

고에너지밀도용접 과정에서의 2차원 열유동에 대한 수치해석적 연구

박건중* · 장경천* · 김찬중**
(1999년 8월 23일 접수)

Numerical Study on the Two-Dimensional Heat Flow in High-Power Density Welding Process

Kun Joong Park, Kyung-Chun Jang and Charn-Jung Kim

Key Words: High-Power Density Welding(고에너지밀도용접), Moving Heat Source(이동열원), Mushy Region Phase Change(머시영역 상변화), Finite Volume Method(유한체적법), Enthalpy Method(엔탈피방법)

Abstract

This work presents a two-dimensional quasi-steady state model to study the fluid flow and heat transfer in high-power density welding process of thin AISI-304 stainless steel plates. The enthalpy method and the finite volume method were used for a numerical analysis of the mushy region phase change as well as the heat flow at the weld pool and the heat-affected zone. The results show that the mushy region distributed around the weld pool becomes wider downstream and the surface heat losses by convection and radiation can be significant factors in welding process especially when a welding speed is relatively low.

기호설명

A : 머시영역에서의 속도 수정 함수
 a : 키홀 반지름
 C : 다공도 상수
 c_p : 비열
 D : 평판의 폭
 f_l : 액상분율
 g : 중력가속도
 Gr : Grashof수, $g\beta(T - T_\infty)l^3/\nu^2$
 ΔH : 잠열함량

h_c^+ : 평판 윗면에서의 대류열전달계수
 h_c^- : 평판 아래면에서의 대류열전달계수
 h_c : 대류열전달계수
 h_r : 복사열전달계수
 I : 단위 두께 당 열전달량
 k : 열전도계수
 L : 잠열
 l : 특성길이
 Nu_l : Nusselt수, $h_c l / k$
 Pr : Prandtl수, $c_p \mu / k$
 p : 압력
 q : 열유속
 q_z : 0으로 나누어지는 것을 방지하는 상수
 r : 반지름
 Ra_l : Rayleigh수, $GrPr$

* 서울대학교 대학원 기계공학부

** 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : kimcj@plaza.snu.ac.kr

TEL : (02)880-1662 FAX : (02)883-0179

S	: 생성항
T	: 온도
T_0	: 기화온도
U	: 용접속도
u	: 속도
u, v	: x, y -방향 속도성분
u_r, u_θ	: r, θ -방향 속도성분
x, y	: 카테시안 좌표
r, θ	: 원통 좌표

그리스문자

β	: 열팽창계수
δ	: 평판 두께
ϵ	: 방사율
μ	: 점성계수
ν	: 동점성계수
ρ	: 밀도
σ	: 스테판-볼츠만 상수

하첨자

c	: 대류
f	: 막
l	: 액상
$loss$: 손실
r	: 복사
s	: 고상
T	: 온도
u	: x -방향 속도
v	: y -방향 속도
∞	: 주위

1. 서론

두 금속모재의 접합부를 적당한 강도의 열원을 이용하여 녹이고 다시 응고시키는 과정을 통해 결합물을 만들어내는 용융용접(fusion welding) 과정에서 열원의 강도가 대략 10^9 W/m^2 이상으로 높아지면 접합부에서는 용융뿐만 아니라 금속의 기화현상이 일어난다. 새로 생겨난 금속증기에 의해 발생하는 압력은 정수압력 및 표면장력과 균형을 맞출 때까지 용접풀(weld pool)을 밖으로 밀어내며 이러한 침투(penetrating)열원은 레이저

용접, 전자빔용접, 플라즈마-아크용접 등이 갖는 특성이다. 투사되는 빔압력 또한 용접풀에 힘을 가하여 손가락모양의 키홀(keyhole)이라 불리는 공동을 만들어내기 때문에 이러한 고에너지밀도 용접을 키홀용접이라고도 한다. 원칙적으로 이러한 용접방법은 용융부 및 열영향부(Heat-Affected Zone, HAZ)의 폭이 좁아서 재료가공에서 발생할 수 있는 야금학적 손실과 비틀림을 최소화하기 때문에 매우 매력적인 방법이다. 그러나 매우 높은 정밀도의 설비장치를 요구함과 동시에 부적절한 고에너지밀도용접 과정을 거친 용접구조물은 다공성, 고온균열, 잔류응력 등의 기계적 결함을 갖게 되므로 용접공정 설계에 있어서 세밀한 주의가 요구된다.^(1,2) 고정밀도와 고비용을 요구하는 이러한 용접과정의 특성상 주로 자동차, 항공우주 등의 자본집약적인 산업현장에서 이용되며 고품질의 용접물을 얻기 위해 점차 산업현장에서 그 적용범위가 늘어가고 있기 때문에 용접공정의 자동화 및 우수한 기계적성질을 갖는 용접부를 얻기 위한 최적의 용접조건을 설정함에 있어서 용접부에서의 열전달 및 유체유동현상에 대한 연구는 필수적이다.

일반적으로 금속의 용접과정에서 관심을 갖는 사항들은 용접후 금속 조직에 영향을 미치는 냉각률과 접합부의 일차적 강도를 대변하는 용융부 및 열영향부의 크기 등이다. 그러나 이러한 자료들은 용접풀에서의 복잡한 열전달 메커니즘과 매우 큰 온도구배로 인하여 이론적인 해석만으로는 얻기가 매우 힘들기 때문에 수치해석적 접근이 필요하다. 또한 키홀을 중심으로 이루어지는 열전달에 의한 모재에서의 온도분포와 유동의 특성은 키홀이 생성되지 않는 일반적인 용융용접에서와는 다른 양상을 보이기 때문에 다른 각도에서 해석되어야 할 필요가 있다.

키홀을 형성하는 고에너지밀도용접 과정에서의 열유동 특성에 대한 초기 연구들은 단순전도만을 고려하였으며,⁽³⁻⁵⁾ Dowden 등,⁽⁶⁾ Wei와 Giedt⁽⁷⁾는 유동장을 함께 고려하였으나 고체-액체 상경계의 형상을 미리 가정하였다. Hsu와 Rubinsky⁽⁸⁾는 잠열효과 및 온도에 따라 변하는 고상에서의 물성치의 영향을, Kim 등⁽⁹⁾은 용접공정과 관련된 여러 무차원변수가 고체-액체 상경계에 미치는 영향을 각각 고찰하였으나, 순수물질의 상변화(단일상경계) 문제에만 국한시켜 연구를 수행하였다.

최근에는 Al-Khalidy⁽¹⁰⁾가 표면에서의 열손실을 고려하였으나, 유체유동현상은 무시하고 온도장만을 해석하였다.

본 연구에서는 온도에 따른 고상에서의 물성치의 변화, 평판 상하면에서의 대류 및 복사에 의한 열손실, 액상과 고상 사이에서의 상변화효과 및 특히 머시(mushy)영역을 고려하여 용융부의 유동장을 해석하고 액상과 고상에서의 온도분포를 구하고자 한다. 이를 위하여, 두께가 얇은 AISI-304 스테인리스강 평판의 고에너지밀도용접 과정을 2차원으로 모델링하여 수치해석하고자 하며, 용접속도를 변화시켜서 용융부와 열영향부의 형상 및 크기 변화, 키홀에서 모재로의 열전달량의 변화, 용접경로의 고정점에서 시간에 따른 온도변화 등을 살펴보고자 한다. 이와 함께 머시 영역의 분포를 확인하고 금속모재 표면에서의 열손실이 용융부와 열영향부 그리고 모재로의 열전달량에 끼치는 영향을 고찰한다.

2. 시스템의 모델링 및 해석방법

본 연구에서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 두께가 얇은 AISI-304 스테인리스강 평판의 고에너지밀도용접 과정에서의 2차원 열유동 문제를 다루고자 한다. 일정속도로 움직이는 레이저/전자빔 또는 플라즈마 아크가 용접중심선($y = 0$)에 수직으로 투사되면 실린더 모양의 키홀이 만들어지고, 그 둘레에 머시영역을 포함한 용융풀(molten pool), 용융풀을 둘러싸는 고상-열영향부, 그리고 열영향부 바깥의 모재영역 등이 구성된다.

접합부 주위의 모재를 녹이고 또 기화시키면서 진행되는 레이저빔 또는 플라즈마 아크는 일정속도로 움직이기 때문에, 실제 용접 전과정에서 용접을 시작하는 때와 용접을 마무리하는 때를 제외하고는 열원에 부착된 좌표계에 대하여, 모재에서의 열유동은 정상상태로 가정할 수 있다. 즉, 열원은 고정되어 있고, 모재가 일정속도로 지나간다는 라그랑지안 해석이 가능해진다.

두꺼운 모재를 용접할 경우, 고에너지밀도의 빔이 모재에 투사될 때 나타나는 가늘고 긴 손가락 모양의 키홀이 형성되는 원리는 매우 복잡하며 아직도 다 알려져 있지 않다.⁽¹¹⁾ 즉, 투사되는 빔압력(플라즈마-아크 용접의 경우에는 플라즈마

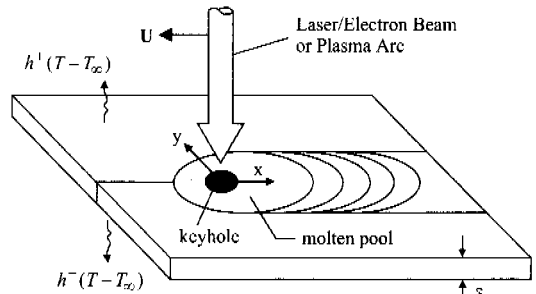


Fig. 1 Schematic diagram of the high-power density welding process of thin metal plates

가스 제트압력), 키홀 내의 증기압 그리고 용융부에서 키홀로의 비평형 기화현상에 의한 반동압력 등의 용발(ablation)압력과 용융부의 정수압력, 표면장력 등이 균형을 이루면서, 동시에 키홀 내에서의 에너지 반사 및 흡수 과정이 복합적으로 작용하여 만들어진다. 그러나 모재의 두께가 얇은 진침투(full penetration)용접의 경우에는, 키홀의 형상에 영향을 끼치는 주요한 변수로서 표면장력 효과를 고려할 수 있으며, 따라서 본 연구에서는 키홀의 단면형상을 원으로 가정한다. 키홀 벽에서의 에너지 및 압력 균형을 고려하여 키홀의 형상을 예측한 Trappe 등⁽¹¹⁾은 매우 빠른 용접속도의 경우에도 키홀의 형상이 약간 타원형으로 변할 뿐, 거의 원의 형태를 유지함을 보임으로써 위 가정을 뒷받침해준다. 한편 키홀 경계에서의 온도는 0.1% 범위 이내에서 거의 균일하다는 이들의 연구결과로부터, 본 연구에서는 키홀에서의 온도경계조건으로 모재의 기화온도를 균일하게 주도록 한다. 이때 경계조건으로 기화온도를 준다는 것은, 키홀 표면에서 기화되는 소량의 일부 급속을 무시함으로써 모든 용융풀의 유동이 키홀 주위를 흘러간다는 가정을 의미한다.

높은 에너지를 갖는 열원에 의해 가열된 모재의 표면으로부터 주위대기로 방출되는 열손실을 실제적으로 구현한다. 모재의 표면온도가 T 이고 주위대기온도가 T_∞ 일 때, 복사에 의해 방출되는 열유속은 다음과 같다.

$$q_r = \epsilon\sigma(T^4 - T_\infty^4) = h_r(T - T_\infty) \tag{1}$$

여기서 ϵ 은 방사율, σ 는 스테판-볼츠만 상수이며, 새로 정의된 복사열전달계수 h_r 은 다음과 같다.⁽¹²⁾

$$h_r \equiv \epsilon\sigma(T^2 + T_\infty^2)(T + T_\infty) \quad (2)$$

실제로 금속표면에서의 방사율은 표면온도, 방사방향, 복사과장 및 표면상태, 즉 조도나 부식, 연마정도에 따라 달라진다.⁽¹²⁾ 본 연구에 사용한 AISI-304 스테인리스강(70 wt% Fe, 18~20 wt% Cr, 8~10 wt% Ni)의 경우, 액체상태인 1593℃일 때의 방사율은 합금의 조성상태에 따라 대략 0.43에서 0.56까지의 값을 가지며, 232℃에서의 방사율은 0.2이다.^(13,14) 이를 근거로 금속표면에서의 방사율을 온도 T 에 대한 선형함수로 가정한다.

$$\epsilon(T) = 0.2 + \frac{0.23}{1361}(T - 232) \quad (3)$$

한편 대류에 의해 방출되는 열유속은 다음과 같다.

$$q_c = h_c(T - T_\infty) \quad (4)$$

외부 자유대류유동에 대한 실험적 상관식으로부터 가열되어 있는 평판의 윗면과 아래면에 대해 평균 Nusselt수는 다음과 같으므로,⁽¹²⁾

$$Nu_l = 0.54Ra_l^{1/4} \quad \text{upper} \quad (5)$$

$$Nu_l = 0.27Ra_l^{1/4} \quad \text{lower} \quad (6)$$

기준되는 특성길이 l 을 평판의 표면면적과 주변 길이(perimeter)의 비로써 정의하면, 대류열전달계수 h_c 는 다음과 같다.

$$h_c^+ = \frac{k}{l} 0.54(GrPr)^{1/4} \quad (7)$$

$$h_c^- = \frac{k}{l} 0.27(GrPr)^{1/4} \quad (8)$$

위 식에서 $k, g\beta/\nu^2, Pr$ 은 막(film)온도, 즉 $T_f = (T + T_\infty)/2$ 에서 평가되는 공기의 물성치이

다. 본 연구에서는 모재가 고정되어 있고 열원이 움직이는 경우이지만, 빈이 고정되어 있고 모재가 이동되는 경우라면 평판 위에 발달하는 온도 및 속도경계층에 의한 표면열손실을 고려해야 할 것이다.⁽¹⁵⁾

Fig. 2와 Fig. 3는 금속모재의 표면열손실을 구현하기 위해 계산된 복사 및 대류열전달계수가 표면온도에 따라 어떻게 달라지는지를 보여준다. 복사열전달계수의 강한 온도의존성에 반하여 대류열전달계수는 약 500℃까지는 복사열전달계수보다 더 우세하지만 이내 다시 작아지는 특성을 확인할 수 있으며 그 크기에 있어서도 복사에 의한 것보다 상당히 작음을 알 수 있다.

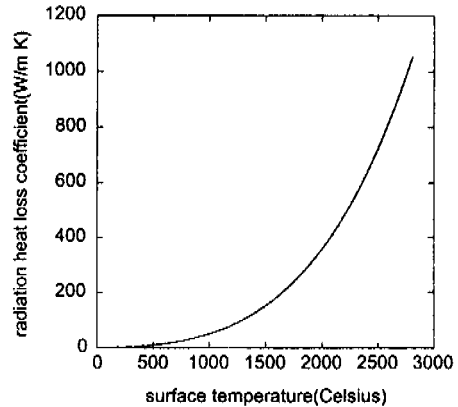


Fig. 2 Radiation heat transfer coefficient

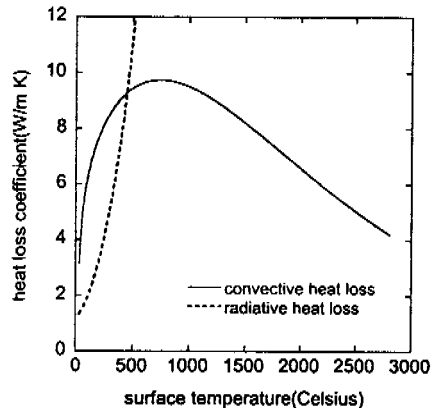


Fig. 3 Convection heat transfer coefficient at upper surface

이외에 본 연구를 위해 가정된 조건들은 다음과 같다.

(1) 금속 평판의 축방향(빔의 투사방향) 온도변화는 반경방향 온도변화에 비해 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정한다. 평판의 얇은 두께로 인한 작은 Biot수가 이 가정을 뒷받침한다.⁽⁸⁾

(2) 용융부의 액체금속은 비압축성 뉴턴유체라고 가정하고, 용접속도가 매우 작으므로 에너지 소산을 무시한다.

(3) 고상영역, 특히 열영향부 및 그 근처에서의 큰 온도구배를 실제적으로 구현하기 위해 고상영역에서의 열전도계수 [W/m℃]와 비열 [J/kg℃]을 각각 온도에 대한 2차 및 3차 함수로 다음과 같이 근사시킨다.⁽¹³⁾

$$k_s(T) = 14.3 + 0.01983T - 5.451 \times 10^{-6}T^2 \quad (9)$$

$$c_{p,s}(T) = 460.5 + 0.4257T - 5.050 \times 10^{-4}T^2 + 2.660 \times 10^{-7}T^3 \quad (10)$$

하지만 액상 및 머시영역에서의 물성치는 온도에 따라 변하지 않는다고 가정한다.

(4) 온도범위 1405℃~1448℃에 걸쳐있는 머시영역에서의 잠열함량은 다음과 같이 온도에 따라 선형적이라고 가정한다.

$$\Delta H = \begin{cases} L & T \geq T_l \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} L & T_s \leq T < T_l \\ 0 & T < T_s \end{cases} \quad (11)$$

(5) 모재의 두께가 매우 얇기 때문에, 움직이는 빔압력에 의해 밀려서 키흐를 주위를 돌아다니는 반경방향 유동이 표면장력구배로 인한 축방향(빔의 투사방향) 마랑고니(Marangoni) 유동보다 훨씬 지배적이라고 가정한다. 즉 용융풀에서의 유체유동은 2차원이라고 가정한다.

(6) 용융된 금속은 키흐 벽면을 가로질러 흐를 수 없기 때문에 키흐 벽면에서의 국부법선방향 속도성분은 없으며, 열원은 용융금속의 측면유동에 대해 저항할 수 없기 때문에 키흐 벽면에서의 접선방향 전단응력 역시 없다고 가정한다.⁽⁸⁾

(7) 유동 및 온도장은 x 축에 대하여 대칭이기 때문에 $y \geq 0$ 인 영역만을 고려한다. 한편 고상영

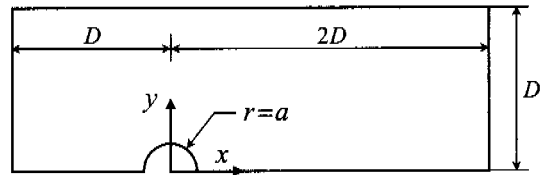


Fig. 4 Computational domain and coordinates

역의 상류경계에는 외부대기온도조건을 주고, 하류경계에는 열원으로부터 충분히 멀리 떨어져 있기 때문에 경계의 법선방향에 대해 온도구배가 없다는 조건을 준다.

문제해석을 위한 계산영역을 Fig. 4에 도시하였으며, 설정된 2차원 준정상상태 모델을 해석하기 위한 지배방정식과 경계조건은 다음과 같다.

• 연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (12)$$

• x -방향 운동량방정식

$$\text{div}(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \quad (13)$$

• y -방향 운동량방정식

$$\text{div}(\rho \mathbf{u} \mathbf{v}) = \text{div}(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \quad (14)$$

• 에너지방정식

$$\text{div}(\rho \mathbf{u} T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T\right) + S_T + S_{\text{loss}} \quad (15)$$

• 경계조건

$$r = a; \quad u_r = 0, \quad \frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{u_\theta}{r}\right) = 0, \quad T = T_v \quad (16)$$

$$y = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (17)$$

$$x = -D; \quad u = U, \quad v = 0, \quad T = T_\infty \quad (18)$$

$$x = 2D; \quad u = U, \quad v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (19)$$

$$x < 0, y = D; \quad u = U, \quad v = 0, \quad T = T_\infty \quad (20)$$

$$x \geq 0, y = D; \quad u = U, \quad v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (21)$$

한편 머시영역을 포함한 상경계 근처에서의 열 및 물질전달 과정을 설명하기 위해서 Voller와

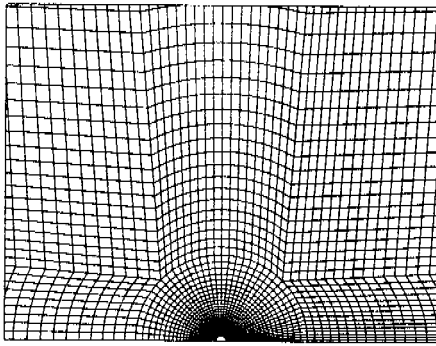


Fig. 5 Mesh for calculation near the keyhole

Prakash,⁽¹⁶⁾ Prakash 등⁽¹⁷⁾이 사용한 엔탈피방법을 이용한다. 머시영역에서 속도를 수정하기 위해 Darcy법칙으로부터 유도된 Carman-Koseny방정식에 근거하여 운동량방정식에서의 생성항을 다음과 같이 정의한다.

$$S_u = A(u - U), \quad S_v = Av \quad (22)$$

$$A = -C(1 - f_i)^2 / (f_i^3 + q_z)$$

여기에서 f_i 은 액상분율, C 는 고상영역에서의 속도를 용접속도 U 로 고정시키기 위해 사용되는 큰 값이며, 상수 q_z 는 계산과정에서 0으로 나누어지는 것을 피하기 위해 사용된다.

머시영역에서의 잠열함량 ΔH 의 흡수 및 방출을 설명하기 위해 생성항을 다음과 같이 에너지 방정식에서 구현한다.

$$S_T = -\frac{1}{c_p} \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \Delta H) \quad (23)$$

마지막으로 평판 상하면에서의 복사 및 대류에 의한 표면열손실은 다음과 같다.

$$S_{loss} = -\frac{1}{\delta} (2h_r + h_c^+ + h_c^-) (T - T_\infty) \quad (24)$$

수치해석을 위해 지배방정식을 제어체적 근사에 기초한 유한체적법으로 이산화하며 유동장을 계산하기 위해 SIMPLE알고리즘과 운동량보간을 적용한 비엇갈림격자계를 이용한다.⁽¹⁸⁻²⁰⁾ 즉, 전체 계산영역을 유한개의 비직교 검사체적으로 나누

Table 1 Physical properties of AISI-304 stainless steel plates

키홀 반지름 a	2 mm
평판의 폭 D	400 mm
밀도 ρ	7200 kg m ⁻³
고상온도 T_s	1405 °C
액상온도 T_l	1448 °C
기화온도 T_v	2807 °C
주위온도 T_∞	30 °C
잠열 L	265.2 kJ kg ⁻¹
점성계수 μ	0.00642 kg m ⁻¹ s ⁻¹

고 격자점을 각각의 검사체적의 중심점에 지정한 후 속도성분, 온도, 압력 등의 변수들을 각 격자점에 저장한다. 비직교 검사체적에 대한 이산화방정식을 구하기 위해 본 연구에서는, 좌표변환한 미분형 지배방정식을 체적적분하지 않고, 물리량의 보존법칙과 구성방정식으로부터 얻어지는 지배방정식의 원형에 공간기울기의 유한개념과 생성항에 대한 평균값정리를 적용하는 새로운 방법을 도입한다.⁽²⁰⁾ 검사체적면에서의 확산 및 대류플럭스와 잠열함량을 처리하기 위해 상류도식을 이용하며 키홀 근처로 갈수록 조밀하게 구성된 비정렬격자계를 이용한다. 각 격자점에서의 물리량에 대한 이산화방정식으로부터 얻어지는 연립 대수방정식을 풀기 위해 SIP행렬해법을 이용하며, 압력수정방정식을 풀기 위해 CGS행렬해법을 이용한다. 한편 수치해석에 사용된 격자계와 재료의 물성을 각각 Fig. 5와 Table 1에 나타내었다.

3. 해석결과 및 고찰

Fig. 6은 용접속도가 0.5 mm/s와 2.5 mm/s일 때의 머시영역과 열영향부의 크기 및 형태를 보여준다. 키홀 뒤쪽으로 갈수록 그 두께가 넓어지는 머시영역의 분포를 확인할 수 있으며, 반면에 키홀의 앞쪽에서는 큰 온도구배로 인하여 거의 단일상경계의 형태를 띠고 있음을 알 수 있다. 여기에서 열영향부는 70 wt% Fe, 20 wt% Cr_{eq}, 10 wt% Ni_{eq}의 조성을 갖는 AISI-304 스테인리스강이 δ -ferrite상에서 완전히 γ -austenite상으로 변하는 1100°C보다 높은 구역으로서 이 구간 내에

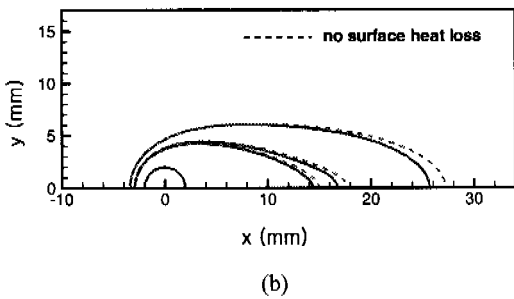
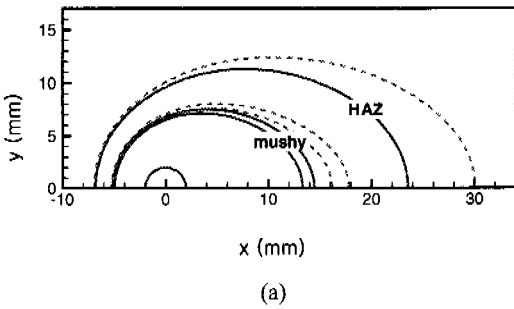


Fig. 6 Mushy region and heat-affected zone at different welding speeds (a) $U=0.5$ mm/s (b) $U=2.5$ mm/s

서는 불균일한 미세구조로 인하여 기계적 결합이 발생할 확률이 높다.⁽¹³⁾ 그림에서 보듯이 용접속도가 빨라지면 용융부와 더불어 그 형상이 가늘고 길어짐을 확인할 수 있으며, 이는 무차원화된 속도인 Peclet수의 영향을 고려한 Kim 등⁽⁹⁾의 경향과 일치한다. 점선으로 표시한 영역은 표면열손실을 고려하지 않았을 때의 용융부와 열영향부를 나타내는 것으로서 용접속도가 빠른 경우에는 그 효과가 미비하지만, 용접속도가 느린 경우에는 용융부와 열영향부의 분포에 큰 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 용접속도가 0.5 mm/s일 때, 오일러적 관점으로 표현된 용접풀에서의 유체속도를 가지고 키홀 근처에서 유선분포를 그린 것이다. 빔압력에 의해 밀려나가는 액상금속이 키홀을 감아들면서 흐르는 유동특성을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 용접속도가 0.5 mm/s에서 2.5 mm/s로 변화할 때 용접풀과 열영향부의 크기 및 형상이 어떻게 변하는지를 보여준다. Fig. 6에서 확인

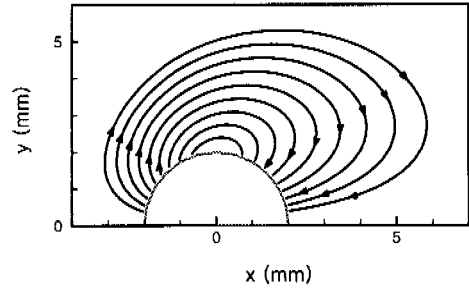


Fig. 7 Streamlines near the keyhole

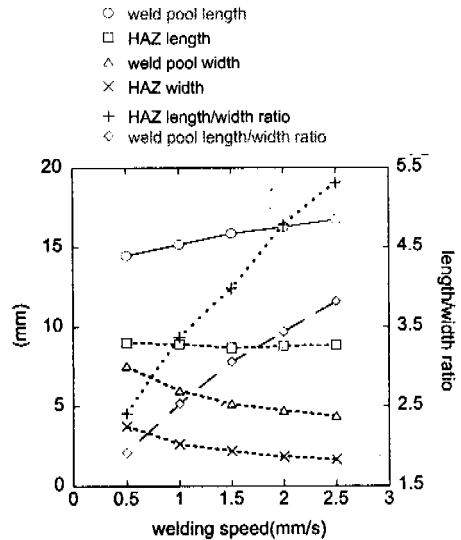


Fig. 8 The width, length and length/width ratio of weld pool and HAZ

할 수 있듯이 용접속도가 증가함에 따라 그 폭이 줄어드는 경향을 인지할 수 있으며 이로 인해 길이/폭 비가 크게 증가함을 알 수 있다. 한편 용접속도가 빨라질수록 용접풀의 길이는 다소 증가하지만 열영향부의 길이는 거의 변하지 않음을 알 수 있다. 이와 함께 용접풀보다 열영향부의 길이/폭 비가 용접속도에 더 민감함을 알 수 있다.

Fig. 9는 모재에 흡수되는 열량이 용접속도에 따라 변화함을 보여준다. 키홀 둘레를 따라 온도 구배를 식분한 단위 두께당 열전달량은 다음과 같으며,

$$I = \int_0^{2\pi} \left(-kr \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=a} d\theta \quad (25)$$

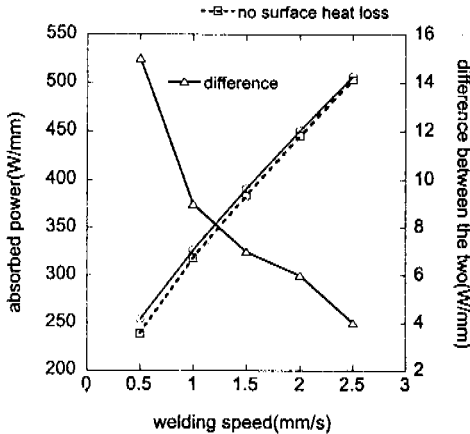


Fig. 9 Absorbed power against welding speeds

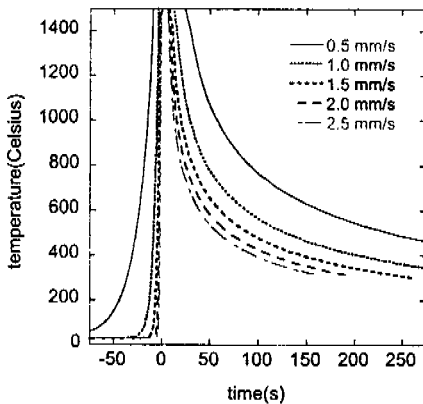


Fig. 10 Temperature history of a fixed point on the welding path

용접속도가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 이러한 경향은 1 mm 두께의 강판에 대해 레이저용접실험을 한 Ducharme 등⁽²¹⁾의 연구 결과에서도 확인되었으며, 키홀 크기를 일정하게 유지시키면서 더 높은 용접속도를 필요로 할 경우에는 공급하는 열원의 에너지강도가 더 높아져야함을 의미한다. 더불어 용접속도가 증가할수록 표면열손실의 고려 유무에 따른 흡수열량의 차이가 줄어들음을 알 수 있는데, 이러한 특성은 표면열손실이 용융부 및 열영향부의 분포

에 끼치는 영향과 같은 맥락에서 이해될 수 있다.

Fig. 10은 용접 경로($y=0$)에 위치한 고정점에서의 시간에 따른 온도변화를 보여준다. 용접속도가 증가할수록 온도상승률과 냉각률이 증가함을 알 수 있으며, 이러한 온도특성은 기존의 연구결과(Hsu와 Rubinsky,⁽⁸⁾ Kim 등⁽⁹⁾)에서도 확인되었다. 특히 고체-고체 상변화가 일어나는 온도 범위 1100℃이상의 열영향부에서의 냉각률은 용접부의 결정조직에 직접적인 영향을 끼치므로, 용융부와 열영향부의 크기 및 열원의 강도를 고려한 최적화된 용접속도 설정의 중요성을 확인할 수 있다.

4. 결론

두께가 얇은 AISI-304 스테인리스강 평판의 고에너지밀도용접 과정에서의 2차원 열유동과 머시상변화를 유한체적법과 엔탈피방법을 이용하여 수치해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 키홀 뒤쪽으로 갈수록 그 폭이 넓어지는 머시영역이 분포한다.

(2) 표면열손실이 용융부와 열영향부의 분포 및 모재에 흡수되는 열량에 영향을 끼친다. 특히 용접속도가 작을수록 그 영향은 커진다.

이외에도 기존의 연구들에서 알려진 용접속도의 변화에 따른 용접 과정의 특성을 재확인하였다. 즉 용접속도가 증가할수록 용융부와 열영향부의 형상은 가늘고 길어지며 모재로 유입되는 열전달량이 증가함과 동시에 열영향부에서는 큰 냉각률을 갖는다.

후 기

본 연구는 서울대학교 터보동력기계연구센터(TPMRC)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Lancaster, J. F., 1984, *The Physics of Welding*, Pergamon Press, Oxford.
- (2) Lancaster, J. F., 1994, *Metallurgy of Welding*, Chapman & Hall, London.
- (3) Swift-Hook, D. T., and Gick, A. E. F., 1973,

- "Penetration Welding with Lasers," *Welding Journal*, Vol. 52, pp. 492~499.
- (4) Mazumdar, J., and Steen, W. M., 1980, "Heat Transfer Model for CW Laser Material Processing," *Journal of Applied Physics*, Vol. 51, pp. 941~947.
- (5) Miyazaki, T., and Giedt, W. H., 1982, "Heat Transfer From an Elliptic Cylinder Moving Through an Infinite Plate Applied to Electron Beam Welding," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 25, pp. 807~814.
- (6) Dowden, J., Davis, M., and Kapadia, P., 1983, "Some Aspects of the Fluid Dynamics of Laser Welding," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 126, pp. 123~146.
- (7) Wei, P. S., and Giedt, W. H., 1985, "Surface Tension Gradient-Driven Flow around an Electron Beam Welding Cavity," *Welding Journal*, Vol. 64, pp. 2515~2595.
- (8) Hsu, Y. F., and Rubinsky, B., 1988, "Two-Dimensional Heat Transfer Study on the Keyhole Plasma Arc Welding Process," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 31, pp. 1409~1421.
- (9) Kim, C.-J., Kauh, S., Ro, S. T., and Lee, J. S., 1994, "Parametric Study of the Two-Dimensional Keyhole Model for High Power Density Welding Processes," *Journal of Heat Transfer, Transactions of ASME*, Vol. 116, pp. 209~214.
- (10) Al-Khalid, N., 1998, "An Upwind Numerical Solution of Nonlinear Advection-Diffusion Problems with a Moving Heat Source," *Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, pp. 287~293.
- (11) Trappe, J., Kroos, J., Tix, C., and Simon, G., 1994, "On the Shape and Location of the Keyhole in Penetration Laser Welding," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 27, pp. 2152~2154.
- (12) Incropera, F. P., and DeWitt, D. P., 1990, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, Inc., Singapore.
- (13) Davis, J. R., Ed., 1996, *Stainless Steels*, ASM International, Materials Park.
- (14) Wood, W. D., Deem, H. W., and Lucks, C. F., 1964, *Thermal Radiative Properties*, Plenum Press, New York.
- (15) Goldak, J. A., 1997, "Thermal Analysis of Welds," *Modeling in Welding, Hot Powder Forming, and Casting*, pp. 17~29, ASM International, Materials Park.
- (16) Voller, V. R., and Prakash, C., 1987, "A Fixed Grid Numerical Modelling Methodology for Convective-Diffusion Mushy Region Phase-Change Problems," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 1709~1719.
- (17) Prakash, C., Samonds, M., and Singhal, A. K., 1987, "A Fixed Grid Numerical Methodology for Phase Change Problems Involving a Moving Heat Source," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 30, pp. 2690~2694.
- (18) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere, New York.
- (19) Peric, M., 1985, "A Finite Volume Method for the Prediction of Three-Dimensional Fluid Flow in Complex Ducts," Ph.D. thesis, University of London.
- (20) 김찬중, 1998, *길잡이 전산유체역학*, 문운당.
- (21) Ducharme, R., Williams, K., Kapadia, P., Dowden, J., Steen, B., and Glowacki, M., 1994, "The Laser Welding of Thin Metal Sheets: An Integrated Keyhole and Weld Pool Model with Supporting Experiments," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 27, pp. 1619~1627.