

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 18, No. 4, 1998

재생 에너지를 이용하는 연속가변 ER댐퍼에 관한 연구

김기선*, 정재천**

* 천안공업대학 기계과

** 인하대학교 기계공학과

A Continuously Variable ER Damper with Energy Generation

K. S. Kim^{*}, C. C. Cheong^{**}

* *Chon-An Technical College*

** *Dept. of Mechanical Engineering In-ha University*

ABSTRACT

This study presents a so-called regenerative ER damper which does not require external power sources with aid of energy conversion from kinetic energy into electrical energy. The ER damper is manufactured by employing a rack and pinion mechanism which converts a linear piston motion to a rotary motion. This rotary motion is amplified by gears and subsequently activates a generator to produce an electrical energy. In order to demonstrate the efficiency of the mechanism, with respect to the frequency of the ER damper is investigated a generated electric voltage, which is amplified via a transformer prior to being applied to the ER damper. In addition, the damping force of the ER damper obtained by the regenerated voltage is evaluated

1. 서 론

자동차의 현가 장치에 대한 연구는 수년 전부터 승차감과 안정성을 동시에 개선하려는 노력으로 진행되고 있다. 스프링과 댐퍼만으로 구성되어 있는 기존 시스템과는 달리 능동형 현가 장치는 유공압 및 전기적 힘의 작동기로 에너지 흐름을 연속적으로 공급하고 조절하여, 가변 함수의 힘으로 제어할 수 있다는 장점이 있으나 대부분의 복잡한 구조와 고가로 인하여 실용화에 어려움이 있다. 이를 해결할 수 있는 방법으로 빠른 응답속도와 폭넓고 연속적으로 제어할 수 있는 특성을 갖은 ER(electro-rheological)유체가 소개되면서 이를 이용한 댐퍼나 기계 메카니즘이 활발히 연구되고 있다.^[1~5] ER댐퍼가 요구되는 댐핑력을 생성하기 위해서는 고전압장치가 부가되고, 외부전원으로 작동되고, 외부로부터 에너지의 공급없이 작동하지 못한다.^[6]

이는 외부로부터 에너지의 공급 없이 작동하지 못한다는 것을 의미한다. 본 연구는 외부의 전원 공급 없이 버려지는 에너지를 재생시켜 이를 이용하여 작동할 수 있는 ER댐퍼를 제안한다. 기존에 수동식 현가 장치에서 재생 에너지를 얻기 위한 연구가 수행되어 왔으나, 주로 수치적 해석이나 기초실험이고 실제 이 에너지를 이용한 메카니즘은 이루어지지 않았다.^[7,8]

따라서 이 논문에서는 에너지 재생 메커니즘을 개발하여 버려지는 에너지를 재생에너지로 환원한 후 ER댐퍼에 적용시켰으며, 그 결과를 실험적으로 확인하였다. 먼저 ER댐퍼의 크기는 arabic gum계 ER유체의 기계적 성질에 기초하여 설계 되었으며, 모델링과 수식은 bond graph method에 의하여 유도하였고 설계 파라메타는 댐핑력 해석에 의하여 결정 되었다. 재생 메커니즘의 내부 증속기와 발전기의 사양은 ER댐퍼의 왕복운동 범위에 의하여 결정 되었다. 재생된 전원은 전압 변환기, 증폭기에 의하여 고전압의 에

너지로 변하고 이를 ER댐퍼에 입력시켜 실험평가 하였다.

2. ER유체의 Bingham 특성

ER유체는 부하 되는 전기장의 강도에 따라 그 역학적 거동특성이 변하는 유체로서, 기본적으로 비전도성의 용매 중에 강한 전도성을 갖는 고체 입자들을 분산시킨 콜로이드 용액이며 ER효과를 증대시키기 위한 첨가제(additive) 등으로 구성된다. 입자의 종류에는 전분, 셀룰로이드, 실리카 등에서 전용으로 합성된 고분자 입자에 이르기까지 많은 종류의 입자가 사용되고 있다.^[9,10] ER유체의 전기유동 효과에 대한 메커니즘을 보면, 비전도성의 용매에 분산된 입자는 용매와 다른 투과율을 갖고 있으며 외부에서 부하 되는 전기장에 의하여 입자에 분극이 발생되어 국부적으로 다른 전기장을 형성하게 되고, 분극이 발생한 입자들이 서로 연결되어 전극을 향하여 고리모양의 섬유상 구조를 형성하게 된다. 형성된 섬유상 구조는 외부에서 가해지는 전단력이나 유체의 유동에 대하여 저항하게 된다. 따라서 ER유체는 전기장 무부하시 뉴토니안 유체(Newtonian fluid)의 거동을 보이지만, 부하 되는 전기장 강도에 대하여 항복응력이 발생되어 빙햄 플라스틱 거동(Bingham plastic behavior)을 하게 된다. 이러한 ER유체의 거동을 수학적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\tau_t = \eta \dot{\gamma} + \tau_y(E) \quad (1)$$

여기서 τ_t 는 외부에서 가해지는 전단력에 대한 ER유체의 전단응력(shear stress)을 나타내며 η 는 ER유체의 가점성계수(apparent viscosity), $\dot{\gamma}$ 는 전단속도비(shear rate), 그리고 $\tau_y(E)$ 는 전기장 E 의 함수인 ER유체의 항복응력(yield stress)을 나타낸다.

ER유체의 항복응력은 유체가 유동을 일으키는 순간의 전단응력을 나타내는데, 유체의 유동은 매우 짧은 시간에 시작되고 또한 복잡한 거동을 하기 때문에 항복응력을 정확히 측정하기 어렵다. 따라서 많은 연구자들은 전단속도비를 변화시켜 구한 전단응력 값을 직선 보간 한 후 전단속도비의 값이 영(zero)인 부근에서의 절편 값을 항복응력으로 고려하여 이를 동적 항복응력이라 칭하며, 일반적으로 동적 항복응력 값이 ER유체의 항복응력으로서 취급된다. ER유체의 항복응력은 전기장 E 의 크기에 대하여 지수함수의 관계가 있으며, 이로부터 식(1)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\tau_t = \eta \dot{\gamma} + \alpha E^x \quad (2)$$

여기서 상수 α, x 는 ER유체의 용매 종류, 용매의 점도, 입자 종류, 입자의 중량비, 입자의 크기 및 모양, 입자의 수분함량 그리고 ER유체의 사용 온도 등 ER유체의 조성 조건에 따라 달라지는 ER유체의 고유치이다. 본 연구에서 사용된 ER유체는 gum arabic의 입자와 실리콘오일을 기초로 하여 자체 조성하였다. 전도성 입자는 26 μm 에서 88 μm 직경의 특수 처리된 gum arabic계이며 중량비를 35%로 하여 30 cs점도의 실리콘오일 용매를 주원료로 하여 조성하였다. ER유체의 역학적 특성을 얻기 위하여 상용 점도계(HAAKE VT500)를 사용하여 측정하였으며, Fig. 1(a)는 전기장의 크기에 따른 ER유체의 전단속도비와 전단응력의 관계를 나타낸다. Fig. 1(b)에서 ER유체의 전기장 강도에 따른 항복응력을 나타내며, 도시된 바와 같이 전기장 강도가 증가할 수록 항복응력의 값은 지수 함수로 증가한다. 본 ER유체의 식(2) 상수 α, x 는 각각 201.10, 1.53 으로 도출되었다. 따라서 전기장 E 에 의하여 발생하는 ER유체의 항복응력(τ_y)은 Fig. 1(b)와 같이 $201.10E^{1.53}$ Pa의 관계식으로 표현된다. Fig. 1(c)는 부하 되는 전기장에 의하여 ER유체가 ER

효과를 나타내는데 소용되는 전류밀도를 측정하는 것으로, ER유체를 응용장치에 적용하였을 때 전

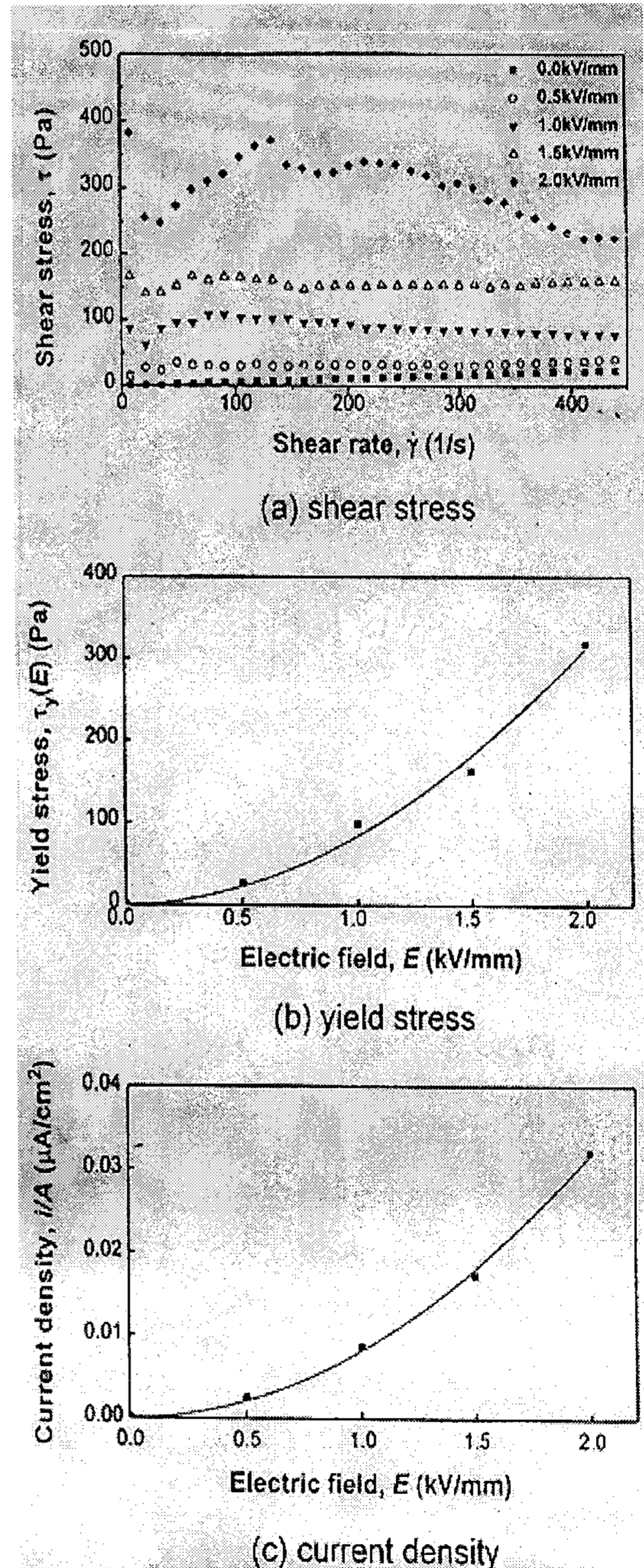


Fig. 1. Bingham properties of ER fluid

력소모관계 예측에 사용된다. 두 ER유체의 경우 모두 매우 작은 전류밀도를 나타내며 이는 낮은 전력소모를 요구한다. 일반적으로 전류밀도는 부하되는 전기장에 대하여 지수 함수를 따라 변화하는 것으로 알려져 있으며 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \alpha_1 E^\beta \quad (3)$$

여기서 상수 α_1, β 는 항복응력의 α, x 와 같이 ER유체의 고유치이다. 본 ER유체의 α_1, β 는 각각 0.056, 1.64로 도출되었다.

3. 에너지 재생 가능한 ER댐퍼

본 연구에서 제안한 에너지 재생 ER댐퍼 시스템은 Fig. 2와 같이 구성된다. 외부의 가진에 의하여 발생하는 ER댐퍼의 직선 운동이 피니언과 랙 기구에 의하여 회전운동으로 변환되고, 그 회전 운동은 기어 증폭기와 한 방향 크러치를 사용하여 6배의 속도로 증가되어 제네레이터를 일정 방향으로 회전시킨다. 이 실험에 적용된 AC제네레

타는 농기용 트랙터 type를 이용하였으며, 제네레이터에서 발생된 전압은 자체 제작한 고전압장치에 의하여 증폭되고, 증폭된 AC 고전압은 다이오드 브리지 회로 및 축전지를 통하여 DC전원으로 변환되어 ER댐퍼에 공급되며 주요 사양은 Table 1과 같다.

본 연구에서 제안한 ER댐퍼는 실린더형의 구조로 Fig. 3에 도시되었다. 가진에 따른 피스톤 로드(piston rod)의 상하 운동에 의해 ER유체의 유동이 발생되어 ER유체가 전극판 사이에 형성된 유로를 흐르게 되므로 유동저항이 발생된다. 따라서 유동저항으로 인하여 소요되는 힘이 댐핑력으로 작용한다. ER댐퍼의 환형 유로의 바깥쪽 실린더에는 (-)전원이, 안쪽 실린더에는 (+)전원이 연결되어 있어 ER유체에 전기장을 가하는 전극판으로 작동하게 된다.^[11] 전기장이 환형 유로에 형성되면 ER유체는 순간적으로 뉴토니안에서 빙햄 플라스틱 거동을 하게 된다. 즉 전기장이 부하 됨에 따라 ER유체의 전단응력이 발생하게 되어 환형 유로 내의 유동저항을 증가시키고, 이는 피스톤 상하의 압력차를 증가시키게 되어 피스톤의 상하운동에 소요되는 힘은 증가하게 된다. ER유체의 항복응력이 전기장의 강도에 따라 변화하므로 전기장 강도의 변화에 따라 ER댐퍼의 댐핑력 조절이 가능하게 된다 하부의 가스 챔버

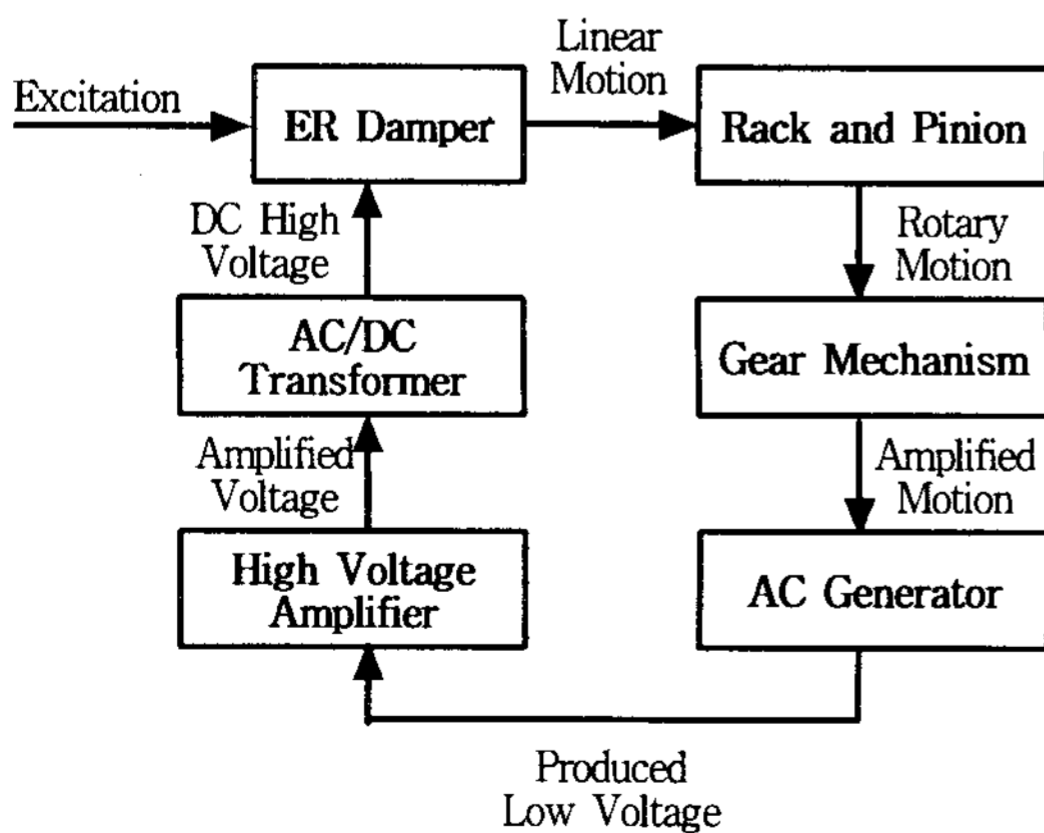


Fig. 2. Block-diagram of the proposed energy regenerative ER damper system

Table 1. Specification of the components

Component	Specification
A.C. Generator	Max. rotary speed : 7000rpm matching outpower : 220 watt at 5000rpm
High Voltage Amplifier	rated capacity : 60VA amplification factor : 1:1000
A.C./D.C. Converter	bridge diode model : SILITEK MUR 3509 capacitor : 8000VDC, 0.1Mega F

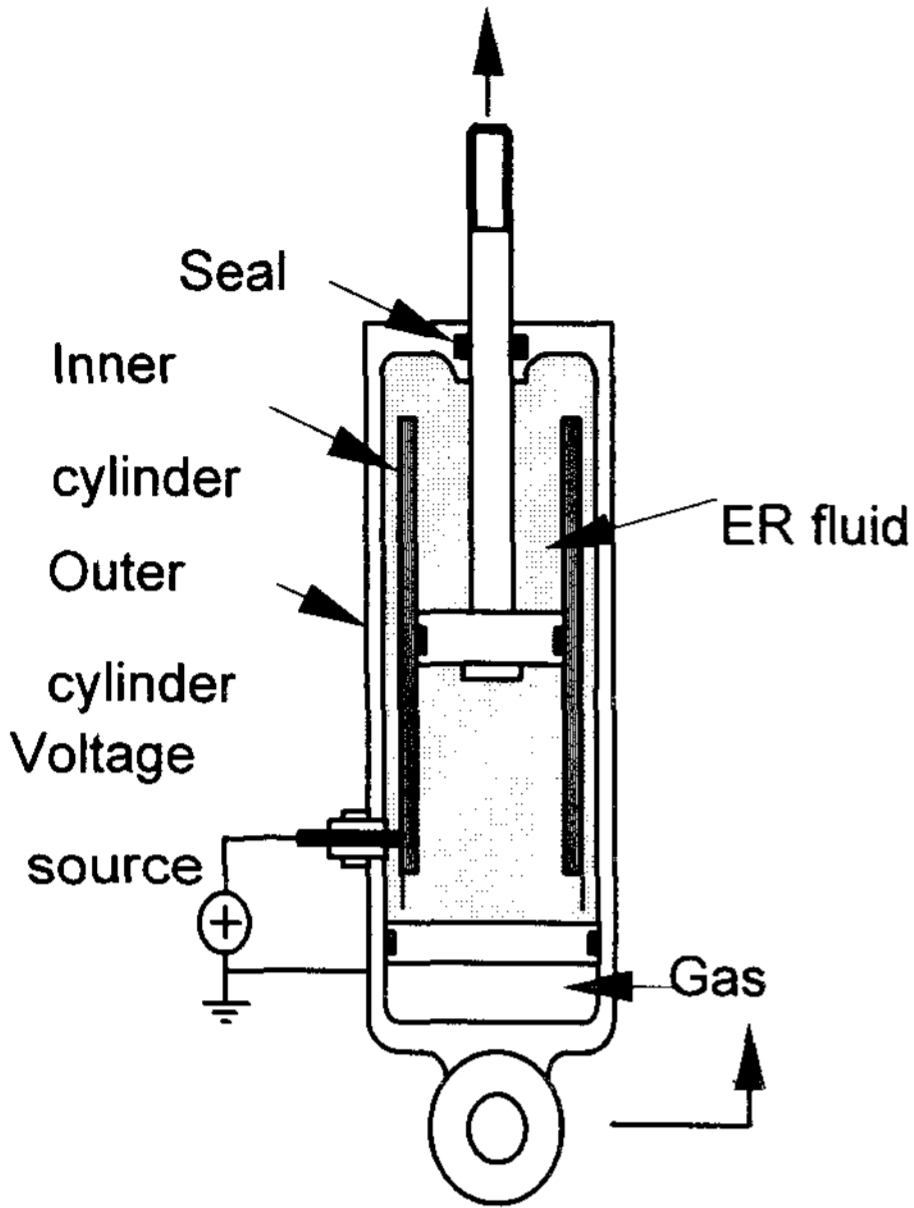


Fig. 3. Configuration of the ER damper

는 피스톤 로드의 운동과 열팽창에 따른 유체 유동을 수용하는 어큐뮬레이터(accumulator)로 작동하게 되고 피스톤 로드의 부피보상과 급격한 압력 변화로 발생될 수 있는 기포 등의 영향을 방지하는 역할을 한다.

한편 ER댐퍼 해석을 위하여 ER유체는 비압축성 유체로 가정하였고 동일 공간에서의 내부 압력은 모든 방향으로 균일하게 작용한다고 가정하였다. 또한 유로 형상에 따른 압력손실과 유체 관성력은 없다고 가정하였다. 유체 저항들은 첫째, ER유체가 환형 유로 사이로 유동될 때 발생하는 유체 저항 R_e 은 두 평판 사이의 유체 유동으로 가정하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R_e = \frac{12\eta L_e}{b_e h_e^3} \quad (4)$$

여기서, L_e 는 안쪽 실린더 길이, b_e 는 안쪽 실린더의 원둘레, h_e 는 두 실린더 사이의 간격이다. 전극갭 사이의 유체 질량으로 발생하는 유체관

성(I_e)은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$I_e = \frac{12\eta L}{bh^3} \quad (5)$$

가스 챔버에서 가스의 압축성으로 인해 발생하는 컴플라이언스(compliance)는 단열변화로 가정하여 선형화 시키면 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$C_g = \frac{\Delta V}{\Delta P} = -\left(\frac{dP}{dV}\bigg|_0\right)^{-1} = \frac{V_0}{P_0 n} \quad (6)$$

V_0 , P_0 는 초기 작동점에서의 가스 챔버의 부피와 압력, n 는 가스의 비열비이다.

전기장 부하시 ER유체의 전단응력 증가에 따른 압력강하(pressure drop)는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$\Delta P_{ER} = 2 \frac{L_e}{h_e} \tau_y(E) = 2 \frac{L_e}{h_e} \alpha E^x \quad (7)$$

따라서 댐퍼의 동적 지배 방정식은 Fig. 4에 도시된 본드 그래프로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{q}_1 = -A_r V_p \quad (8)$$

$$F_D = -\frac{A_r}{C_g} q_1 + (A_p - A_r)^2 [I_e V_p + R_e V_p] + (A_p - A_r) \text{sgn}(V_p) \Delta P_{ER} + Fr \quad (9)$$

여기서,

$$\text{sgn}(V_p) = \begin{cases} 1 & \text{if } V_p > 0 \\ 0 & \text{if } V_p = 0 \\ -1 & \text{if } V_p < 0 \end{cases}$$

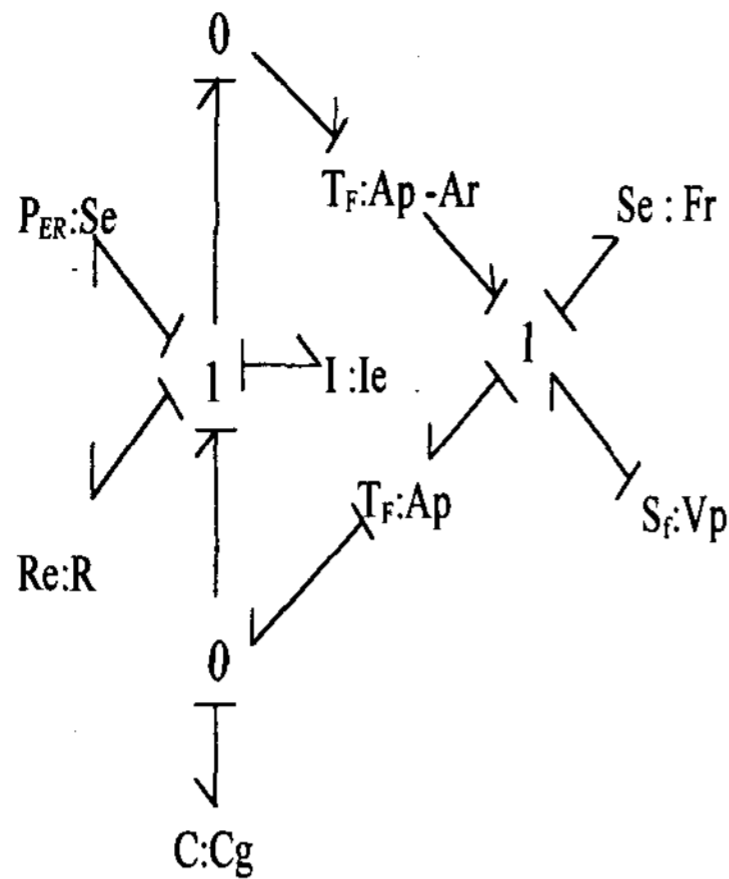


Fig. 4. Bond graph model of the ER damper

- q_1 : 하부 챔버의 부피
- F_D : ER댐퍼의 댐핑력
- F_r : Coulomb friction force
- V_p : 가진 속도
- A_r : 피스톤 로드의 단면적
- A_p : 피스톤 단면적

제안한 모델을 근거로 전극 간격등 각 설계변수에 따른 성능해석을 상기와 같이 수행한 후, 기존 승용차의 댐핑력과 유사하게 설계변수를 결정하였고, 그를 기반으로 전극길이 $L=190$ mm, 전극 갭 $h=0.75$ mm, 전극 너비 $b=120.95$ mm 로 설계 제작하였으며 시작품은 Fig. 5와 같다. ER댐퍼의 가스 챔버는 질소가스로 초기압력을 10 bar로 충전하였다. Fig. 6은 피스톤 속도의 변화에 따른 댐핑력을 측정된 결과이다. 이 실험에서 상용 Trek. 10/10 고전압증폭기를 사용하여 전원을 공급하였으며 각각의 속도에서 최대 댐핑력으로 측정하였다. 피스톤속도는 0.4 Hz의 가진에서부터 3.4 Hz까지 순차적으로 증가시키면서 시험하였고, 이때의 진폭은 ± 20 mm으로 일정하게 유지하였다. 보는바와 같이 전기장이 증가 할 수

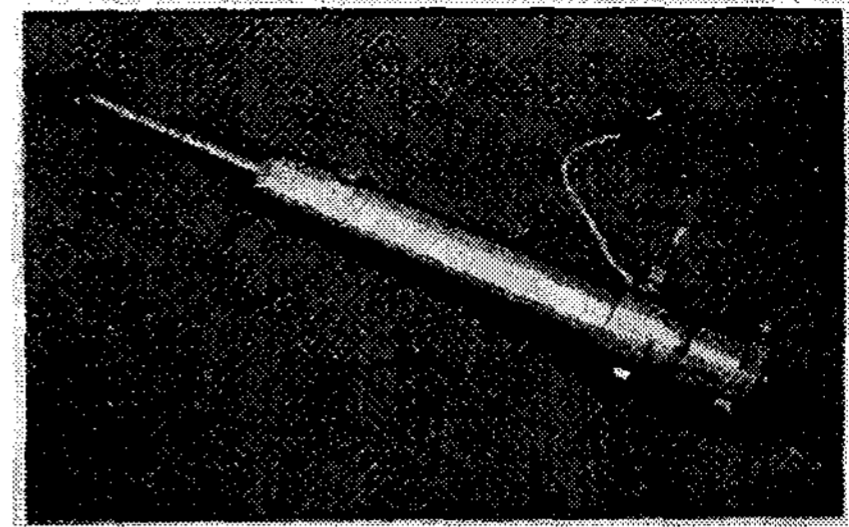


Fig. 5. Photograph of the ER damper

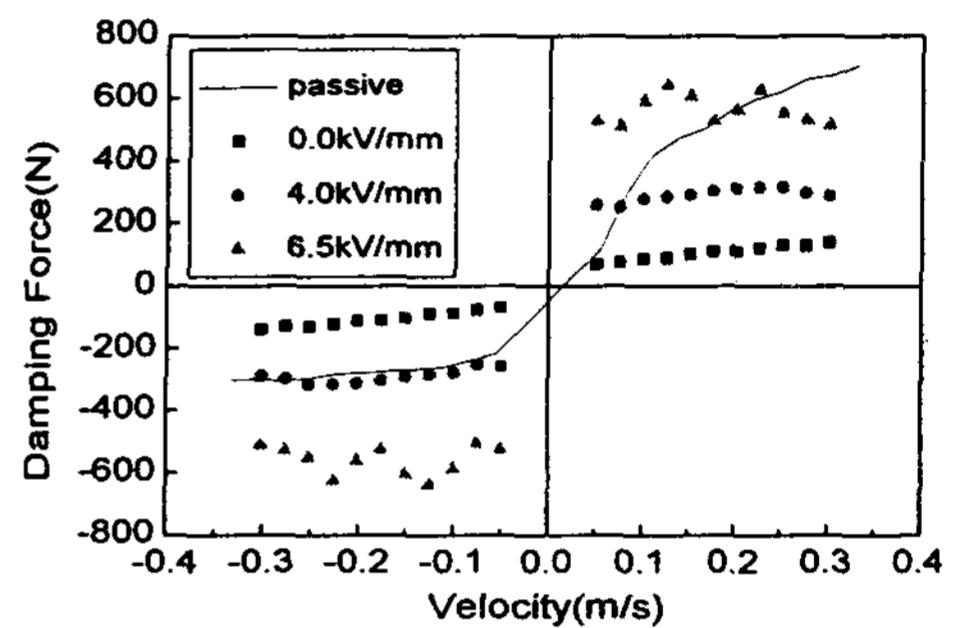


Fig. 6. Dampig force vs. piston velocity

록 댐핑력이 증가함을 볼 수 있으며 그 크기는 일반 수동식 댐퍼와 유사함을 알 수 있다.

4. 성능 시험 및 고찰

제안된 재생 에너지 ER댐퍼의 실험을 위하여 사용된 장치의 전체 구성도는 Fig. 7과 같다. 유압 서보 밸브(servo valve)을 이용하여 실제 승용차에서 발생하는 유사한 가진을 ER댐퍼에 주어 실험하였고, LVDT와 로드셀을 이용하여 각각 가진의 진폭과 댐핑력을 측정하였다. 측정된 결과는 A/D 컨버터를 통하여 컴퓨터에 저장하여 분석하였다. 본 재생 메커니즘으로 얻은 에너지를 고전압으로 변환시켜 ER댐퍼에 공급하였다. 댐퍼의 피스톤 왕복 직선운동은 랙 과 피니언을 이용하여 회전운동으로 변환시키고, 회전운동은 기어로 증폭시킨 후 AC 전기 에너지로 재생시킨다

Fig. 8은 댐퍼의 가진이 $\pm 20\text{mm}$ 의 진폭으로 운동할 때, 댐퍼의 가진과 제네레이터의 회전속도와 의 관계를 나타낸다. 회전운동은 기어로 약 6 배정도 증폭되어 제네레이터를 회전시켰으며, 댐퍼의 가진 진폭이 증가될수록 회전속도가 증가됨을 알 수 있다.

특히 자동차 현가 장치의 1st mode 고유 진동수 영역인 1.4 Hz에서 약 1300 rpm이 되었다. 그래프에서 직선이 아닌 곡선으로 나타난 이유는 재생 메커니즘 내에 크러치를 설치하여 왕복 직선운동을 한 방향 회전운동으로 변환시킬 때 발생하는 간헐적 동력 전달 때문이다.

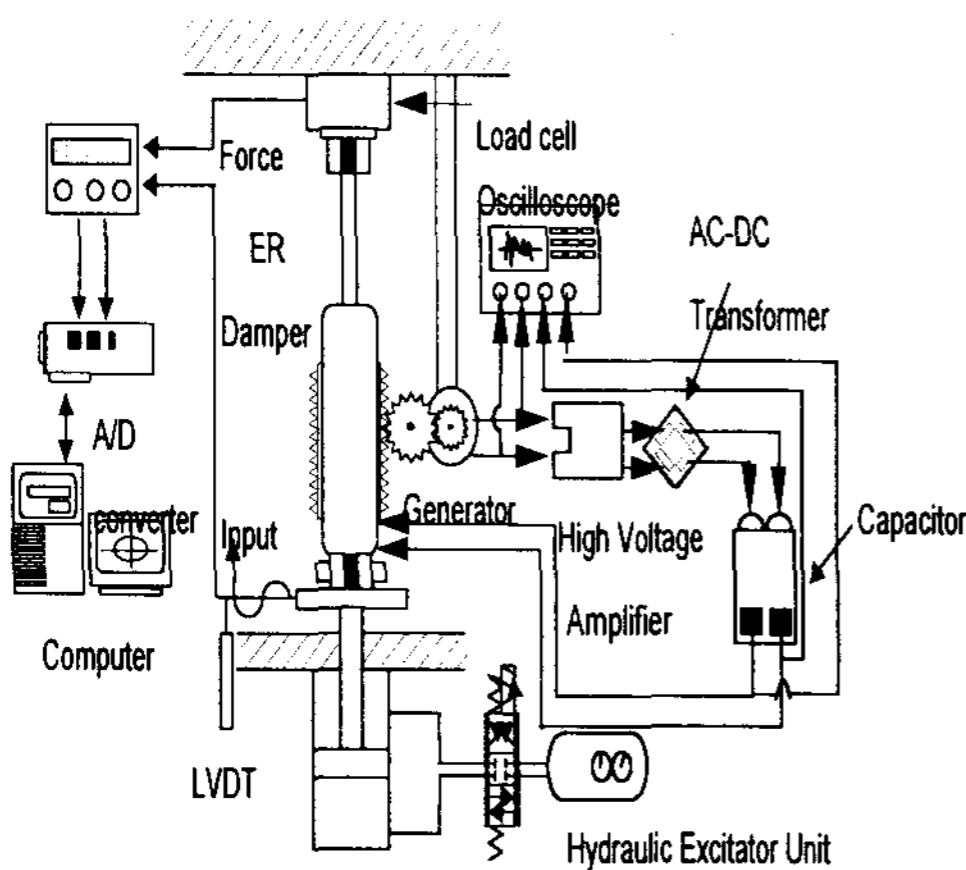


Fig. 7. Experimental apparatus

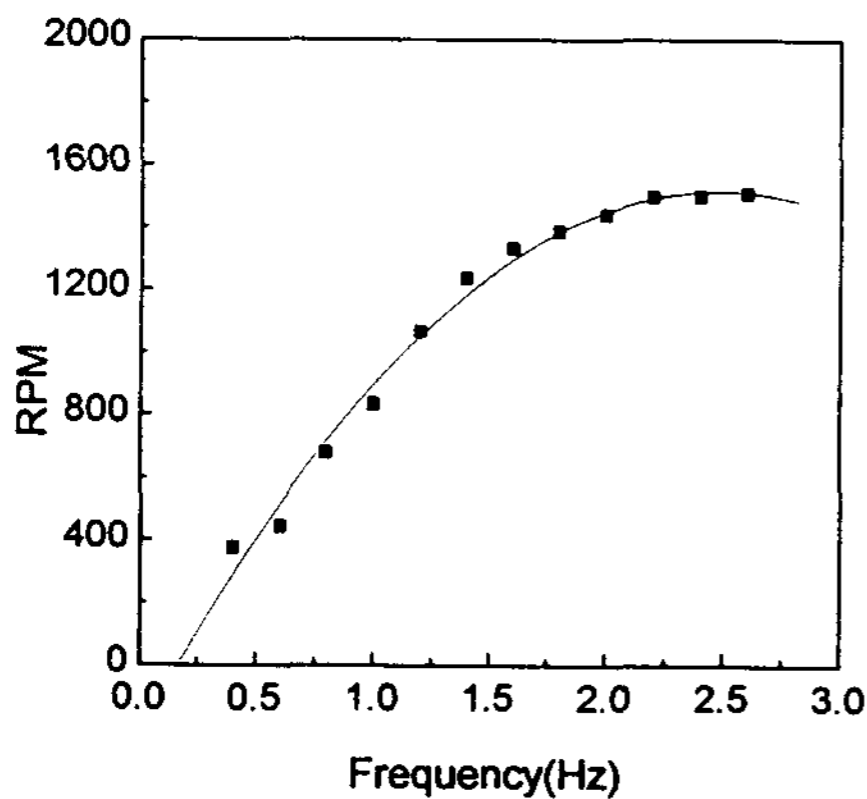


Fig. 8. Frequency vs. rpm of the generator

Fig. 9는 재생 메커니즘이 작동하는 동안에 제네레이터 회전 속도의 변화에 따른 재생된 에너지의 전압을 나타내며, 보이는 바와 같이 전압과 회전속도와의 관계는 직선과 유사하게 나타났으나 다소 편차가 큰 이유는 간헐적 동력 전달시 관성력에 의한 회전운동 때문으로 사료되며 15000 rpm에서 약 15V 정도 얻을 수 있었다.

Fig. 10은 피스톤 속도를 0.13 m/s로 일정하게 유지하며 왕복운동 했을 때, 피스톤의 진폭에 따른 재생된 에너지의 전압을 나타내며, 여기에서 재생된 전압은 피스톤 진폭에 비례하고 있다. 따라서 재생된 에너지의 양을 Fig. 11에 나타냈으며,

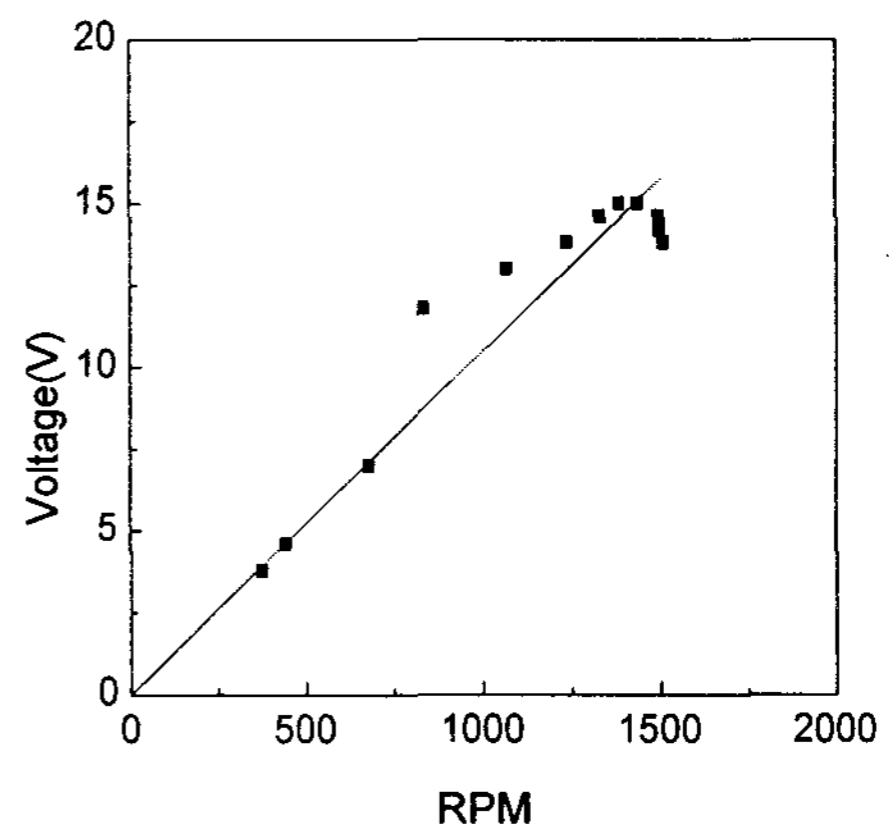


Fig. 9. Electric voltage vs. rpm of the generator

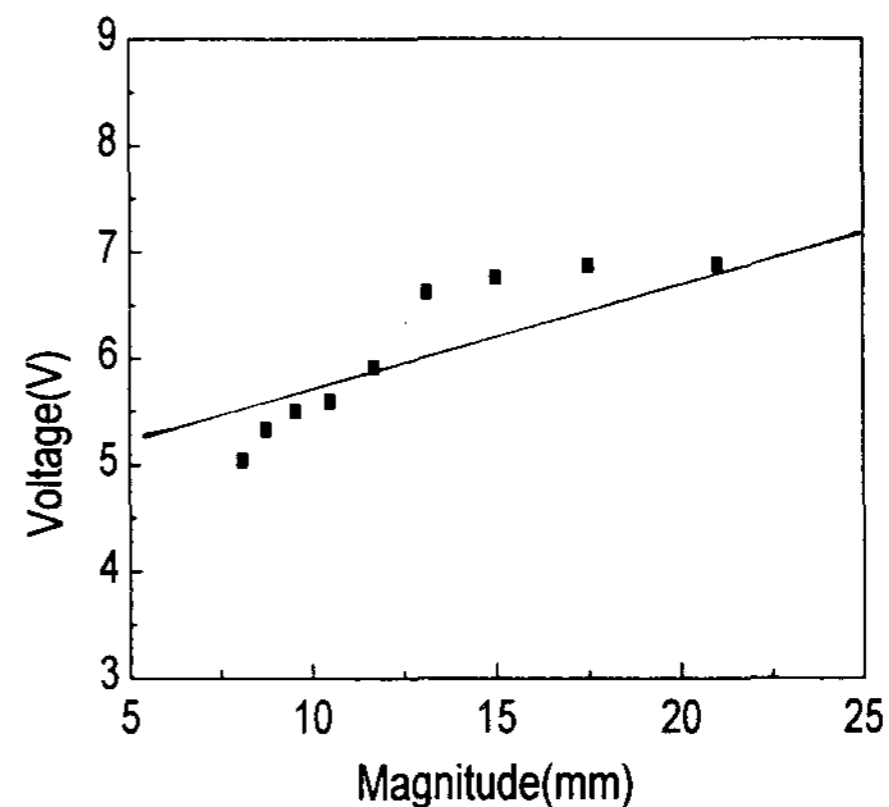


Fig. 10. Electric voltage vs. excitation magnitude

1500 rpm의 제네레타 속도에서 약 40 W 정도의 전기 에너지를 얻었다. 승용차용 ER댐퍼가 20 W 정도의 전력에서 작동하는 것을 고려하면, 결국 제안된 시스템으로부터 얻은 재생 에너지의 양은 ER댐퍼를 작동시키기에 충분한 수준임을 알 수 있다. 제네레타에서 발생된 전압은 자체 제작한 고전압장치에 의하여 증폭되고, 증폭된 AC 고전압은 다이오드 브리지 회로 및 축전지를 통하여 DC전원으로 변환시켰으며 Fig. 12는 제네레타 회전속도에 따른 증폭된 고전압의 크기를 나타낸다. 증폭된 고전압과 제네레타 속도와의 관계는 직선적으로 나타나는 것을 볼 수 있으며,

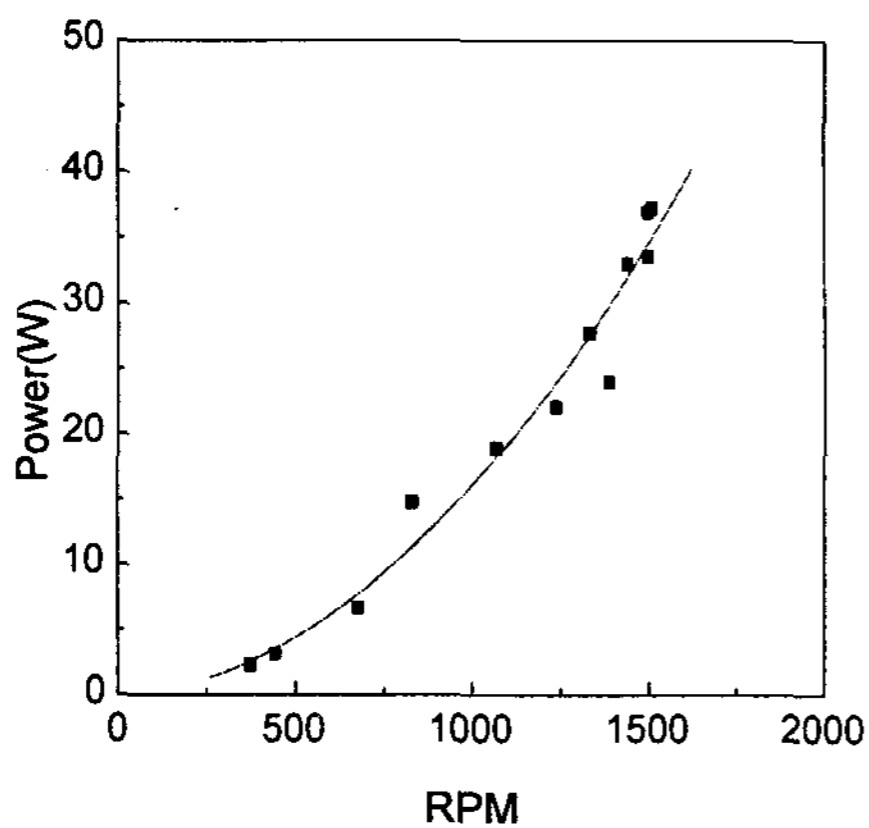


Fig. 11. Regenerated power

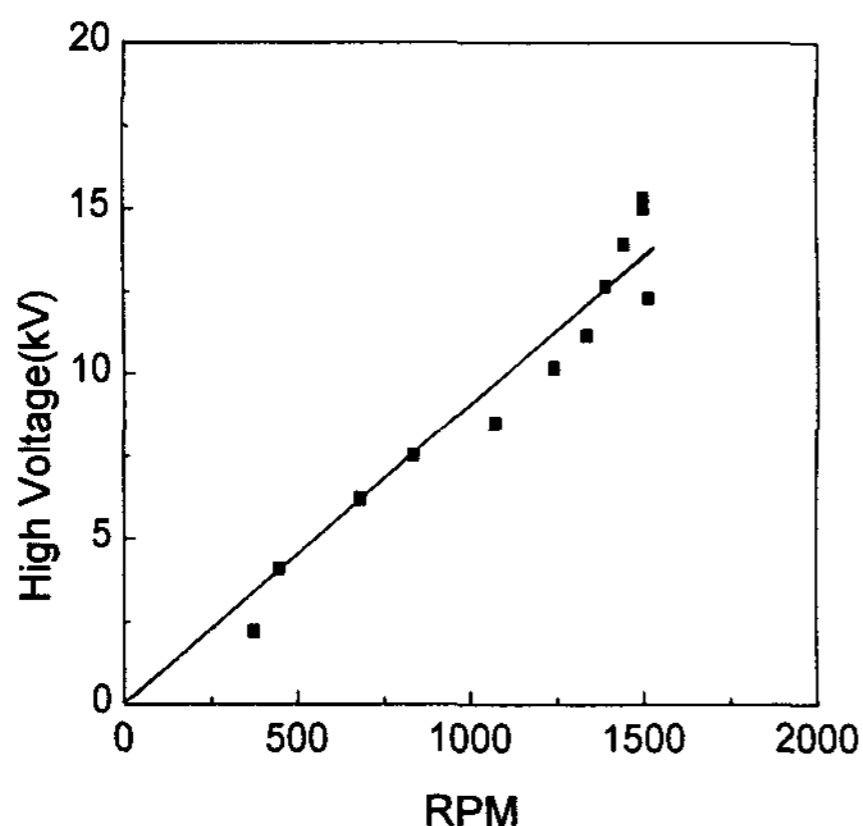


Fig. 12. Amplified high voltage

1300 rpm의 제네레타 회전속도에서 약 13 V의 전원이 발생 되었고, 이를 약 1000배 증폭한 12 KV의 최고치 고전압으로 변환 되었음을 알 수 있다.

Fig. 13은 재생 에너지로 얻어진 고전압을 ER댐퍼에 공급하여 시험한 결과이며 ER댐퍼의 피스톤 속도 변화에 따른 댐핑력을 나타낸다. 여기에서 ER댐퍼의 가진은 ± 20 mm으로 일정한 진폭으로 운동하도록 하였으며 속도를 0.4 Hz에서부터 3.0 Hz까지의 진폭변화를 주어 시험한 결과이다. 제안한 재생에너지 시스템의 효과를 관찰하기 위해서 전기장을 공급하지 않은 경우의 댐핑력과 재생에너지를 사용하여 얻은 댐핑력을 비교 하였으며 그 결과 피스톤 속도가 증가함에 따라 댐핑력이 증가하였으며 특히 이 두 경우의 댐핑력 차이폭(bandwidth)은 피스톤 속도의 증가에 따라 크게 벌어짐을 알 수 있다. 그 이유는 속도 증가에 따라 재생에너지의 증가로 댐퍼내에 있는 ER유체에 더 높은 고전압을 공급하기 때문이다. 그림에서 피스톤 펌프 속도가 0.3 m/s일 때 무부하 전기장 일 경우 댐핑력이 150 N이던 것이 재생에너지 메커니즘을 적용하였을 경우 약 700 N으로 증가되어 550 N의 댐핑력 차이 폭을 형성 하였으며, 이 폭은 전기장의 크기를 조절함에 따

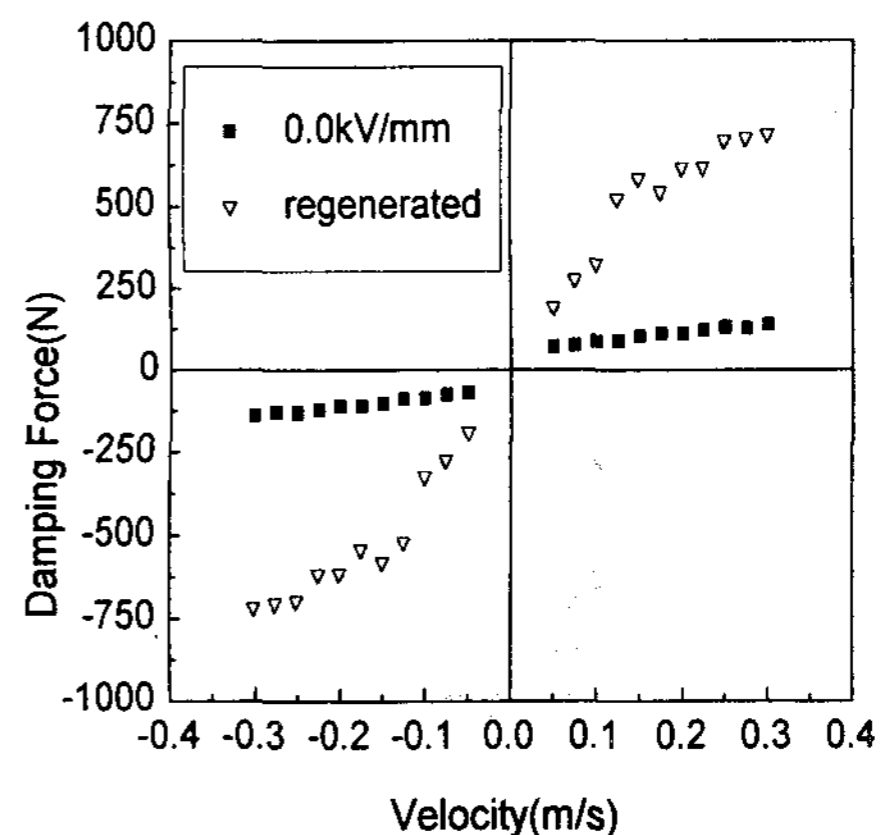


Fig. 13. Damping force vs. piston velocity

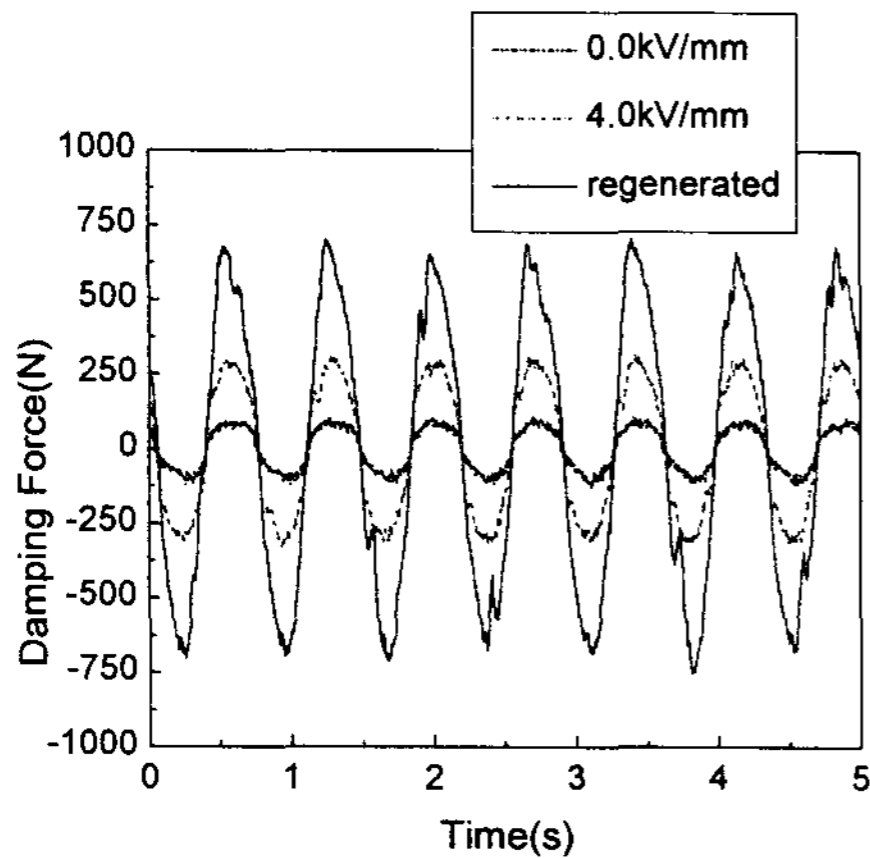


Fig. 14. Damping forces in time domain

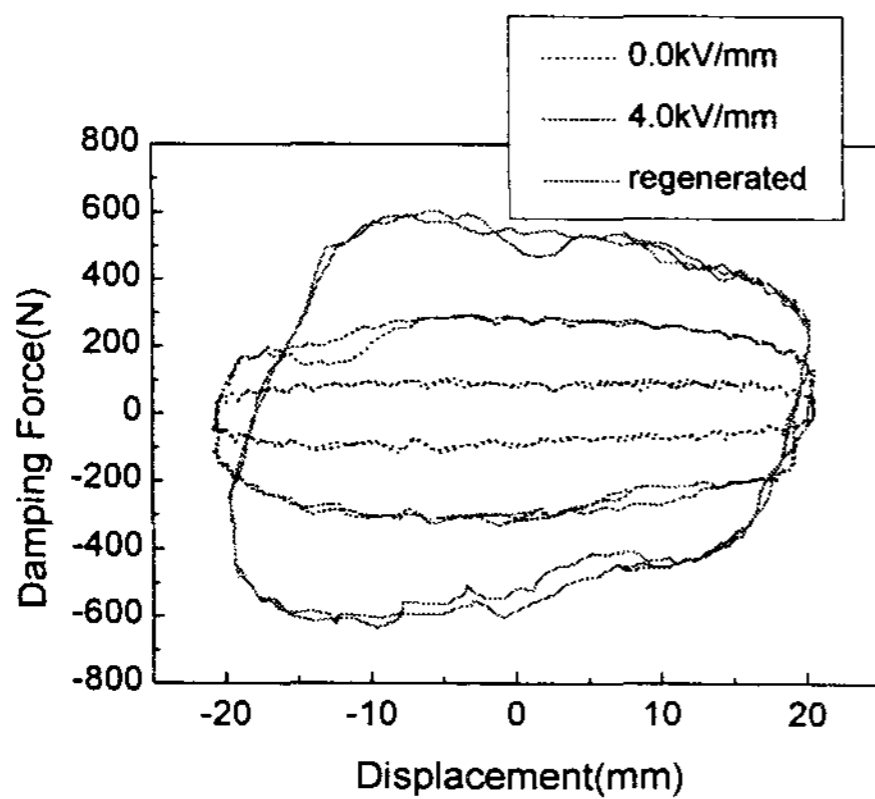


Fig. 15. Damping forces vs. piston displacement

라 현가 장치의 안전성을 제어할 수 있는 영역의 폭을 의미한다. 따라서 제안된 재생 에너지 시스템에서 얻은 에너지로 ER댐퍼를 충분히 제어할 수 있다는 가능성을 보였다.

Fig. 14에 댐핑력의 시간 히스토리를 나타냈으며, 재생에너지의 공급에 의해 얻은 댐핑력은 상업화된 범용 고전압 증폭장치로부터 4 kV/mm 일정하게 공급하여 얻은 댐핑력보다 더 높게 나타났다. Fig. 15는 댐핑력과 피스톤 이동거리와의 관계를 나타낸다. 전기를 가하지 않았을 때 댐핑

력은 적었으나 재생된 전기장을 가했을 때는 크게 나타났으며 그의 면적도 증가함을 보였다. 여기에서 면적의 증가는 사이클이 진행되는 동안에 에너지 분산을 의미한다. 만일 전기장을 공급함이 없이 오직 점도 댐핑력만 존재한다면, 그 커브의 형태는 낮은 진동에서 타원형이 될 것이다. 그러나 전기장을 부하 하였을 경우는 커브의 형태가 원형에 접근하는 쪽으로 바뀐다. 이것은 적용된 전기장의 크기에 따라 ER유체의 항복 응력이 증가함을 뜻한다. 따라서 ER댐퍼를 위한 재생 메커니즘은 매우 효과적이고 실지 환경에 적용될 수 있음을 보였다.

4. 결 론

이 논문에서는 안정된 댐핑력을 얻을 목적으로 ER유체에 필요한 전기장을 발생할 수 있는 재생 에너지 메커니즘을 포함하는 ER댐퍼를 제안 하였다. 외부 가진으로부터 발생하는 직선운동을 랙과 피니언을 통해서 회전운동으로 변화시키고 기어 메커니즘을 통해서 회전속도로 증폭시켰다. 실험 결과, 제네레타에서 생성된 재생 에너지는 댐핑력을 제어시킬 수 있는 충분한 전기장의 크기 임을 보였다. 이것은 외부의 에너지 공급 없이도 재생에너지만으로 승용차용 semi-active ER댐퍼의 제어가능성을 확인하였다. 마지막으로 제안된 메커니즘의 성능 시험을 통하여 향후 연구될 재생 에너지 메커니즘을 ER현가 장치에 적용시키기 위한 기반을 구축하였다.

후 기

이 논문은 1996년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. N. K. Petek, D. J. Romstadt, M. B. Lizell, T. R. Weyenberg, SAE Technical Paper, 950586, 1995
2. S. Morishita, "Adaptive Vibration Control System with Controllable Dynamic Damper", J. JSME, Vol.58, pp.1748~1754, 1991
3. S. B. Choi, Y. T. Choi, E. G. Chang, S. J. Han and C. S. Kim, Mechatronics.
4. D. A. Brooks, "Devices Using Electro-Rheological Fluids", Proceeding of the Second International Conference on ER Fluids, pp.371~401, 1990
5. 김기선, 장유진, 최승복, 정재천, 서문석, 여문수, "승용차용 연속가변 ER댐퍼의 성능연구", 한국 자동차공학회 논문집, 제 3권 6호, pp.69~77, 1995
6. M. Sturk, X. M. Wu and J. Y. Wong, "Development and Evaluation of a High Voltage Supply Unit for Electrorheological Fluid Dampers", Vehicle System Dynamics, Vol.24, pp.101~121, 1995
7. Y. Suda, T. Shiiba, Proceedings of the 6th Asia-Pacific Vibration Conference, pp137~142, 1995
8. M. G. Fodor, R. C. Redfield, Proceedings of American Control Conference, pp26~30, 1,1992
9. H. Block, J. P. Kelly, "Electro-Rheology", J. Phys. D:Appl. Phys., Vol.21, pp.1661~1676, 1988
10. T. C. Jordan, M. T. Shaw, "Electrorheology", IEEE Transactions on Electrical Insulations Vol.24, No.5, pp.849~872, 1989
11. K. S. Kim, S. B. Choi, C. C. Cheong, M. S. Suh, "A Semi-Active Suspension System Featuring Electro-Rheological Fluid-Based Dampers", The 6th Asia-Pacific Vibration Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 1995