

**研究論文**

## GMA 용접의 아크빛 모델 및 용접선 추적에의 응용

유용상\* · 최상균\* · 유중돈\* · 선우희권\*\*

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

Y. S. Yoo\*, S. K. Choi\*, C. D. Yoo\* and H. K. Sunwoo\*\*

**Key Words** : Weld seam tracking, GMAW, Arc light intensity, Heat balance, Arc length, Least square and integration methods

#### Abstract

The arc sensor has been most widely used for weld seam tracking through welding current or voltage variation. In this work, the relation between the arc light intensity and welding condition is investigated using heat balance in the plasma for its possible application to seam tracking in the GMAW process. The arc light intensity is derived to be the function of the arc length and welding current. Experiments are carried out to verify the proposed heat balance model. Performances of least square and integration methods to process the signals for seam tracking are compared experimentally. Predicted arc light intensity shows reasonably good agreement with experimental results. The weld seam is successfully tracked through the arc light intensity. The least square and integration methods demonstrate almost same performance of seam tracking with CO<sub>2</sub> gas shielding.

#### 1. 서 론

아크 용접은 작업 환경이 열악하고 노동력에 의존하는 경향이 큰 공정으로 생산성 및 생산품의 신뢰도를 향상시키기 위해서는 로봇을 이용한 공정

의 자동화가 필수적이다. 아크 용접 공정의 자동화를 위해서는 용접선의 추적이 선행되어야 하며, 이를 위한 여러 종류의 용접선 추적용 센서 중에서 아크 센서가 널리 사용되고 있다. 아크 센서는 아크 길이가 변화할 때 용접 전류 또는 전압이 변화하는 특성을 이용하여 용접선을 추적하며 그루브

\* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 비회원, LG산전, 자동화 기기 연구실

(groove) 형상에 관한 정보도 얻을 수 있는 장점이 있다<sup>1,2)</sup>. Gas Metal Arc (GMA) 용접에서는 일반적으로 정전압 (constant voltage) 용접기를 사용하므로 위빙 (weaving) 동작시 발생하는 용접 전류의 변화를 측정하여 용접선 추적을 행한다. 그러므로 용접 전류나 전압과 같이 아크 길이를 측정할 수 있으면 용접선 추적용 센서로 응용할 수 있다.

최근 Gas Tungsten Arc (GTA) 용접에서 아크 빛 (arc light) 을 이용하여 아크 길이의 변화를 측정하고, 용융 풀 (molten pool) 의 고유 진동수를 이용하여 용입 상태를 제어하려는 시도가 있었다<sup>3)</sup>. 이 연구에서는 아크 빛과 아크 길이의 관계를 정량적으로 해석하지는 못하였으나, 아크 빛은 용접 전압에 비해 깨끗하게 용융 풀의 진동 신호를 발생시키는 것을 확인하였다. 아크 빛과 아크 길이의 관계를 실험적으로 나타내려는 시도가 있었으나<sup>4)</sup>, 다양한 용접 조건의 변화에 대해 적용이 제한되고 GMA 용접에는 응용되지 못하였다.

본 연구는 GTA 용접에서 아크 빛이 아크 길이에 관련된 깨끗한 신호를 발생시키는데 착안하여 이를 GMA 용접에 적용하고자 하였다. GMA 용접에서 아크 빛과 용접 조건의 관계를 플라즈마 (plasma) 의 열 평형 (heat balance) 을 이용하여 아크 빛의 세기를 용접 전류와 아크 길이의 함수로 유도하고 실험을 통하여 검증하였다. 그리고, 아크 빛을 이용하여 CO<sub>2</sub> 가스를 사용하는 경우에 용접선 추적에 적용하였으며, 용접선 추적용 신호 처리 방법으로 사용되는 최소 오차 자승법<sup>5)</sup> 과 적분법<sup>6)</sup>의 성능을 용접선 추적 실험을 통하여 비교하였다.

## 2. 아크 빛의 모델링

아크 용접시 발생하는 강렬한 빛은 복사열에 의한 것으로 이에 관한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 이와 같은 연구 결과들은 GTA 용접과 같이 고온에 의한 방출 (thermionic emission)에 관한 것이며, 입력 조건과 계산이 복잡하여 실제적으로 적용하기에는 어려움이 많다<sup>5)</sup>. 또한, GMAW 공정에는 적용하지 못한다. 그러므로 본 연구에서는 플라즈마의 열 평형을 이용하여 GMAW 공정의 아크 빛과 아크 길이 간의 관계를 유도하였다.

용접 아크는 전압 강하 특성에 따라 음극과 양극 강하 구역 (cathode and anode drop regions) 및 플라즈마의 세 구역으로 나누어 진다<sup>6)</sup>. 음극과 양극 강하 구역은 그 두께와 체적이 플라즈마에 비하여 매우 작으며 발생하는 열의 대부분이 모재나 용접봉에 전도된다. 그러므로 아크 체적의 대부분은 플라즈마로 구성되어 있으며 플라즈마에서 발생하는 복사열에 의하여 대부분의 아크 빛이 방출된다. 플라즈마는 아크 길이의 변화에 가장 민감하게 변화하므로 GTA 용접에서 용접 전압보다 깨끗한 아크 길이 신호를 발생하는 것으로 추정되었다<sup>3)</sup>.

아크가 안정되어 있는 평형 상태에서는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 플라즈마에서 발생하는 저항열 (joule heating) 은 전도와 대류 및 복사에 의한 열 손실과 같다.

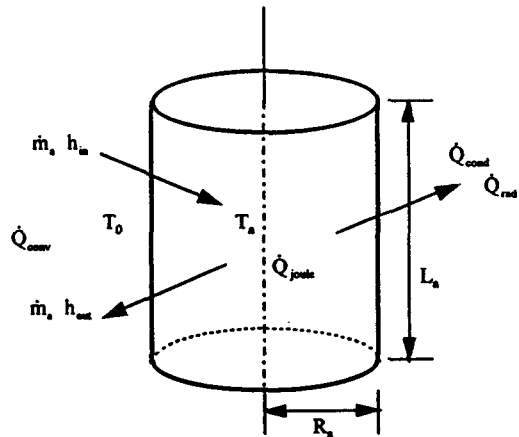


Fig. 1 Heat balance of cylindrical plasma

$$Q_{joule} = Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad} \quad (1)$$

위의 식에서 저항열은 용접 전류와 플라즈마의 전압 강하의 곱으로 나타낼 수 있다. 용접 전류는 current shunt 를 이용하여 측정이 가능하지만, 플라즈마 전압은 직접 측정이 불가능하므로 아래와 같이 Ayrton의 식을 이용하여 추정한다<sup>7)</sup>.

$$V_a = (V_A + V_C) + V_p = (k_1 + k_2 I_a) + (k_3 + k_4 I_a) L_a \quad (2)$$

이 때,  $V_p$ ,  $V_A$  그리고  $V_C$ 는 플라즈마, 양극 및 음극구역의 전압을 각각 나타내고,  $I_a$ 는 용접 전류,  $L_a$ 는 아크 길이,  $k$ 는 상수를 나타낸다. 양극과 음극의 전압은 아크 길이에 무관하므로 플라즈마 전압은 아크 길이와 용접 전류의 함수로 표현된다. 즉,  $V_p = (k_3 + k_4 I_a) L_a$ 이다. 이 관계를 이용하면, 저항열은 다음과 같이 표현된다.

$$Q_{joule} = I_a V_p = (k_3 + k_4 I_a) I_a L_a \quad (3)$$

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

$$Q_{cond} = x A_s \frac{T_a - T_o}{\delta_e} = 2 \pi x R_a \frac{T_a - T_o}{\delta_e} L_a \quad (4)$$

이 때,  $x$ 는 열전도율 (thermal conductivity),  $A^s$ 는 실린더의 옆면적 ( $= 2\pi x R_a$ ),  $\delta_e$ 는 길이 (effective length),  $T_a$ 와  $T_o$ 는 아크와 주변의 온도를 각각 나타낸다. 대류에 의한 열손실은 아크에서의 유동량  $\dot{m}_a$ 와 엔탈피,  $h$ 로 나타낼 수 있다 (Fig. 1). 아크의 유동량은 아크의 밀도, 속도 및 유동의 면적과 관련이 있으며, 유동 면적,  $A_{out}$ 이 실린더의 옆면적과 비례한다고 가정하면 대류에 의한 열 손실은 다음과 같다.

$$Q_{conv} = \dot{m}_a (h_{out} - h_{in}) \quad (5)$$

$$\dot{m}_a = \rho A_{out} V_{out} = \rho (\alpha A_s) V_{out} \quad (6)$$

이 때,  $\rho$ 는 아크의 밀도,  $v_{out}$ 은 속도,  $\alpha$ 는 비례상수를 나타낸다. 식 (6)을 식 (5)에 대입하면, 대류열은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{conv} = \rho (2\pi R_a) \alpha v_{out} (h_{out} - h_{in}) L_a \quad (7)$$

위의 식 (4)와 (7)에서 전도와 대류에 의한 열은 아크 길이에 비례하는 것을 알 수 있다.

저항열과 전도 및 대류에 의한 열로부터 복사열을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$Q_{rad} = ((k_3 + k_4 I_a) I_a - K) L_a = K^* L_a \quad (8)$$

$$K = 2\pi R_a \left\{ x \frac{T_a - T_o}{\delta_e} + \rho \alpha v_{out} (h_{out} - h_{in}) \right\} \quad (9)$$

위의 식에서  $K$ 는 상수이며 복사열은 아크 길이와 용접 전류의 함수이다. 식 (8)의  $K^*$ 는 용접 전류만의 함수이므로 정전류 (constant current) 전원을 사용하는 GTA 용접에 적용하면  $K^*$ 는 상수가 된다. 복사열의 일부는 아크 내에서 흡수되므로 측정된 아크 빛은 복사열의 일부가 방출된 결과이다. 아크 빛과 복사열이 비례한다고 가정하면, 아크 빛은 다음과 같다.

$$S = n Q_{rad} \quad (10)$$

이 때,  $S$ 는 아크 빛의 세기,  $n$ 은 비례상수를 나타낸다.

식 (8)의 복사열을 계산하기 위하여 아크 길이

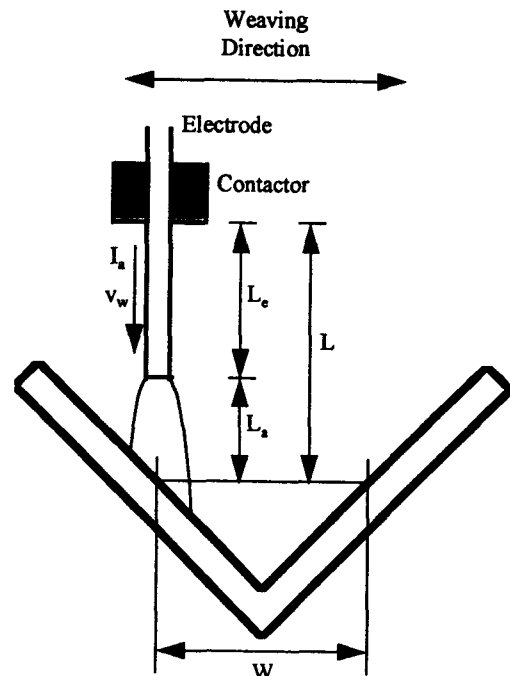


Fig. 2 Configuration of GMAW IN V-groove

에 관한 정보가 필요하다. 아크 길이는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 contactor와 모재의 거리, L에서 용접봉 돌출 길이 (electrode extension)로부터 구할 수 있다. 용접봉 돌출 길이의 변화는 용접봉 송급 속도 (wire feed rate)와 용접 전류와 돌출부의 저항열에 비례하는 용접봉의 용융 속도 (electrode melting rate)로부터 구할 수 있다.

$$\frac{dL_e}{dt} = v_w - (k_5 I_a + k_6 L_e I_a^2) \quad (11)$$

$$L_a = L - L_e \quad (12)$$

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

### 3. 용접선 추적용 신호처리 알고리즘

용접선 추적을 위하여 센서로 부터 얻은 신호를 처리하여 용접선의 위치를 추정하여야 한다. 이를 위하여 실시간에 수행이 가능한 이동 평균법 (moving averaging)<sup>8)</sup>, 최소 오차 자승법 (least square)<sup>1)</sup>과 적분법 (integration)<sup>2)</sup> 등의 신호처리 알고리즘이 사용되고 있다. 이동 평균법은 고주파 영역의 노이즈 (noise) 성분을 줄이는 필터의 역할을 하며, 아르곤 가스를 사용할 때 발생하는 비교적 깨끗한 신호에 대하여 적용이 가능하다. 그러므로 CO<sub>2</sub> 가스를 사용하여 신호에 노이즈 성분이 큰 경우에는 적용하기 곤란하다.

CO<sub>2</sub> 가스를 사용하는 경우에 적용하기 위하여 최소 오차 자승법이 개발되었다. 이 방법은 반 위빙 주기 (half weaving cycle)의 신호를 2차 함수로 맞춤 (fitting) 하여 그루브의 중심을 추정하며, 실시간의 용접선 추적을 위하여 계산 시간을 줄이기 위한 방법이 제시되었다. 적분법은 Fig. 3에 개략적으로 나타난 바와 같이 위빙 시 그루브의 중심에 대한 좌우의 신호를 시간에 따라 적분한 결과를 이용하여 용접선의 이탈량 (deviation)을 구한다. 적분법은 아르곤 가스를 사용하는 경우에 용접 전압을 측정하여 용접선을 추적하는 데 적용되었다. 그러므로 CO<sub>2</sub> 가스를 사용하는 경우나 용접 전류의 신호처리에 적용된 사례가 없다. 비례 제어기

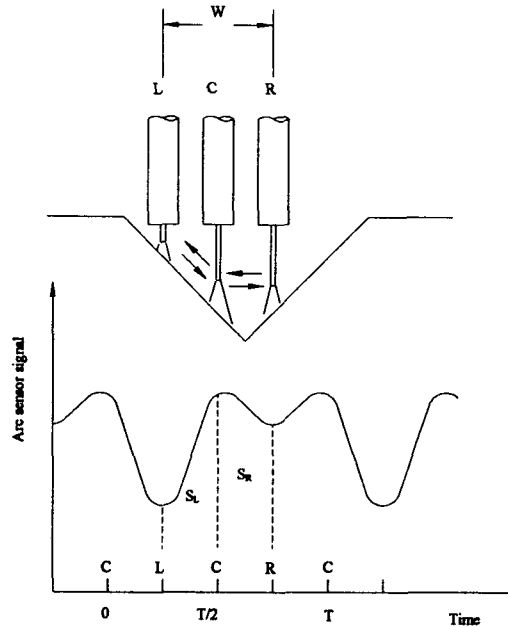


Fig. 3 Arc sensing by integration method

를 사용하는 경우, 이탈량과 비례 이득 간의 관계는 다음과 같다.

$$D = \frac{S_L - S_R}{K_p t_w} \quad (13)$$

이 때, D는 이탈량,  $K_p$ 는 비례 이득,  $t_w$ 는 위빙 시간의 절반,  $S_L$ 과  $S_R$ 은 위빙 신호 좌우의 적분값을 각각 나타낸다 (Fig. 3). 적분법은 원리가 간단하고 계산 시간이 짧다. 본 연구에서는 최소 오차 자승법과 적분법의 성능을 비례 제어기를 이용한 용접선 추적 실험 결과를 이용하여 비교하고자 한다.

### 4. 실험

아크 빛을 측정하여 모델링 결과와 비교하고, 아크 빛을 이용한 용접선 추적 실험을 수행하였다. 모델링 결과를 확인하기 위하여 깨끗한 신호가 필요하므로 아르곤 가스를 사용하였다. 용접선 추적 실험에서는 센서와 신호 처리 방법의 성능을

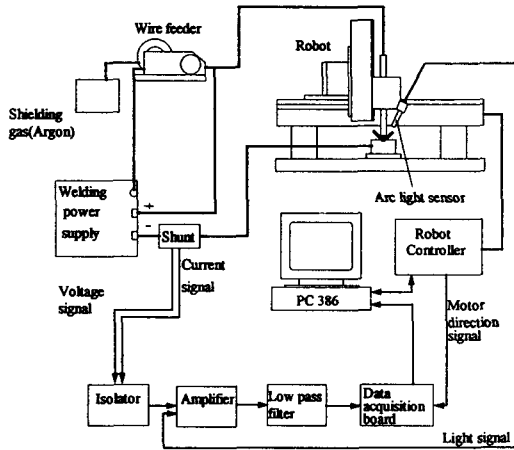


Fig. 4 Schematic diagram of experimental system

비교하기 위한 것이므로 CO<sub>2</sub> 가스를 사용하였다.

실험 장치는 Fig. 4 에 보인 바와 같이 인버터 용접기를 포함하는 GMA 용접 시스템, 3축 직교형 로봇 시스템, 아크 빛 센서와 신호처리 장치 및 PC386 컴퓨터로 구성되어 있다. 컴퓨터는 RS232 통신을 이용하여 로봇을 구동시킨다. 용접 전류는 current shunt를 이용하여 측정하였고, 용접 전압은 용접기 전원의 양극과 음극의 전위차를 측정하였다. 아크 빛 센서는 작은 구멍 (pin-hole) 을 통하여 아크 빛의 세기를 감소시킨 후, 렌즈에 의하여 수집된 빛을 광섬유를 통하여 photodiode에 전달하였다. 전달된 빛의 세기에 따라 전압 신호로 변환된다. 아크 빛, 용접 전류와 전압 신호를 cut-off frequency 가 15Hz인 2차 저주파 통과 필터 (2nd order low pass filter) 를 통과시켜 노이즈를 감소시켰다. 필터링된 신호와 인코더 (encoder) 의 토치의 위빙 방향 신호를 각각 100 Hz 로 동시에 샘플링 (sampling) 하였다. 샘플링된 자료로 용접선의 이탈량을 계산하여 토치의 위치를 보정하였다. 로봇의 명령과 각 신호에 대한 자료를 메모리에 저장하고, 용접이 끝난 후 디스크에 저장하였다.

직경 1.2 mm 인 강 용접봉을 이용하여 seam 의 길이가 300mm 인 V-그루브에서 위빙을 하며 직선 용접을 수행하였다. 이때 wire feedrate는 120 mm/s 이었다. 분위기 가스로 아르곤과 CO<sub>2</sub> 가스를 20 liter/min 로 공급하였고, 용접봉 이송 속도는 4

mm/s 이다. 모델의 확인과 위빙 속도의 영향을 관찰하기 위하여 아르곤 가스를 사용하였고 위빙 주기를 0.5, 1, 1.5, 2 Hz 로 하였다. 위빙 폭이 10 mm 이므로 평균 위빙 속도는 각각 10, 20, 30 그리고 40 mm/s 이다. 신호처리 알고리즘의 성능을 비교하기 위하여 CO<sub>2</sub> 가스를 사용하여 원래 토치의 궤적에서 5°, 10°, 15° 회전시킨 용접선을 추적하였다.

### 5. 결과 및 고찰

아르곤 가스를 사용하는 경우, 측정된 용접 전류와 아크 빛의 세기를 위빙 방향과 함께 Fig.5 에 나타내었다. 용접봉이 그루브의 중심에 접근하면, 아크 길이가 길어지므로 용접 전류는 감소하지만, 아크 빛의 세기는 증가한다. 식 (8) 에서 복사열은

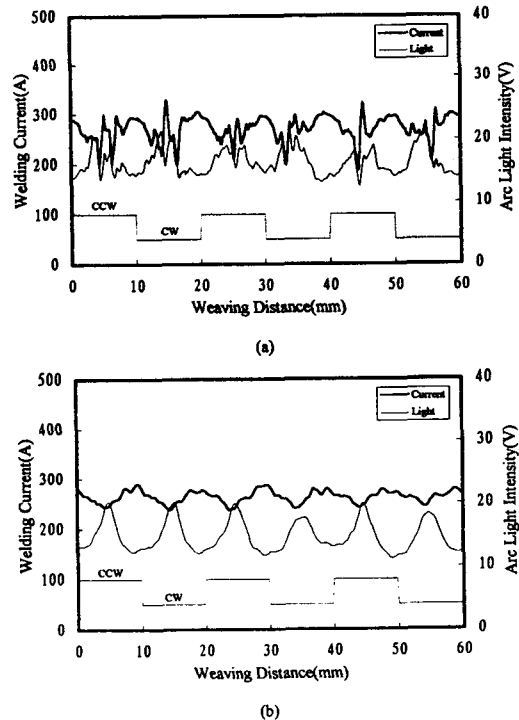


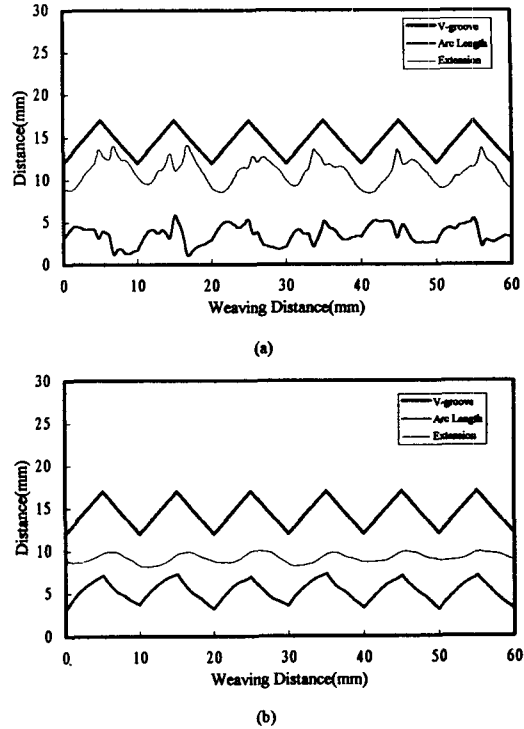
Fig. 5 Comparison of welding current and arc light intensity during weaving  
(a) 0.5Hz (b) 1Hz

아크 길이와 용접 전류의 함수임을 고려할 때, 아크 빛은 용접 전류에 비하여 아크 길이에 더 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 위빙 주기가 1 Hz 인 경우에는 (Fig. 5b), 0.5 Hz 에 비하여 (Fig. 5a) 신호의 질이 향상되었다. 위빙 주기가 1.5, 2Hz인 경우에도 위의 경향을 확인할 수 있었는데, 위빙 속도가 증가할 때 신호의 질이 좋아지는 이유와 다음과 같이 추정 할 수 있다. 위빙 속도가 증가하면 self-adjusting 효과에 의해 아크 길이가 일정하게 되기 전에 용접봉의 위치가 그루브 내에서 다음의 위치로 이동한다. 그러므로 아크 길이가 그루브 높이에 따라 변화하고 깨끗한 위빙 신호를 얻을 수 있다. 반대로 위빙 속도가 감소하면 정상상태 (steady state) 와 유사하게 되어 self-adjusting 효과가 크게 되므로 아크 길이가 그루브 형상과 무관하게 일정하게 유지되어 그루브 높이 변화에 따른 신호의 변화가 작아진다. 이와 같은 self-adjusting 효과를 입증하려면 용접봉의 용융과 용접기의 특성을 고려한 추가의 연구가 필요하다.

측정된 용접 전류 (Fig. 5) 와 식 (11), (12) 를 이용하여 아크 길이를 계산한 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. 계산에 사용된 상수 값은 Table. 1 에

**Table 1.** Values of parameters and constants

Variables	Value
$\alpha$	0.3
$\delta_c$	100 mm
$K$	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
$k_2$	0.307 V/A
$k_3$	0.6315 V/mm
$k_4$	$1.02 \cdot 10^{-5}$ V/A-mm
$k_5$	0.311 mm/sA
$k_6$	$4.63 \cdot 10^{-5}$ s <sup>-1</sup> A <sup>-1</sup>
$R_a$	3 mm
$T_a$	1200 K
$T_o$	300 K
$V_{out}$	50 m/s

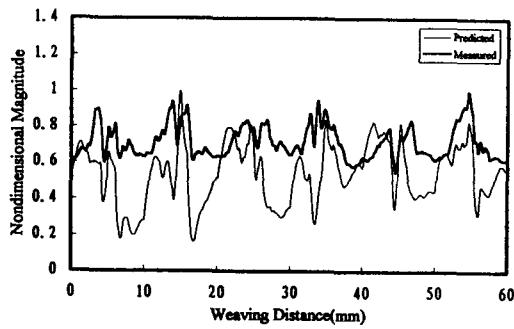


**Fig. 6** Predicted arc length and electrode extension during weaving  
(a) 0.5Hz (b) 1Hz

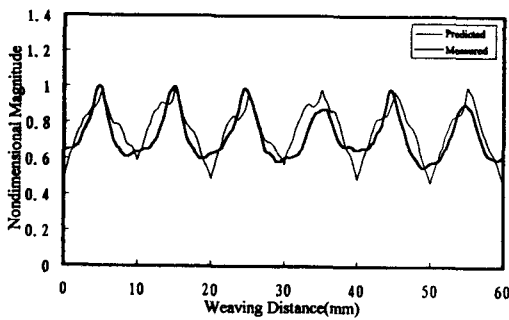
주어졌다<sup>7,9)</sup>. Fig. 6 에 나타난 바와 같이 위빙 주기가 1 Hz 인 경우 (Fig. 6b) 및 그 이상인 경우의 용접봉 돌출 길이의 변화는 0.5 Hz 인 경우 (Fig. 6a) 와 비교하여 상당히 작으며 그루브의 형상을 정확히 예측하였다. 이는 Fig. 5 에서 위빙 속도가 증가할 때 신호가 정확한 그루브의 높이 정보를 포함하기 때문이다. 위빙 속도가 감소하면 self-adjusting 효과가 증가하므로 아크 길이가 그루브 형상과 무관하게 일정하게 유지되어 그루브 높이에 관한 정확한 정보를 얻기 곤란하다.

Fig. 5 와 6 에 보인 용접 전류와 아크 길이에 대한 복사열을 식 (8) 과 (9) 를 이용하여 계산하였다. 계산된 복사열과 아크 빛의 세기를 각각의 최대값으로 나누어 무차원 수로 변환하여 Fig. 7 에 나타내었다. 위빙 주기가 0.5 Hz 인 경우에는 대략적인 추세가 일치하였고 (Fig. 7a), 위빙 주기가 1 Hz 인 경우에는 상당히 정확하게 실험값을 예측하

였다(Fig. 7b). 이 결과로부터 플라즈마의 열평형을 이용한 모델이 아크 빛의 세기를 비교적 정확하게 예측할 수 있으며, 아크 빛과 아크 길이의 관계를 이용하여 용접선 추적에 응용할 수 있다. 계산 결과 저항열이 전도나 대류에 의한 열에 비하여 상당히 크기 때문에 복사열은 저항열에 의하여 결정된다.



(a)



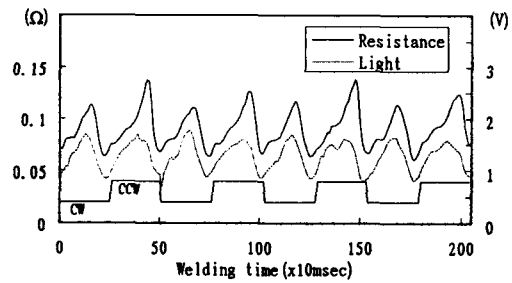
(b)

Fig. 7 Comparison between predicted and measured arc light intensity

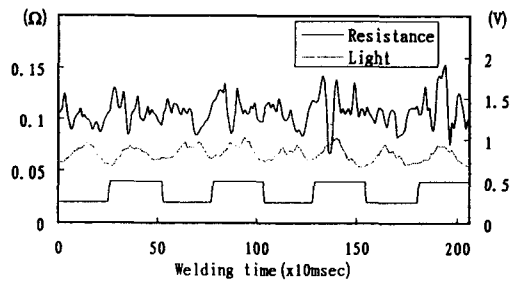
(a) 0.5Hz (b) 1Hz

CO<sub>2</sub> 가스를 사용하고 1 Hz 로 위빙하는 경우에 측정된 아크 빛과 용접 저항을 Fig. 8 에 나타내었다. 용접 저항은 정전압 용접기를 사용하므로 용접 전류의 역수이며 180 도의 위상차가 발생하는 외에는 큰 차이가 없다. 본 연구에서 용접 전류 대신 용접 저항을 사용한 이유는 용접 저항이 아크 빛의 세기와 위상차가 없으므로 비교하는 데 용이하고 용접선 추적 알고리즘에 수정이 필요없기 때문이다. 또한, 용접기에 기울기 특성이 있으면,

용접 저항은 용접 전류에 비하여 증폭되는 효과를 얻을 수 있다. Fig. 8 에서 나타난 바와 같이 CO<sub>2</sub> 가스를 사용하면 용접 저항 신호로부터 그루브의 형상을 판별하기 어렵다. 아크 빛의 경우에도 아르곤 가스의 경우와 비교하면 신호의 질이 떨어지지만, 대략의 그루브 중심을 판별할 수 있다. 그러므로 CO<sub>2</sub> 가스를 사용하는 경우에는 아르곤 가스에 비하여 일반적으로 신호의 질이 낮아지며, 최소 오차 자승법이나 적분법 등과 같은 알고리즘을 사용하여야 용접선의 위치를 추정할 수 있다.



(a)



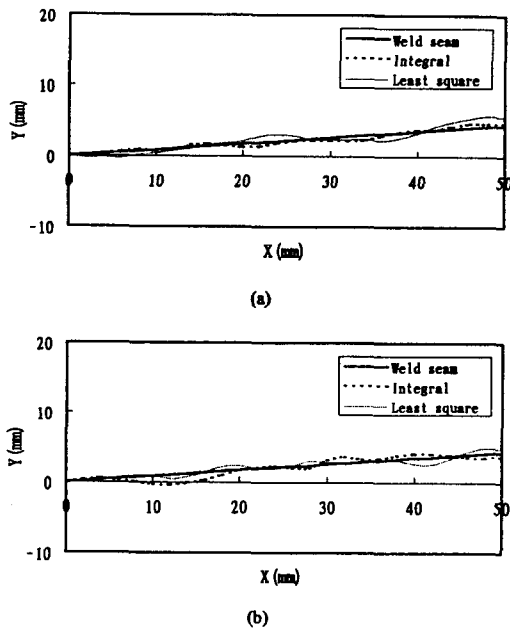
(b)

Fig. 8 Comparison of welding resistance and arc light intensity signals

(a) Argon (b) CO<sub>2</sub>

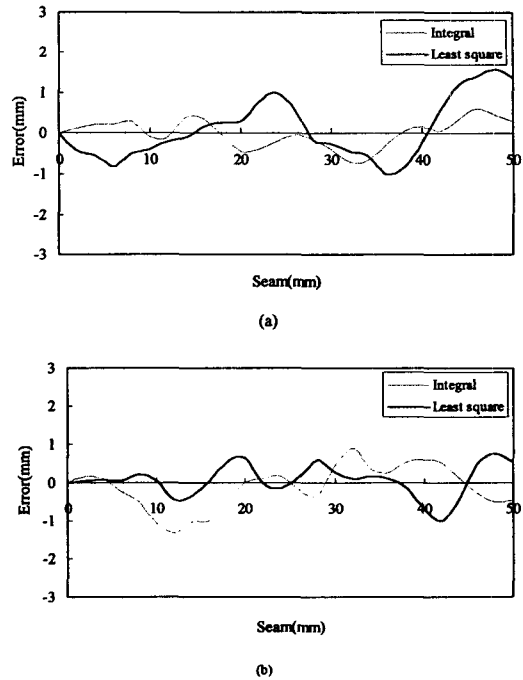
용접선 추적은 CO<sub>2</sub> 가스를 사용하여 최소 오차 자승법과 적분법을 사용하여 수행하였다. 용접선이 원래의 토치 경로에서 5 도 회전된 경우에 용접 저항과 아크 빛을 이용하여 용접선을 추적한 결과를 Fig. 9 에 나타내었다. 그림에서 x 축은 용접봉 진행 방향, y 축은 위빙 방향을 나타낸다. 이 때의 추적 오차를 Fig. 10에 나타내었는데, 각 경우에 대

하여 대략 1.5 mm 오차 내에서 용접선을 추적할 수 있음을 확인할 수 있다. 그러므로 CO<sub>2</sub> 가스를 이용하면 아르곤 가스에 비하여 신호의 질이 낮아 지지만 최소 자승법이나 적분법에 의한 신호처리를 통하여 비교적 정확하게 용접선의 위치를 추정할 수 있다. 최소 오차 자승법과 적분법을 사용했을 때, 거의 동일한 오차 내에서 용접선을 추적하였으므로 두 신호 처리 방법의 성능은 비슷하였다. 또한 용접선이 10도나 15도 회전된 경우에도 유사한 양상을 확인할 수 있었다.



**Fig. 9** Performance of seam tracking deviated by 5° using CO<sub>2</sub> gas  
 (a) welding resistance  
 (b) arc light intensity

연구 결과로부터 CO<sub>2</sub> 가스를 사용하는 경우에 아크 빛을 이용하면 신호의 질이 향상된다. 그러나 GTA 용접에서와 같이 아크 센서를 대체할 만큼 월등한 성능을 보이지 못하였다. 또한 아크 빛이 장애물에 의하여 가려지는 occlusion 등의 문제점 등을 고려할 때 용접 전류를 사용하는 것이 바람직하며, 신호의 질이 떨어지는 문제는 신호처리로 극복할 수 있는 것으로 판단된다. 신호 처리



**Fig. 10** Seam tracking error deviated by 5° using CO<sub>2</sub> gas  
 (a) welding resistance  
 (b) arc light intensity

방법으로는 최소 오차 자승법과 적분법이 유사한 성능을 나타내었으나, 적분법이 계산 시간이 짧고 알고리즘이 간단하므로 최소 오차 자승법에 비하여 유리하다고 판단된다.

## 6. 결 론

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

(1) 아크 빛의 세기를 플라즈마의 열평형으로부터 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 좋지 않으며 그루브의 높



이 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. 김재웅, 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. Drew, P.N. and Deam, R.T. : Relationship between arc light, current and arc length in TIG welding, Int. Conf. on Advances in Cutting Processes, (1989)
5. Cram, L.E. : A model of the cathode of a thermionic arc, J. of Physics D: Applied Physics, Vol. 16, (1983), pp.1643-1650
6. Lancaster, J.F., The physics of welding, Pergamon Press, (1985)
7. 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
8. Cook, G.E., et al. : Analyzing arc welding signals with a microcomputer. Conf. Recent IEEE Industry Applications, Society Annual Meeting, (1982), pp.1282-1288.
9. P. G. Jnsson, T. W. Eagar, and J. Szekey : Heat and metal transfer in gas metal arc welding using argon and helium, Metallurgical and Materials Transactions B., Vol. 26B, April, (1995), pp. 383-395