

## 論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.38.4.315

## 하이브리드 MR댐퍼를 이용한 주륜 착륙장치 하중제어기법 연구

현영오\*, 황재업\*, 황재혁\*\*, 배재성\*\*, 임경호\*\*, 김두만\*\*, 김태욱\*\*\*, 박명호\*\*\*\*

Force Control of Main Landing Gear  
using Hybrid Magneto-Rheological DamperYoung-O Hyun\*, Jae-Up Hwang\*, Jae-Hyuk Hwang\*\*, Jae-Sung Bae\*\*,  
Kyoung-Ho Lim\*\*, Doo-Man Kim\*\*, Tae-Wook Kim\*\*\* and Myungho Park\*\*\*\*

## ABSTRACT

To improve not only the basic performance but also the fail-safe performance, power consumption of the main landing gear for helicopters, a semi-active control landing gear using hybrid MR damper, was introduced in this paper. This damper of the configuration to install a permanent magnet in a electromagnet MR damper, was designed by the trade-off study on permanent magnet location and a magnet field analysis. Force control algorithm which keep the sum of air spring force and damping force at a specified value during landing, was used for the controller. The drop simulations using ADAMS Model for this semi-active control landing gear, were done. The improvement of the preceding performances as the result to evaluate the landing performance by the simulations, has been confirmed.

## 초 록

본 논문은 헬기용 주륜 착륙장치의 기본 성능 향상 뿐 만 아니라 Fail-Safe 성능 및 소모 전력량을 개선할 목적으로, 전자석에 영구자석을 장착한 하이브리드 MR댐퍼형의 반능동 제어 착륙장치를 도입하였다. 영구자석 위치에 따른 비교연구와 자기장 해석을 통해 원하는 제어력이 발생하는 MR댐퍼를 설계하였고 착륙 거동 시 내력으로 발생하는 공기력과 감쇠력의 합을 특정 값에서 일정하게 유지시키는 개념의 하중제어기법을 제어기로 적용하였다. 하이브리드 MR댐퍼를 이용한 하중제어의 착륙장치에 대하여 구성한 ADAMS 모델을 기반으로 낙하 시뮬레이션을 수행하였고 착륙특성에 대한 성능평가로 성능 개선을 확인하였다.

**Key Words** : Magneto-Rheological Damper(MR 댐퍼), Semi-Active Control(반 능동제어), Main Landing Gear(주륜착륙장치), Force Control Law(하중제어기법)

## 1. 서 론

† 2009년 11월 25일 접수 ~ 2010년 3월 15일 심사완료  
\* 정희원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부 대학원  
\*\* 정희원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부  
교신저자, E-mail : jhhwang@kau.ac.kr  
경기도 고양시 덕양구 화전동 200-1  
\*\*\* 정희원, 한국항공우주연구원  
\*\*\*\* 정희원, 아주자동차대학 자동차튜닝사업

항공기의 착륙 시, 기체에 전달되는 충격을 완화시키고자 도입된 착륙장치는 1900년대 초 단순한 강철 스프링 형태로부터 발전하기 시작하였고 현재는 단위 중량당 효율이 가장 우수한 것으로 알려져 있는 유공압 완충장치(Oleo-Pneumatic Shock Absorber)까지 발전하였다[1].

또한, 유공압 완충장치도 성능개선을 목적으로 미터링 핀, 2단 공기실 및 택시밸브 등이 적용되어 운용되고 있다[2]. 그러나, 최신 유공압 완충형까지 고려된 착륙장치는 모두 수동형으로써, 성능향상의 한계성, 다양한 설계운용조건에서 최적성능 구현의 어려움 등으로 본 논문과 같이 반능동제어 착륙장치가 연구되고 있다[2,3].

반능동제어형으로 고려되고 있는 완충장치는 크게 오리피스 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 있다. 그런데, ER유체에 비하여 MR유체가 자기장에 따른 점성의 변화량이 크므로 착륙장치의 완충기로서 MR유체 댐퍼를 고려하였다[4].

이 MR유체는 피에조세라믹(Piezoceramic), 형상기억합금과 함께 지능재료로 각광 받고 있는 분야로써 일찍이 1940년대 말부터 1950년 초기에 집중되었던 관심은 밀폐기술의 한계와 MR유체의 굳어지는 현상과 침전현상을 방지하는 기술적 어려움으로 수그러들었다가, 앞선 문제의 기술적 해결이 이루어지면서 1990년대부터 다시 관심이 증폭되었고 이에 따른 많은 연구가 진행되었다. 이러한 연구 노력의 결과로 1990년 중반에 Lord사의 MotionMaster가 차량좌석의 완충장치로 사용되기 시작하였으며, 차량용 현가장치, 로터리 브레이크, 건물의 지진진동완화장치, 보철다리 및 군용 포의 주퇴장치 등과 같이 다양한 분야에 적용되고 있다[5].

반능동제어 착륙장치에 MR댐퍼의 적용은 충격하중을 받은 완충장치의 연구로 시작되었으며, 그 성과로 MR댐퍼에 하중제어기법을 적용한 반능동제어 착륙장치의 성능향상은 확인되었다[6,7]. 그러나, 반능동제어 장치의 단점인 제어기 고장시 수동형대비 완충장치의 성능미달 문제가 있었다. 이를 개선할 뿐만 아니라 소모 전력량을 감소시키기 위해 영구자석의 자기장을 활용하는 방안으로, 순수 전자석 MR댐퍼에 영구자석을 추가 장착하는 하이브리드 MR댐퍼를 연구하게 되었다.

따라서, 본 논문에서는 비교연구를 통해 선정된 영구자석 장착방안을 토대로 하이브리드 MR댐퍼를 설계하였고 반능동제어기법으로는 착륙장치의 효율 향상 및 기체 작용하중 감소를 위해 새롭게 고안된 하중제어기법[6]을 적용하였다. 또한 ADAMS-Matlab Simulink를 이용하여 구성한 낙하 시뮬레이션 모델을 기반으로 성능평가를 수

행하여 제어기 고장시 댐퍼의 성능향상과 소모 전력량의 감소의 결과를 확인하였다.

## II. 하이브리드 MR댐퍼 설계 및 모델링

### 2.1 영구자석 장착방안 연구

하이브리드 MR댐퍼의 설계에 앞서, 제어장치 고장시 댐퍼성능을 더욱 향상시키고자 도입한 영구자석을 순수 전자석에 장착하기 위한 방안에 대하여 비교연구를 수행하였다.

영구자석의 부피를 일정하게 하면서 Fig. 1과 같은 5가지 장착형상에 대하여, Maxwell을 이용한 0A와 1A에서의 자기장 해석 결과는 Fig. 2, 3과 같다.

1A일 경우에는 영구자석의 조합에 따른 자속 밀도의 큰 차이는 없지만 0A일 때는 Case 1의 경우가 가장 큰 자속밀도를 나타내고 있다. 여기서, Case2, 4와 Case 3, 5의 차이는 전자석을 좌우로 분리하는 얇은 공기층의 유무이고 공기층으로 인한 자기투과성에 의해 자기장을 실린더와 피스톤의 간격 쪽으로 흐르게 함으로써 Case 3, 5가 보다 큰 자속밀도를 나타내고 있다.

그러나, 결론적으로 제어장치 고장시 MR댐퍼의 성능 향상을 위해, 0A일 때 가장 큰 자속밀도

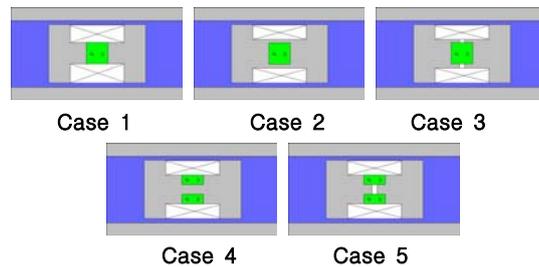


Fig. 1. 영구자석 장착방안별 형상

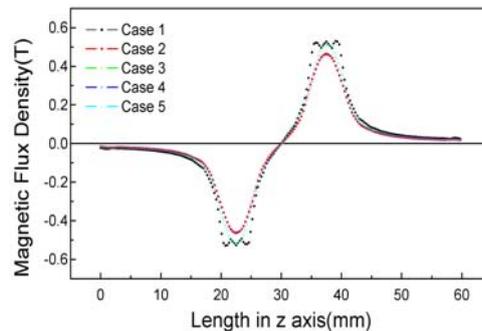


Fig. 2. 자속밀도(전류 : 1A)

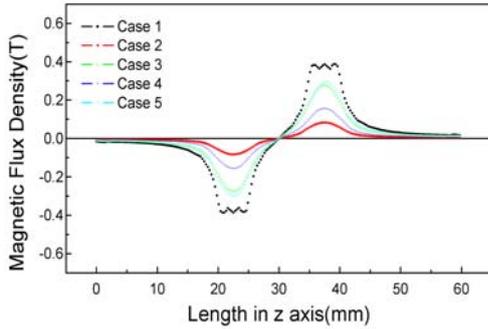


Fig. 3. 자속밀도(전류 : 0A)

를 발생시키며 전자석 코어를 영구자석으로 대체함으로써 전자석의 중량절감과 코일 영역확대에 따른 자기장 세기의 증가 잠재성 등의 장점을 구비하고 있는 Case1 방안을 하이브리드 MR댐퍼의 기본형상으로 선정하였다.

### 2.2 댐퍼의 설계 및 자기장 해석

MR유체로 사용한 LORD사의 NRF-241ES 유체에 대한 물성치[8]를 이용하여 원하는 감쇠력이 발생하도록 Case1 장착방안을 기준으로 하이브리드 MR댐퍼의 형상설계를 수행하였다. 그 과정에서 전자석에 해당하는 피스톤과 실린더의 간격, 피스톤 형상을 결정하는 것이 가장 중요하며, 그 결과는 Fig. 4와 Table 1과 같다.

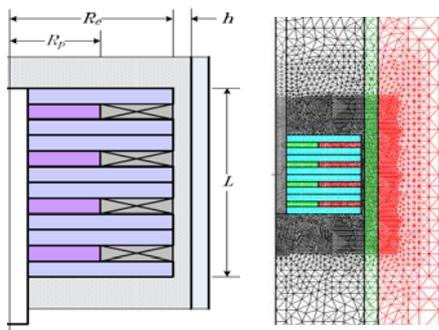


Fig. 4. 하이브리드 MR댐퍼 형상 및 메쉬

Table 1. 전자석 모델링 파라미터

파라미터	값
전자석 반지름( $R_e$ )	39.1mm
영구자석 반지름( $R_p$ )	16mm, 18mm, 20mm
전자석 & 실린더 간격( $h$ )	1.43mm
피스톤 헤드 길이( $L$ )	44mm
자기장 노출 구간 길이( $l$ )	32mm

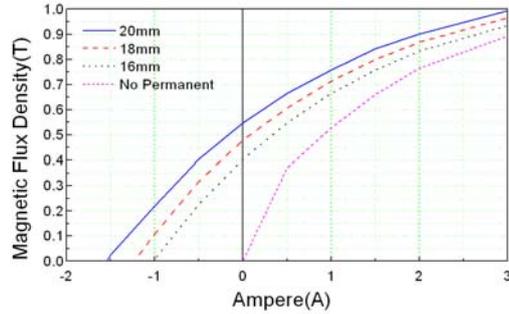


Fig. 5. 전류별 자속밀도

설계시, 하이브리드형을 위해 도입된 영구자석의 크기, 즉 반경( $R_p$ )은 순수 전자석에 영구자석의 장착 뿐 만이 아니라, 영구자석 크기에 따른 성능 영향성까지 확인하고자, 16mm, 18mm, 20mm, 3가지 종류로 선정하였고 이에 따른 자기장 해석 및 성능해석을 각각 수행하였다.

또한, 성능 향상 정도를 파악할 목적으로 영구자석을 장착하지 않은 순수 전자석의 MR댐퍼를 함께 고려하였는데, 코일이 감기는 영구자석 부분을 9mm 반경의 전자석 재질 코어로 바꾼 것 이외에는 하이브리드 MR댐퍼와 동일한 형상이다.

Fig. 4와 Table 1의 댐퍼형상에 대한 자기장 해석 결과로 얻은 Fig. 5는 영구자석의 반경과 전류에 따른 자속밀도를 나타낸 그래프이다. 전류를 인가하지 않은 상태에서 영구자석의 영향으로 16mm는 0.40T, 18mm는 0.48T, 20mm는 0.55T 정도의 자속밀도가 각각 발생됨으로써, 제어장치 고장 시 착륙장치의 성능 향상을 위한 추가 감쇠력 확보가 확인되었다. 또한, 순수 전자석의 경우 0.9Tesla의 자속밀도를 발생시키기 위해 3A의 전류를 흘려주어야 했으나 영구자석을 장착할 경우 16mm는 2.65A, 18mm는 2.3A, 20mm는 2.0A 정도만으로도 충분하므로 소모 전력량 감소의 가능성을 예측할 수 있었다.

### III. 반능동제어 착륙장치의 동특성

#### 3.1 MR댐퍼 모델 구성 및 운동방정식

하이브리드 MR댐퍼의 전체적인 형상은 일반적인 착륙장치와 유사하게 Fig. 6과 같이 상부, 하부 스트러트로 구성하였다.

이로써, MR댐퍼의 설계 결과와 자기장 해석 결과를 기반으로 착륙장치의 성능해석을 위한 낙하 시뮬레이션용 ADAMS 모델을 Fig. 7과 같이 구성하였다.

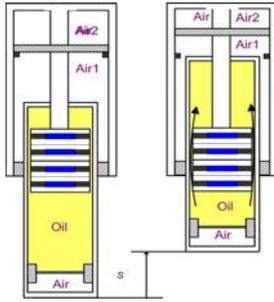


Fig. 6. MR 댐퍼 형상

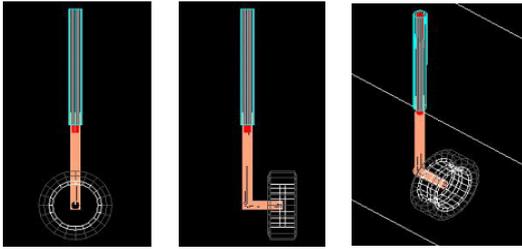


Fig. 7. 주륜 착륙장치의 ADAMS 모델

MR댐퍼의 경우 유체의 점성을 변화키는 방식이므로 오리피스형의 감쇠력항만 달라질 뿐 기존의 수동형 착륙장치에 대한 운동방정식의 기본틀을 그대로 사용할 수 있다. 착륙시 발생하는 3가지 내력인 공기력, 감쇠력 및 마찰력에 대한 각각의 힘 방정식은 참고문헌[9]에 설명되어있다. 착륙장치에 대하여 유도한 2자유도 운동방정식은 다음과 같은 식으로 표현된다[9].

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

여기서,  $F_{air}$ 는 공기력,  $F_d$ 는 감쇠력,  $F_{fri}$ 는 마찰력,  $F_T$ 는 타이어 힘을 의미하며, A는 양력을 보정해 주는 상수이다.

### 3.2 하중제어기법 및 시뮬레이션 모델

헬기 또는 항공기의 착륙장치에 대한 성능향상, 즉 효율개선 및 작용하중 감소는 하중-변위 선도의 형상을 가급적 사각형에 가깝게 만드는 것으로 이루어질 수 있다[3]. 이 하중-변위 선도의 하중은 변위에 따른 내력의 변화에 좌우되기 때문에 성능 향상을 위한 방안으로, 완충장치의 3가지 내력 중에서 마찰력을 제외하고 공기력과 감쇠력의 합을 특정 값에서 가급적 유지시키는 개념을 착안하여 제어기법으로 적용하였다. 따라서, 공기력과 감쇠력의 합을 일정하게 유지시키

는 제어기법의 적용식으로 이용될 내력 합의 하중식은 식(2)와 같다.

$$F_{total} = \begin{cases} A_a \left[ P_0 \left( \frac{V_0}{V_0 - A_a S} \right)^n - ATM \right] + \frac{12\eta A_p^2 L}{bh^3} v + \frac{3\tau_y A_p l}{h} + \frac{3\tau_r A_p l}{h} & \text{for } |F_{com}| > |F_{total}| \\ A_a \left[ P_0 \left( \frac{V_0}{V_0 - A_a S} \right)^n - ATM \right] + \frac{12\eta A_p^2 L}{gw^3} v & \text{for } |F_{com}| \leq |F_{total}| \end{cases} \quad (2)$$

$$\tau_y = \frac{F_{com} h}{3A_p l} - \frac{A_a h}{3A_p l} \left[ P_0 \left( \frac{V_0}{V_0 - A_a S} \right)^n - ATM \right] - \frac{4\eta A_p L}{bh^2 l} v - \tau_y^p \quad (3)$$

하중식 (2)을 보면, 내력합이 미리 설정한  $F_{com}$  보다 작을 경우, 영구자석 뿐 만이 아니라 필요 전류를 인가한 전자석에서 발생하는 자기장에 의한 제어전력으로 그 차이를 보상함으로써  $F_{com}$  을 가급적 따라가게 한다. 또한 내력 합이  $F_{com}$  보다 큰 경우는, 인가전류를 없애주고 필요시 역 전류를 통해 영구자석의 자기장 효과까지 상쇄 시킴으로써  $F_{com}$  을 따라가게 한다. 이로써 각각의 변위구간 동안에 내력의 합이 일정한  $F_{com}$  을 따라가게 함으로써 착륙장치의 효율을 증가시키고 작용하중을 감소시킬 수 있는 하중제어기법을 적용하였다.

본 하중제어기법을 기반으로 참고문헌[6]과 동일하게 Fig. 8과 같이 제어기를 설계하였고 반응동제어 착륙장치의 성능해석용 낙하 시뮬레이션을 위해 Fig. 9와 같이 ADAMS와 인터페이스를 구성하였다.

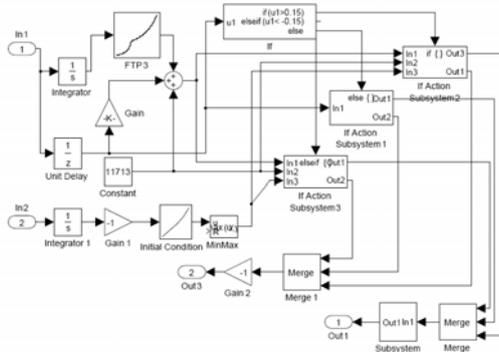


Fig. 8. 하중제어기법의 Simulink Block

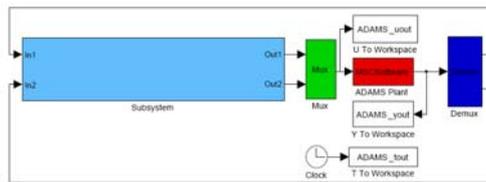


Fig. 9. 제어기와 ADAMS 인터페이스

### 3.3 시뮬레이션 결과 및 토의

본 절에서는 하이브리드 MR댐퍼를 이용한 착륙장치의 반능동제어로 하중제어기법을 적용하여 낙하 시뮬레이션을 수행한 결과를 기술하였다. 우선은, 제어기 고장을 모사하기 위해 전류를 인가하지 않은 조건(0A)으로 낙하 시뮬레이션 수행하였고 그 결과는 Fig. 10, Table 2와 같다.

하이브리드형의 경우, 순수 전자석 대비 최대 변위의 감소, 효율의 증가를 가져왔다. 이로써 하이브리드형 MR 댐퍼를 도입하게 된 목적 중 하나인 제어장치 고장 시 착륙장치의 성능 개선을 확인할 수 있다.

Fig. 11, 12는 하이브리드형과 순수 전자석의 MR 댐퍼에 동일한 하중제어기법을 적용하여 낙

하 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 동일한 제어기법을 적용함으로써 동일한 선도를 얻을 수 있었으며, 성능 측면에서도 수동형 대비 효율은 14%증가, 최대 작용하중은 10% 감소의 성과를 확인하였다.

Fig. 13~15는 하이브리드형과 순수 전자석형의 소모 전류량을 나타낸 선도이다. 영구자석별 차이는 반경이 클수록 영구자석에 의한 큰 전단력 때문에 감소되는 전자석의 제어전단력에 따라 전류가 16mm는 2.65A, 18mm는 2.3A, 20mm는 2.0A 로 감소될 뿐, 선도의 경향은 유사하며, 반경이 커질수록 선도가 아래로 내려가는 것으로

Table 2. 완충장치별 성능비교

구 분	착륙하중	최대변위	효율
영구자석 $R_p=16\text{mm}$	90.3 kN	0.41m	69.3%
영구자석 $R_p=18\text{mm}$	91.0 kN	0.40m	70.5%
영구자석 $R_p=20\text{mm}$	91.6 kN	0.39m	71.9%
순수 전자석	87.6 kN	0.45m	65.0%
수동형	94.0 kN	0.37m	72.4%

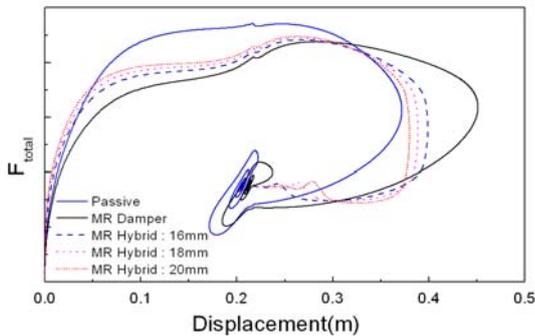


Fig. 10. 하중-변위 선도

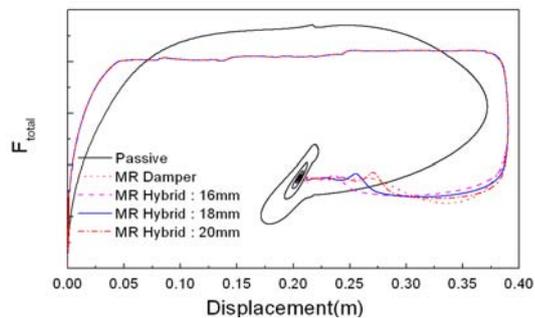


Fig. 11. 하중-변위 선도

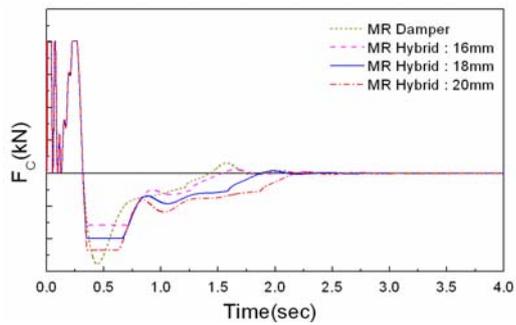


Fig. 12. 제어력

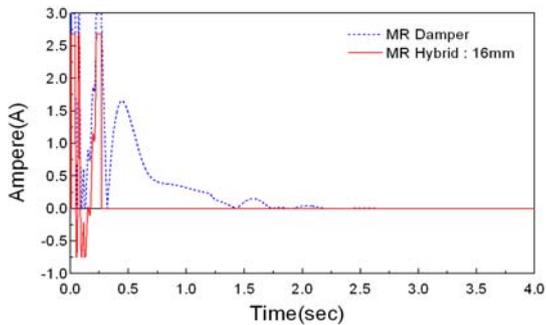


Fig. 13. 제어전류 ( $R_p=16\text{mm}$ )

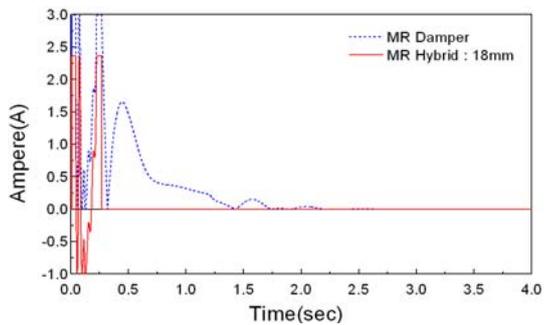
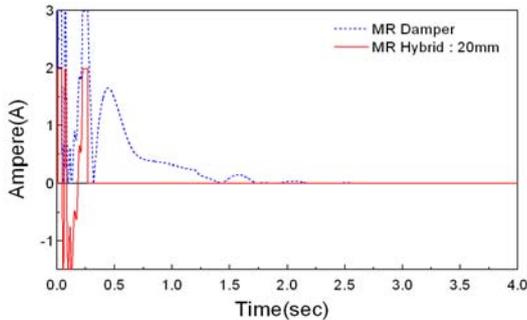


Fig. 14. 제어전류 ( $R_p=18\text{mm}$ )

Table 3. 완충장치별 소모전력량

구 분	소모 전력비율		
	진 과정	Rebound전	Rebound후
순수 전자석	100%	100%	100%
영구자석 $R_p=16\text{mm}$	43.1%	71.3%	0
영구자석 $R_p=18\text{mm}$	34.5%	57.1%	0
영구자석 $R_p=20\text{mm}$	28.8%	0	

Fig. 15. 제어전류 ( $R_p=20\text{mm}$ )

나타났다. 또한 하중제어기법에 따른 동일한  $F_{com}$  설정으로 필요시 영구자석에 의해 발생하는 자기장을 감소시키기 위해 역 전류를 인가했음을 확인할 수 있다. 하이브리드형의 경우 영구자석에 의한 고유 전단제어력이 상존하므로, 착륙장치의 복원과정에는 전류를 인가하지 않았기 때문에 0A 전류로 나타났으며, 이는 소모 전력량 감소시키는 방안이기도 했다. Table 3은 순수 전자석의 경우를 100으로 보았을 때 하이브리드형의 소모 전력량을 나타낸 것으로 전과정에 있어서 최대 70%정도의 절감이 가능하며, 복원 전까지만 고려하더라도 30%~50%의 절감을 얻을 수 있었다. 이러한 결과는 영구자석 도입에 따라 0.9Tesla 이상의 잉여 자속 밀도를 활용하였고 복원과정에서 전류인가를 배제했기 때문이다.

#### IV. 결 론

일반적인 전자석 형태의 MR댐퍼에 영구자석을 장착하는 하이브리드 MR댐퍼의 설계를 위해, 영구자석 장착방안 연구에 따라 전자석의 코어부분을 영구자석으로 대체하는 형상을 기본으로 확정하였다. 자기장 해석 및 성능 해석을 통해 영구자석의 반경을 포함하는 댐퍼의 설계를 수행하였다. 이로써, 제어기 고장시의 낙하 시뮬레이션 결과로, 순수 전자석형 대비 최대변위는 10%감소, 효율은 8%증가를 가져왔다.

착륙장치의 반능동제어로, 성능 향상을 위해 새롭게 고안했었던 하중제어기법[6]에  $F_{com}$  만을 추가한 동일 개념의 제어기법을 적용하였고 낙하 시뮬레이션의 결과, 수동형대비 14%의 효율증가, 10%의 작용하중 감소라는 성능 향상을 얻었다.

또한, 하이브리드 형은 순수 전자석 MR댐퍼와 동일한 성능을 보이면서 소모 전력량에 있어서는 최대 70%까지의 절감을 달성할 수 있는 것으로 확인되었다.

#### 후 기

본 연구는 지식경제부 한국형 헬기 민군겸용 구성품 개발산업 수행 결과의 일부이며, 지원에 감사 드립니다.

#### 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) 현영오, 황재업, 황재혁, 배재성, 임경호, 김두만, 김태욱, "MR 댐퍼를 이용한 주류 착륙장치 하중제어기법 연구", 한국항공학회지, 제37권 4호, pp. 344~349, 2009.
- 7) 황재업, 황재혁, 배재성, 현영오, 임경호, 김두만, 김태욱, "MR 댐퍼를 이용한 헬기 착륙장치 반 능동제어", 한국항공학회지, 제36권 4호, pp. 346~351, 2008.
- 8) "MRF-241ES Magneto-Rheological Fluid", LORD Technical data, 2006.
- 9) 김두만, 임경호, 황재혁, 전제춘, 이환규, "항공기 착륙장치의 동특성해석 및 최적설계", 한국항공우주학회지, 제21권 제4호, 1993, pp. 37~48.