

## 고배속 광디스크 드라이브 트랙 추종 제어 시스템에서의 외란 관측기를 이용한 점근적 외란 제거

### Asymptotic Disturbance Rejection using a Disturbance Observer in the Track-Following Control System of a High-Speed Optical Disk Drive

유 정 래, 문 정 호, 진 경 복, 정 명 진\*

(Jung Rae Ryoo, Jung-Ho Moon, Kyoung Bog Jin, and Myung Jin Chung)

**Abstract** : To obtain a good tracking performance in an optical disk drive servo system, it is essential to attenuate periodic disturbances caused by eccentric rotation of the disk. As an effective control scheme for enhancing disturbance attenuation performance, disturbance observers (DOBs) have been successfully applied to the track-following servo system of optical disk drives. In disk drive systems, the improvement of data transfer rate has been achieved mainly by the increase of disk rotational speed, which leads to the increase of the disturbance frequency. Conventional DOBs are no longer effective in disk drive systems with a high-speed rotation mechanism because the performance of conventional DOBs is severely degraded as the disk rotational frequency increases. This paper proposes a new DOB structure for effective rejection of the disturbance in optical disk drives with a very high rotation speed. Asymptotic disturbance rejection is achieved by adopting a band-pass filter in the DOB structure, which is tuned based on the information on the disturbance frequency. In addition, performance sensitivity of the proposed DOB to changes in disk rotational frequency is analyzed. The effectiveness of the proposed DOB is verified through simulations and experiments using a DVD-ROM drive.

**Keywords** : asymptotic disturbance rejection, disturbance observer, optical disk drive system, track-following control

#### I. 서론

디지털 다기능 디스크 (Digital Versatile Disc, DVD)는 대용량 데이터의 저장을 위하여 널리 사용되는 저장 매체이다. 콤팩트 디스크 (Compact Disk, CD) 드라이브에서와 마찬가지로 DVD 드라이브에서도 데이터 전송 속도 향상을 위하여 디스크의 회전 속도를 꾸준히 높여왔다. 디스크 회전 속도 증가는 서보 제어 시스템이 해결해야 하는 몇 가지 문제를 야기시키는데, 그 대표적인 문제가 서보 제어 시스템에 유입되는 외란의 주파수 증가이다. 본 논문에서는 높은 디스크 회전 주파수를 가진 광디스크 드라이브의 트랙 추종 제어기 설계를 다룬다.

광디스크 드라이브에서 데이터를 기록하고 재생하기 위해서는 레이저 스폿이 데이터 트랙의 중앙에 위치해야 한다. 그러나 디스크의 편심 성분에 의하여 발생하는 외란의 영향으로 디스크가 회전함에 따라 데이터 트랙이 디스크 반경 방향으로 끊임없이 진동하게 된다. 따라서 트랙 추종 서보 시스템에 작용하는 외란 성분을 감쇄시키는 성능은 트랙 추종 제어기 설계 과정에서 고려되어야 하는 매우 중요한 설계 사양 중 하나이다[1,2]. 여러 연구 결과에서 효과적인 외란 감쇄 방법으로서 외란 관측기 (disturbance observer, DOB)가 소개되었는데, 외란 관측기는 그 구조가 매우 단순하면서도 광디스크 드라이브에서의 트랙 추종 성능을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다[3-6]. 외란 관측기의 성능은 Q 필터라고 하

는 저역 통과 필터의 대역폭에 의하여 거의 결정되는데, 충분한 외란 감쇄 성능을 얻기 위해서는 이 저역 통과 필터의 대역폭이 외란의 주파수 대역보다 충분히 넓어야 한다. 기존의 많은 연구 결과에서는 시스템의 안정성을 보장하는 범위 내에서 Q 필터의 대역을 증가시키는 방법을 주로 제안하였다[5,7].

광디스크 드라이브에서의 데이터 전송률 향상을 위한 디스크 회전 주파수의 증가는 필연적으로 서보 시스템에 유입되는 외란의 주파수 증가 현상을 수반한다. 그러므로 고속의 디스크 회전 주파수에 대응하기 위한 외란 관측기에서는 Q 필터의 차단 주파수를 보다 높게 설정하여야 한다. 하지만, Q 필터의 대역을 증가시키는 것은, 궤환 보상에 의하여 결정되어야 하는 전체 제어 대역을 증가시키고 위상 여유를 감소시켜 시스템을 불안정하게 만들 수 있기 때문에 Q 필터의 대역 증가에는 한계가 있다. 결국, 매우 높은 디스크 회전 주파수를 갖는 광디스크 드라이브에서는 외란 관측기에 의한 성능 향상을 더 이상 기대할 수 없게 된다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 고배속 DVD-ROM 드라이브의 트랙 추종 서보 시스템을 위한 새로운 외란 관측기를 제안한다. 기존의 외란 관측기 구조를 약간 변형하고, 점근적 (asymptotic)인 외란 제거가 가능하도록 필터를 선정한다. 내부 모델 원리 (Internal Model Principle)에 의하면 정현파 성분의 외란이나 기준 입력을 점근적으로 추종하기 위해서는, 유입되는 정현파 신호와 동일한 주파수 성분을 제어 루프 내에서 생성해야 한다[8,9]. 이 조건을 만족시키기 위하여 새로운 외란 관측기에서는 대역 통과 필터 (band-pass filter)를 사용한다. 디스크 회전 속도를 측정할 수 있고 그 값이 항상 일정하다면, 제안된 외란 관측기는 외란 성분을 완벽히 제거할 수 있다. 디스크 회전 속도가 알려진

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 11. 25., 채택확정 : 2004. 1. 19.

유정래, 정명진 : 한국과학기술원 전자전산학과

(ryoo@cheonji.kaist.ac.kr/mjchung@ee.kaist.ac.kr)

문정호 : 강릉대학교 정보전자공학부(tsmoon@kangnung.ac.kr)

진경복 : 한국기술교육대학교 제어시스템공학과(kbjin@kut.ac.kr)

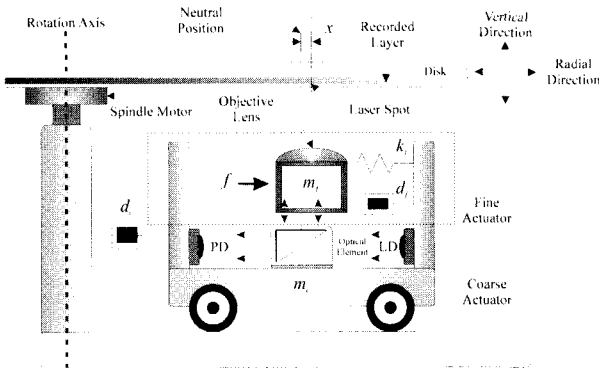


그림 1. 광디스크 드라이브 트랙 추종 기구부.  
Fig. 1. Schematic view of an optical disk drive track-following mechanism.

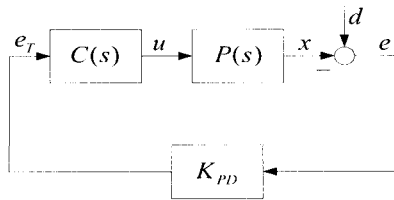


그림 2. 일반적인 트랙 추종 서보 시스템의 블록선도.  
Fig. 2. Block diagram of a general track-following servo system.

값에서 약간 벗어나더라도 제안된 외란 관측기는 기존의 외란 관측기 보다 향상된 외란 감쇄 성능을 나타낸다. 외란 주파수의 변화에 대한 제안된 외란 관측기의 성능 변화를 정량적으로 분석하며, 트랙 추종 서보 시스템의 디지털 제어기 구현 과정에서의 고려 사항을 설명한다. 모의 실험 및 DVD-ROM 드라이브를 이용한 실험 결과를 제시함으로써 제안된 외란 관측기의 성능을 입증한다.

II. 시스템 설명 및 외란 관측기의 성능 한계

1. 트랙 추종 서보 시스템

광디스크 드라이브의 트랙 추종 제어는 레이저 스팟의 수평 위치를 데이터 트랙의 중앙에 일치시키는 제어로서, 이를 위하여 일반적으로 그림 1과 같은 조동 (coarse) 액츄에이터와 미동 (fine) 액츄에이터로 구성된 2단 (dual-stage) 액츄에이터 구조의 기구부를 사용한다. 트랙 추종 제어에서 조동 액츄에이터 기능은 나선형의 트랙 추종을 위하여 미동 액츄에이터가 탑재된 광픽업을 천천히 이동시켜서 대물 렌즈가 광축에서 크게 벗어나지 않도록 하는 것이므로 대부분의 트랙 추종 정밀도는 미동 액츄에이터의 제어 성능에 의하여 결정된다. 따라서, 본 논문에서는 미동 액츄에이터만을 제어 대상으로 고려한다.

일반적인 트랙 추종 서보 시스템의 구조는 그림 2의 블록선도로 표현된다. 여기서  $P(s)$ 는 미동 액츄에이터를 나타내며  $C(s)$ 는 궤환 보상기를 의미한다.  $d$ 는 회전하는 디스크의 편심 성분에 의한 주기적인 외란을 나타낸다. 트랙 중심과 레이저 스팟의 수평 위치 오차  $e$ 는  $K_{PD}$ 의 이득을 가지는 광 검출기 (photo detector)에 의하여 전기적인 트랙 추종

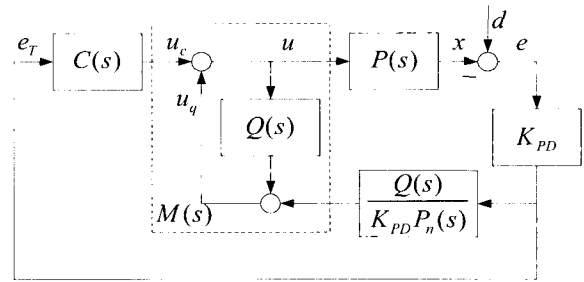


그림 3. 기존의 외란 관측기를 이용한 트랙 추종 서보 시스템의 구조.  
Fig. 3. Structure of a track-following servo system using a conventional DOB.

오차 신호  $e_T$ 로 변환되어  $C(s)$ 에 입력된다. 광픽업의 광학적 특성으로 인하여  $e_T$ 만이 유일하게 측정 가능한 신호이며, 결과적으로 트랙 추종 서보 시스템은 오차 궤환 제어 구조를 갖는다. 따라서, 디스크 회전 주파수 대역에서는 높은 개루프 이득 (open loop gain)을 생성하여 외란의 영향을 충분히 감쇄시키고, 시스템 안정성 보장을 위한 위상 여유를 확보하도록 궤환 보상기  $C(s)$ 를 설계한다.

보이스 코일 모터 (voice-coil-motor)로 구현되는 미동 액츄에이터를 이용하여 대물 렌즈의 수평 위치를 제어함으로써 레이저 스팟의 위치  $x$ 를 결정한다. 이 대물 렌즈에는 스프링과 댐퍼가 연결되어 있으므로 미동 액츄에이터는 일반적인 2차의 매스-스프링-댐퍼 (mass-spring-damper) 모델로 표현된다. 본 논문에서 사용하는 미동 액츄에이터의 공칭 (nominal) 모델  $P_n(s)$ 는

$$P_n(s) = \frac{183.81}{s^2 + 209.21s + 159310} \text{ [m/V]} \quad (1)$$

이며 여기서 입력과 출력은 각각 미동 액츄에이터 양단의 전압과 대물 렌즈의 수평 방향 위치이다. (1)에 나타난 공칭 모델에는 모델링 과정에서 다루기 어려운 코일의 인덕턴스 (inductance) 및 고주파 공진 성분은 포함되지 않았으며, 이로 인한 위상 여유 감소 및 시스템 공진 현상을 억제하기 위해서 제어 대역은 3~4 kHz로 제한되어야 한다.

2. 외란 관측기의 특성 및 성능 한계

그림 3은 외란 관측기를 이용한 광디스크 드라이브의 트랙 추종 서보 시스템의 블록선도이다. 외란 관측기는 공칭 모델을 바탕으로 외란 성분을 추정하고, 그 결과를 이용하여 외란의 영향을 제거한다.  $Q(s)$ 는 통상적으로 단위 이득의 저역 통과 필터 (unity-gain low-pass filter)로 선정되는데, 외란 관측기의 외란 감쇄 성능은  $Q(s) \geq 1$ 인 저주파 대역에서만 유효하다. 그 특징은

$$M(s) = \frac{1}{1 - Q(s)} \quad (2)$$

로 표현되는 정궤환 블록  $M(s)$ 의 높은 이득에서 발생하는 데,  $Q(s)$ 가 1에 근접하면  $M(s)$ 의 이득은 무한대로 증가한

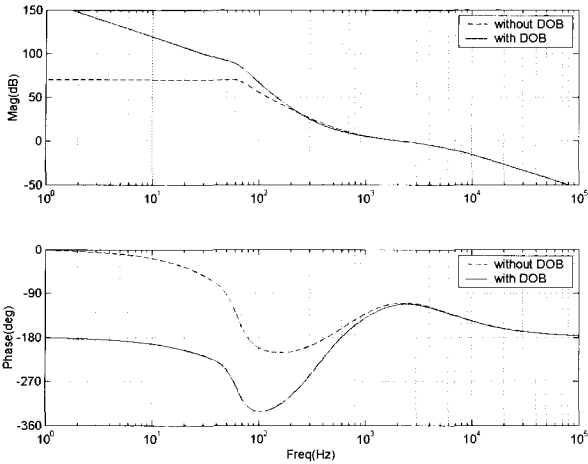


그림 4. 외란 관측기를 포함한 경우(실선)와 포함하지 않은 경우(점선)의 개루프 주파수 응답 비교.  
Fig. 4. Comparison of the open loop frequency responses with (solid) and without (dash) the DOB.

다. 따라서,  $Q(s)$  는 높은 차단 주파수를 가지는 것이 외란 감쇄 성능에 효과적이다. 하지만,  $Q(s)$  의 차단 주파수는 제어 대역 설정과 안정도 여유 확보에 대한 제어 시스템 요구 사양으로 인하여 제한되므로 차단 주파수 증가에 의한 트랙 추종 성능 향상에는 한계가 있다.

그림 4에는 제한 보상기  $C(s)$  와 외란 관측기의 저역 통과 필터  $Q(s)$  를

$$C(s) = 0.64 \frac{(s + 2513)(s + 4398)(s + 5654)}{(s + 377)(s + 18850)(s + 31416)} \quad (3)$$

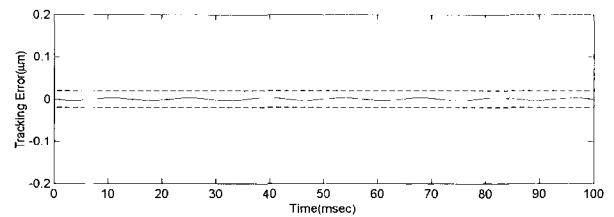
$$Q(s) = \frac{3\omega_c^2 s + \omega_c^3}{(s + \omega_c)^3} \quad \text{with } \omega_c = 600\pi \quad (4)$$

로 설정한 경우의 외란 관측기에 의한 개루프 이득의 증가를 나타내었다. 외란 관측기를 사용하는 경우에는 100 Hz 미만의 저주파 대역에서의 개루프 이득이 (3)의 보상기에서 설정한 제어 대역이나 위상 여유에 영향을 주지 않고 크게 향상된다. 하지만, 100 Hz 이상의 고주파 대역에서는 외란 관측기에 의한 효과가 뚜렷하게 감소함을 확인할 수 있다.

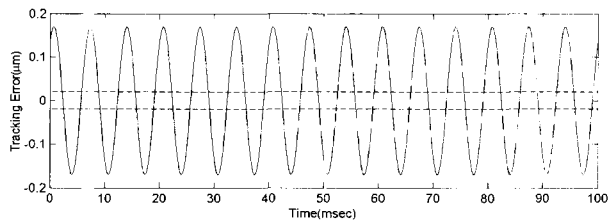
DVD 표준 사양에 의하면 디스크 회전에 의한 트랙의 수평 방향 진동은 최대 진폭 100  $\mu\text{m}$  이내로 제한되며, 트랙 추종 정밀도는  $\pm 0.022 \mu\text{m}$  오차 범위 이내로 제어되어야 한다 [10]. 이를 위해서 트랙 추종 서보 시스템에서는 디스크 회전 주파수 대역에서 70 dB 이상의 개루프 이득과 시스템 안정성을 위한 60° 이상의 위상 여유를 확보하여야 하는데, DVD 8 배속과 16 배속의 디스크 회전 속도에 대한 시스템 요구 사양을 정리하면 표 1과 같다. 그림 4의 개루프 주파수 응답 특성을 보면 DVD 8 배속 디스크 회전 속도에서는 표 1의 요구 사양을 만족하지만, DVD 16 배속에 해당하는 153 Hz의 디스크 회전 주파수에서는 충분한 개루프 이득을 확보하지 못한다.  $Q(s)$  의 제어 대역을 증가시켜서 개루프 이득 조건은 만족시킬 수 있지만,  $C(s)$  에 의하여 설정된 제어 대역이 증가

표 1. 디스크 회전 속도에 따른 트랙 추종 서보 요구 사양.  
Table 1. Track-following servo specifications required at two different rotational speeds.

Read-out Speed	8 X	16 X
Disk rotation	4597 RPM	9194 RPM
Disturbance freq.	76.6 Hz	153.2 Hz
High freq. resonance	20 kHz	20 kHz
Control bandwidth	3 kHz	3 kHz
Required phase margin	60 deg	60 deg
Required loop gain	70 dB	70 dB
Roll-off	- 43 dB/dec	-54 dB/dec



(a)



(b)

그림 5. 모의 실험 결과: (a) 4200 rpm 과 (b) 9000 rpm 에서의 기존 외란 관측기를 이용한 서보 시스템의 트랙 추종 오차.

Fig. 5. Simulation results: tracking error with the conventional DOB((a) 4200 rpm, (b) 9000 rpm).

하고 위상 여유가 감소하여 안정성이 확보되지 않는다.

그림 5에는 4200 rpm (revolutions per minute)과 9000 rpm 디스크 회전 속도에서의 트랙 추종 모의 실험 결과를 나타내었다. 4200 rpm에서의 트랙킹 오차는 점선으로 표시한 0.022  $\mu\text{m}$  의 오차 범위 이내로 제어되지만, 9000 rpm에서는 트랙킹 오차가 이 허용 오차 범위를 벗어난다. 이 결과에서 보듯이 기존의 저역 통과 필터를 사용하는 외란 관측기는 고배속 광디스크 드라이브에서 더 이상 효과적이지 않다.

다음 절에서는 고배속 광디스크 드라이브의 트랙 추종 서보 시스템에서 외란 감쇄 성능을 효과적으로 향상시키기 위하여 새로운 외란 관측기를 제안한다. 통상적인 고배속 광디스크 드라이브에서는 균일 각속도 (constant angular velocity) 방식으로 스피들 모터의 회전 속도를 제어한다. 따라서, 시스템에 유입되는 정현파 외란의 주파수 성분을 알 수 있으며, 이 정보를 이용하면 점근적인 외란 제거 성능을 확보할 수 있다.

### III. 점근적인 외란 제거 성능을 위한 외란 관측기

#### 1. 변형된 외란 관측기 구조

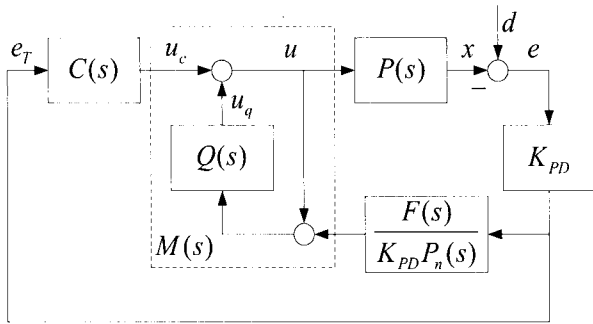


그림 6. 변형된 외란 관측기를 적용한 트랙 추종 서보 시스템의 구조.  
Fig. 6. Structure of the track-following servo system using the modified DOB.

우선, 기존의 외란 관측기에서 약간 변형된 외란 관측기 구조를 제시한다. 외란 관측기에 포함되는 저역 통과 필터  $Q(s)$ 는 다음과 같은 두 가지 조건을 만족하도록 설정한다.

- 역모델 블록의 프로퍼니스 (propemess): 전달 함수  $Q(s)P_n^{-1}(s)$ 의 분모의 차수가 분자의 차수보다 크거나 같도록  $Q(s)$ 의 차수를 설정하여야 한다.
- 시스템의 안정성 유지:  $Q(s)$ 의 대역은 전체적인 시스템의 안정성을 유지하도록 설정하여야 한다.

첫번째 조건은 Q 필터의 차수 설정과 관련된 조건으로서 Q 필터 선정에 있어서 심각한 제약 조건으로 작용한다. 보다 자유롭게 Q 필터를 설정하기 위하여 이 조건을 Q 필터 설정과 관련 없이 만족시키는 새로운 필터  $F(s)$ 를 도입한다. 이와 아울러,  $F(s)$ 가 추가된 구조에서도 전체적인 외란 관측기의 특성을 Q 필터를 이용하여 조절하기 위해서  $Q(s)$ 의 위치를 조정한다. 새로운 외란 관측기를 채택한 트랙 추종 서보 시스템의 구조는 그림 6의 블록선도로 표시하였다.

단위 이득을 가지는 저역 통과 필터로 설정하는  $F(s)$ 는 외란 관측기에서의 높은 이득 특성을 나타내는 정제된 루프  $M(s)$ 에 포함되지 않기 때문에 성능에 크게 영향을 주지 않는다. 다시 말하면,  $F(s)$ 의 대역이 증가하더라도 전체 외란 관측기의 성능에는 뚜렷한 효과가 나타나지 않기 때문에  $F(s)P_n^{-1}(s)$ 가 프로퍼 (proper) 하도록  $F(s)$ 의 차수를 설정하고, 그 차단 주파수는 전체 제어 대역보다 조금 낮게 설정한다. 새로운 필터가 추가되었지만, 새 필터  $F(s)$ 는 기존의  $Q(s)$  역할을 대체하므로  $F(s)$ 로 인하여 전체 차수가 증가하지는 않으며, 또한 구현 과정에서의 연산 시간 증가를 초래하지 않는다. 결과적으로, 변형된 외란 관측기 구조에서는 기존의 Q 필터 설정에 요구되었던 하나의 제약 조건을 제거함으로써 보다 자유롭게 Q 필터를 설정할 수 있다.

2. 대역 통과형 (band-pass type) 외란 관측기

정현파 외란에 대한 점근적인 트랙 추종 성능을 위해서는 외란의 주파수에서  $Q(s)=1$ 을 만족하여야 한다. 본 논문에서는 이 조건을 만족시키기 위하여

$$Q(s) = \frac{2\zeta\omega_0 s}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \tag{5}$$

로 표현되는 대역 통과 필터를 사용하는데,  $\zeta$ 와  $\omega_0$ 는 각각 감쇄율 (damping ratio)과 대역 통과 필터의 중심 주파수를 의미한다. (5)의 대역 통과 필터는  $s = j\omega_0$ 에서  $Q(s)=1$ 이 성립하므로 중심 주파수  $\omega_0$ 는 외란의 주파수와 동일한 디스크 회전 주파수로 설정하여야 한다.  $Q(s)$ 를 (5)의 대역 통과 필터로 설정함으로써 전달 함수  $M(s)$ 는

$$M(s) = \frac{1}{1-Q(s)} = \frac{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2}{s^2 + \omega_0^2} \tag{6}$$

과 같이 표현된다. 따라서, 그림 6의 변형된 외란 관측기 구조를 기반으로 하는 트랙 추종 서보 시스템에서 (5)의 Q 필터를 사용하면 전체 개루프 이득의 주파수 응답에서는 디스크 회전 주파수로 설정된  $\omega_0$ 에서 피크가 나타난다. 또한, 제어 루프에 포함되는  $M(s)$ 에는 (6)에 보인 것처럼 정현파 외란과 동일한 성분이 생성되므로 내부 모델 원칙에 의하여 점근적인 외란 제거 성능을 가지게 된다.

지금까지는 디스크 회전 주파수에 대한 정보를 바탕으로 점근적인 외란 제거 성능에 관하여 설명하였다. 대역 통과 필터의 중심 주파수  $\omega_0$ 가 시스템에 유입되는 정현파 외란의 주파수와 정확히 일치하면 점근적 외란 제거 성능을 보장할 수 있다. 하지만, 실질적인 디스크 회전 주파수는 디스크 스핀들 모터 제어 시스템에서의 제어 오차로 인하여 알려진 회전 주파수에서 어느 정도는 벗어날 수 있다. 따라서, 트랙 추종 서보 시스템의 개루프 이득은 디스크 회전 주파수의 변화에 대하여 급격히 감소하지 않아야 한다. 여기서, 중심 주파수  $\omega_0$  주변에서의 개루프 이득 변화 감도는 (5)에 나타난  $Q(s)$ 의 감쇄율  $\zeta$ 를 이용하여 조절할 수 있다.

대역 통과 필터  $Q(s)$ 에서  $\omega_0$ 를 중심으로 형성되는 통과 대역 (pass band)의 폭은  $\zeta$ 에 의하여 결정된다.  $\zeta$ 를 감소시키면 일반적으로  $Q(s)$ 의 통과 대역 폭은 좁아지고  $M(s)$ 의 주파수 응답 곡선에는 보다 날카로운 피크가 형성된다. 따라서,  $\omega_0$  주변 주파수에서의 급격한 개루프 이득 변화를 줄이고 외란의 주파수가 변한 상황에서도 외란의 영향을 충분히 감쇄시키기 위해서는  $\zeta$ 를 증가시켜야 한다. 그림 7과 8에는 각각 3가지  $\zeta$  값에 대한  $Q(s)$ 와 개루프 전달 함수의 주파수 응답을 표시하였다. 여기서, 중심 주파수  $\omega_0$ 는 9000 rpm의 디스크 회전에 해당하는 300π rad/s로 설정하였으며, 추가로 사용된 필터  $F(s)$ 는

$$F(s) = \frac{1}{(s/1400\pi + 1)^2} \tag{7}$$

로 설정하였다.  $\zeta$ 를 증가시키면  $\omega_0$  근처에서의 개루프 이득이 증가하는 영역이 점차 증가하는 현상을 그림 8에서 쉽

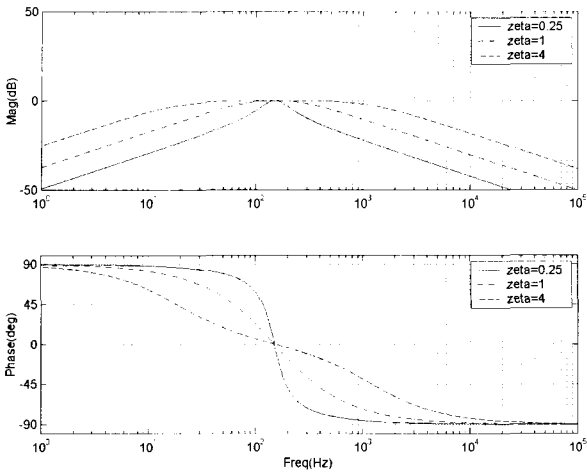


그림 7. 세가지  $\zeta$  값을 사용한 대역 통과 필터  $Q(s)$ 의 주파수 응답.

Fig. 7. Frequency responses of the band-pass filter  $Q(s)$  with three different values of  $\zeta$ .

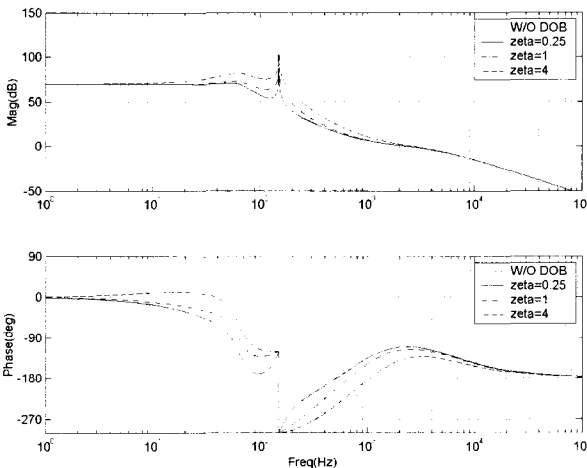


그림 8. 세가지  $\zeta$  값을 사용한 변형된 외란 관측기 기반 트랙 추종 서보 시스템의 개루프 주파수 응답.

Fig. 8. Open loop frequency responses with the modified DOB with three different values of  $\zeta$ .

관찰할 수 있다. 하지만, 증가된  $\zeta$ 에 의하여 전체 제어 대역의 차단 주파수에서 위상 여유가 감소하므로 외란의 주파수 변화에 대한 개루프 이득의 민감도와 시스템 안정성을 함께 고려하여  $\zeta$ 를 설정하여야 한다.

표 2에는 외란 관측기가 없는 경우, 기존의 외란 관측기를 사용한 경우, 그리고 제안된 외란 관측기를 사용한 경우 각각에 대하여 150 Hz로 설정된 중심 주파수 근처에서의 개루프 이득 변화를 정리하였다. 여기서, 주파수 오차는 중심 주파수에 대한 디스크 회전 주파수의 변화량을 백분율로 나타내었다. 중심 주파수 근처에서의 개루프 이득의 변화는 제안한 대역 통과형 외란 관측기를 사용하는 경우에 크게 나타나지만, 개루프 이득의 절대치는 가장 큰 값을 가진다. 또한, 제안한 대역 통과형 외란 관측기에서는  $\zeta$  값을 조정함으로써

표 2. 외란 관측기가 없을 때, 기존의 외란 관측기를 사용했을 때, 그리고 3 종류의  $\zeta$  값을 사용한 제안된 외란 관측기에서의 개루프 이득 변화 감도.

Table 2. Loop gain sensitivity without DOB, with the conventional DOB, and with the proposed DOB using three different values of  $\zeta$ .

	Freq. Error	W/O DOB	Conv. DOB	DOB with BPF ( $\zeta$ )		
				0.25	1.0	4.0
Loop gain (dB)	-10%	47.0	53.5	55.1	66.5	78.5
	-1%	44.3	49.6	72.2	84.2	96.3
	0%	44.0	49.2	$\infty$	$\infty$	$\infty$
	1%	43.7	48.8	71.7	83.7	95.8
	10%	41.4	45.5	50.3	61.8	73.8
Phase margin (deg)		70.6	67.3	68.7	63.0	44.8

써 전체 시스템의 위상 여유가 감소되지 않으면서도 개루프 이득의 급격한 변화를 방지할 수 있다. 균일 각속도 방식으로 제어되는 스피들 모터의 회전 속도는 일반적으로 1% 오차 이내로 제어된다. 따라서, 대역 통과형 외란 관측기를 이용하면 디스크 회전 주파수가 정확하지 않더라도 충분히 향상된 트랙 추종 성능을 확보할 수 있다.

3. 모의 실험

본 논문에서 제안한 외란 관측기에 의한 성능 향상의 타당성을 검증하기 위하여 두 종류의 모의 실험을 수행하였다. 보다 약조건에서의 성능을 확인하기 위하여 DVD 표준 사양에 언급된 허용 편심량의 2배에 해당하는 200  $\mu\text{m}$ 의 편심 성분을 포함한 DVD-ROM 디스크가 9000 rpm의 속도로 회전하는 상황을 가정하였으며, 결과적인 입력 외란은 그림 9(a)에 나타내었다.  $Q(s)$ 의 중심 주파수  $\omega_0$ 는 편심에 의한 외란 성분을 제거하기 위하여 디스크 회전 주파수에 해당하는  $300\pi$  rad/s로 설정하였다. 제안된 외란 관측기는 150 Hz의 외란 성분을 완벽히 제거하여서 그림 9(b)에 나타낸 트랙 추종 오차에서는 150 Hz 성분을 전혀 발견할 수 없다.

두 번째 모의 실험에서는 스피들 모터 제어계의 오차로 인하여 외란의 주파수 성분이 규정된 150 Hz에서  $\pm 1\%$  벗어난 경우를 가정하였으며, 모의 실험 결과로 트랙 추종 오차를 그림 10에 나타내었다.  $Q(s)$ 의 중심 주파수 설정이 외란의 주파수와 일치하지 않으므로 점근적인 외란 제거 성능은 거둘 수 없다. 하지만, 트랙 추종 오차는 허용 오차인 0.022  $\mu\text{m}$  범위 이내로 제어되므로 충분히 향상된 트랙 추종 성능을 얻을 수 있다.

IV. 실험 및 실험 결과

1. 실험 환경

제안된 외란 관측기를 포함한 트랙 추종 서보 시스템은 32 비트의 부동 소수점 연산형 DSP (Digital Signal Processor)를 이용하여 구현하였으며, 전체 시스템의 구조는 그림 11에 나타내었다. DSP의 충분한 연산 능력을 바탕으로 200 kHz의 높은 샘플링 주파수를 사용하는데, 이는 일반적인 상용 DVD-ROM 드라이브에서는 통상적인 샘플링 주파수이다. 디스크의 회전 속도는 스피들 모터에 장착된 홀 센서 (Hall sensors)

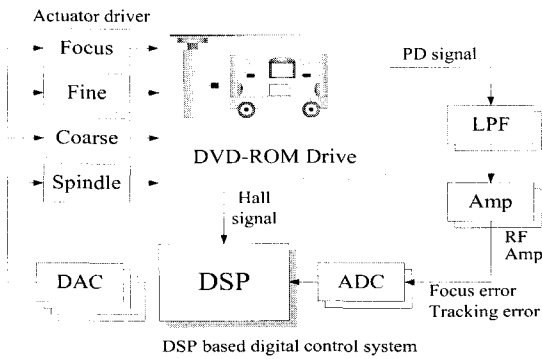


그림 11. DSP를 이용한 디지털 서보 시스템의 구성도.  
Fig. 11. Schematic view of the DSP-based digital servo system.

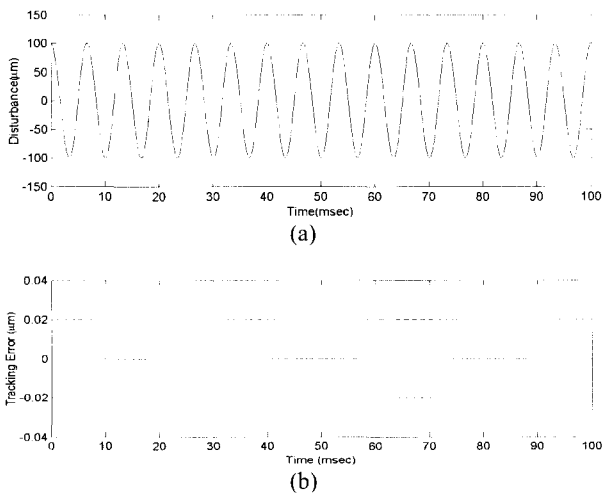


그림 9. 모의 실험 결과: (a) 입력된 외란과 (b) 제안된 외란 관측기를 사용했을 경우의 트랙 추종 오차.  
Fig. 9. Simulation results: (a) external disturbance, (b) tracking error with the proposed DOB.

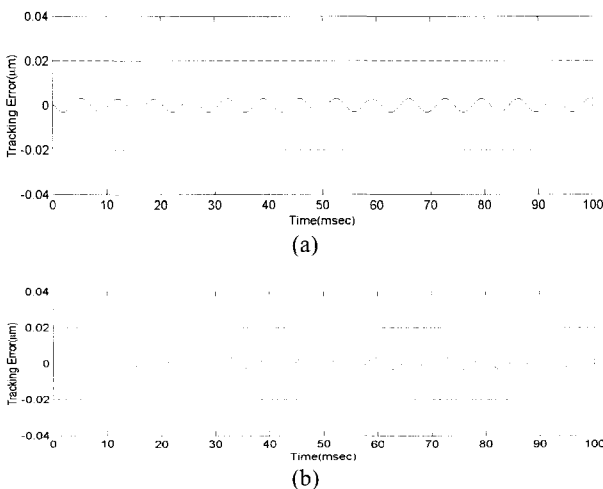


그림 10. 모의 실험 결과: (a) -1%와 (b) +1%의 회전 주파수 변화에 대한 트랙 추종 오차.  
Fig. 10. Simulation results: tracking error when the rotational frequency is deviated by (a) -1% and (b) +1%.

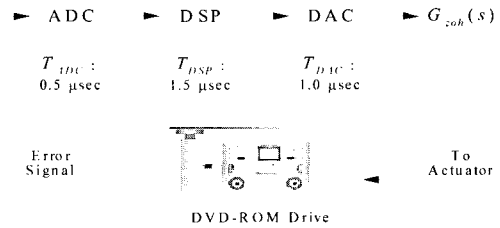


그림 12. 디지털 서보 시스템에 존재하는 시간 지연 요소.  
Fig. 12. Time delay factors existing in the digital servo system.

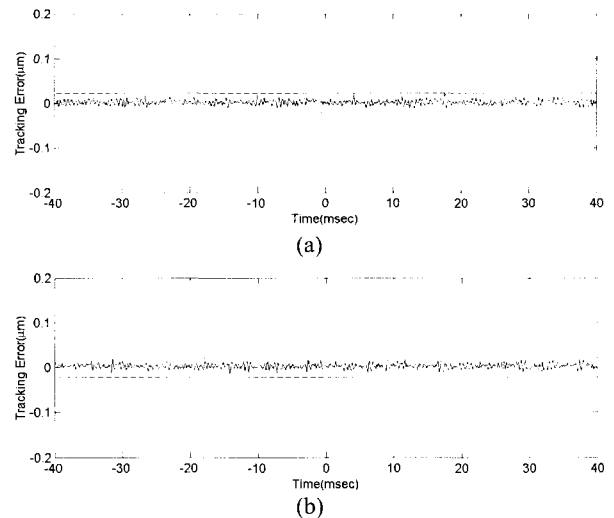


그림 13. 실험 결과: 3000 rpm 회전 속도에서 (a) 저역 통과형 외란 관측기를 사용했을 경우와 (b) 대역 통과형 외란 관측기를 사용했을 경우의 트랙 추종 오차.  
Fig. 13. Experimental results: tracking error at 3000 rpm (a) with the low-pass type DOB and (b) with the band-pass type DOB.

를 이용하여 일정 각속도 방식으로 제어하였다.

2. 시스템 구현 과정에서의 고려 사항

아날로그 영역에서 설계된 제어기는 쌍일차 변환 (bilinear transformation)을 통하여 등가의 이산 제어기로 변환하였다 [11]. 이 디지털 제어기는 DSP의 프로그램에서 여러 개의 1차 무한 임펄스 응답 필터 (Infinite Impulse Response Filter)를 다단계 (cascade) 방식으로 연결하여 구현한다. 3 kHz의 전체 제어 대역과 비교하여 충분히 높은 샘플링 주파수를 사용하므로 아날로그 제어기의 특성이 등가의 이산 제어기에서도 대부분 그대로 유지된다. 하지만, 디지털 제어 루프의 구현 과정에서 발생하는 피할 수 없는 시간 지연 성분은 제어 시스템에서의 위상 여유를 감소시키므로 시간 지연 성분에 관하여 정량적으로 분석하고 제어기 설계에 반영할 필요가 있다[12].

그림 12에는 구현된 디지털 제어 시스템에 존재하는 대표적인 시간 지연 성분을 표시하였다.  $T_{ADC}$ ,  $T_{DSP}$ , 그리고  $T_{DAC}$ 는 각각 A/D 변환 시간, DSP 연산 시간, 그리고 D/A 안정화 시간을 나타내며, 이 지연 시간들의 합은 대략 3.0  $\mu$ s에 해당한다. 또 다른 시간 지연 요소로서 제어 루프상에 존

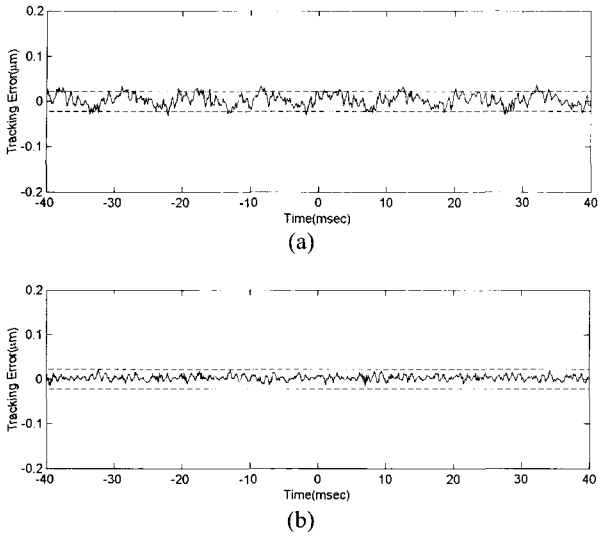


그림 14. 실험 결과: 6000 rpm 회전 속도에서 (a) 저역 통과형 외란 관측기를 사용했을 경우와 (b) 대역 통과형 외란 관측기를 사용했을 경우의 트랙 추종 오차.  
Fig. 14. Experimental results: tracking error at 6000 rpm (a) with the low-pass type DOB and (b) with the band-pass type DOB.

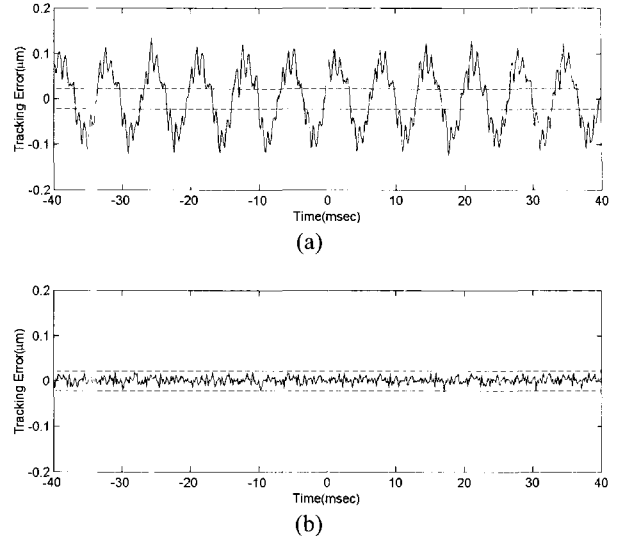


그림 16. 실험 결과: 9000 rpm 회전 속도에서 (a) 저역 통과형 외란 관측기를 사용했을 경우와 (b) 대역 통과형 외란 관측기를 사용했을 경우의 트랙 추종 오차.  
Fig. 16. Experimental results: tracking error at 9000 rpm (a) with the low-pass type DOB and (b) with the band-pass type DOB.

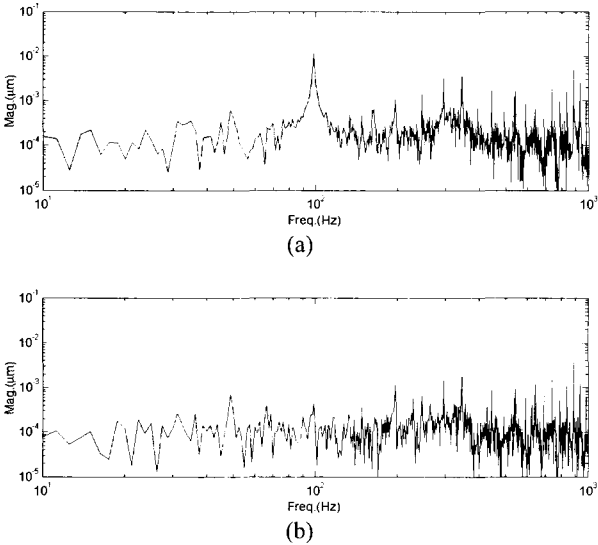


그림 15. 실험 결과: 6000 rpm 회전 속도에서 (a) 저역 통과형 외란 관측기를 사용했을 경우와 (b) 대역 통과형 외란 관측기를 사용했을 경우의 트랙 추종 오차의 주파수 분포.  
Fig. 15. Experimental results: frequency spectrum of the tracking error at 6000 rpm (a) with the low-pass type DOB and (b) with the band-pass type DOB.

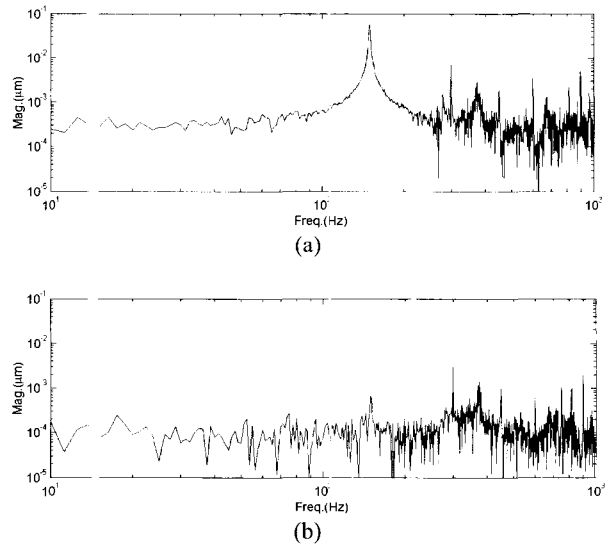


그림 17. 실험 결과: 9000 rpm 회전 속도에서 (a) 저역 통과형 외란 관측기를 사용했을 경우와 (b) 대역 통과형 외란 관측기를 사용했을 경우의 트랙 추종 오차의 주파수 분포.  
Fig. 17. Experimental results: frequency spectrum of the tracking error at 9000 rpm (a) with the low-pass type DOB and (b) with the band-pass type DOB.

제하는 영차 홀드 (zero-order hold)가 존재하며, 그 전달함수는

$$G_{zoh}(s) = \frac{1 - e^{-sT_s}}{sT_s} \quad (8)$$

과 같이 샘플링 주기  $T_s$ 에 의존적으로 표현된다.

시간 지연에 의한 개루프 주파수 응답의 위상 감소는 주파수에 따라서 변화하는데, 표 3에는 3개의 대표적인 주파수 3

kHz, 5 kHz, 그리고 10 kHz에서의 이득과 위상의 변화를 정리하였다. 트랙 추종 서보 시스템의 제어 대역은 대략 3 kHz로 설정하므로 3 kHz에서의 위상 감소는 서보 시스템에서의 위상 여유 감소로 해석할 수 있다. 결론적으로, 구현된 시스템에서는 6도 정도의 위상 여유 감소가 발생하고 있으며, 이런 위상 여유 감소는 피할 수 없으므로 제어기 설계 과정에서

충분히 고려하여야 한다.

### 3. 실험 결과

실험은 기존의 외란 관측기를 사용하는 경우와 제안된 외란 관측기를 사용하는 경우로 나누어 진행하였다. 두 외란 관측기의 성능을 비교하기 위하여 (3)에 표시한 동일한 궤환 보상기를 사용하였다. 또한, 실험은 3000 rpm, 6000 rpm, 그리고 9000 rpm의 3가지 디스크 회전 주파수에서 수행하였다. 제안된 외란 관측기에서  $Q(s)$ 의  $\zeta$ 는 1로 설정하였으며, 중심 주파수  $\omega_0$ 는 디스크 회전 주파수에 맞추어 설정하였다.

그림 13에는 3000 rpm에서의 두 외란 관측기에 대한 트랙 추종 오차를 나타내었다. 디스크가 충분히 지속적으로 회전하고 있으므로 트랙 추종 오차는 점선으로 표시한 제어 허용 오차보다 충분히 작은 것을 두 경우에서 모두 확인할 수 있으며, 성능의 차이를 거의 확인할 수 없다. 하지만, 그림 14에 나타난 6000 rpm에서의 실험 결과에서는 기존의 저역 통과 필터를 사용한 경우의 트랙 추종 오차는 때때로 허용 오차 범위를 벗어나는 반면, 제안된 외란 관측기를 사용하는 경우에는 그림 13의 3000 rpm에서와 큰 차이를 확인할 수 없다. 성능의 차이는 그림 15에 나타난 트랙 추종 오차의 주파수 분포에서 보다 극명하게 확인할 수 있는데, 기존의 외란 관측기 실험 결과에서는 디스크 회전 주파수인 100 Hz 성분이 뚜렷하게 보이는 반면, 제안된 외란 관측기의 경우에는 전혀 찾아볼 수 없다. 성능의 차이는 9000 rpm에서의 트랙 추종 오차와 주파수 분포를 표시한 그림 16과 17에서 보다 뚜렷이 확인할 수 있다. 기존의 외란 관측기를 사용한 결과에서는 6000 rpm에서의 결과보다 훨씬 큰 트랙 추종 오차와 디스크 회전 주파수 성분이 나타나는 반면, 제안된 외란 관측기의 경우에는 저속의 디스크 회전과 비교하여 성능 저하가 거의 나타나지 않는다. 결론적으로, 제안된 대역 통과 형식의 외란 관측기는 기존의 저역 통과 형식의 외란 관측기에서는 다룰 수 없었던 매우 높은 주파수의 외란 성분도 효과적으로 제거할 수 있으며, 고배속 광디스크 드라이브에서의 트랙 추종 성능 향상에 매우 효과적이다.

### V. 결론

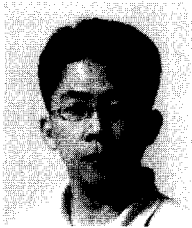
본 논문에서는 고배속 광디스크 드라이브에서의 트랙 추종 서보 시스템을 위한 새로운 외란 관측기 구조를 제안하였다. 대역 통과 필터를 외란 관측기에 채택함으로써 매우 높은 주파수의 외란 성분에 대해서도 점근적인 외란 제거 성능을 확보할 수 있다. 스핀들 모터 제어계의 오차에 의하여 외란의 주파수가 약간 변하더라도 제안된 외란 관측기에 의한 트랙 추종 성능은 매우 우수하다. 제안된 외란 관측기의 성

능은 다양한 모의 실험 및 DVD-ROM을 이용한 실험 결과를 통하여 입증하였으며, 이의 활용은 DVD-ROM 드라이브에 제한되지 않고 일정 각속도 제어 방식으로 디스크를 회전시키는 다른 광디스크 드라이브에 대해서도 효과적으로 적용할 수 있다.

### 참고문헌

- [1] T. H. Akkermans and S. G. Stan, "Digital servo IC for optical disc drives," *Contr. Eng. Pract.*, vol. 9, no. 11, pp. 1245-1253, Nov., 2001.
- [2] S. Bittanti, F. Dell'Orto, A. D. Carlo, S. M. Savares, "Notch filtering and multirate control for radial tracking in high-speed DVD-players," *IEEE Tran. Consumer Electron.*, vol. 48, no. 1, pp. 56-62, Feb., 2002.
- [3] K. Fujiyama, R. Katayama, T. Hamaguchi, and K. Kawakami, "Digital controller design for recordable optical disk player using disturbance observer," in *Proc. Adv. Mot. Contr.*, pp. 141-146, 2000.
- [4] M. T. White, M. Tomizuka, and C. Smith, "Improved track following in magnetic disk drives using a disturbance observer," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, vol. 5, no. 1, pp. 3-11, March, 2000.
- [5] J. R. Ryoo, T.-Y. Doh, and M. J. Chung, "Disturbance observer design for track-following control in optical disk drive using structured singular value," in *Proc. Int. Conf. Contr., Automat., Syst.*, 2002.
- [6] K.-S. Kim, S.-P. Hong, "Enhancing the tracking performance in optical storage systems using a disturbance compensator," in *Proc. Amer. Contr. Conf.*, pp. 1384-1388, 2002.
- [7] Y. Choi, K. Yang, W. K. Chung, H. R. Kim, and I. H. Suh, "On the robustness and performance of disturbance observers for second-order systems," *IEEE Tran. Automat. Contr.*, vol. 48, no. 2, pp. 315-320, Feb., 2003.
- [8] J. W. Howze and S. P. Bhattacharyya, "Robust tracking, error feedback, and two-degree-of-freedom controllers," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 42, no. 7, pp. 980-983, July, 1997.
- [9] L. H. Keel, S. P. Bhattacharyya, and J. W. Howze, "Robust tracking and disturbance rejection with two DOF controllers and distributed internal models," in *Proc. Amer. Contr. Conf.*, pp. 3892-3896, 1997.
- [10] DVD Forum, "DVD specifications for read-only disc—part 1. physical specifications. version 1.01," 1997.
- [11] K. Ogata, *Discrete-Time Control Systems*, Englewood Cliffs, NJ:Prentice-Hall, 1995.
- [12] J. H. Moon, M. N. Lee, M. J. Chung, S. Y. Jung, and D. H. Shin, "Track-following control for optical disk drives using an iterative learning scheme," *IEEE Tran. Consumer Electron.*, vol. 42, no. 2, pp. 192-198, May, 1996.





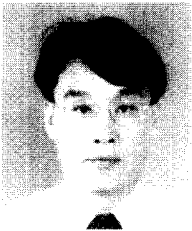
### 유 정 래

1972년 2월 6일생. 1996년 한국과학기술대학 전기 및 전자공학과 졸업. 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사(1998). 현재 한국과학기술원 전자전산학과 박사과정. 관심 분야는 강인 동작 제어, 광디스크 드라이브 서보 제어, DSP를 이용한 디지털 제어 시스템 설계.



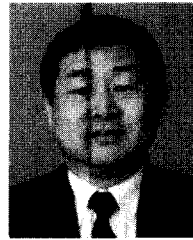
### 문 정 호

1969년 3월 8일생. 1991년 서울대 제어 계측공학과 졸업. 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사(1993), 박사(1998). 현재 국립 강릉 대학교 정보전자공학부 조교수. 관심 분야는 반복 학습 제어, DSP를 이용한 디지털 제어 시스템 설계, 디스크 드라이브 서보 제어.



### 진 경 복

1961년 5월 19일생. 1985년 한양대학교 전기공학과 졸업. 한양대학교 전기공학과 석사(1987), 한국과학기술원 자동화 및 설계 공학과 박사(1999). 현재 한국 기술교육대학 제어시스템공학과 조교수. 관심 분야는 광디스크 드라이브 서보 제어, 강인 제어, 반복 학습 제어.



### 정 명 진

1950년 1월 31일생. 1973년 서울대 전기 공학과 졸업. 미시간대 전기 및 컴퓨터 공학과 석사(1977), 동대학 컴퓨터, 정보, 제어공학과 박사(1983). 1983년~현재 한국과학기술원 전자전산학과 교수. 관심 분야는 로봇 경로계획 및 제어, 지능 제어, 원격 제어, 강인 제어.