

〈논 문〉

ER CD-ROM 마운트를 이용한 드라이브 피딩 시스템의 진동 제어

Vibration Control of a Drive Feeding System Using ER CD-ROM Mounts

최 승 복* · 김 형 규** · 임 수 철** · 박 영 필***

Seung-bok Choi, Hyoung-kyu Kim, Soo-chul Lim and Young-pil Park

(1999년 9월 11일 접수 : 1999년 11월 16일 심사완료)

Key Words : Electro-rheological Fluids(ER 유체), ER CD-ROM Mount(ER CD-ROM 마운트), Vibration Control(진동 제어), Fuzzy-Skyhook Control(퍼지-스카이훅 제어기)

ABSTRACT

This paper presents vibration control of a CD-ROM(compact disc-read only memory) drive feeding system consisting of a new type of CD-ROM mount using an electro-rheological(ER) fluid. Chemically treated starch particles and silicon oil are used for ER fluid, and its field-dependent yield stresses are experimentally distilled under both the shear and the flow modes. On the basis of the yield stress, an appropriate size of ER CD-ROM mount adapted to conventional feeding system is designed and manufactured. Vibration isolation performance of the proposed mount is evaluated in the frequency domain and compared with that of conventional rubber mount. The ER CD-ROM mount is then installed to the drive feeding system and the system equation of motion is derived. The skyhook controller is then incorporated with the fuzzy technique to improve the performance of ER CD-ROM mount. A set of fuzzy parameters and control rules are obtained from a relation between vertical displacement and pitching motion of the feeding system. Following the formulation of the fuzzy-skyhook controller, computer simulation is undertaken in order to evaluate vibration suppression of the CD-ROM drive feeding system subjected to various excitations.

1. 서 론

컴퓨터 하드웨어와 소프트웨어가 급격히 발전하면서 사용 데이터 양이 증가함에 따라 기존의 하드 디스크와 플로피 디스크만으론 데이터를 저장할 수 없

기 때문에 이를 해결하기 위하여 보다 저장능력이 큰 여러 매체와 장치들이 개발되었다. 이러한 매체와 장치 중 보편성, 가격경쟁력, 편리성 등에서 우수성을 갖춘 CD(compact disc)와 CD-ROM(compact disc-read only memory) 드라이브가 널리 이용되게 되었다⁽¹⁾. 따라서 현재 CD가 이러한 대용량 정보를 저장하거나 읽기 위하여 활발히 사용되고 있으며 이와 함께 사용자들의 고배속, 고정밀의 신뢰성 높은 CD-ROM 드라이브에 대한 요구 또한 높아지고 있다⁽²⁾. 현재 CD-ROM 드라이브는 정배속으로부터 발

* 정회원, 인하대학교 공과대학 기계공학과

** 인하대학교 대학원 기계공학과

*** 정회원, 연세대학교 공과대학 기계공학과

전을 거듭하여 40배속, 48배속의 드라이브가 주종을 이루고 있으며, 또한 차세대 광디스크로 불리는 DVD(digital versatile disc)도 컴퓨터의 새로운 보조 기억장치로 각광을 받고 있다. 그러나 정보가 저장된 CD와 CD에서 정보를 읽는 CD-ROM 드라이브의 대량 생산의 결과로 인한 모델 변수의 변화, 시스템의 불확실성, CD의 사출 성형시의 발생하는 미세한 뒤틀림 그리고 다양한 사용환경에 따른 외란 등이 CD-ROM 드라이브의 성능 저하의 원인이 되고 있으며 또한 기존의 저배속, 저밀도의 CD에서 데이터를 재생할 때 진동과 소음의 제어는 상대적으로 용이하였으나, 고배속, 고밀도의 CD-ROM 드라이브에서의 진동 소음문제는 CD-ROM 드라이브의 개발에 심각한 장애로 대두되고 있다^(3,4). 이를 해결하기 위하여 기존 광픽업 장치(optical pick-up)가 트랙과 초점의 벗어남(off-track, off-focusing)에 의한 작동오류를 서보 제어기술로 극복하기 위하여 트랙킹 서보(tracking servo) 및 포커싱 서보(focusing servo)를 CD-ROM 드라이브 자체의 기계적, 동적 안정성을 기반으로 한 강건 제어기(robust controller)로 대체하는 연구가 활발히 진행되고 있으며 이러한 서보 제어의 개선으로도 다룰 수 없는 부분을 위하여 기존의 시스템의 구조를 변경하거나 새로운 장치를 부착하여 성능을 개선하고자 하는 연구 또한 활발히 진행되고 있다. 예를 들어 현재까지는 점탄성 재료를 이용한 고무마운트의 설계 및 개발과 최근 들어 자동 불 균형 장치(automatic ball balancer)등 부가적인 장치들을 부착하여 성능 향상을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 점탄성 재료를 이용한 고무마운트의 역할은 정적인 상태에서 피딩 시스템의 무게를 지탱해주며 CD의 회전시 발생하는 진동을 CD-ROM 드라이브와 컴퓨터 본체에 전달되는 것을 방지하며 반대로 외부에서 들어오는 진동을 광픽업 장치가 장착된 피딩 시스템에 전달되는 것을 방지하는 역할들을 한다. 따라서 설계자가 이러한 고무마운트의 감쇠 능력을 향상시키기 위하여 방진부 내부에 코어를 삽입하거나 고무의 재질을 변경하여 원하는 주파수대역에서의 감쇠능력을 향상시키는 연구가 진행되고 있으나 CD-ROM 드라이브의 넓은 작동 영역에 비하여 설계자가 원하는 특정 주파수 대역에서만 성능을 보장할 수 있으며 또한 댐핑력이 작고 일정하다는 단점이 있다. 이와 같이 기존의 고무마운트는 제작 가격이 상대적으로 낮고 제작이 용이하다는 장점이 있지만 스피들 모터(spindle motor)의 광 범위한 작동속도, PC의 성능 향상으로 인한 빠

른 액세스 시간(access time), 고배속화에 따른 디스크 회전 속도의 증가 등의 현 추세에 능동적으로 대처하는 데는 한계가 있어 새로운 개념의 방진 시스템이 요구된다.

본 연구에서는 대표적 지능재료(smart material)의 하나인 ER(electro-rheological)유체를 이용하여 새로운 방진 시스템을 구성하고자 한다. 제안된 ER CD-ROM 마운트는 전단모드와 유동모드가 혼합된 복합모드형태의 ER CD-ROM 마운트로서 이에 대한 진동절연성능을 실험과 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다. 우선, ER CD-ROM 마운트에 핵심이 되는 ER유체를 직접 조성하고, 이 조성된 ER유체의 전기장 증가에 따른 항복응력값을 두 유체 작동모드에 대하여 실험적으로 얻었다. 그후, 복합모드형태의 ER CD-ROM 마운트를 제안하고, 이 제안된 ER CD-ROM 마운트에 대한 유체 역학적 모델을 구성하였다. 구성된 유체역학적 모델로부터 전기장 부하에 따른 ER유체의 거동특성이 고려된 ER CD-ROM 마운트의 동적지배방정식을 도출하였다. 도출된 지배방정식과 실험을 통해 얻어진 ER유체의 항복응력을 연계한 컴퓨터 시뮬레이션을 토대로 기존의 8배속 CD-ROM 드라이브에 장착된 고무마운트와 동일한 고유주파수를 갖는 ER CD-ROM 마운트를 설계, 제작하여 전기장 증가에 따른 ER CD-ROM 마운트의 진동절연성능과 기존 고무마운트의 성능을 비교하였다. 그후 제안된 ER CD-ROM 마운트를 장착한 피딩 시스템의 모델을 구성한 후 이 피딩 시스템 모델에 대한 동적지배방정식을 도출하였다. 시스템 지배방정식으로부터 반능동형 작동기에 효과적으로 사용되는 스카이훅 제어기를 설계하였다. 또한 ER CD-ROM 마운트의 성능을 향상시키기 위하여 피딩 시스템의 무게 중심의 변위를 고려한 퍼지 로직을 스카이훅 제어기와 연계하여 퍼지-스카이훅 제어기를 제안하였다. 이렇게 설계된 제어기를 ER CD-ROM 마운트가 장착된 피딩 시스템에 적용하여 진동절연성능이 향상됨을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다.

2. ER CD-ROM 마운트의 모델링

기존 대부분의 연구에서 제안된 ER 마운트는 유동모드(flow mode)형태로, 전극이 두 평판 형태로 고정되고 그 사이로 ER유체가 유동하게 된다. 이러한 유동모드형태의 ER 마운트는 높은 전기장부하로 락업(lock-up) 상태가 발생할 경우, 공진주파수 이

후의 비교적 높은 주파수 대역에서 진동 절연성능의 악화가 발생된다⁽⁵⁾. 반면, 전단모드(shear mode)형태의 ER 마운트는 유동모드형태의 ER 마운트에서 발생하는 큰 진동절연성능의 악화는 없지만, 큰 저항력을 발생시키기 위해서는 전극 면적이 크게 증가되는 단점이 있다⁽⁶⁾. 따라서 본 논문에서는 락업 상태에서 발생하는 진동절연성능의 악화를 줄이고 구조를 단순화시키기 위하여 유동모드와 전단모드를 갖고 있는 복합모드(mixed-mode)형태의 ER CD-ROM 마운트를 제안하였다. 본 연구에서 제안한 복합모드 형태의 ER CD-ROM 마운트의 기본적인 구조는 Fig. 1 (a)와 같다. 내측전극과 외측전극이 각각 고무커버와 마운트 프레임에 고정되어 전압을 인가 받게 되고, 전극간의 간극을 일정하게 유지 시키기 위하여 스페이서(spacer)가 일정한 간격으로 구성되어 있다. ER유체는 상부 챔버와 하부 챔버로 나뉘어진 두 챔버에 모두 채워지게 되며, 마운트 프레임 밑에 다이어프램을 구성하여 전극 간극 사이로 흘러내려

온 ER유체를 수용하도록 하였다. 고무커버는 상부 챔버의 ER유체의 유출을 방지함과 동시에 피딩 시스템의 질량을 지지하게 되며 마운트 프레임은 CD-ROM드라이브의 프레임에 고정된다.

ER CD-ROM 마운트의 해석을 위한 가정으로 ER유체는 비압축성유체로 가정하였고, 해석의 단순화를 위해 마운트의 수직방향만을 고려하였다. 전기장에 따른 ER유체의 항복응력 모델은 빙햄 모델을 사용하였으며 또한 전기장에 따른 시간 응답은 수 ms로 매우 빠르기 때문에 이에 대한 동적 거동은 고려하지 않았다. 이러한 유체특성을 고려한 유체역학적 모델은 Fig. 1 (b)와 같다. 이 모델로부터 ER CD-ROM 마운트에서 발생하는 댄핑력을 구하면 다음과 같다.

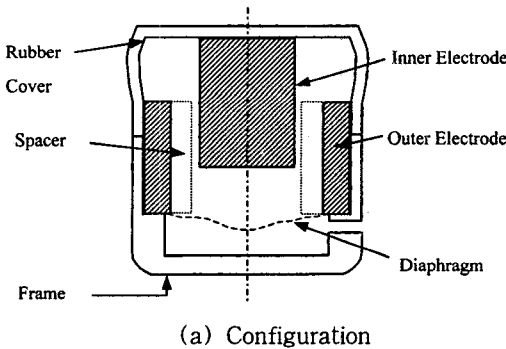
$$\begin{aligned}
 F_i &= k_R(x_i - y_i) + b_R(\dot{x}_i - \dot{y}_i) + A_e \frac{\eta(\dot{x}_i - \dot{y}_i)}{h} \\
 &\quad + A_e \tau_{ys} \operatorname{sgn}(\dot{x}_i - \dot{y}_i) - A_p P_1 \\
 &= k_R(x_i - y_i) + B(\dot{x}_i - \dot{y}_i) + F_{ERs} - A_p P_1, \\
 B &= b_R + \frac{A_e \eta}{h}
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 A_p 는 고무커버의 단면적, $A_e (= b_e L_e)$ 는 전극의 총면적, L_e 는 전극의 길이, b_e 는 전극의 너비이다. P_1 은 상부 챔버의 압력, h 는 전극 간격, k_R 는 고무커버의 수직강성, b_R 는 고무커버의 댄핑계수, 그리고 τ_{ys} 는 전기장 부하시 전단모드에 의해서 발생하는 ER유체의 항복응력을 나타낸다. 또한 x_i 는 피딩 시스템의 질량의 변위이고, y_i 는 가진 입력의 변위이다. 따라서, 제안된 복합모드형태의 ER CD-ROM 마운트에 대한 지배방정식을 구하면 다음과 같다.

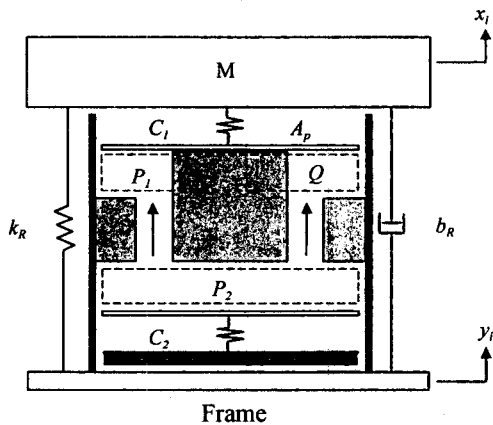
$$\begin{aligned}
 M\ddot{x}_i &= -F_i = -k_R(x_i - y_i) - b_R(\dot{x}_i - \dot{y}_i) - A_e \frac{\eta(\dot{x}_i - \dot{y}_i)}{h} \\
 &\quad - A_e \tau_{ys} \operatorname{sgn}(\dot{x}_i - \dot{y}_i) + A_p P_1 \\
 &= -k_R(x_i - y_i) - B(\dot{x}_i - \dot{y}_i) - F_{ERs} + A_p P_1
 \end{aligned} \tag{2}$$

한편, ER유체가 전극간격틈새를 흐를 때 발생하는 압력강하는 전기장 무 부하시의 압력강하 ΔP 와 전기장 부하시의 항복응력에 의한 압력 강하 ΔP_{ER} 의 합으로서 다음과 같이 표현된다⁽⁷⁾.

$$\begin{aligned}
 P_2 - P_1 &= \Delta P + \Delta P_{ER} \\
 &= \frac{12\eta L_e}{b_e h^3} Q_f + 2 \frac{L_e}{h} \tau_{yf} \operatorname{sgn}(Q_f) \\
 &= R_f Q_f + P_{ER} \operatorname{sgn}(Q_f)
 \end{aligned} \tag{3}$$



(a) Configuration



(b) Hydraulic model

Fig. 1 The proposed mixed-mode type ER CD-ROM mount

여기서 P_2 는 하부 챔버의 압력, Q_f 는 상하부 챔버의 압력차에 의해 발생하는 유체 유량이다. 상부 챔버와 하부 챔버에서 발생하는 유체유동에 대한 연속 방정식을 적용하면 다음의 관계식을 얻을 수 있다⁽⁸⁾.

$$\begin{aligned} C_1 \dot{P}_1 &= -A_p(\dot{x}_i - \dot{y}_i) + Q \\ C_2 \dot{P}_2 &= -Q \\ Q &= Q_f + Q_s = Q_f + \frac{A_s(\dot{x}_i - \dot{y}_i)}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

C_1, C_2 는 각각 고무커버와 다이어프램의 컴플라이언스, A_s 는 전극간극에 의해 형성된 유로의 단면적, Q_s 는 전단모드에 의해서 발생하는 유량, 그리고 Q_f 는 유동모드에 의해서 발생하는 유량이다. Q_f 를 정략적으로 나타내기 위하여 새로운 변수 x_{fi} 를 도입하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_f = A_p \dot{x}_{fi} \quad (5)$$

이제, 식 (3)~(5)를 정리하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} P_2 - P_1 &= -\frac{A_p}{C_2} x_{fi} - \frac{A_s(x_i - y_i)}{2C_2} \\ &+ \frac{A_p(x_i - y_i)}{C_1} - \frac{A_p}{C_1} x_{fi} - \frac{A_s(x_i - y_i)}{2C_1} \\ &= R_f A_p \dot{x}_{fi} + P_{ER} \operatorname{sgn}(\dot{x}_{fi}) \end{aligned} \quad (6)$$

양변에 A_p 를 곱하여 힘에 관한 방정식으로 다시 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} -k_2 x_{fi} - k_4(x_i - y_i) + k_1(x_i - y_i) \\ -k_1 x_{fi} - k_3(x_i - y_i) = D\dot{x}_{fi} + F_{ERf} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,

$$\begin{aligned} D &= R_f A_p^2, \quad k_1 = \frac{A_p^2}{C_1}, \quad k_2 = \frac{A_p^2}{C_2}, \\ k_3 &= \frac{A_p A_s}{2C_1}, \quad k_4 = \frac{A_p A_s}{2C_2} \end{aligned} \quad (8)$$

식 (2), (4), (7)로부터 ER CD-ROM 마운트에 대한 지배 방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} M\ddot{x}_i &= -k_R(x_i - y_i) - B(\dot{x}_i - \dot{y}_i) - F_{ERs} \\ &+ A_p \left[\left(-\frac{A_p}{C_1} + \frac{A_s}{2C_1} \right) (x_i - y_i) + \frac{A_p}{C_1} x_{fi} \right] \\ &= (k_3 - k_1 - k_R)(x_i - y_i) - B(\dot{x}_i - \dot{y}_i) + k_1 x_{fi} - F_{ERs} \end{aligned} \quad (9)$$

$$D\dot{x}_{fi} = -(k_1 + k_2)x_{fi} + (k_1 - k_3 - k_4)(x_i - y_i) - F_{ERf} \quad (10)$$

두개의 연계된 방정식에서 F_{ERs}, F_{ERf} 는 각각 전단모드와 유동모드에 의해서 발생하는 힘으로, 복합모드 형태의 ER CD-ROM 마운트에서 댐핑력으로 작용하게 된다.

3. ER CD-ROM 마운트의 제작 및 성능 고찰

ER유체의 특성은 일반적으로 전기장이 가해짐에 따라 유체의 전단응력이 변화되는 것으로, 전기장 무 부하시에는 유체 입자가 자유로이 운동하는 뉴토니안(Newtonian)유체 상태에서, 전기장 부하시에는 입자가 체인형의 구조를 형성하여 전기장 증가에 따라 유체의 항복응력이 증가하는 특성을 갖는 빙햄(Bingham) 거동을 보이는 것으로, 아래의 수식으로 표현된다.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + \tau_y(E) = \eta \dot{\gamma} + \alpha_j \left(\frac{V}{h} \right)^{\beta_j}, \quad j = s, f \quad (11)$$

여기서, η 는 유체의 점성계수, $\dot{\gamma}$ 는 유체의 전극에 대한 전단 속도 비, E 는 ER유체에 부하 되는 전기장, V 는 부하 되는 전압, h 는 전극 간격을 나타낸다. α_j 및 β_j 값은 ER유체의 고유치로서 α_s, β_s 는 전단모드, α_f, β_f 는 유동모드를 나타내며, 실험을 통하여 얻는다.

본 연구에서 제안된 ER CD-ROM 마운트의 경우, 전단모드와 유동모드가 동시에 존재하는 복합모드로서 빙햄특성 실험을 통하여 각 모드에 대한 항복응력을 도출하였다. 본 연구에서 사용된 ER유체는 자체 조성한 것으로서 실리콘 오일을 기본 용매로 하였으며, 특수 화학 처리된 전도성 전분 입자를 무게 중량비 50%로 하였다. Fig. 2는 빙햄 특성 실험 장

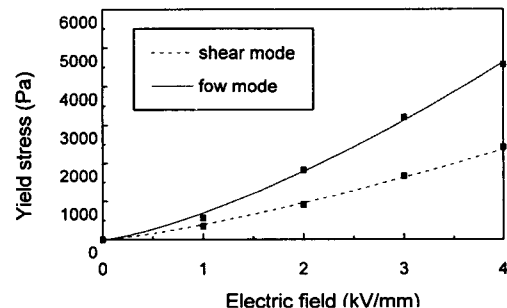


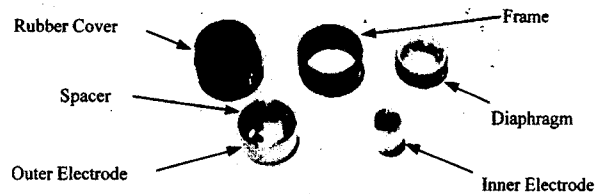
Fig. 2 Bingham properties of the ER fluid

치를 통하여 얻은 사용된 ER유체의 유동모드와 전단 모드하에서의 항복 응력(yield stress)을 나타낸다. 이를 전기장의 함수로 표현하면 각각 $688.87E^{1.373}$ [Pa]과 $385.93E^{1.305}$ [Pa]로서, E의 단위는 kV/mm이다. 전기장 증가에 따라 항복응력이 증가되는 것을 볼 때 전단모드에 비하여 유동모드가 약 1.92배정도 큰 것을 알 수 있다. 자세한 실험 장치 및 방법은 참고문헌 (9)에 잘 기술되어 있어 생략한다.

앞 절에서 유도된 ER CD-ROM 마운트의 모델과 ER유체의 전기장에 따른 항복응력을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 후, 이를 토대로 ER CD-ROM 마운트를 설계, 제작하였다. 실제 피딩 시스템에 적용될 수 있도록 강성과 댐핑력을 설계하였다. 이때 설계된 ER CD-ROM 마운트의 실제 설계 변수값들은 전달률에 대한 실험결과와 시뮬레이션 결과에 대한 곡선 맞춤법(curve fitting)을 통하여 구하였으며 Table 1에 나타나 있다. 제안된 ER CD-ROM 마운트는 전극형태를 실린더형으로 하였는데, 이는 평판형에 비하여 마운트 내부에 장착이 용이하고, 전기장의 작용단면적을 크게 구성할 수 있다. 전극간극은 1.5 mm가 되도록 하였으며, 사용된 전극재질로는 내측 전극에는 스테인레스 스틸과 외측 전극에는 가공이 용이한 알루미늄을 사용하였으며, 방전현상을 줄이기 위해 전극표면을 호닝가공하여 표면을 매끄럽게 다듬질하였다. ER CD-ROM 마운트의 외부 프레임은 절연을 위하여 MC(methyl cellulose) 플라스틱을 사용하여 가공하였다. 다이아프래임은 실리콘을 이용하여 제작하였다. 일반적인 방진고무의 강성은 피딩 시스템의 지지 중량과 설계자가 원하는 시스템의 공진주파수에 의해서 결정되며, 댐핑 계수는 주로 방진고무의 재료 특성에 의존한다.

본 연구에서 제시된 ER CD-ROM 마운트는 전기

장이 인가될 때 진동 제어의 영역을 확인하기 위하여 전기장 무 부하시 기존 방진 고무와 유사한 고유 주파수를 가지지만 전달률은 기존의 고무마운트보다 크게 설계하였으며, 전기장 부하 시에는 넓은 영역의 주파수 대역에서 진동 감쇠를 보이도록 하였다. 단, 일반적인 방진고무의 탄성과 감쇠 특성은 비선형성을 갖지만 ER CD-ROM 마운트의 성능 해석을 위하여 선형화된 모델로 단순화 하였다. 전기장 부하에 의해서 발생하는 댐핑력은 같은 유체에 대하여 주로 전극의 길이 및 면적, 마운트의 단면적에 주로 의존하며, 전극 간극과 ER유체의 점성에 의해서 영향을 받는다. 식 (10)은 유동모드에 발생하는 유체유량의 반응속도에 대한 것으로 그 값은 $(k_1 + k_2)/D$ 에 의해서 결정되며, 연계된 지배 방정식 (9)에서 강성의 증가로 나타나게 된다. 이것은 공진점 이후의 높은 주파수 대역에서 시스템의 성능 악화를 가져올 수 있으며 따라서 적절한 설계변수 값의 선택이 필요하다. 설계 변수 선정 시 ER CD-ROM 마운트의 크기는 실제 CD-ROM드라이브에 장착시킬 수 있도록 높이와 반지름을 각각 12 mm와 6 mm로 제한하여 설계하였다. Fig. 3은 제작된 ER CD-ROM 마운트의 부품도와 조립도 사진을 나타낸다.



(a) Components



(b) Assembly

Table 1 Parameters of the ER CD-ROM mount

Parameter	Value	Parameter	Value
L_e [m]	0.002	h [m]	0.0015
b_e [m]	0.012	k_R [N/m]	6000
A_e [m ²] (= $L_e b_e$)	2.4×10^{-5}	b_R [Ns/m]	3.3
A_p [m ²]	4.71×10^{-5}	C_1 [m ³ /N]	4.2×10^{-11}
A_s [m ²]	2.3×10^{-5}	C_2 [m ³ /N]	1.5×10^{-7}

Fig. 3 Photograph of the ER CD-ROM mount

제안된 ER CD-ROM 마운트의 진동절연성능을 고찰하기 위한 실험장치의 개략도가 Fig. 4에 도시되었다. 가진기(shaker)에 의하여 일정한 진폭으로 ER CD-ROM 마운트를 가진시키면서 가진부의 변위를 측정하는 동시에 ER CD-ROM 마운트를 통해 전달되는 피딩 시스템 질량의 진동변위를 측정하였

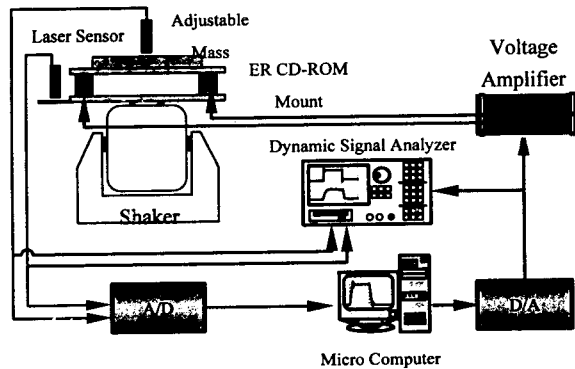
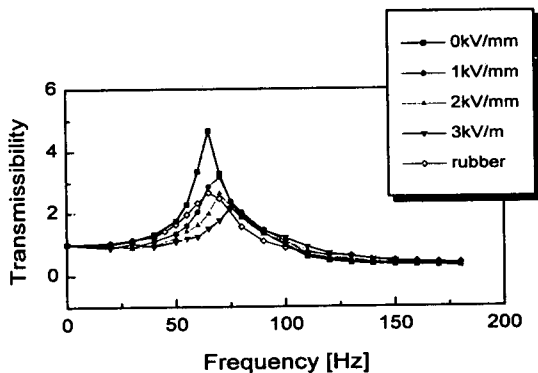
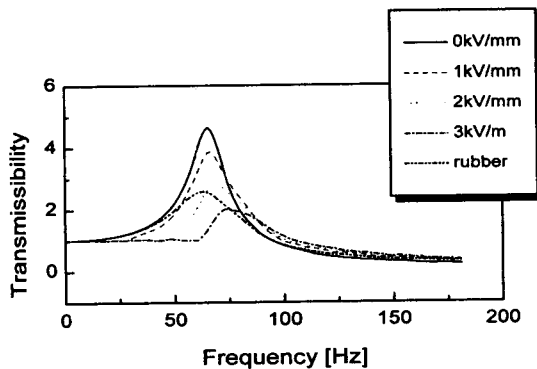


Fig. 4 Experimental apparatus for the ER CD-ROM mount test



(a) measured



(b) simulated

Fig. 5 Field-dependent transmissibility of the ER CD-ROM mount

다. ER CD-ROM 마운트의 전달률을 측정하기 위하여 실험에 사용된 센서는 레이저 센서(Keyence LC-2430)이다. 레이저 센서는 피딩 시스템 무게 중심 변위와 가진부의 수직변위들을 측정하였다. ER CD-ROM 마운트에 인가되는 가진 주파수와 전기장을 변화시켜가면서 실험을 수행하여 각 주파수에 따른 전달률(transmissibility)을 계산하여 제안된 시스템의 성능평가를 수행하였다. Fig. 5(a)는 선택된 설계변수 값을 통하여 일정한 전기장에 대한 ER CD-ROM 마운트의 변위 전달률을 기존의 방진고무의 변위 전달률과 비교한 것이다. 전기장 무 부하시와 1 kV/mm의 전기장의 인가시에는 일반적인 방진고무보다 높은 전달률을 보이는 것을 알 수 있으며, 2 kV/mm, 3 kV/mm의 전기장을 인가하였을 때, 공진점 부근에서 변위 전달률이 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 마운트의 설계 조건에 따라 전기장을 인가하지 않을 경우와 기존의 고무마운트의 전달률을 동일하게 할 수 있으나 본 연구에서는 전기장에 따른 보다 넓은 제어 영역을 확보하기 위하여 전기장 무부하시의 전달률이 기존 고무의 전달률보다 높게 설계하였다. 한편, 인가되는 전기장이 클수록 공진점 이후의 높은 주파수 영역에서 성능이 약간 저하되는 것을 볼 수 있다. 이는 공진이후의 비교적 높은 영역에서는 댐핑이 클수록 진동절연성능이 저하되기 때문이다. ER CD-ROM 마운트의 전기장 부하시 공진주파수 대역 부근에서 기존의 고무마운트에 비하여 우수한 진동절연성능을 발생시킴을 알 수 있다. 이로부터 실제 피딩 시스템에 제안된 ER CD-ROM 마운트가 장착될 경우 우수한 진동절연성능의 향상을 예측할 수 있다. Fig. 5 (b)는 시뮬레이션 결과로서 실험 결과와 매우 유사함을 알 수 있어 제안된 모델의 타당성을 입증한다.

4. 피딩 시스템의 모델링

Fig. 6은 전체 피딩 시스템에 대한 마운트의 성능평가를 위하여 ER CD-ROM 마운트가 장착된 피딩 시스템의 진동 모델을 나타내며 그림에서 보듯이 3 자유도를 갖는 시스템으로 모델링하였다. 피딩 시스템 자체의 변형에 의한 진동수는 강체 운동시의 고유 진동수보다 매우 높다고 가정하여 피딩 시스템을 강체로 가정하여 강체운동만을 고려하였다. G 는 피딩 시스템의 질량중심, z_b 는 질량 중심에서의 수직 변위, z_{bi} 는 i 번째 ER CD-ROM 마운트의 수직 변위, θ 는 x 축 방향의 각변위, 그리고 ϕ 는 y 축 방향

의 각변위를 나타내며, F_{ERi} 는 i 번째 ER CD-ROM 마운트의 전기장 인가 시 유동모드와 전단모드에 의해서 발생하는 댐핑력의 합이다. y_i 는 일정한 크기를 갖는 정현파로서 각각의 ER CD-ROM 마운트에

동일하게 입력되는 가진 변위이다. ER CD-ROM 마운트는 피딩 시스템의 4군데 모서리에 대칭으로 배치하였으며 도시된 피딩 시스템 모델로부터 동적 지배 방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 M \cdot \ddot{z}_b &= \left[-4K_I + \frac{4K_{II}k_1}{k_1+k_2} \right] \cdot z_b - 4B \cdot \dot{z}_b + \left[2K_I(l_{bf} - l_{br}) + \frac{2K_{II}(l_{br} - l_{bf})k_1}{k_1+k_2} \right] \cdot \theta + 2B(l_{bf} - l_{br}) \cdot \dot{\theta} \\
 &+ \left[2K_I(t_r - t_l) + \frac{2K_{II}(t_l - t_r)k_1}{k_1+k_2} \right] \cdot \phi + 2B(t_r - t_l) \cdot \dot{\phi} - \sum_{i=1}^4 F_{ERi} + D \cdot \sum_{i=1}^4 \dot{x}_{fi} + \left[4K_I - \frac{K_{II}k_1}{k_1+k_2} \right] \cdot y + 4B \cdot \dot{y} \\
 J_\theta \cdot \ddot{\theta} &= 2(l_{bf} - l_{br}) \left[2K_I - \frac{2K_{II}k_1}{k_1+k_2} \right] \cdot z_b + 2B(l_{bf} - l_{br}) \cdot \dot{z}_b + \left[-2K_I(l_{bf}^2 + l_{br}^2) + \frac{(l_{br} - l_{bf})^2 K_{II}k_1}{k_1+k_2} \right] \cdot \theta - 2B(l_{bf}^2 + l_{br}^2) \cdot \dot{\theta} \\
 &+ \left[K_I(l_{bf} - l_{br})(t_l - t_r) + \frac{2(l_{br}t_r - l_{bf}t_l)K_{II}k_1}{k_1+k_2} \right] \cdot \phi + B \cdot (l_{bf} - l_{br})(t_l - t_r) \cdot \dot{\phi} + l_{bf}(F_{ER1} + F_{ER4}) - l_{br}(F_{ER2} + F_{ER3}) \\
 &+ (l_{bf} - l_{br}) \left[-K_I + \frac{K_{II}k_1}{k_1+k_2} \right] \cdot 2y - 2B(l_{bf} - l_{br}) \cdot \dot{y} + \frac{k_1 D}{k_1+k_2} [l_{bf}(\dot{x}_{f1} + \dot{x}_{f4}) - l_{br}(\dot{x}_{f2} + \dot{x}_{f3})] \\
 J_\phi \cdot \ddot{\phi} &= 2(t_r - t_l) \left[K_I - \frac{K_{II}k_1}{k_1+k_2} \right] \cdot z_b + 2B(t_r - t_l) \cdot \dot{z}_b + (t_r - t_l)(l_{br} - l_{bf}) \left[K_I - \frac{K_{II}k_1}{k_1+k_2} \right] \cdot \theta + B(t_r - t_l)(l_{br} - l_{bf}) \cdot \dot{\theta} \\
 &+ 2 \left[-K_I(t_l^2 + t_r^2) + \frac{K_{II}k_1(t_l^2 - t_r^2)}{k_1+k_2} \right] \cdot \phi - 2B(t_l^2 + t_r^2) \cdot \dot{\phi} \\
 &- t_l(F_{ER1} + F_{ER2}) + t_r(F_{ER3} + F_{ER4}) + 2K_I(t_l - t_r) \cdot y + 2B(t_l - t_r) \cdot \dot{y} + \frac{k_1 D}{k_1+k_2} [t_l(\dot{x}_{f1} + \dot{x}_{f4}) - t_r(\dot{x}_{f2} + \dot{x}_{f3})]
 \end{aligned} \tag{12}$$

여기서, $K_I = k_R + k_1 - k_3$, $K_{II} = k_1 - k_3 - k_4$, $F_{ERi} = F_{ERsi} + \frac{k_1}{k_1+k_2} F_{ERfi}$, $i=1,2,3,4$

$$\begin{aligned}
 D \cdot \dot{x}_{f1} &= -(k_1+k_2) \cdot x_{f1} + (k_1-k_3-k_4)(z_b - l_{bf} \cdot \theta + t_l \cdot \phi) - y_i - F_{ERf1} \\
 D \cdot \dot{x}_{f2} &= -(k_1+k_2) \cdot x_{f2} + (k_1-k_3-k_4)(z_b + l_{br} \cdot \theta + t_l \cdot \phi) - y_i - F_{ERf2} \\
 D \cdot \dot{x}_{f3} &= -(k_1+k_2) \cdot x_{f3} + (k_1-k_3-k_4)(z_b + l_{br} \cdot \theta - t_r \cdot \phi) - y_i - F_{ERf3} \\
 D \cdot \dot{x}_{f4} &= -(k_1+k_2) \cdot x_{f4} + (k_1-k_3-k_4)(z_b - l_{bf} \cdot \theta - t_r \cdot \phi) - y_i - F_{ERf4}
 \end{aligned} \tag{13}$$

Table 2 Parameters of the CD-ROM drive feeding system

Parameter	Value	Parameter	Value
M [kg]	0.14	t_r [m]	0.0295
J_θ [kgm ²]	2.78×10^{-4}	t_l [m]	0.0295
J_ϕ [kgm ²]	5.91×10^{-5}	l_{bf} [m]	0.034
		l_{br} [m]	0.061

본 연구에서 사용된 각각의 시스템 변수들은 기존의 8배속 CD-ROM 드라이브의 피딩 시스템을 기준으로 선정하였고, 그 값들을 Table 2에 나열하였다. 식 (12)는 각각 피딩 시스템의 수직방향운동, 피칭(pitching)과 롤링(rolling)을 나타내며, ER CD-ROM 마운트의 전단모드에 의한 댐핑력 F_{ERsi} 와 유동모드에 의한 댐핑력 F_{ERfi} 로 인하여 각각의 운동을 제어하게 된다.

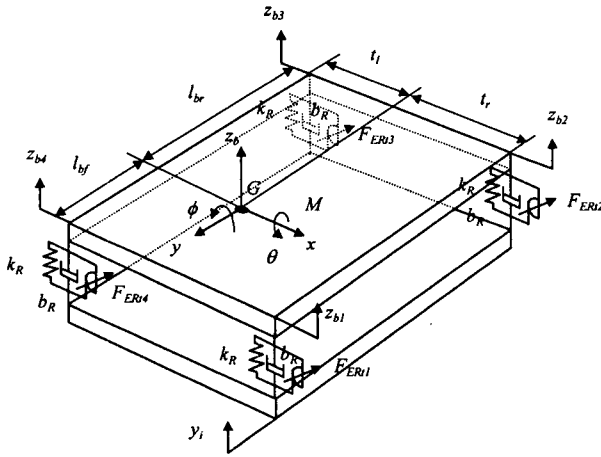


Fig. 6 Vibration model of the feeding system with ER CD-ROM mount

5. 제어기 설계

ER CD-ROM 마운트에 부하되는 전기장이 과다하게 들어갈 경우 과도한 댐핑에 의해서 공진주파수 이후의 비교적 높은 주파수 영역에서 진동절연성능이 저하되게 된다. 따라서 우수한 진동절연성능을 얻기 위해서는 적절한 제어알고리즘에 의한 진동제어가 필요하다. ER CD-ROM 마운트는 반 능동형(semi-active)으로서 구조가 간단하고 일반적으로 많이 사용되는 스카이훅 알고리즘의 사용이 매우 효과적이다⁽¹⁰⁾. 스카이훅 알고리즘은 시스템 위의 공간상에 설정된 절대 고정변위와 시스템 사이에 가상의 댐퍼를 설치하고 이 때 발생하는 가상 댐퍼의 댐핑력을 요구 댐핑력으로 사용하는 것으로, ER CD-ROM 마운트의 모델링을 통하여 도출된 수식을 이용하여 요구 댐핑력과 관계된 전기장 E 를 결정한다. 이 때 요구 댐핑력 U_i 는 다음과 같이 표현된다⁽¹¹⁾.

$$U_i = F_{ERi} = b_{sky} \cdot \dot{z}_{bi}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (14)$$

여기서 b_{sky} 는 스카이훅 알고리즘의 제어게인 값을 나타내며 물리적으로는 댐핑 계수를 나타낸다. ER CD-ROM 마운트는 반능동형이므로 제어입력 (U_i)은 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$U_i = \begin{cases} U_i & \text{for } U_i(\dot{z}_{bi} - \dot{y}_i) > 0 \\ 0 & \text{for } U_i(\dot{z}_{bi} - \dot{y}_i) \leq 0 \end{cases} \quad (15)$$

따라서 유동모드와 전단모드의 관계를 통하여 요구 성능을 얻기 위해 필요한 입력 전기장으로 요구 댐

핑력을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$E_i = \left[U_i \frac{h(k_1 + k_2)}{\alpha_s (h(k_1 + k_2)A_e + 1.92 \cdot 2 \cdot k_1 A_p L_e)} \right]^{\frac{1}{\beta_i}}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (16)$$

식 (14)에서 제어기 U_i 는 여러가지 상태변수를 요구한다. 그러나 실제로 구현하기 위해서는 사용하는 감지기(sensor)의 수가 제한되며 또한 모든 상태변수들이 직접적으로 측정하기가 어려운 경우가 있다. 본 연구에서는 ER CD-ROM 마운트 무게중심에서의 변위센서에 의한 피딩 시스템의 변위신호를 이용하여 전체-차수 관측기(full-order observer)를 구성하여 제어를 수행하였다⁽¹²⁾.

CD-ROM 마운트의 중요한 기능은 피딩 모터와 스피들 모터의 진동 및 외부에서 전달되는 진동이 광피업 장치에 전달되지 못하도록 절연하는 기능을 가져야 한다. 일반적인 스카이훅 제어기는 제어하고자 하는 대상에 가상의 댐퍼를 설치하여 진동제어를 수행하므로 제안된 스카이훅 제어기 (14)의 관심 부분은 일반적으로 광피업 장치가 장착된 피딩 시스템의 중앙부분이 아닌 각각의 ER CD-ROM 마운트가 장착된 부분이다. 따라서 본 연구에서는 피딩 시스템의 무게 중심의 수직 변위와 각속도 성분을 고려한 퍼지 알고리즘(fuzzy algorithm)을 제안된 스카이훅 제어기 (14)와 연계하여 피딩 시스템의 무게 중심부분의 진동 절연 성능을 향상시키고자 퍼지-스카이훅(fuzzy-skyhook) 제어기를 제안하였다. 퍼지 알고리즘을 실제로 적용할 때, 최초로 문제가 되는 것은 제어기의 설계, 즉 퍼지 제어 규칙을 어떻게 설정하는가 하는 점이다. 이를 위하여 관측기에 의하여 관측되는 수직변위 속도성분 \dot{z}_b 와 x 축 방향의 각속도 성분 $\dot{\theta}$ 를 고려하기로 한다. 이로부터 퍼지 제어(FC:fuzzy control)의 언어적 규칙을 나타내는 다음과 같은 조건문을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{If } \dot{z}_b, \dot{\theta} \text{ is big, then } \eta_{fuzzy} \text{ is big} \\ & \text{If } \dot{z}_b, \dot{\theta} \text{ is small, then } \eta_{fuzzy} \text{ is small} \end{aligned} \quad (18)$$

이러한 언어적 규칙을 갖는 FC를 설계하기 위해서 실제 외란 값과 관측된 외란 값의 차이에 대한 정보를 나타내는 변수를 다음과 같이 정의한다.

$$\alpha = |\dot{z}_b|, \beta = |\dot{\theta}| \quad (19)$$

이와 같이 정의된 α 와 β 의 값을 퍼지화 시킨 변수

로 변환한다. 이와 같이 설계된 퍼지-스카이훅 제어기를 나타내면 다음과 같다.

$$U_i = F_{ERi} = b_{skyi} \cdot \eta_{fuzzy} \cdot \dot{z}_{bi}, i = 1, 2, 3, 4 \quad (24)$$

6. 진동 제어 결과 및 고찰

퍼지 스카이훅 알고리즘을 이용한 ER CD-ROM 마운트의 성능 평가를 위하여 주파수 영역과 시간 영역에 대하여 각각 제어를 수행하였다. 이때 적용된 ER CD-ROM 마운트의 설계 변수값들은 Table 1에 제시된 실제 값들을 사용하였다. 인가되는 전기장은 ER유체의 전열과피를 고려하여 3 kV/mm로 제안하였다. Fig. 8은 관측기로부터 예측되는 상태변수 값의 타당성을 고찰하기 위하여 관측된 상태변수가 실제 상태변수를 추적하는 결과를 제시하였다. 보는 바와 같이 각각의 관측된 상태변수들이 약 0.1초후 실제 값들에 잘 추적하는 것을 볼 수 있다. 그러므로 설계된 관측기로부터 추정된 값을 제어기에 적용시킴이 타당함을 알 수 있다. Fig. 9는 가진 입력에 대한 피딩 시스템의 무게중심 (z_b)과 1번 ER CD-ROM 마운트 z_{b1} 와 2번 ER CD-ROM마운트 z_{b2} 의 변위 전달률을 주파수 영역에서 나타낸 것이다. 가진 입력은 각각의 ER CD-ROM 마운트 부분에서 $y_i = 100 \times \sin(2\pi \times \omega \times time)[\mu m]$, $i = 1, 2, 3, 4$ 로 가정

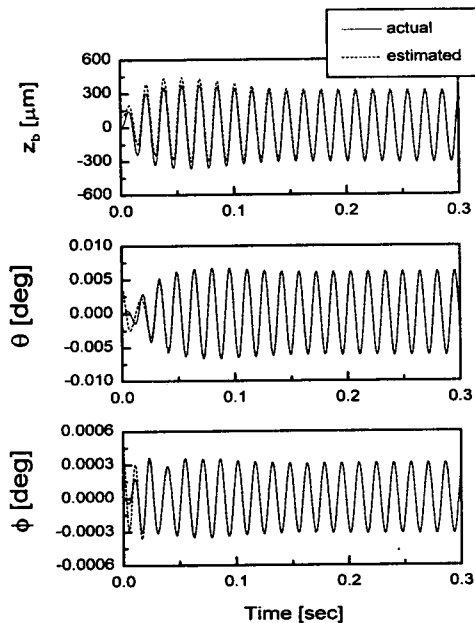
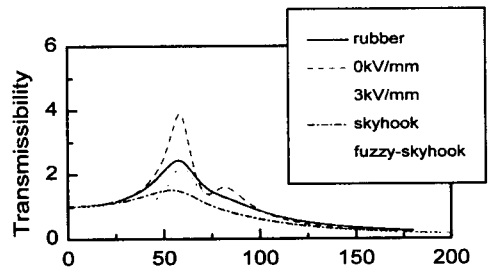
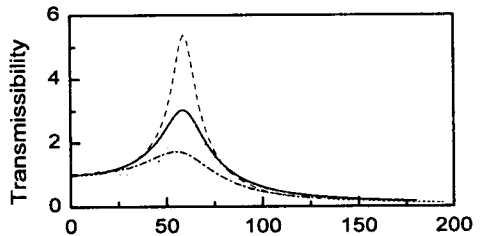


Fig. 8 Time responses of the state estimation

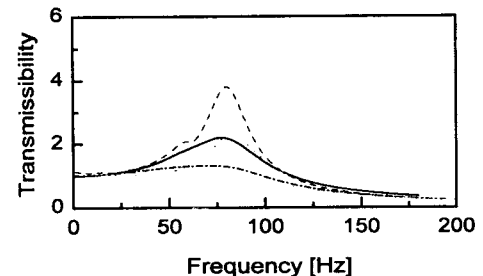
하였다. 여기서 ω 는 가진 주파수이다. 제어 입력의 무부하시에는 공진점 부근에서 기존의 고무마운트보다 높은 전달률을 보인다. 그러나 ER CD-ROM 마운트에 3 kV/mm의 일정한 전기장을 인가하면 공진점 부근에서 전달률이 크게 감소되는 것을 볼 수 있으나 상대적으로 높은 주파수 영역에서는 전달률이 상대적으로 작은 감소를 보임을 볼 수 있다. 이는 ER CD-ROM 마운트에 전기장이 인가될 때 고무 영역에서 시스템의 성능이 악화되는 특징을 나타내기 때문이다. 그러나 스카이훅 제어기에 의한 제어 전압의 인가시에는 공진 주파수 부근뿐만 아니라 전 영역에서 전달률이 크게 감소되는 것을 볼 수 있다. 여기서 사용된 스카이훅 게인값은 모두 7을 적용하였다. 한편 본 연구에서 새롭게 제안된 퍼지-스카이훅 제어기에 의한 제어 입력의 인가시에는 스카이훅 제어기만을 사용하였을 때보다 전 영역에서



(a) C.G. of feeding system (z_b)



(b) 1st ER CD-ROM mount (z_{b1})



(c) 2nd ER CD-ROM mount (z_{b2})

Fig. 9 Transmissibility responses of the feeding system

전달률이 더욱 감소됨을 볼 수 있어 제안된 제어기의 성능이 우수함을 알 수 있다. (z_{b1})와 (z_{b2})도 퍼지-스카이훅 제어기 적용시 가장 좋은 진동 제어 성능이 나타남을 볼 수 있다. Fig. 10은 피딩 시스템의 무게 중심에서의 수직 변위와 인가된 전기장의 결과를 각각 스카이훅 제어기와 퍼지 스카이훅에 대하여 시간 영역에서 나타낸 것이다. Fig. 10(a)는 외란이 50 Hz로 가해질 때의 제어 결과로서 제어 입력이 부하되는 0.5 sec부터 양쪽 다 진동 제어가 우수히 수행됨을 볼 수 있다. 그러나 퍼지-스카이훅 제어기의 적용시 스카이훅 제어기의 적용시보다 약 30~40 μm 정도의 진동이 제어됨을 볼 수 있다. Fig. 10(b)는 65 Hz의 외란이 인가될 때의 제어 결과로서 제어 입력이 부하되면서 Fig. 10(a)의 경우보다 더 변위가 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 제어 입력

도 반응등 조건을 만족하며 인가되는 것을 볼 수 있다.

7. 결 론

본 연구에서는 CD-ROM 드라이브의 새로운 방진 시스템으로서 ER유체를 이용한 ER CD-ROM 마운트를 제안하였다. 유체 유동에 대한 연속 방정식을 통하여 ER CD-ROM 마운트에 대한 지배 방정식을 도출 하였으며, 이를 이용한 변위 전달률과 퍼지-스카이훅 제어기를 통한 성능 평가 결과 고유진동수 주파수 영역 부근에서 높은 진동 감쇠 성능을 보였다. 또한 이를 장착한 피딩 시스템의 진동 제어 컴퓨터 시뮬레이션 결과 질량 중심에서의 변위와 ER CD-ROM 마운트에서의 변위가 기존의 고무마운트에 비하여 전기장 제어 시 크게 감소하는 것을 볼 수 있었다. 현재 제안된 ER CD-ROM 마운트의 실용화를 위하여 시간에 대한 각종 내구성 실험과 나아가 기존의 CD-ROM 드라이브의 피딩 시스템과 연계된 HILS(hardware-in the loop simulation)를 통하여 여러 제어 성능을 입증하고 있는 중이다.

참 고 문 헌

- (1) Fujitani, L., 1984, "Laser Optical Disk: The Coming Revolution in On-line Storage," Communication of the ACM, Vol. 27(6), pp. 546~554.
- (2) Mitsuhashi, Y., 1988, "Optical Storage: Science and Technology," Japanese Journal of the Applied Physics, Vol. 37, pp. 2079~2083.
- (3) 이승엽, 1998, "광디스크 드라이브의 최근 동향과 기계적 진동의 영향," 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 218~226.
- (4) 노대성, 정진태, 1997, "광디스크 드라이브의 메커니즘과 진동소음," 한국소음진동공학회지, Vol. 7(3), pp. 362~368.
- (5) Jeon, Y. S., Choi, Y. T. and Choi, S. B., 1995, "Vibration Control of an Engine Mount Featuring Electro-Rheological Fluids," Asia-Pacific Vibration Conference, pp. 191~196.
- (6) Choi, S. B., Lee, J. H. and Cheong, C. C., 1999, "Vibration Control of Flexible Structures Using ER Fluid Dampers, Proceedings of the SPIE's Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, U.S.A., pp. 506~515.
- (7) Nakamura, S., 1993, Applied Numerical Methods

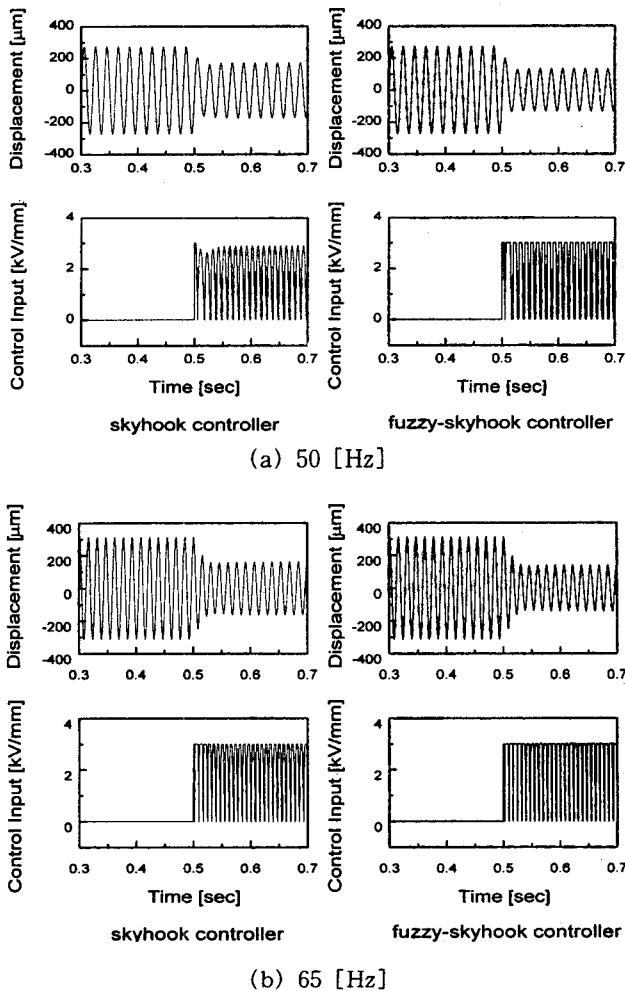


Fig. 10 Time responses of the feeding system using the proposed controllers

in C, Prentice-Hall International, Inc., London.

(8) Singh, R. and Kim G., 1993, "Nonlinear Analysis of Automotive Hydraulic Engine Mount," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 158(2), pp. 219~243.

(9) 이호근, 성금길, 최승복, 정재천, 1998, "작동 모드에 따른 ER유체의 빙햄 특성 비교," 한국유변학회 추계 학술대회논문집, pp. 132~135.

(10) Karnopp, D. and Crosby, M. J., 1974, "Vibration Control Using Semi-active Force Generators," *ASME Journal of Engineering for*

Industry, Vol. 96(2), pp. 619~626.

(11) Choi, S. B., Choi, Y. T., Chang, E. G., Han, S. J. and Kim, C. S., 1998, "Control Characteristics of a Continuously Variable ER Damper," *Mechatronics*, Vol. 8, pp. 143~161.

(12) Chen, C. T., 1984, *Linear System Theory and Design*, CBS college publishing

(13) Choi, S. B. and Kim, J. S., 1997, "A Fuzzy-Sliding Mode Controller for Robust Tracking of Robotic Manipulator," *Mechatronics*, Vol. 7(2), pp. 199~216.