

마이크로 디스크 드라이브의 전력소모 최소화 제어

Control for Minimizing Power Consumption in Micro Disk Drives

강창익*, 백상은, 심준석
(Chang-Ik Kang, Sang-Eun Baek, and Jun-Seok Shim)

Abstract : Recently, the demand for micro hard disk drive that provides high-capacity removable storage for handheld electronic devices is growing very rapidly. Reducing power consumption is one of the primary control objectives in micro disk drives. The input power delivered to the seek servo system is consumed as heat by the transistors of power amplifier and motor coil resistance. In this paper, we present a new seek servo controller for minimizing the power consumption. We use a Fourier decomposition and nonlinear programming to determine the optimum seek profile that minimizes the power consumption. Also, the trajectory tracking controller is developed for exact tracking of the optimum seek profile. Finally, we present some experimental results using a commercially available micro disk drive in order to demonstrate the superior performance of the proposed controller.

Keywords : micro hard disk drive, power consumption, nonlinear programming, optimum seek profile, trajectory tracking controller

I. 서론

21세기 정보화 시대를 맞이하여 Personal Digital Assistance (PDA), 디지털 카메라, MP3 재생기, 노트북 PC 등 휴대형 정보 기기에 대한 수요가 현격하게 증가하고 있다. 이러한 휴대형 정보기기의 고성능화를 위해서는 작은 공간에 다량의 데이터를 저장하고 처리할 수 있는 초소형 정보저장장치 개발이 필수적이다. 따라서 휴대형 정보기기 대상 1인치 마이크로 디스크 드라이브 개발 경쟁이 전 세계적으로 치열하게 전개되고 있다. 최근 개발되어 시판되고 있는 1인치 마이크로 드라이브는 그 폭 및 중량이 각각 4.3 cm 및 16 g에 불과한 초소형 제품으로서 1인치 디스크 한 장에 무려 4 GB 데이터를 저장할 수 있고 트랙밀도는 90,000 TPI(Tracks Per Inch)에 육박하고 있다.

디스크 드라이브에서 헤드 위치 제어기는 트랙탐색제어기 (Track Seek Controller)와 트랙추종제어기 (Track-Following Controller)로 구분된다. 먼저 트랙탐색제어의 목적은 헤드를 현재 트랙에서 목적 트랙으로 가능한 신속 정확하게 이동시키기 위한 것이고 반면 트랙추종제어의 목적은 외란이 존재 하더라도 헤드의 위치를 트랙중앙에 정확히 일치시키기 위한 것이다. 트랙탐색시간을 최소화하기 위하여 트랙탐색제어 기로서 최적시간 (Time Optimal) 제어기가 널리 사용되어 왔다[1-4]. 그런데 최적시간 제어기는 가속도 파형이 불연속하여 기계적 시스템의 고주파 모드를 자극하여 원하지 않은 기계적 소음 및 진동을 유발시키는 문제가 있었다[5]. 그래서 구형파 대신 정현파 형태의 부드러운 가속도 파형을 사용하여 기계적 소음을 저감하고 또한 드라이브의 내구성 및 신뢰성을 향상시킬 수 있는 제어기가 널리 사용되고 있다[6,7].

그런데 휴대형 정보기기의 배터리 수명은 사용자의 가장 중요한 관심사이므로 마이크로 드라이브 경우 트랙탐색제어 기 설계 시 최우선으로 고려해야 할 사항은 전력소모 문제이다. 트랙탐색 시 제어시스템에 전달된 입력 전력의 일부는 액츄에이터 코일 저항에 의하여 열로 소모된다. 액츄에이터 코일 저항에 의한 전력손실을 최소화하기 위한 트랙탐색 제어기에 대한 기존 연구가 진행되어 왔다[8-11]. 그런데 입력전력은 액츄에이터 코일외에 액츄에이터를 구동하는 전력증폭기의 트랜지스터에 의해서도 소모되며 실제로 트랜지스터에 의한 전력 손실량은 저항에 의한 손실에 비해 5 배 이상이나 된다(본 논문의 표 3을 참조하면 저항에 의한 손실이 13.9 mW 인 경우 트랜지스터에 의한 손실은 75.3 mW 임). 그런데도 불구하고 기존 연구에서는 전력증폭기의 트랜지스터에 의한 전력손실이 전혀 고려되지 못했다.

본 논문에서는 액츄에이터 코일 및 전력증폭기의 트랜지스터에 의한 전체 전력 손실을 최소화하기 위한 새로운 트랙탐색제어기를 제안하였다. 코일에 의한 전력손실과 트랜지스터에 의한 전력 손실의 수학적 모델을 유도하였고 이러한 전력손실을 최소화하는 트랙탐색제어를 푸리에 (Fourier) 급수 전개 및 최적화 기법을 사용하여 결정하였다. 그리고 최적으로 결정된 트랙탐색제어를 정확히 추종하기 위한 제적추종 제어기를 설계하였다. 마지막으로 제안된 트랙탐색제어기의 전력손실 최소화 성능을 검증하기 위하여 상용 마이크로 하드 디스크 드라이브를 대상으로 실험한 결과를 제시하였다.

II. VCM에 소모되는 전력

본 장에서는 트랙탐색 시 소모 전력에 대한 수학적 모델을 구체적으로 제시하고자 한다.

디스크 드라이브에서 헤드의 위치를 조정하기 위하여 액츄에이터로서 음성코일전동기(Voice Coil Motor, 이하 VCM이라고 칭함)가 사용되고 있다. 고주파 특성을 무시하여 단순화된 액츄에이터의 모델을 구하면 다음과 같이 2차 시스템으로 표현된다.

$$\ddot{x} = \dot{v} = K_a i \quad (1)$$

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 10. 31., 채택확정 : 2003. 12. 15.

강창익 : 제주대학교 해양계측공학과(cikang@cheju.ac.kr)

백상은, 심준석 : 삼성종합기술원 스토리지연구실

(sebaek@sait.samsung.co.kr, junseok.shim@samsung.com)

※ 본 연구는 삼성종합기술원의 지원에 의하여 수행되었고 지원에 감사 드립니다.

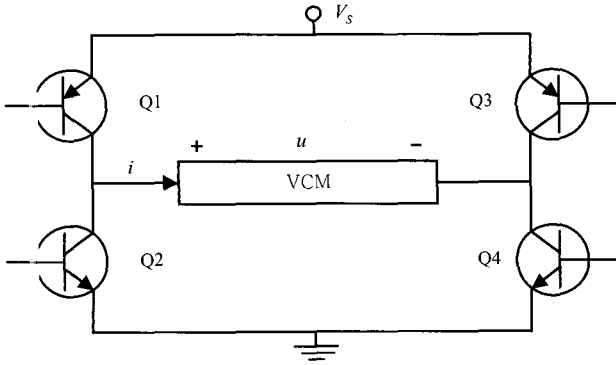


그림 1. VCM 전력증폭기.
Fig. 1. VCM power amplifier.

여기서 상수 K_a 는 액츄에이터의 가속도 상수를 나타내고 변위 x, v, i 는 액츄에이터 위치, 속도, VCM 코일 전류를 각각 나타낸다. 그리고 VCM 코일 전압 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$u = Li\dot{+} + Ri + K_e v \tag{2}$$

여기서 상수 L, R, K_e 는 코일 인덕턴스, 저항, 그리고 역기전력 상수를 각각 나타내고 변수 u 는 VCM 코일에 인가되는 전압을 표시한다.

디스크 드라이브에서 전력증폭기(Power Amplifier)는 VCM 전류를 제어하는 기능을 수행한다. 그림 1에 나타난 바와 같이 전력증폭기는 H-Bridge 형태로 조합된 4 개의 트랜지스터들로 구성된다. 왼쪽 상단 트랜지스터(Q1) 와 오른쪽 하단 트랜지스터(Q4) 가 활성화(ON) 되면 VCM에는 양의 방향으로 전류가 흐르게 되고 반면 오른쪽 상단 트랜지스터 (Q3) 와 왼쪽 하단 트랜지스터 (Q2) 가 활성화되면 반대 방향으로 전류가 흐르게 된다. 따라서 트랙탐색 시 전력증폭기에 전달되는 평균입력전력 P_{IN} 은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$P_{IN} = \frac{1}{T_{SK}} \int_0^{T_{SK}} V_s |i| dt \tag{3}$$

여기서 상수 V_s 는 직류 전원 전압으로서 마이크로 드라이브 경우 5 V 혹은 3.3 V 정도의 값을 갖는다. 그리고 T_{SK} 는 트랙탐색시간을 나타낸다.

다음에는 이러한 입력전력 전체가 전력증폭기 트랜지스터와 VCM 코일 저항에 의하여 소모된다는 사실을 입증하고자 한다. 그림 1에서 활성화된 2 개의 트랜지스터에 걸리는 전압 u_{TR} 은 전류방향에 따라 다음과 같이 표현됨을 알 수 있다.

$$u_{TR} = [V_s - \text{sgn}(i) u] \tag{4}$$

여기서 sgn 은 아래와 같이 정의되는 부호함수를 나타낸다.

$$\text{sgn}(i) = \begin{cases} 1, & i > 0 \\ -1, & i < 0 \end{cases} \tag{5}$$

따라서 활성화된 트랜지스터에 의하여 소모되는 평균전력 P_{TR} 은 아래와 같이 표현된다.

$$P_{TR} = \frac{1}{T_{SK}} \int_0^{T_{SK}} [V_s - \text{sgn}(i) u] |i| dt = \frac{1}{T_{SK}} \int_0^{T_{SK}} [V_s |i| - ui] dt \tag{6}$$

이번에는 VCM 코일에 의하여 소모되는 전력에 대하여 언급한다. (1)과 (2)에 의하여 VCM 에 전달되는 순간전력은 다음과 같이 표현된다.

$$ui = Li\dot{i} + K_e vi + Ri^2 = Li\dot{i} + \frac{K_e}{K_a} \dot{x}\ddot{x} + Ri^2 \tag{7}$$

따라서 VCM에 전달되는 평균전력은 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} P_{VCM} &= \frac{1}{T_{SK}} \int_0^{T_{SK}} ui dt \\ &= \frac{1}{T_{SK}} \int_0^{T_{SK}} (Li\dot{i} + K_e \dot{x}\ddot{x}/K_a + Ri^2) dt \\ &= \frac{1}{T_{SK}} \left([Li^2/2]_0^{T_{SK}} + [K_e \dot{x}^2/(2K_a)]_0^{T_{SK}} + \int_0^{T_{SK}} Ri^2 dt \right) \\ &= \frac{1}{T_{SK}} \int_0^{T_{SK}} Ri^2 dt \end{aligned} \tag{8}$$

이러한 (8)의 유도에서 전류 i 와 속도 \dot{x} 의 주기적 성질인 $i(0) = i(T_{SK})$ 와 $\dot{x}(0) = \dot{x}(T_{SK})$ 이 사용되었다. 따라서 (3), (6)과 (8) 에 의하면 전력증폭기에 전달되는 전력 P_{IN} 전체가 트랜지스터와 코일 저항에 의하여 소모됨을 쉽게 알 수 있다.

$$P_{TR} + P_{VCM} = P_{IN} = \frac{1}{T_{SK}} \int_0^{T_{SK}} V_s |i| dt \tag{9}$$

III. 전력소모 최소화 제어기 설계

본 장에서는 전장에서 소개한 전력소모를 최소화하는 새로운 트랙탐색 제어기를 설계하고자 한다.

전력소모를 최소화하는 최적의 트랙탐색제적을 결정하기 위하여 푸리에 급수 전개 방법을 사용한다. VCM 전류 제적을 다음과 같이 유한개의 푸리에 계수를 갖는 유한 푸리에 급수 형태로 표현한다.

$$i^*(t) = \sum_{n=1}^N I_n \sin\left(\frac{2n\pi}{T_{SK}} t\right) \tag{10}$$

여기서 $I_n (n = 1, 2, \dots, N)$ 들은 전류제적의 푸리에 계수들을 의미한다. 최적화 문제를 구성하기 위하여 먼저 실제적으로 존재하는 제한 조건들을 언급하고자 한다. 첫째로 VCM 에 인가되는 전압 u 는 직류전원 전압 V_s 로 제한된다. (10)의 전류제적을 시간에 대하여 적분하면 다음과 같이 속도제적 및 위치 제적을 얻게 된다.

$$\begin{aligned}
 v^*(t) &= \int_0^t K_a i^*(\tau) d\tau = \sum_{n=1}^N \frac{K_a T_{SK}}{2n\pi} I_n \left[1 - \cos\left(\frac{2n\pi}{T_{SK}} t\right) \right] \\
 x^*(t) &= \int_0^t v^*(\tau) d\tau = \sum_{n=1}^N \frac{K_a T_{SK}}{2n\pi} I_n \left[t - \frac{T_{SK}}{2n\pi} \sin\left(\frac{2n\pi}{T_{SK}} t\right) \right]
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

(10)과 (11)를 (2)에 대입하면 전압제함에 의한 푸리에 계수들에 대한 첫번째 제한조건을 얻게 된다.

$$\begin{aligned}
 \max_{0 \leq t \leq T_{sk}} |u(t)| &= \max_{0 \leq t \leq T_{sk}} \left| \sum_{n=1}^N \frac{K_e K_a T_{SK}}{2n\pi} I_n + \sum_{n=1}^N R I_n \sin\left(\frac{2n\pi}{T_{SK}} t\right) \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{n=1}^N \left(\frac{L 2n\pi}{T_{SK}} I_n - \frac{K_e K_a T_{SK}}{2n\pi} I_n \right) \cos\left(\frac{2n\pi}{T_{SK}} t\right) \right| \\
 &\leq V_s
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

또한 요구되는 디스크 드라이브의 동작속도 성능을 유지하기 위하여 트랙탐색시간은 허용 가능한 최대의 시간 T_{MAX} 을 넘어서는 안 된다. (11)의 위치제적 식을 사용하면 탐색거리 X_{SK} 와 탐색시간 T_{SK} 사이의 관계를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$X_{SK} = x^*(T_{SK}) = \sum_{n=1}^N \frac{K_a T_{SK}^2}{2n\pi} I_n
 \tag{13}$$

따라서 두 번째 제한 조건은 다음과 같이 표현된다.

$$T_{SK} = \sqrt{\frac{2\pi X_{SK}}{K_a \sum_{n=1}^N \frac{I_n}{n}}} \leq T_{MAX}
 \tag{14}$$

결국 전력손실을 최소화하기 위한 최적화 문제는 (12), (14)의 제한조건 하에서 (9)로 표현되는 전력손실을 최소화하는 (10)의 푸리에 계수들 I_n 을 찾는 문제로 귀결된다. 이러한 최적화 문제를 수학적으로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Minimize } F(X) \\
 &\text{subject to } C_1(X) \leq 0 \text{ and } C_2(X) \leq 0
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

여기서 X 는 다음과 같이 푸리에 계수들로 구성된 벡터이다.

$$X = [I_1 \quad I_2 \quad I_3 \quad \dots \quad I_N]
 \tag{16}$$

그리고 X 에 대한 비선형 함수 $F(X)$ 는 최소화 대상 목적함수로서 다음과 같이 정의된다.

$$F(X) = \frac{1}{T_{SK}} \int_0^{T_{SK}} V_s \left| \sum_{n=1}^N I_n \sin\left(\frac{2n\pi}{T_{SK}} t\right) \right| dt
 \tag{17}$$

그리고 X 에 대한 함수 $C_1(X)$ 와 $C_2(X)$ 는 비선형 제한조건을 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 C_1(X) &= \max_{0 \leq t \leq T_{SK}} \left| \sum_{n=1}^N \frac{K_e K_a T_{SK}}{2n\pi} I_n + \sum_{n=1}^N R I_n \sin\left(\frac{2n\pi}{T_{SK}} t\right) \right. \\
 &\quad \left. + \sum_{n=1}^N \left(\frac{L 2n\pi}{T_{SK}} I_n - \frac{K_e K_a T_{SK}}{2n\pi} I_n \right) \cos\left(\frac{2n\pi}{T_{SK}} t\right) \right| - V_s \\
 C_2(X) &= \sqrt{\frac{2\pi X_{SK}}{K_a \sum_{n=1}^N \frac{I_n}{n}}} - T_{MAX}
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

(15)의 최적화 문제는 제한적 비선형 프로그래밍 (Constrained Nonlinear Programming) 문제로 닫힌 형태 (Closed Form)의 해를 구하기가 거의 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 닫힌 형태의 해 대신에 수치적인 해를 구하고자 한다. 이러한 수치적인 해는 Matlab 프로그램의 FMINCON 명령을 사용하면 쉽게 구할 수 있다. FMINCON 명령은 비선형 제한조건 하에서 비선형 목적함수를 최소화하는 해를 구하는 프로그램으로서 FMIN, X0, NONCON 등의 입력변수를 갖는다. FMIN은 (17)의 목적 함수를 입력하기 위한 변수이고 X0는 초기치를 설정하기 위한 변수이다. 그리고 NONCON은 (18)의 비선형 제한 조건들을 입력하기 위한 변수이다.

마지막으로 전 절에서 설계된 트랙탐색 제적 x^* , v^* , i^* 을 정확히 추종하기 위한 제적 추종제어기 설계에 대하여 언급한다. 이를 위해 먼저 위치제어오차를

$$e = x^* - x
 \tag{19}$$

으로 정의하고 (1)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\ddot{e} = \ddot{x}^* - \ddot{x} = \ddot{x}^* - K_a i
 \tag{20}$$

따라서 제적추종제어기를 다음과 같이 선택하면 위치제어오차가 0으로 수렴함을 쉽게 알 수 있다.

$$\begin{aligned}
 i &= \frac{\ddot{x}^*}{K_a} + K_v \dot{e} + K_x e \\
 &= i^* + K_v (v^* - v) + K_x (x^* - x)
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

여기서 상수 K_v 와 K_x 는 제어이득으로서 페루프 제어시스템이 안정화되도록 선정된다. 그런데 하드 디스크 드라이브에서는 헤드가 서보 섹터를 만날 때마다 위치정보를 얻게 되므로 하드 디스크 드라이브의 제어 시스템은 이산제어 시스템이 된다. 따라서 (21)에 해당하는 이산제어기를 설계하면 다음과 같다.

$$i_k = i_k^* + K_v (v_k^* - v_k) + K_x (x_k^* - x_k)
 \tag{22}$$

여기서 아래 첨자 k 는 이산 시간을 나타낸다. 그리고 이산 제적들 x_k^* , v_k^* , i_k^* 은 (10)과 (11)를 이산화하여 다음과 같이 얻게 된다.

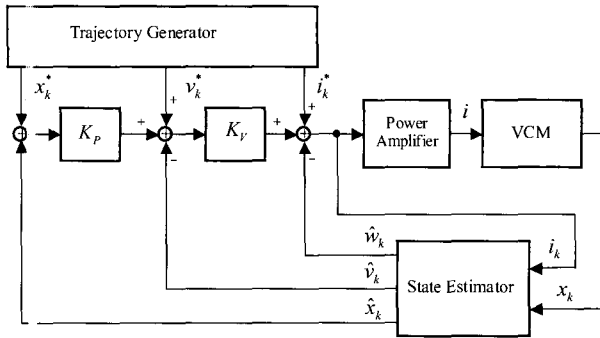


그림 2. 트랙탐색제어시스템.
Fig. 2. Track seek control system.

$$\begin{aligned}
 i_k^* &= \sum_{n=1}^N I_n \sin\left(\frac{2n\pi}{N_{SK}} k\right) \\
 v_k^* &= \sum_{n=1}^N \frac{K_a T_S^2 N_{SK}}{2n\pi} I_n \left[1 - \cos\left(\frac{2n\pi}{N_{SK}} k\right)\right] \\
 x_k^* &= \sum_{n=1}^N \frac{K_a T_S^2 N_{SK}}{2n\pi} I_n \left[k - \frac{N_{SK}}{2n\pi} \sin\left(\frac{2n\pi}{N_{SK}} k\right)\right]
 \end{aligned} \tag{23}$$

여기서 T_S 는 샘플링 주기를 나타내고 N_{SK} 는 트랙탐색시간 T_{SK} 에 해당하는 이산시간이므로서 $T_{SK} = N_{SK} T_S$ 를 만족한다.

지금까지 언급한 트랙탐색제어시스템의 블록도는 그림 2에 제시되었다. 그림 2에서 상수 K_p 는 K_X 를 K_V 로 나눈 값에 해당한다. 궤적발생기(Trajectory Generator)는 (23)의 이산 궤적들을 계산하여 제어루프에 인가하는 기능을 수행한다. 이에 필요한 이산 정현파 신호는 다음과 같은 순차적 계산알고리즘[6, 7]에 의하여 발생된다.

$$\begin{bmatrix} \cos(2n\pi(k+1)/N_{SK}) \\ \sin(2n\pi(k+1)/N_{SK}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(2n\pi/N_{SK}) & -\sin(2n\pi/N_{SK}) \\ \sin(2n\pi/N_{SK}) & \cos(2n\pi/N_{SK}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(2n\pi k/N_{SK}) \\ \sin(2n\pi k/N_{SK}) \end{bmatrix} \tag{24}$$

그림 2에서 상태 추정기는 헤드의 위치 정보 x_k 와 VCM 전류 정보 i_k 로부터 위치 추정치 \hat{x} , 속도 추정치 \hat{v} , 외란 추정치 \hat{w} 를 계산하는 기능을 수행한다. VCM 전류 정보는 직접 측정이 어렵기 때문에 전력증폭기 입력정보로 대체하여 사용된다. 외란 추정치는 VCM 과 전자제어장치(PCB)를 연결해주는 케이블의 탄성력에 의하여 발생하는 외란(일반적으로 바이어스 외란이라고 칭함)을 보상해주기 위하여 사용되었다[6, 7].

IV. 실험결과

본 장에서는 전장에서 제시한 전력소모 최소화 제어기의 성능을 실제적으로 검증하기 위하여 1인치 마이크로 디스크 드라이브를 대상으로 실험을 수행하여 얻은 결과를 제시한다.

그림 3과 같이 실험 장치는 1인치 마이크로 드라이브, 전자제어장치(PCB), 진단보드(Diagnostic Board), 직류전원공급장

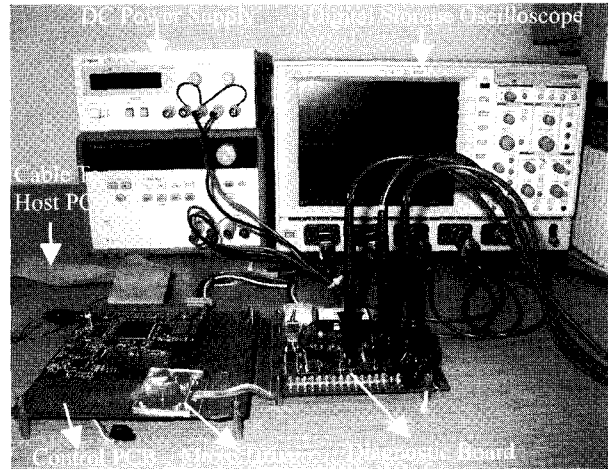


그림 3. 실험장치.
Fig. 3. Experimental setup.

표 1. 마이크로 드라이브의 사양.
Table 1. Specifications of micro drive.

Specification	Value
Track density	35,000 tracks per inch (TPI)
Disk rotation speed	4,500 rpm
Sampling period	69.44 microseconds
Acceleration constant	110,520 rad·s ⁻² ·A ⁻¹
Back EMF constant (K_e)	0.0015 V·s·rad ⁻¹
VCM coil resistance (R)	11 Ω
VCM coil inductance L	0.118 mH
Power supply voltage (V_S)	4.0 V

치(DC Power Supply), 디지털 저장 오실로스코프(Digital Storage Oscilloscope), 호스트 컴퓨터(Host PC) 등으로 구성된다. 실험에 사용된 마이크로 드라이브는 그 크기가 3 cm × 4cm에 불과한 초소형 제품으로서 삼성종합기술원에서 제작되었으며 자세한 사양은 표 1에 제시되었다.

전자제어장치는 고속 디지털신호처리기(DSP), VCM 전력 증폭기, 헤드신호 처리장치, 플래쉬 메모리 (Flash Memory) 등으로 구성된다. 사용된 DSP는 임베디드(Embedded) DSP 인 Oak DSP 이고 동작속도는 40 MIPS (80 MHz) 이다. 그리고 본 논문에서 제안된 제어기는 DSP 프로그램으로 구현되며 호스트 컴퓨터에서 어셈블리어를 사용하여 개발되고 RS232C 직렬 포트를 통하여 플래쉬 메모리로 다운로드 된다. 그리고 DSP내부의 디지털 제어 신호들을 실시간으로 관측하기 위하여 12 bit D/A 변환기를 내장하고 있는 진단보드를 사용하였다.

본 논문에서 제안하는 제어기의 우수성을 입증하기 위하여 기존 제어기와의 성능을 비교하고자 한다. 여기서 기존 제어기란 기존 연구[8-11]에서 제시된 제어기로서 VCM 코일

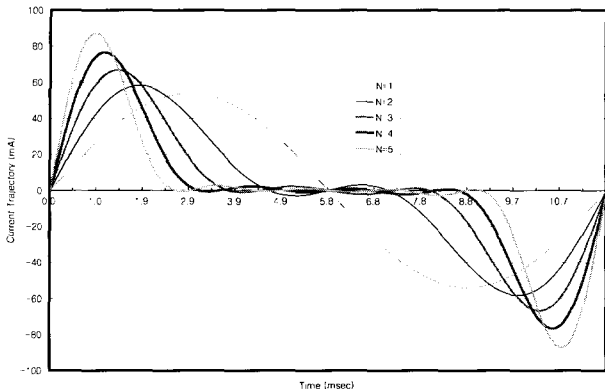


그림 4. 전력소모 최소화를 위한 제안된 전류궤적.
Fig. 4. Proposed current trajectory for minimizing power consumption.

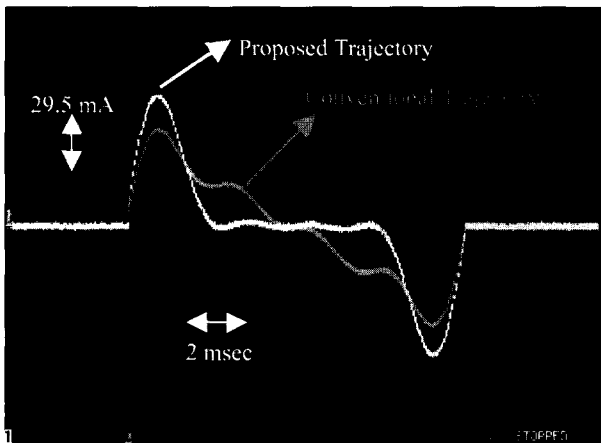


그림 5. 궤적발생기로부터 생성된 전류궤적의 형태.
Fig. 5. Current trajectories created by the trajectory generator.

저항에 의한 전력손실만을 최소화한 제어기를 의미한다. 성능 비교용 트랙탐색 거리 X_{SK} 는 최대 탐색거리의 1/3에 해당하는 값인 3,000 트랙으로 선정하였고 이 경우 허용 가능한 최대의 트랙탐색 시간 T_{MAX} 은 11.5 msec로 설정하였다. 탐색 시간을 11.5 msec 로 선정한 이유는 최근 시판되고 있는 대부분의 마이크로 드라이브의 평균탐색시간이 11 msec와 12 msec 사이에 있기 때문이다. 먼저 Matlab에서 제공되는 FMINCON 함수를 사용하여 (9)의 전체 전력소모 ($P_{TR} + P_{VCM}$)를 최소화하는 전류궤적의 푸리에 계수들을 결정하였다. 그림 4는 전류궤적의 고조파 수, 즉 (10)의 N 의 값에 따른 전력소모 최소화 전류궤적의 형태 변화를 보여주고 있는 그림이다. 그림 4로부터 고조파 개수가 증가함에 따라 진폭이 커지고 대신에 0 근처 영역이 넓어지고 있음을 알 수 있다. 각각의 경우 전체 전력 소모량은 표 2에 제시되었고 고조파 수를 늘릴수록 해가 더욱 정확해지고 전력소모량이 감소함을 알 수 있다. 그런데 구현 시 프로그램 크기 및 DSP 수행 시간이 비례하여 증가하는 문제와 전력소모 감소 비율을 동시에 감안하면 전류궤적 고조파 개수의 적절한 선택은 $N = 4$ 라고 볼 수 있다. $N = 4$ 인 경우 전체 전력소모

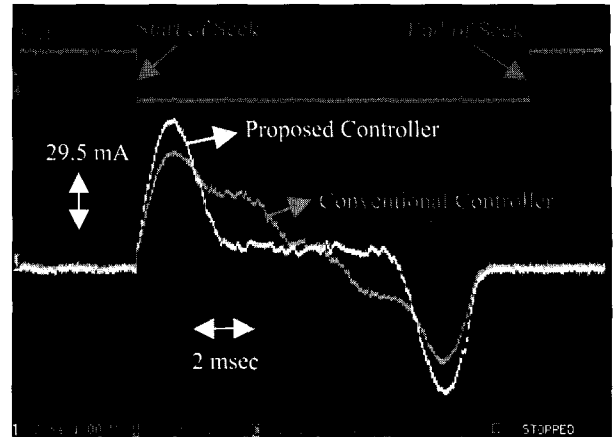


그림 6. 전력소모 최소화 제어기에 의한 VCM 전류.
Fig. 6. VCM current with the controller for minimizing power consumption.

표 2. 궤적 고조파 개수에 따른 전력소모량.

Table 2. Power consumption for the number of trajectory harmonics.

Power Consumption	$N = 1$	$N = 2$	$N = 3$	$N = 4$	$N = 5$
mW	137.4	107.3	95.6	89.3	85.4
%	100	78	69	65	62

($P_{TR} + P_{VCM}$)를 최소화하는 푸리에 계수들을 구한 결과를 제시하면 아래와 같다.

$$I_1 = 26.6mA, I_2 = 34.0mA, I_3 = 24.3mA, I_4 = 9.2mA \quad (25)$$

반면 성능 비교를 위하여 기존 연구에서 제시된 전류궤적 즉 (8)의 VCM 코일 저항에 의한 손실 (P_{VCM}) 만을 최소화하는 전류궤적의 푸리에 계수들을 동일한 방법으로 구하였고 그 결과는 다음과 같다.

$$I_1 = 37.9mA, I_2 = 19.0mA, I_3 = 12.6mA, I_4 = 9.5mA \quad (26)$$

다음에는 지금까지 설계한 2개의 트랙탐색제어기를 DSP 프로그램으로 구현하여 트랙탐색을 직접 수행하였고 진단보드를 사용하여 각종 제어 신호들을 관측하였다. 먼저 궤적발생기에 의하여 생성된 전류궤적들을 그림 5에 제시하였다. 이 그림으로부터 본 논문에서 제안하는 전류궤적과 기존연구에서 제시된 전류궤적 사이에 그 형태에 있어 확연한 차이를 볼 수 있다. 다음에는 각각의 경우 실제 VCM 전류, 헤드의 속도, 헤드의 위치 반응을 관측한 결과를 그림 6, 7, 8에 제시하였다. VCM 전류는 Tektronix 사의 전류측정 시스템(TM502A)에 의하여 측정되었다. 이 측정 결과를 사용하여 (6), (8), (9)의 전력소모량을 각각 계산하여 그 결과를 표 3에 제시하였다. 표 3으로부터 제안된 제어기를 사용한 경우 기존 제어기에 비해 트랜지스터에 의한 전력소모량 (P_{TR})은 22% 만큼 그리고 전체 전력소모량 ($P_{TR} + P_{VCM}$)은 17% 만큼 저감됨을 알 수 있다. 다음에는 탐색거리 X_{SK} 를

표 3. 제안된 제어기와 기존 제어기의 전력소모량 비교

Table 3. Power consumption comparison between proposed controller and conventional controller.

	$P_{VCM} (mW)$	$P_{TR} (mW)$	$P_{IN} (mW)$
Proposed	13.9	75.3	89.3
Conventional	11.3	96.0	107.3

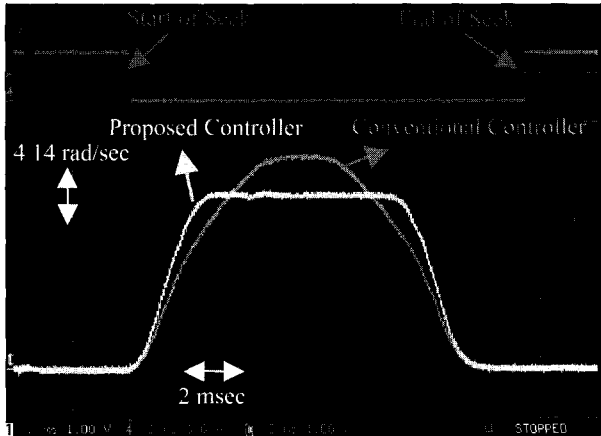


그림 7. 전력소모 최소화 제어기에 의한 헤드의 속도 반응.
Fig. 7. Head velocity response with the controller for minimizing power consumption.

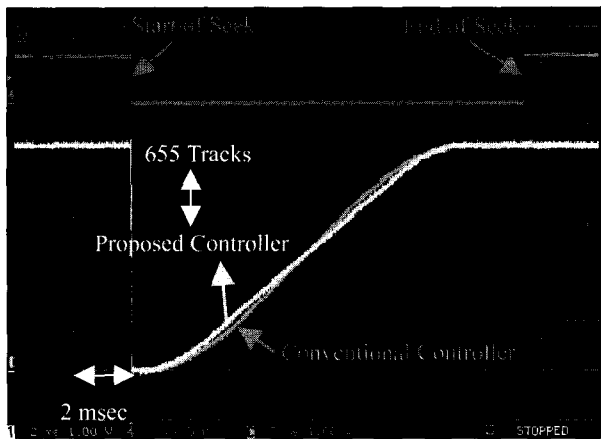


그림 8. 전력소모 최소화 제어기에 의한 헤드의 위치 반응.
Fig. 8. Head position response with the controller for minimizing power consumption.

300) 트랙 이외의 값들로 변경하여 각각의 경우마다 지금까지의 실험과정을 반복하여 전체 전력소모량을 측정하였다. 그림 9는 탐색거리 별로 선정한 최대의 탐색 시간 (T_{MAX}) 을 보여주고 있다. 이러한 탐색시간 선기에 있어 탐색거리는 탐색시간의 제곱에 비례하도록 하였다. 그림 10은 탐색거리 별로 전체 전력소모량을 보여주고 있는 데 탐색거리에 상관없이 제안된 제어기는 기존 제어기에 비하여 17% 만큼 전력소모량을 저감하고 있음을 알 수 있다.

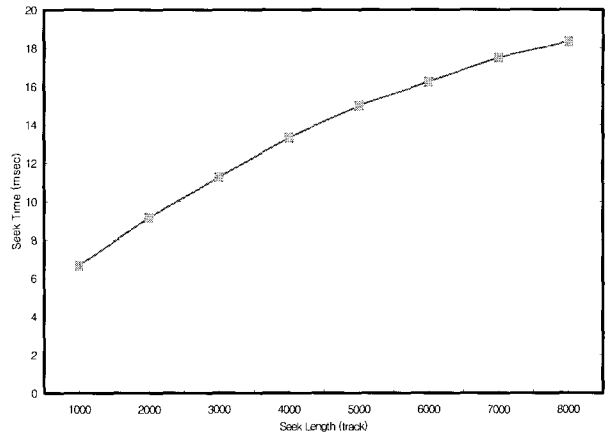


그림 9. 탐색거리에 따른 허용 가능한 최대 탐색시간.
Fig. 9. Admissible maximum seek time versus seek length.

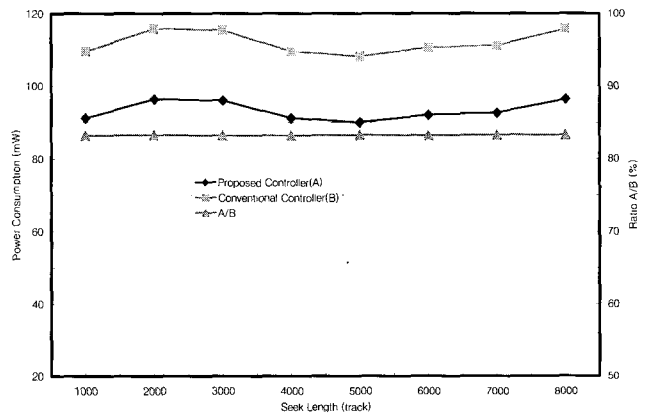


그림 10. 탐색거리에 따른 전력소모량.
Fig. 10. Power consumption versus seek length.

V. 결론

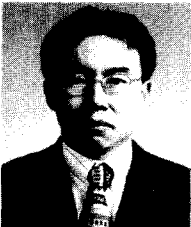
본 논문에서는 마이크로 드라이브의 전력소모량을 최소화할 수 있는 새로운 트랙탐색제어기를 제안하였다. 푸리에 급수 전개 및 비선형 최적화 기법을 사용하여 전력소모를 최소화하는 트랙탐색궤적을 설계하였고 또한 설계된 트랙탐색궤적을 정확히 추종하기 위한 궤적추종제어기를 제시하였다. 또한 실험을 통하여 제안된 제어기를 사용하면 기존제어기에 비하여 전력 손실량을 17% 만큼 저감할 수 있음을 입증하였다.

제안된 트랙탐색제어기는 노트 PC 용 2.5 인치 하드 디스크 드라이브, 광자기 디스크 드라이브, 광 디스크 드라이브 등 다른 정보 저장장치에도 직접 적용되어 전력소모 저감에 크게 기여할 수 있다.

참고문헌

[1] R. K. Oswald, "Design of a disk file head-positioning servo", *IBM J. of Res. & Develop.*, 1974.
 [2] M. L. Workman, *Adaptive Proximate Time Optimal Servomechanisms*, Ph. D. thesis, Stanford University, 1987.
 [3] Y. Xiong, S. Weerasooriya, and T.-S. Low, "Improved discrete proximate time optimal controller of a disk drive actuator",

- IEEE Trans. Magnetics*, vol. 32, no. 5, pp. 4010-4012, Sep. 1996.
- [4] G. F. Franklin, J. D. Powell, and M. L. Workman, *Digital Control of Dynamic Systems*, Addison-Wesley, 1990.
- [5] L.-S. Fan, H. H. Ottesen, T. C. Reiley, and R. W. Wood (1995), "Magnetic recording head positioning at very high track densities using a microactuator-based two-stage servo system," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 42, no. 3, pp. 222-233, 1995.
- [6] C.-I. Kang, "A new seek servo controller for acoustic noise reduction in disk drives," *Journal of Information Storage and Processing Systems*, vol. 3, no. 1/2, pp. 53-60, 2001.
- [7] 강창익, 추상훈, "디스크 드라이브의 탐색시간 단축제어," 제어·자동화시스템공학논문지, 제8권, 제2호, pp. 104-112, 2002.
- [8] E. S. Cooper, "Minimizing power dissipation in a disk file actuator," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 24, no. 3, pp. 2081-2091, 1998.
- [9] K. F. Hallamasek and R. Horowitz, "Comments on minimizing power dissipation in a disk file actuator," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 25, no. 5, pp. 4353-4354, 1989.
- [10] D. K. Miu and S. P. Bhat, "Minimum power and minimum jerk position control and its applications in computer disk drives," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 27, no. 6, pp. 4471-4475, 1991.
- [11] Y. Mizoshita, S. Hasegawa, and K. Takaishi, "Vibration minimized access control for disk drives," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 32, no. 3, pp. 1793-1798, 1996.



강 창 익

1967년 3월 25일 생. 1989년 서울대학교 제어계측공학과(공학사). 1991년 서울대학교 제어계측공학과(공학석사). 1995년 서울대학교 제어계측공학과(공학박사). 1995년 삼성전자 스토리지 시스템 사업부 선임연구원. 1999년 ~ 현재 제주대학교 해양계측공학과 조교수. 관심분야는 비선형제어, 스토리지 시스템 제어, 소나 신호처리.



백 상 은

1969년 4월 15일 생. 1993년 서강대학교 전자공학과(공학사). 1995년 서강대학교 전자공학과(공학석사). 1995년 ~ 현재 삼성종합기술원 Storage Lab. 전문연구원. 관심분야는 정보저장기기 시스템 제어, 신호처리, Robot self-navigation.



심 준 석

1962년 9월 8일 생. 1985년 한양대학교 전기공학과(공학사). 1987년 한양대학교 전기공학과(공학석사).

1990년 한양대학교 전기공학과(공학박사 수료) 1990년 ~ 현재 삼성종합기술원 Storage Lab Technical Leader. 관심분야

는 Intelligent Storage System & Control, Signal Processing.