

# METAL DROP 내부에서 대류현상을 고려한 금속 이행 해석에 관한 연구

## Investigation of Metal Transfer considering the Convection effect in a Droplet

박기영\*, 이 세 현\*\*, 엄 기 원\*\*

\* 대우전자

\*\* 한양대학교 정밀기계공학과

### 1. 서론

GMAW에서의 금속 이행은 globular, spray, streaming과 rotating spray transfer등 여러 모드로 행하여 진다. 여러 연구자들은 각 모드에서의 drop shape을 구하기 위해 많은 연구를 행하였다. Drop shape을 구하기 위한 이론적인 모델로는 static force balance theory(SFBT), pinch instability theory(PIT)와 energy method(EM)등이 있다. SFBT는 1960년에 W.J. Green, 1962년에 J.C. Amson이 그리고 1983년에 J.H. Waszink가 연구하였으며, PIT는 1897년에 Rayleigh에 의하여 liquid cylindrical column 해석에 적용하였으며, 1960년 G.S. Murty가 전자기력을 도입하여 해석하였고, 1979년 J.F. Lancaster는 최초로 PIT 이론을 용접 이행 현상 해석에 도입하였으며, 1985년 C.J. Allum에 의하여 이행을 유도하였다. 1991년 S. Rhee는 arc pressure 효과를 고려한 금속 이행을 연구하였다. 한편, EM은 1995년 C.D. Yoo에 의하여 연구되었다. 이러한 drop shape에 대한 연구는 drop 내부의 유동 현상을 고려하지 않았기 때문에 실제 형상과 다를 수가 있다. 따라서 본 연구에서는 convection을 고려하여 이러한 transient 현상을 보기 위하여 전극 wire를 유체로 가정하여 해석을 행하였다. 이에 대한 선행 연구로는 1983년 L.E. Cram이 행하였으나 이 연구도 drop의 초기 volume을 가진 1차원 해석이다. 본 연구에서는 초기 형상을 가정하지 않고 drop의 초기 성장 과정에서부터 이탈될 때까지의 천이 변화를 관찰하였으며, 아울러 drop의 성장 및 이탈될 때의 drop 내부 유동 효과에 대해서도 관찰하였다.

### 2. 기초 방정식과 가정

비압축성 뉴턴유체의 운동에 대한 기초방정식은 다음의 연속방정식과 운동방정식으로 주어진다.

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left\{ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right\} = \nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{F} \quad (2)$$

GMAW에서 drop에 영향을 주는 인자로는 중력, 표면장력, 전자기력, drag force, arc력 등이 있다.

이 해석을 수행함에 있어 다음과 같은 가정을 하였다.

- (1) 유체에 작용하는 힘은 중력, 표면장력과 전자기력이다.
- (2) 표면장력은 유체 전표면에 대해 같고, 유체의 밀도와 점성은 내부 어느 곳에서도 일정하다
- (3) 유체 형상과 그 변동은 축대칭이다. 더구나, 유체에 전도성이 있고, 전자기력을 도입한 경우, 식(2)에 있는 F에  $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ 가 외력으로 더하여 지기 때문에 그 효과를 Maxell 방정식과 Ohm의 법칙에 의해 구한다.

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (5)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (6)$$

$\mathbf{J}$  : 전류밀도 벡터(A/cm<sup>2</sup>),  $\mathbf{B}$  : 자장벡터 (T),  $\mathbf{E}$  : 전장벡터(V/cm)

$\mu_0$  : 진공중의 투자율(=  $4\pi \times 10^{-9}$  H/cm),  $\sigma$  : 유체의 전기전도율( $\Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ )

- (4) 용접시 발생하는 Arc의 크기는 Fig.1과 같이 작용한다고 가정하였다.

### 3. 수치 해석

본 연구에서는 위와 같은 모델을 이용하여 2차원 유동 해석을 수행하였으며, 이 해석은 유한요소 CFD code인 FIDAP 7.5를 사용하였고, drop의 이탈 현상을 관찰하기 위하여 VOF Method를 사용하였다. 해석에 사용된 물성치들은 Table.1과 같다.

Table.1 Material properties of Electrode Wire

Prooerties	Symbol	Value
Wire Dia.	$\varphi$	1.6 mm
Surface tension	$\gamma$	1000 dyne/cm
Density	$\rho$	7.8 g/cm <sup>3</sup>
Viscosity	$\mu$	0.04 g/cms
Gravity	$g$	981 cm/s <sup>2</sup>

#### 3.1 해석

복잡한 경계조건이나 유동의 시간적 변화를 해석적으로 구하는 것은 어렵고, 일반적으로는 유한요소법이나 차분법을 사용한 수치해석이 사용된다. 여기서 사용된 VOF method는 연속방정식과 Navier-Stoke의 식을 유한 요소화하여 empty element 내에 유체가 들어왔는가를 계산하며 유체의 표면 형상을 추적하는 방법으로, 자유표면을 가진 유체의 문제에 적용 가능하다.

계산에 있어서는, 식(1),(2)를 원통좌표계 (r,θ,z)로 표현한다.

θ 방향의 흐름은 없는것으로 하여 속도벡터(u,0,v)를 구한다. 또 전류에 대해서도 θ 성분은 0으로 하기 때문에 자장은 θ 방향 성분만 (0,θ,0)으로 하면,  $J \times B = -\nabla B^2 / 2\mu_0$  가 성립한다. 즉 자장 분포는 식(3)~(6)으로 부터  $\nabla^2 B = 0$ 으로 되기 때문에 전자기의 경계 조건에 따라 구할수가 있다.

#### 3.2 초기조건과 경계조건

Fig.1에 계산에 사용된 model과 유체의 초기형상을 나타냈다. z축에 대하여 대칭이기 때문에 r=0 에서 free slip 경계로 하고 있다.

초기 표면형상은 eletrode wire의 끝단을 가지며, 이 부분을 유체로 하였다. z=z<sub>1</sub>의 경계는 drop이 들어올 경우 빠져나가도록 하였다.

자장에 관해서는 유체의 초기 표면에서부터 z=z<sub>1</sub> 까지로, 전류는 Fig.1과 같이 유체의 초기 표면에서 15°의 각도로 수직하게 흐른다고 가정하고, 다음의 직선전류에 의한 자장의 식으로 근사하여 결정한다.

$$B_{\theta} = \frac{\mu_0 I r}{2\pi R^2} \quad (r < R) \quad (7)$$

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

또, 유체 표면의 위치(r<sub>s</sub>, z<sub>s</sub>)에서는 r=R=r<sub>s</sub>로 하여 식(7)을 사용한다.

### 4. 결과 및 고찰

유속이 20cm/s일 때는 71ms에서 단락을 하였으며, 16cm/s일 때는 98.9ms에서 단락을 하였다. 금속 이행에서 drop frequency가 커지는 것은 단지 전류에 의한 Lorentz force뿐만이 아니라 전류가 증가함에 따라 wire feed rate의 증가도 커다란 영향을 주는 것으로 나타났다.

Drop이 형성되면서 유입된 유체는 내부와 표면에서의 convection 효과에 따라 drop의 성장을 진

행시키고 다시 내부로 역류한다. 이러한 convection에 의해 drop은 더욱 커지다가 어느 안정점에 도달하게 되면 pinch부가 발생하며 drop의 이탈 과정이 시작된다. 일단 이탈 과정이 시작되면 유속이 20cm/s일 때는 15ms, 16cm/s일 때는 12.9ms의 짧은 시간에 이탈이 완료되며, 새로운 drop 형성 과정이 반복 된다.

## 5. 결론

용적 이행 현상을 이해하는데 있어 drop의 성장 과정에서부터 이탈될 때까지의 전 과정을 관찰할 수 있었으며, drop의 이탈시 convection이 어떠한 영향을 주는지 알 수가 있었다. 그리고 용적 이행 현상을 본 연구와 같이 유체로 해석할 경우 각 mode에 따른 transient 과정 및 drop frequency를 예측할 수가 있다.

## 6. References

- 1) J.E. Green., "An Analysis of Transfer in Gas-Shielded Welding Arcs", AIEE 79, Jul. 1960, pp.194-202
- 2) J.C. Amson., "An Analysis of the Gas-Shielded Consumable Metal Arc Welding System", Br. Weld. J., Apr. 1962, pp.232-249
- 3) J.H. Waszink., "Experimental Investigation of the Forces Acting on a Drop of Weld Metal", Weld. J., Apr. 1983, pp.108s-116s
- 4) L. Rayleigh., "Theory of Sound", 1897
- 5) G.S. Murty., "Instability of conducting fluid cylinder due to axial current", Arkiv foer Fysik 18, 1960, pp.241-250
- 6) J.F. Lancaster., "Metal transfer in fusion welding", Proc. Int. Conf. on Arc Physics and Weld Pool Behaviour, 1979, pp.170-174
- 7) C.J. Allum., "Metal transfer in arc welding as a varicose instability : I", J. Appl. Physics., Vol. 18, 1985, pp.1431-1446
- 8) S. Rhee., "Analysis of arc pressure effect on metal transfer in gas-metal arc welding", J. Appl. Physics., Vol. 70, No 9, 1 Nov. 1991, pp.5068-5075
- 9) C.D. Yoo., "Effects of Welding Conditions on Molten Drop Geometry in Arc Welding"
- 10) L.E. Cram., "A Numerical Model of Droplet Formation", Computational Techniues & Applications : CTAC83, 1983, pp.182-188
- 11) J.F. Lancaster., "The Physics of Welding", Pergamon Press, New York, NY, 1984, pp.204-241

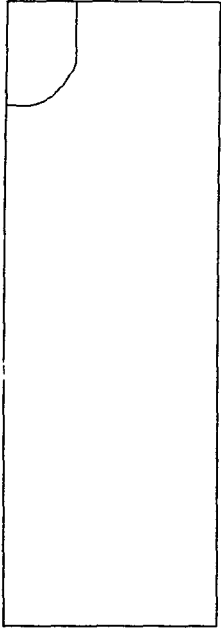


Fig.1 Initial shape

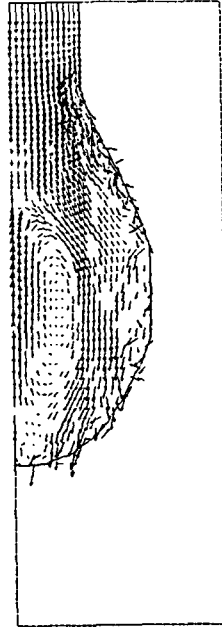


Fig.2 Shape of maximum droplet  
at  $u_z=20\text{cm/s}$  ( $t=56\text{ms}$ )

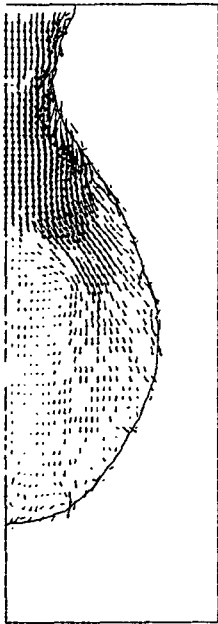


Fig.3 Shape of the droplet ( $t=67\text{ms}$ )

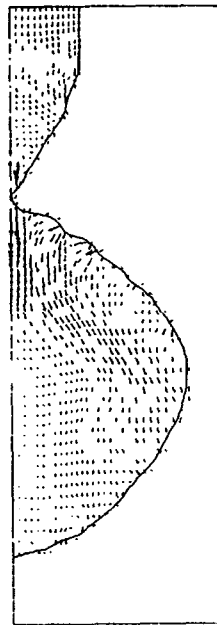


Fig.4 Shape of the droplet at the break-up  
point at  $u_z=20\text{cm/s}$  ( $t=71\text{ms}$ )