

모터사이클 프레임의 구조강성 강화를 위한 설계변수해석

이 용 우¹⁾ · 하 성 용²⁾ · 권 종 호^{*2)}

에스톡 컨설팅그룹¹⁾ · 신한대학교 자동차공학과²⁾

Parametric Analysis for Structural Stiffness Enhancement of Motorcycle Frame

Yongwoo Lee¹⁾ · Sungyong Ha²⁾ · Jongho Kwon^{*2)}

¹⁾ESTOC Consulting Group, #206, 5 Digital-ro, 26-gil, Guro-gu, Seoul 08389, Korea

²⁾Department of Automotive Engineering, Shinhan University, Gyeonggi 11644, Korea

(Received 15 June 2016 / Revised 13 July 2016 / Accepted 13 July 2016)

Abstract : A motorcycle frame is a structure that endures the load and retains durability under various driving environments. A motorcycle has been developed with a diverse utility range, and its design has always been expanded to the newly created concept based on advanced engineering technologies. In this study, a compact motorcycle frame is considered to perform parametric studies that can enhance the stiffness of a frame with computational simulation. Finite element analysis is used to compare the deformation and stiffness of a base model and four case-models with three design-change-parameters. The parametric studies are analyzed to provide available methods that can be expected in the industrial fields of engineering design for a motorcycle frame.

Key words : Motorcycle(모터사이클), Frame(프레임), Parametric analysis(설계변수해석), Deformation(변형), Stiffness(강성), Finite element analysis(유한요소해석)

1. 서론

모터사이클(motorcycle)이란 원동기를 장착하여 주행하는 이륜차로 오토바이시클(auto-bicycle)이라고도 한다. 한국의 도로교통법에서는 모터사이클을 이륜자동차라고 정의하고, 일반적으로 소형의 가솔린기관을 탑재한 이륜차를 지칭하고 있다. 최근에는 다양한 용도로 디자인이 바뀌면서 자전거에 보조기관을 설치한 모페드(moped), 스쿠터(scooter), 삼륜 및 사륜의 형태 등도 모터사이클에 포함시키고 있다.¹⁾

인류가 개발한 다양한 형태의 운송수단 중에서 가장 많이 사용되고 있는 자동차 이외에 모터사이클의 활용성과 시장성은 어느 국가 어느 사회에서

나 매우 뿌리 깊게 자리하고 있으며, 한국, 중국, 일본, 미국, 유럽 등의 선진시장뿐만 아니라 동남아시아와 남미, 아프리카 등의 신흥시장에서도 많은 업체들이 관련 산업에서의 경쟁력 확보를 위해 노력하고 있다.

모터사이클은 동력계, 제동계, 조향계, 프레임, 편 의장치 등으로 구성되는데, 이 중에서 프레임은 각 요소부품들을 고정시키고, 주행 중에 발생하는 하중을 견뎌내며, 안전한 주행성능을 확보할 수 있어야 한다. 이러한 구조적 요구 조건을 만족하기 위하여 모터사이클 프레임은 충분한 수준의 강성 및 내구성을 확보하여야 하며, 용도 및 디자인의 다양성에 대한 심미적, 기능적 요구 조건 또한 만족시켜야 함에 따라 새로운 공학적 개념과 방법을 통해 지속적인 연구 개발이 진행되고 있다.

*Corresponding author, E-mail: jkwon@shinhan.ac.kr

자동차와 기계 산업 분야에서 광범위하게 활용되고 있는 CAD 및 CAE 기술은 모터사이클 프레임의 강도(strength) 및 강성(stiffness) 평가를 위한 연구 개발에도 꾸준히 활용되고 있다.

Bhunte와 Deshmukh²⁾는 휠 포크 프레임(wheel fork frame)에 대한 정하중 및 동하중 해석을 이용하여 피로수명을 예측하는 방법을 제시하였으며, Zhang 등³⁾은 도로 주행 시험 결과와 유한요소해석을 이용하여 모터사이클 프레임의 피로수명을 평가하는 방법을 제시하였다. 한문식과 조재웅⁴⁾은 모터사이클 프레임의 다양한 형상에 대한 내구성과 변형량을 해석하였고, 배원락 등⁵⁾은 Al 6061 소재를 이용한 프레임의 설계 과정을 발표하였다. 또한 Boccione 등⁶⁾은 모터사이클 프레임의 정강성 및 고유진동 특성의 실험과 해석 결과를 비교하여 분석하였으며, Cossalter 등⁷⁾은 경주용 모터사이클의 성능을 실제 경주장의 조건을 반영한 해석조건을 적용하여 평가하였고, 박보용⁸⁾은 모터사이클의 진동 특성에 대한 해석 결과를 제시하였다.

본 연구에서는 소형 모터사이클의 프레임을 3차원 모델링하고 유한요소해석(finite element analysis)을 이용하여 변형 및 강성을 분석하였다. 프레임의 강성 강화에 요구되는 설계요소를 선정 한 다음 4가지 경우의 매개변수 변경에 따라 강성을 평가하는 설계변수해석(parametric analysis)을 수행하였다. 본 연구 결과를 이용하여 모터사이클 프레임의 설계에서 요구되는 강성 강화를 위한 공학적인 예측 및 분석 기법으로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 강성해석

본 연구에서는 소형 모터사이클의 프레임을 3차원으로 모델링한 후, 실제 주행 환경을 고려한 해석 조건을 기반으로 프레임의 강성해석을 수행하였다.

2.1 강성해석 모델 및 조건

모터사이클 프레임의 강성해석을 위한 유한요소 모델은 Fig. 1과 같이 구성하였으며, 이에 대한 상세 내용을 Table 1에 요약하였다.

유한요소해석은 ABAQUS V6.10을 사용하였으며, Tube, Bracket 및 Reinforcement 등의 요소부품은

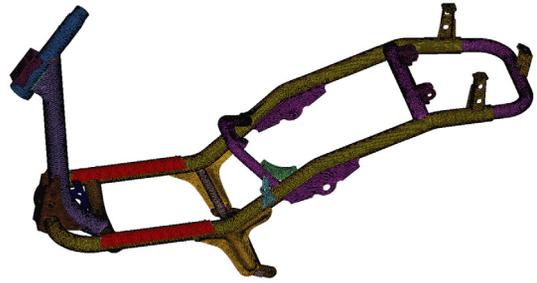


Fig. 1 Finite element model

Table 1 Finite element properties

Node	159,679
Element	464,312
Mass (kg)	12.26
Elastic modulus (GPa)	210
Poisson's ratio	0.29
Density (g/cm ³)	7.89

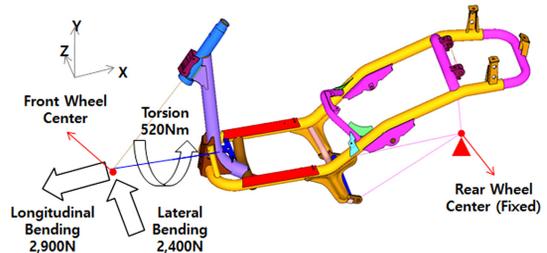


Fig. 2 Load and boundary conditions of stiffness analysis

C3D8, C3D6 Solid 요소를, 용접부는 S4, S3 Shell 요소를 사용하였다.

Fig. 2에 나타낸 것과 같이 전륜(front wheel) 및 후륜(rear wheel)의 중심부는 Rigid 요소로 모델링 하였다. 모터사이클 프레임에 작용하는 하중 및 경계 조건은 승차자 및 부속물의 중량과 직진 및 선회 주행에서 발생할 수 있는 운동조건을 고려하여 선정하여야 한다. 종굽힘의 경우는 급제동 및 전방 장애물 조건에 대한 특성을, 횡굽힘의 경우는 측방향 장애물 조건을, 비틀림은 급선회시 발생할 수 있는 조건을 반영하고 있다. 종굽힘(longitudinal bending), 횡굽힘(lateral bending) 및 비틀림(torsion) 하중 조건은 후륜 중심의 변위는 모든 방향으로 구속하고 전륜의 중심에 하중을 부여하는 것으로 일반화 할 수 있다.

2.2 강성해석 결과 및 분석

모터사이클 프레임의 하중 및 경계 조건에 관한 Fig. 2를 적용하여 강성해석을 수행하였다.

Fig. 3에는 각 하중 조건에 대한 변형 형상을 나타내었고, Table 2에는 전륜의 중심에 발생하는 최대 변위와 프레임의 강성을 요약하였다.

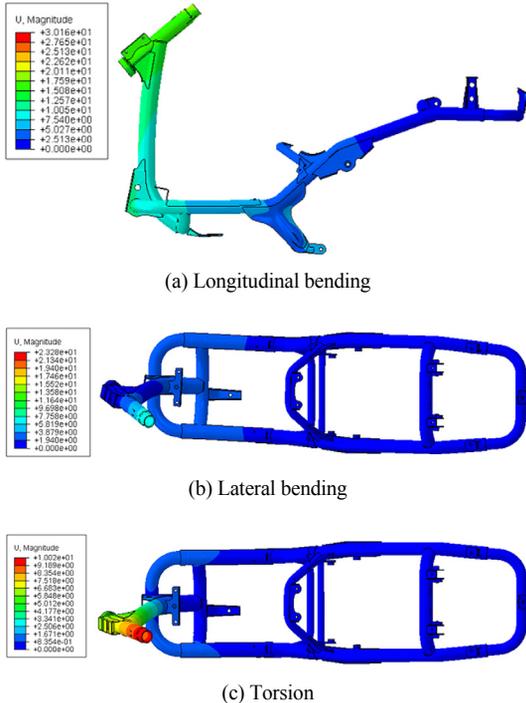


Fig. 3 Deformation of stiffness analysis (Base model)

Table 2 Summary of stiffness analysis (Base model)

Load condition	Displacement	Stiffness
Longitudinal bending	18.92 mm	153 N/mm
Lateral bending	23.28 mm	107 N/mm
Torsion	0.0203 rad	26.60 Nm/rad

강성은 모터사이클의 주행 시 발생할 수 있는 외력이 부여되었을 때 변형되는 정도를 수치로 나타내었고, 단위 변위 당 하중(하중/변위)으로 표현되며, 프레임의 구조 건전성을 대표하는 값으로 활용할 수 있다.

3. 설계변수해석

본 연구의 목적인 모터사이클 프레임의 강성을

강화하기 위해서 기본 모델에 대한 강성해석 결과를 분석하여 설계 변경을 위한 매개변수를 설정하였고, 기본 모델과의 강성을 비교하기 위한 설계변수해석을 수행하였다.

3.1 설계변수해석 모델 및 조건

모터사이클 프레임의 강성은 전륜의 중심과 연결되는 부재의 설계변수에 따라 크게 좌우되기 때문에 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 Head pipe, Down tube, Reinforcement의 세 개의 부재를 선택하여 Table 3과 같은 설계변수해석 조건을 설정하였다.

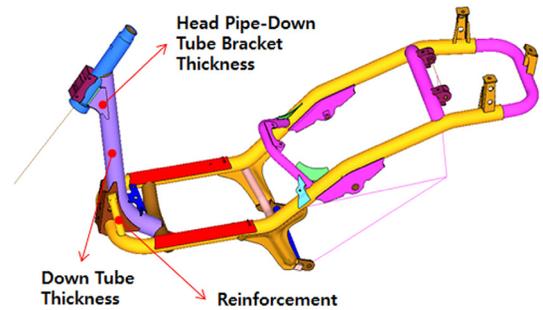


Fig. 4 Design changes for parametric analysis

Table 3 Case models of parametric analysis

Case 1	Thickness change of bracket between head pipe and down tube (2.0 mm → 3.0 mm)
Case 2	Thickness change of down tube (2.5 mm → 3.5 mm)
Case 3	Case 1 + Case 2
Case 4	Case 3 + Reinforcement

3.2 설계변수해석 결과 및 분석

모터사이클 프레임의 강성을 강화하기 위해 설정한 Table 3의 설계변수 변경 조건 4가지에 대한 강성해석을 수행하였으며, 각각의 경우에 대한 결과를 정리하여 Fig. 5 ~ 8에는 각 하중 조건에 대한 변형 형상을 나타내었고, Table 4 ~ 7에는 각 하중 조건에서 전륜의 중심에 발생하는 최대 변위와 프레임의 강성을 요약하였다.

프레임 강성을 강화하기 위한 4가지 설계변수해석 결과를 전륜의 중심에 작용하는 중급힘, 횡급힘 및 비틀림의 세 가지 하중 조건별로 비교 분석한 내용을 Table 8 ~ 10에 요약하였다.

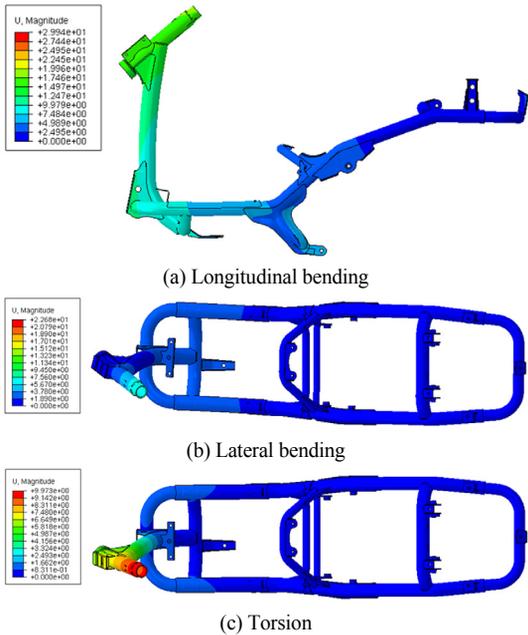


Fig. 5 Deformation of parametric analysis (Case model 1)

Table 4 Summary of parametric analysis (Case model 1)

Load condition	Displacement	Stiffness
Longitudinal bending	18.65 mm	155 N/mm
Lateral bending	22.68 mm	110 N/mm
Torsion	0.0200 rad	27.01 Nm/rad

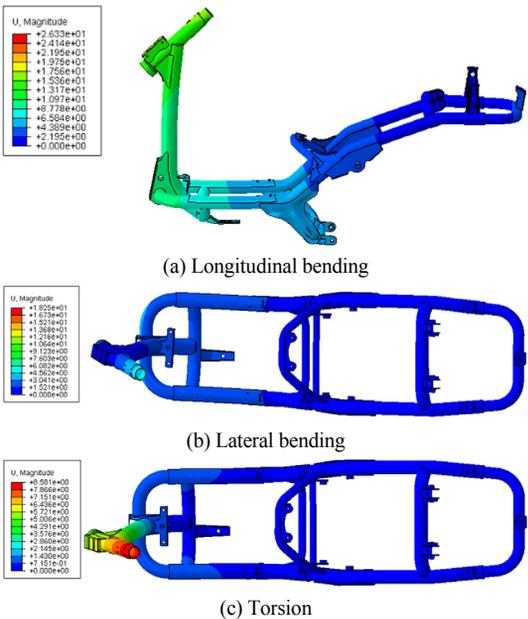


Fig. 6 Deformation of parametric analysis (Case model 2)

Table 5 Summary of parametric analysis (Case model 2)

Load condition	Displacement	Stiffness
Longitudinal bending	15.64 mm	185 N/mm
Lateral bending	18.25 mm	137 N/mm
Torsion	0.0167 rad	32.32 Nm/rad

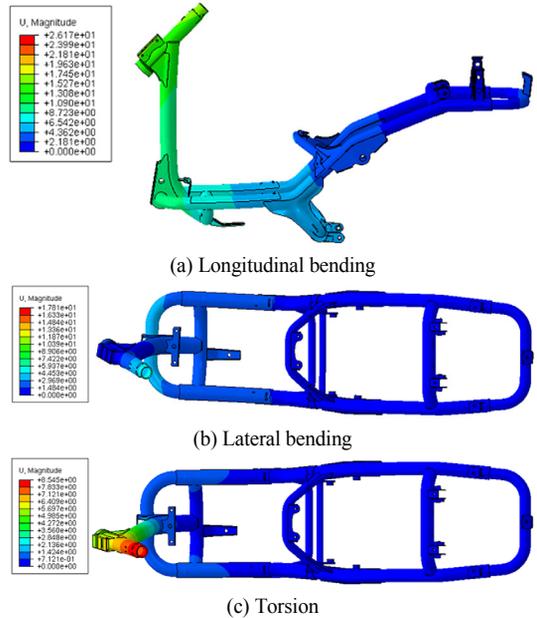
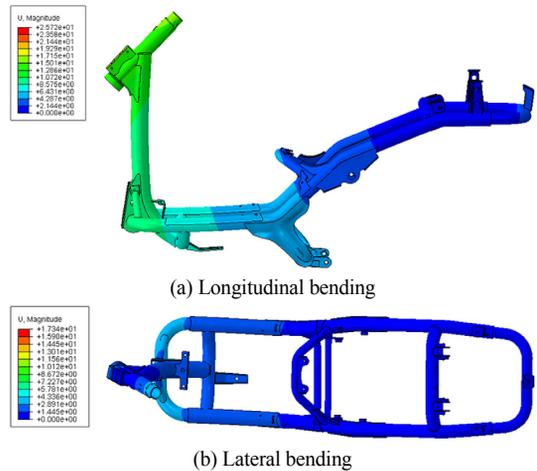
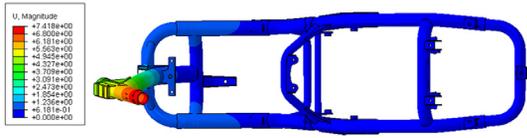


Fig. 7 Deformation of parametric analysis (Case model 3)

Table 6 Summary of parametric analysis (Case model 3)

Load condition	Displacement	Stiffness
Longitudinal bending	15.47 mm	187 N/mm
Lateral bending	17.81 mm	140 N/mm
Torsion	0.0165 rad	32.75 Nm/rad





(c) Torsion

Fig. 8 Deformation of parametric analysis (Case model 4)

Table 7 Summary of parametric analysis (Case model 4)

Load condition	Displacement	Stiffness
Longitudinal bending	15.29 mm	190 N/mm
Lateral bending	17.34 mm	144 N/mm
Torsion	0.0146 rad	36.99 Nm/rad

Table 8 Longitudinal bending of parametric analysis

Longitudinal bending	Stiffness	Rate
Base model	153 N/mm	N/A
Case model 1	155 N/mm	+1 %
Case model 2	185 N/mm	+21 %
Case model 3	187 N/mm	+23 %
Case model 4	190 N/mm	+24 %

Table 9 Lateral bending of parametric analysis

Lateral bending	Stiffness	Rate
Base model	107 N/mm	N/A
Case model 1	110 N/mm	+3 %
Case model 2	137 N/mm	+28 %
Case model 3	140 N/mm	+31 %
Case model 4	144 N/mm	+35 %

Table 10 Torsion of parametric analysis

Torsion	Stiffness	Rate
Base model	26.60 Nm/rad	N/A
Case model 1	27.01 Nm/rad	+2 %
Case model 2	32.32 Nm/rad	+21 %
Case model 3	32.75 Nm/rad	+23 %
Case model 4	36.99 Nm/rad	+38 %

세 가지 하중 조건 모두에서 Case 1의 Head pipe와 Down tube를 연결하는 Bracket 두께를 증가시키는 설계 변경은 프레임의 강성 향상에 미치는 영향이 다른 경우에 비해 상대적으로 매우 적음을 알 수 있다.

Table 8에서 전륜의 중심에 작용하는 종굽힘 하중에 의한 모터사이클 프레임의 강성은 Case 2의 Down tube 두께를 증가시키는 경우에 가장 크게 향상되었다. Case 3와 Case 4의 경우에서 Case 2에 비

해 강성 증가 효과는 높지 않음을 알 수 있다. 이는 Down tube의 두께가 다른 요소에 비하여 강성에 미치는 효과가 큰 것을 알 수 있다.

Table 9에 요약한 것과 같이, 전륜의 중심에 작용하는 횡굽힘 하중에 의한 모터사이클 프레임의 강성은 종굽힘 강성과 마찬가지로 Case 2의 Down tube 두께를 증가시키는 경우가 강성 증가 효과가 가장 큰 것으로 나타났다.

Table 10에서 전륜의 중심에 작용하는 비틀림 하중에 의한 모터사이클 프레임의 강성은 종굽힘 및 횡굽힘 강성과 마찬가지로 Case 2의 Down tube 두께를 증가시키는 경우에 가장 크게 향상되었다. Case 3의 경우에는 미세한 증가 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있으며, Case 4의 경우가 프레임의 비틀림 강성 향상에 다른 경우에 비해 중요한 역할을 하는 것을 알 수 있다.

Table 8 ~ 10의 설계변수해석 결과를 요약하면, Down tube의 두께를 증가시키는 것이 모터사이클 프레임의 종굽힘과 횡굽힘 및 비틀림 강성 강화에 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났으며, Down tube 하단부 양쪽에 추가하는 Reinforcement가 비틀림 강성 향상에 상대적으로 큰 역할을 하는 것으로 분석된다.

본 연구에서 제시된 결과를 이용하여, 향후 위상 최적설계(topological optimum design) 기법을 적용한 최적화된 두께와 경량화 방안을 제시하고자 한다.

4. 결론

본 연구에서는 소형 모터사이클 프레임의 3차원 설계 모델을 이용하여 프레임의 강성을 강화하기 위한 설계변수해석을 수행하였으며, 다음과 같은 내용과 결과를 도출하였다.

- 1) 모터사이클 프레임에 작용하는 하중 및 경계 조건은 승차자 및 부속물의 중량과 직진 및 선회 주행에서 발생할 수 있는 운동조건들을 구축하였으며, 종굽힘의 경우는 급제동 및 전방 장애물 조건에 대한 특성을, 횡굽힘의 경우는 측방향 장애물 조건을, 비틀림은 급선회시 발생할 수 있는 조건을 반영하고 있다.
- 2) 기본 모델에 대한 강성해석을 수행하여 전륜의

중심에 발생하는 최대변위와 프레임의 강성을 구하였으며, 강성은 모터사이클의 주행 시 발생할 수 있는 외력이 부여되었을 때 변형되는 정도를 수치로 나타내었고, 단위 변위 당 하중(하중/변위)으로 표현되며, 프레임의 구조 건전성을 대표하는 값으로 활용할 수 있다.

- 3) 모터사이클 프레임의 강성을 강화하기 위해서 기본 모델에 대한 강성해석 결과를 분석하여 설계 변경을 위한 매개변수를 설정하였고, 기본 모델과의 강성을 비교하기 위한 설계변수해석을 수행하였다.
- 4) 설계변수해석을 통해 Down tube의 두께를 증가시키는 것이 모터사이클 프레임의 중급힘과 횡급힘 및 비틀림 강성 강화에 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났으며, Down tube 하단부에 추가하는 Reinforcement가 비틀림 강성 향상에 큰 역할을 하는 것으로 파악되었다.
- 5) 본 연구에서 제시된 결과를 이용하여, 향후 위상 최적설계 기법을 적용한 최적화된 두께와 경량화 방안을 제시하고자 한다. 또한 본 연구 결과는 모터사이클의 용도 및 디자인의 다양성에 대한 심미적, 기능적 요구 조건이 강화되고 있는 최근의 기술 개발 동향에 따라 다양한 환경에서 만족할 만한 수준의 강성 및 내구성을 확보하여야 하는 프레임의 설계를 위한 새로운 공학적인 개념의 예측 및 분석 기법으로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

References

- 1) Industrial Competitiveness of Motorcycle, Marketing Forum, DacoD&S, Seoul, 2007.
- 2) G. V. Bhunte and T. R. Deshmukh, "A Review on Design and Analysis of Two Wheeler Chassis," International Journal for Research in Emerging Science and Technology, Vol.2, No.1, pp.42-45, 2015.
- 3) L. Zhang, C. Lu and K. Tieu, "Fatigue Analysis of a Motorcycle Frame System Based on a Road Test and the Finite Element Method," Materials Science Forum, Vols.773-774, pp.850-858, 2014.
- 4) M. Han and J. Cho, "Structural Analysis for Bicycle Frame by Type," Transactions of KSAE, Vol.20, No.6, pp.146-155, 2012.
- 5) W. R. Bae, D. W. Shin, B. K. Shim, B. N. Kim, S. I. Shin and Y. K. Kwon, "Development of Localization Bicycle Frame using Al 6061," KSPE Spring Conference Proceedings, pp.853-854, 2010.
- 6) M. Boccione, F. Cheli, M. Pezzola and R. Vigano, "Static and Dynamic Properties of a Motorcycle Frame: Experimental and Numerical Approach," WIT Transactions on Modelling and Simulation, Vol.41, pp.517-526, 2005.
- 7) V. Cossalter, M. Da Lio and R. Lot, "Simulation and Performance Evaluation of Race Motorcycle Dynamics based on Parts of Real Circuit," International Conference Power Two Wheels Proceedings, pp.99-112, 1998.
- 8) B. Y. Park, "Vibration Characteristics of a Motorcycle Body," Journal of KSPE, Vol.15, No.1, pp.169-176, 1998.

1) Industrial Competitiveness of Motorcycle, Mar-