

엑사이머 레이저를 이용한 폴리머 미세가공에 대한 모델링

Modeling of Micromachining of Polymers with Excimer Lasers

동국대학교 기계공학과 **방세윤**

LG전자 신귀성

한국기계연구원 가공기술그룹 **윤경구, 황경현, 김재구**

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 미세가공의 관점에서 지대한 주목을 받고 있다⁽¹⁾.

기존에는 단순히 고정된 마스크를 통한 노광을 이용해 특정형상을 소재에 가공하였지만, 레이저빔을 조사하면서 소재와 레이저빔간에 상대적인 이송을 주면 3차원적인 형상을 가공할 수 있다. 이를 위해 일정형상의 마스크를 사용하면서 소재의 가공 위치마다 조사되는 펄스의 수를 달리 해 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⁽²⁾. 본 연구에서는 자외선계열의 엑사이머 레이저로 폴리머 소재를 어블레이션 가공해 준삼차원 형상의 미소구조물을 가공하는 과정을 예측하기 위한 모델링을 수행하고 수치모사를 통해 가공에 필요한 변수의 영향을 파악해 원하는 형상의 결과를 얻기 위한 기본 지식을 구축하고자 하였다.

II. 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. 그러나, 어블레이션 가공 결과는 펄스 에너지, 빔강도 분포, 빔 quality factor, 초점의 위치 등과 같은 빔특성에 큰 영향을 받는다. 본 연구에서 개발된 모델은 폴리머를 짧은 펄스의 엑사이머 레이저로 어블레이션 가공할 때, 빔변수가 가공 결과에 미치는 영향을 파악하기 위해 빔의 집속 효과와 단순 어블레이션 효과를 동시에 고려하고 있다. 폴리머소재의 어블레이션 가공을 고려하기 위해 광화학 에칭 효과와 빛에 의한 열 에칭 효과를 같이 감안해 주는 SSB 모델⁽³⁾을 사용하였으며, 펄스당 에칭 깊이, $d [\mu\text{m}]$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 즉,

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

여기서 H 는 레이저 빔조사도(J/cm^2), β 는 흡수계수($1/\text{cm}$)이며, $A_1(\mu\text{m}/\text{pulse})$, E^* 는 모델에서 사용하기 위해서는 실험 데이터로부터 curve fitting에 의해 값을 구하게 된다.

준3차원 형상가공 과정을 모델링하기 위해서는 가공시에 마스크의 형상 및 이송을 고려해야 한다. 마스크 또는 시편을 일정속도로 이송하면서 레이저빔을 조사하면 경사진 면을 갖는 3차원 형태의 홈이 가공되고, 이때 사용하는 마스크의 형상에 따라 가공된 형태가 변하게 된다. 식 (1)에 의해 소재와 조사되는 에너지 값에 따라 단위 펄스당 에칭 깊이를 계산할 수 있다.

마스크가 이송되는 경우에는 빔이 재료에 조사되는 부분의 이송속도 및 빔이 조사되는 시간을 계산하여 조사영역의 펄스 수를 구할 수 있으며, 따라서 빔이 이송되어 조사되는 각 부분에서 빔 조사펄스 수를 이용해 에칭깊이를 계산, 형상을 유추할 수 있다.

이송속도를 v =일정, 마스크의 이송거리= l , 빔폭= b , 펄스반복율= f , 단위 펄스당 에칭깊이= d 라 할 때, 임의의 위치 x 에서의 총 에칭깊이 s 를 구하기 위해서는 이송거리와 빔폭의 크기에 따라 크게 두 가지 경우로 나누어 고려할 수 있다. Fig. 1은 사각형 형태의 빔이 재료에 조사될 경우 이송거리에 따른 예측형상으로 좌측의 그림은 이송거리가 빔폭보다 적은 경우의 형상이며, 우측의 그림은 이송거리가 빔폭보다 큰 경우의 예측 형상이다.

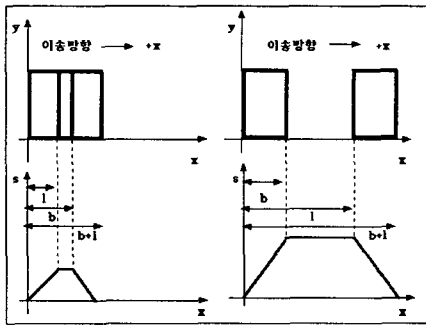


Fig. 1 Etched shape for constantly moving specimen

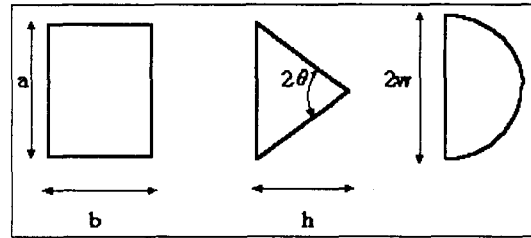


Fig. 2 Shapes and dimensions of masks

이송거리가 빔폭보다 작은 경우에 만약 고려하는 조사부위가 이송거리보다는 크고 빔폭보다는 작은 영역이라면 (즉, $l \leq x \leq b$); 이송소요시간 = $\frac{l}{v}$, 총펄스수 = $\frac{l}{v} \cdot f$ 가 되고 따라서, 총 에칭 깊이는 펄스당 에칭깊이와 그 위치에 조사되는 총 펄스의 수의 곱으로 구해진다. 즉,

$$s = d \cdot \frac{l}{v} \cdot f = \frac{dfl}{v} \quad (2)$$

최종적으로 결과를 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} 0 \leq x \leq \min(l, b) & \quad s = \frac{dfl}{v} \\ \min(l, b) \leq x \leq \max(l, b) & \quad s = \frac{dfl}{v} \times \max(l, b) \\ \max(l, b) \leq x \leq b+l & \quad s = \frac{dfl}{v} (b+l-x) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $\min(l, b)$ 와 $\max(l, b)$ 는 각각 l 과 b 중 작은 값과 큰 값을 가리킨다.

한편 일정한 에너지 분포를 가진 레이저빔을 조사할 때에 다양한 형상의 마스크를 활용하여 각기 다른 형상의 가공을 유도할 수 있다. 일정 강도분포를 가진 빔은 조사된 부분과 조사되지 않은 부분과의 경계만을 고려하여 줌으로써 계산을 할 수 있다. Fig. 2는 프로그램 계산시 쓰이는 마스크의 형상 및 치수에 대한 그림이다. 문제를 단순화하면서도 실제 적용성이 있는 직사각형의 마스크와 이등변 삼각형 및 반원형의 마스크를 선택하였으며, 각각의 치수와 관련한 변수는 프로그램을 이용한 계산시 직접 입력할 수 있다. 상세한 내용은 참고문헌^[4]에 정리하였다.

III. 시뮬레이션 결과 및 토의

이송변수중 특히 펄스반복율과 이송속도는 가공 소재가 결정되어 있을 경우 공정에서 변화시킬 수 있는 변수가 된다. 가공결과에 미치는 영향을 알아보기 위해 가로폭과 세로가 각각 $1000\mu\text{m}$ 인 사각형빔, 빔 에너지밀도는 $0.5\text{J}/\text{cm}^2$, 소재는 폴리우레탄, 이송속도는 $100\mu\text{m}/\text{s}$, 이송거리는 $2000\mu\text{m}$ 의 경우에 대해 계산해 보았다. 레이저빔의 펄스반복율을 10Hz에서 100Hz까지 증가시킬 때의 가공결과를 Fig. 3에 보인다. 펄스가 증가함에 따라 에칭깊이가 $60\mu\text{m}$ 에서 $600\mu\text{m}$ 까지 선형적으로 비례해 증가함을 확인할 수 있다. 이는 식(3)에서 예측할 수 있는 바와 같으며, 따라서 가공형상의 깊이 방향의 제어는 펄스반복율의 제어를 통해 손쉽게 달성할 수 있음을 짐작할 수 있다.

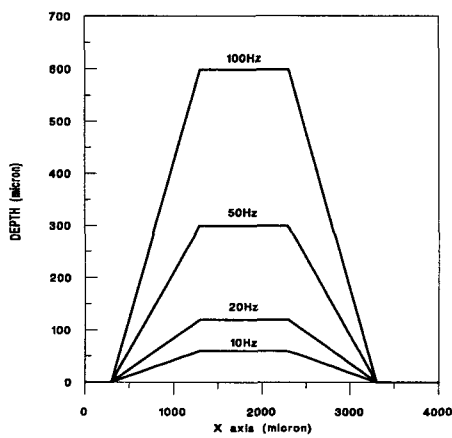


Fig. 3 Etching depth vs pulse repetition rate

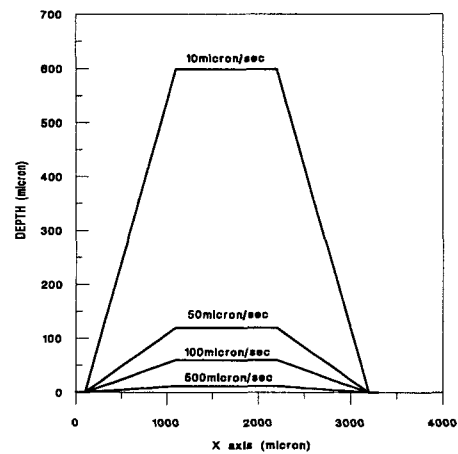


Fig. 4 Etching depth vs moving velocity

한편 이송속도는 레이저빔과 가공시의 폴리머 재료표면의 상대적인 속도를 나타내며 이러한 이송속도는 레이저빔이 폴리머 재료표면에 조사되는 조사시간에 영향을 주며 이송속도가 증가할수록 재료표면의 조사량이 적어진다. 이러한 결과로 인해 이송속도가 증가할수록 에칭깊이는 반비례해 감소하게 된다. Fig. 4에서 이송속도가 증가할수록 재료 표면의 레이저 조사량이 감소해 결국 에칭깊이의 감소를 가져옴을 확인할 수 있다. 이송속도가 $10\mu\text{m}/\text{s}$ 에서 $500\mu\text{m}/\text{s}$ 까지 증가할 때 각각의 이송속도에 해당하는 최고 에칭깊이의 값이 $600\mu\text{m}$ 에서 $12\mu\text{m}$ 까지 반비례하여 감소함을 알 수 있다.

이상의 결과를 종합하면, 가공형상의 깊이방향의 제어는 일차적으로는 펄스반복율을 통해, 레이저의 사양이 미흡한 경우에는 이송속도의 제어를 통하여 이루어질 수 있으리라 판단된다.

준3차원 형상의 구조물을 얻고자 조사되는 레이저빔의 형상을 변화시키기 위해서 사용되는 마스크중 단순한 형태를 가지면서도 실용적인 세 가지, 즉 직사각형, 삼각형, 반원형 형태의 마스크를 선정해 시뮬레이션을 통해 가공결과를 예측해 보았다. 계산에 사용한 변수는 폴리우레탄 소재, 빔에너지는 $0.5\text{J}/\text{cm}^2$, 이송속도는 $100\mu\text{m}/\text{s}$, 이송거리는 $2000\mu\text{m}$, 펄스반복율은 10Hz이다.

먼저 가로폭과 세로가 각각 $2000\mu\text{m}$ 및 $1000\mu\text{m}$ 인 직사각형 마스크를 이용해 가공할 경우의 결과는 가공시 시작부분과 가공종료시 끝부분이 각각 사각형상의 대칭적인 경사면을 갖는다.

이동변 삼각형의 마스크에서 $h=1000\mu\text{m}$, $\theta=45^\circ$ 인 경우의 계산 결과를 Fig. 5에 나타냈는데, 시작부와 끝부분의 경사면은 비대칭적인 형태를 보인다. 가운데의 깊이가 일정값에 도달해 있

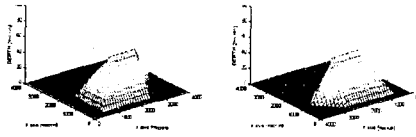


Fig. 5 Etched shape with triangular shaped mask

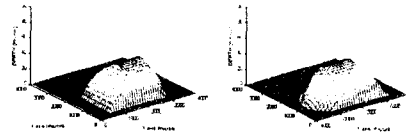


Fig. 6 Etched shape with half-circular shaped mask

는 영역에서는 깊이 방향으로의 단면 형상이 이등변 삼각형으로 나타남을 확인할 수 있다. 그림에서 왼쪽부분은 가공시 시작부분으로 y축을 따라 균일한 경사를 가지며 가공된 형상을 보이고 오른쪽 부분은 가공시 끝부분으로 마스크의 삼각형 변부분을 통과한 빔에 의해 노광된 부분이 가공된 형상을 보여준다.

반경 $w=1000\mu\text{m}$ 의 반원형 마스크를 이용한 계산 결과는 Fig. 6에 보이며, 반원형 형상의 경사면을 가지고 있다. 그림에서 왼쪽 부분은 가공시의 시작부분으로 가공 면이 y축을 따라 일정하게 경사짐을 보여주고 오른쪽 부분은 마스크의 반원부분을 통과한 빔에 의해 가공된 부분임을 알 수 있다. 이 형상에서 빔이 투과되는 부분을 역으로 만든 마스크를 이용하면 원통형상의 렌즈 형상을 가공할 수 있음을 실험적으로 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 폴리머 재료에 대하여 자외선계열의 엑사이머 레이저로 미소구조물을 가공하기 위한 수치모사 프로그램을 개발하여 실제 가공에 필요한 변수 및 가공데이터를 시뮬레이션을 통해 알아보려 하였다. 모델링을 위해 빔 조사시에 마스크의 형태를 사각형, 이등변삼각형, 반원형의 3가지로 구분하여 빔의 모양을 계산하였고, 동시에 가공시 사용되는 이송변수를 감안하여 모델을 정립, 프로그램을 개발하였다. 이송변수로는 레이저빔의 펄스반복율, 이송속도, 이송거리를 주었으며 특히, 이송속도는 등속도 이송을 고려하였고 이송속도와 빔이 조사되는 구간의 이송거리로부터 빔이 조사되는 시간 및 펄스 수를 계산하여 빔조사 구간에서의 에칭깊이를 계산하였다. 결과는 다음과 같다.

가공 깊이는 모델식에서 예측된 바와 같이 펄스반복율과 이송속도의 제어에 의해 조절이 가능할 것으로 판단되었다. 이송변수의 조합에 의해 다양한 형상의 미소 구조물 가공이 가능함을 확인할 수 있었으며, 특히 삼각형 및 반원형 형상의 마스크를 사용해 계산한 결과는 실험에서 얻은 결과와 같아 앞으로 마이크로 프리즘이나 마이크로 실린더 형상의 렌즈와 같은 미소 광학 부품의 가공 결과 예측에 적용할 수 있는 가능성을 보여 주었다.

V. 참고문헌

1. J. C. Miller., *Laser Ablation*, Springer Series in Materials Science 28, 1994.
2. 방세윤, 윤경구, "엑사이머 레이저를 이용한 미세가공," *대한기계학회 99년도 열공학부문 추계학술대회논문집*, pp. 299-310, 1999.
- 3 V. Srinivasan, M. A. Smrtic, and S. V. Babu, "Excimer laser etching of polymers", *J. Appl. Phys.*, Vol. 59, No. 11, pp3861-3867, 1986.
4. 신귀성, *3차원 미소형상 가공을 위한 레이저 어블레이션에 관한 연구*, 석사학위논문, 동국대학교 대학원, 1999.