용접공정을 이용한 CFRP와 금속의 접합기술 동향

김 용* · 방 희 선**,*

*고등기술연구원 로봇생산기술센터

**조선대학교 용접·접합과학공학과

Recent Joining Techniques of CFRP to Metal Using Welding Process

Yong Kim* and Hee-seon Bang**,*

*Center for Robot & Manufacturing, Institute for Advanced Engineering, Yongin, 17180, Korea

**Dept. of Welding and Joining Science Engineering, Chosun University, Kwangju, 61452, Korea

†Corresponding author : banghs@chosun.ac.kr

(Received October 2, 2018 ; Accepted October 15, 2018)

Abstract

Techniques for joining lightweight dissimilar materials, particularly metals and polymers including CFRP, are becoming increasingly important in the manufacturing of hybrid structures and components for engineering applications. The recent drive towards lightweight construction in the aerospace and automotive industries has led to increased exploitation of lightweight metallic and non-metallic materials with the aim of achieving specifically optimized versatility. Hence, suitable joining methods are necessary in order to reliably join these dissimilar materials and to integrate them in engineering structures. Understanding of the various joining technologies that exist for multi-material structure is consequently important. The objective of this current study is to examine and summarize information and results from previous research and investigations on techniques for joining metal to polymer including CFRP. Specially in this paper, the findings presented serve to further understanding of solid state or laser-assisted conduction heat joining techniques available and optimization of processes for metal to CFRP hybrid joints.

Key Words : Friction stir spot joining, CFRP, Thermoplastic, Ultrasonic welding, Multi-material

1. 서 론

자동차 경량화는 과거부터 지속되어 온 자동차 업계의 화두이다. 가장 큰 이유는 미국과 EU를 비롯한 세계 각국의 연비규제 강화 때문이다. 미국 정부는 1975년 이후로 1만대 이상의 차량을 판매하는 완성차 업체를 기준으로 자동차 기업 평균연비 규제(Corporate Average Fuel Economy, CAFE)를 적용하여 규제 적용 10년 만에 평균 연비를 두 배 가량 개선시켰다. 이후 미국 정부는 2025년까지 10인승 이하 승용 자동차에 대해 최소 23.2 km/ℓ 연비를 규제로 내걸었으며, 완성차 업체들은 미국 시장을 위해 현재보다 평균연비를 50% 이상 개선해야만 한다¹⁾.

이와 같은 시장 상황에서 차량의 경량화는 연비를 크게 향상시킬 수 있는 가장 현실적인 대안이다. 이를 위해 초기에는 차체 경량화를 위한 대체 소재로 알루미늄이나 마그네슘 등 비철금속을 주로 적용하였으며, 최근 국내외 완성차 업계에서는 탄소섬유강화플라스틱(이하 CFRP)를 자동차 차체에 적용하려 하려는 움직임이 활발히 일고 있다.

이와 같이 차체 소재는 점차 스틸과 알루미늄 나아가 CFRP까지 복합적으로 구성되고 있으며 안정적인 소재 적용을 위해서는 특히 이종소재간의 접합기술 확보가 필수 선행되어야 한다. 이 중 우선 스틸과 알루미늄의 접합은 기계적 체결²⁾ 및 본딩 접합³⁾ 외 마찰용접⁴⁻⁵⁾, 폭발압접⁶⁾, 초음파용접⁷⁾ 뿐만 아니라 최근에는 마찰교반 용접⁸⁻¹²⁾, 레이저용접¹³⁻¹⁷⁾, 하이브리드용접¹⁸⁾ 및 저항접

용접¹⁹⁾과 함께 아크 열원을 이용한 브레이징 접합²⁰⁻²¹⁾ 등 많은 방법들이 제안되었다. 그에 반해 금속과 CFRP를 포함한 플라스틱과의 조립은 현재로서는 기계적 체결 및 접착제를 이용한 접합이 거의 대부분이며, GMAW나 GTAW 그리고 저항점용접과 같은 고전적인 용융용접 공정의 적용은 높은 입열량으로 인해 적용이 불가하다²²⁾. 반면 체결 및 접합 공정의 경우 응력집중, 사전 표면처리, 추가적인 무게 증가, 갈바닉 부식 및 사용 환경에서의 열화 등의 문제가 존재한다²³⁾. 이에 많은 연구자들이 스틸과 알루미늄의 이종접합과 마찬가지로 기존의 용접 공정을 활용하여 금속과 플라스틱의 접합에 적용하고자 노력하였으며 그 결과 최근 기술 수요의 증가에 따라 레이저용접²⁴⁻²⁸⁾, 초음파용접²⁹⁻³²⁾, 마찰교반용접³³⁻³⁶⁾ 및 마찰교반점용접³⁷⁻⁴⁰⁾을 활용한 접합 기술들이 많이 발표되고 있다.

여기서 적용된 용접 공정들의 특징은 바로 초음파 진동이나 마찰열과 같은 열을 이용한 고상용접(Solid state welding) 방식이나 또는 레이저와 같은 간접적인 전도 열원(Conduction heat)을 이용한 것이다. 이는 다시 말해 금속과 CFRP의 접합에는 열원의 적용이 상당히 제한된다는 것을 의미하며 입열량은 통상적으로 수지의 녹는점과 관계된다.

이러한 수지는 열적 성질에 따라서 크게 열경화성 수지와 열가소성 수지로 구분된다. 이 중 열경화성 수지의 경우 한번 가열에 의하여 경화하면 3차원 구조를 취하기 때문에 다시 가열해도 연화, 용융하지 않는 반면에 열가소성 수지는 일정온도에서 용융하고 냉각에 의해서 다시 고체화되는 성질로 인해 열과 압력에 의한 접합공정의 적용은 열가소성 수지 기반의 복합소재만이 가능하다²²⁾.

이에 따라 본고에서는 앞서 언급된 용접 공정을 활용한 금속과 열가소성 플라스틱을 포함한 CFRP의 접합 기술 동향에 대해 최근 발표된 논문들을 조사하여 리뷰하였다. 특히 이들 각 공정의 접합 메커니즘 주요 공정 변수에 대해 중점적으로 검토하였으며 접합강도 비교에 따른 공정 별 효율성에 대해서도 간략히 언급하였다.

2. CFRP와 금속의 용접기술

2.1 레이저용접

레이저의 비약적인 발달로 비로소 금속과 플라스틱의 접합 또한 가능하게 되었다. 레이저를 이용한 금속과 플라스틱의 접합은 일본 오사카대학 접합연구소에서 개발되어 LAMP(Laser-Assisted Metal and Plastic) 접합법으로 명명되어 있다⁴¹⁾. Katayama²⁴⁾는 2008년

Fig. 1 Laser direct joint between PET and austenitic stainless steel Type 304 before (A) and after (B) the tensile shear test, showing that the base PET on Type 304 is elongated, leading to the production of a strong joint²⁴⁾

807 nm의 파장을 갖는 다이오드 레이저를 이용하여 약 90 %의 레이저빔 투과율을 갖는 2 mm 두께의 PET 소재와 3 mm 두께의 STS304 소재의 접합을 시도하였으며, 그 결과는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1의 상판은 PET 소재이며 접합부의 폭은 약 10 mm로 형성되어 있고 용접열에 의해 발생된 버블이 투명한 PET 전면에 쉽게 관찰된다. Fig. 1의 (A) 및 (B)는 각각 인장전단시험 전 후 시편 형상을 나타낸 사진으로 레이저를 이용한 접합 결과 약 3 kN의 강도로 모재의 강도에 육박함을 증명하였다. 그는 레이저에 의한 금속과 플라스틱의 접합 메커니즘을 규명하기 위해 접합부의 단면을 주사전자현미경(SEM)으로 우선 관찰하였으며, 그 결과 금속과 플라스틱은 원자 또는 분자 수준에서 강하게 결합되어 있는 것을 확인하였다. 보다 미세적 접근을 위해 투과전자현미경(TEM)으로 관찰한 결과, PET와 STS304 소재 사이 Cr_2O_3 의 산화막이 형성되어 있는 것을 확인하였다.

그는 이러한 결과를 토대로 그의 후속 연구에서 레이저에 의한 금속과 플라스틱의 접합 메커니즘에 대해 Fig. 2와 같이 설명하였다²⁵⁾. 우선 소재의 투과율에 따라 금속 또는 플라스틱 소재를 상판에 위치시킨 후 접합강도를 충분히 보증할 수 있는 넓은 면적에 대해 레이저빔을 조사하면 계면의 플라스틱 측에서 기포가 발생한다. 이렇게 발생한 기포는 급속한 팽창을 동반하며 고압을 유발하며 이러한 압력이 용융된 플라스틱을 금속 표면의 미세 틈이나 간격으로 밀어 넣음으로서 앵커링(Anchoring)효과와 같은 기계적인 결합을 우선적으로 만들어낸다. 뿐만 아니라 Cr_2O_3 의 산화막이 형성된 것을 근거로 고온의 활성 플라스틱 용액이 활성화한 금속 측의 산화피막 표면에 밀착하여 생기는 반데르발스 힘(물리적 결합)과 함께 화학적 결합이 관여하여 고강

Fig. 2 Mechanism of laser direct joining between metal and plastic, showing absorption of laser in metal, melting of plastic due to absorbed heat, and formation and expansion of bubbles inducing plastic flows onto oxide covering metal. The joining is attributed to anchor effect, van der waals force and chemical bonding between melted plastic and oxide film²⁵⁾

Fig. 3 Tensile shear test results made under different joining conditions about laser direct lap joints between CFRP to zinc-coated steel²⁶⁾

도의 접합이 이루어지는 것으로 해석된다. 이러한 접합 메커니즘에 기인하여 금속과 플라스틱의 레이저용접은 모든 금속과 PET, PA, PC 등 일부 플라스틱과 강한 접합강도를 구현 가능하다고 주장하였다²⁵⁾. 이의 근거를 확보하기 위해 그의 또 다른 후속 연구²⁶⁾에서는 0.7 mm 두께의 아연도금강을 상판으로 놓고 3 mm 두께의 CFRP를 하판으로 배치한 후 마찬가지로 다이오드 레이저를 이용하여 다양한 공정 조건에서 접합을 시도하였다. 그 결과는 Fig. 3과 같이 특정 입열 영역에서 약 3.3 kN으로 가장 우수한 강도를 나타내었다. 그는 입열과 강도와의 관계에 대해 입열이 적은 경우 접합 면적이 감소가 원인이며 반대로 너무 큰 경우는 CFRP의 열적 손상으로 인해 강도가 저하된다고 주장하였다.

이상과 같이 레이저를 이용한 금속과 플라스틱의 접합에서는 버블의 발생에 의한 용융지의 유동을 기본 구동력으로 활용하며 이에 따라 접합 계면에 기공이 항상 존재한다. 그러나 접합을 유도하는 기공의 발생이 크고 많게 되면 이는 또 접합부의 강도저하를 초래하게 된다. 이에 따라 Tan^{27,28)}은 CFRP와 금속의 레이저용접 시 나타나는 기공 발생 메커니즘에 대해 연구하였다. 이를 위해 그는 3 mm 두께의 CFRP와 1.2 mm 두께의 연강의 조합에서 최대 2 kW 용량의 파이버레이저를 사용하여 빔 직경을 8.8 mm까지 디포커싱(Defocusing) 시킨 후 연강의 표면에 500~900 W 출력으로 조사하거나 또는 Fig. 4와 같이 700 W의 고정 출력에서 접합 속도를 6~14 mm/s 까지 달리하여 다양한 조건에서 접합 후 나타나는 기공 발생 현상에 대해 관찰하였다. 그 결과 플라스틱 접합부에 나타나는 기공의 형태는 Fig. 4와 같이 크게 두 가지 형태로 구분할 수 있었는데 그 중 첫 번째 형태의 기공은 용융지 중앙에 위치하며 온도의 가장 큰 영향을 받는 중심부 기공이다. 이들 기공은 플라스틱 수지의 열분해(Pyrolysis) 과정에서 발생된 가스에 의한 기공으로 그 내벽은 비교적 매끈하다. 반면 용융지 중심부에서 약간 떨어진 곳에서 불규칙적으로 발견되는 기공은 수축공(Shrinkage porosity) 형태로 이는 열에 의해 응고 수축응력을 받아 발생되며 그 형상은 거친 내벽과 불규칙적인 형상 그리고 기공 내 미세 균열을 내포하고 있다. 그의 주장에 의하면 이러한 기공의 발생은 완전히 억제될 수 없으며, 최대한 방지를 위해서는 금속과 CFRP 간 상이한 열전도도를 제어함으로써 가능하다고 하였다. 이를 위해 그는 Cu²⁷⁾ 또는 Cr²⁸⁾ 소재의 냉각용 백킹판(Backing plate)을 설치하여 최대한 열평형을 맞추므로써 기공을 억제하였으며 그 결과 백킹판 적용 유무에 따라 인장전단강

Fig. 4 Cross-section of CFRP/mild steel joints under the scanning speeds of (a) 6mm/s (b) 8mm/s (c) 10 mm/s (d) 12mm/s and (e) 14mm/s (laser power of 700 W)²⁷⁾

도가 9.32 MPa에서 22.14 MPa까지 상승된 결과를 제시하였다²⁸⁾.

이상과 같이 레이저를 이용한 금속과 CFRP의 접합에서는 출력, 속도 그리고 에너지 밀도를 조합한 입열량이 가장 중요한 품질인자가 됨을 알 수 있다. 이에 향후 레이저용접기술이 실험실 수준을 벗어나 보다 실용화되기 위해서는 용접 중 균일한 입열 제어 및 정밀한 클램핑 장치의 개발이 요구될 것으로 예상된다.

2.2 초음파용접

기존의 용접공정 개선을 통해 이중접합을 달성하기 위한 많은 연구가 진행되었으며, 서로 물리 화학적 성질이 상이한 재료간의 접합에는 되도록 적은 입열과 압력으로 고상상태에서 접합을 유도하는 것이 보다 효율적으로 알려져 있다. 이에 초음파용접은 고상용접의 일종으로 이와 같이 제한된 입열에서 이중재료 간의 접합을 가능하게 하며, 금속끼리의 접합뿐만 아니라 플라스틱의 용착에도 널리 사용되고 있다.

이에 기반하여 Balle²⁹⁻³²⁾은 초음파용접공정을 통해 알루미늄과 CFRP의 접합을 구현하고자 관한 많은 연구를 진행하였으며, 그 결과 금속끼리 접합할 때와 플라스틱 접합할 때는 초음파 진동의 방향이 강도에 많은 영향을 미치는 것을 확인하였다. 일반적으로 금속의 접합에서는 Fig. 5와 같이 접합부와 평행 방향으로 진동을 가하지만 플라스틱의 접합 또는 금속과 플라스틱의 접합에서는 진동 방향을 수직하게 함으로써 분자 간 결합력과 앵커링 효과가 보다 잘 일어난다고 하였다²⁹⁾.

그는 상판에 Fig. 6과 같이 구성된 시스템을 이용하여 1 mm 두께의 AA5754와 2 mm 두께의 열가소성 CFRP를 초음파용접으로 접합하고자 하였으며, 시편의 형상은 Fig. 7과 같이 제작하였다. 이때 접합부의 면적은 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 로 하였으며 초음파 진폭은 $40 \mu\text{m}$

Fig. 5 Schematic comparison between ultrasonic plastic and metal welding²⁹⁾

Fig. 6 Experimental setup for ultrasonic metal welding: (1) sonotrode tip (2) anvil (3) clamping for CF/epoxy-PA6-Al joint (4) CF/epoxy-PA6 sheet and (5) AA5754 sheet³⁰⁾

Fig. 7 CF/epoxy-PA6-AA5754 joint after ultrasonic welding³⁰⁾

로 고정 후 가압력과 진동에너지를 바꿔가며 접합 결과 최대 31.5 MPa의 접합강도를 얻었으며, 알루미늄 소재 표면을 질산으로 산세처리를 할 경우는 54 MPa까지 강도를 증가시킬 수 있음을 증명하였다³⁰⁾.

나이가 그의 후속연구에서는 열경화성 CFRP와 AA5754 소재의 접합 또한 시도되었다^{31,32)}. 그는 열경화성 수지와와의 접합을 위해 수지 표면에 $100 \mu\text{m}$ 두께의 PA6 소재를 코팅한 뒤 동일한 장비와 형태로 접합에 성공하였다. 그는 접합부를 접합부 중앙, 접합부 경계 및 미 접합부의 3 영역으로 나누어 단면을 미시적으로 관찰하였으며 Fig. 8에는 각 영역에서의 단면 분석 결과를 나타내었다. 여기서 우선 Fig. 8의 (a) 및 (b)는 미접합부의 단면을 보여주고 있는데 열경화성 CFRP 소재 위에 PA6가 코팅되어 있는 모습을 확인할 수 있으며 (c) 및 (d)에서는 접합부의 경계에서 PA6가 용융되어 손실된 경계이다. 마지막으로 (e) 및 (f)는 접합부의 중앙부를 보여주는데 카본 섬유가 알루미늄 소재와 직접적인 접촉이 이뤄진 것이 확인된다.

이에 따른 금속과 CFRP 간 초음파접합 메커니즘은 일반적인 금속의 접합 메커니즘과 유사하게 설명될 수 있다. 일반적으로 초음파용접은 진동과 마찰열에 의하여 계면에 있는 산화막 및 오염막이 파괴되어 활성화

Fig. 8 Optical micrographs of several cross-section of CF/epoxy - PA6 - AA5754 joints after ultrasonic metal welding at 2300 J and 280 N, 40 μ m ultrasonic amplitude³¹⁾

된 금속 간의 접촉상태에서 강력한 접합이 이루어지는데, 본 연구의 경우에는 CFRP에 코팅된 열가소성 PA6가 매개체 역할을 한다. 가압 및 진동이 시작되면 계면의 강한 마찰로 온도가 매우 빠르게 상승되며 이로 인해 PA6가 용해되기 시작한다. 이렇게 용해된 PA6는 가압에 의해 접합부의 가장자리 영역으로 벗어나게 되고 이 과정에서 마찬가지로 활성화된 알루미늄 표면이 탄소 섬유와 직접 접촉함으로써 앵커링 효과가 일어나게 되는 것이다. 이와 같은 과정으로 인해 열경화성 CFRP와 알루미늄의 접합에 최대 34.8 MPa의 접합강도를 얻을 수 있었다³¹⁾.

이상과 같이 초음파를 이용한 금속과 CFRP의 접합에서는 가압력과 진동에너지 그리고 접합부의 표면 상태에 의해 강도가 결정됨을 알 수 있으며, 열경화성 소재의 접합 가능성을 확인할 수 있다. 그러나 실용화를 위해 보다 중요한 것은 초음파 혼과 강건한 클램핑 장치의 설계기술이 될 것으로 사료된다.

2.3 마찰교반용접

전통적인 마찰교반용접 기술은 고상상태에서 접합이

Fig. 9 Process scheme of friction press joining³³⁾

이뤄지므로 특히 알루미늄을 포함한 비철금속의 용접이나 이종 금속간의 용접에 매우 효과적인 기술로 사용되고 있다. 본 공정은 다양한 소재 조합에 대해 이미 전세계적으로 많은 연구가 진행되었으며, 금속과 플라스틱 간 용접의 경우도 최근 기술 수요의 증가에 따라 이를 적용하기 위한 연구가 활발히 진행 중이다.

이러한 마찰교반용접에서의 에너지원은 초음파용접과 마찬가지로 마찰열과 가압력에 의하며, 회전 톨에 의한 금속 소재의 마찰 발열이 플라스틱으로 전도되어 계면 용착이 일어나는 메커니즘을 갖는다. 이에 Wirth³³⁾는 Fig. 9와 같이 마찰교반용접에서 핀에 의한 플라스틱과 금속 소재간의 교반없이 단순 발열에 의한 접합을 시도하였다. 그는 2 mm 두께의 AA6082 소재를 상판에 위치 후 하판에 유리섬유(Glass fiber)가 15% 보강된 PA6 기반 유리섬유강화플라스틱(GFRP)과 접합하였다. 이때의 공정변수는 톨의 회전속도, 용접속도 그리고 가압력이 되며, 표면상태 또한 주요 변수이다. 각종 변수 조합에 따라 시편 제작 후 인장전단시험을 실시한 결과 알루미늄 표면에 레이저 텍스처링(Texturing)을 한 경우와 블라스팅(Blasting) 처리를 한 경우 각각 최대 11 N/mm² 및 7 N/mm²의 결과를 도출하였다.

한편 Liu³⁴⁾는 비슷한 시기에 마찬가지로 각각 2 mm 두께의 알루미늄과 MC Nylon-6 소재를 접합하였으며, 공정변수가 강도에 미치는 영향에 대해 연구하였다. Fig. 10은 접합된 시편의 상/하부 모습 및 인장전단시험 후 파단 위치를 보여주고 있다. 접합부의 상면은 Fig. 10의 (a)와 같이 일반적인 마찰교반용접의 형태를 보이며 하부는 (b)와 같이 접합의 흔적이 거의 발견되지 않는다. 인장전단시험 시 파단은 계면 전체에서 일어나는 것이 아닌 계면 끝 단 일부만이 파단된다. 이때 최대 인장전단강도는 7.8 N/mm²가 도출되었다. 그는 Wirth³³⁾의 연구와 마찬가지로 톨의 회전속도와 용접속도가 가장 중요한 공정변수라고 하였으며, 특히 회전속도를 증가시킬수록 내부 기공의 크기가 감소하고 강도의 향상을 가져온다고 주장하였다.

Fig. 10 Typical friction lap welding joint processed using tool with dimension of 20 mm in diameter³⁴⁾

나이가 Nakatsuka³⁵⁾는 마찰교반용접을 이용해 2 mm 두께의 AA5052 소재와 3 mm 두께의 CFRP 소재의 접합을 실시하였다. 그는 이전 연구자들과 달리 접합속도를 100~2,000 mm/min까지 변화해가며 접합 후 실시간 발열 온도를 측정하였으며, 접합 속도에 따른 인장전단강도를 비교하였다. 또한 이전 연구자들과 마찬가지로 알루미늄 소재의 표면처리 여부에 따른 강도도 비교하였다.

그는 알루미늄 소재에 대해 수산화 표면처리를 하였으며 그 여부에 따라 1.0 kN에서 2.9 kN까지 최대 3 배 정도 차이가 남을 본 연구를 통해 증명하였다. 또한 Fig. 11과 같이 동일한 톨 회전속도와 가압 조건에서 접합 속도에 따른 발열량을 비교하였다. 일반적으로 CFRTP의 녹는점은 498 K이며, 열분해는 623 K에서 시작된다. 그의 주장에 의하면 낮은 용접속도로 인해

Fig. 11 Temperature histories during friction lap joining of ground - A5052/CFRTP joints fabricated at joining speeds of 100 and 1,600 mm/min³⁵⁾

Fig. 12 The relationship between joining speed during friction lap joining and the tensile shear strength of the joints³⁵⁾

열분해 온도 구간에 많이 노출될수록 접합부의 성능이 저하되며 이는 Fig. 12의 인장전단시험 결과로도 증명된다. 일반적으로 낮은 용접속도에서 보다 많은 입열로 인해 수지의 열분해가 촉진되기 때문에 입열량을 정확히 제어할 필요가 있다. 그의 연구에서는 접합속도가 1,600 mm/min 조건에서 2.9 kN의 가장 높은 인장전단강도가 나타났으며 그 이상에서는 불충분한 용융시간으로 인해 점차 감소되었다.

이상으로 마찰교반용접공정을 활용한 금속과 CFRP의 접합 또한 접합 표면의 상태 및 입열의 제어가 가장 큰 변수로 작용함을 알 수 있다. 기존의 마찰교반용접과 달리 톨 핀이 존재하지 않아 교반작용 없이 순수 마찰열의 전도에 의한 접합이므로 접합 메커니즘은 앞선 2.1절의 레이저용접과 매우 유사하다. Fig. 13은 마찰교반용접에서의 접합 메커니즘을 설명하고 있다³⁶⁾. 마찰열에 의해 수지가 녹는점 이상으로 가열되면 기포가 발생되기 시작하고 이는 곳 팽창하며 용융 플라스틱의

Fig. 13 Mechanism of friction lap joining between metal and CFRP³⁶⁾

유동을 일으키게 된다. 이러한 결과로 앵커링 효과가 발생함과 함께 반데르발스 힘에 의한 결합도 추가적으로 형성됨에 따라 강도가 발현되는 것으로 보고되고 있다. 이에 앵커링 효과를 보다 극대화하기 위해서는 알루미늄 또는 플라스틱 소재의 표면처리가 요구된다.

2.4 마찰교반점용접

마찰교반점용접은 일반적으로 마찰교반용접과 동일한 공정으로서 단지 톨의 이동이 없이 제자리에서 점접합을 이루는 것이다. 이때 기존의 마찰교반점용접의 경우 핀에 의한 키홀(Keyhole), 핀홀(Pin hole), 프루브홀(Probe hole) 등으로 불리는 빈 공간을 형성하게 되며 이러한 공간은 기계적 강도저하 뿐만 아니라 외관상의 문제와 집중적 부식 가능성을 유발한다⁴²⁾. 따라서 이러한 키홀을 채워 넣기 위한 다양한 방법들이 제안되었으며, 현재 가장 상용화 되어있는 공정은 Fig. 14와 같다. 여기서 마찰교반용접 톨은 핀과 슬리브가 독립적으로 구동하는 특징이 있다. Fig. 14 (1)과 같이 일단 슬리브의 회전마찰을 통해 재료를 가열하게 되면 재료는 소성 유동을 하며 핀이 있는 공간으로 올라오게 된다. 이때 (2)와 같이 슬리브를 올리며 핀을 내려 유동금속을 제 자리에 다시 채워 넣고 최종적으로 (3)과 같이 응고가 완료되면 종료된다.

이와 같은 일련의 과정으로 기존의 마찰교반점용접 시 문제되던 키홀의 완벽한 제거가 가능해졌다. 이에 따라 알루미늄 동종소재⁴³⁾ 뿐만 아니라 스틸과의 이종접합⁴⁴⁾ 그리고 나아가 복합소재와의 접합³⁷⁻⁴⁰⁾ 또한 많이 연구되고 있다.

일례로 독일의 Helmholtz-Zentrum Geesthacht사는 2012년 본 공정을 이용하여 Fig. 15⁴⁵⁾와 같이 CFRP와 금속의 겹치기 이종접합에 성공하였으며, Goushegir³⁷⁻⁴⁰⁾는 이와 관련된 많은 연구 결과들을 발표하였다. 그는 2 mm 두께의 알루미늄과 2.17 mm 두께의 CFRP

Fig. 15 Friction spot joining is one of several techniques developed by Helmholtz-Zentrum Geesthacht for joining CFRP to metal for hybrid automotive construction⁴⁵⁾

소재를 개발된 마찰교반점용접 공정으로 접합하고자 하였으며 그의 첫 번째 연구결과로 표면처리되지 않은 알루미늄과 CFRP의 접합에서 27 MPa의 인장전단강도를 얻었다³⁷⁾. 이후 동일한 공정 조건에서 알루미늄 소재를 샌드블라스트 표면처리하여 표면 조도(Ra)를 0.68 μm 에서 4.5 μm 으로 거칠게 한 결과 접합강도를 43 MPa까지 상승시켰다. 이러한 사실은 앞서 소개된 타 공정들과 마찬가지로 금속과 플라스틱 간의 앵커링 효과를 향상시킨 원리로서 마찰교반점용접에서 또한 표면처리가 입열량과 함께 상당히 중요한 인자가 됨을 알 수 있다.

이후 그의 후속 연구에서는 마찰교반점용접의 공정변수와 접합강도와의 상관성을 확인하는 연구를 진행하였다³⁸⁾. 이를 위해 그는 접합 품질 및 강도에 영향을 미치는 인자를 ① 톨의 회전속도, ② 삽입 깊이, ③ 접합 시간 및 ④ 가압력으로 규정하고 이를 완전요인배치(Full factorial design) 실험계획법을 이용하여 결과를 도출하였다. 그의 주장에 따르면 접합강도에 가장 큰 영향을 미치는 것은 접합 면적(Bonding area)이며, 이러한 접합 면적은 Fig. 16과 같이 정의될 수 있다. 접합부 파단면은 CFRP면을 기준으로 소성변형부와 열영향부로 구분할 수 있으며, 접합부의 강도는 실제 소성변형부(Fig. 16 (b)의 PDZ 영역)의 면적에 의해 결정되

Fig. 14 Schematic of the Friction stir spot joining technique (sleeve plunge variant). (1) The sleeve plunging softens the metal alloy; (2) spot refilling and (3) joint consolidation³⁷⁾

Fig. 16 (a) Schematic illustration of an Friction stir spot joining fracture surface in which the bonding zones are indicated; (b) a real fracture surface: the transition zone (TZ) and plastically deformed zone (PDZ) are indicated by solid ovals on the composite side, whereas the dashed oval on the aluminum shows the AZ region³⁸⁾

므로 이 면적과 공정변수 간의 상관성을 분석하였다. 그 결과 톨의 회전속도와 접합 시간이 가장 큰 영향인자로 확인되었으며, 이는 곧 입열량을 의미한다. 그의 실험계획에 의한 영역 범위에서의 공정 온도는 370~474 °C 사이로 측정되었으며 회귀분석을 통한 최적조건에서의 접합강도는 2.28 kN으로 확인되었다.

마지막으로 그는 최적 도출된 공정조건에서 보다 강도를 향상시키기 위한 방안으로 알루미늄과 CFRP 사이에 약 100 μ m 두께의 PPS 필름을 삽입재로 넣고 접합을 시도하였다³⁹⁾. 이러한 시도는 앞선 2.2절의 초음파 용접에서 열경화성 CFRP와 금속의 접합을 위해 Balle³¹⁾가 수행한 실험과 유사하다. 실험 결과 삽입재에 따른 접합 강도는 접합 면적과 앵커링 효과의 증대로 인해 기존 대비 최대 55 % (3.07 kN)까지 향상된 결과로 나타났다. 그의 주장에 따르면 이러한 결과는 PPS 필름이 마찰 발열과정 중 계면에서 용융 및 재결정이 일어나며 금속과의 결합력을 증가시키는데 보다 도움을 준다고 하였다. Fig. 17은 삽입재를 사용한 접합 결과를 보여준다. 우선 Fig. 17 (A)는 마찰교반점용접을 이용하여 알루미늄과 CFRP를 접합된 거시적 단면이다. (B)는 소성변형부 끝단(Fig. 16(b)의 PDZ 경계)을 보여주는데 알루미늄 계면의 틈새로 수지가 채워져 있는 것을 확인할 수 있다. (C)는 가장 발열이 많이 발

생하는 접합 중앙부로 탄소섬유가 금속과 강하게 결합되어 있는 것을 확인할 수 있으며, 이러한 결과는 초음파 용접으로 접합된 Fig. 8³¹⁾의 결과와 매우 유사하다. 마지막으로 (D)는 접합부와 멀리 떨어져있는 부분으로 알루미늄과 CFRP 사이에 약 100 μ m 두께의 PPS 필름이 여전히 잔존해 있는 것을 확인할 수 있다.

한편 Pabandi⁴⁰⁾의 경우 변형된 방식의 마찰교반점용접 공정을 응용하여 2 mm 두께의 AA5052와 CFRP를 접합하였다. 그가 제안한 방법은 Threaded Hole Friction Spot Welding(이하 THFSW)로 공정의 개념은 Fig. 18과 같다. 본 공정의 특징은 알루미늄 접합 중앙부에 지름 4 mm 정도의 나사선이 가공된 구멍을 위치시키는 것으로 시작된다. 이후 Fig. 18 (b)와 같이 평평한 톨의 회전으로 마찬가지로 마찰발열을 일으키게 되면 (c) 수지가 유동되기 시작하며 (d) 이것이 나사선 가공된 구멍을 역으로 채워지며 공정이 종료되는 원리이다. 그의 연구에 따르면 이와 같은 일련의 과정을 통해 알루미늄과 CFRP 간에 나사선에 채워진 수지와의 결합력에 더해 기존과 같이 금속과 수지 계면의 서로 다른 두 가지 결합력을 기대할 수 있다고 하였다. 그는 본 연구에서 다른 공정변수들은 고정된 채 톨의 회전속도만 500 ~ 2,000 rpm으로 바꿔가며 접합한 후 외관, 단면 및 강도를 확인하였으며 그 결과는 Fig. 19 및 Fig. 20과 같다.

우선 Fig. 19는 회전속도 변화에 따른 비드 상부 표면을 보여주고 있다. 여기서 회전 톨의 직경은 20 mm를 사용하였다. 비드 상부에 사전 가공된 구멍을 통해 수지가 돌출되며 재응고된 모습을 볼 수 있으며, 표면의 조도는 회전속도의 증가에 따라 보다 양호한 형태를

Fig. 17 Microstructural details of the joint interface: (a) cross-section of an FSJ joint with interlayer; (b) entrapped molten polymer into the crevices of the aluminum surface; (c) embedded carbon fibers by the deformed aluminum (black arrow), and micro-voids indicated by the white arrows; (d) interface of aluminum/interlayer/composite³⁹⁾

Fig. 18 Schematic of the different steps for the THFSW process⁴⁰⁾

Fig. 19 Joint surface appearance at different rotational speeds: (a) 500 rpm, (b) 1,000 rpm, (c) 1,500 rpm and (d) 2,000 rpm⁴⁰⁾

Fig. 20 Stereograph images from cross section of the joint at the rotational speed of: (a) 500 rpm, (b) 1,000 rpm, (c) 1,500 rpm and (d) 2,000 rpm⁴⁰⁾

보인다. Fig. 20은 이들의 단면을 관찰한 결과로서 회전 속도(입열량)에 따라 Fig. 20 (a)의 500 rpm의 경우는 저입열에 따라 언더필 현상을 나타냈으며, (c) 및 (d)의 경우 과도하게 돌출되어 있다. 본 THFSW 공정에서의 결합력은 Fig. 20 (b)를 통해 설명이 가능하다. 사전에 가공된 나사선의 틈새로 용융된 수지가 강하게 결합됨과 동시에 20 mm의 넓은 직경에 걸쳐 알루미늄과 수지 간 본딩 접합이 실현되었다. 이와 같은 강력한 결합은 인장전단강도의 결과로 나타나는데, 본 연구에서는 최대 28 MPa의 강도를 얻었으며 이는 수지강도의 80 %에 육박하는 수준이다.

3. 접합공정 비교

앞서 설명한 금속과 CFRP의 접합공정은 모두 제한

적인 입열 조건에서 접합이 이루어진다. 일반적으로 CFRP의 기지(Matrix)로 사용되는 PA6의 경우 230 ℃ 근방에서 용융이 시작되며, 350 ℃가 넘어가게 되면 열분해가 일어난다. 이에 이상적으로는 350 ℃ 이하에서 접합이 이뤄져야 하나 활성화된 금속 표면과의 접합을 위해서는 그 이상의 온도가 필요하며 2절에서 언급된 모든 공정에서의 접합 시 발생하는 온도는 최대 500 ℃를 넘지 않는다.

이와 같이 제한된 입열을 제어하는 방식은 각 공정별로 차이가 있다. 우선 레이저용접의 경우 ① 레이저 출력, ② 용접속도 그리고 ③ 빔 형상에 따른 에너지밀도를 제어함으로써 입열량을 조절한다. 이 공정은 비접촉식 방법으로 실용화 시 빠른 용접속도와 자동화를 용이하게 구현할 수 있는 장점이 있다. 반면 고가의 레이저 장비와 균일한 가압력을 줄 수 있는 고도의 클램핑 장치기술이 요구되며 또한 공정 조건의 제어도 타 공정에 비해 까다롭다.

다음으로 초음파용접의 경우, ① 초음파 진폭, ② 진동에너지, ③ 접합 유지시간 그리고 마지막으로 ④ 가압력이 주요 공정변수이다. 본 공정의 장점은 금속과 CFRP의 접합공정 중 가장 강력한 접합강도를 나타낸다는 것이다. 또한 빠른 접합속도와 낮은 에너지 소모만으로도 공정의 구현이 가능하다. 그러나 장비의 구성이 비교적 복잡하고 접합 면적 및 형상의 제약이 존재하는 단점이 있다.

마찰교반용접의 입열 제어를 위한 공정변수는 보다 간단하다. 주요 변수로서는 ① 톨의 회전속도, ② 용접속도 그리고 ③ 가압력으로 간단한 제어 변수와 기존의 마찰용접장비를 사용하여 그대로 활용 가능한 장점이 있다. 그러나 본 공정의 최대 단점은 바로 취약한 접합강도 그리고 제한된 접합부 형상에 있다. 뿐만 아니라 앵커링 효과를 증대시키기 위해서는 금속 소재의 표면

Fig. 21 Qualitative analysis of mechanical performance of the currently available techniques for metal composite structure

처리가 필수적이다.

마지막으로 마찰교반점용접의 경우도 마찰교반용접과 공정변수가 거의 유사하다. 그러나 본 공정은 마찰교반용접과 비교하여 매우 우수한 접합강도를 나타낸다. 다만 장비의 가격이 고가이고 구성 또한 비교적 복잡하여 숙련에 어려움이 따를 것으로 예상된다.

Fig. 21은 앞서 소개된 공정을 인장전단강도로 비교한 그래프이며 각 공정별 최대값을 기록하였다. 여기서 본딩 접합강도는 용접공정과 비교하기 위해 별도로 조사 후 삽입하였다⁴⁶⁾. 이들 공정은 점접합과 선접합 또는 면접합으로 이음 형태가 모두 달라 접합 강도만을 절대적으로 비교하기에는 무리가 있으나 Fig. 21을 통해 그 효율성은 충분히 비교가 가능할 것으로 사료된다. Fig. 21을 보면 초음파용접공정이 타 공정에 비해 월등한 효율을 나타내는데, 이는 초음파진동에 의해 금속 표면의 활성화가 타 공정에 비해 낮은 온도에서 시작되어 플라스틱 소재의 열화(Degradation)가 가장 적게 일어났기 때문으로 판단된다. 한편 PPS 필름을 삽입재로 사용한 마찰교반점용접의 접합강도도 초음파용접에 필적한다. 이에 향후 실용 실용화를 위해서는 자동화의 수준, 접합 대상의 사용 환경 및 요구사항 등을 종합적으로 고려하여 공정을 선정할 필요가 있다.

4. 결 론

본고에서는 기존의 용접 공정을 활용한 CFRP와 금속의 접합기술 동향에 대해 최신 발표된 논문들을 중심으로 기술하였으며 이에 따른 결론은 다음과 같다.

1) 금속과 CFRP의 접합에는 매우 제한된 입열만이 요구되므로 기존의 용융용접공정은 적용이 불가하며 레이저용접, 초음파용접, 마찰교반용접 및 마찰교반점용접 공정 등 고상용접 방식이나 전도용접 방식만이 실용화를 위한 연구가 진행되고 있다.

2) 이들의 접합 메커니즘은 용융 플라스틱이 금속 표면의 미세 틈이나 간격으로 침투함으로서 발생하는 앵커링 효과를 기본으로 하며 반데르발스 힘(물리적 결합)과 함께 화학적 결합이 복합적으로 관여하여 고강도의 접합이 이루어지게 된다.

3) 각 공정에 대한 인장전단강도 최대값을 비교한 결과 초음파용접이 54 MPa로 가장 높은 값을 나타냈으며, 마찰교반용접의 경우 금속 소재에 표면처리를 실시하였음에도 불구하고 8.0 MPa 정도밖에 나타나지 않았다.

Acknowledgement

This study was supported by research fund from Chosun University, 2018

ORCID: Yong Kim: <https://orcid.org/0000-0002-7181-5851>

ORCID: HeeSeon Bang: <https://orcid.org/0000-0003-4891-5712>

References

1. Yong Kim and Bo-Young Lee, A Study on the Dissimilar Metal Joining of Aluminum to Steel Using the Arc Heat Source (1), Research Trends and Comparison of the Processes, *Journal of Welding and Joining*, 36(4) (2018), 1-12
<https://doi.org/10.5781/jwj.2018.36.4.1>
2. Ken-ichiro Mori, Niels Bay, Livan Fratini, Fabrizio Micari and A. Erman Tekkaya, Joining by plastic deformation, *CIRP Annals*, 62(2) (2013), 673-694
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.05.004>
3. Yong Kim, Ki-Young Park and Sung-Bok Kwak, Mechanical fastening and joining technologies to using multi mixed materials of car body, *Journal of Welding and Joining*, 33(3) (2015), 12-18
<https://doi.org/10.5781/jwj.2015.33.3.12>
4. Ambroziak A et al., Friction welding of aluminum and aluminum alloys with steel, *Advances in Materials Science and Engineering*, (2014), 1-15
<http://dx.doi.org/10.1155/2014/981653>
5. M. B. Uday et al., Advanced in friction welding process, A review, *Science and Technology of Welding and Joining*, 15 (2010), 534-558
<https://doi.org/10.1179/136217110X12785889550064>
6. Mustafa Acarer and Bilge Demir, An investigation of mechanical and metallurgical properties of explosive welded aluminum-dual phase steel, *Material Letter*, 62(25) (2008), 4148-4160
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.05.060>
7. Takehiko Watanabe, Hideo Sakuyama and Atsushi Yanagisawa, Ultrasonic welding between mild steel sheet and Al-Mg alloy sheet, *Journal of Material Processing Technology*, 209(15) (2009), 5475-5480
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.05.006>
8. R.S. Coelho, A. Kostka, J.F. dos Santos and A. Kaysser-Pyzalla, Friction stir dissimilar welding of aluminum alloy to high strength steels, Mechanical properties and their relation to microstructure, *Materials Science and Engineering A*, 556 (2012), 175-183
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.06.076>
9. Z. Shen, Y. Chen, M. Haghshenas and A.P. Gerlich, Role of welding parameters on interfacial bonding in dissimilar steel/aluminum friction stir welds, *International Journal of Engineering Science and Technology*, 18(2) (2015), 270-277
<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2014.12.008>
10. Hrishikesh Das, Sushovan Basak, Goutam Das and Tapan Kumar Pal, Influence of energy induced from processing parameters on the mechanical properties of friction stir welded lap joint of aluminum to coated steel sheet, *International Journal of Advanced Manu-*

- facturing Technology*, 64(9-12) (2013), 1653-1661
<https://doi.org/10.1007/s00170-012-4130-3>
11. M. Movahedi, A.H. Kokabi, S.M. Seyed Reihani, W.J. Cheng and C.J. Wang, Effect of annealing treatment on joint strength of aluminum/steel friction stir lap weld, *Materials & Design*, 44 (2013), 487-492
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.08.028>
 12. M. Movahedi, A.H. Kokabi, S.M. Seyed Reihani and H. Najafi, Effect of tool travel and rotation speeds on weld zone defects and joint strength of aluminium steel lap joints made by friction stir welding, *Science Technology of Welding & Joining*, 17(2) (2012), 162-167
<https://doi.org/10.1179/1362171811y.0000000092>
 13. M. J. Torkamany, S. Tahamtan and J. Sabbaghzadeh, Dissimilar welding of carbon steel to 5754 aluminum alloy by Nd:YAG pulsed laser, *Materials & Design*, 31(1) (2010) 458-465
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.05.046>
 14. S. Meco, G. Pardal, S. Ganguly, R. M. Miranda, L. Qui- ntino and S. Williams, Overlap conduction laser welding of aluminium to steel, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(1-4) (2013), 647-654
<https://doi.org/10.1007/s00170-012-4512-6>
 15. Rattana Borrisutthekul, Taisei Yachi, Yukio Miyashita and Yoshiharu Mutoh, Suppression of intermetallic reaction layer formation by controlling heat flow in dissimilar joining of steel and aluminum alloy, *Material Science Engineering A*, 467(1-2) (2007), 108-113
<https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.03.049>
 16. Hui-Chi Chen, Andrew J. Pinkerton, Lin Li, Zhu Liu and Anil T. Mistry, Gap-free fiber laser welding of Zn coated steel on Al alloy for light weight automotive applications, *Materials & Design*, 32(2) (2011), 495-504
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.08.034>
 17. Junjie Ma, Fanrong Kong, Blair Carlson and Radovan Kovacevic, Two-pass laser welding of galvanized high strength dual-phase steel for a zero-gap lap joint configuration, *Journal of Material Processing Technology*, 213(3) (2012), 495-507
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.10.019>
 18. G. Sierra, P. Peyre, F. Deschaux Beaume, D. Stuart and G. Fras, Galvanized steel to aluminum joining by laser and GTAW processes, *Material Characterization*, 59(12) (2008), 1705-1715
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2008.03.016>
 19. Kenji Miyamoto, Shigeyuki Nakagawa, Chika Sugi, Hiroshi Sakurai and Akio Hirose, Dissimilar joining of aluminum alloy and steel by resistance spot welding, *International Journal of Materials and Manufacturing*, 2(1) (2009), 58-67
<https://doi.org/10.4271/2009-01-0034>
 20. H.T. Zhang, J.C. Feng, P. He and H. Hackl, Interfacial microstructure and mechanical properties of aluminum zinc coated steel joints made by a modified metal inert gas welding - brazing process, *Material Characterization*, 58(7) (2007), 588-592
<https://doi.org/10.1016/j.matchar.2006.07.008>
 21. Yong Kim and Bo-Young Lee, A Study on the Dissimilar Metal Joining of Aluminum to Steel Using the Arc Heat Source (II): Mechanism of Dissimilar Metal Joining, *Journal of Welding and Joining*, 36(4) (2018), 13-22
<https://doi.org/10.5781/jwj.2018.36.4.2>
 22. Paul Kah, Raimo Suoranta, Jukka Martikainen and Carl Magnus, Techniques for joining dissimilar materials: Metals and polymers, *Reviews on Advanced Materials Science*, 36 (2014), 152-164
 23. 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/j.compositesa.2017.06.007>
 24. Seiji Katayama and Yousuke Kawahito, Laser direct joining of metal and plastic, *Scripta Materialia*, 59(12) (2008), 1247-1250
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.08.026>
 25. Seiji Katayama, Yousuke Kawahito and Masami Mizutani, Latest Progress in Performance and Understanding of Laser Welding, *Physics Procedia*, 39 (2012), 8-16
<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.008>
 26. K.W. Jung, Y. Kawahito, M. Takahashi and S. Katayama, Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to zinc-coated steel, *Materials & Design*, 47 (2013), 179-188
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.015>
 27. Xianghu Tan, Jing Zhang, Jiguo Shan, Shanglu Yang and Jialie Ren, Characteristics and formation mechanism of porosities in CFRP during laser joining of CFRP and steel, *Composites Part B: Engineering*, 70 (2015), 35-43
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.023>
 28. Xianghu TAN, Jiguo SHAN and Jialie REN, Effect of Cr plating layer on shear strength and interface bonding characteristics of mild steel/CFRP joint by laser heating, *Acta Metallurgica Sinica*, 49(6) (2013), 751-756
<https://doi.org/10.3724/sp.j.1037.2013.00045>
 29. Frank Balle, Guntram Wagner and Dietmar Eifler, Ultrasonic Metal Welding of Aluminium Sheets to Carbon Fibre Reinforced Thermoplastic Composites, *Advanced Engineering Materials*, 11(1) (2009), 35-39
<https://doi.org/10.1002/adem.200800271>
 30. Frank Balle, Stefan Huxhold, Guntram Wagner and Dietmar Eifler, Damage Monitoring of Ultrasonically Welded Aluminum / CFRP-Joints by Electrical Resistance Measurements, *Procedia Engineering*, 10 (2011), 433-438
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.074>
 31. Francesca Lionetto, Frank Balle and Alfonso Maffezzoli, Hybrid ultrasonic spot welding of aluminum to carbon fiber reinforced epoxy composites, *Journal of Materials Processing Technology*, 247 (2017), 289-295

- <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.002>
32. Francesca Lionetto, Claudio Mele, Paola Leo, Sonia D'Ostuni, Frank Balle and Alfonso Maffezzoli, Ultrasonic spot welding of carbon fiber reinforced epoxy composites to aluminum: mechanical and electrochemical characterization, *Composites Part B: Engineering*, 144 (2018), 134-142
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.026>
 33. F.X. Wirth, M.F. Zaeh, M. Krutzlinger and J. Silvanus, Analysis of the Bonding Behavior and Joining Mechanism during Friction Press Joining of Aluminum Alloys with Thermoplastics, *Procedia CIRP*, 18 (2014), 215-220
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.134>
 34. F.C. Liu, J. Liao and K. Nakata, Joining of metal to plastic using friction lap welding, *Materials & Design*, 54 (2014), 236-244
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.056>
 35. Kimiaki Nagatsuka, Shoichiro Yoshida, Atsuki Tsuchiya and Kazuhiro Nakata, Direct joining of carbon-fiber-reinforced plastic to an aluminum alloy using friction lap joining, *Composites Part B: Engineering*, 73 (2015), 82-88
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.12.029>
 36. K. Tanaka, T. Teramura, T. Katayama and K. Nishiguchi, Friction stir spot welding of CFRP and aluminum alloy with thermoplastic adhesive, *2nd International Conference on High Performance and Optimum Design of Structures and Materials* (HPSM 2016)
<https://doi.org/10.2495/hpsm160371>
 37. S.M. Goushegir, J.F. dos Santos and S.T. Amancio-Filho, Friction Spot Joining of aluminum AA2024/carbon-fiber reinforced poly(phenylene sulfide) composite single lap joints: Microstructure and mechanical performance, *Materials & Design*, 54 (2014), 196-206
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.08.034>
 38. S.M. Goushegir, J.F. dos Santos and S.T. Amancio-Filho, Influence of process parameters on mechanical performance and bonding area of AA2024/carbon-fiber-reinforced poly(phenylene sulfide) friction spot single lap joints, *Materials & Design*, 83 (2015), 431-442
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.044>
 39. Natália M. André, Seyed M. Goushegir, Jorge F. dos Santos, Leonardo B. Canto, and Sergio T. Amancio-Filho, Friction Spot Joining of aluminum alloy 2024-T3 and carbon-fiber-reinforced poly(phenylene sulfide) laminate with additional PPS film interlayer, Microstructure, mechanical strength and failure mechanisms, *Composites Part B: Engineering*, 94 (2016), 197-208
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.03.011>
 40. Hossein Karami Pabandi, Mojtaba Movahedi and Amir Hossein Kokabi, A new refill friction spot welding process for aluminum/polymer composite hybrid structures, *Composite Structures*, 174 (2017), 59-69
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.04.053>
 41. Youngsik Kim and Sangcheol Kil, Latest Joining Technology of Metal and Plastic, *Journal of Welding and Joining*, 34(3) (2016), 31-39
<https://doi.org/10.5781/jwj.2016.34.3.31>
 42. Jin Young Yoon, Sanghoon Kang, Sehun Rhee and Cheolhee Kim, Review of Keyhole Refilling Technology in Friction Stir Welding, *Journal of Welding and Joining*, 36(4) (2018), 58-62
<https://doi.org/10.5781/jwj.2018.36.4.6>
 43. Hideki Okada, Kenichi Kamimuki, Syuhei Yoshikawa, and Shintaro Fukada, Refill Friction Spot Joining for Aerospace Application, *SAE Technical Paper Series*, (2015)
<https://doi.org/10.4271/2015-01-2614>
 44. Honggang Dong, Su Chen, Yang Song, Xin Guo, Xiaosheng Zhang and Zhiyang Sun, Refilled friction stir spot welding of aluminum alloy to galvanized steel sheets, *Materials & Design*, 94 (2016), 457-466
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.066>
 45. <https://www.compositesworld.com>
 46. Walter Brockmann, Durability of Adhesion Between Metals and Polymers, *Journal of Adhesion*, 29 (1989), 53-61
<https://doi.org/10.1080/00218468908026477>