



레이저 홈가공에서 편광빔의 다중반사 효과

방 세 윤* · 성 관 제*

*동국대학교 공과대학 기계공학과

Effects of Multiple Reflections of Polarized Beam in Laser Grooving

Se-Yoon Bang* and Kwan-Je Seong*

*Dept. of Mechanical Engineering, Dongguk University, Seoul 100-715, Korea

Abstract

A numerical model for multiple reflection effects of a polarized beam on laser grooving has been developed. The surface of the treated material is assumed to reflect laser irradiation in a fully specular fashion. Combining electromagnetic wave theory with Fresnel's relation, the reflective behavior of a groove surface can be obtained as well as the change of the polarization status in the reflected wave field. The material surface is divided into a number of rectangular patches using a bicubic surface representation method. The net radiative flux for these patch elements is obtained by standard ray tracing methods. The changing state of polarization of the electric field after reflection was included in the ray tracing method. The resulting radiative flux is combined with a set of three-dimensional conduction equations governing conduction losses into the medium, and the resulting groove shape and depth are found through iterative procedures. It is observed that reflections of a polarized beam play an important role not only in increasing the material removal rate but also in forming different final groove shapes. Comparison with available experimental results for silicon nitride shows good agreement for the qualitative trends of the dependence of groove shapes on the electric field vector orientation.

* Corresponding author : sybang@dgu.edu

(Received March 17, 2005)

Key Words : Multiple reflections, Polarized beam, Laser grooving, Ray tracing

1. 서 론

선형 편광된 레이저빔을 이용한 재료의 홈가공(grooving)에서는, 전기장의 방향, 즉 편광 벡터의 방향이 가공되는 홈의 최종 형상과 재료 제거율에 큰 영향을 미친다^{1,2)}. 따라서 일반적인 절단 가공에서는 이러한 선형 편광된 빔의 주사 방향의 영향을 피하기 위해 원형 편광 빔 또는 편광을 제거한 빔을 사용하게 된다. 이와는 대조적으로 빔반사도가 입사각에 따라 달라지는 특성을 적극 이용하기도 하는데, 선형 편광빔의 브루스터 각도에서의 높은 흡수율을 이용해 레이저 표면 처리에서 커플링 효율을 증진하는 방안이 발표된 바 있다^{3,4)}. 빔과 장 10.6 μm 에서 질화규소의 수직 편광빔 (편광방향이

입사면에 수직인 빔) 및 평행 편광빔 (편광방향이 입사면에 평행한 빔)에 대한 반사도(ρ_{\perp} 및 ρ_{\parallel})가 입사각에 따라 변화하는 형태를 실험적으로 관찰한 논문⁵⁾에 의하면, 수직 편광빔의 반사도는 입사각의 전 영역에서 크게 나타나는데 비해, 평행 편광빔의 반사도는 입사각이 90°에 가까운 영역에서는 작아진다. 따라서, 입사면에 평행하게 편광된 입사광의 흡수율 α_{\parallel} 는 커지게 되며 가공효율이 증진되게 된다. 이는 레이저 가공에서 상당히 중요한 결과를 가져오게 되어 재료 제거율이 편광 방향과 시편의 이송방향 사이의 배치에 의존하게 된다. 최적의 커플링은 입사되는 레이저빔의 전기장 벡터가 입사면내에 위치할 때 일어난다. 이 현상은 절단율이 전기장 벡터 E 와 절단 속도 u 가 상대적으로 배치된 형태에 좌우됨을 의미하고 있다.

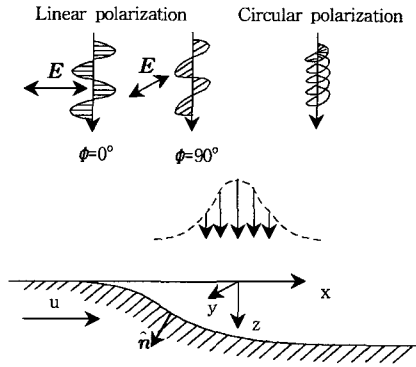


Fig. 1 Orientation angle between electric field and scanning direction

Fig. 1에 전기장 벡터와 이송 방향과의 상대적인 각도 및 선형 편광과 원형 편광의 상태를 나타내 보인다. 전기장이 한 방향으로만 진동하는 빔이 선형 편광빔이며 이때 전기장의 진동방향이 이송방향과 일치하면 배치각도 ϕ 는 0° , 수직하면 ϕ 는 90° 로 표기하기로 한다. 평행 편광상태에서의 흡수율 α_{\parallel} 는 입사각에 강하게 의존하며 입사각이 90° 에 가까운 영역에서 최대값에 도달하므로 선형 편광빔에 의한 흡수 및 절단작용을 통해 절단부 측면이 경사지게 되는 결과를 초래할 수 있다. 원형이나 곡선경로를 따라 절단할 때 이러한 효과가 잘 드러난다. 실제 상황에서 종종 마주치게 되는 이러한 빔편광의 효과를 더욱 잘 이해하기 위해서는 빔편광 상태를 모델에 포함해야 한다.

편광빔에 의한 재료의 제거 과정은 종횡비(aspect ratio)가 1보다 큰 깊은 홈이나 반사도가 높은 소재의 경우에는 더욱 강하면서도 복잡해지는데, 이때는 다중 반사와 빔의 유도 효과도 중요하게 된다. Wallace^{6,7)}는 홈가공 실험을 통해 가공된 홈의 단면이 심하게 휘어진 형태가 많은 것으로 보고하였으며, 홈 내부에서의 부분 편광된 레이저빔의 유도 효과에 기인하는 것으로 판단하였다. 그는 질화규소에 대한 레이저 홈가공 실험을 통해 다음과 같은 편광 효과를 관찰하였다. 즉, 배치각도, ϕ 가 0° 일 때는 대칭형상의 홈이 좁고 깊게 가공된다. ϕ 가 90° 일 때는 대칭형상의 홈이 보다 넓고 얕게 가공된다. 0° 와 90° 사이의 각도에서는 비대칭형상의 구부러진 홈이 가공된다.

저자는 선행 연구에서 편광되지 않은 빔으로 세라믹 소재를 증발 제거하는 홈가공에서 다중 반사 효과를 고려하였는데, 난반사⁸⁾ 또는 정반사 효과⁹⁾에 의해 재료의 제거율이 증가하고 깊은 홈이 가공되며 중앙부위는 보다 편평해지고 절단 폭도 균일해짐을 보였다. 비록 난반사와 정반사에서 빔 커플링 메커니즘에는 분명한 차이가 있지만, 최종적인 홈의 형상은 비슷하게 나타나

는 것이 관찰되었다. 난반사의 경우에는 정반사의 경우에 비해 중앙부가 더 편평하고, 깊은 홈이 생성되는 경향을 보인다. 레이저 절단 및 용접의 경우에 대해 다중 반사 및 빔의 편광효과를 밝히기 위한 이론적인 모델이 여러 연구자에 의해 시도되었다¹⁰⁻¹³⁾. 그러나 삼차원 형상의 소재에 대해 다중 반사 및 빔편광 효과를 고려한 모델은 시도된 바 없다. 이를 밝히기 위해 본 고에서는 조사되는 레이저빔이 대상 소재의 표면에서 거울면에서와 같이 완전한 정반사 형태로 반사하는 것으로 가정하였다. 또한 입사되는 레이저빔의 편광을 고려하여, 빔의 반사도가 단순히 입사각뿐만 아니라 편광상태에도 의존하도록 모델을 구축하였다. 계산 결과 편광된 빔의 반사가 재료 제거율의 증가를 가져올 뿐 아니라 최종 가공된 홈형상에 큰 차이를 야기하는 것이 관찰되었다.

2. 모델링

2.1 레이저 홈가공 모델

레이저빔이 조사되는 상태에서 이송되는 시편의 증발면에 대한 개념도를 Fig. 2에 나타내었으며, 수학적으로 모델링하기 위해 다음과 같은 가정을 도입하였다.

- 1) 시편은 일정한 속도 u 로 이송된다.
- 2) 시편은 일정한 성질을 갖는 등방성 고체로 간주한다.
- 3) 재질은 불투명하며, 레이저빔은 매질 내부로 침투하지 못 한다.
- 4) 고체에서 기체로의 상변화는 증발 온도 T_{ev} 에서 일어난다. 실제의 재료는 상당히 다른 양상을 보일 수도 있으나 가장 중요한 인자가 재료의 제거에 필요한 총 에너지량이라고 가정한다면 현재의 모델로 충분하다.
- 5) 증발된 재료는 입사되는 레이저빔을 방해하지 않으며, 가스의 이온화도 발생하지 않는 것으로 간주한다

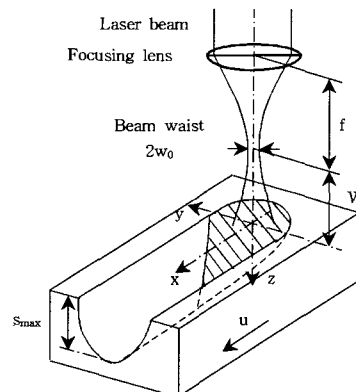


Fig. 2 Laser evaporation setup and coordinate system

다. 가스는 광학적으로 투명하며 액적이나 입자는 없다고 간주한다.

- 6) 전도와 상변화에 의한 열손실에 비해 대류 및 복사에 의한 열손실은 무시할 정도로 작다.
- 7) 소재의 표면에서 레이저빔은 Fresnel의 관계식¹⁴⁻¹⁶⁾에 따라 반사도 $\rho = \rho^s$ 값을 갖는 정반사 형태로 반사된다.

상세한 모델링 과정은 저자의 선행 연구 논문⁹⁾에 정리되어 있으며 간단히 요약하면 다음과 같다. 레이저빔은 연속파 모드(CW)로 작동하며, 유효 반경 $w(z)$ 의 가우시안 출력 분포를 갖는 것으로 가정한다. 유효 반경 및 파면의 곡률반경, $R(z)$, 은 Kogelnik과 Li에 의해 다음과 같은 관계식을 갖는 것으로 보고되었다¹⁷⁾.

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

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

여기서 w_0 는 초점면에서의 유효 반경이고, W 는 렌즈의 초점면과 소재 표면사이의 거리이며 (초점이 소재의 상부에 위치하면 $W > 0$, 초점이 소재 내부에 위치하면 $W < 0$), λ 는 레이저의 파장이다. 레이저빔의 전파 거동을 전자기파의 이론을 적용해 나타낼 수도 있지만, 가느다란 광선이 다발로 모여 이루어져 있는 것으로 간주하면 하나의 광선은 곡률반경 R 의 파면에 수직한 방향을 갖는 벡터로 표현할 수 있다. 레이저빔이 공간을 전파해 갈 때 포함된 에너지는 보존되어야 하므로, 출력 P 의 레이저빔 조사량을 벡터식으로 표현하면,

$$\mathbf{F} = \left[\hat{k} + \frac{(x \hat{i} + y \hat{j})}{\sqrt{R^2(z) - x^2 - y^2}} \right] \frac{F_0 w_0^2}{w^2(z)} e^{-2(x^2 + y^2)/w^2(z)} \quad (2)$$

여기서, $F_0 (= 2P / \pi w_0^2)$ 는 초점면에서 빔중앙의 에너지밀도이다. 이상의 조건하에서 물성치가 일정한 경우의 열전달 문제는 다음과 같은 무차원 과도 형태로 표현할 수 있다⁹⁾.

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + U \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \zeta^2} \quad (3a)$$

$$\xi \rightarrow \pm \infty, \eta \rightarrow \pm \infty, \zeta \rightarrow +\infty: \Theta = 0; \quad (3b)$$

$$\zeta = S(\xi, \eta, \tau); \quad (3c)$$

$$\overline{\mathbf{H}}(\xi, \eta, \tau) = N_k (-\hat{n} \cdot \nabla \Theta) + (V_n - U \hat{i} \cdot \hat{n}) \frac{N_e}{U}$$

수식에 포함된 무차원 변수는 다음과 같이 정의된다.

$$\xi = \frac{\sqrt{2}x}{w_0}, \eta = \frac{\sqrt{2}y}{w_0}, \zeta = \frac{\sqrt{2}z}{w_0}, \tau = \frac{\alpha_H t}{w_0^2}; \quad (4a)$$

$$S = \frac{\sqrt{2}s}{w_0}, \Theta = \frac{(T - T_\infty)}{(T_{ev} - T_\infty)}, \overline{H} = \frac{H}{F_0} = \frac{\mathbf{F} \cdot \hat{n}}{F_0}; \quad (4b)$$

$$N_e = \frac{\rho_m u h_{ev}}{F_0}, N_k = \frac{k(T_{ev} - T_\infty)}{F_0 w_0}, U = \frac{u w_0}{\alpha_H}; \quad (4c)$$

$$N_\lambda = \frac{\lambda}{\sqrt{2\pi} w_0}, N_w = \frac{\sqrt{2}W}{w_0}, V_n = \frac{v_n w_0}{\alpha_H} \quad (4d)$$

여기서 ρ_m 은 소재의 밀도, c 는 열전도도, $\alpha_H = k / (\rho_m c)$ 는 열확산도(thermal diffusivity), h_{ev} 는 제거열(즉, 일정량의 고체를 제거하는데 소요되는 에너지), s 는 해당 위치의 홈의 깊이를 나타낸다. 물리적으로 N_e 는 최대 흡수되는 레이저 에너지에 대한 재료의 증발제거에 필요한 에너지의 비를, N_k 는 최대 흡수되는 레이저 에너지에 대한 전도 열손실의 비를, U 는 소재의 열확산도에 대한 레이저빔의 이송 속도의 비를 의미한다. N_λ 는 빔이 발산되는 정도, N_w 는 소재 표면으로부터 초점의 위치를 나타내는 무차원값이다. V_n 는 레이저에 대해 소재의 증발면이 가지는 과도적인 속도를 의미하는 무차원값이다.

경계 조건을 나타내는 식 (3c)는 흡수된 레이저 에너지가 전도에 의한 열손실과 소재의 증발에 사용되는 것을 의미한다. 준 정상상태에 이르게 되면, 증발면의 후퇴 속도, V_n 은 0이 되고 정상 상태의 증발에 사용되는 에너지는 $-N_e(\hat{i} \cdot \hat{n})$ 이 된다. 또한 정상상태에서 증발이 일어나는 영역에서는 $\hat{i} \cdot \hat{n} < 0$ 이 성립한다.

가공되는 홈의 형상은 다음 관계식으로 구할 수 있다.

$$\Theta = 1, \text{ if } V_n - U \hat{i} \cdot \hat{n} > 0 \quad (5a)$$

$$S(\xi, \eta, \tau = 0) = 0 \quad (5b)$$

식 (5a)는 증발이 일어나는 동안에는 표면 온도가 증발 온도를 가짐을 의미한다.

홈의 표면에 조사되는 총 조사량은 다음과 같다.

$$\overline{H}(\xi, \eta, \tau) = \overline{H}_0(\xi, \eta, \tau) + \overline{H}_s(\xi, \eta, \tau) \quad (6)$$

즉, 총조사량은 직접조사량(\overline{H}_0)과 정반사에 의해 추가되는 조사량(\overline{H}_s)의 합으로 구해진다. 직접조사량(\overline{H}_0)은 식 (2)와 표면의 법선벡터의 내적을 이용해 구하고, 다중 정반사에 의해 추가되는 조사량(\overline{H}_s)은 다음 절에서 소개할 편광빔 추적법을 이용해 구하게 된다.

식 (3a)와 경계조건 (3b), (3c) 및 조건식 (5a), (5b), 레이저 조사량의 식 (6)을 이용해 흡의 형상 $S(\xi, \eta, \tau)$ 및 온도장 $\Theta(\xi, \eta, \zeta, \tau)$ 을 구하게 된다.

2.2 편광된 광선추적법

현재 고려하는 문제는 곡면 형상의 표면상에서의 정 반사를 감안한 복사 에너지를 구해 3차원 열전도 방정식에서 반복 계산을 통해 수렴해를 구하는 과정을 거치게 된다. 이런 유형의 복사를 고려하기 위한 일반적인 방법으로 몬테 카를로 방법 (Monte Carlo method)^{14,15)}이 많이 사용되지만, 난수(random number)를 이용한 통계적인 접근법이므로 현재 고려하는 경우와 같이 계산되는 3차원 온도장이 곡면형상의 미세한 변화에도 극히 민감하게 반응하는 경우에는 부적절하다. 따라서 본 고에서는 광선의 위치와 방향을 난수적으로 계산하지 않고 규칙적인 방법으로 고려한 광선추적법(ray tracing method)을 사용하였다⁹⁾.

흡 표면에서의 총조사량은 레이저로부터의 직접조사량과 다중 정반사에 의한 추가적인 조사량의 합으로 구할 수 있다. 2차 또는 그 이상의 반사에 의한 각 절점에서의 조사량은 직접 조사량에 따라 일정한 수의 광선을 추적해 절점 주위의 요소들의 조사량을 구하고 이 값을 평균하는 방식으로 얻어진다. 먼저 처음 요소에서 레이저로부터의 직접 조사에 의한 광선의 입사 위치에서 에너지의 $\alpha=1-\rho$ 비율이 흡수되고 나머지 ρ 비율은 반사된다. 반사 방향은 이미 알고 있는 입사광선의 방향과 표면의 법선 벡터로부터 계산되며, 따라서 다음 층들 위치를 구할 수 있다. 이러한 방식으로 해당 광선이 소재의 표면에 충돌할 때마다 재료에 일부 에너지가 계속 흡수되어 결국 에너지의 99%를 상실하게 되거나 흡의 바깥으로 반사되어 더 이상 충돌이 일어날 수 없을 때까지 추적을 계속하게 된다.

본 연구에서 사용한 방법은 위에 서술한 통상적인 광선추적법에 편광 효과를 고려한 편광된 광선추적법(polarized ray tracing)이다. 편광된 광선추적법의 단계별 접근 방법에 대해서는 Waluschka¹⁸⁾가 소개하고 있다. 그의 논문에 의하면 하나의 광선은 스칼라적인 평면파와 벡터의 특성을 동시에 갖는 것으로 고려하고 있으며, 광선이 광학계를 통과해 나아갈 때 편광 상태를 나타내기 위해서 존스 벡터 (Jones vector)를 사용하고 있다. 그러나 본 고에서의 접근 방법은 Waluschka와 유사하지만, 존스 벡터를 사용하지 않고 경사각도로 입사할 때의 전자파의 반사를 직접 고려한다¹⁴⁻¹⁶⁾.

일반적으로 전자파가 평면형태의 경계부위에 입사하

게 되면, 전자파의 일부는 반사하고 일부는 투과하게 된다. 수직으로 입사하는 경우에는 반사/투과는 편광 상태에 무관하다. 그러나 평면파가 평면 경계부위에 기울어진 상태로 입사하면, 입사파의 편광이 중요해진다. 레이저에 의한 증발 가공과정에서 빔편광 효과를 파악하기 위해서는 입사되는 레이저빔과 소재 표면의 형상 및 반사도와 흡수율 사이의 수학적 관계식이 필요하다. 모델에서 플라즈마나 방출되는 가스가 빔을 방해하는 현상이 없다고 가정하였으므로, 현재 고려하는 상황은 Fig. 3에 보인 바와 같이 공기와 같은 완전한 유전체 가스(dielectric gas)로부터 금속과 같은 전도 매질에 해당하는 흡수 매질 (absorbing medium)에 광파가 입사하는 경우에 해당한다. 이러한 흡수 매질의 굴절률을 나타내기 위해서는 복소수 형태의 복소굴절률 (complex index of refraction)을 정의해 사용한다. 복소굴절률은 $m=n-ik$ 형태로 정의되는데, n 은 보통 의미의 굴절률이고 k 는 흡수 계수 또는 감쇠 계수이다. 공기는 비전도 매질이므로 $m=n=1$ 의 값을 갖고, 흡수 매질인 금속은 $m=n-ik$ 로 표현된다^{2,14-16)}.

입사면은 표면의 법선 벡터, \hat{n} 과 입사되는 빔의 방향 벡터, \hat{s}_i 의 두 벡터로 정의되며, 일반적인 삼차원 형상의 소재 표면에서는 위치에 따라 변화한다. 따라서 원래 입사되는 빔의 전기장 벡터가 일정해도 소재 표면 위치마다 입사되는 빔과 반사되는 빔의 편광 상태에 변화를 가져오게 된다. 해석을 단순화하기 위해 레이저빔은 파동보다는 광선, 즉 벡터량으로 표현하기로 한다.

만약 Fig. 3과 같이 입사되는 빔의 방향, \hat{s}_i , 법선 벡터, \hat{n} , 굴절률 $m_1=1, m_2=n-ik$, 입사되는 레이저 빔의 전기장 벡터, E_i 가 이미 알려져 있다면, 반사도 ρ 및 흡수율 α 는 다음과 같은 과정을 거쳐 계산되며, 이 결과식은 프레넬 관계식 (Fresnel's relations)으로 불린다.

입사되는 레이저빔 전기장 벡터, E_i 는 다음과 같이 평행 편광 성분 ($E_{||}$) 및 수직 편광 성분 (E_{\perp})으로 분리해 표현할 수 있다.

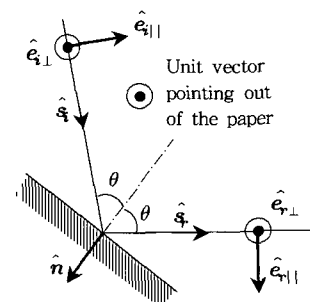


Fig. 3 Reflection of a ray on the surface

$$\mathbf{E}_i = E_{i\parallel} \hat{e}_{i\parallel} + E_{i\perp} \hat{e}_{i\perp} \quad (7)$$

입사각, θ 와 반사되는 빔의 방향, \hat{s}_r , 은 반사의 법칙으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\cos \theta = \hat{s}_i \cdot \hat{n} \quad (8)$$

$$\hat{s}_r = -2 \hat{n} \cos \theta + \hat{s}_i \quad (9)$$

입사되는 빔의 평행 성분 및 수직 성분은 다음과 같다.

$$E_{i\parallel} = \mathbf{E}_i \cdot \hat{e}_{i\parallel}, \quad E_{i\perp} = \mathbf{E}_i \cdot \hat{e}_{i\perp} \quad (10)$$

여기서 단위 벡터 $\hat{e}_{i\perp}$ 및 $\hat{e}_{i\parallel}$ 는 다음과 같은 간단한 벡터식으로부터 구할 수 있다. 즉,

$$\hat{e}_{i\perp} = -\hat{s}_i \times \hat{n} / \sin \theta \quad (11)$$

$$\hat{e}_{i\parallel} = \hat{e}_{i\perp} \times \hat{s}_i \quad (12)$$

반사되는 광의 수직성분 단위 벡터, $\hat{e}_{r\perp}$ 는 입사광의 해당 단위 벡터, $\hat{e}_{i\perp}$ 와 동일하다. 즉,

$$\hat{e}_{r\perp} = \hat{e}_{i\perp} \quad (13)$$

반사되는 광의 평행성분 단위 벡터, $\hat{e}_{r\parallel}$ 는 벡터 관계식을 적용해 구할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} \hat{e}_{r\parallel} &= -\hat{s}_r \times (\hat{e}_{i\parallel} \times \hat{s}_i) \\ &= (\hat{s}_r \cdot \hat{e}_{i\parallel}) \hat{s}_i - (\hat{s}_i \cdot \hat{s}_r) \hat{e}_{i\parallel} \end{aligned} \quad (14)$$

따라서 반사광의 전기장 벡터, \mathbf{E}_r 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{E}_r = E_{r\perp} \hat{e}_{r\perp} + E_{r\parallel} \hat{e}_{r\parallel} \quad (15)$$

$$\text{여기서, } E_{r\perp} = E_{i\perp} \frac{\cos \theta - p + iq}{\cos \theta + p - iq} \quad (16)$$

$$E_{r\parallel} = E_{i\parallel} \frac{p - \sin \theta \tan \theta + iq}{p + \sin \theta \tan \theta - iq} \left(\frac{E_{r\perp}}{E_{i\perp}} \right) \quad (17)$$

수식중의 p , q 는 다음과 같이 구해진다^{14,15}.

$$p^2 = \frac{1}{2} [\sqrt{(n^2 - k^2 - \sin^2 \theta)^2 + 4n^2 k^2} + (n^2 - k^2 - \sin^2 \theta)] \quad (18)$$

$$q^2 = \frac{1}{2} [\sqrt{(n^2 - k^2 - \sin^2 \theta)^2 + 4n^2 k^2} - (n^2 - k^2 - \sin^2 \theta)] \quad (19)$$

마지막으로, 편광빔의 반사도 ρ 및 흡수율 α 는 상호 수직한 두 성분으로부터 구할 수 있다.

$$\rho = -\frac{E_{r\parallel} E_{r\parallel}^* + E_{r\perp} E_{r\perp}^*}{E_{i\parallel} E_{i\parallel}^* + E_{i\perp} E_{i\perp}^*} \quad (20)$$

$$\alpha = 1 - \rho \quad (21)$$

위첨자로 나타낸 별표(*)는 켈레복소수 (complex conjugates)를 의미한다. 전자파의 강도와 위상각은 주변 가스의 영향을 받지 않는 것으로 가정하였으므로 위에 소개한 접근 방법은 계속되는 반사에 의한 표면에서의 반사도 및 흡수율의 계산에서도 유효한 것으로 일반화할 수 있다. 다음 표면과의 충돌에서의 반사도 및 흡수율과 파동의 변수 (wave parameters)값은 단순히 $\mathbf{E}_i^{\text{next}} = \mathbf{E}_r^{\text{current}}$ 로 간주함으로써 구할 수 있다. 즉, 현재 반사되는 표면에서의 반사광의 전기장 벡터는 다음에 반사되는 표면에서의 입사광의 전기장 벡터가 된다.

2.3 해석 과정

반사되는 빔의 방향과 흡수되는 에너지는 표면의 법선 벡터에 좌우되며, 따라서 표면을 수학적으로 나타내는 방법의 영향을 받는다. 이때 표면을 매끄러우면서도 2차 미분까지 연속인 형태로 나타내기 위해 홈 표면을 작은 사각형의 패치들로 구성하고, 각각의 작은 표면 요소는 CAD에서 적용되는 두 매개변수의 3차 다항식으로 표시되는 3차 곡면 패치 (bicubic surface patch)로 모델링한다. 이 방법은 계산시간이 짧으면서도 표면을 매끄럽게 나타낼 수 있는 장점이 있다^{19,20}. 입사되는 레이저 조사광 H 값을 구하기 위해서는 해당 절점에서의 법선 벡터값을 계산해야 하며, 이는 3차 곡면 패치를 이용하면 쉽게 구할 수 있다.

문제의 단순화를 위해 레이저빔을 발산하지 않는 평행빔으로 한정하거나 가공되는 부위가 레이저로부터 충분히 멀리 있으며 가공부의 크기가 상대적으로 작다면 식 (2)에 의해 소재의 표면에 조사되는 레이저광은 연직 방향 (\hat{k})으로 진행되는 것으로 간주할 수 있다. 이 경우에 표면과의 처음 충돌 위치에 입사되는 광선 (즉, 직접 레이저광원으로부터 조사되는 광선)의 전기장 벡터는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{선형 편광 } (\phi = 0^\circ): \quad \mathbf{E}_0 = (1+0i)\hat{i} + (0+0i)\hat{j} + (0+0i)\hat{k}$$

$$\text{선형 편광 } (\phi = 90^\circ): \quad \mathbf{E}_0 = (0+0i)\hat{i} + (1+0i)\hat{j} + (0+0i)\hat{k}$$

원형 편광(오른손법칙):

$$E_0 = (0.5 - 0.5i)\hat{i} + (0.5 + 0.5i)\hat{j} + (0 + 0i)\hat{k}$$

일단 표면의 각 절점 위치에서 흡수되는 조사량을 파악하게 되면, 지배방정식인 3차원 열전도 방정식의 해를 구하는 과정은 이전 연구⁹⁾에서와 동일하다. 3차원 과도 열전도 방정식은 경계 일치 (body-fitted) 좌표계를 고려해 구한 그리드 시스템에서 유한차분화되며 근사인자화법 (approximate factorization scheme)²¹⁾을 사용해 흡의 깊이가 정상 상태의 값에 도달할 때까지 반복 계산을 통해 답을 구하게 된다.

초기의 흡형상은 다중 반사를 무시한 상태에서 주어진 흡수율을 이용해 구한 형상으로 가정한다. 이 가정된 흡형상에 대해 정반사에 의한 추가적인 조사량을 계산해 전도 방정식의 경계조건항에 추가하고 방정식의 해로부터 흡형상을 새로 갱신하게 된다. 각각의 광선을 추적하면서 매번 광선과 표면이 충돌하게 될 때마다 입사각과 편광상태를 감안해 반사도 및 흡수율을 새로 계산하고, 반사된 광선의 전기장 벡터도 새로 계산된다.

본 고에서 고려하는 소재는 세라믹으로 열간압축된 질화규소 (silicon nitride)이다. 질화규소의 물성치는 선행 연구에서 사용된 바와 같으며 그 값은 Table 1에 정리되어 있다. 증발영역에서 질화규소의 흡수율은 0.3으로 추산되었는데, 이는 재료제거율을 감안해 Wallace⁷⁾가 구한 유효 흡수율 0.28과 거의 일치하고 있다. 복소 굴절률 $m=1.5-3.71i$ 값은 질화규소의 반사도 측정결과를 외삽하고, 수직 입사할 때의 흡수율 0.3을 이용해 구하였다. 실수값으로 나타낸 굴절률 n 은 1.5에 고정된 상태에서 흡수계수 k 값은 프레넬 방정식을 이용해 곡선 맞춤으로 구하였다. 공기와 접하고 있는 질화규소에 대해 편광성분별로 반사도 및 흡수율의 입사각에 따른 변화를 Fig. 4에 보인다. 참고로 원형 편광빔에 대한 반사도(ρ_{circ}) 및 흡수율(α_{circ})도 그림에 같이 나타내었다.

3. 계산결과 및 고찰

3.1 수치 모사 계산

빔편광의 효과를 파악하기 위해, 고출력 레이저를 이용한 중간 속도의 이송 가공에 해당하는 $U=10$, $N_k=0.01$, $N_e=0.01$ 의 평행빔($N_k=0$)을 수치 계산의 입

Table 1 Material properties for silicon nitride

T_{ev} (K)	k_{ev} (W/mK)	ρ_m (kg/m ³)	c_{ev} (J/kgK)	h_{ev} (kJ/kg)	α_{ev}	m
2151	12.14	3250	1294.5	6206	0.3	1.5-3.71i

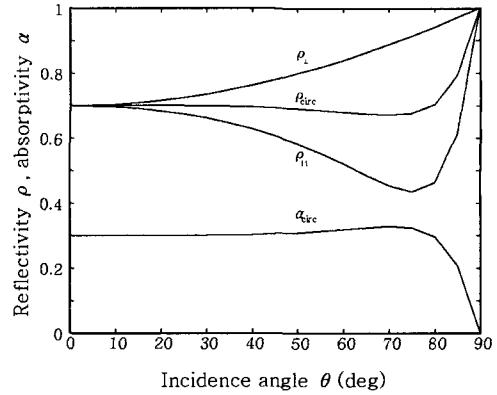
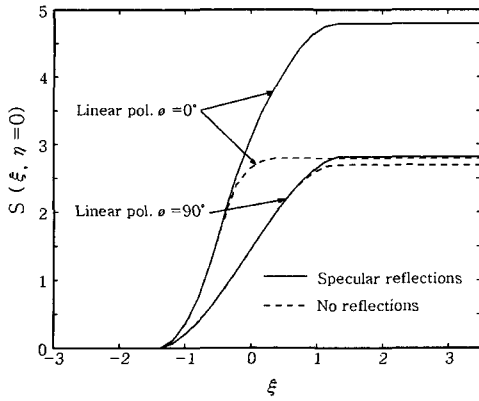


Fig. 4 Directional reflectivity for silicon nitride ($n=1.5, k=3.71$) in contact with air ($n=1$)

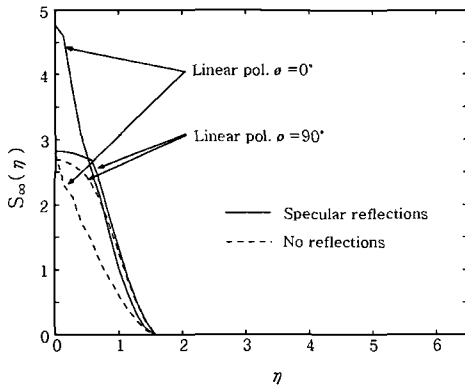
력 변수로 채택하였다. 입사되는 레이저빔은 선형 편광빔으로 한정하였다. 소재의 복소굴절률로 $m=1.5-3.71i$ 값이 사용되었으며, 이때의 ρ_{\perp} 및 ρ_{\parallel} 가 입사각에 따라 변화하는 양상을 Fig. 4에서 확인할 수 있다. ρ_{\perp} 는 입사각의 전 영역에서 ρ_{\parallel} 보다 크게 나타나며, ρ_{\parallel} 는 입사각이 75°보다 큰 영역에서 비교적 작은 값을 갖는다. 선형 편광의 효과를 파악하기 위해서, 처음 입사되는 레이저빔의 전기장 벡터 E 와 시편 이송방향 u 사이의 배치각도 ϕ 의 두 가지 대표적인 값을 고려하였다. $\phi=0^\circ$ 는 전기장과 이송 방향이 서로 평행한 경우이며, $\phi=90^\circ$ 는 서로 수직인 경우에 해당한다.

Fig. 5는 선형편광 빔으로 흡가공하는 경우 다중반사 효과를 고려할 때와 고려하지 않을 때의 형상 차이를 보인다. 배치각도 0°와 90°의 각각의 경우에 대한 흡형상은 아주 커다란 차이를 보인다. Fig. 5(a)는 중심축을 따라서 (즉, $\eta=0$)의 흡 깊이를 나타내고, Fig. 5(b)는 정상상태에 도달한 상태의 흡의 단면 형상을 나타낸다.

Fig. 5(b)에서 점선으로 표시한 바와 같이 다중반사 효과를 고려하지 않아도 편광빔의 입사각에 따른 흡수율 차이로 인해 가공된 흡의 단면 형상이 매우 달라진다. $\phi=0^\circ$ 에서 가공된 흡형상은 삼각형에 가까운 모습인데 비해, $\phi=90^\circ$ 일 때는 최대 가공된 깊이는 흡사하지만 중앙부의 폭이 넓고 편평한 형태를 갖는다. $\phi=90^\circ$ 조건으로 가공된 흡의 단면적이 넓어지므로 재료 제거율도 $\phi=0^\circ$ 에 비해 커진다. 중심축을 따라서의 흡형상은 Fig. 5(a)에 보인 바와 같이 두 각도의 경우 큰 차이를 보인다. $\phi=0^\circ$ 일 때는 $\xi \approx 0.4$ 에서 단면 형상이 완결되어 이후의 위치에서는 일정하게 되지만, $\phi=90^\circ$ 의 경우 $\xi \approx 1.4$ 가 될 때까지 단면 형태가 변형 중이다.



(a) Cross-section along centerline

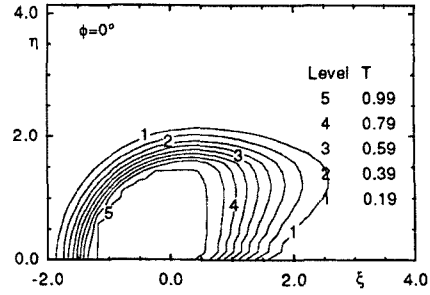


(b) Final groove shape

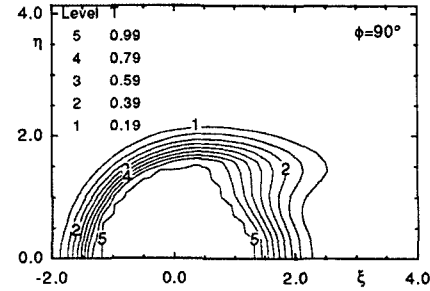
Fig. 5 Groove cross-section along centerline and final groove shape [$U=10, N_k=0.01, N_e=0.01$, parallel beam, $m=1.5-3.71i$]

다중반사를 고려하면 홈형상은 실선으로 나타낸 것처럼 더욱 큰 차이를 보이게 된다. $\phi=90^\circ$ 의 경우 다중반사를 고려하지 않는 경우에 비해 홈의 깊이는 약간 증가하면서 홈 바닥 중앙에 가까운 영역은 보다 편평해진다. 그러나 $\phi=0^\circ$ 의 경우에는 다중반사효과가 매우 큰 영향을 미친다. 가공된 홈의 최대 깊이는 거의 두 배가 되며 ($S=2.7$ 에서 4.7 로), 증발이 일어나는 영역은 훨씬 하류(즉 중심선을 따라 아래쪽으로)까지 확장된다. 입사되는 레이저빔의 대부분은 하류쪽으로 반사되어 홈의 보다 많은 부분을 제거하는 역할을 한다.

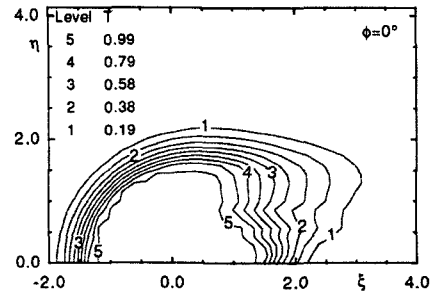
소재 표면의 온도분포를 등고선 형태로 보인 Fig. 6에서 이를 확연하게 살필 수 있다. 그림은 소재를 위에서 내려다 본 상태의 $\xi\eta$ -평면에서의 등온선을 표시하고 있으며, 무차원 온도값 $0.19 \sim 0.99$ 까지의 영역을 다섯 단계로 보여준다. 소재의 증발 영역은 온도 0.99 에 해당하는 등온선의 내부 영역(그림의 Level 5로 표기된 영역 내부)에 해당한다. 다중반사를 고려하지 않아도 Fig. 6(a)의 $\phi=0^\circ$ 와 Fig. 6(b)의 $\phi=90^\circ$ 의 경우 온도분포를 통해 확인할 수 있는 증발 영역의 모



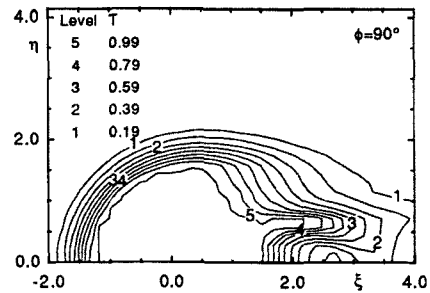
(a) No reflections ($\phi=0^\circ$)



(b) No reflections ($\phi=90^\circ$)



(c) Polarized reflections ($\phi=0^\circ$)



(d) Polarized reflections ($\phi=90^\circ$)

Fig. 6 Top view of the contour lines of surface temperature [$U=10, N_k=0.01, N_e=0.01$, parallel beam, $m=1.5-3.71i$]

습은 매우 다르다. 다중반사가 고려되면 증발 영역은 형태가 달라지면서 확장된다. Fig. 6(c)의 $\phi=0^\circ$ 에서는 증발 영역이 중심선을 따라 훨씬 하류 영역까지 확대되는데, 결과적으로 홈 바닥이 추가적으로 제거되는 현상을 설명해준다. Fig. 6(d)의 $\phi=90^\circ$ 에서는 증발

영역은 중심선에서 벗어난 영역으로 확대되는데, 대부분 홈 전면의 벽부위에서 반사되는 빔에 의한 것으로 설명된다. 따라서 최종적인 홈형상은 측벽부위가 더 많이 제거되어 가운데 부분은 보다 편평해지고 측면은 보다 경사가 큰 단면을 갖게 된다.

3.2 실험결과와의 비교

편광빔의 반사를 고려한 모델로 계산한 결과를 질화 규소에 대해 입수 가능한 실험결과와 비교해 보았다. Wallace의 실험⁷⁾에서는 초점거리 12.7cm (5 in)의 렌즈를 사용하였으며, 시편의 표면에서 빔반경 115 μ m의 초점이 생긴다. 계산에서는 이를 고려해 입력 변수를 설정하였다. Fig. 7은 두 가지 이송속도의 조건에서 가공된 홈의 단면을 보인다. Wallace는 낮은 이송속도에서의 $\phi = 0^\circ$ 실험 결과는 매우 불안정하였음을 지적하였으며, 그림에 보인 데이터 역시 상당히 구부러진 형상을 보이고 있지만, 비교를 위해 같이 나타내었다. 그의 실험에서는 $\phi = 0^\circ$ 일 때 단면형상이 삼각형으로 가장 좁고 깊은 결과를 보였으며, $\phi = 90^\circ$ 에서는 바닥면이 둥근 형상에 전체적으로 넓고 얇은 홈단면이 얻어졌다. 그 사이의 각도에서는 단면이 구부러져 있음을 보여주었다. 본 고의 모델을 이용한 계산 결과는 이 실험 결과와 유사한 경향을 보여주고 있다. 계산결과의 그래프는 0° 에서는 삼각형에 가까운 단면을, 90° 에서는 편평한 바닥면의 얇고 넓은 단면을 보여준다. 모델은 0° 에서는 실험보다 깊이가 다소 작고 날카롭지 않은 형상을, 90° 에서는 벽면이 매우 급격한 실험결과에 비해 보다 완만한 모습을 예측하고 있다. 실험에서는 빔이 부분적으로 편광되었을 가능성이 있고, 낮은 속도의 $\phi = 0^\circ$ 조건에서 홈 생성 메커니즘이 불안정하였으며, 계산에 사용한 굴절률값이 실제와 다소 차이가 있을 수 있는 등의 복합적인 이유 때문으로 추정된다. 전체적으

로는 계산된 홈의 형상이 실험결과와 정성적으로 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었으며, 홈가공에서의 편광빔에 의한 다중 반사의 역할을 설명해 주고 있다.

4. 결 론

연속파 모드의 레이저로 증발 제거에 의한 홈가공을 수행할 때 빔의 편광 및 다중 반사 효과를 살펴보았다. 본 연구에서 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

1) 레이저 홈가공에서 빔의 다중 반사 및 편광 효과를 고려하기 위해 빔의 전기장 벡터를 이용해 삼차원 형상의 소재 표면에서 편광 성분에 따른 반사도 및 흡수율을 계산할 수 있는 모델을 정립하고 홈가공 계산 프로그램에 도입하였다.

2) 수치계산 결과 편광빔의 반사에 의한 소재의 증발 제거 영역의 확장이 홈가공에서 재료 제거율의 증가를 가져올 뿐 아니라 홈형상의 변화를 가져오는 중요한 역할을 수행하고 있음을 확인하였다.

3) 선형 편광빔에서 이송 방향이 빔의 전기장 벡터와 일치할 때는 보다 깊고 좁은 형상이 가공되는 반면, 서로 수직인 방향일 때는 바닥이 편평하고 보다 얇은 홈이 가공되는 것을 수치 계산으로 확인하였다.

4) 질화규소에 대한 기존의 실험과 비교한 결과 모델은 홈형상을 정성적으로 잘 예측하고 있음을 확인하였다. 보다 정확한 계산을 위해서는 소재의 물성치 및 빔의 조건이 정확하게 파악되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. W. W. Duley : Laser Processing and Analysis of Materials, Plenum Press, New York, 1983
2. 김도훈 : 레이저가공학, 경문사, 1992 (in Korean)
3. F. Dausinger and T. Rudlaff : Novel Transformation Hardening Technique Exploiting Brewster Absorption, Proceedings of International Conference on Laser Advanced Materials Processing-Science and Applications, High Temperature Society of Japan, 1987, 323-328
4. F. Dausinger, M. Beck, J. H. Lee, E. Meiners, T. Rudlaff and J. Shen : Energy Coupling in Surface Treatment Processes, Journal of Laser Applications, 2-3/4 (1990), 17-21
5. S. Roy, S. Y. Bang, M. F. Modest and V. S. Stubican : Measurement of Spectral, Directional Reflectivities of Solids at High Temperatures between 9 and 11 μ m, Applied Optics, 32-19 (1993), 3550-3558
6. R. J. Wallace and S. M. Copley : Laser Machining of Silicon Nitride - Energetics, Advanced Ceramic Materials, 1-3 (1986), 277-283
7. R. J. Wallace : A Study of the Shaping of Hot-Pressed

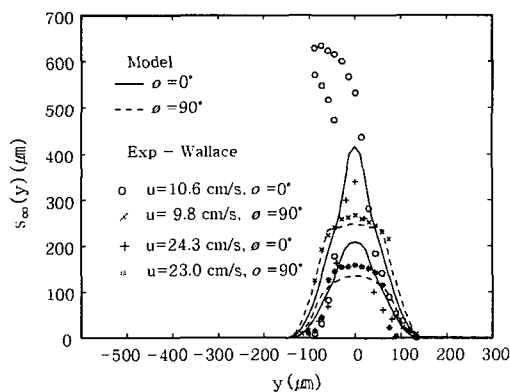


Fig. 7 Comparison of final groove shape [P=560W, f=12.7cm, silicon nitride, m=1.5-3.71i]

- Silicon Nitride with a High Power CO₂ Laser, PhD Thesis, Univ. of Southern California, 1983
8. S. Y. Bang and M. F. Modest : Multiple Reflection Effects on Evaporative Cutting with a Moving CW Laser, ASME Journal of Heat Transfer, **113-3** (1991), 663-669
 9. S. Y. Bang, S. Roy and M. F. Modest : CW Laser Machining of Hard Ceramics - II. Effects of Multiple Reflections, Int. Journal of Heat and Mass Transfer, **36-14** (1993), 3529-3540
 10. W. Schulz, G. Simon, H. M. Urbasseck and I. Decker : On Laser Fusion Cutting of Metals, J. Physics D: Applied Physics, **20** (1987), 481-488
 11. D. Petring, P. Abels and E. Beyer : Absorption Distribution on Idealized Cutting Front Geometries and Its Significance for Laser Beam Cutting, Proceedings of High Power CO₂ Laser Systems and Applications, SPIE, 1988, 123-131
 12. E. Beyer and D. Petring : State of the Art in Laser Cutting with CO₂ Lasers, Proceedings of the ICALEO 90, Laser Institute of America, 1990, 199-212
 13. W. Schulz and K. Behler : Adjustable Redistribution of the Laser Intensity between Two Adjoining Metal Surfaces, High Power Lasers and Laser Machining Technology, SPIE, 1989, 166-172
 14. R. Siegel, J. R. Howell and J. Howell : Thermal Radiation Heat Transfer, 4th ed., Taylor and Francis Group, 2001La
 15. M. F. Modest : Radiative Heat Transfer, 2nd ed., Academic Press, 2003
 16. E. Hecht : Optics, 4th ed., Addison Wesley, 2001
 17. H. Kogelnik and T. Li : Laser Beams and Resonators, Applied Optics, **5-10** (1966), 1550-1565
 18. E. Waluschka : Polarization Ray Tracing, Proceedings of Polarization Considerations for Optical Systems, SPIE, 1988, 104-111
 19. I. D. Faux and M. I. Pratt : Computational Geometry for Design and Manufacture, Ellis Horwood Limited, U.K., 1979
 20. Kunwoo Lee : Principles of CAD/CAM/CAE Systems, Addison Wesley, 1999
 21. S. Roy and M. F. Modest : CW Laser Machining of Hard Ceramics - I. Effects of Three-dimensional Conduction, Variable Properties and Various Laser Parameters, Int. Journal of Heat and Mass Transfer, **36-14** (1993), 3515-3528