

수정된 외란관측기를 이용한 광 디스크 드라이브 서보 시스템

An Optical Disk Drive Servo System Using a Modified Disturbance Observer

정 종 일, 김 무 섭, 오 경 환, 정 정 주*

(Jong-Il Jeong, Moo-Sub Kim, Kyung-Whan Oh, and Chung Choo Chung)

Abstract : Using a disturbance observer is effective in enhancing the performance of dynamic system in presence of disturbances. Although various types of disturbance observers have been proposed to improve sensitivity of systems, there exist poor transient responses due to cross-couplings among disturbance observer loops. In this paper, dual disturbance observer (DOB) is proposed to reduce the effects of the cross-couplings. A different type of loop transfer function is proposed for external disturbance observer. While improving the sensitivity function by adding external DOB, it also provides improved complementary sensitivity function. The proposed dual DOB is applied to a commercial optical disk drive tracking system. It is shown that the dual DOB is an effective method in rejecting the effect of disturbance as well as improving the tracking performance.

Keywords : tracking control, disturbance observer, optical disk drives, dual dob

1. 서론

모델 불확실성이나 외란이 존재하는 시스템에서 제어 성능을 높이는 다양한 방법들이 연구되어 왔다. 그 중 외란 관측기(Disturbance Observer, DOB)는 선형 시스템에서 외란을 관측하여 효과적으로 보상하는 원리의 제어기로 Ohnishi에 의하여 처음 제안되었다[1,2]. 그 후 이 외란 관측기는 이론적 분석이 강화되었으며[3], 외란 관측기의 관측 대상을 단지 외부 외란의 의미에서 벗어나 그 해석의 범위를 확장하여 해석하는 방법들이 제안되었다. 확장된 의미의 외란은 모델 불확실성, 토크 및 출력 외란, 그리고 플랜트에 존재하는 마찰력과 비선형성 등을 포함하는 추종 오차이다. 외란 관측기는 그러한 원인의 결과를 관측하고 보상함으로써 일부 비선형 시스템의 비선형성까지도 외란으로 간주하여 제거할 수 있음이 밝혀졌다[4,5]. 외란 관측기는 외란을 제거하여 시스템의 안정성을 도모하는데 그 목적이 있다[4]. 외란 관측기의 외란 제거 성능은 Q 필터로 불리는 저역 통과 필터의 차수에 의존되며, 강인성은 저역 통과 필터의 상대 차수와 분모 차수에 따라 결정된다[6]. 이러한 외란 관측기는 시스템의 안정도와 성능을 높이는데 효과적인 것으로 알려져 로봇 시스템, 고속 기계 시스템, 정밀 위치 제어 시스템, 광 디스크 시스템 등에 널리 적용되고 있다[7-11].

CD나 DVD 같은 광 디스크 구동시스템은 디스크 표면 진동, 디스크 편심 그리고 구동기 자체에 기인한 공진 등으로 구성되는 외란들을 포함하게 된다. 트래킹 서보의 경우, 광 초점은 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 의 오차 이내로 트랙을 따라가야 하는데, 시스템에 내재된 외란들은 고배속 고밀도 ODD시스템의 개발에 있어서 방해가 된다[11]. 이러한 상황에서 외란 관측기는 ODD시스템에 들어오는 외란들을 제거하는데 매우 효과적인

대안이 될 수 있다[10,11]. 그러나 ODD시스템은 기준 입력을 측정하지 못하고, 기준 입력과 출력간의 오차(Tracking Error:TE)만이 측정 가능하다. 이러한 문제를 해결하고자 추가적인 센서를 이용하여 기준 입력을 측정하고 이를 외란 관측기에 적용하고자 하는 시도가 있었다[10]. 다른 한편으로는 추가적인 센서를 이용하지 않고 수정된 형태의 외란 관측기인 EDOB(Error based DOB)를 적용하였다[12]. 이 외에도 시스템의 외란 제거 성능을 높이고, 민감도를 개선하는 여러 가지 형태의 외란 관측기가 제안되었다. PAC(Passive Adaptive Controller)와 외란 관측기 간의 이득 조정이 가능하도록 하여 민감도를 개선하고, PAC와 외란 관측기 간의 교차 결합(cross-coupling)의 영향을 줄이고자 하는 시도가 있었다[3]. RIC(Robust Internal-Loop Compensator)는 외란 관측기를 단일 이득의 회환과 피드포워드(feedforward) 형태로 등가 변형하고 Q 필터의 대역폭 결정에 따라 나타나는 일련의 결과를 분석하였다[9]. MPEC(Multiloop Perturbation Compensator)는 하나의 외란 관측기로는 계산 시간 지연 및 위상 뒤짐으로 인하여 완벽한 외란의 제거를 위한 보상값의 한계가 있으므로 그 보상의 부족한 양만큼을 추가적인 외란 관측기를 통하여 보상한다. 이러한 구조는 시스템의 강인한 성능을 개선한다[13]. IMC(Internal Model Controller)는 시스템 내부 루프에서 보상되지 못한 외란을 시스템 외부 루프에서 추가적으로 보상하는 구조이다[14]. IMC는 외란제거 성능이 외부 루프를 다중화함으로써 민감도가 개선됨을 보였으나 반면에 여민감도의 피크치가 증가하여 측정 잡음이 민감하게 된다. 현재까지 제안된 외란 관측기의 구조에서는 루프간 외란 관측기의 교차 결합(cross-coupling) 발생 및 위상 뒤짐으로 인하여 시스템의 과도응답 성능이 저하되는 경향이 있다[3]. 따라서 주파수 영역에서의 민감도 개선과 시간영역에서의 과도응답 성능 사이에 절충이 필요하다.

본 논문에서는 기존 다중 외란관측기의 외란 제거 성능을 유지하면서 교차결합을 감소시키며 측정노이즈에 대하여 강인한 특성을 갖고 있는 dual DOB(Dual Disturbance Observer)를

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 1. 19., 채택확정 : 2005. 1. 7.

정종일, 김무섭, 정정주 : 한양대학교 전자통신전파공학부

(allday@netian.com/muat@hanmail.net/cchung@hanyang.ac.kr)

오경환 : 삼성전자 스토리지 사업부(kw208.oh@samsung.com)

제안한다. 제안된 dual DOB는 내부루프와 외부루프 즉, 두 개의 외란 관측기들로 구성되어 있다. 이 시스템은 구조는 IMC와 유사 하나 외부 루프의 설계 방식이 다르다. IMC는 외란제거 성능이 외부 루프를 다중화 함으로써 민감도가 개선됨을 보였으나 여민감도의 피크치가 증가하여 측정 잡음에 민감하다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 외부 루프의 설계에 사용되는 공칭시스템의 모델을 IMC구조와 다르게 설정하였다. 즉, 두 외란 관측기들 간의 교차 결합 영향을 줄이기 위하여 각각의 외란 관측기에 대한 설계 목적을 다르게 한다. 본 논문에서 제안된 dual DOB가 기존의 다중루프 외란관측기와 시간 영역에서 동일한 과도응답을 보이지만 주파수 영역에선 외란에 대한 민감도가 개선됨을 보인다. 또한 dual DOB를 광 디스크 서보 시스템에 적용하여 성능을 실험적으로 검증한 결과를 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서 외란 관측기의 특성 및 Q필터의 영향에 관하여 살펴본다. 3절에서는 본 논문에서 제안된 dual DOB의 구조를 살펴보고 dual DOB의 확장성에 대하여 설명한다. 4절에서는 제안된 dual DOB의 실용성을 상용 광 디스크 드라이브 서보시스템에 적용하여 실험적으로 검증한다. 마지막으로 5장에서는 결론을 맺는다.

II. 외란 관측기의 원리 및 분석

1. 외란 관측기의 원리

일반적인 외란 관측기는 그림 1에서와 같이 출력단에 공칭 모델의 역함수를 추가하여 제어 입력과의 차로 외란을 추종하고 제어 입력단에 제환함으로써 외란을 제거하는 방법이다. 외란 관측기의 보상되는 양 \tilde{d} 는 Q필터가 단일 이득을 가지는 저주파 대역을 고려할 경우 (1)과 같이 정리될 수 있으며, 플랜트의 모델 불확실성을 고려하지 않을 경우 보상되는 양은 토크 외란과 출력 외란 모두를 완벽히 제거할 수 있는 크기가 된다.

$$\lim_{Q(s) \rightarrow 1} \tilde{d} = [u + d_{in}]P(s)P_n^{-1}(s) - u + P_n^{-1}d_{out} \cong d_{in} + P_n^{-1}d_{out} \quad (1)$$

그러나, 일반적으로 공칭 모델의 역함수를 취하면 순수미분 성분이 발생하여 실제적인 역함수의 존재가 불가능하다. 따라서 Q필터를 추가하여 공칭 모델의 역함수를 적용할 수 있도록 하고 측정 잡음의 영향도 제거하게 된다. 이러한 Q필터는 일반적으로 단일 이득을 가지는 저역 통과 필터(LPF)의 형태를 지니게 된다. 본 논문에서는 binomial Q필터를 사용하였다[15].

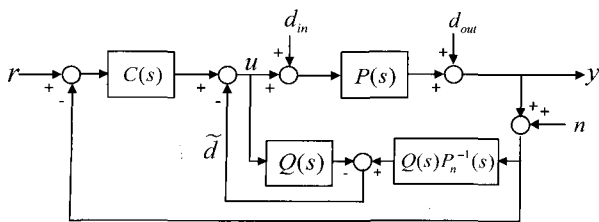


그림 1. 외란 관측기를 적용한 시스템의 구조.
Fig. 1. System structure of DOB.

$$Q_{mn} = \frac{\sum_{i=0}^n a_{mi}(\tau s)^i}{(\tau s + 1)^m}, \quad a_{mi} = \frac{m!}{(m-i)!i!} \quad (2)$$

여기서 τ 는 필터 시정수, a_{mi} 는 binomial 상수, m 과 n 은 $m > n$ 을 만족하는 필터의 분모 차수와 분자차수를 나타낸다. 필터의 차수가 높을수록 이상적인 저주파 통과와 결과물을 얻을 수 있으나 위상 지연으로 인하여 제어기의 성능에 제약이 있게된다. 또한 시스템의 응답은 Q필터의 대역폭에 영향을 받는다. 다시 말하자면 Q필터의 대역폭을 결정하는 극점이 허수 축에서 멀리 있으면 있을수록 빠른 감쇠를 통해 그만큼 원하지 않는 출력을 빠르게 제거할 수 있다. 그러나 극점의 이동은 그만큼 제어 노력(control effort)이 요구되므로 설계 시 중요한 조건이 된다. 따라서 Q필터는 외란 관측기의 성능에 큰 영향을 미치는 요소이다[6].

2. 외란 관측기를 적용한 시스템의 분석

전달함수의 특성방정식으로부터 외란 관측기의 성능을 분석할 수 있으나 일반적인 전달함수의 전개로 외란 관측기의 성능을 분석하는 것은 용이하지 않다. 시스템의 불확실성은 매개변수 $\delta(s)$ 를 이용하여 각각의 전달함수에서 실제 플랜트를 소거하면 직관적이고 용이한 해석이 가능하다[3]. $\delta(s)$ 는 (3)과 같이 표현되며, 곱셈형 모델 불확실성 $\Delta_M(s)$ 과 밀접한 관계를 가지고 있다.

$$\begin{aligned} P(s) &= P_n(s)[1 + \Delta_M(s)] \\ \Delta_M(s) &= \frac{P(s) - P_n(s)}{P_n(s)} \\ \delta(s) &= \Delta_M(s) \cdot \frac{-P_n(s)}{P(s)} \\ &= \frac{P(s) - P_n(s)}{P_n(s)} \cdot \frac{-P_n(s)}{P(s)} \\ &= \frac{P_n(s) - P(s)}{P(s)} \end{aligned} \quad (3)$$

시스템의 전체적인 입출력 관계는 제어 명령 (r), 토크 외란 (d_{in}), 출력 외란 (d_{out}), 측정 잡음(n)에서 출력까지를 각각 $G_{Dob}(s)$, $S_{Dob_in}(s)$, $S_{Dob_out}(s)$, $T_{Dob_noise}(s)$ 로 구분하여 나타낼 수 있으며 $\delta(s)$ 를 이용한 전달함수의 특성 방정식은 (4)-(8)과 같다.

$$y = G_{Dob}(s)r + S_{Dob_in}(s)d_{in} + S_{Dob_out}(s)d_{out} + T_{Dob_noise}(s)n \quad (4)$$

$$\begin{aligned} G_{Dob}(s) &= \frac{C(s)P(s)}{[1 - Q(s)] + Q(s)P_n(s)^{-1}P(s) + C(s)P(s)} \\ &= \frac{C(s)P(s)P_n(s)}{[1 - Q(s)]P_n(s) + Q(s)P(s) + C(s)P(s)P_n(s)} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} S_{Dob_in}(s) &= \frac{[1 - Q(s)]P(s)}{[1 - Q(s)] + Q(s)P_n(s)^{-1}P(s) + C(s)P(s)} \\ &= \frac{[1 - Q(s)]P(s)P_n(s)}{[1 - Q(s)]P_n(s) + Q(s)P(s) + C(s)P(s)P_n(s)} \end{aligned} \quad (6)$$

$$S_{Dob_out}(s) = \frac{1-Q(s)}{[1-Q(s)]+Q(s)P_n(s)^{-1}P(s)+C(s)P(s)} \tag{7}$$

$$= \frac{[1-Q(s)]P_n(s)}{[1-Q(s)]P_n(s)+Q(s)P(s)+C(s)P(s)P_n(s)}$$

$$T_{Dob_noise}(s) = \frac{-Q(s)P(s)P_n(s)^{-1}-C(s)P(s)}{[1-Q(s)]+Q(s)P(s)P_n(s)^{-1}+C(s)P(s)} \tag{8}$$

$$= \frac{-[Q(s)+C(s)P_n(s)]P(s)}{[1-Q(s)]P_n(s)+Q(s)P(s)+C(s)P(s)P_n(s)}$$

(5)~(8)을 직관적이고 용이하게 해석하기 위해 매개변수 $\delta(s)$ 를 이용하여 각각의 입력에 의한 전달함수를 정리하면 다음과 같다.

$$G_{Dob}(s) = \frac{C(s)P_n(s)}{\delta(s)[1-Q(s)]+1+C(s)P_n(s)} \tag{9}$$

$$S_{Dob_in}(s) = \frac{[1-Q(s)]P_n(s)}{\delta(s)[1-Q(s)]+1+C(s)P_n(s)} \tag{10}$$

$$S_{Dob_out}(s) = \frac{[1-Q(s)][\delta(s)+1]}{\delta(s)[1-Q(s)]+1+C(s)P_n(s)} \tag{11}$$

$$T_{Dob_noise}(s) = \frac{[1-Q(s)]-1-C(s)P_n(s)}{\delta(s)[1-Q(s)]+1+C(s)P_n(s)} \tag{12}$$

위 식에서 외란이 저주파 영역에만 존재한다고 가정하면, 일반적으로 Q필터는 이득이 1인 저주파대역의 필터로 구현되므로 저주파 대역에서는 페루프 시스템이 공칭 모델 시스템과 같이 동작하게 됨을 확인할 수 있다.

3. 교차 결합(cross-coupling)의 해석

DOB 시스템에서 언급되는 교차 결합이란 두 개 이상의 DOB를 적용함에 있어서 발생하는 중복된 보상치를 의미한다. DOB는 시스템에서 외란을 관측하고 관측값에 상응하는 보상을 통해서 외란을 줄이는 방법으로 두 개 이상의 DOB를 사용할 경우에는 반드시 관측된 외란이 중복되지 않도록 설계를 하여야만 과도한 보상을 막을 수 있다. 그러나 지금까지 연구된 대부분의 논문에서는 이러한 교차 결합으로 인한 부작용을 고려하지 않은 상태에서 제어를 설계하였다. 이러한 부작용이 크게 대두 되어 보이지 않은 까닭은 두 가지 정도로 설명될 수 있다. 하나는 교차 결합으로 인한 중복된 보상치마저도 DOB에 의해서 제차 보상되어 그 부작용의 결과가 크게 부각되지 않는다는 것이고, 다른 하나는 DOB의 외란에 대한 보상률이 크지 않아 교차 결합으로 인하여 중복된 보상치가 시스템에 인가되더라도 DOB를 한 개 적용한 시스템보다 우수한 성능으로 보일 수 있기 때문이다. 또한 참고문헌[3]에서 이러한 교차 결합에 대하여 언급하고, 이러한 문제를 해결하고자 두 개의 DOB를 적용함에 있어서 서로 보상하는 외란의 주파수를 이원화 하였다. 그러나 여기에도 한계가 있다. 외란의 주파수를 이원화하는 것은 개념적으로 가능할지 모르나 실제적으로 두 개의 필터를 100% 이원화한다는 것은 불가능하기 때문이다. 두 개의 필터가 가까우면 교차 결합 발생하는 대역이 발생하고 멀면, 외란의 보

상이 제대로 이루어지지 않는 대역이 발생하기 때문이다.

이러한 문제를 최소화 하고자 dual DOB는 DOB를 적용한 하나의 페루프 시스템 자체를 공칭 모델로 설정하여 새로운 DOB를 추가로 적용하고자 한 것이다. 이 경우 내부의 DOB에서 보상되지 못한 외란 관측하고 그에 상응하는 추가적인 외란을 보상함으로써 이러한 교차 결합의 문제를 해결할 수 있다.

III. Dual DOB의 구조 분석 및 확장

1. Dual DOB의 구조

현재까지 외란에 대한 민감도의 향상된 성능을 위하여 다양한 형태의 외란 관측기가 제시되었다[3,9,12,14,15]. 외란 관측기의 성능은 시간 영역에서의 과도응답 성능과 주파수 영역에서의 민감도 개선 성능 사이에서 상호 절충이 요구된다. 이것은 다중 외란 관측기 구조에서 외란 관측기 상호간에 교차 결합이 발생하기 때문이다. 본 논문에서는 외란 관측기 상호간에 설계목표를 다르게 하여 교차 결합을 감소시킴으로써 주파수 영역에서의 민감도 개선 및 시간 영역에서의 과도응답 성능 향상을 동시에 달성할 수 있는 dual DOB 구조를 제안한다. dual DOB의 구조를 그림 2와 같이 내부의 외란 관측기를 통하여 성능이 개선된 시스템에 외부의 외란 관측기를 추가하여 구성한다. 이 시스템은 IMC와 유사한데 외부 루프의 설계 방식이 다르다. IMC는 외란제거 성능이 외부 루프를 다중화 함으로써 민감도가 개선됨을 보였다[14].

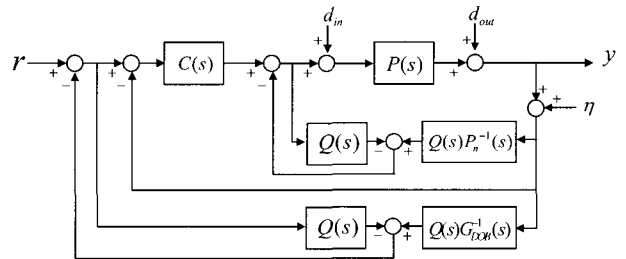


그림 2. Dual DOB를 적용한 시스템 구조.
Fig. 2. System structure of dual DOB.

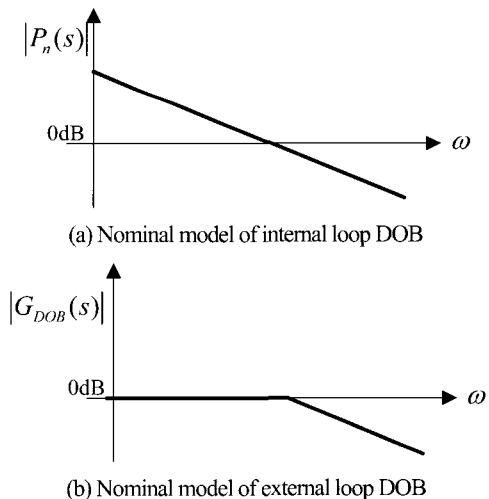


그림 3. Dual DOB에서 사용되는 공칭 모델의 보드선도.
Fig. 3. Bode of dual DOB nominal model.

반면에 여민감도의 피크치가 증가하여 측정 잡음에 민감하게 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 외부 루프의 설계에 사용되는 공칭시스템의 모델을 IMC구조와 다르게 설정하였다. 일반적인 외란 관측기는 계산 시간 지연으로 인하여 외란 제거 성능의 한계를 가지고 있다. dual DOB는 시스템 루프 내부에 그림 3(a)와 같이 플랜트를 공칭 모델로 설정하는 일반적인 외란 관측기를 사용한다. 이 외란 관측기를 통하여 시스템 내부로 유입되는 외란 및 시스템 불확실성으로 내부에서 발생하는 오차를 보상하기 위하여 외부에 그림 3(b)와 같이 페루프의 시스템을 공칭 모델로 설정하는 외란 관측기를 추가로 적용한 것이 dual DOB 구조이다. 외부 외란 관측기는 공칭 페루프를 기반으로 설계되기 때문에 내부 외란 관측기를 포함하여 내부적인 시스템 동작을 관측하고 내부에서 제거되지 못한 나머지 외란 성분을 관측하고 보상한다. 이러한 이중 구조의 외란 관측기를 적용함으로써 외란 제거 성능으로 표현되는 주파수 영역에서의 민감도의 개선을 얻을 수 있다. 또한, 상호 독립된 외란 관측기의 설계를 통하여 교차 결합을 최소화함으로써 민감도 개선 시 발생하는 과도 응답의 저하를 막을 수 있다.

2. Dual DOB를 적용한 시스템의 분석

Dual DOB는 내부 외란 관측기와 외부 외란 관측기로 구성이 된다. 내부 외란 관측기는 일반적인 외란 관측기와 동일하게 플랜트의 공칭모델을 사용하는 반면에 외부 외란 관측기는 외란 관측기를 적용한 폐회로의 전달함수인 (9)를 공칭 모델로 적용하여 설계하여야 한다. 그러나 (9)는 일반적으로 모델 불확실성이 존재하여 사용할 수 없으나 저주파 영역에서는 (13)와 같이 근사하여 페루프 공칭 모델 $G_{Dob}^*(s)$ 를 가정할 수 있다.

$$G_{Dob}^*(s) = \lim_{\delta(s) \rightarrow 0} G_{Dob}(s) = \frac{C(s)P_n(s)}{1 + C(s)P_n(s)} \quad (13)$$

앞에서 수행한 동일한 방법으로 이와 같이 dual DOB를 적용한 시스템에 대하여 제어 명령, 토크 외란, 출력 외란 그리고 측정 잡음에서부터 출력까지의 전달함수를 매개변수 $\delta(s)$ 를 이용하여 정리하면 (14)~(17)과 같다[3].

$$G_{Dual}(s) = \frac{1}{[1-Q(s)]G_{Dob}} \frac{1}{1 + \frac{1}{[1-Q(s)]G_{Dob}Q(s)} \frac{1}{G_{Dob}^*}} \quad (14)$$

$$= \frac{C(s)P_n(s)}{\delta(s)[1-Q(s)]^2 + 1 + C(s)P_n(s)}$$

$$S_{Dual_{in}}(s) = \frac{[1-Q(s)]P_n(s)}{\delta(s)[1-Q(s)] + 1 + C(s)[1-[1-Q(s)]^{-1}]Q(s)G_{Dob}^*(s)^{-1}P_n(s)}$$

$$= \frac{[1-Q(s)]^2 P_n(s)}{\delta(s)[1-Q(s)]^2 + 1 + C(s)P_n(s)} \quad (15)$$

$$S_{Dual_{out}}(s) = \frac{[1-Q(s)][\delta(s)+1]}{\delta(s)[1-Q(s)] + 1 + C(s)[1-[1-Q(s)]^{-1}]Q(s)G_{Dob}^*(s)^{-1}P_n(s)}$$

$$= \frac{[1-Q(s)]^2[\delta(s)+1]}{\delta(s)[1-Q(s)]^2 + 1 + C(s)P_n(s)} \quad (16)$$

$$T_{Dual_{noise}}(s) = \frac{-Q(s) - [1+Q(s)G_{Dob}^*(s)^{-1}\{1-Q(s)\}^{-1}]C(s)P_n(s)}{\delta(s)[1-Q(s)] + 1 + [1+Q(s)G_{Dob}^*(s)^{-1}\{1-Q(s)\}^{-1}]C(s)P_n(s)}$$

$$= \frac{[1-Q(s)]^2 - 1 - C(s)P_n(s)}{\delta(s)[1-Q(s)]^2 + 1 + C(s)P_n(s)} \quad (17)$$

각각의 모든 전달함수는 일반적인 외란 관측기와 비교해 볼 때 우선 제 2절의 외란 관측기의 분석과 마찬가지로 $Q(s) \geq 1$ 인 저주파수에서의 개선된 낮은 민감도와 $Q(s) \leq 0$ 인 고주파수에서의 악화되지 않은 여민감도를 확인할 수 있다. 우선 모든 전달함수 분모항의 $(1-Q)$ 가 $(1-Q)^2$ 로 바뀌었음을 확인할 수 있다. 이것은 불확실성비 δ 와 곱해져 있으며, 주파수 전역에서 Q 필터의 이득이 1보다 작거나 같음을 감안할 때 dual DOB를 적용한 시스템이 일반적인 외란 관측기를 적용한 시스템에 비하여 주파수 전역에서 발생하는 모델 불확실성에 대해 더욱 강인함을 확인할 수 있다. 그리고, 기준 입력에 있어서도 마치 공칭 모델과 같이 동작하게 됨을 확인할 수 있다. 또한 토크 및 출력 외란의 민감도에선 전달 함수 분자항의 $(1-Q)$ 가 $(1-Q)^2$ 로 바뀌었음을 확인할 수 있다. 이것은 저역 주파수의 외란에 대한 dual DOB의 제거 성능의 향상을 의미한다. 마지막으로 측정 잡음에 대한 전달함수 분자항의 $(1-Q)$ 또한 $(1-Q)^2$ 로 바뀌었음을 확인할 수 있다.

일반적인 제어기의 전달함수와 달리 DOB는 추가적인 항 $\delta(1-Q)$ 이 발생하고 이로 인하여 외란 제거성능의 향상이 있으나 과도응답 특성을 저하시킬 수 있다. 또한 다중구조의 DOB를 사용할 경우에는 과도응답 특성이 저하됨을 확인할 수 있다. 그러나 dual DOB에서 언급하는 동일한 과도응답 특성이라 함은 한 개의 DOB를 사용함으로써 인하여 저하되는 과도응답 특성 정도를 두 개의 DOB를 사용함에도 불구하고 그림 9에서 확인할 수 있듯이 한 개의 DOB에 비하여 과도응답의 특성의 저하 없이 유지시킬 수 있다는 것을 의미한다.

3. Dual DOB의 확장성

Dual DOB 구조는 IMC의 경우와 마찬가지로 외부의 외란 관측기를 병렬로 추가하여 무한 확장이 이론적으로 가능하다. 추가되는 외란 관측기는 추가되기 전의 안정된 시스템을 전제로 설계되며, 외란 관측간 교차 결합(cross-coupling)의 영향을 줄이면서, 외란의 보상 성능을 더욱 개선시킬 수 있다. 첫 번째로 추가되는 외부 외란 관측기는 dual DOB를 적용한 시스템을 기반으로 설계하여 적용하는 것이 이상적이다. 그러나 공칭 모델은 모델 불확실성을 고려하지 못하기 때문에 $\delta(s) \geq 0$ 으로 가정한다면, 결과적으로 확장되는 모든 외부 외란 관측기의 공칭 모델은 (13)과 같은 $G_{Dob}^*(s)$ 가 된다. 외부 외란 관측기를 추가한 dual DOB의 확장 구조는 그림 4와 같다. 그림 5는 dual DOB를 확장함에 따른 민감도 함수가 감소하는 효과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 그러나 본 논문에서는 보이지 않았지만 무한정 감소하는 것이 아니라 일정한 값으로 수렴함을 확인하였다.

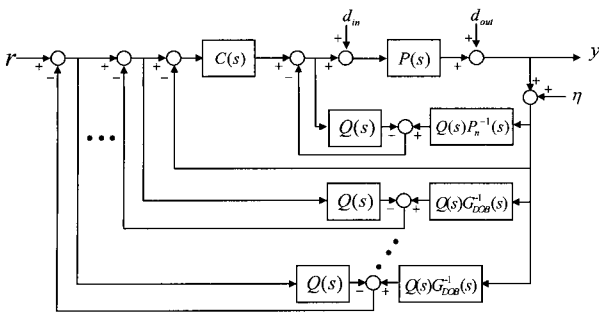


그림 4. 확장된 dual DOB를 적용한 시스템 구조.
Fig. 4. Extended dual DOB system.

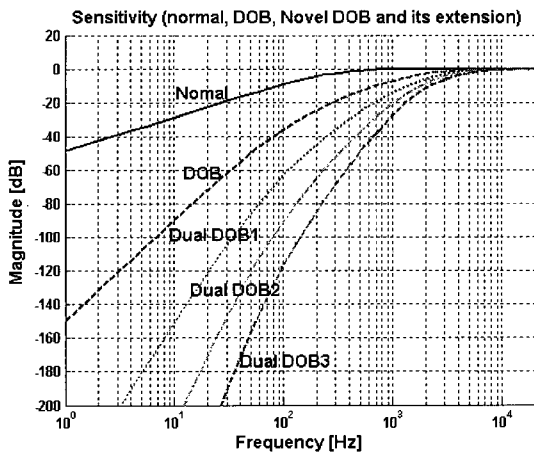


그림 5. 확장된 dual DOB의 민감도 함수.
Fig. 5. Sensitivity functions of extended dual DOB.

IV. 모의 실험 및 실험

1. 광 디스크 드라이브 시스템

Dual DOB의 성능 실험을 위해 현재 시판되고 있는 LG DVD combo 플레이어를 기반으로 하여 실험장치를 구성하였다. 대부분의 광 디스크 드라이브 픽업은 그림 6과 같이 거친 운동 구동기(coarse actuator)와 정밀 운동 구동기(fine actuator)로 구성되어 있다. 트래킹 제어 방향에 대해서는 스테핑 모터가 거친 운동 구동기로 사용되고 있고 VCM(Voice Coil Motor)는 정밀 운동 구동기로 사용되고 있다. 외란 관측기에 필요한 플랜트의 공칭 모델을 선정하기 위해 제어입력(VCM driver 입력)으로부터 위치오차를 생성하는 경로인 RF-AMP의 출력(TE:Tracking Error)까지를 시스템의 공칭모델로 선정하였다. 따라서 트랙 추종 시스템의 공칭 모델은 (18)과 같이 2차식으로 근사화될 수 있다.

$$P_n(s) = \frac{K}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (18)$$

여기에서 ω_n 는 공진 주파수, ξ 는 감쇠비, K 는 VCM driver 입력으로부터 RF-AMP의 출력까지의 DC gain을 의미한다. 매개변수 ω_n 은 326.72rad/sec, ξ 는 0.158, 그리고 K 는 4.003×10^7 이다. 선정된 시스템 공칭 모델을 실험적으로 검증하기 위해 HP35670A dynamic signal analyzer를 사용하여 페루프 시스템의 주파수 특성을 나타내는 보드 선도를 구할 수

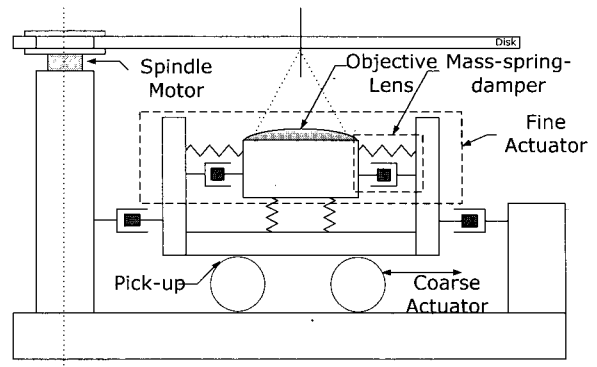


그림 6. ODD system의 구조.
Fig. 6. System structure of ODD system.

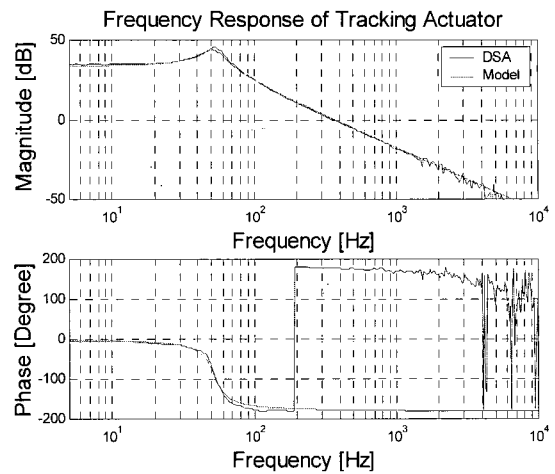


그림 7. 트래킹 액츄에이터의 주파수 응답.
Fig. 7. Frequency response of tracking actuator.

있다. 모의 실험 및 실험에서는 그림 7에 있는 플랜트를 공칭모델로 사용하였다.

2. 모의 실험

앞에서 언급한 바와 같이 외란 관측기의 성질을 이용하여 공칭 모델에 근거한 선형 제어를 설계하였다. 선형 제어기는 샘플링 시간 T_s 를 10 μ s로 하여 lead-lag제어기를 사용하여 (19)와 같이 설계 하였다.

Q 필터는 binomial 저주파 필터를 선택하여 분모가 2차인 Q_{20} 필터를 사용하였으며 τ 는 0.0031로 하였다.

$$C(s) = \frac{9.911s^2 + 8.918 \times 10^4 s + 2.006 \times 10^8}{s^2 + 9 \times 10^4 s + 3.677 \times 10^8} \quad (19)$$

$$Q_{20}(s) = \frac{1}{9.61 \times 10^{-6} s^2 + 6.2 \times 10^{-3} s + 1} \quad (20)$$

이렇게 구하여진 제어기와 $C(s)$, $Q(s)$ 를 bilinear 변환 방법을 이용하여 이산 시간 영역의 제어기로 변환하여 적용하였다.

광디스크 드라이브 시스템에서는 위치신호를 별도로 측정할 수 없고 위치오차만을 측정할 수 있으므로 기준 입력을 0으로 하여 제어기를 설계하였다. 그림 8은 lead-lag만을 사용

한 제어기, 그리고 lead-lag에 일반적인 외란 관측기를 추가한 제어기, 마지막으로 lead-lag에 일반적인 외란관측기와 dual DOB를 추가한 제어기 순서로 저주파에서 민감도 개선이 있음을 보여주고 있다. 여기서 lead-lag제어기와 DOB를 적용한 제어기의 민감도가 100~1000Hz사이에서 큰 차이가 없는 이유는 구성된 시스템의 측정노이즈가 트래킹오차에 비하여 매우 큰 반면에 제거 대상의 외란이 10Hz 정도로 낮아 Q필터의 대역폭을 다소 낮게 선택한 연유이다. sensitivity에서 dual DOB의 침투치가 일반적인 외란 관측기에 비해 증가하지 않음이 확인 되었는데 이는 시간영역에서 과도 응답을 개선하게 되는 필요 조건이 된다. 그림 9는 여민감도 함수를 나타낸 것으로 dual DOB가 일반 DOB에 비해 다중 루프임에도 불구하고 외부 노이즈에 덜 민감한 것을 알 수 있다.

그림 10에는 모의 실험 결과를 보였다. 그림 10(a)는 모의 실험에 사용된 출력 외란의 특성으로 CD규격을 고려하여 $\pm 60\mu\text{m}$ 의 편심 외란을 적용했다(CD규격에 의하면 1배속 기준 최대 편심 $\pm 70\mu\text{m}$). optic gain을 $0.32 \mu\text{m/V}$ 로 고려하면 CD규격을 만족하기 위하여 트래킹 오차는 $\pm 0.3\text{V}$ 이내로 제어가 되어야 한다. 그림 10(b)(c)(d)는 모의 실험결과를 나타낸 것으로 lead-lag선형제어기는 규격을 만족시키지 못하지만, 일반적인 외란 관측기, 제안된 dual DOB는 규격을 만족시킨다. 더불어, dual DOB의 성능이 일반적인 외란관측기보다 우수한 것을 알 수 있다.

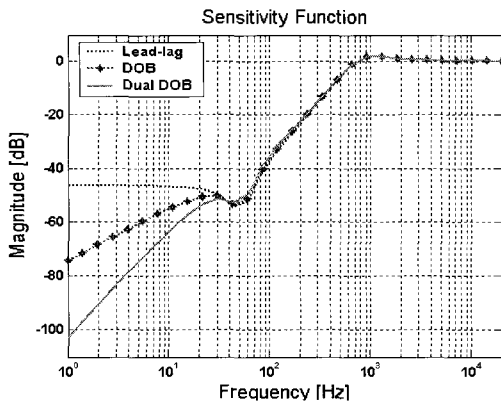


그림 8. 민감도 함수.
Fig. 8. Sensitivity function.

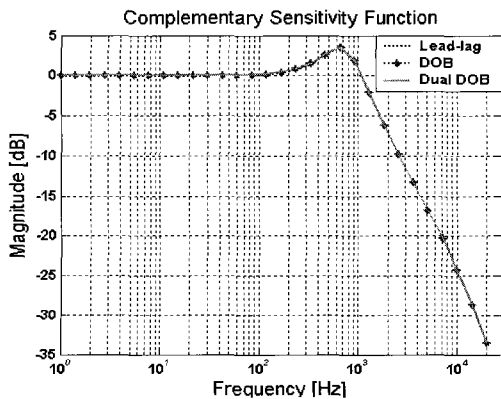


그림 9. 여민감도 함수.
Fig. 9. Complementary sensitivity function.

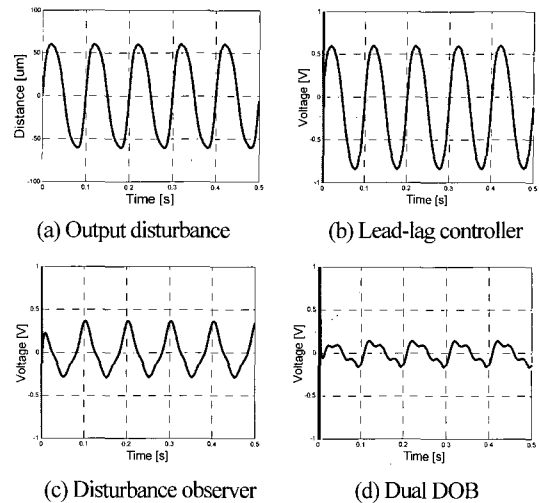


그림 10. 출력 외란과 위치 오차.
Fig. 10. Disturbance and tracking error.

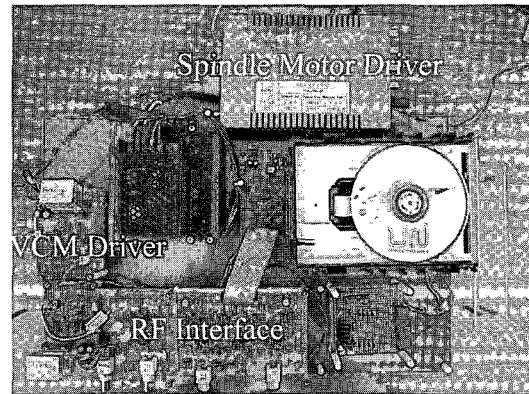


그림 11. 실험장치.
Fig. 11. Experimental setup.

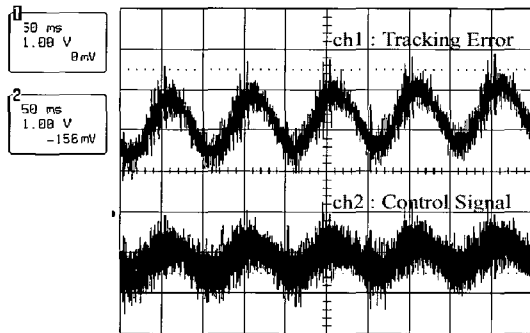
3. 실험 결과

실험은 actuator driver, RF-amp회로를 자체 제작하여 구성하였으며 그림 11에 구성된 시스템의 사진을 보였다. 제어기 구현에 사용된 DSP는 TI사의 TMS320VC33 DSP이며 16비트 ADC, DAC를 사용하여 100KHz로 샘플링을 하였다. 그림 13는 실험에 사용된 제어기들의 보드 선도로 고주파 영역에서 (c)의 일반적인 외란 관측기와 (d)의 dual DOB의 크기는 유사하나 위상이 다르게 나타남을 알 수 있다. 또한 그림 8에서와 같이 외란을 제거 하고자 하는 목표 주파수 대역에서 dual DOB는 -40dB/dec의 기울기를 가지는 민감도 특성으로 저주파 영역의 외란 제거 성능이 크게 개선될 수 있음을 확인할 수 있다. 그림 12은 실제 실험을 한 결과로 Ch1은 트랙 위치오차, Ch2는 제어신호로 (a)는 lead-lag제어기만을 적용한 결과이고, (b)는 lead-lag에 일반적인 외란 관측기, (c)는 (b)의 제어기에 dual DOB를 추가하여 적용한 결과이다. 그림 13(a)나 (b)보다 dual DOB를 적용한 (c)의 제어 신호 잡음이 적은 것이 확인할 수 있다. 이것은 그림 9에서 dual DOB의 여민감도가 일반적인 외란 관측기보다 고주파에서 침투치가 작아 측정 잡음에 영향을 덜 받기 때문이다. 이를 통해 통해 dual DOB를 적용한 시스템이 가장 작은 트래킹 오차를 발생하는

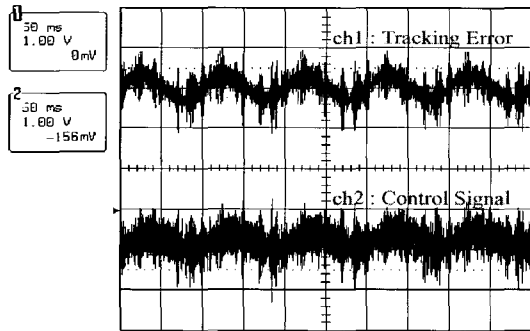
것을 확인하였으며, 이로써 외란에 대한 효과적인 제거 성능을 검증하였다.

V. 결론

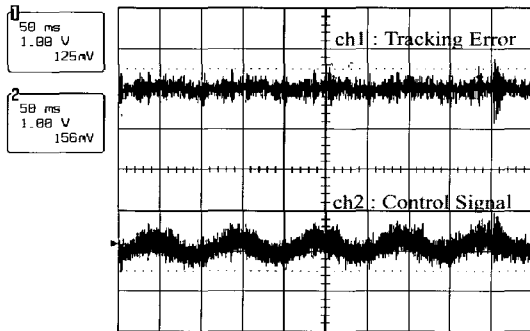
일반적으로 외란 관측기는 강인성과 명령 추종 성능 모두를 강화하는 매우 효과적인 방법이다. 그러나, 강인성과 명령 추종 성능 사이에 서로 다른 경향이 있어서 더 나은 성능 향상을 위해선 양자간에 절충을 하여야 한다. 본 논문에서는 이러한 민감도 개선과 과도 응답 성능 사이의 교환 관계가 성립하지 않고, 시간 영역에서의 과도 응답 성능을 보장하면서 주파수 영역에서의 민감도를 개선하는 dual DOB를 제안하였다. 또한, 강인한 트랙 추종 성능을 보장할 수 있도록 수정된 구조를 가지는 에러에 기초한 외란 관측기인 dual DOB를 기존 ODD 시스템에 적용을 하였다. dual DOB의 성능 확인을 위해 선형제어기와 일반적인 외란 관측기, dual DOB를 비교하여, dual DOB가 외란 관측기 상호간에 설계 기준을 다



(a) Lead-lag controller

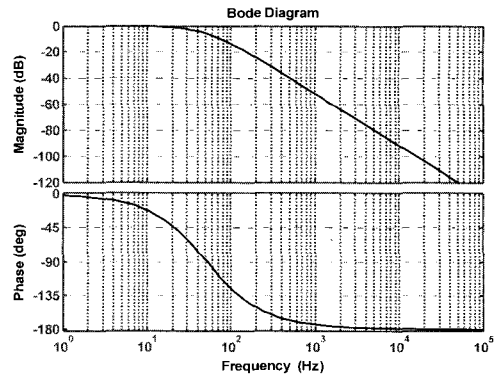


(b) Disturbance observer

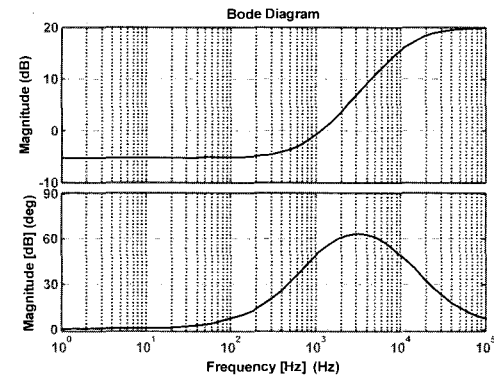


(c) Dual DOB

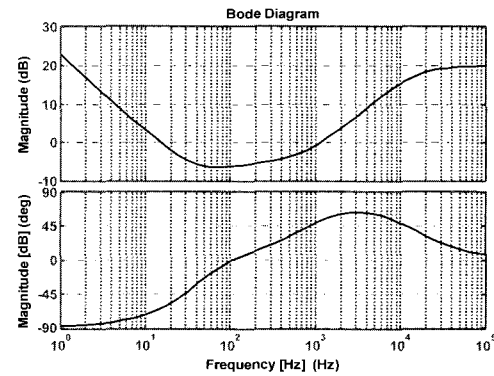
그림 12. 실험 결과.
Fig. 12. Experimental results.



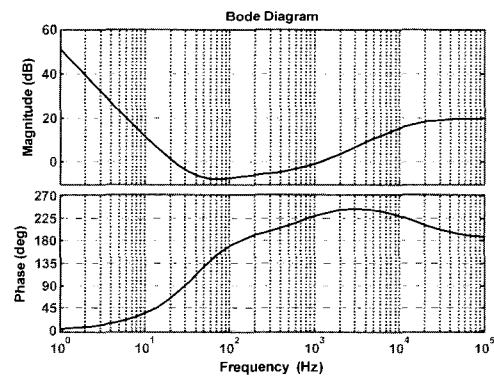
(a) Q filter transfer function



(b) Lead-lag controller



(c) Conventional disturbance observer



(d) Dual DOB

그림 13. 제어기들의 보드 선도.
Fig. 13. Bode diagrams of controllers.

르게 하여 교차결합을 줄임으로써 주파수 영역에서 민감도가 개선된 것을 시뮬레이션을 통해 확인하고, 실험적으로 검증 하였다.

참고문헌

[1] K. Ohnishi, "A new servo method in mechatronics," *Trans. Jpn. Soc. Elect. Eng.*, vol. 107-D, pp. 83-86, 1987.

[2] K. Ohishi, M. Nakao, K. Ohnishi and K. Miyachi, "Microprocessor controlled DC motor for load-insensitive position servo system," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 34, pp. 44-49, Feb. 1987.

[3] K. Ohishi, K. Ohnishi and K. Miyachi, "Adaptive DC servo drive control tracking force disturbance suppression into account," *IEEE Trans. on Ind. Applications*, vol. 24, no.1, pp. 171-176, Jan./Feb. 1988.

[4] S. M. Shahruz, "Performance enhancement of a class of nonlinear systems by disturbance observers," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 5, pp. 319-323, Sep. 2000.

[5] S. M. Shahruz, C. Cloet and M. Tomizuka, "Suppression of effects of nonlinearities in a class of nonlinear systems by disturbance observers," *Proceedings of American Control Conference*, vol. 3, pp. 2340-2345, 2002.

[6] Y. J. Choi, K. J. Yang, W. K. Chung, H. R. Kim, I. H. Suh, "Design of disturbance observer considering robustness and control performance(1): analysis on second order system," *Journal of Control. Automation and Systems Engineering*, vol. 8, no. 8, pp. 655-664, Aug. 2002.

[7] S. Komada, N. Machii, T. Hori, "Control of redundant manipulators considering order of disturbance observer," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 47, no. 2, pp. 413-419, Apr. 2000.

[8] B. K. Kim, W. K. Chung, "Advanced design of disturbance observer for high performance motion control systems," *Proceedings of the American Control Conference Anchorage, AK* pp. 2112-2117 May. 8-10, 2002.

[9] B. K. Kim, W. K. Chung, "Performance predictable design of robust motion controllers for high-precision servo systems," *Proceedings of the American Control Conference Arlington, VA* pp. 2249-2254 Jun. 25-26, 2001.

[10] J. Ueda, A. Imagi and H. Tamayama, "Track following control of large capacity flexible disk drive with disturbance observer using two position sensors," *Proc. Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 144-149, 1999.

[11] K. Fujiyama, M. Tomizuka, R. Katayama, "Digital tracking controller design for cd player using disturbance observer," *IEEE*, pp. 598-603, 1998.

[12] K. J. Yang, Y. J. Choi, W. K. Chung, I. H. Suh, S. R. Oh, "Robust tracking control of optical disk drive systems using error based disturbance observer and its performance measure," *Proceedings of American Control Conference*, vol. 2, pp. 1395-1400, 2000.

[13] S. J. Kwon, W. K. Chung, "Robust performance of the multiloop perturbation compensator," *Mechatronics, IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 7, pp. 190-200, Jun. 2002.

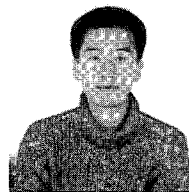
[14] H. T. Choi, I. H. Suh, "Disturbance observer based internal model controller design: applications to tracking control of optical disk drive," *T. KIEE*, vol. 48A, no. 2, pp. 159-166, Feb. 1999.

[15] H. S. Lee and M. Tomizuka, "Robust motion controller design for high-accuracy positioning systems," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 43, no. 1, pp. 48-55 Feb. 1996.



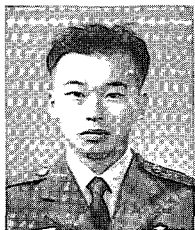
정종일

2004년 한양대학교 전자통신전파공학과 졸업. 2004년~LG전자 DS연구소 재직중. 관심분야는 Optical Disk, Motor Control.



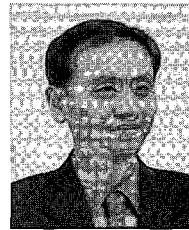
김무섭

2002년 한양대학교 전자공학과 졸업. 2002년~현재 한양대 동 대학원 석사과정. 관심분야는 Optical Disk, Motor Control, Nano position control.



오경환

2003년 한양대학교 전자통신전파공학과 졸업. 2003년~삼성전자 스토리지 사업부 재직중. 관심분야는 BLDC Motor/VCM Control, Motor Driver.



정정주

1958년 9월 5일생. 1981년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 전기공학 졸업(석사). 1993년 University of Southern California 졸업(공학박사). 1983년~1985년 LG 전자 중앙연구소 주임 연구원. 1985년~1987년 한국 IBM 국제 구매 사무서 구매 및 품질보증 엔지니어. 1993년~1994년 미국 콜로라도주립대 전기 및 컴퓨터 공학과 Research Associate. 1994년~1997년 삼성 종합기술원 정밀기계 연구실 수석 연구원. 1997년~현재 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수. 관심분야는 Nonlinear control theory, robotic system, vehicle dynamics control, biological control and data storage systems including hard disk drives, optical disk drives, holographic data storage system and SPM based storage system.