

## 용적입사에 의한 용융지 유동 및 형상변화

### Weld Pool Flow and Shape due to the Impact of Droplets

박현성\*, 이세현\*\*, 엄기원\*\*

\*한양대학교 정밀기계공학과 대학원

\*\*한양대학교 정밀기계공학과

#### 1. 서론

가스메탈 아크용접(GMAW)시 와이어는 아크열에 의해 녹아, 용융지로 전달되게 된다. 이 금속 이행(metal transfer)의 특성이나 용적(droplet)의 크기, 용적의 입사속도 등은 용접전류에 의존한다. 이 금속이행 모드(metal transfer mode)는 short-circuit, globular, streaming spray, rotating spray 등의 형태로 나타나게 된다.

용융지의 크기와 형상을 예측할 때에는 용접부 내의 열전달과 유체유동 현상을 알아내는 것이 중요하다. 현재까지 용융지 유동현상에 관한 연구는 주로 아크열을 이용하여 모재만을 용융시켜 접합하는 가스텅스텐 아크용접(GTAW)에 대한 것<sup>1,2)</sup>이 대부분으로, 이것은 주로 박판접합시에 사용된다. 1981년 Essers<sup>3)</sup>는 GMA용접시에는 금속이행이 발생하여 용입의 깊이는 용적의 운동량의 영향에 따라 변한다는 것을 실험적으로 연구, 발표하였다. Choo<sup>4)</sup>등은 고전류의 GTA용접에서 아크압력(arc pressure)에 의하여 용융지 함몰이 일어날 때, 아크가 사라진 직후부터 용융지의 유동 과정을 SOLA-VOF를 사용하여 해석하였다.

따라서 본 논문에서는 전류값에 따라 용적의 크기와 입사속도가 변할 때, 이 용적의 입사에 의한 용융지의 함몰과 유동현상을 수치해석 하고, 이것이 실제 GMA용접의 용융지 유동에 어느 정도의 영향을 미치는가를 정량적으로 알아내고자 하며, 이를 해석치와 비교분석하고자 한다.

#### 2. 용적입사에 의한 용융지 해석의 수학적 공식화

이 해석을 수행함에 있어 다음과 같은 가정을 사용하였다.

- 1) 이 유체는 층류이며, 비압축성이다.
- 2) 이 시스템은 축대칭이다.
- 3) 모델은 2 차원이고, 축대칭으로 1/2만이 해석된다.
- 4) 밀도, 점성계수등 재료의 물성치들은 모두 상수이다.

##### 2.1 지배방정식

연속방정식

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식(Navier-Stokes equation)

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla P + \nabla \tau \quad (2)$$

자유 표면(free surface)은 VOF(volume-of-fluid) method에 의하여 격자(mesh)에 나타내게 된다. 유체의 확산(advection)은 체적추적방법(volume tracking method)을 따르게 되며, 주어진 속도장에 기초하여 체적추적방법은 새로운 유체 표면을 결정하게 된다.

유체의 체적은 characteristic marker concentration  $F$ 에 의하여 나타내지게 되며, 이  $F$ 의 전달 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \cdot \nabla F = 0 \quad (3)$$

VOF 함수  $F$ 는 유체가 채워진 격자인 경우 1, 유체가 없는 격자인 경우 0, 그리고 자유표면인

경우 0에서 1사이의 값을 갖게 된다.

$$F = \begin{cases} 1 & \text{fluid cell} \\ >0, <1 & \text{surface-containing cell} \\ 0 & \text{void cell} \end{cases} \quad (4)$$

## 2.2 경계조건

GMAW의 개략도는 Fig. 1과 같으며, 본 해석에 사용된 경계조건과 초기조건은 Fig. 2와 같다. 축대칭을 사용하였고, 해석영역의 상부의 속도값은 0, 하부의 속도는 0, 우측 경계면의 속도는 0으로 주었다. 초기 조건으로는 용융지의 초기 속도를 0으로 주었으며, 용적은 전류값에 따라 초기속도를 z방향으로만 주었다.

## 2.3 용적이행에 의한 용융지 합몰의 이론적 해석

용적(droplet)이 용융지로 전달될 때 용융지 표면에는 용적의 운동에너지(kinetic energy)가 전달되게 된다.<sup>5)</sup> 이 운동에너지는 용융지의 합몰을 일으키게 되는데, 이때 합몰된 구멍을 만드는데 한 일  $W$ 는 다음과 같다.

$$W = \int_0^h (\rho dV + 2\pi a \gamma dh) \quad (5)$$

구멍을 만드는데 한 일  $W$ 는 다음의 용적의 운동에너지와 같다. 만일 용적의 반경이 원통형 구멍반경의 1/2이라 가정하면, 질량  $m = \frac{1}{6} \pi a^3 \rho$ 이다. 따라서

$$h = \frac{1}{2} \left[ -\frac{4\gamma}{a\rho g} + \sqrt{\left(-\frac{4\gamma}{a\rho g}\right)^2 + \frac{4av^2}{6g}} \right] \quad (6)$$

을 얻을 수 있다.

그러나 연속되는 용적사이에 합몰된 구멍은 채워지게 되며, 이때의 복원력은 정수압과 표면장력(surface tension)에 기인하며, 다음과 같다.

$$F = \pi a^2 \rho g (h-x) + 2\pi a \gamma \quad (7)$$

여기서  $x$ 는 채워지는 질량중심의 이동거리이며, 이때 채워지는 전체질량은  $\pi a^2 h \rho$ 이다.

$$x = \left(h + \frac{2\gamma}{a\rho g}\right) \left[1 - \cos\left\{\left(\frac{g}{h}\right)^{\frac{1}{2}} t\right\}\right] \quad (8)$$

## 3. 해석

본 연구에서는 위와같은 아크의 모델을 이용하여 2차원 유동 해석을 수행하였으며, 해석은 유한요소 CFD(Computational Fluid Dynamics) code인 FIDAP7.6b를 사용하였다. 용접부는 용접부 단면의 1/2 mesh를 만들어 해석하였으며, 해석의 정확성을 위하여 용융지가 형성되는 부분의 mesh는 조밀한 균일격자를 형성하였고, 해석의 경제성을 위하여 측면으로 갈수록 점점 커지는 형태로 형성하였다. 단, 변화율은 15%를 넘지 않게 하였다. 용적이 형성되는 부분과 공기로 해석하는 부분은 격자 형성의 어려움으로 인해 자유격자(paved mesh)를 사용하였다.

Table 1 Material properties of carbon steel

Definition	Symbol	Value
Surface tension coefficient	$\gamma$	1.2~1.8 N/m
Density	$\rho$	7870 kg/m <sup>3</sup>
Viscosity	$\mu$	0.006 kg/m·s

#### 4. 해석결과 및 고찰

전류 250A인 경우의 용적입사에 의한 용융지 유동현상은, 초기 용적의 반경이 0.8mm이며, 초기 속도가 1546mm/s라고 가정하였다. 용적이 입사함에 따라 용적의 질량과 운동에너지에 의해 용융지가 함몰되기 시작하며, 이에 따라 용융지의 ripple현상도 수반하게 된다. 함몰된 용융지는 표면장력에 의해 다시 회복되게 되며, 이때 용융지 내부에는 깊이방향으로 들어가는 유동도 동반하였다. 최대 함몰이 일어난 직후에 중심부에서 기공이 형성되게 되며, 이는 Choo<sup>4)</sup> 논문에서 나타난 모습과 유사함을 알 수 있다.

Fig. 4 부터 Fig. 6까지는 전류 300A인 경우의 용적입사에 의한 용융지 유동현상을 surface tension 값에 따라 수치해석한 경우의 유동장을 나타낸 것이다. 해석조건은 용적의 반경 0.5mm, 초기속도는 2139mm/s로 가정하였으며, 표면장력만 1.2, 1.5, 1.8로 바꾸어 주었다. 여기서의 최대 함몰은 0.00375 sec일 때, 약 1.85mm정도가 된다. 예상한 바와 같이 표면장력이 작을수록 용적의 입사에 의한 용융지 함몰이 커지는 것을 알 수 있었다.

Table 2. The results of simulation

	current (A)	surface tension $\gamma$ (N/m)	time (sec)	h (mm)
1	300	1.2	0.00375	1.85
2	300	1.5	0.00319	1.7
3	300	1.8	0.00248	1.5

위의 각 전류값에 따른 용융지 유동을 보면 초기속도는 증가하나 질량이 감소함으로 인해 운동 에너지 값이 작아지고 따라서 최대함몰 감소함을 알 수 있다. 그러나 250A인 경우에는 용적의 frequency가 작아져 다음 용적이 입사할 때에 이미 용융지는 모두 복원된다. 그러나 300A인 경우에는 용융지가 복원하기 전에 용적이 다시 입사함으로 실제 용융지의 함몰깊이는 더 커지게 된다.

따라서 GMA용접시, 고전류인 경우 용적의 크기가 줄어들고 용적의 수가 많아지는 axial spray mode가 일어나면, 연속적으로 용적이 용융지에 입사하게 되어 용융지의 함몰이 일어나게 되며, 용적이 가지고 있는 열량은 좀더 효율적으로 용융지 내부로 전달되게 되고, 그 결과로 용융지 중심이 깊어지게 된다는 것을 알 수 있었다. 따라서 용적이 용융지 형상결정에 중요한 요소로 작용할 수도 있음을 알 수 있다. 따라서 이 유동장의 형성을 전체적인 용융지 유동해석에 적용한다면 GMA용접에서 가정에 의존할 수밖에 없던 것들을 실제상황과 같게 해석조건을 맞추어줄 수 있으므로 좀 더 정확한 유동현상과 용접부 형상예측이 가능할 것이다.

#### 5. References

- 1) Oreper, G. M., and Szekely, J., 1984, "Heat and Fluid Flow Phenomena in Weld Pools," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 147, pp.53~79.
- 2) Kou, S., and Wang, Y. H., 1986, "Computer Simulation of Convection in Moving Arc Weld Pools," Metallurgical Transaction, Vol. 17A, No. 12, pp.2271~2277.
- 3) Essers, W. G., and Walter, R., 1981, "Heat Transfer and Penetration Mechanisms with GMA and Plasma-GMA Welding," Welding Journal, Vol. 60, No. 2, pp. 37s~42s.
- 4) Choo, R. T. C., Szekely, J., and Westhoff, R. C., 1990, "Modeling of High-current Arcs with Emphasis on Free Surface Phenomena in the Weld Pool," Welding Journal, Vol. 69, No. 9, pp. 346s~361s.
- 5) Lancaster, J. F., 1984, "The Physics of Welding," Pergamon Press, New York, NY, pp.204~267.
- 6) Seun Rhee, 1992, "Observation of Metal Transfer in GMAW", Welding Journal, Vol 71, No. 10, pp. 381s~386s.

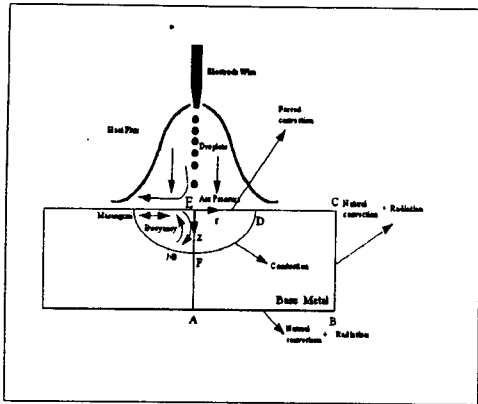


Fig. 1 The physical domain of GMAW

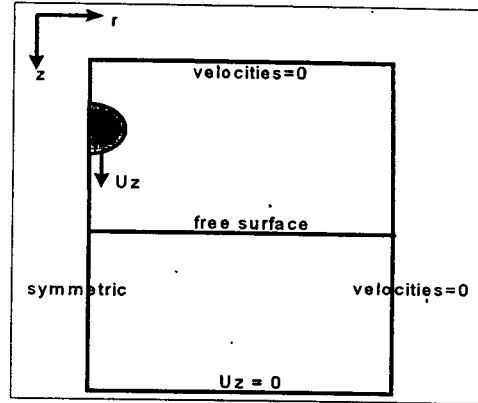


Fig. 2 Boundary conditions and initial conditions

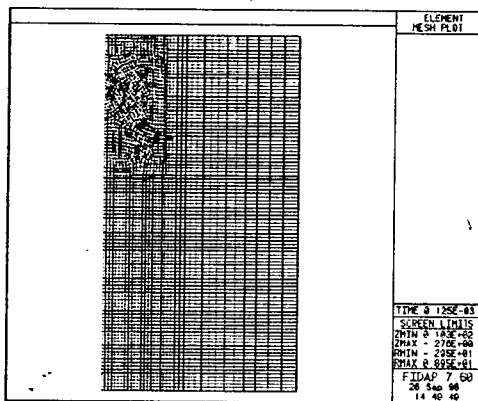


Fig. 3 An example of grid generation

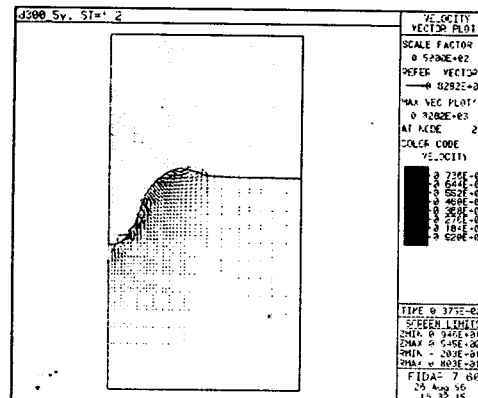


Fig. 4 The fluid flow due to the droplet impact ( $\gamma = 1.2\text{N/m}$ )

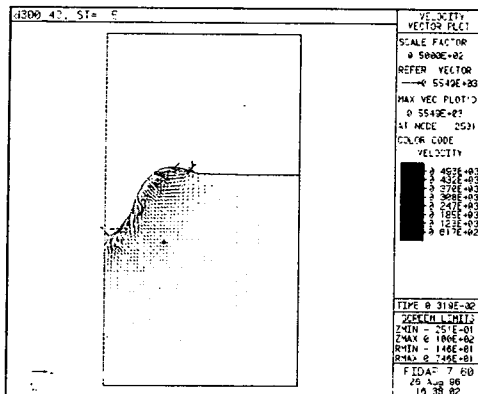


Fig. 5 The fluid flow due to the droplet impact ( $\gamma = 1.5\text{N/m}$ )

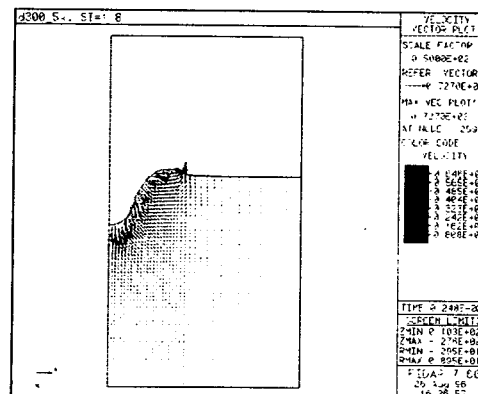


Fig. 6 The fluid flow due to the droplet impact ( $\gamma = 1.8\text{N/m}$ )