

研究論文

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

- 단락 이행 모드의 해석 -

최상균* · 고성훈* · 유중돈** · 김희진***

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

- Short Circuit Transfer Mode -

S. K. Choi*, S. H. Ko*, C. D. Yoo** and H. J. Kim***

Key Words : Short circuit transfer mode (단락 이행 모드), Dynamic analysis (동적해석), Volume of Fluid method, Pressure difference (압력차), Electromagnetic force (전자기력)

Abstract

Dynamic characteristics of the short circuit mode are investigated using the Volume of Fluid (VOF) method. When the initial molten drop volume, contact area and wire feed rate are given, rate change of the molten bridge profiles, pressure and velocity distributions are predicted. The electromagnetic force with proper boundary conditions are included in the formulation to consider the effects of welding current. It is found that the molten metal is transferred to the weld pool mainly due to the pressure difference caused by the curvatures in the initial stage, and electromagnetic force becomes dominant factor in the final stage of short circuit transfer. Necking occurs at the contact position between the molten drop and weld pool, and the initial molten drop volume and welding current have significant effects on break-up time.

1. 서 론

단락 이행(short circuit transfer)은 Gas Metal

Arc(GMA) 용접에서 용융된 용접봉이 단락에 의하여 모재로 이행되는 현상으로, 주로 용접 전류가 낮은 경우에 발생한다. 단락 이행 모드는 발생하는 입열량이 작기 때문에 박판의 용접에 적합하지

* 학생회원, 한국과학기술원 기계공학과

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

*** 정회원, 생산기술연구원

만, 단락으로 인하여 아크가 불안정하고 스패터(spatter)가 발생한다. 스패터의 발생은 고속 촬영한 화상을 분석하여 단락의 초기와 말기에 집중되는 것이 관찰되었고, 이는 전자기력이 증가하기 때문인 것으로 추정되었다¹⁾. 이와 같은 실험 결과를 이용하여 단락의 초기와 말기에 용접 전류를 감소시킴으로서 스패터의 발생량을 감소시키는 용접기가 개발되고 있다²⁾.

단락 이행은 다른 금속 이행 모드와 같이 다양한 용접 변수에 의하여 영향을 받으며, 중요한 변수로는 용접 전류와 전압, 차폐 가스, 용접봉 송급 속도 등을 들 수 있다. 그러나 단락 이행 현상은 용적, 아크 및 용융풀(pool)이 관련되어 있는 복잡한 현상으로 이를 모두 포함한 해석은 아직 이루어지지 못하고 있다. 현재까지의 단락 이행에 관한 연구는 용접 변수의 추정과 고속 촬영 등을 통한 실험 또는 표면장력, 중력, 전자기력 등을 고려한 단순화된 모델을 통하여 이루어지고 있다^{3,4,6-8)}.

단락 이행 현상을 해석하기 위하여 Ishchenko는 단락부의 곡률 변화에 의한 표면 장력 에너지 변화로부터 단락부에 작용하는 힘을 구하여 단락의 가속도와 속도 등을 구하였다³⁾. 최근 황주호 등은 단락부에 작용한 힘에 의한 일률로부터 단락 이행에 소요되는 시간 등을 구하고 실험과 비교하였으며, 이를 용접기 설계에 이용하고자 하였다⁴⁾. 단락 이행에 관한 대부분의 모델은 단락 이행에 작용하는 힘 중에서 일부만을 고려하거나, 단락부의 형상을 원통 또는 구로 단순화하여 해석하였다. 그러나 실험이나 단순 모델을 통한 해석으로는 단락 내부에서 발생하는 유체의 속도나 압력 등을 측정하거나 계산할 수 없으므로, 단락 이행의 동적 해석이 요구되었다. Maruo 등은 Marker and Cell (MAC) 방법을 이용하여 자유 표면을 고려한 동적 해석을 수행하였으며 계산된 단락부의 형상 및 파단에 이르는 시간 등이 실험 결과와 비교적 정확하게 일치하였다⁶⁻⁸⁾. 또한 용융부의 유속과 압력 등의 영향을 계산할 수 있었으며, 저 스패터 용접기 개발에 응용될 수 있음을 보였다. 그러나 이 연구에서는 전자기력을 고려하기 위한 경계 조건으로 자속 밀도를 사용하여 복잡한 단락과 용융풀의 자유 표면 형상에 적용하는데 문제점이 있다.

본 연구에서는 수치해석 기법인 Volume of Fluid (VOF) 방법을 도입하고, 전자기력의 영향

을 고려하여 단락 이행에 관한 동적 해석을 하였다. 용적이 모재에 단락하는 순간부터 단락부의 형상 변화와 압력과 속도 같은 동적 특성을 계산하고, 용접 전류, 접촉 면적, 용융부의 부피, 용접봉 송급 속도 등의 용접 변수가 단락 이행에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 기존의 연구⁶⁻⁸⁾에서 사용한 자속 밀도 대신 전류 밀도를 경계조건으로 전자기력을 계산하여 문제점을 보완하였으며, 해석 결과를 이용하여 과도한 스패터 발생 원인의 규명 및 저 스패터 용접기의 개발에 응용하고자 한다.

2. VOF 방법을 이용한 단락 이행 모드의 모델링

일반적인 금속 이행에 VOF 방법을 적용하는 과정은 前報¹⁰⁾에서 이미 기술하였으므로 본 논문에서는 사용되는 중요한 식들을 가정과 함께 언급하고, 단락 이행 모드의 전자기력을 모델링하는 부분을 기술하고자 한다. 단락 이행에서 용융부의 형상은 축대칭이고, 용융 금속은 비압축성이며, 온도에 따른 물성치는 변화하지 않는다고 가정하면, VOF 방법에서 사용되는 지배 방정식은 연속식과 Navier-Stokes식 및 F에 관한 식으로 아래와 같이 표현된다.

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

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

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

각 cell에서 구한 F 값으로부터 자유 표면에 위치한 cell과 표면의 기울기를 계산하면 자유 표면의

곡률(curvature)을 구할 수 있고, 곡률로부터 자유 표면에서의 압력을 아래의 식으로 구할 수 있다.

$$P_s = -\gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (4)$$

이 때 γ 는 표면 장력 계수, R_1 과 R_2 는 주축(principal axes) 1, 2에 대한 곡률반경이다. 즉, R_1 은 r - θ 평면 상의 곡률 반경을 R_2 는 원통형 좌표계에서 표면의 법선 방향에 해당하는 곡률 반경을 나타낸다.

VOF 방법을 단락 이행에 적용하기 위하여 식(2)의 체적력에 중력과 전자기력을 포함시켜야 하며, 전자기력은 입상 용적이나 스프레이 모드에서와 같이 핀치력(pinch force)으로 작용한다. 용접 전류와 이에 의하여 유도된 자기장(self-induced magnetic field)에 의하여 발생하는 단위 부피 당 전자기력은 다음 식과 같다.

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (5)$$

이때, \mathbf{J} 와 \mathbf{B} 는 전류 밀도와 자속 밀도를 나타내는 벡터이며, 전류 밀도는 다음 식으로 계산된다.

$$J_r = -\sigma_e \frac{\partial V}{\partial r} \quad (6)$$

$$J_z = -\sigma_e \frac{\partial V}{\partial z} \quad (7)$$

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

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\sigma_e r \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma_e \frac{\partial V}{\partial z} \right) = 0 \quad (8)$$

자기장은 z 축 방향의 전류에 의하여 발생하므로 자속 밀도는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{B}_\theta = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r \mathbf{J}_z r dr \quad (9)$$

위의 식들은 前報의 입상 용적이나 스프레이 모드에서 적용하는 식과 동일하며 차분화하여 계산에 사용된다.

단락 이행과 입상용적이나 스프레이 모드의 차이점은 초기조건과 경계조건으로 나타낼 수 있다. 본 연구에서 사용한 초기 조건은 기존의 연구를 참조하여 용적의 초기 부피와 형상 및 용융물과의 접촉 면적으로 설정하였다^{3,8)}. 해석에 사용된 초기 및 경계조건을 Fig. 1에 나타내었다. 초기 용적의 형상은 중력과 표면 장력에 의하여 계산되며 구와 거의 유사한 형태이다. 본 연구에서는 열전달 및 용융에 관한 해석은 포함하지 않았으며 용적과 접촉하는 용융물의 형상은 원통형으로 가정하였다. 고체 상태의 용접봉과 용적의 경계면에서는 용접봉 송급 속도를 부과하였고, 속도가 없는 경우에는 no-slip 조건을 부과하였다. 대칭축에서는 z 축

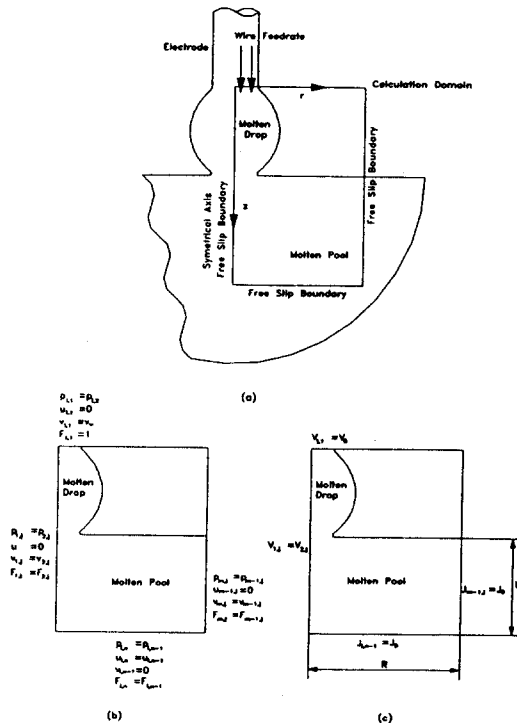


Fig. 1. Initial and boundary conditions
(a) Initial shape and domain
(b) Velocity and pressure
(c) Voltage and current density

을 따라 free-slip 조건을 부과하였으며, 원통으로 가정한 용융풀의 경계면에서는 free-slip 조건을 부과하였다. 원통형 용융풀의 경계면에서 속도와 압력에 대한 경계 조건을 Fig. 1b 에 나타내었고, 전압과 전류 밀도에 관한 경계 조건을 Fig. 1c에 나타내었다.

단락 이행은 용적이 용융풀과 접촉하며 아크가 소멸되므로 금속 이행 과정에서 아크의 영향이 없다. 아크가 존재하지 않으므로 용접 전류는 자유 표면을 통하여 유출되지 않고 용융 금속을 통하여 흐르게 된다. 그러므로 자유 표면에 존재하는 셀에 대하여 전류의 유입이나 유출이 없음을 나타내는 다음의 조건을 부가한다.

$$\sum_{neighbor} (J \cdot A) = 0 \quad (10)$$

이때, Λ 는 인접한 셀과의 단면적이다. 식 (10)을 식 (6), (7) 과 함께 전압에 대하여 계산하면 자유 표면에서의 전압에 관한 경계 조건을 구할 수 있다. 전류는 용융풀의 경계면을 통하여 유출되며 경계면에서의 전류 밀도는 일정하다고 가정하여 아래와 같은 경계 조건을 부가하였다.

$$J_0 = \frac{1}{(\pi R^2 + 2\pi RL)} \quad (11)$$

이 때 R과 L은 원통형으로 가정한 용융풀의 반지름과 깊이를 나타낸다. VOF 방법으로 단락 이행 현상을 계산하는 과정은 前報와 동일하며 Fig. 2에 나타내었다¹⁰⁾.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 가장 널리 사용되는 직경 1.2mm인 강 용접봉을 해석에 사용하였다. 단락 이행의 주기성은 고려하지 않았으며 초기 형상에서 파단에 이르는 과정의 단락부의 거동과 여러 인자들의 영향을 살펴 보았다. 계산에 사용된 물성치는 일정한 값을 갖는다고 가정하였으며 Table 1에 나타내었다. 단락 이행에 영향을 미치는 주요 용접 변수로서 용접 전류, 용적의 초기 부피, 용적과

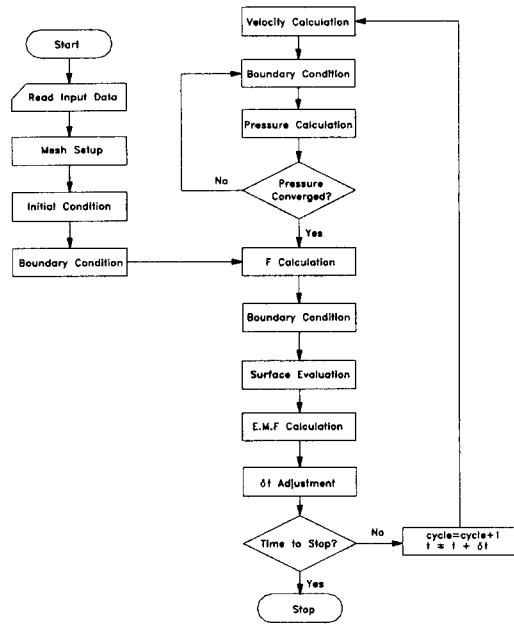


Fig 2. Flow chart of VOF method

Table 1 Material properties of mild steel

Mass density, ρ	7860 (kg/m ³)
Kinematic viscosity, ν	2.8×10^{-7} (m ² /s)
Surface tension coefficient, γ	1.5 (N/m)
Electrical conductivity, σ	8.54×10^6 (mho/m)
Permeability, μ	$4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)

용융풀의 접촉 면적, 용접봉 송급 속도를 선정하였다. 용접 변수의 범위로서 용접 전류는 0, 100, 200, 300A, 초기 용적의 부피는 5, 7.5, 10mm³, 접촉 면적의 반지름은 0.3, 0.6, 0.9mm, 용접봉의 송급 속도는 0, 70mm/s이다. 수치해석 영역은 4mm×6mm(W×H)으로 하였고, 사용된 셀은 크기가 0.1mm인 정사각형으로 계산 영역내에 균일하게 분포시켰다.

3.1 용융부의 형상 및 유동 해석 결과

용접 전류가 100A, 초기 접촉면의 반지름이 0.

6mm이고, 용접봉의 송급 속도가 70mm/s인 경우, 초기 부피의 변화에 따른 용융부의 형상 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 초기 부피가 커질수록 파단 시간은 증가하며 파단에 이르는 과정에서 용적의 형상 변화는 초기 부피와 무관하게 매우 유사하다.

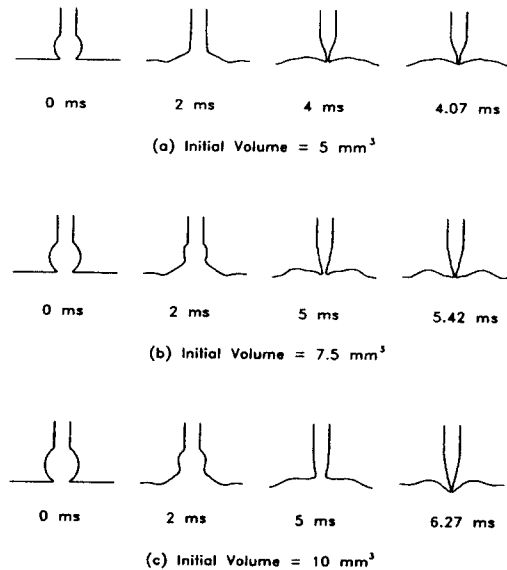


Fig. 3. Effects of initial volume on bridge profile at 100A

전류가 단락 이행에 미치는 영향을 살펴 보기 위하여 초기 용적의 부피가 10 mm^3 인 경우 용접 전류가 0, 100, 300A일 때의 용융부 형상 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 실제 용접에서 전류가 0A인 경우는 발생할 수 없지만 용접 전류가 파단에 미치는 영향을 비교하기 위하여 계산을 수행하였다. 전류가 흐르지 않는 상태에서 (Fig. 4a), 금속 이행은 표면 장력과 중력에 의하여 진행되어 파단된다. 이는 곡률에 의하여 용적부의 압력이 용융풀의 압력에 비하여 크기 때문이며, 이와같이 곡률과 표면장력에 의하여 파단이 발생하는 현상을 self-failure 효과라 한다⁹⁾. 용접 전류가 100A인 경우에는 (Fig. 4b) 전류가 흐르지 않는 경우와 비교하여 파단 시간은 다소 감소하지만 형상에 큰 변화를 보이지 않으므로 전자기력의 영향이 그리 크지 않음을 알 수 있다. 용접 전류가 300A인 경우 (Fig.

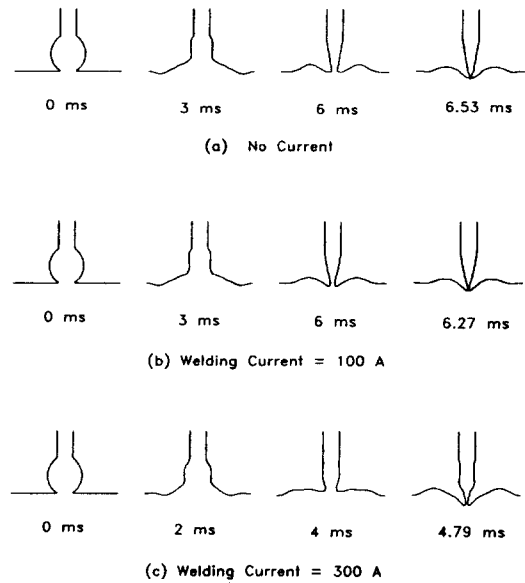


Fig. 4. Effects of welding current on bridge profile with initial volume of 10 mm^3

4c), 파단 시간은 상당히 감소하고 형상에 있어서도 차이를 보인다. 단락 이행 초기의 형상은 유사하지만, 이행 후기에 단락부에 강한 전자기력이 집중되어 파단 시간은 짧아지게 된다. 파단 위치는 Fig. 3과 Fig. 4에 나타난 바와 같이 초기 부피나 용접 전류의 변화에 관계없이 용적과 용융풀의 접촉부에서 발생하며 이는 기존의 연구 결과와 일치한다^{7,8)}.

용접 전류가 100A, 300A일 때 단락 이행의 초기와 말기의 압력 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 이행 초기에 용접 전류가 100A인 경우에는 용융부의 곡률에 의한 압력 분포가 지배적인 반면 (Fig. 5a), 용접 전류가 300A와 같이 큰 경우에는 전반적으로 높은 압력을 형성하며 특히 용융부와 용접봉의 경계면에서 전류 밀도가 커지므로 상부에 높은 압력이 형성된다 (Fig. 5c). 단락 이행이 진행되어 단락부의 반경이 작아지게 되면 곡률과 전자기력에 의하여 교락부의 압력이 점점 증가하게 되며 상대적으로 낮은 압력을 갖는 용융풀과 큰 압력 차이가 나타난다 (Fig. 5b, 5d). 교락부의 압력은 용접 전류가 큰 경우가 작은 경우보다 더 크며, 용접 전류가 300A와 같이 큰 경우에는 교락부에 작용하는

강한 핀치력의 영향으로 용융풀내에서도 단락부 근처에서 부분적으로 큰 압력을 갖는 부분이 발생한다.

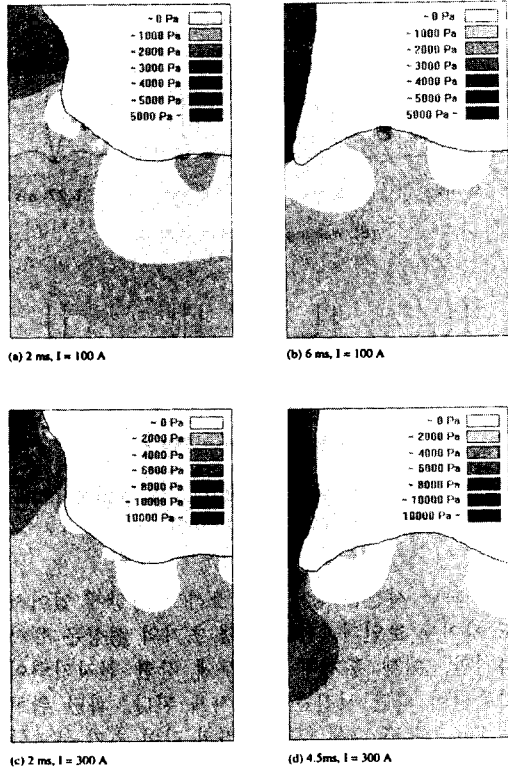


Fig 5. Effect of welding current on pressure distribution

용접 전류가 100A, 300A인 경우에 대한 속도 분포를 Fig.6에 나타내었다. 이행 초기에는 용적과 용융풀의 접촉면에서 곡률에 의한 압력차로 r방향의 속도가 존재하며, 이행 후기에 용적 내부의 속도는 z방향이 지배적이며 핀치부의 근처에서 유속은 최대가 된다. 이행 후기에 용융풀은 반시계 방향으로 유동하며 용적으로부터 유입되는 용융 금속으로 인하여 용융풀의 표면은 기준면보다 높아진다. 용접 전류가 큰 경우에 전반적으로 빠른 속도 분포를 나타내며 단락이 진행될수록 속도가 증가한다. 단락 후 2ms경과시 용접 전류가 100A, 300A일 때 용융부내의 최대 속도는 각각 0.8, 0.9m/s이었다. 단락 이행의 말기에는 전자기력에 의

한 핀치 효과로 인하여 최대 속도는 각각 2.4, 2.9m/s로 증가한다.

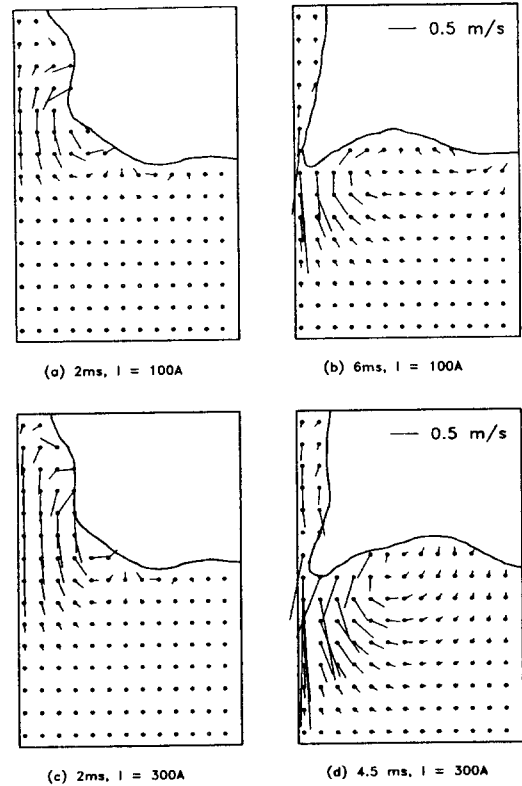


Fig 6. Effect of welding current on velocity distribution

3.2 용접 조건의 영향

용접 전류, 용적의 초기 부피와 접촉 면적 및 용접봉 송급 속도 등의 용접 변수가 단락 이행에 미치는 영향들을 단락부의 최소 반경으로 정의한 핀치 반경의 변화를 통하여 추정하였다. 초기 용적의 부피가 10mm³, 접촉면의 반경이 0.6mm이고 용접봉 송급 속도가 70mm/s인 조건에서 용접 전류를 300A 까지 변화시킬 때, 핀치 반경 변화를 Fig.7에 나타내었다. 핀치 반경이 최대값에 도달하는 시간은 전류와 관계없이 1.2ms정도로 일정하며, 이 때의 최대 핀치 반경은 약 1mm정도로 일정하다. 용접 전류가 0와 100A인 경우를 비교하면 Fig.4의 형상과 핀치 반경의 변화가 거의 없으므로

용접 전류가 100A이내의 저전류 영역에서는 전자 기력의 영향은 크지 않다. 그러므로 저전류 영역에서의 금속 이행은 표면장력과 곡률 변화에 따른 구동력에 의하여 지배된다.

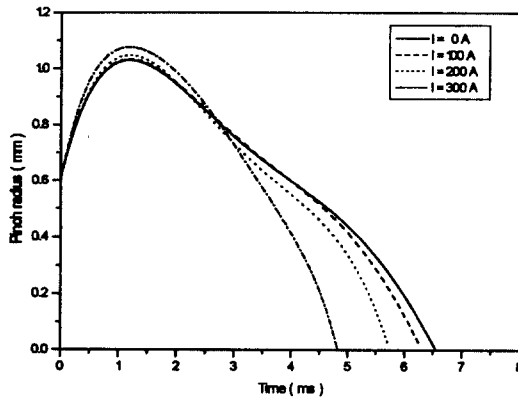


Fig 7. Relation between pinch radius, break-up time and welding current

용접 전류가 200A이상인 경우에는 이행 초기 4ms동안은 전류의 영향이 크지 않으나 그 이후에 전자기력의 영향이 증가한다. 이는 단락 초기에는 용적의 부피가 단락 후기와 비교하여 상대적으로 크기 때문에 용적 내부의 전류 밀도가 낮아서 전자기력이 작고, 이행이 진행되어 교락부 반경이 작아질수록 전류 밀도가 높아져 전자기력이 커지기 때문이다. 그러므로 용접 전류에 의한 전자기력은 단락 이행의 후기에 크게 영향을 주며, 단락 후기의 핀치 반경 변화율은 전류에 의하여 지배된다. 이행 초기에는 곡률의 변화에 따른 표면 장력에 의한 구동력이 지배적이며 이행 후기에는 전류에 의한 전자기력이 지배적으로 작용한다.

용접 전류가 100A인 경우, 용적의 초기 부피에 따른 핀치 반경의 변화를 Fig.8에 나타내었다. 초기 부피가 작은 경우에는 이행되는 금속의 양이 작으므로 최대 핀치 반경은 초기 부피가 큰 경우에 비하여 작아지며, 초기 부피가 큰 경우에는 핀치 반경이 급격히 증가하고 최대값도 커지게 된다. 핀치 반경이 최대값에 도달한 후에는 시간에 따른 반경의 변화율은 용적의 초기 부피에 관계없이 거의 동일하다. 그러므로 용접 전류와 초기 접촉 면적이 일정한 경우, 단락에 소요되는 시간은 최대

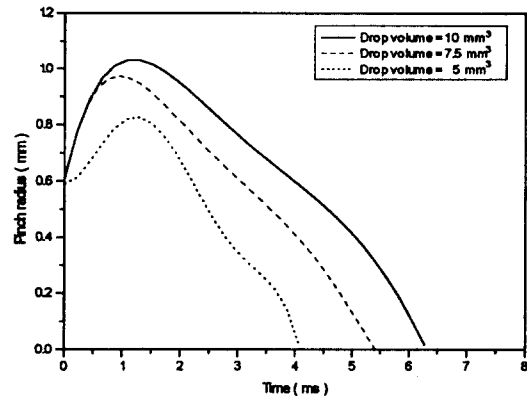


Fig 8. Relation between pinch radius, break-up time and initial volume

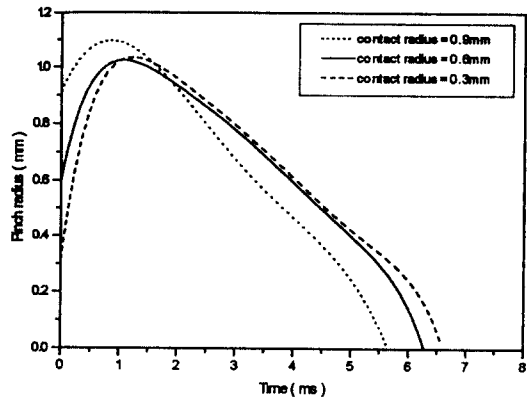


Fig 9. Relation between pinch radius, break-up time and contact radius

핀치 반경에 의하여 결정되며 초기 용적의 부피가 증가하면 최대 반경도 증가하므로 초기 용적의 부피가 단락 시간에 큰 영향을 미친다.

초기 접촉 면적은 단락 직전의 용적과 용융풀의 형상에 의하여 영향을 받으며 용융풀의 형상은 아크 압력(arc pressure)과 내부 유동 등에 의하여 변형하므로 정확한 초기 접촉 면적을 예측하는 것은 어렵다. 본 연구에서는 용융풀의 자유 표면은 초기에 평면이고 용적의 일정 면적이 용융풀에 수직으로 접촉한다고 가정하였다. 초기 부피가 10mm³, 용접봉 송급 속도가 70mm/s이고 용접 전류가 100A일 때 초기 접촉 반경의 변화에 따른 핀치 반경의 변화를 Fig.9에 나타내었다. 최대 핀치 반경

에 도달하는 데 소요되는 시간은 초기 접촉 면적이 큰 경우가 접촉 면적이 작은 경우보다 짧다. 최대 핀치 반경에 도달한 후에 핀치 반경의 변화율은 거의 동일하며, 이는 Fig. 8의 초기 용적 부피의 경향과 유사하다.

용접 전류가 100A이고, 초기 부피가 10mm^3 일 때, 용접봉 송급 속도에 따른 핀치 반경의 변화를 Fig. 10에 나타내었다. 송급 속도가 70mm/s 인 경우에 송급에 의한 부피의 증가로 인하여 파단에 소요되는 시간이 다소 증가하지만, 전반적인 추세가 동일함을 알 수 있다. 이는 단락 시간이 짧으므로 송급 속도에 의한 부피 증가량이 작고 송급 속도가 단락 내부의 유속에 비하여 상당히 작기 때문인 것으로 추정된다. 그러므로 송급 속도는 단락 이행 현상에 큰 영향을 미치지 못한다.

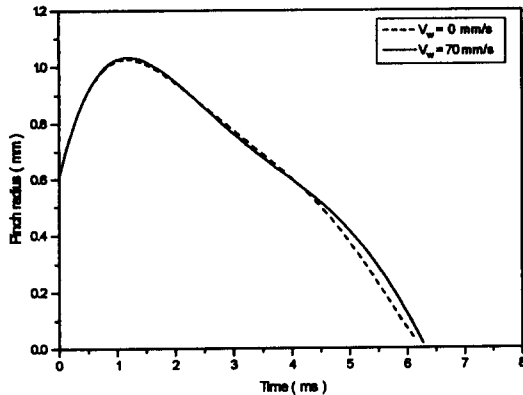


Fig 10. Relation between pinch radius, break-up time and wire feed rate

3.3 용접 조건과 스패터의 관계

앞에서 언급한 바와 같이 스패터의 발생은 이행의 초기와 말기에 집중적으로 발생한다. 본 연구에서는 단락이 항상 안정되게 유지되는 것으로 가정하였으므로 스패터가 발생하는 현상을 정량적으로 계산할 수 없지만, 발생 원인 등을 추정할 수 있다. 단락 이행이 발생하는 순간에 용접 전류는 급격히 증가하고 용적과 용융풀의 접촉 면적은 작기 때문에 접촉면에서 큰 전자기력이 작용한다. 또한 접촉면에서 곡률의 변화가 크기 때문에 큰 압력차가 발생하게 된다. 이때, 외란에 의하여 단락의 안

정성이 저하되면 스패터가 발생할 확률이 증가한다. 이행 초기의 스패터는 용적 자체가 비산할 수 있으므로 스패터의 부피는 크게 된다. 전자기력이 존재하지 않는 일반 유체의 경우에는 용적이 이행되는 경우에는 스패터가 발생하지 않으므로 용접에서 발생하는 스패터는 전자기력에 의한 것으로 추정할 수 있다. 그러므로 스패터를 줄이려면 단락되기 이전에 용접 전류를 낮추어 접촉면에서 발생하는 전자기력을 감소시킴으로서 단락 이행이 안정적으로 진행되도록 하여야 한다. 현재까지의 해석 결과로부터 (Fig. 7-10), 단락이 시작된지 1.5ms 이내에 최대 핀치 반경에 도달하여 안정된 단락을 형성하므로 단락 후 1.5ms 동안 저전류 상태를 유지시키는 것이 바람직하다. 용접 전류가 낮더라도 self-failure 효과에 의하여 금속 이행은 진행되므로 저전류의 값은 용적과 용융풀의 용융 상태가 유지되는 정도로 설정하여야 한다.

단락이 안정적으로 형성된 이후에는 전류를 증가시켜 단락 이행을 촉진시킨다. 단락 이행의 후기에 핀치부의 면적이 작아지므로 핀치부에서 전류 밀도와 전자기력이 증가하고 이에 의해 교락부와 용융풀 사이에 큰 압력 차이가 나타나므로 외란에 의하여 스패터가 발생할 확률이 증가한다. 그러므로 스패터 발생을 줄이기 위하여 전자기력을 감소시켜야 한다. Fig. 7의 경우, 단락 발생 후 3.5ms 경과 후 부터 전류의 영향이 현저히 증가하므로 전류를 감소시켜야 한다. 단락 이행의 후기에 발생하는 스패터는 전자기력과 함께 저항열에 의하여 결정되는 것으로 추정된다. 교락부의 높은 전류 밀도로 인한 단위 부피당 저항열이 증가하여 단락부의 온도가 금속의 증발 온도에 도달하게 되어 스패터가 발생한다. 실제 용접에서 외란은 항상 존재하므로 단락 이행의 말기에 발생하는 스패터를 완전하게 제거할 수는 없다. 그러나 단락부의 부피가 작을수록 스패터의 양이 감소하므로 전류를 감소시켜 단락부의 전자기력과 온도를 감소시키고 단락 시간을 증가시켜 단락부의 부피를 감소시키면 단락 이행의 말기에 발생하는 스패터를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 수치 해석의 결과로 파단 시간을 구하였으나, 실제의 파단 시간은 계산값 보다 짧을 것으로 추정된다. 이는 용접 속도와 아크의 불안정 등의 영향을 해석에 포함시키지 못하였고 단락은

항상 안정되게 유지되어 진행되는 것으로 가정하였기 때문이다. 또한, 이행 말기에는 저항열에 의하여 교락부의 온도가 금속의 증발 온도에 도달하여 파단이 발생할 것으로 추정되기 때문이다. 그러므로 단락의 초기와 후기에 저전류로 변환하는 시간과 전류값을 보다 정확하게 예측하기 위해서는 열 및 용융에 관련된 추가의 연구가 요구된다.

4. 결 론

GMA 용접의 단락 이행 현상을 VOF 방법을 이용하여 해석하였으며, 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 단락 이행의 초기에는 곡률 변화와 표면장력에 의한 구동력에 의하여 금속 이행이 지배되며, 이행의 후기에는 전자기력에 의하여 영향을 받는다. 전자기력은 200A이하의 저전류 영역에서 금속 이행에 영향을 미치지 못하며, 초기 용적의 부피와 접촉 면적에 영향을 받는다.

(2) 파단은 용적과 용융물의 접촉면에서 발생하며, 단락 시간은 최대 핀치 반경과 핀치 반경의 변화율에 의하여 결정된다. 최대 핀치 반경은 초기 용적 부피와 접촉 면적과 같은 초기 조건의 영향을 받으며, 핀치 반경의 변화율은 용접 전류의 영향을 받는다.

(3) 스패터를 감소시키기 위하여 단락 후 1.5ms 동안 저전류를 지속하고 전류를 증가시킨 후, 용접 전류의 영향이 증가하기 시작하는 단락 후 대략 3.5ms에서 전류를 감소시키는 것이 바람직하다.

5. 후 기

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

참 고 문 헌

1. J. Lipei, L. Jingchang and W. Zhihuan : The effect of the dynamic behaviour of welding rectifiers on spatter, *Welding International*, Vol. 1, No. 3 (1987), pp. 129-133
2. H. Yamamoto, S. Harada and T. Yasuda : The development of welding current control system for spatter reduction, *Welding International*, Vol. 4, No. 5 (1990), pp. 398-407
3. Y. S. Ishchenko : Relationships governing droplet transfer during a short circuit, *Welding International*, Vol. 7, No. 8 (1993), pp. 627-631
4. 황주호, 문형순, 나석주, 한광수 : 가스 메탈 아크 용접에서 단락 현상 모델링 및 스패터 감소를 위한 전류 파형 선정에 관한 연구, *대한용접학회지*, Vol. 14, No. 1 (1996), pp. 57-67
5. 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
6. H. Maruo, Y. Hirata and K. Yoshida : Numerical Analysis on the Stability of conductive fluid cylinder-The effects of electromagnetic pinch force on the bridging transfer, Report 1, *Quarterly J. of JWS*, Vol. 7, No. 4 (1989), pp. 473-478
7. H. Maruo, Y. Hirata and K. Yoshida : Current and time required for breakup of conductive liquid bridge-The effects of electromagnetic pinch force on the bridging transfer, Report 2, *Quarterly J. of JWS*, Vol. 7, No. 4 (1989), pp. 479-484
8. H. Maruo, Y. Hirata and N. Goto : Bridging transfer phenomena of conductive pendent drop-The effects of electromagnetic pinch force on the bridging transfer, Report 3, *Quarterly J. of JWS*, Vol. 10, No. 2 (1992), pp. 251-258
9. 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
10. 최상균, 유중돈, 김용석 : VOF 방법을 이용한 GMA 용접의 금속 이행에 관한 동적 해석(Ⅰ) - 입상 용적과 스프레이 이행 모드의 해석, *대한용접학회지*, Vol. 15, No. 3(1997)