레이저의 편광을 고려한 키홀 거동 해석에 관한 연구

조정호† · 나석주*

A Study on the Keyhole Dynamics According to Polarization of Laser

Jung-Ho Cho and Suck-Joo Na

Key Words : Polarization, Laser welding, Keyhole, Fresnel

Abstract

Three-dimensional transient keyhole profile is numerically analyzed for the case of stationary laser keyhole welding. Volume of fluid (VOF) method is adopted to track the free surface of molten metal based on the three governing equations which are continuity, momentum and energy equations. Multiple reflections of laser beam at the keyhole walls are also included in analysis through a real-time ray tracing technique. In this simulation, especially, polarization of laser is considered as an energy absorption mechanism following the Fresnel reflection theory. Both cases of linearly and circularly polarized beam are simulated and compared. The results show that the theoretically generated keyhole is asymmetrically stretched along the direction of polarization which is already observed experimentally before.

1. 서 론

레이저의 편광은 금속의 절단, 용접 공정에서 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 특히, 용접 절단 공정에서 레이저가 선형 편광되어 있는 경우 편광 방향과 공정의 방향, 즉 절단 방향이 일치하는 경우 그 효율이 증가하는 것으로 알려져 있다. 1991 년의 Dausinge 의 발표[1]에 따르면, 선형 편광의 방향을 공정 방향에 따라 계속 변화시켜 주는 기술을 사용해 자동차 강판에 대한 절단, 용접 실험에서 원형 편광 혹은 자연 편광 상태의 경우보다 70%에서 100%까지 효율이 증가되었다고 보고되었다. 또한 1996 년 Sato *et al* [2]의 실험에 따르면 선형 편광 방향을 용접 방향과 일치시키고, He 가스를 보호 가스로 사용하는 경우, 알루미늄 합금의 용접성이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

이에 따라 레이저의 편광이 재료의 가공성에 미치는 영향을 실험적인 방법뿐 아니라 해석적인 기술을 동원해 보다 자세히 고찰해 보려는 노력들이 시도 되었다. Niziev *et al* [3,4]은 비교적 간단한 모델로 다중 반사의 영향을 고려하지 않고 편광 방향이 절단 효율에 미치는 영향을 이론적으로 고찰하고, 반지름 방향 편광(radial polarization)을 제안하였으며, Ho *et al* [5,6]은 임의로 가정된 키홀 형상에서 통계학적인 방법을 이용해 편광이 끼치는 영향을 조사하였다. 하지만, 키홀이나 아크 용접의 해석에 비해 이러한 편광 효과에 대한 해석은 크게 부족해 앞서 언급한 네 가지 이외에 뚜렷한 연구 실적이 없는 상태이다.

본 연구에서는 Fresnel 반사 모델을 적용하여 금속의 레이저 흡수를 해석함에 있어 레이저의 편광 방향과 광선 추적을 이용한 다중 반사[7]를 고려하여 레이저의 편광이 키홀 거동에 미치는 영향을 이론적으로 고찰한다.

† 한국과학기술원, 기계공학과
E-mail : junghocho@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3216 FAX : (042)869-3210
* 한국과학기술원, 기계공학과

2. Fresnel 반사 이론

금속이 레이저의 의해 조사될 때 레이저의 일부는 직접 흡수되고, 일부는 반사되며, 나머지는 산란되어 흩어진다. 따라서, 이러한 현상을 바탕으로 금속 표면의 레이저 흡수를 수식화 하기란

여간 어려운 문제가 아니다. 하지만, 금속이 용융되기 시작하면 그 표면이 경면(specular)처럼 매끄러워 빛의 흡수와 반사를 설명하기가 용이해 진다. 바로 Fresnel 반사 이론을 적용하면 되는 것이다. 따라서, 본 연구에서는 금속의 표면을 경면으로 가정하고, Fresnel 반사 이론을 적용해 금속의 레이저 흡수를 계산하도록 한다.

본격적인 Fresnel 반사 이론을 위해 입사 평면에 대한 정의를 다시 되새길 필요가 있다. 기본적인 물리 및 광학 이론서들에 따르면, 입사 평면(plane of incidence)은 입사 광선과 이 광선에 의해 조사되는 금속 표면의 법선 벡터에 의해 결정이 된다. 이렇게 입사 평면의 정의를 다시 한번 확인하는 이유는 레이저의 편광성(polarization)과 관련하여 *s*-편광과 *p*-편광의 개념을 쉽도록 하기 위함이다. 여러 교과서의 정의에 따르면 *s*-편광은 선형적으로 편광된 레이저 빔의 전기장 벡터가 앞서 정의한 입사 평면과 수직을 이루면서 물체 표면에 조사되는 상태를 일컫는다. 반대로, *p*-편광은 레이저 빔의 전기장 벡터가 입사 평면과 수평을 이룬 채 조사되는 상태를 말한다.

Fresnel 반사 모델은 우선 편광된 입사광을 Fig. 1 과 같이 정의에 따라 입사 광선 벡터 $\hat{S}_i$ 와 모재 표면의 법선 벡터 $\hat{n}$ 로 정의되는 입사 평면 위에서 *s*-편광 성분과 *p*-편광 성분으로 나누는 것으로 시작한다[8,9]. 입사광의 전기장 벡터를 $\vec{E}$ 라 하면, 이 전기장은 입사 평면에 수평한 성분 크기 $E_{i\parallel}$ 와 수직한 성분 크기 $E_{i\perp}$ 로 나뉘지며, 반사광선 $\vec{E}_r$ 역시 $E_{r\perp}$ 과 $E_{r\parallel}$ 로 분해된다.

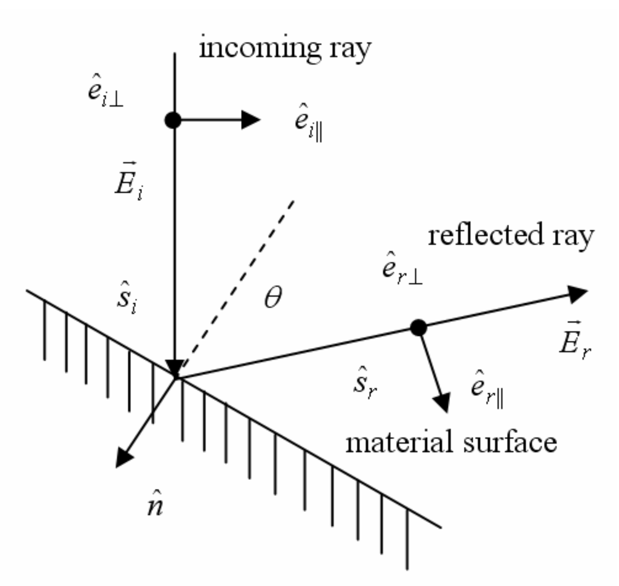


Fig. 1 Schematic diagram of Fresnel reflection theory

그리고, 이들의 크기는 Fresnel 공식에 따라 아래와 같이 정해진다.

$$E_{r\perp} = E_{i\perp}\frac{n_1\cos\theta - p + q\mathrm{i}}{n_1\cos\theta + p - q\mathrm{i}} = E_{i\perp}r_\perp \quad (1)$$

$$E_{r\parallel} = E_{i\parallel}\frac{p - n_1\sin\theta\tan\theta + q\mathrm{i}}{p + n_1\sin\theta\tan\theta - q\mathrm{i}}r_\perp \quad (2)$$

위의 식에서 i 는 복소수의 허수부를 의미하는 기호이고, p 와 q 는 공기의 굴절 계수 n_1, 그리고, 금속의 굴절 계수 n_2 와 흡수 계수 k_2 에 따라 아래의 식과 같이 계산된다.

$$p^2 = \frac{1}{2}\left\{\left(n_2^2 - k_2^2 - n_1^2\sin^2\theta\right)^2 + 4n_2^2k_2^2\right\}^{1/2} + \frac{1}{2}\left(n_2^2 - k_2^2 - n_1^2\sin^2\theta\right) \quad (3)$$

$$q^2 = \frac{1}{2}\left\{\left(n_2^2 - k_2^2 - n_1^2\sin^2\theta\right)^2 + 4n_2^2k_2^2\right\}^{1/2} - \frac{1}{2}\left(n_2^2 - k_2^2 - n_1^2\sin^2\theta\right) \quad (4)$$

모재 표면에서의 반사율이라는 것은 간단히 말해 입사광의 전기장의 크기와 반사광의 전기장의 크기의 비율이므로 반사율 Cr 은 아래의 식과 같이 구해 지며, 흡수율 Ca 는 1 에서 반사율을 뺀 값이 된다.

$$c_r = \frac{E_{r\parallel}E_{r\parallel}^* + E_{r\perp}E_{r\perp}^*}{E_{i\parallel}E_{i\parallel}^* + E_{i\perp}E_{i\perp}^*} \quad (5)$$

$$c_a = 1 - c_r \quad (6)$$

3. 지배방정식과 경계조건

본 연구는 상용 해석 코드인 Flow3D 를 이용한 것으로, 그에 따른 지배방정식을 이용하는 것으로 지면 관계상 자세한 설명은 생략하기로 한다.

해석의 유동은 편의를 위해 비압축성이며, Newtonian 이고, 층류로 가정한다. 자유 표면 추적을 위해서 VOF(volume of fluid) 방법을 사용하였으며, 해석의 개념도는 Fig. 2 와 같다.

해석 영역은 가로, 세로 2mm 로 높이도 2mm 로 정해 주었으며, 천공(drilling)시 자유 표면 추적을 위해 해석 영역의 위, 아래 1mm 공간은 빈 공간으로 지정해 주었다.

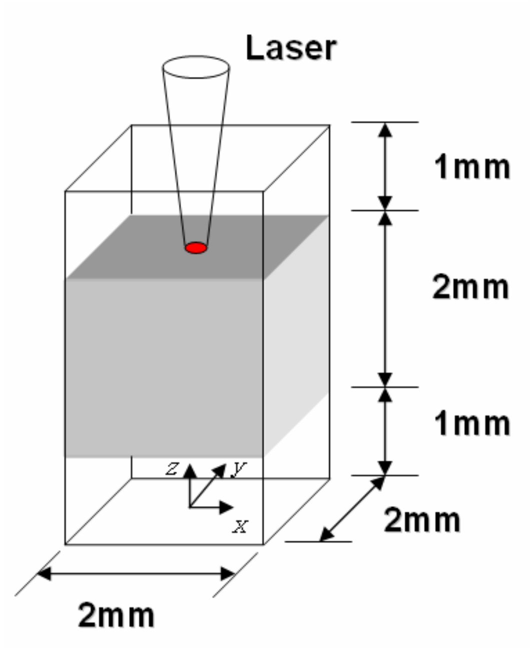


Fig. 2 Schematic diagram of keyhole simulation

해석의 경계 조건은 아래와 같다.

상단면:

$$K\frac{\partial T}{\partial n}=\eta_F q_L-h_A(T-T_\infty)-\sigma_s\varepsilon_r\left(T^4-T_\infty^4\right)-q_{vap} \quad (7)$$

$$-p+2\mu\frac{\partial V_n}{\partial n}=-p_r+\frac{\gamma}{R_c} \quad (8)$$

$$q_L(x,y,z)=\frac{3Q}{\pi r_L^2}\exp\left(-3\frac{x^2+y^2}{r_L^2}\right) \quad (9)$$

$$p_r\cong 0.54P_0\exp\left(L_v\frac{T-T_b}{RTT_b}\right) \quad (10)$$

여기서, q_L 과 p_r 은 각각 가우시안(Gaussian) 분포를 갖는 레이저의 열원과 키홀 내의 반발 압력(recoil pressure) 모델이고, r_L 은 레이저의 유효 반경이며, L_v 는 증발잠열, R 은 일반기체상수, p_0 는 대기압, T 와 T_b 는 각각 표면의 온도와 증발 온도를 가리킨다.

식 (7)은 모재 표면의 열전달 경계 조건으로 h_A 는 대류 열전달 계수를 나타내며, σ_s 와 ε_r 은 각각 Stefan-Boltzmann 상수, 방사율(emissivity)을 의미하고, T_∞ 는 대기 온도를 가리킨다. η_F 는 Frensel 반사 모델로 결정되는 레이저의 흡수율로 식 (6)의 C_a와 같다

식 (8)은 유동의 압력 경계 조건으로 γ 는 표면 장력, R_c 는 자유 표면의 곡율(curvature)을 가리킨다.

모재의 하단면 :

$$K\frac{\partial T}{\partial n}=-h_A(T-T_\infty)-\sigma_s\varepsilon_r\left(T^4-T_\infty^4\right) \quad (11)$$

$$-p+2\mu\frac{\partial V_n}{\partial n}=\frac{\gamma}{R_c} \quad (12)$$

적용된 모재의 열물리적 특성은 Tab. 1 과 같다.

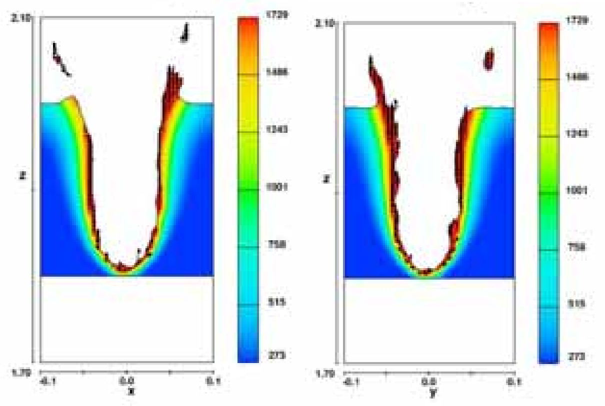
Table 1 Properties used in simulation

Names of properties	Value
Density	6740 kg/m^3
Thermal conductivity	27.2 W/mK
Specific heat	710 J/kgK
Latent heat of fusion	277 kJ/kg
Latent heat of vaporization	7340 kJ/kg
Liquidus temperature	1729 K
Solidus temperature	1660 K
Boiling point	3034 K
Dynamic viscosity	0.004 kg/ms
Surface tension	1.8 *N/m*
Refractive index of air	1
Reflective index of metal	3.26
Absorptive index of metal	4.34

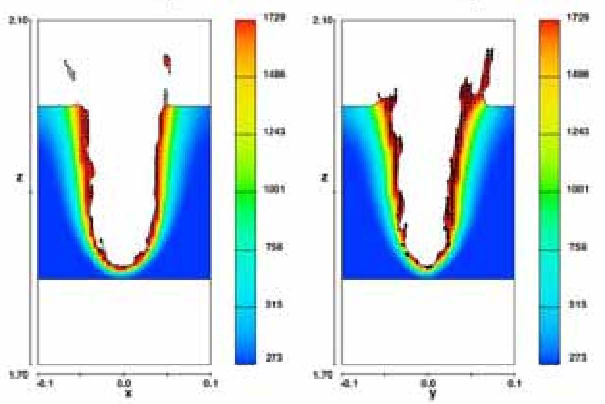
4. 해석 결과 및 고찰

Fig. 3 은 선형 편광과 원형 편광에 대한 해석 결과를 각각 도시한 것으로 두 해석 결과 모두 *x-z* 평면과 *y-z* 평면으로 잘라 이 평면들에서 관찰한 모습을 비교하였다. 시간은 5kW 의 레이저가 조사된 후 6.1ms 후의 모습으로 천공이 일어나기 바로 직전 순간이다.

그림에서 보듯이, 원형 편광의 경우 두 비교 평면상 형성된 키홀의 모습이 크게 다르지 않음을 알 수 있다. 하지만 (b)와 같이 선형 편광의 경우 편광 방향과 수평한 평면인 *x-z* 평면에서의 키홀 너비가 *y-z* 평면의 키홀 너비보다 다소 크다는 것을 알 수 있다.



(a) Keyhole shapes in *x-z* and *y-z* planes for circularly polarized beam



(b) Keyhole shapes in *x-z* and *y-z* planes for linearly polarized beam

Fig. 3 Comparison of keyhole width for circularly and linearly polarized beam.

이것은 바로 Fig. 4 와 같이 편광 상태에 따라 흡수율이 다른 Fresnel 반사 이론이 원인이다.

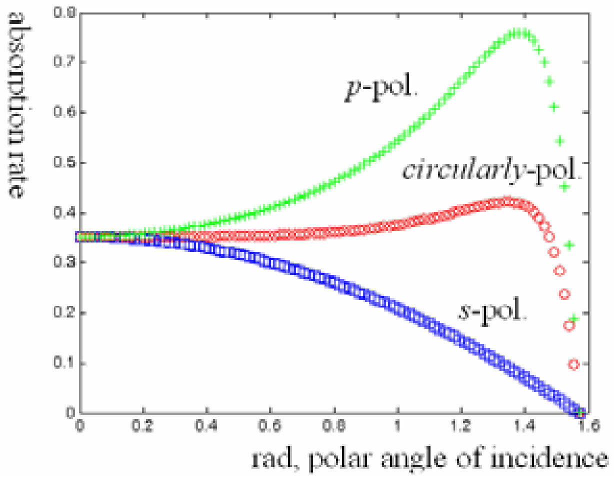
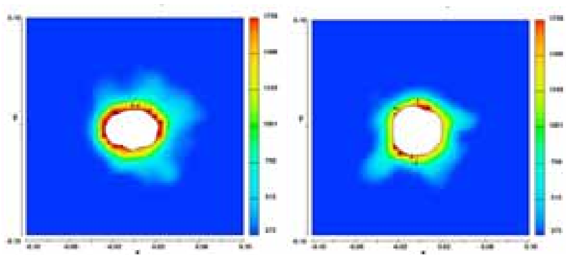


Fig. 4 Typical absorptivity tendency of Fresnel reflection theory according to polarization



(a) Linear polarization (b) Circular polarization

Fig. 5 Bottom of drilled hole.

선형 편광의 경우 x-z 평면에서 레이저는 p-편광 상태로 키홀 벽면에 조사되고 y-z 평면에서는 s-편광 상태로 조사된다. 따라서, Fig. 4 에서 보듯이 p-편광의 경우, 입사각이 증가할수록 흡수율이 증가하므로 상대적으로 x-z 평면에서의 키홀 너비가 더 크게 나타나는 것이다. 원형 편광의 경우는 두 평면 모두에서 레이저는 똑같이 원형 편광 상태이므로 흡수율 차이는 나지 않는다. 이에 따라, 천공된 구멍의 단면 모습이 차이가 나며, Fig. 5 에서 보듯이 원형 편광의 경우는 원에 종래처럼 원형에 가까운 구멍이 생기는 것에 반해 선형 편광의 경우 타원 형태의 구멍이 생기는 것을 관찰할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 Fresnel 반사 이론을 적용한 레이저의 천공 공정을 해석함에 있어서 다중 반사를 고려함과 동시에 레이저의 편광 방향에 따른 흡수율 변화를 고려하여 편광이 키홀의 거동에 미치는 영향을 조사하였으며, 이 결과 선형 편광의 경우 키홀의 단면이 편광 방향으로 늘어나 있어 타원의 모습을 보이는 것을 확인하였다.

참고문헌

(1) Dauseing F., 1991, "Welding and cutting with controlled polarization of laser beam", The laser and electron beam in welding, cutting and surface treatment: state of the art, 12-24.

(2) Sato S., Takahashi K. and Mehmetli B., 1996, "Polarization effects of a high-power CO2 laser beam on aluminum alloy weldability", J. Appl. Phys. 79, 8917-8919.

(3) Niziev V. G. and Nesterov A. V., 1999, "Influence of beam polarization on laser cutting efficiency", J. Phys. D: Appl. Phys. 32, 1455-1461.

(4) Nesterov A. V. and Niziev V. G., 1999, “Generation of high-power radially polarized beam”, J. Phys. D: Appl. Phys. 32, 2871-2875
(5) Ho C. Y., 2004, “Effects of polarizations of a laser on absorption in a paraboloid of revolution-shaped welding or drilling cavity”, J. Appl. Phys. 96, 5393-5401.
(6) Ho C. Y. and Wen M. Y., 2004, “Distribution of the intensity absorbed by the keyhole wall in laser processing”, J. Mat. Proc. Tech. 145, 303-310.
(7) J. H. Cho and S. J. Na, 2006, “Implementation of real-time multiple reflection and Fresnel absorption of laser beam in keyhole”, J. Phys. D: Appl. Phys. 39, 5372-5378
(8) Bang S. Y., 1991, “Effects of multiple reflections and beam polarization on laser grooving of hard ceramics”, Ph. D. Thesis, The Pennsylvania State University.
(9) Modest M. F., 1992, *Radiative Heat Transfer*, Mc-Graw Hill, New York.