

# 다중 핀 하중을 받는 MWK 복합재료의 응력 해석

조민규\*·김병구\*·전흥재\*\*·변준형\*\*\*

## Stress Analysis of MWK Composite Laminate with Multi-pin Loaded Holes

M.-G Jo\*, B.-G Kim\*, H.-J Chun\*\*, J.-H Byun\*\*\*

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

### Abstract

Stress analysis was conducted with finite element method to study the stress distributions in both single-pin and multi-pin loaded composite laminates. The various parameters involved in the design of the joint method were considered. The stress distributions in the vicinity of the holes were predicted considering the effects of various parameters such as the lay-ups, number of pins, number of rows, row spacing, and hole patterns. The results show that the performance of joint is greatly affected by these parameters.

### 1. 서 론

섬유강화 복합재료는 재료의 높은 비강성 및 내식성이 뛰어나며 경량성 또한 우수한 특성을 가지고 있다. 이에 따라 그 응용범위 또한 산업계 전반으로 확대되고 있는 것이 사실이다. 하지만 섬유강화 복합재료의 경우 두께방향의 물성이 취약한 약점이 있으며, 이러한 배경에서 3차원 복합재료의 개발이 필요하다. 특히 이러한 취약점을 보강하기 위한 방법으로 스티칭(Stitching)이나 다축 경편(Multiaxial Warp Knitting)등의 방법으로 두께방향의 기계적 특성을 향상시키고 있다.

본 논문에서 연구할 MWK(Multiaxial Warp Knitting Fabric)복합재료는 다축으로 직물된 복합재료의 두께 방향으로 스티칭(Stitching)을 한 것으로서 두께방향으로의 물성이 우수하다. 1차 구조물로 이 재료가 사용될 경우 각 구조물의 체결이 필요하며, 체결방법으로 기계적 체결

과 접착제에 의한 체결이 있다. 기계적 체결방법은 모재에 원공을 가공한 후, 볼트나 리벳 혹은 핀 등을 이용하여 결합한다. 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 MWK복합재료의 기계적 체결부 주위에서의 응력분포를 살펴보았다. 체결부 주위에서의 응력분포를 확인하기 위한 방법으로 탄성학을 이용한 미분방정식의 해를 직접 구하는 방법과 유한요소법을 이용한 수치적 방법이 있다. Hyer and Klang<sup>1</sup>은 복소함수를 이용하여 미분방정식의 해를 직접 구했으며, Wilkson and Chang<sup>2</sup>은 2차원 FEA를 이용하여 체결부 주위의 응력분포를 확인하고, 이를 실험적으로 일치함을 보여주고 있다. 특히 다양한 응력영향 요인을 가정하고(복합재료 및 핀의 물성, 기하학적 형상, Clearance 효과 등), 이에 따른 응력분포를 제시하고 있다. Eriksson<sup>3</sup>은 2차원 유한요소 모델을 이용하여 마찰과 볼트의 강성 및 간극효과를 고려하여 체결부 주위의 응력분포를 연구하였으며, 이러한 연구 외에도 2차원

\* 연세대학교 기계공학과 대학원

\*\* 연세대학교 기계공학부 부교수

\*\*\* KIMM (한국기계연구원)

수치 해석 방법을 이용한 연구논문은 많이 발표되었지만, 보다 정확한 응력분포를 확인하기 위해서는 3차원 모델링이 필수적이다.

Matthews *et al*<sup>4</sup>은 3차원 유한요소방법을 이용하여 핀에 의한 하중이 복합재료에 어떻게 전달되는지를 연구하였으며, Chen *et al*<sup>5</sup>역시 3차원 모델을 통해 마찰력, 간극효과(Clearance effect), 와서의 하중(Clamping effect) 및 적층 순서에 따른 응력분포를 확인하였다. Ireman<sup>6</sup>은 3차원 모델을 통하여 체결된 볼트와 와서의 형상에 따른 원공 주위의 응력분포를 확인하였다. Multi-pin loaded joint의 경우에 관한 연구도 진행되어 왔는데, Blackie and Chutima<sup>7</sup>는 2차원 contact 요소를 이용해 원공주위에서의 응력분포를 확인하였으며, Shyprykevich *et al*<sup>8</sup>의 경우 해석적 방법을 이용해, 경계조건으로 대칭조건을 가정하여 해를 구하였다.

위 연구에서 알 수 있듯이, 많은 연구 논문에서 마찰을 고려한 결과가 실험값과 일치함을 보여주고 있다. 또한 두께방향의 효과를 고려하기 위해 3차원 형상을 모델링해야 하며, 복합재료의 적층순서를 묘사하여야 한다. 수치해석적 방법을 위한 구속조건(Boundary Condition)역시 결과에 많은 영향을 미치는 것으로, Contact element를 이용해 볼트와 복합재료의 마찰을 모델링하고 볼트를 고정시키는 구속조건을 이용해야 한다.

본 연구에서는 이러한 주요한 요인을 고려하였으며, Single-hole문제와 Multi-hole문제를 가정하여 기하학적 변화 및 적층순서, 원공의 배치 형상에 따른 원공주위의 응력분포를 연구하였다. 이를 위해 3차원 유한요소모델을 이용하였으며, Contact element를 이용해 볼트와 복합재료의 마찰을 고려하였다.

## 2. 본론

### 2.1 유한요소 모델링

MWK복합재료의 기계적 체결을 모사하기 위해 상용 패키지 프로그램인 ANSYS를 사용하였으며, 복합재료를 구현하는 SOLID46요소를 사용하였다. 기하학적 형상은 Single-pin loaded joint인 경우와 Multi-pin loaded joint인 경우로 나누어 응력해석을 수행하였으며<sup>7</sup>, 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) MWK를 기본

으로 16ply를 적층하였으며, 기존의 복합재료와 비교를 위해서 4가지 Type으로 나누어<sup>9</sup> 해석하였다. 그림.1은 Hybrid composite의 적층순서를 보여주고 있다.

- ① UD(Unidirectional Laminate) :  $[0]_{16}$
- ② MWK Laminate :  $[0/45/90/-45]_{2s}$
- ③ UD and MWK Hybrid Composite(I) :  $[0/0/0/0/0/45/90/-45]_s$
- ④ UD and MWK Hybrid Composite(II) :  $[0/45/90/-45/0/0/0/0]_s$

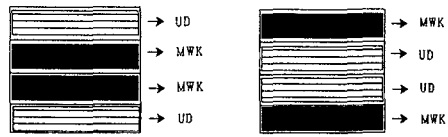


Fig. 1 Hybrid Composite(I),(II)

복합재료의 경우 각 요소의 방향성이 중요하기 때문에 방향을 고려하여 모델링 하였다. 또한 MWK복합재료를 3차원 형상으로 구현할 수 있지만 모델링 과정과 메쉬 과정이 너무 복잡하기 때문에 실험결과를 이용하여 재료의 평균화된 물성을 입력하였다. 표.1은 본 연구에 사용된 재료의 물성치이다.

| Material Properties of UD | $E_x$     | $E_y$      | $G_{xy}$  | $\nu_{xy}$ |
|---------------------------|-----------|------------|-----------|------------|
|                           | 42.4(GPa) | 12.76(GPa) | 5.35(GPa) | 0.269      |

표. 1 Laminate Stiffnesses of UD

### 2.2 Single-pin Loaded Composite Laminate

그림.2는 모델의 형상과 메쉬된 모델의 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 x축에 대하여 대칭이므로, symmetric 경계조건을 이용하여 해석하였고, 핀과 MWK복합재료를 각각 모델링 한 후 contact element를 사용하여 하중을 모사하였다.

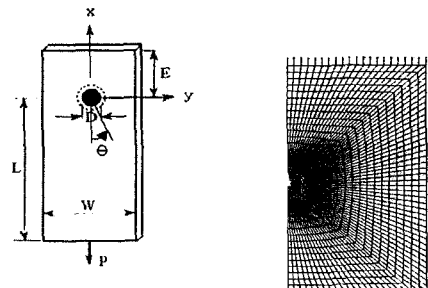


Fig. 2 Modeling and Mesh

표.2는 기하학적 형상에 따른 응력분포를 확인하기 위한 문제 설정이다. 여기서  $D=6\text{mm}$ 와  $t=3\text{mm}$ 는 고정된 값이다.

|       | Varying ratio |   |    | Fixed ratio |
|-------|---------------|---|----|-------------|
| $E/D$ | 2             | 5 | 10 | $W/D=10$    |
| $W/D$ | 2             | 5 | 10 | $E/D=10$    |

표. 2 Geometrical effects

### 2.3 Multi-pin Loaded MWK

원공이 여러 개인 경우의 응력분포를 확인하기 위해 다음에 제시한 방법을 이용한다.

|     | Varying ratio |      | Fixed ratio |        |        |
|-----|---------------|------|-------------|--------|--------|
| $S$ | $3D$          | $4D$ | $L=20D$     | $W=3D$ | $E=2D$ |
| $P$ | $3D$          | $4D$ | $L=20D$     | $W=6D$ | $E=2D$ |

표. 3 Comparison of Span ( $S$ ) and Pitch ( $P$ ) value

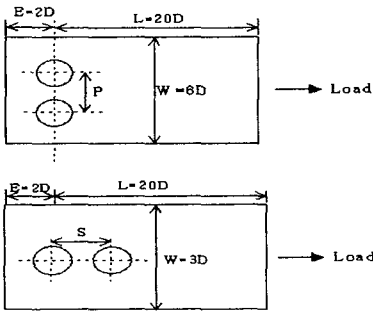


Fig. 3 Comparison of Span ( $S$ ) and Pitch ( $P$ ) values

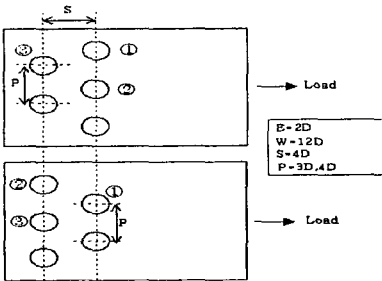


Fig. 4 Comparison of hole pattern A and B

## 3. 수치해석결과

### 3.1 Single-pin Loaded MWK Composite Laminate

원공 주위의 응력분포를 확인하기 위해서 다음과 같이 무차원화된 값을 이용한다.

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

여기서  $D$ 와  $t$ 는 각각 원공의 지름 및 복합재료의 두께이다. 평균 베어링 스트레스를 정의하고, 원공 주위의 Radial Stress( $\sigma_r$ ), Tangential Stress( $\sigma_\theta$ ), Shear Stress( $\sigma_{r\theta}$ )를 평균 베어링 스트레스로 나눈 값을 그림.2의  $\theta$ 에 따라 제시하였다. 또한, 기계적 체결에 따른 원공 주위의 응력 집중을 나타내기 위한 방법으로 응력집중 계수를 도입하였다<sup>10</sup>.

$$K_{tb} = \frac{(\sigma_{\theta\theta})_{\max}}{\sigma_b} \quad (2)$$

$$K_{sb} = \frac{(\sigma_{r\theta})_{\max}}{\sigma_b} \quad (3)$$

그림. 5는  $W/D$ ,  $E/D$  ratio에 따른 응력집중 계수의 값이다. 그림에서 알 수 있듯이  $W/D$ ,  $E/D$  값이 제일 작은 경우 급격한 응력집중 현상이 발생하는 것을 알 수 있다.

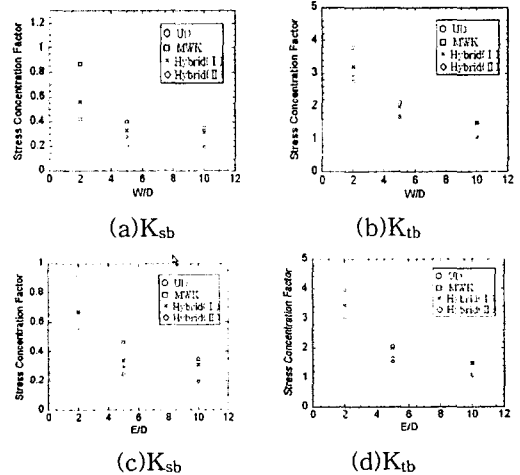
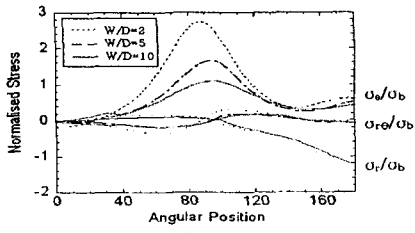
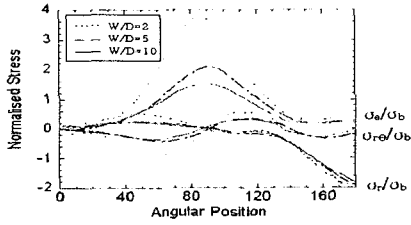


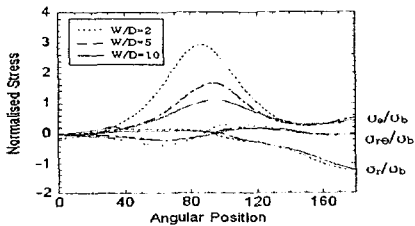
Fig. 5  $W/D$ ,  $E/D$ 값의 변화에 따른 응력집중 계수  
그림. 6 (a), (b), (c), (d)는 적층순서에 따른 응력분포를 각각 제시한 그림으로,  $W/D$ 값의 변화에 따른 원공주위의 응력분포를 보여주고 있으며, MWK Laminate의 경우 응력을 가장 많이 받는 것을 알 수 있다.



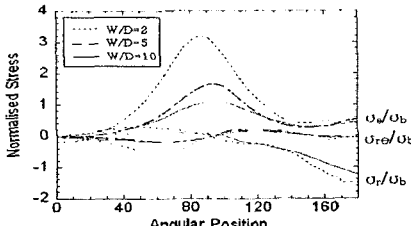
(a) UD



(b) MWK



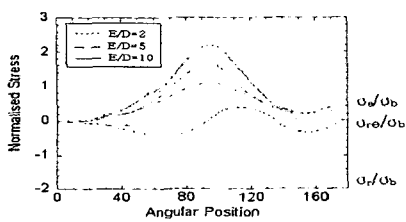
(c) Hybrid(I)



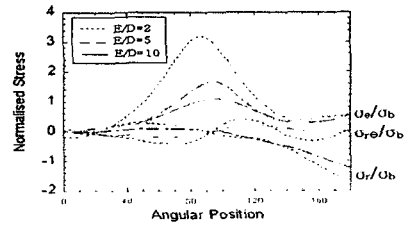
(d) Hybrid(II)

Fig. 6  $W/D$ 값에 따른 응력분포

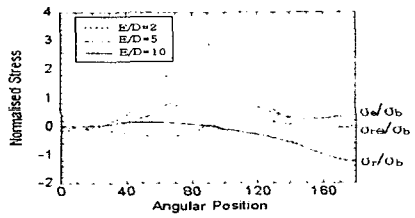
그림. 7은  $E/D$ 의 변화에 따른 원공 주위의 응력 분포를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 그림.6 (b)의  $W/D$ 값이 가장 작은 경우에 비해  $E/D$ 값이 가장 작은 경우에는 상대적으로 응력을 덜 받는 것을 알 수 있다.



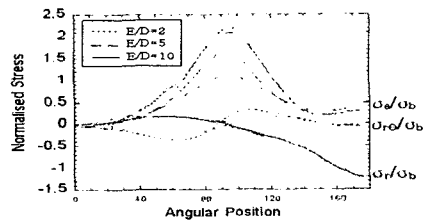
(a) UD



(b) MWK



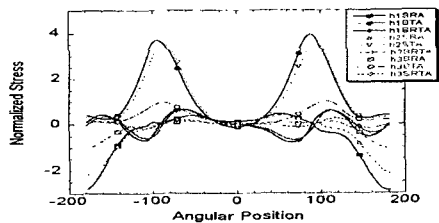
(c) Hybrid(I)



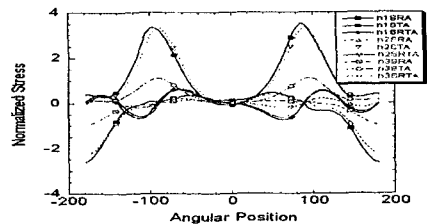
(d) Hybrid(II)

Fig. 7  $E/D$ 값에 따른 응력분포

### 3.2 Multi-pin Loaded MWK Composite Laminate



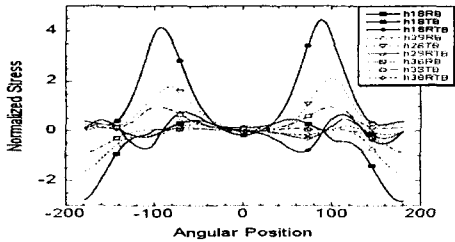
(a) Pitch distance = 3D



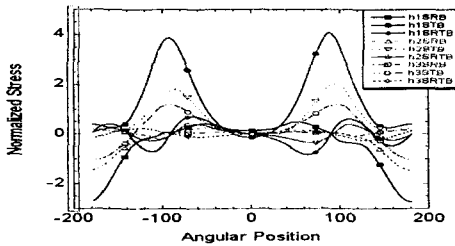
(b) Pitch distance = 4D

Fig. 8 Pattern A에서의 Pitch 변화에 따른 응력분포

그림. 8은 MWK의 경우로서 피치 길이가 3D인 경우에 응력을 더 받는 것을 알 수 있다. 이는 4D의 경우 각각의 원공에 보다 균일한 응력을 받기 때문이다.



(a) Pitch distance = 3D



(b) Pitch distance = 4D

Fig. 9 Pattern B 에서의 Pitch 변화에 따른 응력분포 그림. 9에서 보면 pattern A 에서와 마찬가지로 pitch distance가 4D인 경우 보다 균일한 응력분포를 보인다.

#### 4. 결 론

3차원 유한요소 모델링을 이용해, MWK 복합재료의 기계적 체결부의 응력분포를 확인하였다. Single-pin인 경우  $W/D$ 와  $E/D$ 값의 변화에 따른 응력분포를 확인하였으며,  $W/D$ 와  $E/D$ 값이 낮은 수록, 높은 응력집중 현상이 발생하는 것을 알 수 있었다. 4가지 적층순서에 따라 원공 주위의 응력분포를 확인하였으며, MWK 복합재료의 경우 높은 응력을 받는 것을 알 수 있었다. Multi-pin인 경우 핀의 개수와, 핀의 체결 patterns 및 pitch distance에 따른 응력분포를 살펴 보았으며, 각각의 원공에서의 응력분포를 확인 하였다. pattern A의 경우가 B의 경우에 비교해서 각각의 원공으로 응력이 분산되었으며, 따라서 응력집중이 작음을 확인하였다. pitch distance 가 클 경우 응력이 고르게 분산되었으며, span

length의 경우 응력분포에 미치는 영향력이 미소 하였으며, 오히려  $W/D$ 나  $E/D$ 의 영향을 고려해야 할 것이다.

#### 후기

본 연구는 21세기 프론티어 연구 사업 차세대 소재성형 개발 사업단의 연구비 지원으로 이루어 졌습니다. 이에 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

#### 참고문헌

- (1) M.W. Hyer and E.C.Klang, "Contact Stresses In Pin-Loaded Orthotropic Plate", International Journal of Solids Structures, vol.21, NO.9 , pp.957-975, 1985
- (2) R.E. Rowlands, M.U. Rahman, T.L. Wilkinson and Y.I.Chiang. "Single-and multiple-bolted joints in orthotropic materials", Composites, July, 1982
- (3) L.Ingvar Eriksson, "Contact Stresses in Bolted Joints of Composite Laminates", Composite Structures, vol.6, pp.57-75, 1986
- (4) C.M.S. Wong And F.L. Matthews, "A Finite Element Analysis of Single and Two-Hole Bolted Joints in Fibre Reinforced Plastic", Journal of composite material, 1981
- (5) 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
- (6) Tomas Ireman, "Three-dimensional stress analysis of bolted single-lap composite joints", Composite Structures, vol.43, pp195-216, 1998
- (7) Alvin P.Blackie & Surachate Chutima, "Stress distributions in multi-fastened composite plates", Composite Structures, vol.34, pp427-436, 1996
- (8) E. Madenci, S.Shkarayev, B.Sergeev, D.W. Oplinger and P. Shpyrykevich, "Analysis Of Composite Laminates With Multiple Fasteners", International Journal of Solids Structures, vol.35, NO.15, pp.1793-1811, 1998
- (9) 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
- (10) Crews, J.H., Hong, C.S. and Raju, I.S., "Stress-concentration factors for finite orthotropic laminates with a pin-loaded hole", NASA Tech. Paper 1862, 1981, 1-40