

에폭시 기지 입자 강화 GFRP를 사용한 계단형 패치 보수법이 고온 고습 환경하에서 재료의 물성 회복에 미치는 영향

정경석* · 박수정* · 김윤해**†

Effect to Material Strength Recovery of Stepped Patch Repair with Epoxy based Particle Reinforced GFRP Composites under Hygrothermal Environment

Kyung-Seok Jung*, Soo-Jeong Park*, Yun-Hae Kim**†

ABSTRACT: In this study, damaged composite laminates were repaired by a stepped patch repair method using halloysite nanotube(HNT) and milled carbon(MC) reinforced composite materials with different amount of the particles. And the mechanical and structural effects of the particles on the interface between the damaged and repair surfaces were analyzed. At this time, after exposing them to a harsh environment of high temperature and humidity for a long time, the recovery rate of the material properties relative to the material forming the damaged plate was compared. As a result, at 70°C high temperature distilled water, the hygroscopicity of the HNT/GFRP composites was significantly different from that of the MC/GFRP composites. Especially, 0.5, 1 wt. % HNT was added, the moisture absorption rate was the lowest and this was the factor that contributed to the mechanical strength increase. On the other hand, MC showed a high hygroscopic resistance only with a small amount, and the strength was different according to the action direction of the load, and the addition amount was also different.

초 록: 본 연구에서는 입자크기가 서로 다른 할로이사이트 나노튜브(Halloysite nanotube, HNT)와 밀드 카본(Milled carbon, MC) 강화 복합재료를 사용하여 손상된 복합재료 적층판을 계단형 패치 보수법에 따라 수리하고, 손상된 면과 수리면 사이의 접합 계면에 입자가 미치는 기계적, 구조적 영향을 분석하였다. 이 때, 고온 고습의 가혹한 수분 환경에 장시간 노출시켜 손상된 판을 형성하는 기존 재료와의 상대적인 재료 물성 회복률을 비교하였으며 기계적 물성 시험을 통해 성능평가를 실시하였다. 그 결과 70°C 고온 증류수에서 HNT는 입자 첨가량에 따라 흡습률이 MC에 비해 뚜렷한 차이를 보였으며 인장강도와 굽힘강도의 경우, 대체적으로 HNT로 강화된 복합재를 사용하여 보수한 시험편이 흡습 전과 후 모두 높은 수치를 나타냈다. 특히, 0.5, 1 wt. %의 HNT가 첨가되었을 때 흡습률이 가장 적었고 이는 기계적 강도 증가에 관여하는 하나의 요인으로 작용하였다. 반면 MC는 소량만으로도 높은 흡습 저항성을 나타냈으며 하중의 방향에 따라 강도의 차이가 발생했다.

Key Words: 할로이사이트 나노튜브(Halloysite nanotube), 밀드카본(Milled carbon), 기계적 물성(Mechanical property), 회복률(Recovery rate), 계단형 패치 보수법(Stepped patch repair)

Received 9 April 2018, received in revised form 30 April 2018, accepted 9 June 2018

*Major of Material Engineering, Graduate School, Korea Maritime and Ocean University

**†Department of Ocean Advanced Materials Convergence Engineering, Korea Maritime and Ocean University,
Corresponding author (E-mail: yunheak@kmou.ac.kr)

1. 서 론

FRP 복합재료는 높은 비강도와 비강성, 우수한 내식성과 성형성을 가지고 있어 항공기, 선박, 자동차 등 다양한 산업에서 금속재료의 대체재로 사용되고 있으며, 그 중에서도 해양산업 내 레저, 플랜트, 선박 등에 사용되는 구조 재료로서 그 수요가 점차 증가하는 추세다. 그러나 FRP 복합재료의 우수한 기계적, 구조적 물성에 비해 실제 적용되는 해양이라는 가혹한 환경은 재료 수명에 직접적인 영향을 미치기 때문에 환경 열화에 대한 예측이 필요하다[1-3]. FRP 복합재료 내 수분 침투와 염분에 의한 표면 부식의 측면에서 미세 결함을 가진 재료는 염수 환경에 상당히 취약함으로, 이를 최소화하고 구조체가 가지는 안정성을 확보하기 위해서는 조립식이 아닌 일체형 성형 공법 연구와 재료의 수명 연장을 위한 복합재료 수리에 관한 연구가 필수적이다[4].

특히, 복합재료의 수리(Repair)는 이차접합(Secondary bonding) 중에서 크게 기계적 체결(Mechanical joining)과 접합(Adhesive bonding)으로 구분된다. 기계적 체결은 손상된 부위에 금속 혹은 복합재료로 이루어진 판재를 덧대고 이들 주위에 체결부를 가공하여 볼트와 너트에 의해 기계적으로 접합하는 방식으로, 체결부를 중심으로 응력 집중 현상이 나타나거나 균열, 층간 분리 등을 초래한다[5]. 이와 달리 접합은 손상된 부분에 패치를 이용하여 적층보수는 방식으로, 손상된 면과 수리면 사이의 접합 계면의 연속성이 높으며 우수한 강도 회복 특성을 가지고 있어 활발한 연구가 이루어지고 있다[6-8]. 그러나 손상된 구조체에서 사용된 동일한 일반적인 FRP 재료에 의한 접합 연구에 제한되어 있어, 접합 계면의 분리(De-bonding)를 방지하기 위한 대안 도출에 한계를 가진다[9,10].

따라서 본 연구에서는 계면접합력을 향상시키고 가혹한 해양환경에서의 재료 수명 증가와 경량 복합재료의 우수한 성질을 유지하기 위해서, 충전재로 이루어진 복합재료를 통해 손상된 계면을 수리[11]하였으며 할로이사이트 나노튜브(Halloysite nanotube, HNT)와 밀드 카본(Milled carbon, MC)을 입자 충전재(첨가재)로 사용하였다. 석회암을 주재료 한 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 조성의 나노튜브 형상의 HNT와는 달리 밀드카본은 탄소섬유를 마이크로 단위로 분쇄한 형태로 기존 탄소의 환경 유해성을 그대로 가지고 있다. 또한 복합재 수리 후에는 접합계면 내 접착성능만큼이나 충격 특성이 요구되는데 이는 수리 계면에서의 2차 분리에 의한 손상을 방지하기 위함으로, HNT는 탄소나노튜브의 대체소재로서 고분자에 강화되어 충격 성능을 보강한다. 이렇듯, 두 종류의 입자가 보강된 유리섬유강화복합재료(Glass fiber reinforced plastic, GFRP)를 사용하여 계단형 패치 보수법에 의해 복합재료 수리를 실시하였으며 70°C 고온의 증류수에 최대 70일간 침지하여 주기적으로 흡습률을 관찰하였다. 또한 입자 첨가량에 따른 흡습 거동, 흡

습 전과 후에 따른 기계적 강도의 변화, 계단형 패치 보수법에 의한 재료 강도 회복률을 분석하였다.

2. 실 험

2.1 실험 재료 및 방법

본 연구에서 사용된 에폭시 기지 HNT와 MC 입자 강화 GFRP는 Table 1에서와 같이 3가지 종류로 구성된다. 손상된 복합재 적층판은 에폭시 수지를 기반으로 한 유리섬유 프리프레그(Glass fiber prepreg)로 제작되었으며, 수리에 사용된 복합재는 에폭시 수지와 직조된 평직 유리섬유(Woven plain glass fiber)로, 수지를 섬유에 함침시키기 전에 HNT와 MC 입자를 각각 초음파 분산(Ultrasonic homogenization)하여 입자 콜로이드 용액(Particle colloidal solution)을 제작하였고, 이들을 Wet prepreg 성형법에 따라 적층하여 상호 이차 접합하였다. 이 때 사용된 각 입자는 0.5, 1, 3, 5 wt. %로 첨가량을 달리하였으며, 500 Watt/20 kHz의 출력으로 30분간 초음파 분산시킨 후 약 40°C 상온에서 일정한 온도로 유지한 것을 사용하였다.

Fig. 1은 계단형 패치 보수법의 모식도와 실제 손상된 복합재 적층판 제작 모습을 나타낸 것으로, 각 층이 일정한 간격을 가지고 형성되어 있어서 보수시, 패치를 정확한 길이

Table 1. Type of materials

Composition	Product name	Model
Matrix	Epoxy resin	KFR-120V (Kukdo Chmecal Co., Ltd)
	Hardener	KFH-141 (Kukdo Chmecal Co., Ltd)
Reinforcement	Glass fiber	Prepreg/Woven fiber (MSC Korea Co., Ltd)
Fillers	HNT	Diameter: 30-50 nm Length: 100-3000 nm CAS No. 1332-58-7 (Sigma-aldrich)
	MC	Diameter: 7 μm Length: 100 μm Milled carbon (Fiberman Co., Ltd)

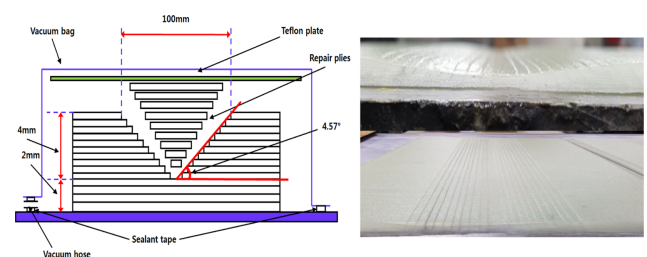


Fig. 1. Schematic diagram of the stepped patch repair (left) and the reproduction of damaged specimens (right)

로 가공하여 적층해야 하기 때문에 보다 정밀한 가공기술을 필요로 한다. 따라서 적층 후 진공 성형시 수리면의 수축, 뒤틀림 등을 방지하기 위해 테프론 판(Teflon plate)을 덧대 적층판을 고정할 수 있도록 조치하였다.

2.2 시험 및 평가

계단형 패치 보수법에 의해 수리된 HNT와 MC 강화 GFRP (이하 HNT/GFRP, MC/GFRP라 명명)는 ASTM D5229에 의해 흡습률을 측정하였으며 각 시험편을 70°C 고온의 증류수에서 최대 70일간 침지시켜 하루 간격으로 관찰하였다. 또한 흡습 전 시험편과 70일간 흡습된 시험편의 기계적 특성 분석을 위해, 만능재료시험기(Universal test machine KDMT-150, KyungDo KDP Co., Ltd.)를 사용하여 ASTM D3039와 ASTM D790에 따라 각각 3 mm/min, 1 mm/min의 시험 속도(Cross head speed)로 인장강도와 굽힘강도의 변화를 분석하였다. 이 때, 측정된 데이터를 토대로 재료의 강도 회복률(Strength recovery rate)을 계산하여 최적의 재료 수리 조건을 도출하였다. 또한 재료의 환경 열화 현상이 기계적 강도 이외에도 파단 거동에 미치는 영향을 확인하기 위해 Tescan사의 MIRA-3 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM)을 사용하였으며 파단면에 백금(Pt) 코팅을 한 후 진행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 흡습 시험

Fig. 2는 계단형 패치 보수법에 의해 수리된 GFRP를 70°C 고온 증류수에서 최대 70일동안 주기적으로 수분 흡습률을 측정하여 시간에 따른 흡습률 변화 거동을 나타낸 것으로, 입자의 종류와 첨가량에 따라 흡습 거동은 상이한 경향을 보였다. Fig. 2(a)에서 Neat GFRP를 기준으로 1 wt. % 이하의 HNT가 첨가된 시험편의 경우, 높은 내흡습성을 나타냈으나 3 wt. % 이상의 HNT가 첨가됐을 때 수분에 급격히 활성화된 것을 확인할 수 있었다. 또한 0.5, 1 wt. % HNT/GFRP를 제외하고는 약 15일과 45일에서 일시적인 증감 현상이 관찰됐다. 이는 HNT가 가지는 구조적 특성에 기인한 것으로, 본 연구에서 사용된 HNT는 $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ 의 분자식을 가지며 일반적으로 물 분자를 가지고 있는 Hydrohalloysite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)와는 달리 상대적으로 수분에 비활성화되어 있는 상태기 때문에, 이들은 다량의 수분에 강한 편이다. 그러나 HNT의 크기는 나노미터 단위로 이들 사이의 강한 반데르발스 힘(Van der Waals force)이 작용하여 서로 끌어당기는 인력으로 인해 응집현상(Aggregation phenomenon)이 발생한다. 이러한 응집은 점도가 높은 수지에서 분산할 때 더욱 두드러지게 관찰되는데, 이렇게 응집된 입자는 응집된 정도(크기)가 커질수록 에폭시 수지와 결합이 잘 이루어지지 않아 응집체 내부는 순수 HNT로 채워지게 된다.

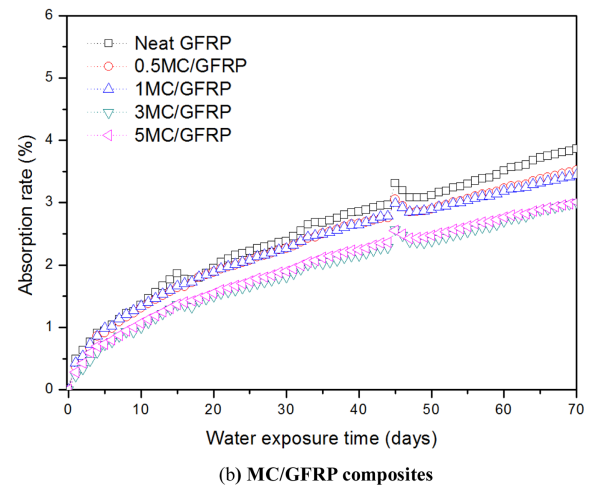
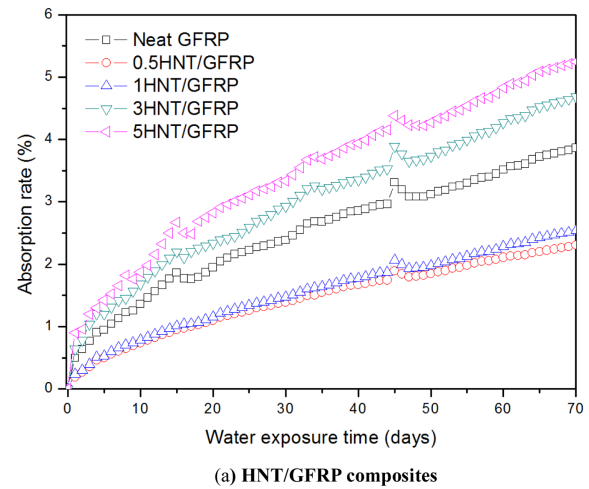


Fig. 2. The result of the water absorption test at 70°C high temperature distilled water for 70 days

이 때, 다량의 수분에 장시간 노출되게 되면 응집체 표면에 결합된 일부 에폭시 수지가 수분에 열화되어 간극을 발생시킨다. 수분이 가지는 외부에서 내부로 작용하는 압력에 의해 틈 사이로 수분이 응집체 내부로 침투하면서 밀도가 낮고 부피가 큰 HNT 응집체를 압축시켜, Fig. 2(a)에서와 같이 일시적인 수분 활성화 구간을 형성하게 된다. 다시 말해서, HNT의 경우 내흡습성을 향상시키기 위한 첨가제로 사용하기 위해서는 점도를 가지는 액체와의 결합에 있어서 균일한 분산에 대한 연구가 선행되어야 하며 이는 최종 제품의 물성과 수명에 직접적인 영향을 미치는 주요한 요인이 된다는 것을 확인할 수 있었다[12].

Fig. 2(b)에서 사용된 MC는 HNT와는 달리 입자 첨가량에 따른 흡습률의 차이가 상대적으로 크지 않았으며 응집과 같은 현상에 영향을 덜 받았다. 대체적으로 70일간 완전한 곡선을 보였으며 약 45일에서 일시적인 증감 현상이 관찰되었다. 이는 HNT/GFRP 흡습 거동과 비교했을 때, 이는 마이크로미터(μm) 크기의 MC와 나노미터(nm) 크기의 HNT

의 구조적 특징 차이에서부터 비롯되었으며 응집을 일으키는 메커니즘 차이에 의한 결과라 사료된다. 다시 말해서 입자 첨가량에 따른 흡습률 변화 폭의 차이가 HNT/GFRP에서 도드라지는 이유는 HNT의 표면적 크기에 의한 상대적으로 넓은 결합 계면과 응집력 때문이라 판단된다. 또한 MC도 미비하지만 소량의 첨가에 대해 상대적으로 내흡습성을 보였으며 HNT에 비해 5 wt. %까지는 첨가량과 내흡습성이 비례하는 경향을 나타냈다. 이는 MC의 경우 응집현상을 초래하는 입자 간 인력 발생이 적으며 에폭시 수지와 우수한 분산 결합력에 의한 결과라고 판단된다.

3.2 기계적 물성

HNT와 MC 강화 GFRP로 보수된 적층판을 70°C 고온 증류수에서 70일 동안 침지시킨 후 인장강도 변화를 비교 분석하였으며, 인장시험의 결과는 Fig. 3과 같다. 0.5HNT/GFRP와 1MC/GFRP가 흡습 전과 후 가장 높은 인장강도를 나타냈으며 이를 기점으로 점차 인장강도가 저하되었다. HNT는 상대적으로 MC에 비해 흡습 전과 후의 그래프 개형이 비슷한 경향을 보였으며 입자 첨가량에 따른 강도 차이는 최소 12.5%에서 최대 15.3%로 약 14.05%의 일정한 강도 감소율을 나타냈다. 반면, MC는 입자 첨가량이 증가함에 따라 흡습 전과 후의 강도 차이가 최대 20.7%에서 8.3%로 감소했다.

Fig. 4에서 볼 수 있듯이, 굽힘강도의 경우 인장시험 결과와는 다른 그래프 경향을 보였다. 0.5HNT/GFRP와 3MC/GFRP가 흡습 전 가장 높은 굽힘강도를 나타냈으나 흡습 후에는 1HNT/GFRP와 3MC/GFRP가 높게 측정되었으며, 높은 강도 감소율을 보였다. 실제 HNT는 내충격성을 향상시키기 위한 기능성 첨가제로 연구되고 있으며, 이는 굽힘시험 결과에서와 같이 0.5, 1 wt. %에서 안정적인 경향을 보였다. 특히 흡습 환경은 인장방향으로의 응력보다는 압축방

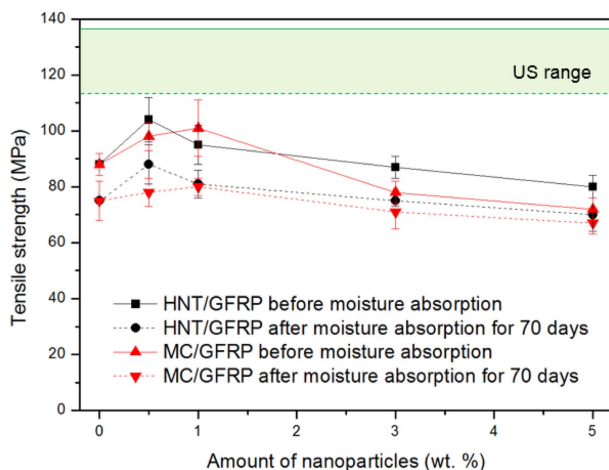


Fig. 3. Change in tensile strength of HNT/GFRP and CNT/GFRP composites before and after water absorption test

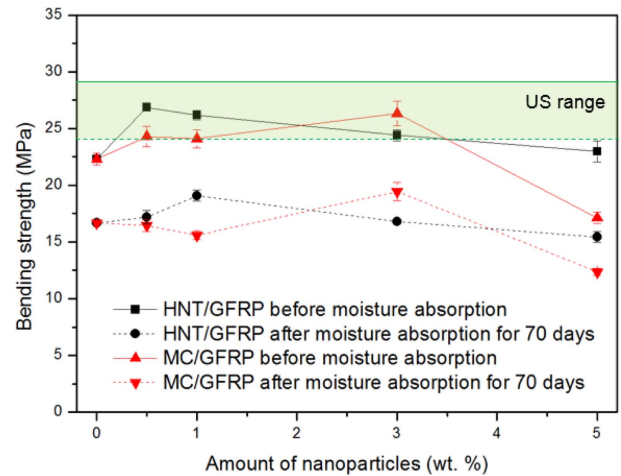


Fig. 4. Change in bending strength of HNT/GFRP and CNT/GFRP composites before and after water absorption test

향으로 응력을 받았을 때, 적층복합재료의 층간(계면) 결합력에 더욱 영향을 미치기 때문에, 에폭시 수지와 유리섬유 사이에 가교역할을 하는 HNT의 흡습 특성에 주로 기인한다. 이와 같이, MC는 HNT보다 체적이 크기 때문에 계면 결합력에 미치는 영향이 소량에도 민감하게 작용하며 상대적으로 그래프의 개형이 입자 첨가량에 따라 큰 폭으로 변화하는 것을 알 수 있었다. 다시 말해서, MC는 탄소섬유를 파쇄한 것으로 탄소섬유가 가지는 고유한 내충격성을 동일하게 가지지만[13], 복합재 수리에 있어서 HNT에 비해 상대적으로 취약한 굽힘 특성을 발현한다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 본 연구에서 사용된 MC의 경우 표면 기능화 없이 Raw 타입의 MC를 사용했기 때문에 Amine(-NH₂) 기능기 그룹을 사용하여 표면 기능화한 MC에 비해 에폭시 수지와 결합력이 낮아 상 분리 현상을 보이게 되며 이는 곧 기계적 물성을 감소시키는 주요한 요인으로 작용하게 된다.

이러한 인장시험과 굽힘시험 결과를 토대로 흡습 전 순수 계단형 패치 보수법에 의한 강도 회복률을 Table 2와 같이 계산하였으며 이 때, 앞서 언급한 보수법에 맞는 최적의

Table 2. Recovery rate according to the amount of the particle addition by a stepped patch repair

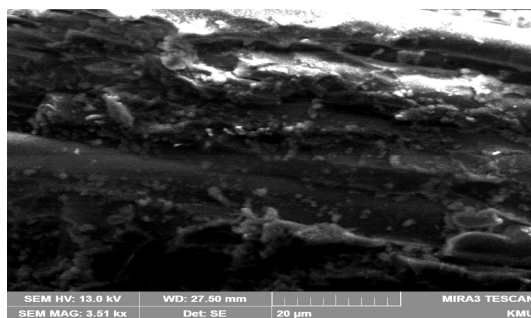
Recovery rate (Undamaged specimen, US)	Amount of HNTs (wt. %)					
	US	0	0.5	1	3	5
Tensile strength (%)	100	64.7	76.4	69.8	63.9	58.8
Bending strength (%)	100	75.8	91.3	89.0	82.9	78.1
Recovery rate (Undamaged specimen, US)	Amount of MC (wt. %)					
	US	0	0.5	1	3	5
Tensile strength (%)	100	64.7	72.0	74.2	57.3	52.9
Bending strength (%)	100	75.8	82.6	81.9	88.2	56.3

재료 조건을 분석하였다. 인장강도 회복률의 경우, 비입자 첨가 Neat GFRP에 비해 각각 0.5HNT/GFRP와 1MC/GFRP가 약 12%와 16%, 굽힘강도 회복률은 각각 0.5HNT/GFRP와 3MC/GFRP가 약 8%, 13%로 가장 높게 측정되었다.

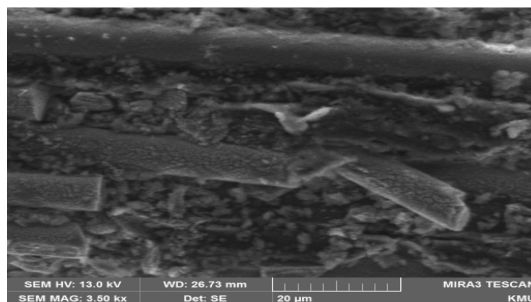
3.3 파단면 관찰

HNT와 MC 첨가 GFRP로 복합재 수리 후 고온 다습한 환경에 장시간 노출시켰을 때 강도 회복률과 계면 결합력 향상에 있어 앞서 언급된 입자 분산 및 응집이 구조적으로 재료 내부에서 어떠한 거동을 보이는지와 이에 따른 영향을 입증하기 위해 SEM을 통해 층간 계면을 분석하였으며, 대표적으로 높은 강도 회복률을 보인 0.5HNT/GFRP와 0.5MC/GFRP를 관찰한 사진을 나타냈다. 이는 1 wt. %를 넘어서게 되면 응집현상이 지배적이므로 명확한 응집 구조를 확인하는데 어려움이 존재하기 때문이다.

Fig. 5(a)에서 유리섬유 주위로 다량의 수지 층을 확인할 수 있었다. 이는 HNT가 에폭시 수지와 결합을 향상시켜 에폭시 수지 자체의 열화 현상을 방지해 줌으로서, 수분의 침투 현상을 저하시키는 역할을 하기 때문인 것으로 사료된다. 반면에, Fig. 5(b)에서는 유리섬유 주위로 상대적으로 얇은 층으로 에폭시 수지가 잔류하고 있는데, 이는 HNT보다 입자 크기가 큰 MC의 결합 한계를 보여주는 것으로 결합 밀도가 낮아 파괴 양상이 잘게 으스러진 파편형상임을 확인할 수 있었다.



(a) 0.5HNT/GFRP



(b) 0.5MC/GFRP

Fig. 5. Fracture surface of HNT/GFRP and MC/GFRP composites by SEM after 70 days

4. 결 론

본 연구에서는 복합재 수리시 기계적 강도 회복률을 향상시키고, 가혹한 환경에서의 재료 수명을 연장하고자 손상된 판을 구성하는 GFRP 복합재 판에 HNT와 MC를 첨가하여 입자 보강시킨 HNT/GFRP와 MC/GFRP를 각각 사용하여 보수한 후 입자 첨가량에 따른 특성을 분석하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

(1) 70°C 고온 증류수에서 재료의 수명 연장을 위해 우수한 내습성을 가진 0.5HNT/GFRP 복합재의 사용이 적합했으며, MC의 경우, 5 wt. %까지는 입자 첨가량 증가에 따라 흡습 저항성 역시 증가하는 경향을 보여 기능성 첨가제로의 적용 가능성이 높다고 판단된다.

(2) HNT의 구조적 특성에 기인하여 에폭시 수지와 분산시, 균일한 분산을 통해 입자 응집 현상을 최소화할 수 있으며 이는 최종 제품의 물성과 수명에 직접적인 영향을 미치므로 상대적으로 MC에 비해 정교한 분산 기술이 요구된다.

(3) 대체로 1 wt. % 이하 소량의 입자 첨가로 인장강도와 굽힘강도를 향상시킬 수 있었으며, 장시간 고온의 흡습 환경에서도 비슷한 경향을 보였다. 특히 굽힘 특성은 적층복합재료의 층간 결합력에 영향을 미치기 때문에 입자 크기가 작은 HNT를 사용하여 에폭시 수지와 유리섬유 사이의 가교 형성과 결합 밀도 향상을 통해 계면 결합력 증진이 가능할 것으로 사료된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the MSS(&KISED) IDEA FACTORY Research Grant of 2017 (10105714).

REFERENCES

1. Moon, C.K., Choi, H.L., and Lee, B., "Influence of Moisture Absorption on the Mechanical Properties in the Laminated Composite," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 14, No. 3, 2000, pp. 90-99.
2. Susanna, D.O., Federica, P., Ivana, R., Antonella, P., and Marco, F., "Repair Potential of a Laboratory-processed Nano-hybrid Resin Composite," *Journal of Oral Science*, Vol. 50, No. 4, 2008, pp. 403-412.
3. Kim, Y.H., Park, C.W., Jung, G.S., and Shin, S.J., "Environment Deterioration Characteristics of Polypropylene/Glass Fiber Composites under Moisture Absorption Environment," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 30, No. 6, 2016, pp. 520-525.
4. Kong, C.D., Park, H.B., Lim, S.J., and Shin, C.J., "A Study on Compressive Strength of Carbon/epoxy Composite Structure Repaired with Bonded Patches after Impact Damage," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 23, No. 5, 2010,

- pp. 15-21.
5. Ahn, S.H., *Repair of Composite Laminates*, Ph.D Thesis, Stanford University, U.S.A., 1997.
 6. Yoon, S.W., Jung, M.K., Park, Y.B., Kwon, J.H., Choi, J.H., Shin, S.J., Song, M.H., and Song, K.I., "Tensile Strength of Composite Laminates with Various Repairing Methods," *The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 11, 2011, pp. 96-99.
 7. Lee, J.S., "Applications of Bonded Composite Repair on Aircraft Structural Damage," *The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 4, 2001, pp. 336-341.
 8. Yoo, J.S., Truong, V.H., Park, M.Y., Choi, J.H., and Kweon, J.H., "Parametric Study on Static and Fatigue Strength Recovery of Scarf-patch-repaired Composite Laminates," *Composites Structures*, Vol. 140, 2016, pp. 417-432.
 9. Kim, C.H., Yoo, J.S., Byeon, C.S., Ju, H.W., Park, M.Y., Choi, J.H., and Kweon, J.H., "Failure Characteristics of Scarf Patch-repaired Composite Single-lap Joints," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 29, No. 3, 2018, pp. 177-124.
 10. Kwon, D.J., Wang, Z.J., Choi, J.Y., Shin, P.S., and Park, J.M., "A Study of Damage Sensing and Repairing Effect of CNT Nanocomposites," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 27, No. 6, 2014, pp. 219-224.
 11. Kim, B.A., and Moon, C.K., "Nanoparticle Effect on Durability of Carbon Fiber/Epoxy Composites in Saline Water Environment," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 28, No. 1, pp. 64-68.
 12. Park, S.J., *Change of the Structural and Mechanical Properties on Nanocomposites based on Halloysite Nanotubes with the Optimization of Dispersion by Ultrasonic Waves*, Master Thesis, Tokushima University, Japan, 2016.
 13. Jung, K.S., *A Study on the Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Composites Repaired by Stepped Patch Method with Particles*, Master Thesis, Korea Maritime and Ocean University, Republic of Korea, 2017.