

## 기하학적 인자의 영향을 고려한 TIG용접아크의 수치해석에 관한 연구

이 승 영 (한국과학기술원 정밀공학과)

나 석 주 (한국과학기술원 정밀공학과)

### 1. 서론

TIG용접은 철 및 비철합금에 이르기까지 적용이 가능하며, 아크가 안정되어 정밀한 용접부에도 적용이 가능한 공정이다. 특히 초충용접시 이면비드를 요구하는 곳에서는 TIG 용접이 주로 이용되고 있다. 따라서 정확한 용접부를 얻기위한 TIG용접변수의 제어는 많은 연구가의 대상이 되고 있다[1,2,3,4]. 이와같은 용접부의 형상은 결국 용접아크에 의한 열 및 물질전달에 의해서 이루어지므로, 용접아크와 용접변수와의 관계를 알 수 있다면 용접부의 형상을 예측하는데 많은 데이터를 제공할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 알곤가스를 사용하는 정극성 TIG용접시 전극봉각에 따른 전극봉표면에서의 전류밀도분포를 정의하고, 용접전류 및 아크길이와 용접아크에 의해 용접부에 전달되는 제 현상-열속분포, 전류밀도분포, 아크압력, 전단응력-에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

### 2. 전극봉 표면에서의 전류밀도 분포

정극성아크의 경우 전극봉표면이 고온으로 가열되면 전극표면에서 열전자의 방출이 이루어지는데 이때 전류밀도는 Richardson-Dashman 식에 의하여 다음과 같이 결정된다[5].

$$j = AT^2 \exp\left(-\frac{V_w e}{k_B T}\right) \quad (1)$$

여기서  $A$ 는 대부분의 금속에 대해 약  $6.0 \times 10^5 A/m^2 K^2$  인 상수,  $V_w$ 는 전극봉재질이 갖는 work function,  $k_B$ 는 Boltzmann 상수,  $e$ 는 전자가 갖는 전하량이며  $T$ 는 전극봉 표면의 절대온도이다. 일반적으로 열전자방출에 의한 용접아크의 경우 전극봉표면에서의 전류밀도는  $10^6 - 10^8 A/mm^2$  정도로 알려져 있다[5,6]. 따라서 텅스텐과 같은 고온의 기화점을 갖는 재질이 높은 온도에 도달해야만 열전자방출에 의해 이런 정도의 전류밀도를 얻을 수 있다. 그러나 R-D식으로부터 직접 전극봉표면에서의 전류밀도를 얻는다는 것은 전극봉표면에서의 온도분포 및 work function에 대한 정보가 부족하므로 어려운 일이다. Savage등[7]에 의하면 전극봉표면을 따라서 온도구배가 존재하며, 전류가 매우 높을 경우(용접봉의 허용전류)에는 오히려 전극봉끝단과 collet사이에서 최대온도가 나타나는 것으로 알려져 있다. 이것은 전극봉끝단에서 열전자방출에 필요한 열에너지 흡수로 인하여 나타난다고 보고 있다. 따라서 전극봉끝단에서 최대전류밀도가 나타나며, 끝단에서 멀어질수록 감소할 것으로 볼 수 있다. 전극봉의 재질이  $W+2\%ThO_2$ 의 경우 전극봉 끝단이 용융온도 근처까지 가열되었고(3600K), 열전자방출이 Th의 work function(3.4V)에 의해서 이루어진다면, R-D식에 의해 최대전류밀도는 약  $135 A/mm^2$ 까지 도달한다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 전극봉표면에서의 전류밀도를 Gaussian 형태를 갖는다고 가정하여 전극봉끝단에서 최대전류밀도를 갖고 끝단에서 멀어질수록 감소하도록 하였다. 또한 전류는 전극봉 표면에 수직한 방향으로 흐른다고 가정하였다. 즉

$$j_n(s) = j_0 \exp\left\{-3\left(\frac{s}{s_p}\right)^2\right\} \quad (2)$$

여기서  $s$ 는 용접전극표면에 접한 좌표이며  $s_p$ 는 분포정도를 결정하는 인자로서 중심에서의 최대전류밀도,  $j_0$ 의 5%가 되는  $s$  좌표이다. 중심에서의 최대전류밀도는 다음과 같다.

$$j_0 = \frac{I}{2\pi A_0} \quad (3)$$

여기서  $I$ 는 용접전류이며  $A_0$ 는 식(4)와 같이 구해진다.

$$A_0 = \int_0^\infty \exp\left\{-3\left(\frac{s}{s_p}\right)^2\right\} r(s) ds \quad (4)$$

여기서  $r(s)$  는 전극봉표면의 한점  $s$  에 해당하는 반경을 나타낸다. 따라서  $s_p$ 를 결정하여 용접봉표면에서의 전류밀도분포를 결정할 수있도록 하였다. Savage가 행한 실험에 의하면 용접전류를 100A에서 300A까지 증가시킬 경우 열전자가 방출한다고 볼수있는 백광부(brilliant white core)가 전극봉표면을 따라 올라오는 현상이 나타난다. 이 현상은 전극봉표면에서 방출되는 전류밀도는 더이상 증가하지 않고 단지 전류밀도분포의 면적이 증가하는 것으로 해석할 수있다. 또한 동일한 용접전류에 대해 전극봉각을 증가시킨 경우는 전류방출면적이 약간 증가하여 전류밀도가 감소한다고 보았다. 일단  $s_p$  를 결정하는 기준을 설정하기 위하여 전극봉각이  $60^\circ$ , 용접전류가 200A일 경우  $s_p$ 를 조정한 결과 1.5mm일 경우 계산에 의한 온도분포가 실험결과와 잘 맞는 것을 알 수있었다. 이때 최대전류밀도는  $136.5A/mm^2$ 으로 R-D식에서 구한 전류밀도와 잘 맞는 것을 알 수있다. 전극봉각이  $60^\circ$ , 용접전류가 100, 300A일 경우에도 Savage에 의한 실험적 고찰을 고려하여, 최대 용접전류를 200A의 경우와 동일하도록  $s_p$  를 각각 1.05, 1.9mm로 결정하였다. 전극봉각에 따른  $s_p$ 는 전극봉각이  $60^\circ$ 보다 작을때는 용접전류와 관계없이 최대 전류밀도를  $60^\circ$ 의 경우와 동일하게  $s_p$ 를 결정하였으며, 전극봉 각이 커지면 전극봉 표면에서의 전류밀도분포가 확장되는 효과를 고려하기 위하여  $s_p$  를  $60^\circ$ 일 때와 동일하게 유지하였다. 따라서 식 (3)과 (4)에 의해 알 수있듯이 전극봉각이 커지면 전극봉표면  $s$  에서 반경  $r(s)$ 가 증가하므로 최대전류밀도가 감소하게 된다.

### 3. 해석결과 및 고찰

알곤가스를 사용하여 음극의 W+2%ThO<sub>2</sub>의 전극봉과 열 및 전기전도도가 매우 뛰어난 양극평판(실험에서는 구리판을 사용)사이에서 생성되는 정지아크에 대하여 해석하였다. 해석방법은 전극봉의 형상을 잘 표현할 수있는 경계밀착좌표계를 사용하였으며, 아크축에 대한 축대칭 문제로 국한 하였다[8].

모재로 전달되는 열속 분포,  $q(r)$  및 전류밀도 분포,  $j(r)$  는 다음과 같은 Gaussian 함수로 근사화하여 중심에서의 최대치와 분포계수로 표현하였다.

$$q(r) = q_{\max} \exp\left(\frac{-r^2}{2\sigma_q^2}\right)$$

$$j(r) = j_{\max} \exp\left(\frac{-r^2}{2\sigma_j^2}\right) \quad (5)$$

Fig.1에 전극봉각이  $60^\circ$ , 직경이 3.2mm인 경우 양극에 전달되는 최대열속과 최대 전류밀도를 아크길이의 변화에 대하여 나타내었으며, Fig.2에는 각각의 분포계수를 나타내었다. 동일한 전류및 아크길이에 대하여 전극봉각의 변화에 따른 최대열속의 변화는 최대 28% 까지 나타났으며, 전류밀도분포는 거의 동일하게 나타났다. 따라서 전극봉각에 따른 최대열속의 변화는 아크플라즈마에 의한 대류열전달에 기인한 것으로 아크중심부에서 크게 나타났다.

모재에 미치는 아크압력은 전극봉각의 변화에따라 차이가 많았으며, 아크길이에 따른 아크중심에서의 최대압력변화를 Fig.3에 나타내었다. 용접전류가 300A일 경우는 아크길이에 따른 아크압력의 변화가 작게 나타나고 있으며 이는 Lin[9]에 의한 실험결과와 일치하고 있다. 또한 Yamauchi[10]에 의한 실험결과는 해석결과와 잘 맞고 있는 것을 알 수있다.

아크플라즈마의 유동에 의한 모재표면에 미치는 천단응력은 용융부의 유동을 유발하여 용접부의 형상을 결정하는 중요한 요인이 되며, Fig.4A와 같이 전극봉각에 따라 차이가 많은것을 알 수있다. Fig.4B는 최대천단응력이 나타나는 위치이며, 아크길이가 길어질 수록 최대천단응력은 아크중심부에서 멀리 나타난다.

### 4. 결론

전극봉각과 용접전류에 따른 전극봉표면에서의 전류밀도분포를 실험적고찰과 열전자방출에 의한 용접아크의 형성을 근거로 하여 가정하였으며, 실험에 의한 아크의 온도분포와 해석결과를 비교하여 분포계수를 결정할 수있었다.

아크길이 및 전극봉각을 고려하여 TIG용접아크를 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

. 용접아크에 의해서 모재에 전달되는 용접열원은 아크길이에 의해 가장크게 영향을 받으며, 전극봉각이 미치는 영향은 대류에 의한 중심부의 열속을 변화시켜 최대열속의 변화를 28% 까지 유발하나, 전체적인 열원의 분포에 미치는 효과는 적게 나타나고 있다.

. 모재에 미치는 아크압력은 전류가 높은 경우(300A)는 아크길이에 의한 영향보다 전극봉각의 영향이 두드러지게 나타나고 있었으며, 용접전류가 200A일 경우는 아크길이와 전극봉각의 영향이 같이 나타나고 있는 것을 알 수 있었다.

. 아크프라즈마가 모재표면에 전달하는 전단응력은 전극봉각에 의한 영향이 크게 나타나고 있었다.

### 5. 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. P.Burgardt and C.R.Heiple, Interaction between impurities and welding variables in determining GTA weld shape, *Welding Journal*, June 1986, pp150s-155s.
3. J.F.Key, Anode/cathode geometry and shielding gas interrelationships in GTAW, *Welding Journal*, Dec. 1986, pp364s-370s.
4. A.A.Shirali and K.C.Mills, The effect of welding parameters on penetration in GTA welds, *Welding Journal*, July 1993, pp347s-353s.
5. Lancaster, J.F. The physics of welding, 1984(Pergamon Press)
6. Matsuda, F., Ushio, M. and Kumagai, T. Fundamental arc characteristics of La-, Y- and Ce-oxide tungsten electrodes. *Welding International*, 1986, 6, pp497-502.
7. W.F.Savage, S.S.Strunck and Y.Ishikawa, The effect of electrode geometry gas tungsten-arc welding, *Welding Journal*, Nov. 1965, pp489s-496s.
8. 이승영, 나석주, 경계밀착좌표계를 사용한 TIG용접아크의 해석에 관한 연구, 대한용접학회 춘계발표, pp21-24.
9. M.L. Lin and T.W.Eagar, Pressure produced by gas tungsten arcs, *Metall. Trans.*, Sep. 1986, 17B, pp601-607.
10. N.Yamauchi and T.Taka, TIG arc welding with hollow tungsten electrode, I.I.W. Doc. No.212G-452-79

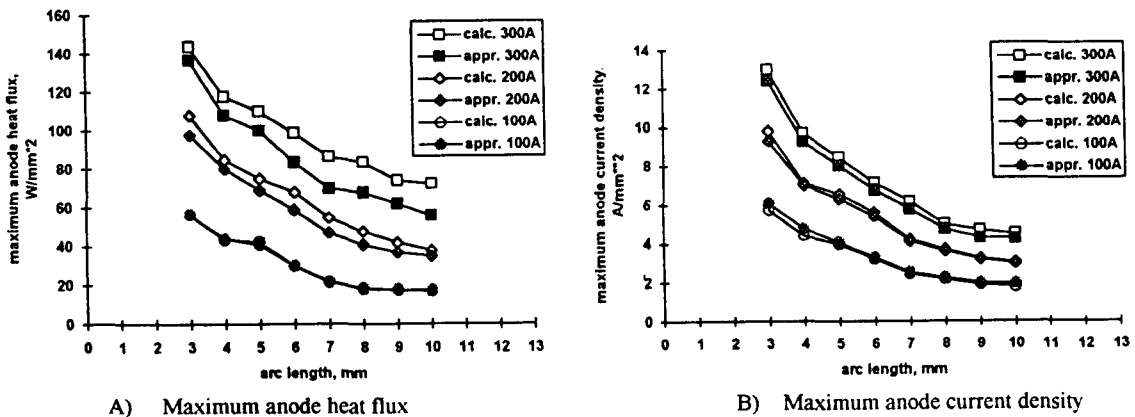


Fig. 1 Maximum anode heat flux and current density with arc length for electrode of 60° vertex angle, 3.2mm diameter.

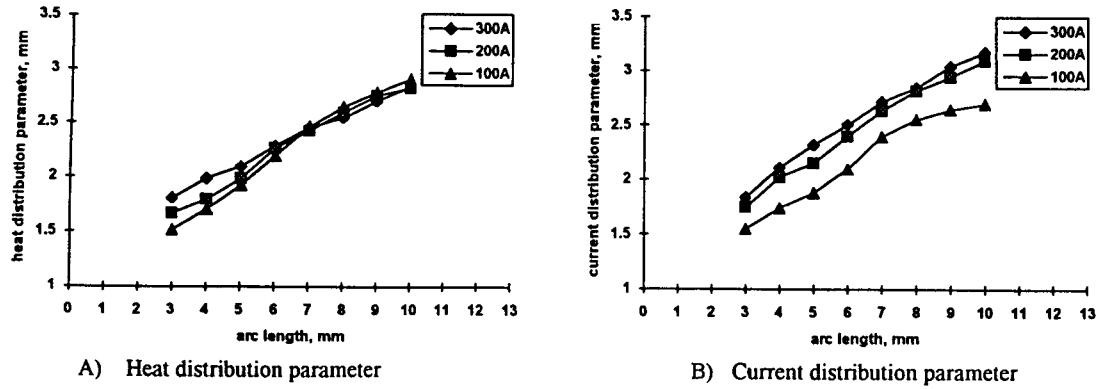


Fig. 2 Heat and current distribution parameters with arc length for electrode of  $60^\circ$  vertex angle, 3.2mm diameter.

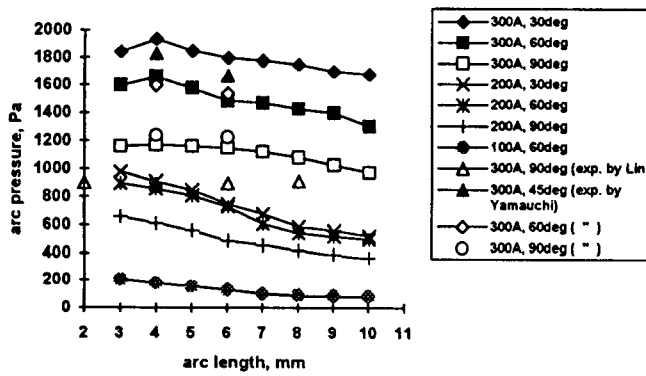


Fig. 3 Maximum arc pressure with arc length for electrodes of 3.2mm diameter and various vertex angles.

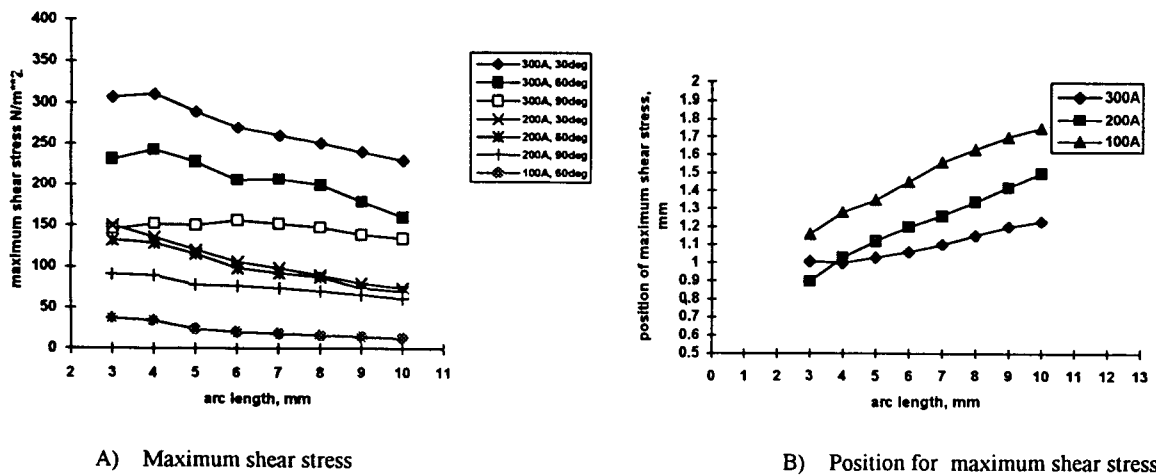


Fig. 4 Maximum shear stress and position with arc length for electrodes of 3.2mm diameter and various vertex angles.