

## 고배속 광 디스크 드라이브를 위한 강인 직접 검색 제어 시스템의 구현

### Implementation of Robust Direct Seek Control System for High-Speed Rotational Optical Disk Drives

진경복, 이문노

(Kyoung Bog Jin and Moon-Noh Lee)

**Abstract** : This paper presents a new direct seek control scheme that provides fast data access capability and robust performance for high-speed rotational optical disk drives (ODD). When a disk is rotating at a high speed to obtain fast data transfer in ODD, the magnitude and frequency of velocity disturbance caused by eccentric rotation of the disk increase in proportion to the rotational speed of the disk. Such disturbances make it almost impossible for the conventional seek control scheme to achieve stable and satisfactory seek performance. We analyze the problems that may arise when the conventional seek control scheme is applied to the high-speed rotational ODD and propose a new direct seek control scheme that will solve such problems. In the proposed scheme, a seek control system is designed such that its performance is guaranteed for a set of plants with parameter perturbations. The performance of the proposed seek control scheme is shown by experiments using a high-speed rotational ODD.

**Keywords** : optical disk drives, direct seek control, velocity disturbance, access time, plant uncertainty, structured singular value

#### I. 서론

광 디스크 드라이브는 광 픽업을 디스크의 반경 방향으로 이동시켜 디스크에 기록된 데이터를 읽어내는데 이를 위해 트랙 추종 제어 [1]-[4]와 검색 제어 [5]의 두 가지 제어 방식을 사용한다. 트랙 추종 제어의 목적이 광 픽업이 트랙을 정확하게 추종하는 것인 반면에 검색 제어의 목적은 광 픽업을 현재 트랙에서 특정 트랙으로 빨리 이동시키는 것이다. 광 디스크에 기록된 데이터를 정확하게 읽어내기 위해서는 트랙 추종 제어와 검색 제어가 교대로 실행되어야 한다. 디스크의 특정 트랙의 데이터를 읽기 위해서는 먼저 검색 제어로 광 픽업을 특정 트랙으로 최대한 빨리 이동시킨 후에 트랙 추종 제어로 특정 트랙의 데이터를 읽어내게 된다.

광 디스크 드라이브의 성능을 나타내기 위한 지수 중에 높은 데이터 전송률과 짧은 접근 시간 (access time)은 매우 중요한 성능 지수이다. 일반적으로 데이터 전송률을 높이기 위해서는 디스크 회전 속도를 증가시켜 데이터 재생 속도를 증가시키거나 에러 정정 능력을 강화하여 배속이 떨어짐 없이 데이터를 정확하게 재생할 수 있도록 하여야 한다. 그리고, 접근 시간을 짧게 하기 위해서는 검색 제어시 속도 프로파일의 최대 속도를 최대한 크게 하여 검색 시간을 최대한 줄이거나 한번의 검색 동작에 목표 트랙까지 이동하는 직접 검색 제어를 구현하여야 한다.

광 디스크 드라이브에서는 디스크의 트랙 중심과 디스크의 회전 중심이 일치하지 않음으로 인해 디스크가 회전할 때마다 디스크의 편심적인 회전으로 인해 외란이 발생한다. 이러한 외란의 크기와 주파수는 디스크 회전 속도에 직접적으

로 비례하고 검색 제어 구조에서도 속도 외란으로 나타난다. 데이터 전송률을 높이기 위해 디스크 회전 속도를 증가시키면 검색 동작시 속도 제어가 더욱 어려워져 목표 트랙까지 찾아가는 시간이 더욱 증가하게 된다. 따라서, 데이터 전송률을 높이면서 접근 시간을 줄이기 위해서는 디스크 회전 속도의 증가로 인해 크기가 더욱 커지는 속도 외란을 효율적으로 제어하여야 한다.

디스크의 특정 트랙의 데이터를 최대한 빨리 재생하기 위해서는 검색 제어 동안 광 픽업의 정확한 속도 제어가 필요하다. 그러나, 디스크의 회전 속도가 증가함에 따라 편심적인 회전으로 인해 발생하는 속도 외란의 영향이 더 증가하기 때문에 검색 동작 동안 정확한 속도 제어를 실행하기가 어렵고 시스템의 모델링 불확실성도 속도 제어의 성능을 나쁘게 만든다. 배속이 증가할수록 크기가 커지는 속도 외란과 모델링 불확실성에 대해서 만족할만한 검색 제어 성능을 유지하기 위해서는 속도 외란과 모델링 불확실성을 검색 제어 구조에서 고려하는 것이 필요하다. 그러나, 현재 대부분의 검색 제어 구조는 속도 외란과 모델링 불확실성을 설계에서 고려하지 않기 때문에 접근 시간을 현저하게 줄일 수 있는 직접 검색 제어 구조를 고배속 광 디스크 드라이브에서는 구현할 수 없다 [6]-[8]. 그래서, 여러 번의 검색 동작을 통해 목표 트랙을 찾아가게 되고 이로 인해 접근 시간도 증가하게 된다. 배속이 증가할수록 속도 외란의 영향이 커지기 때문에 검색 동작 반복 횟수와 접근 시간이 더욱 증가하게 된다.

본 논문에서는 고배속 광 디스크 드라이브에 직접 검색 제어를 구현할 수 있는 새로운 직접 검색 제어 구조를 제안하고 모델링 불확실성과 속도 외란에 대해서 강인 성능을 보장하는 제어기를 설계한다. 제안된 직접 검색 제어 구조는 속도 외란의 영향을 최대한 줄여 속도 제어의 정확성을 최대

한 높인다. 그리고, linear fractional transformation(LFT)과 structured singular value를 이용하여 강인 성능을 가진 직접 검색 제어 시스템을 설계한다. 제한된 직접 검색 제어 구조의 성능과 설계 기술은 시뮬레이션과 실험을 통해 검증된다.

II. 종래의 검색 제어 구조

그림 1은 전형적인 광 디스크 드라이브의 시스템 구성도를 나타낸다. 광 디스크 드라이브는 디스크의 회전을 위한 스피indle 모터, 포커스 및 트랙 추종을 위한 광 픽업 등으로 구성된다. 1단 구조의 트랙킹 액츄에이터로는 요구된 대역폭과 물리적인 크기를 만족하기가 불가능하기 때문에 대부분의 경우 비교적 큰 규모의 조동 액츄에이터 위에 높은 대역폭의 작은 미동 액츄에이터로 구성된 2단 구조의 트랙킹 액츄에이터를 사용한다. 조동 액츄에이터가 대역폭이 작지만 비교적 먼 거리를 이동할 수 있는 반면에 미동 액츄에이터는 이동 거리가 크게 제한되어 있지만 트랙 추종시 요구되는 높은 대역폭을 만족한다.

그림 2는 2단 구조 트랙킹 액츄에이터의 블록도를 나타내는데  $v_f$ 는 미동 액츄에이터의 속도,  $v_c$ 는 조동 액츄에이터의 속도,  $v_d$ 는 디스크의 편심적인 회전에 의해 발생하는 속도 외란을 나타낸다. 레이저 빔 스팟의 속도는 두 액츄에이터의 속도의 합 ( $v_f+v_c$ )이지만 측정되는 실제 속도는 속도 외란에 대한 레이저 빔 스팟의 속도이므로 실제 속도  $v_m$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$v_m = v_f + v_c + v_d \tag{1}$$

이것은 미동 액츄에이터의 속도, 조동 액츄에이터의 속도, 속도 외란이 별도로 측정될 수 없고 단지 모두 합한 실제 속도  $v_m$ 만이 측정될 수 있다는 것을 나타낸다. 결과적으로, 2단 구조 액츄에이터는 2입력 1출력 시스템으로 모델링될 수 있다.

그림 3은 종래의 검색 제어 시스템의 블록도를 나타낸다. 이동해야 할 트랙수가 주어지면 지령 속도 프로파일  $v_r$ 이 만들어진다. 제어기  $C_r(s)$ 은 지령 속도를 추종하기 위한 제어 입력을 만들어내고 실제 속도와 지령 속도의 차이는 피드백 제어기  $C_c(s)$ 에 입력된다. 종래의 검색 제어 구조에서는 실제 속도가 지령 속도를 추종하기 위해 조동 액츄에이터만을 사용한다. 만약, 속도 외란의 주파수 대역이 낮다면 종래의 제어 구조로도 정확한 속도 제어가 가능할 것이다. 그러나, 고배속 광 디스크 드라이브에서는 속도 외란의 주파수 대역이 증가하여 단지 조동 액츄에이터만으로 속도 외란을 제어하기가 어렵다. 편심적인 회전에 의해 발생하는 속도 외란은 지령 속도가 작을수록 영향이 크기 때문에 검색 동작의 시작과 끝에서 상대적으로 영향이 크다. 그래서, 검색 제어가 종료될 때 속도 에러가 크게 되고 트랙 추종 제어는 검색 제어가 종료되자마자 바로 정상적으로 시작할 수 없게 된다. 이것은 한번의 검색 동작으로 광 픽업이 목표 트랙으로 이동할 수 없다는 것을 의미한다.

그림 4는 조동 액츄에이터와 미동 액츄에이터가 정지된 상태에서 디스크가 2000rpm, 3500rpm, 5000rpm으로 회전할 때의 속도 외란  $v_d$ 를 나타낸다. 이 경우에, 두 액츄에이터의 속도는 0이므로 속도 외란은 실제 속도와 같게 된다. Suzuki[6][7] 등은 속도 외란의 크기가 10mm/s보다 큰 경우에 종래의 검색 제어 구조로는 직접 검색 제어를 성공적으로 실행할 수 없다는 것을 증명하였다. 그림 4에서 점선은 직접 검색 제어를 위해 허용되는 최대 속도 외란  $\pm 10\text{mm/s}$ 를 나타낸다. 그림에서 보면 디스크 회전 속도가 2000rpm에 도달하면 속도 외란은 허용 제한 속도보다 커진다는 알 수 있다. 그래서, 디스크의 회전 속도가 2000rpm보다 크면 종래의 검색 제어 구조로는 직접 검색 제어를 실현할 수 없게 된다.

종래의 검색 제어 구조로 직접 검색 제어를 구현하기 위해서는 속도 외란을 충분히 다룰 정도로 조동 액츄에이터의 대역폭이 증가하거나 속도 외란이 포함된 속도 에러를 충분히 제어할 수 있도록 미동 액츄에이터의 성능이 개선되어야 한다. 그러나, 이러한 액츄에이터의 성능 개선은 회전 속도

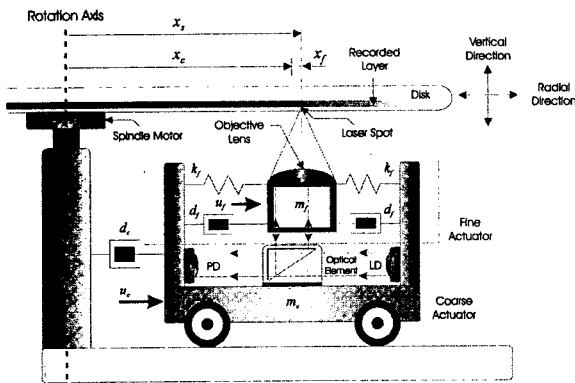


그림 1. 광 디스크 드라이브의 시스템 구성도.  
Fig. 1. Schematic view of an optical drive mechanism.

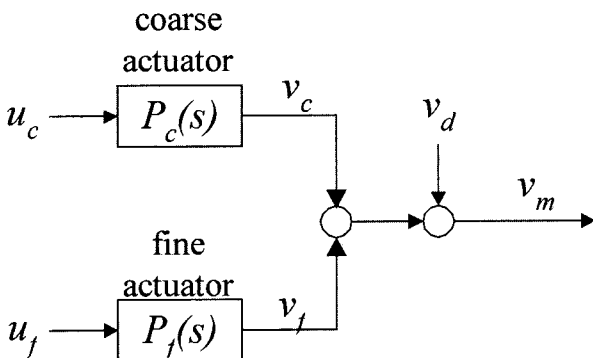


그림 2. 2단 액츄에이터의 블록도.  
Fig. 2. Block diagram of a compound actuator.

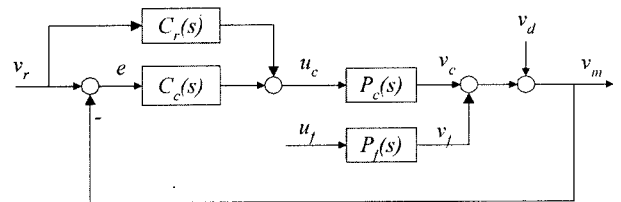


그림 3. 종래의 직접 검색 제어 구조의 블록도.  
Fig. 3. Block diagram of a conventional SCS.

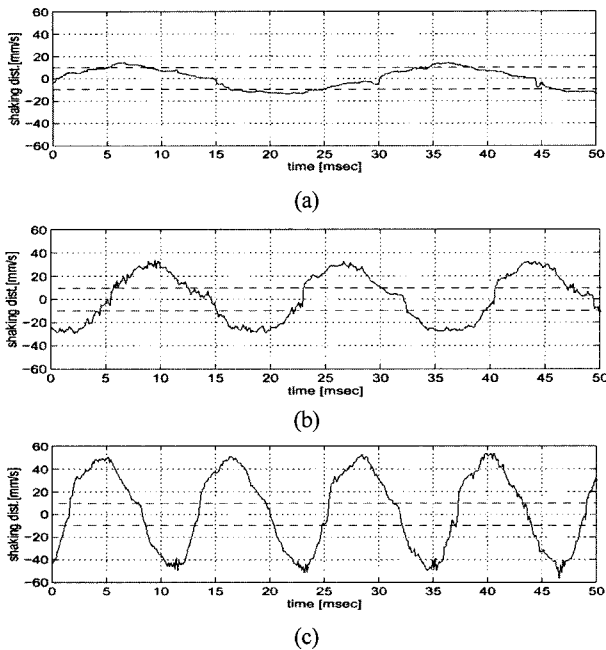


그림 4. 디스크가 (a) 2000 rpm, (b) 3500 rpm, (c) 5000 rpm로 회전할 때의 속도 외란.  
 Fig. 4. Velocity disturbances when the disk rotates at (a) 2000 rpm, (b) 3500 rpm, and (c) 5000 rpm.

의 증가에 따라 무한정 개선될 수 없고 상업적으로도 많은 비용이 요구되기 때문에 현재 대부분의 고배속 광 디스크 드라이브에서 직접 검색 제어를 사용하고 있지 않다. 그래서, 광 픽업이 특정 트랙에 도달하기까지 여러 번의 검색 동작이 필요하게 되고 접근 시간도 매우 증가하게 된다.

III. 제안하는 직접 검색 제어 구조

종래의 검색 제어 구조에서 중요한 문제는 디스크의 편심적인 회전으로 인해 발생하는 속도 외란의 영향을 고려하고 있지 않다는 것이다. 조동 액츄에이터와 미동 액츄에이터로 구성된 2단 액츄에이터는 그림 5와 같은 주파수 특성을 가지고 있다. 이것은 조동 액츄에이터는 낮은 주파수 영역에서 높은 게인을 가지고 있고 미동 액츄에이터는 높은 주파수 영역에서 높은 게인을 가지고 있다는 것을 나타낸다. 그래서, 속도 에러의 낮은 주파수 성분은 조동 액츄에이터에 의해 보상되는 것이 낮고 속도 에러의 고주파 성분은 미동 액츄에이터에 의해 보상되는 것이 더 낫다는 것을 알 수 있다. 종래의

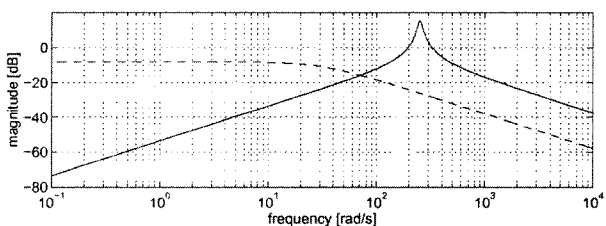


그림 5. 미동 액츄에이터 (실선)와 조동 액츄에이터 (점선)의 주파수 특성.  
 Fig. 5. Frequency response of the fine (solid) and coarse (dashed) actuators.

검색 제어 구조 중에 검색 제어 동안 대물 렌즈가 광축을 벗어나지 않도록 하기 위해 미동 액츄에이터를 사용한 적은 있지만 속도 외란을 제어하기 위해 미동 액츄에이터를 사용하지는 않았다.

본 논문에서는 종래의 검색 제어 구조의 문제점을 해결하기 위해 고대역의 미동 액츄에이터를 사용한 새로운 직접 검색 제어 구조를 제안한다. 그림 6은 제안된 직접 검색 제어 구조의 블록도를 나타낸다.

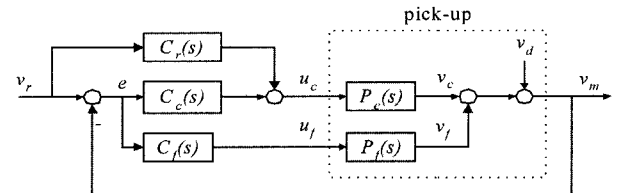


그림 6. 제안된 직접 검색 구조의 블록도.  
 Fig. 6. Block diagram of a new direct SCS.

이 그림에서는 고주파의 속도 외란의 영향을 줄이기 위해 미동 액츄에이터를 포함한 추가의 피드백 제어 루프를 사용한다. 디스크가 고배속으로 회전하는 경우에 디스크 회전 속도에 비례하는 속도 외란에 의해 고주파의 속도 에러가 발생한다. 속도 외란이 미동 액츄에이터에 의해 완전히 제거된다면 실제 속도는 단지 조동 액츄에이터에 의해 제어되어야 하는 저주파 성분만을 포함하게 된다. 결과적으로, 본 논문에서는 검색 제어가 종료된 후 바로 트랙 추종 제어를 안정적으로 시작하기 위해 검색 제어 동안 속도 에러를 허용되는 속도 에러 범위내로 제어할 것이다. 이를 위해 미동 액츄에이터 제어 루프의 제어기  $C_f(s)$ 는 미동 액츄에이터가 디스크의 고배속 회전으로 인해 발생하는 속도 외란의 영향을 효율적으로 제거하도록 설계되어야 한다. 속도 외란이 미동 액츄에이터에 의해 효율적으로 제거된다는 전제하에 조동 액츄에이터 제어 루프의 제어기  $C_r(s)$ 과  $C_e(s)$ 는 실제 속도가 지령 속도를 잘 추종하도록 설계되어야 한다.

디스크 반경 방향으로 광 픽업을 이동하는 조동 액츄에이터와 미동 액츄에이터로는 DC 모터와 voice coil motor를 사용한다. 각 액츄에이터의 특성은 간단히 선형 시스템으로 모델링될 수 있고 서로간의 영향은 거의 무시할 수 있지만 온도 변화 등의 액츄에이터 특성 변화로 인해 모델링 에러가 존재하게 된다. 그러나, 각 액츄에이터 파라미터는 어떤 범위내에서 변한다고 가정할 수 있기 때문에 미동 액츄에이터  $P_f(s)$ 와 조동 액츄에이터  $P_c(s)$ 는 모델링 불확실성을 고려하여 다음과 같이 모델링될 수 있다.

$$P_f(s) = \frac{k_f s}{s^2 + \alpha_f s + \beta_f} \quad [(m/s)/V] \quad (2)$$

$$P_c(s) = \frac{k_c}{s + p_c} \quad [(m/s)/V] \quad (3)$$

액츄에이터 파라미터는 다음과 같이 어떤 범위내에 존재한다고 가정된다.

여기서,  $k_{fn}, a_{fn}, \beta_{fn}, k_{cn}, p_{cn}$ 은 미동 액츄에이터와 조동 액츄에이터 모델의 공칭값이고  $\omega_{fn}, \omega_{fa}, \omega_{fb}, \omega_{ck}, \omega_{cp}$ 은 크기가 1로 제한된 ( $|\delta_i| < 1, i=1, \dots, 5$ ) 변수  $\delta_i$ 를 가진 파라미터 불확실성을 나타낸다.

미동 액츄에이터와 조동 액츄에이터를 (2), (3)과 같이 모델링할 때 지령 속도  $\nu_r$ 과 속도 외란  $\nu_d$ 입력에 대한 실제 속도  $\nu_m$ 의 전달 함수를 구하면 다음과 같다.

$$\nu_m = \frac{P_c(s)\{C_r(s) + C_c(s)\} + P_f(s)C_f(s)}{1 + P_c(s)C_c(s) + P_f(s)C_f(s)} \nu_r + \frac{1}{1 + P_c(s)C_c(s) + P_f(s)C_f(s)} \nu_d \quad (4)$$

모델링 불확실성이 없을 때는 위에서 언급된 미동 액츄에이터와 조동 액츄에이터의 제어 루프 특성을 가지는 피드백 제어기  $C_f(s)$ 과  $C_c(s)$ 를 설계하는 것은 그렇게 어렵지 않지만 액츄에이터가 모델링 불확실성을 가질 때에는 설계 과정이 매우 복잡하게 된다. 문제를 간단히 하기 위하여 미동 액츄에이터 제어 루프와 조동 액츄에이터 제어 루프의 루프 특성을 이용한다. 실제 속도에서 속도 외란의 영향을 줄이기 위해 미동 액츄에이터 제어 루프  $P_f(s)C_f(s)$ 는 속도 에러의 고주파 대역에서 높은 게인을 가지도록 설계하고 반면에 조동 액츄에이터 제어 루프  $P_c(s)C_c(s)$ 는 속도 에러의 저주파 대역에서 높은 게인을 가지도록 설계한다. 그리고, 이동해야 할 트랙수에 따라 발생하는 지령 속도는 고배속 광 디스크 드라이브에서 발생하는 속도 외란의 주파수보다 낮도록 설정한다. 속도 외란은 미동 액츄에이터에 의해서 제어될 수 있기 때문에 속도 에러의 고주파 대역은 속도 외란 주파수를 포함하도록 하고 조동 액츄에이터의 cutoff 주파수가 수십 Hz 이하이기 때문에 조동 액츄에이터 제어 루프에서 제어하는 저주파 대역은 수십 Hz 이하이다. 각 액츄에이터 제어 루프 특성과 지령 속도, 실제 속도를 토대로 (4)는 다음과 같이 근사화될 수 있다.

$$\nu_m \approx \frac{P_c(s)\{C_r(s) + C_c(s)\}}{1 + P_c(s)C_c(s)} \nu_r + \frac{1}{1 + P_f(s)C_f(s)} \nu_d \quad (5)$$

디스크 회전 속도와 관계없이 제어기  $C_r(s)$ 과  $C_c(s)$ 를 적절하게 설계함으로써 저주파 특성의 지령 속도  $\nu_r$ 은 조동 액츄에이터 루프에 의해서 다루어질 수 있다. 그림 5의 미동 액츄에이터의 특성과 드라이브 회로의 입력 제한 (saturation) 때문에 미동 액츄에이터 제어 루프는 저주파 영역에서 검색 제어 시스템에 거의 영향을 주지 않는다. 더구나, 속도 외란의 주파수와 크기가 디스크의 회전 속도가 커짐에 따라 증가하기 때문에 고배속 광 디스크 드라이브에서는 낮은 주파수에서 속도 외란이 거의 존재하지 않기 때문에 (5)는 저주파 영역에서 다음과 같이 근사화될 수 있다.

$$\nu_m \approx \frac{P_c(s)\{C_r(s) + C_c(s)\}}{1 + P_c(s)C_c(s)} \nu_r \quad (6)$$

저주파 영역과 같이 고주파 영역에서는 그림 5의 조동 액츄에이터 특성 때문에 조동 액츄에이터 제어 루프는 검색 제어 시스템에 거의 영향을 미치지 않는다. 그리고, 지령 속도도 저주파 영역에서 존재하기 때문에 고주파 영역에서 (5)는 다음과 같이 근사화될 수 있다.

$$\nu_m \approx \frac{1}{1 + P_f(s)C_f(s)} \nu_d \quad (7)$$

(6)과 (7)을 토대로 제안된 직접 검색 제어 시스템은 그림 7의 두개의 단일 입출력 시스템으로 분리될 수 있다.

그래서, 불확실한 직접 검색 시스템의 제어기 설계 문제는 (2), (3)을 만족하는 모든 액츄에이터 모델에 대해서 다음의 조건들을 만족하는 제어기  $C_f(s), C_r(s), C_c(s)$ 를 설계하는 문제가 된다.

1) 미동 액츄에이터는 속도 에러가 조동 액츄에이터에 의해 제거될 수 있는 저주파 성분만 가지도록 속도 외란의 영향을 제거하여야 한다.

2) 조동 액츄에이터는 속도 에러가 허용 에러 범위내에 존재하도록 지령 속도를 추종하여야 한다.

위의 제어 목적을 만족하는 제어기를 설계하기 위하여 본 논문에서는 LFT와 structured singular value를 사용한다. 제어기들은 D-K iteration [9]-[11], Hankel model reduction [11][12]에 의해 설계되는데 이를 위해 각 제어 목적을 반영하는 주파수 가중 함수  $W_f(s)$ 와  $W_c(s)$ 를 도입한다. 그림 7로부터 미동 액츄에이터 제어 시스템과 조동 액츄에이터 제어 시스템의 성능을 나타내는 변수  $z_f$ 와  $z_c$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} z_f \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_f(\nu_d + \nu_f) \\ W_c(\nu_r - \nu_m) \end{bmatrix} \quad (8)$$

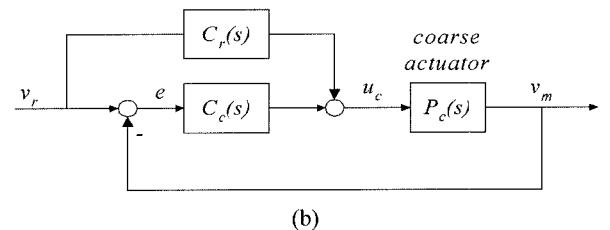
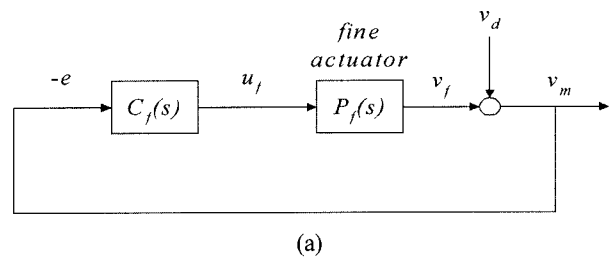


그림 7. 분리된 검색 제어 시스템 : (a) 미동 제어 시스템, (b) 조동 제어 시스템.

Fig. 7. Decoupled seek control system : (a) fine actuator control system (b) coarse actuator control system.

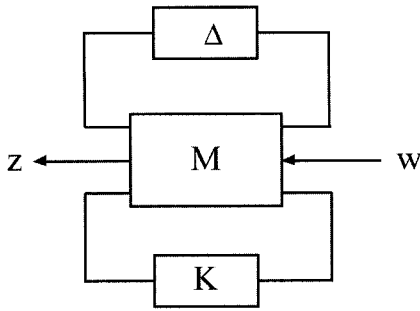


그림 8. LFT의 일반적인 구조.  
Fig. 8. General framework of LFT.

이러한 제어기 설계 구조에서 제어 목적은  $z_f$ 와  $z_c$ 가 허용된 범위내에 존재하도록 제어기를 설계하는 것이 된다.

일반적으로 모델링 불확실성이 있는 시스템을 다룰 때에 그림 8에 나타난 LFT 형태로 시스템을 나타내는 것이 효율적이다. 그림 7의 미동 액츄에이터 제어 시스템과 조동 액츄에이터 제어 시스템은 LFT에 의해 그림 8의 일반적인 구조로 구성될 수 있다.

따라서, 불확실한 직접 검색 시스템의 제어기 설계 문제는 그림 8의  $w$  입력에 대한  $z$  출력의 전달 함수인  $F_u(F_l(M, K), \Delta)$ 의 structured singular value ( $\mu$ )가 1보다 작도록 제어기를 설계하는 문제가 된다.

미동 액츄에이터 제어 시스템의 경우에 M 행렬은 다음과 같이 구성되어진다.

$$M = M_f = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & q_1(s) \\ q_2(s) & -q_2(s) & -q_2(s) & 0 & k_{fn} s P_{fn}(s) \\ q_3(s) & -q_3(s) & -q_3(s) & 0 & k_{fn} q_3(s) \\ q_4(s) & -q_4(s) & -q_4(s) & W_f(s) & k_{fn} q_4(s) \\ -P_{fn}(s) & P_{fn}(s) & P_{fn}(s) & -1 & -k_{fn} P_{fn}(s) \end{bmatrix},$$

$$\Delta = \Delta_w = \text{diag}\{\delta_3, \delta_2, \delta_1\}, K = C_f(s), z = z_f, w = v_d \quad (9)$$

$$P_{fn}(s) = \frac{s}{s^2 + \alpha_{fn}s + \beta_{fn}}, q_1(s) = w_{fn} k_{fn},$$

$$q_2(s) = w_{fa} \alpha_{fn} P_{fn}(s), q_3(s) = \frac{w_{fb} \beta_{fn} P_{fn}(s)}{s},$$

$$q_4(s) = W_f(s) P_{fn}(s)$$

조동 액츄에이터 제어 시스템의 경우도 M 행렬은 다음과 같이 구성되어진다.

$$M = M_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & w_{ck} k_{cn} C_r(s) & w_{ck} k_{cn} \\ \frac{p_{cn} w_{cp} s}{s + p_{cn}} & -\frac{p_{cn} w_{cp}}{s + p_{cn}} & \frac{p_{cn} w_{cp} k_{cn} C_r(s)}{s + p_{cn}} & \frac{p_{cn} w_{cp} k_{cn}}{s + p_{cn}} \\ \frac{W_c(s)}{s + p_{cn}} & \frac{W_c(s)}{s + p_{cn}} & \gamma_1 W_c(s) & -\frac{k_{cn} W_c(s)}{s + p_{cn}} \\ \frac{1}{s + p_{cn}} & \frac{1}{s + p_{cn}} & \gamma_1 & -\frac{k_{cn}}{s + p_{cn}} \end{bmatrix},$$

$$\Delta = \Delta_{uc} = \text{diag}\{\delta_5, \delta_4\}, K = C_c(s), z = z_c,$$

$$w = v_r, \gamma_1 = \left(1 - \frac{k_{cn} C_r(s)}{1 + p_{cn} s}\right) \quad (10)$$

미동, 조동 액츄에이터 제어 시스템은 모든 모델링 불확실성에 대해 다음의 조건을 각각 만족하는 제어기를 설계함으로써 미동 액츄에이터 제어 시스템과 조동 액츄에이터 제어 시스템은 강인 안정하고 각 시스템 계인은 1보다 작게 된다 [11].

$$\sup_{w \in \mathfrak{R}} \mu_{\Delta pf}(F_l(M_f(jw), C_f(jw))) < 1 \quad (11)$$

$$\sup_{w \in \mathfrak{R}} \mu_{\Delta pc}(F_l(M_c(jw), C_c(jw))) < 1 \quad (12)$$

(11)과 (12)를 만족하는  $\mu$ 의 정확한 값을 계산하기가 어렵기 때문에  $\mu$ 의 upper bound를 사용한다.  $\mu$  설계에서는  $\mu$ 의 upper bound를 구하기 위해 D-K iteration을 사용하는데 D-K iteration은 보통 구현하기 힘든 높은 차수의 제어기가 초래되기 때문에 Hankel model reduction을 사용하여 설계된 제어기의 차수를 줄여야 한다[12].

#### IV. 시뮬레이션 및 실험 결과

본 논문에서 제안된 제어기 설계 방법을 785nm 파장의 고배속 광 디스크 드라이브에 적용한다. 1.6um 트랙 피치의 디스크가 5000rpm의 일정한 속도로 회전할 때에 디스크의 편심적인 회전에 의해 발생하는 속도 외란은 다음과 같다.

$$v_d(t) = v_{dm} \sin(523.6t + \phi_1) \quad (13)$$

여기서,  $v_{dm}$ 은 ISO 규격에 따라 50mm/s보다 작은 값을 가진다. 실제로, 속도 외란은 디스크 회전 주파수 성분과 그 정수배의 주파수 성분으로 구성되지만 정수배의 고주파 성분의 크기는 허용되는 속도 에러의 크기보다 작기 때문에 속도 외란은 (13)과 같이 디스크 회전 주파수 성분으로 근사화될 수 있다.

미동 액츄에이터와 조동 액츄에이터는 (2)와 (3)과 같이 2차와 1차 선형 시스템으로 근사화될 수 있다. 미동 액츄에이터에 대한 데이터 시트에는 공진 주파수 ( $w_n$ ), Q감도 (dB), DC 감도, 200Hz 에서의 감도 등의 파라미터가 주어져 있다. 미동 액츄에이터는 보통  $K_p w_n^2 / (s^2 + 2\zeta w_n + w_n^2)$ 의 2차 시스템으로 모델링되는데 감쇠 상수 ( $\zeta$ )는  $1/2Q$ ,  $K_p$ 는 DC 감도를 이용하여 계산될 수 있다. 조동 액츄에이터는 DC 모터이기 때문에 마찰 계수 등을 이용하여 쉽게 모델링될 수 있다. 액츄에이터 모델링 과정은 [13]을 참조하라. 액츄에이터 파라미터는 보통 공칭값에서  $\pm 20\%$  이내의 값을 가지는데 이러한 파라미터 변화는 모델링 불확실성으로 간주된다. 이러한 불확실성을 고려하여 미동 액츄에이터와 조동 액츄에이터의 모델 계수는 다음과 같이 모델링될 수 있다.

$$k_f = 43.17(1 + 0.2\delta_1), \alpha_f = 30.17(1 + 0.2\delta_2),$$

$$\beta_f = 28780(1 + 0.2\delta_3), k_c = 12.57(1 + 0.2\delta_4),$$

$$p_c = 31.42(1 + 0.2\delta_5), |\delta_i| \leq 1, i = 1, \dots, 5$$

조동 액츄에이터의 1차 cutoff 주파수는 31.42rad/s(5Hz)이고 속도 외란의 주파수는 523.6rad/s(83Hz)이다. 조동 액츄에이터는 낮은 대역의 1차 LPF 특성을 가지기 때문에 속도 외란을 조동 액츄에이터로는 제어할 수 없고 미동 액츄에이터로는 제어할 수 있다.

1. 제어기 설계

먼저, 제어기  $C_r(s)$ 는 모델링 불확실성이 없는 상황에서는 실제 속도가 지령 속도를 완벽히 추종할 수 있도록 공칭 조동 액츄에이터의 역모델로 선택되어야 한다. 그러나, 조동 액츄에이터는 strictly proper이기 때문에 역모델의 분자의 차수가 분모보다 크게 되므로 제어기  $C_r(s)$ 는 다음과 같이 선택되어야 한다.

$$C_r(s) = \frac{s + p_{cn}}{k_{cn}(s/p_a + 1)} \quad (14)$$

여기서, 추가된 극점  $p_a$ 는 조동 액츄에이터 제어 루프의 대역폭인 200rad/s보다 크게 선택되어야 하므로 본 논문에서는 500rad/s로 선택하였다.

본 논문의 제어 목적을 달성하기 위하여 미동 액츄에이터 제어 시스템은 속도 외란이 존재하는 고주파 영역에서 충분히 높은 게인을 가져야 하고 조동 액츄에이터 제어 시스템은 저주파 영역에서 충분히 높은 게인을 가져야 한다. 제어기 설계 과정에서 이러한 시스템 특성을 반영하기 위해 다음과 같은 가중 함수  $W_f(s)$ ,  $W_c(s)$ 를 도입한다.

$$W_f(s) = 0.8 \frac{(s + 21410)(s^2 + 90s + 5625)}{(s + 400)(s + 500)(s + 600)} \quad (15)$$

$$W_c(s) = 0.6 \frac{(s + 500)^2}{(s + 0.6)(s + 1000)} \quad (16)$$

각 파라미터의 변화를  $\pm 20\%$ 로 하고 D-K iteration를 사용하면 모든 목표 성능을 만족하는 제어기  $C_f(s)$ ,  $C_c(s)$ 는 다음과 같이 설계될 수 있다.

$$C_f(s) = 600 \frac{(s + 76)(s + 242)}{(s + 500)(s + 600)} \quad (17)$$

$$C_c(s) = 2380 \frac{(s + 56)(s + 1417)}{(s + 0.6)(s + 312)(s + 1000)} \quad (18)$$

그림 9는 미동, 조동 액츄에이터 제어 시스템의  $\mu$  값을 나타낸 것이다. 각  $\mu$ 의 최대값이 1보다 작기 때문에 설계된 제어기 (17), (18)은 모든 파라미터 불확실성에 대해 미동, 조동 액츄에이터 제어 시스템을 강인 안정하게 한다. 미동, 조동 액츄에이터 제어 시스템의 루프 전달 함수의 주파수 특성은 그림 10에 나타나 있다. 예상한 것과 같이 조동 액츄에이터 제어 시스템은 저주파 영역에서 높은 게인을 가지고 미동 액츄에이터 제어 시스템은 디스크 회전 주파수와 그 정수배의 고주파 영역에서 높은 게인을 가진다는 것을 볼 수 있다.

2. 시뮬레이션 결과

설계된 미동, 조동 액츄에이터 제어 시스템의 성능을 알아보기 위해 그림 11의 신호들을 속도 외란과 지령 속도로 사용한다. 시뮬레이션에서 사용하는 속도 외란은 5000rpm의 각속도로 디스크가 회전할 때에 발생할 수 있는 최대 속도 외란이다. 지령 속도는 현재의 트랙에서 6000 트랙을 이동하기 위해 지령 속도 발생기에 의해 생성되는데 조동 액츄에이터와 드라이브 회로의 성능을 고려하여 만들어진다. 종래의 검색 제어 구조와 제안된 직접 검색 구조사이의 검색 제어 성능을 비교하기 위하여 두 제어 구조에 대해 그림 11의 속도 외란과 지령 속도를 인가하고 설계된 제어기 (17), (18)을 사용한다.

그림 12(a)는 종래의 검색 제어 구조에 의해 광 픽업이 6000 트랙을 이동하였을 때의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 조동 액츄에이터의 제한된 성능 때문에 속도 외란을 충분히 제거하지 못해 속도 에러가 허용된 속도 에러 범위 (6mm/s)를 벗어나는 것을 볼 수 있다. 그림 12(b)는 제안된 직접 검색

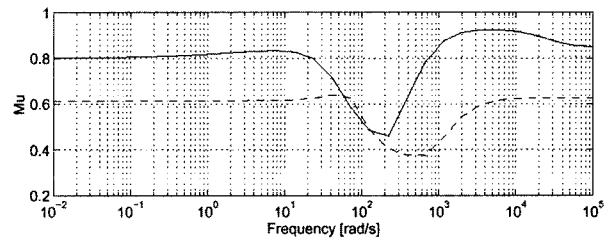


그림 9. 미동 제어 시스템 (실선)과 조동 제어 시스템(점선)의  $\mu$ -plots.

Fig. 9.  $\mu$ -plots of both fine(solid) and coarse(dashed)actuator control systems.

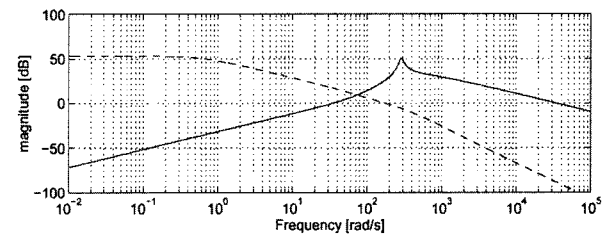


그림 10. 미동 (실선)과 조동 제어 시스템 (점선)의 루프 전달 함수의 주파수 특성.

Fig. 10. Frequency response of open loop transfer function of both fine (solid) and coarse (dashed) actuator control system.

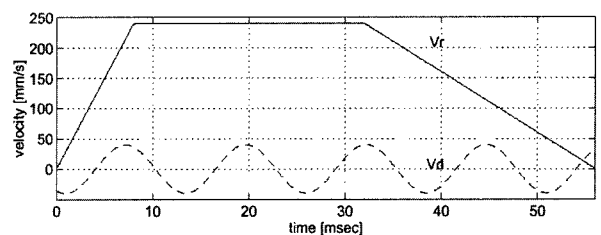


그림 11. 시뮬레이션에서 사용된 입력 신호들.

Fig. 11. External signals used in simulation.

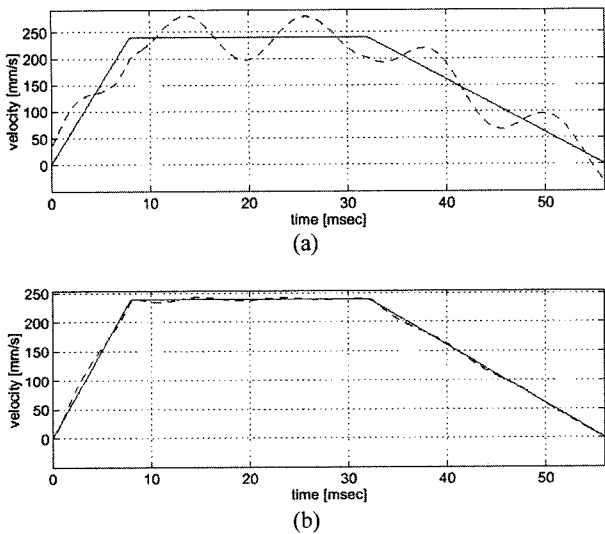


그림 12. 시뮬레이션 결과: (a) 종래의 검색 제어, (b) 제안된 직접 검색 제어.  
 Fig. 12. Simulation results : (a) the conventional seek control and (b) the proposed direct seek control (reference velocity (solid), measurable velocity(dashed)).

제어 구조에 의한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 속도 외란이 존재하여도 실제 속도가 지령 속도를 잘 추종하고 있는 것을 볼 수 있다. 이것은 종래의 검색 제어 구조와 달리 제안된 검색 제어 구조에서는 미동 액츄에이터에 의해 속도 외란의 영향을 제거하기 때문에 실제 속도가 지령 속도를 잘 추종하고 있다는 것을 나타낸다.

3. 실험 결과

그림 13은 실험을 위해 개발한 디지털 서보 시스템의 구성도를 나타낸다. 디지털 서보 시스템은 DSP, 32 Kwords SRAM, EPROM, 12-bit A/D 변환기, 12-bit D/A 변환기, EPLD 등으로 구성된다. 제안된 방법에 의해 설계된 제어기와 직접 검색 시스템을 포함한 모든 광디스크 서보 시스템은 40MHz 클럭으로 구동되는 DSP96002에 의해 디지털로 구현된다. 모든 광 디스크 서보 시스템의 성능을 개선하기 위하여 각 시스템마다 샘플링 주파수를 다르게 하는 multirate 샘플링 서보 기술을 사용하였다. 샘플링 주파수는 각 시스템의 요구

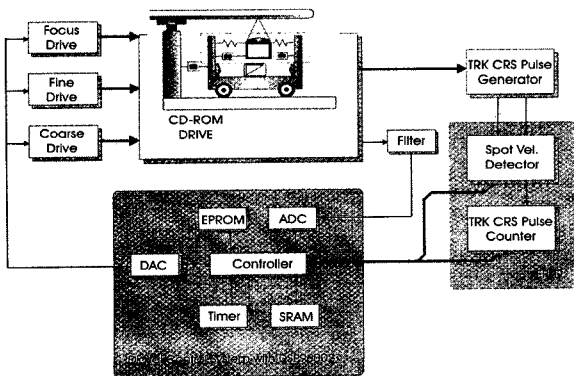


그림 13. 직접 검색 제어를 위한 디지털 서보 시스템의 구성도.  
 Fig. 13. Schematic diagram of the digital servo system for the direct seek control.

된 대역폭에 따라 결정되는데 미동 액츄에이터 제어 시스템과 조동 액츄에이터 제어 시스템은 50KHz와 25KHz로 실행되었고 모든 제어 알고리즘은 DSP96002에서 어셈블리어로 프로그램되었다.

그림 14와 15는 디스크가 5000 rpm으로 회전할 때 종래의 검색 제어 구조와 제안된 직접 검색 제어 구조에 의해 광 픽업을 6000 트랙 이동하였을 때의 실험 결과이다. 그림 14(a)는 광 픽업이 트랙을 따라 이동할 때의 트랙 횡단 신호를 나타내고 그림 14(b)와 (c)는 지령 속도와 실제 속도를 각각 나타낸다. 시뮬레이션과 같이 종래의 검색 제어 구조의 실험 결과는 지령 속도가 0인 목표 트랙에서 속도 외란의 영향으로 속도 에러가 허용하는 속도 에러 범위를 벗어남을 보여준다. 그런 경우에, 목표 트랙에서부터 원하는 정보를 읽어내기 위한 트랙 추종 제어는 속도 에러가 허용 범위내로 안정될 때까지 기다려야 한다. 그러나, 안정될 때까지 기다리는 동안 광 픽업은 목표 트랙을 벗어나게 되어 다시 추가의 검색 동작이 필요하게 된다. 광 픽업이 최종적으로 목표 트랙에 도달하기 위해 이러한 반복적인 검색 동작이 필요하므로 종래의 검색 제어 구조로는 전체 접근 시간이 매우 증가하게 된다.

제안된 직접 검색 구조와 제안된 제어기를 사용하는 경우에는 그림 15에서와 같이 실제 속도에서 속도 외란의 영향을 줄일 수 있다. 미동 액츄에이터 제어 루프가 속도 외란을 제거하기 때문에 실제 속도는 지령 속도를 정확히 추종하게 된다. 그래서, 검색 동작이 종료된 후에 트랙 추종 제어를 바로 시작할 수 있으므로 검색 동작 후 기다릴 필요도 없고 추가적인 검색 동작이 불필요하게 된다. 최종적으로 현재 트랙에서 6000 트랙을 이동하는데 종래의 검색 제어 구조 방법으로는 접근 시간이 84 msec이었지만 제안된 직접 검색 제어 방

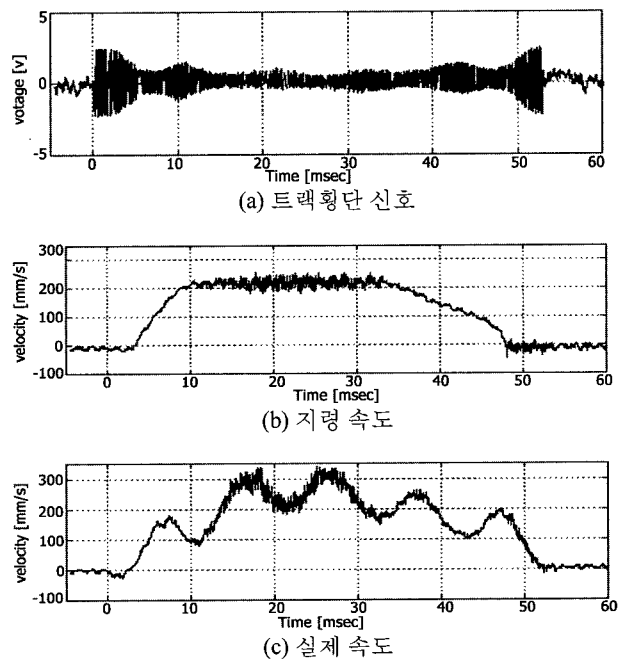


그림 14. 종래의 검색 제어 구조를 사용하여 6000트랙을 이동할 때의 실험 결과.  
 Fig. 14. Experimental results during seeking 6000 tracks using the conventional SCS.

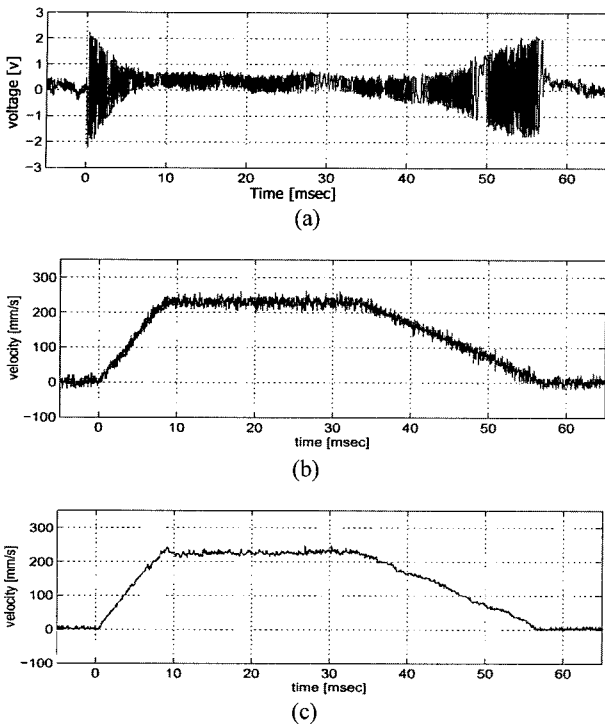


그림 15. 제안된 검색 제어 구조를 사용하여 6000 트랙을 이동할 때의 실험 결과: (a) 트랙 횡단 신호, (b) 지령 속도, (c) 실제 속도.

Fig. 15. Experimental results during seeking 6000 tracks using the proposed direct SCS : (a) track cross signal, (b) reference velocity, (c) measurable velocity.

범으로는 56 msec으로 약 30 msec 시간이 단축되었다.

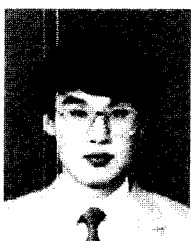
**V. 결론**

본 논문에서는 고배속 광 디스크 드라이브를 위한 새로운 직접 검색 제어 구조를 제안하였다. 액츄에이터 불확실성이 존재하는 상태에서 직접 검색 제어의 성능을 만족하는 제어를 설계하였고 시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 직접 검색 제어 구조의 성능을 검증하였다. 추가적인 센서나 회로없이 단지 액츄에이터 특성만을 이용하는 직접 검색 구조를 제안함으로써 실제 시스템에 매우 효율적으로 적용될 수 있다.

**참고문헌**

[1] M. Steinbuch and G. Schootstra, "Robust control of a

compact disc player," in *Proc. Conf. Dec. Contr.*, pp. 2596-2600, 1992.  
 [2] M. Steinbuch, P. Groos, G. Schootstra, and H. Bosgra, "Multivariable control of a compact disc player using DSPs," in *Proc. Amer. Contr. Conf.*, pp. 2434-2438, 1994.  
 [3] M. Kamoshita and M. Fujita, "Tracking control of an optical disk drive using  $\mu$ -analysis and synthesis," in *Proc. Conf. Dec. Contr.*, pp. 873-874, 1995.  
 [4] J.-H. Moon, M.-N. Lee, M. J. Chung, S. Y. Jung, and D. H. Shin, "Track-following control for optical disk drives using an iterative learning scheme," *IEEE Trans. Cons. Electr.*, vol. 42, no. 2, pp. 192-198, 1996.  
 [5] K. B. Jin, H. K. Lee, and M. J. Chung, "Direct seek control scheme for high-speed rotational optical disk drives," *Electronics Letters*, vol. 34, no. 15, pp. 1476-1477, Jul 1998.  
 [6] M. Suzuki, H. Tanaka, and Y. Miura, "Pull-in condition and method of tracking servo in optical disk drive," *J. Inst. Television Jpn*, vol. 44, no. 10, pp. 1391-1397, 1990.  
 [7] M. Suzuki, H. Tanaka, M. Miura, Y. Suzuki, and M. Mori, "Advanced direct seeking system for 5.25, magneto-optical disk drive," *J. Appl. Phys.*, vol. 32, Part 1, no. 11B, pp. 5371-5375, 1993.  
 [8] T. Semba, "Model-following digital servo using multirate sampling for an optical disk drive," *J. Appl. Phys.*, vol. 32, Part 1, no. 11B, pp. 5385-5391, 1993.  
 [9] J. C. Doyle, "Analysis of feedback systems with structured uncertainties," *IEE Proc.*, Part D, vol. 129, no. 6, pp. 242-250, 1982.  
 [10] A. Packard and J. C. Doyle, "The complex structured singular value," *Automatica*, vol. 29, no. 1, pp. 71-109, 1993.  
 [11] G. Balas, J. C. Doyle, K. Glover, A. Packard, and R. Smith,  *$\mu$ -Analysis and Synthesis Toolbox*, The Math Works, Inc. 1994.  
 [12] K. ZHOU, J. C. DOYLE, and K. GLOVER, *Robust and Optimal Control*, Prentice-Hall, Inc. 1989.  
 [13] 이문노, 문정호, 정명진, 정수열, 신동호, "컴팩트 디스크 플레이어의  $H_{\infty}$  제어기의 구현," 전기학회 하계 학술대회 논문집, pp. 732-735, 1994.



**진 경 복**

1961년 5월 19일생. 1985년 한양대학교 전기공학과 (공학사). 1987년 한양대학교 전기공학과 (공학석사). 1999년 한국과학기술원 자동화 및 설계공학과 (공학박사). 2001년~현재 한국기술교육대학교 제어시스템

공학과 조교수. 관심분야는 광 메카트로닉스 제어, 강인 제어, 광 신호처리, 진동 제어.



**이 문 노**

1969년 3월 11일생. 1991년 경북대학교 전자공학과 (공학사). 1993년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사). 1998년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사). 2001년 9월~현재 동의대학교 컴퓨터공학과

전임강사. 관심분야는 강인 제어, 광 디스크 서보 시스템, 컴퓨터 시스템 설계, 임베디드 시스템.