

## 적층 제조된 H13 공구강의 미세조직과 기계적 특성간의 상관관계

안우진<sup>1</sup> · 박준혁<sup>1</sup> · 이정섭<sup>1</sup> · 최중호<sup>2</sup> · 정임두<sup>2</sup> · 유지훈<sup>2</sup> · 김상식<sup>1</sup> · 성효경<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>경상대학교 나노신소재융합공학과, <sup>2</sup>한국기계연구원 부설 재료연구소, 분말/세라믹연구본부

## Correlation between Microstructure and Mechanical Properties of the Additive Manufactured H13 Tool Steel

Woojin An<sup>1</sup>, Junhyeok Park<sup>1</sup>, Jungsub Lee<sup>1</sup>, Jungho Choe<sup>2</sup>, Im Doo Jung<sup>2</sup>, Ji-Hun Yu<sup>2</sup>, Sangshik Kim<sup>1</sup> and Hyokyung Sung<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>Department of Materials Engineering and Convergence Technology, ReCAPT, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Republic of Korea

<sup>2</sup>Powder & Ceramics Division, Korea Institute of Materials Science, Sang Nam Dong 66, Changwon 51508, Republic of Korea

(Received September 8, 2018 : Revised October 1, 2018 : Accepted October 17, 2018)

**Abstract** H13 tool steels are widely used as metallic mold materials due to their high hardness and thermal stability. Recently, many studies are undertaken to satisfy the demands for manufacturing the complex shape of the mold using a 3D printing technique. It is reported that the mechanical properties of 3D printed materials are lower than those of commercial forged alloys owing to micropores. In this study, we investigate the effect of microstructures and defects on mechanical properties in the 3D printed H13 tool steels. H13 tool steel is fabricated using a selective laser melting(SLM) process with a scan speed of 200 mm/s and a layer thickness of 25  $\mu\text{m}$ . Microstructures are observed and porosities are measured by optical and scanning electron microscopy in the X-, Y-, and Z-directions with various the build heights. Tiny keyhole type pores are observed with a porosity of 0.4 %, which shows the lowest porosity in the center region. The measured Vickers hardness is around 550 HV and the yield and tensile strength are 1400 and 1700 MPa, respectively. The tensile properties are predicted using two empirical equations through the measured values of the Vickers hardness. The prediction of tensile strength has high accuracy with the experimental data of the 3D printed H13 tool steel. The effects of porosities and unmelted powders on mechanical properties are also elucidated by the metallic fractography analysis to understand tensile and fracture behavior.

**Key words** additive manufacturing, 3D printing, selective laser melting, H13 tool steel.

### 1. 서 론

H13 공구강은 우수한 경화능, 내마모성, 고온 강도로 인해 다이캐스팅(die casting), 열간 단조(hot forging), 압출(extrusion), 고온 프레스 성형(hot press forming) 등의 금형용 소재로 널리 사용되고 있다.<sup>1,2)</sup> 금형 설계가 복잡하고 다양해짐에 따라 H13 공구강의 절삭가공이 필요하지만 높은 내마모성으로 인해 가공에 많은 어려움이 따른다.<sup>3,4)</sup> 이를 해결하기 위해 어닐링(annealing)을 통해

경도를 낮추어 절삭 가공을 실시한 후 다시 재경화하고자 하는 연구들이 보고되었으나 공정이 복잡하여 상용화되기에 어려운 측면이 있었다.<sup>5)</sup> 따라서 본 연구에서는 최근 들어 비약적으로 기술이 발전된 금속 3D 적층 제조 기술을 활용하여 H13 공구강을 제작하고 그 미세조직 및 기계적 특성을 분석하고자 한다.

금속 3D 적층 제조 기술은 설계에서부터 제조까지 공정을 체계화, 단순화할 수 있다는 큰 장점이 있는 반면, 소재의 기계적 특성이 기존 소재들에 비해 우수하지 못

<sup>†</sup>Corresponding author

E-Mail : [hksung@gnu.ac.kr](mailto:hksung@gnu.ac.kr) (H. Sung, Gyeongsang Nat'l Univ.)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하다는 연구 결과들이 많이 발표되었다.<sup>6)</sup> 이는 주로 응고 공정에서 필수 불가결하게 발생하게 되는 기공(pore) 또는 표면 조도의 문제에 기인한 것으로 알려져 있다.<sup>7,8)</sup> 내부의 기공률(porosity)을 감소시키기 위하여 열간 정수압 소결법(hot isostatic pressing, HIP)을 적용한 연구들이 많이 있으며 Svensson<sup>9)</sup> 등에 따르면 HIP 처리를 실시하였을 때 내부 기공률이 크게 감소되었다는 논문들도 보고되었다. 하지만 HIP 처리에 있어서도 주로 표면의 기공들이 감소되고 내부의 기공은 계속 존재한다는 결과들도 발표되고 있어 시편 제조 후 3차원적인 기공 분석이 필요하다.<sup>10,11)</sup>

3D 프린팅 소재의 경우 인장 시험을 통해 기계적 특성을 평가하기 전에 경도를 측정하여 기본적인 기계적 특성을 평가하게 된다. 초미소 경도 같은 경우는 시편의 기공과 관계없이 적층 높이가 높아짐에 따라 조금씩 낮아지는 것으로 잘 알려져 있으나 대부분의 경우는 기공을 포함하여 측정되므로 기공률이 높은 곳의 경도가 낮게 나타난다.<sup>12)</sup> 이 때 비파괴적인 방법으로 경도 시험한 결과를 통해 인장 특성을 모델링 해 볼 수 있으며, Cahoon,<sup>13)</sup> Lu<sup>14)</sup> 등은 Vickers 경도와 항복 및 인장 강도간의 상관관계에 대한 다양한 실험식을 제시하였다. 본 연구에서도 이를 활용하여 고강도 H13 공구강 소재에 대한 위치별 경도 특성을 통해 실제 시험된 인장 특성과 비교하고자 한다.

이와 같이 본 연구에서는 적층 제조된 H13 공구강의 위치에 따른 미세조직과 경도 및 인장 특성을 분석하고자 하였다. 광학(optical microscopy, OM) 및 주사 전자현미경(scanning electron microscopy, SEM)으로 시편의 미세조직을 3차원적으로 분석하였으며, 적층 높이 및 방향에 따라 Vickers 경도를 평가하였다. 인장 시험을 실시하여 항복, 인장 강도 및 연신율을 측정하였고, 인장 파면 분석을 통해 내부 기공의 분율, 크기, 분포, 형상 등을 정량 분석하였다. 따라서 미세조직 및 파면에서 관찰되는 다양한 결함이 경도 및 인장 특성에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구에서는 가스 분무법(gas atomization)으로 제조된 H13 소재 분말(Sandvik Inc.)에 대하여 PBF(powder bed fusion) 방식의 Mlab Cusing-R(concept Laser Inc., Germany) 금속 3D 프린팅 장비를 활용하여 시편을 제작하였다. 이 때 레이저 파워는 90 W, hatch space는 80  $\mu\text{m}$ , 적층 두께는 25  $\mu\text{m}$ , 중첩부분(overlap)은 30%, 레이저 스캔 속도는 200 mm/sec로 공정 변수를 제어하여 H13 강 시편을 제조하였다. 제조된 H13 강 시편의 미세

조직을 분석하기 위하여 X-D, Y-D, Z-D 면에서 모두 표면 연마 후 3% Nital 용액으로 15초 동안 에칭하였으며, OM(model: I-Scope 2001), SEM(model: Philips XL30S FEG)을 사용하여 미세조직을 관찰하였다. 이 때 X-D는 scan 방향, Y-D는 scan 방향에 수직한 방향이며, Z-D는 적층 높이 방향이다. 또한 Image analyzer(model: Sigma scan pro)를 활용하여 기공의 분율, 크기, 분포, 형상 등을 정량 분석하고 내부의 석출상들은 SEM-EDS(energy dispersive spectroscopy)를 통하여 분석하였다. EBSD(electron backscatter diffraction) 분석을 위하여 90% acetic acid와 10% perchloric acid 용액에 32V의 전압을 인가하여 시편을 전해 연마하고, FE-SEM(model: MIRA I LMH)을 사용하여 20 kV 전압에서 60  $\mu\text{m}$ 의 step size 조건으로 실험을 진행하였다. 기계적 특성에 있어서는 Vickers 경도계(model: HV-114)를 활용하여 각 시편의 X-D, Y-D, Z-D 면에서 적층 높이에 따른 경도를 측정하였고 기공률과의 상관관계를 알아보하고자 하였다. 소재의 Y-D 방향과 평행하게 표점 거리 12.5 mm, 시편 너비 3 mm, 시편 두께 2 mm의 판상 인장 시편을 제작하였으며, 만능시험기(model: Instron model 8516)를 사용하여 상온에서  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 의 변형률 속도 조건에서 ASTM E8M 규격에 따라 인장 시험을 실시하였다. 또한 인장 파면 분석을 통하여 기공, 개재물과 같은 내부 결함이 인장 특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

## 3. 결과 및 고찰

적층 제조된 H13 공구강의 X-D, Y-D, Z-D 면 미세조직을 적층 높이에 따라 상단(top), 중앙(center), 하단(bottom) 영역으로 구분한 후 OM으로 관찰한 결과를 Fig. 1에 나타내었다. X-D 면의 경우 melt pool이 scan direction에 수직하게 약 150  $\mu\text{m}$  간격으로 규칙적으로 형성되어 있으며 layer thickness는 약 25  $\mu\text{m}$  정도로 나타난다. 시편 내부에서는 크기 10  $\mu\text{m}$  이하의 미소기공(micropore)과 함께 melt pool 경계에서 20~40  $\mu\text{m}$  크기의 macropore들도 동시에 발견된다. Y-D 면에서는 melt pool의 간격이 X-D에 비해 더 넓게 나타나며 layer 사이의 약 30% 정도에 해당하는 overlap 부분을 잘 관찰할 수 있다. Z-D 면에서는 전형적인 keyhole type의 미세한 기공을 관찰할 수 있으며 melt pool이 X-D와 평행하게 잘 형성되어 있음을 알 수 있다.

시편의 높이 및 방향에 따른 기공률을 정량적으로 분석한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 전체적인 기공률은 0.4% 이하로 매우 낮게 나타나며, 기공은 시편의 중앙 영역보다는 상단 또는 하단 영역에서 주로 관찰된다. X-D, Y-D, Z-D 면에서 방향별 기공의 차이는 크게 나타

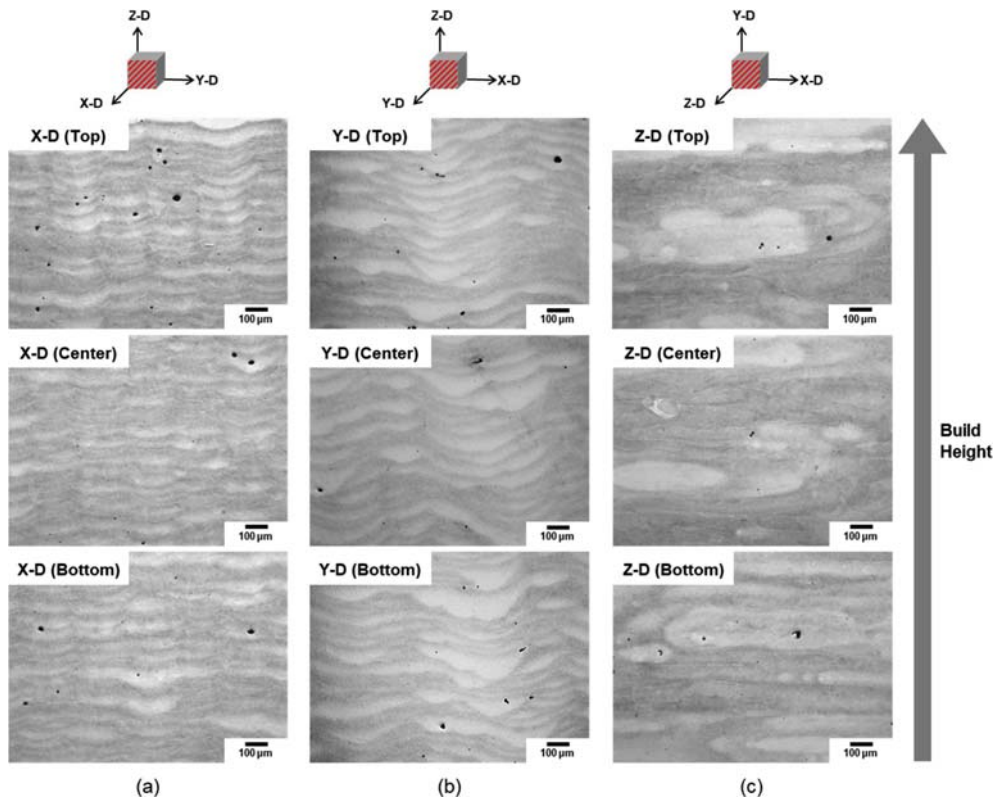


Fig. 1. Optical micrographs of (a) X-D, (b) Y-D, and (c) Z-D plane in the top, center, and bottom of the 3D printed H13 steel specimen with respect to build height.

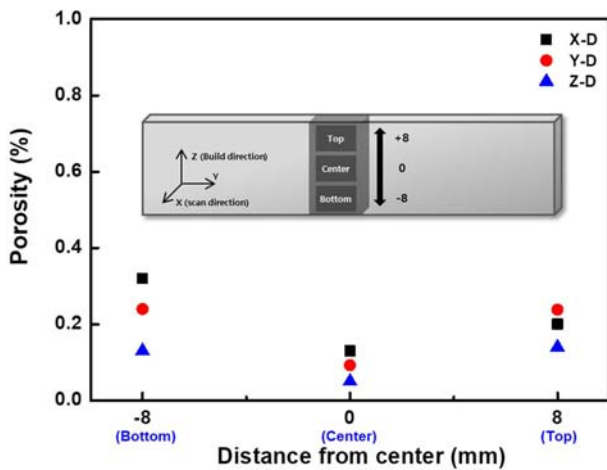


Fig. 2. The porosity against distance from center of the 3D printed H13 steel specimen.

나지 않았으나 Z-D 면에서는 표시한 바와 같이 keyhole type의 미소기공이 주로 관찰되어 기공률이 다소 낮게 측정 되었다. 이러한 keyhole type의 미소기공은 열전도도가 높은 금속에서 경우 대류보다는 전도에 의한 열전달이 주로 일어나 melt pool 에서의 유체 유동이 불안정해져 발생하는 것으로 알려져 있다.<sup>15)</sup> 미소기공들은 gas

pore로 분류되며 주로 냉각 중에 아르곤 가스(Ar gas)가 포집되거나 합금 원소의 기화로 인해 생성된다.<sup>16)</sup> 일반적으로 용접 과정 중에는 keyhole의 발생이 공공(cavity) 내부의 다중 전도(multiple reflection)를 유도하여 에너지 효율을 높이는 것으로 알려져 있지만, 적층 제조 공정 중에는 미세한 크기의 공공도 시편의 인장 특성을 열화시킨다고 보고되고 있다.<sup>17)</sup>

방향에 따른 미세조직 형성 거동을 자세히 알아보기 위하여 Fig. 3에 X-D, Y-D, Z-D 면 미세조직을 SEM으로 관찰한 결과를 나타내었다. X-D와 Y-D 면 미세조직에서 볼 수 있듯이 방향성 응고에 의한 주상정 결정립(columnar grain)이 관찰된다. 잘 알려진 대로 방향성 응고는 build direction 을 따라 발생하며 이는 적층 시 액상에서 고상으로 응고가 진행될 때 우선 성장 방향(preferred orientation)을 따라 이미 응고된 기존층의 방위와 같은 방위로 성장하기 때문으로 알려져 있다.<sup>18)</sup> Z-D 면에서는 주상정 결정립의 단면이 나타나며 각 결정립의 횡축 너비는 1 μm 정도로 균일하게 나타난다. Fig. 4에 SEM-EDS 분석을 통해 결정립 내부와 결정립계의 성분 분석 결과를 나타내었다. 주상정 결정립계에 흰색으로 나타나는 부분과 주상정 결정립 내부에 회색으로 나타나는 부분으로 구분하였으며, 탄소 함량이 주상정 결정립

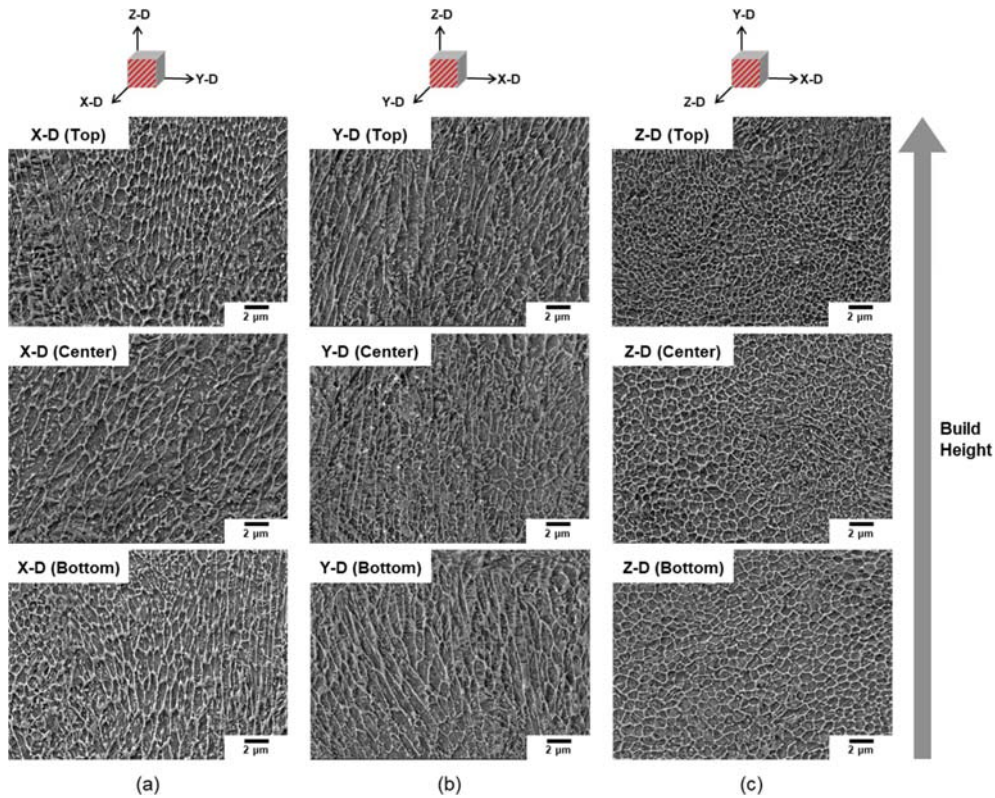


Fig. 3. Scanning electron micrographs of (a) X-D, (b) Y-D, and (c) Z-D plane in the top, center and bottom location of 3D printed H13 steel with respect to build height.

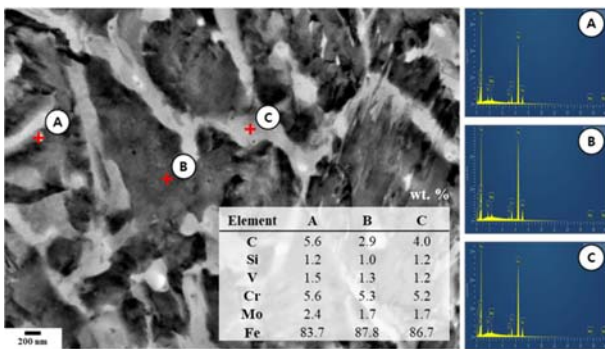


Fig. 4. SEM-EDS images in the X-D plane with quantitative analysis of three different points of the 3D printed H13 steel specimen.

계에서 4~5%로 내부에 비해 약간 더 높게 나타나지만 합금 성분의 차이는 크지 않았다.

자세한 상분석을 위하여 EBSD 분석을 실시하였고 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Phase map 분석 결과와 같이 파란색으로 표현된 결정립 내부는 마르텐사이트이고, 빨간색으로 표현된 주상정 결정립계 부분은 잔류 오스테나이트로 확인된다. 각각의 분율은 마르텐사이트의 경우 74.8%, 잔류 오스테나이트의 경우 24.2%로 측정되었다. Grain boundary map에 따르면 각 주상정 결정립

의 방위 관계는 15도 이상의 고경각계(high angle grain boundary)로 일반적 주조 조직의 cell 경계와 같은 특성을 보인다. Grain orientation spread(GOS) 결과에 의하면 잔류 오스테나이트에 비해 마르텐사이트의 GOS 값이 높게 나타나는데 이는 전단 변태에 의한 것으로 판단된다. 앞서 Fig. 4의 SEM-EDS결과에서도 볼 수 있듯이 탄소 원자들은 마르텐사이트 내부에서 확산되지 못하고 남아 주로 체심정방정구조(body centered tetragonal, bct)를 가지는 마르텐사이트로 변태되어 탄소 함량의 차이는 크지 않은 것으로 판단된다. 이러한 잔류 오스테나이트는 응고 시의 높은 냉각 속도로 인해 발생된 잔류 열적 응력(residual thermal stress)에 의해 기계적으로 준안정 오스테나이트가 안정화되며 생성되는 것으로 알려져 있다.<sup>19)</sup>

각 시편 방향별 적층 높이별 비커스 경도(Vickers hardness)를 측정하고 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 전체적으로 시편의 경도는 550 HV 정도이며 중앙 영역이 하단이나 상단 영역에 비해 경도가 약 20 HV 정도 높게 나타났다. 일반적으로 기공률이 높은 경우 시편의 부분적 붕괴로 인해 경도 값이 낮게 나타난다고 보고 되고 있는데,<sup>20)</sup> 본 연구 결과에서도 시편의 기공률이 가장 낮은 center 영역에서 경도가 가장 높게 나타났음을 알 수



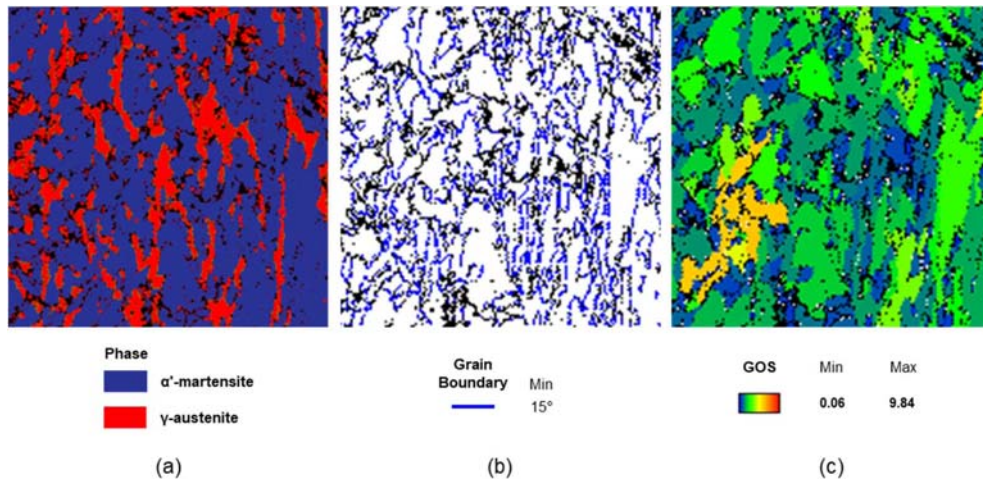


Fig. 5. EBSD figures in the X-D plane of (a) phase map, (b) boundary map, and (c) GOS(grain orientation spread) map of the 3D printed H13 steel specimen.

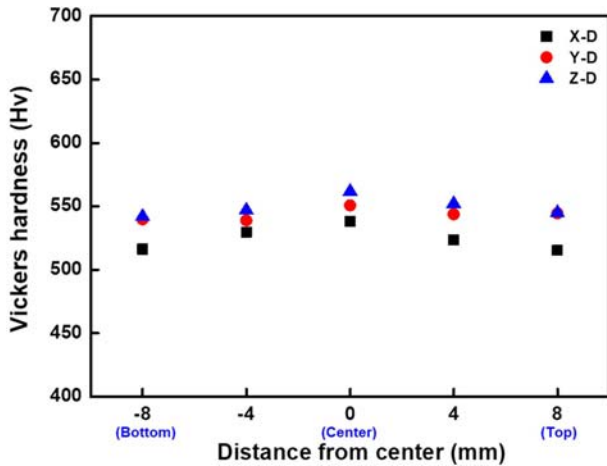


Fig. 6. The Vickers hardness against distance from center of the 3D printed H13 steel specimen.

있다. 이와 같이 미세조직 분석을 통해 측정된 기공률은 적층제조된 H13 소재의 경도뿐만 아니라 인장 특성에도 큰 영향을 줄 수 있다.<sup>21)</sup> Fig. 2와 Fig. 6의 결과에서 볼 수 있듯이 기공률과 경도 값은 1:1 상관관계를 가지게 되므로 본 연구에서는 측정된 경도 값을 통해 인장 특성을 예측하는 경험식을 활용하고자 하였다. 알려진 대로 많은 연구자들에 의해 Vickers 경도 값을 항복 및 인장 강도로 간단하게 환산하고자 하는 노력들이 많이 진행되었다. Cahoon<sup>12)</sup> 등은 Ti-6Al-4V 소재를 적층 제조하고 경도를 측정하여 항복 및 인장 강도를 예측할 수 있는 아래와 같은 식을 제시하였다.

$$\sigma_y = \frac{H_v}{3}(0.1)^n, \sigma_v = \left(\frac{H_v}{2.9}\right)\left(\frac{n}{0.217}\right)^n \quad (1)$$

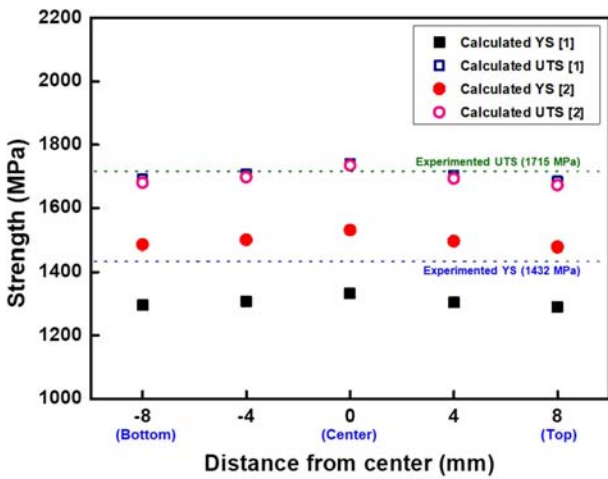
Table 1. Measured Vickers hardness data with distance from center and predicted yield strength and ultimate tensile strength obtained from Cahoon et al. and Lu et al. equations.

Distance from center (mm)	Hardness (HV)	Cahoon et al. <sup>13)</sup>		Lu et al. <sup>14)</sup>	
		YS (MPa)	UTS (MPa)	YS (MPa)	UTS (MPa)
-8	533	1290	1684	1478	1672
-4	539	1304	1703	1496	1693
0	550	1332	1739	1531	1735
4	540	1307	1707	1499	1698
8	535	1295	1691	1485	1680

이 때  $H_v$ 는 Vickers 경도 이고  $n$ 은 가공경화지수(strain hardening exponent)이다. 한 편 Lu<sup>13)</sup> 등은 가공경화지수를 측정하지 않고도 실험적으로 단순히 경도 값을 통해 항복 및 인장 강도를 예측할 수 있는 식을 아래와 같이 제시하였다.

$$\sigma_y = 3.013H_v - 127.012, \sigma_u = 3.586H_v - 237.900 \quad (2)$$

이 식은 경험적으로 경도-인장 특성 간의 선형적 비례관계를 가정한 상태에서 제안되었으며 물리적 의미는 내포하고 있지 않다. 이에 지금까지 제시된 Cahoon<sup>12)</sup>과 Lu<sup>13)</sup>의 식을 활용하여 경도 값을 통해 인장 특성을 예측하고 그 결과를 Table 1과 Fig. 7에 나타내었다. 실험 과정에서 언급한대로 적층 제조된 H13 공구강 소재의 인장 시험을 실시하였으며 항복강도 1,432 MPa, 인장강도 1,715 MPa, 연신을 1.5 %, 가공경화지수는 0.13으로 측정되었다. 예측 항복 강도는 실제 실험적으로 측정된 항복 강도에 비해 Cahoon equation을 활용한 경우 1,306

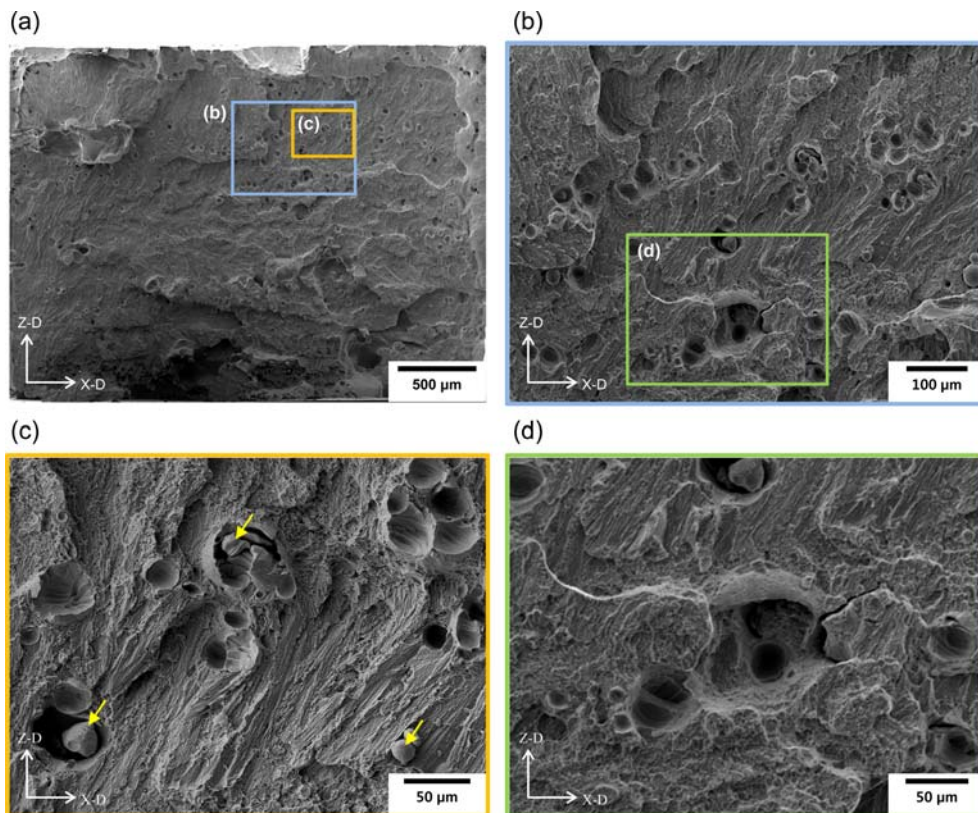


**Fig. 7.** Comparisons of YS(yield strength) and UTS(ultimate tensile strength) values obtained from Cahoon et al., Lu et al. equations, and experimented data in this study.

MPa로 낮고, Lu equation을 활용한 경우 1,498 MPa로 높게 계산되었다. 하지만 인장 강도의 경우에는 두 예측식을 활용한 평균값이 각각 1,705 MPa, 1,696 MPa 정도로 실제 시험 결과와 매우 유사한 값으로 계산되었다.

이와 같이 고경도 소재는 인장 강도와 경도간의 상관관계를 간단하게 적용할 수 있는 반면, 항복강도의 경우 탄성 및 소성과정의 복합적인 거동에 대한 이해가 요구되어 모델링을 통한 예측이 어렵다고 볼 수 있다. 이러한 경험식들은 이미 그 관계가 검증된 소재들에 대해서는 산업적으로 활용할 가능성이 있으나 식의 확장 적용이 어렵다는 단점을 가진다. 따라서 인장 변형 및 파괴 거동을 제대로 이해하기 위해서는 경도와 인장 특성간의 단순한 상관관계 예측뿐만 아니라 시편 내부의 결함이 변형 및 파괴 과정 중에 기여하는 역할에 대해 더욱 자세한 분석이 필요하다.

인장 파괴 거동을 분석하기 위하여 Fig. 8과 같이 인장 시험 후 파면 관찰 결과를 나타내었다. Fig. 8(a)에서 볼 수 있듯이 전반적으로 템퍼드 마르텐사이트(tempered martensite) 취성 파면이며 columnar 형태가 파면에 그대로 드러난다. 또한 미소기공들이 국부적으로 집중되어 나타나는 영역도 관찰된다. 이 때 기공의 응집 효과(aggregation effect)에 의해 모여 있는 기공들이 시편의 기계적 특성을 크게 열화되는 것으로 알려져 있다.<sup>22)</sup> Fig. 8(b)에서 볼 수 있듯이 미소기공들은 scan 방향과 평행하게 X-D를 따라 분포하고 있다. 이처럼 X-D와 평행하



**Fig. 8.** The SEM fractographs in the Y-D plane with enlarged view of selected areas from (a) the entire region: (b) alignment of keyhole type pores, (c) unmelted powders, and (d) pore coalescence.

게 일렬로 배열된 기공들은 keyhole type pore 이며, 단 순히 시편의 밀도를 감소 시키는 역할을 할 뿐만 아니라 파괴 개시점으로 작용할 수 있다.<sup>23)</sup> 파괴 개시점으로 작용할 수 있는 또 다른 인자로는 Fig. 8(c)에 노란색 화살표로 표시된 것과 같이 미용융 분말(unmelted powder)을 들 수 있다.<sup>24)</sup> 미용융 분말은 인장 시험 중에 개재물(inclusion)과 같은 역할을 하여 기지조직과의 계면접합력을 낮추어 균열을 생성하거나 낮은 파괴 강도로 인해 내부 균열이 발생하기도 한다. 변형 도중 기공간의 거리가 가까운 경우에는 Fig. 8(d)와 같이 기공 병합(pore coalescence)이 일어나기도 하는데 이는 파괴를 더욱 가속화시키는 인자가 된다.<sup>25)</sup> 본 연구에서 살펴본 결과와 같이 소재 내부의 미소기공, 미용융 분말 등과 같은 결함(defect)들은 소재의 인장 특성에 결정적인 영향을 미치게 되며 향후 적층 제조 공정에 있어서도 이러한 변수들을 고려하여 제조해야 함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 적층 제조한 H13 공구강 시편의 미세 조직과 기공률을 적층 높이 및 방향에 따라 구분하여 분석하였고 이 결과를 경도 및 인장 특성과 연관지어 설명하였다. 시편의 전체적인 기공률은 0.4% 정도이며 시편 중앙의 기공률이 상단 또는 하단에 비해 낮게 나타났다. 미소기공들의 크기는 수  $\mu\text{m}$  정도로 관찰되고 melt pool의 유체 유동 불안정 또는 응고시 gas 포집으로 인해 발생하는 keyhole type pore 임을 알 수 있다. Build direction(Z-D)을 따라 주상정 결정립들이 성장하였으며 EBSD 상분석 결과 결정립 내부는 마르텐사이트, 결정립계는 잔류 오스테나이트임이 확인된다. 전체적으로 시편의 Vickers 경도는 550 HV 정도이며 높이에 따라 큰 차이는 없으나 기공의 분율이 낮은 중앙 부분에서 다소 높게 나타난다. 소재의 항복 및 인장 강도는 1,400, 1,700 MPa로 측정되었고 경도-인장 관계식을 활용해 얻은 결과는 인장 강도 예측에 더욱 효과적이다. 인장 파면 분석 결과에서 균열 개시점이 될 수 있는 미소기공, 미용융 분말들이 scan 방향을 따라 배열되어 있는 것을 관찰하였으며, 이러한 결함들이 응집되어 있는 부분에서는 균열 개시 및 전파가 가속화될 수 있다는 것을 알 수 있었다. 이와 같이 본 연구에서는 적층 제조된 H13 소재에 있어서 미세조직, 기공률 등이 경도와 인장 특성에 미치는 영향에 대해서 예측식과 파면 분석을 활용하여 분석하였으며 상호간의 상관관계를 파악할 수 있었다.

#### Acknowledgement

This work was supported by development fund foundation, Gyeongsang National University, 2015. This work was also supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government (MSIP) (2018R1A5A6075959).

#### References

1. J.-H. Lee, J.-H. Jang, B.-D. Joo, Y.-M. Son and Y.-H. Moon, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, **19**, 917 (2009).
2. M. Koneshlou, K. M. Asl and F. Khomamizadeh, *Cryogenics*, **51**, 55 (2011).
3. J. Mazumder, J. Choi, K. Nagarathnam, J. Koch and D. Hetzner, *JOM*, **49**, 55 (1997).
4. J. Yun, J. Choe, H. Lee, K.-B. Kim, S. Yang, D.-Y. Yang, Y.-J. Kim, C.-W. Lee and J.-H. Yu, *J. Korean Powder Metall. Inst.*, **24**, 195 (2017).
5. D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk and C. Emmelmann, *Acta Mater.*, **117**, 371 (2016).
6. W. E. Frazier, *J. Mater. Eng. Perform.*, **23**, 1917 (2014).
7. G. H. Shin, J. P. Choi, K. T. Kim, B. K. Kim and J. H. Yu, *J. Korean Powder Metall. Inst.*, **24**, 210 (2017).
8. L. Sheridan, O. Scott-Emuakpor, T. George and J. E. Gockel, *Mater. Sci. Eng. A*, **727**, 170 (2018).
9. L. Ceschini, I. Boromei, A. Morri, S. Seifeddine and I. L. Svensson, *Mater. Des.*, **36**, 522 (2012).
10. C. Qiu, N. J. E. Adkins and M. M. Attallah, *J. Mater. Sci. Eng. A*, **578**, 230 (2013).
11. H. Masuo, Y. Tanaka, S. Morokoshi, H. Yagura, T. Uchida, Y. Yamamoto and Y. Murakami, *Int. J. fatigue*, **117**, 163 (2018).
12. X. Tan, Y. Kok, Y. J. Tan, M. Descoins, D. Mangelinck, S. B. Tor, K. F. Leong and C.K. Chua, *Acta Mater.*, **97**, 1 (2015).
13. J. Cahoon, *Metall. Mater. Trans. B*, **3**, 3040 (1972).
14. W. Lu, Y. Shi, X. Li and Y. Lei, *J. Mater. Eng. Perform.*, **22**, 1694 (2013).
15. R. Rai, J. W. Elmer, T. A. Palmer and T. DebRoy, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **40**, 5753 (2007).
16. R. Li, Y. Shi, Z. Wang, L. Wang, J. Liu and W. Jiang, *Appl. Surf. Sci.*, **256**, 4350 (2010).
17. H. Zhao and T. DebRoy, *J. Appl. Phys.*, **93**, 10089 (2003).
18. D. Gu and Y. Shen, *Mater. Des.*, **30**, 2903 (2009).
19. T. LeBrun, T. Nakamoto, K. Horikawa and H. Kobayashi, *Mater. Des.*, **81**, 44 (2015).
20. B.-K. Jang and H. Matsubara, *Mater. Lett.*, **59**, 3462 (2005).
21. M. Simoelli, Y. Y. Tse and C. Tuck, *Mater. Sci. Eng. A*, **616**, 1 (2014).

22. Q. Zhang, Z. Zuo and J. Liu, *Eng. Fail. Anal.*, **48**, 11 (2015).
23. J. Choe, J. Yun, D.-Y. Yang, S. Yang, J.-H. Yu, C.-W. Lee and Y.-J. Kim, *J. Korean Powder Metall. Inst.*, **24**, 187 (2017).
24. H. Asgari and M. Mohammadi, *Mater. Sci. Eng. A*, **709**, 82 (2018).
25. P. Krakhmalev, G. Fredriksson, I. Yadroitsava, N. Kazantseva, A. D. Plessis and I. Yadroitsev, *Phys. Procedia*, **83**, 778 (2016).