

Gas Tunsten Arc 용접에서 용융지폭의 퍼지 제어에 관한 연구

정 현 권*, 이 세 현**, 엄 기 원**

A Study of Fuzzy Control of Weld Pool Width in Gas Tungsten Arc Welding

Hyun-Kwon Chung*, Se-Hun Rhee**, Ki-Woan Um**

ABSTRACT

Uniform weld pool shape is important in determining the weld quality. And weld pool width is one of the most dominant factors of the weld pool shape. In order to control the weld pool width, the fuzzy logic controller, which is well adapted to the complicated nonlinear systems such as welding, was used in this study. The weld pool image was obtained through CCD camera, and the weld pool width was calculated by processing the image. Using the calculated width, welding speed, as a control input, was inferred by the fuzzy logic controller. An uniform weld pool width can be successfully obtained regardless of the disturbances in the system.

Key Words: TIG Welding(티그 용접), Weld Pool Width(용융지 폭), Fuzzy Logic Controller (퍼지 제어기), Welding Speed(용접 속도), CCD(Charge-Coupled Device), Optical Filter(광학 필터)

1. 서론

용접은 많은 산업 분야에서 금속을 접합하는데 쓰이는 중요한 공정중의 하나이다. 용접이 중요한 공정으로 인식되고 있지만, 작업 중 유해광선이 나오고, 유해 가스가 쓰이는 등 작업환경이 열악해서 용접공이 감소하는 추세이고, 정밀용접에 대한 필요성으로 인해 자동화에 대한 필요성이 많아지고 있다. 용접을 한 제품이, 혹은 구조물이 충분한 강도를 가지려면 일단 용접부위의 형상이 일정한

모양을 나타내어야만 한다. 용접부의 형상 중 중요한 부분중의 하나가 용융지폭이다. 용융지폭은 용접부의 형상 중 가장 중요한 용융깊이와도 많은 관계가 있다. 용융지폭이 일정하였을 때 비교적 일정한 용융지깊이가 얻어짐을 볼 수 있다. 또한 용융지폭은 용융지깊이보다 실시간으로 예측하기에 비교적 유리한 위치에 있다. 따라서 용융지폭을 제어함으로써 용융지깊이를 어느 정도 제어할 수도 있을 것으로 생각된다.

TIG 용접은 용접 전류, 용접 전압, 용접 속도, 용접봉

* (주)삼성전자 자동화연구소

** 한양대학교 정밀기계공학과 정희원

의 형상, 모재와 용접봉과의 거리 등 매우 많은 인자에 의해 영향을 받는 복잡한 공정이다. 기존의 많은 제어기는 주로 시스템을 선형화하여 제어기를 구축했는데, 용접과 같이 여러가지 인자에 의해 강한 비선형성을 갖고, 시스템이 간단히 정의되지 않는 분야에 적용되기에는 약간의 문제가 있다. 본 연구에서는 비선형적이고, 잘 정의되어 있지 않은 분야의 제어에 잘 적용되는 퍼지 제어를 설계하였다. 퍼지제어의 제어규칙은 실제 용접작업자가 용접하는 방식으로부터 추출해 내었다. 시스템의 제어입력으로는 용융지폭을 취하였고, 출력은 용접속도를 취하였다. CCD 카메라를 이용한 시각시스템에서 용융지에 대한 시각정보를 얻고, 얻은 정보를 컴퓨터가 처리하여 용융지폭을 구하며 이를 가지고서 용융지폭을 일정하게 유지하기 위한 용접속도값을 계산한 다음 다시 시스템의 입력값으로 주는 피드백 시스템을 구현하였다.

2. 본 론

2.1 용융지 관찰 및 화상처리

용접중에는 강한 아크광이 나오기 때문에 용융지로부터 나오는 광을 감지해서 용융지폭을 감지하는 것이 용이하지 않다. 본 논문에서는 화상의 질을 향상시키기 위해서 long wavelength pass filter 를 이용하였으며, 이 필터는 아크광이 강한 파장영역을 잘라주는 역할을 한다. 용융지 관찰을 위해 흑백 CCD 카메라가 사용되었고, 여기서 출력된 비디오신호는 화상처리장치(DT2853)에서 A/D 변환되어, 256레벨의 밝기를 가진 화상데이터로 화상메모리버퍼에 저장된다. 이 화상데이터는 용융지폭을

검출하는데 이용되고, 용접부를 모니터링하는 데에도 사용되었다.

Fig. 1은 용융지의 화상에서 토치 바로 뒤의 수평선상의 밝기 분포를 나타낸다. 그림에서 용융지폭의 경계면에서 화소의 밝기가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이 특성을 이용해서 좌측에서부터 어떤 일정한 값보다 큰 밝기를 가지게 되는 최초의 화소를 검출하고, 또한 우측에서부터도 같은 방법으로 그와 같은 화소를 검출하였다. 용융지폭은 앞의 두 화소간의 간격에 해당된다. 따라서, 한 화소에 상당하는 길이를 구하여 실제 용융지폭을 계산하였다.

2.2 용융지폭의 상태방정식

용접공정은 용접전류, 용접전압, 용접속도, 보호가스의 종류 등이 복잡하게 연관되어 있는 공정이다. 시스템을 모델링하는 방법에는 운동방정식에서부터 이론적으로 구하는 방법과 실험적으로 구하는 방법이 있다. 본 논문에서는 실험적으로 시스템의 전달함수를 구하였다. 모재는 연강(SS41), 두께 3.2 mm, 폭 50 mm, 길이 150 mm 이고, 용접전류는 100A, 보호가스는 100% 아르곤가스, 모재와 용접봉과의 거리는 3 mm인 조건에서 실험을 하였다.

먼저 용접 속도 변화에 따른 용융지폭의 변화를 구하였다.(Fig. 2) 이 그림에서 일정 영역에서 용접속도와 용융지폭은 반비례 관계가 있음을 알 수 있다. 그리고, 스텝 입력에 대한 출력값의 변화로부터 시스템의 상태방정식을 유도하기 위해 속도를 170 mm/min에서 110 mm/min으로 변화시켜서 용융지폭의 변화를 구하였다(Fig. 3). Fig. 3에서 초기 용융지폭을 5.5mm(w_0), 최종 용융지폭을 7mm(w_1)라 할 때 다음과 같은 용융지폭 w 의 과도상태응답식을 근사적으로 구할 수 있다.

$$w = (w_1 - w_0)(1 - e^{-\lambda t}) + w_0 \quad (1)$$

용융지폭 w 를 상태변수로 하고, 용접속도 v 를 입력변수로 하여, 선형근사 시키면,

$$\frac{dw}{dt} + \lambda w = bv + c \quad (b, c는 상수, 1/\lambda = \text{time constant}) \quad (2)$$

식을 간단하게 하기 위해 변수를 다음과 같이 정의한다.

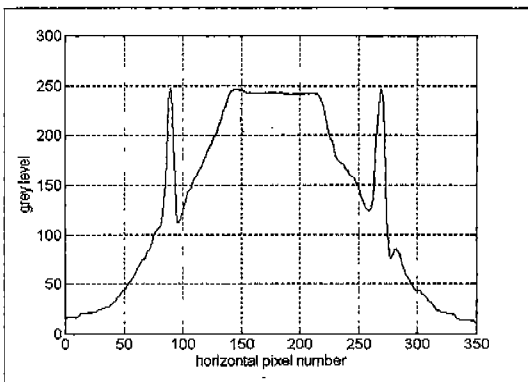


Fig. 1 Distribution of brightness in the weld pool image

$$w = x, v = V_0 + u \quad (\text{여기서, } V_0 = -c/b) \quad (3)$$

위의 식을 식(2)에 대입하면 식(4)와 같은 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dx(t)}{dt} = -\lambda x(t) + bu(t) \quad (4)$$

그러므로 입력이 용접속도이고 출력이 용융지폭인 용접 시스템의 전달함수 $G(s)$ 는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{b}{s + \lambda} \quad (5)$$

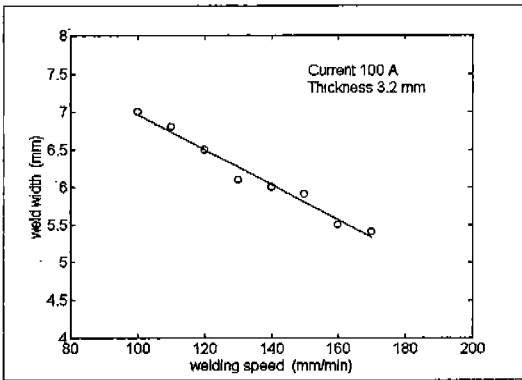


Fig. 2 The relationship of weld pool width and welding speed

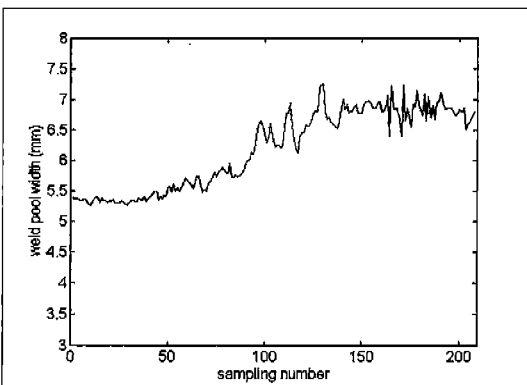


Fig. 3 Step response of weld pool width

2.3 퍼지 제어기

용융지폭을 제어하기 위해서 퍼지 제어기를 설계하였다.

퍼지 제어기는 L. A. Zadeh(1965)에 의해 제안된 퍼지 집합 이론에 기초를 두고 있다. 0과 1로 그 집합에 대한 소속정도가 표현되는 일반적인 집합이론과는 달리 퍼지 논리는 여러가지 소속함수로 모호한 정도를 나타낼 수 있어서 실제 사실을 잘 반영할 수 있다. 퍼지 제어는 퍼지 이론의 응용분야 중에서 가장 성공적으로 이용되고 있는 분야이다. 일반적으로 퍼지 제어기는 시스템의 특성이 복잡하여 기존의 정량적인 방법으로는 해석할 수 없거나 얻어지는 정보가 정성적이고, 부정확하고, 불확실한 경우에 기존 제어기들보다 우수한 제어 결과를 나타낸다. 일반적으로 퍼지 제어기는 퍼지화 도입부(fuzzification interface), 지식 베이스(knowledge base), 퍼지 추론부(fuzzy inference), 비퍼지화부(defuzzification interface)로 구성된다.

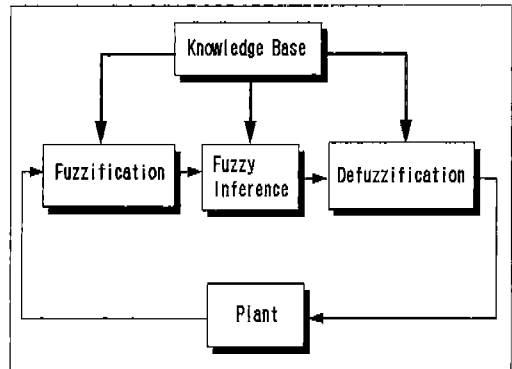


Fig. 4 Schematic diagram of fuzzy logic controller

퍼지 제어기는 일반적으로 다음과 같은 순서로 설계된다.

- ① 입출력변수 선정
- ② 입력값의 퍼지화 방식 결정
- ③ 추론의 방식 결정
- ④ 퍼지 제어 규칙의 구체적 기술
- ⑤ 출력부의 비퍼지화 방식 결정

2.4 퍼지 논리의 용융지폭 제어에의 적용

Fig. 5에 용융지폭에 대한 퍼지 제어기를 나타내었다.

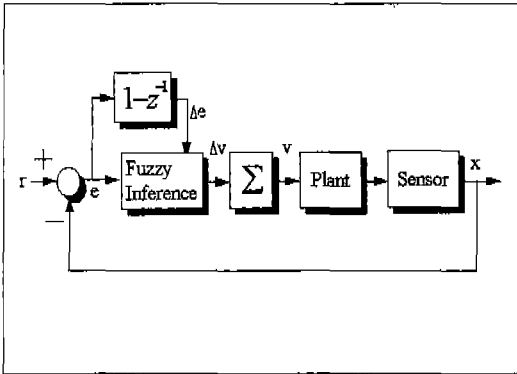


Fig. 5 Fuzzy controller for weld pool width control

퍼지 입력으로는 예러 $e_n (= r - x_n)$ 과 예러의 변화를 $\Delta e_n (= e_n - e_{n-1})$ 이 사용되었다. 여기서 n은 n번째 샘플링을 나타낸다. 퍼지추론을 하면 속도의 변화량 (Δv) 이 추론된다. 용접속도 v 는 Δv 를 합해서 얻어진다.

용융지폭제어를 위한 제어 규칙은 Table 1에 나타내었다. 제어규칙은 작업자의 지식을 이용해 이끌어 내어졌다.

제어 규칙을 예를 들어 설명하면, 만약 e 가 PS이고(용융지폭이 좁고), Δe 가 PS이면(용융지폭이 줄어들고있으면), Δv 는 NS이다(용접 속도를 조금 줄이시오). 이것은 규칙표에서 다음과 같이 나타난다.

IF e 가 PS 이고, Δe 가 PS 이면,

THEN Δv 은 NS 이다.

여기서, PS(Positive Small)과 NS(Negative Small)은 퍼지 변수들이다.

속도의 변화량 Δv 를 결정하기 위해 Mamdani가 제안한 minimum 연산을 이용한 합성법칙이 사용되었다.

만약, e 와 Δe 를 각각 e° 와 Δe° 라 하면, 일반적으로 이 값들은 i번째 규칙을 만족한다.

i번째 규칙 :if e° is A_{i1} and Δe° is A_{i2} then Δv is B_i

여기서 A_{i1} , A_{i2} 와 B_i 는 퍼지 변수들이다. 우선, 적합도 w_i 가 계산된다. w_i 는 e° 와 Δe° 가 i번째 규칙을 만족시키는 정도를 나타내고 다음과 같이 표현된다.

$$w_i = \mu_{A_{i1}}(e^\circ) \wedge \mu_{A_{i2}}(\Delta e^\circ) \quad (6)$$

$\mu_{A_{i1}}(e^\circ)$ 와 $\mu_{A_{i2}}(e^\circ)$ 는 각각 퍼지 변수 A_{i1} , A_{i2} 의 소속정도를 나타내고, 연산자 \wedge 는 다음과 같이 정의된다.

$$a \wedge b = \min(a, b) \quad (7)$$

i번째 규칙에 대한 결론의 소속함수 (B_i^*)는 퍼지 변수 B_i 의 소속함수를 w_i 에서 잘라냄으로서 추론된다.

$$B_i^*(\Delta u) = w_i \wedge B_i(\Delta u) \quad (8)$$

모든 제어 규칙들에 대한 최종 결론 (B_o)은 각각의 결론의 합집합이다.

$$B_o = \bigcup_{i=1}^n (B_i^*) \quad (9)$$

최종결론의 퍼지변수의 무게중심이 퍼지제어기의 출력값으로 쓰였다. ($y^\circ = \Delta u$)

$$y^\circ = \frac{\int \mu_{B_o}(y) y dy}{\int \mu_{B_o}(y) dy} \quad (10)$$

Table 1. Control rules

Δe / e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PM	PS	PS	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PB	PM	PS	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PS	PS	ZO	NS	NS	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NB
PM	PS	ZO	NS	NS	NM	NB	NB
PB	ZO	NS	NS	NM	NB	NB	NB

- e : 용융지폭의 예러
- Δe : 예러(e)의 변화율
- NB : Negative Big
- NM : Negative Medium

- NS : Negative Small
- ZO : Zero
- PS : Positive Small
- PM : Positive Medium
- PB : Positive Big

3. 실험

3.1 실험장치

실험에 사용된 용접기는 GTA(YT-300 2AD GTA)용 접기로 직류정극성(DCSP)으로 사용하였고, 용접속도 제어장치는 스텝핑모터(OEM 83-65)와 모터제어용보드(AT6400-AUX1) 및 모터구동장치로 이루어져 있고, 시각 시스템은 CCD 카메라(IK-541RA)와 850 nm long wavelength pass filter 및 화상처리장치(DT2853)로 이루어져 있다. 그리고 사용된 컴퓨터는 IBM-AT 호환기종으로 메인 프로세서(CPU)는 인텔 80486이다. 전체 시스템의 개략도는 Fig. 6과 같다.

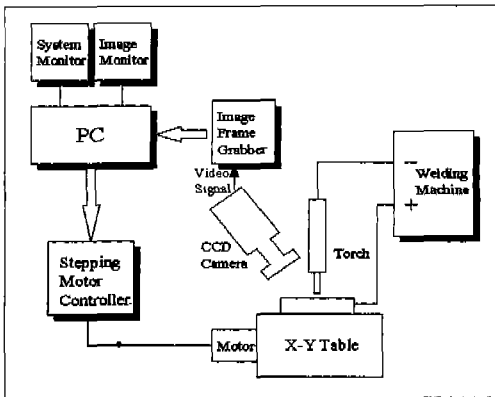


Fig. 6 Schematic diagram of weld pool width control system

3.2 실험방법

제어입력이 용접속도이고 출력이 용융지폭인 제어기의 성능을 관찰하기 위해 모재의 폭을 변화시켜가면서 또한 시편의 폭이 넓은 부분 밑에 알루미늄 판을 대고 실험을 하였다.

Fig. 7은 사용된 모재의 모양을 나타내고 있다. 모재의 폭이 변하면 열이 외부로 유출되는 양이 변하여 열용량이

변하기 때문에 일정속도로 용접을 하면 용융지폭이 변화될 것으로 예상된다. 이 실험에 사용된 용접시편은 두께 3.2 mm, 폭 50 mm, 길이 150 mm인 연강(SS41)이다. 용접조건은 전류 100A, 보호가스 100% 아르곤가스, 용접봉과 모재와의 거리는 3mm 가 되도록 하였다.

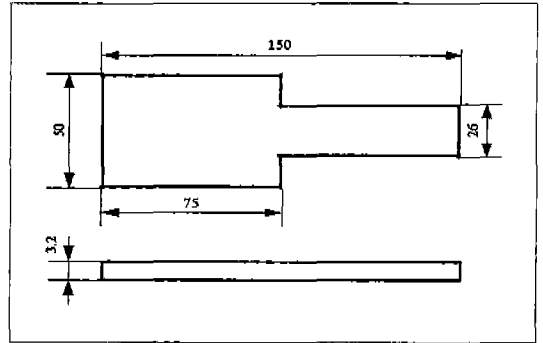


Fig. 7 Weld specimen

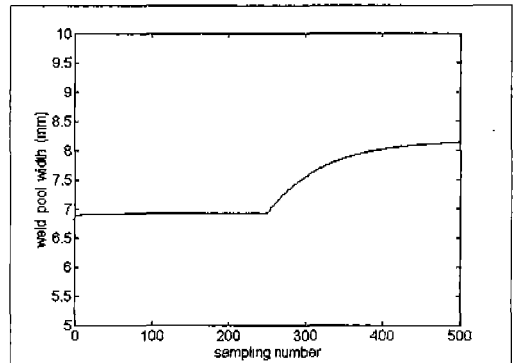


Fig. 8 Simulation of weld pool width without controller

3.3 실험결과 및 고찰

Fig. 8은 식(4)를 이용하여 λ 값을 변화시켰을 때의 시뮬레이션 결과이다.

Fig. 9는 구축한 퍼지 제어기를 사용하여 Fig. 7과 같은 시편을 용접할 때에 나타날 수 있는 용융지폭의 응답 특성을 시뮬레이션 해 본 결과이다. 용융지폭이 일정하다가 시편의 폭이 감소하는 순간 용융지폭이 증가하였으나,

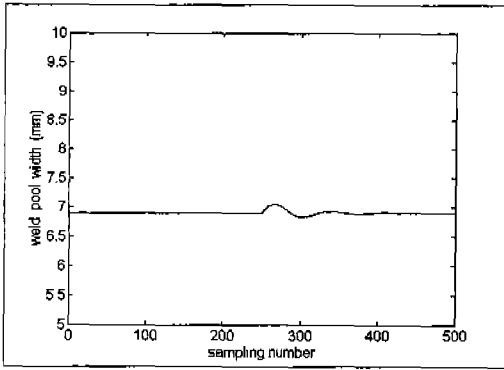


Fig. 9 Simulation of weld pool width with fuzzy controller

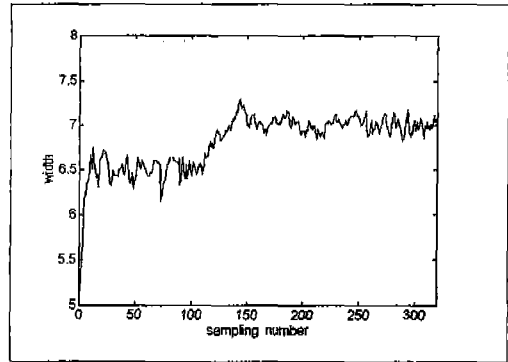


Fig. 11 Time response of weld pool width, the reference input varying from 6.5 mm to 7 mm

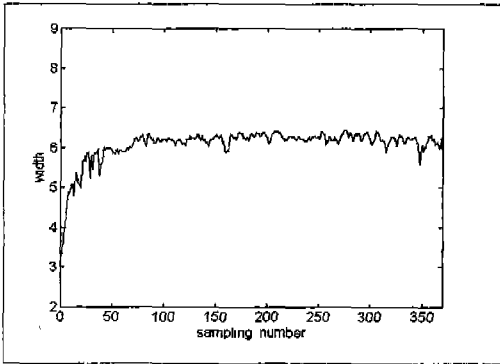


Fig. 10 Weld pool width without disturbance

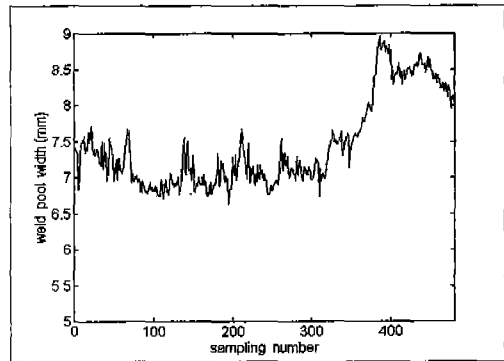


Fig. 12 Weld pool width without controller, base metal thickness 3.2 mm

퍼지 제어를 통하여 다시 일정하게 용융지폭이 유지 되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 $50 \times 150 \times 3.2$ mm(연강 SS41)의 시편을 용접전류 100 A에서 용접속도 140 mm/min으로 용접한 결과이고, Photo. 1은 그 시편의 사진이다. 용융지폭에 영향을 주는 열용량의 변화가 없으므로 정속도로 용접을 하여 용융지폭이 거의 일정한 것을 볼 수 있다. 그리고, 용융상태의 용융지폭을 측정하기 때문에 강한 아크광의 영향으로 인해 필터를 사용하였음에도 용융지폭에 약간의 맥동(fluctuation)이 있음을 볼 수 있다.

Fig. 11은 용접전류 100 A에서 두께 3.2 mm인 시편을 기준입력을 6.5 mm로 하고 용접하는 중에 기준입력을 7 mm로 변화시켰을 때, 시간의 경과에 따른 용융지폭의 변화량을 보여주고 있다. 기준입력은 Fig. 2의 데이

터를 참조하여 용접속도를 입력하여 얻은 것이다. 사진 2는 그 때의 용접시편의 사진이다.

Fig. 12는 용접전류 100 A에서 두께 3.2 mm인 용접시편의 폭을 50 mm에서 26 mm로 변화시키면서, 제어를 달지 않고 용접하였을 때의 용융지폭의 변화를 나타낸 것이다. 용접시편의 폭이 감소하므로 인해 열이 잘 발산되지 못하여 용융지폭이 증가하였음을 볼 수 있다.

Fig. 13은 용접전류 100 A에서 두께 3.2 mm인 용접시편의 폭을 50 mm에서 26 mm로 변화시키면서, 퍼지 제어를 하면서 용접하였을 때의 용융지폭의 변화를 나타낸 것이다. 비교적 용융지폭이 일정하게 나타남을 볼 수 있다.

Fig. 14는 용접전류 150 A에서 두께 4.5 mm인 용접시편의 폭을 50 mm에서 26 mm로 변화시키면서, 제어

기를 달지 않고 용접하였을 때의 용융지폭의 변화를 나타내고, Fig.15는 같은 조건에서 퍼지제어기를 달고 용접하였을 때의 용융지폭의 변화를 나타낸다. 제어기를 달지 않았을 경우에는 폭이 늘어남을 볼 수 있고, 제어기를 달았을 경우에는 비교적 폭이 일정함을 볼 수 있다.

위의 실험에서 용융지폭이 일정하게 유지될 때에는 용융지의 깊이도 비교적 일정하게 유지됨을 볼 수 있었다. 그리고, 용접조건이 변화 되었을 때에도 제어기가 비교적 잘 작동되었음을 볼 수 있었다.

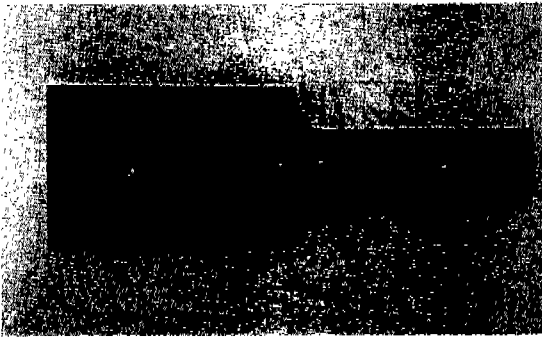


Photo. 1 Weld specimen without controller

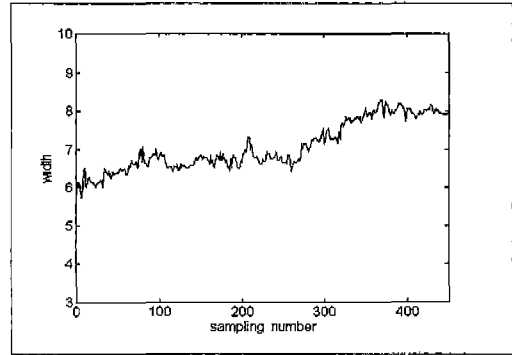


Fig. 14 Weld pool width without controller, base metal thickness 4.5 mm

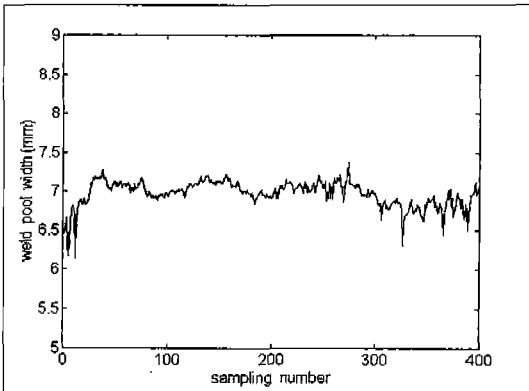


Fig. 13 Weld pool width with fuzzy controller, base metal thickness 3.2 mm

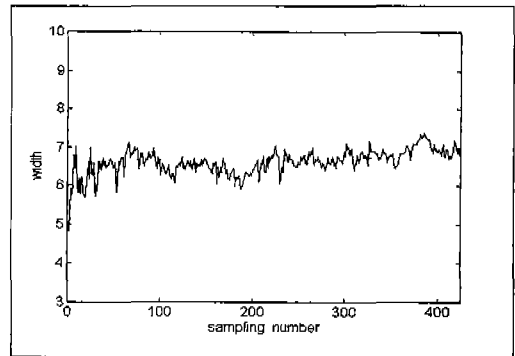


Fig. 15 Weld pool width with fuzzy controller, base metal thickness 4.5 mm

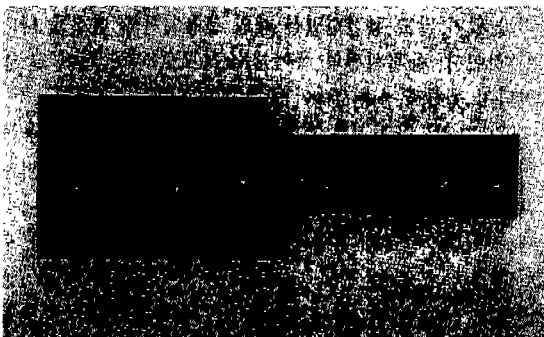


Photo. 2 Weld specimen with fuzzy controller

4. 결 론

본 연구에서는 Gas Tungsten Arc 용접에서 용접속도를 제어함으로써 일정한 용융지폭을 유지하도록 하는 시스템을 구성하였다.

용융지폭을 용접속도에 관한 방정식을 유도하여 이를 시뮬레이션 하였고, 이것을 기초로하여 퍼지 룰 베이스 (fuzzy rule base)를 구성하였다.

또한, CCD 카메라와 장파장 통과 필터(long wavelength pass filter)를 사용하여 강한 아크광 중에서도 비교적 용융지폭을 명확하게 검출할 수 있었다. 이 용융지폭을 퍼지 입력 변수로 사용하고, 퍼지 추론, 비퍼지화를 거쳐 용접속도를 구하였다. 그리고 이 속도값을 시스템의 입력값으로 하여 용융지폭을 제어하였다.

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 퍼지 제어 시스템을 구축하여, 용접시편의 폭이 변하는 외란에서 일정한 용융지폭을 얻을 수 있었다.
2. 실시간에 용융지폭을 제어함으로써 용접성을 향상시킬 수 있었다.
3. 모재의 두께와 용접 전류가 다른 상태에서도 퍼지 제어 시스템이 양호하게 작동하는 것을 볼 수 있었다.
4. 용접 시스템과 같이 복잡하고 영향인자가 많은 시스템에서 퍼지 제어 시스템이 적당하다는 것을 알 수 있었다.
5. 강한 아크광과 외란등으로 데이터에 맥동(fluctuation) 현상이 나타나는데, 향후 이것을 극복할 수 있는 센서와 디지털 필터링 알고리즘의 연구가 필요하겠다.

참 고 문 헌

1. 엄기원, "최신 용접공학", 동명사, 1992.
2. K. Ohshima, et al., "Fuzzy Expert System for Robotic Arc Welding," PED-Vol 51, Welding and Joining Processes, ASME, 1991, pp 85-90.
3. R. W. Richardson, et al., "Coaxial Arc Weld Pool Viewing for Process Monitoring and Control," Welding Journal, Vol. 63, No. 3, 1984, pp. 43-50.
4. K. Inoue, "Image Processing for On-Line Detection of Welding Process," 일본용접학회지, Vol. 50, No. 11, 1981, pp. 94-100.
5. 김동철, "화상처리에 의한 Gas Tungsten Arc 용접에서의 용융지폭 제어에 관한 연구," 한양대학교, 석사논문, 1994.
6. K. S. Boo, et al., "A Fuzzy Linguistic Control Approach to the Control of Weld Pool Size in Gas Metal Arc Welding Processes," PED-Vol 51, Welding and Joining Processes, ASME, 1991, pp 73-84.
7. 이광형, 오길복, "퍼지 이론 및 응용", 홍릉과학출판사, 1991.
8. H. Nomura, et al., "Sensors and Control Systems in Arc Welding". Chapman & Hall, 1994.
9. L-X. Wang, "Adaptive fuzzy systems and control design and stability analysis", Prentice Hall, 1994.
10. S. C. Chapra, R. P. Canale, "Numerical methods for engineers", McGraw-Hill, 1990.