

GTA 완전 용입 용융지의 동적 유동 및 진동현상 해석

Analysis of Dynamic Convection and Oscillation on GTA Weld Pool of Full Penetration

고성훈*, 최상균**, 유중돈*

* 한국과학기술원 기계공학과

** 경북대학교 기계공학과

1. 서론

GTA 용융지의 형상과 크기는 전자기력, 표면장력 등의 힘에 의하여 결정되는 내부 유동과 밀접한 관계가 있으며 많은 실험과 해석으로 연구되어져왔다. 용융지의 내부 유동에 대한 수치 해석적 접근은 실험적으로는 알기 어려운 내부 유동 패턴 및 용융지 형상을 예상할 수 있는 장점을 가지지만, 자유표면에 대한 해석이 어려워 평평하거나 미리 계산된 형상으로 가정하는 단점이 있었다[1,2]. 최근 VOF(Volume of Fluid)방법 등에 의한 자유표면 처리가 가능하여지면서 금속이행에 대한 동적 해석이 이루어졌으며[3], 두 개의 자유표면을 가지는 완전용입 용융지의 마랑고니 유동의 영향이 해석되어졌다[4]. 본 연구에서는 첫째, 고정된 완전용입 용융지 형상에서 아크압력, 전자기력, 표면장력에 의한 내부 유동 및 표면의 진동 변화를 계산하고 이들의 영향을 분석하였다. 둘째, 열 해석을 통해 완전용입 용융지의 형상 및 크기를 계산하고 burn-through 현상을 해석하였다.

2. 완전용입 용융지의 열 유동 해석

정지 상태의 완전용입 용융지의 유동 해석을 위하여 다음과 같이 가정하였다. (1) 축대칭 용융지는 비압축성 층류(laminar)유동이고, (2) 아크의 drag force에 의한 영향은 고려하지 않으며, (3) 사용된 물성치는 표면장력 계수를 제외하고는 일정하다. 자유표면을 포함하는 용융지의 유동을 계산하기 위하여 VOF방법을 사용하였다[3]. 계산에 사용된 지배 방정식은 연속식, Navier-Stokes식 및 VOF와 관련된 아래의 수식으로 구성된다.

$$\nabla \cdot v = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 v + \frac{f}{\rho} \tag{2}$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (v \cdot \nabla)F = 0 \tag{3}$$

이때, v 는 유속, ρ 는 밀도, ν 는 점성, f 는 체력(body force)을 나타낸다. 아크열과 Joule 열에 의한 용융지의 온도는 다음 식을 이용하여 계속된다.

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T \right) = k \nabla^2 T + q' ; \tag{4}$$

이때, T 는 온도, C_p 는 비열, k 는 열전도율, q' 는 용융지에서 Joule열에 의해 발생하는 단위 체적당 열량을 나타낸다. 아크에 의하여 가해지는 아크열과 전류밀도의 분포는 Gaussian분포로 가정하여 자유 표면에 경계 조건으로 부과하였고, 마랑고니 유동은 용융지 표면에서 아래 식의 전단 응력을 부과하여 고려하였다.

$$\tau = \left(\frac{\partial \gamma}{\partial T} \right) \left(-\frac{\partial T}{\partial \psi} \right) \tag{5}$$

이때, ψ 는 자유표면의 접선 방향을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

용융지는 반경 5mm, 깊이 4mm의 원통형이고, 초기의 표면은 평평하다고 가정하였으며, 표면장력 구배를 고려하지 않는 경우의 표면장력계수는 윗면, 아래 면 각각에 대해서 1200, 1800dyne/cm로 가정하였다.

아크 압력만을 고려한 경우의 용융지 중심부의 표면 변형을 Fig.1에 나타내었다. 아크 압력에 의하여 용융지 표면은 쉽게 변형되고 일정한 주파수로 진동하였으며, 표면 변형은 아크 압력이 증가할수록 증가하였지만, 진폭은 아크 압력이 구속조건으로 작용하여 압력이 증가할수록 감소하였다. 전자기력과 마랑고니 유동에 의한 영향이 고려되지 않아 내부에 회전 유동은 발생하지 않았다. 아크 압력을 P_{200} 으로 고정하고 전류를 변화시켜 해석한 경우의 표면 변형을 Fig.2에 나타내었다. 전자기력에 의한 반시계 방향의 회전유동으로 용융지 중심부의 평균 속도와 중심부의 표면 변형이 증가하였다. 용융지의 내부유동은 전자기력에 의한 회전유동과 진동에 의한 유동의 합으로 나타났다. 아크압력 P_{200} , 전류 200A, 표면장력구배가 $\pm 0.49\text{dyne/cmK}$ 인 경우의 내부유동과 자유표면 형상을 Fig.3에 나타내었다. 두 개의 자유 표면에서 발생하는 마랑고니 유동에 의하여 두 개의 회전 유동이 발생하였고, 전자기력에 의한 유동과 방향이 일치하는 회전 유동이 더 큰 유속을 나타내었다. 용융질의 진동은 두 개의 내부 회전 유동에 영향을 미치며, 표면장력구배가 음수인 경우 표면장력이 구속조건으로 작용하여 진폭이 빠르게 감소하였다.

표면장력구배가 $\pm 0.49\text{dyne/cmK}$ 이고, 두께 2mm인 경우의 열 해석을 포함한 결과를 Fig.4에 나타내었다. 표면장력구배가 음의 값인 경우 높은 온도를 가지는 윗면에서 용융지 외각으로의 유동이 형성되므로 초기에는 아래 면보다 윗면의 반경이 빠르게 증가하였다. 차츰 용융지의 평균 반경이 증가하고 아래 자유표면에 의한 회전 유동이 증가하면서 윗면과 아래 면의 반경이 고르게 증가하였다. 표면장력구배가 양인 경우 용융지 중심으로의 회전 유동에 의하여 빠르게 완전용입 상태에 이르며 윗면과 아래 면의 반경이 고르게 증가하였다. 이 경우의 표면 반경과 변형을 Fig.5에 나타내었다. 아래 면은 0.2초이후 녹기 시작하였으며 아래 면과 윗면의 반경이 같아지는 0.55초 이후 표면 변형이 급격하게 증가하였다.

앞서 계산된 Fig.4의 결과에서 아크 압력을 증가시켜 burn-through 현상을 해석하였다. 용융지 크기가 작은 경우, $3 \times P_{300}$ 의 아크 압력을 가하면 내부 유속이 급속히 가속되고 대부분의 유체가 이탈하였다(Fig.6(a)). 이는 절단(thermal cutting)하는 경우 나타나는 형상과 유사하다. 용융지의 크기가 큰 경우 아크 압력에 따라 액적이 이탈하는 시기가 변화하였으며, 액적 이탈 후 나머지 부분은 표면장력에 의해 고액 경계면으로 이동하였다(Fig.6(b),(c)).

4. 결론

- (1) 완전용입 용융지는 아크 압력에 의해 쉽게 변형되며, 내부 유동 패턴은 진동에 의한 용융지 중심부의 유속과 전자기력과 표면장력구배에 의한 회전유동의 합으로 나타난다.
- (2) 표면장력구배와 전자기력에 의해 두 개의 회전 유동이 발생하였고, 표면장력구배가 음의 값인 경우 표면 진동이 빠르게 감쇄하였다.
- (3) 용융지 형상과 온도 분포는 내부 유동에 따라 변화하며, 용융지의 아래 면의 반경이 윗면의 반경과 유사해질 때 표면 변형이 급격히 증가하였다.
- (4) Burn-through 현상은 용융지의 크기와 아크 압력에 따라 이탈 시기와 이탈 액적의 크기가 다르게 나타났다.

참고문헌

1. Choo R.T.C., Szekely J., and Westhoff R.C., *Welding Journal*, 69-9(1990), pp.346s-361s.
2. Kim S.D., and Na S.-J., *Welding Journal*, 71-5(1992), pp.179s-193s
3. Choi S.K., Ko S.H., Yoo C.D., and Kim Y.S., *Welding Journal*, 77-1(1998), pp.45s-51s
4. Chen Y., David S.A., Zacharia T., and Cremers C.J., *Numerical Heat Transfer*, 33(1998), pp.599-620

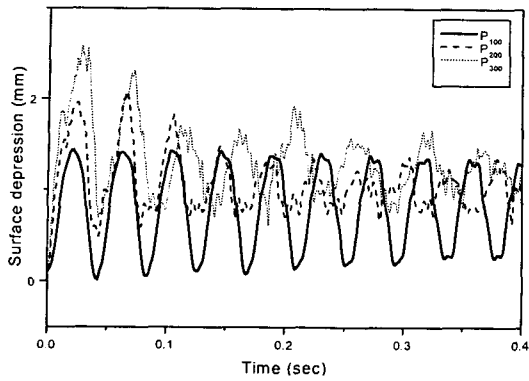


Fig.1 Rate change of surface depression for arc pressure ($I=0A, \partial \gamma / \partial T=0 \text{ dyne/cmK}$)

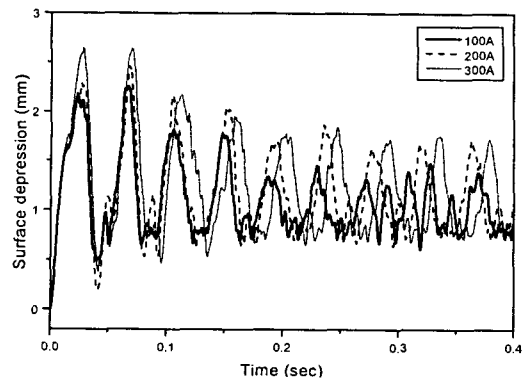


Fig.2 Rate change of surface depression for arc pressure ($I=0A, \partial \gamma / \partial T=0 \text{ dyne/cmK}$)

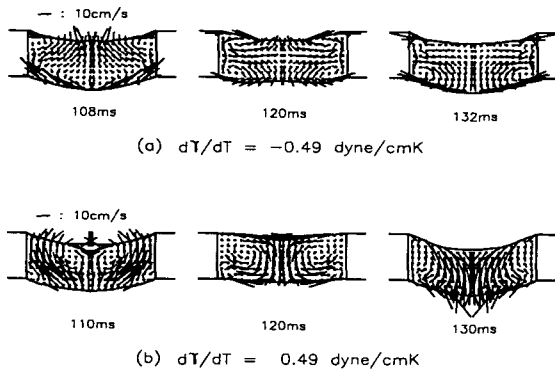


Fig.3 Free surface shapes and convection patterns ($P=P_{200}, I=200A$)

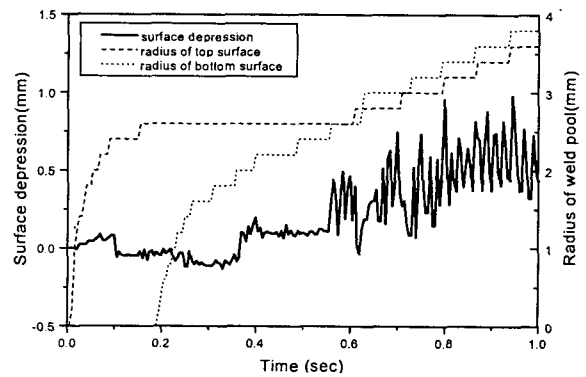


Fig.5 Rate change of surface depression and radius of pool ($\partial \gamma / \partial T= 0.49 \text{ dyne/cmK}$)

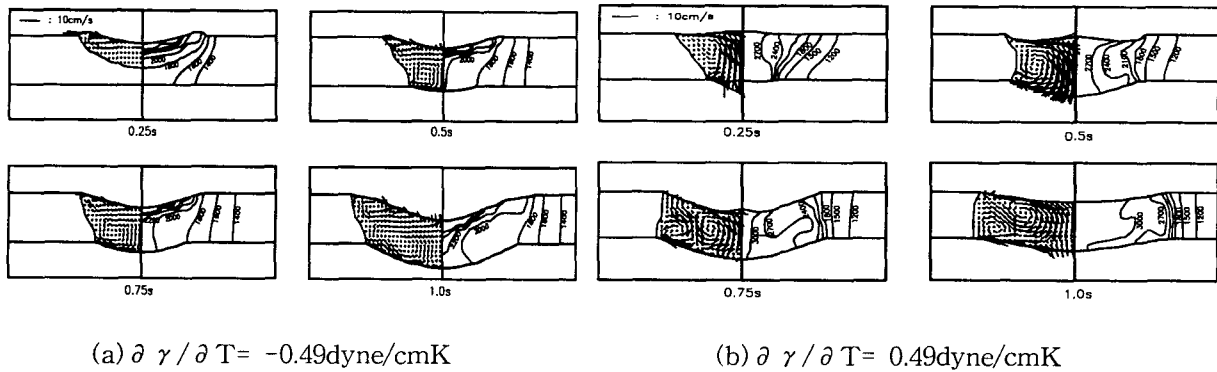


Fig.4 Free surface shapes and temperature and convection patterns ($P=P_{200}, I=200A$)

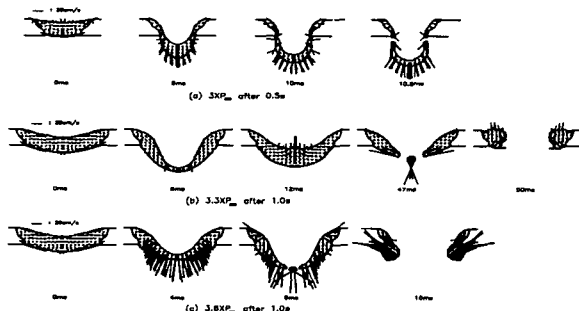


Fig.6. Free surface shapes and convection patterns during burn-through