

## 전극분리 제어에 의한 인버터 스폿용접기의 용접품질 향상

金才文, 金鍾德, 元忠淵, 崔圭夏, 金奎植, 睦亨洙

### Welding Quality Improvement of Inverter Spot Welder by Electrode Movement Control

Jae-Mun Kim, Jong-Duck Kim, Chung-Yuen Won, Gyu-Ha Choe, Gyu-Sik Kim and Hyung-Soo Mok

#### 요 약

저항 스폿용접기에서 용접품질의 보장은 오래 계속 되어온 문제이었다. 본 논문에서는 용접품질과 전극분리와의 관계를 조사하였으며 전극분리가 하나의 제어변수로써 사용될 수 있음을 실험적으로 입증하였다. 피드백신호로서 전극분리를 이용한 퍼지제어에 기초를 둔 용접품질개선을 제시하였다. 저항 스폿용접기의 용접품질은 인장전단강도시험과 같은 파괴적인 검사에 의해 증명되었다. 실험결과는 퍼지 제어를 이용한 전극분리 제어의 성능이 종래의 정전류 제어와 비교하여 훨씬 더 우수하였다.

#### ABSTRACT

In resistance spot welder, the assurance of weld quality has been a long-standing problem. In this paper, the relationship between welding quality and electrode movement is investigated and verifies experimentally that the electrode movement can be used as a control parameter. We presented the welding quality improvement based on fuzzy control using electrode movement as a feedback signal. Welding quality of resistance spot welder is verified by destructive inspection such as testing of tensile shear strength. Experimental results excellent compared to those of conventional constant current control.

**Key Words :** Resistance Spot Welder, Electrode Movement Control, Welding Quality, Fuzzy Control

#### 1. 서 론

자동차 산업, 항공기 및 가전업계 등에서 많이 이용되고 있는 저항 스폿용접(Resistance Spot Welding)은 작업속도가 빠르고 열 영향부가 적어 깨끗한 용접품질을 얻을 수 있다. 반면에 용접이 진행되는 동안 용접전류, 가압력 및 전극의 마모상태 등 공정 변수들이 너게트 형성에 큰 영향을 미치고 있어 예측할 수 없는 외관으로 작용하고 있다.<sup>[1][2]</sup> 따라서 저항 스폿용접의 균일한 용접품질을 보장하기 위해서는 용접진행 상태를 모니터링하고 용접품질을 보증받기 위한 적절한 제

어가 이루어져야 한다. 일반적으로 용접물 내부에서 너게트 형성과정과 밀접한 관계를 갖는 모니터링 변수로서 전기 동저항(Electrical Dynamic Resistance)과 전극분리(Electrode Movement)가 있다. 이러한 변수들을 이용한 용접품질 개선은 양호한 용접품질을 갖는 용접물의 동저항 곡선이나 전극분리의 패턴을 기준으로 하여 용접 중에 기준패턴을 추종하도록 용접전류를 제어함으로써 이루어진다. 그러나 대부분 구조가 간단한 사이리스터를 이용한 교류용접기를 대상으로 연구되어 왔으며 이로 인해 고품질의 용접성능을 얻을 수 없었다.<sup>[3][4]</sup>

한편 저항 스폿접은 용융부 형성과정을 결정하는 공정변수들이 서로 복잡하게 연관되어 있어 용접 공정의 정확한 모델을 구하는 것이 매우 어렵다. 따라서 수학적 모델링을 필요로 하는 기존의 선형 제어기법을 사용할 경우 적절한 제어 이득값을 설정하기 어렵고 기준 전극분리 패턴이 비선형 특성을 보이므로 충분한 제어성능을 기대하기가 힘들다.<sup>[5-7]</sup>

본 논문은 양호한 용접품질을 얻기 위해 부하단에 대한 수학적 모델링이 정확히 규명되지 않더라도 비선형 특성을 보이는 기준 전극분리 패턴에 대해 기존의 선형제어기보다 강인한 제어성능을 얻을 수 있는 퍼지 제어기를 사용하여 용접중의 피용접물에 대한 전극분리현상을 제어하는 기법을 제안하였다.

제안된 방식의 타당성을 확인하기 위하여 피용접물은 산업현장에서 많이 사용되는 순수한 철(Fe)을 대상으로 용접변수(가압력, 용접시간, 용접전류)에 대한 설정값을 변화시켜가며 전극분리패턴을 얻은 후 각 설정값에 따른 데이터를 분석하였다.

그리고 용접 결과물에 대한 표면검사 및 인장전단강도시험(Tensile Shear Strength Test)을 통해 기준 전극분리패턴으로 선정된 후 퍼지 제어기를 이용해 전극분리 제어를 하였다.

이에 따른 용접 결과물에 대한 표면검사 및 인장전단강도 시험을 통하여 기존의 정전류 제어를 했을 경우와 용접품질을 비교하였다.

## 2. 스폿용접의 원리 및 전극분리현상

### 2.1 스폿용접의 원리

스폿 용접은 그림 1에서와 같이 주울열을 이용하는 방법으로, 피용접물을 전극사이에 놓고 압력을 가하면서 전류를 흘리면 용접부는 주울열에 의해 가열되어 국부적으로 용융되고 피용접물이 용접된다. 용접저항  $R$ , 용접전류  $I$ , 용접시간  $t$ 에 대해 발열량  $Q$ 는 식 (1)과 같이 되고 이 열로 인해 용접부가 용융되면서 가압력에 의해 용접된다.

$$Q = 0.24 I^2 R t \text{ (cal)} \quad (1)$$

### 2.2 전극분리현상

피용접물에 용접전류가 흐르기 시작하면 접촉저항에 의해 생긴 주울열로 인해 피용접물은 열팽창을 일으키게 되어 전극은 서로 멀어지도록 힘을 받게 된다. 전류의 공급이 중단되면 전극에 의한 용융 부분의 냉각

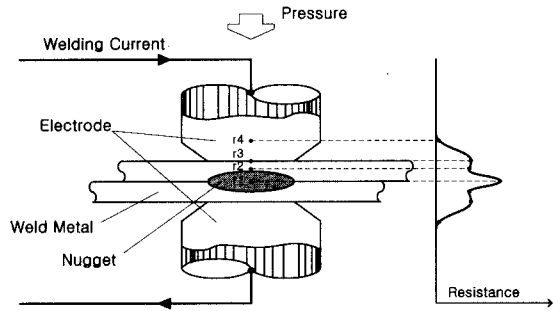


그림 1 스폿용접의 원리  
Fig. 1 Principle of spot welding.

에 의해 수축을 일으키고 전극은 다시 가까워진다. 이때 피용접물의 누그러짐에 의해 용입(Indentation)이 생기고, 전극은 용접하기 전의 거리보다 더욱 가까워진다. 그림 2는 용접단계에 따라 전극이 분리되는 과정으로 크게 5단계로 나타낸다.

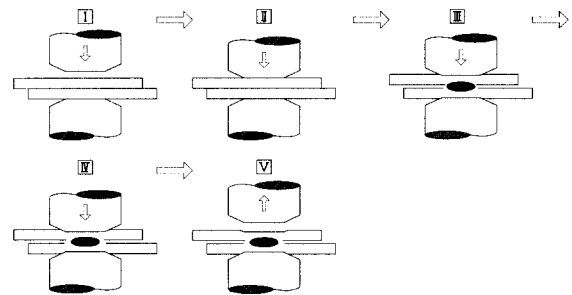


그림 2 용접중의 전극의 분리 과정  
Fig. 2 Electrode movement procedure during welding time.

단계 I은 용접하기 위한 처음단계로 상위 전극이 피용접물에 가까이 접근하며 단계 II는 용접전류는 흐르지 않고 단지 전극의 가압력에 의해 피용접물 사이의 거칠음, 불순물, 산화물의 피막 등이 파괴된다. 피용접물의 표면 산화막 때문에 절연저항이 수 MΩ 정도로 된다. 단계 III은 용접전류가 흐르기 시작하며 용접부의 절연저항으로 인해 용접부위의 온도가 상승하게 된다. 이 때 피용접물의 열팽창으로 인해 두 전극사이의 간격이 벌어진다. 단계 IV는 용접전류가 흐른 후 피용접물에 압력만 가해지는 시간으로 피용접물의 냉각으로 인한 너게트의 수축과 압력으로 인해 너게트 부위에 용입이 일어나 전극사이의 간격이 가까워진다. 단계 V는 다음 용접을 위한 준비단계로 상위전극이 다시 처음의 위치로 되돌아간다.

한편 용접이 진행됨에 따른 용융부의 형성과정과 전극분리신호의 패턴은 그림 3과 같이 나타낸다.

구간 I 은 피용접물에 용접전류가 흘러 용접부위가 가열되어 용융이 시작되기까지의 구간이며 전극분리신호는 거의 선형적으로 증가한다. 이 구간을 지나 용융부가 형성되고 피용접물이 연화(Softening)되기 시작하면서 전극분리신호 증가율이 서서히 감소하며 구간 II의 끝에서 최대점에 이른다. 구간 III에서는 용융부의 확산으로 용융부 주위의 연화된 피용접물이 전극의 압력을 더 이상 지탱하지 못하고 함입(Embedding)이 일어나 전극이 서로 가까워지는 현상을 보인다.

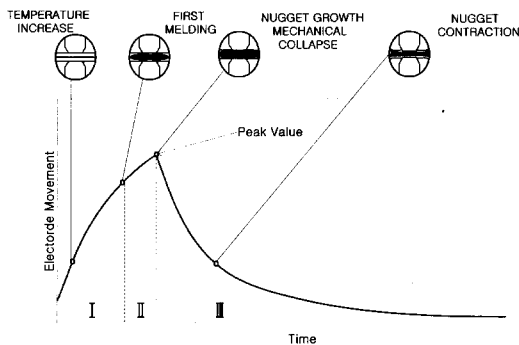


그림 3 전형적인 전극분리 패턴  
Fig. 3 Typical pattern of electrode movement.

### 3. 전극분리제어를 위한 퍼지 제어기의 구성

그림 4는 전극분리제어를 위한 퍼지 제어기의 블록도를 나타낸다. 용접이 진행되는 동안 기준 전극분리값  $V_{Ele}^*$ 와 변위센서로부터 검출되는 전극분리값  $V_{Ele}$ 와의 오차  $E$ 와 오차의 변화량  $CE$ 가 제어기 입력변수가 된다. 그리고 퍼지 제어기에서 출력되는 값은 제어의 변화량  $dU$ 이며, 식 (4)와 같이 오차와 오차의 변화량으로부터 제어의 변화량  $dU$ 가 결정된다. 샘플링  $k$  시점에서 입력변수  $E(k)$ 와  $CE(k)$ 는 식 (2)와 식 (3)과 같이 정의된다.

$$E(k) = V_{Ele}^*(k) - V_{Ele}(k) \quad (2)$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (3)$$

$$E(k), CE(k) \rightarrow dU(k) \quad (4)$$

퍼지 변수인  $E, CE, dU$ 는 그림 5와 같은 이등변 삼각형 형태를 갖는 소속함수를 사용하여 PB, PM,

PS, ZO, NS, NM, NB의 7단계로 하였다.

퍼지 추론을 위한 룰-베이스는 표 1과 같고 퍼지 추론방법으로 일반적으로 많이 사용하는 Max-Min합성법을 적용하였으며 비퍼지화 과정은 식 (5)의 무게중심법을 사용하였다.

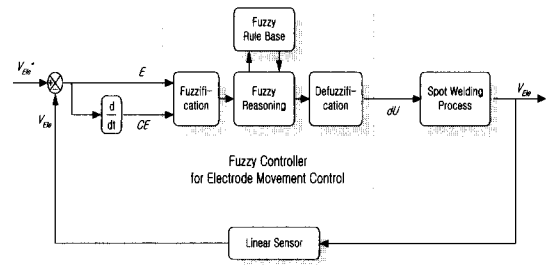


그림 4 전극분리 제어를 위한 퍼지 제어기의 블록도  
Fig. 4 Block diagram of fuzzy controller for electrode movement control.

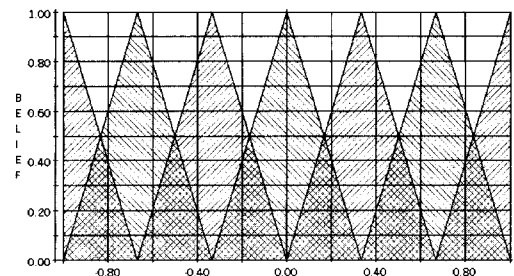


그림 5 전극분리제어를 위한 소속함수  
Fig. 5 Membership function for electrode movement control.

표 1 퍼지 추론을 위한 룰-베이스  
Table 1 Rule-Bace for fuzzy inference.

CE \ E	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

$$U_0 = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(\mu_j) \cdot \mu_j}{\sum_{j=1}^n \mu(\mu_j)} \quad (5)$$

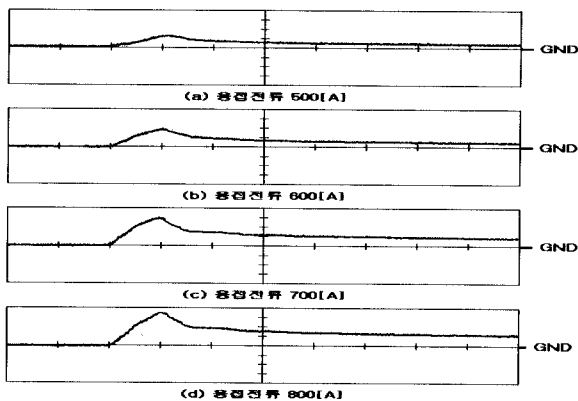
여기서,  $n$ 은 양자화 레벨의 개수이고  $\mu(\mu_j)$ 는 소속함수이며  $\mu_j$ 는 지지값을 나타낸다.

4. 기준 전극분리 패턴 구축

양호한 용접품질을 얻기 위해 용접중의 기준값이 되는 기준 전극분리 패턴을 얻어야 한다. 본 논문에서는 용접중의 전극분리값을 검출하기 위해서 고정밀 변위 센서에 차동증폭회로를 첨가하여 변위값을 증폭하였다. 이 값은 인터페이스 카드를 통해 컴퓨터에 디지털 값으로 받아들여 데이터 베이스화 하였으며, 이후 저장된 전극분리패턴의 최대값에 대한 데이터 분석과 용접된 용접물의 표면검사 및 인장전단강도 시험을 통해서 기준 전극분리패턴을 선정하였다.

4.1 용접조건에 따른 전극분리변화

그림 6은 용접전류 변화에 따른 전극분리패턴을 보여준다. 가압력 2.8[kg $f$ ], 용접시간 50[msec]로 두고 용접전류 500~800[A] 사이에서 용접전류를 100A씩 증가시켜가며 실험하였다. 용접전류가 피용접물에 많이 흐를수록 전극분리패턴의 최대값이 증가함을 볼 수 있다. 이는 용접전류가 많이 흐르면 용접부위에 발생된 주울열도 함께 증가하게 되어 피용접물의 열팽창에 기인한다. 한편 용접품질에 영향을 미치는 가압력과 용접시간, 용접전류를 변화시켜가며 전극분리 패턴의 최대값을 비교·분석하였다.



X축:용접시간[50msec/Div], Y축:전극의변위값[0.5V/Div]

그림 6 용접전류 변화에 따른 전극분리 패턴  
Fig. 6 Pattern of electrode movement for welding current variation.

그림 7은 용접시간을 각각 45[msec], 50[msec], 55[msec], 60[msec]으로 두고 각각 용접전류(500[A], 600[A], 700[A], 800[A]) 및 가압력(2.4[kg $f$ ], 2.8[kg $f$ ], 3.2[kg $f$ ], 3.6[kg $f$ ])을 변화시켰을 때 전극분리패턴의 최대값을 나타낸다. 용접전류 500[A]~800[A]사이에서 용접전류가 100[A]씩 증가함에 따라 전극분리패턴의 최대값도 비례적으로 증가한다.

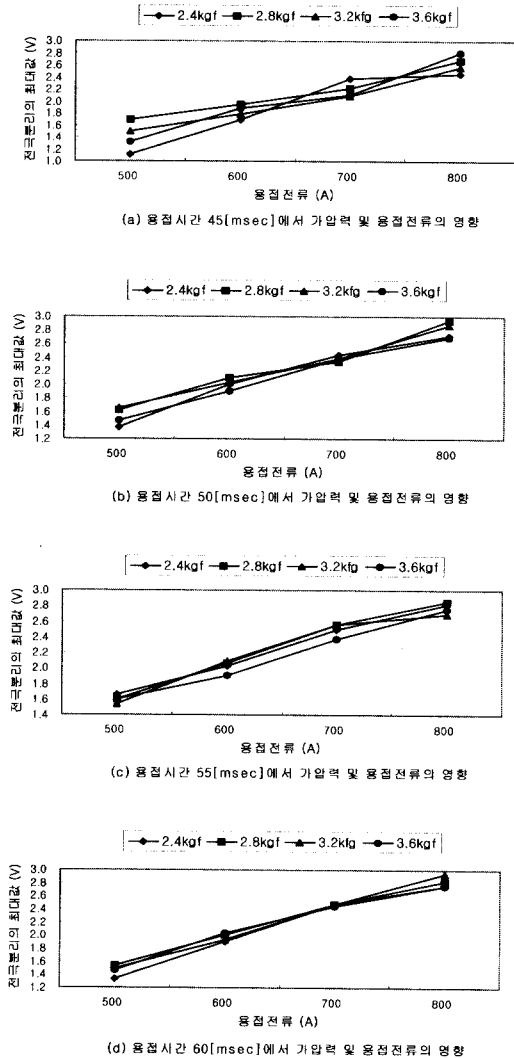
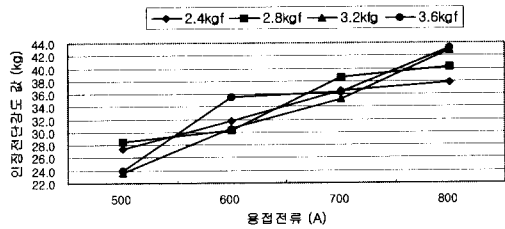


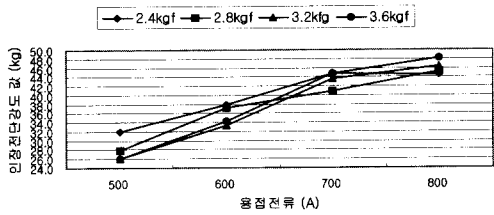
그림 7 용접조건 변화에 따른 전극분리패턴의 최대값  
Fig. 7 Peak value of electrode movement pattern for variation of welding conditions.

그러나 가압력 및 용접시간 증가에 따른 전극분리패턴의 최대값은 큰 변화를 보이지 않는다. 다만 용접시

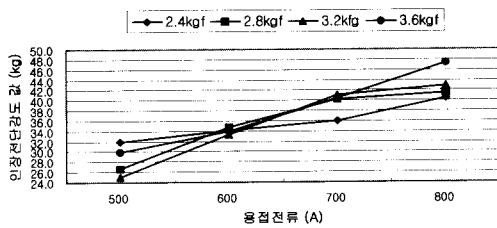
간 45[msec]일 때 가압력의 크기에 따라 전극분리패턴의 최대값의 편차가 크게 나타남을 볼 수 있는데 이는 용접시간이 너무 짧아 너게트 형성에 충분한 에너지를 가할 수 없기 때문이다.



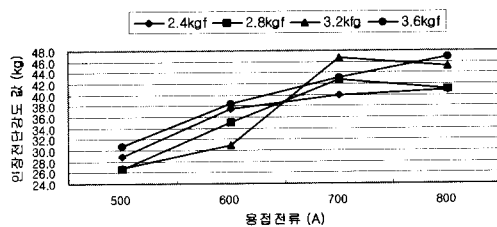
(a) 용접시간 45[msec]에서 가압력 및 용접전류의 영향



(b) 용접시간 50[msec]에서 가압력 및 용접전류의 영향



(c) 용접시간 55[msec]에서 가압력 및 용접전류의 영향

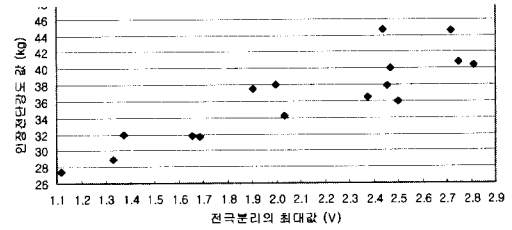


(d) 용접시간 60[msec]에서 가압력 및 용접전류의 영향

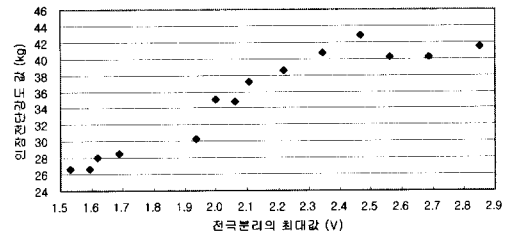
그림 8 용접조건 변화에 따른 인장전단강도 값  
Fig. 8 Value of tensile shear strength for variation of welding conditions.

그림 8은 그림 7의 각각의 경우에 대해 용접한 결과물에 대한 인장강도를 측정된 결과를 나타낸다. 전극분리패턴의 최대값과 마찬가지로 피용접물의 인장강도도 용접전류에 비례적으로 증가하며 가압력 및 용접시

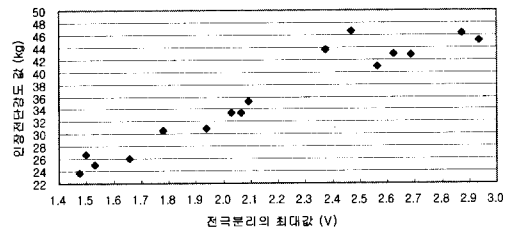
간 증가에는 큰 변화를 보이지 않는다.



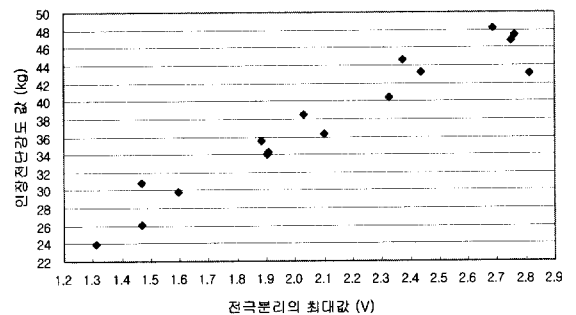
(a) 가압력 2.4[kgf]에서 최대값에 따른 인장강도 값



(b) 가압력 2.8[kgf]에서 최대값에 따른 인장강도 값



(c) 가압력 3.2[kgf]에서 최대값에 따른 인장강도 값



(d) 가압력 3.6[kgf]에서 최대값에 따른 인장강도 값

그림 9 전극분리패턴의 최대값과 인장전단강도 사이의 관계

Fig. 9 Relationship between peak value of electrode movement pattern and tensile shear strength.

그림 9에는 그림 7과 그림 8에서 구한 전극분리패턴의 최대값과 인장전단강도와의 관계를 나타낸다. 전극분리패턴의 최대값이 증가함에 따라 피용접물의 인장전단강도도 증가함을 볼 수 있다. 그러나 가압력

2.4[kgf]에서는 피용접물에 가해지는 가압력이 충분하지 못하여 다른 가압력 조건들과 비교해서 전극분리패턴의 최대값에 따른 피용접물의 인장전단강도 값이 분산된 형태를 보이고 있다.

그림 9(d)에서 전극분리패턴의 최대값이 대략 2.7[V] 이후부터 피용접물의 인장전단강도가 떨어지고 있는데 이는 용접중에 과도한 용접전류로 인해서 피용접물의 내부에서 스파터가 발생하기 때문이다.

이상에서 살펴본 결과 전극분리패턴의 최대값 및 피용접물의 인장전단강도는 가압력 및 용접시간에 따른 영향에 비해 용접전류에 큰 영향을 받으며 선형적으로 비례함을 알 수 있다.

### 4.2 기준 전극분리 패턴

일반적으로 스폿용접은 용접의 3대 요소인 용접전류, 용접시간, 가압력이 상호 관계속에 용접이 이루어진다. 피용접물의 두께 및 재질이 달라지면 이에 따른 용접조건들이 달라진다. 논문에 사용된 0.5[mm]의 두께를 가진 피용접물인 철의 경우 용접이 가능한 전류는 500[A]에서부터 800[A]까지이며 800[A]가 넘으면 용접이 이루어지는 피용접물 내부에서 스파터가 발생한다. 그리고 800[A]인 경우에도 용접된 피용접물의 표면상태가 좋지 않아 실제적으로 용접전류는 700[A]가 적당하다. 그리고 가압력은 2.8[kgf]에서 3.6[kgf]까지, 용접시간은 충분한 에너지를 가할 수 있는 시간 50[msec]에서 60[msec]까지 적당하다. 따라서 본 논문에서는 기준 전극분리 패턴의 용접조건을 피용접물의 인장전단강도의 크기가 비교적 크고 편차가 작은 범위인 용접전류 700[A], 용접시간 50[msec], 가압력 2.8[kgf]로 선정하였다.

그림 10은 위의 실험 데이터를 근거로 구한 기준 전극분리 패턴이며 0.5[mm]의 두께를 가진 철에 대해 용접을 할 경우 기준값으로 사용된다.

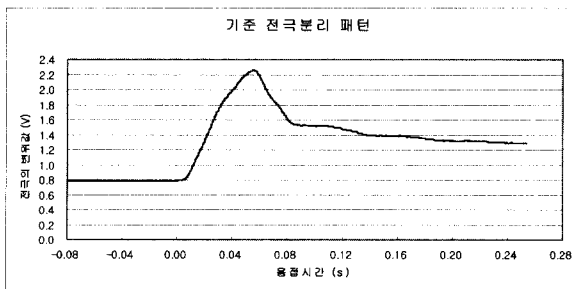


그림 10 철 0.5[mm]에 대한 기준 전극분리 패턴  
Fig. 10 Reference pattern of electrode movement for Fe(0.5[mm]).

## 5. 시스템 구성 및 실험결과

그림 11은 전극분리제어를 위한 스폿용접 시스템이다. 인버터식 스폿 용접 시스템의 구성은 3상 전파정류부, 평활용 커패시터, 단상전파형 인버터부, 중간탭 용접용 변압기, 2차측 전파정류부, 가압부로 이루어져 있다. 용접이 진행되는 동안 전극분리값을 접촉식 변위센서를 이용해 검출하고 이 값을 A/D 컨버터를 통해 디지털 값으로 받는다.

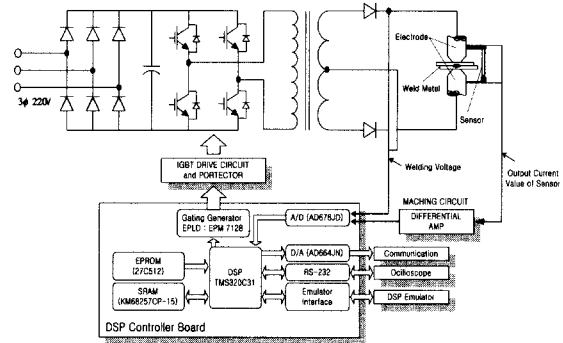


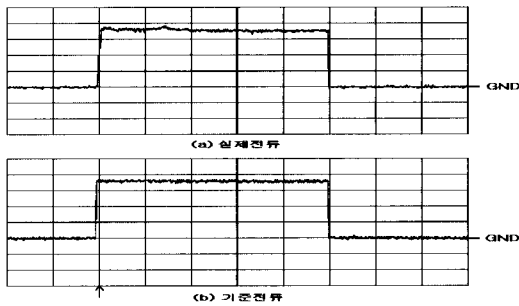
그림 11 전극분리제어를 위한 스폿 용접시스템  
Fig. 11 Spot welding system for electrode movement control.

표 2 실험 파라미터  
Table 2 Experimental parameters.

파라미터	공칭값
<b>스폿 용접기 사양</b>	
입력전압	3상 AC 220 [V]
변압기 용량	9 [kVA]
인버터 스위칭 주파수	2 [kHz]
최대전류	4000 [A]
피용접물의 두께	0.5 [mm]
<b>접촉식 변위센서 사양</b>	
측정범위	최대 5 [mm]
분해능	10 [ $\mu$ m] 이하
선형도	$\pm 0.5$ [%]
최대부하임피던스	300 [ $\Omega$ ]
출력	4~20 [mA]

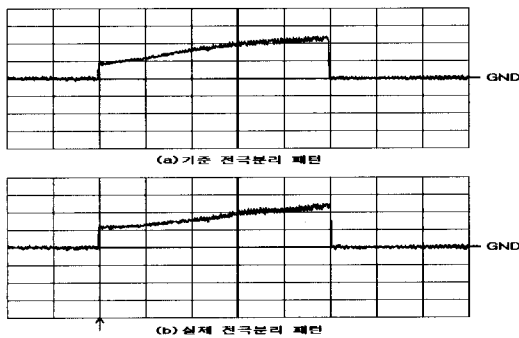
그리고 이 값과 마이크로 프로세서 내에 록-업 테이블 형식으로 미리 저장된 기준 전극분리 값과의 비교를 거쳐 오차값을 구한다. 이 오차값과 오차의 변화량인 제어 입력변수를 가지고 퍼지 제어 알고리즘을 수행하게 된다. 표 2는 전극분리제어를 위해 사용된 스폿용접기 및 접촉식 변위센서 파라미터이다.

그림 12는 정전류 제어에 대해 기준전류 및 실제전류의 파형을 나타낸다. 기준전류 700[A], 업-슬로우프 2[msec], 용접시간 50[msec], 가압력을 2.8[kgf]로 설정하였을 때 용접전류 파형으로 초기에 약간의 리플이 있지만 실제 전류값이 기준 전류에 빠른 응답특성과 함께 잘 추종됨을 볼 수 있다. 그림 13은 본 논문에서 제안한 퍼지 제어기를 이용한 전극분리 제어시의 기준 전극분리 파형과 실제 전극분리패턴을 나타낸다. 과도 상태에서 2[msec]동안 약간의 오버슈트 발생하지만 이후 기준 전극분리곡선을 잘 추종하고 있음을 볼 수 있다.



(a) 실제전류 (b) 기준전류 [1V/Div], [10msec/Div]

그림 12 정전류 제어일 때 전류파형  
Fig. 12 Current waveforms for constant current control.



(a) 기준파형 (b)실제파형 [1V/Div], [10msec/Div]

그림 13 전극분리 제어일 때 전극분리패턴  
Fig. 13 Electrode movement patterns for electrode movement control.

그림 14는 가압력 2.8[kgf], 용접시간 50[msec]에서 용접타점수 200번 후 기준전류 700[A]에 대해 정전류 제어를 한 경우 피용접물의 용접 표면상태를 보여준

다. 광학 현미경을 통해 용접된 부위를 50배로 확대하여 촬영한 결과 용접이 이루어진 부위에 코로나 분드가 형성된 것을 볼 수 있었으며, 오목자국의 형태가 매우 불규칙적임을 확인할 수 있었다.

그림 15는 그림 14와 같은 용접조건에서 용접타점수 200번 후 기준 전극분리 패턴에 대해 전극분리 제어한 경우의 용접된 피용접물의 표면상태를 보여준다. 정전류 제어를 했을 때보다 용접표면 상태가 매우 양호하고 용접된 부위의 오목자국의 형태가 매우 일정함을 볼 수 있다.

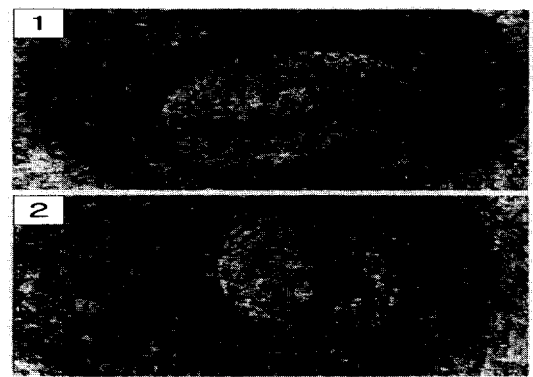


그림 14 정전류 제어에 의한 용접상태  
Fig. 14 Welded state by constant current control.

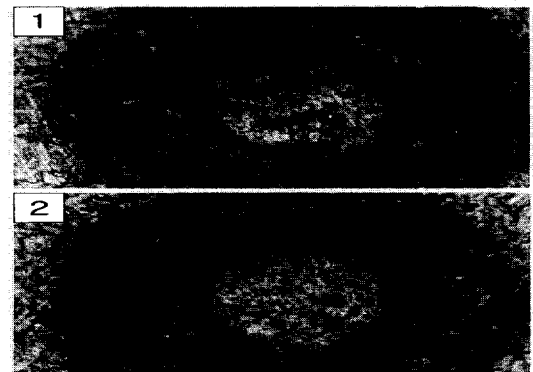


그림 15 전극분리 제어에 의한 용접상태  
Fig. 15 Welded state by electrode movement control.

이는 정전류 제어를 할 경우 용접타점이 증가하더라도 700[A]로 일정하게 놓고 용접하기 때문에 전극마모로 인한 전극팁 직경이 넓어져서 전류밀도가 떨어진

다. 그러나 전극분리 제어인 경우 용접전류 700[A]로 설정하여 그림 10의 기준전극분리 패턴을 얻은 후 이를 기준으로 용접을 한다. 따라서 용접타점이 증가하여 전극팁 직경이 넓어지면 피용접물에 700[A]이상의 용접전류가 흘러 일정한 전류밀도를 유지할 수 있으므로 양호한 용접품질을 얻을 수 있다.

한편 10개씩의 피용접물에 대해서 정전류 제어와 전극분리제어를 한 다음 용접된 결과물에 가지고 인장전단강도 시험을 수행하였다. 용접조건은 가압력 2.8[kgf], 용접시간 50[msec], 용접전류(정전류제어시) 700[A]로 설정하고 피용접물을 동일한 규격으로 잘라 용접을 하였다.

그림 16에서 보면 정전류 제어일 때 인장전단강도의 편차가 상당히 큰 반면에 전극분리 제어인 경우 편차가 비교적 작을 뿐만 아니라 인장전단강도의 평균값도 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, 전극분리 제어를 했을 때는 안정된 용접품질을 얻을 수 있다.

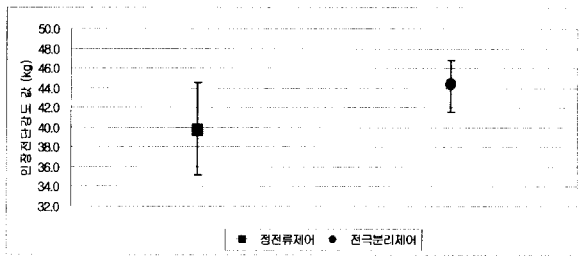


그림 16 제어방식에 따른 인장전단강도  
Fig. 16 Tensile Shear strength for control method.

### 6. 결 론

본 논문은 저항 스폿 용접기의 용접품질 향상을 위한 연구로서 기존의 정전류 제어에 비해 제안된 제어방식이 보다 더 안정된 용접품질을 얻을 수 있음을 확인하였다. 실험을 위해 용접기의 전력 변환부와 주변 회로를 설계 및 제작하였다.

피용접물인 순수한 철을 대상으로 용접변수의 변화를 통해 데이터베이스를 구축한 후 퍼지 제어를 전극분리 제어에 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 순수한 철 0.5[mm]에 대하여 용접시간, 가압력, 용접전류의 변화를 통해 데이터 분석을 한 결과 용접시간, 가압력의 변화에 비해 용접중의 피용접물에 흐르는 전류는 전극분리패턴의 최대값 및 용접 결과

물에 대한 인장전단강도의 크기와 비례하였다.

- 2) 전극분리패턴의 최대값은 용접품질의 신뢰도를 판정하는 인장전단강도와 상관관계를 가지므로 스폿용접기의 유용한 제어변수임을 확인하였다.
- 3) 용접시간이 매우 짧은 스폿용접기에 빠른 응답특성과 안정된 용접전류를 공급하기 위하여 고속연산이 가능한 TI사의 TMS320C31 마이크로프로세서에 의한 디지털 퍼지 제어기로 안정된 제어를 얻었다.
- 4) 기준 전극분리 패턴에 대해 실시간 전극분리 제어를 한 결과는 피용접물에 대한 표면검사 및 인장전단강도 시험에 의한 전극분리 제어방법이 정전류 제어방법에 비해 안정된 용접품질을 얻었다.

본 연구는 한국과학재단 '97 특정기초 연구비 (97-01-01-01-3) 지원으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] 김명준, 저항용접, 기문사, 1995.
- [2] D. W. Dickinson, *Metals Handbook*, Vol. 6, Welding, Brazing and Soldering, pp. 469-493, 1983.
- [3] D. W. Dickinson, J. E. Franklin, and A. Stanya, "Characterization of Spot Welding Behavior by Dynamic Electrical Parameter Monitoring," *Welding Journal*, pp. 170-176, June, 1980.
- [4] 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.
- [5] Z. Han, J. Orozco, J. E. Indacochea, C. H. Chen, "Resistance Spot Welding: A Heat Transfer Study," *Welding Journal*, pp. 364-371, Sept., 1989.
- [6] M. Kimchi, "Spot Weld Properties when Welding with Expulsion-Comparative Study," *Welding Journal*, Vol. 63, No. 2, pp. 58-63, 1984.
- [7] H. S. Chang, Y. J. Cho, S. G. Choi, H. S. Cho, "A Proportional-Integral Controller Compensating Spot Weld Quality Variation due to Electrode Wear," *Modeling, Sensing, and Control of Manufacturing Process*, PED-Vol.23/DSC-Vol.4, No. H00370, pp. 83-93, 1986.



저 자 소개



**김재문(金才文)**

1967년 9월 6일생. 1994년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 졸업(석사). 2000년 동 대학원 졸업(공학박사). 현재 현대정공(주) 기술연구소 근무.



**김종덕(金鍾德)**

1975년 6월 8일생. 1998년 수원대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 성균관대 대학원 졸업(석사). 현재 한국항공우주산업(주) 근무.



**원충연(元忠淵)**

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1991년 12월 ~ 1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문교수. 현재 성균관대 전기전자 및 컴퓨터 공학과 부교수. 당 학회 학술이사.



**최규하(崔圭夏)**

1978년 서울대학교 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 졸업(공학박사). 1987~1988년 미국 오레곤주립대 객원 교수. 1997~1998년 건국대 연구처장 역임. 현재 건국대 공대 전기공학과 교수. 당 학회 총무이사.



**김규식(金奎植)**

1958년 8월 25일생. 1981년 서울대학교 공과대 전자공학과 졸업(학사). 1983년 동대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1990년 8월 동 대학원 제어계측공학과(박사). 1988~1992년 대우중공업 중앙연구소 선임연구원. 1993년 ~ 현재 서울시립대 전자전기공학부 부교수. 당 학회 편집위원.



**목형수(睦亨洙)**

1963년 10월 31일생. 1986년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 졸업(석사). 1992년 동 대학원 졸업(공학박사). 1992~1996년 서울산업대 제어계측공학과 조교수. 현재 건국대 전기공학과 교수. 당 학회 학술위원.