

## SLS 3D 프린터를 이용하여 제작된 PA2200의 단축 반복 인장하중에 따른 피로 특성에 관한 연구

박준수<sup>1,2</sup> · 정의철<sup>2,3</sup> · 최한솔<sup>2,3</sup> · 김미애<sup>2</sup> · 윤언경<sup>2</sup> · 김용대<sup>2</sup> · 원시태<sup>1</sup> · 이성희<sup>†</sup>

서울과학기술대학교 기계디자인금형공학과<sup>1</sup>  
한국생산기술연구원 금형기술그룹<sup>2,†</sup>  
단국대학교 기계공학과<sup>3</sup>

### A study on the fatigue characteristics of SLS 3D printed PA2200 according to uniaxial cyclic tensile loading

Jun-Soo Park<sup>1,2</sup> · Eui-Chul Jeong<sup>2,3</sup> · Han-Sol Choi<sup>2,3</sup> · Mi-Ae Kim<sup>2</sup> · Eon-Gyeong Yun<sup>2</sup>  
· Yong-Dae Kim<sup>2</sup> · Si-Tae Won<sup>1</sup> · Sung-Hee Lee<sup>†</sup>

Dept. of Mechanical Design and Manufacturing Engineering, Seoul National University of Science and Technology<sup>1</sup>  
Molds & Dies Technology R&BD Group, Korea Institute of Industrial Technology<sup>2,†</sup>  
Dept. of Mechanical Engineering, Dankook University<sup>3</sup>

(Received March 18, 2020 / Revised March 30, 2020 / Accepted March 31, 2020)

**Abstract:** In this study, the fatigue behavior and fatigue life characteristics of PA2200 specimens fabricated by SLS 3D printer were studied. Fatigue tests were performed according to the standard specification (ASTM E468) and fatigue life curves were obtained. In order to perform the fatigue test, mechanical properties were measured according to the test speed of the simple tensile test, and the self-heating temperature of the specimen according to the test speed was measured using an infrared temperature measuring camera in consideration of heat generation due to plastic deformation. There was no significant difference within the set test speed range and the average self-heating temperature was measured at 38.5 °C. The mechanical strength at the measured temperature showed a relatively small difference from the mechanical strength at room temperature. Fatigue test conditions were established through the preceding experiments, and the loading conditions below the tensile strength at room temperature 23 °C were set as the cyclic load. The maximum number of replicates was less than 100,000 cycles, and the fracture behavior of the specimens with the repeated loads showed the characteristics of Ratcheting. It was confirmed that SLS 3D printing PA2200 material could be applied to the Basquin's S-N diagram for the fatigue life curve of metal materials. SEM images of the fracture surface was obtained to analyze the relationship between the characteristics of the fracture surface and the number of repetitions until failure. Brittle fracture, crazing fracture, grain melting, and porous fracture surface were observed. It was shown that the larger the area of crazing damage, the longer the number of repetitions until fracture.

**Key Words:** SLS 3D Printing, Nylon Powder, Mechanical Properties, Uniaxial Tensile Loading, Loading Speed, Fatigue Behavior, Fatigue Life, S-N Diagram

## 1. 서 론

최근 3D 프린팅 기술은 제조업뿐만 아니라 항공, 건축, 의료산업 등의 다양한 산업 분야에 큰 영향력

을 미치고 있다. 3D 프린팅이 주목받는 이유로는 각각의 소비자의 요구에 따라 맞춤형 제품을 기존의 생산방식보다 빠르게 얻을 수 있다는 것이다<sup>1)</sup>. 3D 프린터의 종류에는 압출 적층 조형(Fused Deposition Modeling, FDM), 광경화성 수지 조형(Streo Lithographic Apparatus, SLA), 선택적 레이저 소결 조형(Selective Laser Sintering, SLS)의 여러 가지 방식이

1. 서울과학기술대학교 기계디자인금형공학과  
† 교신저자: 한국생산기술연구원 금형기술그룹  
E-mail: birdlee@kitech.re.kr

있으며 그 중 SLS 방식은 분말형태의 원재료를 빌딩 룸(Building room)에 한 층 한 층 채워 넣고 레이저를 쏘아 소결(Sintering)과정을 통하여 제품을 제작하는 방식이다. 이때 다른 방식에 비하여 SLS 방식은 남은 원자재를 재활용할 수 있으며, 제품을 제작할 때 특별한 지지대가 불필요하다는 장점이 있다. 또한 분말형태의 원재료를 사용하기 때문에 금속, 플라스틱, 세라믹, 유리 등 다양한 재료를 사용할 수 있다는 장점이 있다<sup>2)</sup>. 이에 따라 SLS 방식의 3D 프린터를 이용하여 금형 안에 최적의 냉각수로, 개인 맞춤형 관절, 다공성 임플란트 등의 개발이 활발히 진행되고 있다. 이러한 기하학적인 자유도가 높은 형상을 제조할 수 있는 장점이 있으나 보다 정밀하고 내구성이 우수한 설계가 필수불가결하다<sup>3)</sup>. 이러한 요구기준에 따라 3D 프린터를 이용해 제작된 구조물에 대한 기계적 특성이나 피로특성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>4)</sup>. 따라서 본 연구에서는 SLS 3D 프린팅을 이용하여 제작된 구조물의 피로수명을 예측하기 위하여 소결된 PA2200을 1~50000 Cycles 이내에 하중제어 피로시험을 수행하였으며 피로시험을 분석한 결과를 바탕으로 소결된 PA2200 소재를 기존 금속소재의 피로특성과 비교하고자 하였다.

## 2. 인장시험 및 피로시험 준비

### 2.1. 소재

본 실험에서 사용된 PA2200 분말형 소재는 폴리아미드12(polyamide-12)의 단량체(monomer)로 구성된 분말형 소재이며 소결시켰을 때에는 우수한 기계적 특성 및 열적 특성을 갖고 있다. Table 1은 EOS社에서 제공된 주요 물성을 나타내었다.

### 2.2. 시험장비 및 시편제작방법

본 실험에 사용된 기기로는 EOS社의 EOSINT P395 3D printer를 사용하였으며 분말 형태의 열가소성 플라스틱을 선택적 레이저 소결 방식(Selective Laser Sintering, SLS) 기술이 적용된 장비이다. 제작 가능한 최대 적층물의 부피는 340 x 340 x 620mm이며, 적층하는 속도는 최대 31mm/h, 레이저 소결을 위한 스캔속도는 8m/s이다. Fig. 1을 통하여 자세한 적층방법을 보이고 있다. 첫 레이어는 소결선(sintering line)을 따라 소결선 간격(scan spacing)

0.012mm를 맞추어 수직인 방향으로 진행되며 광원의 이송속도가 8m/s로 빠르게 진행된다. 첫 레이어의 단면을 소결선으로 완성한 뒤 모델의 윤곽을 따라 윤곽선(outline)을 1m/s의 저속으로 재소결하여 제작물의 형상을 잡아주며 제품 표면의 미소결 결함을 방지한다. 두 번째 레이어는 첫 레이어와 같은 원리로 소결되며, 진행방향은 첫 레이어에 직교하는 수평방향으로 진행된다. 위와 같은 방식으로 Fig. 2의 시험편을 총 21개의 레이어(2.52mm)로 제작되었다. 또한 본 실험에서 사용된 시험기는 Zwick社의 Z010TE 모델인 미세탄성 재료시험기를 사용하였다.

Table 1 Properties of sintered PA2200

Properties	Test method	Unit	Value
Average grain size	ISO 13220-11	$\mu\text{m}$	60
Bulk density	EN ISO 60	$\text{g}/\text{cm}^3$	0.45
Density of laser-sintered part	EOS method	$\text{g}/\text{cm}^3$	0.93
Tensile modulus	EN ISO 527	MPa	1700±150
Tensile strength	EN ISO 527	MPa	48
Elongation at break	EN ISO 527	%	24
Melting point	EN ISO 11357-1	°C	172 - 180
Glass transition temp.	EN ISO 11357-1	°C	52 - 56
Specific heat	DIN 51005	$\text{J}/\text{g} \cdot \text{°C}$	2.35
Thermal conductivity			
Vertical to sintered layers	DIN 52616	$\text{W}/\text{m} \cdot \text{°C}$	0.144
Parallel to sintered layers	DIN 52616	$\text{W}/\text{m} \cdot \text{°C}$	0.127

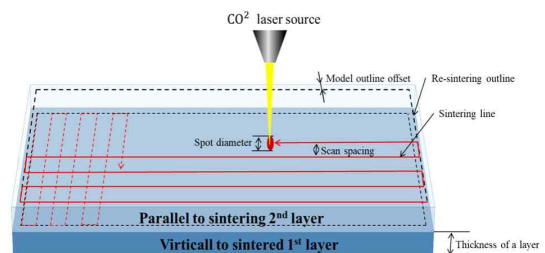


Fig. 1 Additive manufacturing process of EOSINT P395 3D printer

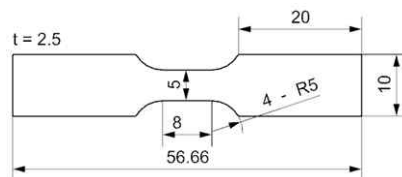


Fig. 2 Specimen model according to ASTM E 466

### 3. 단순 하중 조건에서 인장 실험

#### 3.1. 인장시험 실험방법

단순하중조건에서 PA2200의 시험속도에 따른 기계적 특성을 알아보기 위하여 시험속도를 경질 플라스틱 인장시험 통칙에 따라 권장 시험속도인 1, 10, 50, 100mm/s로 설정하여 인장시험을 수행하였다. 또한 인장시험 중 시편의 self-heating 여부를 확인하기 위해 FLIR SYSTEMS 社의 Thermo-vision A20 적외선 카메라를 이용하여 촬영을 수행하였다. 또한 시험속도의 영향을 확인하기 위하여 10, 50, 100, 150mm/s로 변화하며 촬영하였다.

#### 3.2. 시험속도에 따른 PA2200의 기계적 물성 측정 실험 결과

소결된 PA2200의 인장 거동은 Fig. 3과 같이 시험속도 1, 10, 50, 100mm/min으로 진행하였을 때 PA2200의 응력-변형률 선도를 나타내었으며 각각의 탄성계수, 항복강도, 인장강도, 파단까지의 연신율을 Table 2에 기술하였다. 시험속도에 따른 탄성계수는 EOS 社에서 제공한 결과와 유의미한 차이가 없는 것을 확인하였다. 항복응력은 시험속도에 따라서 27.2%, 11.3%, 5.0%의 증가율을 보였다. 인장강도는 15.3%, 3.1%, 2.6%의 증가율을 보였다. 파단까지의 연신율은 5.1%, 10.0%, 8.8%의 감소율을 보였다. 이러한 결과에 따라서 시험속도가 빨라지면 소결된 PA2200은 강성이 높아지는 것을 확인 할 수 있다.

Table 2 Mechanical properties according to crosshead speed

Mechanical properties	Crosshead speed(mm/min)				unit
	1	10	50	100	
Tensile modulus	1853	1746	1820	1882	MPa
Yield strength (0.5% offset)	29.8	37.9	42.2	44.3	MPa
Tensile strength	42.6	49.1	50.6	51.9	MPa
Elongation at break	29.4	27.9	25.1	22.9	%

#### 3.3. 시험속도에 따른 시편의 self-heating 측정 실험 결과

인장시험과정에서 시편은 인장되면서 탄성영역을 넘어서 소성변형의 과정을 겪다가 파단에 이르

게 된다. 이때, 소성변형과정에서는 소재의 미세구조가 미끌어짐(sliding)이 일어나게 되며 이 과정에서 마찰에 의한 발열이 생기게 된다<sup>7)</sup>. 이를 시편의 self-heating이라고 하며, 본 실험에서는 20℃의 상온 환경에서 시험속도의 수준에 따라서 시험편의 발열을 알아보려고 하였다.

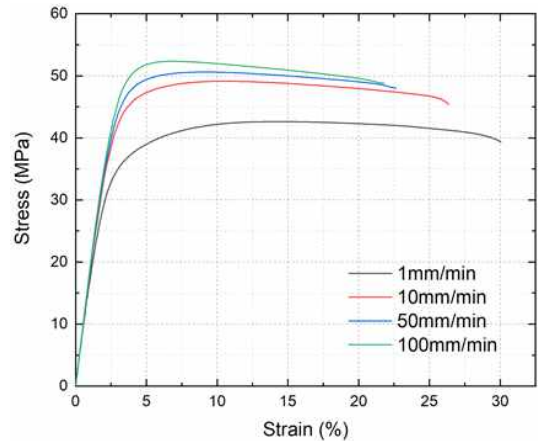


Fig. 3 Stress-strain response according to test speed

Fig. 4에서 보이는 (a)는 시험기기에 거치된 상태에서 촬영된 사진이며 (b), (c), (d), (e)는 시험속도가 10mm/min, 50mm/min, 100mm/min, 150mm/min 으로 증가시켜 파단될 때의 시험편의 온도를 측정된 결과이다. 시험 전 시험편을 20℃상태로 유지하였으며 각각의 파단될 때의 파단면의 최고온도는 40.2℃, 37.5℃, 38.5℃, 37.8℃로 확인하였다. 따라서 10mm/min~150mm/min 시험속도에서 시험편의 self-heating은 유의미한 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

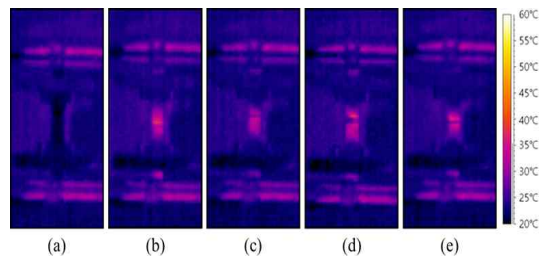


Fig. 4 IR-Camera temperature measurements during tensile testing, image before tensile test (a), failure at 10mm/s of crosshead speed (b), failure at 50mm/s of crosshead speed (c), failure at 100mm/s of crosshead speed (d), failure at 150mm/s of crosshead speed (e)

### 3.4. 온도에 따른 PA2200의 기계적 물성 측정 실험 결과

일반적으로 플라스틱의 기계적 강도는 온도에 민감하며, 시험속도의 영향이 시편의 self-heating의 온도 차이에 유의미한 영향이 없음을 확인하였다. 따라서 본 실험에서는 상온 23℃, 시편의 평균 self-heating 온도인 38.5℃, 유리전이온도인 52~56℃의 중간값인 54℃, 유리전이온도와 용융온도 사이에 존재하는 100도를 선정하였으며 시험속도는 100mm/min으로 설정하여 진행하였다.

온도에 따른 각각의 소결된 PA2200의 응력-변형을 거동은 Fig. 5에서 확인할 수 있으며, 각각의 탄성계수, 항복강도, 인장강도, 파단까지의 연신률을 Table 3에 기술하였다. 유리전이온도 이하인 상온 23℃와 시편의 평균 self-heating 온도인 38.5℃에서의 탄성계수는 EOS社에서 제공한 결과인 1700±150 MPa과 유의미한 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 항복강도와 인장강도는 1.8%, 3.8% 감소를 보였고 파단까지의 연신률은 10.5%의 증가율을 보였다.

반면에 상온 23℃의 기계적 물성과 비교하여 유리전이온도 이상의 온도조건인 54℃와 100℃에서는 탄성계수가 32.6%, 73.3%의 감소율을 보였으며, 인장강도 감소율은 40.0%, 72.0%의 감소율을 보였다. 또한 파단까지의 연신률은 238%, 1135.8% 만큼 크게 증가하는 것을 확인하였다. 따라서 소결된 PA2200은 유리전이온도 이상에서 온도에 굉장히 민감한 소재이며, self-heating의 평균온도인 38.5℃에서는 기계적강도저하가 적은 것을 확인할 수 있다.

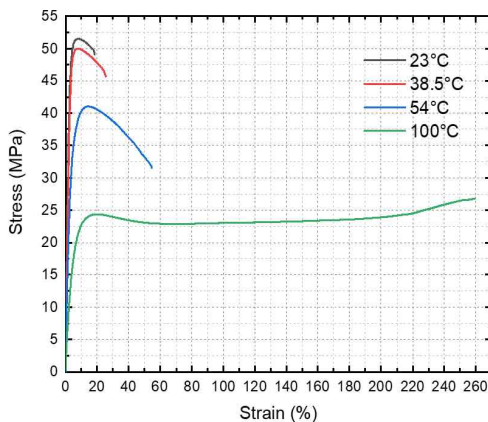


Fig. 5 Stress-strain response according to temperature conditions

Table 3 Mechanical properties of sintered PA2200 according to temperature conditions

Mechanical properties	Temperature condition				unit
	23℃	38.5℃	54℃	100℃	
Tensile modulus	1860	1725	1254	497	MPa
Yield strength (0.5% offset)	44.3	43.5	26.6	12.4	MPa
Tensile strength	51.9	50.3	41.1	26.8	MPa
Elongation at break	22.9	25.3	54.6	260.1	%

## 4. 반복 하중 조건에서 피로 실험

### 4.1. 피로시험 실험방법

피로특성에 미치는 영향을 최소화 하기 위하여 앞절의 실험을 진행하였으며, 상온에서 피로시험의 시험속도는 100mm/min, 응력비(R)은 0, 진폭비(A)는 무한대인 인장 편진 반복하중의 하중조건을 부여하였다.

### 4.2. 피로수명선도

본 실험을 통하여 Fig. 6의 피로수명선도를 작성하였다. 또한 시험결과들을 99%의 신뢰도로 선형 회귀분석을 하여 관계식 (1)의 결과를 얻었다. 이 결과는 basquin이 제안한 금속소재의 수명이  $10^3 \sim 10^6$  회에서의 관계식 (2)가 적용 가능함을 언급하였는데, 소결된 PA2200은 수명이  $10^1 \sim 5 \times 10^4$  회에서 만족함이 확인되었다.

$$S_f = 10^{1.41036} N^{-0.02284} = 25.76 N^{-0.02284} \dots (1)$$

$$S_f = 10^C N^b \dots (2)$$

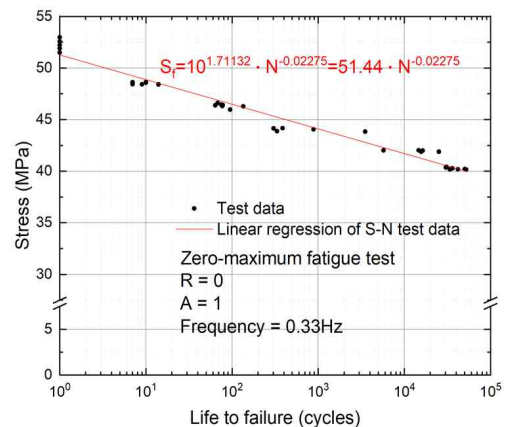


Fig. 6 S-N curve of sintered PA2200



### 4.3 반복하중에 따른 PA2200의 피로거동

앞 절의 선형회귀 분석결과와 가장 유사한 피로 시험결과물들을 각각의 응력수준에 따라 하나씩 확인하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7의 (a)와 (b)는 전형적인 라체팅(Ratcheting)거동<sup>7)</sup>특성을 보이며, (c)와 (d)는 Plastic shakedown의 거동특성<sup>7)</sup>을 보이는 것을 확인할 수 있다. (e)는 Elastic shakedown의 거동특성<sup>7)</sup>을 보이고 있다.

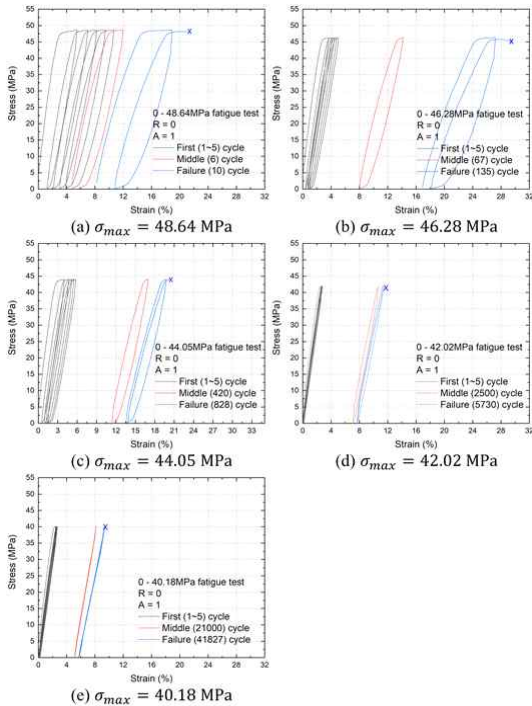


Fig. 7 Stress-strain hysteresis according to level of applied maximum stress, under applied maximum stress 48.64 (a), under applied maximum stress 46.28 (b), under applied maximum stress 44.05 (c), under applied maximum stress 42.02 (d), under applied maximum stress 40.18 (e)

### 4.4 파단면의 SEM 분석

Hitachi 社の SU8020의 전계방사형주사전자현미경을 이용하여 파단된 시편의 파단면을 30배율로 촬영하였다. 파단면에는 크게 크레이징 파단 표면(crazing fracture surface)<sup>8)</sup>와 취성 파단 표면(brittle fracture surface)<sup>9)</sup>가 확인 되었다. 또한 grain melting defect<sup>10)</sup>, 기공(pore)의 결함들이 존재하고 있다. 일반적으로 금속소재는 높은 반복하중에서 빠른 파단면이 넓으며 파단까지의 반복횟수가 많을수록 균열이

빠른 파단에 이를 때까지 성장해야한다<sup>11)</sup>. 이에 따라 Fig. 8의 파단면 영역의 넓이 변화를 확인하였을 때, 소결된 PA2200의 파단면의 구성은 금속소재의 빠른 파단면과 균열 개시 및 전파에 의한 파단면과는 다른 표면형상을 보여주고 있으나 취성 파단면이 빠른 파단면의 발생 원리와 크레이징 파단면이 균열 개시 및 전파에 의한 파단면과 같은 발생 원리를 갖고 있다는 것을 확인 하였다. 즉, grain melting defect 혹은 기공에서 균열의 시발점으로 작용하며 균열이 하중방향으로 성장함에 따라 고분자의 사슬 구조가 찢어지는 형상이 형성되어 크레이징 파단면을 형성하며 크레이징 파단면의 영역이 커지게 되어 일정수준 이상의 하중에서 급격한 속도로 파단되는 취성 파단면이 형성된다고 판단된다.

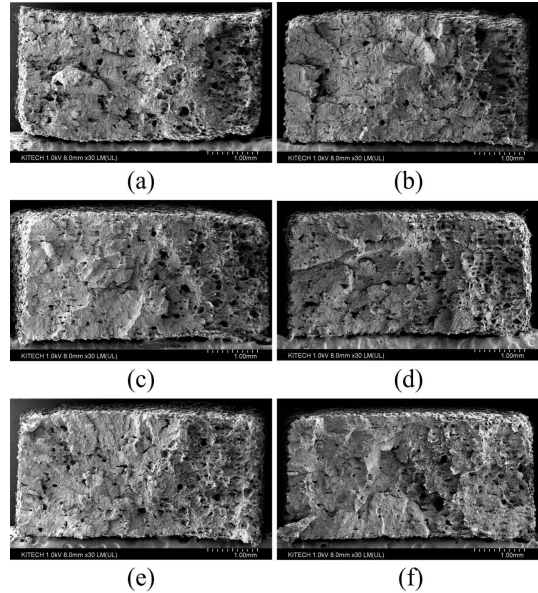


Fig. 8 SEM observation of fracture surface, under monotonic tensile loading (a), under 48.64MPa cyclic loading (b), under 46.28MPa cyclic loading (c), under 44.05MPa cyclic loading (d), under 42.02MPa cyclic loading (e), under 40.18MPa cyclic loading (f)

## 5. 결론 및 토의

본 연구에서는 SLS 3D Printer를 이용하여 제작한 PA2200 시편의 단축 인장 반복하중에 따른 피로 시험을 통하여 피로수명선도를 얻었다. 또한 Basquin이 제안한 금속소재의 수명 관계식이 소결

된 PA2200 소재에도 적용되며, 이를 이용하여 PA2200으로 제작된 구조물의 수명을 등가응력접근법을 이용하여 수명을 예측할 수 있으며 정밀한 설계가 가능할 것이라 판단된다. 또한, 각각의 반복응력 수준에 따른 피로 거동특성과 파단면을 분석한 결과 금속소재에서 나타나는 균열 개시 및 전파에 의한 파단과, 빠른 파단으로 인한 불규칙한 파단이 소결된 PA2200 소재에도 크레이징 파단면과 취성 파단면으로 나타남을 확인할 수 있었다.

## 후기

본 연구는 중소벤처기업부 중소기업상용화기술개발 세부사업의 구매조건부 신제품개발 사업(S2652287(SE19640))에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) Wohlers, T. and Gornet, T., "History of additive manufacturing", Wohlers Report : Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report, 2011.
- 2) Goodridge, R. D., Tuck, C. J and Hague, R. J. M., "Laser sintering of polyamides and other polymers", Progress in materials science, Vol. 57, pp. 229-267, 2012.
- 3) L. Lu, J. Fuh, "Laser-induced Materials and Processes for Rapid Prototyping", Kluwer, London, 2001.
- 4) B. V. Hooreweder, D. Moens, R. Boonen, J. P. Kruth, P. Sas, "On the difference in material structure and fatigue properties of nylon specimens produced by injection molding and selective laser sintering", Polymer Testing 32, pp. 972-981, 2013.
- 5) V. E. Rubtsov, A. V. Kolubaev, "Effect of Heat Generation Due to Plastic Deformation on Behavior of Surface-Layer Material during Sliding", Journal of Friction and Wear, Vol. 30, pp. 324-328, 2009.
- 6) Y. L. Lee, Pan, J., Hathaway, R. and Barkey, M., "Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice", Elsevier, Boston, p. 106, 2005.
- 7) Behzad, G., Hamid, N, Michele, R., "Dynamic

simulation of a flexible pavement layers considering shakedown effects and soil-asphalt interaction", Transportation Geotechnics, Vol. 7, pp. 40-58, 2016.

- 8) A. J. Kinloch, R. J. Yong., "Fracture Behaviour of Polymers", Applied Science, London, pp. 147-181, 1978.
- 9) B. V. Hooreweder, F. D. Coninck, D. Moens, R. Boonen, P. Sas, "Microstructural characterization of SLS-PA12 specimens under dynamic tension/compression excitation", Polymer Testing, Vol. 30, pp. 611-615, 2009.
- 10) T. Jollivet, A. Darfeuille, B. Venquin, S. Pillot, "Rapid Manufacturing of Polymer Parts by Selective Laser Sintering", International Journal of Material Forming, Vol. 12, pp. 697-700, 2009.
- 11) Bannantine, Julie. A., Comer, Jess. J., Handrock, J. L., "FUNDAMENTALS OF METAL FATIGUE ANALYSIS", Englewood Cliff, New Jersey 07632, pp. 4-255, 1990.

## 저자 소개

### 박 준 수(Jun-Soo Park)

[학생회원]



- 2018년 2월: 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (기계디자인금형공학사)
- 2018년 3월~현재: 서울과학기술대학교 기계디자인금형공학과 (석사과정), 한국생산기술연구원 뿌리산업기술연구소 금형기술그룹 학연협동과정생

< 관심분야 >

사출성형 및 금형, 3D 프린팅, 피로해석

### 정 의 철(Euichul-Jeong)

[학생회원]



- 2014년: 단국대학교 기계공학 학사
- 2016년: 단국대학교 대학원 기계공학 석사
- 2016년 3월 ~ 현재: 단국대학교 대학원 기계공학과 박사과정

< 관심분야 >

사출성형 및 금형

**최 한 솔(Han-Sol Choi)**

[학생회원]



- 2015년 2월: 한국폴리텍2대학 금형디자인과 졸업
- 2017년 3월 ~ 현재: 단국대학교 기계공학과 석과과정 재학중

< 관심분야 >

사출성형 및 금형, 유동해석

**김 용 대(Yong-dae Kim)**

[정회원]



- 2007년 2월: 한양대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2007년 7월~2011년 7월: 한국섬유기계연구원 선임연구원
- 2011년 8월~현재: 한국생산기술연구원 금형기술그룹, 수석연구원

< 관심분야 >

사출성형 및 금형, 분말사출성형, 유동해석

**김 미 애 (Miae Kim)**



- 2002년 2월: 인천시립대 기계공학과
- 2002년 11월~현재: 한국생산기술연구원 금형기술그룹, 기술원

< 관심분야 >

기계설계 및 3D 프린터

**원 시 태(Si-Tae Won)**

[정회원]



- 1978년: 고려대학교 기계공학과 (공학박사)
- 1984년 9월~현재: 서울과기대 기계시스템디자인공학과 교수
- 1996년 1월~1997년 1월: 미국 펜실베니아 주립대학교 방문 연구
- 2008년 1월~2010년 7월: 서울과학기술대학교 산업협력단장
- 2018년 1월~현재: 서울과학기술대학교 공과대학 학장

< 관심분야 >

재료 및 응용역학, 소성가공

**윤 언 경(Eon-Gyeong Yun)**



- 2012년 2월: 국가평생교육진흥원 기계공학과 학사
- 2010년 10월~현재: 한국생산기술연구원 금형기술그룹, 기술원

< 관심분야 >

고분자재료의 유변물성분석

**이 성 희(Sung-Hee Lee)**

[정회원]



- 1998년 8월 : 홍익대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2002년 7월~2006년 12월 : 한국생산기술연구원 선임연구원
- 2010년 12월~2014년 1월 : 한국생산기술연구원 부친금형센터 센터장
- 2014년 1월~2015년 3월 : 한국생산기술연구원 한국금형센터 그룹장
- 2007년 1월~현재: 한국생산기술연구원 금형기술그룹, 수석연구원

< 관심분야 >

고분자성형 및 금형, 급속가열, 복합재료, 전산모사/최적화