

자전거용 반능동 현가기구 개발에 관한 연구

The study on the semi-active suspension system for bicycle

주형준† · 김찬중* · 이동원* · 이봉현*

Hyung Jun Ju, Chan Jung Kin and Dong Won Lee, Bong Hyun Lee

Key Words : Semi-active suspension(반능동 현가기구), Bicycle(자전거), Damping force(댐핑력)

ABSTRACT

This paper represents the study on the development of semi-active bicycle suspension system. The road vibration and transmissibility of front suspension are obtained by driving test on proving ground. The numerical simulation is evaluated by dynamic system modeling and equation of motion. The numerical simulation are performed to estimate the optimal damping force for minimal vibration transmission. And oscillating displacement is calculated and analyzed. Therefore the stoke which convert the damping characteristics is suggested from the driving test and numerical simulation.

성능을 평가하였다.

1. 서 론

최근 레저생활의 저변확대와 자전거의 고급화에 따라 자전거 현가장치의 고성능화에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 일반적으로 자전거 현가장치는 선형적 스프링과 댐퍼의 조합으로 주행시 노면으로부터의 가진에 관계없이 수동적으로 진동을 절연시키는 현가기구를 사용하였으나, 최근 산악자전거 및 고급자전거에서 노면에 가진에 따라 현가계의 특성을 능동적으로 변경시키는 현가기구의 개발에 대한 관심이 많아지고 있다. 본 논문은 자전거 주행조건에 따라 현가계의 특성을 변경시키는 전륜 현가기구 개발에 관한 내용이다. 자전거 주행시험을 통하여 자전거에 전달되는 진동 특성을 분석하였고, 현가계 전달률 최적화 해석을 통하여 최적 현가계 특성에 대해 파악하였다. 자전거 노면 진동특성과 진동절연률이 높은 현가계 특성 분석을 통하여 전륜 현가기구의 설계변수를 설정하고 시작품을 제작하여

2. 자전거용 반능동 현가기구 개발

2.1 자전거 특수로 주행시험 및 거동 분석

(1)자전거 특수로 주행 진동 측정

자전거 주행시 진동특성을 파악하기 위해 특수로 주행시험을 수행하였다. 주행시험에 사용한 특수로는 자동차부품연구원의 벨지안로와 빨래판로이다. 벨지안로의 경우 저주파 가진 성분이 주요한 도로이며 빨래판로의 경우 충격파 가진이 주요한 도로이다. 시험에 사용한 자전거는 전륜현가계의 댐퍼특성을 수동으로 2단계로 조절이 가능하며 현가계를 사용하지 않는 잠김모드도 설정할 수 있다.



Figure 1 Proving ground for bicycle driving test

† 주형준 ; 자동차부품연구원
E-mail : hjju@katech.re.kr
Tel : 041-559-3128 , Fax : 041-559-3340
* 자동차부품연구원

자전거 진동을 측정하기 위해 로우어 레그(lower leg), 자전거 시트 아래 프레임, 핸들에서 가속도계를 설치하고, 주행시 가속도를 측정하였다. 자전거 주행 시험을 수행한 운전자는 몸무게 70kg인 표준 한국 남성이며, 20km/h의 일정한 속도로 특수로를 주행하였다. 자전거의 현가계 댐퍼모드를 3가지(Slow, Lock, Fast)로 변경시키고 이에 따른 진동특성을 분석하였다.

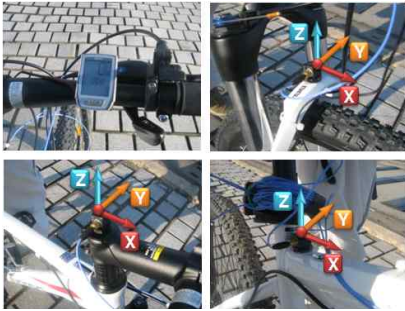


Figure 2 Measuring point for driving test

자전거의 현가계 댐퍼 3가지 모드에 따른 현가계 아래 로우어 레그에서의 가속도와 현가계 위 시트 아래 프레임의 가속도 측정 결과는 다음과 같다.

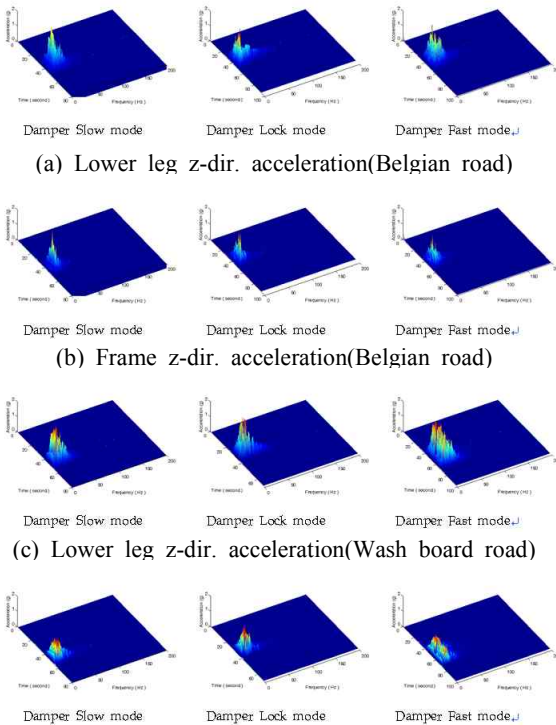


Figure 3 Acceleration of lower leg and frame according to the damper mode

자전거의 현가계 댐퍼모드에 따른 프레임의 진동 전달 특성을 분석하기 위해 주행구간에서 주파수 도메인 신호를 평균내어 노이즈를 제거하고 현가계 슬로우(Slow) 모드(댐핑력 높음)와 패스트(Fast) 모드(댐핑력 낮음)를 서로 비교하면 다음과 같다.

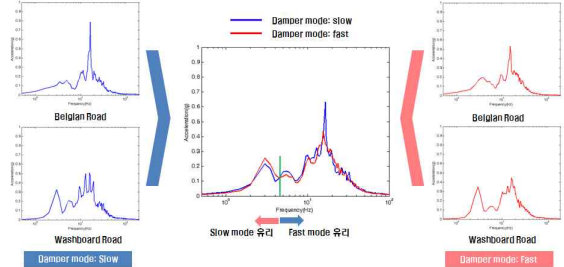


Figure 4 Comparison of frame acceleration according to the damper mode

결과를 분석해 보면 주파수 4.5 Hz 이상에서는 댐핑력이 낮은 경우가 진동전달이 적게 되며, 4.5 Hz 이하에서는 댐핑력이 높은 경우가 진동전달이 적게 되는 것을 알 수 있다.

(2)자전거 주행시 진동 전달 특성 파악을 위한 ODS(Operational Deflection Shape) 분석

자전거 주행시 진동 전달 특성을 파악하기 위해 ODS 분석을 수행하였다. ODS 분석을 위해서는 측정 샘플간 위상이 동일하여야 하므로 로우어 레그의 수직방향 가속도 신호를 기준점(Reference)으로 잡고, 프레임의 위상을 보정하였다. 위상이 보정된 각 샘플을 복소수 평균(Complex Average)하여 자전거 측정 위치(geometry)에서 입력하여 거동 분석을 수행하였다.

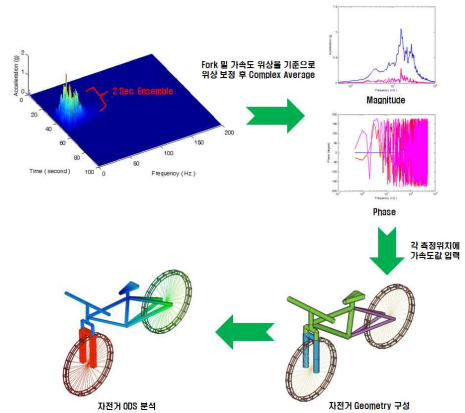
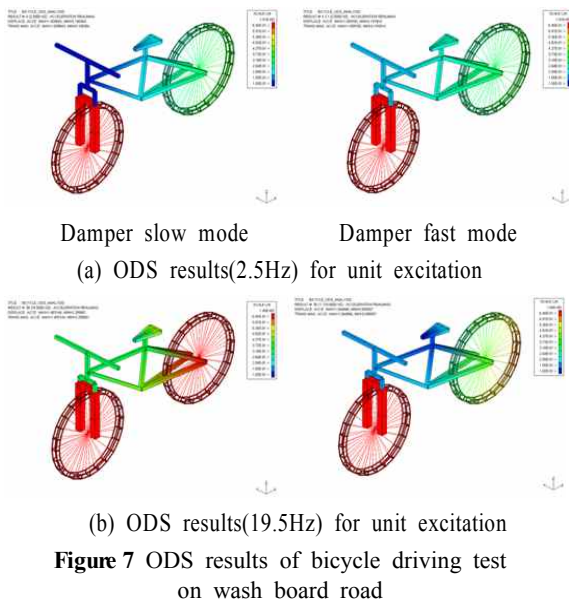
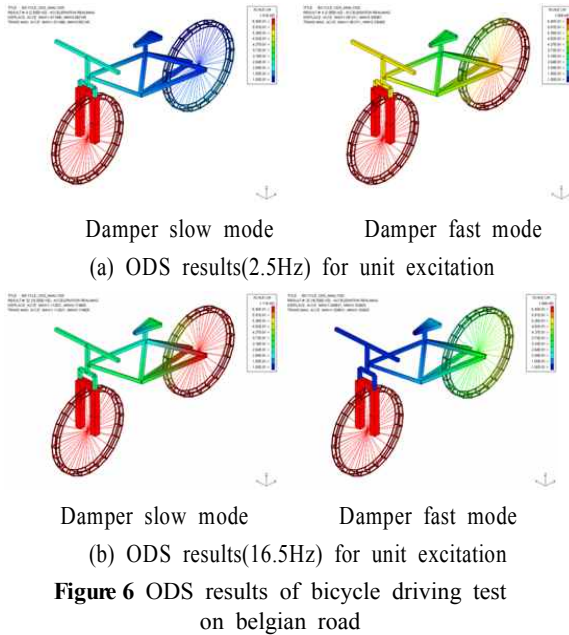


Figure 5 Process of ODS analysis

기준점인 로우어 레그 수직방향의 가속도의 크기를 1로 위상을 0도로 변환시키고, 이에 따라 프레임의 가속도를 보정하면, 현가계 아래 단위 기저가진 (Unit Basement Excitation)에 대한 자전거의 전달진동 특성을 파악할 수 있다. 현가계 댐퍼의 모드 변화에 따른 저주파(4.5Hz 이하)와 고주파(4.5 Hz 이상)의 단위기진에 대한 자전거 진동전달 ODS결과는 다음과 같다.



ODS 분석을 통하여 자전거 현가계 아래 단위기진에 대한 자전거 거동을 분석하여 저주파(4.5 Hz)이하에서는 댐핑력이 큰 슬로우 모드가 진동전달이 적으며, 고주파(4.5Hz) 이상에서는 댐핑력이 작은 페스트 모드가 진동전달이 적음을 확인할 수 있었다.

2.2 자전거 전륜 현가계 강성·댐핑 특성 분석

(1)자전거 전륜 현가계 강성 특성 분석

주행시험을 수행한 자전거 전륜 현가계 댐퍼 특성을 파악하기 위해서 로드셀과 액추에이터를 이용한 시험을 수행하였다. 시험에 사용한 전륜 현가계는 주행시험에서 사용한 전륜현가계이며 포크(Fork)의 한쪽은 스프링으로 구성되어 있으며, 다른 한쪽은 댐퍼로 구성되어 현가계의 강성과 댐핑을 담당하며, 댐퍼는 3가지 모드 변환이 가능하다.



Figure 8 Structure of bicycle front suspension

액추에이터 시험을 통하여 현가계의 강성과 댐핑을 측정하였다. 시험 셋업은 다음과 같다. 현가계에 걸리는 힘을 측정하기 위해 현가계 위에 로드셀을 설치하였으며, 아래에는 액추에이터와 연결시켰다.

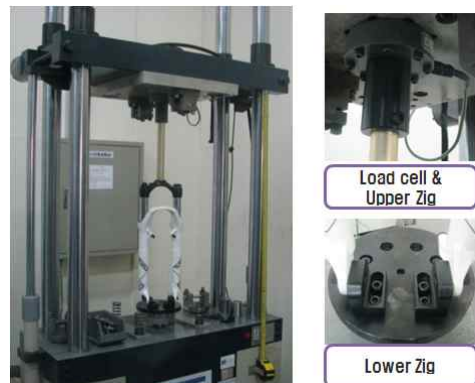


Figure 9 Test setup for bicycle front suspension stiffness and damping force

본 현가계는 스프링의 압축을 조절하여 프리로드 (Preload)를 조절할 수 있으며, 프리로드를 최소, 최대로 하였을 때 강성을 측정하여 보았다.

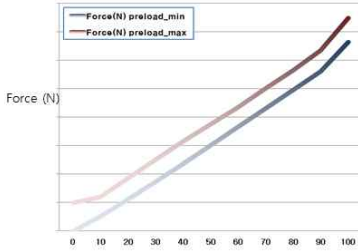


Figure 10 Stiffness results of bicycle front suspension

시험한 현가계의 강성은 12.5N/mm로 측정되며 프리로드 조절장치로 변경할 수 있는 프리로드는 200N으로 측정되었다.

(2)자전거 전륜 현가계 댐핑 특성 분석

댐퍼의 특성을 측정하기 위해서 시험조건을 설정하였다. 시험한 현가계는 3가지 모드로 댐퍼를 조절할 수 있으며, 잠김 모드를 제외한 패스트 모드와 슬로우 모드에 대해 시험을 수행하였다. 전륜 현가계를 53mm 압축시키고, 상하 40mm의 변위로 속도를 0.2m/s~1.0m/s 변화시켜 가며 시험을 수행하였다.

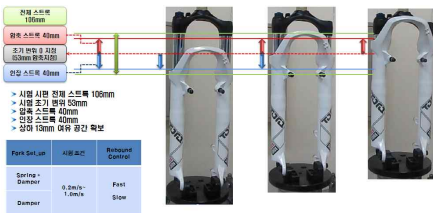


Figure 11 Boundary condition for damping force measurement test

댐퍼의 특성결과는 다음과 같다. 본 전륜 현가계는 압축과 인장시의 댐핑 특성이 전혀 다르게 나타나며, 댐퍼 모드 변화에 따라 인장시의 댐핑력만 조절함을 알 수 있다.

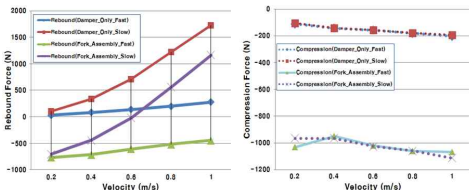


Figure 12 Comparisons of compression & rebound damping force according to the damping mode

2.3 자전거 전륜 현가계 댐퍼 최적화

(1)자전거 전륜 현가계 기저 진동 분석

자전거 현가계의 특성 변화에 따른 진동전달 특성을 파악하기 위해 자전거 현가계 아래 기저진동에 대한 정의가 필요하다. 개발 현가계는 산악자전거용으로 주로 오프로드 주행시의 승차감을 고려하여 벨지안로와 빨래판로의 조합을 통하여 기저진동을 정의하였다.

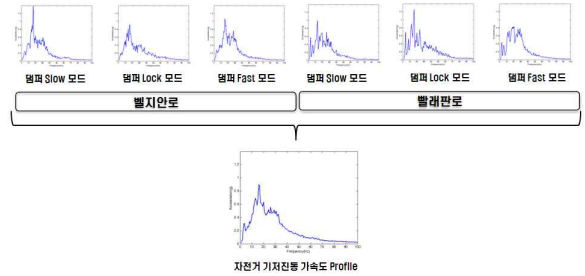


Figure 13 Estimated acceleration profile of bicycle basement excitation

(2)자전거 전륜 현가계 전달률 분석

자전거 현가계의 기저진동에 대한 진동전달률을 평가하기 위하여 자전거의 전륜현가계를 다음과 같이 모델링 하였다.

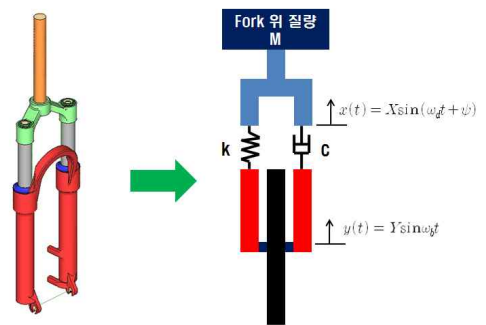


Figure 14 The modeling of the bicycle front suspension

2자유도 자전거 전륜 현가계 모델링의 운동방정식을 구하면 다음과 같다.

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0$$

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = cY\omega_b \cos\omega_b t + kY_s \sin\omega_b t$$

본 운동방정식을 통하여 차량 운전석 바닥진동이 운전자에 전달되는 진동전달률은 다음과 같이 나타

낼 수 있다.

$$\frac{X}{Y} = \left[\frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2} \right]^{1/2},$$

$$r = \frac{w_b}{w}, \zeta = c/(2mw), w = \sqrt{k/m}$$

시험에서 측정된 자전거의 데이터를 바탕으로 현가계 강성 12.5 N/mm, 포크위 질량(대한민국 성인평균 69.5kg, 자전거 15kg 고려) 42kg시에 댐핑계수 375~2000 Ns/m의 범위로 변화시키면서 앞에서 정의한 기저진동을 가진하였을 때 현가계위에 전달되는 가속도 해석을 수행하였다.

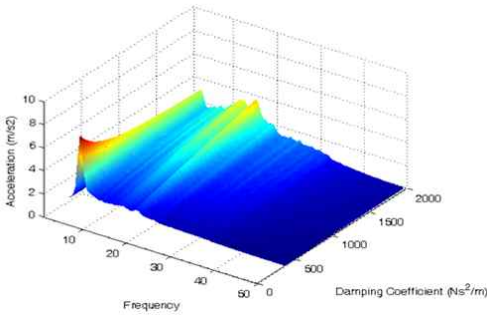


Figure 15 The transmitted acceleration by bicycle front suspension

해석된 전달 가속도를 주파수별로 최소가 되는 댐핑계수를 구해 보면 Figure 16와 같으며 4Hz 이하에서는 댐핑이 높은 것이 진동전달이 적게 되며, 4Hz이상에서는 댐핑이 낮은 것이 진동전달이 적게 되는 것으로 나타났다. 이로써 스프링 질량(Sprung Mass)의 공진점 이하의 주파수에서는 현가계의 댐핑이 높은 것이 유리하고 스프링 질량 공진점 이상에서는 댐핑이 낮은 것이 진동전달을 측면에서 유리한 것으로 파악되었다.

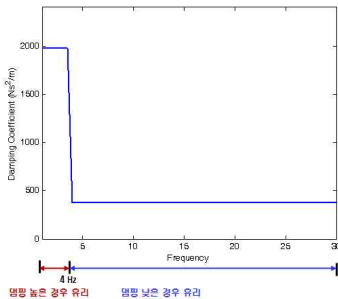


Figure 16 Define of damping coefficient for minimal transmissibility

(3)자전거 전륜 현가계 설계 변수 선정

자전거 주행시험 및 해석결과를 바탕으로 댐핑력을 변화시키는 기준점을 4 Hz로 정의하였다. 정의된 기저진동 가속도 프로파일을 다음의 수식으로 진동변위로 변환할 수 있다.

$$D \cos(\omega t) = -\frac{A}{\omega^2} \cos(\omega t)$$

진동변위로 변환된 자전거 기저진동 가속도는 다음과 같다.

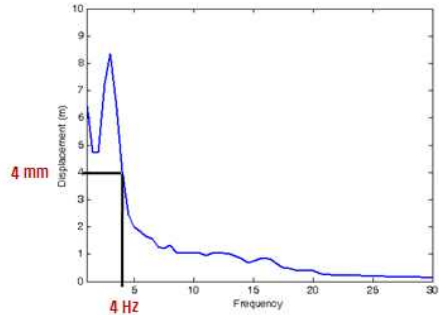


Figure 17 Oscillating displacement of bicycle basement excitation

스프링 질량(Sprung Mass) 공진으로 보이는 3Hz의 경우를 제외하고 고주파로 갈수록 진동변위가 작아짐을 알 수 있다. 앞에서 댐핑변화의 기준 주파수인 4Hz의 경우 진동변위가 4mm로 파악되었다. 따라서, 진동변위 4mm 이하는 4Hz이상이 고주파 진동이고, 진동변위 4mm 이상은 4Hz이하의 저주파 진동으로 분류할 수 있다. 자전거 주행시에 진동변위 4mm 이상의 경우 댐핑력이 크게, 4mm 이하의 경우 댐핑력이 작게 적용되는 경우가 진동전달이 적으므로, 자전거 현가계의 진동변위에 따라 댐퍼의 특성을 변경시켜면 노면으로의 가진을 효과적으로 절연시킬 수 있다.

2.4 자전거 전륜 반능동 현가기구 제작

(1)자전거 전륜 반능동 현가계 시작품 검증

앞에서 구한 반능동 전륜 현가계 설계안에 따라 진동변위에 대하여 댐퍼특성이 달라지는 자전거 전륜 현가계 시작품을 제작하였다. 시작품의 댐퍼특성을 파악하기 위해 변위에 따라 댐퍼의 성능을 액추에이터 시험기를 이용하여 검증하였다. 상하변위를

2~12mm로 변경시키며 속도 0.2m/s~1.2m/s에 대해 측정한 댐핑계수는 다음과 같다. 4mm 미만의 변위에서는 댐핑이 작으며, 4mm 이상에서는 댐핑이 큰 현상계가 제작되었음을 검증하였다.



Figure 18 Proto semi-active front suspension

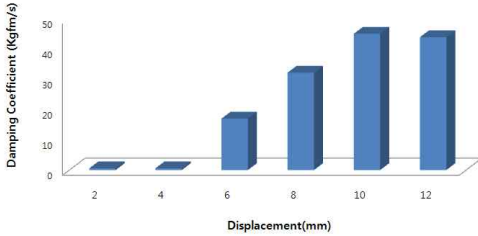


Figure 19 Damping coefficient results for proto semi-active front suspension

3. 결 론

산악용 자전거의 승차감 및 안락성 개선을 위하여 주행시 노면가진에 따라 현가계의 특성을 변화시키는 반응동 현가기구 개발을 수행하였다. 첫 번째로 자전거의 특수로 주행시험을 통하여 자전거 현가계 진동전달 특성과 설계시 고려할 노면가진을 파악하였다. 두 번째로 노면가진이 현가계를 통해 전달되는 전달률을 파악하였으며, 노면가진 주파수에 따라 진동전달이 최소가 되는 댐핑을 구하였다. 노면가진 특성 분석과 댐핑력에 따른 진동 전달률을 분석하여, 노면가진에 따라 현가계 진동전달이 최소가 되는 반응동 현가기구의 댐핑변환 변위를 설정하였다. 세 번째로 자전거용 반응동 진륜 현가기구를 제작하여, 변위에 따른 댐핑의 성능을 평가하여 시제품을 검증하였다. 본 연구를 통해 자전거 노면가진 경향 분석 및 자전거 댐핑 변화에 따른 진동전달 특성분석 및 반응동 현가계 설계변수를 선정, 검증 하였다.

후 기

본 연구는 자전거-해양레저장비산업육성사업(자전거용 스트로크 감응형 현가장치 개발)으로 수행된 연구로 관계자분들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Chung, K. R., Hyeong, J. H., Kim, S. Y., 2010, "Evaluation of Shock-Absorbing Performance of Three-Different Types of Bicycle Suspension Systems", KSME, Vol.34 No.7 , pp 943~946.
- (2) Song, P. G., Maksym Sporyagin, Yoo, H. Y., 2008, "Robust Design Optimization of the Vehicle Ride Comfort Considering Variation of Design Parameters", KSNVE, Vol.18 No.12 , pp 1217~1223.
- (3) Seong M. S., Choi, S. B., Kim, C. H., Lee, H. K., Baek, J. H., Baek, J. H., Han, H. H., Woo, J. K., 2010, "Experimental Performance Evaluation of MR Damper for Integrated Isolation Mount", KSNVE, Vol.20 No.12 , pp 1161~1167.
- (4) Chung, K. R., Hyeong, J. H. and Kim, S. Y., 2009, "The Study on the Influences of Vibration Associated with Cycling on the Human Body", KSNVE, Spring conference pp 643~646.
- (5) Choi, N. H., Kim, Y. B. 1998, "Active Vibration Control of a Suspension System Using Magnetic Damper", KSPE, Autumn conference pp 450~453.
- (6) Lee, D. L., Han, K. B. and Lee, S. B., 1995, "Control of Active Suspension Systems Considering Wheel Hop", KSPE, Autumn conference pp 420~424.
- (7) Lee, K. B., Kim, Y. B. and Lee, H. B., 2002, "A Study for Active Vibration Control of a Automotive Suspension System Using Electro-magnetic Damper", KSPE, Autumn conference pp 420~424.
- (8) Inman, Daniel J, 2007, "Engineering Vibration", Prentice Hall.