

광디스크 드라이브의 새로운 포커스 제어모델 개발 Development of New Focus Control Model for Optical Disk Drives

지 중근* · 장 영배** · 박 노철*** · 박 영필****

Jung-Geun Jee, Young-Bae Chang, No-Cheol Park and Young-Pil Park

Key Words : Focus Error Signal(포커스 에러신호), Full states feedback(전차수 상태 되먹임)

ABSTRACT

There are four servo systems in a DVD drive such as a focus servo system, a tracking servo system, a sled servo system and a spindle servo system, Focus servo system maintains relative distance between lens and disk, In this paper, two plant models for the focus servo system will be presented, One of them is conventional and the other is newly developed.

Focus error signal between lens and disk is detected using LDV 2 beam method, The system is observable and all states are estimated, Full states feedback controller and minimum order observer are designed using those states, Impulse responses are simulated. And experiment is performed to compare with responses of conventional model.

1. 서 론

광디스크 저장장치의 서보기구에는 포커스 서보, 트랙킹서보, 슬레드 서보, 스피들 서보로 크게 나눌 수 있다. 이 중에서 포커스 서보는 레이저 빔의 초점을 디스크상의 피트에 항상 일치시키기 위한 서보로서 광학계에서 검출된 초점위치 정보를 기초로하여 대물 렌즈를 움직이는 액츄에이터를 통해 초점위치가 디스크의 면진에 추종하도록 하는 제어를 말한다.⁽¹⁾

디스크가 고밀도화 고용량화 됨에 따라서 외란이 들어왔을 때 디스크와 렌즈 사이의 거리를 일정하게 유지시키는 문제가 중요시되고 있으며⁽²⁾, 본 연구에서는 이를 제어하기 위한 새로운 제어대상플랜트를 정의하고 기존의 모델과 비교하였다.

기존의 모델이 디스크를 샷시에 고정된 강체로 가정하는데 반해서 새로운 모델에서는 디스크를 집중질량으로 가정하였고, 디스크와 렌즈사이의 속도신호를 LDV 2 Beam 법으로 측정하였으며 이를 적분하여 포커스 에러신호(FES)를 얻었다. 극점배치법을 이용하여 진상대 되먹임 제어기와 최소차수 관측기를 설계하였고, 외란을 디스크에 가해지는 외란과 샷시에 가해지는 외란 그리고 프레임으로부터 가해지는 외란으로 각각 나누어 시뮬레이션하였으며, 이를 DSP를 이용하여 실험하였고, 기존의 모델과 비교하여 우수성을 검증하였다.

여기에 사용된 설계변수들은 삼성 DVD I6X, SD-616 모델로부터 얻은 것이다.

2. 제어대상플랜트의 모델링

2.1 기존의 모델

기존의 포커스 모델에서는 디스크를 샷시에 고정된 강체로 가정하여 샷시의 움직임이 곧 디스크의 움직임과 같다고 보았다. 이것은 제어대상플랜트가 픽업 장치에만 한정되게 되며 디스크나 샷시 그리고, 프레임으로부터 들어오는 외란의 특성을 상세히 파악하는데는 한계가 있다.

* 연세대학교 기계공학과
E-mail : jj7315@hanmail.net
Tel : (02) 2123-4577, Fax : (02) 355-8460

** 연세대학교 기계공학과

*** 연세대학교 정보저장협동과정

**** 연세대학교 기계공학과

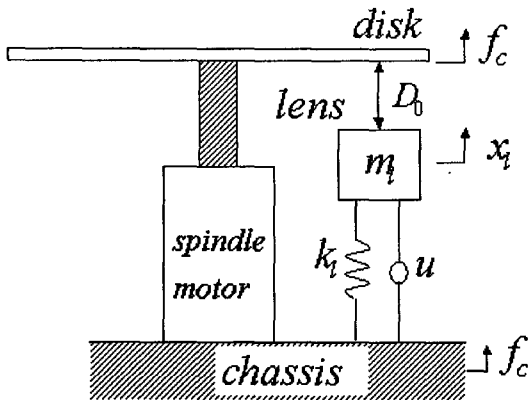


Fig.1 Conventional Model

Fig.1은 기존의 모델을 개략적으로 나타낸 것이다.

(1) 상태방정식

위 시스템에 대한 상태방정식을 얻기 위해서 상태변수를 다음과 같이 정의하면

$$x = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_l \\ x_c \end{Bmatrix} \quad (2.1.1)$$

다음 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu + B_v f_c \quad (2.1.2.a)$$

$$y = Cx \quad (2.1.2.b)$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m} \end{bmatrix}, \quad (2.1.3)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k}{m} \end{bmatrix}, \quad C = [1 \ 0]$$

2.2 새로운 모델

Fig.2는 새로운 모델의 개략도(skeleton)이다. 디스크

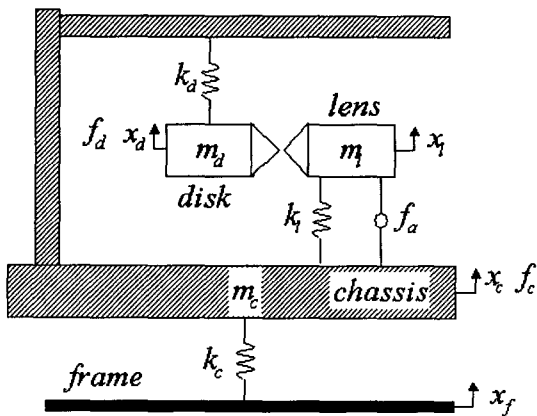


Fig.2. Newly Developed Model

를 집중 질량으로 가정하였으며 감쇠는 고려하지 않았다.

(1) 상태방정식

위 시스템에 대한 상태방정식은 상태변수를 다음과 같이 정의하면

$$x = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6)^T$$

$$= \{x_l - x_d \ x_l - \dot{x}_d \ x_c - x_l \ x_c - \dot{x}_l \ x_l \ x_l\}^T \quad (2.2.1)$$

다음을 얻을 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bf_a + B_1x_f + B_2f_c + B_3f_d \quad (2.2.2.a)$$

$$y = Cx \quad (2.2.2.b)$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_d}{m_d} & -(\frac{k_d}{m_d} - \frac{k_l}{m_l}) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{k_d}{m_c} & -(\frac{k_c + k_f + k_d}{m_c} + \frac{k_l}{m_l}) & 0 & -\frac{k_c}{m_c} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{k_l}{m_l} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m_l} \\ 0 \\ -\frac{1}{m_c} - \frac{1}{m_l} \\ 0 \\ \frac{1}{m_l} \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k_c}{m_c} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{m_c} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m_d} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.2.3)$$

3. 설계 변수값의 추정

DVD 디스크의 물성치를 구하기 위해서 충격가진 실험을 수행하였으며, 디스크의 절원모드 중 (0,0) 모드의 고유진동수인 116.01 Hz를 집중질량 디스크의 고유진동수가 되도록 하였다. Ansys 해석을 통해서 디스크 끝단에서의 강성을 추정하였고 이렇게 구한 강성과 고유진동수로부터 집중질량 디스크의 질량을 구하였다.

픽업에 대해서는 정현파 수입(sine sweep)을 수행하여 고유진동수를 구하였고 렌즈의 무게를 측정하여 4와이어(4 wire)의 강성을 추정하였다.

샤시에 대해서는 Star Modal을 이용한 충격가진

실험으로 히브(heave) 모드가 발생하는 고유진동수를 측정하고 질량을 측정하여 강성을 추정하였다.

Table.1 Estimated Parameter Values

	Chassis	Lens	Disk	Unit
m	156.728	0.390	1.0147	<i>g</i>
k	3563.927	46.3046	539.1417	<i>N/m</i>
fn	23.5	54.84	116.01	<i>Hz</i>

3. 제어기설계

3.1 가제어성

다음과 같은 연속시간시스템을 고려해보자

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{3.1.1}$$

여기서

x = 상태벡터 (n -벡터)

u = 제어신호 (스칼라)

A = $n \times n$ 행렬

B = $n \times 1$ 행렬

시스템이 완전 상태 가제어가 되려면 다음 $n \times n$ 행렬의 계수(rank)가 n 이어야 한다.

$$[BAB \cdots A^{n-1}B] \tag{3.1.2}$$

이 결과는 제어벡터가 r -차원일 경우로 확장될 수 있다. 그러면 완전 상태 가제어성의 조건은 다음 $n \times nr$ 행렬

$$[BAB \cdots A^{n-1}B] \tag{3.1.4}$$

의 계수가 n 이거나, 또는 n 개의 일차독립 열벡터를 가지면 된다. 식 (3.1.4)의 행렬을 보통 가제어 행렬(controllability matrix)이라고 한다.⁶⁶⁽⁷⁸⁸⁾

식 (3.1.4)을 이용하여 기존의 모델과 새로운 모델에 대해서 가제어성을 확인해보면 두 모델이 가제어임을 확인할 수 있다.

3.2 극점배치를 이용한 제어기 설계

식

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{3.2.1}$$

에서 제어신호를 다음과 같이 선택하면,

$$u = -Kx \tag{3.2.2}$$

이것은 제어신호가 그 순간의 상태에 의하여 결정된다는 것을 의미한다. 이러한 구조를 상태피드백(state feedback)이라 한다. $1 \times n$ 행렬 K 를 이득행렬이라고 한다.

식 (3.2.2)를 식 (3.2.1)에 대입하면

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t) \tag{3.2.3}$$

가 된다. 이 식의 해는

$$x(t) = e^{(A - BK)t} x(0) \tag{3.2.4}$$

로 주어진다. 안정도와 과도응답 특성은 행렬

$A - BK$ 의 고유값에 의하여 결정되며 행렬 K 를 적절히 선택하면 행렬 $A - BK$ 는 점근적 안정행렬이 될 수 있다. 행렬 $A - BK$ 의 고유값을 조정기 극점(regulator pole)이라고 하며 이러한 조정기 극점들이 s 평면의 왼쪽 반평면에 위치하면, t 가 무한히 커짐에 따라 $x(t)$ 는 0으로 간다.

기존 모델에 대한 전차수 상태피드백 제어기의 고유값을 다음과 같이 설정하면

$$s_{1,2} = -180 \tag{3.2.5}$$

Ackermann의 공식을 이용하여 제어기 이득행렬 K 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K = [33.6696 \quad -0.1404] \tag{3.2.6}$$

새로운 모델에 대해서도 제어기의 고유값과 이득행렬을 구하면 다음과 같다.

$$s_{1,2} = -180$$

$$s_{3,4} = -260$$

$$s_{5,6} = -360$$

$$K = [-60623 \quad -148.4 \quad -73521 \quad -161.07 \quad -12935 \quad -12.45] \tag{3.2.7}$$

4. 관측기설계

4.1 가관측성

다음 식으로 기술되는 비강제 시스템(unforced system)을 고려해 보자

$$\dot{x} = Ax \tag{4.1.1}$$

$$y = Cx \tag{4.1.2}$$

여기서

x = 상태벡터(n -벡터)

y = 출력벡터(m -벡터)

A = $n \times n$ 행렬

C = $m \times n$ 행렬

시스템이 완전 가관측이면 다음에 주어진 $nm \times n$ 행렬의 계수가 n 이 되어야 한다.

$$\begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \tag{4.1.3}$$

식 (4.1.1) 및 (4.1.2)에 의해 기술된 시스템이 완전 가관측일 필요충분 조건은 $n \times nm$ 행렬

$$[C \ A^T C \ \cdots \ A^{n-1 T} C] \tag{4.1.4}$$

의 계수가 n 이거나, 혹은 n 개의 일차독립 열벡터가

존재하는 것이다. 이 행렬을 가관측성 행렬(observability matrix)이라고 한다.^{[6][7][8]}

식 (4.1.4)를 이용하여 기존의 모델과 새로운 모델에 대해서 가관측성을 조사해보면 두 모델이 가관측임을 확인할 수 있다.

4.2 최소차수 상태관측기

실제 시스템에 있어서 몇 개의 상태변수는 정확하게 측정할 수 있다. 상태벡터 x 를 n -벡터라 하고, 출력벡터 y 를 m -벡터라 하면 $n-m$ 개의 상태변수만 추정하면 된다. 이와 같은 $(n-m)$ 치의 관측기를 최소차수 관측기(minimum order observer)라고 한다. 다음과 같은 시스템을 고려해보자.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4.2.1)$$

$$y = Cx \quad (4.2.2)$$

먼저 상태변수를 변형시키기 위한 변환행렬 z 를 정의하면

$$z = Tx \quad (4.2.3)$$

여기서

$$T = (n-m) \times n \text{ 행렬}$$

$$z = (n-m) \times 1 \text{ 행렬}$$

새로운 행렬

$$E = \begin{bmatrix} C \\ T \end{bmatrix} \quad (4.2.4)$$

라 하면

$$E^{-1} = [P \ M] \quad (4.2.5)$$

이다. y 와 z 를 결합하면 다음 식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ T \end{bmatrix} x \quad (4.2.6)$$

위의 식(4.2.6)을 x 에 대해서 다시 쓰면

$$\begin{aligned} x &= \begin{bmatrix} C \\ T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} = [P \ M] \begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} \\ &= Py + Mz \end{aligned} \quad (4.2.7)$$

특별히 C 행렬이 식 (4.2.8)과 같으면 T 행렬은 식 (4.2.9)과 같이 나타내어진다.

$$C = [I_m \ O_{m, n-m}] \quad (4.2.8)$$

$$T = [O_{n-m, m} \ I_{n-m}] \quad (4.2.9)$$

위의 식들을 이용하여 식 (4.2.1)을 다시 쓰면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} CAP & CAM \\ TAP & TAM \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} CB \\ TB \end{bmatrix} u \\ &= \begin{bmatrix} A_{aa} & A_{ab} \\ A_{ba} & A_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_a \\ B_b \end{bmatrix} u \end{aligned} \quad (4.2.10)$$

z 에 관한 미분방정식은 다음과 같다.

$$\dot{z} = A_{bb}z + (A_{ba}y + B_2u) \quad (4.2.11)$$

z 에 관한 전차수 관측기를 설계한다.

$$\dot{\hat{z}} = A_{bb}\hat{z} + (A_{ba}y + B_2u) + L(y - C\hat{x}) \quad (4.2.12)$$

y 에 관한 미분방정식은

$$\dot{y} = A_{aa}y + A_{ab}z + B_1u \quad (4.2.13)$$

이다. 식 (4.2.13)을 이용하여 식(4.2.12)를 다시 쓰면 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{z}} &= A_{bb}\hat{z} + (A_{ba}y + B_2u) \\ &\quad + L(\dot{y} - A_{aa}y - B_1u - A_{ab}\hat{z}) \end{aligned} \quad (4.2.14)$$

새로운 행렬 w 를 다음과 같이 정의하면

$$w = \hat{z} - Ly \quad (4.2.15)$$

최소차수 관측기에 대한 최종식을 얻을 수 있다.

$$\dot{w} = Fw + Dy + Gu \quad (4.2.15)$$

$$\hat{x} = Mw + Ny \quad (4.2.16)$$

여기서

$$F = A_{bb} - LA_{ab} \quad (4.2.17.a)$$

$$D = FL + A_{ba} - LA_{aa} \quad (4.2.17.b)$$

$$G = B_2 - LB_1 \quad (4.2.17.c)$$

$$N = P + ML \quad (4.2.17.d)$$

기존 모델에 대한 최소차수 관측기의 고유값을 식 (4.2.18)과 같이 설정하면

$$s_1 = -130 \times 3 \quad (4.2.18)$$

Ackermann의 공식을 이용하여 제어기 이득행렬 L 을 구할 수 있다.

$$L = [540] \quad (4.2.19)$$

새로운 모델에 대해서도 최소차수 관측기의 고유값을 설정하고 이득행렬을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} s_1 &= -130 \times 3 \\ s_{2,3} &= -260 \times 3 \\ s_{4,5} &= -360 \times 3 \end{aligned} \quad (4.2.20)$$

$$L = 10^3 \times [0.4260 \ -0.0017 \ -1.2829 \ 0.0256 \ 3.9617]^T \quad (4.2.21)$$

5. 시뮬레이션 결과

보상기의 전달함수는 관측기 식에 u 를 대입하여 얻어진다.

$$u = -K\hat{x} = -KMw - KNy \quad (5.1.1)$$

$$\dot{w} = (F - GKM)w + (D - GKN)y \quad (5.1.2)$$

관측기 전달함수는

$$K(s) = \begin{bmatrix} F - GKM & D - GKN \\ -KM & -KN \end{bmatrix} \quad (5.1.3)$$

전체 시스템에 대한 식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A-BKNC & -BKM \\ DC-GKNC & F-GKM \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} f_d \quad (5.1.4)$$

Fig.3은 기존의 모델의 보상기에 대한 근궤적 선도를 나타내며 보상기가 조건부 안정임을 알 수 있다. Fig.4는 기존모델의 충격응답특성을 나타낸다.

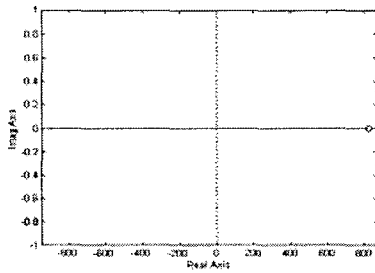
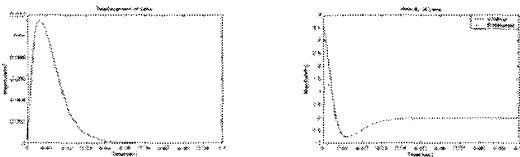


Fig.3 Root Locus Plot for Conventional Model Compensator

표본 시간(sampling time)은 0.00003초로 하였고 충격의 크기는 1N으로 하였다. Fig.4의 (a)는 측정되어 지는 신호이며 렌즈의 변위를 나타낸다. 대물렌즈가 샷시에 고정되어 있으므로 샷시로부터의 충격 힘에 대한 렌즈의 변위는 곧 포커스 에러신호를 나타낸다.



(a) (b)

Fig.4 Matlab Simulation of Conventional Model
Fig.4의 (b)는 측정되었을 때의 신호와 관측기에 의해서 얻어진 신호를 비교한 것이다.

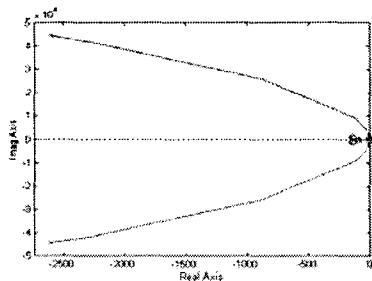


Fig.5 Root Locus Plot of New Model Compensator
Fig.5는 새로운 모델의 보상기에 대한 근궤적 선도이며 이득이 유한한 값이면 보상기는 안정함을 알 수 있다. Fig.6은 새로운 모델에 대한 충격 응답 특성을

나타낸다. (a)는 직접 측정된 값이며 (b),(c),(d),(e),(f)는 측정되었을 때와 관측기에 의해서 추정되었을 때

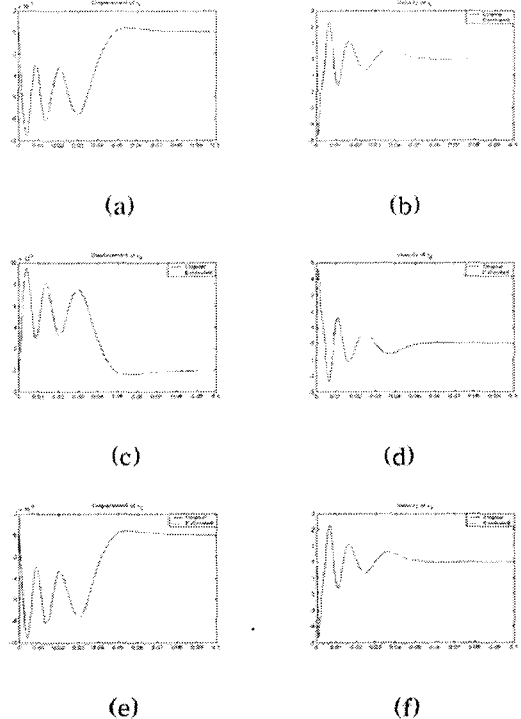


Fig.6 Matlab Simulation of New Model for Input from Disk

를 한 그래프에 나타내었다.

6. 실험결과

설계된 제어기는 DSP 보드를 이용해서 실험하였고 실험에 사용된 블록 선도는 Fig.7과 같다. Fig.8은 기존의 모델에 대한 충격응답 실험결과이며 Fig.9는 새로운 모델에 대한 실험 결과이다.

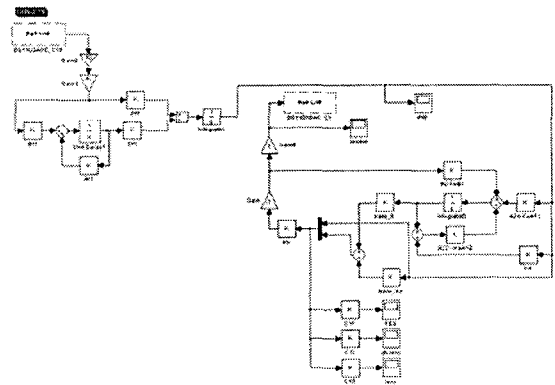


Fig.7 Simulink Block Diagram for DSP Control Desk

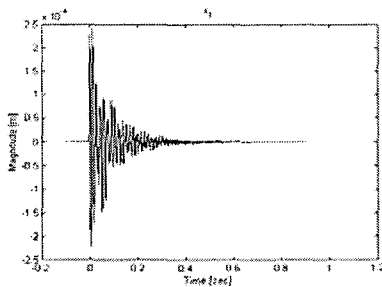


Fig.8 Experimental Result of Conventional Model

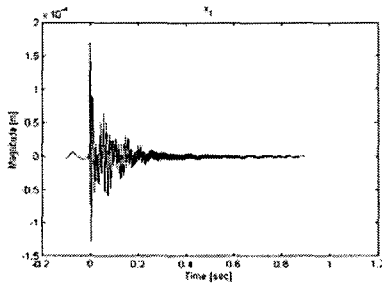


Fig.9 Experimental Result of Newly Developed Model

7. 결론

두 모델의 시뮬레이션 결과에서 얻어진 FES신호만으로는 어느 것이 더 우수하다고 말하기 어렵고 원하는 응답을 성능을 내기 위한 제어 입력의 크기를 비교하는 것이 바람직할 것이다. 새로운 모델에서는 외란을 실제 DVD ROM에서와 같이 디스크 드라이브내의 공기에 의해서 디스크에 가해지는 힘과 스핀들 모터나 슬레드 모터에 의해서 샤프트에 가해지는 힘, 그리고 드라이브 밖으로부터 들어오는 변위 외란으로 각각 나누어 시뮬레이션하였다. 실험에서는 디스크와 샤프트에 충격을 가하여 실험하였으며 디스크가 정지상태에 있을 때 실험하였다. 디스크가 회전하고 있을 때 좋은 결과를 얻기 위해서는 우선 정지 상태에서 실험이 수행되어야 하며 정지상태 실험에서 보다 좋은 결과를 얻기 위해서는 보상기의 보드선도를 파악해야 할 것이다. 또한 액츄에이터에 제어 입력을 가할 때의 이득에 있어서 튜닝(tuning)이 필요할 것이다. 그리고 가진기를 이용하여 정현파의 외란에 대한 실험이 수행되어야만 새로 개발된 모델의 특성파악이 완전히 이루어질 것으로 예상된다.

후기

본 연구는 한국과학재단 지정 정보저장기기연구센터의 지원(R11-1997_006101-0)을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) CHOW,J.H., "A Pole-Placement Design Approach for Systems with Multiple Operating Conditions", IEEE Trans. Automat Contr., vol.35, no.3, pp.278-288, 1990
- (2) S.Lim and T.Y.Jung, "Dynamics and Robust Control of a High Speed Optical Pickup", Journal of Sound and Vibration, vol.221, no.4 pp.607-621, 1999
- (3) Eiji Yokoyama, Masato Nagasawa and Tsuyoshi Katayama, "A disturbance Suppression Control System for Car-mounted and Portable Optical Disk Drives", IEEE Trans. Consumer Elec., vol.40, no.2, pp.92-99, 1994
- (4) Ton H. Akkermans and Sorin G. Stan, "Digital Servo IC for Optical Disc Drives", Control Engineering Practice, vol.9, pp.1245-1253, 2001
- (5) Ki-Bong Han and Shi-Bok Lee, "Control System Design for the Focus Servo System of DVD Drive", 한국소음진동공학회지, 제 11권 제 1호, pp.49-56, 2001
- (6) Gene F. Franklin, J. David Powell and Abbas Emami-Naeini, 1994, Feedback Control of Dynamic Systems, Addison Wesley.
- (7) Charles L. Phillips and Royce D. Harbor, 1991, Feedback Control Systems, Prentice-Hall
- (8) Bahram Shahian and Michael Hassul, 1993, Control System Design Using Matlab, Prentice-Hall