

정전형 마이크로 액추에이터를 이용한 초고밀도 HDD용 Dual-Stage 서보 시스템

論文
48C-2-14

Dual-Stage Servo System using Electrostatic Microactuator for Super-High Density HDD

金勝漢* · 成又慶** · 李曉政* · 李宗遠*** · 崔正薰*** · 安永宰[§] · 全國鎮^{§§} · 金奉煥^{§§§}
(Seung-Han Kim · Woo-Kyeong Seong · Hyo-Jung Lee · Jong-Won Lee ·
Jung-Hoon Choi · Young-Jae Ahn · Kukjin Chun · Bong-Hwan Kim)

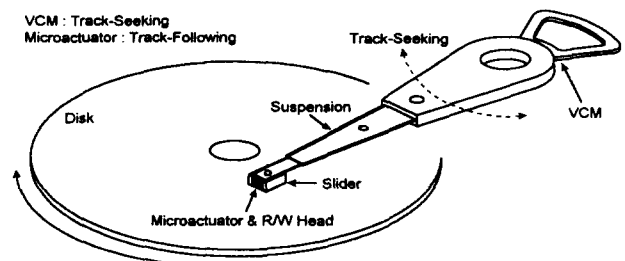
Abstract - Dual-stage servo system for super-high density HDD has the chances of being composed of the coarse actuator(VCM) for track-seeking control and the fine actuator(microactuator) for track-following control in near future. This paper presents the concept design of dual-stage servo system and the track-following control using an electrostatic microactuator for super-high density HDD. The electrostatic microactuator is designed and fabricated by MEMS(micro-electro-mechanical systems) process. Both the nonlinear plant(voltage/displacement-to-electrostatic force) and the linear plant(electrostatic force-to-displacement) of the microactuator are established. Inverse function of the nonlinear plant is employed for a feedforward nonlinear compensator design. And feedforward control effect of this compensator is shown by time-domain experiments. A track-following feedback controller is designed using the feedback nonlinear compensator which is derived from the feedforward nonlinear compensator. The track-following control experiment is done to show the control efficiency of the proposed control system. And, excellent track-following control performance(2.21kHz servo-bandwidth, 7.51dB gain margin, 50.98° phase margin) is achieved by the proposed control system.

Key Words : MEMS(micro-electro-mechanical systems), hard disk drive, servo-bandwidth, dual-stage servo system, feedback nonlinear compensator

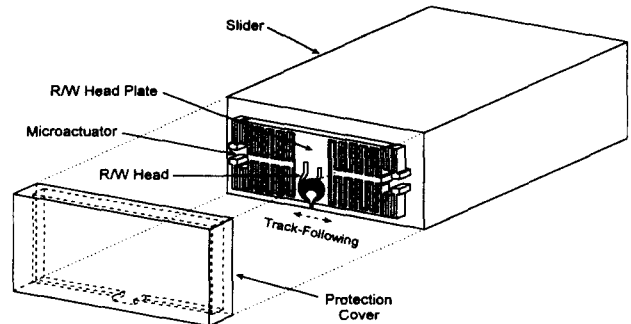
1. 서 론

2000년대 초기에 실현화 될 것으로 전망되는 기록밀도 10Gb/in² 이상의 초고밀도 하드 디스크 드라이브(hard disk drive)에서는 기존의 VCM(voice coil motor)만으로는 헤드(head)의 정밀위치제어가 어렵게 될 것으로 예상된다. 따라서 현재 세계 여러 연구기관에서 VCM과 함께 dual-stage 서보 시스템을 구축하는 데 응용할 수 있는 마이크로 액추에이터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[1,2,3]

본 논문은 초고밀도 HDD를 위한 dual-stage 서보 시스템의 개념 설계와 정전형 마이크로 액추에이터를 이용한 트랙 추적 제어에 대한 것이다. 현재 상용화되어있는 기록밀도 1Gb/in², 트랙밀도 5kTPI의 일반적인 하드 디스크 드라이브는 VCM을 이용하여 트랙 탐색(track-seeking)과 트랙 추적(track-following)을 모두 수행하며, 트랙 추적 제어시에 약 500~600Hz의 servo-bandwidth 제어성능을 갖는다.



(a) Dual-Stage Servo System



(b) Head-Assembly

그림 1 Dual-Stage 서보 시스템 개념 설계
Fig. 1 Concept Design of Dual-Stage Servo System

* 正 會 員 : 高等技術研究院 電子材料研究室 主任研究員
** 非 會 員 : 高等技術研究院 電子材料研究室 先任研究員
*** 非 會 員 : 高等技術研究院 電子材料研究室 研究員
[§] 非 會 員 : 高等技術研究院 電子材料研究室 室長 · 工博
^{§§} 非 會 員 : 서울대 工大 電氣工學部 副教授 · 工博
^{§§§} 非 會 員 : 서울대 大學院 電氣工學部 博士課程

接受日字 : 1998年 6月 5日
最終完了 : 1999年 1月 7日

그러나 기록밀도 10Gb/in² 이상, 트랙밀도 25kTPI 이상의 차세대 초고밀도 하드 디스크 드라이브(HDD)에서는 트랙 추적 제어시에 약 2kHz 이상의 servo-bandwidth를 요구하게 될 것이다.[1]

이에 따라, 본 논문에서는 그림 1에 나타난 바와 같이 트랙 탐색에는 기존의 VCM을 사용하고, 트랙 추적에는 정전형 마이크로 액추에이터를 사용하는 dual-stage 제어 시스템에 대한 개념 설계를 수행하였고, 트랙 추적을 담당하는 마이크로 액추에이터의 제어에 대하여 연구하였다. Head-assembly는 슬라이더(slidebar), R/W(read/write) head, 마이크로 액추에이터 및 보호 덮개(protection cover)를 포함하는 것이며, 마이크로 액추에이터는 슬라이더의 후미(trailing edge)에 설치되어 R/W head가 원하는 트랙을 따라갈 수 있도록 추적 제어를 수행하게 된다.

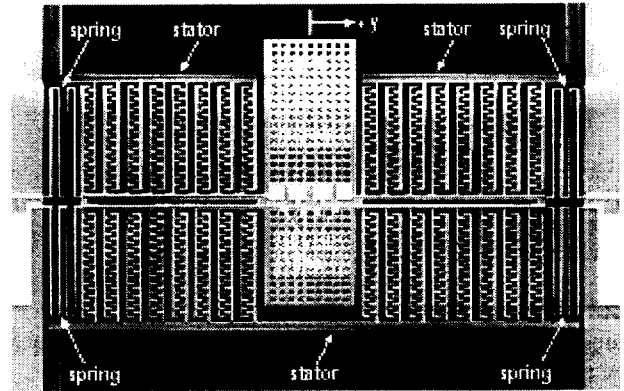
트랙 추적 제어를 수행하는 마이크로 액추에이터는 MEMS 공정을 통하여 제작되었다. 전압/변위에 대한 정전력(electrostatic force)의 비선형성을 포함하는 정전형 마이크로 액추에이터를 모델링하기 위하여 마이크로 액추에이터의 플랜트를 비선형 플랜트와 선형 플랜트로 분리하였고, 비선형 관계식과 실험 결과를 분석하여 이들을 설정하였다. 비선형 플랜트의 역함수를 이용하여 피드포워드(feedforward) 제어를 위한 비선형 보상기(nonlinear compensator)를 설계하였고 성능을 확인하였다. 트랙 추적 제어를 위하여, 피드포워드 비선형 보상기로부터 유도되는 피드백(feedback) 비선형 보상기와 저대역 통과 필터(low-pass filter)를 도입한 PI(proportional-plus-integral) 제어기를 설계하였고, 제안된 제어기의 성능을 보이기 위한 제어 실험을 수행하였다.

2. 마이크로 액추에이터 제작

그림 2(a)는 제작된 빗살형 구조의 정전형 마이크로 액추에이터를 SEM(scanning electron microscopy) 촬영한 것이며, 그림 2(b)는 설계 parameter를 표시하기 위하여 마이크로 액추에이터의 일부분을 촬영한 것이다.

마이크로 액추에이터 제작 공정은 다음과 같다. 20 μ m 단결정 실리콘(SOI)의 도핑을 위해 1000 $^{\circ}$ C에서 30분 동안 predeposition을 한 후 다시 1000 $^{\circ}$ C에서 60분 동안 drive-in을 하였다. 도핑결과는 면저항이 2.6 Ω/\square , junction depth가 2 μ m이었다. 단결정 실리콘의 건식 식각을 위한 hard mask인 TEOS(두께 6 μ m)를 최소 선폭 2 μ m로 patterning 하기 위해 spin coater에서 2000rpm으로 35초간 도포한 후에 soft bake를 100 $^{\circ}$ C에서 30분간 실시하고 mask aligner(Kalsus MA-6)에서 9.5초간 노광(expose)하였다. Develop time은 70초로 하였으며 130 $^{\circ}$ C에서 30분간 hard bake를 하여 최소 선폭 2 μ m의 TEOS hard mask를 patterning 할 수 있었다. 단결정 실리콘 식각의 최적조건은 STS Multiplex ICP 장비에서 coil power 300W, platen power 200w, chamber 압력 7mTorr, 식각 gas Cl₂ 유량 40sccm이며, 이때 가장 좋은 비등방도(anisotropy)를 얻을 수 있고, black silicon을 제거할 수 있다. 식각 선택도는 실리콘과 TEOS가 6.5:1이며 비등방도는 0.96이다. 구조물 위의 signal line으로 사용할 금속으로 Mo를 선택하였으며, Mo를 식각하기 위해 비등방도가 좋은 CCl₂F₂ gas를 사용하였다. 식각 조건은 RF power 250W, 압

력 180mTorr, CCl₂F₂ 유량 20sccm, Ar 유량 45sccm이고 Mo와 PR과의 선택도는 약 2:1이며 단결정 실리콘과의 선택도는 약 1:1이다. 희생층인 산화막을 식각하기 위해 7:1 BHF를 사용하여 210분 동안 식각하였다. 마지막으로 승화건조법(sublimation)을 이용하여 구조물을 release함으로써, 금속 신호선(metal signal line)을 가진 마이크로 액추에이터가 제작되었다.



(a) SEM Micrograph of Microactuator



(b) Design Parameters of Microactuator

그림 2 제작된 마이크로 액추에이터

Fig. 2 Fabricated Microactuator

제작된 마이크로 액추에이터의 구조 및 동작원리를 살펴보면, R/W head plate를 포함하는 가로 중심축 및 가로 중심축의 상하 방향 빗살구조가 이동자(mover)를 형성하고 있고, 가로 중심축과 연결된 스프링(spring)이 이동자들 사이에 두고 좌우로 연결되어 있다. 한편 이동자의 빗살구조와 대응된, 또 다른 빗살구조를 고정자(stator)라 한다. 이동자와 고정자간에 전압(V)을 공급하면, 상호간에 인력방향의 정전력(F_{es})이 작용함에 따라 이동자가 고정자에 접근하여 변위(y)가 발생되고, 이들의 관계는 식(1)과 같은 비선형 관계식으로 표현된다. 이식은 전압/변위-정전력의 관계로서 마이크로 액추에이터 비선형 플랜트의 모델링에 적용되며 식에 포함된 parameter는 표 1과 같다.

$$F_{es} = \frac{1}{2} n_1 \epsilon_0 V^2 \frac{t}{g_1} + \frac{1}{2} n_2 \epsilon_0 V^2 \frac{t \cdot l_f}{(g_2 - y)^2} - \frac{1}{2} n_3 \epsilon_0 V^2 \frac{t \cdot l_b}{(g_3 + y)^2} \quad (1)$$

표 1 실측 parameters
Table 1 Measured Parameters

ϵ_0	8.854×10^{-12}	g_1	$1.82 \mu\text{m}$
t	$20 \mu\text{m}$	g_2	$4.55 \mu\text{m}$
n_1	800	g_3	$7.01 \mu\text{m}$
n_2	832	l_f	$3.34 \mu\text{m}$
n_3	30	l_b	$134 \mu\text{m}$

표 1에서 ϵ_0 는 공기의 유전상수, t 는 마이크로 액추에이터 구조층 두께, g_1 은 finger gap, l_f 는 finger 폭, g_2 는 transverse gap, l_b 는 finger bar 중첩 길이, g_3 는 mover bar와 stator bar와의 gap이며, n_1, n_2, n_3 는 각각 g_1, g_2, g_3 의 개수이다. 그림 2(a)에서 마이크로 액추에이터의 우측 스프링과 고정자 사이의 간격이 일종의 이동자와 고정자의 역할을 할 수도 있기 때문에 n_3 에 포함되어야 한다고 생각할 수도 있으나 전압이 인가되어 변위가 발생하면 스프링은 고정자로부터 멀어짐과 동시에 변위(y)의 크기에 따라 굽힘에 의한 스프링 변형이 일어나므로 스프링과 고정자 사이의 간격이 공간적으로 균일하지 않기 때문에 정전력의 식으로 고려하기에 어려움이 있어서 이 부분에서의 정전력은 포함시키지 않았다.

일반적인 정전력 관계식은 식(1) 우변의 첫 번째 항이다. 본 논문에서 두 번째 항과 세 번째 항을 고려한 이유는 다음과 같다. 본 논문에서는 가능한 한 낮은 전압을 사용하여 차세대 HDD에서 요구하는 1 track pitch(=1 μm)이상의 변위를 발생시키고자 하였다. 마이크로 액추에이터는 그림 1에서 볼 수 있듯이 slider 후미에 장착되므로 마이크로 액추에이터가 차지할 수 있는 면적에 제약을 받는다. 제한된 면적 내에서 가능한 한 낮은 전압으로 원하는 크기의 변위를 생성하기 위해서는 식(1)의 n_1 이 커야한다. 그러나 n_1 이 크다는 것은 빗살구조가 조밀하다는 것을 의미하므로 결국 식(1) 우변의 두 번째 항과 세 번째 항의 영향이 고려되어야 한다. 한편, 식(1)에서 정전력의 저하요소인 세 번째 항이 나타나지 않게 하기 위해서 g_3 를 충분히 크게 한다면 제한된 면적 내에서 n_1 과 n_2 가 작아져야 하므로 정전력의 손실이 더욱 커진다. 따라서 본 논문에서는 마이크로 액추에이터의 설계단계에서 앞서 설명한 모든 내용을 고려하여 가능한 한 낮은 전압으로 원하는 크기의 변위를 발생시킬 수 있는 설계안을 제시하고 그에 따라 제작을 수행한 것이다.

3. 마이크로 액추에이터 모델링

그림 3은 마이크로 액추에이터 실험 장치로서, dynamic signal analyzer(HP 35670A)와 digital signal processor(DSP : TMS320C44), 마이크로 액추에이터에 전압을 인가하기 위

한 probe, 변위 측정을 위한 laser vibrometer(Polytec OFV-502/OFV-3001/OFV-130), 전압증폭기(HP 6826A) 및 digital oscilloscope(Tektronix TDS 754A)로 구성되었다.

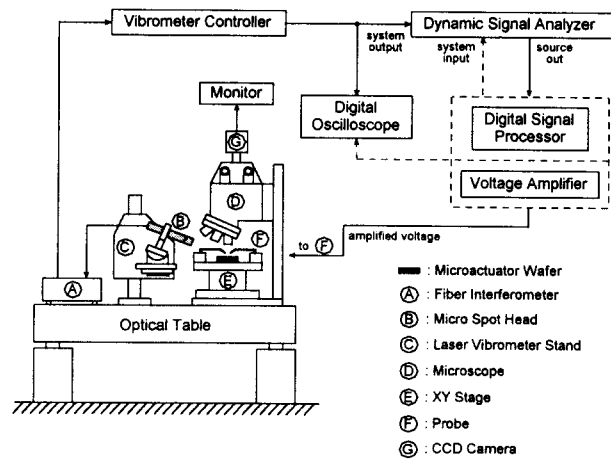


그림 3 마이크로 액추에이터 실험장치

Fig. 3 Experimental Apparatus for Microactuator

정전형 마이크로 액추에이터는 식(1)과 같이 전압/변위-정전력간에 매우 심한 비선형성을 갖고 있기 때문에 일반적인 선형 시스템으로 간주할 수는 없다. 이에 따라, 본 연구에서는 마이크로 액추에이터 플랜트를 전압/변위-정전력간의 비선형 플랜트와 정전력-변위간의 선형 플랜트로 분리하였고, 이러한 개념을 그림 4에 나타내었다.

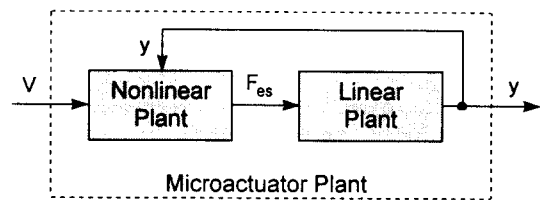


그림 4 마이크로 액추에이터 플랜트 모델링

Fig. 4 Modeling of Microactuator Plant

그림 5는 정전형 마이크로 액추에이터에 증가/감소를 수회 반복하는 전압을 인가하였을 때 발생하는 정전력(F_{es} =발생된 변위(y) \times 스프링 강성($k=37.88\text{N/m}$))을 나타낸 비선형성 실험 결과 및 비선형 플랜트 모델링 결과이다.

여기서 변위 실험치는 laser vibrometer를 이용하여 측정되었고, 스프링 강성은 제작된 스프링의 제작 치수를 SEM으로 실측한 후 실측 치수를 FEM(finite element method)에 적용하여 계산한 수치이다. 비선형 플랜트 모델링 결과는 식(2)를 그림으로 나타낸 것이다. 여기서 우변의 α 는 비선형 플랜트에 대한 실험 및 모델링 결과를 가능한 한 일치시키기 위하여 설정된 상수로서, 그림 2(b)에서 볼 수 있는 제작 공정중의 over-etching과 같은 것이 원인이라 할 수 있다. 본 논문에서는 $\alpha=0.97$ 로 설정되었으며, 이 수치는 이상적인 값인 1에 매우 가까우므로 이론치와 실험치가 비교적 잘 일치

한다고 볼 수 있다.

$$F_{es} = \frac{1}{2} \alpha n_1 \epsilon_0 V^2 \frac{t}{g_1} + \frac{1}{2} \alpha n_2 \epsilon_0 V^2 \frac{t \cdot l_f}{(g_2 - y)^2} - \frac{1}{2} \alpha n_3 \epsilon_0 V^2 \frac{t \cdot l_b}{(g_3 + y)^2} \quad (2)$$

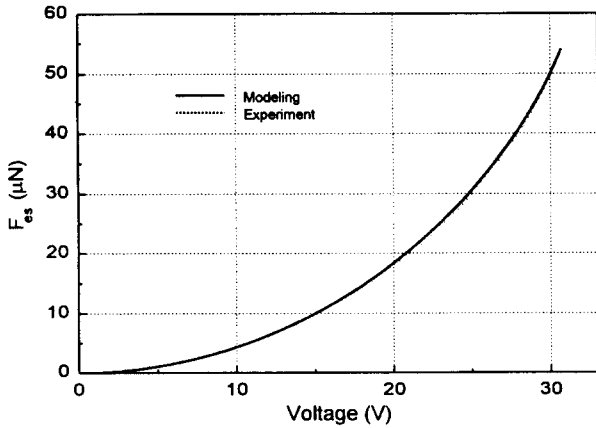


그림 5 마이크로 액추에이터 비선형 플랜트
Fig. 5 Nonlinear Plant of Microactuator

그림 6은 마이크로 액추에이터의 선형플랜트(G_{MA})를 전달 함수로 나타낸 실험 결과 및 모델링 결과이다.

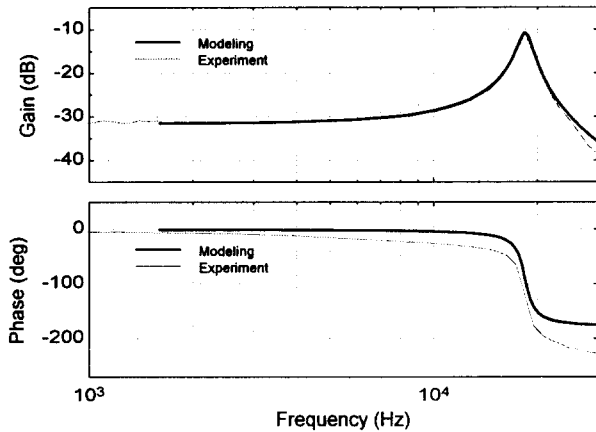


그림 6 마이크로 액추에이터 선형 플랜트
Fig. 6 Linear Plant of Microactuator

여기서, 선형 플랜트의 모델링 결과는 시스템 차수 및 공진주파수 그리고 감쇠비(ζ)를 구하기 위한 실험 결과를 근거로 하여 설정된 아래의 식(3)을 그림으로 나타낸 것이다. 앞서 설명한 바와 같이, 선형 플랜트(G_{MA})의 입력은 force이고 출력은 변위이므로, 선형 플랜트의 DC gain은 스프링 강성의 역수(1/k)이다. 표 2는 마이크로 액추에이터의 스프링 강성(k), 감쇠비(ζ), 공진주파수(ω_n)를 정리한 것이며, ω_n = ω_r / (1 - 2ζ²)^{1/2}, a=1, b=2ζω_n, c=ω_n², d=(1/k) × ω_n²이다.

$$G_{MA} = \frac{d}{as^2 + bs + c} \quad (3)$$

표 2 선형 모델 Parameters

Table 2 Parameters of Linear Plant

k	37.88N/m
ζ	0.045
ω _r	18.36 × 10 ³ × 2π rad/s

마이크로 액추에이터의 공진주파수와 스프링 강성을 고려하면 마이크로 액추에이터 이동자의 질량은 약 2.84μg이다. 그림 1에서 pico-slider를 사용하는 경우, slider의 질량이 약 1mg이기 때문에 마이크로 액추에이터의 동작이 slider 또는 suspension에 미치는 동역학적인 영향은 무시할 수 있다.

4. 마이크로 액추에이터 피드포워드 비선형 보상기

정전형 마이크로 액추에이터는 식(2)와 같은 비선형성을 갖는다. 이러한 비선형성은 제어를 수행하는 데 있어서 충분한 제어성능을 얻기 어려운 요인이 되기 때문에, 본 연구에서는 식(2)의 역함수로부터 유도되는 피드포워드(feed-forward) 비선형 보상기(nonlinear compensator)를 적용하여, 마이크로 액추에이터의 출력 변위(y)가 기준 변위(r)를 비선형 특성 없이 추종할 수 있도록 하였다. 정전력이 기준 변위(r)에 스프링강성(k)을 곱한 스프링력과 평형을 이루면, 변위(y)는 기준 변위(r)와 일치하게 된다. 그러므로, 식(2)를 전압(V)에 대하여 정리한 후, 변위(y)를 기준 변위(r)로 대치하고, 정전력(F_{es})을 전압증폭기의 DC gain(DC_A=-10)을 고려한 k/(DC_A²) × r로 대치하면, 다음의 식(4)와 같은 피드포워드 비선형 보상기(FFNC)의 출력(u_{FFNC})이 정의된다.

$$u_{FFNC} = -\sqrt{\frac{\frac{k}{DC_A^2} \times r}{D_{FF1} + D_{FF2} + D_{FF3}}} \quad (4)$$

$$D_{FF1} = \frac{1}{2} \alpha n_1 \epsilon_0 \frac{t}{g_1}$$

$$D_{FF2} = \frac{1}{2} \alpha n_2 \epsilon_0 \frac{t \cdot l_f}{(g_2 - r)^2}$$

$$D_{FF3} = -\frac{1}{2} \alpha n_3 \epsilon_0 \frac{t \cdot l_b}{(g_3 + r)^2}$$

그림 7은 피드포워드 비선형 보상기(FFNC)를 이용한 제어 시스템의 블록 다이어그램이며, 그림 8은 피드포워드 제어 효과를 보이기 위한 실험 결과이다.

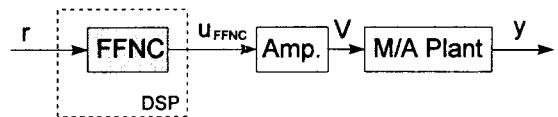
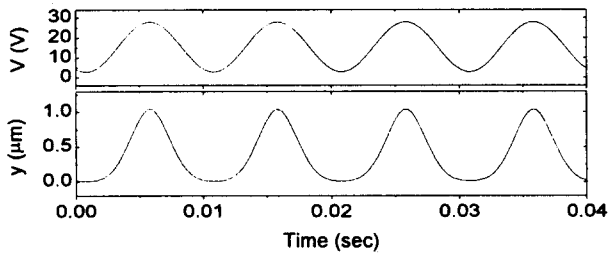


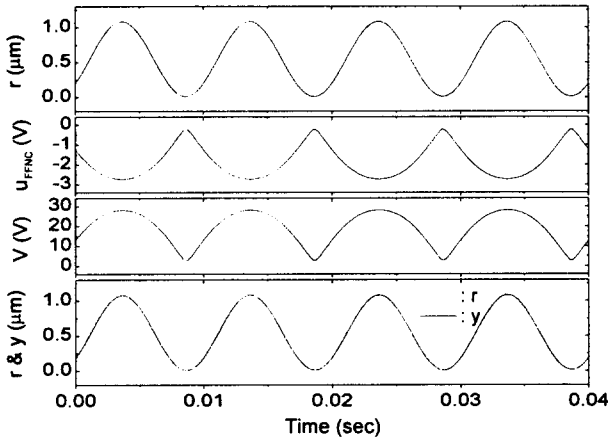
그림 7 피드포워드 제어 블록 다이어그램
Fig. 7 Feedforward Control Block Diagram

그림 8(a)에서는 마이크로 액추에이터(M/A)에 임의의 정현파 전압을 인가하였을 경우, 비선형 특성으로 인하여 전압(V)과 단순한 비례 관계를 갖는 변위(y)를 원하는 대로 발생시킬 수 없음을 알 수 있다. 반면에, 그림 8(b)는 기준 변위(r)를 추종하도록 하기 위하여 FFNC를 적용하였을 경우의 시

간 응답으로서, 기준변위(r)가 FFNC에 입력되어 u_{FFNC} 가 생성되고, u_{FFNC} 가 전압증폭기를 통하여 증폭된 전압(V)이 마이크로 액추에이터(M/A)에 전달되어 변위(y)를 생성시키는 것을 보여주고 있으며, 비선형 보상기는 마이크로 액추에이터에 전달되는 전압(V)이 비선형 플랜트의 역함수 특성을 갖도록 하여, 마이크로 액추에이터의 변위(y)가 기준변위(r)를 비선형 특성 없이 추종하도록 하고 있는 것을 알 수 있다. 결국, FFNC의 역할은, 전압(V)과 변위(y)의 비선형 관계는 변하지 않지만, 마이크로 액추에이터의 변위(y)가 기준변위(r)를 비선형 특성 없이 추종하도록 하는 것이다. 전압(V)과 변위(y)의 비선형 관계는 항상 유지되므로, 만일 기준변위(r)를 추종하고자 하면서도 비선형 보상기를 사용하지 않고, 그림 8(a)와 같이 단순히 기준변위(r)와 임의의 선형관계를 갖고 있는 전압(V)을 마이크로 액추에이터에 인가한다면, 변위(y)는 기준변위(r)를 비선형 특성 없이 추종할 수가 없게 된다.



(a) Time Response with Sine-wave Voltage



(b) Time Response with FFNC

그림 8 피드포워드 제어 효과

Fig. 8 Feedforward Control Effect

초고밀도 HDD의 트랙 추적 제어에서는 R/W head의 position error signal(PES)만이 제어기에 전달된다. 따라서 피드백(feedback) 제어기를 구성하게 되며, 피드포워드 비선형 보상기(FFNC)는 피드백(feedback) 비선형 보상기(FBNC)로 변환되어 피드백 제어기의 구성요소로서 적용된다.

5. 트랙 추적 제어를 위한 제어기 설계

HDD의 트랙 추적 제어에서, 제어 성능은 제어 시스템의

open-loop 전달함수의 gain이 0dB가 될 때까지의 주파수 대역을 의미하는 servo-bandwidth로써 평가할 수 있다. 기록밀도 10Gb/in², 트랙 밀도 25kTPI의 성능을 요구하는 차세대 초고밀도 HDD를 구현하기 위하여 요구되는 제어 성능은 2kHz 이상의 servo-bandwidth이며, 이러한 목표 성능을 달성하기 위하여 본 연구에서 고안된 제어기는 저대역 통과 필터와 피드백 비선형 보상기를 도입한 PI(proportional-plus-integral) 제어기이다.

그림 9는 저대역 통과 필터 LPF(low-pass filter)와 피드백 비선형 보상기(FBNC)를 도입한 PI 제어기를 사용하는 트랙 추적 제어 시스템의 블록 다이어그램이다.

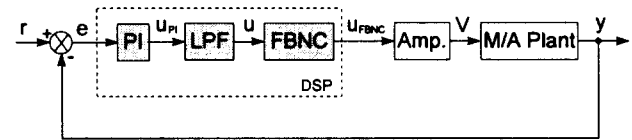


그림 9 트랙 추적 제어 시스템 블록 다이어그램

Fig. 9 Block Diagram of Track-Following Control System

제어를 수행하기 위해서는 그림 9에 나타난 바와 같이, position error signal(PES=e)을 이용하여 PI 제어기를 계산하고, 저대역 통과 필터(LPF)를 거쳐 피드백 비선형 보상기(FBNC)를 통과시킨 후에, 전압증폭기(Amp.)를 통하여 증폭한 후, 마이크로 액추에이터(M/A)에 전달시킨다. 마이크로 액추에이터는 앞서 설명한 바와 같이 비선형 플랜트와 선형 플랜트를 연결한 형태이며, 전달된 전압은 비선형 플랜트를 통하여 정전력으로 변환되고, 정전력은 선형플랜트에 전달되어 변위를 출력시킨다.

본 연구에서 제안된 제어기의 구성요소인 PI 제어기와 저대역 통과 필터는 마이크로 액추에이터 제어 시스템의 플랜트를 MATLAB SIMULINK에 적용하여 설계되었다. 이와 같이 수치해석을 통하여 설계된 PI 제어기와 저대역 통과 필터 및 FFNC로부터 유도되는 FBNC를 실험에 적용한 후, 요구되는 제어 성능을 충족시키기 위하여 제어 실험 수행 중에 PI 제어기와 저대역 통과 필터의 설계 요소를 조정하였다.

일반적으로 널리 쓰이는 PI 제어기는 식(5)와 같은 전달함수로 표현되며, 여기서 비례 게인 k_p 와 적분 게인 k_i 는 표 3과 같이 설정되었고, 이때 PI 제어기의 입력인 오차(error)의 단위는 [meter]이고, 출력인 u_{PI} 의 단위는 [Volt]이다.

$$G_{PI} = \frac{k_p \cdot s + k_i}{s} \tag{5}$$

표 3 PI 제어기 Parameter

Table 3 Parameters of PI Controller

k_p	-2.079×10^0
k_i	-2.805×10^{10}

PI 제어기의 출력(u_{PI})은 다음의 식(6)과 같은 전달함수로 표현되는 저대역 통과 필터(LPF)에 입력되며, 여기서 cut-off frequency는 $\omega_{co}=2 \times 10^3 \times 2\pi$ [rad/sec]으로 설정되었다.

$$G_{LPF} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_{co}} \cdot s + 1} \tag{6}$$

저대역 통과 필터의 출력(u)은 피드백 비선형 보상기(FBNC)로 입력되며, FBNC는 피드포워드 비선형 보상기(FFNC)로부터 유도된다. FFNC와 FBNC의 입력은 각각 기준변위(r)와 제어기(u)이므로 이 두 변수간의 변환이 필요하며 그 과정은 다음과 같다.

그림 5에서 정전력(F_{es})을 스프링 강성(k)으로 나누면, 전압과 변위의 최대치 V_M과 y_M을 알 수 있다. 여기서 최대치라는 것은 초고밀도 HDD의 track pitch(=1μm)보다 큰 변위를 달성할 수 있는 전압과 이에 상응하는 변위이며, 그림 5 선도의 최대치로 설정되었다. FBNC는 u-y 선형 관계를 성립시키는 것이므로 u-y 선형 관계의 DC gain을 설정할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 V_M을 전압증폭기의 DC gain(DC_A=-10)으로 나눈 V_M/DC_A와 y_M을 기준으로 u-y 선형 관계의 DC gain(=y_M×DC_A/V_M)을 설정하였다. FFNC는 입력을 r로 하고 r-y 선형 관계의 DC gain을 1로 설정한 것이지만, FBNC는 입력을 u로 하고 u-y 선형 관계의 DC gain을 y_M×DC_A/V_M으로 설정한 것이므로, FFNC의 r을 (y_M×DC_A/V_M)×u로 대치하여 u를 입력으로 하는 FBNC의 출력(u_{FBNC})을 다음의 식(7)과 같이 정리할 수 있으며 V_M과 y_M은 표 4와 같다.

$$u_{FBNC} = -\sqrt{\frac{k}{DC_A^2} \frac{y_M \times DC_A}{V_M} \cdot u} \cdot \frac{1}{D_{FB1} + D_{FB2} + D_{FB3}} \quad (7)$$

$$D_{FB1} = \frac{1}{2} \alpha n_1 \epsilon_0 \frac{t}{g_1}$$

$$D_{FB2} = \frac{1}{2} \alpha n_2 \epsilon_0 \frac{t \cdot l_f}{(g_2 - \frac{y_M \times DC_A}{V_M} \cdot u)^2}$$

$$D_{FB3} = -\frac{1}{2} \alpha n_3 \epsilon_0 \frac{t \cdot l_b}{(g_3 + \frac{y_M \times DC_A}{V_M} \cdot u)^2}$$

표 4 FBNC Parameters
Table 4 FBNC Parameters

V _M	30.7V
y _M	1.43μm

실제로 마이크로 액추에이터를 HDD의 트랙 추적에 사용할 때는 R/W head를 장착해야 한다. 제안된 마이크로 액추에이터의 이동자(mover) 질량은 약 2.84μg으로 계산되고, 마이크로 액추에이터에 장착될 R/W head의 질량은 약 0.3μg으로 예상되므로 R/W head가 장착될 경우 공진주파수의 변화율은 약 5%정도로 생각할 수 있다. 이러한 변화는 목표성능을 달성하기 위한 제어기의 parameter에 약간의 변화를 줄 수도 있으나 목표성능을 달성하는 데에는 아무런 어려움이 없다고 할 수 있으며, 이러한 경우에도 마이크로 액추에이터의 동작이 slider 및 suspension에 미치는 동역학적인 영향은 무시할 수 있다.

본 제어 시스템에서, 제안된 제어기(식(5)~(7))는 I/O board(Loughborough Sound Images AM/D16SA)와 digital signal processor(DSP : TMS320C44)로 구현되었으며, 차세대 초고밀도 HDD의 PES sample rate을 50kHz로 가정하였고, 제안된 제어기는 50kHz sample rate을 기준으로 discrete

제어기로 변환되어 제어 프로그램에 적용되었다.

6. 트랙 추적 제어 실험

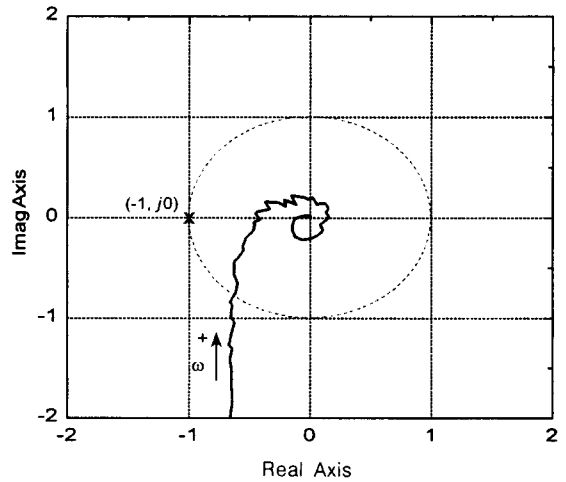
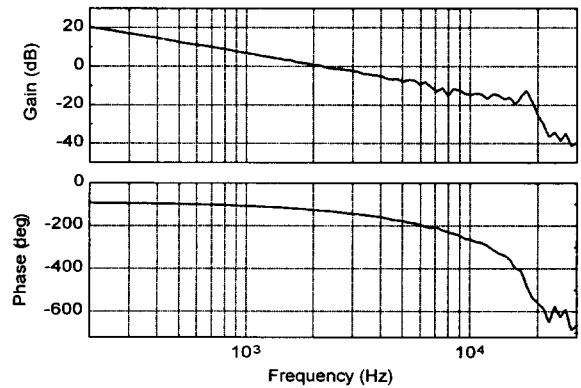
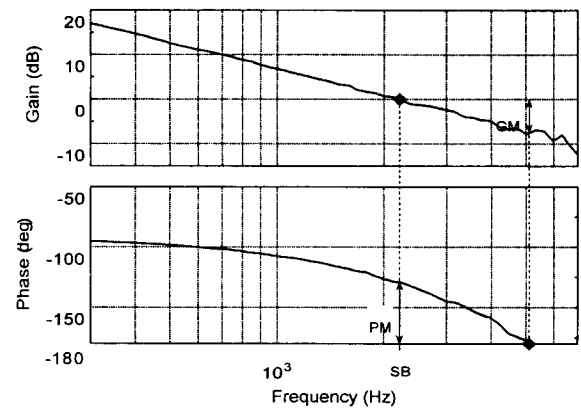


그림 10 트랙 추적 제어 시스템 Nyquist 선도

Fig. 10 Nyquist Plot of Track-Following Control System



(a) Open-Loop Transfer Function



(b) detail view of (a)

그림 11 트랙 추적 제어 시스템 개회로 전달함수

Fig. 11 Open-Loop Transfer Function of Track-Following Control System

본 논문에서 제안된 제어 시스템의 HDD 트랙 추적 제어 성능을 평가하기 위하여 Nyquist 선도와 open-loop 전달함수를 구하였다. 그림 10은 제안된 마이크로 액추에이터 제어 시스템의 성능 실험 결과를 Nyquist 선도로 나타낸 것이며, 그림 11(a)는 그림 10의 결과를 open-loop 전달함수로 나타낸 것이고, 그림 11(b)는 그림 11(a)의 상세도이다.

표 5 트랙 추적 제어 성능

Table 5 Track-Following Control Performance

SB	2.21kHz
GM	7.51dB
PM	50.98°

표 5는 그림 10, 11에 나타난 본 제어시스템의 성능을 정리한 것으로서 그 결과에서 알 수 있듯이, 본 연구에서 제안된 제어 시스템은 기록밀도 10Gb/in², 트랙밀도 25kTPI의 차세대 HDD에서 요구하는 트랙 추적 제어 성능인 2kHz servo-bandwidth(SB)를 무난히 달성하였고, 충분한 크기의 gain margin(GM) 및 phase margin(PM)을 확보하였다.

7. 결론

공진주파수가 18.36kHz이고, 30.7V의 전압입력시 54.17μN의 정전력(변위 1.43μm)을 발생시키는 정전형 마이크로 액추에이터가 MEMS 공정을 이용하여 제작되었다. 전압/변위-정전력간의 비선형성 및 정전력-변위간의 선형성에 대한 모델링 실험을 수행하여 마이크로 액추에이터의 비선형 플랜트와 선형 플랜트를 설정하였으며, 비선형 플랜트의 역함수를 이용하여 피드포워드 비선형 보상기를 설계하였고, 피드포워드 비선형 보상기의 기준변위 추종 제어 성능이 매우 우수함을 확인하였다.

피드포워드 비선형 보상기로부터 유도되는 피드백 비선형 보상기 및 저대역 통과 필터를 도입한 PI 제어를 설계하였으며, 제안된 제어기와 연계된 마이크로 액추에이터가 10Gb/in²의 기록밀도와 25kTPI의 트랙밀도를 갖는 차세대 초고밀도 HDD의 트랙 추적 제어에 사용될 수 있는지를 알아보기 위한 실험을 수행하였다.

그 결과, 제안된 제어기와 마이크로 액추에이터로 이루어진 트랙 추적 제어 시스템이 2.21kHz servo-bandwidth와 7.51dB gain margin, 50.98° phase margin을 확보하여 차세대 초고밀도 HDD를 위한 트랙 추적 제어에 적합함을 입증하였고, VCM과 마이크로 액추에이터를 연계시킨 dual-stage servo system을 구축하는 것이 차세대 초고밀도 HDD를 구현하기 위한 적절한 방법임을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부와 산업자원부가 주관하는 초소형정밀기계 선도기술개발사업의 연구비 지원에 의한 것이며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

[1] Long-Sheng Fan, Hal H. Ottesen, Timothy C. Reiley and Roger W. Wood, "Magnetic Recording Head Positioning at Very High Track Densities Using a Microactuator-based, Two-stage Servo System," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.42, No.3, pp. 222-233, 1995. 6.
 [2] Takahiro Imamura, Takao Koshikawa and Masaki Katayama, "Transverse Mode Electrostatic Microactuator For MEMS-based HDD slider," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp. 216-221, 1996.
 [2] Denny K. Miu and Yu-Chong Tai, "Silicon Microstructures and Microactuators for Compact Computer Disk Drives," IEEE Control Systems, Vol.14, No.6, pp. 52-57, 1994. 12.

저 자 소 개



김 승 한 (金勝漢)
 1967년 3월 14일생. 1991년 인하대학교 기계공학과 졸업. 1994년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1994년~1995년 현대우주항공 근무. 현재 고등기술연구원 전자재료연구실 주임연구원.



성 우 경 (成又慶)
 1967년 10월 1일생. 1990년 서울대학교 무기재료공학과 졸업. 1992년 동 대학원 무기재료공학과 졸업(석사). 1992년~1995년 대우전자 중앙연구소 근무. 현재 고등기술연구원 전자재료연구실 선임연구원.



이 효 정 (李曉政)
 1968년 12월 31일생. 1993년 인하대학교 기계공학과 졸업. 1995년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 현재 고등기술연구원 전자재료연구실 주임연구원.



이 종 원 (李 宗 遠)

1968년 5월 14일생. 1990년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업. 1997년 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업(석사). 현재 대우고등기술연구원 전자재료연구실 연구원.



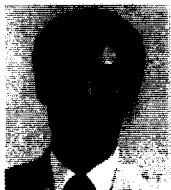
최 정 훈 (崔 正 薰)

1971년 1월 31일생. 1994년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 현재 고등기술연구원 전자재료연구실 연구원.



안 영 재 (安 永 宰)

1958년 2월 3일생. 1980년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1982년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1987년 미국 RPI 기계공학과 졸업(공학박사). 1987년~1989년 KIST 근무. 1990년~1993년 한국생산기술연구원 근무. 1993년~1994년 유진로보틱스 근무. 1994년~1995년 대우전자 근무. 1996년~1997년 (주)테크라프 근무. 현재 고등기술연구원 전자재료연구실 실장.



전 국 진 (全 國 鎭)

1955년 3월 24일생. 1977년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1981년 University of Michigan, Ann Arbor(석사). 1986년 University of Michigan, Ann Arbor(공학박사). 1986년~1989년 워싱턴 주립대 조교수. 현재 서울대학교 전기공학부 부교수, 서울대학교 마이크로시스템 기술센터장.



김 봉 환 (金 奉 煥)

1970년 1월 13일생. 1996년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1999년 서울대학교 대학원 전기공학부 졸업(석사). 현재 서울대학교 대학원 전기공학부 박사과정.