

고Si DP980강 스폿 용접 특성에 미치는 Phosphorus (P) 및 in-situ 후열처리 펄스 조건의 영향

최 두 열^{*,†}

*포스코 제품이용연구센터(PAC)

Effects of Phosphorus and in-situ Post-heat Pulse Conditions on Resistance Spot Weldability of High Si DP980 Steel Sheet

Du-Youl Choi^{*,†}

*Product Application Center, POSCO, In-Cheon 21985, Korea

†Corresponding author : ctoto88@posco.com

(Received November 12, 2015 ; Revised December 7, 2015 ; Accepted December 17, 2015)

Abstract

Recently, application of UHSS(Ultra High Strength Steels) whose tensile strength is over 1000MPa to car body structure are growing due to great needs for light weighting and improved crash worthiness. However, their poor weldability is one of obstacles to expand selecting to car body. In this study, effect of Phosphorus contents on resistance spot weldability of high elongation DP980 steel whose Si content is over 1% was investigated. The cross tension strength (CTS) was decreased showing partial interface fracture as Phosphorus content increase because of solidification segregation of Phosphorus. In order to improve resistance spot weldability by modification of welding condition, in-situ post-weld heating pulse was introduced after main pulse. The optimum cooling time between main and post pulse and post-pulse current condition were determined through FEM welding simulation and DOE tests. The CTS was increased about 1.5 time showing plug fracture. The decrease of Phosphorus segregation was found to be a major reason for weld ductility and CTS improvement.

Key Words : Ultra high strength steel, Dual phase steel, Cross tension strength, Resistance spot welding

1. 서 론

자동차 산업에서 차체 경량화 및 충돌 안정성 향상의 강력한 요구에 의해 적용 소재가 점점 고강도화 되어 최근에는 인장강도 1000MPa급의 강재 적용이 크게 증가하고 있다. 그러나 이러한 초고강도강을 자동차 부품에 적용하는데 있어서 용접성 열위가 장애물이 되고 있다. 높은 강도를 얻기 위해서는 일반적으로 많은 함량의 탄소와 합금원소가 첨가된다. 이에 따라 경화능을 나타내는 탄소당량이 증가하게 되어 용접부가 취약하게 되어 부품이나 차체에서 요구하는 성능을 확보하는데 어려운 점이 있다.

일반적으로 자동차 부품 조립에는 저항용접의 일종인 스폿용접(Spot welding)이 가장 널리 적용되고 있다. 스폿 용접부의 십자인장강도(CTS, Cross Tension Strength)는 용접부의 연성이 클수록 높은 값을 보여준다. 일반적으로 고강도강 스폿용접 방법은 동일 용접전류로 단일 펄스 또는 2펄스 이상의 다펄스 용접을 실시하는 경우가 많다. 그러나 이러한 용접방법을 적용할 경우, 탄소당량이 높은 고강도강은 용접부의 취성이 커져서 Interface Fracture (IF) 또는 Partial Interface Fracture (PIF)가 발생하여 CTS가 낮아지며, 이로 인해 차체 충돌특성이 저하되는 문제가 야기될 수 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해 최근에는 Blind rivet 과 같은 기계적 접합법이나 구조용 접착제와 스폿용접

을 동시에 적용하는 하이브리드 본딩(Hybrid-bonding) 등의 접합법을 통해 고강도강의 용접강도 문제를 개선하고자 하는 노력이 진행되어 왔으며, 하이브리드 본딩은 현재 차체 조립에 적용이 확대되고 있는 추세이다.

그러나 많은 자동차사에서는 생산성 및 경제성 우수한 스폿용접이 향후에도 차체조립의 주 접합공정으로 보고 있기 때문에 새로 개발되는 초고강도강의 스폿용접성을 개선하는 노력도 반드시 필요하다고 생각된다.

이러한 관점에서 초고강도강의 CTS 개선을 위해 통전패턴에 대한 연구결과가 발표되고 있다. 오래전부터 알려져 있는 In-situ post-weld tempering 기법은 본 통전 후에 일정 시간의 냉각시간을 통하여 너깃부를 마르텐사이트로 급냉시키고 이 후에 다시 일정 크기의 전류를 인가하여 템퍼드 마르텐사이트를 생성시켜서 연성을 확보하는 방법이다¹⁾. 그러나 이를 위해서는 최소 500ms 이상의 냉각시간이 추가로 필요하여 자동차 조립라인에 적용하기에는 어려운 방법이다.

이러한 공정시간 증가를 최소화 하기 위하여 응고편석 저감²⁻³⁾, 열영향부 폭 및 위치 제어 경도저감⁴⁾ 등을 위한 다양한 통전패턴에 대한 연구결과가 발표되고 있다. 그 중의 하나는 짧은 용접시간을 부여함으로써 열영향부 연화 위치를 너깃쪽으로 이동시켜서 응력집중을 줄여 줌으로써 십자인장강도를 향상시켰다⁴⁾.

또 다른 방법으로는 너깃 가장자리의 Mn, P, S 등의 응고편석을 감소시킬 수 있는 균질화(Homogenization) 열처리 개념을 도입한 Post-Weld Homogenization (PWH)이 있다²⁻³⁾. 이 방법은 통전패턴의 형태는 PWT와 매우 유사하지만, 본 통전과 후통전 사이의 냉각시간(cool time)의 길이가 약 100ms로 공정시간을 크게 줄일 수 있다는 장점이 있어서 실제 양산라인에 적용 가능성이 높다.

본 연구에서는 인장강도 1000MPa급의 DP(Dual Phase)강을 대상으로 스폿용접부의 CTS에 미치는 불순물 원소의 영향과 CTS 개선을 위한 용접공정 변수의 영향을 조사하고자 하였다..

2. 사용재료 및 실험 방법

본 연구에서 사용된 기본 소재는 인장강도 980MPa급의 냉간압연재로 두께 1.4mm의 비도금 DP980강이었으며, 화학성분과 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다. 본 연구에 사용된 DP980값은 연신율을 높이기 위해 약 1%의 Si를 첨가되어 탄소당량(CE)⁵⁾가 0.3% 수준으로 통상의 0.25%의 DP980에 비해 다소 높은 값을 보여주고 있다. 기계적 성질로는 인장강도 1040MPa, 항복강도 690MPa, 연신율 16% 이었다.

Table 1 Chemical composition of base metal

Chemical compositions (wt%)					
C	Mn	Si	P	S	CE*
0.1	2.7	1.1	0.01	0.003	0.303
CE=C+Mn/20+Si/30+2P+4S					

Table 2 Basic welding conditions

Electrode force	4.5kN
Squeeze time	20 cycle
Number of pulse	3 times
Weld time	8 cycle
Cool time	2 cycle
Hold time	15 cycle

한편 불순물 원소, 특히 P가 용접부 연성에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 상기 DP980강의 화학조성을 바탕으로 하여 P 함량을 10~300ppm 수준으로 변화시킨 진공용해 잉곳을 제조하여, 실험실 열간압연, 냉간압연, 소둔열처리를 거쳐 두께 1.4mm의 판재를 제조하였다.

스폿용접은 교류(AC)전원의 공기압 가압식 정치식 용접기를 사용하였으며, 전극은 Cr동 재질의 DR(Dome Radius)형의 캡팁(cap tip)이 사용되었으며, 외경 16mm, 선단경 6mm, 선단곡률반경이 40R이었다.

본 연구에서 적용된 기본 용접조건은 용접성 평가시 통상적으로 이용하는 ISO 18278-2 규격이었으며⁶⁾, 상세 용접조건을 Table 2에 나타내었다.

주어진 용접조건에서 50mmW × 150mmL 크기의 시편 2개를 십자모양으로 겹쳐서 용접하여 인장시험을 실시하였다. 이때 얻어진 파단하중을 십자인장강도 (CTS, Cross Tension Strength) 라고 불리며, 스폿 용접부의 연성 (ductility) 평가 목적으로 널리 이용되고 있다. 십자인장시험 시의 크로스헤드 속도는 10mm/min으로 일정하게 유지하였다.

용접부의 미세조직은 광학 현미경과 주사전자현미경으로 관찰하였으며, 응고편석 거동을 파악하기 위하여 EPMA를 통한 면, 선분석을 실시하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 CTS에 미치는 P 함량의 영향

Fig. 1는 P 함량을 10~300ppm으로 변화시킨 DP980 용해재에 대한 CTS를 나타낸 것이다. 용접조건은 용접

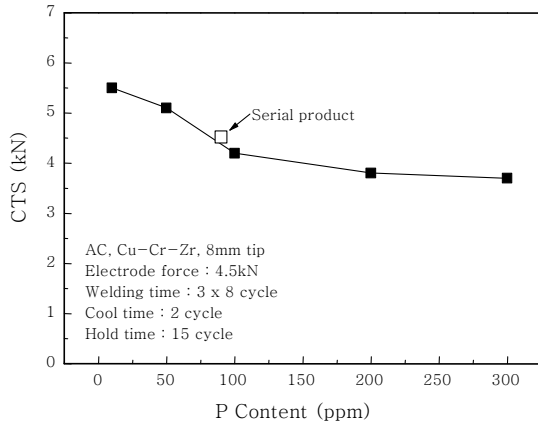


Fig. 1 Effect of P content on CTS of spot welds

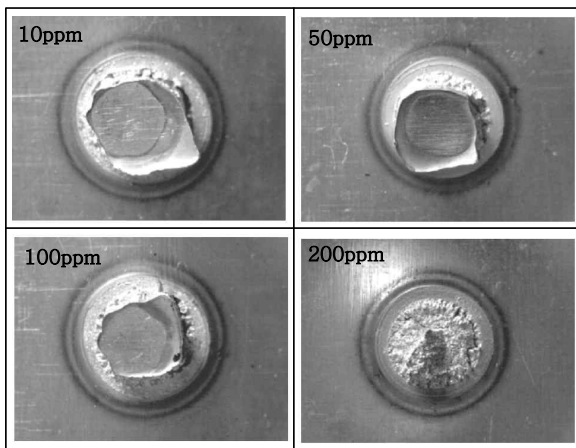


Fig. 2 Fracture images with P content

성 기초 평가시에 사용하고 있는 ISO 18278-2에서 제시된 조건을 적용하였으며, 너깃경이 $4\sqrt{t}(=4.7\text{mm})$ 가 되는 하한전류에서 용접을 실시하였다. 참고로 P 함량이 90ppm인 양산재에 대해서 동일한 방법으로 평가되었다.

실험결과에 의하면 P 함량이 적을수록 CTS가 증가함을 알 수 있다. P 함량에 따라서 CTS가 변하는 것은 파단특성의 차이가 있기 때문이다. Fig. 2는 P 함량에 10, 100, 200ppm에서의 십자인장시험 후의 파단면을 보여주는 것으로, P 함량이 증가함에 따라서 취성파단 면적이 넓어지면서 버튼 (button) 의 크기가 작아짐을 확인할 수 있다. 200ppm 이상의 P함량에서는 계면분리(Interface fracture)가 일어나며 매우 낮은 CTS 값을 보여주고 있다.

P 함량이 증가함에 따라서 취성이 증가하고, CTS가 감소하는 것은 응고시의 P 편석이 증가하기 때문인 것으로 예상된다. Fig. 3는 P함량이 각각 10, 200ppm에서의 너깃 끝단에서 0.2mm 안에서 너깃 세로방향

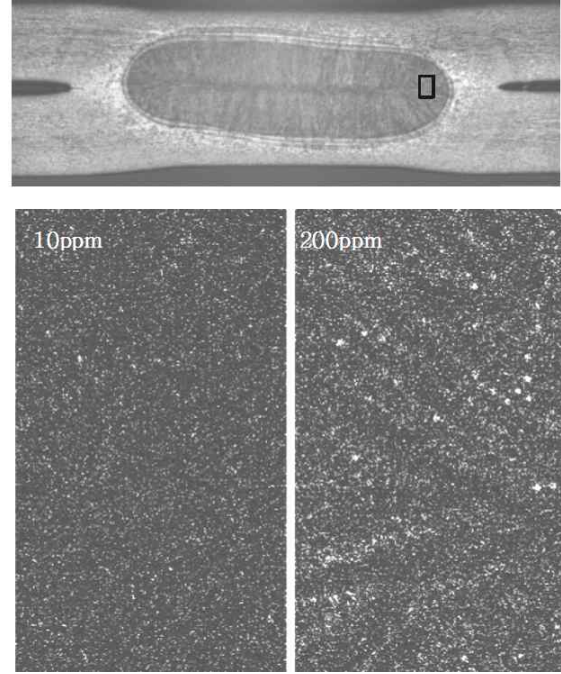


Fig. 3 P distribution in nugget edge

으로 EPMA를 이용하여 P 면분석한 결과를 보여주고 있다. P 함량이 10ppm인 경우, P 편석이 거의 관찰되지 않았지만, 십자인장시험 시 계면분리가 난 200ppm의 경우는 너깃의 상하부에서 동시에 응고된 덴드라이트 형상으로 P의 편석이 명확히 관찰되었다. 이상의 결과로부터 응고시 발생하는 P 편석이 고강도강의 연성 및 십자인장강도에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

3.2 P 편석 저감을 위한 통전패턴 최적화

P 편석 저감을 위해서는 1차적으로 P 함량을 50ppm 이하로 줄여야 하지만, 실제 제강공정에서 P함량을 50ppm 이하로 제어하는 것은 탈린 공정에 부하가 많이 걸리기는 문제가 있다. 이에 스폿용접 공정에서 Fig. 4과 같이 너깃을 생성시킨 후 재가열을 통한 편석을 저감시키는 통전패턴이 다양한 방법으로 검토되고

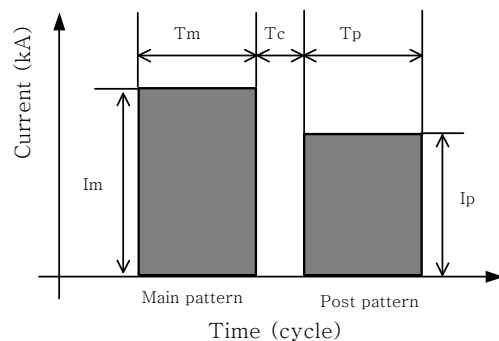


Fig. 4 Schematic of welding pattern and parameters

있다.

Fig. 4의 통전패턴에서 편석저감에 중요한 패러미터는 냉각시간 (Tc), 후통전의 전류 (Ip) 와 시간 (Tp) 이다. 상기 패러미터에 대한 최적조건 도출에는 저항용접 공정해석 전용 소프트웨어인 SORPAS를 활용하였다. 각 패러미터별로 세수준씩 변화시켜서 완전요인배치법으로 해석을 실시하였다. 이때 Tc 는 2, 6, 10 cycle, Ip 는 본통전 전류의 70, 80, 90%, Tp 는 5, 10, 15 cycle 였으며, 본통전 시간과 유지시간은 각각 17 과 15 cycle로 고정하였다.

Fig. 5는 본통전 시간전류 7.0kA 일때, 너깃끝단부에서의 온도변화를 보여주고 있다. Tc가 증가함에 따라서 본통전 후의 온도 감소폭이 크게 증가하였다. Tc가

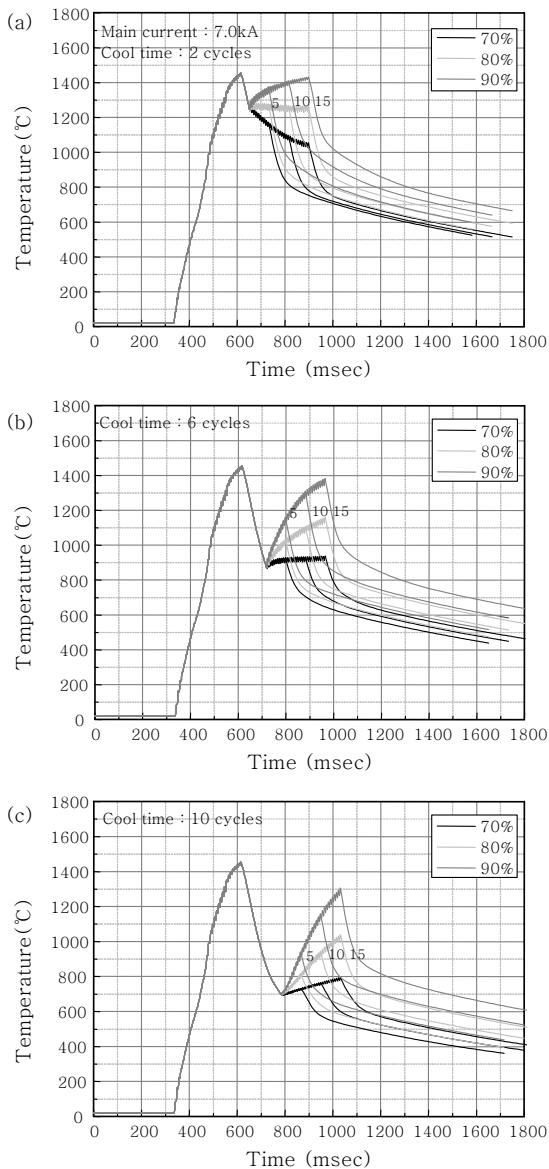


Fig. 5 Temperature profile at nugget edge area with post-pulse current and time; (a) 2 cycles, (b) 6 cycles and (c) 10 cycles of cool time

2 cycle 일때는 1258°C, 6 cycle 일때는 약 882°C, 10 cycle 일때는 698°C까지 온도가 감소하는 것으로 계산되었다. Tc가 짧은 경우, 온도 강하가 약 200°C 정도로 크지 않고 70, 80%의 후통전 전류크기로는 온도가 상승하지 않고 유지되거나 오히려 감소하여 후열처리 효과가 크지 않을 것으로 판단된다. 후통전 전류가 90% 수준에서는 온도는 상승하지만 너깃이 재용융이 일어날 위험이 큰 것으로 생각되었다.

한편, 냉각속도가 10 cycle과 같이 상대적으로 길게 되면, 온도강하가 심하여 후통전의 시간이 길어져야 하기 때문에 용접성 개선 효과가 있다고 하더라도 생산성 측면에서 불리할 것으로 생각된다. 이러한 판단에 의해 냉각시간은 6 cycle로 선정하였으며, 후통전 전류는 냉각시간 후 온도가 재상승 하는 80, 90%의 후통전 전류를 최적 전류범위로 결정하였으며, 최종적으로는 본통전 전류의 85%를 최적조건으로 선정하였다. 후통전 시간은 공정시간과 후열처리 효과적인 측면을 고려하여 중간 수준인 10 cycle로 선정하였다. 이러한 과정을 통해 결정된 최종 용접 패러미터를 Table 3에 나타내었다.

Fig. 6는 도출된 최적조건을 적용하였을 때, 하한전류에서의 CTS 개선 결과를 보여주는 것이다. 개선된 통전패턴의 적용으로 파단모드가 기존 조건 적용 시 PIF (Partial Interface Fracture)에서 FP(Full Plug)로

Table 3 Welding conditions of modified pattern

Electrode force		4.5 kN
Main pattern	Current, Im	4.0 ~ Expulsion
	Weld time, Tm	17 cycle
Post pattern	Cool time, Tc	6 cycle
	Current, Ip	85% of Im
	Weld time, Tp	10 cycle
Hold time		15 cycle

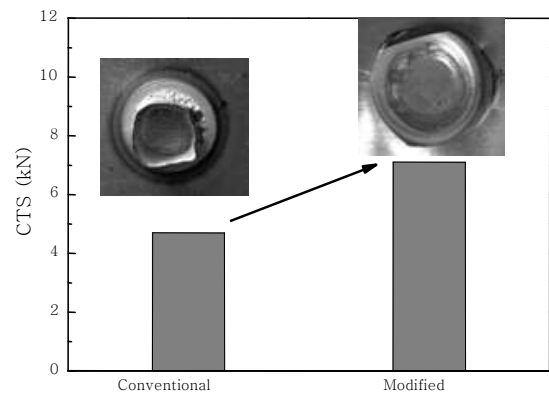


Fig. 6 Improvement of CTS and fracture mode by application of modification current pattern

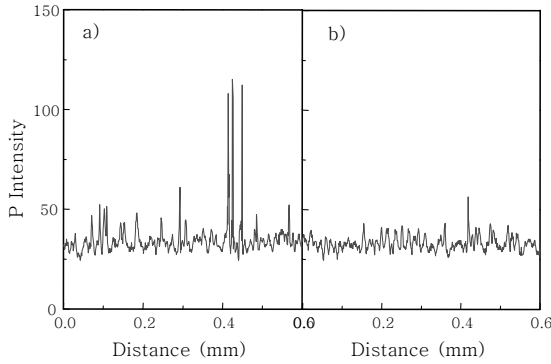


Fig. 7 P line profiles in nugget edge; a) conventional and b) modified current pattern

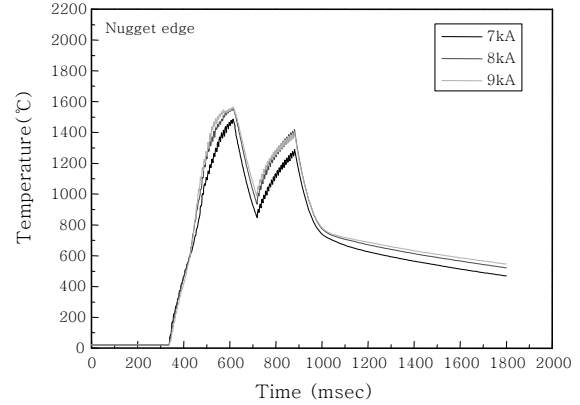


Fig. 9 Temperature profile at nugget edge with modified current pattern

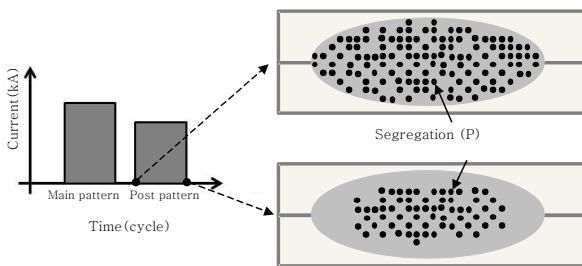


Fig. 8 Schematic of post-pattern effect on decrease of solidification segregation

개선되었으며, 이로 인하여 CTS가 4.7kN에서 7.1kN으로 약 1.5배 크게 증가하였다. Fig. 7은 통상 및 개선조건에서의 너깃 끝단부 P성분의 선분석 결과를 보여주는 것으로, 개선된 통전패턴에 의해 P의 응고편석이 크게 감소되었음을 확인하였다.

Fig. 8은 도출된 통전패턴에 의해 응고편석 저감현상을 개략도로 나타낸 것이다. 본 통전(main pattern)을 거치쳐서 일정크기로 용융된 너깃이 생성되고, 그 후 냉각시간을 통해 응고가 일어난다. 이때 냉각시간이 너무 짧으면 응고가 충분하게 일어나지 않을 것이며, 너무 길 경우에는 온도가 너무 낮아져서 후통전(post-pattern)의 시간이 길어져야 하는 문제가 있다. Fig. 9은 본 연구에서 도출된 용접조건을 FEM 해석에 의해 너깃 끝단부에서의 온도변화를 보여주는 것으로 너깃 끝단부의 온도가 900°C 전후가 되는 냉각시간이 효과적인 것으로 나타났다. 이렇게 결정된 6 cycle의 냉각시간을 거치고 나면 너깃전체에 응고편석이 발생할 것이다. 그 후에 10 cycle의 후통전을 인가하되 너깃이 재용융되지 않는 수준에서 가능하면 높은 전류를 공급하였을 때 너깃 테두리가 가장 먼저 가열되면서 편석되었던 P가 기지대로 재용융되는 것이 너깃의 인성이 개선되는 주요인으로 해석되었다.

4. 결 론

최근 차체경량화 및 충돌안전성 범규 강화에 따라서 인장강도 1000MPa 이상의 초고강도강에 대한 차체 적용이 증가 추세에 있지만, 열위험 용접성이 적용확대에 지연시키고 있다.

본 연구에서는 높은 탄소당량으로 인하여 스폿용접부의 연성이 낮은 자동차용 초고강도강인 고연신계 DP980강의 십자인장강도(CTS)를 개선하고자 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

통상 용접조건에서 P 함량이 증가함에 따라서 스폿용접부의 CTS가 크게 감소하였으며, 200ppm 이상의 P 함량에서는 계면분리가 발생하면서 통상재의 80% 수준의 CTS값을 보였다. 이러한 용접특성의 차이는 P 편석 정도의 차이에 의한 것임을 확인하였다.

본통전 후에 약 본통전 전류의 85% 수준의 후통전을 인가하는 개선된 통전패턴을 통하여 너깃 끝단부의 응고편석 저감을 시켰으며, 이로 인하여 CTS를 약 1.5배 향상되었다.

References

1. M. Mimer, L.E. Svensson and R. Johansson, Process Adjustments to Improve Fracture Behaviour in Resistance Spot Welds of EHSS and UHSS, *Welding in the World*, 48 (2004), 14-18
2. T. Okada, H. Ueda, M. Yasuyama, M. Uchihara, Masato and K. Fukui, Resistance Spot Welding of Boron Steel (Report 4), *Preprints of the National Meeting of JWS*, 90 (2012) (in Japanese)
3. K. Taniguchi, R. Ikeda and S. Endo, Development of Resistance Spot Welding with Pulsed Current Pattern for High Strength Steel Sheets, *Preprints of the National Meeting of JWS*, 90 (2012), 240-241 (in Japanese)
4. H. Hamatani, F. Watanabe, Y. Miyazaki, T. Tanaka, J.

- Maki, H. Oikawa, and T. Nose, Characterization of Cross Tension Strength in Resistance Spot Welding Ultrahigh Strength Steel Sheets, *Preprints of the National Meeting of JWS*, 89 (2011), 44-45 (in Japanese)
5. S. Nayak, Y. Zhou, V. Hernandez and E Biro, Resistance Spot Welding of Dual-Phase Steels, Heat affected zone softening and tensile properties, Trends in Welding Research, *Proceedings of the 9th International Conference*, (2012), 641-649
6. T. Nishi, T. Saito, A. Yamada and Y. Takahashi, Evaluation of Spot Weldability of High-Strength Sheet Steels for Automobile Use, *Nippon Steel Technical Report*, 20 (1982), 37-41
7. Resistance Spot Welding and Projection Welds - Destructive Testing of Welds - Specimen Dimensions and Procedure for Impact Shear Test and Cross-Tension Testing, ISO 14323:2006



- 최두열
- 1969년생
- POSCO 철강솔루션마케팅실 PAC
- 용접야금
- e-mail : ctoto88@posco.com