

디지털 요소법을 이용한 3D 직물의 직조 기하형상 및 인장 및 전단 하중 하 기계적 거동에 대한 유한 요소 시뮬레이션

Lode Daelemans^{a,*}, Jana Faes^b, Samir Allaoui^c, Gilles Hivet^c, Manuel Dierick^d, Luc Van Hoorebeke^d, Wim Van Paepegem^b

^a벨기에 쥐즈나르테 소재 겐트대학교 섬유학과

^b벨기에 쥐즈나르테 소재 겐트대학교 재료공학과

^c프랑스 오를레앙 소재 오를레앙대학교 PRISME EA 4229 연구실

^d벨기에 쥐즈나르테 소재 겐트대학교 물리천문학과

초 록

본고는 3D 직물의 역학 거동을 결정할 수 있는 가상의 섬유 및 디지털 요소 개념에 기반을 둔 시뮬레이션 방법론을 제시한다. 이는 실제 섬유의 다발로 구성되는 실을 모델링하여 계산한 직물 내 섬유 상 특성에 근거한다. 지금까지는 디지털 요소 방법이 섬유 재료의 기하학적 거동을 예측하기 위한 동역학적 방법으로서 주로 사용되어 왔었지만, 아직까지 확인되지 않은 직물의 역학적 거동을 밝혀내는 연구가 수행 중에 있다. 본 방법론은 간단한 특성(직조 패턴, 원사의 강성) 입력값을 기반으로 한 벌크한 단위 격자를 가지는 3D 직물의 미세구조를 예측할 수 있으며, 인장 및 전단 하중 하 단위격자의 거동을 가상으로 평가하여 직물의 동적, 기계적 거동을 고려하였다. 본 방법론의 주요 이점은 시뮬레이션을 통해 복잡한 구성규칙이 없이도 하위 원사의 거동을 고려한 직물의 기계적 특성을 예측해낼 수 있다는 점이다. 이는 실제 실험 데이터 결과와도 우수하게 일치하였기에, 본 접근 방법이 3D 직물 단위격자의 역학 거동을 모델화하는데 유용하였음을 입증해내었다.

키워드

역학 특성, 유한 요소 해석, 모델링, 멀티스케일 모델링, 디지털 요소

1. 소개

최근, 구조강화용 복합재료용으로서 3D직물을 활용하는 것에 대해 복합재료 관련 단체를 중심으로 많은 관심을 불러일으키고 있다. 기존 상대적으로 낮은 면외 특성을 가지는 2D 섬유 강화재가 적층된 형태의 라미네이트 복합재료와 비교하여 3D직물은 두께 방향으로의 보강이 가능하다. 이는 2D 직물을 기반으로 한 복합재료와 비교하여 높은 면외 특성이 높아져 박리 저항을 증가시킬 수 있다. 더욱이 3D 직조 기술은 상대적으로 수 겹의 적층 작업을 위한 시간소모와 불필요한 절차들을 필요로 하는 공정 대비 두께의 강화를 통해 손쉽게 제조가 가능하다. 따라서 제직 설비를 이용하여 이들 강화재의 자동화 및 연속 생산을 통해 3D 직조 직물을 재료로 하는 구조강화용 복합재료를 더욱 빠르게 생산해낼 수가 있으며 그에 따른 비용 절감 효과도 가져올 수 있다. 이는 특히 짧은 시간 내 대량의 물품들을 생산해내야 하는 자동차 분야 등에서 큰 관심을 가질 것으로 예측된다. 게다가 3D 직조 기술은 단일의 생산 공정으로도 복합재료 프리폼 생산을 가능하게 할 수 있다.

많은 연구진들은 최종 복합재료의 물성에 지대한 영향을 미치는 3D 직물의 실험 및 해석적 특성 연구에 몰두하고 있다. 장력 및 전단력과 같은 하중 조건에서 3D 직물의 직조 형상 및 기계적 거동을 시뮬레이션하고 예측해낼 수 있는 수치해석 프로그램은 복합재료의 용도전개를 위한 3D직물 프리폼을 최적화하기 위한 유용한 도구이다. 그러나 일반적으로 직물 상 섬유소의 구성과 다양한 특성 때문에 3D직물 및 직물소재의 수치적 모델링은 어렵다.

직물의 거동을 모델링하는 일반적인 방법은 원사(혹은 직물)를 적합한 구성규칙을 고려하여 섬유상 특성을 적용한 연속상의 고체로 간주하는 것이다. 이 방법의 주요 단점은 섬유 고유의 특성에서 대변위, 직교성의 재료 거동, 국부적인 파손 등 여러 특이성을 초래한다는 것이며, 이것은 구성 규칙의 정확한 정립이 어렵고 또한 수치적인 불안정성을 초래할 수 있다. 더구나 이상적인 기학적 형상(렌즈형 혹은 타원형)이나 소형 CT-스캔을 통해 얻은 연역적인 방법으로 단면의 형태를 결정할 때 비교적 방대한 양의 실험 데이터 값들의 입력이 필요하다.

최근 섬유 재료를 모델링할 수 있는 또 다른 방법이 많은 이들의 주목을 끌고 있는데, 이른바 ‘디지털 요소법’이다. 이 방법은 Wang 외 연구진에 의해 최초로 제시되었으며, 디지털 요소와 함께 가상 섬유 개념을 기반으로 한다. 이들은 구성 원사들을 연속체인 재료가 아닌, 여러 개의 가상 섬유들이 분할된 것으로써 취급하였다. 가상 섬유법의 개념은 원사의 이방성이 이를 구성하는 섬유상 구조, 즉 원료 섬유들의 재배열에 의해서 결정된다는 것이다. 상대적으로 낮은 수준의 횡 방향의 압축 조건 하에서 원사의 횡 방향으로의 주된 변형 요인이 섬유자체의 횡적 변형 특성에 기인한 것이 아닌, 섬유 자체의 재배열에 의한 결과라는 것이다.

원료섬유들이 횡적 변형 특성은 오직 높은 압력 조건 하에서 원사들이 완전히 압축되었을 경우에만 작용한다. 물론 가상 섬유의 양은 실제 원사 내부에 포함되는 섬유의 양 보다는 작지만, 이 방법을 통해 자연스럽게 사를 구성하고 있는 섬유들의 거동을 표현해낼 수가 있다. 대개 19~50개 사이의 가상의 섬유들이 직물의 대략적인 내부 기하형상을 표현해내기에 충분하다. 지금까지 이 방법은 주로 3D 직조 복합재의 운동학(kinematic) 모델로써 사용되어져 왔다. 그 예로, Reen 외 연구진은 디지털 요소법을 채택해 3D 직조 직조물의 압축 후 내부 미세 구조를 연구하였다. 이들은 그들이 작성한 모델과 실제 소형-CT 스캔으로 측정된 이미지 간에 우수하게 일치하고 있음을 발표하였다. 그러나 이를 다른 구조의 직물에 적용하였을 경우에는 사용이 제한될 수 있기 때문에, 모델 내 몇 가지 매개변수 입력 값들은 여전히 보정되어야 할 필요가 있다. Huang 외 연구진은 다양한 사 유형의 조건에서 3D 직조 프리폼의 내부 미세 기하형상을 예측하기 위해, 디지털 요소과 함께 주기적 경계 조건에 기반을 둔 동적 이완 접근법을 채택하였으며 이는 실제 직물의 이미지 결과와도 잘 일치하는 것으로 나타났다.

디지털 요소를 3D 직물의 운동학적 모델로 활용하는 것 외에도, 역학적 거동을 정확하게 표현하고 예측해내는데 적용할 수 있다면 많은 이들이 큰 관심을 가질 것이다. 선행 연구를 디지털 요소법을 통해 다양한 섬유 재료의 역학 거동을 예측할 수 있는 것으로 밝혀졌지만, 본 연구진이 아는 한 3D 직물에서는 아직까지 적용된 바가 없었다. 대개 3D 직물은 2D 직물보다도 그 크기가 훨씬 크기 때문에, 이러한 대규모의 재료에서도 디지털 요소법이 적용이 가능한지에 대해 분석할 가치가 있겠다.

본고에서는 가상 섬유 및 디지털 요소 개념에 기반을 둔 수치 모델링 방법론을 통해, 직조 형상과 함께 3D 직조 직물에 대한 대형 크기 단위격자의 내부 사 역학에 대한 시뮬레이션을 제안하고자 한다. 예를 들면 드레이핑 공정에서 종종 수반되는 장력 및 전단력과 같은 2가지 면내 하중 조건들을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과를 실제 실험을 통해 측정된 데이터와 비교함으로써 이를 검증하였다.

2. 3D 직조 직물

조사 대상인 직물은 경사 및 위사, 그리고 결합 사에 의해 서로 간에 맞물린(인터로크) 다층의 3D 직물 구조 형태를 지닌다. 결합사는 침지 전 상태인 직물 구조를 연결시켜주고 다층의 경사 및 위사 층들을 함께 지탱해주며, 최종 복합재에 면외 방향으로부터의 강화재 역할을 수행한다. 본 3D 직조 직물은 유럽의 FP7 프로젝트 일환인 ‘3D-Light Trans’에서 개발된 구조물 중 하나이며, 이는 2015년 JEC 혁신상 중 강화재 분야를 수상한 바 있다. 그림 1에 이상화한 직물 구조와 함께 단위격자를 함께 제시하였다. 단위격자는 5개의 위사 층을 가로지르는 1개의 경사 층으로써 구성되어 있다.

본 조사 대상인 3D 직조 직물의 단위격자를 여타 2D 및 3D 직조 직물과 비교했을 때, 40개의 위사, 8개의 경사, 그리고 8개의 결합사로 구성된 다소 복잡한 형태의 구조를 지닌다. 사들은 유리섬유와 PET 섬유를 혼합하여 구성되었다. 열 성형에 의해 열가소성인 섬유들이 용융되어 유리섬유들을 함침 시키면서 이때의 압밀 압력으로 인해 직물이 강력하게 압축되어 유리섬유 강화 열가소성 복합재가 형성되는 것이다. 표 1에 해당 직물의 성질을 제시하였다.

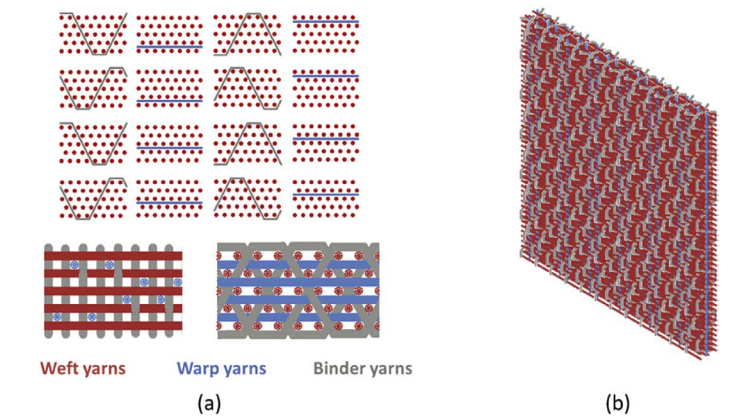


그림 1. 단위격자 구조의 단면 형태(a) 그리고 이상화한 직물 기하형상의 3D 표현(b) / 붉은색 : 위사 파란색 : 경사 회색 : 결합사

표 1. 3D 직조 직물의 물리적 특성

특성	값
경사, 위사 그리고 결합사	410tex 유리섬유/PET섬유 70/30 혼합사
사의 영률	30 GPa
in 당 위사 중량	26.8 cm ⁻¹
in 당 경사 중량	20 cm ⁻¹
in 당 결합사 중량	20 cm ⁻¹
단위 중량	2900 g/m ²
두께	4 mm

3. 디지털 요소법을 이용한 모델링 접근법

앞서 언급한 바와 같이 가상 섬유를 활용 시 재료의 거동을 표현하는 구조 모델을 작성하지 않고서도 사의 섬유상 거동을 고려할 수 있다. 빔(beam) 요소와 같은 일반적인 유한 요소를 이용해 가상 섬유를 쉽게 모델링 할 수 있다. 하지만 빔 요소로 구성된 가상 섬유의 직경은 실제 섬유의 직경보다도 훨씬 크기 때문에, 사의 휨 강성을 과대평가할 수가 있다. 이로 인해 탄-소성의 재료 모델 선택, 또는 휨 강성을 감소시킨 맞춤형 빔 요소의 선택과도 같이 인위적인 방식을 통해 휨 강성을 낮춰줄 필요가 있다.

실제 섬유 재료가 지닌 성질과 함께 낮은 휨 강성을 보유한 가상 섬유를 표현하기 위해선, 트러스(truss) 요소 기반의 가상 섬유를 그 솔루션으로써 제시할 수 있겠다. 트러스 요소 기반의 가상 섬유는 빔 요소 기반의 가상 섬유와 비교해 휨 강성 값이 0이며, 역학적 성질에 의존하지 않는다. 따라서 인위적으로 휨 강성을 낮춰 줄 필요가 없으며, 실제 섬유의 영률을 고려해 재료를 정의내릴 수 있다. 유한 요소의 환경에서 트러스 요소의 절점들은 모멘트를 전달하지 않으며, 마치 마찰력이 없는 핀과도 같은 역할을 수행한다. 따라서 기본적으로 트러스 요소 기반의 가상 섬유는 휨 강성이 없으며, 섬유 내 장력에 의해서만 휨-컴플라이언스가 영향을 받는다. 트러스 요소를 사용한다고 해서 반드시 이러한 요소 기반의 사 혹은 직물의 휨 강성이 손실되는 것은 아니다. 섬유는 그 시작

점과 종점 사이의 직선 형태의 경로를 따르려고 하는 경향이 있기 때문에, 섬유 방향 이외의 임의 방향으로의 변위 시 섬유의 장력과 그에 대항하는 힘을 증대시키게 한다. 이에 따라 섬유 내 유발되는 모든 장력이 굴곡 강성을 유발해 섬유가 마치 스트링(string)과도 같이 거동하게 된다. 게다가 트리스 요소 기반의 가상 섬유들로 구성된 사 또는 직물 내부 개개의 원료섬유들은 인접 섬유들 간의 접촉으로 인해 서로 독립적으로 구부러질 수가 없기 때문에 지속적으로 휨 강성을 유지한다. 가상 섬유 다발을 활용함에 따라 사 및 직물 수준에서의 휨 강성이 무시되지 않으며, 오히려 보다 자연스레 실제 재료 거동을 따르게 된다. 트리스 요소의 크기가 0에 가까워질수록, 트리스 요소 기반 가상 섬유들은 마치 이상화된 스트링과도 같이 거동한다. 더욱이 트리스 요소는 각각 2개의 절점과 3°의 자유도로 구성된 가장 단순화된 유한 요소이기 때문에, 이러한 트리스 요소 기반의 가상 섬유를 활용해 시뮬레이션을 수행하였을 시 계산상으로도 매우 효율적이다. 그림 2a는 트리스 요소 기반 가상 섬유의 개념을 제시한다.

그림 2(b)에 본 연구에서 직조 구조와 사 역학을 시뮬레이션하기 위해 채택된 기본 접근법을 제시하였다. 이는 다음과과 같은 수순을 따른다.

(1) 직물의 한 조각을 이상화된 단위격자에 맞춰 파이썬(Python) 스크립트를 통해 렌더링한 다음에 Abaqus 입력 파일로써 기록한다. 기본 값으로써, 사들이 원형의 단면 형태를 지닌 것으로 간주한다. 각 사는 가상 섬유들의 동심원 층들로 구성되며, 이러한 섬유 층수들은 곧 가상 섬유의 양과 함께 가상 섬유 각각의 직경 크기를 결정하게 된다. 이상화된 “느슨한” 형태의 직물은 개별 사들 사이의 작은 틈을 발생시킴으로써 생성을 하며, 이때 원료섬유와 사 간에 교차 표면은 발생되지 않아야 한다.

(2) 직조 형태의 직물은 Abaqus/Explicit을 통해 이상화된 직물 내부 결합 사에다 수축을 가함으로써 생성된다. 이는 실제 직조 공정과도 유사하며 원료섬유의 장력 및 재배열을 초래하게 한다. 이와 함께 최종 직물 형상이 지닌 울퉁불퉁한 형태를 보상하기 위해 경사와 위사를 팽창시킬 수가 있다. 사의 수축 및 팽창은 적절한 열 팽창 계수를 활용하거나, 혹은 앞서 Green 외 연구진이 제시한 접근법과 유사하게 적용함으로써 수행할 수 있다. 여기서는 열 수축 과정을 채택해 각 가상 섬유의 개개의 요소에 변형 및 응력을 균일하게 발생시켰다. 가상 직물이 실제 직물과 동일한 두께에 도달하게 되면 시뮬레이션이 중지되면서 직조 직물의 형상이 생성된다.

(3) 역학 실험을 시뮬레이션하는 데 활용될 시편을 “잘라내기” 위해 파이썬(Python) 스크립트를 활용하였으며, 이는 큰 조각의 직물로부터 시편을 채취하는 실제 실험 과정과도 매우 유사하다. 본 단계에서는 2단계에서 생성된 (열) 응력은 더 이상 고려하지 않았는데, 이는 인장 및 전단 시뮬레이션에 있어 시편에 가해지는 초기 예하중(이는 하중 시뮬레이션 시 초기 응력 상태를 유발시키는 역할을 한다)을 활용하였기 때문이다.

본고는 크게 2개의 절로 나뉜다. 우선 적용된 가상 섬유 방법론의 견고성(robustness)을 평가하기 위해 매개변수 연구를 수행하였다. 여기에는 가상 섬유의 개수와 트리스 요소 길이를 변경한 “메쉬의 세분화” 연구 또한 포함한다. 또한 마찰의 영향이 분석되었다. 매개변수 연구는 상대적으로 작은 크기의 시편을 활용해 2축 인장 실험을 진행함으로써 수행되었다. 그 다음 절에서는 본 방법론을 확장시킴으로써 보다 큰 가상 직물을 생성하였다. 시뮬레이션 상 접근법의 결과를 검증하고자 실제 하중 실험 절차 수순과 일치하도록 직물로부터 시편을 채취하였다. 3D 직조 직물의 역학 응답을 결정하기 위해 인장 및 전단 하중 조건 모두를 분석하였다.

모든 시뮬레이션들은 유한 요소 해석 소프트웨어인 Abaqus 6.14를 통해 수행되었다. 외연적 솔버로는 Abaqus/Explicit가 선택되었는데, 이는 복잡한 비선형 거동, 가상 섬유들의 대변위 및 다량의 접촉 정의들을 다루기에 보다 적합한 S/W이다.

시뮬레이션 수행 시 시간 척도를 선택함으로써 가상 직물로부터 준정적 응답을 얻어냈으며, 관성 법칙은 적용하지 않았다(운동 에너지 < 내부 에너지) 각 가상 섬유는 T3D2 트리스 요소들로 구성이 되며, 초기 길이는 사의 직경과 유사하였다. 원료섬유-원료섬유 간의 접촉은 Abaqus의 일반적인 접촉 알고리즘인 Coulomb 마찰법에 의해 처리되었다. 비교적 적은 개수의 가상 섬유를 활용하였기에, 실제 실험을 통해 결정된 사의 영률을 트리스 요소의 강성으로써 정의를 내렸다. 이와 같이 본 모델링 전략은 가상 섬유들의 균질화된 특성을 활용하였으며 사 고유의 뒤엉킨 형태적 특성을 외연적으로 모델링하지 않은 서브 메조-스케일 규모의 접근법을 채택하였음을 간주할 수 있겠다. 사 강도는 간소화를 위해 고려되지 않았다.

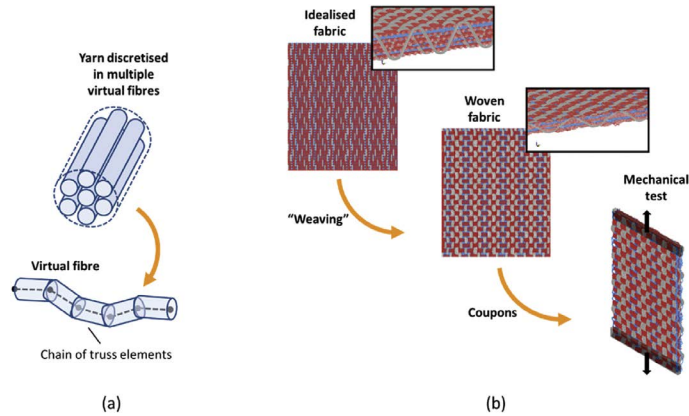


그림 2. 가상 섬유 원리의 도식적 개요(a) 및 이에 따른 모델링 접근법(b)

4. 2축 인장 시뮬레이션을 통한 매개변수 연구

2축 인장 시뮬레이션에 상대적으로 크기가 작은 2×2 단위격자로 구성된 느슨한 상태의 직물 조각을 사용하였다. 본 시편 크기는 가장자리 효과(주기 경계 조건을 가하지 않았음)를 최소한으로 나타낼 수 있는 만큼의 크기를 제공하며, 또한 매개변수 연구를 수행하는 데 있어 계산상으로 충분히 실행이 가능하였기에 선택하였다. 선행 연구와 같이 직물로부터 위사들의 풀림 현상을 줄여주기 위해 위사에 원거리 경계 조건이 가해졌다. 이는 즉 시편 길이와 동일한 길이만큼 양 방향으로 위사 섬유들을 신장시킨 다음, 늘어난 길이의 말단부에다 경계 조건을 가하는 것으로 구성된다(이러한 요소들은 명확성을 위해 그림 3에서는 제시하지 않았다). 각 섬유 말단부에서의 절점들은 면내 방향으로 구속되었지만, 면외 방향으로 자유롭게 움직일 수가 있다. 직물의 직조된 형태는 3절에서 언급된 열 수축 과정을 통해 생성되었다. 직물이 원하는 만큼의 두께에 도달한 다음 시뮬레이션은 중단이 되며 직조된 형태의 기하형상을 2축 인장 시뮬레이션을 수행하는데 사용한다. 경사 방향으로 자리한 사(경사 및 결합 사) 및 위사에 동일한 크기의 신장이 가해졌다. 2축 인장 하중 실험은 비교적 구현하기 용이하기 때문에 선택되었으며, 그 실험 결과는 재료로 선택된 일반적인 사 및 직물 역학(사 접촉, 마찰, 사 크립프, 국부적 파쇄)에 따라서 달라진다. 따라서 가상 섬유법과 관련된 매개변수들의 효과를 평가하기 위해, 2축 인장 실험을 기준 시뮬레이션으로 선택한 결정이 적절하였음을 여길 수 있겠다.

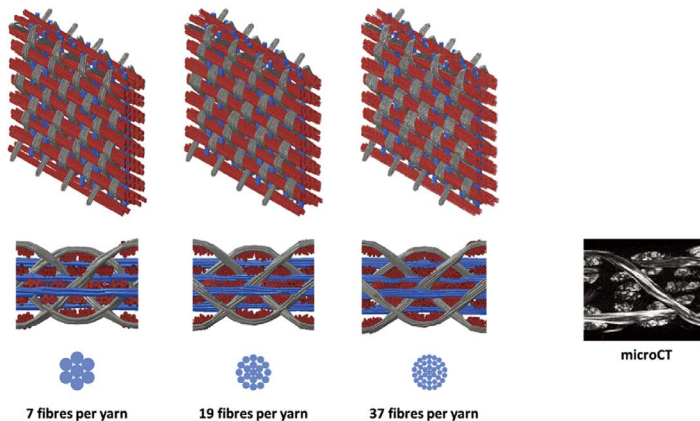


그림 3. 사당 가상 섬유의 개수가 직조 구조의 기하형상에 미치는 영향을 통해 19개의 가상 섬유를 사용 시 미세 구조를 정확하게 포착할 수 있음을 보여줌

4.1. 사당 가상 섬유 개수

사 하나 당 가상 섬유의 개수는 시뮬레이션의 “정밀성”에 영향을 미친다. 실제로 가상 섬유의 개수가 많을수록 섬유상의 미세 구조의 정확도가 보다 높아짐에 따라 사/직물의 실제 거동을 보다 잘 표현할 수가 있다. 반면에 가상 섬유의 개수가 늘어가면 요소 및 접촉 쌍들의 양 또한 급속히 증가하기 때문에 계산상의 번거로움이 발생된다. 7, 19, 그리고 37개의 가상 섬유들로 구성된, 사의 초기 단면 형태인 원형의 사를 이용해 시뮬레이션을 수행하였다. 선행 연구에서는 초기 단면 형태가 최종 직물 형상에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났었다. 그림 3은 각각의 가상 섬유 개수를 지닌 직조 직물의 단면 형태와 함께 실제 직물의 소형 CT-스캔을 통한 이미지와 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 3D 직조 직물의 중간층에 위치한 위사들은 실제 직물 모습보다도 약간 더 퍼져 보이는 것으로 나타났는데 이는 상대적으로 적은 양의 가상 섬유(이는 곧 사 내부에서 발생하는 초기 마찰을 낮추게 한다)가 사용되었고, 혹은 실제 사는 매우 낮은 수준의 비프레이밍을 지니는 것과 함께 섬유에 가한 사이징제의 영향으로 인해, 직물이 취급되는 동안 원료섬유들 서로 간에 함께 유지하려는 경향을 유발시키는 것이다. 그럼에도 불구하고 19개의 가상 섬유만으로도 전반적인 미세 구조를 표현하기에 충분한 것으로 나타났다. 유사한 결과는 2축 인장 시뮬레이션을 통해서도 나타났는데, 그림 4에서와 같이 19개의 가상 섬유를 사용하였을 시 위사 및 경사에 가해진 하중이 잘 수렴하고 있는 것을 통해 이와 같은 결과를 도출할 수가 있었다. 따라서 본 연구에서 수행된 모든 시뮬레이션은 19개의 가상 섬유를 포함하는 원사들을 통해 수행되었다.

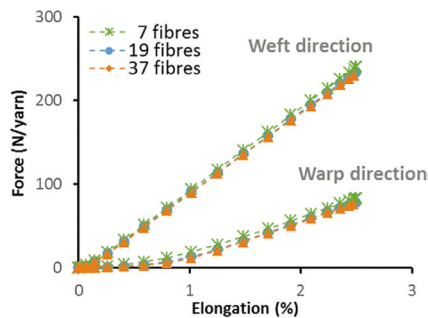


그림 4. 3D 직조 직물의 2축 인장 특성에 대한 사당 가상 섬유 개수의 효과를 나타낸 것으로, 19개의 가상 섬유를 사용하였을 시 결과가 잘 수렴되었음을 나타내고 있다.

4.2. 트러스 요소 길이

트러스 요소 길이는 단일개의 가상 섬유에 대한 메쉬 세분화를 정의하며 주로 섬유의 곡률에 영향을 준다. 트러스 요소 자체는 횡수가 없기 때문에, 일련의 트러스 요소들 내 각각이 분할된 특성으로부터 가상 섬유의 곡률이 계산된다. 트러스 요소들이 작을수록 보다 이상적인 스트링(string)과도 같은 거동을 허용하지만, 이는 계산상의 작업량을 증대시킨다. 트러스 요소의 길이를 줄이기 위한 시뮬레이션을 수행하고자 각각 초기 요소 길이를 1mm, 0.4mm, 그리고 0.2mm인 것으로 설정하였다. 직조된 기하형상 뿐만 아니라 2축 인장 거동 역시 거의 트러스 요소의 길이 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 따라서 본 모델을 모델링 시 트러스 요소의 길이는 1mm로 충분한 것을 결론을 내릴 수 있었다.

4.3. 마찰 계수

실험을 통해 사와 사간의 마찰 계수는 0.2인 것으로 나타났다. 원료섬유 간의 접촉 및 마찰은 Abaqus S/W 내 일반적인 접촉 알고리즘을 통해 처리되었다. Coulomb 마찰 법칙은 접선 마찰 계수가 0.2에서 0.8인 범위에서 사용된다. 그림 5와 같이, 2축 인장 거동은 마찰 계수의 영향을 거의 받지 않았다. 비록 이 결과는 처음에는 상당히 눈에 띄어 보일 수 있지만, 가상 섬유 간의 마찰 정도는 실제 사에 존재하는 섬유 간의 마찰에 비하면 상당히 적기 때문에 접촉 표면이 훨씬 적은 것으로 나타났다. 더욱이 3D 직조 직물의 내부 구조는 경사층과 위사층 서로 간에 얹히지 않은 것으로 고려하였기에, 직물의 2축 거동은 경위사 각각의 특성에 따라 결정되는 것이지 이들 간의 상호 작용은 영향을 미치지 않는다. 이는 시뮬레이션의 에너지 균형에서도 확인할 수가 있는데, 구조물 내부 에너지는 주로 원료섬유들의 변형, 그리고 (슬라이딩) 접촉으로 인한 마찰 소실에 의해 제한이 된다. 마찰 효과는 다음 5.3절에서와 같이, 여타 구조의 직물 또는 직물에 힘이나 전단과 같은 다른 하중 조건을 가하였을 경우에 보다 현저히 나타날 수 있음에 유의해야 한다.

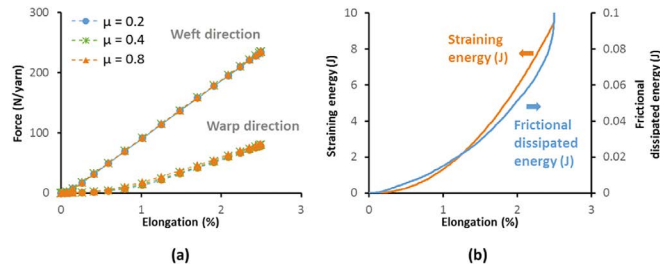


그림 5. 일반적인 접촉 알고리즘에 적용된 마찰 계수가 3D 직조 직물의 2축 인장 거동에 미치는 영향 (a). 시뮬레이션의 에너지 균형($\mu = 0.2$)을 통해 변형 에너지에 비해 마찰 손실 에너지가 제한됨을 보여줌 (b)

5. 3D 직조 직물의 인장 및 전단 거동 해석

이전 절에서는 본 연구 대상인 3D 직조 직물의 역학 거동을 모델링하기 위해 트러스 요소에 기반한 가상 섬유 방법론이 견고하다는 내용을 제시하였다. 본 절에서는 동일한 방법론을 사용해 3D 직조 직물의 역학 거동을 보다 자세히 분석하고자 한다.

5.1. 직조 직물의 미세 기하형상

직조 직물을 생성하기 위해 6×6 개의 단위격자로 구성된 상대적으로 크기가 큰 직물 조각을 사용하였다. 직조 직물의 미세 기하형상은 결합 사를 수축시키는 열 수축 과정을 가하는 동안에 각 사의 절점들을 모든 자유도로부터 고정시킴으로써 시뮬레이션 되었다. 직물이 원하는 두께에 도달하게 되면 시뮬레이션은 중지가 되며, 그림 6a와 같이 3D 직조 직물로 직조된 기하형상이 생성된다.

사용된 경계 조건들은 일부 영역에 가장자리 효과를 발현하게 하였는데 이는 그림 6b와도 같이, 원료섬유들의 말단부 내 고정된 절점들의 영향으로 인해 직물의 완전한 압축이 가능하지 않았기 때문이다. 하지만 가장자리 영향을 받는 영역들은 후속 시뮬레이션에서 활용되지 않기 때문에 이는 아무런 문제도 발생시키지 않는다. 인장 및 전단 시뮬레이션을 위해 채취하는 시편은 가장자리로부터 충분히 멀리 떨어져 있다. 또한 가장자리 근처에서는 직물로부터 몇몇 개의 섬유들이 풀리는 경향이 있음을 확인할 수가 있었다. 모든 시뮬레이션 과정에서 직물의 가장자리가 자유로웠을 경우 이와 동일한 섬유 풀림 현상 효과들이 발생되었다. 이러한 풀림은 모든 섬유 재료에 있어 공통적으로 발생하는 현상이며, 실제 실험 및 직물 취급 과정에서도 이와 유사하게 가장자리가 풀리는 현상을 발견할 수 있었다.

시뮬레이션 된 직조 직물의 미세 기하형상을 3D 직조 직물의 소형-CT 스캔 이미지와 비교하였다. 초반에는 결합 사만이 수축되었으며, 경사와 위사에는 그 어떤 팽창이 발생되지 않았다. 그러나 이러한 현상은 경사와 위사를 직선 형태에서 물결 형태로 형상을 변형시켰을 시 매우 높은 인장 응력을 초래하게 하였다. 이와 같은 물결 형태를 보상하기 위해, 결합사가 수축되는 도중에 사와 위사가 팽창되도록 설정하였다. 이를 통해 그림 6c와도 같이 실제 미세 구조와 시뮬레이션 된 구조 간의 일치 정도가 향상되었다. 소형-CT 스캔 이미지 대신에 작은 직물 조각을 수지에 포매시킨 것을 현미경으로 분석한 이미지를 활용할 수도 있다. 열 팽창 계수를 결정하기 위해 적용할 수 있는 보다 물리적인 접근법은 사내 인장 응력을 실제 직조 과정 중 사로 가해지는 장력과 연관시키는 것이다. 하지만 본 직물에서는 해당 데이터들을 활용할 수 없기에, 이 방법을 더 이상 진행시키지 않았다. 그림 6c와 같이 시뮬레이션 된 직물의 미세 구조는 실제 직물의 소형-CT 스캔 이미지와도 우수하게 일치하고 있었다. 사 경로가 보유한 물결 형태와 이의 변형된 단면 형태를 시뮬레이션 상에서 잘 포착해내었다.

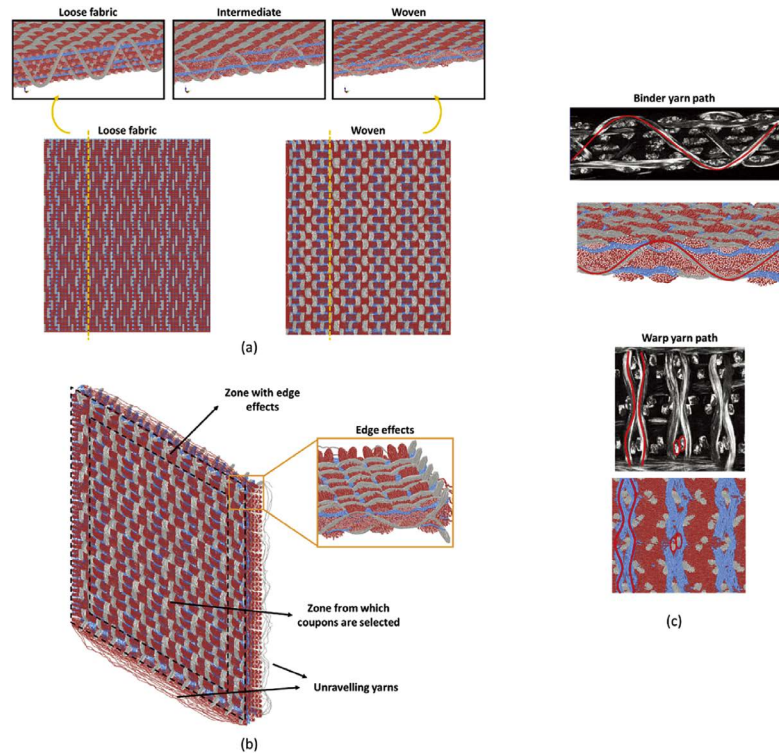


그림 6. 느슨한 직물 내부 결합 사이에 열 수축을 가하는 동시에 각 사의 말단부의 절점을 고정시킴으로써 생성해낸 직물 내 직조 구조의 미세 기하형상 (a). 이는 직물의 완전한 압축이 발생되지 않는 일부 가장자리 효과를 초래함 (b). 소형-CT 스캔 이미지와 시뮬레이션 결과 간에 우수하게 일치하고 있는 것을 확인하였음 (c).

5.2. 3D 직조 직물의 인장 시험

인장 시뮬레이션을 수행하기 위해 직조 직물로부터 장방향의 시편을 선택하였다. 시편의 형상과 경계 조건을 그림 7a에 제시하였다. 3D 직조 직물에 대한 실제 실험 절차를 준수해, 인장 기기로부터 직물로의 하중을 그대로 전달하기 위해 고정된 시편의 말단부를 에폭시 수지로 포매하였으며, 고정된 영역에 존재하는 모든 요소들에 대해선 강체 구속을 가하였다. 직물에 인장 응력이 가해지게 되면 강체인 말단부의 반대 방향으로의 변위로 인해, 다른 방향으로의 이동이 불가능해지게 된다. 5×3 크기의 단위격자는 대략 $85 \times 50\text{mm}$ 인 시험편의 크기가 일치하는 것으로 나타났다.

실제 실험과 시뮬레이션을 통해 얻은 힘 대비 신장 곡선을 그림 7b에 제시하였다. 힘을 경사 방향의 사(경사 및 결합 사)가 보유한 양만큼 나누어줌으로써 이를 정규화하였다. 실제 실험 데이터 결과와도 잘 일치하였기에, 가상 섬유 개념이 직물로의 인장 조건 하 사의 역학을 정확히 설명하고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 사 역학에는 (i) 사/사 접촉, (ii) 사/사 슬라이딩, (iii) 원료섬유에 재배열로 인한 단면 형태의 변형, 그리고 (iv) 사 장력에 따른 직물의 압축을 포함한다. 이들은 곧 인장 하중 하 직물로 하여금 높은 수준의 비선형 거동을 발현하게 하는 요인들이다. 직조 직물 내 위치한 경사 방향에서의 사들이 매우 큰 기복을 지니기 때문에, 작은 크기의 신장에서도 하중 방향을 따라서 섬유들이 스스로 재배열된다. 이는 곧 사/사 및 원료섬유/원료섬유 접촉 및 슬라이딩을 야기하지만, 경사 방향으로의 사에 발생된 크립를 제거하는데 필요한 하중은 상대적으로 그 크기가 낮다. 이는 곧 3D 직물의 신장 수준이 적을 시 상대적으로 낮은 강성 거동을 초래하게 된다. 1-1.5% 보다도 높은 신장 수준에서는 직물의 응답이 변화하게 되면서 강성이 보다 높아지는 것으로 관측되었다. 이 지점에서는 사들이 뺄뺄하게 채워지게 되면서 서로 간에 얹히기 시작하며 이로 인해 직물이 보다 강성을 지니게 된다. 측정된 반력은 그림 7c에서와 같이 경사 내 장력으로 인한 힘과 결합 사의 장력으로 인한 힘으로 나눌 수 있겠다. 각 분리된 힘들은 시뮬레이션을 통해 경사 및 결합 사 각각에 대한 반력을 합산함으로써 얻어냈다. 1% 이상의 신장에서는 직물의 주요 강성이 경사의 응답에 의한 것임을 확인할 수 있었다.

2축 인장 시뮬레이션과 유사하게 시뮬레이션상의 에너지 균형은 변형 에너지가 마찰 손실보다도 훨씬 큰 것으로 나타났다. 이는 경사와 위사 간의 상호작용이 적었기 때문에, 직물의 내부 마찰이 상대적으로 적게 발생되었다는 것을 의미한다. 실제로 경사 혹은 위사 층이 번갈아 섞여 적층된 형태인 직물 구조로 인해, 이들 사 간의 상호작용은 상대적으로 낮았다. 더욱이 직물로 장력이 가해질 경우, 원로 섬유 간의 상대적 변위가 적게 유지됨에 따라 내부 마찰이 낮은 수준으로 가해지게 된다.

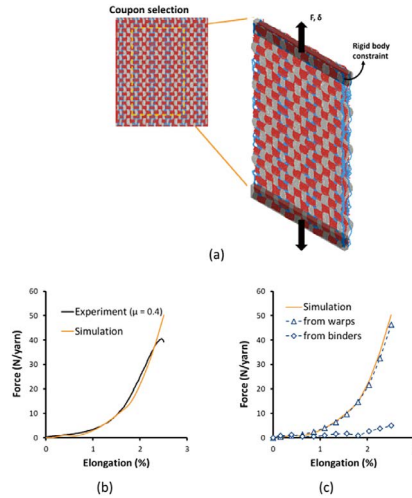


그림 7. 인장 시뮬레이션 수행을 위해 선택된 시편 및 경계 조건들 (a).
사마다에 가해진 힘 대비 신장에 대한 실제 실험과 시뮬레이션 결과 간에 우수하게 일치하는 것을 확인하였음 (b).
직물의 인장 응답은 신장이 낮았을 시에는 강성 영역이 낮으며, 신장이 높았을 시에는 강성 영역이 높았음을 특징으로 함.
경사 방향에서의 직물의 인장 응답은 주로 경사에 의해 결정되었음 (c)

5.3. 3D 직조 직물의 전단

직조된 직물의 전단 거동을 결정하기 위해선 일반적으로 다음의 2가지 실험법을 사용한다 - (i) 2축 인장 실험, (ii) 사진프레임(The picture frame) 방법. 사진프레임 방법은 시편의 크기가 작을 경우도 허용하기에 이를 적용해 연구를 진행하기로 하였다. 또한 사진프레임 방법의 경계 조건은 직물의 풀림 현상을 초래하지 않으며, 보다 더 제어된 전단 하중 조건을 허용한다. 각 모서리에 힌지(hinge) 연결부가 있는 라멘 구조인 것으로 실험을 구성하였다. 십자형인 직물 조각을 프레임에 고정시켰다. 프레임 내 모서리들에 변위를 줌으로써, 직물에 전단력을 가한다. 길이가 200mm인 사각형의 직물 조각을 압 길이가 245mm인 프레임에 맞물리도록 설정하였다. 직물을 압축시키지 않고도 양호한 수준으로 하중을 전달하기 위해, 직물을 고정하기에 앞서 가장자리 부위에 에폭시 수지를 포매시켰다. 사들의 움직임에 제약을 가하지 않도록, 압 길이를 시편 길이보다도 약간 길게 설정하였기 때문에 이로 인한 전단 잠김(locking) 각도가 과소평가될 수가 있었다. 적용된 사진프레임 방법의 설정에 대해선 선행 연구를 통해 보다 자세히 확인 할 수가 있다. 계산상의 수고를 덜기 위해, 시뮬레이션 상에서는 보다 작은 크기를 지닌 직물에 대해 가상 실험을 수행하였다. 시편의 길이는 40mm이며, 프레임의 길이는 46mm이다. 시험편의 크기는 2×2의 단위격자보다도 약간 크다. 상이한 크기를 지니는 프레임로부터의 사진프레임 실험의 결과를 비교하고자, 실제 실험과 시뮬레이션 실험 내용을 비교한 연구 결과에서 제시된 시험편 길이를 참고해 반력을 표준화하였다. 프레임에 변위를 가함으로써 전단 각도를 측정하였다.

사진프레임 시뮬레이션에 가해진 경계 조건을 그림 8에 제시하였다. 프레임은 프레임에 고정되는 모든 트러스 요소들에 대해 강체 경계 조건을 가하는 것으로서 모델링하였다. 강체는 프레임의 평면 내에서 회전이 가능하도록 서로 간에 핀에 의해 연결되어 있다. 프레임의 왼쪽 하단부 모서리는 공간에 고정시킨 반면, 반대쪽 모서리는 직물 내 전단 하중을 생성하기 위해 변위를 주었다. 모든 강체 및 핀 연결 절점들은 면내 방향으로 움직이도록 허용이 되었지만, 면외 방향으로부터는 고정되었다. 그러나 고정되지 않은 직물에 대해선 모든 방향에 있어 자유를 허용하였으며 그 어떠한 경계 조건도 가하지 않았다. 모서리 절점으로 가해지는 반력을 실제 실험을 통해 측정된 반력과 비교하였다. 제시된 사진프레임 방법이 지닌 시편을 고정하는 과정상의 메커니즘으로 인해, 실제로 실험을 수행 시 직물에는 예하중(preload)이 가해지게 된다. 시뮬레이션 상에서는 전단 실험에 앞서 이러한 예하중

을 고정되지 않은 요소들에 대해 작은 크기의 열 수축을 가함으로써 이를 모방하였다.

전형적인 사진프레임 방법의 시뮬레이션을 그림 9에 도시하였다. 전단 과정 중 원료 섬유의 재배열이 발생되었음을 확인할 수 있었다. 매우 높은 전단 각도를 가했음에 불구하고도 시뮬레이션 상 및 실제 실험상에서 3D 직조 직물 내 주름(wrinkling) 현상은 관측되지 않았다. 이는 아마도 직물 고유의 두께 및 3D 직조물이란 구조상의 이유로 인해, 해당 수준의 높은 전단 각도에서 종종 주름이 관측되는 2D 직물에 비해 이의 굽힘 강성이 상당히 증대된 데 기인한 것으로 여길 수 있겠다. 그림 10a는 실제 실험을 수행해서 얻은 3D 직조 직물에 대한 힘 대비 전단 각도 곡선을 제시한다. 사진프레임에 대한 반력은 직물에 전단 잠김이 발생할 때까지는 상대적으로 그 크기가 낮다. 일정 전단 각도에서는 사들이 인접의 사들로 인해 면내 이동이 제한되며, 이에 따라 사진프레임에 대한 반력이 급속히 상승하게 되면서 전단 잠김 현상이 발생된다. 시뮬레이션 상의 전단 거동은 실제 실험 결과와 우수하게 일치하고 있는 것을 나타내었다. 게다가 전단 잠김 전후 점선들의 교차점인 것으로 정의내린 전단 잠김 각도의 결과 역시 거의 동일한 것으로 나타났다. 인장 실험에서의 결과와 마찬가지로, 트러스 요소 기반의 가상 섬유를 활용한 시뮬레이션 방법이 전단 하중 조건에서 사의 역학을 정확하게 설명하고 있음을 확인할 수가 있었다. 여기서 사 역학이란, (i) 사/사 접촉, (ii) 사/사 슬라이딩, (iii) 사 장력 조절 (iv) 원료섬유 재배열, (v) 직물 압축, 그리고 (vi) 직물의 전단 잠김을 포함한다. 직물의 표면에 자리 잡은 사의 내부 원료섬유들의 재배열은 그림 9의 추가 삽입 그림을 통해 표현하였다.

시뮬레이션 상의 에너지 균형 분석 결과, 그림 10b와 같이 인장 시뮬레이션 때 보다 전단 시뮬레이션 시 마찰 소실 에너지가 훨씬 두드러지는 것을 확인할 수 있었다. 마찰 소실 에너지는 전단 잠김이 발생되기 전의 변형 에너지보다도 약 1 자릿수의 크기(10 배)만큼 그 크기가 크다. 이는 즉 직물의 전단이 대량의 사/사 접촉, 사 재배열 그리고 원료섬유의 재배열을 유발하는 동안에도, 사 내부에는 일부 장력들이 남아 있어 전단 잠김 상태에 도달하기 전까지 여전히 일부 존재하기 때문이다. 전단 잠김 이후 사의 면내 이동이 제한되면서 사에 인장이 가해짐에 따라 변형 에너지는 급속히 상승하게 된다. 이와 같이 3D 직조 직물의 거동은 인장 하중의 경우 보다 전단이 가해졌을 경우, 직물의 내부 마찰에 보다 영향을 받게 된다. 게다가 시뮬레이션 결과 그림 10c와 같이 마찰 계수가 높아질수록 보다 높은 수준의 내부 마찰로 인해 전단 잠김 각도의 감소하고 있음을 확인할 수 있다.

유의할 점은 실제 직물은 일반적인 직조 상 과정으로 인해 일정량의 장력이 지속적으로 유지된다는 점인데, 이는 섬유 고유의 구조인 서로간이 맞물린 형태와 함께 원료섬유와 사들 간의 마찰에 기인한 것이다. 이러한 응력들은 직물이 실제로 취급되는 중 직물 내 일부 사들이 이동됨에 따라 완화될 수 있다. 이와 유사한 메커니즘이 전단 잠김 후 직물에 하중을 제거하는 동안에 관측되었다. 하중이 제거되는 동안(이후 후속 하중이 가해짐)의 전단 잠김 각도는 그림 10d와 같이, 예하중이 가해진 직물에 하중이 주어졌을 시 보다도 값이 크다. 더욱이 하중이 제거되었을 시의 전단 거동은 직물에 예하중이 가해지지 않았을 시의 시뮬레이션의 결과와 유사한 것을 확인할 수 있다. 이는 즉 직물의 초기 응력이 첫 번째 하중 주기 이후에 완화되었음을 의미한다.

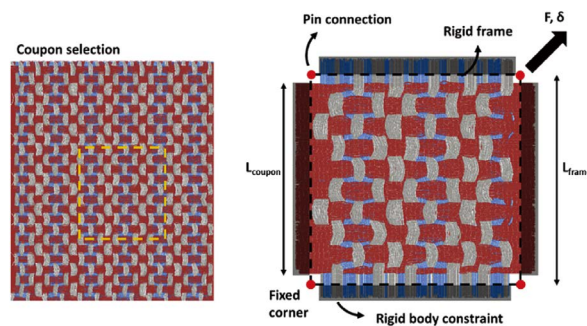


그림 8. 사진프레임 방법을 시뮬레이션 하기 위해 선택된 시편 및 경계 조건들

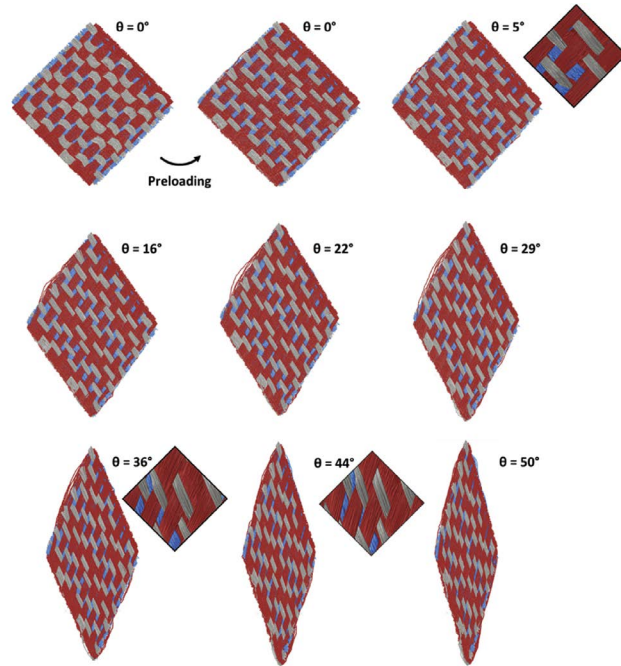


그림 9. 사진프레임 방법 시뮬레이션이 수행되는 동안 서로 다른 각도에서 3D 직조 직물을 관측한 모습(명확성을 위해 십자 형태의 암은 제거하였음)

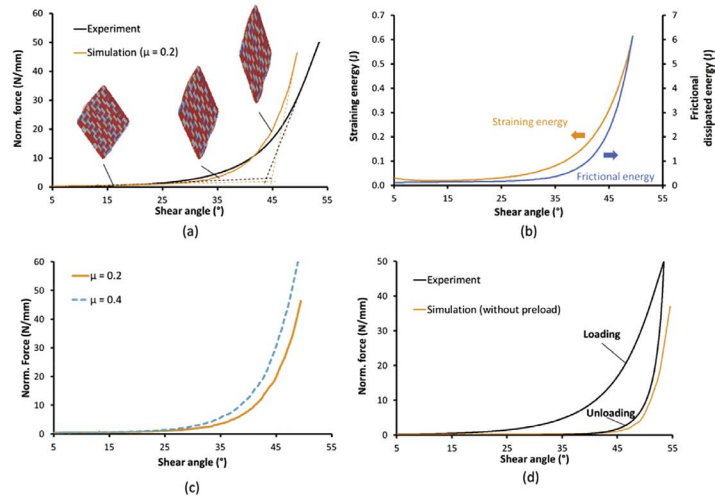


그림 10. 예하중이 가해진 3D 직조 직물에 대한 정규화된 힘 대비 전단 각도임. 대략 42°에서 45°의 전단 잠김 각도 범위에서 실제 실험 데이터와 시뮬레이션상의 데이터 간의 우수하게 일치하고 있는 것을 나타냄 (a). 시뮬레이션 상에서의 에너지 균형은 마찰 손실 에너지가 변형 에너지보다도 훨씬 두드러지고 있음을 나타내며, 이는 즉 내부 직물의 마찰이 훨씬 크다는 것을 보여줌 (b). 마찰 계수가 높아질수록 전단 잠김 각도의 크기는 점점 작아짐 (c). 사진프레임에 하중을 제거했을 시 얻은 힘 대비 전단 각도는 직물에 예하중이 가해지지 않고 전단 거동을 시뮬레이션 했을 시의 결과와 유사함 (d).

5.4. 3D 직조 직물의 휨

이전 절들에서는 본 모델링 전략이 면내 인장 및 전단 하중 조건 하, 3D 직조 직물의 역학적 거동을 결정할 수 있음을 제시하였다. 이러한 면내 거동은 일반적으로 직물의 인장 특성 및 직물의 구조에 의해 결정되곤 한다. 이는 곧 트러스 기반의 가상 섬유를, 예를 들어 복합재를 생산하는 과정인 침지 전 상태인 프리폼의 드레이핑 공정과도 같이, 면내 및 면외 하중 조건 모두를 유발시키는 휨과 같은 면외 하중 거동을 표현해하기에도 적합한지에 대해 의문점을 남기게 한다. 가상 섬유 그 자체로써는 통상의 휨 강성을 지니지 않으며 섬유 내 장력에 의존하는 휨 컴플라이언스를 지니기에, 트러스 요소 기반의 사의 사용으로 인해 3D 직조 직물의 휨 강성을 과소평가하지 않는 것이 중요하다. 앞서 3절에서 설명된 바와 같이, 장력으로 인한 휨 컴플라이언스 이외에도 사 혹은 직물 내 원료섬유들은 인접 섬유 간의 접촉 및 마찰로 인해 개개가 독립적으로 구부러질 수가 없다. 이러한 효과는 곧 사 및 직물 수준에서의 휨 강성을 초래하게 된다. 이러한 휨 강성이 실제 현상과도 부합하는지를 확인하기 위해 Peirce 휨 실험에 의거해 한 조각의 직물을 하나의 캔틸레버(cantilever) 빔으로써 간주하고, 몇 가지 휨 시뮬레이션을 수행하였다. 휨 시뮬레이션을 위한 수치적 모델링 절차는 이전 절에서 설명된 인장 및 전단 하중에서와 과정과 동일하다. 직조 직물로부터 가느다란 한 조각의 직물을 채취한 다음 휨 시뮬레이션에 사용하였다. 한쪽 말단부는 완전히 구속(고정시켜 줌)시킨 다음에, 자유단에는 힘을 작용시킴으로써 캔틸레버형 변형이 제공되게끔 설정하였다. 시뮬레이션은 선형 영역 인근의 낮은 곡률에서 수행되었으며, 그림 11과 같이 실제로 직물의 모멘트-곡률을 측정한 실험 데이터와 비교되었다. 이러한 시뮬레이션 수행을 통해 트러스 요소 기반의 직물이 실제 직물과 유사한 크기의 휨 강성을 보유하고 있음이 분명한 것으로 나타났다. 따라서 트러스 요소 기반의 가상 섬유를 사용한다고 해서, 반드시 사와 직물 수준에서의 휨 강성을 과소평가하는 것이 아님을 확인할 수 있었다.

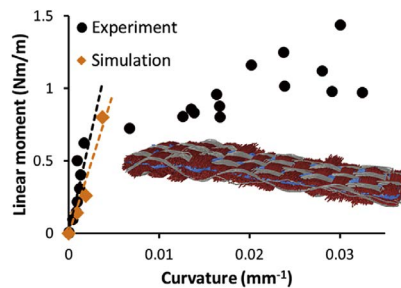


그림 11. 직조 직물에 대한 실제 실험 대비 시뮬레이션 상의 선형 모멘트(직물의 폭에 따라 모멘트 값을 나누어 줌) 결과. 휨 시뮬레이션 실험 이후 변형된 샘플의 모습을 제시하였음.

6. 결론

가상 섬유 개념을 기반으로 둔 시뮬레이션 방법론을 직조 구조라는 미세 기하형상과 함께 3D 직조 직물에 대한 대형 크기의 단위 격자 내 사의 역학을 모델링하기 위해 적용하였다. 일련의 트러스 요소들로 구성된 가상 섬유를 사용함으로써 가상 섬유의 유연성에 영향을 주지 않으면서 사의 실제 강성을 활용할 수가 있었다. 본 방법은 원료섬유상의 거동을 현실적으로 고려하였기에 직물의 역학 거동을 우수하게 예측해내었으며, 실제 실험 결과와도 잘 일치하고 있음을 나타내었다. 제시된 시뮬레이션 방법론은 일반적인 3D 직물 및 섬유 소재의 가상 실험을 위한 실용적이면서도 다양한 방법을 제공한다.

3D 직조 직물의 직조 구조의 미세 기하형상은 이상화된 느슨한 직물 모델 내 사들에 인장을 가함으로써 얻을 수가 있었다. 직물은 결합 사의 수축으로 인해 압축되었으며, 그에 따른 미세 기하형상 결과는 실제 직물에 대해 소형-CT 스캔을 통해 얻은 결과와도 우수하게 일치하는 것으로 나타났다. 인장 및 전단 하중 하 3D 직조 직물의 거동은 각각의 직조 직물 모델로부터 취한 시편에 대해 인장 실험 및 사진프레임 실험 시뮬레이션을 통해 구해졌다.

주목할 점은 경사 방향에서의 직물의 인장 거동이 주로 경사의 거동에 의해 결정된다는 점이었다. 비록 경사 방향으로 결합 사들이 배향되어 있지만 이들은 면외 방향으로 매우 큰 수준의 기복 상태를 가지기에, 경사에 대해선 매우 낮은 강성을 지니는 것으로 관측되었다. 또한 인장 시의 내부 마찰 에너지는 변형 에너지에 비하면 그 값이 상대적으로 적었다. 이는 곧 대상 직물 내 직조 구조 및 또한 인장이 가해지는 동안에 발생된 낮은 수준의 신장으로부터 기인한 것으로 여길 수 있다.

직물의 전단 거동 실험에 있어서도 실제 실험 결과와 시뮬레이션 상의 결과는 우수하게 일치하고 있었다. 전단 잠김의 메커니즘은 실제 실험 및 시뮬레이션 결과 모두에서 확인할 수 있었다. 인장 하중과는 달리 전단 하중은 변형 에너지에 비해 상대적으로 큰 수준의 내부 마찰 에너지를 발생시켰다. 따라서 전단 거동이 마찰 계수의 영향을 받는 것을 밝혀낼 수 있었다. 마찰 계수가 높아질수록 전단 잠김 각도의 크기는 낮아졌다.

또한 초기 휨 시뮬레이션을 통해 트러스 요소 기반의 가상 섬유를 사용한다고 해서 반드시 사 및 직물 수준에서의 휨 강성을 결코 과소평가하지 않았음을 보여주었다. 이는 제시된 방법론이 침지 전 상태인 직물의 면외 거동뿐만이 아니라 면내 거동까지도 잘 포착해낼 수 있음을 의미하는데, 이는 두 가지 하중 조건 모두를 발생시키는 드레이핑 공정에 있어 특히나 유의미하다.