

## 섬유강화복합재료를 사용한 일반용 경량화 자전거 프레임의 최적설계

윤원석\* · 김도형\*\* · 김학성\*\*,\*†

\* 한양대학교 기계공학과, \*\* 한양대학교 융합기계공학과, \*\*\* 한양대학교 나노과학기술연구소

### Optimization of Lightened Fiber-Reinforced Composite City & Trekking Bicycle Frame

Won Sok Yoon\*, Do Hyung Kim\*\* and Hak Sung Kim\*\*,\*†

\* Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.,

\*\* Dept. of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang Univ.

\*\*\* Institute of Nano Science and Technology, Hanyang Univ.

(Received May 26, 2015 ; Revised September 23, 2015 ; Accepted December 14, 2015)

**Key Words:** Finite Element Analysis(유한요소해석), Optimization(최적화), Tsai-Wu Failure Criterion(Tsai-Wu 파손 이론), Bicycle Frame(자전거 프레임), Composite(복합재료), Digital Logic Method(Digital Logic 방법)

**초록:** 본 연구에서는 자전거의 경량화를 위해 탄소섬유 복합재료, 유리섬유 복합재료, 케블라섬유 복합 재료를 자전거 프레임의 재료로 사용하여 강도 설계 및 최적화를 수행하고 재료 성능을 비교하였다. 이를 위해 유럽표준위원회가 제시하는 자전거 안전사항을 기준으로 복합재료가 가진 이방적 특성을 활용하여 적층각 최적화와 두께 최적화를 수행하였다. 또한, 최적화된 무게, 복합재료의 강도와 비용을 바탕으로 Digital logic 방법으로 재료별 자전거 프레임의 성능을 비교하였으며 이를 통해 섬유강화복합재료를 사용한 자전거 프레임의 구조적 안정성을 확보하며 동시에 경량화를 수행할 수 있었고, 자전거 프레임에 적합한 복합재료를 선별할 수 있었다.

**Abstract:** In this paper, optimal designs of bicycle frame were studied for weight reduction of bicycle using carbon-fiber-reinforced plastic (CFRP), glass-fiber-reinforced plastic (GFRP) and Kevlar-fiber-reinforced plastic (KFRP), respectively. Based on the anisotropic properties of FRP material, stacking angle and thickness optimization were performed under the safety reference of European committee for standardization (CEN) to ensure the stability of bicycle frame. Finally, performances of FRP bicycle frame was evaluated by digital logic method based on the optimized results of weight, strength properties and cost. Then, the optimized bicycle frame composed of each FRPs were evaluated and ranked by total performance values.

- 기호설명 -

$f$  : Tsai-Wu 파손지수  
 $f_{pedaling}$  : 페달 하중조건의 Tsai-Wu 파손지수  
 $f_{vertical}$  : 수직 하중조건의 Tsai-Wu 파손지수  
 $f_{frontal}$  : 전면 하중조건의 Tsai-Wu 파손지수  
 $F_i, F_{ij}$  : 강도 텐서  
 $\sigma_1$  : 섬유 방향 응력  
 $\sigma_2$  : 섬유에 수직인 방향 응력  
 $\sigma_6$  : 전단 응력

$X_t$  : 섬유방향 인장강도  
 $X_c$  : 섬유방향 압축강도  
 $Y_t$  : 섬유에 수직인 방향 인장강도  
 $Y_c$  : 섬유에 수직인 방향 압축강도  
 $S$  : 면내 전단 강도  
 $\theta_i$  : 적층판의 적층각도  
 $t_i$  : 적층판의 두께  
 $C'$  : 단위 무게당 상대적 비용  
 $m_{frame}$  : 자전거 프레임의 무게  
 $\alpha$  : 가중치  
 $\beta$  : 환산 값  
 $\gamma$  : 재료성능지수

† Corresponding Author, kima@hanyang.ac.kr

## 1. 서 론

최근 자전거는 단순한 이동 수단을 넘어서 많은 사람들이 즐기는 스포츠 산업의 한 축으로 성장해왔다.<sup>(1)</sup> 이러한 산업적 수요로 인해 국내외에서 자전거에 대한 다양한 연구들이 진행되어왔고, 특히 자전거의 경량화 재료에 대한 연구도 활발히 수행되어왔다. 이러한 재료들 중 섬유강화 복합재료는 높은 강도와 강성에 비해 낮은 밀도, 우수한 피로 성능, 환경적인 안정성 등의 장점들을 갖고 있기 때문에 자전거의 경량화 재료로서 연구가 활발히 진행되고 있다.

탄소섬유 복합재료는 자전거 부품에서 가장 많이 연구되는 재료로 높은 강도와 강성으로 인해 자전거 프레임<sup>(2)</sup>과 손잡이<sup>(3)</sup> 등의 여러 부품에 대한 수치적 및 실험적 연구가 활발히 진행되었다. 하지만 다른 복합재료들은 각 재료가 가진 장점들이 우수하나 탄소섬유 복합재료와 다르게 자전거 재료로 활용이 부족하다. 특히 유리섬유나 케블라섬유 복합재료는 탄소섬유 복합재료보다 우수한 충돌 성능으로 오토바이 헬멧,<sup>(4)</sup> 자동차 부품<sup>(5)</sup>으로 연구가 진행되었음에도 불구하고, 자전거 부품의 재료로서의 연구는 미진하다. 따라서 탄소섬유 복합재료 이외의 재료들에 대한 자전거 부품 연구가 수행된다면 여러 복합재료들이 가진 장점들을 자전거 부품으로 활용할 수 있다.

여러 복합재료들의 자전거 프레임으로 활용하기 위해 M.A. Maleque 등<sup>(6)</sup>은 재료선택방법론을 이용하여 금속 재료, 탄소섬유, 유리섬유와 케블라섬유 복합재료를 비교하였다. 하지만 각 재료의 비교는 자전거 프레임의 성능에 관한 실험적이거나 수치적인 접근방법이 아닌 재료만의 기계적 성능을 통해 자전거 프레임의 적합성을 판별하였다. 따라서 자전거 프레임의 하중조건이 고려된 재료들의 기계적 성능을 바탕으로 프레임 재료의 선별이 필요하다.

본 연구에서는 탄소섬유, 유리섬유, 케블라섬유 복합재료를 사용한 경량화 자전거 프레임에 대한 최적설계를 수행하고, 그 결과들을 바탕으로 각 재료들의 특성들을 비교하여 자전거 프레임의 재료로서의 적합성을 비교하였다. 자전거 프레임의 최적화는 복합재료의 이방적인 특성에 따라 자전거 프레임이 받는 하중조건 하에서 적층각 및 적층두께를 최적화하여 구조 강도를 최대화하고, 무게를 최소화하였다. 또한, 고전 복합재료 평판이론과 Tsai-Wu 기준을 통해 각 복합재료의 강도를 예측하였으며 이러한 프레임의 무게 및 재료의 강도

등의 성능을 바탕으로 Digital logic 방법을 이용하여 자전거 프레임의 적합한 재료를 평가하였다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 유한요소해석 모델

자전거 프레임의 모델은 Fig. 1 과 같이 헤드 튜브(head tube), 탑 튜브(top tube), 시트 튜브(seat tube), 다운 튜브(down tube), 시트 스테이(seat stay), 체인 스테이(chain stay)로 구성되어 있고 각 부분은 모두 튜브의 형태로 이루어져 있다. 모든 구성요소는 CATIA(Dassault systems)를 이용하여 선형 쉘 요소(S4R)로 모델링되었다.

선형 쉘 요소를 사용한 모델은 Fig. 2 와 같이 Hypermesh(Trinity Engineering)를 사용하여 총 60786 개의 요소와 60557 개의 노드로 구성되었다.

### 2.2 프레임 복합재료 라미네이트

프레임의 재료로는 직교 이방성(orthotropic)을 지닌 Carbon/Epoxy(USN150, SK chemical), Glass/Epoxy(UGN150, SK chemical), Kevlar/Epoxy(Kevlar 49, Dupont) 복합재료를 사용하였고 각 재료의 물성값은 Table 1 과 같다.<sup>(7,8)</sup>

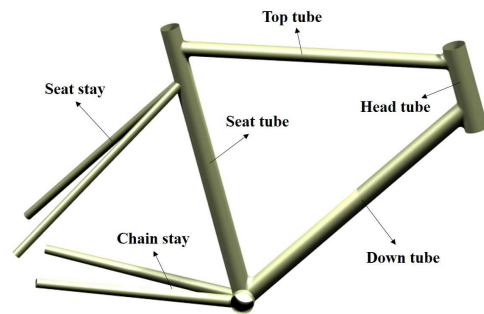


Fig. 1 CAD model of bicycle frame

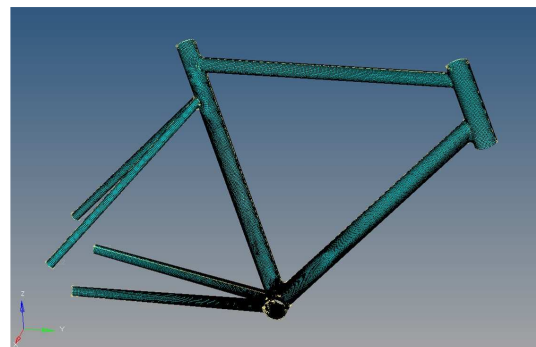
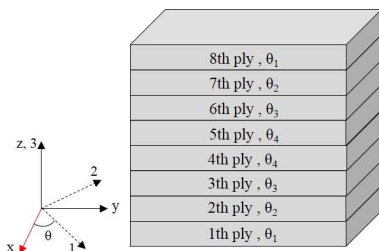


Fig. 2 Finite element model of bicycle frame

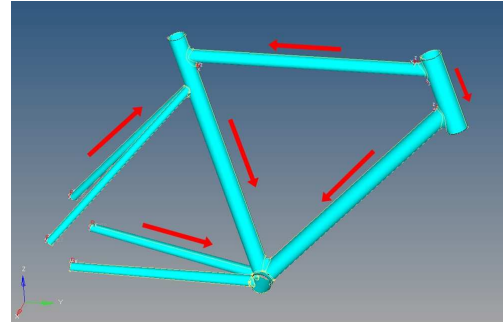
**Table 1** Mechanical properties of composite materials

Property	Carbon/Epoxy	Glass/Epoxy	Kevlar/Epoxy
Axial modulus, $E_1$	131.6 GPa	43.3 GPa	76.8 GPa
Transverse modulus, $E_2$	10.8 GPa	14.7 GPa	5.5 GPa
Shear modulus, $G_{12}$	5.65 GPa	4.4 GPa	2.07 GPa
Shear modulus, $G_{23}$	3.38 GPa	3.5 GPa	1.4 GPa
Poisson's ratio, $\nu_{12}$	0.28	0.3	0.34
Density, $\rho$	1540 kg/m <sup>3</sup>	2100 kg/m <sup>3</sup>	1380 kg/m <sup>3</sup>
Axial tensile strength, $X_t$	2000 MPa	1050 MPa	1380 MPa
Axial compressive strength, $X_c$	1400 MPa	700 MPa	276 MPa
Transverse tensile strength, $Y_t$	61 MPa	65 MPa	27.6 MPa
Transverse compressive strength, $Y_c$	130 MPa	120 MPa	138 MPa
In-plane shear strength, $S$	70 MPa	40 MPa	44 MPa

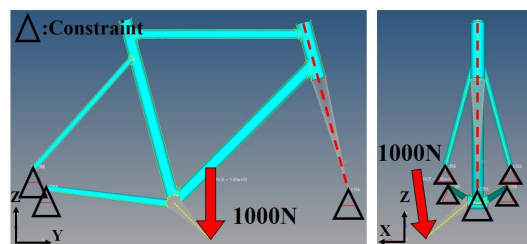


**Fig. 3** Stacking angle and structure of symmetric composite laminate

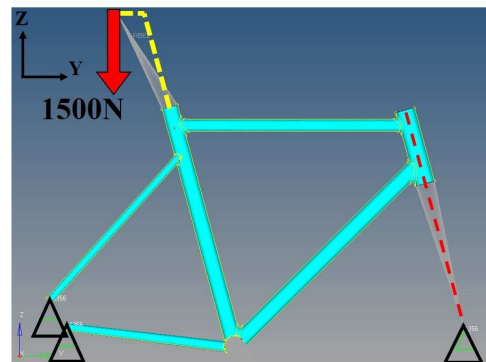
복합재료의 구조는 Fig. 3 과 같이 8 개의 적층판이 적층각을 이루며 적층되는 대칭적 라미네이트 구조이다. 적층판의 적층각 기준을 자전거 프레임 내에 적용하기 위해서 프레임 모델의 6 개의 부분별로 국부좌표계를 설정하였다. 각 부분별 국부



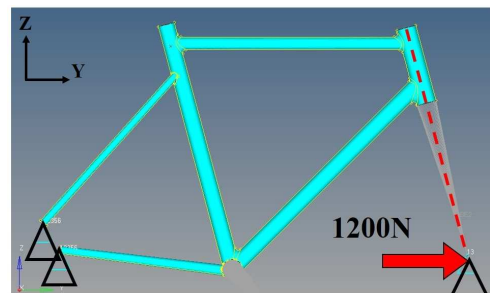
**Fig. 4** Local coordinates of bicycle frame parts



(a) Pedaling condition



(b) Vertical condition



(c) Frontal condition

**Fig. 5** Load condition of bicycle frame

좌표계는 Fig. 3 과 같이 직각좌표계를 사용했으며  $x$  방향은 Fig. 4 의 화살표 방향으로,  $z$  방향은 튜브의 외경방향으로 정의하여 복합재료의 적층각을 설정하였다.

### 2.3 하중 및 경계 조건

자전거 프레임의 유한요소해석 내의 하중 및 경

계 조건은 유럽표준위원회의 EN14764<sup>(8)</sup>에 의거하여 세 가지 조건으로 해석이 수행되었다. 각 하중 조건은 페달 하중(pedaling force), 수직 하중(vertical force) 그리고 전면 하중(frontal force)으로 구분된다. 페달 하중조건은 Fig. 5(a)와 같으며, 하중이 가해지는 위치는 자전거의 크랭크의 중심을 기준으로  $z$ - $y$  평면에 수직한 방향으로 150mm,  $y$ - $z$  평면 내의  $y$  축에서 시계방향으로 45 도로 175mm 에 위치한 곳이며, 하중이 가해지는 점은 Hypermesh 내의 rigid 조건으로 프레임과 연결되었다. 하중의 작용 방향은  $x$ - $z$  평면 내에서  $z$  축을 기준으로 시계방향으로 7.5 도인 방향에서 Fig. 5(a)와 같이 1000N 의 크기로 작용한다. 첫 번째 구속조건은 그림과 같이 헤드 튜브의 중심으로부터 400mm 떨어진 곳을 rigid 조건으로 헤드 튜브와 연결하고 그 위치의  $x$ ,  $y$ ,  $z$  방향의 병진과  $y$ ,  $z$  방향의 회전운동을 구속하였다. 두 번째 구속조건은 헤드 튜브의 구속 조건과 동일한 조건으로 모든 스테이 부품의 끝 부분의 병진과 회전운동을 구속하였다.

수직 하중조건에서 하중이 작용하는 위치는 시트 튜브의 상단부분의 중심으로부터 튜브의 중심 축 방향으로 250mm 떨어진 위치에서  $y$  축 방향으로 70mm 에 위치한 곳이다. 하중이 작용하는 점은 시트 튜브의 상단부분과 rigid 조건으로 연결되어 있으며,  $z$  방향으로 Fig. 5(b)와 같이 1500N 의 힘이 작용한다. 수직 하중조건 첫 번째 구속조건이 작용하는 점은 페달 하중조건 첫 번째 구속 조건과 동일한 곳에 위치하였다. 구속조건이 작용하는 점은  $x$ ,  $z$  방향의 병진과  $y$ ,  $z$  방향의 회전운동이 모두 구속되었다. 두 번째 구속조건은 페달 하중조건 첫 번째 구속조건과 동일하게 적용하였다.

전면 하중조건 하중의 작용하는 점은 다른 하중조건들의 첫 번째 구속조건이 작용하는 점과 같은 위치이고, 하중이 적용되는 위치는 rigid 연결 조건으로 프레임과 연결되었다. 하중은 Fig. 5(c)와 같이  $y$  방향으로 1200N 의 크기로 작용한다. 전면 하중조건 첫 번째 구속조건은 하중이 작용하는 점에서의  $x$ ,  $y$  방향의 병진 운동을 구속하였고, 두 번째 구속조건은 다른 하중조건들과 동일하게 모든 스테이 끝 단의 운동을 구속하였다.

### 3. 프레임 최적화

#### 3.1 Tsai-Wu 강도 이론

자전거 프레임의 강도를 예측하기 위해 본 연구에서는 Tsai-Wu 파손이론을 사용하였다. Tsai-Wu 파손지수는 식 (1)과 같이 서술되며 파손 지수가

1 이상의 값을 갖는 경우를 프레임재료의 파손으로 정의하였다.

$$f = F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j < 1, \quad i, j = 1, 2, 6 \quad (1)$$

$F_i$  와  $F_{ij}$  는 강도 텐서로 재료의 인장, 압축과 전단 강도들의 연산으로 정의된다. 직교이방적인 복합재료의 평면응력 상태의 경우 식 (2), (3)과 같이 파손지수가 표현된다.

$$f = F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \sigma_6^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 = 1 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c}, & F_2 &= \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \\ F_{11} &= -\frac{1}{X_t X_c}, & F_{22} &= -\frac{1}{Y_t Y_c} \\ F_{66} &= \frac{1}{S^2}, & F_{12} &= -0.5 \sqrt{F_{11} F_{22}} \end{aligned} \quad (3)$$

#### 3.2 적층각 최적화

페달 하중조건, 수직 하중조건, 전면 하중조건에서 자전거 프레임의 최대 파손지수를 최소화하기 위해서, 프레임의 3 개의 하중 조건 중 가장 큰 파손지수를 최적화 목적함수로 선정하였다. 또한, 각 적층판의 두께는 0.2mm 로 고정하였고, 초기 적층각도는 모두 0 도로 초기 조건을 설정하였다. 적층각 최적화는 아래와 같은 조건으로 Hypermesh 의 Optistruct solver 와 Hyperstudy 의 이산 최적화 기능을 사용하여 수행되었다.

$$\begin{aligned} \min \quad & \text{Max}(f_{pedaling}, f_{vertical}, f_{frontal}) \\ \theta_i &= -45^\circ, -30^\circ, \dots, 75^\circ, 90^\circ; i = 1, \dots, 4 \end{aligned}$$

#### 3.3 두께 최적화

각 재료별로 최적화된 적층각의 결과를 바탕으로 복합재료의 각 층의 두께를 변수로 최적화를 진행하였다. 두께 최적화는 파손지수가 1 이하인 조건을 만족하며 무게를 최소화하며, 아래와 같은 조건으로 Hypermesh 의 Optistruct solver 와 Hyperstudy 의 이산 최적화 기능을 사용하여 수행되었다.

$$\begin{aligned} \min \quad & W_{frame} \\ \text{subject to} \quad & \text{Max}(f_{pedaling}, f_{vertical}, f_{frontal}) < 1 \\ & t_i = 0.05i; i = 1, \dots, 4 \\ & 0 < t_i \leq 1.5 \end{aligned}$$

#### 3.4 유전 알고리즘(Genetic algorithm)

적층각과 두께 최적화는 Fig. 6 과 같이 유전 알고리즘을 사용하여 수행되었다. 각 최적화는 초기

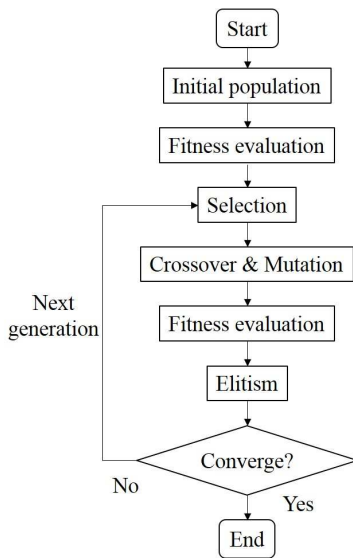


Fig. 6 Flow chart of genetic algorithm

변수값을 포함한 유전자들을 무작위로 만들어 초기 유전자 집단을 생성하였고, 자전거 프레임의 무게와 파손지수 항목과 같은 목적함수와 제한조건을 기준으로 적합성 평가(fitness evaluation)를 수행하였다. 이 중 적합도가 높은 유전자를 가진 해들을 선택(selection)하여 교차(crossover)를 통해 다음 세대 변수들을 가진 유전자 집단을 생성하였다. 지속적인 교차를 통해 유전자 집단을 생성하면 국소적 해(local solution)를 얻을 수 있으므로, 변이(mutation)을 통해 전역적 해(global solution)를 구할 수 있는 유전자를 다음 세대 집단 내에 생성하였다. 각 과정을 반복하여 수렴조건인 목적함수의 변화가 0.5% 이하의 경우 최적화를 종료하였다.

#### 4. 프레임 재료 선별

##### 4.1 재료 비교 항목

경주용 자전거는 빠른 속도를 요구하기 때문에 자전거의 무게가 가장 중요한 요소다. 하지만 일반용 자전거는 가벼운 무게, 강도와 같은 기계적 성질과 더불어 비용도 중요한 요소다. 따라서 본 연구에서는 프레임 재료의 적합성을 판별하기 위한 요소들을 선정하고 요소들을 수치화하여 평가하였다.

자전거 프레임의 중요 요소들로는 무게, 비용, 복합재료의 강도를 선정하였다. 프레임의 첫 번째 판별 요소는 자전거의 속도와 이동 휴대성에 관련이 있는 프레임의 무게이다. 두 번째 요소는 자전거의 비용으로 많은 제품들이 주어진 비용의 한계가 존재하기 때문에 일반적으로 가장 많이 고려되는 중요 요소이다. 마지막으로 복합재료의 강도

Table 2 Rank of attributes of material using digital logic method

	Decision number									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cost	1	1	1	1						
Weight	0				1	1	1			
Longitudinal compressive strength		0			0			0	1	
Transverse compressive strength			0			0		1		0
Shear strength				0			0		0	1

로 프레임의 성능에 직접적으로 관련된 척도로 재료의 신뢰성과 크게 연관이 있기 때문에 중요 요소로 고려하였다.

프레임의 무게는 재료별 최적화된 프레임의 결과값을 반영하였다. 프레임의 비용은 식 (4)와 같이 최적화된 무게와 일반적인 복합재료들의 단위 무게당 상대적 비용의 값<sup>(6)</sup>을 곱하여 산출된 상대적인 비용으로 다음과 같이 계산하였다.

$$Cost = C \times m_{frame} \tag{4}$$

자전거 프레임 재료들의 기계적인 강도는 고전 복합재료 적층평판이론(classical laminated plate theory, CLPT)과 Tsai-Wu 파손기준을 사용하여 이론적으로 계산되었다. 이때, 일반적으로 자전거 프레임은 압축과 굽힘 응력<sup>(6)</sup>이 주로 작용하므로 섬유방향과 그에 수직인 방향의 압축 강도, 그리고 전단 강도를 계산하였다.

##### 4.2 Digital Logic 방법

본 연구에서는 자전거 프레임에 중요한 요소들을 통해 자전거 프레임의 재료 적합성을 정량적으로 판별하기 위해 Digital Logic 방법을 사용하였다. Digital Logic 방법은 특정한 가중치를 요소 별로 할당하여 재료의 성능을 판별하는 방법으로 중요도에 따른 가중치  $\alpha$ 를 산출하고 재료에 따른 성능들을 환산한 값인  $\beta$ 에 곱하여 성능지수  $\gamma$ 를 산출하여 제품에 적합한 재료를 판별할 수 있다.

일반용 자전거 프레임의 판별 요소로는 프레임의 가격, 무게, 압축 강도, 전단 강도를 선정하였다. 각 요소들 사이의 중요도는 0과 1의 값으로 Table 2와 같이 일대일 비교를 통해 평가지수를 수치화하였다.



각 평가를 통해 얻은 값들은 식 (5)와 같이 평가요소에 따라 가중치(weighting factor)를 부여하였다.

$$\text{weighting factor}(\alpha) = \frac{\text{positive decision}}{\text{total decision number}} \quad (5)$$

또한 각 재료별로 평가 요소에 해당하는 값들을 표준화하여 비교하기 위해, 강도와 같이 높은 값이 좋은 요소일 경우 가장 높은 값이 100의 수치를 갖도록 식 (6)과 같이, 무게와 같이 낮은 값이 좋은 요소일 경우 식 (7)을 사용하여 가장 낮은 값이 100의 값을 갖도록 환산 값(scaling factor)을 계산하였다.

$$\beta = \frac{\text{numerical value}}{\text{maximum value}} \times 100 \quad (6)$$

$$\beta = \frac{\text{minimum value}}{\text{numerical value}} \times 100 \quad (7)$$

가중치  $\alpha$ 와 환산 계수  $\beta$ 를 사용해 각 재료는 식 (8)과 같은 방법으로 재료성능지수를 결정하고 성능지수가 높을수록 프레임에 더 적합한 재료로 평가하였다.

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i \quad (8)$$

### 5. 결과 및 고찰

#### 5.1 적층각 최적화 결과 비교

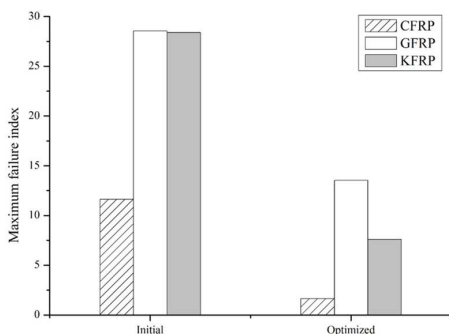
섬유 복합재료들의 최적 적층각과 파손지수를 하중 조건 별로 비교하여 나타낸 결과는 Table 3, 4와 Fig. 7

**Table 3** Initial and optimized stacking angle of bicycle frame composite material

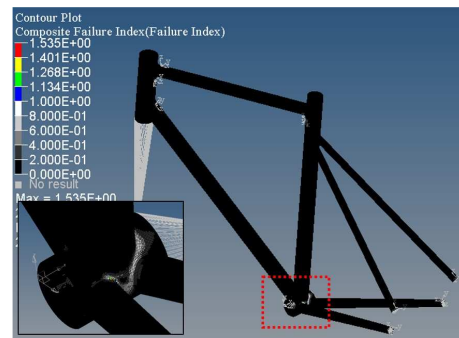
Material	Initial stacking angle	Optimized stacking angle
Carbon/Epoxy	[0] <sub>s</sub>	[90/0/30/-30] <sub>s</sub>
Glass/Epoxy	[0] <sub>s</sub>	[-45/45/0/0] <sub>s</sub>
Kevlar/Epoxy	[0] <sub>s</sub>	[75/15/30/-45] <sub>s</sub>

**Table 4** Failure index of Initial and optimized bicycle frame with respect to load condition

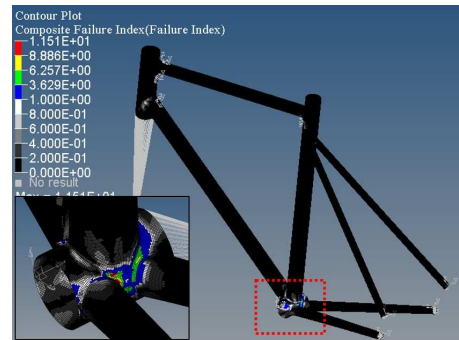
Material	Optimized state	Pedaling load condition	Vertical load condition	Frontal load condition
Carbon/Epoxy	Initial	<b>11.63</b>	1.17	11.61
	Optimized	1.53	0.40	<b>1.65</b>
Glass/Epoxy	Initial	20.02	4.25	<b>28.56</b>
	Optimized	11.51	3.59	<b>13.53</b>
Kevlar/Epoxy	Initial	<b>28.40</b>	2.98	28.23
	Optimized	<b>7.61</b>	1.88	6.49



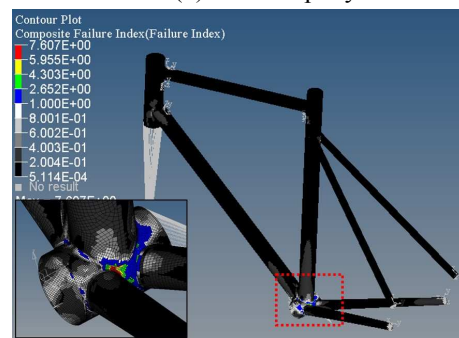
**Fig. 7** Comparison of maximum failure index for optimized condition



(a) Carbon/Epoxy

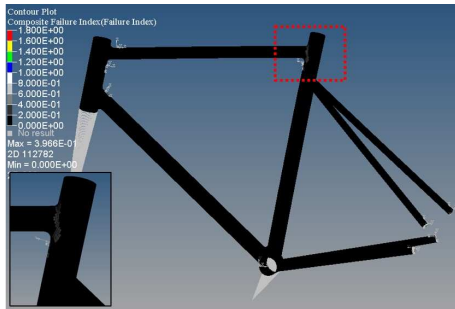


(b) Glass/Epoxy

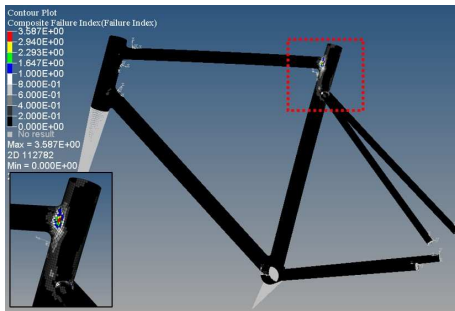


(c) Kevlar/Epoxy

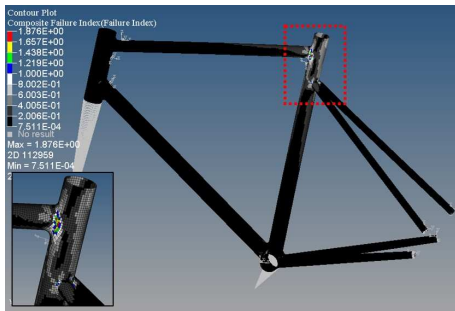
**Fig. 8** Location of composite failure for pedaling load condition



(a) Carbon Epoxy



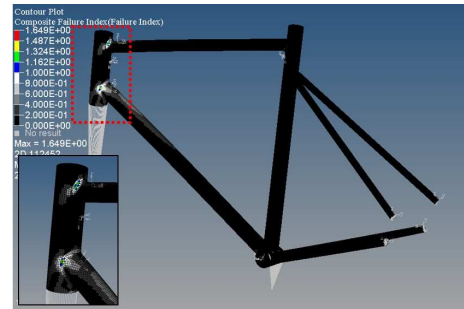
(b) Glass/Epoxy



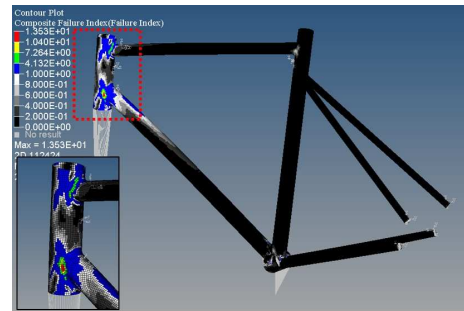
(c) Kevlar/Epoxy

**Fig. 9** Location of composite failure for vertical load condition

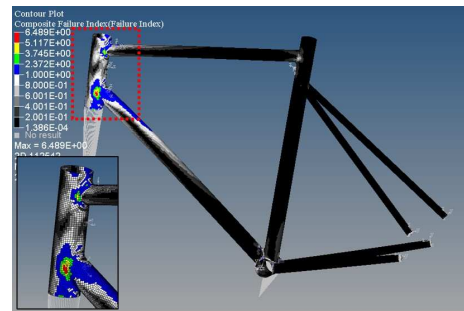
과 같다. 최적화된 적층각을 바탕으로 유한요소해석을 수행한 결과, 최대 파손지수는 탄소섬유 복합재료가 1.65, 유리섬유 복합재료가 13.53, 케블라섬유 복합재료가 7.61 으로 세 재료 중 유리섬유 복합재료의 파손지수가 가장 높게 나왔으며 탄소섬유 복합재료의 파손지수가 가장 낮음을 알 수 있었다. 또한 최적화 이후로 탄소섬유 복합재료, 유리섬유 복합재료, 케블라섬유 복합재료의 최대 파손지수는 각각 9.98, 15.03, 20.79 만큼 낮아져 적층각 최적화를 통해 프레임의 강도 성능을 향상시켰음을 알 수 있다. Fig. 8, 9, 10 은 적층각 최적화된 프레임의 하중조건에서 복합재료 파손을 나타낸다. 페달 하중조건에서는 시트 튜브, 다운 튜브, 체인 스테이가 만나는 부분에서 복합재료 파손이 발생하며, 수직하중조건에서는 시트 튜브와 탑 튜브, 시트 스테이가 연결된 부분이, 전면하중 조건에서는 헤드 튜브와 다른 연결부분에서 주로 복합재료 파손이 발생한다. 이를 통해 하중



(a) Carbon Epoxy



(b) Glass/Epoxy



(c) Kevlar/Epoxy

**Fig. 10** Location of composite failure for frontal load condition

하중이 작용하는 부분이나 튜브와 연결되는 부분이 가장 취약함을 알 수 있다. 적층각 최적화 이후 최대파손지수는 모든 복합재료에서 낮아졌으나, 여전히 1 을 초과하므로 자전거 프레임의 파손이 존재함을 알 수 있다. 따라서 최대파손지수를 최소화하기 위해 두께 최적화가 필요함을 알 수 있다.

### 5.2 두께 최적화 결과 비교

적층각 최적화값을 바탕으로 섬유복합재료들의 적층관 두께의 최적화를 진행한 결과, 최대파손지수는 모두 1 미만으로 복합재료 파손이 발생하지 않았고, 그 결과는 Table 5 와 같다. Fig. 11, 12, 13 은 두께 최적화를 수행한 자전거 프레임의 하중 취약 부분이다. 최적 설계 결과 Fig. 8, 9, 10 에서 나타난 취약 부분에서 파손지수가 모두 1 을 초과하지 않는 것으로 보아 프레임이 강도 성능이 향상되었음을 알 수 있다. 적층각과 두께가 최적화된 복합재

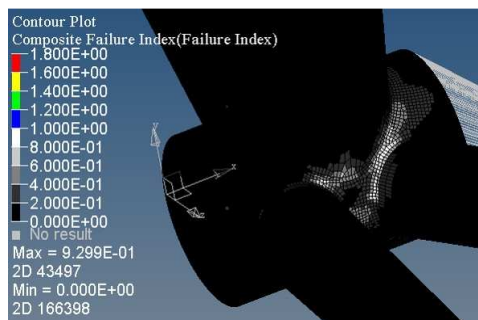
**Table 5** Initial and optimized ply thickness of composite bicycle frame

Material	Ply number (stacking angle)	Initial thickness	Optimized thickness
Carbon /Epoxy	Ply4 (-30°)	0.2 mm	0.25 mm
	Ply3 (30°)	0.2 mm	0.20 mm
	Ply2 (0°)	0.2 mm	0.25 mm
	Ply1 (90°)	0.2 mm	0.25 mm
Glass /Epoxy	Ply4 (0°)	0.2 mm	0.80 mm
	Ply3 (0°)	0.2 mm	0.70 mm
	Ply1 (-45°)	0.2 mm	0.10 mm
Kevlar /Epoxy	Ply4 (-45°)	0.2 mm	0.55 mm
	Ply3 (30°)	0.2 mm	0.20 mm
	Ply2 (15°)	0.2 mm	0.60 mm
	Ply1 (75°)	0.2 mm	1.20 mm

료 프레임의 무게는 Table 6에 나타내었다. 탄소섬유 복합재료를 사용한 프레임은 유리섬유 복합재료 프레임에 비해 69.8%, 케블라섬유 복합재료에 비해 58.6%이 더 가볍다. 유리섬유와 케블라섬유 복합재료 프레임은 탄소섬유 복합재료 비해 무거우나, 일반적으로 철로 만들어진 프레임의 무게가 5kg 이므로 유리섬유복합재료 프레임은 26.4%, 케블라섬유 복합재료 프레임은 46.4% 가벼우면서도 모든 하중조건을 만족한다.

**Table 6** Weight of composite bicycle frame

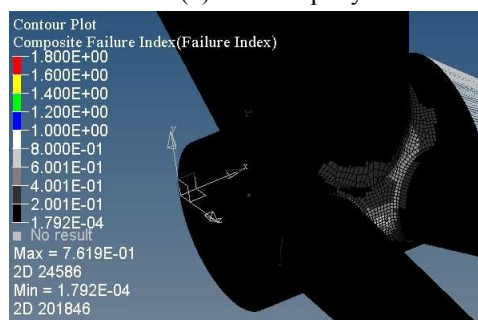
	Carbon/Epoxy	Glass/Epoxy	Kevlar/Epoxy
Weight (kg)	1.11	3.68	2.68



(a) Carbon Epoxy

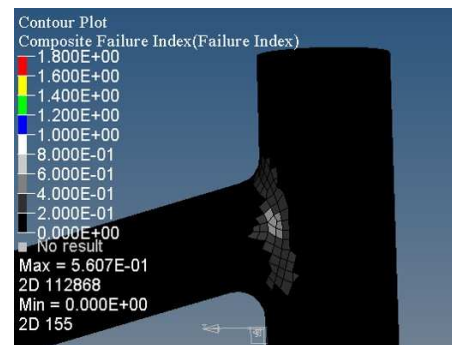


(b) Glass/Epoxy

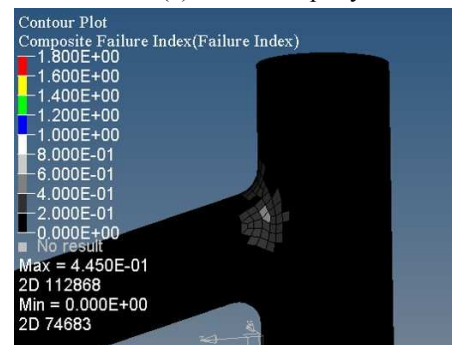


(c) Kevlar/Epoxy

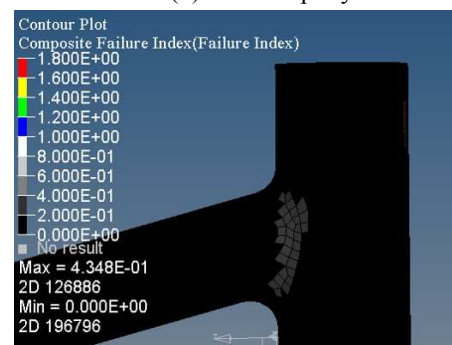
**Fig. 11** Location of composite failure for pedaling load condition after thickness optimization



(a) Carbon Epoxy



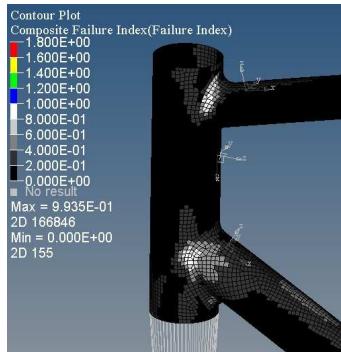
(b) Glass/Epoxy



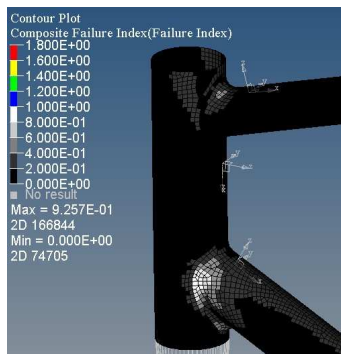
(c) Kevlar/Epoxy

**Fig. 12** Location of composite failure for vertical load condition after thickness optimization

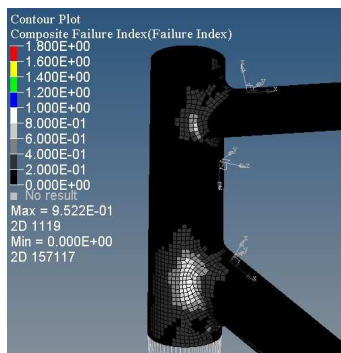




(a) Carbon Epoxy



(b) Glass/Epoxy



(c) Kevlar/Epoxy

**Fig. 13** Location of composite failure for frontal load condition after thickness optimization

5.3 재료 성능 비교

Digital Logic 방법을 사용해 재료를 비교하기 위해 가중치를 계산한 결과는 Table 7 과 같다. 환산값을 계산하기 위해 각 요소에 해당하는 값들은 Table 8 와 같다. 이를 환산한 값과 가중치를 사용해 얻은 성능 지수는 Table 9 과 같다. 환산된 요소들로는 무게, 강도에서는 탄소섬유 복합재료가 가장 높은 환산 지수를 갖고, 가격에서는 케블라섬유 복합재료가 높은 환산 지수를 갖는다. 자전거 프레임에 중요한 요소들을 반영한 성능 지수는 탄소섬유복합재료가 75.4 로 가장 높고 유리섬유 복합재료가 52.1 로 가장 낮았다. 성능 지수를 토대로 자전거 프레임에 가장 적합한 재료는 탄소섬유복합재료임을 알 수 있으며,

**Table 7** Weighting factors for bicycle frame

	Positive Decisions	Weighting Factor( $\alpha$ )
Cost	4	0.4
Weight	3	0.3
Longitudinal compressive strength	1	0.1
Transverse compressive strength	1	0.1
Shear strength	1	0.1
Total	10	1.0

**Table 8** Properties of frame material for ranking

Material	CFRP	GFRP	KFRP
Cost	24.5	11.25	9.45
Weight (kg)	1.11	3.68	2.68
Longitudinal compressive strength (MPa)	718	221	112
Transverse compressive strength (MPa)	497	114	162
Shear strength (MPa)	159	64	48

**Table 9** Scaled values and performance index

Material	CFRP	GFRP	KFRP
Cost	38.6	84	100
Weight	100	30.2	41.4
Longitudinal compressive strength	100	30.8	15.6
Transverse compressive strength	100	22.9	32.6
Shear strength	100	40.3	30.2
Performance Index ( $\gamma$ )	75.4	52.1	60.3

케블라섬유 복합재료는 탄소섬유 복합재료에 비해 성능지수가 낮으나 탄소섬유 복합재료 성능지수의

80%에 해당하는 값으로 이를 통해 케블라섬유 복합 재료도 자전거 프레임의 재료로 고려할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 따라서 무게와 강도의 비중을 높게 고려하면 탄소섬유 복합재료가 자전거 프레임에 적합하고 비용을 우선적으로 고려하면 케블라섬유 복합재료가 자전거 프레임에 적합한 재료라는 것을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 자동차, 항공분야 등 많은 분야에 연구되는 탄소섬유 복합재료, 유리섬유 복합재료와 케블라섬유 복합재료를 자전거 프레임 재료로 사용하여 경량화 및 강도 설계를 수행하였다. 페달, 수직, 전면 하중조건 하에서 유한요소해석과 적층각 최적화를 통해서 최적 적층각을 도출하였다. 그 후 각 복합재료의 두께를 최적화하여 자전거 프레임 안정성을 확보할 수 있었다. 그 결과, 탄소섬유 복합재료를 사용한 자전거 프레임은 1.11kg, 유리섬유 복합재료 프레임은 3.46kg, 케블라섬유 복합재료를 사용한 프레임은 2.68kg 으로 기존 프레임에 비해 가벼우면서도 모든 하중 조건을 만족시키는 결과를 얻어낼 수 있었다. 마지막으로 최종 설계 결과를 바탕으로 한 Digital Logic 방법을 통해 비용, 무게와 강도를 고려하면 탄소섬유 복합재료가 가장 적합한 재료이고, 비용적인 측면에서 케블라섬유 복합재료의 자전거 프레임의 재료로써 적합하다는 것을 알 수 있었다.

## 후 기

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (No. 2012R1A6A1029029). This work was also supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MEST) (No. 2013M2A2A9043280).

## 참고문헌 (References)

- (1) Kwon, K. B. and Kim, H. K., 2008, Research of Structure Optimization of Bicycle Frame, Korea Institute of Sport Science.
- (2) Liu, T. J. C. and Wu, H. C., 2010, "Fiber Direction and Stacking Sequence Design for Bicycle Frame made of Carbon/Epoxy Composite Laminate," *Material & Design*, Vol. 31, Is. 4, pp. 1971~1980.
- (3) Chang, R. R., 2002, "Finite Element Analyses and Experimental Considerations of the Deflection and Failure Behaviour of an Asymmetric Laminate Composite Bicycle Handlebar," *Proc Instn Mech Engrs*, Vol. 216, pp. 207~218.
- (4) Kostopoulos, V., Markopoulos, Y. P., Giannopoulos, G. and Vlachos, D. E., 2002, "Finite Element Analysis of Impact Damage Response of Composite Motorcycle Safety Helmets," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 33, Is. 2, pp. 99~107.
- (5) Al-Qureshi, H. A., 2001, "Automobile Leaf Springs from Composite Materials," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 118, Is. 1-3, pp. 58~61.
- (6) Maleque, M. A. and Dyuti, S., 2010, "Materials Selection of a Bicycle Frame Using Cost per Unit Property and Digital Logic Method," *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 95~100.
- (7) Kim, B. J., Kim, H. S. and Lee, D. G., 2006, "Design of Hybrid Steel/Composite Circular Plate Cutting Tool structures," *Composites Structures*, Vol. 75, Is. 1-4, pp. 250~260.
- (8) Kasavajhala, A. R. M. and Gu, L., 2011, "Fracture Analysis of Kevlar-49/Epoxy and e-Glass/Epoxy Doublers for Reinforcement of Cracked Aluminum Plates," *Composites Structures*, Vol. 93, Is. 8, pp. 2090~2095.
- (9) CEN, 2005, "EN 14764:2005 City and Trekking Bicycles – Safety Requirements and Test Methods," CEN.