

다층섬유복합재의 셸 요소 기반 FEM 모델링

J. Gager^{a, b}, H.E. Pettermann^{b, *}

^a 오스트리아 레오벤 소재, 고분자 기술경쟁력지원센터

^b 오스트리아 비엔나 소재, 비엔나 기술대학교 경량설계 및 구조생체역학 연구소

개요

본고는 섬유강화 적층판의 수치적 균질화(homogenization)를 위한 단위격자(unit cell) 기반의 셸(shell) 요소를 제시한다. 여기서의 모델링 전략은 유한 요소법(FEM) 틀 내에 모델을 세우는 것이다. 다층 구조 적층판은 균일한 직조물들로만 구성되었을 것으로 고려하였으며, 토우사, 비강화 영역인 기지(matrix)를 포함한 모든 구성 재료들이 적절히 커플링 되었을 경우에만 셸 요소들에 의해 이산화(discretized)하였다. 본 연구는 적층판, 즉 셸의 외연적 모델의 강성을 다루었으며, 이를 선행 문헌에서 제시된 접근법과 비교해 결과를 고찰하였다. 또한 기하 비선형 시뮬레이션을 수행하였으며, 이를 문헌에 나타난 실제 실험 결과 값과도 비교하였다.

1. 도입부

적층 형태의 복합재, 그 중에서도 특히 직조 및 브레이드로 적층된 구성물은 뛰어난 기계적 물성으로 인해 지난 수십 년간 매우 큰 인기를 끌어들였다. 그러나 이러한 섬유 구조물들을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였을 시, 대부분이 구조를 너무 단순화해 설계한 결과 보유 내력을 충분히 고려해내지 못하였다. 이러한 한계를 극복하기 위해선 해당 적층물의 강성과 강도를 예측해낼 수 있는 모델링 접근법 및 계산법의 연구가 필수적이라 할 수 있겠다. 중시적 시점에서 섬유 구조는 서로 간에 뒤섞여 짜여진(interwoven) 매우 복잡한 토폴로지(topology)를 지니기에 이를 정확하면서도 효율적으로 표현할 수 있는 모델과 함께, 높은 수준의 비선형 구성 거동을 결합시킨 정밀한 연구를 필요로 한다. 이때 모델들은 적합한 방법을 통해 전반적인 메커니즘 속성을 포착해(최소한 현상 학적으로라도) 모델링되어야 한다.

수치 역학 분야에 있어 복합재의 효과적 응답을 예측할 수 있는 일반적인 접근법은, 단위격자를 기본으로 하는 균질화 기법을 적용하는 것이다. 유한요소법(FEM)의 틀은 이산화 기반의 연속체 요소를 활용하는 것을 일반적으로 한다. 그러나 섬유의 경우, 재료 자체의 복잡한 토폴로지로 인해 수없이 많은 자유도(DOF)를 발생시키게 되면서 시뮬레이션 수행 시간이 연장되는 것이 사실이다. 특히나 다층 구조인 적층판의 경우 더욱이 그러하며, 이는 섬유 복합재를 대상으로 한 대부분의 연구 사례들이 왜 단위격자들을 오직 한 층으로만 구성된 것으로 가정하였는지를 설명해주는 근거가 된다. 이러한 수치적 한계를 극복하기 위한 몇 가지 접근법들이 발표되었는데, 예를 들어 Refs. 외 연구진이 제시한 분석 균질화 모델, XFEM 및 트러스(truss), 빔(beam), 또는 셸 기반의 심화된 수치 모델, 그리고 중첩화(superposition) 기법을 각각으로 들 수 있겠다.

또한 적층판이 다층으로 형성되었다는 구조적 관점에서 추가적인 복잡성 문제가 발생되는데, 이는 즉 인접한 층들 간의 영향을 들 수 있겠다. 적층판 1개 내 플라이(ply)의 개수, 그리고 내부 층들 개개의 위치 변화는 재료의 거시적 성질에 현저히 영향을 미치는 것으로 이미 잘 알려진 사실이다. Owens. 외 연구진은 적층판 중심부에 인접한 층들에 비해, 표면부 인근 층들에서의 응력 분포가 현저히 다르다는 것을 예측한 바 있다. 또한 이들은 플라이의 개수가 곧 유효 모듈러스에 영향을 미쳤음을 보여주었으나 그 효과는

그다지 뚜렷하지 않았다. 이에 대해선 타 연구진들에 의해 실제 실험 및 수치 시뮬레이션을 통한 후속 결과들이 보고되었다.

문헌을 통해 인접 층들 간의 영향을 설명한 다양한 접근법들을 찾아 볼 수 있다. 이들의 공통된 방법은 그림 1과도 같이, 하나의 층을 마치 동일 위상(IP), 그리고 역-위상(OP) 형태로 적층된 것으로 “극단적이게” 표현해 면의 경계 조건을 구분지은 것이다. Refs. 외 연구진에 따르면, 전자(IP)는 두께 방향을 고려해 주기적 경계 조건을 이용해 작성한 반면, 후자(OP)는 대칭 경계 조건으로부터 얻은 것이라고 한다. 이에 상응하는 유효 응답은 대략 실제 값의 상한 및 하한 추정치인 것으로 취급한다. 엄밀히 말하자면, 이러한 접근법은 매우 많은 층을 지닌 적층판에 적합하다고 볼 수 있다. Ivanov 외 연구진은 인접 층들에 의한 제약을 모방한 보다 심화된 경계 조건 세트를 제안하였다. 해당 경계 조건은 적층판 내 플라이별 각 위치, 그리고 내부 층에 발생된 임의의 위치 변화를 구분할 수가 있으며, 또한 사용자가 층의 개수를 지정할 수 있게끔 해준다. Refs. 외 연구진의 연구에서 알 수 있듯, 이는 면의 섬유 모델의 변위 크기 변화를 경계 조건으로써 삼았다.

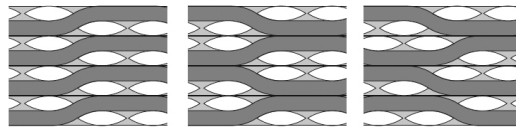


그림 1. 직조 구조 적층판의 단면적 스케치임. 플라이는 동일 위상(왼쪽), 역 위상(중간), 그리고 임의(오른쪽) 형태로 적층되었음.

이보다는 덜 알려진 접근법으로 단위격자 내 다층 구조를 외연적(explicit)으로 모델링하는 방법이 있다. 일반적 모델링 전략과 결합한 접근법은 그 계산 요구량이 상당히 크기 때문에, 보통 메시의 크기를 크게 설정하고, 선형 탄성 시뮬레이션으로 제한해 수행하곤 하였다. 그러나 모델 내 개별 층들 간의 물리적 상호작용을 표현해내기 위해선, 모든 층들이 구분되어야지만 이를 구현할 수 있는 것이 사실이다. 특히 파손(damage) 및 층간분리(delamination)와 같은 비선형 현상을 연구해야할 경우에는 더욱이 그러하다.

본 연구에서는 모든 직물 플라이를 양면이 볼록한 렌즈 형태의 횡단면을 지닌 토우사들로 구성된 것으로서 모델링하였다. 적층판 내 각 층들을 셸 요소 기반의 접근법을 사용해 외연적으로 모델링하였다. 이러한 방식을 거칠 시 방대한 량의 계산상의 요구 사항들을 덜어주게 됨으로써, 비선형 관점에서 적층판의 전체 단위격자들을 효율적으로 시뮬레이션 할 수가 있다. 각 층에 적용한 셸 요소 기반 모델링은 앞서 Refs. 외 연구진에 의해 입증된 모델을 참고하였다. 본 접근법은 상업용 FEM 패키지인 Abaqus/Standard 6.13 (미국 로드아일랜드주 프로비덴스 소재, Dassault Systemes Simulia Corp., 제조)을 통해 구현되었다.

2. 모델링 방법

제시된 다층 구조 섬유복합재의 모델링 과정은 계층적 방법을 따른다. 먼저 셸 요소 기반 모델링 전략에 따라 각 층을 개별적으로 모델링 한다. 두 번째 단계에서는 이들 층을 적절하게 적층하고 커플링 시킨다. 마지막으로 전체 누적 층에 경계 조건을 설정해준다. 이러한 방식을 거침으로써 단위격자들로 전체 적층판의 두께를 구성하게끔 하는 것이다. 본 과정에서는 중첩(nesting) 영향은 고려되지 않았다. 적층판 전체가 아주 상세하게 모델링되었기에, 시뮬레이션에 있어 수치적인 효율성을 주요 이슈라고 여길 수 있겠다.

2.1. 단일 층

단일 개 플라이의 모델을 설정하고자, 셸 요소 기반의 모델링법을 적용하였다. 본 접근법은 Refs. 외 연구진이 제시한 모델링 전략을 보다 확장시킨 것으로, 그림 2에 도시된 바와 같이 토우사의 횡단면은 렌즈 형태이고, 사 경로는 물결 형태인 파(波)형인 것으로 간주하였다. 이러한 접근법에 따라 토우사 및 비강화 영역(기지 영역)은 오직 셸 요소로만 표현된다. 이는 연속체 요소의 모델링과 비교해 계산 요구량을 대폭 줄일 수가 있다. 본 접근법의 주요 과제 중 하나로 비강화 영역인 기지 영역의 표현을 들 수 있겠다. 모델이 지닌 직사각형인 단면 형태에 맞춰, 기지에 해당되는 셸 요소의 2층을 각각 단위격자 내 상단부 및 하단부 표면에 위치하게 함으로써, 순수 수치만의 체적을 모델링하였다. 토우사의 단면 형태는 렌즈형이며 이에 맞춰 셸 두께도 점차적으로 변화하기에, 전체 상단 영역과 하단 영역 또한 셸 요소로써 표현하였다.

또한 인접한 2개 토우사의 교차 지점에 발생하는 비강화 기지 영역 또한 셀 요소로 표현하였다. 토우사들의 교차 지점에서 발생된 국부적인 기하학 구성은 그림 3에 제시된 3가지의 기하학적 케이스 중 하나인 것으로 구분할 수가 있으며, 이들 각 모델링 방법은 상이하다.

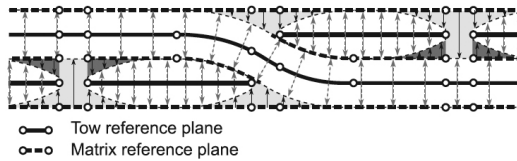


그림 2. 1층의 2/2 능직 구조물의 단면적 스케치임. 셀 참조 평면, 셀 오프셋, 그리고 셀 두께를 나타내고 있음. 기지 영역은 음영 처리되었으며, 작은 원은 형상들의 가장자리를 의미함.(즉, FEM 절점을 나타내는 것이 아님)

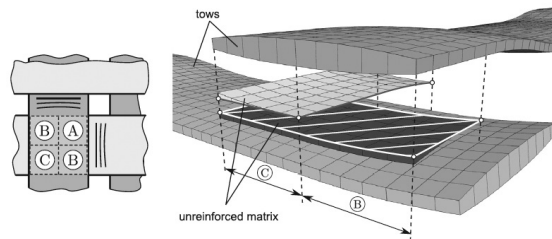


그림 3. 2/2 능직물의 기하학적 구성을 나타낸 스케치(왼쪽) 및 셀 요소의 두께를 확장시킨 이의 분해도(오른쪽)를 나타냄. 흰색의 빗금 친 영역은 하단 셀 요소의 참조 평면을 나타내며, 각 점들은 형상의 위치를 표현함. 명확한 이해를 돕고자, 편의상 여타 다른 토우사, 셀 상단부 및 기지 요소의 하단부 표현은 배제하였음.

A 영역은 2개의 토우사 경로가 모두 국부적으로 약간 굽은 형태이며 서로 간의 표면이 일치할 나타낸다. 이를 단순화하기 위해, 토우사 사이의 비결정질 영역은 모델링하지 않았다. B 영역은 교차하는 토우사들 중 하나는 직선 형태를 유지하며, 나머지 하나는 파형을 지닌 것으로 고려하였다. 중간부의 기지 영역의 셀 참조 평면은 토우사 내 직선 형태를 지닌 표면(즉, 그림 3에서 흰색의 빗금 친 영역을 뜻함)으로 위치하게 된다. 마지막으로, C 영역에서는 2개의 토우사 모두가 직선 형태를 지닌다. 비결정질 영역의 참조 평면은 직물 층의 평면 중간부(그림 3에서 빗금 친 영역)에서 모델링되었다. Abaqus S/W 환경에선 오프셋 기반의 절점을 지정할 수 없기에 셀을 두 배로 만들어 준 다음 하나의 층에는 양(+)의 오프셋을 할당하고, 다른 층에 음(-)의 오프셋을 할당한 후 이들을 서로 간을 묶어 주었다.

2/2 능직물의 토폴로지 경우 그림 3(왼쪽)과 같이 교차 영역을 각각이 정의된 기하학적 케이스들로 구성된 것으로 간주한다. 그림 3(오른쪽)은 두께를 확장시킨 기지 셀 요소의 분해도를 나타낸다. 그림에서 흰색의 빗금 친 영역은 하단부 기지 셀 요소에 대한 셀 참조 평면을 나타낸다. 이와 유사하게 상단부 기지 셀 요소의 참조 평면 또한, 이들 요소의 하단 면으로부터 오프셋을 한다. 흰색 점들은 그림 2에서 설명했듯이 형상의 위치를 구분하는 역할을 한다. 국부적인 기하 형태를 정확히 표현해내기 위해 셀 요소가 오프셋 값을 가질 뿐만 아니라, 그림 3에 나타난 바와 같이 셀 두께를 불균일하게 설정하였다. 본 연구는 직물 층 내 모든 인터페이스들이 완벽한 것으로 가정하고 있으며 이에 따라 표면을 기반으로 한 타이(tie) 구속에 맞춰 이를 모델링하였다. Refs. 외 연구진이 제시한 바와 같이 손상받기 쉬운 인터페이스들은 플라이 내부에서 발생하는 층간 박리 현상을 연구하기에 적합하다.

2.2. 다층 구조

원하는 개수만큼의 단일 층 단위격자들을 모델링하였으며 이들 층간에는 그 어떠한 틈새도 발생되지 않도록 적절하게 쌓아 올렸다. 단일 층 개개의 모델링을 통해 플라이 내부에서 발생하는 위치 변화를 표현하였다. 이러한 각 층간의 커플링은 기지 셀 요소의 외곽과 연결된 응집(cohesive) 요소에 의해 구현된다. 이들 요소들은 참조 면의 수직 분리 및 전단 분리를 허용함으로써 경계면을 형성시킨다. 이하 용어 "단위격자"란 전체 적층판의 단위격자를 뜻한다. 제시된 단위격자 접근법은 모든 층들이 평면 치수를 동일하게 가질 것을 요구한다. 이는 즉 적층판 내 플라이들의 각도가 동일하지 않다면, 이를 모델링할 수 없다는 뜻이다. 추가적으로 각 토우사의 기하 형상 및 재료 시스템으로 가해지는 구속 조건은 없다.

2.3. 거시적 시점에서의 적층판의 취급

적층판의 유효 모델은 마치 얇은 껍질과도 같이 거동하는 것으로 가정한다. 이러한 가정을 염두에 두고서, 단위격자의 측면부에 평면 주기 경계 조건을 가하였다. 구조적 요소들이 사용되는 만큼 이들의 경계 조건들을 절점 변위뿐만 아니라 회전과도 커플링 시키게 되는데, 자세한 내용은 Refs. 외 연구진의 선행 연구를 참고하면 되겠다. 평면 내 구속 외에도 적층판 단위격자의 상단면 및 하단면은 견인력(traction)으로부터 자유로운 것으로 간주하기에, 전반적으로 평면 응력 조건을 가진다. 이는 단일 층의 섬유복합재에도 마찬가지로 적용한다. 단위격자의 하중은 소위 말하는 “거시적 자유도”에 의해 구현된다. 각기 다른 절점력, 또는 변위에 의해 유효 응력과 유효 변형이 각각 균일하게 적용될 수가 있다. 이를 소위 “마스터” 절점이라 불리며, 단위격자의 응답을 읽어내는 데 사용한다.

3. 적용 사례

본 접근법을 입증하고자, 2/2 능직 구조의 동일한 층들로 구성된 다층 적층판을 연구 대상으로 삼았다.

3.1. 기하 형상

직조 구조의 기하형상은 앞서 Refs. 외 연구진이 연구한 형상과도 유사한 것을 선택하였으며, 이는 중앙부가 곧은 형태이며 토우사의 단면적이 정점을 기준으로 평면으로 잘랐을 시 렌즈 형태를 지닌 것을 특징으로 한다. 해당 사 경로는 파형을 지니며 직선 형태 및 활꼴(弓형, 弓形)로써 모델링됩니다. 그림 4는 단일 플라이의 단면적에 mm단위의 치수를 포함한 스케치를 나타내고 있다. 단일 층에 대한 단위격자는 각기 다른 방향을 가진 4개의 토우사로 구성된다. 토우사 내 섬유 고유의 체적 비율이 약 70%이라고 가정했을 경우, Refs. 외 연구진의 연구에서와 마찬가지로, 현 조사 대상인 직조물 내 전체 섬유가 차지하는 체적의 비율은 약 45%인 것으로 여길 수 있겠다. 이러한 층이 여러 개가 적용됨으로써 본 연구 대상과도 같은 적층판이 형성되는 것이다. 본 연구의 경우, 그림 1과 같이 동일 위상 및 역 위상 형태로 적층된 적층판들이 조사되었다. 전자의 경우 그 어떠한 위치 변화도 없이 층들이 쌓인 반면, 후자의 경우는 반주기 형태의 위치 변화를 지닌다.

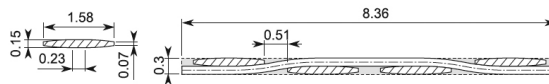


그림 4. 조사 대상인 2/2 능직물의 단면적 모습으로, 토우사의 단면(빛금 친 영역), 파형으로 매칭시킨 사 경로, 그리고 기지 영역(음영 처리 영역)을 나타냈으며, 치수는 mm단위로 기입함.

3.2. FEM 이산화

앞서 2절에서 설명된 이산화 접근법 기반 셸 요소를 이용해, 직조물 내 모든 구성 요소들을 오직 셸 요소만을 이용해 모델링하였다. 각 셸 참조 평면들을 선형형상함수(linear shape function)에 따라 4개의 절점들로 구성된 셸 요소를 사용해 메시 작업을 수행하였다. 요소들은 심프슨의 적분 법칙(Simpson's rule)을 적용함으로써, 5개의 절점으로써 두께 방향으로 적분된다. 일반적인 요소의 길이는 토우사 폭의 약 1/10 가량에 해당된다. 시뮬레이션을 수행하기 위해 다수의 층들을 모델링한 다음에 이를 적층 후 적절하게 커플링 하였다.

3.3. 재료 데이터

토우사는 선형 탄성의 횡 방향으로 등방성을 나타내는 반면, 비강화 영역인 기지 영역은 선형 탄성의 등방성을 지닌 재료인 것으로 모델링하였다. 섬유의 강도를 효과적으로 예측하고자, Hashin이 제시한 FPF(첫번째 플라이 파손) 이론을 토우사에 적용하였다. 구성 요소에 관한 각 데이터들을 표 1에 열거하였다. 데이터는 Refs. 외 연구진의 실험 결과를 참조해 선택되었다. 본 연구의 경우 플라이 내부 층간분리는 고려하지 않았으며 이에 각 층들 간 연결 역할을 수행하는 응집 요소들이 선형 형태의 견인(traction)-분리 거동을 나타내, 오직 선형 탄성의 영역만이 발현되었다. 해당 재료의 강성은 선행 연구를 참고해, $K_n = K_s = K_t = 10^5 \text{N/mm}^2$ 인 것으로 설정하였다.

표 1. Refs. 외 연구진의 연구를 참조한 탄소섬유/에폭시 직조 복합재의 토우사 및 기지 재료 데이터

토우사	E1	E2 = E3	$\nu_{12} = \nu_{13}$	ν_{23}	$G_{12} = G_{13}$
	160.20 GPa	9.82 GPa	0.31	0.29	4.68 GPa
	R_{11}^I	R_{11}^C	R_{22}^I	R_{22}^C	R_{12}
	2002 MPa	1677 MPa	85 MPa	290 MPa	82 MPa
기지	E_{Matrix}	ν_{Matrix}			
	3760 GPa	0.39			

4. 결과 및 고찰

본고는 직물의 다층 구조에 초점을 두고 있기에 우선 동일한 직조 플라이들로 구성된 다양한 적층판들의 초기 쉘 강성 값을 비교하였다. 이를 통해 적층판의 강성과 관계한 플라이의 개수 및 적층 설계 구조의 영향이 연구되었다. 또한 단축 응력의 영향을 받았을 시 1층, 2층 및 4층 구조의 적층판의 기하 비선형 거동을 나란히 비교하였다. 연구된 모든 적층판 내 각층들은 플라이 각도를 동일하게 하여 적층시켰다. 본 모델링은 쉘 요소를 이용한 접근법이기에 본질적으로 조사 대상인 섬유 직물의 면내 성질만이 계산될 수 있다. 면의 성질은 사용된 응집 요소에 의한 커플링의 강성을 적합하게 정의 내린다면, 이를 표현할 수 있을 것이다.

4.1. 초기 유효 쉘 강성

적층판의 초기 유효 쉘 강성을 계산하기 위해선 Refs. 외 연구진이 제시한 바와 같이 6개의 독립된 하중 조건을 필요로 한다. 이러한 시뮬레이션을 기반으로 적층판에 대한 ABD 행렬을 계산할 수가 있다.

4.1.1. 동일 위상 적층

다소 정확도는 낮을 지라도 다층 적층판의 유효 강성 값을 예측하기 위한 노력으로 문헌들이 공통적으로 제시해온 접근법은 무한 개수의 층들을 적층시킨 면의 경계 조건을 이용하는 것이다. 허나 오직 몇 개의 층들로만 구성된 적층판을 해당 방식으로 예측 시에는 과연 이의 결과 값이 합리적일지에 대한 의문이 발생한다.

이러한 의문을 해결하고자, 1, 2, 3, 5, 10개 그리고 20개 층으로 구성된 6개의 적층판들을 조사하게 되었다. 그림 5는 극좌표도를 통해 각각 유효 영률인 E_{ξ} (왼쪽)와 유효 전단 계수 G_{η} (오른쪽)을 나타내었는데, 여기서 $\xi-\eta-\xi$ 는 좌표계를 뜻하며 전체는 z축 방향으로 회전되었다. 이를 통해 단일 층 그리고 다중 층의 탄성 거동 간에 현저한 차이가 있음을 알 수 있었다. 이는 토우사 방향으로 하중이 실릴 시 단일 층 구조의 2/2 능직 직물에서 국부적인 뒤틀림이 발생하는 데서 그 원인을 설명할 수 있겠다. 그리고 인접한 층간에는 면의 구속 조건을 주기에 적층판의 유효 강성이 증가된다. 영률의 x축 방향에서의 “수렴(convergence)” 거동을 강조하고자 주기해(periodic solution)에 맞춰 해당 값들을 정규화한 값을 그림 6에 나타내었다. 엄밀히 말해 구성 요소들 간의 커플링은 두께 방향으로의 주기적 경계 조건을 가하는 데 방해가 될 수 있음을 고려해, 10층 및 20층 적층판의 결과에 기반 하여 주기해를 추산하였다. 그림 6은 이러한 주기해에 의해 예측된 강성 값과 적어도 7층으로 구성된 적층판의 강성 값간 차이가 1% 이하임을 나타내고 있다. 하나 이상의 층을 포함하는 모든 적층판에 있어 유효 영률간의 편차는 약 5% 미만인 것으로 예측되었다. 그림 5(오른쪽)와 같이 45°방향에서의 유효 전단 계수를 비교 시에도 이와 유사한 결과가 나타났다. 연구 결과 예측된 전단 강성들의 편차를 1% 이하로 유지하기 위해선 적어도 9개의 층이 적층되어야할 것을 권장하고 있다.

흥미로운 점은 45°방향에서의 유효 영률, 그리고 x방향, y방향에서의 전단 계수는 적층수의 영향을 받지 않는다는 것이다. 이는 이러한 하중 조건들은 조직물 내 각 층들로 하여금 국부적인 뒤틀림이 발생시키기에는 다소 부족한 것으로서 설명될 수 있겠다. 인접한 층들 간에는 적층판의 유효 강성에 영향을 미치는 면의 구속 조건을 가하였다.

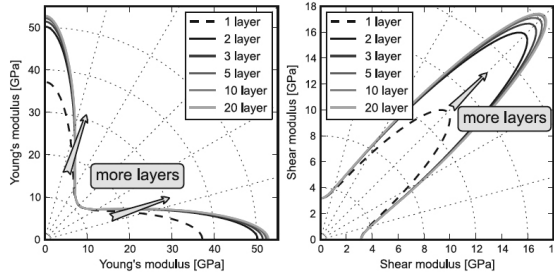


그림 5. 동일 위상 방향으로 1, 2, 3, 5, 10 및 20층이 적층된 2/2 능직 구조 적층판의 예측된 유효 영률 E_x (왼쪽), 유효 전단 계수 G_x 를 극좌표도로 나타냄.

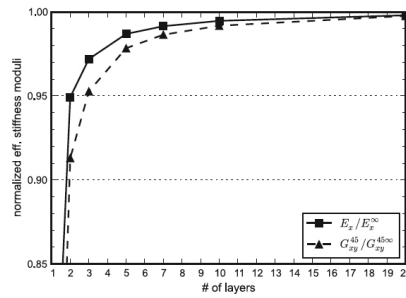


그림 6. 적층판 내 플라이 개수 대비 x방향에서의 유효 영률(실선), 45°방향에서의 전단 계수(파선) 예측 값을 정규화하였음.

4.1.2 역 위상 적층판

유효 강성 성질에 있어 역 위상 형태로 쌓은 적층 층의 개수에 따른 영향을 평가하고자, 이전 절에서와 유사한 조건들을 고려하였다. 여기서는 2, 3, 4, 5, 그리고 16층을 시뮬레이션 하였으며 그 결과로 나타난 유효 강성 값을 그림 7에 나타내었다. 값을 비교하고자 동일 위상 형태로 1층, 그리고 20층으로 적층된 적층판의 결과 곡선 또한 함께 도시하였다. 실험 결과 역 위상 적층판의 반응 경우, 플라이의 개수와는 거의 무관한 것으로 나타났다. 플라이가 홀수 개일 경우 보다 잘 부응되는 것으로 나타났는데 이는 남은 한 개의 층이 상쇄 역할을 할 수 있는 상대자를 가지지 못하기 때문이다. 그러나 이러한 차이는 층수가 늘어나게 되면서 점차 줄어들게 된다. 다시 말해 45°방향에서의 유효 영률, 그리고 x방향 및 y방향으로의 전단 계수는 적층수의 영향을 받지 않았으며 단일 층 구조의 적층판과 동일 위상으로 적층된 적층판의 결과 값은 거의 동일한 것으로 나타났다.

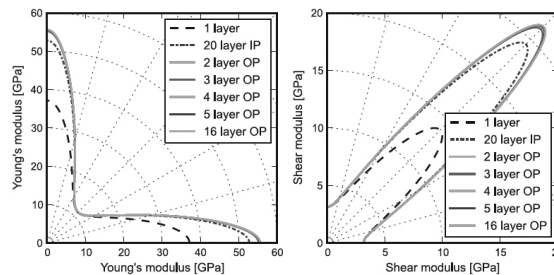


그림 7. 역 위상 형태로 2, 3, 4, 5 및 16층이 적층된 2/2 능직 구조 적층판에 대해 예측된 유효 영률 E_x (왼쪽), 유효 전단 계수 G_x (오른쪽)를 극좌표도로 나타내었음. 짝수개 층 적층물의 모듈러스 값은 서로 간이 거의 일치함을 나타내고 있음. 값을 비교하고자 동일 위상 형태로 1층, 그리고 20층이 쌓인 적층판의 강성 값 또한 함께 제시하였음.

4.2. 기하 비선형 응답

Refs. 외 연구진 외에도 다양한 연구자들에 의해 주장된 바와 같이, 토우사 방향으로 단축 인장 응력에 놓인 단일 층 구조의 2/2 능직물은 강성이 높은 거동을 나타낸다. 이는 하중 방향으로 배향된 파동 형태인 토우사의 평탄화(flattening)에 기인할 수 있겠다. 다양한 구조의 다층 적층판의 거동을 연구하기 위해 동일 위상, 그리고 역 위상 형태로 2층, 그리고 4층의 구조물을 쌓아올렸으며 토우사 방향을 따라서 장력을 가해주었다. 그림 8.은 예측된 유효 선형 변위 대비 유효 공칭(engineering) 응력을 보여준다. 이를 비교하고자 단일 층(검은색의 대시 기호(—) 처진 가는 선)의 응답과 실제 실험 값 곡선(검은색의 가는 선)을 함께 비교하였다. 후자의 경우 Refs. 외 연구진의 선형 연구 결과를 참조하였다.

강도를 예측하기 위해, Hashin 이론을 적용해 FPF 지점을 십자가(+)로 표시하였다. 실제 실험에서 관측한 파손 지점들은 작은 원으로 표시하였다. IP 적층판은 앞서 초기 강성 값들을 비교한 선형 연구 결과와도 마찬가지로, 더 많은 층이 쌓일수록 적층판의 초기 강성 값이 크다는 결론에 일치하였다. 2층 구조의 IP 적층판에서 일부 점진적인 응력-변형 응답이 나타났는데, 이는 인접한 층들로 인해 발생된 국부적 뒤틀림을 고려하지 않았기 때문이다. 4층 구조의 IP 적층판은 강성에 있어 그 어떠한 기하학상의 영향을 받지 않았다.

OP 적층판의 경우 인접하고 있는 층들이 역 위상 형태를 지니기에 국부적인 뒤틀림의 발생이 억제되어, 강성에 있어 그 어떠한 기하학상의 영향도 받지 않았으며, 또한 이에 따라 파형인 형태가 편평해졌다. 결과적으로 2개의 OP 적층판 모두가 거의 동일한 응답을 가지는 것으로 나타났다.

예측된 결과를 실제 실험 결과인 곡선 값과 비교하였을 시에도 서로 간에 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. 본 예측 결과는 적층판의 유효 강성에 있어 일반적으로 보다 높은 산출 값을 지니는 OP 적층판과 비교해, IP 적층판은 그보다는 값이 낮을 것이라는 일반 추정과도 일치한다. 4층 구조의 IP, OP 적층판과 2층 구조의 IP 적층판은 약 0.96%의 유효 변형에서 FPF 발생과 함께 섬유 균열을 유발할 수 있는 파손 모드가 되는 것으로 예측되었다. 2층 구조의 OP 적층판은 보다 값이 큰 FPF 변형을 나타낸다. 토우사의 수직 하중은 비선형 재료 거동을 유발하는 전단력을 유도하지 않는 것을 주목할 수 있다. 이러한 결과를 토대로, 사후 섬유 파손 응답에 관심이 없는 한, 적층판의 모델링에 선형 탄성 구성규칙만을 고려하는 것으로도 충분하다는 것을 알 수 있었다. 그러나 여타 다른 하중 시나리오 조건에 있어선 이는 사실이 아니며, Refs. 외 연구진이 제시한 바와 같이 비선형의 구성 모델도 함께 고려해야 한다.

표 2에 기하학 비선형 시뮬레이션을 수행하기 위해 필요한 자유도(DOF)의 개수, 메모리 요구 사항 및 소요 시간을 나타냈다. 이러한 요구 수치들은 연속체 요소를 이산화한 모델의 값과 비교했을 시 다층 구조 섬유 적층판의 비선형 시뮬레이션이 범용 컴퓨터에서도 얼마든지 실행 가능한 잠재력을 지녔음을 암시할 수 있다.

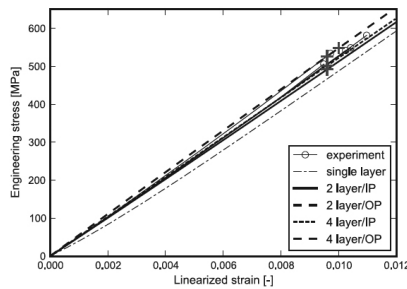


그림 8. 각기 다른 5개의 적층판에 대해 예측된 선형 변위(ε_{xx}) 대비 공칭 응력(σ_{xx}) 관점에서의 기하 비선형 응답임. 위상 방향(적층 형태)이 다른 2개 적층물의 응답 결과가 서로 간에 거의 일치하는 것으로 나타났다. +는 FPF 예측 지점이며, 작은 원은 실제 실험에서 나타난 파손 지점을 나타냄.

표 2. 범용 PC 워크스테이션에서 셸 요소 기반 다층 구조 복합재 모델을 기하학 비선형 시뮬레이션 수행 시 계산상 요구되는 사항들을 나타냄. 이를 선형 연구 결과, 즉 1층의 연속체 요소를 시뮬레이션 했을 시의 결과 값과 함께 제시해 비교하였음.

적층판	컴퓨터 대수	자유도	수행 시간	메모리
1층	2	81,756	92초	206 MB
2층	4	163,512	120초	552 MB
4층	6	327,024	260초	1,391 MB
연속체(1층)	2	2,400,000	7,400초	35,000 MB

5. 요약

셸 요소 기반의 모델링 전략을 세움으로써 다층 직조 구조 복합재의 균질화된 기계적 특성을 유한 요소법의 틀 내에서 계산하였다. 본 접근법은 수치상으로 매우 효율적이었기에 섬유 적층판의 비선형 연구가 가능하였음을 증명해내었다. 일반적으로 널리 알려진 대칭 및 주기적 면외 경계 조건을 적용해 외연적 셸의 강성 연구를 수행하였으며 오직 강성에만 관심을 둔다면 그 결과가 효과적이었음을 밝혔다. 그러나 다층 적층판의 비선형 거동에 보다 관심을 둔다면, 제시된 접근법을 가능하기 위해 각 층에 있어 보다 상세 모델링 작업이 필요하겠다.

계산상의 효율성을 위해, Refs. 외 연구진이 제시한 바와 같이, 토우사 및 기지 재료의 구성규칙으로부터 보다 심화된 형상의 비선형 모델을 생성해내었으며 직물의 손상 및 파괴와 같은 높은 수준의 비선형 현상을 조사하였고, 또 그 진행 과정이 합리적인 계산 시간 및 일반 하드웨어 자원 내에서 수행되었음을 입증하였다.