

# 궤도 차량용 MR 현수장치의 최적 설계

## Optimal Design of MR Suspension System for Tracked Vehicle

하성훈\*, 김형섭\*, 최승복†, 이철희\*\*, 조명우\*\*

Sung Hoon Ha, Hyung Seob Kim, Seung Bok Choi, Chul Hee Lee and Myung Woo Cho

### 1. 서론

지능 재료 중의 하나인 MR(magneto-rheological) 유체는 가해지는 자기장에 따라 그 역학적 특성이 변하는 유체를 말한다. 이러한 MR 유체의 특성을 이용하여 여러 산업분야에서 활발한 응용 연구가 진행되고 있다. 그 중에서도 자동차 관련 산업에서의 연구가 가장 활발히 이루어지고 있다. 특히 Delphi 사에서는 상용 MR 댐퍼를 개발하여 실제 승용차에 적용하여 시판하고 있으며 또한, 승용차뿐만 아니라 철도, 대형 중기차등에 MR 댐퍼를 적용하기 위하여 국내외적으로 많은 연구가 진행되고 있다.

잘 알려진 바와 같이, 궤도차량의 운전 및 환경 조건은 승용차에 비해 매우 까다롭고 가혹하다. 따라서, 궤도차량의 현수장치는 승무원의 승차감을 향상시키고 차량내외 장비를 보호하며, 원하는 방향으로의 작동에 필요한 마찰력을 충분히 발생시키는 데 필수적이라 할 수 있다. 궤도차량용 현수장치에는 여러 가지 종류의 스프링과 댐퍼들로 이루어진 조합들이 사용되고 있다. 현재 우리나라에서 궤도 차량에 실제 적용된 현수장치로는 한 개의 실린더로 작동 피스톤과 부동피스톤이 연결된 단동형 유 기압 현수장치(hydro-pneumatic suspension unit; HSU)와 두 개의 실린더에 각각 작동피스톤과 부동피스톤이 위치하고 이 두 개의 실린더가 매니폴드로 연결된 복동형 HSU 등이 있다. 이러한 유 기압 현수장치들은 특정한 노면 및 가진 조건에서는 우수한 성능을 가져오지만 수동형 현수장치의 특성상 변화하는 노면의 상황에 즉각적으로 대응하지 못하므로 차량의 성능 향상에 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 HSU 가 갖는 한계성을 극복하기 위하여 MR 유체를 적용한 반능동형의 MRSU(magneto-rheological suspension unit)를 제안하고 이를 평가하고자 한다. 이를 위해 MR 댐퍼에서

자기장을 인가시키는 MR 밸브 구조 최적설계를 수행한다. 최종적으로 MR 댐퍼와 가스 스프링이 결합된 복동형 구조의 MRSU 의 실질적 적용가능성을 보이도록 하겠다.

### 2. MRSU 의 모델링

MRSU 는 기존의 복동형 HSU 의 오리피스부에 MR 밸브를 설치한 형태로서 작동 피스톤이 작용하면 MR 유체는 일정압력에 도달하기 전에는 모두 오리피스를 통하여 상부 또는 하부 실린더로 이동하게 되고 일정압력 이상에서는 오리피스와 자운스 혹은 리바운드 밸브를 통하여 이동하게 된다. MRSU 의 개략도는 Fig. 1 에 도시되었으며, 자운스 밸브와 리바운드 밸브를 포함한 MR 밸브 형상은 Fig. 2 에 나타내었다. 이에 따르면 MRSU 에서는 유량이 흐를 수 있는 방향이 일정 압력 이하에서는 한 방향뿐이므로 작동 피스톤이 이동한 부피만큼의 유체가 오리피스와 자극을 차례로 통하여 상부 실린더로 혹은 하부 실린더로 이동하게 된다. 따라서 상부실린더와 하부 실린더의 압력차가 MR 밸브의 항복 압력보다 커지게 되면 유체의 일부는 밸브를 통하여 흐르게 되어 각 실린더 사이의 압력강화를 도출하게 된다. 도출된 압력강하는 피스톤의 면적과 밸브의 단면적을 통하여 감쇠력으로 산출되며 MR 밸브 자극의 강도를 변화시켜 발생하는 항복응력을 통해 압력을 변화시켜 능동적으로 감쇠력을 조절하게 된다.

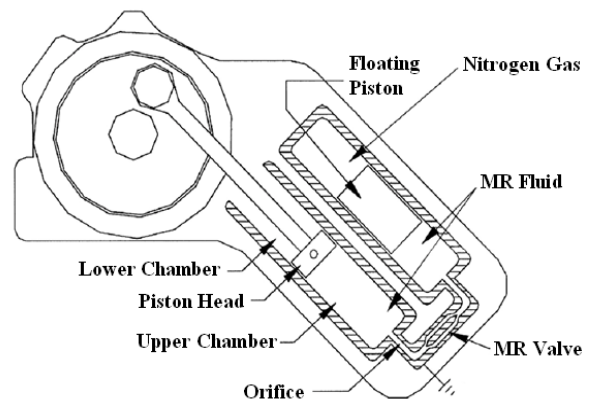


Fig. 1 Schematic configuration of MRSU

† 교신저자; 인하대 기계공학부  
E-mail : seungbok@inha.ac.kr  
Tel : (032) 860-7319, Fax : (032) 868-8719  
\* 인하대 대학원 기계공학과  
\*\* 인하대 기계공학부

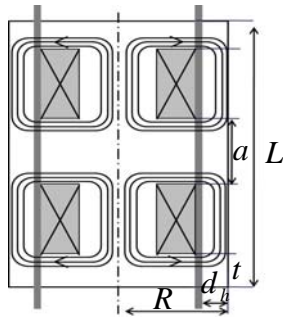


Fig. 2 Schematic configuration of MR valve

### 3. MRSU의 최적설계

MRSU의 최적설계를 수행하기 위하여 본 연구에서는 가변 감쇠력을 결정하는 MR 밸브의 자기 회로 해석을 이용하여 최적화를 수행하였다. 회로 해석은 상용 프로그램인 ANSYS 변수 설계 프로그램을 이용하여 수행하였고 Fig. 2와 같이 두 개의 코일 밸브를 가지는 MR 밸브에 대하여 최적화를 도출하였다. 최적화되는 변수들은 코일 두께, 자극의 길이 및 외벽 두께이다. 본 연구에서는 최적화를 위해 시스템을 1 차수로 분석하는 개선된 ANSYS 최적설계 프로그램을 이용하여 최적화를 수행하였다. 해석된 파일에서 코어 반지름, 자극 길이, 자속 및 자기 밀도를 정하게 되고 이를 이용하여 최적화된 변수를 결정하게 된다. ANSYS 최적화 프로그램은 고정된 설계 변수를 패널티 함수를 통하여 고정되지 않은 설계 변수로 변경하여 최적화를 수행하게 되며 이때 고정되지 않는 목적함수는 다음과 같이 나타낸다.

$$f(x) = \frac{OBJ}{OBJ_0} + \sum_{i=1}^n P_{x_i}(x_i) \quad (1)$$

Fig. 3~4는 설계 변수에 따른 최적화된 결과 값이다. 최적화를 위해서 설정된 목적함수( $\lambda$ )를 최소화하며, 코일 두께( $t$ ), 밸브 외벽 두께( $d_h$ ), 자극 길이( $l$ ) 등이 최적화 되어 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

### 4. 결과 및 결론

본 연구에서는 궤도차량에 반능동 현수장치인 MR 유체를 적용하기 위하여 새로운 형태의 MRSU를 제안하고 MRSU의 핵심 부품인 MR 밸브의 최적 설계를 수행하였다. 수행된 결과에 따르면 목적함수가 감소함에 따라 에너지 소모( $N$ )를 최소화 시키면서 압력강하( $\Delta P$ )를 상승시켜 효율을 증가시켰다. 또한 최적화된 결과의 검증은 위하여 MRSU의 수학적 모델링을 통하여 Fig. 5~6과 같이 시뮬레이션을 수행하였다. 이에 따르면 같은 입력 전류 값에 대하여 최적화된 결과 값이 더 큰 감쇠력을 나타내고 있음을 확인할 수 있고 감쇠력 규모도 30ton 규모의 궤도차량에 적합한 것으로 나타나고 있다.

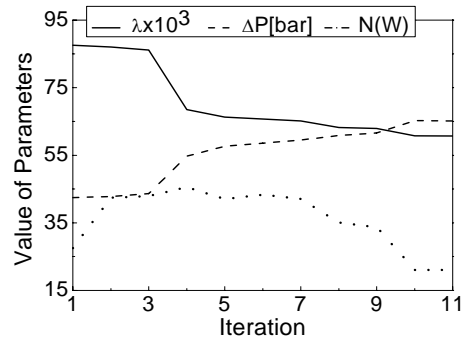


Fig. 3 Results of the optimal variables

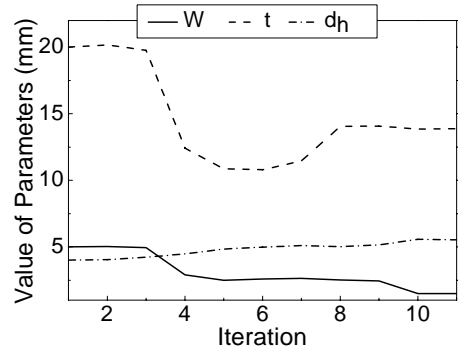


Fig. 4 Results of the design variables

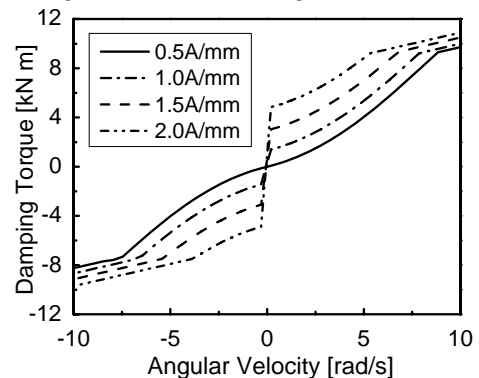


Fig. 5 Damping Characteristic of the initial MRSU

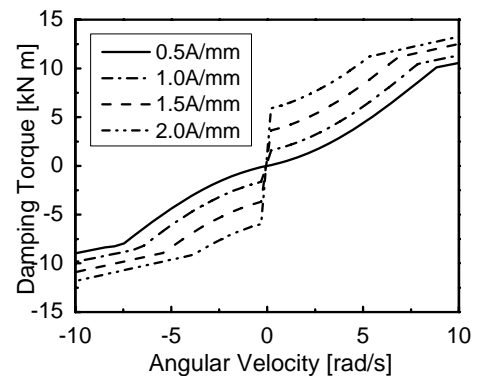


Fig. 6 Damping Characteristic of the optimized MRSU

### 후 기

본 연구는 지식경제부와 한국과학기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과입니다.