

수평필릿용접에서 회전아크를 이용한 아크센서에 관한 연구

A study on arc sensor using rotating arc in horizontal fillet welding

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 Hz이상의 위빙 주파수를 가질 수 없으나 회전아크를 이용한 아크센서는 전극을 고속으로 회전시켜 위빙 주파수를 수십 Hz이상으로 높여 줄 수 있으며, 기존의 아크센서에 비해 용접속도가 빨라 self-regulation이 충분히 일어나지 못하기 때문에 팁-모재간의 거리차에 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.

회전아크를 이용한 용접장치는 아크센서로서의 우수한 특성과 함께 아크가 고속으로 회전하기 때문에 원심력의 영향으로 와이어의 용융속도가 커지고, 용접속도가 커 필릿 용접에서 효율을 높일 수 있을 뿐 아니라 narrow gap welding 등에도 이용되고 있다^{1,2)}.

본 연구에서는 이제까지 개발된 아크 회전 메카니즘보다 간단한 구조를 가진 회전 메카니즘을 통하여 회전아크 발생장치를 구현하고, 팁-모재간의 거리가 빠른 속도로 변할 때 팁-모재간의 거리와 전류사이의 관계를 모델링하고 이를 이용하여 용접선 추적에 이용하였다.

2. 본론

용접전류와 팁-모재간의 거리 사이의 관계를 수학적으로 모델링할 수 있다면 이 관계를 이용하여 용접선의 추적과 용접 토치의 높이 제어에 유용하게 이용할 수 있지만, 위빙을 이용한 아크센서의 수학적 모델링은 정상상태에서 와이어의 송급속도와 용융속도가 같다고 가정하여 용접 전류와 팁-모재간의 거리사이의 관계를 구하였다³⁾.

팁-모재간의 거리가 상당히 빨리 변한다면 정상상태를 이루지 못하기 때문에 용접속도에 따라 와이어의 용융 속도가 달라진다. 회전아크를 이용한 아크센서는 고속으로 회전하는 아크에 의해 팁-모재간의 거리가 시간에 따라 크게 변하게 되므로 정상상태를 이루지 못하고 이를 모델링하기 위하여 와이어의 송급속도와 용융속도가 다른 수학적 모델링이 요구된다. GMA 용접을 모델링하기 위하여 그림 1과 같이 관계된 인수를 나타내었다.

대류에 의한 열전달을 무시할 때 용접 중 발생하는 줄(joule)열 및 아크열의 영향을 에너지 보존 법칙을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다⁴⁾.

$$w_m = \gamma_1 j + \gamma_2 L_e j^2 \quad (1)$$

와이어 들출에서 전압강하와 아크내에서 전압강하는 다음과 같이 나타내어질 수 있다^{5,6)}.

$$V_e = \lambda_1 L_e (I / A_w) - \lambda_2 w (A_w / I) \quad (2)$$

$$V_a = \beta_1 I + \beta_2 + \beta_3 / I + \beta_4 L_a \quad (3)$$

GMA용접에서 이용하는 정전압 용접 전원에서 용접 전류와 용접 전압의 관계는 다음과 같이 나타내어질 수 있다.

$$\frac{dV_c}{dI} = -n \quad (4)$$

시간에 따라 팁-모재간의 거리가 급격히 일어나는 경우 와이어의 용융속도를 와이어 송급속도에 가중치, a 를 주어 $w_m = w(1+a)$ 로 나타낸다면 팁-모재간의 거리와 전류사이의 관계식은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 표 1과 같이 인수를 설정하여 식 (5)에서 구해지는 a 와 dI/dL_c 관계를 그림 2에 나타내었다.

$$\frac{dI}{dL_c} = \frac{-\beta_4 \gamma_2 I^3}{(\beta_1 + n) \gamma_2 I^3 + w A_w [\gamma_2 \lambda_2 - \lambda_1 (1+a)] I - \gamma_1 \beta_4 A_w I - \beta_3 \gamma_2 I + 2 \beta_4 A_w^2 w (1+a)} \quad (5)$$

팁-모재간 거리가 시간에 따라 변하는 속도에 따른 가중치의 변화를 알아보기 위하여 팁-모재간 거리가 선형적으로 작아지는 모재 위를 직선으로 bead-on-plate용접을 수행하여 전류를 측정하고, 위빙을 통하여 더 큰 dL_c/dt 의 값에 대한 값들을 보충하여 그 때 a 와 dL_c/dt 와의 관계를 지수함수를 이용하여 비선형회귀로 식 (6)과 같이 나타내고, 그림 3에 이를 도시하였다.

$$a = -1.0 + 0.661 \times e^{\frac{dL_c/dt}{6.539}} + 0.412 \times e^{\frac{dL_c/dt}{128.9}} \quad (6)$$

실제 회전아크를 이용하여 용접을 수행할 때는 용접토치가 이미 용접한 곳을 다시 지나게 되므로 용융풀의 영향을 받게 된다. 이 때, 형성되는 용융풀의 형상은 FDM해석을 통하여 그림 4와 같이 나타나게 된다.

용융풀의 형상을 고려하여 식 (5)와 식 (6)을 이용하여 3.5 mm 직경의 회전아크가 발생될 때 용접전류의 파형의 크기와 회전속도와의 관계를 구하여 참고문헌 1의 실험결과와 함께 그림 5에 나타내었다.

기존의 회전아크를 발생시키는 회전 메커니즘은 주로 외부의 모터를 회전시키고 기어를 통하여 전극을 회전시키는 구조를 가지고 있었다. 이 때, 회전하는 전극의 용접 팁 끝에서 와이어가 편심될 수 있도록 편차(offset)를 주어 전극을 회전시키거나 전극자체가 회전축에 기울어져 있어 전극을 회전시키는 방법 등이 제안되었다¹⁾. 본 연구에서는 모터를 전극 외부에 위치시키지 않고, 와이어가 모터 내부를 통과할 수 있도록 그림 6과 같이 모터 축을 대신한 가이드를 따라서 진행한 와이어가 전극 팁에서 편심될 수 있도록 편차를 주어 아크를 회전시키는 장치를 개발하였다. 이 장치는 구조적으로 간단하고, 용접 노즐 내부에 회전 장치를 구현할 수 있었으며 그림 7과 같이 용접 로봇의 토치에 회전 메커니즘을 장착하여 용접실험을 수행하였다. 회전 직경 5mm로 설정하여 회전아크를 발생시켰을 때의 전류 파형은 그림 8에 나타내었으며, 이를 이용한 용접선 추적실험의 결과를 그림 9에 나타내었다.

3. 결론

(1) 팁-모재간의 거리가 상당히 빨리 변하여 self-regulation이 충분히 일어나지 않는 경우 와이어의 용융속도가 와이어 송급속도와 같지 않으므로 실험적으로 가중치를 구하고 이를 이용하여 회전아크에서의 팁-모재간의 거리와 용접전류사이의 관계를 수학적으로 모델링하였다.

(2) 외부 모터의 회전을 기어로 전달시켜 전극을 회전시키는 회전메커니즘과 달리 모터내부를 통과하는 와이어 가이드를 통해 와이어가 송급되면서 전극 팁 끝에서 회전아크를 일으키는 간단한 메커니즘을 용접 토치의 끝에 부착하여 회전아크 용접 시스템을 개발하였다.

(3) 수학적으로 모델링한 팁-모재간의 거리와 전류와의 관계를 이용하여 용접선을 자동추적하는 아크센서를 개발하였다.

Reference

1. Y. Sugitani, "Development and Application of Automatic High Speed Rotation Arc Welding", Welding International, May, 1991, pp.577-583.
2. H. Nomura, Y. Sugitani and Y. Kobayashi, "Narrow Gap MIG Welding Process with High Speed Rotating Arc", International Institute of Welding Document IIW-SG212-527-82.
3. 김재용, "GMA 용접에서 아크길이의 특성을 고려한 용접부의 열 및 유체유동 해석과 용접선 자동추적에 관한 연구", 한국과학기술원 정밀공학과 박사학위 논문, 1991.
4. A. Lesnewich, "Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielded Metal Arc Welding. Part1: Control of Electrode Melting Rate", Welding Journal, 37(8), 1958, pp.343s-353s.
5. E. Halmoy, "Wire Melting Rate, Droplet Temperature, and Effective Anode Melting Rate", Arc Physics and Weld Pool Behavior, The Welding Institute, Cambridge, 1980, pp.49-54.
6. G. E. Cook. "Robotic Arc Welding", IFS Publication, Spring-Verlag, pp. 188-194.

Table 1. Values of parameters and constants

λ_1	$1.2 \times 10^{-5} (\Omega \cdot \text{mm})$	β_4	0.74 (V/mm)
λ_2	$3.98 (\text{J}/\text{mm}^3)$	γ_1	0.2308 (mm/A · sec)
β_1	0.013 (V/a)	γ_2	$7.96 \times 10^{-3} (\text{mm}^2/\text{A}^2 \text{ sec})$
β_2	5.2 (V)	n	0.02(V/A)
β_3	120 (V · A)	w	148(mm/sec)

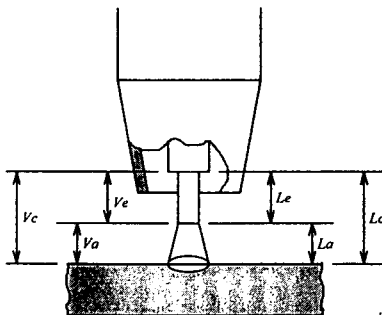


Fig. 1 Definition of GMAW parameters

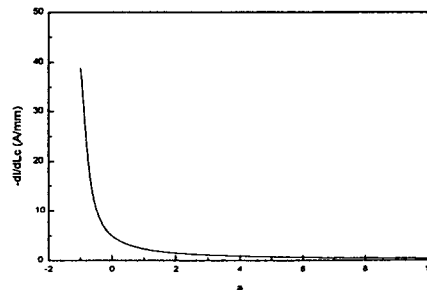


Fig. 2 Relation between dL_e/dL_c and weighting factor, a

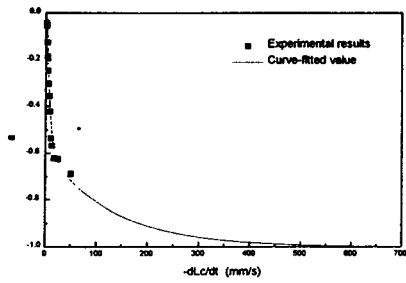


Fig. 3 Nonlinear regression between dL_c/dt and weighting factor, a



Fig. 4 Calculated weld bead shape

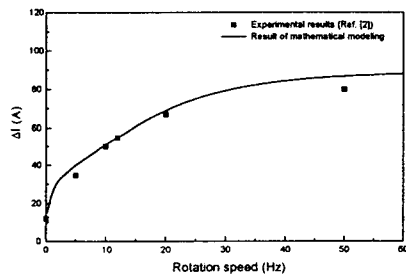


Fig. 5 Comparison between experimental results and mathematical model considering molten pool

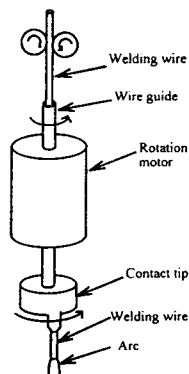


Fig. 6 Schematic diagram of rotation mechanism

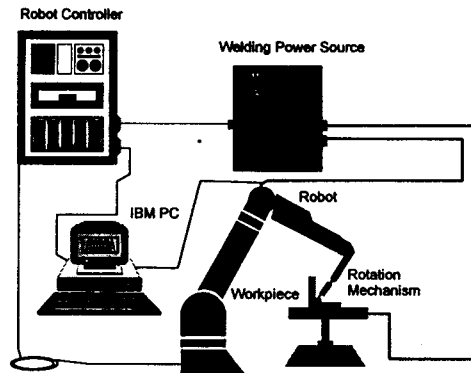


Fig. 7 Schematic diagram of experimental apparatus

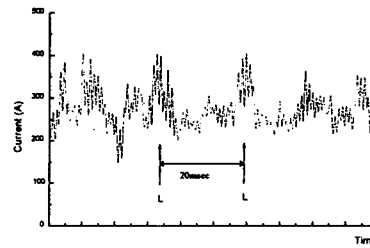


Fig. 8 Current waveform for high-speed rotating arc (1.2mm diameter solid wire; 20%CO₂-Ar; $w=390\text{ipm}$, $V_c=32\text{V}$, $V_s=7\text{mm/sec}$, $L_c=20\text{mm}$, $N=50\text{Hz}$, $D=5\text{mm}$,)

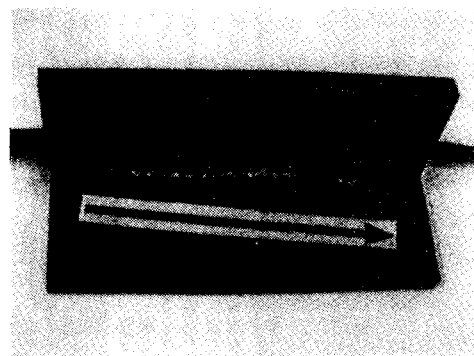


Fig. 9 Photograph of fillet weldment in seam tracking test ($I=260\text{A}$, $V_c=30\text{V}$, $N=35\text{Hz}$, $V_s=7\text{mm/s}$, $D=5\text{mm}$)