



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](#)

工學碩士 學位論文

입자를 첨가한 계단형 패치법으로 보수된  
유리섬유강화복합재의 기계적 특성에 관한 연구

A Study on the Mechanical Properties of Glass Fiber  
Reinforced Composites repaired by stepped Patch Method  
with particles



2017年 11月

韓國海洋大學校 大學院

材 料 工 學 科

鄭 敬 錫

本 論文을 鄭敬錫의 工學碩士 學位  
論文으로 認准함.



委員長 文慶萬 (인)

委員 沈道植 (인)

委員 金允海 (인)

2017年 11月

韓國海洋大學校 大學院

# 목 차

List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv
Abstract .....	vi
1. 서 론 .....	1
2. 재료 및 실험 방법 .....	4
2.1 복합재료 수리 방법 .....	4
2.1.1 기계적 체결법 .....	4
2.1.2 수지 주입법 .....	5
2.1.3 외부 패치법 .....	6
2.1.4 스카프 패치법 .....	7
2.1.5 계단형 패치법 .....	8
2.2 실험 재료 .....	9
2.2.1 유리섬유 .....	9
2.2.2 분쇄 탄소섬유 .....	9
2.2.3 할로이사이트 나노튜브 .....	10
2.3 시편 제작 .....	13
2.3.1 입자 분산 .....	13
2.3.2 입자첨가 보수 시편 .....	15
2.3.3 접착 강도 시편 .....	19
2.4 실험 방법 .....	21
2.4.1 기계적 특성 실험 .....	21
2.4.2 환경 특성 실험 .....	24
2.4.3 접착표면 및 적층면 분석 .....	26

3. 실험 결과 및 고찰 .....	28
3.1 기계적 특성 실험 결과 .....	28
3.2 환경 특성 실험 결과 .....	34
3.3 접착표면 및 적층면 분석 결과 .....	41
4. 결론 .....	52
감사의 글 .....	54
참고문헌 .....	55



## List of Tables

<b>Table 1</b> Property of glass fiber .....	11
<b>Table 2</b> Property of resin .....	11
<b>Table 3</b> Property of milled carbon .....	12
<b>Table 4</b> Property of halloysite nanotube .....	12
<b>Table 5</b> Code of specimens .....	18
<b>Table 6</b> Recovery rate of milled carbon specimens .....	30
<b>Table 7</b> Recovery rate of halloysite nanotube .....	33
<b>Table 8</b> Rate of diminution of milled carbon specimens .....	38
<b>Table 9</b> Rate of diminution of halloysite nanotube specimens .....	40



## List of Figures

Fig. 1 Schematic of mechanical fastening method .....	4
Fig. 2 Schematic of resin injection method .....	5
Fig. 3 Schematic of external patch repair method .....	6
Fig. 4 Schematic of scarf patch repair method .....	7
Fig. 5 Schematic of step patch repair method .....	8
Fig. 6 Particle dispersion procedure .....	14
Fig. 7 Making process of repair specimen .....	17
Fig. 8 Schematic of repair specimen .....	18
Fig. 9 Making process of bonding test specimen .....	20
Fig. 10 Images of method for each test .....	23
Fig. 11 Moisture absorption test .....	25
Fig. 12 Microscope apparatus .....	26
Fig. 13 SEM apparatus .....	27
Fig. 14 Comparison of mechanical property of milled carbon .....	29
Fig. 15 Comparison of mechanical property of halloysite nanotube ..	32
Fig. 16 Moisture absorption behavior of repairing specimens .....	35
Fig. 17 Degradation of mechanical properties of milled carbon .....	37
Fig. 18 Degradation of mechanical properties of halloysite nanotube	39
Fig. 19 Image taken with a Imaging microscope .....	42
Fig. 20 Image taken with a Optical microscope .....	44
Fig. 21 Surface taken with a scanning electron microscope .....	47
Fig. 22 Surface taken after the moisture absorption test .....	50

# 입자가 첨가된 계단형 패치법으로 보수 한 유리섬유강화 복합재료의 기계적 성질에 관한 연구

정경석

조선기자재공학부  
한국해양대학교 대학원

## 초록

고분자 복합 재료인 섬유 강화 복합 재료는 금속 재료에 비하여 비중이 낮으며 비강도, 비강성의 특징을 갖는다. 내식성과 성형성이 우수하여 각종 산업에서 금속 재료를 대체하는 고기능 소재로 사용되고 있다. 그러나 약한 인성 및 충격에 대한 취약성으로 인해, 복합 재료의 손상에 대한 지속적인 보수가 요구된다. 현재 복합 재료의 수리에 관한 대부분의 연구는 항공 산업에 초점을 맞춰 탄소 섬유 및 샌드위치 구조의 수리에 관한 것이다. 추가적으로 복합 재료의 기계적 특성을 향상시키기 위해 다양한 입자의 첨가에 대한 연구가 수행되고 있다.

본 연구에서는 할로이 사이트 나노 튜브 및 밀드 카본의 함량을 단계적으로 변화시켜 기지재에 첨가 하였다. 수리 된 시편을 사용하여 기계 및 환경 테스트를 수행했습니다. 유지 보수 시장에서 입자가 첨가된 수리 방법의 적용 가능성에 대해 기존의 비입자 첨가 시험편과 비교하여 평가하였다.

기계적 시험중 인장 강도에서 밀드 카본과 할로이 사이트 나노 튜브의 첨가량을 1 wt %까지 증가시켰을 경우, 비입자 첨가 시험편에 비해 회복율이 향상되었음을 확인 하였다. 굽힘 강도에서는 밀드 카본의 5 wt % 첨가를 제외하고 비입자 첨가 시편의 굽힘 강도보다 높았다. 반면에, 접착강도는 비입자 첨가 시험편의 접착 강도보다 낮다. 환경 시험에서, 밀드 카본의 첨가는 비입자 시편보다 낮은 흡습율을 보였다. 수분 흡수에 의한 기계적 물성의 열화에서는 두 입자 모두 물성이 저하되는 경향을 보였다.

본 연구를 통해 입자가 첨가 된 수리 된 시편이 특정 함량에서 기계적 특성을 향상 시킨다는 것을 증명하였다. 그러나 수리 할 모재 부분과 패치 사이

의 계면 결합을 개선하고 입자를 고르게 분산시키기 위해서는 더 많은 연구가 필요하다. 이러한 문제를 해결한다면 섬유 강화 복합 재료를 수리 할 때 기계적 물성의 회복률을 향상시킬 수 있다. 또한 섬유 강화 복합 재료의 수명은 다양한 산업 분야에서 연장 될 것이다.



# A Study on the Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Composites repaired by stepped Patch Method with particles.

Jung, Kyung Seok

Department of Marine Equipment Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

Fiber-reinforced composites, which are polymer matrix composites, have a low specific gravity compared to metal materials, and have high nodal strength and non-rigidity. They are excellent in corrosion resistance and moldability, and are used as high-functional materials to replace metal materials in various industries. However, due to weak toughness and vulnerability to impact, continuous maintenance of the damage of the composite material is required. Currently, most of the research on the repair of composite materials is about repairing carbon fiber and sandwich structure focused on aviation industry. In addition, studies on the addition of various particles have been carried out in order to enhance the mechanical properties of composite materials.

In this study, the contents of Halloysite Nanotubes and Milled Carbon were changed in a stepwise patch and added to the matrix. Mechanical and environmental tests were carried out using the repaired specimens. The applicability of the repair method with particle addition in the maintenance market was evaluated in comparison with the existing non - particle addition specimens.

In the mechanical test, it was confirmed that the addition of up to 1

wt% of Milled Carbon and the Halloysite Nanotube in the tensile strength improved the recovery rate compared to the non - particle addition specimen. The bending strength of the specimens was higher than that of the non - particle addition specimens except for 5 wt% addition of Milled Carbon. On the other hand, bonding strength was lower than that of non-particle addition specimen. In the environmental test, the addition of Milled Carbon showed lower moisture absorptivity than that of non - particle specimens. In the deterioration of mechanical properties due to water absorption, both particles showed similar tendency to decrease in physical properties.

The results of this experiment proved that the repaired specimens with added particles improved the mechanical properties at certain contents. However, further studies are needed to improve the interfacial bonding between the repair specimen and the patch and to distribute the particles evenly. Solving these problems can improve the recovery rate of mechanical properties when repairing fiber-reinforced composites. and the life span of fiber-reinforced composites will be extended in various industries.

**KEY WORDS:** Composite 복합재료, Glass Fiber 유리 섬유, Stepped Patch Method 계단형 패치법, Halloysite Nanotube 할로이사이트 나노튜브, Milled Carbon 분쇄 카본, Mechanical test 기계적 특성, Water absorption 수분 흡수

## 제 1 장 서 론

복합재료는 1960년대 이후로 개발이 본격화 되면서 항공·우주, 자동차, 해양 산업 등 다양한 산업분야에서 각광받고 있는 대표적인 신소재이다.<sup>1)2)</sup> 재료적인 의미로는 성질이 서로 다른 두 가지 이상의 물질이 거시적으로 혼합되어 보다 유용한 기능을 발현하는 재료라고 할 수 있다. 합금 재료의 경우 화학적으로 혼합하며 기존의 물질이 소멸되는 반면, 복합재료는 기계적 혼합을 통해 제작되고 기존의 물질이 유지됨으로써 각 재료가 갖는 기능의 장점을 살릴 수 있다. 이러한 복합재료는 기지재의 종류에 따라 금속기지복합재료, 세라믹기지복합재료, 고분자기지 복합재료로 나뉘어진다. 그중에서도 고분자기지 복합재료에 해당되는 섬유강화플라스틱은 금속재료에 비해 비중이 낮아 비강도, 비강성이 높으며 내식성과 성형성이 우수하여 다양한 산업에서 금속재료를 대체하는 고기능성 소재로서 그 사용량이 계속적으로 증가하고 있다.<sup>3)4)</sup> 또한 최근 세계적으로 환경에 대한 관심이 증가함에 따라 대기환경에 관한 보호정책이 강화되고 있으며 이에 따라 항공기, 선박, 자동차 등의 운송수단의 연비향상을 위한 경량화가 요구되어지는 만큼 경량성의 장점을 갖는 복합재료의 사용은 필수적이라 판단된다.

섬유강화복합재는 강화재인 섬유와 기지재인 수지로 구성된다. 강화재로 사용되는 섬유는 유리 섬유, 탄소 섬유, 현무암 섬유, 케블라 섬유 등이 있으며, 기지재인 수지의 경우 열경화성, 열가소성 수지가 있다. 섬유강화복합재는 수지가 내부에 구성된 각각의 섬유들로부터 복합재에 가해진 하중을 분산시키고 마모나 충격으로부터 섬유의 파손을 방지하면서 강화재인 섬유

1) 신석진, 2016, pp.1~3

2) 김정현, 2003, pp.429~438

3) 김부안, 2017, pp.13~19

4) ZHOU, S.F, 2012, pp.2323-2327

는 자체가 갖는 높은 강성을 유지하는 시스템이다.

산업용 섬유 시장에서 가장 많이 수요되는 섬유로는 유리섬유와 탄소섬유가 대표적이다. 탄소섬유는 다른 섬유에 비해 높은 기계적 물성을 가져 고성능 복합재를 제작할 때 가장 우선시 되는 재료이다. 하지만 한정된 생산량에 비해 수요가 많아 매우 고가라는 단점을 갖기 때문에 항공·우주 산업과 자동차 산업 일부에서 사용된다.<sup>5)6)</sup> 반면 유리섬유는 가격에 비해 성능이 우수하며 공급 역시 원활하여 여러 산업분야에서 사용된다.<sup>7)</sup>

그 중 해양산업에선 경량화를 위해 유리섬유강화복합재료를 사용하여 대형 선박의 유체 이송 파이프 및 내부 구조물을 대체하고 있으며 소형 선박의 선체를 제작하고 있다. 또한 국내 1인당 국민 소득이 증가하고 여가시간이 증가함에 따라 해양레저에 대한 관심이 크게 증가하였고 이에 따라 레저 선박의 수요 역시 증대되고 있는 추세이며, 2016년 말 기준 20년 이상 된 노후 어선만 1만2000여척에 달해 유리섬유강화복합재의 활용은 지속될 것으로 판단된다.<sup>8)</sup> 하지만 국내의 복합재 기술로는 수요를 충족시키기에 무리가 있으며, 해양이라는 예측할 수 없는 환경에 노출되기 때문에 초기의 기대 수명을 유지할 수 없다.<sup>9)</sup> 따라서 손상된 복합재료 구조물과 노후화된 선박의 수명 연장을 위해 복합재 보수 기술에 관한 연구가 필수적이다.

현재 복합재 보수 연구는 항공산업 위주의 탄소섬유와 샌드위치 구조 수리에 관한 것이 대부분이다.<sup>10)</sup> 또한 복합재료의 물성을 강화하기 위해 다양한 입자 첨가에 관한 연구가 진행되고 있지만, 복합재 보수방법에 적용한 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 입자가 첨가되어진 계단형 패치법으로 보수되어진 유리섬유강화복합재를 제작하고 입자 첨가가 복합재 보수시 기계적 물성에

5) Anwar, M. 2014. pp.574~577

6) Zhou, Z. 2011. pp.396~397

7) 고희영, 2011, pp.1~3

8) 조규림, 2013, pp.1~11

9) Shen, C.H, 1997, pp.2~16

10) 김성훈, 2016, pp.1~9

미치는 영향을 확인하고자 한다.

보수할 섬유강화복합재료 시편은 유리섬유 프리프레그를 계단형식으로 적층하여 진공성형법으로 제작하였다. 보수에 사용될 패치는 기지재에 할로이사이트 나노튜브(HNT, Halloysite Nano Tube)와 분쇄 카본(MC, Milled Carbon)의 함량을 각각 0.5~5.0wt% 까지 다르게 첨가한 후 유리섬유에 함침시켜 Wet prepreg 형태로 제작하였다. 이후 보수할 시편에 계단형식으로 패치를 적층하여 진공성형법을 통해 보수하였다.

HNT/MC이 첨가되어진 계단형 패치법으로 보수된 유리섬유강화복합재료의 기계적 물성을 분석하기 위해서 인장시험(tensile test), 굽힘 시험(bending test), 접착 시험(bonding test)을 실시하였으며 기존의 단순 계단형 패치법으로 보수된 유리섬유 강화 복합재와 비교하여 입자 첨가가 미치는 영향을 분석하였다. 이후 열화 인자 중 수분이 입자가 첨가되어 보수된 복합재에 미치는 영향을 분석하기 위해 항온수조에서 흡습시험을 진행하였다. 이러한 분석을 통해 유리 섬유 강화 복합재 보수 시장에서 입자 첨가 보수법의 적용 가능성 및 타당성을 검증해보고자 한다.

## 제 2 장 재료 및 실험 방법

### 2.1 복합재료 수리 방법

복합재료 보수의 목적은 초기 설계에서 고려되었던 하중을 견딜 수 있는 강도까지 최대한 회복시키는 것이다. 복합재료의 보수방법은 기계적 체결, 수지 주입, 외부 패치법, 스카프 패치법, 계단형 패치법이 대표적이다. 각 보수방법마다 가공 공정, 숙련도 및 강도 회복률에서 차이가 난다.

#### 2.1.1 기계적 체결법

기계적 체결법은 손상된 부위 양면에 같은 종류의 금속재료나 복합재료의 판재를 볼트와 같은 기계적인 체결로 수리하는 방법이다. 이 방법을 위해 손상 주위에 체결을 위한 원공을 가공해야하며, 이 원공을 중심으로 응력집중이 발생하여 균열 또는 층간분리 등 결함이 생길 수 있다.<sup>11)</sup>

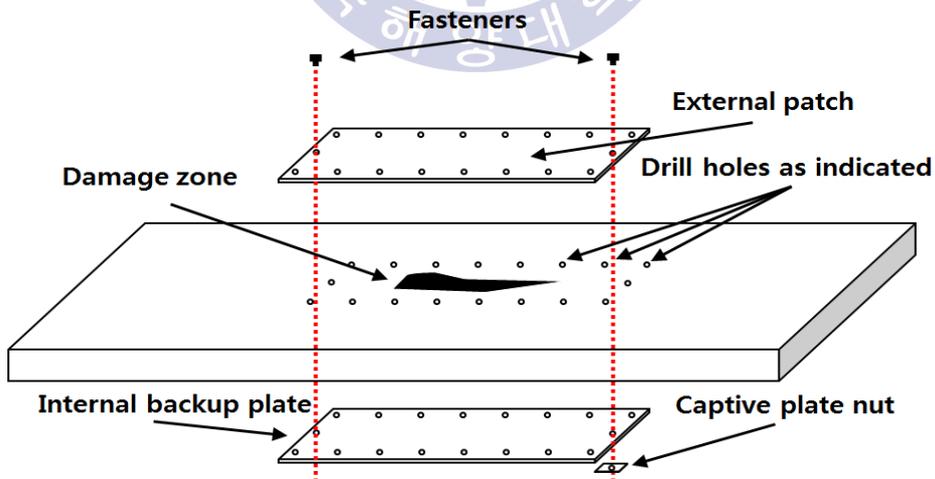


Fig. 1 Schematic of mechanical fastening method

11) 백설, 2015, pp.393~394

## 2.1.2 수지 주입법

수지 주입법은 복합재료 내에 층간부리 또는 디본딩이 발생할 경우 임의로 작은 구멍을 가공하여 주사기를 이용하여 수지를 주입하는 방법이다. 수리에 소요되는 비용과 시간이 적다는 장점이 있지만 표면처리가 불가능하고 강도 회복이 크지 않다는 단점이 있어 임시적 수리할 경우에만 사용된다. 수지에는 점도가 낮은 열경화성 수지를 주로 사용하며 점도를 낮추기 위해 주로 고온 환경에서 수리한다.<sup>12)</sup>

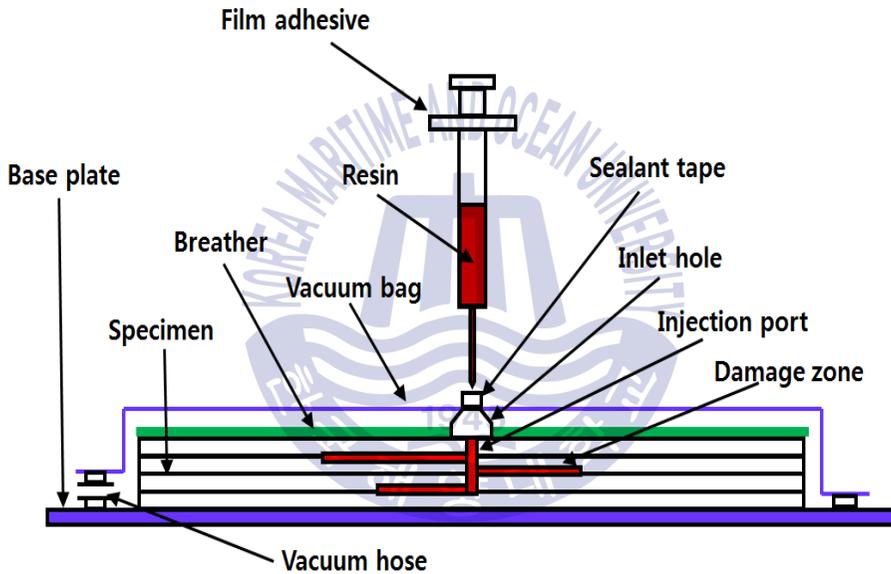
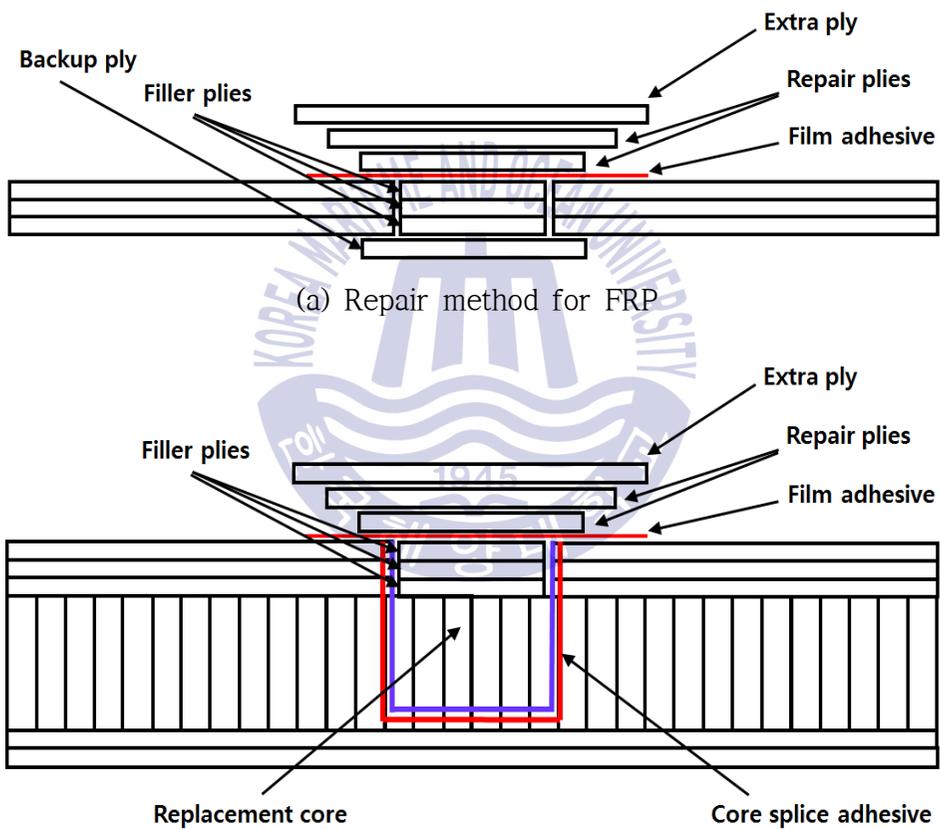


Fig. 2 Schematic of resin injection repair

12) 유재승, 2016, pp.9~10

### 2.1.3 외부 패치법

외부 패치법은 손상된 부분에 패치를 이용하여 보수하고 보수층 이외에 외부에도 추가적으로 패치를 적층하여 보수하는 방법이다. 작업이 단순하여 빠른 보수가 가능하며 별도의 기술을 요구하지 않다는 장점이 있지만 외부 패치로 인해 두께가 증가함으로써 무게가 증가되고 외부패치에서 응력이 집중된다는 단점이 있다.<sup>13)14)</sup>



(b) Repair method for sandwich composite material

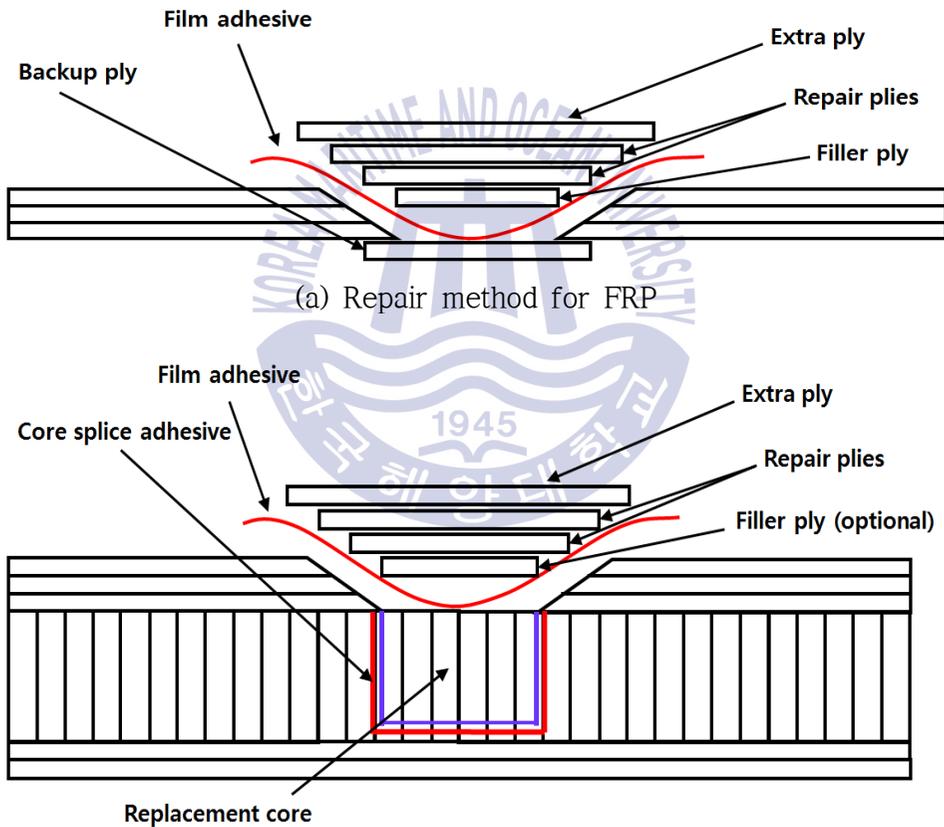
Fig. 3 Schematic of external patch repair method

13) 이대길, 2003, pp.74~77

14) Yala, A.A, 2009, pp.200~205

### 2.1.4 스카프 패치법

스카프 패치법은 손상된 부분을 제거하고 주변부위를 임의의 경사로 가공하여 패치를 이용하여 수리하는 방법이다. 무게 증가도 없으며, 수리된 부분에 응력집중이 거의 발생되지 않는다는 장점이 있다.<sup>15)</sup> 하지만 수리할 부분을 가공하기 위해 작업자의 높은 숙련도가 필요하며 가공에 시간이 많이 소요된다는 단점이 있다. 또한 패치보수법에 비해 넓은 면적에 대해 가공하기 때문에 좁은 부위에 적용이 어렵다.<sup>16)</sup>



(b) Repair method for sandwich composite material

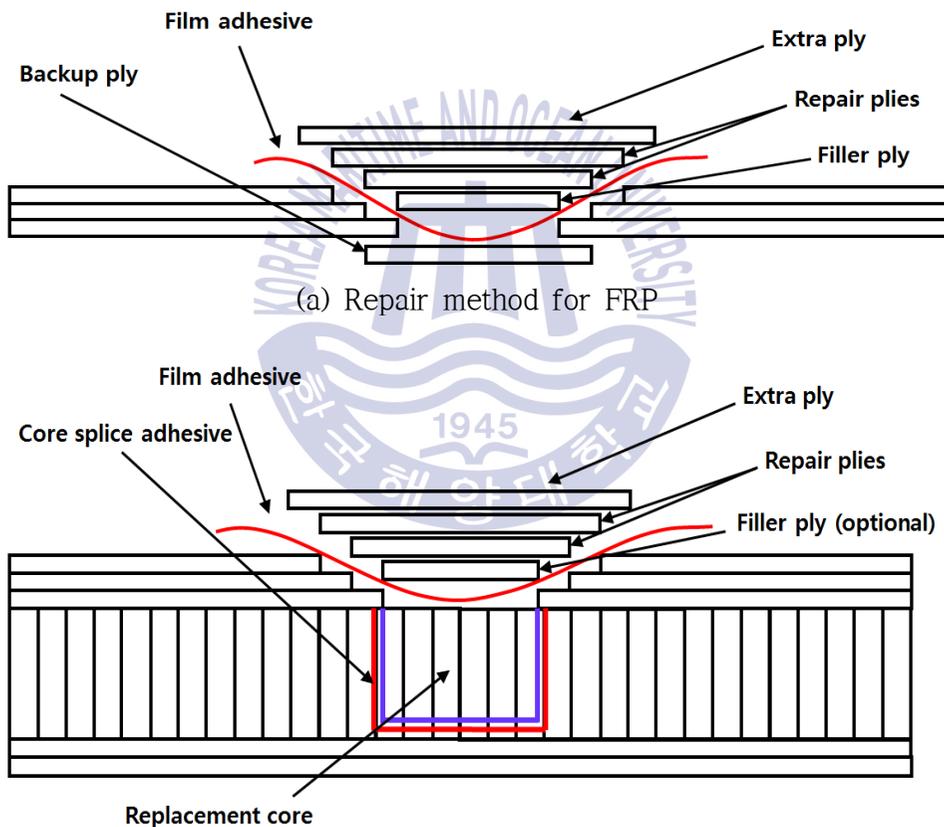
Fig. 4 Schematic of scarf patch repair method

15) 김정식, 2009, pp.110~114

16) 김윤해, 2011, pp.9~15

## 2.1.5 계단형 패치법

계단형 패치법은 손상부위와 계단형태로 가공한 후 층별 길이에 맞춰 패치를 접착하여 수리하는 방법이다. 무게 증가가 없고 적층된 층이 일정한 간격을 두고 완벽하게 일치되어 보수되기 때문에 연속성이 높고 강도회복이 가장 우수하다는 장점이 있지만 보수될 각층과 패치를 정확한 길이로 가공해야하기 때문에 스카프 패치법보다 정밀한 가공기술이 필요하다는 단점이 있다.<sup>17)</sup>



(b) Repair method for sandwich composite material

Fig. 5 Schematic of step patch repair method

17) Boumaaza, M, 2017, pp.575-584

## 2.2 실험재료

### 2.2.1 유리섬유 (Glass fiber)

백금로에 유리를 용융시켜 작은 구멍을 통해 방사하여 장섬유 상태로 만든 것으로 유리 자체가 갖는 특성인 내열성, 내구성, 흡음성, 전기 절연성을 이용하여 단열재, 공기 여과재, 전기 절연제, 흡음재 등으로 사용되고 있다.<sup>18)</sup> 또한 산업용 섬유 중 저렴한 가격으로 다양한 산업에서 섬유 강화 복합재료에 가장 많이 사용되는 섬유이다. 유리 섬유의 인장 강도, 굴곡성, 내마모성은 가늘수록 우수하나 비용적인 장점이 사라지기 때문에 11~13 $\mu\text{m}$ 의 지름이 많다. 본 연구에서 사용된 유리섬유는 국내의 한국 신소재에서 판매하고 있는 평직 유리섬유/유리섬유 프리프레그를 사용하였고 물성은 Table 1에 나타내었다. 입자의 고른 분산을 위하여 점도가 낮은 국도화학의 열경화성 수지인 KFR-120V를 사용하였고 강화제는 KFH-141을 사용하였다. 수지와 경화제의 배합 비율은 100:30으로 사용하였으며, 에폭시와 경화제의 물성은 Table 2에 나타내었다.

### 2.2.2 밀드 카본 (Milled Carbon)

밀드 카본은 탄소섬유강화복합재료에 강화제로 사용되는 탄소섬유를 분쇄하여 만든 파우더 형식의 입자를 말하며, 사용용도에 따라 60~120 $\mu\text{m}$ 의 크기를 갖는다. 일반적으로 수지, 고무, 카본 등의 첨가재로 사용되며 열가소성 수지와 함께 압출·사출 공정에 사용이 가능하다.<sup>19)</sup> 가격적인 부분에서 일반적으로 섬유강화복합재료의 기계적 물성을 향상시키기 위해 사용되는 다중벽 탄소나노튜브에 비해 1/75~1/100 수준으로 매우 저렴하다. 본 연구에서는 미량은 입자 첨가가 기계적 물성을 향상시킨다는 연구결과에 따라 복합재 보수시 밀드 카본이 기계적 물성 회복률에 미치는 영향과 밀드카본의 적정 첨가량을 확인하였다. 실험에 사용된 밀드 카본의 물성은 Table 3

18) 조병완, 1994, pp.101~109

19) 이진우, 2015, pp.43~45

에 나타내었다.

### 2.2.3 할로이사이트 나노튜브 (Halloysite Nanotube)

할로이사이트는 일반적으로 산업적 용도로 카울린 광물에 이용되어 왔으나, 최근에는 천연 할로이사이트 튜브의 분리, 정제 기술 개발이 성공하면서 할로이사이트만이 갖는 독특한 튜브형의 결정형을 이용하는 연구가 증가함에 따라 이종 합금의 부식 방지, 약물 및 항균제의 제한된 전달과 같은 다양한 분야에서 활용되고 있다.<sup>20)</sup> 또한 할로이사이트 나노튜브는 복합재료의 내열성 및 내충격성을 향상시킬 수 있으며, 마모율을 감소시킨다.<sup>21)</sup> 가격적인 부분에서 밀드 카본과 동일한 가격대를 형성하고 있어 탄소나노튜브의 대체재로 각광받고 있다. 이전 연구결과에 따르면 할로이사이트 나노튜브가 고분자에 골격 구조를 형성하는 핵제이기 때문에 플라스틱에 일정량을 첨가시 인장강도, 내충격성, 난연성을 향상시킬 수 있으며 제조 공정에서 향상된 양산 시간의 이점을 제공하는 반면 할로이사이트 나노튜브의 함량이 일정 수준을 넘어가게 되면 오히려 순수 복합재보다 강도가 낮아졌다.<sup>22)</sup> 또한 700도의 열처리가 가해질 경우, 입자의 외곽에서 탈수가 시작되면서 섬유강화복합재를 제조시 수지와의 결합력이 상승하였다. 본 연구에서는 할로이사이트 나노튜브가 유리섬유강화 복합재를 보수시 기계적 물성 회복률에 미치는 영향과 할로이사이트 나노튜브의 적정 첨가량을 확인하였다. 사용된 할로이사이트 나노튜브의 물성은 Table 4 에 나타내었다.

---

20) Wu, W, 2013, pp.443~452

21) 김윤해, 2014, pp.223~228

22) 박수정, 2016, pp.57~58

**Table 1** Property of glass fiber

Properties	Units	Values
Tensile strength	MPa	3400~3600
Density	g/cm <sup>2</sup>	2.5
Elastic modulus	GPa	75
Diameter	μm	4.70

**Table 2** Property of resin

Properties	Units	Value	
		KFR-120V	KFH-141
Equivalent weight	g/eq, EEW	170~180	-
Density	g/ml	1.12~1.17	0.8~1
Viscosity	cps	900~1050	5~50
Total amine value	mgKOH/g	-	500~700

**Table 3** Property of Milled Carbon

Properties	Units	Values
Filament diameter	$\mu\text{m}$	7.2
Carbon content	%	> 92
Sizing content	GPa	0.5~1
Mean fiber length	$\mu\text{m}$	100
Bulk density	g/ml	0.25

**Table 4** Property of Halloysite Nanotube

Properties	Units	Values
Molecular weight	g/mol	294.19
Specific gravity	-	2.53
Pore volume	ml/g	1.26~1.34

## 2.3 시편 제작

복합재료 보수방법 관한 연구는 항공산업 위주의 탄소섬유 및 샌드위치 구조에 관한 것이 대부분이며, 복합재료 제조시 CNT 및 나노입자 첨가를 통한 기계적 물성 향상에 관한 연구는 광범위하게 진행 되었으나, 보수 시 입자첨가가 기계적 물성에 미치는 영향에 관한 연구는 미비하였다. 본 연구에서는 밀드 카본과 할로이사이트 나노튜브 입자를 첨가한 계단형 패치법을 이용하여 유리섬유강화복합재를 보수하고 첨가된 입자가 미치는 영향을 확인하기 위해 아래와 같은 시편을 제작하였다.

### 2.3.1 입자 분산

첨가된 입자가 에폭시 수지 내에서 응집을 방지하기 위해 초음파 분산장치를 이용하였다. 초음파의 특징인 에너지가 증가하면서 유체의 분자간에 응집력이 파괴되고 수만개 이상의 미세한 물방울이 발생하는 공동 현상을 이용하기 위해서이다.<sup>23)</sup> 이 현상을 통해 고분자 수지인 유체가 폭발하면서 강력한 에너지를 방출함으로써 보이지 않는 곳까지 힘이 전달되어 첨가된 입자가 골고루 분산시킬 수 있다. 각 입자마다 0.5/1.0/2.0/3.0/4.0/5.0 wt%씩 첨가하였으며 특정 싸이클(5초 분산, 2초 정지)에서 500Watt/20kHz의 출력으로 30분간 분산시킨 후 경화제와 빠른 발열반응을 방지하기 위해 약 40°C가 되도록 상온에서 냉각시켰다. 초음파 분산장치를 이용한 작업 과정은 Fig. 6에 나타내었다.

---

23) 박재준, 2008, pp.1572-1578



(a) Adding particles to resin



(b) Stirrer setting



(c) Ultrasonic agitation



(d) Cooling at room temperature

**Fig. 6** Particle dispersion procedure

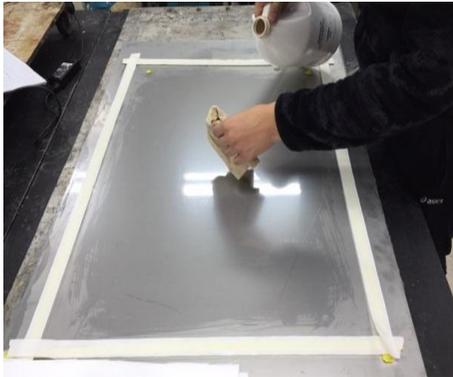
### 2.3.2 입자 첨가 보수 시편

계단형 패치법을 적용한 유리 섬유 강화 복합재료 보수 시편을 제작하기 위하여 우선적으로 유리섬유 프리프레그를 사용하여 임의로 손상되어진 모재 부분을 제작하였다. 패치와 모재와의 접촉각이 물성 회복률에 영향을 준다는 연구 결과를 통해 가장 회복률이 높게 나타나는 접촉각 5도에 근접하는 약 4.5도로 설정하였다.<sup>24)</sup> 또한 모든 입자 첨가 시편의 균일한 두께를 위해 진공성형을 거쳐 제작하였다. 계단형 패치부분은 최대한 적정량의 수지 함침을 위해 평직 유리섬유를 Wet prepreg 형식으로 제작하였다. Fig. 7 은 보수시편의 제작과정을 나타내고 있으며, Fig. 8 은 공정 모식도이다. Table 8 은 입자종류, 첨가량 및 손상 유무에 따른 코드를 나타내고 있다.



---

24) 조영대, 2011, pp.54~60



(a) Mold release treatment



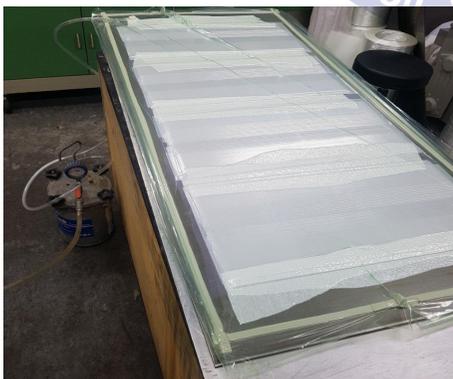
(b) Glass fiber prepreg lamination



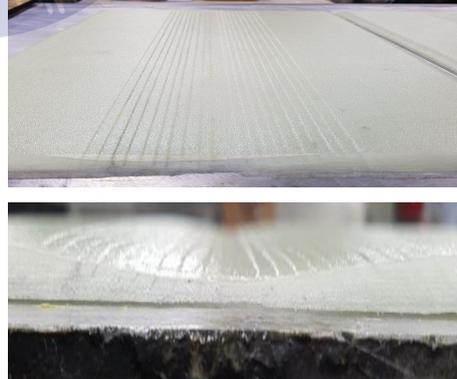
(c) Lamination of peel ply



(d) Breather lamination



(e) Vacuum molding



(f) Demolding and surface treatment



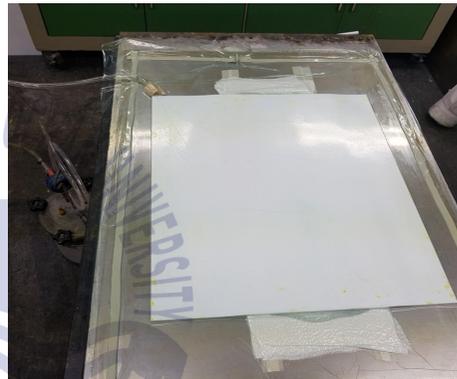
(g) Wet prepreg making



(h) Stacking stepwise



(i) Laminating auxiliary materials



(j) Vacuum molding

**Fig. 7** Making process of repair specimen

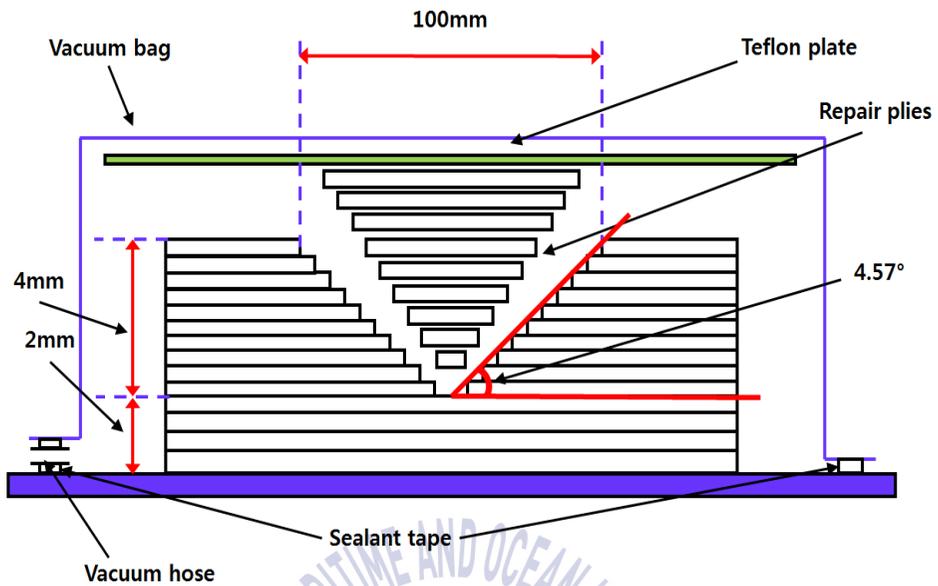


Fig. 8 Schematic of repair specimen

Table 5 Code of specimens

Name	Added particle	Content(wt%)	Damage(O/X)
U.S	X	0	X
N.P	X	0	O
MC0.5	Milled Carbon	0.5	O
MC1.0	Milled Carbon	1.0	O
MC2.0	Milled Carbon	2.0	O
MC3.0	Milled Carbon	3.0	O
MC4.0	Milled Carbon	4.0	O
MC5.0	Milled Carbon	5.0	O
HNT0.5	Halloysite Nano Tube	0.5	O
HNT1.0	Halloysite Nano Tube	1.0	O
HNT2.0	Halloysite Nano Tube	2.0	O
HNT3.0	Halloysite Nano Tube	3.0	O
HNT4.0	Halloysite Nano Tube	4.0	O
HNT5.0	Halloysite Nano Tube	5.0	O

### 2.3.3 접착 강도 시편

보수시편과 달리 입자 첨가의 접착강도를 확인하기 위해 보수시편과는 다른 제작과정을 통해 시편을 제작하였다. 보수시편과 동일한 조건을 위해 유리섬유 프리프레그를 이용하여 접착시킬 모재를 제작하였으며, 접착 부분 역시 보수시편과 동일하게 평직 유리섬유를 사용하여 Wet prepreg 형식으로 제작하여 모재의 겹침 부분 길이 만큼 절단 후 접착 시켰다. 모든 케이스의 균일한 두께를 위하여 진공성형을 통해 제작하였다. Fig. 9 는 접착강도 시편의 제작과정을 나타내고 있다.

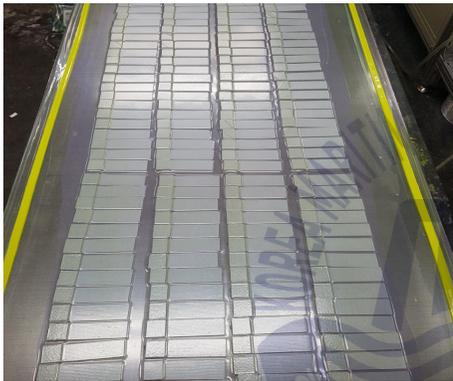




(a) Base material production



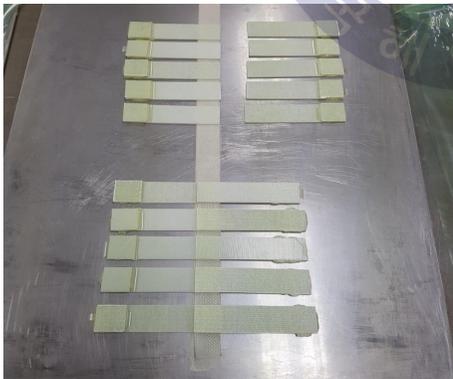
(b) Attach the tab



(c) Medium Vacuum Forming



(d) Wet prepreg making



(e) Specimen bonding



(f) Final vacuum forming

**Fig. 9** Making process of bonding test specimen

## 2.4 실험 방법

### 2.4.1 기계적 특성 실험

MC/HNT가 첨가된 계단형 패치로 보수한 유리섬유강화복합재료의 기계적 특성을 평가하기 위하여 만능재료시험기를 이용하여 인장, 굽힘, 접착강도 시험을 실시하였다. 사용장비는 Kyung-Do사의 Universal Test Machine KDMT-156(이하 UTM)이며 하중을 측정된 후 각각의 수식을 통해 물성을 계산하였다.

#### - 인장 시험 (Tensile Test)

입자가 첨가된 함유량에 따른 보수 시편의 인장강도(Tensile strength)를 분석하기 위해 인장 시험을 실시하였다. 시험은 상기 UTM에 인장 시험용 지그(Jig)를 장착하고, ASTM D 3039규격에 따라 시편별로 9개의 시편을 3mm/min의 시험 속도(Cross head speed)로 진행하였다. 인장 응력과 강도는 아래의 수식에 따라 계산하였다.

$$F^{tu} = P^{max} / A \quad (2-1)$$

$$\sigma_i = P_i / 9.8A \quad (2-2)$$

여기서,  $F^{tu}$  는 최대 인장 응력,  $P^{max}$  는 파괴 전 최대 하중,  $\sigma_{if}$  는 No.  $i$  데이터의 인장 응력,  $P_i$ 는 No.  $i$  데이터의 인장 하중,  $A$ 는 평균 단면적을 나타낸다.

#### - 굽힘 시험 (Bending test)

보수된 시편에서 입자의 함유에 따른 변형 저항이나 굽힘 강도(Bending strength)를 분석하기 위해 굽힘 시험을 실시하였다. 상기 UTM에 굽힘 시험용 지그(Jig)를 장착하고, ASTM D 790 규격에 따라 시편별로 9개의 시편을

1mm/min의 시험 속도(Cross head speed)로 진행하였다. 굽힘 강도는 아래의 수식에 따라 계산하였다.

$$\sigma_f = 3PL/2bd^2 \quad (2-3)$$

여기서,  $\sigma_f$  는 No.  $f$  데이터의 인장 응력  $P$ 는 최대 하중(N),  $L$ 은 지지대 간격(mm),  $b$  및  $d$ 는 샘플의 폭 및 두께(mm)이다.

- 접착 시험 (Bending test)

계단형 패치와 보수된 모재 사이의 계면결합력 및 접착강도(Bonding strength)를 분석하기 위해 접착 시험을 실시하였다. 시험은 상기 UTM에 인장 시험용 지그(Jig)를 장착하고, ASTM D 1002 규격에 따라 시편 별로 7개의 시편을 1.3mm/min의 시험 속도(Cross head speed)로 진행하였다.



(a) Tensile test



(b) Bending test



(c) Bonding test

Fig. 10 Images of method for each test

## 2.4.2 환경 특성 실험

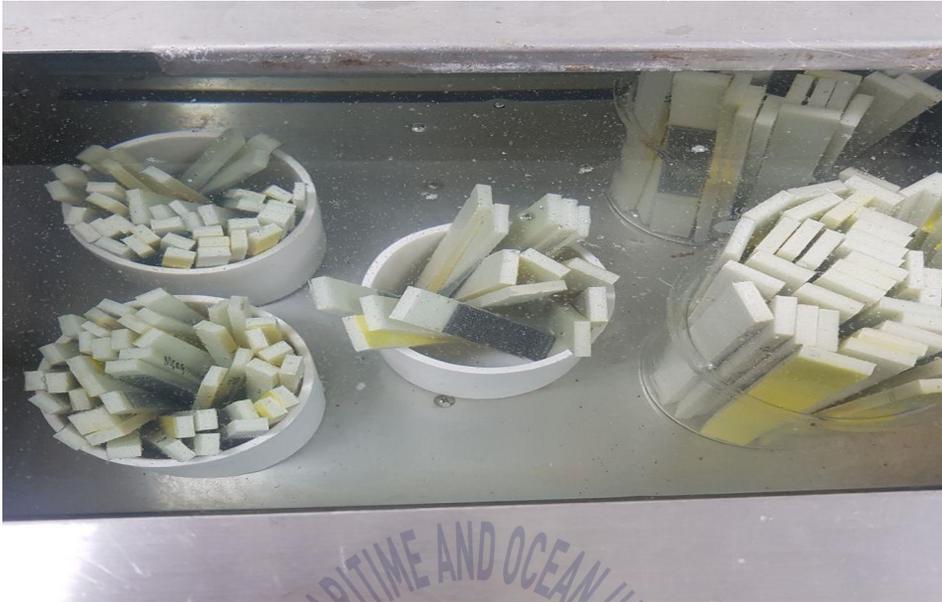
섬유강화 복합재료에서 수지는 물, 열, 방사선, 빛, 산소 등의 작용에 의해 화학구조 및 응집상태가 변화하여 열화된다.<sup>25)</sup> 환경인자에 오랜 시간 노출 시 기계적 특성, 질량 등이 변하게 된다. 이러한 인자들 중 수분/습기는 섬유강화복합재료에 심각한 변형을 일으키고 그 결과 기계적 물성이 현저히 감소시킨다.

본 연구에서는 입자를 첨가하여 보수된 유리섬유강화 복합재료의 수분 환경에 의한 흡습 거동을 분석하기 위해 흡습 시험을 진행하였다. 이를 위해 리페어 구간 전체를 포함한 길이로 절단하여 쿠폰 시편을 제작하였으며 일정한 초기 무게를 위해  $40\pm 1^\circ\text{C}$  오븐에서 건조 후 정밀저울을 이용하여 측정하였다. 무게 측정 후  $70\pm 1^\circ\text{C}$  항온수조에 75일간 침지 시켜 흡습율의 변화를 관찰하였다.

흡습에 의한 기계적 물성의 열화를 분석하기 위하여 입자가 첨가되어 보수되어진 유리섬유강화복합재료의 인장, 굽힘시편을 10개씩 침지시켰으며, 75일 후 모든 시편을 일괄적으로 꺼내어 건조 없이 인장, 굽힘 시험을 진행하였다.

---

25) 김도형, 2016, pp.139-145



(a) Moisture absorption procedure



(b) Moisture absorption test machine

**Fig. 11** Moisture absorption test

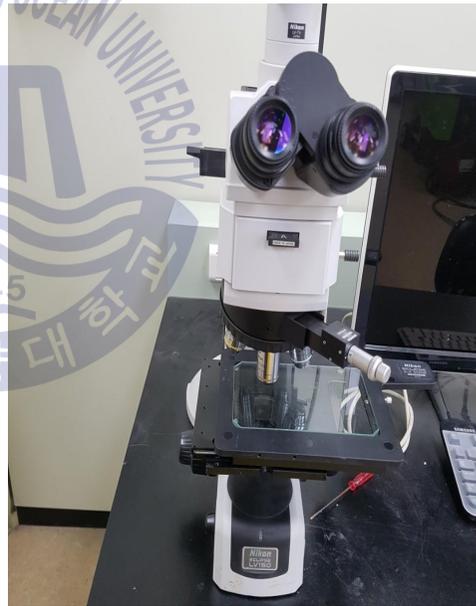
### 2.4.3 접착표면 및 적층면 분석

#### - 접착 표면 분석

보수에 사용된 계단형 패치부분이 입자첨가에 따라 접착 강도에 미치는 영향을 확인하기 위해 접착 강도 후 파단된 접착 표면 부분을 절단한 후 영상현미경과 광학현미경을 이용하여 관찰 하였다. 사용 장비는 Sometech사의 SV-55와 Nikon사의 ECLIPSE LV-150이며, 분석은 각 케이스별 5개씩 파단면을 채취하여 전체적인 파면 관찰에 영상현미경을 이용하였으며, 세부적인 파면 관찰에 광학현미경을 이용하였다. 분석에 사용 된 장비 사진을 Fig. 에 나타내었다.



(a) Imaging microscope



(b) Optical microscope

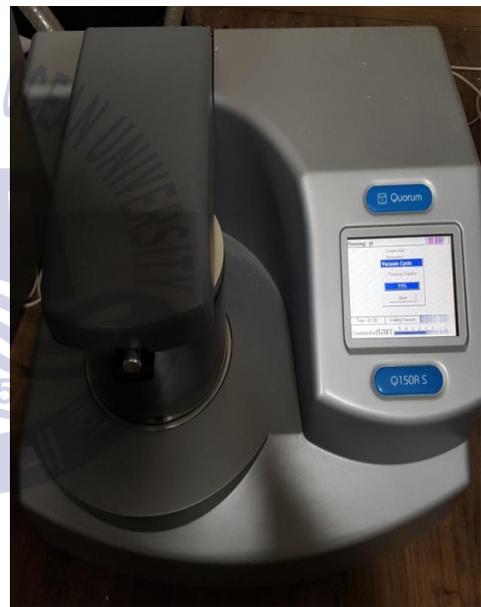
Fig. 12 Microscope apparatus

- 적층면 분석

입자첨가량이 증가함에 따른 계단형 패치 내에서 섬유와 수지간의 형태가 인장강도, 굽힘강도, 기계적 물성 열화에 미치는 영향을 확인하기 위하여 SEM(Scanning Electron Microscopy)을 이용하여 관찰 하였다. 사용 장비는 Tescan사의 MIRA-3 이며, 분석은 각 케이스별 보수되어진 시편의 정가운데 부분을 절단한 후, 백금 코팅 전처리작업을 거쳐 진행하였다. 분석에 사용된 장비 사진을 Fig. 에 나타내었다.



(a) Scanning electron microscopy



(b) Platinum coater

Fig. 13 SEM apparatus

## 제 3 장 실험 결과 및 고찰

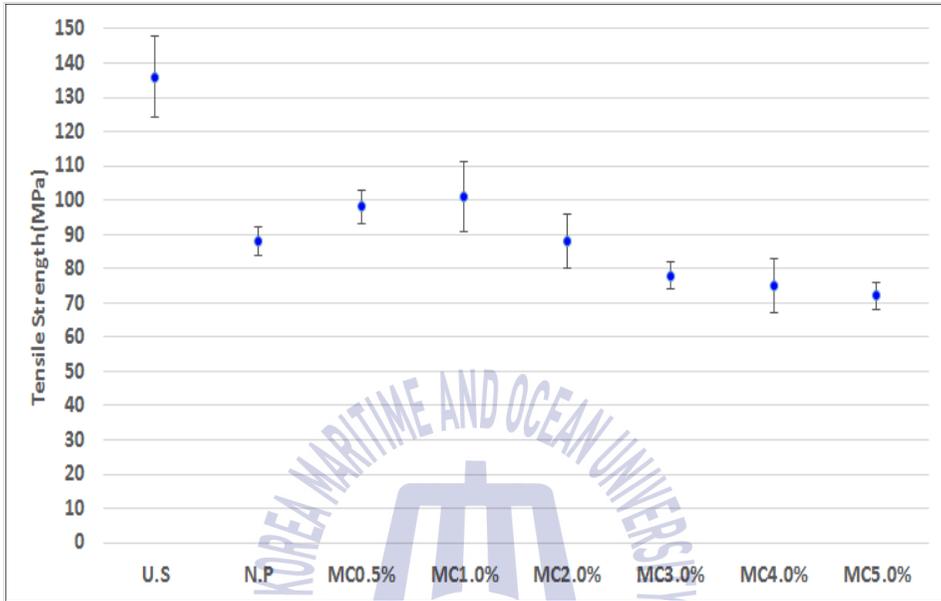
### 3.1 기계적 특성 실험 결과

#### - 밀드카본 첨가

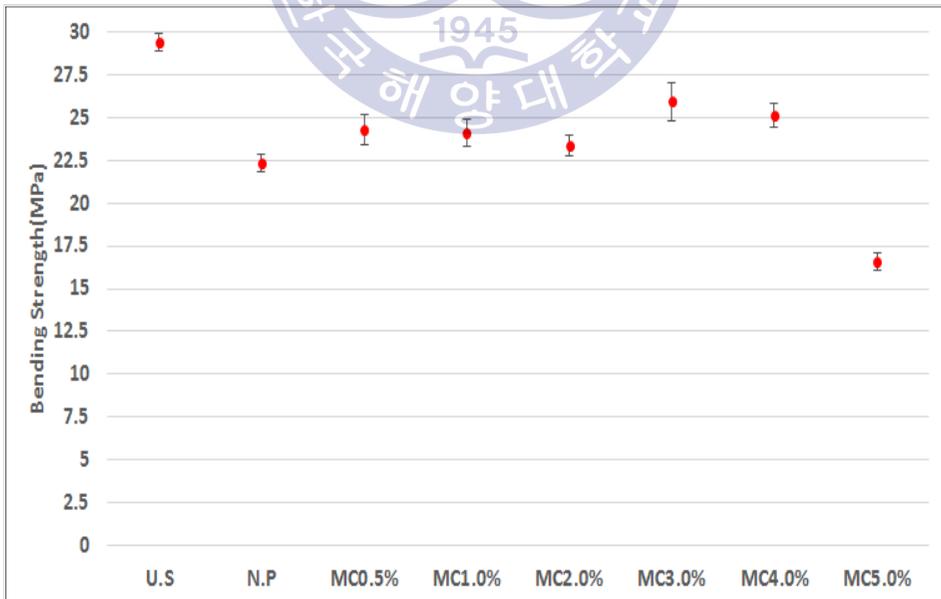
밀드카본을 계단형 패치에 사용된 수지와 교반시켰으며, 입자첨가량에 따른 기계적 물성 회복률을 확인하고자 인장, 굽힘강도 시험을 진행하였다. Fig. 14 의 (a)는 인장강도를 (b)는 굽힘강도 (c.)는 접착강도 값을 나타낸 그래프이고 Table 6 은 인장강도와 굽힘강도의 회복률을 나타내고 있다. 인장강도를 나타낸 그래프에서 첨가량이 1 wt%까지는 첨가량이 증가함에 따라 인장강도가 증가하였고, 1 wt%를 기점으로 함유량이 증가함에 따라 인장강도가 감소하였다. 이는 밀드카본의 입자의 크기가 크고 함유량이 증가함에 따라 입자가 응집되면서 응력집중으로 인해 강도가 하락된 것으로 사료된 굽힘강도를 나타낸 그래프에서 첨가량이 증가함에 따라 강도 회복률이 비입자 첨가시편에 비해 전반적으로 강도가 증가하였으나 5 wt%에서 급격히 감소하였다. 다른 첨가량에 비해 5 wt% 에서 입자가 뭉치는 현상을 육안으로 확인할 수 있었으며, 입자가 뭉친 부분에 응력이 집중되어 강도가 하락한 것으로 사료된다. 접착강도 그래프에선 입자첨가를 통해 전반적으로 비입자 첨가 시편에 비해 강도가 감소하였으나 첨가량이 증가함에 따른 특정한 경향은 나타나지 않았다. 이는 첨가된 입자가 손상된 모재와의 계면결합력을 저하시키기는 하나 5 wt% 함량까진 미치는 영향이 미비한 것으로 사료된다.

기계적 물성 회복률을 나타내는 표에 따르면 비입자 시편에 비해 1.0 wt% 첨가량에서 인장강도 회복률이 약 8%가량 증가하여 가장 높았으며, 3.0 wt%에서 굽힘강도 회복률이 약 13%가량 증가하여 가장 높았다. 굽힘강도 특성이 전체적으로 높게 증가함을 알 수 있었는데 이는 밀드카본 자체가 탄소

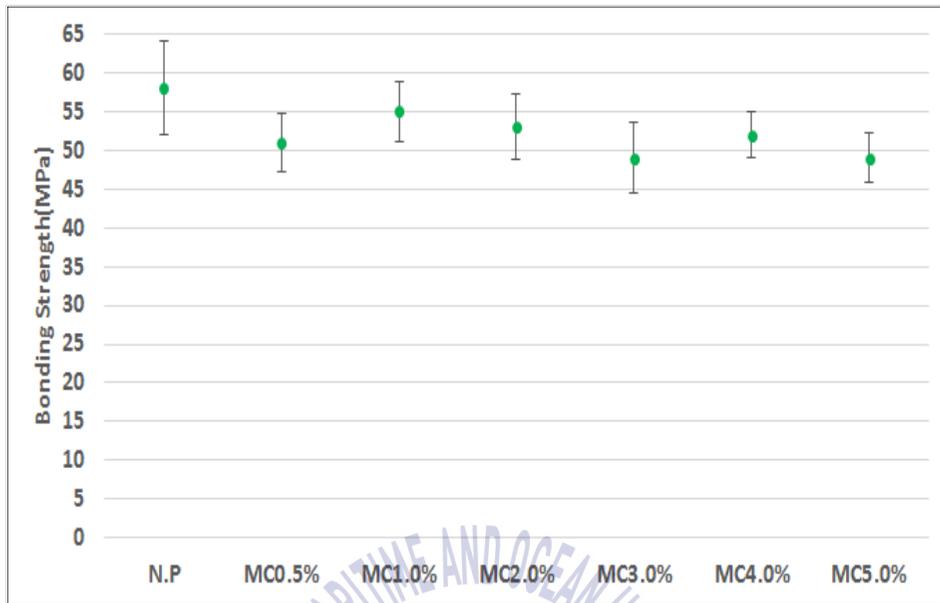
섬유를 파쇄한 것이기 때문에 탄소섬유 자체가 갖는 고유특성인 내충격성이 기인한 것으로 사료된다.



(a) Tensile strength of specimen with Milled Carbon



(b) Bending strength of specimen with Milled Carbon



(c) Bonding strength of specimen with Milled Carbon

Fig. 14 Comparison of mechanical property of Milled Carbon

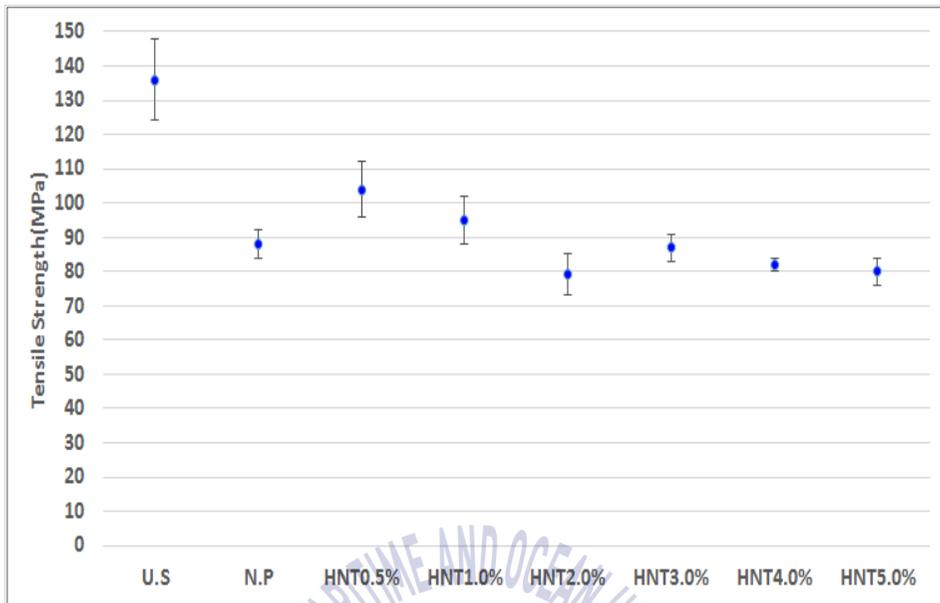
Table 6 Recovery rate of Milled Carbon specimens

	Recovery rate (%)	
	Tensile strength	Bending strength
U.S	100	100
N.P	64.7	75.8
MC0.5	72.0	82.6
MC1.0	74.2	81.9
MC2.0	64.7	79.3
MC3.0	57.3	88.2
MC4.0	55.1	85.4
MC5.0	52.9	56.3

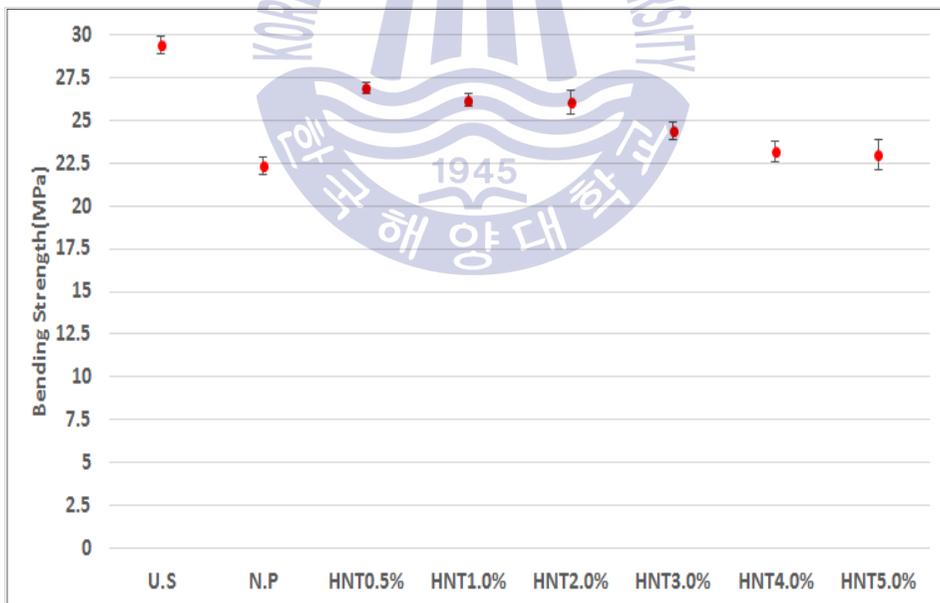
- 할로이사이트 나노튜브 첨가

할로이사이트 나노튜브를 계단형 패치에 사용된 수지와 교반시켰으며, 입자첨가량에 따른 기계적 물성 회복률을 확인하고자 인장, 굽힘강도 시험을 진행하였다. Fig. 15 의 (a)는 인장강도를 (b)는 굽힘강도 (c)는 접착강도 값을 나타낸 그래프이고 Table 7은 인장강도와 굽힘강도의 회복률을 나타내고 있다. 인장강도를 나타낸 그래프에서 할로이사이트 나노튜브가 함유량이 1 wt%까진 인장강도가 비입자 시편에 비해 높았으며, 0.5 wt%를 기점으로 함유량이 증가함에 따라 인장강도가 감소하는 경향을 보였다. 이는 할로이사이트 나노튜브의 함유량이 증가함에 따라 입자가 응집되면서 응력집중으로 인해 강도가 하락된 것으로 사료된다. 굽힘강도를 나타낸 그래프에서 할로이사이트 나노튜브를 첨가함에 따라 전체적으로 강도 회복률이 비입자 첨가 시편에 비해 증가하였으며, 0.5 wt%를 기점으로 함유량이 증가함에 따라 굽힘강도가 감소하는 경향을 보였다. 이는 할로이사이트 나노튜브 또한 수지 대비 함유량이 증가함에 따라 입자가 응집되지만 입자 자체가 결합하려는 특성을 가져 수지와 섬유 사이의 결합력을 증가시킨 것으로 사료된다. 접착강도 그래프에선 입자첨가를 통해 전반적으로 비입자 첨가 시편에 비해 강도가 감소하였으나 첨가량이 증가함에 따른 특정한 경향은 나타나지 않았다. 밀드카본과 동일하게 첨가된 입자가 손상된 모재와의 계면결합력을 저하시키는 것은 하나 5 wt% 함량까진 미치는 영향이 미비한 것으로 사료된다.

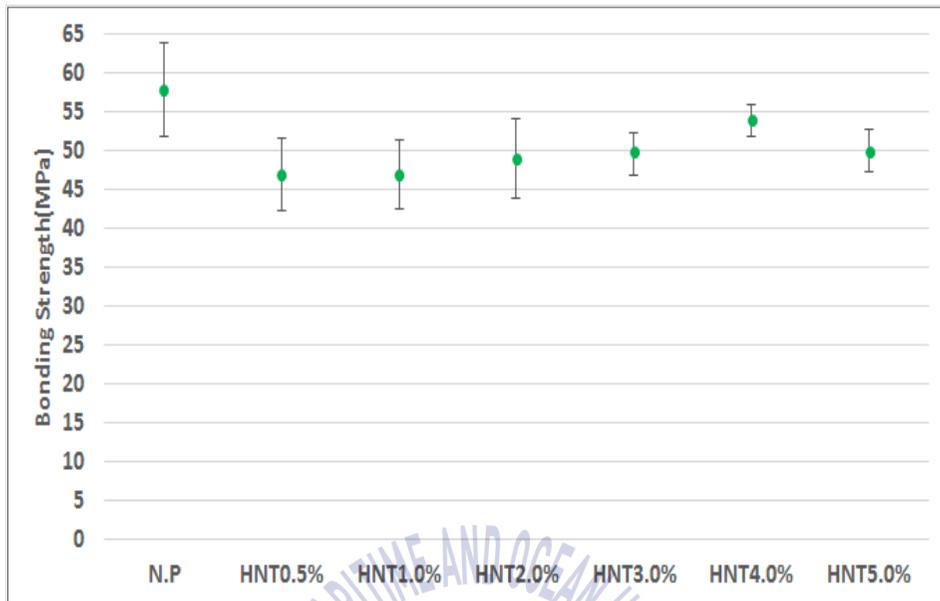
기계적 물성 회복률을 나타내는 표에 따르면 비입자 시편에 비해 0.5 wt% 첨가량에서 인장강도 회복률이 약 12%, 굽힘강도 회복률이 약 16% 가량 증가하여 가장 높았다.



(a) Tensile strength of specimen with Halloysite Nanotube



(b) Bending strength of specimen with Halloysite Nanotube



(c) Bonding strength of specimen with Halloysite Nanotube

Fig. 15 Comparison of mechanical property of Halloysite Nanotube

Table 7 Recovery rate of Halloysite Nanotube

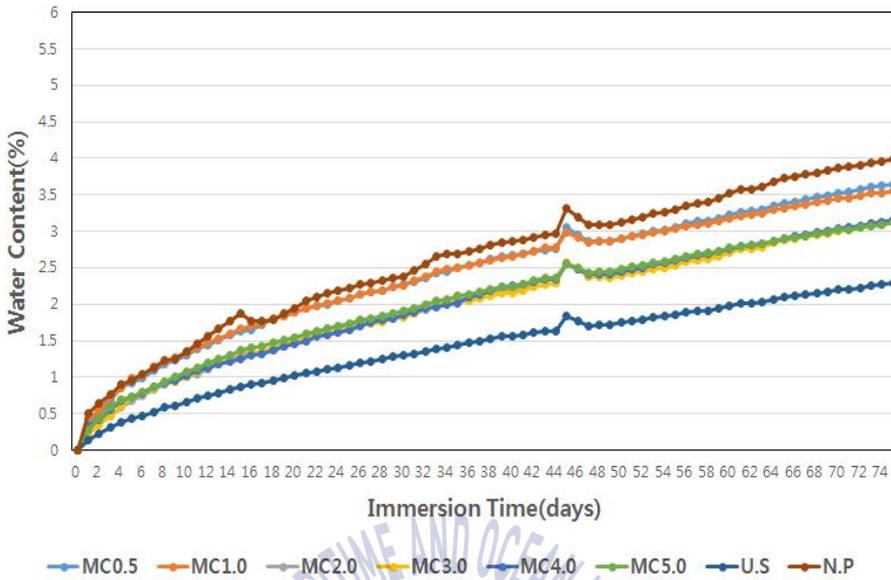
	Recovery rate (%)	
	Tensile strength	Bending strength
U.S	100	100
N.P	64.7	75.8
MC0.5	76.4	91.3
MC1.0	69.8	89.0
MC2.0	58.0	88.5
MC3.0	63.9	82.9
MC4.0	60.2	78.9
MC5.0	58.8	78.1

## 3.2 환경특성 실험 결과

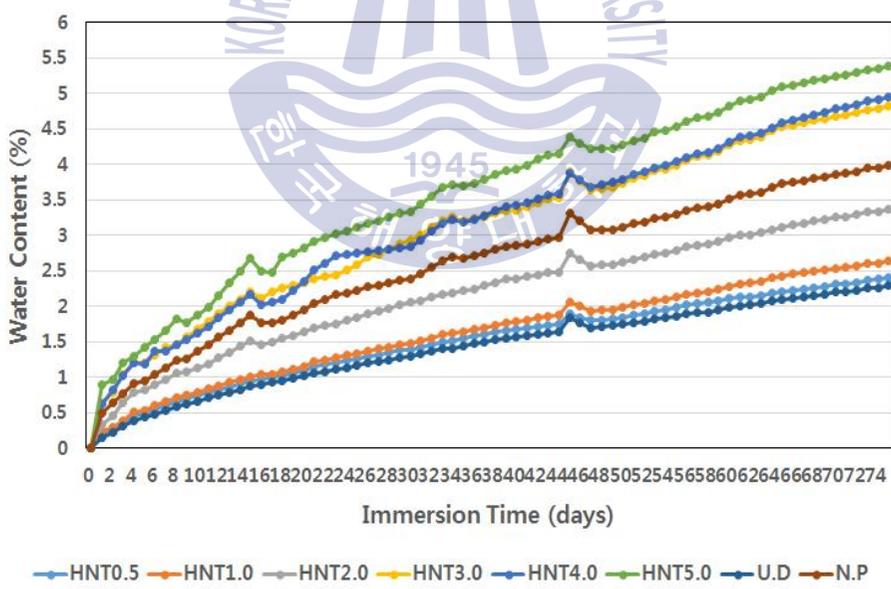
### - 수분 흡수 거동

흡습 실험 시작 후 15일 동안 모든 시편에서 급격한 수분 흡수율을 보였으며, 이후 완만하게 증가하였다. 75일 동안 진행하였으나 모든 시편에서 포화 현상은 보이지 않았다.

Fig. 16 에서 (a)는 밀드카본이 첨가된 보수시편을 (b)는 할로이사이트 나노튜브가 첨가된 보수시편의 수분 흡습 거동을 나타내고 있다. 밀드카본의 경우 입자 첨가량이 증가함에 따라 흡습율이 감소함을 보였다. 0.5 wt%에서 3.6%의 흡습률로 가장 높았으며, 5.0 wt%에서 3.1%의 흡습률로 가장 낮았다. 이는 밀드카본이 첨가된 시편에서 입자가 수지로의 수분 침투를 방지하고 첨가량이 증가할수록 수분이 침투할 공간이 적어지기 때문으로 사료된다. 할로이사이트 나노튜브가 첨가된 시편의 경우 첨가량이 증가함에 따라 흡습률이 증가하였다. 0.5 wt%에서 2.4%의 흡습률로 가장 낮았으며, 5.0 wt%에서 5.3%의 흡습률로 가장 높았다. 이는 할로이사이트 나노튜브가 수분과 결합하려는 성질로 인해 적은 함량에선 일정 수분이외에 침투를 억제하지만 함량이 증가함에 따라 결합된 수분 주위로 확산 현상이 일어나기 때문으로 사료된다.



(a) Specimen containing Milled Carbon

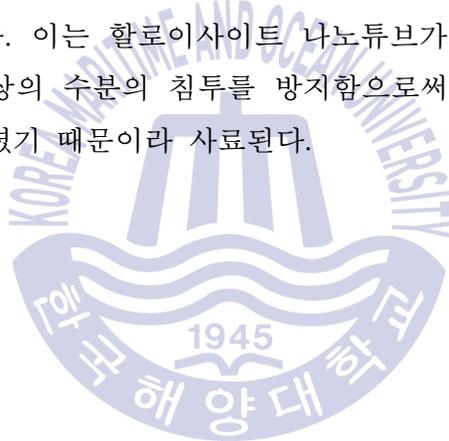


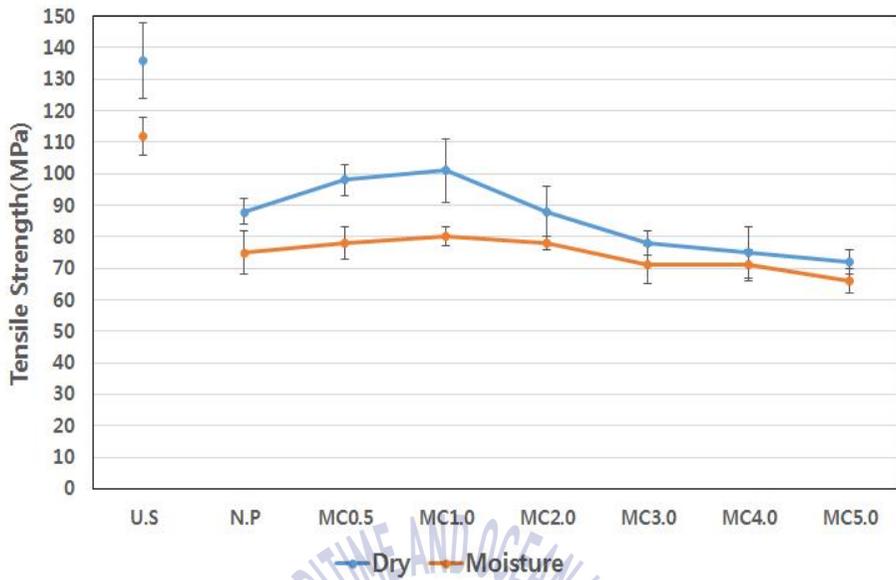
(b) Specimen containing Halloysite Nanotube

Fig. 16 Moisture absorption behavior of repairing specimens

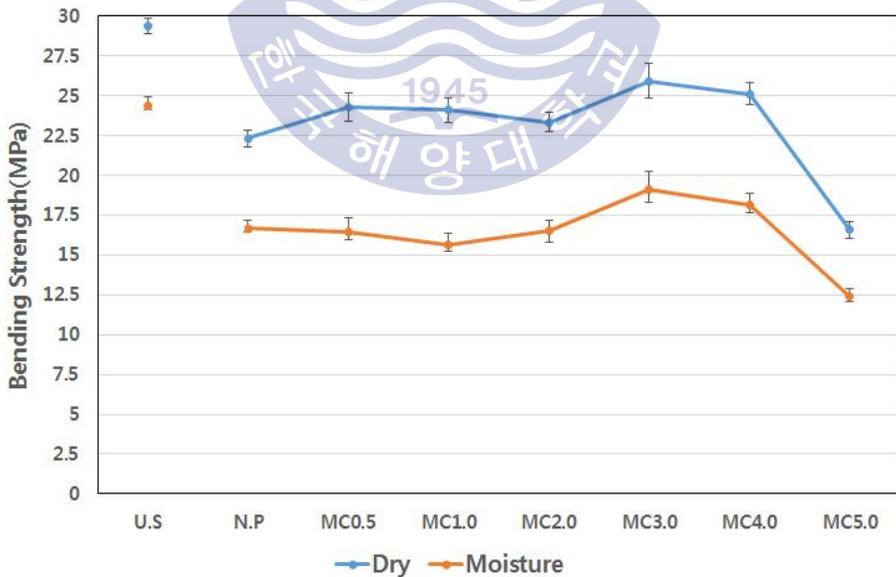
- 흡습에 의한 기계적 물성 열화

Fig. 17 과 Fig. 18 은 밀드카본과 할로이사이트 나노튜브가 첨가된 보수시편의 수분에 의한 열화 전.후의 강도를 나타낸 그래프이며, Table 8 과 Table 9 는 각각의 열화율을 나타내고 있다. 밀드카본의 경우 1.0 wt%까지 인장강도의 열화가 비입자첨가 시편에 비해 심하였으나 1.0 wt%를 기점으로 덜 진행되었고 굽힘강도의 열화에선 전체적으로 비입자첨가 시편에 비해 물성의 열화가 심하였다. 두 물성 모두에서 첨가량이 증가함에 따라 열화율이 감소하는 경향을 보였다. 이는 수분 흡수 거동에서 확인하였듯이 수분의 침투가 첨가량이 증가함에 따라 용이하지 못하였기 때문이라 사료된다. 반면 할로이사이트 나노튜브에선 첨가량에 따라 기계적 물성 열화에서 특정한 경향을 보이지 않았다. 이는 할로이사이트 나노튜브가 강화재 표면에 수지와 결합하면서 일정 이상의 수분의 침투를 방지함으로써 강화재 내부로 침입되는 물 분자가 적어졌기 때문이라 사료된다.





(a) Tensile strength

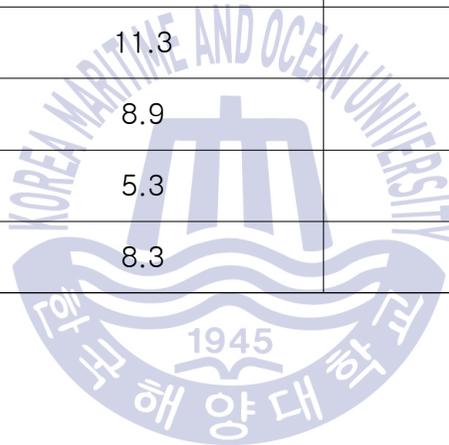


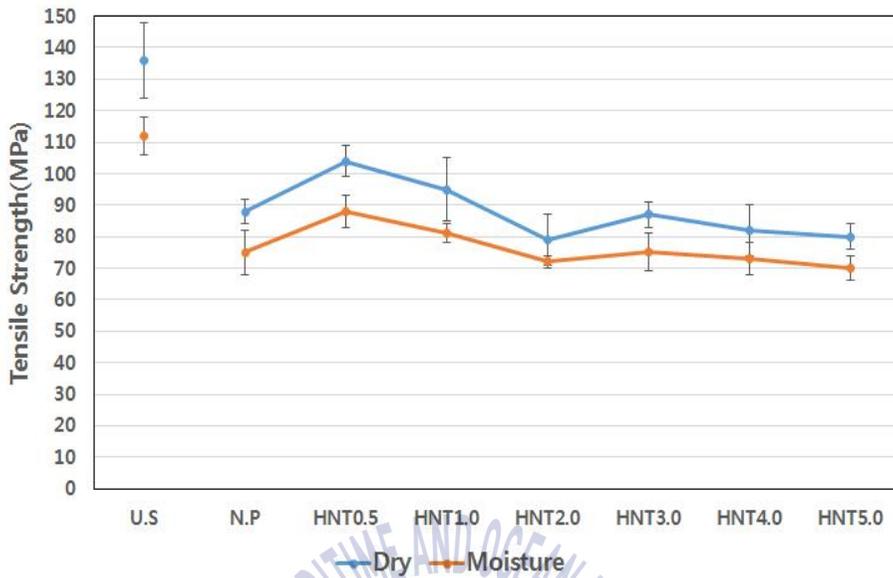
(b) Bending strength

Fig. 17 Degradation of mechanical properties of Milled Carbon

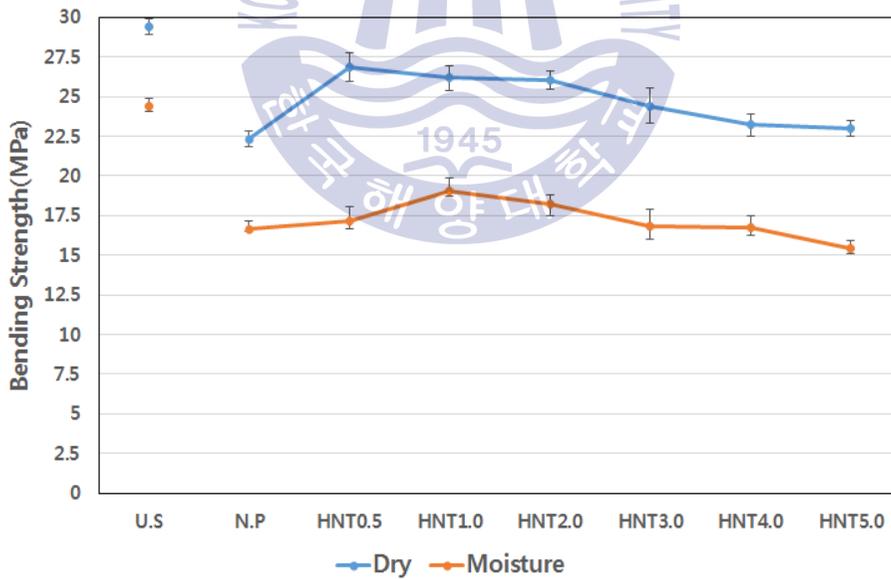
**Table 8** Rate of diminution of Milled Carbon specimens

	Rate of diminution(%)	
	Tensile strength	Bending strength
U.S	17.6	17.0
N.P	14.7	25.2
MC0.5	20.4	32.3
MC1.0	20.7	35.2
MC2.0	11.3	29.1
MC3.0	8.9	26.2
MC4.0	5.3	27.6
MC5.0	8.3	25.4





(a) Tensile strength



(b) Bending strength

Fig. 18 Degradation of mechanical properties of Halloysite Nanotube

**Table 9** Rate of diminution of Halloysite Nanotube specimens

	Rate of diminution(%)	
	Tensile strength	Bending strength
U.S	17.6	17.0
N.P	14.7	25.2
HNT0.5	15.3	36.0
HNT1.0	14.7	27.0
HNT2.0	8.8	30.0
HNT3.0	13.7	31.1
HNT4.0	10.9	27.7
HNT5.0	12.5	32.8

### 3.3 접착표면 및 적층면 분석 결과

#### - 접착표면 분석

접착강도 실험 후 밀트카본과 할로이사이트 나노튜브의 가장 낮은 강도값을 보이는 케이스의 접착 파단면 분석함으로써 입자첨가가 계면 결합력에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. Fig. 19 는 영상현미경을 통해 25배율로 전체적인 파단면을 촬영한 사진이며, Fig. 20 은 광학현미경을 통해 100배율로 특정 파단면을 촬영한 사진이다. Fig. 19 (a) 에서는 접착면에서 수지가 완전히 박리되었음을 알 수 있었으며, (b) 에서는 일부 수지가 응집되어 부분적으로 박리된 형태를 보였고 (c) 에서는 섬유의 파손이 관찰되었다. 이를 더 확대하여 본 Fig. 20 (a)에선 수지가 형상이 보이기는 하나 섬유의 표면이 잘 관찰되었으며, (b)에서는 섬유의 표면은 관찰이 되긴하나 잔류된 수지가 눈에 띄게 나타났고 (c) 에서는 섬유의 풀 아웃현상이 관찰되었다. 이를 통해 (a)와 (b)는 접착제 파손, (c)는 계면 파손 및 모재 파손임을 확인하였고 HNT가 첨가됨으로써 상대적으로 수지의 접착 강도를 모두 사용하지 못하였다는 것을 알 수 있었다.



(a) N.P fracture section

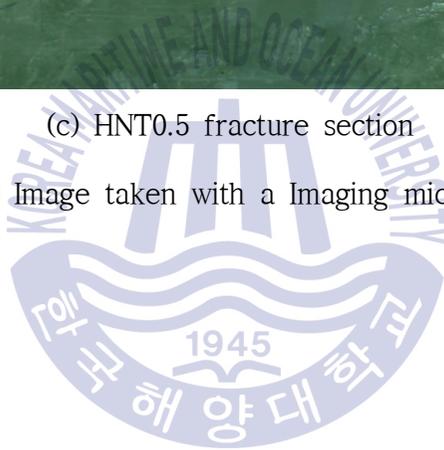


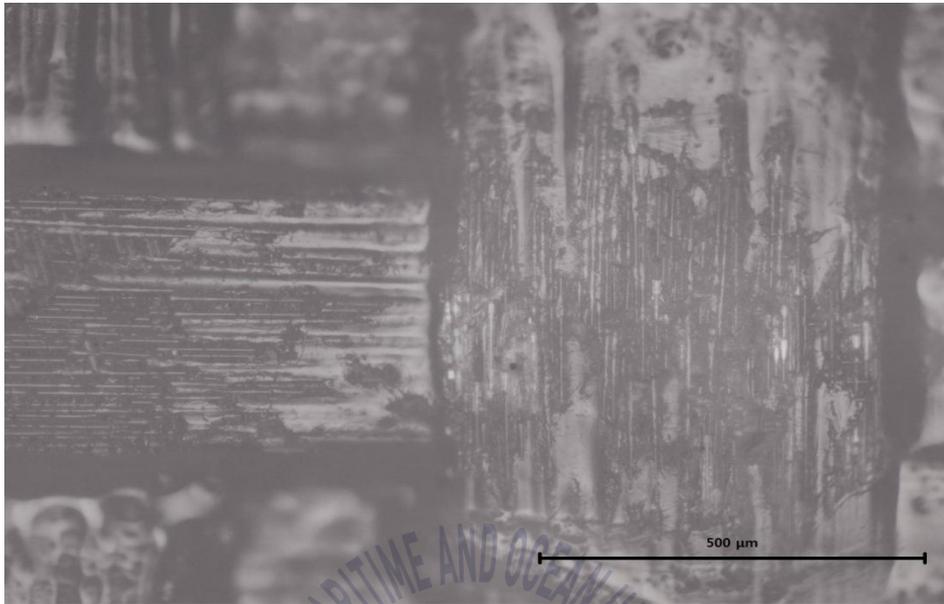
(b) MC0.5 fracture section



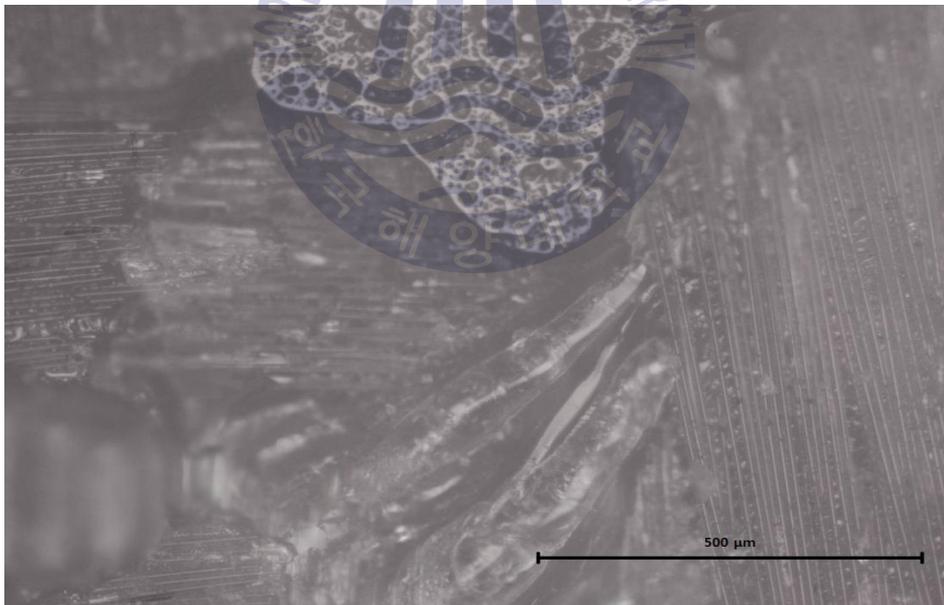
(c) HNT0.5 fracture section

Fig. 19 Image taken with a Imaging microscope

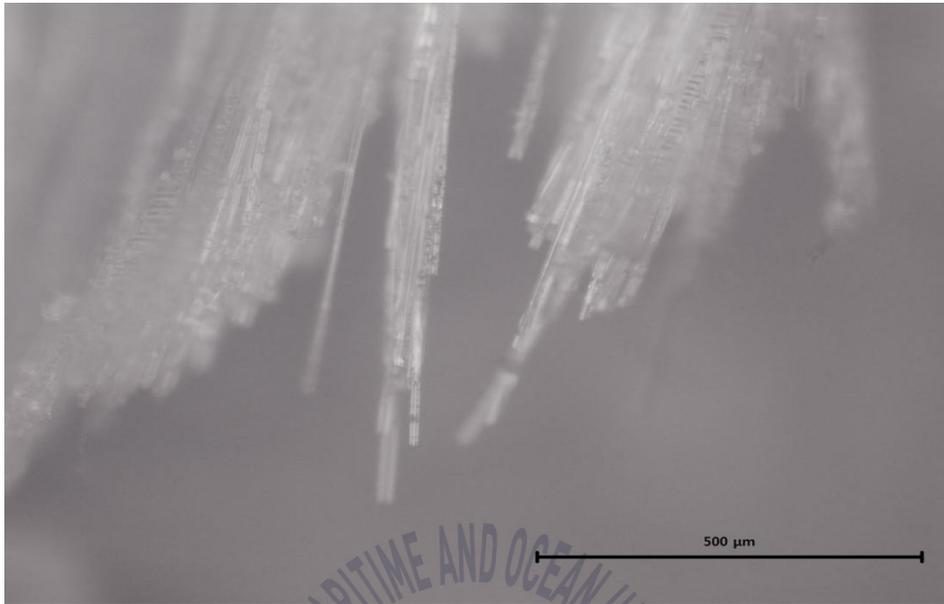




(a) N.P fracture section

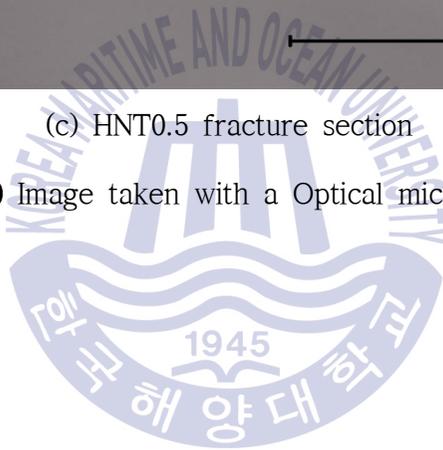


(b) MC0.5 fracture section



(c) HNT0.5 fracture section

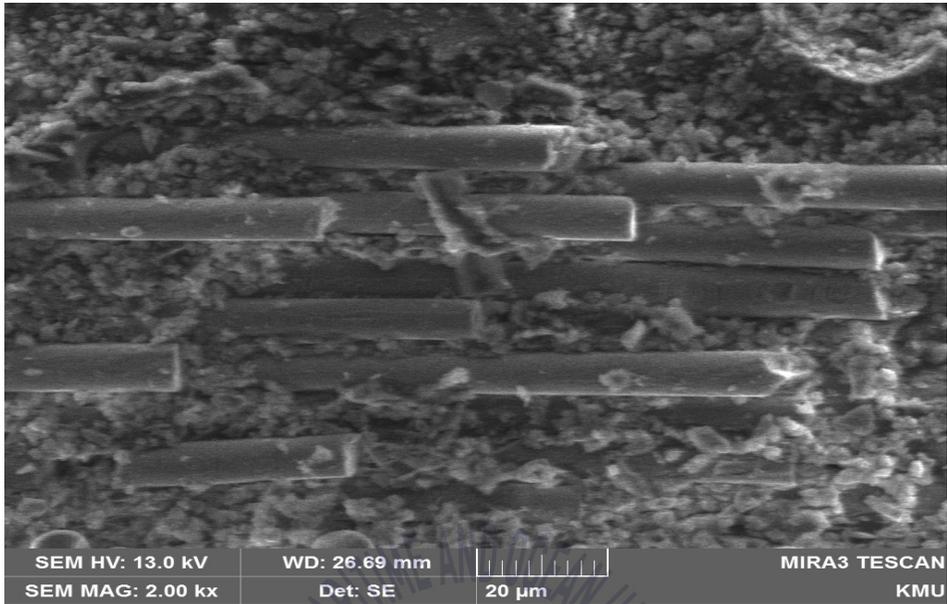
Fig. 20 Image taken with a Optical microscope



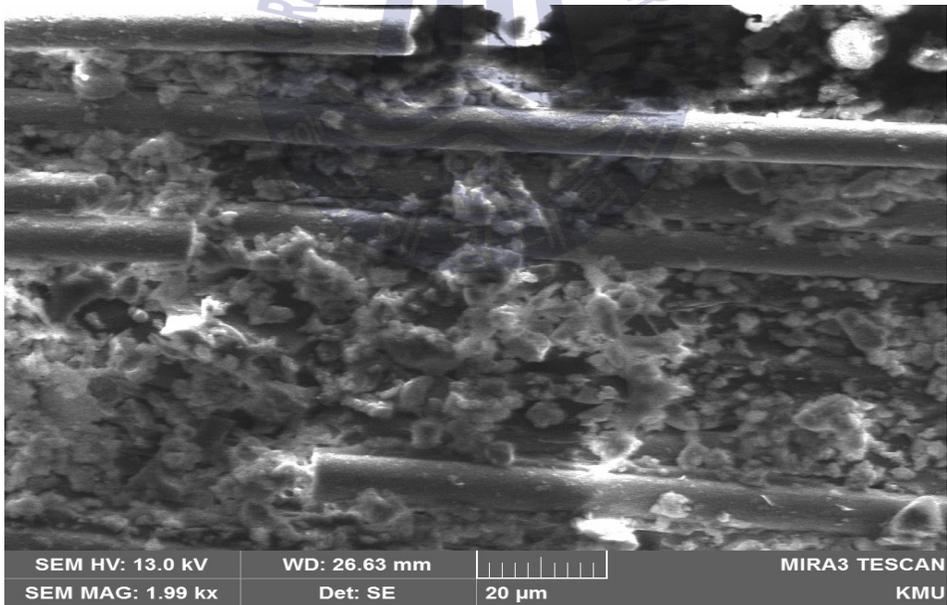
#### -HNT/MC 보수 복합재 적층면 분석

밀드카본과 할로이사이트 나노튜브의 첨가량이 수지의 분산 및 응집에 미치는 영향을 확인하기 위하여 SEM을 이용하여 적층면을 분석하였다. Fig. 21 은 각각의 입자 첨가량 0.5 wt%와 5.0 wt%를 촬영한 사진이다. (a) 에서 수지는 섬유 주변으로 비교적 고르게 분산되어 있는 반면 (b) 는 상대적으로 수지가 많이 응집되어 있음을 확인할 수 있었다. 이는 밀드카본의 입자가 크고 방향성이 없기 때문에 주변으로 무분별하게 응집되었다고 사료된다. (c) 에서 수지는 고르게 분산됨과 동시에 섬유표면과 결합되어 있었으며, (d) 에서는 섬유표면과의 결합과 응집된 수지가 확인 되었다. 이는 할로이사이트 나노튜브가 불완전한 구조로 인해 섬유 및 수지와 결합하려고 하기 때문으로 사료된다.

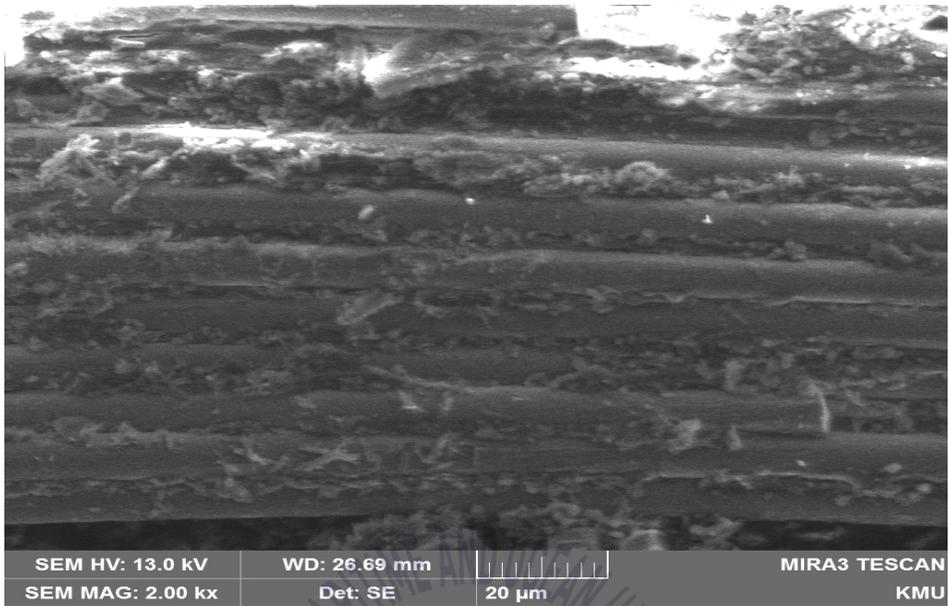




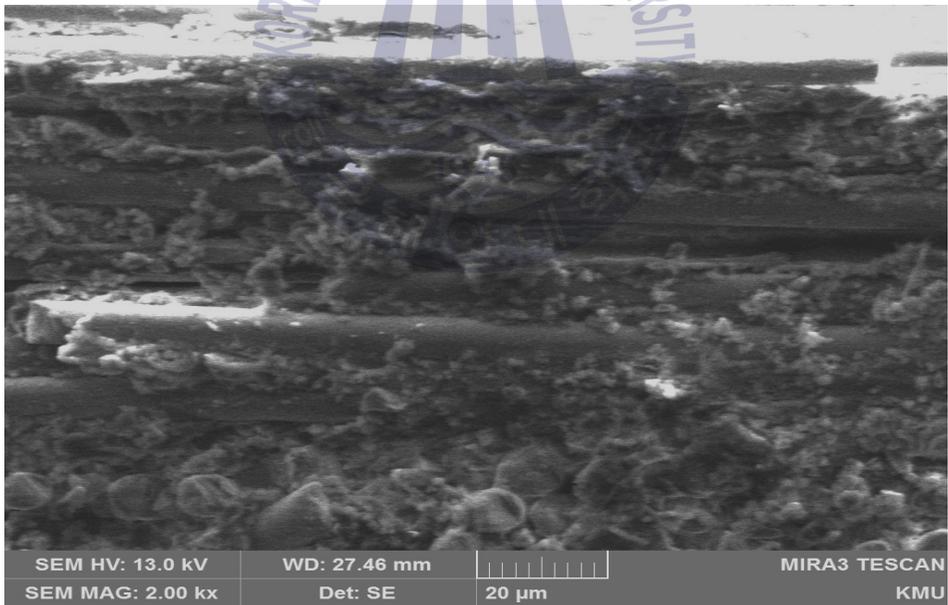
(a) The laminated side of MC0.5



(b) The laminated side of MC5.0



(a) The laminated side of HNT0.5



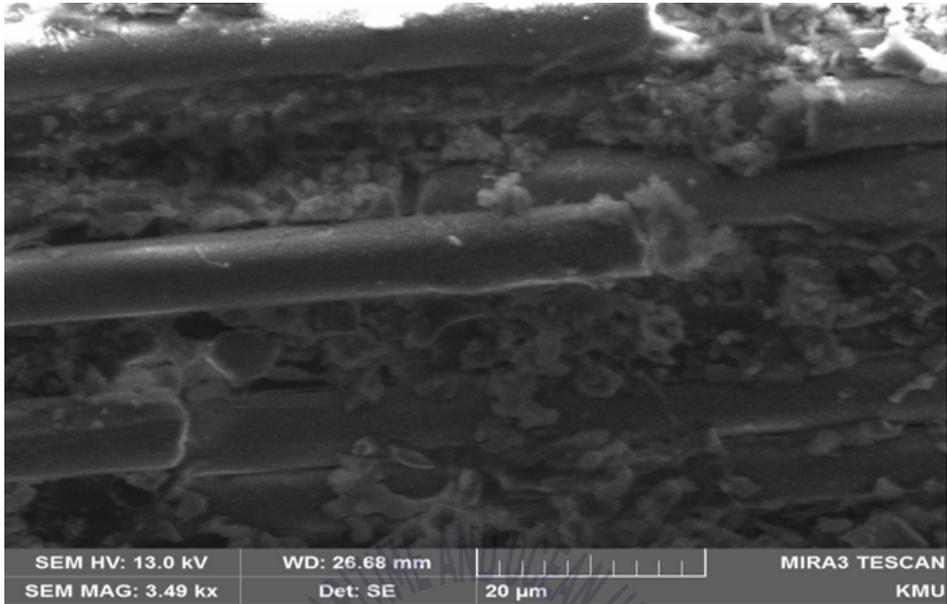
(b) The laminated side of HNT5.0

Fig. 21 Surface taken with a scanning electron microscope

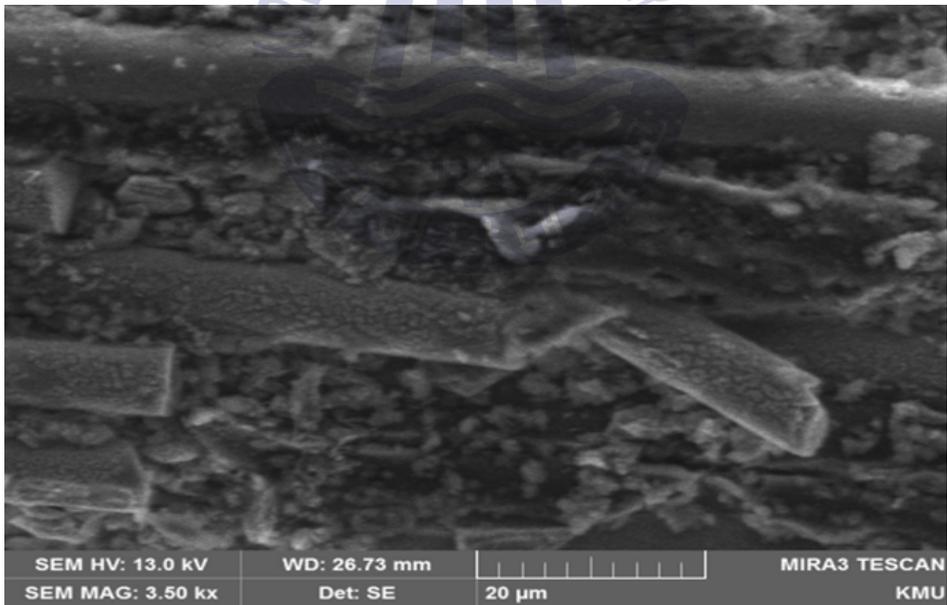
- 흡습실험 후 적층면 분석

수분환경이 밀드카본과 할로이사이트 나노튜브가 첨가된 보수 시편 내 섬유와 수지에 미치는 영향을 확인하기 위해 SEM을 이용하여 적층면을 분석하였다. Fig. 22 는 비입자시편과 각각의 첨가된 입자의 0.5wt% 를 촬영한 사진이다. 전반적으로 수지가 고르게 분산되어 있었으나 섬유 표면에서의 수지의 형태가 다르게 나타났다. (a)의 섬유 표면에서 수지의 결합이 다소 떨어지게 나타났으며, (b)의 섬유 표면에선 수지가 얇은 층으로 형성한 막을 확인할 수 있었다. 마지막으로 (c)에선 섬유 표면에 두터운 수지층을 확인할 수 있었다. 이는 입자첨가가 수분의 침투를 저하시켜 섬유표면에서의 수지의 박리 현상을 저하시키는 것으로 보이며, 할로이사이트 나노튜브가 밀드카본에 비해 수분 침투를 저하시킴과 동시에 결합을 향상시키는 것으로 사료된다.

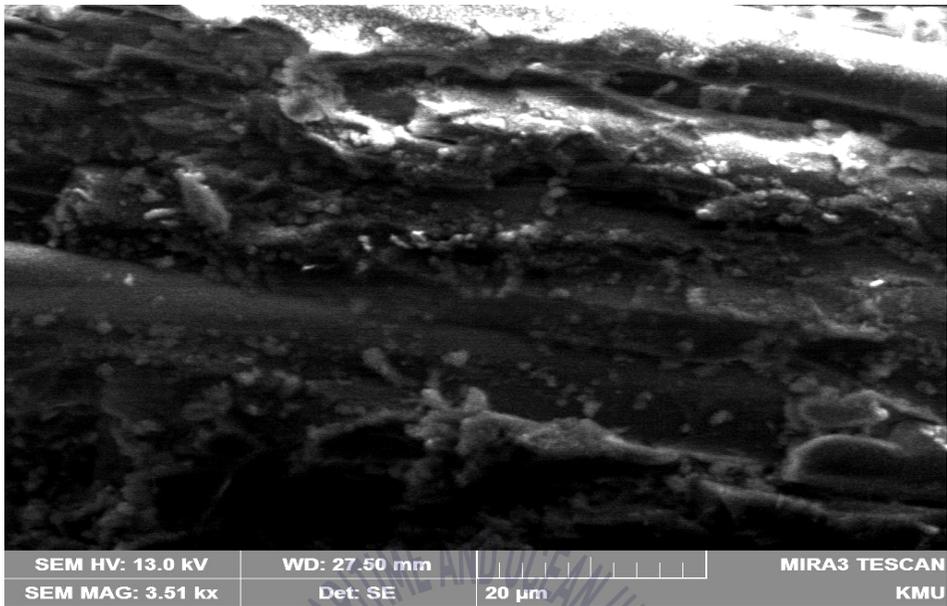




(a) The laminated side of N.P

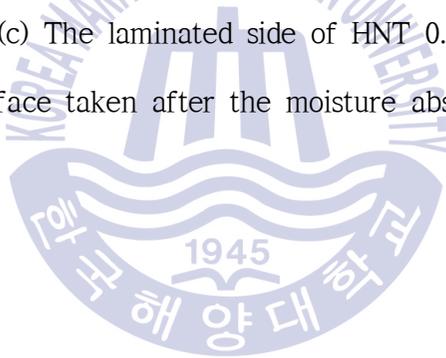


(b) The laminated side of MC 0.5



(c) The laminated side of HNT 0.5

Fig. 22 Surface taken after the moisture absorption test



## 제 4 장 결 론

본 연구에서는 밀드 카본과 할로이사이트 나노튜브 입자의 첨가량을 조절하여 계단형 패치에 첨가한 후 유리섬유강화복합재를 보수하였고 그에 따른 영향을 기계적 물성 분석, 흡습 시험, 파단면 분석 등을 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 인장 물성시험에서 HNT, MC 첨가량이 증가함에 따라 강도가 감소하는 추세를 보이지만 굽힘 물성에서 MC는 증가하고 HNT는 감소하는 추세를 보였다. 이는 전반적으로 입자가 응집되면서 응력이 집중되기 때문에 강도 특성이 저하되지만, 굽힘강도 특성에서 밀드 카본만 증가하는 추세를 보이는 것은 탄소섬유 고유의 내충격성에 의한 것으로 사료된다.

2. 기계적 물성 회복률에서 MC는 2.0wt%, HNT 1.0%까지 향상되는 것을 확인할 수 있었으며, 각각 1.0wt%, 0.5wt%에서 가장 입자 첨가 효과가 우수하였다. 복합재 제조시 첨가와 다른 거동을 보이는 이유는 입자첨가로 인해 모재부와 접착강도가 감소하기 때문으로 사료되며, 복합재 보수시 적용성을 높이기 위해 선 계면결합력 향상을 위한 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

3. 흡습 거동분석에서 MC의 첨가량이 증가함에 따라 흡습율이 저하되었으며, HNT는 흡습율이 증가하였다. 이는 밀드카본의 경우 입자 자체가 파쇄 섬유이기에 수분의 침투를 저하하기 때문이고 할로이사이트 나노튜브의 경우 입자 자체가 구조적으로 불안정하여 일정 수분과 결합을 하고 그 이외의 침투를 저하시키나 첨가량이 증가함에 따라 입자간의 응집으로 인해 수분의 침투가 용이해진 것으로 사료된다.

4. 수분 흡수 실험 후 물성 열화 분석에서 MC 첨가량이 증가함에 따라 열화율이 감소하는 경향을 보였다. 이는 접촉부위에서 입자가 수분의 흡수를 감소시키기 때문이라 사료된다. 또한 할로이사이트 나노튜브에선 첨가량에 따라 기계적 물성 열화에서 특정한 경향을 보이지 않았는데 이는 할로이사이트 나노튜브가 강화재 표면에 수지와 결합하면서 일정이상의 수분이 강화재 내부로 침투하는 것을 방지하기 때문으로 사료된다.

5. 적층면 분석을 통해 입자량이 증가함에 따라 수지의 응집이 심해지는 것을 확인하였으며 흡습실험 후 적층면 분석을 통해 입자첨가가 수분의 침투를 방지해 계면결합력 저하를 방지하는 것으로 사료된다.

위 연구를 통해 밀드카본과 할로이사이트 나노튜브를 복합재 보수에 적용시 기계적 물성 회복률에 미치는 영향을 확인 할 수 있었다. 기계적 물성 시험을 통해 두 입자의 복합재 보수 시장에서 적용 가능성을 확인할 수 있었으며, 입자의 응집 문제와 모재와의 접촉강도 문제를 보완한다면 해양 산업 및 다양한 산업에서도 충분히 적용가능하다고 사료된다.

## 감사의 글

2010년도에 조선기자재공학부에 학부생으로 입학하였던 것이 엇그제 같은데 벌써 7년이라는 시간이 지나 석사과정을 마친다니 실감이 나질 않습니다. 특히나 복합재료 실험실에서 3년이라는 시간은 제 인생에 큰 전환점이 되었습니다. 항상 제 자신에게 부족함과 앞으로의 나날에 대해 조급함을 느꼈지만, 그러한 시간들을 통해 지금의 모습까지 올 수 있었던 것 같습니다. 오늘 이 순간까지 항상 저를 걱정해주시고 많은 도움을 주신 분들께 감사를 드리며, 소중한 인연 잊지 않겠습니다.

제 인생에 있어 복합재료라는 큰 전환점을 만들어 주시고 부족함이 많은 저에게 끊임 없는 격려와 학문 및 인생을 살아감에 있어 많은 가르침을 주신 김윤해 지도 교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 바쁘신 와중에도 좋은 논문이 될 수 있도록 지도 해주신 문경만 교수님과 심도식 교수님께도 감사의 말씀을 올립니다. 제가 대학에 입학하면서부터 전공지식을 전해주신 이성열 교수님, 이병우 교수님, 김준영 교수님께 깊이 감사드립니다.

학부생 시절 진로를 고민하였던 3학년 때 충고와 관심을 보여주셨고, 복합재료에 대해 이해하기 쉽게 가르쳐 주셨던 이진우 형님에게 감사하단 말씀 전합니다. 더불어 실험실에서 힘들어 할 때 마다 고민을 들어주며 조언을 해주었던 박창욱 형님에게도 감사하단 말씀 전합니다. 그리고 학부시절부터 대학원까지 항상 옆을 지켜주던 내 친구 박수정, 한석희에게 진심으로 고맙다고 전하고 싶습니다. 이 친구들에게는 편하게 말하고 싶네요. 너희들이 있어 내가 이렇게 잘 졸업한다. 너네한테 항상 고맙고 또 고맙다. 사랑한다!

그리고 지금은 자주 보지 못하는 우리 조선기자재공학부 10학번 동기들, 특히 아직까지 연락하고 지내는 박성민, 이재민, 배한진, 하청운, 이경운, 전희범, 연주한, 박영준, 김명조, 김광효, 김경원에게 감사하다고 전하고 싶습니다.

마지막으로, 저를 위해 오랜시간동안 뒷바라지 해주신 아버지, 어머니께 감사드립니다. 평생을 다 갚지 못할 사랑을 주신 부모님께 이 논문을 바치며 감사의 글을 마치겠습니다. 모든 분들에게 다시 한 번 감사하단 말씀 올립니다. 감사합니다!

## 참고문헌

신석진, 2016, 폴리프로필렌/유리 혼합직조 섬유 복합재료 기계적 특성에 관한 기초 연구, 석사학위논문, 부산:한국해양대학교

김정현, 우성충, 최낙삼, 2003, 유리섬유강화 복합재의 AE특성에 대한 섬유배향 효과. 비파괴검사학회지, Vol.23 No.5 pp.429-438

김부안, 문창권, 최영민, 2017, 탄소섬유의 기계적 특성에 대한 열처리의 영향, 한국동력기계공학회지, Vol.21 No.5 pp.13-19

Zhou, S.F., Wu, C.Q., Chen, L.H., Zhang, Q.X., 2012, Effect of Carbon Fiber Reinforcement on the Mechanical and Tribological Properties of PA6/PPS Composites, Advanced Materials Research, Vol.476-478 No.3, pp.2323-2327

Anwar, M., Sukmaji, I. C., Wijang, W. R., Diharjo, K., 2014, Application of Carbon Fiber-Based Composite for Electric Vehicle, Advanced Materials Research, Vol.896, pp.574-577

Zhou, Z., Bai, R., Ren, M., Chen, L., Li, A., Sun, J., Hu, Q., Wang, C., 2011, Dynamic Mechanical Thermal Analysis of Pultruded Carbon Fiber/Resin Composite Cable Cores, Carbon Research, Vol.1, pp.396-397

고희영, 2011, 유리섬유/에폭시 적층 복합재 적용 경량화 대차프레임의 피로특성 평가 연구, 석사학위논문, 대전:한밭대학교

조규립, 안중기, 2013, 현안과 과제: 최근 관광, 레저산업의 주요 특징 및 시사점, 이슈리포트 Vol.57, pp.1-11

Shen, C.H., Springer, G. S., 1997, Effect of Moisture and Temperature on the Tensile Strength of Composite Materials, Journal of Composite Materials,

Vol.11, pp.2-16

김성훈, 2017, 레저선박용 복합재료의 패치를 적용한 손상 수리 후 기계적 거동에 대한 연구, 석사학위논문, 부산:부산대학교

백설, 강경탁, 이진아, 전홍재, 박종찬, 2015, 면외 하중을 고려한 복합재 기계적 체결부의 강도예측, Vol.CAE 및 응용역학, pp.393-394

유재승, 2016, 복합재 적층판의 스카프 패치 수리 후 정적 및 피로 성능 연구, 석사학위논문, 진주:경상대학교

이대길, 2003, 신소재의 Reliable joining 및 Repair 기술, 한국복합재료학회, Vol.16 No.2, pp.74-77

Yala, A.A., Megueni, A., 2009, Optimisation of composite patches repairs with the design of experiments method, MATERIALS AND DESIGN, Vol.30 No.1, pp.200~205

김정식, 윤혁진, 김승철, 서승일, 2009, 패치 보수된 샌드위치 복합재 적층판의 압축시 강도회복 평가, 한국철도학회, Vol.12 No.1, pp.110-114

김윤해, 조영대, Murakami, R., 2011, Computational analysis of the scarf angle on a composites repair, 한국해양공학회, Vol.1 No.1, pp.9-15

Boumaaza, M., Bezazi, A., Bouchelaghem, H., Benzennache, N., Amziane, S., Scarpa, F., 2017, Behavior of pre-cracked deep beams with composite materials repairs, Structural Engineering and Mechanics, Vol.63 No.5, pp.575-584

조병완, 1994, 내압을 받는 복합 적층 파이프(GFRP) 구조의 유한요소 해석, 전산구조공학회, Vol.7 No.2, pp.101-109

이진우, 2015, 나노 입자에 의한 탄소섬유강화 복합재료의 층간계면특성에 관한 연구, 박사학위논문, 부산:한국해양대학교

Wu, W., Cao, X., Zhang, Y., He, G., 2014, Polylactide/Halloysite Nanotube nanocomposites: Thermal, mechanical properties, and foam processing, Journal of applied polymer science, Vol.130 No.1, pp.443-452

김윤해, 이진우, 박수정, 2014, Halloysite 보강 유리섬유강화복합재료의 기계적 특성 평가, 대한기계학회 춘추학술대회, Vol.2014 No.5, pp.223-228

박수정, 2016, Changes of the Structural and Mechanical Properties on Nanocomposites based on Halloysite Nanotubes with the Optimization of Dispersion by Ultrasonic Waves, 석사학위논문, 부산:한국해양대학교

박재준, 2008, 초음파 분산을 이용한 Epoxy-Organoclay 나노복합재료 구조적 그리고 유전특성에 관한 연구, 전기학회논문지, Vol.57 No.9, pp.1572-1578

조영대, 2011, 복합재료 보수 시 접착면적과 스카프앵글에 따른 강도회복에 대한 연구, 박사학위논문, 부산:한국해양대학교

김도형, 김정규, 김학성, 2016, 나노클레이/에폭시 나노-복합재료의 기계적 및 흡습 특성에 관한 연구, 대한기계학회, Vol.40 No.2, pp.139-145