

# HDD 회전형구동장치의 피벗비선형성 측정 및 모델링

## Pivot Nonlinearity in Disk Drive Rotary Actuator : Measurement and Modeling

박재홍 · 변용규 · 장홍성 · 노광춘 (삼성종합기술원 정밀기계 Lab.)  
J.H.Park, Y.K.Byun, H.S.Chang and K.C.Ro(SAIT Electro Mechanics Lab.)

### ABSTRACT

As track density increases, the effects of nonlinearity in pivot bearing of hard disk drive on the servo performance are becoming more important in considering the range of inertia force and the input torque during settling and tracking mode. Recently, an increasing attention is given to more precise experimental observations and modelings of pivot nonlinearity for achieving higher performance of servo control. In this paper, we propose a new model that shows an improved prediction of the pivot nonlinearity than existing preload-plus-two-slope model at matching simulations and experimental results in both time and frequency domains. Experimental measurements are carried out to validate and identify the specific nonlinearity presents in the pivot bearing when its in fine motion. Using the experimental results new model along with the existing one are characterized and compared for relevancies.

**Key Words :** Hard Disk Driver(하드 디스크 드라이브), Pivot Bearing Friction(피벗 베어링 마찰), Rotary Actuator(회전형 구동장치), Nonlinearity(비선형성)

### 1. 서론

최근까지는 HDD 위치 제어계의 설계와 시뮬레이션에서 마찰에 의한 비선형 효과가 고려되지 않았다. 그 이유는 비교적 낮은 위치정밀도(TPI)의 디스크 폼팩터(disk form factor)와 고회력 VCM(voice coil motor)을 사용하였기 때문이다. 그러나 현재 고밀도, 고속 추세로 인하여 액츄에이터 피벗부에서 발생하는 롤링마찰, 점성마찰, 스틱션(stiction), 히스테리시스 등의 영향에 대한 고려가 요구된다. 이는 경우에 따라서 마찰이 위치제어계의 안정도나 위치결정도를 향상시키나, 대부분의 초정밀 위치제에 있어서 오버슈트, settling 시간 지연, 정상상태 오차등의 문제를 유발하며 뎀핑을 발생시키기 때문이다.

본 연구의 대상모델인 3.5 인치 폼팩터에 사용되는 피벗 베어링은 구름 접촉형태로서 외륜, 내륜, 볼 및 분리부(separator)의 네 가지의 부분으로 구성되며 이중 분리부는 볼과 볼 사이에 일어나는 마찰을 줄이는 중요한 역할을 한다. 이러한 베어링은 볼과 링 사이의 간극 최소화, 피로 수명증가, 베어링축 기울기를 줄이기 위해 프리로드(preload)를 가하며 이것으로 인해 발생하는 비선형성을 고려하지 않으면 고정밀도의 회전제어가 불가능하다. 실험대상에서 채용하고 있는 소형(miniature) 베어링은 반경간극을 없애기 위하여 350 ~ 400gmf의 프리로드를 가지며 최대 기동토크(starting torque)를 1.5gm-cm로 규제하고 있다.

피벗 마찰 토크는 구조적 측면에서 프리로드, 윤활등에 의해 크기가 결정되고 베어링 등급, 조립공정등에 의해 회전시 발생하는 마찰력 변화량이 직접적인 영향을 받으나 사실상 그 크기가 매우 작다. 따

라서 트랙(track) seek 시에는 액츄에이터 관성력, 입력 토크에 대하여 피벗 베어링 마찰의 비선형성 영향을 무시할 수 있다. 그러나 settling, 트랙 following 시에는 액츄에이터 관성력, 입력 토크가 마찰토크와 같은 범위를 가진다. 이때 비선형성에 의한 영향을 예측하고 제어하기 위해서는 적합한 수학적 모델의 설정 및 그에 따른 측정이 필요하다. 실제로 비선형성이 고려되어야 하는 구동변위는 액츄에이터의 각변위가 매우 적은 범위(<50nm 볼 변위, <0.003deg. 볼 회전각도)로서 이 구간 전체의 피벗 베어링 마찰력을 비틀림 스프링으로 볼 수는 없으나 매우 낮은 breakaway torque(3.5 인치 디스크에 있어서 약 1 gmf-cm(0.098 mN-m)에서는 비선형 스프링과 같은 특성을 가지며 코일 전류가 증가함에 따라 이와 같은 특성은 점차 줄어든다. 이러한 특성을 기계적인 방법이나 장치를 이용하여 측정하기란 매우 어려우며 반복적인 결과를 얻어내기 힘들다. 따라서 분석 및 모델링을 위한 피벗 마찰의 측정에 있어서는 모델설정과 측정방식이 달라져야 한다.

본 연구는 액츄에이터 위치 및 속도에 따른 피벗 베어링 마찰을 측정/분석하여 적합한 모델을 설정하고 이의 타당성을 검증한다. 이를 위해 피벗 베어링의 미세거동특성을 측정할 수 있는 시스템을 구성하고 측정결과로부터 수학적 모델 및 변수를 도출하여 측정결과와 시뮬레이션의 비교를 통한 적용모델의 효용성을 검증하고자 한다.

### 2. 측정방안 모색 및 장치 구성

HDD의 트랙 following 시에는 헤드(head)가 트랙 피치(pitch)의 10%이내(<500nm) 정도의 폭을 추종하게 되나 실제로 피봇 베어링은 트랙 following 과 트랙의 RRO/NRRO가 누적된 각변위를 가지게 되며 이를 위해서는 매우 미소한 구동 토크가 가해져야 한다. 이때 피봇 마찰의 비선형성과 히스테리시스 모델을 설정하기 위한 구동입력/가진주파수와 변위/속도의 관계를 분석하고자 다음의 측정시스템(Fig. 1)을 구성하였다.

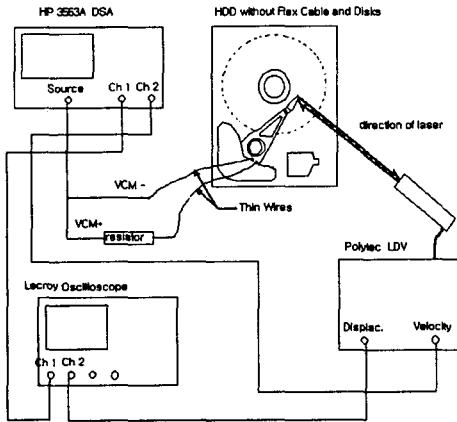


Fig. 1 Experimental Setup

본 구성은 액츄에이터 VCM 코일에 미소한 정현파 형태의 입력전류를 단계적으로 가하여 입력전류에 대한 출력변위/속도를 측정함으로써 피봇 베어링의 각변위에 따른 마찰력의 특성을 구하고, 이와 동시에 주파수 영역에서 비선형성의 특성을 측정하기 위해 구성된 시스템으로서 sweep sine/ describing function 방법을 적용 분석하였다.

그러나 실험대상 모델로부터 피봇 마찰을 측정하여 DSA(HP3563A)의 소오스(source) 신호의 범위를 조정하고 비선형 특성을 얻는데는 다음과 같은 문제점이 발생한다.

- 위치에 따라 변하는 flexcable 바이어스 토크
- 디스크회전에 의해 발생하는 공기유동의 영향에 의한 windage
- AC 전력 증폭기(power amplifier)의 영점조정의 문제로 발생하는 누설 전류

실험대상모델은 VCM에 입력을 가하지 않았을 경우 상기 항목의 크기가 서로 토크 평형(torque equilibrium)을 이루는 중간 트랙부분에서 정지하게 된다. 그러나 실험결과 마찰력에 의한 비선형성의 범위가 피봇의 미소한 각변위로 발생하는 바이어스의 변화량보다 작음으로 마찰 자체만의 영향을 추출할 수 없음을 알 수 있었다. 따라서 베어링 마찰에 의한 영향만을 측정하기 위해 다른 성분에 의한 외란의 영향을 제거하여야 한다. 즉 HDD 상에 장착된 액츄에이터에 작용하는 바이어스 토크 성분인 디스크 windage, flexcable, 베어링 마찰 및 이로 인한 외란을 분리하고자 디스크와 flexcable을 제거하였으며,

flexcable은 전류입력단자를 가는 구리선(copper wire)로 대체하여 VCM 코일에 직접 연결하였다. 이때 입력전류를 가하기 위해서는 입력전압에 대하여 전류를 선형적으로 변환시켜주는 전력 증폭기가 필요하나 상기실험에서 요구되는 가진 주파수 범위와 코일 인덕턴스, 역기전력(back emf)의 영향을 고려할때 코일 전압과 전류간의 주파수 특성은 평탄(flat)함을 측정을 통하여 확인하였다. 입력전류는 최소 5mV부터 입력이 가능하나 외부의 연결장비로부터의 영향에 의한 잡음 신호의 크기가 상대적으로 큰 영향을 줌으로 이를 상쇄하고 보다 정확하고 미세한 전류를 코일에 인가하기 위해 1kΩ의 저항을 직렬로 부가시켜 소오스 레벨을 증폭시켰다. 또한 입력 토크범위를 고려할때 구리선의 바이어스 토크의 영향을 완전히 무시할 수 없는 상태임으로 가능한 한 길게하고 선의 영향을 최소화하기 위한 액츄에이터의 측정 위치를 다음의 방법에 의하여 결정하였다. 즉 상당량의 입력을 VCM 코일에 정현파형태로 가하게 되면 액츄에이터는 좌우로 진동하며 구리선으로 인한 바이어스 토크가 상쇄되는 동적 토크 평형상태로 drift하게되고 이로부터 정확한 피봇마찰특성을 측정할 수 있다.

### 3. 피봇 비선형특성 측정 및 분석

#### 3.1 Sweep Sine Describing Function 을 이용한 측정결과

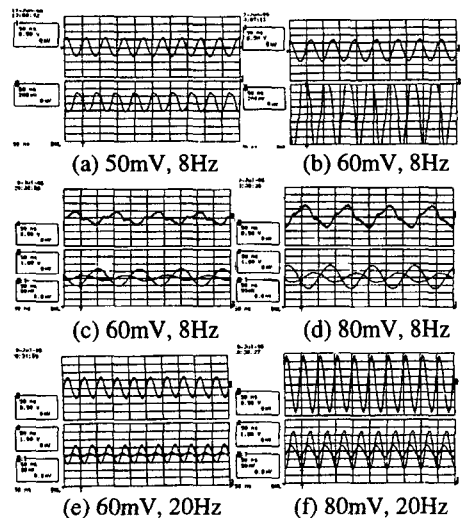
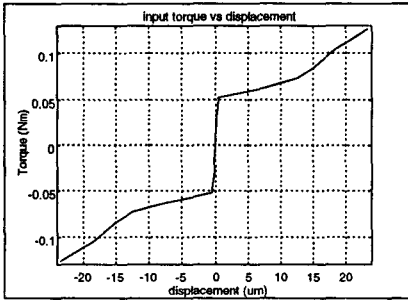


Fig. 2 Input voltage vs. Displacement/Velocity

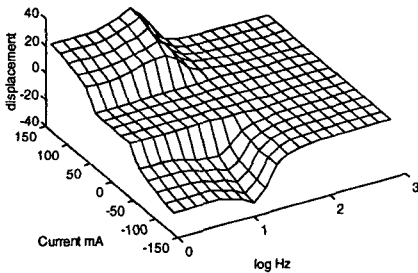
Fig. 2-(a)~(f)는 입력전류에 대한 액츄에이터 헤드의 출력변위와 속도를 측정된 결과이다. 이는 피봇 베어링의 프리로드에 의하여 발생하는 기동 토크의 원인이 된다. Fig. 2-(a), (b)는 입력전압을 10mV씩 단계적으로 상승시키면 입력전류의 변화를 비교한 결과로 50mV까지는 입력 토크와 출력변위 및 속도

의 비가 대체적으로 선형적 비례를 나타내나 60mV 이후에는 상당히 급격한 변화가 발생함을 알 수 있다. Fig. 2-(c)~(f)는 이러한 현상을 좀더 세밀히 분석하기 위하여 입력 토오크와 주파수대를 변화시켜 가며 측정된 결과로서 입력주파수 8Hz와 20Hz에서 입력전류의 변화에 따라 발생하는 입출력간의 왜곡 정도를 나타낸다. 즉 8Hz 주파수, 50mV 입력범위내에서는 입력 토오크의 크기에 따라 액츄에이터 피봇의 각변위가 선형적으로 비례하며 가진시간에 관계없이 일정한 최대 각변위 내에서 제한된다. 그러나 60 mV 이상에서는 입력에 따른 출력변위와 속도의 형태가 각변위에 따라 왜곡되며 가진시간에 비례하여 각변위의 변화가 발생함을 알 수 있다. 그러나 20Hz의 가진주파수에서는 이러한 왜곡현상이 일어나지 않으며 비선형성도 적어진다. 이러한 결과를 종합하여 볼 때 일정주파수 영역과 입력토오크에 따라 피봇 베어링의 비선형특성이 나타남을 알 수 있다.

Fig. 3-(a)는 8Hz에서의 입력전류변화에 따른 측정결과를 도시하였으며 Fig.3-(b)는 주파수변화까지 고려한 측정결과로서 10Hz에서 가장 큰 2-slope 변화가 나타남을 알 수 있다.



(a)  
two slope in frequency range



(b)

Fig. 3 입력전류와 속도의 관계

### 3-2. Stiffening 효과

Fig. 4는 미소각변위 내에서의 주파수분석 결과로서 저주파영역에서 댐핑이 존재함을 알 수 있는데, 이 극(pole)은 실제 피봇 베어링에서 비선형성 때문이 기인한다[1].

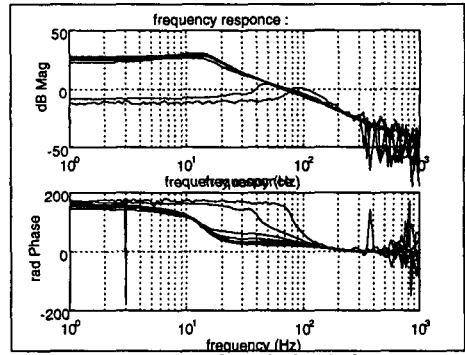


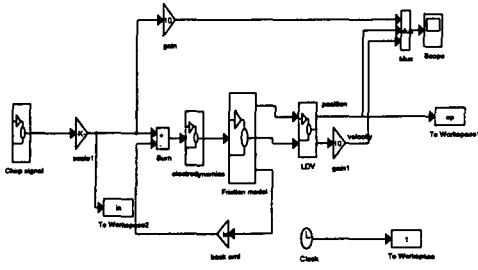
Fig. 4 주파수분석 결과

주파수 영역과 입력전류는 각각 1 Hz~1k Hz, -0.08 mA~0.08 mA 이다. 각 입력의 시작주파수에서 이득을 보면 낮은 입력의 경우 -9 dB에서 시작하며 다소간의 이득차이가 있음을 알 수 있다. 즉, 입력의 증가에 따라 증가상태를 나타내며 공진 주파수는 낮아지는 추세가 보인다. 60 mV (0.07mA) 이상의 입력의 경우는 낮은 입력의 경우들과 달리 상당한 큰 출력을 발생하며 유사한 증가상태를 나타내는데 공진 이후의 이득값은 일정하며 공진주파수는 거의 변하지 않는다. 이러한 원인을 파악하기 위하여 별도의 laser vibrometer를 사용하여 액츄에이터 e-block 중단의 수평변위를 입력으로 하고 헤드의 변위간의 주파수분석을 통하여 suspension, flexure, 헤드로 구성된 HGA(head gimbal assembly)에서는 상기 조건의 저주파수대에서 공진원이 없음을 알 수 있었으며 e-block은 구조적인 특성상 구동입력이 작을때는 강제로 보아도 무관하다. 또한 VCM에 직접 연결된 선의 동특성을 고려하여 굵기와 길이 형태를 달리한 결과 공진주파수와 무관함을 알 수 있었다. 따라서 본 공진주파수의 발생원인과 변화는 피봇 베어링의 비선형성과 히스테리시스로 인하여 발생하는 stiffening 효과로 결론지을 수 있다.

### 4. 피봇 friction의 비선형성 모델링

앞장의 측정/분석 결과로부터 피봇 마찰의 비선형성 및 stiffening 효과를 모델링하였으며 이의 타당성을 주파수영역과 시간영역에서 시뮬레이션을 통하여 실험결과와 비교 검증하였다.

액츄에이터 시스템전체의 모델링은 Fig. 5와 같으며 실험에 사용된 장비와 모델의 시뮬레이션을 위해 사용된 파라미터값은 다음과 같다.



- Laser Vibrometer : position gain(1V/8μm)  
velocity gain(1V/mm/s)
- Actuator Inertia : 47.99 (gm-cm<sup>2</sup>)
- Torque constants : 1051.31 (gmf-cm/amp)
- VCM coil resistance : 14(Ohm)
- VCM inductance : 1.08e-3 (Henries)

Fig. 5 Actuator System Model

#### 4.1 Preload + 2-slope 스프링 모델

Abramovitch [1],[2]는 Fig. 6 과 같이 피봇 마찰이 속도와 변위에 미치는 비선형성의 영향을 속도제한에 대해서 쿨롱과 점성 마찰로 구성된 프리로드 모델을 사용하고, 위치제한에 대해서는 2-slope 모델을 사용하였다.

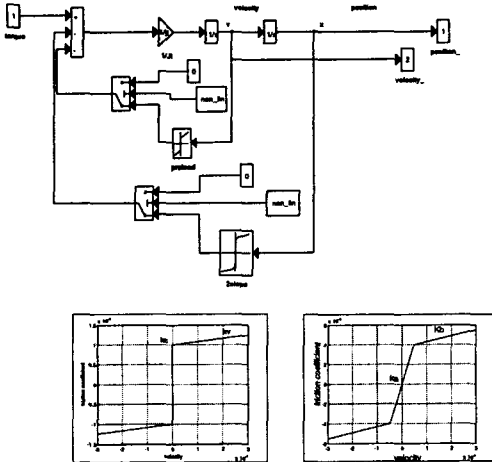


Fig. 6 Preload + 2-slope 모델

프리로드와 2-slope 로 구성된 토오크식은 다음으로 표현된다.

$$\tau = Kcsgn(v) + Kv v \quad |v| < Sa \quad (1)$$

$$\tau = Kcsgn(v) + Kv v + Kbv + (Ka - Kb)Sa \quad |v| > Sa \quad (2)$$

여기서  $Kc$  와  $Kv$  는 각각 쿨롱, 점성마찰계수이고,  $Ka, Kb$  는 스프링 계수이며,  $Sa$  는 문턱값(threshold value)이다.

Fig. 7 은 주파수영역에 있어서 상기모델의 실험결과와 시뮬레이션결과의 비교이다. 시뮬레이션 결과

주파수응답특성(Fig. 7)에서는 소스 레벨이 커짐에 따라 공진주파수가 대략 100Hz 에서 30Hz 로 이동되고, 크기도 증가하며 소스 레벨의 크기에 의해 공진의 stiffening 효과가 발생하고 낮은 주파수(0Hz-100Hz)에서 평탄하며, 공진주파수 이후는 40db/decade 의 기울기를 갖게되고 입력 레벨에 따라 공진점이 바뀌게되는 것을 발견 할 수 있다.

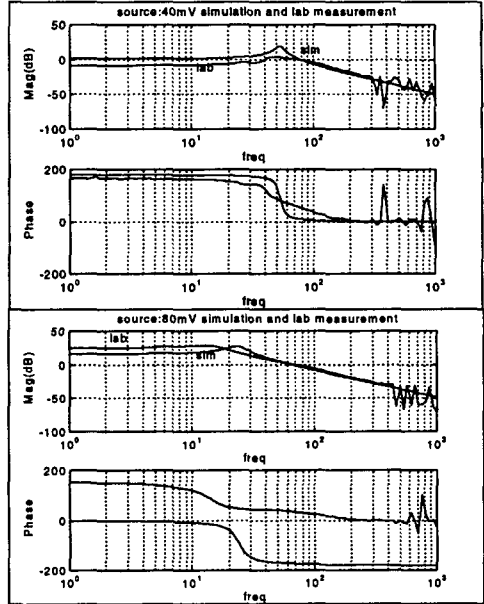


Fig. 7 FRF : Simulation vs. Experiment

Fig. 8.에서는 시간영역 특성 보기위해 정현파를 입력으로 주고 이때 변위를 본 결과이다. 입력이 어느 값 이상부터는 출력신호가 크게 증폭되는 것으로부터 실험 결과와 일치하며 이는 베어링의 프리로드가 있기 때문에 나타나는 현상이라 볼 수 있다. 그러나 실험결과에서 나타나는 왜곡현상의 경향은 일치하지 않는다.

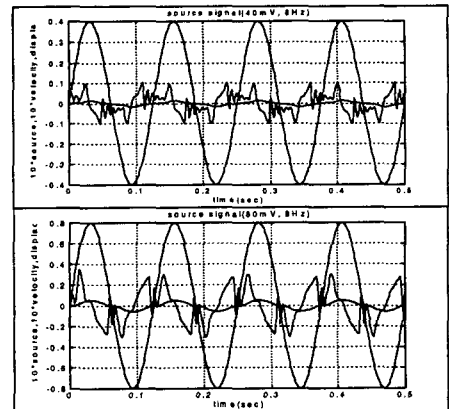


Fig. 8 Time : Simulation

이로서 상기모델링은 주파수영역에서의 특성은 잘 나타내나 시간영역에서의 특성은 잘 나타내지 못하는 모델임을 알 수있다.

#### 4.2 2-slope + 3-slope 모델

본 연구에서는 앞장의 측정결과와 비선형 스프링영역을 모델링하여 시간영역과 주파수영역에서 측정과 시뮬레이션이 모두 부합되는 모델을 제시하였다. 우선 기존의 속도 궤환에 대해서는 프리로드 모델을 데드존이 없는 속도에 대한 모델로 제시하였고 (2-slope 모델), 위치 궤환에 대해서는 점성마찰이 나타나는 문턱값(threshold value)을 위치정보를 이용해 구성하였다. 3-slope 모델에서는 문턱값을 속도정보를 이용해 구성하였다.

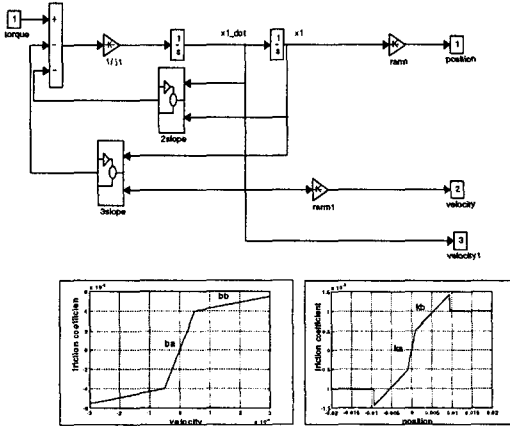


Fig. 9 2-slope 모델 + 3-slope 모델

2-slope 모델 equation :

$$f = K_{av} \quad |x| < T \quad (3)$$

$$f = K_{bv} + (K_a - K_b)T \quad |x| > T \quad (4)$$

3-slope 모델 :

$$f = K_1 x \quad |v| < S \quad (5)$$

$$f = K_1 x + (K_1 - K_2)S \quad U > |v| > S \quad (6)$$

$$f = K_1 x + (K_1 - K_2)S + K_3 x \operatorname{sgn}(U) \quad |v| > U \quad (7)$$

여기서 T, S, U 는 문턱값이다.

Fig. 10 은 주파수영역에 있어서 상기모델의 실험결과와 시뮬레이션결과와의 비교이다.

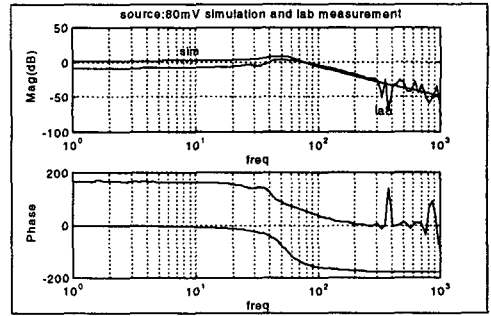
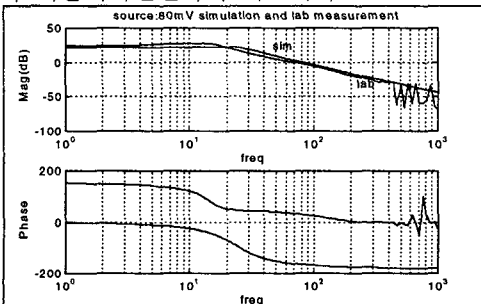
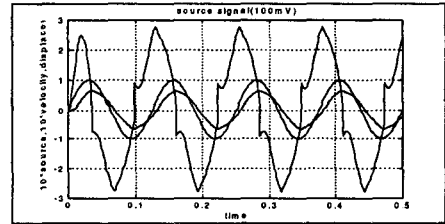
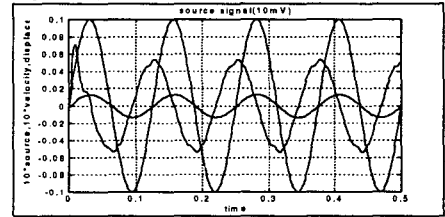
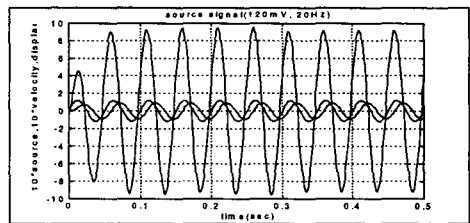
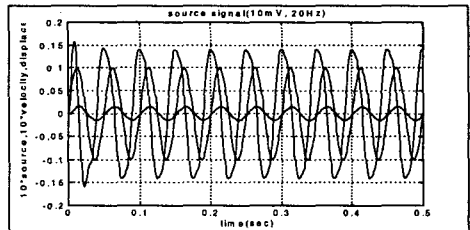


Fig. 10 FRF : Simulation vs. Experiment

Fig. 11.에서는 2-slope 모델 + 3-slope 모델의 시간영역 특성을 시뮬레이션한 결과이다.



(a) 8Hz fixed sine simulation



(b) 20Hz fixed sine simulation  
Fig. 11 Time : Simulation

Fig.11 의 시뮬레이션결과를 Fig. 2 의 측정결과와 비교하여 볼때 입력과 가진주파수에 따른 시간영역에서의 변화도 상기모델이 잘 추종함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 HDD 피봇베어링의 미세거동 측정 결과를 바탕으로 하여 모델링 및 시스템구성을 위한 궤환이득의 문턱(threshold)조건을 결정함에 있어서 속도궤환은 위치정보를, 위치궤환은 속도정보를 이용한 2-slope + 3-slope 모델을 구성하였다. 실험결과를 기준으로 변수를 설정하고 기존의 모델링방식인 프리로드 + 2-slope 모델에 대하여 본 연구의 2-slope+ 3-slope 모델을 시뮬레이션하여 타당성을 비교분석하였다. 기존의 프리로드 + 2-slope 모델링방식은 주파수 특성에서는 실제와 잘 부합이 되나 시간영역 특성에서의 비선형특성은 다르게 나타난다. 이에 대해 본 연구의 모델을 시간과 주파수영역에서 모두 적합한 특성을 가짐을 보였다. 상기의 결과로부터 모델링관점에 있어서 데드존을 고려하는 기존의 방법에 대해 비선형 스프링영역 및 stiffening 효과를 고려한 새로운 방법이 실험결과와 더 잘 일치함을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

1. D. Abramovitch, F. Wang and G. Franklin, "Disk Drive Pivot nonlinearity Modeling Part1: Frequency Domain" Proceedings of the American control conference FA9-10:00. Baltimore, MD. June 1994
2. D. Abramovitch, F. Wang and G. Franklin, "Disk Drive Pivot nonlinearity Modeling Part2: Time Domain" Proceedings of the American control conference FA9-10:20. Baltimore, MD. June 1994.
3. D. Abramovitch, F. Wang and G. Franklin. "A Method for Verifying Measurements and Models of Linear and Nonlinear Systems". Proceedings of the American Control Conference WA7-9:15. San Francisco, CA. June 1993
4. B. Armstrong-Helouvry, P. Dupont and C. Canudas De Wit. "A Survey of Models, Analysis Tools and Compensation Methods for the Control of Machines with Friction". Automatica Vol.30.No7. July 1994
5. H.T. Goh, S. Weerasooriya, T.S. Low and Y.H. Huang, "Compensation of pivot friction in a disk drive actuator positioning servo system". INTERMAG '95 FB-10 San Antonio, OR. April 1993