

# GMA 용접의 아크 빛 모델링 및 용접선 추적에의 응용

## Modeling of Arc Light Intensity and Its Application to Weld Seam Tracking in GMAW

선우희권\*, 유용상, 최상균, 유중돈

\* LG 산전

한국과학기술원, 기계공학과

### 1. 서론

아크 센서는 용접선 추적용으로 널리 사용되며, 아크 길이가 변화할 때 용접 전류 또는 전압이 변화하는 특성을 이용하여 그루브 형상에 관한 정보를 얻을 수 있고 용접선 추적에 응용될 수 있다[1,2]. 본 연구는 GTA 용접에서 아크 빛이 아크 길이에 관련된 깨끗한 신호를 발생시키는데 착안하여 이를 GMA 용접에 적용하고자 하였다[3]. GMA 용접에서 아크 빛과 용접 조건의 관계를 플라즈마의 열 평형을 이용하여 유도하고 실험을 통하여 검증하였다. 또한, 용접선 추적용 신호 처리 방법으로 사용되는 최소 오차 자승법 [1] 과 적분법 [2]의 성능을 용접선 추적 실험을 통하여 비교하였다.

### 2. 아크 빛의 모델링

아크 체적의 대부분은 플라즈마로 구성되어 있으며 플라즈마에서 발생하는 복사열에 의하여 대부분의 아크 빛이 방출된다. 평형 상태에서 플라즈마에서 발생하는 저항열 (joule heating) 은 전도와 대류 및 복사에 의한 열 손실과 같다.

$$\dot{Q}_{\text{joule}} = \dot{Q}_{\text{cond}} + \dot{Q}_{\text{conv}} + \dot{Q}_{\text{rad}} \quad (1)$$

위의 식에서 저항열  $\dot{Q}_{\text{joule}}$  은 용접 전류와 플라즈마의 전압 강하의 곱으로 나타낼 수 있다. Ayrton 의 식을 이용하여 플라즈마의 전압을 표현하면 저항열은 다음과 같다.

$$\dot{Q}_{\text{joule}} = I_a V_p = (k_3 + k_4 I_a) I_a L_a \quad (2)$$

전도 및 대류에 의한 열손실을 유도하기 위하여 다음과 같이 가정하였다. (1) 아크의 형상은 원통이며, (2) 아크의 온도는 일정하며, (3) 계산에 사용되는 물리적 특성은 상수이다. 이와 같은 가정아래 전도 및 대류에 의한 열손실은 다음과 같다.

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \kappa A_s \frac{T_a - T_o}{\delta_e} = 2\pi \kappa R_a \frac{T_a - T_o}{\delta_e} L_a \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = \rho (2\pi R_a) \alpha v_{\text{out}} (h_{\text{out}} - h_{\text{in}}) L_a \quad (4)$$

이 때,  $\kappa$  는 열전도계수,  $A_s$  는 실린더의 옆면적 ( $= 2\pi R_a L_a$ ),  $\delta_e$  는 길이(effective length),  $T_a$  와  $T_o$  는 아크와 주변의 온도를 각각 나타내며,  $\alpha$  는 비례 상수이다. 위의 식에서 전도와 대류에 의한 열전달은 아크 길이에 비례하는 것을 알 수 있다. 복사열은 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = ((k_3 + k_4 I_a) I_a - K) L_a = K^* L_a \quad (5)$$

$$K = 2\pi R_a \left\{ \kappa \frac{T_a - T_o}{\delta_e} + \rho_{\text{out}} \alpha v_{\text{out}} (h_{\text{out}} - h_{\text{in}}) \right\} \quad (6)$$

아크 길이는 contactor 와 모재의 거리  $L$  에서 용접봉 돌출 길이를 빼면 구할 수 있으며, 용접봉 돌출 길이의 변화는 용접봉 공급 속도와 용접봉의 용융 속도로 부터 구할 수 있다.

$$\frac{dL_e}{dt} = v_w - (k_5 I_a + k_6 L_e I_a^2) \quad (7)$$

$$L_a = L - L_e \quad (8)$$

이 때,  $L_e$  는 돌출 길이,  $v_w$  는 용접봉 공급 속도,  $k_5$  와  $k_6$  는 상수이다. 아크 길이는 측정된 용접 전류를 이용하여 수치적으로 구한다.

### 3. 용접선 추적용 신호처리 알고리즘

최소 오차 자승법은  $\text{CO}_2$  가스를 사용하는 경우와 같이 신호에 노이즈가 클 때 적용하기 위하여 개발된 것으로 반 위빙 주기 (half weaving cycle) 의 신호를 2차 함수로 맞춤 (fitting) 하여 그루브의 중심을 추정한다. 적분법은 위빙시 그루브의 중심에 대한 좌우의 신호를 시간에 따라 적분한 결과를 이용하여 용접선의 이탈량 (deviation) 을 구한다. 적분법은 원리가 간단하고 계산 시간이 짧지만  $\text{CO}_2$  가스를 사용하는 경우나 용접 전류의 신호처리에 적용된 사례가 없다. 본 연구에서는 최소 오차 자승법과 적분법의 성능을 비례 제어기를 이용한 용접선 추적 실험 결과를 이용하여 비교하였다.

#### 4. 실험

실험 장치는 Fig.2 에 보인 바와 같고, 아크 빛은 작은 구멍 (pin-hole) 을 통하여 세기가 감소되고 렌즈 및 광섬유를 통하여 photodiode 에 전달되었다. 필터링된 아크 빛, 용접 전류, 용접 전압, 그리고 토치의 위빙 방향 신호를 각각 100 Hz 로 동시에 샘플링하였으며 이로부터 용접선의 이탈량을 계산하여 토치의 위치를 보정하였다.

직경 1.2 mm 인 강용접봉을 이용하여 V-그루브에서 위빙을 하며 직선 용접을 수행하였다. 분위기 가스로 아르곤과 CO<sub>2</sub> 가스를 20 liter/min 로 공급하였고, 용접봉 이송 속도는 4 mm/s 로 하였다. 모델의 확인과 위빙 속도의 영향을 관찰하기 위하여 아르곤 가스를 사용하였고 위빙 주기를 0.5 와 1 Hz 로 하였다. 위빙 폭이 10 mm 이므로 평균 위빙 속도는 0.5 와 1 Hz 에 대하여 10 과 20 mm/s 이다. 또한 신호처리 알고리즘의 성능을 비교하기 위하여 CO<sub>2</sub> 가스를 사용하여 원래 토치의 궤적에서 5 도 회전시킨 용접선을 추적하였다.

#### 5. 결과 및 고찰

실험을 통하여 측정된 용접 전류와 아크 빛의 세기를 Fig.3 에 나타내었다. 용접봉이 그루브의 중심에 접근하면 용접 전류는 감소하지만, 아크 길이가 길어지므로 아크 빛의 세기는 증가한다. 즉 아크 빛은 용접 전류보다 아크 길이에 의해 더 큰 영향을 받는다. 위빙 주기가 0.5 Hz 인 경우에는 self-adjusting 효과가 크게 작용하여 그루브의 높이 변화를 정확하게 예측하기 어렵다. 그러나 위빙 주기가 1 Hz 인 경우는 self-adjusting 효과에 의해 아크 길이가 변화하는 것보다 위빙 속도가 상대적으로 크므로 그루브의 형상에 따라 변화하는 깨끗한 신호를 얻을 수 있다.

아크 길이 및 복사열을 계산한 결과를 Fig.4 에 나타내었다. 계산에 사용된 상수 값은 Table.1 에 나타내었다. Fig.4a 에서 용접봉 들출 길이의 변화는 비교적 작으며 그루브의 형상을 정확히 예측하였다. Fig.4b 를 보면 계산된 복사열은 비교적 정확하게 아크 빛의 세기와 일치한다. 이 결과로 부터 플라즈마의 열평형을 이용한 모델이 아크 빛의 세기를 예측할 수 있고 용접선 추적에 응용할 수 있음을 알 수 있다.

분위기 가스에 따른 아크 빛과 용접 저항의 변화를 Fig.5 에 나타내었다. 본 연구에서 용접저항을 측정한 이유는 용접 저항이 용접 전류와 큰 차이가 없으며 아크 빛의 세기와 위상차가 없으므로 비교하는 데 용이하기 때문이다. 아르곤 가스를 사용한 경우는 용접 저항과 아크 빛 모두 양질의 신호를 나타내는 반면, CO<sub>2</sub> 가스를 사용할 때에는 용접 저항 신호로부터 그루브의 형상을 판별하기 어렵고 아크 빛의 경우에는 대략적인 그루브 정보만을 알 수가 있다. 따라서 CO<sub>2</sub> 가스를 사용하는 경우에는 정확한 용접선의 위치를 추정하기

위하여 신호처리 알고리즘을 사용하여야 한다.

용접선 추적은 CO<sub>2</sub> 가스를 사용하여 최소 오차 자승법과 적분법을 사용하여 수행하였다. 용접선이 원래의 용접 경로에서 5 도 회전된 경우에 용접 저항과 아크 빛을 이용하여 용접선을 추적한 결과를 Fig.6 에 나타내었다. 그림에서 x 축은 용접봉 진행 방향, y 축은 위빙 방향을 나타낸다. 각 경우에 대하여 대략 1.5 mm 오차 내에서 용접선을 추적할 수 있었다. 그러므로 CO<sub>2</sub> 가스를 사용하는 경우에도 최소 자승법이나 적분법에 의한 신호처리를 통하여 비교적 정확하게 용접선의 위치를 추정할 수 있다. 이 두 방법은 거의 동일한 오차 내에서 용접선을 추적하였으므로 성능은 비슷하다고 판단된다.

연구 결과로부터 볼 수 있듯이 CO<sub>2</sub> 가스를 사용하는 경우에 아크 빛을 이용하면 신호의 질이 향상된다. 그러나 GTA 용접에서와 같이 아크 센서를 대체할 만큼 월등한 성능을 보이지는 못하였다. 또한 아크 빛 측정 센서의 가격이 current shunt 에 비하여 높고 아크 빛이 장애물에 의하여 가려지는 *occlusion* 등의 문제점들을 고려할 때 용접 전류를 사용하는 것이 바람직하며, 신호의 질이 떨어지는 문제는 신호처리로 극복할 수 있는 것으로 판단된다. 신호처리 방법으로는 최소 오차 자승법과 적분법이 유사한 성능을 나타내었으나, 적분법이 계산 시간이 짧고 알고리즘이 간단하므로 최소 오차 자승법에 비하여 유리하다.

## 6. 결론

아크 빛에 관한 모델링과 용접선 추적 결과로부터 다음의 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 아크 빛의 세기를 플라즈마의 열평형으로 부터 용접 전류와 아크 길이의 함수로 유도하였다. 아크 빛의 세기는 용접 전류에 비하여 아크 길이에 의해 큰 영향을 받으며 실험 결과와 비교적 정확하게 일치하였다.
- (2) 위빙 속도가 증가함에 따라 *self-adjusting* 효과가 감소하여 신호의 질이 좋아지며 그루브의 높이 변화를 정확하게 예측할 수 있다.
- (3) CO<sub>2</sub> 가스를 사용하는 경우, 아크 빛이 용접 저항이나 전류에 비하여 깨끗한 위빙 신호를 발생한다. 아크 빛과 용접 저항을 이용하여 용접선을 추적할 수 있었으며 최소 오차 자승법이나 적분법의 성능은 비슷하였다.

## References

1. 김재용, 나석주 : "아크센서를 이용한 용접선 추적장치", 대한용접학회지, 제 6 권, 제 4 호, 1988, pp. 1-6
2. Sugitani, Y., et al. : "CAD/CAM welding robot system in steel bridge panel fabrication", Quarterly J. of Japan Welding Society, Vol.13, No. 1, 1995, pp. 28-38.

3. 유중돈 : “완전 용입 풀의 진동을 이용한 형상 측정에 관한 연구”, 대한 용접학회지, 제 11 권, 제 2 호, 1993, pp. 62-73
4. Cram, L.E. : “A model of the cathode of a thermionic arc”, J. of Physics D: Applied Physics, Vol. 16, 1983, pp.1643-1650
5. Lancaster, J.F. : The physics of welding, Pergamon Press, 1985.
6. Kim, J.W and Na, S.J. : “A study on prediction of welding current in GMAW, Part 1: modeling of welding current in response to change of tip-to-workpiece distance”, Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 205, 1991, pp. 59-63
7. Cook, G.E., et al. : “Analyzing arc welding signals with a microcomputer”. Conf. Recent IEEE Industry Applications, Society Annual Meeting, 1982, pp.1282-1288.

Table 1. Values of parameters and constants

Variables	Value
$\alpha$	0.3
$\delta_0$	100 mm
$\kappa$	0.486 W/mK
$\rho$	0.09732 Kg/m <sup>3</sup>
$h_{in}$	348.6 KJ/Kg
$h_{out}$	2600 KJ/Kg
$k_1$	15.22 V
$k_2$	0.0307 V/A
$k_3$	0.6315 V/mm
$k_4$	$1.02 \times 10^{-5}$
$k_5$	0.311 mm/s.A
$k_6$	$4.63 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} \text{ A}^{-1}$
$R_a$	3 mm
$T_a$	12000 K
$T_0$	300 K
$v_{out}$	50 m/s

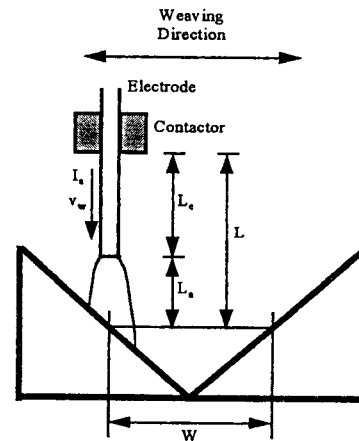


Fig. 1. Configuration of GMAW in V-groove

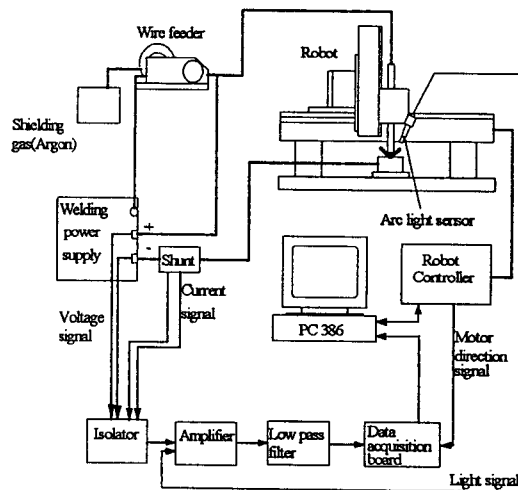


Fig.2 Schematic diagram of experimental system

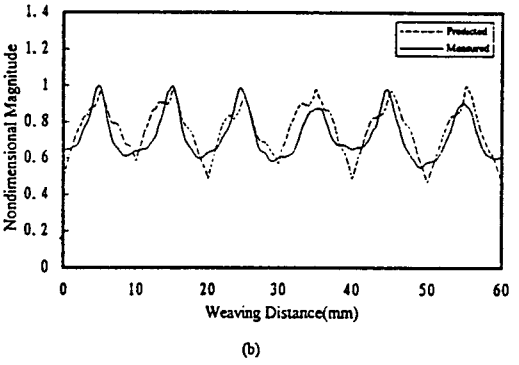
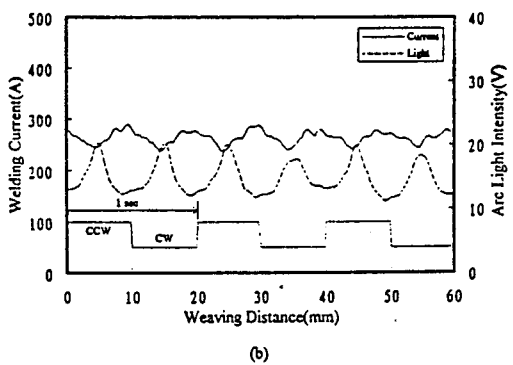
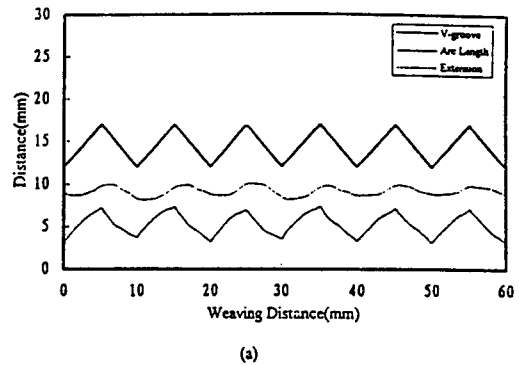
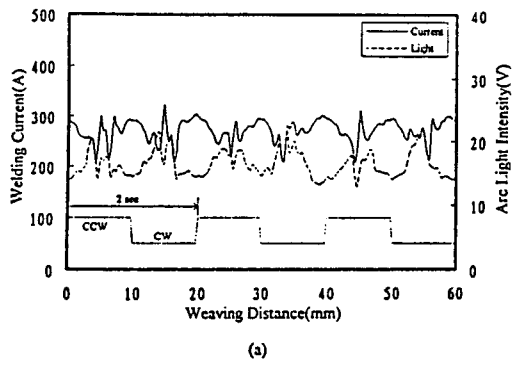


Fig.3 Measured welding current and arc light intensity during weaving  
(a) 0.5 Hz (b) 1 Hz

Fig.4 Comparison between prediction and measurement at 1 Hz  
(a) arc length (b) arc light intensity

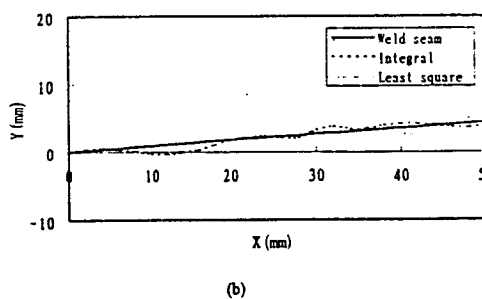
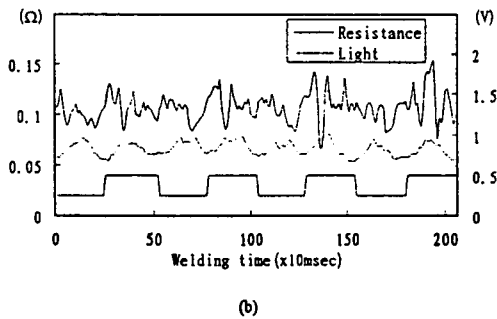
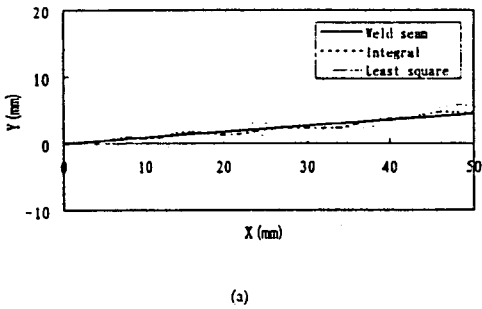
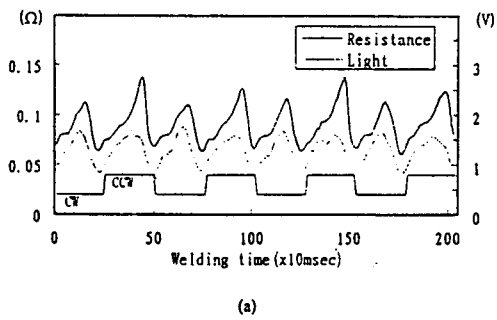


Fig. 5 Comparison of welding resistance and arc light intensity signals  
(a) Argon (b) CO<sub>2</sub>

Fig. 6 Performance of seam tracking in CO<sub>2</sub>  
(a) using welding resistance  
(b) using arc light intensity