

## 고속 광디스크 드라이브를 위한 수정된 구조를 가진 외란 관측기

김 일 한\* , 김 흥 록\* , 최 영 진\*\* , 서 일 흥\* , 정 완 균\*\* , 박 명 관\*\*\*

\*한양대학교 전자전기제어계측공학(Tel:82-31-408-5802; Fax:82-31-408-5803; E-mail:lhsuh@incorl.hanyang.ac.kr)

\*\*포항공과대학교 기계공학과(Tel:82-54-279-2844; Fax:82-54-279-5899; E-mail:wkchung@postech.ac.kr)

\*\*\*동양대학교 시스템제어공학부(Tel:82-54-630-1109; Fax:82-54-637-4057; E-mail:mkpark@phenix.dyu.ac.kr)

### Error-Based Modified Disturbance Observer(EM-DOB) for Optical Disk Drive Systems

Il Han Kim\*, Hong Rok Kim\*, Young Jin Choi\*\*, Il Hong Suh\*, Wan Kyun Chung\*\*, Myoung Kwan Park\*\*\*

\*School of Electrical & Computer Science, Hanyang Univ., Korea

\*\*Dept. of Mechanical Engineering, POSTECH, Korea

\*\*\*School of System & Control, Dongyang Univ., Korea

**Abstract** - 고속 광디스크 드라이브(ODD) 시스템에서 위치제어 성능을 향상시키기 위해서는 디스크의 면진동과 수평진동과 같은 외란에 의한 오차를 감소시켜야만 한다. 따라서 하드디스크를 포함한 여러 분야에서 뛰어난 외란 제거 성능을 보이고 있는 외란 관측기는 좋은 대안이 될 수 있다. 그러나 ODD 같은 양산용 전자 제품에 외란 관측기를 구현하기 위해서는 별도의 계산 장치가 필요하고, 출력신호를 직접 Feedback신호로 활용해야 하는 경우가 발생한다. 본 논문에서는 ODD 시스템의 외란을 제거하기 위한 수정된 구조를 가지는 오차를 기초로 한 외란관측기(Error Based Modified Disturbance Observer, EM-DOB)를 제안한다. EM-DOB 시스템은 DOB 시스템에 비해 그 구조가 더욱 간편하고 쉽게 구현 할 수 있다는 장점을 가진다. 그리고 제안한 EM-DOB 시스템의 특성을 연구하고 실험을 통해서 EM-DOB의 효용성을 입증하였다.

### 1. 서 론

최근 디지털 고용량 데이터 저장 장치가 컴퓨터의 필수 장치로 인식되고, 컴퓨터의 사용 범위가 점점 넓어짐에 따라 이러한 장치는 더욱 널리 보급되고 있다. 특히 PC용 CD-R/RW, DVD-ROM 드라이브는 가격절감과 성능 향상을 가속시키면서 PC 탑재 비율이 높아져 이제는 기본사양이 되었다. 이와 같은 광디스크 드라이브는 단위 드라이브 당 저장용량의 증가와 사용범위가 다양해짐에 따라 고 정밀 제어 기술과 환경변화에서도 성능을 유지하는 강인성이 요구되어진다. 특히 고속 대용량 드라이브의 경우는 알려진 기계적인 공진, 스핀들의 이탈, 외부 충격 및 진동, 디스크의 좌우, 상하 진동 등의 문제가 더욱 심각해져, 디스크의 기록 밀도가 높아짐에 따라 요구되는 제어의 정밀도를 만족하는 것이 더욱 난제가 된다.

고속 광디스크 드라이브(ODD) 시스템에서 위치제어 성능을 향상시키기 위해서는 디스크의 면진동과 수평진동과 같은 외란에 의한 오차를 감소시켜야만 한다. 따라서 하드디스크를 포함한 여러 분야에서 뛰어난 외란 제거 성능을 보이고 있는 외란 관측기(DOB)는 좋은 대안이 될 수 있다[2],[5]. 그러나 ODD 같은 양산용 전자 제품에 외란 관측기를 구현하기 위해서는 별도의 계산 장치가 필요하고, 출력신호를 직접 Feedback신호로 활용해야 하는 경우가 발생한다.

본 논문에서는 ODD 시스템의 외란을 제거하기 위한 수정된 구조를 가지는 오차를 기초로 한 외란관측기(Error Based Modified Disturbance Observer)를 제안한다. EM-DOB시스템은 DOB 시스템에 비해 그 구조가 더욱 간편하고 다양한 설계 기법으로 쉽게 구현할 수 있는 장점을 가진다. 그리고 제안한 EM-DOB 시스템의 특성을 연구하고 Eccentricity 디스크를 이용한 160Hz 이상의 Sinusoidal 외란에 대한 실험을 통해서 EM-DOB의 효용성을 입증하였다.

### 2. Error-Based Modified DOB(EM-DOB)

#### 2.1. EM-DOB 의 배경

Masato Nakao에 의하여 처음 제안된 외란 관측기(DOB)[1]는 실제 시스템을 외란 관측기에 설계한 시스템의 공칭 모델처럼 동작하게 하는 특징으로 최근 강인 제어 및 외란 제거 제어의 여러 분야에 널리 적용되고 있다[3],[4],[6]. 공칭 모델처럼 동작하게 함으로써 모델링 오차와 매개 변수의 변화, 외란을 함께 제거 할 수 있다. 외란 관측기의 뛰어난 외란 제거 성능은 근본적으로 실제 시스템을 공칭 모델로 동작하도록 하는 성질에 기인한다. 그러므로 강인성과 정밀도가 요구되는 ODD 시스템에 좋은 대안이 된다. 하지만 DOB는 그림 1과 같이 출력신호를 Feedback으로 사용하기 때문에 출력을 알 수 없는 ODD 시스템에 적용할 수 있는 구조 변경이 요구된다.

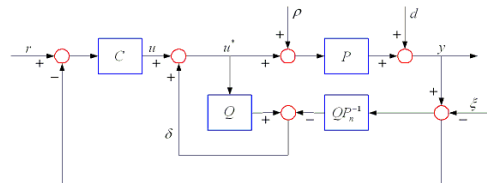


그림 1. 외란 관측기의 구조

#### 2.2. 오차에 기초한 외란 관측기

ODD 서보 시스템의 경우 대개의 서보 시스템과 달리 출력 y를 직접 관측할 수 없다. 즉, 레이저 스팟에 의해 트랙에서 벗어난 정도를 RF amp로써 생성해 내기 때문에 기준 입력과 출력을 대신하여 오차 e를 기준으로 서보 시스템이 동작된다. 따라서 외란 관측기의 또 다른 입력을 e로 대체할 경우 외란 관측기의 본래 특성이 그대로 유지되는 지를 검토하여야 한다. 그림2와 같이 외란 관측기는 재구성 될 수 있다.

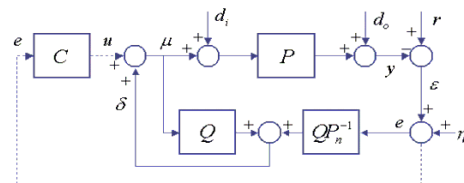


그림 2. 오차에 기초한 외란 관측기의 구조

여기서  $d_i$ ,  $d_o$ ,  $\eta$ , 각각 입력 외란, 출력 외란, 측정 잡음이고,  $\delta$  는 관측된 외란이다. 그리고  $P$ 는 실제 시스템이고,  $P_n$ 는 공칭모델이다.  $Q$ 는 저역통과 필터로  $Q$ 필터라 한다. 이러한 구조 하에서 시스템의 입출력 함수는 다음과 같이 나타난다.

$$\varepsilon = G_{r\varepsilon}r - G_{d_{0\varepsilon}}d_0 - G_{d_{1\varepsilon}}d_1 - G_{u\varepsilon}u - G_{\eta\varepsilon}\eta$$

$$G_{r\varepsilon} = \frac{P_n(1-Q)}{P_n(1-Q)+PQ}, \quad G_{d_{0\varepsilon}} = \frac{-P_n(1-Q)}{P_n(1-Q)+PQ}, \quad G_{d_{1\varepsilon}} = \frac{-PP_n(1-Q)}{P_n(1-Q)+PQ}$$

$$G_{u\varepsilon} = \frac{-PP_n}{P_n(1-Q)+PQ}, \quad G_{\eta\varepsilon} = \frac{-P_n(1-Q)}{P_n(1-Q)+PQ}$$

이 때, 이상적으로 Q필터가 1일 경우

$$G_{r\varepsilon} = 0, G_{d_{0\varepsilon}} = 0, G_{d_{1\varepsilon}} = 0, G_{u\varepsilon} = -P_n, G_{\eta\varepsilon} = -1$$

으로 표현되고, Q필터가 0일 경우

$$G_{r\varepsilon} = 1, G_{d_{0\varepsilon}} = -1, G_{d_{1\varepsilon}} = -P, G_{u\varepsilon} = -P, G_{\eta\varepsilon} = 0$$

으로 표현된다. 이로써 외란 관측기의 성질을 그대로 유지하고 있음을 알 수 있다. 아울러, ODD 시스템에서 제어기를 제외한 부분을 하나의 플랜트  $P(s)$ 로 간주하여 시스템의 공칭모델  $P_n$ 을 구해야 하고, 제어기를  $C(s)$ 로 취급하여 원래 ODD 시스템의 제어 구조를 큰 변화 없이 외란 관측기를 구현 할 수 있다.

### 2.3. 수정된 오차에 기초한 외란 관측기

외란 관측기에서  $QP_n^{-1}$ 블록은 플랜트의 출력으로부터 제어 입력과 외란으로 간주 될 수 있는 모델링 오차, 입력 외란, 출력외란 등을 찾아주는 역할을 한다. 그런데, ODD 서보 시스템의 경우 플랜트의 DC 이득이 60dB에 이르는 시스템인데, 시스템의 출력으로부터 환산된 위치오차의 경우 약 1V 내외의 전압 레벨을 유지하기 때문에  $QP_n^{-1}$  블록에 의해 반대로 -60dB의 전압 감쇠가 일어나므로 1mV 정도의 전압으로부터 제어 입력과 외란을 재생하여야 한다. 반면에 기존 제어 입력으로부터는 1V 레벨의 전압이 외란 관측기에 인가되므로  $QP_n^{-1}$  블록의 상대적 전압 값이 미미하다. 이는 ODD 서보 시스템 내부적으로 오차 생성 자체가 일부 구간을 제외하고는 비선형적인 특성을 가지기 때문으로 사료된다. 따라서 오차에 기초한 외란 관측기에서  $QP_n^{-1}$  블록을 제외한 외란 관측기(EM-DOB)를 구현한다.

#### 2.3.1. EM-DOB 의 이론적 배경

그림2에서 오차에 기초한 외란 관측기에서  $QP_n^{-1}$  블록을 제외할 경우 그림3과 같은 구조를 지닌다. 이는 모델 기반의 강인 제어 개념이 없어지고  $1/(1-Q)$ 의 좋은 이득을 가지는 제어기로 그 구조가 변경됨을 의미한다.

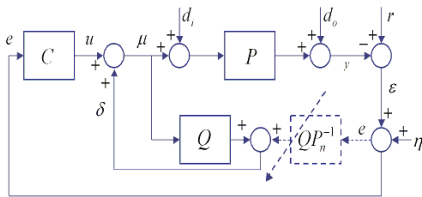


그림 3. EM-DOB의 구조

이러한 구조하에서 각 부분의 전달 함수를 구하면 다음과 같다.

$$G_{r\varepsilon} = \frac{1-Q}{1-Q+PC}, \quad G_{d_{0\varepsilon}} = \frac{-(1-Q)}{1-Q+PC}$$

$$G_{d_{1\varepsilon}} = \frac{-P(1-Q)}{1-Q+PC}, \quad G_{\eta\varepsilon} = \frac{-PC}{1-Q+PC}$$

이 때, 이상적으로 Q필터가 1일 경우

$$G_{r\varepsilon} = 0, G_{d_{0\varepsilon}} = 0, G_{d_{1\varepsilon}} = 0, G_{u\varepsilon} = 0, G_{\eta\varepsilon} = -1$$

으로 표현되고, Q필터가 0일 경우

$$G_{r\varepsilon} = \frac{1}{(1+PC)}, \quad G_{d_{0\varepsilon}} = -\frac{1}{(1+PC)}, \quad G_{d_{1\varepsilon}} = -\frac{P}{(1+PC)}, \quad G_{\eta\varepsilon} = -\frac{PC}{(1+PC)}$$

으로 표현된다. 이는 외란 관측기의 기존 성질이 없어지고, 특정 대역(Q필터의 절점 주파수 이내)에서 높은 이득을 가지는 제어기로 변화하였음을 나타낸다.

### 2.4. 모의실험

모의실험은 Matlab에서 DVD-ROM 트랙킹 서보 시스템에 대해 기존 제어기와 EM-DOB를 설계하였고, Matlab의 simulink를 이용하여 구성하고 수행하였다. 그리고 본 모의실험의 목적은 ODD 서보 시스템에 EM-DOB를 적용할 경우 기존 ODD 시스템의 제어기와 성능 비교를 하는데 있다. 성능비교를 위해 200Hz와 50Hz의 복합된 입력, 출력 외란을 인가하여 모의 실험한 결과 기존의 ODD시스템의 제어기에 비해 우수한 성질을 나타냄을 그림4와 같이 알 수 있었다. 그림5와 같이 Q 필터의 절점 주파수를 변경하며 모의실험을 한 결과, 편심 주파수의 5배 정도가 적정함을 확인할 수 있었다. 그리고, 너무 높은 절점 주파수를 가질 경우 외란 억제 성능은 뛰어나지만 노이즈에 민감하고, 시스템을 불안하게 만드는 단점이 나타남을 알 수 있었다.

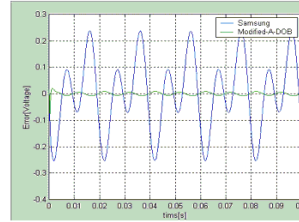


그림 4. EM-DOB외란 제거 모의실험 결과

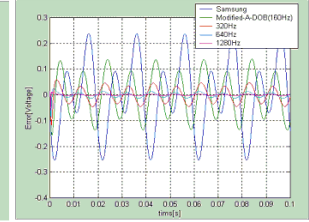


그림 5. Q필터의 절점 주파수 모의실험 결과

### 2.5. 실험 및 결과

그림6은 DVD-ROM에 대한 수동소자인 R(저항),C(커패시터)와 OP-AMP를 사용하여 별도의 계산 장치가 필요 없는 아날로그 방식의 EM-DOB를 나타내고 있다.

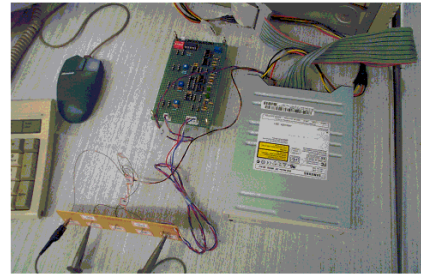


그림 6. 실험 장치

#### 2.5.1. 실험 장치 구현

아날로그 EM-DOB는 아주 간소화된 회로로 구성된 다. Q필터를 구성하는 OP-AMP 2개와 가산기를 구성하는데 필요한 1-2개 정도의 OP-AMP로 전체 회로를 나타낼 수 있다. 여기에 추가적으로 제어 입력 단에서 25Hz 미만의 저주파 DC 성분이 통과할 수 있도록 고주파 통과 필터를 추가로 구현하였다. 이는 위치오차에 연동되어 Coarse 구동기가 움직일 수 있도록 된 부분을 반영하기 위함이다.

#### 2.5.2. EM-DOB의 성능

이상과 같이 제작된 아날로그 EM-DOB의 성능을 평가 위해 여러 가지의 CD, DVD 편심디스크를 사용하였다. 먼저 편심크기가 210 μm인 오디오 CD에 대해 실험을 한 결과 기존 ODD시스템의 제어기에 비해 현저한 위치오차의 감소를 나타내었다. 그림7은 기존 제어기를 그대로 사용한 경우이고, 그림8은 아날로그 EM-DOB를 적용한 경우인데, 이때, CH1 트랙킹 오차, CH2 기존 제어기의 제어 입력, CH3 새로운 제어기의 제어 입력 나타낸다. 즉, 아날로그 EM-DOB에서는 편심 성분에 대해 추가적으로 제어 입력을 생성하여

기존 입력에 가산해주므로 편심 성분을 억제하는 성질을 확인할 수 있었다.

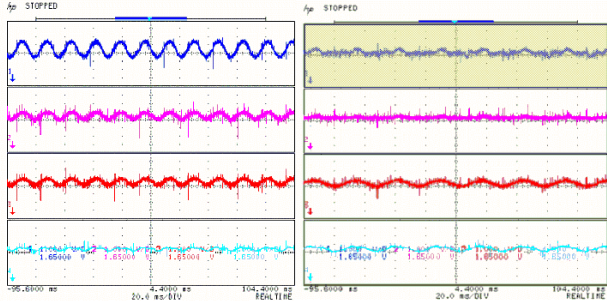


그림 7. 기존제어기의 오디오

CD 210  $\mu\text{m}$  편심 대응력

그림9, 10은 CD48배속으로 70  $\mu\text{m}$  편심의 데이터 CD를 사용했을 경우 기존 제어기에서는 트랙킹 서보가 걸리지 않았지만 수정된 아날로그 외란 관측기에서는 안정적으로 트랙킹이 동작함을 알 수 있었다. 그림11, 12와 그림13, 14는 각각 DVD 16배속의 경우에 50  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$  편심 DVD 디스크에 대한 기존 제어기와의 트랙킹 오차를 나타낸다.

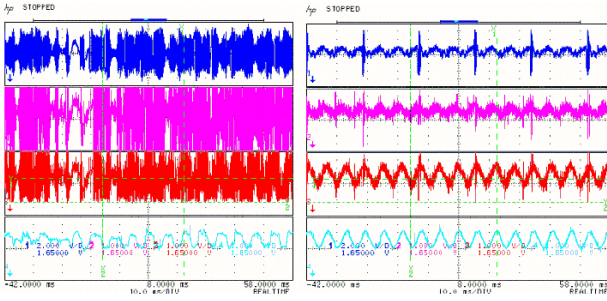


그림 8. EM-DOB에서의 CD

210  $\mu\text{m}$  편심 대응력

그림 9. CD48배속기존 제어기에서의 70  $\mu\text{m}$  편심대응력

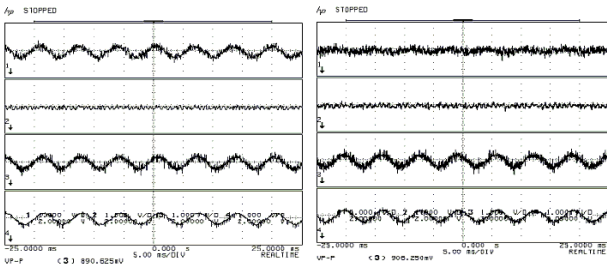


그림 11. DVD16배속 기존 제어기에서의 50  $\mu\text{m}$  편심대응력

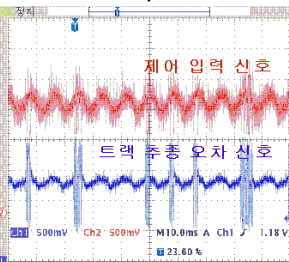


그림 13. DVD16배속 기존 제어기에서의 150  $\mu\text{m}$  편심대응력

그림 10. CD48배속 EM-DOB에서의 70  $\mu\text{m}$  편심대응력

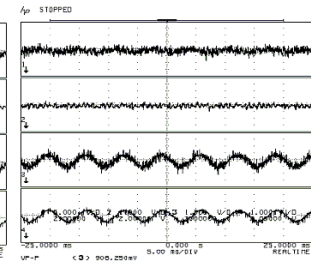


그림 12. DVD16배속 EM-DOB에서의 50  $\mu\text{m}$  편심대응력

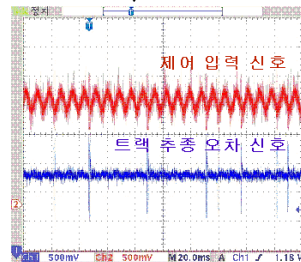


그림 14. DVD16배속 EM-DOB에서의 50  $\mu\text{m}$  편심대응력

### 2.5.3. Q필터의 차수와 배속에따른 서보오차 비교

EM-DOB의 효용성을 입증하기 위해 트랙추종 오차 신호를 비교하였다. 이러한 트랙 추종 성능이 뛰어난 EM-DOB가 ODD시스템의 서보 성능 향상에 얼마나 영향을 미치는지 알아보기 위해 150  $\mu\text{m}$  DVD편심 디

스크를 이용하여 Q필터의 차수와 각 배속에 따른 서보 오차를 측정 비교하였다. 비교 대상으로써 EM-DOB의 필터 차수와 대역폭을 조절할 경우의 서보 오차 3가지 경우와 기존의 서보에서의 오차 1가지에 대해 실험을 반복하였고 특정 데이터의 P-P값을 육안으로 측정하여 이를 비교지수로 삼았다.

표 1 배속에 따른 트랙 서보 오차의 비교

Q filter	2-0	2-0	3-1	3-1		
Cutoff Freq	800	800	800	400		
Test Disk	Ecc150u	Ecc150u	Ecc150u	Ecc150u		
EM-DOB	OFF	ON	ON	ON	Average	Reduction
Average	347	233	236	231	233	33(%)
Min	214	179	207	184	190	11
Max	414	312	312	281	302	27
Freq 20Hz	407	321	321	281	302	26 DVD-1x
39Hz	363	244	235	260	246	32 DVD-2x
58Hz	356	235	223	212	223	37 DVD-4x
77Hz	214	179	214	193	195	9 DVD-8x
115Hz	330	237	226	256	240	27 DVD-12x
158Hz	414	166	207	184	193	53 DVD-16x

표 1에서는 배속에 따른 트랙서보 오차를 정량적으로 비교한 측정 데이터이다. 측정데이터는 오차신호의 P-P 전압 값을 측정하여 mV단위로 표시하였다. EM-DOB를 사용할 경우 배속과 필터의 차수에 따라 차이가 있지만 평균 33%의 위치 오차감소가 있고, 특히 16배속의 경우 53%의 오차 감소를 확인할 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 강인한 트랙 추종 성능을 보장할 수 있도록 수정된 구조를 가지는 에러에 기초한 외란 관측기 EM-DOB를 기존 ODD시스템에 추가하는 구조를 제안하였다. EM-DOB의 성능 확인을 위해 다양한 편심 디스크를 적용하여 뛰어난 외란 제거 성능을 확인하고, 그 효용성을 입증할 수 있었다. 이는 이미 정형화되어 있는 기존의 외란 관측기에 비해 간략하게 성능 개선 효과를 볼 수 있기에 추가적으로 체계적인 이론 연구와 함께 다양한 실험이 필요함을 알 수 있었다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Masato Nakao, Kouhei Ohnishi, and Kunio Miyachi, "A robust decentralized joint control based on reference estimation," in Proc. 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.326-331, 1987.
- [2] Ho Seong Lee and Masayoshi Tomizuka, "Robust motion controller design for high-accuracy positioning systems," IEEE Trans.on Industrial Electronics, vol.43, no.1, pp. 48-55, February 1996.
- [3] Carl J. Kempf and Seiichi Kobayashi, "Disturbance observer and feedforward design for a high-speed direct-drive positioning table," IEEE Trans. on Control System Technology, vol.7, no.5, pp. 513-526, Sept.1999.
- [4] Hyun-Taek Choi, Bong Keun Kim, Il Hong Suh, and Wan Kyun Chung, "Design of robust high-speed motion controller with actuator saturation," accepted to ASME J.of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2000.
- [5] Kohji Yamada, Satoshi Komada, Muneaki Ishida, and Takamasa Hori, "Analysis and classical control design of servo system using high order disturbance observer," in Proc.1998 IEEE Int. Conf. On Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, pp.4-9, 1998.
- [6] Bong Keun Kim, Wan Kyun Chung, Hyun Teak Choi, Il Hong Suh, and Yong Hoon Chang, "Robust optimal internal loop compensator design for motion control of precision linear motor," in Proc. 1999 IEEE Int. Symposium on Industrial Electronics, pp.1045-1050, 1999.