

유전알고리즘을 이용한 인버터 DC 저항점용접에서의 정전류퍼지제어기 최적화

유 지 영* · 윤 상 만* · 이 세 현**,*†

*한양대학교 대학원 기계공학과

**한양대학교 기계공학과

Optimization of Fuzzy Controller for Constant Current of Inverter DC Resistance Spot Welding Using Genetic Algorithm

Jiyoung Yu*, Sangman Yun* and Sehun Rhee**,*†

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

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

†Corresponding author : srhee@hanyang.ac.kr

(Received August 11, 2010 ; Revised September 28, 2010 ; Accepted October 5, 2010)

Abstract

Inverter DC resistance spot welding process has been very widely used for joining such as automotive body sheet metal. Because the lobe area of DC welding is larger than AC welding and DC welding has low electrode wear. So the use of Inverter DC resistance spot welding process has been further increased. And the application of high tensile steel is growing for light weight vehicle. To improve the weldability of high strength steel, the development of Inverter DC resistance spot welding system is more conducted. However, Inverter DC resistance spot welding system has a few problems. Current waveform is unstable and the expulsion has been occurred by characteristics of steel. In this study, inverter DC resistance spot welding system was made. And Fuzzy control algorithm was applied for constant current. The genetic algorithm was applied to optimize the fuzzy scaling factors, in order to optimize the fuzzy control.

Key Words : Resistance spot welding, Fuzzy control, Genetic algorithm, Constant current, Scaling facto

1. 서 론

전 세계적으로 환경오염에 대한 규제가 강화되면서 자동차 업계는 연비향상, 환경 오염 물질 배출 억제에 대한 대응이 적극적으로 이루어지고 있다. 그 중에서도 차량 경량화를 통한 연비 향상에 많은 관심이 집중되고 있으며 이를 위한 수단으로 차체의 고강도강 적용이 증가되고 있는 실정이다. 고강도강의 용접을 위해 일반적으로 DC 용접이 사용되고 있다. 이는 DC 용접이 AC 용접에 비해 전력 소모량이 적으며, 적정 용접 영역이

더욱 넓고, 전극 마모가 적은 장점을 가지고 있기 때문이다. 또 최근 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor), 다이오드(Diode) 등과 같은 인버터 구성에 필요한 전력 소자의 소형화 및 가격 하락으로 인해 용접기 제작에 소요되는 가격이 감소하였고, 각 소자의 신뢰성이 향상되었다¹⁾. 이와 같은 이유로 고강도강의 용접성 향상을 위해 종래 사용되던 AC 용접 대신 인버터 DC 저항 점 용접의 적용이 증가하고 있다.

하지만 인버터 DC 저항 점 용접 시스템을 구성하고 정전류 제어를 적용하지 않으면, 시편을 삽입한 용접의 경우 시편의 고유 저항으로 인하여 사용자가 원하는 전

류보다 낮은 전류가 생성되고, 용접전류가 일정하지 않고 흔들리며, 용접전류의 증가로 인한 날림 현상과 같은 문제점이 발생하게 된다.

인버터 DC 저항 점 용접과 관련하여 Brown²⁾ 등은 단상 AC 용접기와 인버터 DC 용접기의 전류파형 비교를 통해 용접성을 평가하고 DC 용접이 AC 용접보다 적정 용접 영역이 더 넓고, 27% 정도 더 작은 전류에서도 용접 품질이 양호함을 보였고, Wei³⁾ 등은 용접부에 입력되는 에너지가 AC와 DC에서 서로 다를 수 있다고 그 영향에 따라 너깃직경(Nugget diameter)이 달라짐을 보였으며, Sree⁴⁾ 등은 DP600강에서 AC와 DC의 용접성을 비교하여 DC를 사용할 경우 얻을 수 있는 장점을 서술하였다. 또한 용접 시스템과 관련된 연구로는 Tsai⁵⁾ 등이 저항 용접에 실시간 제어 시스템의 해석과 개발에 관한 연구를 실시하였고, 인버터 용접 시스템 제어에 대한 연구로는 Kim⁶⁾ 등이 진화 알고리즘을 이용하여 가변 전력제어를 연구하였고, Kim⁷⁾ 등은 지능형 제어 시스템 설계 및 용접 품질 모니터링에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 인버터 DC 저항 점 용접 시스템의 정전류 제어를 위해 퍼지 제어 알고리즘을 적용하였다. 이에 앞서 인버터 DC 저항 점 용접 시스템을 구성하였으며, 구성된 하드웨어를 이용하여 퍼지 제어를 설계한 후 전류의 특성을 고찰하였고, 퍼지 제어 환산계수를 최적화함으로써 제어를 최적화하였다. 성능지수로 ITAE를 사용하였으며, 이를 최소화하기 위한 방법으로 유전 알고리즘을 이용하여 퍼지 제어 환산계수를 최적화하였다.

2. 인버터 DC 저항 점 용접 시스템

2.1 인버터 DC 저항 점 용접 시스템의 구성

본 연구에서 사용된 인버터 DC 저항 점 용접 시스템의 구성은 Fig. 1과 같으며 Fig. 2는 개략도이다. 시

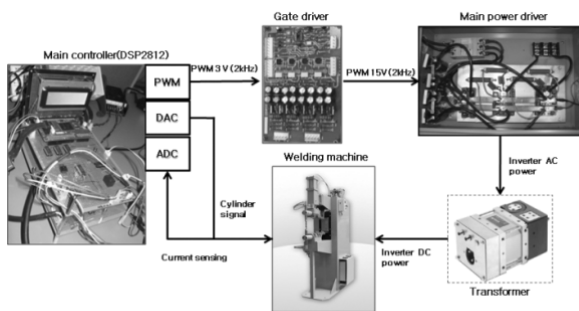
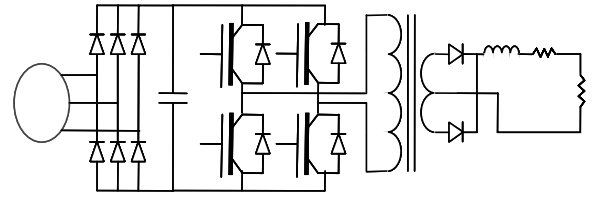


Fig. 1 Inverter DC resistance spot welding system



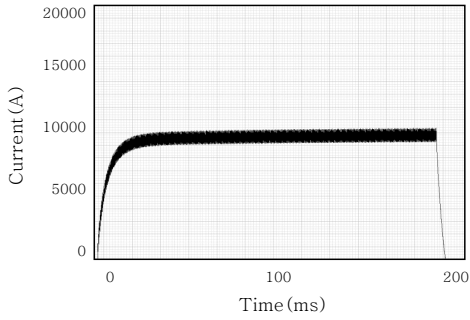
AC 3 phase Diode Condenser IGBT Transformer Diode Reactor 380V 60Hz

Fig. 2 Schematic diagram of inverter DC resistance spot welding system

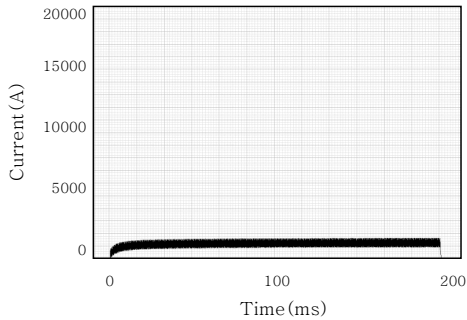
스템의 구성은 크게 메인 컨트롤러와 게이트 드라이버, 메인 파워 드라이버, 용접 건으로 나눌 수 있다. 메인 컨트롤러는 32비트 DSP(Digital Signal Processor)를 사용하여 제어 주파수 2kHz의 PWM(Pulse Width Modulation) 신호를 발생시켜 게이트 드라이버에 제어 신호를 인가한다. 또 용접시 용접 건의 공급을 제어하며, 용접 공정 중 용접전류를 피드백 받아 전류를 제어하는 역할을 한다. 게이트 드라이버는 메인 컨트롤러에서 발생하는 1kHz 대역의 3.3V의 PWM을 1kHz-15V로 증폭시켜 이를 파워 드라이버로 보내주게 된다. 이는 파워 드라이버에 있는 IGBT 소자의 게이트에 구동 전압을 인가시키기 위함이다. 메인 파워 드라이버에서는 3상 AC 380V의 전압이 입력되며, DC로 변환하기 위해 정류기를 거치게 된다. 여기서 만들어진 DC는 컨덴서를 통해 평활화가 이루어지게 되며, 이를 변압기용 AC로 변환하기 위해 메인 파워 드라이버에서 1kHz의 AC로 변환하게 된다. 변압기에서 변환된 AC 전류는 다시 정류기를 거쳐 DC로 변환되어 용접 건으로 흐르게 되며 이런 과정을 통해 발생하는 DC 전류가 시편으로 통전되어 최종적으로 저항 점 용접이 이루어지게 된다. 또 130kVA급 용접용 변압기를 사용하였으며, 최대 가압력 1000kgf의 정치식공압 용접 건을 조립하였다.

2.2 정전류 제어의 필요성

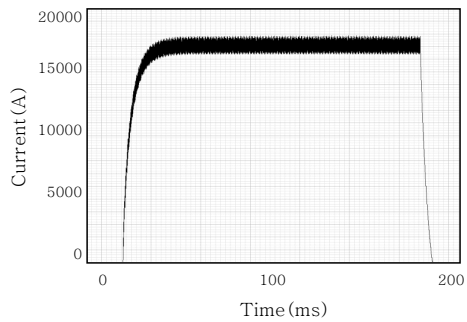
Fig. 3은 용접전류 제어를 하지 않을 경우 시편 삽입 유무에 따른 전류 파형을 보여 준다. Fig. 3의 (a)는 시편이 없을 시 용접전류 9kA, 가압력 400kgf, 용접 시간 200msec에서 실험을 한 경우의 용접전류의 파형을 보여 주며, 시편이 없는 경우에는 설정 목표전류를 확보할 수 있음을 알 수 있다. 하지만 (a)와 동일한 용접 조건에서 시편이 삽입된 (b)의 경우, 시편의 고유 저항이 작용하기 때문에 기존의 전류보다 낮은 전류 파형이 발생됨을 관찰할 수 있다. 용접기에 전달되는 전력은 전류의 제곱과 저항의 곱으로 계산되는데 시편이



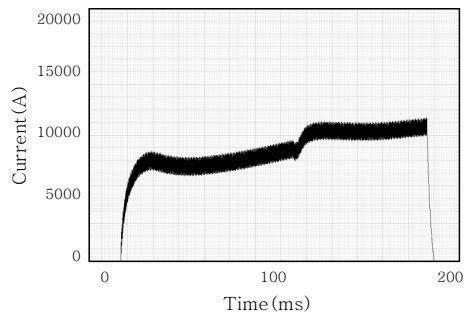
(a) 9kA, 400kgf, 200msec without specimen



(b) 9kA, 400kgf, 200msec with specimen



(c) 17kA, 400kgf, 200msec without specimen



(d) 17kA, 400kgf, 200msec with specimen

Fig. 3 Current profile with/without control

삽입된 경우에는 시편의 고유저항에 의해 전극 사이의 저항이 크게 증가하게 되어 저항 증가에 대한 보상값만큼 입력 전력을 증가시키지 않으면 전류가 감소하여 설정 목표전력을 확보할 수 없게 된다. (c)는 시편이 없을 시 용접전류 17kA, 가압력 400kgf, 용접시간 200msec에서 실험을 한 경우의 용접 파형을

보여주고 있으며, 시편의 고유 저항이 작용하지 않기 때문에 설정 용접전류를 확보할 수 있다. (c)와 동일한 용접 조건에서 시편이 삽입된 (d)의 경우, 높은 입열에 의해 용접부의 저항 변동이 크기 때문에 전류 파형이 흔들리는 것을 확인할 수 있으며, 115msec부근에서 날림이 발생하였고, 이후에도 설정 목표전류를 확보할 수 없음을 알 수 있다.

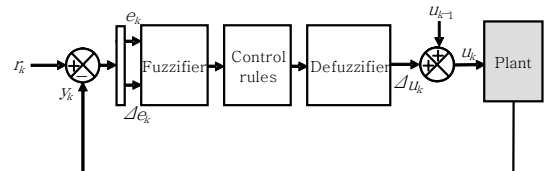
이와 같은 실험 결과에서 정전류 제어가 적용되지 않을 경우 모재의 고유 저항의 영향으로 목표전류보다 낮은 전류가 발생되고, 공정 진행에 따라 용접부의 변화하는 동저항에 의해 전류가 일정하지 않는 문제점이 있다. 따라서 용접부 저항의 변화, 전극의 마모, 이물질의 존재 등의 외부 환경 변화에 대응 가능한 용접전류 제어가 요구된다.

3. 정전류 제어를 위한 퍼지 제어기 설계

퍼지 제어는 수학적인 모델링이 어렵거나 복잡하여 잘 정의되지 않는 불확실한 시스템을 IF-THEN 형태의 규칙에 의해 표현한다⁸⁾고 알려져 있다. 본 연구에서는 정전류 제어를 위해 인버터 DC 저항 점 용접 시스템의 퍼지 제어기를 설계하였다. 퍼지 제어기의 설계 과정은 퍼지 제어 규칙의 설정, 퍼지 집합의 결정, 제어 규칙의 검증 및 수정의 과정으로 진행하였다. 제어 성능의 향상을 위해서 퍼지 환산계수(Scaling Factor)를 조정하는 방법을 선택하였고, 이를 유전 알고리즘을 이용하여 최적화하였다.

3.1 퍼지 제어기의 설계

Fig. 4에서와 같이 본 연구에서는 정전류 제어를 위해 제어 규칙 수가 적게 되는 이점을 가진 속도형 퍼지 PI 제어기(Fuzzy PI Controller)⁹⁾를 설계하였다. 이는 기준이 되는 설정 전류와 실제 용접전류와의 차이인 e_k 와 용접전류 차이의 변화량 Δe_k 를 입력 변수로 사용하고, 출력 변수로는 제어 입력 오차 보정량 Δu_k 를 사용하는 퍼지 PI 제어기를 의미한다. GE, GDE는



$$e_k = GE \times e_k$$

$$\Delta e_k = GDE \times \Delta e_k$$

$$\Delta u_k = GDU \times \Delta u_k$$

Fig. 4 Structure of a fuzzy control system

각각 피드백 받은 신호인 오차(* e_k), 오차 변화량(* Δe_k)의 환산계수이고, GDU는 제어 출력(* Δu_k)의 환산계수이다. 환산계수에 의해 환산된 입출력값($e_k, \Delta e_k, \Delta u_k$)의 추론법은 간략추론법을 사용하였다. 규칙 N개와 입력변수 2개인 경우의 간략추론법은 식(1)⁹⁾과 같이 정의된다. 식(1)에서 입력변수 x 는 오차(e), y 는 오차 변화량(Δe)이며, z_i 는 제어입력값의 변화량(Δu)으로 선정하였다.

$$R^i : IF x \text{ is } A_i \text{ and } y \text{ is } B_i, THEN z_i \text{ is } C_i \quad (1)$$

여기서 R^i : i 번째 제어규칙($i=1,2,\dots,N$)

i : 규칙번호, N : 규칙수

A_i, B_i : 퍼지집합, C_k : 실수치

- 전반부 적합도 : w_i
- 각 규칙의 추론 결과 : z_i^*

$$\cdot \text{최종추론결과} : z^* = \frac{\sum_{i=1}^N w_i C_i}{\sum_{i=1}^N w_i}$$

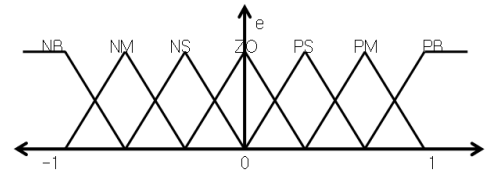
여기서 w_i : 규칙 i 의 전반부 적합도

$$w_i = \mu_{A_i}(x) \wedge \mu_{B_i}(x)$$

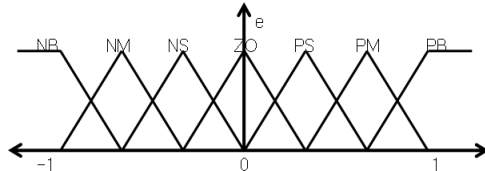
간략추론법은 직접법의 형태를 가지고 있지만 후반부 변수를 직접법은 퍼지수를 사용하고, 간략추론법은 실수를 사용한다는 점이 다르다. 이는 직접법과 비교했을 때 추론기구가 간단하고 계산기 상에서 추론 시간이 빠르다는 장점을 가진다. 제어기로 사용한 DSP 모듈의 IF-THEN 연산 처리 속도가 사칙연산 처리 속도에 비해 상대적으로 느리게 때문에 간략추론법을 통해 IF-THEN 연산의 사용량을 가능한 감소시켜 처리속도를 증가시켰다. 제어에 사용된 퍼지 언어 변수는 오차, 오차 변화량, 제어 입력 변화량에 대해서 각각 PB(Positive Big), PM(Positive Medium), PS(Positive Small), ZE(Zero), NS(Negative Small), NM(Negative Medium), NB(Negative Big)의 7개로 구성하였으며, 간략추론법을 사용하였기 때문에 퍼지 소속 함수¹⁰⁾는 Fig. 5와 같이 정의하였다. 즉 입력변수인 오차(e)와 오차변화량(Δe)은 삼각형 퍼지집합을 사용하였으며, 출력변수인 제어입력값의 변화량(Δu)은 실수인 퍼지 싱글톤(Fuzzy Singleton)을 사용하였다.

3.2 ITAE 성능지수¹¹⁾

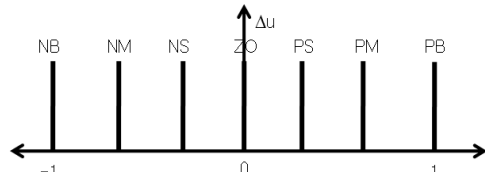
성능지수에는 ISE, IAE, ITAE, ITSE 등이 사용되고 있다. ISE(Integral of the Square of the Error)



(a) Membership function for e_k



(b) Membership function for Δe_k



(c) Membership function for Δu_k

Fig. 5 Fuzzy membership functions for current control

Table 1 Fuzzy rule base of current control

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

는 오차제곱 적분으로써, 과도하게 감쇠과다인 시스템과 감쇠부족인 시스템을 판별해낼 수 있으며, IAE (Integral of Absolute magnitude of the Error)와 유사하게 쓰인다. ITAE(Integral of Time multiplied by the Absolute Error)는 절대오차 시간 곱 적분이며, 큰 초기오차가 성능 적분의 값에 미치는 영향을 줄이고, 이후의 응답에서 발생하는 오차를 강조하기 위하여 사용된다. 이와 유사한 지수로 제곱오차 시간 곱 적분(ITSE: Integral of Time multiplied by the Squared Error)이 있다.

본 연구에서는 용접 초기에 목표전류까지의 도달 시간을 최소화하고 지나친 오버슈팅이 발생하지 않도록 하기 위하여 절대오차 시간 곱 적분(ITAE)성능지수를

사용하여 실험을 실시하였다. ITAE는 식(2)와 같이 시간(t), 오차 절대값(|e(t)|)의 곱의 적분으로 표현된다. ITAE의 정의에서 시간(t)의 존재에 의해 큰 초기 오차의 영향을 감소시키고, 긴 시간 동안 지속되는 오차의 영향을 증가시킨다. ITAE 성능지수를 통해 목표전류 도달 이후 시간에서 용접부 저항의 변화에 의한 용접전류의 변동을 억제하고자 하였다. 본 연구에서는 용접공정의 특성에 맞추어 ITAE의 적분시간을 초기 50msec로 설정하였다.

$$ITAE = \int_0^t t|e(t)|dt \quad (2)$$

3.3 유전 알고리즘을 이용한 제어기 최적화

자연계에 있는 생물의 진화과정에서, 어떤 세대를 형성하는 개체들의 집합 중에서 환경에 대한 적합도가 높은 개체가 살아남을 확률이 높으며, 높은 확률로 생존하여 재산을 하고, 교배 및 돌연변이를 통해 다음 세대의 개체군을 형성하게 된다. 유전 알고리즘은 이와 같이 생물의 진화과정을 인공적으로 모델링 한 알고리즘이다¹²⁾.

유전 알고리즘은 다른 탐색이나 최적화 방법과 달리 파라미터(Parameter)를 직접 부호화하여 이용하고, 점이 아닌 다점 탐색을 이용하는 방법이며, 탐색에 적합도를 이용하고, 결정론적인 규칙이 없이 확률적 연산자를 사용하여 수행하게 된다. 유전 알고리즘은 전역적인 최적점을 찾는 방법으로써 용접과 같은 비선형 공정의 최적화에 많이 사용된다¹³⁾. Fig. 6은 연구에서 사용한 유전 알고리즘의 순서도를 나타낸다. 본 연구에서는 퍼지 제어 환산계수의 최적화 방법으로 유전 알고리

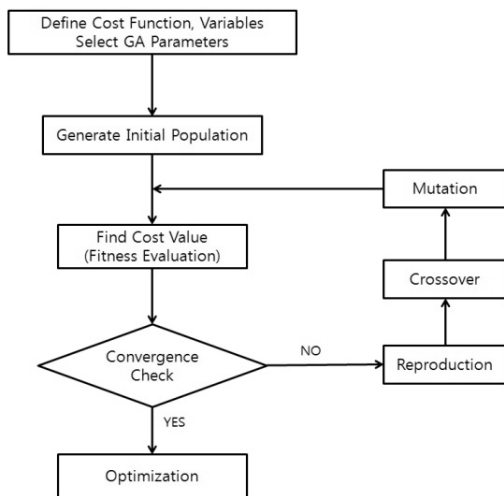


Fig. 6 Genetic algorithm flow chart

즘을 이용하였다.

3.3.1 유전 알고리즘을 이용한 최적화 실험

용접 실험을 통해 각 개체의 적합도를 구하였다. 용접 조건은 용접전류 8kA, 용접시간 300msec, 가압력 400kgf으로 설정하고, 용접 시험편은 비도금강인 SPRC440, 두께 1.0mm의 고강도강을 사용하여 총 2회 반복실험을 수행하였다. 선행 실험을 통해 도출한 환산계수의 범위는 Table 2에서 나타내었다. 선행 실험에서 GE의 값이 0.0017 이상이 되면 통전 초기의 오버슈팅이 심하게 나타남을 확인할 수 있었고, GD값은 오버슈팅 이후의 안정화, GDU는 목표전류까지의 도달시간과 연관성이 높은 것을 확인할 수 있었다. 사전 실험의 결과를 통해 GE는 0.0001~0.0016, GD는 0.001~0.016, GDU는 300~450 범위로 설정하였다. GE, GD, GDU 3개의 파라미터는 4비트씩 할당하여 이진 코드화하였으며, 선택은 룰렛휠선택(Roulette Wheel Selection), 교배는 교배율 80%의 일점교배, 돌연변이는 돌연변이율 0.5%의 표준돌연변이법을 사용하였다. 실험은 최대 40세대까지 진행하였으며, 세대 당 개체 수는 20개로 실험하였다. 목적함수로는 ITAE를 사용하였다.

3.3.2 유전 알고리즘을 이용한 최적화 실험

유전 알고리즘의 목적함수는 식(3)과 같이 정의하고 최적화를 수행하였다.

$$Objective\ Function = \frac{ITAE}{2000} \quad (3)$$

Fig. 7은 세대별 최적 목적함수의 추이이며, 세대별 최적 목적함수는 세대가 거듭할수록 감소하여 28세대 이후 수렴하였다. 28세대 이후의 수렴값은 40세대까지 세대가 진행될 때까지 변하지 않았기 때문에 이 값을 최적값으로 선정하였다. 최종적으로 유전 알고리즘을 이용하여 최적화된 퍼지 환산계수 (GE=0.0015, GD=0.014, GDU=380)를 도출하였다.

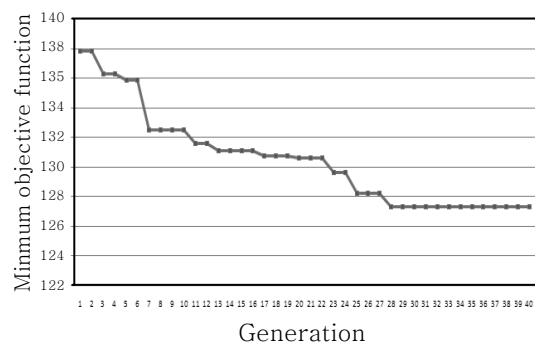


Fig. 7 Result of genetic algorithm

4. 실험고찰

용접부 동저항의 변화, 외부 환경 등에 대응하여 일정한 용접전류를 생성하기 위하여 퍼지 알고리즘을 적용한 정전류 제어기를 제작하였다. 제작된 정전류 제어기는 퍼지 환산계수를 최적화하는 방법으로 제어기를 최적화하였다.

Fig. 8은 퍼지 환산계수가 최적화 되지 않았을 때의 전류 파형, 최적화 되었을 때의 전류 파형, 그리고 최적화 되었을 때 제어기 검증을 위한 3단 통전 시의 전류 파형이다. (a)는 환산계수가 최적화 되지 않았을 때의 파형이며, 용접 초기 50msec 이내에서 오버 슈팅이 크게 발생하여 정전류 제어가 적절히 이루어지지 않음을 확인할 수 있다. 퍼지 환산계수가 최적화된 (b)의 경우, 오버슈팅이 발생하지 않으며, 목표전류까지의 도달 시간도 10msec 내외였다. 목표전류에 도달한 후 용접이 진행되는 동안 용접부의 저항변화와 같은 용접부 조건의 변화에 대해서도 적절히 대응하여 목표전류를 용접공정이 끝날 때까지 유지하는 것을 확인할 수 있다. (c)는 목표전류를 5kA(100msec)-8kA(100msec)-6kA

Table 2 Search range for scaling factors

Parameter	Range	Number
GE	0.0001~0.0016	16
GD	0.001~0.016	16
GDU	300~450	16

(100msec)로 3단 통전하였을 때의 전류 파형이며, 다단통전은 용접 품질 향상을 위한 방법으로 사용되는 방법으로 이것을 통하여 목표전류의 급격한 변화에 대한 제어기의 반응을 시험하고자 하였다. 통전 결과 전류가 급격하게 변화하는 구간에서 10msec이내의 시간에서 목표전류를 확보하여, 설정치를 만족시키는 제어 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한 제작된 제어기는 시험 강종인 두께 1mm - SPRC440이외의 다양한 두께의 고강도강, 연강의 용접에서도 시험강종 용접시와 같은 성능을 보이는 것을 확인하였다.

5. 결 론

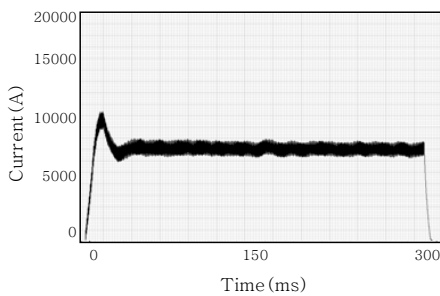
본 연구에서는 인버터 DC 저항 점 용접시스템을 구성하였고, 정전류 제어를 위해 퍼지 제어기를 설계하였으며, 퍼지 환산계수를 최적화하기 위해 유전 알고리즘을 이용하였다. 초기 실험을 통해 모재 고유 저항의 영향으로 용접시 기준 전류보다 낮은 전류로 용접이 진행되거나, 용접이 진행되는 과정 중에 전류가 흔들리거나 불안정한 모습을 볼 수 있었고, 날림의 발생과 더불어 전류가 불규칙하게 나타나는 문제점을 확인하였다. 이러한 인버터 DC 저항 점 용접 시스템의 정전류 제어의 필요성으로 정전류 제어를 위한 퍼지 제어기를 설계하였으며, 제어 성능을 향상시키기 위해 퍼지 환산계수를 최적화하였다. 최적화를 위한 성능지수는 절대오차 시간 곱 적분인 ITAE를 사용하였으며, 최적화를 위해 전역 최적화 알고리즘으로 널리 사용되고 있는 유전알고리즘을 사용하였다. 퍼지제어 환산계수의 최적값은 GE=0.0015, GD=0.014, GDU=380이며 실험을 통해 정전류 파형제어를 확인하였다.

후 기

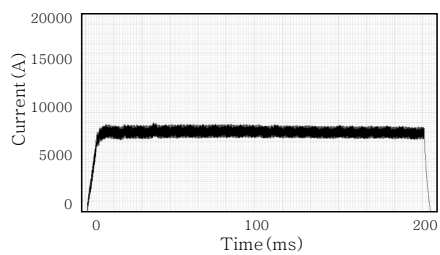
본 연구는 2009년도 서울시산학협력사업(과제번호 10848) 및 BK21의 연구비지원을 받아 수행하였음.

참 고 문 헌

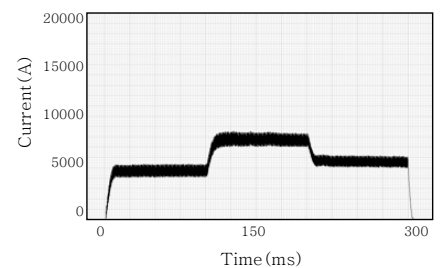
1. T.H. Kim, M.J. Kang, S. Rhee : A Study of Circuit Modeling for Welding Current Wave Form According



(a) GE(0.0015), GDE(0.004), GDU(400)



(b) GE(0.0015), GDE(0.014), GDU(380)



(c) GE(0.0015), GDE(0.014), GDU(380), 3 step

Fig. 8 Current profile by scaling factors

- to Variable Switching Frequency, Proceedings of KSW 2005-Autumn, **45** (2005), 108-110 (in Korean)
2. B. M. Brown : A Comparison of AC and DC Resistance Welding of Automotive Steels, Welding Journal, **66-1** (1987), 19-23
 3. 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)
 4. H.L.Sree and A.Soumitra : Spot Weldability of Advanced High-strength Steels Using AC and MFDC Power Sources, SheetMetal Welding Conference XI, (2004)
 5. C. L.Tsai, W. L.Dai, D. W.Dickinson and J. C. Dickinson :Analysis and Development of a Real-time Control Methodology in Resistance Spot Welding, Welding Research Supplement, **70-12** (1991), 339-351
 6. Jea-Moon Kim, Lee-Hun Kim, Byoung-Gwon Min, Chung-Yuen Won, Gyu-Sik Kim, and Se-Wan Choi : Variable Power Control of Inverter Spot Welding Machine Using Evolution Algorithm, Journal of Power Electronics, **7-4** (2002), 385-394 (in Korean)
 7. T. H. Kim :A Study of Intelligent Control System Design and Weld Quality Monitoring in Inverter DC Resistance Spot Welding Process, A doctor's thesis, Department of Mechanical Engineering, Hanyang Univ., (2006), 34-39 (in Korean)
 8. E. H. Mamdani : Twenty Year of Fuzzy Control : Experience Gained and Lessons Learnt, Proceedings of 2nd IEEE Int. Conf. Fuzzy System, (1993), 339-344
 9. S.K.Oh : Fuzzy Model &Control System, Naeha Co., 2002, 292-304 (in Korean)
 10. J. J. Park, G. S. Choi :Fuzzy Control Systems, Gyowoo Co., 2001, 153-158 (in Korean)
 11. Richard C. D :Modern Control Systems, Pearson Co., 2005, 337-338
 12. Jin, G. G : Genetic Algorithms and Their Applications, Gyowoo Co., 2000, 119-148 (in Korean)
 13. D. Kim, S. Rhee : Determination of Optimal Conditions for a Gas Metal Arc Welding Process Using Genetic Algorithm, Journal of Korean Welding Society, **18-5** (2000), 63-69 (in Korean)