연 구 논 문

가압력 변화에 따른 표면조도처리 강판의 저항 점 용접성 비교

박상순* · 박영도* · 김기홍* · 최영민** · 임영목*** · 강남현****

*동의대학교 신소재공학과
**POSCO 기술연구소 자동차소재연구그룹
***한국기계연구원
****부산대학교 재료공학부

A Comparison of Spot Weldability with Electrode Force Changes in Surface Roughness Textured Steel

Sang-Soon Park*, Yeong-Do Park*, Ki-Hong Kim*, Yung-Min Choi**, Young-Mok Rhym*** and Nam-Hyun Kang****

*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 Materials Science Materials Test & Characterization Group, Changwon 641-010, Korea
****Division of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

Abstract

With the development of surface roughness textured steel for automotive body-in-white assemble, one of key issues is to understand the role of the surface roughness in textured steel sheets. To investigate effect of surface roughness on weldability in prepared steels, electrode force was varied. Steel sheets (T-H) with high surface roughness (Ra = 1.94 ㎛) reduced electrode life. It was attributed to the higher contact resistance at the electrode-sheet interface in the presence of the high surface roughness. The increased electrode diameter decreased current density, therefore reducing weld electrode life due to small weld button size. When an increased electrode force was used, a significant increase in the electrode life was observed in welding of high surface roughness steel sheet. This study suggested that contact resistance at the electrode-sheet interface was the dominant factor, as compared to the sheet-sheet interface for determining electrode life in welding of surface roughness textured steel.

*Corresponding author : ypark@deu.ac.kr (Received February 18, 2008)

Key Words : Spot welding, Surface roughness, Electrode force, Electrode life, Contact resistance.

1. 서 론

저항 점 용접은 자동차용 강판 접합에 가장 널리 사용되고 있는 방법으로 다른 접합법에 비해 작업성, 생산성이 우수한 장점을 가진다. 최근에 강판을 스킨 패스 롤링 밀로 재압연하여 표면에 전반적으로 반구형의 조도를 형성시킨 표면조도처리 강판이 자동차용 판재로 사용이 시도되고 있고 이러한 처리는 가공성, 도장 후 선영성, 도장 밀착성의 개선에 목적이 있다. 판재의 높은 표면조도가 존재할 경우 딥 드로잉 마찰계수가 감소하는데 이는 표면에 보존되는 윤활유의 양이 표면조도의 크기에 비례하기 때문이다[1]. 선영성과 도장 밀착성 역시 표면조도의 크기와 비례한다[2].

저자는 자체적으로 실시한 예비실험 결과에서 표면조도가 점 용접의 연속타점 전극수명에 영향을 미칠 수 있다는 결과를 제시하였다[3]. Song의 연구에 따르면 가압력의 증가는 전극과 판재의 접촉면적과 판재와 판재

의 접촉면적을 증가시킴으로써 전류밀도를 낮추고 그 결과 접촉저항이 감소되었다[4]. 또한 Abu-Aesh는 표면조도의 감소가 피용접물의 기계 및 물리적 성질을 개선시켰다고 발표하였다[5]. Abu-Aesh의 연구는 점 용접 시연마지를 이용하여 표면조도를 단계적으로 생성시켜 실험을 하였다. 이러한 접근방법은 가압력을 증가시켰을 때, 높은 압력에 의해 표면조도가 평활해지는 현상과 같다고 판단된다. 즉, Song과 Aesh의 연구를 통해 가압력의 증가는 표면조도, 접촉저항의 감소와 함께 피용접물의 물성치를 개선시키는 효과가 있음을 알 수 있다.

용접 품질을 결정하는 너깃 형성의 관점에서 볼 때 이러한 접촉저항의 변화는 용접 시 발열량과 직접적인 연관이 있다. 점 용접은 피용접물에 주어진 용접 전류에 의한 주울 열로 공정이 이루어지고 이 때 생성되는 발열량은 총저항에 비례한다. 여기서 총저항은 판재의 성분, 두께에 의한 모재 저항 외에 위치적으로 판재와 판재 (faying surface), 그리고 판재와 전극 (interface)이 만나는 접촉부위에서 발생하는 접촉저항이 더해진 것이다. 특히 판재와 판재 계면의 접촉저항은 너깃 형성에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 접촉부위의 접촉저항은 세부적으로 압축저항 (constriction resistance)과 박막저항 (film resistance)의 2가지로 나눌 수 있다[4,6]. 압축저항은 판재와 판재가 접촉 시 조도에 따른 접촉면적의 차이로 인해 통전이 이루어 졌을 때 전류밀도의 차이가 발생하고 그에 따라 변화하는 저항이며 박막저항은 표면의 산화, 윤활유의 유무, 용접 시 수증기의 발생으로 표면에 생성되는 저항을 의미한다. 접촉저항은 점 용접 시 초기발열에 영향을 주는 인자로써 모재의 저항과 함께 용접시간에 따라 변화한다. 전극 선단부의 면적에 따라 변하는 통전전류밀도, 용접 초기 단계에 발생하는 접촉면의 산화막과 표면 요철부의 붕괴, 표면의 조도와 청결상태에 따른 용접부의 온도변화가 유동적인 주요 변수로 알려져 있다. 접촉저항의 변화에 따른 너깃 형성의 고찰은 Kaiser등에 의해 연구되었는데 동저항 중 초기저항이 로브곡선에 미치는 영향을 관찰하여 동저항값이 용접전류와 접촉저항의 증가에 따라 변화됨을 보였다[7].

일반적으로 점 용접에서 전류가 흐르는 동안의 저항 변화를 관찰하기 위해 동저항을 이용한 분석이 많이 적용되어왔다. 일반 강판의 동저항 측정 결과는 α-peak와 β-peak의 형성 시점 및 시간에 따른 저항의 거동을 보여줌으로써 최초 용접성 판단을 위한 모니터링의 판단 기준으로 사용되고 있다. 동저항 곡선에서 α-peak는 점 용접 과정 중 초기발열과 연관성이 깊으며 β-peak의 크기 및 위치는 시간 경과에 따른 너깃 형성을 간접적으로 확인 할 수 있는 인자로 알려져 있다[8]. β-peak가 빨리 형성되거나 저항값이 클 경우 점 용접의 인장전단강도와 너깃의 크기가 증가하고 α-peak와 β-peak 두 점 간의 기울기가 클수록 너깃 성장률이 증가하기 때문에 동저항의 측정으로 판재의 조도 차이가 초기 저항과 너깃 형성에 어떠한 영향을 주는지 알 수 있다[9].

언급한 바와 같이 현재까지의 많은 연구들은 표면조도의 변화에 따른 접촉저항 변화와 너깃 형성 및 용접부 기계적 특성에 대한 연구에만 한정이 되어 왔다. 또한 대부분의 실험이 반복적인 단일타점으로 수행되었기 때문에 실제 산업 공정에서 중요하게 고려되는 반복적인 가압과 발열에 의한 전극의 마모적인 측면은 고려되지 않았다. 이와 같은 측면에서 표면조도와 전극의 마모에 관한 접근이 필요하다고 판단된다.

표면조도처리가 되지 않은 냉연강판의 연구결과들에 의하면 판재와 전극 접촉부위에서 발생하는 저항열은 점 용접에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다[10-12]. 표면조도처리가 되지 않은 냉연강판의 전극과 판재 사이 접촉저항이 낮아 저항열이 낮기 때문에 점 용접 중 전극 마모에 큰 영향인자로 작용하지 않기 때문이다. 하지만 표면조도처리 강판의 경우 높은 표면조도로 인해 전극과 판재 접촉부위의 접촉저항이 표면조도처리가 되지 않은 냉연강판에 비해 전극 마모에 크게 영향을 미칠 것으로 사료된다. 따라서 본 연구는 접촉저항에 있어서 일반적으로 주요인자로 알려진 판재와 판재 접합계면뿐만 아니라 전극과 판재계면의 접촉부위 또한 영향인자라는 사실에 중점을 두었다. 접촉저항에 비례하여 전극과 판재 접촉부위의 저항열도 증가하게 되고 결과적으로 냉연강판에 비해 표면조도처리 강판의 전극의 마모가 빠르게 진행될 것으로 예상된다. 연속타점 전극수명의 측면에서 볼 때 이러한 전극의 마모는 치명적으로 작용할 것이다.

본 연구에서는 연속타점실험에서 전극의 열화와 접촉저항의 관계를 규명하기 위해 높은 가압력으로 표면조도처리 강판과 전극의 접촉면적을 증가시켜 점 용접을 실시하였다. 표면조도처리 강판들의 표면조도차이가 전극의 연속타점 전극수명에 미치는 영향을 조사하고 점 용접 시 가압력 변화에 따른 연속타점 전극수명 변화를 분석하고자 한다.

2. 실험방법

실험에 사용된 용접기는 단상교류 공압 정치식 (75 kVA)이며, 전극은 직경 6 ϕ인 Cu-Cr재를 상하단에 동일하게 적용하였다. 냉각수는 8 ℓ/min으로 일정하

게 공급되었고 사용된 판재는 탄소함량 0.002%의 냉연강판으로 두께는 0.7 mm이고 접촉저항과 표면조도를 제외한 화학성분 및 기계적 성질 등이 동일하다. 표면조도처리 강판의 화학적 조성과 기계적 성질을 Table. 1과 Table. 2에 각각 나타내었다.

2.1 표면조도 처리강판

판재는 표면조도형성에 따라 EDT (Electro-Discharge Texturing)방법으로 생성된 것을 "E", Pretex (Pricision Texturing)방법으로 생성된 것을 "T"로 분류하였다. 또한 조도값의 차이에 따라 낮은 조도 L과 높은 조도 H로 분류하여 각각 E-L, E-H, T-L, T-H의 4종으로 나타내었다. 실험 전 모든 시편은 접촉저항 중 박막저항에 영향을 줄 수 있는 표면의 윤활유 제거를 위해 에틸 알코올로 깨끗이 세척하였다. 가압력 250 kgf에서 가장 열위한 용접성을 보인 T-H판재를 가압력 300 kgf에서 점 용접하여 주요 비교대상으로 설정했다. 접촉저항의 측정은 접촉저항 시험법(특허번호 10-0685015)을 통해 이루어졌고 측정하중은 3 kgf, 측정전류는 10 A다. 접촉저항 측정에 사용된 프로브는 직경 15.5 mm의 일체형 Cu-Cr전극으로 구성되었다. 측정된 접촉저항은 모재저항, 판재와 전극 계면 그리고 판재와 판재 계면의 접촉저항이 모두 더해진 값이다. 실험에 사용된 판재는 모두 동일한 화학적 조성을 가지고 있으므로 모재저항의 차이는 배제되었다. 따라서 실제 측정된 접촉저항은 전극과 판재계면(interface), 판재와 판재계면(faying surface)의 저항이 더해진 값이다.

2.2 로브곡선 작성

로브곡선은 E-H, T-H판재를 각각 250 kgf와 300 kgf의 상태로 가압력을 고정하고 용접 전류와 용접 시간을 변수로 하여 측정하였다. 로브 하한선은 KS B ISO 14327 규격에 맞추어 최소 용접 너깃 크기를 5 $\sqrt{t}$ (판재의 두께: t)로 적용하였고, 상한선은 중간날림(expulsion)의 발생점을 적용하였다.

점 용접 시 표면조도 크기에 따른 저항의 변화를 관찰하기 위해 동일한 적정용접조건에서 실험에 사용된 판재 4종의 모재 동저항을 측정하였다.

연속타점실험의 용접조건은 일반적으로 로브곡선에서 얻어지는 최적용접조건으로 행해지지만, 본 실험에서는 가압력에 따른 비교 분석을 위해 가압력 250 kgf에서 측정된 조건을 가압력 300 kgf에 동일하게 적용하였다. 일반적으로 연속타점실험에 사용되는 최적용접조건은 중간날림이 발생하는 전류의 80~90%수준으로, 사용하는 판재마다 차이는 있겠으나 최소 5000타점에서 최대 10000타점까지의 연속타점 전극수명을 보인다. 본 표면조도처리 강판의 연속타점 전극수명실험에서는 표면조도에 따른 차이와 가압력에 의한 차이를 확인하는 것이 주목적이다. 따라서 높은 전류에 의한 전극의 초기마모를 줄이고 전극수명에 미치는 표면조도와 가압력의 영향을 관찰하기 위해 로브곡선에서 중간날림이 발생하는 전류의 60%수준을 적정용접조건으로 적용하였다.

2.3 연속타점실험

표면조도처리 강판 T-H의 연속타점실험에서 타점 간 간격은 20 mm, 타점 간 시간은 3초로 실시하였고, peel test와 인장시험편은 0타 이후 200타 간격으로 계면파단이 발생하는 시점까지 각각 5 set씩 채취하였다. 또한 미세조직의 거동관찰과 미소경도측정을 위해 peel test 및 인장시험편의 채취와 함께 조직 시험편을 1 set씩 채취하였다. 점 용접 시험편의 파괴거동은 연속타점실험에서 채취한 시험편을 각각 JIS Z 3136 규격의 2점 peel test시험을 통한 버튼직경변화와 10 ton 용량의 만능시험기를 사용하여 인장속도 5 mm/min으로 설정한 인장전단시험의 인장강도 변화로 관찰하였다.

T-H판재를 가압력 250 kgf에서 연속타점실험을 실시하여 계면파단이 발생하는 가압력의 타점에서 채취한 조직시편으로 각각의 미세조직을 관찰하였다. 또한 최초 20타점 점 용접을 실시한 전극에서 조직시편을 채취하여 가압력 250 kgf의 T-H판재 미세조직과 비교하였다. 준비된 조직 시험편을 생성된 버튼의 수직 방향으로 절단하여 그 단면의 조직을 분석하였다. 조직관찰에는 광학현미경이 사용되었고 에칭액으로 3% nital을 사용하여 판재 접합계면의 분석을 통해 계면파단 시의 너깃 형상을 관찰하였다.

Table. 1 Chemical compositions of base metals (unit: w%)

	C	Si	Mn	P	Ti (ppm)	Ni	Mo	B (ppm)
Chemical compositions	0.002	0.06	0.51	0.047	100	0.071	0.034	5

Table. 2 Mechanical properties of base metals

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

연속타점실험에서 전극의 성장 폭은 연속타점진행에 따른 전극의 열화와 직접적인 연관이 있다. 이를 관찰하기 위해 최초 타점 이후 200타 간격으로 계면파단이 발생하는 시점까지 카본 페이퍼를 이용하여 전극의 마모 정도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 표면조도 처리강판

Table 3은 Wyko DMEMS NT3300 장비를 이용하여 비접촉 모드에서 0.55 배율로 측정한 표면조도 처리판재들의 표면조도값이다. E-L과 T-L, E-H판재의 표면조도 (Ra)값은 각각 1.44 ㎛, 1.41 ㎛ 그리고 1.55 ㎛로 유사하나 T-H판재의 표면조도 (Ra)값은 1.94 ㎛로 비교적 높게 측정되었다. T-H판재의 높은 표면조도는 동일한 스킨 패스 롤링 밀에서 재압연되었다는 측면에서 볼 때 표면조도 형성 방법의 차이에 의한 것으로 판단된다. Fig. 1은 판재들의 접촉저항 측정 결과를 나타내었다. 측정 결과는 모두 12회씩 측정하여 최대값과 최소값을 제외한 10회의 평균치를 나타내었다. T-H판재가 1.14 mΩ으로 가장 높은 저항값을 보였고 나머지 3종의 판재는 평균 0.91 mΩ의 유사한 접촉저항값을 보였다. 판재의 화학성분과 기계적 성질이 동일하고 표면조도의 차이만 존재한다는 측면에서 이러한 접촉저항값의 차이는 표면조도 (Ra)의 차이에 기인한 것으로 판단된다.

Table 3 Surface roughness of surface roughness textured steels (unit: ㎛)

	E-L	E-H	T-L	T-H
Ra	1.44	1.55	1.41	1.94

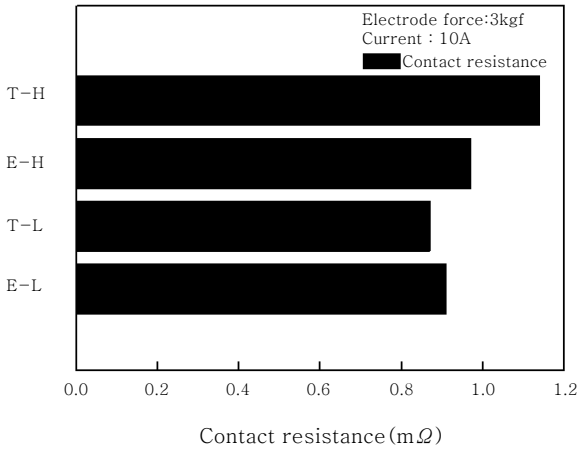
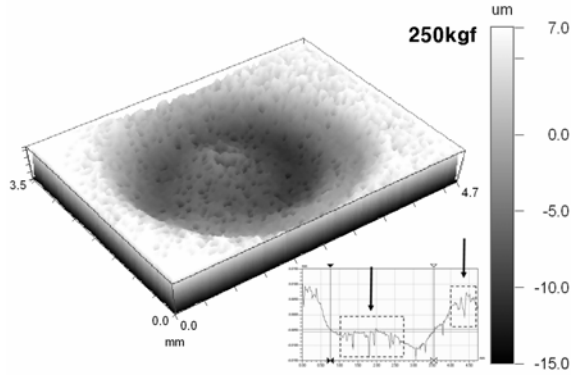


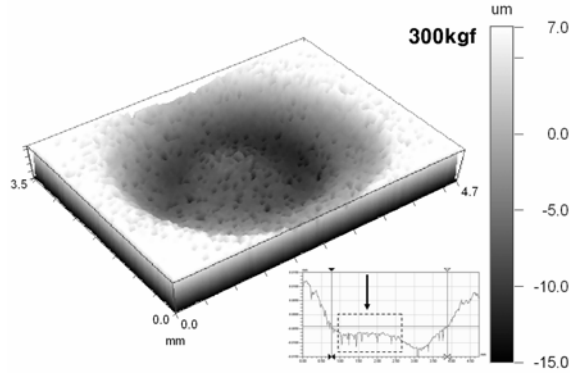
Fig. 1 Contact resistances of surface roughness textured steel after cleaning

Fig. 2는 T-H판재의 무통전 가압형상으로 점 용접 공정에서 전류를 통전시키지 않고 단순 가압하여 압흔을 확대한 것이다. 무통전 가압 후 표면조도를 측정함으로써 점 용접 공정에서 초기 가압이 이루어진 후 통전 이전에 가압력에 따른 표면조도의 변화를 비교하는 것이 가능하다. 가압력 차이로 인한 표면조도의 변화는 전극 선단부와 판재의 접촉면적에 차이를 발생시켜 실제 통전영역에서 전류밀도에 직접적인 영향을 준다.

Fig. 2(a)와 (b) 모두 가압력 250 kgf와 300 kgf에서 전극이 가압한 부위에 압흔이 존재하는 것을 보여준다. 이것은 용접 공정의 초기 가압 영역에서 통전되기 직전까지 압흔이 존재하는 것을 의미하며 이후 통전되는 시점에서 실질적으로 접촉저항에 영향을 미치는 조건으로 볼 수 있다. 전극과 판재 접촉부위뿐만 아니라 판재와 판재 접촉부위에서도 마찬가지로 전류가 흐르기 이전까지 표면조도가 남아 있을 것으로 예상된다. 본 연구에서는 시도되지 않았으나 판재와 판재 접촉부위에는 전극의 단면적보다 넓은 범위에서 가압이 이루



(a)



(b)

Fig. 2 Surface roughness profiles on contact surfaces of T-H steel compressed between flat and spot weld electrode ; (a) electrode force 250 kgf, (b) electrode force 300 kgf-nserted figures are enlarged surface profiles of indented areas.

어지기 때문에 가압력의 분산으로 전극과 판재의 접촉 부위보다는 비교적 높은 표면조도를 유지할 것이다. 따라서 판재와 판재사이에 잔존하는 표면조도는 차후의 통전영역에서 초기발열에 영향을 줄 것으로 예상된다.

Fig. 2(b)와 같이 가압력을 300 kgf로 증가시켰을 때 압흔 자국 내의 표면조도가 좀 더 평활해 진 것을 볼 수 있다. Fig. 2(a)와 2(b)에 첨부된 단면의 2차원 조도측정결과를 비교해보면, 가압력 250 kgf보다 가압력 300 kgf에서 잔존하는 표면조도가 낮고 깊이도 얕지만 가압력 300 kgf에서도 표면조도 측정치 (Ra)가 완전히 제거되지는 않았음을 알 수 있다. 가압력 250 kgf와 300 kgf 모두 가압 부위가 약간 기울어져 한쪽 방향의 가압이 불균일하게 이루어진 부분이 존재한다. 불균일한 가압영역은 다른 측정부위에서도 동일하게 발견되었고, 반복적인 연속타점 점 용접을 실시할 경우 전극의 편마모에 영향을 미칠 수 있다고 판단된다.

Fig. 2에서 무통전 압흔 중심 부위가 볼록한 형태를 보이는 것이 관찰되었다. 무통전 가압을 통해 이 전극의 테두리영역에 높은 압력이 주어진다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 판재에서 전극의 가압으로 소성유동이 발생하게 되며 가압된 테두리영역의 모재가 중심으로 이동하는 것을 의미한다. 따라서 가압부위의 중심부가 테두리영역보다 볼록한 형태를 가지게 되며 Fig. 3에서 전극과 판재의 접촉부위 변형과정을 도식화하여 나타내었다. 이러한 일련의 과정을 통해 이후 통전영역에서 전극 선단부는 볼록한 모재에 의해 균일한 발열이 아닌 국부적인 발열이 발생하고 전극의 열화가 부분적으로 더 빨리 진행될 것으로 판단된다.

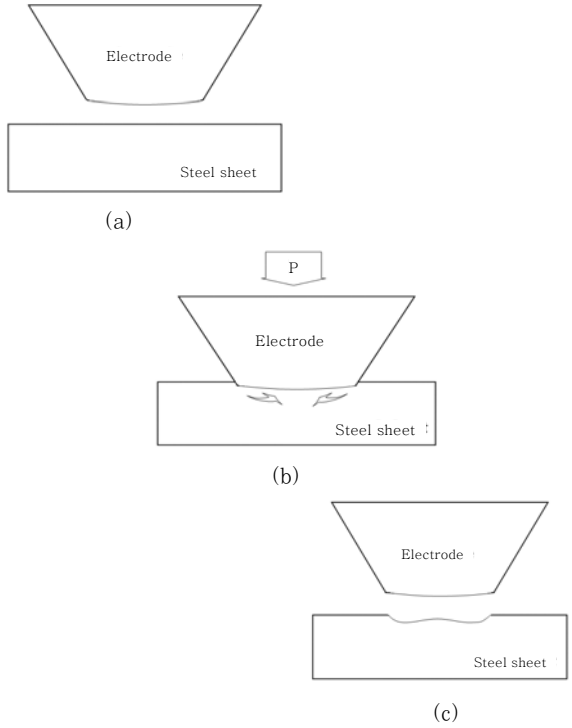


Fig. 3 Illustration of surface indention changes on steel sheet by electrode compression without current

3.2 로브곡선

용접성의 적정 용접 범위는 일반적으로 로브곡선을 이용하여 나타낸다. 특히, 표면조도처리 강판에 대한 로브곡선은 알려진 실험결과가 없어 예비실험을 실시하였다. 로브곡선에서 하한치는 용접으로 인한 최소 접합 물성치의 기준이 되고 상한치는 중간날림의 발생점으로써 이 이상의 영역은 점 용접에 부적합하다는 판단의 기준이 된다. 이 두 기준선 사이의 영역이 해당 판재의 적정 용접 전류 영역으로 적용된다.

Fig. 4(a)와 (b)는 E-H판재와 T-H판재를 각각 가압력 250 kgf와 300 kgf에서 측정한 로브곡선이다. Fig. 4(a)에서 보이는 바와 같이 E-H에서는 가압력

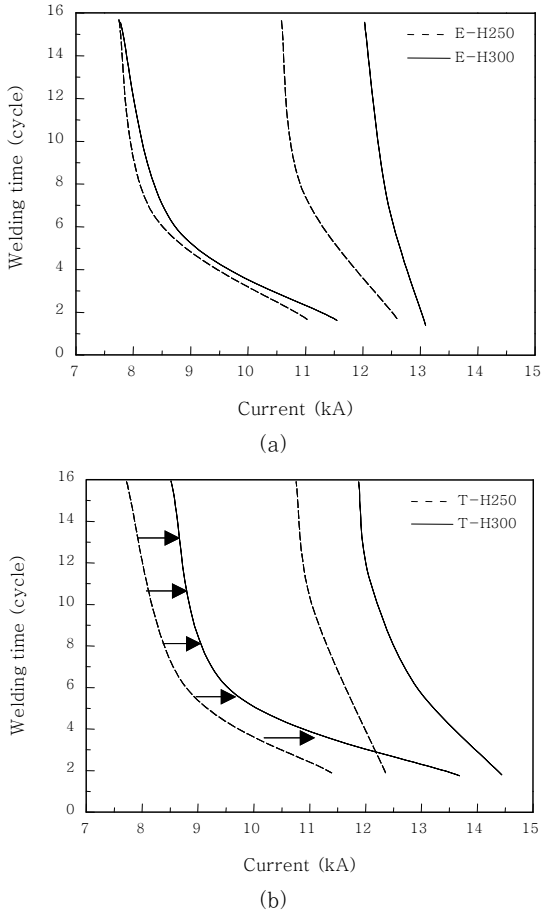


Fig. 4 Welding lobes for (a) E-H and (b) T-H steel sheet with electrode force at 250 kgf and 300 kgf

증가에 따른 로브 하한치의 차이가 거의 없다. 이는 로브 하한치에서 가압력 증가에 따른 접합계면의 접촉면적 차이가 거의 없으며, 250 kgf에서 300 kgf로 증가시킨 가압력에 의한 표면조도 감소가 적다는 것을 의미한다. 즉 250 kgf의 가압력에서 표면조도가 제거되어 가압력 증가에 의한 표면조도 감소가 미비한 것으로 판단된다. Kaiser 등의 실험 결과에 의하면 가압력 증가는 로브곡선에서 적정 전류 용접 구간을 확장시키며 로브곡선의 기울기가 감소하는 것으로 보고되었다[7]. E-H판재의 로브곡선에서도 가압력 증가에 따른 이러한 전류 영역 범위의 확장은 확인되고 있다.

반면, Fig. 4(b)의 T-H판재의 경우 로브의 하한선이 우측으로 약 0.7~0.8 kA 이동한 것을 볼 수 있다. E-H의 결과와 비교해보면 T-H판재의 로브 하한선 이동은 250 kgf에서 300 kgf의 가압력 증가로 표면조도 감소가 발생하여 접촉면적의 증가가 발생한 것이 원인으로 판단된다. 즉 초기의 높은 표면조도가 높은 가압력에 의해 감소되고 그로 인한 접촉저항의 감소로 발열량 또한 감소한 것이다. 결과적으로 E-H판재, T-H판재의 로브 하한치는 표면조도의 크기와 연관성이 있는 것으로 판단된다. 로브 상한치의 경우 가압력 250 kgf와 300 kgf에서 E-H판재와 T-H판재 모두 거의 동일한 전류 영역에서 중간날림이 발생한 것으로 볼 때 표면조도보다 전류의 영향을 크게 받는 것으로 판단된다. 연속타점실험에 사용된 용접조건은 다른 표면조도를 가진 판재들의 로브곡선 실험결과에서 도출된 용접조건을 적용하였으며 적정용접조건을 Table. 4에 나타내었다.

3.3 동저항 특성

Fig. 5의 동저항 측정결과에서 보는 바와 같이 T-H판재는 높은 α-peak와 β-peak를 보인다. T-H판재가 E-H보다 높은 α-peak를 가지는 것은 T-H판재의 높은 표면조도에 의해 초기가압이 끝나고 통전이 이루어지는 시점에서 접촉저항이 높아져 그에 따른 초기 발열량이 더 크게 발생한다는 것을 의미하며 이러한 높은 초기 발열이 너깃의 형성 및 성장에 기여할 것으로 판단된다. 또한 β-peak의 위치가 T-H판재의 경우 2cycle의 빠른 통전cycle에서 일어난다는 점도 초기 발열로 인해 너깃이 빨리 형성되었음을 의미한다. 하지만 표면조도에 기인한 초기 발열은 판재와 전극 사이의 계면 발열도 함께 동반하므로 연속타점이 진행됨에 따라 발생하는 전극의 성장과 관련이 크다. 따라서 초기발열

Table 4 Welding parameters for weld electrode life test of surface roughness textured steel sheet

Weld Force (kgf)	Weld Time (cycle)	Hold Time (cycle)	Squeeze time (cycle)	Water flow rate (ℓ /min)	Current (kA)
250/300	13	5	20	8	10

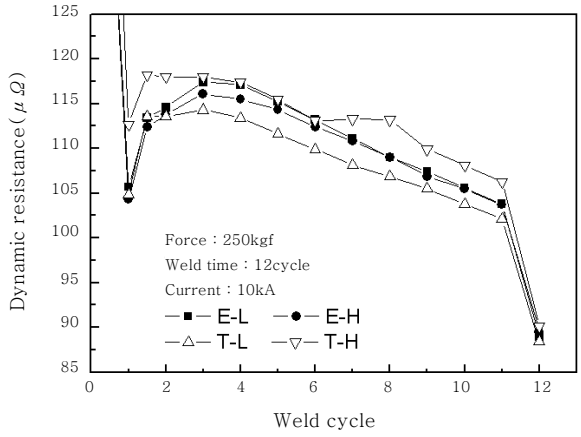


Fig. 5 Dynamic resistance curves of the surface roughness textured steel sheet

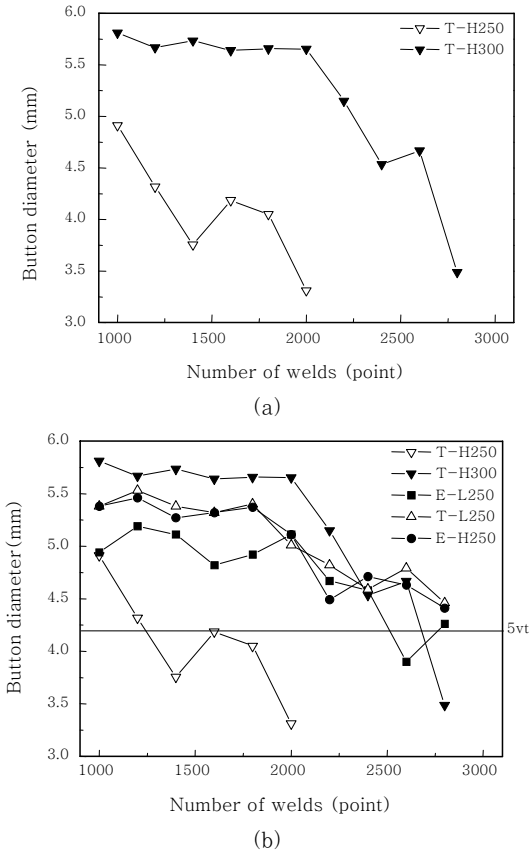


Fig. 6 Comparison of button diameter in (a) electrode force 250 kgf and 300 kgf of T-H steel sheet ; (b) electrode force 250 kgf of E-L, E-H, T-L, T-H and 300 kgf of T-H steel sheet

에 따른 전극 선단의 소성변형이 빠르게 진행될 것으로 예측이 되며 이러한 전극 손상과정을 전극의 직경 증가를 측정하여 분석하였다.

3.4 연속타점실험

3.4.1 Peel test

Fig. 6(a)는 표면조도처리 강판 T-H를 가압력 250 kgf에서 300 kgf로 변화시켰을 때 연속타점수에 따른 버튼직경의 측정 결과를 비교한 것이다. 최소용접 너깃 크기를 기준으로 버튼크기는 가압력 250 kgf의 T-H판재가 열위이고, 연속타점은 800타 정도 가압력 300 kgf의 T-H판재가 우위에 있다. 또한 가압력 250 kgf의 T-H판재는 1000타점부터 급격한 버튼직경의 감소를 보이는 반면, 가압력 300 kgf의 T-H판재는 2000타점부터 버튼직경의 감소경향을 보인다. 일반적으로 가압력을 크게 할수록 전극과 모재, 모재와 모재 사이의 계면 접촉성이 좋아지며, 접촉면적을 증가시켜 전류밀도가 저하되며 초기 접촉저항이 줄어들게 된다. 또한 가압력의 증가는 중간날림의 발생 억제 및 용융부 내의 기공 및 균열 발생을 억제한다. 이러한 원인들로 가압력 300 kgf에서 T-H판재의 버튼직경이 큰 것으로 사료된다.

Fig. 6(b)는 250 kgf 가압력의 E-L, E-H, T-L, T-H판재 및 가압력 300 kgf T-H판재의 연속타점실험에 따른 버튼직경변화를 비교한 것이다. T-H판재의 경우 가압력 300 kgf 연속타점 전극수명과 가압력 250 kgf의 T-H판재를 제외한 나머지 판재 3가지의 250 kgf 연속타점 전극수명이 유사한 것을 알 수 있다. 또한 가압력 250 kgf의 경우 T-H판재의 연속타점 전극수명과 버튼직경이 나머지 판재들보다 열위인 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 T-H판재의 높은 표면조도 때문으로 판단된다. 접촉저항이 높은 T-H판재의 경우 점 용접 시 나머지 3가지 판재보다 높은 발열량을 가진다. 연속타점실험에서 전극과 판재계면에서 발생하는 저항열 또한 높은 접촉저항 때문에 나머지 3가지 판재보다 전극의 마모가 빠른 속도로 진행된다. 전극마모 진행에 따라 전류밀도 역시 빠르게 감소하고 이러한 현상은 빠른 버튼직경의 감소를 야기한다. 즉, Fig. 1의 T-H판재를 제외한 E-L, E-H, T-L판재 3종의 접촉저항은 거의 유사하다는 결과를 통해 T-H판재의 높은 표면조도에 기인한 모재와 전극 간의 큰 접촉저항이 전극 열화를 가속시켜 연속타점 전극수명에 가장 큰 영향을 준 것으로 판단된다.

본 실험의 연속타점실험에서 전극수명이 3000타점 정도로 비교적 낮게 관찰되었다. 그 이유는 로브곡선에서 중간날림이 발생하는 전류의 60%수준을 연속타점 실험에 적용했기 때문으로 사료된다.

3.4.2 인장전단강도

Fig. 7(a)는 가압력 변화에 따라 연속타점실험을 실시한 T-H판재의 인장전단강도를 나타낸 것이다. Peel test 결과와 유사하게 연속타점실험에서 가압력이 300 kgf로 증가했을 때 인장전단강도 또한 증가한다는 것을 알 수 있다. 인장전단강도의 감소경향을 비교해보면 250 kgf 가압력의 경우 지속적으로 인장전단강도가 감소하는 반면, 300 kgf 가압력의 경우 2000타점까지 균일한 인장전단강도를 가진다. 가압력 300 kgf의 연속타점수 증가에 따른 인장전단강도 감소 기울기가 완만하다는 점에서 가압력의 증가로 상대적으로 높은 인장전단강도가 유지되고 전극의 수명이 증대 되었음을 알 수 있다.

Fig. 7(b)는 250 kgf 가압력의 E-L, E-H, T-L,

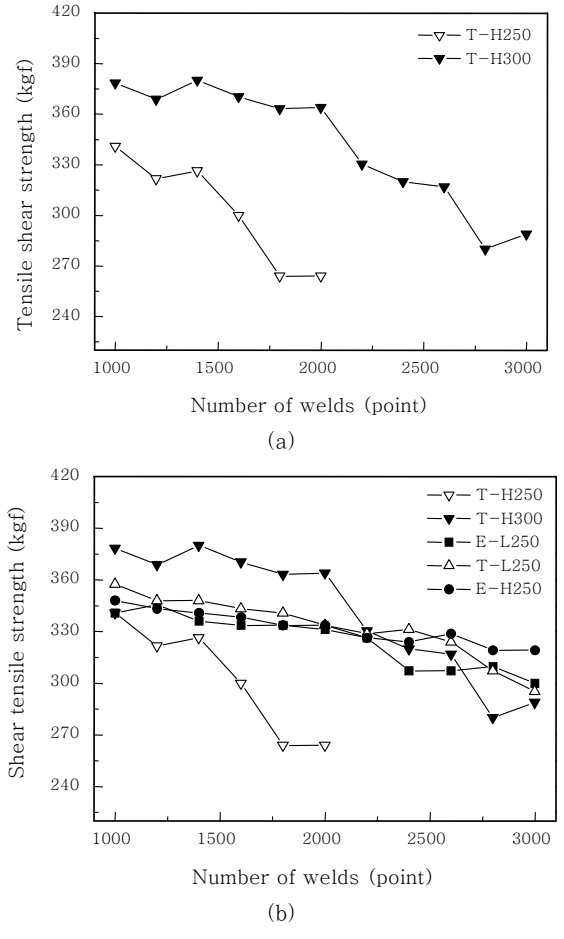


Fig. 7 Comparison of tensile-shear strength in (a) electrode force 250 kgf and 300 kgf of T-H steel sheet ; (b) electrode force 250 kgf of E-L, E-H, T-L, T-H and 300 kgf of T-H steel sheet

T-H판재 및 가압력 300 kgf T-H판재의 연속타점에 따른 인장전단강도를 비교한 것이다. 가압력 250 kgf에서 연속타점실험 시 T-H판재의 경우 1000타점에서 계면파단에 이르기까지 E-L, E-H, T-L의 3가지 판재보다 낮은 인장전단강도를 가진다. 300 kgf T-H판재의 경우 2200타까지는 E-L, E-H, T-L의 3가지 판재보다 우수한 인장강도를 가지지만, 이후 계면파단까지는 유사한 인장강도를 보인다.

가압력 250 kgf에서 최초 30타점 이후 T-H판재의 인장전단강도는 E-L, E-H, T-L의 3가지 판재와 거의 유사하다. 그러나 연속타점실험이 진행됨에 따라 T-H판재의 인장전단강도가 급격하게 하락하고 계면파단이 먼저 일어났다. 그 원인은 peel test실험에서와 같이 T-H판재의 높은 표면조도 때문에 전극의 급격한 열화가 진행되었기 때문으로 판단된다.

3.4.3 카본 임프린트

연속타점 진행에 따라 전극 선단부의 직경은 일반적으로 증가하고 이와 같은 전극 선단의 소성변형에 의한 접촉면적의 증가는 점 용접 과정에서 전류밀도의 감소로 귀결되어 너깃 크기와 접합강도를 하락시키는 직접적 원인으로 작용한다[11,12].

전극들의 마모 상태를 보았을 때 가압력 250 kgf T-H판재의 경우 가장 심하고 전극의 손상이 전극 선단부의 테두리영역에 걸쳐 전체적으로 관찰되었다. 또한 용접 시 계면파단이 일어난 시점에서 채취한 전극들은 원형이었던 초기의 형상과는 달리 불규칙한 타원 형상을 보였다. Meur등은 실험을 통하여 용접의 초기발열이 전극과 판재가 만나는 부위에서 생성되어 모재의 국부적인 열팽창을 발생시킨다고 보고하였다13). 즉 Fig. 3에서 언급한 전류가 흐르기 전, 가압력에 의해 형성된 판재의 부분적인 조도차이와 통전 시 발생하는 모재 열팽창에 의해 전극 선단부에서 불규칙한 열화가 진행된 것으로 판단된다.

Fig. 8(a)는 카본 임프린트 측정법을 사용하여 측정한 T-H판재의 연속타점 진행 시 가압력 증가에 따른 전극 직경 폭의 변화를 보여준다. 일반적으로 가압력에 의한 전극의 소성변형 측면만 고려해 볼 때 가압력 300 kgf의 전극 직경 폭이 클 것으로 예상 할 수 있다. 그러나 연속타점실험 결과, 가압력 250 kgf T-H판재의 전극 직경 폭이 가압력 300 kgf의 T-H판재보다 약 0.2mm 크게 관찰되었고 그 원인은 Fig. 8(b)의 E-L, E-H, T-L 3가지 판재와의 비교를 통해 알 수 있다.

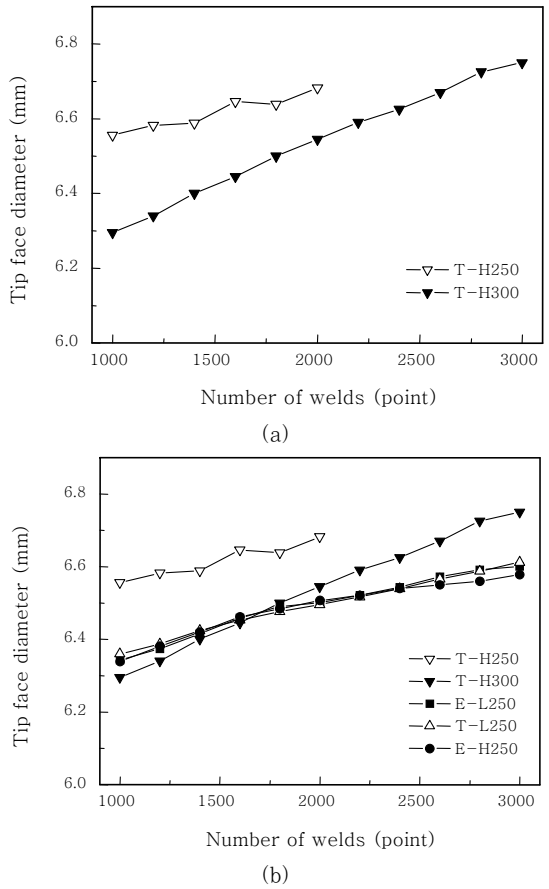


Fig. 8 Electrode tip face diameter changes of (a) electrode force 250 kgf and 300 kgf of T-H steel sheet ; (b) electrode force 250 kgf of E-L, E-H, T-L, T-H and 300 kgf of T-H steel sheet

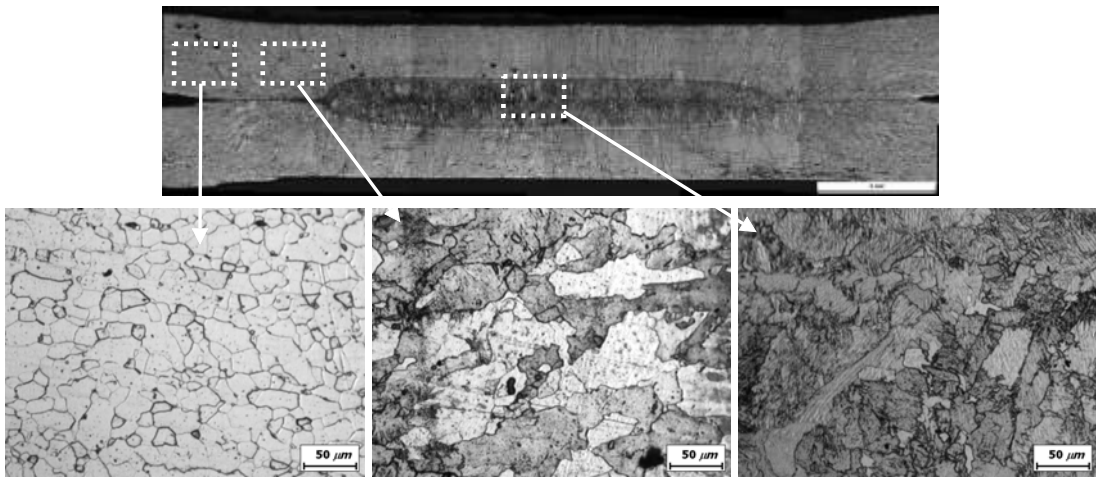
Fig. 8(b)는 Fig. 8(a)의 T-H판재와 나머지 판재 3종을 비교한 것이다. 가압력 250 kgf에서 연속타점실험 시 T-H판재를 제외한 E-L, E-H, T-L 3가지 판재의 전극직경은 거의 동일하며 성장 폭도 유사하다. 반면 가압력 250 kgf의 T-H판재의 경우 전극직경이 E-L, E-H, T-L의 3가지 판재보다 약 0.2mm 크게 관찰되었다. 가압력 300 kgf의 T-H판재는 1600타까지 E-L, E-H, T-L의 3가지 판재와 유사한 거동을 보이지만 1600타 이후 3000타까지 큰 성장 폭을 보이며 계면파단 시점에는 가압력 250 kgf의 T-H판재와 유사한 전극직경을 보인다. 이와 같이 T-H판재의 전극 마모가 나머지 3가지 판재보다 큰 원인은 역시 T-H판재의 높은 표면조도 때문이다. Fig. 5의 동저항에서 T-H판재의 높은 α-peak, 즉 높은 초기발열이 전극의 열화에 영향을 준 것으로 판단된다. Meur등은 실험을 통하여 초기 통전 구간 동안 전극의 온도는 약 600~700℃까지 상승하며 이후 급격히 냉각되는 과정을 반복하는 것

으로 보고하고 있다[13]. 반복적인 전극온도의 상승과 냉각이 전극연화 (softening)의 주원인이며 이때 전극 타격에 의한 소성변형이 전극 선단직경 증가의 직접적인 원인이 된다. 특히 높은 표면조도를 가진 판재의 경우 급격한 초기 접촉저항의 상승으로 인하여 초기 발열이 일반 판재보다 더 높으며 이 발열이 전극 연화를 가속시킨 것으로 예상된다.

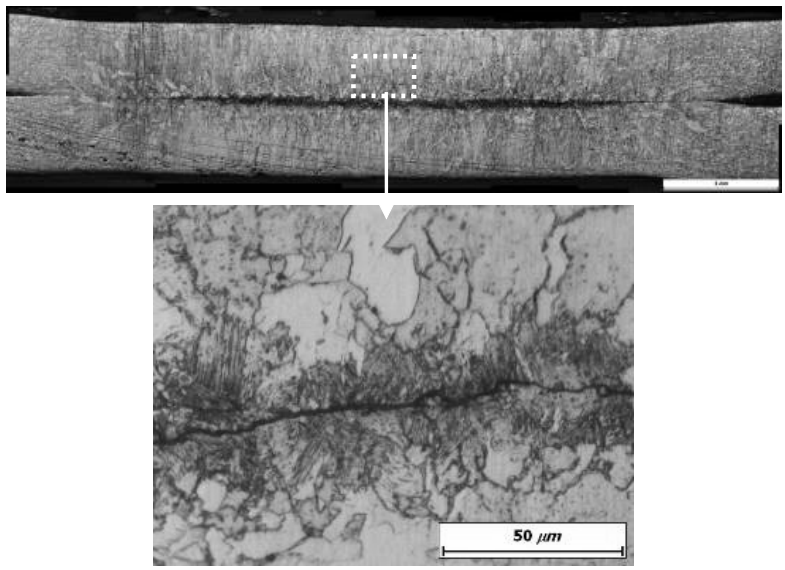
일반적으로 알려진 바로는 점 용접에서 판재와 판재 사이의 저항열이 총저항열과 너깃 형성 및 성장에 가장 큰 영향을 주고 전극과 판재 사이 저항열의 영향은 미비한 것으로 알려져 있다[11,12]. 그러나 표면조도처리강판의 경우, 카본 임프린트 결과를 통해 표면조도가 클 경우 전극수명이 급격히 하락하는 것을 알 수 있다. 따라서 연속타점실험의 전극 열화 측면에서 전극과 판재 사이의 접촉저항과 판재와 판재 계면의 접촉저항을 각각 측정하여 비교할 필요가 있다고 판단된다.

3.4.4 미세조직

Fig. 9(a)는 20타점을 소모한 전극을 사용하여 가압력 250 kgf에서 점 용접을 실시한 T-H 판재시편의 단면조직사진으로 양호한 너깃이 형성되어 용입이 충분히 이루어진 것을 볼 수 있으며 균열과 기공 등의 결함은 관찰되지 않았다. Fig. 9(b)는 T-H판재를 가압력 250 kgf에서 연속타점실험하여 2000타점에서 채취한 판재 시편의 단면 조직사진이다. 판재계면을 중심으로 너깃이 얇게 형성되어 있고 형성된 너깃의 확대사진으로 계면 사이에 존재하는 균열을 확인할 수 있다. 즉, 250



(a)



(b)

Fig. 9 Weld cross sections and weld metal microstructures after (a) 20 welds ; (b) 2000 welds in welding T-H steel

kgf의 가압력에서 T-H판재의 경우 2000타점 영역에서 접합이 이루어질 만한 충분한 발열이 생성되지 못하였음을 의미한다. 그 원인은 앞선 실험들과 마찬가지로 T-H판재의 높은 표면조도가 전극의 마모를 가속시켰기 때문이다. 전극 선단부의 마모에 기인한 T-H판재에 사용된 전극의 직경 증가는 최종적으로 전류밀도의 저하를 발생시키고 2000타점 부근에서 너깃의 형성이 어려운 원인으로 작용하였다.

4. 결 론

1) 가압력 250 kgf와 300 kgf에서 E-H판재와 T-H판재의 로브곡선을 비교한 결과, T-H판재의 비교적 높은 조도에 기인하여 300 kgf의 가압력에서 로브곡선 하한치가 우측으로 이동하였다. 그 원인은 높은 가압력에 의해 표면조도 및 접촉저항이 감소되었고 그에 따른 발열량 또한 감소되었기 때문이다.

2) 연속타점실험에서 T-H판재의 가압력을 250 kgf에서 300 kgf로 증가시킨 경우 연속타점수명 및 버튼 직경이 개선되었다.

3) 인장전단강도 측정 결과 가압력 250 kgf에서 T-H판재의 연속타점 초기 인장전단강도는 E-L, E-H, T-L판재들과 유사하지만 연속타점실험이 진행될수록 인장전단강도의 하락폭이 증가하는 것이 관찰되었고, 표면조도에 기인한 전극과 판재 계면의 발열이 전극의 열화에 기여한다는 것을 알 수 있었다.

4) E-L, E-H, T-L, T-H판재들의 동저항 측정 결과, 표면조도가 α-peak와 β-peak의 형성 시점 및 크기에 영향을 주는 인자라는 사실을 확인하였다.

5) T-H판재의 연속타점실험에서 가압력의 증가는 전극과 판재 계면의 접촉면적을 증가시켜 접촉저항 및 발열량을 감소시켜 최종적으로 전극의 연속타점수명을 증가시켰다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단 신진교수지원의 연구비 지원(D00576)에 의하여 수행 되었으며, 본 실험의 접촉저항 측정에 도움을 준 RIST 이목영 박사님과 연속타점실험에 조언을 주신 부경대학교 조상명 교수님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. G. S. Kim, C. W. Jeong, S. K. Jang: Characterization of Image Clarity and Clarity and Surface Texture for Temper Rolled Sheet Steel, Proc. J. Kor. Inst. Met. &Mater., (1995), 386 (in Korean)
2. S. H. Han, S. Y. Heo: Effect of Initial Surface Roughness of Rolls on Image Clarity and Surface Roughness Properties of Cold Rolled Steel Sheets, Proc. J. Kor. Inst. Met. &Mater., (1998), 218 (in Korean)
3. K. H. Kim, S. S. Park, Y. D. Park: The Resistance Spot Weldability of surface roughness textured cold-rolled steel sheet, Proceeding of the KWS, **48** (2007), 342 - 344 (in Korean)
4. Quanfeng Song, Wenqi Zhang: An Experimental Study Determines the Electrical Contact Resistance in Resistance, Welding Journal, **84-5** (2005), 73-s to 76-s
5. Mohamed Abu-Aesh: Influence of the sheet surface roughness on the resistance spot welding of 0.45% carbon steel, Australasian Welding Journal, **48** (2003), 34 - 41
6. W. B. Ittner and P. J. Magill: A survey of contact resistance theory for nominally clean surfaces, IBM Journal, January (1957), 44 - 47
7. J. G. Kaiser, G. J. Dunn and T. W. Eagar: The effect of electrical resistance on nugget formation during spot welding, Welding Journal, **61-6** (1982), 167-s to 174-s
8. Y. J. Cho, S. H. Rhee, H. I. Shin and K. M. Bae: Characterization of Primary Dynamic Resistance in Resistance Spot Welding, Journal of KWS, **17-2** (1999), 97 - 103 (in Korean)
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 Korean)
10. Kevin Randall Chan: Weldability and degradation study of coated electrodes for resistance spot welding, P h. D. dissertation, Waterloo Uni., Ontario, canada, (2005)
11. 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), 47 - 75
12. N. T. Williams and J. D. Parker: Review of resistance spot welding of steel sheets - Part 2 Factors influencing electrode life, International Materials Reviews, **49-2** (2004), 77 - 108
13. G. Le Meur, B. Bourouga and T.Dupuy: Measurement of contact parameters at electrode /sheet interface during resistance spot welding process, Science and Technology of Welding & Joining **8-6** (2003), 415 - 422