

승차감 향상을 위한 액티브서스펜션의 제어알고리즘

탁 태 오 *

Control Algorithms of Active Suspension Systems for Ride Comfort Improvement

Tae-Oh Tak *

ABSTRACT

Two control algorithms of active suspension system for improving ride quality are described and their effectiveness is assessed using a quarter car model. Optimal control approach demonstrates great flexibility to meet various running conditions of a vehicle. However, in order to fully utilize the power of optimal control approach, accurate estimation of the state variables is essential. Simple, yet effective sky-hook algorithm seems to be well suited for real application because of its much relaxed requirements on sensing the state variables and relative easiness to implement.

1. 서 론

자동차의 현가장치(suspension system)은 차량의 기본적인 동특성을 결정하는 대단히 중요한 부분임에도 불구하고 그에 대한 기본적인 설계 개념은 오랜 기간동안 변하지 않았다. 스프링(spring)과 댐퍼(damper)로 구성된 기존의 현가장치는 승차안락성과 주행안정성이라는 두개의 목표성능을 동시

에 만족시킬 수가 없으므로 현가장치 설계의 일반적인 관행은 위의 두가지 목표성능을 적절히 절충하는 것이었다. 그러나 자동차의 역사와 더불어 가장 오래된 기술영역에 속하는 현가장치 분야에도 근자에 눈부시게 발달한 제어이론, 마이크로 일렉트로닉스, 신호처리이론, 유압서보기술의 등장과 함께 능동현가장치(active suspension)이라고 하는 새로운 개념의 현가장치가 개발되고 있다. 능동현가장치는 기존의 수동형 현가장치가 가지는 성능의 한계성을 극복하고 우수

* 강원대학교 공과대학 기계공학과 전임강사

한 승차 안락성과 주행안정성을 동시에 제공할 수가 있다.”

능동현가장치(active suspension)의 구현에 필요한 하드웨어는 여러 분야의 기술이 유기적 적용되어야만 가능한 다양한 기술의 복합체인데, 능동현가장치의 하드웨어를 구동시켜서 원하는 성능을 발휘할 수 있도록 하기 위해서는 소프트웨어가 필요로 하게 된다. 이러한 능동구현장치의 구동에 필요한 소프트웨어를 제어로직(control logic)이라 하는데, 이는 차량의 주어진 주행조건에 따라서 최적의 승차감과 주행안정성을 제공하기 위해서 어떠한 방식으로 차체와 바퀴사이의 현가력을 제어하는가를 결정하는 것이다.

능동현가장치의 제어로직은 크게 보아서 차자세제어(attitude control)과 승차제어(ride control)로 나눌 수 있다. 차자세제어는 선회, 제동 및 급발진등으로 차체에 야기되는 롤링(rolling)이나 피칭(pitching)의 제어에 주 목적이 있으며 이를 통하여 선회나 제동시에 차량의 조안성(handling characteristics) 혹은 주행안정성을 향상시키고자 하는 것이다. 예를 들면 선회시 차량의 롤링을 제어하기 위해서 각 바퀴에 능동제어에 의해서 현가력을 발생시킬 때 전륜과 후륜의 하중배분을 적절히 함으로서 차량의 조향특성(understeer 혹은 oversteer)을 변화시킬 수 있다. 차자세 제어로직을 개발하기 위한 차량의 동력학적인 모델은 수직방향의 운동만을 고려한 1/4차 모델로는 부족하며, 적어도 롤, 피치, 그리고 횡방향 등의 운동을 포함하는 모델이 필요하다.

승차제어는 직진주행상태에서 노면으로부터 차체로 전달되는 전동차단의 관점에서 승차안락성(ride comfort)의 향상에 주된 목적이 있다. 승차제어 로직은 노면으로부터 전달되는 전동에 대한 차체의 주파수 응답 특성이 중요시 된다. 승차감 제어로직에서는 차체와 현가계의 수직방향의 운동만을 고려해도 무방하므로 차량의 동력학적 모델

로써는 1/4차 모델이 주로 사용된다. 승차제어 로직을 설정함에 있어서 승차안락성만을 고려하게 되면 타이어의 접지력에 부정적인 영향을 미치게 되므로 접지력에 대한 고려도 병행되어야 한다. 본 고에서는 능동현가장치의 제어로직중에서 승차제어에 대해서 논의하고자 한다.

2. 능동현가장치의 승차제어방식

본 절에서는 능동현가장치의 승차제어방식으로서 보편적으로 적용되는 스카이훅(sky-hook) 제어방식과 최적(optimal) 제어방식에 대한 이론적 고찰과 두 제어방식의 특성을 비교하고자 한다. 그림 1에는 1/4차 모델에 적용된 여러 형태의 현가장치를 보여주고 있는데 (a)는 스프링과 댐퍼로 구성된 수동형 현가계, (b)는 스프링(sprung) 질량 위에 별도의 댐퍼가 부착된 이상적 스카이훅방식의 현가계, (c)는 기계적 스프링을 병용한 부분지지방식의 능동현가계를 보여주고 있다. 그림에서 M_s 와 M_u 는 각각 스프링(sprung) 및 언스프링(unsprung) 질량이고, K_s 는 스프링 상수, K_t 는 타이어 강성, C_s 와 C 는 감쇠계수, 그리고 U 는 제어력(control force)를 나타낸다. (c)방식의 능동현가장치는 제어로직의 설정에 따라 스카이훅방식 혹은 최적제어방식에 의한 제어가 가능하다.

2-1. 최적제어방식

최적제어방식은 성능지수(performance index)로 선정된 목적함수 값이 최소화(또는 최대화) 되도록 현가력을 결정하는 방식으로서, 성능지수의 선정이 제어성능에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 성능지수는 시스템의 성능을 충분히 표현할 수 있어야 한다. 1/4차 모델의 운동방정식은 일반적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

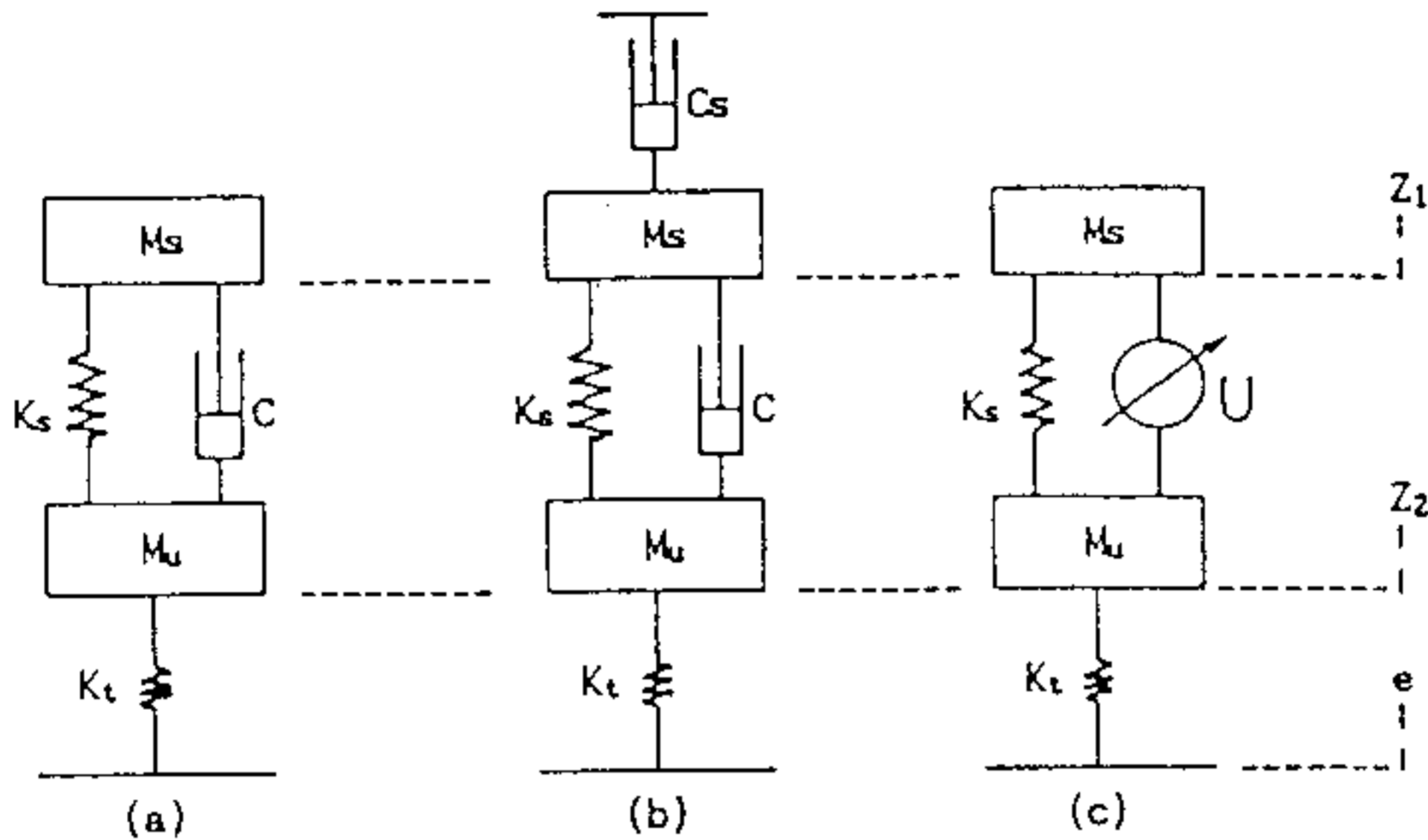


그림 1 1/4차에 적용된 여러 형태의 현가장치 모델

$$\dot{Z} = AZ + BU + Ce \dots \dots \dots (2-1)$$

여기서, $Z = [Z_1 - e \quad Z_2 - e \quad \dot{Z}_1 \quad \dot{Z}_2]^T$ 로서 상태변수이고, A는 system matrix, B는 input matrix, C는 disturbance input matrix를 나타낸다. 한편 제어력(U)는 상태변수(Z)에 대한 선형함수로 주어진다고 가정하면 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$U = -KZ \dots \dots \dots (2-2)$$

성능지수는 차체에 전달되는 진동을 나타내는 척도로서 스프링질량의 속도, 휠하우징(wheel housing)의 공간적 제약조건을 표시하는 스프링질량과 언스프링질량간의 상대변위, 타이어의 접지력을 나타내는 언스프링질량과 노면과의 상대변위, 그리고 에너지 소모량등을 고려하여 아래와 2차 성능지수(quadratic performance index)를 선정할 수 있다.

$$J = \int_0^{\infty} [q_1 \dot{Z}_1^2 + q_2 (Z_1 - Z_2)^2 + q_3 (e - Z_2)^2 + RU^2] dt \dots \dots \dots (2-3)$$

여기서 q_1, q_2, q_3 그리고 R은 상수이며, 제어의 목표에 따라 적절히 선택해야 할 것이다.

성능지수를 최소화하는 현가력 U를 결정하기 위해서는 식(2-2)의 K를 구해야 하는데 이를 위해서 리카티 방정식(Riccati Equation)을 풀어야 한다. 최적제어를 수행하기 위해서는 4개의 상태변수($Z_1 - e, Z_2 - e, \dot{Z}_1, \dot{Z}_2$)에 대한 피드백(feedback)이 필요하고, 전 상태변수의 측정이 불가능 하면 매 최적화 상태에서 상태변수에 대한 추정기(estimator)를 설정해야 한다.

2-2. 스카이훅 제어방식

이상적인 스카이훅 방식의 현가계는 보통의 현가계와는 달리 언스프링질량과 그라운드(ground) 사이에 추가의 감쇠를 가지고 있는 대단히 안정된 현가장치이다. 현실적으로는 차체와 그라운드 사이에 댐핑을 설치한다는 것은 불가능하므로, 능동현가장치에서 스카이훅 제어를 구현하기 위해서는 스프링

질량과 언스프링질량 사이의 액츄에이터에 스프링질량의 절대속도에 비례하는 감쇠력을 발생시킨다.

이상적 스카이훅 현가계에서 댐핑계수 C_s 의 선택이 제어성능에 큰 영향을 주게 된다. 이를 결정하기 위해서는 차체 공진주파수대의 노면입력에 대해 차체의 거동을 최소화하는 값으로 결정한다. 이상적인 스카이훅 현가계(그림 2. b)에서 진동전달률(transmissibility)의 관계식을 구하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{Z_1}{e} = \frac{-2\omega_1 \xi_d j\omega + \omega_1^2}{-\omega^2 + \omega_1^2 + 2(\xi_d + \xi_s)\omega_1 j\omega} \dots\dots\dots (2-4)$$

여기서 ω_1 은 스프링질량의 공진주파수이며 ξ 와 ξ_s 는 감쇠인자로서 다음과 같다.

$$\xi = C / (2\sqrt{KM_s})$$

$$\xi_s = C_s / (2\sqrt{KM_s})$$

스프링질량의 공진주파수에서의 진동전달률의 크기는 아래와 같이 주어진다.

$$\left| \frac{Z_1}{e} \right|_{\omega=\omega_1} = \frac{\sqrt{1+4\xi^2}}{2(\xi + \xi_s)} \dots\dots\dots (2-5)$$

스카이훅 댐핑 시스템의 감쇠인자(damping factor)인 ξ 와 ξ_s 간의 관계는 식(2-5)를 ξ 에 대해 편미분한 값이 0이 되게 함으로서 구할 수가 있다.

$$\frac{\partial (Z_1/e)}{\partial \xi_s} = 0 \dots\dots\dots (2-6)$$

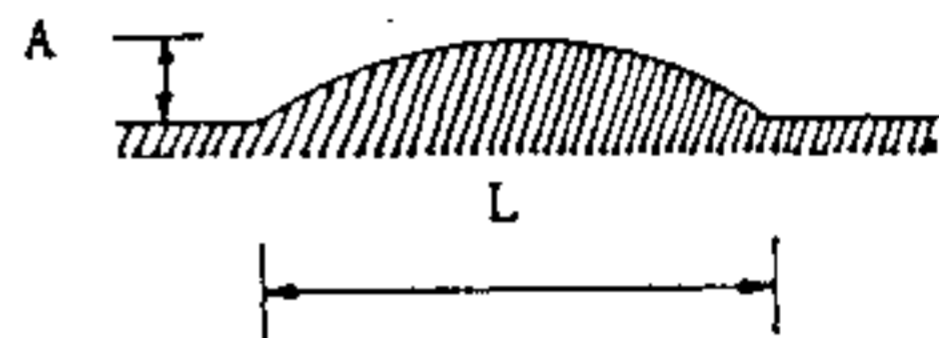
식(2-6)을 풀면 ξ 와 ξ_s 의 관계는 다음과 같이 구할 수가 있다.

$$\xi = 1/4\xi_s \dots\dots\dots (2-7)$$

이와같이 결정된 감쇠계수를 가진 능동현가

시스템은 스프링질량의 공진주파수대에서 차체의 거동을 효과적으로 제어할 수 있게 된다.

최적제어 방식과 스카이훅방식을 채용한 능동현가계의 동특성을 비교하기 위해서 1/4차 모델을 그림 2에 나타난 형태의 범퍼위로 통과시켰을 때의 스프링질량의 변화를 비교하였다.



- $e(t) = A \sin \omega t$
- $A = 0.3m$
- $L = 3.0m$
- $\omega = 6.88 \text{ rad/sec}$
- $V = 23.7 \text{ km/h}$

그림 2 범퍼의 형태

상기의 범퍼형상과 1/4차의 속도는 스프링질량의 고유진동수에 상응하는 노면의 진동을 발생시키는데 이에 대해 시간응답해석결과를 살펴보면 수동형현가계에 비해 스카이훅 및 최적제어방식에 의한 능동현가계는 월등히 우수한 성능을 보여주고 있다. 그리고 스카이훅 제어방식과 최적제어방식을 비교해보면 스카이훅 제어방식이 좀더 빨리 스프링질량의 운동을 감쇠시키고 있음을 알 수 있는데 이는 스카이훅제어 방식의 초점이 스프링질량의 공진주파수에서의 진동의 제어에 있기 때문이다. 최적제어 방식은 성능인자의 선정이 결과에 많은 영향을 미치게 되며 특히 효과적인 제어를 위해서는 스카이훅 제어에 비해서 보다 많은 상태변수의 센싱 및 피이드백이 필요하게 되므로 스카이훅어 방식이 실용적 측면에서 많이 채택되고 있

다. 다음 장에서는 스카이훅 제어방식의 저주파 대응형 능동현가장치 설계시에 고려해야 할 기본적 사항들에 대해서 논의하기로 한다.

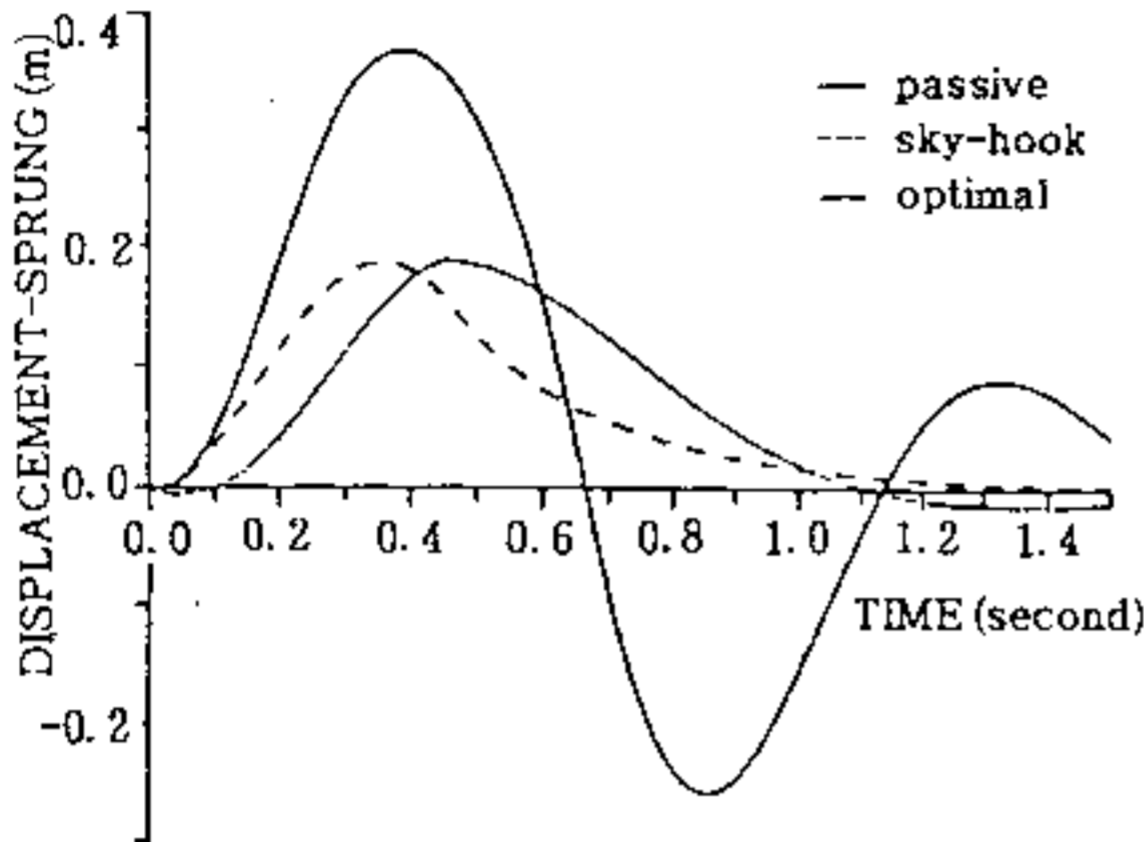


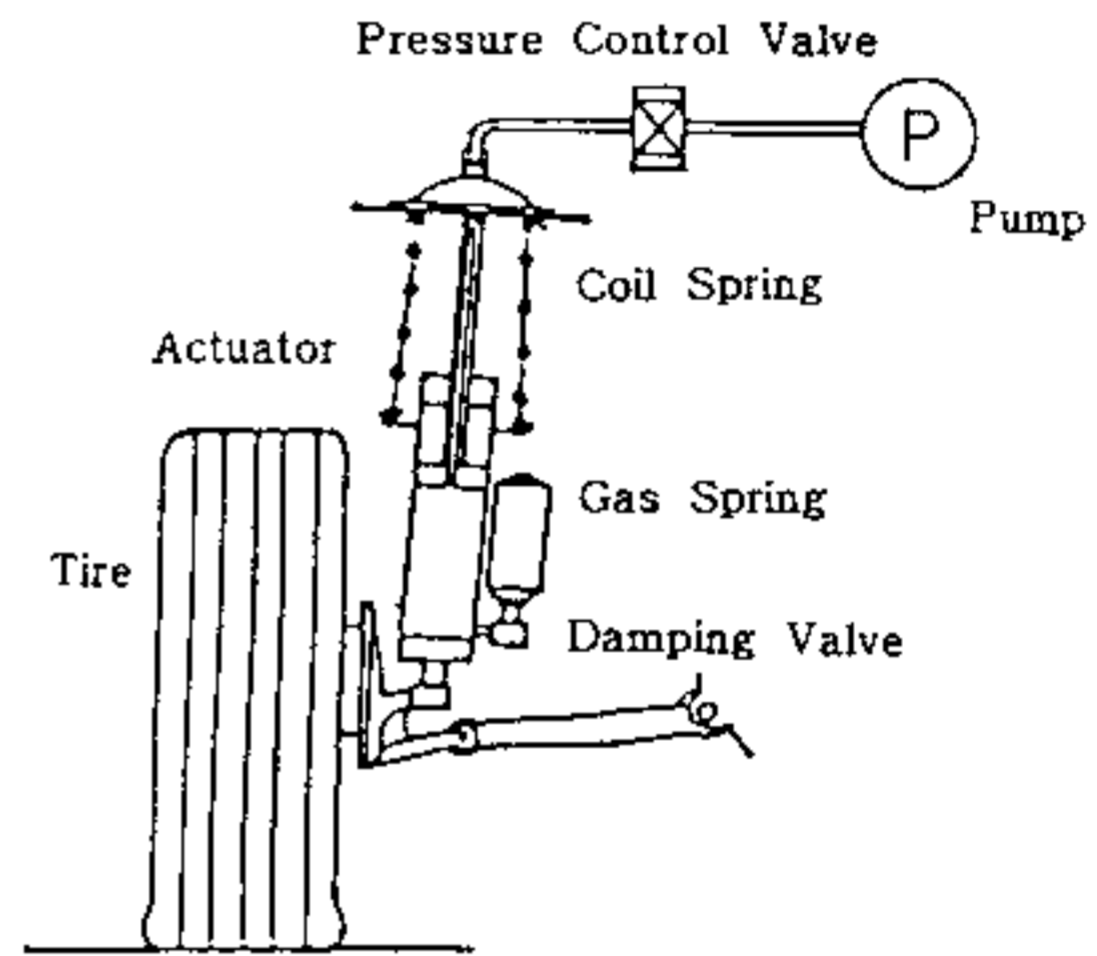
그림 3 범퍼 통과시 스프링질량의 시간응답 특성

3. 스카이훅 개념의 저주파 대응형 능동현가장치

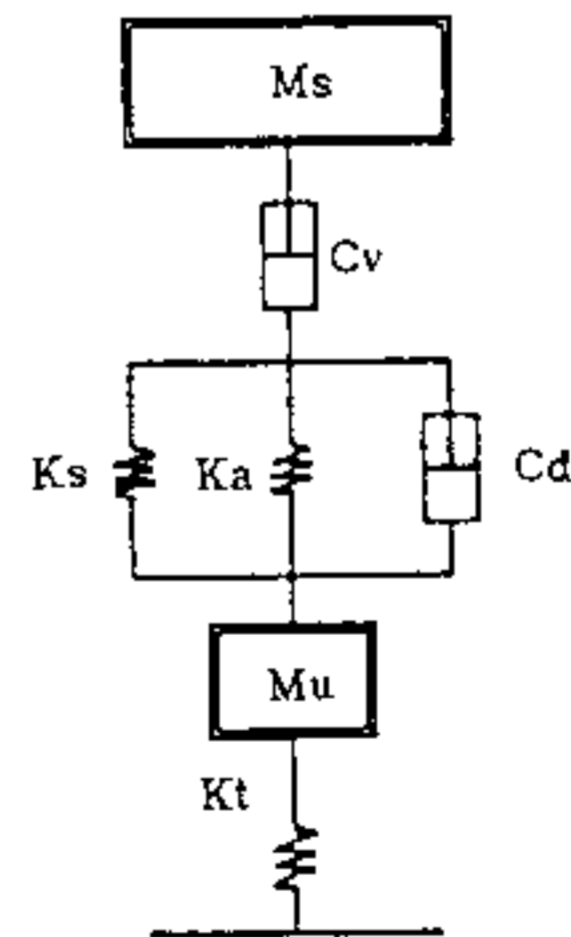
승차제어의 범위가 고주파 영역 까지 가능한 고주파대응형 현가장치와는 달리 능동제어의 범위가 6-7 Hz인 저주파대응형인 경우에는 그 이상의 주파수 대에서의 현가특성은 능동현가계가 아닌 수동현가계의 관점에서 파악되어야 한다. 즉 저주파대응형 능동현가장치의 제어범위가 6-7 Hz 정도라 한다면 그 이하의 주파수대에서는 스카이훅방식에 의한 능동제어가 가능하지만 그 이상의 주파수 대역에서는 능동현가기능은 존재하지 않고 수동현가장치와 같은 특성을 가지게 된다.

부분지지방식의 저주파대응형 액츄에이터를 장착한 1/4차 모델의 능동현가장치가 그림 4. a에 나타나 있으며, 이러한 현가장치에 제어범위를 벗어나는 고주파진동이 가해질 경우에는 1/4차의 현가계 모델은 그림 4.

b와 같이 표현될 수 있다. 여기서 K_s , K_a , K_t 는 각각 코일스프링, 에어스프링, 타이어의 강성(stiffness)이며, C_d , C_v 는 각각 뎀핑밸브와 압력제어 밸브의 감쇠계수이다. 그림 4에 나타난 능동현가장치의 전체적 뎀핑특성은 단순히 C_d 나 C_v 에 의해서만 결정되지 않고 스프링 상수인 K_s 와 K_t 까지도 포함하는 복합적 형태로 표시되며 특히 노면



(a) 실제 시스템



(b) 등가의 2자유도 모델

그림 4 1/4차의 능동현가계의 모델

입력 주파수에 대해서 균일한 값을 가지지 않고 주파수에 따라 변화하는 댐핑특성 (frequency sensitive damping characteristic)을 가지게 된다.

서론에서 언급한대로 능동현가장치의 승차제어로직을 설정하는데 있어서 승차안락성만을 고려하게 되면 주행안전성을 결정하는 중요한 인자인 타이어 접지특성에 부정적 영향을 미치게 되므로 상기 언급한 여러 인자들을 결정할 때는 승차안락성과 접지특성을 동시에 고려해야 할 것이다. 승차안락성의 척도로서는 노면진동에 대한 차체의 가속도가, 타이어 접지특성의 척도로서는 노면입력에 대한 바퀴의 변위를 선정하였다. 그림 5과 6에는 그림 4. b의 모델의 노면입력에 대한 승차안락성과 타이어 접지성능에 대한 주파수 응답특성이 나타나 있다. 임의 노면입력 (random input)에 대해서 능동현가계의 승차안락성은 저주파대 (특히 스프링질량의 공진주파수대)에서는 수동현가계보다 현저히 향상되나 언스프링질량의 공진주파수대에서는 별다른 변화를 보여주지 못함을 알 수 있다. 그러나 언스프링질량의 공진점이상의 고주파대의 진동에 대해서는 수동현가계에 비하여 우월한 승차안락성을 가진다.

한편 접지특성의 관점에서 볼 때 스카이훅 제어방식은 언스프링질량의 공진점을 포함하는 저주파대역에서는 수동현가계와 별다른 차이가 없으나 스프링질량의 공진점 근처에서는 접지성능이 수동현가계보다도 저하됨을 알 수 있다. 저주파대응형 능동현가장치인 경우 그림 5과 6의 주파수 응답특성은 고주파영역에서만 유효하므로 능동현가장치의 수동인자들인 코일스프링과 공기스프링의 강성, 댐핑밸브와 압력제어밸브의 감쇠계수등을 결정할 때에는 언스프링질량의 공진점 근처에서의 승차안락성과 접지특성을 적절히 조화시켜야 할 것이다.

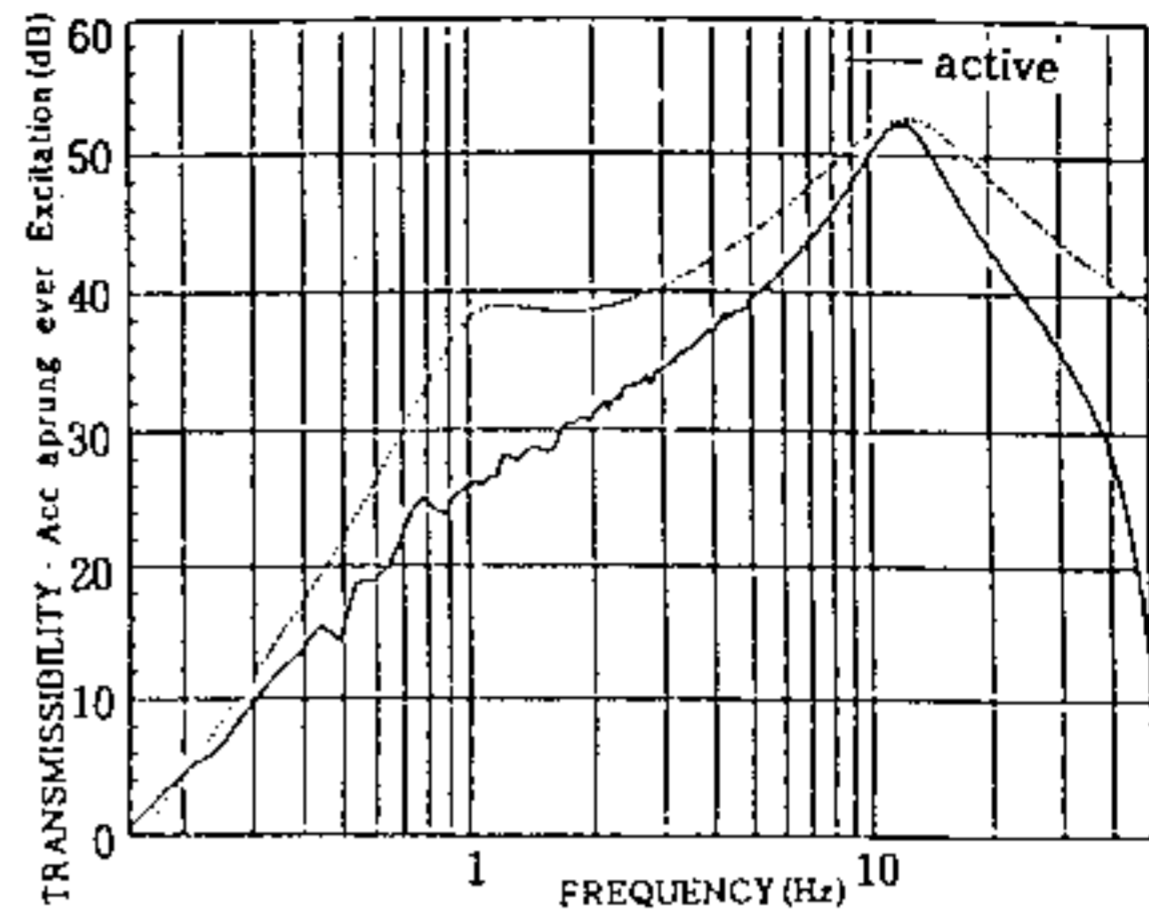


그림 5 승차감의 주파수 응답특성

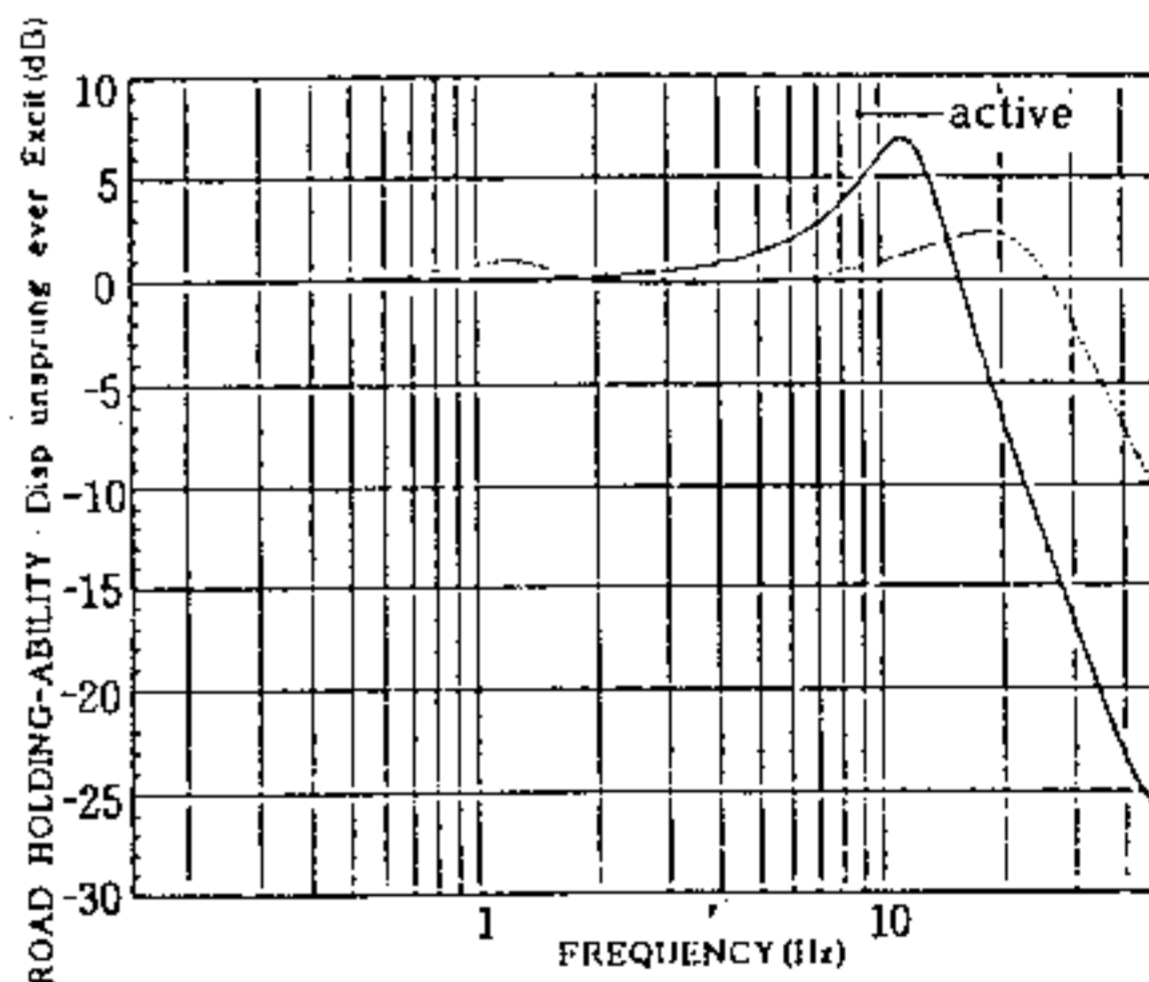


그림 6 접지력의 주파수 응답특성

4. 결 론

직진주행상태에서 노면으로 부터 차체로 전달되는 진동차단이 주 목적인 승차제어로직은 최적제어방식과 스카이훅 제어방식이 고려되었으며 저주파대, 특히 차체고유진동수 근처의 진동을 제어하는 데는 스카이훅 제어 방식이 대단히 효과적이며 실용적인 측면에서도 구현이 용이하다. 저주파대응

형 능동현가장치의 제어범위를 넘어서는 고주파의 노면입력에 대해서는 능동제어기능은 상실하며 능동현가장치에 내재된 수동현가인자인 코일스프링과 공기스프링의 상수, 댐핑밸브와 압력제어밸브의 감쇠계수 등이 전체적인 현가성능을 결정하게 된다. 이러한 수동현가인자들을 결정할 때는 언스프링질량의 공진점 근처에서 승차안락성과 접지특성등을 적절히 조화되도록 해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Y. Akatsu, N. Fukusima, et al, "An Active Suspension Employing an Electre-hydraulic Pressure Control Systems", SAE 905123.
2. S. Doi, E. Yasuda and Y. Hayashi, "An Experimental Study of Optimal Vibration Adjustment Using Adaptive Control Methods", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (1988-89)
3. A. G. Thompson, "An Active Suspension With Optimal Linear State Feedback", Vehicle System Dynamics, No. 5, pp. 187-203 (1976)
4. ISI, "Matrix-x Users' Manual", Integrated Systems Inc. (1992)
5. Gene F. Franklin and J. David Powell, "Feedback Control of Dynamic Systems", Addison Wesley (1991)