

가스 메탈 아크 용접에서 유체 유동을 고려한 금속 이행에 관한 연구

박기영*, 이세현**, 엄기원**

A Study on the Metal Transfer Considering Fluid Flow in GMAW

Kiyoung Park*, Sehun Rhee**, Kiwoan Um**

ABSTRACT

It is commonly known that, in GMAW, the characteristics of metal transfer and the size of molten drop are highly dependent on the welding current. These changes in the characteristics of metal transfer has a considerable effect on the weld quality, and a lot of studies have been made on metal transfer modes for that reason.

In this study, two cases were investigated; the one in which the metal transfer proceeds with gravitational force, surface tension, and no electromagnetic force, and the other in which the process has electromagnetic term in addition, where the current density in the fluid has been assumed to have Gaussian distribution on any given cross-section and it acts vertically.

Using fluid flow analysis, this study has observed the whole process of the development and break-up of the molten drop, and it also showed that transitional processes, drop rate, and the drop size in each metal transfer mode can be estimated.

Key Words : GMAW(가스메탈아크용접), Metal Transfer(금속이행), CFD(전산유체역학) Free Surface(자유표면)

1. 서론

GMAW에서 금속 이행의 특성이나 용융 금속의 크기는 용접전류에 의존한다. 용적의 크기는 용접전류가 증가함에 따라 작아지며, 용적 크기의 감소는 용적 이행율의 급격한 증가를 가져온다. 이러한 현상은 어느 특정 전류 범위에서 나타나는데, 낮은 전류의 입적 이행 모드(globular mode)에서 높은 전류인 스프레이 모드(spray

mode)로 금속 이행 모드(metal transfer mode)가 변할 때 발생한다. 금속 이행의 특성 변화는 용접 품질에 매우 중요하다. 이러한 이유로 인해 금속 이행 모드에 대한 연구는 실험적으로나 이론적으로 많은 연구가 이루어지고 있다.

GMAW에서의 금속이행은 입적, 스프레이, 스트리밍(streaming)과 회전 스프레이 이행(rotating spray transfer)등 여러 모드로 행하여지며 여러 연구자들은 각

* 대우전자 DM사업부 DIT 연구4팀
** 정회원 한양대학교 정밀기계공학과

모드에서의 용적의 형상을 구하기 위해 많은 연구를 행하였다. 각 모드에서의 용적의 형상을 구하기 위한 이론적인 모델로는 힘평형 이론(static force balance theory: SFBT), 핀치 불안정 이론(pinch instability theory: PIT), 에너지 방법(energy method: EM) 그리고 전산 유체 역학(computational fluid dynamics: CFD) 등이 있다.

SFBT는 용적에 작용하는 힘에서 용적을 이탈시키려는 힘과 유지시키려는 힘의 평형을 계산한다. 유지하려는 힘은 표면장력이며, 이탈시키려는 힘은 중력, 항력, 전자기력이다. 전자기력은 전류에 의해서 발생하는 자기장과 전류의 상호 작용에 의해 발생된다. 여기에는 두 가지 힘의 요소가 있는데 자기 압력에 의해 용적을 조이는 반경 방향의 핀치력과 축 방향으로 작용하는 힘이 있다. 축으로 작용하는 힘의 방향은 용적 내부의 전류 분포에 따른다. 용적의 크기가 커짐에 따라 이탈시키려는 힘은 증가하지만 표면장력은 일정한 힘으로 작용하며, 표면장력과 이탈되려는 힘이 평형을 이룰때 최대 용적의 크기를 결정한다.

1960년에 W. J. Greene⁽¹⁾은 용적에 작용하는 힘들에 대해 연구하였으며, 용적의 이탈력과 유지력의 평형 안정점을 어떻게 결정하는가를 보여주었으며, 만일 구형의 용적이 전극에 매달려 있다고 가정하면, 전류의 흐름은 축 방향으로 용적을 통과한다고 하였다. 1960년에 J. C. Needham⁽²⁾은 항력이 차폐가스에 의해 발생하여 용적 표면에 작용한다고 하였다. 1962년에 J. C. Amson⁽³⁾은 용적에 작용하는 힘이 한계 평형점에 이르면 용적이 이탈한다고 가정하여 계산하였으며, 이 계산에 전자기력을 도입하여 Greene의 결과를 일반화하였다. 1979년 J. F. Lancaster⁽⁴⁾는 그 힘이 대부분 중력, 표면장력, Lorentz 힘 그리고 항력이라고 주장하였으며, 입적 이행에서 중력과 표면장력은 가장 크게 작용하는 힘의 요소로 생각되었으나 전자기력 역시 전류의 증가에 따라 중요한 요소로 고려하여 연구하였다. 그리고 전자기력은 자기장과 전류의 상호 작용에 의해 발생되며, 실린더 전도체에서는 자기유도된 자기장에 의한 반경 방향의 압축력이 작용하는데, 그 힘이 표면에서는 없고 중심에서는 최대가 된다고 하였다. 1965년에 B. E. Paton⁽⁵⁾은 표면장력이 온도에 따라 변한다고 하였다.

PIT는 무한 전류 전도 유체의 불안정성에 대한 이론이며, 외란이 있으면 유체 실린더에 파동 현상을 가져오며, 외란의 파장이 충분히 길면 시간에 따라 지수함수로 증가하게 된다. 이러한 불안정은 유체 실린더를 용적으로 이

탈시킨다. 전류가 유체 실린더를 따라 흐를 때 핀치 효과가 작용하게 되는데 이것은 자기 압력이 유체 실린더의 오목한 부분에 더욱 크게 작용하기 때문이다. 결과적으로 유체 실린더에는 전류가 흐를 때 더욱 불안정하게 되는데, 이것이 전류가 증가할수록 용적이 작아지게 되는 원인이 되는 것이다.

PIT는 1897년에 L. Rayleigh⁽⁶⁾에 의하여 무한 유체 실린더의 불안정 모드해석을 하였으며, 이 모델은 유체 실린더가 안정한가 불안정한가를 결정하기 위해 유체 실린더의 표면에 정현파 섭동을 적용한 이론이다. 1960년 G. S. Murty⁽⁷⁾가 Maxwell 방정식을 사용한 전자기력을 도입하여 해석하였고, 1979년 J. F. Lancaster⁽⁴⁾는 최초로 PIT 이론을 용적의 형성과 이탈에 대한 용적 이행 현상 해석에 도입하였으며, 용적의 반경이 어느 전류 값에 도달하면 용적의 이탈이 갑자기 발생한다고 주장하였다. 1983년에 J. H. Waszink⁽⁸⁾는 GMAW에서 용적의 이탈에 관한 메카니즘을 설명하였으며 PIT는 높은 전류에서 금속 이행이 잘 설명된다는 것을 보여주었다. 1985년 C. J. Allum⁽⁹⁾은 금속 이행을 설명하기 위해 이 이론을 가지고 용적 이행율, 속도 그리고 가속도를 구하였다. 1991년 S. Rhee⁽¹⁰⁾는 PIT에 아크 압력(arc pressure) 효과를 고려한 금속 이행을 연구하였다.

EM은 1995년 C. D. Yoo⁽¹¹⁾이 용적에 작용하는 힘을 최소 에너지화하여 각 이행 모드에서의 용적의 형상을 구하였다.

CFD로는 1983년 L. E. Cram⁽¹²⁾이 행하였으나 이 연구는 초기 용적의 크기를 가정한 1차원 유동 해석이며, 1997년 최상균⁽¹³⁾은 VOF를 사용하여 용적내 전류밀도가 균일한 경우와 선형 변화하는 경우의 해석을 하였다.

위와 같은 이론에서 SFBT는 낮은 전류인 입적 이행 모드에서는 일치가 잘 되나 전류가 높은 스프레이 모드에선 크게 벗어나고, PIT는 낮은 전류에서는 일치하지 않으나 전류가 높아질수록 용적의 크기가 일치하게 된다.

한편 이러한 금속 이행 현상에 대한 연구는 용적 내부의 유동 현상을 고려하지 않았기 때문에 실제 형상과 다를 수가 있으며, 용적의 성장과 이탈에 대한 비선형, 시간 종속(time-dependent) 모델은 GMAW의 금속 이행을 설명하는데 중요한 역할을 한다. 따라서 본 연구에서는 입적이행에서 스프레이 모드로 이어지는 천이 현상을 보기 위하여 용적의 내부 유동을 고려하여 용접봉을 유체로 가정하여 해석을 행하였고, 초기 형상을 가정하지 않고 용적의 초기 성장 과정에서부터 이탈될 때까지의 용적의

형상과 전류에 따른 금속 이행 모드를 해석하였으며, 아울러 용적의 성장 및 이탈될 때의 용적 내부 유동 효과에 대해서도 관찰하였다.

2. 수치 해석

2.1 지배 방정식

비압축성 뉴턴유체의 운동에 대한 기초 방정식은 다음의 연속방정식과 운동량방정식으로 주어진다.

연속 방정식

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \quad (2-1)$$

반경 방향 운동량 방정식

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] + F_r \quad (2-2)$$

축 방향 운동량 방정식

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left[\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + F_z \quad (2-3)$$

본 해석에서는 가스압력이 용적 전 표면에 대해 일정하다고 가정하고, 표면장력에 의한 압력구배만 작용한다고 가정한다.

$$P = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2-4)$$

여기서, P 는 표면장력에 의한 압력을 나타내고, γ 는 표면장력이며, R_1, R_2 는 용적 표면에서의 곡률반경을 나타낸다.

2.2 모델링

GMAW에서 용적에 영향을 주는 인자로는 중력, 표면장력, 전자기력, 항력, 아크력 등이 있으며, 이 해석을 수행함에 있어 다음과 같은 가정을 하였다.

- (1) 유체에 작용하는 힘은 중력, 표면장력과 전자기력이다.

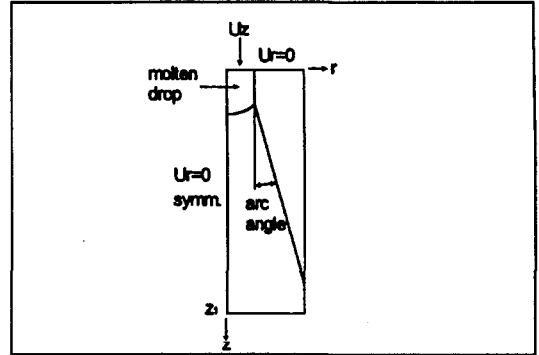


Fig. 2.1 Boundary condition and initial condition

- (2) 표면장력은 유체 전 표면에 대해 같고, 유체의 밀도와 점성은 내부 어느 곳에서도 일정하다.
- (3) 유체의 형상과 그 변동은 축 대칭이다.
- (4) 용접시 발생하는 아크의 각도는 Fig. 2.1과 같이 작용한다고 가정하였다.

유체에 전도자성이 있고, 전기력을 도입한 경우, 식(2-2), (2-3)의 F_r, F_z 에 $J \times B$ 가 외력으로 더하여지기 때문에 그 효과를 Maxwell 방정식과 Ohm의 법칙에 의해 구한다.

$$\nabla \times B = \mu_0 J \quad (2-5)$$

$$\nabla \times E = 0 \quad (2-6)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2-7)$$

$$J = \sigma E \quad (2-8)$$

여기서, J 는 전류밀도이며, σ 는 유체의 전기 전도도이며, B 는 자속밀도이며, μ_0 는 자유 공간에서의 투자율을 나타내며, E 는 전기장을 나타낸다.

2.3 수치 해석

계산에 사용된 시간 변화율은 $\Delta t = 10^{-5} \text{sec}$ 이며, 격자의 크기는 최대 0.08mm 이내로 하여 해석하였다.

본 연구에서는 위와 같은 모델을 이용하여 2차원 축대칭 유동 해석을 수행하였으며, 이 해석은 유한요소 CFD code인 FIDAP 7.5를 사용하였고, 물성치 들은 Table. 2.1을 이용하였다.

용적의 시간변화에 대한 유체표면의 추적과 이탈현상을 관찰하기 위해서 본 해석에서는 volume-of-fluid (VOF) 방법을 사용하였고, 자유표면은 VOF 방법에 의하여 격자에 나타내게 된다. 유체의 확산은 체적추적방법(vol-

Table. 2.1 Input data for numerical analysis

wire diameter (d)	1.6 mm
surface tension (γ)	1.0 1.8 N/m
density (ρ)	7800 kg/m ³
viscosity (μ)	0.004 kg/ms
gravitational acceleration (g)	9.81 m/s ²
electric conductivity (σ)	10 ⁶ Ω ⁻¹ m ⁻¹
permeability of free space (μ_0)	1.26×10 ⁻⁶ H/m

ume tracking method)을 따르게 되며, 주어진 속도장을 기초로 하여 체적추적방법은 새로운 유체표면을 결정하게 된다.

유체의 체적은 characteristic marker concentration F에 의하여 나타내지게 되며, 이 F의 전달 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \cdot \nabla F = 0 \quad (2-9)$$

VOF 함수 F는 유체가 채워진 격자인 경우 1, 유체가 없는 격자인 경우 0, 그리고 자유표면인 경우 0에서 1사이의 값을 갖게 된다.

$$F = \begin{pmatrix} 1 & \text{fluid cell} \\ > 0, < 1 & \text{surface - containing cell} \\ 0 & \text{void cell} \end{pmatrix} \quad (2-10)$$

2.4 경계 조건

복잡한 경계조건이나 유동의 시간적 변화를 해석적으로 구하는 것은 어렵고, 일반적으로는 유한요소법이나 차분법을 사용한 수치해석이 사용된다. 여기서 사용된 VOF 방법은 연속방정식과 운동량방정식을 유한요소화하여 격자내에 유체가 들어왔는가를 계산하며 유체의 표면 형상을 추적하는 방법으로, 자유표면을 가진 유체의 문제에 적용 가능하다. 계산에 있어서는, 식(2-1)~(2-3)을 원통좌표계 (r, θ, z)로 표현하며, θ 방향의 유동은 없는 것으로 하여 속도벡터($u, 0, v$)를 구하고, 또 전류에 대해서도 θ 성분은 0으로 하기 때문에 자장은 θ 방향 성분 ($0, B_\theta, 0$)만을 구한다.

Fig. 2.1에 해석에 사용된 모델과 유체의 초기 형상을 나타냈다. z축에 대하여 대칭이기 때문에 $r=0$ 에서 free

slip 경계로 하고 있으며, 초기 표면 형상은 용접봉의 끝단을 가지며, 이 부분을 유체로 하였다. 그리고 Uz는 와이어의 송급 속도로 본 해석에서는 계산 영역내로 들어오는 용융금속의 유속을 나타낸다. 자장에 관해서는 유체의 초기 표면에서부터 z_1 까지로, 전류는 유체의 초기 표면에서 10°의 각도로 수직하게 흐른다고 가정하고, 다음의 직선 전류에 의한 자장의 식으로 근사하여 결정하였다.

$$B_\theta = \frac{\mu_0 I r}{2\pi R^2} \quad (r < R) \quad (2-11)$$

$$B_\theta = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (r \geq R)$$

여기서, r 는 유체내 임의의 점에서의 반경이며, R 는 임의의 높이 z 에서의 아크 반경이다.

3. 결과 및 고찰

본 해석에서 전류가 작용하지 않을 때의 용적 성장시 용적 내부의 유동 효과를 관찰하였고, 그리고 전류밀도가 가우스 분포(Gaussian distribution)로 존재한다고 가정한 두 가지 경우의 해석을 행하였다.

3.1 중력과 표면장력만 작용한 경우

실제 용접에서는 전류에 의한 전자기력이 발생하지만, 본 해석에서는 용적에 작용하는 힘을 중력과 표면장력만으로 하여 해석하였다. 해석에 사용된 유속은 용접의 실용 조건보다 큰 값으로 전자기력이 없이 해석을 수행시에 강한 표면장력으로 인해 용적의 이행이 어렵다. 따라서 해석에 적용된 유속은 실용 조건과 큰 차이가 있으나 유속 변화에 따른 금속 이행 현상을 관찰하기 위해 적용하였다.

유속이 16cm/s일 때는 98.9ms에서 단락을 하였으며, 20cm/s일 때는 71ms에서 단락을 하였다. 이 결과에서 보듯이 금속 이행에서 용적 이행율이 커지는 것은 단지 전류에 의한 Lorentz힘 영향뿐만이 아니라 전류가 증가함에 따른 용적 이행률의 증가도 커다란 영향을 주는 것으로 나타났다. Fig. 3.1~3.2는 용적이 형성되며 이탈되는 과정을 보여주는 그림으로 용적내로 유입된 유체는 높은 표면장력으로 인해 조금씩 진행하며 용적의 표면을 따라 흐르다 내부로 역류되는 유동 현상을 보이는데 이러한 유동 효과에 의해 용적은 더욱 커지다가 이 계가 힘의 평형점에 도달하게 되면 펀치부가 발생하며 용적의 이탈과

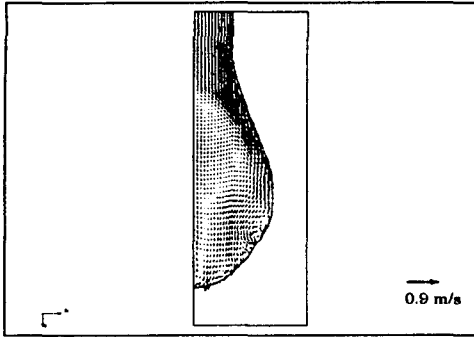


Fig. 3.1 Shape of the maximum drop at Uz=16cm/s ($\gamma=1.0N/m, t=86ms$)

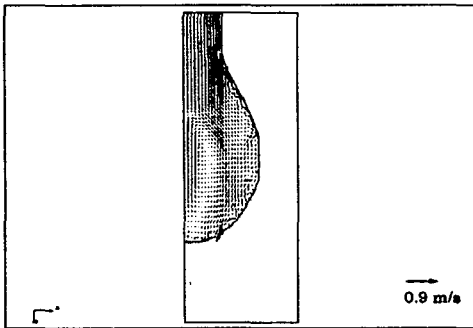


Fig. 3.2 Shape of the maximum drop at Uz=20cm/s ($\gamma=1.0N/m, t=56ms$)

Table. 3.1 Comparison of the different wire feed rate

Wire feed rate	Break-up time	Time passed from pinch to break-up
16 cm/s	98.9 ms	12.9 ms
20 cm/s	71.0 ms	15.0 ms

새로운 용적의 성장 과정이 시작된다. 일단 핀치부가 발생되면 유속이 16cm/s일 때는 12.9ms, 20cm/s일 때는 15ms의 짧은 시간에 이탈이 완료되며, 용적의 평형점 도달은 유속이 빠른 20cm/s에서 발생하였으나 평형점 도달 후 이탈까지의 시간은 유속이 느린 16cm/s 일 때 발생하였다.

이것은 평형 한계점에 도달했을 때의 용적이 16cm/s일 때 더욱 커서 용적에 작용하는 이탈력이 크게 작용했기 때문이다.

3.2 전자기력이 작용하는 경우

Nestor⁽¹⁴⁾는 전류밀도 분포가 가우스 분포로 되어 있

다고 증명을 하였다. 따라서 용접시 입력되는 열량을 정규분포곡선으로 가정을 하면, 그에 따른 임의 높이 z단면에 흐르는 전류밀도도 정규분포로 흐른다고 가정할 수가 있다.

입열량 $q(r)$ 을 정규분포곡선으로 가정하면 다음과 같이 된다.

$$q(r) = q(0)e^{-cr^2} \quad (3-1)$$

그리고 $r=0$ 에서 최대 입열을 하고, 총 입열의 95%가 모재로 입사된다고 하면 다음과 같이 전류밀도에 대한 가우스 분포가 나온다.

$$j(r) = \frac{3Q}{\pi R^2} \exp\left[-3\left(\frac{r}{R}\right)^2\right] \quad (3-2)$$

식(3-2)와 같은 분포를 가진 전류밀도가 임의 단면에 존재한다고 가정하여 Fig. 3.3과 같이 해석을 하였다.

Fig. 3.4~3.7은 전류 150A에서 300A까지의 단락 후 용적이 이행되는 형상을 나타낸 것으로 150A에서는 커

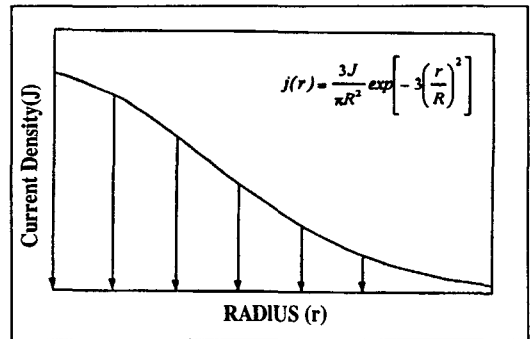


Fig. 3.3 Gaussian distribution of current density

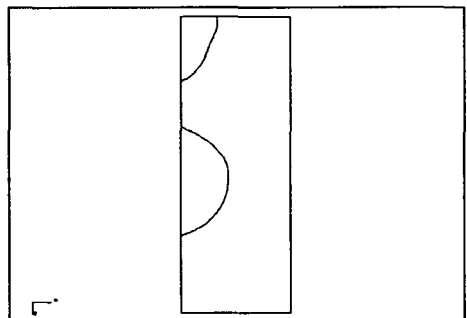


Fig. 3.4 Metal transfer in process at I=150A ($Uz=4.0cm/s, \gamma=1.8N/m, t=68.5ms$)

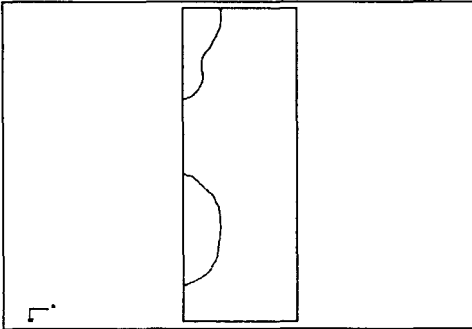


Fig. 3.5 Metal transfer in process at I=200A
($U_z=4.5\text{cm/s}$, $\gamma=1.8\text{N/m}$, $t=42.9\text{ms}$)

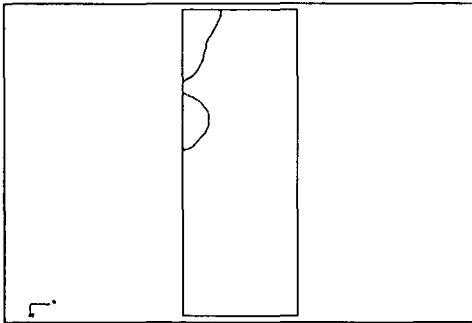


Fig. 3.6 Metal transfer in process at I=250A
($U_z=5.5\text{cm/s}$, $\gamma=1.8\text{N/m}$, $t=7.8\text{ms}$)

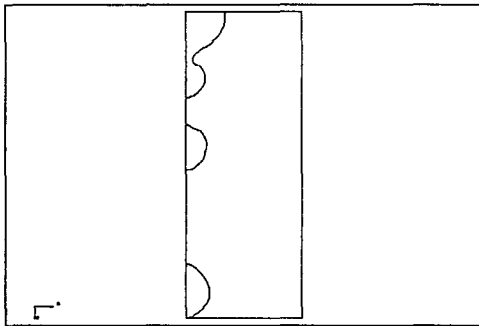


Fig. 3.7 Metal transfer in process at I=300A
($U_z=6.6\text{cm/s}$, $\gamma=1.8\text{N/m}$, $t=7.2\text{ms}$)

다란 용적을 형성하며 이행된다. 200A에서는 용적의 이탈 후 새로운 용적 형성을 시작하는 것을 볼 수 있다. 그리고 250A에서는 짧은 시간에 작은 용적 이행을 하며, 300A에서는 완전한 스프레이 이행인 것을 알 수가 있다. 이와 같이 전류의 증가와 함께 용적 이탈 시간 및 용적의

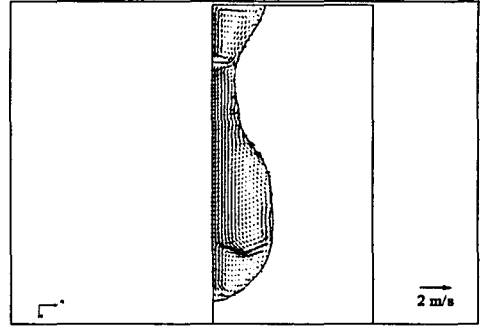


Fig. 3.8 Convection effect in a drop on its development and break-up (I=150A, $t=62\text{ms}$)

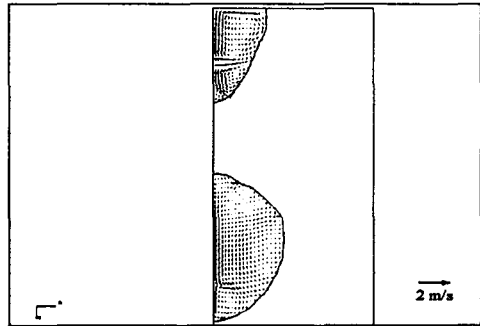


Fig. 3.9 Convection effect in a drop on its development and break-up (I=150A, $t=68\text{ms}$)

크기가 감소됨을 볼 수 있으며 실제 용접시 나타나는 이행 현상과 유사함을 알 수 있다.

3.3 고찰

본 논문의 서론에서 언급하였듯이 금속 이행시 용적의 성장과 이탈 과정에 따르는 유동 효과가 금속 이행 및 형상에 어떠한 영향을 미치는지 고찰해 보도록 한다.

전류가 150A인 저전류인 경우, Fig. 3.8에서와 같이 용적부는 내부 유동이 활발하여 용적을 형성해 가고, 편치부는 용적 이탈을 위해 내부 유동이 없고 용적 진행 방향으로의 속도장만 갖게 된다. 이 후 용적내의 유동은 더욱 활발해 지면서 구형의 용적 형상을 만들어 가며 단락을 위한 평형 상태로 진행해 가는 것을 보여준다.

Fig. 3.9에서 보면 단락 후에 이탈된 용적은 별다른 유동의 변화 없이 진행하고 전극 부위는 새로운 용적을 형성하기 위해 새로운 유동 현상이 발생한다. 그리고 이탈된 용적 내에 미소한 속도장을 가진 유동이 보이는데, 이것은 이탈시 단락된 용적의 형상이 완전한 구형이 아닌

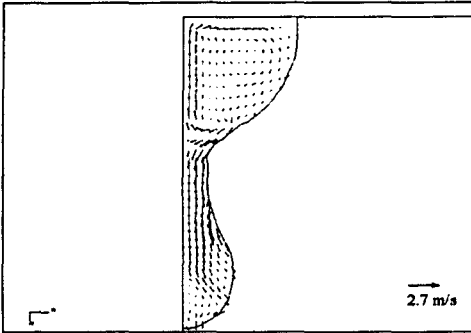


Fig. 3.10 Convection effect in a drop on its development and break-up ($I=300A$, $t=3.8ms$)

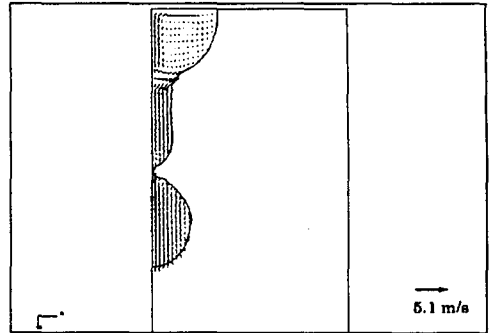


Fig. 3.12 Convection effect in a drop on its development and break-up ($I=300A$, $t=2.9ms$)

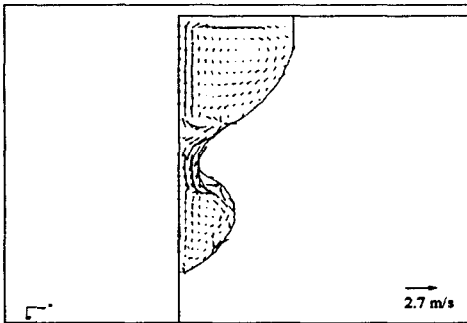


Fig. 3.11 Convection effect in a drop on its development and break-up ($I=300A$, $t=6.9ms$)

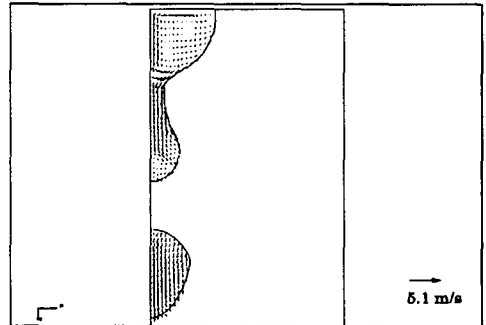


Fig. 3.13 Convection effect in a drop on its development and break-up ($I=300A$, $t=3.8ms$)

약간의 실린더 형상을 가지고 이탈하였기 때문에 낮은 자유에너지인 구형의 형상을 가지려 하는 내부의 운동상태를 나타낸 것이다.

전류가 300A인 고전류인 경우를 보면, Fig. 3.10, 3.11에서 보듯이 용적의 성장시 유동장내의 유속의 v 성분은 u 성분보다 크면 용적은 z 방향으로 늘어지며, 유속의 u 성분이 발달하여 용적 내부에서 회전하는 유동장이 발생하면 구형의 용적을 형성하게 되는 것을 볼 수 있다. 이때 용적내의 유동 방향은 용적의 바깥에서 안으로 역류하며 전류가 없을 때의 유동장과 같은 현상을 보인다.

이러한 유동 효과에 의해 용적이 성장하다가 단락 순간에 이르게 되면 Fig. 3.12, 3.13에서와 같이 형성된 용적 및 전극부도 유체 유동을 거의 멈추고 속도장이 급격히 저하되게 된다. 바로 이점이 이 계의 자유에너지가 최소로 되어 내부 운동이 꺾져 상태인 즉, SFBT에서 말하는 평형 안정점인 것이다. 그리고 일단 이탈된 용적은 특별한 유동없이 진행을 하고, 전극부는 새로운 용적을 형

성하기 위해 속도장을 가진 유동을 시작하게 된다.

이상과 같이 용적이 성장하는 과정에서 발생하는 내부 유동은 구형의 용적을 형성함과 동시에 핀치부를 만드는데 이 때 전자기력에 의한 반경 방향으로 핀치력의 작용과 함께 용적의 단락이 발생한다.

본 해석에서 나온 결과를 이론식에 의한 계산값과 인용한 실험결과⁽¹⁰⁾와의 비교를 Fig. 3.14에 나타냈다. 서론에서 언급하였듯이 실험값은 저전류에서는 SFBT의 값과 유사하고, 고전류에서는 PIT의 값과 일치함을 알 수 있다. 그럼에서와 같이 전류밀도를 가우스 분포로 가정 한 결과는 전류가 증가함에 따라 용적의 크기가 일정하게 감소하여 고전류에서는 PIT와 실험값과 일치하는 것을 알 수 있으며, 저전류에서는 실험값과 약간의 차이는 있으나 전류 변화에 따른 금속 이행 현상을 규명할 수 있었다.

여기서 유체 유동에 의한 용적의 크기가 SFBT의 계산값보다 전체적으로 작다. 이와 같은 결과는 계산을 수행하기 위한 각각의 지배방정식이 다르고, 또한 SFBT의

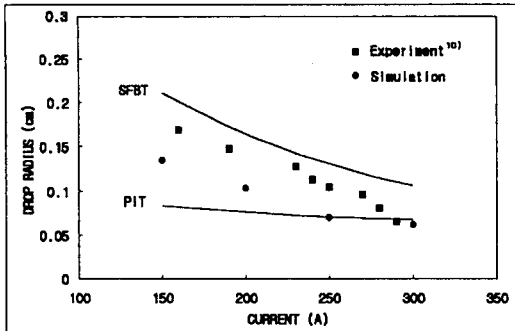


Fig. 3.14 Comparison of theoretic, experimental⁽¹⁰⁾ and simulated drop size

계산은 z방향의 힘만을 고려하여 용적의 크기를 결정하였으나, 유체 유동의 해석은 r방향의 핀치력의 작용에 의한 유체 유동의 효과로 인하여 용적의 이탈을 촉진시켰기 때문이라 생각된다.

4. 결 론

용접시 금속 이행 현상을 유체 유동을 고려하여 해석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유체 유동 해석을 이용함으로써 용적의 성장 과정에서부터 단락될 때까지의 전 과정을 관찰할 수 있었다.
- (2) 용적의 내부 유동은 구형의 용적을 형성함과 동시에 핀치부를 만드는데, 이 때 전자기력에 의한 반경 방향으로 핀치력의 작용과 함께 용적의 단락이 발생한다.
- (3) 금속 이행시 유체의 내부 유동은 구형의 용적을 형성하는 과정에서 가장 활발하고, 단락 순간에 가장 적은 유동장을 갖는다.
- (4) 금속 이행 현상을 유체의 유동을 이용하여 해석할 경우 각 모드에 따른 전이 과정, 용적 이행을 그리고 용적의 크기를 예측할 수가 있다.

참 고 문 헌

1. Greene, J. E., "An Analysis of Transfer in Gas-Shielded Welding Arcs", AIEE 79, pp. 194-202, 1960.
2. Needham, J. C., Cooksey, C. J., and Milner, D. R., "Metal transfer in inert gas shielded arc welding", British Welding Journal, Vol. 7, No. 2, pp. 101-114, 1960.

3. Amson, J. C., "An Analysis of the Gas Shielded Consumable Metal Arc Welding System", Br. Weld. J., pp. 232-249, 1962.
4. Lancaster, J. F., "Metal transfer in fusion welding", Proc. Int. Conf. on Arc Physics and Weld Pool Behaviour, pp. 170-174, 1979.
5. Paton, B. E., "Controlling metal transfer in arc welding with a consumable electrode", Automatic Welding, Vol. 18, No. 5, pp. 1-8, 1965.
6. Rayleigh, L., "The instability of superposed fluids", Theory of Sound, Dover Publ., New York, pp. 428-433, 1894.
7. Murty, G. S., "Instability of conducting fluid cylinder due to axial current", Arkiv foer Fysik 18, pp. 241-250, 1960.
8. Waszink, J. H., "Experimental Investigation of the Forces Acting on a Drop of Weld Metal", Welding Journal, pp. 108s-116s, 1983.
9. Allum, C. J., "Metal transfer in arc welding as a varicose instability : I", J. Appl. Physics., Vol. 18, pp. 1431-1446, 1985.
10. Rhee, Sehun., Kannatey-Asibu, Elijah Jr., "Analysis of arc pressure effect on metal transfer in gas metal arc welding", J. Appl. Physics., Vol. 70, No 9, pp. 5068-5075, 1991.
11. Joo, Tong M., Yoo, Choong D., Lee, Tae S., "Effects of Welding Conditions on Molten Drop Geometry in Arc Welding", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 118, No 4, pp. 623-627, 1996.
12. Cram, L. E., "A Numerical Model of Drop Formation", Computational Techniques & Applications : CTAC83, pp. 182-188, 1983.
13. 최상균, 유중돈, 김용석, "VOF 방법을 이용한 GMA 용접의 금속 이행에 관한 동적 해석 (1)", 대한용접학회지, 제15권, 제3호, pp. 36-46, 1997.
14. Nestor, O. H., "Heat intensity and current density distributions at the anode of high-current, inert gas arcs", J. Appl. Physics., Vol. 33, No. 5, pp. 1638-1648, 1962.