

연속 가변식 반능동형 현가시스템의 승차감 및 주행안전성 제어기 설계 해석

Design Analysis of Ride Comfort- and Driving Safety-control Strategies for the Continuously Controlled Semi-active Suspension Systems

허 승 진* · 박 기 흥* · 황 성 호**

Seung-Jin Heo, Kihong Park and Sung-Ho Hwan

(2003년 4월 4일 접수 : 2003년 12월 22일 심사완료)

Key Words : Semi-active Suspension System(반능동형 현가시스템), Modified Continuous Skyhook Control(변형된 연속 스카이훅 제어), Damping Force Following Control(감쇠력 추적 제어), Wheel Resonance Control(바퀴 공진 제어)

ABSTRACT

The semi-active suspension system is getting widely adopted in passenger vehicles for its ability to improve ride comfort over the passive suspension system while not degrading driving safety. A key to the success is to develop practical controllers that yield performance enhancement over the passive damper under various driving conditions. To this end, several control strategies have been studied and evaluated in this research in consideration of practical aspects such as nonlinearity and dynamics of the damper. From simulation results, it has been observed that, with the proposed control schemes, ride comfort can be significantly upgraded while suppressing degradation of driving safety.

1. 서 론

종래의 차량 현가시스템에서 승차감(ride comfort)과 주행안전성(driving safety)의 성능향상은 서로 상충되는 설계목표이다. 따라서, 주어진 설계목표의 최적치를 얻기 위해서는 현가시스템의 구성 부품인 스프링 및 댐퍼 요소의 상호 보완적인 튜닝 과정이 요구되어 왔다. 그러나, 실제적인 주행상황은 평탄한 고속도로상의 주행, 비포장 도로면의 주행, 범프 통과 상황, 커브주행, 제동상황 등 다양하게 변화하기 때문

에 수동형 현가시스템에 의한 승차감과 주행안전성의 동시적인 최적성능의 달성은 한계를 갖게 된다. 이러한 문제를 해결하고자 최근에는 반능동형 현가시스템(semi-active suspension system)의 활발한 연구개발 및 실용화가 이루어지고 있다.^(1~3)

반능동형 현가시스템에 사용되는 가변 댐퍼(variable damper)에는 크게 단계식(discrete type)과 연속식(continuous type)이 있는데, 시스템의 성능에 가장 큰 영향을 주는 설계인자는 빠른 동적 응답 특성과 폭 넓은 감쇠력 제어 범위를 들 수 있다. 나아가서 제어 성능 측면에서는 다양하고 복잡한 주행상황에 효과적으로 대처할 수 있는 승차감제어(ride control), 안전성제어(safety control), 핸들링제어(handling control)를 구현하여야 한다.

본 연구에서는 Fig. 1에서 제시된 반능동형 현가시

† 책임저자 : 정희원, 국민대학교 기계자동차공학부
E-mail: kpark@kookmin.ac.kr
Tel : (02) 910-4689, Fax : (02) 910-4718

* 정희원, 국민대학교 기계자동차공학부

** 정희원, 성균관대학교 기계공학부

시스템의 성능 최적화를 위해서 크게 요구되고 있는 다음과 같은 두 가지의 설계 사항에 대하여 차량 동역학적 시뮬레이션을 통하여 분석 및 평가를 하고자 한다.

- 가변 댐퍼의 비선형 동특성에 의한 승차감 제어 성능의 저하문제 해결방안
- 주행상황에 따라서 기본적으로 요구되는 주행안전성 확보를 위한 제어 알고리즘의 설계 및 평가

2. 반능동형 현가시스템 모델

2.1 1/4 차량 모델

반능동형 현가시스템을 연구하기 위해서 본 논문에서는 Fig. 2와 같은 연속 가변식 댐퍼가 부착되어 있는 1/4차량 모델을 정립하였다.

Fig. 2에서 m_s 와 m_u 는 각각 스프링상 질량(sprung mass)과 스프링하 질량(unsprung mass)을 나타내며, k_s 와 k_t 는 각각 스프링과 타이어의 강성을 표시한다. 이들의 값은 다음과 같다. $m_s = 454$ kg, $m_u = 50.5$ kg, $k_s = 23915$ N/m, $k_t = 215500$ N/m. f_d 는 가변 댐퍼에 작용하는 가변 감쇠력을 나타낸다. 스프링상 질량 및 스프링하 질량의 변위와 불규칙 도로면의 가진 입력 변위는 Fig. 2에서 각각 z_s, z_u, z_r 에 해당된다.

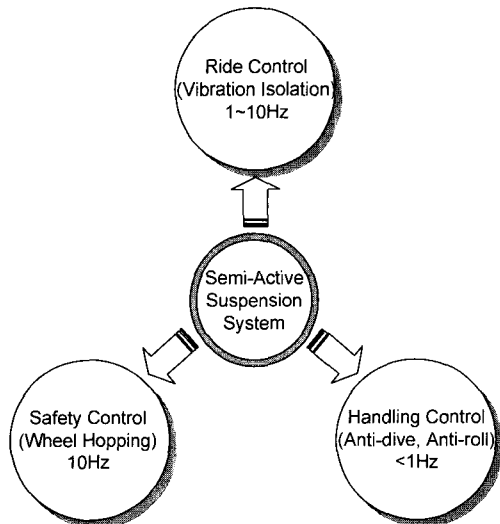


Fig. 1 Control targets of semi-active suspension systems

1/4차량 시스템의 운동방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} m_s \ddot{z}_s &= -k_s(z_s - z_u) - f_d \\ m_u \ddot{z}_u &= k_s(z_s - z_u) - k_t(z_u - z_r) + f_d \end{aligned} \quad (1)$$

2.2 댐퍼 모델

Fig. 3은 본 연구에서 사용된 수동형 댐퍼 및 연속 가변 댐퍼(CVD)의 감쇠특성에 대한 시험 결과를 나타낸다. 연속 가변 댐퍼에는 비례제어 밸브가 부착되어 있어, 이에 인가되는 전류를 제어하면 주어진 댐퍼양단의 속도에 대해 Fig. 3의 상한선과 하한선 사이의 범위 내에서 댐핑력을 낼 수 있다. 그러나 연속 가변 댐퍼는 자체적인 동특성을 가지기 때문에, 원하는 댐핑력과 출력되는 댐핑력 사이에 시간지연이 존재한다. 이러한 특성은 반능동형 현가시스템의 성능에 중요한 영향을 미칠 수 있기 때문에,⁽⁴⁾ 제어기 설계시 이 점을 고려하는 것이 매우 중요하다

본 연구에서는 가변 댐퍼의 동특성을 고려하기 위

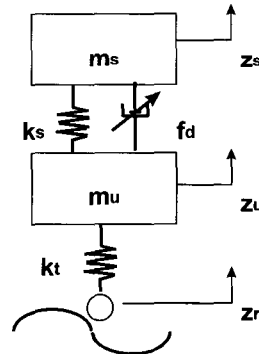


Fig. 2 Quarter car model with continuously variable damper

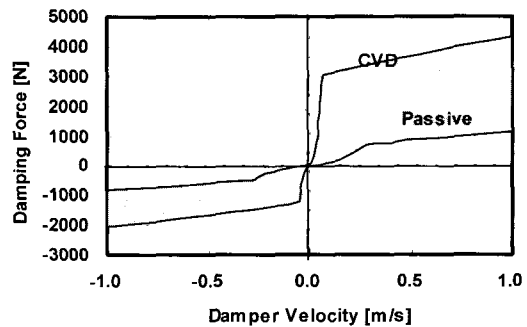


Fig. 3 Damping characteristic curves of passive damper and continuously variable damper

해서 식 (2)와 같은 2차의 댐퍼 동특성 모델을 정립하였다. 여기에서 사용된 매개변수는 연속 가변 댐퍼의 과도 응답특성 시험에서 얻어진 결과 (Fig. 4)를 바탕으로 구하였다.

$$F_d(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0s + \omega_0^2} F_{di}(s) \quad (2)$$

식 (2)에서 ω_0 는 고유진동수, ζ 는 감쇠비, $F_{di}(s)$ 는 입력 감쇠력, $F_d(s)$ 는 출력 감쇠력을 나타낸다.

3. 반능동형 현가시스템 제어 알고리즘

3.1 승차감 제어 알고리즘

(1) 연속 스카이훅 제어(Continuous Skyhook Control : CSC)

반능동형 현가시스템의 승차감 제어를 위해서 가장 일반적으로 적용되고 있는 제어 알고리즘은 Karnopp⁽⁵⁾에 의해 제안된 스카이훅(skyhook)제어 이론이다. 여기에서 이상적인 스카이훅 감쇠력은 다음 식 (3)에 의하여 계산된다.

$$f_{dSH} = c_{sh}\dot{z}_s \quad (3)$$

식 (3)에서 c_{sh} 는 스카이훅 감쇠계수를 나타낸다. 실제적인 가변 댐퍼에서는 Fig. 3에서 보인 바와 같이 감쇠력의 가변 범위가 제한되어 있으므로 실제 적용 가능한 스카이훅 감쇠력은 다음 식 (4)에 의하여 얻을 수 있다.

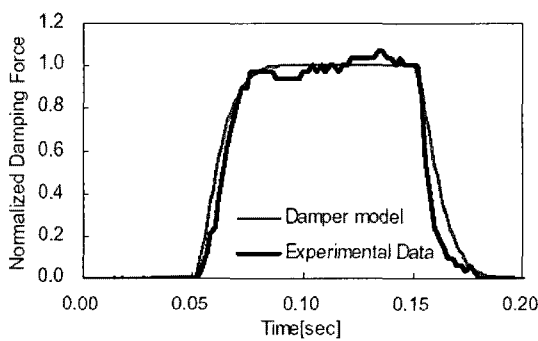


Fig. 4 Transient response of continuously variable damper

$$f_{dCSC} = \begin{cases} f_{dhard}, & \text{if } |f_{dSH}| > |f_{dhard}| \\ f_{dSH}, & \text{if } |f_{dsoft}| \leq |f_{dSH}| \leq |f_{dhard}| \\ f_{dsoft}, & \text{if } |f_{dSH}| < |f_{dsoft}| \end{cases} \quad (4)$$

식 (4)에서 f_{dhard} 와 f_{dsoft} 는 각각 가변 댐퍼의 하드(hard) 및 소프트(soft) 한계 감쇠력을 나타낸다.

(2) 감쇠력 추적 제어(Damping Force- following Control : FFC)

2.2절에서 언급한 가변 댐퍼의 동특성에 따른 응답 시간 지연에 의한 제어성능 저하 문제를 해결하기 위하여, 본 연구에서는 반능동형 현가시스템의 제어 루프 내에 추가적으로 PID 제어기를 적용하였으며, 이에 대한 제어 방정식은 식 (5)와 같다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t)dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

위 식에서, u 는 입력 감쇠력 f_{di} 이고, e 는 식 (4)에서의 제어 감쇠력 f_{dCSC} 와 실제 감쇠력 f_d 사이에서 발생하는 감쇠력 차이를 나타낸다. K_p , K_I , K_D 는 각각 PID제어 게인값으로 그 값은 다음과 같다. $K_p = 2.5$, $K_I = 50$, $K_D = 0.005$.

3.2 주행 안전성 제어 알고리즘

(1) 변형된 연속 스카이훅 제어(Modified Continuous Skyhook Control : MCSC)

이상적인 스카이훅 제어 로직만을 기반으로 하는 반능동형 현가시스템은 차량의 승차감 향상에는 크게 기여할 수 있으나, 이와 반대로 스프링하 질량의 진동과 관련되는 차량의 주행 안전성에는 나쁜 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 주행 상황에 따라서 차량의 주행안전성이 상대적으로 요구되는 경우를 위해서 식 (6)에서와 같이 식 (4)의 변형된 연속 스카이훅 제어 법칙을 적용하였다.

$$f_{dMCSC} = \alpha f_{dref} + (1 - \alpha) f_{dCSC} \quad (6)$$

식 (6)에서 f_{dref} 는 기준이 되는 수동 감쇠력을 나타내고 있으며, f_{dCSC} 는 식 (4)에서 계산되는 스

카이훅 감쇠력을 나타낸다. α 는 이와 같은 두가지 감쇠력 사이의 가중치 적용을 위한 제어 변수이며 [0, 1]의 범위에서 조절된다.

(2) 바퀴 공진제어(Wheel Resonance Control : WRC)

일반적으로 차량의 주행 안전성은 바퀴와 도로면 사이의 접촉성에 의하여 평가된다. 따라서, 주행시의 바퀴와 도로면 사이의 동적 접지력은 차량 주행 안전성능의 평가를 위한 물리적 측정량으로 고려될 수 있다.

결국에 차량의 주행 안전성능 향상은 바퀴공진 주파수 영역에서의 '바퀴 호핑(wheel hopping)' 현상을 최대한 감소시킴으로써 도달될 수 있을 것이다. 바퀴 공진 상태를 판단하기 위해서는 Fig. 5에서와 같이 차체와 차축에 설치된 가속도계 신호로부터 직접 또는 간접적으로 측정된 동적 바퀴 접지력을, 바퀴 공진 주파수의 중심 주파수로 주어진 대역통과 필터(band-pass filter)에 의하여 변조시킨다.

측정된 바퀴 접지력으로부터 구해진 정규화된 동적 접지력은 다시 바퀴 공진 계량기(wheel resonance quantifier)에 입력되어 바퀴 공진 제어 변수 β 를 계산하게 된다.

바퀴 공진 제어는 연속 스카이훅 제어 로직을 바탕으로 작동된다. 단지, 바퀴의 공진 상황을 Fig. 5에 의하여 지속적으로 평가함으로써 가변 댐퍼의 소프트(soft) 한계 감쇠력 $\tilde{f}_{d\ soft}$ 는 식 (7)에 의하여 조절된다. 결과적으로 바퀴 호핑 현상의 발생 시에는 가변 댐퍼의 특성을 하드(hard)하게 유지 시키도록 한다.

$$\tilde{f}_{d\ soft} = (1 - \beta)f_{d\ soft} + \beta f_{d\ hard}, \quad \beta_1 \leq \beta \leq \beta_2 \quad (7)$$

상기식에서 β_1 과 β_2 는 바퀴 공진 제어가 작동되는 상태에서 각각 감쇠력의 최소와 최대치를 결정하여 주는 포화 제어 변수(saturation control parameter)에 해당된다.

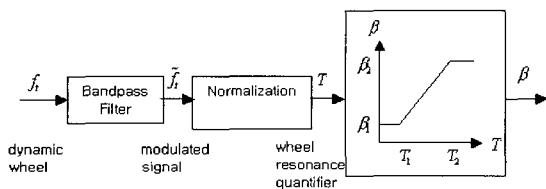


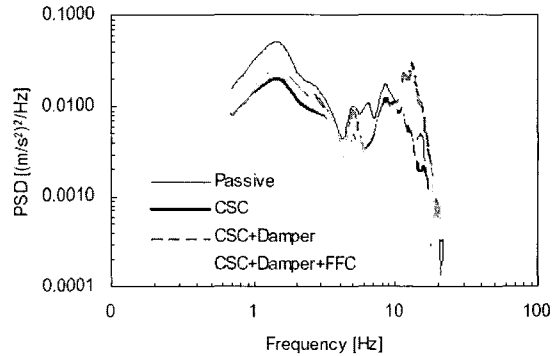
Fig. 5 Wheel resonance control concept

4. 시뮬레이션 결과 및 분석

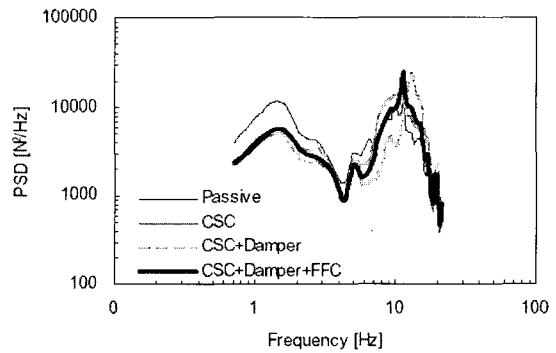
4.1 승차감 제어 분석

Fig. 6은 1/4 차량 모델을 바탕으로 ISO C-class 비포장 도로⁽⁶⁾를 시속 80 km/h로 주행 시의 시뮬레이션 결과를 차체 수직 가속도와 동적 바퀴 접지력의 PSD 선도로서 나타내고 있다. Fig. 6(a)로부터 연속가변댐퍼의 동특성에 의한 응답 시간 지연은 특히 바퀴 공진 주파수 영역에서 연속 제어식 스카이훅 댐퍼의 승차감 성능을 크게 저하시킬 수 있음을 알 수 있다.

이 문제를 해결하기 위해서 앞서 설명한 바 있는 식 (5)의 감쇠력 추적 제어 알고리즘(FFC)을 식 (4)의 연속 스카이훅 제어 알고리즘에 추가적으로 장착하면, 댐퍼 동특성이 고려되지 않은 이상적인 경우(CSC)에 거의 접근될 수 있음을 확인할 수 있다.



(a) Body vertical acceleration



(b) Dynamic wheel force

Fig. 6 Effects of damper dynamics and force following control (FFC) : (a) Body vertical acceleration (b) Dynamic wheel force

4.2 주행 안전성 분석

일반적으로 연속 스카이훅 제어에 의한 승차감 성능은 Fig. 7(a)에서와 같이 수동형 댐퍼에 비하여 크게 향상될 수 있다. 반면에 Fig. 7(b)에서와 같이 주행 안전성 측면의 동적 바퀴 접지력은 바퀴 공진 주파수 영역에서 수동형 댐퍼에 비해서 매우 큰 값을 나타내고 있다.

식 (6)의 변형된 스카이훅 제어 알고리즘(MCSC)에 의하여 수동형 감쇠효과가 가중치 계수 α 에 의해서 적절히 고려될 때 Fig. 7(b)에서 보여주고 있듯이 전체적인 주행 안전성 저하 문제를 해결할 수 있다. 물론, 이 경우에는 이상적인 스카이훅 제어의 경우에 비하여 어느 정도의 승차감 성능 저하는 감수해야 할 것이다.

이와 관련하여 제어 튜닝 변수로 고려되는 가중치 계수 α 의 변화에 대한 승차감과 주행 안전성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Fig. 8과 같은 상충조건(conflict diagram)을 그릴 수 있다. Fig. 8에서 볼

때 이론식에서 기대할 수 있는 것처럼 α 가 클수록 수동형 댐퍼의 특성을 갖고, 반대로 α 가 작을수록 이상적인 스카이훅 댐퍼의 승차감 향상 경향을 나타내는 것을 알 수 있다.

앞서 서술한 바와 같이 이상적인 스카이훅 댐퍼만

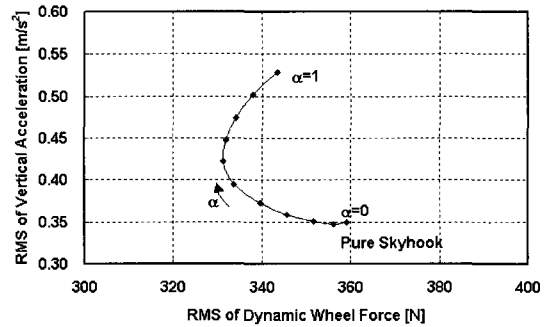
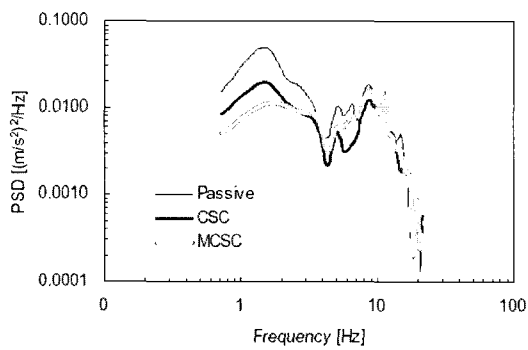
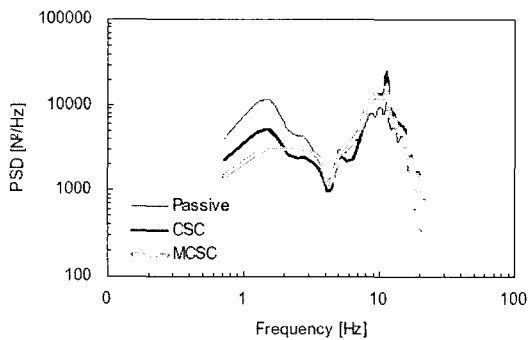


Fig. 8 Conflict diagram w.r.t. control parameter (α) variations of modified skyhook control algorithm

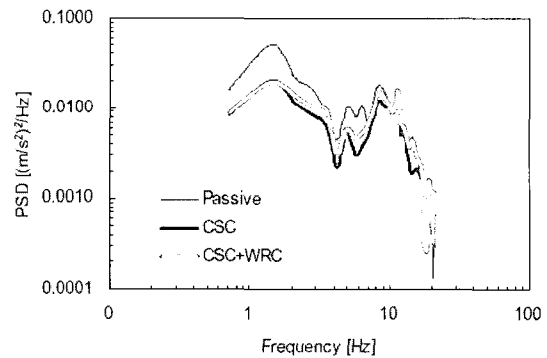


(a) Body vertical acceleration

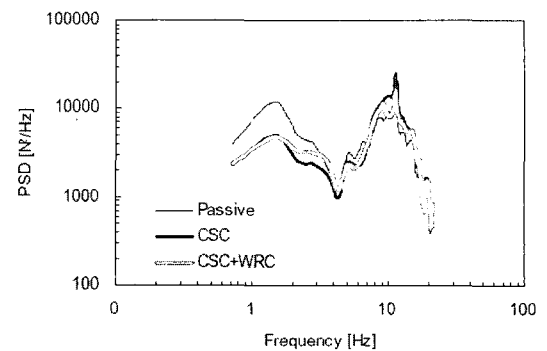


(b) Dynamic wheel force

Fig. 7 Effect of modified continuous skyhook control (MCSC : $\alpha = 0.1$): (a) Body vertical acceleration (b) Dynamic wheel force



(a) Body vertical acceleration



(b) Dynamic wheel force

Fig. 9 Effect of wheel resonance control WRC: ($\beta_1 = 0, \beta_2 = 0.1$): (a) Body vertical acceleration (b) Dynamic wheel force

을 사용하는 경우 주행 안전 성능 저하 문제를 해결하고자 식 (7)과 같은 바퀴 공진 제어 알고리즘 (WRC)을 식 (4)의 연속 스카이훅 제어 알고리즘 (CSC)과 결합시킬 때의 시뮬레이션 결과를 Fig. 9에서 나타내고 있다. 변형된 스카이훅 댐퍼에서와 유사하게 전체적으로 동적 바퀴 접지력 감소와 차체 수직 가속도의 상대적인 증가 경향을 볼 수 있다. Fig. 10에서와 같이 제어기의 포화 변수인 β_2 값의 변화에 따른 제어 성능의 상대적 변화 경향을 상충 곡선 (conflict diagram)을 통해서 알 수 있다.

4.3 반능동형 현가시스템 제어 성능 평가 및 분석

Fig. 11과 Fig. 12에서는 승차감 및 주행 안전성의 동시적인 성능향상을 위해 제시된 각종 제어 알고리즘에 따르는 제어성능 평가를 종합적으로 보여주고 있다.

Fig. 11에서는 실질적인 승차감 성능분석을 위하여 차체 수직 가속도 신호를 ISO-2631에서 제시된 안락감 필터⁽⁷⁾를 통하여 계산된 'K-value'를 이용하였다. 감쇠시스템의 동적 특성에 의한 승차감 제어 성능이 저하된 3의 상태를 감쇠력 추적제어 알고리즘(FFC)을 통하여 다시 4의 상태로 복귀 시킴으로써 이상적인 스카이 훅 댐퍼(CSC) 2의 상태의 제어 성능에 접근됨을 볼 수 있다.

이상적인 스카이훅 댐퍼의 주행 안전성 제어 성능 향상을 위하여 제시된 변형된 스카이훅 제어 알고리즘(MCSC)과 바퀴 공진 제어 알고리즘(WRC)은 거의 비슷한 결과를 보여주고 있다. 그러나, 실제적인

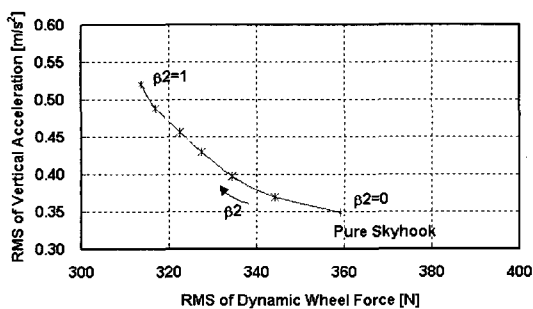


Fig. 10 Conflict diagram w.r.t. saturation parameter (β_2) variations of wheel resonance control algorithm

제어기 설계 측면에서의 상호 장단점을 살펴보면 다음과 같다.

변형된 스카이훅 제어의 경우 매우 간단한 제어 로직 및 튜닝 변수로 제어기를 구현시킬 수 있는 반면에, 최적 제어성능을 얻기 위해서는 기존 댐퍼 특성 곡선의 튜닝 과정 및 댐퍼 속도의 측정 등이 요구된다.

바퀴 공진 제어의 경우에는 바퀴 공진 주파수 영역에서 매우 효과적으로 동적 바퀴 접지력을 제어할 수 있을 뿐 아니라, 다양한 포화제어 설계 변수에 의하여 비교적 폭 넓은 제어 성능의 튜닝이 용이하다. 이에 반하여 고주파 및 저주파 통과 필터 설계와 비교적 복잡한 연산과정이 수반되므로 응답 시간 지연 및 고주파수 성분의 수치계산 오차를 유발 할 수 있다.

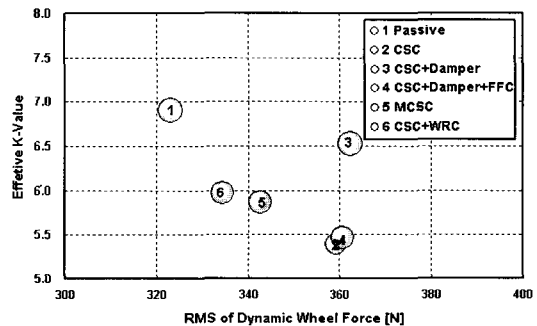


Fig. 11 Conflict diagram for the control performance evaluations between the ride comfort and driving safety control strategies

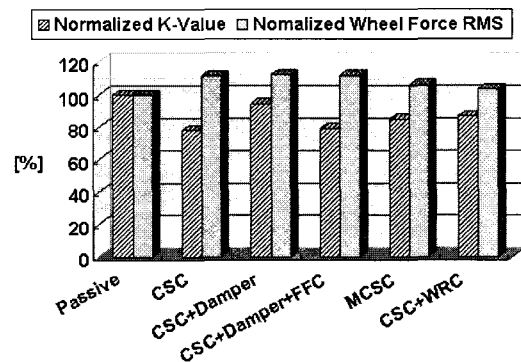


Fig. 12 Normalized K-value and RMS of dynamic wheel forces for the various semi-active system control algorithms w.r.t. passive system

5. 결 론

본 논문을 통하여 수행된 시뮬레이션 결과로 부터 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

- 반능동형 현가시스템에 연속 스카이훅 제어 개념을 고려할 경우에는 기존 수동형 현가시스템에 비하여 승차감 성능 향상에는 우수하나, 주행 안전성능의 큰 저하를 야기 시킬 수 있다.
- 반능동형 현가시스템에 사용되는 연속 가변댐퍼의 동특성에 의한 응답시간 지연은 승차감 제어 성능에 크게 영향을 미치게 되기 때문에 빠른 응답특성을 갖는 액추에이터의 제작과 함께 감쇠력 추적 제어 알고리즘 등에 의한 보상이 이루어 져야 한다.
- 스카이 훅 댐퍼에 수동형 감쇠효과를 고려한 변형된 스카이훅 댐퍼와 바퀴 공진상태를 대역통과 필터에 의하여 제어하는 바퀴 공진 제어 개념은 모두 스카이훅 댐퍼의 주행 안전성능 저하 문제를 해결 하는데 매우 효과적임을 확인할 수 있었다.
- 실제적으로 반능동 현가시스템의 제어기 설계를 구현하기 위해서는 요구되는 센서의 종류 및 갯수, 제어기의 튜닝과정의 용이성 및 타당성, 중앙제어장치 (ECU) 계산과정의 복잡성 및 소요 시간 등을 종합적으로 고려해야 할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Yoshida, H., Kuzuu, Y., Bickel, R. J. and Nagai, M., 1998, "Sky-hook Model Following Control of a Semi-active Suspension Using Continuously Modulated Damper," Proceedings of 4th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Sep, Japan, pp. 57~62.
- (2) 김도형 등, 2001, "ER 유체를 이용한 반능동 완충장치의 동적 특성," 한국소음진동공학회논문집, 제 11 권, 제 4 호, pp. 13~21.
- (3) Hwang, S. H., Heo, S. J. and Park, K., 1998, "Design and Evaluation of Semi-active Suspension Control Algorithms Using Hardware-in-the-loop Simulations," Int. J. of Vehicle Design, Vol. 19, No. 4, pp. 540~551.
- (4) Besinger, F. H., Cebon, D. and Cole, D.J., 1995, "Force Control of a Semi-active Damper," Vehicle System Dynamics, 24, pp. 695~723.
- (5) Karnopp, D., Crosby, M. J. and Harwood, R. A., 1974, "Vibration Control Using Semi-active Force Generators," J. of Engineering for Industry, May, pp. 619~626.
- (6) Wong, J. Y., 1993, Theory of Ground Vehicles, John Wiley & Sons, 2nd Edition.
- (7) Mitschke, M., 1984, Dynamik der Kraftfahrzeug, Band B Schwingungen, Springer-Verlag.