

자동차 차체용 1.2GPa급 TRIP 강의 Weld-bond부 너깃경에 따른 인장전단특성에 관한 연구

최일동* · 박지연* · 김재원** · 강문진*** · 김동철*** · 김준기*** · 박영도****,†

*한국해양대학교 재료공학과

**부산대학교 하이브리드 소재솔루션 협동과정

***한국생산기술연구원 용접접합연구그룹

****동의대학교 신소재공학과

A study on tensile shear characteristics for weld-bonded 1.2GPa grade TRIP steels with changes in nugget diameter for automotive body application

Ildong Choi*, Jiyoun Park*, Jae-Won Kim**, Mun-jin Kang***, Dong-Cheol Kim***, Jun-Ki Kim*** and Yeong-Do Park****,†

*Dept. of Materials Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

**National Core Research Center (NCRC) for Hybrid Material Solution, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

***Advanced Welding & Joining R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-840, Korea

****Dept. of Advanced Materials Engineering, Dong-Eui University, Busan 614-714, Korea

†Corresponding author : ypark@deu.ac.kr

(Received March 10, 2015 ; Accepted April 23, 2015)

Abstract

High strength steels have been continually being developed to improve in fuel economy in automotive and ensure safety of passengers. New bonding and welding methods have been required for improving weldability on high strength steels. In this study, resistance spot welding and Weld-bond with nugget diameters of 4.0mm, 5.0mm, 6.0mm and 7.0mm were produced and tested, respectively. In order to confirm the effect of nugget diameters on tensile shear characteristic of the Weld-bond, tensile shear characteristics of Weld-bond were compared with those of resistance spot welding and adhesive bonding. Peak load of Weld-bond were increased as the nugget diameter increases. After appearing maximum peak load continuous fracture followed with second peak owing to load being carried by resistance spot weldment. Fracture modes of the adhesive layer in Weld-bond fractures were represented by mixed fracture mode, which are cohesive failure on adhesive part and button failure at resistance spot welds. The results showed that the tensile shear properties can be improved by applying Weld-bond on TRIP steel, and more apparent with nugget diameter higher than $5\sqrt{t}$.

Key Words : Weld-bond, Adhesive bonding, Resistance spot weld, Nugget diameter, TRIP steel

1. 서 론

최근 자동차 연비 향상을 위한 차체 경량화와 승객

안전을 위한 자동차 차체용 강판의 고강도화에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그 결과 Dual Phase(DP) 강, Transformation Induced Plasticity(TRIP) 강과 같은 Advanced High Strength Steel(AHSS)이

개발되어 자동차 차체에 적용되고 있다. AHSS를 사용함으로써 차체 경량화와 고강도화에 대한 요구는 만족시켰으나, 소재 개발에 따른 새로운 접합방법의 개발이라는 과제가 주어졌다. 실제 자동차 생산 공정에는 저항 점용접(resistance spot welding)이 주로 이용되고 있지만, 새로운 소재의 용접성 한계로 점용접 외의 추가적인 접합방법이 요구되었다. 이러한 요구를 만족시키기 위하여 현재 자동차 차체 조립에 적용되고 있는 기술이 Weld-bond 기술이다¹⁾. Weld-bond는 강판 표면에 접착제를 도포하고 저항 점용접을 실시한 후, 경화 공정을 거치게 된다²⁻⁵⁾. Weld-bond는 저항 점용접부의 인장전단강도(tensile shear strength) 측면과 자동차 차체의 충돌 에너지 특성 등이 매우 우수하게 나타나는 것으로 보고되고 있다⁵⁻⁹⁾. 그 뿐 아니라, Weld-bond의 적용으로 용접부의 내부 표면 부식을 방지하는 효과도 얻을 수 있다⁶⁾. 이와 같은 Weld-bond의 장점들이 많은 연구를 통하여 확인됨에 따라 그 적용 사례는 꾸준히 증가하고 있다.

Sam⁹⁾ 등은 강도가 다른 두 종류의 DP 강에 Weld-bond를 각각 적용한 뒤 접합부의 인장전단강도와 피로 한도(fatigue limit)를 평가하여 Weld-bond를 적용함으로써 접합부의 기계적 특성이 향상된다고 보고하였다. Kwon⁷⁾ 등은 연강의 두께 및 접착제 두께에 따른 인장전단특성에 대해 연구하여 모재(base metal, BM)의 두께가 두꺼워질수록 접합부의 강도는 증가하고, 접착제의 도포 두께가 증가할수록 접합부의 강도는 감소하는 것을 밝혀 Weld-bond 적용 시에는 접착제 두께가 얇은 것이 인장전단강도와 자동차 차체 충돌 특성 등의 향상에 도움이 될 것이라고 보고하였다. 이 외에도 Shen¹⁰⁾ 등은 접착제의 위치에 따른 Weld-bond의 효과를 검증하기 위한 연구를 진행하였다. 이처럼 소재 종류나 두께, 접착제 종류, 접착층의 두께 등과 관련된 Weld-bond 연구가 많이 진행되어 왔음을 알 수 있으며, Weld-bond를 적용하게 되면 인장전단강도 및 피로 한도와 같은 기계적 성질이 향상하는 것을 대부분의 연구 결과를 통하여 확인하였다^{1,4,7-9)}. 그러나 Weld-bond 적용 시 저항 점용접부의 너깃경(nugget diam-

eter)에 대한 규정이 없어 연구자마다 적용하는 너깃경이 달랐으며, 그 결과 Weld-bond부의 기계적 특성이 연구자에 따른 편차를 보였다^{7-9,11)}. 또한 지금까지 Weld-bond의 기계적 특성에 미치는 너깃경의 영향에 대해서는 연구된 바가 없다.

따라서 본 연구의 목적은 Weld-bond의 점용접부 너깃경의 크기가 접합부의 인장전단특성에 미치는 영향을 고찰하는 것이다. 특히 Weld-bond의 너깃경 크기를 달리하여 인장전단시험을 수행하고 그 결과를 분석하였다. 또한 TRIP 강판에 접착제 접합(adhesive bonding)과 저항 점용접을 각각 적용하여 접합한 시험편에 대해서도 인장전단특성을 평가하고 그 결과를 Weld-bond의 인장전단특성과 비교하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편 제작

본 연구에는 두께가 1.2mm인 1180급 TRIP 강이 사용되었으며, 소재의 화학조성을 Table 1에 나타내었다. 접착제는 H사의 구조용 접착제를 사용하였다. 인장전단특성 평가를 위하여 시험편은 단일 겹치기 이음으로 제작하였으며, 시험편의 치수⁴⁾와 접합방법에 따른 제작 개요도는 Fig. 1에 나타내었다. 치수에 맞게 절단한 시험편은 아세톤에 침지하여 15분 간 세척한 뒤 상온에서 건조시켰다. 접착제 도포 두께에 따른 접합 강도를 평가한 연구 결과를 통하여 접착제 두께가 얇을수록 접합 강도가 증가한다는 사실을 확인하였다^{1,7,12)}. 특히 접착제 두께가 0.2mm일 때 접착제 강도가 가장 높게 나타났으며, 접착제 두께가 0.2mm 이하 혹은 그 이상일 때 접착제 강도가 감소하는 경향이 나타났다. 따라서 본 연구의 접합 공정은 한쪽 시험편에 접착제를 도포한 후 0.2mm 크기의 글래스비드(glass bead)를 사용하여 접착층의 두께가 0.2mm로 균일하게 유지될 수 있도록 하였다.

접착제를 도포한 Weld-bond 시험편은 용접부 너깃경이 각각 4.0mm, 5.0mm, 6.0mm, 7.0mm가 되도록 저항 점용접을 실시하였다. 저항 점용접에는 단상 교류

Table 1 Chemical composition of 1180MPa TRIP steel

Elements	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
wt.%	0.167	1.657	2.251	0.018	0.003	0.027	0.013	0.464
Elements	Mo	Al	Ti	V	Zr	N	O	Zn
wt.%	0.002	0.097	0.024	0.003	<0.001	0.0025	0.0147	0.002

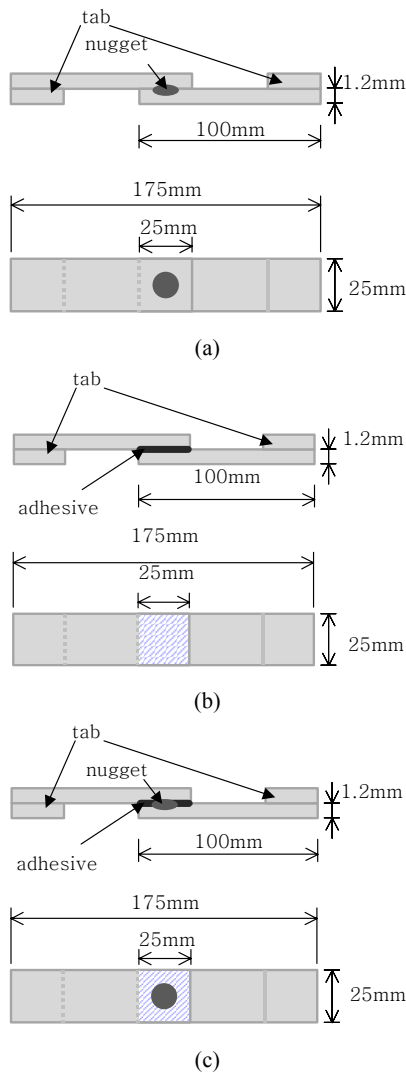


Fig. 1 Schematic diagram of bonding method; (a) Resistance spot welding (b) Adhesive bond and (c) Weld-bond

공압 정치식(75kVA)을 사용하였고, 상하부 전극 팁 (electrode tip)은 돔(dome) 형태의 Cu-Cr재를 사용하였다. 점용접 시에는 중간날림(expulsion)이 발생하지 않는 용접 조건을 적용하였다. 너깃경이 각각 4.0mm

와 5.0mm인 시험편 제작에는 선단 지름이 6mm인 전극과 1단 통전(single pulse)을 이용하여 용접을 실시하였다. 그러나 너깃경이 각각 6.0mm, 7.0mm인 시험편을 선단 지름이 6mm인 전극과 1단 통전을 이용하여 제작하게 되면 중간날림이 발생하므로 선단 지름이 8mm인 전극과 2단 통전(double pulse)을 이용하여 용접을 실시하였다. 특히, 2단 통전을 이용한 용접에서는 용접 시간(weld time) 사이 2 cycle의 냉각시간(cooling time)을 확보하였다. Weld-bond 공정 중 저항 점용접의 압착시간(squeeze time)은 255 cycle로 확보하여 접합계면에서 전류 통전이 가능한 정도로 접착제가 겹침 영역의 가장자리로 밀려날 수 있도록 하였다. 저항 점용접 후에는 접착제 경화를 위하여 160 °C로 유지된 오븐에서 40분 간 경화시켜 Weld-bond 시험편을 완성하였다.

Weld-bond와 저항 점용접의 인장전단특성을 너깃경에 따라 비교하기 위하여 저항 점용접 시험편의 너깃경 또한 4.0mm, 5.0mm, 6.0mm, 7.0mm로 제작하였다. 단, 저항 점용접 전, 용접부에 너깃 크기만큼의 접착제를 도포하여 Weld-bond 용접부와 유사한 조건이 되도록 하였다. 용접부에만 접착제를 도포하여 저항 점용접을 실시함으로써 Weld-bond와 저항 점용접의 용접부 접합 계면의 전류 통전 조건이 유사해지도록 하였다. 단, 저항 점용접의 용접부에 도포된 접착제의 양은 Weld-bond에 비해 상당히 적으며, 너깃 형성부에만 접착제가 도포되어 있어 용접부 주위로 접착제가 밀려나기 쉬우므로 압착시간은 75 cycle로 적용하였다. 압착시간 외의 용접 조건은 Weld-bond와 동일하게 적용하였다. Table 2에 Weld-bond와 저항 점용접의 용접 조건들을 나타내었다.

접착제를 단독으로 사용하여 접합한 접착제 접합 시험편은 Weld-bond의 인장전단특성과의 비교를 위하여 접착제 접합 시험편을 제작하였다. 접착제 접합에 사용된 접착제와 글래스비드는 Weld-bond에 사용된 것과 동일하며, Weld-bond와 동일한 접합 공정을 적용하였다.

Table 2 Welding condition of Weld-bond and resistance spot welding

Sheet thickness [mm]	Nugget diameter [mm]	Electrode		Squeeze time [cycle]		Weld current (AC) [kA]	Weld time [cycle]	Hold time [cycle]
		Tip diameter [mm]	Force [kN]	Weld-bond	Spot welding			
1.2	4.0	6	2.94	255	75	4	14	20
	5.0					5.8		
	6.0	8	3.50			5-7*	15-(2)-15**	
	7.0		4.00					

*Pulse 용접 스케줄 적용 시 1st 및 2nd pulse 각각의 용접 전류

**Pulse 용접 조건 적용 시 1st pulse, cooling 및 2nd pulse 각각의 용접 시간

2.2 너깃경 측정

Weld-bond와 저항 점용접의 경우 압착시간을 제외한 용접 조건을 동일하게 적용하였으므로, 형성되는 너깃경도 동일하다는 전제 하에 Weld-bond 적용 시험편에 대해서만 너깃경을 측정하였다. 용접부 단면과 너깃경을 관찰하기 위하여 용접부에 형성된 너깃을 수직방향으로 절단한 후 콜드 마운팅하였다. 연마작업을 거친 시험편은 picral 용액 (에탄올 98ml, picric acid 3g, HCl 2ml)으로 수 초간 에칭 (etching)하였다. 그 후 실체현미경을 이용하여 너깃을 관찰하고 Image pro plus 상용 프로그램을 이용하여 너깃경을 측정하였다.

2.3 인장전단시험 및 파단 모드 분석

Weld-bond와 저항 점용접 및 접착제 접합의 인장전단특성 평가를 위한 인장전단시험에는 만능인장시험기를 사용하였다. 인장전단시험 시 크로스헤드 속도는 3 mm/min으로 적용하였으며, 실험은 각 시험편당 5 회씩 반복하였다. 단일 겹치기를 이용하여 점용접을 하게 되면 용접부에 형성된 너깃경의 체적을 정확하게 측정하기 어려우므로 인장전단시험 결과는 인장전단강도 [MPa]가 아닌 인장전단하중[kN]으로 나타내었다. 또한, 응력-변형률 곡선(Stress-Strain curve)은 하중-변위 곡선(Load-displacement curve)으로 나타내었다.

Weld-bond의 파단 모드를 분석하기 위하여 인장전단시험 과정을 관찰하였으며, 너깃경에 따라 파단 형태에 차이가 나타나는 것을 확인하였다. 또한, 완전히 파단된 시험편을 통하여 Weld-bond의 점용접부는 너깃경에 따라 파단 형태가 다르게 나타나는 것을 관찰하였다. 접합방법에 따른 파단 모드 비교를 위하여 저항 점용접과 접착제 접합에 대해서도 동일한 방법으로 인장전단시험을 실시하여 파단된 시험편을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Weld-bond의 너깃경 측정 결과

Weld-bond 용접부의 단면을 관찰하고 너깃경 측정 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 전술한 바와 같이 중간날림 없이 너깃경을 성장시키기 위하여 저항 점용접 시 다양한 용접조건을 적용하였고 이를 Table 2에 나타내었다. 각각의 너깃경 형성을 위해 용접 조건에 차이를 두었지만, 중간날림이 발생하지 않았으며 형성된 너깃에서 기공이나 수축공 및 균열 등은 관찰되지 않았다. 이는 상대적으로 큰 전극 선단직경과 높은 가압력의 적용으로 중간날림과 용융부 내의 기공 및 균열 발생이

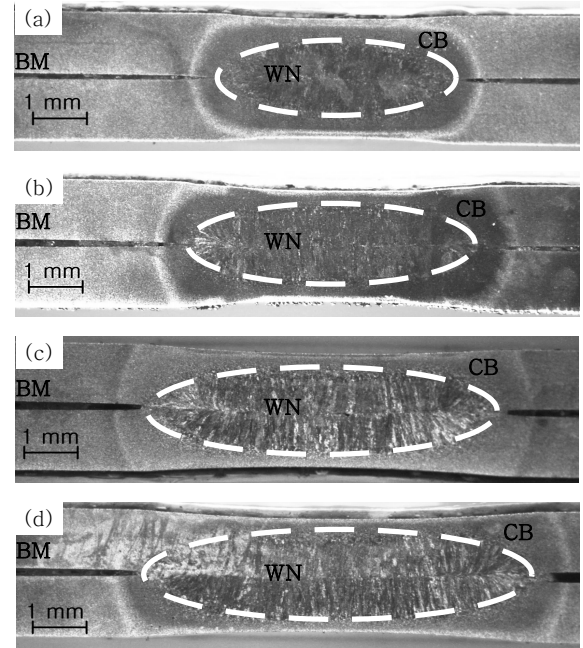


Fig. 2 Cross section images of Weld-bond with nugget diameters of (a) 4.0mm (b) 5.0mm (c) 6.0mm and (d) 7.0mm

억제되기 때문이다¹³⁾. 용접부 단면 관찰을 통해 용접 전류나 가압력이 증가하면 압흔의 깊이가 증가하고 접합계면(faying interface) 사이 간격도 증가하는 것을 확인하였다. 용접 전류나 가압력의 증가로 압흔의 깊이가 증가한다는 사실은 Kong¹⁴⁾ 등의 연구 결과를 통해서도 보고된 바 있다. 과도하게 높은 용접 전류에 의해 중간날림이 발생하게 되면 압흔 깊이가 증가하여 접합부의 강도가 감소한다. 그러나 본 연구에서는 압흔 깊이가 증가의 원인이 중간날림에 의한 것이 아니므로 압흔 깊이가 증가에 따른 접합부 강도의 저하는 발생하지 않은 것으로 판단된다. 이것은 3.2절의 저항 점용접 인장전단시험과 3.4절의 Weld-bond 인장전단시험에서 너깃이 증가할수록 최대인장전단하중 값이 증가하는 것을 통해 확인할 수 있다.

본 연구에서도 용접전류가 증가함에 따라 너깃경이 증가하는 것을 확인하였고, Vural¹⁵⁾ 등의 연구에서도 동일한 결과가 도출되었다. 그러나 용접 전류가 증가함에 따라 열영향부(heat affected zone, HAZ)의 폭과 코로나 본드(corona bond, CB)는 감소하였다. 이것은 전류의 증가로 입열량이 증가하여 열영향부와 모재 사이의 계면이 판재 길이 방향으로 성장하는 것보다 용융부 계면의 증가분이 더 크기 때문으로 사료된다¹⁶⁾. 이러한 현상은 TRIP 1180 강을 이용하여 계면파단(interfacial fracture) 특성을 평가한 Park¹⁷⁾ 등의 연구에서도 확인할 수 있다.

3.2 너깃경에 따른 저항 점용접의 인장전단특성

앞선 실험방법에서도 언급하였듯이 저항 점용접 시, 저항 점용접 용접부의 전류 통전 조건을 접착제와 저항 점용접이 동시에 적용된 Weld-bond 용접부의 전류 통전 조건과 유사하게 유지하기 위하여 전류가 통전되는 너깃경 위치에만 접착제를 도포한 뒤 용접을 수행하였다. TRIP 강에 저항 점용접을 적용하여 너깃경에 따른 인장전단특성을 평가하고 각 너깃경에 대한 최대인장전단하중의 평균값($Load_{mean}$)을 구하여 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 너깃경이 4.0mm 그리고 5.0mm일 때 최대인장전단하중 값은 각각 약 8kN 및 약 16kN이다. 그리고 너깃경이 각각 6.0mm와 7.0mm일 때의 최대인장전단하중의 평균값은 각각 19kN과 20kN이다. 저항 점용접의 경우 너깃경이 증가할수록 최대인장전단하중 값도 증가하나, $5\sqrt{t}$ (단, t 는 모재의 두께) 이상이 되는 너깃경 조건인 6.0mm 이상의 너깃경에서는 너깃경이 증가하더라도 최대인장전단하중 값의 변화가 미미하게 나타난다. Pouranvari¹⁸⁾ 등은 용접 전류와 용접 시간이 증가하게 되면 너깃경이 증가하고 용접부 강도가 향상되지만, 너깃경의 증가로 인해 전기 저항 감소가 더욱 심화되어 너깃의 성장속도가 감소하게 되므로 높은 용접 전류와 용접 시간에서 너깃경이 일정하게 유지되고 용접부 강도 역시 일정하게 유지된다고 보고하였다. 또한 적용된 전극의 선단 직경이 8.0mm이므로 최대 성장 가능한 너깃경 또한 제한되는 것으로 판단된다.

각 너깃경에 대한 저항 점용접의 인장전단시험 결과를 Fig. 4에 하중-변위 곡선으로 나타내었다. 너깃경이 $4\sqrt{t}$ 보다 작은 4.0mm의 경우, 인장전단시험 시 최대인장전단하중 값에 도달하는 순간 파단이 발생하여 하중이 급격하게 감소한다. Fig. 5 (a)의 파단면 사진에

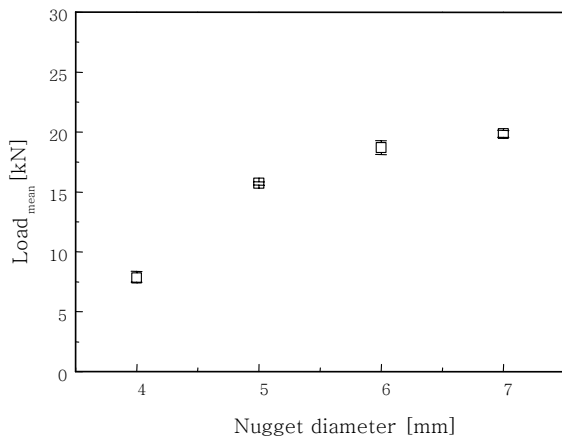


Fig. 3 Maximum tensile shear load of resistance spot welding with increase of nugget diameter

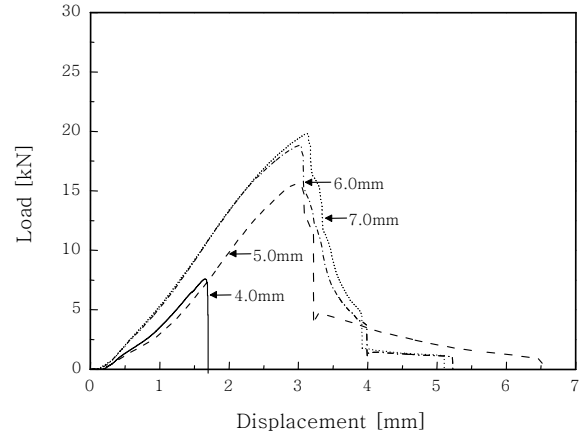


Fig. 4 Load-displacement curves for each nugget diameter (4.0mm, 5.0mm, 6.0mm and 7.0mm) of resistance spot welded samples

서도 전형적인 계면파단이 관찰되었다. 그러나 너깃경이 5.0mm 이상이 되면 최대인장전단하중 값에 도달한 이후 접합부 파단이 종료되는 동시에 모재의 일부로 파단이 진행되었기 때문에 변위가 지속되는 것을 확인할 수 있다. 저항 점용접을 실시한 시험편의 너깃경이 최소 5.0mm 이상이 되어야 인장전단특성이 우수하며, 6.0mm 이상의 너깃경에서는 최대인장전단하중 값의 추가적인 증가는 크지 않으나 모재로 파단이 이행(Fig 5c 와 d)되어 변위가 개선되었다.

너깃경별로 관찰한 저항 점용접의 파단 모드를 Fig. 5에 각각 나타내었다. 파단 모드 관찰을 통하여 용접 전 도포한 전류 통전 영역(너깃부)의 접착제는 너깃경에 관계없이 점용접 시 입열에 의해 전부 연소되고 Fig. 5 (a)의 화살표 표시와 같이 접착제의 흔적만 남아 있는 것을 확인하였다. Fig. 5 (a)와 (b)는 각각 너깃경이 4.0mm와 5.0mm인 점용접 시험편의 파단 모드를 나타낸 것이다. 너깃경이 4.0mm인 시험편은 계면파단, 너깃경이 5.0mm인 시험편은 플러그 파단 (plug fracture)이 발생했으며, 너깃 주변의 모재가 변형되었음을 확인할 수 있다. 이는 시험편에 가해지는

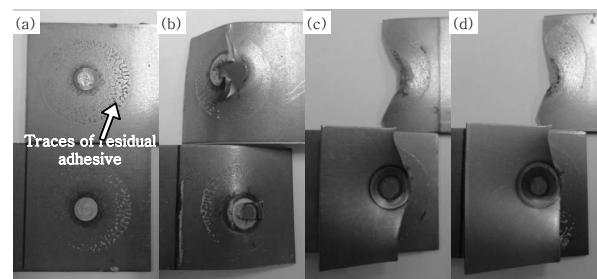


Fig. 5 Fracture mode images of resistance spot welded samples with nugget diameter of (a) 4.0mm (b) 5.0mm (c) 6.0mm and (d) 7.0mm

하중이 너깃에 집중되어 너깃 주변의 모재가 변형되었기 때문이다¹⁹⁾. Fig. 5 (c)와 (d)에는 너깃경이 각각 6.0mm 및 7.0mm인 점용접 시험편의 파단 모드를 나타내었으며, 두 시험편 모두 모재를 관통하는 테어 파단(tear fracture)이 발생하였다. 저항 점용접의 파단 모드는 용접 전류와 용접 시간이 증가함에 따라 계면 파단에서 버튼파단(button failure)으로 이행된다¹⁸⁾. 저항 점용접의 파단모드는 용접 전류와 용접 시간의 변화에 의해 너깃경이 증가하였으며, 이에 따라 파단모드가 계면파단에서 플러그 파단, 테어 파단으로 이행되었다.

3.3 접착제 접합의 인장전단특성

Weld-bond의 인장전단특성과의 비교를 위하여 겹침 영역에 접착제만 도포하여 접합한 접착제 접합 시험편에 대해서도 인장전단특성을 평가하였다. 접착제 접합의 인장전단특성을 평가한 결과와 인장전단시험 후 관찰한 파단 모드를 Fig. 6에 나타내었다. 접착제 접합의 최대인장전단하중은 약 21kN으로 저항 점용접의 인장전단특성보다 우수하게 나타나는 것을 확인하였다. 또한, 접착제 접합 시험편에 인장전단하중이 가해지면 비교적 높은 파단 하중이 나타나며, 최대인장전단하중에 도달한 직후 하중이 급격히 감소한다. 이는 접착제 접합은 접합부 단면이 크고 접합부에 작용하는 응력이 보다 균일하게 분포되는 결합 방식에 의해 응력 집중이 완화되어 인장전단하중이 높게 나타나기 때문이다²⁰⁾.

Kwon⁷⁾ 등의 연구 결과에 따르면 접착제 접합은 접착제 두께가 얇으면 접착층 내에서 접착제가 양분되며 응집파괴(cohesive fracture)가 발생하고, 접착제 두께가 두꺼우면 모재와 접착제 계면을 따라 계면파단이 발생한다. 응집파괴와 계면파단이 함께 발생하는 혼합 모드는 접착층의 두께가 응집파괴와 계면파단으로 나뉘

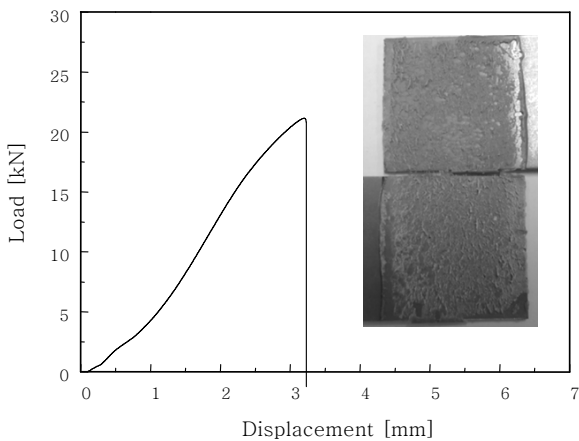


Fig. 6 Load-displacement curve and fracture surface (inserted image) of adhesive bonding

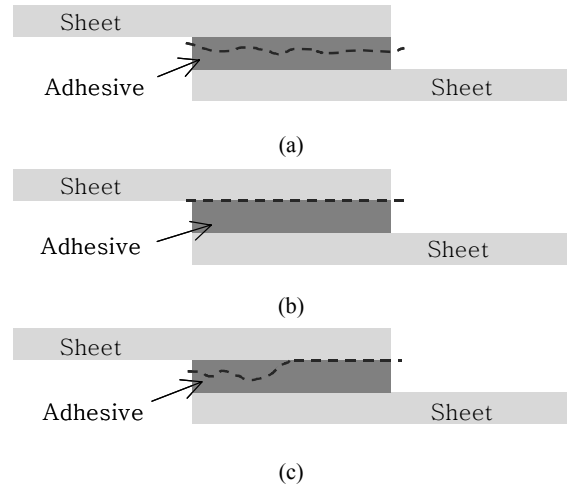


Fig. 7 Schematic diagrams of Fracture mode for adhesive bonding; (a) cohesive fracture (b) interfacial fracture and (c) interfacial + cohesive fracture

는 임계 두께에서 나타난다. 접착제 접합의 각 파단 모드에 대한 모식도를 Fig. 7에 나타내었다. 본 접착제 접합의 경우, 접착제 도포 두께를 0.2mm로 적용하였으며, 이에 따른 응집파괴와 소재의 높은 인장강도(1180MPa)에 기인한 계면파단이 복합적으로 나타나는 것으로 판단된다.

3.4 너깃경에 따른 Weld-bond의 인장전단특성

TRIP강에 Weld-bond를 적용하여 너깃경에 따른 인장전단특성을 평가하고 각 너깃경에 대하여 접착제에 의한 1차 최대인장전단하중 값(first load peak)과 점용접에 의한 2차 최대인장전단하중 값(second load peak)의 결과를 Fig. 8에 각각 나타내었다. First load peak와 second load peak의 위치는 Fig. 9의

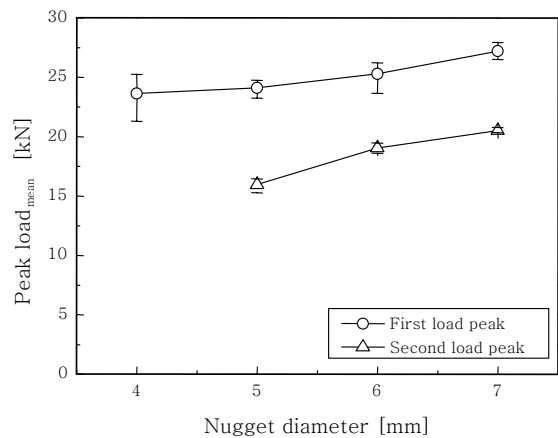


Fig. 8 Peak loads of Weld-bond with increase of nugget diameter; details of first load peak and second load peak are shown in Fig 9

그래프 상에 도시하였다. 너깃경이 4.0mm인 경우, 용접부 너깃이 인장전단하중을 지탱할 수 있는 한계가 접착제보다 낮기 때문에 접착제 도포부에서 응집파괴가 발생할 때 용접부 너깃도 함께 파단이 발생한다. 따라서 너깃경이 4.0mm일 때는 점용접에 의한 second load peak 값이 나타나지 않고 접착제에 의한 최대인장전단하중 값인 first load peak만 나타나며, 그 값은 약 23kN이다. 너깃경이 5.0mm 이상이 되면 접착제 도포부에서 응집파괴가 발생하면서 first load peak가 나타나고, 그 후 점용접부가 인장전단하중을 받아 second load peak를 발생시킨다. First load peak와 second load peak가 모두 나타나게 되면 접합부는 접착제의 최대강도 값을 가지면서 점용접 특성을 동시에 나타내게 되어 충격이나 외력에 대해 지속적인 변위를 수반하게 되므로 Choi 등은 전체적으로 흡수할 수 있는 에너지 영역 범위의 증가 효과가 있는 것으로 보고하였다¹⁾. 너깃경이 5.0mm일 때 first load peak 값은 약 24kN, second load peak 값은 약 16kN이다. 너깃경이 6.0mm, 7mm일 때의 first load peak 값은 각각 25kN, 27kN이고, second load peak 값은 각각 19kN, 21kN이다. Weld-bond 적용 시 접착제 접합에 비해 최대인장전단하중 값의 증가가 크지는 않지만, Weld-bond 너깃경이 증가할수록 최대인장전단하중 값이 증가하는 경향을 나타내는 것을 확인하였다. Weld-bond 적용 시험편에 대하여 인장전단시험을 실시한 결과, 너깃경이 4√t 이상이 확보 되지 않으면 접착제와 너깃이 동시에 파단되어 최대인장전단하중이 한 번 밖에 나타나지 않는다. 그러나 너깃경이 4√t 이상이 되면 일차적으로 접착제에서 파단이 발생하면서 접착제의 최대인장전단하중 값을 나타내며, 그 후 용접부에서 파단이 발생하게 되어 너깃이 가지는 최대인장전단하중 값이 나타나는 것을 확인하였다.

Fig. 9에는 Weld-bond의 인장전단시험 결과 중 대표적인 결과를 하중-변위 곡선으로 나타내었다. 너깃경이 4.0mm일 때는 인장전단시험 시 최대인장전단하중 값에 도달하는 순간 파단이 발생하여 하중이 급격히 감소하는 것을 확인하였다. 그러나 너깃경이 5.0mm 이상이 되면 최대인장전단하중에 도달하는 순간 하중이 감소하지만, 파단 진행 과정에서 약간의 하중이 증가하여 Fig. 9에 표시된 것과 같은 second load peak 값을 나타낸 후 최종 파단으로 이행한다. 앞서 기술하였듯이 Weld-bond를 적용한 시험편의 경우 너깃경이 4.0mm일 때는 4√t 보다 작아 용접부 너깃이 인장전단하중을 지탱할 수 있는 하중이 충분하지 않으므로 접착제 도포부에서 응집파괴가 발생할 때 용접부 너깃도

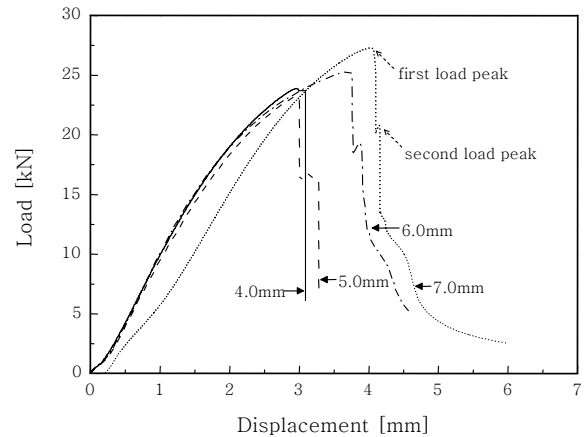


Fig. 9 Load-displacement curves for each nugget diameter (4.0mm, 5.0mm, 6.0mm and 7.0mm) of Weld-bonded samples

함께 파단이 발생하게 된다. 그러나 너깃경이 5.0mm 이상이 되면 4√t 이상의 너깃경을 가지게 되어 용접부 너깃이 지탱할 수 있는 인장전단하중이 상대적으로 증가하므로 접착제가 파단 된 이후에도 인장전단하중을 일부 지탱 가능한 것으로 사료된다. 따라서 너깃경이 5.0mm 이상이 되면 접착제에 의한 최대인장전단하중 값과 저항 점용접에 의한 최대인장전단하중 값이 모두 나타나는 것을 확인할 수 있다. 단, 시험편의 너깃경이 4√t 이상이 되는 경우는 다시 5√t 이상의 너깃경을 가지는지의 여부에 따라 최대인장전단하중 값의 변화가 다르게 나타난다. Fig. 9에서도 확인할 수 있듯이 5√t 이상의 너깃경을 가지는 6.0mm와 7.0mm Weld-bond 시험편들은 접착제 접합과 저항 점용접에 의한 최대인장전단하중 값이 모두 나타나며, 너깃경 증가에 따른 최대인장전단하중 값의 변화가 너깃경이 5.0mm일 때 보다 뚜렷하게 나타난다.

Fig. 10은 너깃경이 각각 4.0mm, 6.0mm인 Weld-bond 시험편에 대해 인장전단시험 중 파단이 발생하는 과정을 나타낸 것이다. 너깃경이 4.0mm일 때는 접착층과 용접 너깃부에서 동시에 파단이 발생한 반면, 너깃경이 6.0mm일 때는 접착층이 먼저 파단된 후 용접 너깃부에서 2차 파단이 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 접착제 접합 또는 점용접만을 적용한 경우와는 달리 Weld-bond 적용 시의 장점은 최대전단인장하중의 상승과 저항 점용접부에서의 2차 파단 발생으로 사료된다. 특히 이러한 효과들은 Weld-bond부 너깃경이 최소 4√t 이상이 되어야 하며, 너깃경이 5√t 이상이 되면 너깃경 증가에 따른 최대인장전단하중 값의 증가도 비교적 뚜렷하게 나타난다는 것을 확인하였다.

Weld-bond 적용 시험편에 대하여 인장전단시험을 실

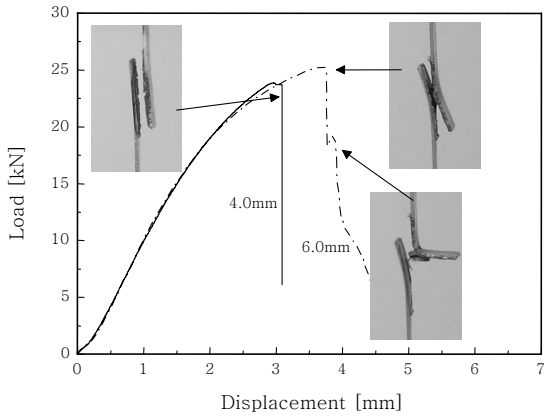


Fig. 10 Load-displacement curve characteristics corresponding to fracture images of Weld-bond with nugget diameters of 4.0mm and 6.0mm, respectively

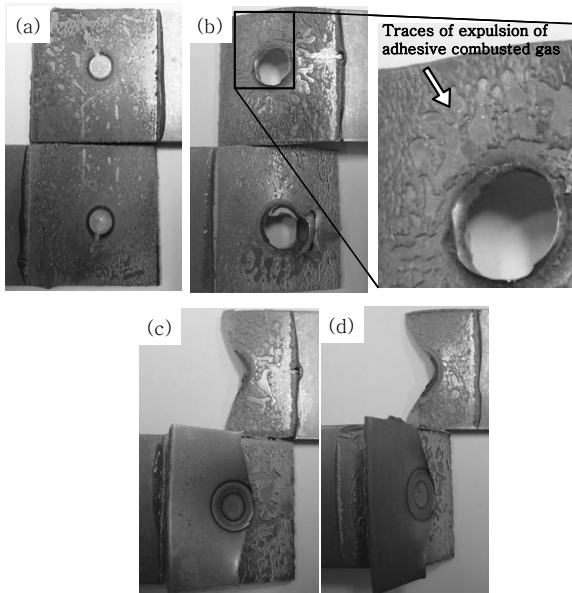


Fig. 11 Fracture mode images of Weld-bond with nugget diameter of (a) 4.0mm (b) 5.0mm (c) 6.0mm and (d) 7.0mm

시한 후 너깃경에 따른 파단모드를 관찰하여 Fig. 11에 나타내었다. Weld-bond의 점용접부 파단모드는 모든 너깃경에서 저항 점용접과 유사하게 나타나는 것을 확인하였다. Weld-bond의 모재에서도 변형이 발생하지만, 접착제를 사용하였기 때문에 겹침 영역 전체에 걸쳐 변형이 발생하므로 저항 점용접에 비해 변형이 적게 발생한다¹⁹⁾. Fig. 11 (b)에는 접착제가 연소되어 접착층 내부에 가스가 발생한 흔적을 나타내었다. 모든 Weld-bond 시험편에서 접착층 내에 가스가 발생한 흔적을 확인할 수 있었다. Weld-bond 공정 중 저항 점용접에 의해 접착제가 연소되면, 접착제가 연소된 부분

은 결함으로 작용한다는 사실이 보고되었으므로^{8,9)}, 접착제의 연소가 Weld-bond의 인장전단강도에도 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

Weld-bond에서 접착제가 도포된 접착층은 너깃경에 관계없이 접착층이 양분되며 파단되는 응집파괴가 발생하여 접착제 접착의 파단 모드와 유사하게 나타났으며, 용접부 너깃은 너깃경에 따라 파단 모드가 다르게 나타났다. Weld-bond의 너깃경이 4.0mm일 때는 너깃 주변의 모재 변형없이 계면파단이 발생하였고, 너깃경이 5.0mm일 때는 너깃 주변의 모재가 변형되며 플러그 파단이 발생하였다. 그리고 Weld-bond의 너깃경이 6.0mm와 7.0mm일 때는 테어 파단이 발생하여 저항 점용접의 파단 모드와 유사한 경향이 나타나는 것을 관찰하였다. 저항 점용접과 접착제 접합의 파단 모드와 Weld-bond의 파단 모드를 비교한 결과, Weld-bond의 파단 모드는 접착제보다는 용접부 너깃의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다.

4. 결 론

자동차 차체용 1180 TRIP 강에 저항 점용접, 접착제 접합, Weld-bond를 각각 적용하여 인장전단특성을 평가하고 파면 모드를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 저항 점용접은 너깃경이 증가할수록 최대인장전단하중 값도 증가하지만, 너깃의 크기가 6.0mm 이상이 되면 최대인장전단하중 값의 변화는 미미하게 나타난다. 너깃경이 증가함에 따라 파단모드는 계면파단에서 플러그 파단, 테어 파단으로 이행된다.

2) 접착제 접합은 하중이 가해질 때 겹침 영역 가장 자리에 응력이 집중되기 때문에 저항 점용접보다 우수한 인장전단특성을 나타내며 파단 모드는 응집파괴로 이행된다.

3) Weld-bond는 접착제 접합에 비해 최대인장전단하중 값의 증가 폭이 크지는 않으나, 용접부 너깃경이 증가할수록 최대인장전단하중 값이 증가하는 경향을 나타낸다. Weld-bond의 전체 파단 모드는 접착제 잔류부위의 경우 응집파단이 발생하고, Weld-bond의 점용접부는 너깃경 증가에 따라 계면파단, 플러그 파단, 테어 파단으로 이행된다.

4) Weld-bond를 접착제 접합 또는 저항 점용접을 단독으로 적용한 경우와 비교했을 때 Weld-bond는 최대전단인장하중 값이 상승하며 저항 점용접부에서 2차 파단이 발생한다. 이러한 특성은 Weld-bond부 너깃경

이 최소 $5\sqrt{t}$ 이상이 되어야 뚜렷하게 나타난다.

감사의 글

이 논문은 2013 학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음 (2013AA162)

References

1. Youngsoo Choi, Sangman Yun, Yongjoon Cho and Se-hun Rhee: A Study on the Crash Characteristics and Analysis of Spot+adhesive Welds in Automobile B-pillar Parts, *Journal of KWJS*, 29(5) (2011), 570-579 (in Korean)
2. A. Al-Samhan and S. M. H. Darwish: Strength prediction of weld-bonded joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 23(1) (2003), 23-28
3. S. M. H. Darwish and A. Ghanya: Critical assessment of weld-bonded technologies, *Journal of Materials Processing Technology*, 105(3) (2000), 221-229
4. I. O. Santos, W. Zhang and V. M. Gonçalves, N. Bay and P.A.F. Martins: Weld bonding of stainless steel, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(14) (2004), 1431-1439
5. P. K. GHOSH and VIVEK: Weldbonding of stainless steel, *ISIJ International*, 43(1) (2003), 85-94
6. Baohua Chang, Yaowu Shi and Liangqing Lu: Studies on the stress distribution and fatigue behavior of weld-bonded lap shear joints, *Journal of Materials Processing Technology*, 108(3) (2001), 307-313
7. J. D. Kwon, S. P. Jeon, Y. B. Moon and H. D. Park: Strength Evaluation of Thin Plate Structures by Weldbonding Method, *Transactions of the KSME*, 1(1) (1998), 139-144 (in Korean)
8. Sullivan Smith, Jurgen Vrenken and Tony van der Veldt: Structural performance of adhesive and weld-bonded joints in AHSS, *Welding in the World*, 57(1) (2013), 147-156
9. S. Sam and M. Shome: Static and fatigue performance of weld bonded dual phase steel sheets, *Science and Technology of Welding and Joining*, 15(3) (2010), 242-247
10. J. SHEN, Y. S. ZHANG, X. M. LAI AND P. C. WANG: Adhesive Placement in Weld-Bonding Multiple Stacks of Steel Sheets, *Welding Journal*, 91(2) (2012), 59-66
11. P. C. WANG, S. K. CHISHOLM, G. BANAS AND F. V. LAWRENCE, Jr.: The Role of Failure Mode, Resistance Spot Weld and Adhesive on the Fatigue Behavior of Weld-Bonded Aluminum, *Welding Journal-Including Welding Research Supplement*, 74(2) (1995), 41-47
12. Ki-Yeob Kang and Jae-Myung Lee: Experimental Study on Evaluation of Bonding Strength of Adhesively Bonded Joints by Adhesive, *Journal of KWJS*, 30(6) (2012), 62-67 (in Korean)
13. Y. D. Shin: A study of expulsion characteristic analysis in resistance spot welding, *Master of Engineering*, (June 1998) (in Korean)
14. Jong-Pan Kong, Gil Mo Kang, Tae-Kyo Han, Kwang-Geun Chin and Chung-Yun Kang: Effect of Si content on Nugget Diameter of Electric Resistance Spot Welded Dual Phase Steel, *Journal of KWJS*, 29(5) (2011), 99-105 (in Korean)
15. M. Vural, A. Akkuş and B. Eryürek: Effect of welding nugget diameter on the fatigue strength of the resistance spot welded joints of different steel sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, 176-1(3) (2006), 127-132
16. Sang-Soon Park, Sang-Min Lee, Young-Min Choi, Nam-Hyun Kang, Ji-Hun Yu, Young-Seok Kim and Yeong-Do Park: Evaluation of Resistance Spot Weld Interfacial Fractures in Tensile-Shear Tests of TRIP 590 Steels, *Korean Journal of Metals and Materials*, 46(10) (2008), 672-682 (in Korean)
17. Sang-Soon Park, Young-Min Choi, Dae-Geun Nam, Young-Seok Kim, Ji-Hun Yu and Yeong-Do Park: Evaluation of Resistance Spot Weld Interfacial Fractures in Tensile-Shear Tests of TRIP 1180 Steels, *Journal of KWJS*, 26(6) (2008), 81-91 (in Korean)
18. M. Pouranvari, H. R. Asgari, S. M. Mosavizadch, P. H. Marashi and M. Goodarzi: Effect of weld nugget size on overload failure mode of resistance spot welds, *Science and Technology of Welding & Joining*, 12(3) (2007), 217-225
19. Baohua Chang, Yaowu Shi and Shijie Dong: Comparative studies on stresses in weld-bonded, spot-welded and adhesive-bonded joints, *Journal of Materials Processing Technology*, 87(1) (1999), 230-236
20. A. Roy, C. Mabru, J. L. Gacougnolle and P. Davies: Damage mechanisms in composite/composite bonded joints under static tensile loading, *Applied Composite Materials*, 4(2) (1997), 95-119