

가공 전극 팁을 이용한 스테인레스 저항 용접 외판 변형 저감

허동운*, 이세현⁺

(논문접수일 2011. 09. 19, 수정일 2011. 11. 24, 심사완료일 2011. 11. 28)

A Study on the Sheet Separation Reduction of Stainless Steel using Hollow Spot Electrode Tip for Resistance Spot Welding

Dong Woon Huh*, Sehun Rhee⁺

Abstract

Recently, STS 301L joints of side panels to frames for stainless steel rolling stock have been made out by using existing welding methods including Resistance Spot Welding, Laser Welding and Arc Welding. Most of the processes were jointed by spot welding because it is faster at welding and comparatively less expensive for investment in welding facilities than other methods. During spot welding, however, indentation of the metal surface was made due to pressure and melting property of welding. Moreover, since the melting metal was forced to periphery of the plate as indentation was made, sheet separation, which cracked apart between jointed sheets, was carried out. A slight deformation which resulted from sheet separation deteriorated the emotional quality of railway vehicles. This paper suggests that by processing conventional spot electrode tip appropriately, melting metal is able to push up around the processed part (Hollow Spot Electrode Tip) and prevent from being dislodged from first place to periphery. Consequently, sheet separation is remarkably decreased. Also, the emotional quality of appearance of stainless steel rolling stock is enhanced considerably.

Key Words : Resistance Spot Welding(저항 점 용접), Hollow Spot Electrode Tip(중공 전극팁), Sheet Separation(판 분리), STS 301L(스테인레스 301L), Lobe Curve(로브곡선)

1. 서론

일반적으로 스테인레스 철도차량의 차체는 roof, side block, under frame으로 크게 구분할 수 있고 차량 제작 시 이들의 접합은 스폿용접(spot welding), 아크용접(arc welding), 레이저용접(laser welding)등의 방법으로 이루어진다. 그 중에서도 대부분의 접합은 시설 투자비가 비교적 저렴하고, 용접 속도가 빠른 스폿 용접에 의해 이루어진다. 하지만 스폿 용접의 압접,

용접 특성으로 인해 용접부에 indentation이 발생하게 된다. 또한 indentation이 발생한 만큼의 용접부 금속이 용접 주변부로 밀려나가게 되어 접합되는 판재의 사이가 벌어지는 sheet separation 현상이 발생된다⁽¹⁾. 이러한 현상에 의해 철도 차량의 스폿 용접된 외판부는 변형이 생기게 되고, 그 결과 외판 미려도가 저하된다⁽²⁾. 본 논문에서는 외판 변형의 주 원인이 되는 sheet separation 현상을 방지하기 위해 전극 팁을 적절히 가공하여 가공된 부분으로 용융 금속의 이동을 유도하여 외판

* 현대로템 차체생산기술팀

⁺ 교신저자, 한양대학교 기계공학과 (srhee@hanyang.ac.kr)

주소: 133-791 서울시 성동구 행당동17

품질을 향상시켰다.

1.1 기존 스테인레스 차량 문제점

철도차량 제작 시 사용되는 Series Spot 용접과 기존 스폿 용접의 차이점은 1통전으로 2타점의 용접이 이루어진다는 것이 가장 큰 특징이다. 전류의 흐름은 아래 Fig. 1 과 같이 모재 또는 Cu 판을 통해서 흐를 수 있다. 이러한 특징 때문에 (+)전극에서 형성되는 너깃 사이즈와 전류 손실이 발생한 후 용접이 되는 (-)전극에서의 너깃 사이즈는 동일하지 않을 수 있다. 하지만 실제 적용은 일정 피치 내에서 이루어지기 때문에 (-)전극에서의 용접 품질 저하는 (+)전극 대비 5% 이하로 발생한다. 그렇기 때문에 기본적인 겹침 조합에서는 사용 상 무리가 없다.

1.2 외판 변형의 원인

이상의 Series Spot 용접을 이용하여 Fig. 1 의 ①, ② 부재 용접 시 Cu 판과 맞닿은 side block의 외판은 indentation 발생과 동시에 용접부 용융 금속이 용접 주변부로 밀려 나가게 되어 sheet separation 현상이 발생한다. 또한 이 현상으로 인해 side block의 외판 품질이 저하된다. 이론적으로 Fig. 2처럼 용접 시 너깃 형성에 의한 팽창력 F_N 이 전극 가압력 F_E 보다 커지면 스파터 발생 또는 sheet separation 현상이 발생하게 된다. 용접 겹침 두께가 두꺼울 경우 이러한 현상을 쉽게 관찰할 수 있다⁽³⁾.

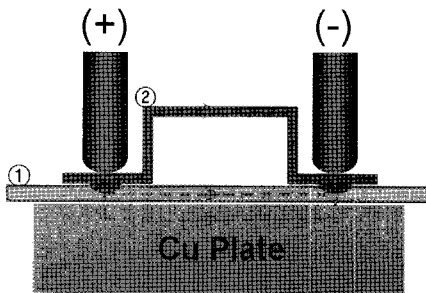


Fig. 1 Schematic diagram of series spot

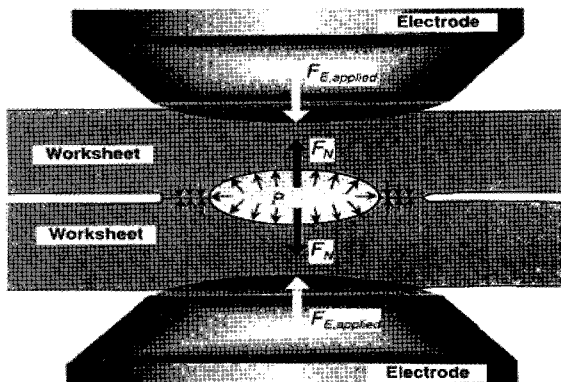


Fig. 2 Principle of sheet separation

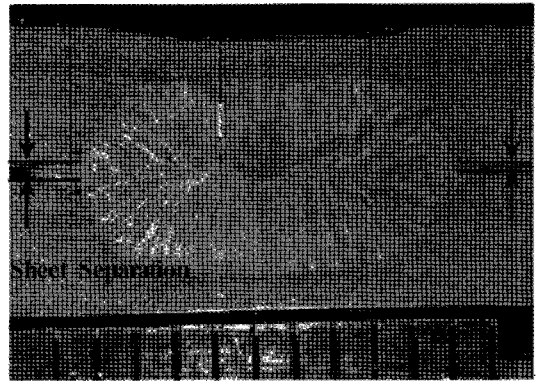
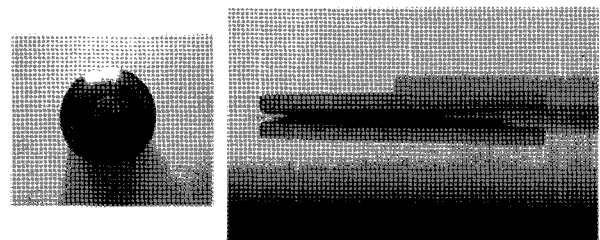


Fig. 3 Cross section of nugget

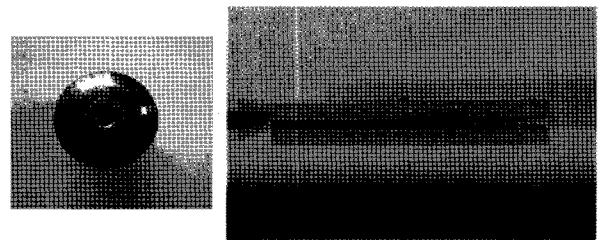
Fig. 3은 실제 용접 단면의 사진으로 용융 금속이 두 모재 사이에서 밀려나온 것을 확인할 수 있으며 이 때문에 양쪽 부분에 gap이 발생한 것을 확인할 수 있다.

1.3 Sheet Separation 저감 방안

일반적으로 스폿 용접을 하면 필연적으로 발생하는 indentation 만큼의 부피가 용접 주변부로 밀려나와 외판이 용기되는 것을 인하였다. 대부분의 용접 전극은 전류 밀도, 용접면 형상 등의 이유로 전극 선단이 R-type 또는 Dome-type이 주로 사용되는데 통전 시 용접부 중앙에서 처음 용융이 되고 외판 변형을 저감시키기 위해선 처음 형성되는 너깃 용융 금속의 팽창력을 적절히 상쇄시킬 수 있는 방법이 필요하다. 이를 위해 전극 선단의 중앙에 홀을 가공하여 용융 금속의 팽창력을 상쇄시키고 밀려나가는 금속을 가공 홀 부분으로 유도하였다⁽⁴⁾. 그 결과 Fig. 4 와 같이 가공 전극 팁을 이용하여 외판의 변형이 줄어든 것을 시편상으로 확인하였다.



(a) Conventional



(b) Improved

Fig. 4 Result of sheet separation reduction

2. 본 론

2.1 적정 가공 전극 선정

외판 변형 최소화 및 용접품질을 최대화 할 수 있는 적정 가공 전극 팁을 도출하기 위해 스테인레스 철도차량에서 주로 사용되는 STS 301L 소재를 사용하여 $\varnothing 19$ 전극 중심을 가공($\varnothing 2, \varnothing 3, \varnothing 4, \varnothing 5$ 가공, 가공 깊이 5mm)하여 실험하였다. $\varnothing 2$ 의 경우 외판 변형의 원인인 압흔부 용융 금속을 가공 홀 부분으로 충분히 유도하지 못하고 외판 변형 및 스패터가 발생하였다. $\varnothing 4, \varnothing 5$ 의 경우 가공 홀의 직경이 적정치를 초과하여 용접 후 용융 금속의 홀 부분으로의 돌출로 인한 외판 함몰이 발생하였고 용접품질은 기존 용접에 비해 저하되었다. $\varnothing 3$ 가공 전극 팁은 전극 마모 정도도 양호하고 외판 변형 저감 효과, 용접 품질 모두 우수한 결과를 나타내었다. 가공 직경 별 외판 변형 결과는 Fig. 5와 같고, 가공 전극 팁을 사용하여 용접한 너깃의 모양은 Fig. 6과 같다.

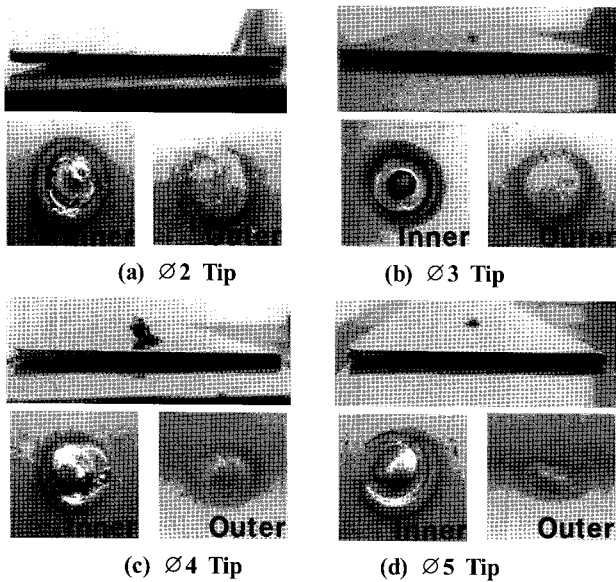


Fig. 5 Outer panel deformation level

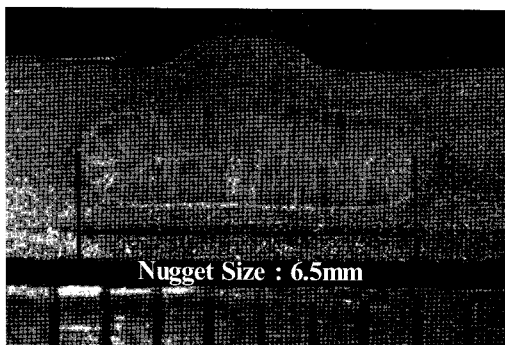


Fig. 6 Improved tip nugget size & shape

2.2 적정 용접 영역 평가 및 도출

구체적으로 $\varnothing 3$ 가공 전극 팁의 외판 변형과 용접 품질은 어떠한 특징을 나타내는지 확인하기 위해 Lobe curve를 도출해 보았다. 일반적으로 사용하고 있는 스폿 용접 대표 용접 이음 ($t2.0 + t1.5 + t2.0 / t1.5 + t2.0 / t1.5 + t1.5 + t2.0$)에 대하여 실험을 수행하였다.

2.2.1 기존 전극 Lobe curve

Table 1 과 Table 2 는 대표적 용접 이음의 인장전단강도, 너깃 사이즈의 Lobe curve를 나타내었다. 데이터는 각 용접 조건 당 3회 반복실험을 한 값의 평균치이며 용접 시 가압력은 7.65kN으로 고정하였다. 인장전단강도의 단위는 N, 너깃 사이즈의 단위는 mm이다. 용접품질이 미달되는 영역, 품질 우수 영역, 스패터 발생 영역을 표시하였다. Table 3은 기존 전극으로 용접했을 경우 정성적 판 분리 현상 발생 정도를 0~3 Level로 정량화 시켜 측정된 데이터이다. 판 분리 현상이 발생하지

Table 1 t1.5+t2.0 Lobe curve (strength)

45	15.307	17.563	20.377	22.456	23.760	25.154
40	15.131	17.455	19.122	21.701	24.358	26.170
35	15.258	17.308	19.406	21.210	23.319	25.246
30	15.288	16.160	18.318	20.812	20.887	21.152
25	14.807	16.160	19.141	20.396	20.948	19.723
Cycle kA	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5

(■:Low Quality, ■:Good weld, ■:Spatter)

Table 2 t1.5+t2.0 Lobe curve (nugget)

45	4.7	5.7	6.6	6.8	7.1	7.1
40	5.2	5.8	6.5	6.6	6.7	7.8
35	5.4	6.8	6.6	6.9	7.2	7.5
30	4.9	6.1	6.4	6.9	6.9	8.0
25	4.1	4.8	6.3	6.5	7.2	7.9
Cycle kA	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5

Table 3 t1.5+t2.0 Sheet separation level

45	0	1	1	3	3	2
40	0	1	1	2	3	2.5
35	0	0	1	2	2.5	2.6
30	0	0	0.5	2	2.5	2.5
25	0	0	0.5	2	2.5	2
Cycle kA	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5

얇은 결과는 Level 0, 판 분리 현상이 심한 결과는 Level 3으로 규정하였으며, Level 1을 초과하는 조건은 외판 변형에 영향을 미칠 것으로 판단하여 따로 구분하였다.

2.2.2 가공 전극 Lobe curve

아래 Table 4, 5, 6은 가공 전극 팁을 이용하여 도출된 인장 전단강도, 너깃 사이즈, sheet separation 결과 Lobe curve이다. 저전류 영역인 6kA 이하 조건에서는 기존 용접 품질을 충족하지 않았기 때문에 실험을 생략하였으며 기존 전극 팁과 동일한 용접 장비와 조건으로 실험하였다.

2.2.3 Lobe curve 평가

기존 전극 Lobe curve와 가공 전극 Lobe curve를 비교한 결과 sheet separation 정도가 크게 개선되었다. 또한 가공 전극 팁의 선단부 면적이 기존 전극에 비해 넓어 전류밀도가 낮아지

Table 4 t1.5+t2.0 Lobe curve (strength)

45	16,121	17,121	21,397	22,652	23,085	
40	15,984	19,632	20,593	23,024	23,417	
35	17,739	17,739	20,495	22,338	22,809	
30	17,719	17,719	19,396	20,985	23,289	
25	15,386	18,043	21,004	21,446		
Cycle kA	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5

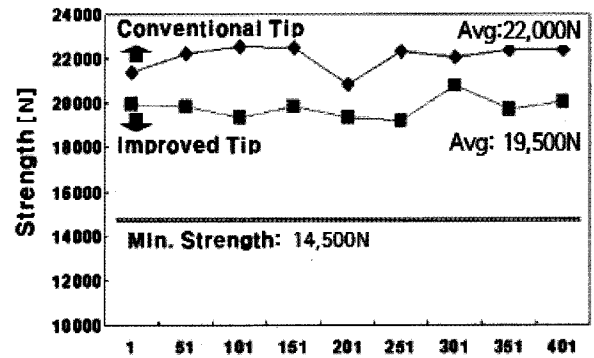
(■:Low Quality, ■:Good weld, ■:Spatter)

Table 5 t1.5+t2.0 Lobe curve (nugget)

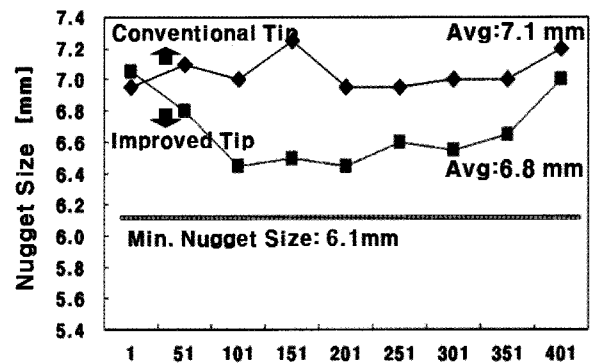
45	6.2	6.3	7.1	8.0	8.2	
40	6	6.4	7.2	8.0	7.9	
35	6.1	6.3	6.5	7.8	8.0	
30	6.1	6	6.4	7.9	8.1	
25	6.1	7.1	7.2	7.5		
Cycle kA	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5

Table 6 t1.5+t2.0 Sheet separation level

45	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
Cycle kA	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5



(a) Tensile shear strength



(b) Nugget size

Fig. 7 Comparison of electrode tip life

게 된다. 그 결과 가공 전극 팁의 Lobe curve가 전체적으로 우측 상향이동 된다는 것을 알 수 있다. 스패터가 발생했던 8.5kA의 용접 조건에서는 가공 전극 팁의 경우 스패터가 발생하지 않고 오히려 우수한 용접 품질을 확보하였다.

2.3 연속타점 비교(전극 수명 평가) 실험

현장에서 제작되는 side block 1ea당 기존 전극 팁은 전극 팁 선단의 마모에 따른 용접품질의 저하가 발생하지 않는 400타점 이하의 연속 용접 후 tip dressing을 실시한다. 따라서 가공 전극 팁 역시 최소 400타점 이상 연속 용접했을 경우 기존 전극 팁과 비교해 동등 혹은 그 이상의 용접 품질이 확보되는지 검증해 볼 필요가 있다⁽⁵⁾. 실험은 Lobe curve의 적정 용접 조건인 전류 7.5kA, 용접 시간 35cycle, 가압력 7.65kN으로 1타점부터 매 50타점마다 인장 전단강도 시편 3ea, 너깃 사이즈 시편 3ea씩 제작하여 측정하였다. 그 결과는 Fig. 7과 같이 400타점까지는 거의 일정한 수준의 용접 품질을 얻을 수 있었다. 실제 동일 용접 조건에서 전극 선단의 면적 차(전류 밀도의 차)에 의해 약 2,000N의 인장전단강도, 0.3mm의 너깃 사이즈 차이가 발생하였다. 동일한 용접 품질을 얻기 위해서는 가공 전극 팁의 용접 시간 또는 용접 전류를 적절히 상승시켜 해결할 수 있다.

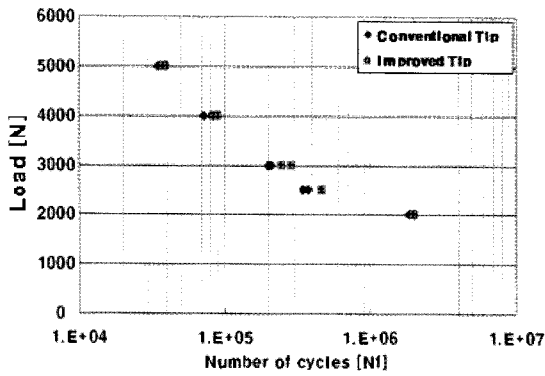


Fig. 8 Comparison of fatigue test

2.4 전극 팁 피로평가

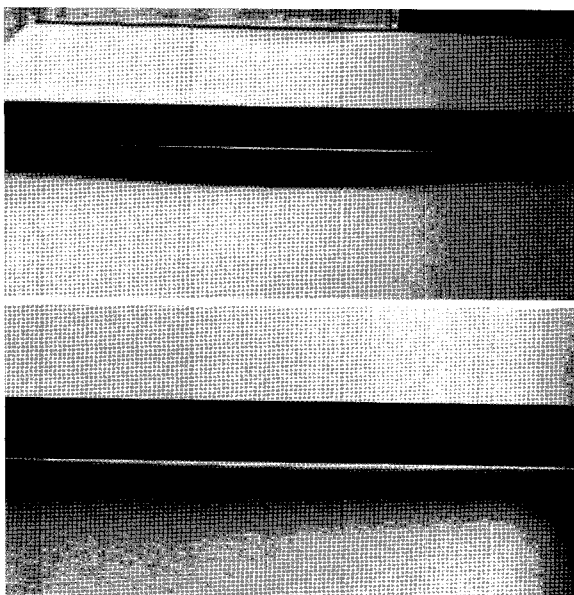
가공 전극 팁을 승객의 안전과 관련된 철도차량 실 제품에 적용하기 위해서 기존 전극 팁과의 피로 성능에 대한 검증이 필요로 된다.

연속 타점 실험과 동일한 용접 조건에서 제작한 시편으로 각 하중 조건(2000N, 2500N, 3000N, 4000N, 5000N)당 피로 시험을 2회 반복한 결과 가공 전극 팁의 피로 수명과 피로 강도는 Fig. 8과 같이 기존 전극 팁과 비교 하였을 때 동등 혹은 이상의 성능이 확보되었다⁽⁶⁻⁸⁾. 이 결과를 통해 우려되었던 품질 저하를 입증, 검증하였다.

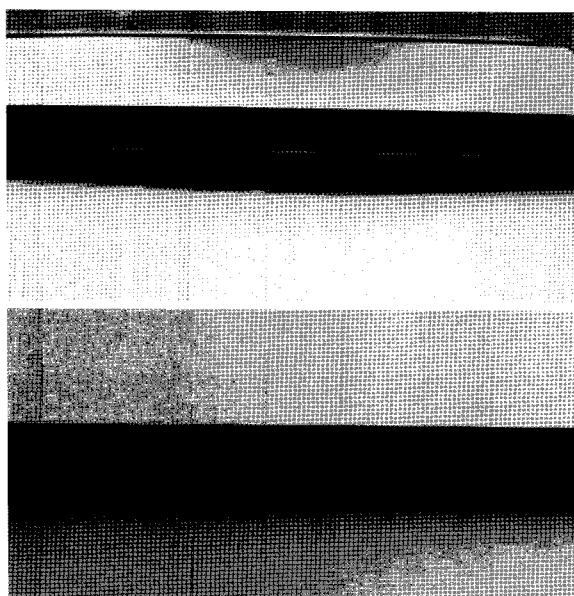
2.5 외판 변형 저감 정도 비교 평가

아래 Fig. 9는 일반 전극 팁과 가공 전극 팁으로 제작한 실제 철도차량 side block의 실 제품이다. 기존 전극 팁의 경우 스폿 타점과 타점 사이의 외판 변형이 발생하여 함몰 또는 융기하는 것을 확인하였다⁽⁹⁾.

반면, 가공 전극 팁의 경우 외판 변형이 저감되어 외판 품질이 향상 되는 것을 확인하였다. 외판 품질은 측정자의 주관적인 판단에 의해 평가될 수 있기 때문에 변형의 정도를 좀 더 정량화하여 판단할 필요가 있다. Fig. 10과 같은 방법을 이용하여 sheet separation 정도를 평가한 결과 기존 0.5mm 이상 발생하던 변형이 0.3mm 이하로 개선되었다.

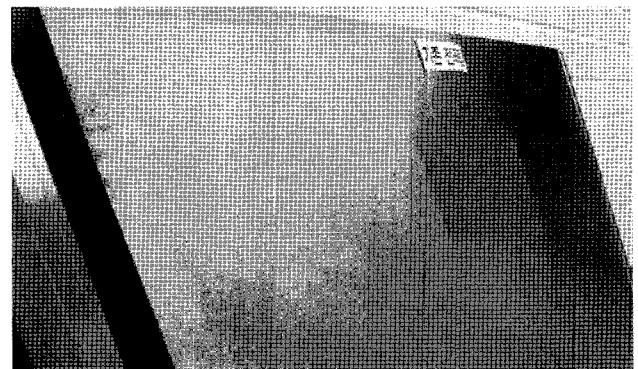


(a) Conventional side block



(b) Improved side block

Fig. 9 Reduced sheet separation measurement



(a) Conventional



(b) Improved

Fig. 10 Reduced sheet separation side block

3. 결론

스폿 용접 시 발생하는 외판 변형을 저감시키기 위해 기존의 전극 팁 선단을 적절히 가공하여 용접 주변부로 밀려나가게 되는 용융금속을 팁 중앙부로 이동을 유도하여 문제를 해결하였다. 또한 우려되는 문제점들은 다양한 실험을 통하여 그 효과를 검증, 확인하였다. 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 판재의 두께 조합에 따른 적정 가공 팁 Φ 가 있다. 본 논문에서는 기초 실험을 통해 외판의 함몰 현상이 발생하지 않고 용접품질이 확보되는 직경은 여러 용접 조합 시험 결과 $\Phi 3$ 이었다.
- (2) 가공 전극 팁을 사용한 결과 sheet separation이 저감되었고, Lobe curve 영역 도출을 통해 기존 전극 대비 용접 품질의 차이가 없음을 확인하였다. 가공 전극팁 내구성 평가와 품질 평가용 피로 시험을 통해 기존 전극 팁 대비 동등 또는 이상의 성능을 확인하였다.

참고 문헌

- (1) Caiping, L., and Liu, X., 2009, "Strength Prediction of Sheet to Tube Single Sided Resistance Spot Welding," *Material & Design*, Vol. 30, No. 10, pp. 4328~4334.
- (2) Trigwell, S., and Selvaduray, G., 2005, "Effects of Welding on the Passive Oxide Film of Electropolished 316L Stainless Steel," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 166, No. 1, pp. 30~43.
- (3) Zhang, H., and Senkara, J., 2006, *Resistance Spot Welding Fundamental and Applications*, Taylor & Francis, Boca Raton, London, New York, pp. 41~189.
- (4) Jun, J., and Rhee, S., 2009, "A Study of Spot Welding Process to Reduce Spatter with the Hollow Tip," *KWJS*, Vol. 27, No. 4, pp. 44~48.
- (5) Kim, T., Cho, Y., and Rhee, S., 2000, "In-Process Time Quality Estimation Method during Resistance Spot Welding," *KSAE Spring conference proceedings*, No. 3, pp. 459~462.
- (6) Yu, H., Yang, S., and Kim, K., 2008, "Fatigue Life Analysis of Spot Weldment of Cold Rolled and High Strength Steel using FEM," *Transaction of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, No. 5, pp. 58~63.
- (7) Vural, M., Akkus A., and Eryurek, B., 2006, "Effect on Welding Nugget Diameter on the Fatigue Strength of the Resistance Spot Welded Joints of Different Steel Sheets," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 176, pp. 127~132.
- (8) Bae, D., and Son, I., 1999, "Evaluation of Fatigue Life and Fatigue Design of Spot Welded Lap Joint," *KSAE conference proceedings*, Vol. B, pp. 72~79.
- (9) Cha, B., and Na, S., 2003, "A Study on the Relationship between Welding Conditions and Residual Stress of Resistance Spot Welded 304-type Stainless Steels," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 22, No. 3, pp. 181~189.