

인버터 스폿용접기의 용접품질 향상을 위한 동저항 데이터베이스 구축

金才文, 元忠淵, 崔圭夏, 金奎植, 睦亨洙

Implementation of Dynamic Resistance Database for Weld Quality Improvement of Inverter Spot Welder

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

요 약

저항 스폿용접은 외관상 말끔하게 용접되고 단시간 용접이 이루어지기 때문에 고품질 용접을 요구하는 제품에 많이 사용되고 있다. 그러나 시편의 동저항 특성을 고려하지 않아 용접중의 스패터가 발생하여 용접품질의 저하를 초래하고 있다. 본 논문은 용접품질 향상의 관점에서 동저항 데이터베이스 구축에 대하여 연구하였다. 구리 위에 주석과 납을 합금한 시편인 경우와 단일 성분인 철에 대해서 다른 용접조건에서 얻어지는 동저항을 비교하고 용접된 시편의 인장강도와 동저항의 관계를 고찰하였다.

ABSTRACT

Resistance spot welding is commonly used for welding products of high quality because of clean welding and short welding-time. But, conventional spot welders bring about the depreciation of welding products, irrespective of dynamic resistance characteristics during welding time. This paper discussed dynamic resistance database implementation in terms of welding performance improvement. On different welding conditions, we compared dynamic resistance, respectively, about pure iron and Sn-Pb alloy on Copper. Also, it investigated the relation of tensile shear strength and dynamic resistance in welded workpiece.

Key Words: Dynamic Resistance Database, Resistance Spot Welder, Nugget

1. 서 론

저항 스폿용접(Resistance Spot Welding)은 두 개의 금속판을 전극사이에 놓고 압력을 가하면서 순간적으로 500[A]에서 100[kA] 정도의 큰 전류를 통과시킨다. 이 때 금속판 사이의 접촉저항으로 발생하는 주울열로 접촉부분이 녹아 너게트(Nugget)가 형성되면서 용접이 된다. 특징은 작업속도가 빠르고 열 영향부가 적어 깨끗한 용접품질을 얻을 수 있으므로 국내 자동차 산업 및 가전업계의 성장과 더불어 수요가 늘어나고 있다. 저항 스폿용접의 용접품질의 좋고 나쁨은 육안으로 식별하기가 어려우며 이를 판정하기 위한 방법에는 파괴 검사와 비파괴 검사가 있다. 파괴 검사방법에는 대표적으로 인장강도 시험과 용접부를 절단하여 단면을 조사하는

단면시험 등이 있으며 비파괴 검사에는 경험이 많은 전문가가 X-ray를 이용하여 평가하는 방법이 있다. 그러나 용접중에 비파괴 검사법을 적용하기에는 비용이나 설비면에서 여러 가지 문제점이 있으며 더구나 실시간 품질검사는 거의 불가능하다.^{1)~2)}

현재까지 사용되고 있는 스폿용접기는 시편의 재질, 두께 등에 따라 용접하기 전에 용접변수를 조정하게 되어 있고 용접도중에는 조정이 불가능하다. 또한 실제 용접과정에서 같은 재질, 두께의 시편이라도 표면의 거칠정도, 산화막의 상태, 전극의 변형상태 등이 일정하지 않기 때문에 용접품질이 일정하지 않아 확실한 용접품질을 보장받을 수 없었다. 따라서 용접품질을 보장받기 위해 주로 용접변수와 너게트의 관계에 대해 연구가 진행되어 왔으며, 제어성능이 떨어지는 사

이리스터를 이용한 스폿용접기를 대상으로 이루어져 왔다. Dickinson 등의 연구에서는 부하단에서 용접전압, 전류, 동저항을 검출하여 동저항의 변화에 따른 용접 특성과의 관계를 규명하였다.^[3] Kaiser 등은 용접동안 너게트 형성에 대한 동저항의 영향을 분석하였는데, 초기에 접촉저항이 고유저항에 비해 상대적으로 주울열에 영향을 주며 용접이 진행되면서 온도상승으로 인한 고유저항값이 주울열에 큰 영향을 준다고 하였다.^[4] Kimchi 등의 연구에서는 스패터(Spatter)가 발생하기 쉬운 전류 영역에 대해 보다 자세한 실험적 검증을 통하여 스패터가 용접 품질에 미치는 영향을 분석하고 용접강도와와의 관계를 규명하였다.^[5] Patange 등의 연구에서는 용접중의 용접변수에 대한 모니터링을 한 후 저항값이 순간적으로 큰 변화를 보이면 스패터가 발생하여 인장강도가 떨어짐을 규명하였다.^[6]

한편 산업현장에서 사용되고 있는 스폿용접기의 정전류 제어방식은 대부분 사이리스터를 이용한 방식으로 제어성능이 떨어지며, 특히 용접과정에서 부하단의 동저항특성(Dynamic Resistance Characteristics)을 고려하지 않아 단위시간당 주울열이 일정하지 않게 되어 스패터가 많이 발생하여 용접품질의 저하를 가져온다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 정전력 제어방식을 인버터 스폿용접기에 적용하고 있는데 용접이 이루어지는 동안 부하단의 저항변화에 대해 주울열이 일정하게 유지시켜준다. 스패터의 발생은 용접부위의 강도 저하를 초래하며 스패터시 발생하는 용융 금속의 돌출은 도장성이나 외관 품질을 떨어뜨리며 금속 입자로 인하여 생산 환경을 오염시킨다. 이러한 스패터의 억제를 위해 최근 새로운 전극을 개발하거나 가압 장치에 서보건(Servo Gun)과 공압건(Air Gun)을 사용한다.^[7]

본 논문은 사이리스터 스폿용접기에 비해 제어성능이 우수하고 용접시간, 용접전류 및 전력제어가 가능한 인버터 스폿용접기를 사용하고자 한다. 가압 방식은 공압건을 이용하고 용접시편은 단일성분의 철인 경우와 커패시터 leg부분에 사용되고 있는 구리 위에 주석-납을 합금한 두 개의 시편을 대상으로 한다. 양호한 동저항 데이터베이스 구축을 위해서 먼저 용접변수의 설정값 변화에 따른 데이터를 비교·고찰하고, 인장강도 시험 및 전자 현미경을 이용한 용접부의 조직분석을 한다. 이와 같은 용접결과로 얻은 양호한 데이터로 동저항 특성곡선을 만들어 용접하는데 사용하고자 한다.

2. 스폿용접의 원리 및 동저항 특성곡선

스폿용접은 그림 1과 같이 주울열을 이용하는 방법으로, 시편(금속판)을 전극사이에 놓고 압력을 가하면서 전류를 흘리면 용접부는 주울열에 의해 가열되어 국부적으로 용융되고 시편은 접합된다. 용접저항 $R(\Omega)$, 용접전류 $I(A)$, 용접시

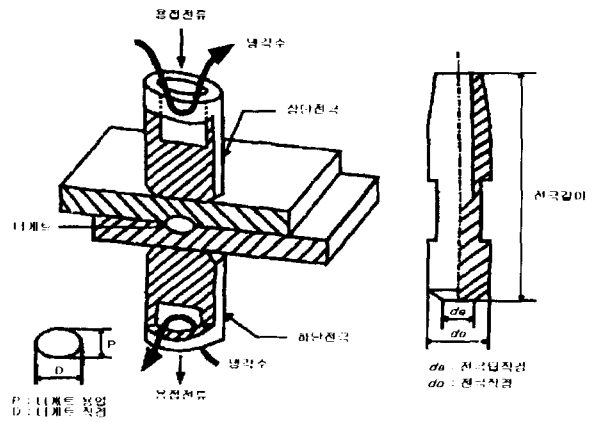


그림 1 스폿용접 시스템과 전극형상의 개략도
Fig. 1 Schematic diagram of spot welding system and electrode geometry

간 $t(sec)$ 에 대해 발열량 Q 는 식 (1)과 같이 되고 이 열로 인해 용접부가 용융되면서 가압력에 의해 용접된다.^[1]

$$Q = 0.24I^2Rt(cal) \tag{1}$$

스폿용접은 용접시간이 매우 짧은 시간 내에 끝나며 시편이 접촉한 상태에서 내부의 융합이 생기므로 용접 중에 관측하는 것은 어렵다. 따라서 영향을 주는 요인을 찾아서 적절한 조건하에서 용접을 해야 하는데 이 중 용접품질에 가장 큰 영향을 주는 요인으로는 용접전류, 가압력, 용접시간이며 그 밖에 몇 가지 요인들이 더 있다.^{[1][8]}

주울열에 의한 발열량은 식(1)에서 전류의 제곱에 비례하므로 용접전류는 스폿용접에서 가장 중요한 요인이지만, 단순히 전류의 크기가 중요한 것이 아니라 용접부의 전류밀도가 중요한 요소가 된다. 용접이 이루어지는 동안 발열량은 용접부의 열전도에 의해 방산함으로 열의 총발생량이 일정해도 용접시간이 변하면 용접부의 최고온도가 달라지므로 용접결과도 달라진다. 또한 스폿용접이 이루어지려면, 상·하 전극에 의해 용접부에 물리적인 힘이 가해져야 하므로 공기 가압 방식으로 스폿용접기 IP-215A에 의해 동저항 데이터베이스를 구축하였다.

한편, 용접이 이루어지는 동안 너게트가 형성되는데, 시편의 용접부 저항값이 용접시간에 따라 변하며, 시편에 따라 그 정도의 차가 크다. 그림 2는 너게트가 형성되는 과정에서 용접시간에 따른 용접부의 저항변화를 보여주고 있다.^{[3], [4](9-11)} 용접부위의 접촉저항은 지수함수적으로 감소하고 주울열로 인한 온도변화에 따른 체적저항은 지수함수적으로 증가하다가 너게트가 이루어지면 약간 감소하는 경향이 있지만, 체적저항의 변화의 크기는 시편에 따라 다르다. 그러나 산업현장에서 사용되고 있는 정전류 제어방식은 이러한 저항변화를 고려하지 않아 식(1)에서 단위시간에 대한 주울열 $i^2(t)R(t)$

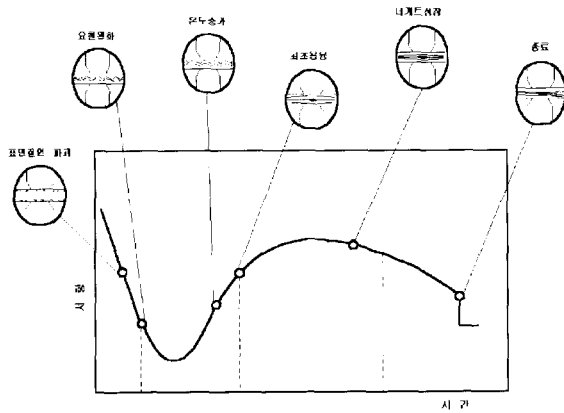


그림 2 전형적인 동저항특성곡선
Fig. 2 The characteristic curve of typical dynamic resistance

변하게 되어 스페터가 발생한다.⁽⁶⁾ 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 용접조건 변화에 따른 양호한 용접품질에 대해 용접중의 동저항 데이터베이스를 구축하여 향후 순시적인 동저항 제어를 함으로써 양호한 용접품질을 얻을 수 있다.

3. 동저항 데이터베이스 구축을 위한 시스템 구현

시편의 용접품질을 판정하는 너게트는 전기적인 변수와 기계적인 변수에 밀접한 관계가 있다. 전기적인 변수로서 용접 전압, 용접전류와 저항은 시편의 용접품질을 조절하는 변수로서 사용되며 기계적인 변수로서 가압력을 들 수 있는데 용접중에 가압력 변화를 주어 용접품질을 조절하기도 한다.⁽¹¹⁾

본 논문은 용접전압 및 용접전류의 전기적인 변수를 사용하여 용접중의 동저항에 근거한 모니터링 시스템으로 주울열에 기초를 두었으며, 전기적인 동저항은 너게트 형성을 제어하는 중요한 요소가 된다.

그림 3은 동저항 데이터베이스 구축을 위한 스폿 용접기에 대한 전체적인 시스템이다. 동저항 데이터베이스 구축을 위해 용접품질에 큰 영향을 미치는 용접조건(용접시간, 용접전류, 용접전력 등)을 제어 유닛에서 변화를 주면서 동시에 외부에 인터페이스부를 설계하여 동저항특성을 모니터링하였다. 용접전압은 전극팁 사이에서 직접 검출하였고 토로이달 코어를 사용하여 용접전류를 측정하였다. 검출된 용접전압과 용접전류는 설계된 필터회로를 거쳐 8bit의 A/D 컨버터로 입력되고 8255A 포트를 통하여 PC와 연결된다. 동저항은 용접중의 용접전압과 용접전류를 매 샘플링시간 1(ms)마다 필터회로를 거친 평균값을 받아들여 스케일링값으로 변환한 후 용접전압에 대한 용접전류로 나눈 값을 얻게 되는데 용접의 품질을 결정하는 가변적인 요소에 영향을 받는다. 따라서 이러한 동저항특성은 모니터링 시스템에서 용접품질을 판정

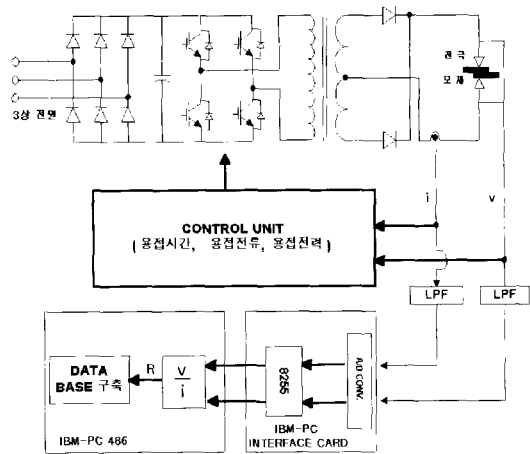


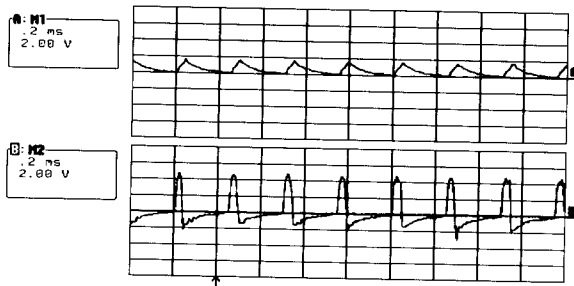
그림 3 동저항 데이터베이스 구축을 위한 스폿 용접시스템
Fig. 3 Spot welding system for dynamic resistance database implementation

하는 기준값으로 이용되며, 용접중의 전압과 전류에 의해 계산되어지는 동저항은 기준동저항과 비교된다. 그리고 만일 그것이 허용값 범위내에 있다면 용접품질은 양호하고 범위를 벗어나면 용접품질이 불량판정을 받게 된다. 기준 동저항특성과 제한값에 대한 설정은 오프라인으로 계산된다.

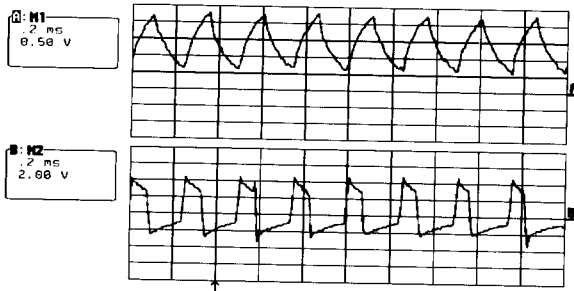
3.1 용접전류 및 전압을 검출하기 위한 회로설계

저항용접기는 주울열에 의해 용접이 이루어지므로 변압기 2차측은 10[V] 이하의 교류 저전압 대전류로 변환된다. 그리고 용접변압기의 2차측 리액턴스 때문에 인버터 주파수가 높게 될수록 전류는 흐르기 어렵게 된다. 그러나 2차측을 정류하여 직류로 한 경우 $f=0$ [Hz]로 되기 때문에 출력 주파수가 2[kHz]에서도 대전류가 흐른다. 다만, 2차측을 정류할 경우, 정류 다이오드는 순 전압강하가 생기고 이로 인해 손실이 발생한다. 일반적으로 대형 용접기에서는 수냉식을 이용하지만, 실험대상은 최대 용접전류가 4000[A]인 소용량 시스템이므로 강제 공냉식을 하고 있으며, 특히 대전류를 정류하는 변압기 2차측 정류다이오드의 보호를 위해 커패시터 스너버회로를 정류다이오드와 병렬로 연결하고 있다. 그림 4(a)는 용접전류가 310[A]일 때, 그림 4(b)는 용접전류가 800[A]일 때의 정류다이오드에 의해 전파정류된 부하단 용접전압과 용접전류 파형이다.

그림 4(a)와 (b)에서 용접 중에 용접전류와 용접전압을 검출하여 일정주기마다 A/D 컨버터를 통해 받아들여지면 그림 5(a)의 필터회로가 필요하며 그림 3의 저역통과 필터(Low Pass Filter : LPF)부분에 해당된다. 필터회로의 입력값으로 각각 용접전류와 전압을 받는다. 이 때 용접전류는 토로이달 코어를 통해 용접부하에 흐르는 전류를 전압으로 변환된 값으로 검출하게 되고 용접전압은 용접중의 시편에 인가되는



(a) 용접전류가 310[A]일 때



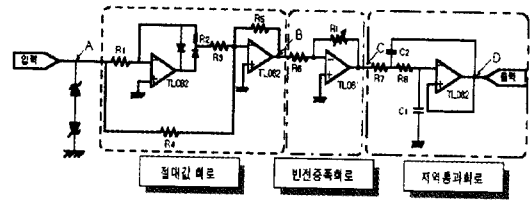
(b) 용접전류가 800[A]일 때

그림 4 부하단 용접전압 및 전류파형
Fig. 4 Welding voltage and current waveforms at load side
(Upper: voltage, Lower: current)

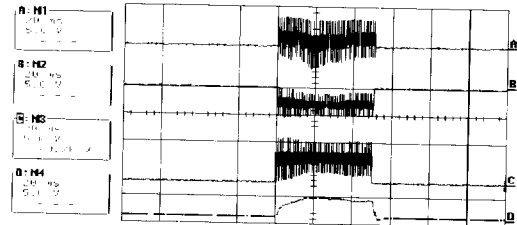
전압만을 받아들이기 위해 전극팁 사이에서 검출한다.

용접부하에 흐르는 용접전류는 대전류가 흐르기 때문에 중간탭 변압기 2차측의 전파장주파회로를 통과하게 되면 구형파에 가까운 파형이 검출된다. 주울열에 의해 용접이 이루어지는 스폿용접기는 식(1)에서 시편에 흐르는 전류의 방향에 관계가 없다. 따라서 음의 방향으로 흐르는 전류에 대해서도 고려를 해야 하므로 절대값 회로를 사용해야 한다. 따라서 절대값회로 및 반전증폭기를 이용하여 양의 값을 취하도록 한다. 이때 반전증폭기의 이득은 절대값회로에서 다이오드 전압강하분을 고려한다. 한편 저역 통과회로는 인버터의 스위칭 주파수가 2(kHz)이므로 일반적으로 많이 사용되는 버터워스 2차 저역 통과필터 (Butterworth Low Pass Filter : BLPF)를 채택하였으며, $C_2 = 2C_1$, $R_7 = R_8$ 으로 설계하여 이득을 평탄하게 하였다. 차단주파수 $f_c = 1/2\pi R_7 \sqrt{C_1 C_2}$ 는 A/D 컨버터로 입력되는 용접전압과 용접전류의 출력파형을 고려하여 225(Hz)로 하였다.

그림 5(b)는 용접전류에 대한 필터회로의 부분 파형으로, (A)의 파형은 제너다이오드를 통과한 파형으로 외부에서 높은 서지전압이나 무부하 전압이 입력되면 제너다이오드에서 차단한다. (B)의 파형은 (A)의 파형에 대해 절대값회로를 거쳐 출력되는 값으로 입력된 값에 대해 음의 절대값을 갖는다.



(a)절대값 및 저주파 필터회로



(b) (a)의 파형(5V/div., 20ms/div.)

그림 5 절대값, 저주파 필터회로와 각 부분 파형
Fig. 5 Absolute value, low pass filter circuit and each waveform

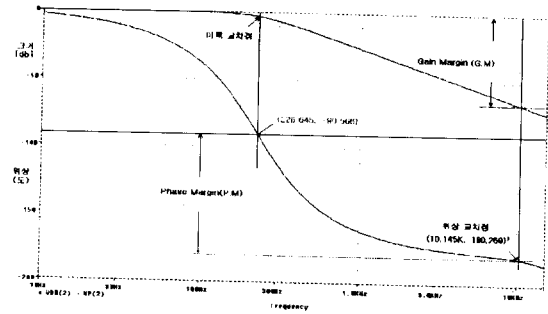


그림 6 필터회로의 안정도 해석
Fig. 6 The stability analysis of filter circuit

(C)의 파형은 절대값회로에서의 다이오드 전압강하 및 절대값회로로 입력된 값에 대해 (B)의 파형을 반전증폭기를 사용하여 얻은 파형이다. (D)의 파형은 BLPF에 의해 출력된 결과 파형을 보여준다.

그림 6은 보드선도를 통한 필터 회로의 안정도 해석 파형으로 그림 5(a)의 BLPF에 대한 신뢰성을 보장받기 위해 Pspice 시뮬레이션을 하였다. 설계된 필터회로를 주파수 영역에서 해석하면, 차단주파수에서 입출력 이득이 0(dB)이며, 위상여유는 90° 이고 이득여유가 67(dB)이므로 설계된 필터회로가 안정하다고 할 수 있다.

3.2 사용된 스폿용접기 사양과 용접시편의 재질

▶용접기사양

입력전원 : 3상 AC 220(V), 50/60(Hz)

인버터 스위칭 주파수 : 최대 2[kHz]
 제어방식 : 정전류, 정전압, 정전력
 변압기용량 : 9[kVA]
 무부하 2차측 전압 : 6.5[V]
 최대전류 : 4000[A], 사용률 : 6 %

본 논문에서 용접 중에 동저항 데이터베이스를 구축하기 위해 사용된 용접시편은 두 종류로 그림 7과 같다. 순수한 구리 위에 주석-납(Sn-Pb) 합금을 한 시편은 주로 커패시터 leg부분의 접합용으로 많이 사용되며, 단일성분의 철은 산업현장에서 많이 사용된다.

- ▶ Cu(구리) : 0.114 mm
- 도금층 Solder (63%Sn - 37%Pb) 합금 : 0.01mm
- ▶ Fe(철) : 0.117 mm

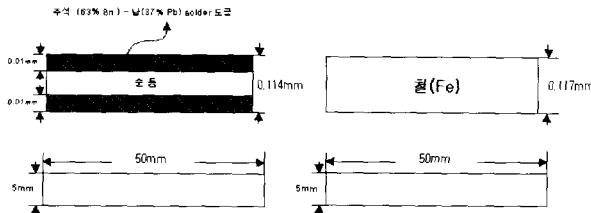


그림 7 용접시편의 재질
 Fig. 7 The material of workpieces

4. 용접조건 변화에 따른 동저항 특성곡선

용접이 진행되는 동안 스폿용접의 부하단 저항은 변하게 되는데 이는 피용접물이 본래 가지고 있던 고유저항값이 주열에 따른 온도상승으로 인해 변하기 때문이다. 여기서 시간에 대한 용접전압의 변화와 용접전류의 변화로 얻어지는 저항값을 동저항이라 정의한다. 따라서 스폿용접의 품질을 결정하는 중요한 변수인 동저항은 용접시간동안 피용접물에 흐르는 용접전류 및 용접전압의 변화를 동시에 보여준다.⁽⁶⁾ 따라서 본 논문은 그림 3을 이용하여 순수한 철인 경우와 구리 위에 주석-납을 합금한 경우인 두 개의 시편에 대해 용접변수인 가압력과 용접시간, 용접전류 등을 변화시켰을 때 동저항 특성곡선을 비교·분석하였다. 용접변수에 대한 변화범위 설정은 피용접물에 따라 다르게 하여 동저항 특성곡선을 얻었으며 대표적인 몇 가지 경우의 동저항 곡선에 대해서만 나타내었다.

그림 8(a)는 철을 시편으로 사용하고 기준 전력값을 1[kW], 용접시간을 50[ms], 초기 용접시간(slope up)을 10[ms]로 용접조건을 설정하고, 가압력을 400[kgf], 350[kgf], 200[kgf]로 변화시켰을 때 동저항 곡선을 보여준다. 가압력 변화에 따라 초기 용접시간(slope up)에는 시편상태에 따른 동저항값이 조금 차이가 나지만, 초기용접시간이

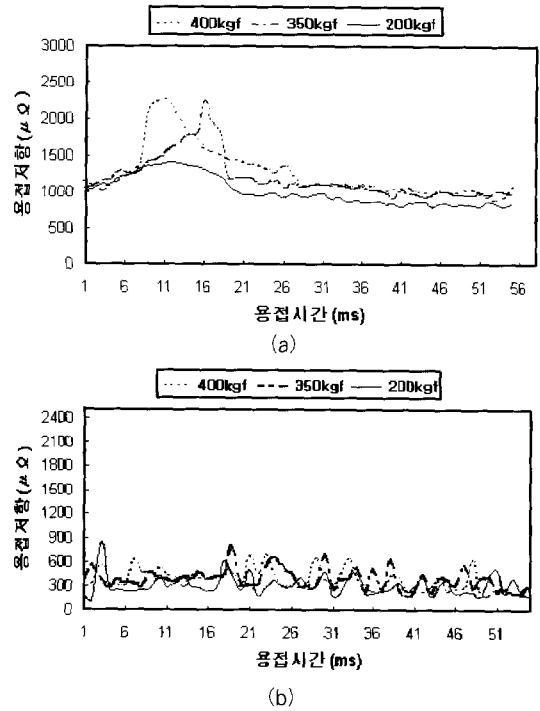


그림 8 가압력변화에 따른 동저항곡선 (a)철, (b)주석-납
 Fig. 8 Dynamic resistance curve with variation in pressure force (a)Fe, (b)Sn-Pb

지난 후에는 거의 같은 값을 갖는다. 또한 전체적인 동저항특성 곡선은 가압력 변화에도 일정한 패턴으로 변화되고 있음을 볼 수 있다.

그림 8(b)는 구리 위에 주석-납 합금을 한 시편에 대해 기준 전력값 2[kW], 용접시간 50[ms], 초기용접시간 10[ms]로 용접조건을 설정한 다음, 가압력을 400[kgf], 350[kgf], 200[kgf]로 변화시켰을 때 동저항 곡선이다. 그림 8(a)와 비교해 보면, 용접 저항값이 작으며 용접시간에 따른 저항변화가 거의 일정함을 볼 수 있다.

그림 9(a)는 철을 시편으로 사용하고 가압력은 200[kgf], 용접시간 50[ms], 초기용접시간 10[ms]을 주었을 때, 기준 전력값을 0.8[kW], 0.9[kW], 1.1[kW], 2.2[kW]로 변화시켰을 때의 동저항 곡선이다. 기준 전력값이 커짐에 따라 용접 저항값이 작아지고 있는데 이것은 용접전압에 비해 상대적으로 용접전류가 커짐을 의미한다. 기준 전력값을 2.2[kW]로 하였을 때 시편에 흐르는 전류는 1300[A]가 되어 용접전류가 많이 흘러 전류밀도가 증가되었고 이로 인해 용접부가 과열되었다. 이 경우 시편에는 너게트가 형성되지 않고 용접부위가 파괴되었다. 따라서 기준 전력값을 크게 하여 용접전류가 많이 흐르게 되면 용접부위가 파괴되어 용융된 금속물이 피용접물밖으로 튀어나가게 되고 극단적으로 피용접물의 용

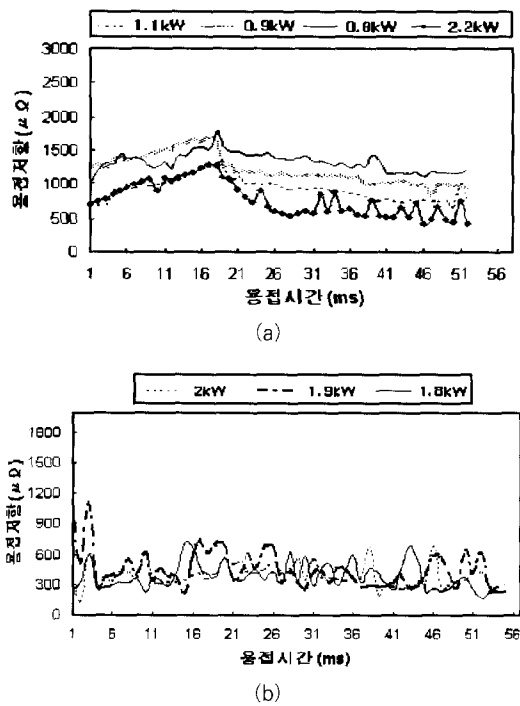


그림 9 기준전력 변화에 따른 동저항곡선 (a)철, (b)주석-납
Fig. 9 Dynamic resistance curve with variation in reference power (a)Fe, (b)Sn-Pb

접부위에 구멍이 생기게 된다. 이로 인해 전압의 변화에 비해 상대적으로 전류변화가 크게 되어 용접저항이 작아진다.

그림 9(b)는 주석-납을 시편으로 사용하고 용접조건을 가압력은 200(kgf), 용접시간 50(ms), 초기용접시간 10(ms)로 했을 때, 기준 전력값을 1.8(kW), 1.9(kW), 2(kW)로 변화시켜 얻은 동저항 곡선이다. 이때의 용접전류값은 1340(A)~1520(A) 정도이며 용접저항은 철에 비해 상대적으로 작음을 알 수 있었다. 이는 순수한 철인 경우에 비해 많은 전류가 시편의 용접부위에 흘러야 양호한 너게트가 형성됨을 의미한다.

용접변수 중 용접시간을 너무 짧게 하면 가열되는 부위가 작아져 충분한 용접이 안되며 너무 길게 하면 열의 손실이 많아지게 되고 불필요한 부분을 가열할 뿐만 아니라 시편이 부풀어 재질의 변화를 가져오게 된다. 따라서 적절한 용접시간이 요구되며 본 논문에서 용접시간에 대한 변화를 주어 양호한 용접품질을 얻었을 때의 동저항 특성곡선을 고찰하였다. 그림 10(a)는 철을 시편으로 사용하고 용접조건을 기준 전력값 0.9(kW), 가압력 200(kgf)로 설정한 다음, 용접시간에 대해서만 변화를 시켰을 때 얻은 동저항 곡선이다. 용접시간 40(ms), 50(ms), 60(ms)동안 각각에 대해 얻은 동저항 곡선은 동일한 패턴을 보여준다.

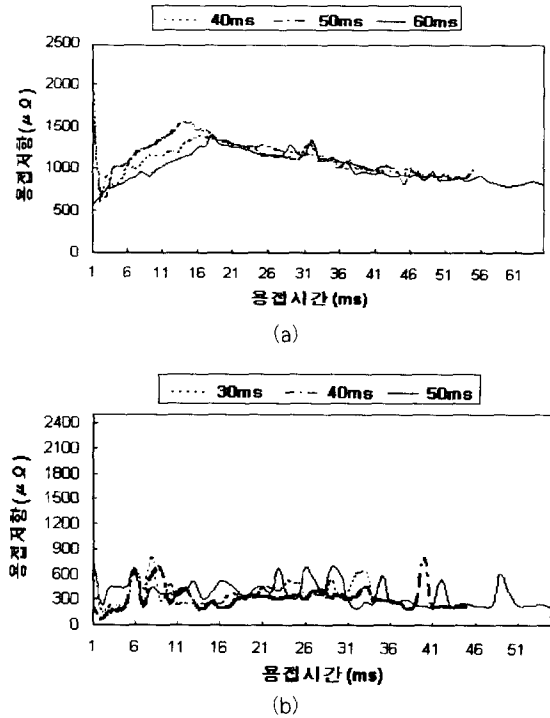
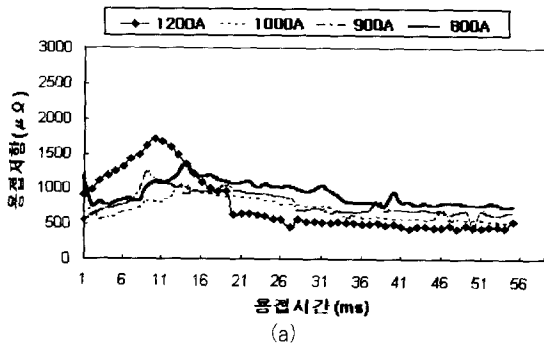


그림 10 용접 시간에 따른 동저항곡선 (a)철, (b)주석-납
Fig. 10 Dynamic resistance curve with variation in welding time (a)Fe, (b)Sn-Pb

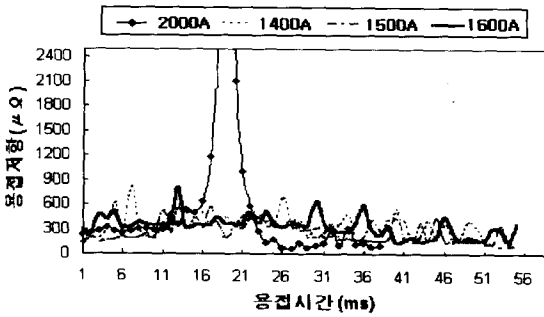
그림 10(b)는 용접조건을 기준 전력값 2(kW), 가압력 200(kgf)로 설정하고 시편을 주석-납 합금을 한 경우에 대해 그림 10(a)와 마찬가지로 용접시간만에 대한 변화를 주었을 때 얻은 동저항 곡선이다. 용접시간 30(ms), 40(ms), 50(ms) 동안 각각에 대해 얻은 저항곡선은 용접이 이루어지는 동안 일정한 패턴을 보여준다.

그림 11(a)는 철을 시편으로 사용하고 기준 전류값을 변화시켰을 때 동저항 곡선이다. 이때 용접조건은 가압력은 200(kgf), 용접시간은 50(ms)(초기용접시간 10(ms) 포함)로 하고 기준전류값을 800(A)~1200(A)로 변화시켰다. 용접전류 1200(A)로 기준값을 주었을 때 시편의 용접부위에 큰 전류가 흘러 과열로 용접부가 변형되었다. 이 때의 용접부의 형상을 전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였으며, 그 결과를 그림 18(b)에서 보여준다.

그림 11(b)는 주석-납을 시편으로 사용했을 때, 기준 전류값 변화에 따른 동저항 곡선이다. 이때 용접조건은 가압력은 200(kgf), 용접시간은 50(ms)(초기용접시간 10(ms) 포함)로 하였다. 용접전류 2000(A)로 기준값을 주었을 때 용접부가 심하게 파괴되었으며 일정패턴에서 크게 벗어난다. 이 때의 너게트 부위를 그림 19(b)에서 보여주는데 용접 중에 기포가 발생했음을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 11 기준전류 변화에 따른 동저항곡선 (a)철, (b)주석-납
Fig. 11 Dynamic resistance curve with variation in reference current (a)Fe, (b)Sn-Pb

4.1 철 및 주석-납 합금에 대한 동저항 특성곡선 구축

순수한 철(Fe)인 경우와 구리 위에 주석-납(Sn-Pb)을 합금한 경우인 두 개의 시편에 대해 용접품질에 큰 영향을 미치는 여러 가지 용접조건에 따른 동저항곡선을 살펴보았다. 그림 12와 그림 14는 재질이 다른 두 시편에 대해 용접중의 저항곡선이며, 재질에 따라 저항값의 크기와 곡선패턴이 다를 수 있다. 이는 앞서 보여준 그림 2의 아연도강판의 전형적인 동저항 곡선패턴과도 차이가 있음을 보여준다. 순수한 철인 경우 주석-납 합금을 한 경우보다 용접중의 용접전류가 적게 흘러야 너게트가 양호하게 형성되었으며 용접전압이 용접전류보다 상대적으로 크게 변화가 없어 동저항값은 일반적으로 크게 나타났다. 그림 12는 시편으로 철(Fe)을 사용하고 용접변수 중에 가압력, 용접시간, 용접전류, 용접전력 각각에 대해서만 변화를 주었을 때 얻은 동저항특성 곡선(그림 8(a), 그림 9(a), 그림 10(a), 그림 11(a))에 대한 평균값을 낸 동저항곡선을 보여준다. 그림 13은 그림 12의 데이터 평균값을 기준으로 용접품질이 양호한 허용범위값을 설정하였다. 철을 사용한 경우 평균값의 ±구간에 200(μΩ)의 허용오차 범위에 대해 양호한 용접품질을 얻을 수 있었다. 허용오차 범위를 벗어난 경우 용접부위에 용접전류가 적게 흘러 너게트가 형성되지 않거나, 용접전류가 많이 흘러 전류밀

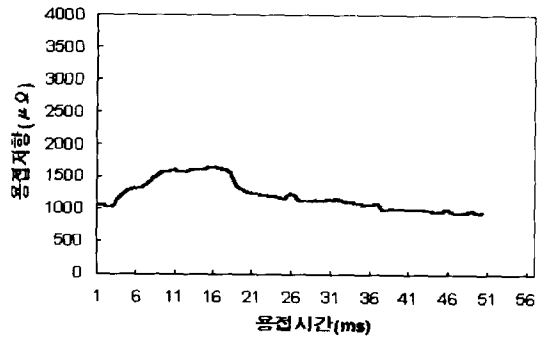


그림 12 용접조건 변화에 따른 평균 동저항 곡선 (철)
Fig. 12 Average dynamic resistance curve with variation in welding conditions (Fe)

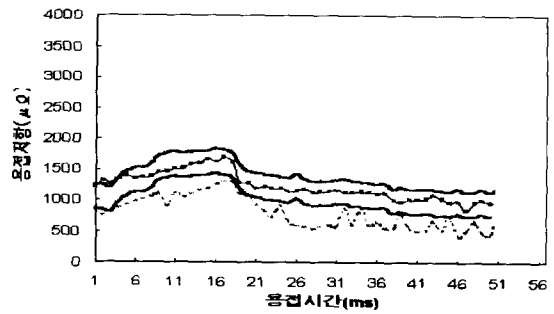


그림 13 용접데이터의 평균값에 대한 허용범위 (철)
Fig. 13 Tolerant range for average value of welding data (Fe)

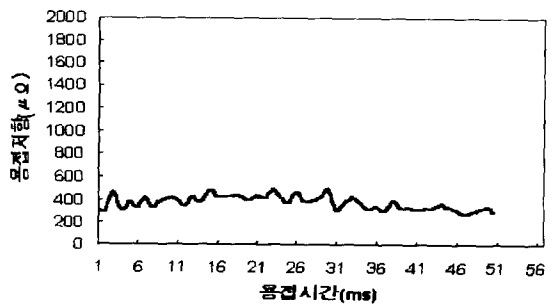


그림 14 용접조건 변화에 따른 평균 동저항곡선 (주석-납)
Fig. 14 Average dynamic resistance curve with variation in welding conditions (Sn-Pb)

도 증가로 인한 용접부의 변형이 생기고 표면이 손상되었다. 또한 스파터가 발생하고 금속조직이 좋지 않고 인장강도가 저하되었다.

그림 14는 주석-납을 사용하여 용접한 경우에 대해 용접시간, 가압력, 용접전류 등 용접조건 변화에 따른 동저항 데이터값들을 평균한 동저항 곡선을 보여준다. 그림 12의 순수한 철인 경우와 비교해 보면 저항값이 상대적으로 매우 작음을

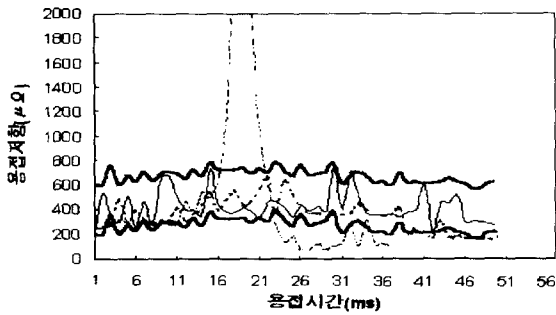


그림 15 용접데이터의 평균값에 대한 허용범위 (주석-납)
 Fig. 15 Tolerant range for average value of welding data (Sn-Pb)

알 수 있다. 즉 용접전압에 비해 상대적으로 용접전류가 많이 흘러야 양호한 용접이 된다.

그림 15는 그림 14의 데이터의 평균을 사용하여 양호한 용접품질을 허용하는 허용오차범위를 설정하였다. 순수한 철인 시편과는 달리 상대적으로 용접저항값 섭동이 심하다. 그러나 전체적으로 용접중의 용접저항값은 일정한 패턴을 이루고 있으며 변동률이 심한 평균값의 +구간에 300[μΩ]의 허용오차를 주고 변동률이 비교적 적은 -구간에는 100[μΩ]의 허용오차 범위내에서 양호한 용접품질을 얻을 수 있었다. 그림 13과 그림 15에서 보듯이 스파터가 발생하여 용접품질이 저하되는 동저항곡선은 순간적으로 큰 변화를 보여준다. 이것은 용접중에 용접전류가 급속히 변했기 때문이며, 용접중에 용접전압과 용접전류를 검출하는 아나로그 소자의 특성변화가 다소 변하더라도 허용오차 범위 400[μΩ]이내에 동저항 데이터 베이스 곡선을 얻을 수 있다면 양호한 용접품질을 얻을 수 있다.

4.2 용접품질 고찰

그림 16은 인장강도와 용접전류와의 관계를 나타낸 것이다. 주석-납 합금을 시편로 사용하고 가압력 200[kgf], 용접시간 50[ms]를 주었을 때, 용접전류값이 1300[A]~1500[A] 정도 흐를 때 인장강도가 상대적으로 높아 용접품질이 양호하다. 이것은 앞에서 동저항곡선의 왜곡정도에 따른 용접상태가 비교적 좋은 실험결과와 거의 일치함을 알 수 있다.

그림 17은 가압력과 용접전류와의 관계를 도시한 것이다. 실선으로 처리된 하단부는 용접이 될 수 있는 한계를 의미하고 상단부의 실선으로 처리된 부분은 그 이상으로 용접전류를 주면 용접부위가 파괴되어 너게트가 형성되지 않음을 의미한다. 가압력이 증가할수록 육안으로 보았을 때 너게트가 형성되는 범위가 넓어지고 있으며, 앞서 실험결과와 비교한다면 가압력 200[kgf]에서 용접전류는 1300[A]~1500[A]가 적당함을 확인 할 수 있다.

그림 18은 전자 현미경을 이용하여 너게트가 형성된 단면

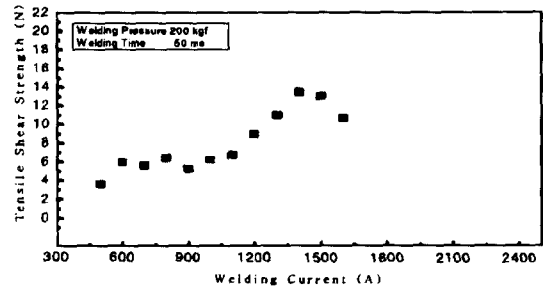


그림 16 인장강도와 용접전류와의 관계
 Fig. 16 The relation of tensile shear strength and welding current

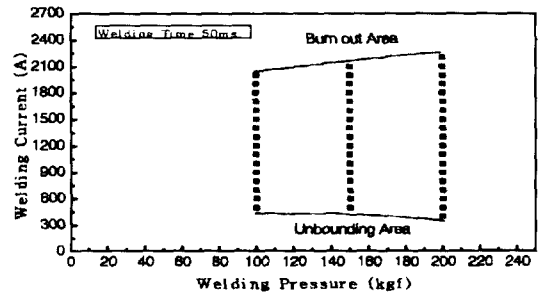


그림 17 가압력과 용접전류와의 관계
 Fig. 17 The relation of pressure force and welding current

의 용접상태를 보여준다. 그림 18(a)는 용접시편이 철이고 용접조건이 가압력 200[kgf], 용접시간 50[ms], 용접전류 800[A]로 설정되었을 때, 상·하 용접시편의 접촉하는 부분에 너게트가 양호하게 형성되었다. 또한 용접이 진행되는 동안 용접시편의 상단 및 하단부위에 전극에 의해 가압력을 받은 상태를 보여준다. 그림 18(b)는 용접조건이 가압력 200[kgf], 용접시간 50[ms], 용접전류 1200[A]일 때의 용접상태를 보여준다. 용접이 진행되는 동안 용접전류가 많이 흘러 스파터가 발생하고 기포가 발생하였다. 그리고 상단과 하단의 용접시편이 불규칙적인 모양을 하고 있는데 이는 용접부의 변형으로 표면이 손상된 경우를 보여준다.

그림 19는 구리 위에 주석-납을 합금한 시편에 대해 용접 단면의 용접상태를 보여준다. 그림 19(a)는 용접조건이 가압력 200[kgf], 용접시간 50[ms], 용접전류 1400[A]로 설정되었을 때의 결과로, 상·하 용접시편의 접촉하는 부분에 너게트가 양호하게 형성되었다. 그림 18(a)와 비교하면 너게트가 작는데 이는 구리가 용접이 쉽게 이루어지지 않고 주석-납을 합금한 부분만 접합되기 때문이다. 그림 19(b)는 용접조건이 가압력 200[kgf], 용접시간 50[ms], 용접전류 2000[A]일 때의 용접상태를 보여준다. 용접부위에 과도한 전류가 흘러 너게트가 형성되는 용접부에 기포가 발생하고

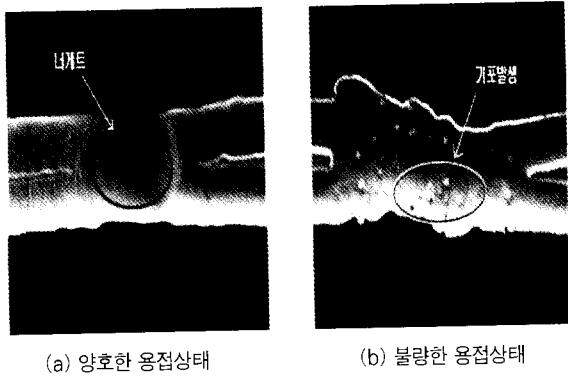


그림 18 용접상태 비교(철)
Fig. 18 Welding state comparison(Fe)

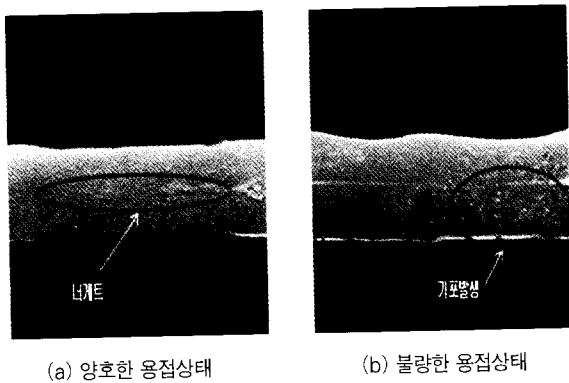


그림 19 용접상태 비교(주석-납)
Fig. 19 Welding state comparison(Sn-Pb)

용접부의 변형을 초래하였다.

5. 결론

본 논문은 용접품질 향상을 위한 동저항 데이터베이스 구축을 위하여 인버터 스폿용접기로 제시된 시편에 대하여 용접변수 변화와 인장강도 시험 및 시편조직 분석을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 용접시편에 걸린 전압과 전류를 검출하기 위해 설계된 필터회로가 안정됨을 보드선도를 통해 확인하였다.
- 2) 순수한 철인 경우와 구리 위에 주석-납을 합금한 경우인 두 개의 시편에 대해 용접변수(용접전류, 용접시간, 가압력, 용접전력)를 변화시켜 가면서 동저항 특성곡선을 얻은 결과, 시편의 종류에 따라 동저항 특성곡선의 패턴 및 동저항값의 차이가 있지만 같은 시편인 경우 동저항 곡선은 거의 같은 패턴으로 변화하였다.
- 3) 용접이 진행되는 동안 얻은 동저항 데이터값 중에 동저

항값이 순간적으로 크게 변하는 경우 용접품질이 좋지 않음을 확인하였다.

4) 전자현미경을 통해 용접부의 단면을 분석한 결과, 적절한 용접조건인 경우는 너겟 형성이 양호한 반면, 그렇지 않은 경우는 기포가 발생하고 시편이 변형되었다.

동저항 데이터베이스 구축을 기본으로 향후 동저항 제어를 하게 되면, 용접 중에 동저항에 따른 용접전류가 순시적으로 변하더라도 일정한 주울열을 얻게 되어 양호한 용접품질을 얻을 수 있을 것으로 본다.

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

참고 문헌

- [1] 김명준, 저항용접, 기문사, 1995.
- [2] SPOT 저항 용접 제어 기술, 금원사, 1994. 6.
- [3] D. W. Dickinson, J. E. Franklin, and A. Stanya, "Characterization of Spot Welding Behavior by Dynamic Electrical Parameter Monitoring", *Welding Journal*, pp.170_s~176_s, June 1980.
- [4] J. G. Kaiser, G. J. Dunn, and T. W. Eagar, "The Effect of Electrical Resistance on Nugget Formation During Spot Welding", *Welding Journal*, pp.167_s~174_s, June 1982.
- [5] M. Kimchi, "Spot Weld Properties when Welding with Expulsion - Comparative Study", *Welding Journal*, Vol. 63, No. 2, pp. 58_s~63_s, 1984.
- [6] S. R. Patange, T. Anjaneyulu and G. P. Reddy, "Microprocessor - Based Resistance Welding Monitor", *Welding Journal*, pp.133_s~138_s, 1985.
- [7] '95 국제용접기술세미나 교재, 한국용접공업협동조합, 1995.
- [8] Spatterless 관련자료 II, 금원사, 1995.
- [9] David W. Dickinson, *Metals Handbook* (9th Edition) Vol. 6, Welding, Brazing and Soldering, pp.469~493, 1983.
- [10] The ASM Committee on Resistance Welding of Steel Resistance Welding(17th Edition) Vol. 6, *The Welding Encyclopedia*, 1983.
- [11] S. A. Gedeon, C. D. Sorensen, K. T. Ulrich, And T. W. Eagar, "Measurement of Dynamic Electrical and Mechanical Properties of Resistance Spot Welds", *Welding Journal*, pp.378_s~385_s, Dec. 1987.

〈 저 자 소 개 〉



김재문(金才文)

1967년 9월 6일생. 1994년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 졸업(석사). 1999년 동 대학원 박사과정 수료.



원충연(元忠淵)

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 19971년 12월~1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문교수.

1988년 3월~현재 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터 공학부 교수. 당 학회 편집이사.



최규하(崔圭夏)

1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 졸업(공학). 1987년~1988년 미국 오레곤주립대 객원교수. 1997년~1998년 건국대 연구처장 역임. 현재 건국대 공대 전기공학과 교수.



김규식(金奎植)

1958년 8월 25일생. 1981년 2월 서울대 공대 전자공학과 졸업(학사). 1983년 2월 동 대학원 제어계측공학과(석사). 1990년 8월 동 대학원 제어계측공학과(박사). 1988년~92년 대우중공업 중앙연구소 선임연구원. 1993년~현재 서울

시립대학교 전자전기공학부 조교수. 당 학회 편집위원.



목형수(睦亨洙)

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