

굽힘과 비틀림 강성을 갖는 카트 새시 프레임의 설계와 해석

장성국* · 강신한

한라대학교 기계공학부, 자동차공학전공

Design and Analysis of Kart Chassis Frame for Bending and Torsional Stiffness

Sungkuk Jang* · Shinhan Kang

Department of Automotive Engineering, Halla University, Kangwon-do 220-712, Korea

(Received 19 February 2003 / Accepted 4 April 2003)

Abstract : There have been many attempts to make kart chassis domestically to lower the price of complete kart. However nobody made a successful chassis due to the lack of understanding the characteristics of kart chassis frame. In this work, a baseline chassis frame under the bending and torsional load is studied. Design target is that the baseline chassis frame is quite adequate not only for the beginners but also for the beginning racers. Results from the analysis are used as a guide to design or modify the baseline chassis with the goal of proper torsional stiffness. Minimum increase in weight is being forced. As a result, the baseline chassis frame was designed, made, and tested. Based on the design results, complete karts are being manufactured by the small size domestic company and these karts are being sold and run in the market.

Key words : Kart(카트), Chassis(새시), Frame(프레임), Torsional stiffness(비틀림강성), Bending stiffness(굽힘강성), Finite element analysis(유한요소해석)

1. 서론

모터스포츠는 월드컵, 올림픽 등과 더불어 세계 3대 스포츠 중의 하나로 시청자의 수, 관련 사업의 경제적 효과 등을 고려하면 단연코 세계 최고의 스포츠라고 할 수 있다. 국내 모터스포츠 수준은 자동차 생산 세계 5위 권에는 걸맞지 않게 매우 낙후된 수준이다. 모터스포츠는 120년여의 역사를 가지고 있지만, 우리나라는 1980년대 중반부터 동호인 수준의 경기가 열려오다 1990년대 중반부터 본격적인 경기에 힘입어 국내에도 프로 드라이버의 탄생을 가져왔다.

1999년 11월, 경상남도 창원에서 국제 Formula 3 경기가 개최되었는데 국내의 모터스포츠 수준을 한 단계 끌어올리는 역할을 하였다. 이에 따라 국내에서도 레이싱 드라이버에 대한 관심이 급격히 높아져 체계적인 드라이빙 교육에 관한 문의가 급증하고 있다. 체계적인 드라이빙 교육의 가장 기초가 되는 것이 카트(kart; Fig. 1)이다. 기본기를 익히기에 매우 적당한 카트는 구조적으로 Formula 1에 버금가는 형태를 가지고 있어 경주 입문용으로는 최고의 선택이 될 수 있다. 그러나 드라이빙에 대한 체계적인 교육은 일부 레이싱 팀에서 국부적으로 수행되고 있는 정도이며 모터스포츠에 대한 학문적인 접근도 국내에서는 최근에 들어서야 소개되기 시작

*To whom correspondence should be addressed.
skjang@halla.ac.kr

하였다.

모터스포츠가 자동차 산업에 미치는 영향에 대한 연구¹⁾를 시작으로 자동차 경기가 자동차 발전에 어떻게 기여해 왔는가에 대한 조사²⁾도 소개되었다. 자동차 산업에 대한 영향뿐만 아니라 드라이빙 기술에 대한 연구³⁾도 소개되었는데 직각 코너에서 아웃-인-아웃(out-in-out) 방식으로 주행을 하여야 하는 이유를 이론적으로 소개한 것이며 코너의 출구 속도가 직선 주로를 주파하는데 어떠한 영향을 주는지에 대한 연구⁴⁾도 소개되었다. 또한 자동차 경주 중 충돌형태에 따른 충돌 후 궤적에 대한 연구⁵⁾도 소개되어 모터스포츠와 관련한 일반적인 분야에 대한 접근이 시도되고 있음을 알 수 있다.

경주용 차량의 새시 프레임은 비틀림 강성이 증가될수록 차량 거동의 대부분을 현가장치로 제어할 수 있다는 점에서 차량의 조종성 면에서 매우 유리한 것으로 알려져 있다. 즉, 새시가 충분한 강성을 가지고 있으면 스프링 상중량(sprung mass)과 스프링 하중량(unsprung mass) 사이에 작용하는 롤 강성(roll stiffness)이 전적으로 현가장치에 의존하기 때문에 차량의 핸들링 특성을 정확히 예측할 수 있어 차량의 조종성 면에서 매우 유리한 것이다. 그러나 카트에서는 현가장치와 차동장치가 없어 이들 장치를 대신하는 새시 프레임을 구성해야하는, 기술적으로 매우 어려운 특성을 가지고 있다.

이에 본 연구에서는 현가장치와 차동장치의 역할을 수행하는 새시 프레임의 구조적 특성을 분석하며, 이를 바탕으로 국산 카트 개발의 기초 기술을 확립하고자 한다.

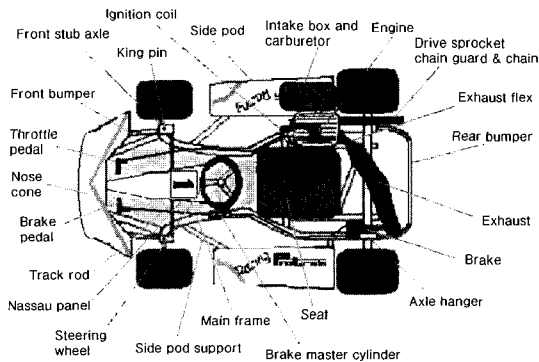


Fig. 1 Parts of kart

2. 카트 프레임

카트에는 차동장치가 존재하지 않으므로, 선회할 때 카트가 직진하려는 경향이 매우 강하며 특히, 접지력이 강한 타이어를 사용하는 경우에는 더욱 선회가 어렵게 된다. 이를 극복하기 위한 방법으로 steering geometry 설계 시 Fig. 2에서와 같이 후륜 내측 바퀴가 들리도록 한다. 이 경우, 후륜은 한 개만 접지력을 가지므로 차동장치의 역할을 대신할 수 있다. 그렇지 않을 경우, 언더 스티어(under steer) 경향이 나타나 코스의 외부로 이탈하여 충돌의 위험성이 있다. 반면에 오버 스티어(over steer) 경향이 있게 되면 코스 내측의 안전 보호 벽에 회전하며 속도가 줄면서 충돌하게 되어 초보자의 경우 언더스티어보다 상대적으로 안전하다고 할 수 있다. 이 밖에도 원심력의 영향으로 카트의 내측이 들리는 점도 함께 활용하면 steering geometry 설계시 큰 변위를 주지 않더라도 차동장치의 역할을 충분히 소화할 수 있는 것이다.

교육용 및 초급 경기용인 경우, 이러한 효과가 충분히 나타나도록 새시 프레임의 비틀림 강성이 높게 되도록 설계한다.

내측 바퀴가 들리는 경우 차동장치 역할을 대신하는 장점이 있지만, 경기용 카트에 있어서는 고속으로 주행하고 빠른 선회가 가능하게 되어 있어 한쪽 바퀴만으로 회전하는 경우, 접지력이 약해져 충분한 속도를 유지할 수 없다는 문제점이 있다. 경기용 카트의 드라이버는 이미 충분한 기능을 보유하고 있으므로 선회 시에도 충분한 구동력과 접지력을 유지하는 프레임 설계가 필요하다. 그러므로 이 경우는 새시 프레임의 비틀림 강성을 오히려 조금



Fig. 2 Lifting off of inside rear tire

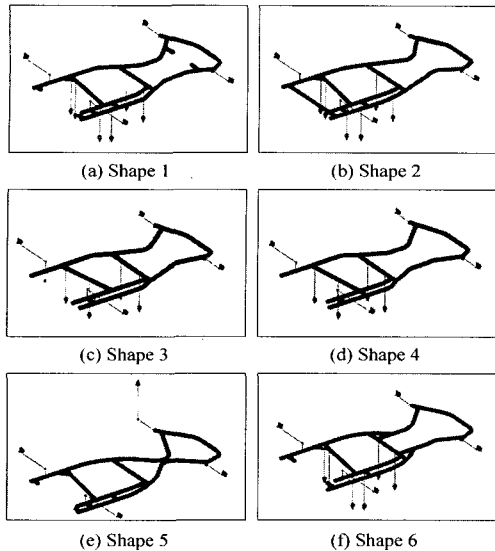


Fig. 3 Selected kart frame types

낮게 하여 선회 시 프레임이 비틀리게 하는 것이 유리하다. 이런 점을 고려하여 본 연구에서는 카트 선진국에서 출시되고 있는 카트새시 프레임의 일반적인 형상 여섯 가지(Fig. 3)를 비교 분석하였다. 이들 결과를 활용하여 초보자 교육 및 초급 경기자용에 적합한 카트 새시의 기본 모델을 설정하여 국산 카트를 제작하는 기법을 소개한다. Fig. 3에서 그림 내부에 표현된 것은 하중 및 지지점 등 FE해석에 사용된 정보이고 여기에서는 프레임의 전체적인 윤곽을 보여주는 것에 의미를 두고 있다.

3. 카트 새시 개념과 설계 제약 사항

카트에서 가장 중요한 부품은 새시 프레임과 뒤 차축이라고 할 수 있다. 앞바퀴는 독립식으로 되어 있어 차축이 없다. 새시 프레임의 기능은 운전자를 보호하는 기능과 더불어 엔진, 조향장치, 제동장치, 연료장치 등을 지지할 수 있는 견고한 플랫폼을 제공하는 것이다. 카트의 새시 프레임은 원형 파이프를 사용하며 카트의 등급에 따라 파이프의 직경과 두께가 결정된다. 뒤 차축의 경우에도 중공축이나 중실축을 사용할 수 있으며 일반적으로 FIA(국제자동차연맹)에서 규정하고 있는 축을 사용한다.

카트의 제원은 등급에 따라 차이가 있으나 본 논문에서 연구된 카트의 제원은 Table 1과 같다. 프레

Table 1 Specifications of basic kart frame

	Basic kart	Competing kart
Tube(mm)	∅30	∅30
Total length(mm)	1480	1480
Wheel base(mm)	1050	1040
Rear axle(mm)	∅30(hollow)	∅30(solid)
Front width(mm)	660	640
Rear width(mm)	580	580

임의 재질은 일반적으로 고장력 강관이나 크롬-몰리브덴 합금관을 사용한다. 프레임의 연결부는 연속 용접(continuous weld)을 하여 충분한 강성 및 강도를 갖도록 하여야 한다.

한국자동차경주협회의 카트 규정집⁶⁾이나 FIA의 규정집⁷⁾에는 카트 설계시의 제약사항에 대한 것이 설명되어 있다. 이 규정은 최우선적으로 안전을 고려하며, 비용의 최소화와 더불어 공정한 경쟁이 가능하도록 설정되어 있다. 그 중 중요한 몇 가지를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 새시프레임은 주행 중 발생하는 충격에 충분히 견딜 수 있어야 한다.
- 2) 프레임의 각 파트는 용접으로 단단히 구속하여야 한다.
- 3) 모든 완충장치는 금한다.
- 4) 휠 베이스는 101cm~127cm 범위여야 한다.
- 5) 휠 트랙은 휠 베이스의 2/3 이상이어야 한다.
- 6) 전체 높이가 시트를 제외하고 60cm를 넘어서는 안된다.

이와 같은 제약에도 불구하고 카트 새시 프레임 설계는 다양한 프레임 형상과 그에 따른 강성, 강도의 다양함에 의하여 그 성능 및 특성이 거의 무한하다 할 수 있다. 특히 뒤 차축과의 조합도 함께 고려하면 무한한 종류의 카트 새시 설계가 가능한 것이다.

4. 유한 요소 모델

카트 새시 프레임 유한 요소 모델(Fig. 4)을 MSC Nastran for Windows를 이용하여 구성하였다. 바(bar) 요소를 사용하여 프레임을 모델링 하였으며 뒤 차축의 경우는 프레임과 비교할 때 강성이 매우 크므로 강체(rigid) 요소를 사용하여 모델링 하였다. 뒤 차축과 프레임을 연결하는 브라켓은 바요소를

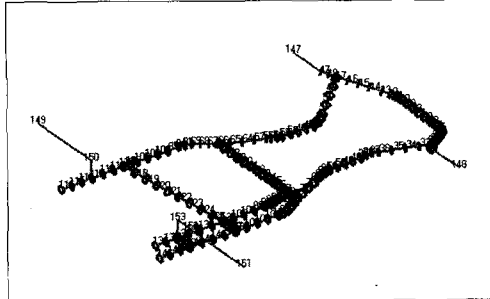


Fig. 4 Kart frame FE model

사용하여 해석의 용이성을 추구하였다. 본 연구에서는 여러 형태의 새시 프레임에 대한 강성값을 상대 비교하는 것이 주된 목적이므로 재질의 E, ν , 밀도 등은 일반 강철 값을 사용하였다. 다음은 모델링에 적용된 가정이다.

- 1) 용접은 완전하여 연결부위도 연속된 파이프로 가정한다.
- 2) 시트 지지대에 의한 프레임의 강성 변화는 고려하지 않는다.
- 3) 뒤차축의 강성은 프레임용 파이프의 강성에 비하여 매우 높으므로 강체라고 가정한다.
- 4) 모든 외부의 하중 및 충격은 바퀴를 통하여 입력된다.
- 5) 현가장치가 없으므로 외부 하중 및 충격은 중간에 흡수되지 않고 그대로 프레임에 전달된다.

5. 하중조건 및 경계조건

굽힘 강성과 비틀림 강성을 분석하기 위한 하중 조건 및 경계 조건은 다음과 같다.

1) 굽힘 하중 : 시트에 체중 80kg의 운전자가 승차하고 있다고 가정하여 프레임 상의 시트 고정점에 하중을 균등하게 분산시켰다. 경계조건은 앞, 뒤 바퀴가 장착되는 지점에 적용하며 x, y, z축 변위는 고정($u_x=u_y=u_z=0$)되고 y, z축을 중심으로 하는 회전 또한 고정($\theta_y=\theta_z=0$)된다.

2) 비틀림 하중 : 앞바퀴가 고정되는 지점에 크기는 같고 방향은 반대인 수직력을 좌우에 작용시킨다. 실제로 주행 중에 발생하는 비틀림 하중의 크기는 카트 속도와 회전 각도에 따라 다르게 나타나므로, 본 연구에서는 여러 가지 형상의 프레임 강성값

을 상대 비교하는데 그 목적을 두어 수직력 F는 프레임에 비틀림을 주기 위한 임의의 값을 취하였다. 그리하여 토크 $T=F \cdot d$ 를 발생하게 된다. 여기서 d는 좌우 하중 작용점 사이의 거리이다. 경계 조건은 뒤 차축에 바퀴가 고정되는 지점에 적용시켰다. x, y, z 축 상의 변위는 고정($u_x=u_y=u_z=0$)되고 y, z 축을 중심으로 하는 회전 또한 고정($\theta_y=\theta_z=0$)된다.

굽힘 하중의 경우, 운전자의 하중이 프레임의 수직방향 처짐을 초래하지만 충분한 최저지상고를 가지고 있으므로 프레임이 지면에 닿는 일은 없다고 볼 수 있으며, 카트의 운동 특성에도 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 프레임에 적용된 토크($T=F \cdot d$)는 프레임을 비틀는 효과를 나타낸다. 카트 프레임은 일반적으로 좌우 대칭이 아니므로 비틀림 각 또한 좌우의 절대 크기가 같을 수 없다. 하중점에서의 z축 상의 변위값(u_z)을 측정하여 프레임의 비틀림 강성을 결정한다.

6. 결과 및 설계

6개의 프레임에 대한 굽힘과 비틀림 강성에 대한 결과가 Table 2에 나타나 있다. 굽힘 하중을 받는 경우 6개의 프레임이 거의 같은 수준의 변위를 갖는다. 카트의 최저지상고가 40mm 정도이므로 6개의 프레임은 모두 충분한 굽힘 강성을 확보하고 있다. 비틀림 하중의 경우에는 변위 값의 변화가 매우 심함을 볼 수 있다. 즉 변위가 매우 작을 경우, 프레임이 충분한 비틀림강성을 가지고 있어 회전시 프레임이 강체처럼 운동을 하여 steering geometry 특성 상 후륜 내측 바퀴가 들러 집지력을 상실하면서 차동장치 역할을 충분히 수행하고 있음을 의미한다. 이 경우 구동력이 충분히 노면에 전달되지 않아 속

Table 2 Maximum deflections under bending and torsional loads

Shape types	Bending deflection (mm)	Torsional deflection (mm)
Shape 1	3.82	96.2
Shape 2	3.82	85.6
Shape 3	3.40	57.6
Shape 4	4.02	88.6
Shape 5	4.26	118.1
Shape 6	3.89	89.4

도저하와 오버스티어 현상이 발생할 수 있음을 유념해야 한다.

형상 5의 경우, 비틀림 변위 값이 다른 형상에 비해 매우 큰 것을 알 수 있으며 이것은 선회 시 프레임이 비틀림을 크게 일으켜 후륜 2개 모두 접지력을 잃지 않고 있음을 의미한다. 이 경우는 충분한 구동력이 전달되기 때문에 선회 시에도 속도를 유지할 수 있어 운전 기술이 습득된 경기용 카트 운전자에게 적합한 프레임형상이라 할 수 있다. 물론 비틀림 강성이 너무 약하게 되면 직진시에 약간의 노면 변화에도 프레임이 비틀리게 되어 직진 성능의 약화를 초래할 수 있으므로 적정 수준의 비틀림 강성을 반드시 유지하여야 한다.

본 연구에서는 카트 프레임 개발의 주된 목표가 초보자 운전 및 초급 경기용에 적합한 프레임의 설계이므로 형상 4를 목표 프레임으로 설정하였다.

형상 2의 경우도 목표 프레임으로 적합할 수 있지만 형상 4보다 무게가 커져 선택에서 제외되었다. 형상 4는 다른 형상과도 굽힘 강성은 동일한 수준이며 비틀림 강성은 중간정도로 차동장치 역할을 충분히 수행하면서도 구동 접지력을 많이 잃지 않게 되는 장점이 있는 것이다. 그리하여 해석의 결과를 이용하여 Fig. 5에 의거한 상세도면을 작성하여 시작자 제작에 착수하였다. 그러나 제작에 필요한 기술과 3차원 파이프 벤딩기, 로봇 용접기와 같은 장비가 부족하여 실제 제작 과정에서는 앞쪽 프레임 부위와 사이드 메인 프레임 부위의 용접부분이 로봇 용접에서나 가능할 정도로 공간이 부족하여 제작이 불가능하게 되었다. 특히 스핀들 브라켓이 장착되어지는 공간과의 간섭으로 용접이 사실상 불가능하게 된 것이다. 임시로 치수를 변경하여 제작을 가능하게 하였으나 실제 주행 시험에서 새시 프레임의 비틀림이 상대적으로 크게 나타나 선회 시 언더스티어 경향을 나타내었다. 이는 초보자 교육용으로는 부적합한 것으로 추가적인 설계 변경이 요구되었다.

형상 4와 유사한 비틀림 강성을 유지하는 동시에 무게 증가를 최소화시키는 프레임을 유한요소해석을 이용하여 찾아내어 설계를 변경한 결과가 Fig. 6이다. 이 프레임은 수작업을 통한 용접의 용이성도

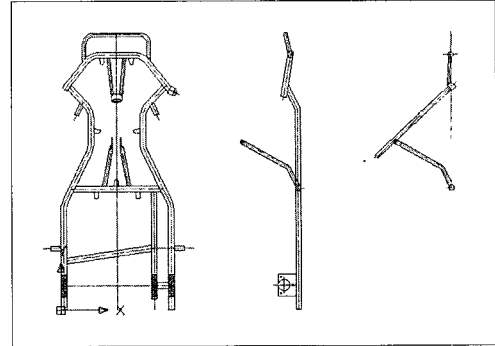


Fig. 5 The drawings of initial frame

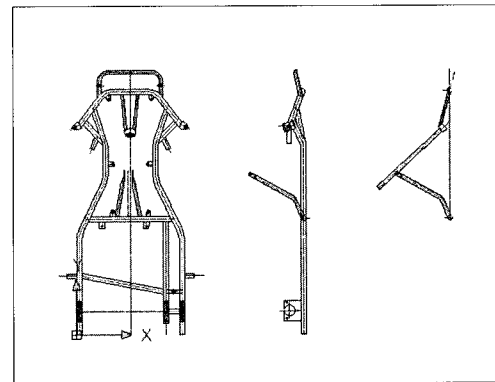


Fig. 6 The drawings of modified frame

함께 고려하여 제작을 간편화시켰다. 비틀림 강성은 Fig. 5의 형상을 갖는 프레임과 비교하여 약 2% 정도 증가하였으며 무게는 약 1% 정도 증가하게 되었다.

7. 결론

이상의 연구 결과 프레임의 형상이 비틀림 강성에 미치는 영향은 매우 크다는 것을 확인할 수 있었다. 특히 초보자 교육용에 활용되는 프레임과 경기용 프레임의 경우에는 굽힘 강성의 특성은 유사하지만 비틀림 강성의 경우에는 차량의 주행 특성을 고려하여 상이점이 매우 크다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 프레임의 특성을 정확히 구현하기 위해서는 제작 특성상 파이프 벤딩, 원통형 파이프의 용접, 용접에 따른 변형 특성 등을 고려하여 steering geometry가 확정되어야 한다. 본 논문에서 언급하지는 않았으나 후륜차축의 강성에 따른 차량특성 또

한 반드시 고려되어야 한다. 더욱이 시트를 고정하는 지지대에 의한 비틀림 강성의 변화까지 고려하여야 최고 수준의 경기용 프레임 설계가 가능해져 수출시장에서의 경쟁도 가능할 것이다. 이에 대한 상세한 내용은 후속 연구에서 수행될 예정이다.

References

- 1) S. K. Jang, S. T. Chung, "The Effect of Motorsports on the Automobile Industry," 2001 KSAE Spring Conference Proceeding, pp.494-499, 2001.
- 2) S. K. Jang, H. J. Won, "The Effect of Racing on the Automobile Development," Education of Automotive Technology Workshop, KSAE, pp.5-29, 2001.
- 3) B. Beckman, S. K. Jang, H. J. Won, "Vehicle Performance Simulation Program Development Considering the Racing Lines on the 90 Degree Corners," 2002 KSAE Spring Conference Proceeding, pp.1481-1485, 2002.
- 4) S. K. Jang, B. Beckman, "A Study on the Relation between the Time to Go Down a Straight and the Speed Entering the Straight," 2002 KSAE Autumn Conference Proceeding, pp.1058-1062, 2002.
- 5) S. K. Jang, S. S. Ko, C. K. Kim, "A Study on the Trajectory of Cars based on the Accident Pattern during the Car Racing," 2002 KSAE Autumn Conference Proceeding, pp.1069-1074, 2002.
- 6) KARA Karting Regulations : KARA, 2001.
- 7) FIA 2001 Karting Technical Regulations : CIK-FIA, 2001.