

## 컴퓨터 하드 디스크의 정밀 서보 제어

### Precision Servo Control of a Computer Hard Disk

°전 도 영

서강대학교 기계공학과 (Tel:02-705-8634; Fax:02-712-0799; E-Mail:dyjeon@ccs.sogang.ac.kr)

**Abstracts** Two servo control algorithms are suggested to reduce the tracking error of a computer hard disk drive. One is the repetitive control to reduce the repeatable tracking error which is not explicitly taken into account in the design of a conventional controller. This algorithm was successfully applied to a commercial disk using a fixed point DSP. The other is the multi-rate sampling control which generates the control output between each sampling times since the sampling time of hard disk drives is limited. These algorithms were shown effectively to reduce tracking errors.

**Keywords** hard disk drive, repetitive, multi-rate sampling, tracking, estimation

#### 1. 서론

지난 수 십년 동안 컴퓨터 하드 디스크 드라이브(HDD) 기술의 발전은 VLSI와 소프트웨어 기술의 비약적인 발전과 더불어 현대 정보산업 발전의 중요한 견인차 역할을 해 왔다. 디스크 드라이브의 기술 추세는 소형화, 대용량화라고 말할 수 있으며, 데이터 기록 밀도로 볼 때 십년 마다 거의 열배씩 증가해 왔으며 이런 추세는 앞으로도 계속 될 전망이다.<sup>(4)</sup>

HDD 서보제어기는 트랙 찾기(seek) 모드, 정착(settle) 모드, 트랙 추종(follow) 모드의 세 가지 모드<sup>(2)</sup>에서 동작하도록 구성되어 있다. 데이터의 기록밀도를 높이기 위해서는 트랙 폭에 대한 트랙 중심과 실제 헤드의 위치 차이로 정의되는 TMR (Track MisRegistration)를 줄이는 것이 관건이며 이를 위해서는 트랙 추종 모드에서 헤드 암(head arm)의 고정밀 서보제어기술을 요한다.

트랙 추종 모드에서 기존의 HDD 서보제어기는 데이터의 재생 및 기록이 가능하도록 자기헤드(magnetic head)를 트랙 중심에 근접시키는 제어기로 구성되어 있다. 만약 디스크 원판의 트랙 중심이 정확히 스피들 중심과 일치한다면, 기존의 제어기를 사용했을 때 입력추종오차성분 중에는 반복되는 성분이 없을 것이다. 그러나 실제 디스크 원판의 중심과 스피들 중심이 항상 일치할 수는 없으므로, 오차성분 중 디스크의 회전 주파수를 기본 모드로 하는 주파수 성분이 나타날 수 있다. 이런 스피들 중심과 디스크 중심의 불일치는 스피들 베어링과 함께 RRO(Repeatable Run Out)오차를 유발시킨다.<sup>(1)</sup>

디지털 제어 시스템에서 성능 향상을 위해서는 샘플링 시간을 줄이는 것이 필수적이다. 그러나 HDD와 같은 시스템에서는 스피들 모터의 회전수, 트랙과 섹터의 수 등에 의해 샘플링 시간이 정해지므로 이를 변화시켜서 제어기의 성능을 향상시키기 어렵다. 예를 들어 5400rpm으로 스피들이 회전하고 디스크에 72섹터가 있으면 서보 제어기의 샘플링 시간은  $1/(90 \times 72)$  초로 정해진다. 따라서 연산 프로세서의 속도가 빨라져도 샘플링 시간은 짧아질 수 없어서 성능은 한계가 있게 되며 이를 극복하기 위해서 샘플링 사이에 예측을 하며 D/A값을 계산하는 것이 한 방법이 된다. 이러한 방법을 멀티레이트 샘플링(Multirate sampling)이라 한다.

본 논문에서는 반복제어기를 현재 상용화되고 있는 HDD를

대상으로 설계하여 정수연산 DSP에 구현하여 반복적인 오차를 효과적으로 제거하는 것을 보이며 멀티레이트 샘플링으로 트랙 추종 성능이 향상되는 모사실험 결과를 보인다.

#### 2. HDD의 동작 원리 및 모델링

HDD는 데이터가 직접 쓰여질 디스크 원판과 이를 일정한 각속도로 회전시키는 스피들 모터, 슬라이더 베어링에 탑재되어 있는 자기헤드 그리고 이 헤드를 지탱하고 있는 서스펜션 암 및 이를 구동시키는 VCM (Voice Coil Motor)로 구성되어 있다. 디스크가 최대 속도의 절반 정도 일 때 자기헤드는 슬라이더 베어링으로 인해서 디스크 원판 위에서 약간 떠서 움직이면서 데이터의 기록 및 재생을 하게 된다.

본 논문에서는 임베디드 서보방식의 HDD를 대상으로 연구하였다. 이 서보방식에서 위치정보는 등간격으로 기록되어 있고 자기헤드가 이 정보를 일정한 시간간격으로 재생하게 되므로 제어기의 샘플링 시간은 위에서 결정된 시간간격으로 결정된다. 또한 이 재생된 위치정보데이터는 복조기를 통해서 PES로 형성되어 제어기의 되먹임신호로 이용하게 된다. 이때 제어기는 빠른 연산을 위해 DSP 핵심(core)에 내장되어 있으며 이 제어기의 출력 값은 VCM를 제어하는 전류신호로 변환된다.

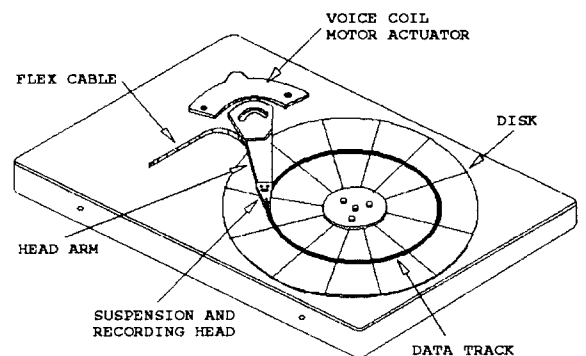


그림 1. 하드 디스크의 구조

HDD의 VCM에서 전기적 시상수는 헤드 암의 기계적 시상수보다 작으므로 액츄에이터의 동특성은 상수항으로 간략화 시킬 수 있다. 그리고 헤드 암을 강체로 가정하면 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$m \ddot{y} + k_f \dot{y} = k_t k_y u \quad (1)$$

여기서  $m$ 은 헤드 암의 질량,  $k_t$ 는 액츄에이터의 힘 상수,  $k_f$ 는 마찰 계수 그리고  $k_y$ 는 위치 이득 상수이다. 식 (1)의 양변에 라플라스 변환을 하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_p(s) = \frac{k_t k_y}{m s (s + k_f/m)} \quad (2)$$

그러나 위의 모델은 헤드 암의 고주파 영역에서의 동특성을 무시한 식으로 이 특성을 고려한 헤드 암의 수학적 모델은 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$G_{pc}(s) = G_p(s) G_c(s) \quad (3)$$

여기서  $G_c(s)$ 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$G_c(s) = \frac{w_1^2}{s^2 + 2\xi w_1 s + w_1^2} \quad (4)$$

위에서 제시된 모델의 실험적 검증과 정확한 모델의 계수를 추정하기 위해서 넓은 주파수 영역의 신호를 VCM에 인가하고 이에 대한 헤드의 PES신호를 측정하여, 다음 식과 같은 수학적 모델을 얻을 수 있었다.

$$G_p(s) = \frac{6.28319 \times 10^7}{s^2 + 6.28319 \times 10^2 s} \quad (5)$$

$$G_{pc}(s) = \frac{3.58185 \times 10^{16}}{s^4 + 4.44850 \times 10^3 s^3 + 5.72469 \times 10^8 s^2 + 3.58185 \times 10^{11} s} \quad (6)$$

여기서 컴플라이언스(compliance) 모델의 공진주파수는 약 3.8 KHz 였다.

본 논문에서는 전산 모의실험 및 강인 안정해석을 위해 위에서 실험적으로 구한 헤드 암의 모델은 식 (6)을 실제 제어하고자 하는 플랜트(plant)라고 가정하였고, 식 (5)의 2차 모델은 제어기 설계시 필요한 공칭(nominal) 모델로 가정하였다.

### 3. 반복제어법을 이용한 추종 오차 제어<sup>(6)</sup>

반복제어기는 그림 2의 블록선도와 같이 나타낼 수 있는데,  $G_p(z^{-1})$ 은 플랜트,  $G_c(z^{-1})$ 는 피드백 제어기를 뜻한다. 그림에서  $T(z)$ 에서  $E(z)$ 까지의 전달함수를  $G_r(z^{-1})$ 이라 하면

$$G_r(z^{-1}) = \frac{z^{-d} B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad (7)$$

로 표현될 수 있으며,  $B(z^{-1})$ 의 근이 복소평면에서 단위원 안에 있으면  $G_r(z^{-1}) = \frac{A(z^{-1})}{B(z^{-1})}$  이고  $N_2=d$ ,  $N_1=N-N_2$ 로 된다. 이때  $N$ 은 한 주기동안의 샘플링 시간 개수를 뜻한다. 만일  $B(z^{-1})$ 의 근 중에 복소평면에서 단위원 밖에 있는 경우는  $B(z^{-1})=B^+(z^{-1}) B^-(z^{-1})$ 로 인수분해 되어

$$G_r(z^{-1}) = \frac{z^{-N} A(z^{-1}) B^-(z)}{B^+(z^{-1}) b}$$

$$b \geq \max |B^-(e^{-j\omega})|^2 \quad \omega \in [0, \frac{\pi}{T}] \quad (8)$$

가 된다. 이때  $B^+(z^{-1})$ 은 단위원 안에 근을 갖는 부분이며  $B^-(z^{-1})$ 은 단위원 밖에 근을 갖는다.

모델링 오차 등에 대한 강인성을 갖기 위해 그림 3과 같이  $Q(z, z^{-1})$ 필터를 넣는다. 이 필터는

$$Q(z, z^{-1}) = \alpha_m z^m + \alpha_{m-1} z^{m-1} + \dots + \alpha_1 z + \alpha_0 + \alpha_1 z^{-1} + \dots + \alpha_m z^{-m} \quad (9)$$

$$\alpha_i > 0, \quad 2\alpha_m + 2\alpha_{m-1} + \dots + 2\alpha_1 + \alpha_0 = 1$$

로 표현되는 움직이는 평균치(moving average)를 뜻한다. 이러한 반복제어기를 트랙추종 모드의 제어기에 적용하면 그림 4와 같은 블록선도로 나타낼 수 있다.

전체 제어시스템을 16비트 정수연산 DSP에 구현하여 실험을 한다. DSP는 곱셈과 덧셈 연산을 하나의 명령어로 수행할 수 있으므로 고속의 제어알고리즘의 구현이 가능하다. 또한 복잡한 제어 알고리즘 구현도 용이하고, 알고리즘의 수정이 매우 쉽다. 그리고 정수 연산 DSP는 실수 연산 DSP에 비해 가격 및 전력 소비면에서 유리하다. 구현에 사용될 정수연산 DSP는 소수점이 부호 비트의 바로 다음에 위치하고 2의 보수연산 모드로 사용할 수 있는 Q15연산을 하도록 하였다. Q15연산을 할 경우 표현 가

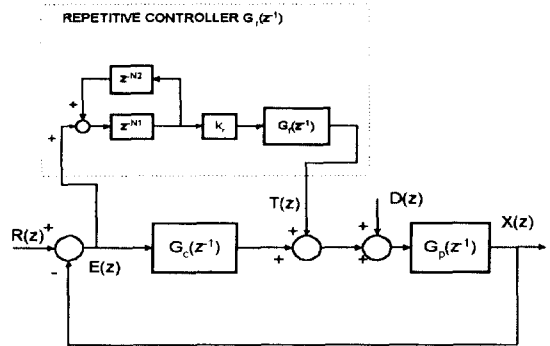


그림 2. 이산시간 반복제어 시스템

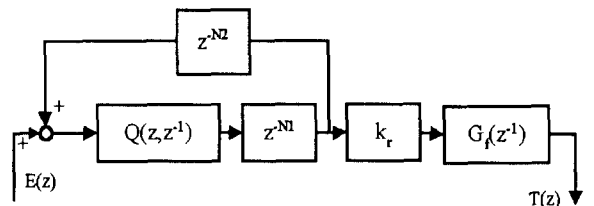


그림 3. 수정된 반복제어기

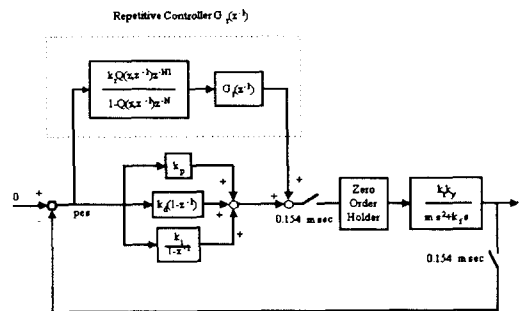
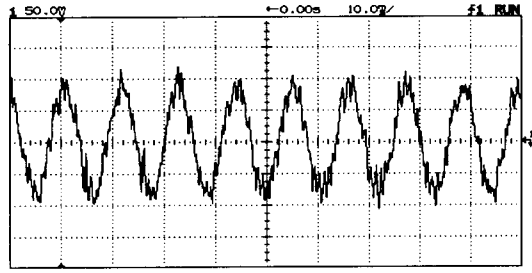
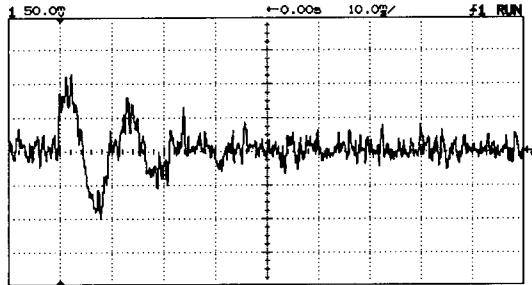


그림 4. 제안된 반복 제어 시스템



(a) PID 제어일 때



(b) 반복 제어일 때

그림 5. 측정된 PES의 시간 영역 그림 (90Hz)의 RRO오차가 포함된 실험 결과임

능한 필터 계수의 범위는 -1.0부터 0.9999까지로 곱셈연산 후 폭주(overflow)가 일어나지 않는 장점이 있다.

RRO성분이 큰 HDD에 대한 반복제어 시스템의 성능을 평가하기 위해서 외부에서 디스크의 회전주파수를 기본 주파수로 갖는 외란을 인가하여 실험을 하였다. 그림 5(a)는 시간 영역에서 PES신호를 보여 주는데 한 주기가 11.1msec인 주기를 갖는 것을 알 수 있다. 반복제어를 적용하면 그림 5(b)와 같이 약 3회전 만에 80%의 외란이 제거 됨을 알 수 있다. 주파수 응답은 90Hz와 그의 하모닉으로 이루어진 RRO성분이 반복제어를 적용하면 거의 제거됨을 알 수 있다.<sup>(6)</sup>

#### 4. 멀티레이트 샘플링 제어기

실험대상인 HDD는 5400rpm으로 스핀들이 회전하고 디스크에 72섹터가 있으므로 서보제어기의 샘플링 시간은  $1/(90 \times 72)$ 초로 정해진다. 또한 트랙중심에서 벗어난 신호를 주는 PES(Position error signal)은 매 섹터를 지날 때 마다 한번씩 입력이 된다. DSP에서 연산시간이 충분히 빠르기 때문에 입력된 PES신호를 이용하여 섹터 중간에 한 번씩 D/A값을 출력하면 마치 샘플링 시간이 반으로 줄어든 효과를 얻게 된다. 이를 그림으로 보이면 그림 6과 같다.<sup>(5)</sup>

헤드 암의 이산시간 모델이 상태영역에서 다음과 같다고 하면

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A_d x(k) + B_d u(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서  $y$ 는 각도  $\theta$ ,  $x$ 는 각도 및 각속도를 의미하게 되며  $u$ 는 VCM모터에 인가되는 전압이 된다. 이때 섹터 중간에서  $x$ 를 예측하기 위해 Luenberger관측기를 사용하면 다음과 같다.

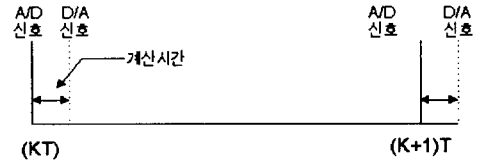


그림 6. 한 샘플링 시간과 멀티레이트 샘플링의 비교

$$\hat{x}_c(k+1|k+1) = \hat{x}_p(k+1|k) + L[y(k+1) - C\hat{x}_p(k+1|k)] \quad (11.a)$$

$$\hat{x}_p(k+1|k) = A_d \hat{x}_p(k|k) + B_d u(k) \quad (11.b)$$

$$\hat{x}_p(k|k) = \hat{x}_c(k|k) \quad (11.c)$$

여기에서  $\hat{x}(k|k)$ 는  $y(k)$ 의 측정치로 예측된  $x(k)$ 를 뜻하며 따라서  $\hat{x}(k|k-1)$ 은  $y(k-1)$ 의 측정치로 예측된  $x(k)$ 를 말한다. 관측기 이득인  $L$ 은 분리이론(separation theorem)에 의해 제어기의 이득과는 독립적으로 설정될 수 있다.

멀티레이트 샘플링을 적용하게 되면 보정식 (11.a)는 여전히  $T_s$ 간격으로 새롭게 되나 식(11.b)에서  $\hat{x}(k+1)$ 와 제어 신호  $u(k)$ 는 새로운 시간간격으로 새롭게 된다. 이때 새로운 시간 간격을 이전 샘플링 시간의  $1/m$ 으로 하면, 즉  $f_s = 1/T_s = m/T_i$ 로 하면, 멀티레이트 예측 방정식은 다음과 같이 된다.

$$\hat{x}_c(k+1|k+1) = \hat{x}_p(k+1|k) + L[y(k+1) - C\hat{x}_p(k+1|k)] \quad (12.a)$$

$$\hat{x}_p(l+1, k) = A_{d_l} \hat{x}_p(l, k) + B_{d_l} u(l, k) \quad (12.b)$$

$$\hat{x}_p(0, k) = \hat{x}_c(k|k) \quad (12.c)$$

여기서

$$A_{d_l} = e^{A_c T_i}, \quad B_{d_l} = \int_0^{T_i} e^{A_c \tau} B_c d\tau$$

$l$ : fast sampling instant ( $l=0, 1, 2, \dots, m-1$ )

$$\hat{x}_p(l+1, k) = \hat{x}_p(k + \frac{l+1}{m})$$

$A_c$ 와  $B_c$ 는  $\dot{x} = A_c x + B_c u$ 로 표현된 시스템 행렬

이에 대한 개념도는 그림 7과 같이 표현될 수 있다.

이 그림에서  $T_s = mT_i$  이므로  $T_s$ 로 샘플링되는 순간은 식 (12.a)를 이용하여 일반적인 Luenberger 관측기를 사용할 수 있으나, 그 사이 시간인  $T_i$  순간마다 (12.b)와 같이  $l+1$  시간에  $\hat{x}_p$ 은 오픈폼 관측기의 형태를 갖음을 알 수 있다. 따라서 식 (12.b)가 아래에 나타낸 식 (13)과 같이 외란의 영향이 있을 때는 예측이 정확하지 못하게 됨을 알 수 있으나 HDD의 트랙 추종 모드에서

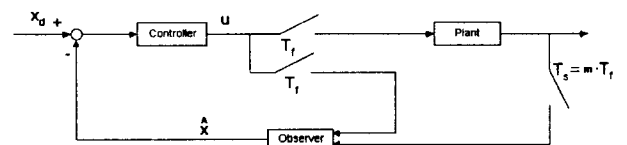


그림 7. 멀티레이트 제어기

는 외란  $w(k)$ 는  $u(k)$ 에 비해 상대적으로 크지 않으므로 이러한 오픈루프 관측기가 적용가능하다.

$$\hat{x}_p(l+1, k) = A_d \hat{x}_p(l, k) + B_d u(l, k) + Dw(l, k) \quad (13)$$

회전수가 5400rpm이고 디스크에 72섹터가 있으므로  $T_s = 1/(90 \times 72) = 154 \mu\text{sec}$ 의 샘플링 시간이 고정되며 이 샘플링 시간의 중간에 한 번의 제어신호를 더 내보내는 방법을 사용하였다. 따라서  $m=2$ 가 되어  $T_f=77 \mu\text{sec}$ 가 된다.

이 경우 예측을 위한 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{x}_c(k+1|k+1) = A_d \hat{x}_p(1, k) + B_d u(1, k) + L[y(k+1) - C\{A_d \hat{x}_p(1, k) + B_d u(1, k)\}] \quad (14)$$

$$\hat{x}_p(1, k) = A_d \hat{x}_c(k|k) + B_d u(0, k) + w(k)$$

여기서  $A_d = \begin{bmatrix} 9.5268 \times 10^{-1} & 0 \\ 7.5320 \times 10^{-5} & 1 \end{bmatrix}$ ,  $B_d = \begin{bmatrix} 7.5320 \times 10^{-5} \\ 2.9293 \times 10^{-9} \end{bmatrix}$

$$C = [ 0 \quad 6.2832 \times 10^7 ]$$

$$L = \begin{bmatrix} 2.0131 \times 10^{-4} \\ 1.5915 \times 10^{-8} \end{bmatrix}$$

모사 실험을 하는데 식 (14)에 표현된 계수값이 정확하다고 가정 하였으며  $w(k)$ 는 실제 실험에서 구한 외란을 입력하여 가능한 실험과 유사한 환경을 만들었다.

그림 8에 PID 제어기와 한 샘플링 시간을 이용하였을 때의 PES 신호를, 그림 9에서는 PID제어기와 멀티레이트 샘플링일 때의 PES 신호를 보였다. 모사실험 결과에서 보는바와 같이 멀티레이트 샘플링을 함으로써 PES가 줄어들었음을 알 수 있다. 그림 10와 11에는 한 샘플링 시간과 멀티레이트 경우의 D/A값을 비교한다. 예측에 의해 D/A값을 계산하여 한 샘플링 시간 중간에 한 번 더 출력하는 것을 나타내고 있다.

## 5. 결론

컴퓨터 HDD에서 같은 크기에 저장 용량을 늘리기 위해서는 트랙 밀도를 높여야 하며 이를 위해서는 트랙 추종 모드에서 서보제어의 정밀도가 증가하여야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 두 가지 방법을 적용하였는데 첫째로 반복제어기를 정수 연산 DSP칩에 구현하여 상용화된 HDD의 트랙 추종 오차를 줄이는 것을 실험적으로 보였으며 둘째로 멀티레이트 샘플링 방법에서 트랙 추종 오차를 샘플링 사이마다 예측하여 제어기 출력을 한 번 더 내 보냄에 따라 오차를 줄일 수 있음을 모사실험을 통하여 보였다.

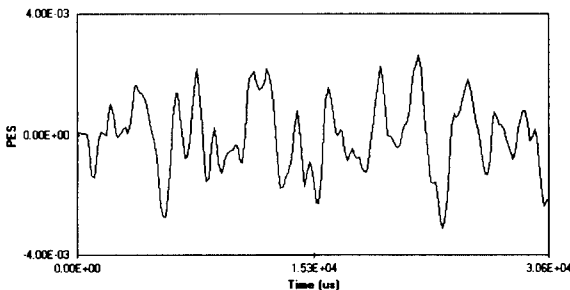


그림 8. PES 신호 (한 샘플링 시간)

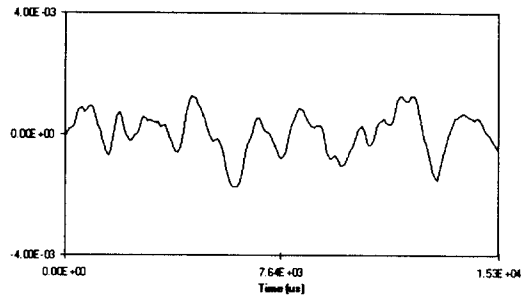


그림 9. PES 신호 (멀티레이트 샘플링)

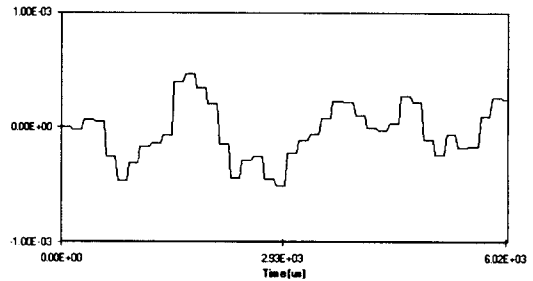


그림 10. 제어기 출력 신호 (한 샘플링 시간)

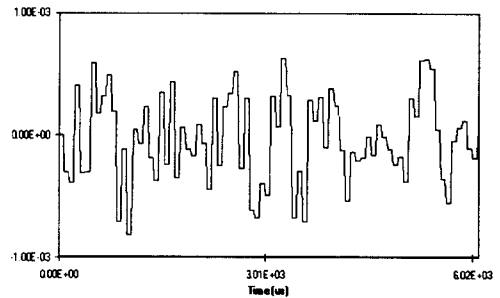


그림 11. 제어기 출력 신호 (멀티레이트 샘플링)

## 참고 문헌

- [1] K. K. Chew, and T. Tomizuka, "Digital Control of Repetitive Errors in Disk Drive Systems," *IEEE Control Systems Magazine*, 10(1):16-20, January 1990.
- [2] G. F. Franklin, J. D. Powell, and M. L. Workman, *Digital Control of Dynamic Systems*. Reading, Addison-Wesley, 1990.
- [3] H. Hanselmann and A. Engelke, "LQG-control of a highly resonant disk drive head positioning actuator," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 35, no 1. pp. 100-104, 1988.
- [4] D. K. Miu, and Y. C. Tai, "Silcon Micromachined SCALED Technology," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 42, pp. 234-239, June 1995.
- [5] A. M. Philips, M. Tomizuka, "Robust Wide-Range Controller Using Multirate Estimation and Control for Velocity Regulation and Tracking", *Advances in Information Storage and Processing Systems*, pp 189-196, ASME, 1995
- [6] 전도영, 정일용, "하드 디스크 드라이브의 반복 추종오차 제어", 한국정밀공학회, 제 13권 제 5호, pp. 131-138, 1996.