

IMP를 이용한 근접장 기록 장치의 디스크 진동 및 편심 보상[#]

Disk Vibration and Eccentricity Compensation of Near Field Recoding Systems Based on the Internal Model Principle

정 준[†] · 김 중 곤^{*} · 박 노 철^{*} · 양 현 석^{**} · 박 영 필^{**}

Jun Jeong, Joong-Gon Kim, No-Cheol Park, Hyun Seok Yang and Young-Pil Park

(2007년 4월 16일 접수 ; 2007년 5월 22일 심사완료)

Key Words : Gap Servo(갭 서보), Tracking Servo(트래킹 서보), Disk Vibration(디스크 진동), Eccentricity(편심), NFR(근접장 기록), IMP(내부 모델 원리)

ABSTRACT

Information storage devices using disks have a disk vibration at the frequency which is equivalent to the disk rotational speed. They also have a track vibration due to the disk eccentricity at the same frequency. In near field recording systems, the former affects the air-gap servo and the latter affects the tracking servo. In this paper, we introduce a novel control algorithm based on the internal model principle to both servos. A controller block designed by the principle is connected to the base lead-lag type compensator in parallel in order to cancel the repeatable run-out due to the disk vibration or eccentricity. Simulation and practical application of the algorithm on a near field recording system show good servo performance.

1. 서 론

최근 고용량 데이터를 저장하기 위한 광디스크 저장장치로 블루레이(blue-ray) 디스크가 상용화되었다. 그러나 앞으로 HDTV 응용 장치나 3D 멀티미디어 파일을 저장하기 위해서는 블루레이 디스크보다 훨씬 큰 용량을 갖는 차세대 광디스크 저장 장치가 필요하다. 그래서 여러 연구자들은 이러한 고용량 요구를 만족시키기 위한 방편으로 근접장 기록(NFR, near field recording) 기술을 이용한 고밀도 광디스크

크 저장 장치를 연구해오고 있다^(1,2).

SIL(solid immersion lens)을 이용한 근접장 기록 장치는 큰 NA(numerical aperture)를 구현하는 것이 가능하나 SIL과 디스크 사이의 갭(gap)을 파장 길이의 반 이내로 유지시켜줘야 한다는 난제에 부딪히게 된다. 이러한 문제는 SIL을 디스크에 접근시킬 때 SIL이 디스크에 충돌하지 않게 하는 문제^(3,4,5)와 디스크와 SIL의 간격을 수십 nm로 유지시켜 주는 문제^(3,4,5)로 나눌 수 있다. 또한 SIL과 디스크 사이의 갭을 일정하게 유지시키더라도 디스크의 데이터를 안정적으로 재생하기 위해서는 기존의 광디스크 저장 장치보다 훨씬 좁은 트랙을 추종해야 한다.

NFR 장치에서 데이터를 안정적으로 재생하기 위해서는 갭 서보와 트래킹 서보가 필수적이다. 이 중 갭 서보에 영향을 끼치는 가장 큰 외란은 디스크 회전 주파수에서의 면의 진동(out of-plane vibration)이고, 트래킹 서보에 영향을 끼치는 가장 큰 외란은

[†] 교신저자 : 정희원, 동양공업전문대학 자동화시스템과

E-mail : junjeong@dongyang.ac.kr

Tel : (02) 2610-5242, Fax : (02) 2610-1860

^{*} 정희원, 연세대학교 정보저장기기 연구센터

^{**} 정희원, 연세대학교 기계공학과

[#] 이 논문은 2007 춘계 소음진동 학술대회에서 우수논문으로 추천되었음.

디스크 편심에 의한 트랙 진동이다⁽⁶⁾. 이들 외란이 서보의 출력에 미치는 영향을 줄이기 위한 일반적인 방법은 해당 주파수에서의 개루프 전달 함수 크기를 특정 값 이상이 되도록 루프 게인을 높이는 것이다⁽⁷⁾. 즉, 서보 대역폭을 크게 하는 것이다. 그러나 대역폭 증가에 의한 외란 억압은 디스크 스크래치나 오염에 의한 외란, 고주파 공진, 전기적 노이즈 등에 민감하게 반응할 수 있으므로 한계가 있다. 한편, 디스크의 회전 주파수와 동기하는 반복적인 외란을 반복 제어기에 의해 제거하는 방법⁽⁴⁾도 있다. 하지만 이 방법은 매우 큰 샘플링 주파수를 갖는 NFR 장치에서는 서보를 구현하는 하드웨어 한계 상 실제 구현이 거의 불가능할 것이다.

이 논문에서는 SIL을 이용한 NFR 기록 장치에서 디스크 진동과 편심에 의한 외란의 영향을 효과적으로 제거하기 위해 내부 모델 원리(IMP, internal model principle)를 이용한 제어기를 꺾 서보와 트래킹 서보에 사용하였다. IMP를 이용함으로써 서보 대역폭을 증가시키지 않은 상태에서 디스크 회전 주파수에서의 개루프 전달 함수 크기를 증가시켜 이 주파수에서 지배적인 외란의 영향을 더욱 저감시킬 수 있었다. 그리고 이러한 서보의 도움으로 NFR 디스크로부터 RF 신호를 얻을 수 있었다.

2. 대상 근접장 기록 장치

Fig. 1은 실험에 사용된 NFR 광학 장치의 개략도

이고, Fig. 2는 이 장치의 사진이다. 이 시스템은 연세대 정보저장기기 연구센터 CISD에서 설계하고 완성한 것이다. 여기에 소니(Sony)의 SIL을 상용 광디스크 저장 장치의 픽업에 붙여 꺾 서보와 트래킹 서보에 이용하였다.

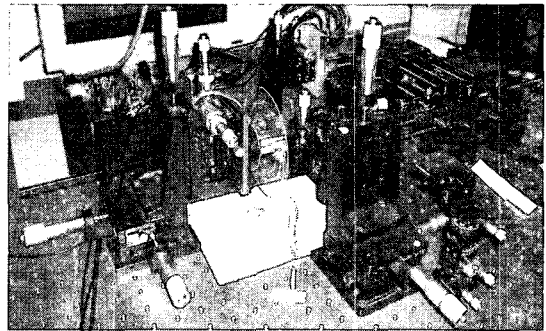


Fig. 2 NFR experimental setup

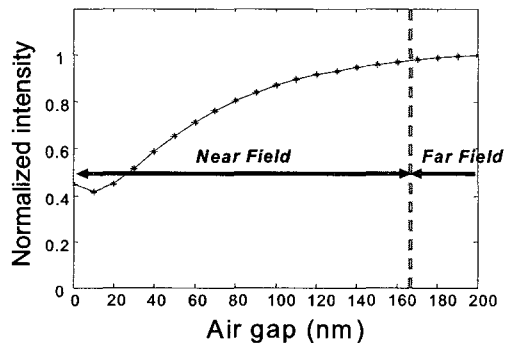


Fig. 3 Normalized gap intensity

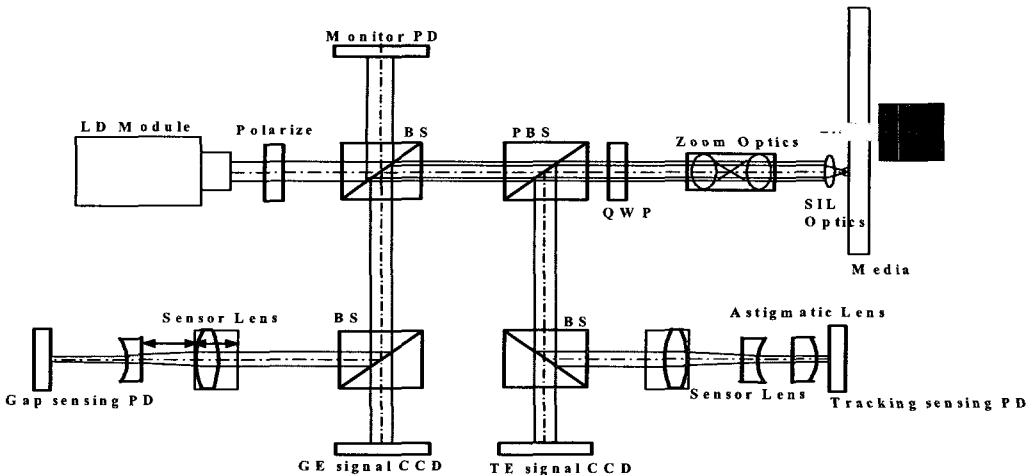


Fig. 1 Schematic diagram of NFR optical system

실험에 사용된 디스크는 폴리카보네이트 ROM 디스크이다. 이 디스크는 226 nm의 트랙 피치와 105 nm의 채널 비트 길이로 50 GB의 용량을 갖는다. 그리고 실험 시 디스크의 회전 속도로 1,200 rpm을 사용하였다.

Fig. 3은 SIL을 디스크에 일정 속도로 이동시키면서 측정한 갭 측정 전압을 정규화한 것이다. SIL이 디스크로부터 약 160 nm 이상 떨어진 영역에서는 갭 측정이 불가능하며 이 이하의 근접장에서만 갭 측정이 가능하다.

3. IMP에 의한 반복 오차 저감

3.1 면외 진동과 트랙 진동

디스크를 사용하는 정보저장기기는 항상 주기적인 외란 성분이 존재한다. 주기적인 외란 성분 중 크기가 큰 진동으로는 디스크 회전 주파수에서의 면외 진동과 디스크 회전 중심과 트랙 중심의 차이에 의한 진동, 즉, 편심에 의한 트랙 진동이 있다.

면외 진동은 디스크가 회전에 의해 디스크 면의 수직인 방향으로 진동하는 것으로 그 크기는 사용되는 디스크 재질에 따라 수 μm 에서 수십 μm 이상이 된다. 또한 이 진동은 디스크 외주로 갈수록 진폭이 커지는 특성이 있다⁽⁶⁾.

트랙 진동은 디스크 자체가 진동하는 것은 아니지만 서보 시스템에서 편심에 의한 트랙을 추종하는 것 자체가 주기적인 외란을 제거하는 것과 동일하기 때문에 진동으로 볼 수 있다.

3.2 IMP와 AFC

앞서 설명한 면외 진동과 트랙 진동의 주파수 성분은 디스크 회전 주파수에서 지배적으로 나타나기 때문에 이러한 진동은 서보 시스템에서 하나의 주파수 성분을 갖는 정현파 외란으로 볼 수 있다.

정현파 외란을 제거하는 방법으로 IMP를 이용한 방법과 AFC(adaptive feedforward cancellation)를 이용한 방법이 잘 알려져 있다.

IMP는 외란과 동등한 모델이 피드백에 포함되면 그 외란을 억제할 수 있다는 원리다. 정현파 외란의 경우, IMP에 의해 피드백에 포함될 전달 함수 C_{IMP} 는 샘플링 시간이 T_s , 라디안 단위의 정현파 주파수가 ω , 제어 이득(gain)이 g 와 ϕ 일 때, 연속

시간 영역에서는 식 (1)과 같이 표현되고, 이산 시간 영역에서는 식 (2)과 같이 표현된다⁽⁹⁾.

$$C_{IMP}(s) = g \frac{\cos(\phi)s - \sin(\phi)\omega}{s^2 + \omega^2} \quad (1)$$

$$C_{IMP}(z) = g \frac{\cos(\phi)z^2 - \cos(\omega T_s + \phi)z}{z^2 - 2\cos(\omega T_s)z + 1} \quad (2)$$

제어 오차를 $e(k)$ 라 하면 AFC 중에서도 이득 ϕ 를 포함한 AFC의 제어 입력은 이산 시간 영역에서 식 (3)과 같으며 이에 대한 적응 법칙은 식 (4)와 같다⁽⁹⁾.

$$u(k) = \hat{a}(k)\cos(\omega T_s k) + \hat{b}(k)\sin(\omega T_s k) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \hat{a}(k) &= \hat{a}(k-1) + ge(k)\cos(\omega T_s k + \phi) \\ \hat{b}(k) &= \hat{b}(k-1) + ge(k)\sin(\omega T_s k + \phi) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (2)의 IMP를 이용한 제어기는 선형제어기이고 식 (3)과 식 (4)의 AFC는 비선형제어기이지만 이들은 제어 입력의 계산 과정만 다를 뿐 서로 동일한 전달 함수를 갖는 특이한 경우이다⁽⁸⁾. 어느 방법을 사용하든 동일한 결과를 얻을 수 있지만 이 논문에서는 삼각 함수 부분이 상수로 계산되어 실시간 제어 도중에 삼각 함수 연산이 필요 없는 IMP 방법을 사용하였다.

IMP에 의한 제어기는 Fig. 4에서와 같이 기본 제어기 $C_B(z)$ 에 평행하게 연결하여 사용한다. 이 때, 이득 g 는 추종 속도를 결정하는데 이 값이 클수록 외란 주파수에서의 개루프 전달 함수의 크기는 커지고 감도 전달 함수의 크기는 작아진다. 그러나 이 값이 지나치게 큰 경우에는 Bode의 적분 정리(Bode's integral theorem)에 의해 감도 전달 함수의 다른 주파수 영역 특성이 크게 저감될 수 있다. 한편 이득 ϕ 는 제어 대상 플랜트를 $P(z)$ 라 할 때 식 (5)에 의해 결정할 수 있다⁽⁹⁾. 즉, 감도 전달 함수

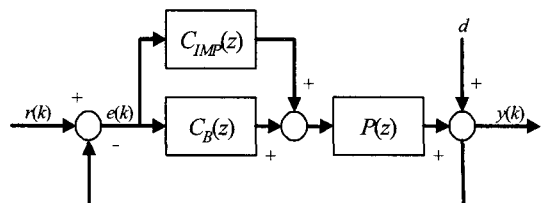


Fig. 4 IMP based controller connected to base controller in parallel

에 플랜트의 전달 함수를 곱한 다음의 전달 함수의 위상으로 정할 수 있다.

$$\phi = \angle \frac{F(z)}{1 + F(z)C_B(z)} \text{ at } \omega \quad (5)$$

이 장에서 소개한 정현파 외란 저감 방법은 하드 디스크 드라이브에서 여러 트랙에 걸쳐 동일한 위상을 갖는 반복 오차를 제거하는데 흔히 사용되는 방법이다. 하지만 광디스크 드라이브의 경우에는 드라이브의 상황에 따라 디스크 회전 속도를 변경하므로 이러한 방식의 제어를 도입하기 위해서는 사용하는 모든 디스크 회전 주파수에 대해 제어 게인을 정해서 선택적으로 사용해야 한다. 하지만 이 논문의 예에서와 같이 디스크 회전 속도를 고정시킨 NFR 시스템에서는 이 제어가 효과적으로 사용될 수 있다.

4. 제어기 설계

4.1 플랜트 모델링

상용 DVD의 VCM(voice coil motor) 액추에이터에 SIL을 부착한 Fig. 5의 VCM 액추에이터를 NFR의 갭 서보와 트래킹 서보에 이용하였다. 그리고 구동 앰프로는 1V 당 0.04 A를 출력하는 전류 앰프를 사용하였다.

VCM 액추에이터와 전류 앰프로 구성된 플랜트의 동특성을 파악하기 위해서 HP35670A를 이용해 5~50 kHz 주파수 영역에 대해 주파수 응답 특성을 측정하였다. 이때 VCM 액추에이터의 위치 측정에는 LDV(laser doppler vibrometer)를 이용하였다.

Fig. 6은 갭 방향과 트래킹 방향 각각에 대해 측정한 VCM 액추에이터와 전류 앰프의 동특성 결과와 이를 통해 얻어낸 전달 함수 결과이다.

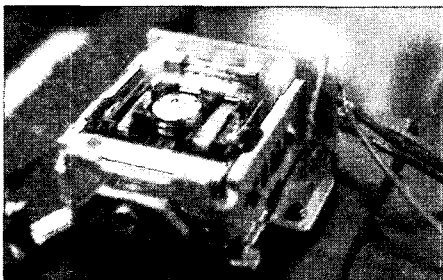
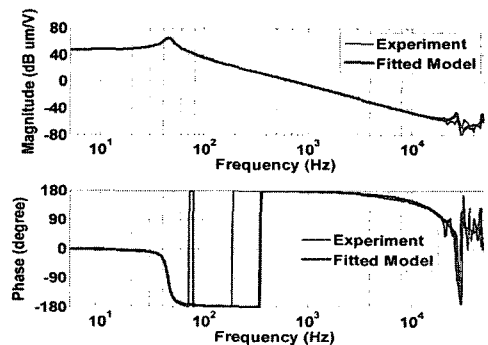


Fig. 5 VCM actuator with SIL for gap and tracking servo

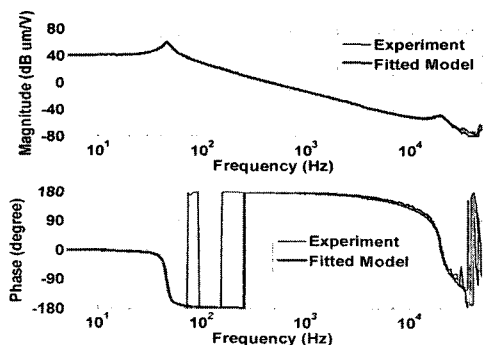
한편, 갭 서보에는 갭을 측정하기 위한 미소 전류 측정 앰프가 사용되며 이 앰프는 15 kHz 대역폭을 갖는 1차 저역 통과 필터를 사용하고 있으므로 이 역시 플랜트를 구성하는 요소이다. 또한 제어기의 처리 시간 지연도 플랜트에 영향을 미치는 요소이므로 서보를 구성하는 플랜트에 포함시켰다. VCM 액추에이터, 구동 앰프, 측정 앰프, 처리 시간 지연을 모두 포함한 전체 플랜트 모델을 Fig. 7에 나타내었고, 이에 대한 전달 함수는 Table 1과 같다. VCM과 전류 앰프에 의한 고차 전달 함수는 각각 $H_C(s)$ 와 $H_T(s)$ 이며, 제어기 시간 지연은 6 μsec 이다.

4.2 제어기 설계

갭 서보와 트래킹 서보의 기본 제어기로, 충분한 위상 여유를 갖기 위한 두 개의 앞섬 보상기(lead compensator)와 DC 외란 성분을 제거하고 저주파 외란을 충분히 억압하기 위한 한 개의 뒤섬 보상기(lag compensator)를 사용하였다. 두 서보 모두 단일 입력 단일 출력 시스템이므로 Matlab의 SISOTOOL을



(a) Gap servo



(b) Tracking servo

Fig. 6 Frequency response and its modelling result of VCM actuator and current amplifier

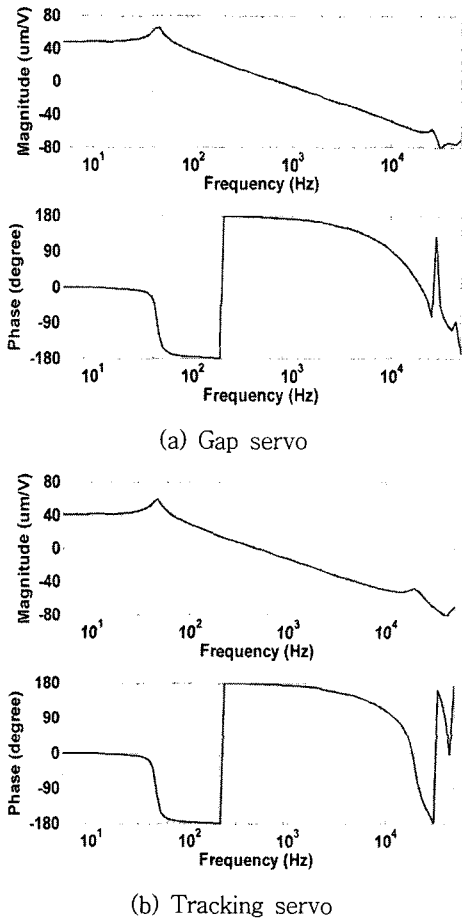


Fig. 7 Modelling result of total plant

Table 1 Plant transfer functions

Servo	Transfer function($\mu m/V$)
Gap	$\frac{1.9e7}{s^2 + 34s + 7.9e4} H_C(s) \frac{9.4e4}{s + 9.4e4} e^{-6e-6s}$
Tracking	$\frac{8.91e6}{s^2 + 31.5s + 8.34e4} H_T(s) e^{-6e-6s}$

기본 제어기 계인을 설정하는데 사용하였다. 이 소프트웨어를 이용해 저주파에서의 개루프 전달함수의 크기가 80 dB가 되고 위상 여유가 40도가 넘도록 기본 제어기의 계인을 설정하였다. 두 서보 제어기에 사용된 샘플링 시간은 각각 10 μ sec이다.

설계된 기본 제어기에 3장에 소개한 IMP에 기초한 외란 보상기 식(2)를 Fig. 4와 같이 구성하였다. 이때 ϕ 는 식(5)에 의해 구하였다. 식(5)는 플랜트 $P(z)$ 앞에 작용하는 토크/힘 외란이 출력에 반영되는 전달 함수이다. 이 논문에서 이용하는 NFR 시스

Table 2 Controller transfer functions

Servo	Transfer function
Gap	$C_B(z) = 141 \frac{(z-0.99)(z-0.907)(z-0.92)}{(z-1)(z-0.509)(z-0.566)}$
	$C_{IMP}(z) = 0.0002 \frac{0.2079z^2 + 0.3614z}{z^2 - 2z + 1}$
Tracking	$C_B(z) = 107 \frac{(z-0.991)(z-0.893)(z-0.908)}{(z-1)(z-0.689)(z-0.653)}$
	$C_{IMP}(z) = 0.0005 \frac{0.2079z^2 + 0.3614z}{z^2 - 2z + 1}$

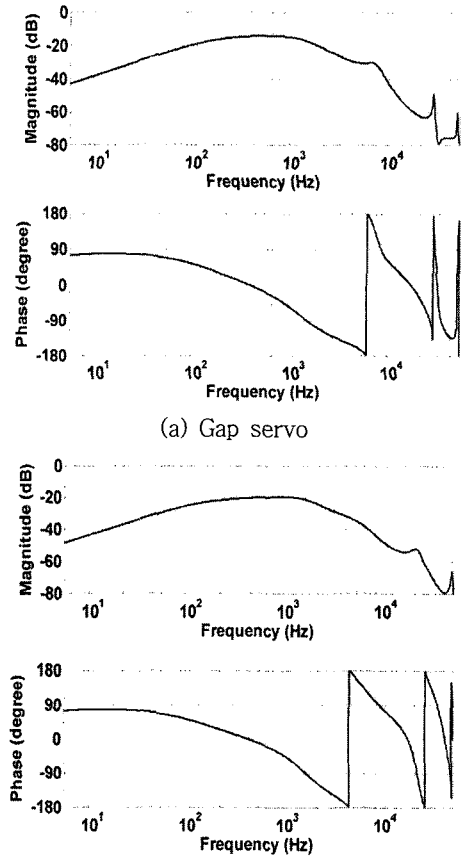


Fig. 8 Torque/force disturbance transfer function

템의 디스크 회전 주파수는 20 Hz이므로 Fig. 8의 토크/힘 외란 전달 함수로부터 ϕ 는 두 서보에 대해 각각 약 78도가 된다.

Fig. 9와 Fig. 10에 설계된 제어기의 개루프 전달 함수를 표시하였다. 갭 서보는 4.5 kHz 개루프 대역폭에 45도의 위상 여유를 갖도록, 트래킹 서보는 2.5 kHz 개루프 대역폭에 45도 위상 여유를 갖도록 기본 제어기를 설계하였다. 20 Hz 외란을 억제하기

위한 제어기가 기본 제어기에 평행하게 추가됨으로써 20Hz 부근의 개루프 전달 함수의 크기가 기본 제어기만 사용했을 때보다 증가했음을 Fig. 9와 Fig. 10에서 볼 수 있다. 이 증가 폭은 식 (2)에서 게인 g 를 크게 할수록 증가하지만 이 값이 너무 큰 경우에는 Bode의 적분 정리에 의해 다른 주파수 대역의 외란 억압 성능을 상당히 떨어뜨릴 수 있으므로 주의해야 한다. 이 논문에서는 20Hz 주파수에서 약 20dB 이상의 크기를 더 확보할 수 있는 정도의 게인 g 를 사용하였다. Table 2에 실험에 사용된 제어기의 전달 함수를 정리하였다.

5. 실험 결과 및 고찰

서보 실험을 위한 하드웨어와 소프트웨어로 dSPACE 시스템과 Matlab을 이용하였다.

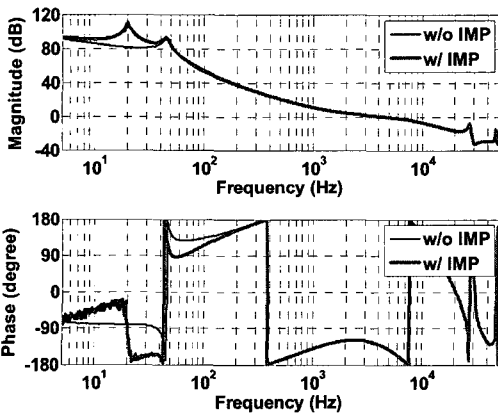


Fig. 9 Open loop transfer function of gap servo

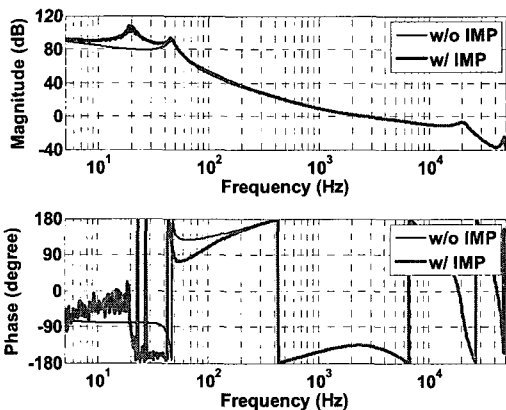


Fig. 10 Open loop transfer function of tracking servo

우선, 기본 제어기가 설계한 대로 동작하는지를 판단하기 위해 디스크를 회전시키지 않은 상태로 갭 서보를 동작시킨 후 DSA(digital signal analyzer)에 의해 페루프 전달 함수를 측정하였다. 그리고 측정 결과를 이용해 개루프 전달 함수의 주파수 응답 특성을 계산하여 Fig. 11에서와 같이 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 페루프 상태에서 측정한 결과로 개루프 전달 함수의 주파수 응답을 추정할 때에는 측정값의 유한한 분해능 때문에 저주파 영역과 고주파 영역에서는 추정이 불가능하다. 따라서 이 영역에서의 데이터는 무시해야 한다. 이러한 사실을 고려해볼 때 설계된 기본 제어기는 시뮬레이션과 거의 일치한다고 볼 수 있다.

Fig. 12는 목표 갭을 50 nm로 했을 때의 갭 서보 결과이고, Fig. 13은 이 결과에 대한 주파수 분석 결과이다. IMP에 의한 제어를 사용하지 않았을 경우에는 20 Hz 면의 진동의 영향이 다소 보이나 IMP에 의한 제어를 사용했을 때는 이 진동의 영향을 상당히 줄일 수 있었다. LDV로 측정한 디스크의 면의 진동은 약 4 μ m로 비교적 작은 양이라서 IMP의 효과가 전체 갭 오차에 큰 영향을 미치지 않았으나 디스크의 면의 진동이 큰 경우에는 IMP의 효과가 매우 명확히 나타날 것이다.

Fig. 14는 갭 서보 상태에서 트래킹 서보를 동작시킬 때의 트랙 오차 신호이다. IMP를 적용하지 않았을 경우에는 트래킹 서보가 동작하더라도 큰 편심에 의한 20 Hz 트랙 진동의 영향이 상당히 크게 존재한다. 반면, IMP를 적용한 경우에는 Fig. 14의 아래 그림과 같이 트래킹 서보 시작 지점인 0.017초

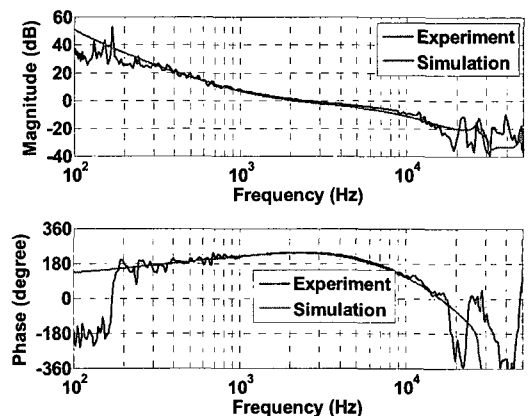


Fig. 11 Measured open loop response

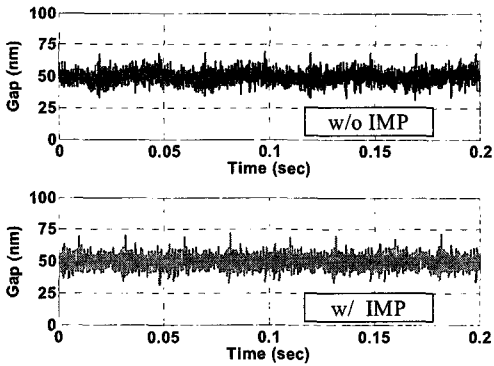


Fig. 12 Gap signal

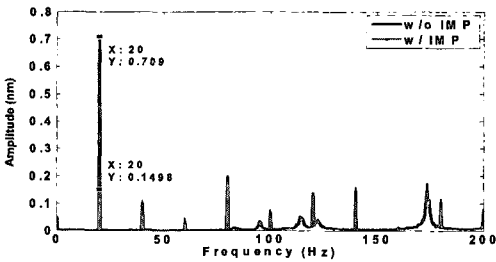


Fig. 13 FFT of gap signal

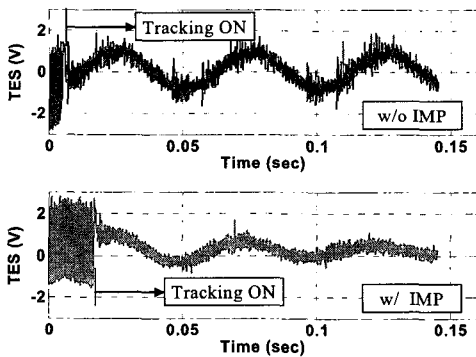


Fig. 14 Tracking error signal

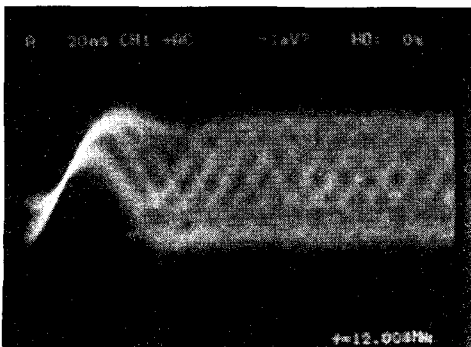


Fig. 15 RF signal

직후에서는 디스크 편심에 의한 트랙 진동이 트랙 오차에 많은 영향을 끼치나 IMP에 의해 설계된 제어기에 의해 시간이 흐를수록 그 영향은 줄어든다. 참고로, 트래킹 서보를 끈 상태에서 측정한 트랙 오차 신호의 분석 결과 편심량은 약 80 μm 였다.

IMP를 적용한 겹 서보와 트래킹 서보에 의해 SIL과 디스크 사이의 간격을 일정하게 유지시키면서 트랙을 추종할 수 있었으며, 그 결과 Fig. 15와 같이 RF신호를 얻어낼 수 있었다.

6. 결 론

SIL과 디스크 사이의 겹을 수십 nm로 유지시키면서 트랙을 추종해야만 하는 NFR 장치에서 디스크 회전에 의한 면의 진동과 트랙 진동을 효과적으로 억제하기 위한 방법으로 IMP를 이용한 제어기를 도입하였다. 이 제어기는 기본 제어기에 병렬로 연결되어 특정 주파수 부근의 개루프 전달 함수 크기를 증가시킨다. 그 결과 제어 대역폭을 변경하지 않고서도 정현파 형태의 외란을 효과적으로 보상할 수 있었다. 즉, 디스크 면의 진동이 SIL의 겹 서보에 미치는 영향과 디스크 편심에 의한 트랙 진동이 SIL의 트래킹 서보에 미치는 영향을 IMP를 이용한 제어기에 의해 효과적으로 억제할 수 있었다.

NFR과 같이 기록 밀도가 높은 정보저장기기의 경우에는 외란이 전 주파수 영역에 대해 다양하게 분포할 수 있으므로 서보 대역폭의 증가만이 오차를 줄이는 유일한 방법이 아닐 수 있다. 이러한 경우에는 디스크 회전에 의한 진동이 서보 성능에 큰 영향을 미칠 수 있으며, 이때 이 논문에서 제안한 방법은 그 구조가 간단하고 적용이 용이하므로 효과적으로 사용될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문을 작성하는데 도움을 주신 연세대학교 정보저장기기 연구센터 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Ichimura, I., Hayashi, S. and Kino, G. S., 1997, "High-density Optical Recording Using a

Solid Immersion Lens”, *Appl. Opt.*, Vol. 36, issue.19, pp. 4339~4348.

(2) Shinoda, M., Saito, K., Ishimoto, T., Kondo, T., Nakaoki, A., Ide, N., Furuki, M., Takeda, M., Akiyama, Y., Shimouma, T. and Yamamoto, M., 2005, “High Density Near Field Optical Recording”, *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 44, No. 5B, pp. 3537~3541.

(3) Ishimoto, T., Saito, K., Shinoda, M., Kondo, T., Nakaoki, A. and Yamamoto, M., 2003, “Gap Servo System for a Biaxial Device Using an Optical Gap Signal in a Near Field Readout System”, *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 42, No. 5A, pp. 2719~2724.

(4) Lee, J. I., Van der AA, M., Verschuren, C., Zijp, F. and Van der Mark, M., 2005, “Development of an Air Gap Servo System for High Data Transfer Rate Near Field Optical Recording”, *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 44, No. 5B, pp. 3423~3426.

(5) Zijp, F., Van der Mark, M., Verschuren, C., Lee, J. I., Van den Eerenbeemd, J., Urbach, P. and Van der AA, M., 2005, “High Density Near Field Optical Recording with a Solid Immersion Lens, Conventional Actuator, and a Robust Air Gap Servo”,

IEEE Transl. J. Magn., Vol. 41, pp. 1042~1046.

(6) Choi, J. Y., Lee, K. H., Jun, H. G., Lee, M. N., Yang, H. S., Park, N. C. and Park, Y. P., 2006, “Disturbance Analysis in an Optical Disk Drive Using Model Based Disturbance Observer and Waterfall Technique”, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 40~49.

(7) Choi, J. Y., Lee, K. H., Yang, H. S., Park, N. C. and Park, Y. P., 2005, “Robust Servo Design and Application for Optical Disk Drive Using Robust Control Theory: H^∞ vs. QFT”, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 1148~1159.

(8) Bodson, M., Sacks, A. and Khosla, P., 1994, “Harmonic Generation in Adaptive Feedforward Cancellation Schemes”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 39, No. 9, pp. 1939~1944.

(9) Sacks, A., Bodson, M., Messner, W., 1995, “Advanced Methods for Repeatable Runout Compensation”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 31, No. 2, pp. 1031~1036.