

〈 논문 〉

## 굴곡의 표면을 가진 금속의 레이저 용융에 대한 열 및 유체유동 해석

김영득\* · 심복철\*\* · 김우승†

(2004년 2월 11일 접수, 2004년 11월 19일 심사완료)

### An Analysis of Heat and Fluid Flow in the Laser Surface Melting with a Deformed Surface

Young-Deuk Kim, Bok-Cheol Sim and Woo-Seung Kim

**Key Words :** Laser Melting(레이저 용융), Thermocapillary Convection(열모세관 대류), Deformed-Surface(굴곡의 표면)

#### Abstract

Laser melting problems with deformed substrates are investigated by axisymmetric numerical simulations. Source-based method is used to solve the energy equation, and the momentum equations are solved in the liquid domain with SIMPLER algorithm. Using a laser beam with a top-hat heat flux distribution, this study is performed to examine the effect of surface deformation, beam power density and surface tension force on the molten pool during laser melting. Surface temperature decreases with increasing surface deformation, while surface velocity increases. It is found that surface deformation, beam power density and surface tension force have a very significant effect on heat transfer and fluid flow during laser melting.

#### 기호설명

$B_f$  : 경계 가열 계수,  $q''r_0C_p k_i^{-1} \lambda^{-1}$   
 $C$  : Darcy 상수  
 $C_p$  : 비열  
 $D$  : 자유표면의 굴곡 정도( $z$  축 기준)  
 $f$  : 액상분율  
 $H$  : 금속의 무차원 높이  
 $h(r)$  : 무차원 자유표면의 위치  
 $k$  : 열전도계수  
 $M$  : 자유표면의 굴곡 정도( $r$  축 기준)  
 $Ma$  : Marangoni 수,  $R_\sigma \cdot Pr$   
 $P$  : 무차원 압력  
 $Pr$  : Prandtl 수,  $\nu \alpha^{-1}$   
 $q''$  : 레이저 빔의 열유속  
 $r$  : 반경 방향

$r_{max}$  : 무차원 용융 풀의 최대 너비  
 $r_0$  : 레이저 빔의 반경  
 $R_\sigma$  : 표면장력 Reynolds 수,  $U_R r_0 \nu^{-1}$   
 $Ste$  : Stefan 수,  $C_p(T_s - T_\infty) \lambda^{-1}$   
 $T$  : 온도  
 $t$  : 시간  
 $\mathbf{u}$  : 무차원 속도 벡터  
 $u$  : 무차원 반경방향 속도  
 $U_R$  : 표면장력 기준 속도,  $\sigma_T \lambda C_p^{-1} \mu^{-1}$   
 $v$  : 무차원 축방향 속도  
 $W$  : 금속의 무차원 너비  
 $z$  : 축 방향

#### 그리스 문자

$\alpha$  : 열확산계수  
 $\theta$  : 무차원 온도  
 $\lambda$  : 용융잠열  
 $\sigma_T$  : 표면장력 온도계수 ( $\partial\sigma/\partial T$ )

#### 하첨자

1 : 액상  
 $s$  : 고상

† 책임저자, 한양대학교 기계공학과  
 E-mail : wskim@hanyang.ac.kr  
 TEL : (031)400-5248 FAX : (031)418-0153

\* 한양대학교 대학원 기계공학과

\*\* LG 실트론, 웨이퍼 연구소, 결정성장연구팀

## 1. 서론

레이저 금속 용융에 대한 연구는 최근 그 중요성이 증대되고 있으며, 레이저를 이용한 용융은 급속한 가열이나 가열 후의 냉각으로 인해 금속의 새로운 물리적인 특성치를 얻거나 더 좋은 재질을 만드는 데 이용된다. 레이저 표면 가열로 부식이나 마모에 강한 개선된 물성치를 가진 재료를 만들 수 있다. 또한, 레이저 빔은 아주 국소적인 용융을 필요로 하는 용접에서 널리 사용되어 왔다.

레이저 용융과 응고에 대한 수치적 연구는 여러 연구가들에 의해 수행되었으며<sup>(1-5)</sup> 지금까지의 연구 결과들을 살펴보면, 레이저 용융과 응고동안에 유체 유동이 가장 중요한 역할을 하는 것으로 많은 연구가들에<sup>(1-3)</sup> 의해 보고되었다. Anthony와 Cline<sup>(1)</sup>은 용융 풀안에서의 유체유동은 표면장력 구배에 의해 생긴다고 제안했다. Srinivasan과 Basu<sup>(2)</sup>는 레이저 용융에서 부력의 영향력이 무시할 수 있을 만큼 극히 작다는 것을 보여주었다. Chan et al.<sup>(3)</sup>은 열유속 범위가  $10^7 - 10^9 \text{ Wm}^{-2}$ 인 정상상태 용융문제를 분석했고, 레이저 빔의 주사속도(scanning velocity)는 표면장력에 의한 유체 유동 속도(thermocapillary convection)에 비해 아주 작기 때문에 레이저 용융 시 중요한 역할을 하지 않는다는 것을 발표했다.

Basu와 Date<sup>(4)</sup>는 축대칭 2차원 정상상태와 비정상상태에서의 레이저 용융문제를 해석하였으며, 그들은 순수 금속에 대해 처음으로 용융의 잠열을 고려했다. 또한 다양한 레이저 빔의 에너지, 빔의 반경 그리고 알루미늄과 강철의 재질을 사용해서 레이저 용융동안의 비정상 상태를 상세히 다루었다. Ravindran et al.<sup>(5)</sup>은 유한요소법을 사용하여, 합금에 대해서 표면장력에 따른 풀의 모양과 유체 유동을 해석했다. 그들은 머시 영역(mushy-zone)에서의 열전달 및 유체유동을 무시한 겉보기 열용량 법(apparent capacity method)을 사용하여 잠열을 처리하였다. 그리고 Kim과 Sim<sup>(6)</sup>은 합금에 대해, 머시 영역에서 열전달과 유체 유동 모두를 고려하여 비정상 상태 및 정상 상태에 대해 해석하였다.

Baumart et al.,<sup>(7)</sup> Chen et al.<sup>(8)</sup> 그리고 Willis와 Xu<sup>(9)</sup>는 레이저 용융동안에 나타나는 자유표면 형상의 변화를 실험을 통해 분석하였다. 또한 동적인 자유표면의 변형은 Iwamoto et al.<sup>(10)</sup>과 Fan et al.<sup>(11)</sup>에 의해 2차원적으로 수치해석 되어졌다. 하지만 그들은 동적인 자유표면 변형에 대한 수학적 및 수치적 어려움때문에 간략화 된 불완전한 응력 방정식(stress balance equation)을 사용하여 자유표면의 변형을 다루었다. Sim과 Kim<sup>(12)</sup>은 열모세관 유동에 따른 동적인 자유표면 변형(dynamic free-surface deformation)을 2차원 수치해석을 통해 분석했으며, 자유표면 변형은 무시할 수 있을 만큼 작다는 것을 보여 주었다.<sup>(13,14)</sup>

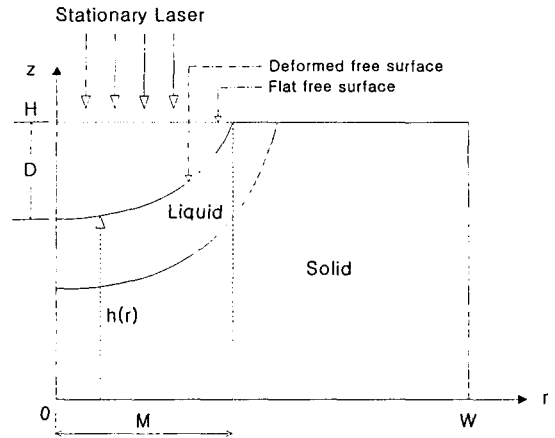


Fig. 1 Physical system

지금까지 레이저 용융에 관련된 모든 연구<sup>(1-6)</sup>에서는 자유표면의 형상이 단지 평평한 경우에 대해서만 해석되어져 왔다. 하지만 실제 레이저 용융 공정에서는 물질의 형상이 단순히 평평한 형태가 아닌 다양한 형태의 표면에서 레이저 가공이 행해지는 경우가 더 많다. 따라서 본 연구에서는 여러 가지 모양을 가진 재질(substrate)에서의 용융에 따른 열모세관 대류(thermocapillary convection)를 2차원 수치해석을 통해 분석하고자 한다. 특히, 표면 형상이 용융 풀의 모양에 어떠한 영향을 미치는지를 체계적으로 분석하고자 한다.

## 2. 수학적 모델

본 연구에서 고려된 형상 및 좌표계는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 평평하거나 굴곡의 자유표면을 가진 경우이다. Top-hat 열유속 분포를 가진 축대칭인 레이저 빔이 연속적으로 비투과성 물질의 표면을 가열시킨다. 이 때, 모든 열이 물질의 표면에 흡수되는 것으로 가정한다. 흡수된 열이 용융 풀을 형성하고, 용융 풀안에서의 유동은 표면장력 구배에 의해 야기된다. 여기서 레이저 빔의 반경이 아주 작을 경우 균일한 열유속의 가정은 타당하며, Table 1에 나타난 바와 같이 본 연구에서 고려된 레이저 빔의 반경은 1mm이다.

레이저 용융 동안 재질이 기화 온도(vaporization temperature)를 초과함에 따른 기화현상은 외부 기체와 연계해서 해석되어야 한다. 그러나 본 논문에서는 기화에 의한 물질 전달(mass transfer)은 무시한다.<sup>(4)</sup> 강합금의 용융 온도는 1723K이며, 기화 온도는 3008K이다. 따라서 본 논문의 해석은 기화 현상을 고려하지 않았기 때문에 온도 범위 1723~3008K의 용융 유동에 적합하다. 또한 기화에 의한 물질 전달이 아주 작은 경우에 적용 가능하다. 대부분의 논문에서 기화에 의한 물질 전달은

무시 되었으며,<sup>(5,6)</sup> 향후 기화에 의한 외부 기체로의 물질 전달과 열유체 유동의 연구가 필요하다. 그리고 용융 풀내에서 부력의 영향은 무시하였다.<sup>(5)</sup>

본 연구에 사용된 무차원 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

연속방정식:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru) + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

r 방향 운동량 방정식:

$$\begin{aligned} \frac{1}{Ma} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru^2) + \frac{\partial}{\partial z}(uv) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \\ \frac{1}{R_g} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial}{\partial r}(ru) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + Au \end{aligned} \quad (2)$$

z 방향 운동량 방정식:

$$\begin{aligned} \frac{1}{Ma} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ruv) + \frac{\partial}{\partial z}(v^2) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \\ \frac{1}{R_g} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + Av \end{aligned} \quad (3)$$

에너지 방정식:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta}{\partial t} + Ma \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru\theta) + \frac{\partial}{\partial z}(v\theta) \right] = \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) - \frac{\partial f}{\partial t} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $f$  는 액상분율이며, 운동량 방정식 (2)와 (3)에서 나타나는  $Au$  와  $Av$  는 고체영역에서 유체 속도를 0으로 만들기 위한 항으로서  $A$  는 아래와 같이 정의된다.<sup>(15)</sup>

$$A = \frac{-C(1-f)^2}{(f^3+q)} \quad (5)$$

$C$  는 Darcy 상수로서 아주 큰 값( $1.6 \times 10^3$ ) 으로 가정하였다. 또한  $q$  는 수치해석과정에서 0으로 나누어지는 것을 방지하기 위해 고려된 상수로서 0.0001을 사용하였다. 머시 영역(mushy-zone)을 무시한 액상분율  $f$  는 유체영역에서는 1, 그리고 고체영역에서는 0이며 용융에 따른 잠열은 에너지 방정식에서 생성항인  $\partial f/\partial t$  로 처리되어진다.<sup>(16)</sup>

그리고 무차원 경계조건은 다음과 같다.

$r=0$  에서,

$$\frac{\partial \theta}{\partial r} = \frac{\partial v}{\partial r} = u = 0, \quad 0 \leq z \leq H \quad (6)$$

$r=W$  에서,

$$u = v = 0, \quad \theta = -Ste, \quad 0 \leq z \leq H \quad (7)$$

$z=0$  에서,

$$u = v = 0, \quad \theta = -Ste, \quad 0 \leq r \leq W \quad (8)$$

$z=H$  에서,

$$-\frac{1}{N} \left( h' \frac{\partial \theta}{\partial r} - \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = \begin{cases} B_f, & 0 \leq r \leq 1 \\ 0, & 1 < r \leq W \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} 2h' \left( \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial r} \right) + (1-h'^2) \left( \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ = -N \left( \frac{\partial \theta}{\partial r} + h' \frac{\partial \theta}{\partial z} \right), \quad 0 \leq r \leq r_{max} \end{aligned} \quad (10)$$

$$v = h'u, \quad 0 \leq r \leq r_{max} \quad (11)$$

여기서,  $h' = \frac{dh}{dr}$ ,  $N = (1+h'^2)^{1/2}$  그리고  $h$  는 자유 표면의 위치를 나타낸다. 그리고 앞서 기술된 지배방정식과 경계조건에서 사용된 무차원 변수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r = \frac{r^*}{r_0}, \quad v = \frac{v^*}{U_R}, \quad P = \frac{P^*}{U_R^2}, \quad \theta = \frac{C_p(T-T_s)}{\lambda}, \quad t = \frac{t^* \alpha_1}{r_0^2}, \\ k = \frac{k^*}{k_1} \end{aligned}$$

윗첨자 \* 는 차원(dimensional) 변수를 나타낸다.

### 3. 수치적 모델

곡면의 자유표면을 가진 문제를 풀기 위해서 모든 방정식들은 실제의 물리적인 영역  $(r, z)$  으로부터 직교형태를 갖는 계산영역  $(\xi, \eta)$  으로 변환된다.

$$\xi = r \quad (12)$$

$$\eta = z \cdot H / h(r) \quad (13)$$

계산영역으로 변환된 지배방정식은 아래와 같다.

연속방정식:

$$\frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} (\xi u) - \eta \frac{h'}{h} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{H}{h} \frac{\partial v}{\partial \eta} = 0 \quad (14)$$

r 방향 운동량 방정식:

$$\begin{aligned} \frac{1}{Ma} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} (\xi u^2) - \eta \frac{h'}{h} \frac{\partial}{\partial \eta} (u^2) + \frac{H}{h} \frac{\partial}{\partial \eta} (uv) \\ = -\frac{\partial P}{\partial \xi} + \eta \frac{h'}{h} \frac{\partial P}{\partial \eta} + \frac{1}{R_g} \left( \nabla^2 u - \frac{u}{\xi^2} \right) + Au \end{aligned} \quad (15)$$

z 방향 운동량 방정식:

$$\frac{1}{Ma} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} (\xi uv) - \eta \frac{h'}{h} \frac{\partial}{\partial \eta} (uv) + \frac{H}{h} \frac{\partial}{\partial \eta} (v^2) = -\frac{H}{h} \frac{\partial P}{\partial \eta} + \frac{1}{R_\sigma} \nabla^2 v + Av \quad (16)$$

에너지 방정식:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + Ma \left[ \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} (\xi u \theta) - \eta \frac{h'}{h} \frac{\partial}{\partial \eta} (u \theta) + \frac{H}{h} \frac{\partial}{\partial \eta} (v \theta) \right] = \nabla \cdot (k \nabla \theta) - \frac{\partial f}{\partial t} \quad (17)$$

$$\nabla^2 = \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \xi \frac{\partial}{\partial \xi} \right) - \frac{2\eta h'}{h} \frac{\partial^2}{\partial \eta \partial \xi} + \left[ 2 \left( \frac{h'}{h} \right)^2 - \frac{h''}{h} - \frac{h'}{h \xi} \right] \eta \frac{\partial}{\partial \eta} + \left[ \left( \frac{h' \eta}{h} \right)^2 + \left( \frac{H}{h} \right)^2 \right] \frac{\partial^2}{\partial \eta^2} \quad (18)$$

$$\nabla \cdot (k \nabla \theta) = \frac{1}{\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \xi \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right) - \frac{\eta h'}{h} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} \left( k \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( k \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right) \right] + \left[ 2 \left( \frac{h'}{h} \right)^2 - \frac{h''}{h} - \frac{h'}{h \xi} \right] \eta \frac{\partial \theta}{\partial \eta} + \left[ \left( \frac{h' \eta}{h} \right)^2 + \left( \frac{H}{h} \right)^2 \right] \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} \quad (19)$$

한편, 변환된 경계조건은 다음과 같다.

$\xi = 0$  에서,

$$\frac{\partial \theta}{\partial \xi} = \frac{\partial v}{\partial \xi} = u = 0, \quad 0 \leq \eta \leq H \quad (20)$$

$\xi = W$  에서,

$$u = v = 0, \quad \theta = -Ste, \quad 0 \leq \eta \leq H \quad (21)$$

$\eta = 0$  에서,

$$u = v = 0, \quad \theta = -Ste, \quad 0 \leq \xi \leq W \quad (22)$$

$\eta = H$  에서,

$$-\frac{H(1+h'^2)}{h} \frac{\partial \theta}{\partial \eta} - h' \frac{\partial \theta}{\partial \xi} = \begin{cases} N \cdot B_f, & 0 \leq \xi \leq 1 \\ 0, & 1 < \xi \leq W \end{cases} \quad (23)$$

$$\frac{H(1+h'^2)}{h} \frac{\partial u}{\partial \eta} - 2h' \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{h'H(1+h'^2)}{h} \frac{\partial v}{\partial \eta} + (1-h'^2) \frac{\partial v}{\partial \xi} = -N \frac{\partial \theta}{\partial \xi}, \quad 0 \leq \xi \leq \xi_{\max} \quad (24)$$

$$v = h'u, \quad 0 \leq \xi \leq \xi_{\max} \quad (25)$$

Table 1 Property values of steel<sup>(5)</sup>

Variable	Value	Variable	Value
$T_s$	1523 K	$C_p$	753 J/(kg K)
$\rho$	7200 kg/m <sup>3</sup>	$k_i$	15.48 W/(m K)
$k_s$	31.39 W/(m K)	$\mu$	0.006 (Ns)/m <sup>2</sup>
$\lambda$	2.47 × 10 <sup>5</sup> J/kg	$q''$	8 × 10 <sup>7</sup> W/m <sup>2</sup>
$r_0$	1 mm		-10 <sup>-4</sup> N/(m K)
$T_i$	1723 K	$\sigma_T$	-10 <sup>-5</sup> N/(m K)
$T_\infty$	303.7 K		-10 <sup>-6</sup> N/(m K)
Process Parameters			
Pr	0.292		
$R_\sigma [\sigma_T]$	65.6 [-10 <sup>-6</sup> N/(m K)], 656 [-10 <sup>-5</sup> N/(m K)], 6560 [-10 <sup>-4</sup> N/(m K)]		
Ste	3.717		
$B_f [q'']$	15.755 [8 × 10 <sup>7</sup> W/m <sup>2</sup> ], 22.648 [1.15 × 10 <sup>8</sup> W/m <sup>2</sup> ], 29.541 [1.5 × 10 <sup>8</sup> W/m <sup>2</sup> ]		

Table 2 Grid refinement studies with the flat free surface ( $D=0$ )

$R_\sigma$	Grid number ( $r \times z$ )	Present results	
		Width	Depth
6560	51 × 41	0.92	0.19
	61 × 41	0.94	0.19
	61 × 51	0.94	0.18
65.6	51 × 41	0.88	0.21
	61 × 41	0.9	0.23
	61 × 51	0.9	0.25

지배방정식 (14)~(17)과 경계조건식 (20)~(25)는 SIMPLER 알고리즘을 사용한 유한체적법<sup>(17)</sup>을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 위해 사용된 강합금의 물성치들은 Table 1에 나타나 있으며, 해석영역의 너비  $W$ 와 높이  $H$ 는 각각 3과 2이다. 그리고 무차원 자유표면의 위치,  $h(r)$ 는 본 연구에서 포물선 방정식을 사용하여 표현하였으며, 그 방정식은 아래와 같다.

$$h(r) = \frac{D}{M^2} r^2 + (H - D) \quad (26)$$

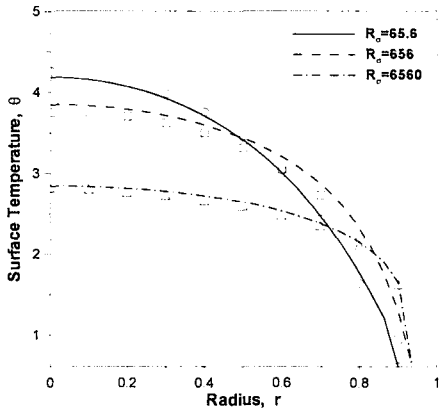
한편, 축대칭 모델에서의 격자 의존성을 조사하기 위해 Table 2에서 나타난 바와 같이 세 가지 격자계에 따른 용융 풀의 깊이와 너비들을 비교한 후, 61 × 51의 비균일 격자계가 사용되었다. 정상상태의 수렴기준은 해의 상대오차로 표현된 다음의 식을 사용하였다.

$$\left| \frac{S^{n+1} - S^n}{S^{n+1}} \right| \leq \varepsilon, \quad \varepsilon = 10^{-3} \quad (27)$$

여기서 상첨자  $n+1$ 과  $n$ 은 반복시간 단계,  $S$ 는 변수 ( $u, v, \theta$ ) 그리고  $\varepsilon$ 는 수렴기준을 나타낸다.

**Table 3** Comparison of the present results with those of Ravindran et al.<sup>(5)</sup>

$R_o$	Present results		Ravindran et al. <sup>(5)</sup>	
	Width	Depth	Width	Depth
6560	0.94	0.18	0.96	0.19
656	0.94	0.25	0.91	0.24
65.6	0.9	0.25	0.9	0.27



**Fig. 2** Comparison of the present results(line) with those of Ravindran et al.<sup>(5)</sup>(symbol)

4. 결과 및 고찰

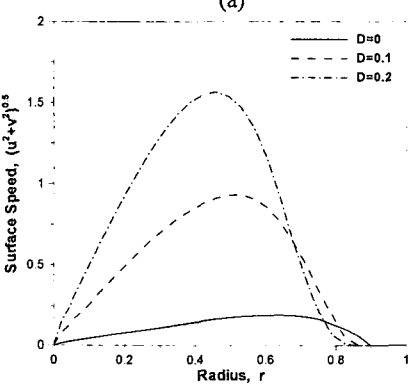
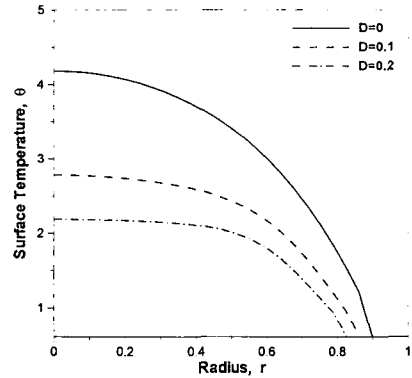
본 연구에서 적용한 수치해석의 타당성을 검증하기 위해 Ravindran et al.<sup>(5)</sup>의 결과와의 비교를 Table 3 과 Fig. 2 에 나타내었다. 계산된 용융 풀의 모양과 표면 온도분포가 Ravindran et al.<sup>(5)</sup>의 결과들과 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

4.1 표면 형상(M, D)의 변화에 따른 영향

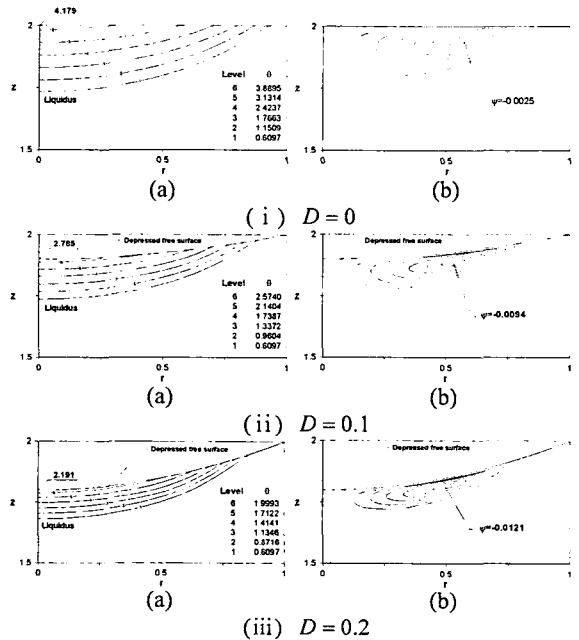
표면의 굴곡 정도에 따른 용융 풀의 기하학적인 형상, 속도장 그리고 온도 분포를 해석하였다.

Fig. 3은 D의 변화에 대해 정상상태에서의 자유표면온도와 속도 분포를 나타낸다. 평평한 자유표면 (D=0) 과 굴곡의 자유표면 (M=1, D=0.1 또는 0.2) 에서의 등온선 및 유선들은 Fig. 4에 나타내었다.

자유표면의 굴곡이 커짐에 따라, 자유표면에서의 최대 온도는 각각 33, 48% 감소하며, 속도는 각각 408, 755% 증가함을 볼 수 있다. 그리고 굴곡이 커짐에 따라 자유표면에서의 최대속도 위치는 중심축에 점점 가까워지며, 풀 내의 등온선은 곡면을 따라 넓고 균일하게 분포함을 볼 수 있다. 이는 자유표면에서 열전달을 촉진시키는 강한 대류의 영향에 의한 것이다. 중심축을 따라서 유동은 상승하므로, 즉 저온의 유체가 상부로 들어 오기 때문에 대류의 영향이 클수록 최대온도는 감소하며, 표면온도 분포는 균일하게 된다.



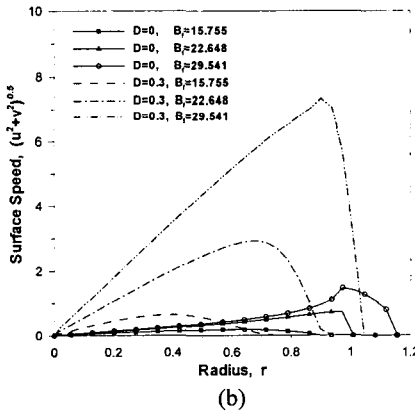
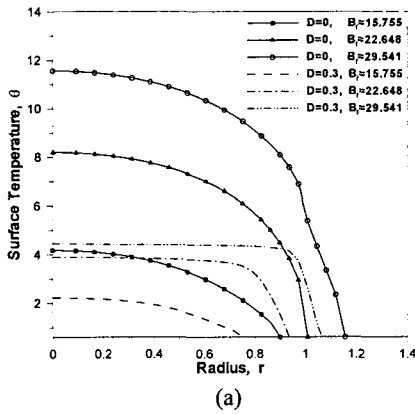
**Fig. 3** (a) Free surface temperature and (b) velocity distributions with  $R_o=65.6$ ,  $B_f=15.76$ ,  $M=1$  for various values of  $D$



**Fig. 4** (a) Isotherms and (b) streamlines with  $R_o=65.6$ ,  $B_f=15.755$  and  $M=1$

**Table 4** Effect of surface shape on the molten pool with  $R_o=65.6$  and  $B_f=15.755$

$M$	$D$	Melt width	Melt depth	Stream function minima, $\psi_{min}$		$M.A.R$
0	0	0.9	0.25	-0.0025		3.6
	0.1	0.86	0.16	-0.0094		5.4
1	0.2	0.83	0.12	-0.0121		6.9

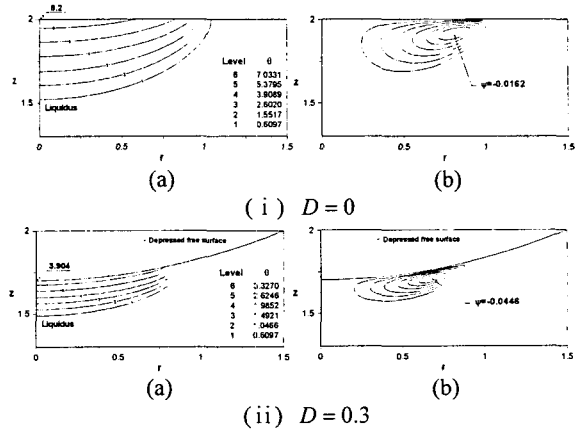


**Fig. 5** (a) Free surface temperature and (b) velocity distributions with  $R_o=65.6$ ,  $M=1.5$  for various values of  $B_f$  and  $D$

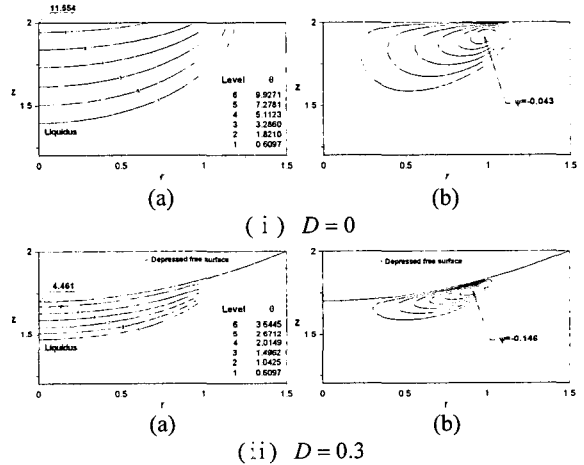
Table 4는 풀의 너비와 깊이 그리고 최대 유동함수 값 및 용융 비 (*Melt Aspect Ratio, width to depth ratio*)를 나타낸다. 자유표면의 굴곡이 커짐에 따라 용융 풀의 너비와 깊이는 작아지지만, 용융 비는 역으로 증가한다. 이는 용융 풀의 너비에 비해 깊이가 상대적으로 더 작게 되기 때문이다. 또한 Fig. 3에 나타난 바와 같이, 굴곡이 커짐에 따라 자유표면속도가 증가하기 때문에 최대 유동함수값은 증가한다.

4.2 열유속( $B_f$ )의 변화에 따른 영향

$R_o$  값은  $65.6(\sigma_f = -10^{-6} \text{ N/mK})$ 으로 일정하고,



**Fig. 6** (a) Isotherms and (b) streamlines with  $R_o=65.6$ ,  $B_f=22.648$  and  $M=1.5$



**Fig. 7** (a) Isotherms and (b) streamlines with  $R_o=65.6$ ,  $B_f=29.541$  and  $M=1.5$

$B_f$  값이  $15.755(q'' = 8 \times 10^7 \text{ W/m}^2)$ ,  $22.648(q'' = 1.15 \times 10^8 \text{ W/m}^2)$  그리고  $29.541(q'' = 1.5 \times 10^8 \text{ W/m}^2)$ 인 경우에 대해 수치해석을 수행하였다. Fig. 5를 살펴보면 평평한 자유표면 ( $D=0$ )인 경우, 열유속이 증가함에 따라 자유표면에서의 최대 온도가 각각 96, 177% 증가하며, 속도는 각각 298, 702% 증가함을 볼 수 있다. 또한 굴곡의 자유표면 ( $D \neq 0$ )인 경우, 열유속이 증가함에 따라 자유표면에서의 최대 온도가 각각 74, 99% 증가하며, 속도는 각각 351, 1029% 증가함을 나타낸다. 굴곡의 자유표면인 경우, 열유속이 증가함에 따라 풀 내의 등온선은 곡면을 따라 더 넓고 균일하게 분포하며 상변화 경계면 근처에서 더 급격한 변화를 보인다. 이에 따라 최대 속도의 위치는 열유속이 증가함에 따라 상변화 경계면쪽으로 이동하며, 상변화 경계면에서 급격한 속도 구배가 존재한다.

**Table 5** Effect of  $B_f$  on the molten pool with  $R_g = 65.6$  and  $M=1.5$

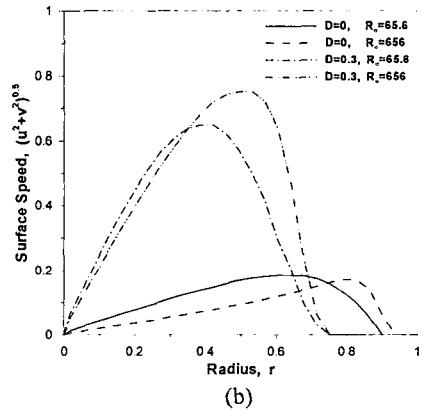
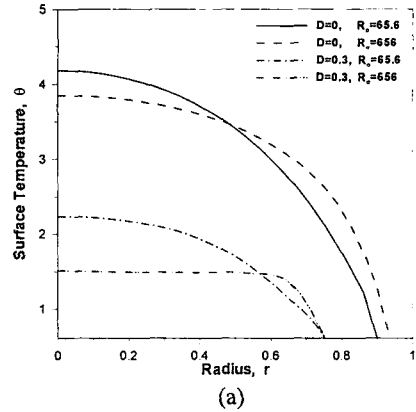
$B_f$	$D$	Melt width	Melt depth	Stream function minima, $\psi_{mn}$	$M.A.R$
15.755	0	0.9	0.25	-0.0025	3.6
	0.3	0.75	0.11	-0.0039	6.8
22.648	0	1.01	0.46	-0.0162	2.2
	0.3	0.94	0.2	-0.0446	4.7
29.541	0	1.16	0.58	-0.043	2
	0.3	1.05	0.23	-0.146	4.6

Fig. 6과 7은 각각  $B_f$ 가 22.648과 29.541일 때, 자유표면 형상 ( $M=1.5$ ,  $D=0$  또는 0.3)에 따른 풀 내에서의 등온선과 유선들을 나타내고 있다. 그리고 열유속의 변화에 따른 풀의 너비와 깊이, 최대 유동함수값 그리고 용융 비는 Table 5에 나타내었다. 자유표면의 형상 ( $D$ )이 동일할 때, 열유속이 증가함에 따라 용융 풀의 너비와 깊이는 모두 증가하고, 용융 비는 역으로 감소한다. 이는 용융 풀의 너비에 비해 깊이가 상대적으로 더 크게 되기 때문이다. 하지만 열유속이 증가함에 따라 용융 비의 감소 폭은 감소한다. 또한 Fig. 5에 나타낸 바와 같이, 열유속이 증가함에 따라 자유표면속도가 증가하기 때문에 최대 유동함수값은 증가한다.

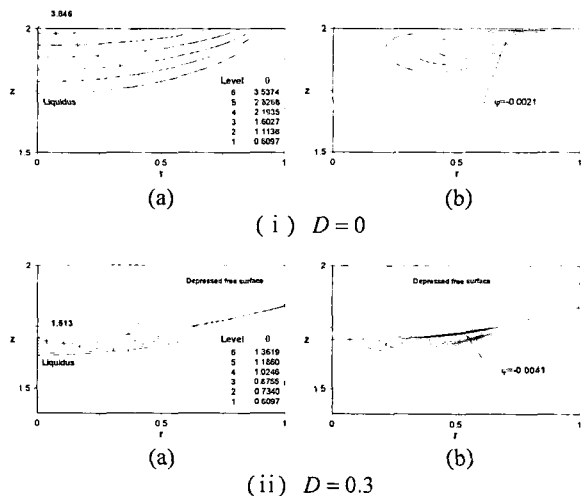
4.3 표면장력 ( $R_g$ )의 변화에 따른 영향

$B_f$  값이 15.755 ( $q'' = 8 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ )으로 일정하고,  $R_g$  값이 65.6 ( $\sigma_f = -10^\circ \text{ N/mK}$ )과 656 ( $\sigma_f = -10^\circ \text{ N/mK}$ )인 경우에 대해 수치해석을 수행하였다.

Fig. 8에 나타낸 것처럼,  $R_g$  값이 커짐에 따라 자유표면에서의 최대 온도가 평평한 자유표면 ( $D=0$ )인 경우와 굴곡의 자유표면 ( $D \neq 0$ )인 경우, 각각 8, 32% 감소하며, 속도는 평평한 자유표면인 경우, 7% 감소하고 굴곡의 자유표면인 경우, 16% 증가하는 서로 상반된 결과가 나타난다. 이는 속도의 무차원 변수와 대류의 영향에 의한 것이다. 즉, 평평한 자유표면 ( $D=0$ )인 경우,  $R_g$  값이 커짐에 따라  $U_R$  값의 증가비에 비해 실제 속도 (dimensional velocity)의 증가비가 이에 미치지 못하기 때문에 속도는 감소하게 된다. 이에 반해, 굴곡의 자유표면 ( $D \neq 0$ )인 경우, 대류의 영향이 평평한 자유표면인 경우에 비해 상대적으로 크기 때문에  $U_R$  값의 증가비에 비해 실제 속도의 증가비가 크므로 속도는 증가하게 된다. 그러나 변환된 실제 속도는 평평한 자유표면일 때 829%, 굴곡의 자유표면일 때 1057%만큼 두 경우 모두 증가한다. 따라서  $R_g$  값이 커짐에 따라, 표면온도의 분산 (dispersion)이 평평한 자유표면 ( $D=0$ )인 경우, 1.45에서 0.92로 감소하고 굴곡의 자유표면 ( $D \neq 0$ )



**Fig. 8** (a) Free surface temperature and (b) velocity distributions with  $B_f=15.755$ ,  $M=1.5$  for various values of  $R_g$  and  $D$



**Fig. 9** (a) Isotherms and (b) streamlines with  $R_g=656$ ,  $B_f=15.755$  and  $M=1.5$

인 경우, 0.45에서 0.17로 감소함에 따라 풀 내에서 온도가 균일해짐을 알 수 있다.

**Table 6** Effect of  $R_o$  on the molten pool with  $B_f = 15.755$  and  $M = 1.5$

$R_o$	$D$	Melt width	Melt depth	Stream function minima, $\psi_{\min}$	$M.A.R$
65.6	0	0.9	0.25	-0.0025	3.6
	0.3	0.75	0.11	-0.0039	6.8
656	0	0.94	0.25	-0.0021	3.8
	0.3	0.78	0.06	-0.0041	13

$M = 1.5$ ,  $R_o = 656$  ( $\sigma_r = -10^{-5}$  N/mK) 그리고  $D$  가 0과 0.3일 때 풀 내에서의 등온선과 유선들은 Fig. 9에 나타내었다.  $R_o$  값의 변화에 따른 풀의 너비와 깊이, 최대 유동함수값 그리고 용융 비는 Table 6에 나타내었다.  $R_o$  값이 커짐에 따라, 즉  $Ma$  수가 높을수록 용융 비는 평평한 자유표면 ( $D=0$ ) 인 경우 3.6에서 3.8로, 굴곡의 자유표면 ( $D=0.3$ ) 인 경우 6.8에서 13으로 상대적으로 커진다. 또한  $R_o$  값이 커짐에 따라 자유표면속도가 평평한 자유표면인 경우 감소하고, 굴곡의 자유표면인 경우 증가하기 때문에 최대 유동함수값은 각각 감소 또는 증가한다.

## 5. 결론

굴곡이 있는 표면에 대한 레이저 표면가열에 의한 금속 용융 시, 용융 풀의 기하학적인 형상, 속도장 그리고 온도분포에 미치는 영향에 대해 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

표면의 굴곡이 증가할수록 최대 표면온도는 감소하고 표면유체속도는 증가한다. 따라서 최대 유동함수값은 증가하며 강한 대류의 영향으로 표면 온도분포는 균일하게 된다. 또한 표면의 굴곡이 커짐에 따라 풀의 너비와 깊이는 모두 작아지지만, 용융 비는 역으로 증가한다.  $R_o$  값이 증가할수록 무차원 최대 표면온도는 감소하며 속도는 평평한 자유표면인 경우 감소하고, 굴곡의 자유표면인 경우 증가한다. 그러나 변환된 실제(dimensional) 표면속도는 모두 증가한다.

## 후 기

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었습니다(KRF-2002-041-D00071).

## 참고문헌

(1) Anthony, T. R. and Cline, H. E., 1977, "Surface Rippling Induced by Surface Tension Gradients During Laser Surface Melting and Alloying," *J. Appl. Phys.*, Vol. 48, pp. 3888-3894.  
 (2) Srinivasan, J. and Basu, B., 1986, "A Numerical

Study of Thermocapillary Flow in a Rectangular Cavity During Laser Melting," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 24, pp. 563-573.

- (3) Chan, C., Mazumdar, J. and Chen, M. M., 1984, "Three-Dimensional Model for Convection in Laser Melted Pool," *paper presented at ICALEO-85*.  
 (4) Basu, B. and Date, A. W., 1990, "Numerical Study of Steady State and Transient Laser Melting Problems-I. Characteristics of Flow Field and Heat Transfer," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 33, No. 6, pp. 1149-1163.  
 (5) Ravindran, K., Srinivasan, J. and Marathe, A. G., 1994, "Finite Element Study on the Role of Convection in Laser Surface Melting," *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 26, pp. 601-618.  
 (6) Kim, W. S. and Sim, B. C., 1997, "Study of Thermal Behavior and Fluid Flow during Laser Surface Heating of Alloys," *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 31, pp. 703-723.  
 (7) Baumgart, P., Krajnovich, D. J., Nguyen, T. A. and Tam, A. C., 1995, "A New Laser Texturing Technique for High Performance Magnetic of Ni-P Disks," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 31, No. 6, pp. 2946-2951.  
 (8) Chen, S. C., Cahill, D. G. and Grigoropoulos, C. P., 2000, "Melting and Surface Deformation in Pulsed Laser Surface Micromodification of Ni-P Disks," *J. Heat Transfer*, Vol. 122, pp. 107-112.  
 (9) Willis, D. A. and Xu, X., 2000, "Transport Phenomena and Droplet Formation During Pulsed Laser Interaction with Thin Films," *J. Heat Transfer*, Vol. 122, pp. 763-770.  
 (10) Iwamoto, M., Ye, M., Grigoropoulos, C. P. and Greif, R., 1998, "Numerical Analysis of Pulsed Laser Heating for the Deformation of Metals," *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol. 34, pp. 791-804.  
 (11) Fan, H. G., Tsai, H. L. and Na, S. J., 2001, "Heat Transfer and Fluid Flow in a Partially or Fully Penetrated Weld Pool in Gas Tungsten Arc Welding," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 417-428.  
 (12) Sim, B. C. and Kim, W. S., 2003, "Melting and Dynamic-Surface Deformation in Laser Surface Heating," *Int. J. Heat Mass Transfer*, submitted for publication.  
 (13) Sim, B. C., Kim, W. S. and Zebib, A., 2004, "Axisymmetric Thermocapillary Convection in Open Cylindrical Annuli with Deforming Interfaces," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 5365-5373.  
 (14) Sim, B. C., Kim, W. S. and Zebib, A., 2004, "Dynamic Free-Surface Deformations in Axisymmetric Liquid Bridges," *Advances in Space Research*, Vol. 34, pp. 1627-1634.  
 (15) Voller, V. R. and Prakash, C., 1987, "A Fixed Grid Numerical Modeling Methodology for Convection-Diffusion Mushy Region Phase-Change Problems," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 1709-1719.  
 (16) Swaminathan, C. R. and Voller, V. R., 1993, "On the Enthalpy Method," *Int. J. Numerical Methods Heat Fluid Flow*, Vol. 3, pp. 233-244.  
 (17) Pantankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," *Hemisphere Publishing Corp.*