

폴리머 미세가공을 위한 레이저 어블레이션 모델링

윤경구*, 방세윤#

Modeling of Polymer Ablation with Excimer Lasers

Kyung Koo Yoon* and Se Yoon Bang#

ABSTRACT

To investigate the effects of beam focusing in the etching of polymers with short pulse Excimer lasers, a polymer etching model of SSB's is combined with a beam focusing model. Through the numerical simulation, it was found that in the high laser fluence region, SSB model considering both photochemical and thermal contribution is considered to be suitable to predict the etched hole shape than a simple photochemical etching model. The average temperature distribution into the substance obtained by assuming 1-D heat transfer is found to be fairly similar to the fluence distribution on the ablated surface. The experimental etching data for polymers are used to give material properties for ablation model. The fitted etch depth curve gives a nice agreement with the experimental data.

Key Words : Polymer ablation(폴리머 어블레이션), Excimer lasers(엑사이머 레이저), Photochemical etching(광화학 에칭), Thermal etching(열 에칭)

1. 서론

펄스 형태의 자외선 레이저빔이 폴리머표면에 조사되면, 소재는 표면에서부터 0.1 - 수 μ m의 깊이로 에칭 가공된다. 빔이 조사되지 않은 영역에는 아무런 열적 손상도 없기 때문에 폴리머나 생체 소재를 펄스 엑사이머 레이저로 어블레이션 가공 또는 친공하는 응용분야는 특히 미세가공 또는 전자공학이나 외과 수술의 관점에서 지대한 주목을 받고 있다.^{1,2} 실험적으로 임계에너지 이상의 레이저가 조사되면 어블레이션이 일어나며, 에칭깊이는

펄스 수와 레이저 조사량 (fluence, 단위면적당 에너지)으로 조절 가능한 것으로 알려져 있다. 일반적으로 대부분의 폴리머에서는 이 임계에너지값은 매우 작아서 수 mJ/cm^2 에서 수 백 mJ/cm^2 에 이르며, 레이저의 파장과 소재에 따라 값이 다르다. 최근 들어서는 고출력 레이저의 출현으로 에칭 가공시의 레이저 조사량값은 수십 J/cm^2 에 달하게 되었으며, 이때 에칭깊이는 조사량이 작을 때의 양상과는 다르게 나타나는 것이 관찰되었다.

폴리머에 대한 엑사이머 레이저 어블레이션 효과를 이론적으로 고려하기 위한 연구는 많이 진행

접수일: 2005년 2월 14일; 게재승인일: 2005년 8월 9일

* 한국기계연구원

교신저자: 동국대학교 기계공학과

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

되어 왔으며¹, 대부분의 경우 주된 관심은 레이저 조사량에 따른 에칭 깊이의 계산에 집중되었다. 이러한 모델에는 광화학 에칭(photochemical etching)만을 고려한 것도 있고³, 보다 실제 결과를 잘 설명하기 위해 광화학 에칭과 열 에칭(photothermal etching)을 동시에 고려하는 모델도 있으며^{4,5}, 또는 순수하게 열 에칭과정으로 고려하는 모델도 있다.⁶

한편, 어블레이션 결과는 펄스 에너지, 빔강도 분포, 빔 quality factor, 초점의 위치 등과 같은 빔특성에 큰 영향을 받는다. 빔특성을 고려한 빔 집속(focusing) 모델로 자외선 레이저의 어블레이션 가공에 대한 해석을 시도한 국내의 연구⁷에서는 자외선영역의 짧은 파장에서 수 십 나노초 단위의 짧은 레이저펄스로 폴리머를 어블레이션 가공하는 과정의 모델로 (i)열전달효과를 무시하고 입사에너지가 소재의 증발제거에 전부 사용되는 것으로 간주하고, (ii)광화학 에칭에 의한 어블레이션 과정만 고려하는 Jellinek과 Srinivasan 모델³ (이하 JS 모델로 칭함)을 적용해, (iii)빔의 형상, 빔 집속효과, 펄스에너지를 변화가 소재의 가공 깊이 및 가공형상에 미치는 영향을 예측할 수 있는데 주안점을 두었다.

그러나 앞에서 지적한 바와 같이 레이저 조사량이 커지면($H > 1J/cm^2$) 가공깊이가 커지는 현상이 광화학적인 모델만으로는 충분히 설명되지 않는다. 이를 보완하기 위해 Srinivasan 등⁴은 어블레이션 과정에 광화학 에칭과 열 에칭 효과를 같이 감안한 모델을 소개하였다. 이때 모델에 사용되는 소재에 따른 물성치는 실험결과로부터 곡선 맞춤(curve fitting)에 의해 구하게 되며, 복잡하지 않으면서도 비교적 간단하게 실제결과를 잘 예측해주는 것으로 보고되고 있다.⁴

본 연구에서는 기존의 연구⁷를 확장해 어블레이션 모델로 광화학 에칭과 열 에칭 효과까지 추가적으로 감안한 Srinivasan-Smrtic-Babu의 모델⁴ (이하 SSB 모델로 칭함)을 도입하고, 빔의 형상, 빔 집속효과, 펄스에너지를 변화가 소재의 가공 깊이 및 가공형상에 미치는 영향을 예측할 수 있는데 주안점을 두었다. 또한 대표적으로 활용되는 폴리머 소재 - Pellethane Biopolymer와 Polyethylimide - 를 선정해 국내에서 레이저 조사량에 따른 에칭 깊이의 실험 결과를 확보하였으며, 이 데이터로부터 중요한 물성치를 도출해 모델의 주요 입력 변수로 활용하였다. 가공 형상에 대한 계산 결과는 JS 모델을

사용한 선행 연구 결과와 차이점을 비교해 보았다.

2. 모델링

2.1 어블레이션 모델링

빔 집속 모델에 대해서는 앞에서 소개한 논문⁷에 정리되어 있으므로, 본 논문에서는 열 에칭 효과까지 감안해 보완된 모델에 대해 중점적으로 정리하였다.

SSB 모델에 의하면 펄스당 에칭 깊이, l_f 는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 즉,

$$l_{f, total} = l_{f, photo} + l_{f, thermal} \\ = \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{H}{H_{TR}}\right) + A_1 \exp\left(\frac{-E_1}{RT}\right) \quad (1)$$

여기서 H : 펄스당 레이저조사량(J/cm^2)
 H_{TR} : 임계 레이저 조사량 (J/cm^2)
 β : 빔 흡수계수 ($1/cm$)
 A_1 : effective frequency factor ($\mu m/pulse$)
 E_1 : 활성화 에너지 (activation energy)
 T : 온도 (K)

위의 식중 첫 번째 항은 광자(photon)의 침투 깊이에 대해서 Beer의 법칙 형태를 가정해 얻어진 광화학 에칭 깊이이며, 두 번째 항은 활성화 에너지 E_1 의 열에 의해 활성화된 반응률로 표시되는 열 에칭 깊이이다.

즉 이 모델에서는 열에 의한 에칭 깊이를 0차의 반응식으로 나타내는 방법을 제시하고 있으며, 이 반응상수는 Arrhenius의 관계식으로 표시되는 온도 의존성을 갖는다. 만약 깊이 β^1 까지의 소재의 층 내부에서 초과 에너지 $H-H_{TR}$ 이 열로 변환되는 것으로 간주하면;

$$H - H_{TR} = \rho C_p l_{f, photo} \Delta T \quad (2)$$

여기서 ρ 는 밀도, C_p 는 열용량(J/gK)이다. (1)식의 첫 번째 항과 (2)식을 조합하면,

$$\Delta T = \frac{H - H_{TR}}{\rho C_p} \frac{\beta}{\ln(H/H_{TR})} = T - T_0 \quad (3)$$

여기서 T_0 는 주변 온도이며, $T \gg T_0$ 으로 가정하면, (1)식은 다음과 같이 레이저 조사량의 함수 형태로 쓸 수 있다.

$$l_{f, total} = \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{H}{H_{TR}}\right) + A_1 e^{\left(\frac{-E^* \rho C_p}{R\beta} \ln\left(\frac{H}{H_{TR}}\right)\right)}$$

$$\approx \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{H}{H_{TR}}\right) + A_1 e^{\left(\frac{-E^*}{\beta} \frac{\ln(H/H_{TR})}{H}\right)} \quad (4)$$

여기서 고려하는 레이저 조사량은 $H \gg H_{TR}$ 이므로 두 번째 항의 수식중의 $H - H_{TR} \approx H$ 로 쓸 수 있으며, E^* 는 여러 상수가 결합된 유효 활성화 에너지값(kJ/cm³)이다. (4)식을 모델에서 이용하기 위해서는 실험으로 얻은 에칭깊이로부터 필요한 변수의 값 β , E^* , A_1 을 곡선 맞춤에 의해 구해야 한다.

이 식(4)는 여러 가지의 고분자 소재에 대해 특히 레이저 조사량이 높은 영역에서의 경험적인 에칭율(펄스당 에칭 깊이)을 잘 나타내 주고 있다. 식을 살펴보면 열에 의한 에칭 깊이 $l_{f, thermal}$ 은 레이저 조사량 H 가 증가함에 따라 제한값 A_1 에 도달하고, 광화학적인 에칭깊이 $l_{f, photo}$ 는 레이저 조사량이 증가함에 따라 매우 느린 로그함수 형태로 증가한다. Polyimide (PI)의 경우 248nm의 파장에서 $\beta=1.73 \times 10^5 \text{cm}^{-1}$, $H_{TR}=0.090 \text{J/cm}^2$, $E^*=207.6 \text{kJ/cm}^3$, $A_1=0.95 \mu\text{m}$ 로 보고되고 있으며,⁴ Fig. 1에 이 값을 사용해 계산한 레이저 조사량에 대한 펄스당 에칭 깊이를 보인다. 위의 그림은 x-축에 레이저 조사량 $H(\text{J/cm}^2)$ 을 실제 척도로, y-축에는 펄스당 에칭깊이(μm)를 보여주며, 아래 그림은 x-축만 로그 값으로 나타내 다시 그린 것이다. 그림에서 $l_{f, photo}$ 로 표기된 부분이 광화학 에칭만 고려한 JS 모델로 예측되는 부분이고, $l_{f, thermal}$ 로 표기한 곡선은 레이저 조사량이 큰 영역에서 추가적으로 나타나는 열 에칭효과를 의미한다. 두 가지 에칭 효과를 같이 고려한 총 에칭깊이 $l_{f, total}$ 곡선이 본 고에서 사용할 SSB 모델에 의한 에칭 깊이가 계산 결과이다. 대략 1J/cm^2 부근까지는 광화학적인 에칭이 주된 작용을 하지만, 그 이상 10^2J/cm^2 영역에서는 열에 의한 에칭 효과가 급격히 나타나게

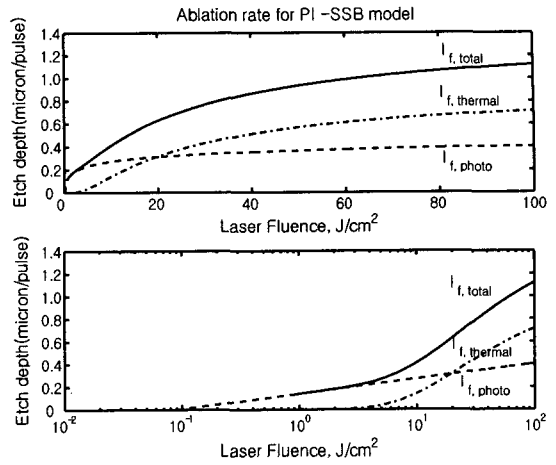


Fig. 1 Plot of etch depth vs. laser fluence for PI

된다. 즉 이 영역에서는 JS 모델로는 실제의 에칭 깊이를 과소 예측하게 된다. 레이저 조사량이 그 이상 10^3J/cm^2 부근에 이르게 되면 열에 의한 에칭은 한계에 이르게 되고 다시 광화학적인 에칭이 주로 작용하게 된다. 물론 대부분의 실험영역은 10^{-1} 부터 10^1J/cm^2 에 이르게 되므로 JS 모델만으로는 한계가 있음을 알 수 있으며, SSB 모델에 의해서 그 변화를 잘 예측할 수 있음을 확인할 수 있다.

2.2 온도 분포의 계산 모델

한편 온도분포를 구하기 위해서는 유사하지만 접근 방법이 다소 다른 D'Couto et al.⁶의 모델을 참고하였다. 이 모델은 기존의 SSB 모델과 유사하게 레이저가 조사될 때 광자의 침투 깊이를 Beer의 법칙을 이용해 나타내지만, 전체의 과정이 열 에칭에 의한 것으로 간주한다. 즉,

$$I_f = \frac{1}{\beta_{eff}} \ln\left(\frac{H}{H_{TR}}\right) \quad (5)$$

깊이 방향으로의 1차원 열전달만을 고려하면, 깊이 방향으로의 온도분포는 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$T(z) = \frac{\beta_{eff} H}{C_p} e^{-\beta_{eff} z} \quad (6)$$

여기서, β_{eff} = 유효 흡수 계수
 C_p = 비열용량 (specific heat capacity)
 z = 이동하는 어블레이션 표면으로부터
 측정된 위치

이때 평균온도 T_{av} 는 (6)식을 표면부터 에칭깊이 l_f 까지 적분함으로써 얻을 수 있다. 즉,

$$T_{av} = \frac{1}{l_f} \int_0^{l_f} T(z) dz = \frac{\beta_{eff} H}{C_p l_f} \int_0^{l_f} e^{-\beta_{eff} z} dz$$

$$= \frac{H}{C_p l_f} [1 - e^{-\beta_{eff} l_f}] \quad (7)$$

다시 정리하면 최종적으로, 다음과 같이 레이저 조사량 H 의 함수 형태로 식을 얻는다.

$$T_{av} = \frac{\beta_{eff}}{C_p} \frac{H - H_{TR}}{\ln(H/H_{TR})} \quad (8)$$

현재 고려하고 있는 모델은 소재와 빔특성이 정해지면 물성치의 값은 일정하다. 따라서 식(8)에 의한 소재의 위치 (x,y) 에서의 내부 평균온도분포 $T_{av}(x,y)$ 는 그 위치에서의 빔강도 $H(x,y)$ 에 비례하게 된다. 즉;

$$T_{av}(x,y) \propto \frac{H(x,y) - H_{TR}}{\ln[H(x,y)/H_{TR}]} \quad (9)$$

한 가지 유의할 점은 여기서 사용하는 E^* , β_{eff} 의 절대값 자체는 물리적 의미를 찾기 곤란하며, 단지 실험값을 곡선 맞춤해 주는 계수의 역할을 하는 것이라는 점이다. 따라서 식 (8), (9)에 의해 얻어지는 온도의 분포 역시 절대값보다는 위치에 따른 상대적인 분포를 파악하는 데 주안점을 두어야 할 것이다.

최종적으로 평균온도 T_{av} 의 무차원화된 값은;

$$\theta = \frac{T_{av}}{T_{av, TR}} = \frac{H/H_{TR} - 1}{\ln(H/H_{TR})} \quad (10)$$

한 가지 유의할 점은 $H=0$ 일때 (6), (7)식으로부터 $T=T_{av}=0$ 이며 따라서 $\theta=0$ 이고, $H=H_{TR}$ 에서는

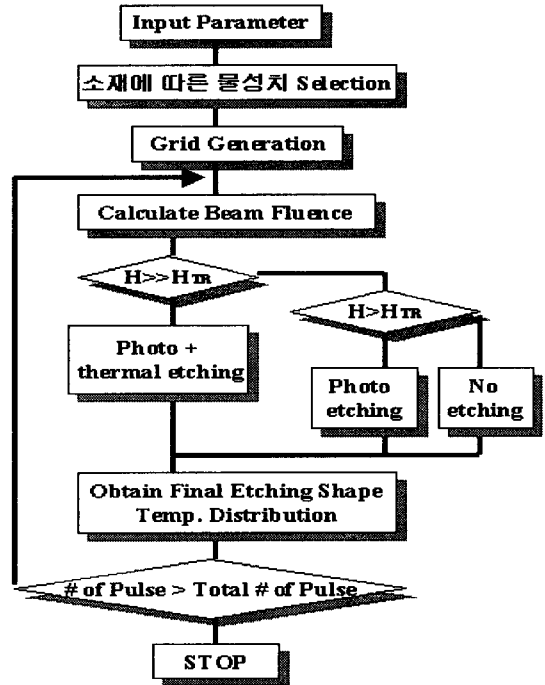


Fig. 2 Flow chart of the program

$T_{av}=T_{av,TR}$ 이며 따라서 $\theta=1$ 이 된다. 실제로 계산시에는 $H \gg H_{TR}$ 로 간주될 수 있는 영역 (프로그램에서는 $H \geq 10 * H_{TR}$ 인 영역)에서만 위의 식을 이용해 θ 를 계산하고, 그 외의 영역은 $\theta=0$ 으로 간주하였다.

수치계산을 통해 답을 구하기 위한 전체적인 프로그램의 구성은 선행 연구 논문⁷에 정리되어 있다. 임의의 형상을 갖는 소재의 임의의 위치에서의 입사에너지량 H 를 알면 식 (4)에 의해 에칭 깊이를 알 수 있으며, 평균온도의 상대적인 값은 식 (10)에 의해 계산한다. 전체적인 프로그램의 구성을 Fig. 2에 보인다. 레이저 조사량이 H_{TR} 보다 충분히 큰 영역에서는 열 에칭까지를 고려해 에칭 깊이를 계산하고, H_{TR} 보다 좀 크다고 간주되는 영역에서는 광화학 에칭만 고려해 에칭 깊이를 구하였다.

3. 실험 데이터로부터 소재 물성치 도출

실험을 통해 얻을 수 있는 데이터는 레이저 조사량 H (J/cm^2) 와 에칭 깊이 l_f (μm), 에칭이

시작되는 임계 레이저 조사량 H_{TR} (J/cm^2)이다. 실험 데이터를 SSB 모델의 식 (4)로 나타내기 위해서는 변수의 값 β , E^* , A_1 을 곡선 맞춤에 의해 구해야 하며, 다음의 단계를 거친다.

- (1) 주어진 데이터로부터 에칭이 시작되는 임계 레이저 조사량 $H_{TR}(J/cm^2)$ 을 알 수 있다. 정확하게 에칭이 시작되는 값을 에칭결과와 측정에서 구하는 것은 쉽지는 않다.
- (2) 흡수계수 β 의 값을 구하기 위해서는 (4)식의 첫 번째 항을 이용하고, 실험 데이터중 경향이 하나의 곡선으로 표현될 수 있는 영역까지를 이용한다. H 와 l_f 를 준로그 그래프에서 직선으로, 즉 $\ln H$ 와 l_f 를 직선식으로 피팅하기 위해서는 범용의 최소자승(least squares fitting) 알고리즘을 이용할 수도 있으며, 또는 간단히 아래와 같이 유도할 수도 있다.

$$l_f = \frac{1}{\beta} \ln(H/H_{TR}) = \frac{1}{\beta} \ln H - \frac{1}{\beta} \ln H_{TR} \quad (11)$$

알고 있는 H_{TR} 값을 이용해 $\ln(H/H_{TR})$ vs. l_f 를 직선으로 피팅시킬 때 오차를 최소화시키는 기울기값 ($1/\beta$)을 구하면 된다.

- (3) 열 에칭, 즉 (4) 식의 두 번째 항과 관련된 변수의 값을 구하기 위해 양변에 \ln 을 취하면;

$$\ln l_{f, thermal} = \ln A_1 - E^* \frac{\ln(H/H_{TR})}{\beta H} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} l_{f, thermal} &= l_{f, measured} - l_{f, photo} \\ &= l_{f, measured} - \frac{1}{\beta} \ln(H/H_{TR}) \quad (13) \end{aligned}$$

이미 알고 있는 $\beta(1/cm)$, $H_{TR}(J/cm^2)$ 값과 측정된 에칭깊이 $l_{f, measured}$ (μm)를 이용해 (13)식으로부터 열 에칭깊이를 계산한다. 이때 열 에칭 관련식은 $H \gg H_{TR}$ 을 만족해야 하므로, 최소한 H_{TR} 보다 order가 하나 정도 큰 영역부터 고려하는 것이 바람직하다.

카테타 재료로 사용되는 폴리머 소재를 대상으로 국내 연구기관에서 실험한 데이터를 이용해

Table 1 Properties fitted from experimental data

Polymer	λ (nm)	$\beta(1/cm)$ $\times 10^5$	H_{TR} (J/cm^2)	E^* (kJ/cm^3)	A_1 (μm)
Pellethane Biopolymer	248	0.3607	0.030	-	-
Polyethylimide	248	1.1121	0.030	87.77	2.0807

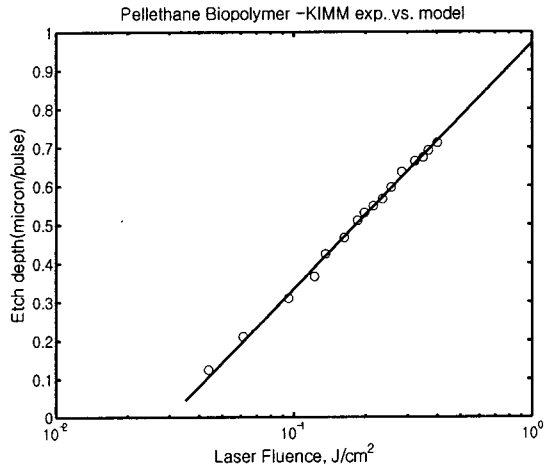


Fig. 3 Plot of etch depth vs. laser fluence for Pellethane Biopolymer

변수 값을 구하면 Table 1과 같다. 여기서 광화학 에칭의 데이터는 $H \leq 0.4 J/cm^2$, 열 에칭의 피팅 데이터는 $H \geq 0.4 J/cm^2$ 을 이용하였다. Pellethane Biopolymer의 경우에 레이저 조사량에 따른 펄스당 에칭 깊이의 변화를 Fig. 3에 보인다. 피팅한 결과는 실선으로 보이며, 작은 원으로 표시한 실험 데이터와 잘 맞는 것을 볼 수 있다. 실험이 비교적 레이저 조사량이 작은 영역에서 이루어져 열 에칭까지 고려할 필요없이 광화학 에칭만 고려해도 데이터와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

Polyethylimide에 대해서는 Fig. 4에 보이며, 구해진 변수를 이용해 예측한 곡선이 실험 결과를 잘 나타냄을 확인할 수 있다. 특히 단순히 광화학 에칭만을 고려한 JS 모델로는 예측하기 불가능한 고에너지 조사량에서의 펄스당 에칭 깊이 증가현상을 SSB 모델로 잘 예측할 수 있음을 명확하게 확인할 수 있다. 향후 다른 폴리머 소재에 대해서도 자외선 펄스 레이저 어블레이션 실험으로 데이

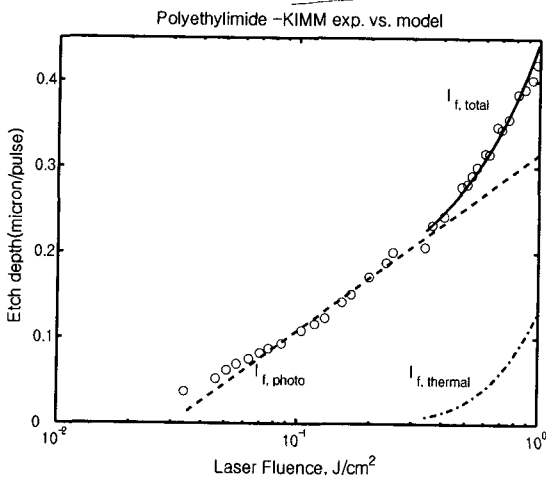


Fig. 4 Plot of etch depth vs. laser fluence for polyethylimide

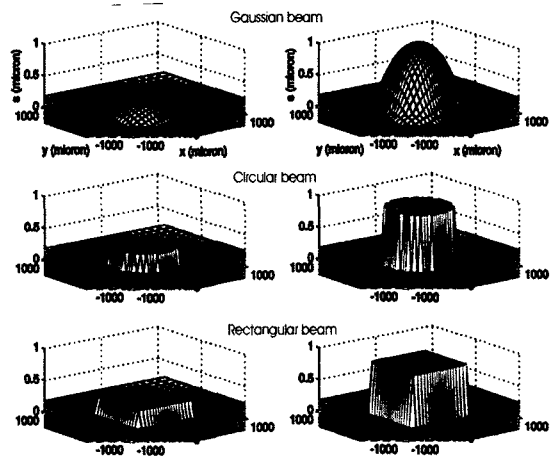
터를 확보할 수 있으면, 모델에 필요한 소재의 물성치는 위에 정리한 방식으로 구할 수 있다.

4. 계산 결과 및 검토

계산은 특히 레이저 조사량이 높은 영역에서 펄스당 에칭 깊이가 증가하는 효과를 중점적으로 살펴 보고자 하였다. 선행 연구논문⁷에서 사용한 JS 모델을 이용한 결과와 열 에칭효과까지 감안한 SSB 모델을 이용한 결과를 비교해, 보다 가공 결과를 잘 예측할 수 있는 모델을 확립하는데 주안점을 두었다. 전형적인 가공조건에 대해 - 소재는 PI(polyimide), 펄스에너지=0.1J, 초점의 위치는 소재의 표면(W=0 mm), beam quality factor $M^2=1$, 가우시안빔 또는 원형빔의 $w_0=500\mu\text{m}$, 사각형빔의 $a_0=b_0=1000\mu\text{m}$ - 1 pulse의 빔을 조사하였을 때의 가공깊이를 구하였다. PI의 물성치는 Fig. 1에 보인 값을 사용하였다. 특히 다음의 조건에 대한 결과를 비교해 영향을 파악하고자 하였다.

- (i) 가우시안빔과 사각형빔
- (ii) 집속빔에서의 빔발산의 영향
- (iii) 펄스에너지의 증가에 의한 영향

먼저 기본조건으로 1 pulse를 조사하였을 때의 가공형상은 Fig. 5와 같다. 그림의 왼쪽은 JS 모델



(a) JS model (b) SSB model

Fig. 5 Comparison of etched hole shape between JS and SSB model (W=0mm, $M^2=1$, pulse energy = 0.1J)

을 적용할 때의 에칭 깊이 $s(x,y)[\mu\text{m}]$ 의 분포를, 오른쪽은 SSB 모델 적용시의 에칭 깊이를 나타내며, 맨 위는 가우시안빔, 가운데는 원형빔, 아래는 사각형빔이 입사될 경우의 계산결과이다. 펄스에너지가 0.1J일 경우 레이저 조사량의 최대값은 가우시안빔에서는 $25\text{J}/\text{cm}^2$, 원형빔에서는 $12.7\text{J}/\text{cm}^2$, 사각형빔에서는 $10.0\text{J}/\text{cm}^2$ 으로 열에 의한 에칭이 중요해지며, 가공결과도 JS 모델에 의한 예측보다 최대 200% 이상 (최대 가공깊이는 가우시안빔에서는 $0.326\mu\text{m}$ 에서 $1.054\mu\text{m}$ 로, 원형빔에서는 $0.286\mu\text{m}$ 에서 $0.882\mu\text{m}$ 로, 사각형빔에서는 $0.272\mu\text{m}$ 에서 $0.812\mu\text{m}$ 로) 증가하게 된다. 즉, 고에너지 조사량의 가공 조건 하에서는 추가적인 열 에칭 효과를 감안한 모델을 적용해야 함을 확인할 수 있다. 또한 빔의 형상이 달라도 펄스에너지는 같으므로, 최대가공깊이는 가우시안빔의 경우에서, 최대가공면적은 사각형빔에서 얻을 수 있다.

이 상태에서 SSB 모델로 계산한 소재 표면에서의 레이저 조사량 $H(x,y) (\text{J}/\text{cm}^2)$ 와 평균온도의 상대분포 $\theta(x,y)$ 를 Fig. 6에 보인다. 왼쪽에 보인 레이저 조사량 분포는 JS 모델에서도 동일한 값으로 나타난다. 선행 연구⁷에서 본 바와 유사하게 원형빔과 사각형빔처럼 레이저 조사량 분포가 일정할 때는 Fig. 6(a)의 빔의 형상과 Fig. 5(b)의 가공형상이 동일하지만, 가우시안빔의 경우는 다소 차이가

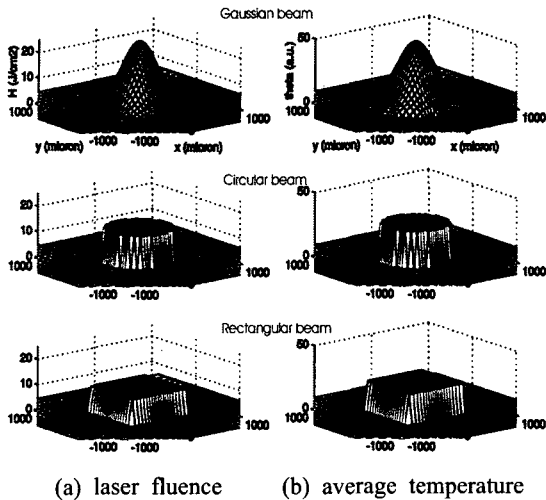


Fig. 6 Effect of beam shape on laser fluence and average temperature (SSB model, $W=0\text{mm}$, $M^2=1$, pulse energy = 0.1J)

나는데, 이것은 가공깊이가 (4)식에 나타낸 바와 같이 H 값의 함수형태에 비례하기 때문이다. 오른쪽의 그림은 평균온도의 상대분포를 나타내며, 왼쪽의 레이저 조사량의 분포와 비교해 스케일만 다르고 모양은 거의 유사한 형태를 보인다. 이 값은 식(10)을 이용해 계산되며, 프로그램에서는 $H \geq 10 * H_{TR}$ 인 위치에서 계산하고, 그 이외의 지역에서는 $H=0$ 일 때의 값(즉 $\theta=0$)으로 간주하였으므로, 가우시안빔의 경우에 빔의 가장자리부근에서는 다소 매끄럽지 않은 형태를 보일 수 있다. 일정한 빔강도 분포의 경우에는 빔이 조사되는 영역에서는 일정한 평균온도를 보이게 된다. 따라서 평균온도의 분포는 거의 레이저 조사량의 분포와 유사한 형태가 되므로 특별히 따로 고려할 필요는 없을 것으로 판단된다.

빔의 발산이 이상적인 가우시안빔과 같은, 즉 $M^2=1.0$ 의 값을 갖는 경우에는 이미 선행 연구⁷에서 밝혔듯이 가우시안분포의 빔 또는 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. 초점면이 소재 표면에 위치할 때는 M^2 값이 1, 10, 100으로 증가해도 가공결과에는

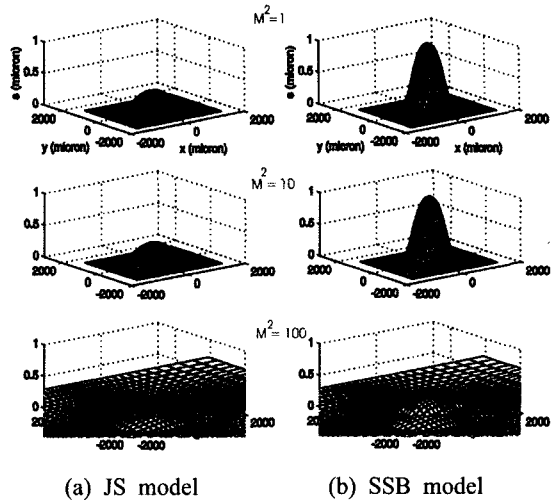


Fig. 7 Effect of beam quality factor M^2 on etched hole shape (Gaussian beam, $W=100\text{mm}$, pulse energy = 0.1J)

차이가 없을 것으로 예측할 수 있으며, 계산으로 확인할 수 있었다. 그러나 Fig. 7에 보이는 바와 같이 $W=100\text{mm}$ 의 위치에 초점이 있을 때는 M^2 값이 1, 10, 100으로 증가하면 SSB 모델로 예측한 최대 깊이는 $1.054\mu\text{m}$, $1.033\mu\text{m}$, $0.365\mu\text{m}$ 로 감소한다. 그림의 왼쪽은 JS 모델을 적용할 때의 에칭 깊이의 분포를, 오른쪽은 SSB 모델 적용시의 에칭 깊이를 나타내며, 맨 위는 $M^2=1$, 가운데는 $M^2=10$, 아래는 $M^2=100$ 일 경우의 계산결과이다. M^2 값이 커질수록 가공면적은 점차 넓어지고 가공깊이는 감소하며, JS 모델에 비해 SSB 모델에서 220% ~ 90%의 예측 깊이의 증가를 볼 수 있다. 따라서 M^2 값이 1에 가까운 좋은 레이저의 경우 초점의 정렬에 별로 영향을 받지 않지만, M^2 값이 커질수록 초점의 정렬에 유의해야 원하는 가공결과를 얻을 수 있을 것으로 추정되며, 이때 보다 정확한 결과를 예측하기 위해서는 본고에서 보인 바와 같이 열 에칭을 같이 감안한 SSB 모델의 적용이 적합할 것이다.

Fig. 8에는 펄스에너지 0.1J의 사각형빔을 사용할 경우의 결과를 보인다. Fig. 7과 유사한 변화를 보여주고 있으며, M^2 값이 1, 10, 100으로 증가하면 SSB 모델로 예측한 최대깊이는 $0.812\mu\text{m}$, $0.783\mu\text{m}$, $0.179\mu\text{m}$ 로 감소한다. $0.272\mu\text{m}$, $0.267\mu\text{m}$, $0.134\mu\text{m}$ 의 깊이를 예측하는 JS 모델에 비해 SSB 모델에서 200% ~ 34%의 예측 깊이의 증가를 볼 수 있다.

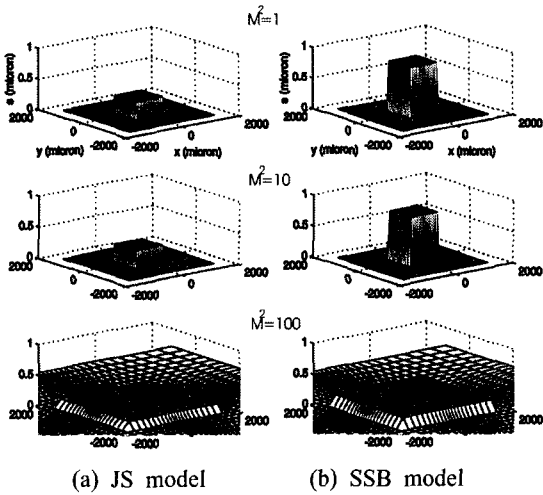


Fig. 8 Effect of beam quality factor M^2 on etched hole shape (Rectangular beam, $W=100\mu\text{m}$, pulse energy = 0.1J)

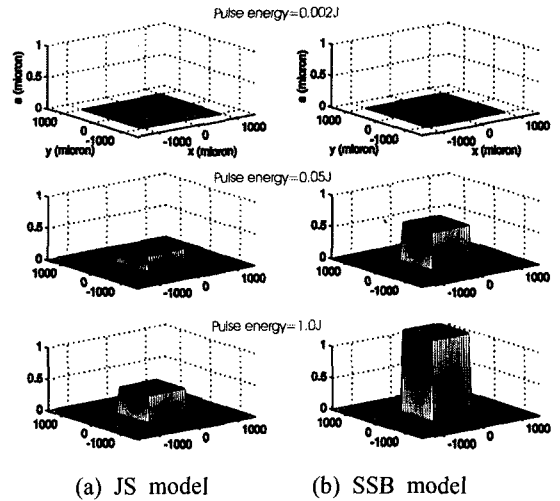


Fig. 10 Effect of pulse energy on etched hole shape (Rectangular beam, $W=0\text{mm}$, $M^2 = 1$)

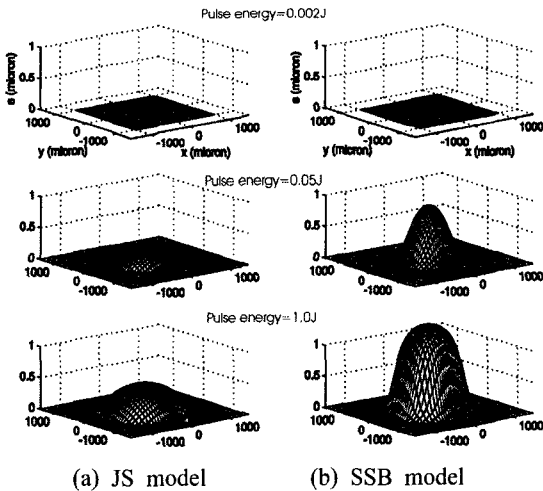


Fig. 9 Effect of pulse energy on etched hole shape (Gaussian beam, $W=0\text{mm}$, $M^2 = 1$)

펄스에너지의 증가는 레이저 조사량의 증가를 가져오게 되며, SSB 모델을 이용함에 따라 JS 모델의 예측과 비교해 펄스당 가공 깊이의 현저한 차이를 볼 수 있다. Fig. 9에 가우시안빔의 펄스에너지를 0.002J, 0.05J, 1.0J로 급격히 증가시키기에 따른 가공깊이의 변화를 보인다. 오른쪽에 보인 SSB 모델의 최대 가공깊이는 $0.100\mu\text{m}$ (왼쪽의 JS 모델: 0.100

μm), $0.882\mu\text{m}$ (JS: $0.286\mu\text{m}$), $1.374\mu\text{m}$ (JS: $0.459\mu\text{m}$)로 증가하고 있다. 펄스에너지가 0.002J에서는 소재 표면에서의 레이저 조사량이 낮아서 열 에칭의 효과는 나타나지 않지만, 펄스에너지가 0.05J 이상으로 급격히 증가해 레이저 조사량이 특정한 영역을 넘어서면 열 에칭의 부수적 효과를 가져오는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 1 펄스에 대한 것으로 실제 작업 조건처럼 다량의 펄스를 조사하는 경우에는 펄스당 에칭깊이 증가의 효과가 누적되어 최종 가공 결과는 크게 달라질 수 있음을 보여준다. 정사각형의 빔에 대해서도 Fig. 10에 보이는 바와 같이 유사한 경향을 보인다.

5. 결론

본 연구에서는 레이저 조사량이 높은 영역에서 펄스당 에칭 깊이가 증가하는 현상을 설명할 수 있도록 광화학 에칭과 열 에칭을 동시에 감안해 주는 SSB의 고분자 에칭 모델과 빔 집속 모델을 결합해, 짧은 펄스의 엑사이머 레이저로 고분자를 어블레이션 가공할 때 빔변수의 영향을 조사하였다. 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 레이저 조사량이 높은 경우까지 포함하기 위해서는, 열 에칭 효과까지 감안하는 SSB 모델을 적용해야 하며, 본 연구의 계산조건하에서는 최대 200%까지 펄스당 가공 깊이의 증가효과를

보였다.

- (2) 단순한 1차원 열전달만을 고려해 계산한 가공 재료 내부의 평균 온도분포는 표면의 레이저빔의 조사량 분포와 유사한 형태를 보인다.
- (3) 빔의 발산이 이상적인 가우시안빔에 비해 커질수록 가공 결과는 초점의 정렬 상태에 영향을 받는다.
- (4) 폴리머 소재에 대한 예칭 실험결과로부터 모델에서 사용되는 소재의 물성치를 도출하였으며, 실험데이터를 잘 예측할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. Duley, W. W., "UV Lasers - Effects and Applications in Materials Science," Ch. 5., Cambridge University Press, 1996.
2. Miller, J. C., "Laser Ablation- Principles and Applications," Ch. 5, Springer-Verlag, 1994.
3. 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, pp. 3048-3051, 1984.
4. 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.
5. Babu, S. V., D'Couto, G. C. and Egitto, F. D., "Excimer Laser Induced Ablation of Polyetheretherketone, Polyimide, and Polytetrafluoroethylene," J. Appl. Phys., Vol. 72, No. 2, pp. 692-698, 1992.
6. 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.
7. Bang, S. Y., "Effects of Beam Parameters on Excimer Laser Ablation," J. of KSPE, Vol. 22, No. 7, pp. 38-46, 2005.