

## 고정 TIG 용접에 있어서 용융지에 영향을 미치는 기하학적 용접변수의 수치해석에 관한 연구

이 승 영 (삼성중공업(주) 생산기술개발팀)  
나 석 주 (한국과학기술원 정밀공학과)

### 1. 서론

TIG용접에 영향을 미치는 용접변수로서는 극성(DCSP,DCRP,AC), 전극봉(재질,형상), 보호가스의 종류와 성분비, 전극봉 끝단의 형상을 비롯한 아크길이, 모재의 형상등 기하학적 제변수들 및 용접기의 특성등을 들 수있다(1,2,3,4). 이 중에서 전극봉과 모재의 기하학적 제변수들은 arc plasma 의 유동을 결정하는 중요인자로서 용접조건 설정시 매우 중요하게 작용한다. 특히 자동 TIG 용접에서는 AVC(Automatic Voltage Control) 에 의한 일정한 아크길이의 유지, 용접봉 형상유지(손상 방지)등은 용접부 결함방지를 위해 매우 중요한 용접변수로 관리하고 있다. Savage 등은(5) 다른 용접변수들이 고정되어 있을 경우 용접봉의 끝단각도에 따른 용접아크 특성의 변화와 용융지에 미치는 영향을 실험적으로 관찰하였다. Yamauchi 등은(6) 일반적으로 사용하는 solid 전극 대신 중공전극(hollow electrode)을 사용하여 아크특성 변화를 관찰하였다.

본 논문에서는 알곤가스를 사용하는 정극성 TIG 용접에 대하여 전극봉각, 아크길이 및 용접전류등이 용접부에 미치는 영향을 이론적인 해석을 통하여 규명하고자 하였다. 용접아크로 부터 용접부로 전달되는 제현상 - 열속분포, 전류밀도 분포, 아크압력, arc plasma 에 의해 용융지 표면에 작용하는 전단응력 - 은 역시 수치해석 결과를 이용하여 아크의 변화에 의한 용접부의 변화를 체계적으로 규명하고자 하였다. 해석결과는 SUS304L 판재에 행한 실험결과와 비교하여 그 타당성을 입증하고자 하였다.

### 2. 본론

용접아크가 용융부에 작용하여 유동을 유발하는 구동력으로는 다음 3가지로 제한하였다.

- . 용접아크에서 용융지로 흐르는 아크전류에 의하여 유기되는 전자기력
  - . 용융지 표면에 용접아크열과 유동에 의해 생기는 온도차이에 의한 표면장력구배에 의한 전단응력
  - . arc plasma 의 흐름에 의해 직접 용융지표면에 작용하는 전단응력
- 또다른 구동력으로는 용융지내에서 생기는 온도구배에 의한 부력을 생각할 수 있는데 그 영향은 작다고 보아 무시하였다(7).

용융지내의 유동현상을 규명하기 위하여 다음 가정을 적용하였다.

- . 보통 적용하는 용접조건하에서는 용융부내의 유동은 정상 (laminar) 및 비압축성 (incompressible) 이라고 가정할 수 있다.
- . 용접공정은 고정 TIG 용접에 국한하였으므로 축대칭문제라 볼 수 있다.
- . 용융지내의 열전도도, 표면장력을 제외한 온도의존 열적성질은 일정하다고 가정하였다.
- . 용접아크로 부터 모재로 전달되는 열속, 전류밀도, 아크압력, 전단응력분포는 계산결과를 이용하였다(8,9). 이때 모재표면의 온도는 일정하다고 가정하여 정상상태 (steady state) 에서 구한 결과를 이용하였다. 따라서 용융지내의 전기장 분포 역시 정상상태로 가정하였다. 이상의 가정하에서 원통좌표계 (r,θ,z) 에 대한 질량, momentum, 전류, 에너지보존의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial E}{\partial r} + \frac{\partial G}{\partial z} = S \quad (1)$$

$$U = \begin{bmatrix} 0 \\ \rho u \\ \rho w \\ 0 \\ \rho c_p T \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} r\rho u \\ r\rho u u - r\mu \frac{\partial u}{\partial r} \\ r\rho u w - r\mu \frac{\partial w}{\partial r} \\ -r\sigma \frac{\partial \phi}{\partial r} \\ r\rho c_p u T - rk \frac{\partial T}{\partial r} \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} \rho w \\ \rho w u - \mu \frac{\partial u}{\partial z} \\ \rho w w - \mu \frac{\partial w}{\partial z} \\ -\sigma \frac{\partial \phi}{\partial z} \\ \rho c_p w T - k \frac{\partial T}{\partial z} \end{bmatrix}.$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) - 2\mu \frac{u}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial r} \right) - j_r B_\theta \\ -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + j_z B_\theta \\ -\frac{\Delta H}{c_p} \frac{\partial f_L}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서  $t$  는 시간,  $\rho$  는 밀도,  $u$  는  $r$  방향의 속도성분,  $w$  는  $z$  방향의 속도성분,  $P$  는 압력,  $\mu$  는 점성계수,  $j$  는 전류밀도,  $B_\theta$  는 자속밀도,  $\Delta H$  는 용융잠열,  $c_p$  는 비열이며  $f_L$  은 잠열을 고려하기 위하여 도입한 계수 (fraction of liquid) 이다. 자속밀도는 축대칭 전류밀도에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_\theta = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r j_z \delta d\delta \quad (3)$$

여기서  $\mu_0$  는 진공상태에서의 투자율을 나타낸다. 전류밀도는 정의에 의해 전기장분포로부터 다음과 같이 구할수 있다.

$$J = -\sigma \nabla \phi \quad (4)$$

여기서  $J = (j_r, j_z)$  이다.

에너지 보존방정식에서  $f_L$  은 다음과 같이 정의하였다.

$$f_L = \begin{cases} 1 & \text{for } T > T_L \\ \frac{T - T_s}{T_L - T_s} & \text{for } T_s \leq T \leq T_L \\ 0 & \text{for } T < T_s \end{cases} \quad (5)$$

여기서  $T_L$  는 액상점이며  $T_s$  는 고상점을 나타낸다.

용접부 표면에 작용하는 arc plasma 에 의한 전단응력과 온도차이에 의한 표면장력구배는 경계조건으로 처리하였다.

해석영역은 Fig.1 에 나타낸 바와 같으며 용융지표면에서의 표면변화를 시간변화에 따라 계산하였다.

아크압력에 의한 표면변화는 다음식을 사용하여 계산하였다.

$$\gamma \left\{ \frac{r z_r + z_r (1 + z_r^2)}{r (1 + z_r^2)^{3/2}} \right\} = \rho g z - p_{arc} + \lambda_L \quad (6)$$

여기서  $\gamma$  는 표면장력, 아래첨자는 편미분,  $g$  는 중력가속도,  $p_{arc}$  는 아크압력을 나타내며  $\lambda_L$  은 Lagrangian multiplier 로서 비선형 방정식을 풀기위하여 도입된 계수로써 반복계산에 의하여 결정하도록 하였다.

Figure 1 에 나타낸 해석영역에 대한 경계조건은 Table 1 에 나타낸 바와 같다.

이상의 보존방정식을 FDM 방법으로 풀었으며 유동해석은 SIMPLE-C 알고리즘을 이용하였다(10).

### 3. 해석결과 및 실험과의 비교

해석과 실험은 동일조건하에서 수행하여 비교하였으며, 실험은 SUS304L 7mm

두께의 판재를 사용하였다.

용접전류가 150A, 용접봉각이 60°, 아크길이가 3 mm 일때 시간변화에 따른 용융부의 형상변화를 Fig.2 에 나타내었다. 아크 중심에서는 실험치와 차이를 보이고 있는데 이는 해석시 용융지의 표면변화를 충분히 고려하지 못한 결과로 예상된다.

용접봉각에 따른 용융부의 형상변화를 Fig.3 에 나타내었다. 용접봉각이 작아짐에 따라 용융지표면에 미치는 전단응력은 커지며 비드폭 역시 커지는 것으로 볼 수 있다.

아크길이에 따른 용융지의 형상변화는 Fig.4 에 나타내었다. 용융지표면의 유동은 온도에 따른 표면장력구배( $d\gamma/dT$ )에 크게 영향을 받으므로 아크길이에 따른 아크중심에서의 최대열속은 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

#### 4. 참고문헌

1. T.W.Petrie and E.Pfender, The influence of the cathode tip on temperature and velocity fields in a gas-tungsten arc, *Welding Journal*, Dec. 1970, pp588s-596s.
2. J.F.Key, Anode/cathode geometry and shielding gas interrelationships in GTAW, *Welding Journal*, Dec. 1986, pp364s-370s.
3. A.A.Shirall and K.C.Mills, The effect of welding parameters on penetration in GTA welds, *Welding Journal*, July 1993, pp347s-353s.
4. F.Matsuda, M.Ushio and T.Kumagai, Fundamental arc characteristics of La-, Y- and Ce-oxide tungsten electrodes. *Welding International*, 1986, 6, pp497-502.5. Lancaster, J.F. The physics of welding, 1984(Pergamon Press)
5. W.F.Savage, S.S.Strunck and Y.Ishikawa, The effect of electrode geometry in gas tungsten-arc welding, *Welding Journal*, Nov. 1965, pp489s-496s.
6. N.Yamauchi and T.Taka, TIG arc welding with hollow tungsten electrode, I.I.W. Doc. No.212G-452-79
7. S.D.Kim and S.J.Na, Effect of weld pool deformation on weld penetration in stationary gas tungsten arc welding, *Welding Journal*, May 1992, pp179s-193s.
8. 이승영, 나석주, 경계밀착좌표계를 사용한 TIG용접아크의 해석에 관한 연구, 대한용접학회 1993, 춘계발표.
9. 이승영, 나석주, 기하학적인자의 영향을 고려한 TIG용접아크의 수치해석에 관한 연구, 대한용접학회 1993, 추계발표.
10. Suhas V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill Book Company, 1980

Table 1 Boundary conditions

	top surface along AF	center line along AB	bottom surface along BF	side surface at point F
u	$-\mu \frac{\partial v_i}{\partial n} = \tau_s + \frac{d\gamma}{dT} \frac{\partial T}{\partial s}$	$u = 0$	$u = 0$	$u = 0$
w	$v_n = 0$	$\frac{\partial w}{\partial r} = 0$	$w = 0$	$w = 0$

	top surface along AE	center line along AC	bottom surface along CD	side surface along DE
$\phi$	$j_n(r) = j_n(r) _{r=r_{max}} = -\sigma \frac{\partial \phi}{\partial n}$	$\frac{\partial \phi}{\partial r} = 0$	$\phi = \phi _{\text{const}}$	$\frac{\partial \phi}{\partial r} = 0$
T	$q_n(r) = q_n(r) _{r=r_{max}} = -k \frac{\partial T}{\partial n}$	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$	$h_c(T - T_\infty) = -k \frac{\partial T}{\partial z}$	$h_c(T - T_\infty) = -k \frac{\partial T}{\partial r}$

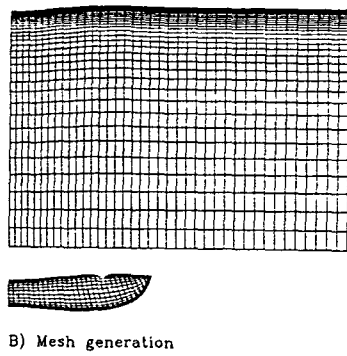
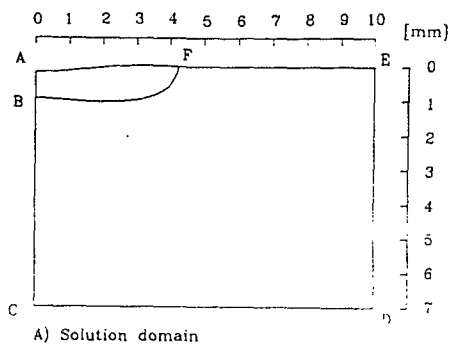


Fig. 1 Solution domain for analyzing molten pool and mesh generation with boundary-fitted coordinates

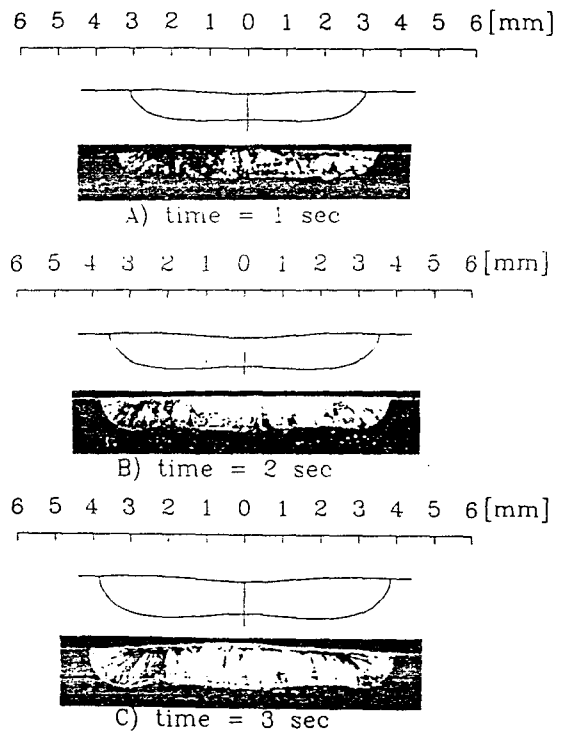


Fig. 2 Transient fusion shapes with welding time for  $I=150$  A,  $\theta_w=60$  deg. and  $L_w=3.0$  mm

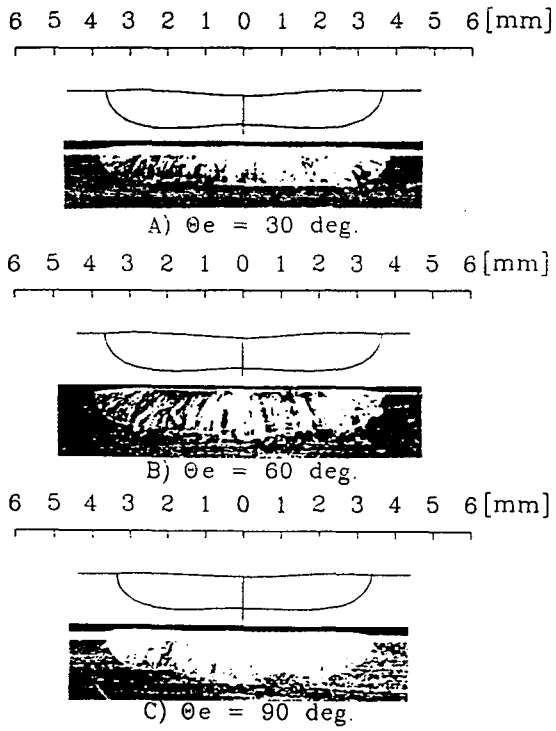


Fig. 3 Fusion shapes with electrode angle for  $I=150 \text{ A}$  and  $La=3.0 \text{ mm}$  after 2 sec welding

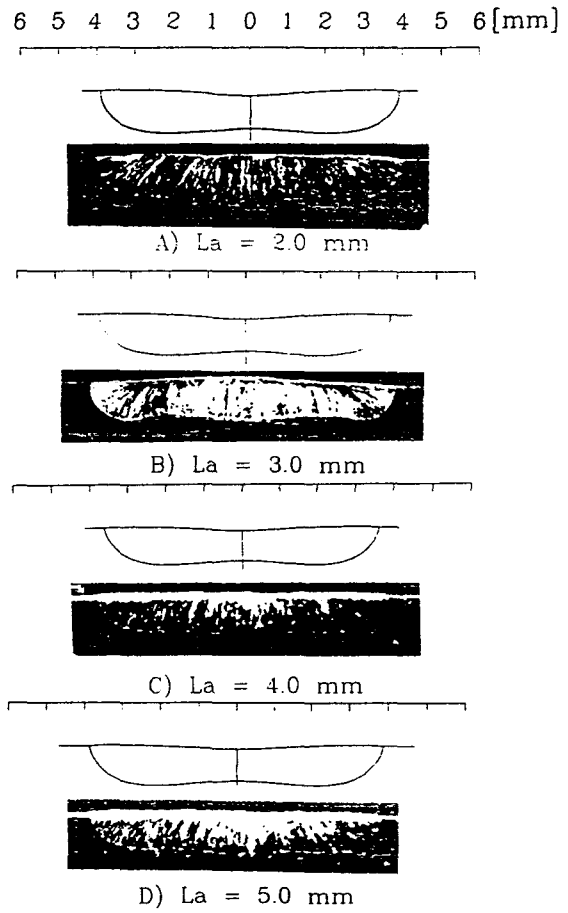


Fig. 4 Fusion shapes with arc length for  $I=150 \text{ A}$  and  $\theta_e=60 \text{ deg.}$  after 3 sec welding