

## 상용 MR 댐퍼를 이용한 반능동형 착륙장치 낙하실험

황재업\* · 황재혁\*\* · 배재성\*\*\* · 임경호\*\*\*

### Drop Test Simulation of semi-active Landing Gear using Commercial Magneto-Rheological Damper

Jae-Up Hwang\* · Jae-Hyuk Hwang\*\* · Jae-Sung Bae\*\* · Kyoung-Ho Lim\*\*

#### ABSTRACT

This paper is used the commercial magneto-rheological(MR) damper for landing gear. The damping characteristics of Commercial MR damper by changing the intensity of the magnetic field are investigated and the dynamic responses of the landing gear. it is set up tset equipment, the landing gear drop test system. The landing gear involved drop testing the gear. The landing gear is tested by implementing sky-hook control algorithm and its performance is evaluated comparing to the result

Key Words : Commercial Magneto-Rheological Damper(MR 댐퍼), Semi-Active Control(반 능동제어), Helicopter Landing Gear(헬기착륙장치), Landing Gear(착륙장치), Sky-hook Control(스카이 훅 제어)

#### 1. 서 론

헬기 또는 항공기의 착륙 시, 기체에 전달되는 충격력을 완화시키고자 도입된 착륙장치는 1900년대 초 단순한 강철 스프링 형태로부터 발전하기 시작하였다. 모든 장치가 성능향상을 위해 여러 가지 형태가 도입되듯이 착륙장치 또한 성능에 해당하는 충격 완화 능력을 향상시키려는 노력의 결과로, 고무완충식, 공기압력식을 거쳐 단위 중량당 효율이 가장 우수한 것으로 알려져 있는 유공압 완충장치(Oleo-Pneumatic Shock Absorber)까지 발전하였다[1].

유공압 완충장치에 있어서도 단일 오리피스형, 미터링 핀형이 도입되었고 착륙장치의 지상 운용 및 저속 특성에 대한 성능개선을 목적으로 2단 공기실 또는 택시밸브 개념이 적용되어 운용되고 있다[2]. 그러나, 최신 유공압 완충형까지 고려된 착륙장치는 모두 수동형으로써, 성능향상의 한계성, 다양한 설계운용조건에서 최적 성능 구현의 어려움 등으로 본 논문과 같이 반능동제어 착륙장치가 연구되고 있다[2,3].

반능동제어형으로 고려되고 있는 완충장치는 크게 오리피스의 크기를 조절하는 방식의 오리피스 가변형[3]과 자기장에 반응하여 특성, 즉 점성이 변화되는 유체의 성질을 이용하는 ER유체(Electro-rheological Fluid) 또는 MR유체(magneto-rheological Fluid)형으로 분류할 수

\* 학생회원, 한국대학교 항공우주공학과

\*\* 종신회원, 한국대학교 항공우주공학부

\*\*\* 종신회원, 한국대학교 항공우주공학부  
연락처, E-mail: jhhwang@kau.ac.kr

있다. 그런데, ER유체에 비하여 MR유체가 자기장에 따른 점성의 변화량이 크므로 착륙장치의 완충기로서 MR유체 댐퍼를 고려하였다[4].

본 연구에서는 착륙장치의 낙하 실험 장치를 구성하고 이를 이용하여 상용 MR 댐퍼를 낙하하여 착륙특성을 분석하고 반능동 제어 알고리즘을 이용하여 반능동형 항공기 착륙장치의 효율에 대하여 고찰하였다.

## 2. MR댐퍼형 착륙장치 모델

### 2.1 MR댐퍼 구성 및 운동방정식

MR 댐퍼의 경우 유체의 점성을 변화키는 방식이므로 오리피스형의 감쇠력의 항목과 이때 적용하는 스프링력의 항목이 달라질 뿐 기존의 수동형 착륙장치에 대한 운동방정식의 기본 틀을 그대로 사용할 수 있다. 착륙장치에 대하여 유도한 2자유도 운동방정식은 다음과 같은 식으로 Table현된다[6].

$$\begin{aligned} m_s \ddot{x} &= -[F_s + F_d + F_{fri}] + Am_s g \\ m_u \ddot{x} &= -F_T + [F_s + F_d + F_{fri}] + Am_u g \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $F_T$  는 타이어 힘을 의미하며, A는 양력을 보정해 주는 상수이다. 여기서 MR 댐퍼를 사용함에 따라  $F_s$ 와  $F_d$ 의 경우 새로 모델을 수립하여야 한다.  $F_d$ 의 경우 참고문헌 8에서 수립한 수식을 기반으로 다음 장에서 설명하는 MR 댐퍼의 실험 결과를 이용하여 감쇠력과 제어력을 모델링하여 시뮬레이션에 사용하였다.  $F_s$ 의 경우 착륙장치에서 일반적으로 사용하는 공기 스프링을 사용하지 않고 일반적인 선형 스프링을 모델링하여 사용하였다.

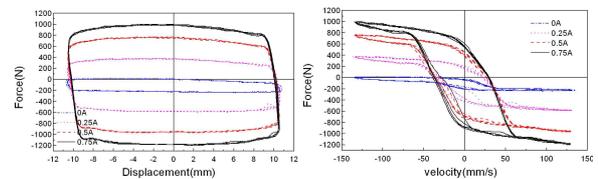
### 2.2 MR 댐퍼의 동특성

MR유체로 사용한 LORD사의 RD-1005-3의 상용 MR 댐퍼의 성능을 이용하여 착륙장치를 구성하였기 때문에 먼저 MR 댐퍼의 성능을 평가하였다. MR 댐퍼의 성능은 다음 Fig. 2와 같이 10mm와 15mm에서 2Hz로 가진하였을 때 감쇠력을 측

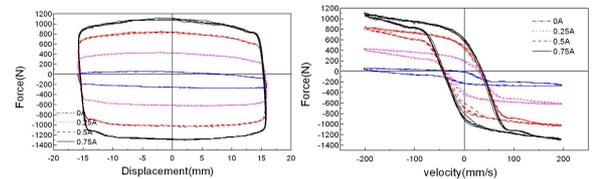
정하여 그 성능을 평가하였으며 자기장에 따라 변화하는 감쇠력은 각각의 실험에서 일정한 전류를 흘려주었을 때 감쇠력의 변화를 측정하였다.



Fig. 1 MR 댐퍼(RD-1005-3)



(a)10mm 2Hz



(b)15mm 2Hz

Fig. 2 MR 댐퍼의 특성곡선

또한 상용 MR 댐퍼에 사용되어지는 스프링은 선형 스프링으로 그 특성 그래프는 다음의 Fig. 3과 같다. MR 댐퍼의 스트로크는 총 45mm로 압축하여 나타낸 그래프이다. 여기에서 스프링 계수는 15N/mm임을 확인할 수 있다.

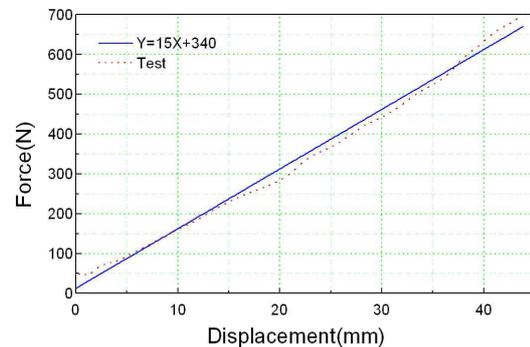


Fig. 3 스프링 변위-하중곡선

### 3. 낙하시험장치 구성

항공기 착륙장치의 특성시험을 감항 증명 시 사용하는 방법에 준하여 낙하 시험장치와 시험 방식을 선정하였다. 다음의 Fig. 4와 같이 낙하시험장치를 꾸미고 각각의 항목은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. 낙하시험장치 구성품

대 분류	상세분류
주 시험장치	기둥
	상부 프레임
	하부 프레임
	이송장치
	가이드기둥
낙하시험장치	이송 프레임
	플렌지 베어링
	전자석홀더
센서 및 보조장치	Magnetic Linear Encoder
	Magnetic Type guide
	로드셀

다음의 Fig. 4는 착륙장치를 낙하 시험장치에 장착하여 구성한 Fig.으로 착륙장치 댐퍼의 상대변위를 측정하기 위하여 LVDT를 설치하였으며 타이어의 변위를 측정하기 위하여 LVDT, 그리고 상부질량의 변위를 측정하기 위하여 이송장치에 마그네틱 리니어 엔코더를 사용하였다. 착륙장치의 내력을 측정하기 위하여 바닥에 로드셀을 설치하여 착륙장치에 작용하는 내력을 측정하였다.



Fig. 4 MR 댐퍼 실험장치

### 4. 스카이 훅 제어기법을 적용한 반 능동형 착륙장치의 동특성

반 능동형 완충기의 제어에서 많이 쓰이는 스카이 훅 제어(Skyhook control)는 Karnopp에 의해서 제안되었으며 Fig. 5와 같이 가상의 기준면을 기준을 감쇠기를 설치하여 감쇠력을 조절하는 형태이다[7].

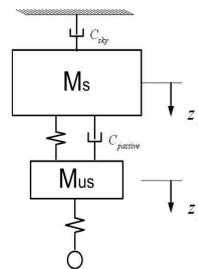


Fig. 5 스카이 훅 모델

스카이 훅 제어에 의해서 발생하는 감쇠력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = C_{passive} (\dot{Z}_l - \dot{Z}_u) + C_{sky} \dot{Z}_u \quad (6)$$

여기서  $C_{passive}$ 와  $C_{sky}$ 는 제어 이득값으로 원하는 성능에 맞추어 그 값을 선정하면 된다. 여기서는 이득값을 변화시켜가며 변화에 따른 성능을 비교하여 보았다.

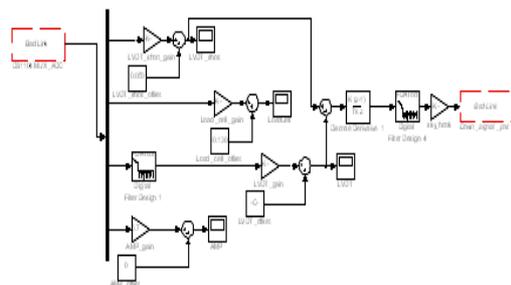


Fig. 6 스카이 훅 알고리즘

Fig. 6은 식(6)을 이용하여 ADAMS와 Matlab의 Simulink를 이용하여 제어기를 작성한 Fig.이다. 데이터 취득 장치를 통하여 타이어 변위와 상대변위, 로드셀 데이터 그리고 제어를 위하여 전류를 흘려주었을 때 전류를 확인하기 위한 전류센서 등을 이용하여 시스템을 구성하였다.

### 5 결과 및 토의

착륙장치의 낙하시험은 제어를 하지 않고 MR 댐퍼의 기본 성능만을 이용하여 낙하시험을 실시한 No Control과 MR 댐퍼에 최대 전류를 흘려 주어 감쇠력을 최대로 하여 실시한 Max Amp., 마지막으로 스카이 훅 제어기법을 이용하여 낙하 시험을 수행하였다. 각각의 착륙장치의 낙하시험을 수행하여 다음의 결과를 얻을 수 있었다.

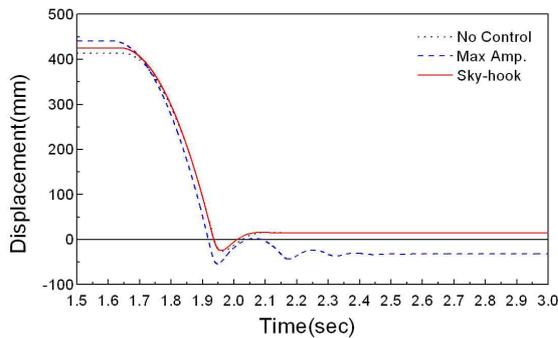


Fig. 7 상부질량 변위

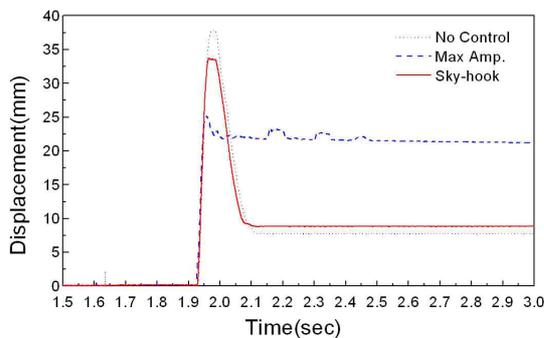


Fig. 8 댐퍼 상대변위

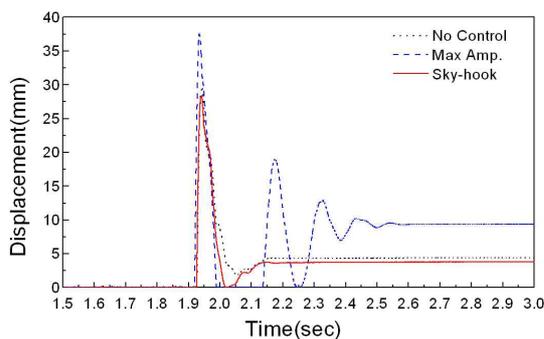


Fig. 9 타이어 변위

다음의 Fig. 7은 상부 질량의 낙하 변위를 나타낸 그래프이다. Fig. 8은 이때의 댐퍼의 상대 변위를 나타내고 있다. 여기에서 댐퍼의 상대 변위를 보면 최대 감쇠력에서 그 변화율이 작음을

확인할 수 있다.

Fig. 9는 타이어의 변위를 나타낸 그래프이다. 여기서 최대 감쇠력에서 타이어가 튀어 오르며 진동이 크게 발생함을 확인할 수 있다. Fig. 10에서는 최대 감쇠력에서 가장 큰 내력이 발생함을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 11은 MR 댐퍼에 적용되는 전류를 나타내고 있다. 최대 감쇠력은 MR 댐퍼의 감쇠력을 증가하기 위하여 처음부터 최대 전류를 흘려주었고 스카이 훅 제어기법의 경우 제어 알고리즘에 의한 전류가 작용함을 확인할 수 있다.

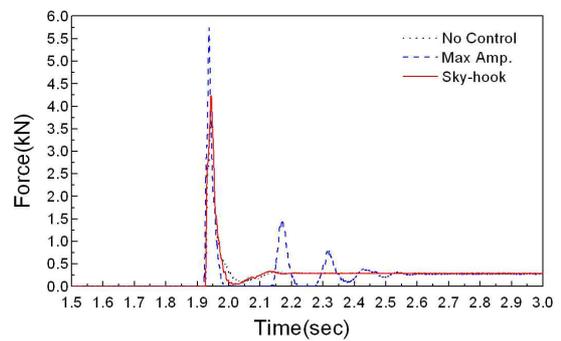


Fig. 10 댐퍼의 내력

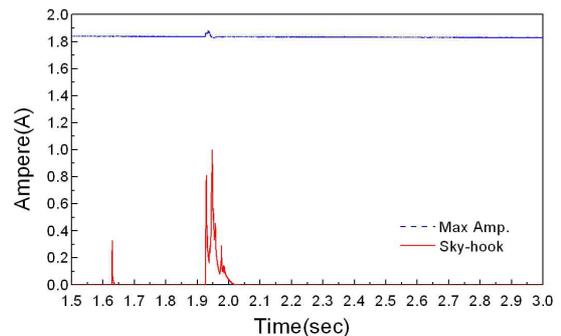


Fig. 11 제어전류

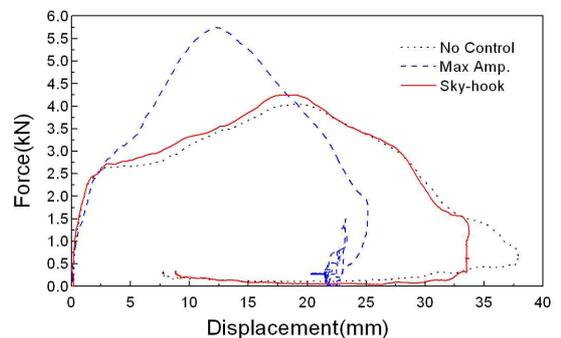


Fig. 12 하중-변위 선도

Fig. 12는 각각의 경우의 하중-변위 곡선을 보여주고 있다. 각각의 효율은 제어하지 않을 경우 66.1%의 효율이 나오며, 최대 감소력의 경우 67%, 스카이훅 제어기법을 적용할 경우 71.3%의 효율이 나와 다소 효율이 상승하는 것을 확인하였다. 제어하지 않았을 때와 최대 감소력의 경우는 일반적인 댐퍼처럼 정해진 감소력에 따라서 작동하기 때문에 두 결과 비슷한 효율을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 반면 반능동제어 알고리즘을 적용한 스카이훅의 경우 제어 알고리즘에 의하여 내력이 다소 상승하였으나 그와 동시에 상대 변위가 줄어들게 되어 효율이 증가되었다.

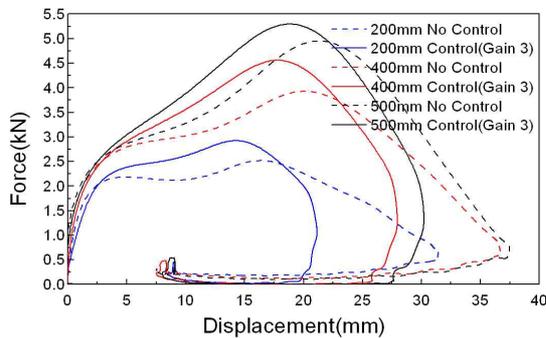


Fig. 13 하중-변위 선도

Table 2. 낙하 높이에 따른 효율변화

	No Control	Sky hook Control
200mm	69.8%	79.4%
400mm	68.3%	74.3%
500mm	64.3%	72.3%

다음의 Fig. 13은 각각의 낙하 높이인 200mm, 400mm, 500mm에 대하여 낙하실험을 수행한 결과를 나타낸 결과이다. 낙하 높이가 증가할수록 최대 변위와 최대 하중이 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 효율을 정리하면 Table 2와 같다. 제어기법을 적용함으로써 인하여 각각 6~10% 정도의 효율이 증가함을 확인할 수 있다.

## 6. 결 론

스카이 훅 제어기법을 사용함으로써 MR 댐퍼의 내력을 조절하여 스트로크를 줄였으며, 착륙장치의 낙하 효율을 증가 시켰다. 또한 각각의 낙하 속도에 따른 MR 댐퍼의 낙하 시험을 통하여 낙하 속도에 따른 착륙 특성을 파악하였다. 제어하였을 때 낙하 속도가 빠를수록 효율이 감소하였는데 이는 제어 이득 값을 변경하면서 향후 개선할 수 있다.

## 참고문헌

- 1) Norman S. currey, "Aircraft Landing gear design : principle and practices", AIAA Education Series, 1988.
- 2) Z. Wolejsza, W. Kowalski, A. Lafitt, G. Mikulowski and L. Remmers, "State of The art in Landing Gear Shock Absorbers", Prace Instytutu Lotnictwa, 2005.
- 3) Krueger. W. R - Integrated Design Process for the Development of Semi-Active Landing Gears for Transport Aircraft : Ph.D. Dissertation, University of Stuttgart, Stuttgart, Germany, 2000.
- 4) <http://www.lord.com/Portals/0/MR/MRvsER.pdf>.
- 5) James C. Poynor, "Innovative Designs for Magneto-Rheological Dampers", Masters of Science in Mechanical Engineering, August 7, 2001, Blacksburg, Virginia.
- 6) 황재업, 황재혁, 배재성, 현영오, 임경호, 김두만, 김태욱, "MR 댐퍼를 이용한 헬기 착륙장치 반 능동제어", 한국항공학회지, 제36권 4호, pp. 346 ~ 351, 2008.
- 7) Dean Farnopp, Active Damping in Road Vehicle Suspension System, Vehicle system Dymanics, 12, pp291 ~ 316, 1983