

HDD의 2단구동기를 이용한 트랙 추종 제어의 실험적 고찰

°박성준*, 박노철**, 양현석**

Experimental Considerations in Tracking Control of HDD Dual Stage Actuator

°Sungjoon Park*, Nocheol Park**, and Hyunseok Yang**

Abstract

The areal recording density of HDD(Hard Disk Drive) has been increasing by about 60% a year. In order to achieve high areal density, less track pitch is expected and more servo bandwidth is required. Dual stage actuator and servo controller for HDD have been suggested for achieving high track density as a possible solution.

Dual-loop servo system is generally classified into a two-input-two-output system. but if we use an estimator for a two-input-two-output system, it can be converted into two input one output system. Since we can't control the dual stage servo system by the classical method, it requires a special technique; for example, Parallel Loop System, Master-Slave Loop System, Decoupled Master-Slave Loop System, and Dual Feedback Loop System. In this paper, we performed experimental evaluations of several types of control algorithm. Further experiments will be made in the future.

1. 서론

HDD(Hard Disk Driver)의 기록밀도를 높이기 위해서는 TMR(Track Misregistration)을 줄여야 하고, 이를 위해서는 서보 대역폭의 획기적인 증가가 필요하다. 하지만 기존의 HDD에서 사용되고 있는 VCM(Voice Coil Motor)은 기계적 공진의 한계와 피봇 베어링의 영향 때문에 서보 대역폭을 높이는 데에는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복할 수 있는 대안으로써 2단구동기를 사용한 기술이 최근 활발하게 연구되고 있다.

디스크 드라이브용 2단구동기는 구동원리에 따

라 Piezoelectric, Electrostatic, Electromagnetic 모터로 분류된다. 또한 2단구동기의 설치 위치에 따라 서스펜션 2단구동기와 슬라이더 2단구동기로 구분된다. 본 논문에서는 시뮬레이션과 실험에 전 단형 피에조를 이용한 서스펜션 2단구동기를 사용하였다.

2단구동기의 경우는 VCM과 같은 단일 구동기에 비해 제어기 설계에 고려해야할 사항이 많지만 가장 우선적으로 고려해야할 사항은 두 구동기 사이의 명확한 역할 구분이며, 역할 구분을 통해 두 구동기의 성능을 보다 효율적으로 이용할 수 있게 된다.

본 논문에서는 2단구동기에 적용되어 온 여러 가지 제어 기법을, 시뮬레이션과 실험을 통해 성능을 평가하고, 이를 통해 HDD의 트랙추종서보 성능에 가장 타당한 제어 기법을 추출해내었다.

* 연세대학교 대학원

** 연세대학교

2. 실험장치의 구성

이 논문에서는 서스펜션과 E-블록 사이에 전단형 피에조를 부착한 MA(Micro Actuator)를 HDD의 VCM에 부착하여 실험에 사용하였다.

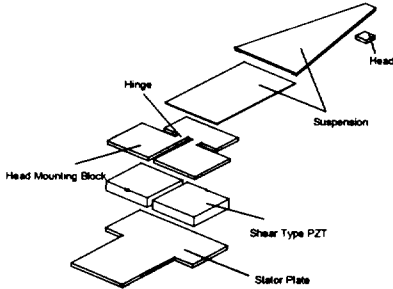


Fig. 1 Shear Mode Piezoelectric MA

Fig. 1에서 묘사된 이 MA는 자체 제작한 것으로서 $\pm 30V$ 의 전압이 주어졌을 때 $\pm 0.25 \mu m$ 의 변위를 발생시킨다. 또한 이것의 히스테리시스는 전체 변위의 10%미만이므로 선형으로 간주할 수 있다. Fig. 2와 Fig. 3은 각각 실험에 사용된 VCM과 MA의 FRF(Frequency Response Function)를 모델링한 결과이다.

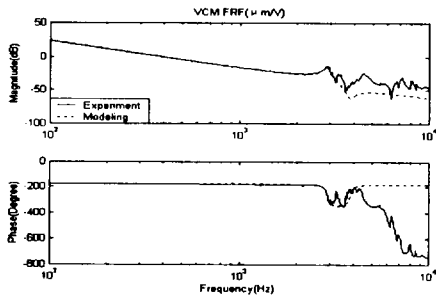


Fig. 2 Frequency Response of VCM

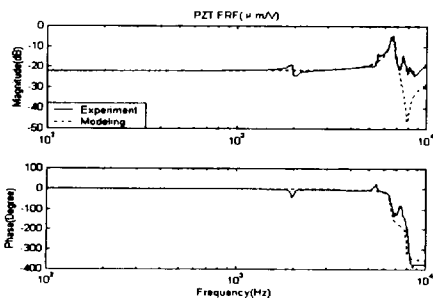


Fig. 3 Frequency Response of MA

Fig. 4는 실험에 사용된 실험장치의 구성도이다.

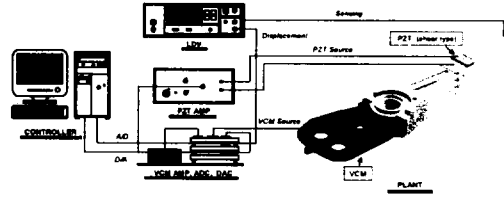


Fig. 4 Experimental Setup

3. 2단구동기 서보제어

2단구동기의 경우 1개의 위치신호를 피드백해서 2개의 제어 입력을 받아들이는 MISO(Multi Input Single Output)시스템이기 때문에 SISO(Single Input Single Output)시스템에만 적용 가능한 고전 제어기는 2단구동기 서보제어 시스템에 바로 적용할 수 없다. 그러므로 전체시스템을 MA 루프와 VCM 루프로 나누어서 각각의 루프를 특별한 방법으로 연결해서 사용해야 한다.

VCM은 반응 속도가 상대적으로 느린 반면에 충분한 변위를 발생시킬 수 있고 반대로 MA는 상대적으로 빠른 반응 속도를 가지지만 변위에 한계를 가지고 있다. 따라서 2단구동기 시스템을 제어하는 기본적인 지침은 다음과 같다[4].

- 높은 페루프 서보 대역폭이 필요하다.
- 저주파수 기준입력은 VCM이 추종해야 한다.
- 고주파수 기준입력은 MA가 추종해야 한다.

3.1 Parallel Loop 시스템

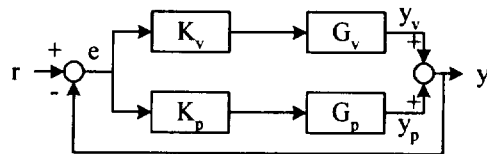


Fig. 5 Parallel Loop

Parallel Loop 시스템은 단지 하나의 피드백신호만을 필요로 하는 매우 단순한 구조를 가지고 있다. 여기서 이 시스템의 페루프 전달함수를 구해보면 다음과 같다.

$$G_{cl} = \frac{G_v K_v + G_p K_p}{1 + G_v K_v + G_p K_p} \quad (1)$$

여기에 사용된 G_v 와 K_v 는 VCM 루프의 플랜트

와 제어를 나타내고, G_p 와 K_p 은 MA 루프의 플랜트와 제어를 나타낸다. 여기서 K_v 는 PD 제어기와 플랜트의 주공진의 영향을 줄이기 위한 노치 필터로 구성되었고, K_p 는 PI 제어기와 노치 필터로 구성되었다.

이 시스템의 특성방정식을 살펴보면 다음과 같다.

$$1 + G_v K_v + G_p K_p = 0 \quad (2)$$

식 (2)에서 알 수 있듯이 MA 루프와 VCM 루프는 연성(coupled)되어 있다. 이것은 VCM 루프와 MA 루프의 각각의 안정성을 만족하는 것만으로는 전체시스템의 안정성을 만족시킬 수 없다는 것을 의미한다.

기준 입력에 대한 y_v (VCM output)과 y_p (MA output)의 응답을 수식적으로 구하여 보면 다음과 같으며, 이에 대한 보드선도를 Fig. 6에 나타내었다.

$$y_p = \frac{G_p K_p}{1 + G_v K_v + G_p K_p} r \quad (3)$$

$$y_v = \frac{G_v K_v}{1 + G_v K_v + G_p K_p} r \quad (4)$$

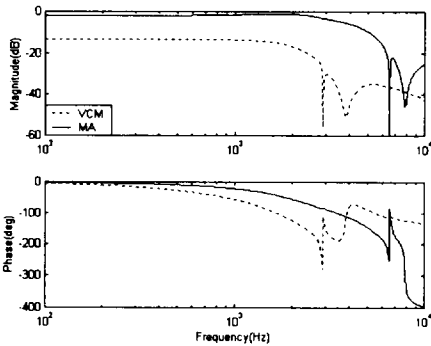


Fig. 6 Relationship between VCM and MA

Fig. 6의 결과로부터, Parallel Loop 시스템은 대부분의 주파수영역에 걸쳐서 MA의 움직임이 VCM보다 훨씬 크게 나타나고 있다. 즉 앞에서 제시한 지침을 전혀 따르지 않고 있다.

2단구동기의 성능과 비교하기 위하여 VCM만을 구동시켰을 때의 정현파 입력 추종 결과를 실험하여 Fig. 7에 나타내었고, Fig. 8은 Parallel Loop 시스템의 정현파 입력 추종실험결과이다. 여기에 사용된 정현파 입력은 각각의 구동기가 앞에서 말한

지침대로 명확한 역할구분을 하는지 알아보기 위해서 큰 변위의 100Hz 사인함수와 작은 변위의 700Hz의 사인함수를 합성하여 만들었다.

실험결과 Parallel Loop 시스템은 MA가 VCM보다 정현파 입력에 대하여 빠르게 반응했지만 쉽게 변위의 한계에 도달하였다. 때문에 전체적인 성능이 VCM만 사용한 경우보다도 오히려 나빠졌다.

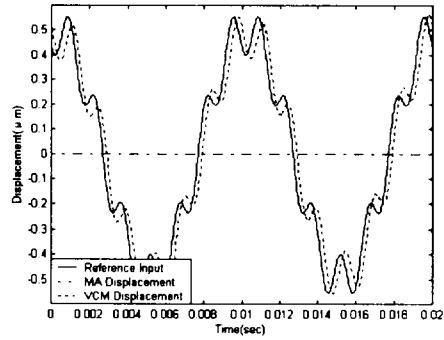


Fig. 7 Tracking Result of VCM

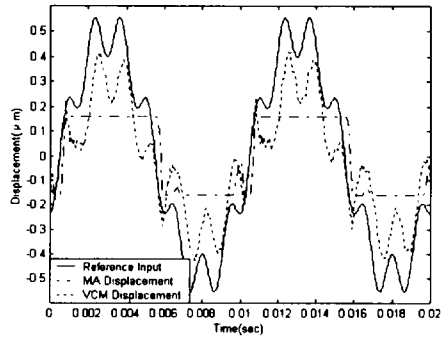


Fig. 8 Tracking Result of Parallel Loop

3.2 Master-Slave Loop 시스템

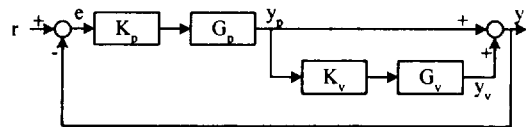


Fig. 9 Master-Slave Loop

Master-Slave Loop 시스템은 Fig. 9와 같은 구조로 되어 있다. 이 구조의 특성상 정현파 입력에 대해 MA가 먼저 반응을 하고 VCM이 그 뒤를 이어 부족한 변위를 보충해 준다.

이 시스템의 폐루프 전달함수와 특성방정식은 다음과 같다.

$$G_{cl} = \frac{(1 + G_v K_v) G_p K_p}{1 + (1 + G_v K_v) G_p K_p} \quad (5)$$

$$1 + (1 + G_v K_v) G_p K_p = 0 \quad (6)$$

식(6)에서 알 수 있듯이 이 시스템 또한 MA 루프와 VCM 루프는 완전히 비연성화(decoupled) 되어있지 않다. 더욱이 이 구조는 y 와 y_p 를 모두 측정해야 한다[1]. 다시 말해서 VCM과 MA의 상대변위 정보를 필요로 한다는 것이다. 하지만 y_p 측정에는 현실적으로 한계가 있으므로, 플랜트 모델을 이용한 관측기를 이용한다.

앞 과정에서와 같이, VCM과 MA의 각각의 움직임을 살펴보기 위해 각각의 변위를 출력으로 하는 전달함수를 구하여 보드선도를 그려보면 Fig. 10과 같다.

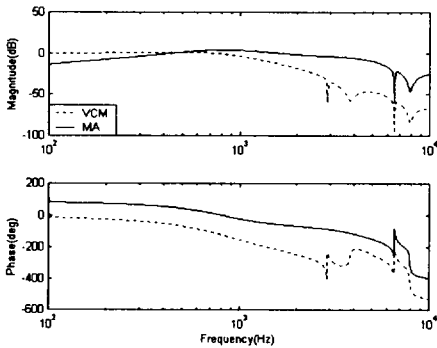


Fig. 10 Relationship between VCM and MA

Fig. 10은 이 시스템이 저주파영역에서는 VCM이 그리고 고주파영역에서는 MA가 전체시스템에 큰 영향을 주고 있음을 잘 나타내 준다. 이 시스템의 정현파 입력 추종실험과 스텝응답실험의 결과는 Fig. 11~13과 같다.

먼저 정현파 입력 추종실험의 결과를 살펴보면 앞에서 예상한 대로 MA가 고주파 성분의 기준 입력에 대하여 먼저 응답하고 VCM은 그 뒤를 따라가며 저주파성분의 변위가 큰 움직임을 추종하고 있다. 즉 MA는 고주파 성분의 움직임만을 주로 추종하므로 변위의 한계가 문제시되지 않는다.

스텝응답을 살펴보면 MA가 먼저 기준입력을 따라 움직이고 뒤따라오는 VCM이 근처에 다가오면 다시 처음의 위치로 돌아가 있다. Fig. 12의 0.7

msec지점에서 오버슈트가 크게 발생하여 정착시간을 크게 하는 것을 볼 수 있는데 이에 대한 비교는 본문의 마지막 부분에 있는 Table 1에 나타내었다.

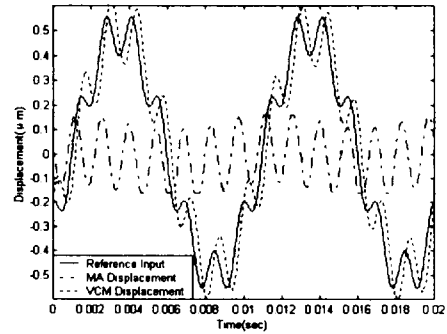


Fig. 11 Tracking Result of Master-Slave Loop

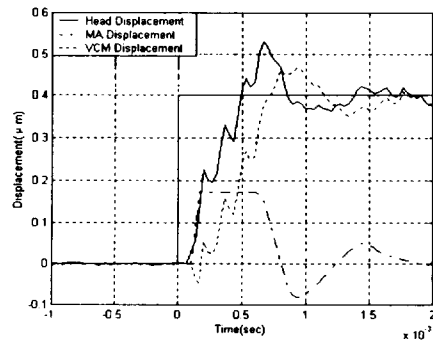


Fig. 12 Step Response of Parallel Loop

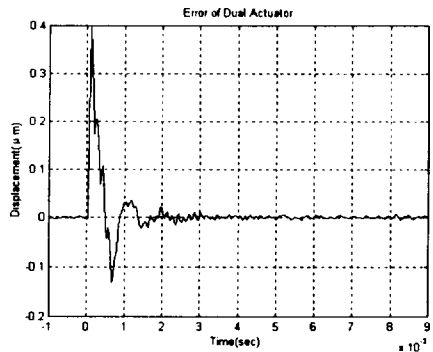


Fig. 13 Error Value of Step Response

3.3 Decoupled Master-Slave Loop 시스템

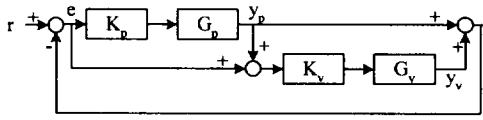


Fig. 14 Decoupled Master-Slave Loop

Decoupled Master-Slave Loop 시스템은 Master-Slave Loop 시스템에 피드포워드 루프를 추가시켜서 Fig. 14와 같은 구조로 이루어져 있다[4]. 이 시스템의 폐루프 전달함수와 특성방정식은 다음과 같다.

$$G_{cl} = \frac{G_v K_v (1 + G_p K_p) + G_p K_p}{(1 + G_p K_p)(1 + G_v K_v)} \quad (7)$$

$$(1 + G_p K_p)(1 + G_v K_v) = 0 \quad (8)$$

식(8)을 보면 이 시스템의 MA 루프와 VCM 루프는 완전히 비연성화 되어있다는 것을 알 수 있다. 다시 말해서 전체시스템의 안정성은 각각의 루프를 안정화시킴으로서 확보할 수 있다는 것이다. 바로 이것이 이 시스템의 주요한 장점중의 하나이다. 하지만 이 방법 역시 y_p 를 추가로 측정해야 하기 때문에 Master-Slave Loop 시스템과 같이 관측기를 사용하여 y_p 를 구한다.

이 시스템의 정현파 입력 추종실험의 결과는 Fig. 15~16과 같다. 실험결과, 각 구동기의 움직임은 앞에서 본 Master-Slave Loop 시스템의 움직임과 거의 동일한 모양을 가지고 있어 시스템의 전체적인 특징이 Master-Slave Loop 시스템과 유사함을 알 수 있다. 더욱이 이 시스템은 40nm 정도의 가장 작은 오차를 보인다.

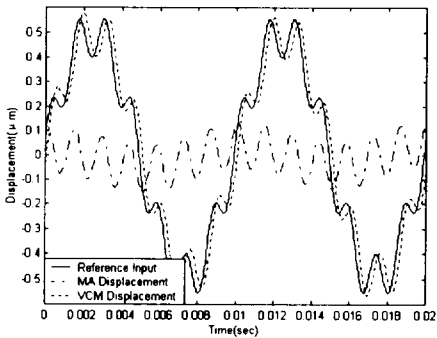


Fig. 15 Tracking Result of Decoupled Master-Slave Loop

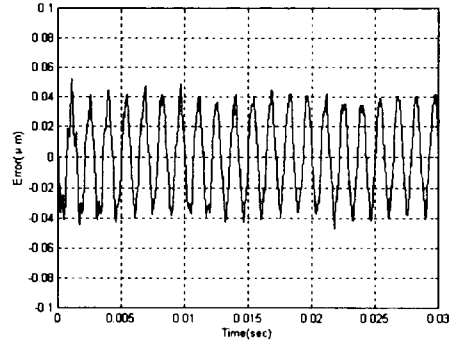


Fig. 16 Error Value Between Reference Input and Measured Output

3.4 Dual Feedback Loop 시스템

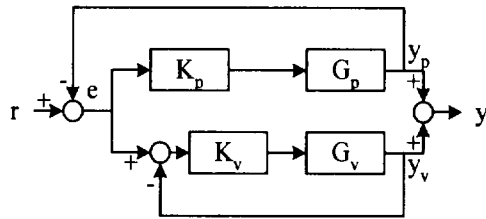


Fig. 17 Dual Feedback Loop

Dual Feedback Loop 시스템은 Fig. 17과 같은 구조를 가지고 있다. 이 시스템의 폐루프 전달함수는 다음과 같다.

$$G_{cl} = \frac{G_v K_v (1 + G_p K_p) + G_p K_p}{(1 + G_p K_p)(1 + G_v K_v)} \quad (9)$$

식(9)는 앞의 Decoupled Master-Slave Loop 시스템과 완전히 동일한 것이어서 결국 블록 다이어그램의 형태는 달라 보이지만 결과적으로 Decoupled Master-Slave Loop 시스템과 같은 시스템이다.

3.5 LQG(Linear Quadratic Gaussian control) 시스템

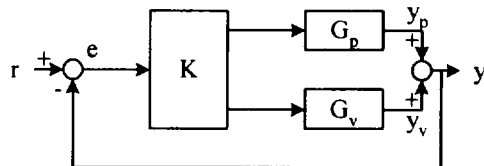


Fig. 18 LQG System

앞에서 실험한 결과를 토대로 각각의 구동기의

성능을 고려하여 LQG제어기를 설계하였다.

실험결과 이 시스템은 Decoupled Master-Slave Loop 시스템과 유사한 움직임을 보이지만 오차 값이 약간 더 크게 나타났다.

Table 1은 정현파 입력추종실험의 최대, 최소 오차와 스텝응답의 정착시간을 각각의 방법으로 실험한 실험결과를 정리한 것이다.

Table 1 Summary of Experimental Results

	Error(μm)	Settling Time of Step Response
VCM only	± 0.15	1.5×10^{-3} sec
Parallel	± 0.19	1.5×10^{-3} sec
Master-Slave	± 0.06	2.5×10^{-3} sec
Decoupled Master-Slave	± 0.04	2×10^{-3} sec
LQG	± 0.05	2.5×10^{-3} sec

4. 결론

2단구동기를 제어하는 데에는 여러 가지 방법이 있을 수 있지만, 이 논문에서는 가장 기본적인 제어방법들을 실험을 통하여 각각의 특징들을 정리하였다. Parallel Loop 시스템의 특징은 y 값만을 측정하면 되는 간단한 구조이지만 각각의 루프가 연성되어 있지 않고, 앞에서 말한 2단구동기 시스템을 제어하는데 필요한 기본적인 지침을 만족하지 않는다. Master-Slave Loop 시스템은 이 지침을 잘 따르지만 여전히 각각의 루프가 연성되어 있으며, 더욱이 y_p 를 추가로 측정해야 한다. Decoupled Master-Slave Loop 시스템은 기본적 지침을 만족하며 각각의 루프가 완전히 비연성화 되어있고, 실험한 방법 중 가장 작은 정현파 입력 추종오차를 갖는다. 하지만 y_p 를 추가로 측정 해야한다는 부담이 여전히 있어서 관측기의 성능이 중요한 변수로 작용한다. LQG로 제어한 경우 앞의 Master-Slave Loop 시스템과 유사한 움직임을 가지며 오차도 비슷하게 측정되었다.

각 루프의 제어 게인을 조절함에 따라 성능은 바뀔 수 있지만 Decoupled Master-Slave Loop 시스템이 가장 장점이 많은 제어기임을 확인하였다.

5. 후기

본 연구는 한국과학재단지정 정보저장기기 연구센터의 지원(과제번호:2000G0102)을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

6. 참고문헌

- [1] Lin Guo, Douglas Martin and Don Brunett, Dual-stage Actuator Servo Control for High Density Disk Drives, 1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, September 19-23, 1999.
- [2] S. Koganezawa, Y. Uematsu and T. Yamada, Dual-Stage Actuator System for Magnetic Disk Drives Using a Shear Mode Piezoelectric Microactuator, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35 No. 2 March 1999.
- [3] Tetsuo Semba, Toshiki Hirano, John Hong and Long-Sheng Fan, Dual-Stage Servo Controller for HDD Using MEMS Microactuator, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 35 No. 5, September 1999.
- [4] W. Guo, S. Weerasooriya, T. B. Goh, Q. H. Li, C. Bi, K. T. Chang and T. S. Low, Dual stage actuator for high density rotating memory devices, IEEE Transaction on Magnetics, Vol 34, No. 2, March, pp. 450-455, 1998.