

반복제어기를 이용한 하드디스크의 주기적인 외란 보상

Compensation of the Repeatable Run Out Using Repetitive Controller in HDD

신 호 철* · 박 성 원** · 박 태 옥*** · 양 현 석**** · 박 영 필†

Ho-Chul Shin, Sung-Won Park, Tae-Wook Park, Hyun-Seok Yang
and Young-Pil Park

(2003년 10월 24일 접수 ; 2003년 12월 19일 심사완료)

Key Words : HDD(하드디스크 드라이브), Repetitive controller(반복제어기), RRO(주기적인 에러)

ABSTRACT

This paper presents three algorithms of repetitive controller for compensation of the repeatable runout in hard disk drive. The basic theory of the repetitive controller and the analysis of the disturbance in hard disk drive are introduced. The tracking controller is designed in order to design the "plug-in type" repetitive controller. Design of the repetitive controller is considered as the design of the filter, determination of gain and design of additional compensation for the various types. Specially, trade-off relationship between stability and performance is important for the design. The three kinds of "plug-in type" repetitive controllers are designed, simulated and experimented. Performance and characteristic of them are compared with the analysis of the experimental results.

1. 서 론

정보 사회의 발전에 따라 각종 정보저장기기가 출현하였으며, 하드디스크는 대표적인 정보저장기기로서 중요한 위치를 차지하고 있다. 하드디스크는 지속적인 저장용량의 증가를 요구받고, 그 요구에 부응하여 발전해 왔다. 하드디스크의 저장용량을 결정하는 주요 요소로는 트랙의 밀도의 증가와 헤드의 발전을 들 수 있다. 이 중 트랙 밀도의 증가는 기계적인 서보 시스템에 그 기초를 두고 있으며, 더욱 정밀한 서보 시스템을 구현함으로써 발전하였다. 본 논문에서는 하드디스크의 외란 특성에 맞는 더욱 정밀한 서보 시스템을

구현하여, 특히 트래킹에서의 정확도를 향상시키고 그에 따른 트랙 밀도 증가와 저장용량의 증가를 위한 발판을 마련하고자 한다. 하드디스크의 외란은 주기적인 특성에 따라 RRO(repeatable run out)과 NRRO(non-repeatable run out)으로 구별 될 수 있다. 이중 RRO의 대부분은 일정한 속도로 회전하는 스피들 모터의 회전 주파수와 연관되어 있다. 그러므로 스피들 모터의 회전주파수와 그의 배수 배에 해당하는 주파수를 예측할 수 있으며, 주기적인 외란을 보상하는 반복제어기를 설계함으로써 이를 보상할 수 있게 된다. 반복제어기는 internal model principle에 의해 외란 특성을 반영하여 설계되고, 안정도와 성능의 측면을 고려하여 설계된다. 반복제어기는 많은 연구자들에 의해 회전부를 가지는 기계계와 반복적인 궤적을 따라 운동하는 기계계에 적용되어 사용되어 왔다.^(1,3-6) 반복제어기는 다양한 형태를 가지고 있는데, 본 논문에서는 기존의 트래킹 제어기를 기초로 하고, 구현이 용이한 "Plug-in type"의 반복제어기를 이용하여 하드디스크의 RRO를 보상하고자 한다.

† 책임저자 : 정희원, 연세대학교 기계공학부

E-nauk : park2814@yonsei.ac.kr

Tel : (02) 2123-2814, Fax : (02) 312-2159

* 정희원, 연세대학교 대학원 기계공학과

* 연세대학교 대학원 기계공학과

*** 연세대학교 정보저장공학과

****연세대학교 기계공학과

2. 모델링과 PES분석

2.1 VCM 모델링

플러그인 형태의 반복제어기는 기존의 트래킹 컨트롤러에 추가되어 적용하기 때문에, 우선적으로 트래킹 제어기를 설계하였다. 제어기 설계를 위한 플랜트 모델링 과정은 다음과 같다. 신호분석기 (HP35670A)를 이용하여 하드디스크의 VCM 부분에 10 Hz에서 3000 Hz까지의 정현파 입력을 넣어준다. 이때 VCM의 끝단에 있는 헤드 부분의 속도를 LDV를 이용하여 측정한다. 이런 과정을 통해 얻은 Fig. 1의 FRF(frequency response function)의 데이터를 커브 피팅 과정을 통해 전달함수를 구하게 된다.⁽²⁾

제어기를 설계할 위해서 간단한 2차로 모델로 모델링하였으며, 연속계 모델링 결과는 식 (1)과 같다.

$$G_p(s) = \frac{3.272 \times 10^8}{s^2 + 92.38s + 4.674 \times 10^4} \quad (1)$$

이산화된 VCM 모델을 얻기 위해서는 A/D 변환 시간, I/O 지연, 계산지연, D/A 변환시간 등을 고려하여 시간지연 요소를 추가한 후 ZOH를 이용하여 변환하게 된다.

$$G_p(z^{-1}) = \frac{3.180z^2 + 5.888z + 0.1320}{z^3 - 1.983z^2 + 0.9846z} \quad (2)$$

트래킹 제어기는 응답속도, 정상상태 오차 등을 고

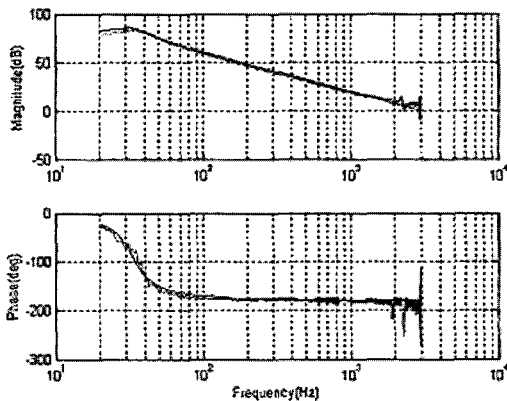


Fig. 1 FRF result and curve fitting

려하여 연속계의 PID제어기를 설계하고, 이를 이산계로 변환하였다.

z 도메인에서 표현된 PID제어기는 다음과 같다.

$$u(k) = \left(K_p + \frac{K_i T_s}{2} \frac{z+1}{z-1} + \frac{K_d}{T_s} \frac{z-1}{z} \right) e(k) \quad (3)$$

설계 결과로 선정된 게인 값은 각각 $K_p = 6.848 \times 10^{-3}$, $K_i = 1.136$, $K_d = 5.627 \times 10^{-6}$ 이며, 66개의 섹터를 가진 5400RPM의 실험용 하드디스크의 경우 $T_s = 168.4 \mu\text{sec}$ 이다. 제어기의 이산계 전달함수는 식 (4)와 같다.

$$G_c(z^{-1}) = \frac{0.04037z^2 - 0.0736z + 0.03342}{z^2 - z} \quad (4)$$

2.2 PES 분석

실험에 사용된 하드디스크는 5400 rpm으로 회전하기 때문에 스핀들 모터의 회전주파수가 90 Hz이고, 90 Hz의 배수 배에 해당하는 주파수에서 주기적인 외란이 있을 것으로 예상 할 수 있었다. 실제적으로 그러한 외란의 여부를 알아보기 위하여 PES(position error signal)를 측정하고, 이를 주파수 분석하여 Fig. 2와 같이 RRO와 NRRO 성분으로 분리하였다.

분석을 통해 예상과 같이 90 Hz의 배수 배에 RRO 성분이 있다는 것을 확인 할 수 있었으며, 이런 성분들이 반복제어기를 통해 컨트롤 할 대상임을 확인 할 수 있었다.

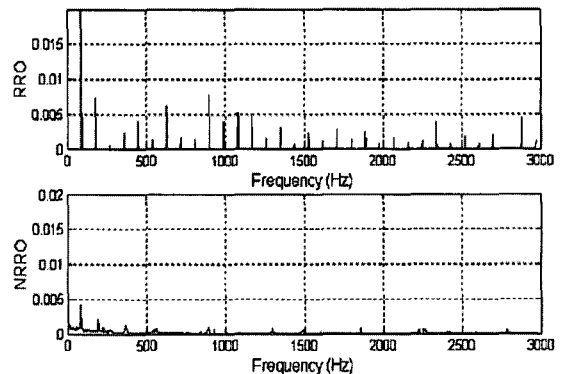


Fig. 2 Analysis of the PES

3. 반복제어기 기초

3.1 내부 모델 원리(Internal Model Principle)

제어기가 시스템에 가해지는 외란을 억제하기 위한 기본 원리에 대해 알아보자.

Internal model principle에 따르면, $D(s) = \frac{B_D(s)}{A_D(s)}$ 와 같은 외란이 있을 때, 정상 상태 오차가 없도록 하기 위해서는 보상기 $G_c(s)$ 가 외란의 특성을 반영하여 $\frac{1}{A_D(s)}$ 의 요소를 가져야 한다.⁽⁵⁾ 이산도메인에서 주기 N 의 외란을 가진 시스템에 이 원리를 적용해보면, 주기적 외란은 다음의 $d(k) - d(k - N) = 0$ 로 식 (5)와 같이 표현 할 수 있다.

$$(1 - Z^{-N}) d(k) = 0 \tag{5}$$

그러므로 이 시스템에 적용되는 반복제어기는 $1 - Z^{-N}$ 의 요소를 가진 형태를 띄게 된다.

3.2 기본 반복제어기

다음은 기본적인 반복제어기의 구조를 나타내고 있다. 이 구조는 기존의 트래킹 컨트롤러에 반복제어기가 추가된 형태를 띄고 있기 때문에 플러그 인 타입(plug-in type)이라 부르며, 기존의 제어기를 그대로 이용한다는 점과 구현이 용이하다는 장점을 가지고 있다.⁽¹⁾

Fig. 4에서 e 에서 u_r 까지 반복제어기의 전달함수

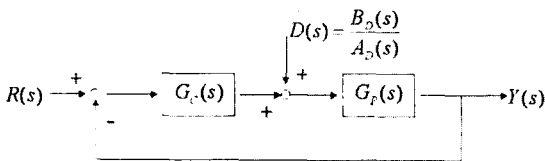


Fig. 3 Structure of Internal model principle

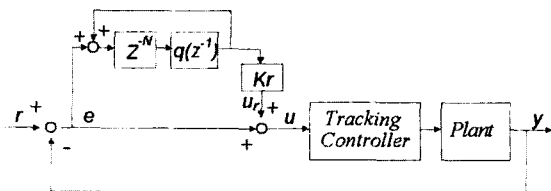


Fig. 4 Structure of basic repetitive controller

는 식(6)과 같다.

$$G_r(z^{-1}) = K_r \frac{z^{-N} q(z^{-1})}{1 - z^{-N} q(z^{-1})} \tag{6}$$

여기서, N 은 주기적 외란의 한 주기당 샘플의 개수이며, 하드디스크에서는 디스크 1회전 당 서보 섹터의 수에 해당하는 값을 가지게 된다. $q(z^{-1})$ 는 저역 통과 필터를 의미하며, 성능과 안정성의 관계를 고려하여 설계된다. 전달함수의 분모 부분의 $1 - Z^{-N}$ 의 요소는 내부 모델 원리(internal model principle)에 의해 외란의 주기적 특성을 반영하여 설계된 부분에 해당한다.

반복제어기 게인인 K_r 에 따라 반복제어기의 성능, 즉 수렴속도와 정상상태의 성능의 차이가 나기 때문

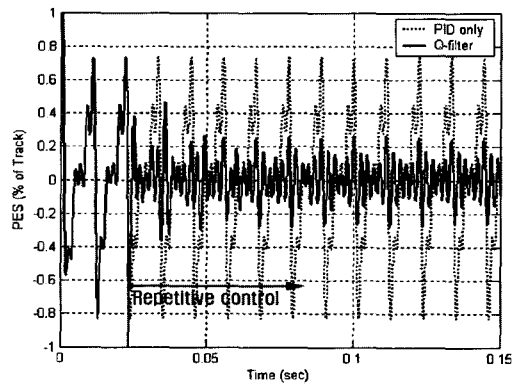


Fig. 5 Comparison of time response between basic repetitive control and PID control

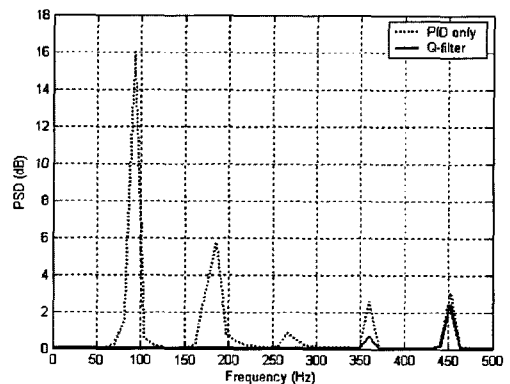


Fig. 6 Comparison of frequency response between basic repetitive control and PID control

에 적절한 값으로 선정하여야 한다.

Fig. 5와 Fig. 6은 기본적인 반복제어기의 시간역 시뮬레이션과 주파수 분석 결과이다. 기존의 제어기인 PID 트래킹 제어기의 경우와, 반복제어기가 추가된 경우를 비교하였다.

3.3 ZPETC(Zero Phase Error Tracking Controller)를 이용한 반복제어기

ZPETC를 이용한 반복제어기는 Fig. 7과 같은 구조를 띄고 있는데, $G_f(z^{-1})$ 를 가짐으로써 기본 반복 제어기와 구분 된다고 볼 수 있다.^(3,4)

$G_f(z^{-1})$ 의 설계를 위해서, 반복제어기를 제외한 부분의 페루프 전달함수와 반복제어기 부분의 전달함수를 이용하여, Fig. 7의 페루프 시스템을 등가의 개루프 시스템으로 변형하게 된다. Fig. 8은 그러한 등가의 시스템을 나타내며, Fig. 7의 u_r 로부터 e 까지의 전달함수를 $\frac{z^{-d}B_{cl}(z^{-1})}{A_{cl}(z^{-1})}$ 로 표현 했을 때, 반복 제어기 부분은 $\frac{A_{cl}(z^{-1})}{B_{cl}(z^{-1})}$ 에 해당하게 된다.

Fig. 8의 perfect tracking 제어기 설계와 비교하면, ZPETC는 페루프 전달함수의 영점이 단위원의 외부에 있는 경우를 고려한 수정된 perfect tracking 제어기로 볼 수 있다. 페루프 전달함수의 영점은 컨트롤러의 극점이 되기 때문에, 페루프의 영점에 따라 전체 시스템의 안정성이 영향을 받게 된다. 그러므로, 페루프 시스템의 영점이 단위원 밖에 있는 경우에는 ZPETC를 방법을 이용해서 단위원 밖의 영점을 소거해 주게 된다. 단위원 안의 영점과 밖의 영점을 다음과 같이 표현하면 $B_{cl}(z^{-1}) = B_{cl}^+(z^{-1})B_{cl}^-(z^{-1})$ 여

기서, $B_{cl}^+(z^{-1})$ 은 단위원 안의 영점, $B_{cl}^-(z^{-1})$ 은 단위원 밖의 영점이다. 안정도에 영향을 미치게 되는 $B_{cl}^-(z^{-1})$ 은 z^{-1} 을 z 로 치환한, $B_{cl}^-(z)$ 를 이용하여 소거해주게 되고, 전체 시스템은 안정성을 확보하게 된다. 이러한 개념에 의거한 $G_f(z^{-1})$ 은 다음과 같은 형태를 가진다.

$$G_f(z^{-1}) = \frac{z^{-n}A_{cl}(z^{-1}) \times B_{cl}^-(z)}{B_{cl}^+(z^{-1}) b} \quad (7)$$

$$b \geq [B_{cl}^-(1)]^2$$

여기서, n 은 단위원 밖의 영점의 수이다.

필터 $q(z^{-1})$ 의 경우, 위상 지연이 일어나지 않는 특징을 지니도록 다음과 같은 형태를 띄게 된다.

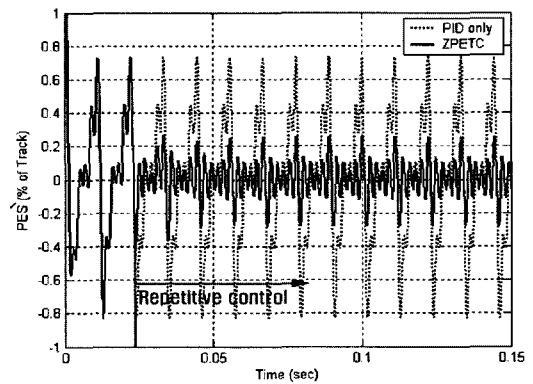


Fig. 10 Comparison of time responses between ZPETC repetitive control and PID control

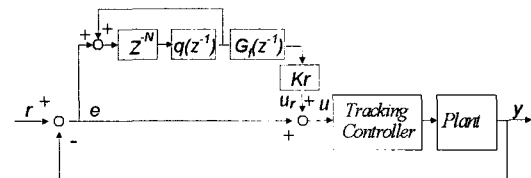


Fig. 7 Structure of ZPETC repetitive controller

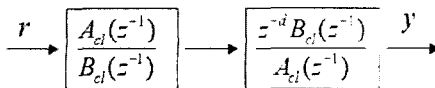


Fig. 8 Perfect tracking controller

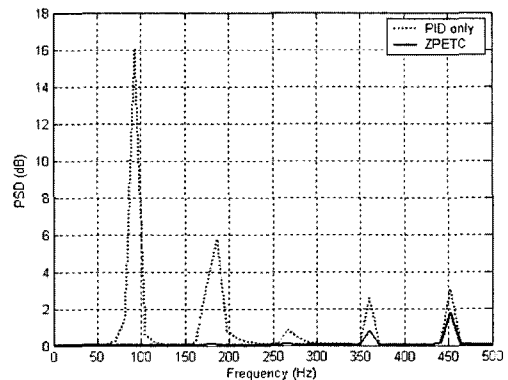


Fig. 11 Comparison of frequency response between ZPETC repetitive control and PID control

$$q(z^{-1}) = \frac{\left(\sum_{i=0}^m \alpha_i z^i + \sum_{i=0}^m \alpha_i z^{-i} \right)}{2 \sum_{i=1}^m \alpha_i + \alpha_0} \quad (8)$$

여기서, m = 차수, α = 계수

Fig. 10, 11은 ZPETC를 이용한 시간영역과 주파수 영역의 시뮬레이션이고 이를 위해 사용된 식들을 다음과 같다.

$$B_{ci}^-(z^{-1}) = 1 + 1.829z^{-1} \quad (9)$$

$$G_f(z^{-1}) = \frac{1.829 - 4.222z^{-1} + 2.579z^{-2} + 0.5825z^{-3} - 0.9638z^{-4} + 0.1952z^{-5} + 0.004412z^{-6}}{1.028 - 1.85z^{-1} + 0.8083z^{-2} + 0.01932z^{-3}} \quad (10)$$

$$q(z^{-1}) = \frac{2 + z^{-1} + z^{-2} + z^{-3} + 2z^{-4} + z^{-5} + z^{-6} + z^{-7} + 2z^{-8}}{12z^{-4}} \quad (11)$$

3.4 Phase Advance를 이용한 반복제어기

Phase advance 개념을 이용한 반복제어기는 다음과 같은 구조를 띄고 있다.⁽⁵⁾

이 반복제어기는 Fig. 12와 같이 구조상으로는 기본적인 반복제어기와 유사하지만, e^{ps} 를 이용하여 게인 변화없이 위상을 추가하여, 크로스 오버 주파수까지의 위상을 보상하는 반복제어기이다. 필터 $q(s)$ 의 경우에는 1차 저역 통과 필터를 사용하고, e^{ps} 에서 p 의 값은 크로스 오버 주파수까지 전체 시스템의 위상이 최소화 되도록 선정한다.

전체 시스템의 위상은 원래 시스템의 위상과 추가되는 1차 필터의 위상 그리고 e^{ps} 에 의한 위상의 합

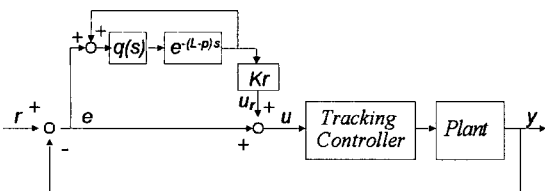


Fig. 12 Structure of phase advance repetitive controller

이 된다. 그러므로 Fig. 13과 같이 전체 위상의 합이 크로스 오버 주파수까지 0도에 가깝도록 하는 것이

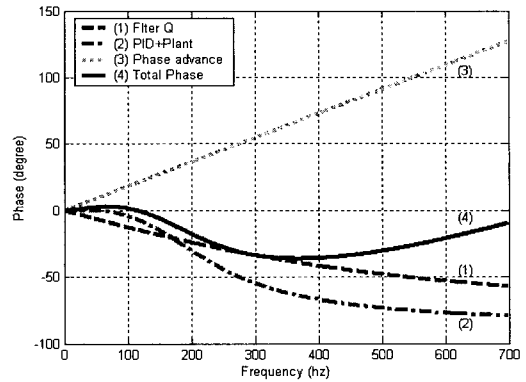


Fig. 13 Phase cancellation using phase advance

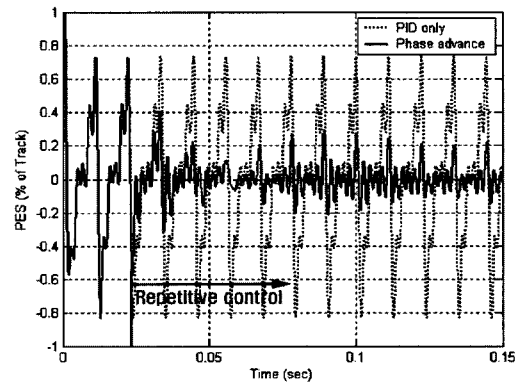


Fig. 14 Comparison of time responses between phase advance repetitive control and PID control

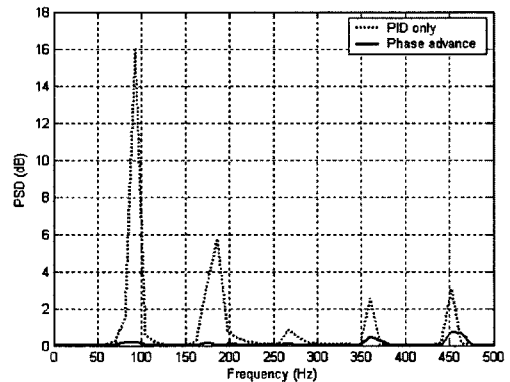


Fig. 15 Comparison of frequency responses between phase advance repetitive control and PID control

목표가 된다. 또한 전체 위상이 0도 보다 큰 부분은 입력보다 위상이 앞선 부분이므로, 이 부분이 과도하게 나타나지 않도록 p 의 값을 선정한다. p 값은 이산계로 변화를 위해 정수 값 중에서 위의 조건에 가장 부합하는 값을 선정하였다.

$$q(z^{-1}) = \frac{0.345z^{-1}}{1 - 0.655z^{-1}}, \quad p=3 \quad (12)$$

4. 실험

기본 제어기인 PID제어기만을 적용한 경우와 각각의 반복제어기를 적용한 경우의 PES를 측정하여 분석하였다.

4.1 실험셋트의 구성

실험 셋트는 Fig. 16과 같이 구성되어 있다. 설계된 반복제어기는 컴퓨터에 의한 연산과정에 포함되어 있으며, 실험 셋트는 기존의 상용 제어기를 실험을 위해 설계한 제어기로 전환하는 구조로 되어 있다. 신호처리와 PES 정보 처리를 위한 장치들과 입력을 위한 전류 앰프 등으로 구성되어 있다.

4.2 기본 반복제어기의 경우

$q(z^{-1})$ 필터를 가진 기본 반복제어기와 PID제어기의 성능을 비교하였다.

4.3 ZPETC를 이용한 반복제어기의 경우

기본 반복제어기와 ZPETC를 이용한 반복제어기의 경우 유사한 성능을 나타내고 있다. 이는 같은 형태의 필터를 사용하였기 때문으로 판단할 수 있다.

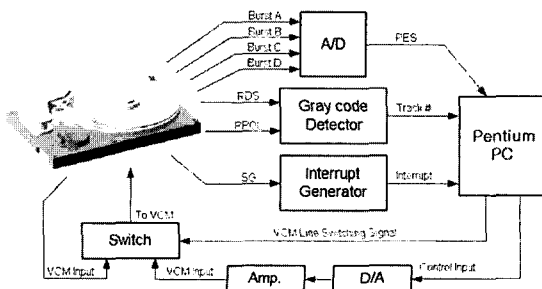


Fig. 16 Experimental setup for track following servo system

ZPETC를 이용한 경우, $G(z^{-1})$ 의 요소가 추가되지만 역할은 필터에 비해 상대적으로 작다는 것을 알 수 있었다. Fig. 17과 Fig. 18에서 특히 90 Hz의 1, 2, 3배의 성분이 크게 감소되는 것을 알 수 있었다.

4.4 Phase Advance를 이용한 반복제어기의 경우

1차 저역 통과 필터와 구조상의 간결성 때문에, phase advance를 이용한 반복제어기의 구조는 매우

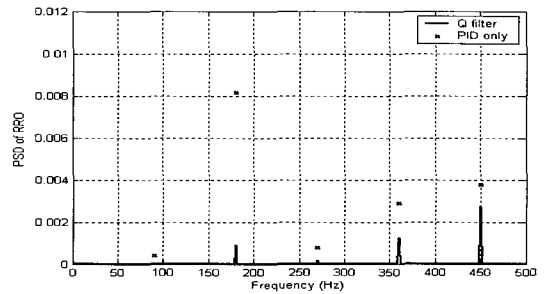


Fig. 17 Frequency response of basic repetitive controller

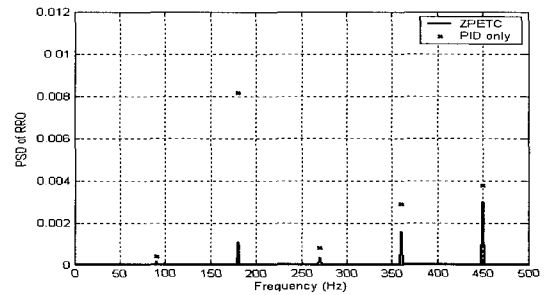


Fig. 18 Frequency response of ZPETC repetitive controller

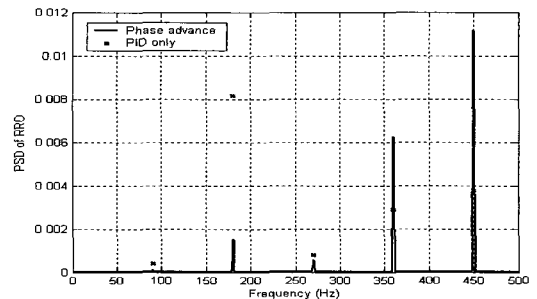


Fig. 19 Frequency response of phase advance repetitive controller

간결하다. 하지만 실험결과 90 Hz의 1, 2, 3배의 주파수 영역에서는 다른 형태와 같이 좋은 성능을 보이지만, 그 이상 주파수에서는 성능이 나빠지는 결과를 얻을 수 있었다. 이는 Fig. 15의 시뮬레이션과 결과와도 차이를 보이는 것이다. 시뮬레이션에서는 주기적인 외란만을 가했지만, 실험에서는 다양한 외란이 있으며, 특히 고대역 부분의 노이즈들이 phase advance 반복제어기에 의해 가진되었기 때문이다.

4.5 Sensitivity를 이용한 실험분석

Fig. 20의 Sensitivity 곡선을 보면, 반복제어기의 경우에는 90 Hz의 배수 배에 해당하는 주파수에서 크기가 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 반복제어기가 주기적 외란을 제거하는 특성을 보여준다. 하지만 90 Hz의 배수 배의 사이 주파수에서는 오히려 sensitivity의 크기가 커지기 때문에, 반복제어기가 모

든 영역에 있어서 기존 PID제어기보다 우수한 것은 아니다. 세 종류의 제어기가 90 Hz의 배수 배의 사이 주파수에서 크기가 커지는데, 특히 ZPETC의 경우 그 크기가 작아 가장 좋은 특성을 가진다. Fig. 20을 보면 phase advance 경우 고대역의 sensitivity가 나빠지는데, 이는 실험결과인 Fig. 19의 360, 450 Hz에서 좋지 못한 성능과 연관된다. phase advance의 경우 고대역에서 다른 반복제어기에 비해 성능이 나빠진다.

5. 결론

반복제어기는 다양한 형태를 가지고 있으며, 필터의 설계, 계인의 선정 그리고 추가적인 요소의 설계로 설계과정을 구분 지을 수 있다. 반복제어기의 성능과 안정성은 서로 상반되는 요소로써, 설계과정에 있어서 특히 고려해야 할 요소이다. 시뮬레이션과 실험 결과, 반복제어기는 기본적인 형태로 구성된 경우에도, 주기적인 외란을 보상하는 시스템에 대해 좋은 성능을 가짐을 알 수 있었다. ZPETC의 경우에는 주기적인 외란 보상 뿐만 아니라 90 Hz의 배수 배 사이 주파수에서 다른 반복제어기보다 좋은 성능을 가진다는 것을 알 수 있었다. 또한 phase advance의 경우에는 간단하다는 장점이 있지만, 고대역 부분에서 좋지 않은 성능을 보여준다.

Table 1 Comparison of PSD of RRO

	PID only	Q filter	ZPETC	Phase advance
90 Hz	0.405	0.003	0.194	0.109
180 Hz	8.153	0.919	1.096	1.530
270 Hz	0.780	0.197	0.372	0.577
360 Hz	2.901	1.294	1.600	6.258
450 Hz	3.759	2.741	2.993	11.200

단위 : PSD of RRO ($\times 10^{-3}$)

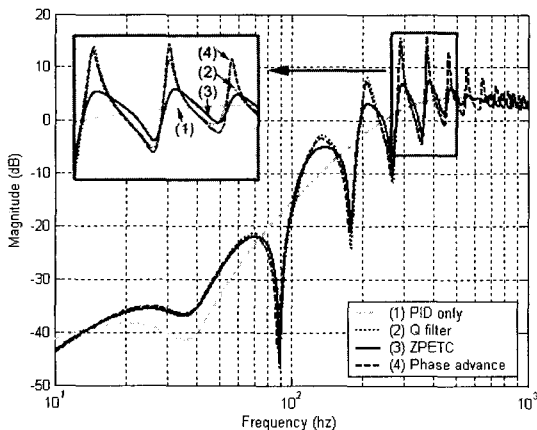


Fig. 20 Sensitivity of Repetitive controllers

참고 문헌

- (1) Onuki, Y. and Ishioka, H., 2001, "Compensation for Repeatable Tracking Errors in Hard Drives Using Discrete-Time Repetitive Controllers," IEEE/ ASME Transactions on Mechatronics, pp. 132~136.
- (2) Yang, H. S., Jeong, J. and Park, Y. P., 2001, "Identification of Contributors to HDD Servo Errors by Measuring PES Only", IEEE Transactions on Magnetics pp. 883~887.
- (3) Tomizuka, M., 1987, "Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control", Journal of

Dynamic Systems, Measurement, and Control, pp. 65~68.

(4) Cosner, C., Anwar, G. and Tomizuka, M., 1990, "Plug in Repetitive control for Industrial Robotic Manipulators," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1970~1975.

(5) Broberg, H. L. and Molyet, R. G., 1994, "A

New Approach to Phase Cancellation in Repetitive Control", Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the 1994 IEEE, pp. 1766~1770.

(6) 유영순, 지명지, 2002, "운동기구용 로봇의 학습 제어 응용," 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권, 제 8 호, pp. 609~615.