

탐색 과정시 2단 액추에이터의 상호 작용 분석 및 트랙 끌어들이 성능 향상을 위한 제어

Interaction Analysis of Dual-stage System during Seek Motion and Control for Track Pull-in Enhancement

최진영[†] · 이광현^{*} · 양현석^{*} · 박노철^{**} · 박영필^{**}

Jin-Young Choi, Kwang-Hyun Lee, Hyun Seok Yang, No-Cheol Park and
Young-Pil Park

(2005년 6월 10일 접수 : 2005년 10월 25일 심사완료)

Key Words : Optical Disk Drive(광 디스크), Dual Actuator(2단 액추에이터), Seek Control(탐색 제어), Interaction Analysis(상호작용 분석), Residual Vibration(잔류 진동), Track Pull-in(트랙 끌어들이)

ABSTRACT

In this paper, the dual stage interaction between the coarse actuator and the fine actuator of an optical disk drive is studied, and the new control method to enhance the track pull-in performance using fine actuator control is proposed. First, the dynamic analysis for the dual stage and the experiments to find the each actuator dynamics are performed. From the experiments, some physical parameters of the actuators were derived, then, some simulations are performed to find the interaction effect of the fine actuator during seek motion. Second, the center servo which suppresses the vibration of fine actuator during seek motion is designed and evaluated. And the fine actuator control to reduce the relative velocity between the target track and beam spot is proposed. From simulations, we show that fine actuator control which has same frequency and same phase of the disturbance is effective to reduce the relative velocity, and this result leads to track pull-in enhancement. Hence, the proposed control method is good approach to improve the track pull-in performance. Finally, the realization of the proposed method and some comments of it are briefly discussed.

1. 서론

정보저장기로서의 기본적인 요구 사항은 대용량의 정보를 빠른 데이터 전송률로 저렴한 가격에 안정적으로 기록 및 재생하는데 있다. 광 디스크 드라이브

이브(optical disk drive: ODD) 분야에서 고용량의 요구 조건은 CD(compact disk)에서 DVD(digital versatile disk), 그리고 다시 HD-DVD(high density-DVD) 및 BD(blue-ray disk)의 개발을 촉진하였으며, 빠른 데이터 전송률에 대한 수요는 미디어 및 드라이브의 배속 경쟁을 유발하였다. 대용량의 저장 용량과 빠른 데이터 전송률 이외에 중요 성능 지표는 임의 탐색(random access) 성능이며, 근래 멀티미디어 환경으로 급속도로 변환함에 따라 이 지표는 정보저장기에서 보다 중요하게 되었다. ODD에서 임의 탐색이란 현재 재생중인 디스크의 특정 위치에

[†] 책임저자 : 정회원, 연세대학교 CISD
E-mail : mithra@yonsei.ac.kr
Tel : (02) 2123-4677, Fax : (02) 365-8460

^{*} 연세대학교 CISD

^{**} 정회원, 연세대학교 CISD

서 다른 특정 위치로 이동하는 것을 말하며, 이때 목표트랙(target track)의 위치는 디스크가 회전함에 따라 지속적으로 변동한다. 따라서 성공적인 임의 탐색을 위해서, ODD의 빔 스폿(beam spot)은 시간에 따라 변동하는 목표 트랙을 정확히 추종하여야 한다.

현재까지 임의 탐색 제어에 대한 연구는 HDD 및 ODD에서 다양하게 진행되어 왔으며^(1,5,6,9,13), 주로 목표 지점까지 빠르고 안정적인 탐색 제어에 대한 연구가 주류를 이루었다. 액추에이터의 특성을 고려한 시간 최적제어(time optimal control)^(1,5), 조동(coarse) 액추에이터와 미동(fine) 액추에이터의 연성(coupling)을 고려한 제어⁽⁷⁾, 그리고 목표 트랙에서 미동 액추에이터의 잔류 진동(residual vibration)을 저감시키기 위한 속도 프로파일(velocity profile)의 설계 등이 대표적이다.⁽¹⁰⁾ 이 외에 목표 트랙 근방에서 탐색 제어에서 트랙 추종제어로 전환하기 위하여 필요한 트랙 끌어들이(track pull-in) 성능에 영향을 미치는 중요 인자에 대한 평가^(2,12), 트랙 끌어들이시 중요한 영향을 미치는 목표 트랙과 빔 스폿의 상대 속도 저감을 위한 브레이크 펄스의 적용⁽⁹⁾, 탐색 과정에서 횡단하는 트랙을 정확히 계수(count)하여 임의 탐색성능을 개선하는 방법^(8,14) 등 매우 다양한 연구가 이루어져 왔다. 그러나 이러한 선행 연구에도 불구하고 탐색시 발생하는 2단 액추에이터의 상호 작용과 속도 검출에 사용되는 TES(tracking error signal)의 상관 관계를 구체적으로 언급한 연구가 없었다. 또한 트랙 끌어들이시 관측되는 TES와 외란 특성과의 관계 파악을 통하여 임의 탐색성능의 개선 등에 대한 연구도 미흡하였다.

따라서 이 논문에서 임의 탐색시 2단 액추에이터의 상호 작용을 분석하고, 상호 작용이 유발하는 미동 액추에이터의 진동, 그리고 이를 방지하기 위한 중점(center) 서보(servo)를 다루었다. 또한 디스크의 외란 특성 및 액추에이터의 동특성을 고려하여 트랙 끌어들이 성능 개선을 위한 방법을 제안하였고, 이를 시뮬레이션을 통하여 증명하였다. 실제 시스템에 제안된 방법의 구현 및 평가는 많은 작업과 시간이 동반되므로, 이 논문에서는 2단 액추에이터의 동특성 해석 및 TES에 관한 기초적인 실험만을 수행하고 나머지 사항에 대하여서는 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

2. 2단 액추에이터의 동역학적 분석

2.1 2단 액추에이터의 구성

ODD의 임의 탐색 성능은 넓은 작동 범위를 가지는 동시에 매우 높은 정밀도를 요구한다. 따라서 이들 조건을 충족시키기 위하여, 대부분의 상용 ODD에서는 Fig. 2와 같은 2단(dual stage) 액추에이터의 형태를 채택하고 있다. 2단 액추에이터는 조동 액추에이터와 미동 액추에이터로 구성된다. 조동 액추에이터는 넓은 작동 범위를 가지나 느린 응답 특성을, 그리고 미동 액추에이터는 좁은 작동 범위를 가지나 빠른 응답특성을 보인다.

미동 액추에이터는 4점 지지 선형 스프링 방식이 일반적이며, 조동 액추에이터의 경우는 구동 방식에 따라 (i) 로터리(rotary) DC 모터를 이용한 랙 피니언(lack and pinion) 방식, (ii) 스텝핑 모터를 이용한 웜 기어(worm gear) 방식 그리고 (iii) 리니어(linear) DC 모터 방식으로 분류된다. 초기의 조동 액추에이터 모델은 로터리 DC 모터를 이용한 랙 피니언 방식이 주종을 이루었으나, 이 경우 백래쉬(backlash)와 같은 비선형 특성뿐만이 아니라 충격 등에 취약하므로 근래에는 스텝핑 모터를 이용한 웜 기어 방식이 주종을 이루고 있다.

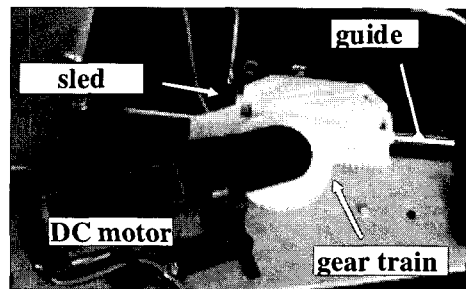


Fig. 1 Dual stage system in a real ODD

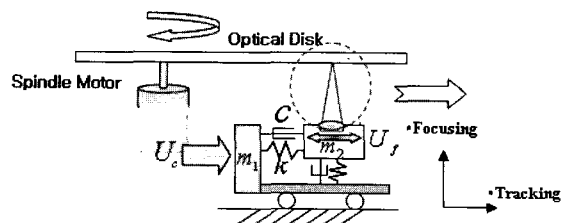


Fig. 2 Dynamic modeling of dual stage system

이 논문에서 사용된 모델은 엽가의 CD-ROM 드라이브(Sony 52X)이며, 조동 액추에이터로 로터리 DC 모터를 채택하고 있다(Fig.1 참조). 이때 조동 액추에이터는 어느 한 지점에 구속받지 않고 가이드(guide)를 따라 이동하므로, 가이드와 조동 액추에이터 사이의 강성은 0으로 간주할 수 있다. 또한 동역학 모델의 단순화를 위하여 조동 액추에이터와 가이드 사이의 감쇄항을 무시하면, 2단 액추에이터는 Fig. 2와 같으며 이로부터 2단 액추에이터의 운동방정식은 식 (1)로 표현 가능하다.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_c \\ \ddot{x}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c & -c \\ -c & c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{x}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_c \\ x_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U_c \\ U_f \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서 m_1 과 m_2 는 조동 액추에이터와 미동 액추에이터의 질량을, 그리고 c 와 k 는 각각 감쇄(damping)와 강성(stiffness)을 의미한다. 그리고 x_c 와 x_f 는 각각 절대 좌표계에서의 조동 및 미동 액추에이터의 위치를 나타내며, 마지막으로 U_c 와 U_f 는 조동 액추에이터와 미동 액추에이터에 각각 작용하는 힘이다.

식 (1)과 같이 임의탐색 시스템을 2개의 집중 질량으로 가정하였으므로, 탐색 시스템은 2개의 고유진동수(natural frequency)를 가진다. 시스템의 질량행렬 M 과 강성행렬 K 로부터 시스템의 비감쇄 고유진동수는 다음의 식으로부터 얻어진다.

$$\det[-\omega^2 M + K] = 0 \Leftrightarrow \omega^2(\omega^2 - k(m_1 + m_2)/m_1 m_2) = 0 \quad (2)$$

이때 고유진동수는 0과 $\sqrt{k/M_e}$ 이며, 여기서 M_e 은 등가 질량(equivalent mass)으로 식 (3)과 같이 정의된다.

$$M_e = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} = \frac{m_2}{1 + m_2/m_1} \quad (3)$$

2.2 2단 액추에이터의 상호 작용 분석

식 (1)을 Laplace 변환을 하면, 다음의 관계식이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} X_c \\ X_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{M_e}{m_1 m_2} \frac{(m_2 s^2 + cs + k)}{s^2(M_e s^2 + cs + k)} & \frac{M_e - m_2}{m_2(M_e s^2 + cs + k)} \\ \frac{M_e}{m_1 m_2} \frac{(cs + k)}{s^2(M_e s^2 + cs + k)} & \frac{M_e}{m_2(M_e s^2 + cs + k)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_c \\ U_f \end{Bmatrix} \quad (4)$$

임의 탐색시 미동 액추에이터의 입력 U_f 가 0이라 가정하면, 식 (5)의 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} \frac{X_c(s)}{U_c(s)} &= \frac{M_e}{m_1 m_2} \frac{s^2 + s \cdot (c/m_2) + k/m_2}{s^2[s^2 + s \cdot (c/M_e) + k/M_e]} \\ &= \frac{M_e}{m_1 m_2} \frac{s^2 + 2\xi_2 \omega_2 s + \omega_2^2}{s^2(s^2 + 2\xi_0 \omega_0 + \omega_0^2)} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 ξ_0 와 ξ_2 는 감쇄 계수로 $c/2M_e \omega_0$ 과 $c/2m_2 \omega_2$ 을, 그리고 ω_0 와 ω_2 는 고유진동수로 $\sqrt{k/M_e}$ 과 $\sqrt{k/m_2}$ 을 각각 나타낸다. 이와 유사한 방법으로 입력 U_c 에 대한 미동 액추에이터의 변위 X_f 의 전달 함수를 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{X_f(s)}{U_c(s)} &= \frac{M_e}{m_1 m_2} \frac{(cs + k)}{s^2(M_e s^2 + cs + k)} \\ &= \frac{M_e}{m_2} \frac{s \cdot (c/m_1) + k/m_1}{s^2[s^2 + s \cdot (c/M_e) + k/M_e]} \\ &= \frac{2\xi_1 \omega_1 s + \omega_1^2}{m_2 s^2(s^2 + 2\xi_0 \omega_0 + \omega_0^2)} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $\xi_1 = c/2m_1 \omega_1$ 그리고 $\omega_1 = \sqrt{k/m_1}$ 이다. 이 수식으로부터 조동 액추에이터의 입력이 미동 액추에이터에 미치는 영향을 개략적으로 유추하여 볼 수 있다. 일반적으로 조동 액추에이터의 질량 m_1 이 미동 액추에이터 m_2 보다 훨씬 큰 값을 가지므로 식 (7)과 같이 M_e 는 m_2 로 근사화할 수 있다.

$$M_e = \frac{m_2}{1 + m_2/m_1} \approx \frac{m_2}{1 + 0} = m_2 \quad (\text{if } m_1 \gg m_2) \quad (7)$$

논문에서 사용된 2단 액추에이터의 경우, $m_1 = 17.5g$ 이고 $m_2 = 0.4g$ 이며 식 (3)에 의하여 $M_e = 0.3911g$ 이므로 식 (7)이 타당함을 알 수 있다.

2.3 2단 액추에이터의 실험적 모델링 및 분석

2.2절에 유도된 관계식과 실험식을 비교하기 위하

여, 정밀 비접촉 속도/변위 계측기인 LDV와 동적 신호분석기(dynamic signal analyzer, HP 35670A)를 이용하여 동특성을 측정하였다. 측정결과에 대한 곡선 적합(curve fitting)을 통하여, 식 (8)과 식 (9)의 전달 함수를 얻었다. Fig. 3과 Fig. 4는 조동 액추에이터와 미동 액추에이터의 실험 및 모델식을 Bode 선도로 표현한 결과이다.

$$\frac{X_c(s)}{U_c(s)} = \frac{5866.67}{s(s+83.33)} [\text{mm/V}] \quad (8)$$

$$\frac{X_f(s)}{U_f(s)} = \frac{5.799 \times 10^4}{s^2 + 115.6s + 8.508 \times 10^4} [\text{mm/V}] \quad (9)$$

실험을 통하여 얻어진 $X_c(s)/U_c(s)$ 의 전달 함수 식 (8)과 수학적 모델링 식 (5)를 비교하면, 차이가 발생함을 알 수 있는데, 이는 다음과 같이 설명할 수 있다.

식 (5)의 관계식에서 $m_1 (17.5\text{g}) \gg m_2 (0.4\text{g})$ 이므로 관계식 (7)에 의하여 $M_e \approx m_2$ 이다. 따라서 근사적으로 식 (5)는 $X_c(s)/U_c(s) \approx 1/m_2 s^2$ 과 같이 간략

화 할 수 있다. 그러나 이 관계는 $U_c(s)$ 가 직접적으로 정현파 입력이 가해질 때의 관계일 뿐, 로터리 DC 모터에 정현파 전압 입력 $V(s)$ 를 가하였을 때 기어 트레인(gear train)을 통하여 얻어지는 조동 액추에이터의 변위 $X_c(s)$ 의 관계식이 아니다. 전압 입력으로 구동하는 로터리 DC 모터의 기어열을 통한 변위는 다음과 같은 수학적식으로 유도된다.⁽¹⁶⁾

$$\frac{X_c(s)}{V(s)} = K \cdot \frac{K_t}{J R_a s^2 + K_e K_t s} = K \cdot \frac{K_t / J R_a}{s(s^2 + K_e K_t / J R_a s)} \quad (10)$$

여기서 J 는 이송부 부하를 고려한 회전 관성을 그리고 R_a 는 DC 모터의 저항을 나타낸다. 또한 K_e 와 K_t 는 각각 역기전력 상수 및 토크 상수를, 그리고 K 는 기어열의 전달함수 및 전달 효율 등을 고려한 상수이다. 따라서 실험으로부터 얻은 조동 액추에이터의 전달함수 (8)은 수학적 모델링 식 (10)과 잘 일치함을 알 수 있다.

다음으로 조동 액추에이터가 임의 탐색 제어시 급격한 움직임이 있을 때, 미동 액추에이터의 동적 거동을 살펴보았다. 실험 대상 모델의 미동 액추에이터의 구동 질량(moving mass) m_2 는 약 0.4g이므로, 일반적인 1자유도 진동시스템의 파라미터를 정의하는 식 (11)과 실험적으로 얻은 미동 액추에이터의 전달 함수 식 (9)로부터 미동 액추에이터의 감쇠비 ξ 와 고유 진동수 ω_n 은 각각 0.2060[N./sec]과 294 [rad/sec] 임을 찾아내었다. 따라서 이들 수치로부터 식 (11)을 통하여 미동 액추에이터의 강성과 감쇄를 찾아낼 수 있다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad \xi = \frac{c}{2m\omega_n} \quad 1\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\xi^2} \quad (11)$$

이들 관계식으로부터 얻어낸 광 픽업 파라미터를

Table 1 Vibration properties of an optical pick-up

Resonance frequency(f_d)	45.7880(Hz)
Damping ratio(ξ)	0.2060
Natural frequency(f_n)	46.7916(Hz)
Moving mass(m)	0.0004(kg)
Damping coefficient(c)	0.0485(Ns/m)
Stiffness(k)	34.5745(N/m)

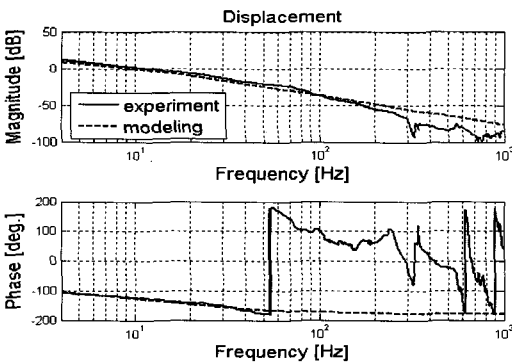


Fig. 3 Coarse actuator dynamics

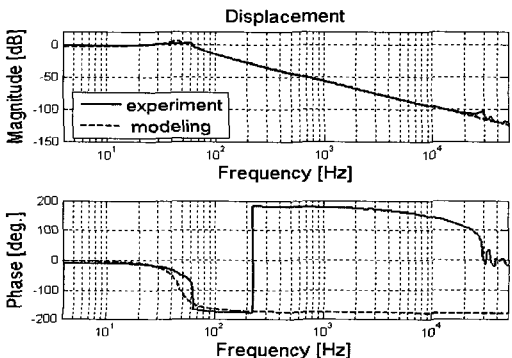


Fig. 4 Fine actuator dynamics

정리하면 Table 1과 같다(여기서 m 은 m_2 를 의미). 조동 액추에이터와 미동 액추에이터의 질량 차이가 상당히 크고 ($m_1:m_2=43.75:1$), 이로부터 m_2 에 의한 m_1 의 반력은 무시할 수 있다. 따라서 임의 탐색시 미동 액추에이터에 작용하는 외력은 조동 액추에이터의 가속도 성분과 m_2 의 곱으로 표현된다.⁽¹⁰⁾

3. 광 디스크의 임의 탐색 과정

3.1 광 디스크 임의 탐색 과정

임의 탐색 제어를 광픽업 빔 스폿의 이동거리에 따라 분류하면 (i) 미동 액추에이터만을 이용하여 수 트랙에서 수십 트랙 범위를 이동하는 스텝 점프(step jump)와 바로 인접 트랙으로 이동하는 트랙 점프(track jump), (ii) 그리고 조동 액추에이터를 이용하는 긴 탐색 제어로 분류할 수 있다. 이 때 긴 거리 탐색의 과정을 간략히 정리하면 다음과 같다.

(a) 먼저 이동하고자 하는 거리에 따라 마이컴에서 계산된 속도 프로파일을 통하여 조동 액추에이터를 움직인다.

(b) 이동 과정에서 포커스 서보는 on 상태로 유지하며, 이동시 트랙을 계수(count)하고 이로부터 속도 정보를 피드백하여 속도 제어를 행한다. 이 때 트랙을 횡단하는 신호를 계수하여 목표 트랙까지의 거리를 계산하며, 탐색 중 발생하는 미동 액추에이터의 진동을 억제하기 위하여 중점 서보를 이용한다. 중점 서보를 통하여 조동 액추에이터의 움직임과 미동 액추에이터의 움직임이 일치하도록 한다.

(c) 목표 트랙 근처에서 트랙 끌어들이음을 행한 후, Q 코드 또는 워블(wobble)의 ATIP(absolute time in pre-groove)로부터 트랙 정보를 읽고, 그 정보에 따라 track jump 또는 재차 탐색 제어를 수행한다.

이 때 탐색 제어시 소요되는 총 시간 T_{access} 는 다음과 같이 표현된다.

$$T_{access} = T_{seek} + T_{lat} + T_{pull-in} \quad (12)$$

여기서 T_{seek} 는 목표 트랙으로 이동하는 시간, T_{lat} 는 미동 액추에이터의 잔류 진동이 저감되도록 기다리는 시간, 그리고 $T_{pull-in}$ 은 빔 스폿을 목표 트랙으로 끌어들이는데 걸리는 시간을 각각 의미한다. 긴거리 탐색 제어 과정에서 목표 트랙에 대한 빔 스폿의 궤적을 그려보면 Fig. 5와 같다.

3.2 원거리 탐색 제어시 관측되는 TES의 형태와 트랙 끌어들이

원거리(long distance) 탐색 제어에서 광 픽업은 포커스 서보가 on 된 상태에서 트랙을 횡단하며, 빔 스폿이 트랙(track)을 횡단할 때마다 일정 형태의 TES가 검출된다. 관측되는 TES의 형태는 여러 검출 방법에 따라 달라지는데, 3빔법(3 beams method)을 사용하는 경우 1트랙을 횡단할 때마다 하나의 사인파(sine wave) 형태의 TES가 검출된다. 따라서 CD 계열의 경우, 1트랙이 간격이 $1.6 \mu\text{m}$ 이므로 이들의 관계를 이용하여 탐색시 트랙과 빔 스폿의 상대 속도 측정이 가능하다. 탐색 제어 과정에서 속도 제어는 홀(hall)센서와 같은 부가적인 센서를 통하여 이용하기도 하지만, 일반적으로 정밀한 빔 스폿의 이동 속도 제어를 위하여 빔 스폿이 트랙 횡단할 때 발생하는 TES로부터 속도 정보를 얻는다.

탐색시 미동 액추에이터를 제어하지 않는 경우, 조동 액추에이터의 가감속에 의하여 조동 액추에이터와 미동 액추에이터의 상대 운동이 발생하며 결과적으로 TES의 흔들림을 유발한다. 따라서 탐색시 발생하는 상대 운동을 최소화할 필요가 있으며, 이를 위하여

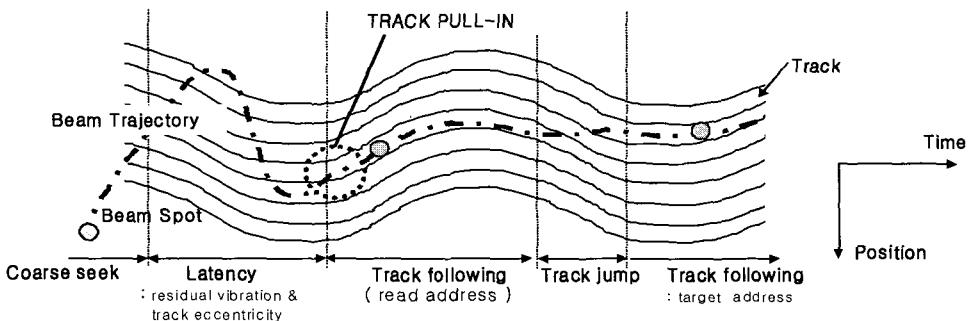


Fig. 5 Beam trajectory during long seek motion

실제 시스템에서 중점 서보를 채택하고 있다. 중점 서보란 조동 액추에이터와 미동 액추에이터의 상대 운동을 최소화하도록 하는 서보이며, (i) TES 및 RF 신호를 이용하여 중점 에러(center error: CE)를 생성하는 방식과, (ii) 조동 액추에이터와 미동 액추에이터의 상대 운동을 플래그(flag) 센서를 이용하여 직접 검출하는 방식이 대표적이다. 이 논문에서는 플래그 센서를 이용한 방식을 기준으로 해석하였으며⁽¹¹⁾, 원거리 탐색 제어를 간략화하여 나타내면 Fig. 6과 같다.

원거리 탐색 제어를 위해 사용되는 전형적인 속도 프로파일(profile)은 사다리꼴 형태이며 이러한 형태로 빔 스폿이 트랙을 횡단하는 경우, 빔 스폿의 이동 거리 및 관측되는 TES를 시뮬레이션 하면 Fig. 7과 같다. Fig. 7(c)의 그림과 같이 가속 구간에서는 TES의 주기가 시간이 증가됨에 따라 짧아지고, 등속도 구간에서는 Fig. 7(d)와 같이 일정 주기의 TES가 관찰된다. 따라서 관측되는 TES의 주기를 통하여 속도 정보를 얻고 이를 속도 제어에 이용한다.

목표 트랙 근방으로 빔 스폿이 다가가면, 탐색 모드에서 데이터의 재생을 위하여 트랙 추종제어로 전환하여야 한다. 이때 목표 트랙으로 빔을 끌어들이

는 동작(track pull-in)이 필요한데, 이 기능은 다양한 파라미터에 영향을 받는다. 트랙 끌어들이의 영향을 미치는 파라미터로는 (i) 서보 대역(servo bandwidth), (ii) 위상 여유(phase margin), (iii) 목표 트랙으로부터의 트래킹 서보의 작동 위치, (iv) 목표 트랙과 빔 스폿의 상대 속도 등이 있다.⁽¹²⁾ 트랙 끌어들이시 사용되는 제어기는 트랙 추종제어 루프와 동일하므로, 트랙 끌어들이에 영향을 미치는 실질적인 파라미터는 (i)트래킹 서보 on 위치, 그리고 (ii) 목표 트랙과 빔스폿의 상대 속도이다. 만일 빔 스폿이 목표 트랙 근방에서 정지하고 있다면, 빔 스폿과 목표 트랙과의 상대 속도 V_{rel_stop} 는 다음과 같다.

$$V_{rel_stop} = f(\omega_{rot}, X_{dis}, t) \quad (13)$$

여기서 ω_{rot} 는 디스크의 회전 속도, X_{dis} 는 디스크의 편심 외란의 크기, 그리고 t 는 트랙 끌어들이 시점을 의미한다. Fig. 8(a)는 포커스 서보만을 on/off 한 상태에서 정지한 빔 스폿에서 관측되는 실제 시스템의 TES를, 그리고 Fig. 8(b)는 Fig. 8(a)의 어두운 부분을 확대한 결과를 보여준다. Fig. 8(b)에서 알 수 있듯 트래킹 서보가 off된 상태에서 TES의 주기는 지속적으로 변하고, 이로부터 트랙과 빔 스폿의 상대 속도가 디스크의 회전에 따라 변동함을 알 수 있다.

3.3 임의 탐색 과정시 미동 액추에이터의 잔류진동

임의 탐색시 조동 액추에이터의 움직임에 따라 미동 액추에이터가 가감속을 받게 되므로, 탐색시 중점 서보를 적용하지 않는 경우 미동 액추에이터는 진동하게 된다. 탐색 제어시 전형적으로 사용되고 있는 사다리꼴 속도 프로파일을 채택하는 경우, 잔류 진동

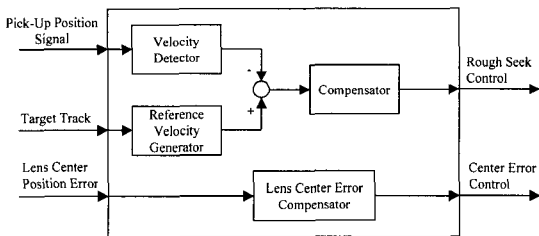


Fig. 6 Block diagram of long seek

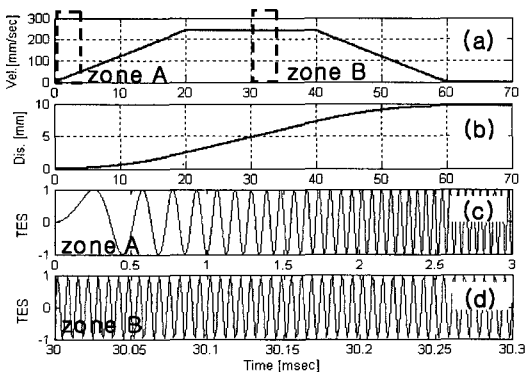


Fig. 7 Travel distance vs. detected TES (simulation)

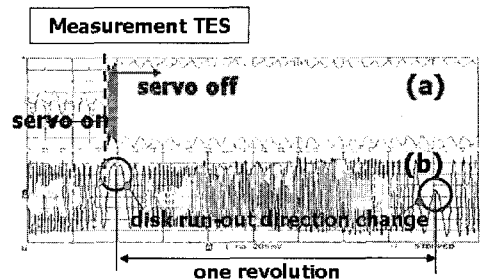


Fig. 8 Detected TES: servo on vs. servo off (experiment)

에 가장 직접적인 영향을 미치는 요소는 가감속의 크기 및 가감속 적용 구간이다. 가속 및 감속 구간의 시간이 $2\pi/\omega_d$ 의 정수 배를 만족하면 잔류 진동이 최소화 되므로⁽¹⁰⁾, 가감속 구간에 미동 액추에이터의 제어 입력이 이루어지지 않고 있다는 가정하에 잔류 진동이 최소한으로 발생하도록 조동 액추에이터의 속도 프로파일을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다(Fig. 9 참조). 실험적으로 얻은 미동 액추에이터의 파라미터로부터 가감속 구간을 각각 $2\pi/\omega_d$ ($=0.0218$ sec)로, 그리고 이송 거리는 대략 정보면의 1/3 거리가 되는 11 mm를 목표로 설정하였다. 이때 조동 액추에이터의 최대 이송 속도를 150 mm/sec 제한하였으며, 조동 액추에이터가 목표 거리에 이동하는데 걸리는 시간은 대략 95 msec이다.

Fig. 9는 조동 액추에이터의 속도 프로파일 및 이때 발생하는 미동 액추에이터 거동에 대한 시뮬레이션 결과로 중점 서보는 off 한 조건이다. 시뮬레이션 결과로 볼 수 있듯이, 가감속 구간에서 미동 액추에이터의 진동이 가장 크며 변위의 최고치는 120 μ m, 속도의 최고치는 17.3 mm/sec의 값을 보였다.

탐색 중 발생하는 미동 액추에이터의 진동은 TES를 흔들리게 하고, 결과적으로 TES를 통한 이동 속도 검출의 정확도를 저하시킨다. 또한 미동 액추에이터의 잔류 진동은 목표 트랙과 빔스팟의 상대 속도를 증가시켜, 트랙 끌어들이의 성능을 저해한다. 일반적으로 트랙 끌어들이 가능 속도가 10~20 mm/sec 인 것을 고려할 때, 시뮬레이션의 잔류 진동의 초기값은

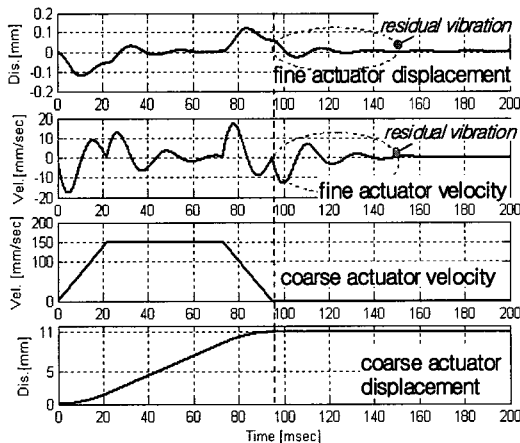


Fig. 9 Residual vibration of the fine actuator during seek motion: center servo off (simulation)

상당히 큰 값에 해당한다.^(2,12) Fig. 10은 탐색 중 발생하는 외란의 주파수 해석 결과를 보여주며, 이를 통하여 저주파수 외란이 지배적임을 알 수 있다.

3.4 중점 서보의 설계 및 제어 특성

탐색시 조동 액추에이터의 속도는 부가적인 센서를 이용하여 측정할 수 있으나, 보다 정확한 속도 제어는 트랙과 빔스팟의 상대속도(TES를 이용)를 통하여 가능하다. 그러나 탐색시, 조동 액추에이터와 미동 액추에이터의 상대 운동이 발생하면 정확한 속도 제어가 불가능하다. 즉, 빔 스팟이 트랙에 대하여 상대 운동이 발생하면 TES가 흔들리고(Fig. 13 참조), 결과적으로 정확한 속도 제어가 불가능해진다. 따라서 탐색시 조동 액추에이터와 빔 스팟의 움직임이 동일하게 유지할 필요가 있는데, 이를 중점 서보를 통하여 행하게 된다. 이 논문은 플레그 센서를 이용하여 중점 서보를 수행하는 방식으로 해석하였으며, 플레그 센서에 대한 보다 자세한 내용은 참고문헌에서

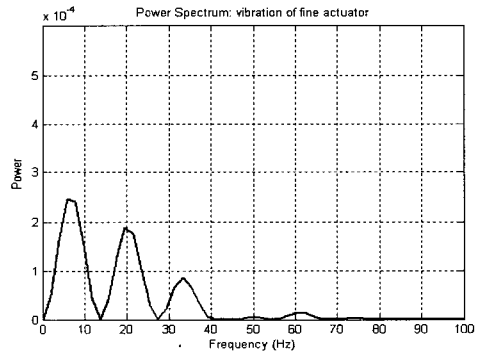


Fig. 10 Frequency analysis : fine actuator vibration during seek motion

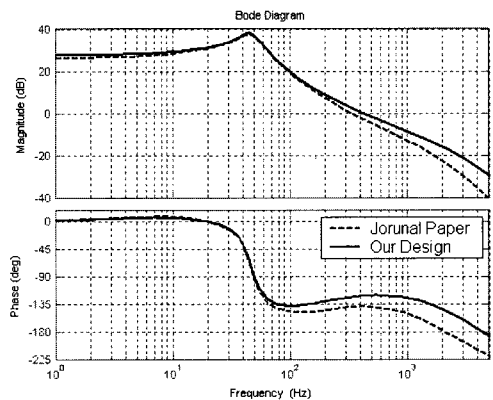


Fig. 11 Center servo loop

찾을 수 있다⁽¹¹⁾. 탐색 과정에서 미동 액추에이터에 가해지는 힘은 가속/감속 과정을 통해 전달되므로, 주된 외란은 Fig. 10과 같이 감속/가속의 스위칭 (switching)과 관련한 주파수가 지배적이다.

이 논문의 시뮬레이션에서 플레그 센서 감도를 고려하여 중심 서보에 의한 허용 목표치를 $10\ \mu\text{m}$ 로 선택하였으며, 이때 플레그 센서는 조립 공차 등의 문제에 의하여 DC 감도에 다소 둔감하게 설계하였다. 중점 제어기는 탐색 중 발생할 수 있는 외부 충격 등을 고려하여 보수적으로 설계하였으며, 광학 이득이나 드라이버 이득을 포함하여 식 (14)로 표현된다.

$$C(s) = 3308.2 \times 10^3 \times \frac{(s+1132)(s+49.54)}{(s+2.09e04)(s+3.854e04)(s+67.14)} \quad (14)$$

Fig. 11은 참고문헌의 중점 제어기⁽¹¹⁾를 이 논문의 사용된 플랫폼에 적용한 경우와, 새롭게 설계된 제어

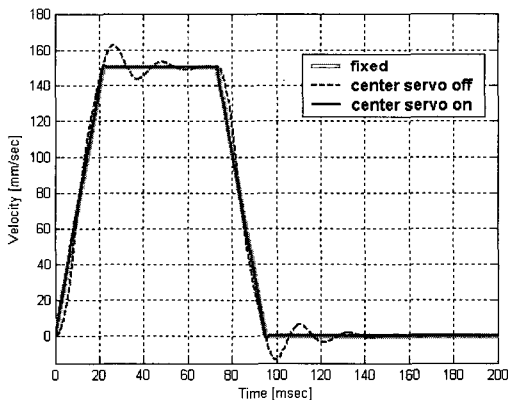


Fig. 12 Velocity profile for each case (simulation)

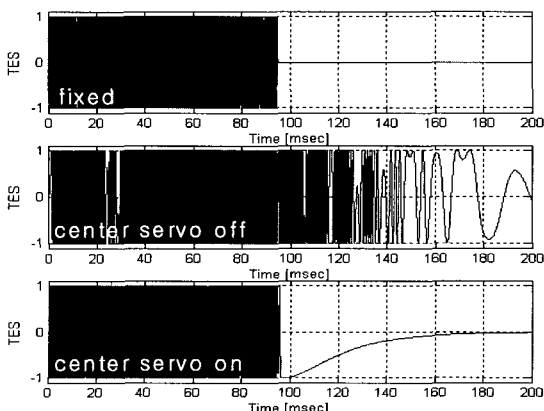


Fig. 13 Detected TES during seek motion(simulation)

기를 반영한 경우의 개루프(open loop)를 보여준다. Fig. 12는 조동 액추에이터의 기준 속도 프로파일과 센터 서보를 on/off 할 때의 빔 스폿 거동의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 중점 서보를 off한 경우 탐색 과정에서 미동 액추에이터의 진동이 발생하고 또한 탐색 종료 후에도 잔류 진동이 발생함을 알 수 있다. 이와 대조적으로 중점 서보를 on 한 경우(식 (14)의 제어기), 탐색 과정 및 탐색 종료 후에 진동이 거의 발생하지 않음을 알 수 있다.

정지된 디스크 위를 Fig. 9(a)와 같이 조동 액추에이터가 이동하는 경우, 각각의 경우에 대하여 관측되는 정규화된 TES 시뮬레이션 결과는 Fig. 13과 같다. 이때 TES는 식 (15)의 관계식을 가진다.

$$TES = A \times \sin((2\pi/l_p) \times L_{sto}) \quad (15)$$

여기서 A 는 TES의 크기, l_p 는 트랙 피치(track pitch) 그리고 L_{sto} 은 빔 스폿이 트랙을 횡단한 거리이다. Fig. 13에서 중점서보를 off한 경우, 미동 액추에이터의 흔들림에 의하여 TES가 흔들리고 이로부터 얻어지는 속도 정보는 Fig. 12의 점선과 같다.

4. 트랙 끌어들이 성능 향상을 위한 미동 액추에이터 제어

4.1 트랙 끌어들이 향상을 미동 액추에이터의 구동 및 관측되는 TES 시뮬레이션

중점 서보를 통하여 탐색 과정에서 조동 액추에이터와 미동 액추에이터의 상대 운동이 존재하지 않고 또한 탐색 후 잔류 진동이 전혀 발생하지 않는다고 하더라도, 조동 액추에이터의 구동이 끝난 시점에서 미동 액추에이터를 구동하지 않으면 트랙 끌어들이 과정에서 또 다른 문제가 발생한다. 목표 트랙과 빔 스폿의 상대 속도는 트랙 끌어들이 성능에 매우 중요한 요소이며, 이 상대 속도가 너무 높은 경우 성공적인 트랙 끌어들이 불가능하다. 발생하는 상대 속도가 미동 액추에이터의 구동에 의하여 보상될 수 있는 점을 감안할 때, 탐색 종료 후에 미동 액추에이터를 정지하고 있다는 것은 결과적으로 탐색 성능의 저하를 의미한다. 트랙 끌어들이 성능 향상을 위한 미동 액추에이터의 영향을 살펴보기 위하여, CD-ROM 40 배속 (9220 rpm, 153.67 Hz)에 해당하는 회전 주파수

성분인 75 μm의 외란이 발생한다고 가정하였다. 이때 정지된 빔 스폿에서 관측되는 TES를 시뮬레이션 하면 Fig. 14(a)와 같다.

트랙 끌어들임 성능은 TES의 주기, 즉 트랙과 빔 스폿의 상대 속도에 직접적인 영향을 받게 되며, TES의 파형 변환 등의 특별한 방법이 사용되지 않는 경우, 10~20 mm/sec의 상대 속도가 트랙 끌어들임이 가능한 한계값으로 알려져 있다.^(2,12) 따라서 TES의 주기와 트랙 피치의 관계를 이용하여 트랙과 빔 스폿의 상대속도를 계산하면, Fig. 14(a)의 경우 성공적인 트랙 끌어들임이 가능한 시점은 디스크의 런-아웃(run-out)의 방향이 변화하는 시점에서 '1~3 개의 정현파 형태의 TES 구간에서만 가능함을 알 수 있다. 즉, 조동 액추에이터의 탐색 종료 시점에서 미동 액추에이터를 고정하는 경우, 트랙 끌어들임 시점은 매우 제한적이다.

따라서 빔 스폿과 목표 트랙과의 상대 속도를 저감하기 위하여 미동 액추에이터의 구동이 필요하며, 그 가능성을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 Fig. 14(b)/Fig. 14(c), 그리고 Fig. 15에 제시하였다. Fig. 14의 (b), (c)는 디스크의 런-아웃과 동일한 주파수/동일 위상으로 미동 액추에이터를 각각 60 μm와 30 μm로 제어하였을 경우, 관측되는 TES를 보여준다. 미동 액추에이터를 외란과 동일 주파수 동일 위상으로 제어함으로써 목표 트랙과 빔 스폿의 상대속도를 저감시켜 트랙 끌어들임 성능 개선이 가능함을 시뮬레이션을 통하여 알 수 있다(TES의 주기 참조). 이는 미동 액추에이터를 제어하지 않았을 경우는 매우 좁은 구간에서만 트랙 끌어들임이 가능하지만, 제어를 함으로써 트랙 끌어들임 구간이 확장

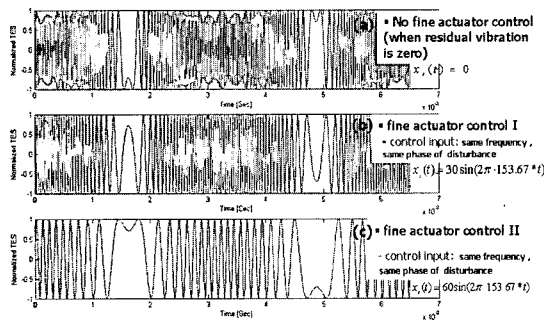


Fig. 14 Fine actuator control effect to reduce the relative velocity (simulation) (a) no control, (b) 60 μm control, (c) 30 μm control

된다는 것을 의미한다. Fig. 15(a)는 조동 액추에이터의 탐색 과정 종료 후, 디스크의 런-아웃과 동일 주파수/동일 위상으로 미동 액추에이터를 30 μm 구동하였을 때 관측되는 TES의 시뮬레이션 결과이다. 또한 Fig. 15(b)와 Fig. 15(c)는 디스크의 런-아웃과 주파수는 일치하나 위상에서 각각 5%, 10%로 차이가 발생한 상태로 미동 액추에이터를 구동하였을 때 관측되는 TES를 보여준다.

따라서 이들 관계로부터 트랙 끌어들임 향상을 위하여 조동 액추에이터의 탐색 종료 후 디스크의 런-

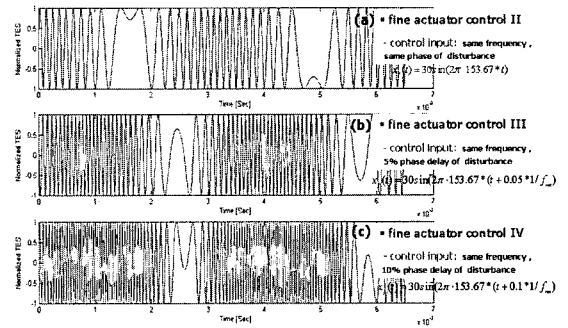
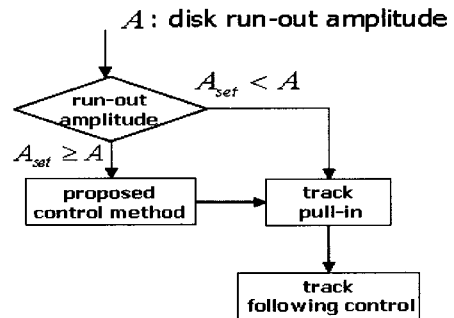
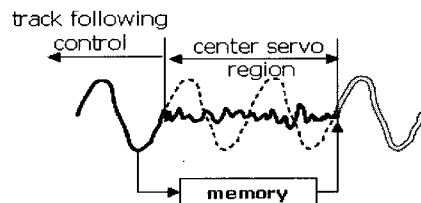


Fig. 15 Fine actuator control effect to reduce the relative velocity (simulation) (a) no control, (b) 30 μm control, 5% phase delay, (c) 30 μm control, 10% phase delay



(a) Signal flow chart for improving track pull-in



(b) Control input signal : timing chart
Fig. 16 Realization of the proposed track pull-in enhancement method

아웃과 동일 주파수/동일 위상으로 미동 액추에이터를 구동하였을 경우에 트랙과 빔스폿의 상대 속도가 최소화되어 트랙 끌어들이 시점이 가능한 구간이 넓어지게 된다.

4.2 트랙 끌어들이 성능 향상을 위한 실제적인 구현 방안

목표 트랙과 빔 스폿의 상대 속도는 식 (13)과 같이 편심 외란의 크기의 함수이므로, 편심 외란의 크기가 작은 경우 제안된 방법을 사용하지 않아도 충분한 임의 탐색 성능을 기대할 수 있다. 따라서 편심 외란, 즉 디스크의 런-아웃의 크기(A)가 설정된 값(A_{set}) 이상일 때 적용하는 것이 보다 효과적이며, 디스크의 런-아웃의 크기는 디스크의 삽입시 드라이브에서 수행되는 편향/편심/편중심 검출 알고리즘을 통하여 알 수 있다. 디스크의 런-아웃량은 트랙킹 서보를 off하고, 이때 발생하는 사인파의 TES의 개수를 계수함으로써 얻을 수 있으며(Fig. 8(b) 참조), 이러한 방법은 실제 시스템에서 널리 사용되고 있다. 따라서 디스크의 런-아웃량을 기초로 트랙 끌어들이 성능 향상을 위한 제어 방법을 Fig. 16(a)의 구조와 같이 변경 함으로서 트랙 끌어들이 향상이 가능하다. 이때 위상의 동기화는 트랙킹 제어시 입력되는 제어 입력 또는 TES을 로패스(low pass) 필터링하여 메모리에 저장한 후, Fig. 16(b)와 같이 탐색 제어 종료시 반복적인 가상의 제어 입력에서 실제 제어입력으로 전환함으로써 구현 가능하다.

5. 결 론

이 논문을 통하여 ODD 탐색 시스템에서 사용되고 있는 2단 액추에이터의 동역학적 관계 및 탐색 과정에서 발생하는 미동 액추에이터의 진동, 그리고 이것이 트랙 끌어들이에 미치는 영향을 살펴보았다. 또한 미동 액추에이터의 진동 저감을 위한 중점 서보의 설계 및 그 효과를 시뮬레이션으로 보였으며, 트랙 끌어들이 성능 향상을 위한 새로운 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 탐색 종료 시점에서, 미동 액추에이터를 디스크의 런-아웃과 동일한 크기 및 위상으로 구동함으로써 트랙 끌어들이 성능을 개선하는 방법으로 시뮬레이션을 통하여 그 효과를 증명하였다. 현재 대부분의 고배속 재생에서 CAV(constant

angular velocity) 모드를 채택하고 있고 또한 트랙킹 방향 런-아웃은 디스크 내외주에 따라 큰 변동이 없으므로, 제안된 방법은 실제 시스템에 유용할 것으로 생각한다.

진행된 주요 내용 및 결과를 간략히 정리하면 다음과 같다.

(1) 2단 액추에이터의 동역학적 분석을 통하여 상호 작용을 분석하였고, 실험을 통하여 각 파라미터 값을 찾아내었다.

(2) 실험으로부터 얻어진 파라미터를 근거로 임의 탐색시 발생하는 미동 액추에이터의 동적 거동을 시뮬레이션 하였으며, 이를 방지하기 위한 중점서보를 설계하고 평가하였다.

(3) 탐색 종료 후, 트랙 끌어들이 성능 향상을 위하여 디스크 런-아웃의 크기에 근거한 미동 액추에이터의 구동 방법을 제안하였다. 이때 미동 액추에이터는 디스크의 런-아웃과 동일 주파수, 동일 위상으로 구동한다. 제안된 방법을 통하여 트랙 끌어들이 성능에 주요 인자인 목표 트랙과 빔 스폿의 상대 속도를 제어할 수 있고, 이를 통하여 트랙 끌어들이 영역을 확장할 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

후 기

이 연구는 한국과학재단(R11-1997-042-11002-0) 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Wagner, J. A., 1983, "The Actuator in High Performance Disk Drives: Design Rules for Minimum Access Time", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 19, No. 5, pp. 1686~1688.
- (2) Suzuki, M., Tanaka, H. and Miura, Y., 1990, "Pull-in Condition and Method of Tracking Servo in Optical Disk Drive", The Journal of the Institute of Television Engineers of Japan, Vol. 44, No. 10, pp. 1391~1397.
- (3) Ogawa, M. and Furukawa, T., 1992, "Robust Servo System of Optical Disk Drive", Japan Journal of Applied Physics, Vol. 31, No. 2B, pp.

643~647.

(4) Semba, T. and Fennema, A., 1996, "State-Space Intercept Method for Seek Control of Optical Disk Drives", Japan Journal of Applied Physics, Vol. 35, No. 1B, pp. 466~470.

(5) Yang, J. -D., et al., 1996, "Seek Time Trajectories of Time Optimal Control for a Dual Stage Optical Disk Drive Actuator", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32, No. 5, pp. 3857~3859.

(6) Toyama, S., et al., 1997, "Fast Seek Servo Method Using Two-degree-of-freedom Control for Magneto-Optical Disk Drives", Information Storage and Processing Systems, Vol. 3, pp. 75~82.

(7) Yang, J. -D., et al., 1998, "Coupling-Enhanced Control for Optical Disk Drives", Japan Journal of Applied Physics, Vol. 37, No. 4B, pp. 2003~2005.

(8) Jin, K. B., Doh, T. Y., Ryoo, J. R. and Chung, M. J., 1998, "Robust Direct Seek Control for High-speed Rotational Optical Disk Drives", IEEE Transaction on Consumer Electronics, Vol. 44, No. 4, pp. 1273~1283.

(9) Lee, H. -J., Han, C. -S. and Kim, S. H., 2000, "Reduction of Seek Time of Tracking Actuator with Pulsed Excitation in Optical Disk", Japan Journal of Applied Physics, Vol. 39, No. 12A, pp. 6546~6549.

(10) 전홍걸, 박영필, 2000, "광픽업 잔류 진동 저감을 위한 이송 속도 분포 해석", 한국소음진동공학회논문집, 제 10 권, 제 2 호, pp. 221~228.

(11) 서삼준, 김동원, 박귀태, 2004, "고배속 CD-RW를 위한 중점 서보 및 편심 보상 제어", 제어·자동화·시스템공학논문지, 제 10 권, 제 12 호, pp. 1202~1209.

(12) 최진영, 박태욱, 양현석, 박노철, 박영필, 2005, "위상 평면을 이용한 광 디스크 트랙 끝어들입의 동적 해석 및 영향 인자의 평가", 한국소음진동공학회논문집, 제 15 권, 제 1 호, pp. 29~38.

(13) Ryoo, J. R., et al., 2001, "Fine Seek Control Extended Applicable Range for Optical Disk Drive", The Institute of Control, Automation and Systems Engineers, Vol. 3, No. 3, pp. 146~150.

(14) Huang, J. -M. and Yen, J. -Y., 2003, "A Novel Fine Track-seeking Scheme for Optical Storage Device", IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 49, No. 2, pp. 382~387.

(15) Zheng, J. and Guo, G., 2004, "Feedforward Decoupling Control Design for Dual-actuator System in Hard Disk Drives", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, No. 4, pp. 2080~2082.

(16) 이광현, 최진영, 박태욱, 양현석, 박영필, 2004, "광 디스크 드라이브 이송계의 모델링 및 비선형 특성 분석", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp. 75~79.