

현가장치의 성능향상을 위한 지능형 제어로직에 관한 연구

A Study on the Knowledge Based Control Algorithm for Performance Improvement of the Automotive Suspension System

소상균 · 변기식

S. G. So and G. S. Byun

Key Words : Semiactive Suspension System(반능동형 현가장치), Variable Damper(가변 댐퍼), Sky-hook Theory(스카이훅 이론), Fuzzy Logic(퍼지 로직),

Abstract : Automotive suspension system is a mechanism for isolation of the vibration coming from the road inputs. Recently, the electronically controlled suspension systems which may improve ride and handling performance have been developed. Here, the continuously controlled semi-active suspension system is focused. As a mechanism to control damping forces continuously, a solenoid valve is used. The modeling for the solenoid valve is introduced briefly, a vehicle dynamics modeling is constructed, and then combined system model is completed. To design the efficient control algorithm for the semiactive suspension system the knowledge based fuzzy logic is applied and the technique how to apply the sky-hook theory to the fuzzy logic is developed. Finally, to confirm the improvement of performance the computer simulation is carried out.

1. 서론

자동차산업이 고도화되어 감에 따라 차량의 기본 성능에 추가하여 차량의 편의성, 안락감이나 안정성 등과 같은 다양한 고객 만족도가 요구되고 있는 추세에 있다.

그러한 요구 성능중 차량의 승차감 향상을 위한 방안으로 현가장치에 대하여 수동형, 적응형, 능동형, 반능동형 시스템 등이 개발/적용되었고, 이 중 능동형은 성능면에서는 우수하지만 가격이 타 시스템에 비하여 매우 비싸고 차량에 부착하기 위해 필요로 하는 공간상의 제약조건 때문에 일반차량에의 적용은 극히 제한적이다. 반면, 능동형의 이러한 단점을 보완하고 성능 면에서도 우수한 반능동형 현가장치 시스템이 현재 중형차급 이상에서 많이 적용되고 있다.

본 논문에서는 반능동형 현가장치 시스템의 성능향상에 초점을 맞추어 연구를 수행하기 위하여 댐퍼 감쇠력을 연속적으로 가변시킬 수 있는 솔레노이드 밸브를 사용하는데 이에 대한 모델링 기법

을 간단히 소개하고, 차량 모델과 결합한 시스템을 구성하였고, 도로에서 오는 불규칙한 입력들에 대해 진동절연을 효과적으로 수행하기 위한 알고리즘을 설계하여 성능이 우수한 지능형 전자제어 현가장치의 모델을 제시하였다. 여기에서 사용된 알고리즘은 지식을 기반으로 한 퍼지로직이 이용되었다. 또한, 자동차 능동형 현가장치의 진동절연에 관한 기본이론인 스카이 훅 이론(skyhook theory)을 퍼지로직에 적용하기 위한 기법에 관한 연구를 수행하였고, 결과 확인을 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 응답성들을 비교 검토한다.

2. 가변댐퍼 모델링

2.1 감쇠력 발생원리

수동형 댐퍼(passive damper)에서는 감쇠력 특성 곡선이 하나의 곡선으로 정해지는데 비해 가변 댐퍼(variable damper)의 경우에는 정해진 영역내의 모든 감쇠력을 얻어낼 수 있는 댐퍼이다. 본 연구에서 사용된 가변댐퍼는 기존의 댐퍼에서 사용하는 방식과는 달리 오리피스(orifice)의 단면적 변화와 그것에 연동되는 블로 오프(blow-off) 밸브의 조합에 의해 감쇠력이 발생하는 구조를 취하였다. 따라

접수일 : 2001년 2월 28일

소상균 : 한밭대학교 제어계측공학부

변기식 : 부경대학교 전기제어계측공학부

서 기존의 수동형 댐퍼의 피스톤 밸브 및 하부밸브의 구조를 대폭 간단히 할 수 있으므로 하드웨어를 제작하기에 용이한 장점이 있다.

기존 댐퍼의 경우 많은 연구를 통하여 단순화한 모델의 유체 유동 및 구조해석은 어느 정도 진행이 되어 왔으나 실제 시스템에서는 유체의 비선형성과 해석상의 난이성 때문에 정확한 감쇠력을 예측하는 것은 매우 어려운 실정이다. 따라서 국내의 댐퍼 제작 업체들은 많은 시제품을 제작하여 시행착오(try and error)를 거침으로써 얻고자 하는 최종 감쇠력 특성을 발휘하는 댐퍼 개발을 완료하는 방식을 따르고 있다.

Fig. 1은 본 연구에서 적용하고자 하는 가변댐퍼의 밸브 구조도이다. 가변댐퍼는 감쇠력 발생부위에 따라 크게 두 부류로 나눌 수 있는데 고정된 감쇠력만을 발생시키도록 만들어진 수동형 댐퍼(passive damper) 부분과 원하는 다양한 감쇠력을 얻을 수 있도록 감쇠력의 가변을 가능케 해주는 솔레노이드 밸브로 구분된다. 이 댐퍼의 특징은 가변 솔레노이드 밸브를 리저버 튜브(reservoir tube)의 외벽에 직렬로 설치함으로써 신장과 압축시의 감쇠력을 솔레노이드 밸브에서 발생토록 하는 구조를 가지고 있으므로 기존의 피스톤 밸브는 단순히 체크밸브 형태만을 갖게 되며, 하부 밸브의 경우 솔레노이드 밸브와 조합하여 압축시의 감쇠력을 발생시키는 구조로 되어 있다. 하부 밸브가 닫히면 압축시의 밸브 감쇠력은 최대가 되며, 하부 밸브의 유체 저항값을 적절하게 조절함으로써 압축시의 전체 감쇠력을 필요한 값으로 설정할 수 있다.

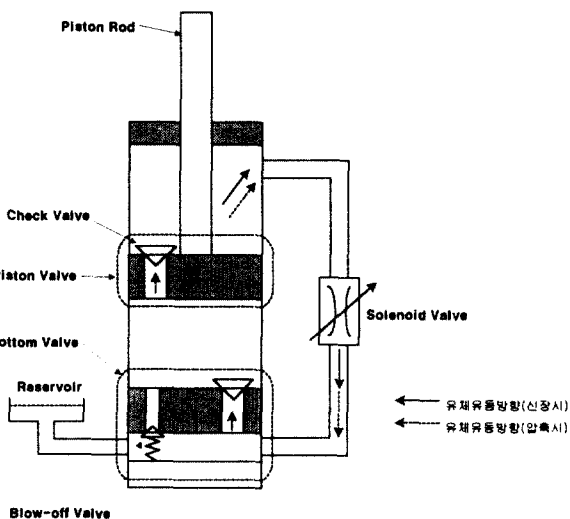
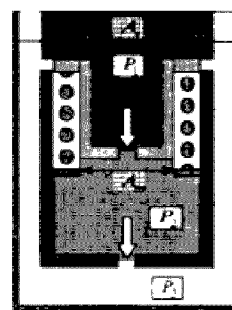


Fig. 1 Schematic diagram of a suspension system with variable damper

2.2 가변댐퍼 모델링

본 연구에서 사용한 가변댐퍼는 신장시의 모든 감쇠력을 솔레노이드 밸브에서 발생시키는 구조로 되어있고 압축시도 이와 유사한 구조를 취하므로 수학적인 모델링을 얻기 위해서는 솔레노이드 밸브의 모델링을 구하면 된다. Fig. 2는 솔레노이드 밸브를, Fig. 2의 (a)는 블로 오프 밸브가 열리기 전의 유체 흐름경로를, (b)는 블로 오프 밸브가 열린 후의 유체 흐름경로를 각각 보여주는 그림이다. 먼저 피스톤 속도가 저속이면 P_1 과 P_2 의 압력차에 의해 발생하는 힘이 블로 오프 밸브 내부에 있는 스프링의 자유하중(F_0)을 이기지 못하므로 블로 오프 밸브가 열리지 않고 Fig. 2의 (a)와 같은 유체 흐름경로가 형성됨을 알 수 있다. 반면에 피스톤 속도가 점차 증가하게 되면 P_1 과 P_2 의 압력 차가 점점 커지게 되어 이로 인해 발생하는 힘이 스프링 자유하중보다 커지게 되면 블로 오프 밸브가 열리게 되고 이 때에는 Fig. 2의 (b)에서 보는 바와 같이 유체 흐름경로가 오리피스 밸브를 거쳐 블리딩 밸브를 지나는 경로와 블로 오프 밸브를 지나는 경로가 병렬로 형성됨을 알 수 있다. 이러한 원리를 이용하여 솔레노이드 밸브를 통과하는 유체의 총 유동량 Q_t 와 이때의 총 압력강하 ΔP_t 사이의 관계식을 구하면 식(1)과 같다⁽³⁾.

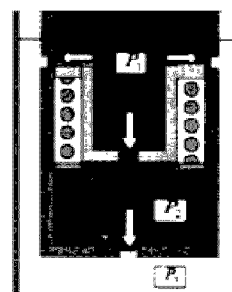
압력강하에 관한 식은 밸브의 형상 및 유동형태에 따라 다르며 층류유동의 경우처럼 유량에 비해 하는 구간이 있지만 댐퍼가 작동되는 경우 대부분 난류유동으로서 실험결과에 따라 유량의 7/4승 또



(a) Blow-off valve

closed

$$P_1 A_v - P_2 A_m \leq F_0$$



(b) Blow-off valve

opened

$$P_1 A_v - P_2 A_m \geq F_0$$

Fig. 2 Schematic diagram of solenoid valve

는 유량의 제곱에 비례하는 것으로 알려져 있으며⁽¹⁾, 여기서는 후자를 사용하였다.

$$Q_t = \sqrt{\frac{\Delta P_t}{K_t + K_v}} + C_d A \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P_t}$$

$$= \sqrt{\frac{\Delta P_t}{K_t + K_v}} + \frac{C_d}{K_{sp}} \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P_t} \times$$

$$\left[\frac{\Delta P_t}{K_p + K_v} \{K_p A_m + K_b(A_v - A_m) - F_0\} \right] \quad (1)$$

여기서, K 는 유체 유동조건에 따라 정해지는 비례상수이고, K_{sp} 는 블로 오프 밸브에 있는 스프링상수, C_d 는 유량방출계수이고, A_v 와 A_m 은 각각 블로 오프 밸브 바디 앞뒤의 형상 단면적들을 나타낸다.

앞에서 구한 수식들에 파라미터 값들을 대입하여 감쇠력과 피스톤 상대속도 사이의 관계식을 얻은 후 컴퓨터 시뮬레이션을 해본 결과 Fig. 3의 실선부분과 같은 결과를 얻었다. 비록 솔레노이드 밸브가 무단의 연속밸브이지만 여기에서는 시뮬레이션의 편의상 솔레노이드 밸브의 제어 단수를 압축과 신장 모두 30단으로 제한하였다. 그러나 실제 시스템에서 무단의 감쇠력을 얻기 위해서는 솔레노이드 밸브에 가해지는 전류를 연속적으로 변화시켜 주면 가변 오리피스 밸브의 오일 통로가 동시에 다양하게 조절되어 연속적인 감쇠력 곡선을 얻을 수 있게 된다. 연속 제어형은 앞에서 언급한 바와 같이 감쇠력 주 발생원이 솔레노이드 밸브이므로 밸브 구성 부품들의 형상 및 파라미터들을 변경함으로써 쉽게

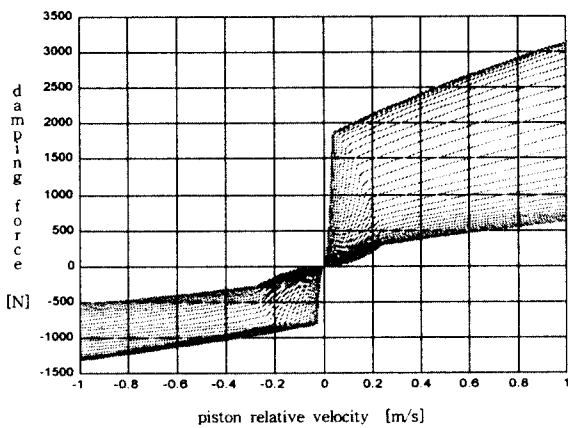


Fig. 3 Damping characteristics of variable damper

감쇠력 제어 범위를 조정할 수 있다. Fig. 3의 피스톤 속도별 감쇠력 발생 범위가 컴퓨터 시뮬레이션시에 반응동형 시스템의 감쇠력 결정을 위한 검색 표로써 활용되었다.

3. 차량모델과 연계한 시스템 구성

차량 모델을 구성하는데 있어서는 여러 가지 형태의 모델 구성이 가능하지만 여기에서는 승차감 향상에 관한 연구를 수행하기 위해 직접적인 관련이 있는 히브(heave)와 주행 안정성 요인의 하나인 피치(pitch)의 평가를 위해 Fig. 4와 같은 모델을 사용하였다. 그림4의 모델을 수학적 모델로 나타내기 위해 Newton 제2법칙을 적용하여 보면 식(2)와 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{d}{dt} X = AX + BU + MF \quad (2)$$

여기서, $X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$ 이고,

- x_1 : 질량중심의 상 방향 변위(heave, x_g),
- x_2 : 질량중심의 상 방향 절대속도 (x_g'),
- x_3 : 피치 각(pitch angle, θ),
- x_4 : 피치 각속도(ω),

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_1+k_2}{m} & -\frac{c_2}{m} & \frac{k_2b-ak_1}{m} & \frac{c_2b}{m} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_2b-ak_1}{J} & \frac{c_2b}{J} & -\frac{a^2k_1+b^2k_2}{J} & -\frac{b^2c_2}{J} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{c_2}{m} & \frac{k_1}{m} & \frac{k_2}{m} \\ 0 & 0 & 0 \\ -\frac{bc_2}{J} & \frac{ak_1}{J} & -\frac{bk_2}{J} \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m} \\ 0 \\ -\frac{a}{J} \end{bmatrix}$$

$$U = \begin{bmatrix} v_{\Delta} \\ x_{\Delta 1} \\ x_{\Delta 2} \end{bmatrix}$$

v_{Δ} : 속도입력(rear),

$x_{\Delta 1}$: 변위입력(front),

$x_{\Delta 2}$: 변위입력(rear),

F : 차량 앞쪽의 수동형 댐퍼, 능동형 또는 반응동형 가변댐퍼에서 발생하는 댐핑력.

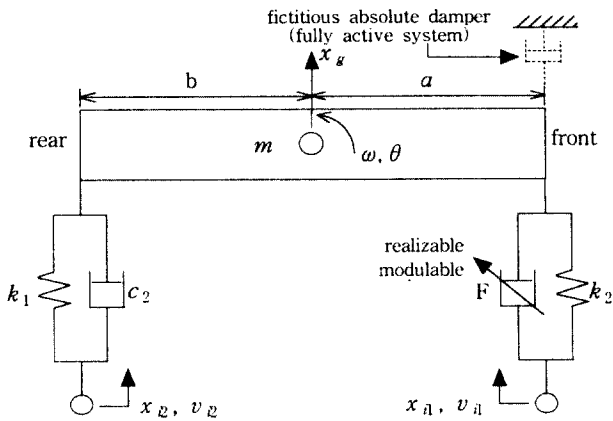


Fig. 4 Vehicle model description

차량 모델에 관한 식(2)에 댐핑력(damping force)을 적용하는 방법으로 수동형(passive), 능동형(active), 반능동형(semiactive)이 고려되었다. 수동형(passive) 시스템의 댐핑력 F 는

$$F = c_1 (x_g' + a\omega - v_{a1}) \quad (3)$$

여기서, c_1 은 수동형 댐퍼의 댐핑 계수이다. 능동형인 경우에는 F 는

$$F = c (x_g' + a\omega) \quad (4)$$

여기서, 감쇠력은 댐퍼 상단의 절대속도에만 비례하고 이때 c 는 비례상수이다. 반능동형(semiactive)의 경우에는 F 가

$$F = c_{on} x_g' \quad \text{if } x_g' \times (x_g' + a\omega - v_{a1}) > 0$$

$$F = c_{off} (x_g' + a\omega - v_{a1}) \quad \text{if } x_g' \times (x_g' + a\omega - v_{a1}) < 0. \quad (5)$$

식(5)는 이상적인 반능동형 시스템에 관한 수식으로 실제로는 하드웨어에 수동형 댐퍼가 포함되어 있으므로 이론적인 반능동형 개념을 구현하는 것은 불가능하다. 따라서, 이론적인 반능동형 시스템에 근접한 성능을 나타내는 실제 시스템을 얻기 위하여 식(5)의 논리를 퍼지로직에 적용하는 기법을 연구하였는데 시스템 변수들간의 퍼지로직 관계는 Table 1에 잘 나타나 있다.

이상에서 설명한 각 시스템별 감쇠력 F 를 식(1)의 차량 모델에 대입한 후 각 시스템별로 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하기 위한 블록선도를 그려보면 Fig. 5와 같다.

Table 1 Fuzzy Logic Relations

| Relative Velocity Input / Absolute Velocity Input | PB | PS | ZO | NS | NB |
|---|----|----|----|----|----|
| PB | PB | PB | ZO | ZO | ZO |
| PS | PS | PS | ZO | ZO | ZO |
| ZO | ZO | ZO | ZO | ZO | ZO |
| NS | ZO | ZO | ZO | NS | NS |
| NB | ZO | ZO | ZO | NB | NB |

4. 시뮬레이션 결과

이상에서 설명한 각 시스템별 감쇠력 F 를 식(2)의 차량 모델에 대입한 후 각 시스템별로 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하였다. 이때 도로 입력으로는 범프 통과와 같은 형태의 입력조건이 사용되었다.

Fig. 6은 입력에 대한 히브와 피치 운동의 변화를 보여주고 있다. 결과를 비교하여 보면 수동형, 퍼지로직의 반능동형, 능동형의 순으로 성능이 우수한 것으로 나타났으며, 반능동형의 경우 능동형에 근접한 결과를 얻을 수 있었고, 퍼지로직의 반능동형이 이론적인 반능동형에 매우 근접한 성능을 나타내 주고 있음을 알 수 있었다.

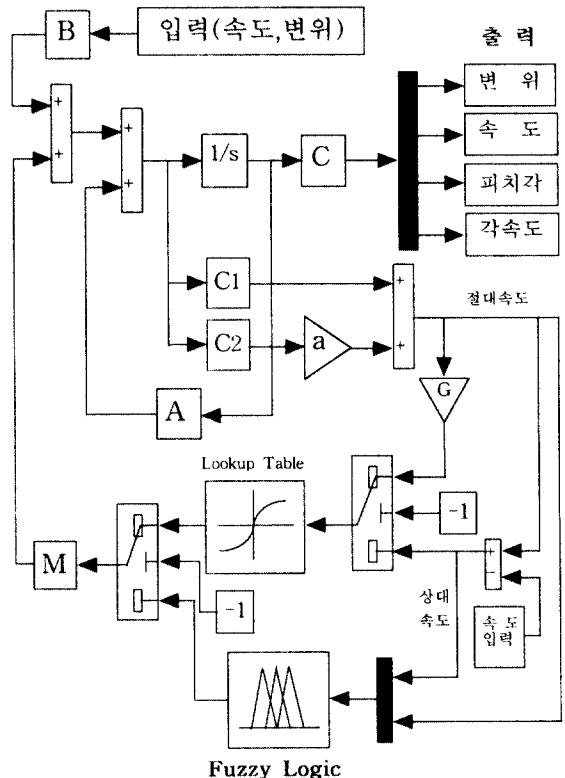


Fig. 5 System block diagram

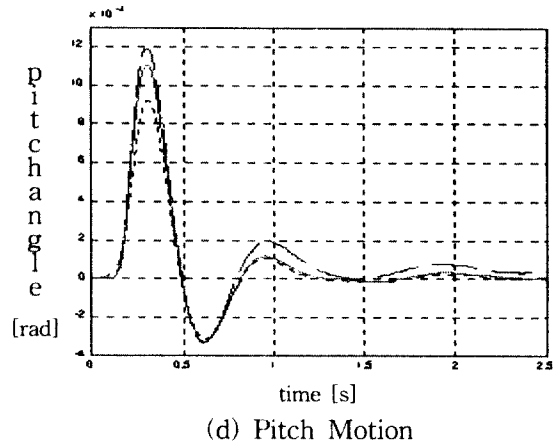
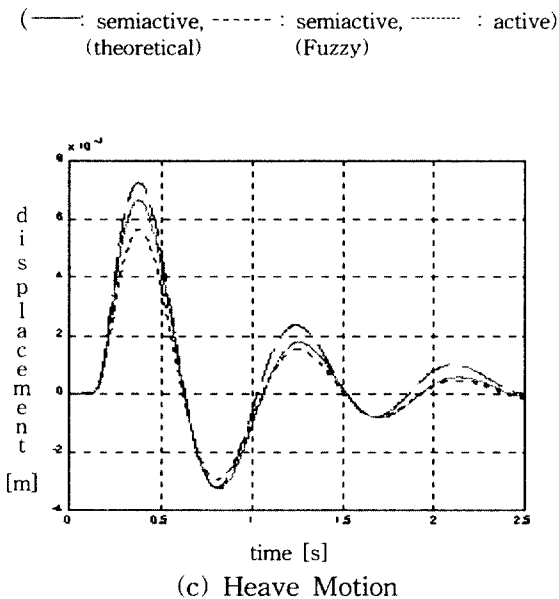
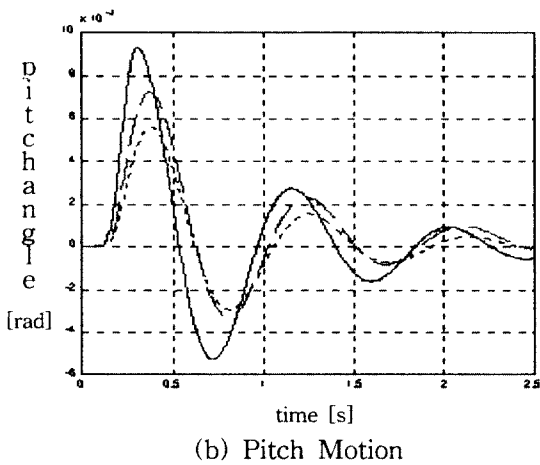
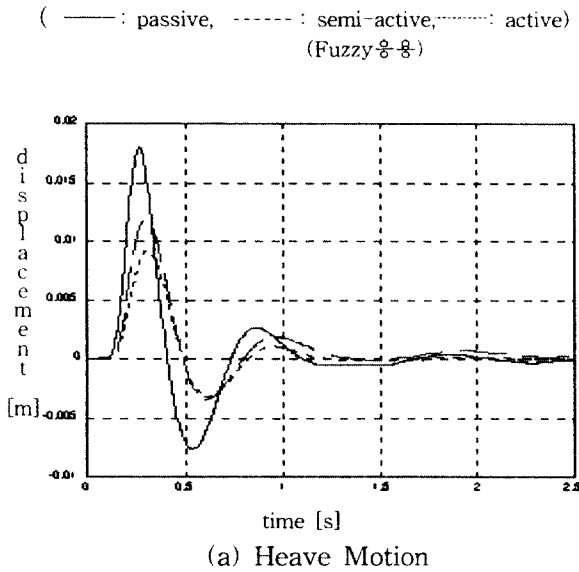


Fig. 6 System Responses for the Road Input

5. 결 론

본 연구에서는 차량의 승차감과 주행 안정성에 중요한 역할을 담당하는 현가장치의 성능향상을 위한 방안의 하나로 중형차급 차량에 적용하기가 적합한 반능동형 현가장치에 퍼지로직을 응용하는 기법에 관한 연구를 수행하였는데, 이를 위한 액추에이터의 모델링 방법, 시스템 구성방법 등을 소개하였으며, 스카이hook 이론을 바탕으로 퍼지규칙을 작성하는 새로운 기법을 완성하였다. 지능형 제어로직을 적용한 반능동형 시스템의 성능 확인을 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 실시해 본 결과 이미 예측하였던 바와 같이 수동형에 비해서는 우수하고 이론적인 반능동형 및 능동형에 어느 정도 근접한 성능을 얻을 수 있었음이 확인되었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 : 2000-2-30400-001-2) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. S. Duym, et al., "Evaluation of Shock Absorber Models," Vehicle System Dynamics, Vol.27, pp.109-127, 1997
2. F. Wobner and P. Causemann, "Continuously Adjustable Shock Absorbers Comparison, Calculation and Optimization," AVEC '92, 923055, 1992
3. D. C. Karnopp, et al., "Vibration Control Using a Semi-Active Force Generator," Trans. ASME, J. of Engr. for Industry, Vol.96, 1974

4. D. E. Ivers, et al., "Experimental Comparison of Passive, Semi-Active On/Off, and Semi-active Continuous Suspensions," SAE. Ser. No.892484, 1984
5. 소상균, 조경일, "연속제어방식의 반능동형 전자 제어 현가장치의 가변댐퍼 감쇠력 특성연구 및 차량운동성능에 미치는 효과 분석," 한국자동차 공학회 논문집, 7권 8호, pp.190~198, 1999