

궤적주행 시 차체 종류에 따른 비틀림에 관한 연구

최윤종¹, 이준성^{2*}

¹다산엔지니어링 기술연구소

²경기대학교 기계시스템공학과

Study on Torsion due to Automotive Body Type at Track Driving

Youn-Jong Choi¹ and Joon-Seong Lee^{2*}

¹Research Institute, DASAN Engineering

²Dept. of Mechanical System Engineering, Kyonggi University

요 약 카트 차체에는 현가장치와 차동장치가 존재하지 않으므로 카트주행 중 발생하는 프레임의 변형은 탄성변형으로 인한 주행성능과 프레임의 피로수명에 영향을 미친다. 선회주행 시 비틀림 변형에 의한 카트의 거동은 이 두 가지 변형에 결정적 원인을 제공한다. 이러한 곡선구간에서 카트의 동적 거동을 분석하기 위하여 GPS를 이용하여 차량의 궤적을 추적하고 카트 프레임 강에 작용하는 비틀림 응력을 측정하였다. 레저와 레이싱 카트 프레임의 기계적 성질을 파악하기 위해 재질 분석과 인장시험을 실시하여 각 프레임의 재료 특성을 분석하였다. 비틀림 응력집중과 프레임 비틀림은 프레임 해석을 통해 조사되었다. 또한 주행 분석 장치를 이용하여 레저와 레이싱 카트를 각 조건별로 실차시험을 수행하였고, 이를 통해 곡선구간에서 카트의 주행거동을 분석하였다. 선회주행 시 차량에 원심력에 의한 하중이동의 현상이 발생했으며, 이로 인해 카트 프레임 강에 비틀림 응력이 발생하였다.

Abstract Because there is no suspension and differential devices at kart body, the deformation of the frame happened during kart driving affects the driving performance caused by the elastic deformation and the fatigue life of kart frame resulted from the permanent deformation. The dynamic behavior of kart caused by the torsional deformation during circular driving is the important factor of these two kinds of deformations. In order to analyze the dynamic behavior of kart at this curved section, GPS is used to trace the track of kart and the torsional stress at kart-frame has been measured with real time. The mechanical properties of kart-frames for leisure and racing are investigated through material property analysis and tensile test. Torsional stress concentration and frame distortion are investigated through stress analysis on frame on the basis of study result. The real karts for leisure and racing kart are also tested in each driving condition by using the driving analysis equipment. The driving behavior of kart at the curved section are investigated through this test. As the phenomenon of load movement due to centrifugal force at car is happened during circular driving, the torsional stress occurs at kart steel frame.

Key Words : Track driving, Torsional deformation, Frame, Stress analysis

1. 서론

카트는 레저 스포츠를 위해 주행이 가능하도록 고안된 차량이며, 다른 차량에 비해 크기가 작고 합금강으로 이루어진 구조물이다. 이러한 카트는 제작 및 운영비가 저

렴하고, 다른 레저 스포츠용 차량 및 동력기구와 비교하여 속도감, 환경친화성이 우수하여 미래형 지상 레저 동력기구로서 점차 부각되고 있다. 하지만 다른 레저 동력기구들처럼 안전성이 요구되어 지며, 경량화에 따른 구조물의 건전성 확보를 위하여 피로강도가 중요한 설계기준

*Corresponding Author : Joon-Seong Lee (Kyonggi University)

Tel: +82-31-249-9813 email: jslee1@kyonggi.ac.kr

Received October 18, 2012

Revised (1st December 3, 2012, 2nd December 7, 2012)

Accepted January 10, 2013

으로 고려되어야 한다[1]. 지속적으로 구조물이 변동하중을 받는 경우, 피로강도는 강성보다 응력집중방향과 발생한 작은 크기의 응력에도 영향을 받기 때문이다.

최근 구조물에 대한 평가방법은 실물을 이용한 실험을 수행하거나, 유한요소 프로그램을 이용한 시뮬레이션 기법 적용이 일반적이다. 따라서 카트와 관련된 연구도 다양한 방법으로 접근되어 왔다. Jang[2]은 카트 주행 중 신뢰 시 취약부의 구조적 안정성 검토를 위하여 설계하중과 동일한 상태를 구현할 수 있는 실험시스템을 구성하고 조향기구의 특성과 하중 이동을 분석하였다. Kim[1]은 카트가 곡선주행 시 하중이동으로 인해 차고가 변화되고 프레임의 주행모드가 변화되는데 차고 변화에 따른 카트의 동적주행특성을 분석하여 차체거동을 연구하였다. 그러나 선행 연구들은 주행 중 발생하는 비틀림 변형 [3]과 하중 이동 평가 시 속도 변화에 의한 효과를 고려하지 않았거나 해석 결과를 사용 목적과 재질에 무관하게 단순 적용한 연구이므로 궤적 주행 시 발생하는 동하중의 복합적 효과를 고려하는 데 한계가 있다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 속도에 따른 주행 중 카트 프레임에 발생하는 하중 이동에 따른 비틀림 현상을 평가하고자 한다.

2. 카트의 종류 및 프레임

2.1 개요

카트는 Fig. 1과 같이 크게 엔진과 새시장치 그리고 프레임으로 구성되어지며, 레저용 카트와 레이싱용 카트로 분류된다. 프레임은 Fe와 Mn으로 이루어졌으며, 특히 레이싱 카트용 프레임 파이프는 Si와 Cr을 포함한 구조물로서 정적강도 및 강성도에 대한 평가를 수행하였다. 이중 프레임은 차체 자중 및 운전자 하중에 의한 정하중과 곡선 주행, 제동 시 발생하는 동하중 등 진폭과 주파수가 변화하는 복합 피로하중을 받는 구조물이므로 이를 피로강도 평가의 대상으로 선정하였다.

2.2 재료의 기계적 성질

레저용 카트 프레임은 강도와 더불어 재료의 연신율을 높이는 Mn 합금을 사용하였으며, 레이싱용 카트 프레임은 경도와 탄성한계를 높이는 Si와 Cr 합금강으로 제작되었다. 각 재료의 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다.



(a) Leisure kart



(b) Racing kart

[Fig. 1] Kart type

피로강도 평가에 이용될 피로한도는 Table 2와 같이 인장시험 결과와 하중효과를 이용하여 비틀림 피로한도를 계산하였다.

[Table 1] Component of kart frames

(%)	Fe	Mn	Si	Cr
Leisure kart	98.30	1.70	-	-
Racing kart	97.37	1.04	0.48	1.15

[Table 2] Mechanical properties of materials

Material	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Elongation (%)
steel	431.3	447.2	6.4
Leisure kart	471.9	558.0	27.0
Racing kart	598.9	754.0	13.1

3. 측정과 분석

3.1 하중조건 및 응력측정 부위

실동응력 측정에 앞서 장비만을 탑재한 공차상태와 승차상태에 대한 하중을 Table 3과 Table 4와 같이 측정하였다. 이 때, 레저용 차체의 중량은 각각 102kg, 161kg, 레이싱용 차체의 중량은 각각 112kg, 167kg이다.

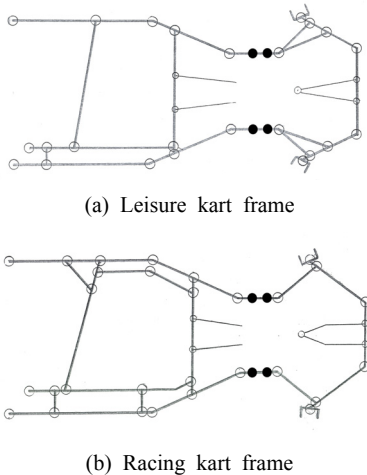
[Table 3] Weight of leisure kart

(kg)	FL	FR	RL	RR	Total
Tare	15.93	13.55	29.98	42.6	102.06
Load	32.47	23.3	45	60.4	161.57

[Table 4] Weight of racing kart

(kg)	FL	FR	RL	RR	Total
Tare	15.5	29	36.5	50.5	112
Load	29	30.5	50.5	57	167

또한, Fig. 2는 응력 측정부위를 나타낸 것이며, 구조 해석 결과에 기초하여 총 56개(레저: 26, 레이싱: 30)의 위치를 선정하였다.



[Fig. 2] Strain measuring points of kart frame

3.2 주행상태를 고려한 측정 및 분석

카트 프레임의 비틀림 측정을 위하여 동일한 카트를 이용, 주행속도를 변화시키며 프레임의 비틀림을 측정하였다. 측정 장소의 제약으로 인해 카트의 최고 주행속도는 50km/h 정도로 제한하여 다양한 속도에서 선회주행을 실시, 비틀림 변형을 측정하였다. 선회주행 중 곡선구간에서는 정속주행을 원칙으로 하였다.

실동응력 측정 시 노이즈에 의한 영향을 제거하기 위하여 보정(calibration)을 수행했으며 다음과 같은 절차에 의해 분석을 한다.

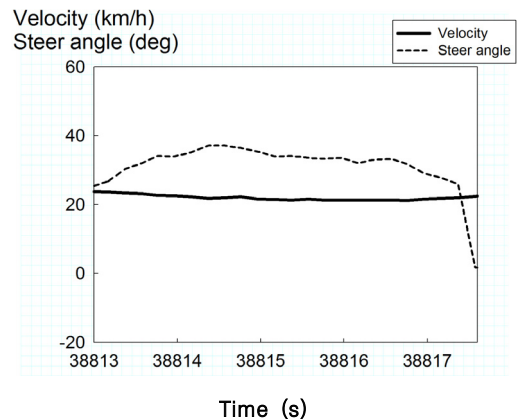
- (1) 1-lap 주행 시 GPS 궤적과 조향각의 변화와 시간을 기준으로 전체 주행로 및 특정 지점에서의 프레임 비틀림 변형을 분석

- (2) 시간에 따른 곡선구간의 비틀림 변화를 분석
- (3) 속도에 따른 곡선구간의 비틀림 변화를 분석

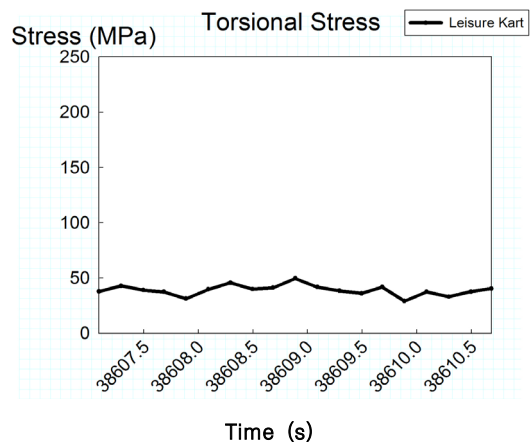
상기의 과정을 측정 데이터에 적용한 결과는 다음과 같다.

Fig. 3은 주행 시 속도와 조향각의 관계를 나타낸 것으로 조향각의 변동이 시작한 부분을 곡선주행의 시작지점으로 곡선구간의 분류기준으로 선정했다. 조향각의 변화와 무관하게 속도변화는 적으며, 이는 곡선구간에서의 등속주행 상태를 유지하고 있음을 알 수 있다.

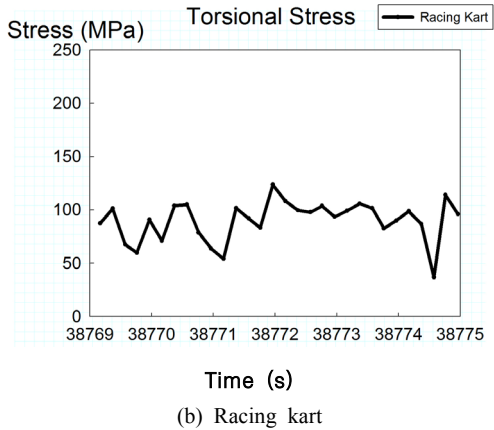
두 카트의 선회주행 시 임의 곡선구간에서 프레임의 비틀림 응력을 시간에 따라 Fig. 4에 표시하였다. Fig. 4(a)는 레이저카트로서 선회주행 시 상대적으로 레이싱카트보다 비틀림 응력의 크기가 작으며 변화량도 적게 나타나고 있다.



[Fig. 3] Speed-steer angle in 1-lap



(a) Leisure kart

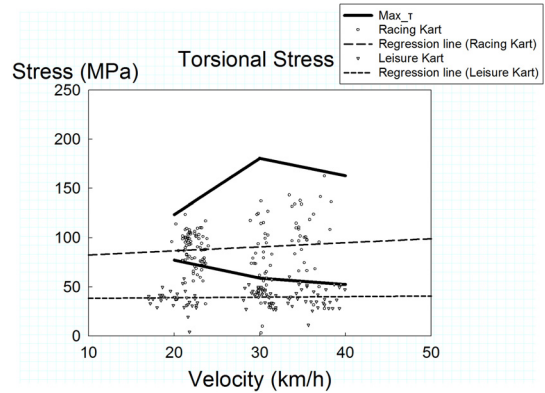


[Fig. 4] Torsional stress in the curve section

Table 5는 곡선구간에서 선회주행 시 측정된 레이싱카트 프레임에 작용하는 비틀림 응력 분포도에 대한 값을 나타내고 있다.

주행 시 두 카트의 프레임에 작용하는 비틀림 응력을 동시에 Fig. 5에 나타내었다. 레이싱카트가 레저보다 약 2배 이상 크게 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 그림에서

굵은 실선으로 표시된 부분은 특정속도에서 두 카트 프레임의 최대 비틀림 응력을 나타낸 것이다. 점선으로 표시된 데이터는 측정된 비틀림 응력 데이터의 경향을 보정하여 나타낸 추세선이며, 긴 점선은 레이싱카트, 짧은 점선은 레저카트를 나타내고 있다. 두 카트 모두 속도가 증가할수록 비틀림 응력의 크기가 증가하는 추이를 나타내고 있다.



[Fig. 5] Torsional stress change for the speed

[Table 5] Torsional stress history on the racing kart frame in the curve section

	Section 1	Section 2	Section 3	Section 4
(단위 : MPa)				
20 km/h	36.746 ~ 123.603	61.472 ~ 118.115	49.366 ~ 124.297	58.949 ~ 118.368
30 km/h	3.063 ~ 180.562	4.759 ~ 187.689	5.108 ~ 208.946	48.352 ~ 163.783
40 km/h	27.915 ~ 162.774	29.682 ~ 193.492	51.632 ~ 206.928	38.008 ~ 202.449

4. 카트 프레임의 피로강도 평가

4.1 피로강도평가 방법

응력-수명 방법의 기본은 파괴 시까지의 반복수(N)에 대한 교번반복응력(S)의 관계로 나타내어지는 S-N선도 [5]이다. 일정한 재료는 내구한도 또는 피로한도 (S_e)를 갖는데, 그 응력 이하에서는 재료가 무한수명을 갖는다. 인장강도와 피로한도 관계식을 통하여 주어진 부재의 피로한도를 알 수 있다.

$$\begin{aligned} S_e(ksi) &\approx 0.5 \times S_u, \quad S_u \leq 200ksi \\ S_e &\approx 100ksi, \quad S_u > 200ksi \end{aligned} \quad (1)$$

유사한 시험편에서 회전굽힘 및 축하중 시험으로부터 얻은 피로시험데이터를 연계시킬 때 앞에서 논의한 체적 개념을 이용할 수 있다. 축하중 시험은 응력구배를 가지고 있지 않기 때문에 높은 응력을 받는 체적이 더 많다. 축하중 및 회 전굽힘시험에서 얻는 피로한도비는 0.6~0.9의 범위이다. 이 실험데이터는 축하중 에서의 편심량 때문에 오차가 있다. 안전한 평가는 다음과 같다.

$$S_{e(axial)} = 0.7 S_{e(bending)} \quad (2)$$

비틀림과 회전굽힘 상태에서의 피로한도비는 0.5~0.6의 범위에 있다. 이론치인 0.577은 Von Mises 파괴기준으로 설명되어 왔다. 합리적인 평가는 다음과 같다.

$$S_{e(torsion)} = 0.577 S_{e(bending)} \quad (3)$$

이와 같은 하중효과를 적용하여 비틀림이 작용하는 카트프레임 강의 비틀림 피로한도를 구할 수 있다.

측정된 비틀림 응력이 카트 프레임에 미치는 영향을 예측하기 위하여, 인장시험 결과와 하중효과를 이용하여 비틀림 피로한도를 Table 6과 같이 계산하였다.

[Table 6] Fatigue limit for the both frames

MPa	S_u	S_e (axial)	S_e (bending)	τ_e (torsion)
Leisure	558	279	398.57	229.97
Racing	754	377	538.57	310.75

부재의 비틀림 피로한도 τ_e 와 측정된 비틀림 한도 τ 의 비를 비틀림 피로한도계수 K 라고 정의하며, $K \leq 1$ 일

경우 실제 작용하는 비틀림 응력은 부재의 비틀림 내구 한도 보다 작은 범위에서 발생하며 이는 부재의 피로에 의한 변형 및 손상에 영향을 미치지 않으며 무한수명을 가지고 있다고 할 수 있다. 반대로 $K > 1$ 일 경우 피로에 의한 부재의 손상을 가져올 수 있다.

$$K = \frac{\tau}{\tau_e} \quad (4)$$

4.2 피로강도평가 결과

Table 7은 40km/h 의 속도로 주행 시 측정된 비틀림 작용응력과 비틀림 피로한도, 그리고 비틀림 피로한도계수 K 를 나타낸다.

Fig. 6은 카트에 따른 속도별 차체의 피로한도계수를 나타낸 것이며, Fig. 7은 속도에 따른 구간별 평균 비틀림 피로한도계수 K 를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 속도에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다.

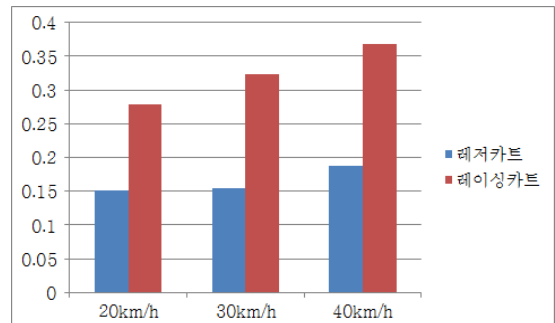
[Table 7] Stress-based fatigue limit evaluation results (40km/h)

(a) Leisure kart

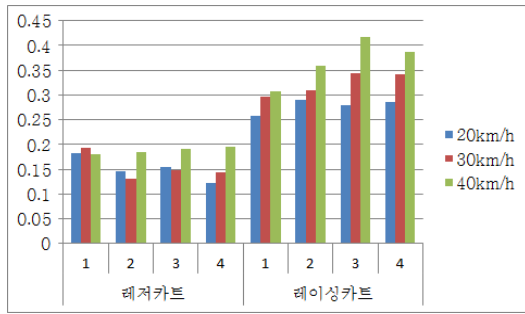
τ_e (MPa)	229.97			
Section	1	2	3	4
τ	52.391	68.138	58.172	59.169
K	0.235	0.306	0.261	0.265

(b) Racing kart

τ_e (MPa)	310.75			
Section	1	2	3	4
τ	162.774	193.492	206.928	202.449
K	0.524	0.623	0.666	0.651



[Fig. 6] Trend of fatigue limit coefficient K



[Fig. 7] Fatigue limit K for the each speed

5. 결론

본 연구에서는 곡선주행 시 측정된 실동응력을 바탕으로 피로강도평가를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 카트의 프레임에 작용하는 비틀림 응력의 크기가 프레임과 주행 속도에 따라 변화하고 있음을 확인하였다.
- 2) 레이저카트와 레이싱카트 모두 정상적인 궤적주행 시 비틀림 내구한도보다 작은 크기의 비틀림 응력이 작용하고 있으므로 변동하중에 의하여 발생하는 피로에 의한 소성변형이 발생하지 않았다.

References

- [1] Kim Y.H., "A Study on the Twisting Characteristic of the Body at Cornering of a Kart", Ph. D. Dissertation, Kyonggi University, 2010.
- [2] Jang. H. T., "A Kinematic Analysis of A Racing Kart Steering Mechanism", Proc. of 1st KAIS Conference, pp. 1156-1158, May, 2010.
- [3] Park, J.S., Kim, Y.H. and Lee, G.S. "A Study on Lateral-Torsional Buckling Strength Equation of Compact T-Beam Subjected to Pure Bending", Journal of the Korea Academia- Industrial cooperation Society, Vol. 10, No. 8, pp. 2038-2043, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2009.10.8.2038>
- [4] Thomas D. Gillespie, Fundamental of Vehicle Dynamics, MIX, 2002.
- [5] Julie A. Bannantine, Jess J. Comer, James L. Handrock, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Prentice Hall, 1990.

이 준 성(Joon-Seong Lee)

[정회원]



- 1988년 2월 : 성균관대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1995년 9월 : 동경대학교 (공학박사)
- 1988년 7월 ~ 1991년 7월 : 육군사관학교 교수부 기계공학과 교수
- 1996년 3월 ~ 현재 : 경기대학교 기계시스템공학과 교수

<관심분야>

최적설계, Neural Network, 구조물 수명평가

최 윤 중(Yoon-Jong Choi)

[정회원]



- 2000년 2월 : 경기대학교 기계공학과 학사
- 2002년 2월 : 숭실대학교 기계공학과 석사
- 2008년 2월 : 경기대학교 대학원 기계공학과 박사
- 2010년 3월 ~ 현재 : 다산엔지니어링 책임연구원

<관심분야>

피로수명평가, 차량역학, CAD/CAM