

해초 나노섬유가 황마섬유 강화 복합재료의 기계적 물성에 미치는 영향

김재철* · 이동우** · 송정일*†

Investigation of the Effect of Seaweed Nanofibers in Jute Fiber-reinforced Composites as an Additive

Jae-Cheol Kim*, Dong-Woo Lee**, Jung-Il Song*†

ABSTRACT: Recently, environmental pollution caused by plastic waste, ecosystem disturbance of micro-plastics and human body accumulation are becoming big problems. In order to replace the traditional plastic, eco-friendly resin and natural fiber-based composite materials have been developed, but they have a disadvantage that their mechanical properties are significantly lower than those of synthetic fiber-based composites. In this study, eco - friendly nanofiber was extracted from seaweed and used as an additive in order to improve the mechanical properties of jute fiber-reinforced composites. Through the hand lay-up process, the composites were fabricated, and it was confirmed that the nanofiber was effective in improving the mechanical properties of natural fiber composites through tensile, bending and drop weight impact tests.

초 록: 최근 플라스틱 폐기물로 인한 환경오염, 미세플라스틱의 생태계 교란 및 인체축적이 큰 문제로 떠오르고 있다. 이를 대체하기 위하여 친환경 수지 및 천연섬유 기반의 복합재료가 개발되어 왔으나 합성섬유 기반의 복합재료에 비하여 기계적 물성이 크게 떨어진다는 단점이 있다. 본 연구에서는 천연섬유인 황마섬유(jute fiber)의 기계적 물성을 향상시키기 위하여 해초로부터 친환경 나노섬유를 추출 후 첨가제로 사용하였다. 핸드 레이업 공정을 이용하여 복합재료를 제조하였으며, 인장, 굽힘, 낙추충격시험을 통하여 나노섬유가 천연섬유 복합재료의 기계적 물성 향상에 효과적임을 확인할 수 있었다.

Key Words: 해초나노섬유(Seaweed nano fiber), 핸드 레이업(Hand layup), 황마섬유 강화 복합재료(Jute fiber-reinforced composites), 기계적 물성(Mechanical property), 첨가제(Additive)

1. 서 론

매년 발생하는 엄청난 양의 플라스틱 쓰레기는 분해되는데 오랜 시간이 걸려 많은 문제가 되어왔으며, 이를 섭취한 생물들이 입는 피해도 점차 심각해지고 있다. 또한, 최근에는 폐기된 플라스틱이 태양광 및 환경에 의한 분해로 인하여 마이크로 플라스틱(micro plastic)이 되는 것이 큰 문

제로 떠오르고 있다[1-3]. 마이크로 플라스틱은 플랑크톤이 섭취하고 먹이사슬을 따라 최종적으로 인간이 섭취하게 되므로, 인체에 점차 누적되면서 건강을 위협할 것으로 예상되고 있다[4].

플라스틱의 이러한 단점을 극복하고 환경에 미치는 영향을 최소화하기 위하여, 생분해성이 있는 친환경 수지 및 복합재료가 개발되어 왔다. 그러나 천연섬유의 친수성으로

Received 4 December 2018, received in revised form 8 December 2018, accepted 13 December 2018

*Department of Mechanical Engineering, Changwon National University, Changwon-si, 51140, Korea

*†Department of Mechanical Engineering, Changwon National University, Changwon-si, Korea, Corresponding author (E-mail: jisong@changwon.ac.kr)

**The Research Institute of Mechatronics, Changwon National University, Changwon-si, 51140, Korea

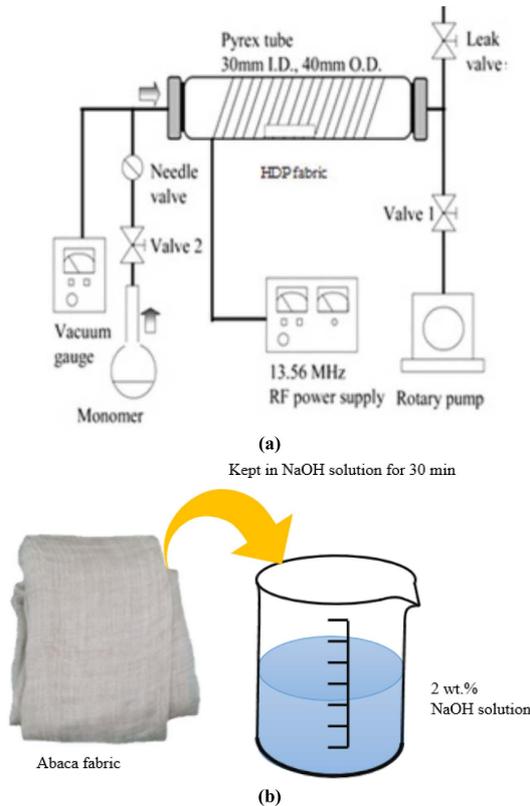


Fig. 1. Surface treatment of natural fibers; (a) Plasma treatment, and (b) Alkali treatment

인하여 소수성을 지닌 수지와와의 계면접착강도가 떨어진다는 단점이 있었으며, 이는 친환경 복합재료의 응용을 제한하여 왔다. 이를 극복하기 위하여 천연섬유의 표면처리를 통하여 소수성을 향상시킴으로써 수지와 기지재 간의 계면접착력을 향상시키기 위한 다양한 연구가 시도되어 왔다.

C. Venkata Prasad 등의 연구에서는 천연섬유 표면의 상온상압 플라즈마 처리를 통해 리그닌 등의 불순물을 제거하고, 모노머로 코팅을 할 수 있었으며, 이를 통하여 천연섬유 복합재료의 기계적 물성을 향상시킬 수 있었다[5]. Dani Jagadeesh 등의 연구에서는 수산화나트륨을 이용하여 천연섬유 표면을 알칼리처리 함으로써 천연섬유 복합재료의 기계적 물성을 향상시킬 수 있었다[6].

그러나, 천연섬유의 표면처리만 사용할 경우 복합재료의 기계적 물성을 향상시키는데 한계가 있을 뿐만 아니라, 처리시간과 비용으로 인하여 천연섬유의 사용으로 얻을 수 있는 이점이 크게 줄어든다는 문제가 있었다.

MWCNT와 같은 나노입자를 사용할 경우 천연섬유 복합재료의 물성향상에 효과가 있었지만[7], 비용측면에서 비효율적이었다.

본 연구에서는 친환경 소재인 해초에서 나노섬유를 추출한 뒤 친환경 복합재료의 제조공정에서 첨가제로 사용함으로써 기계적 물성을 향상시키고자 하였다. 해초로부터

추출한 나노섬유는 제조가 용이하며 비용이 저렴하기 때문에 기계적 물성향상에 효과가 있을 경우 널리 사용될 것으로 기대된다.

2. 연구방법

2.1 나노섬유의 추출

원재료인 천연 해초로부터 불순물을 제거하고 나노 섬유를 추출하여 복합재료의 제조 시 첨가제로 사용하였다. 먼저, 증류수에 해초를 넣고 충분히 끓인 후 맑은 물에 세척하여 불순물을 제거하고, 동결건조시켜 수분을 제거한다. 그 후, 산소계 표백제(Oxygen Bleach)를 사용하여 표백 작업을 하고, 5 wt.% 수산화나트륨(NaOH) 수용액에서 4시간 동안 끓여 섬유소(Cellulose)를 다른 성분들과 분리하였다. 다음으로, 진공 필터기를 이용하여 섬유소를 추출하고 pH가 중성이 될 때까지 반복해서 세척하였으며, 마지막으로 에탄올 치환법을 이용하여 수분을 제거함으로써 섬유소의 추출을 완료하였다. Fig. 3(a)와 (b)는 각각 천연 해초로부터 나노섬유의 추출 전·후 사진이다.

2.2 복합재료 제조

2.2.1 사용 재료

복합재료 제조에 사용된 보강재료는 직조 구조로 짜인

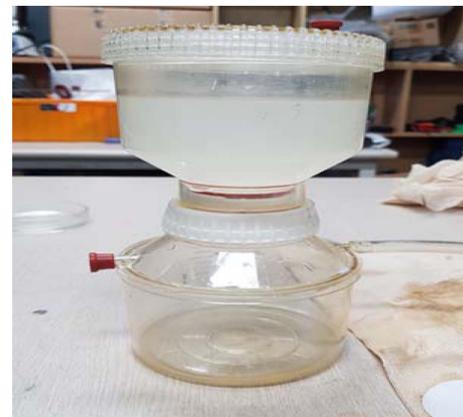


Fig. 2. Filtration of cellulose nano fiber



Fig. 3. Extraction of seaweed nano fiber: (a) Before, and (b) After

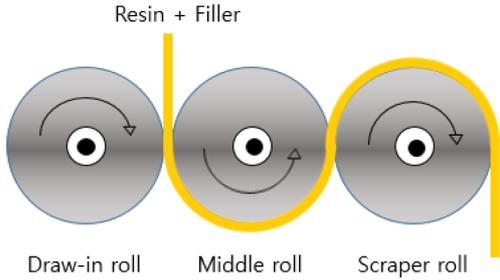


Fig. 4. Conceptual diagram of 3 Roll Mill

황마섬유(Jute fabric, 대하교역, 한국)를 사용하였으며, 기지재로는 상대적으로 점도가 낮은 인퓨전용 비닐에스터(Vinyl ester), 경화제(Methyl Ethyl Ketone Peroxide) 및 촉진제(Cobalt Naphthalate)를 국내업체인 호제화학으로부터 구매하여 사용하였다. 또한 섬유와 기지재간의 계면접착강도를 향상시키기 위하여 천연 해초로부터 추출한 나노섬유를 첨가제(additive)로 사용하였다.

2.2.2 나노섬유의 분산

나노섬유 첨가제를 기지재 내에 분산시키기 위하여, 서로 다른 방향과 속력으로 회전하는 롤의 전단력을 이용하여 효과적으로 나노소재를 분쇄 및 분산하는 장비인 3롤-밀(3 Roll Mill)을 사용하였다. 장비의 회전 속도는 200 RPM으로 작업하였으며, 롤 사이의 간격은 각각 15 μm, 8 μm이다. 첨가제가 수지에 충분히 분산될 수 있도록 3~4번의 반복 작업을 수행하였다. Fig. 4는 3롤-밀의 개략도이다. 첨가제는 수지에 각각 0.1 wt%, 0.3 wt%, 0.5 wt%의 비율로 혼합하였으며, 혼합된 수지를 복합재료의 제조에 사용하였다.

2.2.3 핸드-레이업 공정

복합재료의 제조에는 다양한 공정이 사용가능하다. 그러나 첨가제가 혼합된 수지를 사용할 경우, 수지를 주입하는 방식의 성형공정은 첨가제가 섬유에 의해 필터링(filtering)되기 때문에 사용할 수 없다. 본 연구에서는 고전적인 복합재료의 제조공정인 핸드-레이업(Hand-Layup) 방법을 이용하여 복합재료를 제조하였다. 이 공정은 VARTM(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) 공정에 비하여 섬유 체적율이 낮은 단점이 있으나, 첨가제가 기지재 내에 균일하게 분산되어 있는 상태를 유지할 수 있다. 구체적인 핸드 레이업 절차는 다음과 같다. 먼저 천연섬유를 적층할 몰드의 표면을 충분히 연마/세척하고 이형처리를 하였다. 그후, 4장의 황마섬유를 몰드 표면에 적층하였다. 섬유를 적층하는 과정에서, Fig. 5와 같이 롤러와 브러시를 이용하여 경화제가 촉진제가 혼합된 수지를 보강재에 퍼 바르는 작업을 수행하였다.

2.3 기계적 물성평가

해초 나노섬유의 첨가가 천연섬유 복합재료의 기계적 물

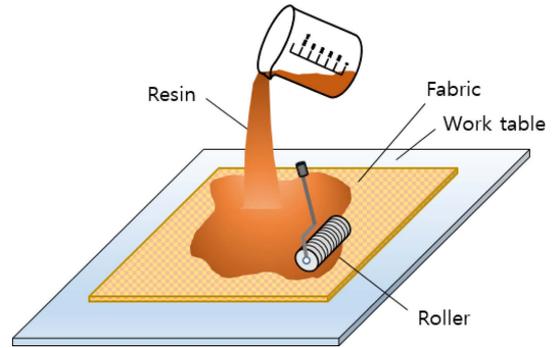


Fig. 5. Manufacturing process Diagram of hand-layup

성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 기계적 물성평가를 수행하였다. 인장시험(Tensile test), 3점 굽힘시험(3 point bending test), 낙추 충격 시험(Drop-weight impact test)을 각각 ASTM D3039, ASTM D790, ASTN D7136 규격에 따라 진행하였다.

인장시험의 경우, 1 mm/min의 시험속도를 사용하였으며 신률계(Extensometer)를 이용하여 인장시험편의 평행부의 표점 거리의 변화를 정밀하게 측정하였다. 굽힘시험의 경우, 지지 거리를 시편 두께의 16배로 했으며 시험 속도는 1.36 mm/min를 사용하였다. 낙하 충격 시험의 경우, 시험편의 두께에 따른 임팩터의 낙하 에너지를 계산하고 위치 에너지 공식과 연립하여 충격 높이를 계산하였으며 시험에 사용한 충격에너지는 21 J이다.

3. 연구 결과

3.1 인장거동

Fig. 6과 7은 나노섬유를 첨가하여 제조한 나노복합재료의 인장거동을 나타낸 것이다. 인장강도는 0.1%의 나노섬유를 첨가하였을 때 가장 높았으며, 그 이상 첨가할 경우 점점 감소하는 거동을 보였다. 나노섬유를 첨가하지 않고 황마섬유만을 이용하여 제조한 복합재료는 평균 34 MPa의

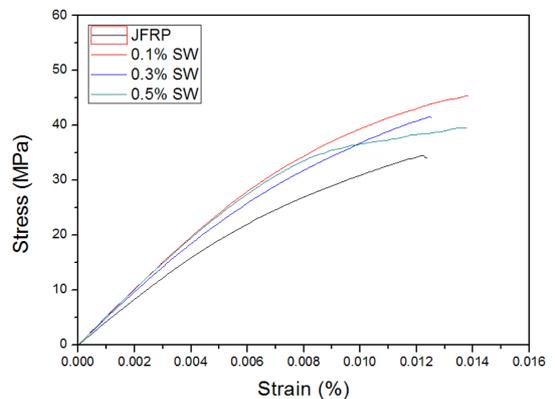


Fig. 6. Tensile behavior of nanocomposites

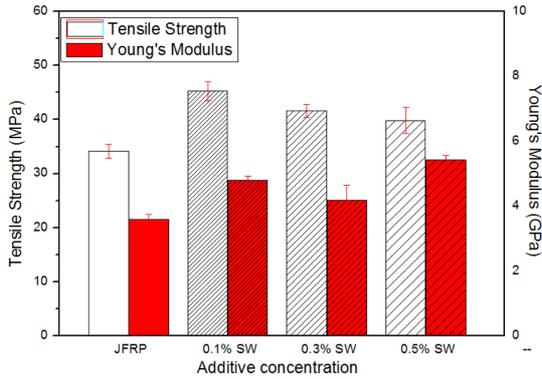


Fig. 7. Tensile properties of nanocomposites

인장강도를 가졌으나, 나노섬유를 첨가할 경우 최대 45 MPa 까지 인장강도가 향상되었으며, 이는 약 24% 향상된 수치이다. 탄성계수는 나노섬유를 첨가함에 따라 조금씩 증가하였다.

3.2 굽힘거동

Fig. 8은 나노복합재료의 3점 굽힘시험 결과를 나타낸 것이다. 굽힘강도의 경우, 인장시험 결과와는 달리 나노섬유의 함량에 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 나

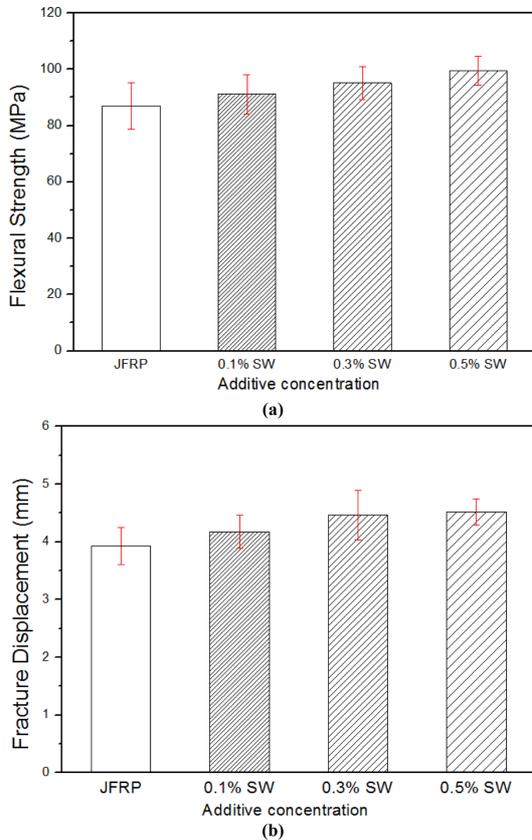


Fig. 8. The results of three-point bending test, (a) Flexural strength, and (b) Fracture displacement

노섬유를 첨가하지 않은 경우는 약 87 MPa, 0.5%를 첨가한 경우는 약 99 MPa로 최대 12% 증가한 굽힘강도를 보였다. 파단거리의 경우, 굽힘강도에 비례하는 경향을 보였으며, 나노섬유를 첨가하지 않은 경우에 비하여 최대 12%까지 증가하였다. 이는 해초로부터 추출한 나노섬유가 천연섬유 복합재료의 유연성을 향상시키는데 효과적임을 의미한다.

3.3 저속충격 거동

Fig. 9는 나노섬유를 첨가하지 않은 경우와 0.5%를 첨가한 경우의 낙추충격 거동을 비교한 것이다. 최대 충격하중은 각각 1281, 1543 N을 보였으며, 차이는 약 17%이다. 먼저 JFRP의 충격거동을 살펴보면, 충격직후 하중이 점점 상승하다가 최대치부터 급격히 하락하는 것을 보여준다. 이는 충격에 대한 저항이 상대적으로 낮음을 나타낸다. 반면에 나노섬유를 0.5% 첨가할 경우, 하중의 최대치가 더 짧은 시간에 나타났으며 최대치 이후로도 하중이 계단식으로 서서히 감소하는데, 이는 충격강도가 크게 향상되었음을 보여준다.

다음으로 충격흡수 거동을 살펴보면, JFRP의 경우에는 약 3.3 J의 에너지를 흡수한 이후 에너지의 흡수량이 급격히 감소하는 경향을 보였다. 이는 JFRP가 충격을 받은 이후 큰 저항없이 급격히 파괴되면서 시편이 관통이 되었음을

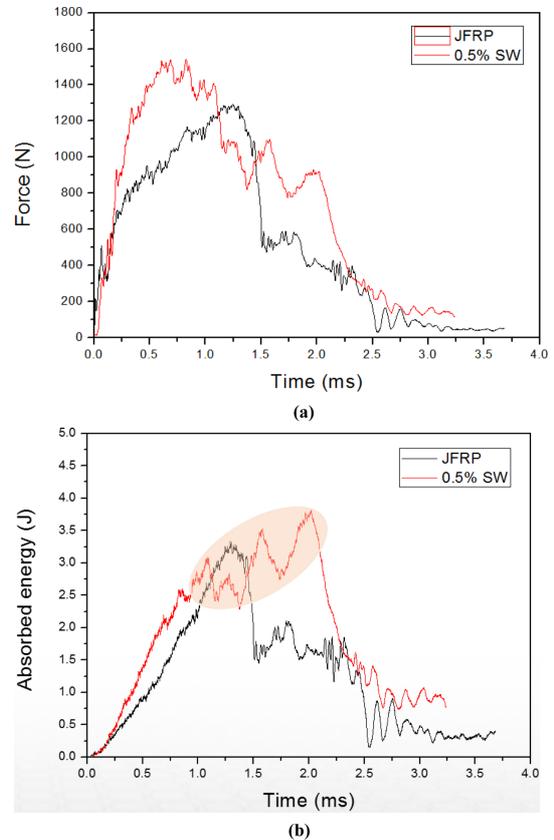


Fig. 9. The results of drop weight impact: (a) Load-time curve, and (b) Absorbed energy-time curve

의미한다. 반면에 0.5% 나노섬유를 첨가할 경우, 약 3 J까지 에너지를 흡수한 이후 하강과 상승을 반복하면서 약 3.7 J까지 에너지를 추가로 흡수하는 거동을 보였다. 이러한 거동은 충격을 받은 복합재료가 한번에 파손되지 않고, 점진적으로 파손되면서 나타나는 것으로 보이며, 균열길이가 클수록 충격을 많이 흡수하였던 연구사례[8]를 통하여 이러한 설명이 잘 일치함을 알 수 있다.

이러한 복합재료의 충격하중 및 에너지 흡수 거동을 통하여 나노섬유를 첨가한 복합재료의 충격물성이 크게 향상됨을 확인할 수 있었으며, 나노섬유가 기지재 및 황마섬유에 미치는 영향을 파악함으로써 물성향상 메커니즘을 확인하고자 하였다.

3.4 파단면 분석

Fig. 10과 11은 나노섬유를 첨가하지 않은 JFRP와 0.5%를 첨가한 시편의 파단면을 주사 전자현미경으로 촬영한 사진이다. 나노섬유를 첨가하지 않은 경우(Fig. 10(a)) 황마섬유가 뽑힌 자국이 다수 관찰되었으나, 나노섬유를 첨가한 경우에는 황마섬유가 폴리머와 함께 파단된 경우가 많았다. 이는 섬유와 기지재간의 계면접착력이 향상되었기 때문인 것으로 예상되며, 섬유의 강도가 기지재보다 높기 때문에 물성향상으로 이어지게 된다.

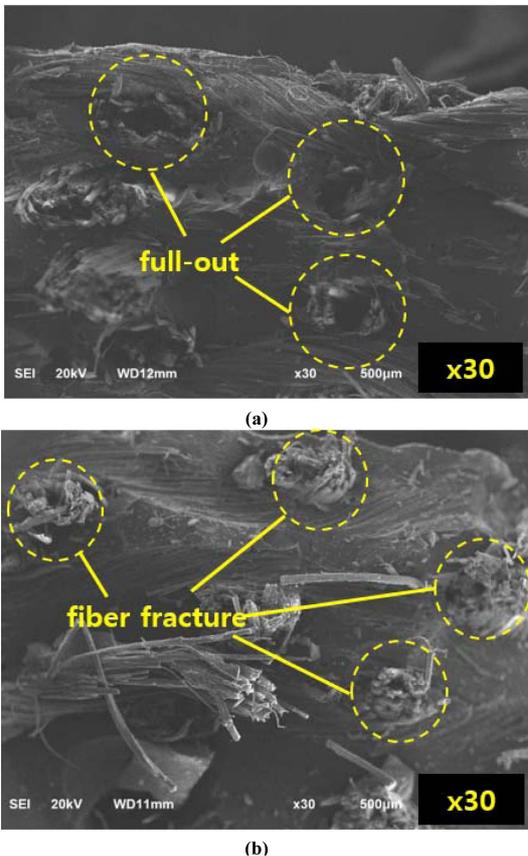


Fig. 10. Fracture surface of (a) JFRP, and (b) 0.5% SW

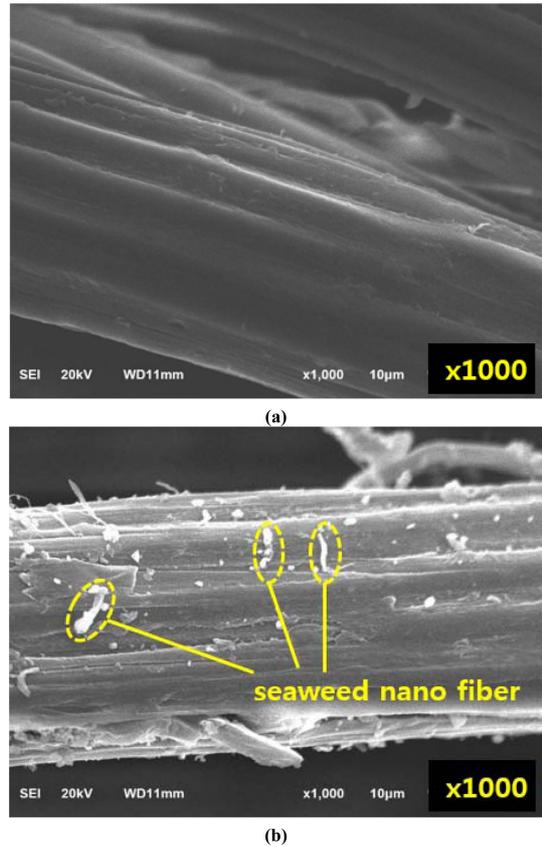


Fig. 11. Observation of the surface of jute fiber, (a) JFRP, and (b) 0.5% SW

물성향상의 메커니즘은 Fig. 11과 같이, 파단시편에서 천연섬유의 표면을 관찰함으로써 확인할 수 있었다. 나노섬유를 첨가하지 않은 JFRP의 황마섬유 표면은 매우 매끄러우며, 하중에 의한 섬유의 뽑힘 발생시 저항하는 힘이 매우 작다. 그러나 Fig. 11(b)와 같이 나노섬유를 첨가한 경우에는 나노섬유가 황마섬유의 표면에 부착되면서 표면 거칠기가 증가하였으며, 이는 계면접착강도 또는 계면전단강도의 상승에 영향을 주었을 것으로 예상된다.

천연섬유는 친수성 소재이기 때문에 일반적으로 기지재와의 결합강도가 떨어지지만, 해초에서 추출한 나노섬유 또한 친수성을 지니고 있기 때문에 황마섬유와 잘 결합한 것으로 생각되며, 그 결과 전반적인 기계적물성 향상에 영향을 준 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 해초로부터 추출한 나노섬유를 첨가제로 사용한 천연섬유 복합재료를 제조하였으며, 첨가제의 함량이 기계적물성에 미치는 영향을 평가하였다. 그 결론은 다음과 같다.

해초 나노섬유를 천연섬유 복합재료에 첨가할 경우 인

장, 굽힘, 충격물성의 향상에 도움이 되었으며, 이는 나노섬유가 성공적으로 추출되었음을 의미한다. 그러나 나노섬유의 함량에 따른 기계적 거동은 달랐다. 인장강도는 나노섬유를 0.1% 이내로 첨가하였을 때 가장 우수하였으며, 굽힘과 충격강도는 나노섬유를 0.5% 첨가하였을 때 가장 우수하였다. 이러한 결과는 나노섬유를 천연섬유와 함께 사용하되, 용도 및 하중의 유형을 고려하여 적절한 비율을 사용해야 함을 의미한다.

본 연구를 통하여 개발된 해초 나노섬유는 천연섬유 복합재료의 물성향상에 효과적일 뿐만 아니라 친환경성 및 경제성을 가지고 있어, 후속연구를 통하여 다양한 분야에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 2017~2018년도 창원대학교 자율연구과제연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

REFERENCES

1. Law, K.L., and Thompson, R.C., "Microplastics in the Seas," *Science*, Vol. 345, No. 6193, 2014, pp. 144-145.
2. Fahrenkamp-Uppenbrink, J., "Seas are Awash with Microplastics," *Science*, Vol. 345, No. 6193, 2014, pp. 175-177.
3. Vignieri, S., "Microplastic's Triple Threat," *Science*, Vol. 352, No. 6290, 2016, p. 1185.
4. Waring, R.H., Harris, R.M., and Mitchell, S.C., "Plastic Contamination of the Food Chain: A Threat to Human Health?" *Maturitas*, Vol. 115, 2018, pp. 64-68.
5. Venkata Prasad, C., Lee, D.W., Sudhakara, P., Jagadeesh, D., Kim, B.S., Bae, S.I., and Song, J.I., "Characteristic Studies of Plasma Treated unidirectional Hildegardia Populifolia Fabric," *Composites Research*, Vol. 26, No. 1, 2013, pp. 54-59.
6. Lee, D.W., Park, B.J., and Song, J.I., "A Study on Fire Resistance of Abaca/Vinyl-ester Composites," *Composites Research*, Vol. 30, No. 1, 2017, pp. 59-64.
7. Mohan, K., and Rajmohan, T., "Effects of MWCNT on Mechanical Properties of Glass-Flax Fiber Reinforced Nano Composites," *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, No. 5, 2018, pp. 11628-11635.
8. Lee, D.W., Park, B.J., and Song, J.I., "Fabrication of High-Stiffness Fiber Metal Laminates and Study of Their Behavior Under Low-Velocity impact Loadings," *Composite Structures*, Vol. 189, 2018, pp. 61-69.