

SLM 공정 기법으로 제작한 AlSi10Mg 인장특성에 관한 연구

김무선

한국철도기술연구원 도시철도연구팀

Study on Tensile Properties of AlSi10Mg produced by Selective Laser Melting

Moosun Kim

Urban Transit Research Team, Korea Railroad Research Institute

요약 선택적 레이저 용융 (Selective Laser Melting) 기법은 금속 소재를 다루는 대표적인 3D 프린팅 기법중의 하나이다. SLM 기법으로 제작되는 구조물의 특성을 좌우하는 주요 제작 인자로는 구조물의 적층 제작 방향, 레이저 파워, 레이저 스캔 스피드 및 스캔 간격 등을 고려할 수 있다. 이번 연구에서는 AlSi10Mg 합금을 대상 소재로 하여, 인장 시편의 제작 방향, 레이저 스캔 스피드 및 스캔 간격을 변수로 하여, 인장특성 결과를 비교 분석하였다. 인장특성으로는 항복 응력, 인장강도 및 연신율을 고려하였다. 시험결과로부터, 인장 시편의 제작 방향 기준으로 0도, 45도, 90도 순서로 항복 응력 값이 낮아짐을 확인하였다. 레이저 스캔 스피드 기준으로는 1870mm/min에서 가장 큰 항복 응력값을 보였으며, 스캔 스피드가 낮아질수록 항복 응력 크기도 줄어들었다. 레이저 스캔 간격 기준으로, 그 크기가 증가할수록 항복 응력값은 증가하지만, 다른 시험 기준에 비해 그 변화폭은 가장 적었다. 인장강도 및 연신율은 시험조건에 따른 명확한 경향성을 파악하기 어려웠다.

Abstract Selective Laser Melting is one of the representative 3D printing techniques for handling metal materials. The main factors influencing the characteristics of structures fabricated by the SLM method include the build-up angle of structures, laser power, laser scan speed, and scan spacing. In this study, the tensile properties of AlSi10Mg alloys were investigated by considering the build-up angle of tensile test specimens, laser scanning speed and scan spacing as variables. The yield stress, tensile strength, and elongation were considered as tensile properties. From the test results, it was confirmed that the yield stress values were lowered in the order of 0, 45, and 90 based on the manufacturing direction of the tensile specimen. The maximum yield stress value was obtained at 1870 mm / min based on the laser scan speed. The yield stress size decreased with decreasing scan speed. Based on the laser scan spacing, as the value increases, the yield stress increases, but the variation is smaller than the other test criteria. The tendency of the tensile strength and elongation variation depending on the test conditions was difficult to understand.

Keywords : AlSi10Mg, Build-up angle, Laser, Selective Laser Melting, Tensile property

1. 서론

레이저 적층 제작 공법은 레이저를 열원으로 하여 파우더 형태의 고분자 또는 금속 소재를 녹여 2차원 레이어를 융착하는 방식으로 3차원 구조물을 제작하는 제조

방식이다. 레이저 적층 제작 공법은 일반적으로 파우더 분사 방식과 파우더 베드 방식으로 구분하는데, 그 중 파우더 베드 방식은 소재 파우더를 제작 플랫폼 위에 균일한 두께로 도포한 후, 구조물 영역에 레이저를 조사하여 융착하는 방식으로 이 과정을 반복하여 진행하게 된다.

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었음

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

Tel: +82-31-460-5546 email: mskim@krri.re.kr

Received October 1, 2018

Revised November 2, 2018

Accepted December 7, 2018

Published December 31, 2018

파우더 분사 방식과 비교하여 구조물의 설계 자유도가 상대적으로 높으며, 표면 품질이 우수한 장점이 있다. 파우더 베드 방식의 대표적 기술인 SLM (Selective Laser Melting) 기법은 주로 금속 소재의 부품 제작시 활용되는 기술이다.

금속 파우더를 이용하는 SLM 공정 기법은 여러 가지 공정변수에 의해 영향을 받게 된다. 따라서 공정을 성공적으로 제어하고 제품의 우수한 기계적 특성을 얻기 위해서는 적절한 공정조건이 뒷받침되어야 한다. 현재까지 공정조건에 따른 SLM 공정 특성에 관한 많은 연구가 진행되었다.

Olakanmi[1]는 파우더들의 뭉침 현상을 피하고 연속적인 증착 표면을 얻기 위한 공정조건에 대하여 분석하였다. Dadbakhsh[2]은 알루미늄 파우더에 Fe₂O₃ 첨가제가 공정 Window에 미치는 영향에 관하여 연구하였다. Read[3]의 연구에서는 알루미늄 합금 파우더에 레이저 조사 조건의 상호작용에 관하여 다루었다. 그리고 Simchi[4]는 레이저 에너지 밀도와 소결 밀도와의 상관관계를 연구하였다. Dewindar[5] 및 Su[6]은 레이저 스캐닝 패턴에 관한 특성을 연구하였으며, Aboulkhair[7]은 스캔 방식이 제품의 porosity에 미치는 영향에 관하여 연구하였다. Niu[8]는 파우더의 제작방식 특성의 차이에 따른 제품의 밀도 변화 연구를 진행하였으며, Olakanmi[9]는 파우더 사이즈와 분포 및 형상 등에 따른 SLM 공정 특성을 연구하였다.

SLM 공정 기법은 레이어 사이의 경계면에서 보이드 등의 결함이 발생하기 쉽기 때문에, 경계면의 방향이 기계적 물성에 영향을 미치게 된다. 따라서 경계면 방향을 결정하는 구조물의 레이어 적층 방향, 즉 제작 방향이 최종 기계적 특성을 좌우하게 된다.

본 연구에서는, 알루미늄 합금 (AlSi10Mg) 소재를 대상으로, SLM 기법의 주요 공정 인자 중, 시편의 제작 방향, 레이저 스캔 스피드 및 스캔 간격을 변수로 하여, 각 조건에 따른 탄성 및 소성 영역의 인장특성을 시험적으로 분석하였다.

2. SLM 공정 특성 및 시편 제작

2.1 SLM 공정 특성

SLM 공정에서 제작 구조물 특성에 영향을 미치는 주요 공정조건을 Table 1에 요약하였다[10].

Table 1. SLM processing parameters [10]

SLM processing parameters
Laser power
Scan rates(Scan speed)
Atmospheric control
Gas flow
Heaters(bed temperature)
Laser type
Scan radius
Scan vector length
Scan spacing
Thickness of layers

SLM 기법의 주요 공정조건 중 상대적으로 구조물 특성에 미치는 영향이 큰 레이저 파워, 스캔 스피드, 스캔 간격 및 레이어 두께에 대한 도식적인 설명은 Fig. 1에 나타내었다.

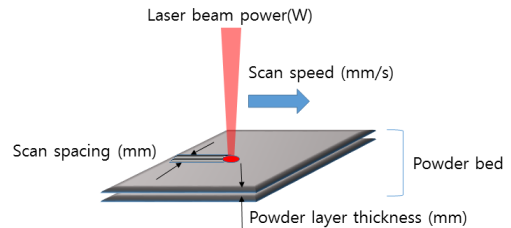


Fig. 1. Schematic diagram of main parameters of SLM

앞에서 열거한 공정변수와 파우더에 공급되는 에너지와의 관계는 아래의 한가지 파라미터로 정의할 수 있다 [11].

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

이 때, E 는 에너지 밀도 (J/mm^3)를, P 는 레이저 파워 (W)를, u 는 스캔 스피드 (mm/s), h 는 스캔 간격 (mm)를, 그리고 d 는 레이어 두께 (mm)를 의미한다.

식(1)과 같이, 에너지 밀도는 금속 파우더의 용융 상태를 예측하기 위한 가장 중요하면서도 간단한 형태의 식으로 정의할 수 있지만, 실제 공정의 복잡한 현상을 이해하기에는 충분하지 않다. 각 파라미터가 용융 현상에 미치는 영향이 다양하므로 파라미터의 조건에 따른 물성 특성을 시험적으로 접근하여 분석하는 방안이 병행되어야 한다.

2.2 시편 제작

본 연구의 목적인 공정조건에 따른 알루미늄 합금의 인장특성을 분석하기 위해, Fig. 2와 같이 제작 평면을 기준으로, 시편 길이 방향이 0도, 45도, 90도의 방향이 되도록 시편 제작을 구분하였다.

다음으로 Table. 2와 같이 스캔 스피드와 스캔 간격을 기준으로 각 시편 제작 케이스를 정의하였으며 시험조건당 5개씩의 시편을 SLM 기법으로 제작하였다.

SLM 공정 장비는 독일 EOS 社의 M290 모델 (레이저 최대출력 400W, 최대 스캔스피드 7m/s)을 활용하였다. 소재는 EOS 社의 AISi10Mg 소재(평균 밀도 2.67g/cm³)를 사용하였다.

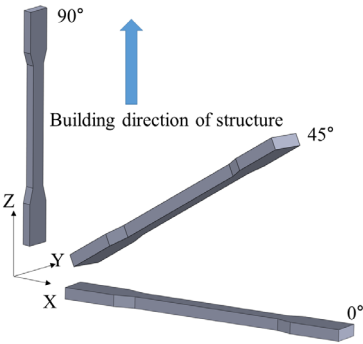


Fig. 2. Build-up angle of specimen

Table 2. Specimen conditions

Case no	Scan speed(mm/s)	Scan spacing(mm)
Case 1	1700	0.1
Case 2	1700	0.12
Case 3	1700	0.14
Case 4	1530	0.12
Case 5	1870	0.12

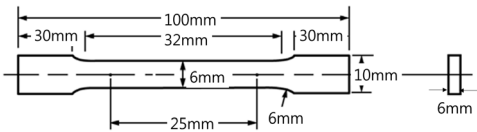


Fig. 3. Size of specimen [12]

인장 시편 규격은 ASTM E8을 인용하여, Fig. 3과 같이 시편 사이즈를 정의하였다.

Fig. 4에 SLM 공정으로 제작 완료한 시편 형태를 나타내었다.

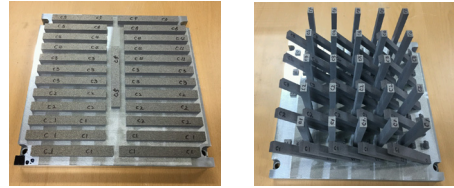


Fig. 4. Completion of specimen production

3. 결과 및 고찰

Shimadzu 社의 UTM 시험기인 AGS-F1000kNX(최대하중 1000kN) 시험기를 이용하여 제작 방향 및 레이저 조사 조건별 알루미늄 합금 시편의 인장시험을 실시하였다. 인장 속도는 항복점 전까지 0.4mm/min으로, 그 이후로는 1.5mm/min으로 실시하였다.

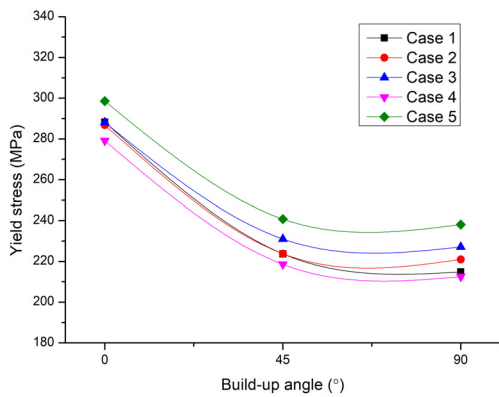
Fig. 5에 각 제작 방향별로 모든 공정조건 케이스 별로 인장특성 시험결과를 도시하였다. 결과값은 조건당 5개 시편의 평균값으로 정의하였다.

먼저 Fig. 5(a)의 항복 응력을 살펴보면, 모든 시험 케이스에 있어, 시편 제작 방향별로 뚜렷한 값의 변화 경향을 확인할 수 있다.

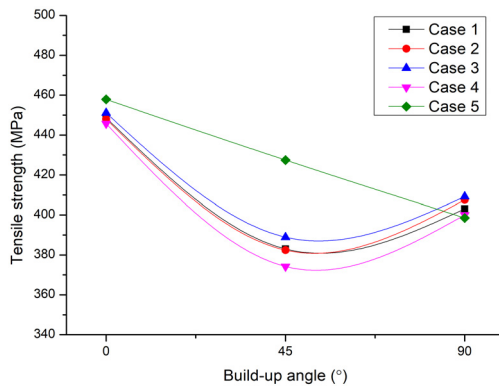
제작 방향 0도에서 가장 높은 항복 응력 값을 나타내며, 90도에서 가장 낮은 항복 응력 값을 가진다. Case 1을 예로 들면, 0도에서 288MPa, 45도에서 224MPa, 90도에서 215MPa의 값을 각각 가진다.

한가지 주요 특징은, 0도와 45도 사이의 값의 차이에 비해, 45도와 90도의 값의 차이는 상대적으로 적다. Case 1의 경우 45도의 항복 응력 값은 0도의 결과값에 비해 22%가 감소하였으나 90도의 항복 응력 값은 45도 대비 4%만 감소하였다.

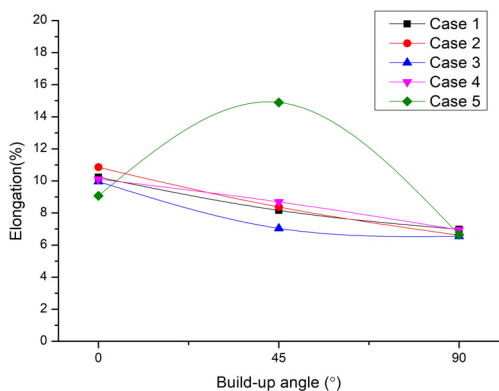
다음으로, Fig. 5의 (b)와 (c)에서 인장강도와 연신율을 살펴보면, 항복 응력과는 다른 경향을 확인할 수 있다. 먼저, 0도에서 최대 인장강도 값을 가지지만, 최소값은 45도에서 발생함을 확인할 수 있다. 연신율은 0도에서 90도로 진행할수록 낮은 값을 가지는 특징은 유사하나, 0도와 45도, 45도와 90도의 결과값의 차이가 거의 동일하다. 특이한 점은, 대부분의 시험 케이스에 있어서, 제작 방향에 대해 비슷한 양상을 보이지만, case 5 조건에서 45도의 결과값이 다른 경향을 보여준다.



(a)

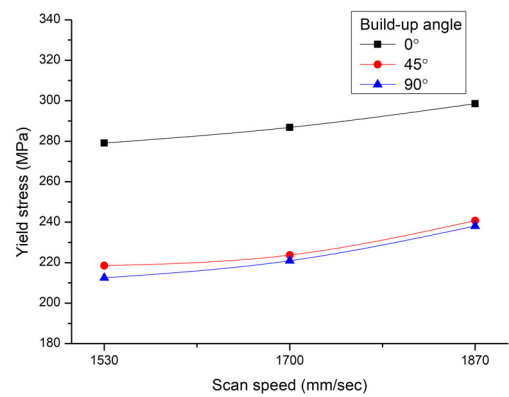


(b)

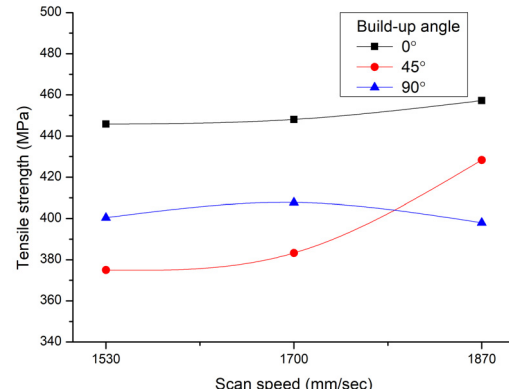


(c)

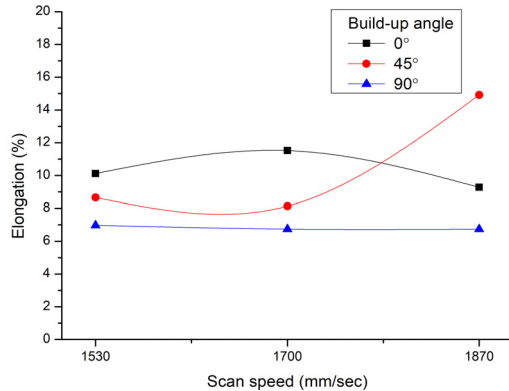
Fig. 5. Results of (a) yield stress, (b) tensile strength and (c) elongation of all test cases according to the build-up angle



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. Results of (a) yield stress, (b) tensile strength and (c) elongation according to the laser scan speed

Fig. 6에는 레이저 스캔 스피드 조건에 따른 항복 응력, 인장강도 및 연신을 결과값을 나타내었다.

먼저 레이저 스캔 스피드에 따른 항복 응력 값을 살펴 보면, 스캔 스피드가 증가할수록 항복 응력 값이 증가함

을 확인할 수 있다. 스캔 스피드가 1870 mm/min의 경우, 1530 mm/min에 비해, 0도, 45도, 90도 제작 방향에서 각각 7%, 10%, 12.2% 증가한 값을 가진다.

인장강도의 경우, 90도 제작 방향을 제외하고는 그 값이 증가하며, 연신율의 경우는 스캔 스피드에 따른 특별한 경향성이 관측되지 않는다. 다음으로 Fig. 7에 스캔 간격에 따른 인장특성을 도시하였다. Fig. 7(a)에서 볼 수 있는 바와 같이, 제작 방향 0도의 경우 스캔 간격에 따른 항복 응력의 별다른 변화가 보이지 않지만, 45도 및 90도로 제작 방향이 증가할수록, 스캔 간격에 따른 항복 응력의 변화가 뚜렷해진다.

인장강도는 45도와 90도에서 스캔 간격에 따른 분명한 증가 양상을 확인할 수 있었지만, 연신율은 각 제조 방향별로 스캔 간격에 따른 동일한 경향성을 확인하기가 어렵다.

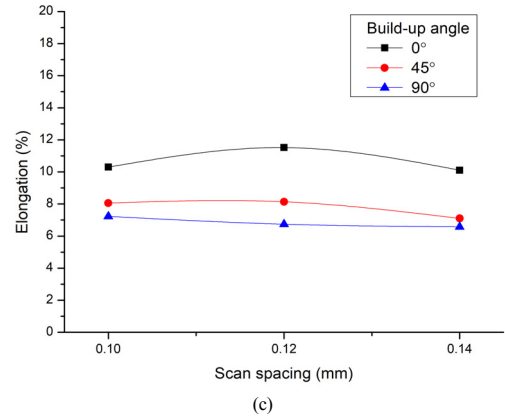
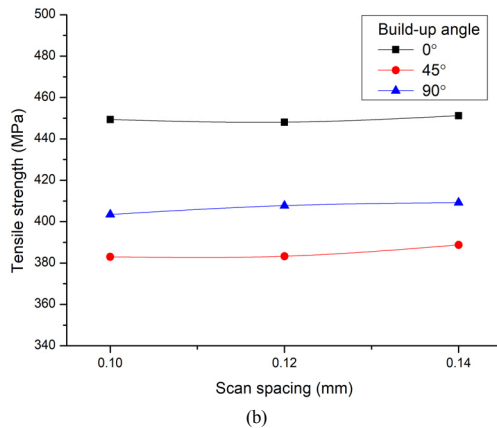
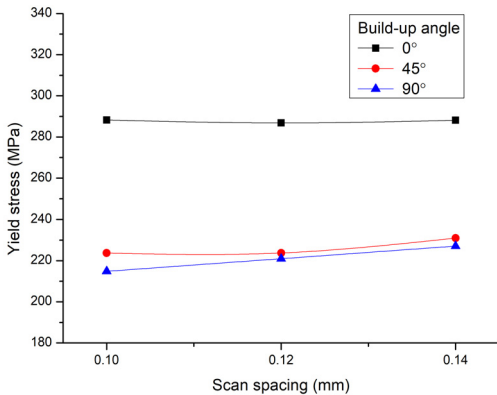


Fig. 7. Results of (a) yield stress, (b) tensile strength and (c) elongation according to the laser scan spacing

앞서 살펴본 바와 같이, 모든 시험조건에서 시편의 제작 방향이 0도에서 90도로 가까워질수록, 탄성 구간의 항복 응력은 점차적으로 낮아짐을 확인하였다. 이는 SLM 기법으로 구조물 제작시 레이어간의 경계면에 보이드와 같은 구조적 결함이 높은 밀도로 포함될 가능성이 커지므로 인해, 경계면이 인장 응력 방향의 수직에 가까울수록 항복 응력이 낮아지는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Chelbus[13]의 연구에서 보이는 결과와 유사한 양상을 보인다.

다음으로 레이저의 스캔 스피드와 항복 응력의 관계에서, 레이저 스캔 스피드가 높을수록 항복 응력도 높아지는데, 이는 결국 레이저 스캔 스피드의 시험조건이 1870 mm/min인 경우에, 경계면의 구조적 결함의 밀도가 가장 낮은 것으로 판단된다. 식(1)에서 정의한 바와 같이, 레이저 스캔 스피드가 낮을수록 에너지 밀도는 높아져서 금속 파우더의 용융이 쉽게 발생하지만, 이번 시험조건에서는, 과도한 에너지 밀도로 인해, 용융 풀(melting pool)의 온도와 유동성(난류 특성)이 증가했을 것으로 판단되며, 이때, 용융 풀 내에 외부 가스의 유입 등이 발생하고 이는 보이드 등의 구조 결함 증가로 이어진 것으로 판단된다.

레이저 스캔 간격과 항복 응력의 관계에선, 일반적으로 레이저 스캔 간격의 증대는 용융부의 온도를 낮추는 효과가 있다. 따라서 앞선 레이저 스캔 스피드와 마찬가지로, 과도한 에너지 밀도가 발생하는 낮은 레이저 스캔 간격에서는 용융 풀의 온도 증가와 난류 특성으로 인해

낮은 항복 응력을 보이는 것으로 판단된다.

다음으로 소성 구간을 지나는 인장강도와 연신율의 결과를 보면 대부분의 시험조건에서 제작 방향 기준으로 45도의 경우 90도보다 낮은 인장강도를 보인다. 소성 변형에 대한 저항력이 45도에서 가장 약한 것으로 판단되지만, 이에 관한 명확한 이유에 대해서는 미세조직 및 결합 분석 등이 필요할 것으로 판단된다. 연신율의 결과에서는 시험조건에 따른 연신율 변화의 뚜렷한 경향성을 파악하기가 어려웠다.

4. 결론

이번 연구에서는 SLM 기법을 적용한 AlSi10Mg 소재 시편을 대상으로, 시편 제작 방향 및 레이저 스캔 스피드, 레이저 스캔 간격 등으로 시험조건을 구분하여 인장특성을 분석하였다.

분석결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 항복 응력은 모든 시험조건에서, 시편 제작 방향을 기준으로 0도, 45도, 90도 순으로 결과값의 크기가 점차적으로 줄어들었다.
- (2) 레이저 스캔 스피드 기준으로, 1870mm/min의 조건에서 가장 높은 항복 응력을 가진다.
- (3) 레이저 스캔 간격 기준으로, 그 값이 높아질 수록, 항복 응력 값이 증가한다.
- (4) 항복 응력 값은 시편 제작 방향 조건에 따라 가장 큰 변화를 보였으며, 레이저 스캔 스피드, 레이저 스캔 간격 조건 순으로 변화 폭이 줄어든다.
- (5) 소성 구간을 지나는 인장강도 및 연신율 값은 시험조건에 따른 명확한 경향을 보이지 않는다.

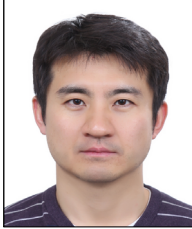
향후, 소성구간의 인장특성에 관한 명확한 배경을 이해하기 위해서는 시편의 미세조직 분석과 공정조건에 의한 결합에 따른 소성 특성 분석이 뒷받침되어야 할 것이다.

References

- [1] E.Olakanmi, "Selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of pure Al, Al - Mg, and Al - Si powders: effect of processing conditions and powder properties", *Journal of Materials Processing Technology*, vol.213, issue.8, pp.1387-1405, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.03.009>
- [2] S.Dadbakhsh, L.Hao, P.Jerrard, D.Zhang, "Experimental investigation on selective laser melting behaviour and processing windows of in situ reacted Al/Fe2O3 powder mixture", *Powder Technology*, vol.231, pp.112-121, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.07.061>
- [3] N.Read, W.Wang, K.Essa, M.Attallah, "Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: process optimisation and mechanical properties development", *Materials & Design*, vol.65, pp.417 - 424, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.044>
- [4] A.Simchi, H.Pohl, "Effect of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder", *Materials Science and Engineering: A*, vol.359, pp.119 - 128, 2003.
DOI: [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(03\)00341-1](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(03)00341-1)
- [5] M.Dewidar, K.Dalgarno, C.Wright, "Processing conditions and mechanical properties of high-speed steel parts fabricated using direct selective laser sintering", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol.217, pp.1651 - 1662, 2003.
DOI: <https://doi.org/10.1243/095440503772680587>
- [6] W.Su, P.Erasenthiran, P.Dickens, "Investigation of fully dense laser sintering of tool steel powder using a pulsed Nd:YAG laser", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol.217, pp.127 - 138, 2003.
DOI: <https://doi.org/10.1243/095440603762554677>
- [7] N.Aboulkhair, N.Everitt, I.Ashcroft, C.Tuck, "Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting", *Additive Manufacturing*, vol.1 - 4, pp.77 - 86, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.001>
- [8] H.Niu, I.Chang, "Liquid phase sintering of M3/2 high speed steel by selective laser sintering", *Scripta Materialia*, vol.39, pp.67 - 72, 1998.
DOI: [https://doi.org/10.1016/s1359-6462\(98\)00126-2](https://doi.org/10.1016/s1359-6462(98)00126-2)
- [9] E.Olakanmi, K.Dalgarno, R.Cochrane, "Laser sintering of blended Al - .Si powders", *Rapid Prototyping Journal*, vol.18, pp.109 - 119, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1108/13552541211212096>
- [10] M. Agarwala, D. Bourell, J. Beaman, H. Marcus, J. Barlow, "Direct selective laser sintering of metals", *Rapid Prototyping Journal*, vol. 1, issue: 1, pp.26-36, 1995.
DOI: <https://doi.org/10.1108/13552549510078113>
- [11] K.Prashanth, S.Scudino, T.Maitly, 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>
- [12] ASTM E8/E8M-15a, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
DOI : https://doi.org/10.1520/E0008_E0008M-15A
- [13] E.Chlebus, B.Kuznicka, T.Kurzynowski, B.Dybała, "Microstructure and mechanical behaviour of Ti - 6Al - 7Nb alloy produced by selective laser melting", *Materials Characterization*, vol.62, pp.488 - 495, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2011.03.006>

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