

다축경편 복합재료 평판의 기계적 체결시 기하학적 형상 및 하중조건에 따른 응력해석

최재민*, 조민규*, 전흥재**, 변준형***

Stress Analysis of Mechanically Fastened Joints in MWK Composite Laminate with Different Geometric Factors and Loading Conditions

J.-M Choi*, M.-G Jo*, H.-J Chun**, J.-H Byun***

Key Words: MWK(Multi-axial Warp Knitted Fabric) Composite laminate, Finite element method, Multi-pin, Stress analysis, Stress distributions

Abstract

When MWK (Multiaxial Warp Knitted Fabric) composites are applied for the structures, the connections of each component using mechanical fastening is needed. The local contact between the bolted joint and the composite laminates may induce high stress concentration or breakdown in the laminates for the mechanical joints. There for, it is strongly required to study the characteristics of mechanically joints of MWK composite laminates. In this study, stress analysis near the hole boundary of MWK composite laminate is conducted with various geometric factors under different loadings. In the case of multi-pin loaded MWK composite laminates, the results show that the types of loadings and geometric factors of mechanical joints have a significant influence on the joint performances.

1. 서론

섬유강화 복합재료는 응용범위가 산업계 전반으로 빠르게 확대되고 있다. 개발 초기에는 하중을 감당하지 않는 이차 구조물에 주로 사용되어 왔으나, 점차 산업 전반의 1차 구조물(Primary Structure)에 쓰이는 등, 그 사용범위가 넓어지고 있으며, 취약한 두께방향 물성 향상의 필요성을 충족시키기 위해 3차원 직물형 복합재료(3-D Textile Composites)에 대한 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서 연구할 MWK(Multi-axial Warp Knitting Fabric) 복합재료는 다축으로 직물된 복합재

료에 두께방향으로 스티칭을 하는 다축경편방법(Multi-axial Warp Knitting Method)을 이용하여 두께방향 물성을 보강한 복합재이다. 1차 구조물에 이 재료가 사용될 경우 각 구조물의 체결이 필요하며, 체결방법으로 기계적 체결과 접착제에 의한 체결이 있다. 기계적 체결방법은 모재에 원공을 가공한 후, 볼트나 리벳 혹은 핀 등을 이용하여 결합한 것으로, 이러한 특성으로 인하여 복합재료의 강도가 저하되고 체결부 주위에는 높은 응력 집중현상이 발생하여 구조물의 파괴를 가져올 수가 있으나, 분해 및 수리가 용이해야 하는 구조물의 특성상 기계적 체결이 필요하며, 이러한 배경에서 본 연구에서는 다축경편(MWK) 복합재료의 기계적 체결부 주위에서의 응력분포를 살펴보고 있으며, 응력분포의 결과를 토대로 실제 복합재 빔에서의 기계적 체결을 모델링 하여 적합한 설계 변수를 확립하였다.

체결부 주위에서의 응력분포를 확인하기 위한 방법으로 탄성학을 이용한 미분방정식의 해를 직접 구하는 방법과 유한요소법을 이용한 수치적

* 연세대학교 기계공학과 대학원

** 연세대학교 기계공학부 부교수

*** KIMM (한국기계연구원)

방법이 있다. 단일 핀 하중을 받는 체결의 경우, Hyer and Klang¹은 복소함수를 이용하여 미분방정식의 해를 직접 구했으며, 복합재료와 핀의 마찰을 효과적으로 해석적 방법으로 표현하였으며, Eriksson²은 2차원 유한요소 모델을 이용하여 마찰과 볼트의 강성 및 간극효과를 고려하여 체결부 주위의 응력분포를 연구하였으며, Chen et al³ 역시 3차원 모델을 이용해 마찰력, 간극효과 (Clearance effect), 와서의 하중(Clamping effect) 및 적층 순서에 따른 응력분포를 확인하였다. Matthews et al⁴은 3차원 유한요소방법을 이용하여 핀에 의한 하중이 복합재료에 어떻게 전달되는지를 연구하였다. 다중 핀 하중을 받는 체결의 경우에 관한 연구 역시 단일 핀 하중을 받는 체결의 연구결과를 바탕으로 확장되었는데, Ireman⁵은 3차원 모델을 통하여 체결된 볼트와 와서의 형상에 따른 원공 주위의 응력분포를 확인하였으며, Blackie and Chutima⁶는 2차원 contact 요소를 이용해 원공주위에서의 응력분포를 확인하였다. Shyprykevich et al⁷의 경우 해석적 방법을 이용해, 경계조건으로 대칭조건을 가정하여 다중 핀 하중을 받는 복합재료를 해석하였다.

원공주위의 응력분포를 살펴보기 위한 수치해석을 이용함에 있어서 중요한 점은 경계조건의 결정이다. 볼트 및 핀에 의해 받는 하중이 복합재료에 전달되는 과정을 모사하는 방법을 결정하는 것이 바로 경계조건을 결정하는 것인데, 지금까지의 연구를 살펴보면 핀과 복합재료 적층판의 마찰을 모사한 비선형해석이 실험결과와 가장 일치함을 보여주고 있다. 위에서 살펴본 바와 같이 복합재료의 기계적 체결부 응력분포에 영향을 주는 인자에 대한 연구는 많이 진행되어 왔지만, 다양한 하중조건에 의한 각 인자간의 영향력을 체계적으로 분석한 연구는 완성되지 않았으며, 특히 다축경편 복합재료 체결부에 대한 연구는 아직 많은 부분에서 부족하다.

본 논문에서는 다중 핀 하중을 받는 경우에 대하여, 인장하중, 압축하중, 전단하중의 경우 응력집중계수 비교를 살펴보고 최대응력값을 무차원화한 응력집중계수값을 이용해 가장 응력을 잘 분산시키는 배치형상을 예측하였다. 원공의 개수 증가와 형상의 변화에 따른 최대 응력집중계수 값의 변화를 살펴봄으로써 원공의 개수 증가에 따른 경향성을 파악할 수 있으며 기계적 체결시 원공의 배치 및 형상결정의 설계자료를 축적할 수 있다.

2. 해석

2.1 유한요소 모델링

본 논문에서는 스티칭 된 일방향 다축경편 복합재료의 실험 물성값을 이용해 기계적 체결부에 대한 다양한 해석을 시도하였다. 본 연구의 특성상 시간 및 비용적 실용성을 고려해 실험 물성값을 이용해 적층시키는 방법을 이용했다. 다축경편 복합재료의 기계적 체결을 모사하기 위해 상용패키

지 프로그램인 ANSYS를 사용하였으며, 표.1은 ANSYS를 이용한 구체적인 모델 방법을 나타낸다. 대칭형상을 가지고 있으므로 원공의 중양을 기준으로 위쪽만을 모델링 하여 대칭경계조건을 부과하였다.

기하학적 형상은 Multi-pin loaded joint인 경우에 응력해석을 수행하였으며, 하중은 동일하게 1kN을 가하였다. 체결에 의한 하중을 모사하기 위한 구속 조건으로 Contact element를 이용하여 3차원 복합재료와 고정된 핀을 이용하는 방법을 사용하였다. 적층순서는 동일산자의 DBLT (0/45/90/-45) 다축경편 Preform을 기본으로 16 ply를 적층하였다.

Fig.1는 lock 스티칭이 된 일방향 다축경편 복합재료의 3차원 형상을 나타낸다. 그림에서와 같이 stitching yarn을 이용한 3차원 모델을 이용하여 다축경편 복합재료의 체결부에 대한 해석도 가능하지만, 모델링 과정과 메쉬 과정이 너무 복잡하기 때문에 Table.2의 일방향 다축경편 복합재료의 물성실험 결과를 이용하여 복합재료 한 개의 플라이의 물성을 이용해 각각의 적층 각도에 따라 적층하는 방법을 이용하였다.

Element Type	- SOLID 46 (appropriate for three dimensional layered structure) - CONTACT174 and TARGET170 (contact element)
Modeling and Boundary Condition	- Symmetric boundary condition - Contact with friction at the interface between pin and composite laminates

Table. 1. Finite Element Analysis Method

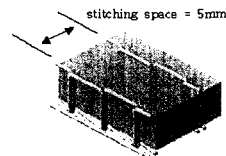


Fig. 1. Lock stitched UD MWK Composite Laminate
Fig.2은 모델의 구체적 형상과 메쉬된 모델을 나타낸다. Table.2는 본 연구에 사용된 일방향 플라이의 물성치를 나타낸다.

Material Properties of UD MWK	E_x	E_y	G_{xy}	ν_{xy}
	39.7(GPa)	12(GPa)	5.1(GPa)	0.25

Table. 2 Laminate Properties of unidirectional MWK composite laminate

Fig.2는 모델의 형상과 메쉬된 모델의 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 x축에 대하여 대칭이므로, Symmetric 경계조건을 이용하여 해석하였고, 핀과 MWK복합재료를 각각 모델링한 후 Contact Element를 사용하여 응력해석을 수행하였다.

Table.3은 기하학적 형상에 따른 응력분포를 확인하기 위한 문제 설정이다.



Fig. 2 Modeling and Meshing

Effective Parameter	Value
Friction Coefficient	$\mu = 0$
Stacking Sequence	MWK[0/45/90/-45] _{2s}
Clamping Force	Pressure = 0MPa
E/D 비	2
W/D (from vertical edge distance)	2
Clearance 비	n = 0
L/D 비	20

Table. 3 Effective parameters in multi-pin loaded MWK composite laminate

2.2 Normalized Stress Concentration Factors

원공 주위의 응력분포를 확인하기 위해서 다음과 같이 무차원화 된 값을 이용한다.

$$\sigma_b = \frac{Load}{D \times t} \quad (1)$$

여기서 D와 t는 각각 원공의 지름 및 복합재료의 두께이다. 평균 베어링 스트레스를 정의하고, 원공 주위의 Radial Stress(σ_r), Tangential Stress(σ_θ), Shear Stress($\sigma_{r\theta}$)를 평균 베어링 스트레스로 나눈 값을 제시하였다. 또한, 기계적 체결에 따른 원공 주위의 응력 집중을 나타내기 위한 방법으로 응력집중 계수를 도입하였다¹⁰.

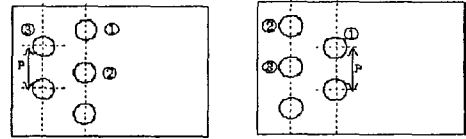
$$K_{rb} = \frac{(\sigma_{rr})_{max}}{\sigma_b} \quad K_{\theta b} = \frac{(\sigma_{\theta\theta})_{max}}{\sigma_b} \quad K_{s b} = \frac{(\sigma_{r\theta})_{max}}{\sigma_b} \quad (2)$$

2.3 다중 핀 하중을 받는 다축경편 복합재료

원공의 개수 증가와 형상의 변화에 따른 최대 응력집중계수 값의 변화를 살펴봄으로써 원공의 개수 증가에 따른 경향성을 파악할 수 있으며 기계적 체결 시 원공의 배치 및 체결형상결정의 설계 자료를 이용할 수 있다. 이를 위해 Table.4에서 나타나는 모든 경우에 대해 하나의 그래프에 응력집중계수 값을 도시함으로써 다축경편(MWK) 복합재료의 기계적 체결 시 원공의 형상 및 개수 증가에 따른 응력 값의 감소효과를 알 수 있다. 이 때, Fig.3은 각 엇각배치 된 패턴을 들 수 있는 것이다.

Type	Number of Hole	Load Condition
Single Row	4 HOLE (1×1, 2, 3, 4)	Tension,
Single Column	4 HOLE (1, 2, 3, 4×1)	
Double Row	6 HOLE (2×1, 2, 3)	Compression, Shear
Double Column	6 HOLE (1, 2, 3×2)	
Pattern A	5 HOLE, 7HOLE	
Pattern B	5 HOLE, 7HOLE	

Table. 4 Number of holes and loadings for DBLT(Double Bias Longitudinal Transverse),[0/45/90/-45]_{2s} composite laminate



a) Pattern A b) Pattern B

Fig.3. Pattern A and Pattern B

3. 결과

다축경편 복합재료의 기계적 체결 시 원공의 형상 및 개수 증가에 따른 최대 응력값의 감소효과를 알기 위해, 원공의 개수 증가와 형상의 변화에 따른 최대 응력집중계수 값의 변화를 살펴봄으로써 원공의 개수 증가에 따른 경향성을 파악할 수 있으며 기계적 체결 시 원공의 배치 및 형상결정의 설계 자료로 이용할 수 있다.

Fig.6은 인장하중의 경우에 대한 응력집중계수를 비교하고 있다. K_{rb} 를 살펴보면 1열 배치의 경우 원공의 증가에 따라 급격히 응력집중계수가 감소함을 알 수 있으며, 2열 배치의 원공이 6개 일 때 최소값을 가짐을 알 수 있다. Tangential Stress를 살펴보면, 우선 Radial Stress에 비해 보다 높은 응력집중이 나타남을 알 수 있다.

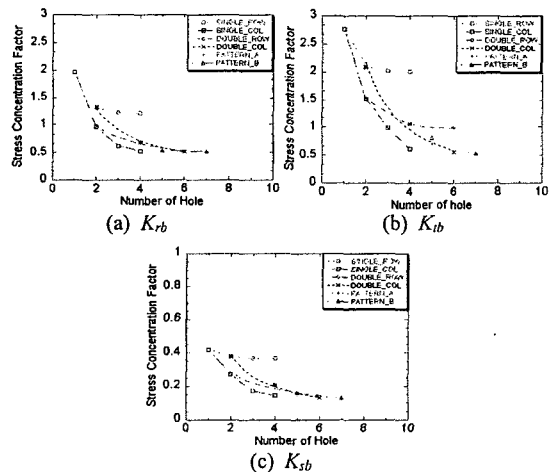
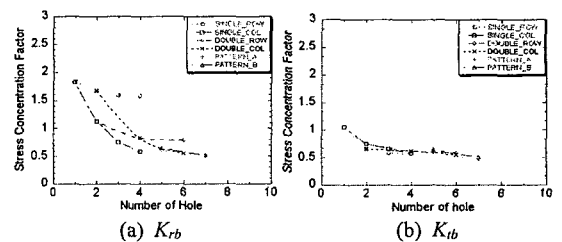


Fig.6. Stress concentration factors under tensile loading



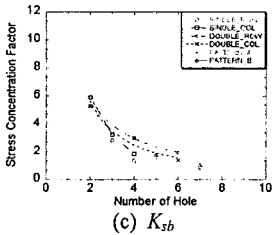


Fig.7. Stress concentration factors under compressive loading

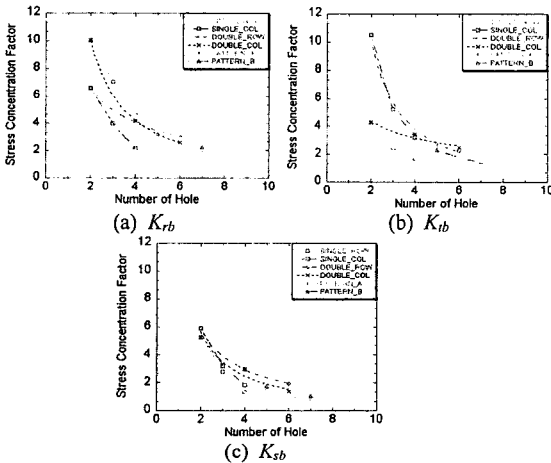


Fig.8. Stress concentration factors under shear loading

Fig.7은 압축하중의 경우 인장하중과 비교할 때 Tangential Stress보다 Radial Stress의 응력집중현상이 크며, 원공의 개수가 증가함에 따라 보다 많이 감소하는 경향을 가짐을 나타내며, Fig.8은 전단하중에 대한 응력집중계수의 값을 나타낸다. 이 때, 인장 및 압축하중의 경우와 비교했을 때, 상당히 큰 응력집중계수의 값을 나타낸다. 원공의 개수가 증가함에 따라 응력집중계수 역시 급격히 감소하는 경향을 갖는다.

4. 결론

3차원 유한요소 모델링을 이용해, MWK 복합재료의 기계적 체결에 관한 체결부의 응력해석을 실시하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 인장하중의 경우에 대한 응력집중계수를 비교한 결과에서 Radial Stress를 살펴보면, 1행 배치(Single Row Case)의 경우 최초 원공의 증가에 따라 감소하나 원공의 개수가 3, 4개로 증가함에 따라 미소하게 감소하는 경향을 갖으며, 2열 배치(Double Column Case)의 원공이 6개일 때 최소값을 가짐을 알 수 있다.
- (2) 압축하중의 경우에 인장하중과 비교할 때 Tangential Stress보다 Radial Stress의 응력집중현상이 크며, 원공의 개수가 증가함에 따라 보다 많이 감소하는 경향을 가진다. 특히, Tangential

Stress값의 변화가 인장하중의 경우와 비교할 때 매우 작음을 알 수 있다.

(3) 전단하중의 경우에 원공의 개수가 증가함에 따라 집중계수역시 급격히 감소하며, 원공의 개수가 7개인 패턴(Pattern) A Case와 원공의 개수가 7개인 패턴(Pattern) B Case가 미소한 차이로 최소응력집중계수를 나타낸다.

결국, 전체적으로 원공의 개수가 증가함에 따라 집중계수역시 급격히 감소하며, 1열 배치보다 2열 배치일 경우 응력집중계수가 작아지는 경향을 갖는 것을 본 연구에서 확인할 수 있었다.

후기

본 연구는 21세기 프론티어 연구 사업 차세대 소재성형 개발 사업단의 연구비 지원으로 이루어졌다.

참고문헌

- (1) M.W. Hyer and E.C.Klang, "Contact Stresses In Pin-Loaded Oorthotropic Plate", International Journal of Solids Structures, vol.21, NO.9, pp.957-975, 1985
- (2) L.Ingvar Eriksson, "Contact Stresses in Bolted Joints of Composite Laminates", Composite Structures, vol.6, pp.57-75, 1986
- (3) Wen-Hwa Chen, Shyh-Shiaw Lee & Jyi-Tyan Yeh, "Three-dimensional contact stress analysis of a composite laminate with bolted joint", Composite Structures, vol.30, pp287-297, 1995
- (4) P.P. Camanho and F. L. Matthews, "Stress analysis and strength prediction of mechanically fastened joints in FRP : a review", Composites Part A, vol.28A, pp.529-547, 1997
- (5) Tomas Ireman, "Three-dimensional stress analysis of bolted single-lap composite joints", Composite Structures, vol.43, pp195-216, 1998
- (6) Alvin P.Blackie & Surachate Chutima, "Stress distributions in multi-fastened composite plates", Composite Structures, vol.34, pp427-436, 1996
- (7) E. Madenci, S.Shkarayev, B.Sergeev, D.W. Oplinger and P. Shyrykevich, "Analysis Of Composite Laminates With Multiple Fasteners", International Journal of Solids Structures, vol.35, NO.15, pp.1793-1811, 1998
- (8) I.M. Daniel, O. Ishai, "Engineering Mechanics of Composite Materials", Oxford University Press, 1994