

# 최적 단면 치수를 가지는 복합재료 중공빔의 설계

## Design of Cylindrical Composite Shell for Optimal Dimensions

최 용 진\*

Choi, Yong-Jin

전 흥 재\*

Chun, Heong-Jae

박 혁 성\*\*

Park, Hyuk-Sung

(논문접수일 : 2004년 7월 30일 ; 심사종료일 : 2005년 9월 7일)

### 요 지

본 연구에서는 휠체어의 경량화를 위해 기존의 강관으로 제작된 휠체어를 피로파괴 및 손상에 강하고 방진 특성이 우수하며 유지 및 보수가 용이한 복합재료 중공빔으로 구성된 복합재료 휠체어로 대체하기 위하여 복합재료 중공빔 이론과 유전자 알고리즘을 적용하여 최적화된 등가 강성을 가지는 복합재료 중공빔의 최적의 단면 치수를 제시하였다. 제시한 최적의 단면치수를 가지는 복합재료 중공빔으로 구성된 휠체어 전체 구조에 Tsai-Wu 파손이론을 이용해 파하중이 가해지는 경우에 대하여 구조해석을 수행한 결과, 휠체어의 파손 유무를 나타내는 Maximum Tsai-Wu Failure Criteria Index가 파손이 발생하는 1.00보다 현저히 낮은  $0.192 \times 10^{-3}$ 을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 또한 기존의 강관을 동일한 강성을 가지는 복합재료 중공빔으로 대체하였을 경우 중공빔 중량을 최대 45%감소하는 효과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다.

**핵심용어** : 복합재료 중공빔, 유전자 알고리즘, 최적설계변수

### Abstract

In this study, the problem formulation and solution technique using genetic algorithms for design optimization of laminate composite cylindrical beam section are presented. The hollow cylindrical beams are usually used in the wheel chair. If the weight of wheel chair is reduced, it will lead to huge improvement in passenger's mobility and comfort. In this context, the replacement of steel by high performance and light weight composite material along with optimal design will be a good contribution in the process of weight reduction of a wheel chair. An artificial genetics approach for the design optimization of hollow cylindrical composite beam is presented. On applying the genetic algorithm, the optimal dimensions of hollow cylindrical composite beams which have equivalent rigidities to those of corresponding hollow cylindrical steel beams are obtained. Also structural analysis is conducted on the entire wheel chair structure incorporating Tsai-Wu failure criteria. The maximum Tsai-Wu failure criteria index is  $0.192 \times 10^{-3}$  which is much less than value of 1.00 indicating no failure is observed under excessive loading condition. It is found that the substitution of steel by composite material could reduce the weight of wheel chair up to 45%.

**keywords** : composite cylindrical beam, genetic algorithm, optimal dimension

## 1. 서 론

현재 항공, 우주 분야 및 자동차 스포츠 분야까지 다양한 분야에 사용이 되어 지고 있는 복합재료는 피로파괴 및 손상에 강하고 적층각 및 적층순서, 적층판의 두께 등을 적절하게 조절하여 설계자의 요구조건에 적합한 역학적 성질을 갖도록 제조가 가능한 장점을 가지고 있다(Daniel 등, 1994). 섬유강화 복합재료를 구조재로 사용하게 되면

철제 구조물이나 알루미늄 구조물보다 같은 강도를 유지하면서도 그 무게를 현저하게 감소시킬 수 있는 특징을 가진다. 현재는 이러한 섬유강화 복합재료를 이용하여 경량 구조물을 설계하는 연구가 활발하게 진행되고 있다.

휠체어의 주요 부품으로서 중공빔은 휠체어의 설계에 있어서 내구성과 사용자의 승차감을 포함하는 휠체어 전체의 거동에 심각한 영향을 미치게 된다. 또한 휠체어에서 중공빔은 휠체어의 1차 구조물인 프레임에 사용되며 중량면에

† 책임저자, 연세대학교 공과대학 기계공학과 석사과정  
전화: 02-2123-4827 ; Fax: 02-362-2736  
E-mail: zahzah@yonsei.ac.kr

\* 정희원 · 연세대학교 공과대학 기계공학부 부교수

\*\* (주)휴모봇

• 이 논문에 대한 토론을 2005년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2005년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

서 약 50%이상을 차지하고 있다. 따라서 이러한 월체어용 원통형 철제 중공빔을 동일한 강성을 가지는 원통형 복합재료 중공빔으로 대체하게 된다면 월체어 전체 중량에 대하여 경량화를 실현할 수 있게 된다.

복합재료 구조물의 효과적인 사용을 위한 구조물의 최적 설계는 여러 해 동안 연구의 대상이 되어 왔다. 특히, Kam과 Chang은 적층판에 대하여 최대의 강성을 지니는 최적 적층각도를 결정하는 최적화를 수행하였고(Kam 등, 1992), Schmit와 Farshi는 주어진 적층각도에 대하여 적층판의 중량을 최소화 하기 위하여 두께를 설계변수로 설정하여 최적화를 수행하였다(Schmit 등, 1977). 그러나, 이러한 최적 설계기법에 관한 연구는 평판 형태의 구조물에 제한되어 왔으며 항공기의 기체, 월체어, 파이프 등과 같은 쉘 형태의 구조물의 최적 설계기법에 대한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 월체어의 경량화를 달성하기 위해 철제 중공빔을 대체하는 복합재료 중공빔의 설계를 위하여 복합재료의 쉘이론을 적용하여 철제 중공빔과 동등 강성을 갖는 복합재료 중공빔의 단면 치수 최적화를 목적으로 하고 최적화된 단면치수를 이용하여 설계된 월체어 전체 구조물의 안전성을 과하중이 가해지는 경우 복합재료의 파손 이론인 Tsai-Wu Failure Criteria Index 을 이용하여 구조적 안전성을 확인 하였다.

## 2. 이론 및 해석

### 2.1 원통형 복합재료 빔 이론

복합재료를 적용함에 있어서 종래의 금속재료를 대체하기 위해서는 평판형태의 구조물뿐만 아니라 쉘 형태의 구조물에 대하여 적용이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 월체어의 부품으로 사용되어 지는 원통형 복합재료 중공빔을 수학적으로 모델링하기 위하여 다음과 같은 복합재료 쉘 이론을 적용하였다

복합재료 쉘 이론을 적용하기 위하여 본 연구에서는 그림 1 과 같이 상호 연관된 2개의 좌표계가 사용되었다.

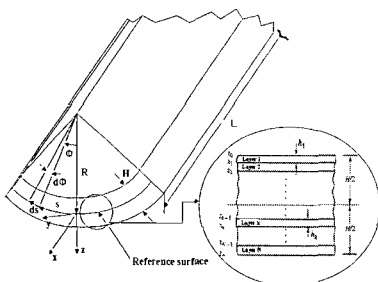


그림 1 원통형 쉘의 좌표계와 변수

먼저, 빔의 길이 방향을 x축으로 설정하고, 단면이 y와 z축으로 구성되어 지는 직교 좌표계 (Cartesian Coordinate) (x, y, z)이다. 또한 쉘의 국부 좌표계를 표현하는 (x, s, r) 좌표계는 빔의 길이 방향 좌표계인 x좌표계, 쉘의 원주 방향을 따라 형성되는 s좌표계, 그리고 쉘의 반경을 따라서 형성되는 r좌표계이다. 그리고 그림 1에서 보여지는 원통형 쉘을 정의하는 변수들은 기준면 곡률의 반지름을 나타내는 R, 쉘의 두께를 표시하는 H, 그리고 빔의 길이를 나타내는 L로 구성되어 진다. 그리고, 본 연구에서 설정한 원통형 쉘의 모델은 두께가 얇아서 z/r이 작은 얇은 원통형 쉘에 대한 식을 Donell의 가정을 이용하여 구하였으며, 그러한 기본 가정은 다음과 같다(Donell., 1993; Whitney., 1993).

- (1) 원통형 복합재료 쉘의 단면은 그 면 내에서 변형되지 않는다.
- (2) Kirchhoff의 가정은 원통형 박벽 복합재료 쉘에서 유효하다.

이러한 상호 연관된 두개의 좌표계와 기본 가정에 의하여 일반적인 변위장을 표현할 수 있다.

그런데 원통형 쉘의 R은 일정하고, 충분히 얇다고 가정할 수 있으며 두께방향 z가 곡률 반경에 비하여 작으므로 z/R과 H/R은 무시할 수 있다. 따라서 원통형 쉘의 좌표계 (x, s, z) 에 대한 변위를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(x, s, z) = u^0(x, s) - z \frac{\partial w^0(x, s)}{\partial x} \quad (1)$$

$$v(x, s, z) = v^0(x, s) - z \frac{\partial w^0(x, s)}{\partial s} \quad (2)$$

$$w(x, s, z) = w^0(x, s) \quad (3)$$

여기서, u, v, w는 각각 원통형 좌표계 x, s, z방향의 변위를 나타내고, u<sup>0</sup>, v<sup>0</sup>, w<sup>0</sup>는 각각 기준면에서의 원통형 좌표계 x, s, z 방향의 변위를 나타낸다.

그리고 원통형 좌표계에 따르는 변형율을 나타내면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_x(x, s, r) = \frac{\partial u(x, s, r)}{\partial x} \quad (4)$$

$$\epsilon_s(x, s, r) = \frac{\partial v(x, s, r)}{\partial s} + \frac{w(x, s, r)}{r} \quad (5)$$

$$\epsilon_r(x, s, r) = \frac{\partial w(x, s, r)}{\partial r} \quad (6)$$

$$\gamma_{sr}(x, s, r) = \frac{\partial w(x, s, r)}{\partial s} + \frac{\partial v(x, s, r)}{\partial r} - \frac{v(x, s, r)}{r} \quad (7)$$

$$\gamma_{xr}(x, s, r) = \frac{\partial w(x, s, z)}{\partial x} + \frac{\partial u(x, s, r)}{\partial r} \quad (8)$$

$$\gamma_{xs}(x, s, r) = \frac{\partial v(x, s, r)}{\partial x} + \frac{\partial u(x, s, r)}{\partial s} \quad (9)$$

그런데,  $R$ 이 일정하고 쉘의 단면은 충분히 얇다고 가정하고 있으므로,  $R$ 과  $r$  그리고,  $z$ 의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

$$r = R + z = R(1 + \frac{z}{R}) \approx R \quad (10)$$

$$dr = dz \quad (11)$$

원통형 쉘의 변위의 식 (1)~(3)을 원통형 좌표계의 변형을 식 (4)~(9)에 대입하면 다음과 같은 기준면에서의 변위-변형을 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_x(x, s, z) &= \frac{\partial u^\circ(x, s)}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w^\circ(x, s)}{\partial x^2} \\ &= \epsilon_x^\circ(x, s) + z\kappa_x^\circ(x, s) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_s(x, s, z) &= \frac{\partial v^\circ(x, s)}{\partial s} + \frac{w^\circ(x, s)}{R} \\ &\quad - z \frac{\partial^2 w^\circ(x, s)}{\partial s^2} \\ &= \epsilon_s^\circ(x, s) + z\kappa_s^\circ(x, s) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\epsilon_z(x, s, z) = \frac{\partial w^\circ(x, s)}{\partial z} = 0 \quad (14)$$

$$\gamma_{sz}(x, s, z) = -\frac{1}{R}(v^\circ(x, s) - z \frac{\partial w^\circ(x, s)}{\partial s}) \neq 0 \quad (15)$$

$$\gamma_{xz}(x, s, z) = \frac{\partial w^\circ(x, s)}{\partial x} - \frac{\partial w^\circ(x, s)}{\partial x} = 0 \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{xs}(x, s, z) &= \frac{\partial v^\circ(x, s)}{\partial x} + \frac{\partial u^\circ(x, s)}{\partial s} \\ &\quad - 2 \frac{\partial^2 w^\circ(x, s)}{\partial x \partial s} \\ &= \gamma_{xs}^\circ(x, s) + z\kappa_{xs}^\circ(x, s) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서,  $\epsilon_x, \epsilon_s, \gamma_{sz}, \gamma_{xs}, \gamma_{xz}$ 는 각각  $x, s, z$ 에 대한 변형을 나타낸다. 그리고,  $\epsilon_x^\circ, \epsilon_s^\circ, \gamma_{sz}^\circ, \gamma_{xs}^\circ, \gamma_{xz}^\circ, \kappa_x^\circ, \kappa_s^\circ, \kappa_{sz}^\circ$ 는 각각 기준면에서의  $x, s, z$ 에 대한 변형률과 곡률을 나타내며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\epsilon_x^\circ(x, s) = \frac{\partial u^\circ(x, s)}{\partial x} \quad (18)$$

$$\epsilon_s^\circ(x, s) = \frac{\partial v^\circ(x, s)}{\partial s} + \frac{w^\circ(x, s)}{R} \quad (19)$$

$$\gamma_{xs}^\circ(x, s) = \frac{\partial v^\circ(x, s)}{\partial x} + \frac{\partial u^\circ(x, s)}{\partial s} \quad (20)$$

$$\kappa_x^\circ(x, s) = -\frac{\partial^2 w^\circ(x, s)}{\partial x^2} \quad (21)$$

$$\kappa_s^\circ(x, s) = -\frac{\partial^2 w^\circ(x, s)}{\partial s^2} \quad (22)$$

$$\kappa_{xs}^\circ(x, s) = -2 \frac{\partial^2 w^\circ(x, s)}{\partial x \partial s} \quad (23)$$

그리고, 복합재료 적층 쉘의  $k$ 번째 응력-변형을 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_s \\ \tau_{xs} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^\circ \\ \epsilon_s^\circ \\ \gamma_{xs}^\circ \end{Bmatrix}_k \quad (24)$$

여기서,  $\overline{Q}_{ij}$ 는 축소된 강성행렬을 나타낸다(Lam 등, 1995).

다시 식 (12)~(17)을 식 (24)에 대입하여 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_s \\ \tau_{xs} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \overline{Q}_{11} & \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{16} \\ \overline{Q}_{12} & \overline{Q}_{22} & \overline{Q}_{26} \\ \overline{Q}_{16} & \overline{Q}_{26} & \overline{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x^\circ + z\kappa_x^\circ \\ \epsilon_s^\circ + z\kappa_s^\circ \\ \gamma_{xs}^\circ + z\kappa_{xs}^\circ \end{Bmatrix}_k \quad (25)$$

따라서, 원통형 빔의 축방향의 단면적  $A$ 에 대하여 적분된  $x, s, z$ 방향의 힘과 모멘트는 다음과 같이 표현되어진다.

$$N_x = \int_A \sigma_x dz \quad (26)$$

$$N_s = \int_A \sigma_s dz \quad (27)$$

$$N_{xs} = \int_A \tau_{xs} dz \quad (28)$$

$$M_x = \int_A z \sigma_x dz \quad (29)$$

$$M_s = \int_A z \sigma_s dz \quad (30)$$

$$M_{x_s} = \int_A z \sigma_{x_s} dz \quad (31)$$

식 (25)에서의 응력 변형을 관계를 식 (26)~(31)에 대입하면 힘 ( $N_x, N_s, N_{x_s}$ )과 모멘트 ( $M_x, M_s, M_{x_s}$ )는 일반화된 변형률에 관한 식으로 나타낼 수 있다. 따라서, 원통형 복합재료 보의 구성방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_s \\ N_{x_s} \\ M_x \\ M_s \\ M_{x_s} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_s \\ \gamma_{x_s} \\ \kappa_x \\ \kappa_s \\ \kappa_{x_s} \end{Bmatrix} \quad (32)$$

여기서,  $A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}$ 는 다음과 같이 정의 된다(Wu 등, 1992).

$$A_{ij} = \int \overline{Q}_{ij} dz \quad (33)$$

$$B_{ij} = \int \overline{Q}_{ij} z dz \quad (34)$$

$$D_{ij} = \int \overline{Q}_{ij} z^2 dz \quad (35)$$

$K_{ij}$ 는 복합재료 원통형 빔의 강성을 나타내며,  $(EA)_c, (EI_s)_c, (GJ)_c$ 은 각각 복합재료의 축방향 강성과  $s$ 축에 대한 굽힘 강성, 비틀림 강성이며, 다음과 같이 표현된다.

$$(EA)_c = \int_s A_{11} ds = K_{11} \quad (36)$$

$$(EI_s)_c = \int_s D_{22} ds = K_{55} \quad (37)$$

$$(GJ)_c = 4 \int_s D_{66} ds = 4K_{66} \quad (38)$$

### 2.2 유전자 알고리즘

본 연구에서의 복합재료 원통형 빔의 단면치수 최적화에 적용된 유전자 알고리즘은 생물진화 원리로부터 착안 알고리즘으로 확률적 탐색이나 학습 및 최적화를 위한 기법이

라고 할 수 있으며, 해공간을 확률적으로 탐색함과 동시에 개체간의 체계적 정보교환을 통하여 주위 환경에 가장 적절한 해를 구하게 된다(Gen 등, 1996). 이러한 유전자 알고리즘에서 집단은 다수의 염색체로 형성되고 염색체는 문제공간 상의 한 점(잠정적인 해)을 대표하게 되며 집단을 유지함으로써 여러 방향으로 탐색을 추구하게 된다.

유전자 알고리즘의 해공간 탐색 과정은 먼저 초기 집단이 형성되고 염색체들의 강점과 약점이 적합도 항목으로 평가된다. 이 때 각 염색체는 복호화 되어 목적함수를 제공하고 이로부터 적합도가 계산된다. 재생산은 적합도 값에 따라 더 적합한 개체들을 선택하여 다음 세대의 집단을 형성하고, 교배는 개체들 사이의 정보교환이 가능하게 하며, 돌연변이는 유전자를 임의로 변경하여 집단에 변화를 도입한다. 이와 같이 한 세대동안 재생산, 교배, 돌연변이를 거치면서 새롭게 형성된 집단은 다시 평가되고 앞서 수행한 일련의 연산과정은 최적의 해가 발견될 때까지 반복된다.

그림 2는 유전자 알고리즘을 이용한 원통형 복합재료 중공빔의 최적화 과정의 체계도를 나타내고 있다.

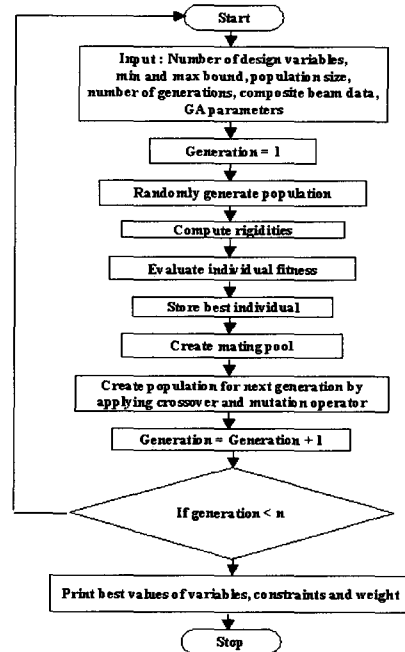


그림 2 복합재료 중공빔의 최적화 체계도

본 연구에서는 복합재료의 쉘이론을 적용하여, 횡채어 및 일반 구조용 강관의 원통형 중공빔의 최적 설계를 위해서 설계변수들의 전역해(Global Solution)를 구하는데, 유리한 실수형 유전자 알고리즘 (Real-coded Genetic Algorithm)을 사용하였으며, 제약조건은 벌점함수(Penalty

Function)를 적용하여 처리하였으며, 최적화를 위하여 Matlab(Ver. 5.4)을 사용하여 알고리즘을 구성하였다.

### 2.3 최적화 문제의 정식화

본 연구에서는 원통형 철제 중공빔을 대체할 수 있는 원통형 복합재료 중공빔의 단면 치수를 결정하기 위하여 목적함수를 원통형 철제 중공빔과 원통형 복합재료 중공빔의 굽힘강성의 차이가 최소화하도록 설정하였으며, 비틀림 강성의 차이를 최소화하는 실수형 유전 알고리즘을 사용하여  $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_ns$ 의 적층구조를 가지는 원통형 복합재료 중공빔에 대하여 최적화를 수행하였다. 또한 원통형 복합재료 중공빔의 두께( $t$ )는 원주방향으로 일정하고 그림 3에 나타나 있는 원통형 복합재료 중공빔의 단면형상에서 두께( $t$ )와 외경( $D$ )를 설계변수로 설정하였으며, 표 3에 나타나 있는 규격의 원통형 철제 중공빔과 같은 굽힘 강성을 갖도록 설계하였다. 또한 제약조건은 최적화된 설계변수를 휠체어 혹은 일반 구조용 중공빔 등의 구조물에 적용하였을 때 경량화 효과를 최대화 하고, 최적화를 수행하여 나타난 설계변수들이 실제 휠체어 프레임이나 부품 및 구조물에의 적용이 용이하게 하기 위하여 복합재료 보의 외경이 두께의 여섯 배가 넘지 않도록 설정하여 최적화를 수행하였다.

다음은 원통형 복합재료 중공빔의 최적화를 수행하기 위한 목적함수와 제약조건을 표현하고 있다.

$$\text{Minimize } \frac{|(EI_s)_c - (EI_s)_s|}{(EI_s)_s}$$

$$\text{subject to } (GJ)_c \geq (GJ)_s$$

$$D \geq 6t$$

$$D, t \geq 0$$

여기서,  $EI$ 는 보의 굽힘강성 (Flexural Rigidities)을,  $GJ$ 는 보의 비틀림강성 (Torsional Rigidities)을 각각 나타낸다. 또한 아래첨자  $s$ 는 Steel을 나타내며  $c$ 는 Composite을 나타내고, 각 ply의 두께는 0.66mm 이다.

원통형 철제 중공빔을 대체하는 원통형 복합재료 중공빔의 최적화 설계를 위하여 복합재료는 S-glass Epoxy를 사용하였으며 재료의 물성치는 아래 표 1과 같으며, 최적화된 원통형 복합재료 중공빔을 적용한 휠체어 구조물의 파손여부를 결정하기 위하여 Tsai-Wu 파손이론을 적용하였다. 그리고, Tsai-Wu 파손이론을 적용하기 위하여 표 2와 같은 재료의 강도를 적용하였다.

표 1 재료의 물성치

재료의 물성	Modulus (GPa)	Shear Modulus (GPa)	Poisson's ratio	Density (g/m <sup>3</sup> )
Steel	210	80.8	0.3	7830
S-glass / Epoxy	43 (Longitudinal) 8.9 (Transverse)	4.5 (In-plane)	0.27 (Major) 0.06 (Minor)	2000

표 2 복합재료의 강도

Tensile Longitudinal Strength (MPa)	Tensile Transverse Strength (MPa)	Compressive Longitudinal Strength (MPa)	Compressive Transverse Strength (MPa)
850.7	45.1	451	119.9
In-Plane Shear Strength (MPa)		Out-of-Plane Shear Strength (MPa)	
38.1		58.9	

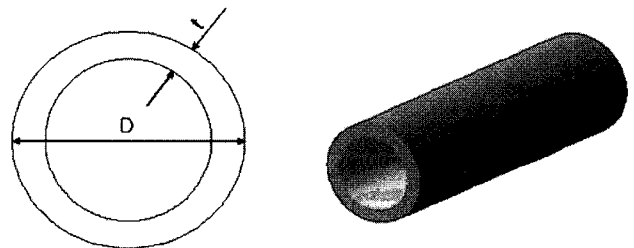


그림 3 원통형 복합재료 중공빔의 단면 및 형상

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 원통형 복합재료 중공빔의 이론을 적용하여 철제 중공빔과 동일한 강성을 갖는 단면 치수의 최적화를 Matlab을 이용하여 수행하였고, 사용된 실수형 유전 알고리즘의 경우 초기 집단은 설계변수의 상·하한 값 내에서 무작위로 개체를 생성하게 되고, 이를 반복 함으로써 최적화를 수행하게 된다. 또한 최적화 수행과정 동안 생성 개체의 단순성을 극복하기 위하여 돌연 변이를 생성하게 되고, 집단의 단순성을 극복하게 된다. 본 연구의 최적화를 수행하는 과정에 있어서 설계집단의 크기는 POP=100, 세대수는 NGEN=500이며, 4개의 중공빔의 단면치수에 따르는 외경 및 두께의 설계변수의 상한 및 하한 값들을 각각 설정하였다. 또한 원통형 중공빔 구조물의 경우 비틀림 하중에 비하여 굽힘 하중이 더 큰 비중을 차지하고 있으므로 굽힘강성의 차이를 최소화 하도록 목적함수를 설

정하였다.

이를 통하여 실수형 유전 알고리즘에 따르는 다양한 원통형 복합재료 중공빔에 대하여 그림 4, 5, 6, 7에서는 최적화 값을 도출하기 위하여 세대변화에 따른 각 설계변수의 변화를 실제 휠체어 및 1차 구조물의 구조재로 사용되어 지는 치수로 표 3에서 나타낸 치수에 따라 최적화 과정을 수행하였으며, 각 최적화 값의 수렴과정에서  $x$ 축은 빔의 세대수의 변화를,  $y$ 축은 두께변화 및 외경의 변화를 나타내고 있다. 그리고 각 세대의 증가에 따라 두께 및 외경의 설계변수가 일정한 값으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 또한 실수형 유전 알고리즘에 의하여 수행되어진 최적화 작업에 의하여 도출된 최종 설계변수의 단면 형상과 그에 따르는 원통형 복합재료 중공빔과 원통형 철제 중공빔의 굽힘 강성, 비틀림 강성의 값을 비교하여 표 4에 나타내었다.

결과에서 원통형 복합재료 중공빔의 굽힘 강성은 원통형 철제 중공빔과 비교하여 볼 때 비틀림 강성에 대하여 동일한 값을 보이는 것을 알 수 있으며, 이러한 굽힘 강성의 차이로 인하여 동일한 굽힘 강성을 갖는 원통형 복합재료 중공빔의 단면치수는 증가함을 알 수 있다. 또한 원통형

철제 중공빔에 비하여 총 중량 면에서 15~45%의 경량화 효과를 확인할 수 있었다.

표 3 최종 설계변수의 단면 형상

외경(D, mm)		두께(t, mm)		n (ply 갯수)
Steel	복합재료	Steel	복합재료	
24	31.1	2	6.6	5
48	60.7	3	9.24	7
60	78.1	4	10.56	8
101	119.6	4	14.52	10

표 4 원통형 복합재료 중공빔과 철제 중공빔의 강성비교

$EI_s(10^{-3} Pa \cdot m^4)$		$GJ(10^{-3} Pa \cdot m^4)$		경량화 효과 (%)
Steel	복합재료	Steel	복합재료	
$1.77 \times 10^6$	$1.77 \times 10^6$	$1.36 \times 10^6$	$2.57 \times 10^6$	15
$2.26 \times 10^7$	$2.26 \times 10^7$	$1.74 \times 10^7$	$3.29 \times 10^7$	39
$5.82 \times 10^7$	$5.82 \times 10^7$	$4.47 \times 10^7$	$8.47 \times 10^7$	19
$3.01 \times 10^8$	$3.01 \times 10^8$	$2.32 \times 10^8$	$4.38 \times 10^8$	45

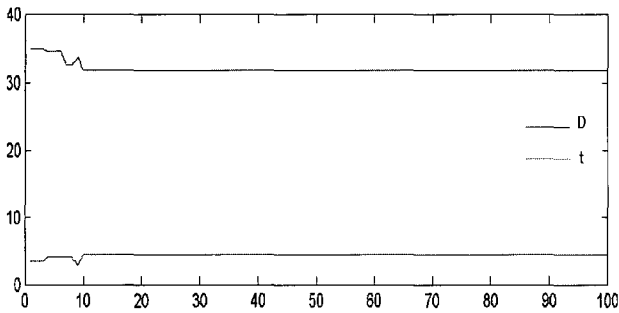


그림 4 외경 24mm 두께 2mm 철제 중공빔에 대한 최적화 결과값

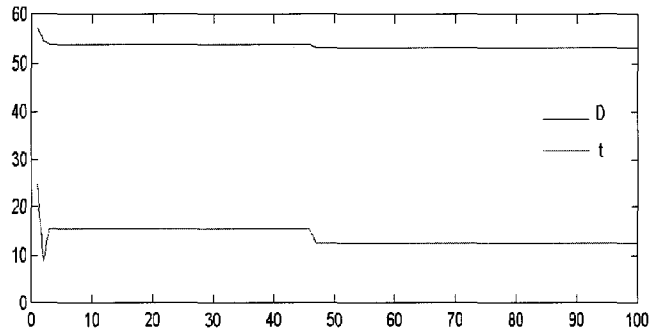


그림 5 외경 48mm 두께 3mm 철제 중공빔에 대한 최적화 결과값

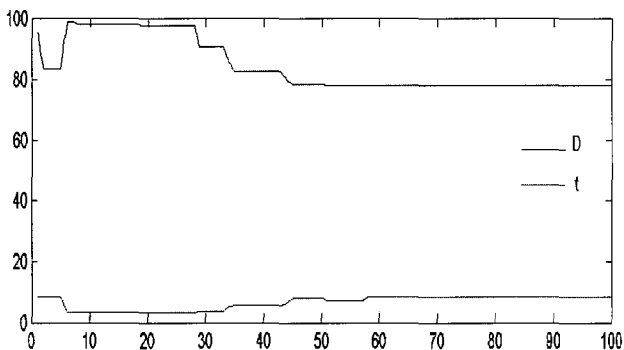


그림 6 외경 60mm 두께 4mm 철제 중공빔에 대한 최적화 결과값

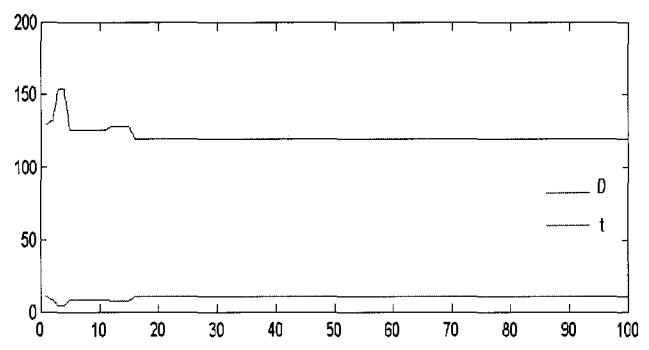


그림 7 외경 101mm 두께 4mm 철제 중공빔에 대한 최적화 결과값

외경 24mm, 두께 2mm의 원통형 철제 중공빔으로 제작된 실제 휠체어 모델을 외경 31.1mm, 두께 6mm의 원통형 복합재료 중공빔으로 구성된 복합재료 휠체어 모델에 적용하여 휠체어 구조물의 안정성 여부를 검증하였다. 이를 위하여 전체 프레임과 부품의 하중 조건 및 경계조건을 성인남자의 일반적 체중인 80kg에 해당하는 하중을 초과하여 102kg에 해당하는 1000kN의 하중을 휠체어 시트가 프레임에 결합되는 네 곳의 부위에 250kN의 집중하중으로 설정하였으며, 프레임과 휠의 결합부분에서 반력이 작용하도록 설정하였다. 이를 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 8-절점 solid 46 layer요소를 적용한 구조해석을 실시하였으며, 그림 8은 본 연구에서 구현한 결과값을 적용한 휠체어 프레임의 3-D모델링과 유한요소해석 모델을 나타내고 있다.

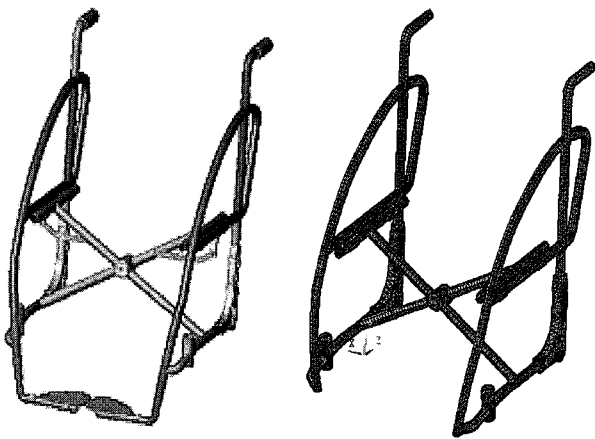


그림 8 휠체어 프레임의 3-D 모델링 및 유한요소해석 모델

그림 9는 원통형 복합재료 중공빔의 파손의 기준을 적용하기 위하여 Tsai-Wu 파손이론을 적용하여 유한요소해석 결과값을 도출한 것이며, 그림 10은 원통형 철제 중

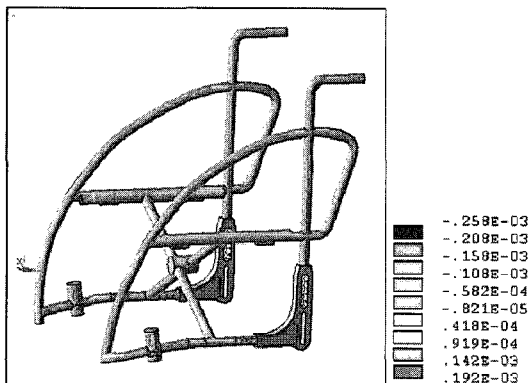


그림 9 Tsai-Wu에 의한 유한요소 해석 결과값

공빔의 응력 분포값을 비교한 것이다. 하중 1000kN에서 본 연구에서 구현한 원통형 복합재료 중공빔의 최적화 결과 값을 적용한 휠체어 구조물의 파손여부를 결정하기 위하여 유한요소해석을 수행한 결과 Maximum Tsai-Wu Failure Criteria Index값은 파손이 발생하는 1의 값보다 현저히 낮은 값인  $0.192 \times 10^{-3}$ 을 나타낸다. 원통형 철제 중공빔의 경우, 최대 등가 응력은 32.74MPa로 휠체어와 X빔의 연결 부위에서 발생하였으며, 철제 중공빔의 항복 응력인 250MPa에 대한 비율인 0.13보다 적어 철제 휠체어에 비하여 복합재료 휠체어가 더 안전하다는 것을 알 수 있다. 따라서, 탑승자의 안전성을 고려하여 동일한 강성을 가지는 원통형 철제 중공빔을 원통형 복합재료 중공빔으로 대체할 수 있을 것으로 예상된다.

#### 4. 결 론

공학구조물의 최적설계에 있어서 일반적으로 얻게 되는 최적해는 대부분 실무에 적용하기 힘든 이론적인 값에 불과한 경우가 많다. 따라서 보다 실질적인 설계, 즉 제작이 가능하고 상용성을 지닌 최적설계가 요구되어지고 있다.

본 연구에서는 다양한 치수를 가지는 원통형 철제 중공빔에 대하여  $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]_{sn}$ 의 적층순서를 가지는 원통형 복합재료 중공빔을 대상으로 유전자 알고리즘을 이용하여 원통형 철제 중공빔의 강성과 등가의 강성을 가지는 원통형 복합재료 중공빔의 단면 형상 치수를 구하였다.

원통형 복합재료 중공빔이 원통형 철제 중공빔과 등가의 굽힘 강성을 가지기 위해서는 원통형 복합재료 중공빔의 단면치수의 증가함을 알 수 있었다. 하지만 재료의 밀도가 철제에 비하여 복합재료는 낮은 값을 가지므로 결과적으로 볼 때 동일한 강성을 갖는 원통형 복합재료 중공빔의 총

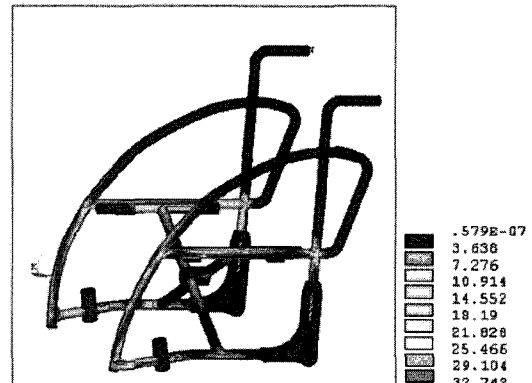


그림 10 원통형 철제 중공빔의 유한요소 해석 결과값

중량은 비교적 낮은 값을 갖게 되어 경량화를 실현할 수 있다. 또한 이를 월체어 구조물에 적용하였을 때 파손여부를 결정하기 위하여 유한요소 구조해석을 실시하였으며 유한요소 해석 결과 값을 Tsai-Wu Failure Criteria Index 값을 통하여 파손이 발생하였는지 확인하였다. 해석 결과로부터 Maximum Tsai-Wu Failure Criteria Index 값은 파손이 발생하는 값인 1의 값보다 현저히 낮은  $0.192 \times 10^{-3}$ 의 값을 나타내고 있어 과하중 상태에서도 월체어가 파손이 되지 않음을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 2002년도 서울지방중소기업청 산·학·연 공동기술개발 컨소시엄사업에서 수행된 연구 결과이며, 저자는 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- Daniel, I.M., Ishai, O.**(1994) Engineering mechanics of composite materials, Oxford University Press.
- Donell, L.H.**(1933) "Stability of thin-walled tubes under torsion", NACA Report 479, 1933.
- Gen, M., Cheng, R.** Genetic algorithm and engineering design, John Wiley & Sons.
- Kam, T.Y., Chang, R.R.**(1992) "Optimum Layup of Thick Laminated Composite Plates for Maximum Stiffness", Engineering Optimization, 19, pp. 237~249.
- Lam, K.Y., Loy, C.T.**(1995) Influence of boundary conditions and fibre orientation on the natural frequencies of thin orthotropic laminated cylindrical shells, *Composite Structures*, 31, pp. 21~30.
- Schmit, L.A., Farshi, B.**(1977) Optimum Design of Laminated Fiber Composite Plates, *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, 11, pp. 433~445.
- Whitney, J.M.**(1993) Structural analysis of laminated anisotropic plates, Technomic Publishing Company, Pennsylvania.
- Wu, X., Sun, C.T.**(1992) Simplified theory for composite thin-walled beams, *AIAA Journal*, 30(12), 1992, pp. 2945~2951.