

## 고배속 CD-RW Drive 를 위한 중점 서보 및 편심 보상 제어

# Center Compensation Servo and Eccentric Compensation Control for High Speed CD-RW Drive System

서삼준\*, 김동원, 박귀태  
(Sam-Jun Seo, Dongwon Kim, and Gwi-Tae Park)

**Abstract :** This paper presents a design methodology of a Digital Servo Signal Processor for high speed CD-RW drive systems. The proposed Digital Servo Signal Processor enables us to develop CD-related systems for the very high speed applications and is one of the key components of the CD-RW systems. The proposed center compensation servo control is newly built for an actuator shaking due to the fast response of a step motor when it jumps to a long distance. A control method compensating for eccentricity of a disc is implemented for operating robustly at a higher rotational speed. This servo mechanism is more size efficient and less power consumed because it is implemented using a ARM7 embedded processor and hardware digital filters. Furthermore, it is convenient to upgrade firmware for the future required functions. From experimental results, we can see that the performance of the control system is improved greatly. The proposed servo algorithm shows a shorter setting time including a pull-in time and a faster access time. It can be applied easily to the DVD-ROM and the DVD-RAM which have the same optical structure.

**Keywords :** CD-RW drive, center compensation servo control, eccentric compensation control, high speed drive system

### I. 서론

정보화 사회로 진행될수록 취급되는 정보의 양은 점점 방대해져 가고 있으며, 따라서 그러한 정보를 취급하기 위한 새로운 방법이 계속해서 개발되고 있다. 특히, 오디오, 비디오 기술과 데이터 압축기술과 같은 멀티미디어 기술이 급속하게 발전하면서 CD-ROM, CD-RW, DVD-ROM, DVDP, DVD-RAM과 같은 광학 매체들이 대용량의 데이터 저장 장치 및 여러 멀티미디어 응용에 이용되고 있다. 이러한 광학 매체들은 현대 첨단 기술의 결정체로서 전기, 전자, 광학 및 기계공학 등 각 분야의 최신기술이 복합되어 있다. 현대의 CD-ROM/CD-RW 드라이브는 보다 빠른 배속, 높은 안정성, 빠른 데이터 액세스를 요구하므로 전체 시스템은 더욱 더 복잡해지고 고성능의 서보 시스템을 필요로 한다. 따라서 이러한 추세에 발맞추어 시스템의 요구를 충족시키는 보다 정밀하고 지능적인 서보 시스템의 개발을 통해 기술력을 확보하는 것이 시급한 과제이다[1]-[3].

한편 CD-ROM 드라이브의 배속 경쟁은 1993년에 2배속 드라이브가 등장한 이래 매년 가속화되어 2000년 말에 52배속 드라이브까지 등장하게 되었으나, 현재는 52배속 정도에서 배속 경쟁이 점점 약화되고 있는 대신, 고 배속에서 더 크게 영향을 받는 편심 등의 외란(disturbance)의 영향을 줄임으로써 데이터 액세스시의 안정도를 보장하여 결국 데이터 액세스 속도를 높이는 작업이 진행 중인 상태이다[4][5].

또한, 광 디스크 내에 4.7Gbyte의 멀티미디어 데이터나 프로그램을 저장할 수 있는 DVDP와 DVD-ROM, DVD-RAM 등의 DVD 제품군도 상용화되어, DVD-ROM 시스템의 경우 16배속 제품까지 개발된 상황이다. 이러한 DVD제품군도 역

시 현재로서는 배속 경쟁보다는, 외란으로부터 데이터를 안정적으로 액세스 하는 것이 중요한 이슈가 되고 있다[6]-[13].

기존 저배속 CD-RW에서는 주로 DC motor를 사용하였으나, 고배속 CD-RW에서는 응답속도가 빠르고, 제어가 간단하므로 스텝 모터로 변경하는 추세이다. 그러나 빠른 응답속도는 Coarse seek시 가감속으로 인한 액츄에이터(actuator)의 관성에 의해 트래킹(tracking) 폴인(pull in)을 불안하여 하여 coarse seek시간이 많이 걸리는 문제점이 발생하였다. 특히 이러한 문제점은 고 배속으로 갈 수록 점점 심해지는 경향이 있다.

본 연구에서는 고배속 CD-ROM/CD-RW의 스텝 모터의 빠른 응답속도는 슬레드(sled) 장거리 서치후 트래킹 폴-인시 액츄에이터의 관성 때문에 트래킹 오차(Tracking Error:TE)의 오버슈트가 크게 발생하여 폴-인이 불안하거나, 실패하는 것을, 액츄에이터의 흔들림을 오차 신호로서 출력하는 flag sensor를 이용하여 coarse seek중에 액츄에이터를 계속 제어함으로써 슬레드 서치중에도 트래킹 액츄에이터의 흔들림을 보상하는 중점 서보 제어 기법을 제안하여 스텝 모터의 안정성을 높였다.

또한, 기존의 고배속 CD-ROM/CD-RW는 편심에 대한 보상이 없어, 고 편심 디스크의 경우에는 배속을 낮추어 동작시킬 수밖에 없었으나, 본 연구에서는 편심을 학습하여 보상하는 편심 보상 제어 기능을 추가함으로써 보다 높은 배속에서도 편심 디스크를 동작시킬 수 있었을 뿐 아니라 점프시 평균 액세스 시간의 편차도 향상시킬 수 있음을 보였다. 또한 이러한 기능을 ARM7 마이크로프로세서 및 디지털 필터를 사용하여 하드웨어 및 소프트웨어로 적절히 나눈 서보 시스템을 구현하고 실험을 통해 제안된 서보 시스템의 우수성을 입증하였다.

### II. CD-RW의 서보 시스템

CD-RW 시스템은 트래킹 액츄에이터, 포커스 액츄에이터, 레이저 다이오드 및 포토 다이오드로 이루어진 픽업과, 슬레

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 8. 4., 채택확정 : 2004. 10. 10.

서삼준 : 안양대학교 전기전자공학과(ssj@anyang.ac.kr)

김동원, 박귀태 : 고려대학교 전기공학과

(upground@korea.ac.kr/gtpark@korea.ac.kr)

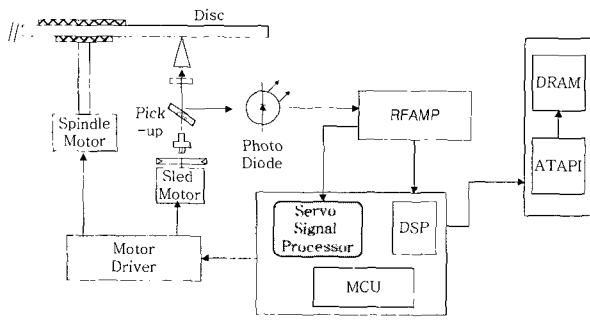


그림 1. CD-RW 드라이브 시스템의 블록선도.  
Fig. 1. Block diagram of CD-RW drive system.

드 모터, 스피들 모터 등의 기구부, 트래킹 오차(TE), 포커스 오차(FE) 등의 서보 에러와 데이터 신호를 생성하는 아날로그 RFAMP부, RFAMP에서 만들어 낸 에러 신호를 사용하여 전체 시스템이 안정되도록 제어하는 서보부 및 드라이버, 데이터를 처리하는 시디전용 디지털 시그널 프로세서(Digital Signal Processor: DSP), ATAPI로 이루어져 있다. CD-RW 시스템의 전체 블록선도를 그림 1에 나타내었다.

1. RFAMP 부분

서보용 에러신호 및 DSP용 데이터 신호를 만들어 내는 부분으로서, 디스크를 회전시키기 위한 스피들 모터를 제어하기 위한 스피들 에러, 레이저 빔을 이용하여 디스크에 있는 데이터를 읽어 내기 위한 포커스 및 트래킹 액츄에이터를 제어하기 위한 반사된 레이저 빔신호를 포토 다이오드를 통해 전압으로 변환시킨 후 이 전압신호를 서보와 DSP를 위해 FE, TE 및 RF 신호를 만든다.

2. 서보 부분

서보 부분은 하드웨어적으로는 아날로그 신호를 디지털화시키기 위한 ADC, 디지털 필터 및 에러 신호처리를 위한 DSP 부분 및 처리된 결과를 출력하기 위한 DAC로 구성되어 있다. 또한 기능적으로는 입력된 FE를 이용하여 디스크 반사면에 포커스를 맞추는 포커스 서보, TE신호를 이용하여 일정한 트랙을 추종하는 트래킹 서보, 광 픽업의 본체를 이동시키는 슬레드 서보 및, 디스크상의 빠른 액세스를 위해 트래킹 서치 및 슬레드 무브를 제공한다. 또한 여러 가지 외란을(defect, shock 등) 보상하기 위한 기능을 제공한다.

3. DSP 및 ATAPI

디스크에서 재생된 RF신호는 EFM(Eight-to-Fourteen Modulation)되어 디지털 데이터로 변환된 후 DSP에서 Leed-Solomon부호를 이용한 CIRC(Cross Interleaved Reed-Solomon Code)방식으로 정정한 후 ATAPI를 거쳐 PC 등의 호스트로 출력된다.

III. 중점 서보 제어

저 배속의 광디스크 시스템의 슬레드 모터는 대부분 DC 모터를 이용하여 제어를 하였으나, 응답속도의 한계 때문에 특히, 디스크의 고속 회전시 편심을 추종하여 대물렌즈의 쉬프트를 보정할 수 없었기 때문에 신호의 열화가 생길 수밖에 없었다. 그러므로 고 배속 광 디스크 시스템에서는 추종능력을 향상시키기 위해 응답 속도가 빠른 스텝 모터를 사용

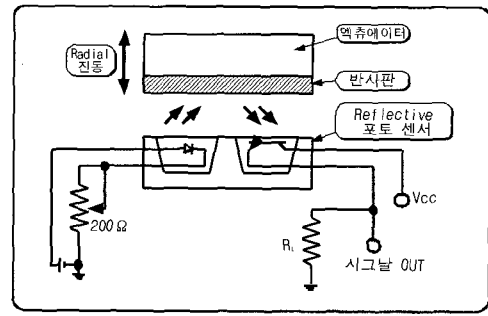


그림 2. Flag 센서.  
Fig. 2. Flag sensor.

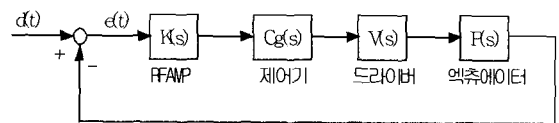


그림 3. 중점 서보 제어 블록선도.  
Fig. 3. Block diagram of center servo control.

하여 구현한다. 스텝 모터를 사용하는 시스템에서는 모터의 응답속도의 향상으로 인해 coarse seek(점프 트랙수가 256trk 이상일 때 마이컴 제어에 의한 슬레드 무브)시 기존 DC 모터를 사용한 시스템에 비해 3배 이상으로 가속도가 높아 트래킹 액츄에이터의 진동량이 3배 이상 커지게 되어 서치 종료 후의 불안정한 조건이 지속되어 on 트랙이 불가능하게 되는 현상이 발생한다. 특히 고 배속에서는 편심에 의한 외란까지 더해지므로 이러한 현상이 더 자주 발생한다.

중점 서보 제어는 위의 문제점을 해결하기 위해 트래킹 액츄에이터의 진동을 검출하는 별도의 센서(flag 센서)를 추가하여 coarse seek시 흔들림을 감지하여 이 양을 최소화하는 방향으로 제어하는 기능이다.

1. Flag 센서의 동작원리

Flag 센서는 발광 다이오드 및 Si-포토 트랜지스터로 구성된 반사형 포토 센서를 사용하고 있다. 그림 2와 같이 액츄에이터가 방사상(radial) 방향으로 진동을 하면 발광 다이오드에서 반사면으로 출사된 광은 다시 포토 트랜지스터로 입사 되는데, 이때 돌아오는 광량은 액츄에이터의 위치에 따라 다르게 된다. 즉, 액츄에이터가 포토센서와 가까워 질수록 돌아오는 광량은 많아지고 멀어질수록 광량이 적어지는데, 이 신호로써 고속 서치시 액츄에이터가 광축에서의 벗어남 정도를 알게 되고, 이 신호가 0이 되도록 제어기를 설계한다.

2. 제어기 설계

중점 서보를 위한 제어 블록선도는 그림 3과 같다. 그림 3에서  $K(s)$  는 Pre-Amp,  $C_g(s)$  는 트래킹 제어기,  $V(s)$  는 Driver,  $P(s)$  는 트래킹 액츄에이터,  $e(t)$  는 오차,  $d(t)$  는 디스크가 회전함에 따라 발생하는 외란으로 트래킹 서보에서는 편심에 의한 진동과 기타 시스템에서 발생하는 방사상의 진동이다.

제어기를 설계할 때 고려해야 할 사항은, coarse seek동안 스텝 모터의 움직임으로 인해 트래킹 액츄에이터는 상대적 인 힘을 받게 되어 광축 벗어남이 발생한 것을 보정하기 위해

플래그 센서 출력을 0으로 만들어 주어야 한다. 이 때 액츄에이터의 흔들림 주파수는 액츄에이터 고유 진동수이다. 그러므로 본 제어기의 주된 제어 영역은 액츄에이터의 공진주파수이다.

또한 flag 센서의 기구적인 조립공차에 따라 flag 센서의 출력신호가 상이하므로 양산을 고려한 설계가 필요하며, 경시 변화에도 제어능력을 발휘할 수 있도록 하기 위해서는 DC level의 변화에 대해서는 다소 둔감하게 제어기를 설계할 필요성이 있다.

이 때 RFAMP에는 픽업에서 각 서보 오차를 검출하는 오차 검출 부분과 검출된 오차를 저주파로 필터링하는 2단 저주파 필터가 포함된다. 그래서, RFAMP의 모델링은 픽업의 검출 감도  $G_{td}[v/mm]$ 와 2단 저주파 필터의 곱으로 다음과 같이 나타난다.

$$K(s) = \frac{2.75 \times 10^3}{(1 + s/2.8 \times 10^5)(1 + s/1.79 \times 10^6)} \quad (1)$$

또한, 드라이버는 단순히 1차 LPF로 모델링 된다. 본 연구에서 사용한 드라이버의 경우 게인이 1.497이고 컷오프 주파수가 48.23 kHz이므로  $V(s)$ 는 다음과 같이 나타난다.

$$V(s) = \frac{1.497}{1 + s/1.03 \times 10^5} \quad (2)$$

그리고, 트래킹 액츄에이터의 특성은 Dc감도= 0.95e-3m/v,  $f_0=37.5\text{Hz}$ ,  $Q_0=28\text{dB}$  이므로 다음과 같이 나타난다.

$$P(s) = \frac{K_t/R_0}{M_a s^2 + B_d s + K_a} = \frac{k_n \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

여기서,  $k_n = P(0)$ ,  $\zeta = \frac{1}{2Q_0}$ ,  $\omega_n = 2\pi f_0 \sqrt{1 - \zeta^2}$  이다.

따라서, (3)은 다음과 같이 나타나고

$$P(s) = \frac{5.27 \times 10^4}{s^2 + 9.378s + 5.55 \times 10^4} \quad (4)$$

제어기를 제외한 전체 루프는 다음과 같다.

$$L_{nc}(s) = \frac{2.75 \times 10^3}{(1 + s/2.8 \times 10^5)(1 + s/1.8 \times 10^6)} \times \frac{1.497}{1 + s/3.03 \times 10^5} \times \frac{5.27 \times 10^4}{s^2 + 9.38s + 5.55 \times 10^4} \quad (5)$$

목표한 10um 이내로 제어하기 위해서는 공진주파수에서 40dB이상의 이득을 확보하고, 위상 여유를 45도 이상, 이득 여유를 15dB 이상을 실현하여야 한다. 이러한 조건이 만족 되도록 아날로그 제어기를 다음과 같이 설계하였다.

$$C_g(s) = \frac{7.5(1 + s/16\pi)(1 + s/500\pi)}{(1 - s/24\pi)(1 - s/3200\pi)(1 - s/7000\pi)} \quad (6)$$

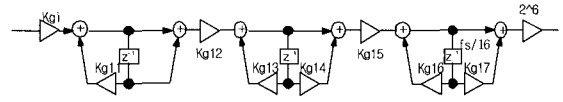


그림 4. 중점 서보 제어 필터.  
Fig. 4. Center servo control filter.

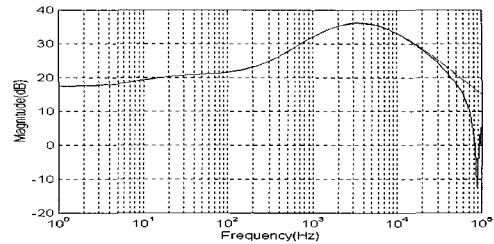


그림 5. 제어기의 주파수 응답.  
Fig. 5. Frequency response of controller.

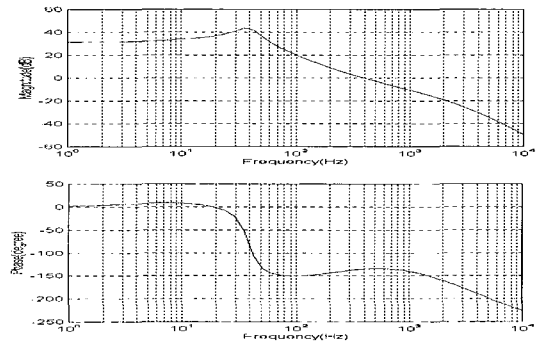


그림 6. 전체 시스템의 개 루프 특성.  
Fig. 6. Open-loop characteristics of overall system.

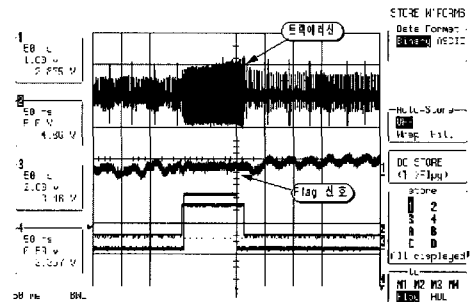


그림 7. 중점 서보 제어를 이용한 점프.  
Fig. 7. Jump using center servo control.

위의 아날로그 제어기를 matched pole-zero 맵핑 방법을 사용하여 중점 서보용 디지털 필터를 그림 4와 같이 설계하였다. 여기서  $K_{g1}=0.5186$ ,  $K_{g11}=0.77932$ ,  $K_{g12}=0.51508$ ,  $K_{g13}=0.9379$ ,  $K_{g14}=-0.99113$ ,  $K_{g15}=0.50806$ ,  $K_{g16}=-0.99318$ ,  $K_{g17}=-0.99545$  이다.

제어기  $C_g(s)$ 의 주파수 응답은 그림 5에 나타내었고 전체 시스템의 오픈 루프 특성은 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 대역폭(bandwidth)는 350Hz이고 위상 여유(phase margin)은 45° 정도임을 알 수 있다.

그림 7에는 중점 서보 제어를 이용한 점프를 나타내었는데 보상된 중점 서보를 이용하여 점프하였을 때의 측정신호로서 중점 에러인 flag신호의 크기가 거의 0으로 된 것을 볼 수 있다.

**IV. 편심 보상 제어**

디스크 드라이브 시스템에 존재하는 편심은 디스크 자체가 가지고 있는 성분 및 CD-ROM 디스크 드라이버의 광축의 흔들림에 의한 성분의 합으로 존재하며 서보 시스템에 있어서 주요한 외란 성분으로 작용하여 시스템의 성능을 크게 제한한다. 특히, 광디스크 기기의 고 배속에 따라 디스크 드라이브 시스템에 미치는 편심의 영향은 더욱 크게 나타나므로 이를 효과적으로 제거하지 않는 한, 편심 디스크에 대하여 드라이브 시스템의 구동 배속은 증가시킬 수 없게 된다. 게다가 서보 시스템의 트래킹 제어를 위한 선형 시스템 제어기만으로는 고 배속에서 고 편심 디스크인 경우에는 트래킹 진입조차 불가능한 상황이 발생하므로 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 기존의 선형 시스템 제어기에 추가로 feed-forward 제어 입력을 인가하여 시스템의 성능을 개선하였다.

본 연구에서는, CD-ROM에서의 편심에 의한 외란은 일정한 구형파로 나오며, 그 크기도 같은 배속에서는 일정한 것을 이용하여 초기에 반복 학습 제어를 통해 외란을 학습한 후 이 학습된 데이터를 편심 보상을 위한 feed-forward 제어 입력으로 계산하고, 디스크의 구동 배속의 변화에 효과적으로 대응을 하기 위하여 액추에이터의 주파수 응답 특성을 충분히 고려하여 저 배속에 얻은 편심 보상 정보를 고 배속에서 바로 이용함으로써 고 배속에서 트래킹 제어기의 진입 성능 및 편심으로 인한 시스템의 부정적인 요소를 효과적으로 제거하는 편심 보정 알고리즘을 적용하였다. 그림 8은 제안된 편심 보상 서보의 블록도이다. 점선 안의 부분이 새롭게 첨가되는 편심 보정 알고리즘에 의한 feed-forward 제어기의 블록을 나타낸다. 이 때 초기 편심 보정은 상대적으로 저 배속(20배속)에서 진행되는데, 그 이유는 고 편심 디스크의 경우에는 고 배속에서는 제대로 트래킹 풀-인조차 불가능하기 때문이다. 초기 편심 보정은 먼저 편심 크기를 검출하여 편심 크기가 일정 크기 이상(>70um)이라고 판단되면 편심 보상을 위한 편심 보정 루틴을 수행하게 된다. 편심 보상을 위한 feed-forward 제어 입력은 기존의 feedback 제어기인 선형

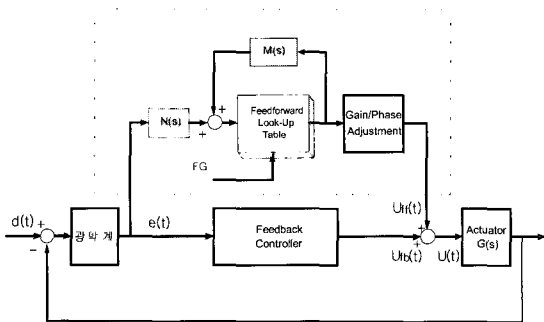


그림 8. Feed-forward 편심 보상 서보 블록선도.  
Fig. 8. Block diagram of feed-forward eccentric compensation servo.

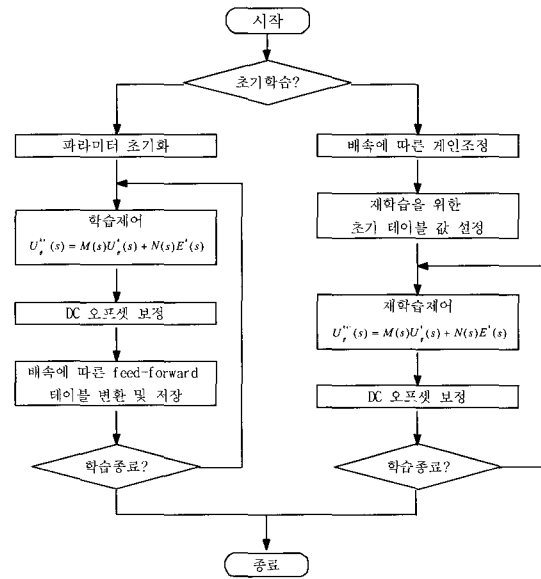


그림 9. 편심 보정 알고리즘의 순서도.  
Fig. 9. Flow chart of eccentric compensation algorithm.

제어기에 add-on 모듈로서 동작한다. 따라서 최종적으로 액추에이터에 인가되는 출력은 다음의 식과 같이 주어진다.

$$U(t) = U_{fd}(t) + U_{ff}(t) \tag{7}$$

여기서,  $U_{fb}(t)$  는 피드백 제어기의 출력을 나타내고  $U_{ff}(t)$  는 feed-forward 제어기의 출력을 나타낸다.

20배속 구간에서 편심 보정을 위한 feed-forward look-up 테이블은 다음의 식과 같은 반복 학습 제어 알고리즘에 의해서 반복적으로 갱신이 된다. (이때, 테이블의 초기값으로 영(zero)을 갖는다)

$$\begin{aligned} U_{ff}^{k+1}(s) &= M(s)U_{ff}^k(s) + N(s)E^k(s) \\ U_{ff}^0(s) &= 0 \end{aligned} \tag{8}$$

여기서, 위첨자  $k$  는 반복의 횟수를 의미하고  $M(s)$  와  $N(s)$  는 각각 필터를 나타내고  $E(s), U_{ff}(s)$  는 각각 트래킹 오차  $e(t)$  와 feed-forward 출력  $U_{ff}(t)$  의 라플라스 변환을 나타낸다. 위와 같은 반복 학습 제어 알고리즘에 의하여 feed-forward look-up 테이블의 값은 반복 학습이 진행됨에 따라서 트래킹 오차를 영으로 수렴하게 만드는 제어 입력으로 수렴한다. 이때, 필터  $M(s)$  와  $N(s)$  는 반복 학습 제어 알고리즘의 수렴성에 영향을 주게 되는데,  $M(s)$  와  $N(s)$  를 간단한 1차 LPF의 특성을 갖도록 설계를 하면 된다.

그림 9는 편심 보정 알고리즘의 순서도이다. 기준배속(20 배속)에서 측정된 편심 성분 데이터는 메모리에 기억되었다가 배속이 변경되면 그 배속에 맞게 위상과 주파수가 변경되어 적용된다.

이 루틴은 시스템 제어기의 펌웨어 명령(ecscmd, 0x6080)에 의해 call 된다. 초기학습과정과 재 학습을 구별하기 위해서

first라는 변수를 사용하였다. 초기학습과정에서는 먼저 학습 제어에 사용되는 변수들을 초기화하고 포즈 배속에서 반복 학습 제어 알고리즘을 수행한다. 반복 학습 제어 알고리즘을 구현하기 위하여  $N(s)$ 는 하드웨어 필터를,  $M(s)$ 는 소프트웨어 필터를 이용하였다. 이때 이용된 각각의 1차 LPF의 cutoff 주파수는  $M(s)$ 는 1.5kHz,  $N(s)$ 는 1.8kHz이다. 이때 이용된 소프트웨어 구조는 하드웨어 필터와 동일한 구조를 갖는다. 또한, 노이즈에 대한 대책으로 TE\_aliashrw에서 읽은 데이터의 하위비트 3개를 제거하여(ln\_gain) 상위비트의 데이터만을 사용하여 반복 학습 제어 알고리즘을 수행한다.

한편, 상대적으로 고 배속에서 진행되는 재 학습 과정에서는 편심에 의한 트래킹 오차가 커지게 되어 트래킹 오차 신호에 대한 노이즈의 영향이 덜 나타나므로 재학습 과정에서는 TE\_aliashrw에서 읽은 데이터의 하위비트 2개를 제거한 데이터를 사용하여 반복 학습 제어 알고리즘을 수행하였다.

그리고, feed-forward 제어 입력에는 DC 성분이 존재하지 않도록 항상 1주기마다의 feed-forward look-up 테이블의 정보의 평균값(offset)을 이용하여 DC 보상을 수행하였다.

**V. 하드웨어 구성 및 실험 결과**

본 연구에서 제안된 디지털 서보 프로세서는 그림 10과 같이 ARM7 마이크로프로세서, 하드웨어 필터, 아날로그 인터페이스, ADC, DAC, 및 디지털 회로를 이용하여 구현하였다. 여기서 ARM7은 CD-RW의 시스템 제어도 같이 겸하고 있다. 아날로그 인터페이스와 ADC는 RF IC로부터 들어오는 에러 신호를 디지털 신호로 바꾸어 주는 데 이용하며 DAC는 서보에서 처리된 데이터를 드라이버 IC로 출력하는데 이용한다. 디지털 서보 프로세서의 주 기능은 대부분 서보 필터와 ARM7에서 이루어지고 있다. 빠른 샘플링을 필요로 하는 필터는 구조를 고정하여 하드웨어로 구현하고, 나머지 기능은 ARM7을 이용하여 소프트웨어적으로 구현하였다. ARM7을 이용한 소프트웨어는 시스템을 제어하고 남은 시간을 이용하여 서보 기능을 구현하였으므로, 하드웨어의 크기 및 전류 소모량을 줄일 수 있었으며, 서보 기능들은 소프트웨어로 구현함으로써 향후 52배속이상으로 동작되는 CD-RW시스템 및 DVD-ROM/DVD-RAM에 이용시 간단하게 기능 향상이 가능

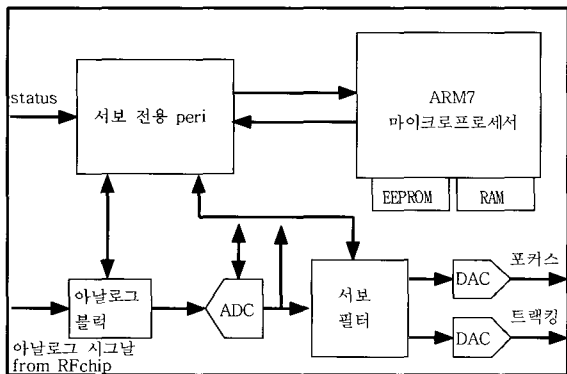


그림 10. 하드웨어 구성.  
Fig. 10. Hardware configuration.

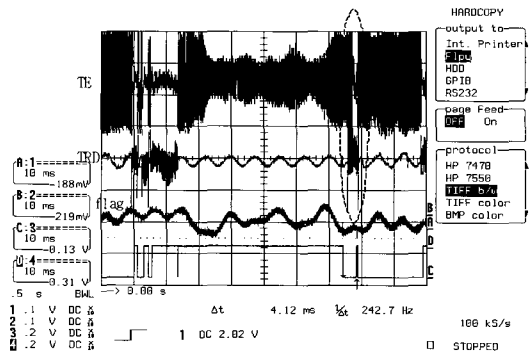


그림 11. 편심 140μm disc를 사용한 슬레드 무브(중점 서보 미 적용시).

Fig. 11. Sled move using eccentric 140μm disc(without center servo).

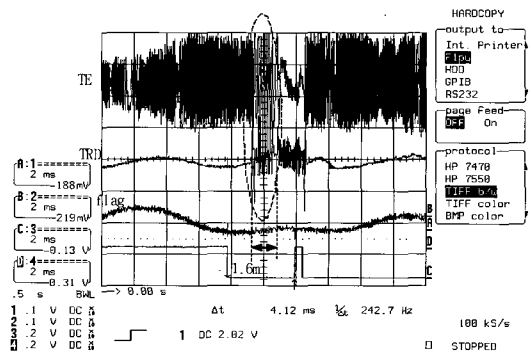


그림 12. 풀-인 부분 확대(중점 서보 미적용시).

Fig. 12. Pull-in part(without center servo).

하게 되었다.

**1. 중점 서보 제어 실험 결과**

중점 서보는 제어 테스트는 편심 140μm의 디스크를 이용하여 진행되었다. 그림 11은 중점 서보를 적용하지 않았을 때의 슬레드 무브시의 파형이며, 그림 12는 트래킹 풀-인 부분만 확대한 그림이다.

그림에 나타난 것과 같이 중점 서보를 적용하지 않았을 때는 액츄에이터의 흔들리는 정도를 나타내는 flag신호가 크게 나타난 것이 보인다. 중점 서보를 적용하지 않았을 때는 그림 11에서 풀-인 시간이 4.12msec로 비교적 길며 그림 12의 점선에서 나타난 것과 같이 풀-인시 액츄에이터의 흔들림으로 인한 불안정으로 인해 TE신호 및 TRD신호가 크게 흔들려 결국 슬레드 무브 시간이 길어진다.

그림 13은 중점 서보를 적용했을 때의 coarse seek시의 파형이며 그림 14는 트래킹 풀-인 부분만 확대한 그림이다. 중점 서보를 적용함으로써 액츄에이터의 흔들림(flag신호 참조)이 적용하지 않았을 때 보다 많이 줄어들어 있음을 알 수 있다. 중점 서보를 적용하면 그림 13에서와 같이 풀-인시간이 3.32msec로 줄어들었으며, 특히 그림 14 점선에서와 같이 트래킹 풀-인시의 TE 및 TRD신호가 쉽게 안정화하여 중점 서보를 사용하지 않았을 때에 비해 보다 빠르고 안정적인 coarse seek가 가능하였다.

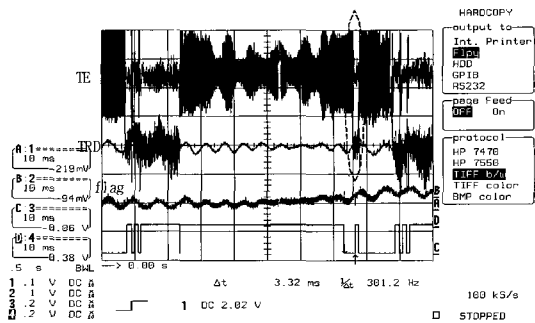


그림 13. 편심 140µm disc를 사용한 슬레드 무브 (중점 서보 적용시).

Fig. 13. Sled move using eccentric 140µm disc(with center servo).

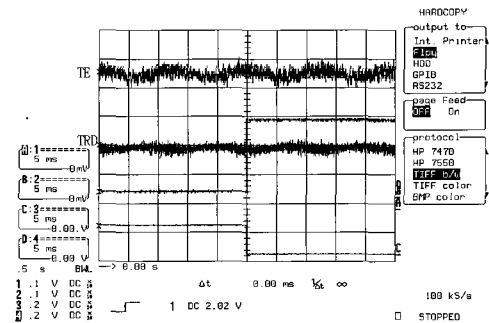


그림 16. 편심 보상전의 TE, TRD 신호.

Fig. 16. TE, TRD signal before eccentric compensation.

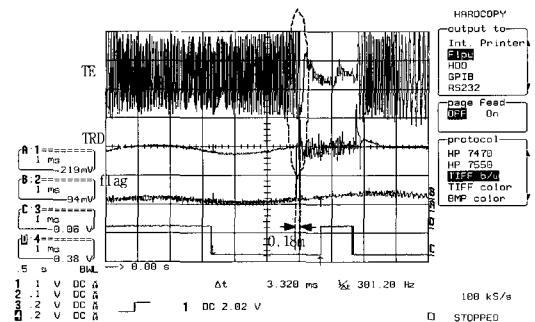


그림 14. 풀-인 부분 확대(중점 서보 적용시).

Fig. 14. Pull-in part(with center servo).

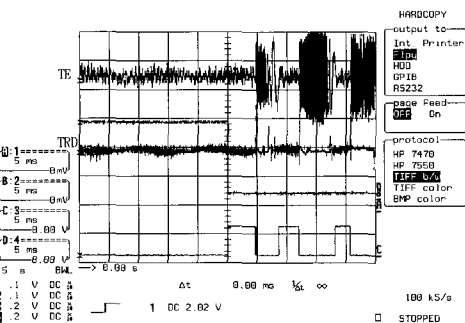


그림 17. 편심 보상후의 TE, TRD 신호.

Fig. 17. TE, TRD signal after eccentric compensation.

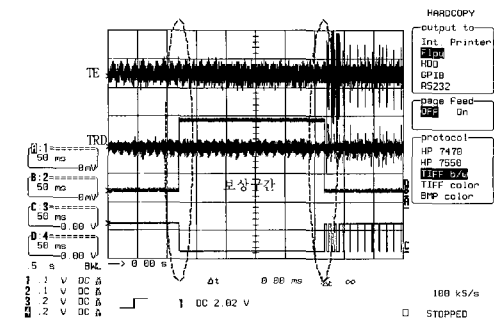


그림 15. 편심 보상시의 측정된 신호의 변화.

Fig. 15. Change of measured signals in eccentric compensation.

2. 편심 보상 제어 실험 결과

편심 성분은 스피들 모터의 회전 속도에 비례하여 TE에 정현파로 나타난다. 이 정현파를 미리 학습하여 기억한 후 서보 내부에서 입력된 TE에 학습된 데이터를 더하여 출력함으로써 편심 보상을 한다. 그림 15는 20배속에서 편심 210µm의 편심 성분을 이용하여 편심 보상 제어를 실시할 때의 신호도이다.

그림 15의 편심 보상이 되기 전과 편심 보상이 시작되는 부분인 점선 부분을 각각 그림 16과 그림 17에 확대하였다. 편심 보상전인 그림 15에서는 편심 성분인 구형파가 TE에 그대로 나타난다.

그림 17은 편심 보상이 시작된 후의 신호들이다. 그림에서 보듯이 편심 보상이 시작되면 TE에 타고 있던 편심 신호가

표 1. Random seek time의 평균값.

Table 1. Average random seek time.

편심 디스크	비적용시	적용시
140µ m	87msec(40×)	80msec(40×)
210µ m	110msec(32×)	91msec(40×)

표 2. Random seek time의 분포.

Table 2. Distribution of random seek time.

210µ m DISK	비적용시(32×)	적용시(40×)
COUNT	10000	10000
평균값	109.84	90.8
0 - 99msec	5109	6015
100 - 199msec	4297	3925
200 - 299msec	503	59
300 - 399msec	78	0
400 - 499msec	9	0
500 - 999msec	4	0
over 1sec	0	0

거의 없어져 평평해진 것을 알 수 있다. 편심 성분인 구형파가 있을 때 구형파의 peak가 되는 부분에서 트랙의 cross속도가 최대가 되어 트래킹 서치시 제어가 어려워지므로 이러한 편심 보상 효과는 특히 seek시에 크게 나타난다.

표 1은 편심 보상 유무에 따른 random seek 시간의 평균값

이다. 210 $\mu$ m 편심 디스크인 경우 편심 보상 비적용 시에는 40X에서 random seek가 안되므로 32X의 결과를 이용하였다. 표에서도 나타나 있듯이 편심 제어를 적용했을 때와 적용하지 않았을 때의 평균 random seek 시간은 편심 성분이 커질 수록 크게 차이가 난다.

표 2는 random access시 seek 시간의 분포도이다. 이는 실제로 시스템의 안정성 측면에 있어서 매우 중요한 요소인 데 편심 보정 적용 시에는 0-299ms에 전부 분포되어 있는 반면에 편심 보정을 적용하지 않았을 때는 300ms이상의 분포도 상당히 나타나, 편심 보정을 적용할 경우가 안정된 시간 분포가 나타나는 것을 알 수 있다.

**VI. 결론**

본 연구에서 CD-ROM과 같이 고속으로 회전하는 시스템에서 disc와 광축의 흔들림 등으로 인한 편심 성분의 보상과 스텝 모터를 사용하여 응답속도를 향상시키기 위해 나타나는 액츄에이터의 흔들림을 보상하는 방법에 대한 제안과 제안된 방법의 성능 실험 및 비교를 제시하였다.

실험결과에서도 나타나듯이 중점 서보 보상기를 사용했을 때와 사용하지 않았을 때를 비교해 보면 중점 서보 보상기를 사용했을 때가 사용하지 않을 때에 비해 트래킹 폴-인시간이 4.21ms → 3.32ms로 줄었을 뿐만 아니라 실질적으로 중요한 폴-인중의 신호의 오버슈트의 안정화 시간이 1.6ms → 0.18ms로 1/8~1/9배 이하 짧아져 보다 빠른 슬레드 무브가 가능하게 되었다.

또한, 편심 보상 제어를 사용하였을 때와 사용하지 않았을 때를 비교해보면, 편심 보상 제어를 사용하지 않았을 때는 편심 성분이 커지면(210 $\mu$ m) 32배속 이하에서만 슬레드 무브가 가능하고 또한 안정성 측면에서 중요한 요소인 슬레드 무브시의 access시간의 편차가 표에서 비교한 것과 같이 편심 보상 제어를 적용하였을 때가 안정하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 디지털 서보 시그널 프로세서는 시스템 컨트롤용인 ARM7 마이크로 프로세서과 하드웨어 필터를 이용하여 구현하였으며, 특히 빠른 샘플링을 필요로 하는 필터는 구조를 고정하여 하드웨어로 구현하고 나머지 기능은 ARM7 마이크로 프로세서가 전체 시스템을 제어하고 남은 시간을 이용하여 소프트웨어적으로 구현함으로써 하드웨어의 크기를 경감하였을 뿐만 아니라 간단하게 기능 향상이 가능하게 하였다.

**참고문헌**

[1] T. D. Milster, R. S. Upton, "Fundamental principles of crosstalk in optical data storage," *Japanese journal of*

*applied physics*, vol. 38, no. 3, pp. 1608-1613, 1999.  
 [2] C. Peng, M. Mansuripur and K. Nagata, "Edge detection readout signal and crosstalk in phase-change optical data storage," *Applied physics letters*, vol. 72, no. 26, pp. 3422, 1998.  
 [3] M. Mansuripur, G. A. N. Connell and J. W. Goodman, "Signal and noise in magneto-optical readout," *Journal of applied physics*, vol. 53, no. 6, pp. 4485, 1982.  
 [4] T. Shihara, K. Watanabe, S. Kadowaki and H. Ishibashi, "Lens shift correction in tracking servo system for digital versatile rewritable disc," *Japanese journal of applied physics*, vol. 39, no. 2, pp. 840-842, 2000.  
 [5] J. Han, K. M. Hock, W. Li, T. C. Chong, K. Shintani, T. K. Leong and R. Rayaraj, "An experimental model of sled system in an optical disk drive," *Japanese journal of applied physics*, vol. 39, no. 2, pp. 843-845, 2000.  
 [6] K. Arai, H. Okumura, H. Tokumaru and K. Ohishi, "Improvement of performance of a tracking servo system for an optical disk drive" *Japanese journal of applied physics*, vol. 39, no. 2, pp. 855-861, 2000.  
 [7] S. Yamada, S. Nishiwaki, A. Nakamura, T. Ishida and H. Yamaguchi, "Track center servo and radial tilt servo system for a digital versatile rewritable disc(DVD-RAM)," *Japanese journal of applied physics*, vol. 39, no. 2, pp. 867-870, 2000.  
 [8] T. Y. Doh and M. J. Chung, "Repetitive control design for linear systems with time-varying uncertainties," *IEE Proc. Control Theory Appl.*, vol. 150, no. 4, pp. 427-432, 2003.  
 [9] Z. Cao and G. F. Ledwich, "Adaptive repetitive control to track variable periodic signals with fixed sampling rate," *IEEE/ASME transactions on Mechatronics*, vol. 7, no. 3, pp. 378-384, 2002.  
 [10] M. T. White, M. Tomizuka and C. Smith, "Improve track following in magnetic disk drives using a disturbance observer," *IEEE/ASME transactions on Mechatronics*, vol. 5, no. 1, pp. 3-11, 2000.  
 [11] K. Arai, H. Okumura, H. Tokumaru and K. Ohishi, "Improvement of performance of a tracking servo systems for an optical disk drive," *Japanese journal of applied physics*, vol. 39, pp. 855-861, 2000.  
 [12] 유정래, 문정복, 진경복, 정명진, "고배속 광디스크 드라이브 트랙 추종제어시스템에서의 외란 관측기를 이용한 점근적 외란 제거," 제어·자동화시스템공학 논문지, 제 10 권, 제 5 호, pp. 402-410, 2004.  
 [13] 부찬혁, 강창익, 김호찬, "디스크 드라이브의 주기적 외란 고속 보상 제어," 제어·자동화시스템공학 논문지, 제 10 권, 제 2 호, pp. 153-163, 2004.



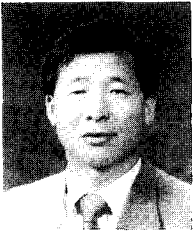
**서 삼 준**

1966년 4월 16일생. 1997년~현재 안양대학교 전기전자공학과 조교수. 관심분야는 비선형제어, 지능제어 이론, 퍼지 추론 시스템, 신경망, 원격 조종 시스템.



**김 동 원**

1974년 3월 15일생. 2002년~현재 고려대학교 전기공학과 박사수료. 관심분야는 소프트 컴퓨팅기반 뉴로-퍼지 시스템, 시스템 모델링 및 지능제어.



**박귀태**

1947년 10월 25일생. 1981년~현재 고려대학교 전기공학과 교수. 2000년~현재 (사) IBS KOREA 회장. 관심분야는 퍼지 및 신경망, 이동로봇, 컴퓨터 비전, 지능제어, 인텔리전트 빌딩시스템 및 정보통신.