


## 레이저 스캐닝 속도가 SLS 3-D 프린팅 용착 형성 층에 미치는 영향

박정빈 · 이동현 · 강호종<sup>†</sup> 

단국대학교 고분공학과

(2018년 1월 29일 접수, 2018년 3월 12일 수정, 2018년 3월 19일 채택)

### Effect of Laser Scanning Speed on the Formation of Sintered Layer in SLS 3-D Printing

Jeongbin Park, Donghyun Lee, and Ho-Jong Kang<sup>†</sup> 

Department of Polymer Science and Engineering, Dankook University, Gyeonggi-do 16890, Korea

(Received January 29, 2018; Revised March 12, 2018; Accepted March 19, 2018)

**초록:** SLS 3-D 프린팅에 의한 고분자 분말 용착 공정에서 레이저 스캐닝 속도가 층 형성에 미치는 영향을 살펴본다. Galvano 스캐너에 비하여 상대적으로 레이저 스캐닝 속도가 느린 X-Y 스캐너를 사용하는 경우, 레이저가 분말에 조사되는 시간이 길어 용착보다는 용융에 가까운 층 형성이 일어남을 확인하였다. 그 결과, 층 두께는 깊어지고 선폭은 넓어짐을 알 수 있었다. 하지만, 형성 층의 밀도와 치수안정성은 스캐닝 속도에 크게 영향을 받지 않음을 확인하였다. 이와 함께 가해진 에너지 밀도에 따른 용착과 용융에 의한 형성 층의 형태학적 차이에 의하여 구조체의 강도는 현저하게 달라짐을 알 수 있었다.

**Abstract:** The effect of laser scanning speed on the formation of sintered layer in SLS 3-D polymer printing was studied. The melting behavior of polymer powders was found in formed layer when X-Y scanner was used in SLS 3-D printing due to the increase of laser exposure time on powder. However, sintering between polymer powders was dominated when Galvano scanner was applied with rapid laser scanning speed. As a result of melting behavior, the layer thickness increased and wide layer width was obtained in the layer made by X-Y scanner. However, the laser scanning speed did not affect the density and dimensional stability of layer, but the difference of flexural strength was noticed between formed layers having sintering and melting appearance of polymer powders.

**Keywords:** selective laser sintering, 3-D printing, polymer powder, scanning speed, sintering, melting.

## 서 론

Selective laser sintering(SLS)은<sup>1</sup> 금속, 세라믹, 고분자 분말을 레이저로 용착(sintering)하여<sup>2,3</sup> 3차원적 구조체를 만드는 3-D 프린팅 방법이다. 재료 및 사용 목적에 따라 CO<sub>2</sub> laser, lamp or diode pumped Nd:YAG laser, disk or fiber laser 등 다양한 레이저 소스가<sup>3-5</sup> 사용되며 레이저를 분말에 조사하는 방법으로 기계적으로 구동되는 선형적 X-Y stage에 미러 반사판을 장착한 X-Y 스캐너와<sup>5</sup> 서보 모터에 반사판이 장착되어 광학적으로 구동되는 Galvano 스캐너가<sup>6,7</sup> 주로 사용된다. X-Y 스캐너는 스캐닝 속도가 용착에 크게 영향을 미치지 않는 세라믹 분말에 고분자 수지가 코팅된 주물사에 주로 적용

되는 반면, Galvano 스캐너는 X-Y 스캐너에 비하여 빠른 스캐닝 속도가 요구되는 금속 및 고분자 3-D 프린팅에 사용되고 있으나 상대적으로 현저히 높은 가격이 단점으로 알려져 있다.

SLS 3-D 프린팅에서 용착 공정은<sup>8-10</sup> 고상 용착(solid state sintering), 액상 보조 용착(liquid phase assisted sintering), 그리고 용융 용착(full melting) 공정, 화학적 반응 공정으로 나눌 수 있다. 고상 용착은 열 공정으로 분말을 용융온도 이하에서 열을 장시간 가해주어 용착이 일어나는 공정이다. 따라서 빠른 공정 속도가 요구되는 SLS 3-D 프린팅에서는 적절하지 않은 공정이다. 액상 보조 용착은 주물사와 같이 고분자가 코팅된 세라믹에 주로 사용되어 고분자가 액상화되어 분말과 분말을 바인딩하는 공정이다. 용융 용착은 완전 용융 공정으로 세라믹과 금속 분말의 용착에서 주로 사용된다. 고분자 분말의 일반적인 3-D 프린팅에서의 용착 공정은 고상 용착과 용융 용착의 중간 단계로 진행되며 가해진 레이저 에

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
hjkang@dankook.ac.kr, ORCID<sup>®</sup> 0000-0003-3706-2616  
©2018 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

너지에 의하여 분말 용융이 일어나 분말과 분말 사이에 넥(neck)이 형성되어 구조체가 만들어지고 이들의 형성 정도에 따라 밀도 및 기계적 특성이 달라진다.

고분자 SLS 3-D 프린팅에서 분말에 가해지는 에너지는 레이저 파워, 스캐닝 속도 그리고 스캐닝 간격에 의하여 결정되며 이는 식 (1)과 같은 에너지 밀도로 나타낼 수 있다.

$$\text{Energy density} = \frac{\text{laser power}}{\text{scan spacing} \times \text{scan speed}} \quad (1)$$

에너지 밀도가 증가되어 고분자 분말의 온도가 용융온도 이상이 되면 분말과 분말 사이에 넥이 형성되기 시작하며 추가적인 에너지 밀도 증가에 의하여 완전 용융이 일어나게 된다. 에너지 밀도는 식 (1)에서 보는 바와 같이 레이저 파워와 함께 레이저 스캐닝 속도에 의하여 조절될 수 있다. 즉, 스캐닝 속도를 빨리 하면 레이저가 분말 표면에 조사되는 에너지가 적어지며 그 결과, 분말과 분말의 넥 현상만 일어나 성형물의 밀도가 낮아지는 반면 스캐닝 속도가 느려지면 분말에 레이저 에너지 조사가 증가되어 분말에 완전 용융이 일어나 밀도가 증가하게 된다. 이러한 밀도의 변화는 성형물의 기계적 특성, 치수안정성, 층과 층의 delamination, 표면 특성과 같은 물성과 밀접한 관계를 갖게 된다.<sup>11,12</sup>

본 연구에서는 에너지 밀도를 좌우하는 레이저 스캐닝 속도가 고분자 SLS 3-D 프린팅 층 형성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 스캐닝 방법이 다른 X-Y 스캐너와 Galvano 스캐너를 사용하는 SLS 3-D 프린터를 이용하여 나일론 분말을 용착하고 이들의 구조 및 물성 변화를 살펴보았다.

## 실 험

평균 입도와 uniformity가 각각 51.8  $\mu\text{m}$ , 0.282인 Exceltec 사 나일론12(PA1550)를 SLS 3-D 프린팅의 고분자 분말로 사용하였다. Figure 1(a)와 같은 X-Y 스캐너와 40 watt CO<sub>2</sub> 레이저가 장착된 SLS 3-D 프린터(Sentrol, 3D-SS150)를 사용하였으며 이때 레이저 파워는 2.4-8.0 watt (6-20%), 스캐닝 간격은 0.1-0.3 mm 그리고 스캐닝 속도는 5-40 mm/sec로 프린팅 조건으로 적용하였다. 이와 함께 Figure 1(b)와 같이 Galvano 스캐너와 100 watt CO<sub>2</sub> 레이저로 구성된 3-D 프린터(Sentrol, 3D-SP250)를 함께 사용하였으며 이 때 레이저 파워는 10-70 watt, 스캔간격은 0.1-0.3 mm 그리고 스캔속도는 1000-6000 mm/sec를 적용하였다.

SLS 공정에 의하여 얻어진 형성 층은 광학현미경(Olympus, BX51)을 사용하여 40-100 배의 배율로 형성 구조체의 선폭 및 두께 그리고 표면을 확인하여 성형 정밀성을 관찰하였다. 비중병에 의하여 제조된 시편 밀도를 함께 측정하였으며 구조체 치수안정성을 확인하기 위하여 상온에서 150 °C의 체적 변화를 TMA(Mettler, SDTA-840e)를 사용하여 측정하였다.

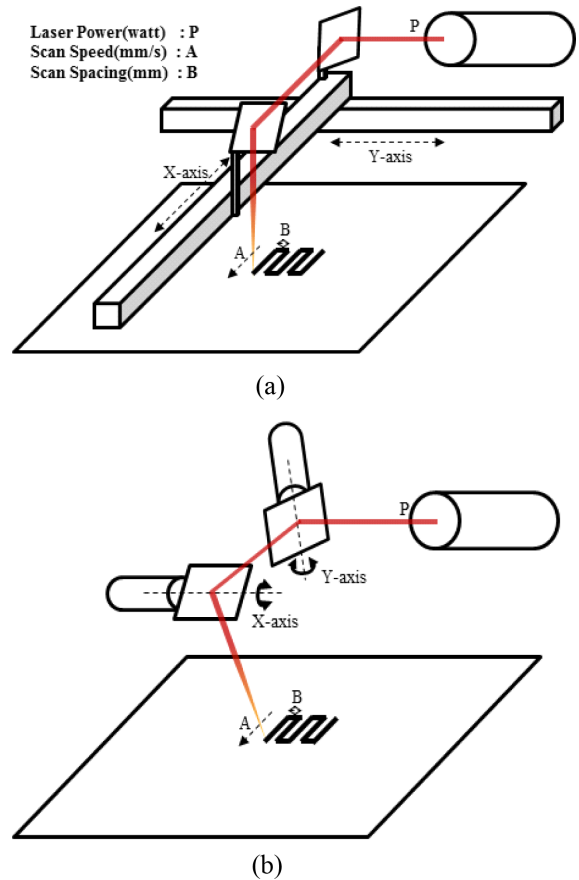
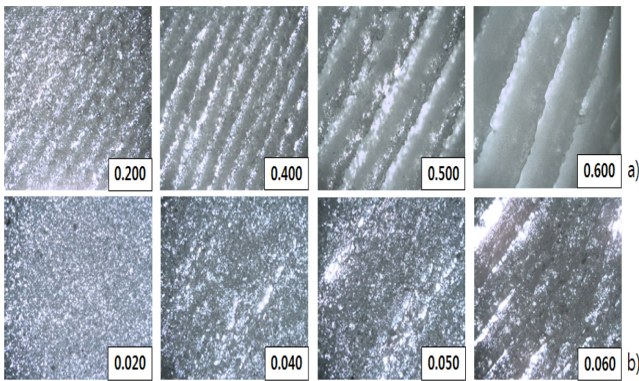


Figure 1. Schematics of sintering method in SLS 3-D printer: (a) X-Y scanner; (b) Galvano scanner.

나일론 3-D SLS 가공의 파우더 bath의 등은 온도(150-170 °C)에서의 치수 변화를 확인하기 위하여 측정된 thermogram으로부터 100-150 °C까지의 단위 온도당 체적변화로 열팽창계수(CTE: ppm/°C)를 계산하고 시편 두께에 따른 측정 오차를 최소화하기 위하여 이를 두께로 나누어 용착 조건에 따른 치수안정성을 확인하였다. LLOYD사의 UTM LR30K에 3 point bending test 치구를 장착하고 형성 층의 flexural strength를 측정하여 이들의 기계적 강도를 확인하였다.

## 결과 및 토론

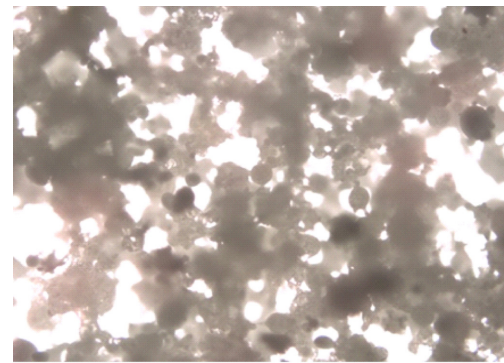
Figure 2에 X-Y 스캐너와 Galvano 스캐너를 사용한 SLS 3-D 프린터로 만들어진 형성 층의 형태학적 변화를 나타내었다. 기계적으로 스캐닝 속도를 변화시키는 X-Y 스캐너는 광학적으로 스캐닝 속도를 변화시키는 Galvano 스캐너에 비하여 상대적으로 매우 느린 스캐닝 속도를 갖는다. 따라서 Figure 2에서 보는 바와 X-Y 스캐너는 Galvano 스캐너의 비교하여 같은 에너지 파워를 적용시켜도 에너지 밀도가 현저히 높음을 알 수 있다. 스캐닝 속도가 느린 X-Y 스캐너는 레이저가



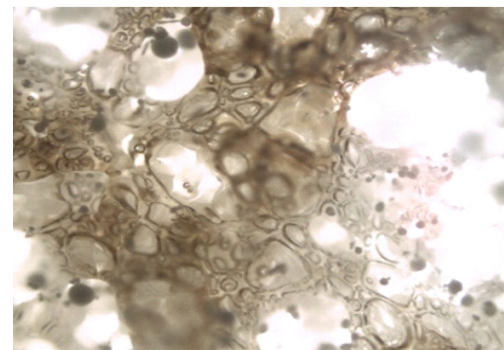
**Figure 2.** Optical micrograph of CO<sub>2</sub> laser sintered nylon samples as a function of energy density (40x): (a) by X-Y scanner; (b) by Galvano scanner.

분말에 조사되는 시간이 증가되어 분말의 용융화가 진행되어 Figure 2에서 보는 바와 같이 레이저 진행 방향으로 용융 현상이 일어나며 반복적인 스캐닝에 의하여 스캐닝이 중첩되지 않는 부분에서 분말 용착 현상이 일어나며 0.6의 에너지 밀도에서는 거의 완전한 용융이 일어남을 알 수 있다. 이와는 달리 스캐닝 속도가 상대적으로 빨라 레이저가 분말에 체류하는 시간이 짧은 Galvano 스캐너의 경우, 용융 현상보다는 분말과 분말 사이의 넥 형성에 의한 분말 용착이 일어남을 알 수 있다. 하지만, Galvano 스캐너도 에너지 밀도를 증가시키면 용융 현상이 일어남을 확인할 수 있다. Figure 3에 스캐닝 속도 차이에 의한 분말에 가해진 에너지 밀도 변화에 따른 분말간의 용융 현상과 용착 현상을 광학 현미경의 배율을 100 배로 하여 다시 나타내었다. Figure 3에서 보는 바와 같이 분말과 분말의 넥에 의한 용착 현상과 완전 용융 현상이 에너지 밀도에 따라 일어남을 알 수 있다. 이러한 레이저 스캐닝 속도에 따른 형성 층의 형태학적 변화는 층의 두께, 선폭, 그리고 밀도 및 치수 안정성에 영향을 미칠 것으로 예상되며 결과적으로 성형체의 기계적 특성을 변화시킬 것으로 판단된다.

Figure 4에 레이저 스캐닝 속도가 형성 층 두께에 미치는 영향을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 에너지 밀도가 증가됨에 따라 층의 두께가 증가됨을 알 수 있다. 이는 에너지 밀도가 증가되면 열전달에 의하여 두께 방향으로의 분말의 용착 혹은 용융 현상이 일어남을 알 수 있다. 따라서 상대적으로 에너지 밀도가 낮은 Galvano 스캐너를 사용하면 앞에서 언급된 바와 같이 분말간의 sintering에 의한 층 형성과 함께 얇은 층의 형성이 가능함을 알 수 있다. 하지만, 에너지 밀도가 높은 X-Y 스캐너는 열전달이 분말의 깊은 부분까지 전달되어 용융현상이 일어나 층의 두께가 두꺼워 짐을 알 수 있다. 이와 함께 Figure 4에서 보는 바와 같이 Galvano 스캐너의 경우, 같은 에너지 밀도에서 층 두께의 편차가 작음을 보아 에너지 밀도를 구성하는 레이저 파워, 스캐닝 속도, 그

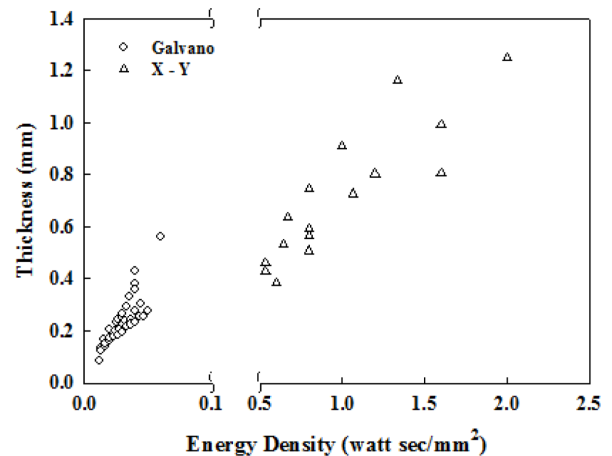


(a)



(b)

**Figure 3.** Formation of layer in SLS 3-D printing (100x): (a) sintering; (b) melting behavior of polymer powders.



**Figure 4.** Effect of energy density of CO<sub>2</sub> laser scan on the thickness of sintered sample.

리고 스캐닝 폭에 의하여 층 두께의 변화가 크지 않은 반면, X-Y 스캐너는 이들 변수에 영향을 미침을 알 수 있다. 즉, 두께는 세 가지의 에너지 밀도 변수 중에서 스캐닝 속도에 가장 민감하게 변화됨을 확인할 수 있다. Figure 5에 에너지 밀도에 따른 선폭 변화를 나타내었다. 에너지 밀도가 증가됨에

따라 레이저 진행 수직 방향으로 용착 혹은 용융 현상이 증가되고 그 결과, 선폭이 증가됨을 확인할 수 있다. 이상의 결과로부터 스캐닝 속도가 빨라 에너지 밀도가 낮은 Galvano 스캐너를 사용하면 두께 및 선폭의 미세 조절이 가능하여 얻어지는 성형체의 치수 정밀성이 향상될 것으로 생각된다.

Figure 6에 에너지 밀도가 형성 층의 밀도에 미치는 영향을 나타내었다. Figure 2의 형태학적인 구조로 보아 분말과 분말이 연결되어 공극이 많을 것으로 예상되는 용착으로 이루어진 에너지 밀도가 낮은 조건에서 형성된 층의 밀도가 완전 용융에 의하여 이러한 공극이 최소화된 층에 비하여 밀도가 낮을 것으로 예측되었으나 Figure 6에서 보는 바와 같이 에너지 밀도가 증가됨에 따라 형성 층의 밀도는 증가되나 스캐너의 종류에 따른 즉, 스캐닝 속도 변화에 따른 밀도 변화는 거의 없음을 알 수 있다. Galvano 스캐너의 경우, 작은 에

너지 밀도의 변화에도 밀도가 급격히 변화되는 반면, X-Y 스캐너는 에너지 밀도의 변화에 따른 층의 밀도 변화가 완만하게 변화됨을 보인다. 이는 X-Y 스캐너의 경우 층 형성이 용융현상에 의하여 에너지 밀도 변화에 따른 변화가 작으며 추가적인 에너지 밀도 변화는 선폭 사이의 용착된 부분의 밀도 변화를 초래하며 그 결과, 에너지 밀도에 따른 밀도 변화가 작음을 알 수 있다. Galvano 스캐너의 에너지 밀도에 따른 급격한 밀도 변화는 에너지 밀도 증가에 따라 형성 층이 용착 현상에서 용융 현상으로 형태가 변화되며 이에 따른 밀도 변화임을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 Galvano 스캐너를 사용하면 낮은 에너지 밀도에서 원하는 성형체의 밀도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Figure 7에 얻어진 형성 층의 온도에 따른 치수 안정성을 나타내었다. 유기 고분자는 온도 변화에 따라 변화되는 분자 운동성에 의하여 체적이 변화된다. 이는 성형체의 치수안정성과 밀접한 관계를 갖는다. 고분자 SLS 3-D 프린팅의 경우, 레이저 스캐닝에 의하여 지속적으로 온도의 증가 및 감소가 반복된다. 따라서 이에 따른 체적 변화가 일어나 형성된 층의 치수 변화를 유발한다. 이러한 치수 변화는 적층이라는 3-D 프린팅의 기본적인 공정 방법에 커다란 문제점으로 작용한다. 즉, 레이저에 의하여 층을 형성한 후 다시 적층을 위하여 고분자 분말을 형성된 층 위에 다시 slicing하는 과정에서 레이저에 의하여 형성된 층의 치수 변형은 분말의 slicing을 안정적으로 하지 못하는 공정 불량 문제점을 야기시킨다. Figure 7에서 보는 바와 같이 일반적 나일론 필름이 250 ppm/°C의 치수 안정성을 갖는 반면 SLS 3-D 프린팅으로 제조된 층의 치수 안정성은 이보다 매우 높음을 확인할 수 있다. 이는 완전 용융에 의하여 제조된 나일론 필름 밀도는 나일론이 갖는 고유 밀도와 같은 반면 3-D 프린팅에 의하여 제조된 형성 층은 적용된 에너지 밀도에 따라 완전 용융이 아닌 용착

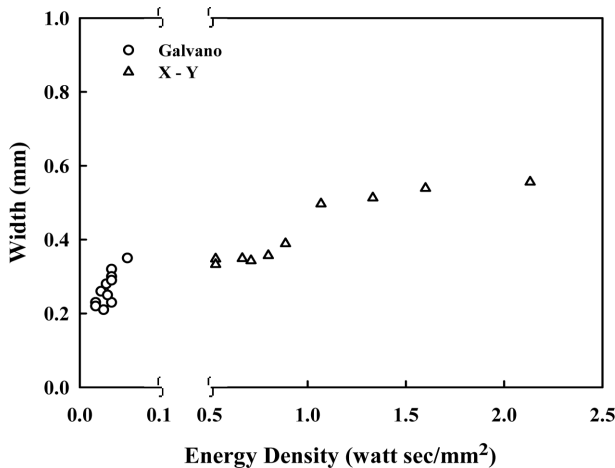


Figure 5. Effect of energy density of CO<sub>2</sub> laser scan on the width of sintered sample.

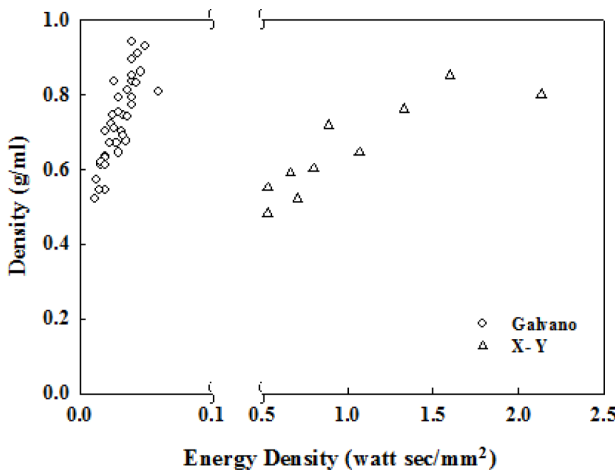


Figure 6. Effect of energy density of CO<sub>2</sub> laser scan on the density of sintered sample.

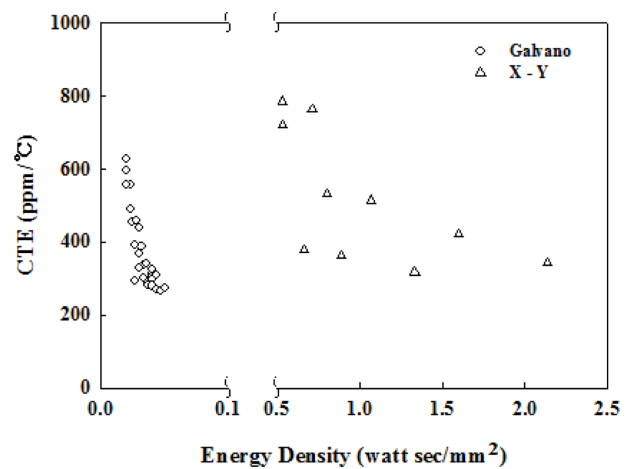


Figure 7. Effect of energy density of CO<sub>2</sub> laser scan on the CTE of sintered sample.

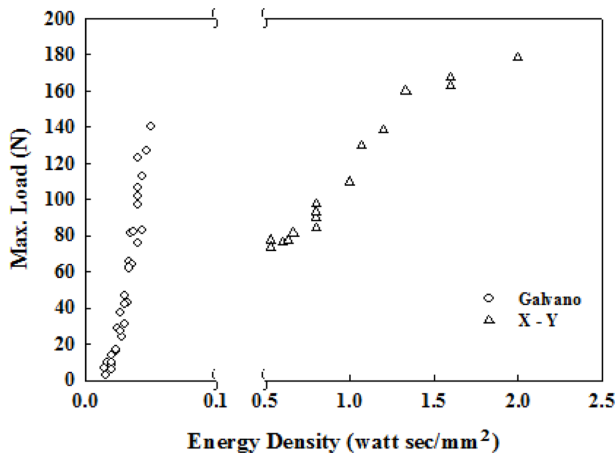


Figure 8. Effect of energy density of CO<sub>2</sub> laser scan on the flexural strength of sintered sample.

이 존재하기 때문에 Figure 6에서 보는 바와 같이 상대적으로 밀도가 낮으며 이러한 형태학적 변화로 인하여 온도에 따른 CTE 값이 매우 큼 즉, 치수의 변화가 매우 심함을 알 수 있다. X-Y 스캐너와 Galvano 스캐너로 제조된 층 모두 에너지 밀도를 증가시키면 CTE가 감소하는 것으로 보아 치수 안정성이 증가됨을 보이는데 이는 앞의 밀도 증가와 마찬가지로 에너지 밀도의 증가에 의하여 형성 층의 형태적 구조가 용착에서 용융으로 변화되기 때문이다. 단, 밀도와 마찬가지로 Galvano 스캐너를 사용하는 경우 적은 에너지 밀도 변화에도 치수안정성이 급격히 변화됨을 알 수 있음을 알 수 있으며 이는 두 스캐너에서 형성된 층의 형태학적 구조 차이 용착과 용융에 따른 차이로 해석할 수 있다.

Figure 8에 SLS 3-D 프린팅으로 제조된 형성 층의 기계적 강도를 확인하기 위하여 3 point bending test에 의한 flexural strength를 나타내었다, 상대적으로 낮은 에너지 밀도에 의하여 용착이 주된 층 형성 매커니즘인 Galvano 스캐너의 기계적 강도가 X-Y 스캐너에 비하여 매우 낮은 것으로 예측되었으나 Figure 8에서 보는 바와 같이 아주 낮은 에너지 밀도에서는 강도가 낮으나 일정 에너지 밀도 이상에서는 X-Y 스캐너로 제조된 층보다 강도가 오히려 높음을 알 수 있다. 이는 Galvano의 경우 레이저에 의하여 중첩된 부분도 낮은 에너지 밀도에 의하여 용착으로 층이 형성되는 반면 X-Y 스캐너의 경우 Figure 2에서 확인된 바와 같이 이러한 경계면이 용착으로 형성되고 레이저가 지나가면서 스캐닝된 부분은 용융으로 층이 형성됨에 따라 경계면이 3 point bending 실험을 할 경우 취약 부분으로 작용하여 낮은 flexural strength를 갖게 된다. 또한 Figure 2에서 확인된 바와 같이 용착이 주된 층 형성 과정인 Galvano 스캐너는 분말 용융이 최소화 되지만 분말과 분말이 necking으로 연결되어 용착과 용융이 반복되는 X-Y 스캐너로 제조된 층에 비하여 기계적 강도가 우수함을 확인할 수 있다.

## 결론

본 연구에서는 나일론 분말의 SLS 3-D 프린팅 공정에 있어서 레이저 스캐닝 속도가 층 형성에 미치는 영향을 확인하고 이에 따른 형성 층의 물성 변화에 대하여 확인하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

상대적으로 레이저 스캐닝 속도가 빠른 Galvano 스캐너는 낮은 에너지 밀도에 의하여 층의 형성이 분말과 분말이 necking되는 용착에 의하여 이루어지는 반면 느린 스캐닝 속도에 의하여 높은 에너지 밀도를 갖는 X-Y 스캐너의 경우, 층 형성이 용융에 의하여 진행됨을 확인할 수 있었다. Galvano 스캐너로 형성된 층은 상대적으로 층 형성 두께가 얇으며 선 폭 또한 좁아 X-Y 스캐너에 의하여 만들어진 층과 비교하여 성형체 형성의 치수 정밀성을 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다. Galvano 스캐너로 형성된 층의 밀도는 가해진 에너지 밀도가 낮음에도 불구하고 X-Y 스캐너와 유사한 밀도를 얻을 수 있으며 따라서 온도에 따른 치수안정성도 용융이 주를 이루는 X-Y 스캐너로 형성된 층과 유사함을 확인하였다. 일정 에너지 밀도 이상에서 제조된 Galvano 스캐너에 의하여 제조된 층은 상대적으로 X-Y 스캐너에 비하여 낮은 에너지 밀도가 가해 졌음에도 불구하고 균일한 구조에 의하여 더 높은 기계적 강도를 가짐을 확인하였다.

**감사의 글:** 본 연구는 2017년도 장비연계형 3D프린팅 소재기술개발사업(과제번호: 10053838)에 의하여 수행된 연구로 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. C. Deckard, U.S.Patent 4,863,538 (1989).
2. J. P. Kruth, P. Mercelis, J. Van Vaerenbergh, L. Froyen, and M. Rombouts, *Rapid Prototyp. J.*, **11**, 26 (2005).
3. J. P. Kruth, X. Wang, T. Laoui, and L. Froyen, *Assembly Autom.*, **23**, 357 (2003).
4. A. J. Pinkerton, *Opt. Laser Technol.*, **78**, 25 (2016).
5. K. P. McAlea, P. F. Forderhase, M. E. Ganninger, F. W. Kunig, and J. Angelo, U.S.Patent 5,733,497 (1998).
6. G. F. Marshall, *Handbook of Optical and Laser Scanning*, Marcel Dekker, New York, 2004.
7. L. Beiser and B. Johnson, *Handbook of Optics*, McGraw-Hill, New York, 1995.
8. S. Eshraghi and S. Das, *Acta Biomater.*, **6**, 2468 (2010).
9. M. Vaezi, H. Seitz, and S. Yang, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **67**, 1721 (2013).
10. K. C. Kolan, M. C. Leu, G. E. Hilmas, and M. Velez, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, **13**, 14 (2012).
11. F. L. Amorim, A. Lohrengel, V. Neubert, C. F. Higa, and T. Czelusniak, *Rapid Prototyp. J.*, **20**, 98 (2014).
12. D. Gu and Y. Shen, *Mater. Sci. Eng.: A*, **489**, 69 (2008).