

# 단순화된 스카이훅 제어를 이용한 반능동 MR 댐퍼의 진동제어 성능 Vibration Control Performance of Semi-Active MR damper Using a Simplified Skyhook Control

\*남윤주<sup>1</sup>, 이도영<sup>1</sup>, #박명관<sup>2</sup>

\*Y. J. Nam<sup>1</sup>, \*D. Y. Lee<sup>1</sup>, #M. K. Park (mkpark1@pusan.ac.kr)<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 부산대학교 대학원 지능기계공학과, <sup>2</sup> 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

Key words : Landing gear system, Magneto-rheological damper, Semi-active control, Skyhook

## 1. 서론

최근, 저자들은 MR 댐퍼의 새로운 전자기적 설계방법을 제안하였고, 이에 대한 유효성은 자기장 해석과 일련의 기초실험을 통해 입증하였다. 더 많은 연구로써, 본 연구의 목적은 랜딩과정 동안 항공기의 승차감을 향상시키기 위한 반능동 랜딩기어의 개발을 위해 제안된 MR 댐퍼의 실제 적용가능성을 확인하는데 있다.

## 2. MR 댐퍼의 모델링

MR 댐퍼의 해석적 모델은 이전 연구를 통해 얻어진 성능 평가결과에 기초하여 얻어졌다.<sup>1</sup> 제안된 MR 댐퍼의 댐핑력에 대한 지배관계식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\tau \dot{F}_d + F_d = F_{MR} + F_\eta + F_g + F_f \quad (1)$$

우측 첫째 항은 MR 유체의 자기장 의존 특성에 의한 댐핑력이며,  $F_{MR} = (426.8I - 3.833)\text{sgn}(v) \approx 426.8/\text{sgn}(v)$ 로 얻어졌다. 이때,  $I$ 는 코일전류이며  $v$ 는 피스톤 헤드의 가진 속도이다. 둘째 항은 MR 유체 자체의 점성에 의한 점성 댐핑력이며, 이는  $F_\eta = 702.2v$ 로 얻어졌다. 또한 가스 압력에 의한 가스 스프링력은  $F_g = 78.54[11634/(11634 - 78.54d)]^{14}$ 로 얻어질 수 있다. 여기서  $d$ 는 피스톤 헤드의 변위이다. 그리고 오일 씰과 가이드 피스톤에 의한 마찰력은  $F_f = 63\text{sgn}(v)$ 로 주어졌다. 마지막으로, 위 식의 좌측 항들은 MR 댐퍼의 동특성을 나타낸다. 시상수  $\tau$ 는 MR 댐퍼의 가진 속도뿐만 아니라 전류입력 조건(turn-on 또는 turn-off)에 의존하여 다소 달라질 수 있음에 유의하자.

## 3. 단순화된 스카이훅 제어기

능동 혹은 반능동 댐핑 시스템의 승차감 향상을 소개된 다양한 제어 알고리즘들 중에서, 가장 직관적이면서도 효과적인 알고리즘은 스카이훅 제어기이다.<sup>2</sup> 이 제어기의 주된 장점은 구현이 간단하다는 점과 설계방법 및 물리적 성능에 대한 이해가 용이하다는 데에 있다. 스카이훅 제어를 장착한 작동기의 댐핑력은 상위 질량의 가진 속도에 비례해서 주어지게 되는데, 이전 대부분의 연구들은 이러한 비례식을 시행착오적으로 결정하거나 다소 복잡한 최적 제어알고리즘에 기반하여 얻어왔다. 따라서 본 연구는 MR 댐퍼를 장착한 항공기용 랜딩기어 시스템의 진동 제어를 위해, 해석적으로 결정된 제어 이득을 갖는 단순화된 스카이훅 제어알고리즘을 제안한다.

일반적으로 제어 가능한 댐퍼를 장착한 랜딩기어는 단순화된 두 개의 질량체로 묘사될 수 있다 (Table 1의 첫째 열). 여기서 상위 질량은 항공기의 기체를 하위 질량은 랜딩기어를 나타낸다. 그러면 랜딩기어 시스템의 동적 지배관계식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x} = -k_1(x-y) - F_d + L_f - m_1 g \\ m_2 \ddot{y} = -k_1(y-x) - k_2(y-z) + F_d - m_2 g \end{cases} \quad (2)$$

여기서  $m_1$ 은 기체의 질량,  $m_2$ 는 랜딩기어의 질량,  $x$ 는 기체의 변위,  $y$ 는 랜딩기어의 변위,  $z$ 는 활주로의 표면 고도,  $k_1$ 은 코일 스프링의 강성계수,  $k_2$ 는 타이어의 강성

Table 1 Schematic diagram of the vibration systems

2-dof general model	2-dof skyhook model	1-dof simplified model

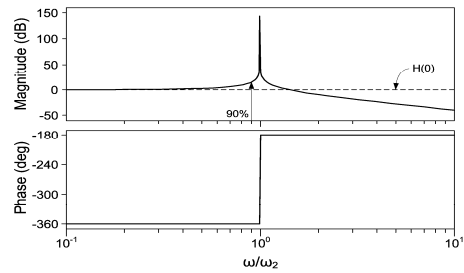


Fig. 1 Relative transmissibility

계수,  $F_d$ 는 능동 댐퍼의 제어 댐핑력 그리고  $g$ 는 중력 가속도이다. 또한 항력은  $L_f = [1.2 - 0.9 \tanh(3t)](m_1 + m_2)g$ 로 묘사될 수 있으며, 이때  $t \geq 0$ 는 시간을 나타낸다.<sup>3</sup> 기체 질량으로의 진동 전달율(transmissibility)을 얻기 위해서, 식 (2)를 선형화하여 라플라스 영역에서 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} [m_1 m_2 s^4 + (k_1 m_1 + k_2 m_2 + k_1 m_2) s^2 + k_1 k_2] \delta x(s) \\ + (m_2 s^2 + k_2) \delta F_d(s) = k_1 k_2 \delta z(s) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $s$ 는 라플라스 변수이며,  $\delta$ 는 정적 평형상태에서 각 변수의 미소 변량을 나타낸다. 유사하게, 2 자유도 스카이훅 모델(Table 1의 둘째 열)에서 기체로의 진동 전달율은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} [m_1 m_2 s^4 + c m_2 s^3 + (k_1 m_1 + k_2 m_2 + k_1 m_2) s^2 \\ + c(k_1 + k_2) s + k_1 k_2] \delta x(s) = k_1 k_2 \delta z(s) \end{aligned} \quad (4)$$

그러면, 식 (3)과 (4)의 비교를 통해서, 2 자유도 일반화된 모델이 2 자유도 스카이훅 모델과 동일한 동적 거동을 갖기 위해 요구되는 댐핑력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_d(s) = c[1 + H(s)]s x(s) \quad (5)$$

여기서  $H(s) = k_1 / (m_2 s^2 + k_2)$ . 제어기 (5)의 보다 간단하고 실질적인 구현을 위해서, 랜딩기어의 질량은 기체의 질량에 비해 매우 작으므로 그 효과는 무시 가능하다고 가정하였다. 그러면, 본 연구에서 간소화된 스카이훅 제어기라고 명명한 댐퍼의 제어입력은 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$F_d(s) \approx F_d(s)|_{m_2=0} = c[1 + H(0)]s x(s) \quad (6)$$

앞서 제시된 가정에 의해, 2 자유도 스카이훅 모델은 하나의 이상적인 스카이훅 댐퍼와 서로 직렬로 연결된 두 개의 코일 스프링을 갖는 1 자유도 스카이훅 모델로 간소화될

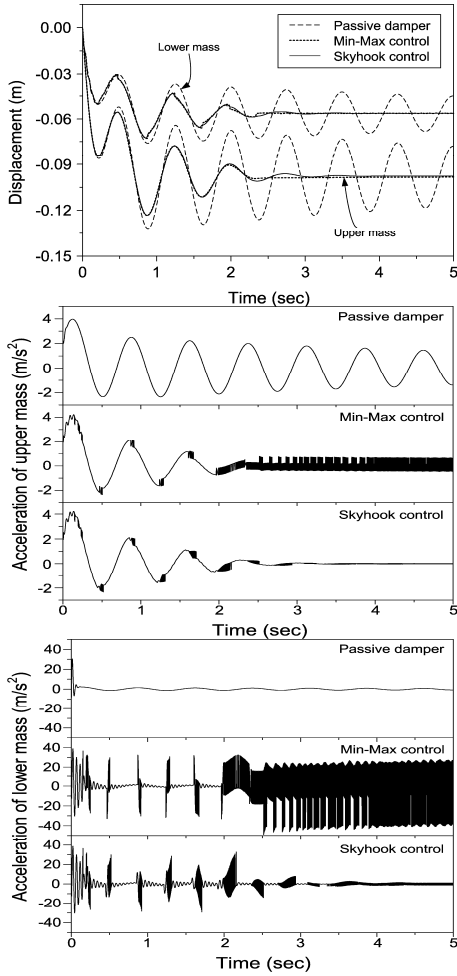


Fig. 2 Control performances according to the controllers

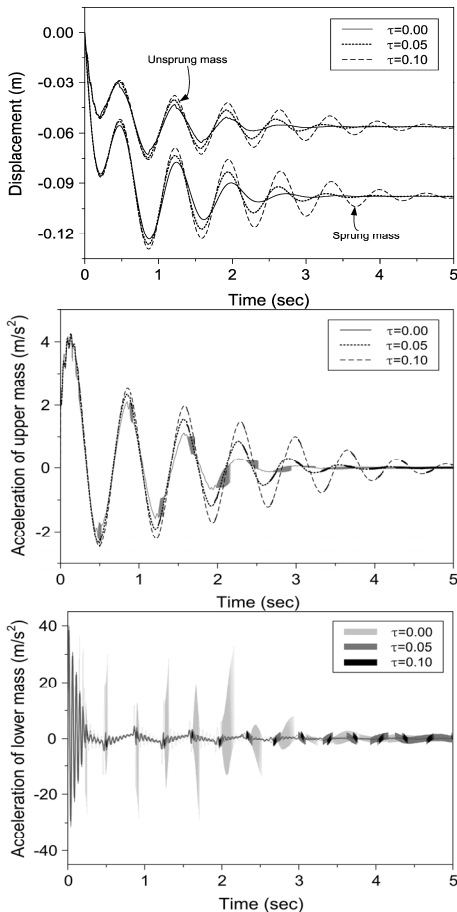


Fig. 3 Control performances according to the time constants of the MR damper

수 있다 (Table 1의 셋째 열). 그러면, 스카이훅 비례이득은  $c = 2\zeta\sqrt{m_1k}$ 로 결정되며, 여기서  $k = k_1k_2/(k_1+k_2)$ . 한편, 고려된 가정의 타당성은 주파수 영역에서 조사될 수 있다;

$$H(s)/H(0) = 1/(\hat{s}^2 + 1) \tag{7}$$

여기서  $\hat{s} = s/\sqrt{k_2/m_2}$ . Fig. 1은 간소화된 스카이훅 제어기의 진동 제어 성능에 대한 랜딩기어 질량의 영향을 보여준다. 이로부터, 간소화된 스카이훅 제어기 (6)은 랜딩기어의 공진주파수  $\omega_2 = \sqrt{k_2/m_2}$  이하의 주파수 대역에서 이상적인 제어입력 (5)와 거의 유사한 성능을 제시할 수 있음을 알 수 있다. 실제로, 기체의 공진주파수  $\omega_1 = \sqrt{k_1/m_1}$ 은 랜딩기어의 공진주파수에 비해 상대적으로 매우 작다. 따라서 간소화된 스카이훅 제어기는 실용성과 구현의 용이성 측면에서 항공기 랜딩기어 시스템에서 유용하다.

#### 4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

MR 댐퍼를 장착한 랜딩기어 시스템의 진동제어 성능은 일련의 시뮬레이션을 통해 조사되었으며, 이때 실제 항공기 'Boeing 707'의 제원이 적용되었다;  $m_1 = 68,210kg$ ,  $m_2 = 1,140kg$ ,  $k_1 = 11,250,000N/m$ ,  $k_2 = 8,461,000N/m$ ,  $c = 105,400Ns/m$ . 항공기의 하강 속도는 0.76m/s로 설정하였으며, 이는 항공기의 실제 'soft landing' 조건으로 고려 가능하다. 또한 제안된 제어기의 유용성은 뱅뱅 제어기의 일종인 Min-Max 제어기와와의 비교를 통해 조사되었다. 그리고 실제 항공기 수동 댐퍼의 댐핑력 크기를 고려하여, 제시된 MR 댐퍼의 용량은 1:18.5의 비율로 확대 조정하였으며, 입력력 코일전류는 최대 5.0A로 설정하였다. 한편, 간소화된 스카이훅 제어기 (6)은 능동형 댐퍼를 위해 제안되었다. 그러나 MR 댐퍼가 반능동형 작동기임을 고려하면, 반능동 조건식이 제어입력에 추가되어야 한다.<sup>3</sup> 이러한 조건은 MR 랜딩기어 시스템의 에너지 발산을 보장한다.

Fig. 2는 제어기에 따른 랜딩기어의 진동제어 성능을 보여준다. 이로부터, 수동 댐퍼에 비해 MR 댐퍼가 가진 변위 억제에 더욱 우수한 성능을 제공할 수 있다. 기체의 가속도 또한 MR 랜딩기어에 간소화된 스카이훅 제어기를 적용함으로써 가장 두드러지게 감소함을 확인하였다. MR 댐퍼의 사용은 랜딩기어의 진동을 다소 증가시킨다. 그럼에도 불구하고, 스카이훅 제어기가 Min-Max 제어기에 비해서 랜딩기어의 진동을 억제함에 있어 보다 나은 성능을 제시한다.

Fig. 3은 스카이훅 제어기를 장착한 MR 댐퍼의 시상수에 따른 진동제어 성능을 보여준다. 시상수가 작을수록, 기체와 랜딩기어의 변위 및 기체의 가속도는 감소되는 반면, 랜딩기어의 가속도는 증가한다. 다시 말해서, MR 댐퍼의 빠른 응답속도는 항공기의 주행 안정성을 저감시킬 수 있다. 만약 MR 댐퍼의 응답속도를 조절하기 위해 능동형 저주파 통과필터를 추가 적용한다면, 주행 안정성에 대한 승차감의 상대적 중요도는 랜딩기어의 작동 상태에 따라 제어될 수 있다. 여기서, MR 댐퍼의 시상수가 하이브리드 제어기에서 스카이훅과 그라운드훅 제어기의 상대성을 결정하기 위해 소개된 가중치와 유사한 기능을 가짐에 주목하자.

#### 참고문헌

1. Nam, Y. J. and Park, M. K., J. of Intell. Mater. Syst. Struct., 2007. (reviewed)
2. Karnopp, D. C. and Cosby, M. J., US Patent 3,807,678, 1974.
3. Choi, Y. T. and Wereley, N. M., Journal of Aircraft, 40(3), 432-439, 2003.