

研究論文

大韓熔接學會誌
第8卷第1號 1990年 3月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol.8, No.1, Mar., 1990

혼합가스 GMA용접에서 아크신호를 이용한 용접선추적에 관한 연구

허장욱* · 김재웅** · 나석주** · 이승영***

A Study on Seam Tracking with an Arc Signal in GMA Welding Process with Mixed Gas

J.W. Hur*, J.W. Kim**, S.J. Na**, S.Y. Lee***

Key Words : Arc Sensor(아크센서), GMAW(가스 메탈 아크용접), Multipass Welding(다층용접), Tip to Workpiece Distance(팁-모재간 거리), Weld Current(용접전류), Velocity Controller(속도제어기), Proportional and Integral Gain(비례적분이득)

Abstract

The robotic welding has been adapted positively in many welding shops for the purpose of improving the welding efficiency and liberating operators from the severe working atmosphere.

But for a large-size structure with thick plates like ship-building and every kind of plants manufacturing, the application of the arc welding robots is not established yet. The reason is assumed that the conventional arc welding robots are not adaptive for multi-pass welding of thick plates whose grooves are not so accurate. As one solution to this problem, a guidance system which uses the welding arc itself as a sensor is largely used.

In this study the velocity controller which changes the tip to workpiece distance for regulating the weld current was applied to track the weld line and guarantee the quality of a weld joint.

To do this, a model using the relationship between welding current and tip to workpiece distance was proposed. The proportional and integral gain of velocity controller were determined by using the computer simulation of the control system, and the simulation results compared with the experimental ones.

It was revealed that the developed control system using the arc sensor principle has a good capability of tracking the weld joint, although some more studies will be needed to refine the model of arc current.

* 국방부
** 정회원, 한국과학기술원 생산공학과
*** 삼성중공업(주) 기계전자연구소

1. 서 론

용접공정은 인체에 유해한 가스 및 광선의 발생 등으로 인해서 악조건의 작업 환경을 가지고 있으며 균일한 품질 유지 및 생산성의 향상을 위해서는 공정의 자동화가 필수적으로 요구된다.

용접공정의 자동화에 있어서 용접선의 자동추적은 큰 비중을 차지하고 있기 때문에, 여러가지의 센서 개발 및 적용에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 이중 아크센서는 용접시의 전압 또는 전류 신호를 이용하여 용접선을 추적하는 것으로¹⁻⁴⁾, 용접토치에 부착되는 별도의 감지장치가 필요없고, 주요기능이 아크의 특성을 이용하는 소프트웨어(software)로 이루어져 제작비가 비교적 저렴하다. 그러나 용접토치가 반드시 위빙(weaving)을 하여야 하므로 박판금속의 용접에는 적용이 곤란하며, 용접조건에 따라 다소 영향을 받는 단점이 있다⁵⁾.

GMA 용접은 보호가스의 종류에 따라 MIG(Metal Inert Gas)용접, MAG(Metal Active Gas)용접과 CO₂가스 용접으로 세분되어 불려지고 있으며, 와이어 형태의 용가재를 전극으로 사용하여 아크열에 의해 연속적으로 공급되는 용가재와 모재가 녹아 용접부를 접합시키는 용접법이다. 이 용접법은 탄소강, 합금강 및 알루미늄 합금의 용접에서 후판을 용접하는데 적합한 용접법이며, 용접기는 정전압 형태의 전원공급 장치로 되어있어 팁-모재간 거리가 길어지면 전류는 감소하며 짧아지면 전류는 증가한다.

용접토치가 용접접합부의 개선면 내에서 위빙할 때와 같이 용접선에 대해 수직방향으로 진행하면 현재의 용접전류가 기준전류와 차이를 갖게 되며, 그 차이를 보상하도록 높이방향의 모터를 구동시켜 항상 일정한 전류신호를 갖도록 한다. 이때 기준전류는 용접접합부 중심에서의 전류값을 이용한다. Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 용접토치 높이가 일정수준(E₀)에 도달하게 되면, 위빙축의 모터는 반대로 회전하여 용접선을 추적하게 된다⁶⁾.

본 연구에서는 GMA 용접시 팁-모재간 거리와 용접전류와의 관계를 체계적으로 분석한 후 용접선 추적시스템의 안정성(stability)과 용접품질(weld quality)의 향상을 고려한 제어 시스템을 구성하였다.

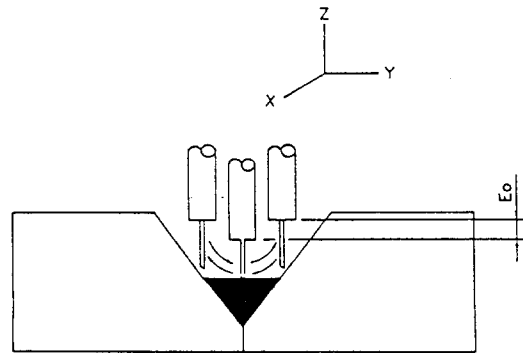


Fig. 1 Principle of automatic seam tracking control with arc sensor

2. 전류신호 측정실험

2.1. 실험장치 및 방법

전체 제어시스템에 대한 개략도를 Fig. 2에 나타내었으며, 본 실험에서는 용접선방향 주행축(X축)만을 구동시켜 션트(shunt)저항으로부터 전류값을 측정하였다. 주요 실험장치로서는 GMA 용접기, 직교 3축 구동장치, 마이크로 컴퓨터로 구성되었으며, 외부접속기기(interfacing card)로서는 상품화되어 있는 ADC(analog to digital converter) 1개와 DAC(digital to analog converter) 3개를 사용하였다. 잡음(noise)신호를 제거하기 위하여 15Hz의 절단주파수를 갖는 저역통과 필터(LPF: low pass filter)를 사용하였다. 또한 펄스모터의 구동을 위하여 V/F converter를 사용하였다. 보호가스(shielding gas)는 80%Ar-20%CO₂ 혼합가스를 사용하였다.

용접조건은 팁-모재간 거리가 20mm일 때 용접전류가 300A 되도록 와이어 송급속도를 고정하였으며 용접전압은 30V로 하였다. 이와 같은 용접조건에서 팁-모재간 거리를 변화시켜 용접전류를 측정하였다.

2.2. 용접전류신호의 평균화(averaging)

측정된 용접전류 신호는 과거의 전류에 대해 어느 정도의 신뢰도가 유지되어야 한다. 실험 프로그램에서 과거 전류값의 저장과 계산시간의 단축을 위하여 평균치를 순환적 관계(recursive relationship)로 표현하는 것이 바람직 하며, 이에 적합한

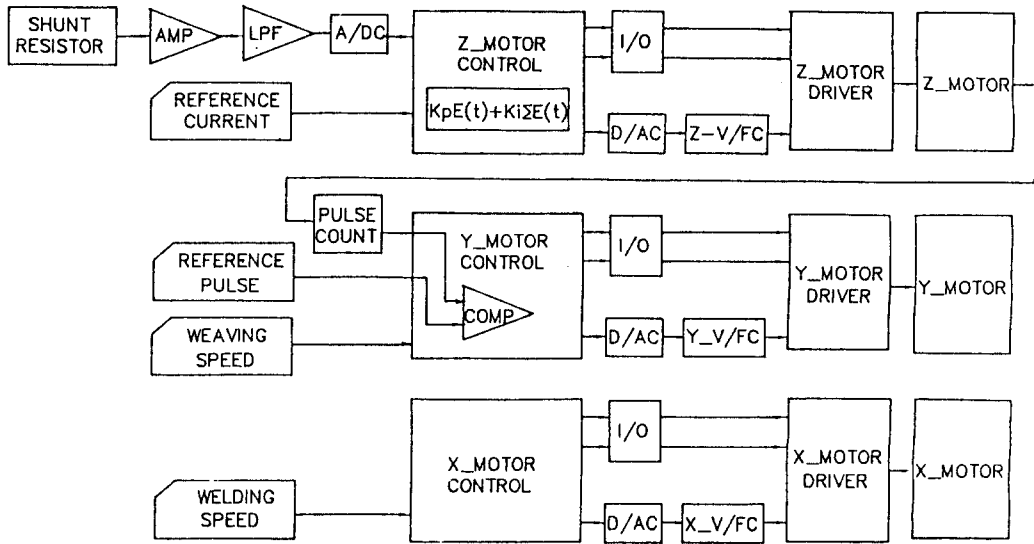


Fig. 2 Schematic diagram of the seam tracking control system

것으로 본 연구에서는 가중 이동평균(weighted moving average)의 하나인 지수평활법(exponential smoothing)을 이용하였다.

지수평활법에 의한 관계식은 다음과 같다.

$$V_{(n)} = (1-\sigma) V_{(n-1)} + \sigma X_{(n)}, \quad \sigma < 1 \quad (1)$$

여기서,

σ : 가중치 (weighting factor)

$V_{(n-1)}$: 전 이동 평균값 (present moving average value)

$X_{(n)}$: 입력 값 (input value)

$V_{(n)}$: 새로운 이동 평균값 (new moving average value)

(1)식에서 $V_{(n-1)}$ 을 $X_{(i)}$ 로 표시하면 다음과 같다.

$$V_{(n)} = \sigma X_{(n)} + \sigma(1-\sigma) X_{(n-1)} + \sigma(1-\sigma)^2 X_{(n-2)} + \dots + \sigma(1-\sigma)^{n-1} X_{(1)} \quad (2)$$

식(2)에서 n 이 충분히 크면 계수들의 합이 1이 되어 $V_{(n)}$ 은 가중 평균치가 되는 것을 알 수 있다.

가중치 σ 는 용접공정(welding process)과 용접 조건들에 의해 최적의 값으로 선정되어야 한다. 실험결과 LPF를 통과한 전류신호가 Fig. 3에 가

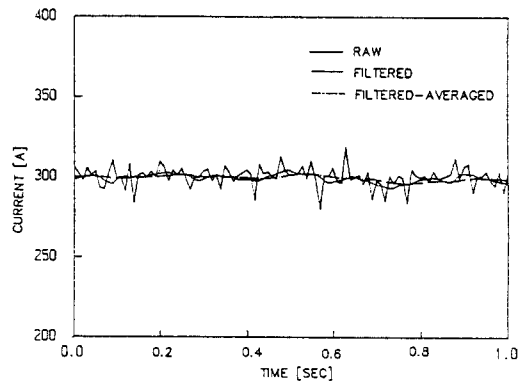


Fig. 3 Comparison of raw, filtered and filtered-averaged current signals

는실선으로 되어 있으며 평균전류에 대한 최대편차가 10A정도이다. 그러나 위빙시의 반전되는 위치에서의 토치높이를 개선부 중심에서의 토치높이에 대해 1.5-2.0mm로 예상하므로 평균전류에 대한 최대전류의 편차가 5A 정도가 되는 가중치를 실험에 의해 1/8로 결정하였다. 식(1)을 이용하여 LPF를 통과한 전류신호의 이동평균한 결과를 Fig. 3에 일점쇄선으로 나타내었다.

3. 용접전류와 팁-모재간 거리의 상관관계

3.1. 용접전류와 팁-모재간 거리에 대한 모델

용접전압(V)은 아크전압(V_a)과 돌출용접봉 전압강하(V_e)의 합으로 표시될 수 있다고 하였을 때, E. Halmoy⁹⁾는 돌출용접봉의 전압강하(V_e)를 식(4)와 같이 나타내었다.

$$V = V_e + V_a \quad (3)$$

$$V_e = R_{avg} \frac{L_e}{A} \quad (4)$$

여기서,

R_{avg} : 돌출 용접봉의 평균비저항 (ohm-mm)

L_e : 용접봉의 돌출길이 (mm)

A : 용접봉의 단면적 (mm)

H. Fujimura¹⁰⁾는 식(5)와 같이 아크전압(V_a)을 나타내었다.

$$V_a = k_1 + k_2 L_a + k_3 I + k_4 I L_a \quad (5)$$

여기서,

L_a : 아크길이 (mm)

k_1, k_2, k_3, k_4 : 상수

전체 전압강하(V)를 식(4)와 식(5)를 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V &= V_e + V_a \\ &= R_{avg} \frac{L_e}{A} + k_1 + k_2 L_a + k_3 I + k_4 I L_a \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)을 시간에 대해 미분하고 용접기의 정전압 특성 ($\frac{dV}{dt} = 0$)을 이용하면 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= 0 \\ &= R_{avg} \frac{1}{A} \frac{dL_e}{dt} + k_2 \frac{dL_a}{dt} + k_3 \frac{dI}{dt} \\ &\quad + k_4 I \frac{dL_a}{dt} + k_4 L_a \frac{dI}{dt} \end{aligned} \quad (7)$$

또한 팁-모재간 거리(L)는 아크길이(L_a)와 와이어 돌출길이(L_e)의 합으로 표시할 수 있으므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

GMA 용접에서 시간에 대한 아크길이의 변화율은 시간에 대한 돌출길이의 변화율 보다 훨씬 작아서 무시할 수 있기 때문에 시간에 대한 팁-모재간 거리의 변화율은 시간에 대한 돌출길이의 변화율로 볼 수 있으므로¹¹⁾, 식(8)를 시간에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dL}{dt} &= \frac{dL_a}{dt} + \frac{dL_e}{dt} \\ &\cong \frac{dL_e}{dt} \end{aligned} \quad (9)$$

식(7)과 식(9)를 이용하여 다시 정리하면 식(10)과 같다.

$$\frac{dI}{dt} \cong - \frac{R_{avg}}{A(k_3 + k_4 L_a)} \frac{dL}{dt} \quad (10)$$

식(10)을 다시 적분을 수행하고 정리하면 식(11)과 같다.

$$\begin{aligned} I &\cong - \frac{R_{avg}}{A(k_3 + k_4 L_a)} \cdot L + C_1 \\ &= C_1 - C_2 L \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, C_1 : 적분상수

$$C_2 = \frac{R_{avg}}{A(k_3 + k_4 L_a)}$$

3.2. 실험결과 및 검토

팁-모재간 거리 20mm에서 300A를 나타내는 와이어 송급속도(414in/min)를 그대로 유지하고서, 팁-모재간 거리를 10mm에서 30mm까지 1mm씩 변화시키면서 절단주파수가 15Hz인 LPF를 통과한 전류신호를 측정하여 Fig.4에 나타내었으며, 팁-모재간 거리변화에 대하여 전류값이 직선적으로 변화함을 알 수 있어 1차 최소자승법을 사용하여 관계식을 구하면 식(12)와 같다.

$$I = 393.5 - 4.74L \quad (12)$$

여기서 L 은 팁-모재간 거리를 나타낸다. 식(12)는 이론적으로 유도해낸 용접전류와 팁-모재간 거리의 관계식인 식(11)과 같은 형태를 나타내고 있으며, 위 식으로부터 팁-모재간거리가 1mm 변화할 때 용접전류의 변화는 4.74A임을 알 수 있으며 이 결과를 시스템 모델링에서 데이터로 사용하였다.

Fig. 5에 60°의 경사면에 대해 모델링한 전류신호를 가는 실선으로 나타내었으며, 토치가 높이 방향으로 고정된 상태에서 실제 경사면을 지나갈

때의 전류신호를 굵은 실선으로 나타내었다. 위 결과로부터 경사면이 상향일 때보다 하향일 때 더 용접전류신호가 불안정함을 알 수 있었는데, 이는 하향용접시 용융금속의 흘러내림이 경사면상으로 발생했기 때문이라고 사료되며, 전류신호가 모델링 결과와 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나 상향 경사면일 경우는 계속적으로 용융물이 쌓여가므로 경사면상에서 흘러내림이 발생하지 않고, 실험결과도 모델링한 결과와 유사함을 알 수 있었다.

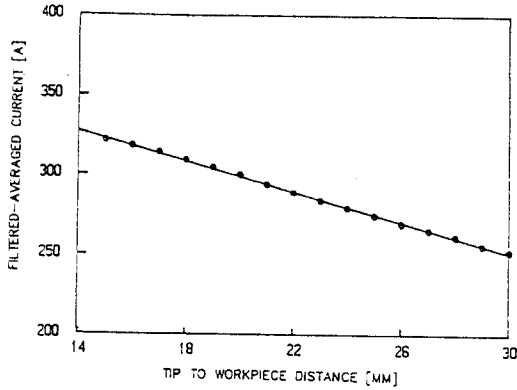
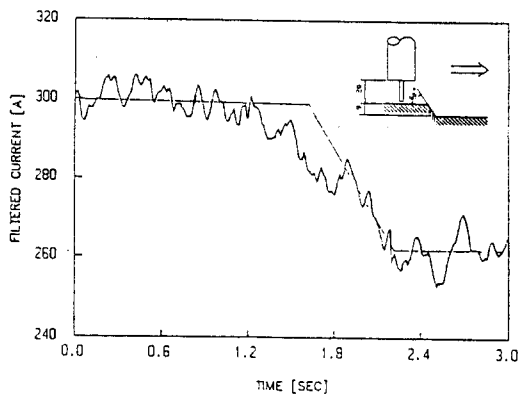


Fig. 4 Current value to change of static tip-workpiece distance

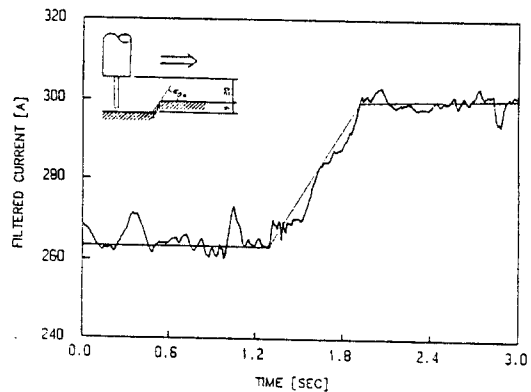
4. 아크센서 시스템의 개발

4.1. Z-축 속도 제어기(controller)설계

용접토치가 개선부 내에서 위빙할 때 용접전류의 변화에 따라 높이방향 변위를 조정해야하는데,



(a) 60° downslope



(b) 60° upslope

Fig. 5 Filtered current signal for linear tip-workpiece change

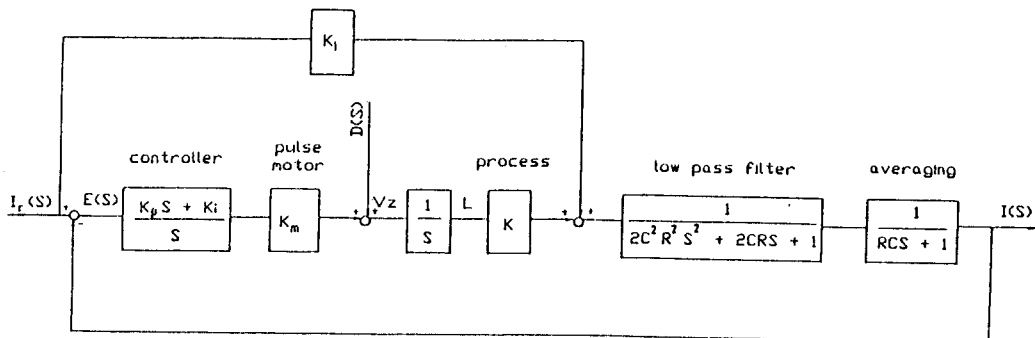


Fig. 6 Block diagram of the torch height control system

본 시스템에서는 그 속도를 제어하는 것이 목적이므로 이에 상응한 제어기 설계가 요구된다.

Z-축 속도제어기의 블록선도는 Fig. 6과 같으며, 팁-모재간 거리의 변화에 따른 용접전류를 나타내는 식(12)에서 두변수 사이에는 서로 선형적인 비례관계가 있으므로 그 비례상수를 K 로 하였고, $K1$ 은 절편값을 결정해주기 위한 상수이다. $D(S)$ 는 경사면에서도 토치 이송속도에 의한 팁-모재간 거리의 변화율을 나타내며, 또한 Z-축 속도제어기는 $D(S)$ 에 의한 정상상태의 오차와 안정성을 고려하여 전류의 오차에 대한 비례적분기(PI)를 적용하였다. 전류의 오차를 작게할 수 있는 비례적분 제어기의 비례제어 상수 Kp 와 적분제어 상수 Ki 는 먼저 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션(simulation)으로 결정하여 이를 실험결과와 비교하였다.

4.1.1. 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 이득(gain) 선정

컴퓨터 시뮬레이션에 의한 이득선정은 시스템 모델링에서의 선형화 및 모터의 동특성 무시등을 감안하여 적정이득의 근사치를 구하는 것을 목적으로 하였다. 시스템의 안정성을 고려하여 근래적에 의해 비례제어상수(Kp)를 먼저 선정한 후 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 적분제어상수(Ki)를 결정하였으며, 비례제어상수의 변화에 따른 응답을 조사하였다.

비례 제어기를 사용하였을 때 Fig. 6의 블록선도에서 루프(loop)전달함수를 구하면 식(13)과 같다.

$$G(s)H(s) = \frac{K'}{S(2R^2C^2S^2 + 2RCS + 1)(RCS + 1)} \tag{13}$$

여기서, $K' = K Kp$

식(13)을 이용하여 근래적을 그려보면 Fig. 7과 같다. $\zeta = \cos \varphi$ 이므로 $\varphi = \cos^{-1} \zeta$ 이며 시스템의 오버슈트(overshoot)를 최소로 하기위해 ζ 를 0.7로 선택하였다. 원점에서 45°되는 방사선을 긋고 이때 근의 궤적과 만나는 점 S1에 해당하는 K' 값을 구하면 2.85가 됨을 알 수 있었다. 따라서 적절한 비례제어상수 Kp 로 0.6을 선정하였다.

적분제어 상수 Ki 는 Kp 를 0.6으로 고정시킨 상태에서 컴퓨터 시뮬레이션에 의해서 구하였으며

그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 그리고 Ki 를 0.01로 고정하고 Kp 를 변화시켜 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 구한 결과는 Fig. 9(a)와 같다. 위 시뮬레이션 결과를 setting time과 오버슈트의 관점에서 볼 때 시뮬레이션에 채택된 Ki 와 Kp 의 값들 중에서는 Ki 와 Kp 를 각각 0.01과 0.6으로 선택함이 제어목적에 적당함을 알 수 있었다.

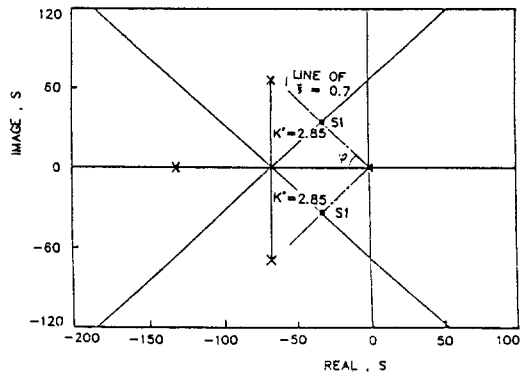


Fig. 7 Root locus of the block diagram (proportional control)

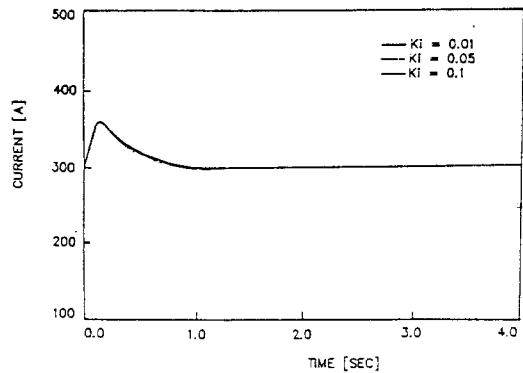


Fig. 8 Current response for various integral gain Ki ($Kp=0.6$)

4.1.2. 실험에 의한 이득선정

컴퓨터 시뮬레이션에서 구한 Ki 의 이득을 0.01로 고정하고 Kp 를 변화시켜 가면서 전류신호를 측정한 결과를 Fig. 9(b)에 나타내었다. 실험에서의 용접전류 제어응답이 시뮬레이션에서 보다 늦게 나타남을 볼 수 있는데, 이는 시뮬레이션에서 펄스모터의 동특성을 무시한 것과 실험에서 팁

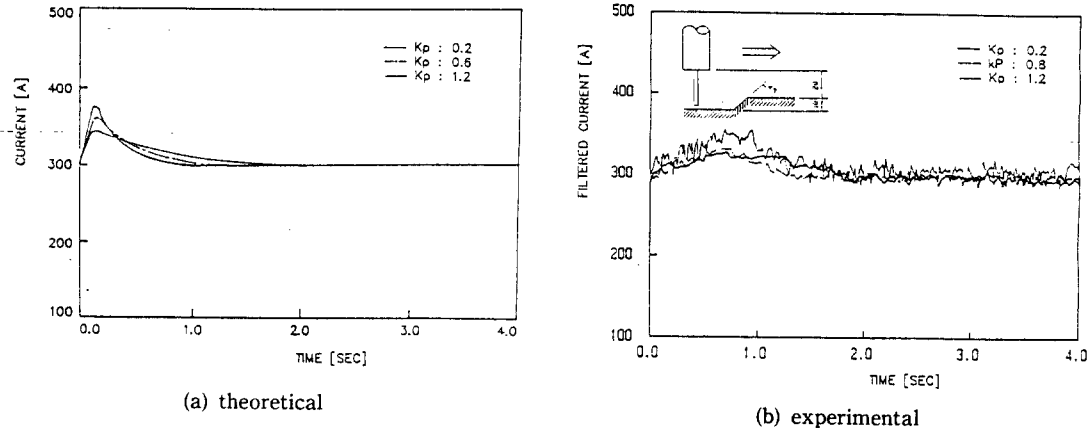


Fig. 9 Current response for various proportional gain K_p ($K_i=0.01$)

-모재간 거리 제어에 따른 용융지(weld pool) 형상의 변화가 용접전류에 영향을 미친 것이 원인으로 사료된다. K_p 의 값의 변화에 따른 용접전류의 응답에서 시뮬레이션에서 구한 값($K_p=0.6$)의 근처에서 실험한 결과 큰 차이가 나타나지 않았으며, 그중 $K_p=0.8$ 일 때 가장 양호한 결과를 볼 수 있었다. 따라서 용접선 자동추적 시스템에는 실험에서 구한 비례제어상수를 적용하였다.

4.2. 실험결과및 검토

위와같은 결과를 이용하여 실제 용접시 용접선을 추적하는 동안에 측정된 용접전류신호와 위빙방향신호를 Fig.10에 나타내었다. 여기서 위빙방향이 변화될 때 전류의 급격한 감소가 나타나는데 이는 전류값이 기준전류보다 높아있는 상태가 영향을 미쳐 토치의 상승이 잠시동안 지속되는 것과 하향 경사면 용접시와 같이 용융금속의 흐름으로 인한 현상으로 사료된다. 개발된 장치를 사용하여 실험한 결과 위빙폭의 크기가 균일하게 나타나는 것으로 미루어 제어시스템의 전반적인 기능이 원활하게 이루어진다는 것을 알 수 있었다.

공작물의 용접선과 용접테이블의 용접선 길이방향이 5°로 기울어 지게 공작물을 제작하여 2-패스 용접한 결과의 대표적인 사진을 Fig.11에 나타내었다. 사진에서와 같이 어느정도 기울어진 용접선에 대해서도 양호한 용접선 추적이 가능함을 알 수 있으며, 이는 용접중 용접부에 발생하는 열변형에 대해서 개발된 장치가 효과적으로 적용될 수 있음을 보여준다.

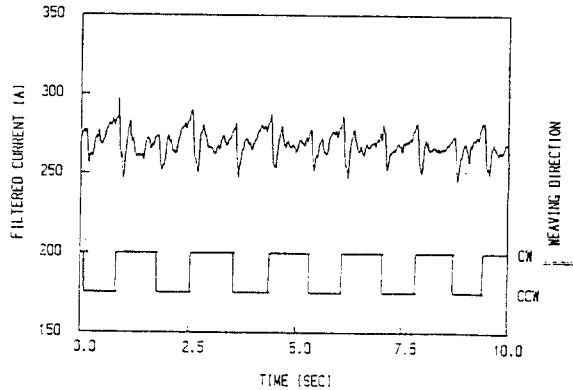


Fig. 10 Welding current and weaving direction signal during seam tracking

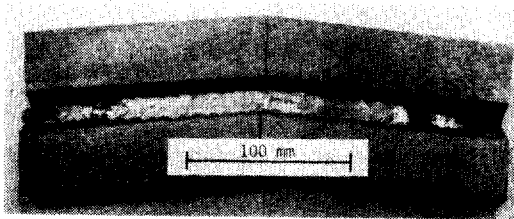


Fig. 11 Valuation of the arc sensor(inclined angle 5°)

5. 결 론

용접선 자동추적 시스템을 개발하기 위한 본 연구의 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) 용접선 자동추적 시스템(아크센서 시스템)에

용접전류를 일정하게 유지하도록 토치의 높이방향 속도를 비례적분 제어하여 토치의 높이가 기준높이보다 높게되면 위빙방향을 반전시켜 용접선을 추적하는 알고리즘을 적용하였다.

2) 용접속도의 변화에 대해 용접전류의 변화는 무시할 만 하므로 용접전류는 용접전압과 와이어 송급속도가 일정할 때에는 팁-모재간 거리만의 함수로 나타낼 수 있으며, 또한 시간에 대한 팁-모재간 거리의 변화율을 와이어 돌출 길이의 시간에 대한 변화율로 표시한 모델링의 결과가 실험과 비교적 잘 일치하였다.

3) 높이방향 제어시 비례적분 제어가 적합하며, 60°경사면에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 결과 Kp 와 Ki 는 각각 0.6과 0.01이 선정되었으며, 실제실험에서 Kp 가 0.8일때 적당한 것으로 나타났다.

4) 개발된 용접선 자동추적 제어 시스템의 성능 시험결과 추적능력이 양호하여 실용가능성을 충분히 볼 수 있었다. 따라서 이의 적용으로 생산 현장에서의 생산성 향상과 자동화 구현에 크게 기여할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 삼성중공업(주)의 연구비 지원에 의해서 수행되었으며, 동사 기계전자연구소의 조광재 소장, 안병규 실장의 많은 협조에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 1) 김재웅, 나석주 : 아크센서를 이용한 용접선 추적장치, 대한용접학회지, 제6권, 제4호, (1988), pp.1-6.
- 2) H.Nomura et al. : Automatic real-time bead height control with arc sensor in TIG. Welding, Trans. of the Japan Welding Society, Vol. 18, No. 2, (1987), pp. 35-42.
- 3) N.Baba et al. : Seam tracking with welding arc as a sensor in the PAW process, IIW Doc. XII-949-86, (1986), pp. 1-11.
- 4) F.Eichhorn et al. : GMA welding of filler passes with a new type of arc controlled seam tracking system, IIW Doc. XII-936-86, (1986) pp. 1-13.
- 5) H.Fujimura et al. : Joint tracking control sensor of GMAW, Trans. of the Japan Welding Society, Vol. 18, No. 1, (1987), pp. 32-40.
- 6) J.Nakajima et al. : Arc sensor for welding line tracking applied to welding robot, IIW Doc. XII-954-86, (1986), pp. 1-8.
- 7) H.Nomura et al. : The development of automatic seam tracking with arc sensor, Nippon Kokan Technical Report, Overseas, No. 37, (1983), pp. 42-50.
- 8) H.Nomura et al. : Automatic real-time bead height control with arc sensor (report2), Trans. of the Japan Welding Society, Vol. 18, No. 2, (1987), pp. 43-50.
- 9) E.Halmoy : Wire melting rate, droplet temperature, and effective anode melting potential, Proc. Int. Conf. on Arc Physics and Weld Pool Behaviour, The Welding Institute, Cambridge, (1979), pp. 49-57.
- 10) H.Fujimura et al. : Estimation of contact tip workpiece distance in gas shielding metal arc welding, Welding International, No. 6, (1988), pp. 522-528.
- 11) G.E. Cook : Robotic arc welding : research in sensory feedback control, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 30, No. 3, (1983), pp. 252-268.