CFRP-Aluminum 이종소재의 Self-Piercing Rivet 접합

전 남 기^{*,**} · 이 세 헌^{**} · 감 동 혁^{*,†}

^{*}한국생산기술연구원 용접접합그룹

^{**}한양대학교 대학원 기계공학과

Parametric Study of Self-Piercing Riveting for CFRP-Aluminum Dissimilar Joint

Nam-Ki Jeon^{*,**}, 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 May 4, 2018 ; Accepted May 23, 2018)

Abstract

In response to the environmental regulations and market forces for fuel economy, automotive industry has continued trying to apply lightweight multi-materials for weight reduction. Carbon fiber reinforced plastics (CFRP) is one of the most attractive structural materials because of its high strength to weight ratio. CFRP-metal dissimilar joints are inevitable to realize a variety of CFRP-metal hybrid designs. However, conventional fusion joining methods for metals are not applicable to CFRP-metal dissimilar joints. In this study, considering the process productivity and the joint reliability, self-piercing rivet (SPR) is investigated to join CFRP and aluminum panels. The SPR joint quality such as head height, interlock, bottom thickness is considered to find an optimal combination of the processing parameters, which include rivet, die, and punch force. In the tensile lap shear test of CFRP-aluminum SPR joints, the first fracture load is found to be a better parameter for representing the joint quality over the max fracture load because of the discontinuous property of CFRP panel. The first fracture load achieved in this study is up to 4.4 kN for SPR lap joint with 1.8 mm thickness CFRP upper and 2.0 mm Al5083-O lower.

Key Words : CFRP, Aluminum, Dissimilar joint, Self-Piercing rivet, Tensile shear strength, Rivet, Die

1. 서 론

유럽 의회와 EU 이사회는 유럽 연합에서의 새롭게 개발되는 차량에 대해 CO₂ 배출규제를 실시하고, 2020년까지 승용차의 CO₂가스 배출량을 95 g/km로 감소시키기로 하였다¹⁾. 엔진효율의 향상 또는 공기저항의 감소를 통한 연료효율 향상에는 한계가 존재하기 때문에, 차량의 무게를 감소시켜 효율을 증대하고자 하는 시도가 계속되고 있다²⁾. 실제로 차량 무게가 100 kg 감소하면 CO₂ 배출량은 6 g/km 가량 감소하며 연비는 약 0.5 L/100 km 절약된다고 보고된 바 있다^{3,4)}. 경량화를 위하여 초고강도강, 알루미늄, CFRP(Carbon Fiber

Reinforced Plastics) 등의 다중소재의 적용비율은 점차 확대되고 있으며, 그 중 비강도가 높은 CFRP^{5,6)}와 연성이 우수한 알루미늄은 기존 철강소재의 대체재로써 제안되고 있다⁷⁾. 다중소재의 적용비율이 증가함에 따라, 각기 다른 특성을 가지는 CFRP와 알루미늄 접합은 차량의 제작에 있어서 필수적인 부분이 되었다. 하지만 CFRP는 아크용접 혹은 점용접과 같은 기존 용융용접의 적용이 불가능하기 때문에⁸⁾, 접착제나 블라인드 리벳, 볼팅과 같은 기계적 체결 중심의 비용접법이 제안되고 있다. 접착제는 CFRP와 알루미늄간의 접합 연구에서 적용되고 있는 보편적인 방법 중 하나이지만, 접착제를 도포하고 경화시키기 위한 공정이 추가되어야 하는 단점이 있다^{9,10)}. 볼트/너트 결합은 가장 일반적인

기계적 접합 방법 중 하나이지만, 홀 가공을 선행되어야 할 뿐만 아니라 홀과 홀, 홀과 볼트의 정렬이 어려워 자동화하기가 어렵다. 특히 CFRP는 난삭재로 홀 가공이 여타의 소재보다 어렵기 때문에 볼팅의 적용이 난해하다¹¹⁻¹³⁾.

SPR(Self-Piercing Rivet)은 상/하부의 홀더로 pre-clamping 하여 대상소재를 고정시킨 후, 상부 홀더 안의 punch를 사용하여 rivet을 눌러 별도의 홀 가공이 없어도 접합이 가능한 기계적 체결방법이다. Punch에 의해 눌러진 rivet은 상판을 관통한 뒤 하판 아래쪽의 die의 형상에 맞게 rivet 다리가 변형되며 상판과 하판을 체결하기 때문에 성형기반의 접합 기술로 볼 수 있다. 접착제와 볼트/너트 결합에 비해서 SPR 접합방법은 접합과정에서 열과 변형이 없으며 상이한 강도의 소재를 접합이 가능하다. 홀 가공이 필요 없고, 공정시간이 짧으며 불필요한 부산물이 생기지 않는다. 또한 기존 점용접 장비와 C 모양의 프레임이 같아 기존 설비를 대체하여 호환이 가능하며, 점용접과 비슷한 강도와 높은 피로 특성을 갖는다¹⁴⁻¹⁶⁾. 때문에 SPR은 CFRP와 같은 복합재료를 포함한 이종소재의 접합에 매우 유리하다.

기존의 SPR 연구에서 C.G. Pickin^{17,18)} 등은 SPR 접합시 rivet 및 die 형상이 접합강도에 미치는 영향에 대하여 고찰하였으며, J.H. Bae¹⁹⁾는 공정변수인 펀치 압력을 변화하여 정적강도에 미치는 영향을 확인하였다. M. Lou등²⁰⁻²²⁾은 금속과 알루미늄의 강도, 두께 및 상/하부 판재의 배치가 접합특성에 미치는 영향을 확인하였다. 해당 연구에서는 하판의 두께가 너무 얇거나, 연성이 낮고 강도가 높은 경우 rivet이 적절히 체결되지 못하고 기계적 특성이 저하된다고 보고하였다. J. Kang²³⁾ 등은 적절한 공정변수의 조합을 통하여 CFRP와 Al6111-T82의 소재를 SPR 접합을 사용하여 최대 인장 하중 3.9 kN을 도출하였다. 그러나 CFRP와 알루미늄의 SPR 접합에서 가장 적합한 rivet과 die의 조합과 주요 공정변수인 punch force의 변화에 따른 접합하중의 관계를 보인 연구는 부족하였다.

따라서 본 연구에서는 SPR의 접합 품질 판단을 위해 이전의 연구^{24,25)}에서 설정한 세 가지 측정인자인 상판 위로 rivet이 돌출 된 길이인 head height, 하판에서 rivet 다리가 벌어진 길이인 interlock, 하판의 잔여 두께인 bottom thickness를 측정하였다. 세 가지 측정인자를 통해 CFRP-알루미늄 SPR 접합시 가장 적합한 rivet-type, die-type과 punch가 rivet을 누르는 힘인 punch force를 확인하였다. 또한 인장하중시험을 실시하고 측정인자와 인장하중과의 상관관계를 확인하였다.

2. 실험방법

시험편은 KS C ISO 14273 규격을 따라 제작되었다. (Fig. 1) 1.8 mm 두께의 열 경화성 CFRP를 상판에 배치하였으며, 두께가 2.0 mm인 Al5083-O 소재를 하판에 배치하여 이종소재 접합을 실시하였다. 열 경화성 CFRP의 단면과 모식도를 Fig. 2에 나타내었다. CFRP는 (주) 한국카본사에서 제작한 제품으로써, Uni-directional form 형태의 pre-preg를 0°와 90°로 교차하여 7층 적층한 뒤 오토클레이브로 3.02 kgf/cm²의 압력에서 60~90분 동안 경화시킨 것을 사용하였다.

실험에 사용된 CFRP와 Al5083-O의 모재인장평가를 실시하였다. 시험편은 Fig. 3에 나타낸 ASTM E8M 규격으로 제작하였다.

Al5083-O의 모재인장강도 값은 280 MPa이며, CFRP는 0° 방향에서 1032 MPa, 45°방향에서 234 MPa로 확인되었다. 본 연구에서는 0°방향의 CFRP만을 사용하였다. (Table 1)

Fig. 4에 보인 Bollhoff사의 Rivset GEN 2를 사용하여 시험편을 제작하였으며, 유압장치를 이용하여 punch force를 최대 78 kN 까지 변화가 가능하였다. 실험에서 사용된 C-type, HD2-type, HD3-type, P-type 4 종

Fig. 1 Geometry of SPR joint specimen

Fig. 2 Cross-section of CFRP and schematic view of CFRP laminate

Fig. 3 Geometry of ASTM E8M standard

Table 1 Properties of base material

Sheets		CFRP	Al5083-O
Thickness (mm)		1.8	2.0
Tensile shear strength (MPa)	0°	1032	280
	45°	234	
	90°	1014

Fig. 4 Configuration of SPR system **A: Head, B: Leg, C: Tip****Fig. 5** Measurement factor of SPR joint and definition of rivet part

류의 rivet 단면을 Fig. 6에 나타내었다. 4종류의 rivet의 재질은 보론강으로써 Almac코팅이 되어있으며, 480 ± 30 HV의 경도값을 가진다. Rivet은 Fig. 6의 (A) 아래 부분과 rivet의 끝단인 (C)부분의 형상에 따라 관통 가능한 상판의 강도가 달라진다. C-type rivet은 비교적 날카로운 끝단의 형상으로 상판이 연강

Fig. 6 Cross-section of rivet **(a) DZ-die** **(b) KA-die** **(c) FM-die****Fig. 7** Geometry of die

과 알루미늄일 때 사용된다. HD2 rivet은 좀 더 둥근 끝단의 형상으로서 고강도강판에 사용된다. HD3-type은 뾰족한 끝단과 안쪽의 홈이 굴곡진 형상이며 HD2-type에 비해 강도가 높은 강판에 사용된다. 마지막으로 P-type rivet은 끝단의 형상이 45°각도로 경사지게 각인 모서리이며 두겹거나 고강도강에 사용된다²⁶⁾. Die의 형상을 변화하여 하판에서 rivet의 다리가 벌어지는 interlock을 최대한 증가시켜 접합부 강도를 향상시킬 수 있다는 이전의 연구에 따라 die 형상을 변화하며 실험을 실시하고자 하였다¹⁷⁾. Die는 하단부가 평평한 형태의 FM-type die와 cone형태의 KA-type die, 가운데가 높게 솟아오르고 깊게 파인 형태의 DZ-type die 세 종류로 진행하였으며 Fig. 7에 간단한 모식도를 나타냈다.

SPR 접합의 접합품질 판단을 위해 광학현미경으로 단면을 관찰하고 Fig. 6과 같이 head height와 interlock, bottom thickness의 치수를 측정하였다. 인장전단시험은 만능재료시험기를 사용하였으며 3 mm/min의 속도로 각 조건을 3회 반복 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Rivet 종류에 따른 접합 품질 판단

앞서 설명한 4가지 종류의 rivet에 따른 SPR 접합 부 품질판단을 위해 실험을 진행하였다. die는 FM-type으로 고정하였으며, pre-clamping force 4 kN, punch force는 40 kN으로 고정하였다. 접합시편의 단면부를 Fig. 8에 나타내었으며, Fig. 6과 같이 head height, interlock, bottom thickness의 크기를 측정하였다. head height는 외관, 접합부의 기밀성, rivet에 의한 상판의 손상 등을 방지하기 위해 head height 값이 작을수록 더 좋은 접합부를 형성한다. Y. Abe의 연구²¹⁾에 따르면 interlock 길이의 증가에 따라 접합 강도가 향상되는 것으로 보고되고 있다. Interlock 길이가 증가하면 rivet을 잡고있는 하판으로부터 rivet을 빼내기 위한 저항이 증가하여 하판과 더 강하게 체결되기 때문에 접합하중이 증가한다. Bottom thickness는 접합하중에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 보고되고 있으나 부식과 하판의 찢어짐을 방지하기 위해 일정 두께 이상이 적합한 것으로 보고되었다²⁷⁾.

Fig. 8에서 보이는 것처럼 모든 type에서 rivet 다리의 좌굴과 같은 결함은 확인되지 않았다.

Fig. 9(a)에서 head height는 C-type rivet이 0.38 mm로 가장 낮았으며, HD2-type은 0.57 mm, HD3-type은 0.45 mm, P-type rivet이 0.70 mm로 가장 높았다. 이는 rivet과 하판 사이에 채워진 CFRP가 압축 될 수 없기 때문에 rivet 아래 부분이 상대적으로 공간이 넓은 C-type rivet이 가장 낮은 head height를 나타냈다.

Interlock은 C-type rivet이 0.35 mm로 다른

Fig. 8 Cross-sections of the SPR joints with different rivet type

type의 rivet에 비해 더 큰값을 보였다. HD2-type은 0 mm, HD3-type은 0.02 mm, P-type은 0.12 mm의 길이로 측정되었다. 이는 HD2, P, HD3 type의 rivet의 경우 강도가 높고 연성이 부족한 고강도강이 상판에 위치할 때 사용하기 때문이다. 고강도강을 관통하기 위해 Fig. 6의 (C)부분을 뭉뚱한 형상으로 변화하고 (A)안쪽의 굴곡을 주었기 때문에 CFRP와 알루

Fig. 9 Graph of measurement factor and rivet types (a) head height, (b) interlock, (c) bottom thickness

미늄의 접합에서는 상대적으로 interlock이 짧아지게 되었다.

Bottom thickness는 C-type rivet이 0.85 mm, HD2-type이 0.98 mm, HD3-type은 0.70 mm, P-type은 0.65 mm로 네 종류의 rivet이 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 CFRP 상판 Al5083 하판의 SPR 겹치기 접합에서 interlock이 가장 길고 head height가 가장 낮으며 bottom thickness가 충분한 C-type rivet이 본 평가에 사용된 4가지 SPR rivet 중 가장 적합한 것으로 판단된다.

3.2 Die 형상에 따른 접합 품질 판단

Die의 형상에 대한 접합 품질 판단을 위해 각 형상에 따른 SPR 접합실험을 진행하였다. 앞서 선정한 C-type rivet과 pre-clamping force 4 kN, punch force를 39 kN으로 고정하였다. die 형상별 실험을 실시한 이유는 interlock을 최대한 증가시켜 접합부 강도를 향상시킬 것으로 판단되기 때문이다¹⁷⁾. 따라서 Fig. 7과 같이 3가지의 die를 평가하였다. Fig. 11의 평가 결과를 종합적으로 판단한 결과, interlock의 편차가 작고 평균값이 가장 높으며 head height가 낮은 FM-type의 die가 상판 CFRP 하판 Al5083의 SPR 접합에서는 가장 적합하였다.

C-type rivet에 대해 세 종류의 die를 이용하여 접합한 시편의 단면을 Fig. 10에 나타내었다. 단면을 관찰한 결과 KA와 DZ type의 die의 경우 rivet 중심선으로부터 좌우 대칭이 아니거나 rivet의 좌굴이 일어나는 경우들이 관찰되었다. 이는 DZ-type의 die의 경우 중심부가 높게 솟고 가장자리가 깊어, 하판인 알루미늄의 연성이 높아 성형이 일정하지 않은 것으로 판단된다. 위와 같은 이유로 KA-type과 DZ-type의 die에서 측정값이 일정하지 않고 큰 편차가 발생하여 반복재현성이 부족하였다.

Fig. 11의 결과에서 head height는 KA-type die의 경우 0.05 mm로 가장 작은 돌출 길이를 보였다. FM-type die의 경우 0.32 mm의 head height 평균값을 보였으며, DZ-type die의 head height 평균값은 0.58 mm로 가장 높았다. 그러나 rivet이 벌어지는

Fig. 10 Cross-sections of the SPR joints with different die types

interlock은 FM-type의 die가 0.37 mm로 가장 높았다. KA-type과 DZ-type die는 각각 0.35 mm, 0.26 mm의 interlock 평균값을 보였다. Bottom thickness는 rivet 종류별 실험 결과와 마찬가지로 FM-type, KA-type, DZ-type이 각각 0.53 mm, 0.42 mm, 0.55 mm로 3가지의 die type에 따른 값이 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 편차가 작고 interlock값이 가

(a)

(b)

(c)

Fig. 11 Graph of measurement factor and die types (a) head height, (b) interlock, (c) bottom thickness

장 높은 FM-type die가 적합한 것으로 판단하였다.

3.3 Punch force의 변화에 따른 접합 품질 판단

SPR 접합의 공정변수인 punch force에 따른 접합 품질을 평가하기 위한 실험을 실시하였다.

앞선 실험에서 선정된 C-type rivet과 FM-type die를 사용하고 pre-clamping force를 4 kN으로 고정하고 뒤 punch force를 변화시키며 실험한 접합부의 단면을 Fig. 12에 나타내었다. Punch Force는 29 kN 부터 69 kN까지 5 kN 단위로 증가시켰다.

Fig. 13의 SPR 단면 품질 측정 결과에서 punch force가 증가함에 따라 SPR rivet의 head height는 punch force 29 kN일 때 0.75 mm의 값을 나타냈으며 punch force가 증가함에 따라서 head height는 감소하여 punch force 69 kN에서 -0.4 mm까지 감소하였다. 반면 interlock은 punch force가 증가함에 따라서 0.23 mm에서 0.61 mm까지 증가하였다. Bottom thickness는 punch force 29 kN일 때 0.72 mm로 최댓값을 나타냈으며 64 kN에서 0.38 mm로 최솟값을 나타냈다. C-type rivet과 FM-type die로 동일한 조건에서 punch force가 증가하면 rivet을 더욱 강하게 누르기 때문에 head height가 감소하였으며, 이로 인해 rivet의 다리는 하판의 알루미늄에서 더 많은 interlock을 형성하였다. 따라서 head height가 상판보다 더 깊이 삽입되어 상판인 CFRP의 손상을 일으킨 punch force 64 kN이상을 제외하고, punch force

Fig. 12 Cross-sections of the SPR joints with punch force

59 kN 일 때 가장 head height가 낮고 interlock이 크며 bottom thickness가 충분한 조건으로 나타났다.

3.4 Punch force 변화에 따른 접합하중

공정변수의 변화에 따른 최적의 접합하중을 도출하기 위해 인장전단시험을 실시 하였다. Fig. 14(a)의 인장하중 그래프에서 보이는 것처럼 CFRP가 처음 파단이 일

(a)

(b)

(c)

Fig. 13 Graph of measurement factor and punch force (a) head height, (b) interlock, (c) bottom thickness

어나기 시작할 때의 값을 CFRP의 first fracture load로 정의하였으며, 최대 하중 값을 maximum fracture load로 정의하였다. Fig. 14(c)의 인장전단시험 결과에서 CFRP의 first fracture load는 punch force 29 kN에서 최솟값 2.4 kN이었으며, punch force가 증가함에 따라 같이 증가하여 punch force 54 kN에

Fig. 14 Tensile shear test of SPR joints (a) location of first fracture load and maximum fracture load, (b) load-displacement curve of punch force 59 kN, (c) tensile shear load of punch force

서 최댓값 약 4.4 kN에 도달하였다.

Maximum fracture load는 punch force 54 kN에서 약 4.6 kN값을 얻었다. 최솟값은 punch force 29 kN에서 3.3 kN의 하중을 보였다. maximum fracture load는 punch force 29 kN의 가장 낮은 값을 제외하고 punch force의 변화에 따라 일정한 경향 없이 약 4 kN에서 4.5 kN사이에 분포하였다.

Fig. 15의 파단형상에서 보이는 것처럼 본 실험조건에서는 rivet이 CFRP와 Al5083의 접합부에 강하게 체결되었기 때문에 rivet이 뽑혀 나오는 pull-out의 파단모드가 발생하지 않았으며, 상판 CFRP 소재의 베어링 파단이 발생하였다. CFRP는 인장하중 시험이 진행됨에 따라 fiber가 연속적으로 파단되어 Fig. 14(a)의 하중-변위 그래프에서 보이는 것처럼 몇 번의 peak 값을 나타낸다²⁸⁾. 이후 베어링 파단이 계속되어 CFRP가 rivet을 잡아당기게 되고, rivet이 회전하며 하판 알루미늄의 파손이 일어나며 최대하중이 발생한다^{29,30)}. CFRP의 파단은 punch force가 낮을 때에는 Fig. 14(a)의 하중-변위 그래프처럼 fiber가 처음 파단이 시작 된 이후 연속적인 fiber 파단으로 인해 maximum fracture load에 도달하게 되었다. 그러나 punch force가 증가함에 따라 Fig. 14(b)의 하중-변위 그래프와 같이 CFRP의 fiber가 처음 파단을 시작하는 하중이 점차 증가하여 maximum fracture load와 같거나 비슷한 값까지 도달한 뒤 연속적인 베어링 파단이 진행되며 접합부가 파손되었다. 이로 인해 Fig. 14(c) 그래프에서 punch force가 증가함에 따라 CFRP의 first fracture load와 maximum fracture load 값의 차이가 감소하였다. 이는 punch force가 증가하면 SPR의 rivet head가 CFRP를 누르는 힘이 증가하여 CFRP의 first frac 본 논문에서는 CFRP의 first fracture load와 maximum fracture load를 모두 측

Fig. 15 Fracture mode of SPR joints at upper sheets and lower sheets

정하여 기재하였다.

3.5 측정인자 값과 파단시점에 따른 하중의 관계

Fig. 16처럼 SPR 접합 시편의 maximum fracture load의 경우 4~4.6 kN의 범위를 보이며 head height, interlock, bottom thickness의 길이에 따른 큰 차이

(a)

(b)

(c)

Fig. 16 Maximum fracture load of measurement factor (a) head height, (b) interlock, (c) bottom thickness

를 볼 수 없었다. 이는 위의 실험에서 CFRP와 알루미늄의 SPR 접합부에서 측정된 인자들의 체결력이 충분하여 CFRP의 모재가 파단되기 때문이다. Fig. 17처럼 CFRP의 first fracture load의 경우 head height와 bottom thickness가 증가함에 따라 하중값이 감소하였으며, interlock이 증가함에 따라서 하중값이 증가하는 것을 볼 수 있었다. 따라서 본 저자는 CFRP와

(a)

(b)

(c)

Fig. 17 First fracture load of measurement factor (a) head height, (b) interlock, (c) bottom thickness

Al5083의 SPR 접합시에 CFRP의 first fracture load를 maximum fracture load까지 증가시켜 상판 모재 파단 하중을 향상시키는 것이 중요하다고 판단하였다.

4. 결 론

CFRP와 Al5083-O의 이중재료간의 SPR 접합 방법을 연구하기 위하여, rivet type과 die type, punch force를 변화시키며 실험을 진행하였다. 또한, punch force에 따른 인장 전단시험을 진행하여 측정 인자들이 인장강도에 주는 영향을 조사하였다. 따라서 이 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 상판의 1.8 mm CFRP와 하판 2.0 mm Al5083 조합에서 측정인자인 head height와 interlock 길이, bottom thickness를 고려하였을 때 head height가 낮고 interlock이 크며 bottom thickness가 충분한 C-type rivet과 FM-type die가 가장 적합하였다.

2) Punch force의 변화에 따른 인장강도 시험에서 CFRP의 first fracture load와 maximum fracture load를 정의하고 punch force 54 kN에서 CFRP의 first fracture load가 최대 4.4 kN까지 도달하였다.

3) SPR 접합에서 접합성을 판단하는 측정인자인 head height, interlock, bottom thickness와 파단 시점에 따른 하중인 CFRP의 first fracture load, maximum fracture load와의 관계를 확인하였다. 위의 측정인자들은 maximum fracture load에는 큰 영향을 주지 않았으나, CFRP의 first fracture load는 head height와 bottom thickness가 감소하고, interlock이 증가할수록 파단하중이 증가하는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 CFRP와 Al 조합에서의 SPR 체결 시 접합부 품질 판단 기준과, 측정인자와 접합하중과의 상관관계를 설명하고자 하였다.

ORCID: Nam-Ki Jeon: <http://orcid.org/0000-0001-5605-3142>

ORCID: Seun Rhee: <http://orcid.org/0000-0002-0039-5650>

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

References

1. P. Mock, EU CO₂ emission standards for passenger cars and light-commercial vehicles, (Retrieved from the International Council on Clean Transportation, website, <http://www.theicct.org/eu-co2-standards-passengercars-and-lcvs>, City, 2014)
2. R. Modaresi, S. Pauliuk, A. N. Lovik and D. B. Muller, Global carbon benefits of material substitution in passenger cars until 2050 and the impact on the steel and aluminum industries, *Environ Sci Technol*, 48(18) (2014),

- 10776-10784
<https://dx.doi.org/10.1021/es502930w>
3. M. K. Kulekci, Magnesium and its alloys applications in automotive industry, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(9-10) (2008), 851-865
<https://doi.org/10.1007/s00170-007-1279-2>
4. P. Mock, Reducing CO₂ and fuel consumption from new cars, Assessing the near-term technology potential in the EU, (Retrieved from The International Council on Clean Transportation website, http://www.theicct.org/sites/default/files/Briefing_City_2013)
5. E. Eusebi, Composite intensive vehicles, past present and future, *Structural materials challenges for the next generation vehicle*. Washington, DC, US Department of Commerce, (1995)
6. N. Gjostein, Technology needs beyond PNGV, *Basic Research Needs for Vehicles of the Future*, New Orleans, LA, (1995)
7. I. Chang, Y. Cho, H. Park and D. So, Importance of Fundamental Manufacturing Technology in the Automotive Industry and the State of the Art Welding and Joining Technology, *Journal of Welding and Joining*, 34(1) (2016), 21-25
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.1.21>
8. P. Kah, R. Suoranta, J. Martikainen and C. Magnus, TECHNIQUES FOR JOINING DISSIMILAR MATERIALS, METALS AND POLYMERS, *Reviews on Advanced Materials Science*, 36(2) (2014)
9. A. Rudawska, Adhesive joint strength of hybrid assemblies, Titanium sheet-composites and aluminium sheet-composites – Experimental and numerical verification, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 30(7) (2010), 574-582
<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2010.05.006>
10. W. Brockmann, O.-D. Hennemann, H. Kollek and C. Matz, Adhesion in bonded aluminium joints for aircraft construction, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 6(3) (1986), 115-IN111
[https://doi.org/10.1016/0143-7496\(86\)90016-3](https://doi.org/10.1016/0143-7496(86)90016-3)
11. R. Zitoun and F. Collombet, Numerical prediction of the thrust force responsible of delamination during the drilling of the long-fibre composite structures, *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 38(3) (2007), 858-866
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2006.07.009>
12. J. P. Davim, P. Reis and C. C. António, Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up, *Composites Science and Technology*, 64(2) (2004), 289-297
[https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00253-7](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00253-7)
13. R. Matsuzaki, M. Shibata and A. Todoroki, Improving performance of GFRP/aluminum single lap joints using bolted/co-cured hybrid method, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(2) (2008), 154-163
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.11.009>
14. T. A. Barnes and I. R. Pashby, Joining techniques for

- aluminium spaceframes used in automobiles Part II - adhesive bonding and mechanical fasteners, *Journal of Materials Processing Technology*, 99(1-3) (2000), 72-79
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00361-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00361-1)
15. 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)
 16. L. Han, M. Thornton and M. Shergold, A comparison of the mechanical behaviour of self-piercing riveted and resistance spot welded aluminium sheets for the automotive industry, *Materials & Design*, 31(3) (2010), 1457-1467
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.08.031>
 17. C. G. Pickin, K. Young and I. Tiersley, Joining of light-weight sandwich sheets to aluminium using self-pierce riveting, *Materials & Design*, 28(8) (2007), 2361-2365
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.08.003>
 18. N. H. Hoang, R. Porcaro, M. Langseth and A. G. Hanssen, Self-piercing riveting connections using aluminium rivets, *International Journal of Solids and Structures*, 47(3-4) (2010), 427-439
<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2009.10.009>
 19. J.-H. Bae, J.-W. Kim, I. Choi, D.-G. Nam, J.-K. Kim and Y.-D. Park, A Study on Tensile Shear Characteristics of Dissimilar Joining Between Pre-coated Automotive Metal Sheets and Galvanized Steels with the Self-Piercing Rivet and Hybrid Joining, *Journal of Welding and Joining*, 34(1) (2016), 59-67
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.1.59>
 20. M. Lou, Y. Li, Y. Li and G. Chen, Behavior and Quality Evaluation of Electroplastic Self-Piercing Riveting of Aluminum Alloy and Advanced High Strength Steel, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135(1) (2013)
<https://doi.org/10.1115/1.4023256>
 21. 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>
 22. N. H. Hoang, M. Langseth, R. Porcaro and A. G. Hanssen, The effect of the riveting process and aging on the mechanical behaviour of an aluminium self-piercing riveted connection, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 30(5) (2011), 619-630
<https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2011.02.006>
 23. 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)
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/137/1/012025>
 24. D. Kim, Y. Qiu and H.-Y. Cho, Design of self-piercing rivet to joint in advanced high strength steel and aluminium alloy sheets, *Journal of Welding and Joining*, 33(3) (2015), 75-80
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2015.33.3.75>
 25. H.-Y. Cho and D. Kim, Finite element analysis for joining glass fiber reinforced plastic and aluminium alloy sheets, *Journal of Welding and Joining*, 33(2) (2015), 78-84
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2015.33.2.78>
 26. C. Villettaz, Influence of the geometry of self-piercing rivets on the joint strength of high-strength thin sheet steel, (Haute Ecole d'Ingénierie, City, 2009)
 27. D. Li, L. Han, M. Thornton and M. Shergold, Influence of edge distance on quality and static behaviour of self-piercing riveted aluminium joints, *Materials & Design*, 34 (2012), 22-31
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.046>
 28. S. Heimbs, S. Schmeer, J. Blaurock and S. Steeger, Static and dynamic failure behaviour of bolted joints in carbon fibre composites, *Composites Part A, Applied Science and Manufacturing*, 47 (2013), 91-101
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.12.003>
 29. L. Kroll, S. Mueller, R. Mauermann and R. Gruetzner, Strength of self-piercing riveted joints for CFRP/aluminium sheets, in 18th International conference on composite materials (ICCM/18), South Korea, (City, 2011), 21-26
 30. 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>