

광 디스크 드라이브 이송계의 모델링 및 비선형 특성 분석 Modeling of Feeding System for Optical Disk Drive and Nonlinear Dynamic Analysis of it.

이 광 현*·최 진 영**·박 태 욱**·양 현 석**·박 영 필**

Kwang-Hyun Lee, Jin-Young Choi, Tae-Wook Park, Hyunseok Yang, and Young-Pil Park

Key Words: Optical Disk Drive (광 디스크 드라이브), Feeding System (이송계), Nonlinear Analysis(비선형 해석)

ABSTRACT

In an optical disk drive, a feeding system which is used to move the optical pick-up system to the target position and the proper control scheme of it are important in random access performance. Since the effect of control is directly affected by the modeling precision of the real system, the precise modeling to the real system should be acquired. Although a simple linear order modeling to the feeding system of an optical disk drive is useful in understanding of the overall dynamic characteristics, the dynamic characteristics which are belongs to the nonlinear area cannot be predicted correctly. Furthermore, the feeding system of an optical disk drive has many nonlinear characteristics such as a nonlinear friction and backlash. For this reason, the understanding of the nonlinear properties in the feeding system is very important. In this paper, the nonlinear items of the feeding system, friction and backlash, are introduced and the effect of it are investigated. Finally, the mathematical model considering the nonlinear properties is compared to the real system, and some comments of it are given.

1. 서 론

광 디스크 드라이브 이송계의 목적은 정확한 정밀도로 최소 시간 내의 이동에 있으며, 이러한 성능 구현을 위해서는 시스템의 초기 설계가 중요하다. 또한 올바른 제어 법칙의 적용 역시 중요하며, 이러한 제어 법칙은 일반적으로 근사화된 모델을 바탕으로 한다. 해석의 편의를 위하여 근사화된 선형의 저차의 전달함수로 유도하는 것이 일반적이지만, 광 디스크 드라이브의 이송계의 경우, 비선형 마찰이나 백래쉬(backlash)와 같은 비선형적 요소들이 지배적으로 존재하므로 이들 요소를 무시하여 유도된 모델의 경우 실제 상황과 부합되지 않는 경우가 종종 발생한다.

따라서 본 논문에서는 이러한 비선형 요소들을 실험적으로 분석하고, 비선형 요소에 적합한 수학적 모델을 유도하였다. 비선형을 포함하는 수학적 모델 입력에 대한 결과와 실제 실험 결과를 비교 분석하여 유도된 수학적 모델에 대한 타당성을 검증하였다.

2. 광 디스크 이송계 개요

광 디스크 드라이브의 올바른 작동을 위해서는

디스크 표면의 정보면을 레이저의 조사에 계속적으로 추종하여야 한다. 이때 요구되는 추종 정밀도는 매우 높으므로 높은 제어정밀도 특성이 보장되는 미동(fine) 액츄에이터를 사용하게 된다. 그러나 미동 액츄에이터는 작동 범위가 1mm 내외로 매우 좁으므로, 광 픽업의 빔 스폿을 디스크의 전 영역으로 이송시킬 수 있는 이송 시스템이 필요하다. 이를 담당하는 부분을 이송 시스템이라 하며, 광 디스크 드라이브에서는 조동(coarse) 액츄에이터가 이 기능을 담당한다. 현재 광 디스크 드라이브에서 채택하고 있는 이송계를 크게 분류하면 (i) 로터리 형의 DC 모터와, (ii) 스텝핑(steping) 모터로 구분된다. 본 논문에서 대상계로 택한 모델은 로터리 형의 DC 모터로, 개략적인 이송시스템에 대한 형상을 Fig.1에 제시하였다. 로터리 DC 모터를 이용하는 경우, 저가의 부품으로 이송계를 구성할 수 있다는 장점이 있으나 백래쉬와 지연(delay)와 같은 문제점들이 있어 근래에 들어서는 이러한 단점들이 회피할 수 있는 stepping 모터의 채택이 일반적이다.

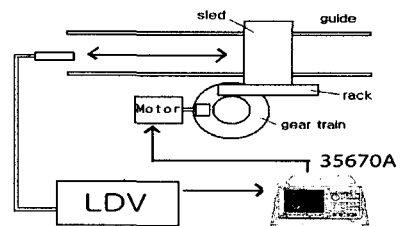


Fig. 1 Experimental Setup for measurement

* CISD, Yonsei University
E-mail : lkh78@yonsei.ac.kr
Tel : (02) 2123-2824, Fax : (02) 361-84608

** CISD, Yonsei University

3. 광 디스크 이송계의 수학적 모델링

3.1 비선형 요소를 무시했을 경우의 이송계의 모델링

DC 모터를 전압으로 구동하는 경우, 입력 전압 V 에 대한 관계식을 유도하면 다음과 같다.

$$V = E_a + I_a R_a + L_a \frac{dI_a}{dt} \quad (1)$$

여기서 I_a 는 DC 모터의 전류 $\dot{\theta}$ 는 DC 모터의 각속도를 나타내며 T 는 토크를 나타낸다. 나머지 상수항에 대한 정의는 Table.1 에 정의되어 있다. 이와 같이 각 계수를 정리하면 다음의 방정식이 유도 된다.

$$E_a = K_e \times \dot{\theta} \quad (2)$$

$$T = K_t \times I_a = J\ddot{\theta} \quad (3)$$

Table 1. motor parameters

Notation	E_a	R_a	L_a
Parameter	Back Emf Voltage	Resistance	Inductance
Notation	K_e	K_t	J
Parameter	Back Emf coefficient	Torque coefficient	Rotor inertia

이들 관계식으로부터 회전운동과 직선운동과의 관계를 유도하기 위하여, 실제 시스템의 구성을 나타내면 Fig.2 와 같다.

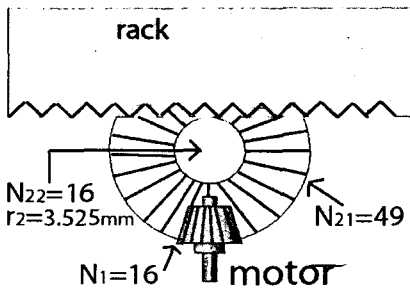


Fig. 2 gear train 의 구조

모터의 구동으로 인한 첫번째 기어의 회전각 θ_1 과 기어열의 작용으로 이루어지는 랙 기어의 리니어한 이송거리 x 와의 관계를 유도하면 다음과 같다.

$$\frac{\theta_2}{\theta_1} = \frac{N_1}{N_{21}} \quad (4)$$

$$x = r_{22} \times \theta_2 \quad (5)$$

$$x = r_{22} \times \frac{N_1}{N_{21}} \times \theta_1 \quad (6)$$

위 식에서 N_{21} 은 모터축과 결합되어 있는 1 번 기어와 결합된 기어의 개수이며 r_{22} 는 2 번 기어에서 랙 기어와 연결되어 있는 부분의 반지름이다. 실제 파라미터를 대입하면, 다음과 같은 회전 운동과 직선 운동의 관계가 유도된다.

$$x = 3.252 \times \frac{16}{49} \theta_1 \quad (7)$$

입력 전압에 대한 이송계의 직선 운동의 최종적인 관계식을 얻어내기 위하여, 식 (1) ~ (6)식을 라플라스 변환하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{X(s)}{V(s)} = r_{22} \frac{N_1}{N_{21}} \frac{K_t}{J R_a s^2 + K_e K_t s} \quad (8)$$

이 때 (1) 식의 인덕턴스는 아주 작으므로 무시하였다. 이와 같이 이송계 시스템에 있어서 비선형 요소를 고려하지 않았을 때, (8)에 입력 전압에 대한 이송계 변위의 전달함수는 극점을 2 개 가지는 2 차 시스템으로 모델링 된다.

3.2 로터리 DC 모터를 이용한 이송계의 비선형 요소

앞 절의 전달함수의 유도에 있어, 비선형 요소는 무시하고 관계식을 유도 하였으나, 본 절에서 비선형 모델을 위하여 먼저 마찰 모델을 간략히 살펴보고, 백래쉬에 대한 수학적 모델을 간략히 유도하였다.

3.2.1 마찰 모델

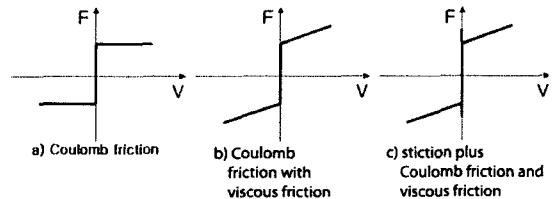


Fig. 3 static friction models

마찰은 크게 정적 마찰과 동적 마찰로 분류할 수 있다. 먼저 정적 마찰은 멈추어 있을 때의 마찰로써, 마찰은 운동의 반대 방향이며 그것의 크기는 접촉면과 속도와는 독립적이다. Fig.3 의 a) 의 거동을 보이는 미끄럼(Coulomb) 마찰의 경우 마찰력 F_c 는 수직항력에 비례한다.

$$F_c = \mu F_N \quad (12)$$

점성(Viscous) 마찰은 윤활제의 점성에 의해 발생되는 마찰력으로 다음과 같이 속도에 비례한다.

$$F = F_v v \quad (13)$$

점성 마찰은 종종 미끄럼 마찰과 동시에 발생하는데, Fig.3 의 b) 에 보여지는 모습의 거동을 보인다. 본 논문의 이송 시스템은 점성 마찰과 미끄럼 마찰이 복합되는 Fig.(b)의 모델로 가정하여, 다음과 같은 운동방정식을 유도하였다.

$$M \ddot{x} + B \dot{x} = -f \cdot \text{sign}(\dot{x}) \quad (14)$$

M 은 슬레드의 질량이며, x 는 슬레드의 이송 거리, B 와 f 는 리니어 가이드와 슬레드 사이의 감쇠 계수 및 마찰 계수를 각각 나타낸다.

3.3 기어 백래쉬(backlash)의 영향

기어열에 있어서 백래쉬의 발생은 비선형적 특성을 보이며 따라서 이에 대한 분석이 필요하다. 랙 앤 피니언 기어 모델을 Fig. 4 와 같이 모델링할 수 있다.

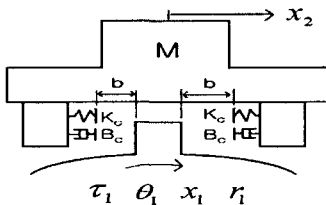


Fig. 4 Model for backlash

Fig.4 에서 M 과 x_2 는 각각 슬레드의 질량과 이송 변위를 나타내며, 구동 기어와 랙 기어 사이의 K_c 는 접촉 탄성 계수를, B_c 는 접촉 감쇠 계수를 나타낸다.

앞서 유도한 (3) 식에 감쇠 효과에 관련된 항을

넣고, $x_1 = r_1 \theta_1$ 의 관계를 이용하면 아래 식이 된다. 여기서 B_1 은 감쇠 계수를 나타낸다.

$$\frac{J_1}{r_1^2} \ddot{x}_1 + \frac{B_1}{r_1^2} \dot{x}_1 = \frac{K_c i_a}{r_1} \quad (15)$$

Fig.4 에서 $\Delta x = x_2 - r_1 \theta_1$ 으로 정의하였을 때, 백래쉬의 발생은 Δx 와 b 와의 아래와 같은 관계에 의해서 발생된다.

$$\begin{cases} |\Delta x| < b & \text{no backlash} \\ |\Delta x| > b & \text{backlash} \end{cases} \quad (16)$$

$\Delta x > b$ 가 되어 백래쉬가 일어났을 때 이에 대한 영향으로 아래와 같은 impact force 항이 추가된다.

$$K_c(\Delta x \pm b) + B_c \Delta \dot{x} \quad (17)$$

식 (17)을 (15)에 더해주면 다음과 같이 된다.

$$\frac{J_1}{r_1^2} \ddot{x}_1 + \frac{B_1}{r_1^2} \dot{x}_1 = \frac{K_c i_a}{r_1} + K_c(\Delta x \pm b) + B_c \Delta \dot{x} \quad (18)$$

백래쉬의 효과는 식(14)에도 영향을 준다.

$$M \ddot{x} + B \dot{x} = -f \cdot \text{sign}(\dot{x}) - K_c(\Delta x \pm b) - B_c \Delta \dot{x} \quad (19)$$

4. 실험데이터 추론 모델링

수학적 유도를 통한 모델링은 시스템의 개략적인 경향을 살피는 데 매우 유용하지만, 실제 모델을 정확히 예측할 수 없으므로 실측을 통한 시스템의 동특성 파악은 매우 중요하다. 특히, 앞에서 고찰했던 많은 비선형적 요소들과 관련된 파라미터의 정확한 측정이 매우 어렵고, 수학적 해석이 불가능한 경우가 있다는 사실에서 실험을 통한 시스템의 동특성 파악은 매우 중요하다. 실험적 모델은 Fig.1 의 구성과 같이, HP35670A 와 LDV 를 사용하여 실험을 수행하였으며, 실험으로 얻은 데이터를 곡선 적합(curve fitting)방법을 사용하여 식 (20)을 얻어 내었다.

$$G(s) = \frac{(1 + 0.00098s)}{(1 + 0.016s)(1 + 0.17s)(1 + 0.0012s + 0.000006s^2)} \quad (20)$$

실험 과정에서 4Hz 미만의 저주파 영역은 슬레드의 변위가 너무 커 가이드 끝에 부딪히는 현상

을 보였다. 따라서 실험 모델은 4Hz 이상의 대역을 대상으로 삼았고, 비선형 마찰 모델을 얻어내기 위하여 추가적인 실험을 행하였으며 그 결과가 Fig. 7에 제시되어 있다. 여기서 입력은 4V의 크기로 0.04sec 펄스 입력을 가했으며, 이 때 발생한 속도 및 변위의 결과를 Fig.8의 상단에 제시하였고, Fig. 8의 하단은 얻어진 곡선 적합을 통하여 얻어진 모델에 적용하여 얻어진 결과이다. 비선형 인자를 제외하였을 경우에는, 결과를 제시하지 않았지만 실험 결과와 비교하여 보다 많은 오차를 보여 주었다. 또한 모델의 결과에 비선형 마찰과 백래쉬의 인자를 적용하여 시뮬레이션 하면 더 정확한 결과를 얻을 수 있다.(Fig.5 참조).

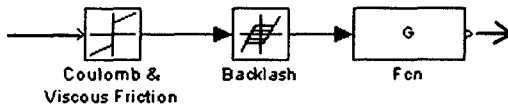


Fig. 5 Modeling of nonlinear effect

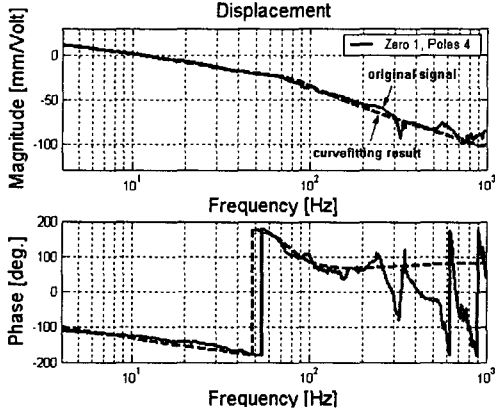


Fig. 6 Frequency response of the system

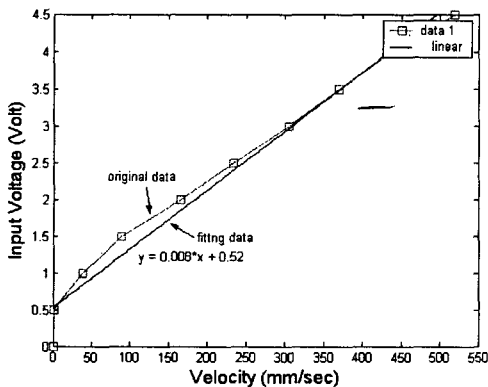


Fig. 7 Nonlinear model of the system

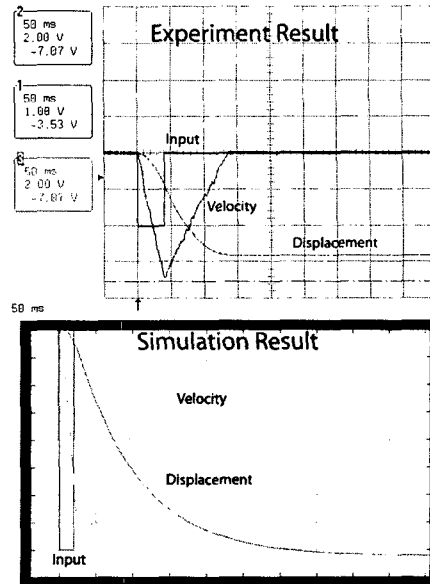


Fig. 8 Comparison of the result

실험 데이터로부터 2.5Hz 미만의 저주파 영역과 200Hz 이상의 고주파 영역에서는 시스템의 성능 저하가 관찰되는데, 이는 저주파 영역에서의 마찰과 고주파 영역에서의 백래쉬와 관련된 비선형적 영향들이 이 성능 저하의 원인으로 추정된다.

5. 결론

이송계 시스템에 있어서의 성능 향상을 위한 시스템 모델링에 있어서의 마찰과 백래쉬의 비선형적 특성에 대하여 수학적 방법으로 분석해 보았으며, 또한 실험을 통하여 얻은 데이터를 통해 이송 시스템을 모델링 하였다. 이송계의 성능을 향상시키기 위한 제어에 있어 본 논문은 시스템의 비선형적 특성을 이해하는데 유용하며, 이를 바탕으로 한 시스템의 성능 향상에 유용할 것이다.

참고 문헌

- (1) Nise, N. S, 2000, *Control Systems Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (2) Han, J, and Hock K. M, "An Experimental Model of Sled System in an Optical Disk Drive" *Japanese Journal of Applied Physics*, vol.39, no. 39, 2000, pp.843-845
- (3) Yeh, T. J, and Pan, Y. C, "Modeling and Identification of Opto-Mechanical Coupling and Backlash Nonlinearity in Optical Disk Drives", *IEEE*, 2000,
- (4) Nordin, M., and Galic, J., "New Models for Backlash and Gear Play", *international journal of Adaptive Control and Signal Processing*. Vol.11, 1997, pp.49-63