

# ER시트댐퍼를 사용한 상용차운전석의 실험적 성능해석 및 진동제어

남 무 호\*

## Experimental Performance Analysis and Vibration Control of Commercial Vehicle Seat Suspension System Using ER Seat Damper

Moo-Ho Nam\*

### Abstract

This paper presents a new concept of a commercial vehicle seat suspension system. The proposed suspension system features an ER(electro-rheological) damper which can produce continuously tunable damping forces by control electric fields. A dynamic model of the ER damper is first achieved by incorporating Bingham property of the ER fluid, followed by the formulation of governing equations of motion for the suspension system. The effectiveness of the proposed ER seat suspension system is evaluated by investigating vibration isolation with respect to sinusoidal inputs.

Keywords : Seat Suspension(운전석현가장치), ER Fluids(ER유체), ER Damper(ER댐퍼), Vibration Isolation(진동절연)

### 1. 서 론

최근 상용차량의 연구동향을 보면 인간에 대한 고려가 더욱 가미된 이른바 생체공학적 개념을 접목시키는 연구가 크게 대두되고 있다.<sup>(1)</sup> 차량을 운전하는 운전자는 필연적으로 피로를 느끼게 되는데, 특히 대형 상업용 차량의 경우 장거리 및 장시간의 운행, 거친 환경 또는 열악한 도로 조건 등으로 인하여 이를 운전하는 운전자는 승용차를 운전하는 일반인보다 훨씬 큰 피로를 느끼게 된다. 이에 앞으로의 상업용 대형차량 개발의 중요한 요인 중 하나인

운전자의 피로감을 줄이는 장치에 대한 연구개발이 필수적이다.<sup>(2)</sup> 운전자가 피로를 느끼게 되는 가장 큰 요인은 운전자에게 전달되는 진동 때문이며 이를 적절히 절연시키기 위한 장치로는 주 현가장치(primary suspension), 캐빈현가장치(cabin suspension), 운전석 현가장치(seat suspension)등이 있으며 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(3)</sup>

최근 스마트재료중 하나인 전기유동유체[이하ER (electro-rheological)유체라 칭함]를 이용한 상용차운전석용 현가장치에 대한 연구가 진행되고 있다. 이에 대한 연

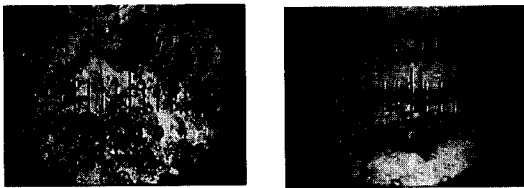
\* 유한전문대학 기계과

구경향으로는 국외의 경우, Wu가 ER댐퍼를 장착한 상용 차운전석의 진동절연성능을 여러형태의 on-off제어알고리즘을 사용하여 제시하였다<sup>(4)</sup>. 그러나 Wu의 연구는 중요한 시스템 요소의 하나인 ER댐퍼에 대한 언급없이 단지 상용차운전석의 진동절연성능만을 제시하였다. 또한, 국내의 경우, ER댐퍼가 장착된 상용차운전석에 대한 연구는 전혀 발표되어있지 않다. 따라서 본 논문에서는 기존댐퍼와는 달리 새로운 형태의 실린더형 ER댐퍼를 제안하고 이 ER댐퍼가 상용차운전석에 장착되었을 때의 진동절연성능을 전기장 증가에 따라 고찰하고자 한다.

## 2. 운전석 현가장치 모델링

### 2.1 ER댐퍼 모델링

ER유체의 특성은 일반적으로 전기장이 가해짐에 따라 유체의 전단응력이 변화되는 것으로, Fig. 1과 같이 전기장 무부하시에는 유체입자가 자유로이 운동하는 뉴토니안(Newtonian)유체 상태에서, 전기장 부하시에는 입자가 체인형의 구조를 형성하여 유체가 항복응력을 갖는 빙햄(Bingham)유체 상태로 변화하게 된다.



(a) No voltage applied (b) Voltage applied

Fig. 1 Bingham characteristics of ER fluid

이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

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

여기서  $\tau$ 는 유체의 전단응력(shear stress)을 나타내고  $\dot{\gamma}$ 는 전단속도비(shear rate)이며,  $\eta$ 는 ER유체의 점성계수를 나타낸다.  $\tau_y(E)$ 는 ER유체의 항복응력을 표현한 것으로 전기장 E의 크기에 지수함수의 관계를 갖는다. 따라서 식(1)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\tau = \eta\dot{\gamma} + aE^x \quad (2)$$

여기서  $a$  및  $x$ 값은, ER유체의 고유치로서 용매종류, 용매점도, 입자종류, 입자중량비 등 ER유체 조성조건에 따라 달라진다. 본 연구에 적용된 ER유체는 실리콘오일을 기본유료 하여 아라빅 검(Arabic Gum)을 25% 입자중량비로 혼합한 것으로, 이 ER유체의 항복응력을 식(2)와 같이 쓰면  $75.345E^{1.64} Pa$ 의 관계식으로 표현할 수 있다.

본 논문에서 제안한 ER댐퍼의 구조는 Fig. 2와 같다. ER유체가 원형덕트 사이로 유동할 때 발생하는 유체저항은 다음과 같이 주어진다.

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

한편 전기장 부하시 ER유체의 전단응력 증가에 따른 압력강하  $P_{ER}$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{ER} = 2\frac{L}{h} aE^x \quad (4)$$

Fig. 2에 주어진 ER댐퍼의 본드그래프모델을 통하여 다음과 같은 지배방정식을 얻을 수 다.

$$\dot{q}_1 = A_r(V_p - V_r) \quad (5)$$

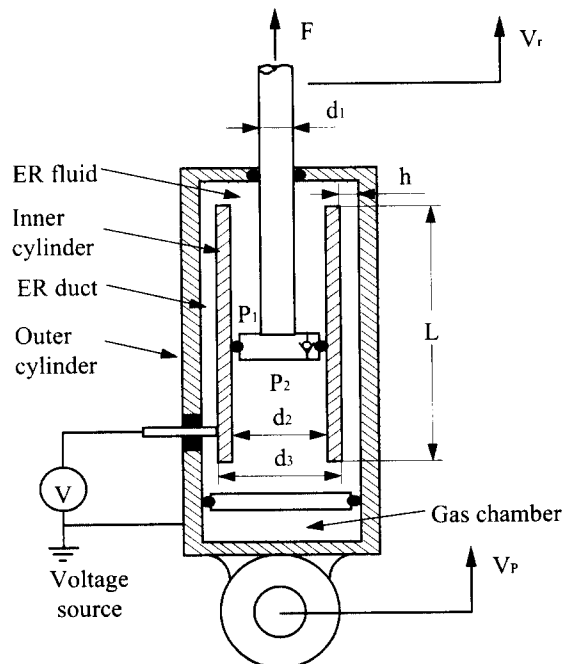


Fig. 2 Schematic diagram of the ER damper

$$F = \frac{A_p}{C_g} q_1 + (A_p - A_r)^2 R_e (V_p - V_r) + (A_p - A_r) P_{ER} \quad (6)$$

여기서,  $C_g$ 는 가스챔버에서의 가스의 압축성으로 인하여 발생하는 컴플라이언스이고,  $A_r$ 은 피스톤로드의 단면적이며,  $A_p$ 는 피스톤 단면적을 나타낸다. 또한  $q_1$ 은 하부챔버의 부피,  $F$ 는 ER댐퍼의 댐핑력,  $V_r$ 는 실린더속도, 그리고  $V_p$ 은 피스톤로드의 속도이다.

### 2.2 운전석 현가 장치 모델링

본 연구에서 제안된 운전석 현가장치 모델은 Fig. 3과 같다.

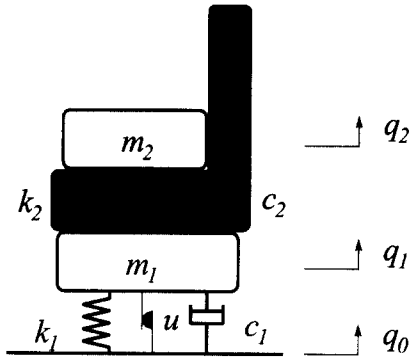


Fig. 3 ER seat suspension system

상기의 모델로부터 동적 지배방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{q}_1 &= -c_1(\dot{q}_1 - \dot{q}_0) - k_1(q_1 - q_0) \\ &\quad + c_2(\dot{q}_2 - \dot{q}_1) - k_2(q_2 - q_1) - u \quad (7) \\ m_2 \ddot{q}_2 &= -c_2(\dot{q}_2 - \dot{q}_1) - k_2(q_2 - q_1) \end{aligned}$$

여기서  $m_1$ 은 운전석 지지부의 질량,  $m_2$ 는 운전자의 질량,  $c_2$ 와  $k_2$ 는 각각 운전석 쿠션의 댐핑 계수와 스프링상수이며,  $c_1$ 과  $k_1$ 은 각각 운전석 현가장치의 댐핑계수와 스프링상수를 나타낸다. 그리고,  $u$ 는 제어입력(댐핑

력)을 나타낸다. 상태변수를  $X = [q_1 \ q_2 \ \dot{q}_1 \ \dot{q}_2]^T$ 로 정의하면, 식(7)은 다음과 같은 상태방정식(state-equation)으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{X} = AX + Bu + D$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{k_1+k_2}{m_1} & \frac{k_2}{m_1} & -\frac{c_1+c_2}{m_1} & \frac{c_2}{m_1} \\ \frac{k_2}{m_2} & -\frac{k_2}{m_1} & \frac{c_2}{m_2} & -\frac{c_2}{m_2} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{m_1} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{c_1}{m_1} \dot{q}_0 + \frac{k_1}{m_1} q_0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, 제어입력  $u$ 는 다음과 같이 전기장의 함수로 전환되어 ER댐퍼에 공급된다. 아래의 식에서 제어입력  $u$ 는 전기장에 의해 발생하는 ER유체의 항복응력 변화에 의한 댐핑력 변화를 의미한다<sup>(5)</sup>.

$$E = \left[ \frac{u}{(A_p - A_r)} \cdot \left( -\frac{h}{2La} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \quad (9)$$

### 3. 파라미터 설정

운전석 현가장치의 모델링을 보면 운전석 쿠션의 스프링상수 및 댐핑계수, 운전석 현가장치의 스프링상수 및 댐핑계수가 필요함을 알 수 있다. 이러한 파라미터를 결정하기 위한 실험방법 및 그 결과치는 다음과 같다.

먼저, Fig. 4는 시트쿠션의 파라미터를 구해내기 위한 실험장치를 나타내었다. 이는 SAE 추천시험법<sup>(5)</sup>을 적용한 것으로서 시트쿠션에 가친을 입력하였을 때 변위와 힘과의 관계를 알아낼 수 있다. 유압장치에 원하는 변위입력을 인가하고 이때 로드셀로부터 힘의 변화를 A/D 변환기로부터 취득한다. Fig. 5는 운전석 쿠션의 힘-변위 곡선으로 이때 기울기는 쿠션의 동적 스프링상수  $k_2$ 를 나타내며, 이때 쿠션의 댐핑상수  $c_2$ 를 다음과 같은 수식으로부터 구할 수 있다.<sup>(6)</sup>

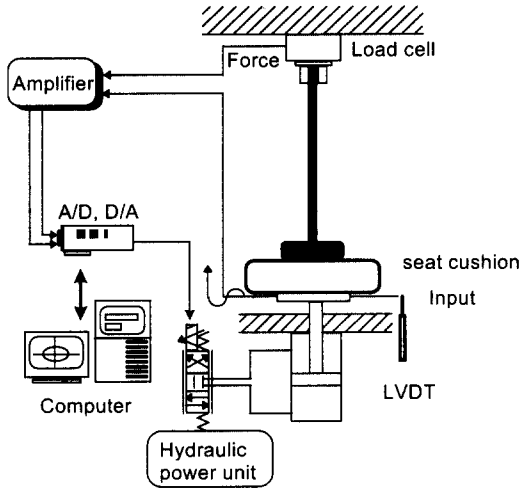


Fig. 4 Experimental apparatus of seat cushion

$$C_{eq} = \frac{\text{리사쥬곡선의 면적}}{\pi(2\pi f)X^2} \quad (10)$$

여기서 1주기당 리사쥬곡선의 면적(Area within Lissajous curve)은 선적분을 통하여 구하며,  $f$ 는 가진 주파수,  $X$ 는 가진변위를 나타낸다.

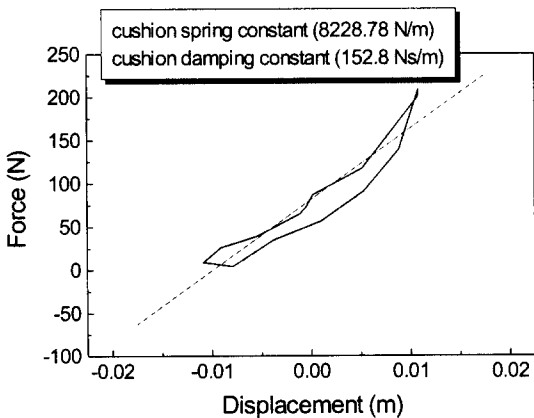


Fig. 5 Force-Displacement characteristics of a seat cushion

Fig. 6에서는 운전석 현가장치에 질량을 증가하면서

그때 현가장치의 변위변화로부터 현가장치만의 스프링상수  $k_s$ 를 구한 것을 나타내었으며, ER댐퍼를 장착했을 경우 ER댐퍼의 가스챔버내의 가스압에 의한 강성  $A_p^2 / C_g$ 가 더해지게 되며 결과적으로 이때, 최종적인 운전석 현가장치의 스프링상수는  $k_1 = k_s + A_p^2 / C_g$ 와 같이 표현된다.

한편, 상용댐퍼의 댐핑계수를 알아내기 위한 실험은 Fig. 4의 실험장치에 상용댐퍼를 장착하고 사인파를 유압 장치에 인가하면서 주파수를 변화시켜 각각의 속도에 따른 댐핑력을 구하며, 이의 결과는 Fig. 7과 같다. 이때 속도-댐핑간의 기울기가 바로 상용댐퍼의 댐핑상수가 된다. ER댐퍼를 장착할 때의 댐핑상수는  $(A_p - A_s)^2 R_c$ 의 수식으로부터 도출하게 된다.

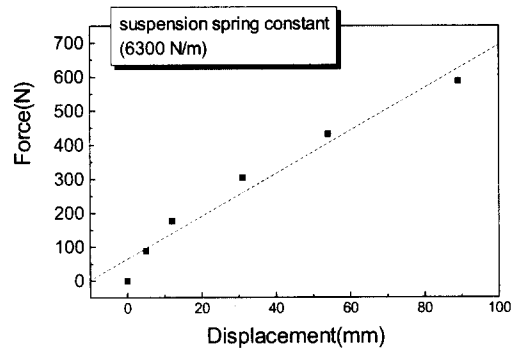


Fig. 6 Force-Displacement characteristics of a seat suspension

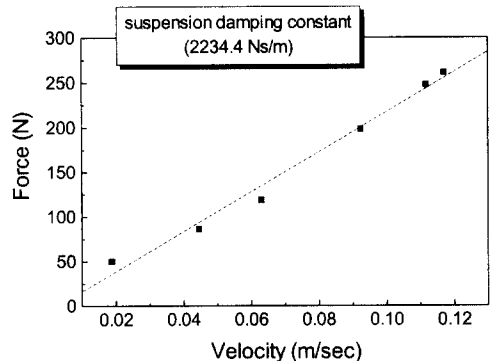


Fig. 7 Force-Velocity characteristics of a seat suspension

위의 결과들로부터 모델링에 필요한 각종 파라미터를 취득하였으며, 이를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Specifications of ER seat suspension

Seat frame mass (Kg)	$m_1$	20
Human body mass (Kg)	$m_2$	50
Seat suspension damping (Ns/m) - Conventional damper applied	$c_1$	2234.4
Seat suspension damping (Ns/m) - ER damper applied	$c_1$	728
Seat cushion damping (Ns/m)	$c_2$	152.8
Seat suspension stiffness (N/m)	$k_s$	6300
Seat cushion stiffness (N/m)	$k_s$	8228.78

그리고, 본 논문에 사용된 ER댐퍼의 사양은 다음의 Table 2에 나타내었다. 이중 운전자 유효 질량은 실제 운전자 무게의 5/7로 하였다<sup>(3)</sup>

Table 1 Specifications of the ER damper

Unit : (m)

Radius of rod	$d1$	0.0055
Radius of piston	$d2$	0.015
Electrode length	$L$	0.19
Radius of Inner cylinder	$d3$	0.018
Gap size	$h$	0.001

#### 4. 실험결과 및 고찰

이론적 해석을 통한 모델링으로부터 ER댐퍼의 설계를 위한 각 파라미터를 유도한 후 적절한 ER댐퍼를 제작한 후, 이러한 ER댐퍼를 적용한 상용차운전석 현가장치의 성능을 평가하기 위한 실험장치를 제작하여 실험을 수행하였다. 이러한 실험장치의 개략도를 Fig. 8에 나타내었다. 원하는 변위를 유압장치를 이용하여 인가한 후 지그위에 장착된 운전석 현가장치의 변위변동을 LVDT를 이용 A/D 변화기를 이용하여 취득한다.

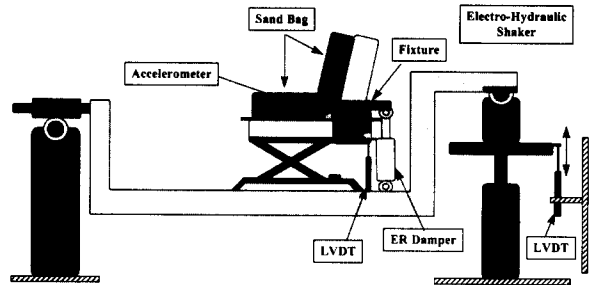


Fig. 8 Schematic of the seat testing equipment

위의 실험장치를 이용하여 현가장치의 가진 입력변위  $q_0$ 를  $\pm 20mm$ 의 사인파로 인가하였을 때의 주파수에 따른 변위전달률 및 가속도전달률, 그리고 첫번째 공진주파수인 1.5Hz에서 시간영역에서의 시스템 응답특성을 알아 보았다.

Fig. 9는 상용댐퍼 장착시 변위전달률 및 가속도전달률을 나타내었다. 그림에서 보듯이 최대 전달률이 변위 및 가속도 모두 약 1.6 정도임을 알 수 있다.

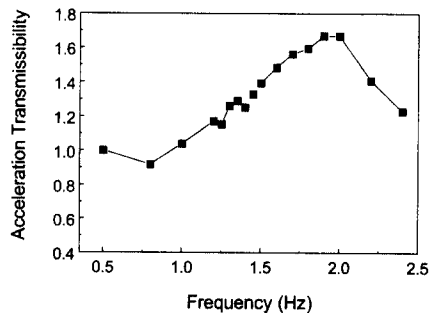
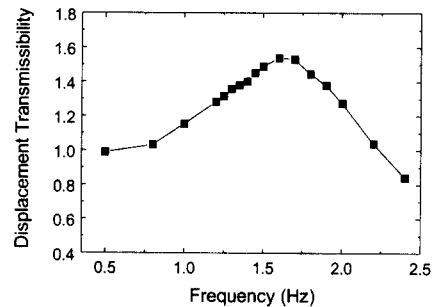


Fig. 9 Transmissibility of seat suspension system (with conventional seat damper)

Fig. 10에서는 ER댐퍼를 적용하였을 때 주파수영역에서의 시스템 응답특성을 나타내었다. 이때, 전기장 무부하시 공진주파수에서의 변위 전달률 및 가속도전달률이 약 1.6정도이며, 전기장의 증가에 따라 변위전달률이 크게 감소하는 반면 가속도전달률은 별로 줄어들지 않음을 알 수 있다. 이는 전기장 증가에 따른 댐핑력의 증가로 인하여 변위전달률은 감소하는 반면, 강성의 증가로 인하여 가속도는 감소하지 않고 그대로 전달되는 것을 의미한다. 그리고 이러한 강성의 증가로 인한 공진주파수의 이동을 관찰할 수 있다. 또한, 높은 주파수영역으로 갈수록 전기장 크기가 증가할수록 변위 및 가속도전달률이 증가함을 알 수 있다. Fig. 11은 1.5 Hz에서 시간영역에서의 응답특성을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 공진주파수에서는 전기장 증가에 따라 변위 및 가속도가 감소함을 알 수 있다.

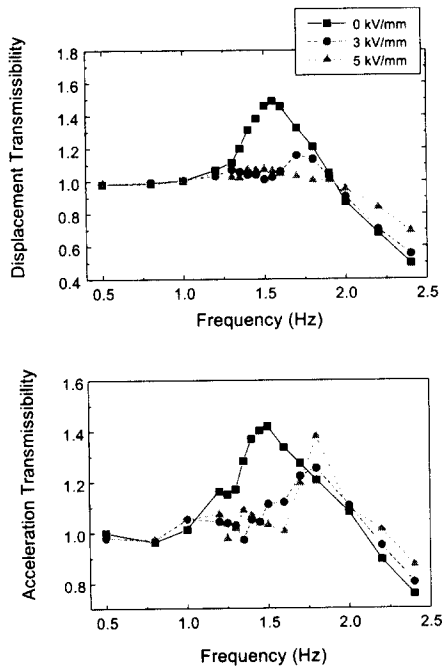


Fig. 10 Transmissibility of ER seat suspension system

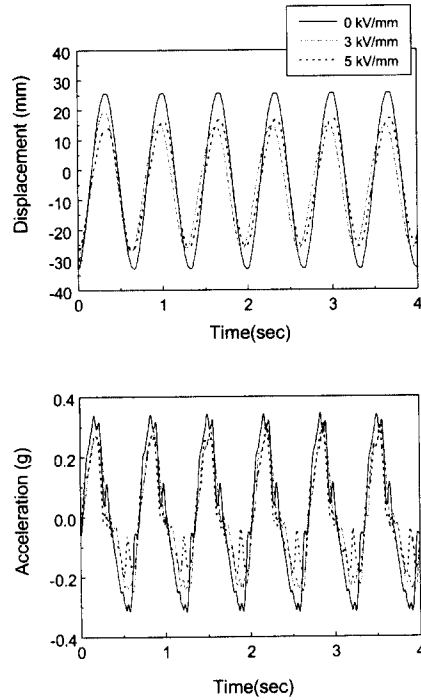


Fig. 11 Time responses of ER seat suspension

## 5. 결 론

본 논문에서는 ER유체를 이용한 상용차 운전석용 현가장치를 제안하였으며, 이를 이론적 해석을 통하여 모델링을 수행하였으며, 이를 이용하여 적절한 ER댐퍼를 직접 설계 제작하여 실험을 통하여 상용댐퍼를 적용하였을 때와 비교하였다. 상용댐퍼를 장착하였을 때와 ER댐퍼에 전기장을 인가하지 않았을 때 변위전달률은 약 1.6으로 유사하였고, 가속도전달률은 상용댐퍼 장착시가 더 큼을 알 수 있다. ER댐퍼를 적용하였을 때, 전기장 증가에 따라 공진주파수에서의 진동은 감소하였고, 인가하는 전기장이 클수록 ER댐퍼의 강성이 증가하여 공진 주파수가 증가함을 알 수 있다.

이의 결론으로 상용차운전석 현가장치에 ER댐퍼를 장착하였을 때 상용댐퍼를 사용할 때 보다 우수한 진동절연 성능을 발휘할 수 있으며, 이에 따라 운전자의 조정 안정성 및 승차감 증진을 가져올 수 있음을 확인하였다. 그러나 일정한 전기장만을 인가하므로 큰 진동절연성능의 발

획가 어려움을 알 수 있으며, 이에 따라 향후, 본 논문에서 제안된 운전석용 ER댐퍼를 보다 최적화하여 설계 제작하고, 각종 가진입력에 따라 능동적으로 제어전기장이 변화하여 보다 큰 진동절연성능을 발휘하도록 제어를 수행할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 유한전문대학 산업과학기술 연구소의 학술연구비 지원으로 수행되었습니다. 감사합니다.

## 참 고 문 헌

1. Robert P. Hubbard, William A. Haas, Robert L. Boughner, Richard A. Canole, and Neil J. Bush, New Biomechanical Models for Automobile Seat Design, SAE Paper No. 930110, 1993.
2. Robert M. Braswell, Harrison T. Pannella, Joseph F. Broder, Robert L. Rak, Peggy J. Fisher, George H. Rood, Jr., Robert D. Flesher, James Salas, David Foster, C. Oren Summer, Sid Gooch, Victor Suski, Kenneth F. Johnson, Jerry Thrift, Tomorrows Trucks: A progress review and Reappraisal of Future Needs, SAE Paper No. 932975, 1993.
3. S. Rahkeja, Y. Afework, S. Sankar, An Analytical and Experimental Investigation of the Driver-Seat-Suspension System, Vehicle System Dynamics, 23, pp. 501~524, 1994.
4. X. Wu and M. J. Griffin, A Semi-active Control Policy to Reduce the Occurrence and Severity of End-stoop Impacts in a Suspension Seat with an Electrorheological Fluid Damper, J. of Vibration and Acoustics, Vol. 203, No. 5, pp.781~793, 1997.
5. S. B. Choi, Y. T. Choi, E. J. Chang, S. J. Han and C. S. Kim, Control Characteristics of a Continuously Variable ER Damper, Mechatronics, 1998 (to be appeared)
6. Deflection of seat cushions for off-road work machines, SAE Handbook, Vol. 4, 40.334 - 40.335, 1988