

# 레이저를 이용한 준삼차원 미소형상 가공 모델링

방세윤<sup>#</sup>, 신귀성<sup>\*</sup>, 윤경구<sup>\*\*</sup>, 황경현<sup>\*\*</sup>

## Modeling of Laser Micromachining of Quasi-three-dimensional Shapes

Se Yoon Bang<sup>#</sup>, Kui Sung Shin<sup>\*</sup>, Kyung Koo Yoon<sup>\*\*</sup> and Kyung Hyun Whang<sup>\*\*</sup>

### ABSTRACT

This paper summarizes the work on the development of a simulation program for modelling the process of machining quasi-three dimensional shape with the excimer laser beam on a constantly moving polymers. Relatively simple masks of rectangle, triangle and half circle shape are considered. The etching depth is calculated by considering the number of laser pulses irradiated on the specimen surface. It was found that similar shapes as experimental results can be obtained by choosing suitable parameters of moving velocity, moving distance and mask sizes.

**Key Words** : Laser ablation(레이저 어블레이션), Excimer lasers(엑사이머 레이저), Polymer(폴리머), Micromachining(미세가공), Quasi-three-dimensional shape (준삼차원 형상)

### 1. 서론

레이저를 활용해 소재를 절단, 용접, 열처리하게 되면 통상의 기계적 방법에 비해 비접촉으로 빠른 속도로 작업할 수 있으며, 높은 에너지 밀도로 원하는 부위만 국부적으로 정밀하게 가공할 수 있어 이미 산업계에서 광범위하게 적용되고 있다. 최근에는 특히 자외선 영역의 펄스 엑사이머 레이저를 이용한 미세 가공에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며 그 응용 범위가 정밀가공, 의료, 전자공학, 광학 등에 이르고 있다.

엑사이머 레이저와 소재간의 가공 공정으로는 레이저 어블레이션(ablation), 레이저 유도 화학에

칭(laser induced chemical etching), 레이저 증착(laser physical vapor deposition) 등이 있다. 이중 어블레이션은 전자적 여기, 결합 파괴, 가열에 의한 화학적 분해, 제거, 증발 등의 여러 가지 프로세스가 복합적으로 작용해 일어난다. 이러한 어블레이션 가공에는 침투출력이 높은 high peak intensity 레이저가 유리하며, 통상 펄스길이가 아주 짧은 nanosecond 또는 그 이하의 펄스 레이저가 사용된다. 가공 대상 소재로는 금속, 반도체, 폴리머, 유리, 세라믹, 생체 조직, 고온 초전도체, 다이아몬드 또는 Diamond-Like Carbon (DLC) 등을 들 수 있으며, 응용분야로는 microelectronics, 광학, 초전도체 박막, 생체공학, 의료분야 및 공업

접수일: 2005년 2월 11일; 게재승인일: 2005년 5월 13일

# 교신저자: 동국대학교 기계공학과

E-mail sybang@dgu.edu Tel. (02) 2260-3704

\* 동국대학교 대학원

\*\* 한국기계연구원

적인 절단, 마킹, 드릴링 등 아주 다양한 분야가 포함된다. 특히 미세가공 분야에서는 종래의 기계적인 공정으로는 실현 불가능했던 극소형 및 초정밀의 기계 구조, 센서 또는 작동부를 비접촉으로 가공할 수 있고, 가공시의 열손상도 거의 없다.

레이저 어블레이션 가공 대상 소재중 특히 폴리머를 구성하는 유기 분자와 레이저빔 사이의 반응은 금속이나 무기화합물의 경우와는 다른 방식으로 이루어진다. 또한 유기분자에 적외선 레이저의 광자가 흡수되면 최종적으로는 열적 분해에 의해 재료가 제거되는데 반해, 자외선 레이저빔이 흡수되면 이온화와 분해가 이루어진다.

1982년도에 처음 보고된 바에 의하면 폴리머 표면에 펄스 UV 레이저빔을 조사하면, 소재는 표면에서부터 0.1 - 수 $\mu\text{m}$ 의 깊이로 에칭 가공된다. 실험적으로 임계에너지 이상의 레이저가 조사되면 어블레이션이 일어나며, 에칭깊이는 펄스 수와 레이저 조사량으로 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.<sup>1</sup>

기존의 가공에서는 주로 단순히 마스크를 통한 노광을 이용해 특정형상을 소재에 가공하였으며, 국내에서도 의료용 카테타에 신호용 도선을 만들거나, 수십  $\mu\text{m}$  직경의 작은 구멍을 일정 간격으로 가공해 마이크로 필터를 제작하고자 하는 시도가 수행되었다.<sup>2</sup> 또한 상업적인 적용 예로는 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 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.<sup>3</sup>

본 연구에서는 자외선계열의 엑사이머 레이저로 폴리머 소재를 어블레이션 가공해 준삼차원형상의 미소구조물을 가공하는 과정을 예측하기 위한

모델링을 수행하고 수치모사를 통해 가공에 필요한 변수의 영향을 파악해 원하는 형상의 결과를 얻기 위한 기본 지식을 구축하고자 하였다.

## 2. 모델링

### 2.1 폴리머 어블레이션 모델링

폴리머에 대한 엑사이머 레이저 어블레이션 효과를 이론적으로 고려하기 위한 연구는 많이 진행되어 왔으며<sup>1</sup>, 이하에 본 연구에서 채택하고 있는 펄스레이저에 의한 폴리머재료의 어블레이션 가공 모델<sup>4</sup>에 대해 간략히 서술하였다. 이 모델은 폴리머를 짧은 펄스의 엑사이머 레이저로 어블레이션 가공할 때, 빔변수가 가공 결과에 미치는 영향을 파악하기 위해 빔의 집속 효과<sup>5</sup>와 단순 어블레이션 모델<sup>6</sup>을 동시에 고려하고 있다. 상세한 내용은 참고문헌에 정리되어 있다.

가공에 관련된 변수는 가공소재의 물성치, 레이저 파장, 빔에너지, 강도분포, 빔 quality factor  $M^2$ , 빔의 초점 위치 등과 같은 빔변수, 그리고 가공속도 및 이송방향에 따른 가공변수로 크게 나누어져 있지만, 드릴링이나 단순한 어블레이션 가공의 경우 빔과 소재의 상대적인 이송속도는 0으로 간주할 수 있다. 폴리머(고분자)소재의 어블레이션 가공을 나타내기 위한 모델로는 고에너지의 레이저 조사량에서의 펄스당 에칭깊이가 증가하는 형상을 설명하기 위해 광화학 에칭 효과와 빛에 의한 열 에칭 효과를 같이 감안해 주는 SSB 모델<sup>6</sup>을 사용하였으며, 이 경우 펄스당 에칭 깊이,  $d$ 는 다음과 같이 레이저 조사량  $H$ 의 함수 형태로 나타낼 수 있다. 즉,

$$d = d_{photo} + d_{thermal} \approx \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{H}{H_{TR}}\right) + A_1 e^{\left(\frac{-E^* \ln\left(\frac{H}{H_{TR}}\right)}{\beta H}\right)} \quad (1)$$

- 여기서 H: 펄스당 레이저조사량( $\text{J}/\text{cm}^2$ )  
 $H_{TR}$ : 임계 레이저 조사량 ( $\text{J}/\text{cm}^2$ )  
 $\beta$ : 빔 흡수계수 ( $1/\text{cm}$ )  
 $A_1$ : effective frequency factor ( $\mu\text{m}/\text{pulse}$ )  
 $E^*$ : SSB 모델에서 유도된 활성화 에너지 ( $\text{kJ}/\text{cm}^3$ )

이 식을 이용하기 위해서는 실험으로 얻은 에칭깊이로부터 모델에 필요한 변수의 값  $H_{TR}$ ,  $\beta$ ,  $E^*$ ,  $A_1$  을 curve fitting에 의해 구해야 한다. 피팅에 의한 변수값 결정 과정은 참고문헌<sup>4</sup>에 정리되어 있다.

KIMM에서는 파장 248nm의 엑사이머 레이저로 폴리우레탄 소재를 대상으로 광범위한 기초 실험을 수행하였으며, 이 데이터로부터 모델에 필요한 변수 값을 구하면 Table 1과 같다. 여기서 광화학 에칭의 데이터는  $H \leq 0.4J/cm^2$ , 열 에칭의 데이터는  $H \geq 0.4J/cm^2$ 을 이용하였다. 폴리우레탄 소재에 대한 레이저 조사량에 따른 에칭 깊이의 변화를 Fig. 1에 보이며, 구해진 변수를 이용해 예측한 곡선이 실험 결과를 잘 나타냄을 확인할 수 있다. 피팅한 결과는 실선(그림의  $l_{f, total}$ 로 표기된 곡선)으로 보이며, 작은 원으로 표시한 실험 데이터와 잘 맞는 것을 볼 수 있다. 특히 단순히 광화학 에칭만을 고려한 모델로는 예측하기 불가능한 고에너지 조사량에서의 펄스당 에칭 깊이 증가현상을 잘 예측할 수 있음을 명확하게 확인할 수 있다. 프로그램에서는 레이저 조사량에 대해 Fig. 1으로 예측되는 펄스당 에칭깊이를 이용해 가공 결과를 구하게 된다.

Table 1 Properties fitted from experiment data

| Polymer      | $\beta(1/cm) \times 10^5$ | $H_{TR}(J/cm^2)$ | $E^*(kJ/cm^3)$ | $A_1(\mu m)$ |
|--------------|---------------------------|------------------|----------------|--------------|
| Polyurethane | 0.4724                    | 0.0375           | 26.30          | 0.9018       |

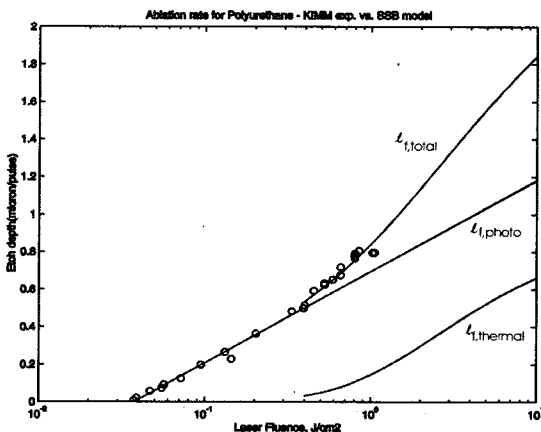


Fig. 1 Plot of etch depth vs. laser fluence for polyurethane

## 2.2 이송 시편의 어블레이션 가공

선행 연구<sup>4,5</sup>에서 사용한 어블레이션 모델은 기본적으로 마스크의 이송이 없다는 (즉, 이송속도=0) 가정 하에서 이루어진 모델이다. 준3차원 형상가공을 위한 시뮬레이션을 구현하기 위하여서는 가공시에 마스크의 형상 및 이송부분을 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. 앞부분에 소개된 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.

레이저빔과 소재의 상대적인 이송에 의해 준삼차원적인 형상을 가공하는 과정을 모델링하기 위해서 몇 가지 가정을 도입하였다. 해석의 단순화를 위해 고려의 범위를 다음과 같이 제한한다.

- (1) 빔과 소재의 상대적인 이송은 일정한 속도의 경우로 한정한다. 즉, 일정한 하나의 방향으로 가공 시작부터 가공 종료시까지 일정 속도값으로 가공되는 경우만 고려한다.
- (2) 실제 마스크를 이용한 에칭가공시에는 빔의 강도를 일정하게 한 상태를 이용한다. 모델에서도 첫 단계로 일정한 빔강도분포 (uniform intensity)의 사각형빔을 고려한다.
- (3) 미소 광학계의 제작에 사용된 반원형 및 삼각형 마스크를 모델하기 위해 일정한 빔강도를 갖는 반원형빔과 삼각형빔의 경우를 고려한다.

이송속도를  $v=const$ , 마스크의 이송거리= $l$ , 빔폭= $b$ , 펄스반복율= $f$ , 단위 펄스당 에칭깊이= $d$ 라 할 때, 임의의 위치  $x$ 에서의 총 에칭깊이  $s$ 를 구하기 위해서는 크게 두 가지 경우로 나눌 수 있다. Fig. 2는 사각형 형태의 빔이 소재에 조사될 경우 이송거리에 따른 가공깊이 형상으로 좌측은 이송거리가 빔폭보다 적은 경우의 형상이며, 우측은 이송거리가 빔폭보다 큰 경우의 예측 형상이다. 이때, 빔폭을 나타내는  $b=b_0$  값은 빔허리 부분에서의 마스크의 길이 입력 값이 된다.

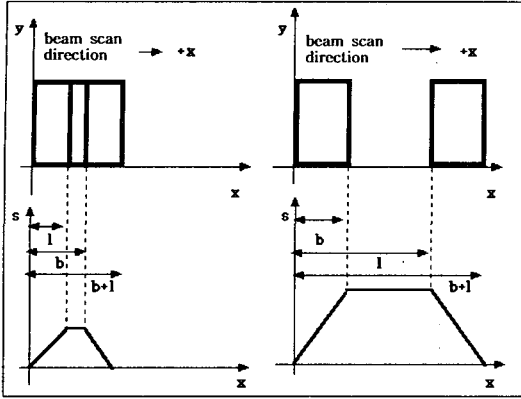


Fig. 2 Etched shape for moving specimen

집속빔에서 빔의 발산까지를 감안하기 위해서는 초점과 재료표면 사이의 거리를  $W$ , 빔 quality factor를  $M^2$ 로 표기하면, 소재위에서의 빔폭  $b$ 는 다음과 같이 변환되어 계산된다.<sup>5</sup>

$$b(z) = b_0 \sqrt{1 + \left( \frac{(W+z)M^2}{(\pi w_0^2)/\lambda} \right)^2} = b_0 \Gamma \quad (2)$$

$$\Gamma = \frac{w(z)}{w_0} = \sqrt{1 + [\beta_\infty^2 (N_w + S) M^2]^2} \quad (3)$$

여기서,  $w$ 는 빔의 반경,  $w_0$ 은 빔 허리(waist)에서의 빔반경이다.  $\beta_\infty = \lambda / (\pi w_0)$ ,  $N_w = W / w_0$ 로 구해지는 무차원변수이며,  $S$ 는 가공깊이  $s$ 의 무차원화된 값이다.

총 에칭 깊이를 구하기 위한 과정을 예로 들어 보면 다음과 같다. 즉, 이송거리가 빔폭보다 작은 경우, 고려하는 조사부위가 이송거리보다는 크고 빔폭보다는 작은 영역이라면(즉,  $l \leq x \leq b$ );

$$\text{이송소요시간} = \frac{l}{v}, \quad \text{총펄스수} = \frac{l}{v} \cdot f$$

따라서, 총 에칭 깊이는 펄스당 에칭깊이와 그 위치에 조사되는 총 펄스 수의 곱으로 구해진다. 즉,

$$s = d \cdot \frac{l}{v} \cdot f = \frac{dfl}{v} \quad (4)$$

결과적으로 총 에칭깊이는 다음 식으로 구해진다.

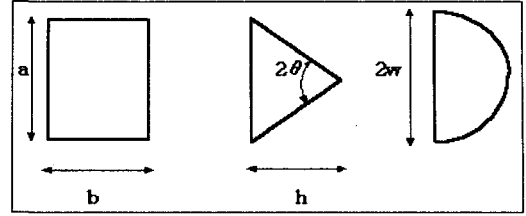


Fig. 3 Shapes and dimensions of masks

$$\begin{aligned} 0 \leq x \leq \min(l, b) \quad s &= \frac{dfx}{v} \\ \min(l, b) \leq x \leq \max(l, b) \quad s &= \frac{df}{v} \times \max(l, b) \\ \max(l, b) \leq x \leq b+l \quad s &= \frac{df}{v} (b+l-x) \quad (5) \end{aligned}$$

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. 3은 프로그램에서 가공 깊이 계산시 쓰이는 마스크의 형상 및 치수에 대한 그림이다. 문제를 단순화하면서 실제 적용 가능한 형태의 직사각형 마스크와 이등변 삼각형 및 반원형 마스크를 선택하였으며, 각각의 치수를 나타내는 변수값은 프로그램에서 직접 입력하도록 구축하였다.

### 2.3 이송 가공 프로그램 흐름도

이송변수가 포함되어 계산되는 부분에서는 constant grid를 이용하여 계산영역을 구성하였다. 특히, 정해진 한 방향으로 이송할 경우 마스크의 형상에 따라 빔이 조사되는 시작부분과 가공이 완료되는 부분의 가공 형상이 달라질 수 있으므로, 이를 관찰하기 위해 레이저빔의 중심을 임의의  $(x, y)$ 위치에 설정하고  $+x$  방향으로 이송하면서 결과를 계산하였다. 따라서 가공이 시작되는 위치와 끝나는 위치의 절대값 자체는 별 의미가 없다. 가공변수로는 이송거리  $l$ , 조사시의 빔의 펄스반복율  $f$ , 빔이 이송하는 속도  $v$ 와 마스크의 형상부분에서 사각형 마스크의 형상 치수인 세로  $a$ , 가로폭  $b$ , 삼각형 마스크의 형상 치수인  $h$ 와  $\theta$ , 반

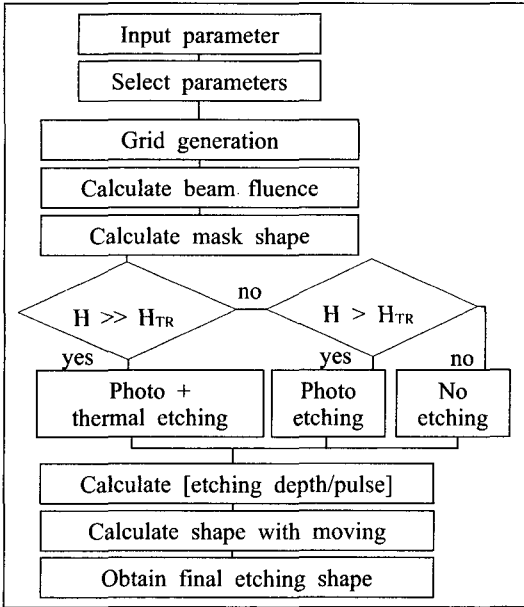


Fig. 4 Flowchart of simulation program for moving specimen

원형 마스크의 반경  $w$  값을 이용하였다. Fig. 4는 이러한 이송가공 프로그램의 흐름도를 나타낸다. 입력 조건에 따라 레이저 조사량이 계산되고, (1) 식에 의해 펄스당 에칭 깊이를 구하게 되며, 최종적으로 이송 변수 조건에 따른 각 그리드 위치에서의 가공 깊이를 구하게 된다.

### 3. 시뮬레이션 결과 및 토의

빔조건 및 이송변수에 따른 가공 결과를 예측해 보기 위해 다음 순서로 살펴 보았다.

- (1) 레이저빔의 펄스반복율의 영향
- (2) 시편의 이송속도의 영향
- (3) 마스크의 형상변화의 영향
- (4) 소재의 물성치 변화의 영향

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 조사량은  $0.5\text{J}/\text{cm}^2$ , 소재는 폴리에탄, 이송속도는  $100\mu\text{m}/\text{s}$ , 이송거리는  $2000\mu\text{m}$ 의 경

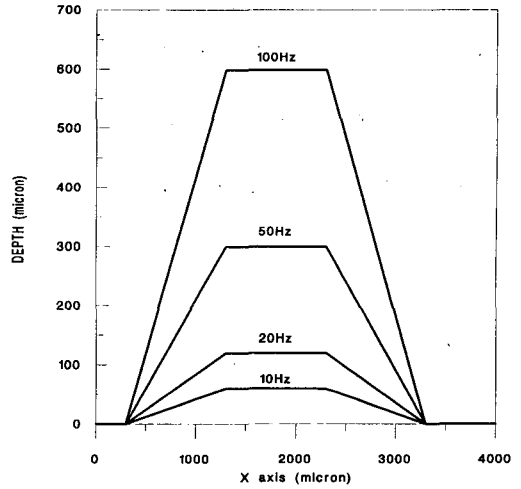


Fig. 5 Etching depth vs pulse repetition rate

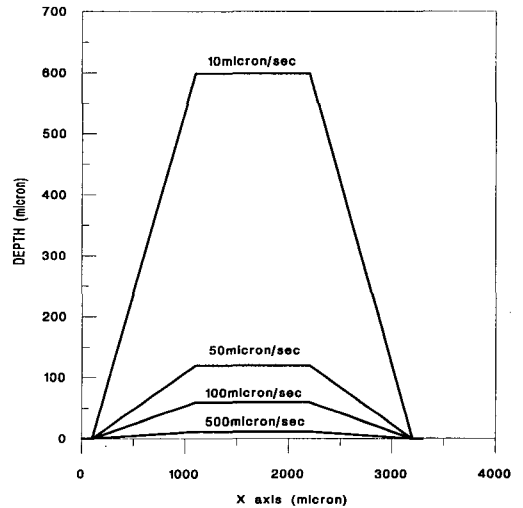


Fig. 6 Etching depth vs moving velocity

우에 대해 계산해 보았다.

먼저 레이저빔의 펄스반복율을 10Hz에서 100Hz까지 증가시킬 때의 가공결과를 Fig. 5에 보인다. x-축은 이송 방향으로의 위치를, y-축은 가공된 깊이를 나타낸다. 펄스가 증가함에 따라 에칭 깊이가  $60\mu\text{m}$ 에서  $600\mu\text{m}$ 까지 선형적으로 비례해 증가함을 확인할 수 있다. 이는 식(5)에서 예측할 수 있는 바와 같으며, 따라서 가공형상의 깊이 방향의 제어는 펄스반복율의 제어를 통해 손쉽게 달

성할 수 있음을 짐작할 수 있다.

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 식 (5)에서 보듯이 이송속도가 증가할수록 에칭깊이는 반비례해 감소하게 된다. Fig. 6에서 이송속도가 증가할수록 재료 표면의 레이저 조사량이 감소해 결국 에칭깊이의 감소를 가져옴을 확인할 수 있다. 이송속도가  $10\mu\text{m/s}$ 에서  $500\mu\text{m/s}$ 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.

다음으로, 3차원 형상의 구조물 가공시 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  $100\mu\text{m/s}$ , 이송거리는  $2000\mu\text{m}$ , 펄스반복율은  $10\text{Hz}$ 이다.

먼저 가로폭과 세로가 각각  $1000\mu\text{m}$  및  $2000\mu\text{m}$ 인 직사각형 마스크를 이용해 가공할 경우의 결과는 Fig. 7과 같다. z-축이 가공 종료후의 에칭 깊이( $\mu\text{m}$ )를 나타낸다. 이송이 특정한 한 방향으로 이루어지므로 가공 시작부분과 끝부분의 형상에 차이가 있을 수 있으며 그림에 대비해 보았다. 그림에서 왼쪽부분은 가공시 시작부분을 원점에서 바라보는 형상이고, 오른쪽 부분은 가공종료시 끝부분을 원점과 반대의 큰 x-위치에서 바라본 형상으로 사각형상의 경사면을 가지고 있으며 경사면은 대칭적인 형태를 보이고 있다.

이등변 삼각형의 마스크에서  $h=1000\mu\text{m}$ ,  $\theta=45^\circ$ 인 경우의 계산 결과를 Fig. 8에 나타냈는데, 시작부와 끝부분의 경사면은 비대칭적인 형태를 보인다. 가운데의 깊이가 일정값에 도달해 있는 영역에서는 깊이 방향으로의 단면 형상이 마스크의 형태와 같은 이등변 삼각형으로 나타남을 확인할 수 있다. 그림에서 왼쪽부분은 가공시 시작부분으로

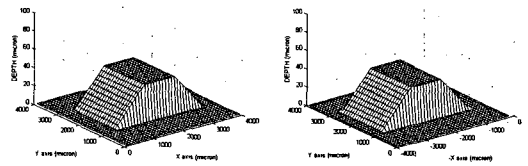


Fig. 7 Etched shape with rectangular shaped mask

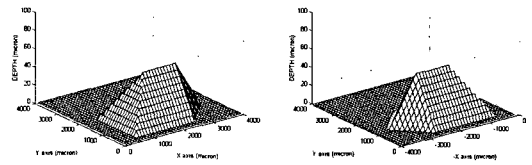


Fig. 8 Etched shape with triangular shaped mask

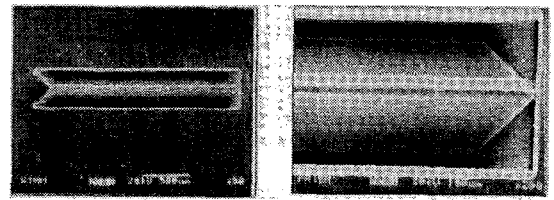


Fig. 9 Experimentally ablated micro prism

y축을 따라 균일한 경사를 가지며 가공된 형상을 보이고, 오른쪽 부분은 가공시 끝부분으로 마스크의 삼각형 변부분을 통과한 빔에 의해 노광된 부분이 가공된 형상을 보여준다.

삼각형 마스크를 이용해 가공된 준3차원형상 구조물은 미소 프리즘의 형상만 어블레이션으로 없앤 형상을 하고 있다. 계산에 사용한 마스크와 반대형태로 삼각형을 제외한 부분만 빔이 투과되도록 가공하면 미소 프리즘 부분만 남도록 할 수 있을 것이다. 실험적으로 미소 프리즘을 가공한 결과를 Fig. 9에 보인다. 가공된 부분 중 가운데의 형상이 일정한 부분을 이용하면 프리즘으로의 기능을 할 수 있을 가능성을 볼 수 있다.

반경  $w=1000\mu\text{m}$ 의 반원형 마스크를 이용한 계산 결과는 Fig. 10에 보이며, 반원형 형상의 경사면을 가지고 있다. 그림에서 왼쪽 부분은 가공시의 시작부분으로 가공 면이 y축을 따라 일정하게 경사짐을 보여주고 오른쪽 부분은 마스크의 반원

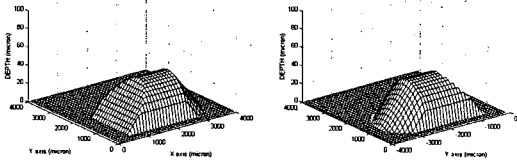


Fig. 10 Etched shape with half-circular shaped mask

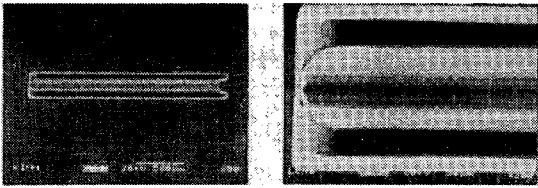


Fig. 11 Experimentally ablated micro cylindrical lens

부분을 통과한 빔에 의해 가공된 부분임을 알 수 있다. 이 형상에서 빔이 투과되는 부분을 역으로 만든 마스크를 이용하면 원통 렌즈 형상을 가공할 수 있음을 Fig. 11과 같이 실험을 통해 확인할 수 있었다.<sup>3</sup>

한편 가공후의 에칭깊이는 재료의 물성치에 영향을 받는다는 것을 이미 식(1)에서 짐작할 수 있으며 따라서 특정형상의 가공시 물성치가 다른 다양한 소재의 적용 가능성을 짐작할 수 있다. 이를 확인해 보기 위해 문헌<sup>6,7,8</sup> 을 통해 입수한 폴리머 소재에 따른 물성치를 Table 2에 요약하였으며, 계산에서는 Table 1 및 Table 2 의 값을 사용하였다.

Table 2 Material properties for various polymers

| Polymer | $\lambda$<br>nm | $\beta$ (1/cm)<br>$\times 10^5$ | $E^*$<br>kJ/cm <sup>2</sup> | Htr<br>J/cm <sup>2</sup> | $A_1$<br>( $\mu$ m) |
|---------|-----------------|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------|
| PI      | 193             | 2.6                             | 702.2                       | 0.0600                   | 0.50                |
| PI      | 248             | 1.73                            | 207.6                       | 0.0900                   | 0.95                |
| PMMA    | 193             | 1.24                            | 756.4                       | 0.0170                   | 13.0                |
| PMMA    | 248             | 0.24                            | 31.20                       | 0.0870                   | 7.7                 |

소재의 물성치에 의한 영향을 파악하기 위해 레이저 조사량이 0.1J/cm<sup>2</sup>인 경우와 10J/cm<sup>2</sup>인 경우에 대해 계산해 보았다. Fig. 12 에서는 조사되

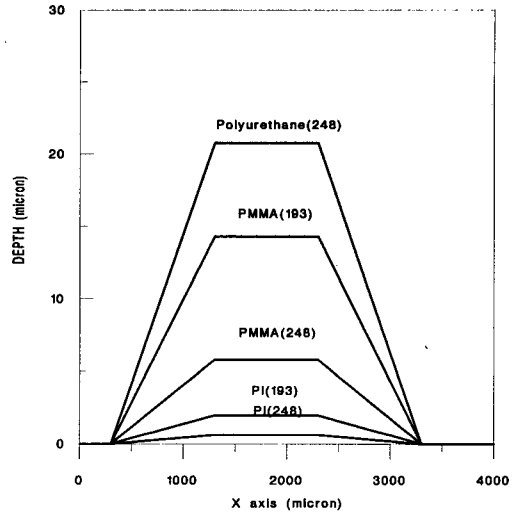


Fig. 12 Etching depth for different polymers (beam fluence=0.1J/cm<sup>2</sup>)

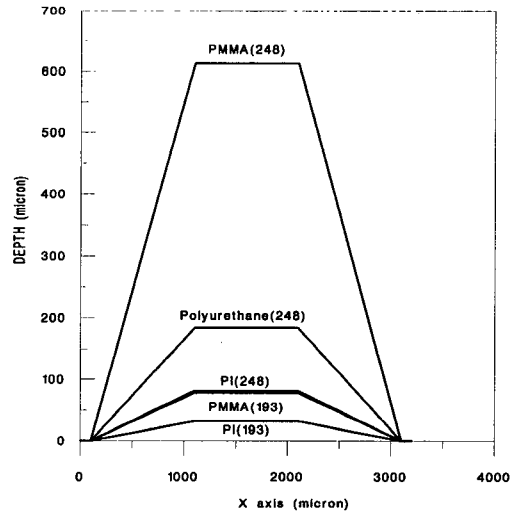


Fig. 13 Etching depth for different polymers (beam fluence=10J/cm<sup>2</sup>)

는 빔에너지를 각각의 폴리머 재료에 대한 열에칭 임계에너지 (통상 H<sub>TR</sub>의 10배 정도)보다 낮은 0.1 J/cm<sup>2</sup>으로 주어 광화학에칭의 주된 인자인 빔 흡수계수  $\beta$ 에 따른 에칭형상을 보여준다. 다른 재료에 비하여 빔흡수계수  $\beta$ 가 작고 임계 레이저 조사량 H<sub>TR</sub>가 상대적으로 적은 폴리우레탄(248) 재료

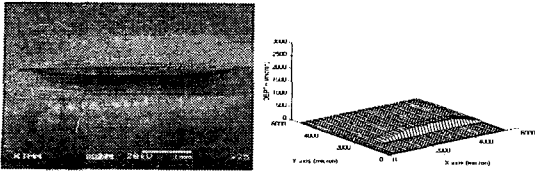


Fig. 14 Comparison between experiment and simulation

에서 에칭깊이가 상대적으로 가장 크게 나타나고, 반면  $H_{TR}$  가 상대적으로 크고  $\beta$ 가 큰 PI(248) 재료에서 에칭깊이가 상대적으로 가장 적음을 확인할 수 있다. 즉, 레이저 조사량이 작아서 광화학에 침만을 고려한 가공시에는 흡수계수  $\beta$ 가 중요한 변수로 작용함을 확인할 수 있다.

이에 비해 Fig. 13처럼 조사량이  $10 \text{ J/cm}^2$  인 경우에는 광화학 및 열에칭의 영향에 의해 재료의 물성치에 해당하는  $\beta$ ,  $E^*$ ,  $A_1$ 과 열에칭 임계에너지에 따라 다른 에칭깊이를 나타냄을 알 수 있다. 특히, PMMA소재에  $248\text{nm}$ 의 파장으로 가공하였을 경우, 상대적으로 가장 큰 에칭깊이를 나타낸 점과 PI소재에  $193\text{nm}$ 의 파장으로 가공하였을 경우, 가장 적은 에칭깊이를 나타냄을 보이고 있다.  $\beta$ 와  $E^*$ 가 증가할수록 가공시 에칭깊이가 감소하는 경향을 보이며,  $A_1$ 의 값이 증가할수록 가공시 에칭깊이가 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 결과를 종합해 보면 레이저 조사량이 낮은 영역에서는 단순히 빔 흡수계수에 좌우되지만, 조사량이 열에칭의 효과가 나타나는 임계에너지값을 넘어서는 영역에서는 열에칭과 관련된 변수들의 조합에 의해 가공 효과가 나타나며, 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

실제 실험 결과와 계산 결과를 비교해 보기 위해 폴리우레탄 소재를  $248\text{nm}$ 의 엑시머 레이저로, 가로  $1400\mu\text{m}$ , 세로  $600\mu\text{m}$ 의 사각형 마스크를 이용해 조사량  $0.35\text{J/cm}^2$ , 펄스반복율  $10\text{Hz}$ , 이송속도  $0.1\text{mm/s}$ , 이송거리  $3600\mu\text{m}$ 의 조건으로 가공해 보았다. Fig. 14의 왼쪽 그림은 시편 위에 축소 투영되는 레이저빔을 고정하고 시편을 이송시키는 방법에 의해 얻어진 경사면의 구조형태를 갖는 가공형상을 보여준다. 오른쪽 그림은 시뮬레이션 프로그램의 결과로 실험에서의 3차원 구조물에 대한 가공형상과 일견 일치함을 보인다. 가공 시편의 정량적 측정 데이터는 측정상의 곤란으로 구

할 수 없었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 폴리머 재료에 대하여 자외선계열의 엑시머 레이저로 미소구조물을 가공하는 과정의 수치모사 프로그램을 개발하여 실제 가공에 필요한 변수를 파악하고 가공 결과에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. 결과는 다음과 같다.

- (1) 가공 깊이는 모델식에서 예측된 바와 같이 펄스반복율과 이송속도의 제어에 의해 조절이 가능할 것으로 판단되었다.
- (2) 이송변수의 조합에 의해 다양한 형상의 미소구조물 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.
- (3) 소재의 물성치에 따른 영향으로는, 가공 깊이는 레이저조사량이 낮은 영역에서는 빔 흡수계수에 좌우되지만, 레이저 조사량이 열에칭 임계값을 넘어서는 영역에서는 열에칭과 관련된 변수인  $E^*$ ,  $A_1$ 의 조합에 의해 가공 효과가 나타난다.

#### 참고문헌

1. Duley, W. W., "UV Lasers - Effects and Applications in Materials Science," Ch. 5., Cambridge University Press, 1996.
2. Yoon, K. K., Lee, S. K., Kim, J. G., Shin, B. S., Choi, D. S., Whang, K. H. and Park, J. Y., "Laser Beam Application and Technology in Micro Machining," J. of KSPE, Vol. 17, No. 7, pp. 28-35, 2000.
3. Yoon, K. K., Kim, J. G., Lee, S. K., Choi, D. S., and Whang, K. H., "Fabrication of Micro Cylindrical Lens Using UV Laser," 2000 Proc. of 2nd Korean MEMS Conference, pp. 191-195, 2000.
4. Bang, S. Y. and Yoon, K. K., "Modeling of Polymer Ablation with Excimer Lasers," submitted to J. of KSPE.



5. Bang, S. Y., "Effects of Beam Parameters on Excimer Laser Ablation," J. of KSPE, Vol. 22, No. 7, 2005.
6. Srinivasan, V., Smrtic, M. A. and Babu, S. V., "Excimer Laser Etching of Polymers," J. Appl. Phys., Vol. 59, No. 11, pp. 3861-3867, 1986.
7. Babu, S. V., D'Couto, G. C. and Egitto, F. D., "Excimer Laser Induced Ablation of Polyetherether-ketone, Polyimide, and Polytetrafluoroethylene," J. Appl. Phys., Vol. 72, No. 2, pp. 692-698, 1992.
8. D'Couto, G. C., Babu, S. V., Egitto, F. D. and Davis, C. R., "Excimer Laser Ablation of Polyimide-Doped Poly(tetrafluoroethylene) at 248 and 308nm," J. Appl. Phys., Vol. 74, No. 10, pp. 5972-5980, 1993.