

궤도 차량용 MR 현수장치의 최적 설계

Optimal Design of MR Suspension Unit for Tracked Vehicle

하 성 훈* · 김 형 섭** · 최 승 복† · 우 제 관***

Sung Hoon Ha, Hyung Seob Kim, Seung Bok Choi and Je-Kwan Woo

(2010년 9월 9일 접수 ; 2011년 4월 25일 심사완료)

Key Words : Military Vehicle(군용 차량), Tracked Vehicle(궤도 차량), Magnetorheological Suspension System(MR 현수장치), MR Valve(MR 밸브), Optimal Design(최적 설계)

ABSTRACT

This paper presents optimal design of controllable magnetorheological suspension unit for a tracked vehicle. As a first step, a double-rod type MR suspension unit is designed on the basis of the Bingham model of commercially available MR fluid, and its damping characteristics are evaluated with respect to the intensity of the magnetic field. Subsequently, the governing equation of motion of the MR suspension system featuring the MR valve is established. Then, the optimization problem to find optimal geometric dimensions of the MR suspension unit is formulated by considering an objective function which is related to damping torque and control energy. The first order optimization method intergrated with a commercial finite element method(FEM) software is adopted to obtain optimal solution of the system. The performance characteristics of the optimized MR suspension unit is then evaluated and compared with initial one.

1. 서 론

MR 유체는 자기장에 의하여 유변학적으로 상변화가 일어나는 지능 유체로서 전기장에 의하여 상변화가 일어나는 ER 유체에 비하여 비교적 큰 항복응력을 발생시켜 보다 큰 힘을 요하는 각종 응용장치에 적용하려는 연구가 시도되고 있다. Carlson 등⁽¹⁾은 차량용 MR 유체 댐퍼를 제안하였으며, 스카이 혹 제어기의 구현을 통하여 제안된 MR 댐퍼의

우수성을 입증하였다. Spensor 등⁽²⁾은 지진을 방지하기 위해 MR 댐퍼를 제안하여 이론적인 모델을 적용하여 이의 타당성을 검증하였다. 그리고 Kamath은 반능동형 MR 유체 댐퍼를 제안하고 감쇠력 히스테리시스에 대한 이론적 모델을 제시하고 실험결과와 비교 분석을 수행하였다.

최근 들어 댐퍼, 및 마운트 시스템과 같이 제진 시스템을 필두로 MR 유체 응용장치의 모델링 및 설계에 대한 연구가 활발히 수행되고 있으며^(3,4), 유한 요소법을 이용한 모델링 및 해석에 대한 연구도 수행되고 있다. 이는 MR 유체가 가지는 유변학적 특성인 자기장에 대한 상변화를 이용한 것으로 응용장치 각 요소들에 대한 자속 밀도 및 자기 회로의 분석을 통하여 효율적인 장치의 설계 변수를 결정하기 위함이다.

잘 알려진 바와 같이, 궤도차량의 운전 및 환경 조건은 일반 승용차와 달리 매우 까다롭고 가혹하다.

† 교신저자; 정회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : seungbok@inha.ac.kr
Tel : (032)860-7319, Fax : (032)872-7925

* 정회원, 인하대학교 대학원 기계공학과

** 인하대학교 대학원 기계공학과

*** 한국폴리텍II대학 인천캠퍼스 메카트로닉스과

이 논문의 일부는 2010년 춘계 소음진동 학술대회에서 발표되었음.

따라서, 궤도차량의 현수장치는 승무원의 승차감을 향상시키고 차량내의 장비를 보호하며, 원하는 방향으로의 작동에 필요한 마찰력을 충분히 발생시키는 데 필수적인 역할을 하여야 한다⁽⁵⁾. 이런 궤도차량 현수장치의 종류에는 여러 가지 종류의 스프링과 댐퍼들로 이루어진 조합들이 사용되고 있다. 현재 우리나라에서 궤도차량에 적용된 현수장치로는 로드 암이 현수장치 외부에 있고 두 개의 실린더로 작동 피스톤과 부동 피스톤이 연결된 단동형 유 기압 현수장치인 HSU(hydro-pneumatic suspension unit)가 있고, 궤도차량 바퀴 연결부인 로드 암이 실린더 내부에 있고 스프링과 댐퍼가 실린더 내부에 같이 존재하는 IHSU(in-arm hydro-pneumatic suspension unit)이 사용되고 있다. 이러한 유 기압 현수장치들은 특정한 노면 및 가진 조건에서는 우수한 성능을 가져오지만 수동형 현수장치의 특성상 변화하는 노면 상황에 즉각적으로 대응하지 못하고 제어능력의 한계를 지니고 있으므로 궤도차량의 성능 향상에는 한계가 있다.

따라서 이 연구에서는 기존의 IHSU가 가지는 성능의 한계성을 극복하기 위하여 실제 궤도차량에 쓰이고 있는 IHSU에 MR 유체를 적용하여 반능동형 MRSU(magneto-rheological suspension unit)를 제안하고 이의 성능을 평가하고자 한다. 이를 위해 현수장치에서 감쇠력을 담당하는 댐퍼 부분에 MR 밸브를 설치한다. 또한 MR 밸브의 효율을 향상시키기 위하여 밸브의 자기 회로와 MR 유체의 유변학적 특성을 이용하여 MR 밸브의 기하학적 최적 설계를 수행하며, 최종적으로 MR 댐퍼와 가스 스프링이 결합된 복동형 구조의 MRSU의 실질적 적용가능성을 보고자 성능 특성을 평가한다.

2. MRSU의 모델링

이 연구에서 제안한 MRSU는 상부실린더와 하부 실린더 사이에 MR 밸브를 설치하여 MR 밸브의 작동 유체의 오리피스 역할과 감쇠력을 조절하는 제어 영역을 동시하도록 설계하였다. 만일 작동 피스톤이 작용하면 MR 유체는 일정압력에 도달하기 전에는 모두 밸브 오리피스를 통하여 상부 또는 하부 실린더로 이동하게 되고 일정압력 이상에서는 MR 밸브가 작동하여 압력이 제어된 상태로 유체가 이동하게 된다. MRSU의 개략도를 Fig. 1에 도시하

였고, 제안된 MRSU의 해석을 위하여 Fig. 2와 같은 좌표 계를 설정하여 MRSU의 성능을 검증하였다. 이 좌표 계는 로드 암과 크랭크의 회전중심을 원점으로 하고 X' 축은 MRSU와 평행한 직선, Y' 축을 X' 축에 수직인 직선으로 설정하였다. α, β, γ 는 MRSU에서 크랭크, 커넥팅 로드, 휠 암이 이루는 각도를 의미하고, 바퀴에서 들어오는 외력을 F_x, F_y 로 표현하였으며 외력에 의해 움직이는 피스톤헤드의 위치를 X_p 로 표현하였다. 작동 피스톤의 위치를 구하기 위하여 좌표 계의 원점과 커넥팅 로드 끝단 및 피스톤 헤드의 끝단의 위치는 다음과 같은 좌표 계로 표현된다.

$$\begin{aligned}
 & l_1(-\cos(93^\circ + \alpha)i + \sin(93^\circ + \alpha)j) \\
 & l_2(-\cos(\beta)i + \sin(\beta)j) \\
 & (l_1 \cos(93^\circ + \alpha) - l_2 \cos(\beta)) \\
 & + l_1 \sin(93^\circ + \alpha) + l_2 \sin(\beta)j
 \end{aligned} \tag{1}$$

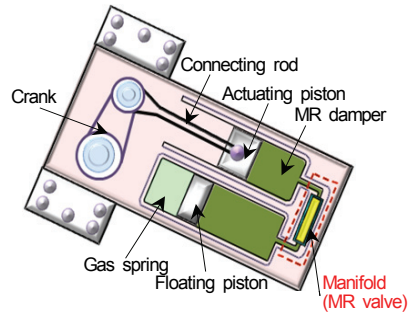


Fig. 1 Configuration of MRSU

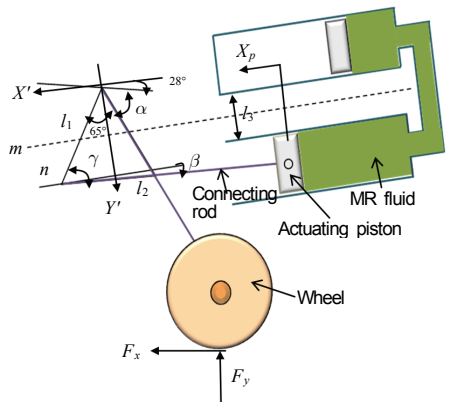


Fig. 2 Coordinate system of MRSU

여기서 l_1, l_2 는 각각 크랭크와 커넥팅 로드의 길이를 나타낸다. 실린더 축과 좌표 계의 중심간의 높이를 l_3 으로 표현하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$l_1 \sin(93^\circ + \alpha) + l_2 \sin(\beta) = l_3 \quad (2)$$

이로부터 커넥팅 로드와 피스톤 축이 이루는 각 β 를 구하면 다음과 같다.

$$\beta = \sin^{-1}\{(l_3 - l_1 \sin(93^\circ + \alpha)) / l_2\} \quad (3)$$

식(1)~(3)을 통하여 현수장치 작동 피스톤의 움직임 X_p 를 구하면 다음과 같다.

$$X_p = -l_1 \cos(93^\circ + \alpha) - l_2 \cos(\beta) \quad (4)$$

또한, 차량 주행 시 가스 챔버의 부피변화는 순간적으로 일어난다고 가정하고 가스 챔버의 정적 상태에서의 압력과 부피를 각각 P_{st}, V_{st} 라 하면 다음과 같은 압력 P 와 부피 V 의 관계식을 얻을 수 있다.

$$PV^{1.4} = P_{st}V_{st}^{1.4} \quad (5)$$

여기서 $V_{st} = \pi r_g^2 l_g$ 이다. r_g 는 가스 챔버의 반지름, l_g 는 정적 상태에서의 가스 챔버의 길이이다. 로드 암이 임의의 위치에 있을 때 가스 챔버의 체적은 다음과 같다.

$$V = V_{st} + \pi r_p^2 (X_p - X_{st}) \quad (6)$$

여기서 r_p 는 피스톤 로드의 반지름이다. 따라서 로드 암 회전 중심에 대한 스프링 토크 T_g 는 다음과 같다.

$$T_g = l_1 \sin(87^\circ - \alpha + \beta) (\pi r_{rod}^2 P) / \cos(\beta) \quad (7)$$

MR 유체에 자기장을 인가했을 때 발생하는 압력강하는 MR 유체 점성에 의한 압력강하와 MR 유체가 자기장에 영향을 받을 때 나타나는 항복응력에 의한 압력강하로 나눌 수 있다. 먼저 MR 유체 기본 점성에 의한 압력강하는 다음과 같은 식으로 표현된다⁽³⁾.

$$\Delta P_{mv} = 6\eta LQ / \pi d_h^3 R \quad (8)$$

그리고 MR 유체 항복응력에 의한 압력강하는

다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\Delta P_{MR} = 2ct\tau_y / d_h + ca\tau_y / d_h \quad (9)$$

여기서 Q 는 유체의 유량이고, τ_y 와 η 는 MR 유체의 항복응력, 자기장 무 부하시의 점성계수이다. R 은 원형 덕트의 반지름이다. 그리고 L 과 t 는 자극과 외부덮개를 포함하는 밸브의 길이와 밸브 외벽의 두께이다. 그리고 d_h, a 는 유로의 두께와 두 자극 사이의 간극이다. 또한 c 는 MR 유체 속도와 관련된 함수로 다음과 같이 표현할 수 있으며⁽⁶⁾ 이 연구에서는 계수 c 의 값을 2.5로 사용하였다.

$$c = 2.07 + \frac{12Q\eta}{12Q\eta + 0.8\pi R_1 d_h^2 \tau_y} \quad (10)$$

따라서 식(8)~(9)에 의하여 결정된 피스톤에 작용하는 감쇠력 F_d 는 다음과 같다.

$$F_d = \pi r_p^2 (\Delta P_{mv} + \Delta P_{MR}) \quad (11)$$

최종적으로 이 연구에서 제안한 현수장치에서 MR 댐퍼로 인하여 나타내는 댐핑 토크 T_d 는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$T_d = l_1 \sin(87^\circ - \alpha + \beta) F_d / \cos(\beta) \quad (12)$$

3. MR 밸브의 최적설계

이 연구에서는 궤도차량에 반능동 현수장치인 MRSU를 적용하기 위하여 MRSU의 핵심 부품인 MR 밸브의 최적설계를 수행하였다. 이를 위해 Fig. 3과 같은 두 개의 코일을 가지는 MR 밸브에 대하여 최적설계 값을 도출하였다. MR 밸브는 밸브 코일, 외벽(housing) 및 상단 덮개(head cover)로 이루어져 있으며 실린더 내부에 원형 덕트로 구성하였다. 덕트를 통하여 MR 유체가 자극 사이를 흐를 수 있게 하였고 부하되는 자기장에 따라 MR 유체가 항복응력을 발생시킬 수 있도록 덕트는 자기회로로 구성하였다. 자기회로에 전류를 인가시키면 자극에 자기장이 부하되고, 자극을 지나는 MR 유체의 유동 저항을 증가시켜 상부와 하부 실린더의 압력강하를 발생시킨다. 이에 따라 피스톤의 운동에

저항하는 방향의 감쇠력을 발생하게 된다.

MR 밸브의 모델링을 위하여 MR 유체는 비압축성 유체로 가정하였고, 유체저항에 의한 동일공간상의 내부압력은 모든 방향으로 균일하게 작용하고 있으며 유로형상에 의한 압력손실은 없다고 가정하였다. 따라서, MR 유체 점성에 의한 압력강하와 MR 유체가 자기장에 의해 발생하는 항복응력에 대한 압력강하는 식 (8)~(9)로 표현된다.

MR 밸브의 최적설계하기 위하여 이 연구에서는 ANSYS 변수 설계 프로그램(APDL) 중 골든 섹션 알고리즘(golden section algorithm)을 사용하여 밸브의 기하학적 최적화를 수행하였다. 이는 3가지 종류의 MR 밸브 구조에 따른 최적 설계를 수행한 Nygeun⁽⁶⁾ 연구를 인용하여 이 연구에 도입하였으며 이 연구에서는 두 개의 코일을 가지는 밸브의 기하학적 최적화를 도출하였다. 최적화되는 변수들은 MR 밸브에서 자기장 인가에 필요한 코일 두께 w , 코어 외벽의 두께 d 및 밸브 외벽의 두께 t 이다. 이는 밸브 외각의 기하학적 형상을 최적 설계함으로써 코어의 크기를 결정해 밸브의 최적설계를 하기 위함이다. 이 연구에서는 시스템을 1차수로 분석하는 개선된 ANSYS 최적설계 프로그램을 이용하여 최적화를 수행하였고 이의 흐름도는 Fig. 4와 같다. 흐름도는 해석된 파일에서 초기 밸브 반지름, 밸브 길이, 외벽 두께, 자속 및 자기 밀도를 정해 프로그램을 시작하며 루프를 통한 여러 번의 연산을 통해 최적화된 변수를 결정하게 된다. 여기서 ANSYS 최적화 프로그램은 제한된 설계변수를 페널티 함수를 통하여

제한되지 않은 설계 변수로 변경하여 최적화를 수행하게 된다. 설계 변수가 제한되지 않는 함수 $f(x)$ 는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(x) = \frac{OBJ}{OBJ_0} + \sum_{i=1}^n P_{x_i}(x_i) \quad (13)$$

여기서 OBJ_0 참조 목적함수이며, 프로그램 실행 후 초기 설계 변수 값으로 결정되며 P_{x_i} 는 설계 변수 x_i 를 위한 페널티 목적함수이다. 그리고 OBJ 는 밸브의 기하학적 최적설계를 위한 목적함수로 이 연구에서는 MR 유체 기본 점성에 의한 압력강하와 항복응력에 의한 압력강하의 비로 설정하다. 이는 MR 유체 항복응력에 의한 압력강하 값을 최대로 만들어 제어할 수 있는 영역을 크게 설정하고 기본 감쇠력을 최소화하여 차량의 동적 특성을 향상시키고자 함이다. 최적설계에 사용된 밸브의 제한조건은 실린더 크기로부터 결정되며 이 연구에서는 밸브 반지름은 23 mm, 길이 120 mm이고 밸브 외벽 두께는 20 mm이다. 그리고 MR 유체의 자기장 무부하 시 점성계수는 0.092 Pas이며, 밸브에 흐르는 유량은 피스톤 속도를 고려하여 $4.5 \times 10^{-4} \text{m}^3 \text{s}^{-1}$ 로 결정하였고 유체가 흐르는 덕트의 굵기는 1 mm로 결정하였다. 또한 이 연구에서는 밸브에 인가되는 전력을 최소화하기 위하여 밸브에 감겨진 코일의 감은 횟수, 굵기 및 저항력 등을 최적설계 값에 적용하여 에너지 소비도 최소화 하였다. 전류가 코일에 인가되어 결정되는 전류 밀도는 다음의 식과 같다.

$$J = I / A_w \quad (14)$$

여기서 I 는 코일에 인가되는 전류이고, A_w 는 코일의 단면적이다. 코일에서 소비되는 전력 소비를 평가하기 위해서 다음 식과 같이 전력량을 산출하였다.

$$N = I^2 R_w \quad (15)$$

여기서 R_w 는 코일의 저항이고 근사적으로 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$R_w = L_w r_w = V_c r_w / A_w \quad (16)$$

여기서 L_w 는 코일의 길이이고 r_w 는 코일의 단위 길이당 저항력이다. 그리고 V_c 밸브에 존재하는 모든

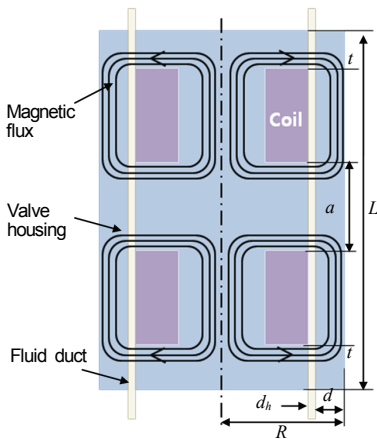


Fig. 3 Configuration of two-coil MR valve

코일의 체적이고 A_w 는 코일의 단면적이다. 여기서 최적설계 변수 중 코일의 두께를 설계변수로 설정하였기 때문에 최적화된 코일의 두께에 의해서 코일의

단면적이 결정되기 때문에 밸브에서 사용되는 전력량도 최적화 할 수 있다. 또한 밸브의 반지름 R 로부터 밸브 코어의 반지름 R_1 , 코어 외벽 두께 d 및 밸브 외벽 두께 t 는 다음의 식과 같이 계산된다.

$$R_1 = (1/2) \cdot \{ \sqrt{2R^2 - (w + d_h)^2} - (w + d_h) \}$$

$$d = R_1 / 2$$

$$t = R - (w + d_h + R_1)$$

여기서 w 와 d_h 는 각각 코일의 굵기 및 유체 덕트의 굵기이다.

Fig. 5는 이 연구에서 제안된 두 개의 코어를 가지는 밸브의 최적설계 결과 값과 설계 변수 값으로 밸브에 2A 전류를 인가하여 값을 도출하였다. 이에 따르면 최적설계 전 초기 변수에 의한 목적함수 값 즉 밸브 비는 설계 초기 값 코일 두께 $w=5$ mm, 코어 외벽 두께 $d=4$ mm 및 밸브 외벽 두께 $t=20$ mm에 따라서 $\lambda=0.087$ 로 측정되었고, 밸브에 의한 압력 강하는 $\Delta P=42.47$ bar로 계산되었다. 이때 밸브에서 사용된 전력은 $N=24.51$ W로 측정되었다. 그리고 모든 설계 변수 및 최적화 값들이 반복연산에 의하여 최종적으로 수렴된 값은 $w=1.5$ mm, $d=5.53$ mm, $t=13.88$ mm로 계산되었고, 이로 인한 목적함수, 압력강하 및 전력소비는 $\lambda=0.062$, $\Delta P=67.23$ bar, $N=18.23$ W로 측정되었다. 따라서 이

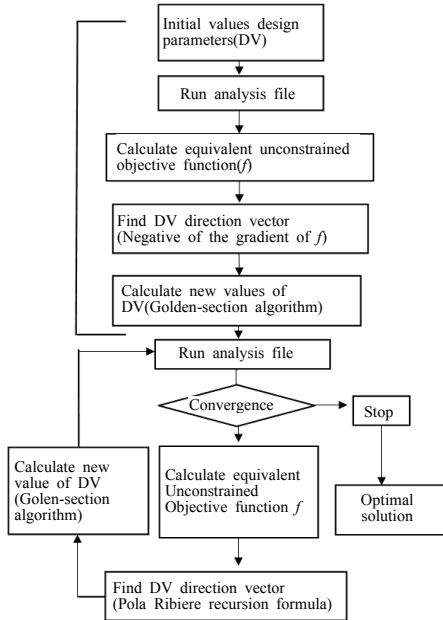


Fig. 4 Flow chart to achieve optimal design parameter

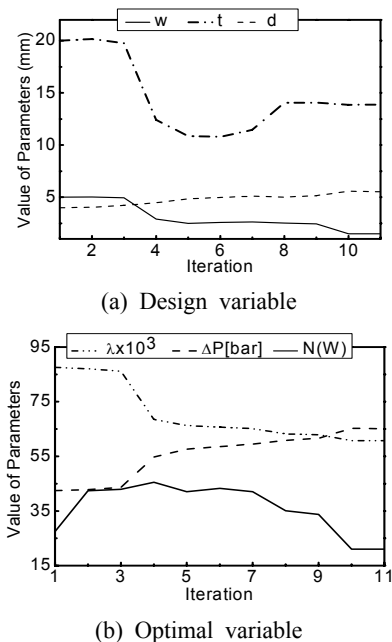


Fig. 5 Optimization results of MR valve

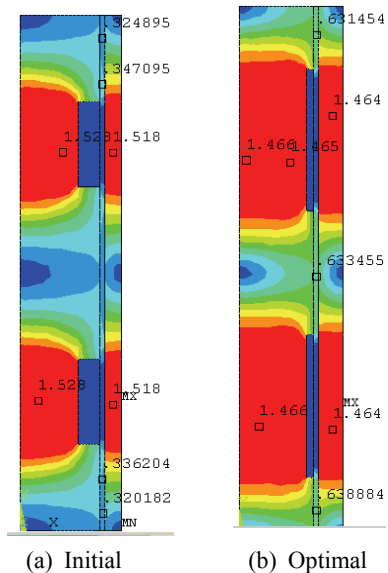
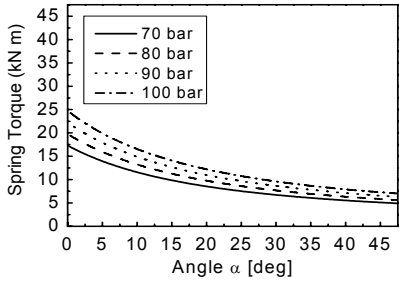


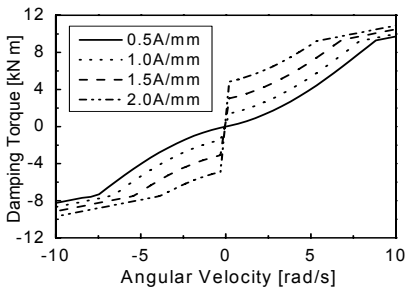
Fig. 6 Magnetic flux density of MR valve

연구에서 제안한 MR 밸브의 기하학적 최적설계로 인하여 밸브의 효율 즉 압력강하량을 증가시켰으며,

또한 밸브 작동에 사용되는 전력량도 줄여 효과적인 최적설계가 된 것을 증명하였다. Fig. 6은 MR 밸브의 자기포화도를 나타낸 것으로 최적화적 초기 설계 값에 의한 자력분포보다 최적 설계된 밸브의 자력분포가 훨씬 더 강력하고 크게 나타내고 있음을 알 수 있다.

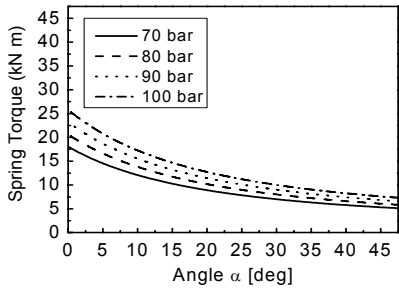


(a) Spring torque

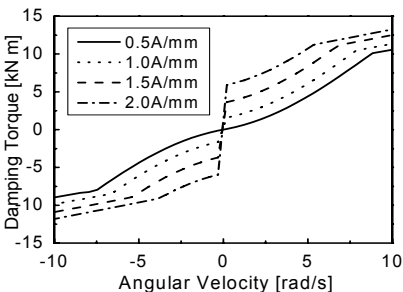


(b) Damping torque

Fig. 7 Characteristics of the MRSU : initial



(a) Spring torque



(b) Damping torque

Fig. 8 Characteristics of the MRSU : optimal

4. 결과 및 고찰

이 연구에서는 궤도차량용 MR 현수장치를 설계하기 위하여 현수장치의 핵심 부품인 MR 밸브 부분의 최적설계 기법을 이용하여 설계 변수 값을 결정하였다. 최적설계로 인해 결정된 설계 변수 값은 이의 타당성을 검증하기 위하여 초기 설계 변수 값과의 비교도 수행하였다. Fig. 7은 제안된 현수장치의 초기 설계 값에 의한 스프링 특성과 댐핑 특성을 나타낸 그래프로 각각 휠의 이동 변위 및 속도를 통해 계산하였다. 먼저 스프링 특성은 가스 챔버를 압축시키는 효과가 피스톤의 이동 거리에 따라 비선형성이 큰 곡선을 나타내고 있으며, 이는 가스 챔버의 길이와 질소 가스압을 변화시킴으로써 조절할 수 있다. 또한 댐핑 특성도 해석에서 사용된 궤도차량에 적합한 특성을 나타내고 있다. 그리고 Fig. 8은 최적 설계 값에 의한 현수장치의 특성 그래프로 스프링 특성은 크게 변하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 스프링의 특성은 댐퍼 운동에 따라 결정되어 지지만 댐퍼 특성으로 변화되는 결과 값은 부동피스톤 길리는 압력 값과 변위 값만 존재하기 때문에 최적설계 변수 값으로 인한 스프링 특성이 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 댐핑 특성은 인가되는 전류에 따라 초기 값에 의한 댐핑 특성과 큰 차이를 보이고 있는데 이는 전력 소모를 줄여 줄 뿐만 아니라 현수장치에 작은 입력 값을 이용하여 큰 제어영역을 가지는 효과를 나타낼 수 있다.

5. 결론

이 연구에서는 궤도차량에 지능 재료 중 하나인 MR 유체를 적용하여 반응동 현수장치를 개발하였다. 이를 위해 기존의 궤도차량에 적용되고 있는 IHSU를 이용하여 새로운 형태의 MRSU를 제안하였으며, MRSU의 핵심 부품인 MR 밸브의 최적설

계를 수행하였다. 수행된 결과에 따르면 설계 변수가 변화함에 따라 목적함수가 감소하는 것을 확인하였고, 이에 따라 에너지 소모를 최소화 시키면서 효율은 증가시켰다. 또한 최적화된 설계 변수의 검증을 위하여 MRSU의 수학적 모델링을 통하여 제안된 현수장치의 특성을 분석하였다. 이에 따르면 스프링 특성 및 댐핑 특성 모두 제안된 차량에 적합한 규모를 나타내고 있었다. 또한 댐핑 특성에 있어서 같은 입력 전류에 대하여 최적화된 설계 변수 값이 더 큰 감쇠력을 나타내고 있음을 확인할 수 있었고 이는 에너지 효율 측면과 차량의 동적 성능 향상시킬 수 있다. 또한, 향후 이 연구에서 제안한 MRSU를 장착한 궤도차량의 동적 모델과 진동제어에 대한 연구가 추진될 것이다.

후 기

이 연구의 일부는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(No. 2010-0015090).

참 고 문 헌

(1) Carsol, J. D., Cantanzarite, D. M. and St. Clair, K. A., 1995, Commercial Magneto-rheological

Fluid Devices, Proceedings of the 5th International Conference on ER Fluids, MR Suspension and Associated Technology, pp. 20~28.

(2) Spencer Jr., B. F., Dyke, S. J., Sain, M. K. and Carlson, J. D., 1997, Phenomenological Model for a Magneto-rheological Damper, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 123, No. 3, pp. 230~238.

(3) Lee, H. S., Choi, S. B. and Lee, S. K., 2001, Vibration Control of Passenger Vehicle Featuring MR Suspension Units, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 41~48.

(4) Lai, C. Y. and Liao, W. H., 2002, Vibration Control of a Suspension System via a Magneto-rheological Damper, Journal of Vibration and Control, Vol. 8, No. 4, pp. 527~547.

(5) Hoogterp, F. B., Saxon, N. L. and Schihl, P. J., 1993, Semiactive Suspension for Military Vehicles, SAE Technical Paper 930847.

(6) Nguyen, Q. H., Han, Y. M., Choi, S. B. and Wereley, N. M., 2007, Geometry Optimization of MR Valves Constrained in a Specific Volume Using Finite Element Method, Smart Materials and Structures, Vol. 16, No. 6, pp. 2242~2252.