

## 레이저 적층 마레이징강의 기계적 특성 및 피로 특성

홍석관<sup>†</sup>

한국생산기술연구원 금형기술그룹<sup>†</sup>

### Fatigue and mechanical properties of laser deposited maraging steel

Seok-Kwan Hong<sup>†</sup>

Korea Institute of Industrial Technology, Molds & Dies R&D Group<sup>†</sup>

(Received October 12, 2018 / Revised November 22, 2018 / Accepted December 01, 2018)

**Abstract:** Metal 3D printing is very useful for making the injection molds containing complex conformal cooling channels. The most important issue of the 3D printed molds is cost and life cycle. However, powder bed fusion (PBF) methods are vulnerable to fatigue loading because of the presence of pores and rough surfaces. In the present study, the fatigue test was performed to obtain fatigue analysis input data for predicting the durability of a 3D printed injection mold core. The metal 3D printer used to manufacture the specimen was OPM250L from Sodick, and the metal powder material was maraging steel. The ultrasonic fatigue testing method was adopted for the fatigue test. A key advantage of the ultrasonic fatigue method is that  $10^8 \sim 10^9$  long cycle test data or more could be obtained within a relatively short period. Based on the results of the experiment, the effect of heat treatment was negligible. However, there was an apparent difference in durability depending on the presence or absence of the surface treatment.

**Key Words:** Conformal cooling channel, Fatigue, Injection molding, Metal 3D printing,

### 1. 서 론

금속 3D 프린팅은 복잡한 3차원 냉각 채널(3D or conformal cooling channel)을 포함하는 사출성형 금형 코어를 제작하는 데 매우 유용한 기술이다. 3차원 냉각 채널의 장점은 잘 알려져 있으며 이와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>1,2)</sup>. 하지만, 아직까지 긴 가공시간과 높은 파우더 소재의 가격은 3차원 냉각 채널의 일반화에 걸림돌이 되고 있는 실정이다.

한편, 사출금형은 높은 온도와 하중 변동의 분위기를 수 내지 수십만 사이클 동안 견뎌야하기 때문에 높은 내구성능이 요구된다. 불행히도 Powder Bed Fusion(PBF)방식의 3D 프린터로 제조된 금속 적층물은 내부의 기공과 거친 표면이 필연적으로 형성

되어 피로하중에 취약해질 수 있다<sup>3,4)</sup>. 최근 고출력 레이저 기술의 발전으로 선택적 레이저 용융(Selective Laser Melting, SLM) 방식과 같이 금속 분말을 소결(sintering)하는 대신 각 금속 층을 완전히 용융(melting)시키기 때문에 매우 조밀한 밀도를 얻게 되었으며 이로 인해 내부 기공에 의한 수명 저하는 많이 개선되고 있다<sup>5,6)</sup>. 또한, 레이저 가공 고유의 거친 표면도 절삭가공과 표면처리를 통해 충분히 원하는 광택을 얻을 수 있다. 하지만, 언더컷 부위의 표면과 냉각 채널 벽의 표면은 절삭가공이 불가능하여 거친 표면 상태로 남아 있어 잠재적 위험 요인으로 남게 된다.

본 연구에서는 CAE를 통해 피로 수명을 예측하기 위한 준비 단계로서 기계적 물성과 피로 강도 데이터를 실험을 통해 얻었다. 즉, 최종 가공물이 사출 금형 코어로서 사용될 때 외부 폴리싱된 표면뿐만 아니라 내부 냉각 채널의 거친 표면 상태를 모두

<sup>†</sup> 교신저자: 한국생산기술연구원 금형기술그룹  
E-mail: skhong@kitech.re.kr

고려하여 보다 정확한 피로수명을 예측할 수 있도록 데이터를 제공하는 데 그 목적이 있다.

## 2. 레이저 적층 시편 가공

본 연구에서 사용한 금속 3D 프린터는 소딕사(Sodick)의 OPM250L 모델이다. 본 장비의 레이저는 Yb 파이버 방식이며 파워는 500W, 가공범위는 250 mm × 250 mm × 250 mm 이다. 금속 파우더는 마레이징강(maraging steel)으로 소딕사에서 MAS1C의 이름으로 공급하고 있다<sup>7)</sup>. 마레이징은 마르텐사이트(Martensite)와 에이징(Aging)의 합성어로 시효처리의 의미를 내포하고 있다. 대표적인 18% 니켈의 마레이징강은 탄소 0.03%, 니켈 17~19%, 코발트 7~9%, 몰리브덴 5%의 저탄소강: 고니켈강이며, 풀림-서랭함으로써 마르텐사이트(martensite)로 변화된다. 이와 같은 마르텐사이트를 450~510℃에서 약 3시간 시효처리를 하면 경화 열처리에 의해 초강력성을 발휘하게 된다. 보통 2 GPa의 인장강도를 갖는다. 이와 같은 장점으로 로켓 부품, 항공기 제트엔진, 모노레일카 부품, 고압용기 등에 사용된다<sup>8)</sup>. 본 실험에 사용된 금속 파우더의 자세한 성분비는 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of the MAS1C

Grade	Nominal composition, %							
	C	Si	Mn	Ni	Mo	Co	Ti	Al
MAS1C	≤0.03	≤0.1	≤0.1	18.5	4.8	9.0	0.6	0.1

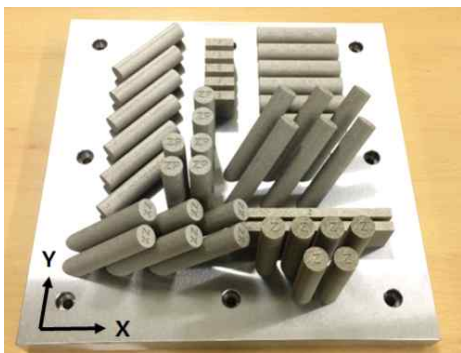


Fig. 1 3D printed test specimen

시편은 Fig. 1과 같이 3D 프린터로 일정 크기 이상 적층 제조한 후 인장시험, 피로시험, 동탄성계수 측정시험, 미세조직시험을 위해 각 해당 규격 크기

로 절삭 가공되었다. 특히, 인장시편은 3D 프린팅 적층방향을 고려하여 수평방향(X), 수직방향(Z), 정 45도방향(X-Y-Z), 평45도방향(X-Z평면)으로 적층하였으며 ASTM E8 시험편 규격을 참고하여 최종 절삭 가공하였다. 또한, 열처리의 효과를 비교하기 위해 본 소재의 권장 열처리 조건(500℃, 3시간)으로 시효 처리하였다.

## 3. 실험 방법

### 3.1. 미세조직 및 경도 시험

미세조직을 관찰하기 위해서 전해부식(Galvanic corrosion)처리 하였다. 전해액 성분은 질산 10%, 에탄올 90%로 하였으며 열처리 전 시편은 10초, 열처리 후 시편은 30초의 시간으로 식각을 수행하였다. 미세경도는 비커스 미세경도 측정기(하중 500g)를 사용하였으며 열처리 전 후 시편을 측정하였다.

### 3.2. 동탄성계수 측정 시험 및 피로 시험

본 연구에서는 초음파 피로시험 방법을 적용하였다. 이 방법은  $10^8 \sim 10^9$  이상의 기가 사이클도 빠른 시간 내에 데이터를 얻을 수 있는 장점이 있다. 초음파 피로시험의 원리는 ASM Vol. 8에 명시되어 있으며 압전세라믹(PZT)의 탄성공진 진동방식을 이용한 변위제어 방식으로 시험 장비의 개념도를 Fig. 2에 도시하였다. 1초에 20,000번 사이클로 0.1 μm이하의 정밀도를 갖는다<sup>9)</sup>.

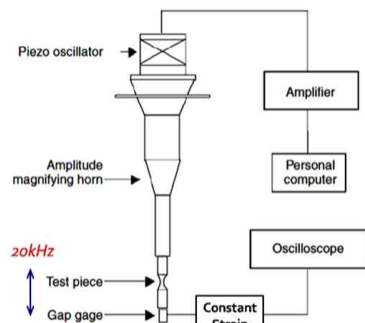


Fig. 2 Ultrasonic Fatigue Test : ASM Volume 8

본 초음파 피로시험 방법은 기본적으로 동탄성계수의 측정이 수반되어야 한다. 이는 시험편 설계와 응력환산에 중요한 인자로 사용된다. 동적 탄성계수의 측정방법은 음파 또는 기계적 진동을 통해 재료

의 공명주파수를 찾거나 시편에서 발생한 반향 음을 이용하여 탄성계수를 측정하는 방법 등 다양한 방법이 있다. 이것은 정적인 탄성계수 측정방법에 비해 정밀성과 재현성이 크며, 온도분위기에서 측정이 비교적 용이하다는 장점을 가지고 있다. 본 실험에서는 기계적 충격을 주어 공명주파수를 찾아내는 임펄스법(Impulse Excitation Technique)을 채용하였다. 시편의 크기는 ASTM E1876 - 01에 따라 정밀 가공하였으며, Fig. 3에서 측정 장치 및 시편을 확인할 수 있다.



Fig. 3 Test for dynamic young's modulus

Table 2 Symbols used in formulas for calculating amplitude stress and specimen size

Symbol	Value	Unit
$2L$	$57.68 \pm 0.02$	mm
$L2$	$16 \pm 0.02$	mm
$L1$	$12.84 \pm 0.02$	mm
$R$	$28.1 \pm 0.02$	mm
$2R1$	$5 \pm 0.02$	mm
$2R2$	$15 \pm 0.02$	mm

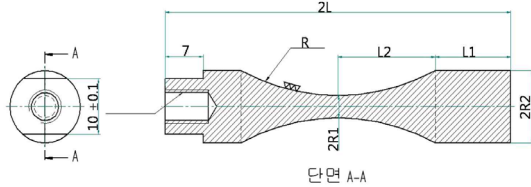


Fig. 4 Geometry and dimensions of ultrasonic fatigue test specimen

Figure 4는 공명주파수 및 동탄성계수 측정에 따라 설계될 수 있는 시험편의 설계도를 보여주고 있다. 공진 후파 시험편은 볼트 형태의 나사산으로 체결되며, 형상은 봉상의 모래시계(hourglass) 형상으로 좌우 대칭구조를 가지도록 한다. 20 kHz ± 300

Hz 주파수에서 시험편의 중앙에서 공진을 일으키도록 시험편의 전체 길이(2L)를 설계 한다. Table 2에 나타난 기호들은 최대응력진폭을 구하기 위한 계산식(1) ~ (4)에 사용된다.

$$\sigma(x) = E_d A_0 \varphi(L_1, L_2) \frac{[\beta \cosh(\beta x) \cosh(\alpha x) - \alpha \sinh(\beta x) \sinh(\alpha x)]}{\cosh^2(\alpha x)} \quad (1)$$

$$\varphi(L_1, L_2) = \frac{\cos(kL_1) \cosh(\alpha L_2)}{\sinh(\beta L_2)} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{1}{L_2} \operatorname{arccosh}\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (3)$$

$$\beta = \sqrt{\alpha^2 - k^2} \quad (4)$$

여기서  $\sigma$ 는 최대응력진폭,  $E_d$ 는 동탄성계수값,  $A_0$ 는 변위진폭,  $k$ 는 진동주파수를 의미한다.



Fig. 5 Ultrasonic fatigue test specimen (upper surface polished, lower surface laser sintered)



Fig. 6 Ultrasonic fatigue test (left side is during test, right side is after fracture)

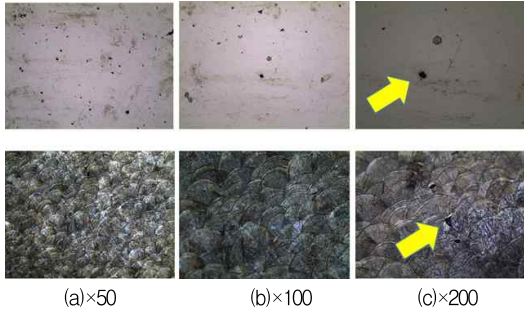
Table 3는 초음파 피로시험 조건들로 주파수는 20 kHz, 응력비는 인장-압축 모드(R = -1), 분위기 온도는 상온으로 설정되었다. 시험 중 피로파단이 일어나면 초음파 공진이 벗어나 자동으로 정지되어 사이클 횟수를 기록되고, 설정 응력 대에 따라 순차적으로 수행하였다. 가공 완료된 피로 시편과 피로 시험 모습을 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다.

**Table 3** Ultrasonic fatigue condition

Loading frequency [kHz]	Stress ratio	Cycle	Temp.
20	R=-1	103 ~107	RT

#### 4. 실험결과 및 고찰

미세조직 관찰 결과 Fig. 7에서 보는 바와 같이 레이저 스캔에 대한 공정이 비늘모양으로 중첩되어 있는 것을 확인 할 수 있었으며, 특히 포어(pore)의 위치가 대부분 비늘과 비늘 사이에 위치하고 있는 것으로 보아 일반 구조재료에서 결정립(Grain Boundary)에 결함이 위치하고 있는 동일한 현상으로 파악된다. 열처리 후 시편의 미세조직은 열처리 전 시편과 유의미한 차이가 없었다(결과 생략).



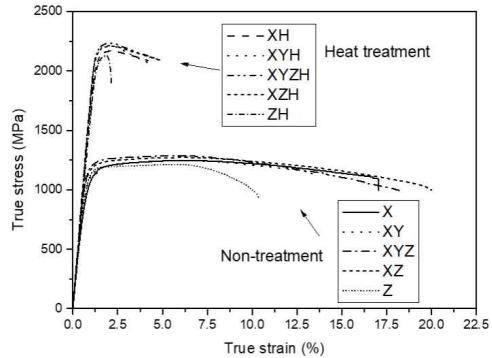
**Fig. 7** Microstructural photographs before(upper) and after(lower) corrosion on X-direction specimens; The arrows indicate pores

본 연구에서는 3D 프린팅 공정 방향에 따른 5가지 시편을 제작하여 탄성계수, 인장강도 등 방향성을 고려한 기계적 물성 평가를 수행하였다. 먼저, 임펄스법(Impulse Excitation Technique)을 이용한 레이저 적층 시편의 동탄성계수와 프아송비를 측정된 결과 각각 167.87 GPa, 0.216으로 측정되었다. 이것은 피로시험 데이터로 활용된다. 미세경도 측정결과

는 Table 4에 명시한 바와 같이 열처리 전 시편은 Hv 365.09, 열처리 후 시편은 Hv 595.85로 측정되었다. 이는 본 재료의 경화 열처리 조건(500°C 3시간)을 따른 것이다.

**Table 4** Micro Vickers hardness test results

Sample	Hv (Non-treatment)	Hv (Heat treatment)
#1	357.8	585.3
#2	360.7	586.8
#3	362.1	586.9
#4	362.8	591.2
#5	363.5	591.2
#6	363.5	594.2
#7	365.7	595.7
#8	368.6	604.9
#9	371.6	608
#10	374.6	614.3
Average	365.09	595.85



**Fig. 8** True stress-strain curve

**Table 5** Tensile test result

Sample	Tensile strength	Elongation	Young's modulus	Yield strength (0.2% offset)
	N/mm <sup>2</sup>	%	GPa	MPa
X	1184.92	19.27	150.96	1049.23
XH	2125.29	4.29	180.71	2023.72
XY	1186.08	14.62	162.61	1040.14
XYH	2170.13	4.31	184.14	2104.55
XYZ	1236.80	20.10	170.50	1144.79
XYZH	2190.69	4.98	190.27	2105.07
XZ	1218.47	22.15	180.64	1113.28
XZH	2165.03	5.00	191.12	2074.36
Z	1170.78	10.91	154.76	1089.63
ZH	2089.20	2.15	164.90	2037.93



열처리 전의 인장시험결과 X(Fig. 1에서 X방향), XY(X-Y평면의 45도 방향), XYZ(X-Y-Z 공간의 45도), XZ(X-Z평면의 45도 방향), Z(X-Y평면의 법선 방향) 방향까지 총 5가지 방향으로 시편을 적층 가공하였으며, Fig. 8과 Table 5에서 해당 측정값을 확인할 수 있다. 대부분의 기계적 강도는 방향에 따른 차이는 미미하였지만 연신율에 대해서는 Z방향 시편이 다른 방향의 50% 수준으로 측정되었다. 열처리 후의 인장시험 결과는 XH, XYH, XYZH, XZH, ZH로 방향을 나타내는 용어 뒤에 H를 붙여서 구분하였다. 모든 방향에서 열처리를 하지 않았을 때에 비해 인장강도와 항복강도가 거의 2배 이상 높아진 것을 확인할 수 있다. 하지만, 연신율의 값이 열처리 후 5% 이하로 큰 폭으로 낮아 졌으며 시편간의 편차도 심하게 나타났다. 편차의 원인은 시편 자체에 내재되어 있는 포어의 영향인 것으로 판단된다.

피로 시험은 피로강도에 가장 불리한 Z방향만 고려하여 시편을 제작하였다. 이때 표면 상태를 폴리싱 처리한 표면(ZM, Fig. 5 상)과 레이저 적층으로 자연스럽게 형성된 원래의 거친 표면(ZO, Fig. 5 하)으로 두 가지 경우로 준비하였다. 이는 실제 3D 프린터로 조형한 사출금형 코어에서 캐비티 표면과 냉각 채널 벽면 상태를 고려한 것이다. 따라서 피로 시험에서는 열처리(용어 뒤에 H를 붙여서 구분함) 유무까지 총 4가지의 시편조건에서 각각 초음파 피로시험을 진행하였다. 시험 결과 Fig. 9와 같이 ZO와 ZOH 모두 진폭응력 범위 530 MPa ~ 330 MPa에서 사이클  $10^6$ 까지 급격한 기울기 변화를 확인할 수 있었으며, ZM과 ZMH는 진폭응력 530MPa ~ 440MPa에서  $10^8$ 까지 완만한 기울기의 S-N 선도를 확인할 수 있다.

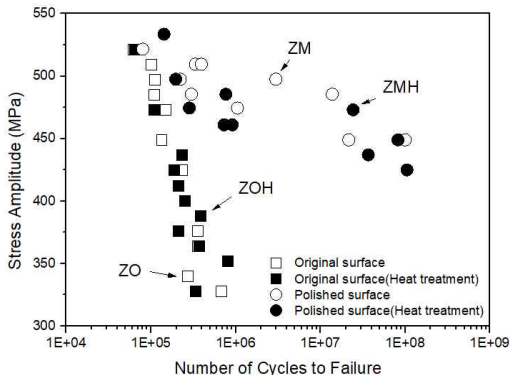


Fig. 9 S-N curve according to surface condition of 3D printed specimen

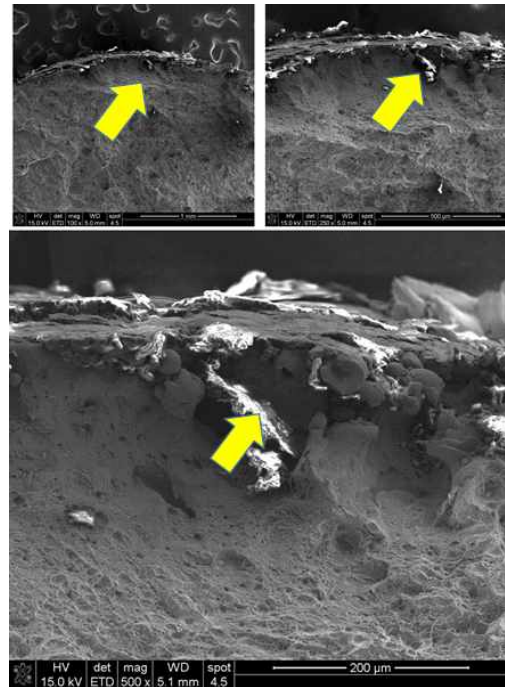


Fig. 10 Fatigue fracture of specimen with original rough surface(ZO); The arrow indicates the crack start point

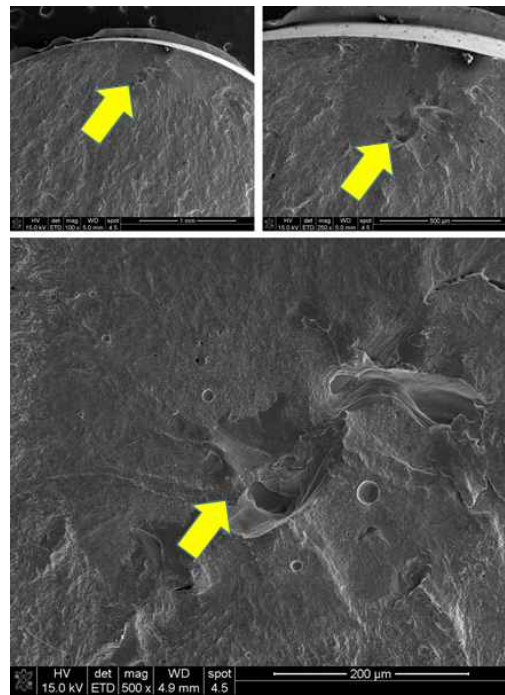


Fig. 11 Fatigue fracture of specimen with polished surface (ZM); The arrow indicates the crack start point

이와 같이 ZO 조건의 피로강도가 현저히 저하된 원인으로는 소결이 덜 된 파우더로 덮여있는 거친 표면에서 응력집중이 발생하였고 피로파단 되었기 때문이다. Figure 10은 ZO 시편의 파단 단면을 보여주고 있으며 화살표 표시에서 크랙이 시작되었음을 알 수 있다. 반면, Fig. 11에서 ZM 시편의 파단 단면 모습에서는 시편 내부에서 크랙이 발생한 것을 알 수 있다. 상기 2가지 시편은 거의 동일한 진폭 응력대(500 MPa)임에도 불구하고 피로 파단의 메카니즘이 전혀 다르게 작용하였다. 한편, ZO조건이든 ZM조건이든 열처리 유무에 대한 피로 수명은 차이가 없었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 컨포멀 냉각 채널이 포함된 사출금형 코어를 금속 3D 프린터로 제작할 때 신뢰성 확보 차원에서 수행하는 피로해석의 기계적 물성과 피로수명 데이터를 얻은 목적으로 실험을 수행하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 5가지 시편 조건에서 인장시험을 진행한 결과 모든 시편의 항복강도와 인장강도의 차이는 미미하였다. 반면, 연신율은 수직방향(Z)의 인장시편이 다른 방향에 비해 50% 수준으로 측정되었다.

2) 인장시편의 열처리 효과는 항복강도와 인장강도를 2배 이상 상승하게 하였지만 연신율은 5% 이하로 감소시켰다. 연신율은 저주기( $10^4$  미만) 피로 특성에 영향을 미치는 인자로 알려져 있다. 일반 적으로 연신율이 커지면 저주기 피로 특성이 향상된다.

3) 반면, 본 논문에서 다루고 있는 고주기 피로 특성은 레이저 적층 코어의 표면 상태에 따라 차이가 극명하였다. 이는 표면의 미소결된 부분이 결합으로 작용하였기 때문이다.

4) 한편, 열처리 유무에 대한 고주기 피로 수명의 차이는 미미하였다.

본 연구의 결과를 활용하면 레이저 적층 사출금형 코어의 신뢰성 해석을 보다 정확하게 예측할 수

있을 것으로 판단된다.

## 후기

본 연구는 한국생산기술연구원의 기관주요사업(과제번호: JA180034)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 1) H.-S. Park and X.-P. Dang, "Development of a Smart Plastic Injection Mold with Conformal Cooling Channels", *Procedia Manuf.*, vol. 10, pp. 48-59, 2017.
- 2) M. S. Shinde and K. M. Ashtankar, "Additive manufacturing - assisted conformal cooling channels in mold manufacturing processes", *Adv. Mech. Eng.*, vol. 9, no. 5, pp. 1-14, 2017.
- 3) A. B. Spierings, T. L. Starr, and K. Wegener, "Fatigue performance of additive manufactured metallic parts", *Rapid Prototyp. J.*, vol. 19, no. 2, pp. 88-94, 2013.
- 4) E. Wycisk, S. Siddique, D. Herzog, F. Walther, and C. Emmelmann, "Fatigue Performance of Laser Additive Manufactured Ti - 6Al - 4V in Very High Cycle Fatigue Regime up to 10<sup>9</sup> Cycles", *Front. Mater.*, vol. 2, no. December, pp. 2-9, 2015.
- 5) B. Ahuja, A. Schaub, D. Junker, M. Karg, F. Tenner, R. Plettke, M. Merklein, and M. Schmidt, "A round robin study for laser beam melting in a metal powder bed", *South African J. Ind. Eng.*, vol. 27, no. 2, pp. 30-42, 2016.
- 6) G. Kasperovich and J. Hausmann, "Improvement of fatigue resistance and ductility of TiAl6V4 processed by selective laser melting", *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 220, pp. 202-214, 2015.
- 7) [www.sodick.com](http://www.sodick.com)
- 8) [www.scienceall.com](http://www.scienceall.com)
- 9) I. S. Cho, C. S. Shin, J. Y. Kim, and Y. H. Jeon, "Accelerated ultrasonic fatigue testing applications and research trends", *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, vol. 36, no. 6, pp. 707-712, 2012.