

# 금속과 플라스틱의 최신접합기술

김 영 식<sup>\*,†</sup> · 길 상 철<sup>\*</sup>

\*한국과학기술정보연구원 ReSEAT Program

\*\*한국과학기술정보연구원

## Latest Joining Technology of Metal and Plastic

Youngsik Kim<sup>\*,†</sup> and Sangcheol Kil<sup>\*\*</sup>

\*KISTI ReSEAT Program, Daejeon 34141, Korea

\*\*KISTI, Daejeon 34141, Korea

†Corresponding author : yskim@kmou.ac.kr

(Received November 20, 2015 ; Revised December 4, 2015 ; Accepted January 12, 2016)

### Abstract

The joining technology of the metal and engineering plastic is rising lately as the important issue in concerning with the method of reducing the weight and air pollution of the transportation structure such as automotive and vehicles. The metal/ plastic joining technology has been developed in 2 types of adhesively bonding and direct joining without adhesives. Moreover, in the direct joining method, there are 2 kinds of mechanical joining and welding. This review paper presents the present world wide status and tendency of the development of metal/plastic joining technology. This article intends to offer the materials for development and raising of the domestic metal/plastic joining technology.

Key Words : Joining technology, Metal, Plastic, Adhesive bonding, Direct joining, LAMP, SPR, FSSJ

## 1. 서 론

최근 들어 금속재료와 플라스틱과의 접착 또는 접합 기술은 엔지니어링 플라스틱이나 GFRP, CFRP와 같은 복합재료와 금속재료와의 복합화 수단으로 이용되어 자동차, 항공기, 철도차량, 기계구조물 및 전자기기 등 다양한 구조물의 경량화나 콤팩트화에 큰 공헌을 하고 있다. 국내의 자동차, 철도차량, 전자기기산업의 국제경쟁력 강화를 위해서는 금속과 플라스틱의 접착, 접합기술의 선진화가 필수적이다. 본 해설에서는 금속과 엔지니어링 플라스틱, CFRP 또는 GFRP의 접합을 위한 접착제의 개발 현황, 접착제를 사용하지 않고 직접 접합하는 접합기술 개발현황 및 접합강도향상을 위한 표면처리기술 개발에 관한 세계적인 연구 동향을 분석하여 국내의 금속/플라스틱 접합기술 향상에 필요한 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 접착제에 의한 접착접합기술

### 2.1 접착접합의 특징과 접착기구

금속과 플라스틱의 접착 시 대상이 되는 금속은 철강 재료, Al과 그 합금, Mg과 그 합금, Cu 및 그 합금, 내열 합금, 금속도금 표면 등이다. 플라스틱 재료로서는 폴리프로피렌(polypropylene), 폴리아미드(polyamides : 나일론), 및 복합재료 (GFRP나 CFRP)이다.

접착법은 ① 이종재료의 접합이 가능하고, ② 접합온도가 상온 또는 저온이기 때문에 열에 의한 접합부의 변질이 일어나지 않고, ③ 면접합이기 때문에 접합부의 높은 강성이 얻어지며, ④ 접합부의 기밀성이 확보되는 등의 장점을 갖는다.

접착의 원리에 대한 많은 이론적 접근이 시도되었으나 아직 이에 대한 완전한 이론이 밝혀지지 않았다. 현재까지 제시된 접착이론으로 기계적 고착(mechanical interlock), 흡착(adsorption), 확산, 정전기력(electrostatic

force) 등을 들 수 있다. 일반적으로 접착은 이들 몇 가지 이론이 혼합되어 발생하는 것으로 추정되고 있다.

### 2.2 구조접착제의 적용규격과 접착제의 종류

일체구조용으로써 사용될 수 있는 접착제는 반드시 사용성능 규격을 만족하는 특성을 갖추어야 한다. 접착제의 성능을 평가하는 규격으로써 가장 많이 인용되고 있는 규격으로는 미국연방규격 FS-MMM-A-132B가 있다. 이 규격은 항공기와 같이 고성능이며, 높은 내구성을 요구하는 부재의 접합에 이용하는 접착제를 평가하는 규격이며, 이를 Table 1에 나타내었다.

이 표에서 알 수 있는 것은 접착제에 의한 접착접합부의 최대내열 온도는 260°C 내외이며, 최저온도는 -55°C 내외가 된다는 것이다. 또한 시험을 위해 응력을 가하는 방식은 인장전단 및 T박리의 방향이 기준으로 되어 있다. 접착제으로써 표준형인 Type 1, Class 1에 있어서는 전단강도와 박리강도의 균형이 잡혀져 있으며, 내열성에 의해 Type II, Type III, Type IV의 클래스가 있고, Type IV는 내열 내구성에 탁월한 특성을 지닌다는 것을 알 수 있다.

종래의 구조용 접착제의 조성을 정리하면 열경화성 수지와 엘라스토머(Elastomer)로 된 복합형의 접착제가 주류를 이룬다. 열경화성 수지로는 에폭시 수지나 페놀수지가 사용되고 있으며, 일반적으로 전단응력에

강하고 박리응력이 약하다. 반대로 엘라스토머는 박리응력에 강하고, 전단응력에 약하다. 엘라스토머로서는 폴리아미드(나일론), 폴리설파이드, 실리콘, 니트릴 고무 등이 사용되고 있다.

### 2.3 피접착재의 표면처리 방법

접착제접합은 금속표면이나 플라스틱 표면의 적절한 표면처리를 통해 구조강도에도 필적한 접착강도를 발휘할 수 있다. 접합강도를 증가시키려면 모재의 표면 상태와 모재의 종류에 따른 접착부위의 설계가 중요하다. 접착제와 모재 표면사이의 젖음 현상은 접착강도에 큰 영향을 미치며 젖음성을 증가시키기 위해서는 모재의 표면 에너지를 증가시키거나 접착제의 표면장력을 감소시켜야 한다.

일반적인 플라스틱의 표면처리 공정은 이하와 같은 4개의 공정으로 되어 있다. ① 세정(물이나 유기용매로 부착되어 있는 이물이나 기름을 제거한다), ② 연마(연마지나 샌드블라스트에 의해 세정으로 제거되지 않은 산화막 등을 기계적으로 제거한다), ③ 약액처리 (산, 알칼리, 산화제 등에 의해 표면의 이물을 제거함과 동시에 표면의 친화성을 높인다), ④ 프라이머처리 (접착제의 표면 친화성을 높이는 프라이머를 도포한다).

한편, 금속재료의 표면처리방법은 강은 비교적 접착이 쉬운 재료로 세정, 연마에 의해 표면의 녹 등을 제

Table 1 Federal spec. FS MMM-A-132B<sup>1)</sup>

Test item	Test cond.	Type 1			Type II	Type III	Type IV
		Class 1	Class 2	Class 3			
Shearing strength (MPa)	24±2.8°C	37.73	24.01	20.58	18.82	18.82	18.82
	82±2.8°C, 10 min.	18.82	13.72	13.72	-	-	-
	149±2.8°C, 10 min.	-	-	-	15.44	13.72	13.72
	149±2.8°C, 192 hr.	-	-	-	15.44	13.72	13.72
	260±2.8°C, 10 min.	-	-	-	-	12.69	12.69
	260±2.8°C, 192 hr.	-	-	-	-	-	6.86
	-55±2.8°C, 10 min.	37.73	24.01	20.58	18.82	18.82	18.82
	24±2.8°C (95%RH 30 days after)	30.87	22.34	18.82	18.82	17.15	17.15
24±2.8°C, JP-4 7days	30.87	22.34	18.82	18.82	17.15	17.15	
T Peel off strength (KN/m)	24±2.8°C	8.8	3.5	-	-	-	=
Blister test (MPa)	24±2.8°C	30.87	22.34	-	-	-	-
Fatigue strength(MPa)	24±2.8°C	5.12 MPa, 10 <sup>4</sup> Cycles					
Creep strength	24±2.8°C, 10.98MPa	After 192hr creep def. 0.381mm					
	82±2.8°C, 5.49MPa	After 192hr creep def. 0.381mm			-	-	-
	149±2.8°C, 5.49MPa	-	-	-	After 192hr creep def. 0.381mm		
	260±2.8°C, 5.49MPa	-	-	-	-	-	-

거한 후 접착에 들어간다. 스테인리스강은 표면이 일반 강판에 비해 불활성이기 때문에 강에 비해 접착이 어려운 재료이다. 수산에 의한 약액처리 후 표면에 형성된 흑색의 피막을 샌드블라스트 등에 의해 제거한 후에 접착에 들어가는 것이 권장되고 있다. AI합금은 여러 가지 방법이 있으나 현재는 인산용액 중에서의 양극 산화법이 항공기 산업에서 채용되고 있으며, 가장 고강도가 얻어지는 표면처리법으로 되어 있다.

### 3. 금속과 플라스틱의 직접접합 기술

#### 3.1 금속과 플라스틱의 레이저 용접

금속과 플라스틱의 레이저 직접접합은 일본 오사카대학 접합연구소에서 개발되어 LAMP(Laser-Assisted Metal and Plastic) 접합법으로 명명되어 있다. 레이저는 보통 파장 0.8~1μm 정도의 반도체 레이저(LD)나 1.03~1.09μm의 YAG 레이저, 파이버 레이저, 디스크 레이저 등이 사용되며, 플라스틱의 종류나 조사방법에 따라서는 파장 10.64μm의 CO2 레이저도 이용된다. 플라스틱은 열가소성의 PET, PA, PC 등의 엔지니어링 플라스틱으로 고강도의 접합부를 제작할 수 있음이 확인되었다<sup>2)</sup>.

Fig. 1은 라인 형상의 레이저 빔을 이용하여 금속과 플라스틱 접합법의 개요를 보인 것이다. 레이저 접합법은 플라스틱판과 금속판을 겹쳐서 고정시킨 후 플라스틱 측이나 금속 측에서 연속 또는 펄스레이저나 2레이저 빔을 조사하여 금속에 접촉한 접침 계면부의 플라스틱을 용융시켜 그 용융부에 작은 기포를 발생시켜서 용착 접합하는 방법이다.

실험결과에 의하면 알루미늄합금과 플라스틱의 직접접합에서 레이저조사는 알루미늄합금 측에서 하는 것이 높은 접합강도를 얻을 수 있음이 밝혀졌다<sup>2)</sup>. 따라서 알루미늄, 마그네슘, 동 등과 같은 고반사율의 금속에서

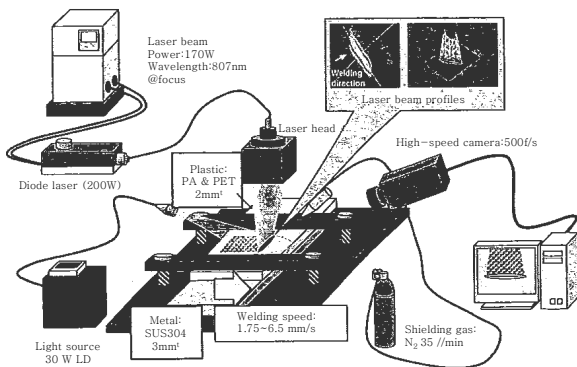


Fig. 1 Schematic of LAMP joining method<sup>2)</sup>

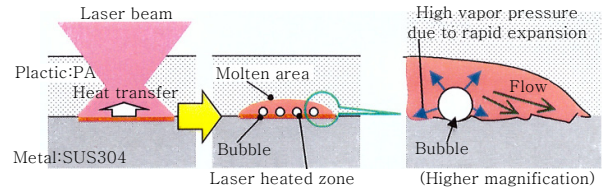


Fig. 2 Plastic flow induced by bubble formation in LAMP procedure<sup>3)</sup>

는 레이저를 금속 측에서 조사하는 것이 추천된다. 레이저 빔 폭을 선(Line)상으로 더욱 넓게 함으로서 폭이 넓은 LAMP접합부를 제작할 수 있고, 플라스틱 소재가 항복하여 연신이 일어나는 고강도의 접합부가 얻어질 수 있다.

레이저에 의한 금속과 플라스틱의 접합 기구는 계면의 플라스틱 측에서 기포가 발생하여, 이의 급속한 팽창에 동반한 고압이 용융플라스틱을 금속표면의 미세 틈이나 간격으로 밀어 넣음으로써 생기는 앵커링(Anchoring)효과(기계적 접합), 고온의 활성 플라스틱 용액이 활성화한 금속 측의 산화피막 표면에 밀착하여 생기는 Van Der Waals힘(물리적접합), 그리고 화학결합이 관여하여 고강도의 접합이 이루어지는 것으로 해석된다. Fig. 2는 레이저 빔에 의한 플라스틱 내의 기포발생과 금속 표면 돌기부로의 플라스틱 압입 모델을 표시한 것이다<sup>3)</sup>

금속과 플라스틱 접합부의 내구성을 확보하기 위해서는 유연성을 갖는 엘라스토머 시트를 양 재료 사이에 삽입하여 열 접합 시 또는 접합 후의 온도 변화에 따라 접합계면에 발생하는 응력을 완화시킨다.

접합재 사이에 엘라스토머 시트를 삽입하여 {폴리프로피렌 (PP) 플라스틱/엘라스토머 시트(t=100μm)/STS 금속}의 배열 구조로 하여, PP측에서 레이저 조사를 시행하여 실험한 결과 최대 11MPa 정도의 전단강도가 얻어졌다<sup>4)</sup>. 이로써 유연한 엘라스토머 시트를 삽입함으로써 접합재 사이의 물리적 특성의 차이를 완화, 해소 시킴으로써 접합계면에서 발생하는 응력을 완화하여 내구성과 강도를 갖는 접합부가 얻어짐이 밝혀졌다.

접착이나 기계적 체결법에서는 생산성이 열악하다는 것이 큰 문제였으나, 엘라스토머를 이용한 레이저 접합 방법은 레이저에 의해 순간적인 접합이 가능하고 생산성의 비약적인 향상이 실현되었다.

### 3.2 금속과 플라스틱의 기계적 접합법

#### 3.2.1 SPR (Self Piercing Riveting)법

이 방법은 종래부터 이종금속 재료 등의 접합에 이용

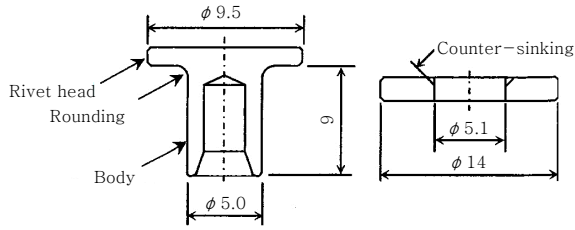


Fig. 3 SPR body & supporting plate shape<sup>5)</sup>

되는 자가천공 리벳 방법인 SPR(Self-piercing rivet) 방법을 이용한 것으로 SPR 공정의 리벳천공 과정에서 플라스틱부분의 박리손상이 발생치 않도록 개량한 방법이다.

Fig. 3은 CFRP의 접합용으로 개발된 SPR의 본체와 CFRP의 박리 손상을 방지하기 위한 받침금속을 나타낸 것이다<sup>5)</sup>. 사전에 구멍을 가공하지 않고, 리벳을 CFRP에 직접 박아 넣을 경우에는 금속과 달리 CFRP의 경우, 구멍 주위에서 박리손상이 일어나 접합 시 문제가 된다. 이를 방지하기 위해 피접합체인 CFRP 표면에 받침금속을 대고 면압을 사전에 가한 상태에서 리벳을 박아 넣도록 설계되어 있다.

### 3.2.2 마찰교반용접 (FSW : Friction Stir Welding)

FSW를 이용한 금속과 플라스틱 접합은 주로 겹치기 접합에 이용되며, 열가소성 플라스틱이나 열가소성 플라스틱 기지의 CFRP 및 GFRP와 Al합금과의 접합에 관한 연구개발이 많이 이루어지고 있다. Fig. 4는 Friction Press Joining 공정을 보인 것이다<sup>6)</sup>.

FSW의 개량형으로 FSSJ (Friction Stir Spot Joining)방법<sup>7)</sup>과 FSBR (Friction Stir Blind Riveting)법이 개발되어 있다. 그 중에서 FSBR의 공정을 Fig. 5에 보인다<sup>8)</sup>. 여기서 (a)는 회전 블라인드 리벳이 공작물에 접근하는 공정이며, (b)는 블라인드 리벳이 목적하는 위치까지 도달한 상태, (c)는 리벳 지지구인 맨드렐(mandrel)이 위로 올라가면서 리벳에 인장응력을 가하는 상태, (d)는 인장응력에 의해 맨드렐

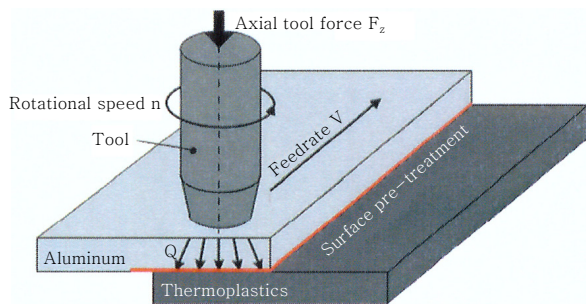


Fig. 4 Friction press joining procedure

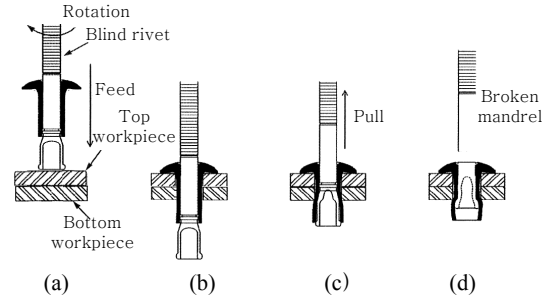


Fig. 5 FSBR(Friction Stir Blind Riveting) procedure<sup>8)</sup>

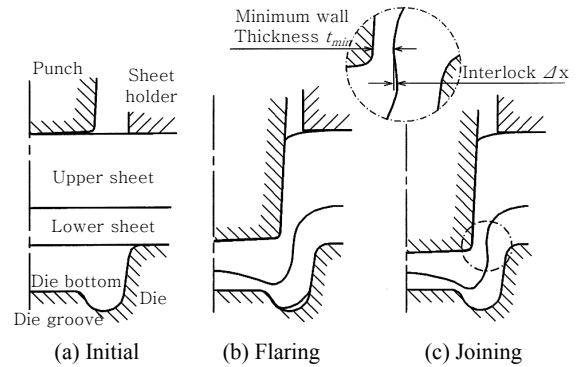


Fig. 6 Mechanical clinching procedure<sup>9)</sup>

의 노치부가 파괴되어 리벳이 분리되어 접합이 완료되는 공정을 보인 것이다.

### 3.2.3 메카니컬 클린칭 (Mechanical clinching)

메카니컬 클린칭 공정에 의한 이종소재 접합 연구가 발표되어 있다<sup>9)</sup>. Fig. 6은 이 공정을 보인 것이다. 윗판과 아래판으로 겹쳐진 피접합 판재는 펀치에 의해 아래판의 밑 방향으로 확장되어 다이(Die)의 밑부분에 접촉하면서 반경방향으로 확장된다. 확장된 판재는 다이의 측벽과 접촉하여 인터록킹(interlocking)을 형성하여 접합이 완료된다.

## 4. 금속과 플라스틱 접합기술 연구의 세계적 동향

### 4.1 학술정보 분석

학술정보 분석은 Web of Science(SCI-EXPANDED)를 이용하여 단계별 검색식으로 2005년부터 2015년까지 10년간에 걸쳐 금속과 플라스틱 접합 연구에 관한 논문들을 검색하였다. 검색결과 532편의 논문이 검색되었으며, 그 중 관련도가 떨어지는 논문을 제외한 252편을 분석대상으로 하였다. Fig. 7은 이들 논문의 연도별 발표건수를 나타낸 것이다.

Fig. 7에 의하면 금속과 플라스틱 접합에 관한 논문

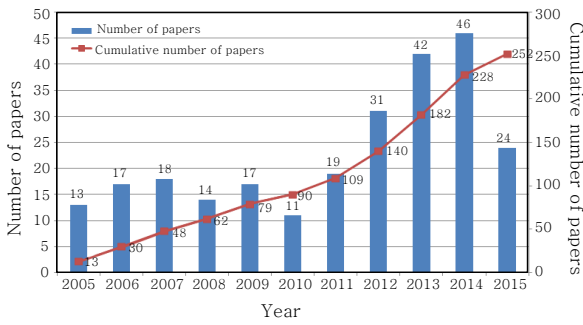


Fig. 7 Number of research papers with years

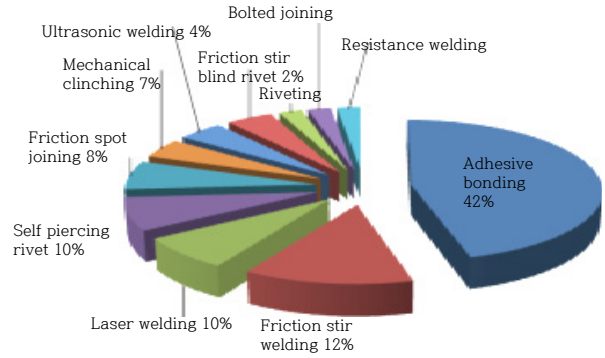


Fig. 9 Distribution of metal/plastic joining process

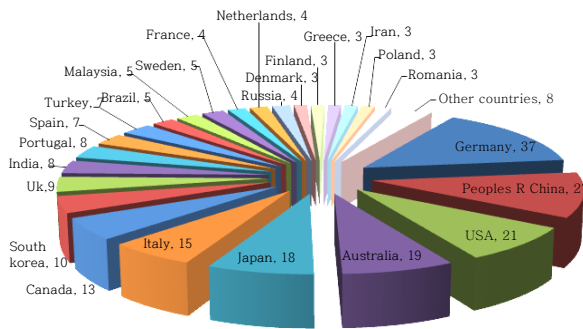


Fig. 8 Cumulative papers in each nation

이 2011년까지는 20건 미만으로 발표되었으나, 2012년부터 급격히 증가하여 2012년 32건, 2013년 42건, 2014년에는 46건의 논문이 발표되고 있음을 보이고 있다. 이것은 자동차, 선박, 항공기 등 각종 구조체의 경량화 요구가 최근 2~3년 사이에 더욱 커지면서 경량소재인 CFRP나 GFRP 또는 엔지니어링 플라스틱과 금속과의 복합화 수단의 필요성이 더욱 커지게 되었기 때문인 것으로 판단된다.

누적 발표 건수를 국가별로 분석하면 Fig. 8과 같이 나타난다. 독일에서 가장 많은 논문이 발표되고 있으며, 그 다음이 중국이며, 이어서 미국, 호주, 일본, 이태리, 캐나다, 한국 순으로 논문 발표건수가 이어지고 있다. 여기서 특히 신흥 공업국가로 발전하고 있는 중국의 최신 용접기술에 관한 높은 관심을 엿볼 수 있다.

발표논문의 접합공정별 분포를 살펴보면 Fig. 9와 같이 나타났다. 종래부터 이용되어 왔던 접착접합(Adhesive bonding)에 관한 연구가 전체의 42%를 차지하고, 마찰교반 용접과 마찰교반 점용접의 합계가 20%를 차지하고 있다. 다음이 레이저 용접과 기계적 접합인 SPR(Self Piercing Riveting)법이 각각 10%, 메카니컬 클린칭법이 7%, 그 다음이 마찰 블라인드 리벳(Friction blind rivet)을 포함한 리벳접합 순으로 나타나 있다.

## 4.2 접합기술의 공정별 최근의 연구개발 동향

### 4.2.1 접착 접합공정 연구

강과 CFRP의 접착제를 사용한 접합부에 대한 각종 환경에서의 내구성 시험연구가 수행되었다<sup>10)</sup>. 이 때 사용된 접착제의 유리전이온도(Tg)에 가까운 승온 분위기에서는 80%, 해수에서 1년 정도 유지할 경우 20% 이상의 강도 감소가 나타났다. 또한 하중을 가하지 않은 상태에서 20~50℃의 온도 사이클릭에서는 변화가 없었다고 보고되어 있다. 하중, 승온, 습도가 복합된 환경에서 가장 치명적이며, 자외선 조사환경에서도 접착강도의 열화 현상이 일어남을 밝혔다.

금속과 CFRP의 접착접합을 균열의 보수목적으로 이용한 예가 다수 발표되어 있다<sup>11)</sup>. Al 2014-T6 판재의 균열부에 접착제를 이용하여 CFRP의 패치를 부착하여 피로수명을 연장할 수 있으며, 판의 한쪽 패치보다는 판의 양쪽에 접착제로 CFRP패치를 부착했을 때 피로수명이 2배로 된다는 결과를 발표하였다. 또한 강재의 피로균열 보수목적으로 CFRP에 의한 접착 패치를 설치할 경우 균열진전이 매우 느린 거동이 나타났다<sup>12)</sup>.

### 4.2.2 마찰교반 접합(FSW)공정 연구

Al합금인 AA6111과 열가소성 플라스틱(Polyphenylene sulfide)과의 FSW 접치기 용접이 수행되어 FSW 공구에 의해 형성된 Al 판재 표면의 절삭 홈 속으로 용융된 열가소성 플라스틱이 용입되어 앵커링(Anchoring) 효과로 접합이 이루어지는 현상을 밝힌 연구결과가 발표되어 있다<sup>13)</sup>. 이 공정은 표면 처리가 필요 없이 FSW공정의 최적조건으로 적정접합강도를 얻을 수 있다. 폴리 에틸렌 판재의 FSW 시 용접조건이 접합부의 크리프특성에 미치는 영향에 대한 논문이 발표되어 있다<sup>14)</sup>. 7075 Al합금 판재와 폴리카보네이트 판재를 FSW 접치기 용접으로 성공적인 접합부가 얻어졌고, Al합금의 전위가 폴리카보네이트 판 측에서 관찰되어 이것으로 접합강도

가 유지된다고 보고하고 있다<sup>5)</sup>. AZ31B Mg합금과 MC Nylon 6 플라스틱을 FSW법인 FLW (Friction Lap Welding)법으로 접합 시 접합공정에서 플라스틱 내에 발생하는 기포를 줄이는 조건이 도출되었다<sup>16)</sup>. 용접속도, 톨의 회전속도, 톨의 압입깊이를 제어함으로써 기포를 줄이고, 접합강도를 향상시키는 방법을 제시하고 있다. A6181-T4 Al합금과 CFRP의 겹치기 접합에 FSJ(Friction Spot Joining)법에 의한 접합 실험연구가 수행되어<sup>17)</sup> 톨의 회전속도, 압입깊이, 접합시간, 압입압력 등의 접합조건이 접합부의 미세조직과 접합강도에 미치는 영향에 관한 결과가 발표되어 최적의 조건이 도출되었다.

#### 4.2.3 레이저 용접접합 연구

레이저 빔에 의한 금속과 CFRP와의 접합 예가 발표되어 있다<sup>18)</sup>. PA6 기지인 CFRP판(두께 3mm, 폭 20mm)을 아래판으로 하고, 알루미늄합금 A5052(두께 1mm, 폭 30mm)를 윗판으로 한 겹치기 이음부에 반도체 레이저 빔을 윗판인 알루미늄합금 판에 조사하여 직접 접합한 결과, 파단 하중이 2,300~3,000N으로 충분히 높은 인장전단 강도 값이 얻어졌다.

플라스틱/금속의 레이저 접합 시 2단계 레이저 공정으로 장기간 안정적인 접합강도를 유지하는 공정이 소개되었다<sup>19)</sup>. 이 공정에서 첫 단계는 레이저에 의해 접합 금속에 미세 언더컷 그루브를 만드는 공정이고, 두 번째 공정은 미세 언더컷 그루브를 갖는 금속과 플라스틱을 겹치기 한 후, 플라스틱 부분에 레이저를 조사하여 플라스틱을 용융하여 외부 클램핑(clamping) 압력으로 금속표면의 그루브로 확산시키는 공정이다. AZ 91D Mg 합금과 PET 플라스틱과의 레이저 접합연구가 수행되어 PET보다 높은 접합 강도가 얻어졌다<sup>19)</sup>. 이 연구에서는 레이저 조사로 인한 접합계면에서의 기포형성 기구를 해명하고, Mg 합금 표면에 미리 핏트(pits)를 가공하여 플라스틱 쪽에서의 레이저 조사로 접합강도가 더욱 개선되었음을 보고하였다.

#### 4.2.4 SPR (Self Piercing Rivet)접합 연구

SPR 방법에 의해 Al합금과 열 가소성 플라스틱인 PA6 및 PA6기지 복합재료인 GFRP와 CFRP 소재와의 접합부의 특성을 조사한 결과가 발표되어 있다<sup>21)</sup>. 이 연구에서는 5754 Al합금 판재와 PA6 기지 GFRP의 SPR 접합부는 PA 기지 접합부보다 강도가 향상하지만, CFRP와의 접합부는 인장전단강도가 약간 저하하고, 접합부에서의 연성은 CFRP의 취성 때문에 현저한

저하가 일어난다는 결과를 발표하고 있다. Al합금 EN AW-6060-T6재와 CFRP의 SPR 접합부에 대한 다중 부식사이클 시험을 통한 부식거동을 조사하여 접합계면의 Al 측의 3단계 피팅 부식 거동을 밝혀냈다<sup>22)</sup>. 블라인드 리벳(Blind Rivet 이하 BR)법과 SPR(Self piercing rivet)법에 의해 제작된 CFRP/강재 접합부에 대한 열 부하 시험을 실시하여 리벳 주변의 손상 전과거동을 분석한 결과가 발표되어 있다<sup>23)</sup>. BR의 경우에는 균열 형상의 최초 손상이 열 부하로 인해 원형상으로 퍼져가는데 비해 SPR의 경우에는 SPR 공정에서 유겨된 넓은 최초 손상이 타원상으로 전파되어 가는 현상을 밝혔다.

#### 4.2.5 FSR (Friction Stir Rivet), FSBR (Friction Stir Blind Rivet) 접합 연구

Ti합금과 CFRP와의 접합방법으로 마찰교반 리벳(Friction rivet) 방법에 의한 접합연구가 수행되어 높은 회전속도, 마찰시간, 압입압력에서 리벳 접합부의 높은 인장강도를 기대할 수 있음이 발표되어 있다<sup>24)</sup>.

FSBR(Friction Stir Blind Riveting) 방법으로 AA6111 Al합금과 CFRP의 겹치기 접합 시 회전속도와 이송속도와 같은 접합조건이 접합부의 전단인장강도에 미치는 영향에 관한 연구가 수행되어 적정조건이 밝혀지고, 2개의 이종소재의 적층방법에 따라 전단강도상의 차이가 나타남이 밝혀졌다<sup>25)</sup>.

#### 4.2.6 메카니컬 클린칭(Mechanical clinching)접합 연구

클린칭(Clinching)방법에 의해 열가소성기지 복합재료와 금속의 접합이 시도되어 적절한 클린칭 조건에서 바람직한 접합결과가 도출되었다<sup>26,27)</sup>. 또한 Lee, CJ 등은 홀 클린칭(Hole clinching) 방법으로 Al과 고강도 강 또는 CFRP와의 접합을 시도하여 연성 재료인 Al을 윗판으로, 취성재료인 고강도강 또는 CFRP를 아래판으로 하여 2.5 KN 이상의 전단강도를 얻을 수 있어 실용화가 가능함을 보고하였다<sup>28)</sup>.

#### 4.2.7 접착과 기계적접합의 혼합공정에 의한 접합 연구

기계적 접합과 접착제를 혼합한 금속과 플라스틱의 접합부에 대한 강도 해석연구가 수행되었으며<sup>29)</sup>, 접착 접합과 리벳접합을 복합하여 얻은 Al/CFRP의 2중 겹침 이음부는 정적강도와 피로강도 양쪽이 탁월하며, 아울러 리벳팅 공정에서 CFRP의 층상 분리로 접합부의 손상이 일어난다는 수치적, 실험적 연구결과가 발표되어 있다<sup>30)</sup>.

4.2.8 열간 프레스접합 연구

AI판재와 CFRP의 판재 간의 층상 접합방법으로 접착제를 사용하지 않고, 사전에 양 재료의 표면을 균일 저에너지 전자 빔 조사 (homogeneous low energy electron beam irradiation : HLEBI)처리를 시행한 후 진공 분위기 열간 프레스(1Pa, 2hr, 403K)방법을 연구한 결과가 발표되어 있다.<sup>31)</sup>

5. 결 론

1) 금속과 플라스틱의 접합기술은 접착제에 의한 접착방법과 접착제를 사용하지 않고 직접 접합하는 직접 접합방법으로 분류되며, 접착제에 의한 접착방법은 금속표면이나 플라스틱 표면의 적절한 표면처리로 모재 강도에 필적하는 접착강도가 얻어지고 있다. 또한 최근에는 접착제를 사용하지 않고 금속과 플라스틱 이종재료를 직접 접합하는 용접기술이 꾸준히 개발되고 있다.

2) 종래의 구조용 접착제의 조성을 정리하면 열경화성 수지와 엘라스토머로 된 복합형의 접착제가 주류를 이룬다. 열경화성 수지로는 에폭시 수지나 페놀수지가 사용되고 있으며, 일반적으로 전단응력에 강하고 박리응력이 약하다. 반대로 엘라스토머는 박리응력에 강하고, 전단응력에 약하다. 엘라스토머로서는 폴리아미드(나일론), 폴리설파이드, 실리콘, 니트릴 고무 등이 사용되고 있다.

3) 최근에는 제2세대 아크릴계 접착제, SGA(Second Generation of Acrylic Adhesive)가 개발되어 있다. SGA의 조성을 살펴보면 엘라스토머, 아크릴모노머, 경화촉매, 경화촉진제, 안정제 등으로 되어 있다. 이 접착제의 특징은 실온에서 경화가 가능한 것으로 열에 약한 피착재료도 적용이 가능하다는 것이다.

4) 접착 이음부의 신뢰성을 확보하기 위해서는 접착제가 취성적으로 파괴하지 않을 것이 요구되고 있다. 정적 강도가 높은 접착제는 일반적으로 취성적으로 파괴되기 쉬운 경향이 있다. 최근에는 정적인 강도를 저하시키지 않으면서 취성파괴에 대한 파괴인성이 높은 접착제가 개발목표로 되어 있다. 접착제의 파괴인성은 DCB (Double Cantilever Beam) 시험편 및 TDCB (Tapered Double Cantilever Beam) 시험편에 의해 평가할 수 있다.

5) 금속과 플라스틱의 직접 접합법으로써 레이저를 이용한 LAMP(Laser-Assisted Metal and Plastic)법이 개발 되어 있다. LAMP 접합법을 실용화하기 위해서는 접합부에 대한 정적 및 동적 특성의 해명이 충분히 이루어져야 한다. 그러나 현 단계에서는 이에 관한 데이터가 축적되어 있지 않아 실용화 예가 아직 없

으며, 금후 자동차, 항공기, 차량, 선박, 진공용기 관계, 전기 전자 스포츠용품 등의 이용이 기대되고 있다.

6) LAMP법의 개량법으로 접합재 사이에 엘라스토머 시트를 삽입하여 {폴리프로필렌 (PP) 플라스틱/ 엘라스토머 시트(t=100μm)/ STS 금속}의 배열 구조로 하여, PP측에서 레이저 조사를 시행하여 실험한 결과, 최대 11MPa 정도의 전단강도가 얻어졌다.

7) 금속과 플라스틱의 기계적인 직접 접합법으로 자기 천공 리벳 방법인 SPR(Self-piercing rivet)법, FSW (Friction Stir Welding)법과 FSSJ (Friction Stir Spot Joining)방법 및 FSBR (Friction Stir Blind Riveting)법이 시도되고 있다. 또한 메카니컬 클린칭 (Mechanical clinching) 공정에 의한 금속과 플라스틱의 직접 접합 연구가 다수 발표되고 있다.

8) Web of Science (SCI-EXPANDED)를 이용하여 2005년부터 2015년까지 10년간에 걸쳐 금속과 플라스틱 접합 연구에 관한 논문들을 검색한 결과 252편이 검색되었다. 연도별로는 2011년까지는 20건 미만으로 발표되었으나, 2012년부터 급격히 증가하여 2012년 32건, 2013년 42건, 2014년에는 46건의 논문이 발표되고 있다. 이것은 자동차, 선박, 항공기 등 각종 구조체의 경량화 요구가 최근 2~3년 사이에 더욱 커지면서 경량소재인 CFRP나 GFRP 또는 엔지니어링 플라스틱과 금속과의 복합화 수단의 필요성이 더욱 커지게 되었기 때문인 것으로 판단된다.

9) 국가별로는 독일에서 가장 많은 논문이 발표되고 있으며, 그 다음이 중국이고, 이어서 미국, 호주, 일본, 이태리, 캐나다, 한국 순으로 논문 발표건수가 이어지고 있다. 여기서 특히 신흥 공업국가로 발전하고 있는 중국의 최신 용접기술에 관한 높은 관심을 엿볼 수 있다.

10) 발표논문의 접합공정별 분포를 살펴보면 종래부터 이용되어 왔던 접착접합(Adhesive bonding)에 관한 연구가 전체의 42%를 차지하고, FSW법과 FSSJ법의 합계가 20%를 차지하고 있다. 다음이 레이저 용접과 기계적 접합인 SPR(Self Piercing Riveting)법이 각각 10%, 메카니컬 클린칭 법이 7%, 그 다음이 마찰 블라인드 리벳(Friction blind rivet)을 포함한 리벳접합 순으로 나타났다.

11) 금후 국내의 플라스틱/금속 접합기술 향상을 위해서는 레이저 응용 접합기술, FSW 응용기술, SPR 또는 SPBR 응용기술, 접착과 FSW 또는 성형기술을 복합시킨 접합 기술 등의 공정 개발이 요구되고 있다. 그리고 플라스틱/금속접합부의 부식이나 열적 환경에서의 동적인 부하거동에 따른 접합부의 내구성이 규명되어야 할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 해설은 미래창조과학부 과학기술진흥기금과 복권기금을 지원받아 수행하는 ReSEAT 프로그램의 성과물입니다.

## References

1. Wakabayashi K, New Trend of Adhesives and Adhesion Technology, *Jnl. of J.W.S*, 81-5 (2012) 54-58 (in Japanese)
2. Katayama S, Kawahito Y, Laser Direct Joining between Al. alloy and Plastic or CFRP, *Journal of Light Metal Welding*, 51-12 (2013), 463-468 (in Japanese)
3. KATAYAMA S, KAWAHITO Y., et.al, Laser Direct Joining between Stainless Steel and Amorphous Polyamide Plastic, *Quarterly Jnl. of JWS*, 25-2 (2007), 316-322
4. Yutaka M, Laser Joining between Metal and Plastic with Elastomer Sheet, *Journal of Light Metal Welding*, 50-11 (2012), 444-447
5. Ueda S, Instantaneous Mechanical Joining between CFRP and Metal, *Jnl. of Welding Technology*, 63-4 (2015), 118-121(in Japanese)
6. Wirth, F.X, Zaeh, M.F. Krutzlinger, M., Silvanus, J., Analysis of the Bonding Behavior and Joining Mechanism during Friction Press Joining of Aluminum Alloys with Thermoplastics, *Procedia CIRP*, v.18 (2014), 215-220
7. Fereiduni, E., Movahedi, M., Kokabi, A.H., Aluminum/steel joints made by an alternative friction stir spot welding process, *Journal of materials processing technology*, v.224 (2015),1-10
8. Min, J. Li, J. Carlson, B.E. Li, Y. Lin, J., Mechanical Property of Al alloy joints by Friction Stir Blind Riveting, *Procedia engineering*, v.81(2014), 2036-2041
9. Yohei ABE, et.al, Mechanical Clinching of High Strength Steel and Al alloy A5052 Sheets, *J. of Japan Soc. for Tech. of Plasticity*, 51-589 (2010), 141-145
10. Bai Y, Nguyen T.C, Environment-Assisted Degradation of the Bond between Steel and Carbon-Fiber-Reinforced Polymer, *JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING*, 26-9 (2014)
11. Srilakshmi, R, Ramji, M, Chinthapenta, V, Fatigue crack growth study of CFRP patch repaired Al 2014-T6 panel having an inclined center crack using FEA and DIC, *ENGINEERING FRACTURE MECHANICS*, 134-1 (2015), 182-201
12. Yu, QQ, Zhao, XL, Gu, XL, Tests on Cracked Steel Plates with Different Damage Levels Strengthened by CFRP Laminates, *INTERNATIONAL JOURNAL OF STRUCTURAL STABILITY AND DYNAMICS*, 14-6 (2014)
13. Ratanathavorn, W, Melander, A, TI Dissimilar joining between aluminium alloy (AA 6111) and thermoplastics using friction stir welding, *SCIENCE AND TECHNOLOGY OF WELDING AND JOINING*, 20-3 (2015), 222-228
14. Hoseinlghab, S, Mirjavadi, SS, Sadeghian, N, Jalili, Influences of welding parameters on the quality and creep properties of friction stir welded polyethylene plates, *MATERIALS & DESIGN*, 67-3 (2015), 369-378
15. Ratanathavorn, W, Melander, A, Dissimilar joining between aluminium alloy (AA 6111) and thermoplastics using friction stir welding, *SCIENCE AND TECHNOLOGY OF WELDING AND JOINING*, 20-3 (2015), 222-228
16. Liu, FC, Nakata, K, Liao, J, Fukui, H, Reducing bubbles in friction lap welded joint of magnesium alloy and polyamide, *SCIENCE AND TECHNOLOGY OF WELDING AND JOINING*, 19-7 (2014), 578-587
17. Esteves, JV, Goushegir, SM, dos Santos, JF, Canto, LB, Hage, E, Amancio, ST, Friction spot joining of aluminum AA6181-T4 and carbon fiber-reinforced poly(phenylene sulfide), Effects of process parameters on the microstructure and mechanical strength, *MATERIALS & DESIGN*, 66-2 (2015), 437-445
18. P. woizeschke, V. woffschei, Recent Development for Laser Beam Joining of CFRP -Aluminum Structures, *Procedia Materials Science*, V.2 (2013), 250-258
19. A. Roesner, et.al ; Long term stability of laser joined plastic metal parts, *Procedia*, 41 (2013), 169-171
20. Wahba, M. Kawahito, Y. Katayama, S. Laser direct joining of AZ91D thixomolded Mg alloy and amorphous polyethylene terephthalate, *Journal of materials processing technology*, 211-6 (2011), 1166-1174
21. Zhang, J, Yang, SL, Self-piercing riveting of aluminum alloy and thermoplastic composites, *JOURNAL OF COMPOSITE MATERIALS*, 48-12 (2015), 1493-1502
22. Mandel, M, Kruger, L, Long-term corrosion behaviour of EN AW-6060-T6 in an aluminium/carbon-fibre reinforced polymer self-piercing rivet joint, *MATERIAL-WISSENSCHAFT UND WERKSTOFFTECHNIK*, 45-12 (2014), 1123-1129
23. Wagner, J, Wilhelm, M, Richter, T, Experimental analysis of damage propagation in riveted CFRP-steel structures by thermal loads, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 75(5-8) (2014)1103-1113
24. Altmeyer, J, dos Santos, JF, Amancio, SF, Effect of the friction riveting process parameters on the joint formation and performance of Ti alloy/short-fibre reinforced polyether ether ketone joints, *MATERIALS & DESIGN*, 29-2 (2014), 217-222
25. Min, JY, Li, YQ, Li, JJ, Carlson, BE, Lin, JP, Friction stir blind riveting of carbon fiber-reinforced polymer composite and aluminum alloy sheets, *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 76(5-8) (2015), 1403-1410



26. AU Gude, M, Hufenbach, W, Kupfer, R, Freund, A, Vogel, C, Development of novel form-locked joints for textile reinforced thermoplastics and metallic components, *JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY*, 216-2 (2015), 140-145
27. Lambiase, F, Di Ilio, A, Mechanical clinching of metal-polymer joints, *JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY*, 215-1 (2015), 12-19
28. Lee, CJ, Lee, JM, Ryu, HY, Lee, KH, Kim, BM, Ko, DC, Design of hole-clinching process for joining of dissimilar materials-A16061-T4 alloy with DP780 steel, hot-pressed 22MnB5 steel, and carbon fiber reinforced plastic, *JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY*, 214-19 (2014), 2169-2178
29. Paul, H, Luke, M, Henning, F, Combining mechanical interlocking, force fit and direct adhesion in polymer-metal-hybrid structures - Evaluation of the deformation and damage behavior, *COMPOSITES PART B-ENGINEERING*, 73-5 (2015), 158-165
30. Marannano, G, Zuccarello, B, Numerical experimental analysis of hybrid double lap aluminum-CFRP joints, *COMPOSITES PART B-ENGINEERING*, 71-5 (2015), 28-39
31. Okada, T, Kanda, M, Faudree, MC, Nishi, Y, Shear Strength of Adhesive Lamination Joint of Aluminum and CFRP Sheets Treated by Homogeneous Low Energy Electron Beam Irradiation Prior to Lamination Assembly and Hot-Press, *MATERIALS TRANSACTIONS*, 55-10 (2014), 1567-1590