



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

이종재 AI-CFRP의 Pinless틀을  
이용한 마찰교반점용접 특성에  
관한 연구

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

박 주 헌

이종재 AI-CFRP의  
Pinless툴을 이용한  
마찰교반점용접 특성에  
관한 연구

A study on welding characteristics for  
dissimilar materials AI-CFRP using  
friction spot joining with pinless tool

2018년 2월 23일

조선대학교 대학원  
용접·접합과학공학과  
박 주 헌

이종재 AI-CFRP의  
Pinless툴을 이용한  
마찰교반점용접 특성에  
관한 연구

지도교수            방 희 선

공동지도교수    방 한 서

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2017년 10월

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

박 주 헌

## 박주헌의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 조교수 송국현 (인)

위 원 조선대학교 특임교수 방한서 (인)

위 원 조선대학교 교수 방희선 (인)

2017년 11월

조선대학교 대학원

## CONTENTS

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| List of Figures .....           | IV  |
| List of Tables .....            | VI  |
| Abstract .....                  | VII |
| <br>                            |     |
| 1장. 서론 .....                    | 1   |
| 1.1 연구배경 및 목적 .....             | 1   |
| 1.1.1 연구배경 .....                | 1   |
| 1.1.2 연구목적 .....                | 5   |
| <br>                            |     |
| 1.2 국내 · 외 기술 동향 .....          | 7   |
| 1.2.1 알루미늄 합금의 기술 동향 .....      | 7   |
| 1.2.2 CFRP의 기술 동향 .....         | 8   |
| 1.2.3 이종재 금속+CFRP 접합기술 동향 ..... | 10  |
| <br>                            |     |
| 1.3 마찰교반점용접(FSJ) 특성 .....       | 13  |
| 1.3.1 마찰교반점용접의 원리 .....         | 13  |
| 1.3.2 마찰교반점용접의 특징 .....         | 15  |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>2장 . 연구 방법</b> .....                   | <b>16</b> |
| 2.1 연구 방법 .....                           | 16        |
| 2.2 실험방법 및 조건 .....                       | 17        |
| 2.2.1 시험편 형상 및 사용 소재 .....                | 17        |
| 2.2.2 실험장비 및 툴(Tool) .....                | 19        |
| 2.2.3 FSJ 용접조건 .....                      | 21        |
| 2.2.4 용접부 특성 평가 .....                     | 22        |
| 2.3 유한요소법에 의한 열전도 및 열탄소성 이론 .....         | 24        |
| 2.3.1 열전도 이론의 정식화 .....                   | 24        |
| 2.3.2 열탄소성 이론의 정식화 .....                  | 29        |
| <br>                                      |           |
| <b>3장 . AI/CFRP 용접부 공정변수별 용접 특성</b> ..... | <b>33</b> |
| 3.1 툴의 삽입깊이에 따른 용접 특성 .....               | 33        |
| 3.1.1 용접부 외관 특성 .....                     | 33        |
| 3.1.2 용접부 인장-전단강도 및 파단면 분석 .....          | 35        |
| 3.2 툴의 삽입유지시간에 따른 용접 특성 .....             | 37        |
| 3.2.1 용접부 외관 특성 .....                     | 37        |
| 3.2.2 용접부 인장-전단강도 및 파단면 분석 .....          | 39        |
| 3.2.3 용접부 표면 온도 특성 .....                  | 41        |

|       |                            |    |
|-------|----------------------------|----|
| 3.3   | 틀의 회전속도에 따른 용접 특성 .....    | 42 |
| 3.3.1 | 용접부 외관 특성 .....            | 42 |
| 3.3.2 | 용접부 단면 특성 .....            | 44 |
| 3.3.3 | 용접부 인장-전단강도 및 파단면 분석 ..... | 46 |
| 3.3.4 | 용접부 표면 온도 특성 .....         | 49 |
| <br>  |                            |    |
| 4장    | . AI/CFRP 용접부 수치해석 .....   | 50 |
| 4.1   | 해석 모델 및 조건 .....           | 50 |
| 4.2   | 열전도 수치해석 결과 및 고찰 .....     | 51 |
| 4.3   | 열탄소성 수치해석 결과 및 고찰 .....    | 54 |
| 4.3.1 | AI/CFRP 용접부 변형률 특성 .....   | 54 |
| 4.3.2 | AI/CFRP 용접부 잔류응력 특성 .....  | 58 |
| <br>  |                            |    |
| 5장    | . 결론 .....                 | 62 |
| <br>  |                            |    |
| 참고문헌  | .....                      | 64 |

## List of Figures

|   |    |
|---|----|
| Fig. 1.1 CO <sub>2</sub> emissions performance and proposed vehicle standards .....     | 3  |
| Fig. 1.2 Effect of vehicle lightweight .....  | 3  |
| Fig. 1.3 CFRP market outlook .....  | 4  |
| Fig. 1.4 Demand outlook for automotive CFRP .....                                       | 4  |
| Fig. 1.5 Multi-materials applied to vehicle .....                                       | 6  |
| Fig. 1.6 Aluminum BIW(Body In White) of Vehicle .....                                   | 6  |
| Fig. 1.7 HP-RTM (High Pressure Resin Transfer Molding) process .....                    | 9  |
| Fig. 1.8 Schematic representation of the FSJ process .....                              | 11 |
| Fig. 1.9 Laser direct joining of CFRP to metal or engineering plastic .....             | 11 |
| Fig. 1.10 FSBR(Friction Stir Blind Riveting) procedure .....                            | 12 |
| Fig. 1.11 Mechanical clinching procedure .....  | 12 |
| Fig. 1.12 Schematic representation of the FSW process .....                             | 13 |
| Fig. 1.13 FSJ(Friction spot joining) process .....                                      | 14 |
| Fig. 1.14 Joining Mechanism of FSJ(Friction spot joining) .....                         | 14 |
| Fig. 2.1 Dimension of FSJ specimen .....  | 17 |
| Fig. 2.2 Equipment of friction stir welding system .....                                | 19 |
| Fig. 2.3 Tool details used for friction spot joining .....                              | 20 |
| Fig. 2.4 Surface roughness measuring instrument .....                                   | 20 |
| Fig. 2.5 Infrared radiation thermometer .....   | 22 |
| Fig. 2.6 UTM(Universal Testing Machine) .....   | 23 |
| Fig. 2.7 Optical microscope .....   | 23 |
| Fig. 2.8 Heat generation from friction at tool between workpiece .....                  | 28 |
| Fig. 3.1 Tensile-shear strength and fracture interface(CFRP) with<br>plunge depth ..... | 36 |
| Fig. 3.2 Surface temperature and tensile-shear strength with dwell time .....           | 41 |

Fig. 3.3 Resin thickness and tensile-shear strength of Al/CFRP joints  
     with rotation speed ..... 47  
 Fig. 3.4 Surface temperature and tensile-shear strength  
     with rotation speed ..... 49  
 Fig. 4.1 Al/CFRP lap joint two-dimensional Modeling for  
     numerical analysis ..... 50  
 Fig. 4.2 Finite-element mesh division for numerical analysis ..... 50  
 Fig. 4.3 Strain distribution of Al/CFRP joint with rotation speed ..... 55  
 Fig. 4.4 Strain distribution of Al/CFRP joint with dwell time ..... 57  
 Fig. 4.5 Residual stress distribution of Al/CFRP joint  
     with rotation speed ..... 59

## List of Tables

|  |    |
|--|----|
| Table. 2.1 Chemical composition and mechanical properties of Al5052/H32 ..               | 18 |
| Table. 2.2 Material properties of CFRP .....   | 18 |
| Table. 2.3 Specifications of friction stir welding system .....                          | 20 |
| Table. 2.4 Welding conditions for friction spot joining .....                            | 21 |
| Table. 3.1 Side face of Al/CFRP joints with plunge depth .....                           | 34 |
| Table. 3.2 Surface of Al/CFRP joints with plunge depth .....                             | 34 |
| Table. 3.3 Fracture interface after tensile-shear test with plunge depth                 | 35 |
| Table. 3.4 Side face of Al/CFRP joints with dwell time .....                             | 38 |
| Table. 3.5 Surface of Al/CFRP joints with dwell time .....                               | 38 |
| Table. 3.6 Fracture interface after tensile-shear test with dwell time .....             | 39 |
| Table. 3.7 Tensile-shear strength with dwell time .....                                  | 40 |
| Table. 3.8 Side face of Al/CFRP joints with rotation speed .....                         | 43 |
| Table. 3.9 Surface of Al/CFRP joints with rotation speed .....                           | 43 |
| Table. 3.10 Cross section(Macro) with rotation speed .....                               | 44 |
| Table. 3.11 Cross section(Micro) with rotation speed .....                               | 45 |
| Table. 3.12 Fracture interface after tensile-shear test<br>with rotation speed .....     | 47 |
| Table. 3.13 Tensile-shear strength with rotation speed .....                             | 48 |
| Table. 4.1 Temperature fields with rotation speed .....                                  | 52 |
| Table. 4.2 Temperature fields with dwell time .....                                      | 53 |
| Table. 4.3 Strain fields with rotation speed .....                                       | 54 |
| Table. 4.4 Strain fields with dwell time .....   | 56 |
| Table. 4.5 Residual stress fields with rotation speed .....                              | 58 |
| Table. 4.6 Residual stress fields with dwell time .....                                  | 60 |
| Table. 4.7 Temperature history and residual stress distribution<br>with dwell time ..... | 61 |

## ABSTRACT

### A study on welding characteristics for dissimilar materials Al-CFRP using friction spot joining with pinless tool

Park Ju-Heon

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

Today, regulations on automobile emissions and fuel efficiency are increasingly being strengthened to cope with problems such as air pollution and global warming all over the world. Therefore, the automobile industry must satisfy the regulations. Vehicle weight reduction is attracting attention as the most effective way to reduce carbon dioxide emissions by improving fuel efficiency. Recently, the automobile industry has been using ultra-high strength steel plates, hot stamping and hydroforming to reduce the weight of vehicles, but it is difficult to meet the tightening emission regulations. Therefore, it is focused on strengthening the strength of the car body and reducing the weight of the vehicle by replacing it with a lightweight material.

Aluminum has an excellent specific strength compared with steel and is excellent in corrosion resistance and recyclability. When replacing BIW (Body In White) entirely with aluminum, up to 45% weight reduction is possible. In addition, carbon fiber reinforced plastic (CFRP), which is attracting attention as a next-generation lightweight material, has 60% weight and 5 times higher strength than that of aluminum.

CFRP is under many restrictions apply to the actual automobile parts because of the disadvantages such as low elongation and breaking strength. In order to solve these problems, Multi-Material Mix Technology that mixes various materials is emerging. By using different properties between materials, it is possible not only to reduce the weight but also to select and arrange materials having suitable mechanical properties to obtain optimized performance and reduced manufacturing cost. However, it is difficult to realize high-strength and high-durability joints by using the conventional bonding technique because the material properties between materials are different from each other. Therefore, it is important to secure appropriate bonding technology in the development of dissimilar materials parts.

In this study, we applied the friction spot joining(FSJ) process as a bonding method for Al/CFRP. For this purpose, the reliability of the joints is secured by evaluating the bonding characteristics and the mechanical and metallurgical characteristics according to the parameters of each process.

In order to investigate the characteristics of Al/CFRP using friction spot joining, plunge depth, the rotation speed, and the dwell time were selected as parameters. The material used in the research is aluminum alloy Al5052 1mm (t), which is lightweight material used in vehicles. As CFRP material, 'LANXESS' 'Tepex dynalite' uses 3k carbon fiber and polyamide 66 thermoplastic resin and thickness is 1.5mm (t). Lap Joints friction stir

welding was performed by superimposing the aluminum plate on the upper plate and the CFRP on the lower plate by 80mm (L) X 30mm (W). In addition, a pinless tool was used to apply heat and pressure to the specimen when Al5052/H32 and CFRP were bonded. Surface roughness was given to the material before all experiments were carried out. During the test, the temperature of the joint surface was measured and tensile - shear test was performed after the experiment. In this study, thermal distribution characteristics of Al/CFRP joints were investigated using numerical analysis program and compared with the experiment.

As a result, maximum tensile - shear strength of 3.65kN was obtained at plunge depth of 0.4mm, rotation speed of 500rpm and dwell time of 15sec. In addition, the reliability of the joint was confirmed by comparing the numerical analysis with the experiment.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구배경 및 목적

### 1.1.1 연구배경

오늘날 전 세계적으로 대기오염, 지구온난화 등의 문제에 대한 대책으로 자동차의 배출가스와 연비에 관한 규제가 점차 강화되고 있다. 국가와 지역에 따라 규제치와 규제 방법에서 약간의 차이가 있지만 대체로 2025년까지 규제를 강화하고 있다. 미국 2025년 까지 90g/km 이하, 유럽 2020년 까지 95g/km 이하이며 국내 또한 2020년까지 97g/km의 이산화탄소 배출 규제를 만족해야한다. 따라서 자동차 산업계에서는 이러한 규제를 대비하고, 성능향상 등의 수요자의 요구를 만족시키기 위해 차체 개선 및 차량 경량화에 대한 연구가 진행되고 있다. 차량 경량화는 연비향상에 의해 이산화탄소의 배출량을 줄이는 가장 유효한 방법으로 주목받고 있으며, 경량화에 의해 자동차의 주행성능도 상승시킬 수 있다. 100kg의 차량 경량화에 의해 약 2~5%의 연비향상이 기대되며, 모델에 따라 차이는 있지만 7.5 ~ 12.5g/km의 이산화탄소 배출을 저감할 수 있다. 최근 자동차 산업계에서 차량 경량화를 위해 초고장력강판 확대 사용, 핫스탬핑 및 하이드로포밍 등의 공법을 적용하고 있으나 강화되는 배출가스 규제를 만족하기엔 역부족인 상황이다. 따라서 차량의 구조재로 쓰이는 소재를 경량 소재로 대체하여 차체의 강도를 강화하고 차량의 중량을 감소시키는데 주목하고 있다.[1-4]

현재 알루미늄 합금은 가장 각광 받고 있는 경량 소재이며, 철강소재에 비해 비강도가 뛰어나 차량의 차체 구조재로 활용할 경우 경량화 효과가 매우 크고 내식성 및 재활용성이 우수한 장점을 갖고 있다. 순수 알루미늄은 산소와 규소 다음으로 지구상에 많이 존재하는 원소이지만, 비교적 큰 산화성 때문에 다른 금속소재에 비해 늦게 사용되었다. 은백색을 띠는 가볍고 가공성이 좋은 비철 금속이며,

마그네슘과 함께 대표적인 경금속에 속한다. 순도 99.0% 이상을 순수 알루미늄이라 부르며 현재 많이 사용되고 있는 알루미늄 합금은 순수 알루미늄이 강도가 상대적으로 낮기 때문에 각종 원소(Si, Mg, Mn, Zn, Cr, Cu 등)를 첨가한 것을 말한다. 알루미늄은 높은 강도 값을 얻을 수 있는 열처리 합금과 비열처리 합금으로 나눌 수 있으며, 자동차의 차체에 주로 5000계열(Al-Mg)과 6000계열(Al-Mg-Si)이 적용되고 있다. 특히 5000계열의 알루미늄 합금은 마그네슘(Mg)을 주 첨가 성분으로 하여 강도가 높은 비열처리 합금이며 용접성이 우수하며 내식성이 매우 뛰어나다. 차량의 BIW(Body In White)에서 스틸을 알루미늄으로 대체할 경우 최대 45%의 경량화를 이룰 수 있다. [2,4]

차세대 경량화 소재로 주목받고 있는 탄소섬유강화플라스틱(CFRP)은 알루미늄 대비 무게 2/3, 강도 5배로 차량에 적용될 경우 큰 경량화 효과를 낼 수 있다. CFRP는 탄소섬유를 합성수지에 혼합한 복합재이다. 합성수지에 혼합하는 섬유에는 탄소섬유 외에도 아라미드섬유, 유리섬유 등이 있으며 섬유의 종류에 따라 복합재의 탄성과 강도가 결정된다. 또한 수지의 종류에 따라서 열경화성 CFRP와 열가소성 CFRP로 나뉜다. 열경화성 수지에는 에폭시가 주종을 이루는데 기계적 특성이 우수한 특징을 갖고 있으며, 사용 환경과 요구 특성에 따라 페놀수지, 불포화폴리에스터 등이 있다. 최근에는 CFRP의 내충격성 및 인성 향상, 재활용, 용융접합 가능, 생산속도 향상 등의 요구에 따라 나일론 및 폴리프로필렌 등과 같은 열가소성 수지의 사용이 확대되고 있다. 현재는 고가의 차량에 부분적으로 사용되고 있지만 앞으로 그 사용량이 증가하여 2025년에는 2015년 대비 약 9.2배인 8만5,231톤이 차량에 채용될 것으로 전망하고 있다. 다가올 미래에는 앞서 말한 경량화 소재를 비롯하여 알루미늄+CFRP와 같은 하이브리드 소재를 이용한 차량이 등장할 것이다. 따라서 자동차 산업계에서는 이를 가공할 수 있는 기술과 함께 다양한 용접·접합 기술의 연구와 개발에 모든 역량을 집중하고 있다. [4, 27, 29]

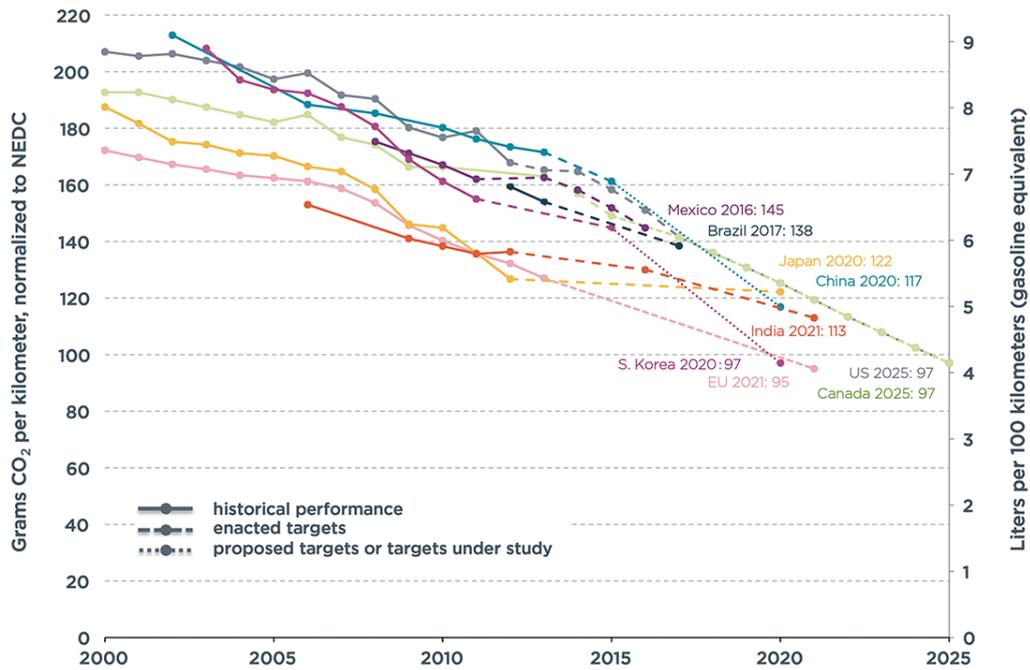


Fig. 1.1 CO<sub>2</sub> emissions performance and proposed passenger vehicle standards

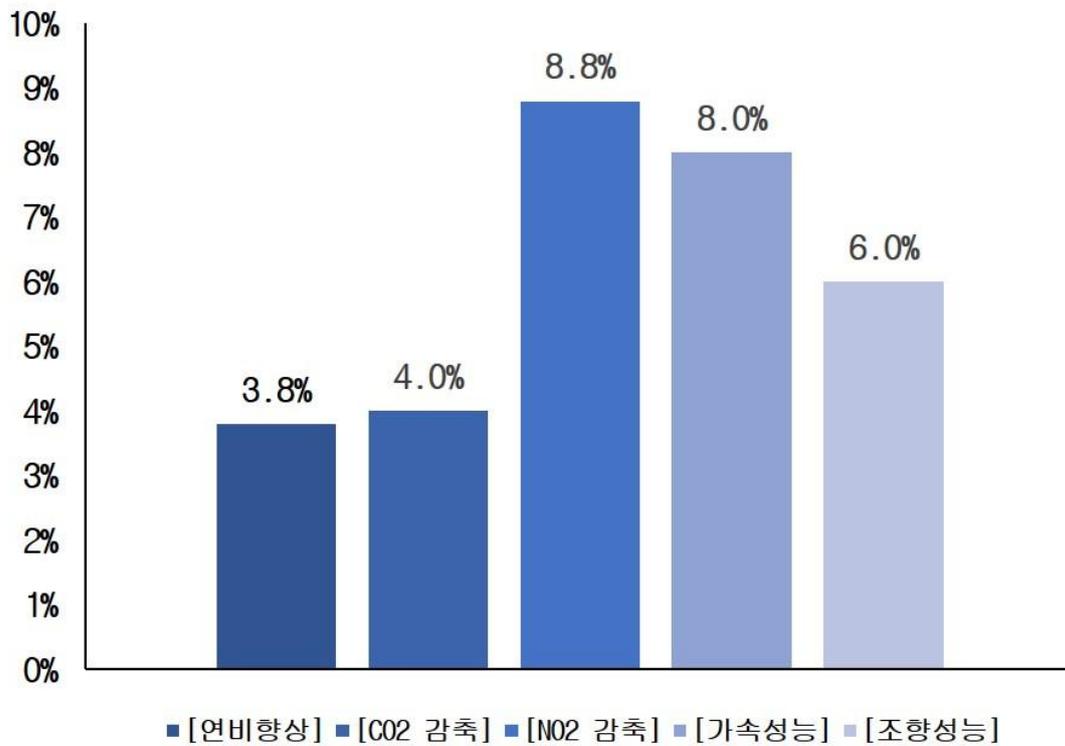


Fig. 1.2 Effect of vehicle lightweight

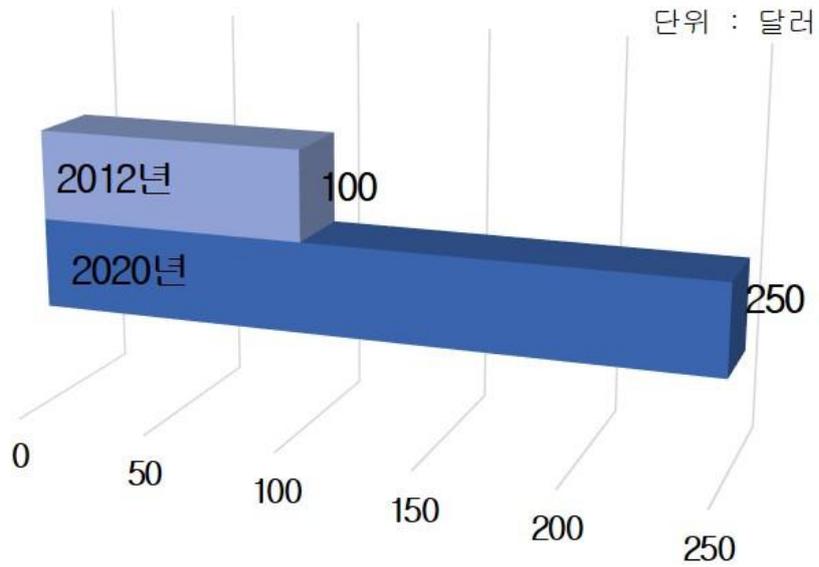


Fig. 1.3 CFRP market outlook

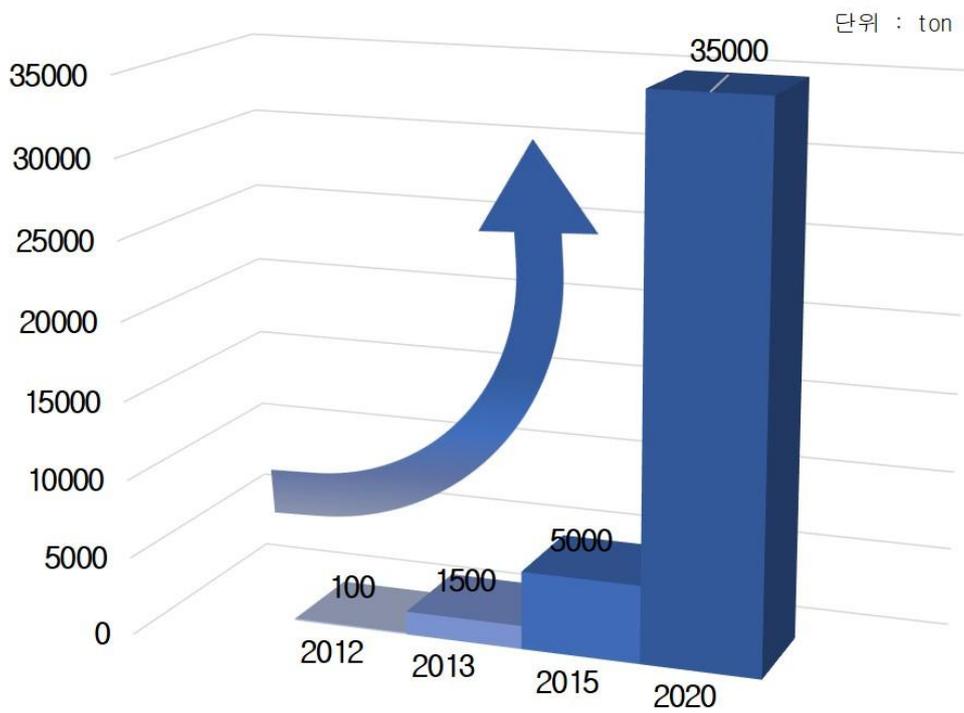


Fig. 1.4 Demand outlook for automotive CFRP

## 1.1.2 연구목적

자동차의 연비 향상이라는 목적과 함께 배출가스 규제에 의해 차량 경량화에 대한 논의가 지속되었음에도 사용자의 편의 및 안전을 위해 추가되는 부품 때문에 자동차의 경량화는 쉽게 이루어지지 않았다. 또한 하이브리드, 전기자동차와 같은 친환경자동차의 등장으로 배터리, 모터 등이 추가되어 차량의 중량이 오히려 증가하게 되는 실정이다. 따라서 현재 가장 효율적인 경량화 방안은 바로 경량 소재의 확대 적용이다.

차세대 차량 경량화 소재로 주목받고 있는 CFRP는 일반 금속소재보다 가볍고 비강도, 비강성이 뛰어나 이에 관한 다양한 연구가 시도되고 있다. 그러나 CFRP는 낮은 연신율 및 파괴 강성 등의 단점으로 인해 실제 자동차 부품의 적용에는 많은 제약을 받고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 여러 소재들을 혼용하는 Multi-Material Mix Technology가 부각되고 있으며, 다양한 소재 혼용은 소재간 상이한 물성을 이용하여 중량 감소뿐만 아니라 적합한 기계적 성질을 가진 소재들을 선별하여 성능을 최적화할 수 있고 제조비용을 절감할 수 있다. 따라서 CFRP와 금속재료를 접합하여 단일소재의 한계점을 극복할 수 있도록 하이브리드 복합재료 또는 이종소재(복합재료-금속)의 접합에 대한 연구가 진행되고 있다. 그러나 이종소재 접합은 소재간의 물성이 크게 상이하므로 기존 전통적인 접합기술을 사용하여 고강도, 고내구성의 접합부를 구현하기 어려운 실정이며, 특히 이종소재 부품 개발 시 생산성이 고려되어야 하므로 적절한 접합기술의 확보가 중요하다.[6-8]

본 연구에서는 이종소재 AI/CFRP에 대한 접합방법으로 마찰교반점용접(FSJ)공정을 적용하였으며, 이를 위해 각 공정별 공정변수에 따른 접합 특성 및 기계·금속학적 특성을 평가함으로써 용접부에 대한 신뢰성과 건전성을 확보하고자 한다. 또한 수치해석을 통해 AI/CFRP 용접부의 온도 분포, 잔류응력 및 변형 특성을 실험과 비교 분석하였다. 따라서 본 연구에서는 마찰교반점용접(FSJ)을 이용한 이종재 AI/CFRP의 접합 특성을 고찰하고자 한다.

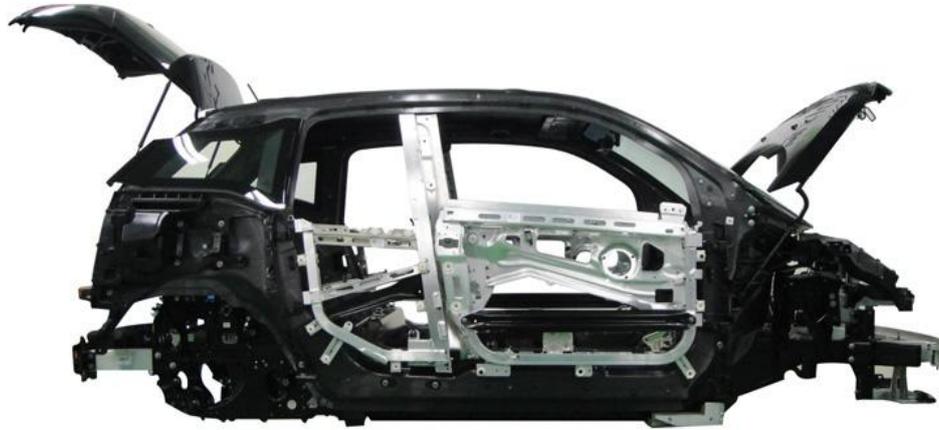


Fig. 1.5 Multi-materials applied to vehicle

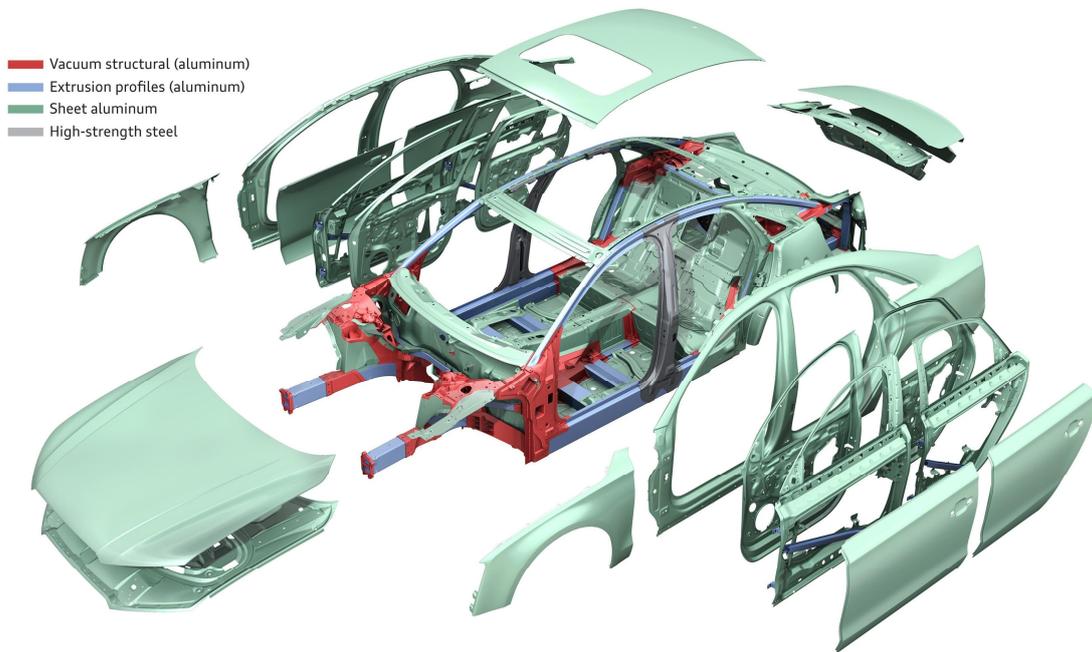


Fig. 1.6 Aluminum BIW(Body In White) of Vehicle

## 1.2 국내 · 외 기술 동향

### 1.2.1 알루미늄 합금의 기술 동향

자동차 무게의 20~30%를 차지하는 차체 부분의 소재를 강판에서 알루미늄으로 대체하면 큰 경량화 효과를 기대할 수 있지만 기존 철강 재료를 대체하기 위해서는 강도, 성형성, 내식성, 용접성, 표면처리성 등이 우수하여야 한다. 알루미늄은 높은 열전도, 주조성과 가공성 등 많은 장점을 가지고 있지만 철강 재료에 비해서 고가이며, 용접성의 개선이 필요하며 강도가 떨어지는 단점이 있다. 따라서 알루미늄의 경우 기계적 특성을 향상시키기 위해 다양한 합금 기술과 제조 기술이 개발되고 있다.

알루미늄 합금 5000계열 Al-Mg 합금은 성형성이 우수하여 차량의 내·외부 패널에 사용하며, 6000계열 Al-Mg-Si 합금은 가열 시 강도가 높아지는 열경화성을 지니므로 차체 패널의 재료로서 최근에 널리 사용된다. 미국에서는 Cu가 포함된 Al6009이나 Al9010이 사용되며, 최근에는 Al6111이 주력이 되고 있다. Cu가 포함된 합금은 열경화성 및 성형성이 좋지만 녹이 발생하기 쉬워 유럽에서는 Cu가 없는 Al6016이 주로 사용된다. 일본에서도 Cu가 없는 6000계열 합금이 개발되어 차체용으로 사용되고 있다. M社 RX-8 차량의 후드 내부에는 움푹 들어간 구멍을 둔 알루미늄 합금 멀티콘을 채용하여, 부품의 강성확보와 경량화를 동시에 실현하였다. 유럽에서는 알루미늄 합금 판재 사이에 수지나 발포알루미늄을 끼운 샌드위치판이 개발되어 차량에 적용되고 있다. 알루미늄 합금의 성형도 고강도강과 마찬가지로 많은 문제점을 갖고 있다. 프레스 성형 시 파단이 생기기 쉽고, 균열을 피하기 위해 윤활제를 사용하여 마찰계수를 낮추면 주름이 발생하기 때문에 저점도의 알루미늄용 윤활제의 개발이 진행되고 있다. [9, 10]

## 1.2.2 CFRP의 기술 동향

CFRP 기술은 50여 년 전 항공, 우주 및 국방 산업 등에서 시작되어 레저스포츠, 기계 부품을 거쳐 현재는 자동차와 IT기기 등으로 확산되고 있다. 일본은 기존 자동차 부품제조에 쓰이는 Stamping 방식의 성형기술을 보급하고 있으며, T社は 열가소성 CFRP를 1분 이내에 연속 성형할 수 있는 공법을 개발하였다.[11]

복잡한 형상의 열경화성 CFRP 부품을 성형하는데 효과적인 HP-RTM 공법은 최근 공정시간이 3분으로 단축되었으며, A Class급의 차량 외장재를 제조할 수 있는 음이온 중합법을 활용하여 함침성 문제를 해결한 열가소성 CFRP 성형공법이 개발되어 보급되고 있다. 또한 복잡한 형상의 부품을 1분 안에 성형이 가능하도록 한 resin과 Wet Compression Molding 공정 기술이 개발되었다. 특히, 열경화성 CFRP에 비해 열가소성 CFRP는 인성과 내충격성이 우수하여 수정작업과 열 접합이 가능하며 저렴하게 제조할 수 있다.[13]

국내에서는 H社에서 탄소섬유를 기반으로 한 고성능 중간재 및 경량 복합재로 이루어진 차체 부품을 개발하여 Steel 대비 50%의 경량화를 달성하였으며, 부품성형시간도 5분 이내로 단축하였다. I社에서는 고속 성형 기술을 이용하여 성형시간을 10분 이내로 단축하면서도 인장강도 1,000Mpa이상의 CFRP 소재의 자동차용 Hood를 개발하였다. W社에서는 기존 금속 소재의 드라이브샤프트에 CFRP를 적용하여 경량화에 성공하였다.[14]

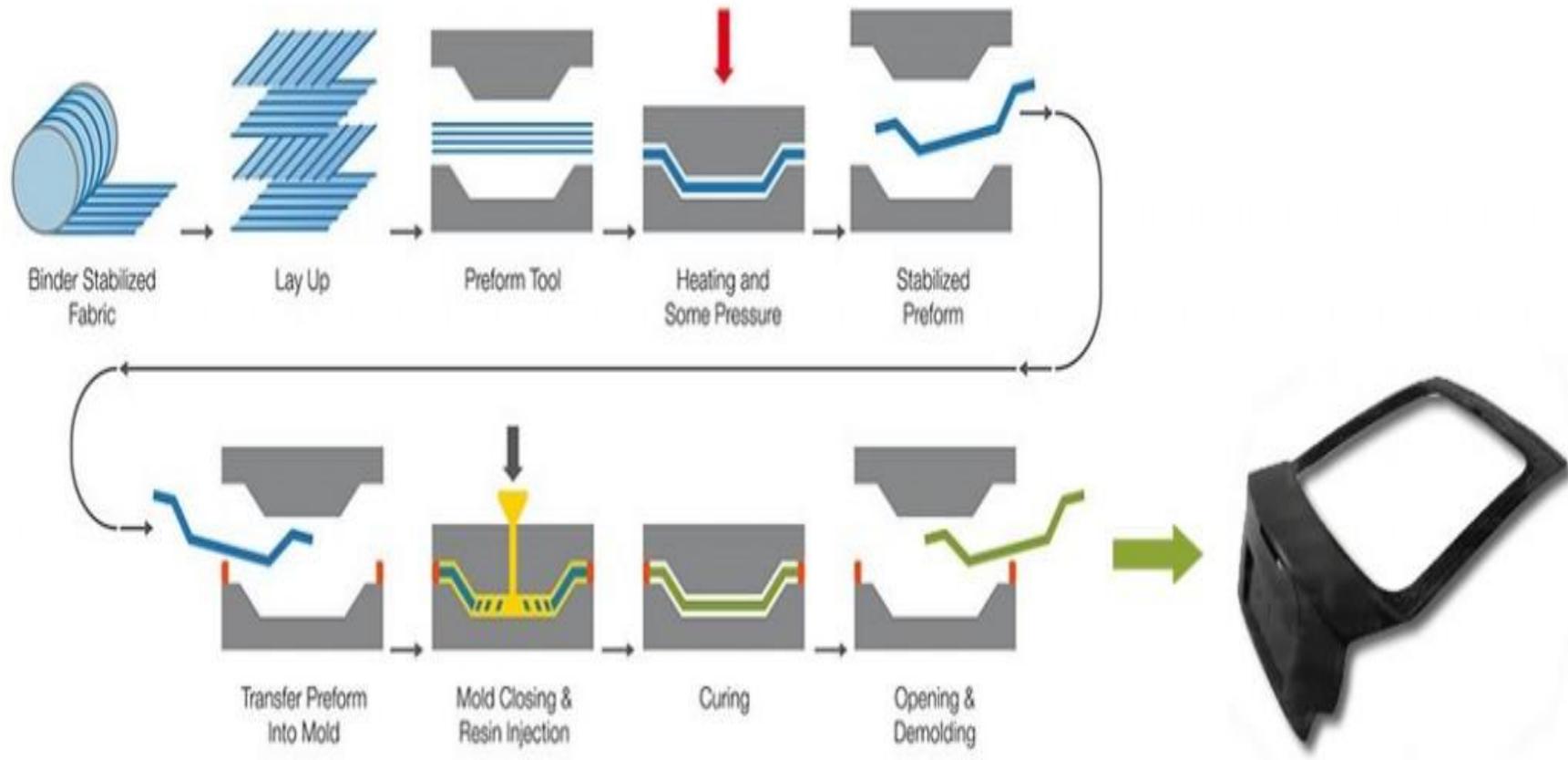


Fig. 1.7 HP-RTM (High Pressure Resin Transfer Molding) process

### 1.2.3 이종재 금속+CFRP 접합기술 동향

Al 2014-T6 판재의 균열에 CFRP패치를 부착하여 피로 수명을 연장할 수 있었으며, 판재의 양쪽에 CFRP패치를 부착했을 때 피로수명이 2배로 증가한 연구결과를 발표하였다.[14]

알루미늄 AA6111과 Polyphenylene sulfide의 FSW Lap joint 용접 시 알루미늄 판재 표면으로 용융된 열가소성 플라스틱이 용입 되어 접합된 연구가 발표되었다.[15] CFRP와 A6181-T4 알루미늄합금의 Lap joint에 FSJ(Friction Spot Joining)에 의한 접합 연구가 수행되었으며, 톨의 회전속도, 삽입깊이, 접합유지시간 등의 공정조건이 접합부의 미세조직과 강도에 미치는 영향에 관한 최적의 조건이 도출되었다.[16]

레이저를 사용한 알루미늄과 CFRP와의 접합에 관한 연구가 발표되었다. A5052를 윗판으로, CFRP(PA6)을 아래판으로 한 겹치기 이음부에 레이저를 알루미늄판에 조사하여 접합하여 2~3kN의 인장전단강도 값을 얻었다.[17] 금속+플라스틱의 레이저 접합 시 2단계 공정을 적용하여 안정적인 접합강도를 유지한 연구가 소개되었다.[18]

Ti합금과 CFRP의 접합에 마찰교반 리벳 (Frictionrivet)을 적용한 연구가 수행되었다. 높은 회전속도, 유지시간, 가압력에서 접합부의 높은 강도를 기대할 수 있다는 연구가 발표되었다.[19] FSBR(Friction Stir Blind Riveting)을 적용한 AA6111과 CFRP의 겹치기 접합에서 접합조건이 인장전단 강도에 미치는 영향에 관한 연구가 수행되어 최적조건이 발표되었다.[20]

열가소성기지 복합재료와 금속의 접합에 클린칭(Clinching)공정을 적용하여 접합결과가 도출되었다.[21,22] 또한 홀 클린칭 (Hole clinching) 방법으로 알루미늄과 CFRP와의 접합을 시도하여 2.5 KN 이상의 전단강도를 얻었다.[23]

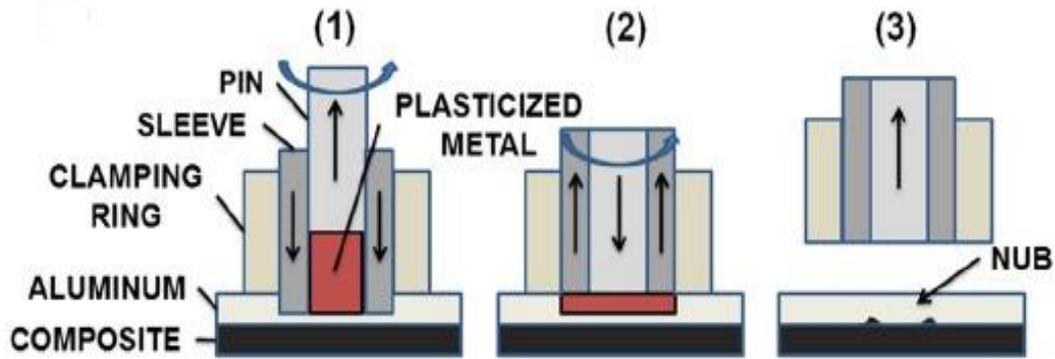


Fig. 1.8 Schematic representation of the FSJ process

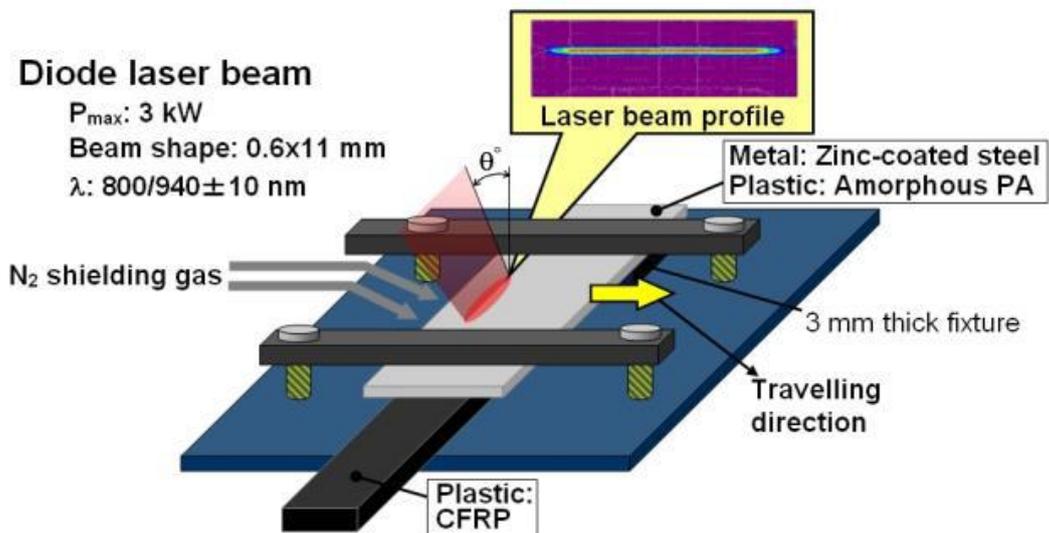


Fig. 1.9 Laser direct joining of CFRP to metal or engineering plastic

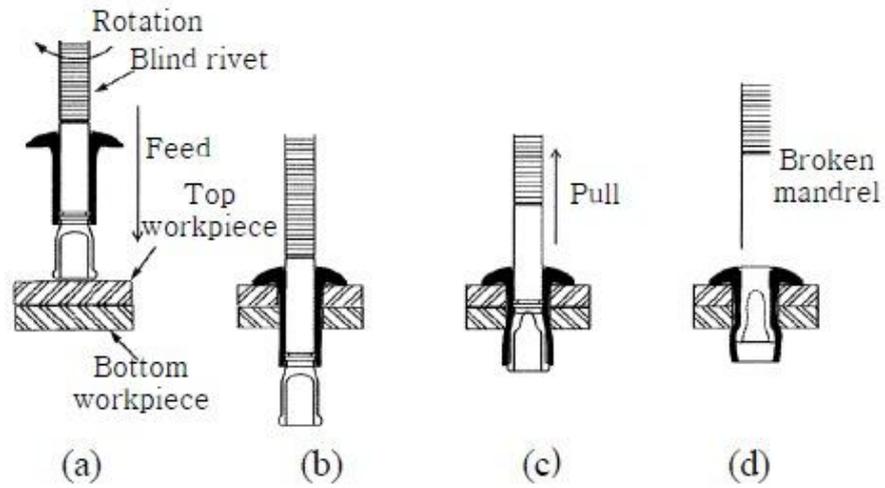


Fig. 1.10 FSBR(Friction Stir Blind Riveting) procedure

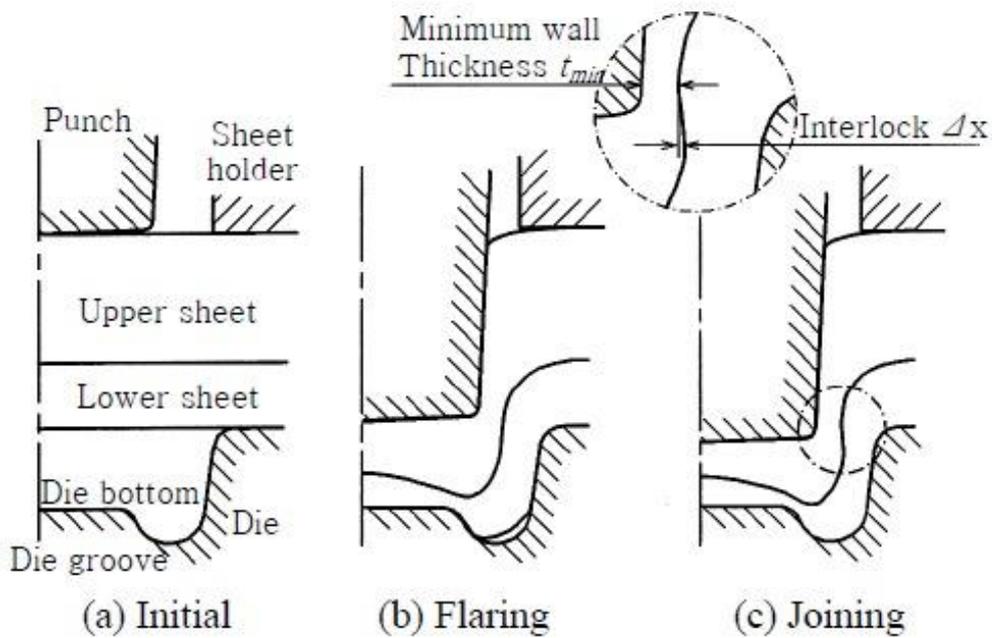


Fig. 1.11 Mechanical clinching procedure

## 1.3 마찰교반점용접(FSJ) 특성

### 1.3.1 마찰교반점용접의 원리

마찰교반용접(Friction Stir Welding : FSW)은 1991년 영국의 TWI에서 개발된 용접법으로 용융과 응고를 수반하지 않는 고상 접합 방식이다. 따라서 접합 시 변형과 용접결함이 적으며 접합부의 양호한 기계적 성질의 확보가 용이하고, 작업 시 숙련기능을 필요로 하지 않아 선박, 철도, 항공 등 다양한 산업분야에 실용화가 진행되고 있다.[24]

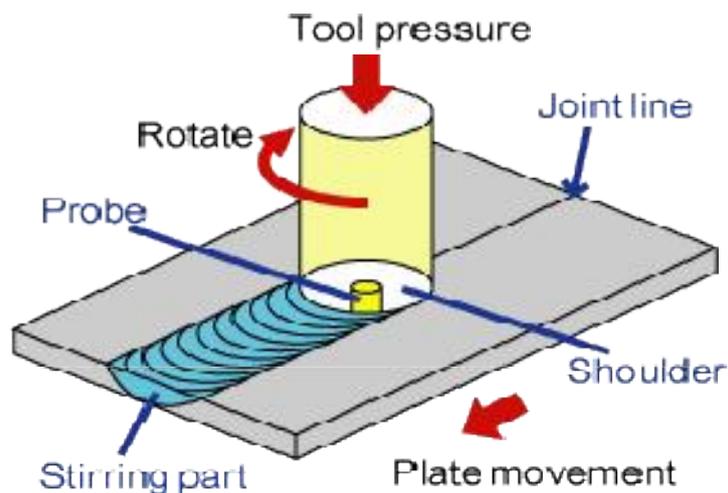


Fig. 1.12 Schematic representation of the FSW process

마찰교반점용접(Friction Spot Joining : FSJ)는 FSW와 마찬가지로 마찰교반현상을 이용한 점 접합이다. 접합 프로세스는 겹쳐진 피접합부에 Fig.1.13(a)와 같이 툴을 고속으로 회전시키면서 삽입하면 툴과 피접합부 사이에 마찰열이 발생된다. 이러한 마찰열로 인해 핀 주변 피접합재는 연화되고 소성유동현상 발생하여 계면이 교반되면서 Fig.1.13(b)와 같이 접합된다. 이때, 피접합재는 고상상태로 유지되며 Fig.1.13(c) 처럼 최종적으로 툴을 제거하면 겹치기 이음의 접합이 완료된다. FSJ 공정의 공정변수로는 툴 회전

속도, 삽입깊이, 삽입유지시간, 가압력 및 틀 형상 등이 있다. [24]

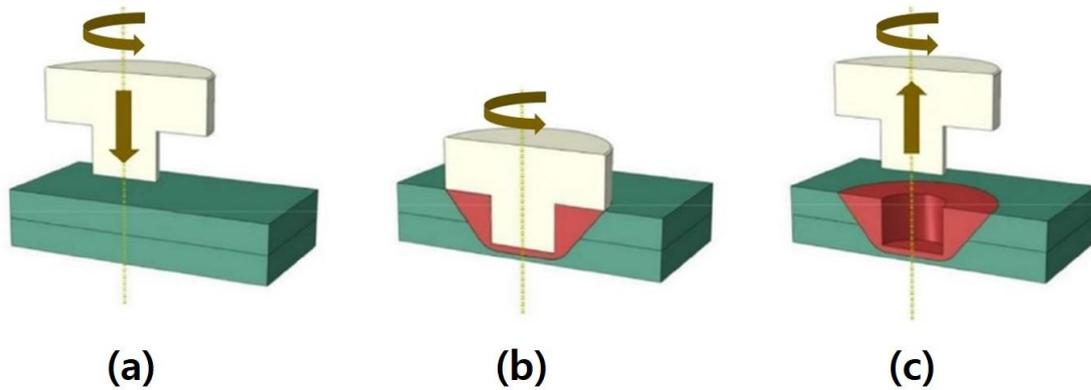


Fig. 1.13 FSJ(Friction spot joining) process

마찰교반점용접(FSJ)의 접합 메커니즘은 다음과 같다. 우선 툴의 회전과 가압에 의해 솔더 아래쪽의 피접합재가 마찰열에 의해 연화되고 소성유동이 발생하여 핀 쪽으로 이동한다. 그리고 핀 부근으로 이동된 피접합재는 고속으로 회전하는 툴의 힘으로 핀의 표면을 따라 계속 이동하며 핀의 끝부분에 도달하게 된다. 이때 피접합재가 핀 끝에 도달하면 바깥쪽과 위쪽으로 회전을 하고 다시 핀의 윗부분으로 돌아가면서 Fig. 1.14의 1, 2, 3의 과정이 반복되고 교반부가 형성되어 접합이 이루어진다.[25]

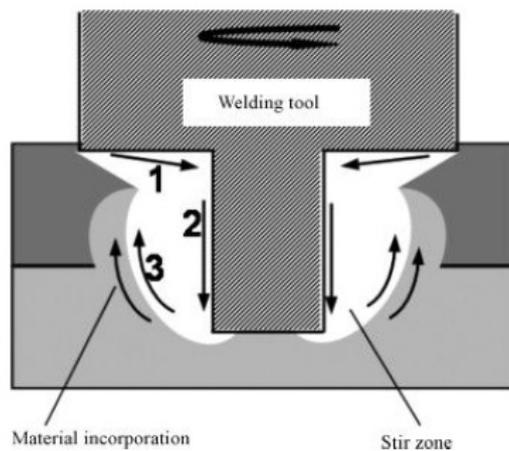


Fig. 1.14 Joining Mechanism of FSJ(Friction spot joining)

### 1.3.2 마찰교반점용접의 특징 [26]

- 고상용접으로 용융용접에 비해 변형이 적다.
- 기존의 용융용접과 달리 별도의 열원 발생장치, 용가재, 용접부 전처리 등이 필요 없다.
- 용융용접에서 발생하는 균열, 기공 등의 결함이 거의 발생하지 않는다.
- 기존의 용융용접과 달리 접합 중 인체에 유해한 가스나 광선이 발생하지 않아 작업환경이 친환경적이다.
- 작업자의 기량이나 숙련도에 크게 의존하지 않으며, 표준화와 자동화가 가능하다.
- 경량합금(Al, Ti, Mg합금 등)으로 제조된 주조 제품, 금속을 기지로 한 복합재료 등 기존 용접의 적용이 불가능했던 재료의 접합이 가능하여 이종 재료의 용접에 적합하다.

## 제 2 장 연구 방법

### 2.1 연구 방법



## 2.2 실험방법 및 조건

### 2.2.1 시험편 형상 및 사용 소재

본 연구에서 사용한 소재는 차량에 사용되는 경량소재인 알루미늄합금 Al5052/H32 1mm(t)으로 냉간가공 후 안정화 처리를 하였으며, CFRP 소재로는 ‘LANXESS’ 사의 Tepex dynalite로 3k의 탄소섬유와 열가소성 수지인 폴리아미드66를 사용했고 두께는 1.5mm(t)이다. 각각 80mm(L) X 30mm(W)로 상판은 알루미늄, 하판은 CFRP를 30mm로 겹쳐 Lap Joint 마찰교반점용접을 실시하였다. 시험편의 치수는 Fig. 2.1에 나타내었고, 사용된 재료의 화학적, 기계적 특성은 Table. 2.1 및 Table. 2.2와 같다.

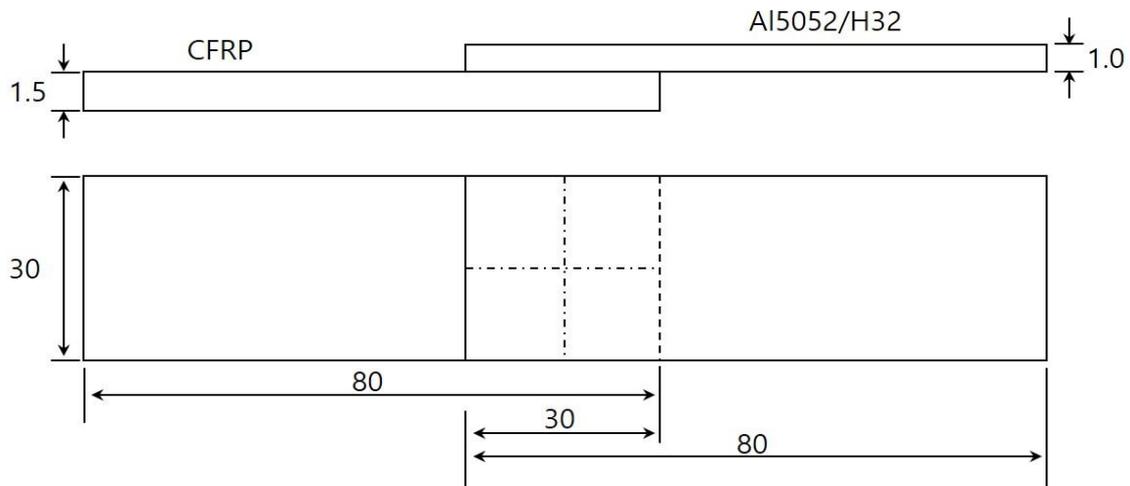


Fig. 2.1 Dimension of FSJ specimen

**Table. 2.1 Chemical composition and mechanical properties of Al5052/H32**

| Chemical composition (%) |       |       |       |       |       |       |      |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| Si                       | Fe    | Cu    | Mn    | Mg    | Cr    | Zn    | Ti   |
| 0.061                    | 0.220 | 0.019 | 0.018 | 2.503 | 0.178 | 0.002 | 0.02 |

| Mechanical properties |                     |               |
|-----------------------|---------------------|---------------|
| Yield stress(MPa)     | Tensile stress(MPa) | Elongation(%) |
| 161                   | 232                 | 9             |

**Table. 2.2 - Material properties of CFRP**

| Material      |            |                |         |                              |                        |                          |
|---------------|------------|----------------|---------|------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Reinforcement |            |                | Polymer | Laminate                     |                        |                          |
| Fibers        | Yarn (tex) | Weigh rate (%) | PA66    | Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Fiber content (% vol.) | Thickness Per layer (mm) |
| carbon        | 3k         | 50             |         | 1.43                         | 45                     | .025                     |

| Mechanical properties |                     |               |                  |
|-----------------------|---------------------|---------------|------------------|
| Tensile Modulus (GPa) | Tensile stress(MPa) | Elongation(%) | Poisson' s ratio |
| 53.0                  | 785                 | 2.1           | 0.007            |

| Thermal properties      |                                  |                                 |
|-------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Melting temperature(°C) | Glass transition temperature(°C) | Heat deflection temperature(°C) |
| 260                     | 70                               | 255                             |

## 2.2.2 실험장비 및 툴(Tool)

본 연구에서는 알루미늄 합금 Al5052/H32와 CFRP의 마찰교반점용접을 위하여 'WINXEN의 Friction Stir Welding 장비를 사용하였다. 실험장비는 X, Y, Z축의 3방향 이동이 가능하다. 또한 X축 및 Y축은 테이블에 의해 0.5 ~ 10mm/sec의 속도로 이동이 가능하며, Z축은 300~3000rpm 회전이 가능하고, 최대 가압 하중은 3000kgf이다. Fig. 2.2는 사용된 실험장비시스템 사진이며, Table. 2.3에 장비 사양을 나타냈다.

마찰교반점용접 시 툴의 소재 및 형상은 매우 중요한 요소이다. 본 실험에 사용된 툴의 소재는 WC(Tungsten carbide)-cobalt(co)12%이며, 다이아몬드 가공을 통해 제작되었다. 또한 툴의 형상은 핀이 없이 솔더로만 이루어졌으며 솔더의 직경은 18mm이다.

일반적으로 금속과 플라스틱의 접합 기구는 접합 계면의 CFRP에서 용융된 수지의 버블이 발생하여, 금속표면의 미세 틈으로 밀어 넣어 발생하는 앵커링(Anchoring)효과로 인한 interlocking, 활성화한 고온의 수지가 금속의 산화피막 표면에 밀착하여 생기는 Van Der Waals결합, 그리고 화학결합이 발생하여 접합이 이루어지는 것으로 알려져 있다.[28] 따라서 본 실험에서도 Al5052/H32와 CFRP를 접합할 때 열과 가압력을 시험편에 부여할 수 있도록 핀이 없는 형상의 툴을 이용하였으며 치수와 형상을 Fig. 2.3에 나타내었다.



Fig. 2.2 Equipment of friction stir welding system

Table. 2.3 Specifications of friction stir welding system

| Items         |        | Range        |
|---------------|--------|--------------|
| Type          |        | Gantry Type  |
| 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 |

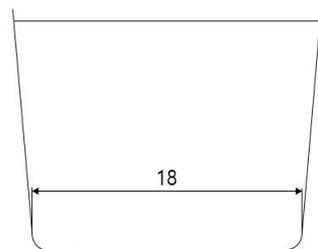


Fig. 2.3 Tool details used for friction spot joining



Fig. 2.4 Surface roughness measuring instrument

### 2.2.3 FSJ 용접조건

마찰교반점용접(FSJ)에서는 툴의 삽입깊이(Plunge depth), 회전속도(RPM), 삽입유지시간(Dwell time) 등이 주요한 변수이다. 본 연구에서는 Al5052/H32와 CFRP의 마찰교반점용접 시 용접부의 공정변수별 특성을 고찰하기 위해서 툴의 삽입깊이, 회전속도 및 삽입유지시간의 변화에 따른 실험을 실시하였다. Table. 2.4에 나타낸 것처럼 먼저 툴의 삽입깊이에 따른 용접 특성을 분석한 후 삽입유지시간을 변화시켜 실험을 실시하였다. 이후 회전속도를 변화시켜 실험을 실시하여 용접 특성을 비교하였다. 각 단계별로 용접부 외관, 계면 및 단면의 특성을 고찰하였고, 인장-전단시험 후 강도 값과 파단면 비교/분석을 실시하였다. 그리고 모든 실험을 실시하기 전 재료에 에머리페이퍼를 사용하여 표면거칠기를 부여 하였는데, 이는 용접 시 접합 계면 사이에 CFRP의 용융 수지의 접촉면적을 증가시켜 앵커링효과를 극대화하기 위함이었다. [28] Fig.2.4와 같은 표면거칠기측정기를 이용하여 표면거칠기값을  $Ra = 3.0\mu\text{m}$ 로 맞춘 후 실험을 진행하였다.

Table. 2.4 Welding conditions for friction spot joining

| 표면거칠기         | $Ra = 3.0\mu\text{m}$ |              |            |
|---------------|-----------------------|--------------|------------|
| 조건            | 삽입깊이 (mm)             | 삽입유지시간 (sec) | 회전속도 (rpm) |
| 삽입깊이에 따른 조건   | 0.2                   | 20           | 500        |
|               | 0.3                   |              |            |
|               | 0.4                   |              |            |
| 삽입유지시간에 따른 조건 | 0.4                   | 15           | 500        |
|               |                       | 20           |            |
|               |                       | 25           |            |
| 회전속도에 따른 조건   | 0.4                   | 20           | 300        |
|               |                       |              | 400        |
|               |                       |              | 500        |

## 2.2.4 용접부 특성 평가

### (1) 용접부 외관 및 단면 분석

본 연구에서는 톨의 삽입깊이(0.2mm, 0.3mm, 0.4mm), 회전속도(300rpm, 400rpm, 500rpm) 및 삽입유지시간(15sec, 20sec, 25sec)에 따른 마찰교반점 용접 실험을 진행한 후, 각 조건별로 용접된 시험편을 육안으로 용접 여부 및 용접부 외관의 형태 등을 1차로 관찰하였다.

### (2) 용접부 표면 온도 측정

실험을 진행하면서 톨의 삽입유지시간동안 용접부 AI판재 표면의 온도를 측정하였다. 온도를 측정하여 열전도 수치해석의 결과와 비교하였으며, 온도에 따라 나타나는 CFRP의 수지와 AI/CFRP 용접부의 특성을 고찰하였다. 측정 장비는 비접촉식 적외선 온도계를 이용하였으며 알루미늄 표면에 적외선을 방사하여 최대 온도를 측정하였다. 장비에 알루미늄 합금의 표면방사율인 0.1을 입력하였고 측정거리는 200mm이며 장치 구성을 Fig.2.5에 나타내었다.



Fig. 2.5 Infrared radiation thermometer

#### (4) 인장-전단시험

AI/CFRP 용접부의 인장-전단강도를 평가하기 위해 인장-전단시험편을 80mm(L) X 30mm(W)로 가공하여 30mm를 겹친 후 마찰교반점용접을 실시하였다. 용접된 시험편을 Shimadzu의 20Ton의 UTM(Universal Testing Machine)을 사용하여 1mm/min속도로 인장-전단시험을 실시하였고. Fig. 2.6은 실험에 사용된 만능재료시험기를 나타낸 것이다.

#### (4) 접합계면 관찰

인장-전단시험 후 파단된 시험편의 계면을 분석하고, 같은 조건의 용접된 시험편의 미세조직 관찰을 위해 시험편 절단, 콜드마운팅 및 미세연마를 실시하였다. AI/CFRP 용접부 단면(Cross section)의 관찰을 위해 올림푸스의 BX51M 광학현미경(Optical microscope)을 사용하였다.



Fig. 2.6 UTM(Universal Testing Machine)



Fig. 2.7 Optical microscope

## 2.3 유한요소법에 의한 열전도 및 열탄소성 이론

본 연구에서는 AI/CFRP 용접부의 열분포를 확인하기 위해 수치해석 프로그램을 사용하여 AI/CFRP의 FSJ를 시뮬레이션 하였다. 사용한 수치해석 프로그램은 모두 자연좌표계를 이용한 iso-parametric element의 개념을 도입하여 정식화 하였다. 또한, 용접은 시간에 따라 온도가 변화하기 때문에 본 연구에 사용한 재료들의 비열, 열전도도 등의 변화를 고려한 열분포 해석용 프로그램을 사용하였다.[5]

### 2.3.1 열전도 이론의 정식화

#### (1) 열전도 문제의 유한요소법 기본식

재료가 등방성(isotropic)일 때, 연속체의 비정상 열전도문제의 지배방정식(governing equation)은 아래의 식과 같다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + \dot{Q} \quad \text{-----}(2.1)$$

이것을 2차원 비정상 열전도 방정식으로 기술하면 아래와 같다.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \dot{Q} \quad \text{-----}(2.2)$$

여기서,  $T = T(x, y, t)$  : 온도(°C),  $c$  : 비열(cal/g · °C),

$\rho$  : 밀도 (g/cm<sup>3</sup>),  $\dot{Q}$  : 단위시간당 입열량 (cal/sec)

$t$  : 시간 (sec),  $\lambda$  : 열전도율(cal/cm · sec · °C) 이다.

식(2.2)의 열전도 방정식을 정식화하기 위해 유한개의 elements(요소)로 mesh(분할)하고 요소내의 온도  $T$ 를 다음과 같이 표현한다.

$$T(x, y, t) = [N(x, y)] \{\phi(t)\} \quad \text{-----}(2.3)$$

여기서,  $T$  : 요소의 온도

$[N]$  : 절점의 온도와 요소내의 온도를 연결하는 형상함수 Matrix

$\{\phi\}$  : 시간  $t$ 일 때의 요소의 절점온도 Vector

형상함수  $[N]$ 을 가중함수로하여 식(2.2)에 Galerkin법을 적용하여 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\int_{v^e} [N]^T \left\{ \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \dot{Q} - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right\} dV = 0 \quad \text{-----}(2.4)$$

여기서  $v^e$ 는 요소의 영역, 위 첨자  $T$ 는 전치행렬을 나타낸다. 위 식(2.4)을 Green-Gauss 정리를 이용하여 전개하고, 열적경계조건으로 열전달을

고려하여  $q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha_c (T - T_c)$ 로 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \int_{v^e} [N]^T \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) dV \\ &= - \int_{v^e} \lambda \left( \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} \right) dV + \int_{s^e} \lambda [N]^T \frac{\partial T}{\partial n} dS \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= - \int_{v^e} \lambda \left( \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} \right) dV - \int_{s^e} q [N]^T dS \\
 &= - \int_{v^e} \lambda \left( \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} \right) dV \\
 &\quad - \left( \int_{s^e} \alpha_c T [N]^T dS - \int_{s^e} \alpha_c T_c [N]^T dS \right) \quad \text{-----}(2.5)
 \end{aligned}$$

여기서,  $T_c$ 는 외기온도이며,  $T$ 는 모재 경계의 온도,  $s^e$ 는 요소의 경계,  $\alpha_c$ 는 열전달계수이다.

요소-절점간의 온도관계 식(2.5)과 식(2.3)을 식(2.4)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 &- \int_{v^e} \lambda \left( \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} \right) dV \cdot \{\phi(t)\} \\
 &- \int_{s^e} \alpha_c [N]^T [N] ds \cdot \{\phi(t)\} + \int_{s^e} \alpha_c T_c [N]^T ds \\
 &+ \int_{v^e} \dot{Q} [N]^T dV - \int_{v^e} \rho c [N]^T [N] dV \cdot \frac{\partial \{\phi(t)\}}{\partial t} = 0 \quad \text{-----}(2.6)
 \end{aligned}$$

위 식을 간단히 하면 비정상열전도문제에 대한 유한요소식은 다음과 같다.

$$[K] \{\phi\} + [C] \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\} = \{F\} \quad \text{-----}(2.7)$$

여기서,  $[K]$  : 열전도 Matrix,  $[C]$  : 열용량 Matrix,  
 $\{F\}$  : 열유속 Vector이다.

$$[K] = \int_{v^e} \lambda \left( \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} \right) dV + \int_{s^e} \alpha_c [N]^T [N] ds \quad \text{-----}(2.8)$$

$$[C] = \int_{v^e} \rho c [N]^T [N] dV \quad \text{-----}(2.9)$$

$$\{F\} = \int_{s^e} \alpha_c T_c [N]^T ds + \int_{v^e} \dot{Q} [N]^T dV \quad \text{-----}(2.10)$$

위 식(2.7) 비선형 열전도 문제에서  $\phi$ ,  $\left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\}$ 의 미지수 두 개가 존재하여 풀이가 불가능하다. 따라서 시간 증분을  $\Delta t$ 라 하고, 증분 전 온도를  $\phi^B$ , 증분 후 온도를  $\phi^A$  그리고 그 중간의 온도를  $\phi^M$ 이라고 하면 다음과 같고

$$\frac{\partial \phi^A}{\partial t} = \frac{\phi^A - \phi^M}{(\Delta t/2)}, \quad \frac{\partial \phi^B}{\partial t} = \frac{\phi^M - \phi^B}{(\Delta t/2)} \quad \text{-----}(2.11)$$

식(2.10) 으로부터 다음과 같이 식을 구성할 수 있다.

$$\frac{\partial \phi^A}{\partial t} = \frac{2}{\Delta t} (\phi^A - \phi^M) - \frac{\partial \phi^B}{(\Delta t/2)} \quad \text{-----}(2.12)$$

최종적으로 식(2.7)은 다음과 같이 유도되며, 미지수는  $\phi^A$ 로 하나만 존재하므로 풀이가 가능하다. (초기조건으로  $\phi^B_{t=0}$ 의 값을 대입)

$$\left( [K] + \frac{2}{\Delta t} [C] \right) \{\phi^A\} = [C] \left( \frac{2}{\Delta t} \{\phi^B\} + \left\{ \frac{\partial \phi^B}{\partial t} \right\} \right) + \{F\} \quad \text{-----}(2.13)$$

(2) FSJ Heat generation [30, 31]

FSJ 용접 시 회전하는 비소모성의 툴의 솔더와 용접 재료 사이의 접촉면에서 발생하는 마찰열과 핀 부근에서 발생하는 너깃부의 소성변형에 의해 용접이 이루어진다. FSJ의 열전도 수치해석 시, Fig. 2.8과 같이 툴의 솔더와 핀 부근의 접촉면에서 발생하는 마찰열을 주 열원으로 한다.

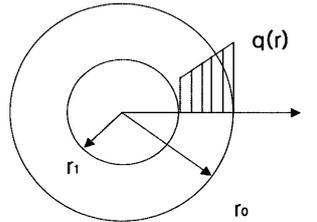


Fig. 2.8 Heat generation from friction at tool between workpiece

이에 대한 FSJ 용접에 의한 입열은 다음 식(2.14)과 같이 가정할 수 있다.

$$q(r) = \frac{3Qr}{2\pi(r_0^3 - r_1^3)} \quad (r_1 \leq r \leq r_0) \quad \text{-----(2.14)}$$

여기서 식(2.14)에 대한 입열 비율의 합은 아래와 같이 식(2.15)로 나타낼 수 있다.

$$\int_{r_0}^{r_1} q(r)2\pi r dr = Q \quad \text{-----(2.15)}$$

또한, 입열의 분포는 툴의 중심으로부터 거리에 비례한다. 그리고 식(2.14)과 (2.15)로부터 마찰계수, 툴의 회전속도, 하중을 변수로 하여 재료에 가해지는 총 입열의 비율은 아래 식(2.16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = \frac{\pi\omega\mu F(r_0^2 + r_0r_1 + r_1^2)}{45(r_0 + r_1)} \quad (W/mm^2) \quad \text{-----(2.16)}$$

$\omega$  : 툴의 회전속도,  $\mu$  : 마찰계수,  $F$  : 하중

### 2.3.2 열탄소성 이론의 정식화

#### (1) 열탄소성 문제의 유한요소법 기본식

용접 응력해석을 위해서 탄성 및 소성영역에서 재료의 기계적 성질 (탄성 계수, 항복응력, 열팽창계수, 비저항)의 온도 의존성을 고려하였고, 소성영역에서는 소성유동이론에 근거하여 증분형으로 나타내었다. 또한, 항복조건에 사용되는 응력인 Von-Mises응력을 항복함수로 사용하였으며, 용접 응력해석문제에서 응력-변형 관계식은 다음과 같다.

$$\{\epsilon\} = [D^e]^{-1} \{\sigma\} - \{\epsilon^t\} \quad \text{-----} (2.17)$$

$[D^e]^{-1}$  : 탄성 응력-변형률 매트릭스,  $\{\epsilon^t\}$  : 열 변형률

식(2.17)을 증분형으로 하면 다음과 같다.

$$\{d\sigma\} = [D^e] \{d\epsilon - d\epsilon^t\} \quad \text{-----} (2.18)$$

재료의 물리적 성질에 대한 온도 의존성을 고려한, 응력 증분의 영향을  $[C]dT$  이라고 하면 식(2.18)은 다음과 같다.

$$\{d\sigma\} = [D] \{d\epsilon\} - [C]dT \quad \text{-----} (2.19)$$

**(2) 절점력과 절점변위의 관계**

재료의 물체력을 무시하고 가상일의 원리에 따라 요소의 등가 절점력 증분  $\{dF\}$ 은 다음과 같다.

$$\{dF\} = [K]\{dU\} - \{dL\} \text{ -----(2.20)}$$

$$[K] = \int_v [B]^T [D] [B] dV : \text{요소의 강성 매트릭스,}$$

$$\{dL\} = \int_v [B]^T [C] dT dV : \text{열에 의한 등가절점력}$$

**(3) 탄성역에서 응력-변형 관계식**

재료가 탄성거동을 하는 경우, 전변형률은 식(2.18)의 열변형률이 적합 조건을 만족하도록 탄성변형률과 합이 되도록 한다.

$$\{de\} = \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^t\} \text{ -----(2.21)}$$

응력  $\{\sigma\}$ 과 탄성변형률  $\{\epsilon^e\}$ 을 탄성 매트릭스를 이용하여 아래와 같이 증분으로 나타낼 수 있다.

$$\{d\sigma\} = [D^e]\{d\epsilon^e\} \text{ -----(2.22)}$$

또한, 탄성변형률  $\{\epsilon^e\}$ 은 온도  $T$  및, 응력  $\{\sigma\}$ 의 함수이므로 탄성변형률의 증분은 아래와 같으며,

$$\{d\epsilon^e\} = \left\{ \frac{\partial \epsilon^e}{\partial \sigma} \right\} \{d\sigma\} + \frac{\partial \{\epsilon^e\}}{\partial T} dT \text{ -----(2.23)}$$

식(2.21)를 식(2.22)에 대입해 정리하면 다음과 같다.

$$\{d\epsilon^e\} = [D^e]^{-1}\{d\sigma\} + \frac{\partial [D^e]^{-1}}{\partial T} \{\sigma\} dT \quad \text{-----}(2.24)$$

위의 식(2.24)을 식(2.21)과 식(2.18)에 대입해 정리하면 아래와 같고,

$$\{d\epsilon\} = [D^e]^{-1}\{d\sigma\} + \frac{\partial [D^e]^{-1}}{\partial T} \{\sigma\} dT + \{\alpha\} dT \quad \text{-----}(2.25)$$

식(2.25)을 식(2.18)에 대입하면 탄성역에서 응력 증분의 구성방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \{d\sigma\} &= [D^e]\{d\epsilon\} - [D^e] \left( \frac{\partial [D^e]^{-1}}{\partial T} \{\sigma\} + \{\alpha\} \right) dT \\ &= [D^e]\{d\epsilon\} - \left( [D^e]\{\alpha\} - \frac{1}{E} \frac{E - E_1}{\Delta T} \{\sigma\} \right) dT \\ &= [D^e]\{d\epsilon\} - \{C\} dT \quad \text{-----}(2.26) \end{aligned}$$

$E_1$  : 온도변화( $\Delta T$ ) 후의 탄성계수,  $\{C\} : [D^e]\alpha \frac{1}{E} - \frac{E - E_1}{\Delta T} \{\sigma\}$  이다.

#### (4) 소성역에서 응력-변형 관계식

항복응력  $\sigma_y$ 은 온도  $T$ 와 소성일(Plastic work)  $W^P(\bar{\sigma}, \epsilon^P)$ 의 함수로,  $\sigma_y(T, W^P)$ 로 하고, 항복함수  $F$ 는 응력 $\{\sigma\}$ 과 항복응력  $\sigma_y$ 로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} F &= f - f_0 = f(\sigma) - f_0(\bar{\epsilon}^P, T) \\ &= \bar{\sigma}^2 - \sigma_0^2(\bar{\epsilon}^P, T) \quad \text{-----}(2.27) \end{aligned}$$

즉,  $dF = df - df_0 = 0$ 를 만족할 때 재료는 항복이 된다. 또한 재료가 소성 영역에서 부하상태일 경우  $dF = 0$ 의 조건을 만족해야 하므로 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$dF = \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T \{d\sigma\} - \left\{ \frac{\partial f_0}{\partial \bar{\epsilon}^p} \right\}^T \{d\bar{\epsilon}^p\} - \frac{\partial f_0}{\partial T} dT = 0 \quad \text{-----}(2.28)$$

$\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T$  : 상당응력의 변화,  $\left\{ \frac{\partial f_0}{\partial \bar{\epsilon}^p} \right\}^T$  : 가공경화,  $\frac{\partial f_0}{\partial T}$  : 온도증분

소성영역에 도달한 재료는 비압축성을 나타내며, 항복함수를 소성포텐셜로 가정하면 소성변형률 증분은 다음과 같다.

$$\{d\bar{\epsilon}^p\} = \lambda \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \quad \text{-----}(2.29)$$

$\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}$  : 편차응력,  $\lambda$  : 양(+)의 스칼라량

전 변형률(total strain)증분  $\{d\epsilon\}$ 은 탄성, 소성 및 열변형률의 합이므로 아래의 식으로 표현할 수 있다.

$$\{d\epsilon\} = \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^p\} + \{d\epsilon^t\} \quad \text{-----}(2.30)$$

따라서 소성영역에서 응력증분에 대한 구성방정식은 식 (2.18), (2.22), (2.24), (2.28), (2.29) 및 (2.30)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\{d\sigma\} = [D^e]\{d\epsilon\} - [D^e] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \lambda - [D^e]\{\alpha\}dT + \frac{d[D^e]}{dT} [D^e]^{-1}\{\sigma\}dT \quad \text{-----}(2.31)$$

## 제 3 장 AI/CFRP 용접부 공정변수별 용접 특성

### 3.1 툴의 삽입깊이에 따른 용접 특성

본 절에서는 툴의 삽입깊이의 최적 조건을 도출하기 위하여 툴의 회전속도는 500rpm, 삽입유지시간은 20sec로 고정하고 삽입깊이를 0.2mm, 0.3mm, 0.4mm로 0.1mm씩 증가시켜 실험을 진행하였다. 실험 실시 전 모든 시험편에 에머리페이퍼를 이용하여 표면거칠기( $Ra=3.0$ )를 부여하였고, 조건별로 실험을 진행한 후 용접부의 측면, 표면을 육안으로 관찰했으며, 인장-전단시험을 실시했다. 또한 파단된 시험편을 분석하여 용접 특성을 고찰하였다.

#### 3.1.1 용접부 외관 특성

우선 용접부 측면을 관찰한 결과 툴의 삽입깊이 0.2mm, 0.3mm, 0.4mm 세 가지 조건 모두 용접 시 CFRP측의 수지가 열에 의해 용융되어 발생하는 압력에 의해 용접부 바깥으로 밀려난 것을 확인할 수 있었으며 이는 Table. 3.1에 나타내었다. 삽입깊이가 증가할수록 주변부로 밀려난 용융 수지의 양이 소폭 증가하였다. 이는 Table. 3.2와 같이 용접부 표면에서도 확인할 수 있었다. 삽입깊이 0.2mm의 조건에서는 용융된 수지가 옆으로만 살짝 흘러나왔지만, 0.3mm, 0.4mm의 삽입깊이 조건에서는 알루미늄 표면 및 CFRP의 표면에서도 용융된 수지가 흘러나와 응고된 것이 관찰되었다. 삽입깊이가 증가할수록 용융되어 흘러나온 수지의 양이 증가한 것을 확인할 수 있었다. 이는 열에 의해 용융된 수지가 버블을 형성하여 순간적인 압력이 발생하였고, 삽입깊이의 증가로 인해 용융된 수지에 미치는 툴의 가압력이 증가하였기 때문으로 사료된다.

Table. 3.1 Side face of Al/CFRP joints with plunge depth

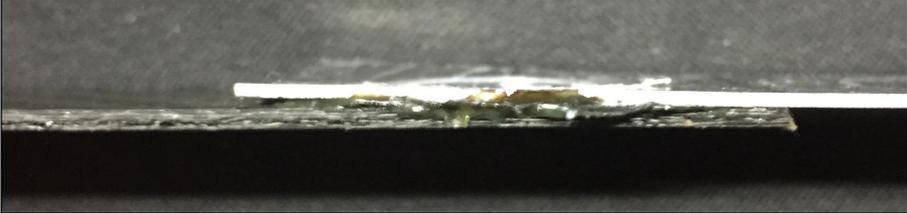
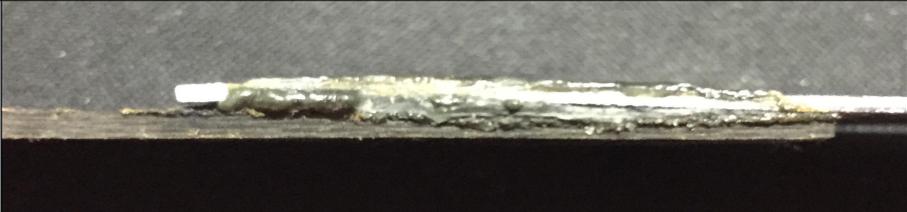
| 삽입깊이  | 용접부 측면  |
|-------|---|
| 0.2mm |   |
| 0.3mm |   |
| 0.4mm |  |

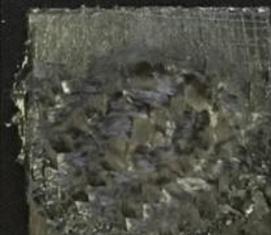
Table. 3.2 Surface of Al/CFRP joints with plunge depth

| 삽입깊이  | 용접부 표면   |
|-------|--|
| 0.2mm |  |
| 0.3mm |  |
| 0.4mm |  |

### 3.1.2 용접부 인장-전단강도 및 파단면 분석

튜의 삽입깊이 조건을 도출하기 위하여 인장-전단시험을 진행하였다. 시험 결과 삽입깊이 0.2mm의 조건에서는 2.61kN의 인장-전단강도값이 도출되었으며, 삽입깊이 0.3mm의 조건에서는 이보다 소폭 증가했지만 2.62kN으로 거의 비슷했다. 그러나 삽입깊이 0.4mm 조건에서는 앞선 두 조건보다 다소 증가한 2.75kN의 인장-전단강도값이 도출되었다. 삽입깊이가 증가할수록 인장-전단강도가 증가하는 경향을 보였다. 시험 후 파단된 시험편의 용접계면을 분석하였으며 이를 Table. 3.3에 나타내었다. 용접계면의 AI측에서는 CFRP의 carbon fiber가 모든 조건에서 관찰되었고, 용접 시 용융된 수지가 응고된 것도 확인할 수 있었다. 용접계면의 CFRP측에서는 모든 삽입깊이 조건에서 수지가 용융되어 퍼져있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 삽입깊이가 증가할수록 용융된 수지가 응고된 면적이 점점 증가함을 알 수 있었다. 이를 Fig. 3.1에 나타낸 것처럼 인장-전단강도 그래프와 함께 비교해 보면 용융된 수지의 면적이 증가할수록 인장-전단강도가 증가한 것을 알 수 있었다.

**Table. 3.3 Fracture interface after tensile-shear test with plunge depth**

| 삽입깊이 | 0.2mm   | 0.3mm  | 0.4mm   |
|------|---|--|---|
| AI   |  |  |  |
| CFRP |  |  |  |

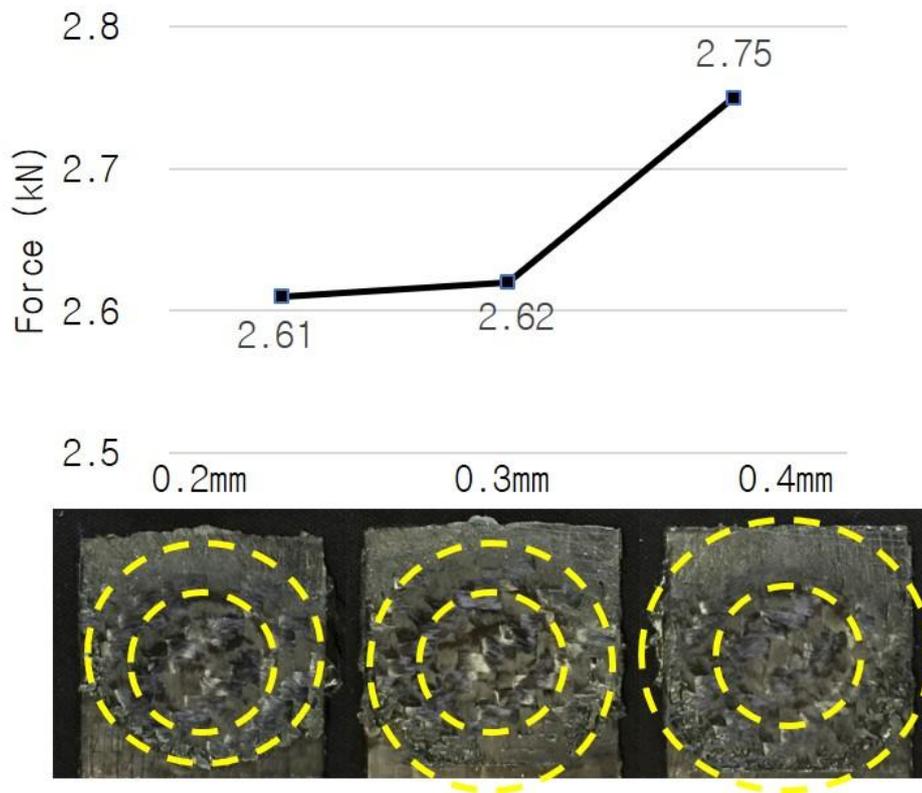


Fig. 3.1 Tensile-shear strength and fracture interface(CFRP) with plunge depth

## 3.2 틀의 삽입유지시간에 따른 용접 특성

본 절에서는 앞 절의 틀의 삽입깊이에 따른 실험 결과를 바탕으로 선정한 틀의 삽입깊이 0.4mm 및 회전속도를 500rpm으로 고정하였다. 앞 절의 실험과 마찬가지로 모든 시험편에 에머리페이퍼를 이용하여 표면거칠기(Ra=3.0)를 부여하였고, 틀의 삽입유지시간을 15sec, 20sec, 25sec로 증가시키면서 실험을 진행하였으며, 실험중 적외선 온도 측정기를 이용하여 용접부의 AI 판재 표면 온도를 측정하였다. 실험 후 육안으로 AI/CFRP 용접부의 외관을 육안으로 관찰하였고, 인장-전단시험을 진행하였으며 파단된 시험편을 관찰하여 AI/CFRP 용접부의 특성을 고찰하였다.

### 3.2.1 용접부 외관 특성

틀의 삽입유지시간 15sec, 20sec, 25sec의 조건으로 실험을 진행한 후 용접부 측면을 관찰하였으며 이를 Table. 3.4에 나타내었다. 세 가지 조건 모두 용접부 측면에서 용융된 수지가 응고되었으며, 삽입유지시간 25sec의 조건에서는 용융된 수지가 심하게 갈변한 것을 확인할 수 있었다. 이는 CFRP의 수지 성분인 PA66이 산화한 것으로 사료된다. 또한 삽입유지시간이 증가할수록 알루미늄의 변형은 감소하는 경향을 보였는데 이는 CFRP의 수지가 용융되어 압력을 발생시켜 변형을 유발하는데, 삽입유지시간이 길어지면 틀이 용접부에 가하는 열과 압력이 증가하기 때문에 용융된 수지가 고루 퍼질 수 있는 시간이 증가되기 때문으로 사료된다. Table. 3.5에 용접부 표면을 나타내었으며 관찰결과는 다음과 같다. 삽입유지시간이 증가할수록 CFRP의 수지가 용융되어 응고된 양이 증가하였다. 삽입유지시간 15sec의 조건일 때는 측면에서만 이를 확인하였지만 삽입유지시간이 20sec, 25sec로 증가할수록 AI/CFRP 용접부의 계면 틈 사이로 흘러나오는 양이 다소 증가하였으며 AI의 용접부 표면에서도 이를 발견되었다. 또한 상부의 비드 표면을 보면 삽입유지시간이 15sec일 때 가장 거친 것을 확인 할 수 있었으며 삽입유지시간이 증가할수록 비드 표면이 소폭으로 매끄러워지지만 큰 차이는 발견할 수 없었다.

Table. 3.4 Side face of Al/CFRP joints with dwell time

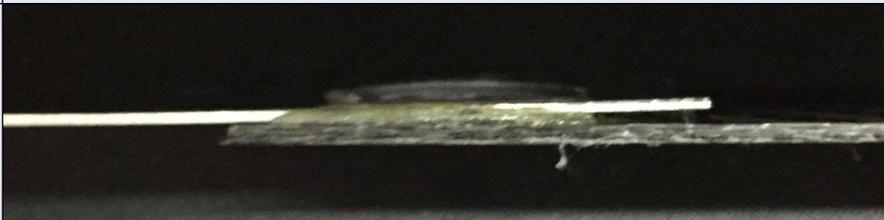
| 삽입유지시간 | 용접부 측면  |
|--------|---|
| 15sec  |   |
| 20sec  |   |
| 25sec  |  |

Table. 3.5 Surface of Al/CFRP joints with dwell time

| 삽입유지시간 | 용접부 표면   |
|--------|--|
| 15sec  |  |
| 20sec  |  |
| 25sec  |  |

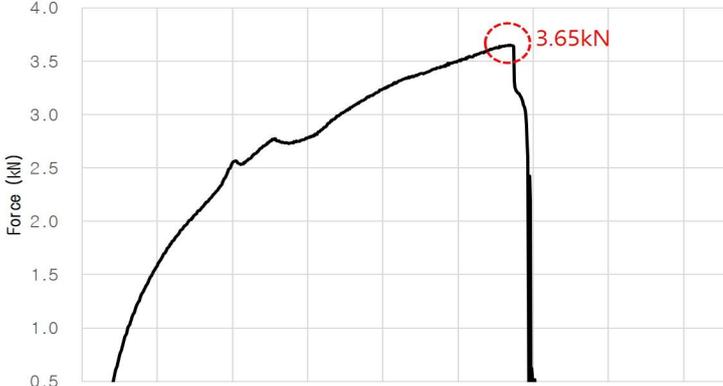
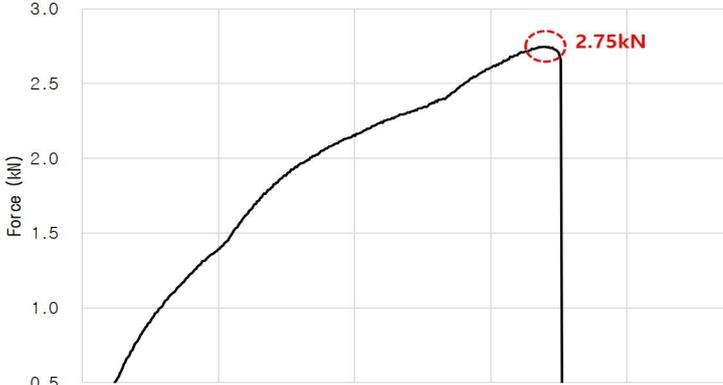
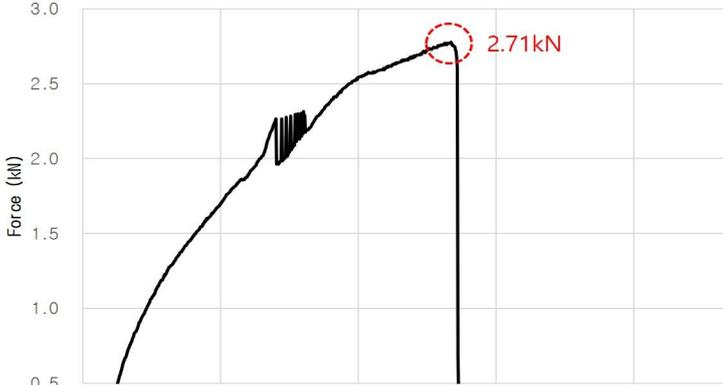
### 3.2.2 용접부 인장-전단강도 및 파단면 분석

틀의 삽입유지시간 조건을 15sec, 20sec, 25sec로 변화시켜 실험을 진행한 후 동일한 시험편으로 인장-전단시험을 진행하였다. 삽입유지시간 15sec의 조건에서 3.65kN으로 최고 인장-전단강도를 확보하였다. 그러나 삽입유지시간이 20sec, 25sec로 증가할수록 인장-전단강도는 약 1kN 이상 하락하여 2.75kN, 2.71kN의 값을 확인하였으며, Table. 3.7에 인장-전단강도 그래프와 값을 나타내었다. 시험 후 파단된 시험편을 분석하였으며 Table. 3.6에 나타내었다. 세 조건의 시험편 모두 용접 계면의 용융된 수지가 응고된 부분에서 파단이 이루어졌으며 용융되어 시측에 응고된 수지의 면적도 크게 다르지 않았다. 그러나 앞선 용접부 외관 특성 관찰에서와 마찬가지로 삽입유지시간이 증가할수록 용융된 수지가 갈변한 양이 증가한 것을 확인하였는데 이는 CFRP의 수지가 산화한 것이다. 금속과 CFRP 용접 시 CFRP의 수지가 용융되어 용접이 이루어지는데 본 실험에서 삽입유지시간이 증가할수록 용융된 수지의 산화가 심해져 용접부의 인장-전단강도가 저하된 것으로 사료된다.

Table. 3.6 Fracture interface after tensile-shear test with dwell time

| 삽입유지시간 | 15sec   | 20sec  | 25sec   |
|--------|---|--|---|
| Al     |  |  |  |
| CFRP   |  |  |  |

Table. 3.7 Tensile-shear strength with dwell time

| 삽입유지시간 | 인장-전단강도  |        |
|--------|--|--------|
| 15sec  |    | 3.65kN |
| 20sec  |   | 2.75kN |
| 25sec  |  | 2.71kN |

### 3.2.3 용접부 표면 온도 특성

실험을 진행하면서 용접 시 Al판재의 표면에 발생하는 열에 대해 비접촉식 적외선 온도 측정기로 측정하였으며 이를 Fig. 3.2에 나타내었다. 삽입깊이 0.4mm, 회전속도 500rpm 및 삽입유지시간 15sec의 조건에서 약 323℃로 측정되었으며, 삽입유지시간이 20sec, 25sec로 증가할수록 약 10℃씩 증가하였다. 다음 Fig. 3.2와 같이 Al/CFRP 용접부 표면의 온도를 인장-전단강도와 비교해 보았다. 본 실험에 사용된 CFRP의 수지인 PA66의 용융온도는 260℃이며 성형 등의 가공을 할 때는 이보다 20 ~ 40℃ 정도 온도를 상승시켜 작업을 권장하고 있다. 본 실험에 사용된 비접촉식 적외선 온도 측정기의 오차를 감안하더라도 강도가 저하된 삽입유지시간 20sec, 25sec의 조건에서는 권장 가공 온도를 벗어난 것을 알 수 있었다. 따라서 이 권장 가공 온도 범위 외에서 작업 시 기존 CRPP의 물성에 크게 영향을 주는 것으로 사료되며, 15sec가 적절한 틀의 삽입유지시간이라고 판단된다.

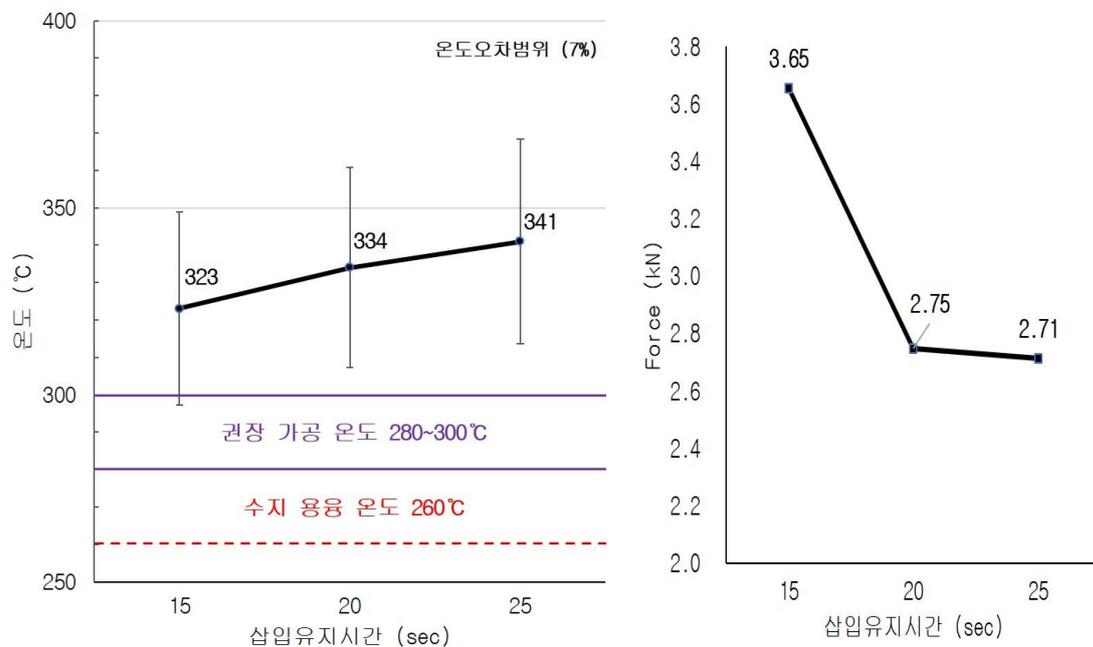


Fig. 3.2 Surface temperature and tensile-shear strength with dwell time

### 3.3 툴의 회전속도에 따른 용접 특성

본 절에서는 Al/CFRP 용접 시 툴의 회전속도를 300rpm, 400rpm, 500rpm으로 100rpm씩 증가시키면서 회전속도에 따른 용접부의 특성을 고찰하고자 한다. 앞 절의 툴의 삽입깊이 및 삽입유지시간에 따른 Al/CFRP 용접부 특성 실험에서 도출된 결과를 바탕으로 툴의 삽입깊이를 0.4mm, 삽입유지시간을 15sec로 선정하였다. 실험 전 모든 조건의 시험편에 에머리페이퍼를 이용하여 표면거칠기( $Ra=3.0$ )를 부여하였으며, 실험 중 비접촉식 적외선 온도 측정기를 이용하여 Al표면에 발생하는 온도를 측정하였고, 용접부의 외관을 육안으로 관찰하였다. 또한 동일한 용접 조건으로 제작된 시험편을 이용하여 인장-전단시험 후 파단면을 분석하고 가공하여 용접부의 단면과 계면을 관찰하여 Al/CFRP 용접부의 특성을 고찰하였다.

#### 3.3.1 용접부 외관 특성

툴의 회전속도에 따른 용접 특성 실험 후 용접부 측면을 관찰한 결과를 Table. 3.8에 나타내었다. 툴의 회전속도 300rpm의 조건에서는 용융된 수지의 흔적을 찾을 수 없었지만 회전속도 400rpm, 500rpm의 조건에서는 수지가 용융되어 용접부 측면으로 새어나온 것을 확인할 수 있었다. 또한 수지가 용융되면서 발생하는 압력 때문에 Al의 변형이 다소 증가한 것을 볼 수 있다. Table. 3.9에 나타낸 것과 같이 용접부 표면을 보면 툴의 회전속도 400rpm이상의 조건일 때 상부로 용융된 수지의 흔적을 관찰할 수 있었다. 비드의 외관은 세 조건 모두 다소 거친 것을 확인할 수 있었다. 이는 앞 절의 툴의 삽입유지시간에 따른 용접 특성 실험에서 비슷한 조건에서의 상부 표면 비드보다 거친 것을 보아 삽입유지시간이 15sec일 때 회전속도가 낮아지면 비드가 매우 거칠어진 것을 보아 툴의 삽입유지시간과 회전속도가 감소하여 급격한 발열 저하로 알루미늄 재료가 충분히 연화되지 못한 것으로 생각된다.

Table. 3.8 Side face of Al/CFRP joints with rotation speed

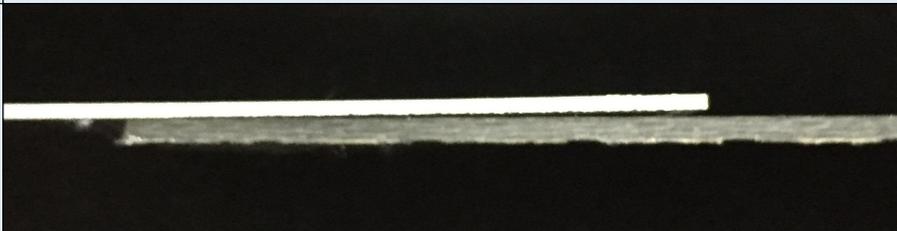
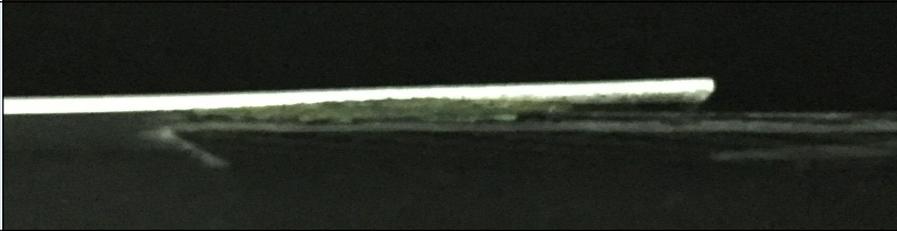
| 회전속도   | 용접부 측면  |
|--------|---|
| 300rpm |   |
| 400rpm |   |
| 500rpm |  |

Table. 3.9 Surface of Al/CFRP joints with rotation speed

| 회전속도   | 용접부 표면   |
|--------|--|
| 300rpm |  |
| 400rpm |  |
| 500rpm |  |

### 3.3.2 용접부 단면 특성

각 조건별로 AI/CFRP를 용접한 후 광학현미경으로 용접부 단면을 관찰하였다. 용접부 단면 마크로 사진을 Table. 3.10에 나타내었으며, 툴의 회전속도 별로 비교해보면 300rpm의 회전속도 조건에서는 CFRP 판재의 표면에 있는 수지만 용융된 것을 확인할 수 있었다. 회전속도 400rpm에서는 조금 더 증가해서 CFRP 판재의 중간부분까지 수지가 용융되었으며, 500rpm의 회전속도 조건에서는 CFRP 판재의 끝단까지 수지가 용융된 것을 확인할 수 있었다. Table. 3.11과 같이 용접 시 툴이 위치하는 중심부분과 바깥쪽의 AI/CFRP 용접부 단면을 확인하였다. 툴의 회전속도 300rpm의 조건에서는 중심부분의 용접 계면에서는 용융된 수지의 두께가 약  $9\mu\text{m}$  정도 측정되었으며, 끝단으로 갈수록 증가하는 경향을 보였으며 약  $48\mu\text{m}$ 의 용융된 수지의 두께가 측정되었다. 400rpm의 회전속도 조건에서는 300rpm의 조건보다 더 두텁게 용융된 수지가 용접부 계면에 형성되었으며, 중심부에서는 약  $48\mu\text{m}$ , 끝단에서는 약  $65\mu\text{m}$ 로 측정되어 300rpm 조건과 마찬가지로 끝단으로 갈수록 용융된 수지의 두께가 증가하였다. 툴의 회전속도 500rpm의 조건에서 중심부에서는 약  $292\mu\text{m}$ 로 이전의 조건들보다 약 6배 정도 용융된 수지의 두께가 측정되었고, 끝단에서는 중심부보다 두께가 감소하긴 했으나 약  $92\mu\text{m}$ 로 툴의 회전속도 300rpm, 400rpm의 조건보다 더 많은 양의 수지가 용융된 것을 확인할 수 있었다.

Table. 3.10 Cross section(Macro) with rotation speed

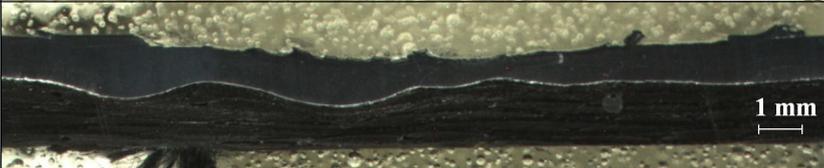
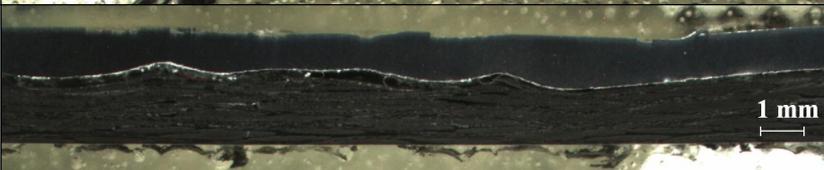
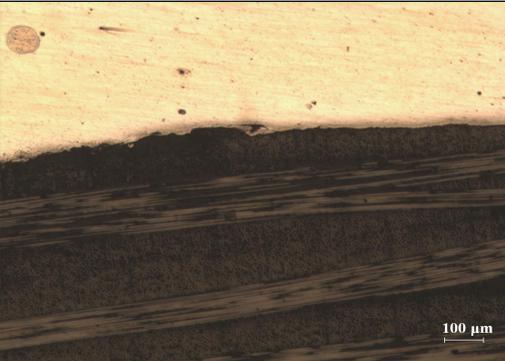
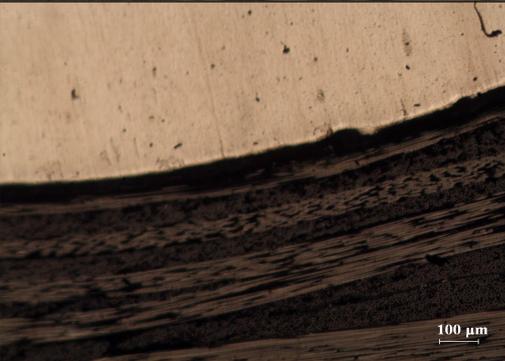
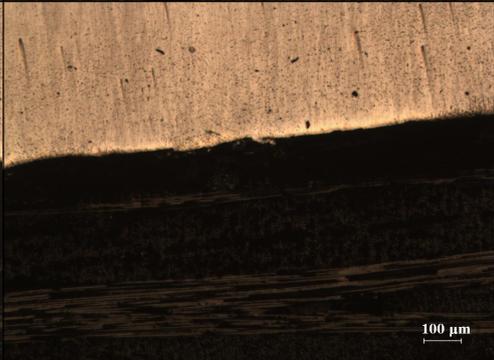
| 회전속도   | 용접부 단면   |
|--------|--|
| 300rpm |  |
| 400rpm |  |
| 500rpm |  |

Table. 3.11 Cross section(Micro) with rotation speed

|        | 틀 중심  | 틀 끝단   |
|--------|---|--|
| 300rpm |    |    |
| 400rpm |   |   |
| 500rpm |  |  |

### 3.3.3 용접부 인장-전단강도 및 파단면 분석

툴의 회전속도 변화 실험을 통하여 제작된 시험편으로 인장-전단시험을 진행하였다. 앞 절의 삽입유지시간 변화에 따른 AI/CFRP 용접부 특성 실험에서 툴의 회전속도 500rpm, 삽입깊이 0.4mm 및 삽입유지시간 15sec에서 3.65kN의 인장-전단강도를 달성하였다. 회전속도 400rpm에서는 약 2kN 정도 감소한 1.66kN 이었고, 회전속도 300rpm의 조건에서는 약 6배 이상 하락한 0.60kN의 인장-전단강도를 확인할 수 있었다. 본 실험을 통해 위의 조건에서 툴의 회전속도가 감소하면 인장-전단강도가 급격히 감소한 것을 확인하였다. 이는 툴의 회전속도가 감소함에 따라 급격한 발열 저하로 인하여 CFRP의 수지가 충분히 용융되지 않은 것으로 사료되며 앞서 진행한 용접부 단면 특성을 평가한 실험을 통해서도 이를 확인하였다. 또한 Fig. 3.3에 나타낸 것처럼 용융된 수지의 두께와 인장-전단강도를 비교해봤을 때 용융된 수지의 두께와 인장-전단강도의 경향이 일치하였으며, 이는 용융된 수지의 두께가 인장-전단강도에 영향을 준 것으로 사료된다.

인장-전단시험 후 Table. 3.12과 같이 파단된 시험편을 분석했다. 회전속도 300rpm의 조건에서는 AI측의 파단면에서는 CFRP의 용융된 수지 및 carbon fiber가 관찰되지 않았으며 CFRP측 파단면에서 소량의 용융된 수지가 발견되었다. 회전속도 400rpm 조건에서는 300rpm의 조건보다 용융된 수지의 양이 늘어났으며 AI측의 파단면에서도 용융된 수지가 관찰되었다. 500rpm의 툴 회전속도 조건에서는 AI측의 파단면에서 carbon fiber 및 용융된 수지가 관찰되었으며, CFRP측의 파단면에서는 수지가 용융되어 툴의 바깥쪽으로 넓게 퍼져있는 것을 확인할 수 있었다. 파단면 관찰결과 파단면에서 용융된 수지의 양과 면적이 용접강도에 영향을 준 것으로 사료된다.

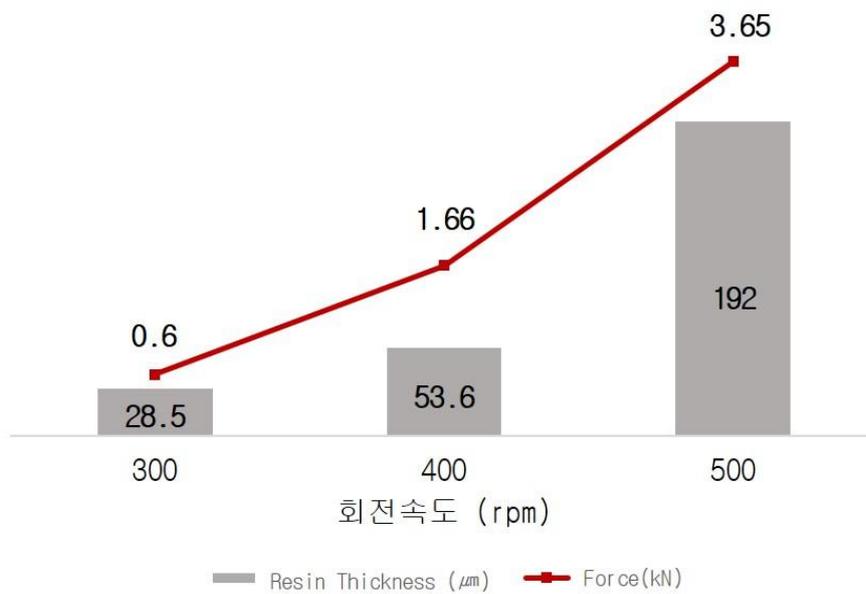
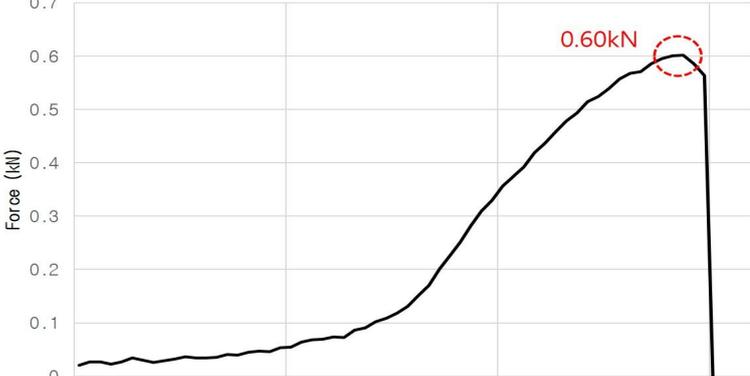
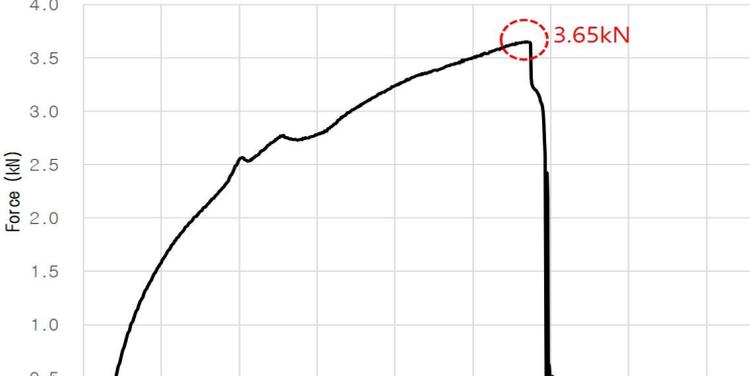


Fig. 3.3 Resin thickness and tensile-shear strength of Al/CFRP joints with rotation speed

Table. 3.12 Fracture interface after tensile-shear test with rotation speed

| 회전속도 | 300rpm | 400rpm | 500rpm |
|------|--------|--------|--------|
| Al   |        |        |        |
| CFRP |        |        |        |

Table. 3.13 Tensile-shear strength with rotation speed

| 회전속도   | 인장-전단강도  |        |
|--------|--|--------|
| 300rpm |    | 0.60kN |
| 400rpm |   | 1.66kN |
| 500rpm |  | 3.65kN |

### 3.3.4 용접부 표면 온도 특성

틀의 회전속도 변화에 따른 특성 실험을 진행하면서 비접촉식 적외선 온도 측정기로 AI/CFRP 용접부의 AI표면의 온도를 측정하였으며 아래의 Fig. 3.4 와 같다. 용접부 표면의 온도는 틀의 회전속도가 감소함에 따라 급격히 저하되었다. 회전속도 500rpm의 조건에서 약 323℃의 표면 온도가 측정되었으며, 회전속도 400rpm에서는 256℃, 300rpm에서는 187℃로 회전속도 감소가 용접부 표면의 온도에 영향을 미쳤으며, 이는 용접부 계면의 용융된 수지의 양에도 영향이 있을 것으로 사료된다. 틀의 회전속도 300rpm의 조건에서는 약 187℃로 수지의 용융 온도에 못 미쳤으며 400rpm일 때는 수지의 용융온도 부근인 256℃로 측정 되었지만 온도 측정기의 오차를 감안했을 때 수지의 용융 온도까지 도달하지 못했을 수도 있다. 틀의 회전속도 500rpm의 조건에서 오차 범위 내에서 권장가공온도 부근의 온도가 측정된 것으로 보아 AI/CFRP 용접부의 인장-전단강도에 온도의 영향이 큰 것으로 판단된다. 아울러 금속과 CFRP의 용접에 있어서 용융되어 금속과 용접이 이루어지는 수지의 양과 산화 정도가 용접 강도에 영향을 준 것이라 할 수 있다.

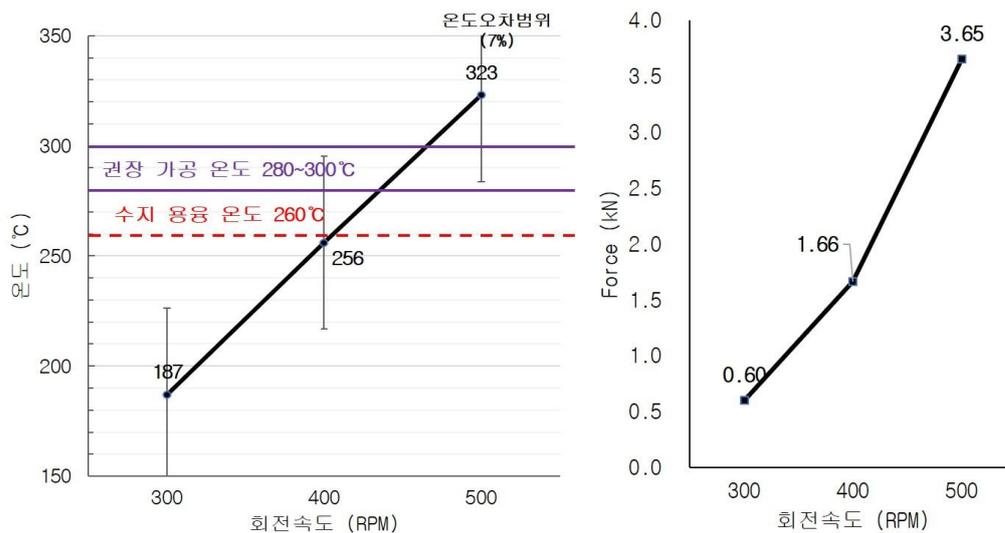


Fig. 3.4 Surface temperature and tensile-shear strength with rotation speed

## 제 4 장 AI/CFRP 용접부 수치해석

### 4.1 해석 모델 및 조건

이종재 AI/CFRP 용접부의 열전도 및 열탄소성 수치해석에 사용된 모델의 크기는 실제 시편과 동일한 80mm(L) X 30mm(W) 및 상판 AI 1.0mm(t), 하판 CFRP 1.5mm(t)의 겹치기 용접부이며, 이를 2차원으로 모델링하여 Fig. 4.1에 나타내었다. Fig. 4.2과 같이 x방향으로 용접부, 열영향부 및 모재로 갈수록 Mesh의 크기를 크게 하였고 요소의 개수는 1430개 절점의 개수는 1627개 이며, 수치해석에 사용한 재료의 물성치는 Fig. 2.1 및 Fig. 2.2에 나타내었다. 수치해석 시 실험에서 사용된 톨의 제원 및 용접조건(회전속도, 삽입유지시간)을 입력하였고, 열전도 수치해석 시 열적 경계조건은 재료 표면에 Convection 및 Conduction을 고려하였으며, 열탄소성 수치해석 시에는 경계조건으로는 무한판의 구속조건을 고려하여 x방향의 양단을 구속하였다. 아울러 열탄소성 수치해석 시 열전도 수치해석을 통해 얻어진 온도 결과치를 이용하여 용접부의 변형 및 잔류응력 특성을 고찰하였다.

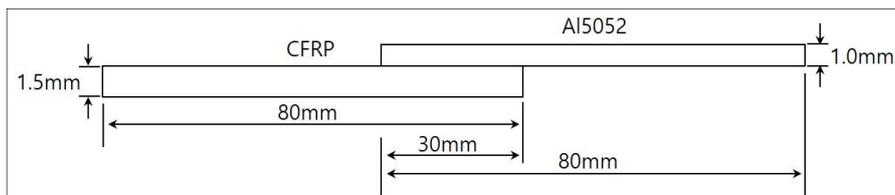


Fig. 4.1 AI/CFRP lap joint two-dimensional Modeling for numerical analysis

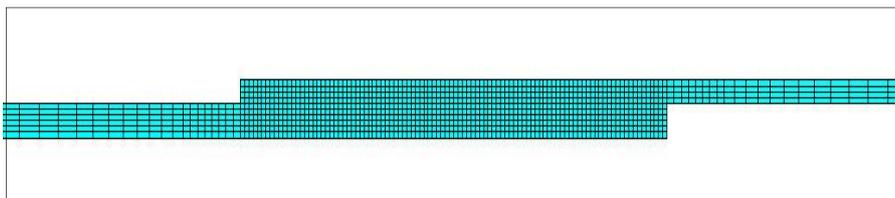


Fig. 4.2 Finite-element mesh division for numerical analysis

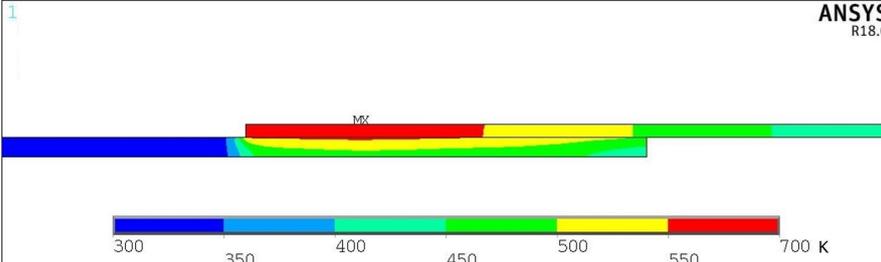
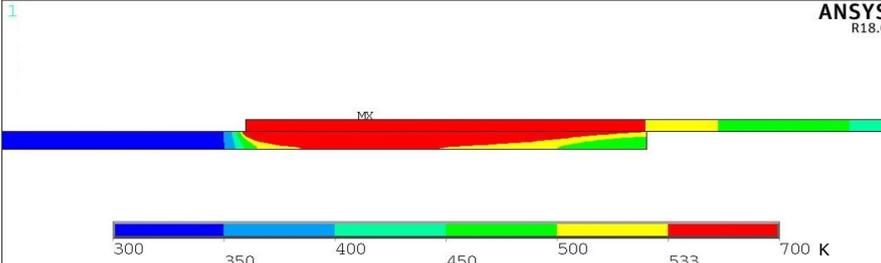
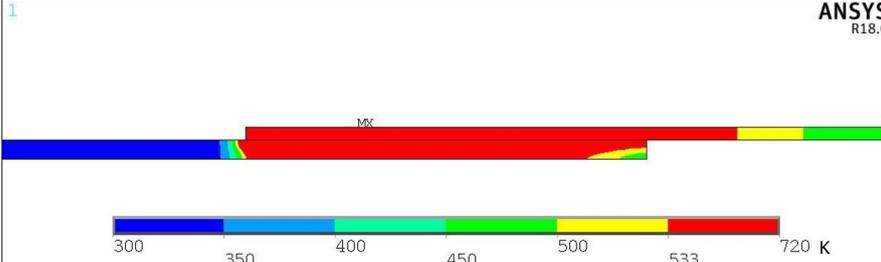
## 4.2 열전도 수치해석 결과 및 고찰

본 절에서는 AI/CFRP의 FSJ 용접부의 2차원 비정상 열전도 수치해석을 실시한 후 해석 결과를 분석하고 실험 결과와 수치해석 결과를 비교 검토하여 AI/CFRP 용접부의 신뢰성을 얻고자 하였다.

용접부의 열전도 수치해석 결과를 바탕으로 최고온도가 발생한 튜의 삽입 유지시간(15sec)의 온도분포를 확인하였으며, 튜의 회전속도에 따른 AI/CFRP 용접부의 온도분포를 Table. 4.1에 나타내었다. 우선 회전속도 300rpm일 때 최고온도는 약 240℃로 확인되었으며, 튜에서 발생된 열은 AI판재에서 두께 방향으로 CFRP의 표면까지만 열전도가 이루어졌다. 이는 앞 장의 시험편의 단면 분석 시 CFRP의 표면에서만 수지의 용융이 일어나 용접이 이루어진 것과 같이 실제 실험의 결과와 동일하게 확인되었다. 회전속도를 400rpm으로 증가시키면 CFRP판재의 아래 부분까지 더 많은 양의 열이 전도되었으며, 최고 온도는 약 290℃정도로 실제 실험과는 약간차이가 있었지만, 실험 시 사용한 비접촉식 적외선 온도 측정기의 오차를 고려했을 때 비슷한 결과라고 사료된다. 회전속도를 500rpm으로 증가 시 앞선 조건들 보다 많은 양의 열이 발생하였으며 최고온도는 310℃로 확인되었다. 두께 방향의 온도분포 특성을 분석해보면 튜에서 전달된 열이 CFRP판재의 끝단 구석까지 열전도가 이루어졌음을 확인하였으며, 이는 실제 실험의 단면 분석 결과와 동일하였다.

세 조건 모두 동일하게 온도 최고치의 발생 위치는 AI에 튜의 맞닿아 있는 중심부에서 확인되었으며, 최저온도는 용접 외부의 CFRP에서 약 27℃로 확인되었다. 또한 분석 모델의 길이 방향으로 열전도는 AI쪽에서 많이 발생하여 열영향부가 형성되었으며, 용접부에서 먼 CFRP에는 열의 영향이 미미했다.

Table. 4.1 Temperature fields with rotation speed

| 회전속도   | 용접부 온도 분포   |
|--------|---|
| 300rpm |   |
| 400rpm |   |
| 500rpm |  |

틀의 삽입유지시간에 따른 AI/CFRP 용접부의 온도 분포 특성을 Table. 4.2에 나타내었으며, 그 특성을 고찰하였다. 삽입유지시간 15sec의 조건일 때 용접부의 최고 온도는 약 310℃로 확인 되었으며, 틀에서 발생한 열이 두께 방향으로 CFRP의 밑단까지 열전도 된 것을 확인할 수 있었다. 삽입유지시간 20sec로 증가시키면 틀에서 발생한 열의 열전도량이 더욱 증가하였으며, 최고온도는 약 360℃로 확인되었다. 삽입유지시간 25sec의 조건에서는 AI과 CFRP의 용접부 전체로 열전도가 이루어졌으며, 최고온도는 약 400℃로 크게 증가하였다. 실제 앞 장에서 실시한 온도측정실험에 사용한 비접촉식 적외선 온도 측정기의 오차를 고려했을 때 비슷한 결과라고 사료된다.

세 조건 모두 최고온도 발생 위치는 AI판재에 틀의 맞닿아 있는 AI/CFRP 용접부 중심에서 확인되었으며, 최저온도는 용접 외부의 CFRP판재에서 약 27℃로 확인되었다. 또한 분석 모델의 AI쪽의 길이 방향으로 열전도 때문에 AI에 열영향부가 형성되었으며, 용접부에서 먼 CFRP는 열영향이 미미했다.

Table. 4.2 Temperature fields with dwell time



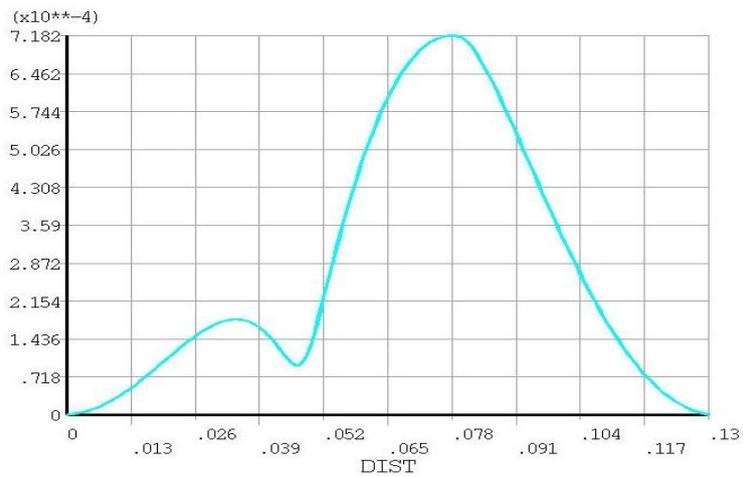
### 4.3 열탄소성 수치해석 결과 및 고찰

#### 4.3.1 AI/CFRP 용접부 변형률 특성

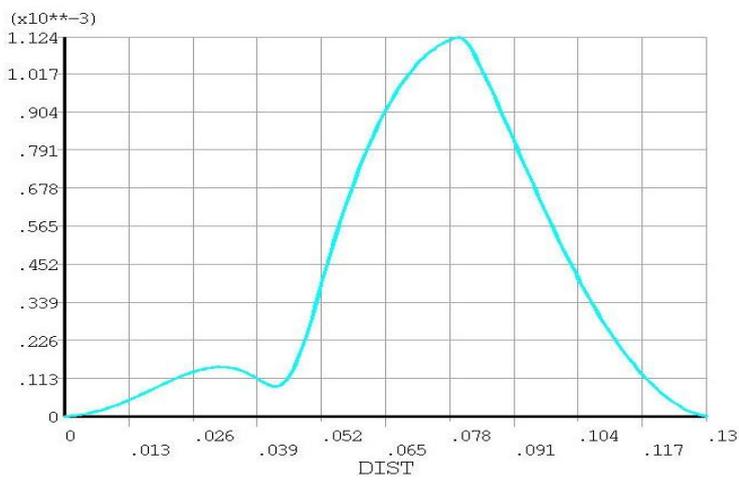
Table. 4.3은 회전속도 변화에 따른 용접 후 시험편의 전 영역에 발생하는 상당변형률의 분포를 나타낸 것이다. 최대 상당변형률은 회전속도 300rpm에서 약 0.00072이며, 회전속도가 증가할수록 변형은 증가하여 400rpm에서 0.00112, 500rpm에서 0.0014로 확인되었다. 최대 변형률의 발생 위치는 틀의 삽입 위치에서 약 1mm 떨어진 위치였다. 또한 CFRP보다 AI의 변형률이 큰 것을 알 수 있었으며, 회전속도가 증가할수록 AI의 변형률이 증가함과 동시에 최대변형률 발생 위치가 AI과 CFRP의 겹침 부위를 조금 벗어난 것을 확인할 수 있었다. 앞 절의 열전도 수치해석의 결과와 비교해 보면 열영향부에서 최대 변형률이 발생한 것을 알 수 있었고, 열전도가 잘되는 AI측에서 변형률이 큰 것을 확인하였다. 또한 CFRP의 변형률은 회전속도가 증가할수록 감소하는 것을 확인하였다.

Table. 4.3 Strain fields with rotation speed

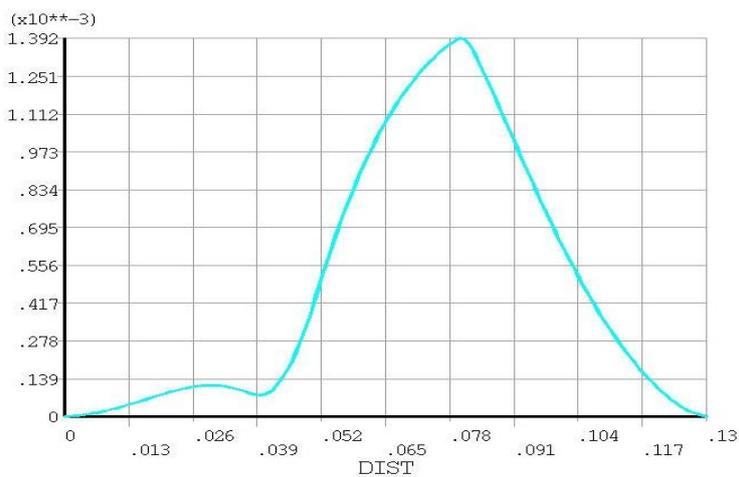
| 회전속도   | 변형률 분포  |
|--------|---|
| 300rpm | <p>ANSYS R18.0</p> <p>1 NODAL SOLUTION<br/>SUB =1<br/>TIME=2<br/>USUM (AVG)<br/>RSYS=0<br/>DMX =.721E-03<br/>SMX =.721E-03</p> <p>0 .802E-04 .160E-03 .240E-03 .321E-03 .401E-03 .481E-03 .561E-03 .641E-03 .721E-03</p>        |
| 400rpm | <p>ANSYS R18.0</p> <p>1 NODAL SOLUTION<br/>STEP=2<br/>SUB =1<br/>TIME=2<br/>USUM (AVG)<br/>RSYS=0<br/>DMX =.001129<br/>SMX =.001129</p> <p>0 .125E-03 .251E-03 .376E-03 .502E-03 .627E-03 .753E-03 .878E-03 .001004 .001129</p> |
| 500rpm | <p>ANSYS R18.0</p> <p>1 NODAL SOLUTION<br/>STEP=2<br/>SUB =1<br/>TIME=2<br/>USUM (AVG)<br/>RSYS=0<br/>DMX =.0014<br/>SMX =.0014</p> <p>0 .156E-03 .311E-03 .467E-03 .622E-03 .778E-03 .933E-03 .001089 .001245 .0014</p>        |



300rpm



400rpm

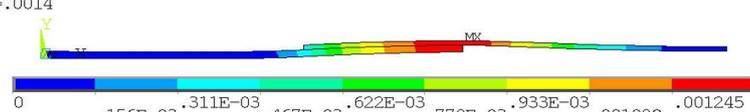
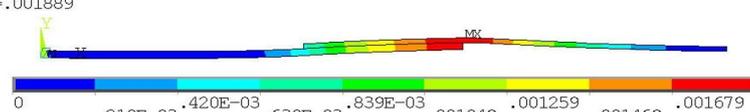
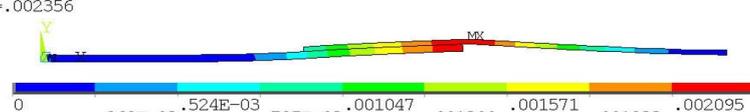


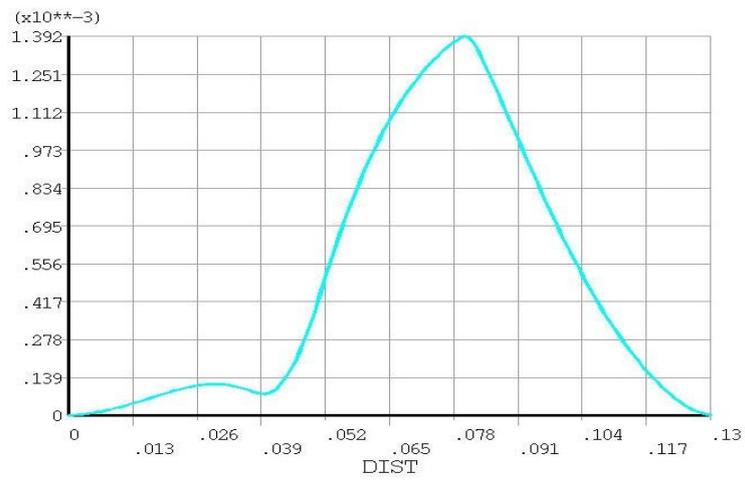
500rpm

Fig. 4.3 Strain distribution of Al/CFRP joint with rotation speed

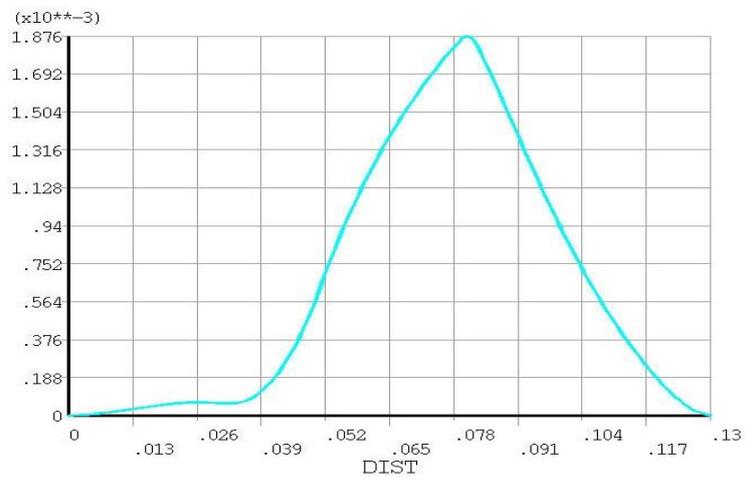
삽입유지시간에 따른 AI/CFRP 용접부의 상당변형률 분포를 Table. 4.4에 나타내었다. 삽입유지시간 15sec일 때 0.0014의 최대 상당변형률을 확인하였으며, 삽입유지시간이 증가함에 따라 변형률은 증가하여 20sec일 때 0.0019, 25sec일 때 0.0024의 최대 상당변형률을 확인할 수 있었다. 최대 상당변형률의 위치는 틀의 삽입위치에서 약 1mm 떨어진 AI과 CFRP의 겹침 부위로 삽입유지시간이 증가하여도 최대 변형률 발생 위치는 거의 변하지 않았다. 앞 장의 실험에서 삽입유지시간이 15sec에서 20sec, 25sec로 증가하였을 때 인장-전단강도가 하락하였는데, 수치해석 결과와 비교했을 때 온도에 따른 CFRP 수지의 물성 변화와 더불어 AI과 CFRP의 겹침 부위 끝에 발생한 변형으로 인해 용접부가 밀착되지 못해 강도가 하락한 것으로 사료된다. 또한 열전도가 잘되는 AI측에서 변형률이 큰 것을 확인하였으며, CFRP의 변형률은 틀의 삽입유지시간 증가할수록 감소하는 것을 확인하였다.

Table. 4.4 Strain fields with dwell time

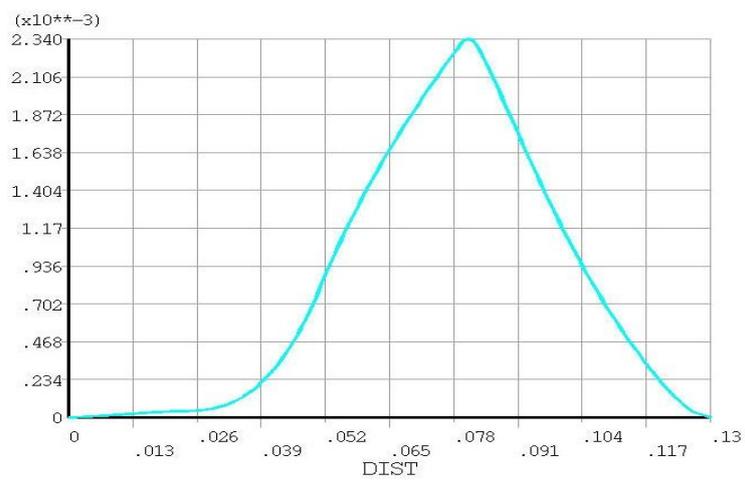
| 삽입유지시간 | 변형률 분포   |
|--------|--|
| 15sec  | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>1 NODAL SOLUTION</p> <p>STEP=2</p> <p>SUB =1</p> <p>TIME=2</p> <p>USUM (AVG)</p> <p>RSYS=0</p> <p>DMX =.0014</p> <p>SMX =.0014</p> </div> <div style="text-align: right;"> <p>ANSYS<br/>R18.0</p> </div> </div>      |
| 20sec  | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>1 NODAL SOLUTION</p> <p>STEP=2</p> <p>SUB =1</p> <p>TIME=2</p> <p>USUM (AVG)</p> <p>RSYS=0</p> <p>DMX =.001889</p> <p>SMX =.001889</p> </div> <div style="text-align: right;"> <p>ANSYS<br/>R18.0</p> </div> </div>  |
| 25sec  | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>1 NODAL SOLUTION</p> <p>STEP=2</p> <p>SUB =1</p> <p>TIME=2</p> <p>USUM (AVG)</p> <p>RSYS=0</p> <p>DMX =.002356</p> <p>SMX =.002356</p> </div> <div style="text-align: right;"> <p>ANSYS<br/>R18.0</p> </div> </div>  |



15sec



20sec



25sec

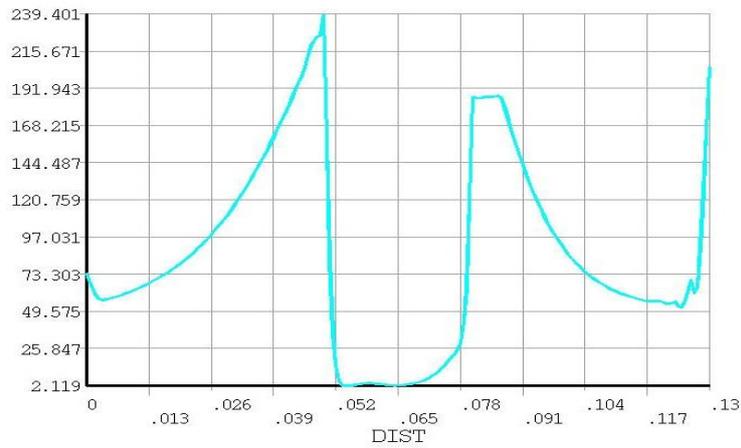
Fig. 4.4 Strain distribution of Al/CFRP joint with dwell time

### 4.3.2 AI/CFRP 용접부 잔류응력 특성

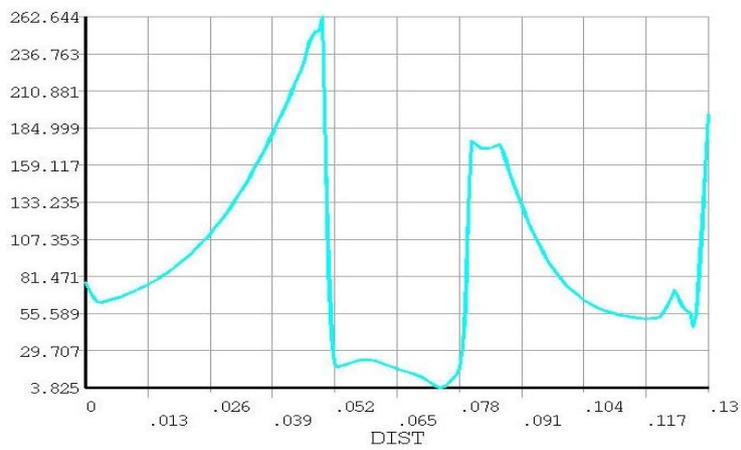
열탄소성 수치해석을 통해 AI/CFRP 용접부의 용접 후 잔류응력 분포를 Table. 4.5에 나타냈으며 스칼라량만을 취하는 Von-mises 응력을 사용하여 그 특성을 고찰하였다. 최대 잔류응력은 회전속도 300rpm일 때 약 240MPa, 회전속도를 400rpm, 500rpm으로 증가 했을 때는 약 290MPa로 비슷하게 증가 하였으며, 모두 AI과 CFRP의 겹침 부위에서 나타났다. Fig. 4.5에 나타낸 것과 같이 회전속도가 증가할수록 최대 잔류응력은 증가하였지만 AI측에서 발생한 잔류응력은 감소하였다. 또한 AI과 CFRP의 물성 차이로 인해 AI측에서 약 160MPa, CFRP측에서 약 80MPa로 잔류응력의 차이가 큰 것이 확인되었다. 아울러 용접 시 틀이 삽입되는 위치에 응력이 0에 가까운 것은 틀의 발열로 인하여 온도가 증가하여 재료의 탄성계수를 넘어섰기 때문으로 사료된다.

Table. 4.5 Residual stress fields with rotation speed

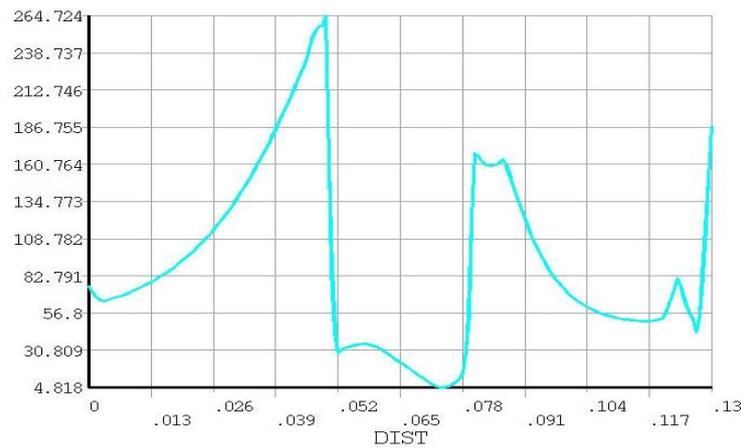
| 회전 속도  | 잔류응력 분포   |
|--------|---|
| 300rpm | <p>ANSYS R18.0</p> <p>1 NODAL SOLUTION<br/>SUB =1<br/>TIME=2<br/>SEQV (AVG)<br/>DMK =.721E-03<br/>SMN =1.38628<br/>SMK =252.466</p> <p>1.38628 29.284 57.1818 85.0795 112.977 140.875 168.773 196.67 224.568 252.466</p>            |
| 400rpm | <p>ANSYS R18.0</p> <p>1 NODAL SOLUTION<br/>STEP=2<br/>SUB =1<br/>TIME=2<br/>SEQV (AVG)<br/>DMK =.001129<br/>SMN =1.37865<br/>SMK =290.756</p> <p>1.37865 33.5317 65.6847 97.8377 129.991 162.144 194.297 226.45 258.603 290.756</p> |
| 500rpm | <p>ANSYS R18.0</p> <p>1 NODAL SOLUTION<br/>STEP=2<br/>SUB =1<br/>TIME=2<br/>SEQV (AVG)<br/>DMK =.0014<br/>SMN =.605481<br/>SMK =296.902</p> <p>.605481 33.5273 66.4491 99.3709 132.293 165.215 198.136 231.058 263.98 296.902</p>   |



300rpm



400rpm



500rpm

Fig. 4.5 Residual stress distribution of Al/CFRP joint with rotation speed

틀의 삽입유지시간에 따른 AI/CFRP 용접부의 용접 후 잔류응력 분포를 Table. 4.6에 나타냈으며 그 특성을 고찰하였다. 삽입유지시간 15sec일 때 최대 잔류응력은 약 296MPa로 AI과 CFRP의 겹침 부위에서 나타났으며 삽입유지시간이 20sec, 25sec로 증가 했을 때도 약 295MPa로 큰 차이가 없었다. Table. 4.7에 나타낸 것과 같이 삽입유지시간이 증가할수록 잔류응력은 AI과 CFRP의 겹침 부위 및 AI측에서 미미하게나마 감소하는 경향을 보였다. 또한 AI과 CFRP의 물성치의 차이로 인해 CFRP측에서 약 80MPa, AI측에서 약 160MPa로 잔류응력의 차이가 큰 것이 확인되었다. 앞 선 틀의 회전속도에 따른 AI/CFRP 용접부 잔류응력 특성과 마찬가지로 용접 시 틀이 삽입되는 위치에 응력이 0에 가까운 것은 틀의 발열로 인하여 온도가 증가하여 재료의 탄성계수를 넘어섰기 때문으로 사료된다.

Table. 4.6 Residual stress fields with dwell time

| 삽입유지시간 | 잔류응력 분포   |
|--------|---|
| 15sec  | <p>ANSYS R18.0</p> <p>NODAL SOLUTION<br/>STEP=2<br/>SUB =1<br/>TIME=2<br/>SEQV (AVG)<br/>DMX =.0014<br/>SMN =.605481<br/>SMX =296.902</p>   |
| 20sec  | <p>ANSYS R18.0</p> <p>NODAL SOLUTION<br/>STEP=2<br/>SUB =1<br/>TIME=2<br/>SEQV (AVG)<br/>DMX =.001889<br/>SMN =.907589<br/>SMX =295.939</p> |
| 25sec  | <p>ANSYS R18.0</p> <p>NODAL SOLUTION<br/>STEP=2<br/>SUB =1<br/>TIME=2<br/>SEQV (AVG)<br/>DMX =.002356<br/>SMN =1.714<br/>SMX =295.131</p>   |

Table. 4.7은 틀 회전속도 500rpm에서 틀의 삽입유지시간을 15sec, 20sec, 25sec로 5sec씩 증가시켜 열전도 및 열탄소성 수치해석을 시뮬레이션하여 틀의 삽입위치에서 1mm 떨어진 위치의 온도 이력과 AI/CFRP 용접부의 잔류응력을 나타낸 것이다. AI/CFRP 용접부의 AI과 CFRP의 겹침 부위에서 발생하는 최대 잔류응력이 틀의 삽입유지시간이 커짐에 따라 소폭 감소하며, AI측에서 발생하는 잔류응력 또한 조금이나마 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 열전도 수치해석 결과인 AI/CFRP 용접부의 온도이력과 비교해보면 틀의 삽입유지시간이 길어질수록 최고온도가 상승하는 것과 함께 최고 온도에 도달하는 온도 기울기가 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 이는 삽입유지시간이 증가함에 따라 재료에 예열을 할 수 있는 시간이 증가하였기 때문에 용접부 주변의 잔류응력이 감소한 것으로 볼 수 있다.

Table. 4.7 Temperature history and residual stress distribution with dwell time

| 삽입유지시간 | 온도이력 | 응력분포 |
|--------|------|------|
| 15sec  |      |      |
| 20sec  |      |      |
| 25sec  |      |      |

## 제 5 장 결 론

본 연구에서는 차량 경량화를 위한 이종소재 AI/CFRP 용접에 Pinless툴을 이용한 마찰교반점용접을 실시하여 용접조건(툴의 삽입깊이, 삽입유지시간 및 회전속도)에 따른 기계적, 금속학적 특성을 고찰하였다. 또한 수치해석을 실시하여 이종재 AI/CFRP 용접부의 열적, 역학적 특성을 고찰한 후 실험과 비교/평가하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 삽입깊이가 0.2mm에서 0.4mm로 증가할수록 용융된 수지의 면적이 증가하였으며, 인장-전단강도도 증가하였다. 이는 열에 의해 용융된 수지가 압력을 동반한 버블을 형성하였고, 삽입깊이의 증가로 인해 툴이 이 용융된 수지에 미치는 가압력이 증가하였기 때문으로 사료된다.
- 2) 툴의 삽입유지시간 15sec(회전속도 500rpm, 삽입깊이 0.4mm)에서 3.65kN의 인장전단강도를 확보하였다. 삽입유지시간 증가할수록 CFRP 수지의 용융된 양이 증가하였으며, 25sec의 조건에서는 15sec, 20sec 대비 용융된 수지가 심하게 갈변하였다.
- 3) 툴의 회전속도 500rpm(삽입깊이 0.4mm, 삽입유지시간 15sec)에서 3.65kN의 인장전단강도를 확보하였다. 위의 조건에서 회전속도가 감소하면 인장-전단강도가 급격히 감소하였다. 회전속도 300rpm 조건에서 약 6배 이상 하락한 0.60kN이었다.
- 4) 용접 시 용융된 수지의 두께가 약  $92\mu\text{m}$ ,  $292\mu\text{m}$  일 때 인장-전단강도는 각각 0.6kN, 3.65kN으로 용융된 수지의 두께가 증가함에 따라 인장-전단강도 또한 증가하는 경향을 나타내었다.

- 5) 용접부의 열전도 수치해석을 실시하여 온도 분포 특성을 고찰한 결과 실제 실험과 온도 분포가 일치하였고, 회전속도 및 삼입유지시간이 증가할수록 용접부의 온도가 상승하였다. 또한 AI모재 쪽으로는 열전도가 활발하게 일어났지만 열전도율이 낮은 CFRP모재에서는 약 27°C로 상온과 비슷하였다.
  
- 6) 용접부의 열탄소성 수치해석의 결과로 얻어진 용접 잔류응력은 최대 약 290MPa로 겹침 부위의 CFRP측에서 확인되었으며, CFRP 모재(80MPa)대비 약 210MPa 크게 나타났다. 또한 회전속도 및 삼입유지시간이 증가할수록 잔류응력의 크기는 AI측에서는 감소하였지만, CFRP측에서는 큰 차이가 없었다.

## 참고문헌

- [1] Y. J. Park, S. I. Kwon and J. Y. Lee, 자동차 온실가스 저감정책에 따른 이산화탄소 저감 효과 평가, 한국대기환경학회지, 32-3, 2016, 280-288.
- [2] D. W. Lee, H. K. Choi and S. K. Lee, 차량경량화를 위한 경량금속 기술동향, 한국과학기술정보연구원, 2012
- [3] M. S. Jang, M. J. Bang and J. H. Gwak, 왜 지금 현대차는 가벼워지려 하는가?, 2015.03.17.
- [4] Y. Kim, K. I. Park and K. D. Lee, Development of Welding Technologies for Lightweight Vehicle, Journal of the Korean Welding and Joining Society, 29-6, 2011, 1-3.
- [5] 房漢瑞, 金裕哲: “有限要素法에 의한 厚板熔接時의 3次元非定常熱解析”, 大韓熔接學會誌, 1990, 9-2, 37~43
- [6] Y. S. Kim, 금속과 플라스틱의 접착기술과 용접재료의 최신동향, 한국과학기술정보연구원, 2014.
- [7] S. J. Mo, 자동차 경량소재 개발 동향 및 완성차업체 대응, 2013.
- [8] S. B. Choi, S. W. Kim and S. K. Jung, 자동차 경량화 기술동향과 개발 전략, 한국과학기술정보연구원 정보분석연구소, 2013, 5-77.
- [9] J. H. Cha, 자동차 경량화의 중요기술인 고강도강, 알루미늄 합금의 성형기술, 한국과학기술정보연구원, 2004.
- [10] W. S. Lee, 자동차 차체에의 알루미늄의 적용과 양산기술, 한국과학기술정보연구원, 2004.
- [11] T. H. Lee, 탄소섬유의 최신 응용 동향, 한국과학기술정보연구원, 2011.
- [12] S. H. Nam, H. J. Lee and D. K. Park, 탄소섬유강화복합재(CFRP) 생산 장비 및 자동화 기술 동향, Korea Evaluation Institute of Industrial Technology, PD Issue Report, 15-10, 2015.

- [13] K. S. Kim, K. M. Bae and S. Y. Oh, Trend of Carbon Fiber-reinforced Composites for Lightweight Vehicles, *Elastomers and Composites*, 47-1, 2012, 65-74.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] P. woizeschke, V. woffschei, Recent Development for Laser Beam Joining of CFRP -Aluminum Structures, *Procedia Materials Science*, V.2, 2013, 250-258.
- [18] A. Roesner, et.al ; Long term stability of laser joined plastic metal parts, *Procedia*, 41, 2013, 169-171.
- [19] 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.
- [20] 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.

- [21] 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
- [22] Lambiase, F, Di Ilio, A, Mechanical clinching of metal-polymer joints, JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY, 215-1, 2015, 12-19
- [23] C. J. Lee, 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
- [24] 김영식, 마찰교반 점용접(FSSW)을 이용한 비철금속 접합기술의 연구 동향과 전망, 대한용접접합학회지, 30-3, 2012, 4-14.
- [25] Q. Yang, Material flow during friction stir spot welding, Materials Science and Engineering: A, 527-16, 2010, 4389-4398
- [26] 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, 23-3, 2005
- [27] M. S. Im, 탄소섬유 강화 복합재료의 개발 동향
- [28] K. W. Jung , et al, Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to zinc-coated steel, Materials & Design, 47, 2013, 179-188.
- [29] Y. H. Jin, 탄소섬유 복합재료의 기술동향, 한국과학기술정보연구원, 2015.
- [30] Paul Colegrove, 3 Dimensional flow and thermal modelling of the friction stir welding process, The university of adelaide
- [31] Yuh J.Chao, Heat transfer and thermal-mechanical analysis of friction stir joining of AA 6061-T6 plates