

〈논 문〉 SAE NO. 953781

승용차용 연속가변 ER댐퍼의 성능연구

Performance Investigation of a Continuously Variable ER Damper for Passenger Vehicles

김 기 선,* 장 유 진,** 최 승 복,** 정 재 천,** 서 문 석,*** 여 문 수***
K. S. Kim, E. Chang, S. B. Choi, C. C. Cheong, M. S. Suh, M. S. Yeo

ABSTRACT

This paper presents performance investigation of a continuously variable ER(Electro-Rheological) damper for passenger vehicles. A dynamic model of the damper is formulated by incorporating electric field-dependent Bingham properties of the ER fluid. The Bingham properties are experimentally obtained through Couette type electroviscous measurement with respect to two different particle concentrations. The governing equation of the hydraulic model treating three components of fluid resistances; electrode duct flow, check valve flow and piston gap flow, is achieved via the bond graph method. A prototype ER damper is then designed and manufactured on the basis of parameter analysis. The damping forces of the system are experimentally evaluated by changing the intensity of the electric field, the particle concentration and the electrode gap.

주요기술용어 : Electro-Rheological Fluid(전기유동유체), Variable ER Damper(가변 ER댐퍼), Damping Force(댐핑력), Pressure Drop(압력 강하), Bond Graph Method(본드 그래프 방법)

1. 서 론

최근 승용차의 주행 안전성과 승차감의 향상을 위하여 현가장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현가장치는 승용차 주행시 노면의 굴곡으

로 인하여 발생하는 가진이 차체에 전달되는 것을 완화시키는 장치로 제어방식에 따라 수동식, 반능동식 그리고 능동식으로 분류할 수 있다.

수동식 현가장치는 구성장치가 단순하고 저가 이나 스프링과 단일 감쇠특성을 갖는 댐퍼만으로 시스템이 구성되기 때문에 설계시 고려되지 않은 가진에 대하여 성능이 저하된다. 능동식 현가장치는 유공압 및 전기적 힘으로 기계 메카니즘을 작동시켜 적합한 감쇠조건으로 가변하며 제어기

* 천안공업전문대학 기계과
** 정희원, 인하대학교 기계공학과
*** 국방과학연구소

의 설계에 따라 높은 성능을 얻을 수 있는 반면 장치가 매우 복잡하고 고가이다. 따라서 기존의 수동식 현가장치와 동일한 형식을 갖으면서 직접적인 에너지를 공급하는 능동형과는 달리 순간적 운동 상태에 대하여 에너지 분산율을 변화시키는 반능동식 현가장치가 1974년 Karnopp에 의하여 제안되었다¹⁾. 이에대한 연구의 일환으로 최근 기존 댐퍼의 댐핑계수를 주행 조건에 따라 조정하여 댐핑력을 가변 하는 방식의 반능동형 현가장치가 활발히 연구되고 있으며 제품에도 응용되고 있다. 반능동형 현가장치는 에너지의 소모가 적고 시스템이 안정적인 장점이 있으나 기계적인 장치 등을 구동하여 현가장치의 강성이나 댐핑력을 조절하는 경우 시스템의 응답속도가 느리게 되고 장치 또한 복잡해진다. 현재까지 대부분의 반능동식 현가장치는 댐퍼의 댐핑력을 가변하는 형식으로 메카니즘이 복잡하고 구동 반응 속도가 느리며 감쇠특성도 몇 단계로 제한된다.

이러한 반능동식 현가장치가 갖는 문제점을 해결하기 위하여 몇몇 선진국에서는 전자제어 시스템과 연계하여 스마트 재료인 전기유동유체(이하 ER(Electro-Rheological)유체라 칭함)를 댐퍼에 적용시키고자 하는 연구가 시도되고 있다.²⁾

³⁾ ER유체를 이용한 댐퍼는 소비전력이 수 와트(watt)수준이고 전기장 강도의 변화만으로 시스템의 강성과 댐핑을 변화시킬 수 있으며, 수 밀리초(ms)의 빠른 반응 속도로 실시간 연속제어가 가능한 특징이 있다.^{4),7)} 또한 기계적으로 오피스를 조절하는 기존의 방식에 비하여 기계적 운동 부분이 없어 장치의 단순화가 가능하다. 따라서 반능동형 현가장치에 ER유체를 작동유체로 한 연속가변 ER댐퍼(이하 ER댐퍼라 칭함)를 사용할 경우 능동형 현가장치에 가까운 우수한 성능을 달성할 수 있다. 그러나 지금까지 ER댐퍼의 실용화는 전세계적으로 이루어지고 있지 않다. 상용화를 위해 가장 시급히 해결되어야 할 문제는 둘로 나눌 수 있다. ER효과가 우수하며 유체의 안정성이 뛰어난 ER유체 자체개발과 ER댐퍼 시스템의 체계적이고 논리적인 모델링 및 설계변수에 대한 심도 있는 성능특성연구이다. 기존 ER댐퍼에 관한 대부분의 연구에 있어

서는 ER효과에 따른 댐핑력변화 고찰에만 중점을 두었을 뿐 ER댐퍼를 구성하고 있는 ER유체 입자의 중량비(particle concentration) 그리고 전극 간격(electrode gap) 등에 따른 시스템 성능해석은 수행되지 않았다. 또한 ER댐퍼의 수학적 모델링에 관한 연구도 전기장에 따른 압력강하식만 고려하였을 뿐 매우 미진한 상태이다.

이에 본 논문에서는 연속적으로 댐핑력을 가변할 수 있는 ER댐퍼를 제안하여 이론적 모델을 구성하고, 전기장에 따른 ER유체의 빙햄(Bingham)거동 특성과 연계된 지배 방정식을 본드 그래프 방법(bond graph method)으로 도출하였다. 이를 위해 먼저, 사용된 ER유체의 빙햄 거동 특성을 Couette형 상용 점도계를 사용하여 실험하였고, 여기서 측정된 항복응력값을 ER댐퍼의 지배 방정식에 도입하여 시스템 성능을 해석하였다. 제안된 모델의 변수해석 결과를 근거로 ER댐퍼를 설계 및 제작하였으며, 댐핑력의 크기는 소형 승용차의 댐퍼수준으로 설정하였다. 전기장 강도에 따른 ER댐퍼의 성능을 시험하였고, 성능시험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 그리고 사용된 ER유체의 입자 중량비와 전극 간격의 변화에 따른 ER댐퍼의 성능변화를 고찰하였다.

2. ER유체의 Bingham 특성

ER유체는 부하 되는 전기장의 강도에 따라 그 역학적 거동특성이 변하는 유체를 총칭하는 것으로서, 기본적으로 비전도성의용매 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.⁸⁾ ER유체의 전기유동효과 발현에 대한 메카니즘을 보면 비전도성의 용매에 분산된 입자는 용매와 다른 투과율(permittivity)을 갖고 있으며 외부에서 부하 되는 전기장에 의하여 입자에 분극이 발생되어 국부적으로 다른 전기장을 형성하게 되고, 분극이 발생한 입자들

이 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 은 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.

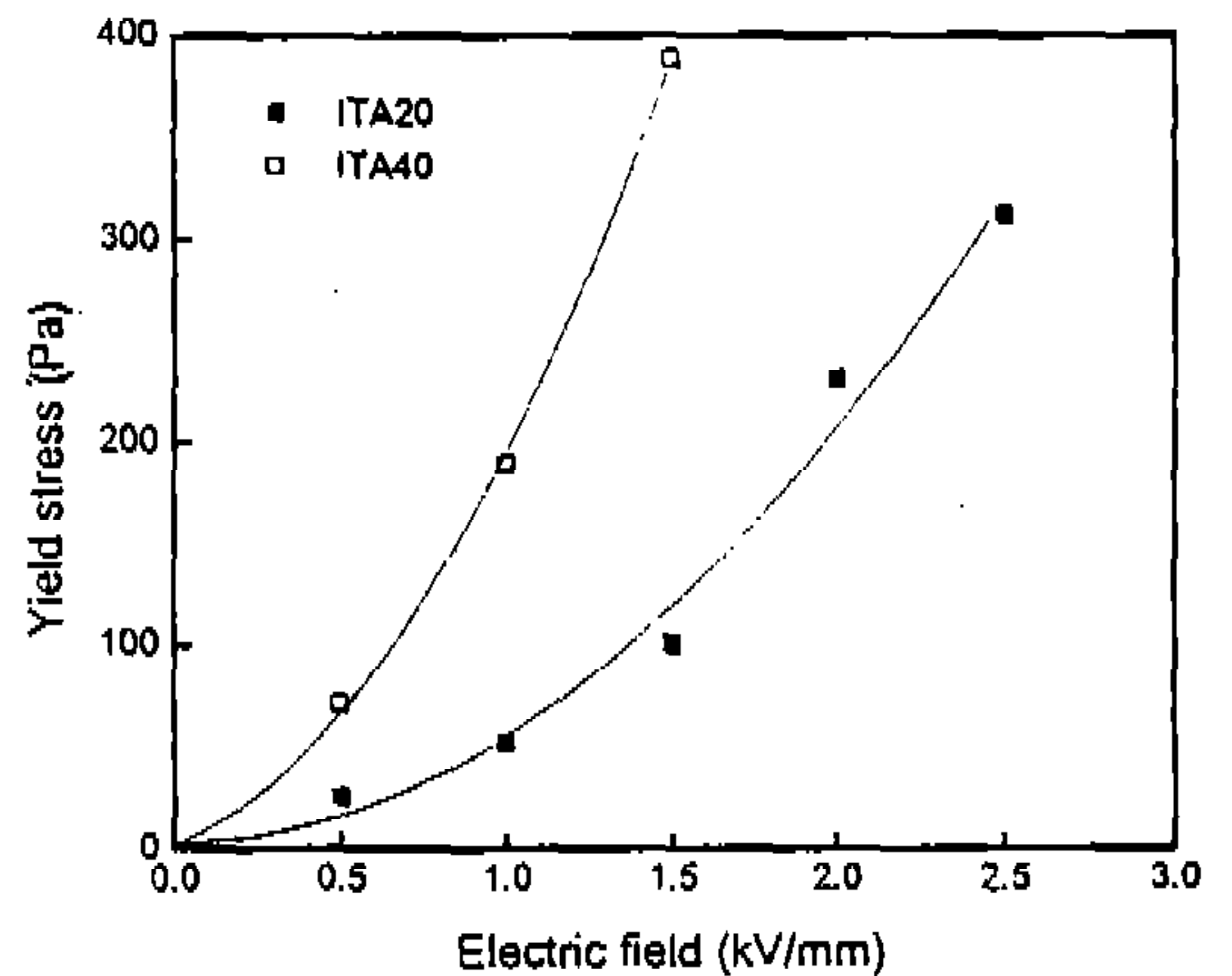
ER유체의 항복응력은 유체가 유동을 일으키는 순간의 전단응력을 나타내는데, 유체의 유동은 매우 짧은 시간에 시작되고 또한 복잡한 거동을 하기 때문에 항복응력을 정확히 측정하기 어렵다. 따라서 많은 연구자들은 전단속도비를 변화시켜 구한 전단응력 값을 직선보간 한 후 전단속도비의 값이 영(zero)인 부근에서의 절편 값을 항복응력으로 고려하여 이를 동적 항복응력이라 칭하며, 일반적으로 동적 항복응력 값이 ER유체의 항복응력으로서 취급된다.⁹⁾ ER유체의 항복응력은 전기장 E 의 크기에 대하여 지수함수의 관계를 갖으며, 이로부터 식(1)을 다시 쓰면 다음과 같다.

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

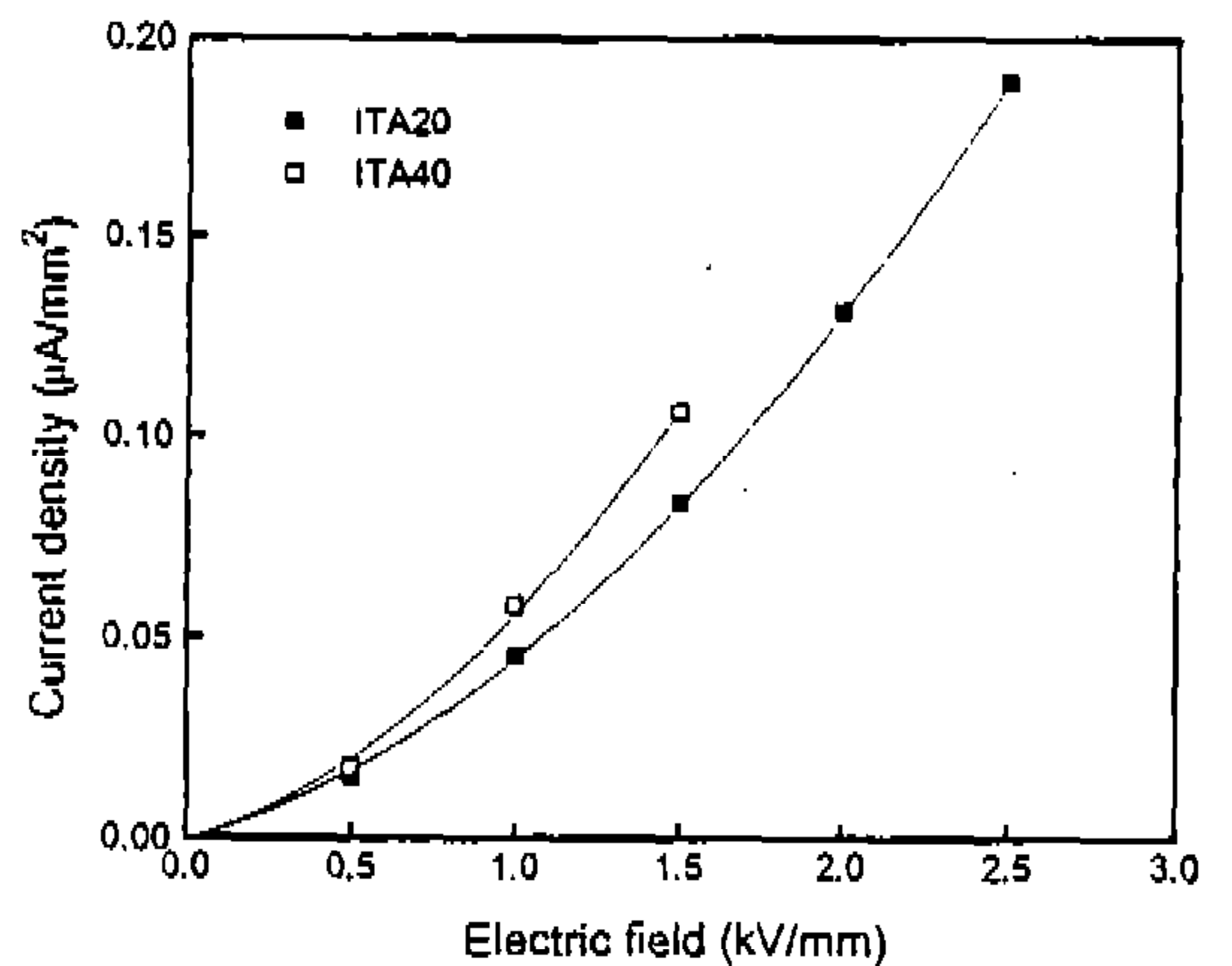
여기서 상수 α , χ 는 ER유체의 용매 종류, 용매의 점도, 입자 종류, 입자의 중량비, 입자의 크기 및 모양, 입자의 수분함량 그리고 ER유체의 사용 온도 등 ER유체의 조성 조건에 따라 달라지는 ER유체의 고유치이다.

Fig.1(a)는 본 연구에서 사용된 트랜스포모계

ITA20(입자 중량비 20%) ER유체와 ITA40(입자 중량비 40%) ER유체의 전기장 강도에 따른 항복응력을 나타내며, 이 값은 상용 점도계(HAAKE VT500)를 사용하여 측정된 것이다. 도시된 바와 같이 전기장 강도가 증가할 수록 항복응력의 값은 지수 함수적으로 증가하며, 입자 중량비가 클 수록 높은 항복응력을 보인다. ITA20 유체와 ITA40 유체의 상수 α , χ 는 각각 64.49, 1.61과 201.10, 1.53으로 도출되었다. 따라서 전기장 E 에 의하여 발생하는 ITA20 유체와 ITA40 유체의 항복응력(τ_y)은 $64.49E^{1.61}$ Pa과 $201.10E^{1.53}$ Pa의 관계식으로 표현된다. Fig.1



(a) yield stress



(b) current density

Fig.1 Bingham properties of employed ER fluids

$$R_i = \frac{12\eta L_i}{bh_i^3} \quad (5)$$

여기서, L_i 는 안쪽 실린더 길이, b_i 는 안쪽 실린더의 원둘레, h_i 는 두 실린더 사이의 간격이고, L_e 는 피스톤의 길이, b_e 는 피스톤의 원둘레, h_e 는 피스톤과 안쪽 실린더 사이의 간격이다.

체크 밸브로 인한 유체 저항 R_i 는 유체 유량에 의존하며 비선형 관계로 표현된다. 따라서 이것을 작은 유량차일 때로 가정하여 작동점에서 선형화 시키면 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$R_i = \left. \frac{dP}{dQ} \right|_0 = \frac{\rho c Q_0}{A_i^2} \quad (6)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도, c 는 유체의 저항 계수, Q_0 는 작동점에서의 유체 유량, A_i 는 체크밸브의 유로 단면적을 나타낸다.

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

$$C_e = \frac{\Delta V}{\Delta P} = - \left(\left. \frac{dP}{dV} \right|_0 \right)^{-1} = \frac{V_0}{P_0 n} \quad (7)$$

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

전기장 부하시 ER유체의 전단응력 증가에 따

른 압력강하(pressure drop)는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta P_{ER} = 2 \frac{L_e}{h_e} \tau_s(E) = 2 \frac{L_e}{h_e} a E^x \quad (8)$$

따라서 ER댐퍼의 동적 지배 방정식은 Fig.3에 도시된 본드 그래프로부터 다음과 같이 구할 수 있다.^{10)~12)}

$$\dot{q}_1 = A_r V_p \quad (9)$$

$$F_D = \frac{A_r}{C_e} q_1 + \frac{R_i}{R_e + R_i} [(A_p - A_r)^2 R_e V_p + (A_p - A_r) \text{sgn}(V_p) \Delta P_{ER}] \quad (10)$$

$$\text{여기서, } R_i = \frac{R_e R_i}{R_e + R_i}$$

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

- q_1 : 하부 챔버의 부피
- F_D : ER 댐퍼의 댐핑력
- V_p : 가진 속도
- A_r : 피스톤 로드 단면적
- A_p : 피스톤 단면적

제안한 모델을 근거로 전극 간격등 각 설계변

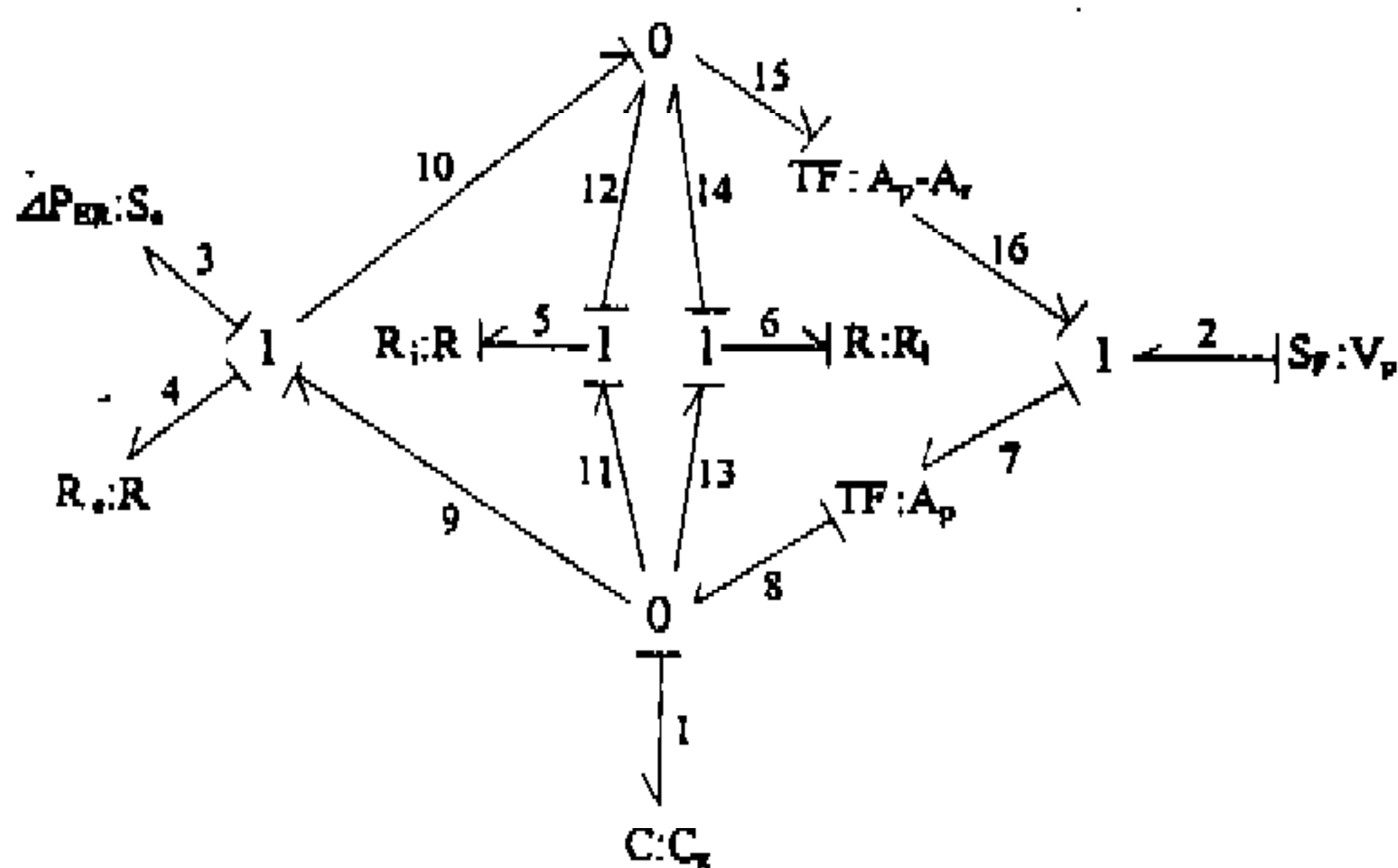


Fig.3 Bond graph model of the ER damper

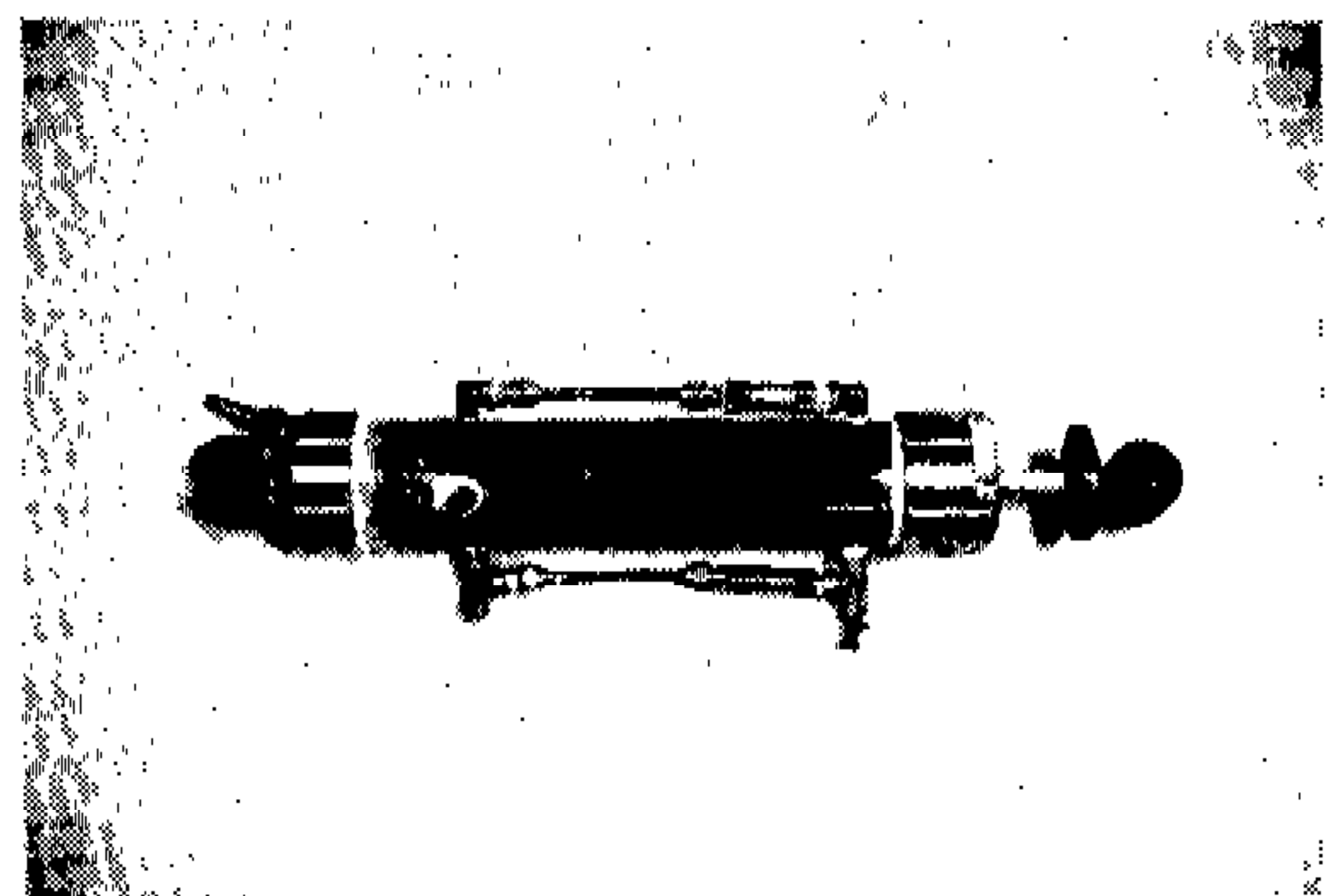


Fig.4 Photograph of the prototype ER damper

수에 따른 성능해석을 수행한 후 ER댐퍼 시제품을 Fig.4와 같이 제작하였다. 댐핑력의 크기는 소형 승용차용 댐퍼를 기준으로 설계하였다. 일반적으로 승용차용 댐퍼의 경우에 기능상 압축될 때 인장시 보다 적은 댐핑력이 요구되는데, 이런 특성을 고려하여 본 ER댐퍼의 양쪽에 체크 밸브를 설치하여 작동 유량을 조절하였다. ER댐퍼의 가스 챔버는 질소가스로 충전하였다.

4. 성능 시험 및 결과 고찰

전기장 강도에 따른 ER댐퍼의 댐핑력을 측정하기 위하여 Fig.5와 같은 시험 장치를 구성하였다. 시험 장치는 크게 ER댐퍼와 고전압 공급장치 그리고 가진부로 구성된다. 가진부의 변위와 댐핑력을 신호 분석기에서 동시에 측정하여 저장하였고, 가진부의 변위 데이터를 미분하여 가진 속도를 구한 다음 ER댐퍼의 피스톤 로드 속도에 대한 댐핑력의 그래프를 구하였다. 유압 실린더의 가진은 근접 스위치로 가진 변위를 제한하며, 유량조절 밸브로 가진 속도를 조절하였다. ER댐퍼에 사용된 ER유체의 조성과 환형 유로의 간격을 변화시키며 전기장 강도의 변화에 따른 댐핑력을 측정하였다.

Fig.6은 ER댐퍼의 성능시험 결과와 모델로부터 얻은 해석 결과를 비교한 것이다. 사용된 ER

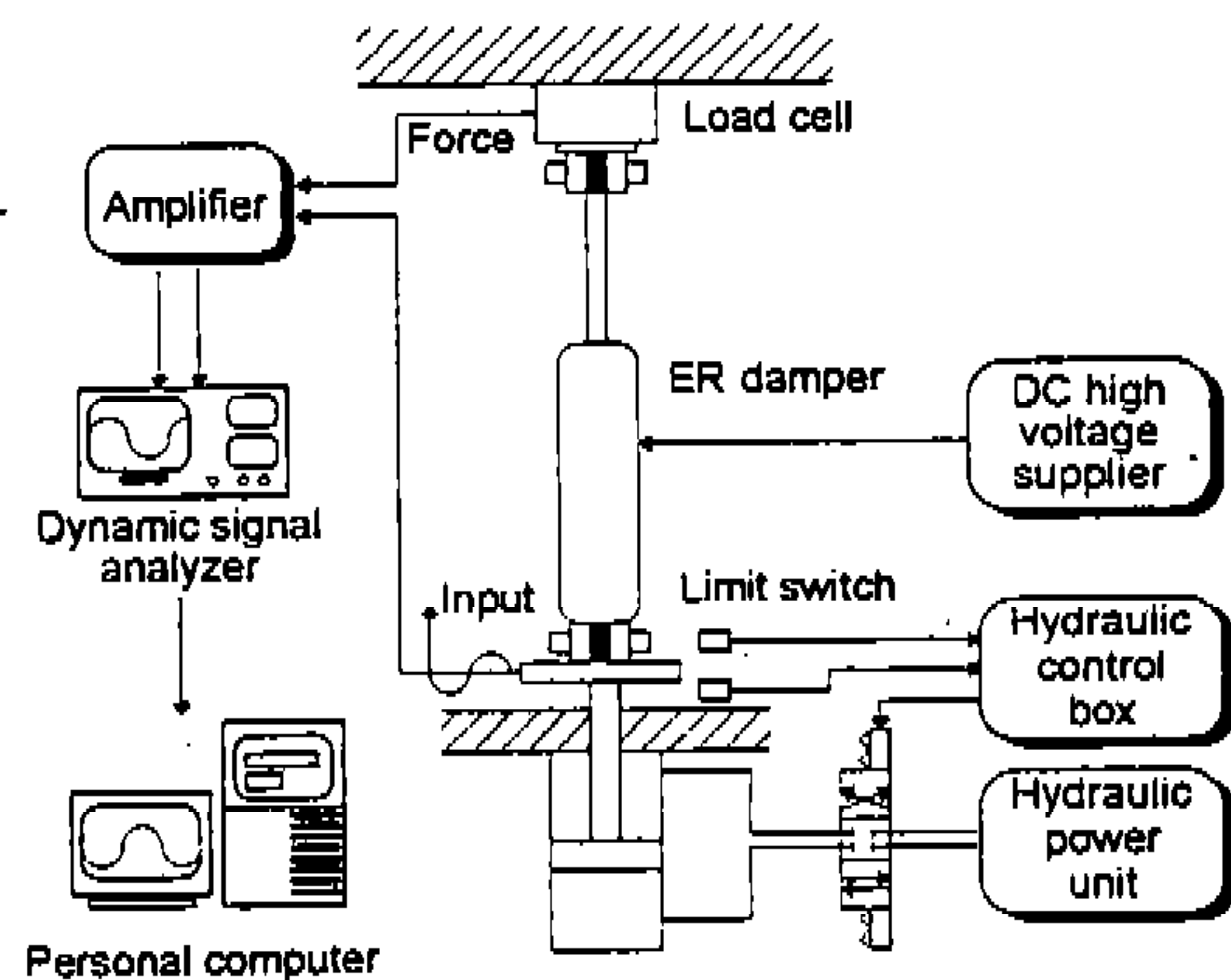
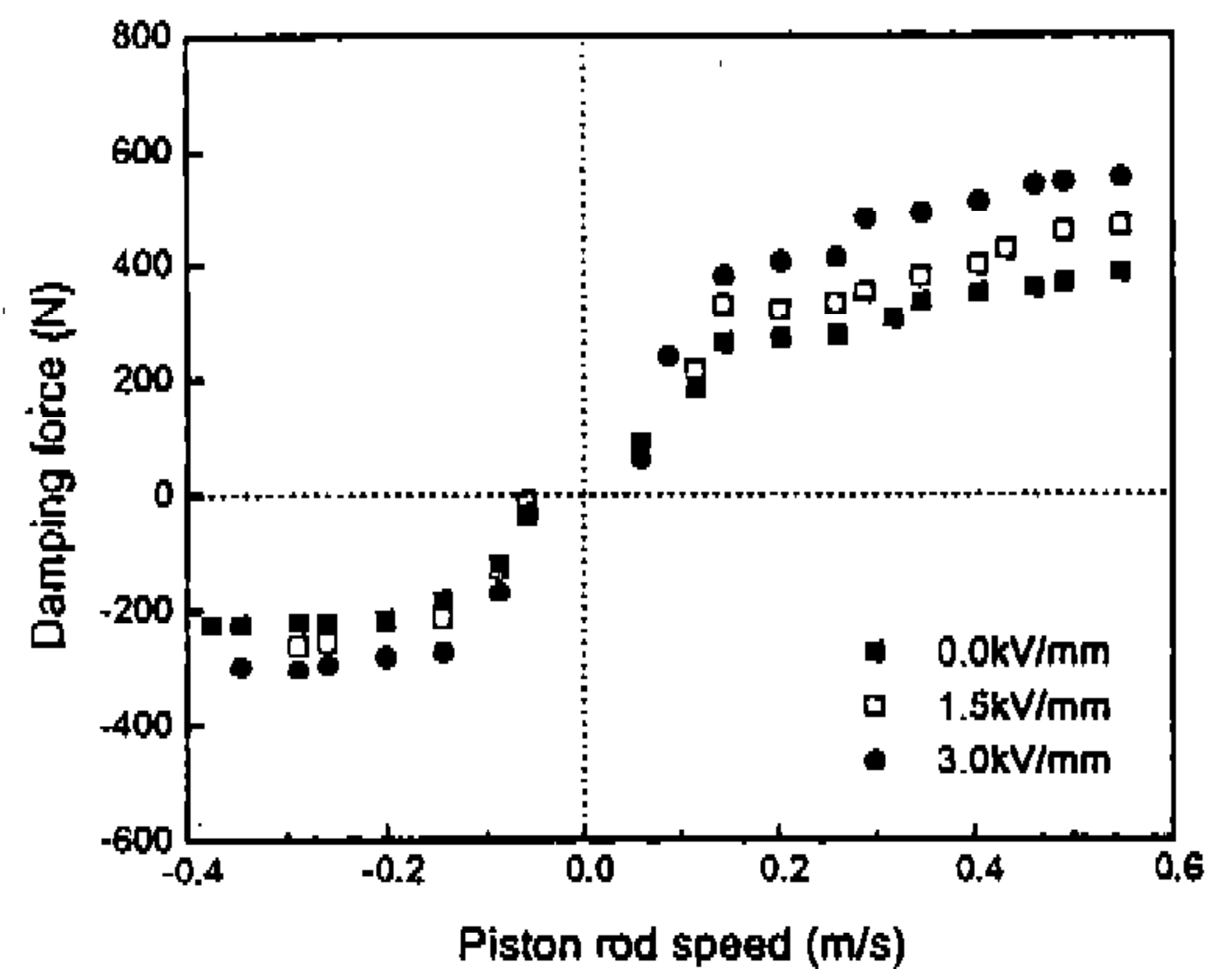
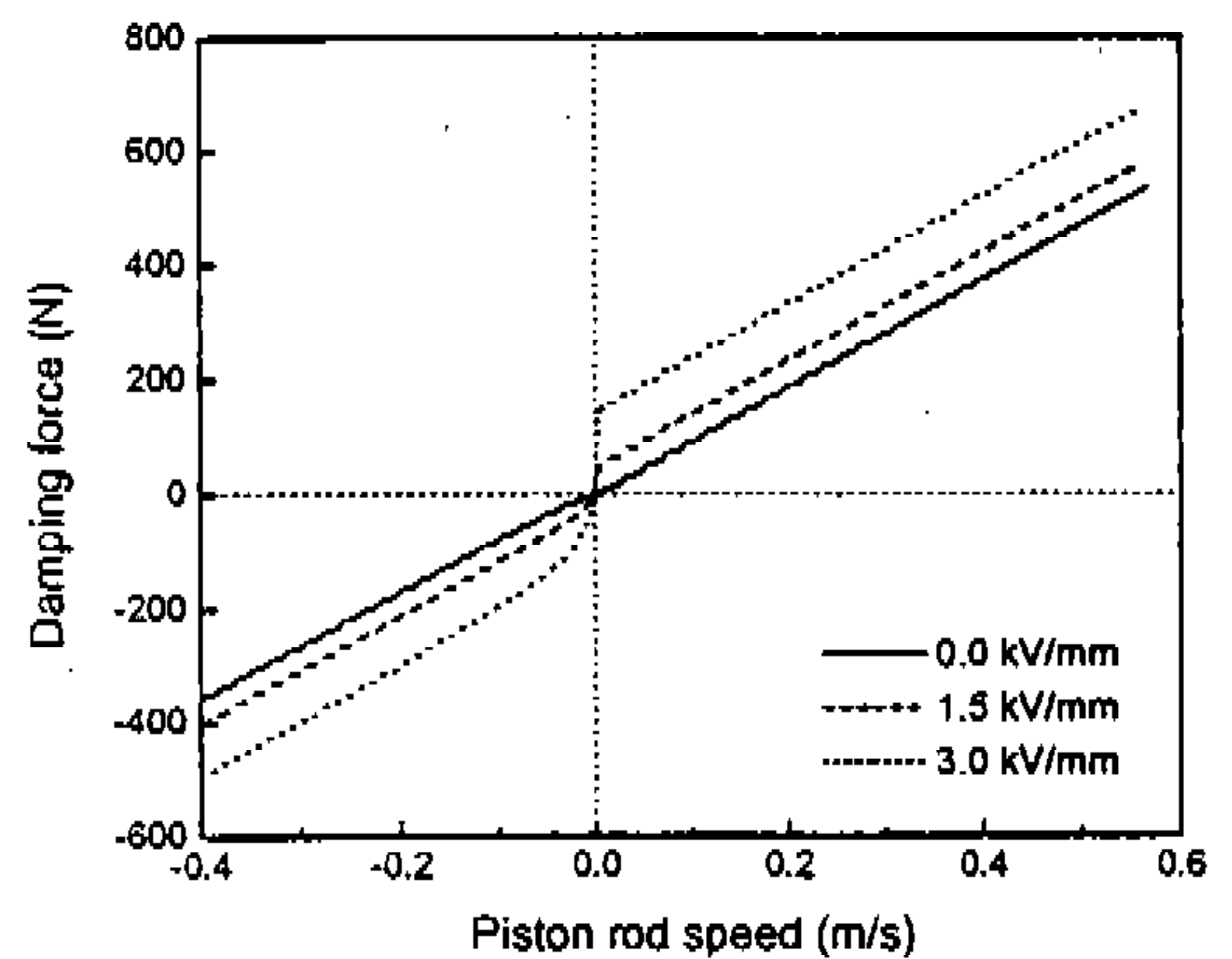


Fig.5 Schematic configuration for damping force measurement

유체는 ITA20 유체이고, 전극 간격은 0.75mm이다. ER댐퍼가 리바운드 운동을 할 때 발생하는 댐핑력, 즉 인장에 저항할 때 댐핑력을 (+)값으로 표현하여 그래프의 1사분면에 나타내었다. 반대 방향인 자운스 운동일 때, 즉 압축에 저항하는 댐핑력을 (-)값으로 표현하여 3사분면에 나타내었다. Fig.6(a)으로부터 리바운드 운동일 때의 댐핑력이 자운스 운동일 때의 댐핑력보다 큰 것을 볼 수 있는데, 이것은 체크 밸브의 역할로 인하여 댐핑력이 운동방향에 따라 달라지기 때문이다. 기대한 바와 같이 전기장의 강도가 증가할수록 큰 댐핑력을 보이고 있으며, 이는 전기장 강도의 증가에 따라 ER유체의 항복응력이 증가되어 전극 사이의 유로에서 유체저항이 증가되기



(a) measured



(b) simulated

Fig.6 Damping force vs. piston rod speed : ITA20, $h_e=0.75\text{mm}$

때문이다. 따라서 전기장 강도를 조절함으로써 일정한 범위내에서 요구되는 댐핑력을 얻을 수 있다. Fig.6(b)에 주어진 시뮬레이션 결과를 측정결과와 비교하였을 때, 두 결과가 모두 전기장 강도증가에 따라 댐핑력이 동일한 경향으로 증가되고 있음을 알 수 있다. 피스톤 로드 속도별로 비교하여 보면, 낮은 속도에서는 두 결과가 비교적 잘 일치하나 높은 속도에서는 측정값이 이론값에 비하여 낮게 나타난다. 이는 가스챔버의 비선형적 컴플라이언스 효과를 선형화 함으로서 기인한 것으로 판단된다. 그러나 전체적인 경향이

일치하므로, 본드 그래프 방법으로 도출된 지배방정식으로 ER댐퍼의 성능예측이 가능함을 알 수 있다.

Fig.7은 ER유체의 입자 중량비와 전극 간격을 달리하였을 때의 ER댐퍼 성능을 나타낸다. 사용된 ER유체는 ITA40 유체로 입자 중량비가 40%이고, 전극 간격은 1.0mm이다. Fig.6(a)와 비교하였을 때, 전극의 간격이 커졌지만 무부하시의 성능이 비슷한데 이는 ER유체의 가점성계수가 높아졌기 때문이다. 그러나 Fig.1에서 도시된 바와 같이 ITA40 유체의 전기장에 따른 항복응력 값이 ITA20 유체보다 크므로 전기장 강도 증가에 따른 ER댐퍼의 댐핑력 증가하는 Fig.6(a)의 경우보다 크게 나타났다. 또한 전기장 강도가 5kV/mm일 때 댐핑력이 무부하시 댐핑력보다 약200%가량 증가하는데, 이 댐핑력 변동폭이 ER댐퍼의 제어영역(control bandwidth)이 된다.

Fig.8은 ER유체의 입자 중량비에 따른 댐핑력의 변화를 비교한 것이다. 전극의 간격은 0.75mm이며 전기장 강도를 2kV/mm로 고정하고, 입자 중량비를 각각 20%와 40%로 조성한 ITA20 유체와 ITA40 유체를 사용하여 댐핑력을 측정하였다. 도시된 바와 같이 입자 중량비가 높아짐에 따라 댐핑력이 증가하는데, 이는 입자 중량비의 증가에 따라 ER유체의 가점성계수가

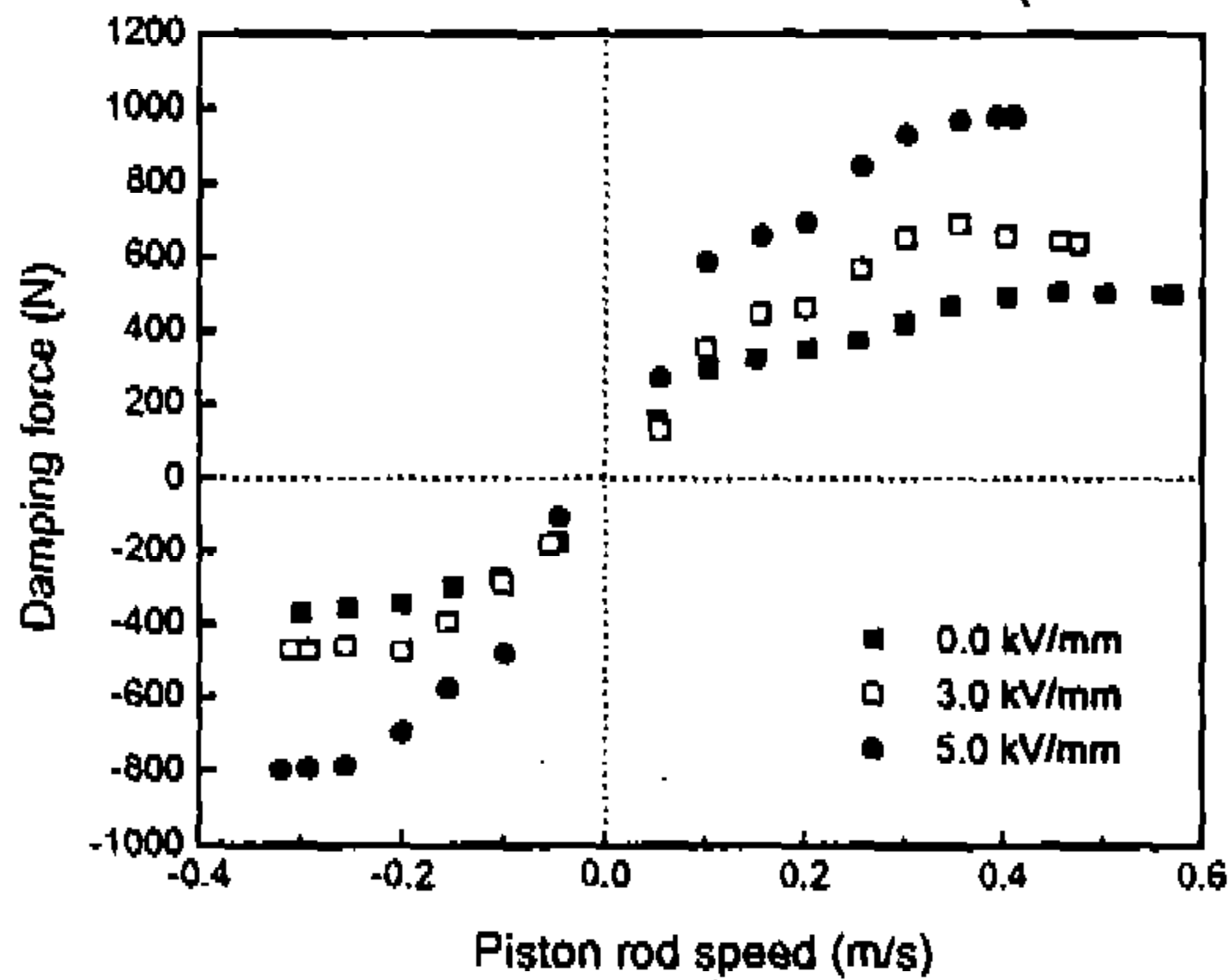


Fig.7 Damping force vs. piston rod speed : ITA40, $h_e = 1.0\text{mm}$

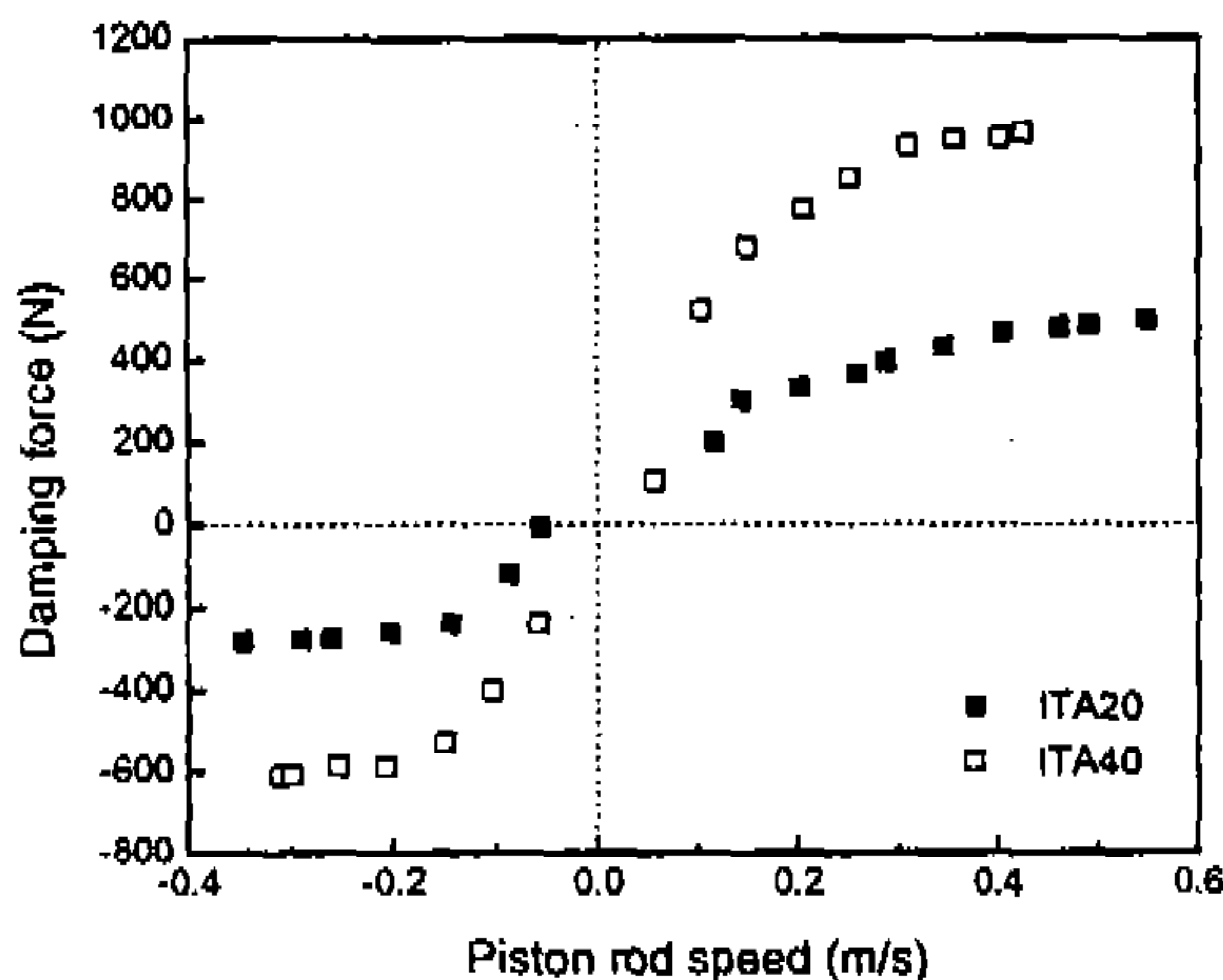


Fig.8 Comparison of damping forces with different particle concentration : electric field=2kV/mm, $h_e = 0.75\text{mm}$

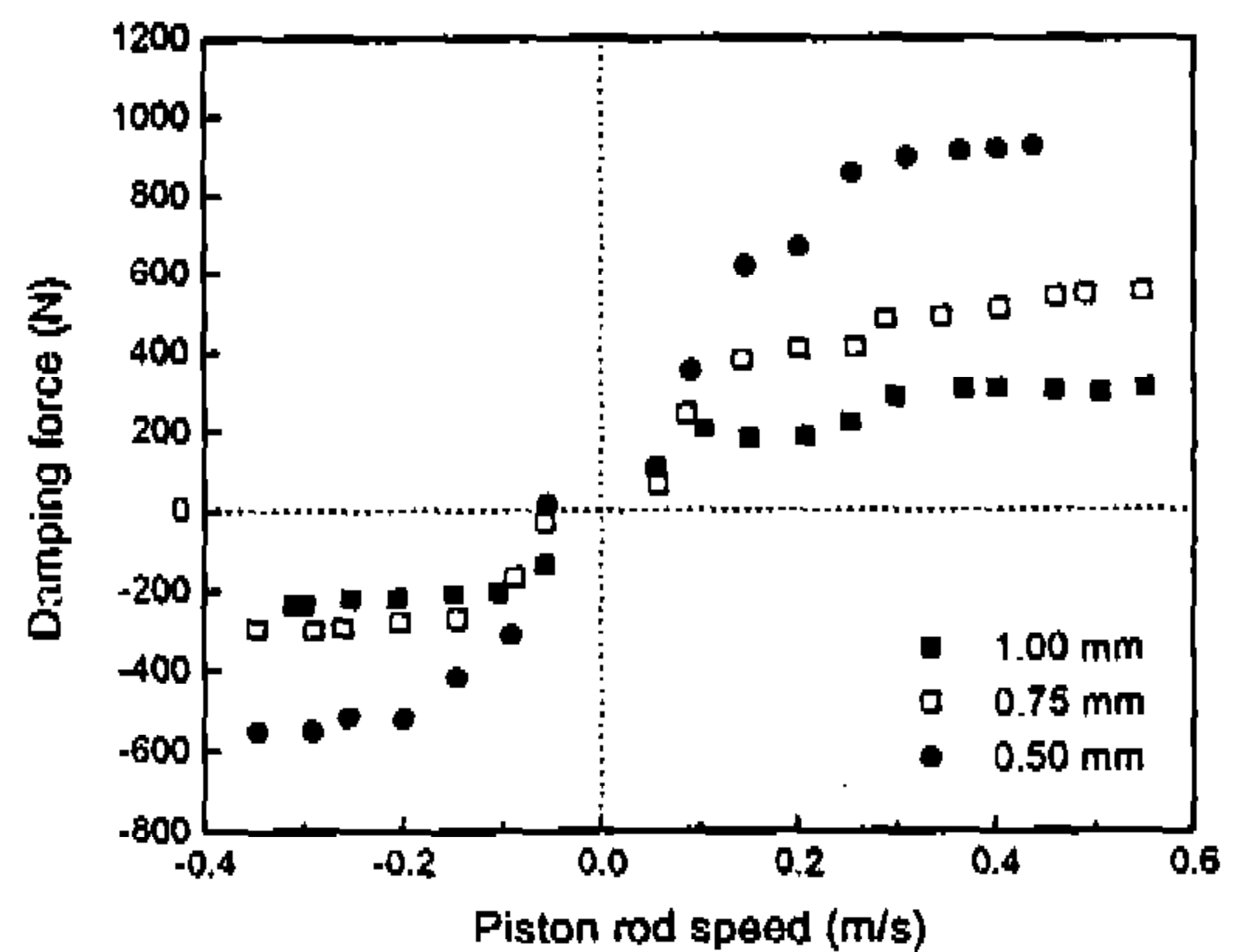


Fig.9 Comparison of damping forces with different electrode gap : ITA20, electric field=3kV/mm

높아지고 또한 전기장에 의하여 ER유체의 항복 응력이 증가되고 때문이다. 그러나, Fig.8에서 보면 전기장 강도에 따른 댐핑력의 증가보다 가점성계수의 증가에 따른 증가가 크게 나타났으며, 따라서 ER유체의 가점성계수가 ER댐퍼의 성능에 중요한 영향을 미치게 됨을 알 수 있다.

Fig.9는 전극 간격의 변화에 따른 성능을 보기 위하여 ER유체를 ITA20 유체로 고정하고 전기장을 3kV/mm로 부하 하였을 때의 댐핑력을 도사한 것이다. 예상한 바와 같이 전극 간격이 감소함에 따라 ER댐퍼의 댐핑력이 증가함을 알 수 있다. 또한 전극 간격이 1.0mm에서 0.75mm로 감소할 때보다 0.75mm에서 0.5mm로 감소할 때 더욱 큰 댐핑력 증가를 가져오는 것을 볼 수 있다. 이는 식(4)에서 보듯이 유체저항이 전극 간격의 3승에 반비례하기 때문이다. 따라서 전극 간격이 ER댐퍼의 기본적인 성능에 영향을 주는 매우 중요한 설계 변수임을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 ER유체를 사용한 연속 가변형 ER댐퍼를 제안하여 모델을 구성하였으며, ER유체의 빙햄거동과 연계된 ER댐퍼의 지배 방정식을 본드 그래프 방법으로 도출하였다. 그리고 제안한 모델을 근거로 ER댐퍼를 설계 및 제작하여 성능시험을 수행하였다. 전기장 강도의 증가에 따른 ER댐퍼의 댐핑력의 증가를 확인하였으며, 이로부터 ER댐퍼는 제어영역내에서 전기장만을 제어하여 댐핑력을 연속적으로 변화시킬 수 있음이 입증되었다. 성능시험 결과와 시뮬레이션으로 구한 이론적 결과의 비교를 통하여 본드 그래프 방법으로 도출된 ER댐퍼의 지배 방정식이 댐퍼의 성능예측에 유용하게 사용될 수 있음이 확인되었다. ER유체의 입자 중량비를 변화시킨 성능시험에서는 전기장 강도뿐만 아니라 ER유체의 가점성계수가 ER댐퍼의 성능에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있었다. 그리고 전극 간격의 변화에 따른 성능시험을 통하여 전극 간격이 ER댐퍼의 기본적인 성능을 좌우하는 매우 중요한 설계 변수임을 확인하였다. 따라서 특정한 요구

댐핑력을 갖는 ER댐퍼의 성공적인 개발을 위해서는 ER유체 자체의 정확한 특성분석 및 설계변수에 따른 성능해석이 동시에 심도 있게 다루어져야 할 것이다. 향후 연속가변 ER댐퍼와 연계된 반능동형 현가장치의 통특성 해석 및 제어 알고리즘 연구가 수행될 예정이다.

후 기

본 연구의 일부는 국방과학연구소의 위탁연구 과제(UD930157D)로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. D. C. Karnopp, M. J. Crosby and R. A. Harwood, "Vibration Control Using Semi-Active Force Generators", ASME J. of Engineering for Industry, Vol. 96, No.2, pp. 619~626, 1974.
2. 최승복, 민수홍, 정재천, "자동차 산업관련 전기점성유체 이용기술", 한국자동차공학회지, 제13권 제4호, pp. 1~10, 1991.
3. 김기선, 이효정, 최승복, 정재천, "전기유동 유체를 이용한 자동차용 가변댐퍼의 연구 동향", 한국자동차공학회 1993년도 춘계 학술대회 논문집, pp. 77~81, 1993.
4. S. B. Choi, Y. K. Park and M. S. Suh, "Elastodynamic Characteristics of Hollow Cantilever Beams Containing an Electro-Rheological Fluid; Experimental Results", AIAA Journal, Vol. 32 No.2, pp. 438~440, 1994.
5. Theodore G. Duclos, "Design of Devices Using Electrorheological Fluids", SAE Technical Paper Series 881134, 1988.
6. K. H. Hägele, K. Engelsdorf, M. Mettner, M. Panther, Q. Ngoc Tarn, E. Rubel, "Continuously Adjustable Shock Absorbers for Rapid-Acing Ride Control System(RCS)", SAE Technical Paper Series

- 905125, 1990.
7. Nicholas K. Petek, "An Electronically Controlled Shock Absorber Using Electrorheological Fluid", SAE Technical Paper Series 920275, 1992.
 8. H. Block and J. P. Kelly, "Electro-rheology", J. Phys. D : Appl. Phys. 21, pp. 1661~1677, 1988.
 9. W. S. Yen and P. J. Achorn, "A Study of the Dynamic Behavior of an Electrorheological Fluid", J. Rheol., Vol.37 No.7, pp. 1375~1384, 1991.
 10. R. C. Rosenberg and D. C. Karnopp, Introduction to Physical System Dynamics, McGraw-Hill Book Company, 1983.
 11. 최영태, 김기선, 최승복, 정재천, 전영식, "전기유동유체를 이용한 엔진마운트 모델구성과 성능해석", 한국자동차공학회논문집, 제2권 제3호, pp. 62~74, 1994.
 12. D. C. Karnopp, "Design Principles for Vibration Control Systems Using Semi-Active Dampers", ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 112, pp. 448~455, 1981.