

SLM 기법으로 제작한 알루미늄 시편 내부 멜팅풀 미세조직 분석

김무선

한국철도기술연구원 도시철도연구팀

Analysis of the microstructure of melting-pool in aluminum specimens fabricated by SLM technique

Moo-Sun Kim

Urban Transit Research Team, Korea Railroad Research Institute

요약 선택적 레이저 용융 (SLM, Selective Laser Melting) 기술은 미세한 금속 분말 위에 레이저를 조사하여 특정 영역의 용착을 진행하고 이 과정을 반복적으로 진행함으로써 최종적으로 3차원 형태의 구조물을 제작하는 최신의 적층 공정 기술이다. 적층 공정 기술 특성상 레이저에 의한 금속 소재의 용융 현상은 레이저의 조사 방향과 적층 방향 등 공정 조건에 의해 방향성을 가지게 되며 이로 인해 구조물 내에서 금속 소재 조성은 불균일 특성을 보인다. 본 연구에서는 SLM 기술을 적용하여 알루미늄 (AlSi10Mg) 시편을 제작하고 시편 내부의 소재 조성 특성을 분석하였다. 시편은 적층 제작 방향을 기준으로 0°, 45°, 90° 로 구분하여 실린더 형태로 제작하였으며 시편 평면의 표면 형상을 광학적으로 분석하였다. 그리고 레이저 조사로 생성되는 시편 내부의 멜팅풀 형상을 대상으로 하여 멜팅풀 내부와 경계면에 대해 각각 TEM 분석을 수행하였다. 분석 결과로부터 멜팅풀 내부와 경계면의 미세 셀 구조의 차이를 확인하였고, Si 의 조성 비율이 셀의 경계면에서 더 높게 보임을 확인하였다.

Abstract Selective Laser Melting (SLM) technology is state-of-the-art additive manufacturing process technology that produces a three-dimensional structure by irradiating a laser on a fine metal powder to perform the fusion of a specific area and repeat this process. Owing to the characteristics of the additive manufacturing process, the melting phenomenon of the metal material by the laser has directionality depending on the process conditions, such as the irradiation direction of the laser and the build-up direction. For this reason, the composition of the metal material in the structure exhibits non-uniform characteristics. In this study, aluminum (AlSi10Mg) specimens were manufactured by applying SLM technology, and the material composition characteristics of the specimen were analyzed. The specimens were manufactured as cylinders by the build-up orientation of 0°, 45°, and 90°. The surface morphology of the specimen plane was analyzed optically. TEM analysis was performed on the core and the interface of the melting-pool inside the specimen generated by laser irradiation. The analysis results confirmed that there was a difference between the nano cell structure of the core and the interface of the melting-pool, and that the composition ratio of Si appeared higher at the interface than at the core of the cell.

Keywords : Additive Manufacturing, Aluminum, Build-up Orientation, Composition, SLM

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1D1A1B07044505)

*Corresponding Author : Moosun Kim(Korea Railroad Research Institute)

email: mskim@krrri.re.kr

Received November 6, 2020

Revised November 26, 2020

Accepted December 4, 2020

Published December 31, 2020

1. 서론

오늘날 항공, 자동차, 철도, 선박 등 운송기기의 부품 제작을 위해 경량화 및 컴팩트화 등의 목적에 부합하는 장점을 보이는 공정 기술에 관한 관심이 증가하고 있다. 그 중 대표적인 기술로서 적층 기법을 고려할 수 있는데, 적층 공정 기술은 얇은 2차원의 평면 형상을 제작하고 이를 반복적으로 쌓아 올림으로써 최종적으로 3차원 구조물을 만들 수 있는 공정기술이다.

여러 적층 공정 기술 중 금속 소재를 대상으로 하는 대표적인 적층기술로는 SLM 기술이 있다.

SLM 공정 기술은 수십 μm 크기의 금속 파우더 베드 위에 레이저를 조사하고 이를 열원으로 하여 파우더를 아래 구조물에 용착하는 원리를 적용한다.

따라서 SLM 공정으로 제작한 구조물은 레이저 공정 조건에 따라 많은 영향을 받게 되며, 적층원리의 특성으로 인한 제품 물성의 방향성을 가지게 된다.

현재까지 적층 공정 기술 관련하여 많은 연구가 진행되어 왔는데 그 중 대부분의 연구가 적층 공정 조건에 따른 물성 변화에 관한 내용을 다루고 있다. 먼저 Simchi 등[1]은 레이저 에너지 밀도와 소결 특성과의 상관관계를 연구하였다.

Olakanmi 등[2]은 파우더 특성에 따른 공정 특성에 관하여 연구를 진행하였고 Kim [3,4]은 SLS 및 SLM 공정에서 시편의 제작방향에 따른 기계적 물성의 차이를 분석하였다. Dewindar 등[5]은 레이저 조사시 스캐닝 패턴에 따른 영향 분석을 연구하였고, Aboulkhair 등[6]도 스캔 방식이 제품 내의 다공성 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

소재 성분 관련한 연구로는 Prashanth 등[7]이 진행한 AlSi10와 관련된 SLM 공정의 미세구조에 관한 연구가 있으며, Strumza 등[8]은 AlSi10Mg 소재를 대상으로 열물성의 이방성과 미세구조의 상관관계에 관하여 연구하였다.

본 연구에서는 SLM 공정 기술을 적용하고 AlSi10Mg 소재를 대상으로 하여 제품의 이방성을 구현하는 원인으로 제품 제작 방향에 따른 시편의 표면 특성을 분석하였고, 레이저 조사에 의해 발생하는 소재의 멜팅풀 영역내에서 소재 구성 성분 별로 분포 특성을 시험적으로 분석하였다.

앞에서 언급한 바와 같이 SLM 공정 기술은 주에너지원인 레이저 조사 조건 및 적층 조건에 의해 제품 특성이 좌우된다. Fig. 1에 SLM 공정기술 주요 공정 인자를 도 시하였다.

SLM 공정 변수와 파우더 용착을 위한 에너지 밀도의 관계는 아래와 같이 정의할 수 있다 [9].

$$E = \frac{P}{udh} \quad (1)$$

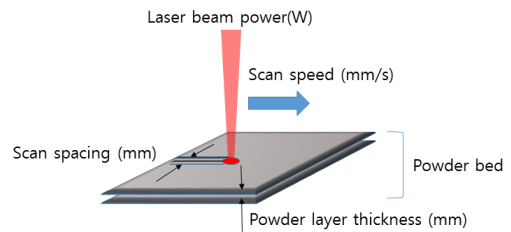


Fig. 1. Schematic diagram of main parameters of SLM [3]

Eq. (1)을 구성하는 인자인 E는 에너지 밀도 (J/mm^3)를, P는 레이저 파워 (W)를, u는 스캔 스피드 (mm/s), h는 스캔 간격 (mm)를, 그리고 d는 레이어 두께 (mm)를 의미한다. 에너지 밀도의 정의는 실제 복잡한 공정 조건을 나타내기에는 부족하지만 레이저에 의한 용융 현상을 이해하는 데 있어 가장 단순하면서도 중요한 인자이다.

2.2 시편 제작

본 연구의 목적인 SLM 공정으로 제작한 시편 내에서 소재 구성 성분 분석을 진행하기 위해 시편을 제작하였다. 시편은 실린더 형태를 가지며, 제작 방향에 따라 구분하여 동일한 공정 조건으로 제작을 진행하였다.

시편 크기는 직경 25 mm, 높이 25 mm 로 정의하였다. 제작 방향은 Fig. 2에 도시한 바와 같이 0°, 45°, 90° 세 가지로 구분하였다.

SLM 공정 장비는 독일 EOS 社의 M290 모델 (레이저 최대출력 400 W, 최대 스캔스피드 7 m/s)을 사용하였다. 소재는 동사의 AlSi10Mg (평균 밀도 $2.67 \text{ g}/\text{cm}^3$)를 적용하였다. 시편제작을 위한 SLM 공정의 주요 조건은 Table 1에서 표시하였다.

Table 1. Parameter conditions of SLM process

Laser power (W)	Scan speed (mm/s)	Scan spacing (mm)	Layer thickness (mm)
285	1.700	0.12	0.03

2. SLM 공정 특성 및 시편 제작

2.1 SLM 공정 특성

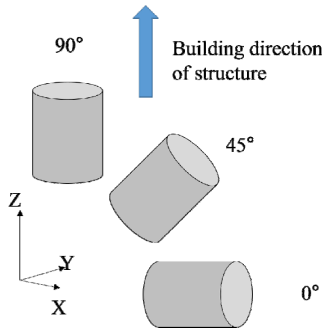


Fig. 2. Build-up angle of specimen

3. 결과 및 고찰

제작한 시편을 대상으로 광학현미경을 통한 시편 표면의 미세형상을 분석하였다.

먼저 전처리 공정으로 원형 평면의 표면 에칭을 진행한 후 표면 형상을 관찰하였다. Fig. 3은 시편 제작 방향 별로 구분한 시편 평면의 100 배율 및 1000 배율 표면 형상을 각각 보여준다.

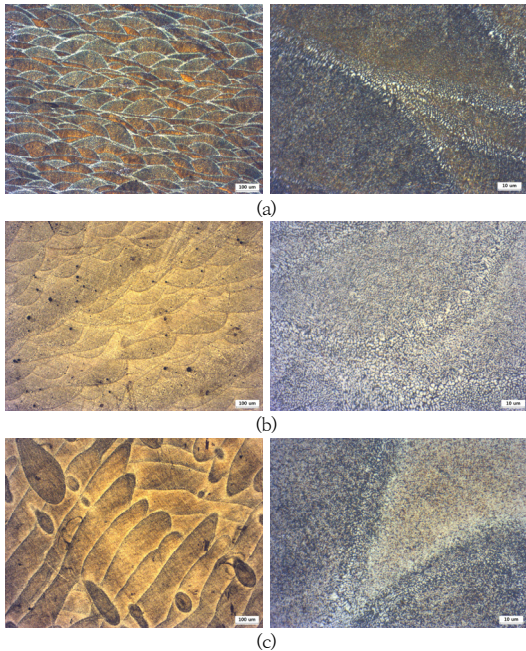


Fig. 3. 100 and 1000 times the surface shape of specimen built up by orientation (a) 0°, (b) 45° and (c) 90°

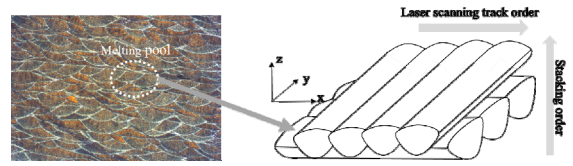


Fig. 4. Composition of laser scanning track in SLM

그림에서 보이는 바와 같이 시편의 제작 각도에 따라 레이저로 파우더가 용융되는 영역인 멜팅풀의 반복되는 단면 형태의 차이를 확인할 수 있다.

이는 Fig. 4에서 보이는 것처럼 레이저가 스캐닝 하면서 지나가는 스캐닝 트랙이 0°, 즉 xy 평면 방향으로 진행되기 때문이다. 따라서 제작 각도가 0°에서 90°로 가 끼워질수록 레이저 스캐닝 트랙의 횡단면에서 종단면으로 멜팅풀의 단면 형상이 나타난다.

멜팅풀은 레이저가 파우더에 조사될 때 가우시안 함수 형태로 에너지 밀도가 파우더 베드 내에 분포하며, 분포 영역내에서 소재의 용융이 발생하고 용융 패턴이 반복되는데 0° 평면 기준 멜팅풀의 경계면에서 이를 확인할 수 있다.

Fig. 3에서 멜팅풀 중심을 구성하는 셀들은 조밀하게 모여있는 반면, 경계면 부근에서 셀들의 크기는 상대적으로 커짐을 확인할 수 있다.

이는 멜팅풀의 중심에 위치한 소재는 용융 과정이 한 번 진행되는 반면, 멜팅풀의 경계면은 이웃하는 멜팅풀과 겹치면서 두 번의 용융 과정을 거치기 때문에, 멜팅풀 중심의 셀들이 상대적으로 더 조밀한 구성을 보이게 된다.

다음으로 멜팅풀의 중심과 경계면을 대상으로 하여 TEM (Transmission Electron Microscope) 분석을 진행하였다. 분석 장비로 JEM-ARM200F (JEOL 社)를 활용하였다.

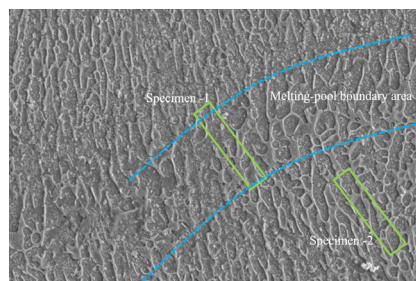


Fig. 5. Cutting location of specimen for TEM analysis

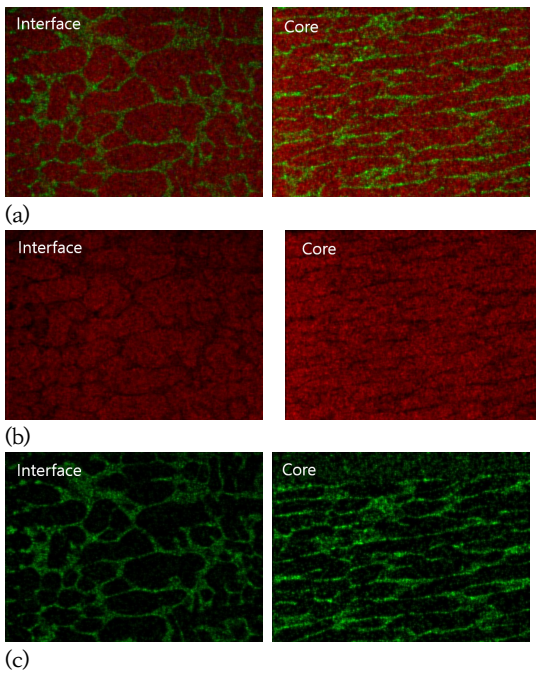


Fig. 6. Composition maps of (a) Al and Si, (b) Al and (c) Si at melting-pool interface and core

Fig. 5에 TEM 분석을 위한 시편의 절취 영역을 표시하였다. 시편은 멜팅풀 내부와 경계면에서 각각 절취하였다. Fig. 6에는 멜팅풀의 중심과 경계면에서 절취한 시편 내에서 소재 구성 성분인 Al과 Si의 분포도를 각각 보여준다. TEM 결과로부터 멜팅풀 중심과 경계면의 위치 차이별로 각 구성 성분의 분포 형태 차이를 확인할 수 있다.

Fig. 6에서 보이는 바와 같이 오른쪽 편에 표시한 멜팅풀 중심에서는 Al 성분의 셀 크기가 조밀한 반면 왼쪽 편의 경계면 Al 셀 크기는 상대적으로 확대된 영역을 가진다. 그리고 두 경우 모두 Al 셀 중심으로 Si 농도가 높은 영역이 주변에 분포되어 있음을 확인할 수 있다.

이는 일반적인 응고거동에 따라 Al이 먼저 응고하면서 계면을 따라 Si가 응고하는 형태를 따르는데, 셀 형성과정 중에 Al 과 Si 중 높은 열전달율로 냉각속도가 상대적으로 빠른 Al이 우선 냉각되면서 고화되는 Al 냉각영역에서 밀려진 Si 성분이 고화된 셀을 두르고 있는 용융액으로 흡수되고 결국 Al 셀의 경계면에 모아지게 되면서 경계면의 Si 성분농도가 높아지게 된다.

따라서 Al 셀 경계면의 Si 성분 농도를 영역별로 비교한다면, 멜팅풀 코어보다 상대적으로 셀의 사이즈가 큰 멜팅풀 경계면의 Si 농도가 멜팅풀의 코어 영역의 Si 농도보다 높을 것으로 예상할 수 있다.

결과적으로 멜팅풀의 경계면에서 더 높은 농도의 Si가 존재함으로써 멜팅풀 경계면과 코어에서의 기계적 물성 및 열물성 등의 차이가 존재할 것이며, 이는 앞서 Fig. 3에서 보이는 SLM 공정 특징인 멜팅풀 경계면 형태의 방향성을 고려할 때, SLM 공정으로 제작되는 구조물의 기계적 물성이 Si 성분농도가 높은 멜팅풀의 경계면에서 더 취약할 것이며, 따라서 기계적 물성의 이방성이 존재함을 설명할 수 있다. 이는 Kim [4]의 SLM 공정으로 제작한 AlSi10Mg 시편 인장특성 연구로부터 방향성을 가짐을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 AlSi10Mg 파우더 소재를 대상으로 하여, 적층공정 기술 중의 하나인 SLM 공정기술을 적용하여 제작 방향별로 표면 분석 시편을 제작하였으며 광학 현미경과 TEM 분석을 통하여 시편 내부에서 생성된 멜팅풀 구조와 멜팅풀 내부에서 소재 구성 성분의 분포 특성에 관하여 시험적으로 분석하였다. 분석 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 레이저에 의해 생성되는 소재의 용융영역인 멜팅풀 형태는 가우시안 분포의 에너지 밀도 형태와 유사함을 보이며, 생성방향이 xy 평면을 따라 진행되기 때문에 시편 제작 방향별로 다른 단면 형태를 가진다.
- 2) 멜팅풀의 중심과 경계면을 구성하는 셀 중 중심에 위치한 셀이 더 조밀한 구성을 보이는데, 이는 멜팅풀 경계면은 이웃 멜팅풀과 접하게 되면서 2번의 용융 과정을 거치는 반면 중심은 1번의 용융과정만 진행되므로 상대적으로 조밀한 셀의 구성을 보인다.
- 3) 멜팅풀 중심과 경계면의 셀 구성에서 Al 성분이 대부분인 셀 중심의 경계면에서 Si 농도가 높게 나타나는데, 이는 Al과 Si 성분의 서로 다른 냉각속도로 인해 Si 성분이 셀 주변으로 집중되었음을 확인하였다.

이상과 같이 SLM 공정으로 제작한 시편은 멜팅풀 내부에서 소재 구성 성분의 농도가 다르게 나타나며, 따라서 방향성을 가지고 있는 멜팅풀의 형태로 인해, 구조물의 기계적 물성 또한 이방성을 가질 것임을 예상할 수 있다.

References

- [1] A. Simchi, H. Pohl, "Effect of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder", *Mater Process Engr A*, vol.359, pp.119~28, 2003.
DOI:[https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(03\)00341-1](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(03)00341-1)
- [2] E. O. Olakanmi, K. W. Dalgarno, R. F. Cochrane, "Laser sintering of blended Al-Si powders", *Rapid Prototyp J*, vol.18 pp.109~19, 2012.
DOI:<https://doi.org/10.1108/13552541211212096>
- [3] M. Kim, "Study on flexural properties of polyamide 12 according to temperature produced by selective laser sintering", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol.19, no.11, pp.319~325, 2017.
DOI:<https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.11.319>
- [4] M. Kim, "Study on tensile properties of AlSi10Mg produced by selective laser melting", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 19, no.12, pp.25~31, 2018.
DOI:<https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.12.25>
- [5] M. M. Dewidar, K. W. Dalgarno, C. S. Wright, "Processing conditions and mechanical properties of high-speed steel parts fabricated using direct selective laser sintering", *Proc Inst Mech Eng Part B: J Eng Manuf*, vol.217, pp.1651~62, 2003.
DOI:<https://doi.org/10.1243/095440503772680587>
- [6] N. T. Aboulkhair, N. M. Everitt, I. Ashcroft, C. Tuck, "Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting", *Add Manuf*, vol.1-4, pp.77~86, 2014.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.001>
- [7] K. G. Prashanth, S. Scudino, H. J. Klaus, K. B. Surreddi, L. Lober, Z. Wang, A. K. Chaubey, U. Kuhn, J. Eckert, "Microstructure and mechanical properties of Al-12Si produced by selective laser melting: Effect of heat treatment", *Materials Science & Engineering A*, vol.590, pp.153~160, 2014.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.10.023>
- [8] E. Strumza, O. Yeheskel, S. Hayun, "The effect of texture on the anisotropy of thermalphysical properties of additively manufactured AlSi10Mg", *Additive Manufacturing*, vol.29, 2019.
DOI:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.06.013>
- [9] K. Prashanth, S. Scudino, T. Maity, J. Das, J. Eckert, "Is the energy density a reliable parameter for materials synthesis by selective laser melting?" *Materials Research Letters*, vol.5, pp.386~390, 2017.
DOI:<https://doi.org/10.1080/21663831.2017.1299808>

김 무 선(Moosun Kim)

[정회원]



- 2002년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부(공학석사)
- 2008년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부(공학박사)
- 2008년 7월 ~ 2012년 8월 : 현대자동차 남양연구소 책임연구원
- 2012년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

〈관심분야〉

적층기법, 최적화, 열유동 및 구조 해석