

고에너지밀도용접의 2차원 온도특성

김찬중(서울대 정밀기계설계공동연구소), 고상근, 노승탁, 이준식(서울대)

1. 서론

고에너지밀도용접시 금속의 기화현상으로 인한 기화압력 효과와 빔압력효과 등의 조합으로 "키홀(keyhole)"이라고 불리는 실린더 모양의 공동이 모재에 유지된다[1]. 이때 용융부위의 폭과 열영향부위가 매우 작고 용가재가 불필요하기 때문에 내부용력이나 균열, 비틀림이 최소화된다. 금속학적으로는 경도, 인장강도, 충격강도와 같은 기계적성질이 모재에 비하여 거의 뒤지지 않아서 산업현장에서 고에너지밀도용접의 이용이 늘어가고 있다.

Swirl-Hook 등[2]과 Mazumder 등[3]은 액상의 대류영향을 고려하지 않고 전도모델을 사용하여 해석하였다. Dowden 등[4]은 액상의 대류영향을 포함하는 2차원 모델을 등온선이동기법[5]으로 풀었다. Hsu와 Rubinsky[6]는 유한요소법을 사용하여 용융부의 형상을 예측하였다. 이성호[7]는 연달피법을 이용하여 수치해석하였다. 본 연구에서는 상변화효과와 대류영향을 고려하여 키홀모델을 해석하고 각 무차원수의 영향을 알아본다.

2. 용접모델

2차원 모델을 Fig. 1에서 도시하였다. 여기에서 고려하는 모델은 기존의 연구들에서 적용된 바 있으나 간과되었던 새로운 사실을 규명하는데 연구의 중점을 두기로 한다.

해석을 위하여 아래의 가정들을 도입한다.

- (1) 키홀은 원형이고 기화온도 T_v 로 가정한다.
- (2) 액상에서 비압축성, 뉴턴유체로 가정한다.
- (3) 열역학적 물성치와 전달계수들은 일정하고 액상과 고상 간에는 다른 값을 갖는다.
- (4) 빔에 고정된 이동좌표계에 대하여 정상상태이며, x 축에 대하여 대칭을 이룬다.

또한, 편의를 위하여 아래와 같이 무차원수들을 도입한다.

$$x^* = \frac{x}{a}, y^* = \frac{y}{a}, u^* = \frac{u}{u_w}, v^* = \frac{v}{u_w}, h^* = \frac{h}{h_{ref}} \quad (1)$$

$$\rho^* = \frac{\rho}{\rho_w}, Pr = \frac{v}{\alpha_l}, Pe = \frac{u_w a}{\alpha_l} \quad (1)$$

$$Ste = \frac{h_f}{c_l(T_v - T_m)}, \Theta = \frac{c_s(T_m - T_w)}{c_l(T_v - T_m)}$$

각 상에서의 비엔탈피는

$$h_s = c_s(T_s - T_w), h_l = c_l(T_l - T_m) + h_f + c_s(T_m - T_w) \quad (2)$$

으로 정의하고, $h_{ref} = c_l(T_v - T_m)$ 이다. 무차원 지배방정식과 경계조건은 다음과 같다.

액상

$$\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{\partial v^*}{\partial y^*} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{Pe}{Pr} \left\{ \frac{\partial}{\partial x^*} (u^* u^*) + \frac{\partial}{\partial y^*} (v^* u^*) \right\} = \frac{\partial^2 u^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}} - \frac{Pe}{Pr} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \quad (4)$$

$$\frac{Pe}{Pr} \left\{ \frac{\partial}{\partial x^*} (u^* v^*) + \frac{\partial}{\partial y^*} (v^* v^*) \right\} = \frac{\partial^2 v^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 v^*}{\partial y^{*2}} - \frac{Pe}{Pr} \frac{\partial p^*}{\partial y^*} \quad (5)$$

$$Pe \left\{ \frac{\partial}{\partial x^*} (u^* h_l^*) + \frac{\partial}{\partial y^*} (v^* h_l^*) \right\} = \frac{\partial^2 h_l^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 h_l^*}{\partial y^{*2}} \quad (6)$$

고상

$$\frac{Pe}{(\alpha_s/\alpha_l)} \frac{\partial h_s^*}{\partial x^*} = \frac{\partial^2 h_s^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 h_s^*}{\partial y^{*2}} \quad (7)$$

경계조건

$$y=0: \frac{\partial u}{\partial x} = 0, v=0, \frac{\partial T_l}{\partial y} = \frac{\partial T_s}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

$$r=r_c: T_s = T_w \quad (9)$$

$$r=a: u_r = 0, \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u_\theta}{r} \right) = 0, T_l = T_v \quad (10)$$

$$\text{상경계: } u = u_w, v = 0, T_l = T_s = T_m \quad (11)$$

$$\rho u_w \hat{h}_s - k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = \rho u_w \hat{h}_l - k_l \frac{\partial T_l}{\partial x} \quad (12)$$

위에서 경계조건들 (8)-(12)는 편의상 차원식으로 표현하였다. 주위온도 T_w 는 20°C로 하였다. 위의 식들로부터 2차원 용접모델을 특징짓는 무차원수들은

$$Pe, Pr, \alpha_s/\alpha_l, Ste, \Theta \quad (13)$$

의 5개로 되고, 모재 금속이 정해지면 Pe 수들 제외한 다른 매개변수들이 모두 결정된다.

3. 수치 해석법

수치해는 크게 두 개의 과정들로 구성되어 있다. 첫째는, 임의로 가정한 상경계위치에 대응하는 각 영역 내에서의 유동 및 온도장을 구하는 것이고, 둘째로는, 앞에서 얻어진 온도장이 주어진 상경계조건을 만족하는 최종적인 상경계위치를 구해내는 과정이다. 전자의 경우는 불규칙한 형상을 처리하기 위하여 비정상상태 상변화문제의 수치해석 등에서 많이 응용되어 온 [8-10] 좌표변환을 사용하며, 여기서는 Karki와 Patankar[11]가 제안한 좌표변환법을 사용하였다. 후자의 경우, 즉 최종적인 상경계위치는 Kim 등[12-16]에 의해 최근에 개발된 수치이론을 이용하여 반복계산에 의해 결정하였다.

문제의 특성을 고려하여 좌표변환식은

$$r = \begin{cases} a + \delta_1 \xi, & 0 \leq \xi \leq 1 \\ a + \delta_l + \delta_s(\xi - 1), & 1 \leq \xi \leq 2 \end{cases} \quad (14)$$

$$\theta = \eta, \quad 0 \leq \eta \leq \pi \quad (15)$$

을 사용하며, δ_l, δ_s 는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 η 만의 함수이다. 변환좌표계에서 키홀은 $\xi=0$; 상경계는 $\xi=1$ 에 위치하고, 상경계면이 $\xi=1$ 에 위치한다. 상경계에서 질량유속과 열에너지유속은 보존되므로

$$\hat{F}_l = \hat{F}_s = \hat{F} \quad (16)$$

$$\hat{J}_l = \hat{J}_s \quad (17)$$

으로 표현된 상경계조건을 사용하는 것이 수치해석상 많은 장점을 내포한다[12-17].

최종적인 상경계의 위치는 상경계가 국소적으로 입차원이라 생각하고 들레방향의 각 격자점들에 Kim과 Kaviany[14]의 방법을 적용하여 상경계위치를 보정하는 방법을 사용하였다. 먼저 상경계와 무한반경의 위치를 아래와 같이 놓는다.

$$r_m = a + \delta_l, r_w = a + \delta_l + \delta_s \quad (18)$$

만약 위에서 가정한 상경계위치가 최종해가 아니면 각각의 상에서 얻어진 온도장은 식(12)를 만족시키지 않는다. 따라서 상경계와 무한반경의 위치를

$$r_m = r_m^*(1 + \omega_m), r_w = r_w^*(1 + \omega_w) \quad (19)$$

와 같이 보정하기로 한다. 이 때 $r_w = C r_m$ 라고 가정하면 (단 C 는 상수), $\omega_w = \omega_m$ 의 관계식을 얻는다. 따라서 ω_m 를 적절히 선택하면 새로운 상경계 및 무한반경의 위치를 결정할 수 있다. 자세한 유도과정[14]은 생략하고 최종결과를 쓰면

$$\rho_m \omega_m = \hat{J}_l - \hat{J}_s, \rho_w = \frac{a}{\delta_l} (\hat{J} - \hat{F})_l \quad (20)$$

과 같이 된다. 식(17)의 양변이 서로 99.95%로 일치하면 수렴한 것으로 판단하였다.

4. 수치결과 및 토의

수치해석은 액상에서 45×31, 고상에서 95×31격자계를 사용하여 수행하였다. Fig.2는 철을 모재금속으로 Pe=0.2586인 경우, 본 연구결과와 Davis 등[5]의 것을 같이 비교해 본 예로써 Davis 등의 결과는 본 연구에서 얻어진 것보다 다소 작은 것을 보여 준다. 그 이유는 그들의 결과가 비교적 생긴 격자계에서 얻어진 때문으로 생각된다.

Figure 3는 Pe수를 증가시키면서 얻은 상경계위치들을 보여준다. Pe=0.18에 이를 때까지는 액상의 크기가 계속 작아지고, Pe수가 그 이상 증가하면 전체적으로 액상의 크기는 작아지지만 액상후류부의 길이는 오히려 늘어나서 뒷편으로 치우치게 됨을 알 수 있다. 그림에서 Pe=0.18보다 큰 경우 액상의 후류부가 뒷편으로 치우치게 되는 것은 대류의 영향이 점차 지배적으로 되기 때문이다. 그러나 Hsu and Rubinsky[6]은 이송속도가 증가하면 액상의 크기가 계속 작아진다고 보고하였는데, 이것은 그들의 결론이 제한된 연구 결과를 토대로 내려진 것으로 보인다. 결론적으로 서술하면, 모재금속의 재질에 관계없이 Pe수를 매우 작은 값에서부터 증가시키면 계속적으로 액상의 크기(키홀의 면적으로 규준화 된)가 작아지다가 어떤 Pe수에(이 값은 금속의 재질에 따라 결정) 이르면 액상의 후류부가 커지게 된다. 이러한 사실은 키홀모델을 해석한 앞서의 연구들에서 보고된 적이 없는 것으로 보인다.

금속재질을 나타내는 각 무차원수들의 영향을 조사하기 위하여 가상의 금속을 Pr = 0.06, $\alpha_s/\alpha_l = 4$, Ste = 0.2, $\theta = 0.5$ 로 택하고 Pe=0.18로 고정한 경우의 결과를 Figure 4에 도시하였다. 그림에서 I^* 는 모재에 유입된 총에너지양을 아래와 같이 무차원화한 것이다.

$$I^* = \frac{I}{k_l(T_v - T_m)D}, \quad I = \int_0^{2\pi} -k_l D r \frac{\partial T_l}{\partial r} \Big|_{r=r_m} d\theta \quad (21)$$

위에서 D는 모재의 두께이다. 일반적으로, α_s/α_l , θ 값들의 증가는 액상의 크기감소에 기여하고, Ste수의 증가는 액상의 크기를 증가시킨다. 또한 Pr수는 상경계의 형상과 무차원 열유입량에 거의 영향을 미치지 않는다. 무차원 열유입량은 α_s/α_l , θ , Ste들이 증가하면, 비록 그 정도는 다르지만, 따라서 증가함을 알 수 있다.

Figure 5은 철을 모재로 한 경우 용접 경로의 고정점(x=0, y=0)에서 시간에 따른 온도의 변화를 나타낸 것으로, 속도가 증가할수록 온도상승률이 커지고 냉각률 또한 커진다는 것을 알 수 있다. 이것은 용접 후에 금속의 재결정이나 열응력으로 인한 조직에 대하여 중요한 정보가 될 수 있다. 즉, 용접속도가 빠를수록 냉각률상승으로 인한 균열, 결합 등의 발생가능성이 증가한다는 사실과 한편으로 속도가 증가할수록 열영향부가 줄어든다는 상충되는 두 사실을 고려하여 모재의 설계조건에 따라 적절한 최적이송속도를 결정하여야 한다.

키홀에서 모재로 전달되는 열량을 계산한 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 속도가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하는 경향을 볼 수 있고, 이것은 Davis 등의 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 철과 타이타늄의 경우, 무차원화된 열전달량은 Pe·Ste^{1/2}에 의해 잘 표현됨을 알 수 있다.

5. 결론

최근에 개발된 새로운 수치이론을 적용하여 고에너지밀도 용접의 이차원모델을 해석하여 유동특성과 온도특성을 연구하였다. 연구결과를 요약하면:

- (1) Kim과 Kaviany에 의하여 제안된 위치보정식은 이차원문제에도 적용이 가능하고, 정상상태의 문제를 다루는 경우에도 매우 유용하게 적용될 수 있다.
- (2) Pe수가 증가함에 따라 액상의 크기는 처음에는 감소하다가 어떤 천이 Pe수를 지나면 액상후류부의 길이

가 증가하는 현상을 보인다. 이러한 현상은 모재금속의 재질과는 무관하게 일어나는 특성이다.

- (3) 일반적으로, 무차원수 α_s/α_l , θ 들이 증가함에 따라 액상의 크기가 작아지는 반면에, Ste수가 증가하면 액상영역이 증가한다. 또한 Pr수의 변화는 액상의 크기에 거의 영향을 미치지 않는다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 지원하에 수행되었으며 이에 대하여 재단 관계자에게 감사드린다.

참 고 문 헌

- (1) Lancaster, J. F., 1983, "The Physics of Welding," Pergamon Press.
- (2) Swift-Hook, D. T. and Gick, A. E., 1973, Welding J., Vol. 52, pp.492-499.
- (3) Mazumder, J. and Steen, W. M., 1980, J. Appl. Phys., Vol. 51, pp.941-947.
- (4) Dowden, J., Davis, M. and Kapadia, P., 1983, J. Fluid Mech., Vol. 126, pp.123-146.
- (5) Davis, M., Kapadia, P. and Dowden J., 1985, J. Comp. Physics, Vol. 60, pp.534-548.
- (6) Hsu, Y. F. and Rubinsky, B., 1988, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 31, pp.1409-1421.
- (7) 이 성호, 1991, 서울대학교 기계공학과, 석사학위논문.
- (8) 유 호선, 노 승탁, 1986, 대한기계학회논문집, 제10권, 제4호, pp.585-592.
- (9) Yoo, H. and Ro, S. T., 1991, Int. J. Heat Fluid Flow, Vol. 12, pp.365-374.
- (10) 김 무근, 노 승탁, 1992, 대한기계학회논문집, 제16권, 제1호, pp.142-155.
- (11) Karki, K. C. and Patankar, S. V., 1988, Numer. Heat Transfer, Vol. 14, pp.295-307.
- (12) Kim, C.-J. and Kaviany, M., 1990, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 33, pp.2721-2734.
- (13) Kim, C.-J. and Kaviany, M., 1992, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 35, pp.457-467.
- (14) Kim, C.-J. and Kaviany, M., 1992, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 35, pp.1143-1154.
- (15) Kim, C.-J., Ro, S. T., Lee, J. S. and Kim, M. G., 1992, Int. J. Heat Mass Transfer, to be published.
- (16) Kim, C.-J., Ro, S. T. and Lee, J. S., 1992, submitted to Int. J. Heat Mass Transfer.
- (17) Kim, C.-J., Kauh, S., Ro, S. T. and Lee, J. S., 1992, submitted to ASME J. Heat Transfer.

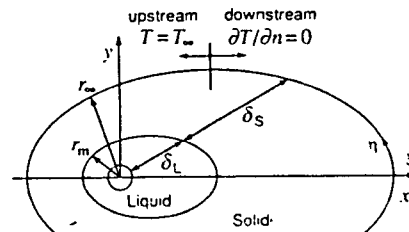


Fig. 1 Two-dimensional steady-state keyhole model. The frame of reference is moving with the center of keyhole

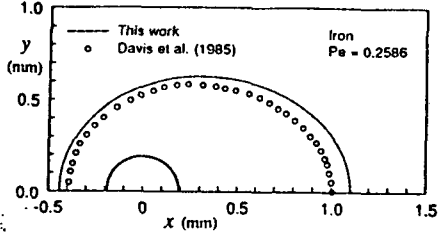


Fig. 2 Comparison of the interface position with an existing solution for the case of iron and $Pe = 0.2586$ (e.g., $a = 0.19\text{mm}$, $u_w = 7.5\text{mm/s}$)

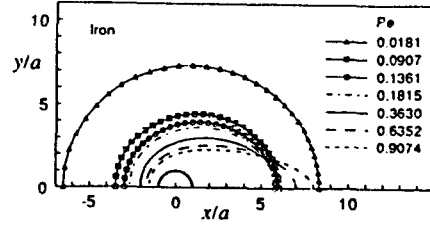


Fig. 3 Interface migration pattern in response to variation of Pe for the case of iron.

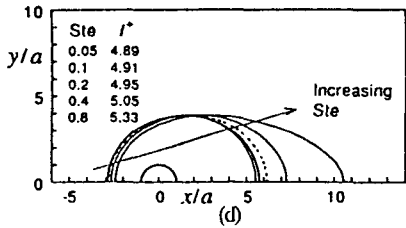
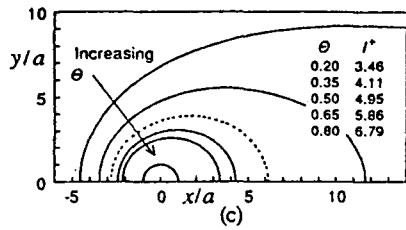
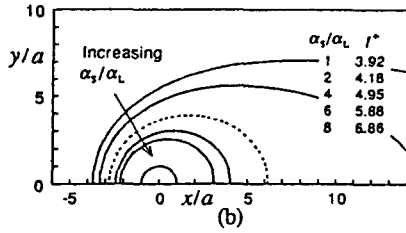
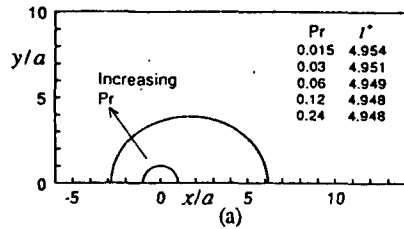


Fig. 4 Interface migration pattern subject to variation of each dimensionless property. The results are for a hypothetical material whose properties are $Pr = 0.06$, $\alpha_s/\alpha_L = 4$, $Ste = 0.2$ and $\theta = 0.5$ and obtained by varying only (a) Pr , (b) α_s/α_L , (c) θ and (d) Ste . The Peclet number is fixed as $Pe = 0.18$ for all cases

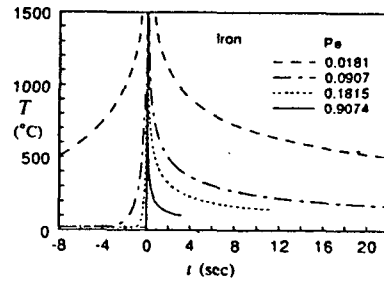


Fig. 5 Timewise variation of temperature at a fixed position ($x = 0, y = 0$) in the weld path for the case of iron

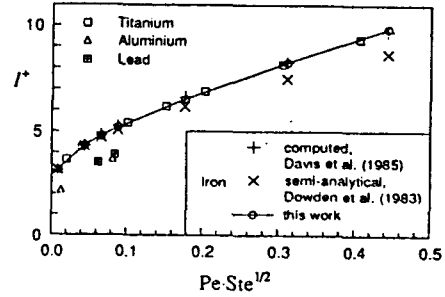


Fig. 6 The dimensionless minimum power supply to maintain keyhole-welding