

경계밀착좌표계를 사용한 TIG 용접아크의 해석에 관한 연구

이승영*(한국과학기술원 정밀공학과)

나석주 (한국과학기술원 정밀공학과)

1. 서론

TIG 용접시 용접아크는 용접전류가 흐르는 전기전도체의 역할과 집적된 열원을 모재에 전달하는 매개체로서의 기능을 수행하게 된다. 용접아크는 내부에 생기는 자장의 영향으로 자기력을 받게되고 이 자기력에의해 보호가스를 모재쪽으로 가속시켜 고온의 용접열원으로서 작용하게 된다. 따라서 용접아크를 해석하기 위해서는 보호가스의 유동 해석, 전기장해석 및 열유동해석을 동시에 해야하며, 보호가스가 고온에서 갖는 열적성질(엔탈피, 점성계수, 밀도, 전기전도도, 열전도도등)을 고려해야 한다(3).

본 연구에서는 알곤가스를 사용한 TIG용접시 용접아크에 영향을 주는 전극봉의 형상을 고려할 수 있는 경계밀착좌표계를 사용하여 용접아크를 해석하고자 하였다.

2. TIG 용접아크의 모델링

용접아크가 발생하여 정상상태에 도달하는 시간은 짧다고 보아 정상상태로 가정하였으며, 정지아크를 대상으로 하여 축대칭문제로 국한하였다. 보호가스의 유동은 층류 유동으로 가정하였으며, 용접아크에 미치는 중력의 영향은 무시하여 부력은 고려하지 않았고, 보호가스의 점성효과에 의한 열손실은 무시하였다. 아크내에서는 전자와 이온의 온도가 동일하다고 보아 LTE(local thermodynamic equilibrium)모델을 적용하였다(2,3,4,5). 고온의 용접아크는 주위로 복사열을 발산하게 되며, 이때 복사 흡수율(reabsorption of radiation)이 복사열손실(radiation loss)에 비해 무시할 정도로 작다고 보아 용접아크는 optically thin 하다고 보았다(6). 용접아크는 음극전압강하영역(cathode voltage drop zone)과 양극전압강하영역(anode voltage drop zone)이 존재하여 LTE모델로 전 아크영역을 해석한다는 것은 어렵다. 따라서 양 전압강하영역을 제외한 아크영역에 해석을 국한하였다.

원통좌표계(r, θ, z)에 대한 각보존방정식은 다음과 같다.

질량보존식

$$(\rho ru)_r/r + (\rho w)_z = 0 \tag{1}$$

여기서 ρ는 밀도, u는 r방향 속도성분, w는 z방향 속도성분이며, 아래첨자는 편미분을 나타낸다.

운동량보존식

$$\begin{aligned} r: (\rho u w - \eta \mu u_r)_r/r + (\rho w u - \mu u_z)_z &= -P_r + (\eta u_r)_r/r - 2\mu u/r^2 + (\mu w_r)_z - j^r B^\theta \\ z: (\rho u w - \eta \mu w_r)_r/r + (\rho w w - \mu w_z)_z &= -P_z + (\eta u_z)_r/r + (\mu w_z)_z + j^r B^\theta \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 P는 압력, μ는 점성계수, j는 전류밀도, B는 자속밀도이며, 윗첨자는 성분을 나타낸다. 자속밀도는 축대칭전류밀도에 의해

$$B^\theta = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r j^r \xi d\xi \tag{3}$$

로 구해진다.

여기서 μ₀는 진공상태에서의 투자율이다

전류보존식

$$(\eta j^r)_r/r + (j^z)_z = 0 \tag{4}$$

또는 전기포텐셜로 나타내면 다음과 같다.

$$(\eta \sigma \phi_r)_r/r + (\sigma \phi_z)_z = 0 \tag{5}$$

여기서 σ는 전기전도도, φ는 전기포텐셜이다.

$$\text{에너지보존식} \quad (\rho u h - r k h_r / c)_r / r + (\rho w h - k h_z / c)_z = \{(j^r)^2 + (j^z)^2\} / \sigma - SR + 2.5k_b(j^r h_r + j^z h_z) / (ec) \quad (6)$$

여기서 h 는 엔탈피, c 는 정압비열, k 는 열전도도, SR 는 단위 체적당 optically thin 복사열손실율, k_b 는 Boltzman 상수, e 는 전자의 전하량이다.

해석영역은 그림 1에 나타낸바와 같이 아크길이 10mm 에 대해 해석하였으며, 전기장해석영역은 ABCDG, 유동및 열해석영역은 ABCEF로 하였으며, 경계조건은 표1 에 나타내었다. 해석결과에 가장큰 영향을 미치는 경계조건은 용접봉표면의 전류밀도 분포라는 것이 많은 연구가들에 의해 언급되었다(3,4). 이것은 용접봉재질, 표면상태, 기하학적인 형상에 따라 달라지므로 전극표면에서의 전류흐름에 대한 정확한 데이터를 얻는다는 것은 어렵다. 본 연구에서는 전극표면을 따른 전류밀도가 Gaussian분포를 갖으며, 전극봉 표면에 수직인 방향으로 전류가 유입된다고 가정하였다.

$$j_n(s) = j_0 \exp\{-\beta\left(\frac{s}{s_b}\right)^2\} \quad (7)$$

여기서 s 는 전극봉 표면에 접한 좌표이고, s_b 는 중심에서 전류밀도의 5% 가 되는 위치이며, 중심에서의 전류밀도 j_0 는 다음식으로 구할 수있다.

$$j_0 = \frac{I}{2\pi A_0} \quad A_0 = \int_0^\infty \exp\{-\beta\left(\frac{s}{s_b}\right)^2\} r(s) ds \quad (8)$$

전극봉각이 30°일 경우 j_0 가 136.5 A/mm², s_b 는 1.5 mm를 갖는 경우에 대해 해석하였다. EF면에 유입되는 보호가스는 증공속을 흐르는 이상유체의 속도해를 이용하여 속도 경계조건을 주었다(2). 격자생성은 그림 2에 나타낸바와 같이 전극봉의 형상을 고려할수 있도록 하였다.

이상의 보존방정식을 대기압상태에서의 열적성질을 고려하여(1) FDM방법으로 풀었으며, 유동해석은 SIMPLE-C 알고리즘을 채택하였다(7).

3. 해석결과 및 검토

그림 3에 아크의 온도분포를 실험치(3)와 비교하여 나타내었다. 그림 4에 해석결과로부터 구해진 아크의 특성 및 모제로 전달되는 현상들을 나타내었다. 전압강하는 온도구배가 급격한 용접전극 끝단에서 크게 나타나고 있으며, 이로인해 용접전극 끝단에서 생긴 압력차로 약간떨어진 부분에서 최대속도가 나타난다. 용접부 해석시 필요한 열속, 용융부의 대류 현상에 영향을 주는 전류밀도 분포, 아크압력및 전단력도 그림 4에 나타내었다.

이상에서 본 바와 같이 전극봉의 형상을 고려할 수있는 경계밀착좌표계를 사용하여 용접아크의 특성을 규명하였으며, 용접부 해석시 필요한 제 현상들을 제시할 수 있었다.

4. 참고문헌

1. J.F.Lancaster, "The Physics of Welding", Pergamon Press, 1984
2. Masao Ushio and Fukuhisa Matsuda, "Mathematical Modelling of Heat Transfer of Welding Arc(Part 1)", Transactions of JWRI, Vol.11, No.1,1982, pp7-15
3. K.C.Hsu, K.Etemadi and E.Pfender, "Study of the free-burning high-intensity argon arc", J.Appl.Phys, 54(3), March 1983, pp1293-1301
4. J.McKelliget and J.Szekely, "Heat Transfer and Fluid Flow in the Welding Arc", Metallurgical Transactions A, Vol.17A, July 1986, pp1139-1148
5. R.T.C.Choo, J.Szekely and R.C.Westhoff, "Modeling of High-Current Arcs with Emphasis on Free Surface Phenomena in the Weld Pool", Welding Journal, Sep. 1990, pp346s-361s
6. D.L.Evans and R.S.Tankin, "Measurement of Emission and Absorption of Radiation by an Argon Plasma", The Physics of Fluids, Vol.10, No.6, 1967, pp1137-1144
7. Suhas V. Patankar, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", McGraw-Hill Book Company, 1980

Table.1 Boundary conditions

	AB	BC	CD or CE	EF or DG	GA or FA
u	u=0	u=0	$(r\rho u)_r=0$	u=0	u=0
w	$w_r=0$	w=0	$w_r=0$	$w=w(r)$ given & $(\rho w)_z=0$	w=0
h	$h_r=0$	$h=h_{const}$ (T=1000K)	$h_r=0$	$h=h_{const}$ (T=1000K)	$h=h_{const}$ (T=3000K)
φ	$\varphi_r=0$	$\varphi=\varphi_{const}$	$\varphi_r=0$	$\varphi_z=0$	$j_a=j(s)$ given

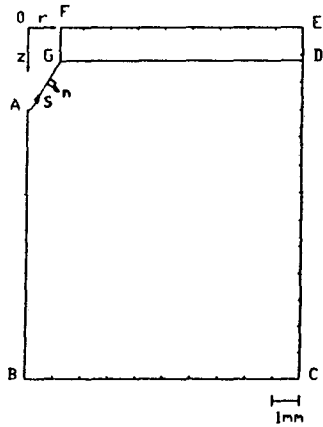


Fig. 1 Solution domain

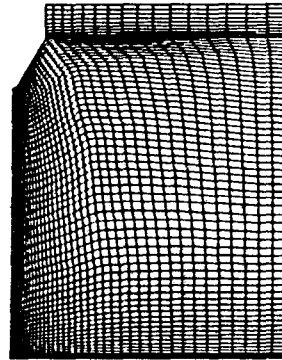


Fig. 2 Mesh generation

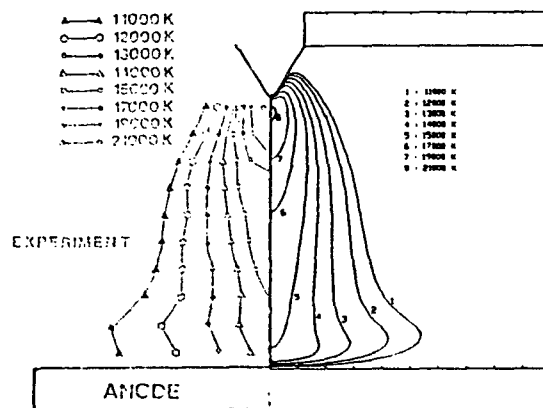
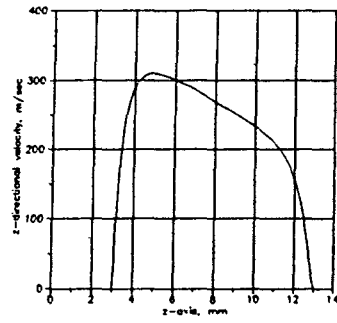
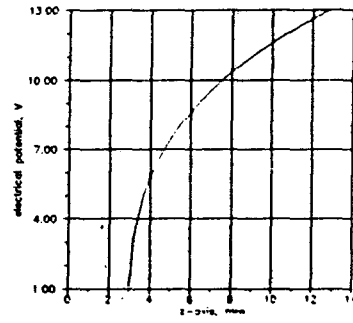


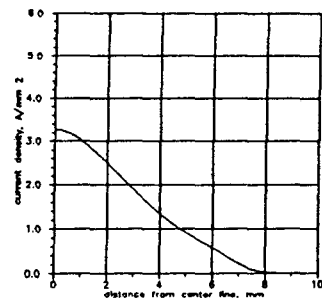
Fig. 3 Temperature profile compared with experiment



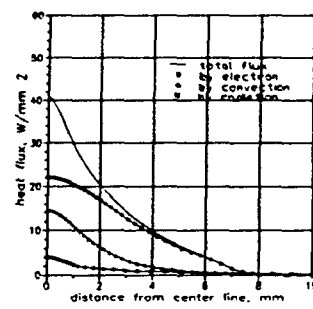
axial velocity along center line



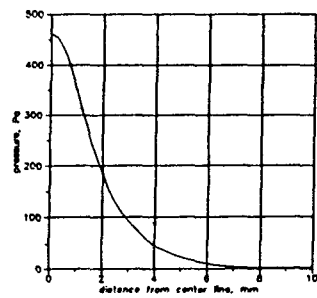
electrical potential along center line



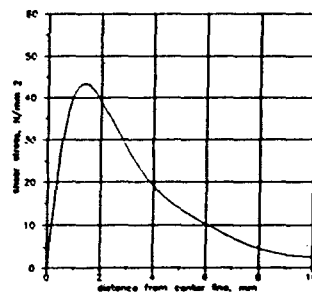
current density along base plate



heat flux along base plate



arc pressure acting on base plate



shear stress acting on base plate

Fig. 4 Axial velocity and electrical potential along center line, current density, heat flux, arc pressure, shear stress acting on base plate