ISSN 2466-2232 (Print)
ISSN 2466-2100 (Online)

차체 경량화를 위한 Al7075-T6와 SPFC590DP 이종소재 접합 공법에 따른 접합부 성능 비교 연구

조경환^{*,***} · 주진혁^{*,***} · 이정흠^{**} · 오제훈^{***} · 감동혁^{*,†}

^{*}한국생산기술연구원 부품기능연구부문

^{**}대우공업(주) 기술연구소

^{***}한양대학교 기계설계공학과

Comparative Study of Joint Performance According to Joining Methods Between Al7075-T6 and SPFC590DP for Lightweight Car Body

Keong Hwan Cho^{*,***}, Jin Hyeok Joo^{*,***}, Jung Heum Lee^{**}, Je Hoon Oh^{***},
and Dong Hyuck Kam^{*,†}

^{*}Advanced Joining & Additive Manufacturing R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology,
Incheon, 21999, Korea

^{**}Daewoo Industrial R&D center, Anyang, 14042, Korea

^{***}Dept. of mechanical design engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

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

(Received August 28, 2021; Revised September 27, 2021; Accepted October 6, 2021)

Abstract

The necessity of dissimilar joining between aluminum alloy and steel is increasing in order to meet the demand for weight reduction in automobiles. However, dissimilar joining between 7000 series aluminum alloy and steel is challenging with mechanical joining methods such as self-piercing rivet (SPR) and flow drill screw (FDS) without hole processing. In this study, mechanical performances of dissimilar joints between 3 mm thick Al7075-T6 and 1 mm thick SPFC590DP were evaluated for use in lightweight B-pillar assembly. Self-Piercing Rivet (SPR) and Flow Drill Screw (FDS) with one-hole processing, bolt/nut and blind rivet with two-hole processing and adhesive bonding were compared with respect to joint performance. In SPR joining, rivet did not penetrate and rivet buckling occurred in the rivet due to the thickness and high strength of the Al7075-T6. By processing pre-hole on Al7075-T6 and applying an additional Al5052-H32 sheet to induce mechanical interlock in SPR joint, it became possible to join Al7075-T6 to SPFC590DP with an SPR. The tensile shear load of the SPR joint was 9.8 kN. In FDS joining, it is also necessary to process pre-hole on Al7075-T6 since the fastener could not penetrate the Al7075-T6. The tensile shear load of the FDS joining was 8.1 kN. In bolt/nut and blind rivet joining, the tensile shear load were measured respectively 11.1 kN and 5.2 kN. In adhesive bonding with 1K glue, the tensile shear load was measured 18.5 kN when the interfacial surface was roughened with a sand paper.

Key Words: Aluminum, Steel, Dissimilar joint, Self-Piercing rivet, Flow drill screw, Bolt/Nut, Blind rivet, Adhesive

1. 서 론

친환경 정책이 강화되면서 내연기관 자동차의 경우

배기가스와 연비 기준을 만족하고 전기자동차의 경우 주행거리를 확보하기 위하여 차량 경량화 연구가 활발하게 진행되고 있다¹⁾. 차량 경량화를 위하여 알루미늄, 초고강도강, 복합재 등의 다종소재가 복합적으로 적용

되므로 이들 소재간 이중소재 접합의 필요성이 증가하고 있다²⁾. 본 연구에서는 B-pillar 경량화를 목적으로 3 mm 두께 Al7075-T6(B-pillar outer 적용) 알루미늄과 1 mm 두께 SPFC590DP(B-pillar inner 적용) 강재의 이중소재 접합 공법들에 대한 실험적 평가를 진행하고 최적의 공법을 제안하고자 한다.

B-pillar는 측면에서 발생할 수 있는 사고로부터 운전자를 보호하고, 차체와 지붕을 지지하며, 탑승자의 안전을 보장해야 하는 중요한 부품이다³⁾. 이러한 B-pillar의 특징 때문에 경량화를 위하여 고강도의 알루미늄과 강재의 적용이 검토되고 있다. 그러나 알루미늄과 강재의 이중소재 접합은 기존의 저항 점용접이나 레이저 용접과 같은 용융용접을 사용할 경우 두 소재의 물성이 달라서 접합의 어려움이 있다. 또한 두 소재의 용융 접합 계면에 취성이 높은 intermetallic compound (IMC) 층이 형성되므로 기계적 특성과 에너지 흡수율이 낮아져서 B-pillar에 안정성을 확보 할 수 없다⁴⁾. 따라서 알루미늄과 강재의 이중소재 부품 조립을 위해 기계적 체결과 같은 비용융 접합의 적용이 활발히 검토된다.

Bolt/nut나 blind rivet과 같은 전통적인 기계적 체결은 전처리 공정으로 접합 대상 소재 모두에 홀 가공이 필요하고 홀 간 정렬의 자동화가 어려운 단점이 존재한다. 예를 들면, bolt/nut나 blind rivet의 2점 소재 접합의 경우 2개의 홀 가공과 홀 간 정렬이 필요하다. 이러한 단점을 해결하기 위해서 홀 가공이 없이도 접합이 가능한 self-piercing rivet (SPR)⁵⁾, flow drill screw (FDS)^{6,7)} 등이 도입되고 있다. 하지만 차체의 경량화를 위하여 기존의 강재에서 알루미늄 합금으로 대체하는 과정에서 고강도의 알루미늄이 적용되고 두께가 증가하기 때문에 SPR과 FDS 단독 접합이 불가능한 경우가 많다. 따라서 resistance element welding (REW)⁸⁾와 friction element welding (FEW)⁹⁾ 등의 용융 또는 마찰교반 기반의 하이브리드 기계적 체결 공법이 검토되고 있다. 하지만 이러한 하이브리드 접합은 공정이 복잡하고 비용이 높은 단점이 존재한다. 따라서 고강도 이중소재 조합에 대한 효율적이고 경제적인 접합기술의 개발이 필요하다.

본 연구의 이중접합 대상 소재인 3 mm 두께의 Al7075-T6알루미늄 합금은 강도가 높고 연성이 부족

하며 두께가 두꺼우므로 SPR 또는 FDS 단독 접합이 불가능하다. 이 문제를 해결하기 위해서 Al7075-T6에 홀 가공 후 SPR 또는 FDS 접합을 실시하였다. 특히, SPR의 경우 성형성이 좋은 덧댐판을 추가하여 SPR 리벳과 덧댐판이 성형체결을 이루도록 하였다. 즉, 2점의 이중접합부의 난접합 소재가 위치하는 상판에 1개의 홀을 가공함으로써 SPR이나 FDS 접합을 가능하게 하고 홀 간 정렬이 불필요한 장점이 있다.

본 연구에서는 3 mm 두께의 Al7075-T6와 1 mm 두께의 SPFC590DP의 이중소재 접합부에 대하여 상·하판 2개의 홀 가공이 필요한 Bolt/Nut, blind rivet, 상판 1개의 홀 가공이 필요한 SPR, FDS 그리고 홀 가공이 없는 접착제 접합을 비교 평가하였다. 각각의 이중접합 공법에 대하여 공정 최적화를 실시하였고 각 접합 공법에 따른 접합부의 접합부 단면, 인장전단하중, 파단모드를 평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구의 이중소재 접합 실험에 사용된 소재는 두께 3.0 mm Al7075-T6와 두께 1.0 mm 두께의 SPFC590DP이다. 각 소재의 두께와 강도는 Table 1에 제시하였으며 모재인장강도는 ASTM E8M 규격으로 진행하였다.

Al7075-T6와 SPFC590DP 이중소재 접합부의 인장전단 평가를 위한 시편은 Fig. 1과 같이 KS B ISO 14273 규격으로 제작하였고 접합 품질을 평가하기 위해 단면평가를 진행하였다. 인장전단 평가는 Shimadzu社의 AG-300 kNX 장비를 사용하여 3회 반복 실험을 진행하였으며 인장속도는 5 mm/min로 설정하였다.

SPR 접합 실험에서 사용된 장비는 Bollhoff社의 유압식 RIVSET® GEN 2를 사용하였으며 최대 78 kN 가압 하중 설정이 가능하다. SPR 리벳의 재질은 보론강(38B2)이며 Fig. 2와 같이 헤드 직경, 샹크 직경이 각각 7.8 mm, 5.3 mm이다. 그리고 SPR 리벳 길이는 L은 SPR 단독 접합의 경우 6 mm 그리고 덧댐판을 적용한 SPR의 경우 7.5 mm 이다. SPR 리벳 다이는 Fig. 3과 같이 4종(FM1, FM2, KA, DZ types)을 사용하였다. SPR 접합 단면의 주요 측정 인자는 Fig. 4와 같이 head height, interlock, bottom thickness이며 head height는 0 ± 0.05 mm의 조건을 만

Table 1 The mechanical properties (UTS & YS) and thickness of the materials

Sheet material	Ultimate tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Thickness (mm)
Al7075-T6	582	503	3.0
SPFC590DP	610	375	1.0

Fig. 1 The dimensions of the test sample used for the tensile-shear test (KS B ISO 14273)

Fig. 2 Geometric dimensions of the SPR rivet used in this study. The rivet length, L is 6 mm for SPR only and 7.5 mm for SPR with additional plate

죽하도록 SPR 접합 장비의 가압력 하중을 설정하였다. 상판 Al7075-T6의 홀 가공 시 직경은 $\varnothing 6$ mm이다.

FDS 접합 실험에 사용된 장비는 DEPRAG社의 Adaptive DFS for Lab이며, 최대 회전속도 8000 RPM, 최대 토크는 15 N·m, 최대 Down force는 1200 N이다. FDS 화스너는 (주)진합社의 M5 제품을

Fig. 4 Geometrical indexes of the self-piercing riveted joint

Fig. 5 Geometric dimensions of the FDS fastener used in this study

사용하였고 그 재질은 SWCH18A이며 침탄 열처리된 제품이다. Fig. 5는 FDS 화스너의 형상과 치수를 나타내었다. 상판 Al7075-T6의 홀의 유무에 따라서 실험을 진행하였고 홀의 직경은 $\varnothing 6$ mm이다.

Bolt/Nut 접합 평가에 사용된 볼트와 너트는 S45C 재질의 M6규격이며, Washer는 탄소강 재질의 M6 규격으로 외경이 $\varnothing 18$ mm이다. TOHNICHI QL25N-MH 토크렌치를 사용하여 체결토크의 변화에 따른 접합성을 평가하였다. Bolt/Nut 체결을 위한 상판과 하

Type	Cross-sectional shape	Die shape	Pip height (mm)	Cavity diameter (mm)	Cavity depth (mm)
FM1		Flat	0	9.0	1.8
FM2		Flat	0	9.0	1.8
KA		Cone	0.65	9.5	1.6
DZ		Dimple	1.25	9.0	1.75

Fig. 3 Geometric details of the die types used in SPR process

Fig. 6 Geometric dimensions of the blind rivet used in this study

판의 홀은 밀링을 통하여 가공하였고 홀 사이즈는 $\phi 6$ mm이다. Bolt/Nut 체결 시 양면에 washer를 적용하였으며 공정 변수인 체결토크를 5, 7, 9, 11, 13, 15 N·m로 변화하여 평가하였다.

Blind rivet 접합 실험에서 사용된 장비는 Bollhoff社의 RIVQUICK® T3이다. Blind rivet은 Bollhoff社의 221 321 64120 모델로 body 재질은 C4C, mandrel 재질은 C48D2이며 Zn3A/Fe 코팅 처리되었다. Blind rivet 체결을 위한 상판과 하판의 홀 가공은 밀링을 통하여 가공하였고 홀 사이즈는 직경 $\phi 6.5$ mm이다.

접착제 접합 실험에서 1액형 고온 경화형 접착제인 Henkel社의 TEROSON® 5016 구조용 접착제를 사용하였다. 접착제의 도포 두께를 균일하게 하기 위하여 접착면에 0.2 mm glass bead 적용하여 갭을 일정하게 유지하였다. 접착제 경화는 180 °C의 오븐에서 40 min 동안 진행하였다. Al7075-T6와 SPFC590DP 접착면은 98% ethanol로 세척하여 이물질을 제거한 후 접착제를 적용하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 SPR 접합 평가

3 mm 두께의 Al7075-T6와 1 mm 두께의 SPFC-590의 이종소재 접합부에 대해 SPR 접합은 Fig. 7과 같이 2가지의 공정을 평가하였다. Fig. 7(a)와 같이 일반적인 SPR 접합 공정은 SPR 리벳이 상판 소재를 관통하고 하판 소재와 성형 체결을 이루어 기계적 체결이 이루어진다. 하지만 상판 Al7075-T6의 경우 강도가 높고(UTS 582 MPa) 두께가 3 mm로 두꺼우므로 Fig. 8의 결과와 같이 SPR 리벳이 상판을 관통하지 못하고 좌굴 불량이 발생한다. Fig. 8의 결과에서 리벳 좌굴 현상은 다이 종류와 관계없이 발생하므로 하판과의 성형 체결이 이루어지지 않는다.

Fig. 7(b)와 같이 상판 Al7075-T6에 홀을 가공하고 성형성이 좋은 1.5 mm Al5052-H32 덧댐판을 추가함으로써 SPR 접합이 가능하였다. 일반적으로 SPR 리벳의 길이는 접합 대상 소재 두께의 총합에 2 mm가 더해진 것을 선택한다. 따라서 1.5 mm 두께의 덧댐판을 사용한 경우 SPR 리벳의 길이는 7.5 mm로 그렇지 않은 경우의 6 mm에 비해 1.5 mm 더 긴 것을 선택하였다. 홀 가공과 덧댐판을 적용한 SPR 접합 결과는 Fig. 9에 정리하였다. SPR 다이 종류와 관계없이 interlock은 0.38~0.43 mm로 유사한 수준을 보이며 interlock 최소 기준 0.2 mm를 충분히 만족한

Fig. 7 Schematic illustrations of (a) SPR only and (b) SPR with pre-hole and additional plate

Die	FM1	FM2	KA	DZ
Punch force	70 kN	70 kN	73 kN	78 kN

Fig. 8 Cross sections for SPR joints between Al7075-T6 (top) -SPFC590DP (bottom) with respect to die types

Die	FM1	FM2	KA	DZ
Punch force	47.5 kN	47.5 kN	49 kN	50 kN

Interlock	0.38	0.40	0.38	0.43
Bottom thickness	0.4	0.4	0.39	0.28
Failures after tensile shear test
UTS	9.82 kN	9.69 kN	9.34 kN	9.80 kN

Fig. 9 Cross sections, interlocks, bottom thicknesses, failure modes and UTS loads for SPR joints with pre-hole and additional plate between Al7075-T6 (top) -SPFC590DP (bottom) with respect to die types

다. Bottom thickness는 FM1, FM2, KA 다이의 경우 0.39~0.4 mm로 유사하지만 DZ 다이의 경우 pip height(Fig. 3 참조)가 높으므로 0.28 mm로 얇다. 하지만 모든 다이에 대해 bottom thickness 최소 기준 0.2 mm를 만족한다. 인장전단하중은 FM1, FM2, KA, DZ type 다이에 대해 9.82, 9.69, 9.34, 9.80 kN로 유사한 수준이다. 모든 경우에 파단모드는 하판 SPFC590DP 강판재의 shear-out 모재 파단이다. 즉, 모든 다이의 경우에 interlock이 충분하게 형성되므로 접합 품질이 양호하여 모재 파단이 발생한다.

3.2 FDS 접합 평가

FDS 접합은 SPR의 경우와 같이 상판 Al7075-T6에 직경 6 mm 홀을 가공한 후 FDS 접합을 실시하였다. 상판에 홀을 가공하지 않고 FDS 접합을 한 경우는 Fig. 10(a)의 접합부 단면 분석 결과와 같이 fastener head와 상판 표면의 미접촉, 상·하판 사이의 간극, screw tip의 용융 등의 불량 발생한다. 그 이유는 FDS 접합 공정은 소재의 특성에 따라 그 조건이 다르며 고강도 소재의 경우 그 특성이 극대화되기 때문이다. FDS 접합 공정은 일반적으로 flow drilling, thread forming, 그리고 tightening 세 가지 과정으로 이루어진다¹⁰⁾. 그리고 각 과정의 주요 공정 변수는 rotating speed, downforce, feed rate, torque 이다. 일반적으로 강재의 접합은 downforce를 크게 하고 rotating speed를 낮게 하지만 알루미늄 접합은 그와

Fig. 10 Cross sections for FDS joints between Al7075-T6 (top) -SPFC590DP (bottom) (a) without pre-hole and (b) with pre-hole on the top sheet

반대로 downforce를 작게 하고 rotating speed 높게 한다. 따라서 상판에 홀 가공을 하지 않은 FDS 접합의 경우 Al7075-T6와 SPFC590DP의 경우 두 소재의 특성을 모두 만족하는 공정 조건을 확보하지 못하여 불량이 발생한 것으로 판단된다.

상판 Al7075-T6에 직경 6 mm 홀을 가공한 후 FDS를 접합한 경우는 Fig. 10(b)와 같이 건전한 접합 단면을 형성하였다. 주요 공정 변수는 최적화 과정을 거쳐 Table 2의 조건을 도출하였다. 앞서 상판 홀 가공 없는 FDS 접합에서 발생한 fastener head와 상판 표면의 미접촉, 상·하판 사이의 간극, screw tip의 용융 등의 불량이 관찰되지 않는다. 그리고 접합부 인장전단하중은 약 8 kN으로 Fig. 11과 같이 FDS screw와 체결된 하판 SPFC590DP 모재의 shear-out 파단이 발생하였다.

Table 2 Processing parameters for FDS joining between Al7075-T6 (top) - SPFC590DP (bottom) in case of pre-hole formed in the top sheet

Process stages	Rotating speed (rpm)	Downforce (N)	Feed rate (mm/s)	Torque (N·m)
Flow drilling	4000	900	35	X
Thread forming	2800	450	X	X
Tightening	X	X	X	6

Fig. 11 Failure after tensile shear test for FDS joining between Al7075-T6 (top) -SPFC590DP (bottom) in case of pre-hole formed in the top sheet

3.3 Bolt/Nut 접합 평가

3 mm 두께 Al7075-T6 알루미늄과 1 mm 두께 SPFC590 강재의 이종소재에 대한 bolt/nut 체결 실험은 두 소재의 상·하판 배치와 체결 토크의 영향이 체결 품질에 미치는 영향을 평가하였다. 여기서 체결 토크의 평가 범위는 사전 실험을 통해 결정하였다. 체결 토크가 7 N·m 미만일 경우 bolt/nut가 접합부가 쉽게 풀리는 현상이 발생하였고 체결 토크가 15 N·m를 초과할 경우 bolt의 파손이 발생하였다. 따라서 체결 토크의 범위를 7~15 N·m로 설정하였다. Fig. 12의 결과와 같이 Al7075-T6가 상판(bolt head 쪽)

Fig. 12 Bolt/Nut joint load and failure mode in terms of joining torque and configuration for Al7075-T6 & SPFC590DP

에 위치할 때 체결 토크에 따른 접합부 인장전단하중은 10.84~11.06 kN 이며 SPFC590DP가 상판에 위치할 경우는 10.45~11.05 kN 이다. 즉, bolt/nut의 접합부 인장전단하중은 해당 범위에서 체결 토크에 따른 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 그리고 상판에 Al7075-T6가 위치할 경우가 그 반대의 경우에 비해 전반적으로 인장전단하중이 높고 그 편차가 작다. 그 이유는 SPFC590DP가 상판에 위치할 경우 볼트 헤드로부터 가해지는 응력 집중이 그 반대의 경우에 비해 더 크기 때문으로 추정된다. 최대 인장전단하중 값은 Al7075-T6가 상판에 위치하고 체결 토크가 7 N·m 일 때의 11.06 kN으로 선정하였다. 그리고 파단 모드는 모든 조건에서 동일하게 SPFC590DP의 cleavage-tension 파단이 발생하였다.

3.4 Blind rivet 접합 평가

Blind rivet 접합은 3 mm 두께 Al7075-T6와 1 mm 두께 SPFC590DP의 상·하판 배치에 따른 접합성을 평가하였다. Fig. 13의 결과와 같이 상판(blind rivet head 방향)에 SPFC590DP가 위치할 경우 인

Configuration	Al7075-T6 (top) - SPFC590DP (bottom)	SPFC590DP (top) - Al7075-T6 (bottom)
Cross section		
Tensile shear load	5.01kN	5.16 kN
Failures after tensile shear test		

Fig. 13 Blind rivet joint load and failure mode in terms of joining configuration between Al7075-T6 and SPFC590DP

Surface treatment	Ethanol cleaning only	Sand paper (grit #40)	Sand paper (grit #80)
Failures after tensile shear test	Cohesive failure	Cohesive failure	Cohesive failure
UTS	18.1 kN	18.5 kN	17.46 kN

Fig. 14 Adhesive bonding joint load and failure mode in terms of joining configuration for Al7075-T6 (top) -SPFC590DP (bottom)

Joining methods	SPR	FDS	Bolt/Nut	Blind rivet	Adhesive
UTS	9.82 kN	8.08 kN	11.1 kN	5.16 kN	18.5 kN
Failures after tensile shear test	590DP sheet shear-out	590DP sheet shear-out	590DP sheet cleavage	Rivet failure	Cohesive failure

Fig. 15 Comparison of joining methods between Al7075-T6 & SPFC590DP

장전단하중이 5.16 kN으로 상판에 Al7075-T6가 위치할 경우의 5.01 kN에 비해 높은 값을 가진다. 그 이유는 상판에 SPFC590DP가 위치할 경우 mandrel 부분이 홀에 깊게 걸려서 리벳 파단을 지연시키므로 인장전단하중 증가에 영향을 주었던 것으로 판단된다. 그리고 파단모드는 두 경우 모두 blind rivet 파단으로 blind rivet 강도가 더 높은 것을 사용할 경우 체결부의 인장전단하중이 증가할 수 있다.

3.5 접착제 접합 평가

접착제 접합에서는 1액형 고온경화형 차체구조용 접착제(Henkel社의 TEROSON® 5016)를 사용하였다. 직경 0.2 mm 구형 유리 비드를 접착면에 적용하여 겹을 일정하게 유지함으로써 접착제 도포량을 제어하였다. 그리고 접합 시편의 접합면은 접착제를 도포하기 전 에탄올을 이용하여 세척하였다. 접착 평가는 Fig. 14에 정리한 것과 같이 접착 계면의 표면처리 유무에 따른 접합부 인장전단하중과 파단모드를 비교하였다. 표면처리는 sandpaper(grit #40, #80)를 이용하여 금속 시편의 접합면에 거칠기를 만드는 것으로 접착력 향상을 기대하였다. 하지만 실제 실험 결과에서는 표면처리 없이 에탄올을 세척만 한 접착시편의 인장전단하중은 18.1 kN이고 sandpaper(grit #40)로 표면처리를 한 접착시편의 인장전단하중은 18.50 kN으로 그 효과가 크지 않다. 그리고 모든 경우에 파단모드는 응집파단(cohesive failure)으로 동일하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 B-pillar 경량화를 위하여 Al7075-T6와 SPFC590DP 소재를 SPR, FDS, bolt/nut, blind rivet 그리고 접착제 접합 공법을 적용하였다. 접합 공법에 대한 접합부의 인장전단하중과 파단모드를 Fig. 15에 도시하였다. 각 공법에 관한 결론은 아래와 같다.

1) SPR 접합에서 다이의 변화에 따라서 실험을 진행하였고 홀 가공이 없는 경우 모든 다이에서 리벳이 상판을 관통하지 못하고 리벳이 좌굴 되었다. 상판 Al7075-T6에 홀 가공 후 덧댐판을 사용함으로써 SPR 접합에 성공하였다. 모든 다이에 대하여 interlock과 bottom thickness 각각 최소 기준 0.2 mm를 만족하였으며 모재 파단이 발생하였다.

2) FDS 접합에서 상판과 하판의 공정 조건이 다르기 때문에 fastener head와 상판 표면의 미접촉, 상·하판 사이의 간극, screw tip의 용융 등의 불량 발생하였다. 상판 Al7075-T6에 홀 가공 후 FDS 접합을 진행하였고 모재 파단이 발생하였다.

3) Bolt/Nut의 접합에서 접합부 인장전단하중은 해당 범위에서 체결 토크에 따른 영향이 크지 않음을 알 수 있었다. 상판에 Al7075-T6가 위치할 경우가 그 반대의 경우에 비해 전반적으로 인장전단하중이 높고 그 편차가 작았다.

4) Blind rivet 접합에서 상판에 SPFC590DP가 위치할 경우 인장전단하중이 더 높았다. 파단모드에서

blind rivet 파단으로 blind rivet 강도가 더 높은 것을 사용할 경우 체결부의 인장전단하중이 증가할 것으로 판단된다..

5) 접착제 접합에서 접착 계면의 표면처리 유무 비교하였으며 표면처리를 한 시편의 인장전단강도가 더 높긴 했으나 그 효과가 크지 않다

6) 경제성과 산업에서의 적용을 고려해봤을 경우 조립 단계에서 홀 가공으로 인한 가공비용, 홀 정렬의 작업 등등 경제성과 시간 측면에서 불리하다. SPR과 FDS 접합의 경우 홀 작업이 필요하지 않고 바로 접합이 가능한 공법이지만 Al7075-T6 소재가 난접합 소재이기 때문에 홀 작업이 필요하다. 인장전단하중의 경우 SPR 접합이 FDS 접합보다 높을 것을 확인하였다. 접착제 접합은 1액형 접착제를 굳히기 위한 공정과 비용이 발생하기 때문에 SPR 접합이 산업에서 사용하기 가장 좋은 공법이라고 판단된다.

Acknowledgements

본 논문은 산업통상자원부 산업기술혁신사업 (과제번호: 20002809)의 지원으로 수행한 연구입니다

ORCID: Keong Hwan Cho: <https://orcid.org/0000-0001-5197-0259>

ORCID: Jin Hyeok Joo: <https://orcid.org/0000-0002-8706-0967>

ORCID: Dong Hyuck Kam: <https://orcid.org/0000-0002-4027-3973>

References

1. 환경부, 자동차 평균에너지소비효율기준 · 온실가스 배출 허용기준 및 기준의 적용 · 관리 등에 관한 고시-[별표 2] 자동차의 에너지 소비효율 및 온실가스 배출량 측정방법. (2011).
2. F. C. CAMPBELL, Introduction and uses of lightweight materials. *Lightweight materials: understanding the basics*, (2012).
3. P. V. Kumar, G. M. Reddy, and K. S. Rao. Microstructure, mechanical and corrosion behavior of high strength AA7075 aluminium alloy friction stir welds-Effect of post weld heat treatment, *Defence Technol.* 11(4) (2015) 362-369.
<https://doi.org/doi.org/10.1016/j.dt.2015.04.003>
4. S. Reddy. Modeling and analysis of a composite B-Pillar for side-impact protection of occupants in a sedan. (Doctoral dissertation) (2007).
5. Y. Abe, T. Kato, and K. Mori. Joinability of aluminium alloy and mild steel sheets by self piercing rivet. *J. Mater. Process. Technol.* 177.1-3 (2006) 417-421.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.04.029>
6. F. Aslan, L. Laurent, and B. Tudor. Experimental analysis of the flow drill screw driving process, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 104.5 (2019) 2377-2388.
<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04097-z>
7. M. Y. Lee, S. H. Jung, and D. U. Lee. A Study on the Effect of the Process Parameters on Joint Quality in SOP (Screwing On Plate) Flow Drill Screw Joining Process. *J. Weld. Join.* 37(1) (2019) 69-75.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2019.37.1.9>
8. H. U. Jun, J. W. Kim, J. H. Kim, K. W. Lee, J. Y. Cheon, and C. W. Ji. Comparison of Weldability Misalignment between Rivets and Electrodes in Aluminum/Steel Resistance Element Welding, *J. Weld. Join.* 39(1) (2021) 51-58.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2021.39.1.6>
9. F. Aslan, L. Langlois, and T. Balan. Experimental analysis of the flow drill screw driving process, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 104(5) (2019) 2377-2388.
<https://doi.org/10.1007/s00170-019-04097-z>
10. J. P. Oliveira, K. Ponder, E. Brizes, T. Abke, P. Edwards, and A. J. Ramirez Combining resistance spot welding and friction element welding for dissimilar joining of aluminum to high strength steels, *J. Mater. Process. Technol.* 273 (2019) 116192.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.04.018>