

# 아크용접 로봇시스템에서 용융지크기의 뉴로-퍼지 제어

전 의 식\*

## Neuro-Fuzzy Control of Weld Pool Size in Arc Welding Robot System (1st Report : Fuzzy Control of Weld Pool Size)

Jeon, Euysik

### Abstract

Welding technique is widely applied to general industry such as pressure vessel for chemical plant, pipe system, heavy industry, and automobile. There are some points which must be considered when robot system is used in welding automation process for productivity improvement. Welding quality is governed by heat input, and this quantity can be different according to shape, property, and thick of material. For desired heat input, weld input parameters such as welding voltage, current, and welding velocity must be determined with those consideration. Until now these parameters have been determined mainly by experience of operator.

In this study, the size of welding zone was predicted by fuzzy rules were constructed from the relation between welding variables and weld pool size. Inverse model method which welding control input for welder is determined with optimum voltage and current by fuzzy controller is validated by computer simulation.

Keywords : Weld input parameter(용접입력변수), Welding variables(용접변수), Weld pool size(용융부의 크기), Fuzzy controller(퍼지제어기)

### 1. 서론

최근 산업이 발전함에 따라 생산체계의 전문화, 자동화가 이루어지고 소품종 대량생산에서 다품종 소량생산으로의 전환이 급속도로 진행되고 있으며 이를 관리하고 생산성 향상을 위하여 컴퓨터 시스템 도입 및 로봇의 도입

이 확대되고 있다. 용접작업과 같이 생산현장의 임금이 급상승하고 작업조건이 열악한 부분의 자동화 시스템 도입이 두드러지고 있으며 종래의 소품종 대량생산 시스템에서 품질관리를 해오던 통계적 방법을 통해 생산경험을 설계나 재생산에 용이하게 적용하게될 방법에서 다품종 소량생산에서의 복잡해진 생산기술과 짧은 경험으로 인하여

\* 천안공업전문대학 용접기술과

유연성있는 생산 품질 관리 기술의 도입이 요구되고 있다. 로봇을 이용한 용접작업에 가장 중요한 요소는 용접기로부터 작업물에 공급되는 입열량이며 이를 제어하여 용융지의 크기 및 용접질 및 용접강도를 향상시킬 수 있으나 전압, 전류, 용접속도, 용접 와이어의 이송속도, 용접자세, 모재와 토치간의 거리등의 많은 용접 파라미터를 갖는 이유로 서로의 관계가 용접부의 열영향에대한 수학적 모델이 정확히 이루어지지 않고 있다.<sup>(1)</sup> GMA 용접에 관련된 기술은 수많은 실험과 경험에 의해 상당히 의존적이므로 그 관련 지식을 데이터베이스와 톨로써 구성하여 추론할 수 있는 Fuzzy 제어기법을 이용하여 용접 파라미터를 제어하면 숙련된 기술자가 판단하여 작업하는 것과 유사한 결과를 얻을 수 있다.<sup>(2)</sup> 이러한 인공지능기법의 사용시에는 용접관련 경험 지식중 불필요한 지식은 삭제하고 적절한 것만 선택하여 톨을 구성하여야 하므로 제어변수와 관측변수의 선정 또한 중요한 문제이다. 현재 대부분의 지능적 용접 작업은 온도의 최적화에 의한 용융지의 크기 예측에 이용되고 있으며 제어 알고리즘으로는 선형적인 PI 나 PID 제어 방식이 주종을 이루고 있다.<sup>(3)</sup> 그러나 역으로 용융지의 크기가 결정되었을 경우나 온도 최적화에 따른 용융지의 크기 예측에 오차가 발생할 경우 이를 제어하기 위한 역문제는 용접 전류와 전압, 속도를 결정하는 것인데 이 경우에는 수학적 모델링이나 예측이 어렵기 때문에 기존의 선형적 제어 알고리즘을 적용하는데는 어려움이 있으므로 인간의 경험에 주로 의존하게 된다.<sup>(4,5,6)</sup>

따라서 본 연구에서는 원하는 용융지의 크기가 주어질 때 용접 속도를 일정하게 유지하였을 경우 비드 폭과 깊이에 영향을 미치는 용접 전류와 전압을 결정하기 위한 퍼지 제어 기법을 연구하였다. 이를 위하여 모델링을 통한 온도를 최적화 하여 용융지를 해석적으로 추정한 데이터로부터 퍼지 톨을 구성하고 이로부터 원하는 비드 폭과 용입이 주어질 경우 추정된 용융지 크기에 대한 정보를 이용하여 제어 전류와 전압을 결정하는 퍼지 제어계를 구성하였다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 본 연구에서 적용한 퍼지제어 알고리즘의 타당성 및 제어 효과를 검증하고 원하는 용융지의 크기를 제어하기 위한 적합한 전압과 전류를 추정하였다.

## 2. 용접 변수의 퍼지 추론

### 2.1 용융지 크기의 퍼지 추론

퍼지추론 방식은 불확실한 수량적 정보를 다루는 수학적 기법의 일종으로서 1965년 Zadeh에 의해 제안되었다. 이 기법은 전문가의 경험이나 직관 등에 의한 규칙을 언어변수로 표현하고 구현할 수 있으며 제어 시스템에 대한 수학적 모델링을 필요로 하지 않기 때문에 비선형 시스템이나 해석이 어려운 시스템에 적용되어 여러 분야에서 활용되고 있다.

퍼지 제어에서는 입력력변수의 정의, 멤버십 함수 및 퍼지 제어규칙의 설계, 퍼지추론, 비퍼지화와 같은 과정을 통하여 제어기의 출력을 계산한다. 퍼지 제어규칙은 일반적으로 IF ~ THEN의 형태를 취하는 N개의 규칙으로 구성되는데 2개의 입력변수  $x_1, x_2$ 에 대한  $i$ 번째 규칙의 표현은 각 입력변수에 대응하는 언어적 변수  $A_i, B_i$ 를 사용하여 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_i : \text{IF } x_1 \text{ is } A_i \text{ and } x_2 \text{ is } B_i \text{ THEN } x_3 \text{ is } C_i \quad (1)$$

여기서  $x_3$ 은 출력 변수를 나타내며  $C_i$ 는 출력 변수에 대응하는 언어적 변수이다. 또한  $i$ 번째 제어 규칙에 의한 퍼지 연관행렬은 다음과 같다.

$$R_i = A_i \times B_i \times C_i \quad (2)$$

여기서  $\times$ 는 카테시안 직곱(cartesian product)을 나타내고 있으며 전체 규칙에 대한 정보는 각 규칙의 MAX 연산을 통하여 계산되어 진다.

$$R = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_N = \bigcup_{i=1}^N R_i \quad (3)$$

한편 제어량 U는 연관행렬과 입력변수로 부터 합성연산자  $\circ$ 에 의하여 식(4)와 같이 추론된다.

$$U = A \circ B \circ R \quad (4)$$

또한 연관행렬  $\mu_R(x_1, x_2, x_3)$ 과 추론  $\mu_U(x_3)$ 의 계산은 MAX-MIN 합성연산자를 이용하여 식(5), (6)과 같이 계산되는데 여기서  $\mu$ 는 각 언어변수에 대한 멤버십 함수를 나타내고 있다.

$$\mu_R(x_1, x_2, x_3) = \max_i \{ \min[\mu_{A_i}(x_1), \mu_{B_i}(x_2), \mu_{C_i}(x_3)] \} \quad (5)$$

$$\mu_U(x_3) = \max \{ \min \{ \mu_{A_i}(x_1), \max[\min[\mu_{B_i}(x_2), \mu_{R_i}(x_1, x_2, x_3)]] \} \} \quad (6)$$

그런데 현실적인 물리양인 제어기 출력  $u^*$ 는 비퍼지화 방법을 이용하여 구할 수 있으며 본 연구에서 이용한 가장 보편적인 방식인 무게중심법은 다음과 같이 표현된다.

$$u^* = \frac{\sum_i [\mu_U(u_i) \cdot u_i]}{\sum_i \mu_U(u_i)} \quad (7)$$

본 연구에서는 원하는 용융지 크기가 주어질 경우 이에 따른 용접 전류 및 전압을 결정하기 위한 제어 알고리즘에 퍼지 추론을 이용하고자 한다. 일반적으로 비드 폭은 용접 전압과 비드 깊이는 용접 전류와 밀접한 관계가 있으며 서로 복합적으로 작용하므로 이들 제어 변수를 결정하기 위해 2번의 퍼지 추론을 행하였다.

용접 전압의 제어를 위한 퍼지 추론에서 입력 변수는 식(8)과 같이 하나는 원하는 비드 폭  $bw_d$  와 측정된 비드 폭  $bw_m$ 의 차이인  $E_{bw}$  항과 비드 폭 차이의 변화율 ( $k$  번째 차이 변화와  $k-1$  번째 차이 변화와의 차이  $\Delta E_{bw}$ )항으로 출력변수는 전압의 변화량  $\Delta v$ 로 구성하였다.

$$E_{bw} = bw_d - bw_m \quad (8)$$

$$\Delta E_{bw} = E_{bw}(k) - E_{bw}(k-1)$$

한편 퍼지 제어 알고리즘을 위한 입력변수  $E_{bw}$ 와  $\Delta E_{bw}$ 의 멤버십 함수는 Fig.1과 같이 삼각형 멤버십 함수로 구성하였다.

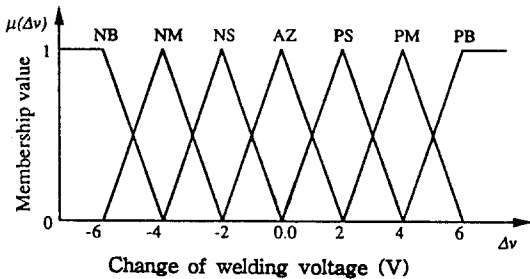


Fig.1 Triangular membership function for difference of bead width

여기서  $x$  축은 비드 폭의 차이를 나타내는데 언어적 변수 - NB(Negative Big), NM(Negative Medium), NS(Negative Small), AZ(Approximately Zero), PS(Positive Small), PM(Positive Medium), PB(Positive Big) - 7개로 구분하여 분할하였고  $y$  축은

0에서 1로 정규화된 멤버십 값이다. 비드 폭 차이에 대한 변화량도 Fig. 1과 같은 형식의 7개의 언어적 변수로 분할하여 구성하였다.

Fig.2는 제어 전압의 변화  $\Delta v$ 에 대한 멤버십 함수를 나타내고 있는데  $x$  축은 비드 폭 차이와 마찬가지로 7개의 언어적 변수 - NB(Negative Big), NM(Negative Medium), NS(Negative Small), AZ(Approximately Zero), PS(Positive Small), PM(Positive Medium), PB(Positive Big) - 로 구성하였다.

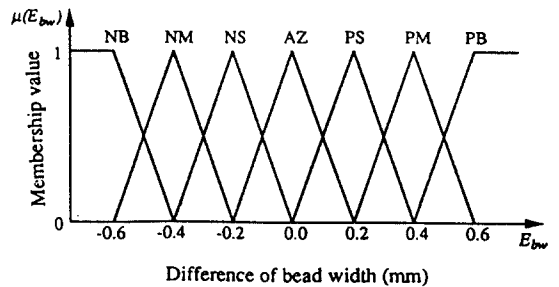


Fig.2 Triangular membership function for change of control voltage

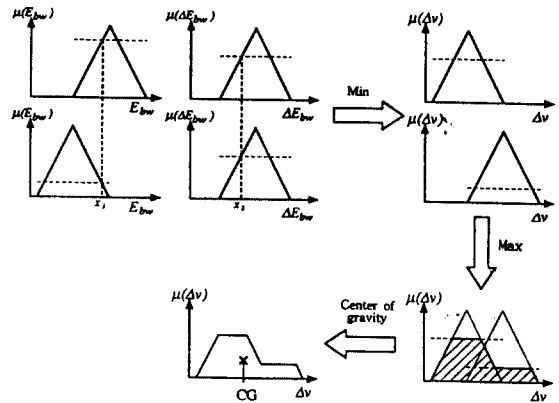


Fig. 3 Graphical representation of fuzzy inference process

Fig.3은 제어 전압의 변화량을 추론하는 절차를 도식적으로 표현한 것으로  $E_{bw}$ 와  $\Delta E_{bw}$ 로 계산된 물리량  $x_1, x_2$ 가 입력되었을 경우 MIN-MAX 연산과 비퍼지화를 통하여 추론된 무게중심(CG)에 해당하는  $x$ 값이 제어 전압의 변화량에 상당하게 된다.

Table 1은 비드 폭의 입력에 따른 각 규칙의 조합을 나타낸 판단 테이블로서 퍼지추론과 비퍼지화를 거친 출

력인 전압의 변화량은 앞 단계의 공급 전압  $v$  가감되어 새로운 제어 전압  $v'$ 을 식(9)와 같이 계산하며 이 새로운 제어 전압은 매 반복시 앞 스텝의 전압을 대치하여 제어를 수행하게 된다.

$$v' = v + \Delta v \quad (9)$$

Table 1. Decision table of linguistic value for each rules

$E_{bv}$ / $\Delta E_{bv}$	NB	NM	NS	AZ	PS	PM	PB
NB	AZ	PS	PM	PM	PB	PB	PB
NM	NS	AZ	PS	PM	PM	PB	PB
NS	NM	NS	AZ	PS	PM	PM	PB
AZ	NM	NM	NS	AZ	PS	PM	PM
PS	NB	NM	NM	NS	AZ	PS	PM
PM	NB	NB	NM	NM	NS	AZ	PS
PB	NB	NB	NB	NM	NM	NS	AZ

한편 용접 전류의 제어를 위한 퍼지 추론에서는 입력 변수를 식(10)과 같이 정의하였는데  $E_{bd}$ 는 원하는 용입  $bd_d$ 와 용융지 예측기에 의한 추정 용입  $bd_e$ 의 차이를 나타내고 있으며  $\Delta E_{bd}$ 는 차이의 변화율을 의미한다. 그리고 출력인 추론 결과는 제어 전류의 변화량  $\Delta i$ 로 하였다.

$$E_{bd} = bd_d - bd_e \quad (10)$$

$$\Delta E_{bd} = E_{bd}(k) - E_{bd}(k-1)$$

Fig. 4는 입력변수  $E_{bd}$ 와  $\Delta E_{bd}$ 의 멤버십 함수를 나타내고 있으며 Fig. 5는 출력 변수인 제어 전류의 변화량에 대한 멤버십 함수이며 언어적 변수나 형태는 Fig.1, Fig.2와 동일하다. 또한 제어 전압에 대한 추론과 마찬가지로

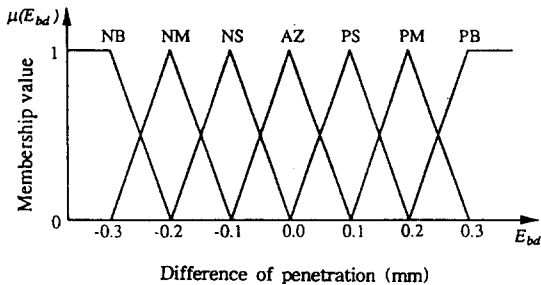


Fig. 4 Triangular membership function for difference of penetration

지로 제어 전류에 대한 판단 테이블도 Table 1과 동일하게 구성할 수 있으며 새로운 제어 전류  $i'$ 는 퍼지 추론에 의한  $\Delta i$ 를 이용하여 식(11)과 같이 계산할 수 있다.

$$i' = i + \Delta i \quad (11)$$

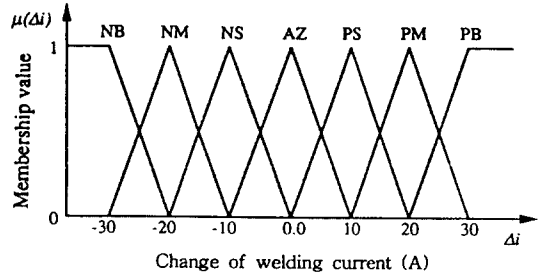


Fig. 5 Triangular membership function for change of control current

## 2.2 퍼지 제어 시스템 구성

본 시뮬레이션에서는 용융지의 크기가 주어졌을 경우 이를 효과적으로 용접하기 위한 제어 전류와 전압 결정을 위한 퍼지 제어계를 구성하고 그 효과를 검증하였다. Fig. 6은 용접 전류와 전압을 제어하기 위한 퍼지 제어계의 구성을 나타내고 있으며 퍼지 추론부 1의 입력 변수로 비드 폭의 차이와 이에 대한 변화량이 입력되며 추론 결과로서 제어 전압이 출력된다.

또한 퍼지 추론부 2의 입력 변수로는 비드 깊이의 차이와 이에 대한 변화량이 입력되며 출력은 퍼지 추론에 의한 제어 전류이다. 한편 제어 전류와 전압은 용접 과정에 적용되고 용접 후 측정된 온도는 앰프를 거쳐 증폭된 후 비드 폭과 용입의 추정을 위한 용융지 예측기로 입력된다.

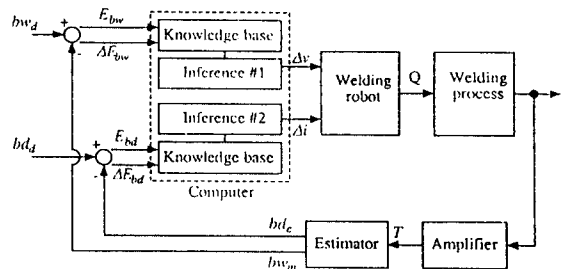


Fig. 6 Schematic diagram of fuzzy controller for welding

예측기에서는 비드 폭과 용입이 계산되어 다시 퍼지 제어기의 입력 변수로 변환됨으로써 새로운 제어 전류와 전압을 추론하게 된다.

### 3. 컴퓨터 시뮬레이션

#### 3.1 용융지 크기에 대한 추정 성능 평가

컴퓨터 시뮬레이션에서는 퍼지 추론을 통해 계산된 제어 전류와 전압에 의해 로봇이 용접한 비드 폭과 용입이 원하는 물리량에 수렴하는 정도를 측정하였다. 제어 효율은 원하는 비드 폭과 용입이 변화할 경우 이에 대한 추정 성능과 수렴 속도를 평가하였다. 또한 원하는 용융지 크기의 용접을 위한 적합한 제어 전류와 전압의 산출에 대한 시뮬레이션을 수행하여 제어 알고리즘 및 역문제 해결의 타당성을 검증하였다.

Fig. 7은 원하는 비드 폭이 용접 구간 내에서 12mm, 13mm, 11mm 로 각각 변화할 경우 이에 대한 퍼지 제어기의 비드 폭에 대한 추정 성능과 원하는 값에 대한 수렴 속도를 평가한 것을 나타낸다.

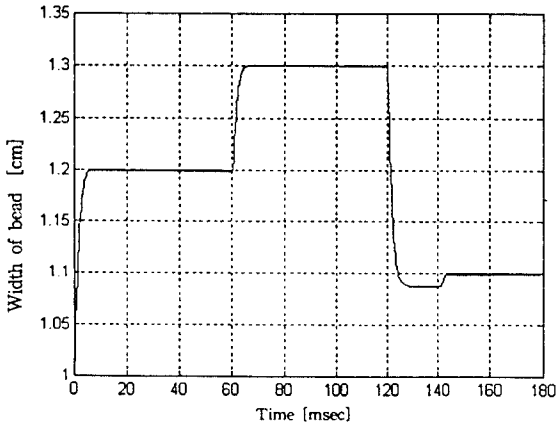


Fig. 7 Estimation of desired bead width by fuzzy controller

그림에서 x축은 퍼지 제어기의 계산 시간을 나타내고 있으며 1회의 계산 시간은 약 0.4 ms 이다. 또한, y축은 비드 폭을 나타내며 원하는 비드 폭이 용접 구간 내에서 임의로 변화할 경우에도 우수한 추정 성능을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 그림에서 원하는 비드 폭과 추론된 비드 폭의 차이가 0.1mm 보다 작게 되는 구간까지의

수렴 속도는 약 6ms 이며 따라서 실시간 처리나 용접 성능에 큰 어려움 없이 온라인 제어계를 설계할 수 있을 것이다.

한편 Fig.8은 원하는 용입이 3mm, 1mm, 2mm 로 변화할 경우 이에 대한 제어 성능을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 비드 폭에 대한 추정 보다는 다소 수렴 성능이 떨어지는데 이것은 퍼지 룰의 구성시 제어 전류의 변화량이 제어 전압의 경우 보다 5배 정도 크기 때문에 출력값의 발산이나 오버 슈트(overshoot)를 방지하기 위하여 비드 폭에 대한 경우 보다 완만한 값으로 용입이 결정 되도록 추론을 행하기 때문이다. 그러나 전반적으로 원하는 용입이 용접 구간 내에서 임의로 변화할 경우에도 양호한 결과를 산출할 수 있을 것으로 기대되며 멤버십 함수에 대한 x축 구간을 차등적으로 분할함으로써 추정 성능을 향상시킬 수 있을 것이다. 한편 이 경우 원하는 용입과 추론된 용입의 차이가 0.1mm 보다 작게 되는 수렴 시간은 14ms 이므로 비드 폭의 경우와 마찬가지로 실시간 제어계의 구성에는 큰 어려움이 없을 것으로 기대된다.

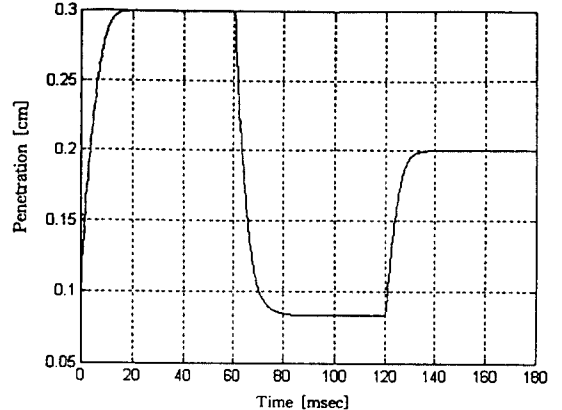


Fig. 8 Estimation of desired penetration by fuzzy controller

#### 3.2 용융지 크기에 대한 제어 전류, 전압의 결정

Fig. 9와 Fig. 10은 비드 폭과 용입이 12mm와 3mm로 각각 주어졌을 경우 퍼지 제어에 의한 용접전압과 전류를 나타내고 있다.

그림에서 알 수 있듯이 제어 전압의 경우 약 23.5V 로 수렴되며 제어 전류는 약 145A이다. 이 결과는 실제의 용접시 인간의 경험적인 제어 변수값과 일치하며 따라서

퍼지 추론에 의하여 용융지 크기가 주어졌을 경우 적합한 제어 전류와 전압을 찾는 역문제를 효과적으로 해결할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 용융지의 크기가 주어졌을 경우 퍼지 추론 방식을 적용하여 제어 전류와 전압을 결정할 수 있는 퍼지 제어 방식을 연구하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

전류를 구하는 역문제 해결을 위한 퍼지 물음 구성 하였다.

- 용융지 크기가 주어졌을 경우나 예측된 용융지의 크기에 오차가 발생할 경우 최적의 제어 전류와 전압을 결정하기 위하여 퍼지 제어 알고리즘을 적용하여 그 타당성을 검토하였다.
- 추론된 전압, 전류에 의한 용융지 크기의 결정을 위한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 퍼지 추론방식에 의한 제어 효과를 검증하였으며 원하는 용융지 크기의 용접을 위한 적합한 제어 전압과 전류를 추정하였다.

향후에는 제어 효과를 높이기 위하여 멤버쉽 함수에 대한 차등적 구간 분할이 필요할 것으로 생각되며 전압, 전류 결정을 위한 퍼지 추론부를 통합하여 학습시킴으로써 수렴 시간이나 제어계의 실시간 효율을 향상시키는 연구가 필요할 것으로 생각된다.

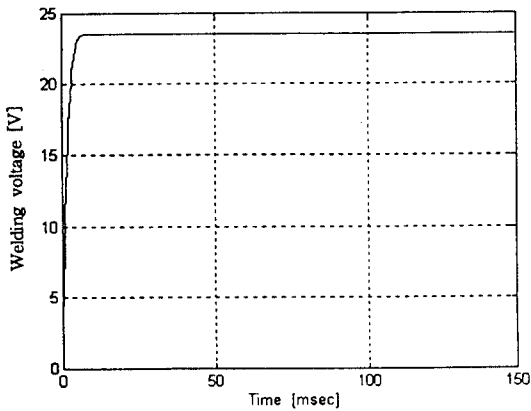


Fig. 9 Estimation of welding voltage by fuzzy inference

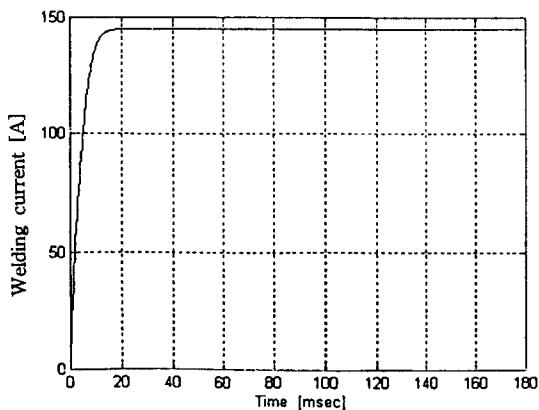


Fig. 10 Estimation of welding current by fuzzy inference

- 용접 모델을 통한 온도의 최적화를 통하여 용융지의 크기를 해석적으로 예측한 결과로부터 제어 전압과

이 논문은 1996년도 학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

#### 참 고 문 헌

- K. C. Tsao, C.S.Wu, "Fluid Flow and Heat Transfer in GMA Weld Pools", Welding Reserch, March, pp.70-s ~ pp.75-s, 1988
- P. Sicard, M. D. Levine, "An Approach to an Expert Robot Weling System", IEEE Trans. on SMAC., Vol. 18 No.2, pp.204~pp.222, 1988
- S. B. Song, D. E. Hardt, "Closed-Loop Control of weld Pool Depth Using a Thermally Based Depth Estimator", Welding Reserch, October, pp.471-s ~ pp.355-s, 1993
- 大嶋健司, 外 1 人, "ファジイ制御の溶接・接合技術", 日本溶接學會誌, 第60卷, 第1號, pp.2~pp.16, 1991
- 前川仁, 外 2 人, "アーク溶接におけるファジイ知識表現法", 日本溶接學會誌, 第8卷, 第1號, pp.84~pp.90, 1990
- 임태균 외 2 인, "신경회로를 이용한 GMA 용접공정에서의 용융지의 크기 제어", 대한용접학회지, 제12 권, 제1호, pp.232 ~ pp.245, 1994

7. 井上勝敬, "接合・加工プロセスへの技術の應用", 日本溶接學會誌, 第66卷, 第1號, pp.61 ~ pp.67, 1991
8. T. W. Eagan, N. S. Tsai, "Temperature Fields Produced by Traveling Distributed Heat Sources", Welding Reserch, December, pp.346-s ~pp.355-s, 1983
9. T. Kasuya, N. Yurioka, "Prediction of Welding Thermal History by a Comprehensive solution", Welding Reserch, March, pp.107-s~ pp.115-s, 1993