

다음과 같다

(1) A의 보집합 A'의 Membership 함수 $\mu_{A'}(x)$ 는

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (2)$$

(2) A와 B의 교집합 A \cap B의 Membership 함수 $\mu_{A \cap B}$ 는

$$\mu_{A \cap B} = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (3)$$

(3) A와 B의 합집합 A \cup B의 Membership 함수 $\mu_{A \cup B}$ 는

$$\mu_{A \cup B} = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (4)$$

퍼지의 관계형렬과 추론

퍼지 관계는 Mamdani 와 Assilian 에 의해 사용된 곱집합에 의해 정의된다. 즉, 두가지 집합 U={x} 와 V={y} 의 관계형렬 R의 Membership 함수 μ_R 은

$$\mu_R(x, y) = \mu_{U \times V}(x) = \min\{\mu_U(x), \mu_V(y)\} \quad (5)$$

로 정의된다.

이때 U에서 V로의 퍼지 관계형렬 R과 주어진 U의 퍼지 부분집합 A에 의해 퍼지 부분집합 B는 다음식으로 추론된다.

$$B(y) = A(x) \cdot R(x, y) = A(x) \text{ or and } R(x, y) \quad (6)$$

여기서, \cdot 는 composition operator 이다.

즉, B의 Membership 함수 $\mu_B(y)$ 는

$$\mu_B(y) = \max\{\min\{\mu_R(x, y), \mu_A(x)\}\} \quad (7)$$

이다.

2.2 퍼지 논리 제어기

공정제어를 위한 퍼지 집합

퍼지 제어기의 입력 변수로 기준 표면온도와 측정된 표면온도와의 오차 (E), 그 오차의 변화 (CE) 그리고 출력변수로 열 입력 (U)을 선정하였으며 아래와 같이 정의한다.

$$e(k) = T_{ref} - T(k) \quad (8)$$

$$E = Ge \times e(k) \quad (9)$$

$$CE = Gce \times (e(k) - e((k-1))) \quad (10)$$

$$u(k) = Gu \times U \quad (11)$$

여기서, T_{ref} = 기준 표면온도

$T(k)$ = 측정된 표면온도

$e(k)$ = 기준 표면온도와 측정된 표면온도와의 오차

Ge = error scaling factor

Gce = change of error scaling factor

Gu = control input scaling factor

Fuzzify

퍼지 논리제어기의 추론기는 모든 공정변수들을 퍼지값으로 처리하므로 퍼지 논리제어기를 구성하는데 있어서 각 변수들을 퍼지변수화 하여야

한다. 퍼지 집합들은 discrete 가 아닌 연속적인 전체 논의 집합 상에서 정의하였다. 모든 공정의 퍼지값은 [0, 1] 의 Membership grade 를 갖는 일반화된 Membership 함수 (Generalized membership function) 로 정의하였다.

퍼지 집합들은 -3에서 +3 사이의 정수값을 대표값으로 하여 다음과 같이 7개의 Linguistic variables 로 설정하였으며, Fig.1에 나타내었다. 그림에서 PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB 은 다음과 같다.

PB : Positive Big

PM : Positive Medium

PS : Positive Small

ZO : Zero

NS : Negative Small

NM : Negative Medium

NB : Negative Big

이러한 연속적인 전체 논의 집합에서 정의되는 퍼지 집합의 표현은 Membership 함수에 의해서만 가능하며 그 값은 연산을 통해 구해지게 된다. 따라서 비교적 간단한 삼각형 형태로 Membership 함수를 설계하였다. 이때 이 Membership 함수가 서로 겹치는 비율이 해당 퍼지 집합의 Fuzzy 한 정도를 나타낸다.

제어 법칙 (Rule Base)

룰 베이스는 퍼지 제어에 있어 핵심적인 부분으로 그 형태는 다음과 같다.

$$\text{"If } E \text{ is } E_k \text{ and } CE \text{ is } CE_k \text{ then } U \text{ is } U_k"} \quad (12)$$

제어 입력 변수를 E 와 CE의 2개로 하고 각각에 대해 7개의 퍼지 집합을 정의하였으므로 가능한 룰의 조합은 49 개가 된다. 이를 다음과 같이 7×7 의 2 차원 행렬을 이용하여 표시할 수 있다.

$$U = \text{Rule}(E, CE) \quad (13)$$

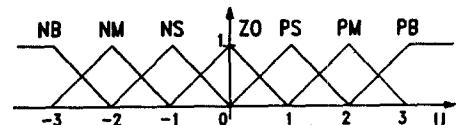
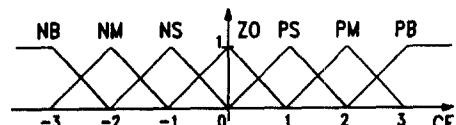
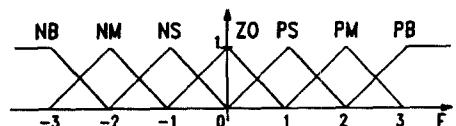


Fig.1 Membership functions of fuzzy variables

퍼지 추론 (Fuzzy reasoning)

퍼지 추론 과정이란 관계행렬을 이용하여 이루어지며, 퍼지 제어는 각각의 룰들을 종합하여 전체 관계행렬을 구함으로서 이루어진다.

Mamdani 가 제안한 방법에 의해 식 (12) 의 k 번째 법칙의 관계행렬은 식 (5)로부터 다음과 같이 표현된다.

$$R_k = E_k \times CE_k \times U_k = D_k \times U_k \quad (14)$$

여기서, $D_k = E_k \times CE_k =$ 만족도 (Degree of fulfillment) 이고 R_k 는 k 번째 법칙의 관계 행렬이다. 여러개의 법칙으로 구성되는 제어기의 경우 이러한 각각의 법칙에 대한 관계 행렬을 구하여 합집합 연산을 통해 전체 관계 행렬인 R 을 구한다.

$$R = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_k \cup \dots = \cup R_k \quad (15)$$

여기서, R은 Membership 값 $\mu_R(e, ce, u)$ 로 표현되는 3차원 행렬이다. 제어시 퍼지추론의 출력은 입력변수 D(e,ce)로부터 식(4)에 의하여 다음과 같이 추론된다.

$$Y(e, ce, u) = D(e, ce) + R(e, ce, u) \quad (16)$$

즉, Y(e,ce,u)의 Membership 함수 $\mu_Y(e,ce,u)$ 는

$$\mu_Y(e, ce, u) = \text{MAX} \{ \text{MIN} \{ \mu_R(e, ce, u), \mu_D(e, ce) \} \} \quad (17)$$

이다.

퍼지 변수의 Defuzzify

추론된 퍼지집합 B(y)에서 대표값 Y_r 를 선정하는 Defuzzify 방법으로는 중심법, 높이법등 여러가지가 있으나 이 중에서 비교적 계산이 간단하기 때문에 많이 사용되는 높이법을 소개한다. 이때 높이법의 계산식은 다음과 같다.

$$Y_r = \sum_i Y_i \mu_B(y_i) / \sum_i \mu_B(y_i) \quad (18)$$

여기서 Y_i = Membership 함수의 fuzzy subsets의 대표값.

$\mu_B(y_i)$ = 퍼지 집합 $B(y_i)$ 의 Membership 함수.

2.3 자기구성 퍼지제어(Self Organized Fuzzy Linguistic Control)

교정 룰을 갖는 퍼지제어 방식은 작업자의 경험이나 사전지식에 근거하여 룰을 형성하고, 그 룰이 제어기의 작동상황에 관계없이 고정되어 있기 때문에 비교적 강건하고 우수한 성능을 발휘하나, 시스템의 복잡 정도가 증가하고 비선형성이 보다 강한 시스템을 제어하는 경우에는 경험이나 사전 지식만으로 룰을 구성하는 것이 매우 어렵다. 이러한 보다 복잡한 시스템의 퍼지제어에 작업상황의 변화에 따라서 룰의 변화를 갖는 Improving Mechanism 기능을 부여한 퍼지 제어기로서 자기 구성 퍼지제어기가 있다.

SOC는 기준의 룰에 의한 제어가 제어대상 플랜트에 적합 정도를 측정하고, 적합하지 않은 정도를 교정해 주는 구조로 구성되어 있다.

Improving Mechanism

자연 시간 nT 를 갖는 제어 대상 플랜트에서 샘플링 시간 nT 에서 측정한 플랜트 출력의 기준값에 대한 오차와 그 오차변화가 각각 $e(nT)$ 와 $ce(nT)$

)라 하면 이 값들을 이용하여 Improving Mechanism에 의해서 교정되어야 할 제어률의 강화정도를 구한다. 교정되어야 할 룰의 강화정도를 $p(nT)$ 라 하면, $p(nT)$ 는

$$p(nT) = IM\{ e(nT), ce(nT) \} \quad (19)$$

로 표현된다. 여기서 IM{}은 Improving Matrix이고, $e(nT)$ 와 $ce(nT)$ 는 각각 샘플시간 nT 에서의 오차와 오차변화에 대한 퍼지 변수이며, T 와 n 은 샘플 주기와 샘플 수를 나타낸다.

샘플 시간 nT 에서의 오차 $e(nT)$ 와 오차변화 $ce(nT)$ 는 플랜트의 지연시간 mT 전의 제어입력 $U(nT-mT)$ 의 영향이므로 제어입력 $U(nT-mT)$ 은 다음과 같이 교정되어야 한다.

$$V(nT-mT) = U(nT-mT) + p(nT) \quad (20)$$

여기서 $e(nT-mT)$, $ce(nT-mT)$ 와 $U(nT-mT)$ 사이의 룰 형태를 다음과 같이 가정하면

"If E is E_k and If CE is CE_k then U is U_k "

$$\rightarrow E_k \rightarrow CE_k \rightarrow U_k \quad (21)$$

$$\rightarrow R'(nT) = E(nT-mT) \times CE(nT-mT) \times U(nT-mT)$$

식 (21)의 룰은 식 (19)에 의해 교정되어야 하므로 다음과 같이 변환되어야 한다.

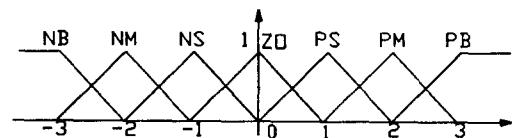


Fig. 2 Membership Function for the Improve SOC

CE \ E	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NM	NB	NM	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NM	NM	NS	ZO	PS	PM
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PM	PB	PB	PB

Fig. 3 Improving rule for modification of fuzzy control rules

$$\begin{aligned}
 & \text{"If } E \text{ is } E_k \text{ and If } CE \text{ is } CE_k \text{ then } U \text{ is } V_k" \\
 \rightarrow & E_k \rightarrow CE_k \rightarrow V_k \\
 \rightarrow & R''(nT) = E(nT-mT) \times CE(nT-mT) \times V(nT-mT) \quad (22)
 \end{aligned}$$

이러한 틀 변화의 형태를 관계행렬로 표시하면 다음과 같이 표현한다.

$$R(nT+mT) = \{ R(nT) \cap R'(nT) \} \cup R''(nT) \quad (23)$$

3. 예측기를 이용한 퍼지 SOC

앞 절에서 언급한 퍼지 SOC는 제어 법칙을 개선시키는 근거로서 현재의 측정된 플랜트의 출력을 이용하여 그 출력에 영향을 미치는 제어법칙을 개선시키고 있다. 이러한 퍼지 SOC를 시간 지연이 있거나 전달 지연이 있는 플랜트의 제어에 이용할 경우에는 천이 과정에서의 성능이 매우 안좋은 응답 특성을 유발한다. 따라서, 본 논문에서는 퍼지 예측기를 이용하여 퍼지 제어기에서 나오는 제어 입력으로 미리 예측되는 플랜트의 오차를 예측하고 그 결과를 가지고서 제어 법칙을 개선시켜주므로써 보다 뛰어난 제어 성능을 얻고자 한다. 예측기를 이용한 퍼지 SOC의 블록선도는 Fig. 4에 나타내었다. 퍼지 예측기는 한 스텝 이전의 오차변화 CE^o 와 현재의 제어입력 U , 그리고 현재 플랜트의 오차변화 CE 와의 퍼지 관계에서부터 현재의 CE 와 U 에 대한 예측되는 오차변화 CE 를 구한다. 그 관계식은 다음과 같다.

$$R_k^o = CE_k^o \times U_k \times CE_k \quad (24)$$

$$R_k^p = CE_k \times U_k \times CE_k \quad (25)$$

예측되는 오차의 양은 예측된 오차 변화와 그 전단계에서의 오차의 합으로 표현된다.

식 (24)에서 (25)에 의해서 구해진 예측 오차 변화와 예측 오차를 이용하여 퍼지 SOC의 제어 법칙의 개선 구조 (Improving mechanism)은 앞점의 SOC와 같은 방법으로 이루어진다.

제어법칙 개선구조 (Improving mechanism)에 의해서 보완되어야 할 제어양 ΔU_k 가 계산되면 $e(k)$ 와 $ce(k)$ 에 영향을 미치는 제어입력 $U(k-m)$ 에 ΔU_k 를 합한 V_k 가 추론되도록 제어법칙을 수정한다.

본 논문에서는 계산상의 편리를 위해 관계된 제어법칙중에서 가장 크게 영향을 미치는 제어법칙만을 변화시켜서 V_k 를 추론하도록 하였다.

4. 시뮬레이션

4.1 아크 용접 공정의 동적 거동

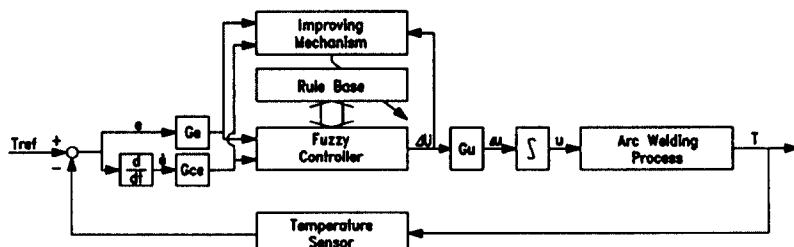


Fig.5 Block diagram of self organizing fuzzy controller for arc welding process control.

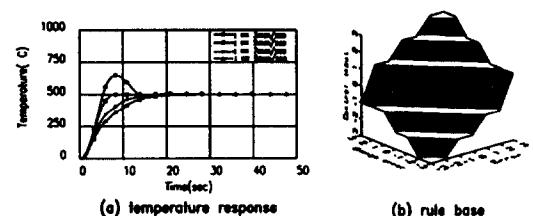


Fig.4 Temperature response of simple fuzzy controller for various welding speed and rule base. (material thickness = 4 mm, arc efficiency = 0.7 and arc distribution = 3 mm)

아크 용접에서의 퍼지 SOC의 성능 평가를 위해 사용한 아크 용접 공정의 수학적 모델은 Boo & Cho (6)의 (13)에서 구한 박판의 아크 용접 공정에서의 온도거동을 나타내는 모델을 셋으며 다음과 같이 표현된다.

$$T(x,y,z,t) - T_0 =$$

$$\begin{aligned}
 & \int q(t_1) / \{ \pi \rho c_p d [\sigma^2 + 2\alpha(t-t_1)] \} \\
 & \times \exp \left(-[(x+X_m(t)-X_m(t_1))^2 + (y+Y_m(t)-Y_m(t_1))^2] / [2\sigma^2 \right. \\
 & \left. + 4\alpha(t-t_1)] \right) \\
 & \times \sum A_n \exp(-\mu_n^2(t-t_1)) \{ \cos(\mu_n z / \sqrt{\alpha}) + \beta_1 \sqrt{\alpha} / \mu_n \cdot \right. \\
 & \left. \sin(\mu_n z / \sqrt{\alpha}) \}
 \end{aligned}$$

여기서, $T(x,y,z,t)$ 는 용접 토치의 위치 ($X_m, Y_m, 0$)에서 $(x, y, 0)$ 만큼 떨어진 점의 시간 t 에서의 온도를 나타낸다. α 는 열전도. ρ 와 c_p 는 각각 용접물의 밀도와 비열. 그리고 σ 는 아크의 유효반경을 나타낸다. 그리고,

$$A_n = \mu_n^{-2} (\mu_n^{-2} + \alpha \beta_1^{-2} + 2\alpha \beta_1 / d)$$

$$\beta_1 = h_1 / k \quad (h_1 \text{은 표면에서의 열순실 상수. } k \text{은 열전도계수})$$

$$\mu_n = \text{임의 상수}$$

이다.

4.2 결과 및 검토

고정된 제어법칙을 갖는 퍼지 제어기와 기존의 Mamdani 등에 의해서 제안된 SOC를 아크 용접공정에 적용하여 그 각 제어기의 제어 특성을 앞 절에서 언급한 용접공정의 수학적 모델을 이용하여 살펴보았다. 시뮬레이션에 사용된 용접조건은 용접시편두개 4 mm. 아크 효율 0.7 및 아크분포가 3 mm인 경우이며, 사용된 시편의 물리적 성질은 연강의 물리적 성질을 사용하였다.

Fig 4는 미리 작업자의 경험에 의해서 결정한 Fig4(b)와 같은 제어법칙 기준을 갖는 단순 퍼지 제어기를 속도를 변화시켜가며 용접공정의 출력온도를 일정하게 유지하도록 얼 입력 제어를 한 결과이다. 여기에서 사용된 퍼지 제어기의 설계 요인으로서 오차 이득과

오차 변화이득 및 열 입력 scaling factor 는 용접속도가 5 mm/s 일때를 기준하여 결정하였으며 그 값은 $g_e = 0.01$, $g_{ce} = 0.02$. 그리고 $g_u = 0.001$ 이다. Fig 4에서 알 수 있듯이, 용접속도가 3 mm/s일때 아주 심한 overshoot 를 갖는 응답특성을 보여주며, 속도가 빨라질수록 응답속도가 느려짐을 알수있다.

이는 이러한 단순한 고정된 제어법칙을 갖는 경우에는 용접속도가 변화함에 따라 그 설계인자들도 따라서 변화시켜 주어야 함을 나타낸다. 이러한 용접공정의 특성은 용접속도에 따라서 용접 공정의 동적특성에 맞게 변화시켜 주어야함을 나타낸다. 이러한 용접공정의 특성은 용접속도에 따라서 용접공정의 동적특성이 비선형적인 관계를 나타내기 때문이며, 따라서 여기에 대한 적합한 대책이 요구된다.

Fig 6 는 앞절에서 언급한 SOC (Self Organized Control) 를 용접속도가 3 mm/s 일때 적용한 것으로서, 초기의 제어 법칙은 앞의 단순 고정 제어법칙 경우와 같이 두고서, SOC 의 알고리즘에 따라서 그 제어법칙이 어떻게 변화하며 또한 그때의 응답온도곡선이 받는 영향을 나타내었다. 용접의 횟수가 진행될수록 기존의 제어 법칙을 Improving Mechanism 에 의해 수정하고 있으나 그 수정결과는 초기의 제어법칙 결과보다도 성능이 떨어진 제어법칙을 제공하고 있다. 특히, 2 번째와 3 번째 용접시행에서 기준점 500 °C 를 중심으로 심하게 진동하는 경향을 보여주고 있는데 이는 용접속도 3 mm/s 의 용접 공정의 동적특성에 아주 느리게 변화하는데 그 원인이 있다.

즉, 초기에 오차를 줄이기 위하여 과도한 입력을 가하여도 용접 공정의 느린 동적 특성으로 인하여 그 입력에 반응하지 않는다. 그 결과 SOC 알고리즘에 따라 더욱 더 큰 입력의 보정이 이루어져서 보다 큰 입력이 가해지게 되고, 어느정도 시간이 경과된 후부터 그 입력에 반응하여 심한 overshoot 를 나타낸다. 이 결과에 따라 제어 입력은 다시 감소하게되나 느린 동특성으로 인하여 온도 응답곡선은 감소한 입력에 즉시 반응을 나타내지 않는다. 그러한 과정의 연속으로 인하여 기준점을 중심으로 응답곡선은 심하게 진동하게 된다.

제어법칙이 변화하는 상태를 살펴보면 용접이 거듭될수록 제어법칙은 3 과 -3 의 대표값을 갖는 PB 나 NB 으로 형성되어감을 알수있다. 따라서, 그 결과로 예측할 수 있는 바는 이러한 SOC 알고리즘으로는 더 이상의 좋은 성능을 기대하기 어려운 응답 특성을 보여주리라 예상된다.

Fig. 8 는 예측기에 근거해서 제어법칙이 개선되는 SOC 알고리즘에 의한 제어 결과를 보여준다. 앞의 SOC 에 비하여 매우 우수한 제어 결과를 보여주며, 세번째 용접시행 이후부터는 제어 법칙의 변화가 안정화되어 다시 제어 법칙의 변화가 발생하지 않음을 알 수 있다. 이상의 결과에서부터 시간 지연 또는 전달 지연이 있는 아크 용접

공정과 같은 공정의 재어에 있어 펴지 SOC 의 제어법칙 개선 구조는 예측기에 의한 오차와 오차 변화를 이용하는것이 그렇지 않은 경우 보다 훨씬 안정화된 결과를 보여줄 수 있다.

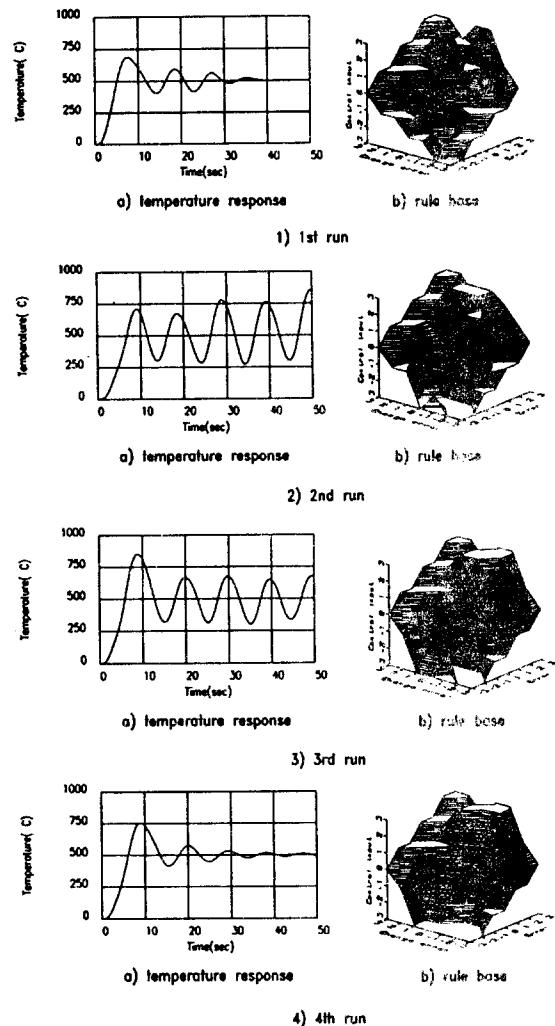


Fig. 6 temperature responses and rule bases of self organized fuzzy controller via trial number of run in arc welding process control. (travel speed = 3mm/sec, material thickness = 4 mm, arc efficiency = 0.7 and arc distribution = 3 mm)

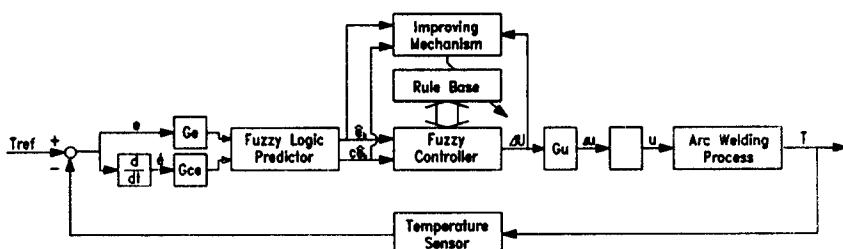


Fig. 7 Block diagram of SOC controller with fuzzy predictor for arc welding process control.

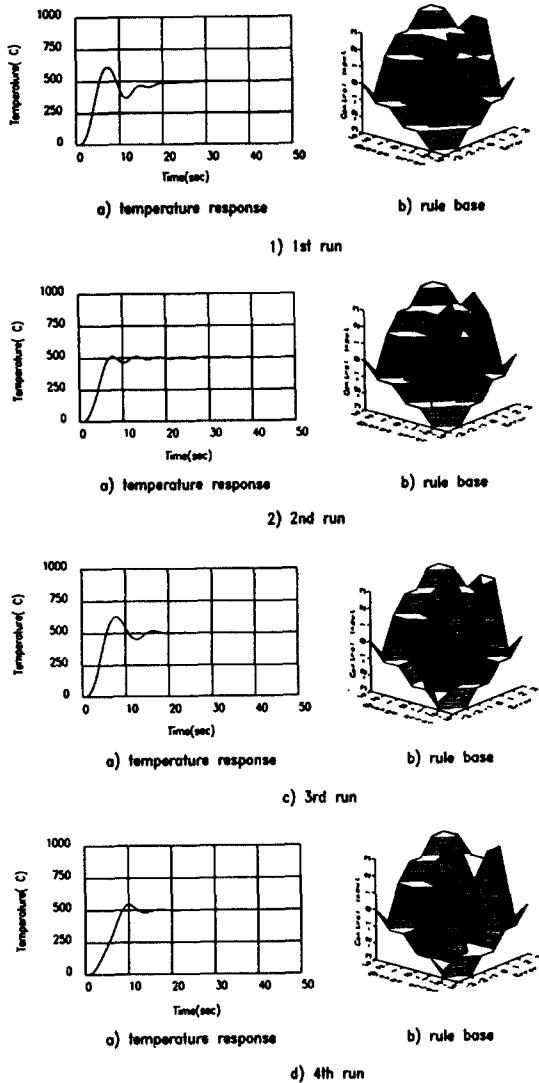


Fig. 8 Temperature responses and rule bases of proposed self organized fuzzy controller via trial number of run in arc welding process control. (travel speed = 3 mm/sec, material thickness = 4 mm, arc efficiency = 0.7 and arc distribution = 3 mm)

5. 결 론

예측기를 이용한 퍼지 SOC 알고리즘을 제안하였으며, 제안된 퍼지 제어기의 제어 특성을 고찰하기 위해 전달 지연이 있는 아크 용접 공정에 적용하였다. 그 결과 다음과 같은 결론이 가능하였다.

- 1) 용접대상 시편의 물리적, 열적인 비선형 특성이 고려되지 않은 상태에서도 용접속도의 변화에 따른 용접공정의 비선형 동적특성이 퍼지 제어기의 성능에 많은 영향을 준다.
- 2) 특히 용접속도가 비교적 느린 경우에 용접공정의 동적특성이 매우 느린 특성을 보여주며, 이러한 느린 공정의 특성을 고려한 설계가 요구된다.
- 3) 예측기에 의한 예측 오차와 오차 변화를 이용하여 SOC의 제어 법칙 개선구조 (Improving Mechanism)을 개선시키므로 전달 지연을 갖는 아크 용접 공정의 제어시 보다 우수한 온도 응답 특성을 얻을 수 있었다.

참고 문헌 .

- (1) E. H. Mamdani and Assilian, "An experiment in linguistic synthesis with a Fuzzy logic controller", Int. j. of Man-Machine studies, 7(1974), 1-13.
- (2) E. H. Mamdani, "Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis", IEEE Trans. Computer C-26, No. 12, pp 1182-1191, 1977.
- (3) L. A. Zadeh, "Fuzzy sets", Information and Control, Vol. 8, pp 338-353, 1965.
- (4) T. J. Procyk and E. H. Mamdani, "A Linguistic Self-Organizing Controller", Automatica, Vol. 15, pp 15-30, 1979.
- (5) G. Langari and M. Tomizuka, "Self-Organizing Fuzzy Linguistic Control With Application To Arc Welding", IEEE, Inter. Workshop on Intelligent Robots and System, Tsuchiura, Japan, pp 1007-1014, 1990.
- (6) K. S. Boo and H. S. Cho, "Transient Temperature Distribution in Arc Welding of Finite Thickness Plates", Proc. of Int. Mech. Eng., to be published, 1990