

研究論文

VOF 방법을 이용한 GMA 용접의 금속 이행에 관한 동적 해석 (I)

- 입상 용적과 스프레이 이행 모드의 해석 -

최상균* · 유중돈** · 김용석***

Dynamic Analysis of Metal Transfer using VOF Method in GMAW (I)

- Globular and Spray Transfer Modes

S. K. Choi*, C. D. Yoo** and Y. S. Kim***

Key Words : Metal transfer (금속 이행), Globular and spray transfer modes (입상용적 및 스프레이 이행 모드), Dynamic analysis (동적 해석), Volume of Fluid method, Electromagnetic force (전자기력)

Abstract

Dynamics of molten drop detachment in the Gas Metal Arc (GMA) welding is investigated using the Volume of Fluid (VOF) method. The electromagnetic effects are included in the formulation of the VOF method which has been widely used to analyze the dynamics of the fluid having a free surface. The molten drop geometry, pressure and velocity profiles within the drop are calculated numerically in the cases of globular and spray transfer modes. It appears that the velocity and current distribution affect metal detachment. It is found that the taper is formed and maintained during the spray transfer by the electromagnetic force. Predicted results show reasonably good agreement with the available experimental data which validates the application of the VOF method to metal transfer analysis.

1. 서 론

Gas Metal Arc (GMA) 용접에서 발생하는 금속 이행 (metal transfer) 현상은 단락 (short-circuit),

입상 용적 (globular), 스프레이 (spray) 모드 등으로 구분되며, 이와 같은 이행 모드는 용접 전류, 전압, 용접봉 송급 속도, 차폐 가스 (shielding gas) 와 같은 용접 조건에 영향을 받는 것으로 알려져 있다¹⁾. 입상용적 및 스프레이 이행 모드는 용적이

* 학생회원, 한국과학기술원 기계공학과

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

*** 정회원, 홍익대학교 금속재료공학과

아크를 통하여 용접봉으로부터 모재로 이행한다. 따라서 용적이 모재의 단락에 의하여 용융부가 모재로 이행되는 단락 이행 모드와는 달리 이행 과정에서 항상 아크가 존재하게 된다. 일반적으로 입상용적 모드는 단락 이행보다 높은 용접 전류 영역에서 발생하며, 전류를 더욱 증가시키고 차폐 가스를 아르곤(argon) 또는 아르곤이 80% 이상 포함되어 있는 혼합 가스를 사용하게 되면 금속 이행은 스프레이 모드로 천이된다. 스프레이 모드는 용적의 지름이 용접봉의 지름과 거의 같은 크기로 이행하는 projected모드와 긴 원뿔 형태의 taper가 형성되는 streaming 모드로 세분화하여 구분하기도 한다¹⁾. 금속 이행 현상은 각 형태에 따라 아크 안정성과 용입 깊이 및 용접 생산품의 품질에 큰 차이를 나타낸다. 따라서 용접봉의 금속 용융 이행에 관한 분석과 제어에 관한 연구는 용접 공정 분야에서 중요한 주제로 부각되어 왔다.

입상 용적 및 스프레이 모드를 해석하기 위하여 정적 힘 평형 모델(static force balance model)과 pinch instability 이론이 널리 사용되고 있으며, 계산 결과는 실험 결과와 상당히 일치하는 것으로 보고되었다¹⁻⁵⁾. 힘 평형 모델^{2,3)}은 일반적으로 입상용적 모드에 적용되며 표면 장력, 중력, 전자기력 및 drag 에 의한 용적에 작용하는 힘을 계산하고 만약에 이탈력이 부착력 보다 크게 되면 용적이 용접봉으로부터 이탈하는 조건을 이용하여 입상용적 모드에서의 이행 현상을 해석한다. 힘 평형 모델은 이탈 조건을 비교적 간단한 식들로 표현할 수 있다는 장점이 있으나 용적의 형상을 단순하게 가정하고, 핀치에 의한 영향을 고려하지 못하는 단점이 있다.

스프레이 모드에서 적용되고 있는 pinch instability 이론^{4,5)}은 표면 장력과 전류에 의해 발생하는 핀치력에 의하여 용적의 길이가 일정한 값 이상이 되면 불안정하게 되어 이탈되는 조건을 이용하여 금속 이행을 해석하는 것이다. Pinch instability 이론은 힘 평형 모델과 같이 간단한 함수 형태의 식으로 이탈 조건의 표현이 가능하지만, 용적을 전류가 흐르는 무한 원통으로 가정하였으므로 실제 현상과는 상당한 차이가 있다. 이는 용적 내부에서 발생하는 유속의 영향을 고려하지 못하고, 파단이 발생하는 부위의 압력은 실제 형상에서는 용적 끝 부분이 막혀 있으므로 끝 부분의

압력이 용적의 형상에 따라 변화하여 이탈에 영향을 주는 것으로 추정되기 때문이다.

최근, 용적에 작용하는 에너지를 최소화하는 방법을 이용하여 입상용적과 스프레이 모드를 해석하고자 하는 시도가 있었으나⁶⁾, 현재까지 개발되거나 적용되는 방법들은 정적 해석으로 용적 내부의 유속이나 압력 분포, 용적의 형상 변화를 추정하기 불가능하다. 한편 수치 해석 방법인 MAC(Marker And Cell)방법을 이용하여 단락 이행을 모드를 해석하려는 시도가 있었으나⁷⁾, 아크가 존재하는 입상용적이나 스프레이 모드의 동적 해석은 현재까지 이루어 지지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 수치해석 기법인 VOF(Volume of Fluid)방법⁸⁾을 이용하여 입상용적과 스프레이 모드에서의 동적 해석을 수행하여 자유 표면의 변화, 속도와 압력의 변화를 추적하였다. 이를 통하여 용접 조건이 금속 이행에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 이와 같은 해석 결과는 용접 변수의 결정과 pulsed MIG 용접기의 개발에 응용될 수 있다.

2. 금속 이행에 대한 VOF 법의 적용

금속 이행이 진행되는 동안 용적의 형상은 용접 조건에 영향을 받으며 시간에 따라 변화한다. 금속 이행과 같이 자유 표면을 포함하는 유동을 해석하기 위하여 일반 유체역학 분야에서 MAC법과 VOF법과 같은 수치 해석 방법이 사용되고 있다. MAC방법⁹⁾은 Fig. 1a에 나타난 바와 같이 해석하고자 하는 유체 전역에 마커를 균일하게 분포시키고, 지배 방정식으로 부터 유속을 계산하고 이에 따라 마커를 이동시켜 자유 표면을 계산한다. 이 방법은 각 마커의 움직임을 저장하고 계산하여야 하므로 계산 시간과 메모리가 많이 소요되는 단점이 있다.

VOF 방법은 MAC 방법의 단점을 보완한 효율적인 수치 해석 방법이다. VOF 방법의 특징은 Fig. 1b에 나타난 바와 같이 해석하고자 하는 부분을 셀(cell)로 구분하고, 각 셀이 포함하고 있는 유체의 양을 셀과의 부피 비율로 나타내는 함수 F로 정의하여 자유 표면을 표현한다. F의 값이 1이면 셀에 유체가 차 있는 경우이고, 0이면 유체가 없는 경우

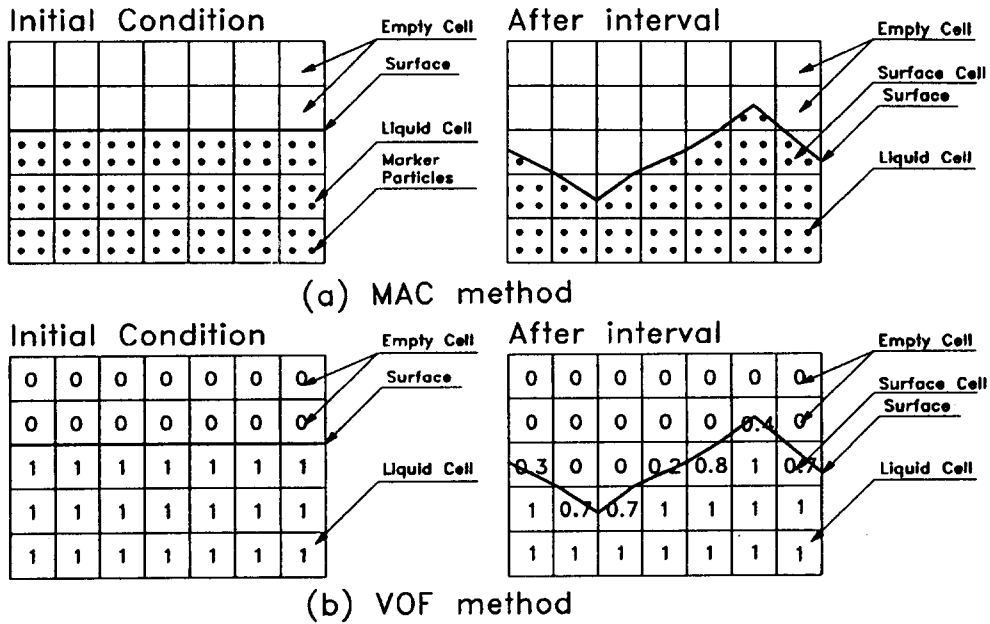


Fig. 1 Expression of free surface in MAC and VOF methods

를 나타낸다. 자유 표면을 포함한 셀은 0에서 1사이의 값을 갖게 되며, 주변 셀과의 F 값을 비교하여 그 기울기가 가장 큰 방향을 구하여 자유 표면의 기울기를 결정한다. VOF 방법은 MAC 방법에서 사용되는 하나의 셀에 존재하는 다수의 마커 역할을 하나의 F 값으로 대신할 수 있으므로 상대적으로 알고리즘이 간단하고 적은 메모리가 소요되는 장점이 있다. VOF 방법은 3차원으로 확장이 가능하지만, 일반적으로 축대칭을 포함하는 2차원 해석에 사용되고 있다.

금속 이행에서의 용융부의 형상을 축대칭(axi-symmetry)으로 가정하고, 용융 금속은 비압축성이라고 가정하면, 금속 이행은 아래의 연속식과 Navier-Stokes식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{v_r}{r} = 0 \tag{1}$$

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

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

이 때 f_r 과 f_z 는 r과 z방향의 체적력(body force)으로서, 일반 유체 유동에서는 중력을 나타내며 금속 이행의 경우에는 중력과 함께 용접 전류에 의한 전자기력이 포함된다. 전술한 바와 같이 VOF 방법은 셀에서 유체가 차지하는 비율을 나타내는 F 값을 통하여 자유 표면을 기술하므로, F에 대한 다음의 방정식을 추가로 풀어야 한다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + v_r \frac{\partial F}{\partial r} + v_z \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \tag{3}$$

각 셀의 F 값을 구하여 자유 표면이 위치한 셀과 표면의 기울기를 계산하면 이에 따라 자유 표면의 곡률(curvature)을 계산할 수 있다. 자유 표면에서의 압력은 곡률로부터 아래와 같이 구할 수 있다.

$$P_s = -\gamma K \tag{4}$$

$$K = K_1 + K_2 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (5)$$

이 때 γ 는 표면장력계수, K 는 곡률을 나타내는데 K_1 과 K_2 는 주축(principal axes) 1, 2에 대한 곡률이다. R_1 은 $r-\theta$ 평면 상의 곡률 반경을 R_2 는 원통형 좌표계에서 표면의 법선 방향에 해당하는 곡률 반경을 나타낸다. 자유 표면을 포함하고 있는 셀 (i, j) 의 중심 압력, $P_{i, j}$ 는 계산된 자유 표면에서의 압력과 이웃한 유체 내부 셀의 압력으로 부터 선형 보간법을 이용하여 구한다.

이와 같이 자유 표면을 포함하는 유체의 유동은 VOF법을 이용하여 해석이 가능하며, 일반 유체의 유동과 아크 용접에서의 금속 이행 현상과의 차이는 용접 전류에 의하여 발생하는 전자기력의 영향을 들 수 있다. 그러므로 기존의 VOF법에 전자기력을 포함시키고, 용적과 용융풀(weld pool)의 초기형상과 경계조건을 고려하면 금속 이행의 동적 해석이 가능하다. 본 연구에서는 용융 액적에 작용하는 외력중에서 표면 장력, 중력, 전자기력을 고려하였으며 drag의 영향은 고려하지 않았다.

3. 입상용적과 스프레이 이행 모드의 모델링

VOF 방법을 금속 이행에 적용하기 위하여 식 (2)의 체적력에 전자기력을 포함시켜야 한다. 전자기력은 핀치력(pinch force)으로 작용하며, 자체 전류에 의하여 유도된 자기장(self-induced magnetic field)에 의하여 발생한다. 단위 부피 당 전자기력은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (6)$$

이 때, \mathbf{J} 와 \mathbf{B} 는 전류 밀도와 자속 밀도를 나타내는 벡터이다. 자기장이 z 방향의 전류에 의하여 발생하므로 θ 방향의 자속 밀도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$B_\theta = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r J_z r dr \quad (7)$$

전류 밀도는 전압 분포가 축대칭이라고 가정하면 전압, V 로 부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_r = -\sigma_e \frac{\partial V}{\partial r} \quad (8)$$

$$J_z = -\sigma_e \frac{\partial V}{\partial z} \quad (9)$$

이 때 σ_e 는 전기 전도도(electrical conductivity)이다. 전압은 다음과 같은 Laplace 방정식에 의하여 결정된다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\sigma_e r \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma_e \frac{\partial V}{\partial z} \right) = 0 \quad (10)$$

수치 해석에서 사용되는 초기조건과 경계조건은 계산 결과의 정확도와 안정성에 영향을 미친다. 본 연구에서 용융에 관한 해석은 제외하였으므로 용접봉 송급 속도에 해당하는 용융 금속이 유입되는 정상 상태로 가정하였다. 본 연구에서 초기조건은 용융부의 형상과 용융부의 속도 및 전압등이며, 용융부내의 초기 속도는 용접봉 송급 속도와 동일하게 주었고 초기 전압은 용접봉 끝 부분과 같은 값으로 균일하게 주었다. 용융부의 초기형상은 반구형으로 하였다. 입상용적과 스프레이 모드에서는 아크가 존재하므로 용적 내부의 전압과 전류 밀도의 분포는 자유 표면에서 아크로 유출되는 전류의 영향을 받게 된다. 이와 같은 영향은 경계조건으로 고려하였으며, 전류 밀도의 분포는 계산 결과에 큰 영향을 미친다. 용융부와 용접봉의 경계면에서는 유입 속도로서 용접봉의 송급 속도를 부과하였고, 대칭축인 z 축을 따라 free-slip조건을 부과하였다. 이와 같이 해석에 사용된 경계조건 및 초기형상을 Fig. 2에 나타내었다.

용적 내부의 전압을 계산하기 위하여 자유 표면에서의 아크로 유출되는 전류 밀도를 경계조건으로 주어진다. 고온에 의한 전자방출(thermionic emission)로 표현이 가능한 GTA 용접과 달리 GMA 용접에서는 용접봉의 표면에서 유출되는 전류의 분포는 자세히 알려져 있지 않으며, 차폐 가스에 영향을 받는 것으로 알려져 있다¹¹. 본 연구에서는 용융부의 전체 표면에 전류 밀도가 균일하게

분포되어 있는 경우와 모재에 가까울수록 전류 밀도가 선형적으로 증가하는 경우에 대하여 계산함으로써 차폐 가스의 영향을 고려하였다.

용융부의 전체 표면에 대하여 유출되는 전류 밀도가 균일하다고 가정하면 자유 표면이 존재하는 셀 (i, j) 에서 아크를 통하여 유출되는 전류 밀도는 아래의 식과 같이 표현할 수 있다.

$$J_s = \frac{I}{\sum_{\text{surface}} S_{i,j}} \quad (11)$$

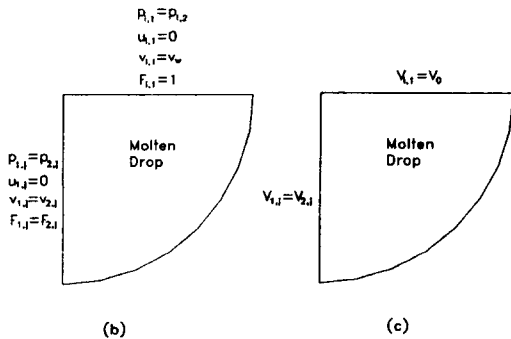
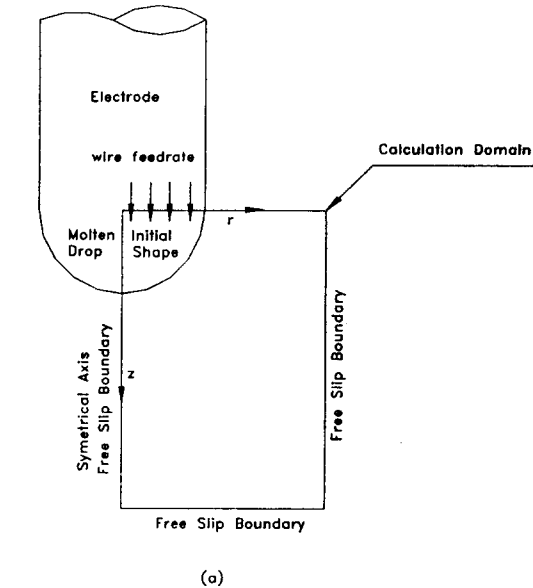


Fig. 2 Initial and boundary conditions
 (a) Initial shape and domain
 (b) Velocity and pressure
 (c) Voltage

이 때 J_s 는 자유 표면에서의 전류 밀도, S 는 해당 셀의 표면적을 나타낸다. 표면에서의 전류 밀도가 모재에 가까울수록 선형적으로 증가한다고 가정하면 자유 표면을 포함한 셀 (i, j) 에서 전류 밀도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_{s,j} = \frac{I z_j}{\sum_{\text{surface}} (S_{i,j} Z_j)} \quad (12)$$

또한, 자유 표면을 포함한 셀에서 전류 유출입의 합이 0이 되므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sum_{\text{neighbor}} (J \cdot A) + J_s S = 0 \quad (13)$$

이 때 Λ 는 인접한 셀과의 단면적이다. 위의 식을 (8), (9) 식을 이용하여 전압에 대하여 계산하면 자유 표면에서의 전압을 구할 수 있다.

VOF방법을 이용하여 금속 이행 현상을 해석하는 순서도를 Fig.3에 나타내었다. 입력된 자료에 따라 해석 영역을 결정하여 셀을 구성하고, 변수들을 초기화 한다. 시간 t 에 대하여 유속을 구하고, 이로 부터 압력을 구한다. 각 셀에서의 F 값을

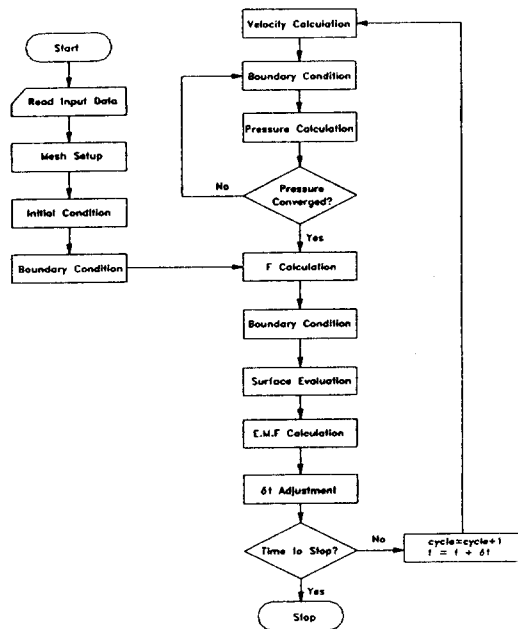


Fig. 3 Flow chart of VOF method

계산하고 자유 표면의 위치 및 경계면을 계산하며, 전압 분포로부터 전류 밀도를 계산하여 전자 기력을 구한다. 연속 방정식(1)을 이용한 수렴 조건을 만족시키면 시간을 $t + \Delta t$ 로 증가시켜 위의 과정을 반복하게 된다.

4. 결과 및 고찰

직경 1.6mm인 강 용접봉에 관하여 입상용적과 스프레이 모드에서의 금속 이행을 해석하고, 기존의 모델의 결과치와 가용한 실험 결과와 비교하였다. 계산에 사용한 물성치는 일정하다고 가정하였으며, Table 1에 나타내었다. 금속 이행에 영향을 미치는 용접 변수로서 표면장력계수, 용접 전류와 표면 전류 밀도의 분포를 선정하였다. 용접 전류는 150에서 350A의 범위에서 50A 간격으로 변화시켰으며, 용융부 표면의 전류 밀도는 균일한 경우와 z 축을 따라 선형적으로 변하는 각각의 경우에 대하여, 그리고 표면장력계수는 1.2N/m와 1.8N/m에 대하여 계산하였다. 모든 경우에 대하여 용접봉 송급 속도는 70mm/s로 하였다. 한편, 입상 용적 이행의 경우에는 1 - 2초동안 계산을 수행하였으며, 이 동안 이탈된 용적의 체적을 평균하고 이를 구에 해당하는 반지름으로 환산하여 결과로 사용하였으며, 스프레이 이행에서는 최소 10개의 액적이 이탈되는 동안 계산하여 이탈된 액적의 부피를 평균하여 구로 환산하였다. 수치해석에 사용된 셀은 크기가 0.1mm인 정사각형을 계산 영역인 3mm×10mm(W×H)에 균일하게 분포시켰다. 프로그램은 FORTRAN 언어를 사용하여 작성하였고 Pentium급의 PC에서 계산을 수행하였다.

용적 표면의 전류 밀도 분포는 실험적인 관찰에 의하여 차폐 가스에 영향을 받는 것으로 알려져 있

Table 1 Material properties of mild steel [1,12]

Mss Density	7860 (kg/m ³)
Kinematic Viscosity	2.8×10^{-7} (m ² /s)
Surface Tension Coefficient	1.2, 1.8 (N/m)
Electrical Conductivity	8.54×10^5 (mho/m)
Permeability	$4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)

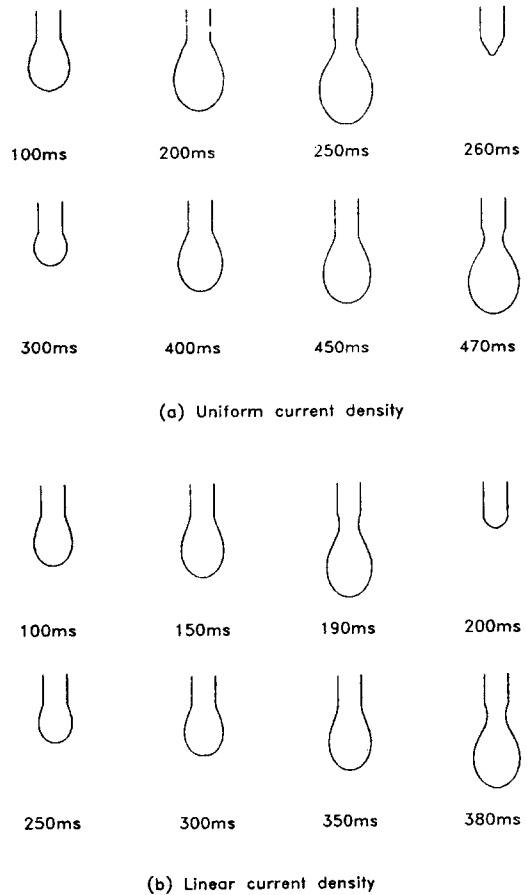


Fig. 4 Change of molten drop profile at 150A

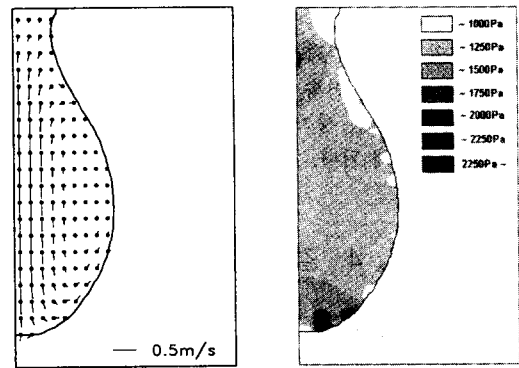
다¹⁰⁾. 일반적으로 CO₂ 나 He 가스를 사용하는 경우에는 아크가 용적의 아래에 존재하고, 아르곤 가스를 사용한 스프레이 모드에서는 아크가 전체 용적을 덮는 것으로 관찰되었다. 균일한 전류 밀도 조건은 용적이 작은 경우에는 타당하고 기준 조건으로 적합하다. 그러나, 용적의 길이가 증가하게 되면 길이에 따른 저항이 변화된다. 용적의 아래 부분은 위 부분에 비하여 모재와의 거리가 짧아지게 되므로 아크의 저항과 비교하여 저항이 작아지게 된다. 그러므로 용적의 아래 부분에서는 위 부분보다 많은 전류가 방출되는 것이 물리적으로 타당하다. 본 연구에서는 이와 같은 경우를 고려하여 용융부 표면에서 전류 밀도가 균일한 경우와 길이에 따라 선형적으로 변화하는 경우에 대하여

해석하였다.

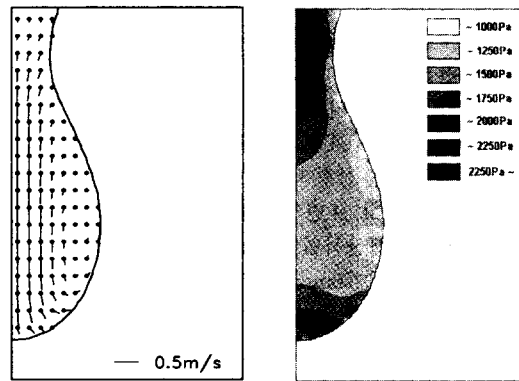
용접 전류가 150A, 표면장력계수가 1.2N/m, 용접봉 송급 속도가 70mm/s인 경우의 시간에 따른 용적의 형상 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 매 주기에 따라 이탈후의 형상이나 속도 차이로 인하여 약간의 차이가 발생하지만, 전류 밀도 분포가 일정한 경우에 용적의 이탈 주기는 대략 220ms이며, 용적의 지름은 3.8mm로서 대표적인 입상 용적 모드를 나타낸다(Fig. 4a). 전류 밀도가 선형적으로 증가하는 경우에는 용적의 이탈 주기는 190ms로 감소하고 용적의 지름도 3.6mm로 감소한다. 두 경우에서 유동의 양상은 유사하지만 일반적으로 전류 밀도가 선형인 경우에 소요되는 이탈 시간은 전류 밀도가 균일한 경우와 비교하여 더 짧아지게 되고 용적의 부피는 감소한다. 이는 전류 밀도가 선형인 경우에는 용적 내부의 핀치력이 증가하기 때문인 것으로 추정된다. 용적이 이탈하기 직전에 중력과 전자기력에 의하여 taper가 발생하지만, 용적이 이탈한 후에는 taper가 유지되지 못한다.

용적이 이탈하기 전에 용적 내부의 속도와 압력을 계산한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 전류 밀도가 균일한 경우 ($t = 250\text{ms}$), 용융 금속은 주로 전자기력에 의하여 r-z평면에서 반시계 방향으로 유동하며 최대 유속은 대략 0.43m/s이다. 전류 밀도가 선형적으로 변화하는 경우 ($t = 190\text{ms}$)에 유동 양상은 비슷하지만 최대 유속은 0.5m/s으로 다소 증가하였다. 전류 밀도가 균일한 경우에는 압력 분포는 주로 표면의 곡률에 따라 지배되고 있는 반면, 전류 밀도가 선형적으로 변화하는 경우에는 넥킹(necking)부의 전류밀도가 상대적으로 크므로 내부에서 압력이 커지게 된다. 자유 표면 부분에 의한 압력은 넥킹부의 표면에서 낮은 값을 가지며 넥킹 내부와 용적의 아랫 부분의 압력은 상대적으로 높게 된다. 최대 압력은 전류 밀도가 균일한 경우에 대략 2500Pa정도이고 전류 밀도가 선형적으로 변화하는 경우에는 3400Pa가량이다.

용접 전류가 300A이고 표면장력계수가 1.2N/m인 경우에 계산된 스프레이 모드에서의 용적의 형상 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 균일한 전류 밀도인 경우, 금속 이행 후반기에 용적의 크기가 증가하게 된다. 이는 용적의 길이가 증가하면서 용적의 끝부분에 흐르는 전류와 이에 의한 전자기력이 작아져서 용적의 크기가 증가하는 것을 억제하지



(a) uniform current density ($t = 250\text{ms}$)



(b) linear current density ($t = 190\text{ms}$)

Fig. 5 Velocity and pressure profiles at 150A

못하기 때문이다. 선형적인 전류 밀도인 경우에는, 용적의 아래 부분에 충분한 전류가 흐르므로 용적이 증가하는 것을 억제한다. 그러므로 streaming모드가 발생하려면, 이행 후기에 용적의 크기를 억제하기 위한 선형 전류 밀도와 같은 조건이 요구된다. 전류 밀도 분포가 일정한 경우에 용적의 이탈 주기는 대략 29ms이며, 용적의 지름은 2mm정도이다. 전류 밀도가 선형적으로 증가하는 경우에는 용적의 이탈 주기는 7ms이하로 감소하고 용적의 지름도 1.2mm정도로 감소한다. 두 경우에서 유동의 양상은 유사하지만 고전류 영역에서의 전류 밀도의 영향은 저전류 영역과 비교하여 크게 나타난다. 전류 밀도가 선형인 경우에 소요되는 이탈 시간과 용적의 부피는 전류 밀도가 균일한 경우

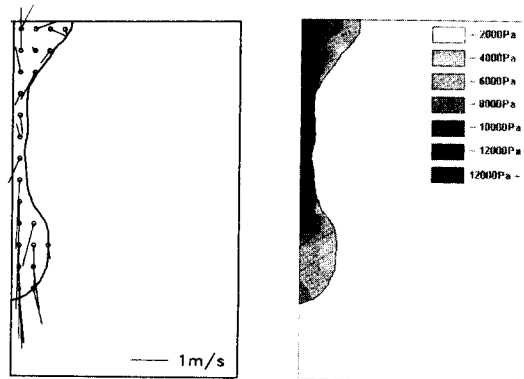
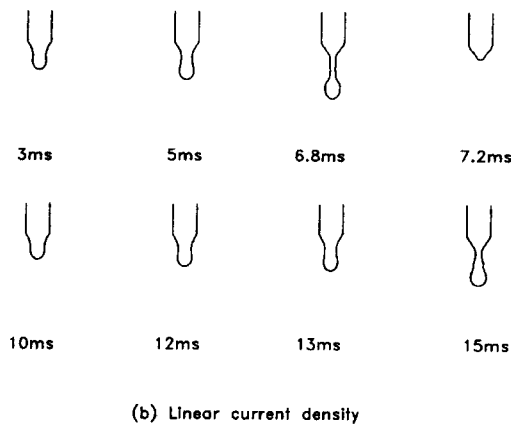
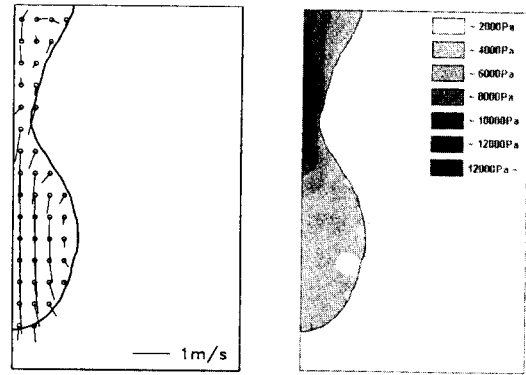
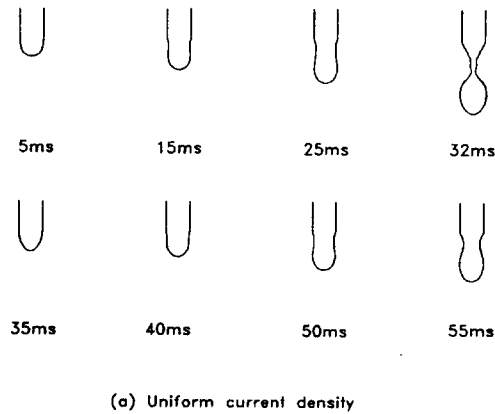


Fig. 6 Change of molten drop profile at 300A

Fig. 7 Velocity and pressure profiles at 300A

와 비교하여 크게 감소한다. 용접 전류가 300A 이상인 경우에는 전류 밀도의 분포와 상관없이 용적이 이탈한 후에도 넥킹부의 taper가 유지된다.

용접 전류가 300A인 경우에 용적 내부의 유속과 압력 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 이 때의 시간은 전류밀도가 균일한 경우와 선형적으로 변화하는 경우에 대하여 각각 31ms과 6.8ms이다. 용적 윗부분의 유속은 상대적으로 작으며 넥킹 부위의 높은 펀치력으로 인하여 입상용적 모드와 반대 방향인 시계 방향으로 회전한다. 넥킹부의 압력은 전류 밀도가 균일한 경우 17000Pa, 전류 밀도가 선형적으로 변화하는 경우가 50000Pa 이상으로서, Fig. 5b에 나타난 입상용적 모드의 압력에 비하여 상당히 높다. 용적의 아래 부분에서는 넥킹부

와 아래 용적의 큰 압력과 전자기력에 의하여 z 축의 방향으로 유속이 증가하며, 최대 유속은 전류 밀도가 균일한 경우에 1.7m/s, 그리고 선형적으로 변화하는 경우에 2.9m/s이다. 특히 전류 밀도가 선형적으로 변화하는 경우, 용적이 넥킹부의 아래에서 이탈하게 되면 이탈 직후에 용접봉에 붙어 있는 넥킹부의 지름은 상당히 작으며 길이는 상당히 길어지게 된다. 이와 같은 경우에 용적이 이탈한 직후에 넥킹부가 강한 전자기력에 의하여 작은 용적으로 분리되는 현상도 발생하며, 이와 유사한 현상은 실험에서 관찰된 바 있다¹¹⁾.

VOF 방법에 의하여 구한 결과를 기존의 힘 평형 모델과 pinch instability 이론의 결과와 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 용적의 직경은 용접 전류에

대하여 연속적으로 이탈하는 용적들의 부피로부터 구한 평균값을 구의 직경으로 환산하였다. 용접 전류가 증가하면 용적의 직경은 연속적으로 작아지며, 입상용적과 스프레이 모드 사이에 급격한 변화는 없다. 전반적으로 기존의 모델과 비교하여 VOF 방법으로 계산한 용적의 직경은 작다. 입상용적 모드에서 힘 평형 모델의 결과와 비교하여 용적의 직경이 작아지는 이유는 힘 평형 모델이 단순히 z방향의 힘만을 고려하는 데 비하여 VOF 방법은 r방향의 핀치에 의한 효과도 고려하기 때문이다. 스프레이 모드에서 pinch instability 이론의 결과보다 VOF 방법으로 계산한 용적의 지름이 작은 이유는 금속 이행에서 z방향의 유속이 용적의 이탈을 수월하게 하기 때문으로 추정된다.

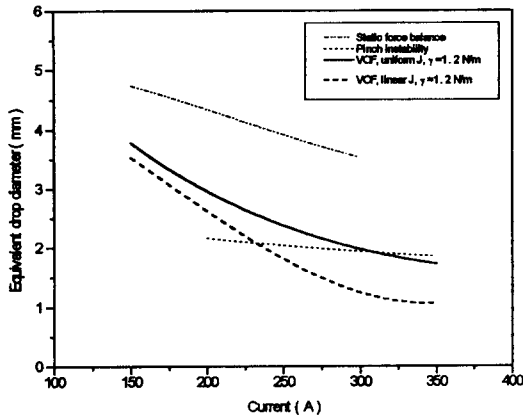


Fig. 8 Comparison with force balance and pinch instability models

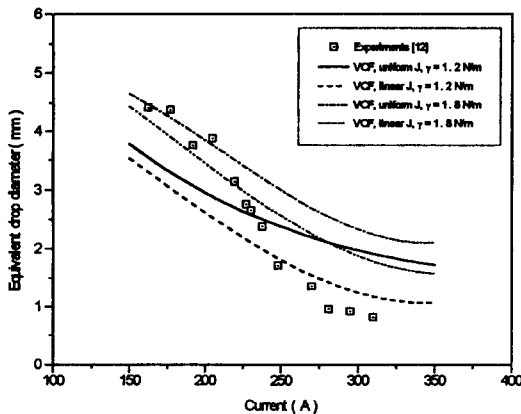


Fig. 9 Comparison with experimental results

해석 결과를 가용한 실험 결과¹²⁾와 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 용적의 직경이 1.6mm인 경우에 계산된 용접 전류는 전류가 선형적으로 변화하고 표면장력계수가 1.2N/m인 경우에 대략 270A이며, 이는 기존에 실험을 통하여 구한 255 - 265A의 천이 전류(transition current)와 대략 일치한다¹³⁾. VOF 방법으로 계산한 결과는 실험 결과와 비교적 잘 일치하였으나, 표면장력계수가 1.2N/m일 때 용접 전류가 낮은 경우에는 실험치보다 작은 직경이 계산되었다. 용접 전류가 낮으면 용적의 온도가 낮으므로 표면장력계수가 증가한다. 표면장력계수가 1.8N/m인 경우의 계산 결과는 용접전류가 낮은 경우에 실험치에 더욱 근접함을 확인할 수 있다.

VOF 방법을 이용하여 전반적으로 기존의 해석 모델에 비하여 금속 이행 현상을 정확히 해석할 수 있으나, 용융부와 플라스마의 밀도 차이가 매우 크기 때문에 플라스마에 의한 drag의 효과를 고려하기 어렵다는 단점이 있다. 추가의 연구를 통하여 이와 같은 제한점의 보완과 함께 열 해석이 추가되어야 할 것으로 판단된다. VOF 방법은 pulsed-GMA 용접에서 용접 조건을 결정하거나, 용융풀과 연계하여 금속 이행이 용입에 미치는 영향을 해석하는 데 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결 론

GMA 용접의 입상용적과 스프레이 이행 현상을 VOF 방법을 이용하여 해석하였으며, 결론을 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 입상용적 이행 모드에서 유체는 반시계 방향으로 회전하며, r방향의 핀치력으로 인하여 용적의 이탈이 촉진된다. 스프레이 모드에서 taper는 전자기력에 의하여 발생하여 유지되며, 용적의 이탈은 전자기력에 의하여 발생하는 유속에 의하여 촉진된다.

(2) 입상용적과 스프레이 모드 사이에 급격한 이탈 주파수 등의 급격한 변화는 없으며, 자유 표면의 전류 밀도 분포에 따라 금속 이행은 큰 영향을 받는다. Streaming모드는 전류 밀도가 선형 분포인 경우에 발생한다.

(3) VOF 결과는 기존의 모델과 비교하여 유사한 추세를 보이며 실험 결과를 비교적 정확히 예측하였다.

5. 후 기

본 논문은 통상산업부에서 시행한 1996년도 공업기반기술 개발 사업의 연구 결과의 일부임을 밝히며, 관계 제위께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. J. F. Lancaster, The physics of welding, 2nd Ed., (1985), Pergamon Press
2. J. C. Amson : An analysis of the gas-shielded consumable metal arc welding system, British weld. J., Vol. 41, No. 4 (1962), pp. 232-249
3. J. H. Waszink and L. H. J. Graat : Experimental investigation of the forces acting on drop of weld metal, Weld. J., Vol. 62, No. 4 (1983), pp. 109s-116s
4. C. J. Allum : Metal transfer in arc welding as a varicose instability : I. Varicose instability in a current-carrying liquid cylinder with surface charge, J. phys. D: Appl. Phys., Vol. 18 (1985), pp. 1431-1446
5. C. J. Allum : Metal transfer in arc welding as a varicose instability : II. Development of model for arc welding, J. phys. D: Appl. Phys., Vol. 18 (1985), pp. 1447-1468
6. S. K. Choi, K. H. Lee, C. D. Yoo and T. S. Lee : Analysis of metal transfer through equilibrium shape of pendent drop in GMAW, Quaterly J. of JWS, Vol. 14, No. 2 (1996), pp. 243-247
7. H. Maruo, Y. Hirata and N. Goto : Bridging transfer phenomena of conductive pendent drop, Quaterly J. of JWS, Vol. 10, No. 2 (1992), pp. 43-50
8. C. W. Hirt and B. D. Nichols : Volume of

- fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, J. of Comp. Phys., Vol. 39 (1981), pp. 201-225
9. F. H. Harlow and J. E. Welch, : Numerical calculation of time dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface, The Phys. of Fluids, Vol. 8, No. 12 (1965), pp. 2182 - 2189
10. A. A. Smith, CO₂ Welding of Steel, The Welding Institute, (1970), Cambridge, U. K.
11. W. Wang, S. Liu, and J. E. Jones : Flux cored arc welding: Arc signals, processing and metal transfer characterization, Welding J., Vol. 74, No. 11 (1995), pp. 369s - 377s
12. Y. S. Kim, Metal transfer in gas metal arc welding, Ph. D Thesis, M. I. T (1989)
13. A. Lesnewich : Control of melting rate and metal transfer in gas-shielded metal-arc welding, Welding J., Vol. 37 (1958), pp. 343s and 418s

Nomenclature

Alphanumeric

A	area of neighboring cell
B	magnetic flux density
D	depth
d	diameter of electrode
F	volume ratio of fluid within cell
f	body force
I	current
J	current density
L	depth of molten pool
n, m	dummy variable
p	pressure
R	radius of curvature or radius of molten pool
S	area of surface cell
t	time

V	voltage
W	width
v	velocity

Greeks

γ	surface tension coefficient
μ_0	permeability of free space
ν	kinematic viscosity
ρ	density
σ_e	electrical conductivity

Superscripts & Subscripts

i	dummy variable
j	dummy variable
r	r-coordinate
s	surface
w	electrode wire
z	z-coordinate
θ	θ -coordinate