

## Al-7075 DED 적층체의 기공을 활용한 Hot Cracking 억제 및 HIP-열처리를 통한 물성 제어

### Pore-assisted hot cracking suppression and property tailoring via HIP and heat treatment in DED-fabricated Al-7075

#### 초록

항공소재 중 하나인 난적층성 소재 알루미늄 7075 (Al-7075)에 대하여 직접에너지증착 (DED) 공정을 통해 적층 조건을 도출하고 균열이 제거된 다공성의 Al-7075를 적층하였다. 해당 다공성 구조의 기공률은 약 4% 가량으로 확인하였으며, 기공이 존재함에도 불구하고, 적층된 Al-7075는 인장강도 (UTS) 328 MPa, 연신율 (TE) 8.8% 건전한 기계적특성을 나타내었다. 적층이 진행되는 동안 Zn과 Mg의 증발이 발생하는데, 해당 원소의 증발이 기공형성으로 발현되어 Hot cracking을 억제하는 메커니즘을 규명하였다. 또한, 고온등방가압 (HIP) 처리를 통한 치밀화를 통해 356 MPa 의 UTS 및 13.5% 의 TE를 나타내며 향상된 기계적 물성을 확인하였으며, 이에 더하여 열처리 조건을 수립하여 더욱 향상된 기계적 특성(UTS(486.4  $\pm$  4.2 MPa), TE(13.5  $\pm$  0.75%))을 확보하였다. 이를 통해 본 연구는 Al-7075에 대하여 DED공정을 활용한 직접적인 부품 생산에 대한 잠재성을 입증하였다.

**Key Words** : Additive manufacturing, Direct energy deposition, Aluminum alloy 7075, Hot cracking suppression, Mechanical properties

#### 서론

알루미늄(Al) 합금은 높은 비강도 및 기계적 특성, 우수한 내식성을 바탕으로, 항공우주, 자동차, 방위산업 등 산업 전반에 걸쳐 여러 분야에 사용되고 있다<sup>1,2</sup>. 특히 Al-Mg-Zn의 원소를 주 성분으로 하는 Al-7075는 석출강화를 통해 높은 강도를 가져 7000 계열의 주요 합금으로 대표되며 항공분야 전반에 걸쳐 적용되었다.<sup>3,4</sup>

한편, 적층제조기술(Additive manufacturing, AM)은 증가하는 여러 분야의 수요에 맞게, 제조산업에 혁명을 일으키며 공급망에 대한 새로운 해결책으로 부상하고 있다<sup>4</sup>. AM의 많은 기술 중에서 직접에너지증착(Direct energy deposition, DED)은 주로 철<sup>6,7</sup>, 니켈 기반 합금<sup>8,9</sup>, 타이타늄 합금<sup>10,11</sup> 및 기타 여러 용접 가능한 금속에 중점을 둔 다양한 재료에서 전도유명한 결과를 나타내었다.

Al 합금의 여러가지 장점들에도 불구하고, 고온균열 (Hot cracking), 높은 에너지 반사율과 같은 그것의 비용접성, 난적층성 특성들로 인하여 DED 및 여러 AM 기술을 사용한 Al 합금 제조에는 많은 장애요소로 작용하고 있다<sup>12,13</sup>. 특히, 언급된 난적층적 특성들로 인하여 높은 기공율과 주상정 결정의 형성 그리고 결정립간에 발생하는 균열과 같은 결함을 발생시켜 기계적 성능을 저하시키는 주요인으로 작용한다<sup>14,15</sup>.

Al-7075의 잠재력을 극대화 하기 위해 많은 연구자들은 다양한 제조기술과 혁신을 통해 AM 공정을 탐구하며 Al 합금의 이러한 한계점들을 해결하기위해 많은 전략을 도입하였다. 예를 들어 DED 공정 중 핵생성 나노입자의 도입을 통해 결정립 구조를 미세화하여 균열을 완화하고 고강도 Al 합금의 기계적 특성을 향상 시키는 연구가 진행되었으며<sup>16,17</sup>, 발생한 기공을 줄이고 다공성구조의 치밀화를 위해 고온등방가압(Hot isostatic pressing, HIP) 공정을 도입하여 밀도를 높이고 물성의 향상을 도모하였다<sup>18,19</sup>. 하지만 여러 다른 AM 공정들에 대한 연구가 진행되었지만<sup>20-22</sup>, DED 공정을 이용한 Al-7075의 적층에 대한 연구는 상대적으로 부실한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 DED를 통한 Al-7075의 적층에 중점을 두었으며, 순수한 특성을 가진 다공성의 Al-7075 적층을 수행하였다. 다른 원소를 첨가하는 타 연구와 다르게, 본 연구는 다공성 구조를 가진 Al-7075의 조성을 유지하면서 Hot cracking을 피하고, 이후 HIP처리와 열처리를 통해 기계적 특성을 향상시키는 새로운 접근방법을 제안한다.

## 본 문

### 1. 실험 방법 및 절차

#### 1.1 분말 입도 및 공정 최적화 적층

본 연구에서는 상용 Gas-atomize 방식으로 제작된 Al-7075 분말(MK, Republic of Korea)을 사용하여 적층을 수행하였으며, 분말의 형태는 Fig.1(a)에 나타난 바와 같이 구형과 위상형의 여러 형태를 가지고 있음을 주사전자 현미경(JEOL-7100, Japan)을 통해 확인하였다. 해당 분말의 크기 및 입도 분포는 레이저 입자크기 분석기(Mastersizer 3000E, UK)를 통해 분석 후, Fig.1(b)에 나타내었으며, 그 입도 분포는 ( $\sim 47.8 \mu\text{m}$ ), 50% ( $\sim 74.6 \mu\text{m}$ ), and 90% ( $\sim 111.0 \mu\text{m}$ )에서 각각 측정되었다. Al-7075 분말은 DED 시스템을 사용하여 동일 재료인 Al-7075 기판에 적층되었으며, 파장  $1.07 \mu\text{m}$ , 빔 직경  $400 \mu\text{m}$ 의 레이저 모듈(YLR-300-MM-AC, USA)를 탑재한 상용 장비(MX-lab, Republic of Korea)를 이용하여 수행하였다.

적층 최적화 과정을 위해 레이저 출력은  $180\text{--}280\text{W}$  범위를 적용하였고, 스캔 속도는  $350 \text{ mm/min}$ 에서  $900 \text{ mm/min}$ ,  $1200 \text{ mm/min}$ , 마지막으로 시스템의 최대 속도인  $1500 \text{ mm/min}$ 까지 점진적으로 조정했으며, 용융 풀에 분말을 원활하게 공급하기 위해 Ar gas를  $8 \text{ L/min}$ 의 공급 속도로 적용했다. 적층 동안 분말은  $0.48 \text{ g/min}$ 의 공급 속도로 유지되었다.

레이저 스캐닝은 양방향 스캐닝(각 Layer 마다  $90^\circ$  회전, 해치 간격  $0.3 \text{ mm}$ )으로 Zig-Zag 패턴으로 수행하였으며, 인쇄 가능한 공정 영역을 평가 및 식별하기 위해 치수  $4 \times 8 \text{ mm}$ , 목표 높이  $3 \text{ mm}$ 의 직육면체 구조를 적층하였다.

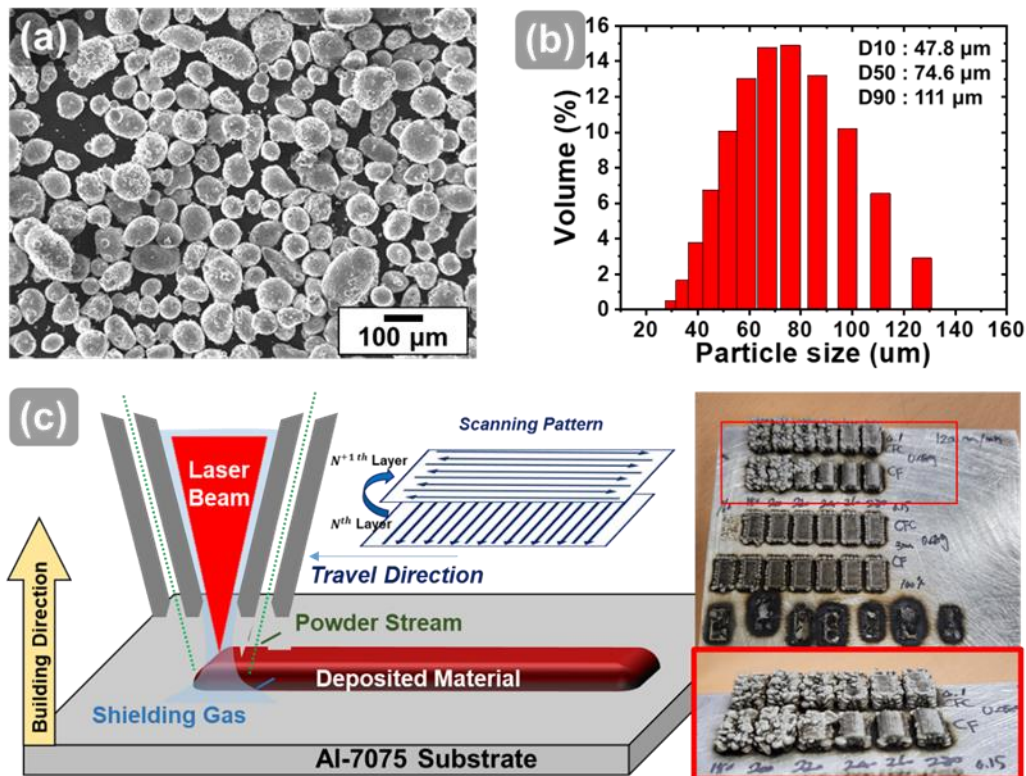


Fig. 1. (a) 분말의 형태 및 (b) 입도 분포, (c) DED 공정의 개괄도 및 적층을 위한 공정최적화 과정

#### 1.2 시편적층 및 특성 분석

분말과 적층된 시편에 대하여 제작과정에서 발생하는 원소 증발과 조성 변화를 확인하기 위해 플라즈마 광학 분광기(ICP-OES, ARCOS-III, USA)를 이용해 해당 조성을 확인하였다. 적층된 Al-7075의

기공률을 확인하기 위하여 아르키메데스법을 이용한 밀도계를 활용하여 밀도를 측정하였으며, 측정 전에 기공으로 인해 발생하는 Air pocket을 방지하기 위하여 각 면은 600-grit의 Sic로 연마작업이 선행되었다,

미세조직적 특성분석을 위해 에너지분산 X선 분광법 (EDS) 검출기가 장착된 전계방출 주사현미경 (FE-SEM, JEOL-7100, JAPAN)을 사용하여 EBSD 분석을 수행하였다. 또한 시편 내부에 발생하는 원소들의 편석현상을 확인하기 위해 EDS를 수행하였으며, X-선 회절분석 (XRD)를 이용해 적층중 발생하는 상에 대하여 분석하였다. 화학적 시뮬레이션은 TCAL8 데이터 베이스와 함께 Thermo-Calc 소프트웨어를 사용하여 AI-7075 제조과정에서의 발생하는 상에 대한 분율을 계산하였다.

1.3 기계적 특성 및 HIP Process

DED로 제작된 AI-7075의 기계적 특성을 확인하기 위해 Gauge 길이가 5 mm인 Dog-bone 형태의 판상 인장시편을 채택하였으며, 인장시험은 인장 시험은 범용 시험기(Instron 1361, USA)를 사용하여  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 의 변형률 속도로 수행하였다. 정확한 측정을 위해서 Digital image correlation(DIC) 기술을 적용하였고, 모든 인장 시험은 25°C에서 수행되었으며 물성의 신뢰성을 확보하기 위해 세 번 반복하였다. 더 높은 밀도와 기공을 줄이기 위해 적용된 HIP 공정은 Ar 가스를 가압매체로 사용하여, 적용하였으며, 200 MPa의 일정한 압력을 가하면서 400°C의 상태로 2시간 유지하였다.

2.결과 및 고찰

2.1 AI-7075의 다공성 구조 및 조성변화

AI-7075는 고온 균열로 인한 높은 응고 수축으로 인해 AM을 통한 인쇄성이 좋지 않기 때문에<sup>22</sup>, 치명적인 결함을 피하기 위해 AI-7075 분말에 대해 DED 공정 조건의 예비 최적화를 수행하였다. 레이저 출력, 이동 속도, 분말 공급 속도와 같은 공정 매개변수는 적층 품질에 막대한 영향을 끼친다. 따라서 최근 연구에서는 에너지 밀도를 공정 최적화의 핵심 기준으로 사용하였으며, 면적 에너지 밀도는 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>9</sup>.

$$E_v = \frac{P}{vht} \tag{1}$$

여기서,  $E_v$ 는 볼륨당 에너지밀도(J/mm<sup>3</sup>),  $P$ 는 레이저파워 (W),  $v$ 는 노즐의 이동속도 (mm/s),  $h$ 는 Hatch 간격 (mm, h=0.3),  $t$ 는 레이어 한 층의 높이 (mm, t=0.06)를 의미한다. 결함이 최소화된 건전한 적층을 위해 계산된 에너지밀도 값을 기반으로 일련의 공정변수를 도출하였으며, Table 1에 나열된 것과 같이 안정적인 적층을 가능하게 하는 공정 변수를 확보하였다.

Table 1. AI-7075의 DED 적층 최적화를 위한 공정변수

Travel speed (mm/min)	Laser power (W)	Energy density (J/mm <sup>3</sup> )	Stable Deposition
350	280/260/240/220/200/180	2,666–1,714	X
1200	280/260/240	778–667	O
1200	220/200/180	611-500	X
1500	280/260/240/220/200/180	622–400	X

노즐 이동속도 350 mm/min의 저속조건에서는 높은 에너지밀도로 인해 분사되는 분말이 제대로 적층되지 않으며, 연속적인 층이 아닌 그을음과 연기를 형성하였다. 반면, 이동속도 1500 mm/min의

고속조건에서 낮은 에너지밀도로 인해 기판에 부분적으로 융합되어 부분적으로 녹은 응집체를 만들었으나, Layer 를 형성하지 못하고 그대로 박리되어 기판에서 분리된 많은 잔해들을 형성하였다.

노즐 이동속도 1200 mm/min에서 레이저파워의 범위가 280 W에서 240 W 사이의 구간이 적층에 최적화된 공정변수임을 식별하였으며, 본 연구에서 260 W에 해당하는 레이저 출력의 공정조건을 최적화된 조건으로 설정하여 적층을 수행하였다. 최적화된 조건아래, Al-7075 샘플을 Fig. 2(a)와 같이, 길이 30 mm, 폭 6 mm, 높이 8.1 mm 크기의 직육면체 형상으로 성공적으로 적층 제작을 하였다.

Fig. 2(b)에서 나타난 바와 같이, 샘플의 표면은 다공성의 기지를 나타내고 있으며, DED 과정에서 집중된 레이저 열원으로 발생하는 불안정한 용융풀에서의 Keyhole 형태의 기공과 Zn 및 Mg와 같은 저용점 원소의 증발을 발생되는 것을 의미한다. 구체적으로 살펴볼때, 강한 열에너지의 입사로 인하여 용융풀 내에서는 Al-7075 금속분말이 급격하게 가열되고 해당 분말내 Mg와 Zn 원소의 끓음 현상이 발생하여 금속증기와 검댕의 형태로 방출되어 다공성의 Al-7075가 형성이 된다. 또한 Fig. 3(c)에 나타난 도식도와 같이, 해당 증기에 의해 생성된 Recoil pressure (반동압력)이 용융풀 표면에 작용하여 용융된 금속을 밀어내고 깊은 형태의 기공 및 Keyhole 을 형성한다<sup>23,24</sup>. 이러한 Keyhole은 불안정한 형태로 급속도로 붕괴하며 가스를 가두고 다공성의 구조를 형성하게 되는 것이다<sup>25</sup>.

Table 2는 ASTM 표준에 기반한 Al-7075의 조성과 본 연구에 사용된 분말 그리고 적층된 조형체에 대하여 ICP-OES 성분 분석을 수행한 결과이다<sup>26</sup>. Al-7075 분말(Powder)의 주요 성분은 ASTM 규격 범위 내 조성과 일치하는 반면, 적층된 조형체(Deposit)는 Zn의 함량이 1.78 wt.%, Mg의 함량이 0.52 wt% 감소한 것으로 나타났다. 선행 연구에 따르면, 적층과정 동안 발생한 Zn과 Mg의 소실은 레이저 출력과 이동속도를 포함한 공정변수에 따라 증발량에 영향을 미치는데<sup>27,28</sup>, 이러한 결과는 적층 과정에서 강력한 열원으로 인하여 발생한 저용점 원소인 Zn과 Mg이 증발이 다공성 구조를 형성하는 것에 기여한다는 결론을 뒷받침한다.

Table 2. Al-7075의 화학적 조성(ASTM) 및 분말과 적층조형체의 조성 확인 결과(wt.%)

AA7075	Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Cr	Si	Mn	Ti
standard	Bal.	5.1–6.1	2.1–2.9	1.2–2.0	0.50	0.18–0.28	0.40	0.30	0.20
<b>Powder</b>	Bal.	<b>5.01</b>	<b>2.36</b>	1.91	0.31	0.19	0.17	0.11	0.05
<b>Deposit</b>	Bal.	<b>3.23</b>	<b>1.84</b>	1.92	0.31	0.20	0.14	0.12	0.04

이러한 다공성 구조와 많은 기공들이 존재함에도 불구하고, 적층 후 As-built 상태의 Al-7075 샘플은 Fig. 2(d)에 나타난 바와 같이 인장강도(Ultimate tensile strength, UTS)  $327 \pm 7.7$  MPa 와 연신율 (Total elongation, TE)  $8.26 \pm 1.45\%$  의 결과를 보이며 양호한 기계적 물성을 보여주었다.

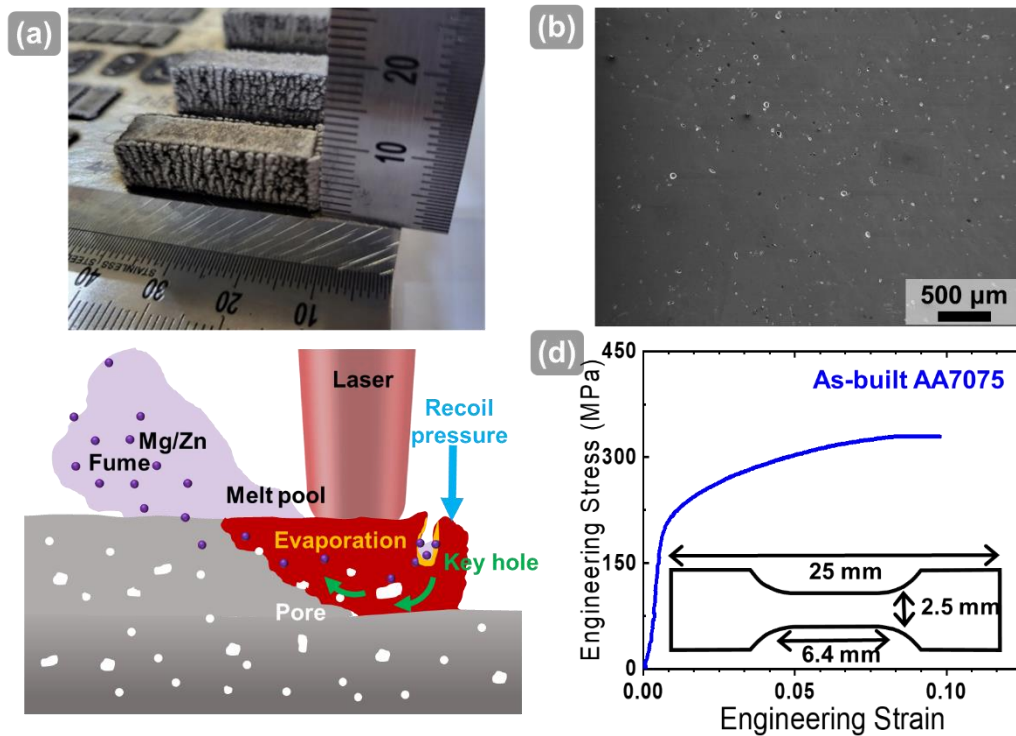


Fig. 2. (a) Al-7075의 적층결과, (b) 다공성 표면을 나타내는 SEM image, (c) 적층중 발생하는 기공 형성의 개략도, (d) 적층된 Al-7075 샘플의 인장결과

## 2.2 적층재 Al-7075 미세조직의 응고 거동

일반적으로, 기동형 수지상(Columnar dendrite) 응고구조의 형성은 응고균열에 취약하기 때문에 기계적 성능에 해로운 것으로 간주된다<sup>29</sup>. 이러한 Columnar dendrite 결정의 형성은 금속 고유의 성질에서 기인하는 것으로 높은 열구배(Thermal gradient,  $G$ )와 낮은 응고속도(Solidification rate,  $R$ ) 조건에서 발생하는 방향성을 가지는 Epitaxial 성장을 통해 발현된다<sup>30</sup>.

Fig. 3(a)에서 도식화 한 것 처럼, DED공정으로 적층된 Al-7075 layer는 높은  $G$ 와 낮은  $R$ 의 조건아래 Epitaxial 성장을 통해 Columnar dendrite 구조의 결정립이 유도된다<sup>15</sup>. 이는 높은 열구배와 방향성을 가진 열확산으로 인해 적층방향을 따라 큰 기동형(Columnar) 구조의 발달로 이어지게 되고, 따라서 Columnar 구조는 여러 층에 걸쳐 응고되는 동안 열이 흘러가며 냉각되는 방향을 따라 우선적인 성장을 나타내기 때문이다<sup>28</sup>.

Columnar 구조에서 주로 발생하는 Hot cracking은 Cu와 Zn, Mg의 응고점의 차이와 이로 인해 발생하는 응고시간차이에 기인한 편석현상이 Columnar 결정립 사이에 집중적으로 형성되면서, Columnar의 기지가 응고됨에 따라 발현되는 수축 응력에 기인하여 주로 결정립 사이에 발생하게 된다<sup>31</sup>. 결과적으로 결정립 경계에서 풍부한 Cu, Mg, Zn의 편석으로 인해 결정립 사이에 균열이 발생한다<sup>32,33</sup>. 더욱이, 다양한 응고간격을 가진 원소의 불균일한 분포가 Columnar 결정립 사이에 분포함에 따라, Al-Zn-Mg 합금 시스템에서  $\eta$ -phase ( $MgZn_2$ ) and S-phase ( $Al_2 CuMg$ )과 같은 쉽게 부서지는 brittle한 금속간 화합물(intermetallic) 상의 형성이 촉진된다<sup>34,35</sup>. 이러한 미세조직적 거동은 해당 영역이 Hot cracking의 발생하는 잠재적인 위험요소이며, 이로 인해 Al-7075가 난적층성 재료로 평가받는 주된 요인이 된다.

Fig. 3(b)는 Al-7075에서 Cu, Zn 및 Mg이 편석되는 전체적인 영역을 나타내고 있다. 주목할 점은 Fig.3(c)는 기공이 없는 영역과 기공이 풍부한 영역 근처의 Fig.3(d)에서 뚜렷한 편석현상의 차이를 확인할 수 있다는 점이다. Fig. 3(c)에서, 기공이 없는 영역의 경우에는 재료가 적층되는 방향을 따라 여러 레이어에 걸쳐 편석되는 현상을 확인 할 수 있었던 반면, Fig. 3(d)에 나타난 기공 주변 영역에서는 Zn과 Mg가 증착 방향을 따라 평행한 미세 분리를 보이지 않고 뚜렷한 방향 선호 없이 분포함을 확인할



수 있었다. 편석현상은 일반적으로 결정립 경계를 따라 형성하기에, Pore 근처의 입자의 형태가 Columnar 구조에서 다른 구조로 변형되었음을 의미하는 결과이다.

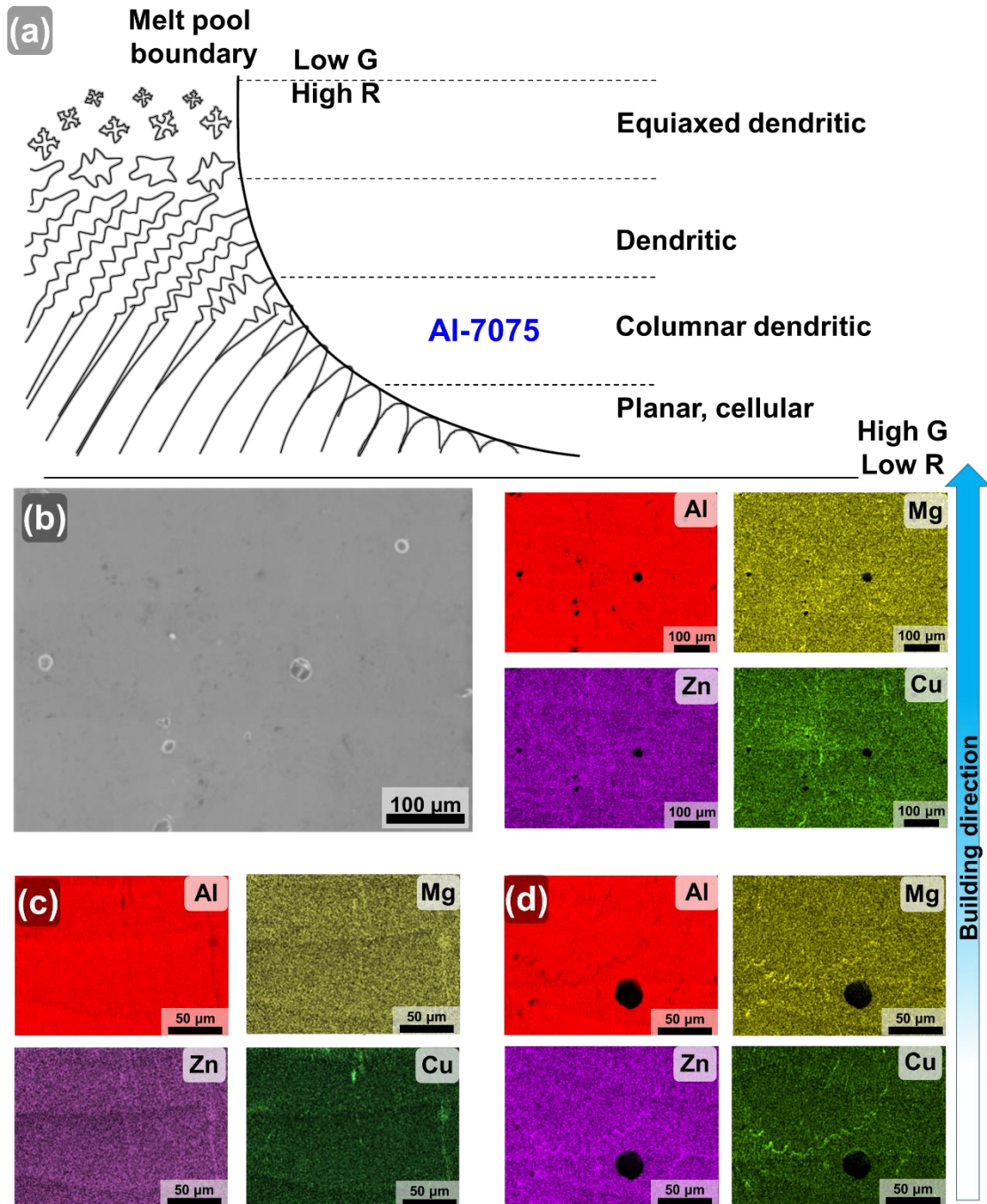


Fig. 3 (a) Thermal gradient(G)와 Solidification rate(R)에 따른 결정립 형상과의 관계, (b) Al-7075의 저배율 SEM image 및 EDS 결과, (c) 기공이 없는 영역에서의 발생하는 적층방향에 수직인 편석현상 및 (d) 기공 근처에서의 방향성이 없는 편석 경향

편석된 원소의 존재 및 해당상의 형성을 확인하기 위해 X-ray diffraction (XRD) 분석을 수행했으며, 그 결과 Fig. 4(a)와 같이 편석된 원소들이  $\eta$ -phase ( $MgZn_2$ ) and S-phase ( $Al_2CuMg$ ) intermetallic phases 형성에 기여함을 확인하였다<sup>36-38</sup>. 하지만 해당 상이 Columnar 결정 사이에 형성되었음에도 불구하고 Hot cracking 현상이 관찰되지 않았는데, 이는 적층재 Al-7075에서 Hot cracking의 부재가 적층 중 발생한 조성변화로부터 기인한 결과일 가능성이 있다.

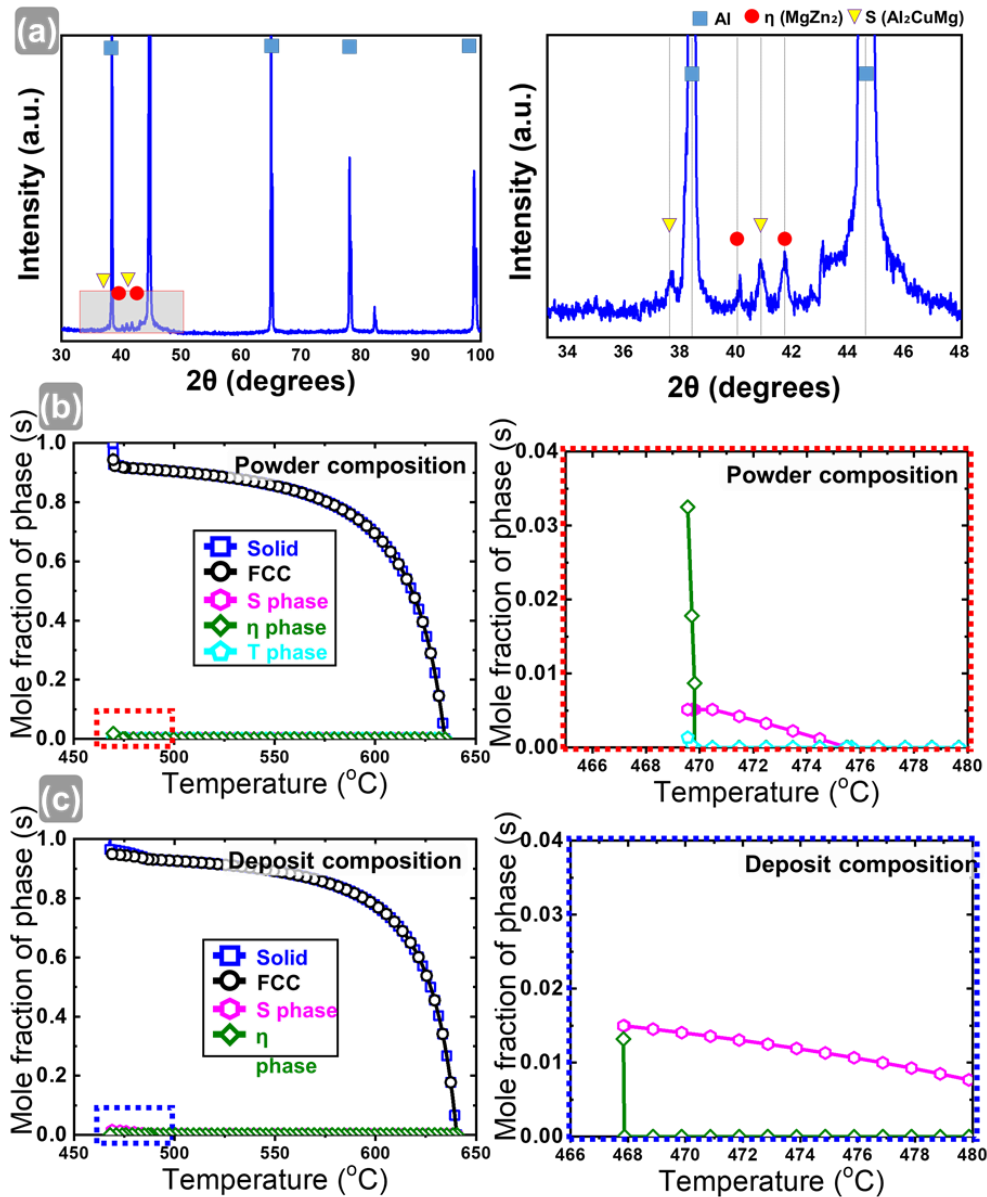


Fig. 4 (a) XRD 분석 결과 및  $\eta$ -phase ( $\text{MgZn}_2$ ), S-phase ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ) intermetallic phases의 형성, (b) Al-7075 분말(Powder) 및 (c) 적층 조형체(Deposit)의 각 조성아래 수향한 Scheil 시뮬레이션 결과, Deposit 조성에서 intermetallic의 총 분율이 감소

적층 중 발생한 원소조성의 변화가 미치는 영향을 파악하기 위해, 각각의 분말 (Powder) 및 적층 조형체 (Deposit) 조성에서 Scheil 시뮬레이션을 사용하여 650 $^{\circ}\text{C}$ 에서 450 $^{\circ}\text{C}$ 까지 응고과정에서의 상 분율을 확인하였다. 응고 과정에서 온도가 감소함에 따라 Solid의 분율이 증가하고 주된 Al의 기지 상인 FCC가 높은 분율을 설명하고 있다. 여기서 상분율 다이어그램은 Fig. 4(b),와 Fig. 4(c)는 각각 Powder 및 Deposit 조성에서  $\eta$ -phase와 S-phase의 intermetallic phases, 형성에 대한 몰 분율을 나타내고 있으며, 응고말기의 분율에 대해 확인하기 위하여 Mole fraction 0.00-0.04 구간 및 온도는 480 $^{\circ}\text{C}$ 에서 466 $^{\circ}\text{C}$ 까지 영역에 대하여, 각각 적색박스와 청색박스로 표기 하였다. 시뮬레이션 결과는 해당 intermetallic상들의 총 몰 분율의 합이 Powder 조성에 비해 Deposition 조성에서 감소한 것을 보여주고 있다. 이는 적층과정에서 증발된 조성인 Deposit에서 Columnar 결정립 사이에서 발생하는 intermetallic의 형성이 더 제한되는 것을 시사한다. 결과적으로 다공성 Al-7075의 변형된 조성물에서 취성상인 intermetallic phase가 감소하고 이는 곧 Hot cracking을 억제하는 효과에 기여하게 되는 것이다.

Fig. 5(a)는 EBSD로 획득한 Al-7075의 Inverse pole figure(IPF) map을 나타내는데 흥미롭게도 기공을 둘러싼 영역에는 등축정(Equiaxed) 결정이 형성된 것을 확인 할 수 있다. 기공은 일종의 Free surface로 작용하기 때문에 새로운 계면을 형성하는데 필요한 에너지를 줄이고 Nucleation barrier를 낮춤으로써, 계면에너지를 낮춰 Al-7075 기지에서 Hetero한 핵 생성을 촉진한다<sup>39,40</sup>.

따라서 Zn과 Mg의 증발로 인한 기공의 형성은 Columnar 구조의 지속적인 성장을 방해하고 기공주변에 Equiaxed 결정의 형성을 촉진하게 된다. Fig. 5(b)에 나타난 바와 같이, 이 과정은 Hot cracking의 잠재적 발생부를 억제하고 궁극적으로 Al-7075의 건전한 기계적 물성에 기여하게 되는 것이다.

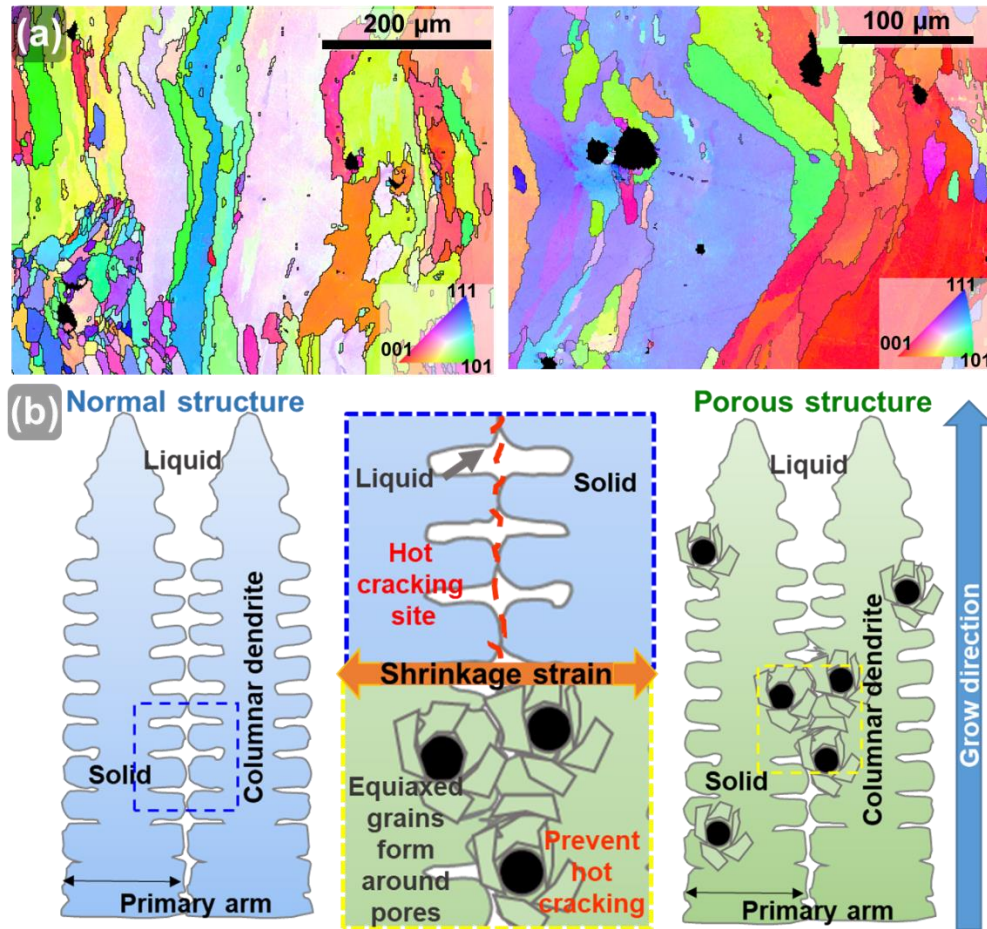


Fig. 5 (a) 기공 주변에 형성된 Equiaxed 결정을 보여주는 Al-7075의 IPF map, (b) DED로 적층된 Porous Al-7075에서 Hot cracking의 억제를 나타내는 개념도

### 2.3 고밀도화를 위한 HIP과 열처리를 통한 물성강화

HIP 공정은 치밀화를 통해 기공을 줄이면서 밀도를 높여 합금의 기계적 성능을 크게 향상시킬 수 있어 고강도의 운용환경에 적용이 가능한 강화공정이다. 해당 공정을 적용하여 다공성 재료의 기공크기 미세화 및 치밀화를 통해 기계적 강도의 증가를 입증한 연구들을 바탕으로, Al-7075에 대하여 HIP 공정을 최적화 하였다<sup>42-44</sup>. HIP 처리 이후 Al-7075 기지에 존재하는 기공이 크게 감소하였다. 정량적인 비교를 위하여 밀도계를 사용하여 As-built 상태의 샘플과 HIP 처리 샘플의 기공률을 측정된 결과, As-built 상태의 샘플의 상대밀도는  $96.17 \pm 0.16\%$  로 측정되었으며, HIP 처리 샘플은  $98.10 \pm 0.15\%$ 로 측정되어 기공률이 크게 감소한 것을 확인하였다.

Fig. 6(a)에 나타난 치밀화된 HIPed Al-7075의 미세구조에서는 Columnar 구조가 뚜렷한 기존의 조직을 보존하고 있는 특징을 나타낸다. 또한 미세한 Equiaxed 결정이 존재하는 곳에는 기공이 존재했던 영역에 해당하는 것으로 추정할 수 있다. 인장시험 결과는 Fig. 6(b)에서 확인할 수 있는 것



과 같이 As-built Al-7075의 UTS ( $327 \pm 7.7$  MPa)와 TE ( $8.26 \pm 1.45\%$ )에 비하여 UTS  $356.3 \pm 4.1$  MPa를 나타내며, 약간의 강도 증가와 더불어 TE 값  $13.5 \pm 0.75\%$ 을 나타내며 상당한 연성의 증가를 확인 할 수 있었다.

HIP 처리에 더하여, Fig. 6(c)와 같이 T6 열처리를 위하여  $480^\circ\text{C}$ 에서 Solution treatment 2시간과 더불어  $120^\circ\text{C}$  Aging 30h를 수행하는 시효경화 처리를 진행한 이후 물성을 확인한 결과, 상당히 증대된 UTS( $486.4 \pm 4.2$  MPa) 및 HIP처리와 동일한 TE( $13.5 \pm 0.75\%$ ) 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 HIP 처리를 통해 기공을 줄여 연성을 늘리면서 열처리를 통해 강도를 높이는 전략으로 고강도 Al-7075 합금을 적층 할 수 있다.

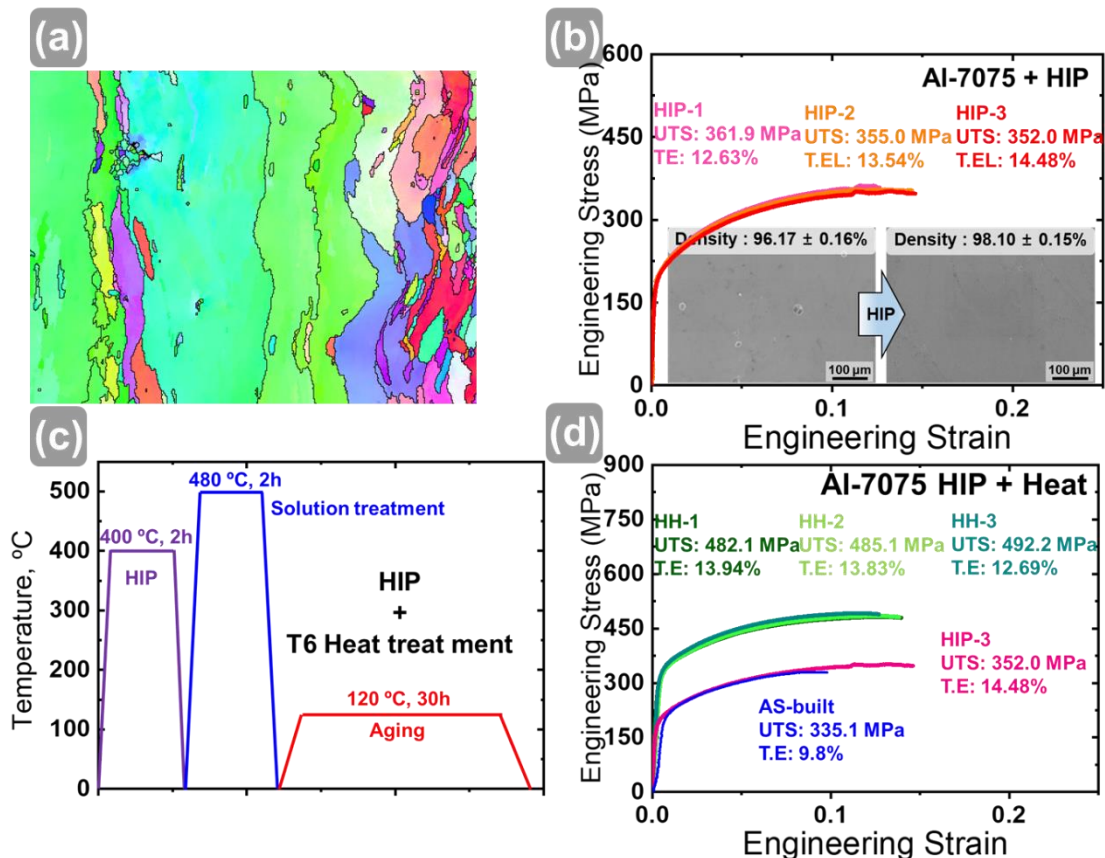


Fig. 6 (a) HIP처리되어 기공이 현저히 줄어든 Al-7075의 IPF map, (b) HIP 처리된 샘플에서 높아진 상대밀도와 이에따라 강화된 연성 (c) HIP과 열처리 조건, (d) 열처리 이후 강화된 물성 및 기존 시편들과의 물성 비교

## 결론

본 연구에서는 HIP 처리와 열처리를 동반한, DED로 제작된 다공성 Al-7075의 향상된 기계적 물성을 확인하고 이것의 잠재력을 입증하였다. Al-7075 기지의 기공은 레이저 열원으로 인해 저융점 원소인 Mg와 Zn의 증발로 인해 발생하며, 해당 기공은 Columnar 구조의 지속적인 성장을 방해하고 기공 주변에 Equiaxed 결정의 형성을 촉진하여 Hot cracking 현상을 억제하는 효과를 입증하였다. 이에더하여, Thermo-Calc 시뮬레이션 분석결과, 다공성 Al-7075의 변형된 조성이 Hot cracking을 유발하는  $\eta$ -phase와 S-phase와 같은 취성상의 물분율을 감소시키는 것으로 밝혀졌다. 이후 진행된 HIP공정은 다공성의 Al-7075를 치밀화하여 미세조직적 특성을 유지하면서도 안정적인 연성을 확보할

수 있었으며, 추가적으로 진행된 T6 열처리를 통해 우수한 인장특성을 나타내었으며, UTS 486.4  $\pm$  4.2 MPa 및 TE 13.5  $\pm$  0.75%를 달성하며 선행된 연구들에서 보고된 DED 적층 Al 합금 인장값을 능가하는 결과를 확보하였다. 본 연구를 통해 수행한 Hot cracking 민감도를 완화하고 밀도를 높이며 열처리를 통해 강도를 확보하는 일련의 과정은 적층제조를 통해 고강도 Al-7075를 확보하고 과도한 재료의 소비 및 비용지출 없이도 부품을 직접적으로 제조할 수 있는 획기적인 방법에 대한 통찰을 제공하였다.

## 참고문헌

- [1] Singh SS, Williams JJ, Lin MF, et al. "In Situ Investigation of High Humidity Stress Corrosion Cracking of 7075 Aluminum Alloy by Three-Dimensional (3D) X-ray Synchrotron Tomography". Materials Research Letters. 2014
- [2] Choi KM, Lee SJ, Bae DH. "Development of Particle and Grain Uniformity in High-Ductility Al-Zn-Mg Alloys with the Addition of Mg and Cu". Met Mater Int. 2024
- [3] Patel M, Aggarwal A, Kumar A. "Investigation of Cracking Susceptibility and Porosity Formation and Its Mitigation Techniques in Laser Powder Bed Fusion of Al 7075 Alloy". Met Mater Int. 2023
- [4] Zou X, Yan H, Chen X. "Evolution of second phases and mechanical properties of 7075 Al alloy processed by solution heat treatment". Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2017
- [5] Herzog D, Seyda V, Wycisk E, et al. "Additive manufacturing of metals". Acta Materialia. 2016
- [6] Kumaran M, Senthilkumar V. "Influence of Heat Treatment on Stainless Steel 316L Alloy Manufactured by Hybrid Additive Manufacturing Using Powder Bed Fusion and Directed Energy Deposition". Met Mater Int. 2023
- [7] SaGong MJ, Kim RE, Lee JA, et al. "Enhanced strength-ductility synergy in stainless steel 316L through hierarchically tailored microstructure via laser-based repair deposition". Materials Research Letters. 2024
- [8] Mostafaei A, Ghiaasiaan R, Ho I-T, et al. "Additive manufacturing of nickel-based superalloys: A state-of-the-art review on process-structure-defect-property relationship". Progress in Materials Science. 2023
- [9] Lee JA, Sagong MJ, Jung J, et al. "Explainable machine learning for understanding and predicting geometry and defect types in Fe-Ni alloys fabricated by laser metal deposition additive manufacturing. Journal of Materials Research and Technology". 2023
- [10] Liu Z, He B, Lyu T, et al. "A Review on Additive Manufacturing of Titanium Alloys for Aerospace Applications: Directed Energy Deposition and Beyond Ti-6Al-4V". JOM. 2021
- [11] Saboori A, Gallo D, Biamino S, et al. "An Overview of Additive Manufacturing of Titanium Components by Directed Energy Deposition: Microstructure and Mechanical Properties". Applied Sciences. 2017
- [12] Li J, Peng Z, Li C, et al. "Mechanical properties, corrosion behaviors and microstructures of 7075 aluminium alloy with various aging treatments". Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2008
- [13] Deschamps A, Texier G, Ringeval S, et al. "Influence of cooling rate on the precipitation microstructure in a medium strength Al-Zn-Mg alloy". Materials Science and Engineering: A. 2009
- [14] Louvis E, Fox P, Sutcliffe CJ. "Selective laser melting of aluminium components. Journal of Materials Processing Technology". 2011
- [15] Martin JH, Yahata BD, Hundley JM, et al. "3D printing of high-strength aluminium alloys". Nature. 2017
- [16] Zhang J, Song B, Wei Q, et al. "A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends". Journal of Materials Science & Technology. 2019

- [17] Tan Q, Fan Z, Tang X, et al. "A novel strategy to additively manufacture 7075 aluminium alloy with selective laser melting". *Materials Science and Engineering: A*. 2021
- [18] Choe J, Kim KT, Yu JH, et al. "A novel route for predicting the cracking of inoculant-added AA7075 processed via laser powder bed fusion". *Additive Manufacturing*. 2023
- [19] Martin JH, Yahata B, Mayer J, et al. "Grain refinement mechanisms in additively manufactured nano-functionalized aluminum". *Acta Materialia*. 2020
- [20] Gussev MN, Sridharan N, Thompson Z, et al. "Influence of hot isostatic pressing on the performance of aluminum alloy fabricated by ultrasonic additive manufacturing". *Scripta Materialia*. 2018
- [21] Ertuğrul O, Öter ZÇ, Yılmaz MS, et al. "Effect of HIP process and subsequent heat treatment on microstructure and mechanical properties of direct metal laser sintered AlSi10Mg alloy". *Rapid Prototyping Journal*. 2020
- [22] Reschethnik W, Brüggemann J-P, Aydinöz ME, et al. "Fatigue crack growth behavior and mechanical properties of additively processed EN AW-7075 aluminium alloy". *Procedia Structural Integrity*. 2016
- [23] King WE, Barth HD, Castillo VM, et al. "Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*". 2014
- [24] Wang L, Zhang Y, Chia HY, et al. "Mechanism of keyhole pore formation in metal additive manufacturing". *npj Comput Mater*. 2022
- [25] Huang Y, Fleming TG, Clark SJ, et al. "Keyhole fluctuation and pore formation mechanisms during laser powder bed fusion additive manufacturing". *Nat Commun*. 2022
- [26] Qi WJ, Song RG, Zhang Y, et al. "Study on mechanical properties and hydrogen embrittlement susceptibility of 7075 aluminium alloy". *Corrosion Engineering, Science and Technology*. 2015
- [27] Wang P, Li HC, Prashanth KG, et al. "Selective laser melting of Al-Zn-Mg-Cu: Heat treatment, microstructure and mechanical properties". *Journal of Alloys and Compounds*. 2017
- [28] Kaufmann N, Imran M, Wischeropp TM, et al. "Influence of Process Parameters on the Quality of Aluminium Alloy EN AW 7075 Using Selective Laser Melting (SLM)". *Physics Procedia*. 2016
- [29] Kou S. *Welding Metallurgy*. John Wiley & Sons; 2020.
- [30] Hagenlocher C, Fetzner F, Weller D, et al. "Explicit analytical expressions for the influence of welding parameters on the grain structure of laser beam welds in aluminium alloys". *Materials & Design*. 2019
- [31] Stopyra W, Gruber K, Smolina I, et al. "Laser powder bed fusion of AA7075 alloy: Influence of process parameters on porosity and hot cracking". *Additive Manufacturing*. 2020
- [32] Eskin DG, Suyitno, Katgerman L. "Mechanical properties in the semi-solid state and hot tearing of aluminium alloys". *Progress in Materials Science*. 2004
- [33] Bhagavatam A, Ramakrishnan A, Dinda VA and GP. "Laser Metal Deposition of Aluminum 7075 Alloy". *IJMSR*. 2018
- [34] Lu Y, Wen S, Gao K, et al. "The phase transformation and enhancing mechanical properties in high Zn/Mg ratio Al-Zn-Mg-Cu(-Si) alloys". *Journal of Materials Research and Technology*. 2024
- [35] Taheri-Mandarjani M, Zarei-Hanzaki A, Abedi HR. "Hot ductility behavior of an extruded 7075 aluminum alloy". *Materials Science and Engineering: A*. 2015
- [36] Farajollahi R, Jamshidi Aval H, Jamaati R. "Evaluating of the microstructure, texture, and mechanical properties of AA2024-Al3NiCu composites fabricated by the stir casting process". *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2022
- [37] Chen F, He J, Li Y, et al. "Effect of different homogenization times on the mechanical properties of 7075 aluminum alloy". *Journal of Materials Research and Technology*. 2024
- [38] Ma D, Xu C, Guo C, et al. "The evolution of Al2CuMg phase during two-stage homogenisation for 7055 aluminium alloy". *Materials Science and Technology*. 2023

- [39] Kashchiev D. Nucleation. Elsevier; 2000
- [40] Schmitz F, Virnau P, Binder K. “Monte Carlo tests of nucleation concepts in the lattice gas model”. Phys Rev E. 2013
- [41] Ishizaki K, Nanko M. “A hot isostatic process for fabricating porous materials”. J Porous Mater. 1995
- [42] Hafenstein S, Werner E. “Pressure dependence of age-hardenability of aluminum cast alloys and coarsening of precipitates during hot isostatic pressing”. Materials Science and Engineering: A. 2019
- [43] Atkinson HV, Davies S. “Fundamental aspects of hot isostatic pressing: An overview”. Metall Mater Trans A. 2000
- [44] Su Y, Savinov R, Wang Y. “Microstructure and property enhancement of 7075 aluminium alloy via laser metal deposition augmented by in-situ ultrasonic vibration”. Virtual and Physical Prototyping. 2024