

표면조도 특성에 따른 저항 점 용접성 평가 및 너깃 형성 고찰

김기홍* · 최영민** · 김영석*** · 임영목**** · 유지훈**** · 강남현***** · 박영도*

*동의대학교 신소재공학과

**POSCO 기술연구소 자동차 소재연구그룹

***한국생산기술연구원

****한국기계연구원

*****부산대학교 재료공학과

Evaluation on Resistance Spot Weldability and Nugget Formation of Surface Roughness Treated Steel Sheet

Ki-Hong Kim*, Yung-Min Choi**, Young-Seok Kim***, Young-Mok Rhym*****,
Ji-Hun Yu*****, Nam-Hyun Kang***** and Yeong-Do Park*

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

**Automotive Steel Products Research Group, Technical Research Labs., POSCO, Gwangyang 545-090, Korea

***Korea Institute of Industrial Technology, Jisa 618-230, Korea

****Korea Institute of Materials Science, Changwon 641-010, Korea

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

*Corresponding author : ypark@deu.ac.kr

(Received July 9, 2008 ; Revised August 18, 2008 ; Accepted October 6, 2008)

Abstract

With the increased use of surface textured steel sheet in body-in-white assembly, resistance spot weldability of these steels is considered to be an important subject. This study evaluated nugget formation and weldability by measuring dynamic resistance with various weld pressure, current, and weld time for steel sheet with two different surface roughnesses. The surface roughness for T-H steel ($R_a=1.79 \mu\text{m}$) was higher than that for T-L steel ($R_a=1.33 \mu\text{m}$), and resulted in increased contact resistance and heating for T-H steel spot welding. Therefore, at low weld current and weld cycle ranges, the T-H steel showed better weldability over the T-L steel. The evaluations of weld interface showed that the fusion zone in the T-H steel sheet was continuous in contrast to discontinuous fusion zone for T-L steel sheet at the same welding conditions. A comparison of dynamic resistance and tensile-shear strength (TSS) between T-H and T-L steel sheet suggested that high surface roughness provided larger heating at early cycle of welding and larger TSS.

Key Words : Resistance spot welding, Weld nugget, Surface roughness, Dynamic resistance, Cold rolled steel sheet

1. 서 론

냉연강판은 거의 모든 산업에 걸쳐 사용되고 있으며, 최근에는 냉연강판에 아연이나 아연합금 등의 표면처리를 적용한 도금강판의 수요가 급증하고 있다.

이러한 냉연 및 도금강판은 가공기술의 발전으로 가공과단의 경우는 점차 감소되고 있으나, 도장 후의 도장면 불량, 선형성에 관한 문제점은 여전히 지적되고 있다. 이러한 문제는 강판의 표면조도와 밀접한 관련을 가지고 있기 때문에 표면조도 관리의 정밀도가 점차적으로 중요시 되고 있다. 따라서 최근에 자

동차용 소재로 표면조도처리 강판이 개발되었으며, 이 강판은 표면의 내마모성이 우수하고, 가공성, 도장 후의 밀착성 및 선형성이 향상되는 장점이 있다. 이러한 표면조도처리 강판의 표면조도는 물에 Shot Blast, Laser, Electron Beam, Electro Discharge texturing 등의 방법으로 조도를 부여하여 1% 정도의 압하율을 주는 조질압연(skin pass or temper rolling)공정에 의해서 강판표면에 전사시킨다. 표면조도 처리된 강판은 가공성 및 표면외관이 우수하며, 평균표면조도가 증가할수록 표면에 윤활유가 균일하게 도포되어 딥 드로잉 마찰계수가 감소하는 것으로 보고되고 있다. 이러한 표면조도처리 강판은 주로 자동차 차체에 적용되지만, 차체 용접 공정에서 가장 많이 적용되는 저항 점 용접에 관한 연구가 부족한 실정이다¹⁾.

저항 점 용접의 원리는 압력을 가한 상태에서 통전 전 금속간 계면의 접촉면에서 발생하는 접촉저항과 통전 시 금속의 고유저항에 의한 발열로 접합이 이루어진다. 초기 통전 전에 존재하는 접촉저항은 두 피용접재 사이의 전기저항으로서 온도가 상승하면 소멸한다. 이때 온도상승에 따라 피용접재의 고유저항이 증가하게 되고, 이러한 저항증가에 기인하여 온도는 급상승하게 된다²⁾. 특히 용접전극들 사이에 존재하는 계면저항 및 모재저항에 의한 발열은 최종적으로 용접성에 영향을 미친다. 재료의 전기저항은 온도 의존적이며, 시간에 따라 변하게 되는데 이러한 현상을 일반적으로 동저항(Dynamic Resistance)이라고 한다³⁾. Kaiser 등은 점 용접 시 너깃 형성에 대한 동저항의 영향을 분석을 통해, 통전초기에는 접촉저항이 고유저항에 비해 상대적으로 발열에 영향을 주며 용접이 진행되면서 온도상승으로 인한 고유저항의 영향이 증가하는 것으로 보고하였다⁴⁾. 따라서 본 연구에서는 동저항 분석을 통해 접촉저항에 따른 초기 발열량 변화를 관찰하여 용접성을 평가하였다. 동저항은 초기 접촉저항과는 달리 용접시간 진행에 따라 변화하는 너깃의 형성 정보를 지니고 있는 인자이기 때문에 동저항 분석 결과를 적절히 활용하면 용접부의 실시간 용접 품질 예측도 가능하다⁵⁻⁶⁾.

표면조도처리 강판의 초기 연구 결과에서 연속타점 용접성은 표면조도가 높은 강판의 용접성이 표면조도가 낮은 강판보다 열위한 것으로 나타났다⁷⁾. 그러나 표면조도처리 강판에서 표면조도 차이에 따른 단일타점 용접성 평가는 규명되지 않았다. 따라서, 본 연구에서는 표면조도처리 강판의 점 용접시 동저항 분석을 활용하여 표면조도에 따른 접합부의 버튼직경 및 인장전단강도와 너깃 형성 과정의 차이를 비교하고자 한다.

2. 실험방법

본 연구에서는 AC 단상 공압정치식(75 kVA)을 사용하였다. 전극은 6 mm 직경의 Cu-Cr재 Dome type을 사용하였으며, 냉각수는 8 ℓ/min로 일정하게 공급되었다.

2.1 사용재료

0.7 mm 두께의 냉연강판에 Precision Texturing 방법으로 표면조도를 부여한 T강판에서 조질압연물의 크기에 따라 표면조도가 낮은 L과 표면조도가 높은 H로 나누어 각각 T-L강판, T-H강판으로 분류하였다. 실험에 사용된 강판의 화학조성과 기계적 특성을 Table 1, 2에 나타내었다.

2.2 로브곡선 및 용접조건

T-L과 T-H강판의 로브곡선은 고정 가압력 250 kgf에서 전류와 시간을 변화시켜 도출하였다. 로브곡선에서의 하한곡선은 peel test에 의해 측정된 버튼 크기를 이용하여 최소버튼직경을 $5\sqrt{t}$ 로 적용하였고, 상한곡선은 중간날림이 발생한 조건으로 용접부 주변의 날림 흔적을 관찰하여 판별하였다.

점 용접에서 가장 중요한 용접변수는 전류, 가압력 그리고 통전시간이므로, 본 연구에서는 전류, 가압력, 통전시간을 각각 9~11 kA, 150~400 kgf, 2~13 cycle로 변화시켜 용접을 실시하였다.

2.3 표면조도 및 접촉저항 측정

표면조도 측정은 Wyko DMEMS NT3300 장비를 이용하여 비접촉 모드에서 0.55 배율로 압연방향(0°), 수직방향(90°) 그리고 45° 방향의 평균값을 3차원 형상으로 측정하여 강판의 평균조도(R_a)를 분석하였다.

Table 1 Chemical composition of surface roughness textured cold-rolled steel sheet(unit : wt%)

	C	Si	Mn	P	Ti (ppm)	Ni	Mo	B (ppm)
Chemical compositions	0.002	0.06	0.51	0.047	•	•	•	5

Table 2 Mechanical properties of surface roughness textured cold-rolled steel sheet

	Yield strength (kgf/mm ²)	Tensile strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)
Mechanical properties	16.7	26.3	45

접촉저항 측정은 특허번호 10-0685015의 접촉저항 시험법에 의해 측정하였다. 접촉저항 측정 시 프로브에 15.5 mm 직경의 평평한 Cu합금 전극을 상하부에 설치하여 가압력 3 kg/cm², 전류 10 A로 적용하였고, 통전 시 발생한 전압 값을 이용하여 저항을 측정하였다. 이 때 측정된 저항은 전극과 모재의 고유저항 및 전극과 판재, 판재와 판재 사이의 계면 저항을 모두 합한 값으로 나타내어진다.

2.4 동저항 측정

동저항 측정은 Monitech사의 WSM-2000N 모니터링 시스템을 사용하였고, Hall센서와 전압측정 장치를 이용하여 계측하였다. 그리고 계측된 전류와 전압 파형에서 1 cycle단위로 평균동저항을 측정하였다.

2.5 용접너깃 형성 관찰

용접후 단면을 절단하여 연마 후 3% nital로 에칭하였고, 광학현미경을 이용하여 용접너깃을 관찰 하였다. 그리고 관찰 된 너깃 용융부의 접합계면을 분석하여 표면조도 차이에 따른 너깃 형성 및 성장을 비교분석하였다.

2.6 SPCC강판의 표면조도 측정과 동저항 분석

표면조도처리 강판에서 표면조도에 따른 용접성 차이를 분석하기 위해 1 mm 두께의 SPCC강판에 인위적으로 표면조도를 부여하여 용접을 실시하였다. SPCC 강판에 각각 #400과 #1000 SiC paper를 이용하여 표면연마를 실시하였다. 그리고 표면조도 처리된 SPCC 강판은 표면조도 측정기를 이용하여 각각의 표면조도를 측정하였고, 점 용접을 실시하여 표면조도에 따른 동저항을 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 표면조도에 따른 접촉저항

Fig. 1은 3차원 표면조도 측정기를 이용하여 T-L과 T-H강판의 표면조도를 측정한 결과이다. T-L강판의 표면조도는 1.33 μm 인 반면, T-H강판의 평균표면조도는 1.79 μm 로 T-H강판의 표면조도가 0.46 μm 높게 나타났다. T-L강판에서는 표면조도가 낮고 균일하게 형성 된 반면, T-H강판에서는 부분적으로 높은 표면조도구간이 관찰되었다. 그리고 T-L강판과 T-H강판 모두에서의 표면조도는 압연방향(0°)의 경우 수직방향

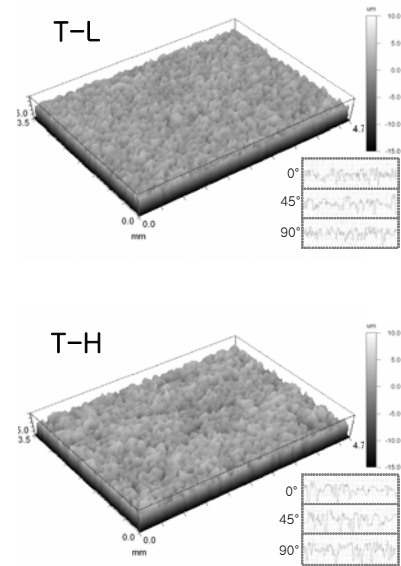


Fig. 1 Surface roughness of T-L and T-H steel sheets 0°, 45° and 90° directions

(90°)보다 약 10 μm 정도 높게 형성되었다. 방향에 따른 표면조도의 차이는 표면조도처리 시 압연 방향과 상관관계가 있을 것으로 사료된다.

각각의 강판에 대한 접촉저항의 측정결과 T-L강판은 0.87 m Ω , T-H강판은 1.14 m Ω 으로 T-H강판의 접촉저항이 0.27 m Ω 높게 나타났다. 실험에 사용된 판재의 화학조성과 기계적 성질이 동일하고, 표면조도의 차이만 존재하므로 이러한 접촉저항의 차이는 표면조도의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 점 용접공정에서 접촉저항은 전극과 판재의 접촉저항(Interface resistance)과 판재와 판재의 접촉저항(Faying surface resistance)으로 분류되는데, 일반적으로 전극과 판재의 접촉저항보다 판재와 판재의 접촉저항이 더 큰 것으로 보고되고 있다⁸⁾. 표면조도 차이에 기인한 접촉저항은 점 용접 시 초기발열에 큰 영향을 미치게 되고, 초기발열량 증가는 용접부 너깃 형성에 기여하므로 최종적으로 용접부의 접합품질에 영향을 미친다. 그러나 이러한 초기발열의 증가는 용접너깃 형성 과정에서 급격한 용융을 야기시켜 중간날림 발생의 가능성이 존재 할 것으로 사료된다.

3.2 T-L과 T-H 강판의 로브곡선 비교

표면조도처리 강판의 적정 용접조건을 얻기 위해 로브곡선을 작성하여 Fig. 2에 나타내었다. T-L과 T-H 강판의 로브곡선에서 용접시간이 10 cycle 이상일 때에는 적정용접전류 범위가 유사하지만, 용접시간이 10

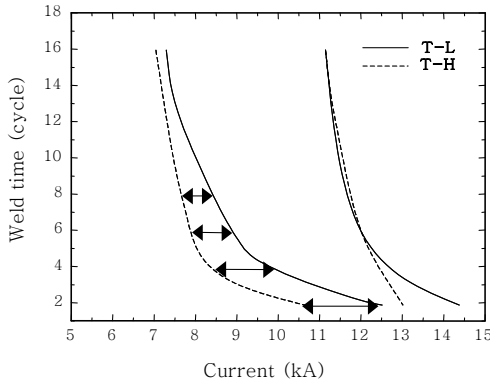


Fig. 2 Weld lobe diagram of T-L and T-H steel sheets. Electrode force was hold at 250kgf for all welding condition

cycle 미만일 때에는 T-L강판보다 T-H강판의 적정전류 범위가 더 넓은 것이 관찰 되었다. T-L과 T-H 강판의 적정용접 범위 차이는 8 cycle 에서 0.5 kA, 6 cycle 에서 1 kA 그리고 4 cycle 에서 1.5 kA로 용접시간이 감소함에 따라 적정용접 범위의 차이가 증가하는 것을 관찰하였다. 그리고 하한곡선에서 동일한 용접 시간을 적용 할 경우 T-H강판은 더 낮은 용접전류인 8 ~ 9 kA에서도 $5\sqrt{t}$ 이상의 버튼직경을 보이지만, T-L강판은 계면과단 혹은 버튼직경이 $5\sqrt{t}$ 미만으로 나타난다. T-H강판의 용접 시 저전류 조건에서 용접이 가능하다는 것은 모재 혹은 계면의 저항에 따른 발열이 높다는 것을 의미한다. T-L과 T-H강판의 모재 저항은 동일하며, T-H강판의 표면조도와 접촉저항이 T-L강판에 비해 더 크기 때문에 발열이 증가하여 저전류 조건에서도 양호한 용접성을 보이는 것으로 판단된다. 한편 상한곡선의 중간날림 경계에서는 용접시간 4 cycle 이하의 범위를 제외하고는 서로 유사한 전류조건을 나타내었다. 중간날림은 높은 전류에 의한 과도한 발열이 발생 한 것으로서 전류 값에 의한 영향이 크며, 높은 전류조건에서는 0.4 μm 수준의 표면조도 차이에 기인한 발열 차이에는 접촉저항의 영향이 크지 않을 것으로 사료된다.

3.3 전류변화에 따른 동저항

용접시간에 따른 동저항 변화는 접촉저항과 발열에 영향을 미치며, 최종적으로 용접부의 접합강도를 변화시킨다. Cho 등은⁹⁾ 동저항 변화와 용접품질간의 상관관계를 통계적 방법으로 분석하여 몇 가지 인자들로 분류 하였으며, 이를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서 α -peak는 초기통전 시 판재의 소성변형에 따른 최소 동저항이고, 동저항의 최대값 β -peak(R_{max})는 너깃 생성

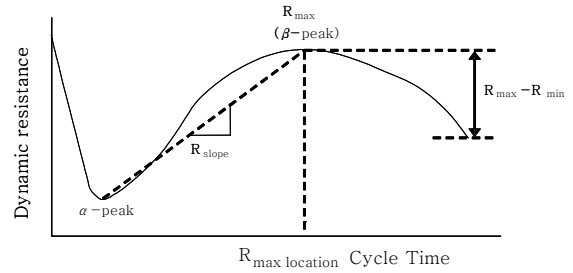


Fig. 3 Analysis of the geometrical parameters for dynamic resistance which represent characteristics of resistance during spot welding⁹⁾

과정에서 나타나는 동저항의 최대값을 의미하며, β -peak의 위치($R_{\text{max location}}$)는 너깃의 생성 시점을 나타낸다. 그리고 동저항 상승기울기(R_{slope})와 동저항의 최대/최소값 차이($R_{\text{max}}-R_{\text{min}}$)는 각각 너깃의 생성 및 성장 속도와 관련된다. 이 외에도 더 많은 기하학적인 인자들이 있으나 위 5가지의 인자들이 저항 점 용접성에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

Fig. 4는 가압력 250 kgf, 통전시간 13 cycle에서 전류조건을 9~11 kA로 변화시켜 용접 하였을 때 T-L과 T-H강판의 동저항 변화를 나타낸 것이다. 전류가 증가함에 따라 T-L과 T-H강판 모두에서 α -peak의 감소가 관찰되었다. 전류에 따른 발열의 증가는 접합계면의 온도 상승과 함께 접촉저항을 감소시키는 것으로 해석된다. 그리고, 통전 전류값이 9 kA에서 10 kA, 11 kA로 증가함에 따라 β -peak가 3 cycle에서 2 cycle로 이동하였다. 그러나 T-H강판과 T-L강판의 표면조도차이에 따른 동저항 변화는 모든 전류조건에서 유사한 형태로 나타났다. 이러한 원인은 동일한 용접시간 조건에서 발열량에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 전류 이므로, 높은 전류의 용접조건에서는 표면조도에 따른 접촉저항의 차이가 발열에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 마찬가지로 로브곡선의 상한곡선 결과에서도, 높은 전류조건에서는 서로 유사한 경향을 보이며, 표면조도의 영향이 크지 않은 것으로 관찰 되었다 (Fig. 2).

3.4 가압력 변화에 따른 동저항

점 용접공정에서 전극 가압 시 전극과 판재 그리고 판재와 판재의 접촉부에 존재하는 표면부의 미세한 요철이 소성변형을 시작한다. 그러나 가압이 진행되면서 판재 접촉부의 소성변형에 의한 접촉면적은 증가하다가 일정 한계치에 이르면 더 이상 증가하지 않고, 가압력

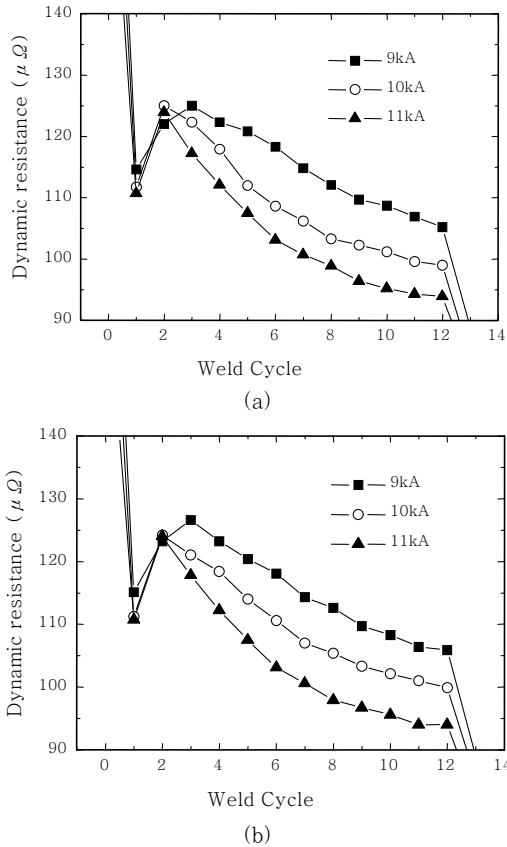


Fig. 4 Dynamic resistance of (a) T-L and (b) T-H steel sheets with current changes from 9kA to 11kA. (weld force : 250kgf, weld time : 13cycle)

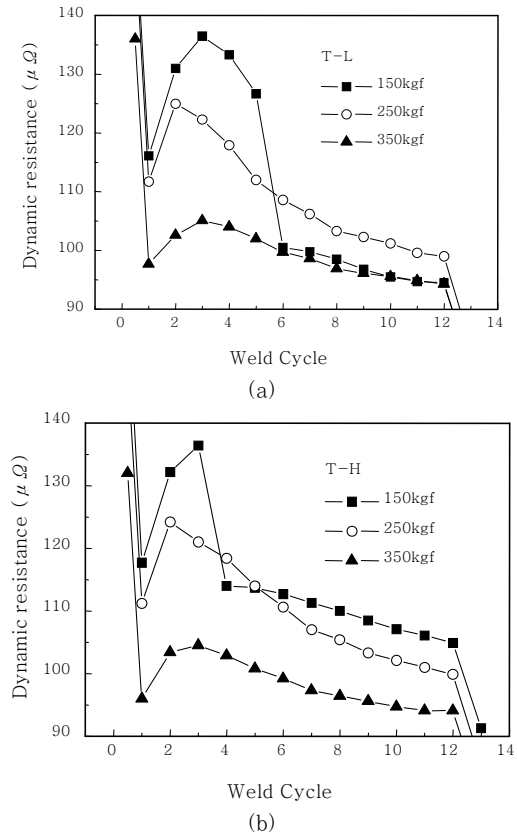


Fig. 5 Dynamic resistance of (a) T-L and (b) T-H steel sheets with weld force changes from 150kgf to 350kgf. (weld current : 10kA, weld time : 13cycle)

을 감소시키더라도 변형 된 부분이 다시 회복되진 않는다. 따라서 점 용접에서의 접촉저항은 이러한 소성변형 정도에 의해 큰 영향을 받으므로 전극 가압력과 밀접한 관련이 있다. 높은 가압력의 경우 판재 접촉부의 소성 변형이 크며 접촉면적은 증가한다. 이러한 접촉면적의 증가에 따라 접촉저항의 감소와 함께 전류밀도 또한 감소되어 용접부의 발열량 감소로 귀결된다. 여기서 접촉 면적과 접촉저항, 전류밀도의 상관관계를 살펴보면 접촉면적은 접촉저항과 전류밀도에 반비례하며, 접촉저항과 전류밀도는 서로 비례하는 것을 알 수 있다. 이러한 이유로 표면조도처리가 되지 않은 일반 냉연강판에 비해 표면조도처리 강판에서는 가압력에 의한 영향이 크게 작용 할 것으로 사료된다.

Fig. 5는 전류 10 kA와 통전시간 13 cycle에서 가압력을 150 kgf부터 400 kgf까지 50 kgf 단위로 변화시켜 동저항을 모니터링한 결과이다. 가압력 변화에 따른 T-L (Fig. 5a)과 T-H(Fig. 5b)강판의 동저항 관찰 결과에서는 가압력이 감소함에 따라 α -peak는 상

승한다. 이러한 결과는 가압력이 감소함에 따라 접촉저항이 증가함을 의미하고, 가압력의 변화는 용접부의 초기발열에 영향이 있음을 보여준다. 또한 가압력이 증가함에 따라 β -peak (R_{max})는 감소하며, 이는 전체적인 발열이 감소 했음을 의미한다. 그러나 낮은 가압력에서 발생하는 급격한 발열은 중간날림을 발생시키며, 동저항 계측에서도 날림현상을 판별할 수 있는 저항의 급격한 감소가 관찰되었다. 그리고 T-L강판은 6 cycle에서 중간날림이 발생한 반면 T-H강판은 4 cycle에서 중간날림이 발생하였고, 이러한 결과는 T-H강판의 발열이 더 크다는 것을 의미한다. 반대로 가압력이 증가 할 경우 접촉저항이 낮아져 용접부 발열이 감소되며 최종적으로 용접부의 품질이 저하된다. Song 등의 연구에서도, 점 용접 시 가압력이 증가하면 동저항 곡선의 기울기가 완만해지고, 온도 변화가 적으며, 발열량이 감소한다고 보고하였다¹⁰⁾. 이는 가압력이 증가함에 따라 판재표면의 요철에 소성변형이 쉽게 일어나 접촉면적이 증가하고, 표면의 박막저항(film resistance)이 넓은 범위에 걸쳐 제거 되기 때문에 저항의 변화가 감소하

는 것이다.

Fig. 6(a)와 (b)의 결과에서 가압력이 증가함에 따라 T-L과 T-H강판의 버튼직경과 인장전단강도가 감소하였고, 150 kgf 가압력에서는 모재의 날림에 의해 인장전단강도와 버튼직경이 감소하는 것으로 판단된다. 그리고 400 kgf의 가압력에서는 인장전단강도와 버튼직경이 유사한 값으로 나타났다. 이것은 가압력이 일정한계치인 400 kgf에 이르면 높은 가압력에 의해 표면조도가 거의 소멸되어 T-L과 T-H강판의 접촉저항에 차이가 사라지는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 가압력에 따른 T-L과 T-H강판의 동저항 거동을 Fig. 3에 설명된 α -peak와 β -peak(R_{max}), R_{slope} , 그리고 $R_{max}-R_{min}$ 에 대하여 나타내었다. T-L과 T-H강판을 비교한 결과에서 표면조도의 영향은 관찰되지 않았으나, 가압력이 증가할수록 α -peak와 β -peak(R_{max}), R_{slope} , $R_{max}-R_{min}$ 이 모두 감소하는 것으로 관찰되었다. Fig.7(a)와 (b)에서 가압력 증가에 따른 α -peak의 감소는 접촉저항의 감소를 의미하고, β -peak(R_{max})의 감소는 너깃 생성에 필요한 최대 발열량

이 감소하는 것으로 해석된다. 그리고 Fig. 7(c)와 (d)에서 가압력 증가에 따른 R_{slope} 와 $R_{max}-R_{min}$ 의 감소는 각각 너깃의 생성 및 성장속도가 감소하는 것을 의미한다. 결국 Fig. 6과 Fig. 7의 결과를 종합해보면 접합강도(TSS)는 동저항 패턴의 기하학적 인자들과 상관성이 있음을 알 수 있다.

그리고 Fig. 7의 가압력 200 kgf ~ 300 kgf 구간에서는 동저항 패턴의 기하학적 인자들이 가압력에 무관하게 일정한 값을 가지는 것으로 관찰되었다. 200 kgf와 300 kgf의 전극 가압력 구간에서 소성 변형에 따른 모재의 표면조도 감소가 크지 않기 때문에 판단된다.

위의 실험결과로부터 (Fig. 4) 250 kgf의 가압력에서 높은 전류 조건인 9 kA~11 kA 구간의 경우 표면조도 크기에 따른 동저항의 변화가 유사한 형태로 관찰되어 용접성에 대한 표면조도의 영향을 명확히 판단하기에 어려움이 있다. 따라서 13 cycle의 용접시간 조건에서 가압력을 200 kgf로 전류를 7 kA와 8 kA로 각각 감소시켜 표면조도의 영향을 관찰하였고 측정된 동저항 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 낮은 전류조건인 7 kA와 8 kA에서 T-L과 T-H강판의 동저항을 비교한 결과, T-H강판의 α -peak와 β -peak가 모두 높게 나타났다. 그리고 전류 증가에 따른 T-L강판의 α -peak는 유사한 값을 가지나, T-H강판의 α -peak는 큰 폭으로 감소하는 것을 관찰하였다. α -peak가 감소하는 것은 판재 표면의 소성변형에 기인하는 것으로 전류가 증가함에 따라 판재 표면의 요철 부에서 연화현상(softening)이 발생하여 소성변형이 증가하기 때문이다. 200 kgf 가압력에서 표면조도가 낮은 T-L강판은 전류가 증가함에 따라 판재 표면의 소성변형이 일정하지만, T-H강판은 전류 증가에 따라 소성변형도 증가하여 α -peak가 큰 폭으로 감소한 것으로 판단된다. 하지만 Fig. 6의 가압력 증가에 따른 동저항 결과와 마찬가지로, 일정한 가압력에서 전류가 계속 증가할 경우 연화현상에 의해 표면조도가 거의 소멸되어 T-L과 T-H강판의 α -peak는 큰 변화가 없을 것으로 사료된다. 이는 Fig. 4의 결과에서 관찰되었듯이 적정용접조건 범위 내에서는 표면조도의 영향이 관찰되지 않은 것과 동일한 결과이다.

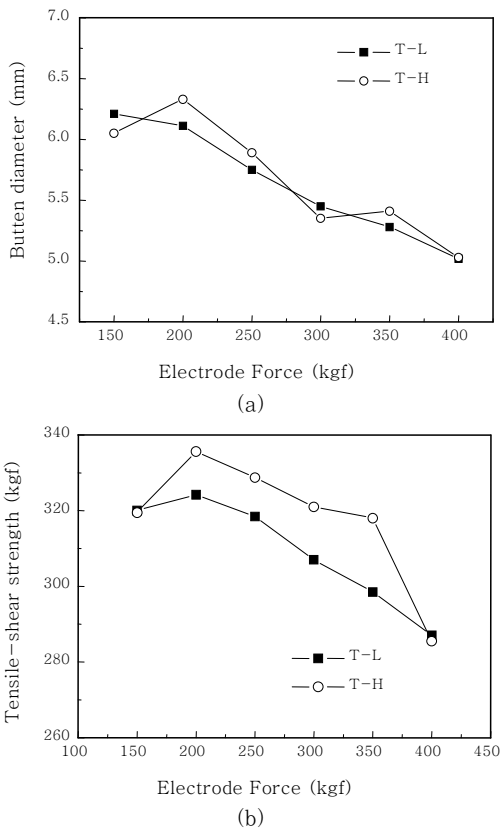


Fig. 6 Comparison of (a) button diameter and (b) tensile shear strength for T-L and T-H steel sheets with electrode force changes from 150kgf to 400kgf. (weld current : 10kA, weld time : 13cycle)

3.5 통전시간 변화에 따른 동저항

앞서 실험한 로브곡선 결과와 전류변화에 따른 동저항 결과에서는 높은 전류(9~11 kA)와 일정 통전시간(10~16 cycle) 이상의 조건에서 점 용접 시 표면조도

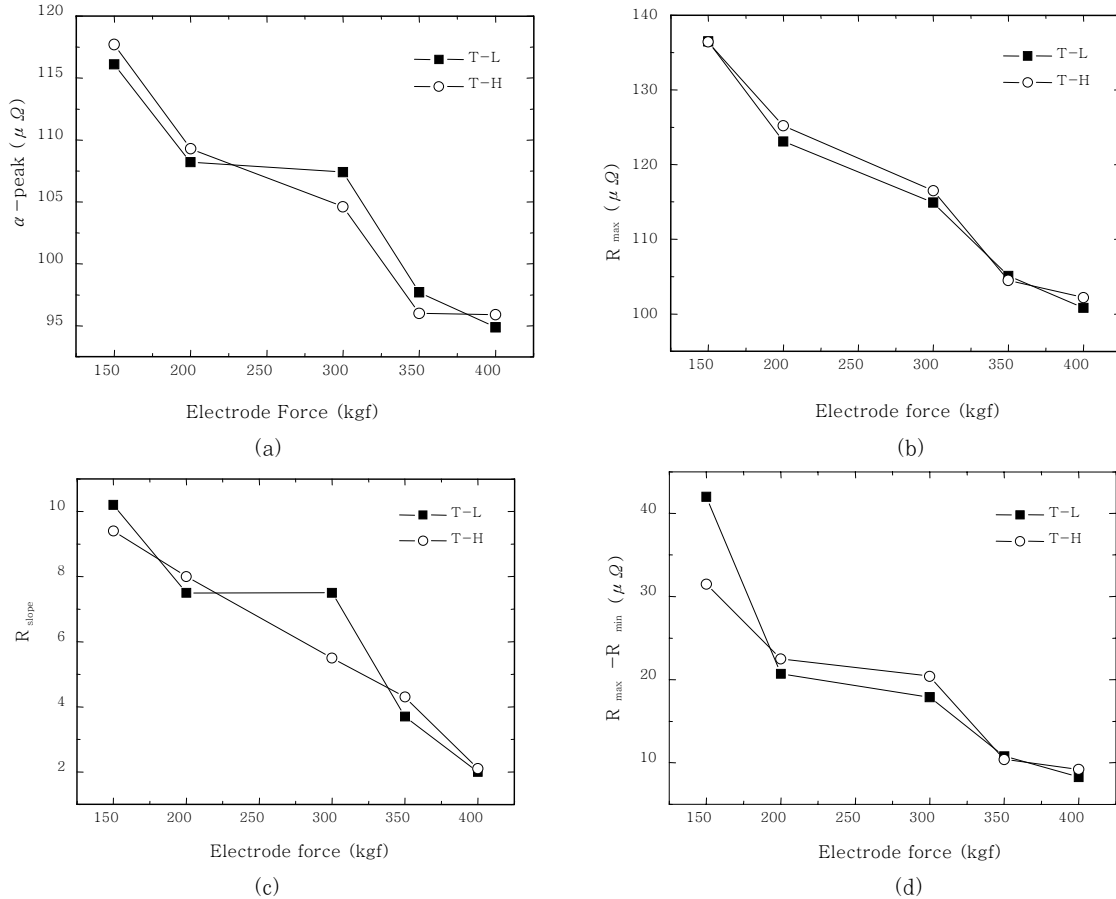


Fig. 7 Analysis of geometrical factors of dynamic resistance for T-L and T-H steel sheets with weld force changes from 150kgf to 400kgf; (a) α -peak resistance, (b) R_{max} (β -peak) resistance, (c) R_{slope} , (d) $R_{max} - R_{min}$. (weld current : 10kA, weld time : 13cycle)

의 영향이 크지 않음을 알 수 있었다. 양호한 용접품질 을 확보하기 위해서는 로브곡선의 적정용접범위 내의 조건에서 대부분 용접이 이루어지지만, 실제 점 용접을

이용한 생산 공정에서는 최적 용접품질을 확보할 수 있는 최소 전류와 용접시간이 중요시 되고 있다. 따라서 본 연구에서는 8 kA의 전류조건과 10 cycle 이하의 짧은 통전시간에서 표면조도의 차이가 점 용접성에 미치는 영향에 대한 실험을 진행하였다.

Fig. 9는 가압력 250 kgf과 전류 8 kA에서 통전시간을 3~6 cycle로 변화시켜 점 용접하였을 때 T-L과 T-H강판의 동저항 변화를 나타낸 것이다. 모든 통전시간 조건에서 높은 표면조도를 가진 T-H강판은 T-L강판보다 더 높은 α -peak와 β -peak를 가진다. 이러한 원인은 주울의 발열식(식1)에서 알 수 있듯이 낮은 전류와 짧은 용접시간일 경우 통전전류와 시간이 발열에 미치는 영향은 감소하고, 접촉저항이 발열에 미치는 영향이 증가한다. 즉, 식(1)에서 모든 인자가 일정할 경우 표면조도 차이에 따른 R_C 의 변화가 발열량 변화의 주요 인자가 된다.

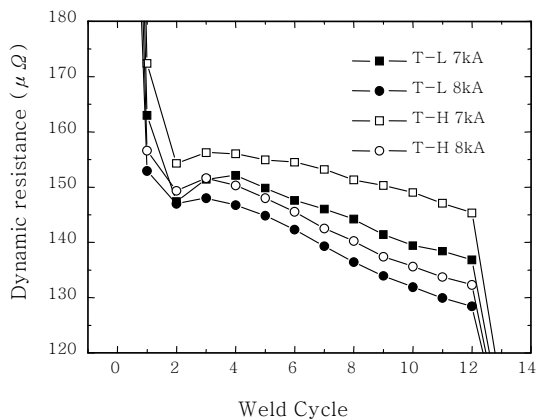


Fig. 8 Dynamic resistance of T-L and T-H steel sheets with weld current changes from 7kA to 8kA. (weld force : 200kgf, weld time : 13cycle)

$$Q = I^2 \cdot (R_B + R_C) \cdot t \tag{1}$$

여기서 Q 는 발열량(J), I 는 통전전류(kA), R_B 는 모재 저항(Ω), R_C 는 접촉저항(Ω), t 는 용접시간(cycle)이다.

통전시간에 따른 용융부의 접합상태 변화를 Fig.10에 나타내었다. 접합부를 관찰한 결과 T-L과 T-H강판의 용융부에서 미세한 차이가 관찰되었다. T-H강판은 판재의 모든 접촉계면에서 용융이 일어난 반면, 표면조도가 낮은 T-L강판은 접촉저항이 높은 부분에서만 부

분적 용융이 일어나는 것으로 관찰되었다. 이는 낮은 전류, 짧은 통전시간에서 T-H강판의 경우 높은 표면조도에 의한 국부적인 접촉부에서 급격한 전류밀도 상승에 따른 발열의 증가가 원인으로 사료된다. 그리고 Fig. 10의 3 cycle과 4 cycle 용접조직에서 삼각형으로 표기된 부분은 미접합부를 나타내는 것으로 T-L강판의 낮은 표면조도에 기인하여 용융에 필요한 발열이 충분하지 않았기 때문에 사료된다. 이러한 미접합부 형성기구를 도식화 하여 Fig.11에 나타내었다. 모식도에서 T-H강판의 용접계면은 높은 접촉저항에 의해 발열이 증가하여 전체적으로 균일한 용융이 발생할 수 있으며, T-L강판은 낮은 표면조도에 따른 불충분한 발열로 인하여 부분적인 접합불량이 발생할 수 있음을 보여준다.

Fig. 12는 T-H강판을 전류 10 kA에서 통전시간 2 cycle부터 6 cycle까지 변화시켜 점 용접한 부분의 Macro 조직 사진이다. T-H강판의 경우 통전시간 2 cycle에서 4 cycle까지는 너깃의 용융부 면적이 급격히 증가하지만 4 cycle이후에는 용융부 면적의 증가가 관찰되지 않았다. Gould등의 연구결과에 따르면 점 용접시 통전초기에 판재와 판재계면에 발생하는 열의 온도가 용융점의 90%에 이른다고 보고하였다. 통전초기에

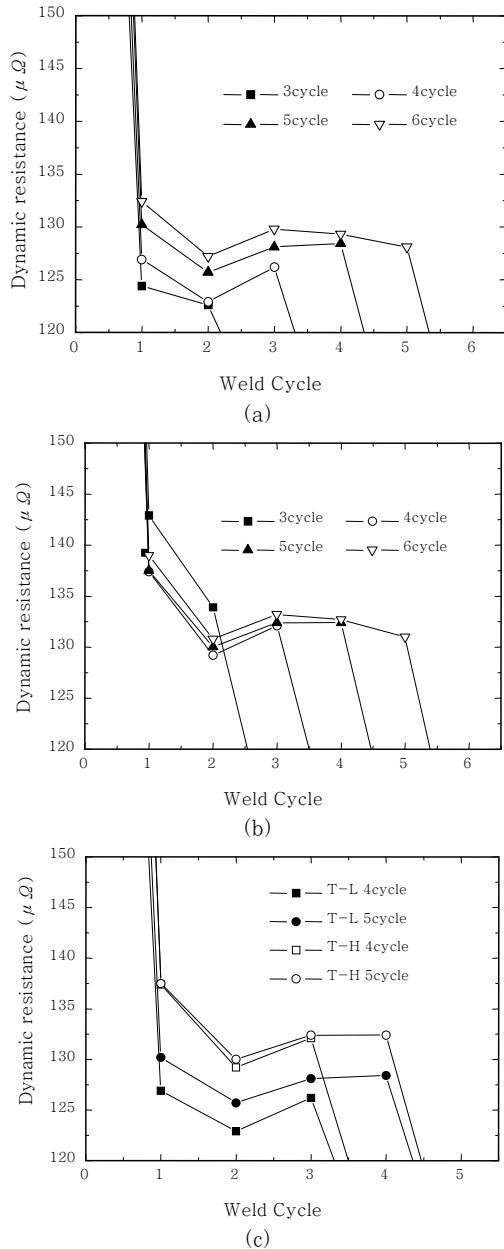


Fig. 9 Dynamic resistance of (a) T-L and (b) T-H steel sheets with weld time changes from 3cycle to 6cycle, and (c) comparison of dynamic resistance of T-L and T-H steel sheets at low weld cycles. (weld force : 250kgf, weld current : 8kA)

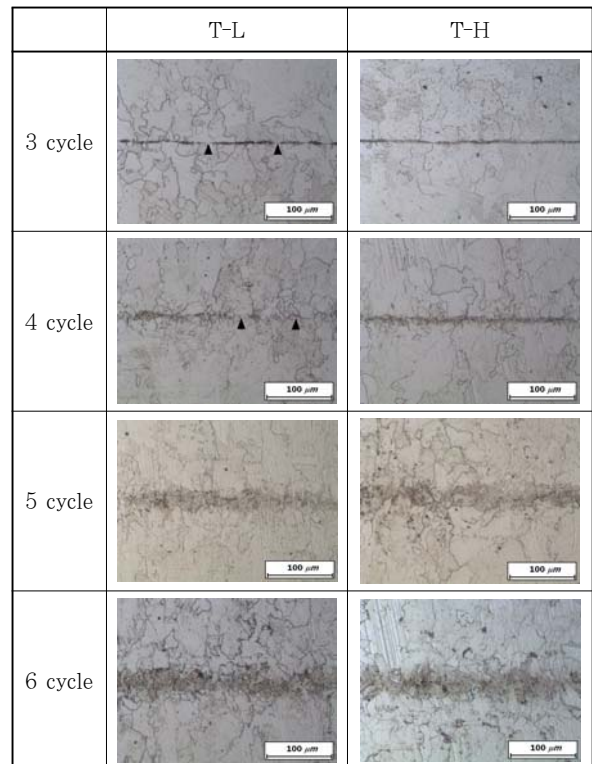


Fig. 10 Microstructure at fusion zone near interface of T-L and T-H steel sheets with weld time changes from 3cycle to 6cycle

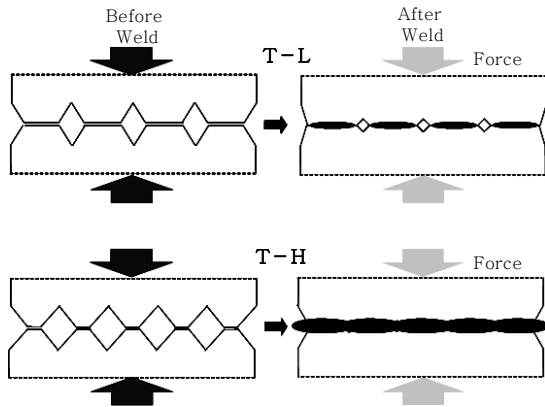


Fig. 11 Schematic drawings of comparison in fusion zone between T-L and T-H steel sheets with same welding conditions

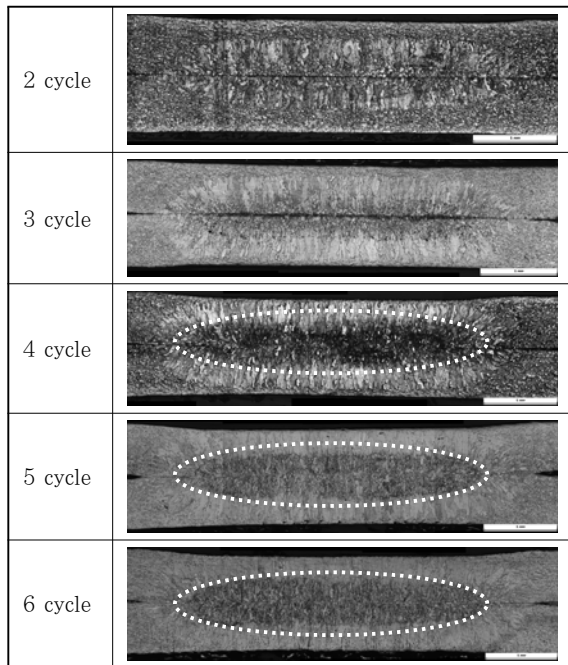


Fig. 12 Macro photographs of resistance spot welds for T-H steel with changes of weld cycles. (weld force : 250kgf, weld current : 10kA)

발열온도가 높은 이유는 접촉저항에 기인한 발열의 증가가 원인이며, 온도가 증가 할수록 판재와 판재계면의 접촉저항은 감소하기 때문에 발열은 점차적으로 감소한다고 설명하였다¹¹⁾. 따라서 표면조도처리 강판의 점 용접 시 짧은 용접시간에 초기 발열을 증가시켜 양호한 용접부를 얻을 수 있으며, 이러한 초기 발열은 표면조도에 따른 접촉저항의 영향이 크게 작용 할 것으로 사료된다.

3.6 표면조도에 따른 SPCC강판의 동저항

앞선 연구결과에서 표면조도처리 강판의 표면조도는 접촉저항과 발열량에 중요한 영향이있는 것으로 나타났다. 이를 검증하기 위해 SPCC강판에서 표면조도를 인위적으로 변화시킨 후 표면조도의 영향을 체계적으로 관찰하기 위한 추가 실험을 실시하였다.

SPCC강판에서 as-received 상태의 표면조도는 $1.12 \mu\text{m}$ 이며, SiC paper를 이용하여 인위적으로 표면조도를 부여한 SPCC강판의 표면조도는 각각 $0.7 \mu\text{m}$ 와 $0.3 \mu\text{m}$ 로 나타났다. 표면조도가 다른 각각의 시편을 점 용접 후 측정된 동저항 결과를 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13의 동저항에서 표면조도가 가장 높은 강판($1.12 \mu\text{m}$)의 α -peak가 가장 높게 나타났으며, β -peak는 가장 빠른 시점인 2 cycle에서 형성되었다. 반면 표면조도가 $0.7 \mu\text{m}$ 와 $0.3 \mu\text{m}$ 인 강판에서 α -peak가 점차적으로 감소하는 것을 관찰하였고, β -peak는 4 cycle에서 형성되었다. Fig. 14는 표면조도 크기에 따른 동저항의 기하학적인 인자들을 나타낸 것이다. 표면조도처리 강판과 유사하게 SPCC강판에서도 표면조도가 증가할수록 α -peak와 β -peak 그리고 R_{slope} 모두 증가 하였다. SPCC 강판의 실험결과에서도 보이듯이 강판 표면에 존재하는 비교적 높은 표면조도는 접촉저항과 초기 발열을 증가 시켜 최종 용접성을 향상시키는 것으로 판단 된다. 그러나 표면조도 크기에 따른 용접성의 향상은 전극의 연속타점 수명과는 연관성이 없으며, 이러한 전극수명의 영향에 대한 연구는 본 연구진들에 의해 진행된 바가 있다⁷⁾.

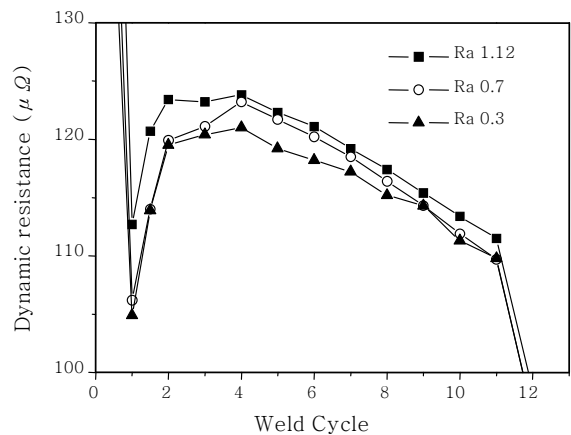


Fig. 13 Dynamic resistance during spot welds of SPCC steels with various surface roughness. (weld force : 250kgf, weld current : 10kA)

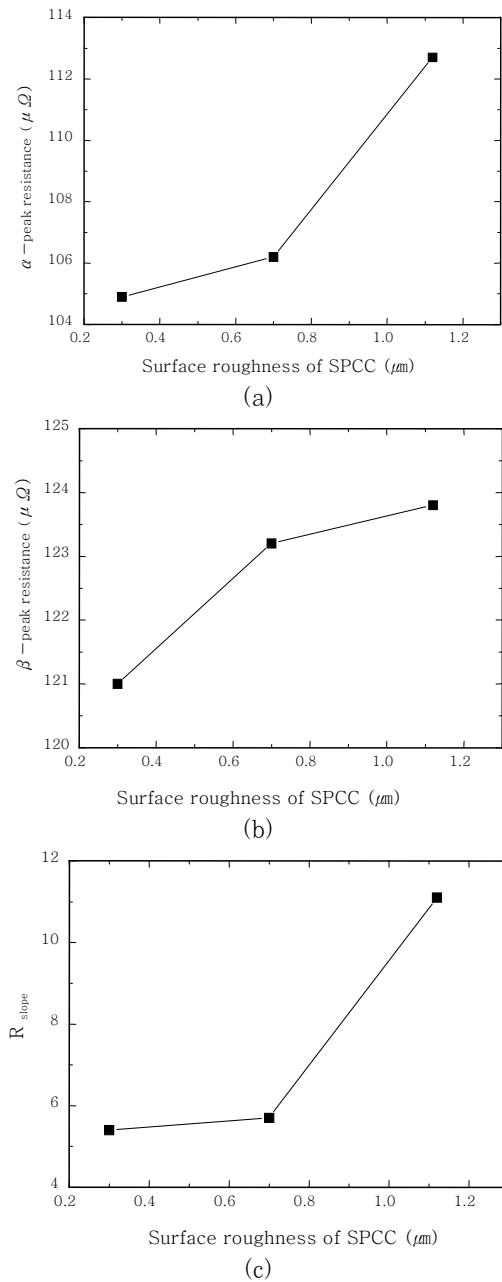


Fig. 14 (a) α-peak resistance, (b) β-peak resistance, and (c) R_{slope} for the resistance spot welds of the SPCC steels with various surface roughness.

4. 결 론

1) T-H강판의 높은 표면조도는 접촉저항 및 발열을 증가시켜 최종적으로 용접성을 향상시키며, 따라서 접촉저항과 밀접한 관련이 있는 표면조도가 발열량에 영향을 미치는 인자로 작용한다.

2) T-L과 T-H강판의 로브곡선 비교를 통해 하한곡

선에서는 T-L강판에 비해 T-H강판이 저전류 조건에서 양호한 용접품질을 얻을 수 있고, 이는 표면조도 크기의 차이에 기인한다. 그리고 상한곡선에서는 유사한 형태의 곡선이 관찰되었고, 이는 통전전류가 높은 경우 전체발열이 전류에 크게 의존하는 것에 기인한다.

3) 가압력이 증가함에 따라 접촉저항은 감소하고, 발열량 또한 감소하여 최종 용접품질을 저하시킨다. 그리고 가압력 증가에 따라 동저항의 기하학적인 인자들 모두가 감소하며, 이러한 인자들은 용접부의 접합강도와 상관성이 있음을 알 수 있다.

4) 짧은 통전시간과 저전류 용접조건에서의 발열은 접촉저항에 크게 의존하므로, 동일한 용접조건에서 용접할 경우 표면조도가 높은 판재는 접촉저항에 기인한 발열량이 크므로 양호한 접합부 품질 및 접합강도를 가진다.

5) 인위적으로 표면조도 처리한 SPCC강판에서는 T-L과 T-H강판의 결과와 마찬가지로 높은 표면조도가 접촉저항과 초기 발열을 증가시켜 최종 접합품질을 향상시키는 것으로 관찰되었다.

참 고 문 헌

1. K.S. Kim, Surface Roughness and Image Clarity for Automotive Sheet Steels, Proceedings of the 1996 Spring Annual Meeting of Korean Society of Automotive Engineers, (1996), 265-272
2. S.M. Cho, Principle of Resistance Welding and Analysis of Monitoring Results, Journal of The Korean Welding and Joining Society, **15-2**, (1997), 1-10
3. N.T. Williams and J.D. Parker, Review of resistance spot welding of steel sheets: Part 1. Modelling and control of weld nugget formation, International Materials Reviews, **49-2**, (2004), 45-75
4. J.G. Kaiser, G.J. Dunn, and T.W. Eaga, The Effect of Electrical Resistnace on Nugget Formation During Spot Welding, Welding Journal, **62-6**, (1982), 167s-174s
5. D.W. Dickinson, J.E. Franklin, and A. Stanya, Characterization of Spot Welding Behavior by Dtnamic Electrical Parameter Monitoring, Welding Journal, **59-6**, (1980), 170s-176s
6. P.H. Thornton, A.R. Krause and R.G. Davies, Contact Resistances in Spot Welding, Welding Journal, **75-12**, (1996), 402s-412s
7. K.H. Kim, S.S. Park and Y.D. Park, The Resistance Spot Weldability of surface roughness textured cold-rolled steel sheet. Proceedings of the 2007 Autumn Annual Meeting of Korean Welding and Joining Society, **Vol 48**, (2007), 342-344 (in Korean)

8. E. Crinon, J.T. Evans, The effect of surface roughness, oxide film thickness and interfacial sliding on the electrical contact resistance of aluminium, *Material Science Engineering*, **242-1**, (1998), 121-128(8)
9. Y.J. Cho, A Study of Dynamic Resistance Monitoring and Intelligent Quality Estimation for the Manufacturing Process Automation during Resistance Spot Welding, P H. D. dissertation, Hanyang Univ., Seoul, Korea, (2000), 51-57 (in Korea)
10. Q. Song, W. Zhang and N. Bay, An Experimental Study Determines the Electrical Contact Resistance Welding. *Welding Journal*, **84-5**, (2005), 73s-76s
11. J.E. Gould, An Examination of Nugget Development during Spot Welding, Using Both Experimental and Analytical Techniques. *Welding Journal*, **66-1**, (1987), 1s-10s