

# 엑사이머 레이저 어블레이션 가공에서의 빔변수의 영향

방세윤<sup>#</sup>

## Effects of Beam Parameters on Excimer Laser Ablation

Se Yoon Bang<sup>#</sup>

### ABSTRACT

In laser machining such as drilling with CO<sub>2</sub> or Nd:YAG laser, and etching or ablation with Excimer laser, one of the most important parameters affecting the machining is known to be beam characteristics. In this paper a numerical study is performed to investigate the effects of beam parameters, especially in the process of excimer laser ablation of polymers. Results of different beam conditions reveal that if the ablated depth is small compared to beam size the simple photochemical etching model is suitable to predict the etched shape, and that the importance of precise alignment becomes large as beam quality factor becomes larger.

**Key Words** : Excimer laser (엑사이머 레이저), Ablation (어블레이션), Beam parameters (빔변수), Photochemical process (광화학적 가공과정)

### 1. 서론

자외선(UV) 레이저에 의한 어블레이션 가공에서는 (i)높은 광자에너지로 분자간 결합의 절단이 가능하며, (ii)아주 짧은 펄스시간동안(통상 50ns 미만) 레이저가 출력되어 열에 의한 재료의 손상을 최소화할 수 있는 장점이 있다. 실험적으로 임계에너지 이상의 레이저 조사량 (fluence, 단위면적당 에너지)와 펄스당 에칭 깊이는 상관관계를 갖는 것으로 보고되고 있으며, 상세한 내용은 Srinivasan의 리뷰<sup>1,2</sup>에 소개되어 있다.

Modest<sup>3,4,5</sup>는 어블레이션 또는 decomposition에

의한 재료제거 가공시의 현상을 해석하기 위한 3차원 과도(transient) 해석 모델을 제시하였다. Nd:YAG 레이저의 경우에는 이 모델을 이용하면 여러 가지 경우에 대한 예측이 가능하지만 엑사이머 레이저와 같이 자외선 영역의 파장에서 아주 짧은 펄스로 작동하는 경우에는 다소 적합하지 않은 측면이 있다. 국내의 연구로는 윤경구 등의 연구<sup>6</sup>에서 금속 박막의 제거 가공을 해석하기 위해 급속가열에 의한 증발 현상으로 모델링하고 박막의 원주방향으로의 열확산만을 고려해 온도분포를 구하였다. 금속의 경우에는 용융부 및 가공주변부로의 열영향을 무시할 수 없어서 모델링에서 고려해 주어야 하지만, 세라믹이나 폴리머의 경우에는 열전

접수일: 2005년 2월 2일; 게재승인일: 2005년 5월 13일

# 교신저자: 동국대학교 기계공학과

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

도에 의한 에너지 손실은 거의 무시할 수 있을 정도가 되고 입사되는 레이저 에너지의 거의 전부가 소재의 증발 제거에 사용된다.

특히 자외선 영역의 레이저로 폴리머를 가공하는 연구분야에 대해서는 Srinivasan이 광범위하게 다루고 있다. 1982년에 보고된 Srinivasan의 연구<sup>7</sup>에서는 폴리머 표면에 펄스 자외선 레이저를 조사할 경우 소재의 표면에 순간적으로 0.1~수  $\mu\text{m}$ 의 깊이까지 에칭되어 제거되는 현상이 관찰되었으며 결과적으로 레이저빔의 형상대로 재료에 에칭 패턴을 만들 수 있다. Tönshoff 등<sup>8</sup>은 엑사이머 레이저를 이용해 비금속의 3차원적인 미세가공이 가능함을 실험적으로 입증하였다. 즉 일정한 형상의 마스크를 이용해 깊이 제어는 펄스수의 증감으로, 수평방향의 형상은 재료의 이동에 의해 미세가공할 수 있는 가능성을 제시하였다.

이처럼 레이저를 이용한 미세가공에 관한 관심이 증가함에 따라, Lassiger 등<sup>9</sup>은 연속모드(CW) 및 Q-switch Nd:YAG 레이저를 이용한 제거 가공에서 빔의 에너지분포와 전파를 고려해 해석을 시도하였으며, 결과적으로 거의 100% 가까이 용융없이 기화에 의한 재료의 제거가 일어나 형상 가공 과정을 정밀하게 제어할 수 있는 가능성을 보였다. 또한 Meiners 등<sup>10,11</sup>은 펄스 모드의 Nd:YAG 레이저를 이용한 세라믹의 미세가공실험을 수행하고, 열전달을 무시한 1차원적 기화 모델을 적용해 해석을 시도하였다.

한편, 어블레이션 결과는 펄스 에너지, 빔강도 (beam intensity) 분포, 빔 quality factor, 초점의 위치 등과 같은 빔특성에 큰 영향을 받는다. CO<sub>2</sub> 레이저나 Nd:YAG 레이저와 같은 적외선 영역의 고풍력 레이저 가공에 대해서는 빔특성을 고려한 빔 집속 (focusing) 모델로 실험결과를 잘 예측한 논문<sup>12</sup>도 발표된 바 있지만, 자외선 레이저의 경우 일반적으로 일정한 강도분포의 사각형 빔이 폴리머 에칭에 적용되므로 빔특성이 가공 결과에 미치는 영향의 연구는 거의 시도된 바 없다.

본 연구에서는 자외선영역의 짧은 파장에서 나노초 급(ns order)의 아주 짧은 레이저 펄스로 폴리머를 어블레이션 가공하는 과정을 해석하기 위해 (i)열전달효과를 무시하고 입사에너지가 소재의 증발 제거에 전부 사용되는 것으로 간주하였으며, (ii) 레이저 빔의 형상, 렌즈에 의한 집속효과, 펄스 에너지의 변화가 소재의 가공 깊이 및 가공 형상에

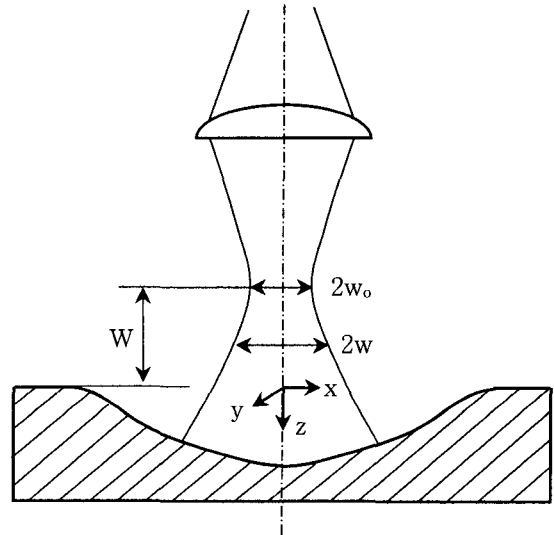


Fig. 1 Schematics of laser beam ablation model

미치는 영향을 파악하고자 하였다.

## 2. 모델링

### 2.1 빔 모델링

도입한 모델은 특히 레이저빔의 특성이 가공 결과에 미치는 영향을 파악하는데 주안점을 두었다. 이러한 빔 특성을 고려한 연구에는 Biyikli<sup>12</sup> 및 Bang 등<sup>13</sup>의 논문이 있다. Fig. 1에 빔의 집속효과를 고려한 레이저 가공의 개념도를 보인다.

가능한 한도에서 문제를 단순화하기 위해 다음과 같은 가정을 도입하였다.

- (1) 레이저 조사에 의해 제거되는 소재는 조사되는 레이저빔을 방해하지 않으며, 재료의 상부에 플라즈마의 형성은 없다.
- (2) 소재의 물성치는 항상 일정하며, 이 값은 실험적으로 결정할 수 있다.
- (3) 레이저빔은 나노초 단위의 짧은 펄스 모드로 작동하므로 펄스폭(width)은 감안하지 않으며, 펄스당 에칭 깊이의 계산에 주안점을 둔다.
- (4) 가공된 홈 내부에서의 다중반사효과는 무시한다.

레이저빔의 모델은 빔 강도 분포를 전형적인 가우시안 분포의 빔외에 마스크를 통과하는 경우까지 고려해 주기 위해 균일 강도의 원형(circular) 및 사각형(rectangular)빔까지 확장하였다. 레이저 발전

기에서의 가장 기본적인 빔 모드(mode)는 TEM<sub>00</sub>, 즉 가우시안 빔모드이며 이에 대해서는 이론적인 예측이 가능하다.<sup>14,15</sup> 그 외의 빔모드는 실험적으로 측정되는 beam quality factor M<sup>2</sup>를 도입해 나타낼 수 있다. 가우시안 빔의 진행을 나타내는 식은;

$$w^2(z) = w_0^2 + \beta_\infty^2(z - z_0)^2 \quad (1)$$

여기서 w는 빔의 반경, w<sub>0</sub>은 위치 z<sub>0</sub>의 빔허리(waist)에서의 최소반경이다. 레이저빔은 z=z<sub>0</sub>의 최소단면부에서부터 발산각 (half-angle) β<sub>∞</sub>로 퍼져나간다. 파장 λ의 가우시안빔의 경우 원거리 전자장에서 발산각은 다음과 같다.

$$\beta_\infty = \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (2)$$

가우시안빔의 경우 빔반경은 에너지 강도가 중심에서의 최대값의 1/e<sup>2</sup>값(=86.5%)이 되는 위치로 정의된다. 모델에서는 다중 모드의 레이저빔을 나타내기 위해 beam quality factor M<sup>2</sup>를 이용해 같은 크기의 가우시안빔보다 더 빠르게 발산하는 가우시안 빔으로 대치하고, 소재 표면에 입사할 때의 빔 방향은 연직방향(z-방향)으로 간주한다.

재료 표면의 임의의 위치  $\vec{r}(x,y,z)$ 에 입사되는 레이저 빔에너지 flux  $F(\vec{r}) = \vec{F}(x, y, z)$ 은

$$F(\vec{r}) = q''_i \hat{s} \approx q''_i \vec{k} \quad (3)$$

여기서  $\hat{s}$ 는 빔이 입사되는 방향의 단위 벡터,  $q''_i$ 은 빔의 전파방향에 수직한 에너지 flux량,  $q''_i$ 는 z-방향의 flux량이다. 에너지보존의 법칙을 고려하면,

(i) 가우시안 빔의 경우;

$$\vec{F}(x, y, z) = F_0 \frac{w_0^2}{w^2(z)} e^{-2(x^2+y^2)/w^2(z)} \vec{k} \quad (4)$$

$$w(z) = w_0 \left[ 1 + \left( \frac{(W+z)M^2}{\pi w_0^2 \lambda} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

여기서,  $F_0 = F_{0c} = 2P / (\pi w_0^2)$  로 표시되며, 초점에서 빔중양부의 에너지 강도 값이다. 또한 W는 초점과 재료표면 사이의 거리를 나타내며, 초점이 재료의 표면 상부에 위치하면 +의 값을 갖는다.

(ii) 균일한 강도 분포의 원형빔의 경우;

$$\vec{F}(x, y, z) = \begin{cases} \frac{w_0^2}{w^2(z)} F_0 \vec{k} & \text{for } x^2 + y^2 \leq w^2 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (6)$$

여기서,  $F_0 = F_{0c} = P / (\pi w_0^2)$

(iii) 균일한 강도 분포의 사각형빔 형상의 경우;

엑사이머 레이저는 발전기에서 나올 때의 빔의 형상이 사각형 형상을 하고 있으며, 이를 이용할 때도 광학계를 통해 일반적으로 사각형 형상의 빔으로 이용하게 되므로 그 영향을 고려해 줄 필요가 있다. 해석을 위해 빔의 강도 분포는 균일하다고 가정하고 가로(폭) a<sub>0</sub> 와 세로(높이) b<sub>0</sub> 의 비를 변화시킬 수 있도록 하고, 빔의 발산은 앞의 M<sup>2</sup>를 고려한 식 (5)를 적용할 수 있다고 간주하면;

$$\vec{F}(x, y, z) = \begin{cases} \frac{w_0^2}{w^2(z)} F_0 \vec{k} & -\frac{a}{2} \leq x \leq \frac{a}{2}, -\frac{b}{2} \leq y \leq \frac{b}{2} \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (7)$$

여기서,  $F_0 = F_{0r} = P / (a_0 b_0)$

## 2.2 폴리머 어블레이션 모델

폴리머에 대한 엑사이머 레이저 어블레이션 효과를 이론적으로 고려하기 위한 연구는 많이 진행되어 왔으며<sup>1</sup>, 대부분의 경우 주된 관심은 레이저 조사량에 따른 에칭 깊이의 계산에 집중되었다. 아직까지 자외선 레이저의 경우 빔특성이 가공결과에 미치는 영향의 연구가 시도된 바 없으므로 본고에서는 모델을 단순화시켜, 앞의 2.1절에서 서술한 빔 조건하에 일정한 물성치를 갖는 폴리머 소재에 대한 어블레이션 가공을 모델링하기 위해 광화학적인 에칭효과를 고려한 Jellinek과 Srinivasan<sup>16</sup>의 연구를 참고하였다. 간단히 설명하면;

(1) 재료의 열전달효과는 무시하고, 빔흡수계수 β

(/cm) 및 임계 레이저 조사량  $H_{TR}(J/cm^2)$ 에 의해 나타낼 수 있는 광화학적 가공과정만을 고려한다.

- (2) 레이저빔 조사에 의해 제거되는 소재의 에칭깊이는 레이저 조사량  $H$ 의 log값에 비례하는 형태로 나타낼 수 있다. 즉 광자의 침투 깊이에 대해 Beer의 법칙 형태를 가정해 에칭 깊이를 구한다. 따라서, 펄스당 에칭 깊이,  $l_f$  ( $\mu m$ )는

$$l_f = \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{H}{H_{TR}}\right) \quad (8)$$

여기서  $H$ : 펄스당 레이저 조사량 ( $J/cm^2$ )  
 $H_{TR}$ : 임계 레이저 조사량 ( $J/cm^2$ )  
 $\beta$ : 빔흡수계수 ( $1/cm$ )

입자의 형상을 갖는 소재의 특정 위치  $\vec{r}(x,y,z)$ 에 입사되는 레이저 조사량  $H$ 값을 알면 식 (8)에 의해 에칭 깊이를 알 수 있다. 에칭은 빔이 입사되는 z-방향, 즉 연직방향으로 진행되는 것으로 간주한다.

### 2.3 무차원화

소재의 표면위치를  $s(x,y)$ 라 할 때, 계산식을 무차원화하기 위해 도입된 무차원변수는 다음과 같다.

$$\xi = \frac{x}{w_0}, \quad \eta = \frac{y}{w_0}, \quad \zeta = \frac{z}{w_0}, \quad N_w = \frac{W}{w_0}$$

$$S = \frac{s(x,y)}{w_0}, \quad \bar{H} = \frac{H}{F_0}, \quad \beta_\infty = \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (9)$$

조사되는 레이저빔의 에너지 강도 분포는 빔의 조사방향을 연직방향으로 가정하였으므로;

- (i) 가우시안 빔의 경우;

$$\bar{H} = \frac{\vec{F} \cdot \hat{n}}{F_0}$$

$$= \frac{e^{-2(\xi^2 + \eta^2)/\Gamma^2}}{\Gamma^2} \hat{k} \cdot \hat{n}(\xi, \eta) \quad (10)$$

여기서;  $\Gamma = \frac{w(z)}{w_0} = \sqrt{1 + \beta_\infty^2 (N_w + S)^2 M^2}$  (11)

평행빔의 경우에는  $\Gamma=1$  이 되며, 이때 위의 식은 다음과 같이 간략화된다.

$$\bar{H} = e^{-2(\xi^2 + \eta^2)} \hat{k} \cdot \hat{n}(\xi, \eta) \quad (12)$$

- (ii) 원형빔의 경우;

$$\bar{H} = \frac{\vec{F} \cdot \hat{n}}{F_{oc}} = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma^2} \hat{k} \cdot \hat{n} & \text{for } \xi^2 + \eta^2 \leq \Gamma^2 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (13)$$

- (iii) 사각형빔의 경우;

$$\bar{H} = \frac{\vec{F} \cdot \hat{n}}{F_{or}} = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma^2} \hat{k} \cdot \hat{n} & \text{빔조사영역} \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (14)$$

계산에 필요한 물성치  $\beta$  및  $H_{TR}$ 은 Srinivasan 등의 결과<sup>17</sup>를 이용한다. Table 1에 대표적인 폴리머 소재, PI (Polyimide)의 물성치를 정리해 보인다. 본 연구에서는 빔과장 248nm일 때의 PI 소재에 대한 물성치를 이용하였다.

Table 1 Material properties used in numerical simulation

Polymer	과장(nm)	$\beta(1/cm)$	$H_{TR}(J/cm^2)$
PI	193	$2.6 \times 10^5$	0.060
	248	$1.73 \times 10^5$	0.090

### 2.4 Solution Approach

레이저빔이 조사되는 소재의 표면은 빔의 중앙부에서부터 외곽방향으로 그리드(grid)의 간격을 점차 크게 해서 x-, y-방향의 메시(mesh)를 만들고, 각 절점(node)에서의 조사량은 식(10)~(14)에 의해 계산된다. 이때 표면을 매끄러우면서도 2차미분까지 연속인 형태로 나타내기 위해 각각의 작은 표면 요소는 CAD에서 적용되는 두 매개변수 u와 v의 3차다항식으로 표시되는 3차 곡면 패치(bicubic surface patch)로 모델링한다. 이 방법은 계산시간이 짧으면서도 표면을 매끄럽게 나타낼 수 있는 장점이 있다.<sup>18</sup> 입사되는 레이저 조사량

H 값을 구하기 위해서는 해당 절점에서의 법선 벡터값을 계산해야 하며, 이는 3차 곡면 패치를 이용해 쉽게 구할 수 있다.

계산결과로부터 최종가공된 에칭 깊이  $s[\mu\text{m}]$ 와 소재 표면에 입사되는 레이저 조사량  $H(\text{J}/\text{cm}^2)$ 의 분포를 구할 수 있고, 결과는 Matlab<sup>19</sup>의 3차원 플롯 기능을 이용해 출력하였다.

### 3. 계산결과 및 검토

계산은 전형적인 가공조건에 대해- 소재는 PI(polyimide), 레이저빔의 파장=248nm, 펄스에너지=0.002J, 초점의 위치는 소재의 표면( $W=0\text{ mm}$ ),  $M^2=1$ , 가우시안빔 또는 원형빔의  $w_0=500\mu\text{m}$ , 사각형빔의  $a_0=b_0=1000\mu\text{m}$  - 1 펄스의 빔을 조사하였을 때의 가공깊이를 구하였다. 특히 다음의 조건에 대한 수치계산 결과를 비교해 영향을 파악하고자 하였다.

- (i) 가우시안 빔과 사각형빔
- (ii) 펄스수 및 펄스에너지의 증가에 의한 영향
- (iii) 집중된 빔에서의 초점 위치 및  $M^2$ 의 변화

먼저 기본조건으로 1 펄스를 조사하였을 때의 가공형상은 Fig. 2와 같다. 그림의 왼쪽은 가공깊이,  $s(x,y)[\mu\text{m}]$ 의 분포를, 오른쪽은 입사에너지량  $H(x,y)[\text{J}/\text{cm}^2]$ 를 나타내며, 맨 위는 가우시안 빔, 가운데는 원형빔, 아래는 사각형빔이 입사될 경우의 계산결과이다. 각축은 동일 척도로 그려진 것이 아니라  $x, y$ 축은  $-1000\sim+1000\mu\text{m}$ 에 해당하는 가공 면적을 나타내며,  $z$ 축은  $0.1\mu\text{m}$ 까지의 가공깊이 또는  $0.5\text{J}/\text{cm}^2$ 까지의 입사에너지량을 표시하고 있다. 빔강도 분포가 일정할 때는 빔의 형상과 가공형상이 동일하지만, 가우시안빔의 경우는 빔의 형상과 가공형상이 다소 차이가 나는데, 이것은 가공깊이가 입사에너지량  $H$ 값의 log 함수에 비례하기 때문이다. 또한 각각의 빔에 포함된 펄스에너지는 동일하므로, 최대가공깊이는 가우시안빔의 경우에서, 최대가공면적은 사각형빔에서 얻을 수 있다.

같은 조건의 펄스수를 증가하면, 최종가공된 깊이는 펄스수에 비례하여 깊어지며, 이를 Fig. 3에 보인다. Fig. 3의 결과는 초점의 위치가 소재 상부  $100\text{mm}(W=100)$ 에 있을 때 얻어진 것이지만

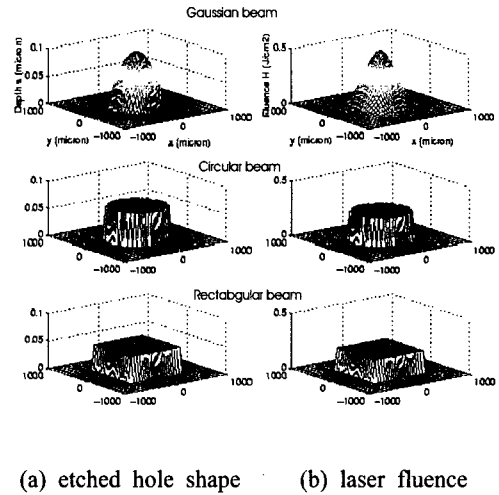


Fig. 2 Effect of beam shape on etched hole shape and laser fluence ( $W=0\text{mm}$ ,  $M^2=1$ , pulse energy = 0.002J, 1 pulse)

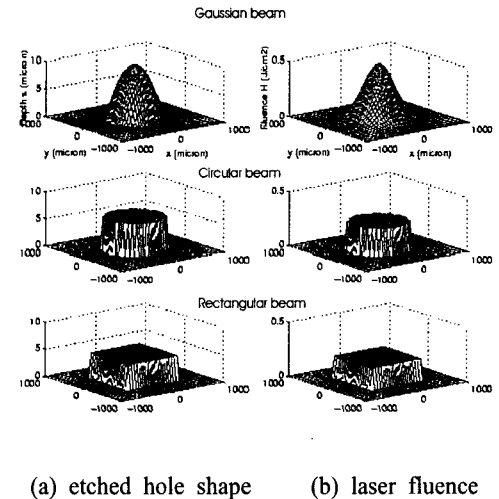
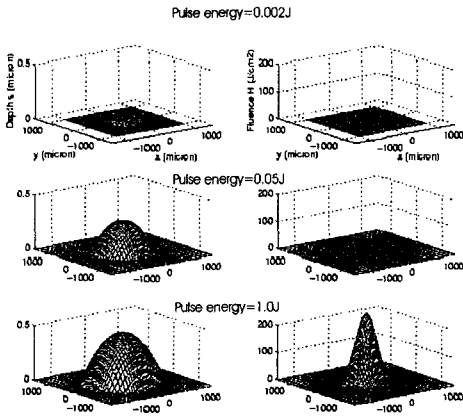


Fig. 3 Effect of number of pulses on etched hole shape and laser fluence ( $W=100\text{mm}$ ,  $M^2=1$ , pulse energy =0.002J, number of pulses=100)

소재표면에 초점이 위치할 때와 같은 결과를 보였다. 그림의 형태는 Fig. 2와 동일해 보이지만 왼쪽의 에칭된 깊이를 나타내는 축은 100배에 해당하는 단위를 가진다. 즉, Fig. 3(a)에 보인 100 펄스 후의 가공깊이는 1 펄스 때의 가공깊이의 100배가 된다. 펄스당 가공깊이는 관계식에서 이미 예측된 대로 일정한 값을 유지하게 된다. 입사에너지



(a) etched hole shape (b) laser fluence

Fig. 4 Effect of pulse energy on etched hole shape and laser fluence (Gaussian beam,  $W=0\text{mm}$ ,  $M^2=1$ , 1 pulse)

지량은 식(10)~(14)에 보이듯이 빔의 입사방향과 표면의 법선 방향간의 벡터 내적 (즉,  $\hat{k} \cdot \hat{n}$ )에 비례하지만 빔이 분포된 면적에 비해 가공된 깊이가 너무 작아 입사에너지량에 변화를 줄 정도로 표면의 형상변화를 가져오지 못하고 있다. Fig. 3(b)에서 확인할 수 있듯이 입사되는 레이저 에너지조건은 100 펄스정도까지도 처음 1 펄스 때의 입사조건(Fig. 2(b))와 비교해 차이가 없다. 만약 빔이 조사되는 면적과 가공깊이가 비슷한 정도의 크기가 되면, 입사조건에 영향을 미쳐 결과가 다르게 나오게 될 것을 짐작할 수 있다.

펄스에너지의 증가는 펄스당 가공깊이의 증가를 가져오게 되지만, 식 (8)에 나타나듯이 log 함수에 비례해 증가한다. Fig. 4에 가우시안빔의 펄스 에너지를 0.002J, 0.05J, 1.0J로 급격히 증가시킴에 따른 가공깊이의 변화를 보인다. 그림 오른쪽의 레이저 조사량의 크기는 0~200J/cm<sup>2</sup>까지를 보이며, 조사량은 급격하게 증가하는데 비해 왼쪽의 최대 가공깊이는 완만하게 0.100μm, 0.286μm, 0.459μm로 증가하며, 가공면적 역시 임계값이상의 에너지가 조사되는 빔면적의 증가에 따라 증가하고 있다. 사각형의 빔에 대해서도 유사한 경향이 나타난다.

빔의 집속에 따른 영향을 살펴보기 위해서는 먼저, 빔의 발산이 이상적인 가우시안 빔과 같은,

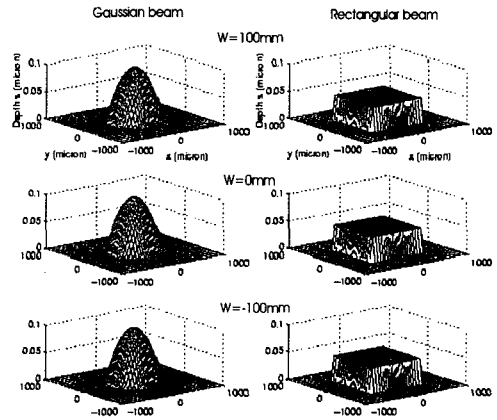
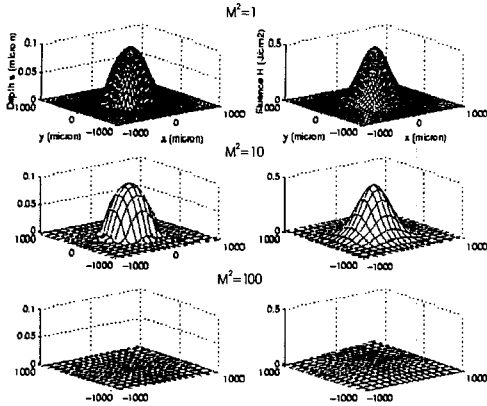


Fig. 5 Effect of beam focus position on etched hole shape ( $M^2=1$ , pulse energy=0.002J, 1 pulse)

즉  $M^2=1.0$ 의 값을 갖는 경우를 고려하였다. 초점면이 각각 소재의 상부 100mm ( $W=100$ ), 소재표면 ( $W=0$ ), 소재내부 100mm( $W= -100$ )에 위치할 때의 가공결과를 Fig. 5에 보인다. 왼쪽은 빔강도분포가 가우시안 형태일 경우, 오른쪽은 균일 강도분포의 사각형빔을 조사할 때의 가공 형상을 나타낸다. 위에서부터 순서대로  $W=100, 0, -100$ 에 해당하는 결과이다. 그림에서 보듯이  $M^2=1$  (즉, 빔발산이 이상적인 가우시안빔)의 경우에는 가우시안 분포의 빔 또는 균일분포의 사각형빔의 경우 모두 초점이 다소 정확하지 않아도 가공결과는 동일하게 나온다.

그러나 실제의 빔은 빔의 발산이 매우 크며  $M^2$  값이 10, 100 이상으로 큰 경우도 없지 않다. 이  $M^2$ 값이 증가할수록, 즉 이상적인 가우시안빔에서 많이 벗어날수록 가공결과는 큰 영향을 받게 될 것이다. 또한  $M^2$ 값의 영향을 받는 정도는 초점면의 위치에 따라 다르게 나타날 것이다. 그림으로 보이지는 않았지만 펄스에너지 0.002J의 레이저로 가공시 초점면이 재료표면( $W=0$ )에 있을 때는  $M^2$ 값이 1, 10, 100으로 증가해도 가공결과에는 차이가 없다. 즉 현재 고려하고 있는 가공 깊이가 상대적으로 작기 때문에 재료표면에 위치한 초점으로부터의 빔발산이 거의 나타나지 않는 영역에 가공면이 위치하게 되어  $M^2$ 값의 영향을 받지 않는다. 그러나,  $W=100\text{mm}$ 의 위치에 초점이 있을 때는  $M^2$ 값이 1, 10, 100으로 증가하면 최대



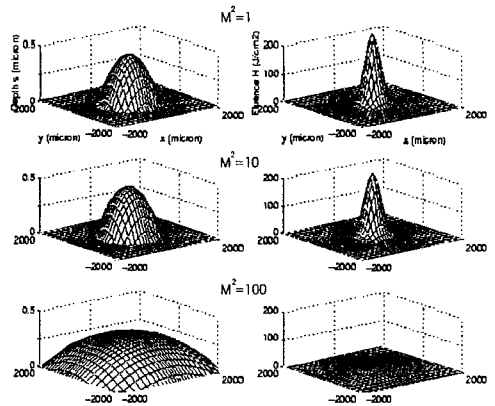
(a) etched hole shape (b) laser fluence

Fig. 6 Effect of beam quality factor  $M^2$  on etched hole shape and laser fluence (Gaussian beam,  $W=100\text{mm}$ , pulse energy= $0.002\text{J}$ , 1 pulse)

깊이는  $0.100\mu\text{m}$ ,  $0.095\mu\text{m}$ ,  $0.0\mu\text{m}$  로 감소한다. 이때의 가공결과를 Fig. 6에 보인다.

그림의 왼쪽은  $0.1\mu\text{m}$ 까지의 가공깊이를, 오른쪽은  $0.5\text{J}/\text{cm}^2$ 까지의 입사에너지량을 나타내며, 위로부터  $M^2=1, 10, 100$  일 경우의 계산결과이다.  $M^2$ 값이 10까지는 오른쪽에 보이는 빔의 조사 영역은 거의 변함이 없다가  $M^2=100$ 이 되면 발산에 의해 급격하게 넓어진다. 왼쪽에 보이는 가공깊이는  $M^2$ 값이 10까지는 거의 차이가 없다가  $M^2=100$ 이 되면 아예 가공이 되지 않는다. 이 효과를 보다 확대해서 살펴보기 위해 펄스 에너지를  $1.0\text{J}$ 로 높여서 계산하고 Fig. 7에 결과를 보인다. 가공깊이는  $0\sim 0.5\mu\text{m}$ 까지, 입사에너지량은  $0\sim 200\text{J}/\text{cm}^2$  까지 보이고 있다. 이처럼 펄스 에너지가 Fig. 6의  $0.002\text{J}$ 에 비해 500배로 증가되는 경우 소재 표면에서의 입사 에너지량은  $M^2=100$ 의 빔발산이 큰 경우에도 임계에너지량을 넘게 되며, 결과적으로 에칭 형상은 매우 넓은 영역에 걸쳐 완만한 형태를 보이고 있다.

실제 어블레이션 가공에 많이 사용되는 강도 분포가 균일한 사각형의 빔을 고려하기 위해 원래의 빔의 에너지는 동일하지만 마스크를 이용해 단지 일부의 빔만을 이용한다고 가정하면, 빔의 발산은 원래의 빔과 동일하고 에너지만 면적의 감소에 비해 감소하는 것으로 간주할 수 있다. 정사



(a) etched hole shape (b) laser fluence

Fig. 7 Effect of beam quality factor  $M^2$  on etched hole shape and laser fluence (Gaussian beam,  $W=100\text{mm}$ , pulse energy= $1.0\text{J}$ , 1 pulse)

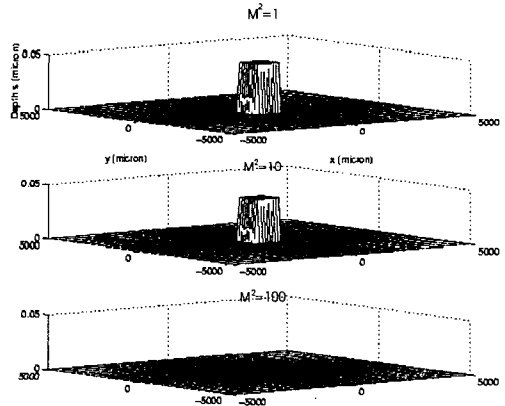


Fig. 8 Effect of beam quality factor  $M^2$  on etched hole shape (Rectangular beam,  $W=100\text{mm}$ , pulse energy= $0.002\text{J}$ , 1 pulse)

각형빔(즉, 폭=높이= $1000\mu\text{m}$ )을 대상으로 살펴본 결과, 초점면의 위치의 영향은 앞의 가우시안빔의 경우와 유사하다. 즉  $M^2=1$ 의 경우에는  $W=100\sim 1000\text{mm}$  에 이르기까지 가공결과는 동일하다. 그러나  $W=100\text{mm}$ 의 위치에서  $M^2=1, 10, 100$ 으로 증가시켜보면 Fig. 8과 같이 가공깊이는  $0.046\mu\text{m}$ ,  $0.041\mu\text{m}$ ,  $0.0\mu\text{m}$ 으로 변화한다. 가우시안빔에서

관찰한 바와 같이 빔의 품질이 좋지 않을 경우에는 빔초점을 정확히 정렬하는 것이 중요함을 알 수 있다. 이상 살펴본 결과를 정리하면

- (i) 에칭 깊이가 깊지 않고 소재표면에 초점이 위치할 경우에는 가공 결과는 빔의 발산 품질에 그다지 영향을 받지 않는다.
- (ii) 빔의 발산이 이상적인 가우시안 빔의 TEM<sub>00</sub> 모드에 가까운 경우의 가공 결과는 초점의 정렬 상태에 별로 영향을 받지 않는다.
- (iii) 빔의 품질이 좋지 않은 레이저의 경우 (즉, M<sup>2</sup>값이 커질수록) 가공 결과는 초점의 정렬 상태에 영향을 받게 되며, 펄스 에너지가 커질수록 큰 영향을 받는다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 자외선과장의 레이저를 이용해 나노초 급의 아주 짧은 펄스로 폴리머를 어블레이션 가공하는 경우를 해석하기 위해 열전달효과를 무시하고 광화학적 가공과정만을 고려한 모델을 도입해 빔변수의 영향을 파악하였다. 요약하면;

- (1) 가공깊이가 빔의 크기에 비해 매우 작으면, 펄스당 가공깊이는 일정한 값을 유지하고, 펄스 에너지가 증가할수록 가공깊이는 레이저조사량의 log 값에 비례하는 모델로 경험적인 가공 결과를 설명할 수 있다.
- (2) 빔특성을 고려한 모델로 빔 집속 효과를 살펴본 결과
  - 에칭 깊이가 깊지 않고 소재표면에 초점이 위치할 경우에는 가공 결과는 빔의 발산 품질에 그다지 영향을 받지 않는다.
  - 빔의 발산이 이상적인 가우시안 빔의 TEM<sub>00</sub> 모드에 가까운 경우의 가공 결과는 초점의 정렬 상태에 별로 영향을 받지 않는다.
  - 빔의 품질이 좋지 않은 레이저의 경우 (즉, M<sup>2</sup>값이 커질수록) 가공 결과는 초점의 정렬 상태에 영향을 받게 되며, 펄스 에너지가 커질수록 큰 영향을 받는다.

#### 참고문헌

1. Srinivasan, R., "Interaction of Laser Radiation with Organic Polymers," Ch. 5, in Laser

Ablation- Principles and Applications, Edited by J. C. Miller, Springer-Verlag, 1994.

2. Srinivasan, R. and Braren, R., "Ultraviolet Laser Ablation of Organic Polymers," Chem. Rev., Vol. 89, No. 6, pp1303-1316, 1989.

3. Modest, M. F., "Three-dimensional, Transient Model for Laser Machining of Ablating/Decomposing Materials," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 39, No. 2, pp221-234, 1996.

4. Modest, M. F., Ramanathan, S., Raiber, A. and Angstenberger, B., "Laser Machining of Ablating Materials - Overlapped Grooves and Entrance/Exit Effects," J. of Laser Applications, Vol. 7, No. 4, pp210-218, 1995.

5. Modest, M. F., "Laser Through-Cutting and Drilling Models for Ablating/Decomposing Materials," J. of Laser Applications, Vol. 9, No. 3, pp137-145, 1997.

6. Yoon, K. K., Lee, S. K., Kim, J. G., Choi, D. S., Whang, K. H., Jung, J. K., Jang, W. S. and Na, S. J., "The UV Laser Ablation of Cr film on Glass Substrate," J. of KSPE, Vol. 17, No. 8, pp134-139, 2000.

7. Srinivasan, R. and Mayne-Banton, V., Appl. Phys. Lett. Vol. 41, pp576, 1982.

8. Tönshoff, H. K. and Mommsen, J., "Process of Generating Three-dimensional Microstructures with Excimer Lasers," European Conference on Laser Treatment of Materials, ECLAT'92, pp597-602, 1992.

9. Lassiger, B., Niessen, M., Ott, P., Treusch, H. G. and Beyer, E., "Contoured Material Removal Using CW-Q-switch Nd:YAG Laser Radiation," European Conference on Laser Treatment of Materials, ECLAT'92, pp585-589, 1992.

10. Meiners, E., Wiedmaier, M., Dausinger, F., Krastel, K., Masek, I. and Kessler, A., "Micro Machining of Ceramics by Pulsed Nd:YAG Laser," ICALEO'91, pp327-336, 1991.

11. Meiners, E., Kessler, A., Dausinger, F. and Hügel, H., "Approaches in Modelling of Evaporative and Melt Removal Processes in Micro Machining," European Conference on Laser Treatment of Materials, ECLAT'92,



- pp704-710, 1992.
12. Biyikli, S. and Modest, M. F., "Beam Expansion and Focusing Effects on Evaporative Laser Cutting," ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 110, pp. 529-532, May 1988.
  13. Bang, S. Y., Roy, S. and Modest, M. F., "CW Laser Machining of Hard Ceramics - Part II. Effects of Multiple Reflections," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 36, No. 14, pp3529-3540, 1993.
  14. Siegman, A. E., "New Developments in Laser Resonators," In Optical Resonators, Proceedings of LASE'90, LA, SPIE, 1990.
  15. Kogelnik, H. and Li, T., "Laser Beams and Resonators," Applied Optics, Vol. 5, No. 10, pp1550-1565, 1956.
  16. Jellinek, H. H. G. and Srinivasan, R., "Theory of Etching of Polymers by Far-Ultraviolet, High-Intensity Pulsed Laser and Long-Term Irradiation," J. Phys. Chem., Vol. 88, No. 14, pp3048-3051, 1984.
  17. Srinivasan, V., Smrtic, M. A., and Babu, S. V., "Excimer Laser Etching of Polymers," J. Applied Physics, Vol. 59, No. 11, pp3861-3867, 1986.
  18. Faux, I. D. and Pratt, M. I., "Computational Geometry for Design and Manufacture," Ellis Horwood Limited, U.K., 1979.
  19. MATLAB User's Guide, MathWorks, Inc.