



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](#)

2024년 2월  
석사학위 논문

Self-Piecing Rivet을 이용한  
이종소재 CFRP-Steel의  
접합특성에 관한 연구

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

최 동 원

# Self-Piecing Rivet을 이용한 이종소재 CFRP-Steel의 접합특성에 관한 연구

A Study on the Joining Characteristics of  
Dissimilar CFRP-Steel by Self-Piecing Rivet

2024년 2월 23일

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

최 동 원

Self-Piecing Rivet을 이용한  
이종소재 CFRP-Steel의  
접합특성에 관한 연구

지도교수            방   희   선

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2023년 10월

조선대학교 대학원

용접·접합과학공학과

최   동   원

## 최동원의 석사학위논문을 인준함

위원장      박철호 (인)

위    원      방희선 (인)

위    원      손윤철 (인)

2023년 12월

조선대학교 대학원

## 목차

List of Figures .....	IV
List of Tables .....	VII
Abstract .....	IX
제1장. 서론 .....	1
1.1 연구 배경 및 목적 .....	1
1.1.1 연구 배경 .....	1
1.1.2 연구 목적 .....	3
1.2 국내·외 기술 동향 .....	4
1.2.1 고강도강 소재 동향 .....	4
1.2.2 CFRP 소재 동향 .....	5
1.2.3 CFRP-Steel 접합 기술 동향 .....	6
1.3 SPR 기술 및 소재 특성 .....	8
1.3.1 SPR 특성 .....	8
1.3.2 CFRP 소재 특성 .....	10
1.3.3 Steel 소재 특성 .....	12

제2장. 연구 방법 .....	13
2.1 사용 소재 및 공정 조건 .....	13
2.1.1 사용 소재 및 시험편 제원 .....	13
2.1.2 실험장비 및 공정 조건 .....	15
2.2 접합부 특성 평가 방법 .....	17
2.2.1 단면 특성 평가 .....	17
2.2.2 인장 전단시험 .....	18
2.2.3 피로 시험 .....	19
2.3 인공 신경망을 이용한 품질 인자 예측 .....	20
2.3.1 Convolution Layer를 이용한 CNN 모델링 .....	20
2.3.2 Xception을 이용한 CNN 모델링 .....	22
제3장. 연구 결과 .....	24
3.1 CFRP-SPRC440 SPR 접합부 특성 .....	24
3.1.1 공정변수에 따른 접합부 단면 특성 .....	24
(1) 리벳 생크 길이에 따른 단면 특성 .....	24
(2) 가압력에 따른 단면 특성 .....	26
3.1.2 기계적 특성 .....	31
(1) 인장 전단시험 .....	31
(2) 피로 시험 .....	35

3.2 CFRP-SPFC590 SPR 접합부 특성 .....	38
3.2.1 공정변수에 따른 접합부 단면 특성 .....	38
(1) 리벳 생크 길이에 따른 단면 특성 .....	38
(2) 가압력에 따른 단면 특성 .....	40
3.2.2 기계적 특성 .....	45
(1) 인장 전단시험 .....	45
(2) 피로 시험 .....	48
3.3 딥러닝 모델 중 CNN을 이용한 품질 인자 예측 .....	51
3.3.1 일반 Convolution 층을 이용한 CNN 모델 .....	51
(1) Head height 인자 예측 .....	51
(2) Interlock 인자 예측 .....	53
(3) Bottom thickness 인자 예측 .....	54
3.3.2 Xception을 이용한 CNN 모델 .....	55
(1) Head height 인자 예측 .....	55
(2) Interlock 인자 예측 .....	55
(3) Bottom thickness 인자 예측 .....	57
 제4장. 결론 .....	 58
 참고문헌 .....	 59



## List of Figures

Fig. 1.1 Fuel efficiency regulation .....	2
Fig. 1.2 Prospect for lightweight material .....	2
Fig. 1.3 ERW door impact beam of company H and BIW with AHSS .....	4
Fig. 1.4 BIW(Body in white) of company B with CFRP applied .....	5
Fig. 1.5 Procedure of SPR Process .....	9
Fig. 1.6 Type of rivet for SPR .....	9
Fig. 1.7 Plain(left), Twill(right) Schematics .....	11
Fig. 1.8 Layer diagram of prepreg .....	11
Fig. 1.9 Position and geometry of Quarter Wheel House Parts .....	12
Fig. 2.1 Geometry and specifications of the SPR specimen .....	14
Fig. 2.2 Equipment for SPR .....	16
Fig. 2.3 Equipment for tensile-shear test .....	18
Fig. 2.4 CNN Model Using Convolution Layer .....	21
Fig. 2.5 CNN Model Using Xception .....	23
Fig. 3.1 Variation of tensile-shear load with force under condition of a 4 mm shank length .....	32
Fig. 3.2 Fracture photos of the tensile-shear test specimens under the condition of a 4 mm shank length at various forces .....	33
Fig. 3.3 Fracture surface photos of CFRP under the condition of a 4 mm shank length and force of 27 kN .....	34
Fig. 3.4 S-N curve under condition of a 4 mm shank length, force of 27 kN .....	36
Fig. 3.5 Fracture surface photos of the fatigue test specimen under	

the condition of a 4 mm shank length and force of 27 kN at  
 70% of the fatigue limit for CFRP ..... 37

Fig. 3.6 Variation of tensile–shear load with force condition of a  
 4 mm shank length ..... 46

Fig. 3.7 Fracture photos of the tensile–shear test specimens under  
 the condition of a 4 mm shank length at various forces .....  
 ..... 46

Fig. 3.8 Fracture surface photos of CFRP under the condition of a 4  
 mm shank length and force of 29 kN ..... 47

Fig. 3.9 S–N curve under the condition of a 4 mm shank length and  
 force of 29 kN ..... 49

Fig. 3.10 Fracture surface photos of the fatigue test specimen  
 under the condition of a 4 mm shank length and force of  
 29 kN at 60% of the fatigue limit for CFRP ..... 50

Fig. 3.11 Loss, MAE curve of CNN model to head height ..... 52

Fig. 3.12 Predicted and measured graph of CNN model to head height  
 ..... 52

Fig. 3.13 Loss, MAE curve of CNN model to interlock ..... 53

Fig. 3.14 Predicted and measured graph of CNN model to interlock ...  
 ..... 53

Fig. 3.15 Loss, MAE curve of CNN model to bottom thickness ..... 54

Fig. 3.16 Predicted and measured graph of CNN model to bottom  
 thickness ..... 54

Fig. 3.17 Loss, MAE curve of xception model to head height ..... 55

Fig. 3.18 Predicted and measured graph of xception model to head  
 height .....  
 ..... 55

Fig. 3.19 Loss, MAE curve of xception model to interlock ..... 56

Fig. 3.20 Predicted and measured graph of xception model to  
interlock ..... 56

Fig. 3.21 Loss, MAE curve of xception model to bottom thickness .....  
..... 57

Fig. 3.22 Predicted and measured graph of xception model to bottom  
thickness ..... 57

## List of Tables

Table. 1.1 Types of CFRP–Steel joining processes .....	7
Table. 1.2 Type of resin .....	11
Table. 2.1 Mechanical properties of materials used to research ·	14
Table. 2.2 Chemical composition of materials used to research ...	14
Table. 2.3 Joining conditions of SPR .....	16
Table. 2.4 Quality assessment standards of cross section for SPR ... .....	17
Table. 3.1 Cross-sectional characteristics of the joint based on the rivet shank length and force .....	28
Table. 3.2 Measurement values of factors (Head height ‘K’ , Interlock ‘ $a_{1,2}$ ’ , Bottom thickness ‘ $t_{1,2}$ ’ ) of the joint based on rivet shank length and force .....	29
Table. 3.3 Damage to CFRP fibers based on the rivet shank length and force .....	30
Table. 3.4 Fracture photos of the fatigue test specimens under the condition of a 4 mm shank length and force of 27 kN ..... .....	36
Table. 3.5 Cross-sectional characteristics of the joint based on the rivet shank length and force .....	42
Table. 3.6 Measurement values of factors (Head height ‘K’ , Interlock ‘ $a_{1,2}$ ’ , Bottom thickness ‘ $t_{1,2}$ ’ ) of the joint based on rivet shank length and force .....	43
Table. 3.7 Damage to CFRP fibers based on the rivet shank length and force .....	44

Table. 3.8 Fracture photos of the fatigue test specimens under the condition of a 4 mm shank length and force of 29 kN .....  
..... 49

## Abstract

### A Study on the Joining Characteristics of Dissimilar CFRP-Steel by Self-Piercing Rivet

Choi Dong Won

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

Department of Welding and Joining  
Science Engineering, Graduate School  
of Chosun University

Various light materials such as aluminum, high-strength steel, and carbon fiber are applied in the automobile industry to improve fuel efficiency due to stricter exhaust gas regulations like CAFE (Corporate Average Fuel Economy) and EURO-IV. In particular, CFRP is a composite material made of carbon fiber and resin. It is attracting a lot of attention because it weighs about 1/5th and has a tensile strength of more than five times that of general carbon steel.

Laser and resistance welding has been studied for joining CFRP and metals, but obtaining sufficient strength in the joints is challenging due to the material properties of CFRP as a composite material. Therefore, mechanical joining methods such as bolts, SPR (Self-Piercing Rivets), and adhesives are commonly used. SPR involves joining by pressing rivets, eliminating the need for additional hole processing, and it is compatible with resistance point welding production facilities. Furthermore, SPR is a mechanical joining technique suitable for bonding dissimilar materials such as CFRP-Steel joints because it does not cause thermal deformation. Moreover, it is an eco-friendly method as it does not

produce harmful gases like welding fumes

In this study, Self-Piercing Rivet (SPR) was employed for joining CFRP/Steel materials, and the joining performance and mechanical properties were evaluated based on the force and rivet geometry factor. Furthermore, quality evaluation criteria factors were predicted using CNN(Convolutional neural network)

As the rivet shank length increased, buckling occurred, and as the force increased, the interlock length increased. CFRP damage increased at the portion where the rivet was fastened as the force increased, and the thickness of CFRP decreased.

In the tensile-shear test of CFRP-SPRC440 joints, the highest tensile load of 2 kN was achieved under the condition of a 4 mm shank length and a force of 27 kN. In CFRP-SPFC590 joints, the highest tensile load was 1.94 kN under the conditions of 4 mm shank length and force of 29 kN. Fractured mode observed phenomenon of rivet head pull-out and CFRP separate. It inferred to exist of relationship between CFRP damage and tensile-load.

As a result of fatigue test in CFRP-SPRC440 joints, fatigue test criteria were satisfied at 50% and 60%, and the maximum load corresponding to the fatigue limit was about 1.2 kN, which is 60% of the tensile shear load, and the amplitude load was 0.54 kN. In CFRP-SPFC590 joints, fatigue test criteria were satisfied at 50%. The fracture specimen showed the CFRP separation fracture mode, and the CFRP remaining in the rivet was confirmed.

Therefore, in the case of the SPR joints of CFRP-SPRC440, the rivet shank length of 4 mm and pressing force of 27 kN showed the best cross-section and tensile strength. In the case of CFRP-SPFC590, the rivet shank length of 4 mm and pressing force of 29 kN showed the best cross-section and tensile strength.

Furthermore, We performed quality prediction using two models: convolutional layers and Xception. The prediction accuracy criterion was selected as a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.8 or more, and the learning results are as follows. The model using the Conv layer met the criteria with a maximum of training: 0.914, Test: 0.852, but did not meet the criteria when predicting the bottom thickness factor. The model using Xoption met the criteria with maximum training: 0.948 and test: 0.928, and the bottom thickness factor also met the criteria.

Therefore, the following conclusions have been drawn:

1. When the thickness of the joint is 2.5 mm, the rivet shank length of 4.5 mm occurs during the SPR process, and the pressing force of 32 kN is unsuitable due to the insertion of the rivet head.
2. In the case of SPRC440, the maximum tensile shear load was about 2 kN under the condition of 4 mm rivet shank length and pressing force of 27 kN, and in the case of SPFC590, the maximum tensile shear load was about 1.94 kN under the condition of 4 mm rivet shank length and pressing force of 29 kN. In the fatigue test, SPRC440 satisfied 1 million cycles (times/Hz) up to 60% fatigue limit and SPFC590 50% fatigue limit.
3. Damage to CFRP occurring during the SPR process reduces the load transmitted to the interlock during the tensile test, resulting in a decrease in the strength of the joint. This is due to the characteristics of CFRP, a composite material, and the degree of damage to a non-flexible composite material such as CFRP is important during the SPR process.
4. Although the prediction accuracy of the bottom thickness tended to decrease slightly, the head height and interlock factors were satisfied by 0.8 or more with the coefficient of determination ( $R^2$ ) of training and test at a maximum of 0.928 and 0.948, and the predictability was confirmed.



# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 목적

### 1.1.1 연구 배경

환경오염으로 인한 대기오염 및 기후변화가 심화됨에 따라 국제적으로 자동차의 연비와 배출가스 규제가 강화되고 있다. Fig. 1.1과 같이 미국은 기존 16.07 km/L에서 19.81 km/L로 23%, 유럽은 CO<sub>2</sub> 규제가 130g/km에서 95g/km로 27% 강화되었다. 국내의 경우 연비는 17km/L에서 24.3km/L로 43%, CO<sub>2</sub>는 140g/km에서 97g/km로 30% 정도 규제가 강화되었다. 이와 같은 세계적인 규제 강화로 자동차 산업에서는 차체 경량화가 요구되며 고강도강 및 경량 소재의 연구 및 개발이 불가피하다.

차체 경량화를 위한 기술로는 경량 소재 및 고강도강 소재 적용, 기존 부품의 설계 최적화가 있다. 경량 및 고강도강 소재 적용은 배출가스 감소 및 연비 향상에 효과적이며, 이에 최근 자동차 산업에서는 고강도, 경량 소재의 비중이 점차 증가하고 있다. Fig. 1.2와 같이 고강도강은 17.1에서 51.2로 13%(CAGR), Al합금은 5.1에서 17.2로 6%(CAGR), CFRP는 0에서 0.5로 17%(CAGR) 증가할 전망이다. CFRP의 증가율이 가장 높다[1-3].

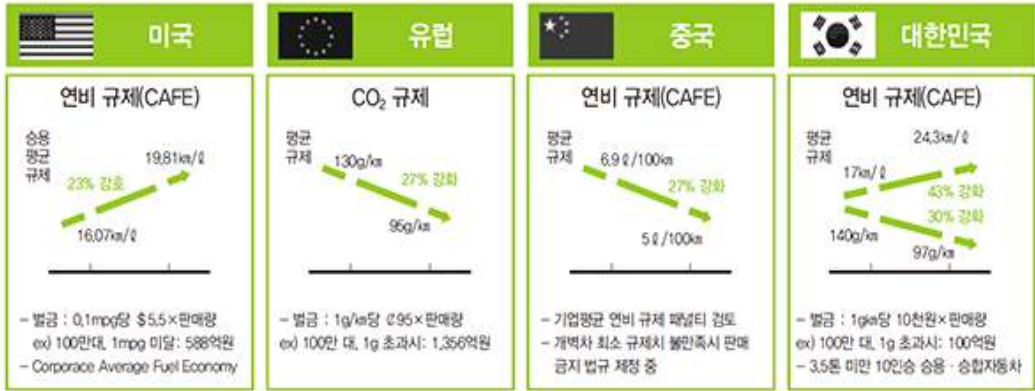


Fig. 1.1 Fuel efficiency regulation(환경부/산자부 보도자료)



Fig. 1.2 Prospect for lightweight material(McKinsey&Company)

### 1.1.2 연구 목적

Al합금이나 CFRP와 같은 경량 소재의 비중이 증가함에 따라 차체에 사용되는 Steel과의 이종재 접합 기술이 요구되고 있으며 품질 기준 확립 및 접합부의 신뢰성 확보가 중요하다. 알루미늄 합금과 Steel의 이종 소재 접합은 마찰교반용접(FSW), 레이저 용접(LBW)와 같은 저입열 공정이 적용되고 있으며, 접합부의 강도 및 신뢰성 확보에 관한 연구가 많이 진행되었다[4-17]. 하지만 CFRP의 경우, Fig. 1.2과 같이 비중이 2010년도 0에서 증가하고 있으며, 이에 Steel과의 접합 시 강도 및 신뢰성 확보에 관한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 SPR을 이용한 이종소재 CFRP-Steel 접합부의 공정변수에 따른 접합부의 단면 및 기계적 특성을 고찰하여 신뢰성을 확보하며 인공 신경망(CNN)을 이용하여 공정 조건에 따른 품질 평가 인자를 예측하고자 하였다.

## 1.2 국내·외 기술 동향

### 1.2.1 고강도강 소재 동향

자동차 차체에 사용되는 소재로는 60%에서 70% 정도 철강 소재가 사용되고 있다. 철은 비중이 7.8로 중량이 무거워 이를 보완하기 위해 철강 대비 강도가 높은 고강도강, 알루미늄합금, 고분자 복합소재(CFRP) 등을 이용한 기술개발이 진행되고 있다. 이중 고강도강은 인장강도 500 MPa 이상 높은 고강도 철강 소재를 말한다. 고강도강 소재사용은 기존 소재 대비 20% 이상 경량화 효과를 나타낸다[1].

이러한 고강도 소재 적용으로는 국내 H社의 핫스탬핑 공법을 적용한 ERW 도어 임팩트빔을 개발하였다. 또한 CTBA(Coupled Torsion Beam Axle)용 튜블러빔 부품에 780 MPa 소재를 적용하여 기존 제품 대비 5.7% 경량화, 8.1%의 원가절감을 실현하였다.

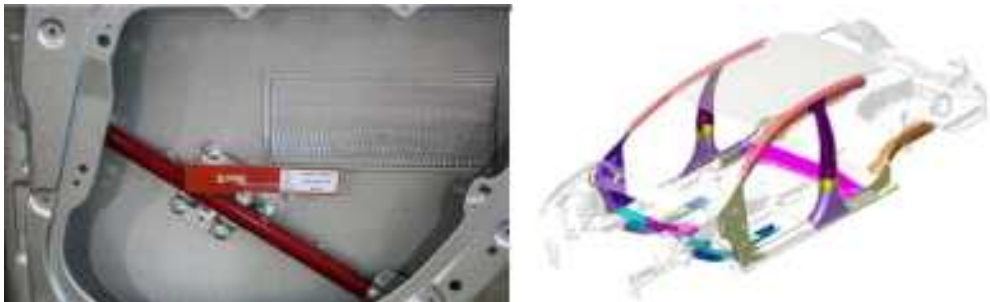


Fig. 1.3 ERW door impact beam of company H and BIW with AHSS

### 1.2.2 CFRP 소재 동향

CFRP는 제조 과정이 복잡하고 시간이 오래 걸려 생산 단가가 높다는 단점이 있었으나 최근 생산기술의 발달로 자동차 산업에서는 점차 비중이 증가하고 있다. 특히 최근에 전기자동차의 연비 문제가 대두됨에 따라 자동차의 경량화에 대한 수요가 높아지고 있다[2-3].

국내에서는 K사에서 ‘쏘렌토’ 모델의 선루프 프레임에 CFRP를 적용하였으며, 이전 대비 8kg 중량을 감소하였다. H사의 경우, i30 N 프로젝트 C에서 CFRP 소재를 적용하였으며, 전면 스플리터, 후면 디퓨저, 보닛 및 사이드 실 등 일부 부품에 대해 부분적으로 CFRP로 대체하였다. 이에 기존 대비 약 50 kg 정도의 경량화를 달성하였다.

독일의 B사는 2013년 CFRP를 I시리즈에 적용하여 복합재 차체를 세계 최초로 양산하였다. 이 차체는 강철 대비 60%, 알루미늄 대비 40% 경량화를 하였으며, M시리즈에 비해 제조공정 시간을 30% 줄여 50%의 제조원가를 절감하였다. 또한 7시리즈에서도 CFRP 부품을 4가지 성형공법을 적용하여 16개의 부품을 제조하고 전 대비 40kg 중량감소를 하였다. 일본의 T사는 하이브리드 모델의 백도어 프레임에 CFRP 소재를 채택하였다.



Fig. 1.4 BIW(Body in white) of company B with CFRP applied

### 1.2.3 CFRP-Steel 접합 기술 동향

CFRP는 수지의 특성으로 크게 열가소성 CFRP와 열경화성 CFRP로 나누어진다. 열가소성 CFRP의 경우, Steel과의 접합 시 GMAW, GTAW와 같은 용접 공정은 높은 입열량에 의해 적용이 어려우며, 입열량이 적은 레이저 용접이나 마찰교반용접 등이 연구되고 있다[4-16]. 레이저 용접의 경우 열전도 모드(Conduction mode)를 이용하며, 버블(Bubble)의 발생에 의한 용융지의 유동을 구동력으로 활용하여 기공 형성이 불가피하다[5-9]. 초음파 용접의 경우 표면 처리 공정이 필요하며[10-13], 마찰교반용접의 경우 접합부의 강도 확보가 되지 않는 실정이다[14-16].

열경화성 CFRP의 경우, 가열로 경화된 수지는 재가열 시 연화 및 용융 되지 않으므로 금속과의 용접이 어렵다[17]. 따라서 용접이 아닌 SPR, FDS, 본딩 등과 같은 기계적 접합이나 접착제를 이용하는 연구가 진행되고 있다[18-21]. FDS(Flow drill screw) 공정은 리벳을 일정 압력으로 펀칭하는 방식으로 접근성이 매우 좋으며, Pre-drilling 공정이 필요 없어 생산성 및 작업 효율성이 우수하다. 하지만 박판이나 강도가 낮은 플라스틱에 적용할 경우, 가압에 의한 균열(Crack)이 발생할 가능성이 존재하며, CFRP의 상부나 하부에서 Peel-up, Pull-out delamination 현상이 발생한다[22-23]. SPR(Self piercing rivet)의 경우, 양쪽에서 압착하여 리벳을 가압하는 방법으로 Pre-drilling 공정이 필요 없어 효율적이며, 다양한 소재의 이종접합이 가능하다. 본딩 접합의 경우, 기계적 접합부보다 넓은 면적에 하중을 분포시킬 수 있고, Pre-drilling 공정이 필요 없다. 또한 소재의 두께에 제약이 없으며, 밀봉효과(Sealing)를 가진다. 하지만 부품의 교체 및 수리 시 분해가 어려우며, 온도 및 습도 등 환경에 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 SPR(Self-Piercing Rivet) 공정을 고려하였다.

Table. 1.1 Types of CFRP-Steel joining processes

	접합공정	특징
열경화성 CFRP	SPR (Self piercing rivet)	Pre-drilling 공정 불필요
	FDS (Flow drill screw)	Pre-drilling 공정이 불필요 박판 및 강도가 낮은 소재의 경우 균열(Crack) 발생
	Adhesive Bonding	넓은 하중 분포 가능 분해 시 어려움 존재 사용 온도, 습도 및 환경의 영향 존재
열가소성 CFRP	Laser welding	버블의 발생에 의한 용융지의 유동을 기본 구동력으로 활용 기공 존재
	Ultrasonic welding	마찰열을 이용하여 고상 접합 앵커링 효과 및 분자 간 결합
	Friction stir welding	마찰열을 이용하여 고상 접합

## 1.3 SPR 기술 및 소재 특성

### 1.3.1 SPR 공정 기술

SPR(Self-Piercing Riveting)은 별도의 홀 가공(Pre-drilling) 공정 없이 Punch로 리벳을 가압하여 리벳과 하판의 소성변형으로 접합하는 공정이다[24-28]. 따라서 SPR 공정은 상판과 하판의 홀 정렬 과정이 불필요하며, CFRP 홀 가공 시 발생하는 Fiber pull-out, infling surface roughness, matrix burning 현상이 발생하지 않는다[22-23]. 게다가 용접부와 비슷한 강도와 더 높은 피로 특성을 가지며, 기존의 저항 점용접 생산설비에 적용할 수 있다[24]. SPR은 기계적 접합이므로 별도의 열원이 필요하지 않으며, 따라서 열에 의한 변형이 없다는 것이 특징이다. 이에 도장 및 코팅된 소재에 적용해도 용접 흠과 같은 유해한 물질이 배출되지 않아 친환경적이다. SPR의 공정변수는 크게 리벳 형상, 다이 형상, 가압력이 있으며, 소재에 따라 리벳 형상과 다이 형상이 달라진다. SPR 공정은 Fig. 1.5와 같이 진행되며, Stemping, forming, setting 과정에서 기계적 접합이 이루어진다.



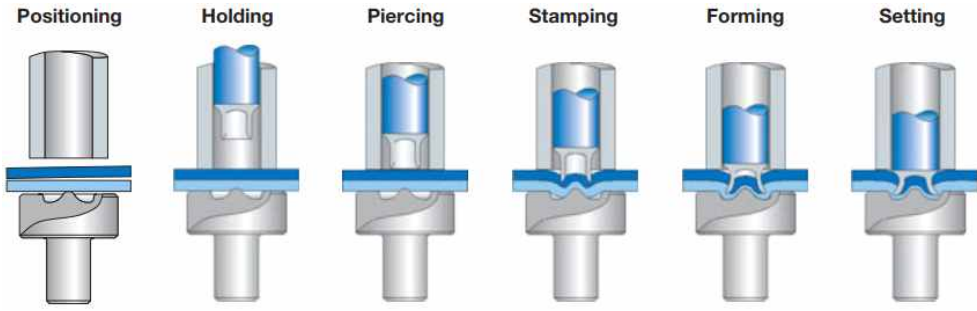


Fig. 1.5 Procedure of SPR Process

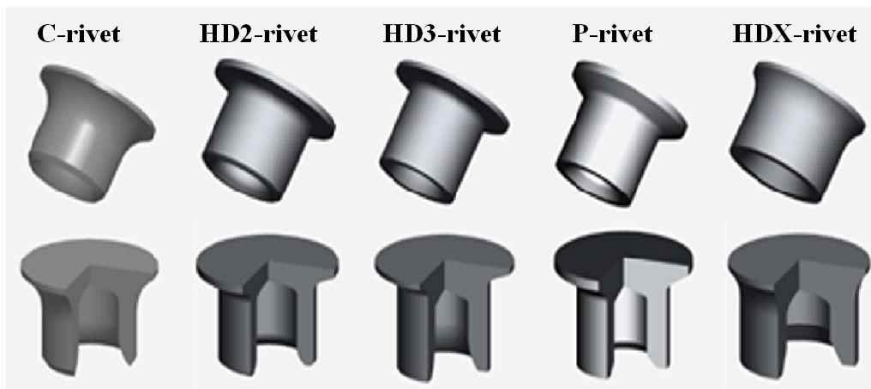


Fig. 1.6 Type of rivet for SPR

### 1.3.2 CFRP 소재 특성

CFRP는 탄소섬유와 수지가 결합한 복합소재로 탄소강에 비해 무게는 약 1/5 이며, 5배 이상의 인장강도를 가지고 있다[29]. CFRP는 수지의 종류에 따라 크게 열가소성 CFRP, 열경화성 CFRP로 분류되며, Table. 1.2와 같이 나타내었다. 열가소성 CFRP는 탄소섬유와 계면 결합력이 상대적으로 낮아 이를 개선하기 위해 탄소섬유 표면에 플라즈마나 화학적 처리 공정이 추가로 필요하다[30-31].

CFRP의 구성요소 중 하나인 탄소섬유는 강도나 탄성에 대한 방향의 의존성이 높으며, 재료로서의 장점을 충분히 이용하기 위해서는 최종적인 제품의 형상과 그 단면에 대한 탄소섬유의 방향이 중요하다. 탄소섬유 직물을 만드는 대표적인 방법으로는 평직과 능직이 있다. 평직은 날실과 씨실을 가로/세로 방향으로 하나씩 교차시켜 짠 직물을 말하며, 교차점 간격이 같아 인장력에 대한 강도는 어느 방향에서도 비슷하나 유연성이 다소 떨어진다. 능직은 날실과 씨실의 교차점을 특정 피치에서 어긋나게 하여 대각선 방향으로 배열한 것을 말하며, 교차점이 만들어내는 선을 능선이라 하고 강도는 이 능선을 따라 방향 의존성을 갖는다. 평직에 비해 유연하여 성형 몰드에 부착성 좋은 장점이 있다.

Table. 1.2 Type of resin

열경화성 수지	불포화 폴리에스테르 수지 (UP)
	에폭시 수지 (EP)
열가소성 수지	폴리아미드 (PA)
	폴리에스테르 (PE)
	폴리카보네이트 (PC)
	폴리페닐렌 설파이드 (PPS)
	폴리에테르에테르 케톤 (PEEK)

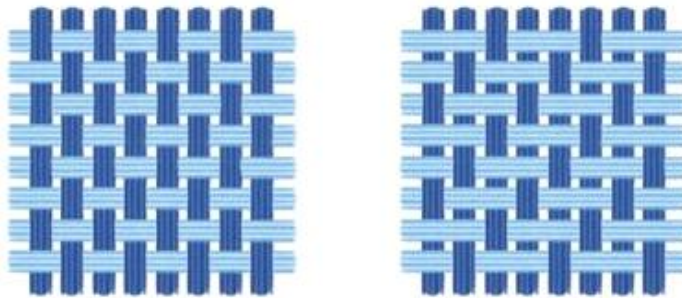


Fig. 1.7 Plain(left), Twill(right) Schematics

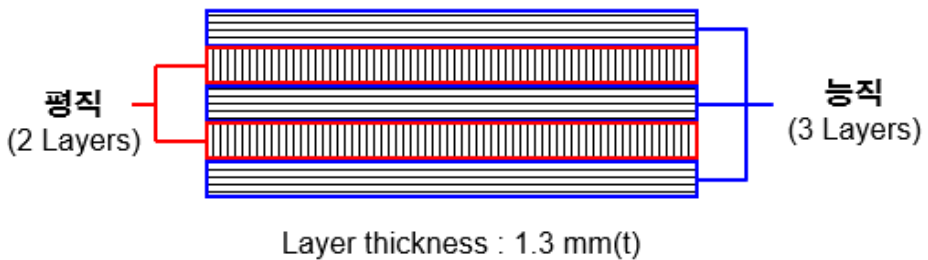


Fig. 1.8 Layer diagram of pre-preg

### 1.3.3 Steel 소재 특성

본 연구에서는 Fig.1.9와 같이 3가지 부품이 결합한 부품인 쿼터 휠 하우스에 사용되고 있는 SPRC440 및 고강도강인 SPFC590을 사용하였다. SPFC590 강재는 냉간 압연 강판으로 상온 상태에서 압연하며, 재결정 온도 이하에서 작업하여 내부 응력이 크고 가공경화 발생으로 인성이 낮아지고 경도와 강도가 증가한다. 이러한 공정으로 생산된 강재는 외관이 미려하고, 가공성이 뛰어나 차체(BIW)에 많이 사용된다.

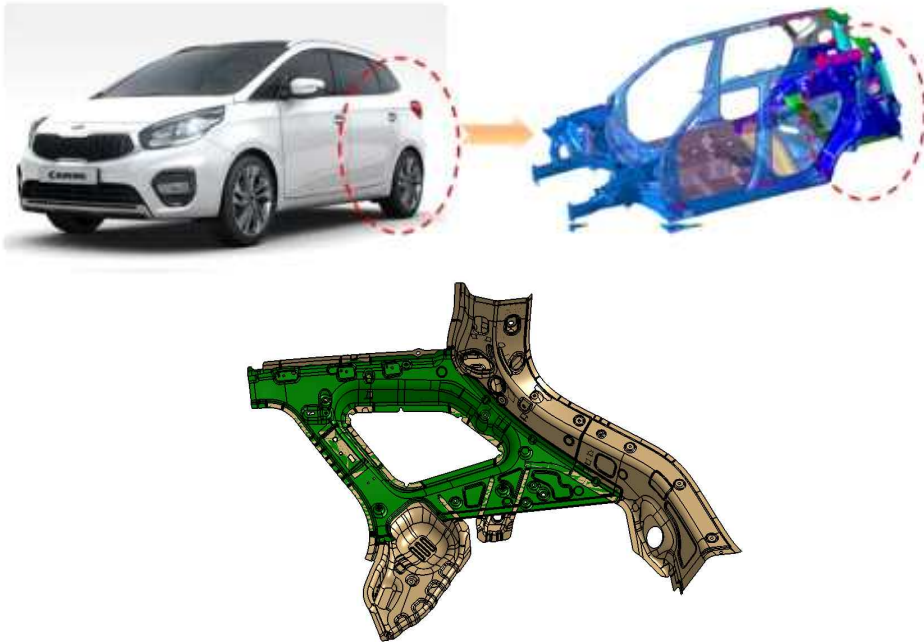


Fig. 1.9 Position and geometry of Quarter Wheel House Parts

## 제 2 장 연구 방법

### 2.1 사용 소재 및 공정 조건

제1장에서는 본 연구의 배경 및 목적, 국내외 기술동향, SPR 공정 및 소재의 특성에 관하여 서술하였으며, 2장에서는 CFRP와 Steel의 SPR 공정변수별 접합부의 단면 및 기계적 특성을 분석하기 위해 연구에서 사용된 소재 및 실험 방법에 대해 서술하였다.

#### 2.1.1 사용 소재 및 시험편 제원

본 연구에서 사용한 소재는 차체 부품(쿼터 휠하우스)에 적용되는 소재인 SPRC440와 고강도강인 SPFC590, CFRP는 한국카본사의 Unidirectional form 형태의 pre-preg를 0° 와 90° 로 교차하여 7층 적층한 뒤, 오토클레이브로 3.02 kgf/cm<sup>2</sup>의 압력에서 60~90분 동안 경화시킨 열경화성 CFRP를 사용하였다. 사용된 소재의 화학적조성 및 기계적 특성은 Table. 2.1 및 Table. 2.2와 같다.

시험편은 KS B ISO 14273 규격을 따라 제작하였으며, 시험편 제원은 아래 Fig. 2.1로 나타낸 바와 같다. 각 소재의 제원은 CFRP : 100 mm(L)×30 mm(W)×1.3 mm(t), SPRC440 : 100 mm(L)×30 mm(W)×1 mm(t), SPFC590 : 100 mm(L)×30 mm(W)×1.2 mm(t) 이며, 총시험편의 길이는 170 mm 이다. 접합 시 상판은 CFRP, 하판은 Steel로 30 mm 겹쳐 SPR을 실시하였으며, 이때 리벳의 위치는 (155 mm(L), 15 mm(W))이다.

Table. 2.1 Mechanical properties of materials used to research

SPRC440		
Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation ( $1.0 \leq t \leq 2.3$ )
457	314	34%

SPFC590		
Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation ( $1.0 \leq t \leq 2.3$ )
590	355	18%

Table. 2.2 Chemical composition of materials used to research

SPRC440					
Materials	C	Si	Mn	P	S
Chemical composition (wt.%)	0.08	0.02	1.38	0.017	0.003

SPFC590					
Materials	C	Si	Mn	P	S
Chemical composition (wt.%)	0.0836	0.185	1.863	0.02	0.005

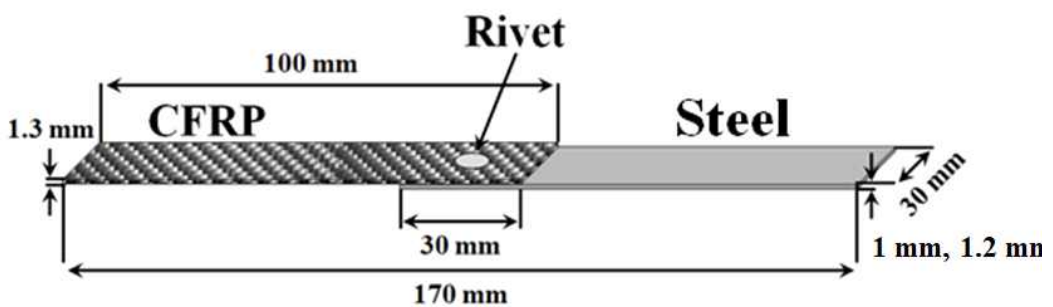


Fig. 2.1 Geometry and specifications of the SPR specimen

## 2.1.2 실험장비 및 공정 조건

본 연구에서 CFRP와 Steel SPR을 수행하기 위해 Fig. 2.2와 같이 Bollhoff社의 RIVSET Automation H 장비를 사용하였다. C-Frame 모듈, 리벳 Feeder, 구동 펌프, 컨트롤러로 구성되어 있으며, C-Frame 내부에 엔코더가 내장되어 있어 리벳 체결 시 가압력을 측정한다. 또한 초기 Setting Force와 가압력의 일치 여부 및 컨트롤러에서 소재의 두께를 측정하여 공차 범위 내로 체결되면 접합이 완료된다.

SPR의 접합 품질은 가압력, 소재의 강도, 리벳 및 다이의 형상에 따라 영향을 받으며, 특히 접합부의 강도와 직결되는 Interlock의 길이는 리벳과 다이의 형상과 밀접한 관련이 있으므로 고려해야 한다. 리벳의 형상은 C-Type, HD2-Type, P-Type 등으로 구분되며, 다이의 형상은 FM-Type, KA-Type, DR-Type 등이 있다. DR-Type은 소재의 두께가 두꺼울 경우 사용되며, KA-Type은 Al합금에 사용된다. FM-Type은 가압력을 감소시키기 위해 사용되며, 이중 CFRP 상판으로 SPR 접합 시 C-Type 리벳과 FM-Type 형상의 다이가 Interlock이 가장 우수하여 본 연구에서는 C-Type, FM-Type을 사용하였다[24].

SPR은 앞에서 언급한 것과 같이 가압력, 소재의 강도, 리벳 및 다이의 형상 등이 주요 공정변수이다. CFRP-Steel의 SPR 공정 적용 시 공정변수에 따른 접합부의 특성을 고찰하고자 가압력 및 리벳 생크 길이를 Table. 2.3과 같이 설정하여 실험을 수행하였다.

하판 소재가 SPRC440에서 SPFC590으로 변화됨에 따라 가압력을 2 kN 증가하였으며, 리벳 생크 길이별 가압력은 5 kN 증분시켜 실험을 수행하였다. 접합부의 단면 특성을 고찰한 후, 인장 전단시험을 통해 강도 및 파단면을 분석하였다. 또한 피로 시험을 수행하여 SPR 접합부의 신뢰성도 고찰하였다.



Fig. 2.2 Equipment for SPR (a) SPR machine, (b) FM-Type Die

Table. 2.3 Joining conditions of SPR

Condition	Parameters	
	CFRP-SPRC440	CFRP-SPFC590
Force (kN)	22, 27, 32	24, 29, 34
Rivet (mm)	C-type	
	3.5, 4, 4.5	
Die	FM-type	



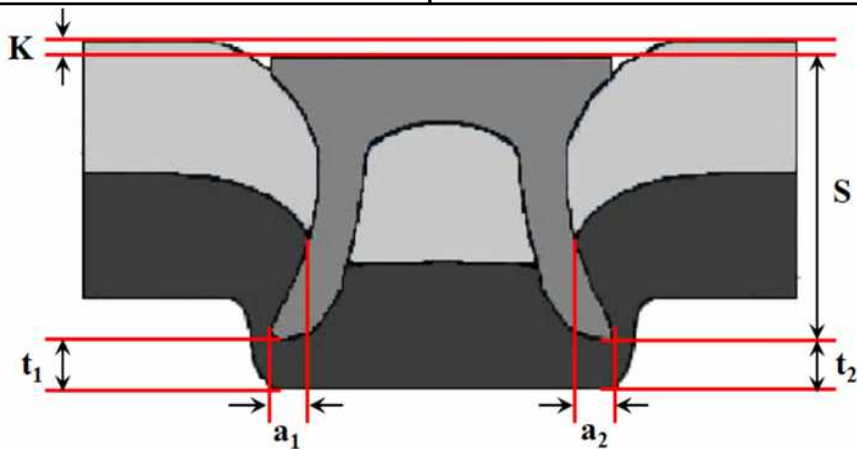
## 2.2 접합부 특성 평가 방법

### 2.2.1 단면 특성 평가

SPR 접합부의 단면 특성 평가 방법으로 Table. 2.4와 같이 단면 품질 평가 기준을 참고하였으며, OLYMPUS社의 BX51M 광학현미경(Optical Microscope)을 이용하여 관찰하였다. 주안점으로 리벳 헤드와 상판 소재 사이의 간격인 Head Height(K), 리벳과 하판 소재가 소성 결합한 길이 Interlock( $a_{1,2}$ ), SPR 공정 후 하판의 두께 Bottom Thickness( $t_{1,2}$ )를 측정하였다[24-28]. 또한 하판의 두께가 감소하여 균열이 발생하는 Necking, 리벳 다리의 펼쳐짐 정도가 작아 접합 능력이 감소하는 Separation, 리벳의 다리가 휘는 Buckling 및 기계적 체결 시 CFRP의 손상 정도 측면에서 고찰하였다.

Table. 2.4 Quality assessment standards of cross section for SPR

Factor	Range
Head height	$-0.2 \text{ mm} \leq K \leq +0.2 \text{ mm}$
Interlock	$0.1 \text{ mm} \leq a_{1,2}$
Bottom thickness	$0.1 \text{ mm} \leq t_{1,2}$



## 2.2.2 인장 전단시험

접합부의 기계적 특성 평가 시 인장 전단시험은 시험에 사용된 장비는 Fig. 2.3 와 같이 SIMADZU社의 EHF-EG200KN-40L이며 ASTM D 1002/5868 규격에 의거하여 시험편을 제작한 후 실시하였다. 시험 진행 시 시험속도는 10 mm/min로 진행하였다 [24]. 인장 전단시험 시 기준은 완성차 저항 점용접 규격인 MS 181-15 규정에 의거하여 1.67 kN 으로 기존 쿼터 휠 하우스 완성품의 두께를 기준으로 선정하였다.



Fig. 2.3 Equipment for tensile-shear test

### 2.2.3 피로 시험

피로 시험은 ASTM E 466-96 규격에 의거하여 시험편을 제작한 후 피로 시험을 실시하였다. 피로 시험 시 하중비  $R(F_{min}/F_{max})$ 은 0.1, 시험 주파수(Frequency)는 10 Hz로 설정하였다[32]. 파형은 정현파(sine wave) 및 하중 제어 방식으로 시험을 진행하였고, 진폭 하중은 인장-전단강도의 80~50% 범위를 적용하였다. 피로 시험 시 100만 Cycle(회/10Hz)를 기준으로 설정하였으며, SPR 공정 기술에 관한 규격이 마련되지 않아 평균 인장 전단하중의 10%에 해당하는 피로한도를 피로 시험의 목표로 설정하였다.

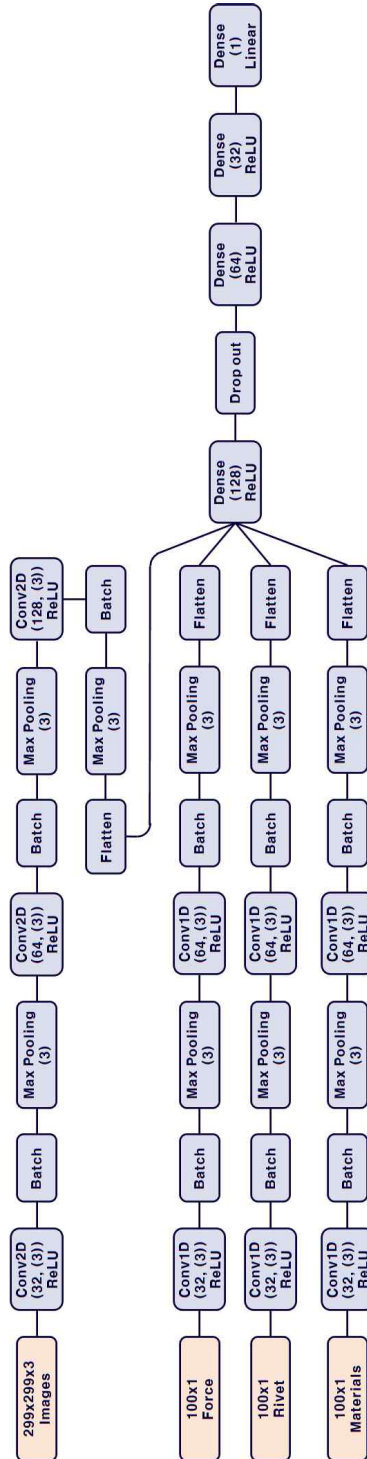
## 2.3 인공 신경망을 이용한 품질 인자 예측

### 2.3.1 Convolution Layer를 이용한 CNN 모델링

모델링은 G사의 Colaboratory를 사용하여 모델 구성 및 학습을 설정 등을 진행하였다. 데이터는 23개 조건의 414개 데이터를 사용하였다. Input 데이터로는 SPR 접합부의 단면 사진, 가압력, 리벳 생크 길이, 하판의 소재를 입력하였으며, Output 데이터는 단면 품질 인자인 Head height, Interlock, Bottom thickness를 입력하여 예측하였다. 단면 사진 데이터를 활용하기에 딥러닝 모델 중 이미지의 특징을 추출하여 학습하는데 뛰어난 성능을 보이는 CNN(Convolutional Neural Network) 모델을 고려하였다.

일반적인 CNN 모델은 Fig. 2.4와 같이 Convolutional Layer를 이용하여 이미지의 시각적인 정보를 추출하였으며, 각각 3개의 Conv2d Layer, Batch 및 Max Pooling Layer로 구성하였다. 이미지 데이터를 제외한 숫자열 데이터는 Conv1d 3개, Batch Layer 2개, Max Pooling 2개 및 Flatten 1개로 구성되어 있다. 또한 과적합을 방지하기 위해 Dropout Layer 1개를 추가하였다. 최적화 알고리즘은 Adam Optimizer, 활성화 함수는 ReLu 함수와 마지막에 선형 회귀이므로 Linear 함수를 사용하였다. 학습 시 Train : 70%, Validation : 15%, Test : 15%로 데이터를 나눠서 수행하였으며, 학습은 100 Epoch까지 진행하였다. 학습 후 모델의 성능을 평가하기 위해 손실, 평균 제곱 오차(MAE) 및 결정계수( $R^2$ )를 나타내었으며, 이때 데이터의 개수가 많지 않아 판단 기준을 0.9가 아닌 0.8 이상으로 예측 가능성을 판단하였다.

Fig. 2.4 CNN Model Using Convolution Layer

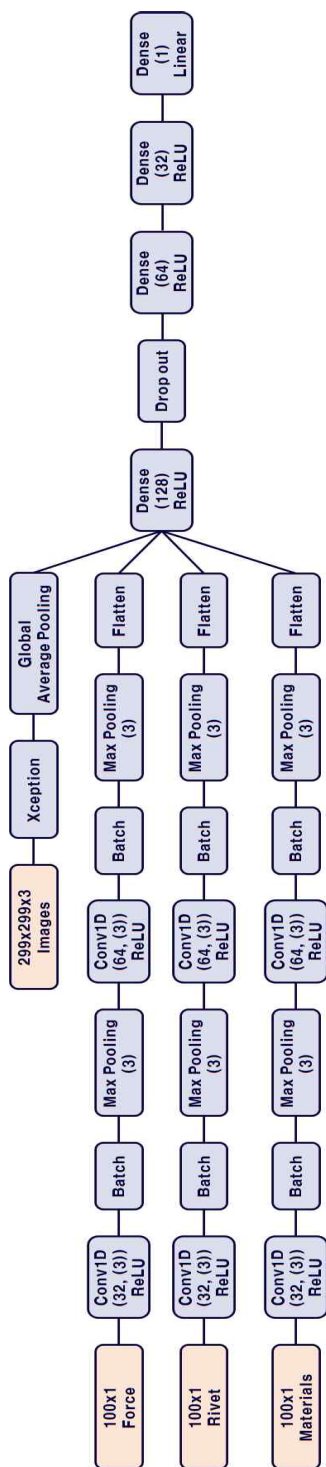


### 2.3.2 Xception을 이용한 CNN 모델링

Xception architecture는 G사의 깊이별 분리 합성곱(Depthwise Separable Convolution)을 사용하여 이미지 특징을 추출하는 모델이다. 깊이별 분리 합성곱은 깊이별 합성곱(Depthwise Convolution)과 점별 합성곱(Pointwise Convolution)으로 나뉘어진다. 깊이별 합성곱은 각 입력 채널에 대해 합성곱을 수행하며, 채널의 수가 감소하지 않는다. 따라서 채널에 따라 독립적인 연산이 이루어져 연산량이 감소한다. 점별 합성곱은 1x1 크기의 필터를 사용하여 채널을 선형으로 결합하는 단계로 정보 혼합 및 최종 출력을 생성한다. 이러한 상호작용으로 모델이 다양한 표현을 학습할 수 있다. 특징을 추출하는 여러 모델(VGG-16, ResNet-152, Inception V3, Xception) 중 Xception 모델이 가장 우수한 성능을 보였으며, 이에 본 연구에서는 Xception을 고려하였다[33].

본 연구에서 사용한 Xception 모델은 Fig. 2.5와 같이 Separable Convolution Layer에서 깊이 확장이 없는 1의 깊이 곱셈을 사용하였으며, 크게 Entry flow, Middle flow, Exit flow로 나누어진다. 이미지 데이터 크기는 299 X 299로 전처리하였으며 이는 Xception 모델의 이미지 데이터 크기이다.

Fig. 2.5 CNN Model Using Xception



## 제 3 장 연구 결과

### 3.1 CFRP-SPRC440 SPR 접합부 특성

본 연구는 CFRP-Steel SPR 기계적 체결 시 공정변수에 따른 접합부의 단면 관찰과 인장 전단시험 및 피로 시험을 통해 접합부의 신뢰성을 고찰하였다.

#### 3.1.1 공정변수에 따른 접합부 단면 특성

CFRP-SPRC440의 SPR 최적 조건을 도출하기 위해서, 리벳 생크 길이 3.5 mm, 4 mm, 4.5 mm에 대한 가압력 22 kN ~ 32 kN 변화에 따른 접합성 실험을 실시하였다. 공정 후 SPR 접합부 단면 품질 평가 기준에 의거하여 공정 변수별 접합부의 Head Height, Interlock, Bottom Thickness 등을 관찰하였으며, 인장 전단과 피로 시험 후 파단된 시험편의 파단면 관찰과 강도값을 비교 평가하였다.

##### (1) 리벳 생크 길이에 따른 단면 특성

CFRP-SPRC440의 리벳 생크 길이에 따른 단면 특성 관찰 결과를 Table. 3.1과 같이 나타내었다. 리벳 생크 길이 3.5 mm, 가압력 22 kN 조건에서 Head height는 0.21 mm, Interlock은 0.06 mm, 0.07 mm, Bottom thickness는 0.33 mm, 0.28 mm이며 Head height 및 Interlock 인자가 단면 품질 평가 기준에 만족하지 못하였다. 가압력 27 kN 경우, Head height는 0.08 mm, Interlock은 0.09 mm, 0.11 mm, Bottom thickness는 0.25 mm이며 Interlock이 기준에 만족하지 못하였다. 가압력 32 kN 경우, Head height는 -0.29 mm, Interlock은 0.08 mm, 0.12 mm, Bottom thickness는 0.24 mm, 0.2 mm이며 앞서 언급한 두 조건과 마찬가지로 Interlock 인자가 기준에 만족하지 못했다. 리벳 생크 길이 3.5 mm의 경우 Interlock의 길이가 기준을 만족하지 못하며 리벳의 펼쳐짐 정도가 작아 강도가 저하되는 Separation 현상이 우려된다.



리벳 생크 길이 4 mm, 가압력 22 kN 경우, Head height는 0.23 mm, Interlock은 0.23 mm, 0.28 mm, Bottom thickness는 0.18 mm, 0.13 mm로 Head height 인자가 기준을 만족하지 못했다. 가압력 27 kN 경우, Head height는 0.12 mm, Interlock은 0.28 mm, 0.31 mm, Bottom thickness는 0.12 mm, 0.13 mm이며 단면 품질 기준에 만족하였다. 가압력 32 kN 경우, Head height는 -0.21 mm, Interlock은 0.29 mm, 0.26 mm, Bottom thickness는 0.07 mm, 0.06 mm이며 Head height 및 Bottom thickness가 기준에 만족하지 못하였다. 리벳 생크 길이 4 mm의 경우 모든 가압력 조건에서 접합부의 강도와 직결되는 Interlock의 길이가 기준에 만족하였으며, 리벳 생크 길이 4 mm는 2.3 mm 두께의 접합부에 적합하다고 사료된다.

리벳 생크 길이 4.5 mm, 가압력 22 kN 경우, Head height는 0.25 mm, Interlock은 0.46 mm, 0.4 mm, Bottom thickness는 0.15 mm, 0.09 mm이며 Head height가 기준에 만족하지 못하였다. 가압력 27 kN 경우, Head height는 0.18 mm, Interlock은 0.35 mm, 0.33 mm, Bottom thickness는 0.08 mm, 0.06 mm이며 Bottom thickness가 만족하지 못하였고 Buckling 현상이 발생했다. 가압력 32 kN 경우, Head height는 0.11 mm, Interlock은 0.43 mm, 0.41 mm, Bottom thickness는 0.09 mm, 0.1 mm이며 Bottom thickness가 기준에 만족하지 못하였고 Buckling 현상이 발생했다. 이는 리벳 생크 길이 4.5 mm는 접합부 두께 2.3 mm에 부적합하며, 가압력 22 kN 조건은 Buckling이 발생하지 않았으나 Head height 인자가 품질 기준에 만족하지 못하였다.

SPR 공정 시 CFRP의 Carbon Fiber 손상 정도를 관찰하기 위해 리벳 헤드 부분과 맞닿는 CFRP를 관찰하였으며, 그 결과를 Table. 3.2와 같이 나타내었다. 리벳 생크 길이에 따른 CFRP의 손상 특성은 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다. 이는 SPR 접합 시 CFRP의 Carbon Fiber 손상이 가압력과 관련이 있으며, 리벳 생크 길이는 Carbon fiber 손상에 큰 영향을 주지 않는다고 사료된다.

## (2) 가압력에 따른 단면 특성

가압력에 따른 단면을 Table. 3.1과 같이 나타내었으며, 조건별 단면 품질 인자들의 측정값, Buckling 현상을 표기하였다. 가압력 22 kN, 리벳 생크 길이 3.5 mm 경우, Head height 0.21 mm, Interlock은 0.06 mm, 0.07 mm, Bottom thickness는 0.33 mm, 0.28 mm이며 Head height 및 Interlock 인자가 단면 품질 평가 기준에 만족하지 못하였다. 리벳 생크 길이 4 mm 경우, Head height는 0.23 mm, Interlock은 0.23 mm, 0.28 mm, Bottom thickness는 0.18 mm, 0.13 mm로 Head height 인자가 기준을 만족하지 못했다. 리벳 생크 길이 4.5 mm 경우, Head height는 0.25 mm, Interlock은 0.46 mm, 0.4 mm, Bottom thickness는 0.15 mm, 0.09 mm이며 Head height가 기준에 만족하지 못하였다. 가압력 22 kN 조건은 리벳 헤드부가 돌출되어 있으며, 22 kN 가압력은 부족함을 시사한다. 또한 이러한 헤드 돌출은 인장 시험 시 노치(Notch)로 작용하여 응력집중에 의한 강도 저하가 발생한다.

가압력 27 kN, 리벳 생크 길이 3.5 mm 경우, Head height는 0.08 mm, Interlock은 0.09 mm, 0.11 mm, Bottom thickness는 0.25 mm이며 Interlock이 기준에 만족하지 못하였다. 리벳 생크 길이 4 mm 경우, Head height는 0.12 mm, Interlock은 0.28 mm, 0.31 mm, Bottom thickness는 0.12 mm, 0.13 mm이며 단면 품질 기준에 만족하였다. 리벳 생크 길이 4.5 mm 경우, Head height는 0.18 mm, Interlock은 0.35 mm, 0.33 mm, Bottom thickness는 0.08 mm, 0.06 mm이며 Bottom thickness가 만족하지 못하였고 앞에서 언급한 이유로 Buckling 현상이 발생했다. 가압력 27 kN 조건의 경우, 리벳 헤드 돌출 현상은 나타나지 않았으며, 적합한 조건이라고 도출되었다.

가압력 32 kN, 리벳 생크 길이 3.5 mm 경우, Head height는 -0.29 mm, Interlock은 0.08 mm, 0.12 mm, Bottom thickness는 0.24 mm, 0.2 mm이며 Interlock 인자가 기준에 만족하지 못했다. 리벳 생크 길이 4 mm 경우, Head height는 0.21 mm, Interlock은 0.29 mm, 0.26 mm, Bottom thickness는 0.07 mm, 0.06 mm이며 Head height 및 Bottom thickness가 기준에 만족하지 못하였다. 리벳

생크 길이 4.5 mm 경우, Head height는 0.11 mm, Interlock은 0.43 mm, 0.41 mm, Bottom thickness는 0.09 mm, 0.1 mm이며 Bottom thickness가 기준에 만족하지 못하였고 Buckling 현상이 발생했다. 가압력 32 kN의 경우, 리벳 생크 길이 3.5 mm, 4 mm 조건에서 리벳 헤드부가 CFRP에 삽입되는 리벳 헤드 삽입 현상이 나타났으며 이는 앞서 언급한 바와 같이 응력집중 현상이 발생하므로 가압력 32 kN 조건이 부적합하다. 또한 CFRP측에 균열이 형성된 것을 확인하였으며, 리벳 헤드가 삽입되면서 CFRP에 균열이 형성 및 전파되었다.

SPR 접합 시 CFRP의 Carbon Fiber 손상 정도를 관찰한 결과를 Table 3.2와 같이 나타내었다. 가압력이 증가함에 따라 Carbon Fiber의 손상이 증가하였으며, 특히 가압력 27 kN 에서 32 kN 으로 증가함에 따라 손상 정도가 확연히 증가하였다. 이는 CFRP 소재에 SPR 접합 시 가압력이 손상과 밀접한 연관성이 있으며, CFRP 소재 특성상 연성이 거의 없으며 취성이 강하므로 SPR 공정 시 일정 가압력 이상 작용하는 경우 Carbon Fiber의 손상이 급격히 증가하므로 복합소재의 기계적 체결 공법 시 손상 정도가 매우 중요하다.

Table. 3.1 Cross-sectional characteristics of the joint based on the rivet shank length and force

Force (kN)	Shank length (mm)		
	3.5	4	4.5
22			
27			
32			

Table. 3.2 Measurement values of factors (Head height 'K' , Interlock 'a<sub>1,2</sub>' , Bottom thickness 't<sub>1,2</sub>' ) of the joint based on rivet shank length and force

Force (kN)	Shank length (mm)		
	3.5	4	4.5
22	$K = 0.21$ $a_{1,2} = 0.06, 0.07$ $t_{1,2} = 0.33, 0.28$	$K = 0.23$ $a_{1,2} = 0.23, 0.28$ $t_{1,2} = 0.18, 0.13$	$K = 0.25$ $a_{1,2} = 0.46, 0.4$ $t_{1,2} = 0.15, 0.09$
27	$K = 0.08$ $a_{1,2} = 0.09, 0.11$ $t_{1,2} = 0.25, 0.25$	$K = 0.12$ $a_{1,2} = 0.28, 0.31$ $t_{1,2} = 0.12, 0.13$	$K = 0.18$ $a_{1,2} = 0.35, 0.33$ $t_{1,2} = 0.08, 0.06$ Occurred buckling
32	$K = -0.29$ $a_{1,2} = 0.08, 0.12$ $t_{1,2} = 0.24, 0.2$	$K = -0.21$ $a_{1,2} = 0.29, 0.26$ $t_{1,2} = 0.07, 0.05$	$K = 0.11$ $a_{1,2} = 0.43, 0.41$ $t_{1,2} = 0.09, 0.1$ Occurred buckling

Table. 3.3 Damage to CFRP fibers based on the rivet shank length and force

Force (kN)	Shank length (mm)		
	3.5	4	4.5
22			
27			
32			

### 3.1.2 기계적 특성

#### (1) 인장 전단시험

앞 절의 접합부의 단면 특성을 고찰한 결과, 리벳 생크 길이 4 mm 조건이 가장 건전한 접합 특성을 나타내어, 리벳 생크 길이 4 mm 조건에서 가압력(22 kN, 27 kN, 32 kN)별 인장 전단시험을 실시하였다.

시험 결과, 리벳 생크 길이 4 mm, 가압력 27 kN 조건에서 최대 인장 전단하중인 약 2 kN 을 얻어졌으며, 리벳 머리 분리 파단이 나타났다. 이는 단면 특성에서 주안점으로 살펴보았던 인자들을 만족하며, 접합부 품질 불량 현상들이 나타나지 않아 하중이 가장 우수하게 나타났다. 가압력 22 kN 조건의 경우 1.94 kN 으로 가압력 27 kN 조건과 인장 전단하중이 비슷하게 나타났으며 이는 Interlock의 길이가 기준을 만족하였으며, CFRP의 손상 감소로 이와 같은 결과가 나타났다.

가압력 32 kN 조건에서 인장 전단하중이 1.89 kN 으로 가장 낮은 값을 나타냈으며, CFRP 분리 파단이 발생했다. 파단면 관찰 결과, 리벳 헤드에 잔존하는 CFRP를 확인하였으며, Interlock 지점과 맞닿는 CFRP의 하부가 상부보다 잔존하는 CFRP가 많았다. 이는 Interlock 지점이 하중을 많이 받으며, SPR 접합 시 CFRP에 균열이 형성되면서 발생하였다. CFRP 상부에서는 Bearing Failure, 하부에서는 Fiber Split과 Compressive Deformation이 나타났다. Buckling과 같은 결함도 발생하지 않았으며, 접합부의 강도와 직결되는 Interlock 인자가 평균 0.27 mm로 다른 조건들과 비슷하였다. 따라서 가압력 32 kN 에서의 급격한 강도 저하 현상은 Carbon Fiber의 손상으로 인해 발생 되었으며, CFRP 소재에 SPR 공법 시 Carbon Fiber의 손상이 접합부 강도에 영향이 있음을 확인하였다.

인장 전단시험에서 가장 높은 강도를 나타낸 가압력 27 kN 조건의 시험편의 CFRP 측 파단면을 전자 주사 현미경을 이용하여 관찰한 결과, Carbon Fiber의 Fractured Fiber와 Delamination이 관찰되었으며, 리벳과 접촉하고 있던 CFRP에서 층 방향으로 균열이 형성된 것을 확인하였다. 이는 기계적 접합 시 CFRP가 손상되었으며, 리벳에 의해 존재하던 구속력이 파단과 동시에 사라지면서 균열이 성장했다고 사료 된다.

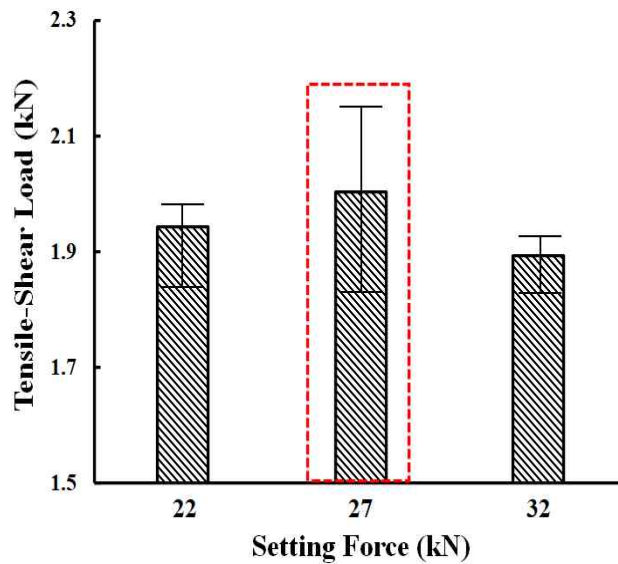


Fig. 3.1 Tensile-shear load with force under condition of a 4 mm shank length



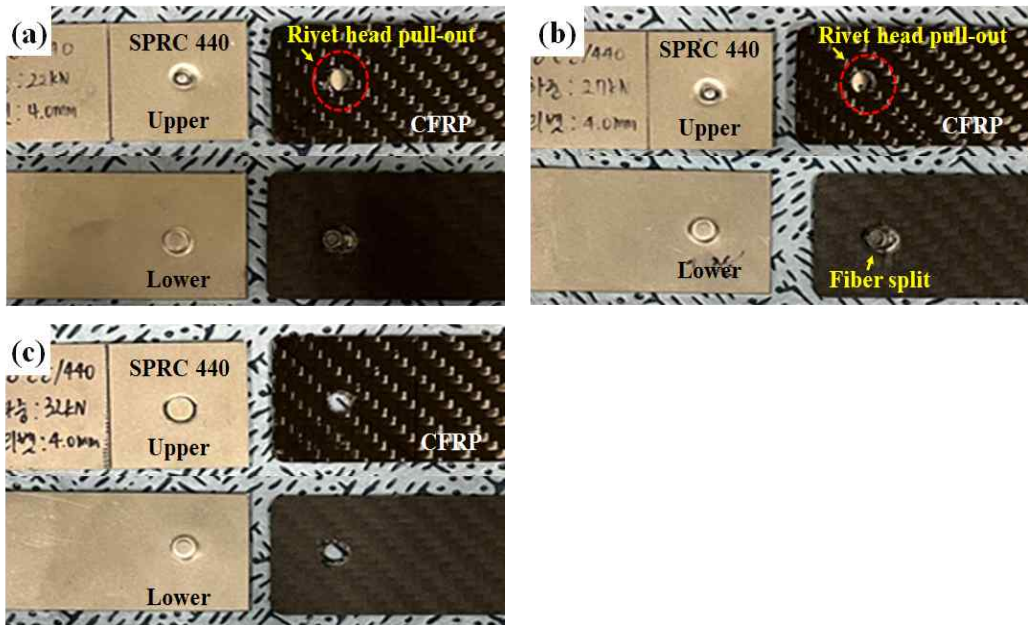


Fig. 3.2 Fracture photos of the tensile-shear test specimens under the condition of a 4 mm shank length at various forces; (a) 22 kN (b) 27 kN (c) 32 kN

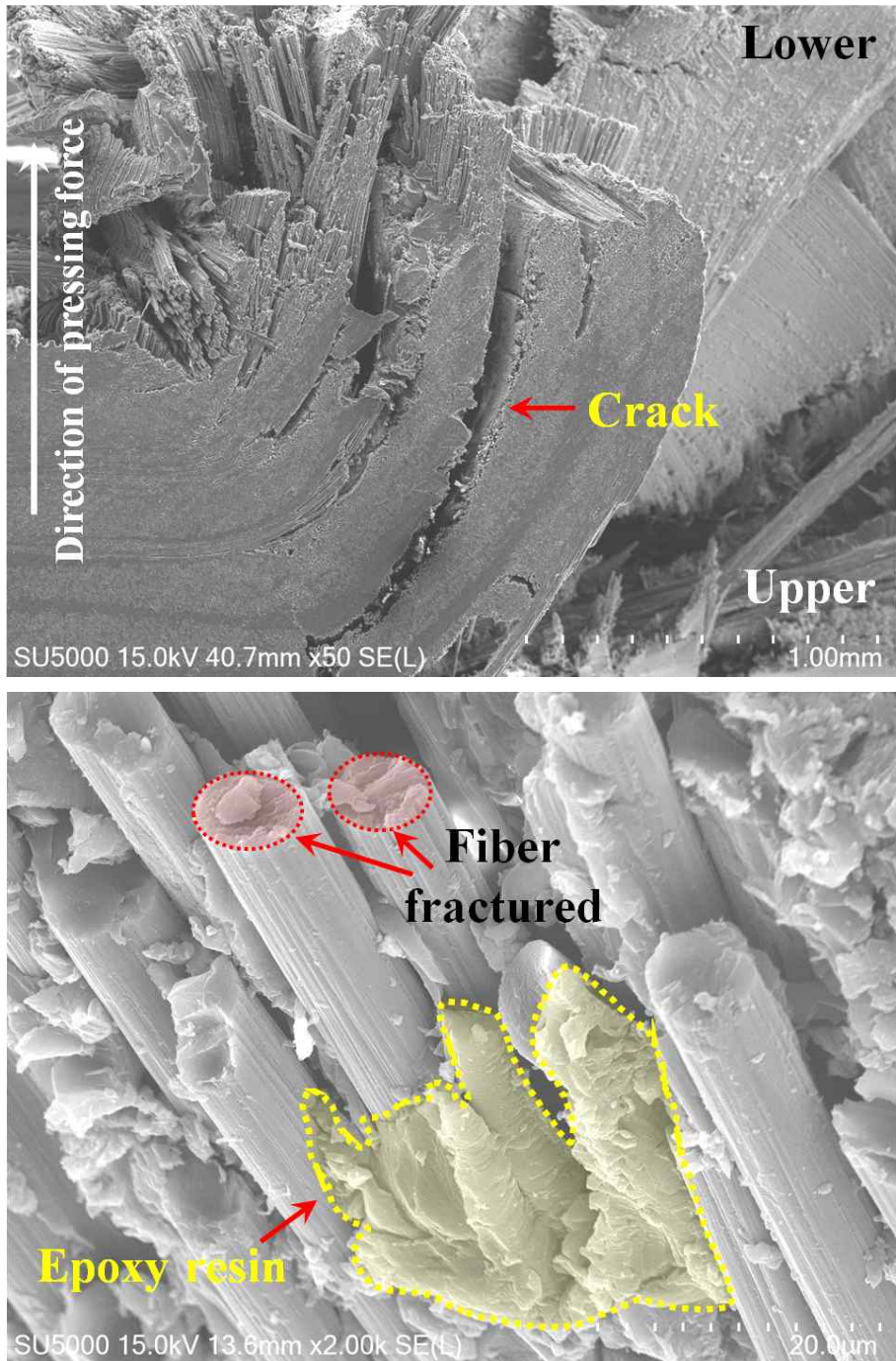


Fig. 3.3 Fracture surface photos of CFRP under the condition of a 4 mm shank length and force of 27 kN

## (2) 피로 시험

피로 시험은 인장 전단시험에서 최댓값을 나타내는 리벳 생크 길이 4 mm, 가압력 27 kN 조건에서 피로한도 50%에서 80%까지 범위를 적용하였으며, 피로 수명 기준은 100만 Cycle(회/10 Hz)로 설정하여 피로 시험을 실시하였다.

피로 시험 결과, 피로한도 50%, 60%에서 피로 시험기준을 만족하였으며, 피로한도에 해당하는 최대하중은 인장 전단하중의 60% 수준인 약 1.2 kN, 진폭 하중은 0.54 kN 이었다. 피로한도 70%의 조건의 경우, 100만 Cycle(회/10 Hz)를 만족하지 못하고 피로 수명 523,072 Cycle(회/10 Hz)에서 상판인 CFRP가 분리되는 현상이 나타났으며, 피로 시험 파단 시험편은 인장 전단시험 파단 시험편과 다르게 리벳에 잔존하는 CFRP가 증가한 것을 확인하였다. 이는 SPR 접합 시 손상된 Carbon Fiber가 리벳과의 반복하중으로 마모가 발생 되어 Hole의 직경이 증가하여 이와 같은 현상이 발생했다고 사료 된다.

피로 시험 시 100만 Cycle(회/10 Hz)를 만족하지 못하고 CFRP 분리가 일어난 피로한도 70% 조건의 CFRP 파단면을 주사전자현미경을 이용하여 관찰한 결과, 인장 전단시험 파단면에서 관찰된 Fractured Fiber 및 Delamination 현상이 동일하게 관찰되었다.

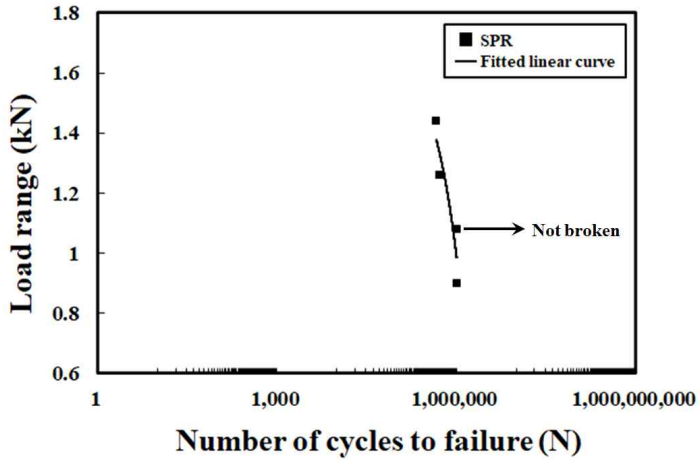

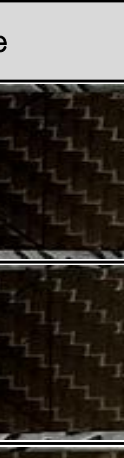
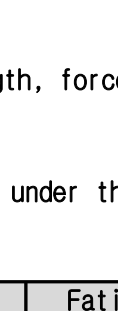
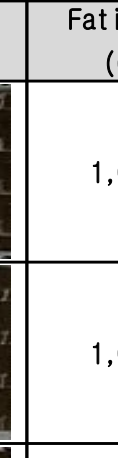
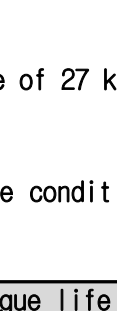
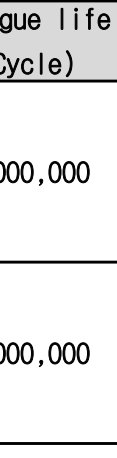


Fig. 3.4 S-N curve under condition of a 4 mm shank length, force of 27 kN

Table. 3.4 Fracture photos of the fatigue test specimens under the condition of a 4 mm shank length and force of 27 kN

Fatigue limit (%)	Point of view from above	Fatigue life (Cycle)
50	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px;">                     피로용/440                      하중: 27kN                      리벳: 4.0MM                 </div>  </div>	1,000,000
60	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px;">                     피로용/440                      하중: 27kN                      리벳: 4.0MM                 </div>  </div>	1,000,000
70	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px;">                     140                      7kN                      4.0MM                 </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px;">                      CFRP                 </div>  </div>	523,072
80	<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px;">                     790                      27kN                      4.0MM                 </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px;">                      CFRP                 </div>  </div>	456,927



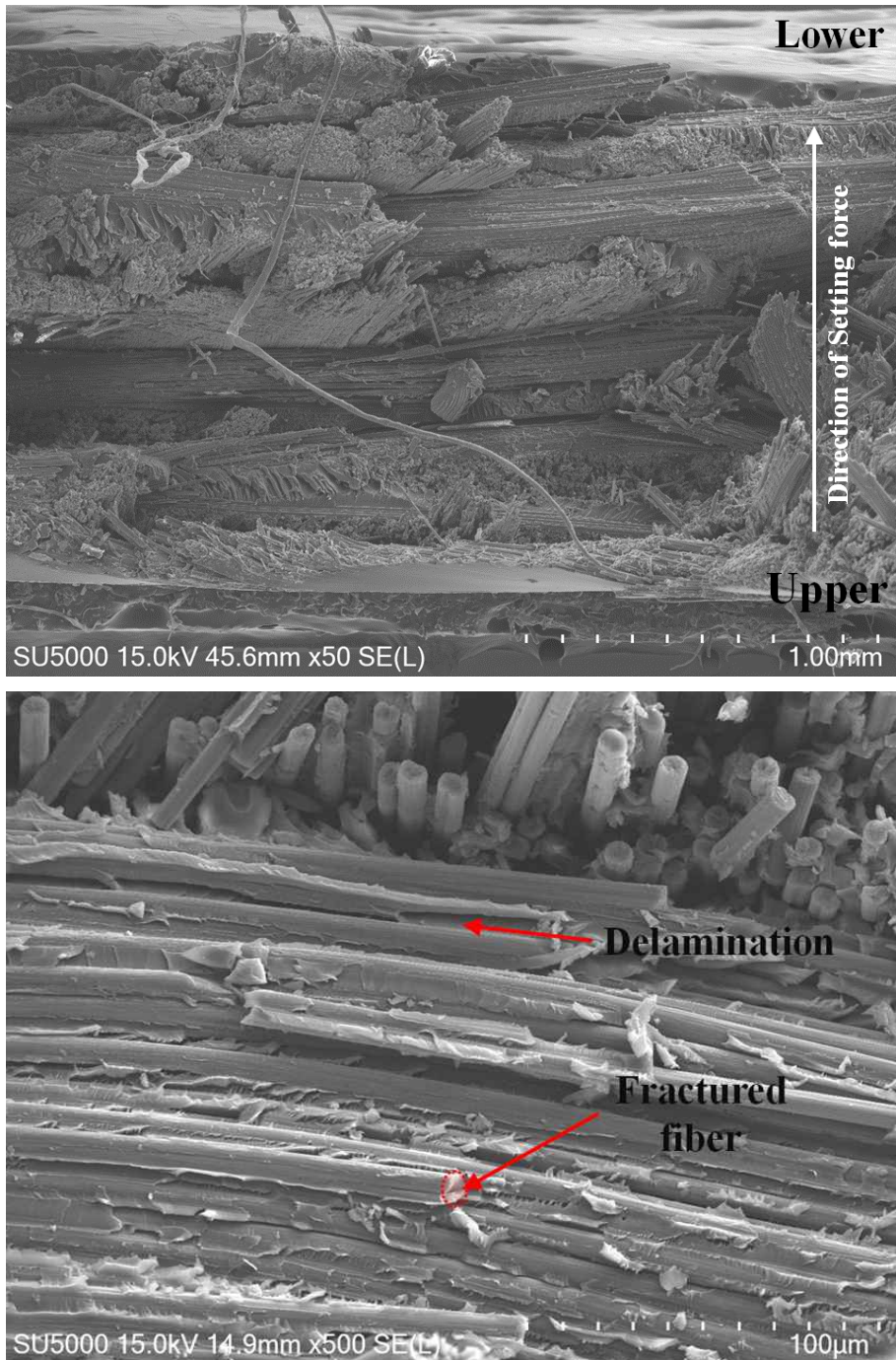


Fig. 3.5 Fracture surface photos of the fatigue test specimen under the condition of a 4 mm shank length and force of 27 kN at 70% of the fatigue limit for CFRP

## 3.2 CFRP-SPFC590 SPR 접합부 특성

### 3.2.1 공정변수에 따른 접합부 단면 특성

CFRP-SPFC590 SPR 접합 시 SPFC440과는 강도 및 두께 차이가 존재하므로 가압력을 5 kN 씩 증가시켜 24 kN, 29 kN, 34 kN, 리벳 생크 길이는 3.5 mm, 4 mm, 4.5 mm으로 설정하여 실험을 수행하였다. 단면 품질 평가 기준에 의거하여 공정 변수 별 접합부의 Head Height, Interlock, Bottom Thickness 등을 관찰하였다.

#### (1) 리벳 생크 길이에 따른 단면 특성

리벳 생크 길이 3.5 mm, 가압력 24 kN 조건에서 Head height는 0.21 mm, Interlock은 0.06 mm이며 단면 품질 기준에 만족하지 못하였다. 따라서 Interlock의 값이 작아 접합부의 강도가 저하되며, Separation 현상이 발생할 것으로 사료된다. Bottom thickness는 기준에 만족하였으며, Necking 현상은 관찰되지 않았다. 가압력 29 kN 조건은 Head height는 0.06 mm, Interlock은 0.13 mm, 0.18 mm, Bottom thickness는 0.49 mm으로 품질 기준에 만족하였다. 가압력 34 kN 조건에서 Head height는 -0.38 mm이며 기준에 만족하지 못하였다. Interlock은 0.24 mm, 0.35 mm, Bottom thickness는 0.3 mm, 0.44 mm이며 기준에 만족하였다.

리벳 생크 길이 4 mm 조건에서 가압력 24 kN 의 단면은 Head height가 0.22 mm이며 기준을 초과하였다. Interlock은 0.2 mm, 0.15 mm, Bottom thickness는 0.51 mm, 0.54 mm이며 기준을 만족하였다. 가압력 29 kN 조건에서 Head height의 값은 0.07 mm, Interlock의 값은 0.38 mm, Bottom thickness는 0.35 mm이며 모든 인자가 품질 기준에 만족하였다. 또한 강도와 연관된 Interlock의 최댓값이 나타났으며, 이는 리벳 생크 길이 4 mm, 가압력 29 kN 조건에서 강도가 가장 높게 나타날 것으로 사료된다. 가압력 34 kN 조건에서 Head height는 0.08 mm, Interlock은 0.33 mm, 0.3 mm, Bottom thickness는 0.25 mm, 0.29 mm이며, Head height가 기준에 만족하지 못하였다. 또한 리벳 생크가 굴절되는 Buckling 현상이 나타났다. 이는 가압력과 관련 있으며 가압력에 따른 단면 특성에 서술하였다.

리벳 생크 길이 4.5 mm 모든 조건에서 Buckling 현상이 발생하였으며, Bottom thickness 변화도 크게 나타나지 않았다. 또한 리벳 생크 길이 4 mm 조건에서 감소하였던 Head height 인자가 증가하였으며, 이는 리벳 생크 길이 4.5 mm는 상, 하판 총 두께인 2.5 mm SPR 공정 시 부적합하다는 것을 알 수 있다.

SPR 접합 시 CFRP의 손상 정도를 고찰하기 위해 리벳과 맞닿는 CFRP 단면을 관찰하였으며 Table. 로 나타내었다. 리벳 생크 길이에 따른 CFRP의 손상에서는 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다. 이는 SPR 접합 시 리벳 생크 길이는 SPR 접합 시 발생하는 CFRP 손상에 영향을 미치지 않은 것으로 사료된다.

## (2) 가압력에 따른 단면 특성

가압력 24 kN 조건에서 리벳 생크 길이 3.5 mm일 때, Head height는 0.21 mm, Interlock은 0.06 mm, 0.07 mm, Bottom thickness는 0.33 mm, 0.28 mm로 Interlock이 기준에 만족하지 못하였고, 이는 리벳의 펼쳐짐 정도가 작아 접합부의 강도가 저하되는 Separation 현상이 발생할 것으로 사료된다. 리벳 생크 길이 4 mm의 경우, Head height는 0.22 mm, Interlock은 0.2 mm, 0.15 mm, Bottom thickness는 0.51 mm, 0.54 mm이며 품질 평가 기준에 만족하였다. 리벳 생크길이 4.5 mm의 경우, Head height는 0.31 mm, Interlock은 0.31 mm, 0.37 mm, Bottom thickness는 0.31 mm, 0.3 mm이며 Head height 인자가 기준에 만족하지 못하였고, 리벳 생크가 굴절되는 Buckling 현상이 발생하였다. 가압력 24 kN 모든 조건에서는 리벳 생크 길이와 상관없이 리벳 헤드부가 돌출되어 있다. 이는 하중을 받는 경우 노치(Notch)로 작용하고 응력집중 현상이 발생하며, 가압력 24 kN은 두께 2.5 mm 소재를 SPR 접합 시 부적합하다고 사료된다.

가압력 29 kN, 리벳 생크 길이 3.5 mm의 경우, Head height는 0.06 mm, Interlock은 0.13 mm, 0.18 mm, Bottom thickness는 0.49 mm로 단면 품질 기준에 만족하였다. 리벳 생크 길이 4 mm 조건의 경우, Head height는 0.07 mm, Interlock은 0.38 mm, 0.4 mm, Bottom thickness는 0.35 mm, 0.41 mm로 평가 기준에 만족하였으며, Interlock의 길이가 최대로 나타났다. 리벳 생크 길이 4.5 mm의 경우, Head height는 0.16 mm, Interlock은 0.36 mm, 0.34 mm, Bottom thickness는 0.31 mm, 0.3 mm로 품질 평가 기준에 만족하였으나 Buckling 현상이 발생했다. 가압력 29 kN 조건은 대체로 단면 품질 평가 기준에 만족하였으며, 이는 29 kN 조건이 2.5 mm 두께 소재에 적합하다고 사료된다.

가압력 34 kN, 리벳 생크 길이 3.5 mm 조건의 경우, Head height 인자는 -0.38 mm, Interlock은 0.24 mm, 0.35 mm, Bottom thickness는 0.3 mm, 0.44 mm로 Head height 인자가 품질 기준에 만족하지 못하였다. 또한 리벳 헤드부가 CFRP에 삽입되었으며, 노치로 작용하여 강도가 저하될 것으로 사료된다. 리벳 생크 길이 4 mm의 경우, Head height는 0.08 mm, Interlock은 0.33 mm, 0.3 mm, Bottom



thickness는 0.25 mm, 0.29 mm로 품질 기준에 만족하였으나 Buckling 현상이 발생하였다. 이는 하판의 소재 강도가 증가하여 발생하였다. 리벳 생크 길이 4.5 mm의 경우, Head height는 0.1 mm, Interlock은 0.36 mm, 0.31 mm, Bottom thickness는 0.27 mm, 0.24 mm로 품질 기준에 만족하였으나 4 mm와 마찬가지로 Buckling 현상이 나타났다. 따라서 가압력 34 kN 조건에서는 리벳 헤드 삼입 현상과 Buckling 현상이 나타났으며, 이는 34 kN 조건이 필요 이상의 가압 조건으로 두께 2.5 mm 소재에 부적합하다고 사료된다.

CFRP의 손상을 고찰한 결과, 가압력이 증가함에 따라 CFRP의 손상이 증가하였으며, 리벳 생크 길이 4.5 mm, 가압력 24 kN 조건 및 리벳 생크 길이 3.5 mm, 가압력 34 kN 조건에서는 수직 방향의 균열이 확인되었다. 이는 SPR 접합 시 가압에 의한 손상으로 연성이 거의 없는 Carbon fiber의 특성에 의해 발생하였으며, CFRP 손상에 가압력의 영향이 있다고 사료된다.

Table. 3.5 Cross-sectional characteristics of the joint based on the rivet shank length and force

Force (kN)	Shank length (mm)		
	3.5	4	4.5
24	0.21 mm 	0.22 mm 	0.31 mm Buckling of the rivet 
29	0.06 mm 	0.07 mm 	0.16 mm Buckling of the rivet 
34	-0.38 mm 	0.08 mm Buckling of the rivet 	0.10 mm Buckling of the rivet 

Table. 3.6 Measurement values of factors (Head height 'K' , Interlock 'a<sub>1,2</sub>' , Bottom thickness 't<sub>1,2</sub>' ) of the joint based on rivet shank length and force

Force (kN)	Shank length (mm)		
	3.5	4	4.5
24	K = 0.21 a <sub>1,2</sub> = 0.06, 0.07 t <sub>1,2</sub> = 0.33, 0.28	K = 0.22 a <sub>1,2</sub> = 0.20, 0.15 t <sub>1,2</sub> = 0.51, 0.54	K = 0.31 a <sub>1,2</sub> = 0.31, 0.37 t <sub>1,2</sub> = 0.31, 0.3 Occurred buckling
29	K = 0.06 a <sub>1,2</sub> = 0.13, 0.18 t <sub>1,2</sub> = 0.49, 0.49	K = 0.07 a <sub>1,2</sub> = 0.38, 0.4 t <sub>1,2</sub> = 0.35, 0.41	K = 0.16 a <sub>1,2</sub> = 0.36, 0.34 t <sub>1,2</sub> = 0.31, 0.3 Occurred buckling
34	K = -0.38 a <sub>1,2</sub> = 0.24, 0.35 t <sub>1,2</sub> = 0.3, 0.44	K = 0.08 a <sub>1,2</sub> = 0.33, 0.3 t <sub>1,2</sub> = 0.25, 0.29 Occurred buckling	K = 0.1 a <sub>1,2</sub> = 0.36, 0.31 t <sub>1,2</sub> = 0.27, 0.24 Occurred buckling

Table. 3.7 Damage to CFRP fibers based on the rivet shank length and force

Force (kN)	Shank length (mm)		
	3.5	4	4.5
24			
29			
34			

### 3.2.2 기계적 특성

#### (1) 인장 전단시험

앞 절의 접합부의 단면 특성을 고찰한 결과, 리벳 생크 길이 4 mm 조건이 가장 건전한 접합 특성을 나타내어, 리벳 생크 길이 4 mm 조건에서 가압력(24 kN, 29 kN, 34 kN)별 인장 전단시험을 실시하였다.

시험 결과, 가압력 24 kN 조건에서 인장 전단하중은 약 1.9 kN 이며, 리벳 머리 분리 파단이 나타났다. 이는 SPR 접합 시 가압력 24 kN 조건에서 CFRP의 손상이 가장 적었으며, 하중이 리벳에 작용하여 발생했다고 사료된다. 가압력 29 kN 의 경우, 최대 인장 전단하중인 1.94 kN 이 나타났으며, CFRP가 분리되었다. 단면 특성에서 주안점으로 살펴보았던 인자들을 만족하며, 접합부 품질 불량 현상들이 나타나지 않아 하중이 가장 우수하게 나타났다고 사료된다. 가압력 34 kN 조건에서 인장 전단하중이 1.7 kN 으로 가장 낮은 값을 나타냈으며, CFRP 분리가 나타났다. 파단면 관찰 결과, 리벳 헤드에 잔존하는 CFRP가 확인하였으며, CFRP 상부에서는 Bearing Failure, 하부에서는 표면의 Carbon fiber가 분리되는 Fiber Split이 나타났다. 강도 저하는 단면 비교에서 접합부의 강도와 직결되는 Interlock 인자는 평균 0.27 mm 로 다른 조건들과 비슷하였기에 Carbon Fiber의 손상 및 Buckling 현상에 의해 강도 저하가 발생했다고 사료된다. 또한 CFRP 소재를 SPR 접합 시 Carbon Fiber의 손상과 접합부 강도 저하에 영향이 있으며, CFRP의 손상으로 CFRP 분리 파단모드가 나타난 것으로 사료된다.

인장 전단시험에서 가장 높은 강도를 나타낸 가압력 27 kN 조건의 시험편의 CFRP 측 파단면을 전자 주사 현미경을 이용하여 관찰한 결과, 하중이 가장 많이 전달되는 Interlock 지점과 맞닿아 있는 CFRP 하부에서 균열의 시작점이 확인되었으며, Carbon Fiber의 Fractured Fiber와 Delamination이 관찰되었다. 또한 CFRP 상부인 Epoxy resin에서 균열을 확인하였으며, CFRP 하부 방향으로 균열이 성장하였다. 이는 SPR 접합 시 형성된 균열임을 알 수 있다.

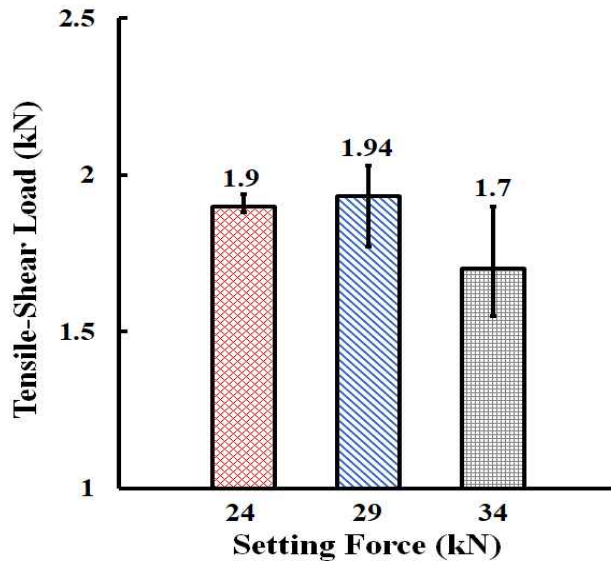


Fig. 3.6 Tensile-shear load with force under condition of a 4 mm shank length

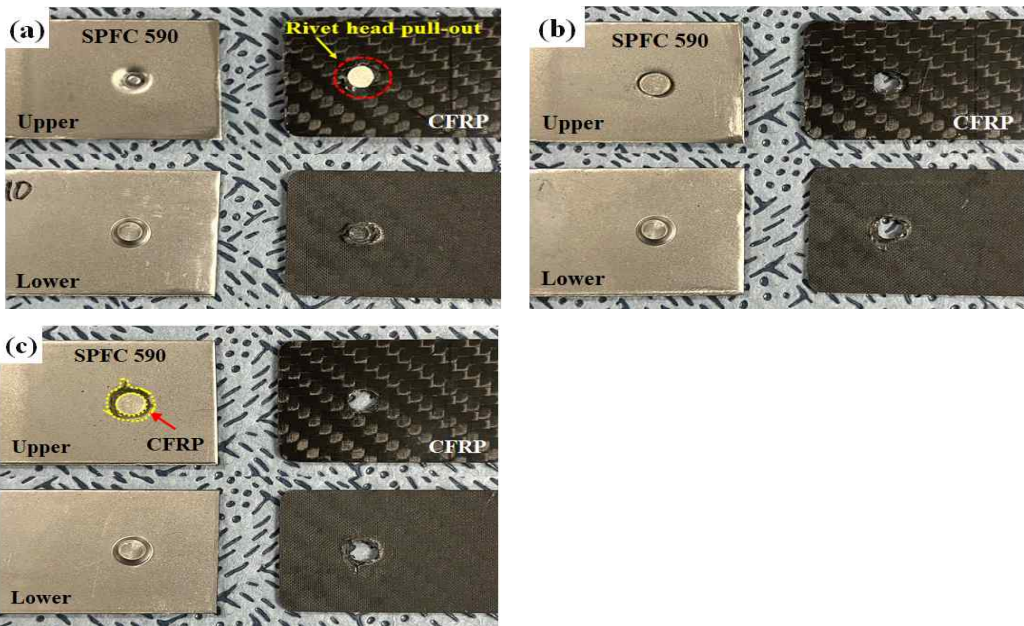


Fig. 3.7 Fracture photos of the tensile-shear test specimens under the condition of a 4 mm shank length at various forces; (a) 24 kN (b) 29 kN (c) 34 kN



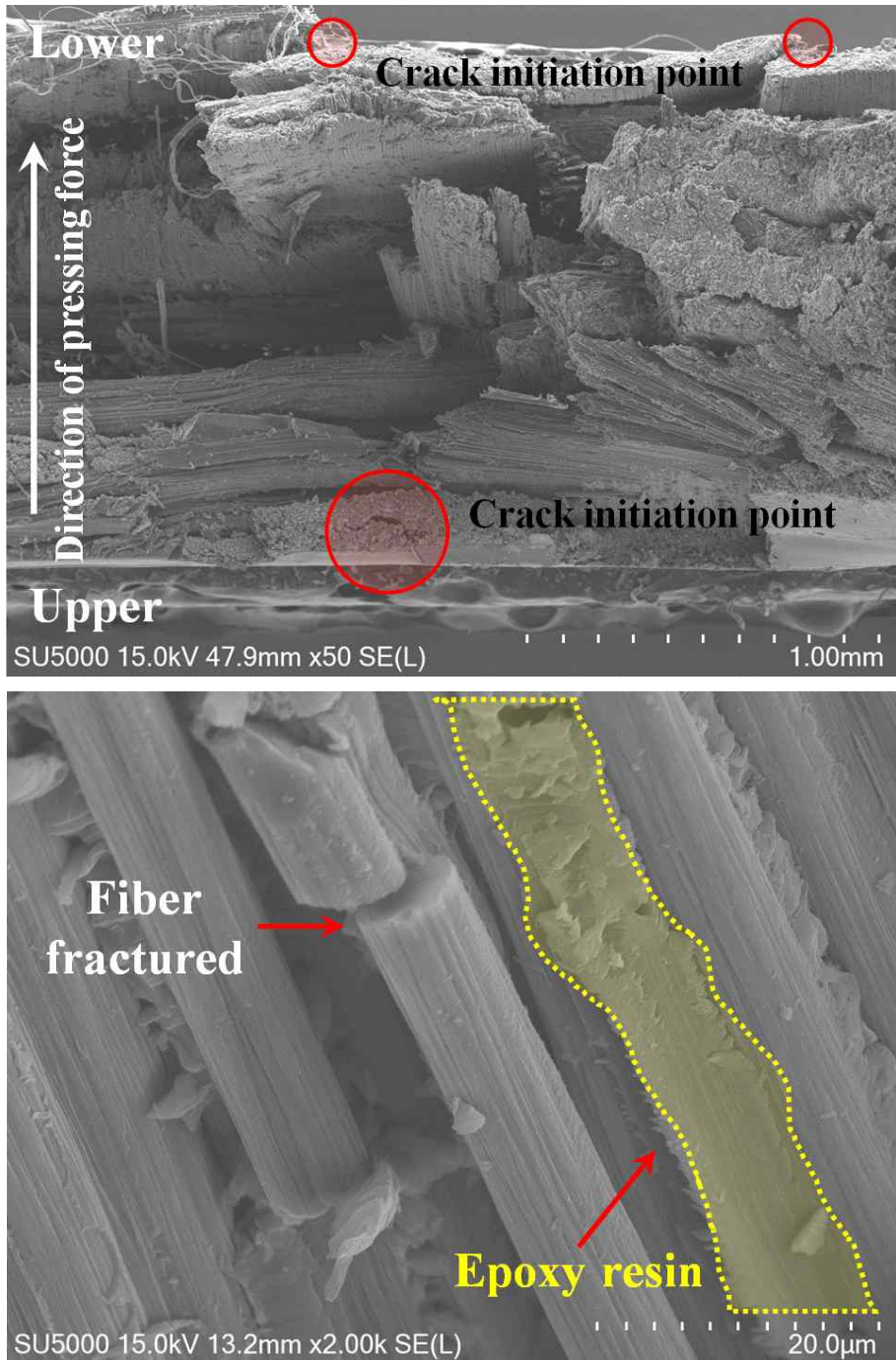


Fig. 3.8 Fracture surface photos of CFRP under the condition of a 4 mm shank length and force of 29 kN

## (2) 피로 시험

피로 시험은 인장 전단시험에서 최댓값을 나타내는 리벳 생크 길이 4 mm, 가압력 29 kN 조건에서 피로한도 50%에서 70%까지 범위를 적용하였으며, 피로 수명 기준은 100만 Cycle(회/10 Hz)로 설정하여 피로 시험을 실시하였다.

피로 시험 결과, 피로한도 50%에서 피로 시험기준을 만족하였으며, 피로한도에 해당하는 최대하중은 인장 전단하중의 50% 수준인 약 1 kN, 진폭 하중은 0.45 kN 이었다. 피로한도 60%의 조건의 경우, 100만 Cycle(회/10 Hz)를 만족하지 못하고 피로 수명 678,554 Cycle(회/10 Hz)에서 상판인 CFRP가 분리되는 현상이 나타났으며, 피로 시험 파단 시험편은 인장 전단시험 파단 시험편과 다르게 리벳에 잔존하는 CFRP가 증가한 것을 확인하였다. 이는 SPRC440과 마찬가지로 SPR 접합 시 손상된 Carbon Fiber가 리벳과의 반복하중으로 마모가 발생 되어 Hole 직경의 증가로 발생하였으며, CFRP의 기계적 접합부에서는 이러한 파단 양상이 나타날 것으로 사료된다.

피로 시험 시 100만 Cycle(회/10 Hz)를 만족하지 못하고 CFRP 분리가 일어난 피로한도 60% 조건의 CFRP 파단면을 주사전자현미경을 이용하여 관찰한 결과, 인장 전단시험 파단면에서 관찰된 Fractured Fiber 및 Delamination 현상이 동일하게 관찰되었다. CFRP 상부에서 균열을 확인하였으며 이는 리벳 접합 시 형성된 균열로 사료된다.



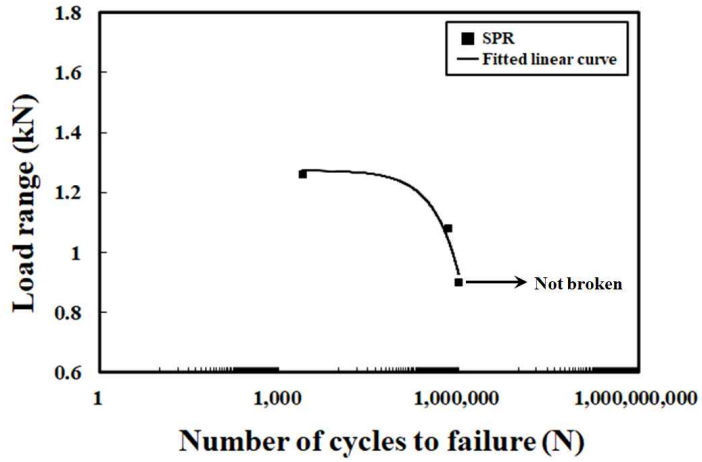


Fig. 3.9 S-N curve under the condition of a 4 mm shank length and force of 29 kN

Table. 3.8 Fracture photos of the fatigue test specimens under the condition of a 4 mm shank length and force of 29 kN

피로한도 (%)	파단 시험편	피로 수명 (Cycle)
50		1,000,000
60		678,554
70		2,478

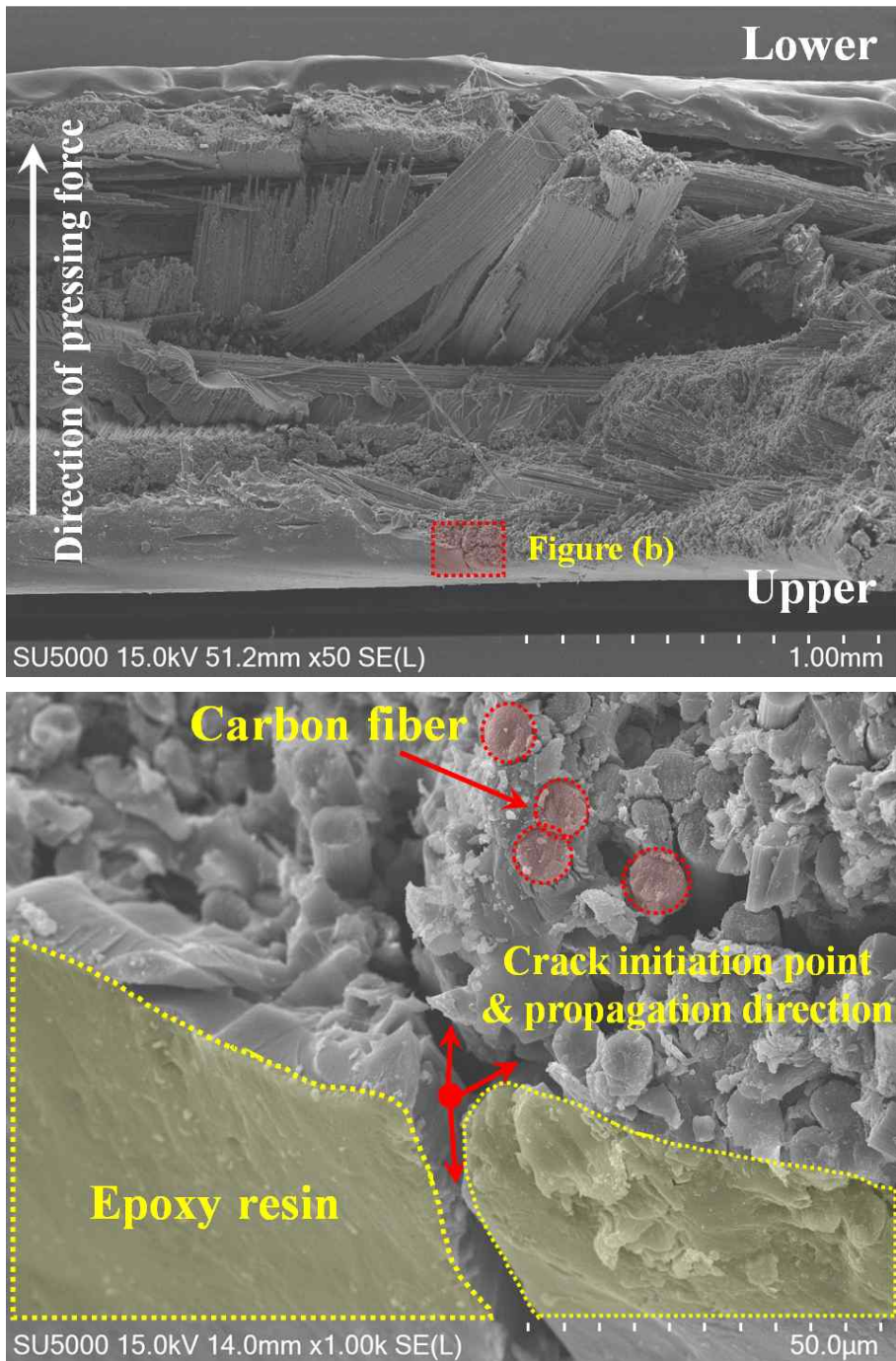


Fig. 3.10 Fracture surface photos of the fatigue test specimen under the condition of a 4 mm shank length and force of 29 kN at 60% of the fatigue limit for CFRP

### 3.3 딥러닝 모델 중 CNN을 이용한 품질 인자 예측

#### 3.3.1 일반 Convolution 층을 이용한 CNN 모델

CNN 분석은 각각 Head height, Interlock 및 Bottom thickness로 나누어 예측하였다. 학습 시 과적합과 같은 문제가 발생하는지 알기 위해 손실 및 평균제곱오차(MAE)를 판단하였으며, 실측값과 예측값을 비교하기 위해 결정계수( $R^2$ ) 값을 비교하였다.

##### (1) Head height 인자 예측 결과

Fig. 3.11, Fig. 3.12는 Colaboratory를 이용하여 Convolution Layer로 특징을 추출 및 학습하여 Head height 인자를 예측한 결과이다. Training 및 Validation의 손실(Loss)과 평균 제곱 오차(MAE) 값을 고찰한 결과, 손실은 10 Epoch, 평균 제곱오차는 30 Epoch에서 0으로 수렴하였다. 또한 결정계수는 Training 0.914, Validation 0.854, Test 0.852로 기준인 0.8 이상을 만족하였다.

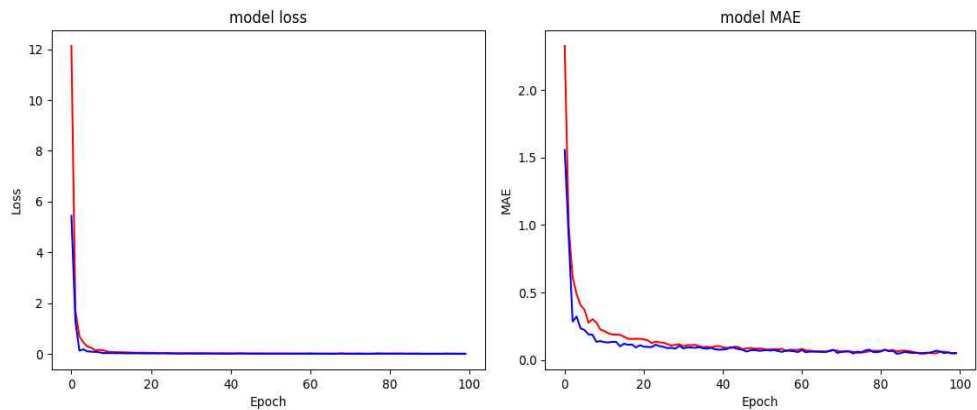


Fig. 3.11 Loss, MAE curve of CNN model to head height; (red) Train, (blue) Validation

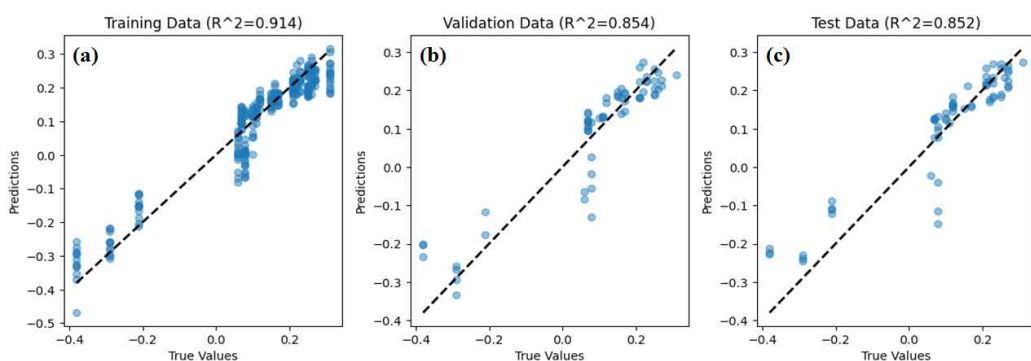


Fig. 3.12 Predicted and measured graph of CNN model to head height; (a) Training (b) Validation (c) Test

## (2) Interlock 인자 예측 결과

다음은 SPR 접합부에서 강도와 밀접한 관련이 있는 Interlock 인자를 예측하였으며, 그 결과를 Fig. 3.13, Fig. 3.14로 나타내었다. 손실(Loss)은 10 Epoch, 평균제곱오차(MAE)는 30 Epoch에서 0으로 수렴하였다. 각각의 결정계수는 Training 0.921, Validation 0.795, Test 0.822로 Training과 Test가 기준인 0.8 이상을 만족하였다.

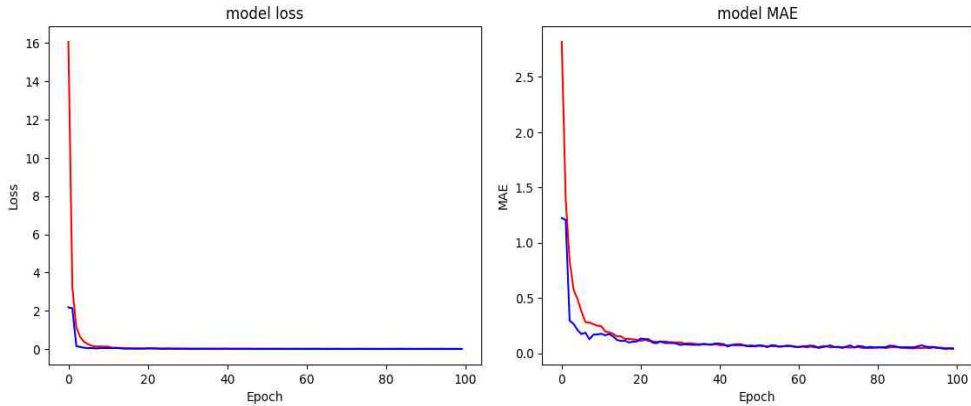


Fig. 3.13 Loss, MAE curve of CNN model to interlock; (red) Train, (blue) Validation

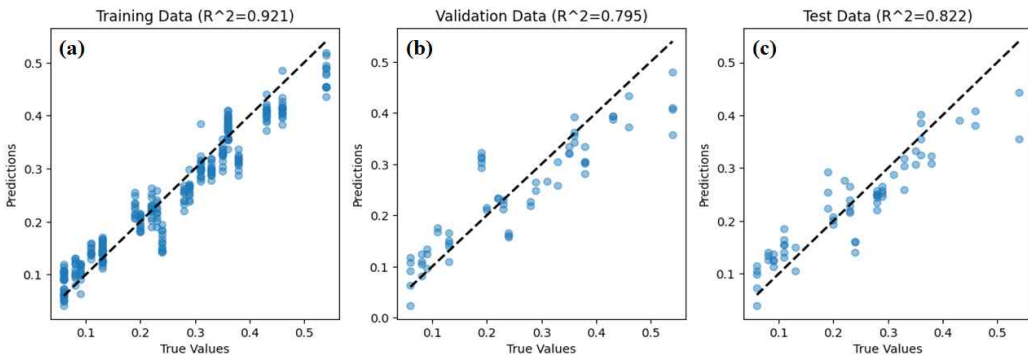


Fig. 3.14 Predicted and measured graph of CNN model to interlock; (a) Training (b) Validation (c) Test

### (3) Bottom thickness 인자 예측 결과

Training 및 Validation의 손실(Loss)과 평균 제곱 오차(MAE) 값을 고찰한 결과를 Fig. 3.15로 나타내었다. 손실은 8 Epoch, 평균제곱오차는 25 Epoch에서 0으로 수렴하였다. 결정계수( $R^2$ )는 Training 0.814, Validation 0.701, Test 0.792로 기준인 0.8에 만족하지 못하였다. 이는 데이터 수 부족과 Bottom thickness 인자의 경우, Buckling 현상의 영향을 많이 받아 이 같은 결과가 나온 것으로 사료된다.

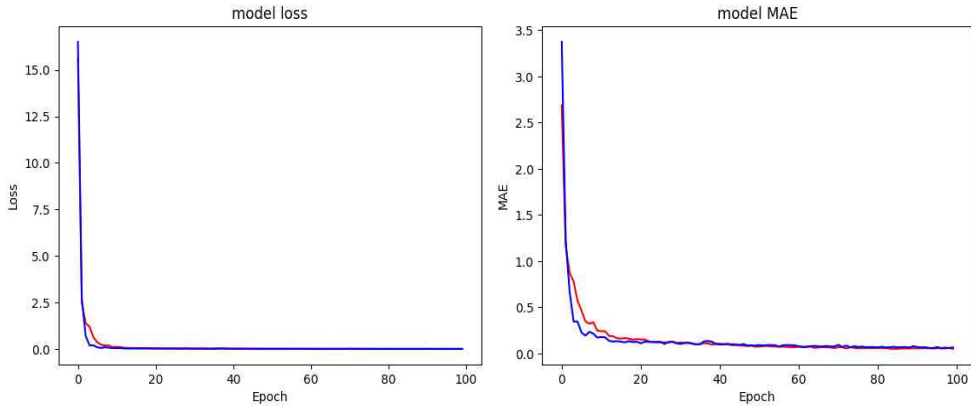


Fig. 3.15 Loss, MAE curve of CNN model to bottom thickness; (red) Train, (blue) Validation

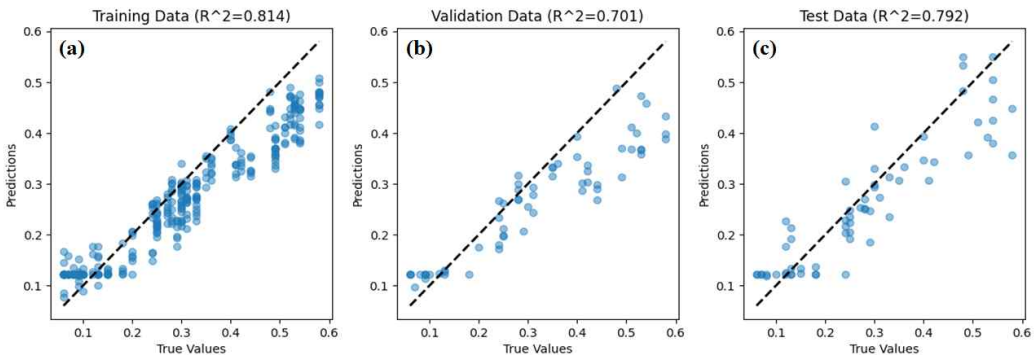


Fig. 3.16 Predicted and measured graph of CNN model to bottom thickness; (a) Training (b) Validation (c) Test

### 3.3.2 Xception을 이용한 CNN 모델의 예측 결과

#### (1) Head height 인자 예측 결과

Xception을 이용한 모델의 Head height 예측 결과를 다음 Fig. 3.17, Fig. 3.18로 나타내었다. 손실(Loss)은 20 Epoch, 평균제곱오차(MAE)는 90 Epoch에서 0으로 수렴하였다. 또한 결정계수( $R^2$ )가 Training 0.914, Validation 0.878, Test 0.904로 기준에 만족하였다.

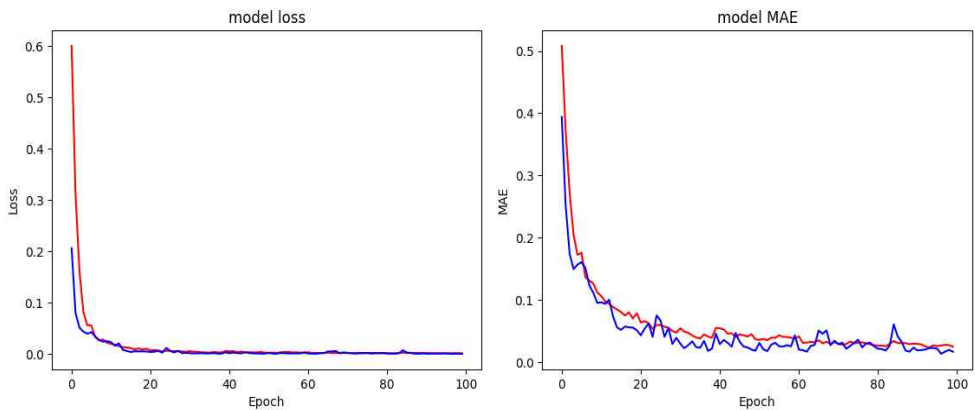


Fig. 3.17 Loss, MAE curve of xception model to head height; (red) Train, (blue) Validation

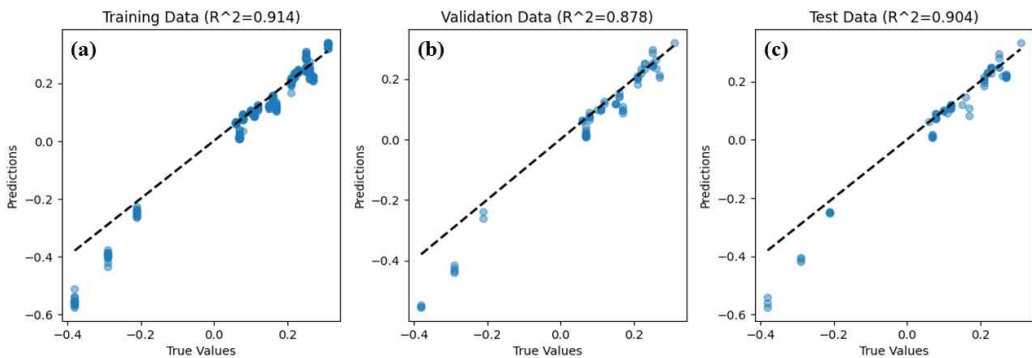


Fig. 3.18 Predicted and measured graph of xception model to head height; (a) Training (b) Validation (c) Test



## (2) Interlock 인자 예측 결과

Xception을 이용한 모델의 Interlock 예측 결과를 다음 Fig. 3.19와 Fig. 3.20으로 나타내었다. 손실(Loss)은 10 Epoch, 평균제곱오차(MAE)는 70 Epoch에서 0으로 수렴하였다. 또한 결정계수( $R^2$ )가 Training 0.948, Validation 0.944, Test 0.928로 가장 높은 정확도를 나타냈다.

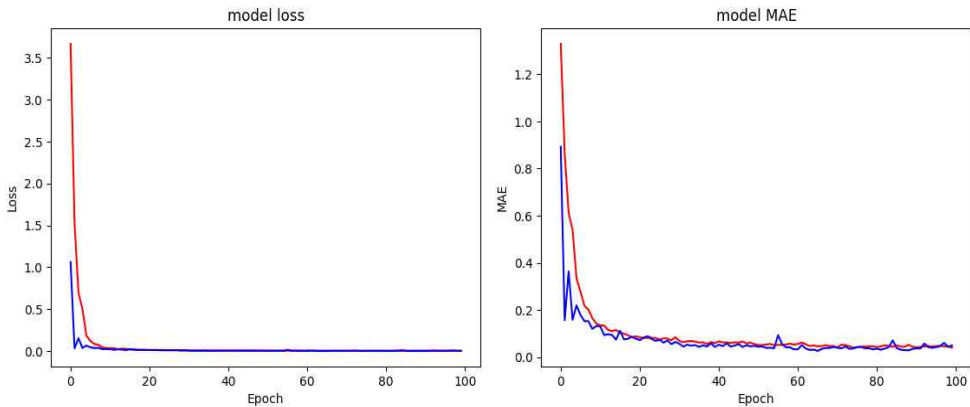


Fig. 3.19 Loss, MAE curve of xception model to interlock; (red) Train, (blue) Validation

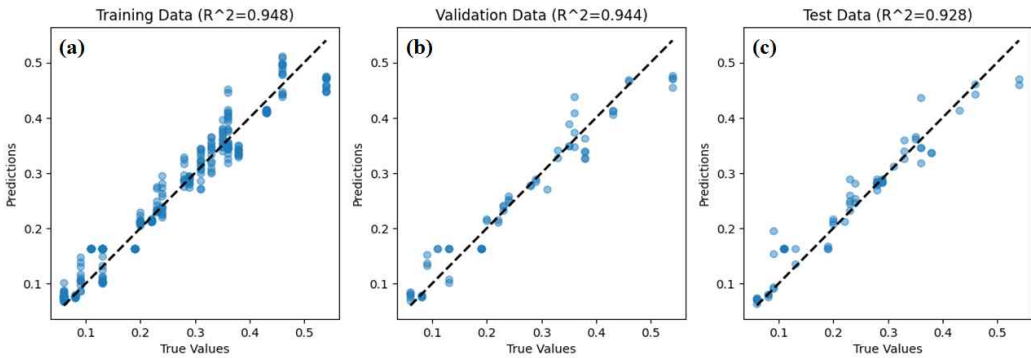


Fig. 3.20 Predicted and measured graph of xception model to interlock; (a) Training (b) Validation (c) Test



### (3) Bottom thickness 인자 예측 결과

다음은 Bottom thickness의 예측 결과를 Fig. 3.21, Fig 3.22로 나타내었다. 손실(Loss)은 10 Epoch, 평균제곱오차(MAE)는 70 Epoch에서 0으로 수렴하였으며, 결정계수( $R^2$ )가 기준 0.8 이상인 Training : 0.974, Validation 0.860, Test : 0.892로 만족하였다.

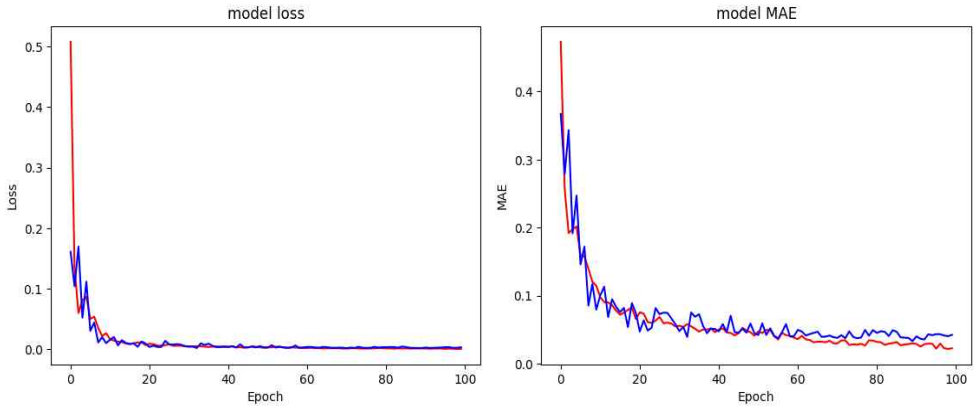


Fig. 3.21 Loss, MAE curve of xception model to bottom thickness; (red) Train, (blue) Validation

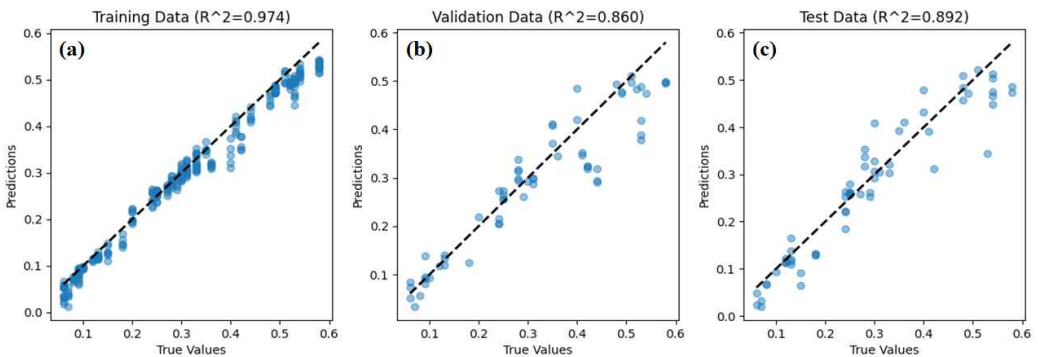


Fig. 3.22 Predicted and measured graph of xception model to bottom thickness; (a) Training (b) Validation (c) Test

## 제4장 . 결론

본 연구는 CFRP-Steel SPR 접합부의 공정변수에 따른 접합부 품질(Head height, Interlock, Bottom thickness), CFRP 손상, 인장 전단 및 피로 강도 평가를 통해 접합부의 신뢰성을 확보하고자 하였다. 아울러 딥러닝 모델 중 CNN을 이용하여 공정 조건에 따른 품질 인자를 예측하였으며, 결론은 다음과 같다.

1. SPR 단면 품질평가 기준에 의거하여 단면을 고찰한 결과, CFRP-SPRC440 접합부는 리벳 생크 길이 4 mm, 가압력 27 kN 조건, CFRP-SPFC590 접합부는 리벳 생크길이 4 mm, 가압력 29 kN 조건에서 단면이 기준에 만족하였다. 또한 접합부의 두께가 2.5 mm일 때 SPR 공정 시 리벳 생크 길이 4.5 mm는 Buckling 현상 발생, 가압력 32 kN은 리벳 헤드 삽입 현상이 발생하였으므로 부적합하다.
2. 가압력이 증가함에 따라 CFRP 손상은 증가하였으며, 두께는 감소하였다. SPR 과정에서 발생한 CFRP 손상은 Fiber fractured와 균열이 나타났으며, 균열의 전파 방향은 가압력과 동일한 방향으로 나타났다.
3. CFRP-SPRC440 접합부의 경우 리벳 생크 길이 4 mm, 가압력 27 kN에서 2kN, CFRP-SPFC590 접합부의 경우 리벳 생크 길이 4 mm, 가압력 29 kN에서 1.94 kN으로 최대 인장 하중이 나타났으며, SPR 공정에 의한 CFRP 손상은 접합부의 강도 저하를 발생시켰다. 피로 시험 시 Case. 1의 경우 피로한도 60%, Case. 2의 경우 피로한도 50%까지 만족하였다.
4. 이종소재 CFRP-Steel SPR 접합부의 414개 데이터를 기반으로 SPR 접합부의 품질 인자(Head height, Interlock, Bottom thickness)를 예측한 결과, Bottom thickness의 예측 정확도가 다소 감소하는 경향이 나타났으나 Head height 및 Interlock 인자는 Training과 Test의 결정계수( $R^2$ )가 최대 0.928, 0.948로 0.8 이상 만족하였으며 예측 가능성을 확인하였다.

## 참고문헌

1. 한범석, et al. "자동차 기술 동향과 경량화 기술." 한국주조공학회지 (주조) 42.2 (2022): 97-104.
2. Czerwinski, Frank. "Current trends in automotive lightweighting strategies and materials." *Materials* 14.21 (2021): 6631.
3. Ahmad, H., et al. "A review of carbon fiber materials in automotive industry." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 971. No. 3. IOP Publishing, 2020.
4. Kim, Y. and Bang, H. S., "Recent Joining Techniques of CFRP to Metal Using Welding Process." *Journal of Welding and Joining* 36.5 (2018): 27-38.
5. Katayama, Seiji, and Yousuke Kawahito. "Laser direct joining of metal and plastic." *Scripta materialia* 59.12 (2008): 1247-1250.
6. Katayama, Seiji, Yousuke Kawahito, and Masami Mizutani. "Latest progress in performance and understanding of laser welding." *Physics Procedia* 39 (2012): 8-16.
7. Jung, K. W., et al. "Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to zinc-coated steel." *Materials & Design* 47 (2013): 179-188.
8. Tan, Xianghu, et al. "Characteristics and formation mechanism of porosities in CFRP during laser joining of CFRP and steel." *Composites Part B: Engineering* 70 (2015): 35-43.
9. Tan, Xianghu, Jiguo Shan, and Jialie Ren. "Effects of Cr plating layer on shear strength and interface bonding characteristics of mild steel/CFRP joint by laser heating." *Acta Metall Sin* 49.6 (2013): 751-756.
10. Balle, Frank, Guntram Wagner, and Dietmar Eifler. "Ultrasonic metal welding of aluminium sheets to carbon fibre reinforced thermoplastic composites." *Advanced Engineering Materials* 11.1-2 (2009): 35-39.
11. Balle, Frank, et al. "Damage monitoring of ultrasonically welded aluminum/CFRP-joints by electrical resistance measurements." *Procedia Engineering* 10 (2011): 433-438.
12. Lionetto, Francesca, Frank Balle, and Alfonso Maffezzoli. "Hybrid ultrasonic spot welding of aluminum to carbon fiber reinforced epoxy composites." *Journal of Materials Processing Technology* 247 (2017):

- 289–295.
13. Lionetto, Francesca, et al. "Ultrasonic spot welding of carbon fiber reinforced epoxy composites to aluminum: mechanical and electrochemical characterization." *Composites Part B: Engineering* 144 (2018): 134–142.
  14. Wirth, F. X., et al. "Analysis of the bonding behavior and joining mechanism during friction press joining of aluminum alloys with thermoplastics." *Procedia Cirp* 18 (2014): 215–220.
  15. Liu, F. C., J. Liao, and K. Nakata. "Joining of metal to plastic using friction lap welding." *Materials & Design (1980–2015)* 54 (2014): 236–244.
  16. Nagatsuka, Kimiaki, et al. "Direct joining of carbon-fiber-reinforced plastic to an aluminum alloy using friction lap joining." *Composites Part B: Engineering* 73 (2015): 82–88.
  17. Kah, Paul, et al. "TECHNIQUES FOR JOINING DISSIMILAR MATERIALS: METALS AND POLYMERS." *Reviews on Advanced Materials Science* 36.2 (2014).
  18. Rakesh, Pawan Kumar, and J. Paulo Davim, eds. *Joining processes for dissimilar and advanced materials*. Woodhead Publishing, 2021.
  19. Davim, J. Paulo, ed. *Welding technology*. Springer International Publishing, 2021.
  20. Davim, J. Paulo, and Kapil Gupta, eds. *Advanced Welding and Deforming*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2021.
  21. Barnes, T. A., and I. R. Pashby. "Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles: Part solid and liquid phase welding." *Journal of materials processing technology* 99.1–3 (2000): 62–71.
  22. Geier, Norbert, J. Paulo Davim, and Tibor Szalay. "Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 125 (2019): 105552.
  23. Davim, J. Paulo, J. Campos Rubio, and A. M. Abrao. "A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates." *Composites Science and Technology* 67.9 (2007): 1939–1945.
  24. Park, J. H., Kang, Y. S., Lee, M. G. and Jeon, Y. H., "An Experimental Study on the Joining of Carbon Fiber Reinforced Plastics and Steel Plate

- Using Self-Piercing Rivets,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 27, No. 3, pp. 211–217, 2018.
25. Porcaro, R., et al. "Self-piercing riveting process: An experimental and numerical investigation." Journal of Materials Processing Technology 171.1 (2006): 10–20.
  26. Abe, Y., T. Kato, and K. Mori. "Self-piercing riveting of high tensile strength steel and aluminium alloy sheets using conventional rivet and die." Journal of materials processing technology 209.8 (2009): 3914–3922.
  27. Jeon, N. K., Rhee, S. H., and Kam, D. H., “Parametric Study of Self-Piercing Riveting for CFRP–Aluminum Dissimilar Joint,” Journal of Welding and Joining, Vol.36, No. 3, pp. 8–17, 2018.
  28. Orthwein, William C. Machine component design. St. Paul: West Publishing Company, 1990.
  29. Qian, Danna, et al. "Fiber-reinforced polymer composite materials with high specific strength and excellent solid particle erosion resistance." Wear 268.3–4 (2010): 637–642.
  30. Zhang, Xinrui, Xianqiang Pei, and Qihua Wang. "Friction and wear properties of combined surface modified carbon fabric reinforced phenolic composites." European Polymer Journal 44.8 (2008): 2551–2557.
  31. Lee, Hun Su, et al. "Design of microwave plasma and enhanced mechanical properties of thermoplastic composites reinforced with microwave plasma-treated carbon fiber fabric." Composites Part B: Engineering 60 (2014): 621–626.
  32. Di Franco, Giuseppe, Livan Fratini, and Antonino Pasta. "Influence of the distance between rivets in self-piercing riveting bonded joints made of carbon fiber panels and AA2024 blanks." Materials & Design 35 (2012): 342–349.
  33. Chollet, François. "Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions." Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2017.