

광 정보저장 드라이브의 동적 특성 해석

남윤수*, 임종락**

Analysis on the Dynamic Characteristics of an Optical Storage Drive

Yoonsu Nam*, and Jongrak Lim**

ABSTRACT

The modern trends of optical storage devices can be characterized by high density in information recording, and high bandwidth in data input/ output processing rate. These make servo engineers to face with a new barrier on control system design in much more difficult way. The first step to attack this barrier will be through a systematic modeling for the dynamic characteristics of optical storage drive. In this paper, an analytical dynamic model for an optical storage drive based on FEM is derived, and compared with experimental results. Through this comparison, a practical dynamic model on the focusing and tracking motion of optical storage drive is proposed for the initiation of real control system design problem.

Key Words : Optical Storage Drive (광 정보 기억장치 드라이브), Finite Element Method (유한요소 해석법), Coupling Effects on Focusing/ Tracking Motion (초점/ 트래킹 운동 연성효과)

1. 서론

1980년대 초기부터 실용화되기 시작한 CD (Compact Disc)는 단순한 음악 저장용 기록매체로서 출발했지만, 현재에는 대용량 광 기억장치 (CD-ROM/ R/ RW), 또는 멀티미디어 장치 (CD-Interactive, DVD: Digital Video Disc)로 그 응용 범위가 급속히 확장되고 있는 추세이다. 특히, 광범위한 시장을 형성하고 있는 개인용 컴퓨터의 대용량 기억장치로서의 응용은 정보저장의 고 밀도화 (High Density), 그리고 정보 입/출력 속도의 고 대역폭화 (High Bandwidth)를 요구하고 있다¹⁾. 이와 같이 점차 강화되는 설계상의 요구조건들은 서보 시스템 설계에 부담으로 남게 되며, 단순 CD 재생기에서 사용되던 종래의 서보 제어계 설계 개념

은 새로운 장벽에 직면하고 있다. 서보계 설계 관점에서 본 광 정보저장 장치(Optical Storage Device)의 발전 추세와 이에 따른 문제점들은 아래의 Fig. 1에서 Fig. 3으로 정리될 수 있다.

● **정보저장의 고 밀도화에 따른 서보 설계 사양의 엄밀성** : 광학 디스크 면 위에 기록되는 정보가 고 밀도화 될수록, 서보계의 정상상태 잔류오차의 크기는 더욱 더 작아져야 한다. 다시 말하면, 아래의 Fig. 1에 나타난 바와 같이 트래킹 방향 감도함수 (Sensitivity Function)의 DC 게인 크기는 점점 작아져야 한다. 그러나, DC 주파수 영역에서 너무 작은 크기를 갖는 감도함수 (Sensitivity Function)는 일반적으로 큰 크기의 피크 (High Magnitude Peak)를 유발하며, 이는 서보계 안정성

* 강원대학교 공과대학 정밀기계과

** LG 전자 디지털 멀티미디어 연구소

에 민감한 영향을 주게 된다. 따라서, Fig. 1 과 같이 정의되는 오차한계의 요구조건을 충족시키기 위하여, 디스크 편심이나 스핀들 축 진동등에 의한 기계적 오차 요인을 최소화하는 정밀가공 및 조립 방법, 새로운 개념의 광학부 구동 메커니즘의 개발과, 그리고 고 정밀 서보계 설계에 의존하는 방안들이 서로 보완적으로 추진되고 있다.

Much Tightened Sensitivity Performance Specification

- Mechanical Vibration due to rotation
 - ✓ Eccentricities/ Disk Deflections
 - ✓ Spindle Rotor Vibration
 - ⋮
 - External Vibration
- } Within order of 10^{-7} - 10^{-8} meter in magnitude for tracking/ focusing servo loop in the face of manufacturing tolerance

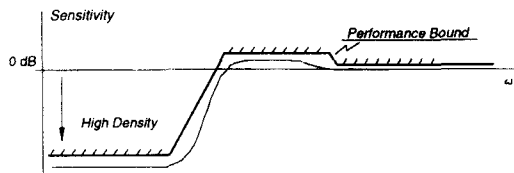


Fig.1 Design Specification for High Density Optical Storage Devices

● **고 배속화에 따른 서보 대역폭의 확장:** 광 디스크 회전에 의하여 발생되는 다양한 종류의 진동에 의한 초점 및 트랙 방향 오차의 크기, 또는 광 픽업 구동부 및 센서 등의 특성은 이 제품이 대량 생산되기 때문에 제품마다 서로 다른 특성 값을 갖게 된다. 또한, 광 픽업 드라이브의 서보 대역폭 (Bandwidth)이 확장 될수록, 그 동안 종종 무시될 수 있었던 광 픽업 구조에 의한 교차 진동모드/ 잔류진동 (Residual Vibration) 특성 등은 고 대역폭 서보계 설계에 있어서 주요한 장벽으로 나타나게 된다. 이는 아래의 Fig. 2 에도 나타나 있듯이, 설계된 공칭 페루프의 주파수 응답특성과 위에서 언급된 모델링 편차의 크기와 연관된 BODE 선도의 관계로서 표현되며, 건설 안정성 (Robust Stability) 을 보장하기 위하여 최소한 서보 대역폭까지는 정확한 모델링을 요구하고 있다. 그러나, 양산 제품이 갖는 특성을 고려할 때, 제품단위마다의 정확한 모델링은 거의 불가능하다. 따라서, 건설 제어의 개념에 의한 페루프 설계^(4,5) 방법이 고려될 수 있다. 또한, 광 정보 저장장치의 서보 대역폭이 확장

될수록 나타나는 또 다른 문제점은 Fig. 2 에서 명시된 바와 같이 고 성능의 디지털 HW 가 필요하다는 점이다.

Much Higher Bandwidth Specification

- Servo Loop Instability due to Modeling Error
 - ✓ Nominal Plant Model Error
 - ✓ Manufacturing Tolerance
 - ✓ Coupling b/w focus and tracking loop
 - ⋮

- Implementation using digital Controller
 - Very high sampling rate is required:
 - ✓ Computational Power
 - ✓ High Speed I/O
 - ⋮

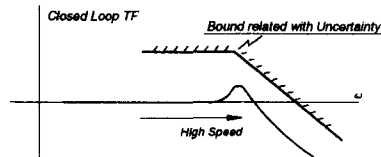


Fig. 2 Design Specification for High Bandwidth Optical Storage Devices

● **고 성능 Seek 알고리즘:** 임의 데이터 접근 (Random Data Access)을 위한 고속 이송 (Seek)는 광 기억장치 성능을 나타내는 또 다른 지표이다. 그러나, 이미 잘 알려진 대로 광학부 전체의 고속 이송에 따른 트랙킹 서보계의 잔류진동은 이 지표의 성능향상에 대한 주된 저해 요인으로 작용하고 있다. 이 문제의 해결을 위하여 다수의 연구 결과가 보고되고 있으며^(6,7), Fig. 3 과 같이 트랙킹 서보계의 잔류진동을 최소화 하면서, 빠르게 광학부 전체를 이동할 수 있는 운동 알고리즘에 관한 연구가 요구된다.

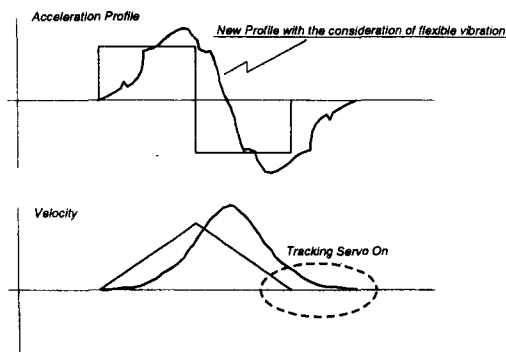


Fig. 3 High Speed Seek Motion Profiles

본 연구의 목적을 위해서 제시된 여러 문제점들의 해결에 관한 것인데, 광 정보저장 장치의 동적 특성을 기술하는 운동모델을 제시하는 것이다. 이를 위하여 FEM에 의한 광 픽업부의 해석적 운동 모델이 유도되었고, 이는 실험결과와 비교/ 분석 되어졌다. 특히, 광 픽업부의 대물렌즈(Objective Lens)의 작동점 변화에 따른 운동 특성의 변화, 그리고 초점/ 트랙킹 방향간의 간섭효과가 실험적으로 관찰되었다. 또한, 실험적으로 얻어진 광 픽업 장치의 운동 특성들은 광 픽업 제조회사의 사양과 비교/ 분석 되었으며, 이러한 결과는 제품 단위마다 필연적으로 발생하는 운동 특성상의 불 균일성 정도를 기준 모델에 대한 불 확실성(Uncertainty)의 크기로 반영하는 것에 중요한 데이터로 사용될 수 있다.

2. 광 정보 저장 드라이브의 모델링

2.1 광 정보 저장 드라이브의 기계적 구조

광 정보 저장 드라이브(Optical Storage Drive)의 서보계가 Fig. 4에 도시 되어 있다. 이 그림에서 보듯이 광 드라이브의 운동은 초점 및 트랙 방향(Focusing and Tracking) 운동 특성으로 나뉘어 진다. 또한, 트랙 방향 운동특성은 대물 렌즈부만을 작은 범위 내에서 가동 코일모터(Moving Coil Motor)를 이용하여 구동하는 정밀 운동(Fine Motion)부와 광 픽업부 전체를 수평이송(Slide) DC 모터를 사용하여 이동하는 거친 운동(Coarse Motion)부로 구성된다. 따라서, 광 저장장치 드라이브는 3개의 입력신호에 의존하여 광 빔 스폿(Optical Beam Spot)이 초점 및 트랙방향으로 정밀하게 광 디스크 면의 특정 정보저장 위치에 놓이게 하는 동적 시스템이다. 한편, 대물렌즈와 가동코일(Moving Coil)로 구성된 렌즈이동 부는 아래의 Fig. 5와 같이 병렬로 연결된 4개의 유연 도선(Flexible Conducting Wire)에 의하여 칸티레버(Cantilever) 지지 방식으로 광 픽업부와 연결되어 있다. 또한, 대물렌즈 부의 운동에 댐핑 효과를 부가하기 위하여 유연 도선의 일부는 고 점성 유체에 잠겨 있게 된다. 렌즈 이동부위를 좀 더 단순화 시키면, Fig. 6과 같이 하나의 유연 도선으로 고려될 수 있으며, 렌즈 이동부는 도선의 끝 단에 매달려 있는 것으로 생각될 수 있다.

위와 같은 구조를 갖는 스프링 지지방식의 광 픽업부 운동모델은 집중상수 해석법(Lumped Parameter Method), 또는 Euler-Bernoulli Beam 이론을 전개하여 유도할 수 있다. 그러나, 집중상수 해석법은 수평 이송(Slide Motion)부와 렌즈 이동부간의 연동 효과를 정확히 기술하기에는 한계가 있으며, Euler-Bernoulli Beam Model은 유체중에 잠겨진 유연 도선부의 댐핑 효과를 적절하게 표현하는 것에 어려움이 있으므로, 유한요소 해석법을 사용하여 광 픽업부의 운동 모델을 유도한다.

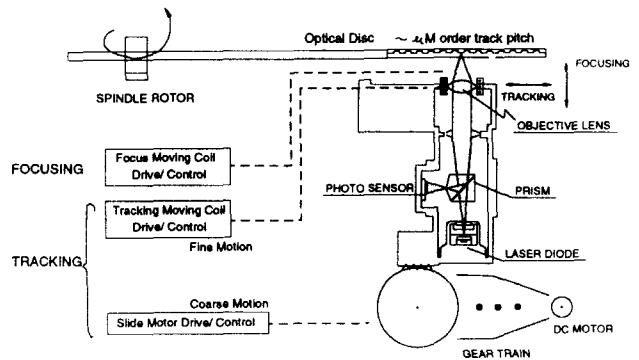


Fig. 4 Servo System Structure of Optical Storage Drive

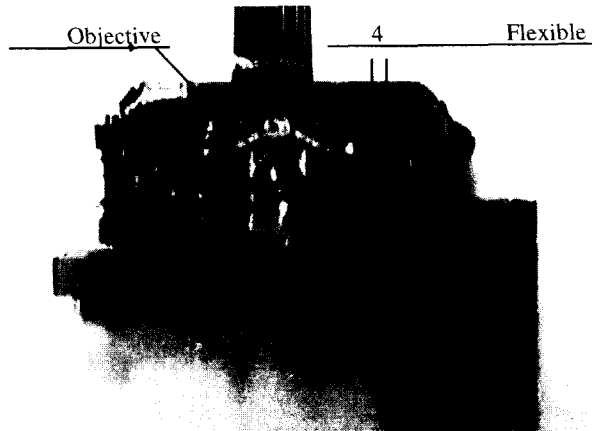


Fig. 5 Optical Storage Drive

2.2 FEM에 의한 광 정보 저장 드라이브의 운동 특성 유도

Fig. 6과 같이 단순화된 구조를 갖는 광 픽업 부에 대한 운동 모델을 얻기 위하여 유한요소 해석법이 사용되었다. 이에 관한 이론적 배경은 많은 참고문헌에⁽⁸⁻⁹⁾ 잘 알려져 있으므로, 여기서는 Fig. 6에 도시된 광 기억장치 드라이브에 대한 트랙킹 방향으로의 운동 모델링에 관한 응용을 중심으로 간략하게 정리한다.

대물렌즈 부는 유연 도선부와 비교할 때, 강체 (Rigid Body)로 고려될 수 있으며, 앞의 Fig. 5의 병렬 구조로 인하여 회전운동을 갖지 않는다고 가정한다. 또한, 유연 도선부는 점성 유체에 잠긴 부분 (m 개의 유한요소)과 공간상에 노출된 부분 (n 개의 유한요소)으로 분리하여, Fig. 6과 같이 유한요소로서 분할 된다. 이 때, 독립된 각 요소의 변위는 아래의 Hermitian Polynomials, $\phi(x)$ 를 사용하여 전개할 수 있다.

$$y_i(x_i, t) = \sum_{k=1}^4 \phi_k(x_i) w_k(t) \quad (1)$$

$$T_i = \frac{1}{2} \int_0^{h_i} m \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\sum_{k=1}^{i-1} h_k \right) + x_i \quad Y + y_i \right] \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\sum_{k=1}^{i-1} h_k \right) + x_i \quad Y + y_i \right]^T dx_i$$

$$= \frac{m}{2} \dot{\mathbf{q}}_i^T [M_i] \dot{\mathbf{q}}_i = \frac{m}{2} \dot{\mathbf{q}}_i^T \left\{ \int_0^{h_i} \begin{bmatrix} 1 & \phi_1 & \phi_2 & \phi_3 & \phi_4 \\ \phi_1 & \phi_1^2 & \phi_1\phi_2 & \phi_1\phi_3 & \phi_1\phi_4 \\ \phi_2 & \phi_2\phi_1 & \phi_2^2 & \phi_2\phi_3 & \phi_2\phi_4 \\ \phi_3 & \phi_3\phi_1 & \phi_3\phi_2 & \phi_3^2 & \phi_3\phi_4 \\ \phi_4 & \phi_4\phi_1 & \phi_4\phi_2 & \phi_4\phi_3 & \phi_4^2 \end{bmatrix} dx_i \right\} \dot{\mathbf{q}}_i \quad (2)$$

$$V_i = \frac{1}{2} \int_0^{h_i} EI \left(\frac{\partial^2 y_i}{\partial x_i^2} \right)^2 dx_i = \frac{EI}{2} \mathbf{q}_i^T [K_i] \mathbf{q}_i = \frac{EI}{2} \mathbf{q}_i^T \left\{ \int_0^{h_i} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \phi_1''^2 & \phi_1''\phi_2'' & \phi_1''\phi_3'' & \phi_1''\phi_4'' \\ 0 & \phi_2''\phi_1'' & \phi_2''^2 & \phi_2''\phi_3'' & \phi_2''\phi_4'' \\ 0 & \phi_3''\phi_1'' & \phi_3''\phi_2'' & \phi_3''^2 & \phi_3''\phi_4'' \\ 0 & \phi_4''\phi_1'' & \phi_4''\phi_2'' & \phi_4''\phi_3'' & \phi_4''^2 \end{bmatrix} dx_i \right\} \mathbf{q}_i \quad (3)$$

여기서, $\mathbf{q}_i = [Y \quad w_1 \quad w_2 \quad w_3 \quad w_4]^T = [Y \quad u_i \quad \theta_i \quad u_{i+1} \quad \theta_{i+1}]^T$

또한, 트랙킹 방향으로 작용하는 외력은 가동 코일 모터에 의한 힘과 도선과 점성유체 간의 상대이동에 의해 발생하는 점성 저항력 (Viscous Drag Force)으로 구성되며, 이들은 가상 일의 원리

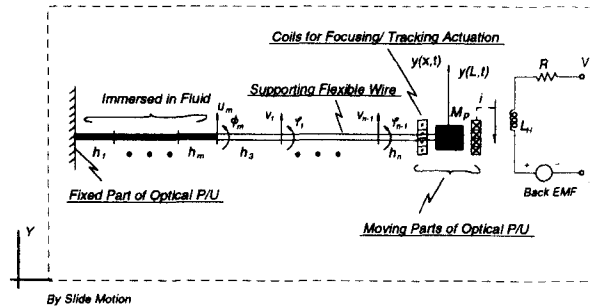


Fig. 6 Simplified Model of Optical Storage Drive

이 때, 분할된 임의의 i - 번째 요소에 대한 운동에너지와 위치에너지는 다음 식과 같이 표현된다.

(Virtual Work Principle)에 의하여 각 노드에 작용하는 일반 외력 (Generalized External Force)으로 표시된다. 즉, 가동코일 모터에 의한 힘, $f_m(t)$ 은 마지막 유한요소에 작용되며 아래와 같이 결정된다.

$$\delta W_M = \int_0^{h_i} f_m(t) \delta(x-h_n) dx \quad (4)$$

$$= f_m(t) \delta y(h_n, t) = f_m(t) \delta v_n$$

점성 저항력, $f_d(x, t)$ 는 분포하중으로서 유체에 잠겨진 유한 요소 부분에만 작용되며, 아래의 식 (5)와 같이 표현된다. 이 식에서 유체 저항계수 (Drag Coefficient, C_d) 는 Reynolds 수에 따라 결정된다. 대물렌즈 운동에 좋은 댐핑 특성을 부가하기 위하여 고점성 유체가 사용되므로, Reynolds 수는 보통 10^2 보다 낮은 값으로 존재하게 된다. 따라서, 유연 도선에 대한 상대적인 유체 유동은 크리핑 유동영역 (Creeping Flow Regime) 특성으로 표현되고, 이 영역에서의 저항계수는 Reynolds 수에 관하여 단순한 수식으로 표현될 수 있다⁽¹⁰⁾. 아래의 식에서 D 는 유연도선의 직경, 그리고 ρ 는 점성 유체의 밀도를 각각 의미한다.

$$f_d(x, t) = \frac{1}{2} C_d D \rho \left\{ \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} \right\}^2 = K_v \left\{ \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} \right\}^{1.14} \quad (5)$$

식 (5)에서 $\partial y(x, t) / \partial t$ 의 크기가 상대적으로 작다는 가정 하에, 점성유체에 잠겨진 각 유한요소의 노드에 작용하는 일반 외력은 아래 식과 같이 결정된다.

$$\delta W_D = - \int_0^{h_i} f_d(x, t) \delta y(x, t) dx \quad (6)$$

$$\approx -1.14 \int_0^{h_i} \left\{ K_v \frac{\partial y(x, t)}{\partial t} \right\} \delta \left(\sum \phi_k(x) w_k(t) \right) dx = \sum_i f_i(t) \delta w_i(t)$$

여기서, $f_i(t) = -K_v \int_0^{h_i} [\phi_1 \phi_i \quad \phi_2 \phi_i \quad \phi_3 \phi_i \quad \phi_4 \phi_i] dx$
 $\bullet [u_i \quad \theta_i \quad u_{i+1} \quad \theta_{i+1}]^T$

Fig. 6 과 같이 분할된 모든 유한요소에 대하여, 위에서 유도된 식 (2)와 (3)을 적용하면 전체 요소에 대한 총 운동/ 위치 에너지를 구할 수 있으며, 또한 각 노드 점에 작용되는 모든 일반 외력을 식 (4)와 (6)을 이용하여 구할 수 있다. 이 때, 트랙킹 방향의 운동 방정식은 다음의 Lagrangian Equation 을 적용 함으로서 유도될 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial \dot{q}_k} \right] - \frac{\partial L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})}{\partial q_k} = Q_k \quad (7)$$

여기서, $k = 1, 2, \dots, 2(n+m)+1$

$$L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = T - V = \sum_{i=1}^{n+m} (T_i - V_i)$$

$$\mathbf{q} = [y \quad u_1 \quad \theta_1 \quad \dots \quad u_m \quad \theta_m \quad v_1 \quad \phi_1 \quad \dots \quad v_n \quad \phi_n]^T$$

위 식에서 u_i 와 θ_i 는 점성 유체에 잠긴 유한 요소에 대한 노드의 변위와 회전각, 그리고 v_i 와 ϕ_i 는 공간상에 노출된 요소에 해당하는 값들을 각각 의미한다. 식 (7)을 정리하면, 아래와 같은 미분 방정식을 얻게 된다.

$$[\tilde{M}] \ddot{\mathbf{q}} + [\tilde{C}] \dot{\mathbf{q}} + [\tilde{K}] \mathbf{q} = \{\tilde{F}\} \quad (8)$$

이제 경계조건을 이용하여 식 (8)을 다시 정리한다. 유연 도선이 $x=0$ 인 위치에서 지지된 조건과 도선의 병렬구조로 인하여 $x=L$ 에서 회전 운동을 하지 않는다는 가정, 그리고 집중 질량 (M_p) 에 대한 효과를 적용하면 아래의 식 (9)로 주어지는 경계조건을 유도할 수 있다.

$$y(0, t) = 0$$

$$\frac{\partial y}{\partial x}(0, t) = 0$$

$$\frac{\partial y}{\partial x}(L, t) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{M_p}{4} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}(L, t) = EI \frac{\partial^3 y}{\partial x^3}(L, t)$$

이 경계조건 식에 식 (1)의 Hermitian 전개를 적용하면, 식 (7)에서 정의된 변수 벡터 \mathbf{q} 는 다음과 같은 구속조건을 갖게 된다.

$$u_1 = \theta_1 = \phi_n = 0$$

$$\frac{M_p}{4} \ddot{v}_n = EI \left(\frac{12}{h_n^3} v_{n-1} + \frac{6}{h_n^2} \phi_{n-1} - \frac{12}{h_n^3} v_n \right) \quad (10)$$

이제 식 (10)의 구속조건을 식 (8)에 적용하면, 트랙킹 방향의 운동을 기술하는 수학적 모델을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\mathbf{Y}} \\ \ddot{\mathbf{X}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & C_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\mathbf{Y}} \\ \dot{\mathbf{X}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{Y} \\ \mathbf{X} \end{Bmatrix} = \{\tilde{F}\} = [0 \quad \dots \quad 0 \quad f_m(t)]^T \quad (11)$$

여기서, $\mathbf{x} = [u_1 \quad \theta_1 \quad \dots \quad u_m \quad \theta_m \quad v_1 \quad \phi_1 \quad \dots \quad v_n \quad \phi_n]^T$

Table 1 System Parameters in Fig. 7

Symbol	Description	Value (Focusing/ Tracking)		Unit
L	Length of Supporting wire	12.08 (4.30 mm immersed in fluid)		mm
m	Mass/ unit length of beam	8.95×10^3		Kg / m^3
Mp	Mass of objective lens system	0.65		g
E	Young's modulus of wire	117.5×10^9		Newton/ m^2
D	Diameter of Wire	0.12		mm
I	Area MOI of wire	1.017876×10^{-5}		mm^4
R	Resistance of coil	6 ± 1	6 ± 1	Ω
L	Inductance of coil	140 ± 10	27 ± 6	mH
Kt*	Force Constant	6.9984×10^4	4.7608×10^4	$g \text{ mm} / s^2 / A$
Ke*	Back EMF constant	7.65×10^{-4}	0.001	V/ mm/ s

Table 2 Variation of Modal Frequency for Wire Length & Number of elements

	CASE 1 (m=1 & n=1)	CASE 2 (m=1 & n=2)	CASE 3 (m=2 & n=3)
1-st Modal Freq (Hz)	48.81/ 50.32/ 51.92	48.78/ 50.29/ 51.89	48.77/ 50.29/ 51.88
2-nd Modal Freq (Hz)	2121.62/ 4024.56/ 3996.31	2071.37/ 3525.10/ 4763.25	1893.18/ 2801.55/ 4413.72
3-rd Modal Freq (Hz)	6766.12/ 7777.43/ 9555.17	4754.90/ 5900.84/ 5004.25	4495.10/ 4527.22/ 5484.29
DC Gain (mm/ N)	65.33/ 61.43/ 57.70	65.33/ 61.43/ 57.70	65.33/ 61.43/ 57.70

위의 식 (11)의 M - 매트릭스에서 강제운동 Y 와 유연체 운동 x 간의 연성 효과를 볼 수 있다. 그러나, 광 정보저장 드라이브는 그 구조상 수평 운동부위가 트래킹 렌즈 운동부 보다 강대하게 설계되므로, 트래킹 방향 운동에 의한 수평운동 효과는 무시할 수 있을 정도로 작다는 가정은 충분히 성립한다. 이 가정과 트래킹 구동 가동코일 모터, 그리고 수평 이동부의 동적 특성을 함께 고려하면, Fig. 7의 트래킹 방향 운동에 관한 블록선도를 얻을 수 있다. 한편, 초점 방향의 운동특성은 Fig. 7에서 수평이송부와 그 연성효과를 무시하여 얻을 수 있다. Fig. 7의 블록 선도 모델에 사용된 파라미터 값들이 Table 1에 정리되었다. 여기서, '*'의 위 첨자를 갖는 변수들은 실험적으로 결정된 값들을 의미하고 있다. 즉, FEM 해석법에 의한 수학적 모델의 주파수 응답특성이 실험적인 주파수 응답 선도와 일치되도록 이들 값들이 선정되었다.

유한요소 해석에 의존한 해석적 모델과 실험적인 모델과의 비교 분석에 앞서, 유한요소 절점의 개수와 유연 도선의 길이 변화가 모델 특성 (모달 주파수/ 도선 끝 점에서의 민감도, 즉 DC Gain)에 어떤 영향을 주고 있는 지 관찰 되었다.

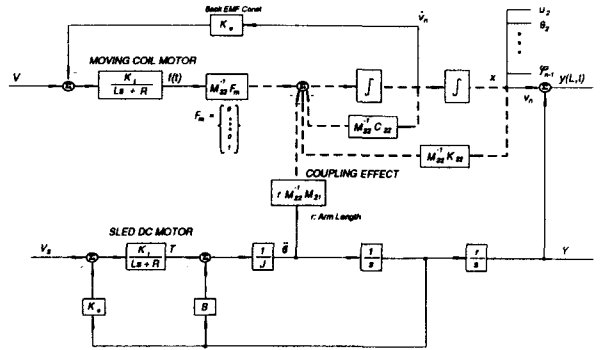


Fig. 7 Block Diagram for Tracking Motion

Table 2에 이에 관한 결과가 수록되었다. 여기서, m은 유체 중에 잠겨진 도선에 해당하는 유한 요소의 수이며, n은 공간 중에 노출된 도선에 대한 요소 수이다. 또한, 이 Table에는 각 CASE에 대하여 도선의 길이를 기준 길이인 12.08 mm에서 ± 0.25 mm 씩 변화 시켜 가면서 얻은 결과들이 (12.33 mm/ 12.08 mm/ 11.83 mm) 함께 정리되어 있다. 일반적인 광 드라이브 대역폭 (Bandwidth)이 1

KHz 미만인 점을 고려한다면, 유한 요소의 개수를 고차 증가시키거나 격자 크기를 줄이는 장점은 플랜트 모델의 차수가 고차화 된다는 점을 고려할 때 별 소용이 없게 된다. 따라서, 뒷 장에서 인용된 해석적 모델링 결과는 모두 Table 2의 CASE 1과 같은 조건으로 얻어진 것이다.

3. 실험적인 결과와의 비교

CD ROM 드라이브에 쓰여지는 광 픽업을 대상으로 초점/트래킹 양 방향으로의 운동 특성이 실험적으로 결정되었다. Fig. 8에 이를 위한 실험장치 구성도가 개략적으로 그려져 있다. B&K사의 주파수 응답 해석기 (B&K 2035)에서 출력되는 스위핑 정현파 (Sweeping Sinewave upto 25.6 KHz)는 전류 증폭기를 통하여 초점, 또는 트랙킹 방향으로 렌즈 이동부를 가진시키고, 이 때 렌즈의 변위는 레이저 바이브로미터 (Laser Vibrometer, PolyTec OFV-512)에 의하여 검출된다.

광학부의 대물렌즈가 중립점 (전기적인 입력이 없을 때 대물렌즈가 초점/트래킹 평면상에서 위치되는 점)이 아닌 곳에서 작동될 때, 그 운동 특성이 중립점의 것과 비교하여 어떤 편차를 갖는가를 보기 위하여 렌즈 이동 평면상의 9개 점 (초점/트래킹 방향상의 중립점, ± 최대변위/2의 조합)에 대하여 주파수 응답 특성이 각각 독립적으로 조사되었다. Fig. 9와 Fig. 10에 초점/트래킹 양 방향에 대한 실험적 주파수 응답과 유한요소 해석에 의해 결정된 모델의 주파수 응답선도가 함께 그려져 있다. 대략적으로 수 Hz 이하의 저 주파수 대역에서의 실험 데이터는 그 정확도에 한계가 있으며, 또한 수 KHz 이상의 고 주파수 대역에서는 해석적 모델에 의한 결과가 실험적인 값과는 다르게 나타나고 있다. 또한, Fig. 9-B)와 Fig. 10-B)는 1차 공진 주파수 대역에서의 주파수 응답 특성을 자세히 보여주고 있다. 여기서, 굵은 실선은 해석적 모델에 의한 주파수 응답 신호를 의미한다. 또한, Fig. 5에 도시된 스프링 지지방식 광 픽업은 4개의 유연 도선에 의하여 초점/트래킹 방향의 운동이 결정되므로, 양 방향간의 간섭효과가 있으리라 라고 예측된다. Fig. 11은 초점 방향으로 가진된 신호에 의한 트랙킹 방향운동의 주파수 응답 특성을 보여주고 있다.

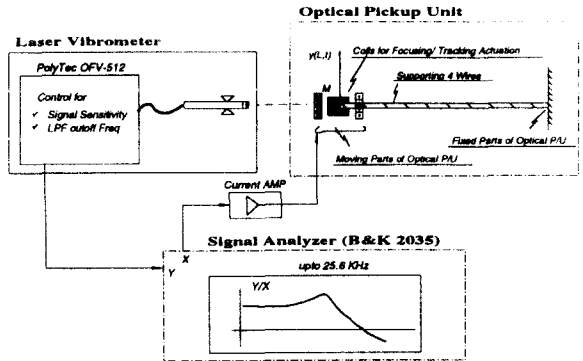


Fig. 8 Schematic Diagram of Experimental Setup

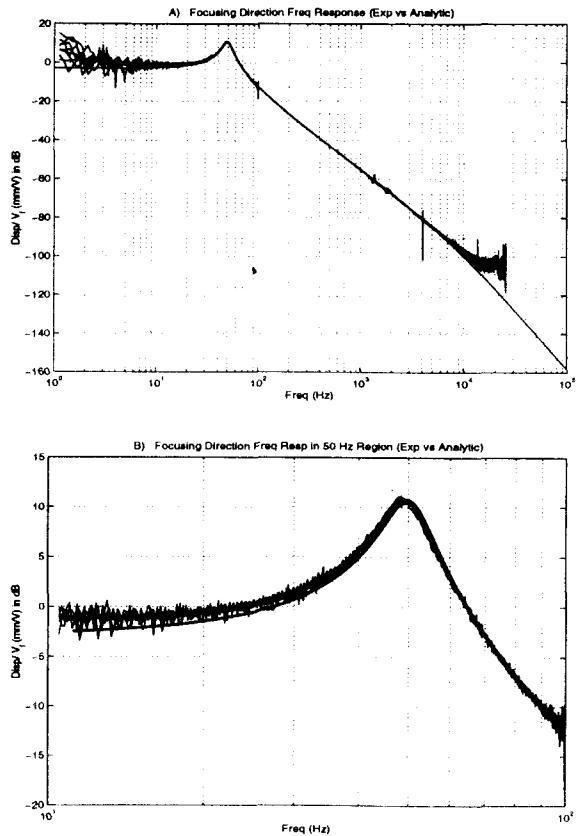


Fig. 9 Comparison of Experimental Data with Analytical One (Focusing)

Table 3 Comparison of Experimental Data with the Manufacturer Specification (Focusing Direction)

Pickup 제조회사의 사양		실험데이터 (평균/분산/최대/최소)
√ Sensitivity		
At 5 Hz	0.8 mm/V ± 3 dB (1.13 – 0.5663)	0.8740/ 0.0819/ 1.1115/ 0.6621 (mm/V)
At 200 Hz	40 μ M/V ± 2.5 dB (56.5 – 28.316)	46.8/ 0.5326/ 47.9/ 45.2 (μ M/V)
At 1 kHz	1.5 μ M/V ± 2.5 dB (2.118 – 1.062)	1.7/ 0.02771/ 1.8/ 1.62 (μ M/V)
√ Resonance Frequency and Peak		
51 ± 6 Hz/ Less than 15 dB		49.31/ 0.86/ 50.5/ 48.0 (Hz) 10.87/ 0.19/ 11.20/ 10.45 (dB)

Table 4 Comparison of Experimental Data with the Manufacturer Specification (Tracking Direction)

Pickup 제조회사의 사양		실험데이터 (평균/분산/최대/최소)
√ Sensitivity		
At 5 Hz	0.6 mm/V ± 3 dB (0.8475 – 0.4247)	0.5592/ 0.0335/ 0.6179/ 0.458 (mm/V)
At 200 Hz	31 μ M/V ± 2.5 dB (43.78 – 21.95)	34.2/ 0.542/ 35.066/ 33.104 (μ M/V)
At 1 kHz	1.1 μ M/V ± 2.5 dB (1.5537 – 0.7787)	1.2706/ 0.0297/ 1.3158/ 1.1863 (μ M/V)
√ Resonance Frequency and Peak		
52 ± 6 Hz/ Less than 15 dB		51.34/ 0.504/ 51.19/ 50.0 (Hz) 8.55/ 0.339/ 9.161/ 7.824 (dB)

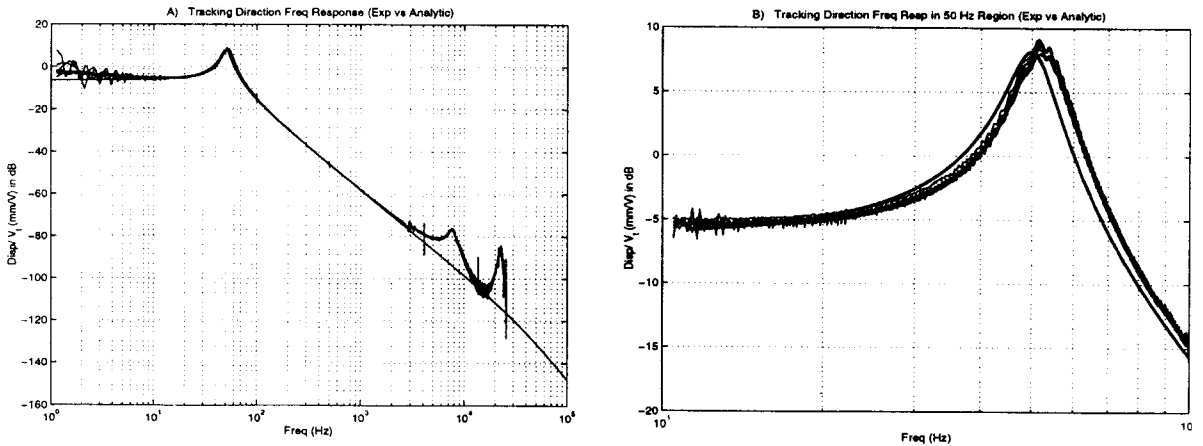


Fig. 10 Comparison of Experimental Data with Analytical One (Tracking)

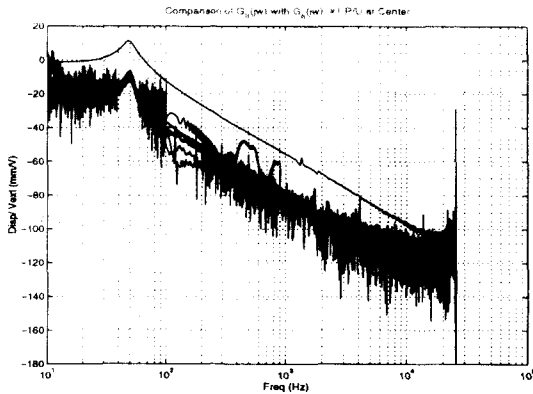


Fig. 11 Cross Interaction Effect Between Focusing and Tracking

이와 같이 수행된 실험 결과를 종합하면, 다음의 통계적 데이터를 얻을 수 있고, 이들은 광 픽업 제조회사의 사양과 비교될 수 있다. 즉, Table 3 과 Table 4 는 초점/트래킹 양 방향에 대하여, 각 항목 별로 광 픽업 제조회사의 사양과 실험자료를 비교한 것이다.

위의 실험 결과를 바탕으로 다음과 같이 결론할 수 있다.

- 1) 대물렌즈가 이동되는 초점/트래킹 운동 평면 상에서, 렌즈의 작동점 변화에 따른 운동특성의 변화는 (Fig. 9-B)와 Fig. 10-B)의 확대 그림 참조) 무시할 수 있는 정도의 작은 양으로 나타났다.
- 2) 초점 방향의 운동 특성은 모든 면에서 제조회사의 특성을 충분히 만족시키고 있다. 또한, 유한 요소 해석에 의한 해석적 모델링 결과 Fig. 9-A)와 Fig. 9-B)에서 볼 수 있듯이 대략 6 KHz 까지는 실험결과와 잘 일치하고 있다. 단, 이 해석적 모델링으로는 20 KHz 근처에서 발생하는 제 2 차 공진현상을 예측할 수는 없었다. 이는 유한요소 해석에서 강체라고 가정한 대물렌즈 부의 비틀림 효과로 인하여 발생되리라 추정된다.
- 3) Fig. 10-A)에서 보듯이 트랙킹 방향의 제 2 차 공진은 7.5 KHz 근처에서 발생되며, 제 3 차 공진이 20 KHz 근처에서 발생하는 것으로 나

타난다. 또한, 해석적인 모델의 주파수 응답은 대략 2 KHz 까지 실험적인 데이터와 전체적으로 일치하는 결과를 보여주고 있지만, Fig. 10-B)에서도 나타나듯이 제 1 차 공진 주파수 대역에서 실험적인 결과와는 어느 정도 차이를 보여주고 있다. 그러나, Table 2 에서도 정리되었듯이 유연도선 (Flexible Conducting Wire)의 길이 변화에 따른 1 차 공진점 주파수의 변화율은 대략 6.22 Hz/mm 로서 매우 민감하다. 즉, 광 픽업 제조사 0.2 mm 의 도선 조립 오차가 대략적으로 1.25 Hz 의 1 차 공진 주파수 변화를 유발하게 되는 것이다. 이런 점을 고려할 때, Fig. 10-B)에서 나타나는 차이는 충분히 허용될 수 있다. 즉, Table 3 & 4 로 주어지는 제조회사 사양의 한도 내에서, 대량 생산되는 광 픽업은 개개의 광 픽업마다 그 고유한 운동특성이 존재하게 되므로, 하나의 기준 모델이 모든 광 픽업의 운동을 정확하게 기술할 수는 없게 된다. 단지, 이러한 플랜트 다이내믹스의 불 균일성/ 불 확실성은 서보 계의 설계에 있어서 해결해야 하는 과제로 남게 된다.

4) 본 연구에서 고려된 스프링 지지방식 광 픽업은 그 구조상 초점/트래킹 양 방향간의 간섭 효과가 존재하게 된다. 즉, 초점방향(트래킹) 구동에 의한 트랙킹(초점) 방향 운동의 간섭 효과는 Fig. 11 에도 나타나 있듯이 초점(트래킹) 방향의 운동특성과 비교하여 대략 10% 정도의 크기를 갖는 것으로 나타났다.

4. 결론

FEM 에 의한 수치 해석적인 결과와 실험적인 결과를 비교 분석 함으로서, 광 정보저장 드라이브 (Optical Storage Drive)의 운동 특성을 표현하는 수학적 기준모델이 제시되었다. 양산 (Mass Production) 되어지는 제품이 필연적으로 갖게 되는 각 제품마다의 특성상의 불 균일성으로 인하여, 어느 기준 모델도 광 픽업의 운동 특성을 정확하게 표현할 수는 없다. 따라서, 여기서 제시된 모델은 광 픽업 제조회사의 사양 (Manufacturer Specification)과 비교되어, 모델의 불 확실성 (Uncertainty) 크기를 결정하는 중요 데이터로서 사용될 수 있다. 한편, 광 정보저장 드라이브의 작동점 변화에 따른 운동특성 변화는 무시할 수 있을

정도의 작은 량이며, 초점 및 트랙 방향간의 상호 간섭 (Cross Interaction) 운동 특성은 각 방향으로의 운동 특성과 비교하여 대략적으로 10% 정도의 크기를 갖는 것으로 나타났다. 본 연구에서 제시된 기준 모델을 바탕으로 광학계 전체이동에 따른 트랙킹 서보계의 잔류진동을 억제하는 알고리즘 개발에 관한 연구가 진행중이다.

참고문헌

1. 임종락, 손희기, “DVD 규격의 개요와 향후 기술동향,” 제어자동화시스템 공학회지, 제 4 권 3 호, pp. 10-14, 1998.
2. T. Takizawa, M. Shinoda, and et al, “High Speed Access Mechanism for 90 mm 1-inch High Optical Disk Drive,” Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 32, No. 11B, pp. 5381-5384, 1993.
3. Y. Chait and et al, “Design and Implementation of a QFT Controller for a Compact Disc Player,” Journal of Systems Engineering, Vol. 4, 107-117, 1994.
4. M. Steinbuch and et al, “ μ -Synthesis for a Compact Disc Player,” International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol. 8, pp. 169-189, 1998.
5. M. Ogawa and et al, “Robust Servo System of Optical Disk Drive,” Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 31, pp. 643-647, 1992.
6. M. Ogawa and et al, “Rapid Access System for Optical Disk Drive using Feedforward Brake Pulse,” Vol. 32, pp. 5376-5380, 1993.
7. M. Yonezawa and et al, “Optimization of Reference Velocity Curve for Optical Disk Drive Seeking Control using Genetic Algorithm,” 3-rd International Conference on Motion and Vibration Control, pp. 154-159, 1996.
8. L. Meirovitch, “Elements of Vibration Analysis,” McGraw-Hill, pp. 300-342, 1986.
9. P. B. Usoro, R. Nadira, and S. S. Mahil, “A Finite Element/ Lagrange Approach to Modeling Lightweight Flexible manipulators,” Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 108, pp.198-205, 1986.
10. F. M. White, “Viscous Fluid Flow,” McGraw-Hill, 1991.