

폴리머 어블레이션에 의한 형상 가공 가능성

Feasibility Study on Machining of 3-D Shape

by Polymer Ablation with Excimer Lasers

동국대학교 기계공학과 박세윤

한국기계연구원 가공기술그룹, 윤경구, 황경현, 이성국

I. 서 론

폴리머표면에 펄스 UV 레이저빔을 조사하면, 소재는 표면에서부터 0.1 - 수 μm 의 깊이로 에칭 가공된다. 실험적으로 임계에너지 이상의 레이저가 조사되면 어블레이션이 일어나며, 에칭깊이는 펄스 수와 레이저 조사량 (fluence, 단위면적당 에너지)으로 조절 가능한 것으로 알려져 있다. 빔이 조사되지 않은 영역에는 아무런 열적 손상도 없기 때문에 폴리머나 생체 소재를 펄스 엑사이머 레이저로 어블레이션 가공 또는 천공하는 응용분야는 특히 미세가공 또는 전자공학이나 외과 수술의 관점에서 지대한 주목을 받고 있다⁽¹⁾.

기존에는 단순히 마스크를 통한 노광을 이용해 특정형상을 소재에 가공하였으며, 국내에서도 의료용 카테타에 신호용 도선을 만들거나, 수십 μm 직경의 작은 구멍을 일정 간격으로 가공해 마이크로 필터를 제작하고자 하는 시도가 수행되었다⁽²⁾. 또한 상업적인 적용예로는 폴리머 소재에 레이저 펄스로 테이퍼 형상의 홈을 가공해 만든 잉크 제트 프린터의 노즐을 들 수 있다. 한편 레이저빔을 조사하면서 소재와 레이저빔간에 상대적인 이송을 주면 3차원적인 형상을 가공할 수 있다. 이를 위해 일정형상의 마스크를 사용하면서 위치마다 펄스의 수를 달리해 가공깊이에 변화를 주어 형상을 가공하거나 또는 레이저 조사중에 마스크의 형상을 변화시켜 매끄러운 3차원 형상을 만드는 공정에 이르기까지 많은 연구가 발표되고 있으며, 일반 기계가공으로는 쉽게 만들기 어려운 미소 광학 부품제조에의 응용 가능성을 보여 주기도 한다⁽³⁾.

대부분 이러한 가공에서 원하는 형상을 만들어 내기 위해서는 실험실에서 수많은 시행착오 과정을 거쳐 적절한 변수 범위를 찾아내고 있는 실정으므로, 만약 대표적인 몇몇 소재에 대해 모델을 이용해 가공 변수를 대략적으로나마 찾아낼 수 있다면 그 효용성은 매우 클 것이다. 본 논문에서는 기존에 발표되었던 레이저 어블레이션에 의한 폴리머의 형상 가공연구 동향을 문헌조사를 통해 전반적으로 검토해 보고, 현재 진행되고 있는 모델링 작업을 소개하고자 한다.

II. 형상 가공을 위한 방법의 최근 연구 동향

엑사이머 레이저로 폴리머 또는 다른 소재를 어블레이션 가공해 형상을 가공하고자 하는 시도는 많은 연구자들에 의해 시도되어 왔다. 특히 독일의 Tonshoff 가 이끄는 LZH(Laser Zentrum Hannover)에서는 90년대 초부터 이 분야의 연구를 진행해 오고 있다. Tonshoff등은 1992년에 발표한 논문⁽⁴⁾에서 엑사이머 레이저를 이용해 비금속의 3차원 미세가공이 가능함을 실험적으로 보였다. 즉 일정한 형상의 mask를 이용해 깊이 제어는 펄스수의 증감으로, 수평 방향의 형상은 재료의 이동에 의해 미세가공할 수 있는 가능성을 제시하였다. 또한 빔이 조사되는 부분을 조금씩 중첩시켜 보다 매끄러운 가공부를 얻을 수 있음을 보였다(Fig. 1 참고). 그러나 이 방법으로는 복잡한 구조물이나 큰 면적, 깊은 형상의 가공에 지나치게 긴 시간이 소요되게 되므로 제거 공정중에 마스크의 단면적을 달리 해서 가공시간을 단축하는 개념을 검토하였다.

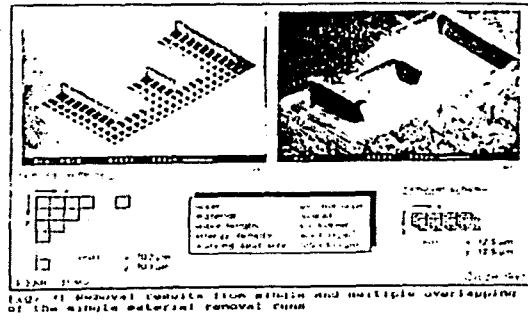


Fig. 1 Removal using single and multiple overlapping⁽⁴⁾

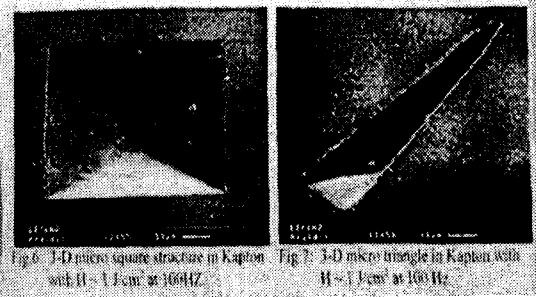


Fig. 2 Removal using 5-axis flexible mask⁽³⁾

1997년도의 논문⁽³⁾에서는 원하는 형상의 빔 이미지를 재료 가공중에 연속적으로 변화시킬 수 있는 flexible mask의 개념을 도입해 3차원 형상을 매끄럽게 가공하는 시스템에 대해 소개하였다. 5축의 CNC 제어되는 flexible mask는 미리 가공하고자 하는 형상을 입력하면 software에 의해 이송속도 및 가공변수가 계산되고, 이에 따라 레이저빔 조사중에도 mask를 움직일 수 있도록 구성되어 있다. 이 시스템을 이용해 삼각형, 사다리꼴에서 사각형상의 3차원 구조물을 매끄럽게 가공하고 있다(Fig. 2 참고). 또한 회전 대칭구조를 가공해 미소 광학부품을 가공할 수 있는 가능성을 제시하고 있다.

또한 국내에서는 pellethane biopolymer 튜브를 일정한 속도로 회전하면서 엑사이머 레이저를 조사해 의료용 카테타에 신호용의 도선을 만들기 위한 홈(groove)을 가공하였다. 또한 polyethylimide(PEI) 소재에 직경 수십 μm 의 작은 구멍을 일정 간격으로 가공해 마이크로 필터를 가공하거나, 잉크 제트 프린터용의 노즐에 사용할 수 있는 테이퍼 형상의 홈을 가공하는 연구가 진행되어 왔다⁽²⁾. 한편 3차원 형상을 가공하기 위해 마스크를 일정한 속도로 이동하면서 polyurethane 소재에 레이저빔을 조사해 경사진 면을 갖는 3차원 홈을 가공하거나, 레이저 조사와 마스크의 이동을 일정하게 반복함으로써 피라미드 형상을 가공하였다(Fig. 3 참고).

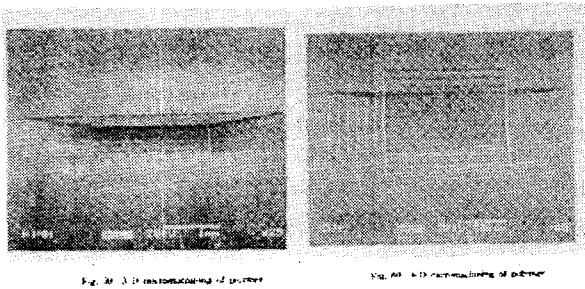


Fig. 3 3-D micromachining of polymer⁽²⁾

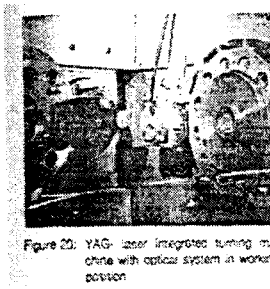
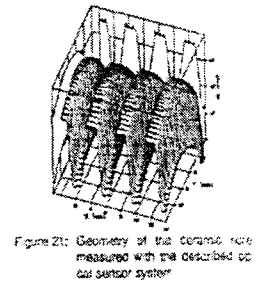


Fig. 4 Ceramic screw machining



한편 폴리머 외에도 Q-스위치 펄스 Nd:YAG 레이저를 이용해 세라믹 소재로 screw를 어블레이션 가공한 결과도 발표되었으며(Fig. 4), 용융 금속을 잉크제트 프린터에서 분사하듯 노즐을 통해 분사함으로써 3차원 구조물을 미세하게 형성하기 위한 연구의 일환으로 polycrystalline diamond에 248nm의 엑사이머 레이저를 조사해 노즐을 가공한 연구⁽⁵⁾도 소개되었다.

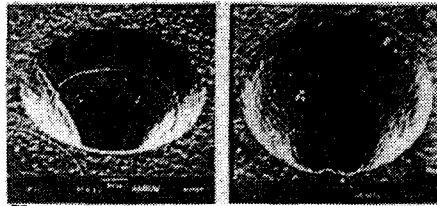


Figure 7. Converging nozzle of polycrystalline diamond made by c-j stage conversion with hyalressTM. Scale bar = 100 μm .

Figure 8. Same nozzle shown in Fig. 7 fabricated with rotational stage motion only. Diamond blank is 0.5 mm thickTM. Scale bar = 100 μm .

Fig. 5 Converging nozzle of polycrystalline diamond⁽⁵⁾

Table 1 Material properties fitted from KIMM experimental data

Polymer	과장 (nm)	$\beta(1/\text{cm}) \times 10^5$	$H_{TR} (\text{J}/\text{cm}^2)$	$E^* (\text{kJ}/\text{cm}^3)$	$A_1 (\mu\text{m})$	for thermal fitting
Polyurethane	248	0.4724	0.0375	26.30	0.9018	$\geq 0.4 \text{ J}/\text{cm}^2$
Pellethane Biopolymer	248	0.3607	0.030	-	-	-
Polyethylimide	248	1.1121	0.030	87.77	2.0807	$\geq 0.34 \text{ J}/\text{cm}^2$

III. 모델링

폴리머에 대한 엑사이머 레이저 어블레이션 효과를 이론적으로 고려하기 위한 연구는 많이 진행되어 왔으며, 대부분의 경우 주된 관심은 레이저 조사량에 따른 에칭 깊이의 계산에 집중되었다. 한편, 어블레이션 결과는 펄스 에너지, 빔강도 분포, 빔 quality factor, 초점의 위치 등과 같은 빔특성에 큰 영향을 받는다. 개발된 model⁽⁶⁾은 폴리머를 짧은 펄스의 엑사이머 레이저로 어블레이션 가공할 때, 빔변수가 가공 결과에 미치는 영향을 파악하기 위해 빔의 집속 효과와 단순 어블레이션 모델을 동시에 고려하고 있다. 폴리머(고분자)소재의 어블레이션 가공을 나타내기 위한 모델로는 광화학 에칭 효과와 빛에 의한 열 에칭 효과를 같이 감안해 주는 SSB 모델을 사용하였으며, 펄스당 에칭 깊이, $l_f [\mu\text{m}]$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 즉,

$$l_{f, total} \approx \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{H}{H_{TR}}\right) + A_1 \exp\left(\frac{-E^*}{\beta} \frac{\ln(H/H_{TR})}{H}\right) \quad (1)$$

여기서 H 는 laser fluence(J/cm^2), β 는 the absorption coefficient($1/\text{cm}$), A_1 은 effective frequency factor ($\mu\text{m}/\text{pulse}$), E_1 은 activation energy를 나타낸다. 이 식을 이용하기 위해서는 실험으로 얻은 에칭깊이로부터 모델에 필요한 β , E^* , A_1 의 값을 curve fitting에 의해 구해야 하며, 이때 열 에칭 관련식은 $H \gg H_{TR}$ 을 만족해야 하므로, 최소한 H_{TR} 보다 order가 하나 정도 큰 영역부터 고려하는 것이 바람직하다. 참고로 KIMM에서 실험한 소재의 데이터를 이용해 변수값을 구하면 Table 1과 같다. 여기서 광화학 에칭의 데이터는 $H \leq 0.4 \text{ J}/\text{cm}^2$, 열 에칭의 fitting 데이터는 $H \geq 0.4 \text{ J}/\text{cm}^2$ 을 이용하였다.

IV. 레이저 가공 시뮬레이션 프로그램

적절한 가공변수가 정해질 때, 모델로부터 구한 계산결과를 그래프로 출력하는 전과정을 윈도우즈 환경에서 구현하기 위하여 MicroSoft 사의 Fortran PowerStation Developer Studio를 사용하여 시뮬레이터를 구축하였다. 전체적인 시뮬레이터의 기본적인 개발 전략 개요는 Fig. 6과 같으며, 이에 따라 구성된 시뮬레이터는 크게 세 가지의 모듈, 즉 입력, 계산, 출력모듈로 구성되어져 있다.

이상의 각 모듈이 종합적으로 작동해 실제 사용자가 PC상에서 프로그램을 구동시 나타나는 화면의 모습은 Fig. 7과 같다. 현재 이송속도가 없을 때의 가공에 대해서는 프로그램이 완성된 상태이며, 3차원 형상가공을 위해 소재와 빔의 상대적인 이송이 있을 때의 가공 결과를 예측하기 위한 프로그램 작업이 진행중이다.

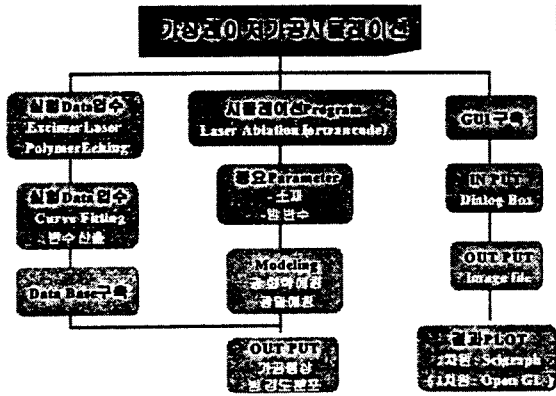


Fig. 6 The development procedure for the simulator

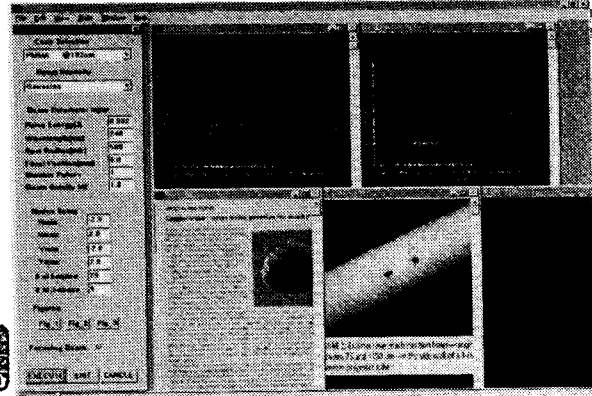


Fig. 7 Window output during execution of simulator

IV. 결 론

엑사이머 레이저를 이용해 폴리머를 어블레이션 가공해 3차원 형상 가공을 하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있으며 그 응용 범위가 의료, 전자공학, 광학 등에 이르고 있다. 본 논문에서는 연구동향을 파악하기 위해 문헌 조사 및 검토를 수행하였고 가능한 방법을 소개하였다. 또한 모델링으로 가공 결과를 예측하기 위한 작업을 소개하였다. 본 연구에서는 기개발된 레이저 어블레이션 가공 모델을 이용해 사용자가 보다 편리한 윈도우 환경에서 손쉽게 입력조건을 변화시키고, 결과를 그래프로 볼 수 있도록 레이저 가공 시뮬레이터를 구축하고 있으며, 향후 연구를 통해 3차원 형상가공을 예측할 수 있게 되면, 실제 실험의 비효율을 덜어주는데 큰 도움을 줄 것이다.

V. 참고문헌

1. Duley, W. W., *UV Lasers: effects and applications in materials science*, Ch. 5., Cambridge University Press, 1996.
2. 윤경구 외, *레이저빔 응용 가공기술*, 초소형정밀기계기술개발사업 자료집, 전자브품종합기술연구소, pp59-80; 1998. 6.
3. Tonshoff, H. K., Graumann, C., Rinke, M., Lonergan, P., and Wais, J., "Improved Surface Quality of Rotation Symmetric Structures by Excimer Laser Micromachining", *Proceedings of ICALEO'97, Section A*, pp114-121, 1997.
4. Tonshoff, H. K. and Mommsen, J., *European Conference on Laser Treatment of Materials, ECLAT'92*, pp597-602, 1992.
5. Friedrich, C., Gu, R., and Huang, Xinming, "Laser and Competing Process Technologies for Microfabrication", *Proceedings of ICALEO'97, Section A*, pp1-10, 1997.
6. 방세운, 윤경구, "폴리머의 레이저 가공 모델링", *한국정밀공학회 98년도 추계논문집*, 1997.