



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2018년 2월

석사학위 논문

이종소재 AI/CFRP
마찰교반접합시 툴 핀 유무에
따른 접합성 평가

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

이 세 영

이종소재 AI/CFRP
마찰교반접합시 톨 핀 유무에
따른 접합성 평가

Evaluation of Weldability dissimilar materials
AI/CFRP using Friction Stir Welding upon pin
existence

2018년 2월 24일

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

이 세 영

이종소재 AI/CFRP
마찰교반접합시 툴 핀 유무에
따른 접합성 평가

지도교수 방 희 선
공동 지도교수 방 한 서

논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2017년 10월

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

이 세 영

이세영의 석사학위 논문을 인준함

위원장 조선대학교 조교수 송 국 현 (인)

위 원 조선대학교 특임교수 방 한 서 (인)

위 원 조선대학교 교수 방 희 선 (인)

2017년 11월

조선대학교 대학원

CONTENTS

List of Figures	IV
List of Tables	VI
Abstract	VII
1장. 서론	1
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 국내외 기술 동향	4
1.3 마찰교반용접(FSW)의 원리와 특징	7
1.3.1 FSW의 원리	7
1.3.2 FSW의 특징	9
1.4 Al5052 및 CFRP의 특징	10
2장. 연구 방법	13
2.1 연구 방법	13
2.2 실험방법 및 조건	14
2.2.1 사용소재 및 시험편 형상	15
2.2.2 용접조건	16
2.2.3 접합부 특성 평가	21
3장. Al/CFRP FSW 접합부의 접합성 평가	22

3.1 Pin이 없는 Frustum type 틀을 이용한 접합특성	22
3.1.1 AI-AI 접합부 표면 및 단면 특성	22
3.1.2 AI-CFRP 접합부 표면 및 단면 특성	28
3.2 Pin이 있는 Frustum type 틀을 이용한 접합특성	30
3.2.1 동종재 AI-AI 접합부 표면 및 단면 특성	30
3.2.2 이종재 AI-CFRP 접합부 표면 및 단면 특성	33
3.2.3 표면조도 유무에 따른 AI-CFRP 접합부 단면특성	37
3.2.4 이종재 AI-CFRP 접합부 온도 특성	39
3.3 접합부의 기계적 · 금속학적 특성	40
3.3.1 접합부의 기계적 특성평가	40
3.3.2 접합부의 금속학적 특성평가	44
3.3.3 Pin 유무에 따른 이종재 AI/CFRP 접합특성 비교	47
3.4 AI/CFRP FSW 접합부 열전도 및 열탄소성 수치해석	49
3.4.1 온도 분포 특성	49
3.4.2 용접잔류응력 및 변형 특성	54
4장. 결론	57
참고문헌	59

List of Figures

Fig. 1.1	Corporate average fuel economy, CAFE	1
Fig. 1.2	Global CFRP market volume	3
Fig. 1.3	Number of thesis about joint between metal and plastic	4
Fig. 1.4	Distribution of joint method between metal and CFRP	6
Fig. 1.5	Schematic illustration of FSW	7
Fig. 1.6	Typical cross section of FSW joint	8
Fig. 1.7	Comparison of welding cost per unit length	9
Fig. 1.8	Manufacturing process of carbon fiber	11
Fig. 2.1	Configuration of specimen	15
Fig. 2.2	Equipment and specifications of FSW system	16
Fig. 2.3	Universal testing machine	17
Fig. 2.4	Optical microscope	18
Fig. 2.5	Scanning electron microscope	19
Fig. 2.6	Tool details used for friction stir welding	20
Fig. 3.1	Measurement position and temperature distribution	39
Fig. 3.2	Tensile shear strength of FSW joints	40
Fig. 3.3	Tensile shear strength test	41
Fig. 3.4	Shape of fractured surface of Al/CFRP joints	41
Fig. 3.5	Scanning electron image of fracture sample at rotational speed of 400 rpm and traveling speed of 1.0 mm/sec	42
Fig. 3.6	Chemical compositions of the fractured surface of Al/CFRP joints	43
Fig. 3.7	Cross-sectional image of ground-Al5052 and CFRP joints	44
Fig. 3.8	Lacations of EDS point analysis	45
Fig. 3.9	Chemical composit distribution	46
Fig. 3.10	Joint interface with surface roughness of 0, 3.0 Ra	48

Fig 3.11 Cross setion and surface heat distribution with welding speed
of 0.8mm/s50

Fig 3.12 Cross setion and surface heat distribution with welding speed
of 1.0mm/s51

Fig 3.13 Heat history with various welding speed52

Fig 3.14 Residual stress distribution54

Fig 3.15 Residual stress distribution toward longitudinal direction 55

Fig 3.16 Residual stress distribution of aluminum plate56

List of Tables

Table 1.1	Chemical composition and mechanical properties of Al5052	10
Table 1.2	Mechanical properties of CFRP(PA66)	12
Table 2.1	Welding conditions for FSW	14
Table 3.1	Bead surface of frustum type pined tool with various conditions	23
Table 3.2	Bead surface of fustum type pined tool with various plunge depth	24
Table 3.3	Cross section of frustum type pined tool with various conditions	25
Table 3.4	Cross section of frustum type pined tool with various plunge depth	26
Table 3.5	Surface appeared of the FSW joint	29
Table 3.6	Surface appeared of thd FSW joints with pinless tool	31
Table 3.7	Cross section of the FSW joints with pinless tool	32
Table 3.8	Surface appeared of the FSW joints with pinless tool	34
Table 3.9	Surface appeared of the FSW joints with pinless tool	35
Table 3.10	Cross section of the FSW joints with pinless tool	36
Table 3.11	Cross section of the FSW joints with pinless tool	38
Table 3.12	Chemical compositions of the fractured surface	43
Table 3.13	Chemical compositions of elements in EDS analysis	45

ABSTRACT

Evaluation of Weldability dissimilar materials Al/CFRP using Friction Stir Welding upon pin existence

Seyoung Lee

Advisor : Prof. Bang, Hee-Seon, Ph.D.

Co-Advisor : Prof. Bang, Han-Sur, Ph.D.

Department of Welding and Joining

Science Engineering,

Graduate School of Chosun University

Recently, fuel-efficient, light-weight vehicles emerged as an important issue in the automotive industry as measures of climate change. Especially, in terms of saving energy, the development of technology for welding and bonding of aluminum alloy is intensively invested for energy saving of the car and environmental protection. As international regulation on fuel efficiency continue to be strengthened, weigh reduction of automobile is inevitable. When the weight of the vehicle is reduced by 10%, the fuel consumption reduced by 3%. acceleration performance increased by 8% and the brake stopping distance is reduced by 5%. Compared with the increase in engine efficiency, light-weight is possible to get higher efficiency at a relatively low cost. This make researches for manufacturing a light vehicle body are actively conducted.

On the other hand, although electric vehicles have been continuously studied for the development of future autobobiles, the weight of vehicles has been increasing due to the electric motors and additional

batteries. Therefore, high strength steel and some light weight materials facing a limit of weight reduction. In order to solve this problem, a new joining method is needed to reduce the weight of the car bodies by using aluminum alloys, magnesium alloys, CFRP and other materials such as nonferrous metals and plastics.

Proportion of aluminum alloys using as car body is increasing, which were used in make bumpers, hoods and engine blocks. The car body weight can be reduced to 40% by increasing the aluminum ratio applied to the car body.

Future automobile development trend is much lighter than ordinary materials and also required non-rigid material. For that, CFRP is suitable as lightweight material. CFRP is 1/4 weight of iron, 10 times stronger, 7 times bigger elastic and has excellent durability, abrasion resistance, heat resistance, impact resistance, and corrosion resistance. But CFRP has low elongation and fracture strength make application of CFRP in automotive industry difficult.

In this case, friction stir welding(FSW), one of the solid-state welding methods was invented at TWI(The Welding Institute), Cambridge, involves the joining of metals without fusion materials or filler materials; in other flank, it joins materials by using friction heat.

Therefore, in this study intends to apply friction stir welding as a bonding technique for dissimilar material(Al alloy - CFRP). In this experiment, FSW is applied as joining 1.0 mm thickness aluminum alloy(AI5052) to 1.5 mm thickness of CFRP(PA6), which are applied to the automotive industry to evaluate joint characteristics and joining properties according to joining conditions such as tool shape, tool rotational speed, travel speed, plunge depth and surface roughness on the aluminum plate. The mechanical properties and the metallurgical properties of the joints were investigated and analyzed

The results show that the tensile-shear strength with aluminum plate roughness of 3.0 Ra shows the highest strength was 2.0 kN. During the observation by SEM-EDS, joint interface comparison according to the presence of surface roughness, in case of specimens without roughness, it was observed that there was a gap in the joint interface. But in the case of specimens with surface roughness, the bonding was observed better joint condition compare to smooth surface specimen.

제1장 서론

1.1 연구배경 및 목적

최근 세계적인 기후변화 대책으로 자동차산업을 포함한 수송기계산업에서는 안전성과 연비개선을 위해 친환경, 고연비, 경량화 자동차 개발이 중요한 이슈로 떠오르고 있다. 연비관련 국제적인 규제는 지속적으로 강화되고 있기 때문에 자동차 경량화는 피할 수 없는 과제이다. Fig 1.1은 연도별 기업평균 연비제도(Corporate average fuel economy, CAFE) 규제로서, 2014년도 10.3km/L 였던 규제연비를 2015년에는 23.2km/L로 연평균 연비를 11.4%씩 증가시키는 것을 목표로 하는데, 이를 위해 꾸준한 연비관련 연구개발이 필요하다. 따라서 최근 경량화를 위한 자동차 업체들의 기술개발노력도 극대화되고 있다. 차체 중량 감소에 따른 연비 상승효과는 100kg 당 0.88km/L이며, 경량화에 따른 연비 상승은 Co2 발생량 절감과 직결되며 엔진 효율 증대와 비교하였을 때 상대적으로 적은 비용으로 더 높은 효율을 나타낼 수 있어 가벼운 차체 제작을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.



Fig 1.1 Corporate average fuel economy, CAFE

한편, 미래형 자동차 개발을 위하여 전기자동차에 대한 지속적인 연구가 이루어지고 있지만 전기모터와 추가배터리 추가 등으로 인해 차량의 무게는 증가되는 경향을 보이고 있다. 그러므로 현재의 고장력강과 일부 경량 소재만으로 차체 경량화는 실질적으로 한계에 부딪히고 있다. 이를 해결하기 위해 알루미늄 합금, 마그네슘 합금, CFRP 등의 소재를 사용하고 비철금속 및 플라스틱 등의 이종소재들을 혼용하여 부품의 중량감소, 최적화 부품 설계하여 차체의 중량 감소를 이루어내는 데, 이종소재를 혼용하여 효율적인 경량화 및 차량 성능 최적화를 구현을 목표로 하는 이종재료 접합의 경우 기존의 용접접합방법을 적용시키기에 한계가 있어 새로운 용접접합기술을 필요로 하고 있다.[1]

경량화 소재인 알루미늄 합금은 범퍼, 후드, 엔진 블록 등 부품단계에서 적용하였으나 점차 차체에 적용되는 알루미늄 비율이 높이고 있다. 차체에 적용되는 알루미늄 비율의 상승을 통해 차체 중량을 40% 수준으로 줄일 수 있는데, 이는 고장력강판의 경량화 효과인 11%와 비교하여 월등히 높은 수치이다. 그중 알루미늄 5000계는 내식성과 용접성이 양호하고, 성형성이 우수하여 자동차 산업에서의 사용량이 매우 높다.

미래형 자동차 개발 트렌드는 지금의 일반 금속소재보다 훨씬 가볍고 비강도, 비강성이 높은 소재의 적용이 요구되며, CFRP는 비강도, 비강성이 뛰어나 차체 경량화 소재로 적합하다. CFRP는 철보다 1/4 가볍고 강도는 10배, 탄성율은 7배 강하며 내구성·내마모성·내열성·내충격성 등이 우수하고 부식이 없으나 낮은 연신율 및 파괴강성 특히, 연결접합의 어려움으로 인해 실제 자동차 부품의 적용에는 많은 제약을 받고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 CFRP와 금속재료를 접합하여 단일소재가 가지는 재료의 한계점을 극복할 수 있도록 하이브리드 복합재료 또는 이종소재 접합에 대한 연구가 진행되고 있다.[2] 각기 다른 특징을 가진 이종소재간의 접합방법으로 1991년 영국 용접연구소(The Welding Institute of the United Kingdom)에서 개발한 마찰교반용접(Friction Stir Welding)은 두 개의 소재를 겹친 후 강력한 압력을 가해 발생된 마찰열로 접합시키는 기술이다. 이 기술은 최근 알루미늄, 마그네슘과 같은 경량합금 간의 용접, 철강-경량합금 간의 이종금속 용접

을 가능하게 하여 자동차, 가전제품 등 다양한 분야에 사용되고 있다. FSW 공정은 비소모성 공구(tool)를 사용하여 추가적으로 발생하는 비용이 적고, 기존의 용접법과 비교하여 낮은 입열에서 접합되기 때문에 잔류응력 및 변형을 최소화할 수 있어 용접부의 기계적 성질을 향상시킬 수 있다.

따라서 본 연구에는 향후 친환경자동차인 전기자동차와 차세대 소재인 이종소재(AI합금-CFRP)에 대한 접합기술로써 마찰교반접합을 적용하고자한다. 본 실험에서는 자동차 산업에 적용되는 두께 1.0mm의 알루미늄 합금(AI5052)과 두께 1.5mm의 CFRP(PA6)에 FSW를 실시하여 용접 조건에 따른 접합부의 특징과 접합성을 평가하고자 한다. 또한 알루미늄 표면에 거칠기의 유/무에 따른 접합성을 비교 분석하였으며, 최적의 조건을 선정 후 접합부의 기계적 특성 및 금속학적 특성을 고찰하고 기계적 성질을 분석하였다.

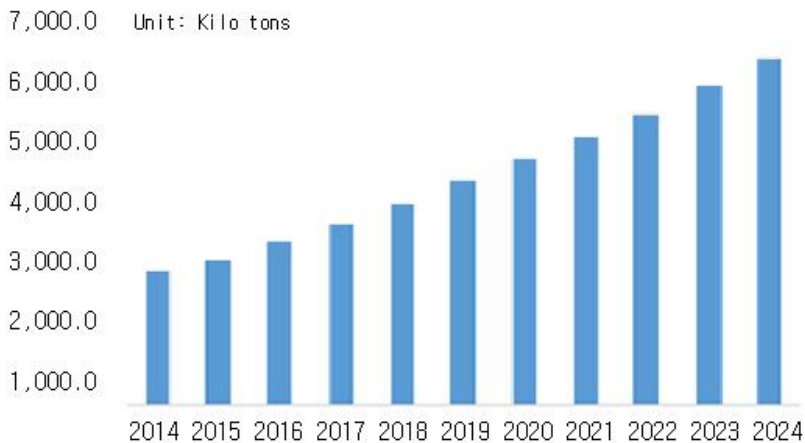


Fig 1.2 Global CFRP market volume

1.2 국내·외 기술 동향

본 연구과제와 관련된 금속과 플라스틱 접합기술에 대한 전반적인 연구의 세계적 동향을 분석하기 위해 학술정보(Web of Science, SCI-EXPANDED) 분석을 수행한 결과, 누적 발표 건수는 국가별로 독일에서 가장 많은 논문이 발표되고 있으며, 그 다음이 중국이며, 이어서 미국, 호주, 일본, 이태리, 캐나다, 한국 순으로 논문 발표가 이어지고 있다. 2005년부터 2015년까지 10년에 걸쳐 금속과 플라스틱 접합 연구에 관한 논문은 총 252편으로 2012년부터 발표 논문의 수가 급격히 증가하였다. 이는 자동차, 선박, 항공기 등 각종 구조체의 경량화 요구가 최근 5년 사이에 더욱 커지면서 경량 소재인 CFRP나 GFRP 또는 엔지니어링 플라스틱과 금속과의 접합 필요성이 증대되었기 때문이다. [3,4]

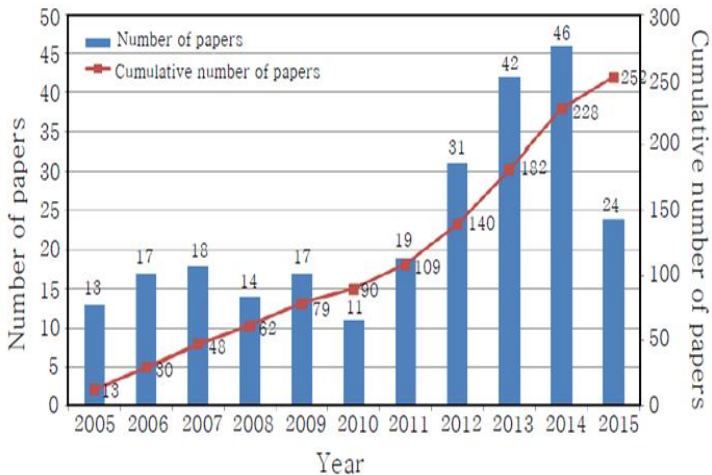


Fig 1.3 Number of thesis about joint between metal and plastic

접합공정별 분포에서는 종래부터 이용되어 왔던 접착접합(Adhesive bonding)에 관한 연구가 전체의 42%를 차지하였으며, 마찰교반접합과 마찰교반점접합의 합계가 약 20%를 차지하였다. 그 다음으로 레이저용접과 기계적 접합인 SPR(Self Piercing Riveting)법이 각각 10%, 메카니컬 클린칭법이 7%, 그 다음은 마찰 블라

인드 리벳(Friction Blind Rivet)을 포함한 리벳접합 순서로 나타났다.[4]

기계적 체결 접합법에 대한 연구로 SPR, 메카니컬 클린칭, 마찰 블라인드 리벳팅 등이 있으며, 이종금속 재료 접합에 이용되고 있다. SPR 방식은 사전에 구멍을 가공하지 않고, 리벳을 CFRP에 직접 박아넣을 경우에 금속과 달리 CFRP측 구멍 주위에서 박리손상이 일어나 접합시 문제가 발생하였다. 이를 방지하기 위해 받침금속을 이용한 이종소재 접합법이 보고되었는데, 피접합체인 CFRP 표면에 받침금속을 대고 면압을 사전에 가한 상태에서 리벳을 박아 넣도록 설계되어 실험을 통하여 실제 적용성을 확인하였다. 또한 SPR 방법을 이용한 Al합금과 열가소성플라스틱 PA6 복합재료인 CFRP의 접합부 특성을 조사한 결과가 발표되었는데, CFRP와의 접합부에서 인장전단강도가 약간 저하되며 접합부에서의 연성은 CFRP의 취성 때문에 현저한 저하가 일어난다는 결과가 발표되었다.[5~7]

금속과 플라스틱의 마찰교반접합에 관한 연구동향은 주로 겹치기 접합에 이용되고 있으며, 열가소성 플라스틱이나 열가소성 플라스틱 기지의 CFRP 또는 GFRP와 Al합금과의 접합에 관한 연구개발이 최근 들어 국외를 중심으로 집중되고 있다. 그중 CFRP와 Al5052합금을 FSW를 이용하여 접합시킨 연구가 보고되었는데, Al합금의 표면처리의 영향과 공정변수에 따른 접합부 특성에 관한 연구로 Al합금 표면에 그라인딩 처리를 함으로써 인장전단강도가 2.9배 증가되는 결과가 발표되었다.[8]

이와 같이 고상접합에 해당하는 마찰교반접합을 이용한 복합소재와 금속의 접합에서 주목할 점은 Al합금의 전위가 복합소재 측에 관찰되거나 표면처리 여부에 따라 접합강도에 미치는 영향이 큰 것으로 분석되었다. 특히, 접합계면의 특성은 접합강도와 직접적인 관련이 있을 것으로 사료되지만 이와 관련된 명확한 규명에 대한 연구결과는 발표되지 않았다.[9]

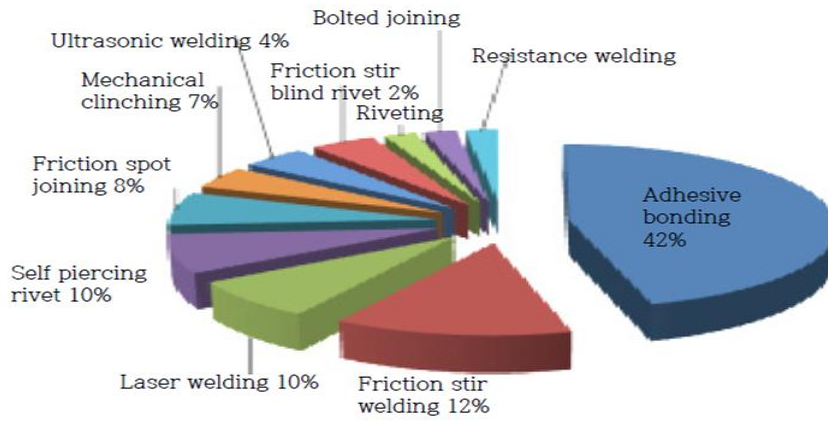


Fig 1.4 Distribution of joint method between metal and CFRP

1.3 마찰교반용접(FSW)의 원리와 특징

1.3.1 FSW의 원리

마찰교반접합은 영국 TWI에서 개발한 기술로 접합하고자 하는 소재의 맞댄 면에 회전 tool을 삽입하여 강한 소성변형과 재료 용점 이하의 마찰열을 발생시켜 계면을 교반시키고, 확산 및 재결정에 의해 접합하는 기술이다. 용융접합이 아닌 고상 접합법으로 기존의 용융용접에서 발생하는 고열로 인한 문제점들을 보완하면서 적합한 강도를 확보할 수 있는 대체기술로써 변형 및 잔류응력이 적고 기존의 용접 기술 적용이 거의 불가능했던 비철소재 경량합금 접합에 있어 핵심적인 공정으로 평가받고 있다.

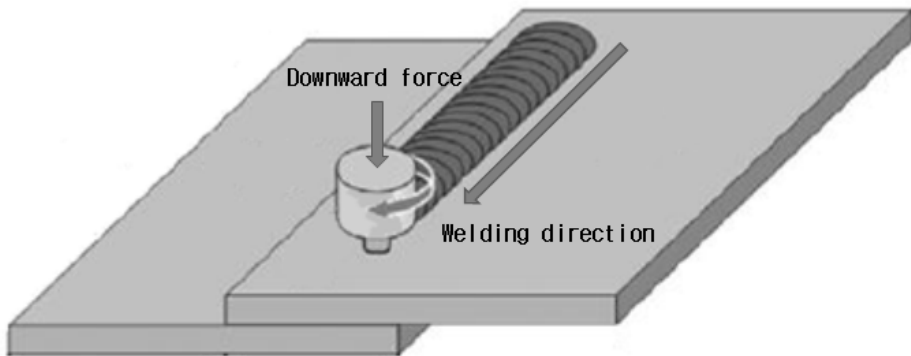


Fig 1.5 Schematic illustration of FSW

FSW 공정은 접합 모재를 고정시킨 후 모재에 비해 강도와 경도가 높은 재료의 비소모식 tool을 회전시켜 삽입하고 압력과 마찰열을 발생시켜 모재를 연화시켜 접합시키는 원리이다. 이러한 압력과 마찰열로 tool 주변 상하 모재는 연화된 후 교반작용에 의한 상부소재와 하부소재간의 소성유동을 일으켜 교반과 혼합작용으로 고상상태에서 두 부재가 접합하게 된다. 이후 tool이 접합부를 따라 이동함에

따라 가열된 부위가 tool의 앞부분에서 뒤쪽으로 압출되게 되고 마찰열에 의해 접합부가 만들어진다. FSW 공정에서 모재의 용융은 일어나지 않아 용접부에 미세한 결정립이 형성되고 기계적 성질이 뛰어나다. 접합 이후 단면의 형상은 Fig 1.5와 같이 pin의 회전으로 발생한 소성 유동에 의해 교반부(Stir zone), 압력과 마찰열에 의한 기계적 열영향부(Thermo-mechanically affected zone), 마찰열에 의한 열영향부(Heat affected zone)가 형성된다.

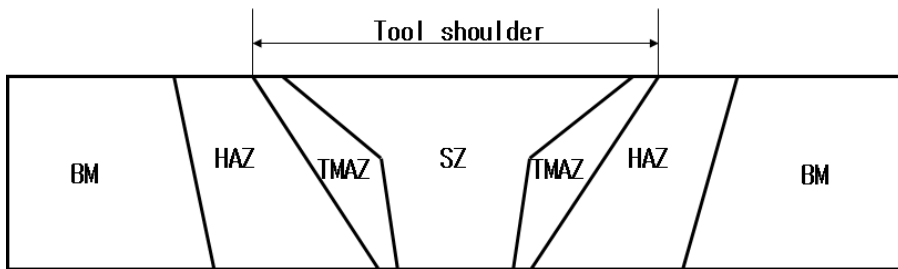


Fig 1.6 Typical cross section of FSW joint

1.3.2 FSW의 특징

FSW는 기존의 용융용접과 비교하여 다양한 특징을 나타내는데, 차폐가스가 필요하지 않고 용가재가 요구되지 않으며 접합에 따른 변형이 용융용접과 비교하여 무시할 정도로 적다. 접합 중에 흠의 발생도 없고 적외선, 자외선 등의 유해광선도 발생하지 않는 친환경적 접합공정이며 기계적 에너지 효율이 높다. 재료의 종류와 두께에 따라 달라지지만 FSW 공정의 각변형은 GMAW의 1/20~1/30 수준으로 적다. 또한 공정에 대한 원가 계산 결과를 비교하였을 때 GMAW의 90% 정도가 소요되었으며 적은 용접길이가 아닌 일정한 수준을 초과할 때부터 원가의 절감이 이루어짐을 Fig 1.7에서 확인 할 수 있다.

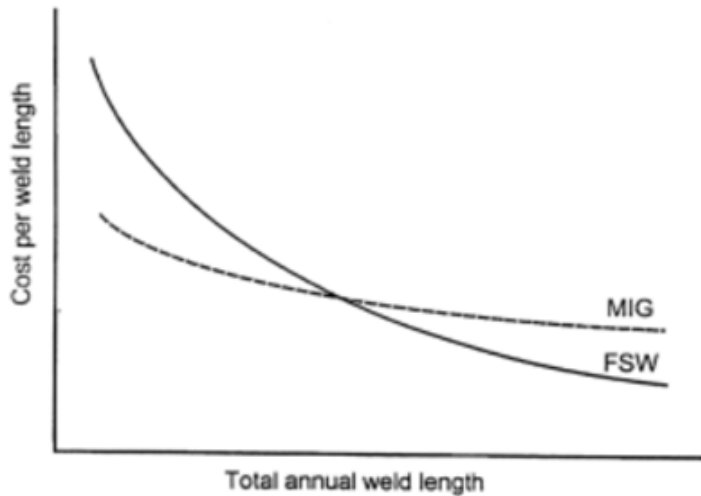


Fig 1.7 Comparison of welding cost per unit length

1.4 Al5052 및 CFRP의 특징

본 연구에 사용된 Al5052 합금은 알루미늄-마그네슘 계열의 소재로 Al 외 Cu, Mg, Cr, Si 등이 첨가되어 있으며 내식성, 성형성, 용접성이 뛰어나 가공에 적합한 재료로 다양한 용도로 사용되고 있다. 마그네슘이 주 첨가 성분으로 강도가 높은 비열처리 합금이며, 냉간 가공 상태에서는 강도가 약간 저하되는 성질을 보인다. 강도에 비해 피로강도가 높은 편이며 해수에 의한 부식에 강하다. GMAW와 GTAW에 의한 용접에 좋은 용접성을 보이며, 용가재가 필요할 경우 Al5356을 사용한다. 내식성이 우수하다는 특성 때문에 선박용 재료, 용접구조용, 차량용 재료로 사용되고 있다.

본 연구에서 사용된 알루미늄 합금 Al5052의 화학적 조성과 기계적 물성치를 Table. 1.1에 나타내었다.

Table. 1.1 Chemical compositions and mechanical properties of Al5052

Chemical Composition(%) of Al5052						
Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti
0.019	2.503	0.018	0.061	0.220	0.002	0.02
Mechanical Properties of Al5052						
Yield stress(MPa)		Elongation(%)		Tensile stress(MPa)		
161		9		232		

연구에 사용된 소재 CFRP는 강화재(Reinforcement)로 탄소섬유를 사용하고 매트릭스 수지(Matrix resin)를 플라스틱으로 하여 결합한 탄소섬유 복합재료이다.

CFRP 제작에 사용되는 탄소섬유는 유기섬유를 가열하여 얻은 탄소 함유율이 90% 이상인 섬유이다. 강철 대비 1/4의 무게로 가볍고, 강도는 10배이다. 탄소 섬유는 수지, 세라믹, 금속 등을 모재로 하는 복합재료의 강화 및 기능성을 부여하는 재료로 사용된다. 저밀도, 저열팽창성, 내열성, 화학적 안정성 등의 우수한 기계적 성능을 보유한 복합재료이다. 이러한 이유로 고급 자동차 및 항공우주 산업에 고강도 경량화 재료로 사용된다.[9~11]

탄소섬유 강화 폴리머(CFRP: Carbon fiber reinforced plastic)는 92% 이상의 탄소로 이루어진 섬유상의 탄소재료인 탄소섬유로 만들어지는데, 제조방법 및 출발원료에 따른 팬(PAN)계, 피치(Pitch)계, 레이온(Rayon)계 탄소섬유로 구별되어 지는데 종류별 탄소섬유의 제조공정은 Fig 1.8과 같다

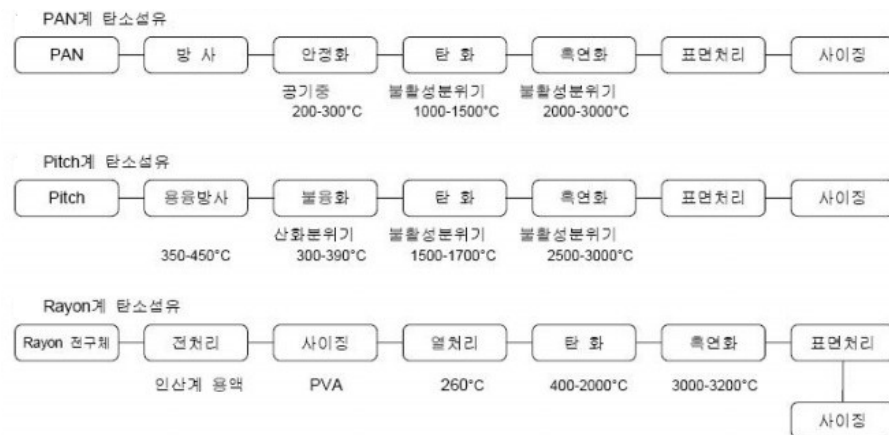


Fig 1.8 Manufacturing process of carbon fiber

탄소섬유는 우수한 성능을 가지고 있지만 그 자체로는 형상을 유지할 수 없기 때문에 플라스틱에 강화재로 더해져 사용한다. 이렇게 제작된 탄소섬유는 금속보다 가벼우면서도 부식이 없고 금속에 비해 인장강도와 탄성계수가 뛰어나다. Creep 등 장기 변형 손실이 없다고 봐도 무방할 정도로 적으며 화학적 안정성, 유연성 등 우수한 특성을 갖는다.

독일의 BMW 사는 CFRP를 주재료로 전기차 i3의 중량을 경쟁차 대비 300 ~ 600kg 가량 무게를 줄였는데, 제조과정이 복잡해 제작비용이 많이 들지만 전기차의 치명적인 단점인 주행거리가 짧다는 단점의 해답이 되었다. 이처럼 비싼 생산가격으로 인해 우주 항공기술에 사용되는 특수소재라고 인식되던 CFRP는 최근 자동차 산업 분야에도 활용 가능성을 인정받고 있다.

본 연구에서 사용된 CFRP(PA6)의 기계적 물성치를 Table. 1.2에 나타내었다.

Table. 1.2 Mechanical properties of CFRP(PA66)

Mechanical Properties of CFRP		
Modulus(Gpa)	Elongation(%)	Tensile stress(MPa)
53.0	2.1	785
Density(g/cm ³)	Ultimate stress(MPa)	Poisson's ratio
1.43	760	0.07
Polymer	Melting point(°C)	Heat deflection(°C)
PA66	260	255

제 2 장 연구 방법

2.1 연구방법

1장에서는 연구 배경 및 목적, 국내외 동향, 공정의 원리를 타나내었다.

2장에서는 본 논문의 구성과 마찰교반접합을 이용한 알루미늄 합금 5052와 CFRP의 접합에서 툴의 형상이 접합성에 미치는 영향에 대한 연구 방법에 대하여 논하였다. 실험에 사용된 소재 알루미늄 합금과 CFRP에 대해 나타내었고, 접합 조건에 따른 알루미늄 합금 5052와 CFRP의 접합성에 미치는 영향을 고찰하기 위해 툴의 형상, 알루미늄 표면의 조도, 툴의 회전속도, 툴의 삽입깊이, 툴의 이동 속도 등의 접합조건에 따른 접합성을 주안점으로 고찰하고자 하였다.

3장에서는 접합부의 기계적과 금속학적 특성을 평가하였다. FSW 공정 파라미터가 접합부의 특성에 미치는 영향을 고찰하기 위해 상부 Al5052(1.0t)와 하부 CFRP(1.5t)의 겹치기 접합을 수행하였다. 접합부의 기계적 특성을 평가하기 위해 인장시험을 수행하였으며, 광학현미경(Optical microscope)과 SEM-EDS를 이용하여 접합부 단면 특성을 평가하였다.

4장에서는 마찰교반용접을 이용한 알루미늄 합금 Al5052와 CFRP간 접합부에 대하여 툴 핀 유무에 따른 기계적, 금속학적 특성을 고찰하여 요약 및 결론을 도출하였다.

5장에서는 실험에 대한 결론을 서술하였다.

2.2 실험 방법 및 조건

마찰교반접합에서의 주요 공정변수는 툴의 형상, 회전속도(RPM), 삽입속도(Plunge speed), 삽입깊이(Plunge depth), 이송속도, 가압력, 유지시간(Dwell time) 등이 있다. 본 연구에서는 Al5052/CFRP 접합시 툴 형상이 접합성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여, 툴의 회전속도, 툴의 이송속도, 툴의 삽입깊이, 알루미늄 합금 표면의 조도에 변화를 주어 공정변수에 따른 접합을 실시하였다.

먼저, Frustum type의 핀 형상인 툴을 사용하여 툴의 회전속도 300 - 500rpm에서 툴 이송속도(0.8, 1.0, 1.2mm/sec), 삽입깊이(0.8, 0.9, 1.0mm)에 따른 동종 알루미늄합금 2.5t, 이종 알루미늄합금 2.5t와 CFRP 1.5t 접합특성을 비교하였다.

다음으로, Pin이 없는 형상의 툴을 사용하여 툴의 회전속도 400 - 500rpm에서 툴 이송속도(0.2~1.0mm/s), 삽입깊이(0.2, 0.3mm)에 따른 동종 알루미늄합금 1.0t, 이종 알루미늄합금 1.0t와 CFRP 1.5t 접합특성을 비교하였다.

Table 2.1 Welding conditions for FSW

	Type1	Type2
툴	Frustum type Pin length : 1.8mm Shoulder : 18mm	Pinless type Shoulder : 18mm
회전속도 (RPM)	300, 400, 500	400, 500
용접속도 (mm/s)	0.2 ~ 1.0 (per 0.2)	0.2 ~ 1.0
삽입깊이 (mm)	0.2 ~ 1.0	0.2, 0.3
틸팅각도 (°)	3	
소재	Al/Al Al/CFRP(PA6)	
표면처리	무	유/무

2.2.1 사용소재 및 시험편 형상

본 연구에서 사용한 재료는 알루미늄 합금 A15052 1.0, 2.5t 와 CFRP(PA6) 1.5t 이다. Fig 2.1에 나타낸바와 같이 시편의 사이즈는 동일하게 150mm(L) X 80mm(B) 로 제작 후 상판 알루미늄, 하판 CFRP를 30mm 겹쳐 마찰교반접합을 실시했다.

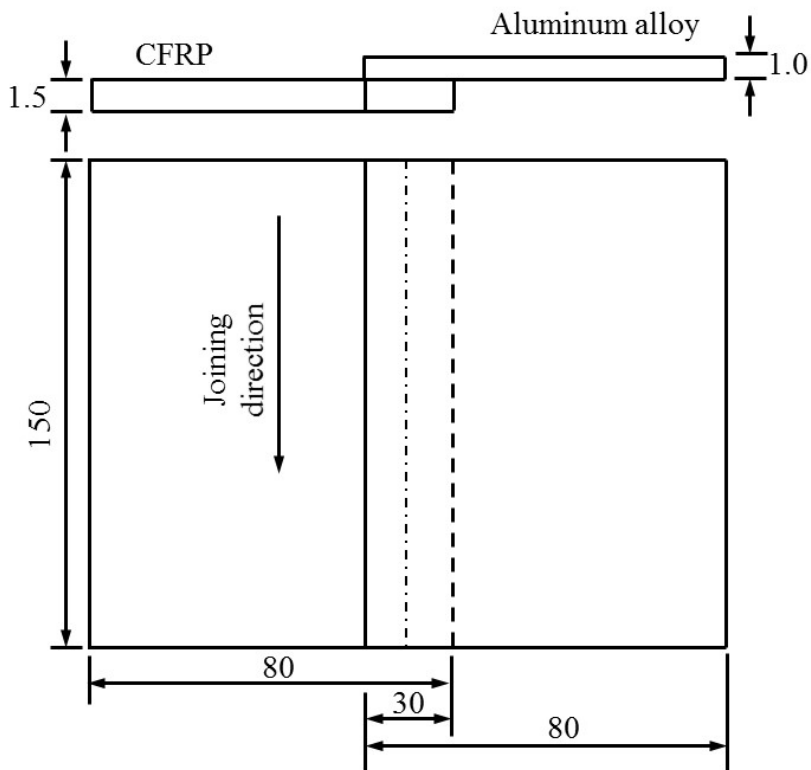
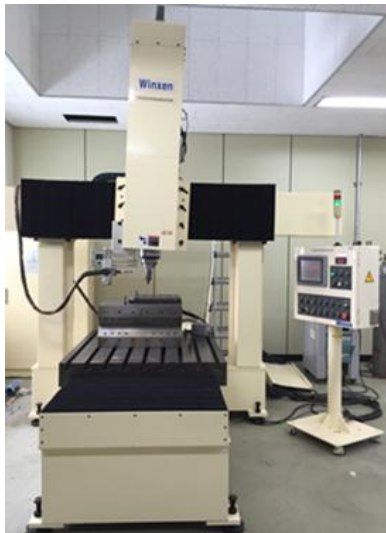


Fig 2.1 Configuration of specimen

2.2.2 용접 조건

본 연구에서는 용접 조건에 따른 알루미늄 합금 A15052와 CFRP(PA6)의 겹치기 FSW의 용접성을 연구하기 위하여 WINXEN사의 FSW 장비를 사용하였다. 마찰교반용 접 실험 장비는 GANTRY TYPE으로 X, Y, Z 세 개의 축으로 이동이 가능하다. X, Y 축은 테이블이 0.5~10mm/sec로 이동하고, Z축은 상부 헤드가 움직이게 된다. Z축의 회전은 300~3000RPM까지 가능하며 최대하중은 3000kgf이다. Fig 2.2는 실험장비의 세부사양이다.



Items		Range
Type		Gantry
Welding Speed	X-axis	0.5~10mm/sec
	Y-axis	0.5~10mm/sec
	Z-axis	0.5~10mm/sec
	R-axis	1~20 RPM
Rotation		300~3000 RPM
Load Capacity		Max. 3000kgf

Fig 2.2 Equipment and specifications of FSW system

알루미늄 합금 A15052와 CFRP(PA6)의 마찰교반접합시 틀 핀 유/무에 따른 접합부 특성을 고찰하기 위하여 접합 변수별 실험을 실시하였다. 또한 마찰교반접합이 실시된 시험편의 인장전단강도를 평가하기 위하여 Shimadzu사의 EHF-EG 600EGKN-40L 만능시험 장치를 사용하였다.

인장 시험 평가시, 시험편의 총 길이는 130mm(L)이며 양쪽에 각 30mm(B)로 grip 부분이 있다. 이러한 시험편을 사용하여 1.0mm/min의 속도로 실험을 실시하였다.



Fig 2.3 Universal testing machine

미세조직 관찰을 위해 접합시편의 절단과 마운팅, 연마 후 부식(에칭)을 실시하였다. 마운팅 후 시편의 연마를 위하여 자동연마기계를 사용하여 사포 #400부터 시작하여 #800, #1000, #1200, #1500, #2000, #2400, #4000 으로 연마 후 다이아몬드 입자와 윤활제를 사용하여 미세연마까지 진행 후, 부식을 하였다.

AI5052 부식에 사용된 용액은 염산 1ml, 질산 3ml, 불산(Hydrofluoric acid) 0.5ml와 증류수 95.5ml의 혼합용액으로 90초 동안 에칭하였다. 각 과정이 끝난 시편은 증류수로 1차 세척 후 알코올로 2차 세척한 뒤 미세조직을 관찰하였다.

연마 및 부식이 완료된 시편 접합부(Cross section)의 미세조직 관찰을 위해 OLYMPUS社 BX51M 광학현미경(Optical microscope)을 사용하였다. 알루미늄-플라스틱 접합면의 형상을 관찰하였다.

또한 접합면 성분 검사를 위해 Hitach사의 S-4800 scanning electron microscope(SEM), energy dispersive spectroscopy(EDS)를 이용하여 계면의 특성을 파악하였다.

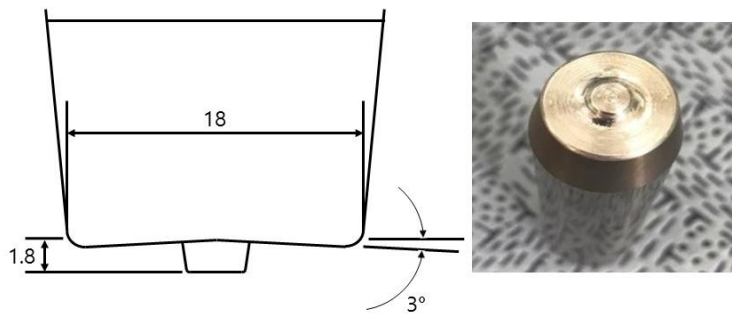


Fig 2.4 Optical microscope

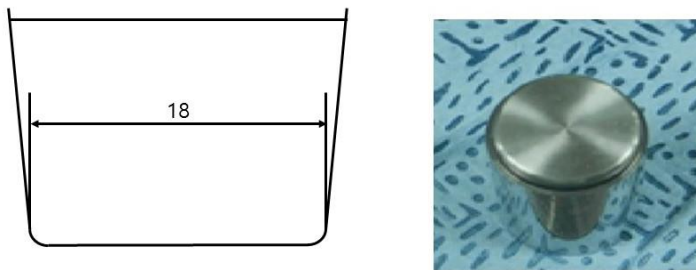


Fig 2.5 Scanning electron microscope

마찰교반접합에 있어서 툴은 매우 중요한 변수 중 하나이다. Fig 2.6는 본 연구에서 사용된 두가지 툴을 나타낸 것이다. 툴의 재질은 WC(Tungsten carbide)-Co12%로 다이아몬드 연삭을 통하여 제작되었으며, 헤드 형상은 절두체(Frustum)로 선정하였다. Type 1은 핀의 길이 1.8mm, 직경은 상부 6.0mm, 하부 4.0mm 오목각 3° , 솔더 직경은 18mm이며, Type 2는 핀이 없으며 솔더 직경은 18mm이다.



(a) Type 1



(b) Type 2

Fig 2.6 Tool details used for friction stir welding

2.2.3 접합부 특성 평가

본 연구에서는 툴 형상 즉, 핀의 유/무에 따라 접합시 접합부의 특성을 고찰하기 위하여 툴의 회전속도 300, 400, 500rpm, 툴 이송속도 0.2 ~ 1.0mm/sec, 툴 삽입깊이 0.2 ~ 1.0mm, 알루미늄 합금 표면의 조도 유/무에 따른 조건으로 마찰교반 접합을 실시하였다. 아울러, 각 조건에 대하여 접합된 시험편의 접합 여부, 외관의 형태, 표면 비드의 형상 등을 육안으로 1차적인 관찰을 실시하였다. 관찰하기에 앞서 시험편 절단과 마운팅, 미세연마를 실시하였다, 시험편은 접합부 중심을 기준으로 양쪽으로 15mm, 총 30mm의 길이로 절단하였다.

시험편의 단면(Cross section) 관찰을 통하여 접합부의 건전성, 접합부 결함의 형성여부와 이에 따른 크기를 측정하여 툴 형상에 따른 특성을 고찰하고자 하였다.

3장 AI/CFRP FSW 접합부의 접합성 평가

3.1 Pin이 없는 Frustum type 툴을 이용한 접합 특성

3.1.1 AI-AI 접합부 표면 및 단면특성

본 연구에서 수행한 알루미늄 합금과 CFRP 접합 특성을 고찰하기 위해 최적조건을 선정하기 위한 AI-AI 동종간의 마찰교반접합 예비 실험을 진행하였다.





툴의 형상이 핀 길이 1.8mm의 Frustum type일 때, 툴의 회전속도(300~500rpm), 이송속도(0.8~1.2mm/sec), 툴 삽입깊이(0.8~1.0mm)에 따른 마찰교반접합을 실시하였다. 유지시간은 15초 틸팅각(degree of tilting)은 3° 로 고정시켰다.

동종 알루미늄 합금간의 접합에 있어 교반에 의한 접합이 아닌 열 전도에 의한 겹치기 접합을 실시하기 위해 삽입깊이를 0.8 ~ 1.0mm로 하여 핀이 알루미늄 합금의 접합면에 위치하게 하였다.

Frustum type 핀 형상인 툴을 사용하여 마찰교반접합을 수행하고, 접합부의 단면을 관찰하였을 때, 툴의 회전속도가 300rpm일 때는 접합이 이루어지지 않았으며, 이는 회전에 의해 발생하는 마찰열이 부족해 접합에 충분한 입열이 발생하지 않은 것이 원인으로 판단된다. 툴 이송속도와 삽입깊이에 따른 접합부 표면 Bead 형상을 각각 Table 3.1과 Table 3.2에 나타내었다.



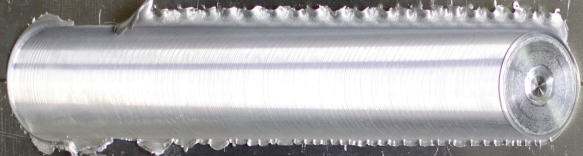
단면 사진을 통해 교반부 너비 및 교반 깊이를 측정된 결과 삽입깊이가 증가할수록 교반 너비와 깊이 모두 증가하는 경향을 보였으며 툴 회전속도에 따른 교반부 너비와 깊이의 변화는 경미한 수준이었다. 또한 툴 이송속도가 증가할수록 입열 감소에 따른 교반부의 너비 및 깊이가 감소함을 확인할 수 있었다. 툴 이송속도와 삽입깊이에 따른 접합부 단면 사진을 각각 Table. 3.3과 Table 3.4에 나타내었다.

Table 3.1 Bead surface of frustum type pined tool with various condition

Rotation speed	Traveling speed	Sur face
300 rpm	1.0 mm/sec	접합불가
400 rpm	0.8 mm/sec	
	1.0 mm/sec	
	1.2 mm/sec	
500 rpm	1.0 mm/sec	


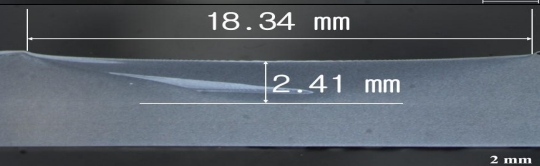

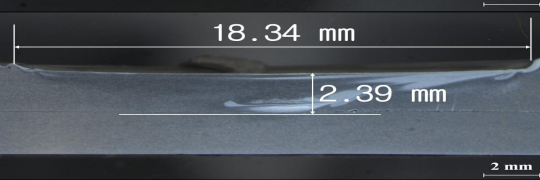
※Plunge depth: 0.9 mm

Table 3.2 Bead surface of frustum type pined tool with various plunge depth

Rotation speed	Plunge depth	Surface
400 rpm	0.8 mm	
	0.9 mm	
	1.0 mm	

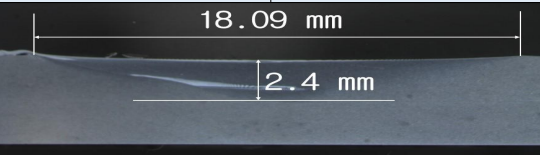
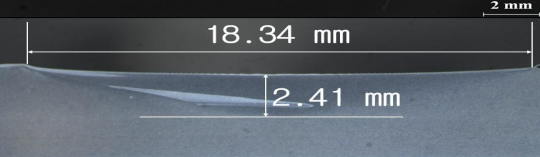

※Welding speed: 1.0 mm/sec

Table 3.3 Cross section of frustum type pined tool with various condition

Rotation speed	Traveling speed	Cross section	
		RS	AS
300 rpm	1.0 mm/sec	접합불가	
400 rpm	0.8 mm/sec		
	1.0 mm/sec		
	1.2 mm/sec		
500 rpm	1.0 mm/sec		

※Plunge depth: 0.9 mm

Table 3.4 Cross section of frustum type pined tool with various plunge depth

Rotation speed	Plunge depth	Cross section	
		RS	AS
400 rpm	0.8 mm		
	0.9 mm		
	1.0 mm		

※Welding speed: 1.0 mm/sec

단면관찰 결과 톨 회전속도 300rpm 조건에서는 마찰열 부족으로 접합이 전혀 이루어지지 않는 반면, 톨 회전속도를 500rpm으로 증가시켰을 때는 마찰열 증가로 인한 소성유동 향상으로 겹침접합부 하부 Al합금소재 상표면 이하까지 이루어짐을 확인되었고, 이는 Al/CFRP 이종접합에 적용하기에는 입열이 과도한 조건이라고 판단되었다.

이송속도에 따른 접합단면 관찰 결과 0.8 mm/sec의 조건 역시 과도한 입열로 인해 Al/CFRP 열전도 접합에 적용하기에는 다소 입열이 높았으나, 하지만 이송속도 1.0 mm/sec의 조건의 경우 Al합금 상표면에 한해 접합이 이루어지는 특성을 보이므로 이종재 Al/CFRP 겹치기 접합시 적합하다고 판단되었다.

삽입깊이에 따른 접합성 평가 결과, 삽입깊이가 증가함에 따라 상표면에 발생하는 burr의 양이 증가하였으며, 아울러 삽입깊이가 증가한 만큼 Al합금의 유효두께가 감소하는 경향을 보였다. 유효두께는 접합부의 강도를 결정짓는 주요 요소중 하나이므로, 최적조건 선정을 위해 삽입깊이와 유효두께간의 상관관계를 고려하여 신중한 선택이 필요하다.[11]

3.1.2 Al-CFRP 접합부 표면 및 단면특성

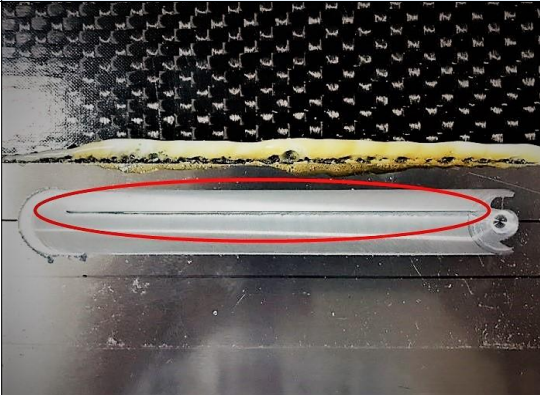

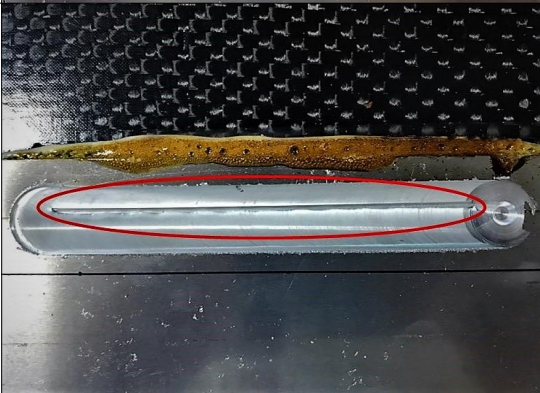
Al합금간 겹치기 실험을 통해 도출한 접합 조건을 토대로 이종재 Al합금 /CFRP(PA66) 접합을 실시하였다.

핀 길이 1.8mm의 Frustum type의 툴을 사용하여 Al5052 2.5t와 CFRP(PA66) 1.5t 이종재료의 툴 삼입깊이(0.8~1.0mm)에 따른 마찰교반접합을 실시하였다. 툴 회전 속도 400rpm, 이송속도 1.0 mm/sec, 유지시간 15초, 틸팅각(degree of tilting)은 3° 로 고정시켰다.

마찰교반접합에서 생기는 결함들은 두 가지의 원인에 의하여 생긴다고 보고되고 있다. 첫 번째, 마찰교반 용접시 사용하는 툴에 의하여 용접하고자 하는 소재에 가해지는 입열량의 부족과 빠른 냉각 속도가 원인이 되어 결함이 발생한다. 두 번째, 과도한 용접조건(툴의 회전속도, 툴의 이송속도)에 따라서 툴 솔더가 소재에서 효과적으로 압착하지 못하여 용접부 윗면으로 재료의 배출(buur)이 과도하게 이루어졌을 때 결함이 발생한다고 보고되고 있다.

본 연구에서는 교반에 의한 접합이 아닌 열전도로 인한 접합을 하고자 하였다. 키싱본드(kissing bond : imperfect bonding), 지그재그라인(zigzag line)과 같은 교반 부족에 의한 결함은 발생하지 않았으나 모든 접합조건에서 터널결함(Tunneling defect)의 발생을 확인하였다. Table 3.5에 나타난 바와 같이 외관상 접합된 것처럼 보이나 손으로 힘을 가했을 때 접합부가 쉽게 파단이 되고, 상부 Al합금 표면에 터널결함이 발생하였다. 터널결함의 원인은 하부 CFRP 소재가 Hard 하고 플라스틱이므로, 툴의 핀이 CFRP로 삼입되기가 쉽지 않아 이로 인해 상부 Al합금 소재와 하부 CFRP 소재간의 교반 및 마찰열 발생이 불충분하여 소성유동이 원활하게 이루어지지 않았기 때문으로 판단된다. [12]

Table 3.5 Surface appeared of the FSW joint

Rotation speed	Plunge depth	Sur face
400 rpm	0.8 mm	
	0.9 mm	
	1.0 mm	

3.2 Pin이 있는 Fustum type 툴을 이용한 접합 특성

3.2.1 동종재 Al-Al 접합부 표면 및 단면특성

핀 진행부 주위에 형성되는 터널결함을 없애기 위해 Pin이 없는 툴을 사용하여 실험을 실시하였다. 먼저 Pin이 없는 툴의 경우 삽입깊이가 증가할수록 형성되는 burr와 가압력이 크게 증가하기 때문에 Al합금의 두께를 2.5t에서 1.0t로 변경하였다.

이전과 같이 Al합금/CFRP간 FSW 접합을 실시하기 이전에 최적조건 선정을 위해 Al합금 동종 FSW 접합 예비 실험을 실시하였다. Pinless type의 툴을 사용하여 툴 회전속도(400, 500rpm), 이송속도(0.2 ~ 1.0 mm/sec)에 따른 접합부의 표면과 단면 특성을 평가하였다. 툴 삽입깊이는 0.3mm, 유지시간은 15초, 틸팅각(degree of tilting)은 3° 로 고정시켜 실험을 실시하였다.

Al합금의 표면 비드 형상을 관찰한 결과 회전속도를 400rpm으로 하여 실험을 실시하였을 때, 모든 이송속도 조건에서 접합이 이루어지지 않았으며 이는 입열이 충분하지 않은 것으로 판단되어 회전속도를 500rpm으로 상승시켜 실험을 진행하였다. 그 결과 이송속도 0.2, 0.3mm/sec 조건에서 접합이 이루어졌으며 비드 형상과 단면사진을 각각 Table 3.6와 Table 3.7에 나타내었다.

이송속도에 따른 접합부의 특성을 관찰한 결과, 0.3mm/sec의 이송속도에서 비드 표면이 좀더 미려하게 관찰되었으나 단면을 통한 확인 결과 0.2mm/sec의 이송속도에서 적절한 입열로 접합부의 하부 Al합금 상표면까지 접합이 이루어졌음을 확인하였고, 이송속도를 0.3mm/sec로 증가시킨 시편의 경우에는 접합부에 불충분한 입열로 인해 적절한 접합이 이루어지지 않았다. 따라서 Al/CFRP간 접합시 이송속도는 0.2mm/sec가 적합한 조건으로 판단된다.

Table 3.6 Surface appeared of the FSW joints with pinless tool

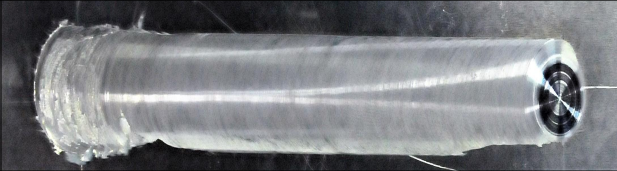
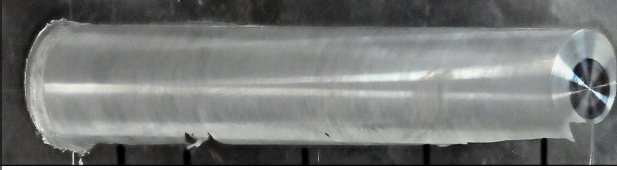
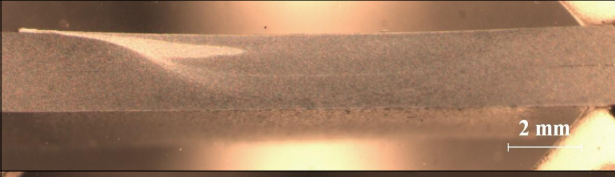
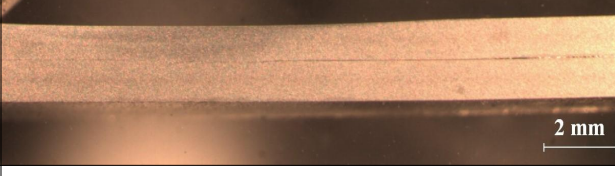
Rotation speed	Traveling speed	Sur face
400 rpm	0.2 ~ 1.0 mm/sec	접합불가
500 rpm	0.2 mm/sec	
	0.3 mm/sec	
	0.4 ~ 1.0 mm/sec	접합불가

Table 3.7 Cross section of the FSW joints with pinless tool

Rotation speed	Traveling speed	Sur face	
		RS	AS
400 rpm	0.2 ~ 1.0 mm/sec	접합불가	
500 rpm	0.2 mm/sec		
	0.3 mm/sec		
	0.4 ~ 1.0 mm/sec	접합불가	

3.2.2 이종재 Al-CFRP 접합부 표면 및 단면특성

앞선 전절의 동종재 Al합금간 접합조건인 이송속도 0.2 mm/sec, 회전속도 500rpm, 톨 삽입깊이 0.3 mm를 토대로 이종재 Al합금/CFRP 실험을 진행하였다. 동종재 접합에 사용한 조건을 이종재 접합에 그대로 적용시켰을 때, Al합금 측에 변형이 발생하여 접합이 이루어지지 않았다. 이는 알루미늄 합금의 열 전도성과 비교하여 CFRP의 열 전도성이 현저하게 떨어져 열 방출이 이루어지지 않아 접합부에 생기는 입열이 과도해져 그로 인한 열 변형이 크게 형성되었다.

따라서 본 실험에서는 입열량을 제어하여 접합을 하기 위해 톨 삽입깊이를 0.2mm로 감소시키고 톨 이송속도를 0.6 mm/sec까지 증가시킨 조건에서 회전속도 400, 500 rpm에 따른 접합부의 특성을 고찰해보았다.

회전속도 400 rpm 조건의 경우, Table 3.8에 나타남과 같이 외관상 접합이 잘 된 것처럼 보였으나 접합부 단면관찰을 위해 시편을 cutting하는 중 파단이 발생하였다. 육안검사로는 양호하다고 판단되었던 조건이었으나 실제로는 접합이 이루어지지 않았음을 확인하였다. 실험 결과 모든 회전속도 조건에서 접합이 제대로 이루어지지 않은 것으로 판단컨대 다른 공전변수를 제어하여 입열을 줄이는 접합 조건의 도출이 필요할 것으로 사료되어 이송속도에 따른 접합부의 특성을 관찰하였다.

이송속도를 0.6 ~ 1.0 mm/sec로 변화시켜 이송속도에 따른 접합부 특성을 고찰하였다. 이송속도가 증가할수록 Al합금 판재의 변형이 눈에 띄게 감소하였으며 건전한 접합부 표면이 형성되었다. 특히 이송속도 1.0 mm/sec 조건에서는 단면 관찰 결과 Al합금과 CFRP 사이 계면에 다소 접합이 이루어졌음을 확인할 수 있었으며, 이송속도에 따른 비드 표면과 단면 사진을 각각 Table 3.9과 Table 3.10에 나타내었다.

Table 3.8 Surface appeared of the FSW joints with pinless tool

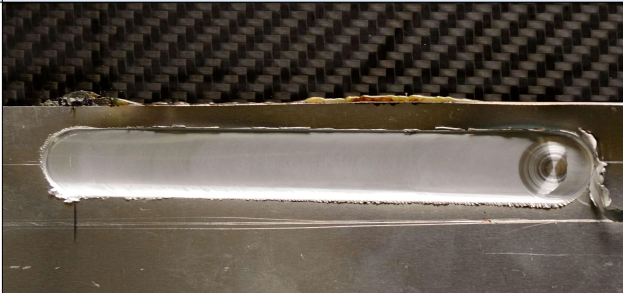

Rotation speed	Traveling speed	Sur face
400 rpm	0.6 mm/sec	
500 rpm		

Table 3.9 Surface appeared of the FSW joints with pinless tool


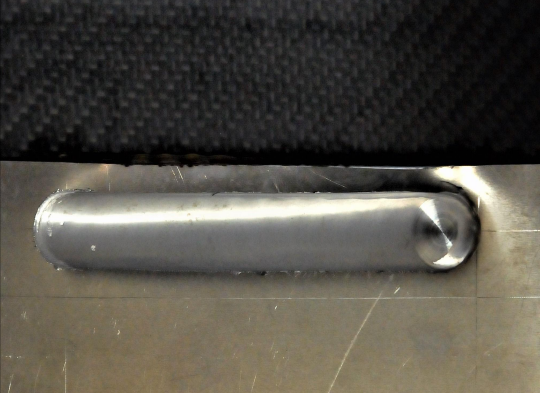
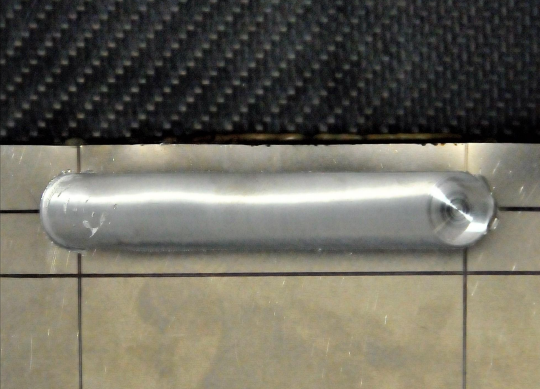

Rotation speed	Traveling speed	Sur face
400 rpm	0.6 mm/sec	
	0.8 mm/sec	
	1.0 mm/sec	

Table 3.10 Cross section of the FSW joints with pinless tool

Rotation speed	Traveling speed	Cross section
400 rpm	0.6 ~ 0.8 mm/sec	접합불가
	1.0 mm/sec	

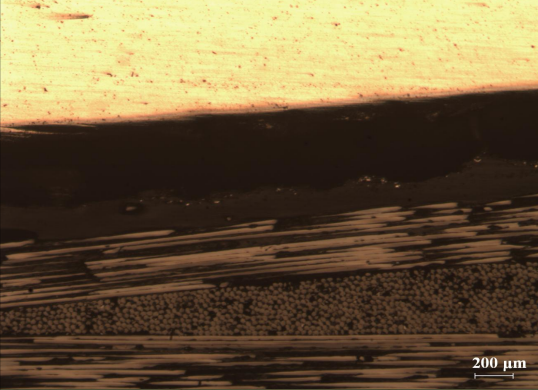

3.2.3 표면조도에 유무에 따른 이종재 Al-CFRP 접합부 단면특성

앞서 도출된 조건을 기반으로 Al합금 표면에 거칠기를 형성하여 표면조도에 따른 접합부의 특성을 관찰하고자 하였다. 표면 처리 방법으로 시편에 조도를 주기 위해 3가지 방법으로 실험을 실시하였다. 샌드블라스팅을 이용하여 조도를 주려고 하였으나 작업중 변형이 발생하는 문제점으로 인해 그라인딩 블러싱 방법과 Wet grinding을 실시하여 그중 가장 적합하다고 판단된 Wet grinding을 채용하여 표면 조도를 형성시켰다. [13~14]

표면처리 유/무에 따른 접합부 특성을 관찰하기 위하여, 접합조건 회전속도 400 rpm, 삽입깊이 0.2 mm, 이송속도 1.0 mm/sec에서 제작된 시편 표면에 3.0Ra의 조도를 형성시킨후 비교 실험을 진행하였다.

단면 관찰결과, 표면에 조도를 준 Al합금과 용융된 CFRP간에는 Inter lock 현상으로 상대적으로 밀착되어 결합이 향상됨을 Table 3.11의 단면사진을 통해 확인할 수 있었다. 이 현상으로 인해 접합부의 강도가 향상될 것으로 예상된다.

Table 3.11 Cross section of the FSW joints with pinless tool

Rotation speed	Surface roughness	Cross section
400 rpm	0 Ra	
	3.0 Ra	

3.2.4 이종재 Al-CFRP 접합부 온도 특성

이송속도에 따른 접합부의 온도 분포를 확인하기 위해 회전속도 400 rpm, 삽입 깊이가 0.2mm를 고정시키고 이송속도를 0.8, 1.0 mm/sec 두가지 조건에서 폭방향으로 30, 35 mm, 길이방향으로 75, 95 mm 위치의 온도를 측정하였으며 측정위치와 그래프를 Fig 3.1에 나타내었다.

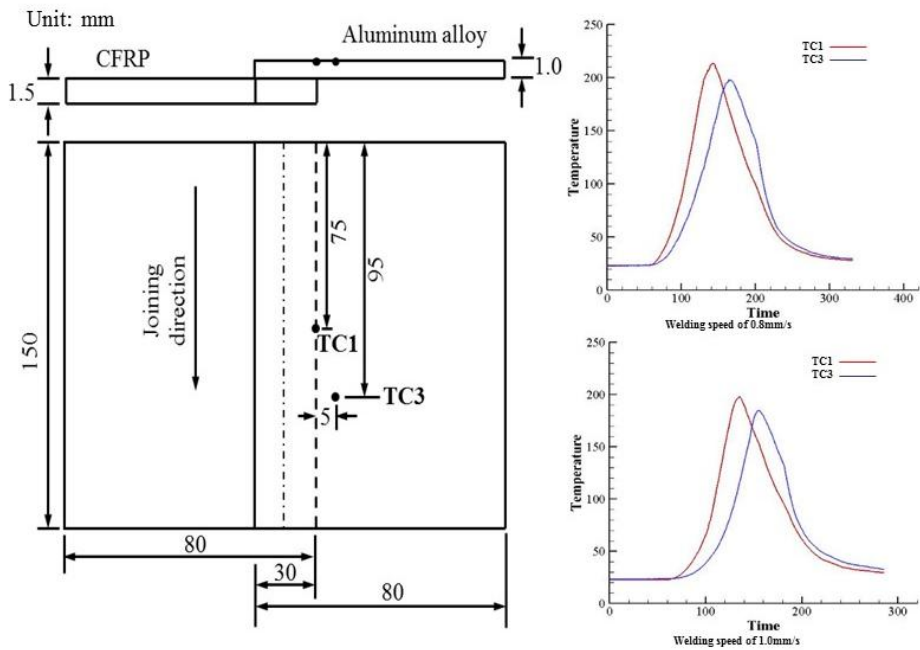


Fig 3.1 Measurement position and temperature distribution

최고온도는 0.8, 1.0 mm/sec 조건에서 각각 213.3, 197.8°C로 나타났으며, 이는 접합성에 있어서 얇은 알루미늄 판재가 높은 마찰열을 받아 생기는 변형이 접합부 강도에 영향을 끼칠 수 있는 온도라고 판단된다.

3.3 접합부의 기계적·금속학적 특성평가 결과

3.3.1 접합부의 기계적 특성 평가

본 연구는 알루미늄 합금 Al5052와 CFRP의 FSW 접합시 틀 핀 유/무에 따른 접합부의 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 마찰교반접합을 실시한 후, 접합부의 강도를 확인하기 위하여 전단인장시험을 실시하였다. 시험편의 전단인장강도 시험을 위해 회전속도 400 rpm, 이송속도 1.0 mm/sec, 삼입깊이 0.2 mm 조건의 시험편을 사용하여 전단인장강도를 측정하였다. Fig 3.2 에 전단인장강도를 kN과 MPa의 단위로 나타내었다.

최대전단인장강도는 2 kN, 7.6MPa로 나타났으며 접합면에서 파단이 발생하였다. 전단인장시험과 파면 사진을 각각 Fig 3.3과 Fig 3.4를 통해 나타내었다.

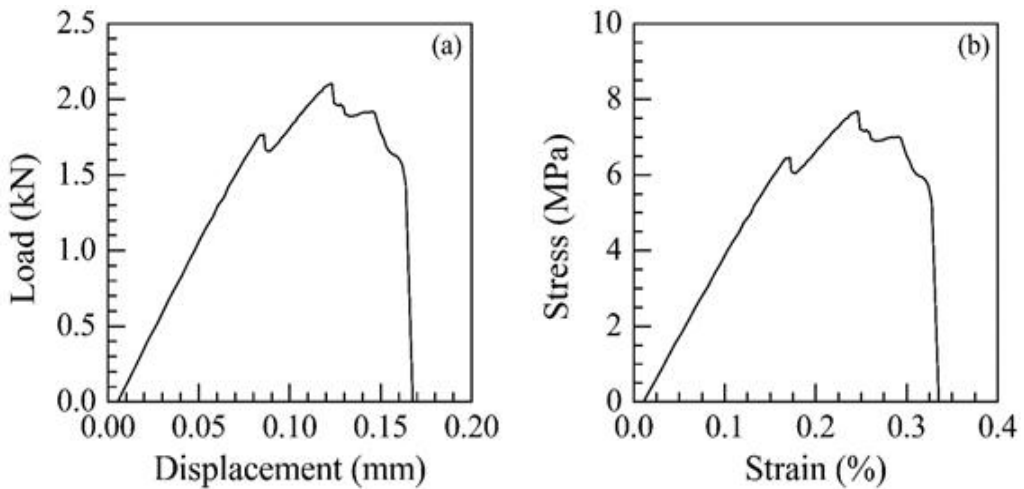


Fig 3.2 Tensile shear strength of FSW joints

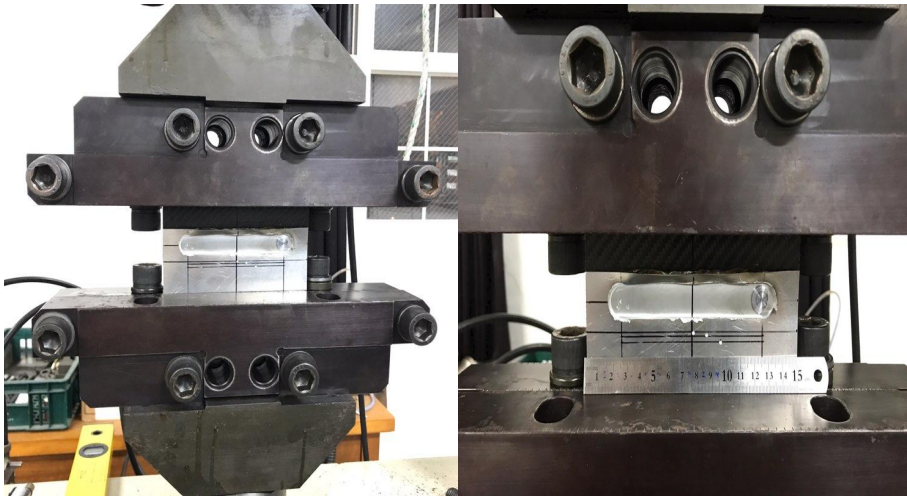


Fig 3.3 Tensile shear strength test



Fig 3.4 Shape of fractured surface of Al/CFRP joints

Fig 3.5는 전단인장 파단시험편에 대한 파단면을 관찰한 것이다. 파단면을 관찰하기 위해 SEM-EDS를 이용한 Area 분석을 통해 파면의 Al합금과 C의 화학적 성분 분포를 확인한 결과 Fig 3.6과 Table 3.12와 같이 각각 36.18%와 63.82%로 나타났다. 이를 통해 접합면을 따라 파단이 일어났지만 부분적으로는 Al합금과 CFRP 모재에서 파단이 발생한 것을 확인하였다.

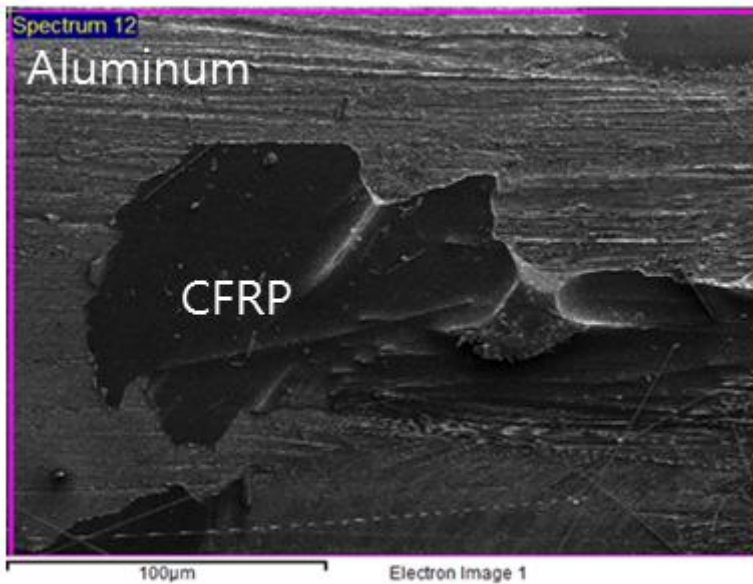


Fig 3.5 Scanning electron image of fracture sample at rotational speed of 400 rpm and traveling speed of 1.0 mm/sec

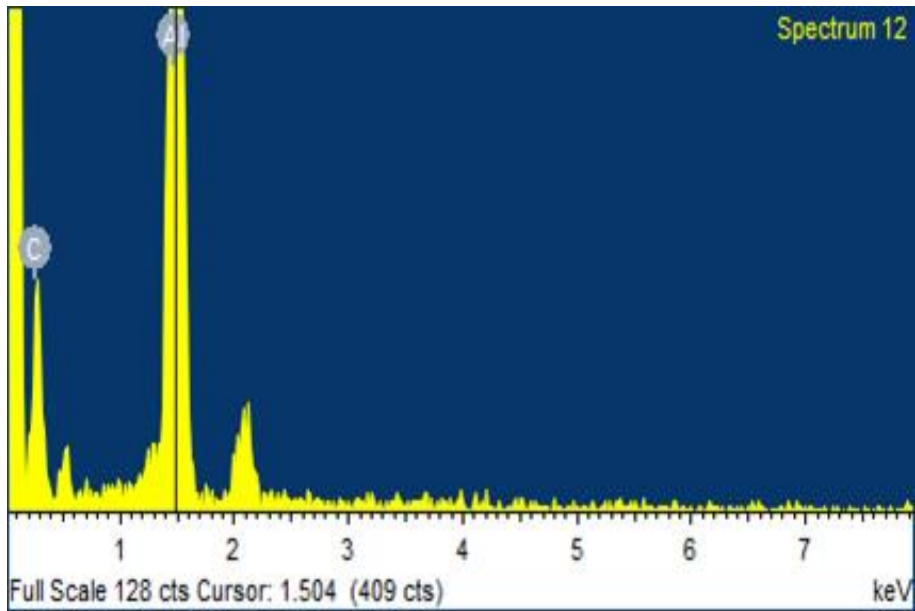


Fig 3.6 Chemical compositions of the fractured surface of Al/CFRP joints

Table. 3.12 Chemical compositions of the fractured surface

Element	Weight(%)	Atomic(%)
C	63.82	79.82
Al	36.18	20.15
Total	100	100

3.3.2 접합부의 금속학적 특성평가

접합부의 미세조직 특성을 평가하기 위해 Al5052와 CFRP의 접합부 계면을 SEM-EDS를 이용하여 성분 분석을 진행하였다. Fig 3.7는 접합부 단면의 사진으로 접합면에 Al과 Polyamid 66의 열전도로 인한 접합이 이루어졌음을 확인하였다.

또한 EDS를 이용하여 접합면의 성분분석을 실시하였다. Fig 3.8은 EDS의 측정위치 및 성분의 분포를 나타낸 것이다. 측정위치는 각각 CFRP, Al합금 모재와 접합 계면 두곳을 포함 총 4점을 측정하였으며, 그 결과 접합 계면의 Al과 Mg, C의 분포를 확인하였다. 접합면인 Point 5, 6의 C와 Al 분포를 통해 Al합금과 CFRP간의 화학적 결합이 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

각각의 point의 성분을 분석하는 점 분석뿐만 아니라 모재를 포함한 계면까지의 성분 분포를 알아보기 위한 선 분석 또한 실시하였다. Fig 3.9를 통해 Al성분과 C성분의 위치에 따른 선 분석을 통해 접합 계면에서의 Al합금과 CFRP간의 결합이 이루어졌음을 다시 한번 확인할 수 있었다.

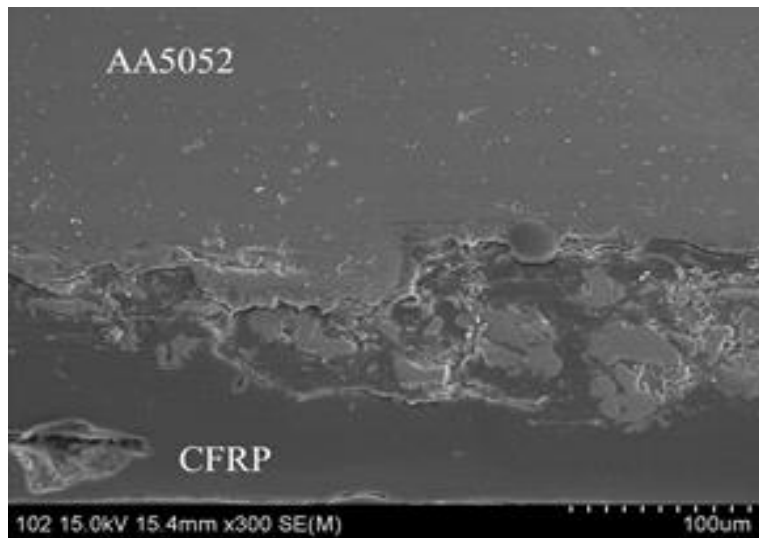


Fig 3.7 Cross-sectional image of ground-Al5052 and CFRP joints

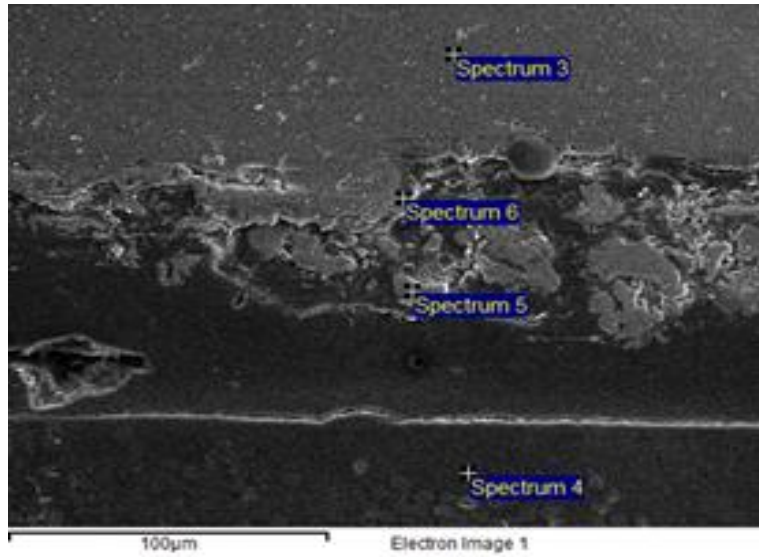


Fig 3.8 Locations of EDS point analysis

Table. 3.13 Chemical compositions of elements in EDS analysis

Point No	Al (Wt%)	Mg (Wt%)	C (Wt%)
Point 3	97.39	2.61	0
Point 4	0	0	100
Point 5	76.73	2.61	20.66
Point 6	86.57	4.61	8.82

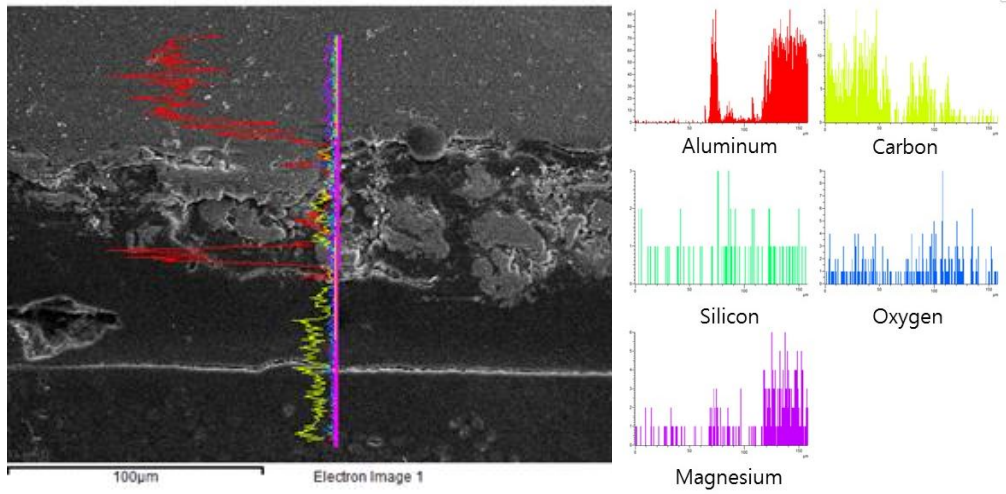


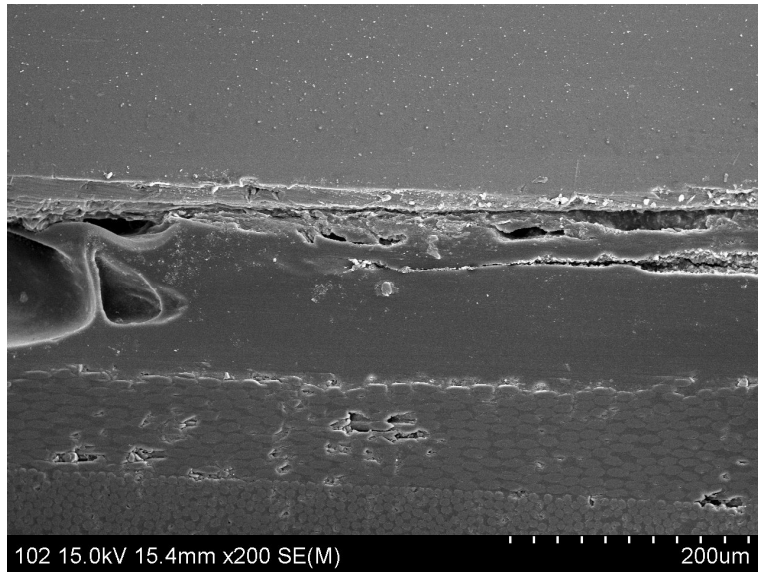
Fig 3.9 Chemical composi distribution

3.3.3 Pin 유무에 따른 이종재 AI/CFRP 접합특성 비교

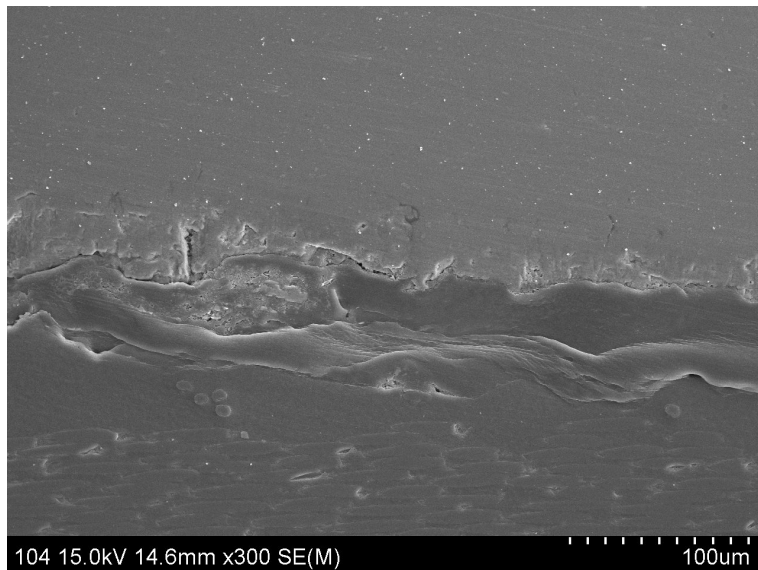
Pin의 유무에 따른 접합특성을 비교하기 위해 frustum type과 pinless type 두 가지 형상의 틀로 실험을 실시하여 그 결과를 비교하고자 하였다.

Frustum type 틀의 경우 핀 주위 터널결함이 발생하는 것을 확인하였으며, 이는 접합부 강도에 큰 영향을 미치는 치명적 결함이다. 이는 열전도 접합의 특성상 소재간의 원활한 교반이 이루어지지 않는 것이 원인으로 판단된다.

이와 같은 결함을 방지하기 위해 Pin이 없는 형상의 틀을 사용하여 새로운 조건을 적용하여 실험을 실시하였고, 그 결과 열전도에 의한 AI합금과 CFRP간의 이종재료의 접합이 이루어졌으며, 추가적으로 AI합금 표면에 거칠기를 주어 실험을 진행하였다. 표면 거칠기에 따른 접합부 계면을 SEM-EDS를 이용하여 관찰한 결과, 거칠기를 부여하지 않는 시편의 경우 접합 계면에 틈이 형성되어 있는 것을 관찰하였으며 표면 거칠기가 형성된 시편의 경우 빈틈이 없이 접합이 이루어져 접합성이 더 뛰어난 것으로 관찰되었으며, 이를 Fig 3.10을 통해 나타내었다. 접합단면 관찰 결과를 확인하기 위해 인장전단강도 시험을 통해 표면 거칠기 유무에 따른 강도를 평가한 결과, 표면 거칠기가 형성되지 않은 시편은 고정하는 과정에서 파단이 발생하였으며 표면 거칠기가 형성된 시편의 경우 앞절에서 언급한 바와 같이 2.0kN의 인장전단강도를 확보하였다.



(a) Roughness = 0



(b) Roughness = 3.0 Ra

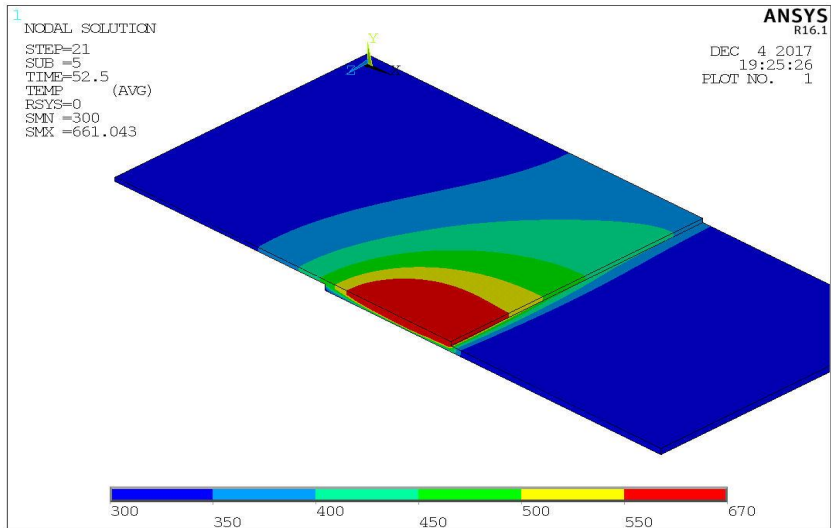
Fig 3.10 Joint interface with surface roughness of 0, 3.0 Ra

3.4 AI/CFRP FSW 접합부 열전도 및 열탄소성 수치해석

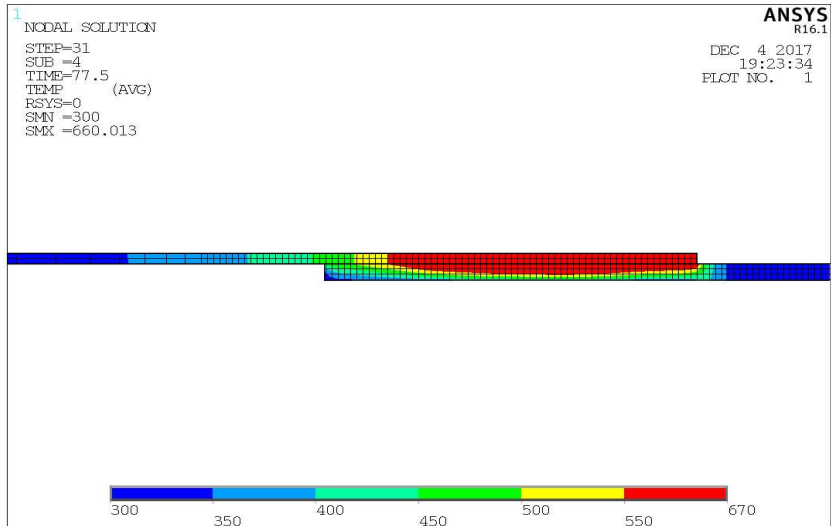
3.4.1 온도 분포 특성

Ansys classic APDL 16.1 프로그램을 기반으로 AI/CFRP간 접합의 온도 이력 및 분포를 계산하고 이를 실제 결과와 비교하여 분석을 실시하였다.

수치해석을 위한 조건으로 Thermo-couple을 이용하여 열 이력을 측정할 회전속도 400rpm, 삼입깊이 0.2mm, 이송속도 0.8, 1.0mm/s 두가지 분석을 실시하였다. 해석을 통해 하부에 위치한 CFRP 시편으로의 열 전도가 이루어지는 깊이를 확인하고자 하였고 해석의 정확성을 확인하기 위해 실제 측정된 온도와의 차이를 비교하였으며 그 결과는 다음과 같다.

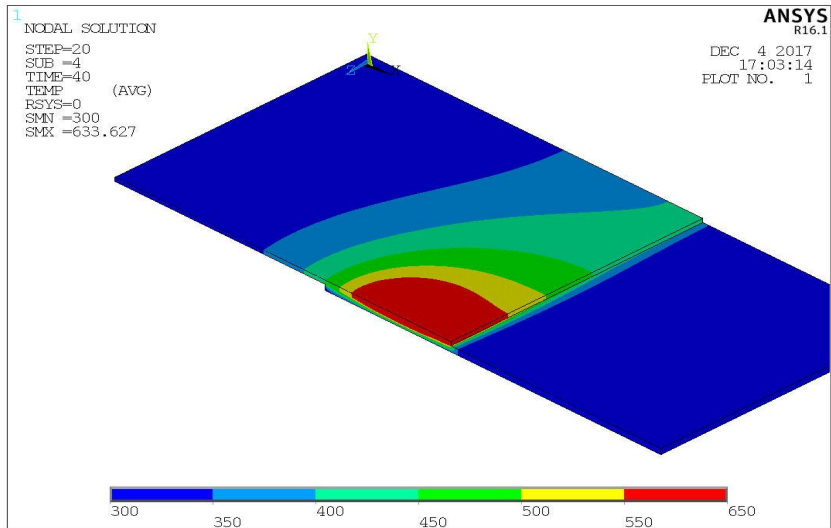


(a) Surface

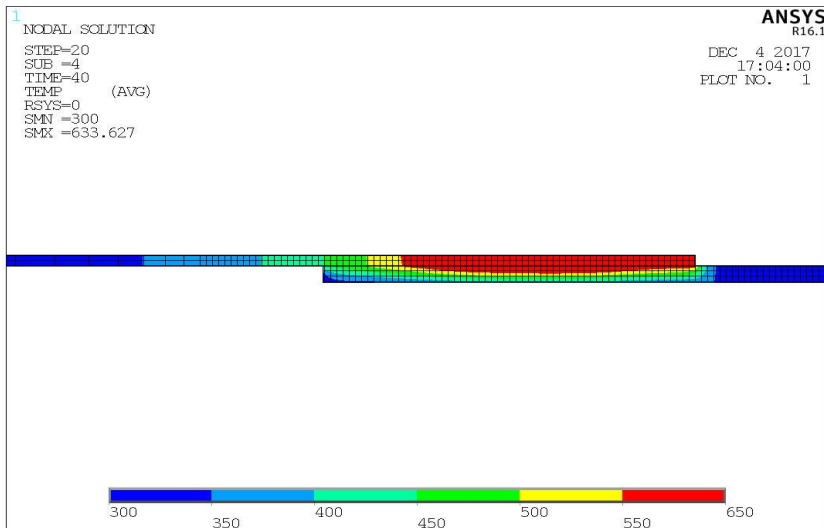


(b) Cross section

Fig 3.11 Cross section and surface heat distribution with welding speed of 0.8mm/s

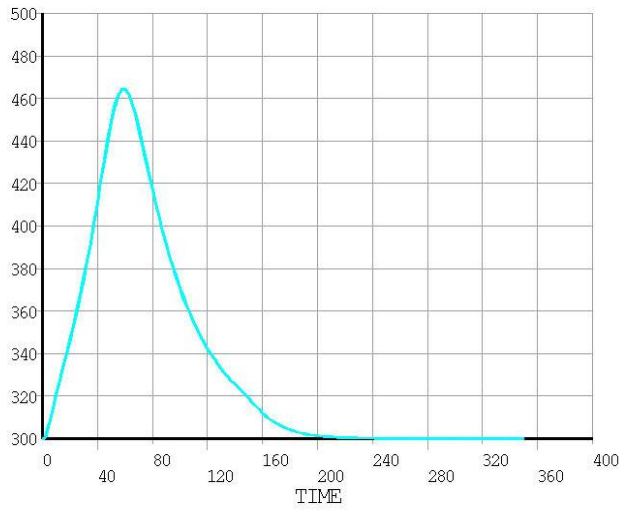


(a) Surface

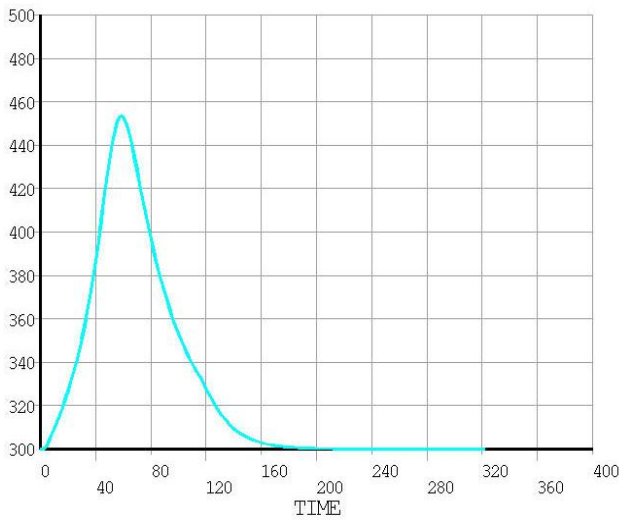


(b) Cross section

Fig 3.12 Cross setion and surface heat distribution with welding speed of 1.0mm/s



(a) Welding speed of 0.8mm/s



(b) Welding speed of 1.0mm/s

Fig 3.13 Heat history with various welding speed

해석의 신뢰성을 확인하기 위해 Thermo-couple을 이용하여 열 이력을 확인한 위치에서의 열 이력을 확인한 결과 0.8mm/s 조건에서 464.5K(195℃)로 Thermo-couple을 이용하여 측정된 213.3℃과 약 18℃정도의 차이가 있었으며, 1.0mm/s 조건에서는 453.5K(185℃)로 측정값 197℃와 약 10℃ 차이가 있었다. 프로그램을 이용하여 해석한 결과가 실제와 완벽하게 일치하지 않았으나, 조건에 따른 온도의 경향이 일치함을 확인하였으므로 결과를 신뢰할 수 있다고 판단된다.

이송속도 0.8mm/s 조건에서는 최고온도가 660K(390℃)로 측정되었으며 열 영향을 받은 CFRP는 깊이 방향으로 1.0mm로 확인되었다. 또한 이송속도 1.0mm/s 조건의 경우 최고 온도는 663K(393℃)로 비슷하게 형성되었으나 열 영향을 받은 CFRP는 깊이 방향 0.5mm로 상대적으로 열로 인한 수지의 용융이 적게 발생하였음을 확인하였다.

결과적으로 두 조건 모두 CFRP의 상부 표면에 용융이 일어날 정도의 온도가 발생 하였음을 확인 하였고, 또한 상부 표면의 0 ~ 1.0mm까지 열영향을 받았음을 해석을 통해 확인할 수 있었다.

3.4.2 용접 잔류응력 및 변형 특성

앞서 해석한 온도 이력 해석 이후에 추가적으로 열-탄소성 해석을 실시하였다.

해석은 회전속도 400rpm, 삽입깊이 0.2mm, 이송속도 1.0mm/s 조건으로 분석을 실시하였다. 접합부를 중심으로 AI, CFRP 시험편 횡방향의 잔류응력과 상부의 AI 시험편 잔류응력 두가지로 나누어 잔류응력을 분석하였다. 다음은 시험편의 전반적인 잔류응력의 분포를 나타낸 것이다.

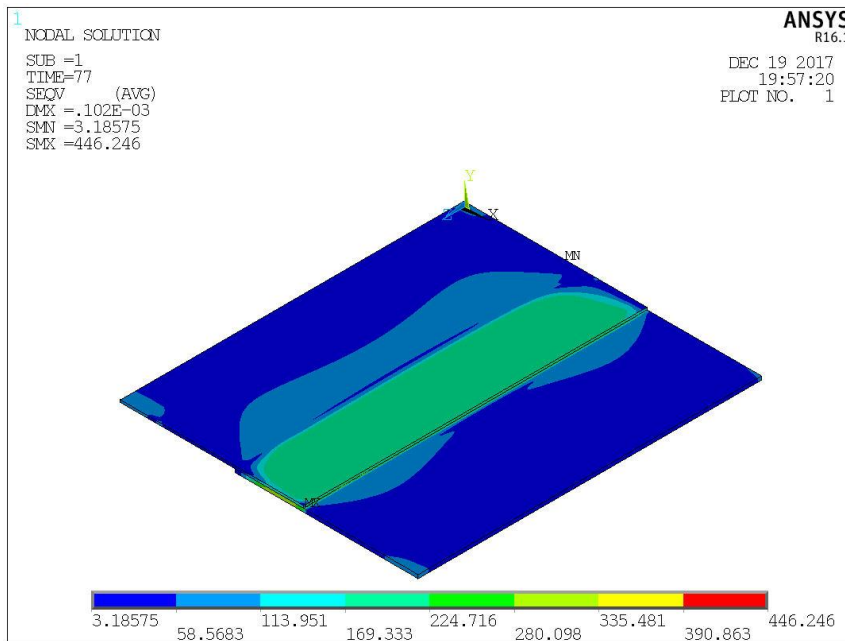


Fig 3.14 Residual stress distribution

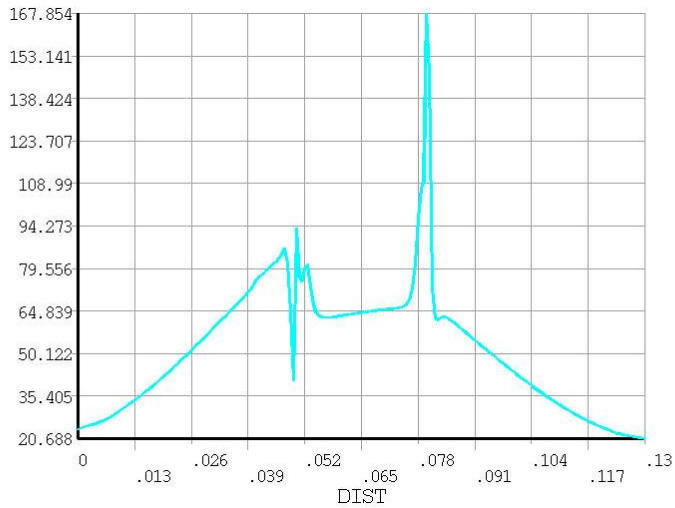


Fig 3.15 Residual stress distribution toward longitudinal direction

시험편의 종방향 잔류응력 분포를 확인한 결과 알루미늄 시험편과 CFRP의 접합
 시단부에서 잔류응력이 크게 감소하는 경향을 보였으며 CFRP측 접합면에서는 잔류
 응력이 크게 증가하는 것을 확인하였다. 이는 알루미늄과 CFRP의 기본 물성치의
 차이에 의한 현상으로 예상된다.

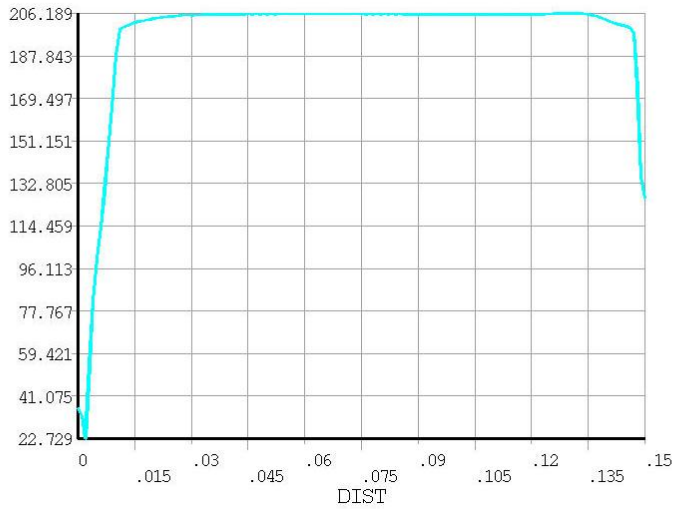


Fig 3.16 Residual stress distribution of Aluminum plate

상부 시험편인 알루미늄의 잔류응력을 분석한 결과 206MPa임을 확인 하였다. 실험 과정에서 매번 높은 입열로 인해 알루미늄 시험편에 큰 변형이 발생하였고 이를 조절하는 것이 접합부의 강도 증가에 직접적인 원인이 될 것이라고 판단하였었다. 따라서, 이러한 높은 해석 결과가 나온 이유로는 접합 과정에서 과도한 열의 발생하였고 이로 인해 알루미늄 시험편이 소성 변형을 일으켜 그로 인해 내부의 잔류 응력 값이 크게 관찰되었다고 판단된다.

4장 결론

본 연구에서는 차체 경량화에 적용되는 가장 대표적인 알루미늄 합금 5052 소재와 첨단 소재인 CFRP를 사용할 때, 마찰교반접합을 실시하는 과정에서 툴의 핀 유무가 접합부에 미치는 영향에 대해서 실험을 수행하였다. 툴의 회전속도, 삽입깊이, 이송속도, AI합금 표면의 거칠기에 따라 조건별로 기계적인 특성과 금속학적인 특성을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) Frustum type의 핀을 가진 툴을 사용하여 이종 AI합금/CFRP의 마찰교반접합을 시도하였을 때, 핀 진행부 주위로 Tunneling defect가 관찰되었다. 이는 불충분한 입열과 소성유동으로 인해 발생하는 것으로 접합부 강도에 치명적이며, 마찰열을 이용한 열전도 접합의 특성상 CFRP 소재가 AI합금과 교반이 이루어지지 않아 형성됨을 알 수 있었다.
- 2) Pinless type의 툴을 사용하여 AI/AI합금 동종 마찰교반접합을 시도하여 얻어낸 최적조건을 AI합금/CFRP 이종 마찰교반접합을 시도하였으나, CFRP의 열전도율이 AI합금과 비교하여 낮기 때문에 동종 접합과 비교하여 상부 AI판재의 열변형이 크게 발생하였다. 변형으로 인한 소재의 파단을 줄이기 위해 입열을 낮추기 위한 새로운 조건을 도출하였으며, 이송속도가 0.6 mm/sec까지 상승시켰을 때 AI합금 판재의 파단을 없앨 수 있었다.
- 3) 접합부 계면을 관찰하기 위해 시편을 cutting하는 중 접합면에서 파단이 발생하였고 접합 조건 툴 회전속도 400 rpm, 이송속도 1.0 mm/sec, 삽입깊이 0.2 mm 조건의 접합시편의 단면을 확보하였으며, 단면 관찰결과 부분적인 접합이 이루어졌음을 확인할 수 있었으나, 다소 많은 면적에서 미접합부가 관찰되어 뛰어난 접합이 이루어지지 않았음을 알 수 있었다.

4) Al합금 표면 거칠기에 따른 접합성의 평가 및 관찰을 위해 Sand blast와 그라인드 블러싱, Wet grinding 방법 세가지를 시도하여 가장 적합하다고 판단된 Wet grinding 방법을 사용하여 Al합금 표면에 평균 3.0 Ra의 거칠기를 부여하여, 앞서 도출된 최적조건 톨 회전속도 400 rpm, 이송속도 1.0 mm/sec, 삽입깊이 0.2 mm으로 실험을 실시하여 전단인장강도 시험을 수행하였다. 그 결과 강도시험을 위한 고정작업에서 파단이 발생한 거칠기 0 Ra시편과 달리, 거칠기 3.0 Ra 시편의 경우 최대전단인장강도는 2 kN, 7.6MPa로 나타났으며 접합면에서 파단이 발생하였다. SEM-EDS를 이용한 Area 분석을 통해 파면의 Al합금과 C의 화학적 성분 분포를 확인한 결과 각각 36.18%와 63.82%로 나타났다. 이를 통해 접합면을 따라 파단이 일어났지만 부분적으로는 Al합금과 CFRP 모재에서 파단이 발생한 것을 확인하였다.

5) 접합부의 미세조직 특성을 평가하기 위해 Al5052와 CFRP의 접합부 계면을 SEM-EDS를 이용하여 성분 분석을 진행하였다. CFRP, Al합금 모재와 접합계면 두곳을 포함 총 4점을 측정하였으며, 그 결과 접합 계면의 Al과 Mg, C의 분포를 확인하였다. 성분 분석을 통해 접합 계면에서의 Al합금과 CFRP간의 결합이 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

6) 수치해석을 통해 CFRP 깊이 방향으로의 열 영향부를 확인한 결과, CFRP 상부 표면으로부터 0 ~ 1.0mm까지 수지의 용융이 일어날 정도의 열이 발생함을 확인하였다. 또한 열-탄소성 해석을 통해 과도한 열의 발생으로 인해 상부 알루미늄 시험편에 다소 높은 206MPa의 잔류응력을 확인하였고, 알루미늄의 소성 변형 발생을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] Y. S. Kim : Future of the friction stir spot welding technology for non-ferrous metal, Journal of Welding and Joining, 2012, 30-3, pp4-14
- [2] S. H. Chowdhury, D. L. Chen, S. D. Bhole, X. Cao and P. Wanjara : Lap shear strength and fatigue behavior of friction stir spot welded dissimilar magnesium-to-aluminum joints with adhesive, Materials Science and Engineering: A, 2013, 562, pp53-60
- [3] 정현상 : 자동차 경량화 용·복합소재 트렌드분석, 한국과학기술정보연구원, 2013
- [4] H. S. Bang, H. S. Bang and G. H. Jeon : Recent Studies on Hybrid Friction Stir Welding. Journal of Welding and Joining, 2010, 28-5, pp35-37
- [6] S. H. Kim, S. W. Kim, S. J. Park and W. S. Chang : Dissimilar Friction Spot Joining : A5052-H32 / A6022-T4, RIST journal of R&D, 2007, 21-2, pp153-159
- [7] C. K. Chun, H. J. Kim and W. S. Chang : Friction Stir Spot Joining on Aluminum Alloy for Transportation, Journal of The Korean Welding & Joining Society, 2008, 26-6, pp23-29
- [8] Y. Abe, T. Kato, 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 (2009) pp3914-3922
- [9] Y. M. Yeon, C. Y. Lee, W. B. Lee, S. B. Jung and W. S. Chang : Spot Friction Stir Welding and Characteristics of Joints in Aluminium Alloys, Journal of Welding and Joining, 2005, 23-3, pp16-20

- [10] E. H. Kim, K. J. Lee and K. H. Song : Evaluation of mechanical properties on friction stir lap jointed Al6061/HT590 alloys, Journal of Welding and Joining, 2015, 33-2, pp8-13
- [11] Y. Kim, K. Y. Park and S. B. Kwak : Mechanical fastening and joining technologies to using multi mixed materials of car body, Journal of Welding and Joining, Vol.33 No.3(2015) pp12-18
- [12] Y. H. Yina, N. Sunb, T. H. Northc and S. S. Hua : Hook formation and mechanical properties in AZ31 friction stir spot welds, Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210, pp2062-2070
- [13] S. J. Lee, S. K. Lee and N. I. Baik : A Study on the Microstructure and Hardness of Al-Si-Mg Alloys upon Heat Treatments, J of the Korean Society for Heat Treatment, v.13, no.2, 2000 Year, pp.108-114
- [14] D. Horstmann, Proc. Fourteenth Int. of Hot Dip Galvanizing, Munich, ZDA, London, (1985) 6/1
- [15] A. A Hershman, Proc. Eighth Int. Conf. of Hot Dip Galvanizing, London, ZDA, London, (1967) 3
- [16] Metals Hand book, 3rd ed, Japan Institute of Metal, Maruzen, Tokyo, Japan, (1993) 539
- [17] Kim KS, Master Thesis, Gyeongsang National University, "Microstructures and mechanical properties of A356 semisolid metal fabricated by cooling plate" (2000) 1.