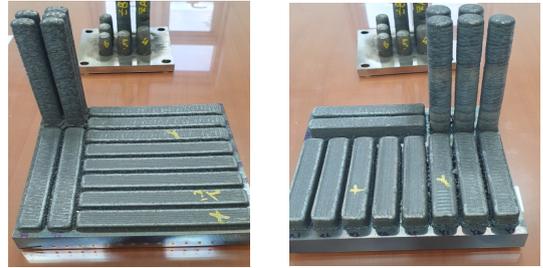


Fig. 9 DED 3D printed specimen.



Fig. 10 PBF Metal 3D printer (M270) (Provided by Daeguntech).

3D프린팅 시편 제작에 사용된 금속 분말은 Sandvik 사의 Stainless Steel 316L 분말이다. PBF 방식 금속 3D프린팅 시편 또한 DED 방식 시편과 같이 형태로 X, Y, Z 방향으로 적층하였으나, 레이저 스캐닝 방식은 모든 시편에 대해 격자 방식으로 적층되었다. 즉, 한 Layer는 X 방향으로 적층하고, 그 다음 Layer는 Y 방향으로 적층하고, 다시 다음 Layer는 X 방향으로 적층하는 방식으로 제작하였다. 따라서, X, Y 방향 시편의 레이저 스캐닝 방향에 대한 차이는 없을 것으로 판단되나, 단지 매 Layer 마다 금속 분말을



Fig. 11 PBF 3D printed specimen.

균일하게 분포하도록 하는 Coater 동작 시 X 방향으로만 이동한다는 차이점이 있다. Coater의 성능에 따라 금속 분말의 평탄도 및 배치가 달라질 수 있으며, 이러한 변화가 출력물의 성능에 영향을 미칠 수도 있다. PBF 방식 금속 3D프린팅 인장 시편은 Fig. 11과 같이 제작되었다.

4. 금속 3D프린팅 시편 인장 시험 결과

4.1 DED 금속 3D프린팅 시편 인장 시험 결과

3장에서 적층 제작된 시편은 인장시험을 위해 Fig. 12과 같이 ASTM E8 6.2장 및 6.4장에 따라 정밀 가공하였다.

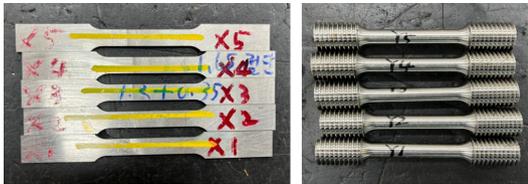


Fig. 12 Machined specimens.

제작한 X, Y, Z 방향 및 시편 형상 Round, Plate 2종에 대해 각각 5개의 시편, 총 30개 시편을 대상으로 인장시험을 수행하였고, 결과는 Table 4 및 Fig. 13~16과 같다.

DED Round 시편의 경우 X, Y 방향에 대한 인장 시험 결과의 차이는 거의 보이지 않았다. 하지만 X,

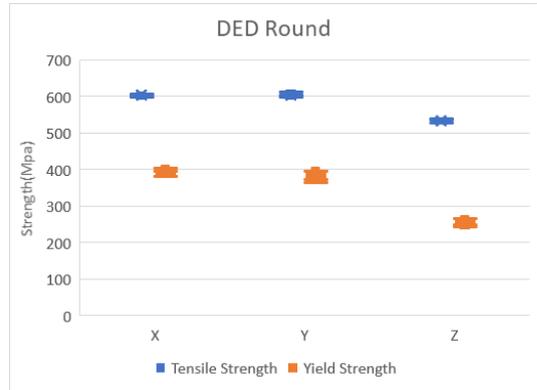


Fig. 13 Tensile test result of DED round specimens-1

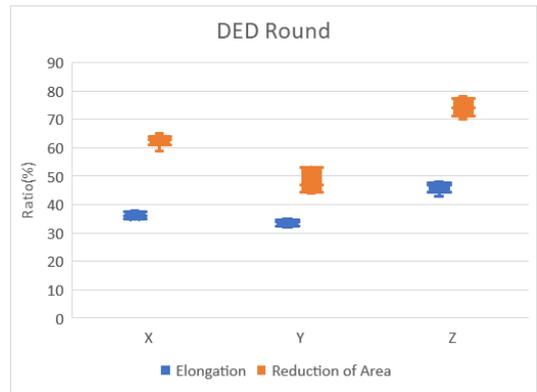


Fig. 14 Tensile test result of DED round specimens-2

Y 방향 대비 Z 방향의 인장 시험 결과는 약간의 차이가 있었는데, 인장강도 및 항복강도는 낮게 측정된 반면, 연신율과 단면수축율은 높게 측정되었다. DED Plate 시편의 경우 또한 X, Y 방향에 대한 인장 시험 결과의 차이는 거의 보이지 않았다. Round 시편과 마찬가지로 X, Y 방향 대비 Z 방향의 인장 시험 결과는 약간의 차이가 있었는데, 인장강도 및 항복강도는 낮게 측정된 반면, 연신율은 높게 측정되

Table 4 Tensile test results of DED specimens (mean value)

		Tensile Strength(Mpa)	Yield Strength(Mpa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)
Round	X	603.8	393.8	36.2	62.6
	Y	605.6	379.2	33.6	48.4
	Z	534.8	253.2	46.2	74.2
Plate	X	585.6	386	31	NA
	Y	584	373	34.6	
	Z	523	265.8	43.8	

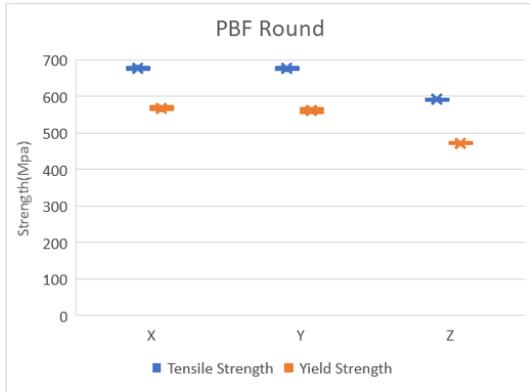


Fig. 15 Tensile test result of PBF round specimens-1.

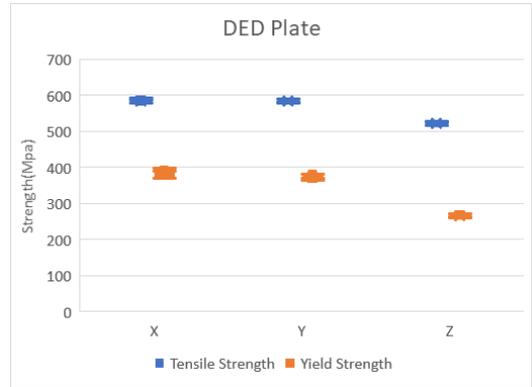


Fig. 17 Tensile test result of DED plate specimens-2.

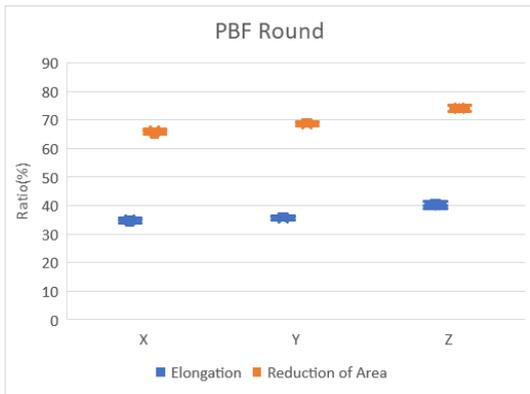


Fig. 16 Tensile test result of PBF round specimens-2.

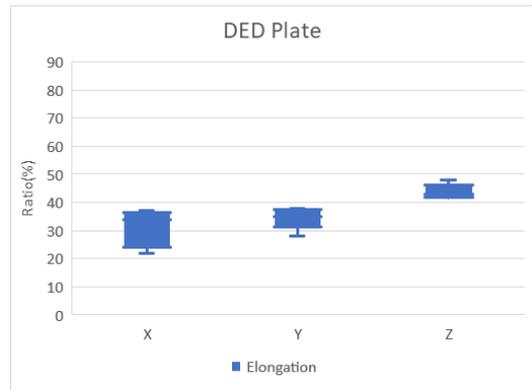


Fig. 18 Tensile test result of DED plate specimens-1

었다. Plate 시편의 경우 두께를 1.5 mm로 상당히 얇게 설정하여 단면수축을 측정은 하지 못하였다.

4.2 PBF 금속 3D프린팅 시편 인장 시험 결과

PBF 금속 3D프린팅 시편도 인장 시험을 위해 ASTM E8 6.2장 및 6.4장에 따라 정밀 가공하였다. DED 금속 3D프린팅 시편과 마찬가지로 X, Y, Z 방향 및 시편 형상 Round, Plate 2종에 대해 각각 5개의 시편을 대상으로 하였으나, Z 방향 Plate 시편 정밀

가공 중 1.5 mm의 얇은 두께로 정밀 가공이 되지 않아 시험에서 제외하였다. 따라서 PBF 금속 3D프린팅 시편은 총 25개 시편을 대상으로 인장시험을 수행하였고, 결과는 Table 5 및 Fig. 17~20과 같다.

PBF Round 시편의 경우 DED 시편과 마찬가지로 X, Y 방향에 대한 인장 시험 결과의 차이는 거의 보이지 않았다. 하지만 X, Y 방향 대비 Z 방향의 인장 시험 결과는 약간의 차이가 있었는데, 인장강도 및 항복강도는 낮게 측정된 반면, 연신율과 단면수축을

Table 5 Tensile test results of PBF specimens (mean value)

		Tensile Strength (Mpa)	Yield Strength (Mpa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)
Round	X	678.4	567.8	34.8	66
	Y	676.4	562.2	35.8	68.8
	Z	592.4	473	40.2	74.2
Plate	X	645.6	536.8	27.8	NA
	Y	637.2	518.4	26.2	
	Z	NA			

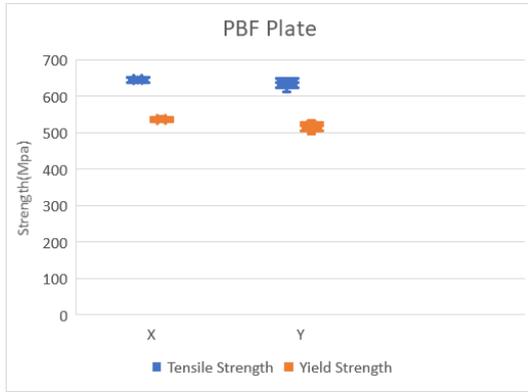


Fig. 19 Tensile test result of PBF plate specimens-1.

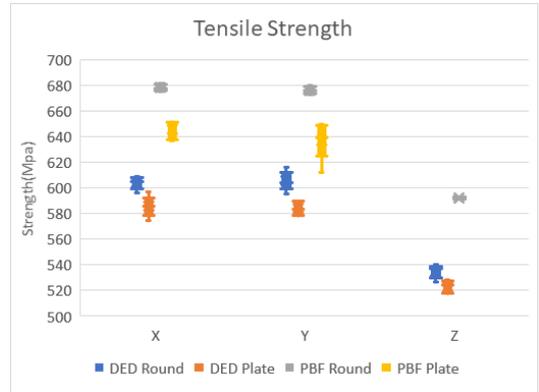


Fig. 21 Tensile strength of 3D printed specimens.

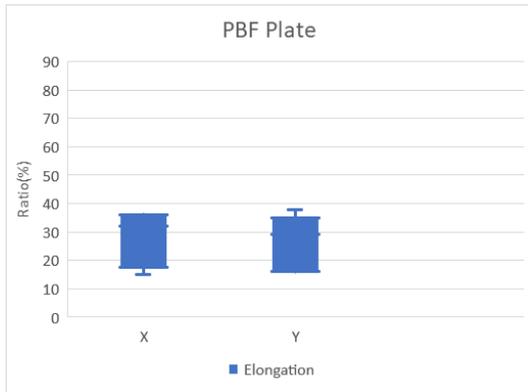


Fig. 20 Tensile test result of PBF plate specimens-2.

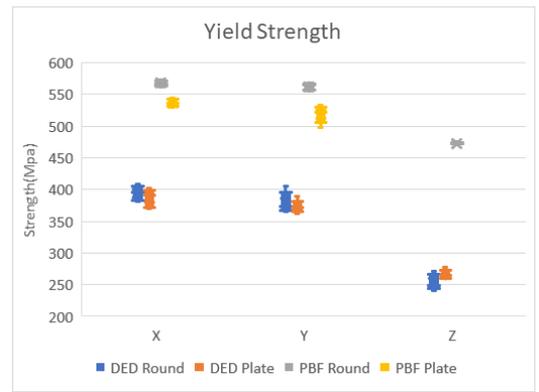


Fig. 22 Yield Strength of 3D printed specimens.

은 높게 측정되었다. PBF Plate 시편의 경우 또한 X, Y 방향에 대한 인장 시험 결과의 차이는 거의 보이지 않았다. Z 방향 Plate 시편 가공 불가로 X, Y 방향 대비 Z 방향의 인장 시험 결과는 확인하지 못하였다. 또한 DED 시편과 마찬가지로 Plate 시편의 경우 두께를 1.5 mm로 상당히 얇게 설정하여 단면수축을 측정할 수 없었다. 또한 같은 이유로 연신율 데이터도 5개 시편 사이의 편차가 크게 발생하여 평균이 낮게 측정되는 결과가 발생하였다. X, Y 방향 각각 5개의 시편 중 30% 이상으로 측정된 시편이 3개이며, 나머지 두 개의 시편은 20% 이하로 측정되어 평균 연신율은 각각 27.8%, 26.2%로 계산되었다.

4.3 인장 시험 결과 비교

인장강도의 경우 Fig. 21과 같이 대체적으로 PBF 시편이 DED 시편보다 50~75 Mpa 정도 높게 측정되었다. 항복강도는 Fig. 22와 같이 더 큰 차이를 보였는데 PBF 시편이 DED 시편보다 145~220 Mpa 정

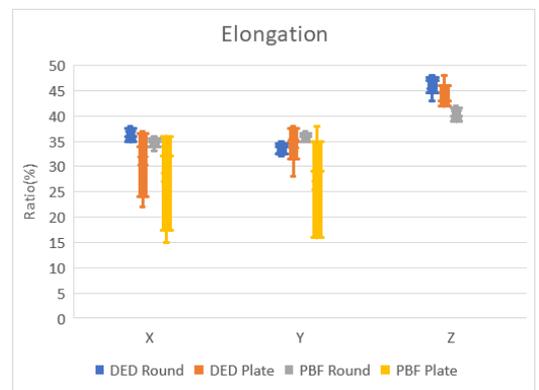


Fig. 23 Elongation of 3D printed specimens.

도 높게 측정되었다. 연신율의 경우 Fig. 23과 같이 X, Z 방향 시편은 DED 시편이 높게 측정되었으며, Y축 방향의 시편만 PBF 시편이 약간 높게 측정되었다. 단면수축율은 Fig. 24와 같이 X, Z 방향 시편은 비슷한 반면, Y축 방향의 시편만 DED 시편이 약

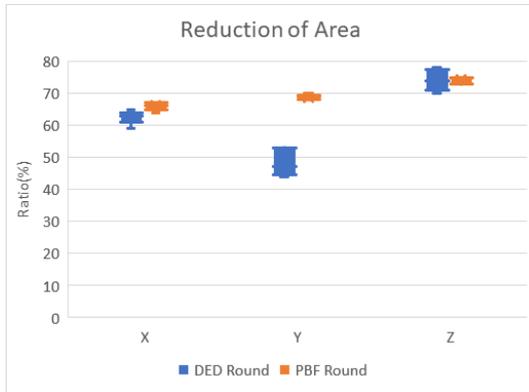


Fig. 24 ROA of 3D printed specimens.

20% 낮게 측정되었다. PBF 시편의 경우 X, Y방향 시편 모두 입방형태(X, Y축 교차)로 적층되어 구조의 차이가 거의 없고, 차이가 있다면 레이저 조사 전 금속분말을 평탄하게 Coater의 이동방향이 X방향이라는 것 뿐이다. 반면 DED 시편의 경우 X 방향 시편은 장축방향으로만 톨 패스가 이동하도록 하였고, Y 방향 시편은 단축방향으로만 톨 패스가 이동하도록 적층하여 재료 구조적으로 상이할 수 있다. 연신율 및 단면 수축율의 차이는 이러한 적층 톨 패스의 차이로 발생했을 가능성이 많으며, 실제 제품 제작 시에는 PBF 시편과 같이 입방형태로 적층하기 때문에 X, Y 방향에 의한 차이는 거의 없을 것으로 판단된다. 하지만, 형상에 따라 Y축 시편과 같이 단축방향으로만 톨 패스가 이동하도록 적층했을 경우 연신율과 단면수축율에서 약간의 차이를 보이므로, 연성이 떨어진다고 판단할 수 있다. 전체적으로 인장강도와 항복강도는 PBF 시편이 DED 시편보다 우수한 성능을 보였으며, 특히 항복강도에서 많은 차이를 보였다. 연신율과 단면수축율은 적층 방향이 동일하다고 가정하였을 경우에는 PBF, DED 시편이 거의 차이를 보이지 않는 것으로 판단된다.

시편 형상에 따라 비교해 보면, DED 및 PBF 시편 모두 Plate 타입 시편보다 Round 타입 시편의 기계적 성질이 높은 것으로 나타났다. 인장강도와 항복강도의 경우, DED 시편은 5%이내의 차이를 보인 반면, PBF 시편은 5~8% 정도의 차이를 보였다. 연신율의 경우 평균값은 대체적으로 Plate 시편이 낮은 것으로 측정되었지만, 동일 시험시편간 차이가 커서 평균값을 대푯값으로 선정하는 것에 논란이 있을 수 있다. Plate 시편의 두께가 얇아 단면 수축율 계산은 불가

하여 비교할 수 없지만 연신율과 비슷한 경향을 보일 것으로 판단된다. 두가지 시편 형상은 모두 ASTM E8에 명시된 표준 시편이고 KOLAS 시험기관에서 표준시험법으로 수행한 결과이므로 시험편의 형상에 따라 거의 차이가 없어야 한다. 이와 관련하여 시편의 부피 대비 파단 단면적의 비율(surface area to volume ratio)과 인장강도 및 항복강도의 관계가 일정한 경향을 보인다는 연구결과도 있다⁹⁾. 부피 대비 파단 단면적이 작은 Plate 시편이 상대적으로 단면적이 큰 Round 시편에 비해 인장강도 및 항복강도가 낮게 측정된다는 것이다. 적층과정에서 발생할 수 있는 조직 내 pore 크기는 일정한데, 작은 단면적일수록 면적대비 pore의 크기는 커질 수 있으므로 상대적으로 인장강도와 항복강도가 낮게 나온다고 판단할 수 있다.

적층 방법 및 시편 형상과 관계없이 X, Y 방향 시편이 Z 방향 시편보다 인장강도와 항복강도는 높고, 반대로 연신율과 단면수축율은 높은 것으로 나타났다. 이러한 적층 방향에 기계적 성질의 차이는 이방성 결정립 구조 생성으로 인한 것으로 여러 연구 논문에서 발표되는 인장시험 결과^(10,11)들과 동일하다.

4. 결 론

본 연구에서는 금속 3D프린팅의 두가지 방법인 DED 및 PBF로 제작된 시편을 대상으로 인장 시험한 결과를 비교하였다. 시편의 형상도 Round 및 Plate의 2가지 형상으로 제작하여, 인장 시험 결과를 비교하였다. 대체적으로 PBF로 제작된 시편의 기계적 성질이 다소 우수한 것으로 측정되었으며, 시편의 형상에 따른 인장시험 결과는 거의 차이가 없어야 하나 이 인장 시험에서는 Round 시편이 Plate 시편보다 더 좋은 결과값을 나타내었다. 일반적으로 As-built 상태 보다는 HIP(Hot Isostatic Pressing)또는 SA(Solution Anneal) 등의 열처리를 통한 기계적 성질 보완 후에 제품에 적용하므로, 향후 열처리 후 인장 시험을 통해 열처리 전후 기계적 성질의 변화를 연구할 예정이다.

참고문헌

- (1) Choi, J. W. and Kim, H. C., 2015, "3D Printing Technologies-A Review," *Journal of Korean*

- Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 14, No. 3, pp. 1-8.
- (2) Choi, S. J, Bae, Y. H., Lee, I. H., and Kim, H., 2018, "Latest Research Trends of 3D Printing in Korea," *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol 35, No. 9, pp. 829-834.
- (3) National IT Industry Promotion Agency, 2018, "2017 3D printer industry Survey," National IT Industry Promotion Agency.
- (4) Jang, K. N., Choi, S. N., and Lee, S. H., 2020, "Consideration for Application of 3D Printing Technology to Nuclear Power Plant," *Trans. of KPVP*, Vol.16, No.01 pp. 117-124. doi:<https://dx.doi.org/10.20466/KPVP.2020.16.1.117>.
- (5) DMG MORI, "Additive Manufacturing-Reinvent Your Metal Production," Additive Technologies, <https://www.dmgmori.com>.
- (6) ASTM E8/E8M-21, 2021, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," ASTM International, West Conshohocken, PA.
- (7) ASTM F3184-16, 2016, "Standard Specification for Additive Manufacturing Stainless Steel Alloy UNS S31603 with PBF" ASTM International, West Conshohocken, PA.
- (8) Jang, K. N., 2020, "Manufacturing using DED Metal 3D Printing Technology and Performance Test of Obsolete Valve in NPP," *Trans. of KPVP*, Vol.17, No.02 pp. 75-82. doi:<https://dx.doi.org/10.20466/KPVP.2021.17.2.082>.
- (9) Shanbhag, G., Wheat, E., Moylan, S., and Vlasea, M., 2021, "Effect of specimen geometry and orientation on tensile properties of Ti-6Al-4V manufactured by electron beam powder bed fusion," *Additive Manufacturing* 48(2021) 102366.
- (10) Yadollahi, A., Shamsaei, N., 2017, "Additive manufacturing of fatigue resistant materials: Challenges and opportunities," *International Journal of Fatigue*, Vol 98, pp.14-31.
- (11) Oh, D., Kang, Y., Kim, G., Park, S., Song, S., 2020, "Effect of HIP Process in Fatigue Performance for SS 316L Manufactured by PBF," *Journal of Weld and Joining*, Vol. 38, No. 1, pp.4 1-46 :<https://doi.org/10.5781/JWJ.2020.38.1.4>.