

CO₂ 아크 용접에서 퍼지 제어기를 이용한 회전 아크센서에 관한 연구

최영수*, 박현성⁺

(논문접수일 2004. 4. 6, 심사완료일 2004. 7. 19)

A Study of Rotating Arc Sensor Using Fuzzy Controller for CO₂ Arc Welding

Youngsoo Choi*, Hyunsung Park⁺

Abstract

In automatic welding process using a robot, seam tracking is one of the important parts. Sensor for seam tracking is divided broadly into two categories as non contact sensor and contact sensor. The arc sensor is one of the non contact sensors, and it can be applied in weaving arc and rotating arc welding process. In such the arc sensors, rotating arc sensor can be applied to high speed welding over tens of Hz. The decrease of self regulation by high rotating speed causes to improve accuracy and response of sensor. In this study, fuzzy controller was used to track the seam for the CO₂ arc welding which had unstable arc. It could be shown that the rotating arc sensor was better than the weaving arc sensor.

Key Words : Arc Sensor(아크센서), Fillet Joint(필릿 이음부), Fuzzy Controller(퍼지 제어기), Rotating Arc Welding(회전 아크 용접), Self Regulation(자기제어)

1. 서론

수동 용접에서는 작업 위치와 다른 구조물과의 간섭에 의한 오차, 용접 중 일어나는 열변형에 의한 오차, 작업물과 지그의 치수 오차, 가용접(tack welding)에 의한 오차 등을 실시간으로 판단하여 보정할 수 있으나, 로봇을 이용한 자동화 용접에서는 위와 같은 오차들이 용접선 추적에 있어서 치명적인 오차를 야기할 수 있게 된다. 따라서, 로봇

스스로가 오차를 인지하여 교시 궤적(teaching trajectory)을 보정 할 수 있도록 고안된 용접궤적 예측센서의 개발은 용접 자동화 공정에서 필수적인 사안이다. 용접궤적 예측센서중에 대표적인 비접촉식 센서인 아크센서는 다른 센서들과 달리 추가적인 부착물이 필요 없을 뿐만 아니라, 용접 시 발생하는 용접 흄(welding fume), 스패터(spatter), 아크 광(arc light)등에 영향을 받지 않는다. 회전 아크센서의 경우, 위빙 아크센서와 달리 토치의 움직임 없이 아크

* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과
주소: 133-791 서울 성동구 행당동 17
+ 기아자동차 차체 생기팀

자체가 회전하므로 좁은 용접부나 예리한 코너부에서 토치와 모재간의 충돌에 의한 센서의 파손이 발생하지 않는 장점을 가지고 있다⁽¹⁾. 또한, 기계적인 한계에 의해 수 Hz 이상의 위빙 속도를 가질 수 없는 위빙 아크센서와 달리 회전 아크센서는 수십 Hz 이상의 고속회전이 가능하므로 기존의 위빙 아크센서에 비해 자기제어(self-regulation) 효과를 감소시키므로, 팁-모재간의 거리차(CTWD)에 따른 용접전류차가 커져 위빙 아크센서보다 센서로서의 정밀도가 높아지고, 회전 수가 증가함에 따라 같은 주기 동안 많은 센싱 정보를 얻을 수 있어 향상된 응답특성을 가질 수 있다^(2,3).

기존의 고속회전 아크 용접의 경우 보호가스로 이산화탄소(CO₂)를 사용할 경우 아크가 불안정하기 때문에 아르곤(Ar)과의 혼합 가스를 사용하였으나⁽⁴⁾, 본 연구에서는 일반 산업 현장에서 가장 많이 사용되고 가격이 저렴한 이산화탄소(CO₂, 100%)를 보호가스로 사용한 용접에서의 회전 아크센서를 이용한 용접선 추적 시스템을 개발하고자 한다. 또한, 실제 용접선 추적 시 발생하는 평균추적오차를 분석하여 기존의 위빙 아크센서와의 상대적인 비교를 통해 회전 아크센서의 추적 성능을 평가해 보고자 한다.

2. 회전 아크센서의 구성

2.1 고속회전 토치

전극의 용접 팁에 편차를 주어 와이어가 물리적으로 편심될 수 있도록 고안한 회전 토치 시스템의 경우, 용접 팁의 편차에 의해 와이어의 뒤틀림 현상이 발생할 수 있고, 팁의 마모를 빠르게 가져옴으로써 아크의 발생에 중요한 문제를 일으킬 수 있다. 또한, 증공축형 모터를 이용한 회전 아크 메커니즘의 경우, 증공축형 모터의 구조적인 특이성과 주문 제작의 필요성 때문에 증공축형 모터를 이용한 회전 아크 메커니즘이 일반 DC모터를 이용한 회전 아크 메커니즘에 비해 고가인 단점을 가지고 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하기 위하여 용접 팁의 편차를 주어 아크를 회전시키는 방법을 대신하여 와이어 가이드 전체를 회전시키는 장치를 Fig. 1(a)와 같이 제작하였다. 와이어를 회전시키는 동력원이 되는 모터는 생산비 절감을 고려하여 값이 저렴한 DC모터를 사용하였다. DC 모터와 회전 운동을 할 와이어 가이드는 기어를 이용하여 연결하였으며, 와이어 가이드를 기어의 중심이 아닌 3mm 편심된 지점에 부착하여 와이어 가이드 전체가 편심을 가지고 회전 할 수 있도록 고안하였다. 용접선 추적을 수행함에 있어서 가장 중요한 요소는 와이어의 위치에 따른 아크 특

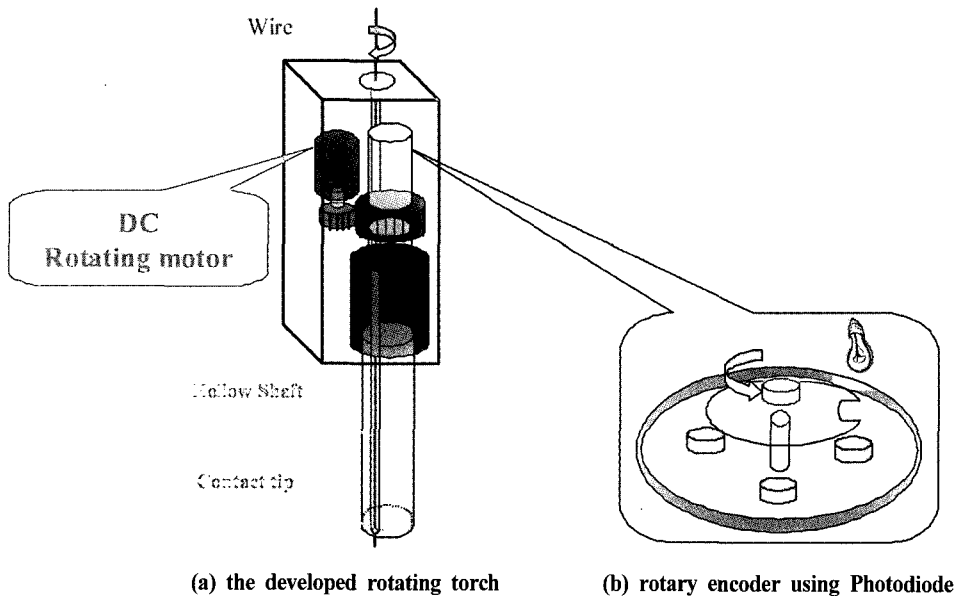


Fig. 1 Schematic diagram of high speed rotating sensor

성을 파악하는 것인데, 이를 파악하기 위해서 Fig. 1(b)과 같이 1개의 구멍이 있는 원형판과 4개의 포토 다이오드(photodiode)로 제작한 회전 엔코더(rotary encoder)를 DC 모터와 일체화하였으며, 회전 엔코더의 회전 위치 신호와 DC모터에 의해 회전하는 와이어 가이드의 회전 위치를 동기화하였다.

2.2 신호 처리 및 기타 장치

앞에서 언급한 고속회전 아크장치를 포함하여 Fig. 2와 같은 회전 아크 용접선 추적 시스템을 구축하였다. 용접을 수행 할 수 있도록 정전압 전원을 제공하는 용접전원, 회전 메커니즘을 가지는 용접토치, 용접토치의 움직임을 주관할 용접 로봇과 용접 로봇을 제어하는 로봇 콘트롤러, 용접 시 발생하는 여러 신호를 계속하는 센서 그리고, 센서에서 계속한 신호를 인터페이스 할 수 있는 PC 등으로 구성된다. 용접전원으로는 정전압 특성을 갖는 350A급 용접기를 사용하였으며, 용접전류 값을 측정하기 위해서 홀 센서와 3축 로봇을 제어하기 위하여 운동 제어 보드(motion control board)를 사용하였다.

3. 용접선 정보

용접선 추적을 수행함에 앞서 가장 먼저 선행되어야 할 것은 용접선에 대한 용접토치의 상대적인 위치정보를 얻는 것이다. 얻어진 상대적인 위치정보를 통해 용접해야 할 용접선의 위치를 예측함으로써 용접선 추적이 가능하기 때문이다. 본 연구에서는 회전하는 토치의 좌·우 끝단에서 계속되는 용접전류의 차이를 이용하여 용접선에 대한 용접토치의 상대적인 위치정보를 얻고자 한다.

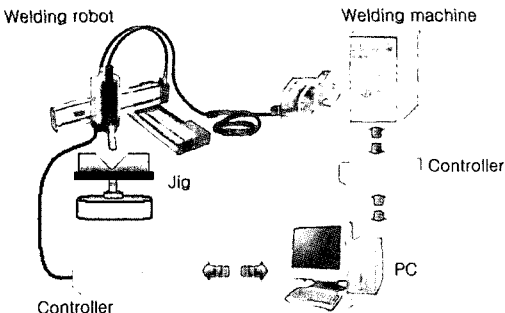


Fig. 2 Schematic diagram of welding seam tracking control system

3.1 회전 아크센서를 이용한 CO₂ 아크용접

용접선에서 오프셋에 따른 용접전류의 특성을 알아보기 위하여 Fig. 3과 같이 그루브 각도 90°의 아래보기 V그루브에 대해, -3mm에서 1mm 간격으로 3mm까지 각 오프셋에 따라 회전 아크센서를 이용한 GMA 용접을 수행하였다.

예비실험을 통해 적정 용접전류(welding input current) 구간이 253A~257A임을 알수 있었으며, 그 중간값인 255A를 최적 용접전류값으로 고정한 후, 와이어 송급 장치에 엔코더를 설치하고 송급속도를 측정하고 결과 그 평균값이 8 m/min로 계속되었다. 전체적인 용접 조건은 Table 1과 같다. 홀센서를 통해서 계속된 용접전류는 이동 평균법을 사용하여 전원 노이즈와 기본 노이즈를 제거하는 디지털 필터링 처리를 하였다.

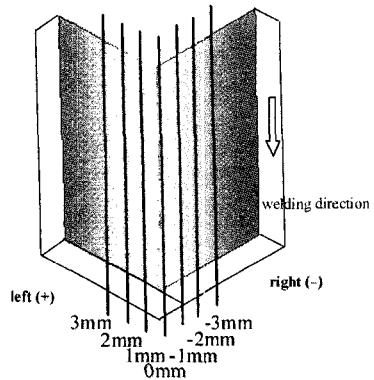
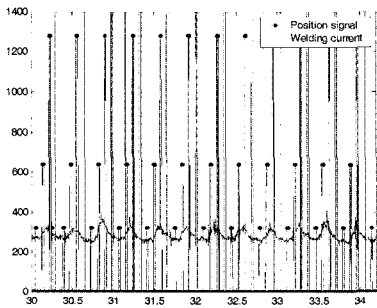


Fig. 3 Welding path according to each offset

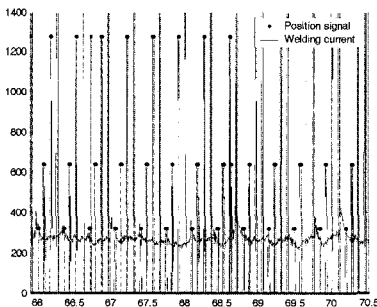
Table 1 Welding conditions in experiment

Variables	Conditions
Electrode	1.2mm ϕ ER70S-6
Shielding gas(flow rate)	100% CO ₂ (20l/min)
Wire feed rate	8m/min
Welding input voltage	33V
Welding input current	255A
Welding speed	7mm/sec
CTWD	20mm
Radius of rotating	3mm
Base metal(thickness)	SS400(9mm)
Groove angle	90°
Rotating frequency	20Hz

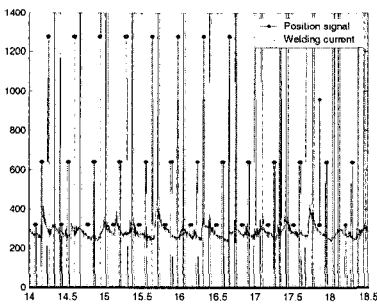
Fig. 4는 포토 다이오드(photodiode)를 통해 계속되는 토치의 위치신호와 홀센서를 통해 계속되는 용접전류를 계속한 결과이다. 위치신호(position signal)의 경우 4가지의 다른 형태를 보이는데, 이것은 토치 위치가 앞, 뒤, 좌, 우임을 의미한다. 즉, 토치의 위치가 뒤, 왼쪽, 앞, 오른쪽인 순서로 큰 값을 보인다. Fig. 4(b)와 같이 오프셀이 0mm인 경우에는 뒤에서, Fig. 4(a)와 같이, 오프셀을 왼쪽(+2mm)으로 주었을 때에는 왼쪽 부근에서 그리고 오프셀을 오른쪽(-2mm)로 주었을 때에는 오른쪽 부근에서 용접전류의 피크점을 보임



(a) 2mm



(b) 0mm



(c) -2mm

Fig. 4 Position and current signal during rotating arc welding

을 확인할 수 있었다. 이것은 용접비드의 형상과 오프셀 변화에 따른 틱-모재간의 거리차(CTWD)의 변화에서 기인한 것으로 보인다.

Fig. 5는 각 오프셀에 따른 좌·우 끝단에서의 전류차의 변화를 보여주고 있다. Left current은 회전토치가 오른쪽에 위치했을 때, Right current은 회전토치가 왼쪽에 위치했을 때의 홀센서를 통해 측정된 용접전류값을 의미한다. 오프셀을 준 방향에서 상대적으로 높은 전류값을 보이며, 오프셀의 크기가 커질수록 좌·우 끝단에서의 전류차 또한 커지는 경향을 보인다. 이것은 용접선 추적에 있어서 가장 중요한 부분인 용접선 정보예측을 가능하게 할 수 있는 중요한 실험결과다.

한편, Fig. 5(c)의 경우 오프셀 거리가 0mm인 경우임에도 불구하고 오른쪽의 평균 전류값이 왼쪽에 비해 다소 높은 이유는 토치의 회전 방향과 용융풀의 흘러내림에 의한 비드형상의 영향일 것으로 생각된다. 이러한 이유로 Fig. 5(a), (b)와 같이 오프셀이 왼쪽 방향인 경우가 오른쪽 방향의 경우인 Fig. 5(d), (e)에 비해 상대적으로 작은 좌·우 전류차를 보이게 되는 것이다.

3.2 용접선 추적 알고리즘

용접선 추적을 위해 10회전(0.5sec)마다 전류의 평균값을 측정하여 좌·우 끝단 전류 차이(e)와 좌·우 끝단 전류 차이 변화량(de)을 인자로 사용하였다.

$$de_i = e_i - e_{i-1} \quad (1)$$

여기서, e_i = i 번째 전류차

e_{i-1} = $i+1$ 번째 전류차

de_i = i 번째 전류차와 $i+1$ 번째 전류차에 대한 변화량

좌·우 끝단 전류 차이(e)를 바탕으로 현재 용접토치의 위치와 앞으로 진행해야 할 방향과 크기를 결정하게 되고, 좌·우 끝단 전류 차이 변화량(de)은 과거 용접선 추적 경로 예측을 가능하게 한다. 이 두가지 정보들을 통해 앞으로 진행함에 있어서 토치의 진행 방향과 꺾임정도를 결정하게 된다. 두 개의 인자를 사용하여 용접선 추적을 수행함에 있어서 발생할 수 있는 네 가지 상황을 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6(a), (b)와 같이 왼쪽에서 오른쪽으로 진행하는 경우에 좌·우 끝단 전류 차이 변화량(de)는 음수이고, Fig. 6(c), (d)와 같이 오른쪽에서 왼쪽으로 진행하는 경우에는 양

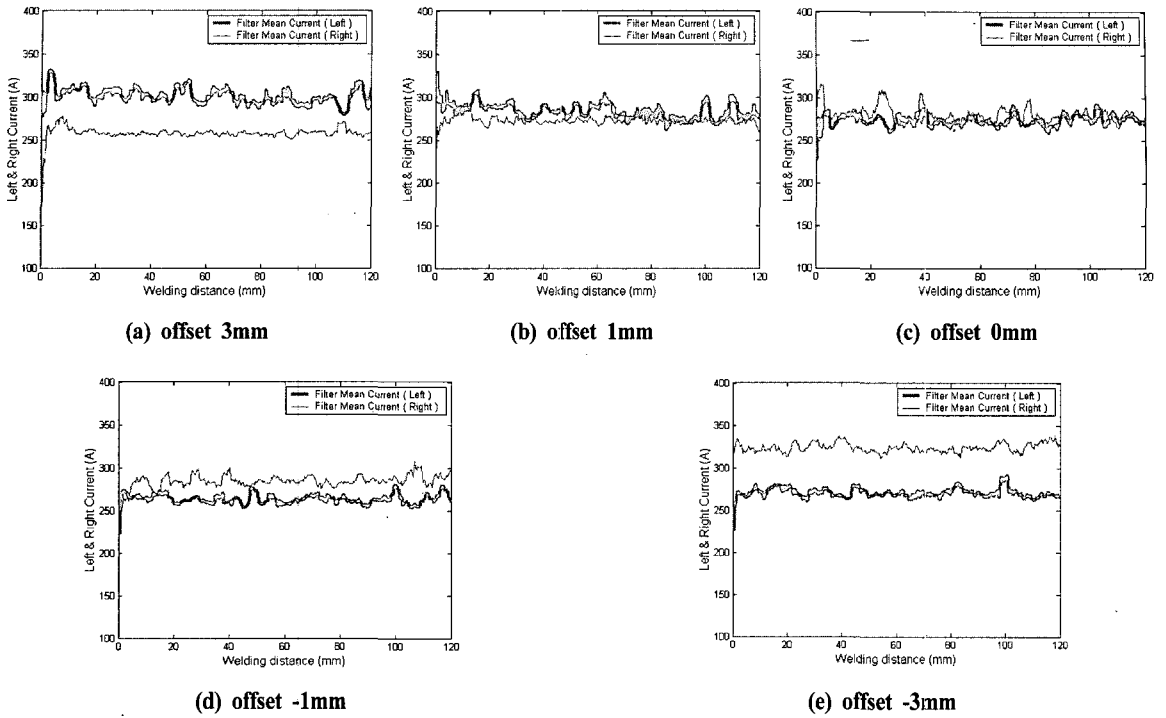


Fig. 5 Left & right current value at each offset

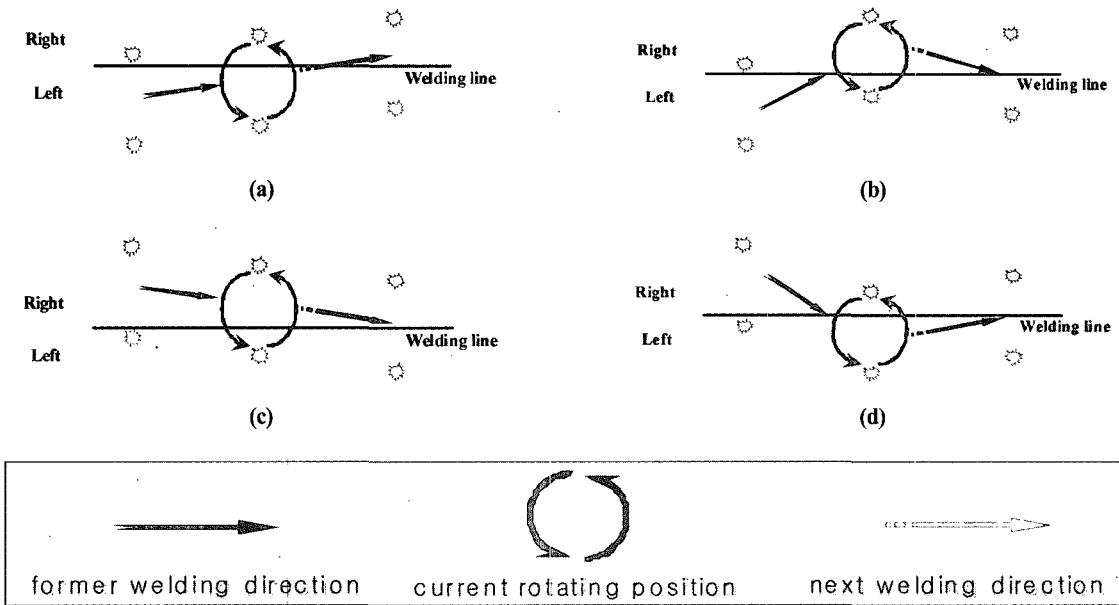


Fig. 6 Conditions during seam tracking with rotating arc sensor

수의 값을 가진다. 즉, 좌 · 우 끝단 전류 차이 변화량(de)의 부호에 따라 과거 진행 방향을 예측하게 되는 것이다. 또한, Fig. 6(a), (d)는 왼쪽 전류값이 오른쪽에 비해 상대적으로 높은 값을 가지므로 오른쪽으로 진행해야 하며, Fig. 6(b), (c)는 위와 상반된 과정을 거치게 된다. 즉, Fig. 6(a), (c)는 좌 · 우 끝단 전류차(e)에서 결정되는 현재 위치에서 앞으로 진행해야 할 방향과 진행하고 있던 방향이 같아져서 작은 꺾임을 가짐에 반해 Fig. 6(b), (d)는 진행하고 있던 방향과 현재 위치에서 앞으로 진행해야 할 방향이 달라서 큰 꺾임을 가지게 된다.

좌 · 우 끝단 전류 차이 변화량(de)은 과거 용접선 정보를 알수 있다는 점에서 좌 · 우 끝단 전류 차이(e)만을 사용한 경우와 비교하여 보다 부드럽고 정확한 추적을 가능하게 한다.

4. 용접선 추적 제어기 설계

4.1 퍼지 제어기

본 논문에서는 Fig. 7과 같은 전형적인 속도형 퍼지 PI 제어기를 도입하였다. 퍼지 제어기의 입력변수로 좌 · 우 끝단 전류차와 용접전류차의 변화량을 사용하였고, 출력변수로는 추적오차 보정량을 사용하였다. 입력변수와 출력변수와 관계를 계수인자를 고려하여 표현하면 식 (2)와 같다.

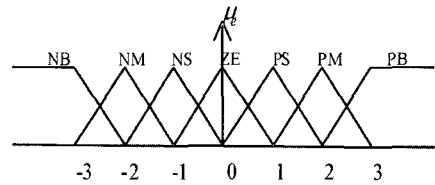
$$\begin{aligned}
 e_i &= Ge \times e_i^* \\
 de_i^* &= e_i^* - e_{i-1}^* \\
 de_i &= Ge \times (du_i) \\
 du_i^* &= Gdu \times (du_i)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

여기서, e^* = 좌 · 우 끝단 전류차
 de^* = 용접전류차의 변화량
 du^* = 추적오차 보정량

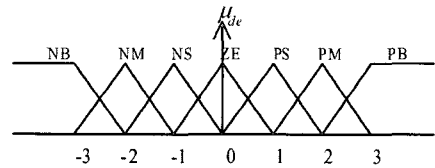
Table 2와 같은 제어규칙(rule base)과 Fig. 8과 같은 소속함수(membership function)를 구성하였다.

Table 2 Rule base for fuzzy control

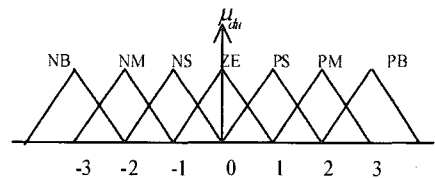
de \ e	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PS	ZE	NS	NS
NM	PB	PM	PS	PS	ZE	NS	NM
NS	PB	PM	PS	ZE	NS	NS	NM
ZE	PM	PM	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PM	PS	PS	ZE	NS	NM	NB
PM	PM	PS	ZE	NS	NS	NM	NB
PB	PS	PS	ZE	NS	NM	NS	NB



(a) fuzzy input variables for e



(b) fuzzy input variables for de



(c) fuzzy input variables for du

Fig. 8 Membership functions of fuzzy subsets

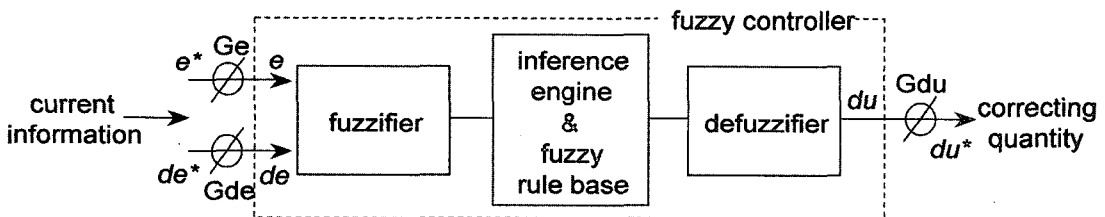


Fig. 7 Block diagram of the PI type fuzzy controller

퍼지 추론은 Mamdani의 min-max 방법을, 비퍼지화는 가중 평균법(weighted average method)을 사용하였다.

4.2 계수인자 결정

3수준 직교 배열법을 이용한 실험 계획법에 따라 실험을 수행하였다. 용접 예정인 직선 부분과 용접선검출을 기반으로 용접된 용접선과의 거리차를 추적오차라 정의하고 그것들을 평균하여 평균추적오차(y_{mean})를 구한 뒤 회귀분석을 통하여 식 (3)과 같은 선형 회귀식을 유도하였다. 각 계수인자의 범위 안에서 평균추적오차(mean tracking error)가 최소값을 가지는 경우의 Ge, Gde, Gdu의 값을 최적의 계수인자로 결정하여 Table 3에 나타내었다.

$$y_{mean} = -0.207 \times Ge - 0.024 \times Gde - 0.003 \times Gdu + 3.692 \quad (3)$$

Table 3 Optimal scaling factor and cost function values

Ge	Gde	Gdu	Mean tracking error
5.52	19.72	692	0.00008

5. 용접선 추적 실험

오프셀 각도를 음의 x축 방향으로 5°로 하여 추적 실험을 실시하였다. Fig. 9은 제어기 구동없이 용접했을 경우이다. 오프셀 거리가 커지는 용접 후반부에 언더컷과 오버랩의 용접 표면 결함이 발생함을 알 수 있다. Fig. 10는 좌·우 전류 차법을 토대로 제작한 퍼지 제어기를 이용하여 용접선을 추적한 경우로 언더컷과 오버랩과 같은 용접 표면 결함이 발생하지 않았으며 용접비드의 좌·우 흔들림 정도도 역시 작게 나타났다.

Fig. 11과 Table 4는 위빙 아크센서와 회전 아크센서의 추적 성능을 나타낸 것이다. Fig. 11의 점선은 초기에 교시한 토치의 진행 방향이고, 실선은 실제 용접해야 할 용접선의 위치이다. Fig. 11(a)는 좌·우 끝단 전류 차이를 이용한 위빙 아크 추적 실험의 결과이다. 용접선 추적은 하고 있으나 Table 4에서 알 수 있듯이 평균추적오차가 0.7201mm이고 최대추적오차가 1.6968mm로써 추적성능이 좋지 않아 추적 중 용접선 정보를 완전히 잃어 버려 용접선을 이탈하는 경우도 발생하며, 외란 때문에 한번 용접선 정보를 잃게 되면 다시 용접선으로 토치가 돌아오는데 많은 시간이 필요하다⁶⁾. 그러나 회전 아크 추적 실험인 Fig. 11(b)의 경우, 평균추적오차가 0.2211mm이고 최대추적오차가 0.8458mm로

써 추적성능이 상대적으로 우수하다. 또한, 용접선 추적도 중 용접선 정보를 잃게 되더라도 짧은 시간 안에 올바른 용접선 정보예측을 이행하였고 용접선 정보를 잃어버리는 경우는 없었으며 비드의 좌·우 불균일 정도 또한 상대적으로 작게 나타났다. 이것은 위빙 아크센서와 달리 회전 아크센서는 수십 Hz이상의 고속회전이 가능하여 자기제어 효과를 감소시키므로, 팁-모재간의 거리차(CTWD)에 따른 용접전류차가 커져 센서로서의 정밀도가 높아지고, 상대적으로 같은 주기 동안 많은 센싱 정보를 얻을 수 있기 때문인 것으로 보인다.

고속회전에 의한 추가적인 이점들이 아크센서의 성능을 향상시키는 중요한 요소인 것으로 보인다. 이러한 이점들을

Table 4 Performance comparison of rotating and weaving arc sensor

Sensor type	Mean tracking error	Max tracking error
Rotating arc sensor	0.2211	0.8458
Weaving arc sensor	0.7201	1.6968

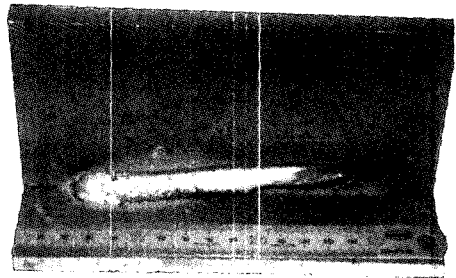


Fig. 9 Weld bead performed without seam tracking

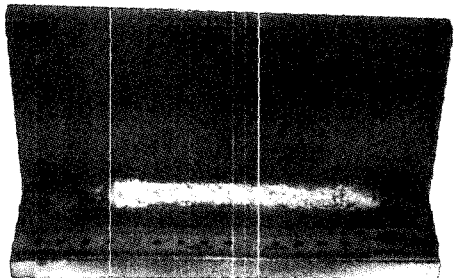
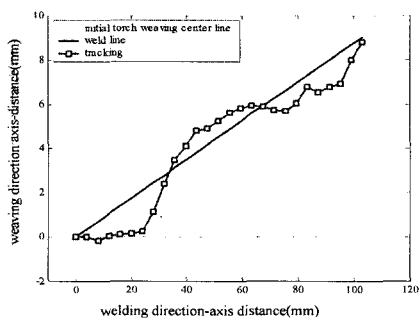
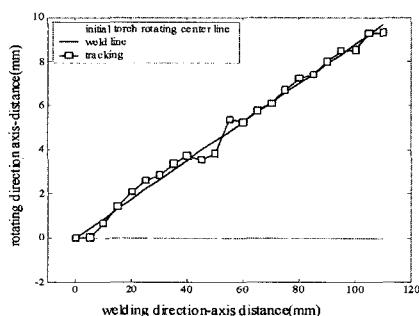


Fig. 10 Weld bead performed with seam tracking using fuzzy controller



(a) weaving arc sensor



(b) rotating arc sensor

Fig. 11 Comparison between weaving arc sensor and rotating arc sensor using fuzzy controller

산업현장에 적용한다면 가시적인 생산성 향상을 이룰 수 있을 것으로 기대된다.

6. 결론

CO₂ 아크 용접에서 회전 아크센서를 이용한 용접선 추적 시스템 개발과 최적의 용접선 추적 제어기 설계, 그리고 회전 아크센서의 우수성 규명에 대한 연구 결론은 다음과 같다.

(1) 일반 산업 현장에서 가장 많이 사용되고 가격이 저렴한

CO₂ 용접에서의 회전 아크센서를 이용한 용접선 추적 시스템을 개발하였다.

- (2) 비선형 모델에 적합하고 노이즈에 강한 퍼지 제어를 용접선 추적 제어기로 도입하여 속도형 PI퍼지 제어를 설계하였다.
- (3) 최적의 계수인자에 대한 회전 아크센서의 실제 용접선 추적 실험을 실시하여 CO₂ 용접에서도 회전 아크센서의 적용이 가능함을 확인하였으며, 위빙 아크센서의 용접선 추적오차와 비교하여 회전 아크센서의 추적 성능이 더욱 우수함을 확인하였다.

참고 문헌

- (1) Hanright, J., 1986, "Robotic Arc Welding under Adaptive Control-A Survey of Current Technology," *Welding Journal*, November, pp. 19~24.
- (2) Norrish, Bristol, J., 1992, *Advanced Welding Process*, Institute of Physics Publishing, pp. 152~154.
- (3) Mao, M., and Ushio, M., 1997, "Measurement and Theoretical Investigation of Arc Sensor Sensitivity in Dynamic State Gas Metal Arc Welding," *Science and Technology in Welding and Joining*, Vol. 2, No. 5, pp. 191~198.
- (4) Kim, C. H., and Na, S. J., 2000, "A Study on Rotating Arc Using Hollow Shaft Motor," *Journal of the Korean Welding Society*, Vol. 18, No. 5, pp. 589~594.
- (5) Kim, Y., and Rhee, S., 2001, "Development of Arc Sensor Model Using Fuzzy Controller in Gas Metal Arc Welding," *Measurement Science and Technology*, Vol. 12, No. 4, pp. 534~541.
- (6) Kim, Y., 2001, *A study on Arc Sensor Model and Fuzzy Controller Design of Gas Metal Arc Fillet Welding*, Ph. D. Thesis, Hanyang Univ, pp. 64~74.