

## 용융아연도금 강판 저항 점 용접 시 정전류 및 적응제어 적용에 따른 연속타점 특성 평가 및 고찰

서정철\* · 최일동\*<sup>†</sup> · 손홍래\*\* · 지창욱\*\*\* · 김치호\*\*\* · 서성부\*\*\*\* · 서진석\*\*\*\*\* · 박영도\*\*\*\*\*<sup>†</sup>

\*한국해양대학교 공과대학 재료공학과

\*\*현대자동차 자동화기술부

\*\*\*부산대학교 재료공학과

\*\*\*\*동의대학교 조선해양공학과

\*\*\*\*\*동의대학교 디지털영상공학부

\*\*\*\*\*동의대학교 신소재공학과

### A comparative study of constant current control and adaptive control on electrode life time for resistance spot welding of galvanized steels

Jeong-Chul Seo\*, Il-Dong Choi\*\*<sup>†</sup>, Hong-Rea Son\*\*, Changwook Ji\*\*\*, Chiho Kim\*\*\*, Sung-Bu Suh\*\*\*\*, Jinseok Seo\*\*\*\*\* and Yeong-Do Park\*\*\*\*\*<sup>†</sup>

\*School of Materials Science and Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

\*\*F.A Engineering Department, Hyundai Motor Company, Ulsan, Korea

\*\*\*School of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

\*\*\*\*Dept. of Naval Architecture & Ocean Eng., Dong-eui University, Busan 614-714, Korea

\*\*\*\*\*Division of Digital Contents Technology, Dong-eui University, Busan 614-714, Korea

\*\*\*\*\*Dept. of Advanced Material Engineering, Dong-eui University, Busan 614-714, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author : ypark@deu.ac.kr, ilchoi@kmou.ac.kr

(Received March 10, 2015 ; Accepted April 23, 2015)

#### Abstract

With using adaptive control of the resistance spot welding machine, the advantage on electrode life time for galvanized steels has been addressed. This study was aimed to evaluate the electrode life time of galvanized steels with applying the constant current control and the adaptive control resistance spot welding process for a comparison purpose. The growth in diameter of electrode face was similar for both the constant current and the adaptive control up to 2000 welds. The button diameter was decreased with weld numbers, however, sudden increase in button diameter with use of the adaptive control after 1500 welds was observed. The peak load was continuously decreased with increasing number of welds for both the constant current and the adaptive control. The current compensation during a weld was observed with using the adaptive control after 1800 welds since the  $\beta$ -peak on dynamic resistance curve was detected at later weld time. The current compensation with adaptive control during resistance spot welding enhanced the nugget diameter at the faying interface of steel sheets and improved the penetration to thinner steel sheet.

Key Words : Resistance spot welding, Constant current control, Adaptive control, Electrode life time, Tensile shear strength

### 1. 서 론

최근까지 자동차 차체의 내식성과 내마모성 등의 향상을 위해 강판표면에 표면처리를 실시한 아연도금강판의 사용이 증가하고 있다<sup>1)</sup>. 그러나 자동차 차체 조립 공정의 대부분에 적용되는 저항 점용접 시 아연도금강판의 적용은 비도금 강판과의 가용용접전류 및 용접 전극의 마모 등에 차이가 존재하는 것으로 알려져 있다<sup>2)</sup>. 아연도금강판의 경우 아연 도금층의 존재로 인한 용접 전류 밀도의 하락 및 전기전도도의 향상으로 비도금강판 대비 발열량이 부족하게 되어 비교적 높은 전류조건의 사용이 적용 되고 있다. 이러한 높은 용접 전류로 인한 전극의 열화 그리고 도금층 표면과 전극의 합금화 현상은 저항 점용접에서 전극의 수명을 단축시키는 원인으로 작용한다<sup>3-7)</sup>.

저항 점용접 전극의 연속타점 수명은 자동차 차체 생산 공정 중 용접 품질 및 생산성에 크게 영향을 미치기 때문에 매우 중요한 요소이다. 특히 새롭게 개발된 용융 아연도금강판의 경우 차체 적용 전 반드시 연속타점 수명을 평가하게 되며 특히 지속적인 용접건의 가압과 전극 합금화, 그리고 전극의 열화 현상에 따라 전극 선단 직경이 증가하여 전류밀도 감소의 영향이 있는 것으로 여러 문헌에 보고 된 바 있다<sup>8,9)</sup>. Lee 등은 연속타점 수명을 연장하기 위해 기존의 정전류 (Constant Current) 제어로 설정된 일정량의 전력을 공급하기만 하는 MFDC (Median Frequency DC)용접 시스템 대신 적응제어 용접 시스템을 제안한 바 있다<sup>10)</sup>. 정전류 제어 방식과 달리 적응제어 방식은 용접 작업 시의 용융량의 상태, 전극의 가압, 표면 상태 등에 따른 동저항 변화 패턴을 기억하고 이후 진행되는 용접에 대하여 정상 동저항 패턴과의 차이를 감지 이를 용접전류와 시간으로 보상하므로 고품질의 용접성을 보장하는 것으로 알려져 있다<sup>11)</sup>. 정전류 제어 방식의 경우 용접공정 조건이 과입열로 설정 된 경우 용접품질의 보장이 어렵고 전극의 열화가 매우 빠르게 발생 할 가능성이 높은 반면 적응제어 방식은 동저항 거동에 따른 적절한 전류 및 시간 제어에 따라 과다 입열의 가능성이 낮은 것으로 알려져 있다.

따라서 본 연구에서는 정전류 및 적응제어 방식의 적용에 따른 저항 점용접 전극의 연속타점 수명 비교평가 및 원인 분석을 실시하였다. 특히 용융아연도금 이중강판 조합에서의 연속타점 수에 따른 전단인장강도 및 버튼 과단 시험을 실시하여 연속타점 수명을 확인하였으며, 적응제어 적용에 따른 연속타점 시 변화하는 동저항 거동과 함께 전류 제어 보상 원리를 고찰하였다.

### 2. 실험 방법

#### 2.1 실험재료 및 용접조건

본 실험에 사용된 강판은 약 340 MPa급의 인장강도를 만족하고 1.4 mm 두께의 용융아연도금강판 (SGARC 340E)과 약 270 MPa급의 인장강도를 만족하는 0.7 mm 두께의 용융아연도금 강판(SGACUD P60/60)을 사용하였다. 정전류 제어의 MFDC 용접 시스템을 바탕으로 적응제어 시스템 적용 유무에 따른 결과를 비교 고찰하기 위해 용접기는 동일하게 서보건 (Sevro-gun-HX200-Hi4a) 용접기를 사용하였다. 냉각수의 공급은 9.5 l/min로 동일하게 공급하였으며, 전극 선단 지름 6.0 mm인 돔 형태의 Cu-Cr 전극을 용접 서보건에 동일하게 적용하였다.

본 실험은 계획한 점용접 타점 수까지의 일관성 있는 작업이 매우 중요하므로 연속타점 실험을 위한 지그를 설치하여 강판을 고정된 뒤 점용접 하였고 실험을 위한 설비 사진을 Fig. 1에 나타내었다. 지그에 고정된 강판을 연속 점용접 할 시, 이미 용접된 곳으로 부가된 전류의 일부분이 유실되므로 용접품질이 저하되는 shunt effect를 고려하여 25 mm 간격을 고려하였다<sup>12)</sup>. 위와 같은 반복 작업으로 한 강판 조합에 100타점씩 점용접 하게 되며, 전극의 과도한 열화를 고려하여 5타점마다 3초, 25타점마다 10초씩 휴지시간을 각각 설정하였다. 연속타점 기준은 AWS D 8.9 규격을 적용하여 실시하였다. 전류조건은 중간날림이나 용착이 발생하는 전류보다 200 A 낮은 조건으로 8.0 kA 전류로 설정하였으며, 가압력과 용접시간은 245 kgf 및 12 cycles로 고정 하였고 기타 용접조건들을 Table 1에 나타내었다.

#### 2.2 연속타점 수명 평가

강판조합의 연속타점 수명평가를 위해 1타점 이후

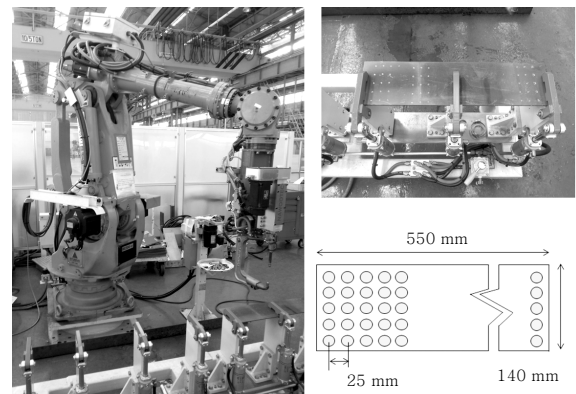
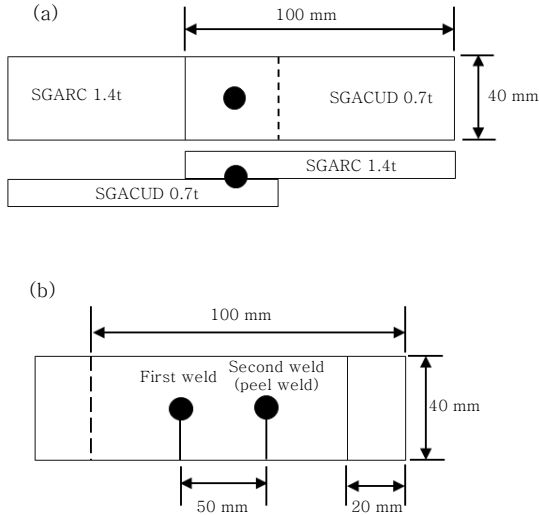


Fig. 1 Resistance spot welding system and jig used for this experiments

**Table 1** Welding parameters used for electrode life test

type	Electrode			Squeeze time (cycle)	Welding current (kA)	Weld time (cycle)	Holding time (cycle)
	Tip diameter (mm)	Force (kgf)	Cooling rate (L/min)				
Constant Current	6	245	9.5	5	8	12	5
Adaptative control							



**Fig. 2** Test coupons dimensions and configuration for (a) tensile test and (b) peel test

100타점 간격으로 전단인장강도 시험 및 버튼 파단 변화 시험을 실시하였으며, 각 시험편은 길이 100 mm, 폭 40 mm의 동일한 규격으로 절단하여 사용하였다. Fig. 2(a)에서 나타난 전단인장시험은 KS규격의 저항 점용접 전단인장 시험편으로 제작하였고 peel test 시험편은 Fig. 2(b)의 AWS 규격으로 제작 하였다. 전극 선단 직경의 변화를 Carbon paper를 이용하여 100타점 간격마다 관찰하기 위해 전극 선단 부의 드레싱과 전극 교체 작업은 제외되었다. 실험 종료 후 연속타점 수에 따른 너깃 형성 거동을 비교 분석하기 위해 용접부 단면을 버튼의 수직방향으로 절단한 후 마운팅하여 연마하고, picric acid 용액에서 수 초간 에칭으로 용접부의 너깃 형상을 실체현미경과 광학현미경을 이용하여 관찰하였다.

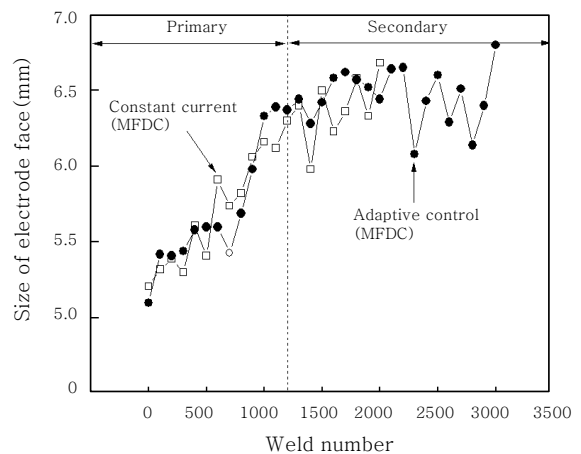
**3. 실험 결과 및 고찰**

**3.1 저항 점용접 연속타점 시 전극 선단 직경 변화**

연속타점 수명은 AWS 규격의 최소 너깃 직경인  $4\sqrt{t}$

기준을 만족하기까지의 점용접 타점수를 의미한다. Boo<sup>11)</sup> 등은 연속타점이 진행 될 때 전극 선단 직경이 증가하는 현상에 의해 전류밀도는 낮아지게 되며, 동일한 조건에서 계속된 용접 시 전류밀도의 감소는 용융부의 발열량 감소와 밀접한 관계가 있다고 보고한 바 있다. 본 연구는 MFDC 용접 시스템을 바탕으로 적응제어의 적용 유무에 따른 연속타점 결과를 비교 고찰하는 것이 목적이므로, 각기 다른 두 조건에서 연속적으로 2000 타점까지의 전극 선단 직경 변화 경향을 관찰하였다. 적응제어를 적용한 경우 2000타점에서 연속 용접 1000 타점을 추가 실시하여 적응제어 적용에 따른 특성 변화를 추가적으로 관찰하였다. 위와 같은 조건에서 연속 용접 시, 상부전극과 하부전극 적용에 따른 전극 선단 직경 차이가 없었으므로 하부전극 선단 직경 변화만을 선정하여 분석 하였다.

Fig. 3은 정전류 제어와 적응제어를 각각 적용했을 때의 연속타점 수에 따른 전극 선단 직경 변화이다. 정전류 제어와 적응제어 두 조건에서 연속 2000타점까지의 전극 선단 직경 성장에는 큰 차이가 없었다. 두 방식 모두 약 1200타점 까지 지속적인 전극의 성장이 발생하는 Primary 영역과 이후 전극성장의 구배가 완만한 Secondary 영역으로 구분이 가능하다. Parker<sup>13)</sup>



**Fig. 3** Comparison of electrode diameter as a function of the weld Numbers for constant current and adaptive control MFDC

등 또한 유사한 결과를 용융아연도금강판의 연속타점 수명 평가에서 보고한 바가 있으며 전극 선단 직경 증가 요인은 크게 전극 재료의 연화 특성과 전극 표면 근처의 온도에 의해 결정된다고 알려져 있다. 전극 표면 근처의 온도는 저항 점용접 시 너깃부의 발열량과 밀접한 관계가 있으며, 특히 정전류 제어의 경우 본 연구에서 과다 입열 용접조건이 아닌 중간날림 발생 직전의 전류를 설정하였다. 따라서 연속타점 수에 따른 전극 선단 직경의 증가가 정전류 제어와 적응제어에서 동일한 경향을 보이는 것으로 사료된다.

앞서 언급한 바와 같이 두 조건에서 모두 동일하게 1200타점 부근까지 전극 선단직경 성장률이 급격히 상승한 후, 이 후 타점부터 감소하였다. 전극 성장은 용접 타점 수에 따라 초반의 급격한 성장이 발생하는 Primary 구간과 이후에 성장 속도가 감소하는 Secondary 구간 그리고 급격한 성장이 발생하는 Ternary 구간으로 나눌 수 있으며, 본 실험의 연속타점 수명평가에서는 최소 너깃 직경 이하의 조건에서 시험을 중단하므로 실질적으로 Ternary의 구간은 관찰되지 않는다. 일반적으로 Primary 구간은 총 전극 성장 크기의 약 50% 수준에서 나타나므로 1200 타점 이내에서 1.0 mm 이상의 전극 선단 직경 성장이 확인되었으며, Secondary 구간에서는 0.4 mm 이내의 전극 선단 직경 성장이 확인되었다. 대부분의 경우 연속타점 수명의 한계는 Secondary 구간에서 발생하는 것으로 알려져 있다<sup>14)</sup>.

적응제어의 경우 약 2000 타점 이후에서는 전극 선단 직경이 일정하거나 오히려 감소되며 또한 선단직경 변화의 범위가 증가하는 현상도 관찰 되었다. 이러한 결과는 연속타점 시 전극의 선단 부분이 가압에 의해 외곽으로 밀려나면서 버섯형태의 모양을 하게 되는데 이를 mushrooming이라고 일컫는다. mushrooming은 연속타점이 진행될수록 강판과의 충격으로 인해 전극 선단부의 합금화층이 축적과 이탈을 반복하여 전극 직경을 불규칙하게 변화시키는데 기인한 것으로 판단된다<sup>8)</sup>. 이러한 현상은 적응제어에서 2000타점 이후 가속화되어, 3000타점까지 폭의 차이가 크게 관찰되는데 그 결과를 3.3장에서 전류 보상의 변화 및 너깃경 변화와 함께 고찰하였다.

### 3.2 연속타점 버튼 직경 및 전단인장강도 변화

정전류 제어와 적응제어 적용 연속타점 수에 따라 용접부 파단 테스트 후 버튼 직경 변화 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 초기 1타점에서 정전류 제어에서 약 0.3 mm 정도 작은 버튼 직경이 확보되었으나 이는 적응제어 적용에 따른 보상의 결과로 사료된다. 판재의 겹침부 조

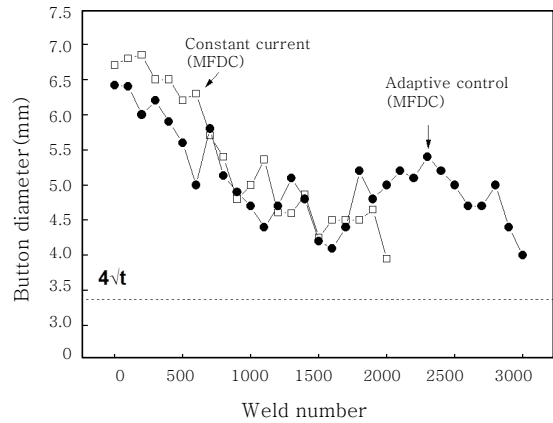
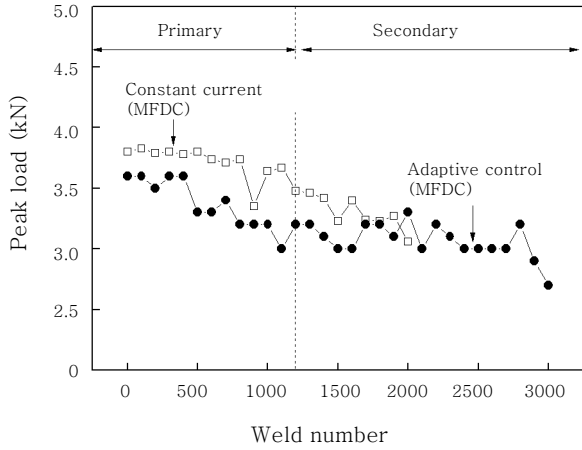


Fig. 4 Comparison of button diameter as a function of the weld numbers for constant current and adaptive control MFDC

건이 미세하게 차이가 존재 할 경우 적응제어 보상은 동정향 측정값에 따라 변하므로 이러한 경향이 초기 연속타점 결과에서 지속 되고 있다. 그러나 이러한 버튼 직경 차이는 최종 용접품질에는 큰 영향이 없는 것으로 판단된다. Fig. 3에서 나타난 결과에 따라 연속타점에 따른 전극 선단 직경이 증가하는 영향에 의해 200타점 이후부터 정전류 제어와 적응제어 모두에서 전류밀도가 감소하며 결과적으로 버튼 직경이 감소하였다. 이러한 현상은 정전류 제어에서 2000타점까지 감소가 지속되는 반면 적응제어의 경우 1600타점까지 감소되었다가 2400타점까지 버튼 직경 오히려 증가한 이후 다시 감소하는 현상이 관찰 되었다. 정전류 제어와 적응제어 두 조건에서 각각 최종타점인 2000 및 3000타점까지 AWS 규격 최소 기준인  $4\sqrt{t}$  이상의 버튼 직경을 만족하였다. 적응제어 방식에서 연속 1600타점까지 감소하던 버튼 직경이 1800타점에서 1.0 mm 이상 증가하여 5.2 mm 의 버튼 직경이 관찰되는 것은 두 가지의 원인에 기인하는 것으로 예상된다. 첫째는 연속타점 진행 과정에서 Mushrooming 현상 발생 후 전극의 합금화 영역의 탈락에 따른 급작스러운 전류 밀도의 상승이며 두 번째는 적응제어 적용에 따른 용접 전류 또는 시간의 보상 결과이다. Fig. 3에서 나타난 전극 직경의 감소폭을 고려 할 때 1.0 mm 이상의 버튼 직경 증가는 현실적으로 어렵다고 판단된다. 따라서 이러한 결과는 적응제어 적용에 따른 전류 세기 보상 영향으로 사료되며 동정향 거동에 따른 전류 제어 변화를 3.3 장에 함께 자세히 고찰하였다.

점용접 부 전단인장강도는 소재특성, 용접조건, 기하학적 특성 및 하중조건 등의 매우 다양한 조건들에 의하여 결정되기 때문에 상관관계를 도출하는 것이 매우 복잡한 영향에 기인하는 것으로 알려져 있다<sup>15)</sup>. 일반



**Fig. 5** Comparison of peak load as a function of the weld numbers for constant current and adaptive control MFDC

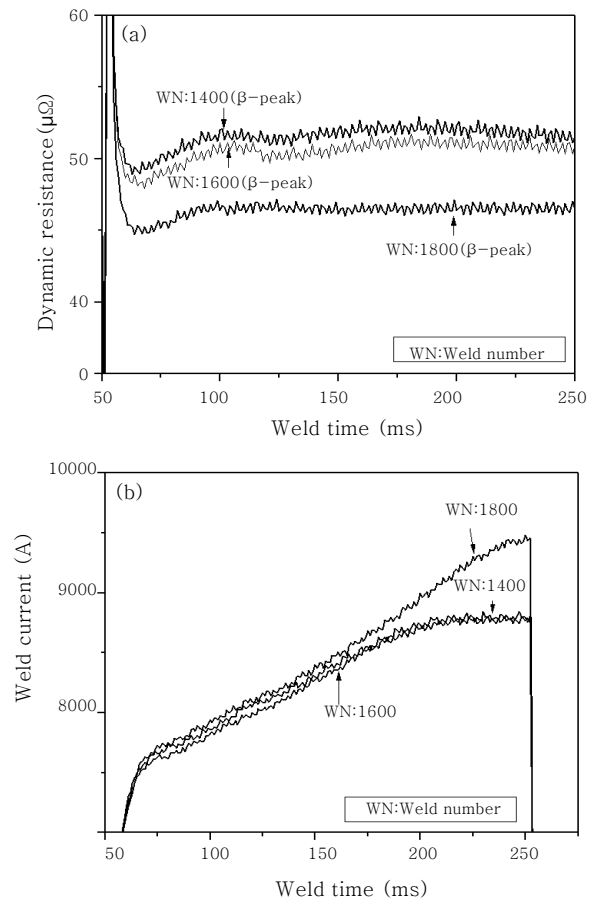
적으로 점용접부 전단인장강도는 점용접부 소성변형 후 최대파단 하중 (Peak Load) 이상에서 형성되므로 파단시험 후 버튼 직경과 밀접한 관계가 있다. 앞선 연속타점 수에 따른 버튼 직경 변화 결과에서 타점 수가 증가할수록 버튼 직경의 감소가 확인되었으므로 전단인장강도 또한 유사한 거동을 보일 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 5는 정전류 제어와 적응제어 각각의 연속타점 수에 따른 전단인장강도 변화를 나타내었다. 정전류 제어 및 적응제어 모두 연속타점수의 증가에 따라 전단인장강도는 지속적으로 감소하였다. 그러나 적응제어의 경우 연속타점수에 따른 전단인장강도의 감소율이 다소 낮은 것으로 판단된다. 정전류 제어의 경우 초기 1타점에서 전단인장강도가 3.80 kN 확보 이후 타점 수가 2000타점까지 증가할수록 지속적으로 3.06 kN까지 감소하였다. 적응제어의 경우 초기 1타점에서 정전류 제어 대비 0.2 kN 낮은 3.6 kN의 전단인장강도 값을 가지며, 이는 적응제어 보상 알고리즘에 따른 차이로 판단된다. 이러한 전단인장강도 값의 차이는 약 1500 타점까지 지속되었다. 그러나 두 제어 방식 모두 KS 규격의 전단인장강도 기준값은<sup>15)</sup> 만족 하므로 용접성 측면의 문제는 없다고 사료된다. 추가적인 현상으로 적응제어의 경우 1500타점 부근까지 전단인장강도의 감소가 지속되다가, 이후 3000타점까지 3.0 kN 보다 높거나 낮은 값의 결과가 관찰 되었다. 이는 Fig. 4에서 관찰된 점용접부 버튼직경의 변화 거동과 거의 일치하고 있으므로 앞서 언급된 버튼직경과 전단인장강도의 상관관계가 유효한 것으로 사료된다. Fig. 3에서 관찰된 전극 선단 직경 변화의 결과에서 확인할 수 있듯이 연속타점 초기 전극 선단 직경의 급격한 성장이 이루어지는 Primary 구간까지 전단인장강도 기울기가 급격히

감소하였으며 이후 전극 선단 직경의 성장 속도가 감소하는 Secondary 구간에서 전단인장강도 감소 기울기가 완만한 것 또한 확인되었다.

### 3.3 동저항 거동에 따른 전류 제어 변화

상부 및 하부 용접전극 사이에 존재하는 계면저항 및 모재저항에 의한 발열은 최종적으로 저항 점용접부 너겟직경 및 전단인장 강도에 직접적인 영향을 미친다. 저항점용접 통전 과정에서 발생하는 모재저항과 접촉저항의 변화는 용접시간에 따라 변하며 이를 일반적으로 동저항 (Dynamic Resistance)이라 한다<sup>16)</sup>. 동저항과 용접 너겟 생성은 직접적인 상관관계에 있다. 특히 적응제어 방식의 경우 동저항 변화에 따른 보상을 기준으로 하고 있어 측정된 동저항 값의 변화를 통해 보상이 크게 달라지기도 한다. Fig. 6(a)에 일반적인 동저항 곡선을 삽입하였다.  $\beta$ -peak 라는 극점은 접촉면의 요철부가 사라지면서 전류가 통전 될 수 있는 접촉 면적이 증가하고, 용접부의 저항이 감소함과 동시에 접촉부



**Fig. 6** The changes in (a) dynamic resistance and (b) weld current with weld time using adaptive control for weld number of 1400, 1600 and 1800, respectively

의 온도 상승으로 인한 비저항이 증가하므로 이에 따라 두 가지 저항 변화가 평형을 이룬 점이다. 따라서  $\beta$ -peak에서 발열량은 최대가 되며 너깃 형성 거동에 가장 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구에 적용된 적응제어 방식은 용접 과정에서  $\beta$ -peak가 감지된 용접시간까지 지속적으로 용접전류를 상승시키는 전류 제어 보상을 알고리즘으로 구성 되어 있다. 따라서  $\beta$ -peak의 형성이 용접시간 후반으로 이동 할수록 용접전류의 상승치가 증가함을 의미한다. 앞선 적응제어 방식의 경우 버튼직경과 전단인장강도가 1500타점 이후 정전류 제어와는 다른 거동을 보였으며 이는 연속타점에 따른 적응제어의 보상 및 동저항  $\beta$ -peak와 상관관계가 있을 것으로 사료된다.

Fig. 6(a)에 적응제어를 적용 1400, 1600 및 1800 타점을 실시하였을 때 각각의 동저항 곡형을 나타내었다. Fig. 4의 결과에서 1600타점까지 연속타점 수에 따라 버튼 직경이 4.1 mm 까지 감소되었다가 1800타점에서 5.2 mm 의 버튼 직경으로 1 mm 가 증가한 각각의 타점수 동저항들을 추출하였다. 1800 타점에서의 전체적인 동저항의 감소는 점용접부 발열량의 감소의 결과로 귀결 될 것으로 예측되나 이러한 현상은 연속타점 과정에서 발생한 외부 인자의 영향으로 사료되어 본 연구 결과에 미치는 영향은 미미 할 것으로 생각된다. 동저항 곡선의 전체적인 변화 측면에서 볼 때 1400타점과 1600타점에서의  $\beta$ -peak는 100 ms 부근에서 관찰되나, 1800타점에서의  $\beta$ -peak는 100 ms 이후 200 ms에서  $\beta$ -peak 가 관찰된다. 이러한 결과는 전극 열화 또는 합금화 현상의 급격한 진행에 따른 판재와의 접촉면적 증가 영향으로 전류밀도가 감소되어 발열량의 극점인  $\beta$ -peak 가 다소 후반부에서 형성 된 것으로 사료된다. 이러한 동저항 거동의 차이를 고려하여 동일한 타점에서의 용접시간에 따른 전류 제어 보상 상승치를 1400, 1600 및 1800 타점 각각에 대하여 Fig. 6(b)에 정리 하였다. 용접시간에 따른  $\beta$ -peak의 위치 차이에 따라 전류 제어 보상 상승치에 차이가 있으며 앞선 동저항 거동 분석 결과에 따라 최대 발열량 즉,  $\beta$ -peak가 1400, 1600타점보다 100 ms 더 이후에 나타난 1800 타점 수에서 전류 세기 상승 (약 700 A)이 가장 높은 것이 관찰된다. 적응제어 방식의 경우 이러한 외부 환경 변화 즉, 전극 선단 직경 변화에 따른 동저항 신호를 감지하여 전류 세기를 제어함을 알 수 있으며 이러한 보상의 결과로 1500타점 이후에서도 버튼 직경 및 전단인장강도가 오히려 상승하거나 유사한 값을 유지하는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 적응제어 방식의 시간 보상은 정전류

제어와의 직접적인 비교를 위하여 적용하지 않았다. 적응제어의 시간보상이 함께 적용 될 경우를 예상 하면 기존 정전류 제어 보다 버튼 직경 및 전단인장강도 확보 측면에서는 유리할 것으로 사료된다.

### 3.4 저항 점용접 연속타점 시 너깃 형상 거동 비교

2000 타점 이후의 용접 시 정전류 제어와 적응제어 적용 차이에 따른 너깃형성 거동을 매크로 이미지로 Fig. 7에 각각 비교하였다. 정전류 제어의 경우 2000 타점의 용접부 단면에서 최대 너깃직경 (너깃직경 'A')은 약 3.88 mm로 측정 되었고 적응제어와 비교할 때 큰 차이가 없었다. 그러나 두 판재의 접합 계면에서의 너깃 직경 (너깃직경 'B'; 이하 유효 너깃경 칭함)은 거의 관찰되지 않았다. 즉, 2000 타점까지 점용접이 진행 되면서 전극 선단 직경의 증가에 따른 전류 밀도의 감소에 따라 상부판재의 일부는 용융이 가능하였으나 상부 및 하부판재의 계면에서의 용융이 발생하기에는 발열량이 부족하였음을 알 수 있다. 구체적인 원인으로 하부 강판 SGACUD (0.7t) 판재가 상부판재 대비 모재저항이 낮기 때문에 충분한 발열이 확보 되지 않을 경우 용입이 부족하게 된다. 이러한 원인 때문에 정전류 제어의 2000 타점에서 버튼 직경이 4.0 mm 에 미치지 못하며 이에 따른 전단인장 강도 또한 최소값을 보인 것으로 판단된다. 매크로 너깃 단면 이미지에서는 두 판재 간 계면에서의 용융이 거의 존재하지 않는 것으로 보이나 고온 압접 또는 열영향부에 의한 효과에 기인하여 최소한의 버튼 직경과 전단인장 강도의 확보는 가능 하였을 것으로 사료된다. 그러나 실제 차체 조립라인에서의 용접 환경을 고려하고 차체 충돌을 고려할 때 용접 불량으로 판정되며 따라서 최종적으로 유효 너깃경은 확보되지 않은 것으로 판단하였다. 이에 반해 적응제어의 경우 2000 타점에서도  $4\sqrt{t}$  이상의 그리고 2500 타점까지 약 3.0 mm 이상의 유효 너깃경이 확보 되었다.

연속타점 전체에 대한 너깃직경 'A'와 'B'를 정전류 제어와 적응제어에 대하여 비교하여 각각 Fig. 8 (a)와 (b)에 나타내었다. 두 제어 방식 모두에서 연속 타점에 따른 너깃 직경은 감소하였다. 이러한 현상의 주 원인으로서는 연속타점이 진행 될수록 전극 선단 직경이 증가하는 mushrooming 현상에 의해 전류밀도는 낮아지게 되며, 전류밀도의 감소는 식(1)에 의해 증명된다.

$$Q = I^2 \left( \frac{\rho L}{A} \right) T \quad (1)$$

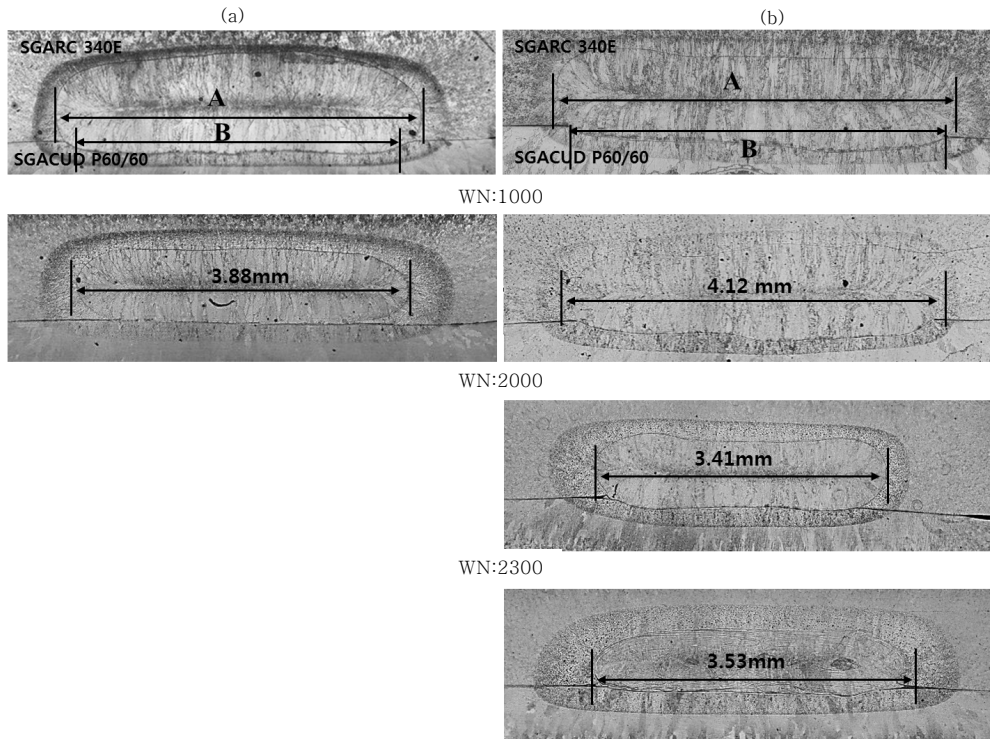


Fig. 7 Comparison of macro images of nugget formation between (a) constant current and (b) adaptive control MFDC

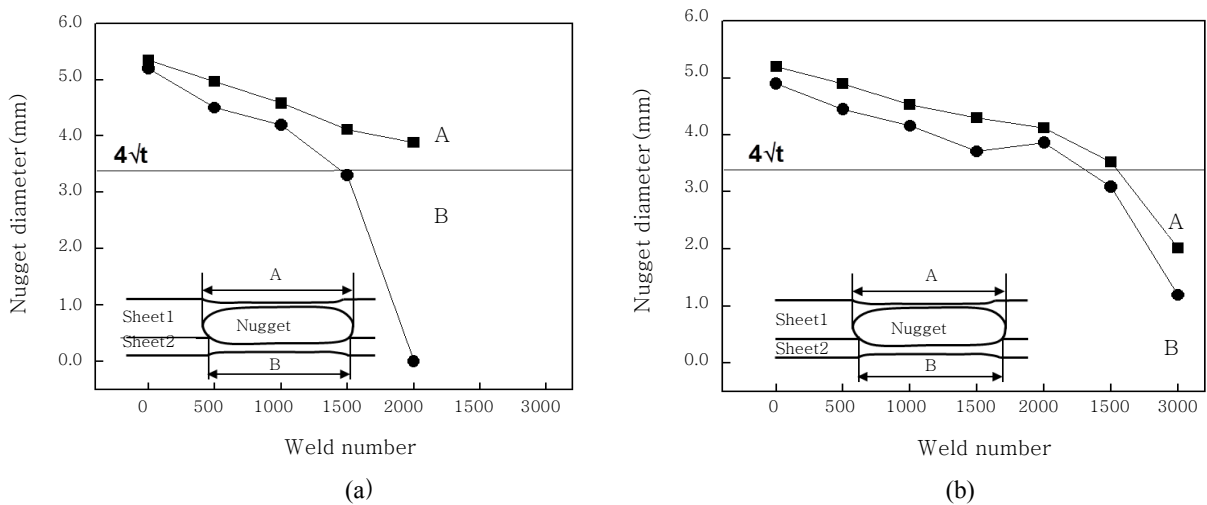


Fig. 8 Comparison of nugget diameter as a function of the weld numbers on (a) constant current and (b) adaptive control MFDC

여기서 발열량(Q)은 전류의 제곱에 비례하고, 통전시간 (T)에 비례한다. 본 실험에서 통전시간(T)은 15 cycle 로 고정하였으므로 전류값( $I^2$ )과 저항값( $\frac{\rho L}{A}$ )만이 발 열량(Q)에 영향을 미치게 된다. 저항( $\frac{\rho L}{A}$ )의 경우 도 체 비저항( $\rho$ ) 및 길이(L)에 비례하는 반면, 단면적(A)에 반비례하는 관계를 가진다. 따라서 연속타점에 의한

전극 선단 직경 증가로 인해 전류가 흐르는 단면적이 커질수록 전류효율이 감소되기 때문에 동일한 전류로 용접할 경우 발열량(Q) 및 너겟 직경이 감소한다<sup>17)</sup>.

Fig. 8 (a)와 (b)를 비교할 때 정전류 제어의 초기 1타점에서 너겟 직경은 5.35 mm 이고 적응제어의 1타 점 너겟 직경 (5.2 mm) 대비 0.15 mm 크기 때문에 앞서 언급한 버튼 직경 및 전단인장강도 차이와 유사한

결과이다. 연속 2000타점 후 정전류 제어와 적응제어의 너깃 직경은 각각 3.88 mm 와 4.12 mm 로 감소하였다. 정전류 제어의 경우, 최종타점인 2000타점에서 초기 너깃 직경보다 1.42 mm 감소한 3.88 mm 의 너깃 직경이 관찰되었다. 너깃 성장 거동의 정확한 분석을 위하여 적응제어와 정전류제어에 대하여 연속타점 수에 따른 너깃직경 'A'와 너깃직경 'B'를 분리하여 고찰 하였다. 정전류 제어 및 적응제어 모두 1500타점까지는 너깃직경 'A'가 유사하거나 적응제어의 너깃 직경이 약간 큰 경향을 보인다. 정전류 제어의 경우 2000 타점 이후의 실험결과가 없어 직접적인 비교는 어려우나 벌크저항에 기인한 최대 너깃경의 크기 감소는 지속적으로 발생하여 적응제어의 값과는 큰 차이가 없을 것으로 예상 된다. 적응제어의 경우는 3000 타점에서 너깃직경 'A'가 급격히 감소하였다. 너깃직경 'B' (유효너깃직경)의 경우 정전류 제어의 1000 타점부터 급격한 감소 현상이 보이며 2000 타점에서는 유효너깃 직경이 거의 0에 가까웠다. 이에 반하여 적응제어 방식의 유효너깃직경은 2500 타점 근방까지  $4\sqrt{t}$ 의 크기로 확보가 가능하였다. 따라서 너깃직경 'A' (최대너깃직경)는 정전류 제어 및 적응제어에서 유사하다고 하여도 계면에서의 유효너깃직경의 차이는 분명히 존재하며 특히 계면에서의 하부판재 방향으로의 용입 발생 유무가 최종적으로 점용접부 버튼 직경 및 전단인장 강도 상승의 주원인으로 파악되었다.

#### 4. 결 론

용융이연도금 강판 사용 시 정전류 제어와 적응제어 적용에 따른 연속타점 특성 비교 연구를 한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 정전류 제어와 적응제어 두 조건에서 연속타점 수에 따른 전극 선단 직경의 성장에 큰 차이가 없었다. 각 조건에서 동일하게 1200타점까지 급격한 전극 선단 직경이 성장한 Primary 구간과 이 후 타점부터 전극 선단 직경이 균일한 Secondary 구간이 관찰되었다. 적응제어의 경우 2000타점 이후에서 전극 선단 직경의 변화가 불규칙 하였다.

2) 정전류 제어와 적응제어 모두 연속타점 수에 따른 버튼 직경의 감소가 1500타점까지 지속적으로 발생한다. 적응제어의 경우 버튼직경이 1600타점까지 감소되었다가 2400타점까지 오히려 증가한 이후 다시 감소하는 현상이 관찰 되며, 이러한 결과는 적응제어 적용에 따른 전류 세기 보상 영향으로 사료된다.

3) 연속타점 수에 따른 전단인장 강도의 감소가 정전류 제어의 경우, 최종 2000타점까지 지속적으로 발생하나 적응제어에서는 1500타점 부근까지 전단인장강도의 감소가 후 3000타점까지 3.0 kN 보다 높거나 낮은 불규칙적 거동을 보인다. 이는 점용접부 버튼직경의 변화 거동과 거의 일치하고 있으므로 앞서 버튼직경과 전단인장강도의 상관관계가 유효한 것으로 사료된다.

4) 적응제어의 경우 연속타점 과정에서 용접시간에 따른  $\beta$ -peak의 위치 차이에 따라 전류 제어 보상이 적용 되었으며, 동저항 거동 차이에 따른 보상으로 1800 타점 수에서 전류 세기 상승이 발생하였다.

5) 점용접부 단면의 최대 너깃직경이 정전류 제어 및 적응제어에서 유사하다고 하여도 계면에서의 유효너깃 직경의 차이는 분명히 존재하며, 이는 적응제어의 적용에 따른 전류 보상 결과로 계면에서의 하부판재 방향으로의 용입이 향상 되었으며, 최종적으로 점용접부 버튼 직경 및 전단인장 강도 상승의 주원인으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2014년 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2014H1C1A1073088)

#### References

1. J. Zou, Q. Zhao, and Z. Chen : Surface modified long-life electrode for resistance spot welding of Zn-coated steel, *J. Mater Proc Tech.* 209 (2009), 4141- 4146
2. S. S. Park, S. M. Lee, Y. J. Cho, N. H. Kang, J. H. Yu, Y. S. Kim, and Y. D. Park : Evaluation of Resistance Spot Weld Interfacial Fractures in Tensile-Shear Tests of TRIP 590 Steels, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* 46(10) (2008), 672-682
3. S. S. Park, Y. M. Choi, D. G. Nam, Y. S. Kim, J. H. Yu, Y. D. Park : A Comparison of Spot Weldability with Electrode Force Changes in Surface Roughness Textured Steel, *J. KWJS.* 26(2) (2008), 75-84 (in Korean)
4. S.A. GEDEON, T.W. EAGAR : Resistance Spot Welding of Galvanized Steel:Part II. Mechanisms of Spot Weld Nugget Formation, *Metallurgical Transactions B*, 17 (1986), 887-901
5. J.W Son, Y.D Park, M.J Kang, D.C. Kim : A Comparative Study of Single-Phase AC and Inverter DC on Electrode Life for Resistance Spot Welded Electrogalvanized Steel Sheets, *J. Kor. Inst. Met. & Mater* 47(12) (2009), 834-841
6. N. Harlin, T.B. Jones, J.D. Parker : Weld growth mechanism of resistance spot welds in zinc coated steel, *Journal of Materials Processing Technology* 143-144 (2003), 448-453



7. Wu Zhisheng, Shan Ping, Lian Jinrui, Hu Shengsun : Effect of deep cryogenic treatment on electrode life and microstructure for spot welding hot dip galvanized steel, *Materials and Design* 24(8) (2003), 687-692
8. J.W Son, J.D Seo, D.C Kim, Y.D Park : Effect of Coating Layer on Electrode Life for Resistance Spot Welding of Al-Coated HPF and Zn-Coated Trip Steels, *Corrosion Science and Technology*, 11(1) (2012), 29-36
9. X.Q. Zhang, G.L. Chen, Y.S. Zhang : Characteristics of electrode wear in resistance spot welding dual-phase steels, *Materials & Design*, 29(1) (2008), 279-283
10. Y.K. Lee : Adaptive Regulators for Quality Assurance in Resistance Welding, *Proceeding of KWJS fall meeting* (2009), 119-119 (In Korean)
11. M. Batista, S. D. Brandi : Use Of Dynamic Resistance And Dynamic Energy To Compare Two Resistance Spot Welding Equipments For Automotive Industry In Zinc Coated And Uncoated Sheets, *American Journal of Engineering Research*, 02 (2013), 79-93
12. K.S. Boo, H.S. Cho, S.J.Na : A study on the shunt effect in resistance spot welding, *Korean society for precision engineering*, 3(2) (1986), 39-54
13. N.T. Williams, and J. D. Parker : Review of resistance spot welding of steel sheets part 2 factors influencing electrode life, *Int. Mater. Rev.*, 49(2) (2004), 77-108
14. Jiho Lim : Prediction of Tensile Shear and Cross Tension Strengths for Spot Welds of Automotive Steel Sheets, *The Korean Society of Automotive Engineers*, 11 (2010), 2760-2765
15. KS B 0850 : Method of inspection for spot weld, 4-6
16. K.H Kim, N.H Kang, Y.D Park : Evaluation on Resistance Spot Weldability and Nugget Formation of Surface Roughness Treated Steel Sheet, *J. KWJS*, 26(5) (2008), 79-89
17. D. S. Choi, D. C. Kim and M. J. Kang, Resistance spot welding characteristics of Mg alloy using process tape, *J. KWJS*, 31(3) (2013), 49-53 (in Korean)