

## 공기저항 및 강성을 고려한 선수용 자전거 프레임 설계

김태균\* · 임우철\* · 이태희\*†

\* 한양대학교 미래자동차공학부

### Development of Racing Track Cycle for Elite Players Considered Stiffness and Aerodynamic Effects

Taekyun Kim\*, Woochul Lim\* and Tae Hee Lee\*†

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

(Received January 23, 2013 ; Revised May 7, 2013 ; Accepted May 9, 2013)

**Key Words:** Aerodynamic Analysis(유동해석), Drag Coefficient(항력계수), Parametric Design(파라미터 설계), Stiffness Analysis(강성해석)

**초록:** 경기력 향상을 위한 자전거 프레임을 제작하기 위하여 주행 시 자전거 프레임에 발생하는 항력을 고려한 공기역학적 설계가 필요하다. 이를 위해 국제 사이클연맹 규격에 맞추어 초기 프레임을 설계 및 제작을 하였고 프레임에 발생하는 항력을 정량적 척도로 판단하기 위하여 항력계수를 이용하였다. 자전거 프레임의 공기저항을 최소화하기 위해 프레임 단면의 파라미터 설계를 실시하여 최적의 프레임의 형상을 도출하였다. 또한 자전거 프레임은 주행 시 선수에 의한 하중을 견딜 수 있어야 한다. 구조적인 측면에서 안정성을 갖춘 프레임을 제작하기 위하여 국제 사이클 연맹규격에서 제시하는 하중조건을 근거로 프레임의 강성을 평가하였고 이를 통해 선수용 자전거 프레임을 개발하였다.

**Abstract:** To improve cycling performance, the power output of the rider and the sources of resistance (e.g., air resistance, frame stiffness, and cycle mass) must be considered. From a mechanical viewpoint, we consider how the bike frame performance can be increased while decreasing the resistance. First, to improve the competitive ability of a racing track cycle, we should consider the stiffness of the bike frame including the pedal loading and aerodynamic effects when riding. Therefore, we obtained the cross-sectional area of each part of the bike frame and then aimed to minimize the drag force through an aerodynamic parametric study. In addition, the frame should remain safe under the loading applied by the rider. Under the guidelines of the UCI (union Cycliste Internationale) regulations, the bike frame has been evaluated under the proposed loading condition, and we developed a racing track cycle for elite cyclists.

- 기호설명 -

$C_d$  : 항력계수(drag coefficient)  
 $A_p$  : 투영면적(projection area of frame)  
 $V$  : 주행시 발생하는 유속  
 $\rho$  : 공기밀도  
 $D$  : 항력

### 1. 서 론

#### 1.1 연구배경 및 연구목적

자전거 트랙경기의 경기력 향상을 위해서 고려

해야 하는 요소는 크게 두 가지로 분류된다. 먼저 주행 시 자전거로 인하여 발생하는 공기저항과 선수로 인하여 발생하는 항력이다. 일반적으로 주행 시 선수로 인해 발생하는 공기저항은 전체의 약 2/3 이고 자전거프레임으로 인하여 발생하는 공기저항이 1/3 로 알려져 있다.<sup>(1)</sup> 주행 시 선수로 인하여 발생하는 저항은 주로 공기저항과 마찰저항이 있는데 실제로 25mph(40km/h)의 고속 주행 시에 발생하는 저항 중 90%이상이 주행방향으로부터 발생하는 공기저항이다.<sup>(2)</sup> 시합 중 공기저항을 줄이는 것은 승패를 좌우하는 요소 중 하나로 선정할 만큼 중요한 요소라고 할 수 있다.<sup>(3)</sup> 본 논문에서는 2009 년 국내에서 발표된 저탄소 녹색성장을 위한 자전거 육성 정책<sup>(4)</sup>과 더불어 성장하고

† Corresponding Author, thlee@hanyang.ac.kr

있는 자전거 시장의 추세에 맞추어 트랙경기용 자전거 Frame 설계를 실시하였다. 이를 위해 유동해석을 통하여 자전거 Frame 에서 항력이 가장 많이 발생하는 Frame 튜브를 선정하였고 이를 줄이기 위한 단면형상을 국제 사이클연맹 규격(Union Cycliste Internationale regulation : UCI regulation)에 맞는 범위 내에서 제시하였다.

또한 이렇게 개발된 자전거 Frame 에 대해 주행 시 선수로부터 페달, 안장, 핸들에 가해지는 하중을 고려하여 강성해석을 실시하였다. 강성해석을 위하여 상용소프트웨어 ANSYS 를 이용하였고 유동해석을 위해서는 ANSYS Fluent 를 이용하였다.

## 2. 프레임 설계

### 2.1 국제 사이클연맹 규격(UCI regulation)

UCI regulation 에서는 자전거 Frame 의 전체 길이, 안장의 길이, 지면으로부터 B.B.(bottom bracket) 까지의 거리, 자전거의 무게, Seat stay 와 Chain stay 단면의 단축과 장축 비 등의 규격을 제시하고 있다. 본 연구는 주행 시 Frame 의 공기역학적 설계를 위하여 UCI regulation 에서 제시하는 Front wheel 부터 B.B.까지의 거리, Rear wheel 부터 B.B.까지의 거리 등, 완성된 자전거에 대한 규격을 제외한 Frame 의 전체 길이 및 단면 형상에 관한 규격을 고려하였다. Frame 형상, 튜브형상에 관련된 UCI regulation 은 각각 Fig. 1, 2 와 같다. 이 때 각 튜브의 정량적인 규격은 Table 1 과 같고 이를 근거로 초기 자전거 Frame 은 UCI regulation 을 위배하지 않는 범위에서 설계하였다.

### 2.2 유동해석

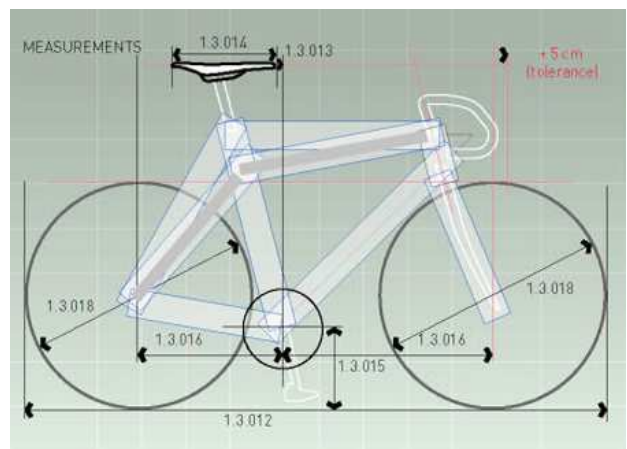
초기프레임(H-frame)에서 공기역학적 관점을 고려한 Frame 을 개발하기 위해 공기저항을 측정하는 정량적 척도가 필요하다. 이를 위해 다음 식과 같이 항력계수를 사용하였다.

$$C_d = \frac{D}{A_p \rho V^2 / 2} \quad (1)$$

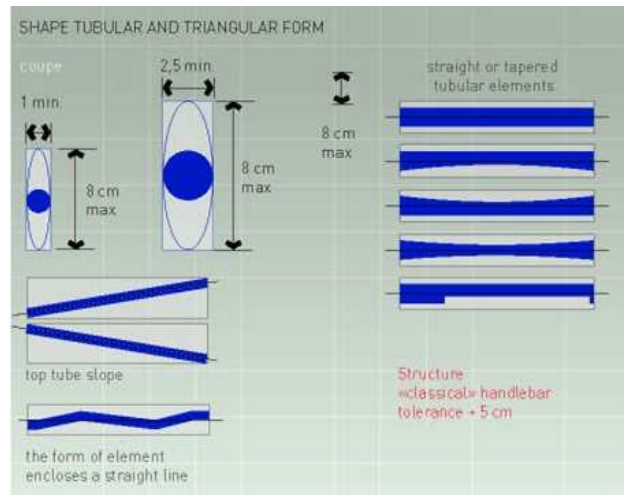
여기서  $C_d$  는 항력계수,  $A_p$  는 Frame 의 투영면적,  $\rho$  는 공기의 밀도,  $V$  는 공기의 유속이다. UCI regulation 에 위배되지 않는 조건으로 H-frame 을 설계하고 이를 통해 주행속도 15 m/s(54 km/h)의 조건하에 유동해석을 수행한 결과 Fig. 3 과 같이 Head tube 와 B.B.에서 가장 큰 항력이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 유동해석의 결과를 보면 Frame 의 최대항력계수는 1.9402e-02 이다. Frame

**Table 1** UCI regulation about cycle frame components

Frame component	UCI regulation
Head tube	25mm~80mm
Top tube	25mm~80mm
Down tube	25mm~80mm
Seat tube	25mm~80mm
Chain stay	10mm~80mm
Seat stay	10mm~80mm



**Fig. 1** UCI regulation about cycle frame



**Fig. 2** UCI regulation about cross-section area and shape of cycle frame

전체의 압력분포를 살펴보면 Head tube 에서 최대 150MPa 의 압력이 발생하고 Down tube 에서 90MPa, B.B.에서 130MPa 의 정압이 발생한다. 따라서 UCI regulation 을 만족하는 범위 내에서 공기저항이 최소가 되는 단면형상을 찾기 위해서 파라미터 설계(parametric design)를 수행하였다.

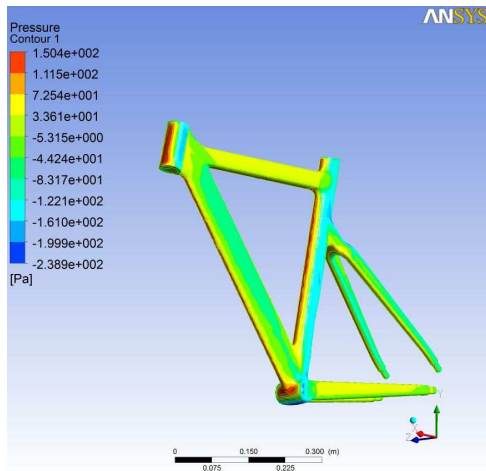


Fig. 3 Aerodynamic analysis result of H-frame

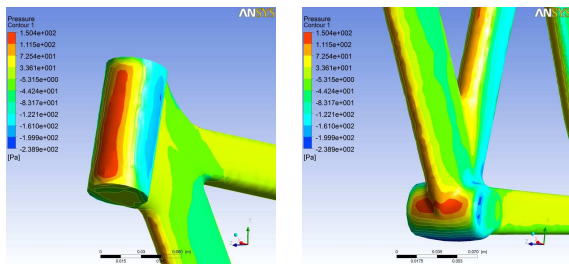


Fig. 4 Pressure of head tube and B.B. about H-frame

2.2.1 단면형상 설계

H-frame의 유동해석 결과 주행 시 발생하는 공기저항을 최소화시키기 위해서는 항력이 작은 단면을 도출해야 한다. UCI regulation에서는 Frame의 단면형상을 원형, 타원, 눈방울모양(tear drop)을 허용하고 있다. 본 논문에서는 주행 시 공기저항이 최소가 되는 최적의 타원형 단면형상을 제시하기 위하여 2 차원 유동해석을 실시하였다. 항력을 줄이기 위해 Fig. 5와 같이 Head tube의 장축을  $X_1$ , 단축을  $X_2$ 로 설정하여 파라미터 설계를 실시하였다. Head tube에 Front wheel과 연결해주는 Fork를 삽입해야 하기 때문에  $X_2$ 를 고정 파라미터로 설정하였다. UCI regulation에 의하여 Head tube 단면의 지름은 25mm~80mm를 만족해야 하기 때문에 Fig. 5와 같이 Head tube의 주행방향 길이  $X_1$ 을 변수로 설정하였다.  $X_1$ 의 최소길이가 23mm이므로  $23\text{mm} \leq X_1 \leq 57\text{mm}$ 를 만족하는 범위에서 항력이 최소가 되는 형상을 얻기 위하여 유동해석을 실시하면 Table 2와 같이  $X_1$ 의 길이가 46mm일 때 항력 계수가 가장 작은 것을 확인할 수 있었다. 이는 타원의 장축  $X_1$ 과 고정 파라미터인 장축  $X_2$ 의 비

Table 2 Results of drag coefficient about head tube

$X_1$ (mm)	$X_2$ (mm)	Drag force	Drag coefficient
23.0	46	17.30475	0.251135
27.6	46	18.30023	0.265582
32.2	46	16.82460	0.244166
36.8	46	16.18939	0.234948
41.4	46	16.86808	0.244798
46.0	46	16.16948	0.234659
50.6	46	17.22528	0.249981
55.2	46	16.34649	0.237228

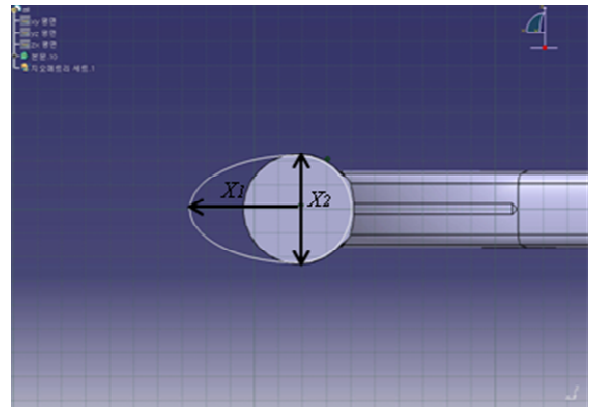


Fig. 5 Parametric design of head tube

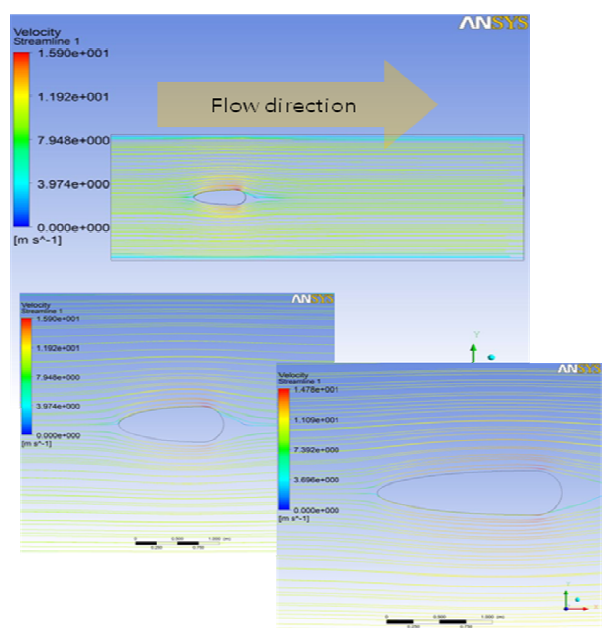


Fig. 6 Two dimensional parametric study

가 2:1 일 때 공기저항이 최소가 된다는 것을 나타낸다. 이 비율을 고려하여 항력을 줄이기 위해 Down tube 및 Seat tube 의 타원 형상의 비율을 동일한 2:1 로 설정하여 설계하였다. 또 B.B.에서의 항력을 최소화하기 위하여 ANSYS Fluent 를 이용하여 Down tube 로부터 유선형으로 이어지도록 B.B. 형상을 도출하였다.

개발된 Frame 은 Table 3 과 같이 UCI regulation 에서 제시하는 Frame 규격을 모두 만족하는 것을 확인할 수 있다. 이렇게 설계된 Ha-frame 의 유동 해석을 H-frame 과 같은 조건으로 수행하면 Table 4 와 같이 항력이 초기 Frame 보다 약 8% 감소한 것을 확인할 수 있다. 이렇게 도출한 형상을 기존의 H-frame 모델의 Head tube 와 Down tube 에 적용하여 Fig. 7 과 같이 Frame 을 개선하였다. Frame 의 유한요소모델은 Fig. 8 과 같고 이 때 프레임과 검사체적을 포함한 Element 개수는 1,170,009 개, Node 는 1,712,430 개이다.

개선된 Ha-frame 을 기존 Frame 과 같은 조건하에서 유동해석을 실시하면 Fig. 9, 10 과 같이 Head tube 와 B.B.에서 압력이 감소한 것을 확인할 수 있다.

2.3 구조해석 및 강성해석

UCI regulation 에서 제시하고 있는 수평하중 (Level loading), 수직하중(Vertical loading), 페달하중 (Pedal loading) 해석을 기존 H-frame 과 개선된 모델 Ha-frame 에 관하여 수행하였다. 수평하중 테스트는

**Table 3** Each tube size of Ha-frame compared with UCI regulation

Frame Components	Each tube size of Ha-frame	UCI regulation	Remarks
Head Tube(mm)	46~70	25~80	O
Top tube(mm)	30~40	25~80	O
Down tube(mm)	25~54	25~80	O
Seat tube(mm)	30~50	25~80	O
Chain stay(mm)	16.2~18	10~80	O
Seat stay(mm)	16.5~19.3	10~80	O

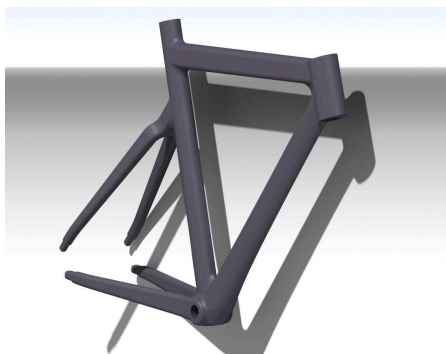


Fig. 7 Geometry of Ha-frame

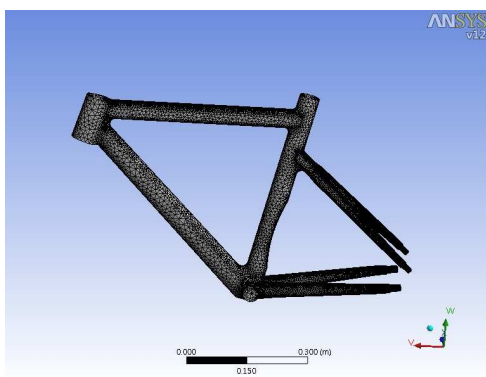


Fig. 8 FEM model of Ha-frame

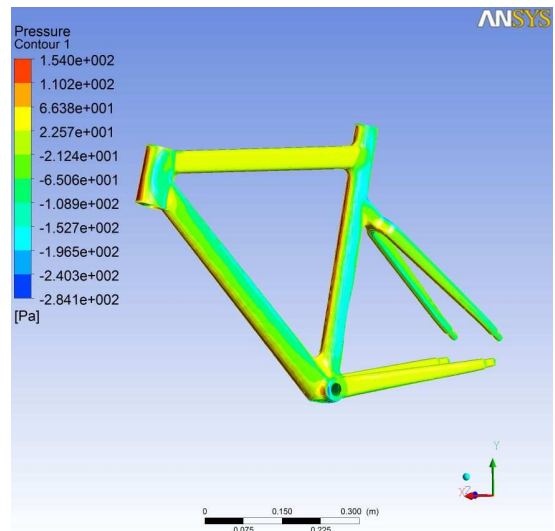


Fig. 9 Aerodynamic analysis result of Ha-frame

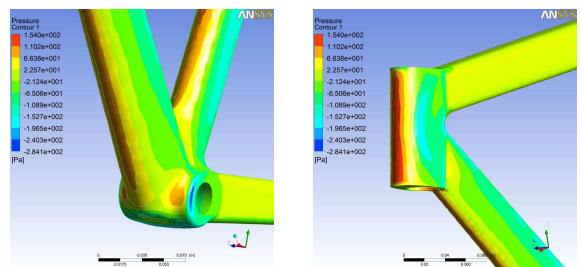


Fig. 10 Pressure of head tube and B.B. about Ha-frame

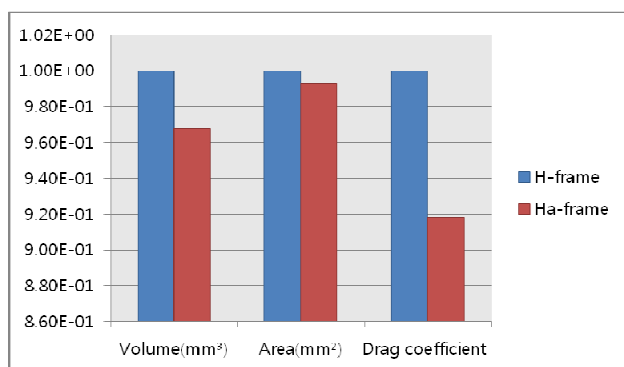
Rear end 를 수평방향으로 회전만 가능하게 하고 Head tube 는 회전과 수평방향 움직임이 가능케 하기 위하여 Dummy fork 로 고정하였고 포크를 Frame 방향으로 1000N 의 수평하중을 부여하여 해석하였다. 수직하중 테스트는 Seat tube 중심선에서 70mm 떨어진 지점에 1200N 의 수직하중을 부여하여 해석하였고 페달하중 테스트는 크랭크 중심으로부터 150mm 떨어진 위치에 수직으로부터 7.5 도 기울기로 1000N 의 하중을 부여하여 해석을 실시하였다. 각 실험에 의한 최대 응력 및 최대 변위를 H-frame 과 Ha-frame 에 대하여 비교하였다. Table 4 와 같이 Ha-frame 이 H-frame 보다 부피는 감소하였지만 Table 5 에서 각각의 해석결과를 살펴보면 응력에 있어서는 기존프레임에서의 최대응력보다 감소하여 향상된 결과가 나온 것을 확인할 수 있다.

**Table 4** Results of drag coefficient about each frame

	H-frame	Ha-frame
Volume(mm <sup>3</sup> )	2.6033e+006	2.5182e+006
Area(mm <sup>2</sup> )	3.4554e+005	3.4299e+005
Drag coefficient	1.9402e-02	1.7814e-02

**Table 5** Structural analysis results of each frame

		H-frame	Ha-frame
Level loading	Max. stress(MPa)	12.42	2.707
	Stiffness(N/m)	0.711	0.619
Vertical loading	Max. stress	1.993	1.886
	Stiffness	17.14	17.02
Pedal loading	Max. stress	1.958	1.840
	Stiffness	16.13	15.87

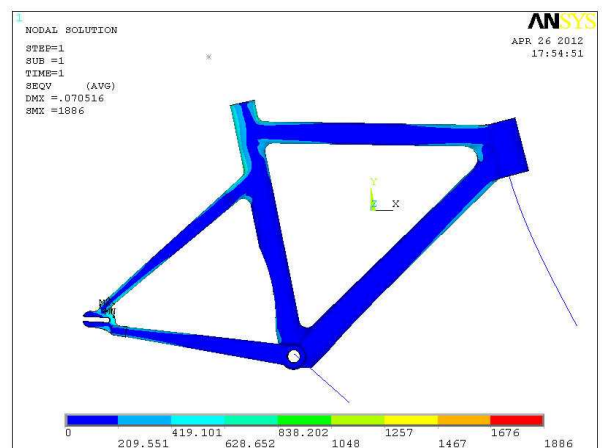


**Fig. 11** Results of drag coefficient about each frame

Fig. 12 는 Level loading 에 관한 von Mises stress 의 결과이며 최대 응력은 Head tube 와 Down tube 가 이어지는 부분에서 발생한다. Vertical loading, Pedal loading 해석 결과는 Fig. 13, 14 와 같이 모두 Dropout 과 Frame 이 연결되는 부분에서 최대응력이 발생하지만 이를 제외하면 Vertical loading 해석 결과에서는 Seat tube 와 Seat stay 가 연결되는 부분에서 최대응력이 발생한다. 전체적으로 응력이 Seat tube 의 상단 쪽에 집중적으로 분포되어 있는 것을 알 수 있다. 또 Pedal loading 의 결과에서는 Dropout 을 제거하면 Bottom bracket 에서 최대응력이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 3 가지 조건하에서 수행한 구조해석결과 모두 H-frame 의 결과보다 향상되었다. 이는 H-frame 의 Down tube 폭을 줄이고 Bottom bracket 의 길이는 늘리는 설계를 하여 응력이 집중되는 부분을 제거했기 때문이다.



**Fig. 12** Ha-frame von Mises stress results about level loading



**Fig. 13** Ha-frame von Mises stress results about vertical loading

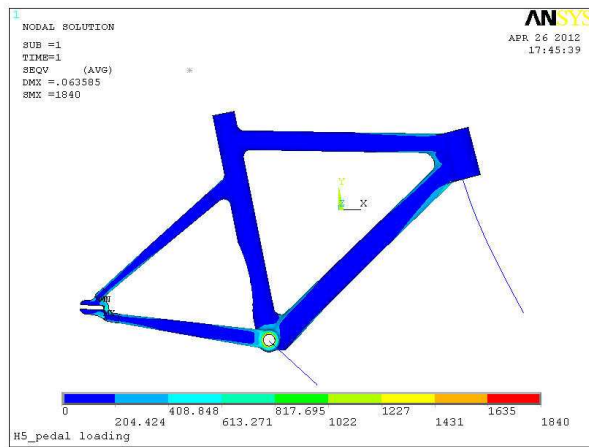


Fig. 14 Ha-frame von Mises stress results about pedal loading

### 3. 결 과

트랙경기의 경기력 향상을 위한 Frame 설계를 수행하였다. 경기력을 향상시키기 위해서는 주행 시 Frame 으로 인하여 발생하는 항력을 고려한 설계가 필요하다. 이를 위해 H-frame 에서 주행 시 가장 많은 항력이 발생하는 Frame 요소를 선정하였다. 그 결과 Head tube 와 Down tube 에서 공기저항이 가장 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었고 이때 발생하는 공기저항을 줄이고 주행시 성능을 향상시키기 위하여 ANSYS Fluent parametric study

를 통해 주행 시 최적의 Frame tube 형상을 도출하였다. 이를 통해 자전거 Frame 의 항력계수를 감소시켜 결과적으로 공기저항을 감소시키는 Ha-frame 설계를 수행하였다.

또 이렇게 개선된 Ha-Frame 의 구조적 안정성을 평가하기 위하여 UCI regulation 에서 제시하는 Level loading, Vertical loading, Pedal loading 조건을 통해 각각의 하중조건에 대한 강성해석을 수행하였다. 해석결과 Ha-Frame 은 H-Frame 보다 강성이 향상된 것을 확인할 수 있었다.

### 참고문헌

- (1) Parker, B. A., Franke, M. E. and Elledge, A. W., 1996, "Bicycle Aerodynamics and Recent Testing," *American Institute Aeronautics and Astronautics, AIAA-96-0557*
- (2) Parker, B. A., 1994, "A New Drag Measurement System for Wind Tunnel Testing of the Racing Bicycle and Rider to Determine a Drag Configuration," Air Force Institute of Technology
- (3) Moore, J. K., 2008, "Aerodynamics of High Performance Bicycle Wheels," University of Canterbury
- (4) Kwon, K. B. and Jeong, S. K., "Development Strategy Report of the Bicycle Industry," Korea Institute of Sport Science, Seoul, 2007.