

VOF 법을 이용한 GMA 용접공정의 금속 이행에 관한 해석

Analysis of metal transfer in GMA welding process using VOF method

최상균, 유중돈

한국과학기술원 자동차 및 설계공학과, 서울

1. 서론

GMA 용접 공정은 가장 널리 사용되고 있는 용접 공정의 하나로 용접부의 금속이행 형태를 규명하는 것은 용접부의 생산성과 신뢰성 향상에 필수적이다. 용융부의 형상이나 용융 액적의 이탈을 규명하기 위하여 지금까지 제안된 대부분의 모델들은 Static Force Balance[1,2,3] 및 Pinch Instability[1,4] 이론에 근거하고 있다. 이러한 연구들은 용융부의 형상을 가정에 의존함으로써 다양한 금속 이행 형태를 표현하기 어려우며 용융부의 내부 유동이나 압력 분포등을 구할 수 없다. 한편 최근에는 용융부의 에너지를 최소화하는 형상을 구하려는 시도[5,6]가 있었는데 이 연구들은 용융부의 현상을 구하는 것은 가능하지만 내부의 유동 분포를 포함하기는 어렵다. 본 연구에서는 VOF(Volume of Fraction)법[7]을 사용하여 자유 표면을 포함한 용융부의 형상 및 유동 형태를 해석하였다. 또한 적절한 경계 조건을 추가하여 전기장을 유도하였고 이로부터 전자기력을 구하여 계산에 포함하였다.

2. 이론 해석

2.1 지배 방정식

용융부는 Axisymmetric incompressible 유동으로 가정하였고 온도 변화 및 drag force 에 의한 영향을 고려하지 않았다. 이 경우 연속 방정식과 Navier Stokes 방정식은 다음과 같은 쓸 수 있다.

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

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} \right] + f_r \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} \right] + f_z \quad (3)$$

2.2 VOF 법

VOF(Volume of Fluid)법은 셀에서의 유체의 부피 비율을 함수 F로 정의하여 표면의 정보를 처리하는 방법이다. F의 값이 1인 경우는 해석하려는 유동장의 내부에 위치한 셀을 나타내며, F의 값이 0인 경우는 해석하려는 유동장의 외부에 위치한 셀이다. 만일 F가 0과 1사이의 값을 가질 경우는 이 셀이 유체의 자유표면을 포함하고 있는 것을 의미한다.

F 함수를 이용하는 것은 MAC(Marker And Cell 법에 비해 메모리가 적게 소요되고 알고리즘이 비교적 쉬우며 표면의 기하학적 정보를 쉽게 얻을 수 있는 장점이 있는 반면, 다음과 같은 F 에 관련된 방정식을 추가로 풀어야 한다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial r F v_r}{\partial r} + \frac{\partial F v_z}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

자유 표면에 관한 정보가 F 에 의해 알려지면 곡률 K 를 이용하여 자유 표면의 압력을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_s = -\sigma K \quad (5)$$

2.2 전자기력의 계산

본 연구에서는 Fig.1 과 같은 전류분포에 대하여 공간상에 균일하게 방출된다고 가정하고 해석적인 방법으로 전자기력분포를 구하였다. 또한 전류가 아크의 표면에 일정한 전류밀도로 방출된다고 가정하고 전압에 대한 Laplace 방정식을 수치 해석을 이용하여 계산하였다.

2.2.1 해석적인 방법

전류분포가 Gaussian 인 경우, 용융부 상단의 전류분포는 다음과 같다.

$$J_z|_{z=0} = 3J_{top} \exp\left(-\frac{3r^2}{b^2}\right) \quad (6)$$

전압에 대한 Laplace Equation 을 위의 경계 조건에 대해 풀고 이를 다시 r 과 z 에 대해 미분함으로써 V 와 J 에 대한 표현을 얻을 수 있다. 또한, $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$ 로 부터 B 에 관한 식을 얻을 수 있으며 이들을 수치적분함으로써 전자기력을 구할 수 있다.

$$V = \frac{J_{top} b^2}{2k_e} \int_0^\infty J_0(r\lambda) \exp\left(-\lambda z - \frac{b^2 \lambda^2}{12}\right) d\lambda \quad (7)$$

$$J_r = -k_e \frac{\partial V}{\partial r} = \frac{J_{top} b^2}{2} \int_0^\infty \lambda J_1(r\lambda) \exp\left(-\lambda z - \frac{b^2 \lambda^2}{12}\right) d\lambda \quad (8)$$

$$J_z = -k_e \frac{\partial V}{\partial z} = \frac{J_{top} b^2}{2} \int_0^\infty \lambda J_0(r\lambda) \exp\left(-\lambda z - \frac{b^2 \lambda^2}{12}\right) d\lambda \quad (9)$$

$$B_\theta = \frac{J_{top} b^2 \mu_m}{2} \int_0^\infty J_1(r\lambda) \exp\left(-\lambda z - \frac{b^2 \lambda^2}{12}\right) d\lambda \quad (10)$$

이 과정은 전류 분포가 일정한 경우에도 경계조건을 바꾸고 반복함으로써 유사한 결과를

얻을 수 있다.

2.2.2 수치해석에 의한 방법

전압에 대한 Laplace 방정식을 용융부에 대하여 수치적으로 계산하여 전자기력을 구하였다. 이 경우에 사용한 경계조건은 용융부 상단에서 $V=0$ 로 하고 surface cell 에서 $J=J_s=I/A_s$ 라고 가정하였다.

3. 결과 및 결론

본 연구에서는 1.2mm 지름의 연강 용접봉에 대하여 SOLA-VOF code 를 사용하여 계산하였다. Fig. 2 와 Table. 1 은 전자기력을 고려하지 않고 중력과 표면장력만을 고려했을 때 시간에 따른 용융부의 성장을 나타낸 것이다. 에너지법을 이용한 해석 결과[6]와 유사한 결과를 보이며 이탈될때의 용융부 부피는 Force balance 이론에 의한 값과 유사함을 확인할 수 있었다. Fig. 3 은 용접봉의 용융전 초기 길이가 1mm 일때 전자기력을 고려하지 않은 경우와 200A 의 Gaussian 분포, 그리고 일정한 전류 분포를 갖는 경우의 정상 상태의 형상을 나타낸다. 전자기력을 고려하지 않은 경우 보다 전자기력을 고려한 경우에 pinch force 에 의해 길이방향의 신장이 커짐을 알 수 있는데 Gaussian 분포의 경우 일정한 분포를 갖는 경우보다 상대적으로 집중된 전류밀도를 가지므로 조금 더 신장됨을 알 수 있다. Fig. 4, 5 는 용접봉의 용융전 초기 길이가 1mm 이고 Gaussian 분포를 갖는 경우에 압력, 속도, 전류밀도, 전자기력의 분포를 나타낸다. 전자기력의 영향으로 인하여 용융부에 vortex 가 발생하며 전류가 용융부의 표면과 무관하게 방출되므로 용융부의 하단으로 내려갈수록 전류밀도는 급속히 작아지고 pinch 효과는 용융부의 상단에 집중됨을 알 수 있다.

수치해석 방법으로 전자기력을 고려한 결과를 Fig. 6, 7 에 나타내었다. 용융부의 초기 길이가 1mm 이고 용융부의 표면에서 일정한 전류밀도를 갖는 경우에 압력, 속도, 전류밀도, 전자기력의 분포를 나타낸다. 이 경우에는 전류가 용융부의 표면에서 일정한 양으로 방출되므로 용융부의 하단에서도 전류밀도는 작아지지 않으므로 pinch 효과는 용융부의 전체에 비교적 균일하게 작용하고 있다. 이 경우에는 전자기력에 의한 vortex 의 방향이 Gaussian 분포에 비해 반대가 된다.

이상으로 살펴본 바와 같이 VOF 법을 용접봉의 급속이행 예측에 적용해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) VOF 법을 이용하여 용융부의 유동이 급속 이행에 미치는 영향을 고려할 수 있었다.
- 2) 표면 장력과 중력만을 고려한 경우, 기존의 모델과 유사한 결과를 얻을 수 있었다.
- 3) 용융부 표면의 전류 분포 및 비정상 상태에 대하여 추가의 연구가 필요하다.

4. 참고 문헌

1. Lancaster, J.F. : The physics of welding, 2nd Ed., Pergamon Press., 1985

2. Amson, J.C. : "Lorentz force in the molten tip of an arc electrode", Brit. J. Appl. Phys., Vol.16, 1965, pp.1169-1179.
3. Kim, Y.S. : "Metal transfer in gas metal arc welding", Ph.D Thesis, M.I.T., 1989
4. Rhee, S.H., and Kannatey-Asibu Jr., E. : "Analysis of arc pressure effect on metal transfer in gas-metal arc welding", J. Appl. Phys., Vol.70, 1991, pp.5068-5075.
5. 주동민: " Energy method 를 이용한 GMA 공정의 molten top 형상해석", 석사학위논문, 한국과학기술원,1994.
6. 이강희, 최상균,유중돈: "용융부의 형상을 고려한 GMA 용접공정의 금속 이행 모델링", 대한용접학회지, 제 13 권, 제 2 호, pp. 155-161, 1995
7. C. W. Hirt and B.D. Nichols : " Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries", J. of Computational physics vol. 39, 1981, pp 201-225

case	time(msec)	volume (cm ³)
1	1.49	0.0109
2	16.22	0.0553
3	26.18	0.0854
4	38.68	0.1231
5	57.66	0.1802
6	82.44	0.2546
7	120.46	0.2546
8	166.62	0.4986

Table. 1 Volume and time in Fig. 2

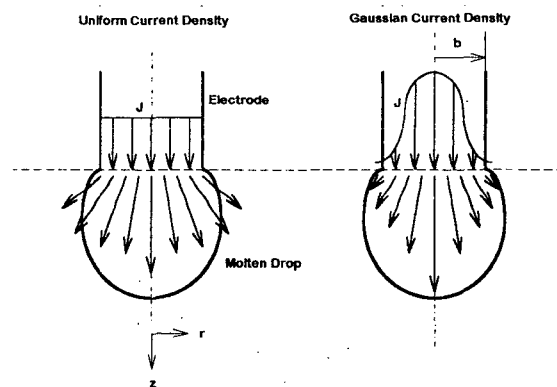


Fig. 1 Assumptions of current distribution

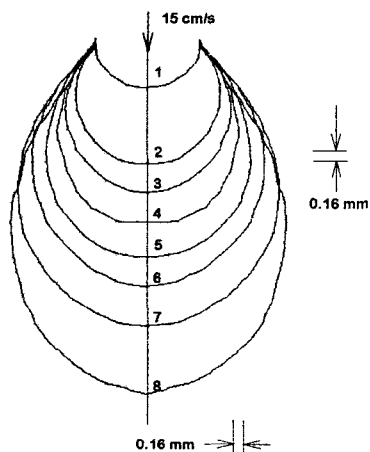


Fig. 2 Growth of molten drop without electromagnetic force (1.6mm dia.)

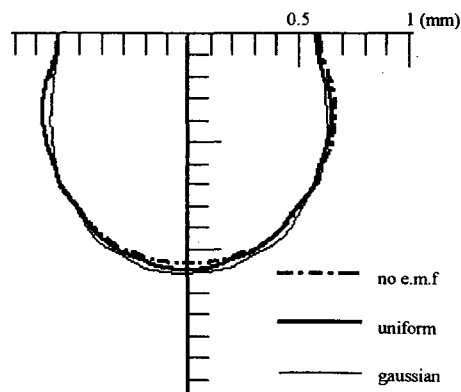


Fig. 3 Effect of electromagnetic force (200A, 1 mm initial length)

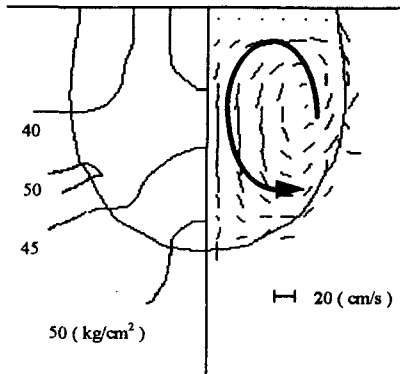


Fig. 4 Pressure and velocity distribution
(Gaussian, 200A, 0.0111cm³)

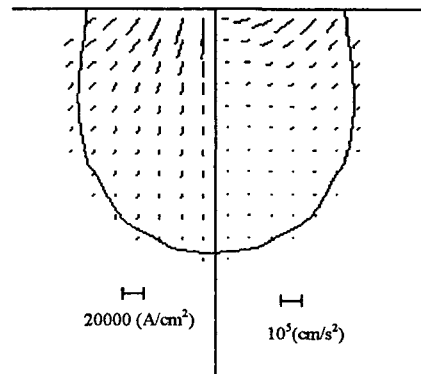


Fig. 5 Curren and E.M.F distribution
(Gaussian, 200A, 0.0111cm³)

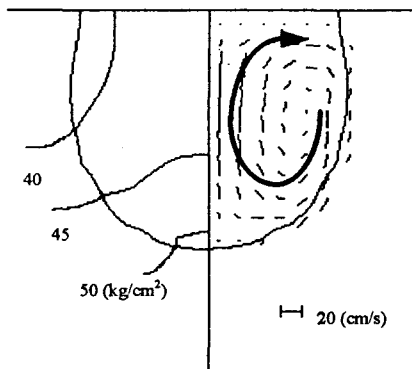


Fig. 6 Pressure and velocity distribution
(Numerical analysis, 200A, 0.0111cm³)

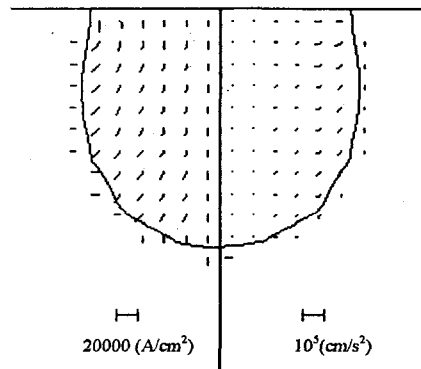


Fig. 7 Current and E.M.F. distribution
(Numerical analysis, 200A, 0.0111cm³)