

# 회전 GMA 용접에서 와이어용융 현상의 동적 해석

## Simulation of dynamic wire melting in rotating GMAW

김철희, 나석주

한국과학기술원 기계공학과, 대전광역시

### 1. 서론

아크센서는 용접공정 중 팁-모재간의 거리 변화에 대한 용접전류의 변화를 이용하여 용접선 추적에 널리 이용된다. 기존 위빙을 이용한 아크센서는 기계적인 한계로 인하여 수 Hz 이상의 위빙 주파수를 가질 수 없으나 회전아크를 이용한 아크센서는 전극을 고속으로 회전시켜 위빙 주파수를 수십 Hz 이상으로 높여 줄 수 있으며, 기존의 아크센서에 비해 용접속도가 빨라 자기제어(self-regulation)현상이 충분히 일어나지 못하기 때문에 팁-모재간의 거리에 따른 용접전류의 차이가 커져 센서로서의 정밀도와 응답성이 높아지고, 더 작은 용입 깊이와 평평한 비드형상을 가지게 되어 필릿용접에 유용하게 이용될 수 있으며 박판 용접이나 겹치기 용접에도 이용될 수 있다. 그러나 회전아크 용접을 모델링할 때에는 자기제어현상이 충분히 일어나지 않으므로 와이어의 송급속도와 용융속도가 달라져 정적인 상태에서의 와이어의 용융 모델을 적용하여 이를 해석할 수 없다[1][2].

본 연구에서는 자기제어 현상이 충분히 일어나지 못하는 동적인 상황에서 와이어의 용융현상을 모델링하고 이를 이용하여 회전아크용접시 팁-모재간 거리가 변할 때 전류파형의 크기를 예측하고자 한다.

### 2. 본론

준정상상태에서 와이어의 송급속도와 용융속도가 같다고 가정할 때 용접 전류와 팁-모재간의 거리사이의 관계는 다음과 같다 [3][4].

$$w = aI + bL_e I^2 \quad (1)$$

팁-모재간의 거리가 상당히 빨리 변한다면 준정상상태를 이루지 못하기 때문에 용접속도에 따라 와이어의 용융 속도가 달라진다. 와이어의 용융속도와 송급속도가 다른 동적 상황에서 와이어의 용융속도를 결정하기 위하여 기존의 연구에서는 주로 와이어에서 열전도를 무시하고 와이어가 전극팁에서 전극 돌출길이 끝까지 이송되는 동안 흐른 전류의 제곱을 시간에 따라 적분한 'action integral'을 이용하여 용접와이어의 동적인 용융현상을 설명하였다[5][6]. 그러나 GMA 용접시  $Pe(= wd / \alpha)$  수는 38 정도로 용접와이어에서 열전도로 인한 열전달을 무시할 수 없다[7].

정전압 GMA 용접을 모델링 하기 위하여 용접기 특성과 용접케이블, 와이어 돌출길이, 용접아크에 대한 모델을 그림 1에 나타내었다. 아크로부터 용접와이어에서 열이 전달될 때 Ar을 보호가스분위기하에서는 전자의 측면 응축(side condensation)이 생긴다고 알려져 있다[7]. 그림 2와 같이 측면응축으로 인한 열전달양을  $Q_s$ , 용적에서 와이어로 전달되는 열을  $Q_m$ 이라 할 때  $Q_s$ 가 와이어 끝단에 집

중된다면 와이어 끝단에서 생기는 열평형식은 다음과 같다[8].

$$-k(T)\frac{\partial T}{\partial z} + \frac{Q_s(t)}{S} + \frac{Q_m(t)}{S} = (w - dL_e/dt)\rho(T) \quad (1)$$

식 (1)을 이용한 와이어의 용융 해석에서 와이어의 온도분포의 해석이 필요하다. 와이어의 공급속도와 용융속도가 같을 때 와이어의 단면에서 온도가 일정하다면 온도분포는 식 (2)와 같은 열전도방정식의 해로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho_e(T)j^2 = C_p(T)\rho(T)w \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2)$$

$$\text{B.C} \quad z=0, \quad T=T_c \\ z=L_e, \quad T=T_m$$

이 때 와이어의 전기적인 비저항을 그림 3 과 같이 선형으로 가정하고 열전도도와 정압비열, 와이어의 밀도를 표 1 과 같이 상수로 두면 식 (3)을 얻을 수 있다[9].

$$k \frac{d^2 T}{dx^2} + \rho_e j^2 = \rho c_p \left( -w \frac{dT}{dx} \right) \quad (3)$$

$$\text{B.C} \quad x=0, \quad T=T_m \\ x=L_e, \quad T=T_c$$

식 (3)의 해석해(analytic solution)과 그림 3 의 비선형 비저항과 온도에 따라 변하는 열전도도와 정압비열을 이용한 수치해(numerical solution)는 그림 4 에 비교하였다.

참고문헌 [10]의 측정결과와 해석해를 이용하여 식 (1)에서 용적에서 와이어로 전달되는 열,  $Q_m$  을 구하고자 한다.  $Q_s$  는 전자의 걸보 기응축전압(apparent condensation voltage,  $=\phi + V_A + 3/2 (kT_e/e)$ ),  $6V$  의 10%로 설정하고 와이어의 해석적 온도분포를 이용할 때 계산된  $Q_m$  을 그림 5 에 나타내었다[7].  $Q_m$  은 와이어의 단면적과 돌출길이의 비를 특성길이로 하는  $Pe(=w(S/L_e)/\alpha)$  수에 대해 선형적인 관계를 가짐을 알 수 있다.

온도에 따른 와이어의 온도분포변화를 구하기 위하여 식 (4)와 같이 비정상상태에서 온도분포식을 해석하고자 한다. 측면응축으로 인한 열전달량을  $F$  로 나타내었다.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho_e j^2 + F = C_p(T)\rho(T)w \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

와이어의 길이가 변할 때 해석을 위한 영역(domain)이 변하게 되므로 이의 해석을 위하여 variable space network 을 이용하였다. 와이어의 길이가 변할 때 같은 수의 해석 격자(gird)를 가진다면  $n$  번째 격자점에서 다음과 같은 관계를 가지게 된다[11].

$$\frac{dT}{dt} \Big|_n = \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_n \frac{dz}{dt} + \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_n \\ \frac{dz}{dt} \Big|_n = \frac{z}{L} \frac{dL}{dt} = \eta \frac{dL}{dt} \quad (5)$$

용접전류를 모의실험하기 위해 그림 1 의 회로는 식 (6)과 같이 표시된다.

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V_{OC} - V_{a0}}{L_s + L_p} - \frac{R_s + R_p + R_a + R_e}{L_s + L_p} I - \frac{E_{a1} + E_{a2}I}{L_s + L_p} L_a \quad (6)$$

식 (1),(4),(6)을 그림 6 과 같은 알고리즘으로 수치해석하여 아크회전시 용접전류파형의 진폭을 구할 수 있다.

### 3. 결론

용접와이어의 동적 용융현상에 대한 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 용적에서 와이어로 전도되는 열은  $Pe(=w(S/L_e)/\alpha)$  수에 선형적으로 비례하는 관계를 가지는 것을 알 수 있다.
- (2) 자기제어현상이 충분히 일어나지 못하는 동적인 용융상황에서 용접와이어의 온도분포를 고려하여 GMA 용접을 모델링하고 용접 전류의 파형을 예측하였다.

**Reference**

1. H. Nomura, Y. Sugitani and Y. Kobayashi, IIW-SG212-527-82.
2. 김철희, 나석주, 대한용접학회 춘계학술대회 자료집, 1997년 5월, pp.129-132.
3. A. Lesnewich, *Welding Journal*, 37(8), 1958, pp.343s-353s.
4. E. Halmoy, *Arc Physics and Weld Pool Behavior*, The Welding Institute, Cambridge, 1980, pp.49-54.
5. W. Mao and M. Ushio, *Science and Technology in Welding and Joining*, 2(5), 1997, pp.191-198.
6. M.E.Shepard and G.E.Cook, *Conference Proceedings, 1992 Third International Conference on Trends in Welding Research*; ASM International.
7. Y. S. Kim, D. M. McEligot and T.W.Eagar, *Welding Journal*, 70(1), 1991, pp.20s-30s.
8. T.P.Quinn, R.B.Madigan and T.A.Seiwert, *Welding Journal*, 73, 1994, pp.241s-248s
9. J.H.Waszink and G.J.M. Van Den Heuvel, *Arc Physics and Weld Pool Behavior*, The Welding Institute, Cambridge, 1980, pp.227-239.
10. J. H. Waszink and G.J.M. Van Den Heuvel, *Welding Journal*, 61, 1982, pp.269s-282s.
11. W.D.Murray and F.Landis, *Journal of Heat Transfer*, 81, 1959, pp.106-112.

Table 1. Material Properties for analytic solution

$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (J/kg K)	$K$ (W/m K)	$a_0$ ( $\Omega$ m)	$a_1$ ( $\Omega$ m/K)
7800	780	25	$3.7e-7$	$8.1e-10$

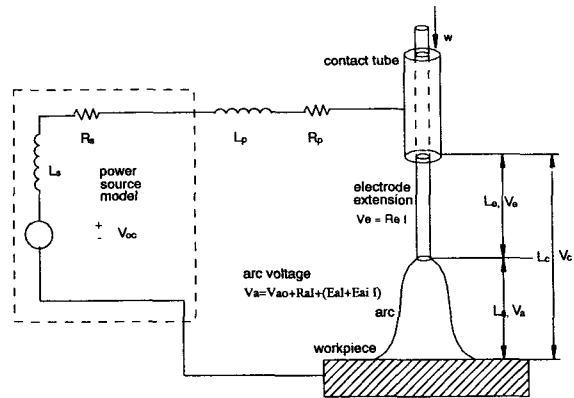


Fig. 1 Equivalent circuit of GMA welding system with CV power source

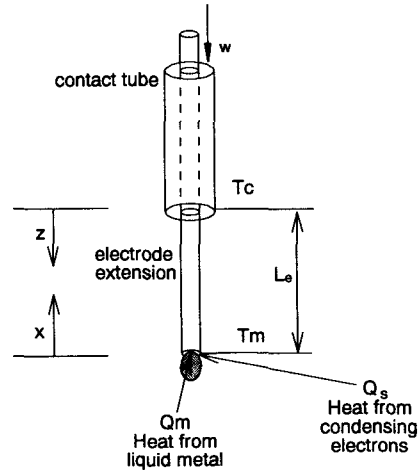


Fig. 2 The melting electrode model

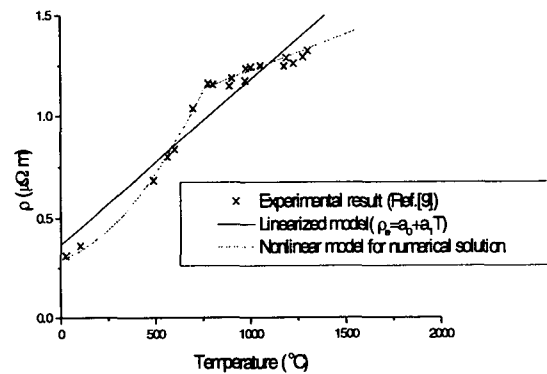


Fig. 3 Electrical resistivity of electrode wire

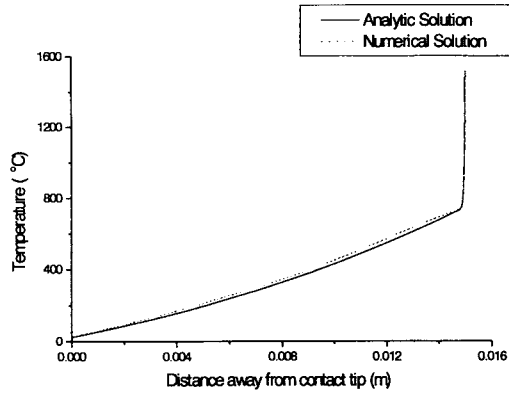
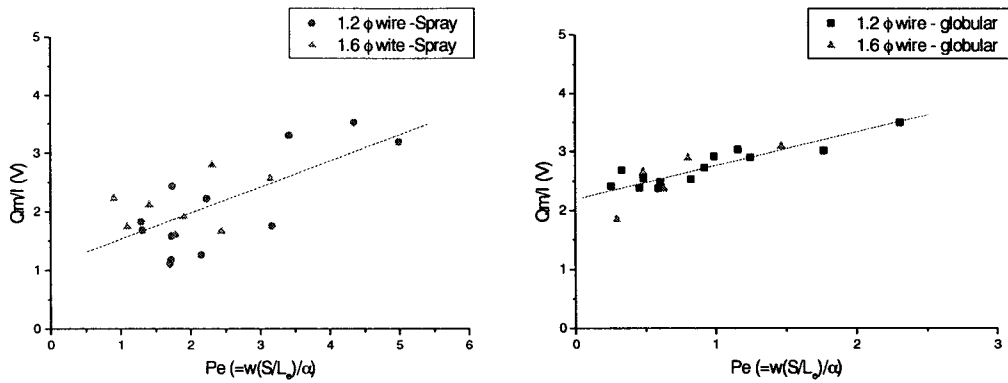


Fig. 4 Temperature distribution of electrode



(a) Spray transfer mode

(b) Globular transfer mode

Fig. 5 Heat Flux entering the solid wire from molten droplet

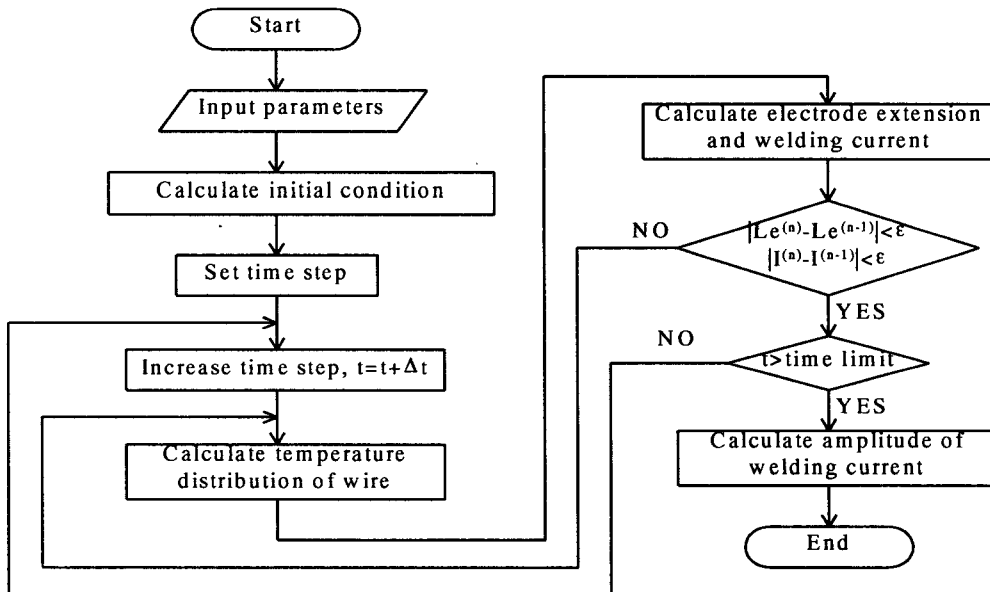


Fig. 6 Flow chart of welding current simulation