

전기변성유체를 이용한 연속가변 현수장치 시스템의 디자인 및 성능에 관한 연구

장문석(동명중공업(주)), 김수태(창원대 기계공학과)

A Study on the Design and Performance of Continuously
Variable Suspension System using Electro-Rheological Fluids

M. S. Chang(TongMyong Heavy IND.), S. T. Kim(Changwon Univ.)

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the ERSU(Electro-Rheological Suspension Unit) and some progress of damping force characteristic of a ERSU. This paper describes overall construction of the system design and the manufacturing of ERSU. A model of the ERSU is made by using electric field dependent on Bingham properties of ER fluid. In this paper, the ERSU is designed and manufactured for a light ground tracked vehicle. From the results, it is shown that the damping performance of ERSU is better than that of a passive suspension unit. This experimental study might be very useful for the simulation and the design of semi-active suspension units.

Key Words : ER Fluid(전기변성유체), HSU(유기압현수장치), Bingham Property(빙헴특성), Damping Force(댐핑력), Semi-Active(반능동)

1. 서론

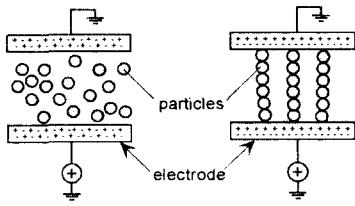
반능동형 현수장치는 기존의 스프링을 그대로 이용하고 가변댐퍼를 채용함으로써 차량의 주행조건에 따라 댐퍼의 댐핑력을 적절하게 변화시킬 수 있는 시스템을 말하는 것이다. 이 시스템의 작동을 위해서는 차량의 거동을 파악하는 센서 및 신호처리에 필요한 정도의 동력만 필요하다. 이러한 구성으로 인하여 수동형 현수장치에 비해서는 승차감 및 조종안정성이 향상되며, 능동형 현수장치에 비해서는 경제성, 저 소모동력, 부품의 단순화 신뢰성 등이 향상될 수 있다. 기존의 반능동형 가변댐퍼 시스템과 구성 및 특성면에서 전혀 다른 ER유체를 이용한 가변댐퍼 시스템 개발이 미국 및 일본 등의 선진국에서 많은 연구가 되고 있다. 일명 스마트 유체(Smart Fluid)라고 불리는 ER유체를 이용하여 자동차 산업관련 엔진마운트, 클러치시스템, 댐퍼 및 지능 구조물 개발 등에 많은 연구가 이루어지고 있다.^(1,2) ER 유체를 이용한 댐퍼는 전기장 강도의 변화만으로 시스템의 강성과 댐핑을 변화시킬 수

있으며, 수 밀리초의 빠른 반응 속도로 실시간 연속 제어가 가능한 점이 특징이다. 또한 기계적으로 오리피스를 조절하는 기계식 방식에 비하여 기계적 운동부분이 없어 마모를 최소화할 수 있으며, 장치의 단순화가 가능하다.⁽³⁾

따라서 본 논문에서는 ER 유체를 이용한 새로운 형태의 반능동형 궤도차량용 현수장치의 디자인 및 성능향상에 관한 연구를 수행하고자 한다.

2. ER 유체의 특성

ER유체에 전기장을 인가하면 유체에 분산된 입자가 유도 분극을 일으켜 양쪽의 전극을 향하여 전기장과 평행한 섬유상 구조의 고리를 형성함으로써 외부에서 가해지는 전단력이나 유체 유동에 저항하게 된다.^(4,5) ER유체의 상 변화에 요구되는 입력전압은 높지만 소요전류는 매우 낮으므로 인해 소비 동력이 낮은 장점을 가지고 있다.⁽⁶⁾ Fig. 1은 전기장의 부하 및 무부하시의 ER유체 입자들의 움직임의 도식적으로 나타낸 것이다.



(a) No Voltage applied (b) Voltage applied
Fig. 1 Micro structure of ER fluid

ER유체의 거의 공통적인 특징은 다음 식으로 표현할 수 있는 Bingham 거동을 하는 것으로 알려져 있다.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + \tau_y = \eta \dot{\gamma} + \alpha_0 E^{\beta_0} \quad (1)$$

전류밀도는 부하되는 전기장에 대하여 다음의 식과 같이 지수 함수적으로 비례하는 것으로 알려져 있다.

$$J = \alpha_1 E^{\beta_1} \quad (2)$$

Fig. 2(a)는 온도변화에 따른 전류밀도를 나타낸 것이며 Fig. 2(b)는 온도변화에 따른 전류량을 나타낸 그림이다.

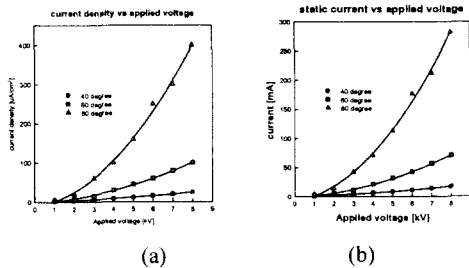


Fig. 2 Current density & current vs applied voltage

3. 현수장치의 특성

현수장치의 성능과 관계가 있는 설계변수는 여러 가지가 있겠으나 야지 주행속도에 지대한 영향을 미치는 것은 범프 트레블인 것으로 알려져 있다. 범프 트레블을 보다 크게 할 수 있는 새로운 스프링 매체를 찾은 결과 기체의 압축탄성을 이용한 유기압 현수장치가 출현하게 되었다. 유기압 현수장치의 범프 트레블은 0.3~0.5m까지 가능하게 된다. 또한 승차감 및 험지 주행 특성을 향상시키기 위해서는 정적 상태에서는 스프링 상수가 낮은 특성을 가지는 것이 좋으며, 로드휠이 최대자운스(Full Jounce)시에는 차체로의 직접 충격을 방지하기 위해서는 높은 스프링 상수 값을 갖는 것이 유리하

다. 유기압 스프링을 사용하여 현수장치를 제작하는 곳은 세계적으로 미국의 CGT(Cadillac Gage Textron Inc.), 영국의 Air-Log, 프랑스의 SAMM, 스위스의 SIG등이 있다.⁽⁷⁾

ISU(In-arm Suspension Unit)와 기존 유기압 현수장치와의 가장 큰 차이점은 로드휠 내부에 실린더를 배치함으로써 그 부피와 무게를 대폭 줄였다는 것이다. Fig. 3(a)는 Air-Log사의 로드암(Road-Arm) 형태의 HSU를 나타내며, Fig. 3(b)는 CGT사의 인암(In-Arm)형태의 HSU를 나타낸다.⁽⁸⁾



(a) (b)
Fig. 3 Hydropneumatic suspension unit

4. ER응용 현수장치의 설계

ER응용 현수장치의 기구학적 해석을 위한 기본 개념도는 Fig. 4와 같이 설정할 수 있다.

본 장에서는 전체적인 기구학적 조건 및 가변 댐핑력을 발생시키는데 가장 중요한 역할을 하는 ER 전극이 내장된 ER밸브 조립체에 대한 연구를 수행하였다.

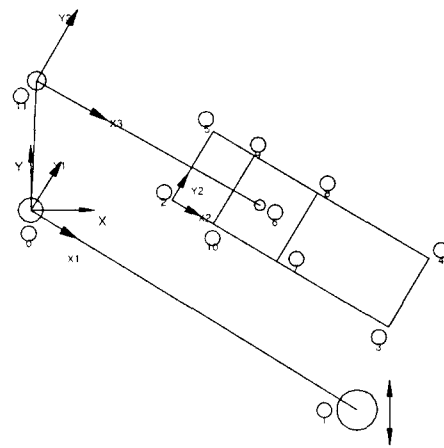


Fig. 4 Coordinate system of the ERSU

4.1 변위해석

거리 벡터 및 변환 행렬에서 미지수는 피스톤의 변위 s 와 커넥팅 로드 각변위 θ_3 이다. 피스톤 변위 s 및 커넥팅 로드 각변위 θ_3 는 \vec{R}^6 구속

조건을 이용하여 구할 수 있다.

$$R^b = R^2 + A_1 \left(A_{\beta} \begin{bmatrix} s_0 + s \\ rp \end{bmatrix} \right) = R^{11} + A_3 \begin{bmatrix} L_2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (3)을 s, θ_3 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} s &= -s_0 + L_3 \cos(\beta - \alpha) + L_4 \cos(\theta_1 + \beta - \gamma) \\ &\quad + L_2 \cos(-\theta_1 - \beta + \theta_3) \\ \theta_3 &= \frac{\theta_1 + \beta + \sin^{-1} \left(\frac{rp - L_3 \sin(\beta - \alpha) + L_4 \sin(\theta_1 + \beta - \gamma)}{L_2} \right)}{L_2} \end{aligned} \quad (4)$$

4.2 속도 해석

편의상 \vec{R}^b 를 표현하기 위해 다음식 (5)와 같이 정의후 s, θ_3 에 대하여 정리하면 다음 식 (6)과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} V_1 &= [s_0 + s; rp]^T \\ V_2 &= [L_3 \cos \alpha; L_3 \sin \alpha]^T \\ V_3 &= [L_4 \cos \gamma; L_4 \sin \gamma]^T \\ V_4 &= [L_2; 0]^T \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{s} &= (rp - L_3 \sin(\beta - \alpha)) \dot{\theta}_1 \\ &\quad - L_2 \sin(-\theta_1 - \beta + \theta_3) \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_3 &= - \frac{(s_0 + s - L_3 \cos(\beta - \alpha))}{L_2 \cos(-\theta_1 - \beta + \theta_3)} \dot{\theta}_1 \end{aligned} \quad (6)$$

4.3 하중 해석

주요 부품에 주어지는 하중분석을 위하여 크랭크, 콘로드 그리고 피스톤에 가해지는 힘을 간략화하여 Fig. 5와 같이 표시하였다.

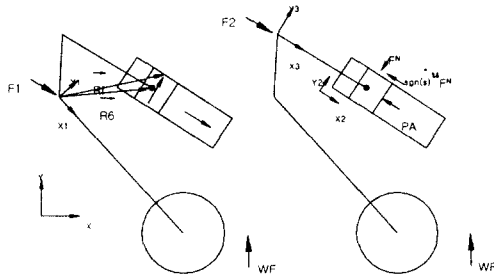


Fig. 5 Crank, Con-rod, Piston

Global 좌표계를 기준으로 크랭크에 가해지는 힘의 분포는 다음 식과 같다

$$\begin{aligned} \sum F &= \vec{WF} + \vec{PA} + \vec{F}_N + \mu \vec{F}_T + \vec{F}_1 = 0 \\ \sum M_0 &= \vec{R}_1 \times \vec{F}_1 + \vec{R}^b \times (\vec{PAD}\vec{V}) + \vec{R}^1 \times \vec{WF} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$WF = - \left(\frac{\vec{R}_1 \times \vec{F}_1 + \vec{R}^b \times (\vec{PAD}\vec{V})}{L_1 \cos \theta_1} \right)$$

다음은 피스톤에 관련되는 힘이다.

$$\begin{aligned} \vec{F}_2 + \vec{F}_N + \mu \vec{F}_T + \vec{PA} &= 0 \\ A_{\beta} \begin{bmatrix} F_2 \\ 0 \end{bmatrix} + A_{\beta} \begin{bmatrix} 0 \\ -F_N \end{bmatrix} + \\ A_{\beta} \begin{bmatrix} -\text{sgn}(s) \mu F_N \\ 0 \end{bmatrix} + A_{\beta} \begin{bmatrix} -PA \\ 0 \end{bmatrix} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

식 (7)과 식 (8)에서 F_2, F_N, F_{1x}, F_{1y} 를 구한 다음, 그 결과를 이용하여 차체로 가해지는 힘을 구하면 다음과 같다.

$$F = -\vec{F}_1 - \vec{F}_2 = - \begin{bmatrix} F_{1x} \\ F_{1y} \end{bmatrix} - A_{\beta} \begin{bmatrix} F_2 \\ 0 \end{bmatrix} \equiv WF$$

5. ER응용 현수장치

4절에서 제안한 모델을 근거로 시제1과 시제2를 설계 및 제작하였다. Fig 7은 본 연구에서 제작한 시제의 모델로서 크기등 제반사항은 실제 차량 장착을 기준으로 제작되었다.

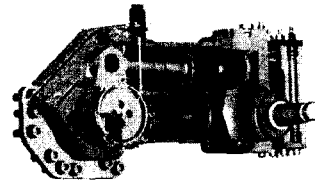


Fig. 7 3D model section of Proto

6. 실험장치

실험장치는 스프링실험과 댐핑실험을 할 수 있도록 Fig. 8과 같이 구축하였다.

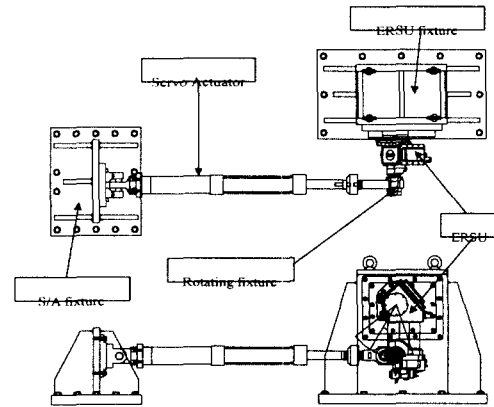


Fig. 8 Test equipment

7. 결과 및 고찰

7.1 스프링실험

Fig. 9, 10은 로드암 회전각에 대한 가스압 및 서보 액츄에이터 하중을 나타내며, 실선은 실험 결과를 점선은 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

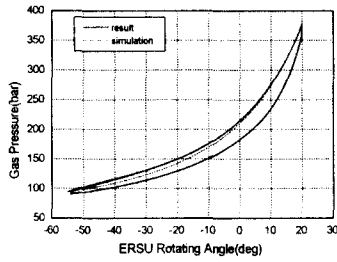


Fig. 9 Spring curve(angle vs. pressure)

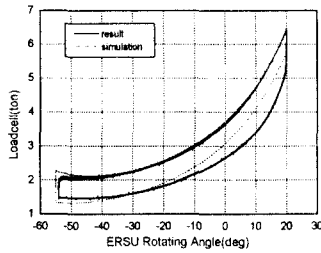


Fig. 10 Spring curve(angle vs. force)

7.2 댐핑실험

Fig. 11은 앞에서 확인한 댐핑실험결과들을 종합하여 얻은 댐핑곡선과 목표치이다.

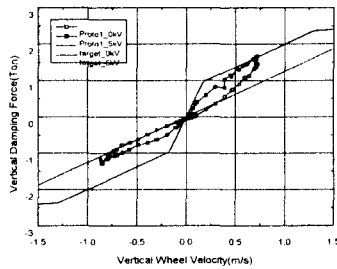


Fig. 11 Damping force curve of ERSU Proto1

Fig. 12는 TPA13566 유체를 주입한 시제2의 댐핑실험결과를 도시한 그림이다.

Fig. 11, 12를 보면 시제2 댐핑곡선의 0kV 기울기가 시제1 댐핑곡선의 0kV 기울기보다 32.5% 낮으며 5kV 기울기는 78.4% 증가한 것을 알 수 있다.

시제1과 시제2의 실험결과를 통하여 사용유체의 변경없이 목표댐핑력과 제어영역 확보를 위해서는 댐퍼의 재설계가 필수적이라는 사실을 알 수 있다. 향후에 높은 항복응력과 저전류특성 그리고 온도특성이 향상된 ER유체가 개발이 된다면 더욱 강성이 있는 제품을 개발할 수 있고 ER유체를 이용한 시

스템도 더욱 소형, 경량화 될 것이다.

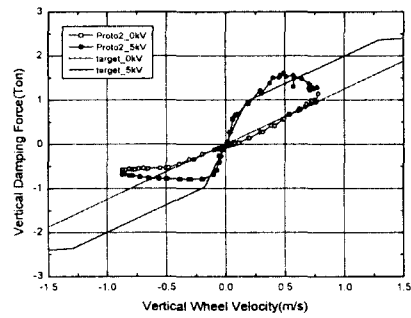


Fig. 12 Damping force curve of Proto2

후기

본 연구는 국방과학연구소와 동명중공업(주)의 협동연구과제로서 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Winslow, W. M., "Method and Means for Translating Electrical Impulses into Mechanical Forces", U. S. Patent Specification, No. 2,417,850. 1947.
2. Winslow, W. M., "Induced Vibration of Suspensions", Journal of Applied Physics, Vol. 20, pp. 1137-1140, 1949.
3. "Lab Proto I ERSU 설계, 제작 및 실험 보고서", 동명중공업주식회사, 1999.
4. Ushijima, T., Takano, K., and Noguchi, T., "Rheological Characteristics of ER fluids and Their Application to Anti-vibration Devices with Control Mechanism for Automobiles", SAE Paper, No. 881,787. 1988.
5. "능동형 현수장치 적용을 위한 최적 ER유체 조성 및 제어기법 연구 (II)", 국방과학연구소, 1999.
6. 한인식, "30톤급 궤도차량용 ERSU 개략 설계보고서", 국방과학연구소, 1998.
7. 김기수, 장문석, "대부하 대용량 현수장치의 소개", 동명중공업(주) 기보 Vol. 10, No. 14, pp. 37-46, 1998.
8. Weiss, K. D., Duclos, T. G., Carlson, J. D., Chrzan, M. J., and Margida, A. J., "High Strength Magneto-rheological and Electro-rheological Fluids", SAE Paper, No. 932451, pp. 425-430. 1993.