

## 분포하중을 받는 목재 적층복합재 빔의 볼트 체결 최적화 설계

조희근<sup>a\*</sup>

## Design Optimization of Bolted Connection with Wood Laminated Composite Beams Subjected to Distributed Loads

Hee Keun Cho<sup>a\*</sup><sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering Education, Andong National University,  
1375, Kyungdong-ro, Andong, Gyeongbuk-do, 36729, Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

|          |    |      |      |
|----------|----|------|------|
| Received | 16 | May  | 2017 |
| Revised  | 10 | June | 2017 |
| Accepted | 13 | June | 2017 |

## Keywords:

Orthotropic material  
Response surface optimization  
Finite element analysis  
Bolted connection  
Design of experiment (DOE)

## ABSTRACT

Numerical analysis for various design parameters should be preceded by optimal design of composite materials. Numerous studies have been conducted on the bolting of interconnecting beams. In this study, the response surface method was applied to optimize the design of bolted joints connected by laminated wood composite beams. The response surface was created by combining the FEA code for composite analysis and the algorithm for forming the response surface. Optimization on this response surface was performed with a genetic algorithm to derive the results. The determination of the optimum bolt-hole position for the connection of composite beams is an optimization problem. Tsai-Wu composite failure index, maximum deflection, and simple von Mises stress are set as the objective functions. It has been proved that the design results of the optimized bolt-hole are superior to the design performance of the existing conventional bolt-hole position.

## 1. 서론

복합재료는 높은 비강성 특성 및 기타 물리적, 화학적 특성 때문에 다양한 첨단 구조물에 많이 사용되고 있다. 목재는 아직도 다양한 구조물에 많이 사용되고 있는 대표적인 복합재의 하나이다. 목재는 건축물, 지지대, 및 기타 구조물에 빔의 형태로 많이 적용된다. 목재 빔을 상호 연결하기 위해서 접합, 꺾쇠, 압수 홈 연결, 볼트 체결 등 다양한 체결방식이 있으며, 설계 목적에 따라서 적당한 방법과 제작 절차를 적용한다. 본 연구에서는 목재 적층 복합재 (laminated veneer lumber, LVL) 빔을 연결하기 위해서 많이 적

용되는 볼트체결에 대하여 최적설계를 수행하였다. 빔을 연결하는데 사용되는 볼트체결은 일정한 체결영역 내에 다수의 볼트가 체결되는 방식이다. 일정한 면적 내에서 다수의 볼트 체결을 위한 볼트 홀의 위치를 어떻게 배치하느냐에 따라서 빔이 받는 하중을 최적으로 지지할 수 있다. 구조물에 적용되는 빔의 역할은 부과된 하중을 최적으로 지지하는 것이다. 즉 재료의 허용 강도 내에서 최대의 하중을 지지하는 것이다. 볼트체결은 가장 대표적인 체결 방식이기 때문에 기존에 많은 연구가 수행되었다<sup>1-3)</sup>. 특히 볼트 체결에 대한 초기응력(pre-stress), 볼트와 홀 사이의 간격, 소성변형(plastic deformation) 등에 대한 연구가 많이 수행되었다<sup>4,5)</sup>. 그러나 볼트

\* Corresponding author. Tel.: +82-54-820-5677

Fax: +82-54-820-6379

E-mail address: hkcho@anu.ac.kr (Hee Keun Cho).

홀의 최적 위치에 대해서는 연구가 거의 수행되지 않았다. 특히 목재와 같은 복합체에 대해서는 유효한 연구가 거의 수행되지 않았다.

목재 복합재 빔의 볼트 체결을 위한 볼트 홀의 위치 최적화는 빔의 성능을 결정하는 매우 중요한 요소이다. 최적 위치를 결정하기 위해서는 복잡한 수치해석과 최적화 알고리즘이 상호 결합하여 유기적으로 계산을 수행하여야 한다<sup>[6]</sup>. FEA 해석을 위해서 상용 코드인 ANSYS 코드를 사용하였고, 반응표면(response surface)을 계산하기 위해서 Design Xplorer를 사용하였다<sup>[7]</sup>. 마지막 최적화 단계에서는 유전자 알고리즘(genetic algorithm)을 사용하였다. 유전자 알고리즘은 기존의 경사도 방법으로 최적점을 찾는 방법에 비해서 계산시간은 상대적으로 많이 소요되지만, 전 설계 영역에서 최대 혹은 최소점을 찾는 데는 매우 효과적이다.

## 2. FEA수치해석 및 최적화

### 2.1 복합재 해석 FEA구성방정식<sup>[8]</sup>

본 연구에서 최적화의 대상이 되는 재료는 목재이며 얇은 목재 판을 여러 겹으로 적층하여 만든 빔이다. 따라서 이러한 적층 복합 재료를 해석하기 위해서는 복합재를 해석 구성 방정식을 정의 하고 적용하여야 한다. 목재는 일반적으로 직교이방성(orthotropic material) 재료로 정의되어 해석에 적용된다. 목재는 반경방향(*R*), 길이방향(*L*), 접선방향(*T*)으로 물성치가 각각 다르며 각 방향을 Fig. 1에 나타내었다.

FEA 해석에서는 수치해석의 정확성을 위하여 비선형 해석을 기본으로 하였고 3D 20 node 아이소파라메트릭 요소를 사용하였다.

비선형 유한요소 해석을 위해서는 가상일의 원리를 적용하여 평형방정식을 유도하는데 시간 *t*에서의 외부 가상일 'R'는 다음과 같이 표현된다.

$$\int_{0V} {}^tS_{ij} \delta_0^t \epsilon_{ij} d({}^0V) = {}^tR \quad (1)$$

여기서  ${}^0S_{ij}$ 는 2<sup>nd</sup> Piola-Kirchhoff 응력 텐서이다. 이 응력의 정의

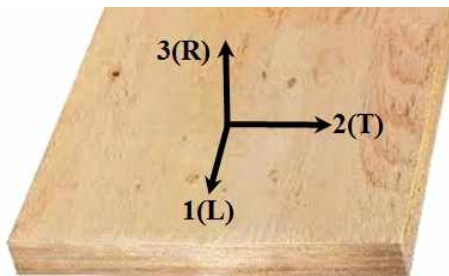


Fig. 1 Wood LVL material direction

는 변형된 물체에 작용하는 실제 힘은 변형하기 전 상태의 위치로 변환된 다음 초기 면적으로 나누는 것이다. 2<sup>nd</sup> Piola-Kirchhoff 응력 텐서와 Green-Lagrange 변형률 텐서의 관계는 다음과 같다.

$${}^tS_{ij} = {}^tD_{ijrs} {}^t\epsilon_{rs} \quad (2)$$

여기서  ${}^tD_{ijrs}$ 는 재료 물성치 텐서이다. 만약 재료가 선형 등방성 재료이면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$${}^tD_{ijrs} = \lambda \delta_{ij} \delta_{rs} + \mu (\delta_{ir} \delta_{js} + \delta_{is} \delta_{jr}) \quad (3)$$

여기서  $\lambda$ 와  $\mu$ 는 Lamé 상수,  $\delta_{ij}$ 는 Kronecker delta이다. 재료가 직교이방성 재료이면 재료 텐서 행렬  ${}^tD_{ijrs}$ 는 다음과 같이 표현 된다<sup>[9]</sup>.

$$[D]_{(k)} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} & 0 & 0 \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} & 0 & 0 \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} & 0 & 0 \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{55} & D_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{65} & D_{66} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} D_{11} &= m^4 Q_{11} + 2m^2 n^2 (Q_{12} + 2Q_{44}) + n^4 Q_{22} \\ D_{12} &= m^2 n^2 (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{44}) + (m^4 + n^4) Q_{12} \\ D_{13} &= m^2 Q_{13} + n^2 Q_{23} \\ D_{14} &= mn [m^2 Q_{11} - n^2 Q_{22} - (m^2 - n^2)(Q_{12} + 2Q_{44})] \\ D_{22} &= n^4 Q_{11} + 2m^2 n^2 (Q_{12} + 2Q_{44}) + m^4 Q_{22} \\ D_{24} &= mn [n^2 Q_{11} - m^2 Q_{22} - (m^2 - n^2)(Q_{12} + 2Q_{44})] \\ D_{33} &= Q_{33} \\ D_{34} &= mn (Q_{13} - Q_{23}) \\ D_{44} &= m^2 n^2 (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{12}) + (m^4 - n^4) Q_{44} \\ D_{55} &= m^2 Q_{55} + n^2 Q_{66} \\ D_{56} &= mn (Q_{66} - Q_{55}) \\ D_{66} &= m^2 Q_{66} + n^2 Q_{55} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $m = \cos \theta$ ,  $n = \sin \theta$ 이다. 재료의 축이 전역 좌표계의 축과 일치 할 때는 식 (5)의 *Q*는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} Q_{11} &= E_{11} \cdot (1 - \nu_{23} \nu_{32}) / \Delta, & Q_{12} &= E_{11} \cdot (\nu_{21} + \nu_{31} \nu_{23}) / \Delta \\ Q_{13} &= E_{33} \cdot (\nu_{13} + \nu_{12} \nu_{23}) / \Delta, & Q_{22} &= E_{22} \cdot (1 + \nu_{13} \nu_{31}) / \Delta \\ Q_{23} &= E_{33} \cdot (\nu_{23} + \nu_{21} \nu_{13}) / \Delta, & Q_{33} &= E_{11} \cdot (1 - \nu_{12} \nu_{21}) / \Delta \\ Q_{44} &= G_{12}, & Q_{55} &= G_{23}, & Q_{66} &= G_{13} \\ \Delta &= 1 - \nu_{12} \nu_{21} - \nu_{23} \nu_{32} - \nu_{31} \nu_{13} - 2\nu_{21} \nu_{32} \nu_{13} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 *E*,  $\nu$ 는 영률과 포외송비이다. Green-Lagrange 변형률 텐서의 정의를 식 (1)에 대입하면 유한요소 평형방정식 식 (7)을 구할

수 있다.

$$\begin{aligned} & \iiint_{0_V} D_{ijrs} e_{rs} \delta_0 e_{ij}^0 dV + \iiint_{0_V} S_{ij} \delta_0 \eta_{ij}^0 dV \\ & = {}^{t+\Delta t}R - \iiint_{0_V} {}^tS_{ij} \delta_0 e_{ij}^0 dV \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $e_{ij}$ ,  $\eta_{ij}$ 는 선형 변형율과 비선형 변형율을 각각 나타낸다. 식 (7)을 유한요소로 해석하기 위한 적분 행렬식의 형태로 나타내기 위하여, 변분법을 적용하면 다음의 FEA 평형방정식을 얻을 수 있다.

$$[{}^{t+\Delta t}K_L + {}^{t+\Delta t}K_{NL}]^{(i-1)} \{\Delta U\}^{(i)} = \{{}^{t+\Delta t}R\} - \{{}^{t+\Delta t}F\}^{(i-1)} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} [{}^{t+\Delta t}K_L]^{(i-1)} &= \sum_{k=1}^p \iiint_{0_V} \left\{ \left( \begin{bmatrix} {}^{t+\Delta t}B_{L0} \\ {}^{t+\Delta t}B_{L1} \end{bmatrix} \right)^T [D] \right\}_{(k)}^{(i-1)} (h_{(k)} / h) d(0V) \\ [{}^{t+\Delta t}K_{NL}]^{(i-1)} &= \sum_{k=1}^p \iiint_{0_V} \left\{ \left( \begin{bmatrix} {}^{t+\Delta t}B_{L0} \\ {}^{t+\Delta t}B_{L1} \end{bmatrix} \right)^T [{}^{t+\Delta t}S] \cdot \left( \begin{bmatrix} {}^{t+\Delta t}B_{NL} \end{bmatrix} \right) \right\}_{(k)}^{(i-1)} (h_{(k)} / h) d(0V) \\ \{{}^{t+\Delta t}F\}^{(i-1)} &= \sum_{k=1}^p \iiint_{0_V} \left( \left( \begin{bmatrix} {}^{t+\Delta t}B_{L0} \\ {}^{t+\Delta t}B_{L1} \end{bmatrix} \right)^T \right)_{(k)}^{(i-1)} \cdot \{{}^{t+\Delta t}S\}^{(i-1)} (h_{(k)} / h) d(0V) \end{aligned} \quad (9)$$

$[K_L]$ ,  $[K_{NL}]$ ,  $\{F\}$ 는 각각 선형 및 비선형 강성행렬, 내력이다.

## 2.2 최적화

반응표면법에 의한 최적화 해석은 다양한 설계 변수들을 표현할 수 있는 방법이며, 최종 결과물은 입력 설계 변수들로부터 계산된다. 전체 설계 영역에서 실험계획법에 의한 샘플링 지점을 효과적으로 결정하여 응답 표면을 계산한다. 응답 표면과 실제 정확한 결과값에는 항상 조금의 오류가 발생할 수 있다. 따라서 반응표면법에 의하여 최적화를 수행한 다음 반드시 검증과정을 거쳐야 한다. 반응표면을 형성하는 방법으로써 Kriging 방법을 사용하였다<sup>7)</sup>. 이 방법은 다항함수  $f(x)$ 와 평균, 표준편차, 공분산 함수로 구성된 가우스 랜덤 프로세서의 정규분포 함수  $Z(x)$  구성되어 있다.

$$y(x) = f(x) + Z(x) \quad (10)$$

N개의 샘플 데이터 포인트를 사용하여 보간하는 모델로써 공분산 행렬  $Z(x)$ 는 다음과 같다.

$$Cov[Z(x^i), Z(x^j)] = \sigma^2 R([r(x^i, x^j)]) \quad (11)$$

$R$ 과  $r(x^i, x^j)$ 는 각각 상관 행렬과, 공간 상관 함수이다. 상관함수  $r(x^i, x^j)$ 는 식 (12)와 같다.

$$r(x^i, x^j) = \exp \left( - \sum_{k=1}^M \theta_k |x_k^i - x_k^j|^2 \right) \quad (12)$$

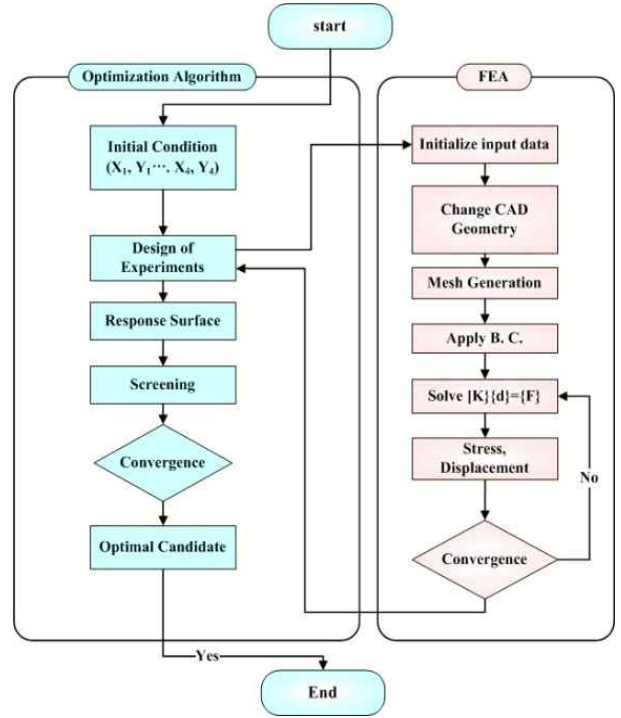


Fig. 2 Optimization process architecture including FEA module

여기서  $\xi$ 는 모델에 적합한 미지의 변수이며, M는 설계변수의 개수이다.

Fig. 2는 최적화를 위한 프로세스 흐름을 나타낸다. 최적화 알고리즘은 CAD 모델의 변경과 요소분할(mesh generation), 경계조건 부여, 해석 결과 획득의 절차를 반복하면서 해를 구하는데, 반응표면은 해를 구하기 위한 목적함수의 응답 함수이다. 반응표면법의 가장 큰 장점은 극대점을 효과적으로 찾을 수 있는 것이다. 즉 해석 시간과 비용을 절감할 수 있으면서 해의 정확도를 비교적 높게 유지할 수 있다. Kriging 방법은 비선형성이 강한 설계영역을 표현하는데 적합한 알고리즘으로서 특히 국부적인 최대, 최소치의 약점을 극복하는데 효과적이다.

## 2.3 모델링 및 최적화 해석

목재 적층복합재의 최적화 해석을 위한 모델링 및 경계조건을 정의 하였다. 목재 적층복합재 빔의 사이즈는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 두께 25.4 mm, 폭 555.8 mm, 길이 6,096.0 mm이다. 빔의 상단에서는 0.5 MPa의 분포하중이 가해지고 있으며 좌측 끝단 부분에서는 빔과 빔의 연결을 위한 볼트 홀이 4개 뚫려있다. 홀의 지름은 19.05 mm이다. 모델링의 대칭성으로 인하여 길이의 1/2만 해석에 사용되었다. Fig. 3과 같이 분포하중을 받고 있는 빔을 지지하기 위한 최적의 볼트 홀의 위치를 찾는 것이다. 볼트 체결을 위한 설계 영역이 정의 되었을 때 이 설계 영역 내에서 각 홀의 x, y

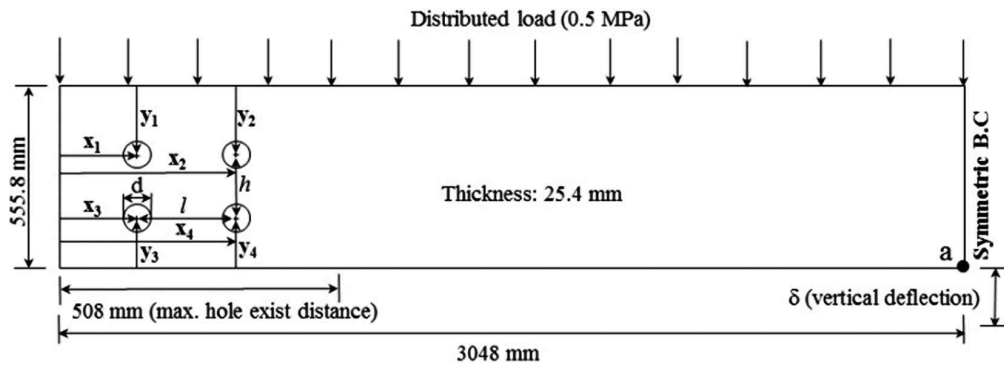


Fig. 3 Dimension and boundary conditions of the optimization analysis model

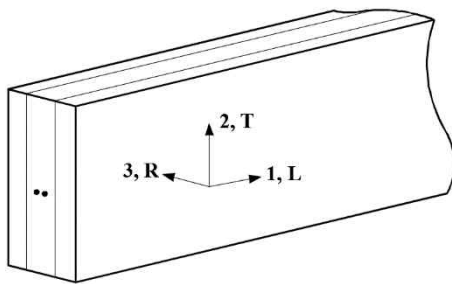


Fig. 4 Material coordinate definition of LVL

좌표를 최적화 해석을 통해서 구한다.

볼트 홀을 뚫을 수 있는 설계 영역은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 좌측의 508.0 mm × 555.8 mm (W×H) 영역이다. 적용된 목재 적층복합재의 재료 방향성 좌표계는 Fig. 4에 나타난 것과 같다. 길이 방향이 재료의 주 방향이며 폭과 두께 방향이 각각 2, 3 방향이 된다. 이 방향에 따른 물성치는 Table 1에 나타내었다. 여기서  $X_i, X_c$ 는 각각 재료의 1 방향의 인장과 압축 강도를 나타내며,  $S_{xy}$ 는 1-2 방향의 전단 강도를 나타낸다<sup>[10,11]</sup>.

볼트 홀의 위치 최적화를 수행함에 있어서 목적함수(object function)를 무엇으로 정의하느냐에 따라서 홀의 위치가 서로 다르게 계산된다. 본 연구에서는 볼트 홀의 위치 최적화 문제를 해석함에 있어서 4가지의 목적함수를 정의하고 각각의 목적함수에 대한 최적의 홀의 위치를 구하였다. 4가지의 목적함수는 각각, (1) Tsai-Wu 파괴기준에 의한 최대 파괴인덱스(maximum failure index), (2) 최대 von Mises 응력, (3) 수직방향의 최대 처짐(Fig. 3의 a 점에서의 처짐), (4) Tsai-Wu, von Mises 응력, 수직방향 최대 처짐을 통합한 다목적 함수이다. 복합재의 파괴이론은 그 특성에 따라서 다양하게 정의 되어있으며 대부분 변형에너지를 기준으로 계산되는 것이 많다. 변형 에너지는 다양한 응력 성분들을 전반적으로 고려하여 나타내기 때문에 복합재의 파괴상태를 비교적 정확하게 표현 할 수 있는 장점이 있다. 복합재 파괴 이론 중 가장 많이 사용되는 것 중의 하나가 Tsai-Wu 파괴이론이며 본 해석에서도 이 기준을 적용하여 볼트 홀의 최적화를 수행하였다. 3D 상태

Table 1 Material properties of LVL

| Material properties |           |                |       |
|---------------------|-----------|----------------|-------|
| $E_1$ (MPa)         | 13,789.51 | $Y_c$ (MPa)    | 25.86 |
| $E_2$ (MPa)         | 937.69    | $Z_t$ (MPa)    | 1.38  |
| $E_3$ (MPa)         | 1,406.53  | $Z_c$ (MPa)    | 10.34 |
| $G_{12}$ (MPa)      | 965.27    | $S_{xy}$ (MPa) | 6.21  |
| $G_{23}$ (MPa)      | 96.53     | $S_{yz}$ (MPa) | 27.58 |
| $G_{13}$ (MPa)      | 965.27    | $S_{xz}$ (MPa) | 6.89  |
| $X_t$ (MPa)         | 41.37     | $\nu_{12}$     | 0.335 |
| $X_c$ (MPa)         | 51.71     | $\nu_{23}$     | 0.362 |
| $Y_t$ (MPa)         | 1.03      | $\nu_{13}$     | 0.335 |

의 직교이방성 복합재 구조물에 대한 Tsai-Wu 파괴이론은 식 (13)과 같다. 식 (13)에서  $\sigma$ 와  $\tau$ 는 각각 수직응력(normal stress)과 전단응력(shear stress)을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 f = & \frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \frac{\sigma_3^2}{Z_t Z_c} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{xy}^2} + \frac{\tau_{13}^2}{S_{xz}^2} + \frac{\tau_{23}^2}{S_{yz}^2} \\
 & - 1.0 \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sqrt{X_t X_c Y_t Y_c}} - 1.0 \frac{\sigma_2 \sigma_3}{\sqrt{Y_t Y_c Z_t Z_c}} - 1.0 \frac{\sigma_1 \sigma_3}{\sqrt{X_t X_c Z_t Z_c}} \\
 & + \sigma_1 \left( \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \right) + \sigma_2 \left( \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \right) + \sigma_3 \left( \frac{1}{Z_t} - \frac{1}{Z_c} \right)
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

식 (13)의 Tsai-Wu 파괴함수는 3차원 복합재료의 파괴를 평가하기 위한 함수로써 이 함수의 값이 1에 도달하면 파괴가 되었다고 판단하는 것이다. 최적화 하기 위해서 최적화 모듈을 FEA 모듈과 결합하여 상호 해석 결과를 공유하면서 계산을 수행한다. Fig. 5는 CAD 형상과 FEA 해석을 위한 모델을 각각 나타낸다.

볼트 홀의 위치 최적화를 위해서 총 4가지의 경우를 해석하였으며, 각각의 경우에 대한 목적함수를 식 (14)에 정의하였다. 최적화의 방향은 식 (14)에 정의한 4가지의 목적함수를 최소화하기 위한 최적의 볼트 홀의 위치를 정하는 것이다. 특히 4번째 목적함수

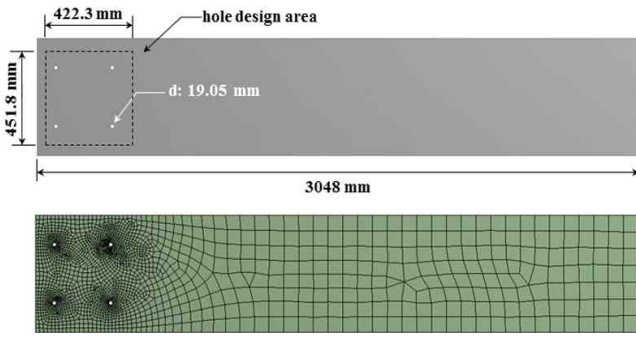


Fig. 5 Geometry and FEA model for optimization

(CASE\_IV)는 다목적 최적화를 수행하기 위한 다목적 함수로써 Tsai-Wu 인덱스, 응력, 처짐을 가중치 없이 똑 같은 비율로 합한 것이다. 최적화를 위한 설계 변수는 총 8개이며  $x_{1-4}, y_{1-4}$ 이다. 구속조건은 식 (16)에 나타내었다. 여기서  $l$ 과  $h$ 는 Fig. 3에 정의된 홀 간의 간격이다.

Object function

$$Case\_I : F_1(x_1, y_1, \dots, x_4, y_4) = Max. Tsai - Wu \text{ index. } (f_{max})$$

$$Case\_II : F_2(x_1, y_1, \dots, x_4, y_4) = \sigma_{max\_von Mises}$$

$$Case\_III : F_3(x_1, y_1, \dots, x_4, y_4) = \delta_v(a)$$

$$Case\_IV : F_4(x_1, y_1, \dots, x_4, y_4) = f_{max} + \delta_v(a) + \sigma_{max\_von Mises}$$

(14)

Design variables

$$x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4 \quad (15)$$

Constraints

- 1)  $76.2 \text{ mm} \leq x_1, x_2, x_3, x_4 \leq 498.5 \text{ mm}$
  - 2)  $38.1 \text{ mm} \leq y_1, y_2, y_3, y_4 \leq 264 \text{ mm}$
  - 3)  $1.5d \leq h \leq 16d$
  - 4)  $4d \leq l$
- (16)

2.4 해석 결과 및 검토

0.5 MPa의 분포하중을 받는 목재 적층복합재 빔의 체결을 위한 볼트 홀의 위치 최적화를 수행하였다. 하중을 최적으로 지지하기 위한 체결볼트의 위치 최적화를 위한 목적함수는 앞 절에서 언급한 바와 같이 (1) Tsai-Wu failure index (Case I), (2) von Mises stress (Case II), (3) displacement (Case III), (4) Tsai-Wu failure index + von Mises stress + displacement (Case IV)의 4가지 항목으로 설정하였다. 최적화의 방향은 각 목적함수의 최대 값을 최소화하기 위한 최적의 볼트 홀의 위치를 찾는 것이다. 이러한 설계 방향은 목재 빔이 파괴가 일어날 때까지 최대의 하중을

Table 2 Bolt hole position optimization results

|                              | Initial     | Case I          | Case II          | Case III      | Case IV                                 |
|------------------------------|-------------|-----------------|------------------|---------------|---|
|                              | -           | Tsai-Wu failure | von Mises stress | Max. disp.    | Multi-Obj (I+II+III)                    |
| $x_1$ (mm)                   | 95.3        | 77.0            | 78.1             | 130.0         | 78.7                                    |
| $y_1$ (mm)                   | 139.5       | 118.1           | 48.1             | 53.1          | 159.9                                   |
| $x_2$ (mm)                   | 381.0       | 349.6           | 360.6            | 497.7         | 414.9                                   |
| $y_2$ (mm)                   | 139.5       | 113.0           | 129.1            | 85.0          | 145.4                                   |
| $x_3$ (mm)                   | 95.3        | 81.2            | 87.8             | 76.8          | 124.5                                   |
| $y_3$ (mm)                   | 139.5       | 39.3            | 130.4            | 112.7         | 40.9                                    |
| $x_4$ (mm)                   | 381.0       | 426.2           | 474.1            | 490.2         | 462.6                                   |
| $y_4$ (mm)                   | 139.5       | 39.4            | 250.1            | 73.6          | 259.1                                   |
| Max. Tsai-Wu failure index   | <b>1.56</b> | <b>(1.23)</b>   | -                | -             | <b>(1.41)</b>                           |
| Max. von Mises stress (MPa)  | <b>7.35</b> | -               | <b>(5.36)</b>    | -             | <b>(6.18)</b>                           |
| Max. displacement (mm)       | <b>0.67</b> | -               | -                | <b>(0.50)</b> | <b>(0.62)</b>                           |
| Optimization enhancement (%) | -           | <b>21.1</b>     | <b>27.1</b>      | <b>25.4</b>   | <b>9.6</b><br><b>15.9</b><br><b>7.4</b> |

받을 수 있도록 볼트 홀의 위치를 최적으로 배치한다는 것을 의미한다.

최적화의 결과를 Table 2에 나타내었다. 각 경우의 최적화 결과를 초기의 설계 값과 비교하여 그 성능의 차이를 백분율로 표시하였다. 초기의 설계는 기존의 정형적인 직사각형(혹은 정사각형) 형태의 홀의 위치 배열을 의미하며 구체적인 좌표도 같이 표시하여 비교 하였다.

Table 2에 나타낸 초기 볼트 홀의 좌표와 최적화된 각 경우의 볼트 홀의 좌표 위치를 Fig. 6에 그림으로 나타내어 비교 하였다. 최적화된 볼트 홀은 기존의 정형화된 홀의 위치에 비해서 그 구조적 성능이 약 21-27 % 정도까지 향상되는 것을 알 수 있다. Tsai-Wu 파괴 인덱스의 경우는 기존의 설계에서는 1.56으로 나타났으나 최적화된 설계에서는 1.23으로 약 21.1% 정도 감소되었으며 이것은 감소된 만큼 설계 안전율이 높아진다는 것을 의미한다. 단순한 von Mises 응력만 가지고 판단할 경우는 최대 von Mises 응력이 약 27.1 % 감소되었고, 최대 처짐의 경우는 25.4 %의 처짐 감소가 나타났다. 이 3가지 기준을 모두 고려하여 계산한 다중 목적함수 최적화 (multi-objective function optimization)의 결과는 최대 Tsai-Wu 파괴 인덱스는 9.6 %, 최대 von Mises 응력은 15.9 %, 최대 처짐은 7.4 %가 각각 감소되었다.



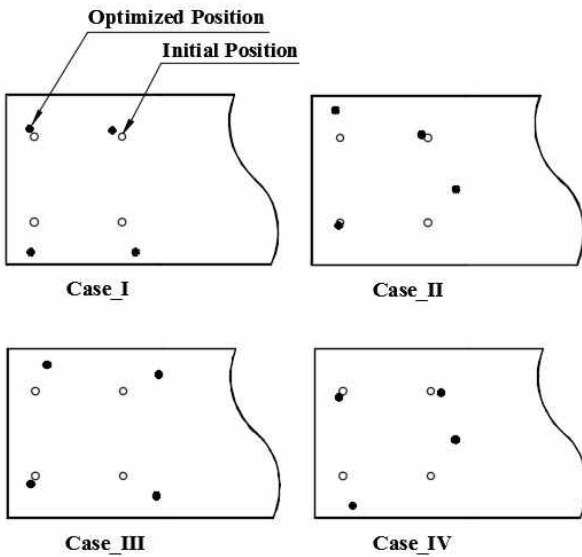


Fig. 6 Comparison of optimized results with initial hole positions

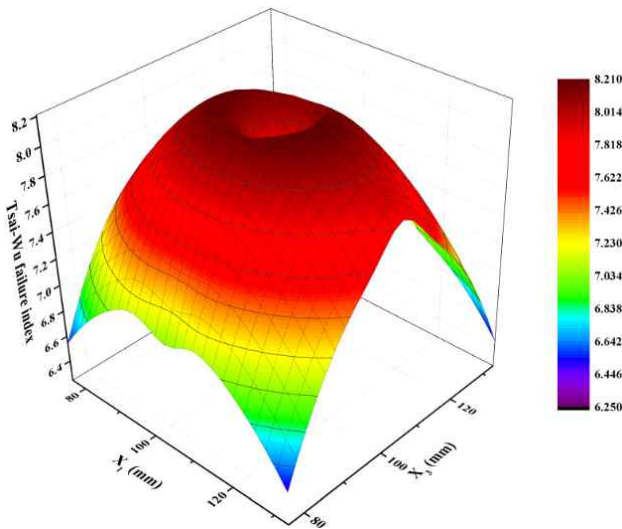


Fig. 7 Response surface of Tsai-Wu failure index w.r.t.  $x_1$ ,  $x_3$

본 최적화 해석 문제에 있어서 총 8개의 설계 변수를 사용하였다. 4개의 볼트 홀의 위치를 결정하기 위한 각  $x$ ,  $y$ 좌표이다. 이 설계 변수들은 각각 목적함수에 대한 일정한 함수 관계를 가지고 있다. 이것이 반응표면이며 Fig. 7에 설계 변수  $x_1$ 과  $x_3$ 에 대한 Tsai-Wu 목적함수의 반응 표면을 나타내었다. 설계변수가 많을 경우는 문제가 매우 복잡해지며 해 또한 찾기가 매우 어려워진다. Fig. 8은 목적함수를 계산하기 위한 FEA 해석 결과이다. 본 최적화 예에서는 목적함수를 계산하기 위하여 FEA 해석을 적용하였고 FEA 해석 결과를 직접 최적화 알고리즘에서 넘겨 받아서 처리하였다. 최종단계의 극대/극소점을 찾는 것은 확률론적 최적화 방법<sup>[12]</sup>의 하나인 유전자 알고리즘을 사용하였다.

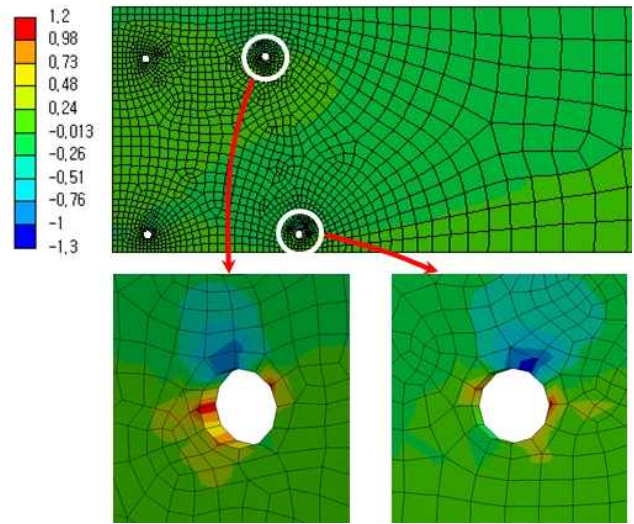


Fig. 8 FEA results of Tsai-Wu failure index after optimized

### 3. 결론

기존의 많은 최적화 문제가 등방성 재료에 대해서 수행되었다. 그러나 본 연구에서는 목재 적층복합재 빔에 대해서 체결을 위한 볼트 홀의 위치를 최적화 하는 문제를 다루었다. 적층복합재의 경우 다양한 응력 성분 및 재료의 변형 거동이 복잡하기 때문에 최적화에 많은 어려움이 있다. 이러한 복잡한 수치해석을 극복하기 위하여 최적화 알고리즘을 FEA, CAD 모듈과 결합하여 최적해석을 수행하였다. 파괴, 처짐, 응력 등을 목적함수로 정의하여 볼트 홀의 위치 최적화를 계산하였다. 최적화의 결과는 기존의 정형적인 볼트 홀의 위치에 대한 구조적 성능에 비해서 약 21-27% 정도의 성능이 향상되었다. 본 연구에서 수행된 최적화 방법, 기법 및 수치해석 절차는 차후 복합재 빔의 체결을 위한 최적의 볼트 홀의 위치를 결정하는데 유용한 자료가 될 것이다.

### 후 기

이 논문은 2016 학년도 안동대학교 연구비에 의하여 연구 되었습니다.

### References

- [1] Toussaint, E., Durif, S., Bouchair, A., Grediac, M., 2017, Strain Measurements and Analyses Around the Bolt Holes of Structural Steel Plate Connections Using Full-Field Measurements, Engineering Structure, 131:15 148-162.
- [2] Soutis, C., Fleck, N. A., Curtis, P. T., 1991, Hole-Hole Interaction in Carbon Fiber/Epoxy Laminates Under Uniaxial Compression,

- Composites, 22:1 31-38.
- [3] Yeh, H. Y., Le, M. D., 1993, Mutual Influence about Stress Concentration of Holes in Composite Plates, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 12 37-37.
- [4] McCarthy, C. T., Gray, P. J., 2011, An Analytical Model for the Prediction of Load Distribution in Highly Torqued Multi-bolt Composite Joints, *Composite Structures*, 93 287-298.
- [5] Ireman, T., 1998, Three-Dimensional Stress Analysis of bolted Single-lap Composite Joints *Composite Structures*, 43:3 195-216.
- [6] Lee, H. W., 2016, Structural Optimization of a Light-weight Manhole Cover Using FEM and Response Surface Method, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 25:6 462-470.
- [7] ANSYS, 2017, Users Manual, Ansys Engineering Inc.
- [8] Cho, H. K., 2013, Design Optimization of Laminated Composite Plates with Static and Dynamic Considerations in Hygrothermal Environments, *Int. J. of Precision Eng. and Manuf.*, 14:8 1387-1394.
- [9] Jones, R. M., 1999, *Mechanics of Composite Materials*, Brunner-Routledge, New York & London.
- [10] Kunes, R. H., 1968, Strength and Elastic Properties of Wood, *Forest Products Journal*, 18:1 65-72.
- [11] Laufenberg, T., 1985, Optimization of Composite Wood Structural Components: Processing and Design Choices, *Proceedings of the 19<sup>th</sup> Washington State University International Particle Board/Composite Materials Symposium*, 77-94.
- [12] Lee, J. W., 2016, Swarm Intelligence-based Optimal Design for Selecting the Kinematic Parameters of a Manipulator According to the Desired Task Space Trajectory, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 26:6 504-510.