

아크 압력을 고려한 GTA 용융지의 동적 유동 해석

Dynamic Convection including Arc Pressure on GTA Weld Pool

고성훈*, 최상균**, 유중돈*

*한국과학기술원 기계공학과 **영남대학교 기계공학부

1. 서론

GTA(Gas Tungsten Arc)용접의 용융지(weld pool)에는 전자기력, 표면장력, 아크압력, 부력 등과 같은 여러 힘들이 작용하고 있으며, 용융지의 유동은 용접 전류 및 전압, 보호가스, 전극봉의 지름, 아크 길이, 모재의 재질 등과 같은 다양한 용접 변수에 의하여 영향을 받는다. 용융지의 형상과 용입 깊이는 용접품의 신뢰도를 결정하는 중요한 요소이므로 지금까지 많은 연구자들이 실험이나 해석을 통하여 다양한 용접 변수가 용융지의 유동과 형상에 미치는 영향을 규명하려 하였다^{1,2)}. 초기의 연구는 용융지의 표면이 평평하고 변형되지 않는다는 가정으로 인하여 실제 용접 현상에 적용하기에는 어려움이 있었다. 근간에 이르러 자유 표면을 여러 가지 방법으로 고려하여 용융지를 해석하는 연구가 이루어졌다³⁻⁶⁾. 최근, 자유 표면 기술법인 VOF(Volume of Fluid)법을 이용하여 GMA(Gas Metal Arc)용접에서 용접 와이어의 비정상 유동 현상을 해석한 연구가 진행되었다⁷⁾.

본 연구에서는 VOF 법을 이용하여 시간에 따른 용융지 표면의 압입 깊이 변화를 관찰하고, 전자기력과 표면장력 및 아크 압력에 따른 표면의 변화와 내부 유동을 해석하였다.

2. 용융지의 모델링

용융지의 형상은 축대칭(axisymmetry)이고 용융 금속의 물성치는 일정하며, 용융지의 유동은 비압축성이고 층류라고 가정하였다. 이러한 가정하에서 지배방정식은 연속식과 Navier-Stokes식으로 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{v_r}{r} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} \right] + \frac{f_r}{\rho} \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} \right] + \frac{f_z}{\rho} \end{aligned} \quad (2)$$

용융지에 작용하는 전자기력은 전류 밀도와 자속 밀도에 의해 구하여 진다. 자속 밀도는 전류 밀도를 통하여 구해지며, 전류 밀도는 전압 분포에 의하여 구해지므로 전압 분포에 의해 전자기력을 구할 수 있다. 전압 분포는 Laplace 방정식으로 구하여 진다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\sigma_e r \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma_e \frac{\partial V}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

용융지에 작용하는 표면장력에 의한 전단 응력은 용융지 표면에서의 온도 구배와 표면 장력 기울기에 의해 결정된다.

$$\tau_{s.t.} = \left(\frac{\partial \gamma}{\partial T} \right) \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (4)$$

철에 황과 같은 불순물이 함유된 경우 표면 장력의 온도계수는 순철의 경우와는 달리 양의 값을 가지게 되는데 이 값은 황의 함유량에 따라 달라지게 된다. 본 연구에서는 Fig.1에 나타낸 바와 같이 철의 표면 장력을 가정하였다.

용융지는 반경 5mm의 반구로 가정하였고, 초기속도는 0이며 초기 전압은 모재 경계 전압과 같은 값으로 균일하게 주었다. 유동 해석에 사용된 경계조건은 대칭축인 z축을 따라 free slip 조건이, 고액 경계면에서는 no slip 조건이 부과되었다. 자유 표면에서는 실험에 의하여 측정된 아크 압력과 유입되는 전류 밀도를 경계 조건으로 주었으며 기존의 연구 결과^{2,3)}를 참조하여 Fig.2,3과 같이 결정하였다. 해석에 사용된 물성치는 Table.1에 나타내었으며 표면 장력을 제외하고는 일정한 값으로 가정하였다. 계산 영역의 크기는 20×15mm이고 셀은 80×60개로 균일하게 배치하였다.

3. 결과 및 고찰

아크 압력은 용융지의 자유 표면을 변형시키는 주원인이며 그 크기에 비례하여 용융지 표면의 압입(depression) 깊이가 증가한다. 초기에 아크 압력이 가해지면 표면이 압입되고, 이 때의 압입 깊이는 최대가 되며, 시간이 지나면서 진동하며 평형 상태에 이르게 된다. Fig.4에 초기 최대 압입 깊이와 평형 상태에서의 압입 깊이를 나타내었다. 아크 압력이 증가하면 최대와 평형 상태의 압입 깊이가 모두 증가하며, 최대 압입 깊이가 더 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. Lin의 결과에 의하면 P₃의 아크 압력에서 0.49mm의 압입 깊이를 예측하였는데, 이 결과는 평형 상태 압입 깊이인 0.54mm와 비교적 잘 일치한다.

전자기력의 영향은 Fig.5에 나타난 바와 같이 용융지 중심부로 향하는 회전 유동을 생성하며 전자기력이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우 유동의 형태가 현저히 달라진다. 전자기력의 의한 회전 유동으로 전체적인 유동 속도는 증가하여 최대 속도에서 두배 이상 차이가 나며, 표면에서의 압입 깊이는 조금 감소하고 그 차이는 전류의 크기가 증가할수록 증가하여, 300A의 전류가 흐르는 경우 평형상태의 깊이에서 약 13%정도의 차이를 보였다.

표면 장력의 영향은 Marangoni 효과를 고려하지 않은 경우와 고려한 경우의 두 가지로 나누어 해석에 임하였다. Marangoni 효과를 고려하지 않고 해석한 결과, 표면 장력의 값이 작을수록 최대 및 평형 상태 깊이가 증가하며 평형 상태에 이르는 시간이 지연되었다. 표면장력계수로 1200dyne/cm의 값을 사용한 경우 최대 0.93mm, 평형상태에서 0.44mm의 깊이가, 1800dyne/cm의 경우 최대 0.61mm, 평형상태에서 0.32mm의 깊이가 계산되었다. 압입 깊이의 차이에도 불구하고 유동의 형태와 최대 속도의 크기는 큰 차이가 없었다. Fig.6은 표면 장력의 온도계수가 ±0.49 dyne/cmK 일때의 유동을 비교한 것이다. 표면 장력의 온도 계수가 음의 값을 가질 경우 표면에서는 용융지 외각으로(시계 방향) 향하는 유동이 발생하고, 내부에서는 전자기력에 의한 반시계 방향의 유동이 발생하여 두 개의 회전 유동이 생성된다. 양의 값을 가질 경우에는 전자기력에 생성되는 유동과 전단 응력에 의해 생성되는 유동의 방향이 같으므로 용융지 중심으로 향하는 하나의 유동만이 발생하며 유동의 최대 속도에 있어서 음의 값을 가진 경우에 비해 두배 이상 증가하였다. 초기 최대 압입 깊이에 있어서는 음의 값을 가진 경우가 1.32mm로 양의 값의 경우의 0.96mm보다 크며 평형 상태 변형량에 있어서는 0.61mm로 양의 값의 경우의 0.46mm보다 크다. 이것은 용융지의 중심부에서 표면 장력이 작고 아크 압력이 중심부에 집중되어 있어 쉽게 변형이 이루어지기 때문에 큰 압입 깊이를 가지게 된다.

4. 결론

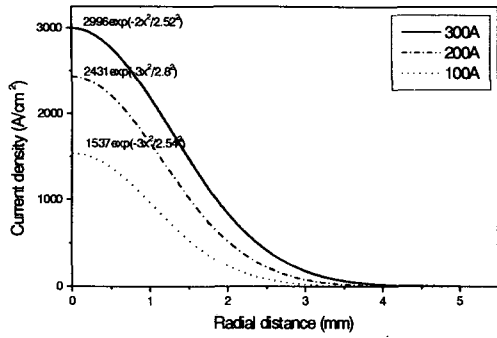


Fig.3 Current density distribution

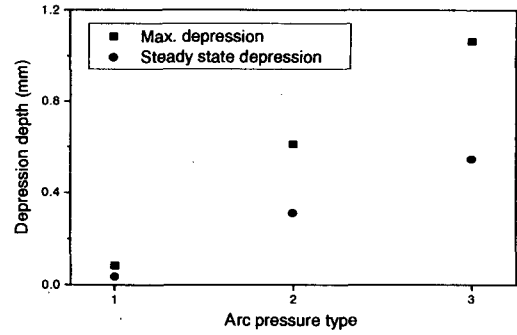


Fig.4 Depression depth for arc pressure

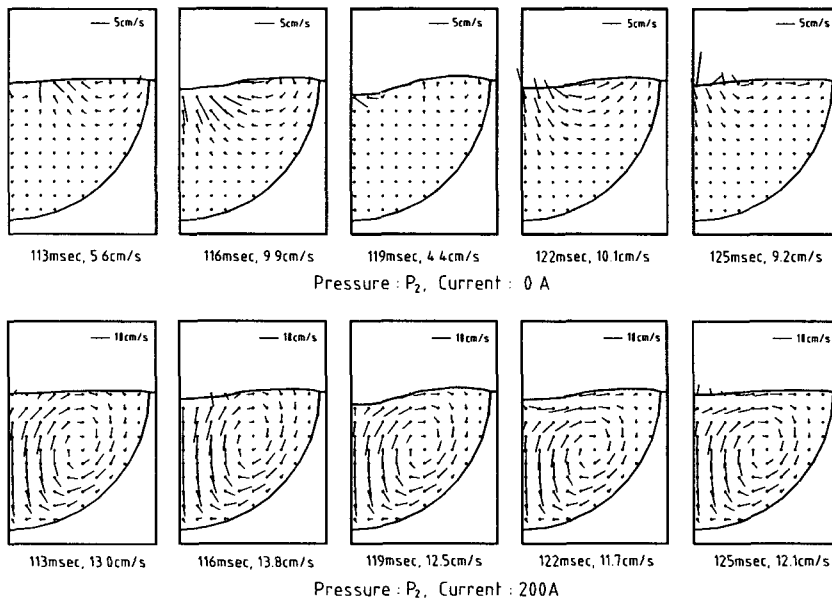


Fig.5 Effect of electromagnetic force on convection of weld pool

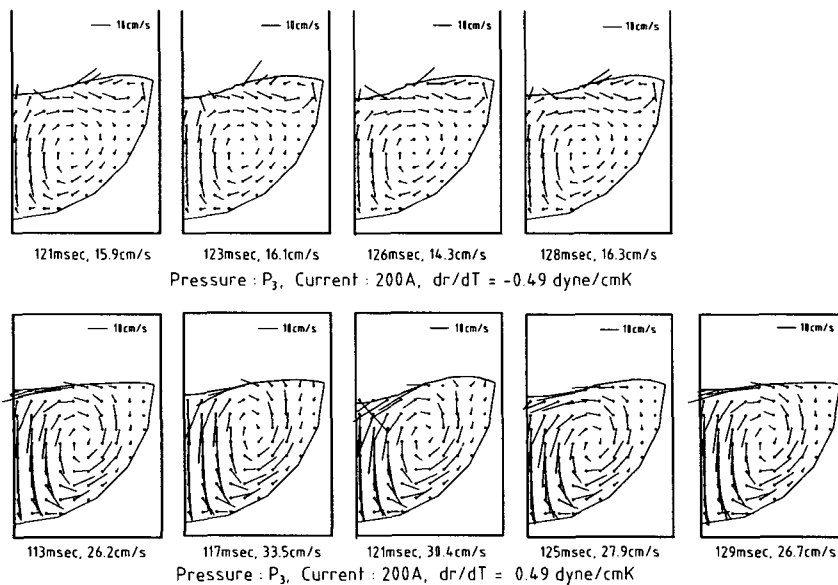


Fig.6 Effect of surface tension gradient on convection of weld pool

GTA용접의 용융지의 유동 현상을 VOF방법을 이용하여 자유 표면을 고려하여 동적 해석하였으며, 시간 변화에 따른 표면에서의 형상 및 유속 변화를 예측할 수 있었다. 아크 압력의 증가에 따라 압입 깊이와 최대 속도가 증가하였고, 전자기력에 의해 용융지 중심으로의 회전 유동이 발생하였다. 표면 장력은 작을수록 압입 깊이가 증가했으며 표면 장력 계수 기울기에 따라 유동의 형태가 변화하였다. 추후 변화하는 고액 경계면 및 열 유동에 관한 연구가 요구된다.

참고문헌

- (1) Oreper, G.M., Eagar, T.W. and Szekely, J., "Convection in Arc Weld Pools", *Welding J.*, Vol.62, No.11, 1983, pp.307s~313s.
- (2) Choo, R.T.C. and Szekely, J., "The Effect of Gas Shear Stress on Marangoni Flows in Arc Welding", *Welding J.*, Vol.70, No.8, 1991, pp.289s~293s.
- (3) Lin, M.L. and Eagar, T.W., "Influence of Arc pressure on Weld Pool Geometry", *Welding J.*, Vol.64, No.6, 1985, pp.163s~169s.
- (4) Zacharia, T., et al., "Modeling of Non-Autogenous Welding", *Welding J.*, Vol.67, No.2, 1988, pp.18s~27s.
- (5) Tsai, M.C. and Kou, S., "Marangoni Convection in Weld Pools with a Free Surface", *Int.J.Numer.Methods Fluids*, Vol.9, 1989, pp.1503~1516.
- (6) Kim, S.D. and Na, S.J., "Effect of Weld Pool Deformation on Weld Penetration in Stationary Gas Tungsten Arc Welding", *Welding J.*, Vol.71, No.5, 1992, pp.179s~193s.
- (7) Choi, S.K., Yoo, C.D. and Kim, Y.S., "Dynamic Simulation of Metal Transfer in GMAW - Part 1: Globular and Spray Transfer Modes", *Welding J.*, vol.77, No.1, 1998, pp.38s~44s

Table. 1 Material properties of pure iron

Mass Density	7860 (kg/m ³)
Kinematic viscosity	5.6×10^{-7} (m ² /s)
Surface tension coefficient	1.2, 1.8 (N/m)
Surface tension gradient	± 0.49 (mN/mK)
Electrical conductivity	8.54×10^5 (mho/m)
Permeability	$4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)

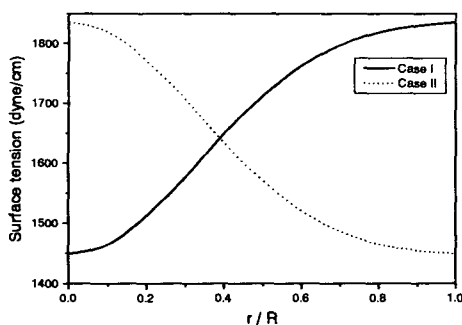


Fig.1 Surface tension distribution

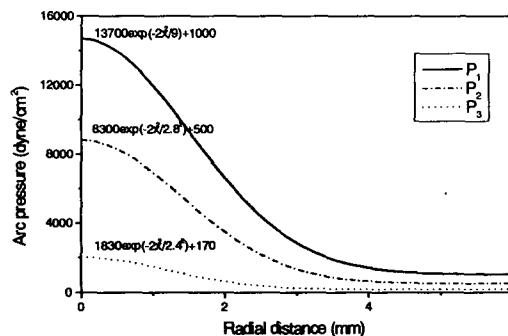


Fig.2 Arc pressure distribution