Self-Piercing Rivet을 이용한 CFRP/Steel/Aluminum 3매 겹침 접합평가

전남기^{*,**} · 정택언^{*,**} · 이세현^{**} · 감동혁^{*,†}

^{*}한국생산기술연구원 용접접합그룹

^{**}한양대학교 대학원 기계공학과

Evaluation of CFRP/Steel/Aluminum Three Layer Joining with Self-Piercing Rivet

Nam-Ki Jeon^{*,**}, Taek-Eon Jeong^{*,**}, Sehun Rhee^{**}, and Dong-Hyuck Kam^{*,†}

^{*}Joining R&D group, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon, 21999, Korea

^{**}School of Mechanical Engineering, Hanyang Univ., Seoul, 04763, Korea

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

(Received October 26, 2018 ; Revised November 13, 2018 ; Accepted January 3, 2019)

Abstract

Multi-material integration between lightweight materials such as aluminum alloy, carbon fiber reinforced plastic (CFRP), ultra-high-strength steel (UHSS), etc. is one of the key techniques for achieving weight reduction. For its wide use, productive and reliable technologies for the dissimilar joining of the lightweight materials is required. In this study, three-layer dissimilar joining of CFRP, GA-590DP, and Al5052-H32 was investigated using self-piercing rivet (SPR). The tensile shear load and the failure modes were evaluated for four different layering sequences. It was identified that the failure originates from the CFRP which rips out the rivet as it tears off from the joint. Therefore, the joining strength was stronger when the CFRP was sandwiched between the metals preventing the fractured CFRP from prematurely ripping out the rivets. Also, it was found that using Al5052-H32 as the lower sheet exhibited similar joining strength compared to that of using GA-590DP as the lower sheet. Finally, the tensile shear load increased as the CFRP thickness is increased in all the layering sequences.

Key Words : Dissimilar joint, CFRP, Metal, Self-piercing riveting, Multi-layer

1. 서 론

차량 경량화는 연비 개선과 배기가스 감소를 위한 가장 효율적인 방법중 하나이다^{1,2)}. 이를 위해 초고강도강, 알루미늄, CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) 등 다종소재의 적용이 확대되고 있다. 그 중 CFRP는 기존 철강소재 대비 70% 이상 경량화가 가능하여 많은 각광을 받고 있다³⁾. 그러나 CFRP와 금속간의 접합은 각 소재의 상이한 물성으로 인해 기존 용융용접의 적용이 불가하여 기계적 체결, 접착제 접합과 같은 비용접법이 적용되고 있다⁴⁾. 성형기반의 기계적 체결방법

인 SPR(Self-Piercing Rivet)은 punch를 사용하여 강한 압력으로 rivet을 눌러 별도의 홀 가공이 없이 접합 가능한 접합법이다. 따라서 SPR 접합은 소재간 홀 정렬이 필요 없으며 기존 점용접 생산시설에 호환이 가능하다. 또한 점용접에 준하는 강도와 높은 피로 특성을 가지므로 복합재와 금속의 접합에서 많은 주목을 받고있다^{4,5)}.

기존의 SPR 접합은 이종소재의 2겹 접합 중심으로 연구가 진행되었다. 동종의 금속 소재^{6,7)}간의 SPR 접합뿐만 아니라 고강도강과 알루미늄 합금⁸⁾, 알루미늄 합금과 구리 합금⁹⁾, 알루미늄 합금과 마그네슘 합금¹⁰⁾ 등과 같은 이종금속간의 SPR 이중접합에 관한 논문들

이 다수 발표되었다. 또한 SPR 접합의 공정변수 최적화를 통한 접합품질 향상을 위한 연구가 진행되었다. SPR의 공정변수인 rivet, die, setting force를 변화하며 접합가능여부와 강도를 평가¹¹⁾하였으며, SPR 접합 품질판단을 위한 인자와 인장하중간의 상관관계를 분석¹²⁾하는 논문들이 발표되었다. 나아가 CFRP와 금속간의 SPR 이중접합 연구^{13,14)}들이 진행되어 접합 가능한 소재 범위가 한층 넓어지게 되었다. 이중금속의 3매 겹침 접합에서는 금속과 알루미늄에 대하여 소재와 공정변수에 따른 접합성을 평가하는 연구^{15,16)}가 몇몇 진행되었으나, CFRP를 포함한 이중소재의 3매 겹침 SPR의 접합에 대한 연구는 진행된 바 없었다. 따라서 본 연구에서는 차량에 주로 사용되는 CFRP, GA-590 DP, Al5052-H32의 3가지 소재에 대하여 3매 겹침 SPR 접합을 진행하였다. 3가지 소재조합, CFRP, GA-590 DP의 두께에 따른 인장하중과 파단모드를 평가하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

실험에 사용한 CFRP((주) 한국카본 제작)는 Unidirectional form 형태의 프리프레그를 0와 90°(Fig. 1)로 교차 적층한 뒤 오토클레이브에서 3.02 kgf/cm²의 일정한 압력으로 60~90분 동안 경화시킨 것으로, CFRP의 두께에 따라 0.9 mm는 3층, 1.3 mm는 5층, 1.8 mm는 7층으로 적층 제작되었다. Steel은 아연도금 된 인장강도 590 MPa급의 DP강으로 0.8 mm와 1.4 mm를 사용하였으며 Aluminum은 두께 1.2 mm의 Al5052-H32를 사용하였다. 실험에 사용된 소재는 Fig. 2의 ASTM E8M의 규격에 따라 모재인장평가를 실시 하였고 이를

Fig. 1 Schematic view of CFRP laminates

Fig. 2 Geometry of ASTM E8M standard

Table 1 Tensile strength of base materials

Sheets	Thickness [mm]	Tensile strength [MPa]
CFRP[0°]	0.9	1131
	1.3	995
	1.8	1032
GA-590 DP	0.8	635
	1.4	607
Al5052-H32	1.2	231

Fig. 3 Configuration of SPR equipment

Table 1에 나타내었다. SPR 시험편 제작에 사용된 CFRP는 Fig. 1과 같이 적층되었으며, Y방향으로 인장평가를 진행하였다.

SPR 실험에 사용된 장비는 Fig. 3에 사진처럼 Bollhoff사의 Rivset GEN 2로 유압을 통해 최대 78 kN까지 setting force를 조절이 가능하다.

SPR rivet의 재질은 경도값 480 ± 30 HV의 Almac 코팅처리 된 보론강(Boron steel)이다. 실험에 사용된 C-type과 HD2-type 두종류의 rivet 단면을 Fig. 4에 나타내었다. Die의 형상은 Fig. 5에서 보인 모식도와 같이 바닥면이 각각 flat 형태와 cone 형태인 FM-type, KA-type 두 종류를 사용하였다.

SPR 인장 시험편은 KS B ISO 14273의 3매 이상 겹침 시험편 규격으로 제작하였으며 이를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 4 Cross-section for type of rivet

Fig. 5 geometry for type of die

Fig. 6 Specimen geometry of SPR joint

실험은 CFRP와 GA-590 DP, Al5052-H32 세 소재의 순서 조합과 CFRP, GA-590 DP의 두께를 변화시키며 실시하였다. 이후 SPR 접합의 단면사진을 광학현미경으로 촬영하였다. 또한 인장전단시험을 위해 각 조건당 3개의 시편을 제작하여 만능재료시험기에서 3 mm/min으로 반복 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 소재순서 조합에 따른 인장하중

CFRP, GA-590 DP, Al5052-H32 세 소재의 겹침 순서를 다르게 하며 실험을 진행하고 인장하중을 확인하

였다. 소재의 겹침순서에 따라 상판 CFRP, 중판 steel, 하판 aluminum을 case 1 (CSA), 상판 CFRP, 중판 aluminum, 하판 steel을 case 2 (CAS), 상판 steel, 중판 CFRP, 하판 aluminum을 case 3 (SCA), 상판 aluminum, 중판 CFRP, 하판 steel을 case 4 (ACS)로 지칭하였다. 위의 조합 이외의 CFRP가 최하판에 위치하는 경우 소재의 성형성이 부족하여 접합이 불가능하였다. 또한 case 2 (CAS)와 case 4 (ACS)에서 하판의 두께가 0.8 mm 이하일 경우 rivet이 성형될 수 있는 두께가 부족하여 접합 시 하판이 파손되었다. 이를 통하여 본 저자는 SPR 3점 접합 시 최하판의 두께와 소재 순서가 접합가능성 여부에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 이 두 경우 이외의 모든 실험에서 공정변수인 rivet과 die의 종류, SPR 장비의 setting force를 변화하며 SPR 접합 실험을 진행하였고 이를 Table 2에 정리하였다. 두께 0.9 mm CFRP, 두께 1.4 mm GA-590 DP, 두께 1.2 mm Al5052-H32의 소재순서에 따른 SPR 접합 시편의 단면사진을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7 (c)에 보이는 Case 3 (SCA)에서는 rivet의 좌굴과 비대칭이 발생하였다. 두께가 동일한 소재를 사용하였음에도 상판에 위치한 소재에 따라 접합 품질에 차이가 발생하였다. 이는 상판이 CFRP와 aluminum인 Fig. 7 (a), (b), (d) 조합과 달리 굽힘 강도가 높은 상판의 GA-590 DP는 rivet이 삽입될 때 상판이 덜 구부러지며 공동을 형성하였다. 이로 인해 rivet의 삽입과정에 저항력이 커져 중판을 관통하는 것을 방해하며 좌굴이 발생하였다. 그러나 case 3 (SCA)이외의 조합에서는 rivet이 CFRP와 aluminum을 먼저 관통하며, 상판 소재가 내부에 충전되어 공동이 발생하지 않았다. 따라서 좌굴과 같은 접합불량은 발생하지 않았다. Fig. 8의 인장하중 그래프에서 case 1 (CSA)과 2인 경우는 GA-590 DP와 Al5052-H32의 중판과 하

Table 2 Setting parameters for all condition

Sheet combination	Thickness [mm]			Pre-clamping force [kN]	Rivet [mm]	Die	Setting force [kN]
	Upper sheet	Middle sheet	Lower sheet				
CFRP-GA590-Al5052	0.9	0.8	1.2	4	5.3*5.5 (C)	FM 100 0 2016	70
	-	1.4	-	-	5.3*6.0 (C)	FM 100 0 2017	40
	1.3	0.8	-	-	5.3*6.5 (C)	FM 100 0 2016	49
	1.8	0.8	-	-	5.3*6.5 (C)	FM 100 0 2016	49
CFRP-Al5052-GA590	0.9	1.2	1.4	-	5.3*6.0 (C)	FM 100 0 2220	40
GA590-CFRP-Al5052	0.8	0.9	1.2	-	5.3*5.5 (C)	KA 095 2 116	35
	1.4	-	-	-	5.3*5.5 (HD2)	FM 090 2 118	36
Al5052-CFRP-GA590	1.2	0.9	1.4	-	5.3*6.0 (C)	KA 095 2 116	60

Fig. 7 Cross-sections of the SPR joints (0.9 mm CFRP, 1.4 mm GA-590 DP, 1.2 mm Al5052-H32) with different stacks: (a) upper sheet: CFRP, middle sheet: steel, Lower sheet: aluminum, (b) upper sheet: CFRP, middle sheet: aluminum, lower sheet: steel, (c) upper sheet: Steel, middle sheet: CFRP, lower sheet: aluminum and (d) upper sheet: Aluminum, middle sheet: CFRP, lower sheet: steel

Fig. 8 Tensile shear test of SPR joints (0.9 mm CFRP, 1.4 mm GA-590 DP, 1.2 mm Al5052-H32) with different stacks: (a) CFRP-steel-aluminum, (b) CFRP-aluminum-steel, (c) Steel-CFRP-aluminum and (d) Aluminum-CFRP-steel

판순서에 상관없이 1.9 kN의 유사한 인장하중값이 도출되었다. 이는 Fig. 9 (a)의 파단사진에서 볼 수 있듯 상판인 CFRP의 파단이 발생하였기 때문이다. Case 3 (SCA)과 case 4 (ACS)에서는 Fig. 9 (b)와 같은 중판 CFRP가 파손되었으며 평균 약 3.3 kN, 3.0 kN의 유사한 인장하중 값이 도출되었다. 동일한 CFRP를 사용하였음에도 불구하고 CFRP가 상판이 아닌 중판에 위치 할 때 인장하중이 증가하였다. 이는 취약부인 CFRP가 상판과 하판사이에 위치함으로써 rivet에 의해 압착되어 소재에 전달되는 힘을 분산시켰기 때문으로 보여진다.

Fig. 9 Fracture modes for SPR joints (0.9 mm CFRP, 1.4 mm GA-590 DP, 1.2 mm Al5052-H32) samples: (a) CFRP-steel-aluminum and (b) Aluminum-CFRP-steel

3.2 상판 CFRP의 두께에 따른 인장하중

앞선 소재순서 조합에 따른 실험에서 CFRP가 상판에 위치하는 경우 CFRP의 베어링 파단이 발생하였으므로 강도향상을 위해 CFRP의 두께를 증가시키며 인장하중을 확인하였다.

Case 1 (CSA)의 중판 0.8 mm GA-590 DP, 하판 1.2 mm Al5052-H32에서 상판의 CFRP 두께를 0.9, 1.3, 1.8 mm로 증가하며 SPR 접합을 실시하였다. Fig. 10에서 보이는 것처럼 CFRP 두께를 증가시켰음에도 불구하고 단면사진상에서 rivet의 좌굴이나 비대칭의 문제는 발생하지 않았다. 상판 CFRP의 두께가 증가함에 따라 인장하중은 Fig. 11의 그래프처럼 4.3 kN까지 선형적으로 증가하였다. 파단모드는 Fig. 12처럼 모든 조합에서 상판인 CFRP의 베어링 파단이 발생하였으므로 SPR의 접합 품질에는 문제가 없는 것으로 판단되었다.

3.3 상판 GA-590 DP 두께에 따른 인장하중

다음으로 소재순서 조합에 따른 실험의 GA-590 DP

Fig. 10 Cross-sections of the SPR joints (CFRP-steel-aluminum) with different thickness of CFRP: (a) 0.9 mm CFRP, (b) 1.3 mm CFRP and (c) 1.8 mm CFRP

Fig. 11 Tensile shear test of SPR joints (CFRP-steel-aluminum) with different thickness of CFRP: (a) 0.9 mm CFRP, (b) 1.3 mm CFRP and (c) 1.8 mm CFRP

Fig. 14 Tensile shear test of SPR joints (steel-CFRP-aluminum) with different thickness of GA-590 DP: (a) 0.8 mm GA-590 DP and (b) 1.4 mm GA-590 DP

Upper sheet fracture

Fig. 12 Fracture modes for SPR joints (CFRP-steel-aluminum) samples

Middle sheet fracture

Fig. 15 Fracture modes for SPR joints (Steel-CFRP-aluminum) samples

Fig. 13 Cross-sections of the SPR joints (steel-CFRP-aluminum) with different thickness of GA-590 DP: (a) 0.8 mm GA-590 DP and (b) 1.4 mm GA-590 DP

가 상판에 위치했을 때 rivet의 좌굴발생 문제를 해결하기 위하여 GA-590 DP의 두께를 감소하여 실험을 진행하고 인장하중을 확인하였다. 중판 0.9 mm CFRP, 하판 1.2 mm Al5052-H32 에 상판 GA-590 DP의 두께를 1.4 mm에서 0.8 mm로 감소시키며 접합을 실시하였다. 상판의 두께를 감소시켰음에도 불구하고 Fig. 13의 단면사진처럼 여전히 rivet 내부의 공동이 발생하였으며 중판을 관통하지 못하고 좌굴과 비대칭 형상이 발생하였다. 이는 Fig. 14의 인장하중 그래프처럼 불규칙하고 편차가 큰 인장하중 값의 원인으로 판단되었다. 파단모드는 Fig. 15의 사진과 같이 중판 CFRP의

파손이 발생하였으며 이로 인해 상판의 GA-590 DP의 두께가 변화하여도 인장하중은 크게 증가하지 않는 것으로 판단된다.

4. 결 론

CFRP와 Metal의 다층 SPR의 접합 가능성을 평가하기 위하여 각 소재의 두께와 소재 조합 순서에 따라 인장하중을 확인하고 각 조합별 파단 모드를 확인하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) CFRP를 하판에 위치할 경우 rivet 체결을 위한 성형성이 부족하여 접합이 불가능하였다.
- 2) 하판이 steel일 때 두께가 0.8 mm 이하이면 하판에서 rivet이 성형 가능한 두께가 부족하여 접합이 불가능하였다.
- 3) GA-590 DP가 상판인 조합에서 rivet의 좌굴과 비대칭이 일어났으며 이에 따라 인장하중값은 큰 산란도를 보이므로 부적합한 조건으로 판정하였으며, 중판의 CFRP를 rivet이 관통하지 못하였다.
- 4) CFRP는 Steel과 Aluminum에 비해 높은 인장강도를 나타내었다. 그러나 본 실험의 SPR 접합 조건에서는 주로 CFRP의 파단이 발생하였으며 이를 통해

CFRP가 취약부인 것을 확인하였다. 따라서 CFRP의 두께를 증가시키거나 CFRP의 배치를 중판에 위치시킴으로써 최대인장하중을 증가시킬 수 있었으며, 취약부인 CFRP에 가해지는 하중을 분산시켜 파단을 지연시키는 것이 중요하다고 판단하였다.

본 연구에서는 CFRP와 metal에 대한 SPR을 이용한 다중소재 다층접합에서 소재 두께와 소재 조합이 접합성에 중요한 영향을 미친다는 것을 확인하였다.

ORCID: Nam-Ki Jeon: <http://orcid.org/0000-0001-5605-3142>
 ORCID: Taek-Eon Jeong: <http://orcid.org/0000-0002-0829-2170>
 ORCID: Sehun Rhee: <http://orcid.org/0000-0002-0039-5650>
 ORCID: Dong-Hyuck Kam: <http://orcid.org/0000-0002-4027-3973>

References

1. A. Isenstadt, J. German, P. Bubna, M. Wiseman, U. Venkatakrishnan, L. Abbasov, P. Guillen, N. Moroz, D. Richman and G. Kolwich, Lightweighting technology development and trends in US passenger vehicles, *International Council on Clean Transportation working paper*, 25 (2016)
2. A. Mascarin, T. Hannibal, A. Raghunathan, Z. Ivanic and J. Francfort, Vehicle Lightweighting: 40% and 45% Weight Savings Analysis: Technical Cost Modeling for Vehicle Lightweighting, *Idaho National Lab. (INL)*, (2015)
3. T. Suzuki and J. Takahashi, LCA of Lightweight Vehicles by Using CFRP for mass-produced vehicles, in Fifteenth International Conference on Composite Materials, (2005)
4. A. Pramanik, A. K. Basak, Y. Dong, P. K. Sarker, M. S. Uddin, G. Littlefair, A. R. Dixit and S. Chattopadhyaya, Joining of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites and aluminium alloys - A review, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 101 (2017), 1-29
[https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(99\)00003-5](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(99)00003-5)
5. D. Carle and G. Blount, The suitability of aluminium as an alternative material for car bodies, *Materials & Design*, 20(5) (1999), 267-272
6. D. Z. Li, L. Han, Z. J. Lu, M. Thornton and M. Shergold, Influence of Die Profiles and Cracks on Joint Buttons on the Joint Quality and Mechanical Strengths of High Strength Aluminium Alloy Joint, *Advanced Materials Research*, 548 (2012), 398-405
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.548.398>
7. B. Xing, X. He, Y. Wang, H. Yang and C. Deng, Study of mechanical properties for copper alloy H62 sheets joined by self-piercing riveting and clinching, *Journal of Materials Processing Technology*, 216 (2015), 28-36
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.08.030>
8. K. Mori, T. Kato, Y. Abe and Y. Ravshanbek, Plastic Joining of Ultra High Strength Steel and Aluminium Alloy Sheets by Self Piercing Rivet, *CIRP Annals*, 55(1) (2006), 283-286
[https://doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)60417-x](https://doi.org/10.1016/s0007-8506(07)60417-x)
9. X. He, L. Zhao, C. Deng, B. Xing, F. Gu and A. Ball, Self-piercing riveting of similar and dissimilar metal sheets of aluminum alloy and copper alloy, *Materials & Design (1980-2015)*, 65 (2015), 923-933
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.002>
10. A. Luo, T. Lee and J. Carter, Self-Pierce Riveting of Magnesium to Aluminum Alloys, *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 4(1) (2011), 158-165
<https://doi.org/10.4271/2011-01-0074>
11. Y. Abe, T. Kato and K. Mori, Self-piercing riveting of high tensile strength steel and aluminium alloy sheets using conventional rivet and die, *Journal of Materials Processing Technology*, 209(8) (2009), 3914-3922
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.09.007>
12. N.-K. Jeon, S. Rhee and D.-H. Kam, Parametric Study of Self-Piercing Riveting for CFRP-Aluminum Dissimilar Joint, *Journal of Welding and Joining*, 36(3) (2018), 8-17
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2018.36.3.2>
13. J. Kang, H. Rao, R. Zhang, K. Avery and X. Su, Tensile and fatigue behaviour of self-piercing rivets of CFRP to aluminium for automotive application, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 137 (2016), 012025
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/137/1/012025>
14. J. Zhang and S. Yang, Self-piercing riveting of aluminium alloy and thermoplastic composites, *Journal of Composite Materials*, 49(12) (2014), 1493-1502
<https://doi.org/10.1177/0021998314535456>
15. K. Mori, Y. Abe and T. Kato, Self-pierce riveting of multiple steel and aluminium alloy sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, 214(10) (2014), 2002-2008
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.09.007>
16. L. Han, A. Chrysanthou and K. W. Young, Mechanical behaviour of self-piercing riveted multi-layer joints under different specimen configurations, *Materials & Design*, 28(7) (2007), 2024-2033
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.06.015>