

## 용적이행현상을 고려한 GMAW의 용융지 유동해석

### A Study of Weld Pool Flow Considering the Molten Droplets Effect in GMAW

박현성\*, 이세현\*\*, 엄기원\*\*

\*한양대학교 정밀기계공학과 대학원

\*\*한양대학교 정밀기계공학과

#### 1. 서론

지금까지의 용접은 이론적인 규명보다는 경험적인 면에 의존하였기 때문에 용접부의 물리적인 현상과 용접부 해석에 의한 용접부 예측이 미비한 상태이다. 이런 용융지의 크기와 형상을 예측할 때에는 용접부 내의 열전달과 유체유동 현상을 알아내는 것이 중요하다.

지금까지의 용융지 유동현상에 관한 연구는 주로 아르케를 이용하여 모재만을 용융시켜 접합하는 가스텡스텐 아르케용접(GTAW)에 대한 것<sup>1),2)</sup>이 대부분으로, 이것은 주로 박판접합시에 사용이 제한된다. GMA용접에 대해서는 Tsao와 Wu<sup>3)</sup>가 1988년에 연구, 발표했으나 2차원, 정지아르케용접에서의 유동에 대한 것으로 실제의 모델과는 많이 다른 것이었다. 그러나 후판접합시에도 광범위하게 사용되어지고 있는 가스메탈 아르케용접(GMAW)은 용가제가 모재와 함께 아르케에 의해 녹아 접합하는 것으로 이에 대한 정확한 유동현상의 규명은 미비한 상태이다.

용융지의 열전달과 유동의 경우, 지금까지는 전자기력, 부력, 표면장력, 아르케등을 적용하여 각 구동력에 따른 유동의 형태를 알아내는 것에 대해서 연구가 있어왔다. 1981년 Essers<sup>4)</sup>는 GMA용접시에는 금속이행이 발생하여 용입의 깊이는 용적의 운동량의 영향에 따라 변한다는 것을 실험적으로 연구했는데, 실제 GMA용접의 spray이행에서 초당 100개가 넘는 용적이행의 운동량을 무시할 수는 없다는 것에 착안하여 용적의 운동량에 따른 용융지 유동과 형상변화를 수치해석적으로 규명해 보고자 한다.

#### 2. 용융지 해석의 수학적인 공식화

이 해석을 수행함에 있어 다음과 같은 가정을 사용하였다.

- 1) 이 유체는 층류이며, 비압축성이다.
- 2) 이 시스템은 축대칭이다.
- 3) 열유속(Heat Flux)과 전류유속(Current Flux)은 반경방향으로 대칭인 가우스 분포(Gaussian Distribution)이다.
- 4) 모델은 2 차원이고, 축대칭으로 1/2만이 해석된다.
- 5) 용융부내의 표면 활성화요소(Surface Active Elements)는 존재하지 않는다.

##### 2.1 지배방정식

연속방정식

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

반경방향 운동량 방정식

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] - \frac{1}{\rho} (J_z B_\theta) \quad (2)$$

축방향 운동량 방정식

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] - \frac{1}{\rho} (J_r B_\theta) + g \beta (T - T_r) \quad (3)$$

에너지 방정식

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (kr \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) + \Delta H \quad (4)$$

## 2.2 경계조건

본 연구에서도 Fig. 1의 경계영역 CE 에 입사하는 열에너지를 반경 방향의 대칭인 Gaussian 분포로 식 (5)과 같이 가정하여 해석하였다. 토오치의 노즐 아래의 영역은 직접적으로 차폐가스(Ar)의 흐름으로 인하여 강제대류를 받으므로 아래와 같이 강제 대류를 적용하였다.

$$k \frac{\partial T}{\partial z} = q(r) - h_f (T - T_a) \quad (5)$$

$$q(r) = \frac{3 \eta_{eff} VI}{\pi r_b^2} \exp[-3(r^2 / r_b^2)] \quad (6)$$

$$h_f = 13 Re^{1/2} Pr^{1/3} K_{gas} / NPD \quad (7)$$

표면에서 표면장력에 기인한 유동은 다음과 같이 설명된다.

$$\tau_{st} = \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \left( \frac{\partial \gamma}{\partial T} \right) \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (8)$$

자연 대류 열전달은 대칭면 ( $r = 0$ )을 제외한 시험편의 모든 표면에서 발생하며, 복사도 일어나게 된다. 자연대류와 복사를 함께 고려하면 다음의 자연대류계수로 나타낼 수 있다.

$$h = 24.1 \times 10^4 \epsilon T^{1.61} \quad (9)$$

## 2.3 용적이행 운동량의 영향

하나의 용적이 용융지에 입사하게 되면, 용융지는 함몰을 일으키게 되고, 곧 다시 원래의 형태로 채워지게 된다. 그러나 용적의 형태가 스프레이 모드가 되면, 연속적인 용적의 용융지로의 입사가 이루어져 용융지게 계속적으로 함몰된 형태로 유지되게 된다. 그에따라 용적의 열량이 효과적으로 용융지 바닥으로 전달되게 되고, finger shape penetration이 형성되게 된다. Lancaster<sup>5)</sup>는 함몰되는 위치  $d$ 를 계산했는데, 그것은 다음과 같다.

$$d = h - x \quad (10)$$

$$h = \frac{1}{2} \left[ -\frac{2\gamma}{\rho g} + \sqrt{\left( \frac{2\gamma}{\rho g} \right)^2 + \frac{4a\nu^2}{6g}} \right] \quad (11)$$

$$x = (h + \frac{2\gamma}{\rho h}) [1 - \cos \{ (\frac{g}{h})^{\frac{1}{2}} t \}] \quad (12)$$

Table 1 MATERIAL PROPERTIES OF CARBON STEEL

Definition	Symbol	Value
Coefficient of thermal expansion	$\beta$	$10^{-4} \text{ K}^{-1}$
Surface tension coefficient	$\frac{\partial \gamma}{\partial T}$	$-10^{-4} \text{ N/m}\cdot\text{K}$
Density	$\rho$	$7200 \text{ kg/m}^3$
Latent heat of fusion	$\Delta H$	$273790 \text{ J/kg}$
Viscosity	$\mu$	$0.006 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$
Natural convective heat transfer coefficient	$h_n$	$10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

### 3. 해석

본 연구에서는 위와같은 아크의 모델을 이용하여 용접부의 2차원 열·유동 해석을 수행하였으며, 해석은 유한요소 CFD(Computational Fluid Dynamics) code인 FIDAP7.5를 사용하였다. 용접부는 용접부 단면의 1/2 mesh를 만들어 해석하였으며, 해석의 정확성을 위하여 용융지가 형성되는 부분의 mesh는 조밀한 균일격자를 형성하였으며, 고체영역에서는 계산의 경제성을 고려하여 격자가 점점 커지는 형태로 형성하였다. 단, 변화율은 15%를 넘지 않게 하였다. 해석에 사용된 물성치들은 Table 1과 같으며, 온도에 따른 열전도도와 비열은 Fig.2, 3에 나타내었다.

### 4. 해석결과 및 고찰

용접부의 해석에 있어 열전도만을 고려한 경우에는 Fig.4와 같이 균일한 속도로 진행되어 나가 반구형의 비드 형상을 볼 수 있으며, 비드의 크기가 실험값보다는 상당히 작게 나온다. 그러나 실제 가스메탈 아크용접의 경우에는 비드가 크고, 용접부 중심이 깊어지는 finger shape penetration 이 나타나게 된다. 이는 용접부 중심으로 유동을 일으키는 전자기력이 영향을 미쳐 발생하게 되지 만, 그와 더불어 고전류의 경우 용적의 크기가 줄어들고 용적의 수가 많아지는 axial spray mode 가 일어나면, 연속적으로 용적이 용융지에 입사하게 되어 용융지의 함몰이 일어나게 된다. 이 때 용적이 가지고 있는 열량은 좀더 효율적으로 용융지 내부로 전달되게 되고, 그 결과로 용융지 중심이 깊어지게 된다.

Fig. 5는 용적이 가지고 있는 열량을 고려한 용융지의 형상이며, Fig. 6은 하나의 용적이 입사하는 것에 의한 용융지의 유동을 수치해석한 결과이다. 용적이 함유하고 있는 열량과 그 입사속도에 의하여 온도구배가 급속히 변화함을 볼 수 있다. 이는 용적의 입사가 용융지의 깊이를 결정하는 중요한 요소로 작용하고 있다는 것을 말한다.

### 5. References

- 1) Oreper, G. M., and Szekeley, J., "Heat and Fluid Flow Phenomena in Weld Pools", J. Fluid Mechanics, Vol. 147, 1984, pp.53-79
- 2) Kou, s., and Wang, Y. H., "Computer Simulation of Convection in Moving Arc Weld Pools", Metall. Trans., Vol. 17A, No. 12, 1986, pp.2271-2277.
- 3) Tsao, K. C., and Wu, C. S., "Fluid Flow and Heat Transfer in GMA Weld Pools", Weld. J., Vol. 67, No. 3, 1988, pp. 70s-75s.
- 4) Essers, W. G., and Walter. R., "Heat Transfer and Penetration Mechanisms with GMA and Plasma-GMA Welding", Weld. J., Vol. 60, No. 2, 1981, pp. 37s-42s.
- 5) "The Physics of Welding", J.F. Lancaster, ed., Pergamon Press, New York, NY, 1984, pp.204-267

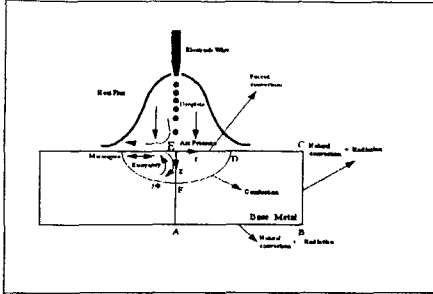


Fig.1 BOUNDARY CONDITION FOR PHYSICAL DOMAIN

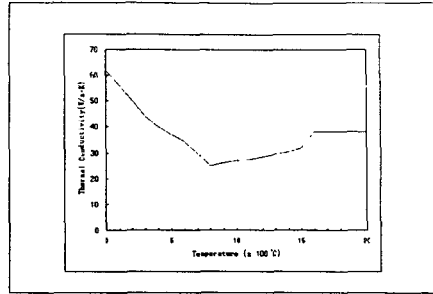


Fig.2 TEMPERATURE DEPENDENT CONDUCTIVITY OF CARBON STEEL

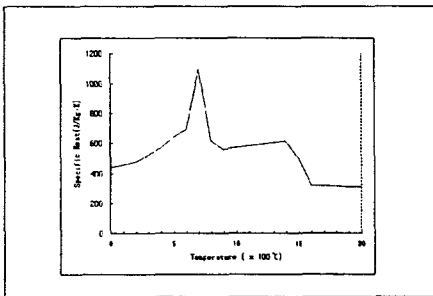


Fig.3 TEMPERATURE DEPENDENT THERMAL SPECIFIC HEAT OF CARBON STEEL

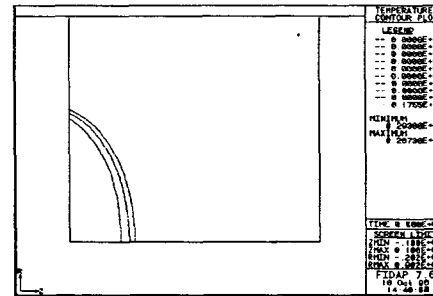


Fig.4 CALCULATED WELD POOL HEAT CONDUCTION PROFILE

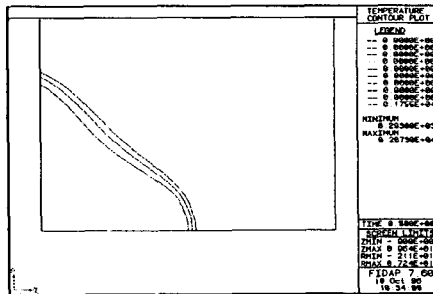


Fig.5 CALCULATED WELD POOL HEAT CONDUCTION PROFILE WITH HEAT SOURCE

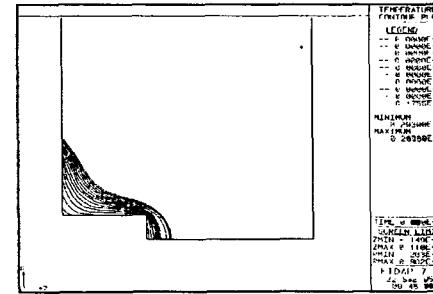


Fig.6 CALCULATED WELD POOL FLOW PROFILE CONSIDERING A DROPLET EFFECT