

나노초 UV 레이저를 이용한 분말사출 부품의 미세가공

안대환*, 박성진*, 권영삼**, 김동식*

*포항공과대학교 기계공학과, **세타텍

Micromachining of powder injection molded parts using ns UV laser

Daehwan Ahn*, Seongjin Park*, Youngsam Kwon**, Dongsik Kim*

*Department of Mechanical Engineering, POSTECH, **CetaTech Co. Ltd.

Abstract

In this work, the feasibility of using a UV laser for micromachining of powder injection molded parts is examined experimentally. The results, although preliminary, indicate that microfabrication of various parts by laser micromachining of the injection molded parts and then sintering is promising. Particularly, micromachining of a mixture composed of stainless steel particles and polymer binders was studied using a KrF excimer laser.

Key words: Excimer laser, Laser micromachining, Powder injection molding, Stainless steel

1. 서론

물리적, 기계적 물성이 우수한 티타늄 소재나 세라믹 재료들은 직접적인 가공에 있어서 매우 제약적이어서 압출 성형이나 주조와 단조 등의 일반적인 가공방법으로는 성형이 불가능하다. 그러나, 분말야금(powder metallurgy)의 방법을 활용하여 앞에서 말한 재료에 대한 성형성을 확보하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.¹⁻³ 특히, 스테인레스 스틸(stainless steel)을 소재로 3차원 마이크로 기어와 같은 부품을 분말야금으로 가공한 사례가 보고된바 있다.⁴ Fig. 1에서와 같이 금속 파우더를 폴리머 바인더와 혼합하여 원재료(feedstock)을 만들고 이 재료를 원하는 형태로 사출 성형하고, 이 후에 탈지(debinding) 및 소결(sintering) 과정을 거쳐 원하는 형태의 금속 제품을 만들 수 있다. 금속 파우더-폴리머 복합재(green body)를 성형하는데 있어서 기계적인 가공법이 일반적으로 사용될 수 있지만 경질 재료의 경우 그 제약이 크므로 레이저를 이용한 미세 가공에 관한 관심이 증가하고 있다. Fig. 2에서 이러한 가공방법을 개념도로 나타내었다. 폴리머 복합재에 UV 레이저를 조사하여 폴리머 및 금속 입자를 제거하여 원하는 미세구조물을 만드는 것이다.

이러한 폴리머 복합재에 대한 연구는 주로 나노입자와 폴리머 복합재의 경우가 대다수를 차지하고 있으며^{5,6} 분말야금을 목적으로 금속 파우더-폴리머 복합재를 가공하는 연구는 희박한 수준이다. 그러므로 본 연구에서는 마이크로 구조를 가지는 금속기지 복합재를 만들기 위해서 사출 성형으로 제작된 폴리머와 금속입자의 혼합재료를 UV 레이저를 이용하여 마이크로 가공의 가능성을 타진하는 것을 목표로 하였으며, 폴리머와 금속 입자가 혼합된 재료와 UV 레이저간에 상호작용 및 가공 특성을 분석하고자 하였다.

2. 실험 및 계산

대상 시편은 스테인리스 스틸 입자와 폴리머 바인더를 6:4 비율로 혼합하여 사출성형 시킨 제품이다. 바인더로는 25% 폴리프로필렌(polypropylene), 15% 폴리에틸렌(polyethylene), 57% 왁스(wax)와 3% Stearic acid를 혼합하여 사용하였으며, 각 재료의 물성 및 특성을 Table 1에 간략히 정리하였다.^{1,6,7} 스테인리스 스틸 입자는 ATMIX사 water-atomized 17-4PH 파우더를 사용하였다. 입자의 크기는 3-18 μ m 사이에 분포하고 있으며, 평균적인

크기는 9 μ m이다. 실험을 위해 파장이 248nm이고, 펄스폭이 25ns 인 KrF 엑시머 레이저(excimer laser)를 사용하였다. Fig. 3에서와 같이 1mm \times 1mm 정사각형 형태의 마스크와 초점거리 10cm 인 렌즈를 사용하여 100 μ m와 180 μ m의 정사각형 형태의 실상(real image)이 시편의 표면에 위치하도록 프로젝션 하였다. 사용한 에너지는 0.11-0.46mJ 영역이고, 300mJ/cm²에서 1J/cm²의 플루언스(fluence)는 레이저 조사영역의 한 모서리의 길이가 180 μ m 이고, 1J/cm² 이상의 플루언스에서는 한 모서리의 길이가 100 μ m이 되도록 하였다. 레이저 플루언스와 중첩수(pulse number)를 달리하여 시편을 가공하고, SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용하여 분석하였다.

Table 1 Material properties

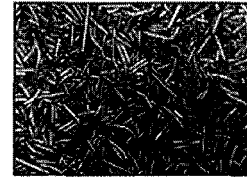
	PP	PE	Wax	SS
rho (kg/m ³)	910	940	800	8000
Cp (J/kgK)	1700	2250	3300	500
k (W/mK)	0.22	0.35	0.2	190
Absorption coeff. (m ⁻¹)	4x10 ³	6x10 ³	5x10 ⁵	.
Melting temp. (°C)	110-150	60-130	49-71	1300
Decomposition temp. (°C)	350-470	420-480	180-320	.

여러 재료와 248nm 엑시머 레이저와의 온도 반응을 수치해석을 통하여 분석하였다. 레이저 조사 시 최고온도를 계산하기 위해서 식 (1)과 같이 열 전달 방정식을 사용하였다. 일반적으로 폴리머 재료의 경우에는 광화학적인 반응이 지배적이어서 가공 깊이(ablation depth) 계산이나 온도 계산을 위해서는 열분해(thermal degradation)에 의한 요소를 무시할 수 없다. 그러나, 본 연구에서는 수치해석을 통해 레이저 빔과 금속 파우더-폴리머 복합재 부품을 구성하고 있는 각 재료의 상대적인 온도반응을 비교하기 위해서 열분해 요소를 제외한 광열반응만을 계산하였다. T는 온도(K), ρ 는 밀도(kg/m³), t는 시간(s)이며, Fig. 5(a)에서와 같이 1차원 계산영역에 단일 경계조건을 적용하였고 레이저에 의한 가열은 식 (2)와 같이 모델링 되었다. 여기에서 I_0 는 레이저 조사도(W/m²), α 는 흡수계수(1/m)이다(Table 1 참조). 단, 스테인리스 스틸의 경우에는 표면에서 모두 흡수되는 것으로 가정하였다. 레이저의 시간에 대한 펄스형태<F(t)>는 식 (3)과 같이 τ_s 가 25ns 인 삼각파 형태로 모델링 되었다.

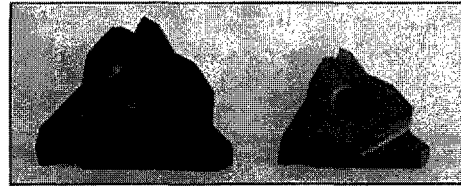
$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = Q \tag{1}$$

$$Q = (1-R)\alpha I_0 e^{-\alpha z} F(t) \tag{2}$$

$$F(t) = \begin{cases} -\frac{1}{\tau_p} |t - \tau_p| + 1 & 0 < t < 2\tau_p \\ 0 & 2\tau_p < t \end{cases} \tag{3}$$



(a)



(b)

Fig. 1 (a) feedstock (mixture of stainless steel powder and polymer binder), (b) Powder injection molded part (left) and final result after debinding and sintering (right).

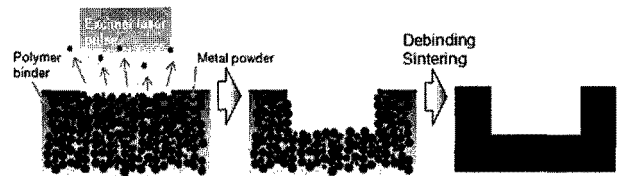


Fig. 2 Concept of laser micromachining of powder injection molded parts.

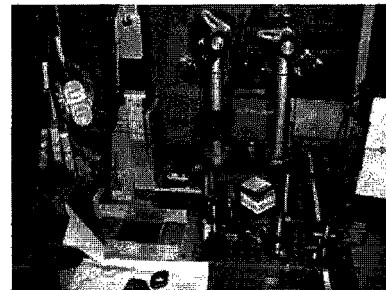
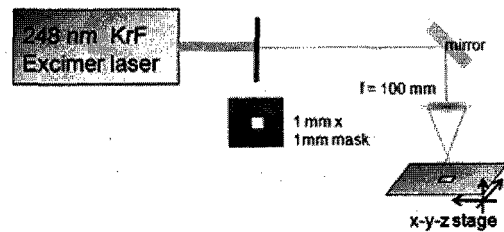


Fig. 3 Experiment setup.

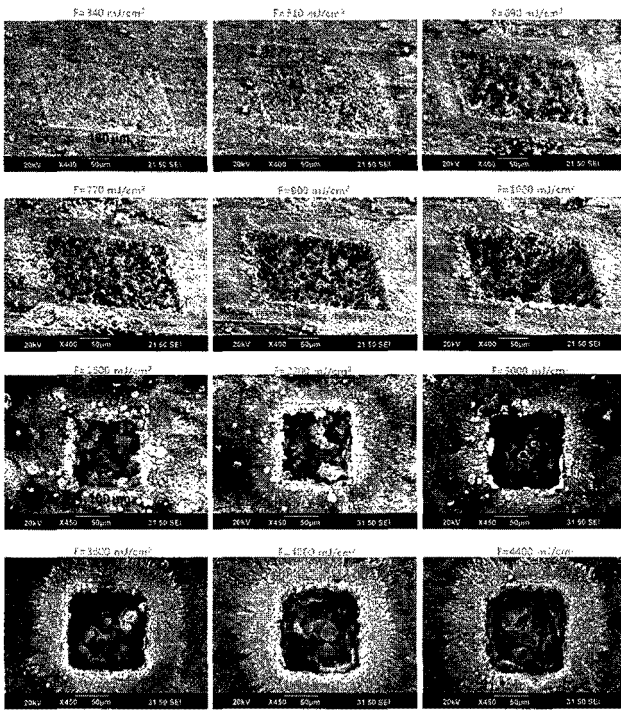


Fig. 4 SEM images of micromachining results of various laser fluencies (pulse number: 5000).

3. 결과 및 고찰

레이저 플루언스에 따른 가공 형상은 Fig. 4에 나타내었다. 5000 펄스가 조사되었을 때 낮은 플루언스의 경우($340\text{mJ}/\text{cm}^2$)에는 일반적인 폴리머 임계 어블레이션 플루언스보다 큰 값임에도 불구하고 펄스가 반복 되어도 표면 근처에 폴리머는 어블레이션 되어 제거가 되지만 그 이상의 가공이 진행되지 않는다. 금속 입자에 의해 차폐된 내부의 바인더는 금속입자와의 결합을 유지하고 있어서 표면에 입자가 이탈되지 못한다. 플루언스가 증가할수록 금속 입자 자체가 흡수하는 에너지에 의해서 금속입자의 온도도 증가하여 바인더와 용융 및 입자와의 결합력에 영향을 줄 수 있을 정도로 증가하게 되고, 높은 플루언스에 의한 폴리머 어블레이션 시의 반발력으로 인해 금속 입자의 제거가 원활해진다. 그로 인해 폴리머의 가공 깊이가 $\sim 1\text{J}/\text{cm}^2$ 플루언스까지는 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 폴리머의 가공 한계 플루언스가 수십 ~ 수백 mJ/cm^2 인 것에 반해 일반적인 금속 재료의 용융이나 어블레이션의 플루언스는 수 J/cm^2 이기 때문에 $1\text{J}/\text{cm}^2$ 이상의 에너지에서 금속 입자의 용융으로 인하여 입자 간에 결합되는 현상이 나타난다.⁸⁻¹⁰ 플루언

스 증가에 따라 결합된 입자의 크기가 점차적으로 증가하게 되고, $4\text{J}/\text{cm}^2$ 이상에서는 입자가 붕괴져 판형으로 층을 이루게 되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 레이저 플루언스에 따른 용융에 의한 특성은 Fig. 5(b)에서와 같이 최대 온도 계산 결과에서도 짐작할 수가 있다. $300\text{mJ}/\text{cm}^2$ 에서 바인더 재료는 모두 분해 온도를 넘게 되고 스테인리스 스틸의 경우에 $1\text{J}/\text{cm}^2$ 이상에서 용융 온도에 도달하는 것으로 나타났다.

이러한 금속 입자간의 결합물은 세정공정을 통하여 제거할 수 있다. Fig. 6(a), (b)는 Fig. 4에 $3\text{J}/\text{cm}^2$ 및 $4.4\text{J}/\text{cm}^2$ 플루언스의 결과물을 초음파 세정기를 통하여 세정한 결과이다. 금속 입자의 결합물이 제거되어 가공 바닥면에 금속입자가 나타난 것을 확인할 수 있고 판형으로 뭉쳐있던 입자도 제거가 되었음을 알 수 있다. 또한, 가공된 벽면의 이미지를 통해 대략 가공 깊이가 $100\mu\text{m}$ 수준임을 알 수 있었다. 또한, 압축 공기를 이용하여 가공부 주변에 유동장을 만들어 주게 되면 Fig. 7(b)와 같이 바인더와의 결합이 약한 파우더를 떼어 내는 역할을 하게 되어 가공률을 증가시키고, 가공형상도 유동장의 영향으로 곡선형태로 나타나게 된다.

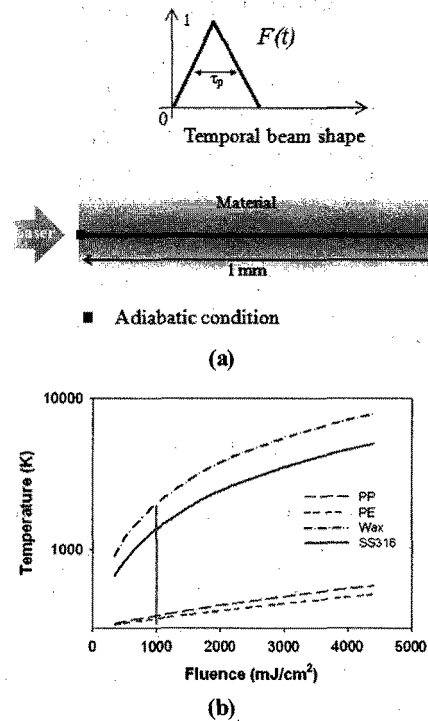


Fig. 5 (a) Calculation domain and (b) maximum temperature of PP, PE, wax and stainless steel.

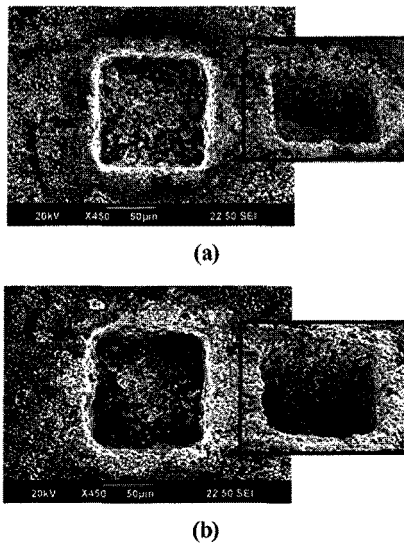


Fig. 6 SEM images at (a) $F = 3\text{J/cm}^2$, (b) $F = 4.4\text{J/cm}^2$ after cleaning (pulse number: 5000).

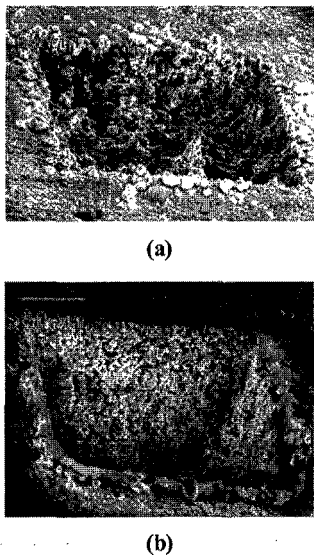


Fig. 7 Machining results (a) without air blowing and (b) with air blowing ($F = 1\text{J/cm}^2$, pulse number: 5000).

4. 결론

본 연구에서는 분말 사출 부품에 대한 UV 레이저 가공 특성을 살펴 보았다. 가공을 위한 임계 플루언스의 차이가 크게 나는 폴리머와 스테인리스 스틸의 영향으로 플루언스 영역에 따라서 상이한 가공 특성을 보인다. 조사하는 레이저의 플루언스가 금속 입자의 임계 어블레이션 플루언스 이하에서는 폴리머 바인더가 제거되면서 금속

입자가 이탈하여 가공이 진행되며, 금속 입자의 이탈 여부가 가공량에 큰 영향을 미친다. 금속 입자의 임계 어블레이션 플루언스 이상의 레이저 에너지가 조사될 때에는 금속 입자 간의 결합이 발생하게 되고, 이러한 결합물이 폴리머에 조사되는 레이저 에너지를 방해함에도 불구하고 재료의 가공이 가능함을 확인하였다. 따라서 레이저를 이용한 분말사출 부품의 미세가공이 가능하며 많은 응용분야가 도출될 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 중견연구자지원사업의 부분적인 지원으로 수행되었다.

참고문헌

- 1) S. Ahn, S. J. Park, S. Lee, A. S. and R. German, "Effect of powders and binders on material properties and molding parameters in iron and stainless steel powder injection molding process," Powder Technology, Vol. 193, 162-169, 2009.
- 2) D. Gu and Y. Shen, "Balling phenomena in direct laser sintering of stainless steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods," Material & Design, Vol. 30, No. 8, 2903-2910, 2009.
- 3) M. Rahimian, N. Ehsani, N. Parvin and H. Baharvandi, "The effect of particle size, sintering temperature and sintering time on the properties of Al-Al₂O₃ composites, made by powder metallurgy," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, No. 14, 5387-5393, 2009.
- 4) B. Y. Tay, N. H. Loh, S. B. Tor, F. L. Ng, G. Fu and X. H. Lu, "Characterisation of micro gears produced by micro powder injection moulding," Powder Technology, Vol. 188, 179-182, 2009.
- 5) Y. Lu, D. Shao and S. Chen, "Nanoparticle-enhanced laser micromachining of polymeric

- nanocomposites,” Transactions of NAMRI/SME, Vol. 33, 243-249, 2005.
- 6) R. Das, F. Egitto, J. Lauffer and V. Markovich, “Laser micromachining of nanocomposite-based flexible embedded capacitors,” Electronic Components and Technology Conference, 435-441, 2007.
 - 7) N. Allen, A study of the light absorption properties of polymer films using UV-visible derivative spectroscopy, Polymer Photochemistry, Vol. 1, 43-55, 1981.
 - 8) T. C. Chang and P. A. Molian, “Excimer pulsed laser ablation of polymers in air and liquids for micromachining applications,” Journal of Manufacturing Processes, Vol. 1, No. 1, 1-17, 1999.
 - 9) K. Salonitis, A. Stournaras, G. Tsoukantas, P. Stavropoulos and G. Chryssolouris, “A theoretical and experimental investigation on limitations of pulsed laser drilling,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 183, 96-103, 2007.
 - 10) I. Sohn, Y. Noh, Y. Kim, D. Ko and J. Lee, “Laser Ablation of Polypropylene Films using Nanosecond, Picosecond, and Femtosecond Laser,” Journal of the Optical Society of Korea, Vol. 12, No. 1, 38-41, 2008.