Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 27:3 (2018) 211~217

https://doi.org/10.7735/ksmte.2018.27.3.211

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online)

Technical Papers

Self-Piercing Riveting 공법을 이용한 CFRP와 Steel 강판의 접합 실험 연구

박지형[a], 강유성[b], 이문구[b], 전용호[b*]

An Experimental Study on the Joining of Carbon Fiber Reinforced Plastics and Steel Plate Using Self-Piercing Rivets

Ji-Hyoung Park[a], You-Sung Kang[b], Moon G Lee[b], Yongho Jeon[b*]

[a] *Department of Mechanical Engineering, Graduate school of Mechanical engineering, Ajou University, 206, Worldcup-ro, Yeongtong-gu, Suwon, Gyeonggi-do, 16499, Korea.*
[b] *Department of Mechanical engineering, Ajou University, 206, Worldcup-ro, Yeongtong-gu, Suwon, Gyeonggi-do, 16499, Korea.*

ARTICLE INFO

Article history:
Received 16 April 2018
Accepted 22 May 2018

Keywords:
Self-piercing riveting
Carbon fiber reinforced plastics (CFRP)
Multi material integration
Shear strength
Fracture mode

ABSTRACT

Recently, the automobile industry is under increasing environmental regulation and must improve fuel efficiency by making cars lighter. In order to minimize weight, carbon fiber reinforced plastics (CFRP) materials with excellent mechanical properties are gaining attention, and various technologies are being developed for joining multiple materials as the application of composite materials increases. In this study, self-piercing rivets (SPRs) were used to assess the quality of the joining between CFRP and metal materials. A series of experiments was conducted to select the shape of the rivets and dies according to the materials, and the type of failure of SPRs was analyzed. The quality of the joining was evaluated using the gap between the rivet head and the upper plate, remaining thickness of the lower plate, the amount of interlock between the rivet and lower plate, and the shear strength evaluation and fracture modes were analyzed.

1. 서 론

최근 세계적으로 환경 문제가 심화되면서 이산화탄소 배출량 감소에 대한 필요성이 대두되고 있다. 자동차 산업의 이산화탄소 배출량은 연비와 직접적인 관계가 있으며, 이산화탄소 배출 규제에 따른 패러다임의 변화에서 경쟁력 확보를 위해서는 자동차 경량화가 필수적이다. 자동차 경량화 기술에는 우수한 기계적 성질을 가지는 새로운 재료를 개발하거나, 가공 방식의 개선을 통해 기존 재료의 기계적 성질을 향상시켜 재료 사용량을 줄이는 방법 등이 있다. 자동차 경량화를 위해서 최근 주목받고 있는 재료는 Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP)이 대표적이다. CFRP는 탄소섬유를 강화재로 사용하는 플라스틱 복합재로 일반 금속재와 비교하여, 밀도가 낮고 높은 비강도(Specific Strength), 비강성(Specific Modulus), 피로강도(Fatigue Strength)를 가지는 것으로 알려져 있다[1,2].

그러나 CFRP와 금속재료의 접합은 기존에 사용하던 레이저, 스폿, 아크등의 용접으로는 한계가 존재하며, 생산성도 낮기 때문에 이종소재 접합기술(Multi Material Integration, MMI)의 개발이 필요하다. 이종재료 사이의 접합 대안으로 볼트 체결, 클린칭(Clinching), 헤밍(Hemming), 접착제, Self-Piercing Riveting (SPR) 등의 다양한 기술들이 개발되고 있다. 이 중에서 SPR 접합은 리벳을 이용하

* Corresponding author. Tel.: +82-31-219-3652
Fax: +82-31-219-1611
E-mail address: princaps@ajou.ac.kr (Yongho Jeon).

여 서로 다른 재질의 다층 구조를 접합하는 기술[3]로, 기존의 리벳 공정과 달리 홀 가공 공정이 불필요한 것이 특징이며, 접합 시간이 스폿 용접만큼 짧기 때문에 생산성도 높다. 또한 소재에 열 변형이 발생하지 않아 도장 및 코팅된 소재의 이종 접합에도 적합하며, 유독가스를 배출하지 않아 친환경적인 것이 특징이다[4]. 체결 강도는 기존의 스폿 용접 이상이며, 다양한 재료에도 적용 가능하다. 따라서 본 연구에서는 SPR 접합을 이용하여 이종소재의 접합 가능성을 확인하고자 하였다. 리벳 및 다이 형상이 이종 소재간의 SPR 접합에 미치는 영향을 분석하고, 이종 소재 조합에 따른 소성 결합(Interlock)된 길이 및 하판의 잔여 두께, 리벳 헤드부와 상판 사이의 간격을 측정하여 SPR 접합의 품질을 평가하였다. SPR 접합의 신뢰성을 검증하기 위해 전단 강도 시험을 수행하였고, 전단 하중에 의한 파단 모드를 분석하였다[5,6].

2. Self-Piercing Riveting

SPR 접합은 리벳 및 다이를 통해 두 개 이상의 판재를 체결하는 기계적 접합 방식이다. 상판의 판재는 관통하고 하판의 판재는 다이 형상에 의해 소성 결합되면서 최종적으로 두 개 이상의 판재가 결합된다. SPR 접합 과정은 Fig. 1에 나타내었다[7,8]. 이 때 리벳의 선정은 접합하고자 하는 상판과 하판의 항복점, 변형 경화(Strain hardening)와 같은 기계적 물성 및 두께를 고려하여 선정해야 한다. SPR 접합과정에서 다이 내측의 형상은 판재의 소성변형 시 형상을 유도하며, 리벳의 접합 가압력을 감소시키는 역할을 한다. Fig. 2는 다이 형상의 유형을 나타내며, DZ와 DR 유형은 상판과 하판의 두께가 두꺼울 경우 많이 사용되며, KA 유형은 알루미늄 합금의 접합, FM 유형은 가압력을 감소시키는 용도로 주로 사용된다.

3. CFRP와 이종 소재간의 SPR 접합 실험

본 연구에서는 CFRP와 이종 소재간의 SPR 접합을 검증하고자 하였다. 일반적으로 CFRP는 하판이 알루미늄 합금일 경우 SPR

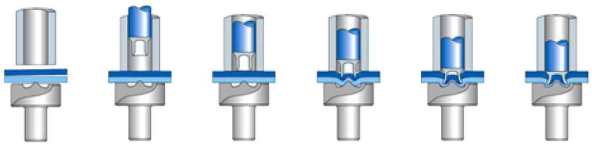

Fig. 1 Self-Piercing riveting process

Fig. 2 Types of die for SPR

Table 1 Experiment case

Case	Material 1	Thickness	Material 2	Thickness
1	CFRP	1.4 mm	Al5083	2 mm
2	CFRP	1.4 mm	Steel590	1.8 mm
3	CFRP	2 mm	SPHC	2 mm
4	CFRP	2.5 mm	Steel340	1.8 mm

접합이 가능하며, 다양한 Steel 재질을 하판으로 사용할 수 있는지 확인하였다.

3.1 실험 장치 및 방법

실험에 사용한 SPR 장치는 Bollhoff사의 RIVSET Automation H 장비를 사용하였으며, C-Frame 모듈, 리벳 Feeder, 구동 펌프, 컨트롤러로 구성되어 있다. C-Frame 모듈 내부에 엔코더가 내장되어 있어 SPR 접합 시의 가압력을 측정하고, 초기 Setting Force와 가압력의 일치 여부로 컨트롤러가 접합 여부를 판단한다. 이후 컨트롤러에서 소재의 두께를 측정하여 공차 범위내로 체결되면, 리벳 헤드부와 상판 소재 사이의 간격을 측정하여 초기 설정 범위내로 들어오면 접합이 완료된다.

CFRP와 이종 소재간의 SPR 접합을 분석하기 위한 실험에서 상판과 하판의 소재 고정 및 각 소재의 두께 공차를 보정하기 위한 Pre-Clamping은 4 kN, 보정 공차는 ± 1 mm로 설정하였다. CFRP와 이종 소재의 조합과 각 소재의 두께는 Table 1에 나타내었다.

SPR의 접합 품질을 평가하기 위해서 주요 치수의 측정이 필요하며, 접합 단면의 주요 치수 정보를 Fig. 3에 나타내었다. 리벳과 하판 소재가 소성 결합한 길이($a_{1,2}$)와 리벳 헤드부와 상판 소재 사이의 간격(K), SPR 접합 후 남아있는 하판의 잔여 두께($t_{1,2}$)를 측정하여 접합 품질을 평가하였다. 또한 접합 형상의 대칭성과 하판 돌출부의 결함 여부를 평가하였다.

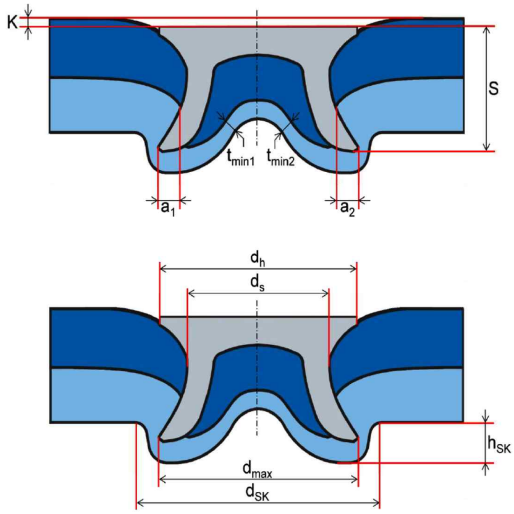

Fig. 3 Dimension of cross section of SPR

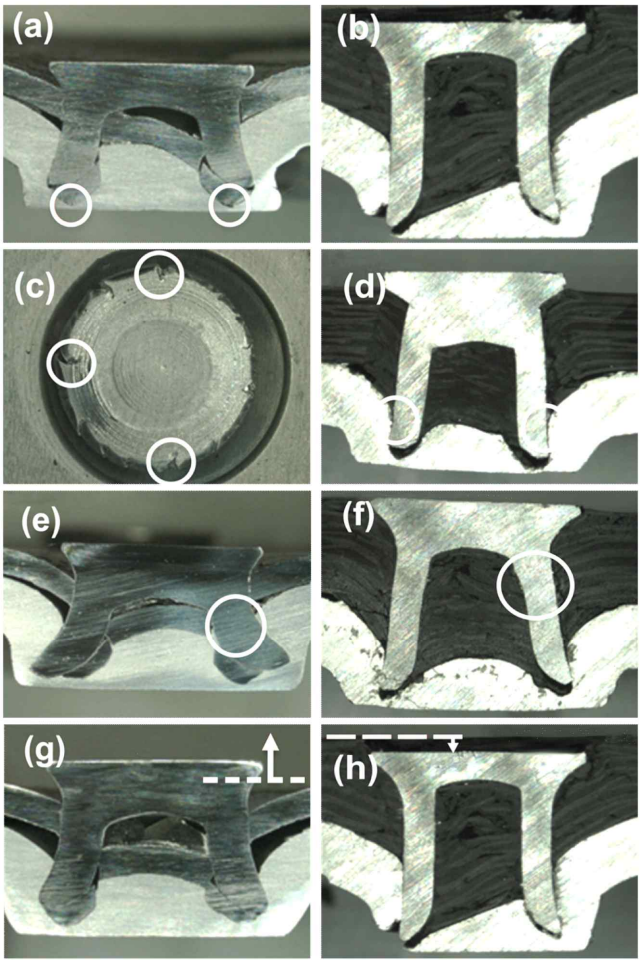

Fig. 4 Failure case of self-piercing riveting: (a) lack of remaining bottom, (b) fracture of the lower plate, (c) crack of the lower plate, (d) lack of interlock, (e) buckling of the rivet, (f) asymmetry of rivet foot, (g) protrusion of rivet head (h) excess of setting force

3.2 SPR 접합의 결함 유형

SPR 접합 실험을 진행하면서 접합 Failure 사례의 접합 단면을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 (a)는 하판의 잔여 두께가 너무 얇은 경우를 나타내며, (b)는 하판의 소재가 파단이 되는 경우를 나타낸다. 이처럼 하판의 잔여 두께가 얇으면 (c)와 같이 하판 소재에 크랙이 발생하는 결함의 원인이 될 수 있다. 또한 하판 소재에 소성결합이 불완전한 경우 (d)도 존재하며, 판재의 강도에 따른 리벳 좌굴이 발생 (e)하는 경우도 있다. 판재의 물성이 이방성일 경우, 리벳 풋이 비대칭적으로 형성 (f)되는 특징이 있다. SPR 접합의 가압력 조절이 적절하지 못 할 경우에는 리벳 헤드부와 상판 사이의 간격이 발생(g, h)하여 접합 품질이 떨어지게 된다.

따라서 SPR 접합의 품질을 향상시키기 위해서는 적절한 Setting force 설정이 필요하며, 리벳 및 다이의 형상, 상판과 하판 소재의 기계적 물성이 변수로 작용한다.

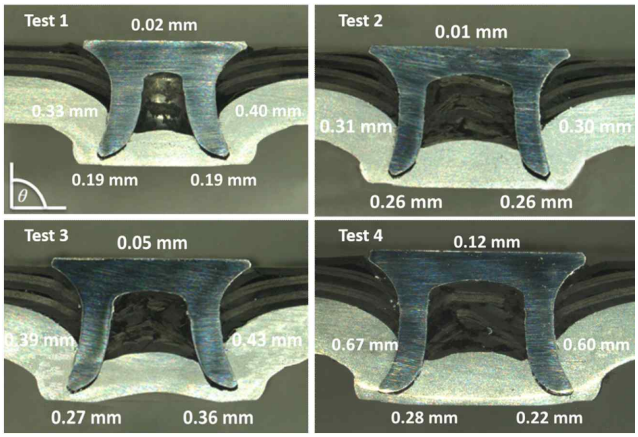

Fig. 5 Cross section of CFRP-Al5083

4. SPR 접합 실험 결과

4.1 CFRP-Al5083 SPR 접합 실험 결과

CFRP와 이종 소재간의 SPR 접합 시 접합 품질을 향상시키기 위한 리벳 및 다이의 형상을 선정하기 위해 실험을 진행하였다. Table 1의 CFRP와 Al5083 조합의 SPR 접합 실험을 진행하였다. 리벳의 종류, Setting force는 동일하게 설정하고 다이의 유형을 교체하면서 접합 품질을 확인하였다. 각각의 측정 결과는 Table 2와 같고, 접합 단면의 형상은 Fig. 5와 같다. 외경 10 mm, 깊이 1.7 mm의 FM 유형 다이에서 SPR 접합을 하였을 때, $a_{1,2}$와 $t_{1,2}$가 기준치를 만족하는 것을 확인하였다. $a_{1,2}$를 증가시키기 위해 KA 유형의 다이로 변경하여 실험을 진행한 결과, $a_{1,2}$와 $t_{1,2}$는 증가하였으나 K도 함께 증가하는 것을 확인하였다. K는 증가하지 않으면서 $a_{1,2}$를 증가시키기 위해 다이의 유형을 FM 유형으로 변경하고, 다이 내부의 각도가 10도 외측으로 구현된 다이를 적용하였다. 마지막으로 리벳의 길이를 증가시켜 실험을 진행하였으며, $a_{1,2}$와 $t_{1,2}$가 증가하는 것을 확인하였다.

Table 2 Results of SPR experiment for CFRP-Al5083

Parameter criteria	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
$-0.2 \leq K \leq 0.3$ (mm)	-0.02	+0.05	+0.01	+0.12
$t_{1,2} \geq 0.15$ (mm)	0.19/ 0.19	0.27/ 0.38	0.26/ 0.26	0.28/ 0.22
$a_{1,2} \geq 0.15$ (mm)	0.33/ 0.40	0.39/ 0.43	0.31/ 0.30	0.67/ 0.60
Setting Force (kN)	37			
Pre-Clamping (kN)	4			
Rivet	C5.3×5.5			C5.3×6.0
Die type	FM	KA	FM	

Table 3 Results of SPR experiment for CFRP-Steel590

Parameter criteria	Test 1	Test 2	Test 3
$-0.2 \leq K \leq 0.3$ (mm)	+0.2	+0.16	+0.26
$t_{1,2} \geq 0.15$ (mm)	0.74/0.74	0.41/Crack	0.58/0.53
$a_{1,2} \geq 0.15$ (mm)	0.12/0.10	0.30/0.40	0.22/0.27
Setting Force (kN)	49.8		
Pre-Clamping (kN)	4		
Rivet	C5.3×4.5	C5.3×5.0	
Die type	FM 0902016	FM 0902017	FM 0902016

Table 4 Results of SPR experiment for CFRP-SPHC

Parameter criteria	Test 1	Test 2	Test 3
$-0.2 \leq K \leq 0.3$ (mm)	+0.11	+0.16	+0.17
$t_{1,2} \geq 0.15$ (mm)	0.50/0.58	0.60/0.61	0.42/0.36
$a_{1,2} \geq 0.15$ (mm)	0.23/0.30	0.27/0.31	0.54/0.46
Setting Force (kN)	47		48.5
Pre-Clamping (kN)	4		
Rivet	C5.3×6.0		C5.3×6.5
Die type	FM 0902218	FM 0902019	

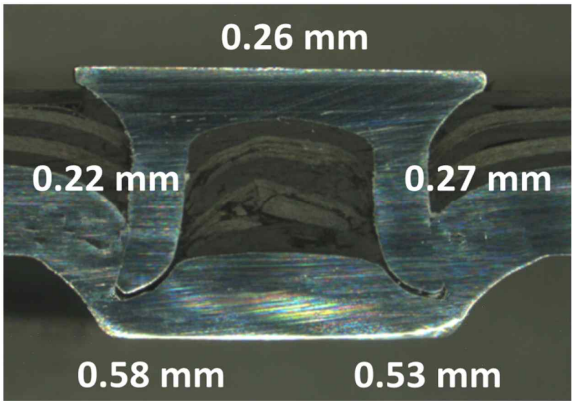

Fig. 6 Cross section of CFRP-Steel590

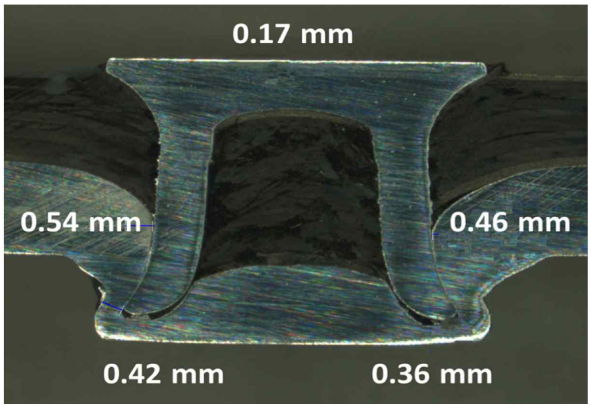

Fig. 7 Cross section of CFRP-SPHC

4.2 CFRP-Steel590 SPR 접합 실험 결과

CFRP와 Steel 이종 소재의 경우, Steel 소재의 연신율이 작기 때문에 길이 4.5 mm의 리벳을 적용하여 실험을 진행하였다. 실험의 결과는 Table 3에 나타내었다. 길이 4.5 mm 리벳을 적용한 실험에서 $t_{1,2}$는 기준치를 만족했지만, $a_{1,2}$는 기준치를 만족하지 못했다.

$a_{1,2}$를 증가시키기 위해 리벳의 길이를 0.5 mm 증가시켜 실험을 진행하였으나, 하판에 크랙이 발생하였다. 하판에 크랙이 발생하는 문제를 해결하기 위해 리벳의 길이가 5.0 mm인 동일 조건에서 다이의 깊이를 감소시켜 최종적으로 $a_{1,2}$를 증가시켰다. 하판 Steel 소재의 강성에 의한 스프링백 현상이 관찰 되었지만, K, $a_{1,2}$, $t_{1,2}$가 기준에 만족하는 것을 Fig. 6과 같이 확인하였다.

4.3 CFRP-SPHC SPR 접합 실험 결과

CFRP의 두께를 2 mm로 증가시키고, SPHC (Steel Plate Hot Com-mercial) 소재와 접합 실험을 진행하였다. 이전의 실험과 다른 조건이 동일할 때, 다이 내부의 각도가 미치는 영향을 분석하였다. 실험의 결과는 Table 4에 나타내었다. 다이 내부의 각도가 0도일 경우에 $a_{1,2}$가 +0.01 ~ +0.04 mm 더 높게 나오는 것을 확인하였다. 또한 Setting force 및 상판 소재 강도가 증가할수록 Stuck이 발생할 소지가 높은 것으로 분석된다. 최종적으로는 Setting force와 리벳 길이를 증가시켜 접합 시, 접합 품질이 향상되는 것을 Fig. 7과 같이 확인하였다.

4.4 CFRP-Steel340 접합 실험 결과

CFRP의 두께를 2.5 mm로 증가시키고, Steel340 소재와 접합 실험을 진행하였다. 리벳의 길이는 6.5 mm, 다이의 외경은 9 mm, 깊이 1.5 mm 조건에서 접합 실험을 진행했을 때, CFRP 상판을 관통하는 과정에서 리벳에 좌굴이 발생하였다. 좌굴로 인해 힘이 손실되면서 $a_{1,2}$가 접합 기준을 만족하지 못했다. 동일한 리벳을 사용하고, 다이의 깊이를 1.6 mm로 변경하였을 때, 좌굴이 미세하게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 최종적으로 다이의 깊이를 1.7 mm로 변경하여 접합 기준에 만족하는 결과를 확인하였다. 단면 치수 측정 결과와 단면 형상을 Table 5와 Fig. 8에 각각 나타내었다.

5. SPR 접합의 전단 강도 평가

CFRP와 이종 소재간의 SPR 접합의 품질을 향상시키기 위한 접합 조건을 실험을 통하여 분석하였다. 실험을 통해 도출된 접합 조건의 신뢰성을 검증하기 위해 전단 강도 평가 시험을 진행하였다.

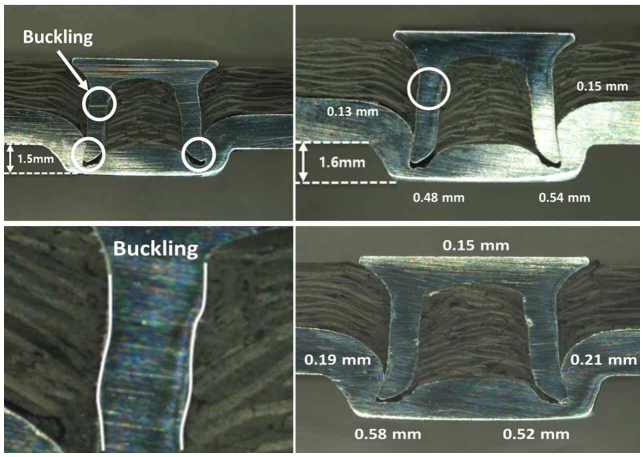

Fig. 8 Cross section of CFRP-Steel340

Table 5 Results of SPR experiment for CFRP-Steel340

Parameter criteria	Test 1	Test 2	Test 3
$-0.2 \leq K \leq 0.3$ (mm)	+0.07	+0.27	+0.15
$t_{1,2} \geq 0.15$ (mm)	0.40/0.53	0.48/0.54	0.58/0.52
$a_{1,2} \geq 0.15$ (mm)	0.11/0.13	0.13/0.15	0.19/0.24
Setting Force (kN)	54	52	
Pre-Clamping (kN)	4		
Rivet	C5.3×6.5		
Die type	FM 0902215	FM 0902016	FM 0902017

5.1 시험 장비 및 방법

SPR 접합의 전단 강도를 평가하기 위한 실험 장비는 최대 적용 가능 하중이 30 kN인 INSTRON 社의 INSTRON 3367 인장시험기를 사용하였으며, 시험 조건은 10 mm/min의 속도로 시험을 진행하였다. 시험 시편은 KS 시험 규격 기준으로 길이 방향으로 100 mm, 폭 방향으로 30 mm이며, 30 mm 겹치기 이음으로 제작하였다[9]. 전단 강도 실험은 CFRP와 이종소재 간의 조합별로 총 3회 수행하여 평균 인장 강도를 산출하였다. SPR 실험에 사용된 Bollhoff사의 리벳은 카본스틸 소재이며, 경도는 H4 기준 480 ±30이다.

5.2 SPR 접합 전단 강도 시험 결과

SPR 접합 실험을 통해 얻은 접합 조건을 검증하기 위해 시편의 전단 강도 평가 시험을 수행하였다. 각 소재 조합에 따른 전단 강도 시험 결과를 Fig. 9~12와 Table 6에 나타내었다. 동일 두께의 CFRP에 대해서 Al5083과 Steel590의 결과를 비교해보면, $a_{1,2}$에 상관없이 하판의 소재가 Steel인 경우가 전단 강도가 더 높게 측정된 것이 특징적이다.

SPR 접합의 전단 강도 시험의 결과를 바탕으로 파단 모드를 분석하였다. 일반적으로 SPR 접합의 파단 모드는 상판 또는 하판의 소재가 파단 되는 경우와 리벳이 파단 되는 경우로 구분된다. 상판 또는 하판이 파단 되는 경우는 인장 응력에 의해 파단 되는 경우와 단부가 파단 되는 형태로 구분할 수 있다. 리벳이 파단 되는 경우는

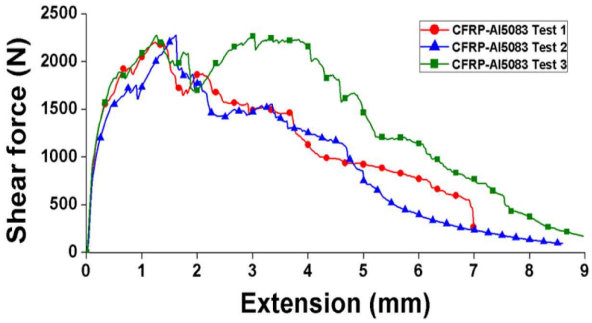

Fig. 9 Results of shear strength test at CFRP-Al5083

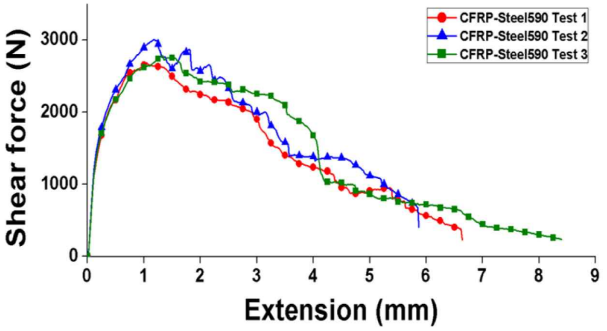

Fig. 10 Results of shear strength test at CFRP-Steel590

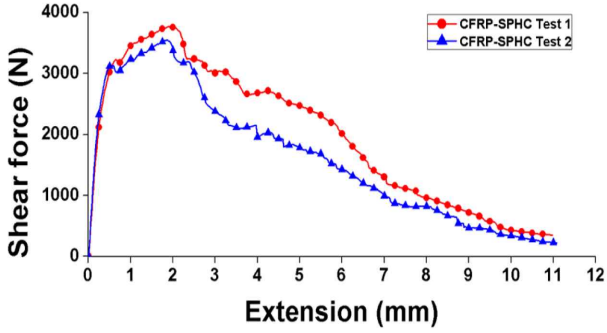

Fig. 11 Results of shear strength test at CFRP-SPHC

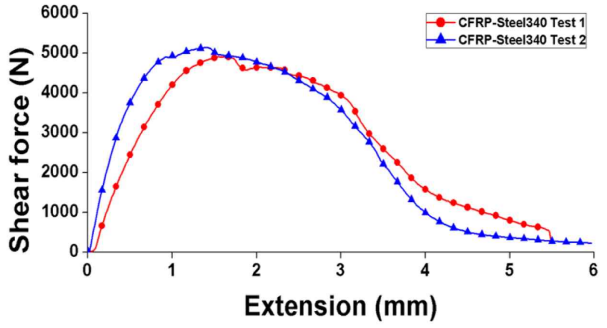

Fig. 12 Results of shear strength test at CFRP-Steel340

Table 6 Results of shear strength test

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Avg. Shear stregth (kN)	2.25	2.82	3.66	5.02
Min. Shear strength (kN)	2.20	2.68	3.54	4.91
$a_{1,2}$ (mm)	0.67	0.22	0.54	0.19
	0.60	0.27	0.46	0.24
$t_{1,2}$ (mm)	0.28	0.58	0.42	0.58
	0.22	0.53	0.36	0.52
Rivet length (mm)	6.0	5.0	6.5	6.5
Die depth (mm)	1.6	1.6	1.9	1.7
Total thickness (mm)	3.4	3.2	4	4.3

Case 1: CFRP-Al5083, Case 2: CFRP-Steel590, Case 3: CFRP-SPHC, Case 4: CFRP-Steel340.

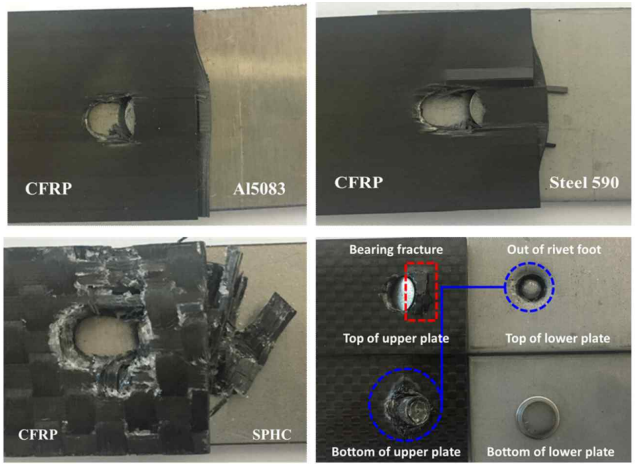

Fig. 13 Analysis of failure mode for each case

리벳 헤드의 이탈과 리벳 풋의 이탈로 구분된다.

CFRP와 Al5083, Steel590, SPHC 소재 조합의 파단은 지압 상태에서 CFRP 소재의 단부가 파단 되는 형태로 진행되었다[9,10]. CFRP와 Steel340 소재 조합 역시 지압 상태에서 파단이 발생하였고, 하판 소재에서 리벳 풋의 이탈이 발생하였다. 이는 상판 소재의 두께가 2 mm 이상이 되면 하판 소재의 강성과 무관하게 리벳 풋 이탈 현상이 발생하는 것으로 분석되며, CFRP의 적층 형태에 따라 파단 형상도 상이하게 나타난다. 파단 모드의 분석 결과는 Fig. 13에 나타내었다.

6. 결 론

본 연구에서는 자동차 차체 경량화 소재로 주목받고 있는 CFRP와 고강도 강판, 알루미늄 합금 조합에 따른 이종 소재 접합에 관한 연구를 수행하였다. 종래의 용접을 이용한 이종 소재 접합은 한계점이 존재하기 때문에, 기존의 리벳 접합보다 공정이 간단하고, 생산성이 높은 SPR 접합에 대해서 연구를 수행하였다.

실험은 CFRP를 상판으로 하고, Al5083, Steel590, SPHC, Steel340을 하판으로 하는 네 가지 경우에 대해서 진행하였다. 실험을 통해 접합 품질을 향상시키기 위한 접합 조건 및 접합 결함의 유형을 분석하였으며, 실험을 통해 도출한 접합 조건을 검증하기 위해 전단 강도 및 파단 모드를 분석하였다.

먼저 SPR 접합 시 리벳과 다이의 기하학적 형상이 접합 품질에 영향을 준다는 것을 실험을 통해 확인하였다. 적절한 리벳과 다이의 유형을 먼저 선정한 후, 리벳의 길이와 다이의 깊이를 변경하여 접합 품질을 향상시킬 수 있었다. 이 때 접합 품질은 리벳 헤드부와 상판 소재 사이의 간격(K), 리벳 풋이 하판에 소성 결합한 길이($a_{1,2}$), 접합이 완료된 이후의 하판의 잔여 두께($t_{1,2}$)를 이용하여 평가하였다.

CFRP와 이종소재 간의 접합 실험을 통해 알루미늄 합금 이외에도 Steel 계열의 초고장력 강판도 SPR 접합이 가능하다는 것을 확인하였다. 접합의 강도를 평가하기 위해 수행한 전단 강도 시험의 결과는 하판이 Al5083인 경우 2.25 kN, Steel590인 경우 2.82 kN, SPHC인 경우 3.66 kN, Steel340인 경우 5.02 kN에서 파단되는 것을 확인하였다. 동일 CFRP 두께에서 Al5083과 Steel590의 경우를 비교하면, $a_{1,2}$와는 상관없이 하판이 Steel 계열일 경우가 전단 강도가 더 크게 나타나는 특징이 있었다. 파단의 형태는 공통적으로 지압 파괴가 발생하였다. 상판 CFRP의 두께가 2 mm 이내인 Al5083, Steel590, SPHC 조합에서는 하판에서 리벳 이탈 현상이 발생하지 않았으며, CFRP의 단부가 파단 되는 형상을 나타냈다. 상판 CFRP의 두께가 2 mm 이상일 경우에는 하판 소재의 강성과 무관하게 하판에서 리벳 풋 이탈 현상이 발생하였다.

향후 연구로는 이종 소재의 조합을 3겹의 상판, 중판, 하판으로 구성하여 SPR 접합의 조건에 대해서 연구하고, 접합 품질을 평가할 계획이다.

후 기

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20165020301430).

References

[1] Qian, D., Bao, L., Takatera, M., Kemmochi, K., Yamanaka, A., 2010, Fiber-Reinforced Polymer Composite Materials with High Specific Strength and Excellent Solid Particle Erosion Resistance, Wear.

368:3-4 637-642.

[2] Han, L., Thomton, M., Shergold, M., 2010, A Comparison of the Mechanical Behaviour of Self-Piercing Riveted and Resistance Spot Welded Aluminum Sheets for the Automotive Industry, Materials & Design. 31:3 1457-1467.

[3] Juvinall, R., Marshek, K., 2012, Machine Component Design, John Wiley & Sons, United States.

[4] Kim, T. H., Suh, J., Kang, H. S., Lee, Y. S., Park, C. D., 2011, Fatigue Assessment Using SPR and Adhesive on Dissimilar Materials, Journal of the Korean Society for Precision Engineering. 28:10 1204-1209.

[5] Franco, G., Fratini, L., Pasta, A., 2012, Influence of the Distance Between Rivets in Self-Piercing Riveting Bonded Joints Made of Carbon Fiber Panels and AA2024 Blanks, Materials & Design. 35 342-349.

[6] Franco, G., Fratini, L., Pasta, A., 2013, Analysis of the Mechanical Performance of Hybrid (SPR/Bonded) Single-Lap Joints Between CFRP Panels and Aluminum Blanks, International Journal of Adhesion and Adhesives 41 24-32.

[7] Bollhoff Group, 2016, Automation RIVSET Product Introduce Presentation, <https://www.boellhoff.com/de-en/index.php>.

[8] Porcaro, R., Hanssen, A. G., Langseth, M., Aalberg, A., 2006, Self-Piercing Riveting Process: An Experimental and Numerical Investigation, Journal of Materials Processing Technology. 171:1 10-20.

[9] Fu, M., Mallick P., 2003, Fatigue of Self-Piercing Riveted Joints in Aluminum Alloy 6111, Int. J. Fatigue. 25:3 183-189.

[10] Park, J. H., 2017, Self-Piercing Riveting of Dissimilar Metal Sheets, Master Thesis, Ajou University, Republic of Korea.