

論文

적층각을 고려한 복합재료 라미네이트 자전거 휠의 설계

이진아*, 홍형택*, 강경탁*, 전흥재**

Design of Composite Laminate Bicycle Wheel considering Stacking Sequence

Jin-Ah Lee*, Hyoung-Taek Hong*, Kyoung-Tak Kang*, Heoung-Jae Chun**

ABSTRACT

The strength design for the lightweight bicycle wheel made of the Carbon/Epoxy composite laminates has been discussed in this paper. For bicycle wheel design, lightness of the wheel is important. Also, it has to satisfy the required strength under specific loading cases. Two testing methods for the bicycle wheel, i.e. vertical and complex loadings, are adopted in this study. Because the strengths of composite wheel is different in relation to the stacking sequence and the number of plies, it is important to decide an appropriate stacking sequence and number of layers for the composite wheel. From the finite element analysis results, the most stable sequence orientation and number of layers are determined. The stacking sequence $[0]_{8n}$, $[90]_{8n}$, $[0/90]_{2ns}$, $[\pm 45]_{2ns}$, $[0/\pm 45/90]_{ns}$ ($n=1,2,3,4$) are performed for finite element analysis. From results, $[0/\pm 45/90]_{3s}$ lay-up is a good selection for the composite bicycle wheel. Also, the weakest point and layer are found in this study.

초 록

본 논문에서는 Tsai-Wu 파손이론을 적용하여 Carbon/Epoxy 복합재 적층판으로 이루어진 자전거 휠의 경량화를 위한 적층수와 적층각에 대한 강도설계에 대하여 연구하였다. 복합재료는 적층수와 적층각에 따라 강도와 강성이 변하기 때문에 적용되는 설계 하중 조건에 따른 구조물의 최취약부에서 파손이 일어나지 않도록 최적의 적층각과 최소의 적층수를 찾아야 한다. 따라서 유한요소해석을 이용하여 복합재 자전거 휠에 부가되는 수직, 복합하중조건에 대하여 가장 안정적인 적층수 및 적층각을 구하였다. 휠에 적용되는 적층각은 $[0]_{8n}$, $[90]_{8n}$, $[0/90]_{2ns}$, $[\pm 45]_{2ns}$, $[0/\pm 45/90]_{ns}$ 으로 적층수를 변화시켜가며 유한요소해석을 수행하였다. 해석 결과로부터 $[0/\pm 45/90]_{3s}$ 의 적층각이 파손에 안정적인 적층각임을 제안하였다. 또한 이를 통하여 휠의 최취약부를 알 수 있었다.

Key Words : 자전거 휠(bicycle wheel), 복합재료(composite materials), 유한요소해석(finite element analysis), Tsai-Wu 파손이론(Tsai-Wu failure index)

1. 서론

섬유강화 복합재료는 섬유 중 방향의 기계적 물성이 섬유 횡 방향의 기계적 물성보다 매우 높은 이방성을 보인다. 이러한 특성은 복합재료가 제품 설계 시 요구되는 강도와 강성에

맞게 설계가 가능한 설계유연성을 갖게 한다. 또한 비강도 및 비강성이 기존에 많이 이용되는 철이나 알루미늄 등의 단일 재료에 비해 크게 높고 우수한 피로특성 및 치수안정성 등의 재료 특성을 지녀, 고성능을 요구하는 우주항공, 자동차 등의 산업에서 널리 사용되고 있다.[1-2] 특히 최근 스포츠 용품

접수: 2012년 5월 11일, 수정: 2012년 9월 21일, 게재승인: 2012년 9월 24일

* 연세대학교 기계공학과 기계공학전공 대학원

** 연세대학교 기계공학과, Corresponding author(E-mail:hjchun@yonsei.ac.kr)

산업에서 경량화와 함께 고성능이 요구되는 골프, 하키, 자전거 등의 분야에서 복합재료를 적용한 고급 스포츠 용품 시장이 크게 성장하고 있다. 국내에서는 2009년 발표된 저탄소 녹색성장을 위한 자전거 육성 정책과 더불어 자전거 시장이 크게 성장하는 추세이다. 최근 자전거 시장의 성장과 더불어 자전거 경량화에 대한 관심이 높아지면서 자전거의 주행 성능에 크게 영향을 미치는 자전거 휠의 경량화에 대한 연구의 중요성이 부각되고 있다. 특히 강도, 강성 및 경량성이 우수한 Carbon/Epoxy 복합재료를 이용한 자전거 휠에 대한 관심이 높아지고 있다.[3] 복합재료는 경량성과 우수한 기계적 물성에 더불어 요구조건에 만족하는 강성 및 강도의 재료를 만들 수 있는 설계 유연성을 지녀, 자전거 구조물의 재료에 적합한 조건을 가지고 있다. 자전거 휠은 림(Rim), 스포크(Spoke), 허브(Hub)로 구성된다. 그 중 림(Rim)부분은 중량이 크고, 공기 저항에 민감하며, 자전거의 속도에 큰 영향을 미친다. 자전거 림(Rim)의 구조물은 타이어를 지지하고 브레이크의 지지대 역할을 하며, 스포크와 휠의 하중 조합을 지지하는 중요한 구조적 역할을 한다. 또한 출발 시와 급격한 코너를 주행할 시에 미세변형이 발생하고 직접하중을 가장 많이 받는 부분으로서, 충격을 흡수할 만큼 탄성력을 지녀야 하고 하중을 여러 스포크(Spoke)로 분산 가능해야 하며 수직하중 및 측면하중을 만족하는 강도를 가져야 한다. 휠은 자전거 주행 성능에 많은 영향을 미치기 때문에 여러 연구가 시도되고 있는 추세로 현재까지 보고된 연구에는 클래식 자전거 휠의 변형에 대한 유한요소해석과 시험을 수행하여 하중에 따른 변형현상에 대하여 비교 검증에 대한 연구가 있다.[4] 또한 Salamon 등은 유한요소해석을 이용하여 기존의 steel 재료 자전거의 스포크(Spoke) 개수가 미치는 영향을 고려하여 휠의 거동 형태와 주행 특성에 맞는 디자인을 제시하였다.[5] 이 밖에 복합재료를 이용한 휠의 연구로써 Kalyanasundaram 등이 복합재료 휠체어 휠의 디자인 최적화를 통하여 림(Rim)과 허브(Hub) 사이에 있는 스포크(Spoke)에 Pushrim을 부착하는 것이 하중부하 시 변형이 가장 적게 발생하는 디자인임을 보인바가 있다.[6] 하지만 기존 연구는 휠의 형상 디자인에 한정되어 있으며, 복합재 휠의 적층각 배열에 대한 연구는 발표된 바가 없다. 따라서 본 논문에서는 경기용 자전거 휠에 하중을 고려한 유한요소해석을 이용하여 적절한 적층각을 도출하였고 이를 통하여 복합재 자전거 휠의 초경량, 고강도의 적층각 디자인을 제안하였다.

2. 유한 요소 해석

2.1 연구 대상

자전거의 휠의 구조는 Fig. 1와 같이 림(Rim), 스포크(Spoke), 허브(Hub)로 이루어져 있다.



Fig. 1 Components of the bicycle wheel.

자전거 휠에서, 비복합재료로 구성된 스포크(Spoke)와 허브(Hub)에 대한 해석은 수행하지 않고, 복합재료로 구성된 자전거 주행 시 하중부하가 가장 높은 림(Rim)만을 고려하여 모델링하여 유한요소해석을 수행하였다. 경기용 자전거 휠은 지름 633mm로 모델링 하였으며, 휠의 형상은 Fig. 2에 보인 바와 같다.



Fig. 2 Wheel geometry and 3D modeling.

2.2 연구방법

본 연구에서는 CATIA (Dassult Systems SIMULIA, Inc.)를 이용하여 3D모델링을 하였고, ABAQUS 6.10 (Dassult Systems SIMULIA, Inc.)를 이용하여 유한요소모델을 생성하였다.

2.3 하중 및 경계조건

복합재료는 이방성 재질로서 해석 시 각 요소에 대하여 섬유 방향의 기준을 위한 국부좌표계를 설정해야 한다. 본 논문에서 휠에 적용된 Carbon/Epoxy 일방향 프리프레그의 섬유방향은 원기둥 좌표계를 이용하여 Fig. 3과 같이 휠의 반지름방향을 0도 방향, 휠의 둘레 방향을 90도 방향으로 정하였으며 휠의 바깥쪽 표면을 첫 번째 층으로, 휠의 내부 표면을 마지막 층으로 설정하였으며, 적용된 복합재 층의 두께는 0.125mm이다. 또한 휠의 적층각 배열은 제작생산성을 고려하여 0°, ±45°와 90°로 제한하였고, $[0]_{8n}$, $[90]_{8n}$, $[0/90]_{2ns}$, $[\pm 45]_{2ns}$, $[0/\pm 45/90]_{ns}$ 의 적층각에 대하여 적층수를 변화해가며 해석을 수행하였다.

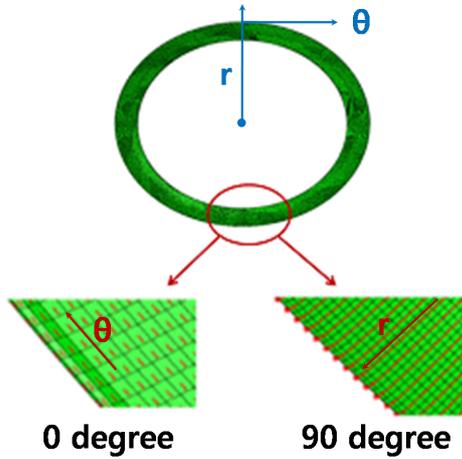


Fig. 3 Fiber orientations of the bicycle wheel.

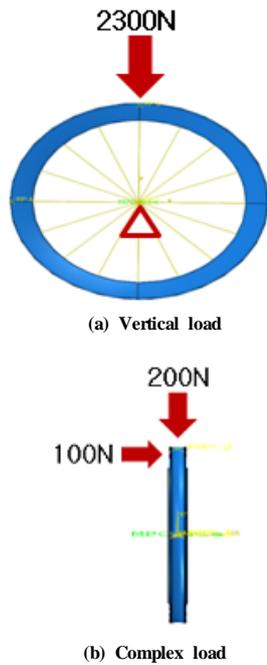


Fig. 4 Boundary condition and loading condition.

연구에 사용된 하중조건 및 경계조건은 ASTM F2680 규격에 의거하여 Primary retention test와 Secondary retention test를 반영한 수직하중조건과 복합하중조건을 독립적으로 적용하였다.[7] 수직하중조건은 사람의 체중과 자전거 주행 시 발생하는 하중을 고려하여 지면과 자전거 휠의 접합부에 2300N을 부가하였으며, 복합하중조건은 주행 시 수직 및 측면에서 발생하는 하중으로 지면에 자전거 휠이 닿는 위치

에 각 100N, 200N으로 부가하여 해석을 진행하였다. 경계조건은 두 하중 조건 모두 그림과 같이 휠의 중심에 x축 변위, y축 변위, z축 변위, x축 회전, y축 회전, z축 회전을 구속하였고, 림 안의 스포크는 ABAQUS 6.10의 MPC (Multi Point Constraint) beam으로 구현하였다.

2.4 파손 이론

본 연구에서는 이방성 재료의 일반적인 파손이론중의 하나인 Tsai-Wu Failure Index(F.I.)을 적용하였다. Tsai-Wu 파손이론은 응력장(Stress Space)내에서 파손면(Failure surface)이 식 (1)과 같이 존재한다고 가정한다.

$$f_i \sigma_i + f_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1 \quad (i, j = 1, \dots, 6) \quad (1)$$

여기서, f_i, f_{ij} 는 강도텐서(Strength Tensor)이고, 자전거 휠을 쉘 요소로 가정하여 평면응력이 발생하는 경우, 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f_1 \sigma_1 + f_2 \sigma_2 + f_{11} \sigma_1^2 + f_{22} \sigma_2^2 + f_{66} \tau_6^2 + 2f_{12} \sigma_1 \sigma_2 = 1 \quad (2)$$

3. 결 과

3.1 물성시험

본 연구에 적용된 복합재료의 물성시험은 ASTM D 3039, ASTM 3210 및 ASTM D 3518 시험 규격에 의거하여 재료 시험기(MTS 810)를 이용하여 수행하였으며, SK사의 USN 125 Carbon/Epoxy 일방향 프리프레그를 이용하였다. 재료의 물성 값은 Table 1과 같다.

Table 1 Material properties of Carbon/Epoxy

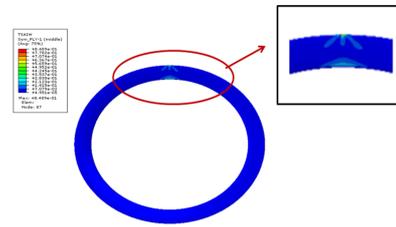
Property	Symbol	Carbon/Epoxy
Longitudinal modulus	E_1	141GPa
Transverse modulus	E_2	8.7GPa
In-plane shear modulus	G_{12}, G_{13}	5.6GPa
Out-of-plane shear modulus	G_{23}	3.7GPa
Poisson's ratio	ν_{12}	0.30
Longitudinal tensile strength	F_{1t}	1925MPa
Transverse tensile strength	F_{2t}	76MPa

3.2 유한요소해석 결과

본 연구에서는 휠의 적층수를 결정하기 위하여 0도, ±45도, 90도의 기본적층을 사용하여 $[0]_{8n}, [90]_{8n}, [0/90]_{2ns}, [\pm 45]_{2ns}, [0/\pm 45/90]_{ns}$ 적층각을 8층, 16층, 24층 32층($n=1, 2, 3, 4$)에서

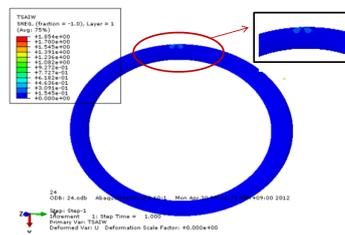
Table 2 Effect of ply count on the maximum Tsai-Wu failure index under vertical loading condition

Stacking Sequence	Tsai-Wu failure index			
	n=1	n=2	n=3	n=4
$[0]_{8n}$	5.91	3.61	1.854	0.32
$[90]_{8n}$	7.025	5.1	3.03	1.39
$[0/90]_{2ns}$	4.50	2.88	1.00	0.67
$[\pm 45]_{2ns}$	6.10	3.74	1.92	0.34
$[0/\pm 45/90]_{ns}$	4.37	2.07	0.84	0.76

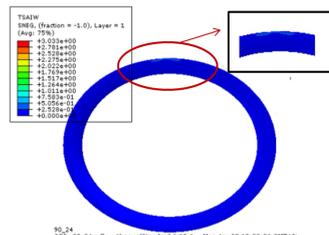


(e) $[0/\pm 45/90]_{3s}$ stacking sequence

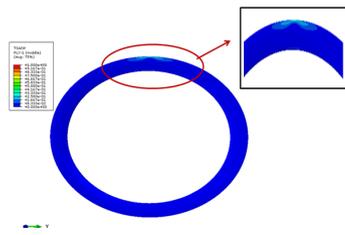
Fig. 5 Tsai-Wu failure index under vertical loading condition(at n=3).



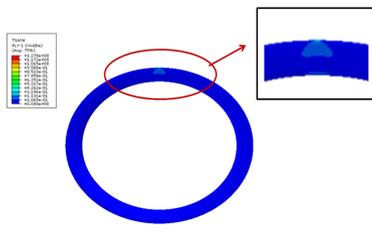
(a) $[0]_{24}$ stacking sequence



(b) $[90]_{24}$ stacking sequence



(c) $[0/90]_{6s}$ stacking sequence



(d) $[\pm 45]_{6s}$ stacking sequence

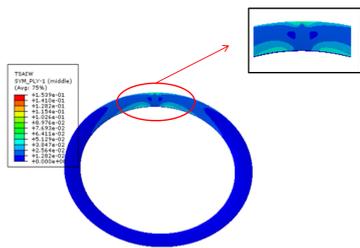
적층 수에 따른 유한요소해석을 수행하였다. 최취약층의 F.I.의 비교를 통하여 복합재 휠의 적층 수 및 적층각을 결정하였다. 복합하중조건은 수직하중조건에 비하여 낮은 하중부하가 발생하기 때문에 최대 F.I.가 수직하중에 비하여 상대적으로 낮으므로 수직하중조건을 기준으로 적층수를 결정하였으며, 결정된 적층 수에서 복합하중조건 하에서 $[0]_{8n}$, $[90]_{8n}$, $[0/90]_{2ns}$, $[\pm 45]_{2ns}$, $[0/\pm 45/90]_{ns}$ 적층각에 대한 해석을 통해 최대 F.I.를 비교하였다. Table 2는 수직하중조건에서 적층 수 및 적층각 따른 최대 F.I.의 변화를 기록한 표이다. 표에서 보이듯이 복합재료는 섬유의 횡 방향에 비하여 종 방향의 강성 및 강도가 높기 때문에, $[90]_{8n}$ 의 적층은 힘의 종 방향에 섬유가 존재하는 $[0]_{8n}$, $[0/90]_{2ns}$, $[\pm 45]_{2ns}$, $[0/\pm 45/90]_{ns}$ 의 적층에 비해 상대적으로 최대 F.I.가 높다.

$[0]_{8n}$, $[0/90]_{2ns}$, $[\pm 45]_{2ns}$, $[0/\pm 45/90]_{ns}$ 을 기준으로 F.I.가 8층, 16층에서는 2 이상으로 상대적으로 높고 32층에서는 1미만으로 적층각 변수에 관계없이 안정성을 나타내므로, 추가적인 복합하중조건 하의 비교 해석을 위해 수직하중 조건하에서 F.I.가 1에 가장 근접한 24층을 적층수로 적용하여 해석을 하였다. $[0]_{24}$, $[90]_{24}$, $[0/90]_{6s}$, $[\pm 45]_{6s}$, $[0/\pm 45/90]_{3s}$ 의 5가지 적층 배열로 수직하중조건과 복합하중조건에 대해 각각 해석을 수행하여 최대 F.I.를 비교하였다. Fig. 5는 수직하중 조건 시 24층 적층 수에서 적층각 배열의 변화에 따른 휠의 최대 F.I.를 보여주고 있다. 수직하중조건에서 직접 하중을 받는 윗부분에서 최대 F.I.가 발생하였으며 5가지 적층 순서 모두 첫 번째 층에서 가장 높은 F.I.를 보여 최취약층이 첫 번째 층으로 나타났으며, $[0/\pm 45/90]_{3s}$ 을 제외한 나머지 적층 배열의 경우 최대 F.I.가 1이상으로 파손이 발생하였고, $[0/\pm 45/90]_{3s}$ 배열의 경우 최대 F.I.가 0.84로 나타나 안정성을 보인다.

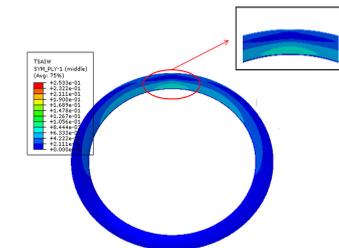
복합하중조건인 경우, 휠은 Fig. 6과 같은 F.I. 분포를 보인다. 수직하중조건인 경우와 유사하게 복합하중조건 하에도 직접 하중을 받는 부분에서 F.I. 집중이 발생하였으며, $[0]_{24}$, $[90]_{24}$, $[0/90]_{6s}$ 와 $[\pm 45]_{6s}$ 적층배열은 24층에서, $[0/\pm 45/90]_{3s}$ 적층배열은 23층에서 가장 높은 F.I.를 가지는 최취약층이 존재함을 확인할 수 있었다.

Table 3 Effect of ply count on Tsai-Wu failure index under complex loading condition

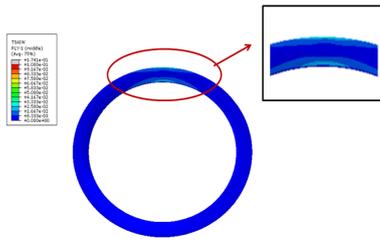
Stacking Sequence	Tsai-Wu failure index
[0] ₂₄	0.154
[90] ₂₄	0.263
[0/90] _{6s}	0.101
[±45] _{6s}	0.104
[0/±45/90] _{3s}	0.063



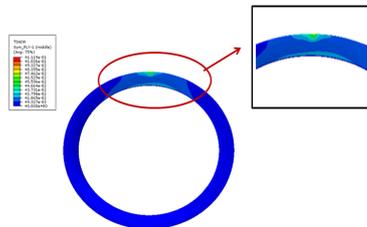
(a) [0]₂₄ stacking sequence



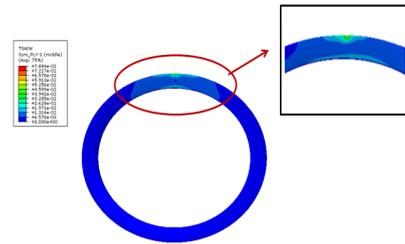
(b) [90]₂₄ stacking sequence



(c) [0/90]_{6s} stacking sequence



(d) [±45]_{6s} stacking sequence



(e) [0/±45/90]_{3s} stacking sequence

Fig. 6 Tsai-Wu failure index under complex loading condition(at n=3).

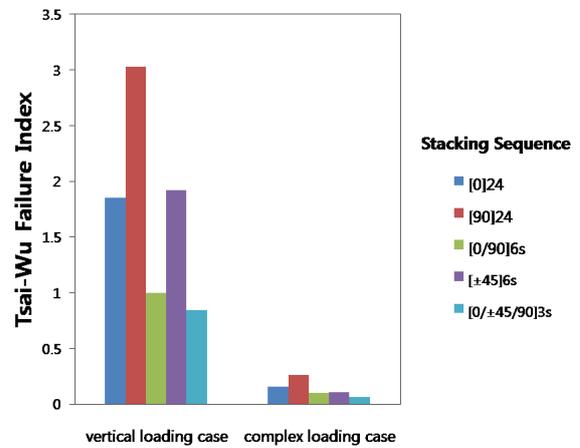


Fig. 7 Tsai-Wu failure index comparison between vertical loading case and complex loading case(at n=3).

Table 4 Weights of the aluminum wheel and composite wheel

	Aluminum bicycle wheel	Composite bicycle wheel
Weight(g)	825	668

Fig. 7에서 수직하중이 복합하중에 비하여 상대적으로 하중부하가 크므로, 최대 F.I.가 높게 나타남을 확인할 수 있다. 수직하중조건인 경우 [0/±45/90]_{3s}의 적층을 제외한 모든 적층 각 배열에서 최대 F.I.가 1을 초과하여 파손이 발생하였다. 복합하중조건에 경우, 5가지 적층변수에 대하여 최대 F.I.가 1미만으로 매우 낮기 때문에 수직하중에 비하여 안정적이다. 적층각 배열의 결정에 있어서 자전거 주행의 두 하중부하의 경우를 모두 만족시켜야한다. 또한 알루미늄 휠이 [0/±45/90]_{3s} 모델의 안전 계수 1.19와 동일 안전 계수를 만족하는 경우, 고급 알루미늄 자전거 휠에 사용하는 7000계열 알루미늄의 물성 값을 적용 시 Table 4와 같은 질량을 갖는다. 따라서 Fig. 7와 Table 4의 결과로부터 [0/±45/90]_{3s}의 적층 배열이 복합재 휠의 설계에 있어 필요 설계조건을 충족시키며 휠의 경량화를 최대화하는 가장 적합한 적층임을 보여준다.

4. 결 론

본 연구에서 Carbon/Epoxy 일방향 프리프레그 물성 값을 적용하여 자전거 휠의 유한요소해석을 통해 연구를 수행하였다. 이를 통하여 경량화와 요구되는 강도를 모두 만족하는 가장 적절한 자전거 휠의 적층각이 $[0/\pm 45/90]_{3s}$ 임을 제안하였고, 복합재 휠의 적층각 변수에 따른 F.I.분포를 비교하여 다양한 하중 조건 하에서의 파손 부위를 예측하였다. 또한 연구에서 제안된 적층의 복합재 휠의 경우, 기존 알루미늄 휠 대비 약 19%의 경량화가 가능함을 밝혔다.

후 기

위 논문은 문화체육관광부의 스포츠산업기술개발산업에 의거 국민체육진흥공단의 국민체육진흥기금을 지원받아 연구되었습니다.

참고문헌

- 1) Daniel, I.M., and Ishai O., *Engineering Mechanics of Composite materials*, Oxford University Press, London, 1994.
- 2) Kim, M.S., Han, D.C., Kim, S.J., and Lee, W.I., "Optimization of stacking sequence for composite golf club shafts," *Journal of The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 20, No. 1, 2007, pp. 1-7.
- 3) 권경배, 정성규, "자전거 산업 발전 전략보고서," *Korea Institute of Sport Science*, Seoul, 2007.
- 4) 권경배, 김현규, "자전거 프레임 구조최적화를 위한 해석 연구," *Korea Institute of Sport Science*, Seoul, 2008.
- 5) Salamon, N.J., and Oldham, R.A., "Analysis for design of spoked bicycle wheels," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 10, No. 4, 1992, pp. 319-333.
- 6) Kalyanasundaram, S., Lowe, A., and Watters, A.J., "Finite element analysis and optimization of composite wheelchair wheels," *Composite Structure*, Vol. 75, No. 1-4, 2006, pp. 393-399.
- 7) ASTM International, *Standard Specification for Manually Operated Front Wheel Retention Systems for Bicycles*, ASTM F2680.