

# 인버터 DC 저항점용접 공정에서 CRS 알고리즘을 이용한 정전류 퍼지 제어시스템 설계에 관한 연구

박형진\* · 박평원\* · 유지영\* · 김동철\*\* · 강문진\*\* · 이세현\*\*\*,†

\*한양대학교 대학원 기계공학과

\*\*한국생산기술연구원

\*\*\*한양대학교 기계공학과

## Study of the Constant Current Fuzzy Control System Design using CRS Algorithm during Inverter DC Resistance Spot Welding Process

Hyoung Jin Park\*, Pyeong Won Park\*, Jiyoung Yu\*, Dong Cheol Kim\*\*, Mun Jin Kang\*\* and  
Sehun Rhee\*\*\*,†

\*Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

\*\*Advanced Welding&Joining R&D Department, KITECH, Incheon, 406-840, Korea

\*\*\*Div. of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

†Corresponding author : srhee@hanyang.ac.kr

(Received August 30, 2010 ; Revised September 29, 2010 ; Accepted December 8, 2010)

### Abstract

The purpose of this study is to propose a method to decide near-optimal settings of the constant current fuzzy control parameters using a controlled random search. This method tries to find the near-optimal settings of the constant current fuzzy control parameters through experiments. It has an advantage of being able to carry out searches in the search domain which includes some irregular points. The method suggested in this study was used to determine the fuzzy control parameters by which the desired welding current were formed during inverter DC resistance spot welding. The output variable was the ITAE (integral of time multiplied by the absolute error). This output variable was determined according to the input variables, which are the GE, GDE, and GDU. This study described how to obtained near-optimal welding current condition over a wide search space conducting a relatively small number of experiments.

Key Words : Resistance spot welding, Inverter welding system, Fuzzy, Scaling factor, Optimization controlled random search, ITAE

### 기 호 설 명

u : system input  
y : system output  
GE : scaling factor for error  
GDE : scaling factor for difference of error  
GDU : scaling factor for correcting quantity as  
output of fuzzy controller  
ITAE : integral of time multiplied by the absolute  
error

### 1. 서 론

저항점용접에서 사용되는 용접전류의 형태는 크게 교류(AC)와 직류(DC)로 나뉘며 일반적으로 직류를 사용하는 경우가 교류에 비해 더 우수한 용접품질과 더 넓은 적정 용접 조건의 범위를 확보할 수 있는 것으로 알려져 있다<sup>1)</sup>. 또한 최근 경량화, 방청(corrosion control)화의 요구가 증가됨에 따라 도금강판, 고장력 강판 및 알루미늄 합금의 적용이 확대되고 있다. 이러한 재료의 용접을 위해서 안정화된 고 전류출력과 빠른 제어주기

의 장점을 가지고 있는 인버터 DC 저항점용접기의 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 특히 용접전류는 용접기 회로의 전기적인 특성을 바탕으로 제어시스템에서 조절되는 인자로서 용접품질에 가장 큰 영향을 끼치므로 스파터(spatter) 등 용접결함의 발생을 억제하기 위해서는 정전류 제어가 필요하다. 스파터의 발생은 용접부위의 강도 저하를 초래하며 스파터시 발생하는 용융 금속의 돌출은 도장성이나 외관 품질을 떨어뜨리며 금속입자로 인하여 생산 환경을 오염시킨다.

이러한 스파터 발생의 억제를 위해 본 연구에서는 제어성능이 우수하고 용접시간, 용접전류 및 전력제어가 가능한 인버터 DC 저항점용접기를 개발하였고 정전류 제어를 위해 퍼지제어기를 사용하였다.

퍼지제어기는 제어대상 프로세스에 대한 작업자의 경험이나 전문가의 언어적인 표현을 제어기와 쉽게 결합시킬 수 있기 때문에 기존의(conventional) 제어기를 적용하기 어려운 복잡한 시스템에 적용하기 쉽다는 장점을 지니고 있다<sup>2-3)</sup>. 퍼지제어기는 기존의 제어기에 비해 제어대상 프로세스의 파라미터(parameter) 변화나 외란에 덜 민감한 특성을 가지고 있으므로, 본 연구에서는 용접전류를 안정화시키기 위해 퍼지제어기를 이용하였다. 그러나 퍼지제어기가 양호한 제어결과를 얻기 위해서는 소속함수와 제어규칙과 같은 제어파라미터를 최적의 값으로 설정해 주어야 하는 과정이 필요하다. 초기 제어기 설계에서 제어파라미터는 주로 작업자의 경험이나 설계자의 플랜트(plant)에 대한 지식으로부터 정량적으로 결정되었으며 시행착오법에 의해 수정되었다<sup>4-6)</sup>. 이렇게 경험이나 시행착오법을 이용해 설계된 제어기는 어느 정도 양호한 제어 결과를 얻을 수 있지만, 이런 설계법은 최적의 결과를 보장할 수 없을 뿐만 아니라 많은 시간과 노력이 드는 단점을 가지고 있다. 또한 요인실험(full factorial experiment)은 용접 공정에 대한 모델을 유도하지 않고 단순히 실험을 수행하여 근사 최적(near-optimal)의 용접 조건을 결정할 수 있지만, 입력변수 개수와 입력변수의 수준수가 커짐에 따라 실험 횟수가 기하급수적으로 커지기 때문에 제어파라미터 설정에 적용하기에는 비현실적이다. 미분계수에 기초한 최대 경사법(the method of steepest ascent)<sup>7)</sup>에 의한 제어파라미터의 결정은 탐색 영역 중에 비선형적인 현상이 나타나면 탐색의 방향성을 잃어 버려 탐색을 처음부터 다시 시작해야 하는 문제점, 노이즈(noise)를 포함한 공정의 최적화에 적용하기 어려운 문제점, 지역적인 극점(minima)으로 수렴하기 때문에 전역적인 해를 찾기 위해서는 여러 탐색 시작점에 탐색을 수행해야 한다는 문제점을 가지고 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해 최적화 하려는 목적함수(objective function)가 미분가능일 필요가 없고, 전역적인 알고리즘(global algorithm)이기 때문에 복잡한 시스템에 적용하기에 유용하며 또한 구현하기 쉬운 장점을 지니고 있는 CRS(controlled random search) 알고리즘을 사용하여 퍼지제어기 환산계수를 최적화하는 효과적인 방법을 제시하였다. 그리고 이를 통하여 저항점용접의 인버터 DC 용접 공정에 사용될 수 있는 정전류 퍼지 제어시스템을 설계하였다.

## 2. CRS 알고리즘을 이용한 퍼지제어기 최적화

인버터 DC 저항점용접 시스템에서 안정된 전류 상태를 유지하고 최소의 전류 상승시간(rising time)을 갖는 정전류 제어기를 구현하기 위해서 본 연구에서는 속도형 퍼지 PI 제어기를 설계하였다. 속도형 퍼지 PI 제어기의 제어성능을 향상시키기 위해 환산계수(scaling factor)를 조정하는 방법을 선택하였다. 최적화를 위한 성능 지수로 ITAE(integral of time multiplied by the absolute error) 값을 이용하였고, 이 값을 최소화할 수 있도록 환산계수를 설정하였다. 본 연구에서는 환산계수의 최적화를 위해 CRS 알고리즘을 사용하였다.

### 2.1 퍼지제어기 설계

퍼지제어기는 퍼지화기, 제어규칙, 비퍼지화기로 구성된다. 퍼지화기를 구성하기 위한 입력변수는, 기준 신호( $r_k$ )에서 실제 용접전류를 뺀 에러값( $e_k$ )과 용접전류 신호의 에러의 변화량( $\Delta e_k$ )을 사용하였고, 출력변수로는 제어 입력의 오차 보정량( $\Delta u_k$ )을 사용하였다. 퍼지제어기의 입력값( $e_k, \Delta e_k$ )을 퍼지 소속함수(fuzzy membership function)의 대표값(center value)에 대응되도록 각각의 값에 대한 환산계수를 GE(scaling factor for error), GDE(scaling factor for difference of error)로 설정하였다. 퍼지제어기 출력값( $\Delta u_k$ )을 실제 제어 출력값에 대응시키기 위한 환산계수는 GDU(scaling factor for correcting quantity as output of fuzzy controller)를 가정하였다. Fig. 1은 인버터 저항점용접 시스템의 속도형 퍼지 PI 제어기의 구조이고, 식 (1)에 입출력 변수와 환산계수의 관계를 나타내었다.

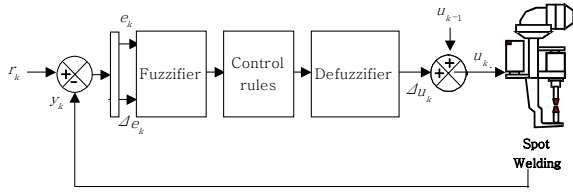


Fig. 1 Structure of a fuzzy control system

$$\begin{aligned}
 e_k &= GE \times * e_k \\
 \Delta e_k &= GDE \times * \Delta e_k \\
 \Delta u_k &= GDU \times * \Delta u_k
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

제어기 입력변수와 출력변수의 소속함수는 구성이 간단하고 계산 시간이 빠른 삼각형 형태를 사용하였다. 입력변수의 언어변수(linguistic variable)로 NB(Negative Big), NS(Negative Small), ZO(Zero), PS(Positive Small), PB(Positive Big)을 사용하였고 입력변수  $e_k$ 의 소속함수를 Fig. 2에  $\Delta e_k$ 의 소속함수를 Fig. 3에 각각 나타내었다. 출력변수의 언어변수로 NV(Negative Very big), NB(Negative Big), NM(Negative Medium), NS(Negative Small), ZO(Zero), PS(Positive Small), PM(Positive Medium), PB(Positive Big), PV(Positive Very big)을 사용하였고 출력변수  $\Delta u_k$ 의 소속함수를 Fig. 4에 나타내었다. 위에서 정의된 입력변수와 출력변수의 퍼지 집합(fuzzy set)을 이용하여 식(2)와 같은 제어규칙을 만들 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{Rule } i : & \text{ If } e_k \text{ is } A_i \text{ and } \Delta e_k \text{ is } B_i \text{ then } \Delta u_k \text{ is } U_i, \\
 & 1 \leq i \leq n
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

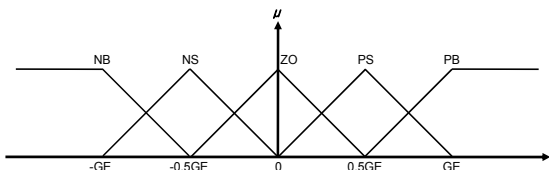


Fig. 2 Membership functions for  $e_k$

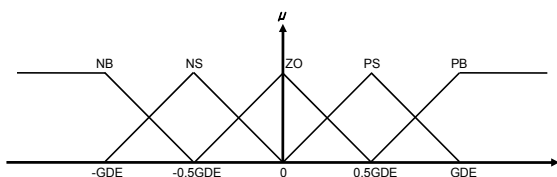


Fig. 3 Membership functions for  $\Delta e_k$

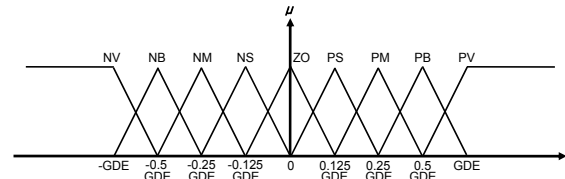


Fig. 4 Membership functions for  $\Delta u_k$

Table 1 Fuzzy control rule base

$\Delta e_k \backslash e_k$	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	PV	PB	PM	NM	NM
NS	PB	PM	ZO	NM	NM
ZO	PM	PS	ZO	NS	NM
PS	PM	PM	ZO	NM	NB
PB	PM	PM	NM	NB	NV

여기서 n은 제어규칙 수를 나타내고,  $A_i, B_i, U_i$ 는 i 번째 제어규칙에 사용된 입력변수와 출력변수의 퍼지 집합이다. 구성된 제어규칙을 Table 1에 나타내었다. 제어기 출력 변화량의 실제값(real value)은 효율적인 계산을 위해 가중평균 비퍼지화기를 사용하였고 이것은 식 (3)과 같이 계산된다.

$$\Delta u_k^* = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta u_i^- \mu_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i}
 \tag{3}$$

식 (3)에서  $\Delta u_i^-$ 는 i 번째 제어규칙에 해당되는 출력변수에서 소속함수의 중심값을 나타내며  $\mu_i = \min(\mu_A(e_k), \mu_B(\Delta e_k))$ 을 나타낸다.

위와 같이 구성된 퍼지제어기에서 퍼지제어기의 출력은 입력변수와 출력변수의 소속함수를 결정하는 환산계수인 GE, GDE, GDU에 의해 결정된다. 즉, 양호한 제어결과를 얻기 위해서는 최적의 소속함수를 결정할 필요가 있다.

### 2.2 CRS (control random search) 알고리즘

본 연구에서는 퍼지제어기 환산계수인 GE, GDE, GDU를 최적화하기 위해서 CRS 알고리즘을 사용하였다. CRS 알고리즘은 Price에 의해 제안되었다<sup>8)</sup>. CRS 알고리즘은 유전 알고리즘과 같이 전역적인 최적화 알고리즘으로 지역적인 극점으로 수렴할 가능성이 일반

구배에 기초한 최적화 알고리즘보다 상대적으로 낮은 장점을 지니고 있다. CRS 알고리즘은 다음과 같은 특성을 가지고 있다.

첫째, 일반적인 최적화 방법과 달리 CRS 알고리즘은 유전 알고리즘과 같이 일정한 개수의 초기 탐색점에 기초하여 탐색을 진행한다. 그러나 유전 알고리즘은 다음 반복(iteration)에서도 일정 개수의 탐색점을 발생시키지만, CRS 알고리즘은 다음 반복(iteration)부터는 한 개의 탐색점만 발생시킨다. 둘째, CRS 알고리즘은 각 입력변수에 대한 목적함수 값을 사용하기 때문에 그 목적함수가 반드시 연속적이거나 미분 가능할 필요는 없다. 셋째, 최소화(또는 최대화) 문제에서 탐색을 수행할 때 초기 탐색점을 구성하는 점들 중 최대값(또는 최소값)을 제거하면서 탐색을 수행한다. 넷째, 목적함수 값의 순위에 따라 탐색을 수행하므로 목적함수 값이 계량적(quantitative) 또는 계수적(qualitative)인 공정에도 순위만 정할 수 있다면 탐색을 수행할 수 있다.

본 연구에서는 CRS 알고리즘을 퍼지제어기 환산계수의 최적조건을 결정하는데 사용하였으며, CRS 알고리즘의 최적화 과정을 Fig. 5의 순서도에 나타내었고 요약하면 다음과 같다.

- Step1. 상, 하한 영역을 정한다.
- Step2. 정해진 실험영역(V) 내에서 랜덤(random)하게 n개의 지점을 정한다. 각 지점에서의 목적함수를 계산한다. 각 지점의 위치와 함수 값을 저장한다.

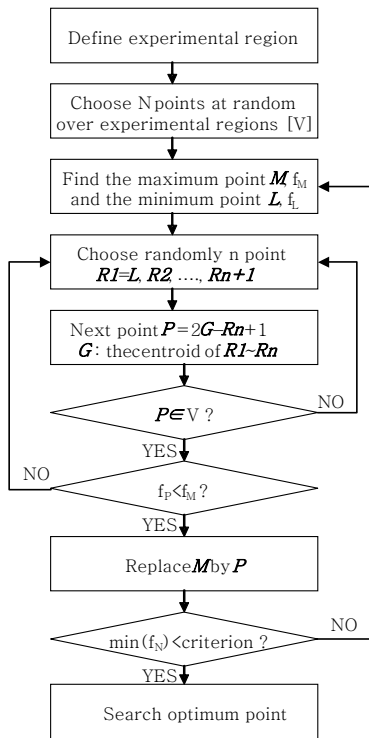


Fig. 5 Control random search algorithm

Step3. 가장 큰 목적함수 값( $f_M$ )을 가지는 지점인 M과 가장 작은 목적함수 값( $f_L$ )을 가지는 지점인 L을 찾는다

Step4. L을 제외하고 랜덤하게 n개의 지점인  $R_2, \dots, R_{n+1}$ 을 선택한다,  $R_1 = L$ 로 정하고  $R_1, \dots, R_n$ 의 무게중심 점인 G를 정한다,  $\bar{P} = 2\bar{G} - \bar{R}_{n+1}$ 를 계산하여 다음 실험점을 구한다.

Step5. 만약 V영역 내에 P가 있다면  $f_p$ 를 계산하여 Step 6으로 이동하고 그렇지 않다면 다시 Step 4로 되돌아 간다.

Step6. 만약  $f_p < f_M$ 이면 M을 P로 바꾸고 Step 7로 이동하고 그렇지 않다면 Step 4로 되돌아 간다.

Step7. 만약 기준에 만족한다면 정지하고 그렇지 않다면 Step 3로 돌아간다.

### 2.5 성능지수

본 연구에서는 정전류(constant current) 퍼지제어기의 성능을 정량적으로 표현하기 위한 CRS 알고리즘의 목적함수로서 ITAE 성능지수를 이용하였다. 여기서 성능지수(performance index)는 시스템의 성능을 나타내는 정량적인 척도이며 시스템의 중요한 규격을 강조할 수 있도록 선정되는 값이다. 성능지수 종류의 하나인 절대오차 시간곱 적분(ITAE: integral of time multiplied by the absolute error)은 큰 초기오차가 성능적분의 값에 미치는 영향을 줄이고 이후 응답에서 발생하는 오차를 강조하기 위한 지수이다. 식 (4)에 ITAE의 수학적 표현식을 나타내었다.

$$ITAE = \int_0^T t|e(t)| dt \tag{4}$$

일반적인 디지털 제어 시스템에서는 ITAE 지수에 대한 수학적 표현식 (5)와 같이 변경하여 사용한다.

$$ITAE = \sum_{t=0}^N (t|e(t)| \Delta t) \tag{5}$$

저항접용접 공정은 수백 msec 정도의 짧은 시간 동안 전류를 통전시켜 금속을 접합하는 공정이기 때문에 초기의 상승시간과 오버슈트가 매우 중요하다. 상승시간이 늦을수록 용접부에 필요한 입열을 제대로 인가하지 못해 용접불량을 가져올 수 있고, 초기에 오버슈트가 클수록 용접 초기에 큰 전류가 인가되어 빠른 용융으로 인한 날림이 발생할 수 있다. 이에 따라 시스템의 매개변수 변화에 따른 적분값의 최소값 구별이 확실하

여 선별도가 높은 ITAE 지수를 사용하여 목적함수 값을 구하였으며 적분 시간 범위는 저항 점 용접 시스템의 특성에 맞추어 50msec를 적분 시간의 한계값으로 설정하였다. 50msec동안의 ITAE값이 작을수록 적분된 값이 작으며 상승시간이 짧고 오버슈트가 작아진다. 이로서 CRS 알고리즘의 목적함수로 ITAE 지수를 이용하여 환산계수를 최적화하였으며 빠른 상승시간과 적은 오버슈트를 가지도록 정전류 피지제어기를 튜닝하였다.

### 3. 실험 결과 및 분석

본 연구의 실험에서 용접모재는 고장력 강판인 두께 1mm의 SPRC440을 사용하였고, 용접전류는 7kA, 용접시간은 200msec, 가압력은 300kgf로 고정하였다. 최적의 환산계수를 찾기 위한 CRS 실험을 2세트(set) 수행하였으며 각 세트 별로 실험의 초기 탐색점을 환산계수의 관심영역 범위 안에서 랜덤으로 다르게 선택하였다. 환산계수의 관심영역은 Table 2에 나타내었다. 인버터 DC 저항점용접 시스템에서 적절한 관심영역의 설정이 중요하다. 그 이유는 관심영역을 너무 작게 설정하면 적정 최적조건을 찾을 수 없고 관심영역을 너무 크게 설정하면 탐색과정 중에 급격하고 큰 전류변화에 의해 파워소자가 건널 수 없게 된다.

실험 1, 2에서 초기에 임의로 선택한 10개의 탐색점과 각 탐색점의 ITAE 값을 Table 3에 나타내었다. 실험 1에서는 8번 탐색점이 가장 작은 ITAE 값을 가졌고 9번 탐색점이 가장 큰 ITAE 값이 나온 것을 확인할 수 있다. 실험 2에서는 5번 탐색점이 가장 작은 ITAE 값을 가졌고 3번 탐색점이 가장 큰 ITAE 값을 가졌다.

Table 3에서 실험 1, 2의 초기 10개 탐색점의 용접전류 파형을 Table 4에 나타내었다. 초기 임의로 정한 탐색점에서는 GE, GDE, GDU 환산계수 값이 적절하지 않아서 정전류 제어가 되지 않고 불규칙하고 상승시간이 긴 용접전류가 출력되는 것을 확인할 수 있다.

CRS 알고리즘을 사용하여 초기에 선택된 10개의 탐색점들 중에서 목적함수의 최대값( $ITAE_{max}$ )을 가지는 탐색점( $Point_{max}$ )과 최소값( $ITAE_{min}$ )을 가지는

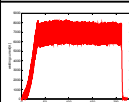
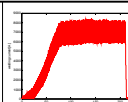
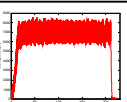
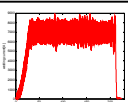
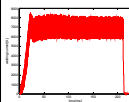
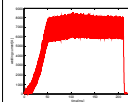
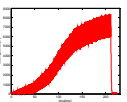
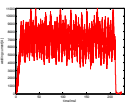
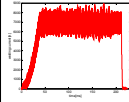
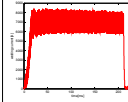
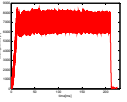
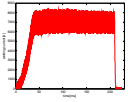
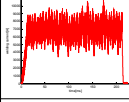
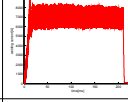
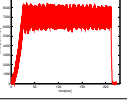
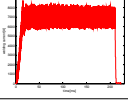
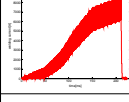
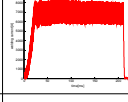
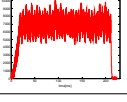
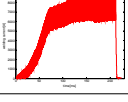
**Table 2** Search range for scaling factors

Parameter	Range	Number
GE	0.1 - 16	10
GDE	0.1 - 16	10
GDU	1 - 60	10

**Table 3** Results of the initial candidate solutions

Experiment 1					Experiment 2				
No.1	GE	GDE	GDU	ITAE	No.2	GE	GDE	GDU	ITAE
1	6.1	5.2	22	15468	1	8.9	9.5	40	4753
2	4.3	2.9	9	65718	2	4.1	2.2	23	13919
3	10.7	10.8	34	6860	3	12.5	3.5	5	82575
4	7.6	14.9	14	39441	4	0.9	12.7	58	15250
5	3.1	1.2	17	23250	5	15.6	14.2	52	3450
6	12.4	4.6	41	5011	6	7.4	15.2	17	22165
7	1.5	12.2	51	10897	7	5.4	7.6	27	10948
8	15.8	7.8	57	3675	8	10.7	10.2	46	4327
9	9.3	9.6	5	82671	9	2.8	6.1	35	13334
10	8.6	6.2	29	8709	10	14.2	1.6	9	66251

**Table 4** Results of the initial candidate currents

Experiment 1		Experiment 2	
			
No.1 Welding current	No.2 Welding current	No.1 Welding current	No.2 Welding current
			
No.3 Welding current	No.4 Welding current	No.3 Welding current	No.4 Welding Current
			
No.5 Welding current	No.6 Welding current	No.5 Welding current	No.6 Welding current
			
No.7 Welding current	No.8 Welding current	No.7 Welding current	No.8 Welding current
			
No.9 Welding current	No.10 Welding current	No.9 Welding current	No.10 Welding Current

탐색점( $Point_{min}$ )을 계산한다. 최소값과 최대값을 가지는 탐색점을 제외한 나머지 8개의 탐색점에서 임의로 3개의 탐색점을 선택한다. 선택된 3개의 탐색점과 최소값을 가지는 탐색점을 이용하여 무게중심 점인 G를 정하고  $\bar{P} = 2\bar{G} - \bar{R}_{n+1}$ 를 계산하여  $\bar{P}$ 를 구한다.  $\bar{P}$

점이 정해진 실험 영역내에 있으면서 이전에 구해놓은 최대값보다 작다면 최대값을 버리고  $\bar{P}$  점으로 대신하고 한 세대를 완료한다. 이런 방식으로 세대를 반복하면 10개 점들이 점차 최적 점 근처로 수렴하게 된다. 실험 1, 2에서 세대가 진화해 나가면서 변하는 개체들의 평균값을 Fig. 6에 최소값을 Fig. 7에 각각 나타내었다. 목적함수인 ITAE 값의 평균값과 최소값의 변화에서 알 수 있듯이 ITAE 값이 점점 작아지면서 2900 근방으로 수렴되는 것을 볼 수 있다.

본 연구에서는 40세대까지 진화된 개체 중에서 ITAE 값이 가장 최소인 세대를 최적조건으로 선정하였다. 실험 1, 2에서 CRS 알고리즘을 40세대까지 수행한 후의 변화된 10개의 탐색점과 각 탐색점의 ITAE 값을 Table 5에 나타내었다. 실험 1에서는 6번 탐색점이 가장 작은 ITAE 값을 가졌고 실험 2에서는 1번 탐색점이 가장 작은 ITAE 값을 가졌다. 초기의 10개 탐색점의 ITAE 값에 비해 CRS 를 40번 거치고 난 후의 ITAE 값이 훨씬 더 작아졌음을 확인할 수 있다.

Table 5에서 실험 1, 2의 CRS 알고리즘을 40세대까지 수행한 후의 변화된 탐색점의 용접전류 파형을 Table

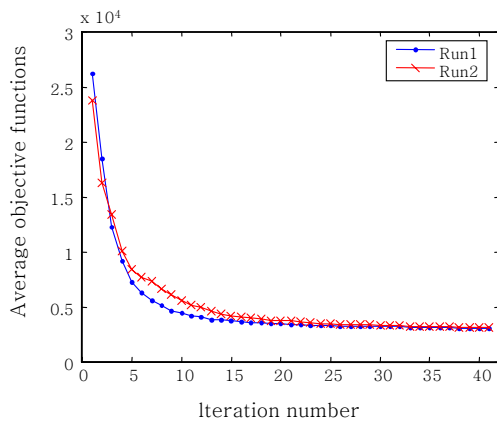


Fig. 6 Results of the average objective functions

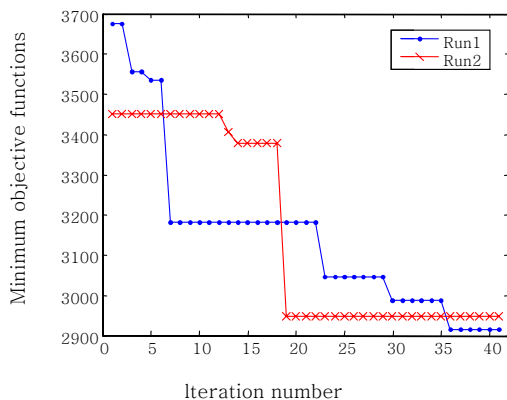


Fig. 7 Results of the minimum objective functions

Table 5 Results of the 40th candidate solutions

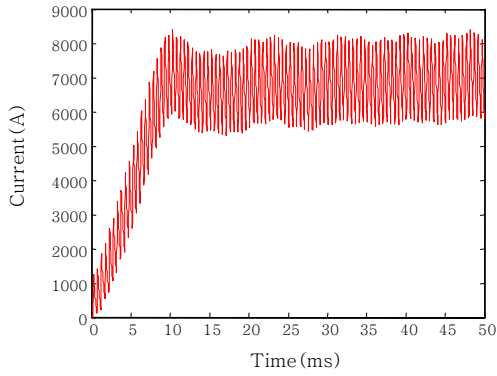
Experiment 1					Experiment 2				
No.1	GE	GDE	GDU	ITAE	No.2	GE	GDE	GDU	ITAE
1	14.3	9.3	57.6	3046	1	15.8	8.4	57.1	2949
2	14.3	7.8	57.9	2988	2	15.6	10.3	58.7	3002
3	14.6	7.7	58.1	3039	3	15.8	13.6	59.5	3150
4	14.7	10.8	56.9	3096	4	15.9	14.3	55.9	3226
5	14.3	6.9	57.7	3118	5	15.8	7	53	2951
6	14.5	9.7	57.9	2916	6	15.8	13.6	59.5	3173
7	14.5	10.4	57.1	2945	7	15.8	8.7	57.1	3257
8	14.7	10.1	57.6	3073	8	15.6	10.4	57.8	3171
9	14.8	11.7	57.4	3006	9	15.8	8.6	54.9	3098
10	14.4	8.5	57.5	3107	10	15.8	13.5	59.6	3094

Table 6 Results of the 40th candidate currents

Experiment 1		Experiment 2	
No.1 Welding current	No.2 Welding current	No.1 Welding current	No.2 Welding current
No.3 Welding current	No.4 Welding current	No.3 Welding current	No.4 Welding current
No.5 Welding current	No.6 Welding current	No.5 Welding current	No.6 Welding current
No.7 Welding current	No.8 Welding current	No.7 Welding current	No.8 Welding current
No.9 Welding current	No.10 Welding current	No.9 Welding current	No.10 Welding current

6에 나타내었다. 초기 임의로 정한 탐색점에서는 정전류 제어가 되지 않아 불규칙적이고, 상승시간이 긴 용접전류가 출력되었다. CRS 를 40세대 거치면서 적당한 GE, GDE, GDU 환산계수 값으로 수렴되면서 짧



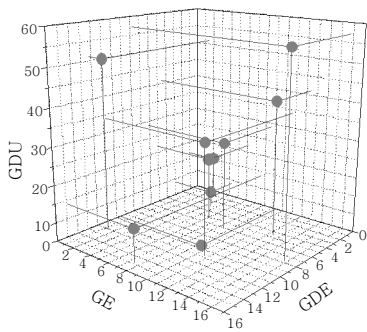


**Fig. 8** Optimal current of the 40th candidate currents

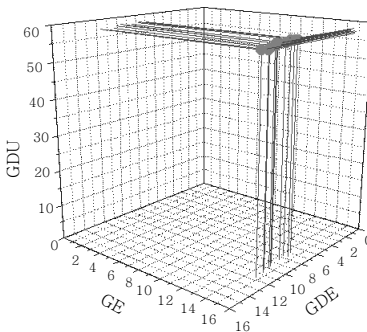
은 상승시간을 가지며 안정된 정전류 제어가 됨을 확인할 수 있었다.

Fig. 8 은 CRS를 40세대 수행 후 실험 1, 2를 통틀어 가장 작은 ITAE 값을 가지는 최적화된 환산계수의 전류파형이다. 용접모재의 고유저항으로 인한 용접전류의 감소가 생기지 않고 설정한 7kA의 용접전류가 일정하게 출력되고 있음을 확인할 수 있다. 이로서 본 연구에서 CRS 알고리즘을 이용하여 얻은 정전류 퍼지 제어기를 위한 최적화된 환산계수는 (GE, GDE, GDU) = (14.5, 9.7, 57.9) 이다.

Fig. 9에서 (a)는 실험 1에서 초기에 선택된 10개

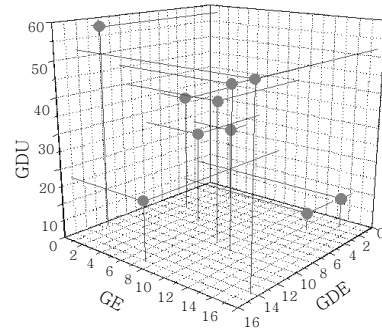


(a) The initial candidates scaling factor

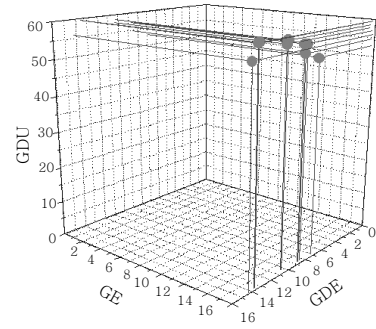


(b) The 40th candidates scaling factor

**Fig. 9** Experiment 1 Results of the candidates scaling factor



(a) The initial candidates scaling factor



(b) The 40th candidates scaling factor

**Fig. 10** Experiment 2 Results of the candidates scaling factor

의 탐색점의 환산계수 값의 좌표를 나타내며 (b)는 CRS 40세대에서 10개의 탐색점의 환산계수 값의 좌표점을 나타낸다. Fig. 10에서 (a)는 실험 2에서 초기에 선택된 10개의 탐색점의 환산계수 값의 좌표를 나타내며 (b)는 CRS 40세대에서 10개의 탐색점의 환산계수 값의 좌표점을 나타낸다. 환산계수의 관심영역 내에서 랜덤으로 형성된 초기 10개의 탐색점이 CRS 를 40번 거친 후 최적점 근처로 수렴함을 확인할 수 있다.

### 4. 결 론

인버터 DC 저항점용접 공정에서 CRS 알고리즘을 이용한 정전류 퍼지 제어시스템 설계에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 인버터 DC 저항점용접 시스템에서 정전류 제어를 위해서 속도형 퍼지 PI 제어기를 설계하였다.
- 2) 퍼지 PI 제어기의 성능 향상을 위해 환산계수를 조정하는 방법을 선택하였고, ITAE 지수를 이용하여 최소 ITAE 값을 지니는 환산계수 값으로 최적화 하였다.
- 3) 환산계수의 최적화 알고리즘은 CRS 알고리즘을 사용하였고 CRS 알고리즘을 40세대 거친 후 최적화된 환산계수를 구하였으며 최적화된 환산계수는 짧은 상승 시간과 안정된 정전류제어를 확인 하였다. 또한 2회 실험

험을 통해 CRS 알고리즘의 재현성을 확인하였다.

## 후 기

이 논문은 서울시 산학연 협력사업(과제번호:10848)과 정부(지식경제부) 산업원천기술개발사업(과제번호:10035641)의 지원을 받아 수행된 연구임.

## 참 고 문 헌

1. B. M. Brown :A Comparison of AC and DC Resistance Welding of Automotive Steels, *Welding Journal*, **66-1** (1987), 19-23
2. E. H. Mamdani : Twenty Year of Fuzzy Control : Experience Gained and Lessons Learnt, *Proceedings of 2nd IEEE Int. Conf. Fuzzy System*, (1993), 339-344
3. M. Sugeno : *Industrial Applications of Fuzzy Control*, Elsevier Science Publishers, (1985)
4. M. Braae and D. A. Rutherford :Selection of Parameters for a Fuzzy Logic Controller,*Fuzzy Sets and Systems*, **2** (1979), 185-199
5. W. J. M. Kicker and H. R. Van NautaLemke :Application of a Fuzzy Controller in a Warm Water Plant, *Automatica*, **12** (1976), 301-308
6. P. J. King and E. H. Mamdani : The Application of Fuzzy Control Systems to Industrial Processes, *Automatica*, **13** (1977), 235-242
7. R.H. Myers and D.H. Montgomery: *Response Surface Methodology*, John Wiley & Sons, Inc., (1995)
8. W.L.Price: A Controlled Random Search Procedurefor Global Optimization, *The Computer Journal*, **20-4** (1977), 367-370
9. W.L.Price:Global Optimization by Controlled Random Search, *Journal of Optimization Theory and Applications*, **74-3** (1983), 333-348
10. D. Kim and S.Rhee : Optimization of Arc Welding Parameters using a Genetic Algorithm, *Welding Journal* **80-7** (2001), 184-189
11. K. I.Johnson and J. C.Needham : New Design of Resistance Spot Welding Machine for Quality Control, *Welding Journal*, **51-3** (1972), 1-8
12. K. I.Johnson:Quality Control Resistance Welding Quality-Control Techniques, *Metal Construction and British Welding Journal*, **5-5**, 176-181
13. D. Hehl, K. Maile, E. Roos and W.Wijaranakula :Factors Affecting Temperature Distribution and Its Calculation in the AC and DC Resistance Spot Welding of Aluminum Sheet,*Welding and Cutting*, **2** (1984), 25-27
14. Li.Wei, F. Eugene, C. Daniel and Gerald A. Grzadzinski :Energy Consumption in AC and MFDC Resistance Spot Welding, *Sheet Metal Welding Conference XI*, (2004)
15. H.L.Sree and A.Soumitra :Spot Weldability of Advanced High-strength Steels Using AC and MFDC Power Sources, *SheetMetal Welding Conference XI*, (2004)