

가상 동흡진기를 고려한 우등버스용 MR댐퍼의 제어 시뮬레이션 Control simulation of MR damper for a cruise bus including the virtual dynamic damper

박성준 · 손정현

S. J. Park and J. H. Sohn

(접수일 : 2011년 01월 07일, 수정일 : 2011년 03월 28일, 채택확정 : 2011년 04월 06일)

Key Words : MR Damper(MR 댐퍼), Virtual Dynamic Damper(가상동흡진기), Sky-hook Control(스카이훅 제어), Computer Simulation(전산해석)

Abstract : In this study, a control method of MR(magneto-rheological) damper for a cruise bus is investigated. A virtual dynamic damper and a sky-hook algorithm are employed to control the damping characteristics of MR damper. Coefficients for a virtual dynamic damper are determined through the parameter identification. A quarter car model of a cruise bus is established by using ADAMS/Car program for the computer simulation. Sine wave excitation and random excitation are used to compare the controlled MR damper with the passive damper. From the simulation results, the performance of MR damper with a virtual dynamic damper is better than that of the passive damper.

1. 서 론

차량동역학 해석은 주로 승용차를 중심으로 많은 연구가 진행되었다. 대형버스는 생산 및 수요량이 많지 않으며 개인소유가 아닌 공용차량이라는 한계 때문에 승차감 향상을 위한 동역학 시뮬레이션에 대한 필요성이 크지 않았다. 그러나 사람들의 생활 수준 향상과 함께 버스의 승차감이나 안정성에 대한 수요도 증가하였으며 동시에 동역학 해석을 이용한 조종안정성 평가에 대한 관심도 커지고 있다. 버스의 현가장치 개발과 승차감 및 조정성의 향상을 위해서는 차량동역학 시뮬레이션을 통한 객관적 승차감 평가와 설계 인자의 추출이 필요하다. 그러기 위해서는 선행적으로 정밀한 차량 모델링과 해석 기법이 개발되어야 한다.

차량의 현가장치는 차체와 차축 사이에 연결되어 차체 중량을 지지하면서, 노면으로부터 차체에 전달되는 충격을 완화시켜주어 쾌적한 승차감을 만족시키고 차량주행에 적합한 자세를 유지하며 안정된

주행성능을 제공한다. 소비자의 고품질 승차성능 요구에 따라서 지능제어 현가시스템 개발이 활발히 이루어져 왔으며, 그 중에는 CDC(Continuous Damping Control)댐퍼 및 PDC(Pneumatic Damping Control)댐퍼 등이 있다. 이러한 시스템은 한가지 특성만 가지는 일반 댐퍼와 달리 노면에 따른 감쇠특성을 가지므로 차량 운행시 운전자 및 승객의 피로감을 감소시켜 주는데 보다 효과적이다. MR댐퍼는 승용차의 승차감 향상을 목적으로 주로 개발되어 왔으며, 버스용으로는 많이 개발되지 못하였다. 스카이훅 제어이론은 Karnopp¹⁾에 의해 연구되기 시작하여 다양하게 변형시켜 사용되어져 왔으며 강태호²⁾등은 스카이훅 제어이론에 추가적으로 MR댐퍼의 최소감쇠력을 조절할 수 있도록 고려하여 스프링 하 질량의 진동을 제어하였다. 이관호³⁾등은 가상 스카이훅-동흡진기를 이용한 승차감 최적화연구를 수행하였다. 승용차급의 1/4차량에 적용하여 가상 스카이훅-동흡진기가 부착된 현가 시스템 모델의 진동절연성이 뛰어난을 확인하였으며 우승훈⁴⁾등은 이중 스카이훅 제어를 1/4차량 및 전차량에 적용하여 성능향상을 시뮬레이션 검증 하였다. 본 연구에서는 우등버스의 승차감 향상을 목적으로 MR댐퍼를 개발하고 MR댐퍼의 전류를 제어하기 위

손정현(교신저자) : 부경대학교 기계자동차공학과
E-mail : jhsohn@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6166
박성준 : 부경대학교 대학원

한 가상 스카이훅-동흡진기 제어 적용과 관련한 연구를 수행하였다. Adams/view를 이용하여 우등버스의 1/4차량을 모델링하고 현가장치의 MR댐퍼 감쇠력제어를 위해 가상 동흡진기-스카이훅 제어를 이용하였다. 동흡진기는 기계, 구조물등의 진동체에 작은 질량-스프링계를 부착하여 진동을 줄이는 방법으로써 본 연구에서는 전달함수를 이용한 최적화를 통해 스프링계수 및 감쇠계수를 구하였다.

2. 가상동흡진기

2.1 1/4차량의 모델링

스프링 상 질량에 스카이훅 댐퍼를 설치하고 스프링 하 질량에 동흡진기(dynamic damper)를 설치한 현가 시스템 모델³⁾이며, 스프링 상 질량과 스프링 하 질량 사이에 설치된 작동기에서 실현하기 위해서 Fig.1과 같이 실제의 스카이훅 댐퍼 및 동흡진기와 등가한 기능을 갖는 가상 스카이훅 동흡진기에 의한 감쇠력 제어를 실현하였다. 사용된 파라미터는 Table 1에 나타냈으며 가상 동흡진기 모델에 사용되는 계수 k13, b13은 승차감을 향상시키기 위해 노면의 변위입력에 대한 차체 수직 가속도의 주파수 응답 및 타이어 동적력의 주파수 응답이 최적 이 되도록 설정하였다.

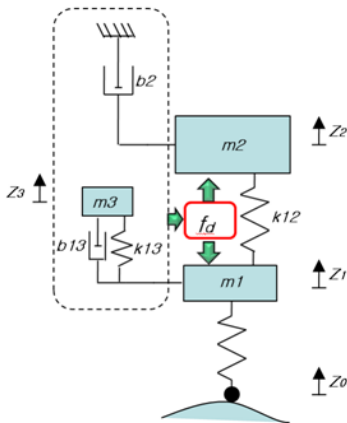


Fig. 1 1/4 car model with virtual sky-hook dynamic damper

Table 1 Parameters of 1/4 car model

M1	282 kg
M2	1609 kg
k12	100000 N/m
k10	1176000 N/m
b2	10000 Ns/m

운동방정식은 식(1)~(4)와 같이 유도된다.³⁾

$$m_1 \ddot{Z}_1 + k_{10}(Z_1 - Z_0) + k_{12}(Z_1 - Z_2) - f_d = 0 \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{Z}_2 + k_{12}(Z_2 - Z_1) + f_d = 0 \quad (2)$$

$$m_3 \ddot{Z}_3 + k_{13}(Z_1 - Z_3) - b_{13}(\dot{Z}_3 - \dot{Z}_1) = 0 \quad (3)$$

$$f_d = k_{13}(Z_1 - Z_3) - b_{13}(\dot{Z}_1 - \dot{Z}_3) + b_2 \dot{Z}_2 \quad (4)$$

식(1)~(4)의 라플라스 변환식을 정리하여 식(5)~(12)와 같이 구해진다.

$$Z_1 = A_1 Z_0 \quad (5)$$

$$A_1 = \frac{k_{10}}{(X - Y)} \quad (6)$$

$$X = m_1 s^2 + k_{10} + k_{12} + k_{13} + b_{13} s \quad (7)$$

$$Y = (k_{12} + b_2 s) A_2 - (b_{13} s + k_{13}) A_3 \quad (8)$$

$$Z_2 = A_2 Z_1 \quad (9)$$

$$A_2 = \frac{(k_{12} + k_{13} + b_{13} s - k_{13} A_3 - b_{13} s A_3)}{(m_2 s^2 + k_{12} + b_2 s)} \quad (10)$$

$$Z_3 = A_3 Z_1 \quad (11)$$

$$A_3 = \frac{(k_{13} + b_{13} s)}{(m_3 s^2 + k_{13} + b_{13} s)} \quad (12)$$

전달함수를 구하는 데 사용된 입출력 값의 정의는 식(13)~(16)과 같다.

$$\text{타이어 동적력} = k_{10}(Z_1 - Z_0) \quad (13)$$

$$\text{노면 변위 입력} = Z_0 \quad (14)$$

$$\text{차체 수직 가속도} = \ddot{Z}_2 \quad (15)$$

$$\text{노면 변위 입력} = Z_0 \quad (16)$$

따라서 전달함수를 식(13), (14)와 같이 정의하였다.

$$H_{fz} = k_{10} \left(\frac{Z_1 - Z_0}{Z_0} \right) = k_{10} (A_1 - 1) \quad (13)$$

$$H_{fz} = \frac{\ddot{Z}_2}{Z_0} = \frac{Z_2 s^2}{Z_0} = \frac{A_1 A_2 Z_0 s^2}{Z_0} = A_1 A_2 s^2 \quad (14)$$

3. 변수 규명

노면의 변위입력에 대한 타이어 동적력을 주파수 영역에서 보면 0~30Hz구간이 주요 관심영역으로써 공진주파수와 승차감에 주된 영향을 미치는 저주파영역을 포함하고 있다. 따라서 식(15)와 같이 정의된 최적화 함수 Γ_1 이 최소가 되는 k_{13} , b_{13} 파라미터를 구한다. 구해진 k_{13} , b_{13} 중 k_{13} 만을 최적값으로 놓고 식(16)에 정의된 최적화함수 Γ_2 로부터 b_{13} 을 구하게 되면 Γ_1 , Γ_2 를 모두 고려한 k_{13} , b_{13} 을 얻을 수 있다.³⁾

$$\Gamma_1(w, k_{13}, b_{13}) = \int_{w_1}^{w_2} |H_{fz}(jw)| dw \quad (15)$$

minimum

$; w_1 = 0, w_2 = 30$

$$\Gamma_2(w, b_{13}) = |H_{fa}(jw)|_{\text{minimum}} \quad (16)$$

Fig. 2는 Γ_1 의 최적 k_{13} , b_{13} 파라미터값을 얻기 위해 Mathematica를 사용하여 나타낸 3차원 그래프이며, 최소 Γ_1 응답을 가질 때 최적 k_{13} , b_{13} 파라미터는 그래프에 원으로 표기한 곳이다. Fig.3은 Γ_2 의 최적 b_{13} 파라미터값을 나타내고 있으며 Table 2에 최적값을 나타냈다.

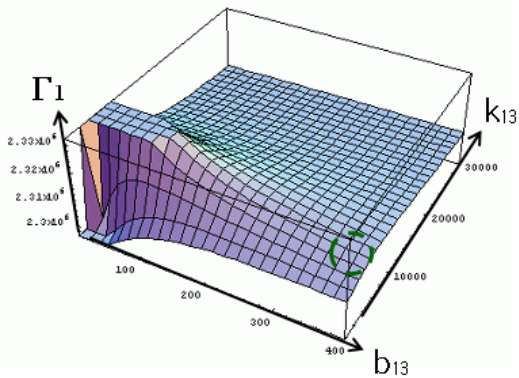


Fig. 2 Optimization 3D-plot for Γ_1

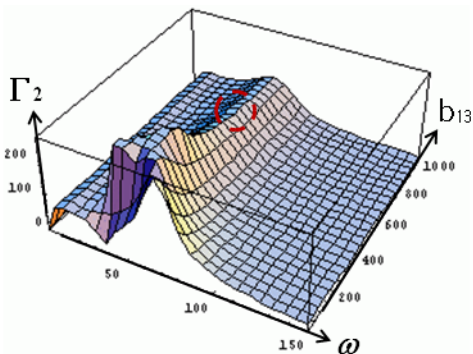


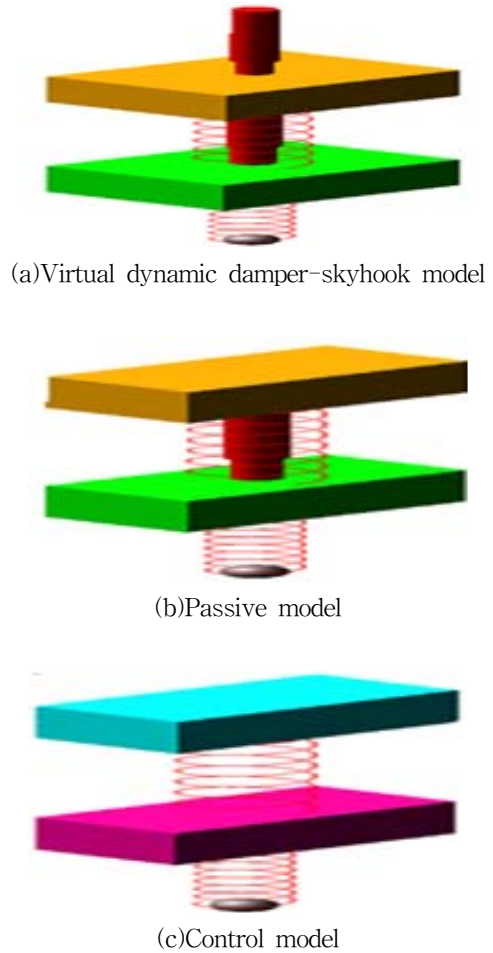
Fig. 3 Optimization 3D-plot for Γ_2

Table 2 Optimal parameters of dynamic damper

M3	5 kg
k13	7000 N/m
b13	600 N/m

4. 제어 로직

Adams/view 는 우등버스의 1/4 passive car 모델과 제어모델 그리고 가상 동흡진기-스카이훅 모델을 만드는데 사용되었고 Fig.4와 같이 모델링 되었다. 노면으로 부터 주파수 가진이 가능하며, 각 1/4 차량 모델은 2자유도를 가진다.



(a)Virtual dynamic damper-skyhook model

(b)Passive model

(c)Control model

Fig. 4 1/4 car modeling in Adams/view

Adams/view의 가상 동흡진기-스카이훅 모델은 Fd값을 계산하여 출력하고 Control model은 댐퍼의 상대속도를 출력하여 두 값을 식(17)과 같이 계산해 주어 댐핑계수를 추출하게 된다. 이 값은 실제 MR 댐퍼에서 구현가능한 범위를 넘기도 하며 식(18)과

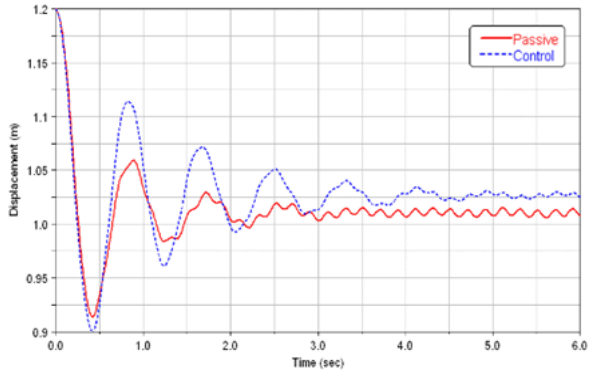


Fig. 8 Vertical displacement of sprung mass

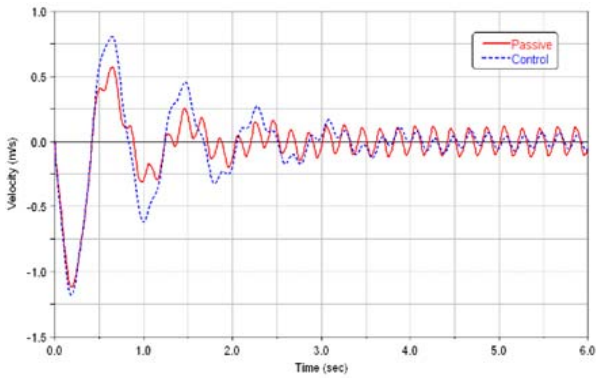


Fig. 9 Vertical velocity of sprung mass

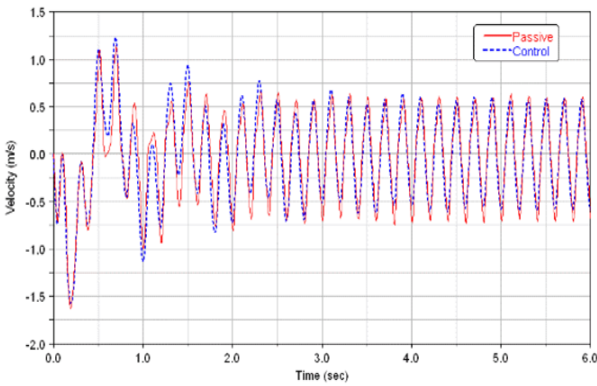


Fig. 10 Relative velocity of damper

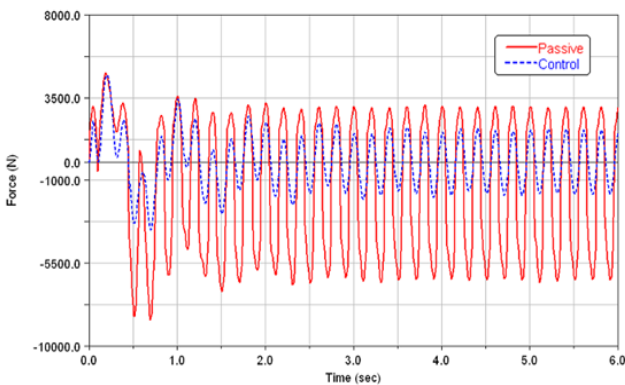


Fig. 11 Damping force(Fds)

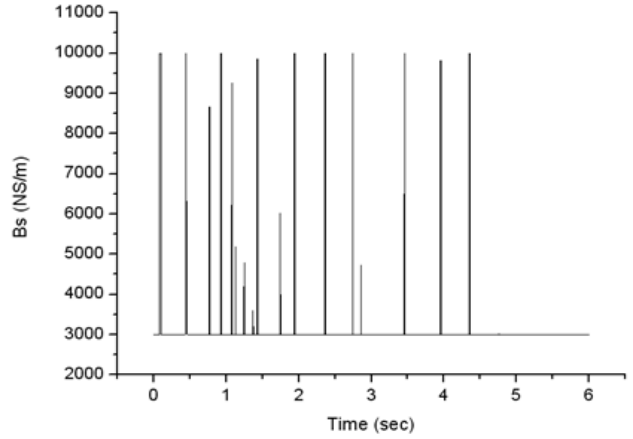
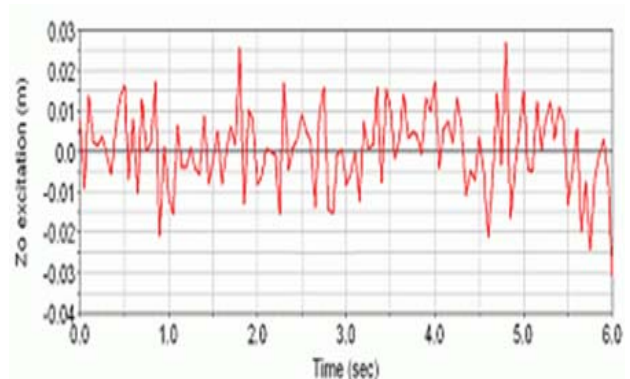


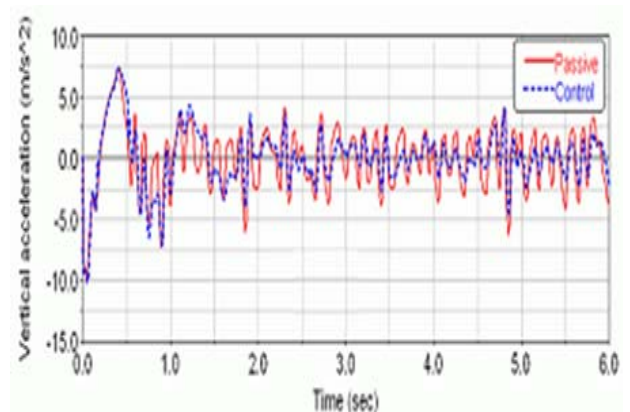
Fig. 12 Bs response

6.2 랜덤가진

노면 가진 조건 20Hz, 30mm이하 랜덤가진시 응답특성을 Fig.13에 나타냈다. 제어모델의 상질량 수직가속도 응답이 Passive 모델보다 작게 나타나는 것을 통해 제어효과가 있음을 확인 할 수 있다.



(a) Excitation Input



(b) Vertical acceleration of sprung mass

Fig. 13 Comparison of vertical response under 20Hz, 30mm

7. 결 론

본 연구에서는 우등버스용 MR댐퍼의 제어를 위하여 가상동흡진기를 고려하여 모델을 구성하였으며, 1/4 동흡진기-스카이훅 모델에 필요한 파라미터 값을 최적화함수를 이용하여 구하였다.

가상동흡진기가 고려된 모델에 스카이훅 제어를 적용하여 제어 시뮬레이션을 수행한 결과, 조화가진 및 랜덤가진에서 승차감 개선에 효과가 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 우등버스용 차량에 MR댐퍼가 장착되었을 경우를 고려하여 1/4 car로 모델링한 차량에 적용하였고, 향후 1/2차량 및 전차량 모델에 적용하는 연구를 수행 할 것이다.

후 기

본 논문은 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도산업 인재양성사업의 연구결과입니다.

참고 문헌

1. M. J. Crosby, R. A. Harwood and D. Karnopp, 2000, "Vibration Control Using Semi-Active Force Generators", Lord Library of Technical Articles LL-7004
2. T. H. Kang, J. S. Lee, S. W. Yyu and W. K. Baek, 2005, "Semi-Active Suspension System Control Considering Minimum Damping Forces of a MR Damper", KSAE 05-Y0011
3. K. H. Lee, Y. Y. Yoo and Y. G. Park, 2000, "Optimization of Ride Comfort using Virtual Sky-hook Dynamic Damper", KSAE Spring conference, pp. 755-762.
4. S. H. Woo, J. H. Ryu, 1999, "New Double Sky-hook Algorithm for Improving road-holding Property in Semi-active suspension Systems", SAE No.99370021