

저항 점 용접의 1차 동저항 특성에 관한 연구

조용준* · 이세현** · 신현일*** · 배경민***

Characterization of Primary Dynamic Resistance in Resistance Spot Welding

Yongjoon Cho*, Sehun Rhee**, Hyun Il Shin*** and Kyung Min Bae***

Key Words : Resistance Spot Welding (저항 점용접), Inductive Noise (인덕티브 노이즈), Primary Dynamic Resistance (1차 동저항), Weldability Lobe Curve (용접성 로브 곡선)

Abstract

The dynamic resistance monitoring in primary circuit is one of the important issues. Because in-process and real time quality assurance of resistance spot weld is needed to increase the product reliability. In this study, new dynamic resistance detecting method is proposed as a practical manner of weld quality assurance using instantaneous current and voltage measured at the primary circuit. And also, various patterns of primary dynamic resistance curve are characterized with the macro photograph and the weldability lobe curve. It is found that the primary dynamic resistance patterns are basically similar to those of the secondary, but there is evident advantage such as no extra devices are needed to obtain the quality information and eventually real time feedback control will be possible.

1. 서 론

앞선 연구들에서 저항 점 용접이 완료됨과 동시에 용접부의 품질을 예측할 수 있는 여러 가지 인자들에 대한 연구가 수행되어 왔다. 저항 점 용접은 전기-기계적 요소가 복잡하게 관련된 공정이기 때문에 다음 네 가지 인자, 즉 전압, 전류, 힘, 변위가 주된 예측의 대상이 되고 있다. 이들 인자들을 이용하여 얻어진 동저항과 전극 변위는 용접 공정 및 용접 품질에 대한 정보

를 동시에 포함하고 있는 요소로서, 적절히 구성된 여러 가지 계측장치 및 계산 방법을 사용하여 이러한 요소를 효과적으로 처리하고자 하는 연구가 진행되어 왔다. 초기의 연구에서는¹⁾ 2차 회로에 장치한 션트(shunt)에서 계측한 용접 전류와 클립을 사용하여 모재에서 직접 계측한 용접 전압을 오실로스코프를 이용하여 측정하였으며, 기록된 그래프로부터 동저항을 구하였다. 인덕티브 노이즈를 효과적으로 제거하기 위하여 전류의 변화량이 0인 순간의 전류와 전압을 이용하여 동저항을 계산하였다. 홀(Hall) 센서와 전압 측정

* 1999년 1월 7일 접수

* 학생회원, 한양대학교 정밀기계공학과 대학원

** 정회원, 한양대학교 기계공학부

*** 정회원, 현대자동차 (주)

• 이세현: srhee@email.hanyang.ac.kr

장치를 이용하여 계측된 신호의 실효값을 아날로그(analog) 회로에 적용시켜 보다 간단히 동저항을 구하는 연구가 계속되었다.²⁾ 이 연구에서는 동저항이 너겟 형성에 미치는 영향과 이에 따른 동저항 패턴등이 고찰되었다. 최근의 연구에서는 계측 장비와 하드웨어의 발달로 인하여, 여러 가지 방법의 동적 인자 계측법이 제안되기도 하였다.³⁾ 또한, 마이크로프로세서를 이용하여 동저항을 계측하는 시스템⁴⁾이 제안되기도 하였다. 2차 회로의 CT(current transformer)에서 계측한 용접 전류값을 이용하여 전류 변화량이 0인 시간에서의 순시적 동저항을 계산하였으며, 이 값을 근거로 마이크로 프로세서를 이용하여 용접 품질을 예측하고자 하였다. 한편, 국내의 연구자들에 의해서, 적외선 카메라와 고속 카메라를 이용하여 용융 너겟의 형성 거동이 파악되기도 하였으며⁵⁾, 저항 점 용접의 용접 공정 변수 계측에 대한 전반적인 소개도 이루어졌다.⁶⁾ 또한 저항 점 용접의 동저항 변화 패턴을 인공신경회로망에 적용하여 용접부의 품질을 감시, 판단할 수 있는 방법도 제시되었으며⁷⁾, 용접 전압의 변동 패턴을 이용하여 얻은 용접 공정 변수와 용접 품질과의 관계를 퍼지 알고리즘에 적용하여, 용접부의 강도와 오목자국 크기에 대한 용접부 품질을 실시간적으로 판단할 수 있는 시스템이 개발되기도 하였다⁸⁾. 그러나 2차 회로에서 검출한 결과를 바탕으로 한 이러한 연구들은 실시간 용접 품질 예측은 가능하지만, 전압 측정 장치의 설치 위치나, 부가적인 측정장치 부착에 따른 비용 증가 등으로 인해 현장에서의 응용에는 여러 가지 제한조건들을 갖고 있다.

이에 본 연구에서는 현장 적용이 가능하고 실시간 용접 품질 예측에 기초가 될 수 있는 1차 회로 동저항에 대하여 연구가 이루어졌다. 기존 연구의 2차 회로에서 얻은 동저항과 용접기의 1차 회로에서 검출한 동저항을 비교하여, 1차 동저항이 2차 동저항과 직접적인 관계가 있음을 밝히고, 용접성 로브 곡선(weldability lobe curve)과 용접부 단면 사진을 이용하여 이러한 1차 동저항 패턴에 따른 너겟의 성장 거동을 관찰하고자 하였다.

2. 동저항 계측

2.1 동저항과 인덕티브 노이즈

저항 점 용접은 피용접물에 작용하는 용접 전류에 의한 주열 열에 의해 용접 공정이 진행되기 때문에, 피용접물 전기 저항은 저항 점용접의 너겟 형성을 지배하는 가장 중요한 요인 중의 하나이다. 특히, 동저항은

초기 접촉저항과는 달리 용접 시간이 진행됨에 따라 변화하는 너겟의 형성 정보를 지니고 있는 인자이기 때문에^{2),9)} 동저항을 적절히 활용하면 용접부의 실시간 용접 품질 예측도 가능하다. 일반적으로 저항은 전압을 전류로 나누어서 구할 수 있지만, 저항 점 용접 회로에서는 교류 회로의 임피던스(impedance)에 포함된 유도 리액턴스(inductive reactance)로 인하여 순수 저항이 크게 왜곡되기 쉽다. 용접기 제어 회로를 단순화된 등가회로로 변화하여 해석한다면, 유도 리액턴스에 의한 인덕티브 노이즈(inductive noise)를 파악할 수 있으나, SCR(silicon controlled rectifier)을 사용하여 입열량을 제어하는 경우에는 SCR 게이트(gate) 점화에 의해 잘려진 전압 파형과 이에 따른 전류 파형으로 인하여 이러한 회로의 분석은 매우 복잡한 과정을 필요로 한다.

용접기 회로에서 발생하는 이러한 인덕티브 노이즈에 크게 영향을 받지 않고 동저항을 얻을 수 있는 간단한 방법은 전극의 선단에서 계측한 전압의 실효값을 이용하여 동저항을 구하는 것이다. 인덕턴스(inductance)가 거의 포함되지 않은 전극간 회로의 실효 전압을 2차 회로에서 검출한 실효 전류로 나누면 인덕티브 노이즈에 의한 상변화(phase shift)에 관계없이 순수한 저항을 얻을 수 있다. 이러한 실효값에 의한 동저항 계산법은 대전류에 의한 전압 강하로 인하여 전압 계측 위치에 따라 정밀도가 결정되며, 특히, 1차 회로에서는 이 방법에 의해 얻어진 값의 정확성을 보장할 수 없다. 왜냐하면 1차 회로에서 계측된 전압은 변압기에서 발생한 전압 강하와 2차 회로에서 발생한 전압 강하를 모두 포함하고 있어 정작 관심을 갖고 있는 용접 전압 강하는 무시되기 쉽기 때문이다.

인덕티브 노이즈를 효과적으로 처리하는 다른 한 가지 방법은 용접 전류가 최고값에 도달한 순간의 전압과 전류를 이용하여 동저항을 구하는 것이다. 이 방법은 저항-코일 회로 방정식,

$$V=RI+Ldi/dt \quad (1)$$

에서 전류의 변화량이 0인 순간에는 유도 리액턴스를 무시한 순수 저항 요소만이 임피던스에 영향을 미친다는데^{1,3,4,9)} 기초를 둔 것이다. 여기서, V 는 전압, I 는 전류, R 은 저항, L 은 인덕턴스 그리고 t 는 시간을 나타낸다. 이 방법의 가장 큰 장점은 1차 회로에서도 같은 원리를 이용하여 동저항을 구할 수 있다는 점이다. 변압기에 의해 연결된 1차 회로와 2차 회로를 흐르는 전류의 위상 변화는 동일하다는 원리¹⁰⁾에 의해 1차 회로에서 검출된 전류의 변화량이 0인 순간에 계산한 동저항에는 인덕티브 노이즈가 제거되었다고 볼 수

있다. 이 때 얻어진 값을 변압기의 권수비를 이용하여 변환하면 용접 제어 회로의 1차 회로에서도 2차 회로의 저항 변화를 상대적으로 관찰할 수 있다.

이상의 두 가지 방법은 반 사이클당 단 한 개의 동저항만을 얻을 수 있어 용접 전류의 파형 피드백(feedback) 제어에는 적용하기 어렵다는 단점을 지니고 있으나, 비교적 쉽고, 빠르게 동저항을 계산할 수 있다는 장점을 지니고 있다.

2.2 동저항 계측

기존의 연구들을 바탕으로 동저항 측정을 위하여 실험 장치를 Fig. 1에 나타내었다. 2차 회로의 순시값을 측정하기 위하여 전압 계측 장치와 홀 센서를 사용하였으며, 이를 이용하여 반 사이클당 실효값을 구하고 각각의 데이터를 이용하여 실효 동저항을 계산하였다. 동저항을 계측하는 또다른 방법으로, 본 연구에서는 용접기 1차 회로에서 동저항을 검출하는 방법을 제안하였다. 동저항의 2차 회로 검출은 몇 가지 문제점을 지니고 있다. 먼저, 현장에서 2차 동저항을 얻기 위해서는 모든 용접기에 전압과 전류를 검출할 수 있는 별도 장치가 필요하다. 특히, 전압을 계측하기 위해서는 계측 장치가 전압 기록 장치로부터 용접 로봇의 건(gun)을 따라 전극까지 연결되어야 한다. 자동차 몸체와 같이 복잡한 구조물을 용접하는 경우, 이러한 계측 장치는 용접 로봇의 동선과의 간섭을 고려하여 설치되어야 하고 경우에 따라서는 계측라인 결선에 따른 또 다른 문제를 발생시킬 수도 있다. 그러나 1차 회로 검출 시스템은 별도의 2차 검출 장비가 없이 제어 회로 내부의 계측 알고리즘에 의하여 동저항이 계산되므로 이 방법은 현장에서 매우 효과적으로 응용될 수 있다.

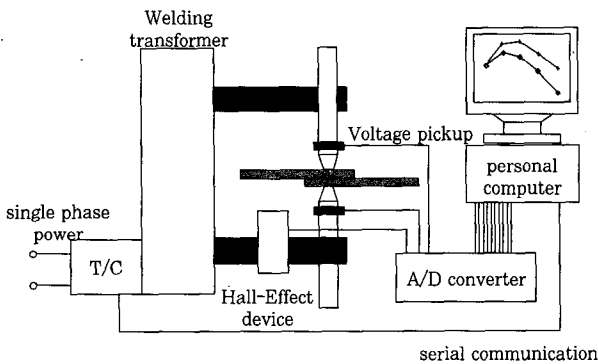


Fig. 1 Schematic diagram of dynamic resistance measurement system

앞에서 서술한 바와 같이 반사이클당 전류의 최고값에 부합하는 전압을 결정하고 이에 따른 동저항을 계

산하기 위하여 다음과 같은 알고리즘을 사용하였다. 1차 동저항 측정 장치는 Fig. 2와 같은 몇 개의 기본 모듈(module)로 구성되어 있다. 위상 제어에 의해 만들어진 1차 전류는 제어기 내부의 CT에 의해서 계측된 후, 실제 용접 전류 파형으로 변환된다. 용접 전압은 변압기 1차 회로에서 검출된 후, 계측용 변압기를 이용하여 감압한다. 전류의 변화율이 '0' 인 시간에 대한 트리거 신호를 생성하여, 검출된 용접 전류와 감압된 1차 전압에 연결된 샘플-홀딩(sample and holding) 회로의 트리거 신호로 작용시킨다. 이상의 회로에서 계측된 용접 전류와 전압을 이용하여 반 사이클에 한 번씩 전압을 전류로 나누어 동저항을 계산하였다.

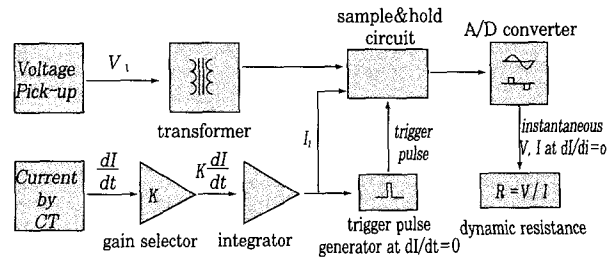


Fig. 2 Primary dynamic resistance monitoring circuit

3. 실험 방법

본 연구에서는 자동차에서 가장 일반적으로 사용되는 두께, 0.7 mm의 저탄소강판으로 용접을 실시하였다. 사용된 시편의 화학적 조성은 Table 1에 제시하였다. 용접에는 공압 실린더를 장착한 정치식 60Hz 단상 100kVA급 교류 저항 점 용접기가 사용되었다. 그 밖의 용접 변수로, 전극은 지름 16mm, 선단 지름 6mm의 도움형 전극을 사용하였고, 전극의 재료는 RWMA class II의 크롬이 포함된 구리 합금을 사용하였다.

Table 1. Chemical compositions of base material

Chemical composition (wt %)					
C	Mn	P	S	Al	Si
0.0030	0.08	0.011	0.008	0.043	-

4. 결과 및 고찰

4.1 1차 동저항과 2차 동저항과의 관계

Fig. 3(a)에 적절한 전류 조건(8kA)과 과도한 전류 조건(10kA)에서의 저탄소강판의 동저항 패턴을 사이

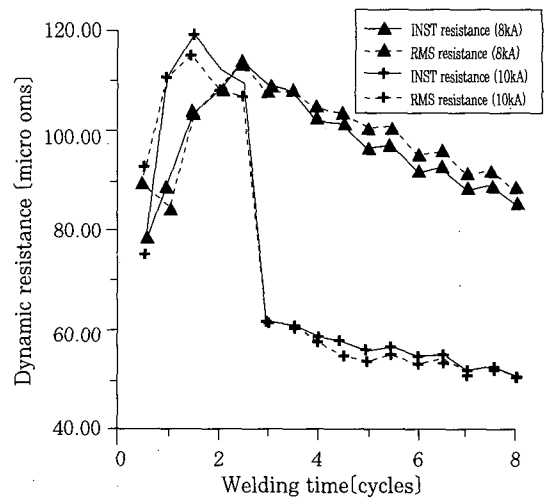
클로 표현된 시간의 함수로 나타내었다. 각 조건에서의 2차측 동저항을 구하기 위하여 두 가지 방법을 사용하였다. 앞선 연구들에서 여러 가지 방법의 동저항 계산법이 소개되었으나, 정확도와 효율면에서 다음의 두 가지 계산법을 이용하였다. 첫 번째 방법으로는 반 사이클당 각각의 전압과 전류의 실효값을 이용하여 동저항을 계산하였으며, 두 번째 방법으로 용접 전류의 변화량(di/dt)이 0인 순간의 전류와 전압의 순시값을 이용하여 동저항을 계산하였다. 각 사이클당 전류와 전압의 최고값을 이용하여 동저항을 계산해 보기도 하였으나, 이 값은 전자의 방법에 의한 결과와 거의 동일하였으므로 두 가지 방법에 의한 결과만을 Fig. 3(a)에 나타내었다. 실선은 전류의 변화율이 '0'인 시간의 순시값을 근거로한 동저항을, 점선은 실효값을 근거로한 동저항을 나타내었으며, 8kA 전류의 동저항 값은 삼각형 표시로, 10kA 전류의 동저항 값은 십자로 각각 표시하였다. 물리적으로 용접부의 저항 변화와 가장 밀접한 관계가 있는 실효값에 의한 동저항을 동저항의 기준값으로 볼 때, 반 사이클당 하나의 순시값을 이용하여 얻은 동저항 패턴도 기준과 거의 일치함을 볼 수 있다.

이와 함께 얻은 1차 동저항 패턴을 Fig. 3(b)에 제시하였다. 1차 동저항은 2차 동저항 보다 상대적으로 큰 값을 지니고 있으며, 이는 측정된 저항값에 1차와 2차의 폐쇄 회로에 대한 저항값이 포함되어 있기 때문인 것으로 보인다. 1차 회로에서 검출한 동저항 패턴은 같은 계산 방법을 사용한 순시값에 의한 2차 동저항과 동일한 패턴을 나타내고 있음을 관찰할 수 있다. 8kA 용접 조건의 경우, 두 가지 동저항 모두 두 번째와 세 번째 사이클 사이에서 최고 저항(beta-peak)을 보이고 있으며, 이후에 저항이 서서히 감소하고 있음을 알 수 있다. 10kA에서도 세 번째 사이클에서 두 동저항 모두 동시에 급격한 저항 감소를 관찰할 수 있다. 이러한 갑작스러운 감소는 중간날림에 기인한 것으로, 그 결과 접촉 면적의 증가와 전류 통로 길이의 감소에 따라 전류 밀도가 감소하여 낮은 저항값을 나타내는 것으로 생각되며, 보다 자세한 너겟 형성 과정은 다른 절에서 다루어질 것이다.

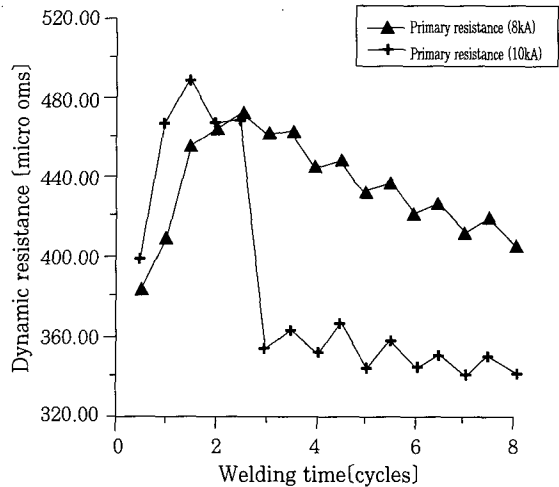
이러한 결과를 바탕으로 정성적인 관점에서 볼 때, 본 연구에서 제안된 방법으로 얻은 1차 동저항은 2차 동저항과 매우 깊은 관계를 갖고 있음을 알 수 있다.

4.2 용접성 로브 곡선과 1차 동저항 패턴

저항 점 용접의 용접성을 판단하기 위하여 일반적으로 널리 사용되는 것이 용접성 로브 곡선이다. 용접성



(a) Secondary dynamic resistance



(b) Primary dynamic resistance

Fig. 3 Comparison of secondary dynamic resistance and primary dynamic resistance

로브 곡선은 용접 전류와 용접 사이클을 각각의 축으로 설정하여 적정 용접 품질을 얻을 수 있는 영역을 도식적으로 표현한 그림이다. 본 연구에서는 Table 1에 제시한 냉연강판에 대한 용접성 로브 곡선을 이용하여 각 조건에 따른 1차 동저항의 변화 특성과 이에 따른 용접성을 관찰하고자 하였다. Fig. 4는 실험에 사용된 강판의 용접성 로브 곡선을 나타낸 것이고, Fig. 5와 Photo 1은 용접성 로브 곡선 평면에서 대표적인 9개의 조건을 선택하여 각 점, (a)-(i)에서의 1차 동저항 패턴과 너겟의 단면 사진이다. 용접성 로브 곡선은 적정 용접 강도를 얻을 수 있는 최소 너겟 지름에 따라 로브 곡선의 왼쪽 경계선을 설정하였으며, 용접시 발생하는 날림 현상을 관찰하여 오른쪽 경계선을 결정하였다. 앞선 연구들에서와 마찬가지로 짧은 용접 사이클 영역에서는 적정 용접을 얻을 수 있는 전류의 범위

가 상대적으로 좁고, 긴 용접 사이클 영역에서는 이 범위가 상대적으로 넓은 것을 알 수 있다.

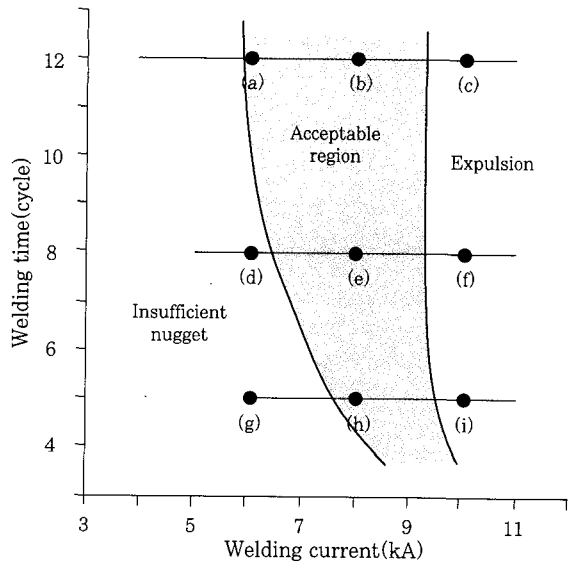


Fig. 4 Weldability lobe curve of plain carbon steel (250kgf, 0.7t)

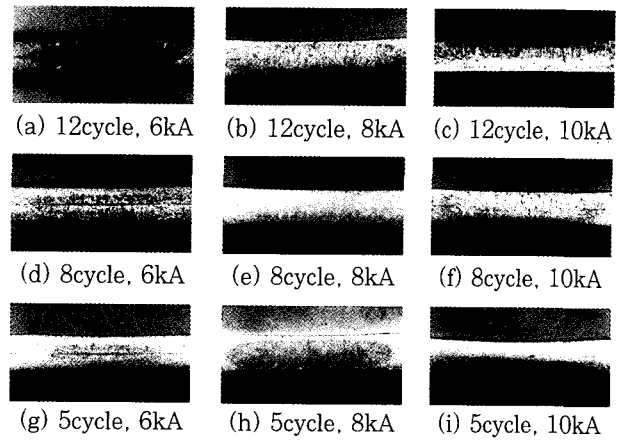


Photo 1. Nugget formation of various welding conditions (plain carbon steel, 250kgf, 0.7t)

먼저, 5 사이클의 용접 시간이 적용된 경우를 보면, 7kA 이하에서는 충분히 너겟이 성장하지 못하여 Photo 1-(g)에서와 같이 판과 판사이의 경계면에서 거의 용융이 이루어지지 않음을 알 수 있다. 그러나

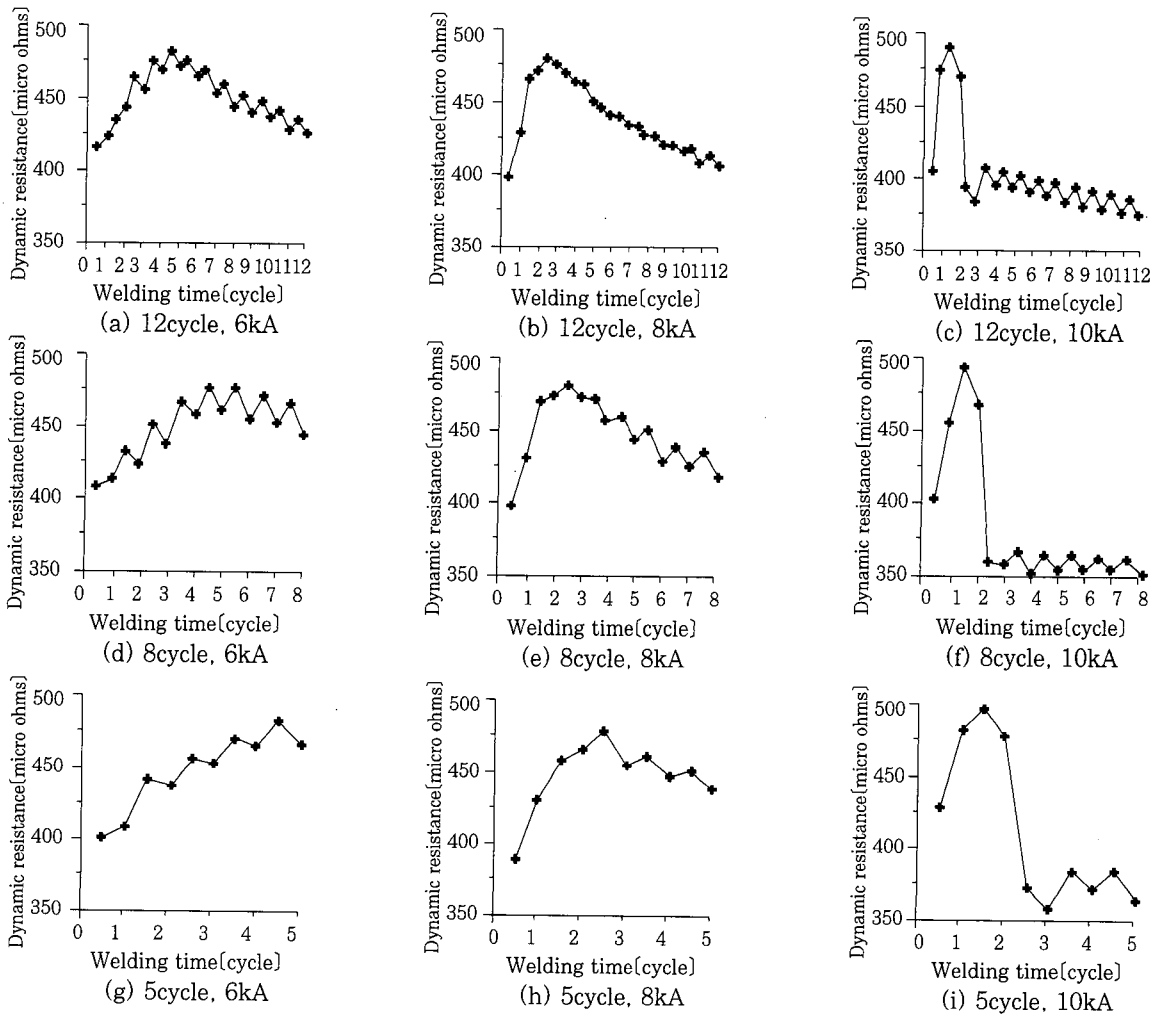


Fig. 5 Primary dynamic resistance patterns corresponding to the weldability lobe curve

8kA의 용접 전류를 가했을 경우, 짧은 용접 시간에도 불구하고 충분한 크기의 너겟이 생성되었다(Photo 1-(h)). 날림이 발생한 9.5kA 이상의 전류가 가해졌을 경우는 너겟의 지름은 좀 더 증가되었으며, 동시에 깊은 오목자국이 생성되었다(Photo 1-(i)). 각 경우에서의 동저항 패턴은 저전류에서 상대적으로 완만한 저항의 증가를 보이다가 전류가 증가함에 따라 저항의 상승 속도가 증가하여 고전류에서는 최대 동저항 이후에 급격한 저항 감소를 보여 날림 현상이 발생하였음을 짐작할 수 있다(Fig. 5(g)-(i)). 이러한 동저항의 변화는 다른 사이클의 용접 조건에서도 유사하게 관찰할 수 있었다. 용접의 초기 단계에서 접촉면의 산화막과 표면의 요철부가 붕괴되면서 초기 최소저항이 관찰된다. 용접 사이클이 진행됨에 따라 용접부의 온도 증가로 인해 저항은 다시 증가하는 경향을 보이기 시작하여 베타 피크(beta-peak)라 불리는 최대값에 도달한다. 너겟의 용융은 베타 피크 이전에 발생하며, 피크점은 용융 너겟의 성장과 기계적인 붕괴에 기인한 저항 감소가 온도 증가에 기인한 저항 상승보다 과다하기 때문에 생기는 것으로 알려져 있다.²⁾

적정 용접 조건이라고 볼 수 있는 8사이클 용접 시간에서의 전류 변화에 따른 동저항 패턴과 너겟의 단면 사진을 살펴보면, 6kA의 경우 Fig. 5-(d)와 같이 완만한 동저항의 증가 속도와 더불어 베타 피크는 관찰되지만, 피크점 이후에 너겟을 성장시킬 충분한 입열 시간이 부족하여 원하는 너겟을 얻을 수 없다(Photo 1-(d)). 그러나 Fig. 5-(e)와 같이 8kA의 용접 전류에서는 충분한 입열에 의한 급격한 동저항의 증가와 베타 피크 이후의 충분한 지속 시간으로 인하여 적절한 크기의 너겟을 얻을 수 있었다(Photo 1-(e)). 10kA의 경우는 5사이클과 마찬가지로 날림에 의한 급격한 동저항의 감소가 관찰되었고 날림 이후에 계속되는 입열로 인하여 좀 더 확대된 크기의 너겟과 오목자국을 관찰할 수 있었다(Photo 1-(f)).

12 사이클의 용접 시간을 적용하였을 경우는 상대적으로 적은 전류에서부터 너겟이 형성되어 보다 넓은 전류 영역에서 적정 너겟이 형성됨을 알 수 있다. 6kA의 용접 조건의 경우, 초기의 저항 증가는 다른 사이클의 경우와 비슷하지만(Fig. 5-(a)), 베타 피크 이후에 너겟 성장에 필요한 충분한 사이클이 유지되었기 때문에 충분한 크기의 너겟을 얻을 수 있다(Photo 1-(a)). 8kA와 10kA의 경우는 8사이클에서 관찰된 패턴과 비슷한 형태로 동저항이 지속되었으며(Fig. 5-(b),(c)), 이에 따라 너겟 크기의 증가를 관찰할 수 있었다(Photo 1-(b),(c)).

용접성 로브 곡선에 따른 동저항을 관찰함으로써 저전류 영역에서는 베타 피크가 관찰된 이후의 용접 시간이 너겟의 성장에 중요한 인자임을 알 수 있었으며, 용접성 로브 곡선의 적정 영역이 용접 사이클이 길어질수록 넓어지는 것도 이러한 원인에 기인한 것으로 보인다. 짧은 용접 사이클 조건에서는 용융이 시작됨을 추측할 수 있는 베타 피크 이후에 너겟을 성장시킬 충분한 시간이 부족하기 때문에 동저항이 빠른 시간내에 베타 피크에 도달하여야 하고, 이 경우 짧은 용접 입열 시간에도 불구하고 일정 크기 이상의 너겟을 형성할 수 있었다. 또한, 중간 날림 현상은 아주 낮은 용접 사이클을 제외하면, 용접 사이클과는 무관하고 용접 전류에만 의존하기 때문에 용접성 로브 곡선의 오른쪽 경계면은 9.5kA에서 거의 수직선 모양을 하고 있음을 알 수 있다.

이상의 연구에 의하여, 저항 점용접기의 1차 회로에서 검출한 동저항 패턴과 저항 점용접의 품질과의 관계를 파악하였고 이러한 관계를 적당한 알고리즘에 적용한다면, 저항 점용접의 용접 품질을 별도의 2차 회로 검출장치 없이 용접기 1차 회로, 즉, T/C에서 실시간적으로 얻을 수 있으며, 용접 불량 발생시 현장에서 즉시 용접 불량을 보완할 수 있는 시스템 개발에 매우 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

5. 결 론

저항 점 용접의 1차 동저항을 계측하여 그 특성을 파악함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 전극 사이 전압 강하의 실효값을 이용하여 동저항을 구하는 방법과 전류의 변화율(dI/dt)이 '0' 인 시간에서 얻은 순시값으로 2차 회로의 동저항을 얻는 방법이 저항 점용접 회로 내에서 발생하는 인덕티브 노이즈를 제거하는 가장 효과적인 두가지 방법임을 알 수 있었다.
2. 용접기 2차측에 별도의 계측 장치 없이 T/C 또는 1차회로의 아날로그 회로만으로 구성된 새로운 동저항 측정 방법이 제시되었다. 인덕티브 노이즈는 전류의 변화율(dI/dt)이 '0' 인 시간에 계측된 순시 전류와 전압에 의해 효과적으로 제거될 수 있었다.
3. 계측된 두 가지 저항을 비교하여, 1차 저항의 정성적 특성은 2차 회로의 그것과 매우 유사함이 밝혀졌으며, 이에 따라 1차 회로에서 검출된 동저항 또한 너겟의 형성과 성장에 관한 중요한 정보를 지니고 있음이 알 수 있었다.
4. 용접성 로브 곡선을 이용하여 1차 동저항의 패턴에

따른 너겟의 형성 거동을 파악하였다. 짧은 용접 사이클에서는 저항의 최대값이 관찰된 후 용융 너겟이 충분히 성장할 수 있는 시간이 상대적으로 부족하기 때문에 적정 용접을 얻을 수 있는 전류의 범위가 상대적으로 좁고, 긴 용접 사이클 영역에서는 이 범위가 상대적으로 넓은 것을 알 수 있었다.

5. 같은 용접 사이클의 경우, 용접 전류가 증가함에 따라 저항의 변화율이 증가하였으며, 단면 사진에 의해, 이러한 저항의 증가율이 용융 너겟의 형성에 중요한 인자임을 알 수 있었다. 또한, 용접 사이클의 증가에 따라 너겟을 포함한 열 영향부의 지름이 증가되기 때문에 저전류에서는 용접 사이클이 용접성 향상에 필요한 중요 인자임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. W. F. Savage, E. F. Nippes and F. A. Wassell : Dynamic Contact Resistance of Series Spot Welds, *Welding Journal*, Vol. 57, No. 2, (1978), pp. 43s-50s
2. D. W. Dickinson, J. E. Franklin, and A. Stanya : Characterization of Spot Welding Behavior by Dynamic Electrical Parameter Monitoring, *Welding Journal*, Vol. 59, No. 6, (1980), pp. 170s-176s
3. 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*, Vol. 66, No. 12, (1987), pp. 378s-385s
4. S. R. Patange, T. Anjaneyulu and G. P. Reddy : Microprocessor-based Resistance Welding Monitor, *Welding Journal*, Vol. 64, No. 12, (1985), pp. 33-38
5. E. W. Kim and T. W. Eagar : Measurement of Transient Temperature Response during Resistance Spot Welding, *Welding Journal*, Vol. 68, No. 8, (1989), pp. 303s-312s
6. 조상명 : 저항용접의 기초원리와 모니터링 결과의 분석, *대한용접학회지*, 제15권, 제2호, (1997), pp. 1-10
7. 최용범, 장희석, 조형석 : 저항 점 용접에서 인공 신경회로망을 이용한 용융부 추정에 관한 연구, *대한기계학회 논문집*, 제 17 권, 제 2 호, (1993) pp. 393-406
8. 조용준, 이세현, 엄기원 : 퍼지 알고리즘을 이용한 저항 점 용접의 실시간 품질 평가 기술 개발에 관한 연구, *대한용접학회지*, 제 16권, 제 5호, (1998), pp. 76-85
9. P. H. Thornton, A. R. Krause and R. G. Davies : Contact Resistances in Spot Welding, *Welding Journal*, Vol. 75, No. 12, (1996), pp. 402s-412s
10. T. Wildi : *Electrical Machines, Drives, and Power System*, 3rd ed., Prentice-Hall, Inc., New Jersey (1997)