

진화알고리즘을 이용한 인버터 스폿용접기의 가변전력 제어

金才文*, 金利勳, 閔丙權, 元忠淵, 金奎植, 崔世琬

Variable Power Control of Inverter Spot Welding Machine using Evolution Algorithm

Jae-Moon Kim, Lee-Hun Kim, Byoung-Gwon Min, Chung-Yuen Won, Gyu-Sik Kim, and Se-wan Choi

요 약

본 논문은 기존의 정전력 제어 대신에 용접품질을 향상시키기 위해 새로운 제어기법을 제안하였다. 제안된 방식을 구현하기 위해 미분기하학 이론을 근거로 한 비선형 피드백 선형화 기법을 이용하여 스폿용접 시스템을 선형시스템으로 한 후 진화전략을 이용하여 PI제어기의 최적 이득을 얻는다. 진화전략은 제어파라미터 최적화 문제를 풀기 위한 방법으로 자연진화의 원리를 모방한 알고리즘이다.

시뮬레이션과 실험결과는 진화전략에 의한 가변전력 제어의 성능이 기존의 제어방법보다 훨씬 더 우수하다는 것을 보여준다.

ABSTRACT

In this paper, a new control strategy is proposed to improve the quality of the welding products. The conventional nonlinear power control system of spot welders is linearized using nonlinear feedback linearization technique based on differential geometry theory. An evolution strategy(ES) geometry is used to find optimal gain of PI controllers. It tries to find out the optimal control parameters by imitating the natural evolution.

Some Simulation and experimental results show that the proposed variable power control system using ES algorithm has better dynamic performances than the conventional one.

Key Words : Evolution Strategy, Spot welding system, Linearization

1. 서 론

스폿 용접은 고품질 용접이 요구되는 제품에 적합한

겹치기 저항 용접의 한 종류로 두 개의 금속판을 서로 겹쳐서 전극으로 압력을 가하면서 전류를 흘려 보낼 때 금속판 사이의 저항에 의한 주울열로 금속판을 접합하는 공정이다^[1].

단시간 용접이 가능하고 자동용접을 하므로 대량생산에 적합하지만 용접시간이 매우 짧아 용접전류, 가압력 및 전극의 마모상태 등 용접변수의 미소 변화에도 균일한 용접품질을 얻기 어렵다.

최근의 연구동향을 살펴보면, 용접 중에 투입되는

*현대모비스(주) 기술연구소 선임연구원

E-mail : goldmon@mobis.co.kr

접수일자 : 2002. 5. 6

1차심사요청일 : 2002. 5.10 2차심사요청일 : 2002. 7. 9

심사완료일 : 2002. 7.24

에너지와 열 팽창으로 야기되는 전극의 분리현상을 이용한 연구^[2] 및 용접부위에 주열을 일정하게 공급하는 정전력 제어에 대한 연구가 발표되었다^[3-7].

이러한 정전력 제어에서는 전극사이의 용접부하가 비 선형구조이므로 제어성능은 개선되나 이득 설정이 어렵게 된다.

본 논문은 이러한 정전력 제어에 대한 문제점을 보완하고자 용접후반부에 시간에 따라 전력이 변화되는 가변전력 제어를 제안하였다. 이에 앞서 기존의 정전력 제어에 따른 스폿용접 시스템이 비선형 특성을 갖는 시스템이 됨을 보이고 비선형 케환 입출력 선형화 기법을 이용하여 선형 시스템으로 근사화하였다. 근사화된 선형시스템에 대한 가변전력 제어를 하기 위해 최근에 많이 연구가 되고 있는 진화 알고리즘의 한 종류인 진화전략(Evolution Strategy: 이하 ES)을 이용하여 PI 제어기의 최적 제어이득값을 찾아내어 제어하는 알고리즘을 제안하였다.

제안한 이론에 대해 시뮬레이션 과정을 보이고 소형 인버터 스폿용접기를 설계 및 제작하여 실험을 통하여 입증하고자 한다.

2. 스폿용접의 원리 및 시스템 선형화

스폿용접은 그림 1과 같이 피용접물을 전극사이에 놓고 가압하면서 전류를 흘리면, 상대적으로 저항값이 가장 큰 용접부는 주열이 높아 국부적으로 용융되면서 너게트가 형성된다^[1].

용접저항 $R(\Omega)$, 용접전류 I (A), 용접시간 t (sec)에 대해 발열량 Q 는 식 (1)과 같이 표현되고 이 열로 인해 국부적으로 용접부가 용융되면서 가압력에 의해 용접된다.

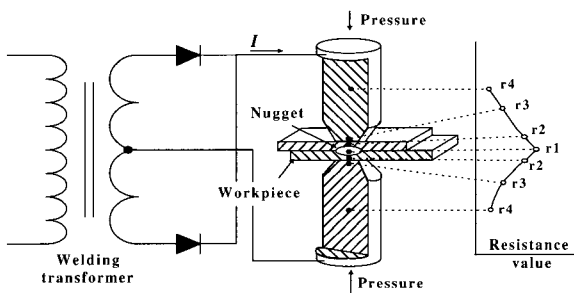


그림 1 스폿용접기의 원리 및 저항분포
Fig. 1 Principle of spot welding machine and its resistance distribution

$$Q = 0.24 I^2 R t \tag{1}$$

용접부하에 대한 등가회로는 인덕턴스와 시간에 따라 변하는 저항으로 등가회로를 표현하거나 단지 시간에 따라 변하는 저항만으로 구성된다^{[2][3]}.

본 논문에 적용된 용접시스템은 소형이므로 두께가 얇은 박판 금속을 사용하였다. 따라서 용접용 변압기와 용접부하를 그림 2와 같이 등가화 하였다.

스폿용접은 저전압, 대전류 시스템으로 피용접물에서 검출되는 전압과 비교하면 변압기 2차측의 다이오드 전압강하를 무시할 수 없다.

따라서 다이오드 전압강하 V_d 를 고려한 변압기 2차측 동적 방정식은 식 (2)와 식 (3)으로 표현된다.

$$v_{t2}(t) = v_{t2}'(t) - V_d \tag{2}$$

$$\begin{aligned} v_{t2}(t) &= L \frac{di_2(t)}{dt} + Ri_2(t) + R_w(t) i_2(t) \\ &= v_{t1}(t)/n \end{aligned} \tag{3}$$

한편 용접하는 동안 부하에서 검출되는 순시전력 $P_{real}(t)$ 는 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} P_{real}(t) &= v_w(t) i_2(t) \\ &= R_w(t) i_2(t)^2 \end{aligned} \tag{4}$$

전극팁 양단 부하저항 $R_w(t)$ 가 서서히 변하는 변수이므로 미소구간에서 일정하다고 가정하면 식 (3)과 식 (4)에서 $R_w(t)$ 는 상수 R_w 로 놓을 수 있다.

따라서 식 (3)을 라플라스 변환하면 식 (5)와 같고 이 식으로부터 양변에 R_w 를 곱하면 식 (6)을 얻는다.

$$\frac{I_2(s)}{V_{t2}(s)} = \frac{1}{Ls + R + R_w} \tag{5}$$

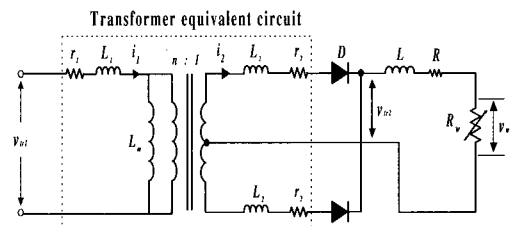


그림 2 용접용 변압기를 포함한 부하 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of load with welding transformer

$$\frac{V_w(s)}{V_{tr2}(s)} = \frac{R_w}{Ls + R + R_w} \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)으로부터 그림 3과 같은 스폿용접 시스템에 대한 제어용 블록선도를 얻을 수 있다.

그림 3에서 주파수 영역에서 실제전력 $P_{real}(s)$ 는 용접전압과 용접전류에 대한 콘벌루션(Convolution) 관계를 가지므로 비선형 구조를 갖고 있다.

따라서 미분 기하학 이론에 기초를 둔 비선형계환 입출력 선형화 기법을 응용함으로써 스폿용접 시스템을 선형시스템으로 근사화 하고자 한다.^[8]

식 (4)에서 부하저항 $R_w(t)$ 가 미소구간에서는 일정하다고 가정하면 상수 R_w 로 놓을 수 있다. 따라서 양변을 미분하면 식 (7)과 같은 결과를 얻을 수 있다.^[4]

$$\begin{aligned} P_{real}'(t) &= v_w'(t) i_2(t) + v_w(t) i_2'(t) \\ &= -(Rv_w'(t) + R_w v_w''(t))/L + R_w v_{tr2}'(t)/L i_2(t) \\ &\quad + (-(Ri_2'(t) + R_w i_2''(t))/L + v_{tr2}'(t)/L) v_w(t) \\ &= -\frac{2(R + R_w)}{L} v_w(t) i_2(t) + 2v_{tr2}'(t) v_w(t)/L \\ &= -\frac{2(R + R_w)}{L} P_{real}(t) + 2v_{tr2}'(t) v_w(t)/L \quad (7) \end{aligned}$$

한편 PI제어기에서 출력되어 전력변환 시스템으로 들어가는 입력을 $\hat{u}(t)$ 라 정의하고 전력변환 시스템의 이득을 K 라고 하면 다이오드 전압강하를 고려한 변압기 2차측 전압은 식 (3)에서 식 (8)을 얻는다.

$$v_{tr2}(t) = \frac{\hat{u}(t) K}{n} \quad (8)$$

식 (8)을 식 (7)에 대입하면

$$P_{real}'(t) = -\frac{2(R + R_w)}{L} P_{real}(t) + \frac{2Kv_w(t)}{nL} \hat{u}(t) \quad (9)$$

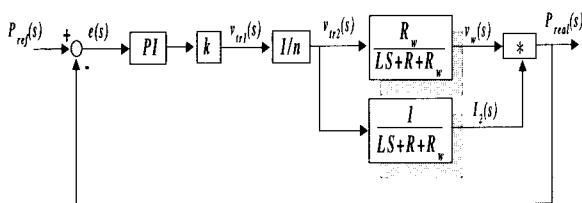


그림 3 용접 시스템 제어 블록선도
Fig. 3 Control block diagram of welding system

그러나 식 (9)에서 두 번째 항은 상태변수들의 곱 $v_w(t) \hat{u}(t)$ 에 의해 비선형 항을 갖는다. 따라서 식 (9)에서 새로운 입력 $\bar{u}(t)$ 를 식 (10)과 같이 정의하면

$$\bar{u}(t) = 2Kv_w(t) \hat{u}(t) / nL \quad (10)$$

식 (9)는 식 (11)과 같이 선형시스템으로 표현된다. 식 (10)에서 $v_w(t)$ 는 피용접물에 인가된 전압이므로 측정 가능한 변수로 새로운 제어입력 $\bar{u}(t)$ 는 실현 가능하다.

$$P_{real}'(t) = -\frac{2(R + R_w)}{L} P_{real}(t) + \bar{u}(t) \quad (11)$$

식 (7)~식 (11)를 통해 선형화된 스폿용접 시스템의 전력제어 블록선도는 그림 4와 같이 표현된다.

식 (10)에서 $\bar{u}(t)$ 는 전력제어를 위한 제어기의 제어량으로 출력된다. 따라서 새로운 입력 $\bar{u}(t)$ 를 시간에 대한 아나로그 형태의 수식으로 표현하면 식 (12)와 같다.

$$\bar{u}(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt \quad (12)$$

식 (10)과 식 (12)를 이용하여 변압기 2차측에 대한 식 (13)을 얻을 수 있으며, 식 (13)을 식 (3)에 대입하면 식 (14)로 표현된다.

$$v_{tr2}(t) = \frac{L}{2v_w(t)} [k_p e(t) + k_i \int e(t) dt] \quad (13)$$

$$v_{tr}(t) = \frac{nL}{2v_w(t)} [k_p e(t) + k_i \int e(t) dt] \quad (14)$$

비선형 계환 선형화 기법을 통해 시스템을 근사적으로 선형화를 하면, 변압기 1차측에 인가되는 전압은 비선형 시스템구조에서 표현되는 식 (8)과는 다른 식 (14)를 얻을 수 있다.

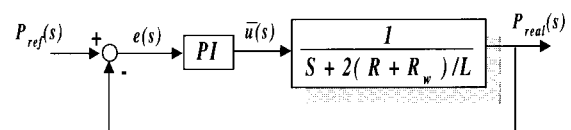


그림 4 선형 시스템으로 바뀐 블록선도
Fig. 4 Block diagram with linear system

3. 진화 알고리즘을 이용한 제어기 설계

진화 알고리즘(Evolution Algorithm : EA)은 자연세계의 진화과정을 모델링하여 복잡한 실세계의 문제를 해결하고자 하는 계산모델이다. 이는 풀고자 하는 문제에 대한 가능한 한 해를 정해진 형태의 자료구조로 표현한 다음 이들을 점차적으로 변형함으로써 점점 더 좋은 해들을 생성한다. 따라서 진화 알고리즘은 개체 집단 내에서 집단적 탐색과정에 기초하며, 각 개체는 탐색공간 내의 하나의 탐색점에 대응된다.

본 논문에 도입한 진화전략은 최적화 문제를 풀기 위하여 자연진화의 원리를 모방한 알고리즘으로 초기 개체집단은 n 차원 실수공간 상에서 부동소수점 벡터쌍 $V=(X, \sigma)$ 으로 표현되는 개체들로 구성된다. 여기서 X 는 탐색공간내의 하나의 점을 나타내며 σ 는 표준편차들의 벡터이다. 이렇게 선정된 초기 개체는 돌연변이에 의한 자손세대 개체는 식 (15)와 같이 표현된다. 이때 돌연변이 된 자손세대(X^{t+1})의 적합도가 부모세대(X^t)보다 우수하고 제약조건을 만족한다면 자손세대는 부모세대와 바뀌어 개체집단의 새로운 구성원이 되며, 그렇지 않으면 자손세대는 제거되고 부모세대가 그대로 남는다.

$$X^{t+1} = X^t + N(0, \sigma) \tag{15}$$

여기서, $N(0, \sigma)$ 는 평균이 0이고 표준편차가 σ 인 독립적인 램덤 가우시안 숫자들의 벡터이다.

한편 ES를 실제 시스템에 적용하는데 있어 수렴속도의 문제가 있는데 본 논문에서는 수렴속도를 빠르게 하기 위해 탐색영역을 적합도 변화에 따라 가변시키는 가변 표준편차를 도입하였다. 자손세대의 각 개체는 식 (16)을 이용하여 진화된다.

$$NEW = ZOOM \times RN + OLD \tag{16}$$

여기서, RN 은 가우시안 램덤변수이고 $ZOOM$ 은 식 (17)과 같이 진화가 진행됨에 따라 가변되는 변수이다.

$$ZOOM = \begin{cases} b - a \times f_{\max} & \text{if } f_{\max} < d \\ \frac{c}{(f_{\max} - f_{avg})} & \text{if } f_{\max} \geq d \end{cases} \tag{17}$$

여기서 a, b, c, d 는 양의 정수, f_{\max} 는 최대 적합도, f_{avg} 는 평균 적합도를 나타낸다. 탐색초기에 최대 적합

도는 매우 작다. 따라서 식 (17)의 첫 번째 식에 따라 탐색영역 공간이 크음을 의미하는 $ZOOM$ 변수가 커지는데 세대가 진행될수록 최대 적합도는 커지고 $ZOOM$ 변수는 점점 작아진다. 한편 최대 적합도와 평균 적합도와의 차이가 작아져 제어기의 파라미터가 국부적 최저점에 머무를 수가 있는데 식 (17)의 두 번째 항에서 분모의 값이 작아 상대적으로 $ZOOM$ 변수가 커지게 되어 국부점에 빠지는 문제를 해결해준다.

식 (16)에 의해 진화되는 자손세대의 각 개체는 부동소수점으로 표현되는데 아래와 같이 PI제어기의 각 제어기 이득을 포함하고 있다.

또한 PI제어기의 제어기 이득을 조정하기 위한 적합도 함수 $fitness(k)$ 는 식 (18)과 같이 정의하였다.

개체

$K_p(k)$	$K_i(k)$
----------	----------

$$fitness(k) = \frac{1}{1 + \alpha \sum_{i=1}^m |e_k(i)|} \tag{18}$$

여기서, α 는 상수, m 은 전체 샘플링 수, $e_k(i)$ 는 k 번째 개체에 대한 i 번째 샘플링 시점에서의 오차값, $K_p(k)$ 는 개체 k 의 비례이득, 그리고 $K_i(k)$ 는 개체 k 의 적분이득이다.

그림 5는 제안된 인버터 스폿용접기의 제어 블록도를 나타내며 전체적인 시스템 안정도를 고려하여 제어기 이득의 탐색공간 범위를 설정하여야 한다.

스폿용접기는 변압기 2차측이 R-L회로인 1차 지연 함수이므로 전체적인 시스템에 대한 개루프 전달함수는 식 (19)와 같고 시스템에 대한 특성방정식은 식 (20)과 같이 표현된다.

$$G(s) = G_p(s)G_c(s) = \frac{K_p S + K_i}{S(S + 2(R + R_w)/L)} \tag{19}$$

$$S^2 + (K_p + 2(R + R_w)/L)S + K_i = 0 \tag{20}$$

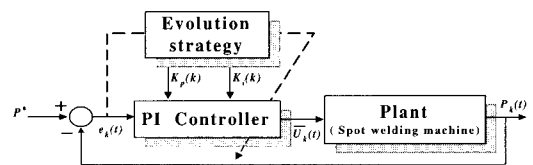


그림 5 인버터 스폿용접기의 제어 블록도
Fig. 5 Control block diagram of inverter spot welding machine

식 (19)와 식 (20)에서 스폿용접 시스템이 안정영역 내에서 진화 전략을 이용한 피드백 전력 제어가 이루어지려면, 식 (21)~식 (23)과 같은 조건들이 만족되어야 한다^[9].

$$K_p > 2(R + R_w)/L \quad (21)$$

$$K_i > 0 \quad (22)$$

$$\frac{K_i}{K_p} \neq 2(R + R_w)/L \quad (23)$$

4. 시뮬레이션

가변전력 제어시의 압력조건은 일정하고 0.5mm의 두께를 가진 순수한 철을 용접한다고 가정하였다.

그림 6은 가변전력 제어에 대한 시뮬레이션 흐름도를 나타낸다. 임의의 개체군이 생성되고 돌연변이 과정을 통해 자손세대를 만들어낸다.

이렇게 생성된 자손 개체들은 적합도를 통해 높은 적합도를 가진 개체들로 진화되어간다.

그림 7은 진화과정동안 각 세대의 최대 적합도와 평균 적합도를 나타낸다.

적합도의 크기는 식 (18)에 의해 표현되며, 진화에 따른 최대 적합도와 평균 적합도의 증가는 식 (18)의 분모에서 두 번째항에 해당되는 기준값에 대한 실제값과의 오차가 거의 영으로 접근함을 뜻하는 것으로 PI 제어기의 이득값을 적절하게 찾아나감을 의미한다.

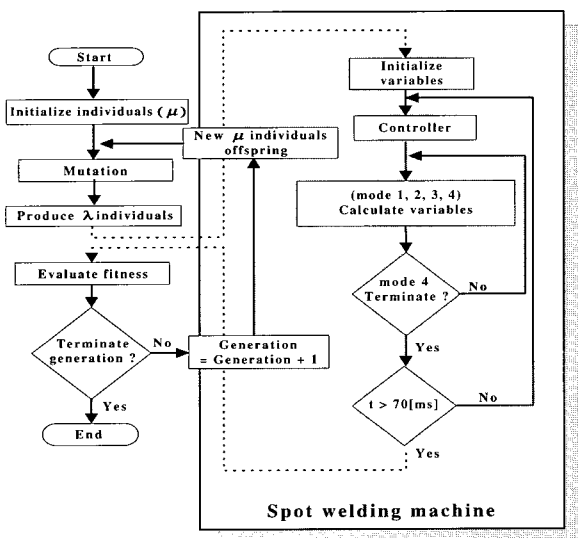


그림 6 시뮬레이션 흐름도
Fig. 6 Simulated flowchart

그림 8은 0.5mm의 두께를 갖는 순수한 철(Fe)에 대해 용접중의 전형적인 저항변화를 보여준다. 용접초기 가압력에 의해 접촉저항은 급속히 감소하다가 주울열 상승으로 체적저항이 증가한다. 이후 피용접물 사이의 연성작용 및 너게트 성장으로 부하저항이 서서히 감소하는 특성을 지닌다.

그림 9는 정전력 제어에서 기준전력 800[W]에 대한 전력응답 파형으로 전력과 주울열은 비례관계에 있으므로 일정하게 주울열이 유지된다고 볼 수 있다.

그림 10은 그림 9에 대해 부하에 인가된 전압과 전류 파형을 보여준다. 용접전압과 전류는 상반된 값으로 변하고 있는데 이것은 너게트가 생성되면서 접촉면적에 비례해서 전류가 흘러 일정한 전류밀도를 가지고 용접되고 있음을 의미한다. 그러나 일정 가압력에 대해 용접후반부의 과도한 전류는 스패터가 발생하여 용접품질을 떨어지게 하거나 불필요한 용접전력을 피용접물에 공급함으로써 에너지 낭비를 초래한다.

그림 11은 5세대에서 PI제어기에 대한 가변전력 응답파형을 보여주고 있는데 부적절한 제어 이득으로 인해 기준전력에 대해 오버슈트가 발생하고 정상상태에 도달하는 시간이 매우 늦다.

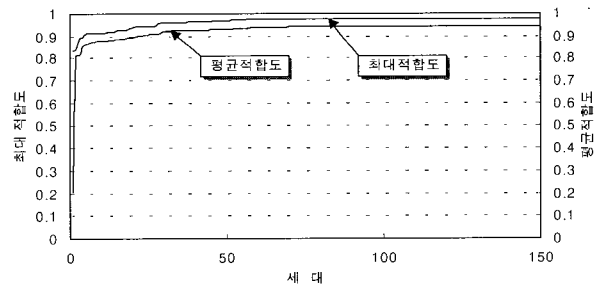


그림 7 각 세대의 평균 적합도와 최대 적합도
Fig. 7 Average fitness and maximum fitness of each generation

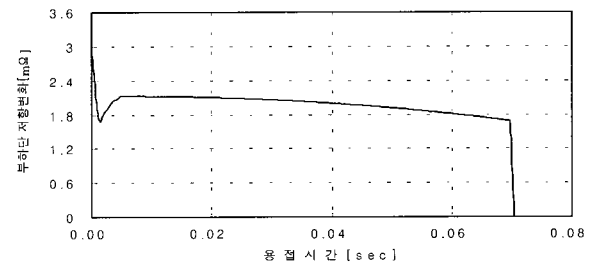


그림 8 용접중의 부하저항 변화
Fig. 8 Variation of load resistance during welding time

그림 12와 그림 13은 각각 10세대와 20세대에 대한 가변전력 응답파형을 보여준다. 10세대에서는 5세대에 비해 오버슈트가 크게 작아져 과도응답특성이 양호하며 20세대에는 정상상태에 도달하는 시간이 이전 세대에 비해 빠름을 알 수 있다. 이것은 세대가 진행됨에 따라 진화전략을 통해 PI제어기의 적절한 제어 이득을 찾아감을 보여준다. 20세대 이후의 기준전력에 대한 실제전력 응답은 그림 13과 비교하면 거의 같은 응답 특성을 얻을 수 있다. 이에 대한 근거는 그림 7의 세대에 따른 적합도를 통해 알 수 있는데 적합도가 단위 값에 가까울수록 용접이 진행되는 동안 기준전력과 실제전력과의 오차가 거의 없음을 의미한다.

그림 14는 그림 13에 대해 부하에 인가된 전압과 전류 파형을 보여준다. 그림 10과 비교하면 용접후반부에 기준전력을 낮추어 줌으로써 과도하게 흐르는 전류를 억제하고 있다.

따라서 용접후반부에 필요이상의 전류가 흐르는 것을 기준전력을 낮추어 과도한 전류 흐름으로 인한 스파터를 줄이고 용접부에 투입되는 에너지를 절감할 수 있다.

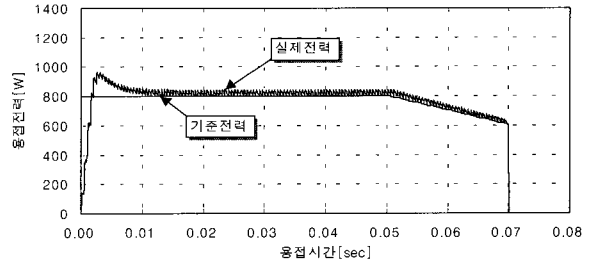


그림 11 PI 이득에 대한 전력응답(5세대)
Fig. 11 Power response on the PI gain(5th generation)

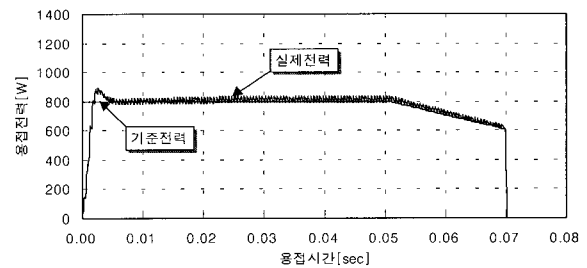


그림 12 PI 이득에 대한 전력응답(10세대)
Fig. 12 Power response on the PI gain(10th generation)

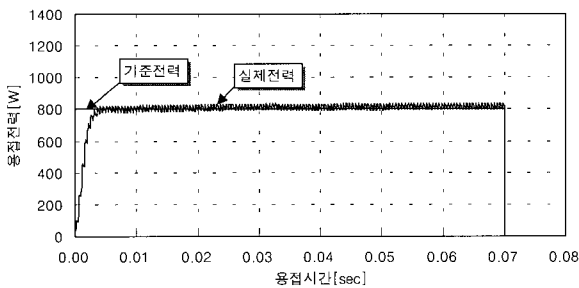


그림 9 기존의 정전력 제어[800W]
Fig. 9 Conventional constant power control[800W]

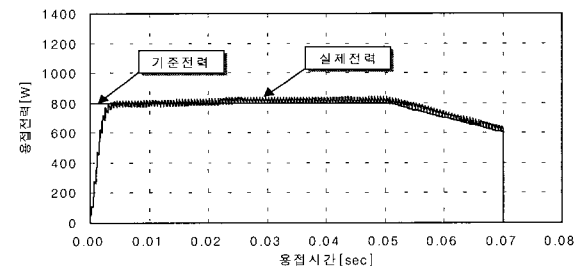


그림 13 PI 이득에 대한 전력응답(20세대)
Fig. 13 Power response on the PI gain(20th generation)

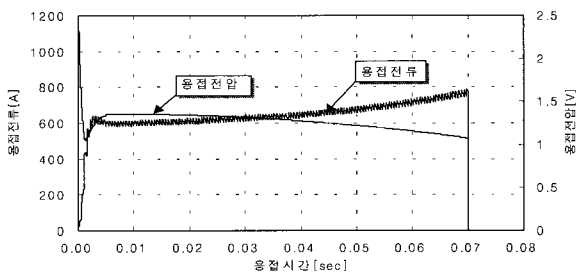


그림 10 용접 전압 및 전류
Fig. 10 Welding voltage and current

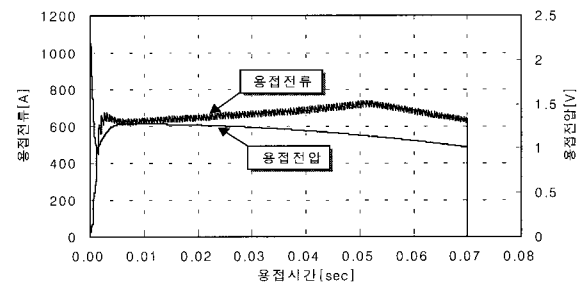


그림 14 용접전압 및 용접전류 파형(20세대)
Fig. 14 Welding voltage and current waveforms (20th generation)

5. 실험결과 및 고찰

그림 15는 전체적인 스폿용접기의 실험장치의 구성도를 보여준다. 스폿용접기의 특성상 인버터 스위칭 주파수는 2[kHz]로 하였으며, 제안된 알고리즘 구현을 위해 프로세서로 TMS320C31를 사용하였다. 용접조건은 용접초기의 과도한 용접전류로 인한 2차측 다이오드의 소자보호를 위해 업-슬로우프 2[ms], 용접시간 70[ms], 가압력 2.8[kgf]로 설정하여 실험을 하였다.

그림 16은 0.5mm의 두께를 가진 순수한 철에 대해 용접하는 동안 저항 변화패턴으로 용접초반부에 상승하다가 후반부에 서서히 저항값이 떨어짐을 볼 수 있다.

그림 17은 정전력 제어 시 기준전력 800[W]에 대한 전력응답 파형이며, 부하에 인가되는 용접전압과 용접전류는 그림 18을 통해 보여준다.

정전력 제어에 대해 용접전압은 그림 16과 같은 부하저항에 비례하며 용접전류는 반비례한다.

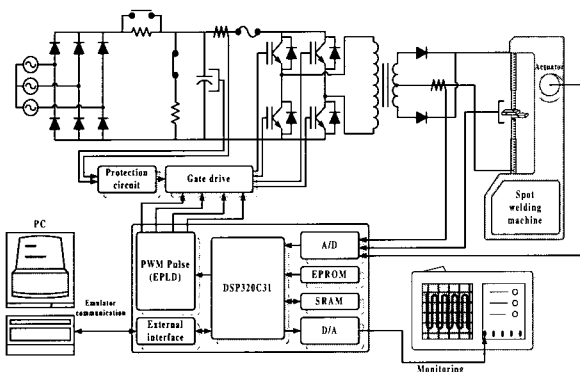


그림 15 실험장치
Fig. 15 Experimental setup

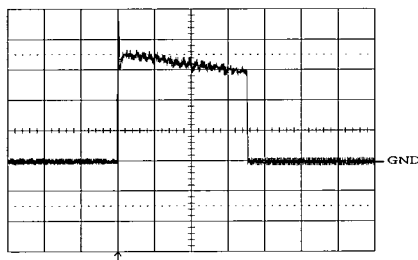


그림 16 철에 대한 저항변화 곡선[0.6 mΩ/Div]
Fig. 16 Load resistance variation curve for Fe [0.6 mΩ/Div]

그림 19는 기준전력 1200[W]에 대한 파형으로 그림 17에 비해 용접후반부에 용접전류가 많이 흐르고 있음을 볼 수 있다. 부하특성상 기준전력이 클수록 부하에 인가되는 용접전압에 비해 상대적으로 용접전류가 많이 흐른다.

따라서 정전력 제어인 경우 같은 조건하에서 기준전력이 증가할수록 용접 후반부에 과도한 용접전류가 피용접물의 접합부에 흐르게 되어 너게트가 파괴되거나 전극과 피용접물이 달라붙어 떨어지지 않는 용착현상이 발생하여 용접품질의 저하를 초래한다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문은 일정한 주울열을 공급하다가 후반부에 전력을 서서히 낮추어 주는 가변전력 제어기법을 제안하였다.

부하저항 변화를 용접시간에 대해 세 단계로 나눌 수 있다. 즉 접촉저항이 급속히 감소하는 용접초반부,

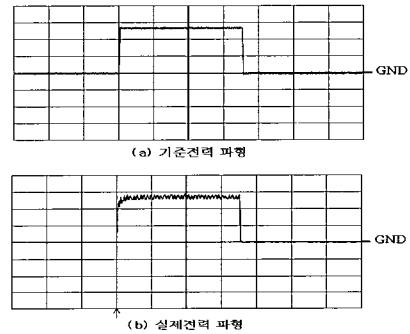


그림 17 정전력 제어일 때 전력 파형 [800W], [300W/Div], [20ms/Div]
Fig. 17 Power Waveforms for constant power control
(a) Reference [300W/Div], [20ms/Div]
(b) Real [300W/Div], [20ms/Div]

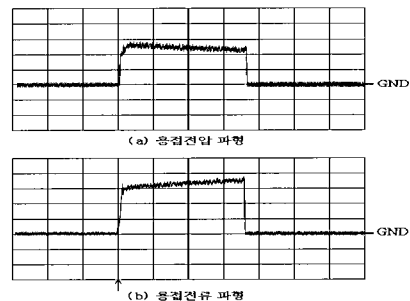


그림 18 용접전압, 전류 파형 [0.5V/Div],[200A/Div]
Fig. 18 Welding voltage and current waveforms
(a) Welding voltage[0.5V/Div],[200A/Div]
(b) Welding current[0.5V/Div],[200A/Div]

주울열에 의한 온도상승으로 너게트의 크기가 점점 증가하는 중반부, 너게트의 크기가 포화상태에 도달하면서 피용접물의 합입 현상으로 부하단의 저항은 감소하고 과도한 전류가 흐르는 후반부로 나눌 수 있다. 따라서 제안된 가변전력 제어기법은 용접중반부까지 일정한 주울열을 유지하다가 용접후반부인 50[ms]에서 25[ms]마다 기준전력을 25[W]씩 서서히 낮추었다. 기준전력에 대한 패턴은 여러 가지 형태로 나타낼 수 있으나, 본 논문은 정전력 제어에 따른 문제점을 보완하고자 하나의 패턴을 제시하였다.

제시된 패턴에 대한 기울기는 많은 용접실험을 통해 얻었는데 기울기가 작은 경우 과도한 용접전류로 인해 스패터 현상이 발생하였으며, 기울기가 큰 경우 전류 밀도가 급속히 낮아지는 결과를 초래하여 용접부 단면에 링모양이 생기게 되어 인장강도가 현저히 떨어졌다.

그림 20은 용접시간동안 기준전력 1200[W]에 대한 가변전력 제어를 했을 경우 실제전력과 부하에 인가되는 전압 및 전류의 파형을 보여준다. 그림 19와 비교하여 용접후반부를 살펴보면, 기준전력의 변화를 줌으로써 부하에 인가되는 전압은 부하저항 패턴과 같지만, 전류는 기준전력에 비례함을 볼 수 있다.

이는 전압에 비해 전류가 상대적으로 크게 변화함을 의미하며 과도한 용접전류의 흐름을 억제하여 용접품질의 저하를 막을 수 있다.

그림 21은 5세대에서 PI 이득에 대한 가변전력 제어 응답 파형을 보여준다. 기준전력 800[W]에 대해 과도상태에서 900[W]까지 오버슈트가 발생하고 있으나 용접시간 30[ms]이후 기준전력을 추종하고 있다.

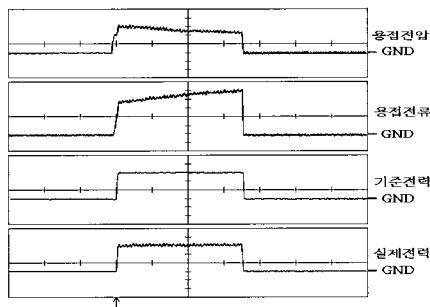


그림 19 정전력 제어일 때 파형[1200W]
 Fig. 19 Waveforms for constant power control[1200W]
 Welding voltage [0.5V/Div],
 Welding current [200A/Div],
 Reference power and real power [400W/Div]

이 세대는 진화알고리즘을 통해 적절한 제어이득을 찾지 못하여 전반적으로 기준전력에 대해 +100[W] 정도의 오차를 보인다.

그림 22는 10세대에서 PI 이득에 대한 가변전력 제어 응답 파형으로 5세대와 비교했을 때 과도상태에서 오버슈트가 크게 줄었으며 용접이 진행되는 동안 기준전력에 대해 실제전력이 ±50[W]정도의 오차가 나타난다. 5세대인 경우 30[ms]이후 기준전력을 추종한 반면 10세대에서는 정정 시간에 빠르게 도달하는 응답특성을 보인다.

이는 진화알고리즘을 통해 세대가 진행됨에 따라 적절한 제어 이득을 찾아나감을 의미하며, 다만 10세대에서도 탐색 공간내에서 부적절한 제어 이득으로 인해 기준전력에 비해 많은 오차를 보인다.

그림 23은 20세대에서 가변전력 제어할 경우 전력 파형을 보여준다. 이전 세대와 비교했을 때 과도상태에서 오버슈트 없이 빠른 응답특성을 보이며 용접시간 동안 기준전력을 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

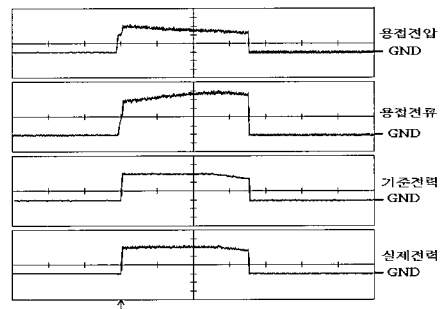


그림 20 가변전력 제어일 때 파형[1200W]
 Fig. 20 Waveforms for variable power control[1200W]
 Welding voltage [0.5V/Div],
 Welding current [200A/Div],
 Reference power and real power [400W/Div]

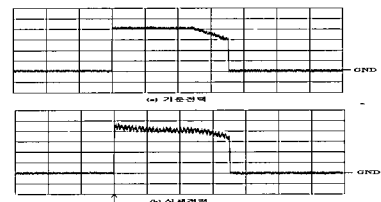


그림 21 5세대에서 전력 파형[800W]
 Fig. 21 Power waveforms on the PI gain at the 5th generation for variable power control[800W]
 (a) Reference[200W/Div] (b) Real[200W/Div]

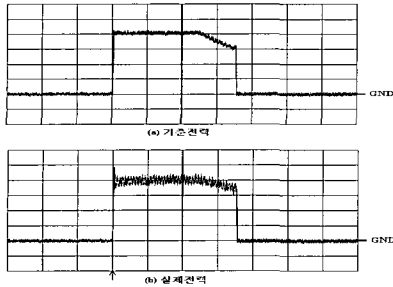


그림 22 10세대에서 전력 파형[800W]
 Fig. 22 Power waveforms on the PI gain at the 10th generation for variable power control[800W]
 (a) Reference[200W/Div] (b) Real[200W/Div]

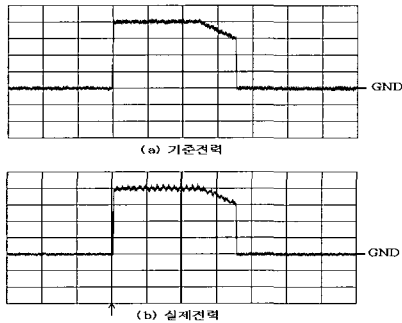


그림 23 20세대에서 전력 파형[800W]
 Fig. 23 Power waveforms at the 20th generation for variable power control[800W]
 (a) Reference[200W/Div] (b) Real[200W/Div]

시물레이션과 마찬가지로 세대가 진행될수록 적절한 제어이득을 찾아나감을 확인할 수 있고 그림 17과 비교했을 때 정상상태에 도달하는 시간이 빠르다. 식 (14)에서 살펴보면, 이것은 부하에 인가되는 전압이 제어량 분모항에 첨가되는 선형화 기법이 적용한 결과이다.

본 논문에서 적용한 진화알고리즘은 한 세대의 개체가 20이므로 한 세대가 진행되려면 20타점을 행해야 하며 20세대까지 진행되기 위해서는 400번의 용접타점이 요구된다.

따라서 용접타점 증가에 따른 전극의 마모 등으로 인해 기준전력 800[W]에 대해서만 제안된 진화알고리즘을 도입하여 타당성을 확인하였다.

그림 24는 기준전력 1200[W]에 대해 정전력 제어방식에 의한 피용접물의 용접상태를 보여준다. 전자 현미경(SEM)을 통해 용접된 부위를 50배로 확대하여 촬영한 결과로서 용접이 이루어진 부위에 코로나 본드가

형성된 것을 볼 수 있으며 용접이 이루어진 부위에 패인구멍(Pit)이 생겼다. 이러한 현상은 피용접물이 너게트가 이루지면서 생긴 기공의 일종으로 용접시 수소, 산소, 질소 등의 기체가 피용접물의 외부로 빠져나간 후 주위로부터 채워지지 않았기 때문이다.

그림 25는 기준전력 1200[W]에 대해 제안된 가변전력 제어방식에 의한 피용접물의 용접상태이며, 정전력 제어를 했을 때보다 양호함을 알 수 있다.

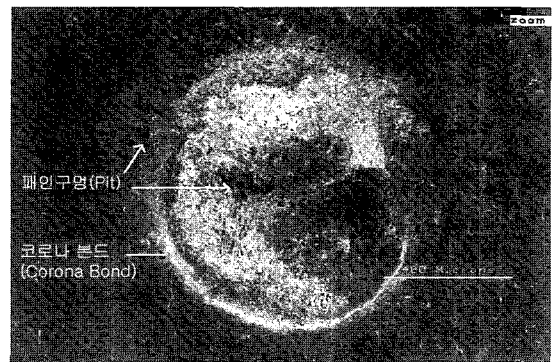


그림 24 정전력 제어방식에 대한 용접상태[1200W]
 Fig. 24 Welded state for constant power control (Reference power : [1200W])

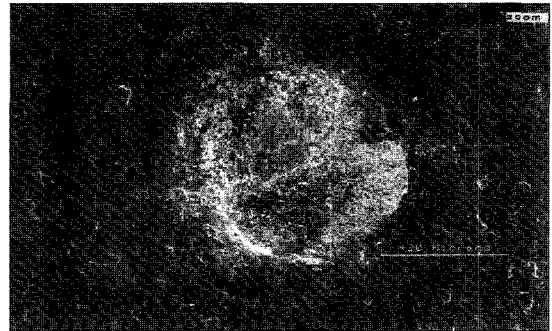


그림 25 가변전력 제어방식에 대한 용접상태[1200W]
 Fig. 25 Welded state for variable power control (Reference power : [1200W])

6. 결 론

본 논문은 용접성능을 개선하고자 가변전력 제어방식을 제안하였다.

이를 위해 진화알고리즘을 도입하여 적절한 제어 이득을 찾아나가는 방식을 제시하였다.

제안된 알고리즘은 시물레이션을 통해 확인한 후 피용접물인 순수한 철을 대상으로 소형 스폿용접기의 시

시스템을 제작 및 실험을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 순수한 철을 대상으로 용접한 결과 용접후반부에 너게트의 성장과 전극의 가압력으로 인한 함입현상으로 저항값이 떨어지는 특성을 확인하였다.
- (2) 정전력 제어에 대한 비선형시스템인 스폿용접 시스템을 선형화한 후 전력 제어를 한 결과 정상상태 도달시간이 빠름을 확인할 수 있었다. 또한 가변전력 제어는 일정한 주울열을 피용접물에 인가하다가 용접 후반부에 전력을 서서히 낮추어 줌으로써 양호한 용접품질을 얻을 수 있었다.
- (3) 가변전력 제어를 위해 PI제어기를 사용하였다. 기존의 PI제어기는 이득설정에 어려움이 있으므로 가변탐색 공간영역에서 적절한 제어 이득을 찾는 진화 전략을 접목하여 결과 시뮬레이션 및 실험결과에서 적절한 제어 이득을 찾아나감을 확인하였다.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R01-2001-003060) 지원으로 수행되었음.

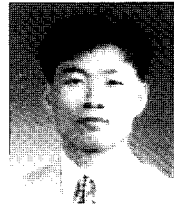
참 고 문 헌

- [1] D.W. Dickinson, Metals Handbook, Vol. 6, Welding, Brazing and Soldering, pp. 469~493, 1983.
- [2] 김재문, 김종덕, 원충연, 최규하, 김규식, 목형수, "전극분리 제어에 의한 인버터 스폿용접기의 용접품질향상", 전력전자학회 논문지, 제5권 제3호.
- [3] H.S. Cho, "A Microprocessor-Based Electrode Movement Controller for Spot Weld Quality Assurance," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. IE-32, No. 3, pp. 234~238, Aug. 1985.
- [4] J. Seo Moon, G.S. Kim, J.M. Kim, C.Y. Won, "Power Control of Resistance Spot Welding System with High Dynamic Performance", IECON '97, pp. 845~849, 1997.
- [5] 김재문, 원충연, "진화전략을 이용한 인버터 스폿용접기의 정전력 제어에 관한 연구", 한국퍼지 및 지능 시스템 학회 논문지, Vol. 9, No. 1, pp. 97~105, 1999.
- [6] 김재문, 원충연, 최규하, 김규식, 목형수, "인버터 스폿용접기의 용접품질 향상을 위한 동저항 데이터베이스 구축", pp. 294~303, 전력전자학회 논문지, 1999.6.
- [7] 구영모, 최해용, 목형수, 최규하, 김규식, 원충연, "진행보상기를 이용한 아크용접기용 3상 PWM 컨버터의 동특성

향상", pp. 419~427, 전력전자학회 논문지, 2000.10.

- [8] Y. Wang et al., "Transient Stability Enhancement and Voltage Regulation of Power Systems", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, No. 2, pp. 620~627, May 1993.
- [9] Benjamin C. Kuo, Automatic Control Systems, Vol. 7, pp. 470~538, 1995.

저 자 소 개



김재문(金才文)

1967년 9월 6일생. 1994년 성균관대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2000년~현재 현대모비스(주) 기술연구소 선임연구원.



김이훈(金利勳)

1970년 7월 7일생. 2001년 성균관 대학원 메카트로닉스공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 메카트로닉스공학과 박사과정.



민병권(閔丙權)

1980년 부산대 전기공학과 졸업. 1985년 연세대 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1999년 성균관대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 현대중공업(주) 기계전기연구소 책임연구원.



원충연(元忠淵)

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년 12월~1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문교수. 1988년 3월~현재

성균관대 전기전자 및 컴퓨터공학부 교수. 당 학회 편집이사.



김규식(金奎植)

1958년 8월 25일생. 1981년 서울대 전자공학과 졸업. 1983년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1990년 8월 동 대학원 제어계측공학과 졸업(박사). 1988년~1992년 대우중공업 중앙연구소 선임연구원. 1993년~현재 서울시립대 전기전자컴퓨터공학부 부교수. 당 학회 재무이사.



최세완(崔世琬)

1963년 3월 3일생. 1985년 인하대 전자공학과 졸업. 1992년 Texas A&M Univ. 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~1997년 삼성전기 종합연구소 수석연구원. 1997년~현재 서울산업대 제어계측공학과 조교수. 당 학회 편집위원.