

차체용 1.2GPa급 합금화아연도금 TRIP강의 용접성에 미치는 Weldbond 공정의 효과

이종대^{*,**} · 이혜림^{*,**} · 김목순^{**} · 서종덕^{***} · 김준기^{*,†}

^{*}한국생산기술연구원 용접접합그룹/마이크로조이닝센터

^{**}인하대학교 신소재공학과

^{***}썬신영 기술연구소

Effect of Weldbond Process on the Weldability of 1.2GPa Grade Galvannealed TRIP Steel for Car Body Manufacturing

Jong-Dae Lee^{*,**}, Hye-Rim Lee^{*,**}, Mok-Soon Kim^{**}, Jong-Deok Seo^{***} and Jun-Ki Kim^{*,†}

^{*}Welding & Joining R&D Group, KITECH, Incheon 21999, Korea

^{**}School of Materials Science and Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

^{***}Shin Young Co. LTD, Yeongcheon 38899, Korea

[†]Corresponding author : jkim@kitech.re.kr

(Received August 17, 2015 ; Revised November 24, 2015 ; Accepted July 6, 2016)

Abstract

Galvannealed(GA) steels are now generally used in car body manufacturing for corrosion resistance. In this study, the weldability and joint mechanical behavior of a newly developed 1.2GPa grade GA ultra high strength TRIP(transformation induced plasticity) steel was investigated for three joining processes, such as adhesive bonding, resistance spot welding and weldbonding. Under both shear and peel stress conditions, the failure mode of the adhesive joints were the mixture of the adhesive cohesive failure, adhesive interface failure and coating layer failure. It means that the adhesion strength of GA coating onto the base metal was similar to that of adhesive bonding onto the GA coating. Under the shear stress condition, the weldbonding exerted to expand the optimal spot welding condition of 1.2GPa GA TRIP steel because the strength of adhesive bond overwhelmed that of the resistance spot weld. Under the peel stress condition, the weldbonding also exerted to expand the optimal spot welding condition of 1.2GPa GA TRIP steel by inducing the tear fracture mode rather than the partial plug fracture mode.

Key Words : Weldbond, Adhesive hybrid joining, Ultra high strength steel(UHSS), Galvannealed(GA) TRIP steel, Car body manufacturing

1. 서 론

최근 자동차 산업에서는 차체의 경량화와 충돌안전성 확보를 위해 초고장력강의 사용이 증가하고 있으며, 이를 위해 1.2GPa급 TRIP(transformation induced plasticity) 강이 개발되고 있다¹⁾.

초고장력강은 고합금량에 따른 용접성 저하로 인해 저항 점용접 시 적정 용접조건 영역의 축소와 용접부의

웨이퍼단(shear fracture) 등이 발생하는 것으로 알려져 있다. 1.2GPa급 비도금 TRIP강도 유사한 용접성을 보이지만, 웰드본드 공정을 적용하면 용접부 강도 증가와 바람직한 파단모드를 얻을 수 있다는 연구결과가 보고되어 있다²⁾.

자동차 제조에 사용되는 강판의 내식성은 차량이 수출되는 지역의 부식환경을 고려하여 선택되고 있다. 우리나라의 경우 과거에는 부식무관지역으로 분류되어 비도금 강판의 사용이 많았으나, 차량부식에 대한 품질문

제가 대두됨에 따라 2007년부터는 GA 도금강판을 적용하고 있는 것으로 알려져 있다³⁾.

GA 도금강판은 비도금 강판에 비해 저항 점용접 시 높은 전기전도도와 낮은 전류밀도로 인해 발열량이 감소된다. 이에 따라 비도금 강판에 비해 긴 용접시간과 높은 용접전류가 필요하며, 스파터를 방지하기 위해 가압력도 높게 설정되고 있다^{4,5)}.

본 연구에서는 최근 개발된 1.2GPa급 GA TRIP 강에 대하여 단일접치기 전단시험과 L-인장시험을 통해 GA 도금된 초고장력강에 있어서 웰드본드 공정이 적정 용접구간에 미치는 영향을 접착제 단독 접합 및 저항 점용접 단독의 경우와 비교하여 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 실험재료 및 접합시험편

본 연구에서 사용된 강판은 포스코로부터 제공받은 합금화아연도금(GA) 처리된 두께 1.2 mm의 1180MPa TRIP강으로, Fig. 1에 나타난 주사전자현미경(SEM) 사진에서 보여지는 바와 같이 강판의 양쪽 면에 평균 6 μ m 두께의 도금층이 형성되어 있었다.

접착제 단독, 저항 점용접 단독, 웰드본드의 3가지 공정별 접합부에 대한 평가는 단일접치기 전단시험과 L-인장시험을 통해 수행하였다. 각 시험편의 형상과 치수를 Fig. 2에 나타내었다. 단일접치기 전단시험편은 KS B 0851 규격으로 제작하였고, L-인장시험편은 KS C ISO 14270 규격을 참조하여 제작하였다.

접착제 단독 접합 및 웰드본드 접합에 사용된 접착제는 차체 구조용 접착제로 사용되고 있는 헨켈의 Terokal

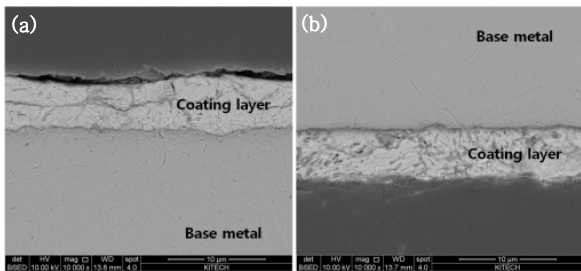
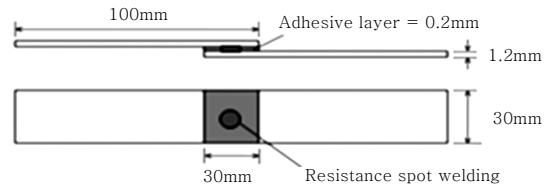
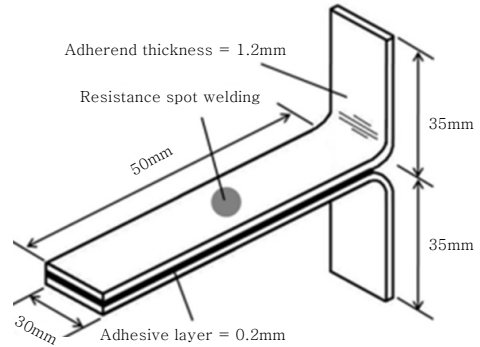


Fig. 1 SEM images of the coating layers in GA 1180 TRIP steel



(a) Single-lap shear test



(b) Modified L-tensile test

Fig. 2 Dimension of test specimens

5089를 사용하였다. Terokal 5089는 열경화성 에폭시 접착제로, 경화물과 접착부의 주요 사양을 Table 1에 나타내었다.

2.2 접합공정

접착제 단독, 저항 점용접 단독, 웰드본드 접합의 공정모식도를 Fig. 3에 나타내었다. GA 1180 TRIP강의 표면은 as-received 상태로, 접합 전에 아세톤으로 15분간 세척한 후 60 $^{\circ}$ C에서 10분 동안 건조시켰다.

접착제 접합공정은 강판의 양쪽 접합면에 접착제를 도포하고, 직경 0.2mm의 글래스비드(glass bead)를 뿌린 다음 포개어 일정한 접착층 두께를 유지하도록 하였다. 접착제의 경화는 클립으로 고정된 상태에서 160 $^{\circ}$ C에서 40분 동안 수행하였다.

저항 점용접은 인버터 DC 용접기를 사용하였고, 선단직경 6mm인 크롬동(Cu-Cr)의 동형상 전극을 상단부와 하단부에 동일하게 적용하였다. 가압력과 용접시간은 각각 300kgf과 18cycle로 고정하였고 용접전류는 5, 6, 7, 8, 9kA로 변화시키면서 용접을 수행하였다.

웰드본드 공정은 접착제를 도포하고 글라스 비드를 적용한 다음, 저항 점용접 단독과 동일한 용접조건으로

Table 1 Properties of the cured product of Terokal 5089 adhesive

Property	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Young's modulus (MPa)	Bake 20minutes at 177 $^{\circ}$ C		
				Impact peel (N/mm)	Lap shear (MPa)	T-peel (N/25mm)
Typical results	> 30	> 10	> 1400	> 25	> 20	> 125

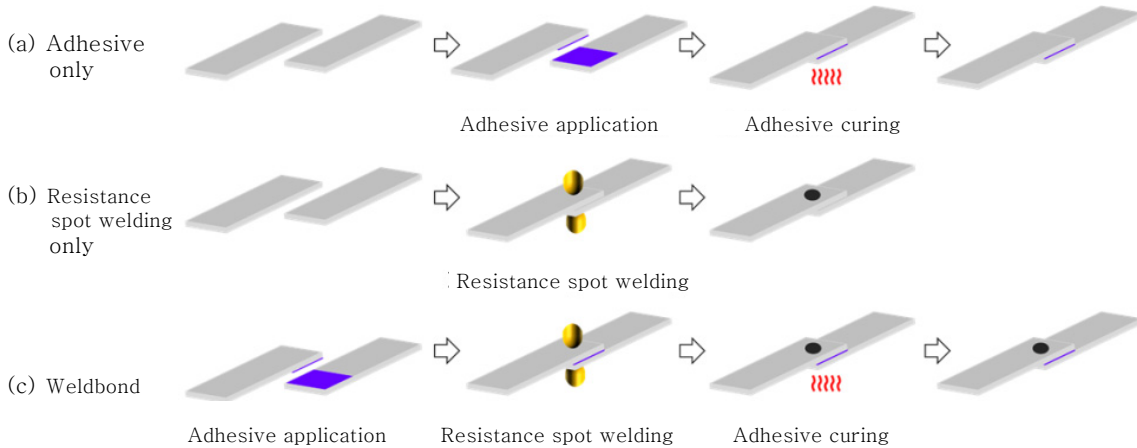


Fig. 3 Schematics of joining processes

저항 점용접을 수행하였으며, 이후 160°C에서 40분 동안 접착제를 경화시켰다.

2.3 인장시험 및 접합부 파단면 분석

단일겹치기 전단시험과 L-인장시험은 유압지그가 장착된 만능인장시험기를 사용하였으며, 각각의 crosshead 속도는 1.3mm/min과 3mm/min으로 시험을 진행하였다. 인장시험 후 파단면은 광학현미경, SEM 및 EDS로 관찰하여 접합부의 파단모드를 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 GA 1180 TRIP강 단일겹치기 전단거동

GA 1180 TRIP강 접착 단독 접합부의 단일겹치기 전단거동을 Fig. 4에 나타내었다. 전단거동은 프리텐션 (pretension)을 제외하면 소성변형이 거의 없는 탄성 파괴 거동을 보이는 것을 알 수 있으며, 최대 전단하중은 32,000N으로 측정되었다.

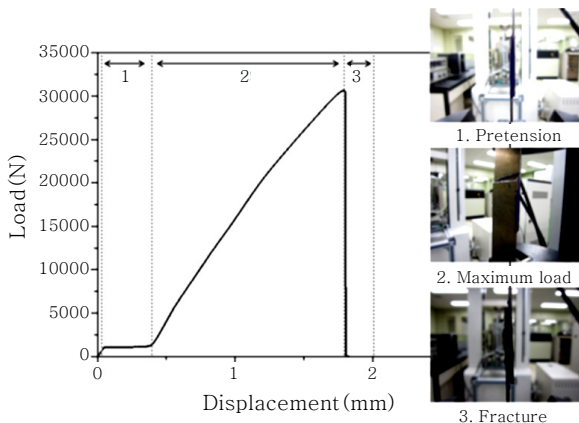


Fig. 4 Single-lap shear behavior of GA 1180 TRIP adhesive joint

접착제 단독 단일겹치기 전단시험 후 파단면 분석결과를 Fig. 5에 나타내었다. 일반적인 접착부의 파단형태는 응집파괴, 계면파괴, 피착재 파괴의 3가지로 구분되어진다. GA 1180 TRIP강과 같이 도금층이 존재하는 경우 피착재 파괴는 도금층 파단과 모재 파단으로 나눌 수 있다.

Fig. 5의 A-1 지점에서 EDS 분석 결과는 Zn와 소량의 Fe 성분이 검출되었고, 반대쪽 시험편의 동일 위치인 C-4 지점에서는 Fe와 함께 소량의 Zn, Al, Si 성분이 검출된 것으로 보아, 도금층에서 파단이 발생된 것으로 판단된다. B-2와 B-3의 경우에는 C, O, Si, Ca 성분만 검출되거나 Zn, Fe 성분만 검출된 것으로 접착제와 도금층 계면에서 파단이 발생한 것으로 판단된다.

이와 같이 접착 단독 GA 도금강판 접착부의 전단 파단면에서 도금층 파단과 접착면 파단이 혼재되어 있다는 것은 전단응력에 대하여 도금층-모재의 접합강도와 도금층-접착제의 접합강도가 유사한 수준임을 의미하는 것으로 판단된다.

용접전류를 변화시킨 저항 점용접 단독과 웰드본드 접합부의 단일겹치기 전단거동 및 최대인장하중의 변화를 Fig. 6에 나타내었고, 각 조건에서의 파단면 사진을 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 6에서 저항 점용접 단독 접합부의 경우 용접전류가 증가함에 따라 최대 전단하중이 증가하는 경향을 보이다가 8kA에서는 24,800N의 최대값을 보이는 것을 알 수 있다. Fig. 7에서 접합부 파단모드는 7kA 이하에서는 웨어파단을 보이다가 8kA부터 부분플러그파단을 보이고 있다. 9kA의 경우 용접 시 스패터가 발생한 것을 감안하면, 저항 점용접 단독 접합 시 GA 1180 TRIP강의 최적 용접조건은 8kA로 제한되는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에서 웰드본드 접합부의 경우 용접전류에 관계없이 30,000N 정도의 최대 전단하중을 유지하는 것을

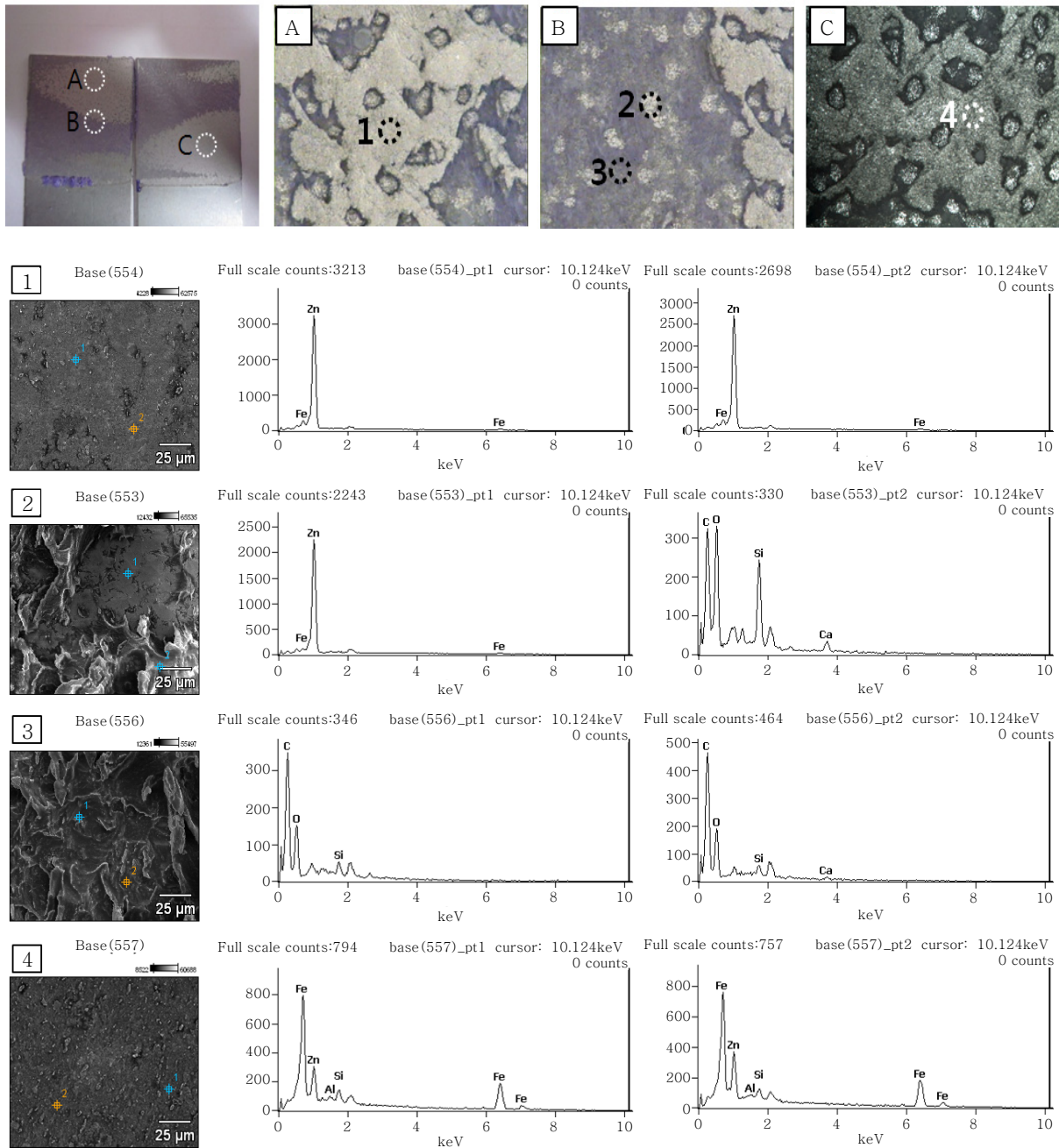


Fig. 5 Fracture surface analyses for the single-lap shear test samples of GA 1180 TRIP adhesive joint by optical microscopy, scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopy

볼 수 있다. Fig. 7에 나타난 웰드본드의 파단면에서 저항 점용접부는 저항 점용접 단독의 경우와 동일하게 용접전류 7kA 이하에서는 쉼파단을 나타내고, 8kA 이상에서는 부분플러그파단이 발생한 것을 볼 수 있다. 접착부 부분에 대한 관찰에서는 Fig. 5에 나타난 접착 단독의 경우와 동일하게 도금층 파단 및 접착층 파단이 관찰되었다.

이는 웰드본드 접합부의 경우 전단응력에 대하여 저항 점용접부와 접착부가 독립적으로 반응하는 것으로 생각할 수 있으며, 접착부 강도가 저항 점용접부 강도

를 초과하기 때문에 웰드본드 접합부는 용접전류와 용접부 파단모드에 관계없이 일정한 최대 전단하중을 보인 것으로 판단된다.

3.2 GA 1180 TRIP강 L-인장거동

GA 1180 TRIP강 접착 단독 접합부의 L-인장거동과 시험 후 파단면의 분석결과를 각각 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다. GA 1180 TRIP강의 L-인장거동은 최대하중구간, 하중감소구간, 파괴구간을 나타내고 있는

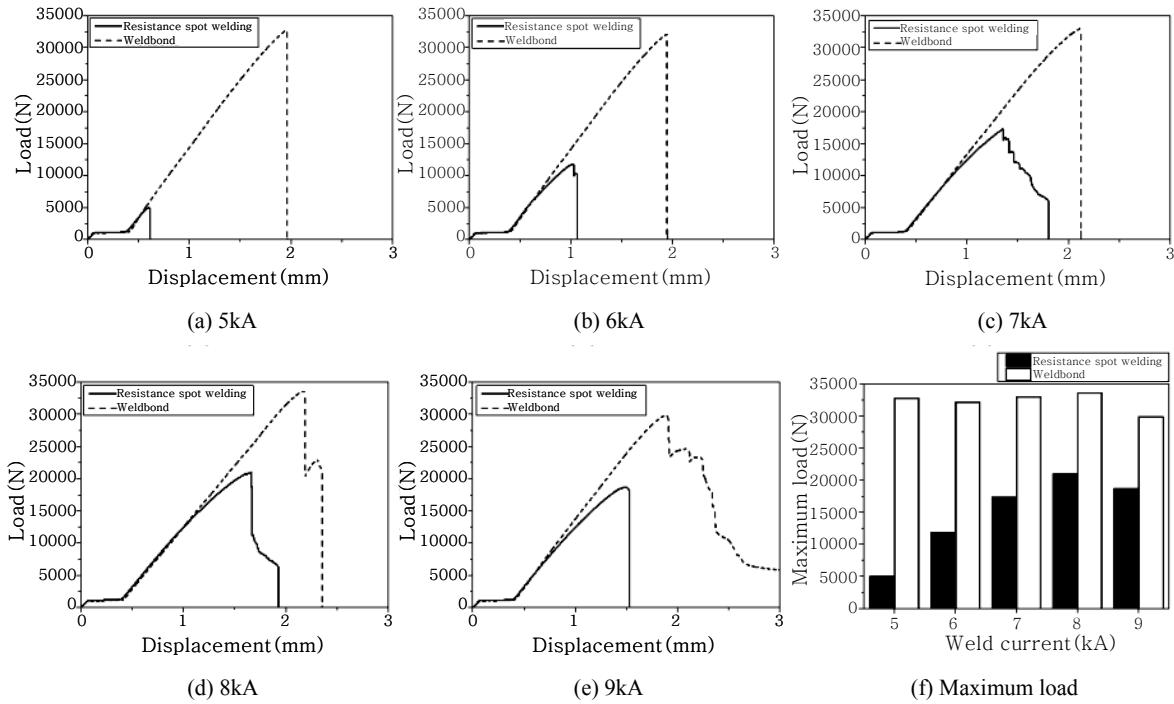


Fig. 6 Single-lap shear behaviors of GA 1180 TRIP steel joints by resistance spot welding and weldbonding with various welding currents

Joining process \ Welding current	5kA	6kA	7kA	8kA	9kA
Resistance spot welding only					
Weldbond					

Fig. 7 Fracture surfaces of single-lap shear test samples by optical microscopy

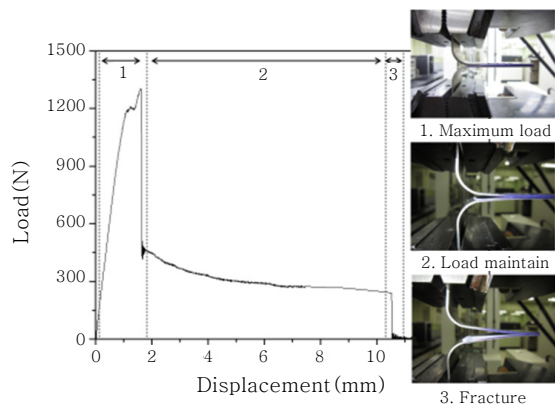
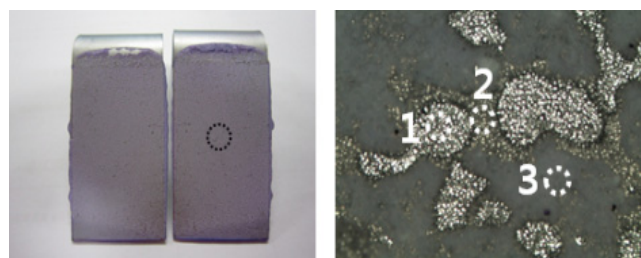


Fig. 8 L-tensile behavior of GA 1180 TRIP adhesive joint



1. Failure at coating layer
2. Adhesive failure between adhesive/coating layer
3. Cohesive failure in adhesive

Fig. 9 Fracture surfaces of L-tensile test samples by optical microscopy

데, 이는 비도금 강판의 경우와 동일한 거동으로, 접합부 가장자리에 형성된 접착제 필릿(fillet)과 시편의 강성에 따른 노치효과에 의한 것으로 보고되어 있다²⁾.

Fig. 9에 나타난 접착부 파단면에 대한 분석결과 단일접치기 전단의 경우와 동일하게 도금층 파단과 접착면 파단이 혼재되어 있는 것으로 나타났다. 이는 박리응력에 대해서도 도금층-모재의 접합강도와 도금층-접착제의 접합강도가 유사한 수준임을 의미한다.

용접전류 변화에 따른 저항 점용접 단독 및 웰드본드 접합부의 L-인장거동과 최대인장하중의 변화를 Fig. 10에 나타내었고, 파단면 사진을 Fig. 11에 나타내었다.

저항 점용접 단독 접합부의 경우 용접전류가 증가함에 따라 최대 박리하중이 증가하는 경향을 보이며, 8kA에서 2,400 kN의 최대값을 보이는 것을 알 수 있

다. 접합부 파단모드는 5kA와 6kA에서는 웨어파단을 보였으며, 7kA에서는 부분플러그파단이 발생하였고, 8kA와 9kA에서는 테어파단(tear fracture)을 보였다. 9kA의 경우 용접 시 스파터가 발생한 것을 감안한다면 박리응력에 대한 최적 용접조건도 단일접치기 전단의 경우와 동일하게 8kA로 제한되는 것을 알 수 있다.

웰드본드 접합부의 경우 5kA를 제외하고는 용접전류 변화에 관계없이 최대 박리하중이 2,700N으로 유지되는 것을 볼 수 있다. 또한 접합부의 파단모드도 5kA에서만 웨어파단이 발생하였으며, 6kA부터는 용접부의 플러그파단과 테어파단이 발생되었다. 9kA의 경우 용접 시 스파터가 발생한 것을 감안한다면 최적 용접조건은 6~8kA로 저항 점용접 단독에 비해 적정 용접구간이 확장된 것을 알 수 있었다.

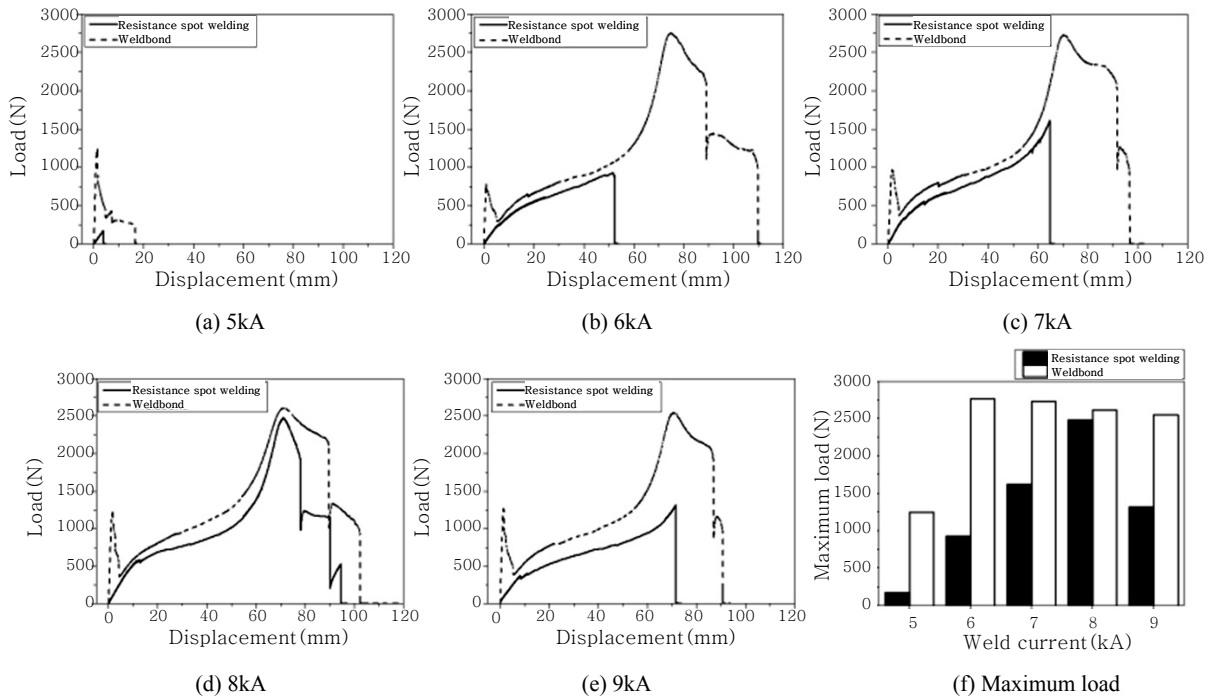


Fig. 10 L-tensile behaviors of GA 1180 TRIP steel joints by resistance spot welding and weldbonding with various welding currents

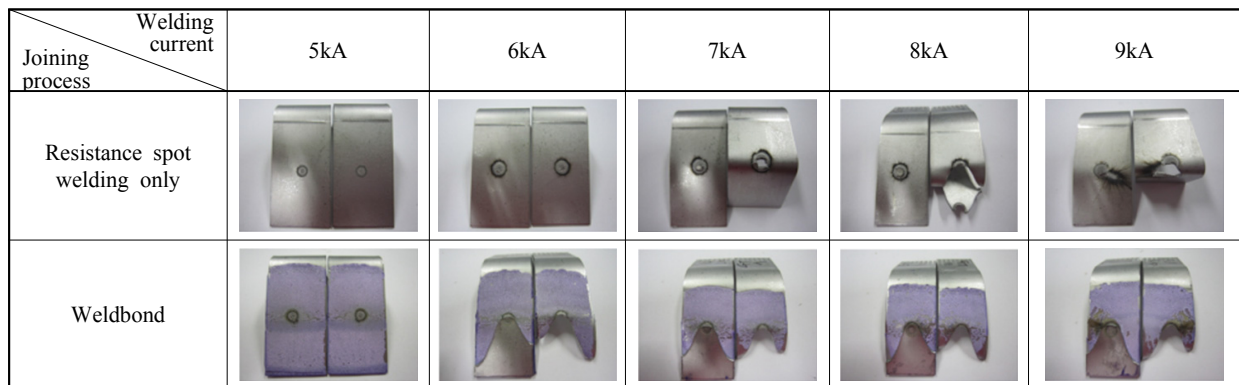


Fig. 11 Fracture surfaces of L-tensile test samples by optical microscopy

웰드본드 접합부의 경우 저항 점용접부 강도가 일정 수준 이상이면 용접전류의 변화에 관계없이 일정한 최대 박리하중을 유지하면서 용접부 플러그파단과 테어파단이 발생하는 것은 저항 점용접부 주위에서 경화된 접착제에 의해 응력이 분산되면서 크랙이 모재 쪽으로 진행된 결과로 보고되어 있다²⁾.

4. 결 론

1.2GPa급 GA TRIP 강에 대하여 접착제 단독, 저항 점용접 단독, 웰드본드 접합공정별 접합부에 대한 단일접치기 전단거동과 L-인장거동을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 단일접치기 전단응력과 L-인장 박리응력에 대하여 접착 접합부의 파단모드가 접착제 응집파괴, 접착계면파단, GA 코팅층 파단이 혼재된 것으로 보아 도금층-모재의 접합강도와 도금층-접착제의 접합강도가 유사한 수준인 것으로 판단되었다.

2) 단일접치기 전단응력에 대하여 웰드본드 접합부는 저항 점용접의 적정 용접구간을 확장시키는 효과를 보였는데 이는 접착부의 접합강도가 저항 점용접부의 강도를 초과하기 때문에 용접전류에 관계없이 일정한 최대 전단하중 값을 나타낸 결과로 생각된다.

3) L인장 박리응력에 대해서도 웰드본드 접합부는 저항

점용접의 적정 용접구간을 확장시키는 효과를 보였는데, 이 경우에는 저항 점용접부 주위에 경화된 접착제에 의한 응력이 분산됨에 따라 부분플러그파단이 억제되고 테어파단이 촉진된 결과로 생각된다.

References

1. R. Kuziak, R. Kawalla and S. Waengler, Advanced high strength steels for automotive industry, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 8-2 (2008), 103-117
2. Jong-Dae Lee, So-Jeong Lee, Jung-Hwan Bang, Dong-Cheol Kim, Mun-Jin Kang, Mok-Soon Kim and Jun-Ki Kim, Mechanical Behavior of Weldbond Joint of 1.2GPa Grade Ultra High Strength TRIP Steel for Car Body Applications, *Journal of KWJS*, 32 (5) (2014), 20-25 (in Korean)
3. 현대자동차 (2015-04-17), 현대자동차 내수용 & 수출용 강판 차별에 대한 오해와 진실 [Web log post], <http://blog.hyundai.com/1728> (in Korean)
4. Ildong Choi, Jiyoung Park, Jae-Won Kim, Mun-jin Kang, Dong-Cheol Kim, Jun-Ki Kim and Yeong-Do Park, A study on tensile shear characteristics for weld-bonded 1.2GPa grade TRIP steels with changes in nugget diameter for automotive body application, *Journal of KWJS*, 33 (2) (2015), 69-77 (in Korean)
5. H. I. Shin and S. S. Kang, A Study on the Spot Weldability of High Strength Steel Sheet and Two Stories Galvannealed High Strength Steel Sheet, *Journal of KWJS*, 12 (3) (1994), 56-62 (in Korean)