

論文

기계적으로 체결된 복합재료 평판에서 다양한 인자의 영향에 따른
원공 주위의 응력분포

최재민*, 전홍재**, 변준형***

**Effects of Various Parameters on Stress Distribution around Holes
in Mechanically Fastened Composite Laminates**

Jaе-Min Choi*, Heung-Jae Chun**, Joon-Hyung Byun***

ABSTRACT

With the wide applications of fiber-reinforced composite material in aero-structures and mechanical parts, the design of composite joints have become a very important research area because the joints are often the weakest areas in composite structures. This paper presents an analytical study of the stress distributions in mechanically single-fastened and multi-fastened composite laminates. The finite element models which treat the pin and hole contact problem using a contact stress analysis are described. A dimensionless stress concentration factor is used to compare the stress distributions in composite laminates quantitatively. In the case of single-pin loaded composite laminate, the effects of stacking sequence, the ratio of a hole diameter and the width of a laminate (W/D ratio), the ratio of hole diameter and distance from edge to hole (E/D ratio), friction coefficient and clamping force are considered. In the case of multi-pin loaded composite laminate, the influence of the number of pins, pitch distance, number of rows, row spacing and hole pattern are considered. The results show that W/D ratio and E/D ratio affect more on stress distributions near the hole boundary than the other factors. In the case of multi-pin loaded composite laminate, the stress concentration in the double column case is better than the other cases of multi-pin loaded composite laminate.

초 록

복합재료가 항공기 구조물 및 기계부품 등에 폭 넓게 적용됨에 따라, 복합재료 구조물에서 가장 취약한 복합재료 체결부의 설계는 매우 중요한 연구 분야로 대두되고 있다. 본 논문에서는 기계적으로 체결이 된 단일 및 다중 핀 하중을 받는 복합재료 평판에서 응력분포에 대한 해석적인 연구를 수행하였다. 또한, 기계적체결부인 핀과 구멍간에서 접촉 문제를 다루기 위하여 접촉응력해석을 이용한 유한요소 모델이 사용되었으며, 응력분포를 정량적으로 비교하기 위하여 무차원화한 응력집중계수를 이용하였다. 단일 핀 하중을 받는 경우에 대하여 적층순서, 원공의 지름에 대한 평판 폭의 비 (W/D ratio), 원공의 지름에 대한 끝단에서 원공까지의 길이의 비 (E/D ratio), 마찰계수, 와셔의 조임력 등에 대한 영향을 알아보았으며, 다중 핀 하중을 받는 경우에 응력집중계수를 이용하여 핀의 개수, 피치, 열의 개수, 열 간격 및 원공의 배치형상의 영향에 대하여 알아보았다. 단일 핀 하중을 받는 경우에 대한 결과로부터, DBLT (Double-Bias-Longitudinal Transverse) 복합재료 평판에서 응력이 가장 민감하게 나타나는 것을 알 수 있었고, 원공의 지름에 대한 평판 폭의 비와 끝단에서 원공까지의 길이의 비에 따른 응력의 변화가 민감하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 다중

* 연세대학교 기계공학과 대학원

**+ 연세대학교 기계공학부, 교신저자(E-mail:hjchun@yonsei.ac.kr)

*** 한국기계연구원

핀 하중을 받는 경우에 대한 응력해석의 결과로부터, 원공이 2열로 배치된 복합재료 평판에서 응력집중현상이 가장 적게 일어나는 것을 확인하였다. 이러한 해석을 통하여, 체결부에서 나타나는 응력분포로부터 복합재료 평판에서의 파손형태를 예측할 수 있다.

Key Words : 다축경편 (Multi Warp Knitting), 기계적 체결 (Mechanically Fastening), 유한요소해석 (Finite Element Analysis), 복합재료 평판 (Composite Laminate), 응력분포 (Stress Distribution)

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 응용범위가 산업 전반의 1차 구조물 (Primary Structure)에 쓰이는 등, 산업계 전반으로 빠르게 확대되고 있다. 1차 구조물에 복합재료가 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 체결부 주위에는 높은 응력 집중현상이 발생하여 복합재료의 강도가 저하되고 구조물의 파괴를 가져올 수가 있다. 하지만 분해 및 수리가 용이해야 하는 구조물의 경우에는 기계적 체결을 이용하여 체결을 하여야 한다. 따라서, 구조물의 기계적 체결시 파손을 방지하기 위하여, 볼트에 의하여 체결이 되는 부분과 복합재료 평판 간에 발생하게 되는 응력집중 및 응력분포와 원공의 배치에 대한 연구가 필요하다.

체결부 주위에서의 응력분포를 확인하기 위한 방법으로 탄성학을 이용한 미분방정식의 해를 직접 구하는 방법과 유한요소법을 이용한 수치적 방법이 있다. 단일 핀 하중을 받는 체결의 경우, Hyer와 Klang[1]은 평형방정식을 이용하여 핀에 작용하는 경계하중이 원공에 작용하는 것을 확인하였고, 복합재료와 핀의 마찰을 효과적으로 해석적 방법으로 표현하였으며, De Jong[2]은 해석적 방법을 이용해 원공주위의 응력분포를 예측하고 이를 2차원 FEA (Finite Element Analysis)를 이용하여 체결부 주위의 응력분포를 확인하였다. Eriksson[3]은 2차원 유한요소 모델을 이용하여 마찰과 볼트의 강성 및 간극효과 (Clearance effect)를 고려하여 체결부 주위의 응력분포를 연구하였다. 또한, Matthews *et al.*[4]은 3차원 유한요소방법을 이용하여 핀에 의한 하중이 복합재료에 어떻게 전달되는지를 연구하였으며, Chen *et al.*[5] 역시 3차원 모델을 이용해 마찰력, 간극효과, 와서의 조임력 (Clamping pressure) 및 적층 순서에 따른 응력분포를 확인하였다. 이러한 연구 외에 보다 정확한 응력분포를 확인하기 위해서 Ireman[6]은 3차원 모델을 통하여 체결된 볼트의 형상에 따른 원공 주위의 응력분포를 확인하였으며, Tsai와 Morton[7]의 경우에는 체결부의 복잡한 파손거동을 이해하기 위해 설계인자에 대한 연구와 함께 시험을 통한 원공주위의 응력분포를 규명하였다. 다중 핀 하중을 받는 체결의 경우에 관한 연구 역시 단일 핀 하중을 받는 체

결의 연구결과를 바탕으로 확장되었는데, Crews *et al.*[8]은 응력집중계수를 도입해 다양한 핀의 형상에 따른 복합재료에서의 응력분포에 대해 연구하였으며, Blackie와 Chutima[9]는 2차원 접촉요소를 이용하여 원공주위에서의 응력분포를 확인하였으며 원공의 개수증가와 배치형상에 따른 응력분포의 변화를 살펴보았다. 특히, 기하학적 형상의 영향을 살펴보기 위해 원공 사이의 간극을 변화시키면서 응력의 변화를 관찰하였다. Shyprykevich *et al.*[10]는 다중 핀 하중을 받는 경우에 다양한 체결 핀에 따른 복합재료에서의 접촉응력 및 파손에 영향을 미치는 인자에 대하여 경계조건으로 대치조건을 사용하여 해석하였다. Chun *et al.*[11]는 체결부의 형상변화 및 적층순서의 변화에 따른 파손하중을 파괴면적지수법에 의한 수치적인 예측과 실험치를 비교 하였으며, 최근의 연구에서 Lim *et al.*[12]는 일방향 적층 구조를 갖는 복합재와 적층각과 조임력에 대한 연구를 수행하여 적절한 조임력이 작용하였을 때의 피로 특성을 연구하였다. 또한 Kradinov *et al.*[13]은 유전자 알고리즘을 이용하여 볼트에 의한 체결이 되는 부분과 복합재료 평판간의 설계변수에 대한 최적화를 수행하였다.

원공주위의 응력분포를 살펴보기 위한 지금까지의 연구를 살펴보면 핀과 복합재료 적층판의 마찰을 이용한 비선형해석이 실험결과와 가장 일치함을 보여주고 있다. 하지만, 다양한 하중 조건에 의한 각 인자간의 영향력을 체계적으로 분석한 연구는 완성되지 않았으며, 특히 다축경편 복합재료 체결부에 대한 연구는 아직 많은 부분에서 부족하다. 따라서, 본 논문에서는 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS version 7.0을 이용하여 단일 핀 하중에 대하여 기계적 체결부 주변에서 무차원화 된 평판의 폭 (Normalized width, W/D ratio)과 평판의 끝단으로부터 원공까지의 거리 (Normalized end distance, E/D ratio), 그리고 UD (Unidirectional), DBLT (Double-bias-longitudinal-transverse), Hybrid I, Hybrid II의 4가지 적층순서와 마찰계수, 와서의 조임력 등이 응력분포에 미치는 영향을 분석하고, 응력분포에 대한 중요인자를 확인하였다. 또한, 다중 핀 하중을 받는 경우 강성이 가장 약한 DBLT 복합재료 평판에서 최대응력을 무차원화한 응력집중계수 값을 이용하여 원공의 배열형상과 하중조건에 따른 평판에서의 응력해석을 수행하였으며, 원공의 개수 증가 및 배치형상의 변화에 따른 최대 응력집중계수 값의 변화를 살펴봄으로써 원공의 개수 증가에 따른 원공 주변의 응력분포 및 배치형상에 따른 응력분산의 경향성을 파악하였다.

2. 해석

2.1 유한요소 모델링

복합재료 평판에서의 기계적 체결을 다루기 위해 상용 패키지 프로그램인 ANSYS version 7.0을 사용하였다. Table 1은 ANSYS를 이용한 구체적인 모델 방법을 나타낸다. 요소의 종류는 복합재료의 적층을 표현하기 위하여 3차원 적층 구조를 구현하는 SOLID46을 사용하였으며, 접촉현상을 적용하기 위하여, 체결 핀과 복합재료의 원공주변에 각각 CONTACT174와 TARGET170의 요소를 이용하여 복합재료와 핀의 접촉현상을 이용한 구속조건을 적용하였다. 또한, 기계적 체결 방법은 단일 핀 하중을 받는 경우와 다중 핀 하중을 받는 경우로 나누어 응력해석을 수행하였으며, 핀의 재질은 물성이 $E=210\text{ GPa}$, $\nu=0.3$ 인 Steel을 사용하였다.

Table 1 Finite element analysis method

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

Fig. 1은 모델의 형상과 메쉬된 모델의 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 1축에 대하여 대칭이므로, 대칭경계조건을 이용하여 해석하였고, 핀과 복합재료 평판을 각각 모델링을 한 후 접촉요소 (Contact element)를 사용하였고, 핀은 3자유도를 구속하여 고정된 것으로 가정하였다.

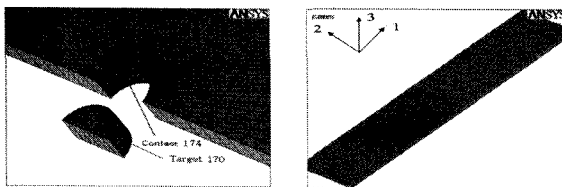


Fig. 1 Modeling and meshing.

본 연구에서 사용된 복합재료의 적층순서는 (주)동일산자의 DBLT를 기본으로 16개의 층 (Ply)을 적층하였다. 이 때, 적층 방법에 따른 비교를 하기 위하여 단방향 하중에 대한 물성이 강하지만, 다른 한쪽 방향으로 물성이 취약한 일방향 (UD) 복합재료와 UD 복합재료의 단방향성 물성을 보완하기 위해 다축으로 적층이 된 DBLT 복합재료, 그리고 UD 복합재료의 단방향성인 물성과 DBLT 복합재료의 장점을 살리기 위한 Hybrid composite (I), (II)의 4가지 종류로 나누어 해석하였다.

다음은 분류된 4가지 종류의 적층순서를 보여주고 있다.

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

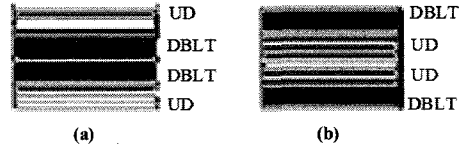


Fig. 2 (a) Hybrid composites (I), (b) Hybrid composites (II).

Fig. 3은 해석에 사용된 니팅(Knitting)된 UD 복합재료의 3차원 형상을 나타내고, Table 2는 실험을 통해 얻은 복합재료의 기계적 물성치를 나타낸다. E_1 은 복합재의 섬유방향인 종방향 (Longitudinal direction) 강성이며, E_2 는 섬유방향에 수직인 횡방향 (Transverse direction)의 강성을 의미한다. DBLT와 같이 여러 층으로 적층된 경우, 니팅된 효과를 고려하기 위하여 각의 층에 대한 물성을 니팅된 UD 복합재료의 물성을 이용하였다.

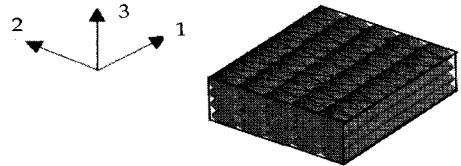


Fig. 3 Unidirectional composite laminate.

Table 2 Laminate properties of unidirectional composite laminate

E_1	E_2	G_{12}	ν_{12}
39.7 GPa	12 GPa	5.1 GPa	0.25

2.2 무차원 응력 집중 계수

응력집중계수를 이용하면, 평균 베어링 스트레스의 몇 배정도의 응력집중현상이 원공 주위에 발생하는지 효과적으로 파악할 수 있다. 즉, 하중에 의한 응력집중의 크기를 확인하고 원공 주위에서 파손모드를 판단하기 위하여 응력집중계수를 이용하였다. 이 때, 파손모드는 하중을 받는 방향과 수직인 방향의 단면이 인장을 받아 파단 되는 것을 인장파손 (Net-tension failure)이라고 하며, 체결부의 전단응력성분이 다른 응력 성분에 비하여 클 경우에는 전단파손 (Shear-out failure)이 발생한다. 이것은 복합재 체결부와 끝 단사이의 거리 (E)가 짧은 경우에 주로 발생하는 파손양상이다. 원공 주위의 응력분포를 정량적으로 확인하기 위해서는 부과된 하중

의 크기와 상관없는 무차원화된 값이 필요하다. 따라서, 최대 응력을 평균 베어링 스트레스로 나눔으로써 정의되는 무차원화된 응력집중계수를 이용할 수 있다. 이를 위하여, 먼저 식 (1)의 평균 베어링 스트레스를 계산하며, 이것은 복합재료에 부과된 전체하중에 대하여 원공에서 받는 평균응력을 구한 것이다.

$$\sigma_b(\text{bearing stress}) = \frac{P}{D \times t} \quad (1)$$

여기서 D 와 t 는 각각 원공의 지름 및 복합재료의 두께이다. 기존 문헌에는 부과된 하중에 대한 원공 주위의 응력을 원공 주위의 반경응력 (σ_{rr}), 접선응력 ($\sigma_{\theta\theta}$), 전단응력 ($\sigma_{r\theta}$) 평균 베어링 스트레스로 나눈 값을 제시하였다[8]. 이 때, Fig. 4는 극좌표계에서 하중에 대한 응력을 임의의 한 점에서 각각의 방향을 나타낸 것이다.

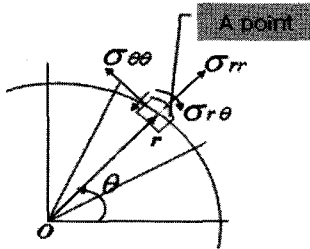


Fig. 4 Stress components around a hole.

식 (2)는 각 방향 응력의 최대값을 이용하여 무차원화된 응력집중계수를 정의한 것이다. 파손모드의 관점에서 보면, $K_{\theta\theta}$ 값은 전단파손에 영향을 미치는 변수이며, K_{rb} 값은 인장파손에 영향을 미친다.

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

2.3 복합재료 평판의 기하학적인 형상 및 요소

구조물의 기계적 체결시에 파손의 방지를 위하여 안정적인 응력분포가 나타나는 복합재료 체결판을 알아내기 위하여, 먼저 하중에 따라 응력분포에 영향을 많이 미치는 요소를 확인할 필요가 있다. 단일 핀 하중을 받는 경우에 다양한 인자에 대한 해석을 수행하여 응력분포에 많은 영향을 미치는 요소를 알아내고, 다중 핀 하중을 받는 경우에는 강성이 낮은 적층순서를 갖는 해석을 수행하여, 최종적으로 체결시 응력집중의 발생이 적게 일어나는 체결부에서 원공의 개수 및 배치형상을 알아낼 수 있다. 따라서 먼저 단일 핀 하중을 받는 경우에 Table 3과 같이 다양한 인자에 대하여 해석을 수행하였으며, 기하학적인 형상 변화를 통한 응력분포를 알기 위하여 W/D 비와 E/D 비의 변화에 따른 응력해석을 수행하였다. 이 때,

W/D 비는 일정 비율 이상이 되면 응력분포에 커다란 영향이 없으며, 비율이 2이하가 되지 않도록 설계한다고 제시되어 있다[4]. 또한, 마찰계수는 원공 주위의 최대 응력에 영향을 주며[1], 따라서, 마찰계수가 없는 경우와 0.2, 0.5인 경우를 가정한 경우로 나누어 해석을 수행하였다. 핀 하중을 받는 경우에는 볼트에 가해지는 토크는 볼트를 통해 복합재료에 압력을 작용한다. 다음은 이것을 산술적으로 토크와 압력을 변환하는 식이다.

$$\tau = \kappa d P_w \left[\frac{\pi}{4} (d^{*2} - D^2) \right] \quad (3)$$

- τ : Torque loaded on bolt (5.6 Nm)
- κ : Torque coefficient (0.3)
- P_w : Normal pressure (21 MPa)
- d : Bolt diameter (6 mm)
- d^* : Washer diameter (15 mm)
- D : Hole diameter (6 mm)

와서의 직경이 15 mm일 경우, 볼트의 체결시 걸리는 토크의 크기는 5.6 kN-mm이며, 토크 계수는 0.3이다. 따라서, 식으로부터 변환된 압력은 21 MPa이며, Table 3과 같이 와서의 조임력 (Clamping pressure)을 적용하였다.

Table 3 Effective parameters in single-pin loaded MWK (Multiaxial Warp Knitted) composite laminate

Effective parameter	Value
Friction coefficient	$\mu = 0, 0.2, 0.5$
Stacking sequence	UD, DBLT, Hybrid(I),(II)
Clamping pressure	0, 21 MPa
Pin type	Steel
E/D ratio	2, 5, 10
W/D ratio	2, 5, 10
L/D ratio	20

Table 4는 단일 핀 하중을 받는 경우에 대한 해석결과를 토대로 DBLT 복합재료 평판에서 다중 핀 하중을 받는 경우에 적용된 인자들의 값이다. 이 때, 기하학적인 영향력을 무시하기 위하여 원공의 증가에 따라 $E/D=2$, $W/D=2$ 로 비율이 일정하도록 복합재료의 기하학적인 형상을 고정하였으며, 또한, Table 5는 다중 핀 하중을 받는 경우 고려된 원공의 배치형상을 나타낸다. 원공의 배치형상은 1행배치, 1열배치, 2행배치, 2열배치, 그리고 엇각배치(Pattern A, Pattern B)로 구분하였으며, 원공의 개수는 2개~7개까지 고려하였다. 이 때, 고려된 모든 배치형상에 대해 하나의 그래프에 응력집중계수 값을 도시함으로써 복합재료의 기계적 체결 시 원공의 개수의 증가 및 배치형상에 따른 응력 값의 감소효과를 알 수 있다.

Table 4 Effective parameters in multi-pin loaded DBLT composite laminate

Effective parameter	Value
Friction coefficient	$\mu = 0$
Stacking sequence	$[0/45/90/-45]_{2s}$
Clamping force	0 MPa
Pin type	Steel
E/D ratio	2
W/D ratio	2
Clearance ratio	$n=0$
L/D ratio	20

Table 5 Number of holes and loading conditions for DBLT composite laminate

Type	Number of hole	Load condition
Single Row	1 × 1, 1 × 2, 1 × 3, 1 × 4	Tension
Single Column	1 × 1, 2 × 1, 3 × 1, 4 × 1	
Double Row	2 × 1, 2 × 2, 2 × 3	
Double Column	1 × 2, 2 × 2, 3 × 2	
Pattern A	5, 7	
Pattern B	5, 7	

3. 결과 및 고찰

3.1 단일 핀 하중을 받는 MWK (Multi Warp Knitted) 복합재료 평판

단일 핀 하중을 받는 경우, Fig. 5와 같이 θ 를 0° 에서 180° 의 범위 내에서 원공주변의 응력분포를 살펴보았으며, 하중 P는 모든 해석이 동일하게 그림과 같은 방향으로 단면적을 고려하여 1kN의 하중을 적용하여 해석을 수행하였다.

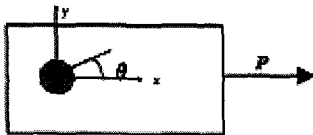


Fig. 5 A range of stress distribution.

단일 핀의 경우, UD 복합재료에 대한 각 인자의 영향을 알아본 후, 적층순서에 따른 응력 분포를 알아보았다. Fig. 6부터 Fig. 9까지는 UD 복합재료에서의 W/D와 E/D ratio, 마찰계수, 와셔의 조임력의 변화에 따른 결과이다. 이 때, 변수가 되는 인자를 제외한 나머지 인자들의 값은 고정된 값이며, W/D와 E/D값은 2, 마찰계수와 조임력은 무시하였으며, 핀의 종류는 Steel로 하였다. Fig. 6은 각 인자들에 따른 응력분포 및 응력집중 계수를 나타낸 것이다. 그리고 Fig. 7과 Fig. 8에서는 각 인자들의 응력분포도가 Fig. 6의 응력분포와 유사하여 응력집중계수만으로 표현하였다.

먼저, Fig. 6과 Fig. 7(a)로부터 W/D, E/D ratio에 대한 결과를

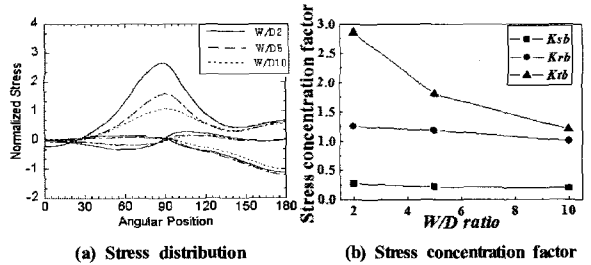


Fig. 6 Stress distribution and concentration factor with the variation of W/D ratio in UD composite laminate.

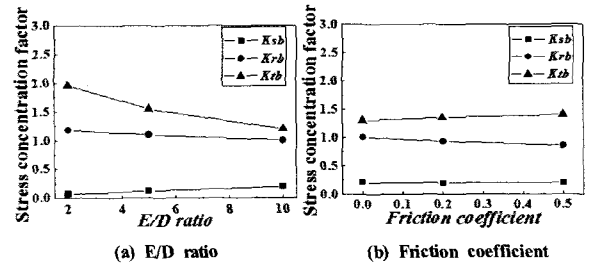


Fig. 7 Stress concentration factor with the variation of E/D ratio and friction coefficient in UD composite laminate.

보면, 비율이 2일 경우, 접선응력의 값이 상당히 큰 것을 알 수 있다. 이것은 평판의 크기에 비하여 원공의 크기가 상대적으로 크기 때문에 하중에 대하여 응력집중이 원공주변에 많이 발생하여, 복합재료가 변형되었기 때문이다. 따라서 W/D, E/D ratio가 너무 작은 경우는 설계를 피해야 한다.

Fig. 7(b)에서 마찰계수의 변화에 따른 경우에 마찰력이 증가하여 접선응력이 미소하게 증가하는 것을 확인할 수 있다[5].

Fig. 8(a)은 와셔의 조임력에 따른 결과이며, 조임력에 따라서 응력이 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서, 적절한 조임력은 인장파손 및 전단파손에 의한 파손을 줄일 수 있다. 하지만, 너무 큰 와셔의 조임력은 복합재료 적층판의 층간 분리현상 (Delamination)을 야기할 수 있다[14].

Fig. 8(b)은 적층순서에 따른 응력집중 계수를 나타낸 것이다. 응력집중계수의 값이 UD 복합재료에서 DBLT복합재료로 완만하게 증가하며, 이는 하중을 받는 방향과 일치하는 층의 비율에 따른 것이다. 이와 같이, 단일 핀 하중을 받는 경우에 W/D, E/D, 적층순서가 응력분포에 가장 중요한 인자임을 알 수 있으며, 다른 인자에 대한 영향은 상대적으로 적은 것을 확인할 수 있다.

3.2 다중 핀 하중을 받는 MWK (Multi Warp Knitted) 복합재료 평판

단일 핀 하중을 받는 경우, 원공주변의 응력분포에 대한 영향인자를 살펴보았으며, 이를 토대로 다중 핀 하중을 받는 경우에 원공의

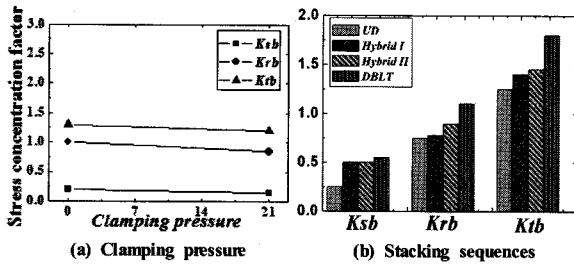


Fig. 8 Stress concentration factor with the variation of clamping pressure in UD composite laminate and various stacking sequences (W/D ratio=10, E/D ratio=10).

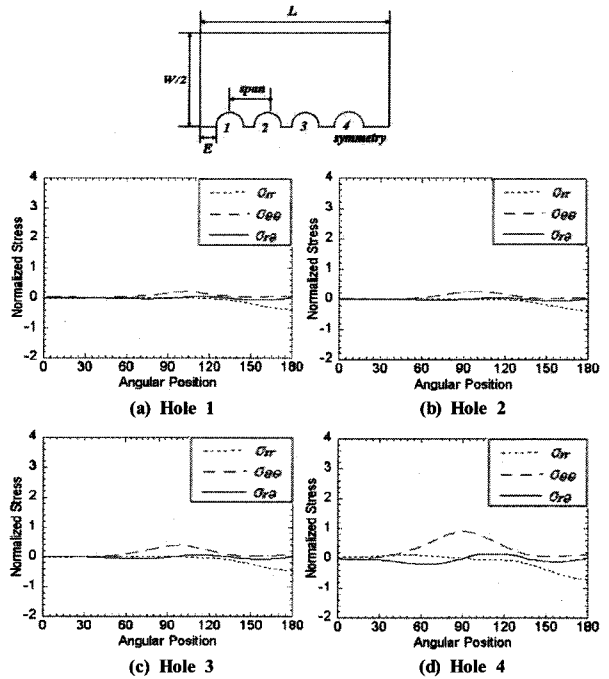


Fig. 11 Stress distributions in DBLT composite, single row case (4 Holes).

배치형상에 따른 원공주변에서의 응력분포를 알아보았다. 이때, 대칭조건을 이용하여 해석을 수행하였다. 그림에 나타나는 x 축은 Fig. 5에 나타난 것과 같이 원공 주위의 위치를 각도 (θ)로 표현한 것으로 범위는 -180° 에서 180° 까지 표시하였다. 하지만, 증립축에 대하여 대칭인 경우에 해당하는 원공인 경우는 0° 에서 180° 까지의 범위만을 나타내었다.

Fig. 9는 원공의 개수가 한 개의 행 (Row)을 중심으로 증가하는 경우에 대하여 원공의 행 간격 (Span=3D, 4D)의 변화에 따른 원공 주변에서의 응력변화를 나타낸 것이다. 그림으로부터 행 간격의 변화에 따른 응력변화가 거의 없는 것을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 10, Fig. 11은 Fig. 9에서 행 간격에 영향이 없는 것을 확인하여 행 간격을 4D로 고정하여 원공의 개수에 따른 원공 주변의 응력변화를 나타내었다. 원공의 개수에 따른 원공의 개수가 증가함에 따라 최대응력의 변화는 크지 않으며, 하중을 받는 방향에서 가장 가까운 원공이 주된 응력을 받고 있음을 알 수 있다. 즉, 행을 중심으로 증가된 원공은 응력을 효과적으로 감소시키지 못한다.

또한, Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14로부터 원공을 열 (Column)로 배치했을 경우에는 원공을 행 (Row)으로 배치한 경우와 달리 하중을 받는 지점과는 무관하게 응력분산이 이루어짐을 알 수 있다. 따라서 그림과 같이 원공의 위치에 따른 응력의 크기는 비슷하며, 원공의 개수가 증가함에 따라 최대응력이 급격히 감소하고, 각각의 원공주변에서의 응력은 거의 동일한 것을 확인할 수 있다.

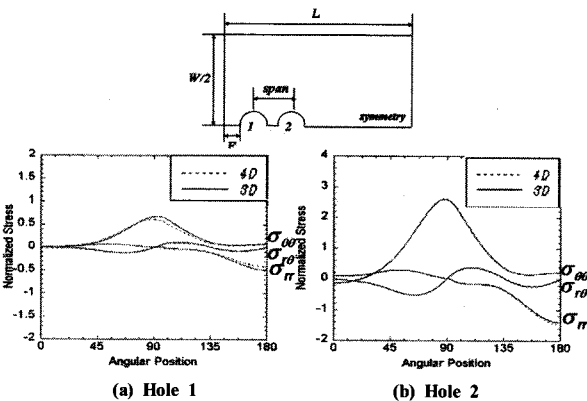


Fig. 9 Stress distributions with variation of span distance in DBLT composite, single row case (2 Holes).

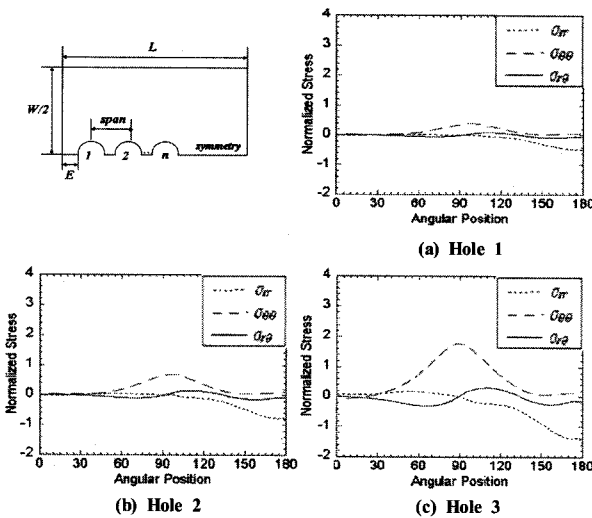


Fig. 10 Stress distributions in DBLT composite, single row case (3 Holes).

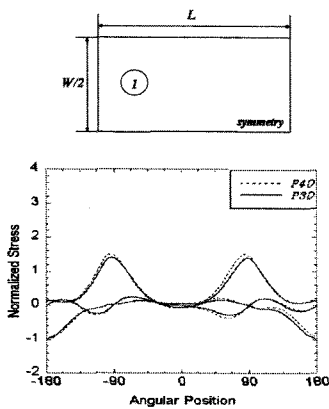


Fig. 12 Stress distributions with variation of pitch distance in in DBLT composite, single column case (2 Holes).

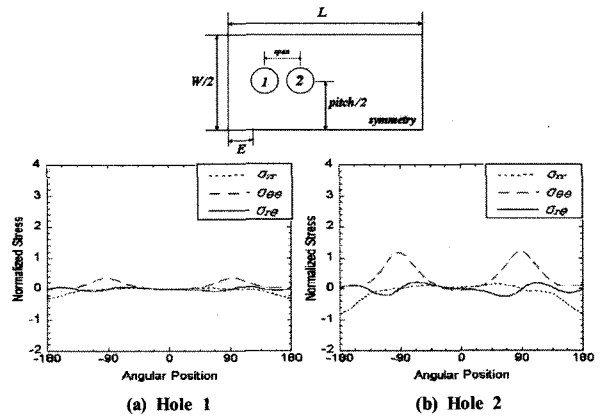


Fig. 15 Stress distributions in DBLT composite, double row case (4 holes).

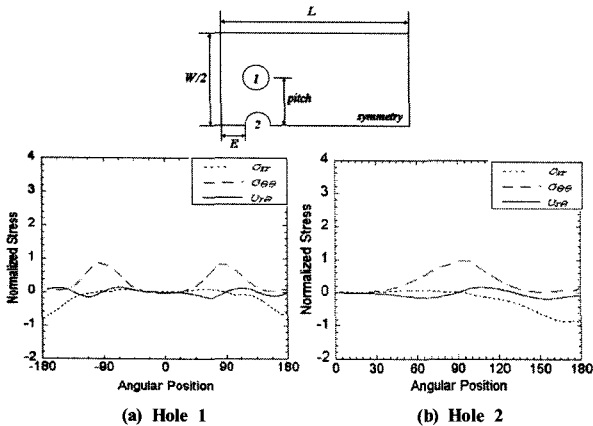


Fig. 13 Stress distributions in DBLT composite, single column case (3 Holes).

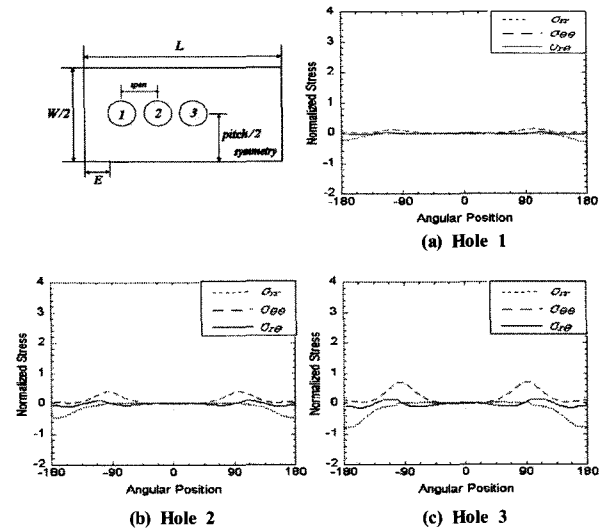


Fig. 16 Stress distributions in DBLT composite, double row case (6 holes).

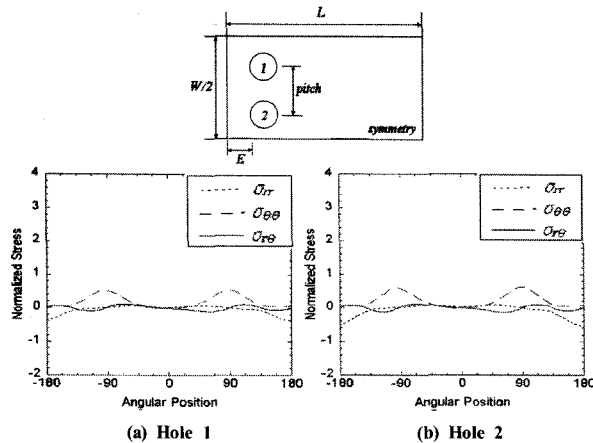


Fig. 14 Stress distributions in DBLT composite, single column case (4 Holes).

즉, 하중을 효과적으로 감소시키기 위해서는 열 방향으로 원공을 배치하는 것이 유용하다는 결과를 제시한다.

Fig. 15, Fig. 16은 두 개의 행을 기준으로 원공의 개수를 증가시킬 경우 원공 주변의 응력분포를 나타낸 것이다. 이 때, 원공이 2개인 경우는 결과가 1행으로 배치된 원공 2개의 경우와 동일하기 때문에 도시하지 않았다. 그림으로부터 하중을 받는 방향의 원공이 주된 응력을 받는 것을 알 수 있고, 나머지 원공의 경우 선형적으로 최대응력이 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 17은 2개의 열을 기준으로 원공의 개수를 증가시켰을 경우의 응력분포를 보여준다. 이 때, 원공의 개수가 2개인 경우의 해석 결과가 1열로 배치된 원공 2개인 경우와 동일하며, 원공의 개수가 4개인 경우는 두 개의 행으로 배치된 경우 중 원공이 4개인 경우와

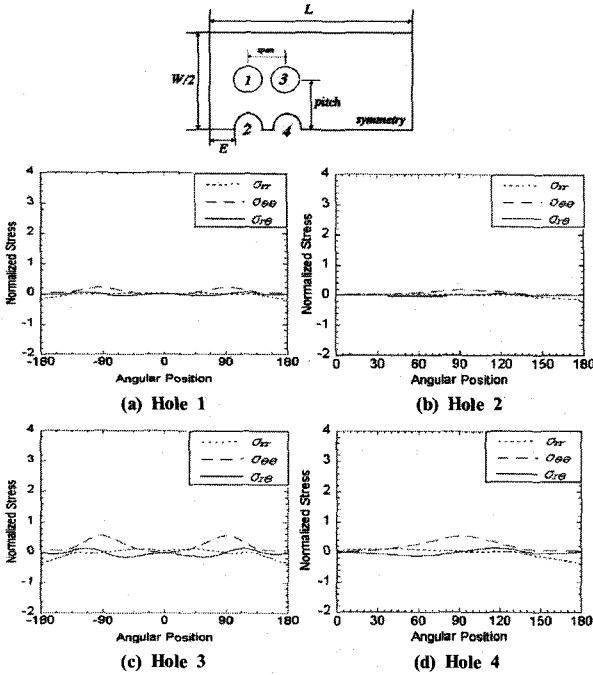


Fig. 17 Stress distributions in DBLT composite, double column case (6 holes).

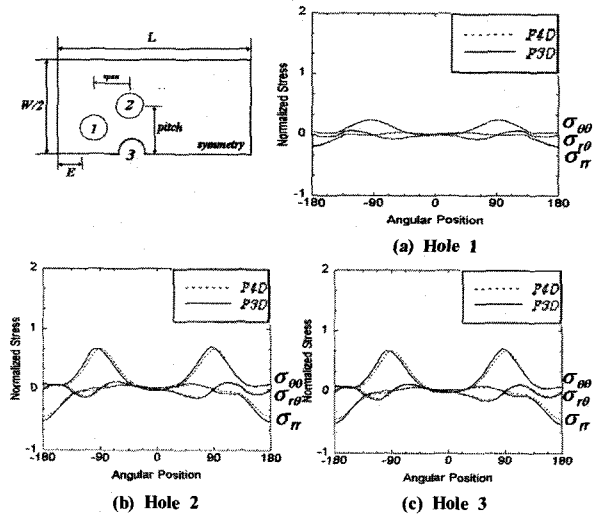


Fig. 18 Stress distribution of holes in pattern A case (5 Holes).

같다. 따라서 원공이 6개인 경우의 응력분포만을 도시하였다. 그림으로부터, 2개의 열을 기준으로 원공이 배치된 경우에 원공의 개수가 증가하면서 최대응력이 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 원공의 개수가 6개인 경우에 대한 하중을 받을 때 최대응력의 급격한 감소효과가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

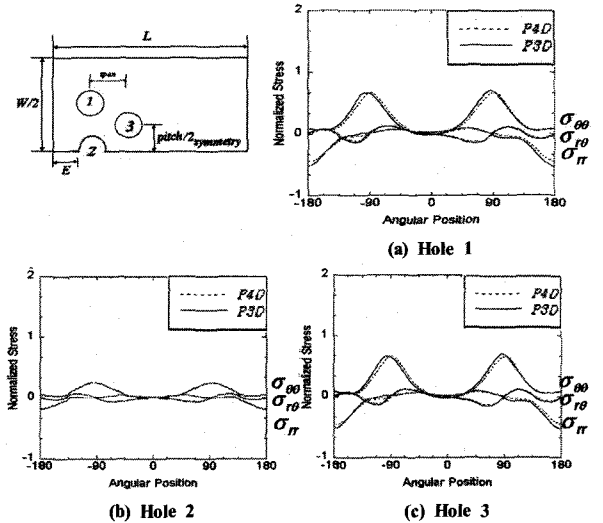


Fig. 19 Stress distribution of holes in pattern B case (5 Holes).

다음의 Fig. 18과 Fig. 19은 엇각배치인 패턴 A와 패턴 B에서의 응력분포를 보여준다. 여기서 나타나는 P3D는 피치의 길이가 Hole의 지름에 3배인 경우이고 P4D는 피치의 길이가 Hole의 지름에 4배인 경우를 나타낸다.

그림으로부터 패턴 A와 패턴 B에서 하중을 받는 방향의 원공이 주된 응력을 받는 것을 알 수 있다. 즉, 하중을 받는 지점으로부터 가까운 지점에 원공의 개수가 많은 패턴 A의 경우가 패턴 B의 경우보다 주 하중을 받는 원공의 개수가 많기 때문에 하중의 분산이 잘되어 최대응력이 작은 것을 확인할 수 있다. 하지만 피치와 원공의 크기와의 관계는 큰 영향이 없는 것을 알 수 있다.

Fig. 20은 다중 핀 하중을 받는 경우 원공의 개수 변화에 따른 평판의 원공의 배치형상의 변화에 따른 응력을 무차원 응력집중계수를 이용하여 비교한 것이다. 먼저 반경응력 (Radial stress)을 살펴보면, 1행배치 (Single row case)의 경우 최초 원공의 증가에 따라 감소하나 원공의 개수가 3, 4개로 증가함에 따라 응력집중계수가 미소하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 나머지 경우에는 원공의 개수가 증가함에 따라 응력집중계수가 미소하게 감소하며, 2열배치 (Double column case)의 원공의 개수가 6개일 때 최소값이 나타남을 알 수 있다. 즉, 원공의 개수가 감소함에 따라 인장파손 (Net-tension failure)이 일어날 가능성이 높으며, 열 배치의 경우가 행배치의 경우보다 인장파손이 일어날 가능성이 적은 것을 보여준다. 그림에서 접선응력 (Tangential stress)의 경우에는 반경응력 (Radial stress)의 경우에 비해 보다 높은 응력집중이 일어나며, 1열배치의 경우 원공의 개수가 증가하면서 응력집중이 급격히 감소한다. 또한 모든 경우에 대하여 원공의 개수가 6개인 2열 배치와 원공의 개수가 7개인 Pattern A의 경우가 최소의 응력집중계수를 나타내고 있다. 결국, 같은 원공을 이용한 결합의

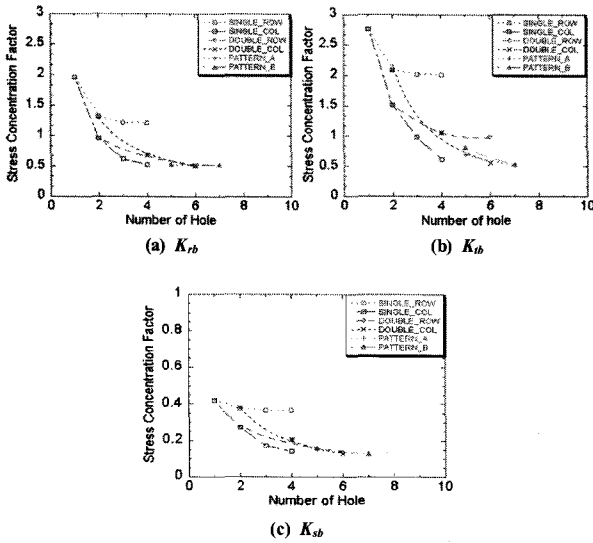


Fig. 20 Comparison of stress concentration factor in tension.

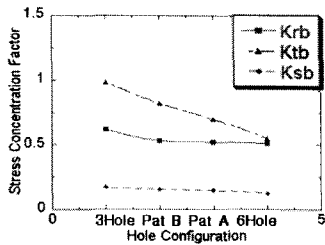


Fig. 21 Comparison of stress concentration factor in tension.

경우에 1열 배치나 2열배치로 원공을 배치하는 것이 가장 응력을 잘 분산시키며, Pattern A의 경우와 비교했을 때에도 응력집중이 미소하게 작은 것을 확인할 수 있다. 따라서, 배치형상을 이용하여 체결부를 설계할 경우 행배치 보다는 열배치, 1열보다는 2열로 배치하는 것이 하중의 분산이 잘되기 때문에 인장파손 (Net-tension failure) 및 전단파손 (Shear-out failure) 방지에 더 큰 효과가 있음을 알 수 있다.

Fig. 21은 동일한 기하학적 형상을 갖는 경우에 대한 응력 집중계수를 나타낸다. 즉, 원공이 하나인 경우의 결과를 이용하여 원공의 응력분포에 가장 많은 영향을 미치는 인자 및 적층순서를 고정시켰을 경우에 대한 응력집중계수를 비교함으로써 원공의 개수 및 배치형상에 대한 영향을 살펴보았다. 그림에서 원공이 3개인 경우 (3 holes)는 1열배치를 나타내며, 엇각배치 (Pattern A, Pattern B)는 원공이 5개인 경우를 나타낸다. 또한, 원공의 개수가 6개인 경우 (6 holes)는 2열배치를 나타낸다. 그림으로부터, 행으로 배치된 것보다는 열배치가, 1열배치 보다는 2열배치가 응력분산이 잘 이루어짐을 알 수 있으며, 원공배치 형태가 6개인 2열배치의 경우 최소의 응력집

중계수를 나타내는 것을 알 수 있으며, 특히 K_{tb} 값의 차이가 많다는 것을 알 수 있다. 이것은 배치형태에 따라 인장파손에서 효과가 크다는 것을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 복합재료의 기계적 체결에 관한 체결부의 응력해석을 실시하였다. 단일 핀 하중을 받는 경우 적층순서, W/D , 마찰계수, 와셔의 조임력에 따른 복합재료 평판에서 응력분포에 영향이 있음을 확인하고, 다중 핀 하중을 받는 경우에 원공의 개수 및 배치형상에 따른 복합재료 평판에서 응력의 변화를 확인하였다.

단일 핀 하중을 받는 경우, 하중의 방향과 섬유방향이 일치하는 UD 복합재료의 경우 완만한 응력분포를 나타냈으며, DBLT 복합재료가 UD 복합재료 보다 강성이 작게 나타남을 알 수 있었다. 또한, UD 복합재료에서 고정인자를 설정하고 변환인자에 따른 각 인자의 영향력을 분석하였고, W/D , E/D 의 값이 감소하면 응력이 증가하며 W/D 값의 변화에 비해 E/D 값의 변화는 결과에 영향을 적게 미치는 것을 알았다. 또한, W/D , E/D 값이 2 이하인 경우 응력이 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. 마찰계수의 변화에 따른 응력은 반경응력 (Radial stress)의 증가효과를 유발하며, 미소한 접선응력 (Tangential stress)의 감소효과를 나타낸다. 이는 마찰계수의 변화에 따라 인장파손에 의한 파손을 줄일 수 있으며, 이와는 반대로 전단파손이 일어날 확률이 커짐을 의미한다. 또한, 와셔의 조임력은 볼트에 가해진 토크가 복합재료 적층판에 가하는 압력으로 산정하였으며, 적당한 조임력은 반경응력 및 접선응력의 미소한 감소효과를 나타내었다. 이에 따라, 마찰계수와 와셔의 적당한 조임력의 선정은 인장에 의한 파손을 방지할 수 있는 요소임을 알려준다. 이러한 단일 핀 하중을 받는 경우의 결과를 토대로 다중 핀 하중을 받는 경우에 대한 해석을 수행하였으며, 원공의 배치형상은 행배치보다 열배치, 1열보다 2열배치 혹은 엇각배치 중 패턴 A의 경우에 응력분산이 잘 이루어지는 것을 확인하였다.

결론적으로, 다축경편 복합재료 평판의 기계적 체결 시 W/D , E/D 비의 선정이 우선적으로 이루어져야 하며, 동시에 마찰계수와 와셔의 조임력을 적절하게 선정하여 전단파손 및 인장파손에 의한 파손효과를 줄이는 것이 중요하며, 기계적 체결 시 원공의 개수는 많을수록, 배치는 2열배치가 응력이 잘 분산되지만, 가공비용이 문제가 될 수 있으므로, 적은 수의 기계적 체결로는 1열배치도 바람직할 수 있다.

후 기

본 연구는 21세기 프론티어 연구 사업 차세대 소재성형 개발 사업단이 지원하는 연구과제로 수행되었다.

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, 1985, pp. 957-975.
- 2) De Jong, T, "Stress in pin-loaded holes in elastically orthotropic or isotropic plates," *Journal of composite material*, Vol. 11, 1977, pp. 313-331.
- 3) L.Ingvar Eriksson, "Contact Stresses in Bolted Joints of Composite Laminates," *Composite Structures*, Vol. 6, 1986, pp. 57-75.
- 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*, Vol. 15, 1981, pp. 481-491.
- 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, 1995, pp. 287-297.
- 6) Tomas Ireman, "Three-dimensional stress analysis of bolted single-lap composite joints," *Composite Structures*, Vol. 43, 1998, pp. 195-216.
- 7) M. Y. Tsai and J. Mortan, "Stress and Failure Analysis of a Pin-Loaded Composite Plates : An Experimental Study," *Journal of Composite Materials*, Vol. 24, 1990, pp. 1101-1121.
- 8) 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 TP-1862*, 1981, pp. 1-40.
- 9) Alvin P.Blackie & Surachate Chutima, "Stress distributions in multi-fastened composite plates," *Composite Structures*, Vol. 34, 1996, pp. 427-436.
- 10) E. Madenci, S.Shkarayev, B.Sergeev, D.W. Oplinger and P. Shyprykevich, "Analysis Of Composite Laminates With Multiple Fasteners," *International Journal of Solids Structures*, Vol. 35, No. 15, 1998, pp. 1793-1811.
- 11) Young-Jun Chun, Jin-Ho Choi and Jin-Hwe Kweon. "A study on the strength of mechanically fastened composite joint using the failure area index method," *Journal of the korea society for composite materials*, Vol. 16, No. 5, 2003, pp. 1-6.
- 12) Tea-Seong Lim, Byung-Chul Kim, Dai-Gil Lee, "Fatigue characteristics of the bolted joints for unidirectional composite laminates," *Composite Structures*, Vol. In Press, 2005.
- 13) V.Kradinov, E.Madenci, D.R. Ambur, "Application of genetic algorithm for optimum design of bolted composite lap joint," *Composite Structure*, Vol. In Press, 2005.
- 14) Y.Tan, W.D.Wen, F.K. Chang, P.Shyprykevich, "Experimental study in clamping effects on the tensile strength of composite plates with a bolt-filled hole," *Composite Part A*, Vol. 30, 1995, pp. 1215-1229.