

용접품질 향상을 위한 저항 스폿 용접용 인버터의 동저항 특성을 이용한 새로운 제어기법

강성관¹, 정재현¹, 노의철[†]

A Novel Control Method of Resistance Spot Welding Inverter using Dynamic Resistance Characteristics for Weld Quality Improvement

Sung-Kwan Kang¹, Jae-Hun Jung¹, and Eui-Cheol Nho[†]

Abstract

This study proposes a new control method for a resistance spot welding inverter to improve weld quality. The proposed method is based on the dynamic resistance characteristics of steel sheets to be welded. A point in the second peak value of the dynamic resistance occurs during one shot of the welding current flow. A constant voltage control is applied from zero to the peak point, and a constant current control is adopted from the peak point to the end of the shot. The mixed mode control of the constant voltage and current guarantees high weld quality. Experiments are conducted with a 5 kA power supply and 0.5 mm steel sheets to compare quality. Experimental results show that weld quality is improved more than 10 times that of the conventional control method.

Key words: Resistance spot welding, Weld quality, Dynamic resistance characteristics

1. 서 론

오늘날 자동차 분야에서 가장 많이 사용되는 저항 용접은 용접할 모재 사이를 용접용 전극으로 충분히 가압한 후 모재 사이에 발생하는 접촉저항에 대전류를 흘려 이때 발생하는 저항 발열로 모재를 용융시켜 접합하는 방법이다.

모재 사이에 흘린 대전류에 의해 바둑알 모양의 형상을 가진 용융부인 너깃이 발생하는데 이 너깃 크기가 용접부의 접합 강도를 판단하는 중요한 기준이 된다. 저항 용접에서 이 너깃 크기를 결정하는 가장 중요한 요소는 저항 용접의 3대 조건인 용접전류, 통전시간, 가압력이며 이 3대 조건을 적절히 조절하여 원하는 용접부의 접합 강도를 얻을 수 있다^[1]. 그러나 저항 용접에 의해 제품이 생산되는 산업현장에서는 비록 위의 3대 주

요 조건을 잘 관리한다 하더라도 다른 품질 영향 인자들 가령, 모재의 형상이나 물성치 변화, 도금층의 두께 변화, 전극의 마모, 인접한 용접부에 용접전류의 일부가 흐르는 분류효과 등의 원인에 의해 접촉저항이 변해서 용접부의 접합 강도를 원하는 수준으로 안정되게 확보하는 것이 용이하지 않다^{[2]-[3]}.

따라서 안정된 용접부의 접합 강도를 확보하기 위해서는 이러한 외부 영향에도 불구하고 최적의 용접상태를 얻을 수 있는 제어기법이 필요 하며 이를 실현하기 위해서는 무엇보다도 먼저 용접부의 품질 변화를 실시간으로 감지할 수 있는 효과적인 방법이 필요하다. 현재 용접 중에 품질 변화를 감지할 수 있는 방법으로는 용접 중에 모재를 가압하기 위한 용접용 상부전극과 하부전극 사이의 변위량 변화를 이용하는 방법^[4]과 용접 중에 모재의 온도 변화에 따른 저항의 변화를 이용하는 방법이 가장 많이 사용되고 있다^{[5]-[7]}. 위의 두가지 방법 중에 전극 변위량 변화를 이용하는 방법은 변위량을 측정하기 위해 추가적인 센서와 고정 장치들이 필요하며 이를 설치하기 위해 많은 시간과 비용이 필요하다. 반면에 모재의 저항 변화를 이용하는 방법은 용접전류와 용접전압 제어를 위해 기본적으로 용접용 전원장치에 내장된 전류와 전압센서를 이용하여 저항을 측정할 수 있

Paper number: TKPE-2015-20-6-1

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: nhoec@pknu.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Pukyong National University
Tel: +82-51-629-6317 Fax: +82-51-629-6305

¹ Dept. of Electrical Engineering, Pukyong National University
Manuscript received Oct. 7, 2015; revised Oct. 21, 2015;
accepted Oct. 28, 2015

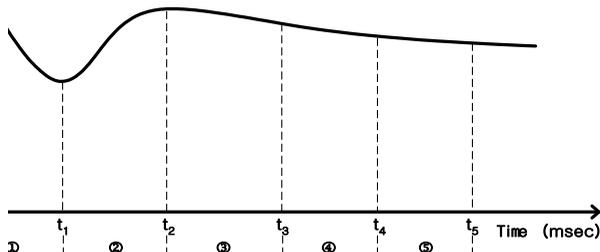


Fig. 1. Typical dynamic resistance waveform.

어 추가적인 시간과 비용이 필요하지 않다는 이점이 있어 실시간으로 용접부의 품질을 제어하기 위해 많이 사용되고 있다.

용접 중에 발생하는 저항의 변화는 용접전류가 모재를 통과할 때 발생하는 저항 발열에 의해 모재의 온도가 상승하여 저항이 증가하는 현상과 모재가 용융하여 형성되는 너깃의 성장에 의해 통전 면적이 증가하여 저항이 감소하는 현상 사이의 상관관계에 의해 동적으로 변화하는데 이것을 일반적으로 동저항이라고 한다^{[1], [8]}. 전형적인 동저항 파형은 그림 1과 같고 그 형성 원리를 알아보면 다음과 같다.

①구간은 통전하기 시작하면서 저항 발열로 모재가 연화되고 동시에 가압력에 의해 압접되면서 높은 초기의 접촉저항이 급격히 감소되는 구간이고 ②구간은 모재의 온도상승에 따라 저항이 증가되는 구간이며 t_2 시점에 이르면 모재 사이의 접촉면이 용융하기 시작하면서 너깃이 생성되기 시작한다. ③구간은 너깃이 성장하면서 통전 면적이 증가하여 저항이 감소하는 구간이고 ④구간은 너깃의 성장이 둔화되고 저항의 감소가 완만하게 일어나는 구간이며 ⑤구간은 너깃이 더 이상 성장하지 않고 가압력에 의해 압접하는 부분이 커지면서 저항이 약간 감소하는 구간이다. 그런데 이러한 동저항 특성을 활용하여 용접품질을 확보하기 위한 제어기법에 대한 연구 결과는 별로 없다. 참고 문헌 [3]에서도 정전력 제어로 동저항 특성 데이터베이스는 제시하였으나 동저항 특성을 이용한 제어기법은 제시하지 못하였다.

본 논문에서는 이러한 동저항 특성을 활용하여 양질의 용접상태를 확보하기 위한 제어기법을 제시하고자 한다. 5,000 A급 2kHz의 스위칭 주파수를 가지는 저항 용접 인버터 전원장치를 구성한 후 제어용 MPU인 Cortex M3를 사용하여 0.5mm 두께의 강판 시편을 대상으로 한 실험을 통해 최적의 동저항 파형을 얻었다. 실제 현장에서 발생 가능한 용접 품질에 영향을 미치는 외부 요인을 임의로 발생시키기 위하여 용접용 가압장치를 제작하여 가압력을 변화시킴으로서 접촉저항에 변화를 주었다. 이러한 변화에도 불구하고 제안된 기법으로 용접한 후 용접부의 상태가 균일하게 용접됨을 확인함으로써 본 논문에서 제안된 기법의 타당성을 증명하였다.

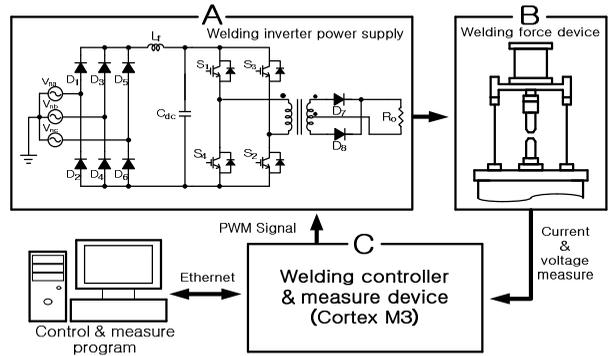


Fig. 2. Schematic of the proposed weld system.

TABLE I
SPECIFICATIONS OF COMPONENT FOR WELD SYSTEM

Component	Specification
3-phase diode rectifier	1600 V, 205 A
L_f	1 mH
C_{dc}	3300 μ F
IGBT ($S_1 - S_4$)	1200 V, 240 A
Transformer	50 : 1
Diode ($D_7 - D_8$)	100 V, 160 A (16 parallel connection)

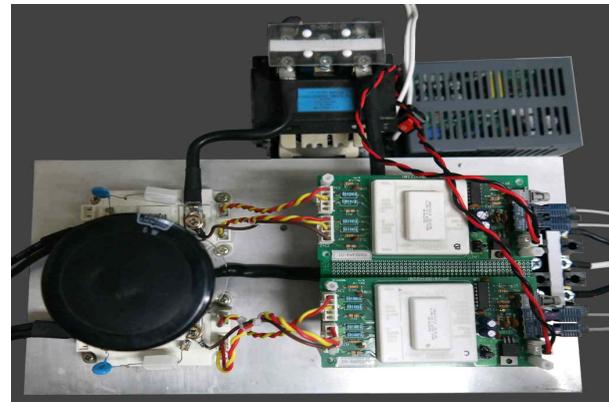


Fig. 3. Welding inverter power supply.

2. 용접 시스템 구성

2.1 용접용 인버터 전원장치

그림 2의 A부분은 본 논문에서 사용한 저항 용접 인버터 전원장치를 나타낸다. 이 전원 장치는 다이오드 정류기, L-C 필터, IGBT 인버터, 가압용 변압기, 2차측 정류용 다이오드로 구성된다. 각각의 사양은 표 1과 같으며 그림 2에서 R_0 는 용접 시편의 등가저항을 의미한다.

그림 3은 실험을 위해 제작된 저항 용접 인버터 전원 장치의 외관 사진이다.

2.2 용접용 제어기 및 계측장치

그림 2의 C부분은 제어부를 나타낸다. 제어용 MPU인

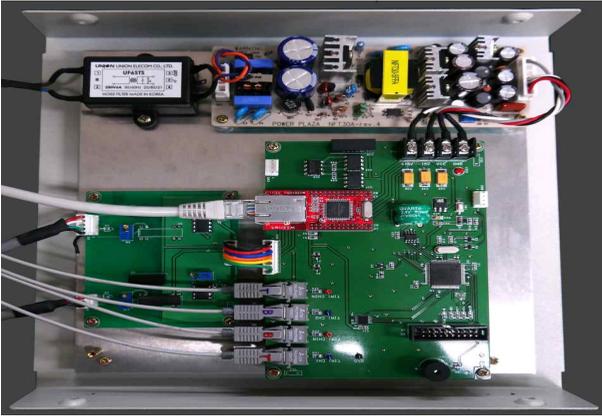


Fig. 4. Welding controller and measure device.



Fig. 5. Welding force device.

Cortex M3의 PWM 모듈을 사용하여 저항 용접 인버터 전원장치의 출력을 제어하고 A/D 모듈을 사용하여 용접전류, 용접전압, 동저항을 계측한 후 데이터를 이더넷 통신을 통해 제어 및 계측 프로그램이 실행되고 있는 컴퓨터로 전송한다. 그림 4는 실제로 제작된 저항 용접 제어기 및 계측장치의 외관 사진이다.

2.3 용접용 가압장치

그림 2의 B부분은 용접할 모재를 충분히 가압한 후 통전하는 장치이며 모재에 흐르는 용접전류와 모재 사이에 걸리는 용접전압을 계측하는 센서가 이곳에 설치된다. 그림 5는 실험을 위해 제작된 가압장치의 외관 사진이다.

3. 제안된 제어기법

우선 그림 1의 동저항 파형의 형성원리를 활용하여 용접의 3대 조건인 용접전류, 통전시간, 가압력을 적절히 변화시켜가면서 최적의 용접 상태를 찾아야 한다. 0.5mm 두께의 강판을 모재로 하여 용접 전류는 50 A, 통전시간은 10 ms, 가압력은 5 kg의 구간으로 변화시켜가면서 최적의 용접상태를 찾은 결과 각각 3750 A, 100 ms, 75 kg의 데이터를 얻을 수 있었다.

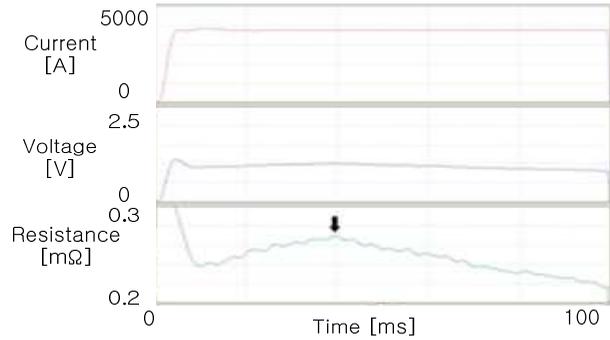


Fig. 6. The optimal welding waveform.

그림 6은 용접전류 3750 A, 통전시간 100 ms, 가압력 75 kg의 조건에서 얻은 최적의 용접상태에 해당하는 용접전류, 용접전압, 동저항 파형이다. 그림 6의 동저항 파형에서 화살표가 가리키는 시점이 너깃의 성장이 시작되는 시점이다.

기존의 정전압 제어나 정전류 제어는 모재에 인가되는 전압이나 전류를 통전시간 동안 일정하게 제어하는 것인데 각각의 장단점을 살펴보면 다음과 같다.

정전류 제어는 통전 초기의 높은 접촉저항 때문에 발생하는 초기 발열로 인해 용융숫물의 팽창력이 모재를 가압하는 힘보다 높아져 대기 중으로 용융숫물이 비산하는 날림이 발생할 수 있다. 그리고 용접작업 중에 품질 영향 인자들의 변화로 인해 모재 사이의 접촉저항이 변화할 경우에도 발열량이 변화하여 안정된 용접품질을 얻을 수 없다. 반면에 정전압 제어는 통전 초기에 접촉저항이 높아도 일정한 전압이 걸리도록 낮은 전류부터 접촉저항이 감소하는 정도와 반비례하여 서서히 전류가 증가하므로 통전 초기에 높은 접촉저항뿐만 아니라 품질 영향 인자들의 변화로 인한 접촉저항의 변화에도 안정된 용접품질을 얻을 수 있다. 그러나 정전압 제어는 통전 후기에 너깃의 성장으로 인해 저항이 감소하면서 전류를 상승시키므로 발열량이 증가하여 후기 날림이 잘 발생한다는 단점이 있다.

제안된 제어기법은 통전 전반부에는 접촉저항의 변화에 따라 적절한 전류를 흘릴 수 있는 정전압 제어를 적용하고, 통전 후반부에는 안정되게 너깃이 성장하게 하는 정전류 제어를 적용함으로써 각각의 장점만을 취한 것이다. 제어를 바꾸는 시점은 그림 6의 화살표로 나타낸 바와 같이 최적의 동저항 파형에서 저항이 증가하다가 감소하는 시점인 너깃이 성장하기 시작하는 시점이다.

제안된 제어기법을 적용하기 위해 이 시점 이전까지는 접촉저항이 변화하여도 적절한 용접전류가 흐르게 하려고 최적의 용접 파형에서 계산된 전압이 일정하게 모재에 걸리도록 저항 용접 인버터 전원장치를 제어하고 이후에는 이 시점에서 흐르는 전류가 유지되도록 제어하여 정전압 제어에서 발생하는 후기 날림을 억제하여 안정되게 너깃이 성장하게 제어하였다.

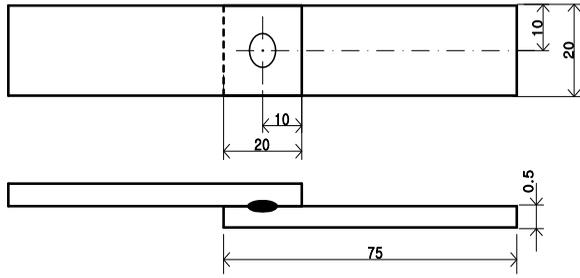


Fig. 7. Specimen for resistance welding.

즉, 정전압 제어 모드에서의 정전압 기준값은 그림 6의 화살표로 나타내는 시점에서의 전압값이 된다. 모재에 압력을 가하는 가압장치의 전극에서 검출된 모재 양단의 전압을 피드백하여 정전압이 되도록 하였으며 제어기는 일반적인 PI제어기를 사용하였다. 또한 정전류 제어 모드에서의 정전류 기준값도 그림 6의 동일한 시점에서의 전류값이 되며 PI제어기를 사용하여 전류제어가 되도록 하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

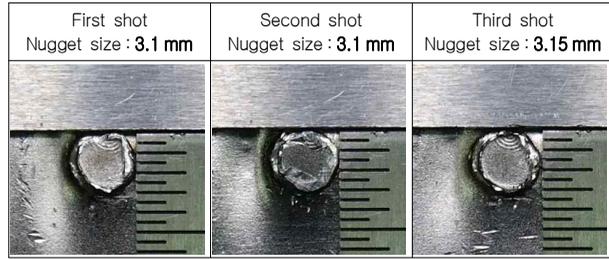
제안된 제어기법의 타당성을 증명하기위해 그림 2와 같이 용접 시스템을 구성하여 다양한 실험을 하였다.

본 논문에 사용된 모재의 두께는 0.5mm이며 냉간압연 강판을 사용하였다. 전극은 도전율 75%이상인 크롬동을 사용하였으며 형상은 직경이 13mm, 선단경이 6mm인 DR형의 전극을 사용하였다. 용접 시험편은 KS B 8051에 있는 시험편의 모양과 치수 규정에 따라 제작하였으며 구체적인 모양과 치수는 그림 7에 나타내었다.

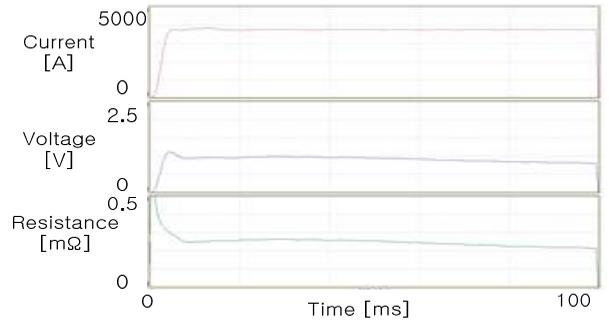
0.5mm 냉간압연 강판이 최적의 상태로 용접된 경우의 너깃 크기는 KS B 8050의 규정에 따라 B등급의 평균인 3.2mm로 설정 하였다. 3절에서 기술한 바와 같이 용접의 3대 조건인 용접전류, 통전시간, 가압력을 조절하여 너깃 크기가 3.2mm일 경우의 동저항 파형을 최적의 파형으로 결정하고 동저항 파형에서 용접전압과 너깃이 성장하기 시작하는 시점을 계산한 후 실험하였다.

실험은 기존의 정전류 제어와 제안된 제어기법 두 가지 경우로 구분하여 수행하였으며 그 결과를 비교하였다.

실제 현장에서 발생하는 다양한 외부 요인을 임의로 만들기 위해 접촉저항이 변하도록 하였는데 모재 사이의 접촉저항에 변화를 주기 위해 최적의 접촉저항일 경우에는 가압력을 75 kg, 접촉저항을 감소시킨 경우에는 95 kg, 접촉저항을 증가시킨 경우에는 60 kg으로 변화시켜 총 여섯 가지 경우로 나누어 실험하였으며 재현성을 알아보기 위해 각각 동일 조건에서 3번 반복 실험하였다. 형성된 너깃 크기는 모재를 분리해 버니어캘리퍼스로 측정한 후 용접부를 사진촬영 하였으며 용접부 파형은 전류, 전압, 그리고 동저항 파형을 나타내었다.

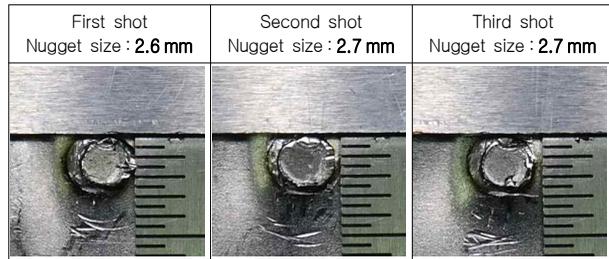


(a) Nugget size

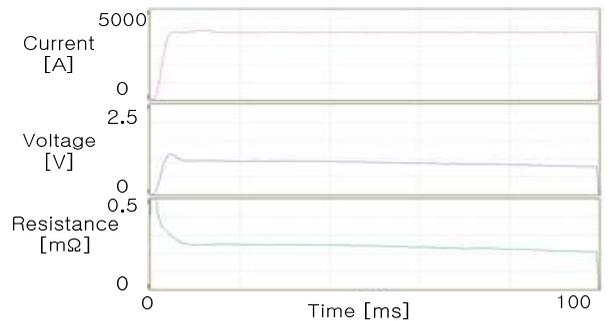


(b) Voltage, current, and resistance waveforms

Fig. 8. Constant current control mode under 3750 A, 100 ms, 75 kg.



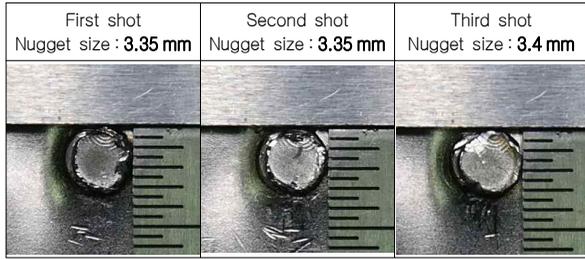
(a) Nugget size



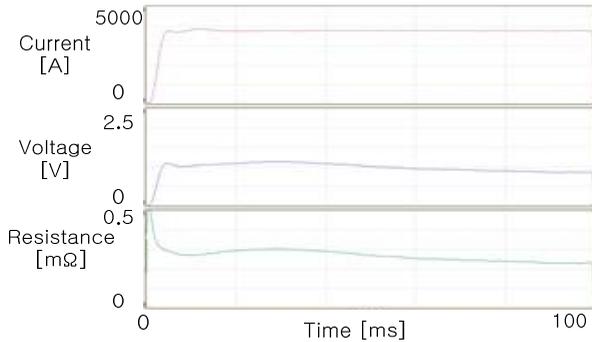
(b) Voltage, current, and resistance waveforms

Fig. 9. Constant current control mode under 3750 A, 100 ms, 95 kg.

그림 8은 정전류 제어로 용접전류 3750 A, 통전시간 100 ms, 가압력 75 kg인 조건에 3번 반복 용접했을 경우의 용접부 너깃 사진과 용접부의 전압, 전류, 저항 파형을 나타낸 것이다. 너깃 크기의 평균은 3.117 mm인데 이것은 KS B 8050에서 규정하는 B등급의 평균인 3.2 mm에 거의 근접함을 알 수 있다.



(a) Nugget size



(b) Voltage, current, and resistance waveforms

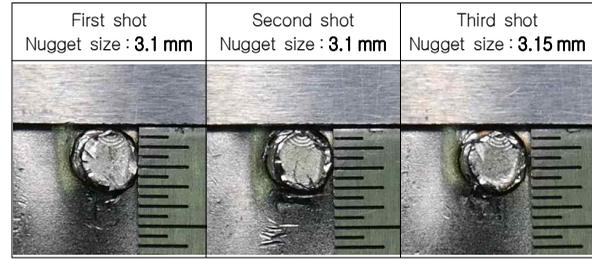
Fig. 10. Constant current control mode under 3750 A, 100 ms, 60 kg.

그림 9는 정전류 제어로 용접전류 3750 A, 통전시간 100 ms, 접촉저항을 감소시키기 위해 가압력 95 kg으로 증가시켜 3번 반복 용접했을 경우의 용접부 너깃 사진과 용접부의 파형을 나타냈으며 너깃 크기의 평균은 2.667 mm이다. 접촉저항의 감소로 인해 너깃 크기가 감소하였고 동저항 파형의 변화도 완만하게 일어남을 알 수 있다.

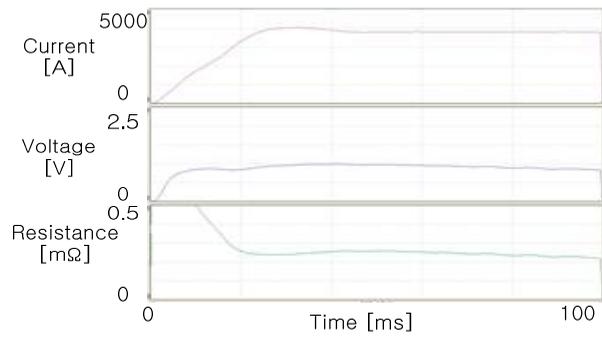
그림 10은 정전류 제어로 용접전류 3750 A, 통전시간 100 ms, 접촉저항을 증가시키기 위해 가압력 60 kg으로 감소시켜 3번 반복 용접했을 경우의 용접부 너깃 사진과 용접부의 파형을 나타냈으며 너깃 크기의 평균은 3.367 mm이다. 접촉저항의 증가로 인해 너깃 크기가 증가하였고 동저항 파형의 변화도 최적의 동저항 파형보다 심하게 일어남을 알 수 있으며 통전 종료 부분의 동저항 파형의 변화가 거의 없는 것으로 보아 통전을 시작하고 90 ms 이후에는 더 이상 너깃이 성장하지 않았음을 알 수 있다. 그림 9와 10을 통해 알 수 있듯이 용접 중 외부 요인으로 인하여 접촉저항이 변하면 너깃 크기도 변해서 양질의 용접상태를 확보하기 어렵다.

그림 11은 제안된 제어기법으로 실험한 결과를 나타낸다. 너깃이 성장하기 시작하는 시점까지는 용접전압 0.97 V로 정전압 제어하고 이후에는 이 시점에서 흐르는 용접전류를 유지하도록 제어하였으며 통전시간 100 ms, 가압력 75 kg으로 3번 반복 용접했을 경우의 용접부 너깃 사진과 용접부의 파형을 나타냈으며 너깃 크기의 평균은 정전류 제어로 용접했을 경우와 같이 3.117 mm이다.

그림 12는 제안된 제어기법으로 너깃이 성장하기 시

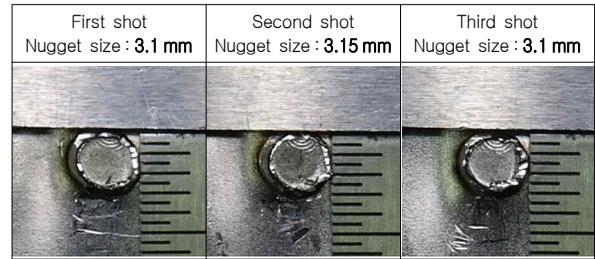


(a) Nugget size

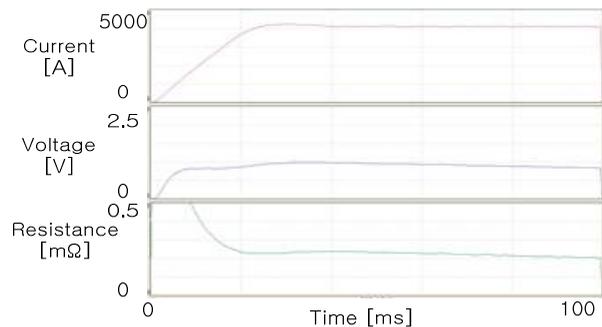


(b) Voltage, current, and resistance waveforms

Fig. 11. Proposed control mode under 0.97 V, 100 ms, 75 kg.



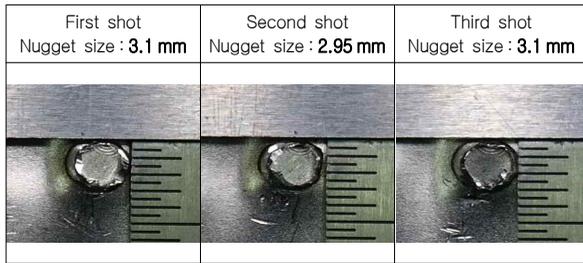
(a) Nugget size



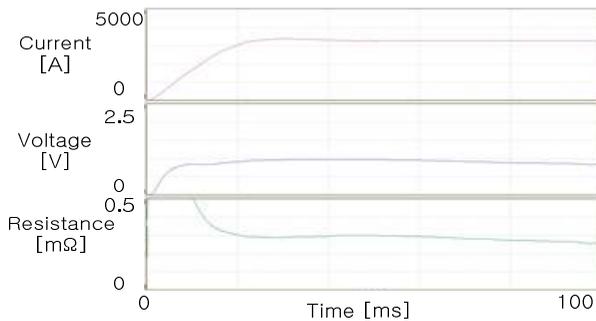
(b) Voltage, current, and resistance waveforms

Fig. 12. Proposed control mode under 0.97 V, 100 ms, 95 kg.

작하는 시점까지는 용접전압 0.97 V로 정전압 제어하고 이후에는 이 시점에서 흐르는 용접전류를 유지하도록 제어하였으며 통전시간 100 ms, 접촉저항을 감소시키기 위해 가압력 95 kg으로 증가시켜 3번 반복 용접했을 경우의 용접부 너깃 사진과 용접부의 파형을 나타냈으며 너깃 크기의 평균은 3.117 mm이다. 접촉저항을 감소시켰음에도 불구하고 기존 방식과는 달리 너깃 크기가 K



(a) Nugget size



(b) Voltage, current, and resistance waveforms

Fig. 13. Proposed control mode under 0.97 V, 100 ms, 60 kg.

S B 8050의 규정값인 3.2 mm에 근접함을 알 수 있고 통전 초기의 높은 접촉저항에 반비례하여 전류가 경사를 가지고 증가하여 초기 날림을 억제했으며 동저항 파형의 변화도 정전류 제어의 경우와 달리 제안된 제어기법의 다른 용접파형과 비슷하게 일어남을 알 수 있다.

그림 13은 제안된 제어기법으로 용접전압 0.97 V로 통전시간 100 ms, 접촉저항을 증가시키기 위해 가압력 60 kg으로 감소시켜 3번 반복 용접했을 경우의 용접부 너깃 사진과 용접부의 파형을 나타내었으며 너깃 크기의 평균은 3.05 mm이다.

접촉저항이 증가하였음에도 불구하고 정전류 제어의 경우와 비교하여 너깃 크기의 변화가 적음을 알 수 있으며 동저항 파형의 변화도 제안된 제어기법의 다른 용접파형과 비슷하게 일어남을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 저항 점용접의 용접 품질을 향상시키기 위한 새로운 제어기법을 제안하였다. 실제 산업현장에서 사용되고 있는 저항 스폿 용접의 80% 이상이 정전류 제어기법을 사용하고 있는데 정전류 제어기법의 경우 용접의 3대 조건이 충족되는 조건에서는 양호한 용접상태를 얻을 수 있으나 외부 요인에 의해 모재의 접촉부 저항이 변하면 용접 상태도 영향을 받는다. 실험 결과 가압력을 정상치(75 kg)의 -20%(60 kg)와 +27%(95 kg)로 변화시킨 결과 용접 상태를 나타내는 너깃 크기는 정상 평균값 3.117 mm에 비해 각각 8.13%(3.37 mm), -13.4%(2.7 mm) 변화였다. 즉, 너깃 크기의 변동은 무려

21.5%에 달할 정도로 심각하다. 그러나, 제안된 제어기법으로 동일한 가압력 조건에서 실험한 결과 너깃 크기는 불과 2.1%(3.05 mm) 밖에 변하지 않았다. 이는 제안된 제어기법이 정전류 제어기법에 비하여 용접 품질의 안정도를 10 배 이상 증가시켰음을 의미한다.

본 논문에서 제안된 새로운 제어기법은 저항 점용접 시 외부 요인에 의해 모재의 접촉부 저항이 변화하더라도 용접 품질을 안정적으로 확보할 수 있어서 실제 산업 현장에서 효과적으로 사용될 것으로 기대된다.

References

- [1] S. M. Cho, "Principle of resistance welding and analysis of monitoring results," *Journal of the Korean Welding & Joining Society*, Vol. 15, No. 2, pp. 7-11, Apr. 1997.
- [2] H. S. Cho, "Welding quality supervision and control resistance welding processes," *Journal of the Korean Welding & Joining Society*, Vol. 18, No. 4, pp. 2-7, Aug. 2000.
- [3] J. M. Kim, C. Y. Won, G. H. Choe, G. S. Kim, and H. S. Mok, "Implementation of dynamic resistance database for weld quality improvement of inverter spot welder," *The Transaction of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 4, No. 3, pp. 294-303, Jun. 1999.
- [4] J. M. Kim, J. D. Kim, C. Y. Won, G. H. Choe, G. S. Kim, and H. S. Mok, "Welding quality improvement of inverter spot welder by electrode movement control," *The Transaction of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 5, No. 3, pp. 276-284, Jun. 2000.
- [5] D. W. Dickinson, J. E. Franklin, and A. Stantya, "Characterization of spot welding behavior by dynamic electrical parameter monitoring," *Welding research supplement*, Vol. 59, pp. 170-176, Jun. 1980.
- [6] S. A. Gedeon, C. D. Sorensen, K. T. Ullrich, and T. W. Eagar, "Measurement of dynamic electrical and mechanical properties of resistance spot welds," *Weld journal*, Vol. 66, No. 12, pp. 378-385, Dec. 1987.
- [7] J. M. Kim, L. H. Kim, B. G. Min, C. Y. Won, G. S. Kim, and S. W. Choi, "Variable power control of inverter spot welding machine using evolution algorithm," *The Transactions of The Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 7, No. 4, pp. 384-394, Aug. 2002.
- [8] Y. J. Cho, S. H. Rhee, H. Shin, and K. M. Bae, "Charaterizion primary dynamic resistance in spot welding," *Journal of the Korean welding & joining society*, Vol. 17, No. 2, pp. 159-164, Apr. 1999.



강성관(姜聖權)

1973년 2월 19일생. 1999년 부경대 공대 생산가공공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년~현재 동 대학원 박사과정. 2002년~현재 웰텍시스템 대표.



정재헌(鄭在憲)

1981년 10월 19일생. 2007년 부경대 공대 전기제어공학부 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2015년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박).



노의철(魯義哲)

1960년 8월 2일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 졸업(공박). 1997년~1998년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 방문교수. 2005년~2006년 미국 University of California-Irvine 방문교수. 1995년~현재 부경대 전기공학과 교수. 당 학회 부회장.