

CO₂ 레이저 용착에 의한 고분자 분말 3D 프린팅

박정빈 · 김재욱 · 이동현 · 강호종[†]

단국대학교 고분자공학과

(2016년 6월 15일 접수, 2016년 7월 25일 수정, 2016년 8월 10일 채택)

Polymer Powder Sintering by CO₂ Laser for 3D Printing

Junghin Park, Jaek Kim, Dong Hyun Lee, and Ho-Jong Kang[†]

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

(Received June 15, 2016; Revised July 25, 2016; Accepted August 10, 2016)

초록: 레이저 용착에 의한 3D 프린팅 가공 시, CO₂ 레이저 용착 조건이 구조체 형성 정밀성 및 치수 안정성에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. SLS 3D 프린팅 가공에 의한 구조체는 가공조건에 따라 분말/분말 근접 계면 용착 및 용융에 의하여 형성됨을 알 수 있었으며 레이저 파워, 스캔속도, 스캔간격에 의한 에너지 밀도가 증가될수록 근접된 분말의 용융화가 더 잘 진행된다. 그 결과, 구조체 밀도 및 치수안정성은 향상되나 근접 분말의 용융화에 의한 구조체 형성 선풍 및 두께 증가로 인한 형성 정밀성 감소에 따라 SLS 3D 적층 공정에 문제점을 야기시킴을 알 수 있었다.

Abstract: The effects of polymer powder sintering by CO₂ laser printing on the shaping accuracy and dimensional stability of produced samples were investigated in selective laser sintering (SLS) 3D printing. It was found that the laser sintering resulted in both the surface fusion and melting between closely contacted powders. Increasing the energy density by laser power, scan speed, and scan spacing caused the enhancement in the density and dimensional stability of samples due to the increase of melting process of powders. However, it caused the lowering of dimensional accuracy in shaping such as the obtained width and thickness in 3D printing, and then the difficulty of powders slicing for next lay-up process was found.

Keywords: selective laser sintering, 3D printing, polymer powder, sintering, dimensional stability, coefficient of thermal expansion.

서 론

3D 프린팅은 다양한 디자인 프로그램을 이용하여 손쉽게 독창적인 고분자 구조체를 제조할 수 있다는 장점으로 최근 관심의 대상이 되고 있다.¹ 대표적인 3D 프린팅 고분자 가공 기술로는 fused deposition modeling(FDM),² stereo lithography apparatus(SLA),³ selective laser sintering(SLS)⁴ 그리고 photopolymer jetting technology(Polyjet)⁵ 등이 있으며 이들 기술은 재료적 측면에서 열가소성 혹은 광경화성 고분자를 사용하는 차이점을 갖고 있다.⁶

SLS는 고분자 분말을^{7,8} CO₂ 레이저를 이용하여 용착(sintering)시키는 방법으로 1987년 University of Texas at Austin의 Carl Deckard에⁴ 의하여 기술이 개발된 이후 2014년 특허가 만료됨에 따라 최근에 많은 연구가 진행되고 있다.^{9,10}

가장 널리 사용되는 고분자 소재는 나일론12이며^{11,12} polyetherimide(PEI)¹³, polyetheretherketone(PEEK)¹⁴ 등 특수 엔지니어링 고분자로 그 영역이 확장되고 있다. 특수 엔지니어링 플라스틱은 나일론에 비하여 기계적 특성이 우수하며 아울러 치수안정성이 월등히 개선되어 CO₂ 레이저에 의한 용착으로 적층을 형성하는 SLS 공정에서 구조체 형성과정에서 냉각 시 발생하는 열 수축 및 팽창에 따른 가공 불안정성을 최소화할 수 있는 장점을 갖는다.

SLS 적층 공정에서 발생하는 치수변화는 용융(melting) 가공과는 달리 필연적으로 발생하는 레이저 용착(sintering)에 따른 형성 구조체의 형태학적 불안정성에 기인한다.¹⁵⁻¹⁷ 고분자 분말은 레이저가 가해지면 분말과 분말 접촉면이 용착하면서 목 형태의 표면 용착이 시작되어 구조체를 형성하게 된다.¹⁸ 이와 함께 레이저에서 발생된 열에 의하여 분말간 용융 현상도 함께 진행된다. 따라서 레이저 파워, 스캔속도, 스캔간격 등에 따라 각기 다른 형태를 갖는 구조체를 형성시키고 구조체 밀도, 치수안정성 그리고 기계적 특성이 현격히 달라진다.

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: hjkang@dankook.ac.kr

©2017 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

본 연구에서는 상업용 나일론12 SLS 분말을 이용하여 CO₂ 용착 조건 즉, 레이저 파워, 스캔속도, 그리고 스캔간격에 따른 고분자 구조체의 형성 정밀성 변화를 살펴보고 이를 구조체 밀도와 치수안정성과 연관시켜 SLS 적층 공정에서의 최적의 레이저 용착 조건을 확인하고자 하였다.

실 험

본 연구에서 사용한 SLS 분말 소재로는 Exceltec사 나일론 12(PA1550)를 사용하였으며 용융온도는 183 °C 그리고 평균 입도와 uniformity는 각각 51.8 μm, 0.282였다. 분말 레이저 용착 특성을 확인하기 위하여 Figure 1과 같이 40 watt CO₂ 레이저가 장착된 SLS 3D 프린터(Sentrol, 3D-SS150)를 사용하였다. 그림에서와 같이 shaded area로 나타낸 분말은 상하로 움직이는 저장탱크, 용착탱크, 그리고 회수탱크로 보관되며 blade를 사용하여 저장탱크에서 용착탱크로 슬라이싱(slicing)된다. 이때 레이저 파워는 2.4-8.0 watt, 레이저 스캔과 근접된 레이저 스캔 사이의 간격(a)인 스캔간격은 0.1-0.3 mm 그리고 b 방향으로의 스캔속도는 5-40 mm/sec로 하여 분말을 Figure 1과 같이 레이저 용착하였다. 광학현미경(Olympus, Bx51)의 마이크로미터를 사용하여 성형 구조체의 선폭(너비) 및 두께 그리고 표면을 확인하여 성형 정밀성을 관찰하였다. 레이저 파워, 스캔속도 그리고 스캔간격이 SLS 성형에 미치는 영향을 확인하기 위하여 식 (1)과 같이 에너지 밀도를 계산하여 성형 정밀성 및 치수 안정성과의 상관관계를 나타내었다.

$$\text{에너지 밀도} = (\text{레이저 파워}) / (\text{스캔 간격} \times \text{스캔속도}) \quad (1)$$

아르키메데스의 원리를 이용하여 상온에서 제조된 시편 밀도를 함께 측정하였으며 구조체 치수안정성을 확인하기 위하

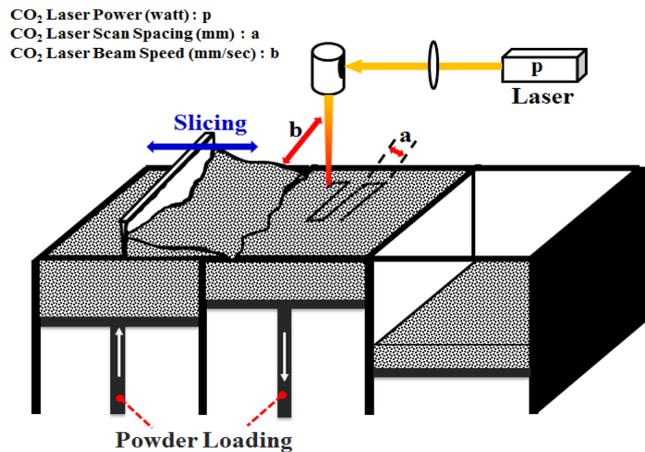


Figure 1. Schematics of SLS 3D printer used in this study (p; laser power a: laser scan spacing, b: laser scan speed).

여 상온에서 150 °C의 온도에 따른 체적 변화를 thermal mechanical analyzer(TMA; Mettler, SDTA-840e)를 사용하여 단위면적당 치수의 변화를 측정하여 ppm 단위로 나타내었다. 나일론 3D SLS 가공의 분말탱크의 등온 온도(150-170 °C)에서의 치수 변화를 확인하기 위하여 측정된 thermogram으로부터 100-150 °C까지의 단위 온도 당 체적변화로 열팽창계수 (coefficient of thermal expansion: CTE(ppm/°C))를 계산하고 시편 두께에 따른 측정 오차를 최소화하기 위하여 이를 두께로 나누어 용착 조건에 따른 치수안정성을 확인하였다.

결과 및 토론

레이저 용착 조건이 구조체 형성에 미치는 영향. Figure 2에 레이저 파워에 따른 SLS 3D 프린터로 만들어진 구조체의 선폭 및 두께 변화를 나타내었다. 이때 레이저 스캔간격과 스캔속도는 각각 0.3 mm와 20 mm/sec로 하였으며 한 번의 선형적 스캔으로 분말 용착 선폭을 확인하고 0.3 mm 스캔간격으로 연속 스캔하여 첫 층을 얻어 3차원적 구조체를 형성 후 이들의 두께를 확인하였다. 그림에서 보는 바와 같이 레이저 파워가 증가될수록 선폭이 증가되며 두께 또한 증가됨을 알 수 있다. 특히, 레이저 파워가 4.8 watt 이상에서 두께 증가 현상이 급격히 심화됨을 알 수 있다. 이러한 이유는 레이저 파워 증가에 따라 근접 분말 입자간의 용착보다는 레이저 발열에 의한 분말간의 용융현상이 일어나기 때문이다. 즉, 레이저가 분말 표면에 스캔될 때 레이저에서 발생하는 열에 의한 주변 분말의 용융현상이 생기며 그 결과, 선폭과 두께가 증가됨을 알 수 있다. 선폭 및 두께의 증가는 구조체 성형 정밀성을 감소시킨다. 분말에 의하여 다층 형태로 제작되는 3D 프린팅 기법에서는 형성된 구조체 위에 다시 분말을 lay up하는 슬라이싱 과정을 거쳐 레이저로 분말을 다시 용착시키는 공정이 필수적이다. 성형 정밀성 감소는 일차

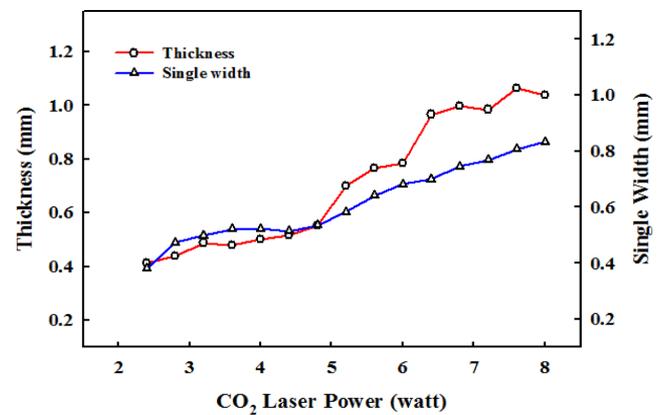


Figure 2. Effect of CO₂ laser power on the shaping dimension of sintered samples.

형성된 구조체 평면 평활성에 영향을 주어 슬라이싱을 방해하는 문제점을 야기시킨다. 따라서 적절한 레이저 파워 사용이 요구되어 지며 본 연구에서는 사용 3D 프린터 레이저 최대 파워의 10% 이내인 2.4-4.0 watt 범위에서 스캔간격 및 스

캔속도 변화시켜 성형 조건을 설정하였다.

Figure 3에 스캔속도와 스캔간격이 구조체 두께 형성에 미치는 영향을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 레이저 파워가 감소될수록, 스캔속도가 증가될수록 그리고 스캔간격이 증가될수록 두께가 감소됨을 알 수 있다. Figure 3(a)에서 보는 바와 같이 스캔간격과는 달리 스캔속도가 증가될수록 레이저 파워에 따른 두께 변화가 최소화된다. 스캔속도가 빠르다는 것은 레이저가 분말에 체류하는 시간이 적어 분말의 용착 혹은 용융이 상대적으로 덜 일어나게 됨을 의미한다. 특히 열에 의한 용융은 현저하게 줄어든다. 그 결과, 빠른 스캔 속도에서는 레이저 파워가 두께에 미치는 영향이 현저히 줄어들게 된다. Figure 3(c)에 레이저 파워, 스캔속도 그리고 스캔간격이 구조체 두께 형성에 미치는 영향을 이들로 구성된 식 (1)의 에너지 밀도로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 사용 에너지 밀도가 높을수록 두께가 증가됨을 확인할 수 있으며 에너지 밀도 0.8 이하에서는 용착 조건에 관계없이 선형적인 두께 변화를 갖는 반면 그 이상으로 에너지 밀도가 증가되면 같은 에너지 밀도에서 스캔간격 및 스캔속도 그리고 레이저 파워와 같은 가공 변수에 따라 두께의 변화가 심화됨을 보인다. 이는 높은 에너지 밀도에서의 성형 정밀성 감소를 의미한다. 즉, SLS의 가공에 있어서 성형 정밀성을 확보하기 위해서는 되도록 낮은 에너지 밀도에서 분말을 용착해야 함을 확인할 수 있다.

Figure 4(a)에 스캔속도와 스캔간격이 구조체 선폭 형성에 미치는 영향을 에너지 밀도로 나타내었다. 여기서 single width는 레이저를 한번 스캔하여 생긴 선폭을 의미하며 width ratio는 레이저를 일정 스캔간격을 유지하여 두 번 스캔하여 얻은 선폭과 첫 번째 스캔한 선폭의 비를 의미한다. 첫 번째 두께 형성과 마찬가지로 에너지 밀도가 낮을 경우 상대적으로 레이저 파워, 스캔속도, 스캔간격과 같은 가공변수에 영향이 작은 반면 에너지 밀도가 높아지면 같은 에너지 밀도라도 선폭이 달라짐을 알 수 있어 성형 안정성이 떨어짐을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 선폭은 스캔간격보다는 레이저 파워와 스캔속도에 더 많은 영향을 받음을 알 수 있다. 이와는 달리 일정한 스캔속도를 사용하면 에너지 밀도에 따른 선폭 변화는 최소화되며 레이저 파워에 따라 선폭이 결정됨을 알 수 있다.

일차 선형적 구조 형성에서는 스캔간격의 영향이 없는 반면 근접된 반복적인 스캔에 의한 2차원적 평면 구조체 형성에서는 Figure 4(b)와 같이 선폭이 스캔간격과 스캔속도에 함께 영향을 받음을 알 수 있다. 이론적으로는 같은 조건으로 근접되게 레이저로 분말을 용착하게 되면 2번 스캔한 선폭은 처음 스캔한 선폭의 2배가 되어야 하나 그림에서 보는 바와 같이 에너지 밀도가 높으면 즉, 레이저 파워 증가, 스캔속도 감소, 스캔간격 감소에 따라 이들 비가 감소됨을 확인할 수 있다. 에너지 밀도가 높으면 1차적으로 용착되었던 분말이 용

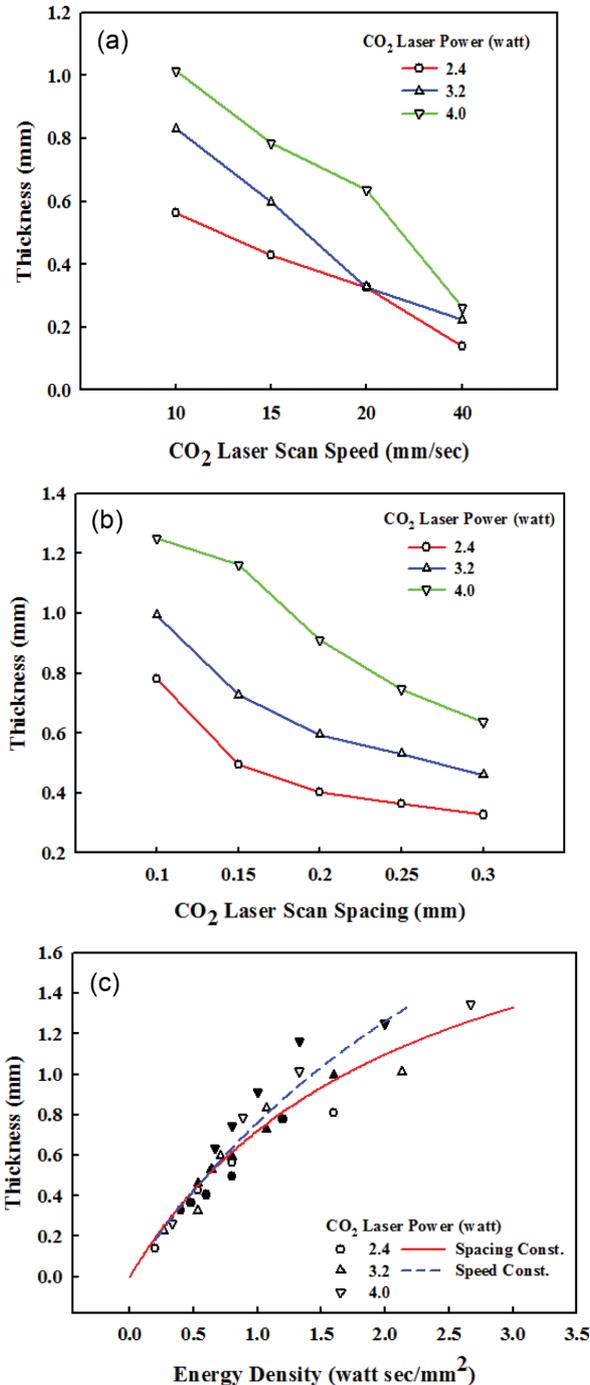


Figure 3. Effect of CO₂ laser scan spacing and scan speed on the thickness of sintered sample: (a) scan spacing; (b) scan speed; (c) energy density (open symbol with solid line; constant scan spacing, closed symbol with broken line; constant scan speed).

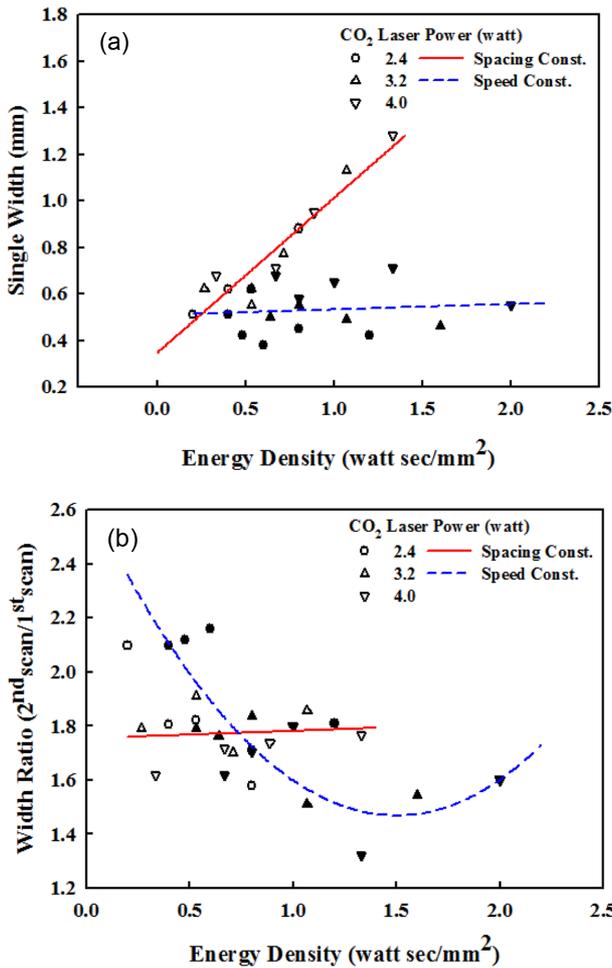


Figure 4. Effect of CO₂ laser scan spacing and scan speed on: (a) the single width of sintered sample; (b) width ratio between 1st scan and 2nd scan (open symbol with solid line; constant scan spacing, closed symbol with broken line; constant scan speed).

용되어 용착된 분말 양이 감소되며 이러한 현상이 선풍의 감소로 나타난다. 그림에서 보는 바와 같이 스캔간격을 일정하게 했을 경우 2.4 watt의 낮은 레이저 파워를 제외하고는 에너지 밀도에 관계없이 선풍이 일정함을 알 수 있다. 즉, 스캔속도를 증가시켜도 선풍에는 영향을 미치지 않음을 의미한다. 따라서 선풍의 조절은 스캔속도 보다는 스캔간격에 의존함을 알 수 있다.

Figure 5에 레이저 파워에 따른 3D 구조체 밀도 변화와 구조체 표면 현미경 사진을 함께 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 낮은 레이저 파워에서는 용착이 구조체를 형성시키는 주요 메커니즘이며 레이저 파워가 증가됨에 따라 분말 간의 용착과 함께 용융 현상이 일어남을 표면 현미경 사진으로 알 수 있으며 밀도가 증가되어 용융가공에서의 나일론 밀도와 유사한 1.1에 근접함을 알 수 있다. 4.0 watt 이하에서는 표면 현미경 사진에서 구조체 표면에 분말과 분말 사이의 빈

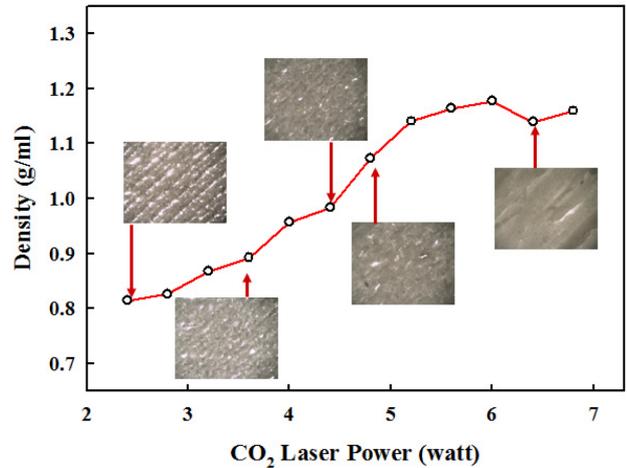


Figure 5. Effect of CO₂ laser power on the density of sintered samples with different surface morphology.

공간이 존재하는 것으로 보아 구조체 형성이 용착에 의한 것을 확인할 수 있으나 그 이상의 파워에서는 이러한 빈 공간이 점차적으로 사라지는 것을 확인할 수 있으며 따라서 용착 보다는 용융에 의하여 구조체가 형성되어 밀도가 증가됨을 알 수 있다. 5.6 watt 이상에서는 파워를 더 증가시켜도 밀도의 변화가 없음을 알 수 있어 용착에 의한 구조체 형성이 아닌 순수 용융에 의한 형성임을 알 수 있다.

Figure 6에 스캔속도와 스캔간격에 따른 구조체 밀도 변화를 나타내었다. Figure 6(a)에서 보는 바와 같이 스캔속도가 증가함에 따라 밀도가 감소함을 알 수 있으며 이러한 현상은 레이저 파워가 높을수록 두드러지며 5 mm/sec의 낮은 스캔속도에서는 레이저 파워가 밀도에는 영향을 주지 못함을 알 수 있다. Figure 6(b)에 스캔간격이 밀도에 미치는 영향을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 스캔간격이 좁을 경우 근접된 분말의 반복적인 용착에 의하여 밀도가 높으며 레이저 파워에 영향을 받지 않는 반면 스캔간격이 넓은 경우, 밀도가 감소함을 보이며 레이저 파워가 높을수록 더 영향이 큼을 알 수 있다. 너무 넓은 스캔간격에서는 레이저 파워가 증가되면 레이저가 지나간 곳과 근접되지 않은 곳의 분말 용착/용융 현상의 차이가 확연히 보이며 전체적인 밀도는 오히려 감소됨을 알 수 있다. 이 경우 레이저 영향이 분말에 미치지 못하는 부분이 존재하며 용융은 물론 용착도 일어나지 않기 때문이다. 하지만, 낮은 레이저 파워에서는 용융현상보다는 용착 현상이 주를 이루며 따라서 스캔간격은 밀도 변화에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. Figure 6(c) 에너지 밀도가 구조체 밀도에 미치는 영향을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 에너지 밀도가 증가됨에 따라 용융현상에 의한 구조체 밀도가 증가됨을 알 수 있으며 스캔간격 및 스캔속도에 따른 밀도 영향은 매우 유사함을 확인할 수 있다. 또한 에너지 밀도 1.0 이상에서는 에너지 밀도에 의한 구조체 밀도 변

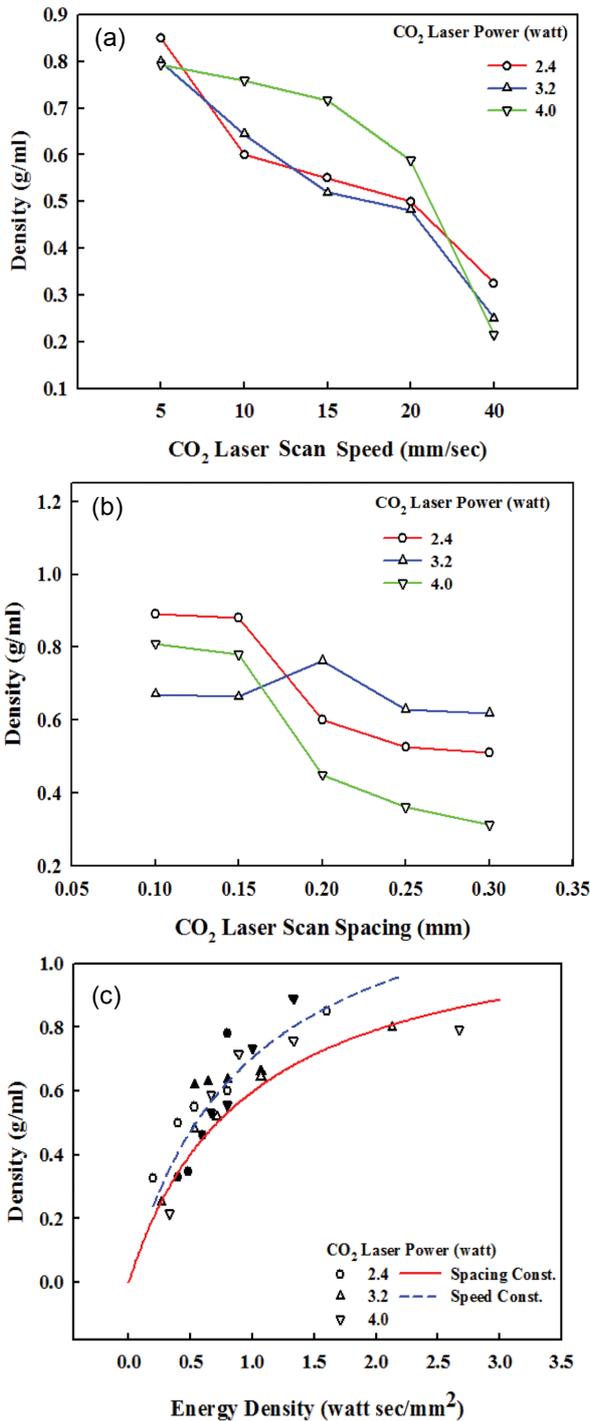


Figure 6. Effect of CO₂ laser scan spacing and scan speed on the density of sintered sample: (a) scan spacing; (b) scan speed; (c) energy density (open symbol with solid line; constant scan spacing, closed symbol with broken line; constant scan speed).

화가 상대적으로 감소하는 것으로 보아 분말간의 용착보다는 용융현상이 주로 일어나 밀도의 변화를 최소화시킬 수 있다.

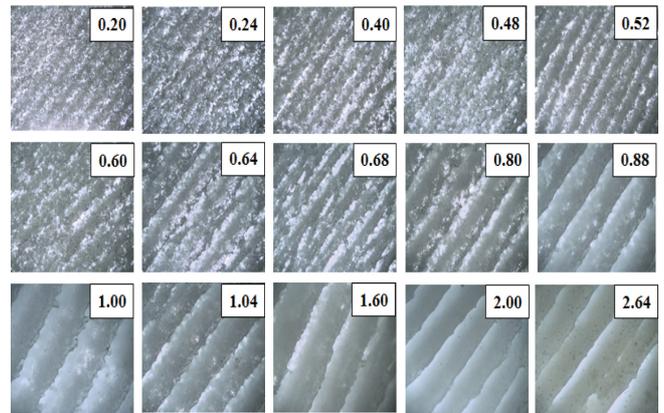


Figure 7. Optical micrograph of CO₂ laser sintered samples as a function of energy density.

Figure 7에 에너지 밀도에 따른 구조체의 표면 광학현미경 사진을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 에너지 밀도가 높아짐에 따라 분말간 용착보다는 용융현상이 증가됨을 알 수 있으며 이러한 용융현상은 에너지 밀도 0.8 이상부터 확연히 증가됨을 알 수 있다. 레이저 파워, 스캔간격, 스캔속도에 따른 에너지 밀도 증가는 분말에 가해지는 열에너지를 증가시키며 일정 에너지 이상에서는 분말 용착 단계를 지나 분말 용융화가 일어나는 결과로 해석할 수 있다. 광학현미경 사진에서도 용융에 의한 조밀한 구조가 형성됨을 확인할 수 있어 Figure 7과 같은 밀도 증가를 예측할 수 있으며 에너지 밀도 0.8 이상에서 밀도의 변화가 적음이 용융화에 의한 것임을 다시 한 번 확인할 수 있다. 또한 이 범위는 Figure 3과 Figure 4의 성형 정밀성의 범위와도 매우 일치함을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 SLS 3D 프린팅의 성형 정밀성은 분말간의 용융이 아닌 용착에서 이루어지며 이를 위하여 에너지 밀도는 최소화 되어야 함을 알 수 있다.

레이저 용착조건이 구조체 치수안정성에 미치는 영향. Figure 8에 얻어진 3D 구조체 가공에서 에너지 밀도에 따른 치수안정성을 확인하기 위하여 TMA thermogram과 각 100-150 °C 구간에서의 계산된 CTE를 시편의 두께로 나눈 값을 Figure 9에 나타내었다. CTE는 온도에 따른 체적의 변화로 용착과 냉각이 반복되는 3D 공정의 치수안정성을 확인하는 주요한 요소이다. 그림에서 보는 바와 같이 유기 고분자는 열 팽창에 의하여 온도가 높아짐에 따라 체적이 증가됨을 알 수 있다. 유기체의 온도에 따른 체적변화는 온도에 따른 분자의 운동성 증가에 기인한다. 이러한 체적 변화는 높은 레이저 파워에서 만들어진 구조체가 상대적으로 낮음을 알 수 있다. 이는 용융 현상에 의하여 조밀한 구조를 갖는 구조체는 상대적으로 온도에 의한 분자 운동성이 용착 현상에 의하여 제조된 구조체에 비하여 작기 때문이다. 체적 변화는 적층에 의하여 3차원 구조체를 제작하는 SLS 3D 프린팅에 있어서 치수 변

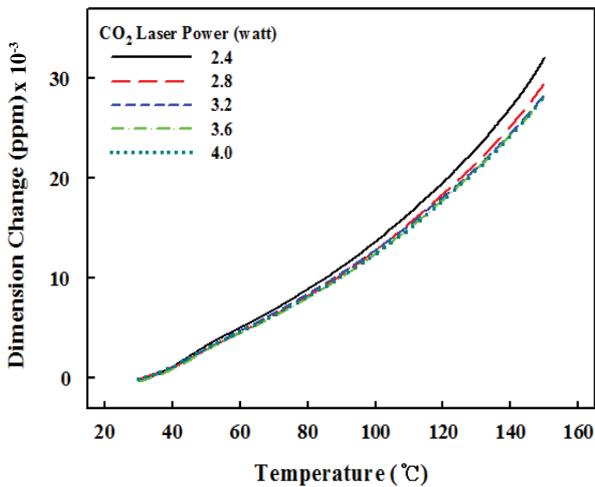


Figure 8. TMA thermogram of sintered samples by CO₂ laser.

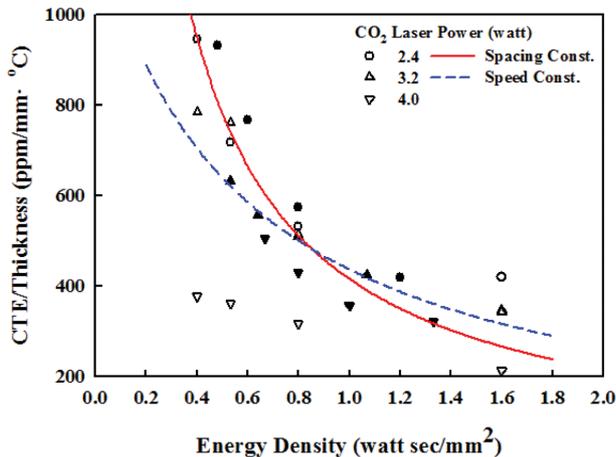


Figure 9. Effect of laser scan speed and scan spacing on the coefficient of thermal expansion of sintered sample (open symbol with solid line; constant scan spacing, closed symbol with broken line; constant scan speed).

형을 초래하며 따라서 표면 평활도가 일정하지 않아 다음 층을 적층하기 위한 슬라이싱 과정에 문제점을 야기시킨다. 즉, 레이저에 의한 분말 온도 상승과 냉각이 반복되는 과정에서 체적의 변화는 적층 공정에 많은 문제점이 된다. Figure 1에서 나타난 일반적인 나일론의 분말 탱크는 이러한 변화를 최소화시키기 위하여 온도를 150-170 °C 등온 조건으로 유지하는 것으로 알려져 있다. Figure 9에서 보는 바와 같이 에너지 밀도가 증가함에 따라 체적 변화가 최소화됨을 알 수 있다. 이러한 체적의 감소는 레이저 파워를 증가시키는 경우 더 감소함을 알 수 있다. 레이저 파워 증가에 따라 분말간의 용융 현상을 유발시켜 Figure 6과 Figure 7에서 확인된 바와 같이 구조체 밀도를 상승시키고 그 결과 치수안정성이 우수해짐을 보인다. 이와 함께 Figure 9에서 보는 바와 같이 치수안

정성은 적정 레이저 파워 이하에서 유사한 에너지 밀도에서는 가공변수에 관계없이 유사한 값을 가짐을 알 수 있으며 이러한 결과로부터 구조체의 치수 안정성은 이들의 밀도와 매우 연관성이 큼을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 치수안정성은 성형 정밀성이 우수한 에너지 밀도가 0.8 이하에서 급격히 변함을 알 수 있어 앞에서 언급한 슬라이싱의 문제점을 최소화하기 위하여 등온 공정이 필수적임을 확인할 수 있었다.

결론

본 연구에서는 SLS 3D 프린팅 레이저 용착 조건이 제조된 구조체 성형 안정성 및 치수 안정성에 미치는 영향을 살펴보고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

SLS 3D 프린팅에 의한 구조체 가공은 레이저 가공조건에 따라 분말간의 용착과 용융이 동시에 일어나 이들의 성형 정밀성, 밀도 그리고 치수 안정성에 영향을 줌을 확인하였다.

에너지 밀도를 증가시킬수록 구조체 두께 및 선풍이 정밀성이 감소됨을 확인할 수 있으며 에너지 밀도 0.8 이하에서 성형 정밀성이 유지됨을 알 수 있었다.

에너지 밀도의 증가에 따른 분말간 용융현상에 의하여 밀도가 증가되며 밀도 증가는 열팽창 및 수축을 감소시켜 치수 안정성(CTE)이 우수해짐을 알 수 있었다. 하지만, 성형 정밀성에 문제를 초래함을 확인하였다.

SLS 3D 프린팅에서 레이저 가공조건인 에너지 밀도는 성형 정밀성과 구조체의 치수안정성에 모두 영향을 미침에 따라 두 조건을 모두 만족시킬 수 있는 선택이 요구되어짐을 확인하였다.

감사의 글: 본 연구는 2015년도 장비연계형 3D프린팅 소재기술개발사업(과제번호 10053838)에 의하여 수행된 연구로 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. E. Matias and B. Rao, *2015 Proceeding of PICMET'15*, p 551 (2015).
2. S. S. Crump, U.S. Patent 5,121,329 (1992).
3. C. W. Hull, U.S. Patent 4,575,330 (1986).
4. C. Deckard, U.S. Patent 4,863,538 (1989).
5. R. Singh, *J. Mech. Sci. Tech.*, **25**, 1011 (2011).
6. M. Hofmann, *ACS Macro. Lett.*, **3**, 382 (2014).
7. M. Schmid, A. Amado, and K. Wegener, *AIP Conference Proceeding*, **1664**, 160009 (2015).
8. J. Schmidt, M. Sachs, D. Blumel, B. Winzer, F. Toni, K. Wirth, and W. Peukert, *Procedia Eng.*, **103**, 550 (2015).
9. D. Rietzel, W. Aquite, D. Drummer, and T. Osswald, *44th CIRP*

- conference on Manufacturing System*, Madison, June 1-3 (2011).
10. J. W. Stansbury and M. J. Idacavage, *Dent. Mater.*, **32**, 54 (2016).
 11. J. P. Kruth G. N. Levy, F. Klocke, and T. H. C. Childs, *CIRP Ann. Manuf. Techn.*, **56**, 730 (2007).
 12. D. T. Pham, S. S. Dimov, and F. Lacan, *J. Eng. Manuf.*, **213**, 435 (1999).
 13. A. C. Leon, Q. Chen, N. B. Palaganas, J. O. Palaganas, J. Manapat, and R. C. Advincula, *React. Func. Polym.*, **103**, 141 (2015).
 14. S. Berretta, O. Ghita, and K. E. Evans, *Eur. Polym. J.*, **59**, 218 (2014).
 15. A. E. Tontowi and T. H. C. Childs, *Rapid Prototyping J.*, **7**, 180 (2001).
 16. I. Gibson and D. Shi, *Rapid Prototyping J.*, **3**, 129 (1997).
 17. U. Ajoku, N. Hopkinson, and M. Caine, *Mat. Sci. Eng.*, **428**, 211 (2006).
 18. J. Frenkel, *J. Phys. (USSR)*, **9**, 385 (1945).