

SMA 작동기를 이용한 HDD의 비접촉 시동 및 정지 기구의 실험적 성능 고찰

⁰임수철*, 박종성*, 최승복**, 박영필***

Experimental Evaluation of HDD's Non-Contact Start/Stop Motion Using Shape Memory Alloy Actuator

S. C. Lim, J. S. Park, S. B. Choi and Y. P. Park

ABSTRACT

In this work, we propose a new type of HDD suspension featuring shape memory alloy (SMA) actuator in order to prevent the contact between the slider and disk. The principal design parameters are obtained from the modal analysis using finite element analysis, and then the dynamic model is established to formulate the control scheme for Non-Contact Start/Stop mode drive. Subsequently, a robust H_{∞} control algorithm is designed by integrating experimentally-obtained SMA actuator dynamics to the proposed suspension system. The controller is empirically realized and control results for different load/unload profiles are presented in time domain. In addition, the contact signal between the slider and disk is measured by the electrical resistance method.

1. 서 론

하드디스크 드라이브(hard disk drive; HDD)의 기록 밀도를 증가시키기 위해서는 디스크 표면의 조도를 향상시켜 슬라이더의 부상 높이(flying height)를 최대한 낮추어야 한다. 현재 슬라이더의 부상 높이는 25nm 이하로 디스크 표면의 최대 거칠기 높이와 거의 같은 수준까지 도달하였다. 현재 사용중인 대부분의 3.5" HDD의 경우, contact start/stop(CSS) 형태를 취하고 있는데, 이러한 형태의 드라이브는 시동 및 정지 시 충분한 공기압이 발생되기 전까지 일정 시간동안 슬라이더와 디스크 표면이 마찰을 일으키게 된다. 이로 인해 발생된 마모/마멸 입자는 슬라이더와 충돌하여 공기베어링을 불안정하게 하거나 디스크 표면과 충돌하면서 디스크 표면의 코팅 층 및 자화 층 등을 손상시켜 데이터의 입출력을 방해하게 된다.^(1,2) 따라서 드라이브 시동 및 정지 시 발생하는 슬라이더와 디스크 사이의 마찰을 제거하기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔다. Jeong 등⁽³⁾과 Zeng 등⁽⁴⁾은 ramp를 이용한 L/UL(load/unload)시 발생하는 슬라

이더의 진동현상과 이때 발생하는 슬라이더/디스크의 충돌을 제거하기 위하여 연구하였으며, Hashimoto 등⁽⁵⁾은 load 시 발생하는 슬라이더의 roll motion을 제거하기 위하여 ramp-cam이 부착된 로드 빔을 제안하였다. 또한 Tagawa 등⁽⁶⁾과 Kajitani 등⁽⁷⁾은 압전재료를 액츄에이터로 적용한 새로운 형태의 L/UL 기구에 대하여 연구하였다. 그러나 압전재료를 이용할 경우, Non-CSS 형태의 슬라이더를 구현하기 위하여 높은 제어 전압을 인가해야 하며 load 상태를 유지하기 위하여 지속적인 전원 공급이 필요하다는 문제점이 있다. 또한 ramp 기구를 이용한 L/UL 드라이브의 경우, ramp profile을 load와 unload 과정에 대하여 독립적으로 설계할 수 없으며, 디스크의 일부분이 ramp 기구에 삽입됨으로써 저장면적의 손실을 가져온다는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 대표적 지능재료의 하나인 형상기억합금(SMA; shape memory alloy) 작동기가 장착된 새로운 형태의 서스펜션을 구성하고 이를 이용한 Non-CSS(contact start/stop)드라이브를 제안하였다. 이를 위해 먼저 유한요소법을 이용한 모달 해석(modal analysis)을 통하여 제안된 시스템의 동특성을 파악한 후 기존 시스템과 비교하였으며, 이를 바탕으로 HGA(head gimbal assembly)에

*인하대학교 기계공학과 대학원

**인하대학교 기계공학과

***연세대학교 기계공학과

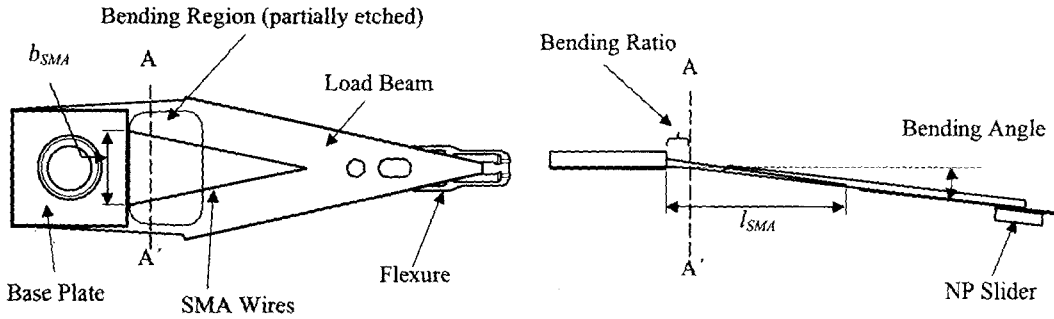


Fig. 1 Configuration of the self-loading/unloading slider

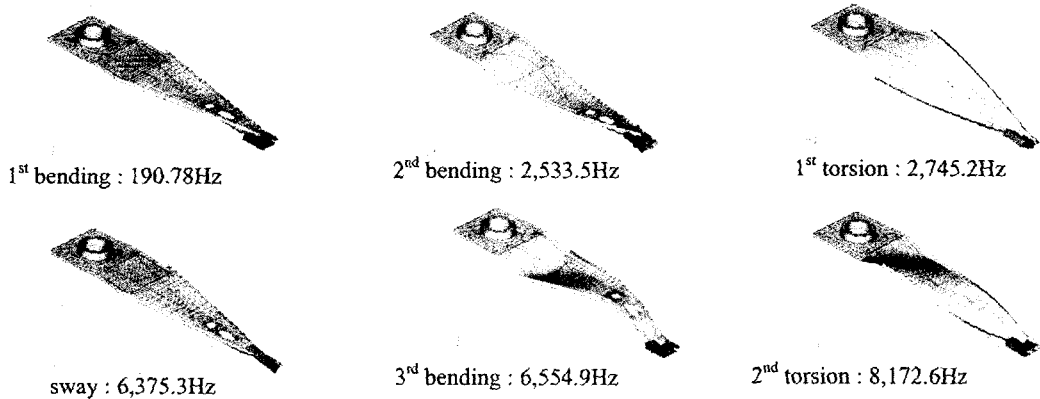


Fig. 2 Mode shapes of the proposed suspension for free unloaded case

대한 동적 모델을 구축하였다. 또한 실제 실험을 통하여 얻어진 SMA 작동기에 대한 동적 모델과 연계하여, 제안된 시스템에 대한 지배 방정식을 도출하였다. 드라이브 사용 전 영역에서 Non-CSS 드라이브를 구현하기 위하여, 스피들 회전과 연계하여 슬라이더의 운동을 설계하고 이에 대한 위치 추적 제어를 위하여 시스템 불확실성이 고려된 H_2 제어기를 설계하였다. 실제 제작된 서스펜션을 기존 드라이브에 장착한 후, 실험을 통하여 제어 성능을 시간 영역에서 고찰하였으며 슬라이더의 위치 제어 시 슬라이더/디스크의 충동을 효과적으로 검출하기 위하여 electrical resistance 방법을 사용하였다. 나아가 충동 신호를 디스크 근처에서의 슬라이더에 대한 변위 제어 결과와 함께 제시하였다.

2. 시스템 모델링

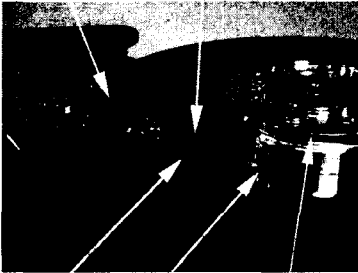
본 연구에서 사용된 HGA 모델은 Hutchinson 사의 Type 850 TAVSF 서스펜션과 50% 부압(negative pressure) 슬라이더로서, Fig. 1은 이를 변경한 서스

펜션 구성도이다. 선재 형태의 SMA 작동기가 E-block 과 연결된 베이스 플레이트와 로드 빔의 일정부분에 걸쳐 부착되어 있다 ($b_{SMA} = 3.5mm$, $l_{SMA} = 8.2mm$). 로드 빔의 굽힘 각도와 굽힘비는 각각 10° 와 25%로 설정하였으며 작동기의 설계변수와 부착 위치는 FEM 해석 결과를 토대로 충분한 부상 높이와 기존 시스템과의 비교를 위하여 최대한 동특성이 변화하지 않는 위치를 선정하여 장착하였다. Fig.2는 제안된 모델에 대한 모달 해석 결과이며, Table.1은 기존 HGA와 본 연구에서 제시된 모델에 대한 공진주파수를 비교한 것이다. 모달 해석 결과, 작동기 부착에 의한 동특성 변화는 첫번째 공진주파수에서 약 4.4%로 가장 큰 변화를 나타내었다. 이것은 작동기 부착에 의한 서스펜션의 강성증가로 인한 것이나 다른 모드에서는 거의 동특성의 변화가 없었다. 이러한 결과는 SMA 작동기가 기존의 상용화된 HGA에 설계변경 없이 쉽게 적용될 수 있음을 보여준다. 또한, SMA 작동기에 의한 서스펜션의 최대 변위는 FEM 해석 결과 약 $376\mu m$ 로써, $25nm$ 이하의 슬라이더의 부

Table.1 Natural frequencies of the suspension for free unloaded case

Mode	Natural Frequency (Hz)	
	Without SMA	With SMA
1 st bending	182.68	190.78
2 nd bending	2,535.2	2,533.5
1 st torsion	2,744.9	2,745.2
Sway	6,374.9	6,375.3
3 rd bending	6,557.2	6,554.9
2 nd torsion	8,172.5	8,172.6

E-Block SMA Actuator



Load Beam NP Slider Spindle Motor

Fig. 3. Photograph of the proposed HDD suspension

상높이를 고려할 때 드라이브가 원활한 L/UL 를 수행하기에 충분한 변위이다. FEM 해석에 사용된 HGA 와 SMA 작동기의 물성치는 기존 연구 결과를 참조하였다.⁽⁸⁾ SMA 작동기의 지름은 로드 빔의 두께와 유사한 0.076mm 로써, 입력 전류에 대한 발생 모멘트와 스피들의 rpm 변화에 대하여 충분한 반응속도를 가지도록 설정되었다. Fig.3 은 실제 제작된 서스펜션이 기존 드라이브에 장착되어 있는 사진이다.

FEM 해석 결과로부터 기본적인 설계변수를 도출한 후, 드라이브의 L/UL 시 가장 지배적인 운동을 고려하여 제안된 서스펜션에 대하여 Fig.4 와 같이 1 자유도를 갖는 진동 모델을 구성하였다. 제안된 동적 모델로부터 포텐셜 에너지, 운동 에너지, 그리고 비보전력에 의한 가상일과 라그랑주 방정식으로부터 다음과 같은 동적 방정식을 얻을 수 있다.

$$M_{eq} \ddot{y}_l + \left[M \frac{l_{cg}(l-l_{cg})}{l^2} - \frac{J_{cg}}{l^2} \right] \ddot{y}_e + c_{eq}(\dot{y}_l - \dot{y}_e) + k_{eq}(y_l - y_e) = \frac{M_t}{l} + F_e \quad (1)$$

$$+ k_{eq}(y_l - y_e) = \frac{M_t}{l} + F_e$$

$$여기서, \quad M_{eq} = M \left(\frac{l_{cg}}{l} \right)^2 + \frac{J_{cg}}{l^2}$$

$$c_{eq} = \frac{c_t}{l^2} = 2\zeta_{eq} \sqrt{M_{eq}k_{eq}}, \quad k_{eq} = \frac{k_t}{l^2}$$

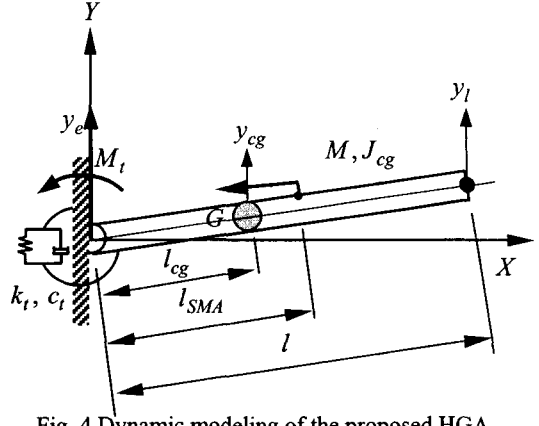


Fig. 4 Dynamic modeling of the proposed HGA

식 (1)에서, k_t 와 c_t 는 각각 로드 빔의 토션 스프링 상수와 토션 댐핑계수를 나타낸다. M_t 는 SMA 작동기에 의해 발생하는 모멘트이며, c_{eq} 는 등가 댐핑계수이다. 위식으로부터, SMA 작동기 의해 발생하는 모멘트를 조절함으로써 슬라이더의 변위 y_l 을 제어할 수 있다. 입력전류에 의해 SMA 작동기에서 발생하는 모멘트에 대한 동적 특성은 제작된 모델로부터 실험을 통하여 구하였다. Fig.5 는 실험을 통하여 얻어진 제어 입력과 모멘트 사이의 관계를 나타낸 것이다. 그림으로부터, 작동기의 발생 모멘트는 공급되는 전류에 의해 지속적으로 증가, 감소하며 이는 다음과 같은 시간의 함수로 표현할 수 있다.^(9,10)

$$M_t = \begin{cases} M_{t_max} [1 - \exp(-t/\tau_s)] & \text{for } 0 \leq t < t_1 \\ M_{t_max} & \text{for } t_1 \leq t < t_2 \\ M_{t_max} [\exp(-t/\tau_f)] & \text{for } t_2 \leq t < t_3 \end{cases} \quad (2)$$

여기서 M_{t_max} 는 작동기가 발생시킬 수 있는 최대 모멘트이며, τ_s , τ_f 는 각각 전류 입력 및 차단 시의 시상수(time constant)를 나타낸다. 제안된 SMA 작동기는 입력 전류의 인가에 의하여 heating 과정에만 모멘트를 발생시킬 수 있다. 따라서 요구 모멘트(M_t)의 부호를 고려하여 입력 전류와

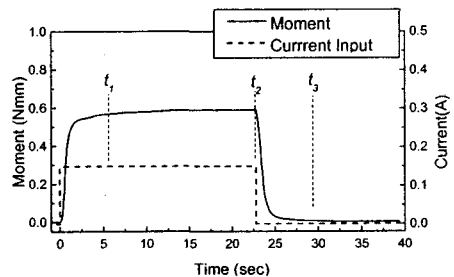


Fig. 5 Dynamic Characteristics of the SMA actuator

발생 모멘트를 다음과 같은 1차 선형 모델로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau_s \frac{dM_l}{dt} + M_l &= k_i \cdot i(t) : M_l > 0 \\ \tau_f \frac{dM_l}{dt} + M_l &= 0 : M_l \leq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 k_i 는 입력전류, $i(t)$ 의 영향계수(input influence coefficient) 이다.

결국 작동기에 대한 미분 방정식(3)과 SMA 작동기가 장착되어 있는 HGA 에 대한 지배 방정식 (1)로부터 전체 시스템에 대한 지배 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} M_{eq} \ddot{y}_l + \left[\frac{M l_{cg} (l - l_{cg}) - J_{cg}}{I^2} \right] \ddot{y}_e + \frac{M_{eq}}{\tau} \dot{y}_l \\ + \left[\frac{M l_{cg} (l - l_{cg}) - J_{cg}}{I^2 \tau} \right] \dot{y}_e + c_{eq} (\dot{y}_l - \dot{y}_e) \\ + \left[k_{eq} + \frac{c_{eq}}{\tau} \right] (y_l - y_e) + \frac{k_{eq}}{\tau} (y_l - y_e) = M_{eq} \frac{b}{\tau} \cdot u(t) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $b = k_i / (l \cdot M_{eq})$ 이며, 어제 전류 $u(t)$ 의 입력 조건은 다음과 같다.

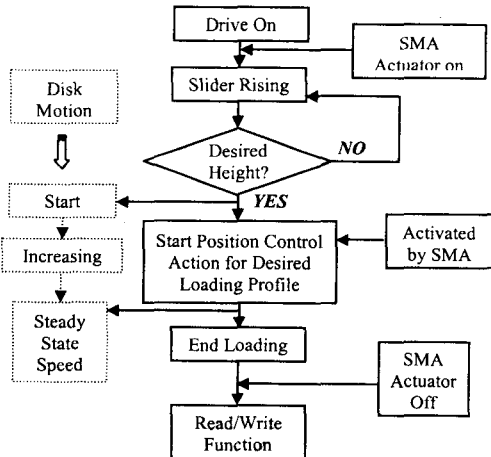
$$\begin{cases} u(t) = u(t) \text{ and } \tau = \tau_s \text{ for } u(t) > 0 \\ u(t) = 0 \text{ and } \tau = \tau_f \text{ for } u(t) \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

E-block 에 인가되는 가진 변위 y_e 에 대한 슬라이더의 변위 y_l 의 전달률 실험 결과, 위에서 제시된 동적 모델로부터 유도된 지배 방정식 (4)에 대한 시뮬레이션 결과와 매우 유사하였으며 이는 제안된 동적 모델의 타당성을 입증한다.

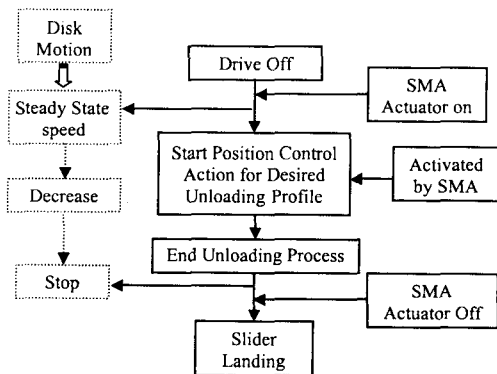
3. 제어기 설계

Fig. 6 은 제안된 서스펜션에 의해 Non-CSS 드라이브를 구현하기 위한 제어 흐름을 나타낸 것으로써, Fig. 6(a)는 드라이브 시동 시 SMA 작동기가 스핀들 회전과 연계되어 Non-Contact Start 드라이브를 구성하는 것을 보여준다. 사용자에게 의한 드라이브 구동 신호는 제어기로 보내지며, 위치제어기는 슬라이더의 변위 y_l 를 디스크 표면으로부터 일정 높이로 위치시킨다. 이때 슬라이더의 요구 위치는 스핀들 회전 시 발생하는 디스크의 진동이나 공기 흐름에 의해 슬라이더가 디스크 표면과 충돌하지 않도록 설정된다. 슬라이더가 요구 위치에 도달하면 스핀들은 회전을 시작하고, 일정회전속도(5,400rpm)에 도달하여 충분한 공기압이 발생하면 슬라이더는 요구 load profile 를 추적하면서 디스크 표면으로 접근하여 공기베어링에 의하여 일정한 부상높이를 가지게 되며, 이후 SMA 작동기에 입력전류는 차단된다. 드라이브 정지 시는 Fig. 6(b)와 같이 슬라이더 unloading, 디스크 정지, 슬라이더 landing, 그리고 입력전류 차단에 의하여 Non-Contact Stop 드라이브가 구현된다. 이와 같이 Non-CSS 드라이브를 구성하는데 있어서, L/UL profile 은 슬라이더/디스크 충돌을 방지할 수 있는 중요한 설계 변수가 된다.⁽¹¹⁻¹³⁾ 본 연구에서는 슬라이더의 제안된 시스템의 L/UL 성능 향상을 위하여 다음과 같은 L/UL profile 을 설계하였다.

$$\begin{aligned} y &= \frac{h}{2} \left\{ 1 + \cos\left(\frac{\pi t}{\Delta t}\right) \right\} : \text{harmonic profile} \\ y &= h \left\{ 1 - \frac{t}{\Delta t} + \frac{1}{2\pi} \sin\left(2\pi \frac{t}{\Delta t}\right) \right\} : \text{cycloidal profile} \end{aligned} \quad (6)$$



(a) loading process



(b) unloading process

Fig. 6 Control principles for the Non-CSS drive system

여기서 h 는 슬라이더의 최대 변위이며, Δt 는 L/UL 에 걸리는 시간이다.

본 연구에서는 요구 L/UL 프로파일에 대한 슬라이더의 변위 추적을 위하여 McFarlane과 Glover에 의해 제안된 루프형상기법(LSDP) H_∞ 제어를 적용하였다. 루프형상기법 H_∞ 제어는 고전적 루프형상기법에 근거하여 개 루프 형상에 따라 설계 목적에 부합하는 가중함수를 선정할 수 있는 방법이다.⁽¹⁴⁾ 먼저, 공칭 플랜트(nominal plant) G 를 정규화 된 좌소인수요소(normalized left coprime factor)의 형태로 나타낸다.

$$G = \tilde{M}^{-1}\tilde{N} = \frac{b/\tau_s}{s^3 + \left[\frac{1}{\tau_s} + 2\omega_n\right]s^2 + \left[\omega_n^2 + 2\zeta_{eq}\frac{\omega_n}{\tau_s}\right]s + \frac{\omega_n^2}{\tau_s}} \quad (7)$$

또한, 소인수요소섭동(coprime factor perturbation)을 고려한 섭동 플랜트(perturbed plant) G_Δ 는 식(8)과 같다. 여기서 소인수요소섭동 $[\Delta_N, \Delta_M]$ 는 SMA 작동기 부착에 따른 질량부과와 강성증가로 인한 공진 주파수의 변동과 디스크 회전 시 발생하는 공기 유동에 의한 SMA 작동기의 열소산에 의한 시상수의 변동을 포함하며, $\|\Delta_M, \Delta_N\|_\infty \leq 1/\gamma$ 조건을 만족한다. 여기서, $1/\gamma$ 는 최대 안정도 여유(maximum stability margin)를 의미한다. Fig. 7은 공칭플랜트 G 와 섭동플랜트 G_Δ 에 대한 특이치 곡선(singular value plot)을 나타낸 것으로써, 공칭플랜트와 섭동플랜트가 서로 다른 특이치 곡선을 가짐을 알 수 있다. 식(7)의 공칭플랜트에 대하여 개루프 특이치가 설계목적에 부합하도록 가중함수

$$G_\Delta = \tilde{M}_\Delta^{-1}\tilde{N}_\Delta = (\tilde{M} + \Delta_M)^{-1}(\tilde{N} + \Delta_N) = \frac{b/(\tau_s + \Delta\tau_s)}{s^3 + \left[\frac{1}{\tau_s + \Delta\tau_s} + 2(\omega_n + \Delta\omega_n)\right]s^2 + \left[(\omega_n + \Delta\omega_n)^2 + 2\zeta_{eq}\frac{\omega_n + \Delta\omega_n}{\tau_s + \Delta\tau_s}\right]s + \frac{(\omega_n + \Delta\omega_n)^2}{\tau_s + \Delta\tau_s}} \quad (8)$$

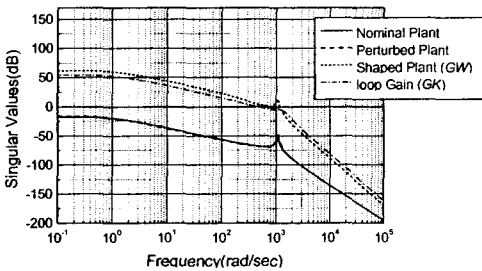


Fig. 7 Singular value plots of the proposed control system

W 를 선정한다. Fig.7로부터 낮은 주파수대역에서 큰 이득을 가지며 폐 루프 대역폭을 증가시켜 외란의 영향을 억제할 수 있도록 설계하였으며, 제어기의 차수를 고려하여 다음과 같은 1차 함수를 선정하였다.

$$W = \frac{2 \cdot 10^6}{s + 200} \quad (9)$$

가중함수 W 와 공칭플랜트 G 가 결합된 형상화 플랜트(shaped plant) GW 에 대한 건설 안정화 제어기 K_∞ 가 공칭플랜트 G 를 안정화 한다면 다음 관계에 의하여 소인수요소섭동 $[\Delta_N, \Delta_M]$ 를 갖는 식(8)의 시스템을 안정화 시킨다.

$$\left\| \begin{bmatrix} K_\infty \\ I \end{bmatrix} (I - G_S K)^{-1} \tilde{M}_S^{-1} \right\|_\infty \leq \gamma \quad (10)$$

따라서 형상화 플랜트 $G_S (=GW)$ 의 좌소인수요소 건설 안정화를 위한 최적해 γ_{min} 는 McFarlane와 Glover가 제안한 다음의 관계를 적용하여 반복적인 계산 없이 얻을 수 있다.⁽¹⁴⁾

$$\inf_{K_\infty} \left\| \begin{bmatrix} K_\infty \\ I \end{bmatrix} (I - G_S K)^{-1} \tilde{M}_S^{-1} \right\|_\infty = \left\{ \sqrt{1 - \|\tilde{N}_S, \tilde{M}_S\|_H^2} \right\}^{-1} = \gamma_{min} \quad (11)$$

여기서 \tilde{N}_S 와 \tilde{M}_S 는 형상화 플랜트의 정규화된 좌소인수요소를 나타낸다. 실제 제어기 설계 시 γ 는 γ_{min} 보다 약간 큰 값을 선정하며 본 연구에서는 $\gamma=2.65$ 의 값을 사용하였다. 형상화 플랜트와 루프 이득에 대한 특이치 선도를 Fig.7에 나타내었다. 그럼에서 알 수 있듯이 루프 이득과 형상화 플랜트가 잘 일치함을 알 수 있으며 이는 성공적

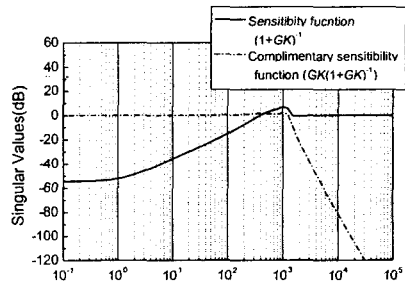


Fig. 8 Frequency domain indicator

인 루프 형상화가 이루어졌음을 의미한다. Fig.8은 폐 루프 시스템의 감도함수(sensitivity function)와 보조 감도함수(complementary sensitivity function)를 나타낸다. 감도함수로부터 저주파수 영역에서는 적은 이득을, 고주파 영역에서는 0dB의 크기를 나타냄으로써 외란에 의한 영향을 최소화 시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한 보조 감도함수 선도의 경우 저주파수 영역에서는 0dB 를, 고주파 영역에서는 적은 이득을 가짐으로써 노이즈에 의한 영향을 최소화 시킬 수 있다. γ 의 선정으로부터 최종귀한 제어기는 $K = WK_{\infty}$ 로 나타낸다. 본 연구에서 얻어진 최종귀한 제어기 K 는 다음과 같다.

$$K = \frac{5.24e^{-10}s^4 + 1.91e12s^3 + 6.11e14s^2 + 2.18e8s + 6.92e20}{s^5 + 3.93e5s^4 + 7.32e8s^3 + 1.09e12s^2 + 1.03e15s + 1.68e17} \quad (12)$$

4. 결과 및 고찰

Fig.9는 제안된 서스펜션이 장착된 드라이브의 Non-CSS 실험을 위한 실험 구성도이다. 로드 빔 끝단의 위치는 레이저 센서(laser sensor)에 의하여 측정되어 제어기에 보내진다. 슬라이더의 요구 변위에 대한 추적 제어를 위한 제어 입력은 H_{∞} 제어기에 의해 계산되며, 얻어진 제어 입력은 전류 증폭기에 의하여 SMA 작동기에 인가된다. 이때 변위 신호와 제어 신호는 A/D 및 D/A 변환기에 의하여 4,600Hz의 샘플링 속도로 처리된다. 또한 L/UL 시 슬라이더와 디스크의 충돌유무를 관찰하기 위하여 electrical resistance circuit 을 구성하였다. 이 방법은 검출된 충돌 신호로부터 바로 슬라이더/디스크의 충돌 유무를 확인할 수 있다는 장점이 있다.⁽¹⁵⁾ 즉, circuit으로부터 검출된 신호는 슬라이

더와 디스크 충돌 시 발생하는 전압차로써, 슬라이더의 ringing 주파수 성분이나 딥플점(dimple point)과 로드 빔 사이에서 발생하는 마찰에 의한 신호 성분을 포함하지 않으므로 효과적으로 슬라이더/디스크 충돌여부를 확인할 수 있다.

Fig.10과 11은 각각 harmonic 및 cycloidal profile에 대한 제안된 서스펜션의 위치추적 제어 실험결과를 나타낸다. 디스크 표면으로부터 슬라이더의 최대 부상 높이는 스펴들 회전에 의한 디스크의 진동과 공기 흐름과 같은 외란에 의한 슬라이더와 디스크의 충돌을 방지할 수 있도록 100 μ m로 설정하였다. 실험 결과로부터 각각의 요구 L/UL profile에 대하여 우수한 위치 추적 제어가 이루어졌음을 확인할 수 있다. 또한 드라이브 구동 시, 디스크 회전 속도가 5,400rpm에 도달하면서 슬라이더의 loading 과정이 완료되었으며, 드라이브 정지 시 unloading 과정에 의해 슬라이더가 디스크 표면으로부터 충분한 높이를 가질 때 디스크의 회전이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 설계된 루프형상기법 H_{∞} 제어기의 불확실성에 대한 제어 강건성을 확인하기 위하여 디스크를 정지 상태로 두고, 같은 L/UL profile에 대한 위치 추적 제어 실험을 수행하였다. 디스크 회전에 의해 발생하는 공기 유동은 SMA 작동기의 시상수를 증가시키며, Fig.5에서 얻은 작동기의 모멘트 특성의 변화를 의미한다. 따라서 불확실성을 고려하지 않은 제어기를 구성할 경우, 원하는 제어성능을 얻기 어렵다. Fig.12는 cycloidal profile에 대한 디스크 회전과 정지 상태에서의 위치 추적 제어 결과와 제어 입력 전류를 나타낸 것이다. 실험결과 디스크의 회전 유무에 관계없이 거의 유사한 위치 추적 제어 성능을 보였다. 그러

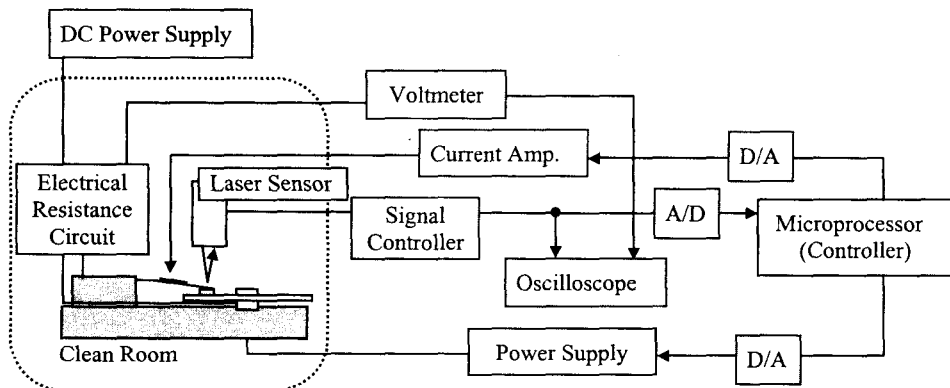
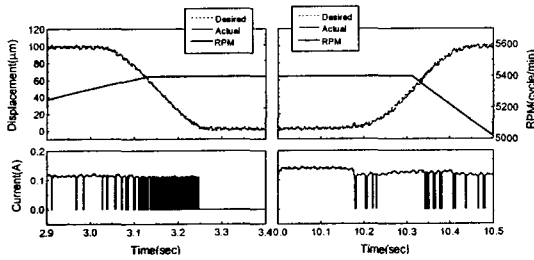
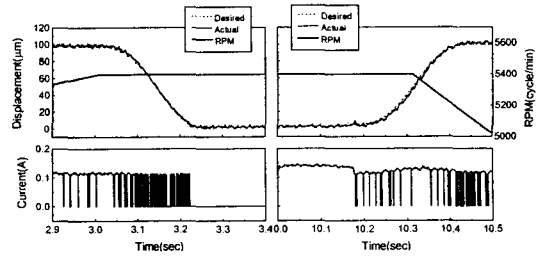


Fig. 9 Schematic diagram of the experimental setup for Non-CSS drive



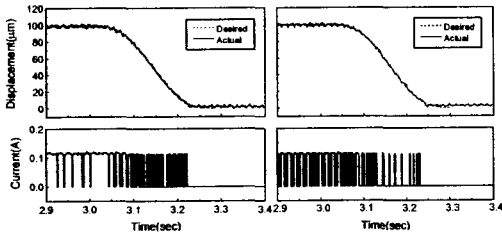
(a) loading process (b) unloading process

Fig. 10 Control responses for the harmonic L/UL profiles



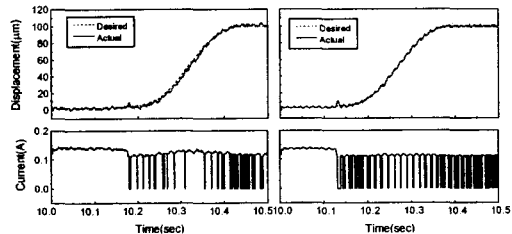
(a) loading process (b) unloading process

Fig. 11 Control responses for the cycloidal L/UL profiles



< disk rotating state > < disk stop state >

(a) loading process



< disk rotating state > < disk stop state >

(b) unloading process

Fig. 12 Control responses of the system with/without uncertainty for the cycloidal L/UL profiles

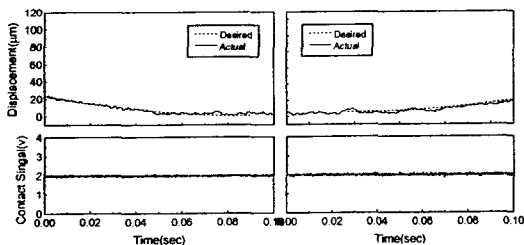
나 제어 입력 값을 비교하였을 때, 디스크 회전 상태에서 더 많은 제어 입력을 요구하고 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 공기 유동에 의한 열소산을 보상해주는 것으로써, 제안된 제어기에 의해 시상수의 불확실성 유무에 관계없이 원하는 요구 profile에 대한 위치 추적 제어가 가능함을 보여준다.

Fig.13은 harmonic profile에 대한 디스크 근처에서의 로드 빔의 위치추적 제어와 이때의 슬라이더/디스크 충돌 신호를 나타낸 것이다. 결과로부터 알 수 있듯이 슬라이더와 디스크간의 충돌신호가 검출되지 않았다. 또한 Fig.14의 cycloidal profile에

대한 실험에서도 같은 결과를 나타내었다. 결국, Fig.13와 14로부터 본 연구에서 제안한 서스펜션이 기존의 드라이브에 적용되어 Non-CSS 드라이브를 구현함을 알 수 있다. Fig.15는 기존 서스펜션이 장착된 CSS드라이브에 대한 실험으로부터 검출된 충돌신호를 나타낸다. 결과로부터 알 수 있듯이 드라이브 구동 및 정지 시 많은 슬라이더/디스크 충돌이 발생하였으며 따라서 많은 오염입자가 발생되었을 것으로 판단된다.

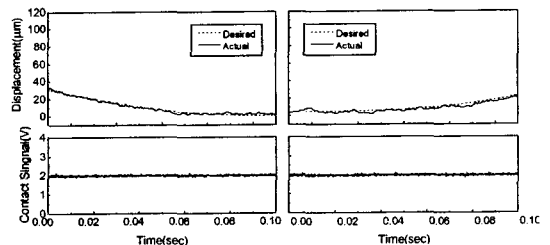
5. 결론

본 연구에서는 Non-CSS형태의 드라이브를 위하



(a) loading process (b) unloading process

Fig. 13 Control responses and contact signals near the disk surface for the harmonic L/UL profiles



(a) loading process (b) unloading process

Fig. 14 Control responses and contact signals near the disk surface for the cycloidal L/UL profiles

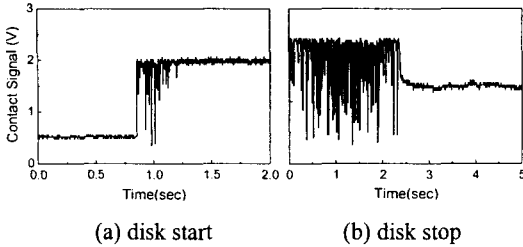


Fig. 15 Slider/disk contact signals of the conventional CSS mode drive

여 SMA 작동기를 이용한 새로운 형태의 서스펜션을 제안하였다. FEM 해석을 통하여 서스펜션의 기본 동특성을 파악한 후, 동적 모델링을 수립하였다. 실제로 제작된 서스펜션으로부터 제어 입력과 작동기에 의해 발생하는 모멘트 관계를 유도하였으며, 작동기가 장착된 전제 시스템에 대한 지배 방정식을 도출하고 전달률 실험을 통하여 지배 방정식의 타당성을 입증하였다. 요구 L/UL profile에 대한 슬라이더의 위치추적제어를 위하여 불확실성을 고려한 H_∞ 제어를 설계하였으며, 제어 성능을 시간영역에서 고찰하였다. 또한 위치추적제어시 electrical resistance 방법을 통하여 슬라이더와 디스크의 충돌 여부를 관찰하였다. 실험결과 슬라이더/디스크의 충돌신호가 검출되지 않았으며 이로부터 본 연구에서 제안된 서스펜션이 Non-CSS 드라이브 구성을 위해 성공적으로 적용될 수 있음을 확인하였다. 앞으로 제안된 서스펜션과 연계하여 슬라이더와 디스크 사이의 stiction을 방지할 수 있는 새로운 형태의 Non-CSS 드라이브에 대하여 연구를 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 연세대학교 정보저장기기 연구센터의 지원에 의하여 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) D. Cooper, "Near-Contact Recording Means Clean Recording", *Data Storage*, 1996, pp.66-69
- (2) M. Suk, "Head-Disk Interface: Migration from Contact-Start-Stop to Load/Unload", *Journal of KSNVE*, 1999, Vol.9, pp.643-651
- (3) T. G. Jeong and D. B. Bogy, "Unloaded Slider Vibration Excited by Air Flow Between Slider and Rotating Disk", *IEEE Transactions on Magnetics*, 1992, Vol.28, No.5, pp.2539-2541
- (4) Q. H. Zeng and D. B. Bogy, "Slider Air Bearing

- Designs for Load/Unload Applications", *IEEE Transactions on Magnetics*, 1999, Vol.35, No.2, pp.746-751
- (5) M. Hashimoto, H. Kajitani and N. Tagawa, "Development of a New Sub-Sub Micron Flying Ramp-Loading Head with Emphasis on Slider Roll Control Capability", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.28, No.5, 1992, pp.2536-2538
- (6) N. Tagawa and M. Hashimoto, "Self-Loading Slider Dynamics for Non-Contact Start Stop Operation With Negative Pressure Air-Lubricated Slider Bearing in Magnetic Disk Storage", *ASME Journal of Tribology*, Vol. 111, 1989, pp.698-702
- (7) H. Kajitani, M. Hashimoto and N. Tagawa, "Dynamic Loading Criteria for 3-1/2Inch Inline HDD Using Multilayer Piezoelectric Load/Unload Mechanism", *IEEE Transactions on Magnetics*, 1991, Vol.27, pp.5079-5081
- (8) 임수철, 박종성, 박철진, 최승복, 박영필, "SMA 작동기와 연계된 HDD 슬라이더의 동특성 및 제어", 한국소음진동공학회 추계학술대회, 2000, pp.217-224
- (9) S. B. Choi and C. C. Cheong, "Vibration Control of a Flexible Beam Using SMA Actuators", *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1996, Vol.19, pp.1178-1180
- (10) S. B. Choi and J. H. Hwang, "Structural Vibration Control Using Shape Memory Actuators", *Journal of Sound and Vibration*, Vol.231, No.4, April 2000, pp. 1168-1174
- (11) Q. H. Zeng and D. B. Bogy, "Effects of Certain Design Parameters on Load/Unload Performance", *IEEE Transactions on Magnetics*, 2000, Vol.36, No.1, pp.140-147
- (12) P. G. Levi and F. E. Talke, "Effect of Ramp Profile and Spindle Speed on Head-Disk Contact During Rotary Load/Unload", *IEEE Transactions on Magnetics*, 1993, Vol.29, No.6, pp.3918-3920
- (13) Q. H. Zeng, M. Chapin and D. B. Bogy, "Dynamics of the Unload Process for Negative Pressure Sliders", *IEEE Transactions on Magnetics*, 1999, Vol.35, No.2, pp.916-920
- (14) D. C. McFarlane and K. Glover, "A Loop Shaping Design Procedure Using H_∞ Synthesis", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1992, Vol.37, No.6, pp.759-769
- (15) T. G. Jeong and D. B. Bogy, "Measurement of Slider-Disk Contacts During Dynamic Load-Unload", *IEEE Transactions on Magnetics*, 1991, Vol.27, No.6, pp.5073-5075