

# 고배속 광디스크 적용을 위한 외란 관측기 설계 Disturbance Observer Design for a High Speed Optical Disk Drive

이주상\*·최진영\*\*·박노철\*\*\*·양현석\*\*\*·박영필\*\*\*  
Joo-Sang Lee, Jin-Young Choi, No-Cheol Park, Hyun-Seok Yang and Young-Pil Park

**Key Words** : Disturbance Observer(DOB:외란관측기), Q filter(Q 필터), Lead-Lag compensator(앞섬-뒤짐 보상기), Gain Cutoff Frequency(이득 차단 주파수), Position Error Signal(PES:위치 에러 신호).

## ABSTRACT

Recently, the disturbance caused by an optical disk vibration and the external vibration/shock are more seriously problem in an optical disk drives (ODD) as an ODD become small size and rotation speed increases. The conventional controller cannot cope with the mentioned problems properly when the disturbance and vibration are larger than some range. Therefore, we propose a new control scheme using a disturbance observer (DOB) and it can control the aforementioned problems. The designed the controller is applied to a commercial ODD in focusing direction, then its validity is proved by experimental method. By using the disturbance observer theory, the focusing performance is conspicuously improved in the presence of sinusoidal vibrations or a shock disturbance. This algorithm also applies to a tracking structure also, because focusing structure is very similar to it.

## 1. 서 론

정보저장기기로서 광 디스크 드라이브는 가격 대비 저장 용량이 높고, 호환성 및 배포성의 우수한 특징으로 인하여 오디오용 및 데이터 저장장치로서 널리 사용되어 왔다. 그러나 호환성을 고려한 미디어의 교체 특징 및 이동형 저장장치로서의 사용 환경의 특징으로 인하여 광 디스크 드라이브는, 일반적인 제어 시스템과는 달리 외부에서 발생하는 외란에 대한 불확실성이 크다는 특징이 있다. 특히, 소형의 이동형 광 디스크 드라이브는 언급된 사항에 대하여 보다 큰 영향을 받으며, 크게 다음과 같은 두 가지 해결 방법을 이용하고 있다. 첫째 버퍼 메모리를 사용하는 방법으로, 충격에 인한 데이터의 끊어짐 없이 재생하기 위함이지만 단지 짧은 시간에만 유효하다는 단점이 있다. 둘째 방법으로 충격 절연체를 이용하여 장치의 움직임으로 일어난 충격과 진동을 흡수하기 기술로서, 효과적이기는 하지만 작은 이동 장치에는 공간상의 제약으로 강한 절연체를 설치할 수 없다는 취

약점이 있다.

또한 광 디스크 드라이브는 일반적인 제어시스템과는 달리 외란 성분이 불확실하다는 특징 이외에, 얻을 수 있는 신호가 위치 에러 신호(PES)에 한정된다는 점에서 1 자유도 제어계로 구축 받게 된다. 1 자유도 제어계의 설계 방법으로 여러 가지 강건 제어기 설계 방법이 제안되고 있지만, 그 중에서 외란 관측기(DOB)를 이용하는 방법은 제어기의 구조의 이해가 쉽고 설계 과정이 명확하며 또한 구현이 쉽다는 특징이 있다. 이 외에도 충격 등에 대한 외란 저감 성능이 우수하고, 실제 계와 모델간의 차이를 외란으로 등가화 하여 제어하는 방법이므로 복잡한 수학적인 배경 없이 쉽게 적용할 수 있는 장점을 가진다.

따라서 본 논문에서는 고배속용 광 디스크 드라이브의 강건 제어기 설계로 외란 관측기(DOB)를 이용한 포커싱(Focusing) 제어계를 다루고자 한다. 이 방법의 효용성을 증명하기 위해 모의실험과 실제 광 디스크 드라이브에 제어기 구현을 이용하여 타당성을 검증하였다. 대상 플랜트는 고배속 CD-ROM 드라이브로, 본 논문은 까다로운 요구조건을 만족해야 하는 고 배속 CD-ROM 에서 기존 제어기보다 강건한 외란 관측기(DOB)를 장착한 제어기의 설계를 구현하였다.

\* 연세대학교 대학원 기계공학과, 석사과정  
E-mail : goodguy@yonsei.ac.kr  
Tel : (02) 2123-4677, Fax : (02) 365-8460  
\*\* 연세대학교 대학원 정보저장기협동과정 박사과정  
\*\*\* 연세대학교 기계공학부 교수

## 2. 광 디스크 드라이브의 포커싱 (Focusing) 제어

### 2.1 CD-ROM의 포커싱(Focusing) 제어

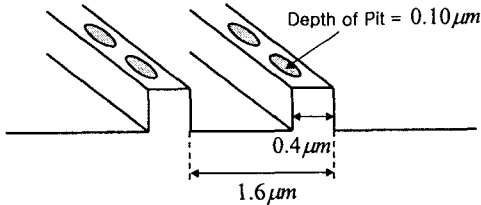


Fig.2.1 CD 표면의 구조

포커싱(Focusing) 제어의 목적은 렌즈와 디스크와의 신호면의 거리를 일정하게 유지해서 디스크의 기록 층에 광 초점이 정확히 맺히도록 수직 방향의 움직임을 제어하는 것이다. 대상 플렌트인 CD-ROM 드라이브의 경우, 1 배속 기준의 디스크의 면진의 범위는  $\pm 500\mu\text{m}$ 로 규정하고 있으며 이를 포커스 제어계를 통하여 허용 에러 성분 이하로 줄여야 한다. 외란과 디스크 자체의 면진을 고려하여 정확한 신호를 얻기 위해서 포커싱(Focusing) 제어의 정확성을  $\pm 1\mu\text{m}$  이내로 하고 있다.

### 2.2 액츄에이터(Actuator)의 수학적 모델링

CD-ROM의 픽업(Pick-up)부 액츄에이터(Actuator)는 다음과 같이 두 가지 모델로 분류할 수 있다. 즉, 기계 시스템과 전자기 시스템으로 분류할 수 있다. 기계시스템은 다음과 같은 그림으로 표현된다.

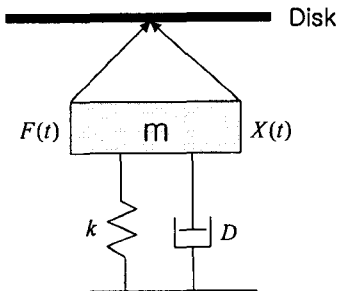


Fig.2.2 액츄에이터의 구조

이 모델에서 탄성계를 스프링 상수  $k$ 와 점성 마찰 계수  $D$ 로 표시하고 가동부의 질량은  $m$ 으로 하며 가동부의 변위는  $X(t)$ 로 모델링을 한 결과는 다음과 같다.

$$F(t) = m\ddot{X}(t) + D\dot{X}(t) + kX(t) \quad (2.1)$$

$$X(s) = \frac{1}{ms^2 + Ds + k} F(s) \quad (2.2)$$

여기서  $F(s)$ 는 전자기력에 의한 힘이며 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$F(s) = BIN \cdot I(s) \quad (2.3)$$

여기서  $B$ 는 자속 밀도,  $l$ 은 코일의 유효 길이,  $N$ 은 코일 권선수이다.

$$I(s) = \frac{1}{R + sL} V(s) \quad (2.4)$$

여기서  $R$ 은 포커스(Focus) 코일의 저항,  $L$ 은 포커스(Focus) 코일의 인덕턴스이고  $B$ 는 공극의 자속 밀도(tesla)이다.

위의 식들을 종합하면 다음과 같은 전압유도 포커싱 액츄에이터의 전달함수가 주어진다.

$$G(s) = \frac{X(s)}{V(s)} = \frac{BIN}{ms^2 + Ds + k} \cdot \frac{1}{R + sL} \quad (2.5)$$

## 3. 외란 관측기(DOB)

### 3.1 외란 관측기(DOB)의 개념

외란 관측기(DOB)의 특징으로는 공칭 모델과 실제 모델의 차이를 외란으로 등가하여 이를 줄이는 방법으로 제어를 행하므로, 효과적인 강건 제어 방법이면서도 수학적인 유도 과정이 복잡하지 않다는데 있다. 아래의 그림은 외란 관측기(DOB)의 전체적인 블록을 보여주고 있다.

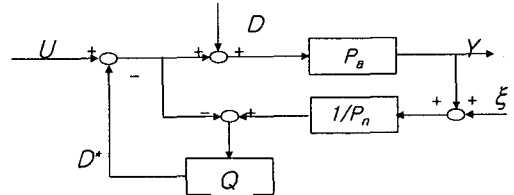


Fig.3.1 DOB의 원리

Fig.3.1로 부터 다음과 같은 전달함수의 식을 얻을 수 있다.

$$Y(s) = G_{UY}U(s) + G_{DY}D(s) + G_{\xi Y}\xi(s) \quad (3.1)$$

여기서

$$G_{UY} = \frac{P_a P_n}{Q(P_a - P_n) + P_n}, \quad G_{DY} = \frac{P_a P_n (1 - Q)}{Q(P_a - P_n) + P_n}$$

$$G_{\xi Y} = \frac{P_a Q}{Q(P_a - P_n) + P_n} \quad (3.2)$$

이 식에서 의미하는 변수들이 의미하는 것은 각각

$P_a(s)$  는 실제 플랜트의 전달함수,  $P_n(s)$  는 명목 플랜트의 전달 함수,  $Q(s)$  는 버터워스(Butterworth) 타입의 저주파 통과 필터,  $\xi(s)$  는 노이즈(Noise),  $D(s)$  는 외란,  $D^*(s)$  는 측정된 외란을 의미한다

$Q(s)=1$  인 주파수 대역에서는  $G_{DY}$  의 전달함수는 근사적으로 0 이 된다. 즉, 이것은 외란이 완전히 제거된다는 것을 의미한다. 그리고  $G_{UY}$  는  $P_n$  이 되고 입력에 대한 출력 특성이 명목 플랜트와 같은 성격을 띄고 있다. 또한  $G_{EY}$  는 1 이 된다. 이는  $G_{UY}$ ,  $G_{DY}$  를 위해서 이득 차단 주파수를 증가시키는 것이 좋지만 노이즈(Noise)가 고주파수 영역에서 발생하므로  $G_{EY}$  측면에서는 이득 차단 주파수를 너무 늘리는 것은 좋지 않다. Fig.3.1 에서  $1/P_n$  의 형태는 분모보다 분자의 차수가 더 높으므로, 실제 시스템으로 구현할 수 없다. 이를 위하여  $Q(s)/P_n(s)$  형태의 단일 블록으로 만들며, 이 때  $Q(s)$  를  $P_n(s)$  의 차수에 맞춰서 선정하게 된다.  $Q(s)$  는 저주파 통과필터로 DOB 의 성질을 결정하는 중대한 요소이고 아래의 Fig.3.2 는 차수에 따른 버터워스(Butterworth) 타입의 저주파 통과 필터의 보테 선도(Bode plot)를 그린 것이다  $Q(s)/P_n(s)$  를 구현 가능하게 위하여  $Q(s)$  를 다음과 같이 정의한다.

$$Q_{31}(s) = \frac{3(\omega) + 1}{(\omega)^3 + 3(\omega)^2 + 3(\omega) + 1} \quad (3.3)$$

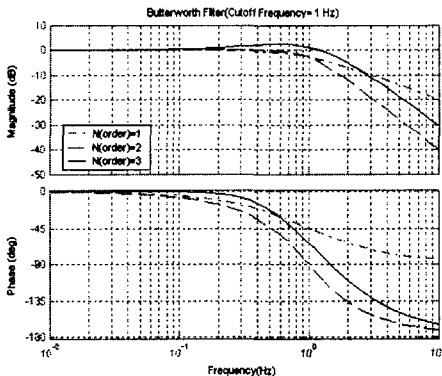


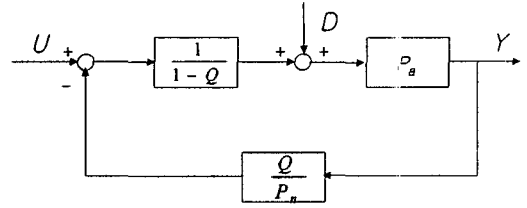
Fig.3.2 버터워스(Butterworth) 타입의 저주파 통과 필터

(3.1) 식과 (3.2) 식에 따르면  $Q(s)$  는 명령 추종이나 외란 제거 측면에서 저주파수에서는 1 에 근접해야 하며, 센서 노이즈의 둔감성(Insensitivity) 측면에서는 고주파수 대역에서는 0 에 근접한 특

성을 가져야 한다.

### 3.2 실제 시스템을 위한 외란 관측기의 장착

Fig.3.1 의 실제적 구현을 위해 아래 Fig.3.3 과 같이 변형하였다.



<Fig.3.3 변형된 외란 관측기>

Fig.3.3 은 실제 시스템의 플랜트에서 나오는 출력 Y 값을 이용할 수 없고 제어를 하기 위한 유일한 신호는 결국 위치 에러 신호(PES)이기 때문에 결국, 외란 관측기의 구조를 실제 시스템에 장착하기 위한 블록 선도를 다음과 같이 변형한다

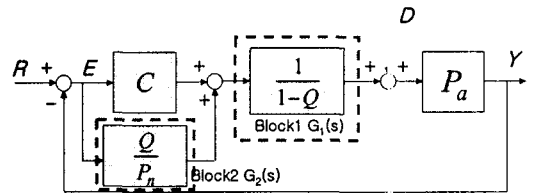


Fig.3.4 외란 관측기를 실제 포커싱 제어기에 장착을 하기 위한 블록 선도

위의 Fig.3.4 는 R 에서 기준 입력인 편향/편심이 들어가고 E 에서 기준 입력과 출력 Y 값의 차이로 위치 에러 신호 (PES)을 생성한다. 이 위치 에러 신호 (PES) 신호를 가지고 제어기 C에서 제어를 하게 된다. 여기서의 제어기 C 는 앞섬-뒤짐 보상기이다.

Fig.3.4 의 블록 선도는 단순히 기존 제어기에 부착만 하면 된다는 점, 부가적인 하드웨어가 필요로 하지 않는 점이 커다란 장점이라는 것을 알 수 있다. 이전 논문의 실험 결과에서도 알 수 있듯이 Fig.3.1 의 Fig.3.4 와 같은 수정을 통해 명목 플랜트와 같은 특성을 보이던 명령 추종 성능은 떨어지고 외란 제거 성능은 유지된다.

### 3.3 외란 관측기 설계

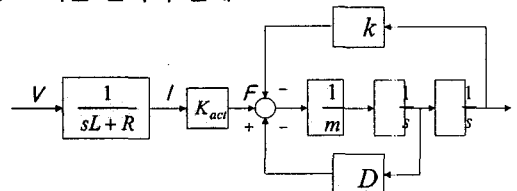


Fig.3.5 포커싱 제어를 위한 플랜트 모델

위의 Fig.3.5 는 전압 구동형 포커싱 액츄에이터인 플랜트를 모델링 한 것이다. Fig.3.5 는 포커싱 제어를 위한 플랜트 모델을 나타낸 것이지만 트래킹(Tracking) 제어도 같은 구조를 나타내므로 모델링은 같다. 그러므로 사양(Spec)의 변경으로 인하여 외란 관측기를 트래킹(Tracking) 제어에도 적용할 수 있다.

플랜트의 수학적 모델링은 다음과 같다.

$$P_a(s) = \frac{Y(s)}{V(s)} = \frac{K_{act}}{ms^2 + Ds + k} \cdot \frac{1}{sL + R} \quad (3.4)$$

여기서의 변수들은  $m$  은 이동부의 질량,  $D$  는 댐핑(damping) 계수,  $k$  는 스프링 상수,  $K_{act}$  는 액츄에이터의 이득,  $L$  은 인덕턴스,  $R$  은 저항,  $Y(s)$  는 액츄에이터로 부터의 출력 그리고  $V(s)$  는 액츄에이터 안으로 들어가는 입력 전압을 나타낸다.

Fig.3.4 의 Block 2 안의 명목 플랜트  $P_n$  은 다음과 같이 선정하였다.

$$P_n(s) = \frac{K_{act}}{ms^2 + Ds + k} \cdot \frac{1}{R} \quad (3.5)$$

우리가 관심 있는 부분은 저주파수 부분이므로 명목 플랜트  $P_n$  을 저주파수 부분의 고유 주파수 부분만을 고려하여 설계하므로 분모 3 차의 전달함수로 나타낸다.

이 논문에서의 Q 필터는 다음과 같이 선정하였다.

Cutoff Frequency	583 Hz
Order	3
Filter Type	Butterworth Low Pass

Table.1 Q 필터의 특성

Q 필터의 이득 차단 주파수가 높아질수록 외란 제거에 대한 성능이 향상되고 외란 제거 범위 또한 넓어지게 되는 결과를 보인다. 하지만 폐루프 시스템의 안정성은 점점 떨어진다.

지금까지의 플랜트와 Q 필터에 관한 정보를 사용하여 Fig.3.4 의  $G_1(s)$  와  $G_2(s)$  의 전달함수를 쉽게 얻어낼 수 있다.

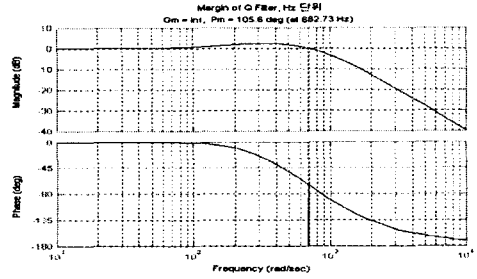


Fig.3.6 Q 필터의 보데(Bode) 선도

디지털 제어를 하기 위해선 Matlab 의 Simulink 를 사용하여 만든 제어 알고리즘을 DSP 에 장착하여 사용한다. 이러한 디지털 제어를 위해선  $G_1(s)$  과  $G_2(s)$  는 쌍 1 차 Z 변환(Bilinear transformation)을 사용하여 디지털 시스템으로 변환시킬 수 있다. 다음의 (3.5) 식은 쌍 1 차 Z 변환 공식을 적은 것이다.

$$G_i(z^{-1}) = G(s) \Big|_{s = \frac{2(1-z^{-1})}{T_s(1+z^{-1})}}, \quad i=1,2 \quad (3.6)$$

여기서의  $T_s$  는 샘플링 시간을 의미하고, 샘플링 주파수  $F_s (=1/T_s)$  는 100 kHz 로 하였다. 여기서 반드시 명심해야 될 것은  $G_2(s)$  가 구현 가능하게 하기 위해서(분자의 차수가 분모의 차수보다 높지 않게 Q 필터의 차수를 선정해야 한다) 하나의 블록으로 바꾸어야 한다는 것이다.

플랜트와 제어기, 그 밖에 다른 이득이 들어간 전체적인 폐루프 시스템의 자세한 블록 선도는 아래 Fig.3.6 과 같이 보여진다.

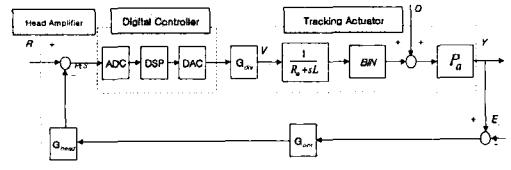


Fig.3.7 외란 관측기의 플랜트와 제어 루프의 블록 선도

여기서 변수  $G_{drv}$  는 드라이버의 이득,  $G_{opt}$  는 픽업(pick-up)(위치신호를 등가의 전류 신호로 바꿔 주어줌)의 이득,  $G_{head}$  는 head 증폭기(기준 입력 전압  $R(V_{ref}: 1.2V)$ 과 반사되어진 신호와 비교하여 위치에러신호(PES)를 발생시켜줌)의 이득이다. 또한  $E_c$  는 광 디스크의 편향이다.  $C$ ,  $G_1$  과  $G_2$  는 DSP 안에 장착한다.

## 4. 모의실험

### 4.1 실제 시스템 모델링

: 실제 시스템에서 곡선 적합(Curve Fitting)을 통해서 플랜트와 제어기의 개루프를 얻어낸다.

#### 4.1.1 플랜트 모델링

실제 시스템에 맞춰 제어기를 설계하려면 실제 플랜트의 전달함수를 알아야 한다. 이를 알기 위해서 실제 픽업(Pick-up)(Samsung CD-ROM(52X), 모델명: SC-152)만을 분리하여 입력으로 Digital Signal Analyzer(HP 35670A)에서 전압을 주고 출력으로 픽업(Pick-up)의 렌즈의 변위를 LDV 로 측정 한 후, 여기에서 등가의 전압으로 바꾸어 다시 Digital Signal Analyzer 에 넣어주면 실제 플랜트의 전달함수를 얻을 수 있다.

아래 Fig. 4.1 은 위와 같은 실험과정을 토대로 얻어낸 실제 플랜트의 전달 함수이다.

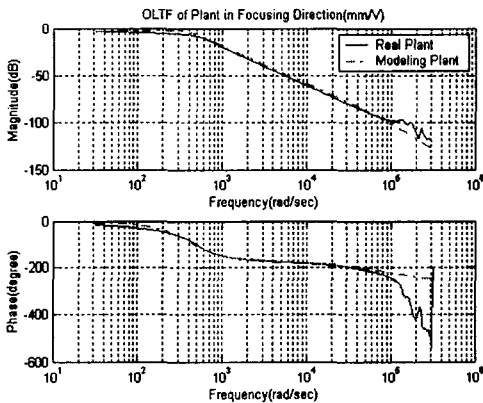


Fig.4.1 액추에이터의 개루프

위의 Fig.4.1 의 플랜트의 전달함수를 토대로 CD 사항(Spec)에 맞게 제어기를 설계하여야 한다.

#### 4.1.2 실제 제어기의 모델링

실제 제어기를 모델링 하기 위해서는 우선, CD 의 사항(Spec)에 맞추는 것이 중요하다.

이 논문에서 사용한 삼성 52 배속 CD-ROM 에서는 오디오 CD 를 구동 시킬 때는 CAV(Constant Angular Velocity) 16 배속을 사용하고 이에 대한 사항(Spec)은 DC gain(5Hz)에서 약 65~70 dB, 배속과 관련된 이득 절점 주파수는 2.5 kHz, 이득 여유는 12~13 dB 이고 위상 여유는 40°를 사용한다.

실제 시스템에서 뽑은 제어기 개루프를 사용하여 Curve Fitting 하여 얻은 앞섬-뒤짐 제어기의 개

루프, 모델링 플랜트의 개루프와 전체 이득을 곱한 전체 개루프는 DC gain 은 70dB, 이득 절점 주파수는 2.65 kHz, 이득 여유는 17.4 dB, 위상 여유는 47.7°이다.

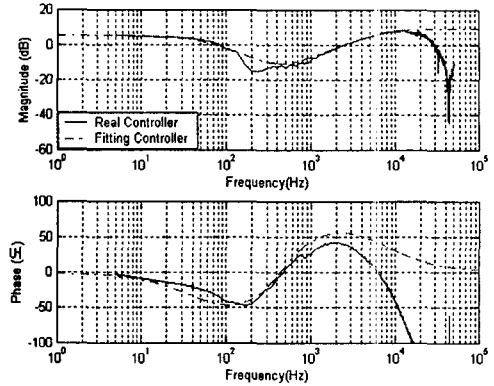


Fig.4.2 실제 제어기의 개루프

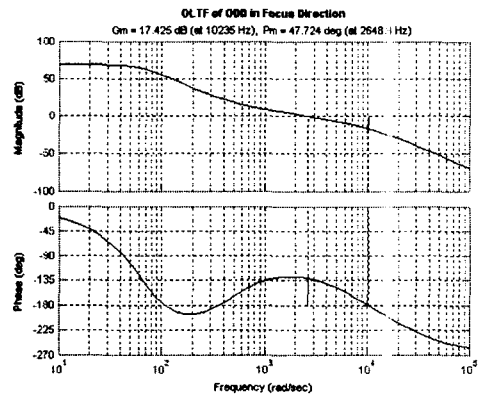


Fig.4.3 전체 시스템의 개루프

## 4.2 외란 관측기의 효과

:외란 관측기의 알고리즘을 평가하기 위해서 컴퓨터 모의 실험이 행해졌다. 아래 세 개의 그림은 외란 관측기를 장착한 페루프 시스템과 장착하지 않은 페루프 시스템 사이의 주파수 응답적인 측면에서 성능을 비교해 주고 있다.

### 4.2.1 R에서 Y까지의 주파수 응답

: 편향/편심에서 출력까지 페루프 시스템의 주파수 응답

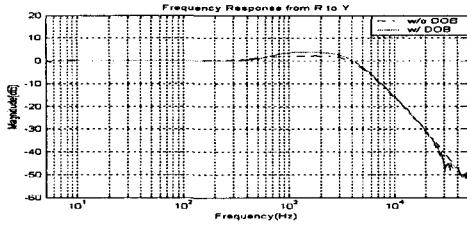


Fig.4.4 R 에서 Y 까지의 주파수 응답

#### 4.2.2 R에서 E까지의 주파수 응답

: 편향/편심에서 위치 에러 신호(PES) 까지 페루프 시스템의 주파수 응답

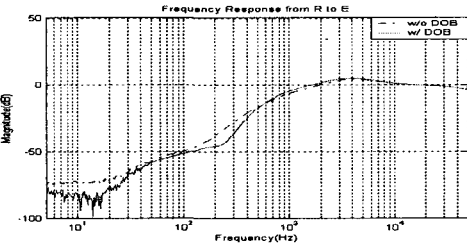


Fig.4.5 R 에서 E 까지의 주파수 응답

#### 4.2.3 D에서 E까지의 주파수 응답

: 외란에서 위치 에러 신호(PES) 까지 페루프 시스템의 주파수 응답

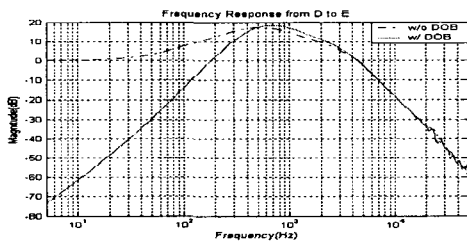


Fig.4.6 D 에서 E 까지의 주파수 응답

R 에서 Y 까지의 주파수 응답은 거의 변하지 않았다. 반면, 외란 제거 성능을 나타내는 D 에서 E 까지는 주파수 응답 특성은 Q 필터의 이득 차단 주파수 아래 부분에서 대단히 향상 되었음을 알 수 있다.(여기서의 Q 필터의 이득 차단 주파수는 583 Hz 이다.)

## 5. 결론

외란 관측기의 경우 특히 저주파수 외란에 강하며 휴대용 광 디스크 드라이브에서 그 효과가 더 크리라 생각한다. 또한 외란 관측기는 트래킹 방향의 제어기 구조도 거의 동일하기 때문에 트래킹(Tracking) 제어에도 사용될 수 있으며, 시뮬레이션에서 적용된 CD-ROM 뿐만이 아니라 다른 광 디스크 드라이브에도 적용될 수 있다.

## 참고문헌

- (1) Fujiyama, K., Tomizuka, M., Katayama, R., 1998, "Digital Tracking Controller Design For CD Player Using Disturbance Observer", Proceedings of the 5th International Workshop on Advanced Motion Control, pp.598~603.
- (2) Fujiyama, K., Katayama, R., Hamaguchi, T., Kawakami, K., 1998, "Digital Controller Design for Recordable Optical Disk Player Using Disturbance Observer", pp.141~146.
- (3) Youngjin Choi, Kwangjin Yang, Wan Kyun Chung, 2002, "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.
- (4) Addisu Tesfaye, Ho Seong Lee and Tomizuka, M., "A Sensitivity Optimization Approach to Design of a Disturbance Observer in Digital Motion Control Systems", IEEE/ASME Trans on Mechatronics, Vol. 5, No. 1., pp. 32~38.
- (5) Martin Fischer and Tomizuka, M., 1996, "Application and Comparison of Alternative Position Sensors in High-Accuracy Control of an X-Y Table", Proceedings of Advanced Motion Control, Vol. 2, pp. 494 ~499.
- (6) Yamade, K., Komada, S., Ishida, M. and Hori, T., 1996, "Analysis of Servo System Realized by Disturbance Observer", Proceedings of Advanced Motion Control, Vol.1., pp338~343.
- (7) 남상엽, 1995, DVD 와 CD/R/CD-RW 기술, 우신 출판사, 대한민국.