

# 표면장력과 후압을 고려한 고에너지밀도 레이저 용접공정 해석

하응지<sup>†</sup>.김우승<sup>\*</sup>

## A study of high-power density laser welding process considering surface tension and recoil pressure

Eung-Ji Ha and Woo-Seung Kim

**Key Words:** laser welding(레이저 용접), free surface(자유표면), key hole(키홀), Knudsen layer(Knudsen 층)

### Abstract

In this study, numerical investigation has been performed on the evolution of key-hole geometry during high-energy density laser welding process. Unsteady phase-change heat transfer and fluid flow with the surface tension and recoil pressure are simulated. To model the overheated surface temperature and recoil pressure considering subsonic/sonic vapor flow, the one-dimensional vaporization models proposed by Ganesh and Knight are coupled over liquid-vapor interface. It is shown that the present model predicts well both the vaporization physics and the fluid flow in the thin liquid layer over the other model.

#### 기호설명

$c_p$	: 비열 (J/kg·K)
$\delta h$	: 격자간격 (m)
$k$	: 열전도계수 (W/m·K)
$f$	: 체적 분율 함수
$g_m$	: 액상 분율
$g_v$	: 기상 분율
$L_m$	: 용융 잠열 (J/kg)
$L_v$	: 기화 잠열 (J/kg)
$q_0$	: 입사 에너지 밀도 (W/m <sup>2</sup> )
$S$	: 생성항

$p$	: 압력 (Pa)
$p_s$	: 표면압력 (Pa)
$r_0$	: 레이저 빔 반경 (m)
$t$	: 시간 (s)
$T$	: 온도 (K)
$T_s$	: 표면온도 (K)
$u_r, u_z$	: r, z 방향 속도 (m/s)

#### 그리스문자

$\chi$	: 곡률 (m <sup>-1</sup> )
$\rho$	: 밀도 (kg/cm <sup>3</sup> )
$\sigma$	: 표면장력 계수 (N/m)
$\mu$	: 동점성계수 (kg/m·s)

<sup>†</sup> 한양대학교 대학원 기계공학과

E-mail : enzy@ihanyang.ac.kr

TEL : (031)416-8649 FAX : (031)418-0153

\*한양대학교 기계공학과

## 1. 서 론

레이저(Laser)빔은 고에너지 밀도의 집중열원이기 때문에 용접 및 가공 열원으로서 재료에 주는 열영향 및 열변형이 적다. 레이저를 이용한 용접작업은 대기 중에서도 행할 수 있고, 레이저 발생장치로부터 상당히 떨어진 장소에까지 빔을 간단히 유도할 수 있으므로 조작성이 매우 좋으며, 빔의 방향제어도 광학장치에 의해 간단히 될 수 있는 이점을 갖고 있다. 이 때문에 많은 산업 현장에서 정밀함을 요하는 용접공정에 레이저 빔 용접이 이용되고 있다. 또한 최근에는 레이저의 고주파-고밀도 열원에 의한 용융과 기화현상을 이용한 기계재료의 천공 및 절단 공정이 산업 현장에서 많이 이용되고 있다. 레이저 용접의 경우, 사용되는 레이저 빔의 에너지 밀도에 따라 크게 저에너지밀도 레이저 용접과 고에너지밀도 레이저 용접으로 나눌 수 있다.<sup>(1)</sup> 천공 및 절단에 사용되는 레이저 빔과 물리적 현상은 고에너지밀도 레이저 용접과 유사하다. 레이저의 에너지 밀도가 보다 높은 고에너지밀도 레이저 용접에서는 용융된 재료가 비등점 이상으로 가열되어 기화가 일어나면서 기체 공동(key-hole)이 형성되고, 이와 동시에 금속 증기의 헤리에 의한 플라즈마가 발생한다.(Fig.1) 일단 공동이 형성되면 공동내부에서 플라즈마에서의 산란, 흡수 효과에 의하여 레이저 빔의 흡수가 급격하게 증가된다. 그리고 기화현상으로 금속증기가 생기면서 발생한 후압(back pressure)이 용융물을 공동 밖으로 밀어낸다. 이 때 기화현상과 용융물 방출로 인한 폭이 좁고 용입이 깊은 용접부를 얻을 수 있게 된다. 레이저 천공 및 절단 공정에서는 이때 생기는 공동의 폭과 깊이를 조절하여 가공 공정을 수행하게 된다. 이와 같이 레이저를 이용한 용접 및 가공 공정은 미소영역 내에서 짧은 시간동안 용융과 응고, 기화현상을 포함한 상변화 현상과 용융풀에서의 자유표면 유동, 그리고 금속증기의 압축성유동 등이 복합적으로 나타나는 현상으로서 이에 대한 정확한 모델링은 대단히 어렵다. 고에너지밀도 레이저 용접 및 가공공정 해석인 경우에는 물리적 현상의 복잡성으로 인하여, 많은 논

문들이 계산영역을 1차원으로 가정하거나<sup>(3)</sup>, 2차원 축대칭좌표계인 경우에도 자유표면을 일정한 함수의 형태로 가정하여 해석하였다.<sup>(4,5)</sup> 최근에는 계산영역을 2차원 축대칭 좌표계로 확장하고, 열전달과 자유표면 유동을 고려한 연구가 진행되었다.<sup>(2,6,7)</sup> 그러나 이 방법도 압축성 유동방정식을 1차원으로 단순화하여 비압축성 유동의 경계 조건으로 사용하였으며, 키톨표면 액상층의 유동을 고려하지 않거나<sup>(6)</sup>, 1차원으로 고려하였고<sup>(2)</sup>, 키톨표면 온도와 기화증기 온도가 동일하며, 기화 증기 유동이 항상 음속이라는 가정을 사용하여<sup>(7)</sup> 해석을 단순화하였다. 본 연구에서는 2차원 축대칭 좌표계를 사용하여 레이저 용접 공정에서의 금속재료의 가열, 용융, 기화 및 자유표면 유동현상을 통합적으로 해석하였다. 키톨 액상층 자유표면에서의 유동과 표면장력을 해석하기 위하여 유체체적법(volume-of-fluid method)<sup>(8)</sup>과 변형된 연속표면력법(continuum surface force method)<sup>(9)</sup>을 도입하였다. 그리고 액상-기상 경계면에서의 과열 표면온도와 기화증기 온도 분포 및 이에 따른 아음속/음속 기화증기 유동 그리고 후압을 보다 정확하게 해석하기 위하여 Ganesh<sup>(7)</sup>와 Knight<sup>(12)</sup>가 제안한 1차원 기화모델을 통합하여 해석을 수행하였다.

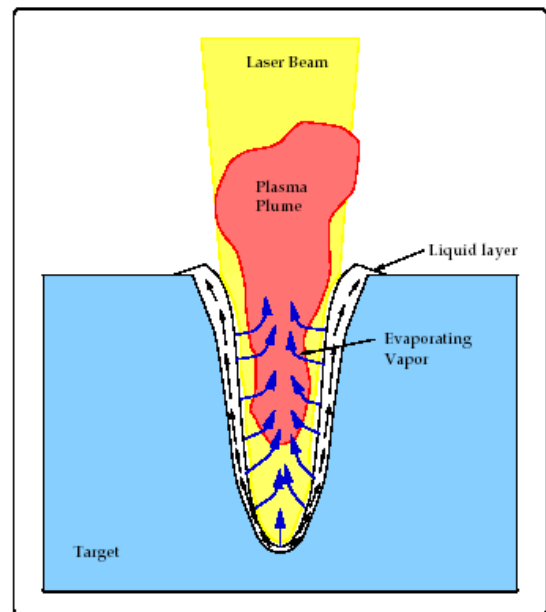


Fig. 1 Schematic of high-power density laser-material interaction.<sup>(2)</sup>

## 2. 수치해석방법

### 2.1 기본방정식

고에너지밀도 레이저 용접의 주요 유동형성기구는 기화에 의한 키홀의 형성과 얇은 액상 층에서의 압력차와 표면장력의 작용에 의한 용융물 배출이므로, 고상에서 액상, 액상에서 기상으로의 상변화와 표면 압력 적용 및 표면장력의 해석이 주요한 모델링의 초점이 된다. 고에너지밀도 레이저 용접해석에 필요한 기본 방정식은 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_r) + \frac{\partial}{\partial z} (u_z) = 0 \quad (1)$$

운동량방정식

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u_r}{\partial t} + \rho u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \rho u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial r} \\ + \mu \left[ \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} \right] + S_{u_r} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u_z}{\partial t} + \rho u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \rho u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial z} \\ + \mu \left[ \frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial r} \right] + S_{u_z} \end{aligned} \quad (3)$$

유체체적방정식:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u_r \frac{\partial f}{\partial r} + u_z \frac{\partial f}{\partial z} = S_f \quad (4)$$

에너지방정식:

$$\begin{aligned} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u_r \frac{\partial T}{\partial r} + \rho c_p u_z \frac{\partial T}{\partial z} \\ = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ kr \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k \frac{\partial T}{\partial z} \right] \\ - \rho L_m \frac{\partial g_m}{\partial t} - \rho L_v \frac{\partial g_v}{\partial t} + S_T \end{aligned} \quad (5)$$

식 (2)와 (3)에서  $S_{u_r}$ ,  $S_{u_z}$ 는 표면장력에 의한 생성항을 나타내며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{u_r} = \sigma x n_x + \nabla_s \sigma_x / \delta h \quad (6)$$

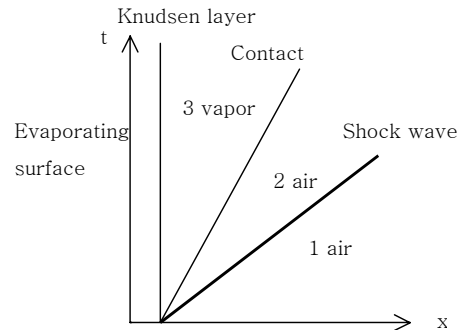
$$S_{u_z} = \sigma x n_z + \nabla_s \sigma_z / \delta h \quad (7)$$

식 (4)의  $S_f$ 는 기화현상에 의한 액상의 감소를 나타내며, 식 (5)의  $S_T$ 는 레이저 흡수에 의한 생성항을 나타낸다.

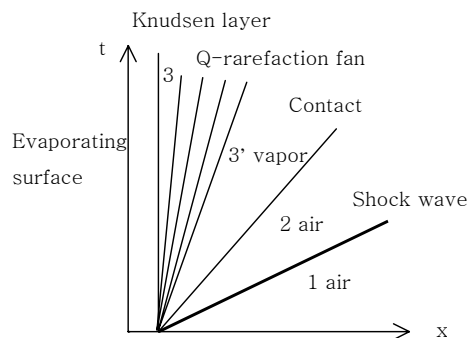
본 연구에서는 연속방정식과 운동량방정식을 수치적으로 해석하기 위하여 투사법(projection method)<sup>(10)</sup>을 도입하였고, 유체체적방정식을 해석하기 위하여 PLIC법(piecewise linear interface calculation method)<sup>(8)</sup>을 적용하였다. 에너지방정식을 해석하기 위하여 체적평균 엔탈피법(volume-averaged enthalpy method)<sup>(11)</sup>를 사용하였으며, 고상에서의 속도를 0으로 고정하였다.

### 2.2 액상-기상 경계면에서의 기화 모델

액상-기상 경계면의 온도가 비등온도에 이르게 되면 기화현상이 나타나기 시작한다. 고밀도 에



(a) subsonic vapor flow



(b) supersonic vapor flow

Fig. 2 Flow structure in the vapor phase in atmosphere

너지 가열에 의한 기화현상에서는 액상-기상 경계면의 바깥쪽에 Knudsen 층이라고 불리는 평균자유행로(mean free path)의 2~3배에 해당하는 매우 얇은 층이 존재하는 것이 알려져 있다. Fig. 2에 Knudsen 층 윗면에서 아음속 유동 또는 음속 유동이 생기는 경우의 유동 구조를 나타내었다.<sup>(6)</sup> 이 층을 포함해서는 연속체 가정이 성립하지 않을 뿐만 아니라 온도와 압력 그리고 밀도의 가파른 변화가 일어난다. 따라서 일반적인 해석에서 이 경계면을 수학적 불연속으로 다룬다. 한편 강력한 기화에 동반된 후압이 유효 포화 압력을 증가시킴에 따라 기화현상이 일어나는 액상의 표면온도는 매질의 비등점보다 항상 높게 된다. Fig. 2의 액상-기상 경계면에서 질량, 운동량, 그리고 에너지 보존방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.<sup>(6,7)</sup>

$$\rho_3(D-u_3) = \rho_s D \tag{8}$$

$$p_3 - \rho_s D u_3 = p_s \tag{9}$$

$$-\rho_s D L_v + k \frac{\partial T}{\partial n} = q_0 \tag{10}$$

여기서  $D$  는 기화면의 이동 속도를 나타낸다. 식 (8~10)으로부터 기화표면압력  $p_s$  는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_s = \frac{R_3 T_3 + \left(1 - \frac{\rho_3}{\rho_s}\right) u_v^2}{L_v u_v} \left( q_0 - k \frac{\partial T}{\partial n} \right) \tag{11}$$

여기서  $u_v = u_3 - D$  이다. 한편  $p_s$  는 Clasius-Clapeyron 방정식으로도 나타낼 수 있다.

$$\frac{p_s}{p_1} = \exp \left[ \frac{L_v}{R_3} T_{vl} \left( 1 - \frac{T_{vl}}{T_s} \right) \right] \tag{12}$$

여기서  $T_{vl}$  은 1기압하에서의 비등점을 나타낸다. 식(11)과 식(12)의 미지수를 구하기 위해서는 Knight<sup>(12)</sup>에 의하여 유도된 후압에서의 아래와 같은 도약조건을 이용하여야 한다.

$$\frac{p_3}{p_1} = 1 + \gamma_1 M_3 \frac{a_3}{a_1} \left[ \frac{-\gamma_1 + 1}{4} M_3 \frac{a_3}{a_1} + \sqrt{1 + \left( \frac{-\gamma_1 + 1}{4} M_3 \frac{a_3}{a_1} \right)^2} \right] \tag{13}$$

$$\frac{T_3}{T_s} = \left[ \sqrt{1 + \pi \left( \frac{-\gamma_3 - 1}{\gamma_3 + 1} \frac{m}{2} \right)} - \sqrt{\pi} \frac{\gamma_3 - 1}{\gamma_3 + 1} \frac{m}{2} \right]^2 \tag{14}$$

$$\frac{\rho_3}{\rho_s} = \sqrt{\frac{T_s}{T_3}} \left[ \left( m^2 + \frac{1}{2} \right) F(m) - \frac{m}{\sqrt{\pi}} \right] + \frac{1}{2} \frac{T_s}{T_3} (1 - \sqrt{\pi} m F(m)) \tag{15}$$

식(14)와 식(15)는 아음속 유동의 경우에 사용되며, 음속 유동의 경우에는  $T_3/T_s = 0.669$  ,  $\rho_3/\rho_s = 0.308$  이다. 식 (14)와 식 (15)에서  $F(m) = e^{m^2} \text{erfc}(m)$  ,  $m = u_3/\sqrt{2R_3 T_3}$  이다.

### 3. 결과 및 고찰

수치해석 방법에서 서술된 모델을 적용하여 레이저 밀도가  $10^7 \text{W/cm}^2$  이고 빔 반경이  $500\mu\text{m}$ 인 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 가우시안 형태의 에너지 분포가 고려되었으며, 플라즈마의 영향과 재응결(recondensation)은 무시하였으며 레이저 빔의 키홀내의 다중 산란은 고려하지 않았다. 매질로는 1.5mm 두께의 철판(iron plate)을 고려하였으며, 철의 물성치는 table 1에 나타내었다. 표면장력은 온도의 함수 형태로 가정하였으며, 표면장력을 제외한 모든 물성치는 상수값을 사용하였다. 입사 에너지 밀도가  $0.1 \text{MW/cm}^2$  이상인 경우에는 용융 철로의 직접적인 열전도가 입사 에너지의 흡수율에 비하여 작으므로 무시할 수 있다. 이 때 입사에너지에 대한 기화온도의 관계를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 입사 에너지가  $10^9 \text{W/m}^2$ 보다 큰 경우에 기화온도가 1기압하에서의 비등점인 3133K보다 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 한편 4500K 부근에서 기화된 철 증기의 유동형태가 아음속 증기 유동에서 음속 증기유동으로 변하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4

**Table 1** Material properties for iron<sup>(2)</sup>

Property	Value
Liquid density (kg/m <sup>3</sup> )	6518.5
Solid density (kg/m <sup>3</sup> )	7870.0
Melting temperature (K)	1809.0
Normal boiling temperature (K)	3133.0
Critical point temperature (K)	9250.0
Viscosity (kg/m·s)	3.2175×10 <sup>-3</sup>
Liquid thermal conductivity (W/m·K)	43.99
Solid thermal conductivity (W/m·K)	40.96
Liquid specific heat (J/kg·K)	804.03
Solid specific heat (J/kg·K)	658.63
Latent heat of vaporization (J/kg)	6.3639×10 <sup>6</sup>
Latent heat of melting (J/kg)	2.7196×10 <sup>5</sup>
Laser absorptivity	0.15

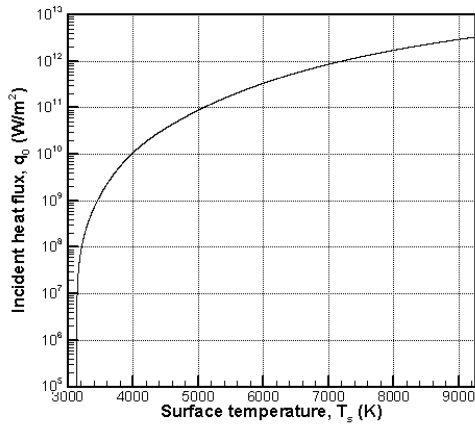


Fig. 3 Relation of incident heat flux and overheated surface temperature.

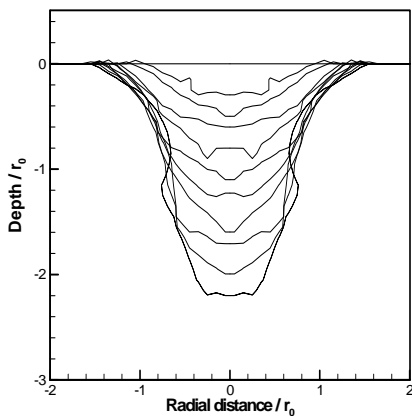


Fig. 4 Transient laser-created key-hole profile. (dt=500μs)

에는 레이저 조사 시간에 따른 키홀 형태변화를 나타내었다. 레이저 조사 초기에는 타원형의 납작한 키홀 형태가 나타나다가 조사시간이 증가함에 따라 점차폭에 비하여 깊이가 깊은 키홀형상으로 변화하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 키홀내에서의 다중산란을 고려하지 않았으므로 깊이방향으로의 키홀의 급격한 성장은 나타나지 않았다. Fig. 5에는 50ms에서의 액상층의 형태와 유동장을 나타내었다. 급격한 기화현상으로 인하여 키홀벽면에 존재하는 액상층의 두께는 매우 얇게 나타났다. 한편 1차원 해석<sup>(3)</sup>이나 단순화된 2차원 해석<sup>(2,4,5)</sup>에서 예측되었던 후압에 의한 액상 배출효과는 표면장력효과에 의해 크게 억제되는 것으로 나타났다. Fig. 6 에는 레이저 조사 초기의 표면 온도의 변화를 나타내었다. 초기의 상

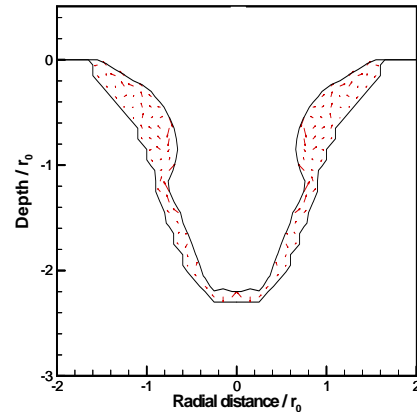


Fig. 5 Fluid flow in the thin liquid layer at t=5ms.

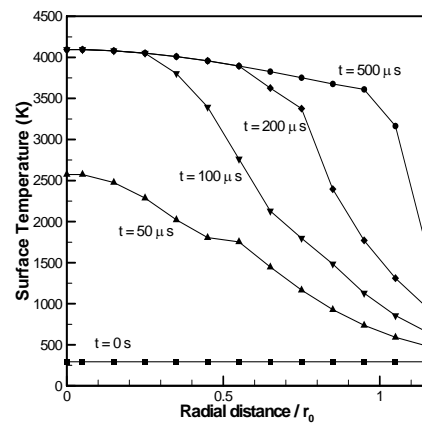


Fig. 6 Free surface temperature profile.

온 상태의 철판은 가우시안 형태의 입사 에너지를 받아 온도가 상승하기 시작한다. 조사시간이 50 $\mu$ s가 경과한 후에도 아직 기화현상은 일어나지 않고 있다가 100 $\mu$ s가 경과하자 높은 입사 에너지를 받는 중심부에서부터 기화가 일어나기 시작하며 이 때 기화온도는 Fig. 3에서 본 것과 같이 입사에너지의 함수형태가 된다. 본 논문에서는 다중 산란은 고려하지 않았기 때문에 레이저 조사시간이 경과함에 따라 철판 키홀 표면의 온도는 일정한 포물선 형태로 수렴하였으며, 최대 표면온도는 4095K로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 고에너지 밀도 레이저를 이용한 용접과정에서 발생하는 키홀의 형상을 표면장력과 후압을 고려하여 수치적으로 연구하였다. 키홀 표면 액상층에서의 표면장력을 포함한 2차원 유동해석을 위하여 유체체적법과 연속표면력법을 사용하였다. 액상과 기상 경계면에서의 키홀 표면온도와 기화증기의 온도차이와 그에 따른 기화증기의 압축성 유동형태 변화를 고려하기 위하여 Ganesh와 Knight가 제안한 1차원 기화모델을 통합하였다. 이 때 기화증기의 유동이 아음속 또는 음속유동인 경우에 대하여 입사에너지에 대한 과열된 키홀 표면온도와 후압과의 관계식을 유도하고 액상과 기상 경계면에 적용하였다. 2차원 유동해석과 통합 기화모델을 사용한 결과 기존 모델에서 해석되지 않았던 액상/기상 경계면에서의 기화 현상의 물리적인 예측과 키홀 액상층에서의 유동 형태를 동시에 예측하는 것이 가능하였다.

#### 후 기

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2003-041-D20071)

#### 참고문헌

- (1) Bauerle, D., 1996, *Laser Processing and Chemistry*, Springer.
- (2) Ki, H., Mohanty, P. S. and Mazumder, J., 2001, "Modelling of high-density laser-material interaction using fast level set method," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 34, pp. 364 ~ 372.
- (3) Chan, C. L. and Mazumder, J., 1987, "One-dimensional steady-state model for damage by vaporization and liquid expulsion due to laser-material interaction," *J. Appl. Phys.*, Vol. 62, pp. 4579 ~ 4586.
- (4) Kar, A. and Mazumder, J., 1990, "Two-Dimensional Model for Material Damage due to Melting and Vaporization during Laser Irradiation," *J. Appl. Phys.*, Vol.68, pp. 3884 ~ 3891.
- (5) Kar, A. and Mazumder, J., 1992, "Two-dimensional model for laser-induced material damage: effects of assist gas and multiple reflections inside the cavity," *J. Appl. Phys.*, Vol.71, pp. 2560 ~ 2569.
- (6) Lim, J., 1993, *A Computational Analysis of Deep Penetration Laser Welding*, Ph. D.'s thesis, University of Arizona.
- (7) Ganesh, R. K. and Fagri, A., 1997, "A Generalized Thermal Modeling for Laser Drilling Process-I. Mathematical modeling and Numerical Methodology," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.40, pp. 3351 ~ 3360.
- (8) Rider, W. J. and Kothe, D. B., 1998, "Reconstructing Volume Tracking," *J. Comput. Phys.*, Vol. 141, pp. 112 ~ 152.
- (9) Brackbill, J. U., Kothe, D. B., and Zemach, C., A., 1992, "Continuum Method for Modeling Surface Tension," *J. Comput. Phys.* Vol. 100, pp. 335 ~ 354.
- (10) Kothe, D. B. and Mjolsness, R. C., 1991, "RIPPLE: A New Model for Incompressible Flows with Free Surfaces," AIAA 91-3548.
- (11) Swaminathan, C. R. and Voller, V. R., 1993, "On the enthalpy method," *Int. J. Num. Meth. Heat Fluid Flow*, Vol. 3, pp. 233 ~ 244.
- (12) Knight, C. J., 1979, "Theoretical modeling of rapid surface vaporization with back pressure," *AIAA J*, Vol. 17, pp. 519 ~ 523.