

## 탄소섬유/아마섬유 하이브리드 복합재료의 기계적 물성 향상 기구에 관한 연구

아부자르 자밀\* · 이동우\* · 송정일\*†

### Study on the Mechanism of Mechanical Property Enhancement in Carbon Fiber/Flax Fiber Hybrid Composite Materials

Jamil Abuzar\*, Dong-Woo Lee\*, Jung-Il Song\*†

**ABSTRACT:** Environmental pollution from waste and the climate crisis, due to rising global average temperatures, are reaching critical levels threatening human survival. Research is ongoing across various fields to solve this problem, with a key focus on developing eco-friendly, carbon-neutral materials. Our study aimed to integrate natural fibers, known for their environmentally friendly properties and lower carbon emissions, with carbon fibers. In general, combining high-strength and low-strength materials results in intermediate properties. However, we found that certain properties in our study exceeded those of typical carbon fiber composite materials. To validate this, we produced both carbon fiber composite materials and carbon fiber/natural fiber hybrid composite materials. We then compared their mechanical properties using a range of specific tests. Our results revealed that the hybrid composite material exhibited superior bending strength and fracture toughness compared to the carbon fiber composite material. We also identified the underlying mechanisms contributing to this strength enhancement. This breakthrough suggests that the use of hybrid composite materials may allow the production of stronger structures. Moreover, this can play a significant role in mitigating environmental pollution and the climate crisis by reducing carbon emissions, a major contributing factor to these global challenges.

**초 록:** 대량의 폐기물에 의한 환경오염, 세계 평균기온 상승에 의한 기후위기가 인류의 생존을 위협하는 수준에 이르고 있다. 이를 해결하기 위하여 다양한 분야에서 관련 연구가 이루어지고 있으며 재료분야에서도 친환경적이며 탄소중립적인 소재를 개발하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 연구에서는 탄소섬유에 천연섬유를 조합함으로써 천연섬유의 장점인 친환경성과 탄소배출 저감을 달성하고자 하였다. 일반적으로 고강도와 저강도 소재를 조합할 경우 그 중간의 물성을 가지는 것으로 알려져 있지만, 본 연구에서는 일부 물성이 탄소섬유 복합재료의 물성을 초과하는 결과를 얻을 수 있었다. 이를 검증하기 위하여 탄소섬유복합재료와 탄소섬유/천연섬유 하이브리드 복합재료를 제조하고 다양한 기계적시험을 통하여 기계적 물성을 비교하고 우수한 물성을 보이는 시험에 대하여 강도향상 기구를 분석하였다. 시험결과 하이브리드 복합재료의 굽힘강도와 파괴인성치가 탄소섬유 복합재료에 비하여 우수하게 나타났으며 강도향상 기구를 규명하였다. 하이브리드 복합재료를 활용할 경우 더욱 우수한 강도의 구조물을 제작할 수 있을 뿐만아니라 환경오염 및 기후위기에 도 도움이 될 것으로 예상된다.

**Key Words:** 탄소섬유(Carbon fiber), 아마섬유(Flax fiber), 하이브리드 복합재료(Hybrid composites), 기구(Mechanism), 파괴인성치(Fracture toughness)

## 1. 서 론

2015년, 기후위기에 대응하기 위하여 195개국에서 참여한 파리협정이 파리에서 체결되었으며, 우리나라도 2020년에 가입하고 이산화탄소 순 배출량을 0으로 만들기 위한 2050 탄소중립을 선언하였다. 현재 핀란드 등 일부 국가는 2035년까지 탄소중립 달성을 목표로 하고 있으며, 대부분의 국가는 2050년까지 탄소중립 달성을 목표로 하고 있다[1]. 이러한 목표 달성을 위해 최근 섬유 및 복합재료 산업에서도 탄소배출의 저감을 위하여 많은 노력을 기울이고 있다[2]. 특히 해마다 세계 평균기온이 증가하면서 무더위, 급격한 온도변화, 길어진 여름 등 이상기후 현상도 전 세계적으로 나타나고 있어 관련 연구에 대한 요구는 해마다 크게 증가하고 있다.

본 연구에서는 탄소섬유와 동등한 수준의 기계적 물성을 지닌과 동시에 탄소배출을 저감하기 위한 방법 중 하나로 탄소섬유와 천연섬유를 함께 사용한 하이브리드 복합재료 제조기법을 제시하고자 하였다. 탄소섬유는 생산과정에서 막대한 양의 탄소를 배출하는 것으로 알려져 있지만 [3] 비강도(specific strength), 비강성(specific stiffness)이 매우 우수하여 자동차, 항공, 우주 등 다양한 산업에서 널리 사용되고 있을 뿐만 아니라 그 사용량이 지속적으로 증가하는 추세이다[4,5]. 반면에 천연섬유는 재배하는 과정에서는 이산화탄소를 흡수하고 수확 후 천연섬유 복합재료 제조시에는 이산화탄소를 배출하지만 전체 공정에서의 이산화탄소 배출 총량은 거의 상쇄되기 때문에 탄소중립 소재로써도 각광받고 있다[6]. 뿐만 아니라 천연섬유는 생분해성(biodegradable) 소재이기 때문에 환경적인 측면에서도 도움이 된다[7]. 따라서 탄소섬유와 천연섬유를 함께 사용하여 복합재료를 제조할 경우 탄소배출의 저감에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

그러나, 적층 복합재료 분야에서의 전통적인 이론인 혼합규칙(rule of mixture)에 따르면 서로 다른 기계적 물성을 지닌 두 종류의 재료를 혼합하여 복합재료 제조시, 복합재료는 그 중간의 기계적 물성을 가지는 것으로 알려져 있다[8]. 탄소섬유는 비강도, 비강성이 매우 우수한 소재인 반면, 천연섬유는 유리섬유에 준하는 비강도, 비강성을 가져 [9], 탄소섬유에 비해서는 기계적 물성이 크게 부족하다. 따라서 탄소섬유와 천연섬유를 함께 사용한 하이브리드 복합재료는 탄소섬유 복합재료에 비하여 기계적 물성이 크게 저하되어 기존의 탄소섬유 복합재료가 사용되던 분야에는 적용할 수 없는 것으로 여겨져 왔다. 그러나 선행연구에서 특정 방법으로 탄소섬유와 천연섬유를 적층할 경우 이종재간 계면에서의 어떤 기계적 거동으로 인하여 일부 기계적 물성이 탄소섬유 복합재료의 기계적 물성보다 더욱 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 기계적 향상 기구(mechanism)를 검증하고 굽힘시험, 파괴

인성시험 등 다양한 종류의 기계적 시험을 수행함으로써 하이브리드 복합재료의 장점 및 응용분야를 검토하고자 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 사용재료

본 연구에서는 탄소섬유/천연섬유 하이브리드 복합재료를 제조하기 위하여 평직 탄소섬유(woven carbon fabric, 한국카본, 대한민국)와 천연섬유의 일종인 평직 아마섬유(woven flax fabric, Eco-Technilin Co., 벨기에)를 보강재료, 인퓨전용 비닐에스터 수지(KRF-1031, 호제화학, 대한민국)를 기지재로 사용하였다. 아마섬유(flax fiber)는 천연섬유 중 강도가 매우 우수한 편에 속하여 유럽의 많은 국가에서 천연섬유 복합재료의 개발에 사용하고 있다. 복합재료의 제조에 사용된 재료의 구체적인 사양은 Table 1과 같다. 탄소섬유와 아마섬유의 기계적 물성에 매우 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

### 2.2 제조 공정

복합재료의 제조에는 적층복합재료의 제조공정중 널리 사용되는 방법중 하나인 진공 인퓨전 성형공정(Vacuum assisted Resin Infusion, VaRI)을 사용하였다(Fig. 1). 이 공정을 Dry fabric을 이용하여 대형 구조물을 성형할 때 널리 사용되고 있으며, 진공압으로 인하여 불필요한 수지가 빠져나오며 전체 성형면적에 대하여 균일한 품질을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 적층방법에 따른 물성변화를 평가하기 위하여 다양한 방법으로 탄소섬유 및 아마섬유를 번갈아가며 적층 후 복합재료 평판을 제조하였으며, 완성된 복합재료 평판은 시편가공기를 이용하여 가공 후 기계적 물성평가에 사용하였다.

Table 1. Specification of materials

Material	Tensile Strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
Carbon fabric	4,000	240	1.78
Flax fabric	345-1,100	27	1.5
Vinyl ester	78	3.66	1.17

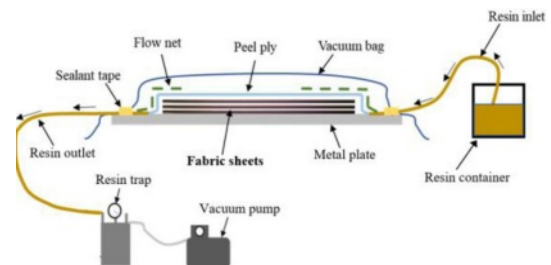


Fig. 1. Schematic of vacuum assisted resin infusion process

### 2.3 복합재료의 적층 구조

하이브리드 복합재료의 제조에 사용된 적층순서는 Figs. 2, 3과 같다. 본 연구에서 사용된 3점 굽힘시험과 파괴인성치 시험에 대하여 각각 다른 적층순서를 사용하였으며, 대조군인 탄소섬유 복합재료(CFRP)는 하이브리드 복합재료의 두께를 측정후 동일한 두께가 될 수 있도록 제조하여 사용하였다.

3점 굽힘시험에서는 적층구조가 비대칭일 경우 시험결과도 달라지기 때문에 이를 고려하여 적층구조를 결정하였다. Fig. 2의 s1과 s4(s: stacking sequence)는 적층 패턴은 동일하지만  $180^\circ$  뒤집은 형태의 비대칭 적층구조이며, s2와 s3는 서로 다른 패턴의 대칭형 적층구조이다. 각각의 복합재료 평판은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 탄소섬유 시트 4장, 아마섬유 시트 4장을 사용하여 총 8장으로 구성된 하이브리드 복합재료를 제조하였으며, 탄소섬유와 아마섬유의 비율이 동일하기 때문에 네 종류의 복합재료 평판 모두 두께가 동일하다.

파괴인성 시험의 경우 Fig. 3과 같이 탄소섬유와 아마섬유가 번갈아가며 적층된 구조를 사용하였으며, 탄소섬유와 아마섬유가 접하는 중심부에는 60 mm 깊이의 테플론 시트를 삽입하고 복합재료 평판 성형 후에는 테플론 시트를 제거함으로써 평판의 중심부 탄소섬유와 아마섬유가 접하는 위치에 균열(crack)을 지닌 복합재료가 제조될 수 있도록 하였다.

### 2.4 기계적 물성평가

본 연구를 수행하기에 앞서 선행연구로써 몇 가지 기계

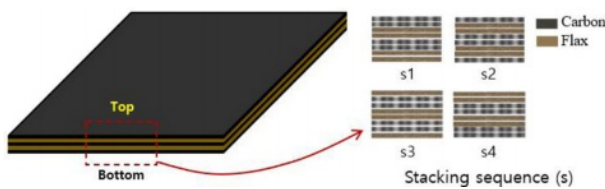


Fig. 2. Cross section of hybrid composites and used stacking sequence for 3-point bending test

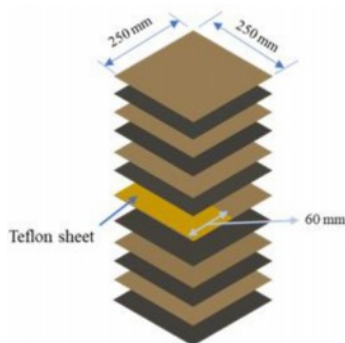


Fig. 3. Stacking sequence for fracture toughness test specimen

적 물성평가를 수행하였으며, 이 중에서 기계적 물성 향상에 명확한 효과를 보였던 시험은 3점 굽힘시험과 파괴인성치 시험을 선정하여 시험을 통하여 탄소섬유와 아마섬유를 조합하였을 때의 기계적 물성 향상 효과를 확인하고자 하였다. 구체적인 시험 방법은 다음과 같다.

#### 2.4.1 3점 굽힘시험 방법

복합재료의 굽힘강도를 측정하기 위하여 ASTM D790 시험규격에 따라 3점 굽힘시험을 수행하였다. 100 kN급 만능시험기(RB 301 UNITECH-T, 알앤비코리아, 대한민국)를 사용하였으며, 시험속도는 2 mm/min을 사용하였다. 시험의 개략도는 Fig. 4와 같다. 시험을 통하여 시간에 따른 하중 및 변위를 측정하였으며, 이를 이용하여 굽힘강도 및 굽힘탄성계수를 계산하였다.

#### 2.4.2 파괴인성치 시험 방법

복합재료의 파괴인성치를 측정하기 위하여 ASTM D5528

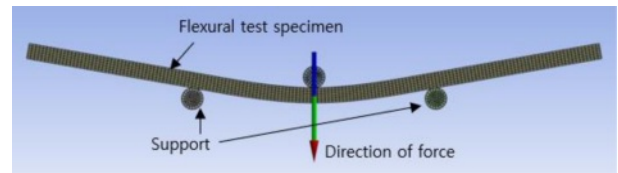


Fig. 4. Schematic of experimental setup for 3-point bending test

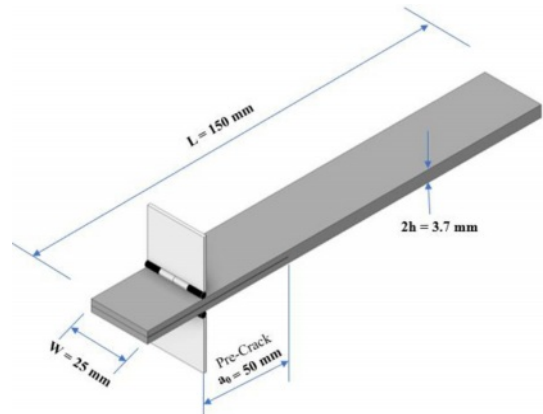


Fig. 5. Dimension of fracture toughness test specimen

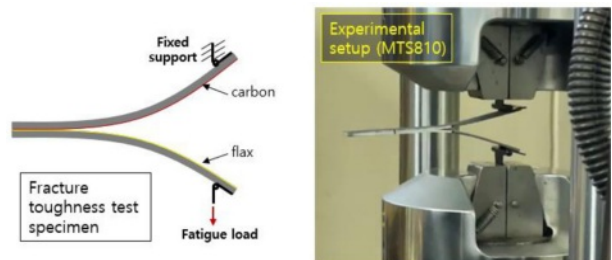


Fig. 6. Experimental setup for fracture toughness test

에 따라 파괴인성 시험을 수행하였다. ASTM D5528은 복합재료의 인장파괴인성을 측정하기 위한 시험으로, 모드I의 파괴인성을 평가한다. 유압식으로 작동하는 100 kN급 재료시험기(MTS 810, MTS, 미국)를 사용하였으며, 시편의 치수 및 셋업은 Figs. 5, 6과 같다. 2중 캔틸레버 빔 형태로 준비된 시편의 끝단에 시험규격에 따라 경첩(hinge)을 부착 후 시험기에 장착하여 시험을 수행하였다. 인장시험을 통하여 하중에 따른 균열진전거리 데이터를 확보하고, 이를 바탕으로 파괴인성을 계산하였다.

### 3. 연구 결과

#### 3.1 하이브리드 복합재료의 굽힘거동

하이브리드 복합재료의 굽힘시험 결과는 Figs. 7, 8과 같다. Fig. 7에서는 4가지 적층구조에 대한 굽힘강도 및 굽힘탄성계수를 비교하였으며, Fig. 8에서는 가장 높은 굽힘강

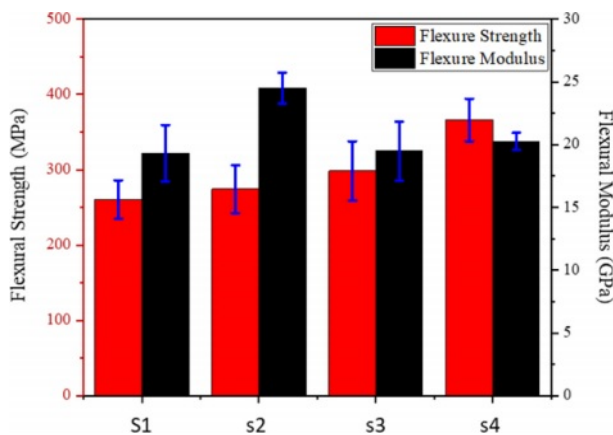


Fig. 7. Change in flexural strength according to the variation in laminate structure

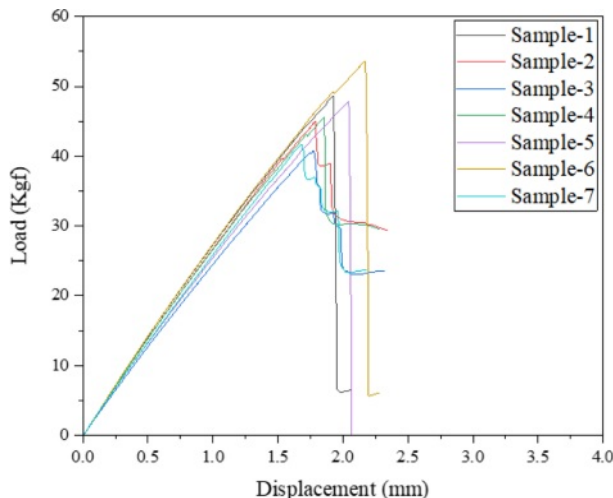


Fig. 8. Load-Displacement curve of hybrid composites with applied S4 stacking sequence

도를 가지는 s4 적층구조에 대한 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 최대 굽힘강도와 최소 굽힘강도간의 오차가 약 28% 정도로, 두 섬유유 적층순서가 굽힘강도에 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있으며, 탄소섬유와 아마섬유가 동일한 비율로 혼합이 되었지만 굽힘강도가 매우 높은 것을 알 수 있다. S4 적층구조에서는 탄소섬유가 아래쪽에 있어 굽힘시험과정에서 가장 높은 인장응력이 작용하며, 이때 탄소섬유가 아마섬유보다 높은 인장강도를 지니기 때문에 굽힘강도가 더 높게 나타난 것으로 추정되었다.

Figs. 9, 10에서는 구조해석을 통하여 굽힘강도가 최대가 될 수 있는 적층패턴을 찾아내고, 이를 적용하여 제조한 탄소섬유-아마섬유 하이브리드 복합재료와 CFRP를 비교한 결과이다. 구조해석은 상용소프트웨어인 ANSYS Workbench 2022 R2에 내장된 적층복합재료 전용 구조해석 모듈인 ANSYS ACP를 이용하여 수행하였으며, 본 논문에서는 결과만을 간략하게 표현하였다. 해석을 통하여 도출된 적층패턴인 [C3F3C2]에서 C와 F는 각각 탄소섬유와 아마섬유(Flax fiber, F)를 의미하며 숫자는 사용된 레이어의 수이다. 여기서 C3는 굽힘시험시 상단에, C2는 하단에 위치하였다. 해석결과에 따라 제조된 최적화된 하이브리드 복합재료의 굽힘강도는 해석결과보다 낮았지만 이전 시험결과(Fig. 7)에 비하여 더욱 높은 값을 얻을 수 있었다. 뿐만 아니라 최적화된 하이브리드 복합재료를 CFRP의 굽힘강도와 비교하였을 때 오차를 감안하더라도 동등하거나 더욱 높은 굽힘강도를 지니는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 7에서는 탄소섬유와 아마섬유가 동등한 비율로 사용되었던 것에 비하여 Fig. 9에서는 탄소섬유의 비율이 소폭 상승하였다.

강도가 낮은 아마섬유가 혼합된 하이브리드 복합재료가 CFRP보다 더욱 우수한 굽힘강도를 가진다는 측면에서 의미가 있다. 이러한 결과는 기존의 혼합규칙 이론에 맞지 않는 새로운 결과이며, 이는 천연섬유와 탄소섬유의 계면에서 계면접착강도에 영향을 주는 어떤 현상이 발생하였기

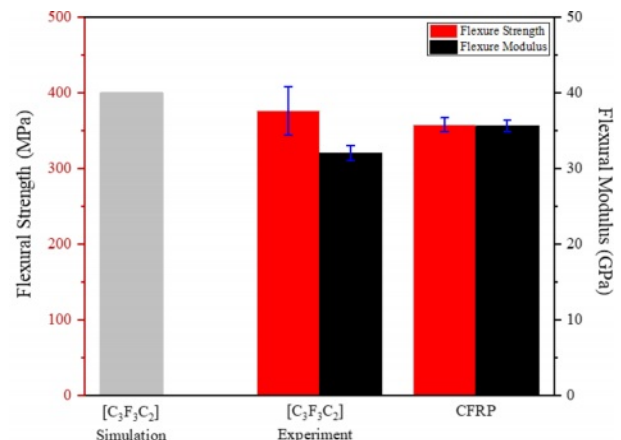
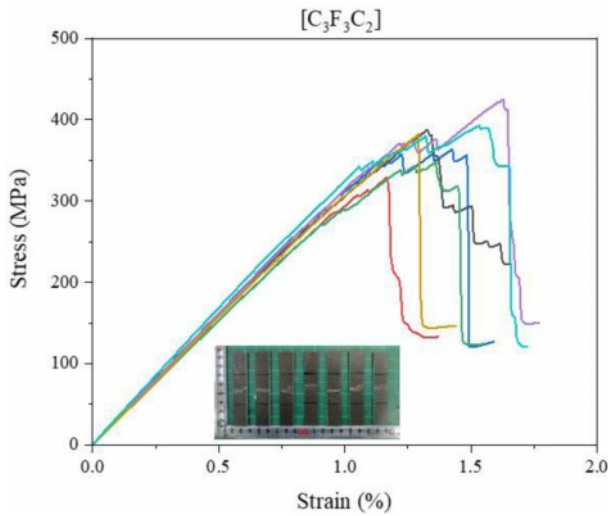


Fig. 9. Comparison of the flexural strength between optimized hybrid composites and CFRP



**Fig. 10.** Stress-Strain curve of hybrid composites with optimized stacking sequence

때문인 것으로 예상되었다. 이러한 거동은 3.3절의 미세구조 분석을 통하여 확인 및 분석되었다.

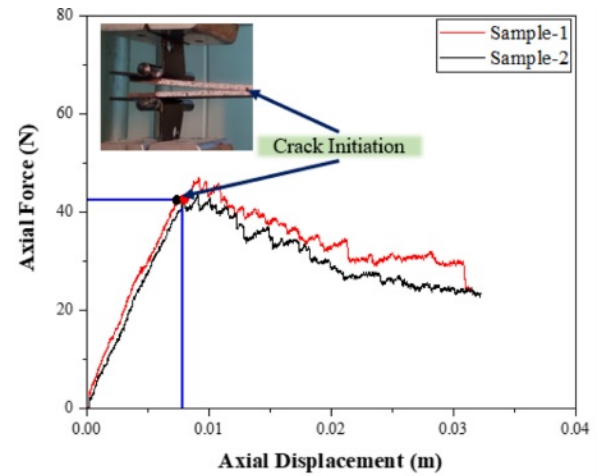
아마섬유가 혼합되었음에도 불구하고 CFRP보다 높은 굽힘강도를 가질 경우, 기존의 천연섬유 복합재료보다 더욱 넓은 분야에 응용이 가능할 것으로 기대되며, CFRP 사용량의 저감 및 아마섬유의 사용에 따라 탄소배출 저감, 폐기물 저감 등에 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

### 3.2 하이브리드 복합재료의 파괴인성치

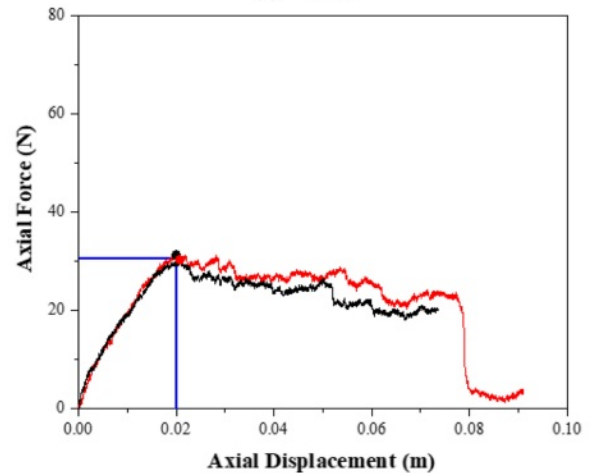
굽힘시험 결과로부터 탄소섬유와 천연섬유 사이의 계면에서 강도향상에 유리한 효과가 발생하였을 것으로 예상됨에 따라, 계면에서 균열이 진전하게 되는 모드I 파괴인성치도 우수할 것으로 예상되어 본 시험을 수행하게 되었으며, 시험결과는 Figs. 11, 12와 같다.

먼저 균열진전에 대한 저항력을 확인할 수 있는 하중-변위 곡선을 분석하면, 하이브리드 복합재료, CFRP, 아마섬유 복합재료 순으로 높은 강도를 보였으며, CFRP가 아마섬유보다 높은 계면접착 강도를 보이지만, 하이브리드 복합재료는 CFRP보다 더욱 높은 계면접착 강도를 보보이는 것 확인할 수 있었다. 이는 굽힘시험 과정에서 탄소섬유와 아마섬유의 계면에서 접착강도가 우수할 것이라고 예상한 것과 동일한 결과이다.

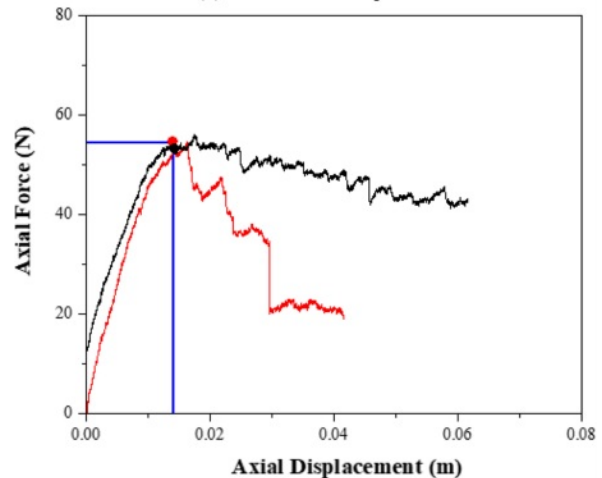
하중-변위 곡선으로부터 컴플라이언스를 계산 후, 최종적으로 계산한 변형 에너지 해방율(Strain energy release rate)은 Fig. 12와 같다. Beam Theory(BT)와 Modified Beam Theory(MBT)를 적용하여 각각 계산하였으며, 이론과 관계없이 하이브리드 복합재료, 아마섬유 복합재료, CFRP 순으로 높은 에너지 해방율을 가지는 것을 확인할 수 있다. MBT가 BT에 비하여 더욱 보수적인 결과이기 때문에 MBT 결과를 비교해 보았을 때, 하이브리드 복합재료가 CFRP보다 약



(a) CFRP



(b) Flax fiber composites

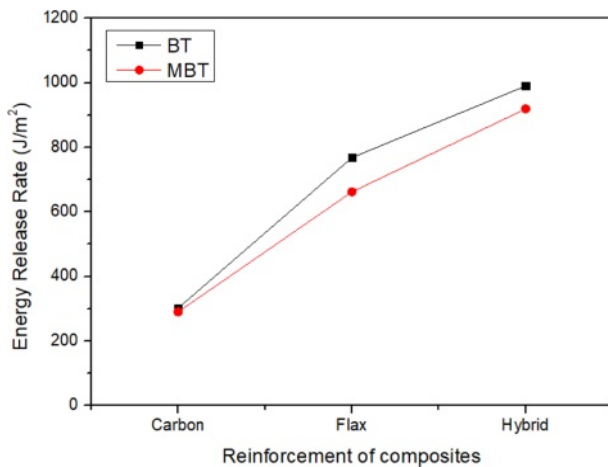


(c) Hybrid composites

**Fig. 11.** Load-Displacement curve of mode I fracture toughness test specimen

68% 향상된 에너지 해방율을 보였다.

시험결과와 같이 파괴인성치가 크게 향상될 경우 재료가 인장응력 환경에서 균열진전이 줄어들고 구조물의 갑



**Fig. 12.** Comparison of the strain energy release rate of CFRP, flax fiber composites and hybrid composites

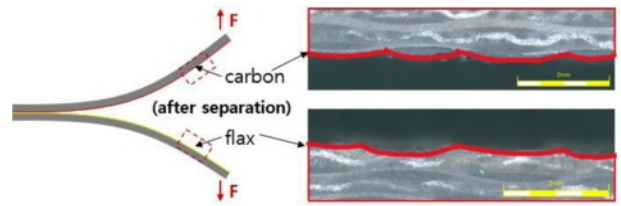
작스러운 파괴 및 파손 위험을 줄여주기 때문에 구조용 재료로서 적합하므로 항공우주, 자동차, 건축 등 다양한 분야에 응용이 가능하다. 또한 줄어든 균열진전으로 인하여 장기간 사용에 대한 내구성이 크게 향상될 수 있다.

### 3.3 미세구조분석

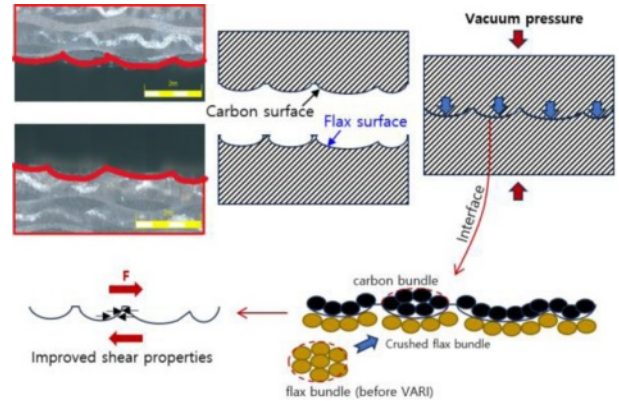
굽힘시험 및 파괴인성시험 후 분리된 시험편의 계면에 대한 미세구조분석 결과는 Figs. 13~15와 같다. 탄소섬유층과 아마섬유층이 분리된 계면의 단면은 탄소섬유층은 돌출이 된 반면 아마섬유층은 패인 형상을 보인다(Fig. 13). 이는 VARI 공정 중 작용한 진공압에 의하여 강성과 밀도가 상대적으로 높은 탄소섬유가 아마섬유를 압입하기 때문인 것으로 분석된다. 이러한 거동은 Fig. 14에 나타내었다.

탄소섬유가 아마섬유는 가는 섬유가닥들이 모여있는 번들(bundle) 형태로 구성되어 있으며, 번들의 단면은 원형에 가깝다. 두 섬유를 이용하여 복합재료를 제조하는 과정에서 탄소섬유 번들은 그 형태를 거의 유지하지만 아마섬유 번들은 탄소섬유의 압입으로 인하여 번들 구조가 깨지면서 좌우로 퍼지면서 패이게 된다.

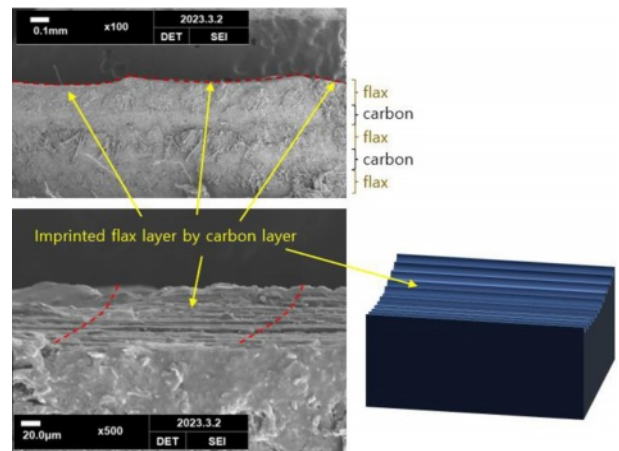
탄소섬유층이 아마섬유층을 압입한 형태의 계면 구조를 가지게 될 경우 기계적 물성이 향상될 수 있다. 적층복합재료의 계면에 전단력이 작용할 때 단일 소재만을 사용한 경우에는 표면에서 쉽게 미끄러질 수 있지만 탄소섬유와 아마섬유가 함께 사용된 경우에는 계면에서 서로의 진행방향을 방해하게 되며, 이로 인하여 향상된 전단력은 상황에 따라 다양한 기계적 물성의 향상에 기여할 수 있다. 3점 굽힘시험의 경우 굽힘하중이 시험편에 가해졌을 때 시험편의 길이방향으로 인장 및 압축응력이 발생하며 시험편의 표면에서 인장 및 압축응력이 최대가 된다. 일반적으로 이 과정에서 인장 및 압축응력에 의하여 층간 박리(delamination)가 발생하며, 하이브리드 복합재료에서는 향상된 전단력의



**Fig. 13.** Cross section view of the separated part of fracture toughness test sample after separation



**Fig. 14.** Assumption of interfacial behavior during the VARI process



**Fig. 15.** Observed imprinting behavior through SEM image

로 인하여 박리가 지연되어 보다 높은 굽힘강도를 가지게 된다.

Fig. 15는 탄소섬유층에 의하여 패인 아마섬유층을 보다 상세하게 나타낸 것이다. 단면 이미지를 통하여 아래쪽으로 패인 형상을 명확하게 관찰할 수 있으며, 3차원 형상의 이미지에서는 패인 경로를 따라 탄소섬유 자국이 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 관찰결과를 바탕으로 탄소섬유와 아마섬유를 이용하여 복합재료를 제조할 경우 두 섬유층이 만나는 계면에서 탄소섬유와 아마섬유간의 압입에 의한 체결(interlocking) 현상이 발생하고, 이로 인하여 하이브리드 복합재료의 굽힘강도 및 파괴인성치가 향상되는 것

으로 분석하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 고강도의 탄소섬유와 비교적 낮은 강도의 아마섬유를 조합하여 탄소섬유 복합재료보다 우수한 굽힘강도 및 파괴인성치를 가지는 하이브리드 복합재료의 기계적 물성 향상 기구를 규명하고자 하였으며 그 결론은 다음과 같다.

1) 탄소섬유와 천연섬유를 조합한 하이브리드 복합재료는 탄소섬유 복합재료보다 우수한 굽힘강도 및 파괴인성치를 보였으며, 이는 탄소섬유층이 천연섬유층을 압입하면서 발생한 체결 구조로 인하여 면내 전단강도가 향상되었기 때문이다.

2) 혼합규칙에 따르면 고강도 소재와 저강도 소재를 조합하였을 때 중간강도를 지녀야 하지만 복합재료 계면에서의 전단강도가 크게 향상될 경우 일부 기계적 물성에서 고강도 소재보다 우수한 강도를 달성하는 것이 가능하다.

3) 본 연구에서 제시한 강도향상 기구를 적용하여 이중재료간의 특성을 파악하여 조합할 경우 본 연구에서 제시한 하이브리드 복합재료보다 더욱 우수한 기계적 물성을 지닌 복합재료를 제조하는 것이 가능할 것으로 기대된다.

본 연구에서 제시된 하이브리드 복합재료는 향상된 파괴인성치를 가졌기 때문에 추가적인 검토를 통하여 고내구성을 요구하는 구조물에 적용이 가능할 것으로 기대된다. 또한 탄소중립소재인 천연섬유를 포함하고 있기 때문에 탄소배출 저감에도 기여할 수 있다.

#### 후 기

이 논문은 2022~2023년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

#### REFERENCES

1. Cai, Y., Woollacott, J., Beach, R.H., Rafelski, L.E., Ramig, C., and Shelby, M., "Insights from Adding Transportation Sector Detail into an Economy-wide Model: The Case of the ADAGE CGE Model," *Energy Economics*, Vol. 123, pp. 106710, 2023.
2. Liu, M., Wang, J., Wen, J., He, G., Wu, J., Chen, H., and Yang, X., "Carbon Emission and Structure Analysis of Transport Industry Based on Input-output Method: China as an Example," *Sustainable Production and Consumption*, Vol. 33, pp. 168-188, 2022.
3. Shioya, M., and Kikutani, T., "Synthetic Textile Fibres: Non-polymer Fibres," *Textiles and Fashion*, pp. 139-155, 2015.
4. Lee, D.W., Park, B.J., Park, S.Y., Choi, C.H., 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, pp. 61-69, 2018.
5. Lee, D.W., and Song, J.I., "Research on Simple Joint Method Using Fiber-metal Laminate Design for Improved Mechanical Properties of CFRP Assembly Structure," *Composites Part B*, Vol. 164, pp. 358-367, 2019.
6. Beus, N.D., Carus, M., and Barth, M., "Natural Fibres Show Outstandingly Low CO<sub>2</sub> Footprint Compared to Glass and Mineral Fibres," *Renewable Carbon News*, 2019.
7. Lee, D.W., Li, M., and Song, J.I., "Study on the Improvement of Flame Retardancy of Bamboo Fiber Using Eco-Friendly Liquid Flame Retardant," *Composites Research*, Vol. 35, No. 6, pp. 456-462, 2022.
8. Kim, H.S., Hong, S.I., and Kim, S.J., "On the Rule of Mixtures for Predicting the Mechanical Properties of Composites with Homogeneously Distributed Soft and Hard Particles," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 112, No. 1, pp. 109-113, 2001.
9. Liu, Z., Wang, H., Yang, L., and Du, J., "Research on Mechanical Properties and Durability of Flax/glass Fiber Bio-hybrid FRP Composites Laminates," *Composite Structures*, Vol. 290, pp. 115566, 2022.