

# 스카이-훅 제어를 이용한 반능동 현가식 운전석의 승차감 해석

## Ride Analysis of A Semi-Active Suspension Seat with Sky-Hook Control

강태호 · 백운경

T. H. Kang, W. K. Baek

**Key Words** : Seat Suspension(운전석 현가장치), Semi Active Damper(반능동형 댐퍼), Sky Hook Control(스카이 훅 제어), Amplitude Transmissibility(진폭전달율)

**Abstract** : Commercial vehicles are mostly subjected to relatively rougher ground environment than passenger vehicles. Many driver's seats of commercial vehicles have suspension system with spring and dampers. Then, impact or vibrative forces transmitted from the vehicle to the driver can be attenuated. This study deals with a ride evaluation method using sky-hook control algorithm for the suspension dampers. Vibration amplitude transmissibilities were compared between passive dampers and semi-active dampers with sky-hook control method.

### 1. 서 론

최근 들어 상업용 차량의 수요가 증가하면서 차량의 성능뿐만 아니라 운전자의 안전과 운전조건에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 더욱이 상업용 차량은 장시간의 운전과 거친 환경으로 인하여 과도한 진동이 운전자에게 전달되어, 운전자는 많은 피로를 느끼게 된다. 이러한 진동을 줄임으로써 승차감을 향상시키기 위한 연구가 이루어지고 있다.

차량의 외부로부터 운전자에게 전달되는 진동을 절연하기 위한 장치에는 주 현가장치(primary suspension)와 운전석 현가장치(seat suspension)가 있다. 특히, 운전석 현가장치는 차량으로부터 운전자에게 직접적으로 전달되는 진동을 완화하기 위한 장치이다.

기존의 운전석용 수동형 댐퍼는 다양한 형태의 가진 입력에 적절히 대응하지 못하는 한계를 가지고 있으므로 반능동형 가변댐퍼를 운전석 현가장치에 적용하는 연구가 발표되었다<sup>1,2)</sup>.

본 연구는 상업용 차량 운전석으로 직접 전달되는 진동을 효과적으로 절연하기 위한 반능동형 댐퍼를 설계하기 위한 기초연구이다.

이를 위하여, 운전석 현가장치의 기구를 고려하여 운동방정식을 도출하였고, 반능동형 댐퍼에 효과적인 스카이 훅 제어를 설계하여 승차감 해석을 컴퓨터 시뮬레이션으로 고찰하였다.

### 2. 운전석 모델

#### 2.1 운전석의 기구

Fig.1은 본 논문에서 연구 대상으로 하는 운전석 현가장치의 2차원 개략도이다.

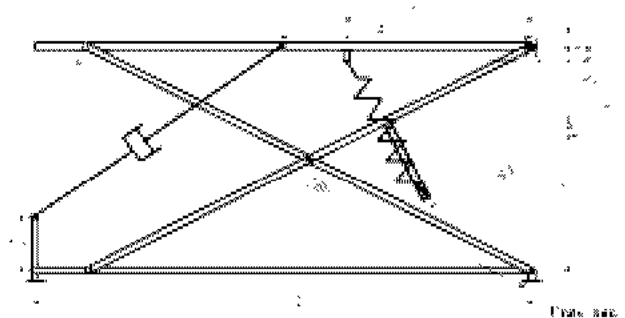


Fig. 1 Seat suspension geometry

이 운전석 현가장치의 상하운동기구는 평행기구(parallel mechanism)로 되어 있는데, 운전자가 승차한 상태에서 기저 가진을 받으면 이 평행기구는

접수일 : 2002년 2월 16일  
 강태호 : 부경대학교 대학원  
 백운경 : 부경대학교 기계공학부

상하로 움직이면서 운전자에게 전달되는 진동과 충격을 절연시키거나 완화시키는 역할을 한다. 이 운전석 현가장치의 최대 높이는 130mm이고 최소 높이는 60mm이다. 정적 평행상태일 때의 높이는 95mm이다.

Fig. 2는 운전석 현가장치 시스템의 승차감 해석을 위하여 승차감에 가장 큰 영향을 미치는 상하 진동만을 고려하고, 기저에 가진되는 1자유도 등가 모델을 구현하였다. 이 등가 모델에서 질량  $m$ 은 운전자의 질량이다.  $k_{eq}$ 는 Fig. 3에서 스프링이 수평면의 수직방향과 이루는 각도  $\beta$ 의 변화를 고려한 등가 스프링상수이고,  $c_{eq}$ 는 Fig. 3에서 댐퍼와 수평면이 이루는 각도  $\alpha$ 를 고려한 등가 댐핑계수이다.

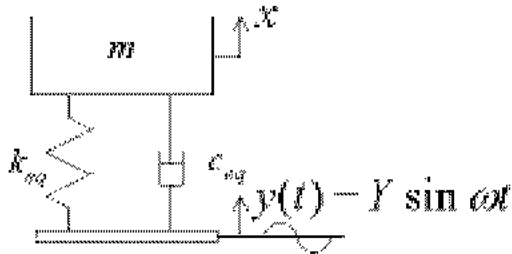


Fig. 2 Equivalent Seat Suspension Model

Fig. 3의 운전석 현가장치 모델에서 시트의 상하 운동에 따라 높이  $h(=x-y+95)$ 가 변동하게 되면 스프링과 댐퍼의 장착각도가 변동하므로 수직 방향의 등가 스프링 상수와 등가 댐핑계수도 변동하게 된다.

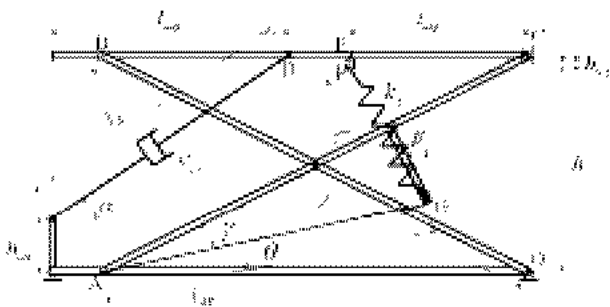


Fig. 3 Planar kinematics modeling of the seat suspension mechanism

먼저 등가 스프링 상수는 Fig. 3에서 기하학적인 관계에 따라 다음과 같이 구해진다.

$$k_{eq} = k_{ps} \cdot \frac{x_{rs} - y_{rs}}{x - y} \cdot \cos \beta \quad (1)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left( \frac{l_{usp} - [l \cos \theta - l_{isp} \cos(\theta - \gamma)]}{l \sin \theta - h_{usp} - l_{isp} \sin(\theta - \gamma)} \right) \quad (2)$$

여기에서  $x_{rs} - y_{rs}$ 는 실제 스프링이 변형된 길이,  $x - y$ 는 두 수평면의 상대변위,  $l$ 은 링크의 길이,  $l_{isp}$ 는 A점에서 G점까지의 거리,  $l_{usp}$ 는 C점과 E점 사이의 거리,  $h_{usp}$ 는 F점과 E점 사이의 수직거리,  $\theta$ 는  $\overline{OA}$ 와  $\overline{AC}$ 사이의 각도이고,  $\gamma$ 는  $\overline{AC}$ 와  $\overline{AG}$ 가 이루는 각도이다. 등가 댐핑계수  $c_{eq}$ 도 Fig. 3에서의 기하학적 관계에 따라 다음과 같이 계산된다.

$$c_{eq} = c_{ps} \cdot \frac{\dot{x}_{rs} - \dot{y}_{rs}}{\dot{x} - \dot{y}} \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{l \sin \theta - h_{udp}}{l_{udp}} \right) \quad (4)$$

여기에서  $\dot{x}_{rs} - \dot{y}_{rs}$ 는 실제 댐퍼가 받는 상대속도,  $\dot{x} - \dot{y}$ 는 두 수평면의 상대속도,  $l_{udp}$ 는 H점과 D점 사이의 수평길이,  $h_{udp}$ 는 J점에서 I점까지의 수직 높이이다.

$\alpha$ 와  $\beta$ 는  $\theta$ 의 함수로 표시되며, 따라서  $k_{eq}$ 와  $c_{eq}$ 도  $\theta$ 에 관한 함수로 표현된다.  $\theta$ 값은 시물레이션의 각 샘플링시간에서  $x$ 와  $y$ 값을 피드백 받아서 다음의 식으로 구한다.

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{x - y + 95}{l} \right) \quad (5)$$

## 2.2 운전석 현가장치의 운동방정식

Fig. 2에서의 1자유도계 진동모델에 대한 운동방정식<sup>3)</sup>은 다음과 같이 유도된다.

$$m\ddot{x} + c_{eq}(\dot{x} - \dot{y}) + k_{eq}(x - y) = 0 \quad (6)$$

기저 가진  $y(t) = Y \sin \omega t$ 를 대입하여  $x$ 에 관한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$m\ddot{x} + c_{eq}\dot{x} + k_{eq}x = k_{eq}Y \sin \omega t + c_{eq}\omega Y \cos \omega t \quad (7)$$

### 3. 스카이-훅 제어 이론

Fig. 4와 같이 가상의 관성 기준(inertial reference)과 질량 사이에 수동댐퍼를 장착한다. 이 댐퍼를 스카이 훅 댐퍼라고 한다 ( $c_{sky} = c_{ps}$ ).

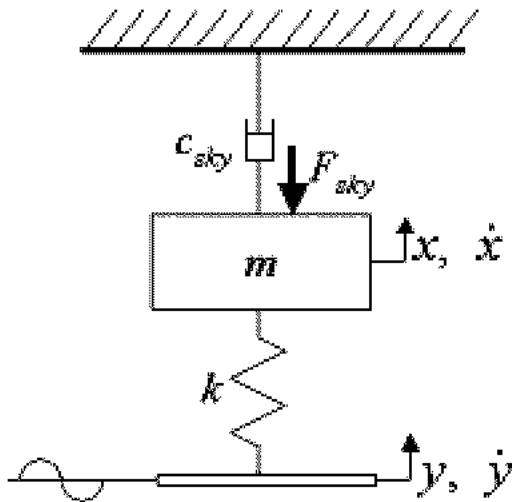


Fig. 4 Ideal skyhook configuration

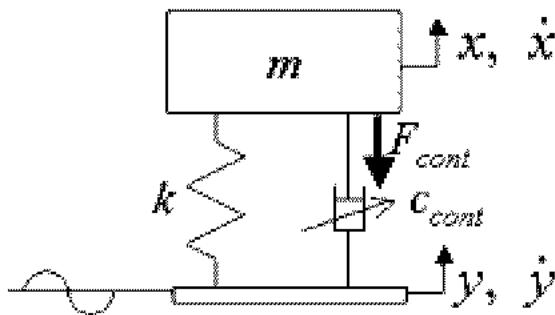


Fig. 5 Practical semi active suspension

이렇게 하면 질량의 절대 속도인  $\dot{x}$ 에만 관계되는 감쇠력이 발생된다.

그러나 이상적인 스카이 훅 댐퍼를 실제 시스템에 적용할 수가 없다. 그리하여 Fig. 5와 같은 가변 댐퍼를 기저와 질량사이에 장착하고 등가적인 댐핑계수 'c\_cont'를 사용하여 스카이 훅 댐퍼에 해당하는 감쇠력을 발생시킬 수가 있다. 이것이 스카이 훅 제어<sup>4,5)</sup>이다. Fig. 4의 이상적인 스카이 훅 댐퍼에서 발생하는 감쇠력은 다음과 같다.

$$F_{sky} = -c_{sky} \cdot \dot{x} \quad (8)$$

Fig. 5의 실제적인 가변댐퍼에서 발생하는 감쇠력은 다음과 같다.

$$F_{cont} = -c_{cont} \cdot (\dot{x} - \dot{y}) \quad (9)$$

식(9)에서의 실제 감쇠력은 식(8)의 이상적인 감쇠력과 같아야 하므로 다음과 같이 식(10)과 (11)이 성립된다.

$$c_{cont} = c_{sky} \frac{\dot{x}}{(\dot{x} - \dot{y})} \quad (10)$$

$$F_{cont} = -c_{sky} \cdot \dot{x} \quad (11)$$

Fig. 6에서는 절대속도  $\dot{x}$ 와 상대속도  $(\dot{x} - \dot{y})$ 의 부호에 따른 감쇠력의 방향을 나타내었다. Fig. 6(a)와 같이 절대속도  $\dot{x}$ 와 상대속도  $(\dot{x} - \dot{y})$ 의 부호가 같으면 같은 방향의 감쇠력이 작용한다.

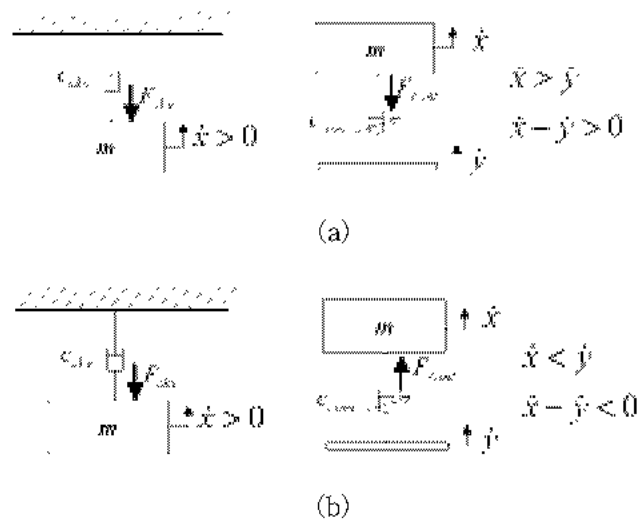


Fig. 6 Damping force direction due to velocity and velocity difference

그러나 Fig. 6(b)와 같이 절대속도  $\dot{x}$ 와 상대속도  $(\dot{x} - \dot{y})$ 의 부호가 반대이면 감쇠력도 반대방향으로 나타내게 된다. 이 경우에는 스카이 훅 댐퍼의 감쇠력과 같게 하기 위해 사용되어진 가변댐퍼에서 같은 크기의 감쇠력은 발생하게 할 수 있으나 같은 방향의 감쇠력을 발생시키는 것이 불가능하게 된다. 따라서 이 경우의 가변댐퍼에서의 감쇠력은 스카이 훅 댐퍼의 감쇠력과 가장 가깝게 하기 위해 감쇠력을 0으로 한다. 이것을 다음의 식과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{x} \cdot (\dot{x} - \dot{y}) \geq 0 & F_{cont} = c_{sky} \cdot \dot{x} \\ \dot{x} \cdot (\dot{x} - \dot{y}) < 0 & F_{cont} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

그러나 실제 차량에 장착된 댐퍼의 감쇠력이 0이 되는 것은 불가능하다. 그래서 가변댐퍼에 제어신호가 없을 때의 댐핑계수를 수동댐핑계수의 1/10으로 가정하여 식(12)를 다음과 같이 수정하였다.

$$\begin{cases} \dot{x} \cdot (\dot{x} - \dot{y}) \geq 0 & F_{cont} = c_{sky} \cdot \dot{x} \\ \dot{x} \cdot (\dot{x} - \dot{y}) < 0 & F_{cont} = \frac{1}{10} c_{sky} \cdot (\dot{x} - \dot{y}) \end{cases} \quad (13)$$

등가 댐핑계수를 나타낸 식(3)을 식(10)에 적용하여 표현하면,

$$c_{cont} = c_{sky} \cdot \frac{\dot{x}}{\dot{x} - \dot{y}} = c_{eq} \cdot \frac{\dot{x}}{\dot{x} - \dot{y}} \quad (14)$$

이를 다시 식(6)과 기저 가진  $y(t) = Y \sin \omega t$ 를 대입하여 다시  $x$ 에 관한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$m\ddot{x} + c_{eq}\dot{x} + k_{eq}x = k_{eq}Y \sin \omega t \quad (15)$$

즉, 질량에 기저 가진으로 인한 발생된 힘들 중에 댐퍼에 의해 발생하는 힘  $c_{eq}\omega Y \cos \omega t$ 가 사라진다. 그러므로, Fig. 7과 같이 1자유도 모델에서 질량에 가진을 받는 시스템으로 등가할 수 있다.

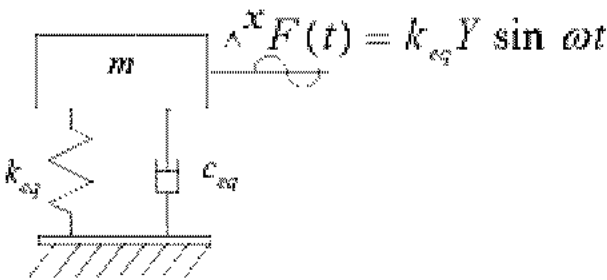


Fig. 7 Equivalent seat suspension model

Fig. 8은 일반적인 1자유도 모델의 진폭전달율과 스카이 훅 제어를 사용한 1자유도 모델의 진폭전달율을 비교하여 나타내었다. 두 시스템에서 감쇠비  $\zeta$ 가 작을 때 공진주파수보다 빠른 입력에 대해 두 시스템의 응답은 모두 진동절연이 되고 있다.

하지만, 공진주파수 근처에서 입력에 대한 큰 진폭 전달율은 바람직하지 못한 결과를 보인다. 이를 개선하기 위해 감쇠비  $\zeta$ 을 크게 하면 일반적인 시스템은 공진주파수보다 높은 주파수영역에서의 진동

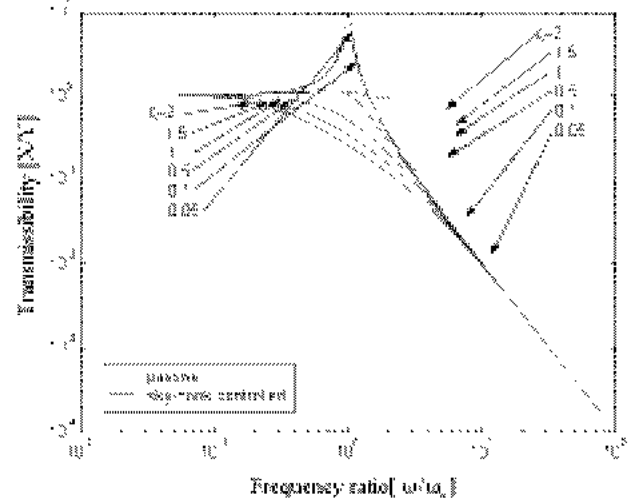


Fig. 8 Comparison of vibration transmissibilities between passive and sky hook controlled dampers

절연이 나빠지게 된다. 그러나, 스카이 훅 제어를 적용한 시스템은 공진주파수에서의 진동절연을 위하여 감쇠비  $\zeta$ 를 크게 하여도 공진주파수보다 높은 주파수영역에서의 진동 절연도 같이 향상된다.

#### 4. 운전석 운동 시뮬레이션

본 연구에서 운전석 현가장치의 승차감 해석을 위한 컴퓨터 시뮬레이션을 MATLAB/SIMULINK<sup>®</sup>를 이용하여 구현하였다.

운전석 모델에 사용된 파라메타는 Table 1과 같다.

Table 1 Parameters of the seat suspension system

Parameter	Symbol	Value	Unit
driver mass	$m$	75	kg
damping coefficient	$c_{ps}$	4169.5	N · s/m
spring stiffness	$k_{ps}$	23397.8	N/m

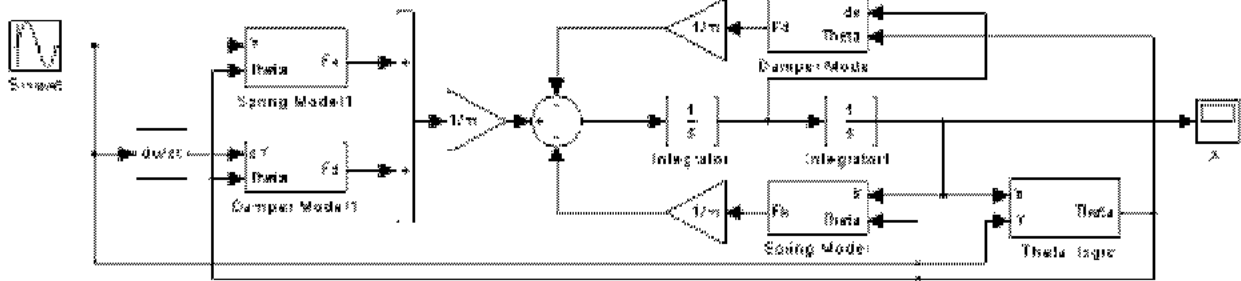


Fig. 9 1 d.o.f. system model with a passive damper

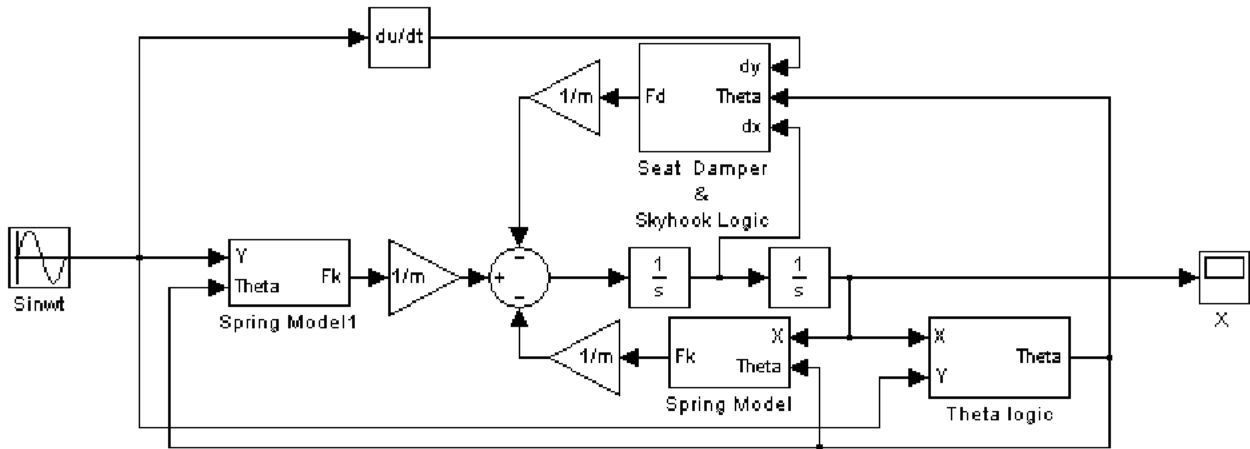


Fig. 10 1 d.o.f. system model with a semiactive damper

Fig. 9는 SIMULINK로 모델링한 1자유도 등가 모델로서 3종류의 블록으로 구성되어 있고, Fig. 10은 스카이 훅 제어를 적용한 1자유도 등가모델이며, 4종류의 블록으로 구성되어 있다.

Fig. 9 및 10에서 Theta logic은 시뮬레이션의 각 샘플링시간에서  $x$ 와  $y$ 값을 피드백 받아서  $\theta$ 값을 출력하는 블록이며 Spring Model과 Damper Model은  $\theta$  입력을 받아  $k_{eq}$ 와  $c_{eq}$ 를 출력하는 블록이다. Skyhook logic은  $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$ ,  $\theta$  입력을 받아 스카이 훅 제어 알고리즘을 이용하여  $c_{eq}$ 를 출력한다.

### 5. 승차감 해석

#### 5.1 진폭 전달율

Fig. 11은 수정된 스카이 훅 제어를 적용한 모델과 스카이 훅 제어를 적용하지 않은 모델의 진폭 전달율을 비교한 것이다. 스카이 훅 제어를 적용한 모델의 진폭전달율이 대폭 감소한 것을 볼 수 있다.

이 운전석 현가장치의 스프링상수는 식(1), (2)에서와 같이  $\theta$ 에 대한 함수이므로 고유진동수

( $\omega_n$ )도 각도  $\theta$ 에 대한 함수로 나타난다. 따라서 고유진동수가 하나의 값으로 고정되어 있지 않다. 편의상 고유진동수( $\omega_n$ )는 스프링상수( $k_{ps}/3$ )를 사용하여 구했다( $\omega_n$  1.623 Hz).

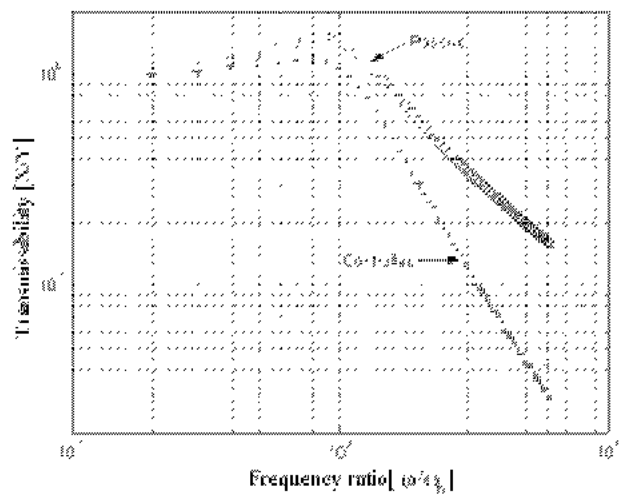


Fig. 11 Comparison of vibration transmissibilities between the controlled and passive systems

5.2 FFT(Fast Fourier Transform) 분석

보통 노면으로부터 차량의 주 현가장치를 통해 차체로 전달되어지는 진동의 주파수 영역은 일반적으로 10Hz 이하이다<sup>7)</sup>. 그러므로 운전석 현가장

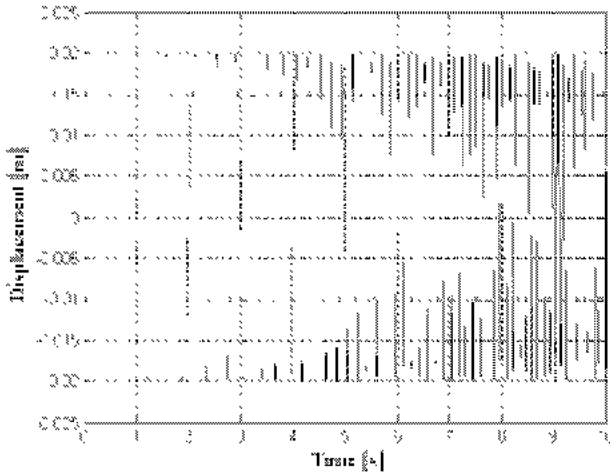


Fig. 12 Displacement excitation with increasing frequency

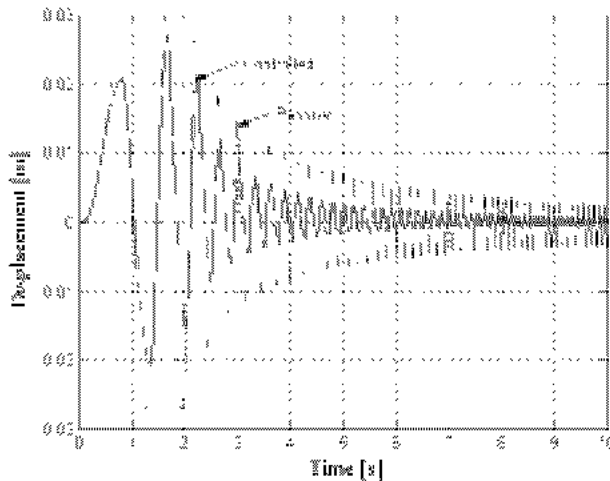


Fig. 13 Displacement response

치는 10Hz 이하의 주파수에서의 진동을 효율적으로 절연하여야 한다. 운전석 현가장치의 주파수 특성을 해석하기 위하여 Fig. 12와 같이 시간에 따라 주파수가 증가하는 입력(0.1~10 Hz)으로 가진하였다.

입력에 따른 운전석 출력 변위  $x$ 를 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13에서 보는 바와 같이 스카이 훅 제어를 사용한 시스템의 경우 전 주파수 영역에서 수동식 현가 시스템보다 진동 절연 효과가 우수함을 알 수 있다. 그림.11에서 알 수 있듯이 약 1.6Hz 부근이 공진영역임을 확인할 수 있다.

Fig. 14는 수동식 현가 시스템에 대해 입력가속도에 따른 출력 가속도의 주파수 강도를 살펴보기 위해 FFT 분석한 결과이다. 공진주파수 영역에서 진동 절연 효과가 거의 없으며, 나머지 영역에서는

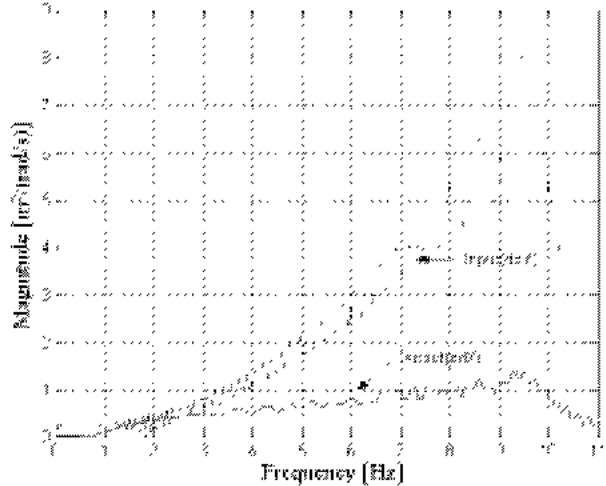


Fig. 14 FFT spectrum of passive system

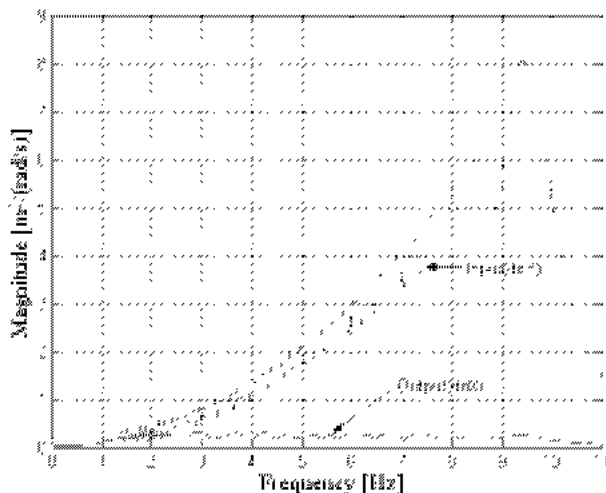


Fig. 15 FFT spectrum of sky hook controlled system

좋은 진동 절연이 되는 것을 볼 수 있다. Fig. 15는 스카이 훅 제어를 적용한 시스템에 대해 Fig. 14와 같은 가속도 입력에 대한 가속도 출력을 FFT 분석한 결과이다. 여기에서는, 공진주파수 부근 영역에서 진동 절연이 수동식 현가 시스템의 FFT 분석결과보다 좋은 진동 절연 결과를 볼 수 있다. 특히, 사람의 몸이 수직 진동을 가장 민감하게 느끼는 주파수 영역<sup>5)</sup> 4~7 Hz에서도 더욱 효과적인 진동 절연을 확인할 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 운전석 현가장치의 기구학적 해석을 통해 1자유도 등가 모델로 변환하여 비선형 운동방정식을 유도하였다. 등가 시스템을 효율적으로 해석하기 위해 MATLAB/SIMULINK를 이용한 시뮬레이션을 통해 진폭 전달율과 FFT 분석을 하였다. 그 결과 반능동 현가장치에 효과적인 스카이록 제어 이론을 적용한 모델에서 진폭 전달율이 크게 감소하였고 공진 주파수 영역(1.6 Hz 부근)에서 약간의 진동 전연 효과를 볼 수 있다. 나머지 주파수 영역에서 모두 진동전연 성능이 크게 향상됨을 관찰할 수 있었다. 그림. 8에서 알 수 있듯이 댐핑계수를 좀 더 큰 값을 사용하면 공진 영역에서도 큰 진동 효과를 볼 수 있다.

## 참고 문헌

1. 남무호, "MR 유체를 이용한 운전석 댐퍼의 성능특성", 한국공작기계학회지, Vol. 9, No. 5, pp. 127~134, 2000
2. 변훈석, 최영휴, 정호일, "컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 서스펜션 시트의 진동해석 및 시험에 관한 연구", 대한기계학회 1999년도 추계학술대회 논문집, pp. 916~921, 1999
3. Daniel J. Inman, "Engineering vibration", Prentice Hall International Inc, London, pp. 73~76, 1996
4. D. Karnopp, M. J. Crosby and R. A. Harwood, "Vibration Control Using Semi Active Force Generators", J. Engineering for Industry, ASME No. 73 DET 122, 1973
5. Brian A. Reichert, "Application of Magneto rheological Dampers for Vehicle Seat Suspensions", M.S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997
6. Using MATLAB, The Mathworks Inc., 2000
7. 백운경, 오세운, "트럭 운전석 현가 댐퍼의 초기 설계", 한국동력기계공학회지, Vol. 3, No. 3, pp. 91~96, 1999