

공학석사 학위논문

자동차 차체용 변태유기소성강의 기계적 특성에
미치는 접합방법의 영향

The Effect of Bonding Method on Mechanical
Properties of Transforming Induced Plasticity Steel for
Automotive Body

지도교수 최 일 동

2015년 01월

한국해양대학교 대학원

재료공학과

박 지 연

본 논문을 박지연의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 이 성 열 (인)

위 원 최 일 동 (인)

위 원 박 영 도 (인)



2015년 01월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vi
1. 서 론	1
2. 이론적 배경	
2.1 변태유기소성(TRIP) 강	3
2.2 저항 점용접	4
2.2.1 저항 점용접의 원리	4
2.2.2 전극 가압력	5
2.2.3 용접 전류	6
2.2.4 통전시간	6
2.3 접착제 접합	7
2.4 Weld-bond	9
2.5 인장전단시험	10
2.6 피로시험	10
3. 실험방법	
3.1 시험편 제작	11
3.1.1 인장전단시험편	11
3.1.2 피로시험편	14
3.2 용접부 관찰	15

3.3 인장전단시험	15
3.4 피로시험	17
3.5 실험결과 처리 방법	19
3.5.1 인장전단시험 결과 처리	19
3.5.2 피로시험 결과 처리	19
3.5.3 인장전단시험 및 피로시험 파단 모드 분석	20
4. 실험 결과 및 고찰	
4.1 용접부 조직 및 너깃경	21
4.2 접합 방법에 따른 인장전단특성	23
4.2.1 저항 점용접의 인장전단특성	23
4.2.2 접착제 접합의 인장전단특성	28
4.2.3 Weld-bond의 인장전단특성	31
4.3 접합 방법에 따른 피로특성	37
4.3.1 저항 점용접의 피로특성	37
4.3.2 접착제 접합의 피로특성	39
4.3.3 Weld-bond의 피로특성	41
5. 결 론	45
참고문헌	47

감사의 글

List of Tables

Table 1 Chemical composition of tested steel

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



List of Figures

- Fig. 1** Cross section of a resistance spot welding.
- Fig. 2** Types of stress in adhesive bonding, (a) compression (b) tension (c) shear (d) peel (e) cleavage.
- Fig. 3** Schematic outline of the Weld-bond process
(a) application adhesive (b) resistance spot welding.
- Fig. 4** Schematic diagram of bonding method, (a) Resistance spot welding (b) Adhesive bonding (c) Weld-bond.
- Fig. 5** Tensile test machine (Instron 4469).
- Fig. 6** Hydraulic servo fatigue test machine (KDMT-320-5).
- Fig. 7** Cross-section of Weld-bond, (a) 4.0mm (b) 5.0mm (c) 6.0mm (d) 7.0mm.
- Fig. 8** Maximum tensile shear load of resistance spot welding by nugget diameter.
- Fig. 9** Load-Displacement curve of resistance spot welding by nugget diameter.
- Fig. 10** Fracture mode of resistance spot welding by nugget diameter during tensile shear test, (a) 4.0mm (b) 5.0mm (c) 6.0mm (d) 7.0mm.
- Fig. 11** Load-Displacement curve of adhesive bonding.
- Fig. 12** Fracture mode schematic diagram of adhesive bonding, (a) cohesive fracture (b) interfacial fracture (c) interfacial + cohesive fracture.
- Fig. 13** Fracture mode of adhesive bonding during tensile shear test.
- Fig. 14** First load peak and second load peak of Weld-bond by nugget diameter.
- Fig. 15** Load-Displacement curve of Weld-bond by nugget diameter.
- Fig. 16** Fracture mode of Weld-bond by nugget diameter during tensile shear test, (a) 4.0mm (b) 5.0mm (c) 6.0mm (d) 7.0mm.

Fig. 17 Fatigue property of resistance spot welding.

Fig. 18 Fracture mode of resistance spot welding during fatigue test.

Fig. 19 Fatigue property of adhesive bonding.

Fig. 20 Fracture mode of adhesive bonding during fatigue test.

Fig. 21 Fatigue property of Weld-bond at 4.0mm.

Fig. 22 Fracture mode of Weld-bond at 4.0mm.

Fig. 23 Fatigue property of Weld-bond at 6.0mm.

Fig. 24 Fracture mode of Weld-bond during fatigue test, (a) over 6kN
(b) below the 5.5kN.



The Effect of Bonding Method on Mechanical Properties of Transforming Induced Plasticity Steel for Automotive Body

Jiyoun Park

Department of Materials Engineering
Graduate School of
Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Advanced High Strength Steel(AHSS), such as Dual Phase(DP) steel and Transformation Induced Plasticity(TRIP) Steel, was developed to improve a fuel efficiency and a safety for passengers. The automobile industry required development of new bonding method because AHSS has poor weldability. Weld-bond was developed and is being used on automotive assembly line. Weld-bond was carried out by adhesive bonding followed resistance spot welding. In this study, 1180 TRIP steel of 1.2mm thickness were prepared by resistance spot welding, adhesive bonding and Weld-bond processes. Tensile shear properties and fatigue properties of the joints were evaluated and were analyzed by tensile shear test and fatigue test.

Nugget diameters of resistance spot welding and nugget diameter of Weld-bond were produced with 4.0mm, 5.0mm, 6.0mm and 7.0mm, respectively, when tensile shear test performed. Tensile shear strength of resistance spot welding is increased as the nugget diameter increases. The failure mode of 4.0mm and 5.0mm are interfacial fracture and plug fracture respectively and tear fracture is occurred over 6.0mm nugget diameter while tensile shear test is performed. Tensile shear strength of adhesive bonding is higher than resistance spot welding. The failure mode of adhesive bonding is cohesive fracture because the thickness of adhesive layer is very thin. Tensile shear strength of Weld-bond is increased as the nugget diameter increases. The failure mode of adhesive layer of Weld-bond is similar to that of adhesive bonding and the failure mode of weld nugget of Weld-bond is similar to that of resistance spot welding.

Nugget diameter of resistance spot welding was produced with 6.0mm and nugget diameter of Weld-bond were produced with 4.0mm and 6.0mm respectively when fatigue test performed. The endurance limit of adhesive bonding is much higher than resistance spot welding but lower than 4.0mm nugget diameter of Weld-bond. The endurance limit of adhesive bonding is similar to that of 6.0mm nugget diameter of Weld-bond.

KEY WORDS: TRIP steel 변태유기소성 강; Weld-bond 웰드본드; Resistance spot welding 저항 점용접; Adhesive bonding 접착제 접합; Tensile shear strength 인장전단강도

제 1 장 서 론

최근 자동차 연비 향상을 위한 차체 경량화와 승객 안전을 위한 자동차 차체 용 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 접합 방법의 개발이라는 과제가 주어졌다. 실제 자동차 생산 공정에는 저항 점용접(Resistance spot welding)이 주로 이용되고 있지만, 새로운 소재의 용접성 한계로 점용접 외의 접합 방법이 요구되었다. 이러한 요구를 만족시키기 위하여 개발되어 현재 자동차 조립에 적용되고 있는 것이 Weld-bond 기술이다[1]. Weld-bond는 강판 표면에 접착제를 도포하고 저항 점용접을 실시한 후, 경화 공정을 거치게 된다[2-5]. Weld-bond의 적용으로 저항 점용접부의 인장전단강도와 피로특성 및 자동차 차체의 충돌 에너지 특성 등이 매우 우수하게 나타나는 것으로 보고되고 있다[5-9]. 그 뿐 아니라, Weld-bond의 적용으로 용접부의 내부 표면 부식을 방지하는 효과도 얻을 수 있다[6]. 이와 같은 Weld-bond의 장점들이 많은 연구를 통하여 확인됨에 따라 그 적용사례는 꾸준히 증가하고 있다.

Sam[9] 등은 강도가 다른 두 종류의 DP 강에 Weld-bond를 각각 적용하고 인장전단강도와 피로한도를 평가하여 Weld-bond의 적용으로 접합부의 기계적 특성이 향상된다고 보고하였다. Kwon[7] 등은 연강의 두께 및 접착제 두께에 따른 인장전단특성에 대해 연구하여 모재의 두께가 두꺼워질수록 강도가 증가하고, 접착제의 도포 두께가 증가할수록 강도가 감소하는 것을 밝혀 Weld-bond 적용 시에는 접착제 두께가 얇은 것이 인장전단강도와 자동차 차체 충돌 특성 등의 향상에 도움이 될 것이라고 보고하였다. 이처럼 소재 종류나 두께, 접착제

의 두께 등에 따른 Weld-bond의 성능에 대한 연구가 많이 진행되어 왔음을 알 수 있다. 그러나 Weld-bond와 접착제 접합(Adhesive bonding)의 기계적 특성을 비교한 결과가 연구마다 다르게 나타나는 것을 확인하였다. 이는 Weld-bond 적용 시 Weld-bond의 너깃경(nugget diameter)을 고려하지 않고 연구가 진행되었기 때문인 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 너깃경을 고려하여 Weld-bond 및 저항 점용접 시험편을 제작하고, Weld-bond와 동일한 접합 공정을 적용한 접착제 접합 시험편을 제작하여 접합 방법이 TRIP 강의 인장전단특성과 피로특성에 미치는 영향을 고찰하고자 한다. 나아가 점용접 부의 너깃경이 TRIP 강의 인장전단특성과 피로특성에 미치는 영향도 고찰하고자 한다. Weld-bond와 접착제 접합, 저항 점용접을 각각 적용한 시험편에 대하여 인장전단시험과 피로시험을 실시하였다.



제 2 장 이론적 배경

2.1 변태유기소성(TRIP) 강

TRIP 강은 Zackay[10] 등에 의해 개발되었으며, Ni과 Cr이 다량 함유된 준안정 오스테나이트 스테인리스강이다. 상온에서도 오스테나이트가 비교적 안정하게 존재하도록 하여 소성변형과정에서 가공유기 마르텐사이트(Martensite)가 변태되도록 설계되었다. TRIP 강은 초강력강 중에서 강도와 연성의 균형이 뛰어난 강이다. 탄소강에서 잔류 오스테나이트를 얻기 위한 방법으로는 탄소나 오스테나이트 안정화 원소(Ni, Mn 등)를 첨가하여 M_s 점을 상온까지 낮추거나, 오스템퍼링(Austempering)을 이용하는 방법이 있으며, 이러한 방법을 이용하여 강도와 연성 밸런스가 우수한 강을 개발하고 있다[11,12]. 일반적으로 철강소재의 경우 강도를 향상시키게 되면 연성이 저하되어 가공성이 감소하지만, 변태유기소성 현상을 이용하면 연성을 감소시키지 않고 강도를 향상시킬 수 있다. 이러한 장점 때문에 TRIP 강에 대한 연구 및 개발이 꾸준히 이루어지고 있다. 특히, TRIP 강은 미세조직 내에 존재하는 잔류 오스테나이트의 변태유기소성 현상에 의해 우수한 인장강도와 연성을 보이고 있어 고강도와 고연성을 요구하는 자동차업계를 중심으로 각광 받고 있다[13].

2.2 저항 점용접

2.2.1 저항 점용접의 원리

저항 용접의 한 종류인 저항 점용접은 전극 사이에 2개 혹은 그 이상의 강판을 고정시킨 후, 상하부 전극을 이용하여 전류를 흐르게 하면 판재 내부에 저항 열이 발생하여 판재를 용융시키고 압력을 가해 판재를 접합하는 용접이다 [14]. 저항 점용접은 용접 시간이 짧고 생산성이 높아 대량 생산을 가능하다는 장점이 있어 자동차, 철도 차량 등에 주로 이용되고 있다. Fig. 1에는 저항 점용접 기구를 나타내었다.

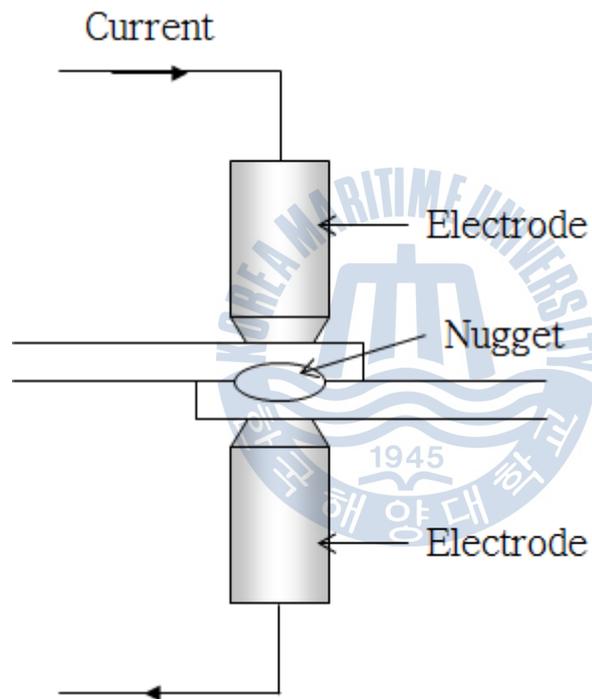


Fig. 1 Cross section of a resistance spot welding.

저항을 가진 금속에 통전하게 되면 열이 발생하는 데, 이 열을 저항 열 또는 줄열이라 하며, 식 (1)과 같이 표현할 수 있다[15].

$$Q = I^2 R t [J] \tag{1}$$

$$= 0.24 I^2 R t [cal]$$

Q는 발열량, I는 전류[A], R은 저항[Ω], t는 통전시간[s]을 나타내며, 1J은 0.24cal 이다. 식 (1)에서 저항(R)은 용접재료, 전극 및 용접장치 등을 포함한 저항을 의미하며, 도체의 비저항(ρ)과 길이(L) 단면적(A)을 이용하여 저항 열을 식 (2)처럼 표현할 수 있다.

$$Q = I^2 \left(\frac{\rho L}{A} \right) t \tag{2}$$

식 2를 통해 알 수 있듯이, 발열량(Q)은 전류(I)의 제곱에 비례하고, 통전시간(t)에 비례한다. 그러나 저항(R)은 도체 비저항(ρ)과 길이(L)에 비례하고, 단면적(A)에 반비례한다. 따라서 전류가 흐르는 단면적이 커질수록 전류효율이 감소하게 된다. 동일한 전류로 용접하는 경우, 단면적이 적을수록 전류밀도가 증가하는 효과를 얻을 수 있다[14]. 용접부의 우수한 품질을 위해서는 저항 점용접 시 전류밀도가 적절하게 형성되어야 한다.

2.2.2 전극 가압력

가압력은 주로 접촉 저항을 조절해주며, 발열에 영향을 미친다. 일반적으로 가압력을 크게 할수록 전극과 모재, 모재와 모재 사이의 계면 접촉성이 좋아지고 접촉 면적을 증가시켜 전류 밀도가 저하되어 초기 접촉저항이 줄어들게 된다. 또한 강판에 주어지는 적절한 전극의 가압력은 중간날림(expulsion)이 발생

하는 것을 방지하며, 용융부 내에 기공(voids)이나 균열(crack) 등이 발생하는 것을 억제한다[16]. 그러나 지나치게 높은 가압력이 가해지면 가압력에 의한 기계적인 소성변형이 증가하게 되어 압흔(indentation) 깊이가 깊어진다[17]. 압흔 깊이가 깊을수록 외력이 가해질 때 응력이 집중되기 쉬우므로 접합강도와 피로 강도 등을 저하시킨다[18]. 반면, 가압력이 부족하게 되면 접촉 저항이 증가하여 발열이 증가하여 중간날림이 발생하게 된다.

2.2.3 용접 전류

용접 전류는 강판에 흐르는 전기의 양을 의미하며, 발열의 요소 중 하나이다. 전류가 부족하면 전류 밀도가 낮아지므로 발열량이 부족해져 너깃이 제대로 형성되지 않아 용접 강도가 저하된다. 그러나 전류가 과다해지면 전류 밀도가 증가하여 발열량도 증가하게 된다. 발열량의 증가는 중간날림 발생의 원인이 된다. 중간날림은 용접 너깃부에 기공을 발생시켜 용접부의 결합력을 저하시켜 계면파단(interfacial fracture)이 발생되도록 하는 원인이 되어 접합부의 강도와 충돌 안정성을 저하시킨다[18].

2.2.4 통전시간

통전시간은 용접 전류가 전극을 통하여 피용접재에 흐르는 시간을 의미한다. 이 시간은 줄의 법칙에서 시간 t 에 해당한다. 통전시간이 너무 짧으면 발열이 부족하여 용접 강도가 저하되며, 통전시간이 지나치게 길면 발열 과다로 날림이 발생하거나 전극의 용착이 발생하게 된다.

2.3 접착제 접합

접착제 접합에 발생하는 현상에 대한 여러 기구들에 대해서는 기계적 구속, 표면 흡착, 정전기적 인력, 상호 확산 및 경계조건 등의 설명이 있으며, 이러한 두 가지 이상의 다른 메커니즘 조합으로 실제 물체의 접착을 설명한다[19]. 접착제는 매끈한 면보다 연마된 금속이나 연마된 비기공성 면에서 접착이 잘 이루어진다. 따라서 피착재의 기계적 연마나 화학적 부식 등의 공정은 접착제의 접착력이 보다 강하게 나타나도록 하는 역할을 한다[20].

접착제 접합부에서 발생 가능한 응력형태를 Fig. 2에 나타내었다[21]. 응력의 형태는 (a) 순수 압축, (b) 순수 인장, (c) 순수 전단, (d) 박리, (e) 벽개로 분류할 수 있으며, 하나 혹은 복합적인 형태로 응력이 작용된다. 접합부에 박리 또는 벽개하중이 작용하지 않더라도 오프셋과 모재 굽힘에 의한 응력의 불균형으로 박리나 벽개가 발생할 수 있다[19].



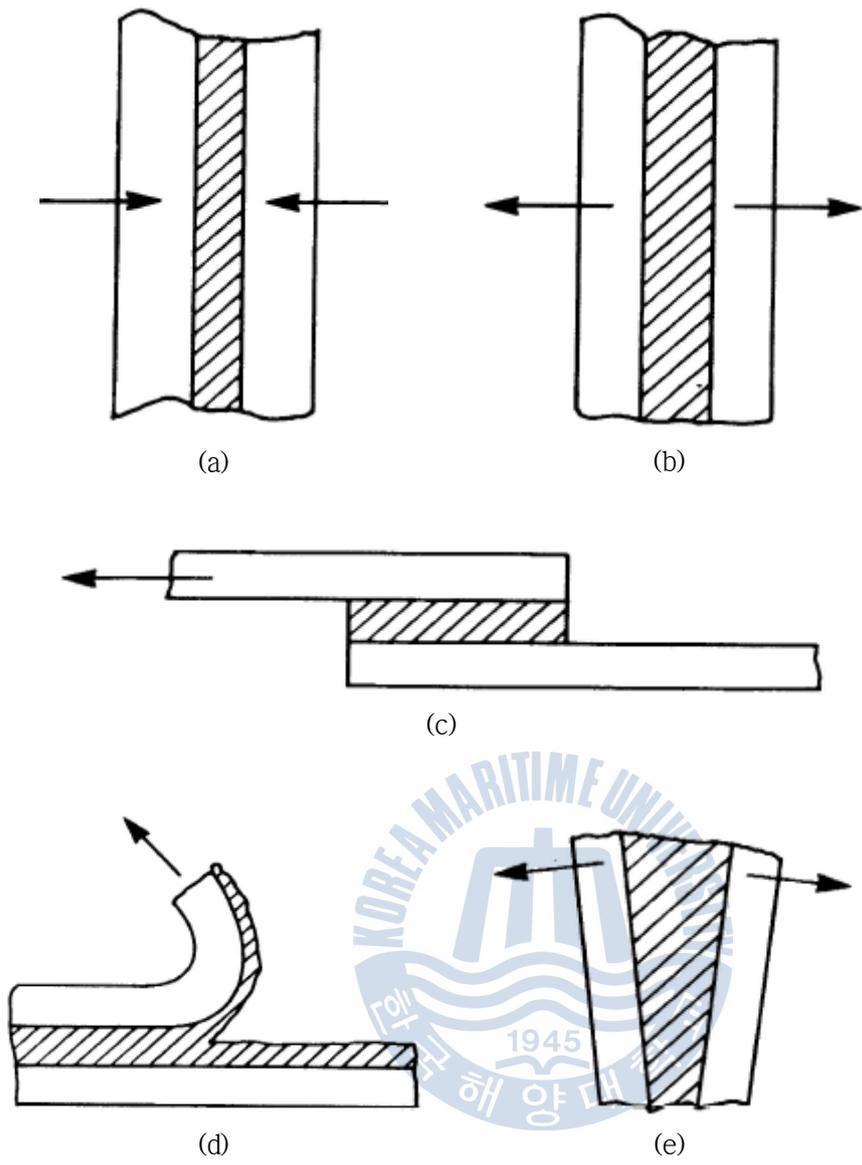


Fig. 2 Types of stress in adhesive bonding,
 (a) compression (b) tension (c) shear (d) peel (e) cleavage[19].

2.4 Weld-bond

Weld-bond는 최근 많이 사용되고 있는 차체 접합기술로, 금속 표면에 구조용 접착제를 도포하고 그 접착제가 경화되기 전 저항 점용접을 수행한다. 그 후 일정한 온도로 유지된 로에서 접착제를 경화시켜 금속을 접합한다. 접착제가 경화되면 전기 접촉저항이 증가하므로, 점용접을 실시하기 전이나 점용접 도중에 접착제가 경화되지 않도록 해야 한다[4]. Fig. 3에는 Weld-bond 공정을 모식도로 나타낸 것이다.

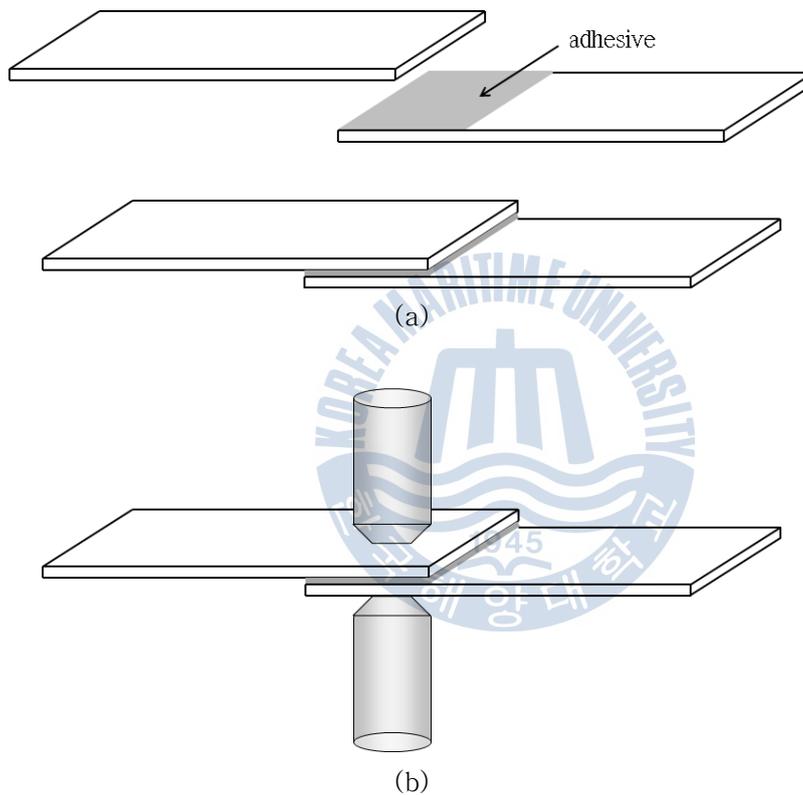


Fig. 3 Schematic outline of the Weld-bond process
(a) application adhesive (b) resistance spot welding.

2.5 인장전단시험

저항 점용접과 접착제 접합을 혼용하여 강판을 접합한 Weld-bond에 대하여 인장전단시험을 진행하면 파단 거동은 너깃경에 따라 다르게 나타난다. Weld-bond를 적용한 강판의 인장전단시험에서 플러그 파단(plug fracture)이 발생할 정도로 충분한 크기의 너깃경이 형성되어 있으면 접합부는 접착제의 최대 강도와 점용접의 특성을 동시에 나타내게 된다. 따라서 충격이나 외력에 대한 취성 특성을 감소시켜주며, 전체적으로 흡수할 수 있는 에너지 영역 범위를 크게 해 준다[1]. 본 연구에서는 접합 방법이 1180MPa급 TRIP 강의 인장전단특성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 인장전단시험을 실시하였다. 특히, 너깃경의 영향을 받는 Weld-bond와 저항 점용접은 너깃경에 대한 인장전단시험도 실시하여 플러그 파단이 발생하는 최소 너깃경을 확인하였다.

2.6 피로시험

구조물에 항복강도 이하의 응력 상태에서 반복하중을 가하게 되면, 구조물에는 미세한 균열이나 손상이 발생하게 된다. 이와 같이 변동 응력이나 변형률을 받는 재료에 발생하는 점진적이며 국부적인 연구변화 과정을 피로라 한다[22]. 피로는 1) 파괴가 발생하기까지 상당한 기간이 필요하고 2) 큰 변형이 수반되지 않고 취성 파괴가 발생하며, 3) 금속 사용 중 발생하는 기계적 파괴의 약 90%를 차지하는 특징을 가진다[23]. 그렇기 때문에 피로 강도 및 내구성 평가의 정밀도 향상을 구조물의 경량화에 따른 안전 대책을 수립하는데 중요한 인자가 된다[24].

본 연구에 사용된 소재는 자동차 차체용 강판으로, 접합부의 내구한도 및 안전성 확인을 위해 피로시험은 필수적으로 이루어져야 한다. 따라서 피로시험을 통하여 접합 방법이 1180MPa급 TRIP 강의 피로특성에 미치는 영향과 각 접합 방법에 대한 피로한도를 확인하였다.

제 3 장 실험방법

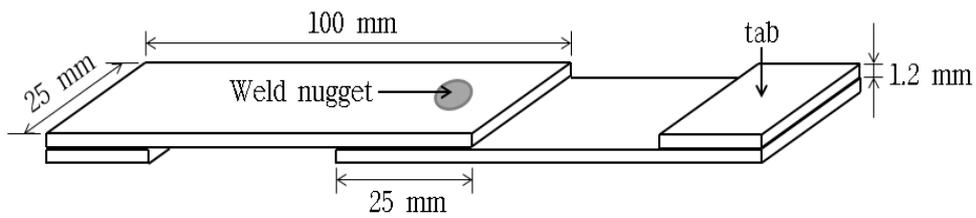
3.1 시험편 제작

3.1.1 인장전단시험편

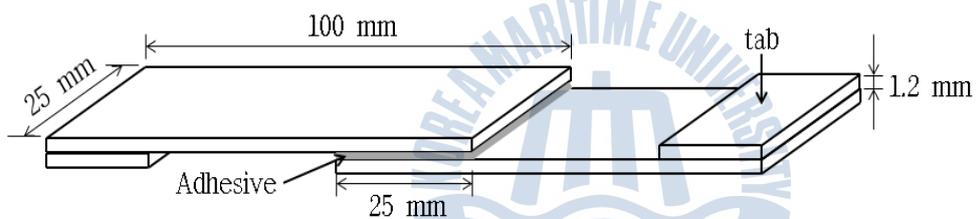
본 연구에는 두께 1.2mm의 1180MPa급 냉간압연 TRIP 강판이 사용되었으며, 소재의 화학조성을 Table 1에 나타내었다. 접합공정에는 Henkel 사의 구조용 접착제가 사용되었다. 인장전단특성 평가를 위하여 단일 겹치기 이음으로 시험편을 제작하였으며, 시험편의 치수[4]와 접합 방법에 따른 시험편의 개요도를 Fig. 4에 나타내었다. 치수에 맞게 절단한 시험편은 아세톤에 침지하여 15분 간 세척한 뒤 상온에서 건조시켰다. 접착제 도포 전 시험편의 한 쪽 끝을 기준으로 25mm가 되는 지점에 선을 그어 접착제 도포 면적이 625mm^2 로 일정해지도록 하였다. 기존의 연구결과들을 통하여 접착제 도포 두께가 얇을수록 접착제의 접합 강도가 증가한다는 사실을 확인하였다[7,25,26]. 특히, 윤[25] 등은 접착제의 접합 강도는 인장전단하중이 가해질 때, 시험편이 겹쳐진 영역의 가장자리에 응력이 집중되지만 접착제 두께가 얇으면 가장자리에 집중되는 응력이 완화되어 접합 강도가 증가한다고 보고하였다. 따라서 접착제가 우수한 접합 강도를 나타내도록 하기 위하여 접착제 두께를 0.2mm로 도포하였다. 한 쪽 시험편에 접착제를 도포하고 그 위에 0.2mm 크기의 글래스비드(glass bead)를 올린 후, 나머지 시험편을 겹쳐 클립으로 고정하였다. 접합 공정을 마친 시험편에 저항 점용접을 실시한 후 경화공정을 거치면 Weld-bond 시험편이 완성되며, 접합 공정을 마친 후 저항 점용접을 실시하지 않고 경화공정을 거치면 접착제 접합 시험편이 완성된다.

Table 1 Chemical composition of tested steel

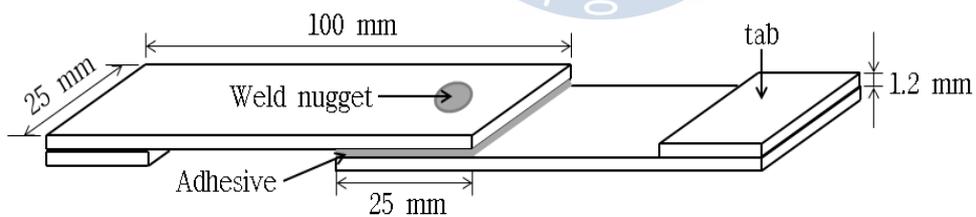
Elements	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
wt, %	0.167	1.657	2.251	0.018	0.003	0.027	0.013	0.464
Elements	Mo	Al	Ti	V	Zr	N	O	Zn
wt, %	0.002	0.097	0.024	0.003	<0.001	0.0025	0.0147	0.002



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Schematic diagram of bonding method, (a) Resistance spot welding (b) Adhesive bonding (c) Weld-bond.

Weld-bond 시험편의 용접부 너깃경이 각각 4.0mm, 5.0mm, 6.0mm, 7.0mm가 되도록 접합 공정을 마친 시험편에 저항 점용접을 실시하였다. 저항 점용접에는 단상교류 공압정치식(75kVA)을 사용하였고, 상하부 전극 팁(electrode tip)은 돔(dome) 형상의 Cu-Cr재 팁을 사용하였다. 중간날림이 발생하게 되면 용접부 너깃에 기공이 형성되거나 용접 강도에 영향을 미치게 되므로[18, 27-29], 점용접 시에는 중간날림이 발생하지 않는 용접 조건을 설정하였다. 압착시간(squeeze time)은 225 cycle을 확보하여 접착 계면에서 전류 통전이 가능한 정도로 접착제가 가장자리로 밀려날 수 있도록 하였다. 너깃경이 각각 4.0mm, 5.0mm 시험편 제작에는 선단지름이 6.0mm인 전극 팁을 이용하였으며, 1단 통전(single pulse)을 이용하여 용접을 실시하였다. 그러나 선단지름이 6.0mm인 전극 팁과 1단 통전으로는 중간날림 없이 너깃경을 6.0mm 이상으로 성장시키는 데 어려움이 있다. 따라서 각각 6.0mm, 7.0mm의 너깃경 형성을 위하여 선단지름이 8.0mm인 전극 팁과 2단 통전(double pulse)을 이용하여 용접을 실시하였다. 특히, 2단 통전을 이용한 용접 공정에는 용접 시간 사이에 2 cycle의 냉각시간(cooling time)을 주었다. 저항 점용접 후에는 접착제 경화를 위하여 160℃로 유지된 오븐에서 40분 간 경화시킨 후 상온에서 냉각시켜 Weld-bond 시험편을 완성하였다.

Weld-bond와 저항 점용접의 인장전단특성을 비교하기 위하여 저항 점용접의 시험편 역시 너깃경이 각각 4.0mm, 5.0mm, 6.0mm, 7.0mm가 되도록 동일한 조건으로 시험편을 제작하였다. 단, 저항 점용접 시험편에도 용접부에 너깃 면적만큼의 접착제를 도포하여 Weld-bond 용접부와 유사한 조건이 되도록 하였다. 저항 점용접 시험편의 너깃 형성부에 접착제를 도포함으로써, 접착제 유무로 인한 전류 통전상의 오차를 최소화하였다. 그러나 저항 점용접의 시험편에 도포된 접착제의 양은 Weld-bond 시험편에 비해 상당히 적으며, 접착제가 가장자리로 밀려나기 쉬우므로 75 cycle의 압착시간을 확보하였다. 압착시간 외의 용접조건은 Weld-bond와 동일하게 적용하였으며, Weld-bond와 저항 점용접 시험편 제작에 적용한 용접조건을 Table 2에 나타내었다.

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

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			
4.0	6	2.94	225	75	4	14	20
5.0					5.8		
6.0	5	3.50			5-7	15-2-15	
7.0		4.00			5-8.2		

접착제를 단독으로 사용하여 접합한 경우와 Weld-bond를 적용한 경우의 인장전단특성을 비교하기 위하여 접착제 접합 시험편을 제작하였다. 접착제 접합에 사용된 접착제와 글래스비드는 Weld-bond에 사용된 것과 동일하며, 접합 공정도 Weld-bond와 동일하게 적용하였다.

3.1.2 피로시험편

피로시험에 사용된 강판은 인장전단시험에 사용된 강판과 동일한 강판을 사용하였으며, 접합공정에 사용된 접착제 역시 인장전단시험에 사용한 접착제와 동일한 접착제를 사용하였다. 피로시험편은 인장전단시험편과 동일한 용접 조건 및 접합 공정을 이용하여 제작하였다. 단, 저항 점용접의 너깃경은 6.0mm, Weld-bond의 너깃경은 각각 4.0mm와 6.0mm가 되도록 시험편을 제작하여 피로 시험을 진행하였다. 접합 방법에 따른 시험편의 치수와 개요도는 Fig. 4에 나타난 인장전단시험편과 동일하다.

3.2 용접부 관찰

Weld-bond와 저항 점용접 시험편은 용융부 환경을 유사하게 적용하였으며, 압착시간을 제외한 모든 용접 조건을 동일하게 적용하였다. 따라서 동일한 조건으로 용접한 경우, Weld-bond와 저항 점용접의 너깃 크기는 동일하게 형성되었다고 가정하고 Weld-bond 적용 시험편에 대해서만 너깃경을 측정하였다. 용접부 단면의 결함 및 너깃경 관찰을 위하여 시험편을 용접부에 형성된 너깃에 수직인 방향으로 절단한 뒤 마운팅하였다. 마운팅 한 시험편을 연마하여 에칭(etching) 용액(ethanol 98ml, picric acid 3g, HCl 2ml)으로 수 초간 에칭한 뒤, 실체 현미경으로 용접부 단면의 너깃을 관찰하였다. 너깃경 측정 및 확인에는 Image pro plus 프로그램을 이용하였다.

3.3 인장전단시험

본 연구에서 사용한 인장전단시험장비는 Instron 4469 모델로 해당 장비를 Fig. 5에 나타내었다. 인장전단시험 시 크로스헤드 속도는 3 mm/min으로 모든 인장전단시험에 동일하게 적용하였다. 인장전단시험은 각각의 접합 방법에 대하여 5회의 반복실험을 진행하고 그 특성을 비교·평가하였다. Weld-bond와 저항 점용접을 적용한 시험편은 너깃경이 각각 4.0mm, 5.0mm, 6.0mm, 7.0mm가 되도록 제작하여, 너깃경 증가에 따른 인장전단특성 및 파괴거동의 변화를 관찰하였다.



Fig. 5 Tensile test machine (Instron 4469).



3.4 피로시험

피로시험은 Fig. 6에 나타난 유압 서보식 피로시험기(KDMT-320-5)를 이용하였으며, 진동 주파수 20Hz, 응력비 (Stress ratio) $R = 0.1$ 인 조건에서 실험을 진행하였다. 피로특성 평가는 인장전단시험 결과를 참고하여 임계점 직전 조건인 너깃경 4.0mm Weld-bond와 임계점 직후 조건인 너깃경 6.0mm Weld-bond 시험편, 접착제 접합 시험편의 피로특성을 평가하였다. 일반적으로 너깃경이 증가하면 피로한도 역시 우수하게 나타나므로 저항 점용접 시험편은 임계점 직후 조건인 너깃경 6.0mm 시험편에 대해서만 피로특성을 평가하였다. 각 하중에서 2회씩 반복 실험을 진행하였으며, 피로수명의 편차가 심한 경우, 최대 5회까지 반복 실험을 진행하였다. 또한, 하중이 2×10^6 cycle 가해지는 동안 파단이 발생하지 않는 경우 동일한 조건으로 반복 실험을 2회 추가로 진행하였으며, 동일한 조건에서 3회 실험이 진행되는 동안 파단이 발생하지 않는 하중을 피로한도로 결정하였다.





Fig. 6 Hydraulic servo fatigue test machine (KDMT-320-5).

3.5 실험결과 처리 방법

3.5.1 인장전단시험 결과 처리

세 가지 접합 방법으로 인장전단시험편 제작 시 단일 겹치기를 이용하여 용접을 실시하였으므로 용접부에 형성된 너깃경의 체적을 정확하게 측정할 수 없다. 따라서 인장전단시험 결과를 인장전단강도가 아닌 인장전단하중으로 나타내었다. 접착제 접합 시험편 제작에는 점용접 공정이 포함되지 않지만, Weld-bond 및 저항 점용접의 인장전단시험 결과와 비교하기 위하여 인장전단강도가 아닌 인장전단하중으로 나타내었다.

Weld-bond와 저항 점용접의 각 너깃경에 대한 최대인장전단하중 값은 5회 반복한 실험값의 평균으로 나타내었으며, error bar를 이용하여 평균값에 대한 오차를 나타내었다. Weld-bond의 경우, 인장전단시험동안 두 번의 피크(peak) 값이 나타나 접착제에 의한 피크 값과 너깃경에 의한 피크 값을 각각 나타내었다. 하중-변위(Load-Displacement) 곡선은 각 시험편에 대하여 5회씩 반복한 실험 결과 중 대표적인 결과 하나를 선정하여 나타낸 후 접합 방법에 따른 파단 거동을 비교 평가하였다.

3.5.2 피로시험 결과 처리

피로시험편 역시 단일 겹치기를 이용하여 용접을 실시하였으므로 용접부에 형성된 너깃경의 정확한 체적을 측정할 수 없다. 따라서 피로응력 및 피로한도를 피로하중으로 나타내었다. 접착제 접합의 피로시험 결과를 Weld-bond 및 저항 점용접의 피로시험 결과와 비교하기 위하여 피로하중으로 나타내었다.

각 하중에서 2회씩 반복 된 실험 결과는 평균값을 구하여 하중-피로수명(Load-Number of cycles) 곡선으로 나타내었다.

3.5.3 인장전단시험 및 피로시험 파단 모드 분석

세 가지 접합 방법에 대하여 인장전단시험과 피로시험을 각각 실시한 후, 시험편의 파단 모드를 관찰하였다. 특히, Weld-bond는 접착층과 용접 너깃부에서 파단이 발생하는 시점이 다르기 때문에 접착층과 용접부 너깃이 각각 파단 되는 순간의 시험편 형상도 관찰하였다. 저항 점용접과 접착제 접합은 완전히 파단이 발생한 후의 시험편으로 파단 모드를 분석하였다.

피로시험은 각 하중에 대한 파단 모드를 분석하였으며, 파단 모드가 전 하중에 걸쳐 동일하게 나타나는 경우, 하나의 파단 모드만 나타내었다. 그러나 특정 하중에서 파단 모드가 변하는 경우, 파단 모드가 이행하는 하중과 파단 모드를 함께 나타내었다.



제 4 장 실험 결과 및 고찰

4.1 용접부 조직 및 너깃경

Weld-bond의 용접부 단면과 너깃경을 관찰한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 전술한 바와 같이 용접 너깃부에 결함이 발생하지 않도록 하기 위해서 중간날림이 발생하지 않는 조건에서 너깃경이 형성되도록 용접조건에 차이를 두어 점용접을 실시하였다.

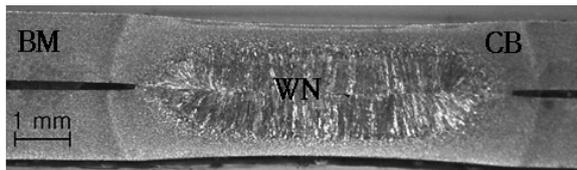
용접부 단면 관찰을 통하여 전류와 가압력의 증가로 압흔의 깊이와 접합계면(faying interface)사이 간격이 증가하는 것을 확인하였다. 그러나 점용접 시 중간날림이 발생하지 않았으며 형성된 용접 너깃부에서 기공이나 수축공, 균열 등 또한 관찰되지 않았다. 이는 가압력의 증가로 중간날림의 발생과 용융부 내의 기공 및 균열 발생이 억제되기 때문이다[27]. 용접 전류가 증가함에 따라 너깃경은 증가하지만, 열영향부(heat affected zone, HAZ)의 폭과 코로나 본드(corona bond, CB)가 감소하는 경향을 보인다. 이것은 용접 전류가 증가하면서 입열량도 증가하여 열영향부와 모재 사이의 계면이 판재 길이 방향으로 성장하는 것보다 용융부 계면의 증가분이 더 크기 때문이다[30,31].



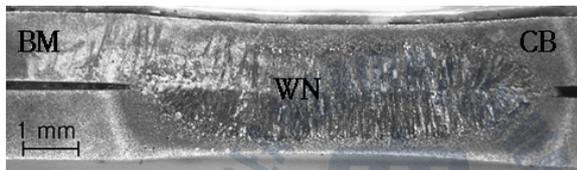
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 7 Cross-section of Weld-bond,
(a) 4.0mm (b) 5.0mm (c) 6.0mm (d) 7.0mm.

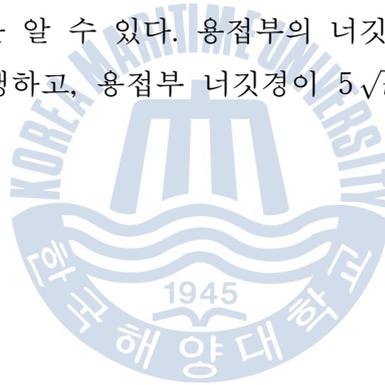
4.2 접합 방법에 따른 인장전단특성

4.2.1 저항 점용접의 인장전단특성

저항 점용접을 실시한 TRIP 강을 이용하여 너깃경에 따른 인장전단특성을 평가하고 각 너깃경에 대한 최대인장전단하중의 평균값을 구한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 너깃경이 4.0mm 일 때 최대인장전단하중 값은 약 8kN이고, 너깃경이 5.0mm 일 때 최대인장전단하중 값은 약 16kN이다. 두 시험편 사이 최대인장전단하중 값은 약 2배의 차이가 나타났다. 너깃경이 6.0mm 일 때 최대인장전단하중 값은 약 19kN, 너깃경이 7.0mm 일 때 최대인장전단하중 값은 약 20kN으로 두 너깃경 사이 최대인장전단하중 값은 유사하게 나타났다. 저항 점용접은 너깃경이 증가함에 따라 최대인장전단하중 값이 증가하는 경향을 나타내지만, 너깃경이 $5\sqrt{t}$ (단, t는 모재 두께) 이상이 되면 너깃경 증가에 따른 최대인장전단하중의 증가는 미미하게 나타나는 것을 알 수 있다. Pouranvari [32] 등은 용접 전류와 용접 시간이 증가하게 되면 너깃경이 증가하고 용접부 강도가 향상되지만, 너깃경의 증가로 인해 전기 저항 감소가 더욱 심화되어 너깃경의 성장속도가 감소하게 되므로 높은 용접 전류와 용접 시간에서는 너깃경이 일정하게 유지되며 용접부 강도 역시 일정하게 유지된다고 보고하였다. 본 연구에 사용된 TRIP 강의 경우, 용접부 강도가 일정하게 유지되는 너깃경의 크기가 6.0mm와 7.0mm 사이에 존재하고 있는 것으로 사료된다.

Fig. 9에는 저항 점용접의 인장전단시험 결과를 하중-변위 곡선으로 나타낸 것이다. 저항 점용접에서는 너깃경이 $4\sqrt{t}$ 가 보다 작을 경우, 인장전단시험 시 최대인장전단하중 값이 작을 뿐만 아니라 최대인장전단하중 값에 도달하는 순간 시험편이 완전히 분리되면서 파단이 발생하여 하중이 급격하게 감소한다. 그러나 너깃경이 $4\sqrt{t}$ 이상이 되면 최대인장전단하중 값에 도달하더라도 시험편이 완전히 분리되지 않기 때문에 하중이 급격하게 감소하지 않고 변위가 지속된다. 즉, 저항 점용접을 실시한 TRIP 강은 너깃경이 $4\sqrt{t}$ 이상이 되면 용접부 강도가 증가하여 최대인장전단하중 값에 도달하더라도 완전히 파단 되지 않는다.

저항 점용접의 각 너깃경에 대하여 인장전단시험을 실시한 후 관찰한 파단 모드를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10 (a)와 (b)는 너깃경이 각각 4.0mm와 5.0mm인 점용접 시험편의 파단 모드를 나타낸 것으로, 너깃경이 4.0mm인 시험편은 계면파단, 너깃경이 5.0mm인 시험편은 너깃 주변의 모재 변형과 함께 플러그 파단(plug fracture)이 발생한 것을 알 수 있다. Fig. 10 (c)와 (d)는 너깃경이 각각 6.0mm와 7.0mm인 점용접 시험편의 파단 모드를 나타낸 것으로, 파단 모드 관찰을 통하여 두 시험편 모두 너깃 주변의 모재 변형과 함께 테어 파단(tear fracture)이 발생한 것을 확인하였다. 저항 점용접을 실시한 TRIP 강을 이용하여 인장전단시험을 실시한 결과, 용접부의 너깃경이 증가함에 따라 파단 모드가 계면파단에서 플러그 파단, 테어 파단으로 이행되는 것을 확인하였다. 용접부의 너깃경이 $4\sqrt{t}$ 가 되지 않는 4.0mm의 경우, 용접 너깃부 주변의 모재가 변형되지 않았으며, 계면파단이 발생하였다. 그러나 너깃경이 $4\sqrt{t}$ 이상이 되는 5.0mm, 6.0mm, 7.0mm 시험편의 경우, 용접 너깃부 주변의 모재가 변형되며 파단이 발생하였다. 저항 점용접의 인장전단시험 시 용접부 강도를 향상시켜 플러그 파단 혹은 테어 파단이 발생하도록 하기 위해서는 너깃경이 $4\sqrt{t}$ 이상이 되어야 한다는 것을 알 수 있다. 용접부의 너깃경이 $4\sqrt{t}$ 이상 $5\sqrt{t}$ 이하이면 플러그 파단이 발생하고, 용접부 너깃경이 $5\sqrt{t}$ 이상이 되면 테어 파단이 발생하게 된다.



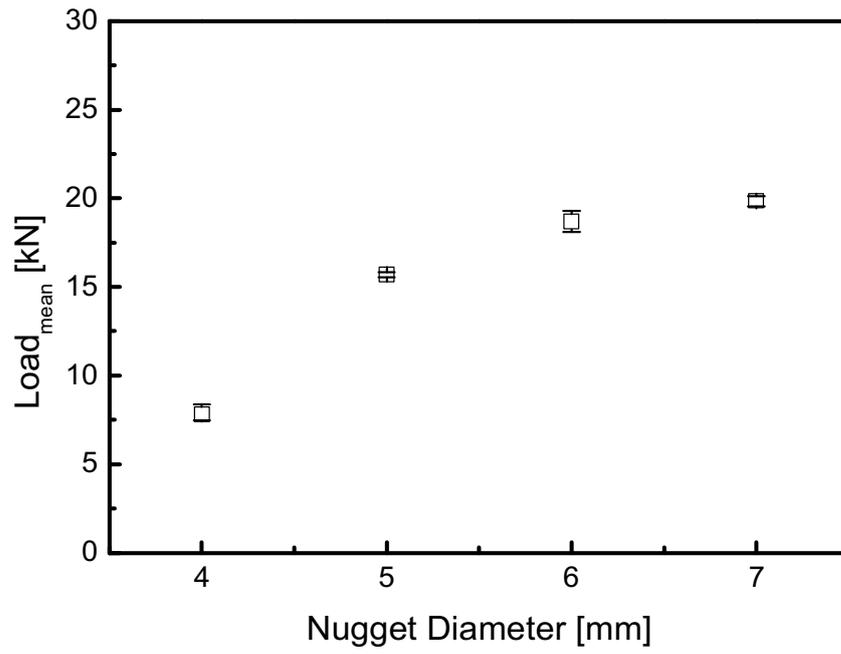


Fig. 8 Maximum tensile shear load of resistance spot welding by nugget diameter.



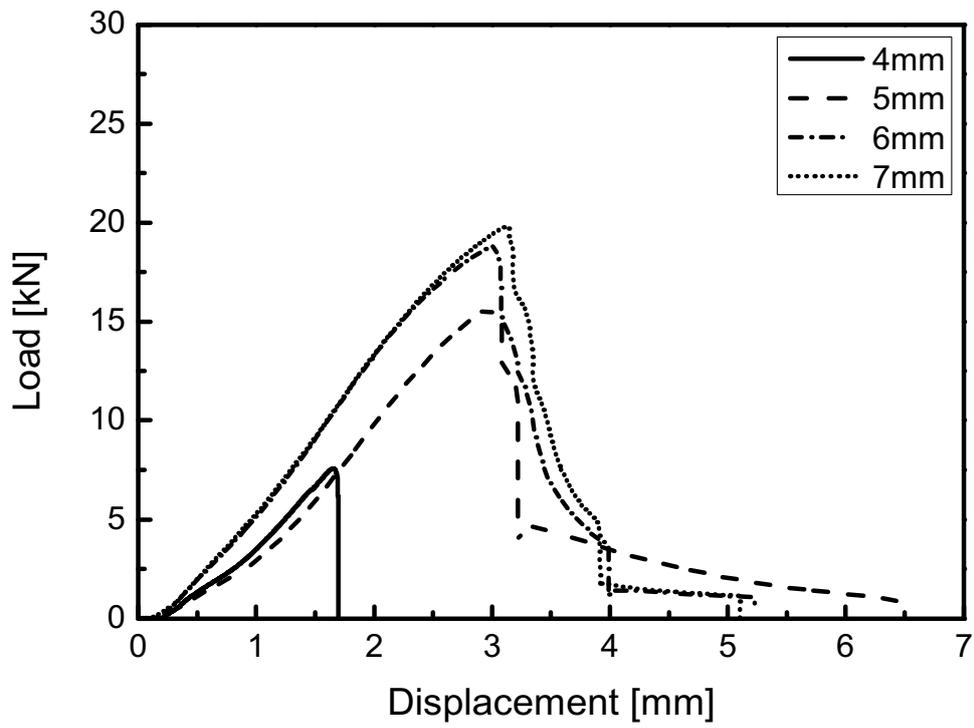


Fig. 9 Load-Displacement curve of resistance spot welding by nugget diameter.



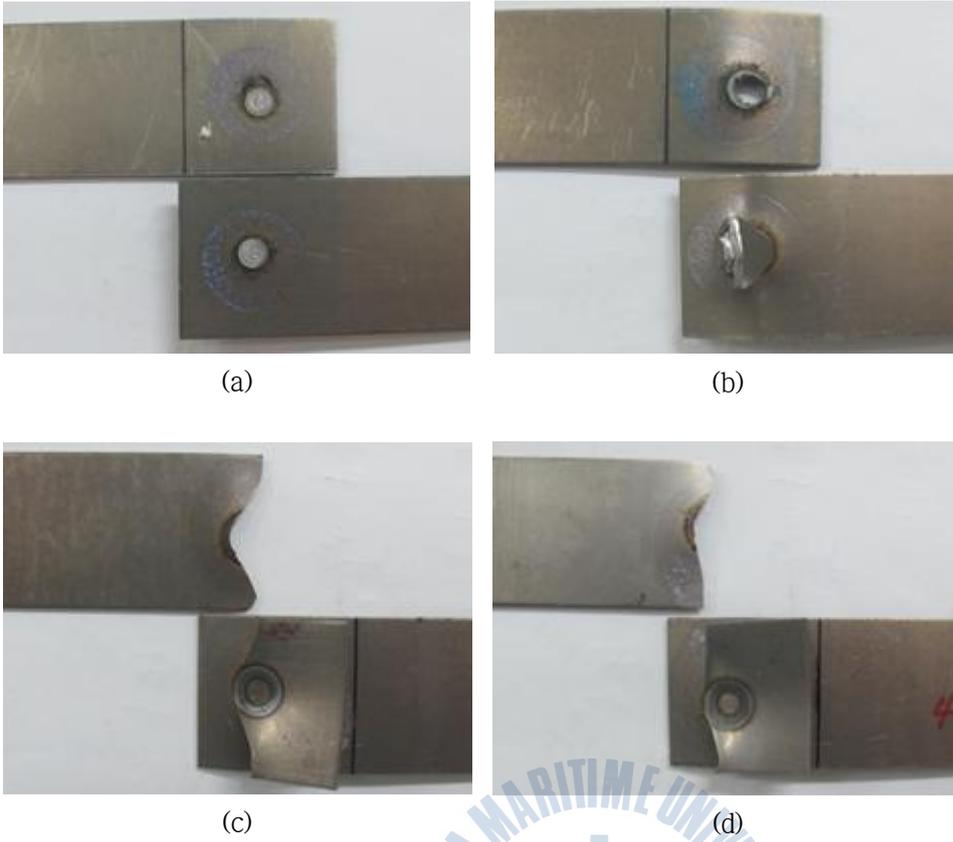


Fig. 10 Fracture mode of resistance spot welding by nugget diameter during tensile shear test, (a) 4.0mm (b) 5.0mm (c) 6.0mm (d) 7.0mm.

4.2.2 접착제 접합의 인장전단특성

접합 방법에 따른 인장전단특성 비교를 위하여 접착제 접합을 적용하여 제작한 시험편에 대해서도 인장전단특성을 평가하였다. 인장전단시험을 통하여 접착제의 접합 강도를 평가하고 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 접착제 접합의 최대인장전단하중은 약 21kN으로 저항 점용접보다 인장전단특성이 비교적 우수하게 나타나는 것을 확인하였다. 접착제 접합 시험편에 하중이 가해지면 결합 영역의 가장자리에 응력이 집중되므로 용접부 너깃 양 끝에 응력이 집중되는 저항 점용접에 비해 우수한 인장전단하중 값이 나타나게 된다[2]. 즉, 접착제 접합은 응력을 보다 균일하게 분포시키는 결합 방식에 의해 응력 집중이 완화되어 인장전단하중이 높게 나타난다[33]. 그러나 접착제 접합은 최대인장전단하중 값에 도달하는 순간 접착층이 완전히 분리되어 하중이 급격히 감소한다. 접착제 접합은 저항 점용접보다 우수한 인장전단하중 값을 나타내지만, 너깃경이 4.0mm인 저항 점용접과 유사한 파단 거동을 보이는 것을 알 수 있다.

Kwon [7] 등은 접착제 접합의 파단 모드가 접착제 두께에 따라 달라진다고 보고하였다. 접착제 접합의 두께에 따른 파단 모드의 모식도를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12 (a)처럼 접착제 두께가 얇으면 접착층 내에서 접착제가 양분되며 파단이 발생하는 응집파괴(cohesive fracture)가 발생하고, Fig. 12 (b)처럼 접착제 두께가 두꺼우면 모재와 접착제 계면을 따라 파단이 발생하는 계면파단이 발생한다. 그리고 Fig. 12 (c)에 나타난 것은 응집파괴와 계면 파단이 함께 발생하는 혼합 모드로, 접착제의 두께가 응집파괴와 계면파단으로 나뉘는 임계 두께에서 나타난다. 본 연구에서 실험한 접착제 접합의 파단 모드를 Fig. 13에 나타내었다. 접착제 접합 시 접착제 두께를 0.2mm로 얇게 도포하였으며, 이에 따른 응집파괴와 소재의 높은 인장강도(1180MPa)에 기인한 계면파단이 복합적으로 나타나는 것으로 판단된다.

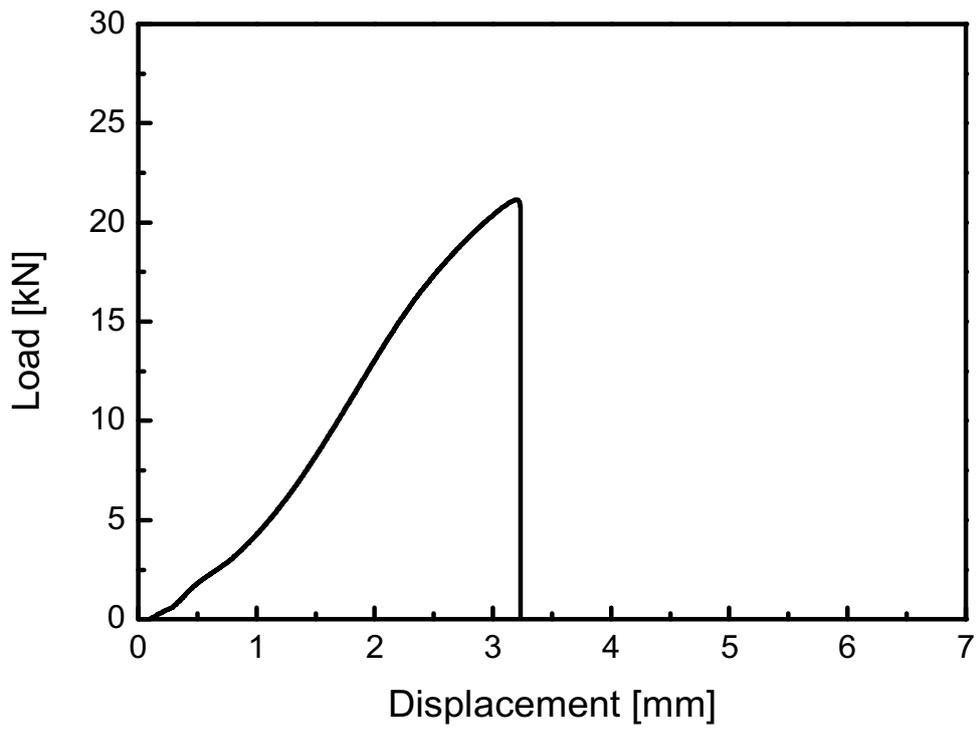


Fig. 11 Load-Displacement curve of adhesive bonding.



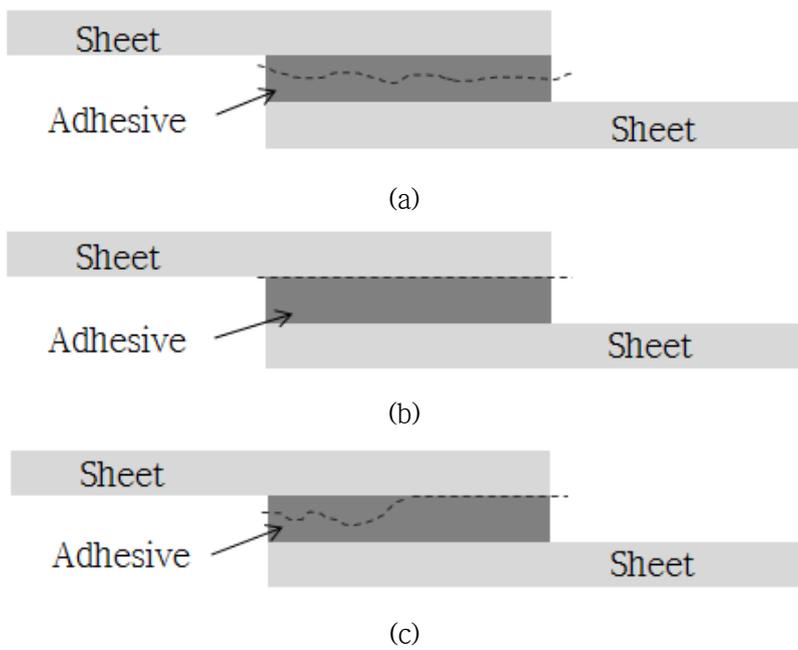


Fig. 12 Fracture mode schematic diagram of adhesive bonding, (a) cohesive fracture (b) interfacial fracture (c) interfacial + cohesive fracture.

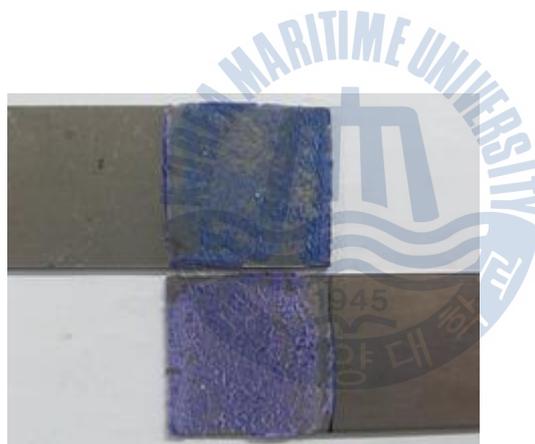


Fig. 13 Fracture mode of adhesive bonding during tensile shear test.

4.2.3 Weld-bond의 인장전단특성

TRIP 강에 Weld-bond를 적용하여 너깃경에 따른 인장전단특성을 평가하고 각 너깃경에 대하여 접착제에 의한 최대인장전단하중 값(first peak)과 점용접에 의한 최대인장전단하중 값(second peak)의 평균값을 각각 구하여 그 결과를 Fig. 14에 나타내었다. 너깃경이 4.0mm인 경우, 용접부 너깃이 인장전단하중을 지탱할 수 있는 한계가 접착제보다 낮기 때문에 접착제 도포부에서 응집과괴가 발생할 때 용접부 너깃도 함께 파단이 발생한다. 따라서 너깃경이 4.0mm일 때는 점용접에 의한 최대인장전단하중 값이 나타나지 않고 접착제에 의한 최대인장전단하중 값만 나타나며, 그 값은 약 23kN이다. 너깃경이 5.0mm 이상이면 접착제 도포부에서 응집과괴가 발생하면서 first peak가 나타나고, 그 후 점용접부가 인장전단하중을 받아 second peak를 발생시킨다. 너깃경이 5.0mm 일 때 first peak 값은 약 24kN, second peak 값은 약 16kN이다. 너깃경이 6.0mm, 7.0mm일 때의 first peak 값은 각각 25kN, 27kN이고, second peak 값은 각각 19kN, 21kN이다. Weld-bond를 적용하는 경우, 너깃경 증가에 따른 최대인장전단하중 값의 증가 폭이 저항 점용접에 비해 크지는 않지만, 대체적으로 너깃경이 증가할수록 최대인장전단하중 값이 증가하는 경향을 나타낸다. Weld-bond 적용 시험편에 대하여 인장전단시험을 실시한 결과, 너깃경이 $4\sqrt{t}$ 이상이 되지 않으면 접착제와 너깃이 동시에 파단 되어 최대인장전단하중이 한 번 밖에 나타나지 않는다. 그러나 너깃경이 $4\sqrt{t}$ 이상이 되면 일차적으로 접착제에서 파단이 발생하면서 접착제의 최대인장전단하중 값을 나타내며, 그 후 용접부 너깃이 하중을 지탱하다가 파단이 발생하게 되므로 너깃에 의한 최대인장전단하중 값도 나타나게 된다.

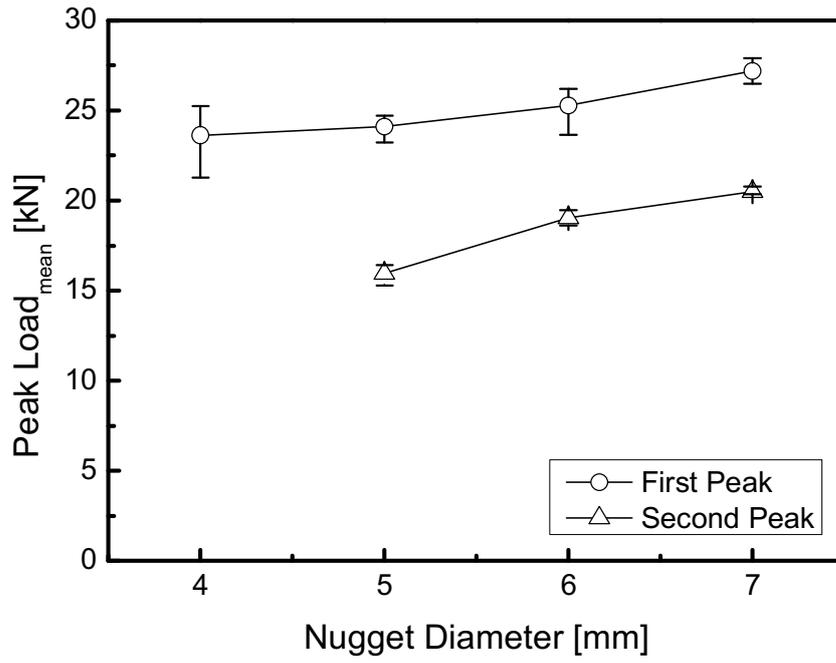


Fig. 14 First load peak and second load peak of Weld-bond by nugget diameter.

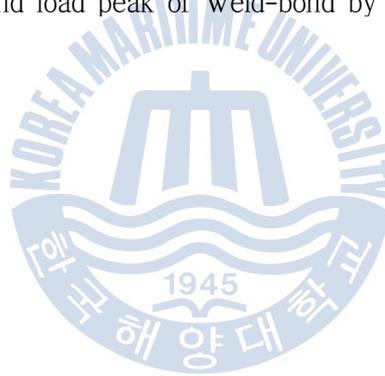


Fig. 15는 Weld-bond의 인장전단시험 결과 중 대표적인 결과를 하중-변위 곡선으로 나타낸 것이다. 너깃경이 4.0mm일 때는 인장전단시험 시 최대인장전단하중 값에 도달하는 순간 파단이 발생하여 하중이 급격히 감소하는 것을 확인하였다. 그러나 너깃경이 5.0mm 이상이 되면 최대인장전단하중에 도달하는 순간 하중이 감소하지만, 완전히 파단이 발생하지 않고 다시 하중이 증가하여 Fig. 15에 나타난 것과 같이 second peak 값을 나타낸 후 파단이 발생한다. 앞서 기술하였듯이 Weld-bond를 적용한 시험편의 경우 너깃경이 4.0mm일 때는 너깃경이 $4\sqrt{t}$ 보다 작아 용접부 너깃이 인장전단하중을 지탱할 수 있는 하중이 낮으므로 접착제 도포부에서 응집파괴가 발생할 때 용접부 너깃도 함께 파단이 발생하게 된다. 그러나 너깃경이 5.0mm 이상이 되면 $4\sqrt{t}$ 이상의 너깃경을 가지게 되어 용접부 너깃이 지탱할 수 있는 인장전단하중이 상대적으로 증가하므로 접착제가 파단된 이후에도 인장전단하중을 충분히 지탱할 수 있게 된다. 따라서 접착제에 의한 최대인장전단하중 값과 저항 점용접에 의한 최대인장전단하중 값이 모두 나타나는 것을 확인할 수 있다. 단, 시험편의 너깃경이 $4\sqrt{t}$ 이상이 되는 경우는 다시 $5\sqrt{t}$ 이상의 너깃경을 가지는지의 여부에 따라 최대인장전단하중 값의 변화가 다르게 나타난다. Fig. 15에서도 확인할 수 있듯이, $5\sqrt{t}$ 이상의 너깃경을 가지는 6.0mm Weld-bond 시험편과 7.0mm Weld-bond 시험편은 접착제 접합과 저항 점용접에 의한 최대인장전단하중 값이 모두 나타나며, 너깃경 증가에 따른 최대인장전단하중 값의 변화는 너깃경이 5.0mm일 때보다 뚜렷하게 나타난다. 실험 결과를 통하여 Weld-bond를 적용하여 그 효과를 나타내기 위해서는 너깃경이 최소 $4\sqrt{t}$ 이상이 되어야 하며, 너깃경이 $5\sqrt{t}$ 이상이 되면 너깃경 증가에 따른 최대인장전단하중 값의 증가도 비교적 뚜렷하게 나타난다는 것을 확인하였다.

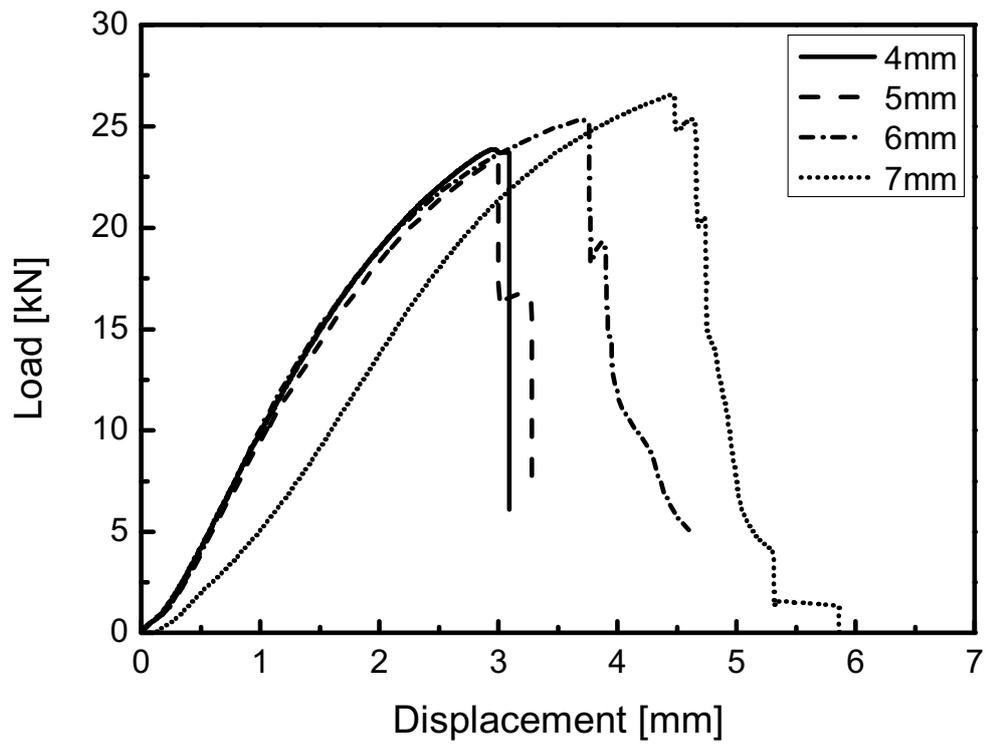


Fig. 15 Load-Displacement curve of Weld-bond by nugget diameter.



Weld-bond 적용 시험편에 대하여 인장전단시험 한 후 너깃경에 따른 파단 모드를 관찰하여 Fig. 16에 나타내었다. Weld-bond의 파단 모드는 모든 너깃경에서 저항 점용접과 유사하게 나타나는 것을 확인하였다. Weld-bond에서 접착제가 도포된 접착층은 너깃경에 관계없이 접착층이 양분되며 파단 되는 응집 파괴가 발생하여 접착제 접착의 파단 모드와 유사하게 나타났으며, 용접부 너깃은 너깃경에 따라 파단 모드가 다르게 나타났다. Weld-bond의 너깃경이 4.0mm일 때는 너깃 주변의 모재 변형 없이 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.



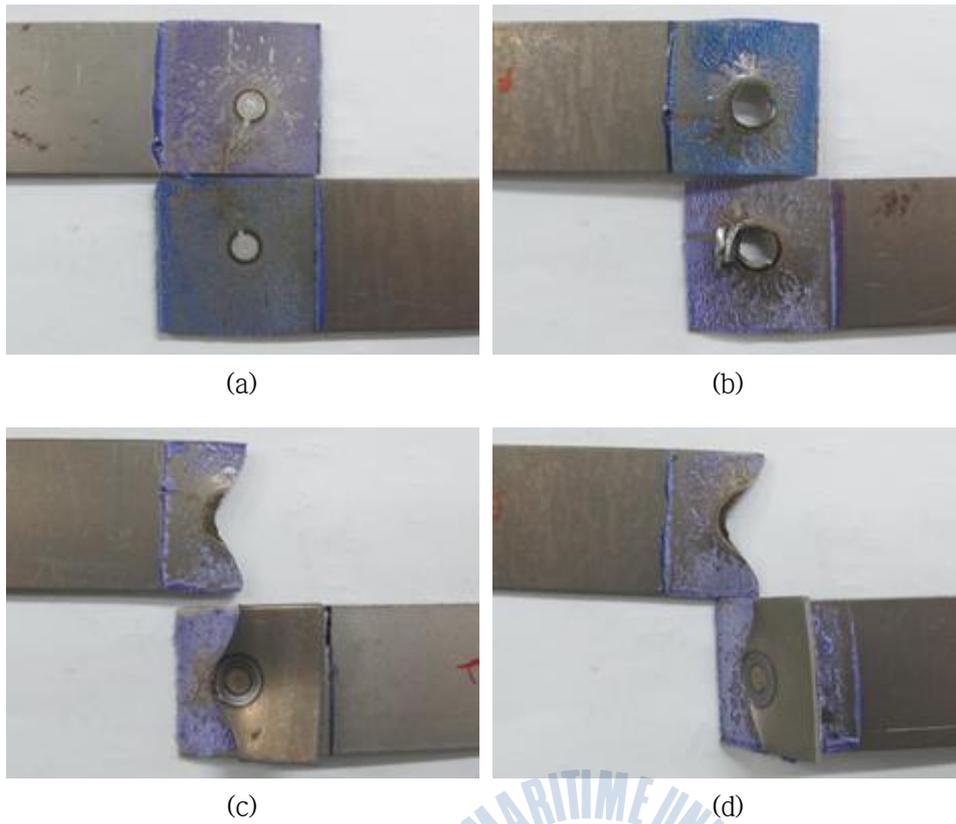
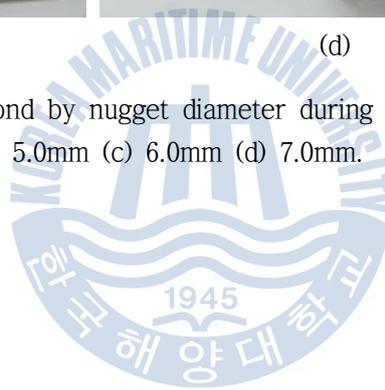


Fig. 16 Fracture mode of Weld-bond by nugget diameter during tensile shear test, (a) 4.0mm (b) 5.0mm (c) 6.0mm (d) 7.0mm.

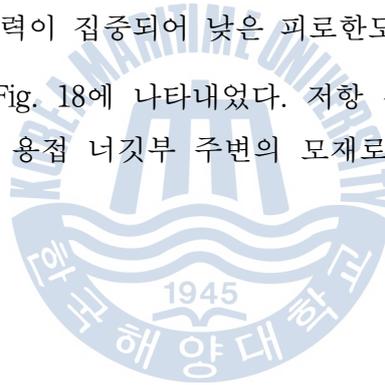


4.3 접합 방법에 따른 피로특성

4.3.1 저항 점용접의 피로특성

너깃경이 6.0mm인 저항 점용접의 피로시험 결과를 Fig. 17에 나타내었다. 피로 하중이 감소할수록 피로수명이 증가하는 일반적인 피로 경향을 나타내고 있다. 저항 점용접 시험편의 경우, 피로하중이 4.0kN 이상일 때는 피로수명이 10^4 cycle 이하이므로 $10^4 \sim 10^7$ cycle에서 내구한도를 평가하여야 한다는 KS B 0528의 피로시험 조건을 만족하지 않는다. 따라서 4.0kN 이하의 피로하중으로 저항 점용접의 피로특성 평가를 진행하였다. 너깃경이 6.0mm인 저항 점용접의 피로한도는 1.0kN으로 최대인장전단하중 값의 약 5.3%이다. 일반적으로 저항 점용접의 피로 균열은 두 장 이상의 박판이 중첩되어 압접된 너깃부의 선단 부근인 열영향부나 모재에서 발생하고, 반복 사이클 수가 증가함에 따라 3차원의 복잡한 형태로 시험편 두께 관통 및 표면 균열로 성장하여 파단하게 된다 [34]. 즉, 저항 점용접 된 시험편에서는 균열이 접합부의 열영향부 주위에서 발생하므로 균열이 발생한 곳에 응력이 집중되어 낮은 피로한도를 보인다.

저항 점용접의 파단 모드를 Fig. 18에 나타내었다. 저항 점용접의 경우, 피로하중에서는 모재의 변형 없이 용접 너깃부 주변의 모재로 균열이 진전되어 파단이 발생한다.



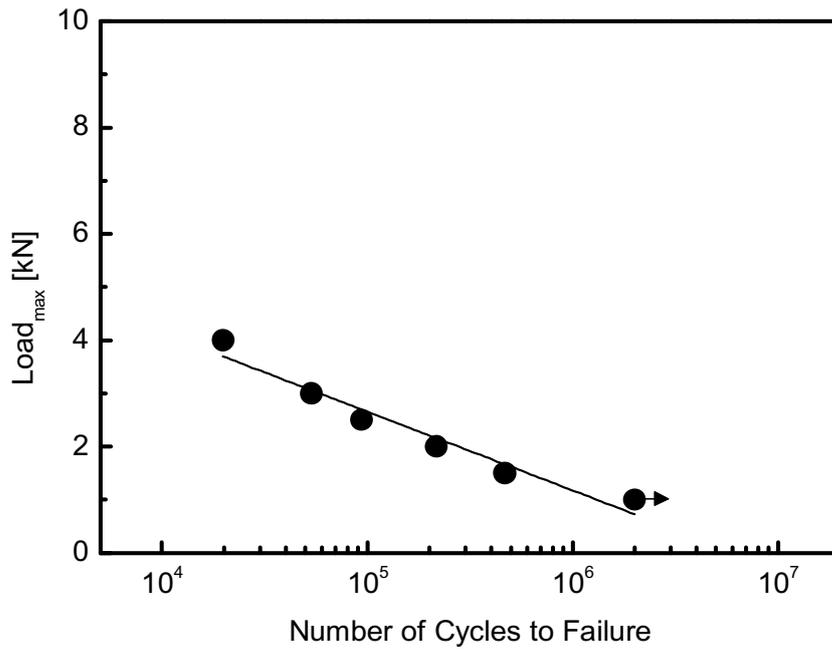


Fig. 17 Fatigue property of resistance spot welding.

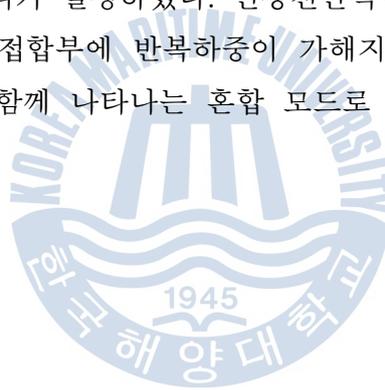


Fig. 18 Fracture mode of resistance spot welding during fatigue test.

4.3.2 접착제 접합의 피로특성

접착제 접합의 피로시험 결과를 Fig. 19에 나타내었다. 피로 하중이 감소할수록 피로수명이 증가하는 일반적인 피로 경향을 나타내고 있다. 접착제 접합의 피로한도는 약 4.0kN으로 비교적 높은 피로한도를 보이며, 최대인장전단하중값의 약 19%로 나타난다. 접착제 접합의 높은 피로한도는 주로 연속한 접착층과 넓은 겹침 영역에 의한 것으로 보고 있다. 또한 접착제 접합은 집중되는 응력이 아주 작고 겹침 영역의 가장자리에서 발생한다[9]. 따라서 접착제 접합의 피로한도가 너깃부에 응력이 집중되는 저항 점용접의 피로한도보다 우수하게 나타난다.

Fig. 20에는 접착제 접합의 파단 모드를 나타낸 것이다. 접착제 접합의 피로 균열은 겹침 영역 모서리에서 시작되어 가장자리를 통해 균열이 진전하다가 접착층 내부로 균열 방향이 바뀌게 된다[9]. 접착제 접합의 피로시험 파단 모드는 Fig. 20에 나타낸 것처럼 겹침 영역의 가장자리에서 계면파단이 발생하였고 겹침 영역 중심부에서는 응집파괴가 발생하였다. 인장전단력을 가했을 때는 응집파괴가 발생하더라도 접착제 접합부에 반복하중이 가해지면 접착층의 파단 모드는 응집파괴와 계면파단이 함께 나타나는 혼합 모드로 파단이 발생할 수 있는 것으로 판단된다.



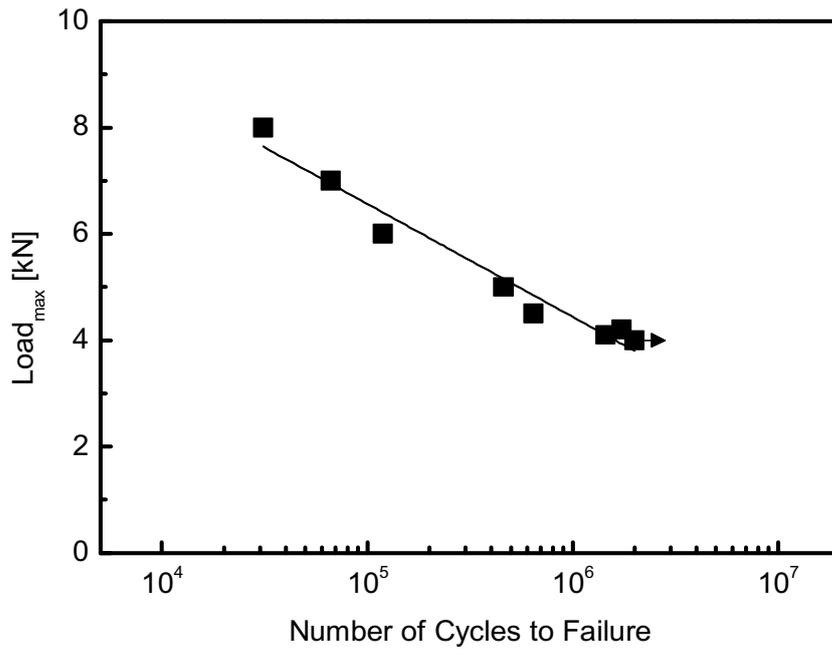


Fig. 19 Fatigue property of adhesive bonding.



Fig. 20 Fracture mode of adhesive bonding during fatigue test.

4.3.3 Weld-bond의 피로특성

너깃경이 4.0mm인 Weld-bond의 피로시험 결과를 Fig. 21에 나타내었다. 피로 하중이 감소할수록 피로수명이 증가하는 일반적인 피로 경향을 나타내고 있다. 피로한도는 약 4.4kN으로 최대인장전단하중 값의 약 19% 정도이다. 너깃경이 4.0mm인 Weld-bond의 피로한도는 저항 점용접의 피로한도보다 4배 이상 우수하게 나타났으며, 접착제 접합의 피로한도보다 약 0.4kN 우수하게 나타났다. Weld-bond의 피로특성 역시 접착제 도포에 의해 피로한도가 증가한 것으로 사료된다. Weld-bond의 피로 균열은 겹침 영역 가장자리에서 시작되어 접착층을 통해 균열이 전파된다. 접착층이 파단 된 후에는 저항 점용접의 파괴 특성과 유사한 피로거동을 보인다[9].

Fig. 22는 너깃경이 4.0mm인 Weld-bond의 파단 모드를 나타낸 것이다. Weld-bond의 접착제 도포 영역은 접착제와 모재의 경계에서 파단이 발생하는 계면파단이 발생하였고, 너깃경이 $4\sqrt{t}$ 가 되지 않는 용접 너깃부에서도 계면파단이 발생하였다.



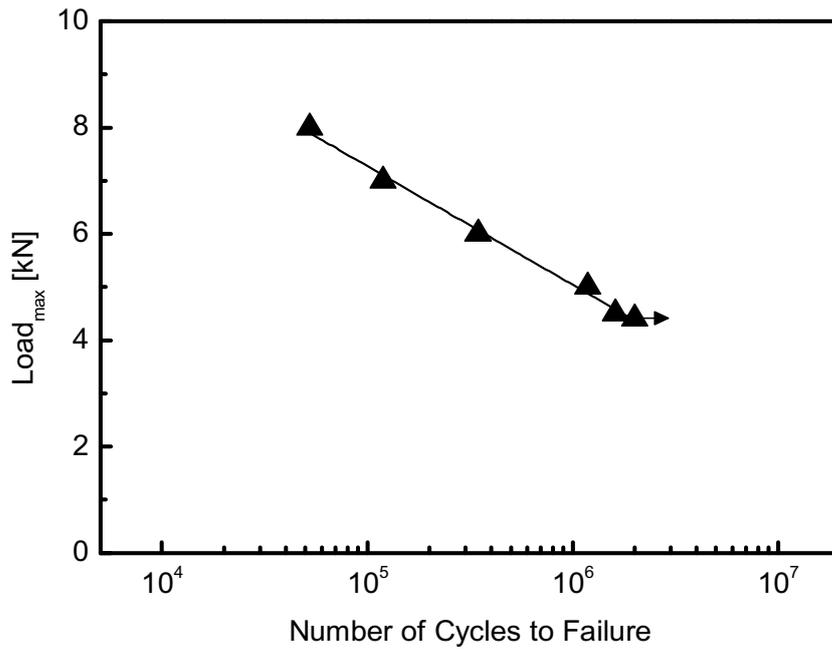


Fig. 21 Fatigue property of Weld-bond at 4.0mm.



Fig. 22 Fracture mode of Weld-bond at 4.0mm.

너깃경이 6.0mm인 Weld-bond의 피로시험 결과를 Fig. 23에 나타내었다. 피로 하중이 감소할수록 피로수명이 증가하는 일반적인 피로 경향을 나타내고 있으나, 너깃경이 4.0mm일 때보다 낮은 피로한도를 나타냈다. 너깃경이 6.0mm인 Weld-bond의 피로한도는 약 4.0kN으로 접착제 접합과 유사한 피로한도를 나타냈다. 이는 최대인장전단강도의 약 16% 정도에 해당하는 값이다. 너깃경이 4.0mm에서 6.0mm로 증가하였지만 피로한도는 오히려 감소하였다. 점용접을 실시하는 과정에서 접착제가 연소되어 접착층 내부에 가스가 발생하게 되는데 [9] 이 때 발생한 가스에 의해 접착층 내부에 결함이 발생하여 피로한도를 저하시킨 것으로 사료된다.

Fig. 24에는 너깃경이 6.0mm인 Weld-bond의 파단 모드를 나타내었다. 접합부에 6kN 이상의 피로하중이 가해지면 접착제가 도포된 접착층은 모재와 접착제의 계면에서 파단이 발생하고, 용접 너깃부에서는 테어 파단이 발생한다. 5.5kN 이하의 피로하중이 가해지면 접착층에서는 계면파단이 발생하고, 용접 너깃부에서는 모재의 변형없이 용접 너깃부 주변의 모재로 균열이 진전되어 파단이 발생한다.



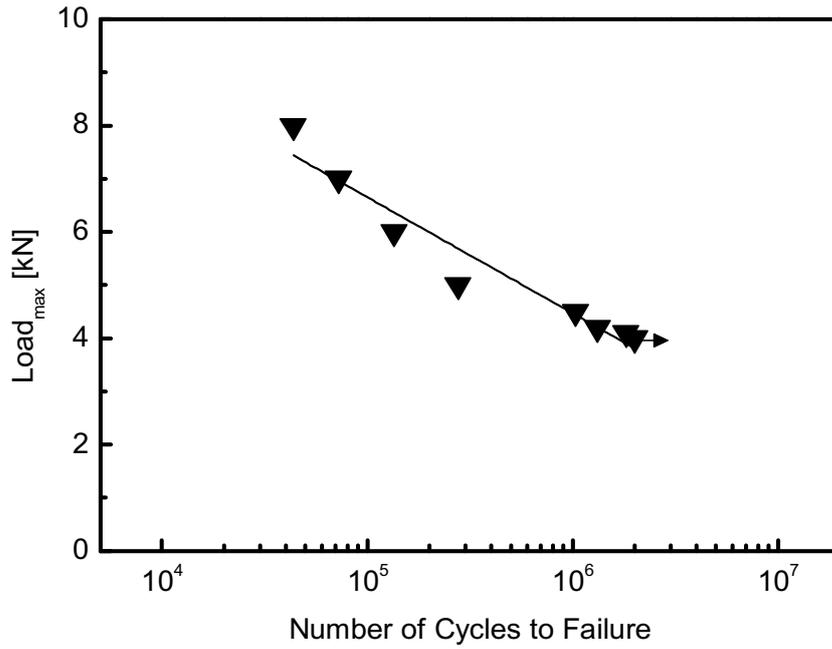


Fig. 23 Fatigue property of Weld-bond at 6.0mm.



Fig. 24 Fracture mode of Weld-bond during fatigue test,
 (a) over 6kN (b) below the 5.5kN.

제 5 장 결론

본 연구에서는 1180MPa급 TRIP 강을 이용하여 저항 점용접, 접착제 접합, Weld-bond 시험편을 제작하였다. 세 가지 접합 방법에 대하여 인장전단특성을 비교 평가하였고, 인장전단특성 평가 결과를 바탕으로 피로특성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 저항 점용접은 너깃경이 증가함에 따라 최대인장전단하중 값이 증가하는 경향을 나타내지만, 너깃경이 $5\sqrt{t}$ 이상이 되면 너깃경 증가에 따른 최대인장전단하중의 증가는 미미하게 나타난다. 또한, 저항 점용접부의 너깃경이 증가함에 따라 파단 모드는 계면파단에서 플러그 파단, 테어 파단으로 이행된다.

2. 접착제 접합은 시험편에 하중이 가해지면 접착 영역의 가장자리에 응력이 집중되므로 저항 점용접보다 인장전단특성이 우수하게 나타나지만, 최대인장전단하중 값에 도달하는 순간 접착층이 완전히 분리되어 하중이 급격히 감소한다. 접착제 접합의 파단모드는 접착층 두께에 따른 응집파괴와 소재의 인장강도에 기인한 계면파단이 복합적으로 나타난다.

3. Weld-bond는 너깃경이 증가할수록 최대인장전단하중 값이 증가하는 경향을 나타내며, 너깃경이 $4\sqrt{t}$ 이상이 되면 접착제가 도포된 영역과 점용접부에서 각각 파단이 발생한다. Weld-bond에서 접착제가 도포된 접착층은 너깃경에 관계없이 접착층이 양분되며 파단이 발생하며, 점용접부의 파단 모드는 저항 점용접과 유사하게 나타난다.

4. 너깃경이 6.0mm인 저항 점용접의 피로한도는 약 1.0kN이다. 저항 점용접은 피로 균열이 열영향부 주위에서 발생하고 균열이 발생한 곳에 응력이 집중되어 낮은 피로한도를 나타낸다. 저항 점용접은 용접 너깃부에서 균열이 발생하며, 모재로 균열이 진전되어 파단이 발생한다. 이 때, 피로하중이 높으면 모재의 변형이 발생하고 피로하중이 낮으면 모재의 변형은 발생하지 않는다.

5. 접착제 접합의 피로한도는 약 4.0kN이다. 연속한 접착층과 넓은 겹침 영역에 의해 높은 피로한도 값을 나타낸다. 접착제 접합은 접합부에 반복하중이 가해지면 접착층의 파단 모드는 응집파괴와 계면파단이 함께 나타나는 혼합 모드로 파단이 발생한다.

6. 저항 점용접과 접착제의 혼용으로 Weld-bond의 피로특성이 향상된다. 너깃경이 4.0mm인 Weld-bond의 피로한도는 약 4.4kN으로 다른 접합 방법에 비해 높은 피로한도 값을 나타낸다. 그러나 너깃경이 6.0mm로 증가하게 되면 점용접 공정 중 발생한 가스에 의해 접착층 내부에 결함이 발생하여 피로한도가 저하된다. Weld-bond에서 접착제가 도포된 접착층은 계면파단이 발생한다. 너깃경이 4.0mm일 때 용접 너깃부는 계면파단이 발생하고, 너깃경이 6.0mm일 때는 가해지는 피로하중에 따라 파단형태가 달라진다.

7. Weld-bond가 저항 점용접이나 접착제 접합보다 공정이 복잡하다는 단점이 있지만, Weld-bond의 적용으로 접합부의 인장전단강도와 피로한도가 향상한다. 따라서 Weld-bond는 새로운 소재의 용접성 한계 극복과 승객의 안전을 확보할 수 있는 기술이라 할 수 있다. Weld-bond 공정의 단순화, 접합부의 기계적 특성 향상을 위하여 꾸준한 연구개발이 필요하다.

참고문헌

1. Youngsoo Choi, Sangman Yun, Yongjoon Cho and Se-hun Rhee, 2011. *A Study on the Crash Characteristics and Analysis of Spot+adhesive Welds in Automobile B-pillar Parts*. Journal of KWJS, 29(5), pp.570-579
2. A. Al-Samhan and S. M. H. Darwish, 2003. *Strength prediction of weld-bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 23(1), pp.23-28
3. S. M. H. Darwish and A. Ghanya, 2000. *Critical assessment of weld-bonded technologies*. Journal of Materials Processing Technology, 105(3), pp.221-229
4. I. O. Santos, et al., 2004. *Weld bonding of stainless steel*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44(14), pp.1431-1439
5. P. K. GHOSH and VIVEK, 2003. *Weldbonding of stainless steel*. ISIJ International, 43(1), pp.85-94
6. Baohua Chang, Yaowu Shi and Liangqing Lu, 2001. *Studies on the stress distribution and fatigue behavior of weld-bonded lap shear joints*. Journal of Materials Processing Technology, 108(3), pp.307-313
7. J. D. Kwon, S. P. Jeon, Y. B. Moon and H. D. Park, 1998. *Strength Evaluation of Thin Plate Structures by Weldbonding Method*. Transactions of the KSME, 1(1), pp.139-144
8. Sullivan Smith, Jurgen Vrenken and Tony van der Veldt, 2013. *Structural performance of adhesive and weld-bonded joints in AHSS*. Welding in the World, 57(1), pp.147-156

9. S. Sam and M. Shome, 2010. *Static and fatigue performance of weld bonded dual phase steel sheets*. Science and Technology of Welding and Joining, 15(3), pp.242-247
10. V. F. Zackay, E. R. Parker, D. Fahr and R. Busch, 1967. *The enhancement of ductility in high-strength steels*. Trans. ASM, 60, pp.252-259
11. O. Matsumura, Y. Sakuma and H. Takechi, 1987. *Trip and its kinetic aspects in austempered 0.4C-1.5Si-0.8Mn steel*. Scripta Metallurgica, 21(10), pp.1301-1306
12. K. Sugimoto, M. Kobayashi, A. Nagasaka and S. I. Hashimoto, 1995. *Warm Stretch-formability of TRIP-aided Dual-phase Sheet Steels*. ISIJ International, 35(11), pp.1407-1414
13. 강성규, 2011. *트립강의 충돌특성에 대한 충돌시험과 컴퓨터 전사모사 결과의 비교연구*. 석사학위논문. 부산 : 한국해양대학교
14. 최철영, 2012. *자동차 차체용 고강도 강판의 저항 점용접부 파단특성에 따른 용접성 평가*. 박사학위논문. 부산 : 부산대학교
15. 이현철, 2008. *자동차용 강판의 전기저항 점용접부 열처리에 의한 인장전단 강도 특성*. 석사학위논문. 부산 : 동의대학교
16. Sang-Soon Park. et al., 2008. *가압력 변화에 따른 표면조도처리 강판의 저항 점 용접성 비교*. Journal of KWJS, 26(2), pp.75-84
17. S. I. Seo, J. K. Lee, S. K. Jang and B. W. Cha, 1996. *점용접 시 압흔 깊이 감소를 위한 최적 용접 조건 선정에 관한 연구*. Journal of KWJS, 14(2), pp.57-64
18. Z. Han and J.E. Indacochea, 1993. *자동차용 철판 고강도강 전기저항점용접의 비산 현상*. Journal of Materials Engineering and Performance, 2(3), pp.437-444
19. 임재경, 2010. *접착제 접합과 저항용접의 혼용에 의한 PP 열가소성 수지의 접합강도평가에 관한 연구*. 석사학위논문. 전주 : 전북대학교

20. L. Dorn and Weiping Liu, 1993. *The stress state and failure properties of adhesive-bonded plastic/metal joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 13(1), pp.21-31
21. Robert W. and Messler, Jr., 1993. *Joining of Advanced Materials*. Butterworth Heinemann
22. 이혁재, 2003. *차량 구조물의 진동 특성을 고려한 점용접부의 주파수영역 피로해석*. 석사학위논문, 서울 : 국민대학교
23. 이동녕, 2006. *材料強度學*. 문운당
24. 강성수, 1989. *이종 점용접재의 피로거동에 관한 실험적 연구*. 박사학위논문, 대구 : 경북대학교
25. 윤호철, 이중삼, 임재규, 1999. *접착제 접합에 의한 얇은 강판 접합부의 응력분포 및 강도평가에 관한 연구*. Journal of KWJS, 1, pp.260-263
26. Ki-Yeob Kang and Jae-Myung Lee, 2012. *Experimental Study on Evaluation of Bonding Strength of Adhesively Bonded Joints by Adhesive*. Journal of KWJS, 30(6), pp.548-553
27. 신영동, 1998. *저항 점용접의 중간날림특성 해석에 관한 연구*. 석사학위논문, 서울 : 한양대학교
28. Hongyan Zhang, S. Jack Hu and Jacek Senkara, 2000. *A Statistical Analysis of Expulsion Limits in Resistance Spot Welding*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 122(3), pp.501-510
29. J. Senkara, H. Zhang and S.J. Hu, 2004. *Expulsion Prediction in Resistance Spot Welding*. Welding Journal, 83(4), pp.123-132
30. Sang-Soon Park, et al., 2008. *Evaluation of Resistance Spot Weld Interfacial Fractures in Tensile-Shear Tests of TRIP 590 Steels*. Korean Journal of Metals and Materials, 46(10), pp.672-682

31. Sang-Soon Park, et al., 2008. *Evaluation of Resistance Spot Weld Interfacial Fractures in Tensile-Shear Tests of TRIP 1180 Steels*. Journal of KWJS, 26(6), pp.81-91
32. M. Pouranvari, et al., 2007. *Effect of weld nugget size on overload failure mode of resistance spot welds*. Science and Technology of Welding & Joining, 12(3), pp.217-225
33. A. Roy, C. Mabru, J. L. Gacougnolle and P. Davies, 1997. *Damage mechanisms in composite/composite bonded joints under static tensile loading*. Applied Composite Materials, 4(2), pp.95-119
34. 김희현, 2006. *자동차용 고장력 강판 점용접부의 피로강도 및 수명 평가*. 석사학위논문, 전주 : 전북대학교



감사의 글

부족함이 많았던 제가 무사히 학위 과정을 마칠 수 있도록 아낌없이 격려해 주시고 가르침을 주신 최일동 지도교수님께 진심으로 감사드립니다. 2년이라는 시간동안 교수님께 다양한 학문적 지식과 하나의 인격체로서 지녀야 할 성품을 배우며 더욱 더 성숙해 질 수 있었습니다. 대학에 입학하면서부터 석사를 졸업하기까지 전공지식을 전해주시는 문경만 교수님, 이성열 교수님, 김윤해 교수님, 이병우 교수님, 김준영 교수님께 깊이 감사드립니다. 그리고 용접이라는 분야에 눈을 뜨게 해주신 박영도 교수님께도 감사드립니다.

실험을 도와주고 항상 함께 의견 나누어주신 부산대학교 김재원 씨 감사합니다. 2년 동안 본인들보다 어린 실험실장과 함께 실험실 생활하느라 고생한 오흔택, 임성상 학생들에게 고맙고 미안한 마음을 전합니다. 그리고 부족한 선배이지만 믿고 따라와 준 박병철, 오병관, 최호진, 그리고 앞으로 실험실을 이끌어 갈 유용수 선배에게도 고맙다는 말과 함께 앞으로도 실험실 생활 열심히 해주길 바란다고 전하고 싶습니다. 그리고 남자 많은 공대에서 어려움 없이 잘 지낼 수 있도록 도와준 09학번 동기들도 정말 고맙습니다.

석사 진학과 동시에 인연을 맺어 아낌없는 격려와 조언으로 응원해주신 이동호, 정준구 멘토님과 2년 동안 즐겁고 소중한 추억을 만들어 준 멘토링 팀원 모두에게도 감사의 마음을 전하고 싶습니다.

마지막으로, 타지 생활하는 손녀 딸 걱정뿐이신 할머니, 하나뿐인 딸을 타지로 보내고 혹시 아프지는 않을까 노심초사하시는 부모님, 묵묵히 응원해주며 힘이 되어주는 오빠 모두 사랑하고 고맙습니다.

항상 저를 응원해주시고 걱정해주신 모든 분들께 다시 한 번 감사의 말씀 드립니다. 감사합니다.