

스테인리스강을 사용한 분말 적층 용융 방식의 금속 3차원 프린터에서 제작된 물체의 최소 선폭 측정

손봉국^{1,2}, 정연홍³, 조재흥^{1*}
¹한남대학교 공과대학 광.센서공학과
²한국기계연구원 광응용기계연구실
³국제대학교 안경광학과

Measurement of minimum line width of an object fabricated by metal 3D printer using powder bed fusion type with stainless steel powder

BongKuk Son^{1,2}, Youn Hong Jeong³, Jae Heung Jo^{1*}

¹Department of Photonics and Sensors, Hannam University, Republic of Korea

²Department of Laser & Electron-Beam Application, Korea Institute of Machinery &
Materials, Republic of Korea

³Department of Optometry, Kookje University

요 약 금속 3D 프린팅 기술은 레이저 빔의 초점에 금속분말을 주입하는 방식에 따라 대표적으로 PBF(Powder Bed Fusion) 방식과 DED(Direct Energy Deposition) 방식으로 나뉜다. DED 방식은 금속 분말 도포와 동시에 레이저를 조사하여 3차원 구조물을 제작하는 금속 3D 프린팅 기술이고, PBF 방식은 일정 높이로 3차원 그래픽을 슬라이싱 한 후 한 층씩 금속 분말을 적층하여 레이저를 이용해 3차원 구조물을 제조하는 방식이다. DED 방식을 사용하면 레이저 클래딩, 금속 용접 등에는 강점을 가지지만 3D 형상을 제작할 경우 밀도가 낮아지는 문제점이 발생한다. DED 방식에서의 구조체 밀도 문제를 해결하기 위해 PBF 방식을 도입하면 상대적으로 밀도가 높은 3차원 구조물을 제작하는데 용이하다. 본 논문에서는 갈바노 스캐너와 광섬유로 전송되는 Nd:YAG 레이저 빔을 이용한 약 30 μm 크기의 스테인리스 강 분말을 이용하는 PBF 방식의 3차원 프린터를 제작하고, 이를 이용하여 얇은 금속 구조물을 제작하였다. 또한 레이저의 조사 횟수, 출력, 초점 크기, 스캐닝 속도에 따른 선폭의 최적조건을 찾았으며, 그 결과 최적 조건은 레이저 조사 횟수 2회, 출력 30 W, 초점 크기 28.7 μm , 스캐닝 속도 200 mm/s에서 최소 선폭은 약 85.3 μm 로 측정되었다.

Abstract Metal three-dimensional (3D) printing technologies are mainly classified as powder bed fusion (PBF) and direct energy deposition (DED) methods according to the method of application of a laser beam to metallic powder. The DED method can be used to fabricate fine and hard 3D metallic structures by applying a strong laser beam to a thin layer of metallic powder. The PBF method involves slicing 3D graphics to be a certain height, laminating metal powders, and making a 3D structure using a laser. While the DED method has advantages such as laser cladding and metallic welding, it causes problems with low density when 3D shapes are created. The PBF method was introduced to address the structural density issues in the DED method and makes it easier to produce relatively dense 3D structures. In this paper, thin lines were produced by using PBF 3D printers with stainless-steel powder of roughly 30 μm in diameter with a galvano scanner and fiber-transferred Nd:YAG laser beam. Experiments were carried out to find the optimal conditions for the width of a line depending on the processing times, laser power, spot size, and scan speed. The optimal conditions were two scanning processes in one line structure with a laser power of 30 W, spot size of 28.7 μm , and scan speed of 200 mm/s. With these conditions, a minimum width of about 85.3 μm was obtained.

Keywords : Additive manufacturing, Galvano scanner, Line width, wall thickness, Metal 3D printing, Powder bed fusion

*Corresponding Author : Jae Heung Jo(Hannam Univ.)

Tel: +82-10-4460-2111 email: jhjo@hnu.kr

Received July 24, 2018

Revised August 28, 2018

Accepted October 5, 2018

Published October 31, 2018

1. 서론

3D 프린팅 기술은 복잡한 3차원 형상 제작에 용이하고 다품종 소량생산 환경에 적합하여 산업분야에서 수요가 지속적으로 증가하고 있다[1-2]. 금속 분말을 이용한 3차원 형상 적층 공정 방식에는 대표적으로 DED (directenergy deposition), PBF (powder bed fusion) 방식이 개발되어 있다[2-8]. DED 방식은 고분자, 세라믹, 금속 매트릭스 복합재료 등에 주로 사용되는 방식으로 분말을 도포함과 동시에 레이저를 갈바노미터나 폴리곤 미러로 스캐닝하면서 용융시키는 방법으로 구조 및 제작 조건이 쉽지 않다[3,8]. 이에 반하여 PBF 방식은 평평한 바닥에 금속 분말을 한 층씩 적층한 후 레이저로 녹여서 구조물을 제작하는 방법으로 DED 방식보다는 제작과 조작이 상대적으로 간편하다[4,8]. DED 방식을 사용하면 레이저 클래딩, 금속 용접 등에는 강점을 가지지만 3차원 형상을 제작할 경우 밀도가 낮아지는 문제점이 발생한다. DED 방식에서의 이러한 문제점을 해결하기 위해 PBF 방식을 도입하였는데, 이는 상대적으로 밀도가 높은 3차원 구조물을 제작하기에 용이하다[2]. PBF 방식에서 선포이 굵은 경우 구조물의 중간에 기공이 발생하여 밀도가 낮아지게 된다[9-10]. 앞의 2가지 방식 모두 선포를 최소화 시키면 즉, 3차원 구조물의 밀도를 높이게 되면 보다 정밀한 가공을 수행할 수 있으며, 의료분야에서 인공관절, 두개골, 임플란트 등 고밀도를 필요로 하는 구조물을 생산하는데 유용하게 사용할 수 있다[1,9,10].

본 논문에서는 스테인리스강 분말을 적층한 후, 레이저 다이오드 펄핑한 파장 1.06 μm 의 Nd:YAG 레이저 빔을 갈바노 스캐너로 2차원 주사하면서 용융시킨 분말을 순차적으로 적층해가는 PBF 방식의 금속 3D 프린터를 제작하고, 이를 이용하여 얇은 벽(선)을 제작하고자 한다. 그리고 이 벽에 대한 선포를 측정하고 분석함으로써 레이저 조사 횟수, 레이저 출력, 초점 크기, 스캐닝 속도 등에 대한 최적화된 실험적 조건을 찾고자 한다.

2. PBF 방식의 금속 3D 프린터 구조 및 제작

Fig. 1은 본 논문에서 설계하고 제작한 PBF 시스템의 간단한 모식도이다. 그림에서 보듯이 PBF 방식의 금속 3D 프린터는 다음과 같이 크게 3부분으로 구성하였다.

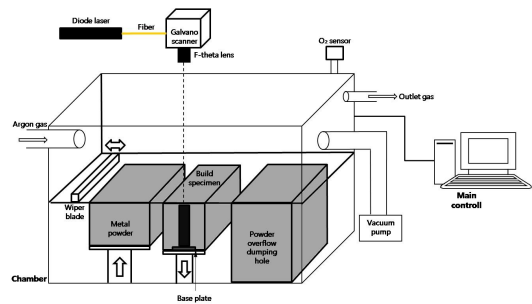


Fig. 1. Schematic diagram of metal 3D printer with powder bed fusion system

첫 번째 부분은 가공에 필요한 금속 분말을 저장해 두는 금속분말 통과 이 통 속의 금속 분말을 이송하고 이를 작업대로 공급해 주기 위한 와이퍼 블레이드(wiper blade) 및 3차원 금속 구조물이 만드는 최대 폭 250 mm × 길이 250 mm × 높이 100 mm의 크기로 적층이 가능한 작업대(build specimen), 그리고 가공 후 남은 분말과 가공시 발생한 금속 입자들 모아두는 유티 금속 분말 저장 홈(powder overflow dumping hole)과 같이 적층에 필요한 모든 장치 및 장비를 포함하는 적층부의 챔버(chamber)이다. 이 챔버는 진공펌프(becker, VASF L50)로 내부를 진공으로 만드는 후 불활성 기체인 아르곤 가스로 내부를 채우며 작업 후 발생하는 배기가스는 다른 출구로 배출한다. 두 번째 부분은 레이저 및 주사부로 적층부에 레이저 다이오드로 펄핑하는 파장 1.06 μm , 최대 출력 500 W인 Nd:YAG 레이저(Raycus Co., RFL-C500)와 이 레이저 빔을 전송하는 길이 10 m인 광섬유, 그리고 이 광섬유에서 나오는 레이저 빔을 금속 분말의 적층부에 집속하여 2차원으로 주사하는 갈바노 스캐너(galvano scanner) (scanlab, hurrySCAN ii 14) 및 F- θ lens로 구성된다. 마지막 부분은 적층부와 레이저 및 주사부를 통제하고 실험 과정 및 시스템을 제어하는 PC 기반의 통합 제어부 컴퓨터(main control)이다. 그리고 챔버(chamber) 내에는 가공 중 금속 분말의 산화를 최소화하기 위해 산소의 양을 측정하고 조절에 필요한 산소 센서(Roscid +Becker Co., VASF L50)를 설치하였다.

Fig. 2는 Fig. 1에 따라 제작된 PBF 방식의 금속분말 3D 프린터의 사진이다. 이 사진에서 보듯이 적색 사각형은 왼쪽부터 PBF 방식의 금속 3D 프린터의 광원인 파장 1.06 μm 인 Nd:YAG 레이저, 이 레이저 빔을 2차원으로 스테인리스강 파우더에 조사하는 갈바노 스캐너와 F- θ lens. 2차원 스테인리스강 분말의 높이를 미세하게 갈

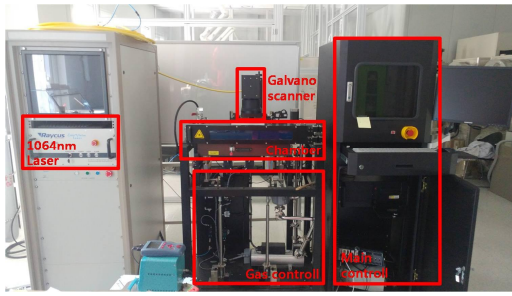


Fig. 2. Photo of the metal 3D printer with powder bed fusion system

면서 높아가는 와이퍼가 들어간 챔버, 레이저 용융이 잘 일어나도록 챔버 안을 진공으로 만든 후에 아르곤 가스를 주입하는 가스 컨트롤러, 이 PBF 방식의 금속 3D 프린터의 각 부분을 제어하는 메인 컨트롤러이다.

3. 선평측정을 위한 실험장치 및 방법

Fig. 3은 실험에 사용한 AMA사의 AM 316L cE (sus316L)를 32 μm 크기의 망으로 거른 후 이를 10배율 현미경(Nikon, MM-800)으로 찍은 사진이다.



Fig. 3. Microscopic photo of stainless steel powder (AM 316L cE) with the diameter size of more than 32 μm

실험에 들어가기 앞선 준비 단계로써 실험시 sus316L의 산화를 막기 위해 Chamber 안의 산소 농도가 1% 이하로 떨어지게끔 비활성기체인 아르곤 가스를 주입한다.

실험 과정은 다음과 같다.

- 1) 기계설계 프로그램인 Solid works를 이용하여 제작하고자 하는 3D 구조물을 설계한다.
- 2) 설계한 3차원 구조물을 metarialize사의 magics 프로그램에 연동하여 제작하고자 하는 구조물을 일정한 미소높이로 나눈다.
- 3) Fig. 1과 같이 챔버 내에 설치한 고무 재질의 와이퍼 블레이드(wiper blade)를 이용하여 금속 분말을 제작 시편(build specimen)에 깊이 40 μm 의 층으로 평평하게 도포한다.
- 4) 높이별로 얇게 나뉘어진 3차원 그래픽 파일의 한 층을 레이저로 조사하여 한 층의 형상을 가공한다.
- 5) 제작 시편을 40 μm (1 layer) 아래로 내리고 금속 분말을 제작 시편 위로 쌓는다.
- 6) 와이퍼 블레이드로 금속 분말을 제작 시편에 평평하게 도포한다.
- 7) 1)에서 설계한 높이까지가 다시 4)에서 6)의 과정을 거쳐서 마지막 층의 가공까지 이를 반복한다.

본 실험에서는 레이저 초점거리 등을 포함한 여러 가지 실험변수들에 따른 3차원 구조물의 선평을 측정하기 위하여 Fig. 4와 같은 한 맨 위쪽 면이 개방된 속이 빈 2 x 4 형태의 육면체를 높이가 각각 다르게 3 x 3의 9개 입방체를 설계하고 이를 PBF 방식의 금속 3D 프린터로 제작하고자 한다. 이 구조물의 높이는 각각 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9mm인데, 한번에 설계 및 제작된 서로 다른 높이의 구조물에서 9가지 실험 변수를 바꾸어 측정할 수가 있다.

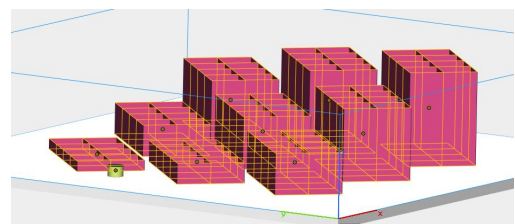


Fig. 4. 3D structure model designed by using Solid Works

4. 실험 결과 및 분석

Fig. 1과 Fig. 2에서 제작한 스테인리스강 분말을 사

용한 PBF 방식의 금속 3D 프린터로 제작한 Fig. 4의 3D 구조물의 벽두께, 즉 선폭에 영향을 미치는 변수로는 스테인리스강 분말과 레이저의 상호작용이 강하게 작용하는 벽을 만들기 위한 선의 가공 반복횟수, 레이저의 출력, 초점 크기, 스캔 속도를 집중적으로 살펴보았다. 선폭에 대한 측정은 십자 모양의 3차원 구조체를 배울 10배의 hyrox 현미경으로 위에서 촬영한 후, 촬영한 사진(흰 선으로 표시됨)의 십자선에서 등간격인 여덟 곳을 측정하였다. 측정시 위성분말을 모두 포함하는 전체 폭을 측정하였으며, 최소 선폭일 때의 표준편차는 6.750이었다.

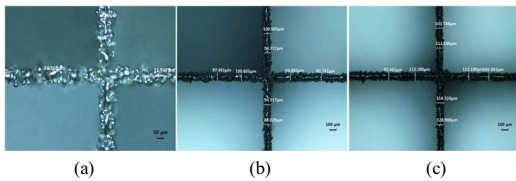


Fig. 5. Photos of the metal cross lines according to the number of processing of 3D printer : (a) 1 time (b) 2 times (c) 3 times

Fig. 5는 레이저 출력이 30 W, 초점크기가 28.7 μm, 스캔속도 200 mm/s일 때 벽을 제작하는 선을 한 번 두 번, 세 번을 각각 반복하여 가공한 결과물을 현미경(Nikon, LV-UEPI)으로 촬영한 사진이다. Fig. 5 (a)에서 선을 한번 가공할 경우, 스테인리스강 분말이 용융되지 않아서 선 형성이 제대로 이루어지지 않았고, 이로 인하여 일부 녹은 선 주변에 일부 녹지 않은 스테인리스강 위성분말이 붙어서 울퉁불퉁하고 일부의 선이 끊어진 상태로 형성되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5 (b)에서 선을 두 번 가공할 경우, 선의 형태는 제대로 형성되고 한번 위성분말이 한번 가공했을 때 보다 적게 나타나는 것을 확인하였다. Fig. 5 (c)에서 선을 3세 번 가공하였을 경우, 두 번 가공했을 때 보다 선이 끊어지는 것을 확인하였다. 이러한 결과에 따라 선이 제대로 형성되는 최적의 가공 횟수는 두 번으로 선정하였으며, 앞으로의 스테인리스강 분말을 사용하는 선 가공에서 변수변화에서 모든 가공횟수는 두 번 가공하는 것으로 하였다.

레이저의 출력을 최대 70 W부터 시작하여 점차 줄여가며 두 번 가공했을 때의 선을 확인하였는데, Fig. 6에서 보듯이 19.7 W일 때부터 선이 제대로 형성되지 않고 끊어지는 현상(Fig. 6의 적색 직사각형 안의 선)을 확인하였다.

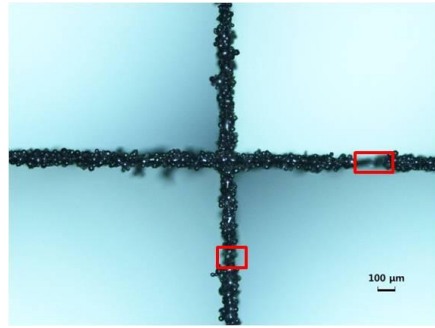


Fig. 6. A Photo of metal cross line at the instant of separation of lines with laser power of 19.7W

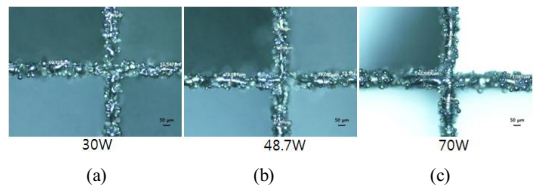


Fig. 7. Photos of metallic cross lines as a function of various laser powers : (a) 30 W (b) 48.7 W (c) 70 W

Fig. 7은 레이저 출력이 각각 (a) 30 W, (b) 48.7 W, (c) 70 W일 때 제작된 벽의 선폭을 비교한 결과로 출력이 높아질수록 선폭이 굵어지기 때문에 레이저 출력에 대한 최소 한계점을 19.7 W로 선정하고 실험을 통하여 정한 최적 출력을 30 W로 선정하였다.

Table 1. Laser spot sizes according to the variation (focus) of focal length of the focusing lens and its degree of defocus

Focus (mm)	Spot size (μm)	defocus (mm)
163	28.7	0
163.3	35.2	0.3
164.3	92.6	1.3
165	138.5	2.0
165.9	198.6	2.9

Table 1.에서 보듯이 스테인리스강 분말의 맨 위층에서 레이저의 초점 크기(spot size)는 갈바노 스캐너의 위치를 조정하여 변화시켰다. 갈바노 스캐너의 위치에 따른 초점 크기는 초점의 위치를 바꾸면서 스테인리스강 분말의 맨 위층이 놓인 부분까지의 디포커스(defocus)에 따라 변하는 초점의 크기를 레이저 빔의 가우스 광학을 이용하여 구하였다. Table 1에서 보듯이 초점 크기는

28.7 μm 가 최소 크기이고, 작은 선폭을 얻기 위해 최소 크기부터 점차 키워가며 실험을 진행하였다. 초점 크기를 28.7 μm , 32.5 μm , 92.6 μm 으로 설정하여 선폭 실험을 진행한 결과를 Fig. 8에 그래프로 정리하였다. 이 결과 레이저 빔의 초점 크기가 작을수록 선폭이 작아지는 것을 확인하였다.

앞서 구한 가공 반복횟수 2회, 레이저 출력 30 W, 초점 크기 28.7 μm 를 고정 변수로 설정하고 스캔 속도를 40 mm/s부터 500mm/s 까지 변화시키며 스테인리스강 분말로 제작한 벽의 선폭을 측정하는 실험을 진행한 결과를 Fig. 9에 정리하였다. Fig. 9로부터 스캔 속도는 200 mm/s 근처일 때 가장 작은 선폭이 되는 것을 알 수 있다. 스캔속도가 너무 낮으면 스테인리스강 분말과 레이저의 상호작용 시간이 길어지면서 많은 분말이 녹음으로 인하여 선이 두꺼워지고, 스캔속도가 너무 크면 분말이 제대로 녹지 않고 위성분말이 많이 생기기 때문에 선폭이 약간 증가하는 현상이 생긴다.

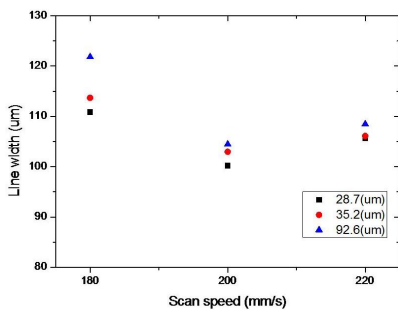


Fig. 8. Graph of line width vs. scan speed according to various laser focusing spot size (black square : 28.7 μm , red circle : 35.2 μm , blue triangle : 92.6 μm)

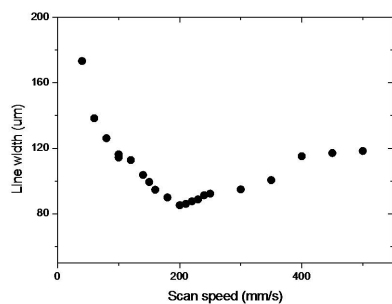


Fig. 9. Graph of line width vs. scan speed at the optimal condition of 2 times processing, laser output 30 W and spot size 28.7 μm

5. 결론

본 논문에서는 스테인리스강 분말을 적층한 후, 레이저 다이오드를 펌핑한 파장 1.06 μm 의 Nd:YAG 레이저 빔을 갈바노 스캐너로 2차원 주사하면서 용융하여 이 분말을 순차적으로 적층해가는 PBF 방식의 금속 3D 프린터를 제작하고, 이를 이용하여 얇은 벽(선)을 제작하였다. 선폭이 가장 작게 나오는 조건은 스테인리스강 분말을 녹이는 레이저 조명을 한 층마다 2회 반복하였을 때, 그리고 이 경우 레이저 출력은 30 W로, 초점 크기는 28.7 μm 로, 스캔 속도는 200 mm/s일 때 선폭이 최소가 되었으며, 이 값은 85.287 μm 이다. 선폭에 대한 측정은 십자 모양의 3차원 구조체를 위에서 배울 10배의 hyrox 현미경으로 촬영한 후, 촬영한 사진을 등각적으로 나누어 여덟 곳을 측정하였다. 측정시 위성분말을 모두 포함하는 전체 폭을 측정하였으며, 최소 선폭일 때의 표준편차는 6.750이다.

스캔 속도가 200 mm/s 보다 빨라지거나 느려지면 선폭이 증가하게 되는데, 빨라질 경우에는 분말에 레이저 에너지가 제대로 전달되지 않아 용융이 일어나지 않고, 반대로 느려질 경우에는 분말에 전달되는 레이저 에너지가 높아져서 분산된 열에너지에 의해 선폭이 커진다. 그리고 레이저의 초점 크기가 커지게 되면 일반적으로 분말에 레이저 에너지가 전달되는 면적이 커지기 때문에 선폭이 증가하게 된다. 레이저 출력은 30W 일 때 가장 얇은 선폭을 보였는데, 출력이 높아지면 스캔 속도와 비슷한 이유로 분말에 전달되는 레이저 에너지가 많아져서 선폭이 증가하게 된다. 레이저 출력이 30 W보다 작은 경우는 가공된 선에서 끊어지는 부분을 다수 발견할 수 있다. 30 W 일 때에도 선이 끊어지는 부분을 간혹 발견하였는데, 이를 보완하기 위하여 선의 같은 부분을 1, 2, 3번 가공 후 비교 결과 2번이 가장 안정적인 선의 형태를 보이고 선폭도 얇게 나오는 것을 확인하였다.

이러한 자체 제작한 PBF 방식의 금속 3D 프린터의 선폭이 가장 작은 최적 가공 조건을 사용할 경우 선폭이 85 μm 인 벽이나 구조물의 3D 물체를 가공할 수 있음을 알 수 있고, 레이저 출력을 보다 크게 할 경우 초점 크기를 작게 할 수 있어서 더욱더 선폭을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

References

- [1] K. W. Dalgarno, J. H. Pallari, J. woodburn, K. Xiao, D. J. Wood, R. D. Goodridge & C.Ohtsuki, "Mass customization of medical devices and implants: state of the art and future directions," *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 1, No. 3, pp. 137-145, September, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1080/17452750601092031>
- [2] Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker, "Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing Second Edition," pp. 35, 107-146, 245-268, Springer, 2015
- [3] Zhuqing Wang, Todd A. Palmer, Allison M. Beese, "Effect of processing parameters on microstructure and tensile properties of austenitic stainless steel 304L made by directed energy deposition additive manufacturing," *Acta Materialia*, 110, pp. 226-235, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.03.019>
- [4] Young Jin An, Sungwoo Bae, Dong Soo Kim, Jae Yeol Kim, "Study on the Development and Sintering Process Characteristics of powder Bed Fusion System," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 32, No. 9, pp. 773-779 DOI: <https://doi.org/10.7736/KSPE.2015.32.9.773>
- [5] Haijun Gong, Khalid Rafi, Hengfeng Gu, Thomas Starr, Brent Stucker, "Analysis of defect generation in Ti-6Al-4V parts made using powder bed fusion additive manufacturing processes," *Additive Manufacturing*, 1, 87 - 98. 2014 DOI:<https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.002>
- [6] Gu, D. D., Meiners, W., Wissenbach, K., & Poprawe, R, "Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms," *International Materials Reviews*, 57(3), 133-164. 2012 DOI: <https://doi.org/10.1179/1743280411Y.0000000014>
- [7] Harish Irrinki, John Samuel Dilip Jangam, Somayeh Pasebani, Sunil Badwe, Jason Stitzel, Kunal Kate, Ozkan Gulsoy, Sundar V. Atre, "Effects of particle characteristics on the microstructure and mechanical properties of 17-4 PH stainless steel fabricated by laser-powder bed fusion," *Powder Technology*, pp. 331, 192-203, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.03.025>
- [8] Jong-Cheon Yoon, Min-Gyu Lee, Chang-Young Choi, Dong-Hyuk Kim, Myeong-Sik Jeong, Youg-Jin Choi, Da-Hye Kim, "Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties in 17-4PH Stainless Steels Fabricated by PBF and DED Processes," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 17, No. 2, pp. 83-88, 2018 DOI: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2018.17.2.083>
- [9] Panagiotis Kazanas, Preetam Deherkar, Pedro Almeida, Helen Lockett, Stewart Williams, "Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture," *Journal of ENGINEERING MANUFACTURE*, 1-10, 2012 DOI: <https://doi.org/10.1177/0954405412437126>
- [10] Xuezhi Shi, Shuyuan Ma, Changmeng Liu, Cheng Chen, Qianru Wu, Xianping Chen, Jiping Lu, "Performance of High Layer Thickness in Selective Laser Melting of Ti6Al4V," *Materials* 2016, 9, 975. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma9120975>

손 봉 국(Bongkuk Son)

[정회원]



- 2018년 2월 : 한남대학교 광센서공학과 (공학사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 융복합시스템공학과 (융복합시스템 석사과정)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 한국기계연구원 광융용기계연구실 (석사과정)

<관심분야>
응용광학, 첨단생산

정 연 홍(Youn Hong Jeong)

[정회원]



- 2015년 3월 ~ 현재 : 국제대학교 안경광학과 조교수

<관심분야>
응용광학, 안경광학

조 재 흥(Jae Heung Jo)

[정회원]



- 1984년 2월 : KAIST 물리학과 대학원 응용광학전공 (이학석사)
- 1987년 2월 : KAIST 물리학과 대학원 응용광학전공 (이학박사)
- 1987년 3월 ~ 1992년 2월 : 한국표준과학연구원 선임연구원
- 1992년 3월 ~ 현재 : 한남대학교 컴퓨터통신문인기술학과 정교수

<관심분야>
응용광학, 정보통신