

# 비선형 견실 확정제어를 이용한 하드디스크 드라이브의 트랙추종제

## Track-Following Control of a Hard Disk Drive Actuator Using Nonlinear Robust Deterministic Control

위 병 열, 강 철 구

(Byung-Yeol Wie and Chul-Goo Kang)

**Abstract** : There are significant nonlinearities and uncertainties in hard disk drive actuators. In particular, pivot bearing nonlinearity and repeatable run-out make track-following control difficult as track density increases. In this paper, we design a robust track-following controller using a robust deterministic control scheme in which the pivot bearing nonlinearity and repeatable run-out are considered as uncertainties. Simulation study is conducted to evaluate the control performance of the proposed control scheme.

**Keywords** : hard disk drive, track-following, pivot bearing nonlinearity, robust deterministic control

### I. 서론

하드디스크 드라이브(Hard Disk Drive, HDD)의 저장 용량은 해마다 대략 두 배씩 증가해 왔으며, 과거 10년 동안 면적 저장밀도는 약 100배가 증가해 왔다. 이러한 비약적인 발전은 MR (Magneto-Resistive) 헤드와 PRML (Partial Response Maximum Likelihood) 신호처리 방식 때문에 가능한 것이었으며, 앞으로도 GMR (Giant Magneto-Resistive) 헤드 등의 주도적 역할로 저장 밀도는 더 많은 증가가 있을 것이다. 현재 상용되고 있는 HDD의 트랙밀도는 10,000 TPI (Tracks Per Inch) 정도이며, 2000년까지 20,000에서 25,000 TPI까지 올라갈 것으로 예상된다.

이렇게 HDD의 소형화, 대용량화의 기술적 추세에서 저장밀도가 증가하면서 트랙밀도도 함께 증가하게 되므로 Read/Write 헤드 위치 서보시스템의 정밀도에 대한 요구가 높아 지고 있다. 이를 위하여 트랙폭에 대한 트랙중심과 실제 헤드의 위치 차이로 정의되는 TMR (Track Mis-Registration)을 줄여야 한다.

트랙추종(track-following) 모드는 헤드를 계속 트랙의 중심에 근접시켜야 하는 제어기로 구성되어 있으며, 트랙밀도가 증가함에 따라 트랙 폭이 좁아지면서 작동기의 움직이는 변위가 작아지게 된다. 이렇게 되면 작동기와 드라이브 전자부를 연결하여 여러 신호의 통로가 되는 플렉스 케이블(flex cable), 디스크 회전 때 따른 윈디지(windage), 그리고 작동기를 지지해주는 피벗베어링(pivot bearing)의 비선형성으로 인한 외란 성분들이 바이어스 토크(bias torque)로서 작동기에 직접적인 외란으로 작용하면서 정밀한 제어를 어렵게 한

다. 또한 디스크 원판의 중심과 스피들 중심의 불일치로 생기는 RRO(Repeatable Run-Out)는 디스크 회전주파수의 하모닉스로 나타나면서 주기적인 외란으로 작용하게 된다. 이런 외란들은 HDD의 구조가 변하지 않는 한 없앨 수 없는 것으로 트랙추종 모드에서 반복 제어기나 적응제어기와 같은 제어기로서 외란을 보상하려는 연구가 시도되었다[1].

그런데 전체시스템의 안정성에 대한 고려없이 RRO 보상이나 설계되면, 견실성이 부족할 수 있기 때문에 견실성을 증가시키기 위한 여러 가지 기법들이 제안되었다. 작동기 모델링 부분에서는 피벗베어링의 비선형성의 모델에 대한 제시가 있었고, 이를 보상하려는 기법들도 제안 되었다[2]-[4].

본 논문에서는 Y. K. Byun등[4]이 제안한 작동기의 피벗베어링 비선형성의 모델을 가지고, 비선형 견실 확정제어(nonlinear robust deterministic control)기법을 사용하여, 시스템의 전체적인 안정도를 보장해주면서 피벗베어링의 비선형성과 RRO를 보상하는 제어기법을 제시하였다. 설계한 제어기에 대한 시뮬레이션 연구를 수행하고 제어성능을 검증하였다.

### II. HDD 작동기의 모델링

#### 1. 작동기의 모델링

HDD 작동기는 슬라이더 베어링에 탑재되어있는 자기헤드 그리고 이 헤드를 지탱해 주는 서스펜션 암 및 이를 구동하는 VCM (Voice Coil Motor)으로 구성되어 있으며, 디스크가 최대 속도의 절반 정도일 때 자기 헤드는 슬라이더 베어링으로 인해서 일정 각속도로 회전하는 디스크 원판 위에 약간 떠서 움직이며, 데이터의 기록 및 재생을 하게 된다. 본 논문에서 HDD는 25,000 TPI의 트랙밀도를 가지며 트랙폭은 1 $\mu$ m인 3.5" 디스크원판의 트랙을 추종하는 작동기를 대상으로 모

접수일자 : 2000. 2. 2., 수정완료 : 2000. 6. 8.

위병열 : 서울대학교 제어계측신기술연구센터

강철구 : 건국대학교 기계항공공학부

델링을 하였다.

트랙검색 모드에서의 작동기는 입력전류가 트랙추종 모드에서의 입력보다 상대적으로 크기 때문에 감쇠효과와 스프링효과를 무시 할 수 있지만 트랙추종 모드에서는 피봇베어링 내에서의 점성저항, 마찰, 예압(preload) 그리고 플렉스 케이블에 의하여 생기게 되는 위와 같은 효과를 무시 할 수 없다. 특히 HDD 디스크 원판의 트랙폭이 좁아지면서 이러한 효과는 정밀하게 움직여야 하는 작동기의 성능에 중요한 인자로 작용하게 된다.

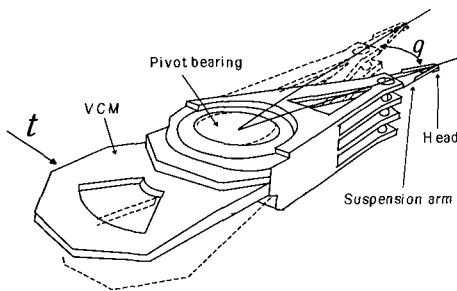


그림 1. 하드디스크 작동기.  
Fig. 1. Hard disk drive actuator.

디스크 원판의 트랙폭이 좁아지면서 피봇베어링의 비선형성이 작동기제어의 정확도에 중요한 외란으로 생각되면서, 피봇베어링의 비선형성에 대한 해석 및 모델링과 이를 제어기 설계시에 보상해 주려는 노력을 해왔다.

F. Wang et al.[2][3]은 작동기 피봇베어링에 대하여 preload + two-slope 스프링 모델을 이용하여 모델링 하였으나, 시간 영역과 주파수 영역에서 실험결과를 동시에 만족하는 모델을 제시하지는 못하였다.

시간영역과 주파수 영역에서 작동기의 동특성을 모두 만족시키기 위하여 Y. K. Byun등[4]은 two-slope + three-slope 모델을 제시하였다. 이 모델은 F. Wang et al 이 제시한 모델보다 시간영역과 주파수 영역에서의 실험결과와 잘 맞는 모델이라고 할 수 있다.

하드디스크의 동특성을 이해하고, 이를 바탕으로 제어기를 설계하기 위하여, 여기서 Y. K. Byun등[4]이 제안한 모델링의 결과를 소개하고, 이를 시간영역과 주파수영역에서 어느 정도 실험치와 일치하는지 확인 하도록 한다.

피봇베어링의 비선형성을 고려한 작동기의 모델을 구하기 위하여 [4]에서 수행한 것과 같은 실험을 하였다. HDD 작동기의 피봇 베어링이외의 다른 외란의 원인이 되는 성분을 배제하기 위하여, 디스크원판과 작동기의 플렉스 케이블을 제거하고 얇은 선을 통하여 DSA (Digital Signal Analyzer)로부터 작동기에 40mV 에서 120mV까지 20mV단위로 증가시키면서 전압을 인가 하였다. 작동기로 직접 연결되는 얇은 선에 1kΩ의 저항을 연결하여 작동기에 아주 작은 전류가 인가되도록 하여, 피봇베어링의 비선형성을 관찰하였다. 이렇게 작

은 전류를 흐르게 하여 실험한 이유는 트랙추종 모드에서 트랙폭이 좁아질수록 작동기의 움직이는 변위가 작게 되므로, 작동기에 인가되어야 하는 전류의 값도 작게 되어야 하기 때문이다.

작동기에 붙어있는 헤드의 변위를 측정하기 위하여 LDV (Laser Doppler Vibrometer)를 사용하였으며, 여기에서 측정된 신호를 DSA에서 처리하여 작동기에 대한 주파수 응답 해석을 하였다.

주파수영역에서의 피봇베어링의 비선형성은 그림 2에서 보는 바와 같이 40mV 이하의 낮은 전압의 입력에 대한 응답 신호에서 피봇베어링의 고유진동수는 25Hz에서 나타나고, 60mV 이상의 입력에 대하여 15Hz에서 나타나며, 저 주파수 대역에서 출력 이득도 갑작스런 증가를 보이고 있다.

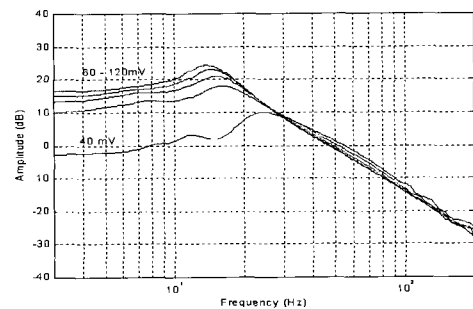


그림 2. 주파수영역 실험 결과.  
Fig. 2. Experimental results in frequency domain.

시간영역에서 40mV 이하의 사인파 입력에 대하여 정상적인 사인파의 응답형태로 나오지만, 60mV이상의 입력에 대하여 찌그러진 사인파 응답이 나온다. 즉, 40mV에서 60mV로 입력이 증가하는 순간 비선형성이 나타나는 것을 알 수 있으며, 이에 대한 수학적 모델로서 Y. K. Byun등[4]은 다음과 같은 모델을 제시 하였다.

$$J\ddot{\theta} + f_b(\dot{\theta}) + f_k(\theta, \dot{\theta}) = C(i)K_f i \tag{1}$$

여기서  $J$ 는 작동기 관성 모멘트이며,  $\theta$ 는 작동기의 각변위(rad),  $\dot{\theta}$ 은 각속도,  $C(i)$ 는 출력이득,  $K_f$ 는 모터상수,  $i$ 는 입력전류이다.  $f_b$ 와  $f_k$ 는 피봇베어링에서 각각 스프링 효과와 감쇠효과로 발생되는 토크이다.

$$f_b = b_1\dot{\theta} \quad \left| \dot{\theta} \right| < S$$

$$f_b = b_2\dot{\theta} + (b_1 - b_2)S \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) \quad \left| \dot{\theta} \right| \geq S \tag{2}$$

$$f_k = k_1\theta \quad \text{otherwise}$$

$$f_k = k_2\theta + (k_1 - k_2)T \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) \quad \left| \dot{\theta} \right| \geq S, \left| \theta \right| \geq T \tag{3}$$

(2), (3)에서  $S, T$ 의 값은 변하는 기율기의 문턱값(threshold value)이다. 여기서  $S = 9.7 \times 10^{-4}$  rad/s,  $T = 5 \times 10^{-6}$  rad의 문턱값을 사용하였다. 작동기에 대한 (1), (2), (3)의 수학적 모델을 블록선도로 나타내면 다음 그림 3과 같다.

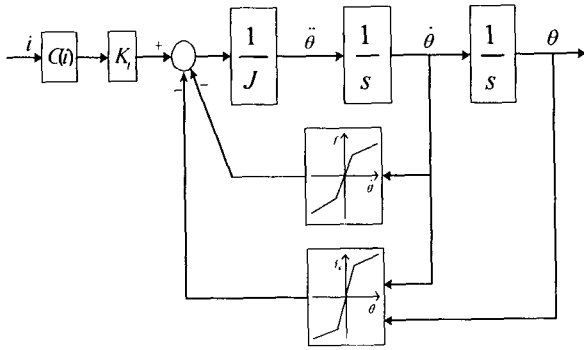


그림 3. 작동기 모델의 블록선도.  
Fig. 3. Block diagram of an actuator model.

2. 작동기 모델 시뮬레이션 결과

그림 2의 실험결과를 이용하여 (1), (2), (3)의 수학적 모델의 계수를 추정하여 주파수 및 시간 영역에서의 거동을 비교한 결과는 다음과 같다.

그림 4는 작동기 모델을 주파수 영역에서 시뮬레이션 한 결과로서 40mV와 100mV의 실험결과와 비교한 것이다. 그림 4에서 보듯이 실험결과와 수학적 모델의 시뮬레이션 결과가 비교적 잘 맞고 있음을 알 수 있다.

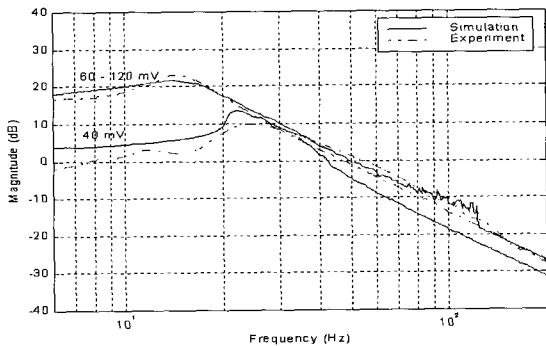


그림 4. 주파수영역에서 작동기 동특성의 실험 결과와 시뮬레이션 결과의 비교.  
Fig. 4. Comparison between experimental results and model simulation results for the actuator dynamics at frequency domain.

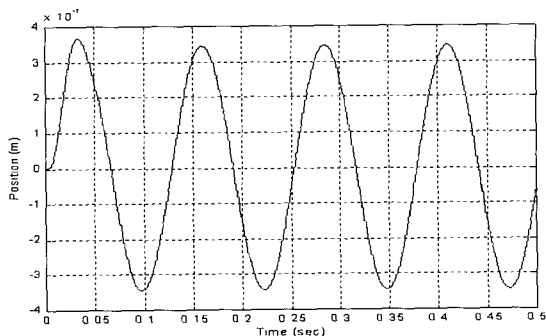


그림 5. 시간영역에서 작동기 모델의 변위 시뮬레이션 (40mV, 8Hz 입력신호).  
Fig. 5. Displacement simulation of the actuator model at time domain (40 mV, 8 Hz input signal).

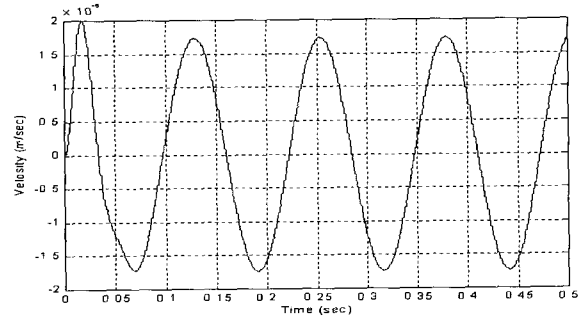


그림 6. 시간영역에서 작동기 모델의 속도 시뮬레이션 (40mV, 8Hz 입력신호).  
Fig. 6. Velocity simulation of the actuator model at time domain (40mV, 8Hz input signal).

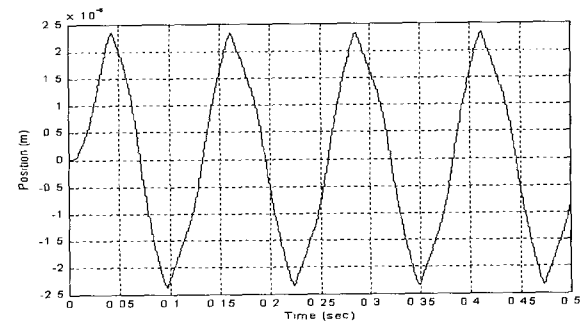


그림 7. 시간영역에서 작동기 모델의 변위 시뮬레이션 (60mV, 8Hz 입력신호).  
Fig. 7. Displacement simulation of the actuator model at time domain (60mV, 8Hz input signal).

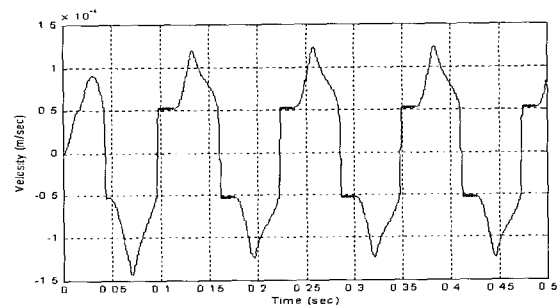


그림 8. 시간영역에서 작동기 모델의 속도 시뮬레이션 (60mV, 8Hz 입력신호).  
Fig. 8. Velocity simulation of the actuator model at time domain (60mV, 8Hz input signal).

하드디스크 드라이브의 동특성을 시간영역에서 그림으로 나타내보면 사인파입력신호에 대한 찌그러진 주기적인 출력신호가 나오고, 이 주기적인 출력신호의 모양이 입력신호의 진폭 및 주파수에 따라 다르게 나온다. 이러한 비선형성을 확인하기 위하여 작동기 수학적 모델의 시간영역에서의 시뮬레이션 결과를 보여 주도록 한다.

그림 5와 6은 입력신호의 주파수가 8Hz이고, 진폭이 40mV일 때 작동기의 변위와 속도응답에 관한 시뮬레이션

선 결과이다. 그림 7과 8은 입력신호가 8Hz이고, 60mV 일 때 작동기의 변위와 속도응답에 관한 시뮬레이션 결과이다.

[4]의 실험결과에서 나타났듯이, 작동기 모델의 시간 영역 시뮬레이션에서, 입력신호의 진폭이 40mV에서 60mV로 변할 때, 그림 8에서 보듯이 속도 파형이 찌그러진 사인곡선의 형태로 나오는 것을 볼 수 있다.

### III. 비선형 견실 확정제어기 설계

현재 상용되고 있는 HDD는 트랙추종모드에서 PID 구조의 제어기를 사용하고 있으나, PID 제어기는 RRO 및 다른 외란에 대한 보상이 미약하기 때문에, 트랙밀도의 증가에 따라 반복제어기나 적응제어기를 설계하여 보상하려는 연구가 시도되었다. 그러나 시스템 전체적인 안정도의 고려 없이 반복제어기나 적응제어기가 설계되면 견실성이 부족할 수 있다.

본 논문에서는 전체적인 시스템의 안정도를 Lyapunov 제 2방법을 통하여 보장 하면서, 이 Lyapunov 함수를 제어기 설계에 활용하는 비선형 견실 확정제어 방법을 사용 하였다. 비선형 견실 확정제어 방법은 불확실한 외란을 확률적이 아닌 확정적인 유계 함수로 처리하여 제어기 설계를 하는 기법이다. 따라서 불확실한 피벗 베어링의 비선형성 및 바이어스 토크와 RRO를 확정적이 유계함수로 처리하여 TMR을 줄이고자 한다. 본 연구에서 목표로 하는 제어시스템의 성능사양은 다음과 같다.

- 디스크 회전수 : 7200 RPM
- 트랙 밀도 : 25000 TPI
- 트랙 폭 : 1μm
- 트랙 Access time : 2 msec 이내
- 트랙 추종 오차 : ±3 % 이내

작동기가 원하는 트랙을 추종하기 위하여 움직일 때 많은 불확실성을 내재하고 있다. 본 연구에서는 불확실성 중 피벗베어링 비선형성과 RRO를 주로 보상하고 이들에 대한 견실한 제어기를 설계하고자 한다.

(1)의 작동기 시스템에 PD제어기로부터 제어입력  $\tau$ 와 비선형 견실확정제어 입력  $u$ 를 적용하면, (4)와 같이 정리할 수 있다.

$$J\ddot{\theta} = -f_b(\dot{\theta}) - f_k(\theta, \dot{\theta}) + C(i)K_t(\tau + u) \quad (4)$$

$f_b(\dot{\theta}), f_k(\theta, \dot{\theta}), C(i)$ 의 각 항에서 불확실 성분을 (5)와 같이 분리할 수 있다.

$$\begin{aligned} f_b(\dot{\theta}) &= (b_o + \Delta b)\dot{\theta} \\ f_k(\theta, \dot{\theta}) &= (k_o + \Delta k)\theta \\ C(i) &= C_o + \Delta C \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $b_o, k_o, C_o$ 는 공칭값(nominal value)이고,  $\Delta b, \Delta k, \Delta C$ 는 불확실성(uncertainty)값이다. (5)의 불확실성을 그림으로 나타내면 그림 9와 같다.

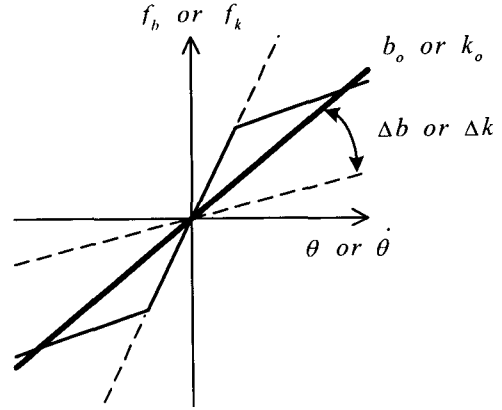


그림 9.  $b$ 와  $k$ 의 공칭값과 불확실성값.  
Fig. 9. Nominal and uncertain values of  $b$  and  $k$ .

피벗 베어링으로부터 헤드까지의 거리를  $r$ , RRO를 포함한 경로를  $x_d$ 라 하고, 다음과 같은 상태변수를 정의하자.

$$\begin{aligned} x_1 &= e = x_d - r\theta \\ x_2 &= \dot{e} = \dot{x}_d - r\dot{\theta} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $e$ 는 PES (position error signal)를 나타낸다. (6)에서 설정한 상태변수와 (5)를 이용하여, (4)를 상태방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -mx_1 - nx_2 - \Delta mx_1 - \Delta nx_2 + \ddot{x}_d + \Delta B\dot{x}_d + \Delta Kx_d \\ &\quad + \frac{\Delta C}{J}rK_t u + \frac{C_o}{J}rK_t u \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,

$$\begin{aligned} m &= \frac{1}{J}(k_o + C_o r K_p K_t), \quad n = \frac{1}{J}(b_o + C_o r K_p T_d K_t) \\ \Delta m &= \frac{1}{J}(\Delta k + \Delta C r K_p K_t), \quad \Delta n = \frac{1}{J}(\Delta b + \Delta C r K_p T_d K_t) \\ \Delta B &= \frac{1}{J}(b_o + \Delta b), \quad \Delta K = \frac{1}{J}(k_o + \Delta k) \text{이다.} \end{aligned}$$

HDD 작동기 시스템은 매칭조건을 만족하므로, (7)의 상태방정식을 다음과 같은 형태의 식으로 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_0(\mathbf{x}) &= \mathbf{Ax} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -m & -n \end{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{B}_0(\mathbf{x}) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}, \Delta) &= -\Delta m x_1 - \Delta n x_2 + \ddot{x}_d + \Delta B \dot{x}_d + \Delta K x_d \\ \mathbf{G}(\mathbf{x}, \Delta) &= \frac{C_o + \Delta C}{J} r K_t \end{aligned} \quad (8)$$

(8)에서 불확실성을 포함하는  $\Delta$  항들과 디스크 회전주파수 하모닉스들의 조합으로 이루어진 RRO를 표현하는  $x_d$  항들은 유계함수(bounded function)이며, 따라서

비선형 견실 확정제어이론을 적용할 수 있다[5] [6]. 이 불확실 시스템의 공칭 시스템

$$\dot{\mathbf{x}} = f_o(\mathbf{x}) \quad (9)$$

는 Lyapunov 제2방법에 의하여 대역 평등 지수적 안정(Globally Uniformly Exponentially Stable, GUES)함을 보일 수 있다.

또 (10)의 조건을 만족하는 연속이고 유계이며 음이 아닌 함수  $\kappa(\mathbf{x}), \rho(\mathbf{x})$ 를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} \|g(\mathbf{x}, \delta)\| &= \kappa(\mathbf{x}) \\ \|g(\mathbf{x}, \delta)\| &= \frac{1}{2} \lambda_{\min} [G(\mathbf{x}, \delta) + G(\mathbf{x}, \delta)^T] \rho(\mathbf{x}) \end{aligned} \quad (10)$$

즉,

$$\begin{aligned} \kappa(\mathbf{x}) &= \Delta m |x_1| + \Delta n |x_2| + 1.3965 \\ \rho(\mathbf{x}) &= \frac{\kappa(\mathbf{x})}{\lambda_m(\mathbf{x}, \Delta)} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서  $\lambda_{\min}[M]$ 은  $M$ 의 고유치의 최소값을 의미한다. 본 논문에서 고려하고 있는 시스템에 대하여 (11)의  $\lambda_m(\mathbf{x}, \Delta) = 378.05$ ,  $\Delta m = 9.4441 \times 10^6$ ,  $\Delta n = 4.4532 \times 10^3$ 의 값을 이다. 불확실 시스템의 Lyapunov 함수  $V(\mathbf{x})$ 를

$$V(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{x} \quad (12)$$

로 두고,  $\mathbf{P}$ 를 임의의 양의 한정(positive definite) 행렬  $\mathbf{Q}$ 에 대하여 다음 식

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} = -\mathbf{Q} \quad (13)$$

를 만족하는 양의 한정 행렬이라고 하면, 다음과 같은 비선형 제어기에 의하여 이 시스템은 대역 평등 지수적 수렴(globally uniformly exponentially convergent)한다. (11)에서 구한  $\kappa(\mathbf{x}), \rho(\mathbf{x})$ 를 이용하여 비선형이며, 연속인 제어기를 다음과 같이 설계할 수 있다.

$$u(t) = \begin{cases} -\rho(\mathbf{x}) \frac{\kappa(\mathbf{x}) \mathbf{B}_0^T(\mathbf{x}) DV(\mathbf{x})}{\varepsilon} & \left\| \frac{\kappa(\mathbf{x}) \mathbf{B}_0^T(\mathbf{x}) DV(\mathbf{x})}{\varepsilon} \right\| \leq 1 \\ -\rho(\mathbf{x}) \frac{\kappa(\mathbf{x}) \mathbf{B}_0^T(\mathbf{x}) DV(\mathbf{x})}{\left\| \frac{\kappa(\mathbf{x}) \mathbf{B}_0^T(\mathbf{x}) DV(\mathbf{x})}{\varepsilon} \right\|} & \left\| \frac{\kappa(\mathbf{x}) \mathbf{B}_0^T(\mathbf{x}) DV(\mathbf{x})}{\varepsilon} \right\| > 1 \end{cases} \quad (14)$$

이 제어기에서 사용된 계수와 함수를 구체적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 10^{-9} \\ \kappa(\mathbf{x}) &= 9.4441 \times 10^6 |x_1| + 4.4532 \times 10^3 |x_2| + 1.3965 \\ \rho(\mathbf{x}) &= 2.4981 \times 10^4 |x_1| + 1.1779 \times 10 |x_2| + 3.6939 \times 10^{-3} \\ \mathbf{B}_0^T(\mathbf{x}) DV(\mathbf{x}) &= 2 \times 2.0346 \times 10^{-8} x_1 + 2 \times 4.3006 \times 10^{-5} x_2 \end{aligned}$$

(14)의 제어기에서  $\varepsilon$ 의 값이 0에 가까워 질수록 폐루프 시스템은 GUES하게 된다. 위의 제어기를 HDD 작

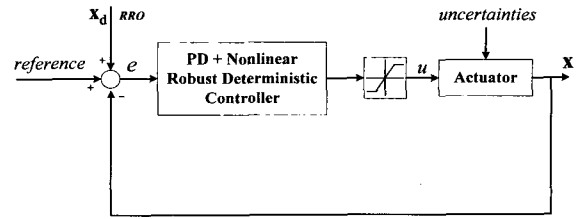


그림 10. 제어기를 포함한 HDD 작동기 시스템의 블록선도.

Fig. 10. Block diagram of the HDD actuator system including the controller.

동기의 트랙추종제어에 적용한 블록선도는 그림 10과 같다.

#### IV. 시뮬레이션

위에서 설계한 비선형 확정제어기의 제어성을 평가하기 위하여 트랙 추종모드에 대한 시뮬레이션 연구를 수행하였다.

PES 신호에서의 RRO성분은 디스크 회전주파수인 120Hz를 기본으로 하는 4개의 하모닉스의 조합으로 구성된 사인파이며, 인접 트랙을 넘지 않는다는 가정으로 모델링하여 시뮬레이션 하였다. 사용된 RRO 신호는 그림 12와 같다. 시뮬레이션에서 RRO에 대한 정보는  $x_d$ 에 포함되어 있으며, 기준값(reference)은 0으로 두었다.

제어성을 비교하기 위하여 기존의 HDD에서 많이 사용하는 PID 제어기를 사용한 경우에 대하여도 동일한 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 먼저 외란이 존재하지 않는 경우 원하는 트랙추종 성능(2msec 이내 위치추종오차  $\pm 3\%$  이내)이 되도록 PID 제어기의 파라미터를 그림 11과 같이 튜닝하였다.

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) \cdot dt + T_d \dot{e}(t)] \quad (15)$$

이때 사용한 PID제어기는 식 (15)와 같으며, 외란이 없는 상태에서 원하는 트랙추종 성능을 내기 위하여 사용된 파라미터 값은  $K_p = 80,000$ ,  $T_i = 1$ ,  $T_d = 0.0004$ 이다.

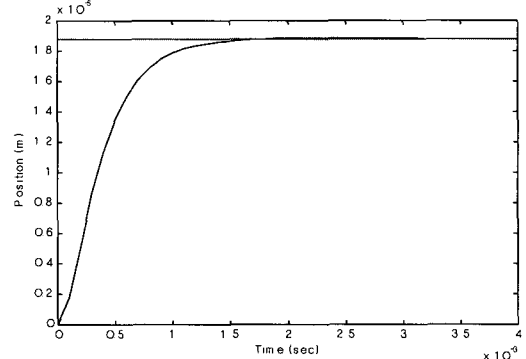


그림 11. PID 제어기 성능 (불확실성이 없는 경우).  
Fig. 11. Performance of PID controller (without any uncertainty).

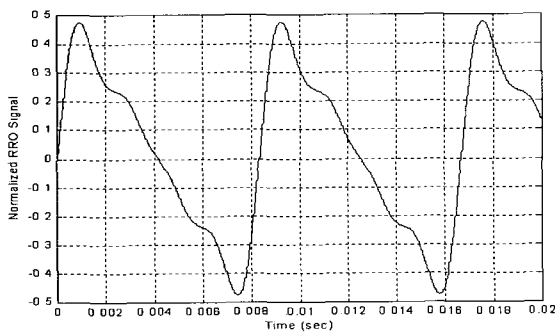


그림 12. RRO 신호.  
Fig. 12. RRO signal.

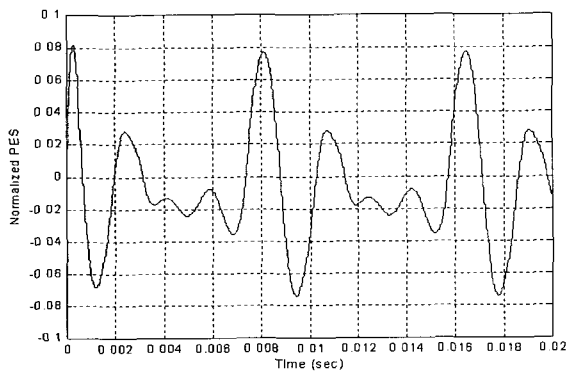


그림 13. PID 제어시 정규화된 PES 신호.  
Fig. 13. Normalized PES when PID control is used.

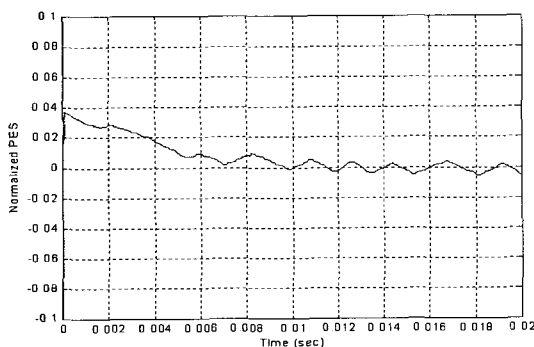


그림 14. 비선형 견실확정제어시 정규화된 PES.  
Fig. 14. Normalized PES when PD and nonlinear robust deterministic control is used.

그림 11과 같이 불확실성이 없는 상태에서 PID 제어기는 매우 좋은 성능을 보여주고 있음을 알 수 있다.

이 상태에서 그림 12와 같은 PRO를 적용하게 되면 외란에 대하여 효과적인 보상을 해주지 못하게 되는 것을 그림 13을 통하여 알 수 있다.

그러나 PD 제어기와 함께 견실한 비선형 견실 확정 제어기를 사용하여 트랙 추종 모드에서 제어를 수행한 결과, 그림 14와 같이 정상상태에서 PES가 2 msec 이후 트랙폭의 3% 이내에서 제어되었다. 이때 비선형 견실 확정제어기와 함께 사용한 PD제어기의 파라미터값으로  $K_p = 65,000$ ,  $T_d = 0.00047$  을 사용하였다.

그림 14로부터 본 논문에서 제안한 비선형 확정제어기는 RRO와 바이어스 토크에 기인하여 생기는 불확실성을 적절히 보상해 주어 정상상태에서 TMR이 줄어들게 함을 알 수 있다. 즉, 알려지지 않은 RRO 및 바이어스 토크의 상한값과 하한값을 알 수 있다면, 비선형 견실 확정제어기로 트랙추종 모드에서 이러한 외란들을 적절히 보상할 수 있음을 알 수 있다.

본 논문에서 제시하고 있는 방법은 HDD의 디스크 원판의 기록밀도가 높아짐에 따라 발생하는 피벗베어링의 비선형성, RRO 신호 등의 불확실성을 대처할 수 있는 방법중의 한가지 일 것이다.

## VI. 결론

HDD의 저장밀도가 증가할수록, 트랙밀도가 증가한다. 이에 따라 트랙폭이 좁아져서 트랙추종이 어려워지며, HDD 작동기 시스템에 존재하는 불확실성이 제어성능에 크게 영향을 미치게 되고, 이를 보상해 주는 제어기가 필요해진다.

트랙추종 모드에 존재하는 불확실성은 여러 가지가 있지만, 본 논문에서는 RRO와 피벗베어링에서의 비선형성 및 윈디지와 플렉스 케이블에 의한 바이어스 토크에 대하여 고려하였으며, 대상 플랜트는 피벗 베어링의 비선형성을 구현할 수 있는 비선형 모델을 사용하였다.

본 논문에서는 시스템의 전체적인 견실성을 Lyapunov 제2방법을 통하여 보장하였으며, 이 Lyapunov함수를 제어기 설계에 적극적으로 활용하였다. 이 방법은 불확실한 외란을 확률적이 아니라 확정적으로 처리하는 방법으로서, 대상 HDD 시스템에 존재하는 불확실성을 효과적으로 제어함을 보여 주었다.

본 논문에서 제안한 방법으로 트랙밀도 25,000TPI, 디스크 회전수 7,200rpm의 HDD에 대하여 연속시간 영역에서 트랙추종 제어를 시뮬레이션한 결과는 트랙과 헤드의 위치추종오차가 2msec이후  $\pm 3\%$  이내 있음을 보여주었다.

## 참고문헌

- [1] 전도영, 정일용, "하드 디스크 드라이브의 반복 추종 오차 제어," 한국정밀공학회지, 제13권, 5호, pp. 131-138, 1996.
- [2] F. Wang, T. Hurst, D. Abramovitch, and G. Franklin, "Disk drive pivot nonlinearity modeling Part I: Frequency domain." *Proc. American Control Conference*, pp. 2600-2603, 1994.
- [3] F. Wang, T. Hurst, D. Abramovitch, and G. Franklin, "Disk drive pivot nonlinearity modeling Part II: Time domain." *Proc. American Control Conference*, pp. 2600-2603, 1994.
- [4] Y. K. Byun, J. H. Park, H. S. Chang, and K. C. Ro, "Pivot nonlinearity in disk drive rotary actuator : Measurement and modeling," *IEEE*.

*Transactions on Magnetics*, vol. 33, No. 5, pp. 2635-2637, 1997.

- [5] M. Corless, "Control of uncertain nonlinear systems," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 115, pp. 362-372, 1993.

- [6] C. G. Kang, R. Horowitz, and G. Leitmann, "Tracking control of robot manipulators using a robust deterministic control law", *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 120, pp. 537-541, 1998.



**위 병 열**

1970년 11월 2일생. 1993년 건국대학교 기계공학과 졸업. 1995년~1997년 (주)삼성전기 종합연구소 근무. 1999년 건국대학교 기계공학과 대학원 졸업. 1999년~ 서울대학교 제어계측신기술연구센터 연구원. 관심분야는

디스크 드라이버 제어 및 시스템 모델링과 시뮬레이션, CEMTool.



**강 철 구**

1959년 1월 15일생. 1981년 서울대학교 기계설계학과 (공학사). 1985년 서울대학교 기계설계학과 (공학석사). 1989년 University of California, Berkeley 기계공학과 (공학박사). 1990년~현재 건국대학교 기계항공

공학부 교수. 관심분야는 운동제어, 힘제어, 힘센싱, 제어이론, 지능기계, 고속전철, 시뮬레이터.