

광디스크 드라이브의 고속 액세스를 위한 광픽업 액추에이터 메커니즘 설계

박준혁*, 이상현*, 백윤수**

Mechanism Design of Optical Pickup Actuator for Fast Access of Optical Disk Drive

Joon Hyuk Park*, Sang Heon Lee*, Yoon Su Baek**

ABSTRACT

In this paper, mechanism design of optical pickup actuator for fast access is proposed. This actuator is composed of moving magnet type actuator and moving coil type actuator for tracking and fine motion, respectively. Moving magnet type tracking actuator is configured by two permanent magnets and four air-core solenoids. Additional damper by induced current in tracking actuator can reduce the transient vibration between the coarse seeking servo and fine seeking servo. Variable stiffness can be acquired by applying current to air-core solenoid simply. This actuator can achieve fast access by these additional damper and stiffness. Performance of this actuator is predicted through the FEM, simulation and simple experiment. Settling time for transient vibration is reduced to 14.7% according to simulation result.

Key Words : Optical pickup actuator(광픽업 액추에이터), Moving magnet type(자석 구동 방식), Moving coil type(코일 구동 방식), Induced damper(유도 감쇠), Variable stiffness(가변 강성)

1. 서론

광디스크 드라이브는 미디어 가격이 싸고, 착탈이 용이한 장점을 갖고 있어 최근에도 매우 유용하게 쓰이고 있는 정보 저장 장치이다. 또한 앞으로 보다 더 고용량화에 성공하면 그 사용이 더욱 늘어날 전망이다. 이러한 광디스크 드라이브의 발전 방향은 크게 네 부분으로 나눌 수 있다. 즉, 첫째, 보다 짧은 액세스 시간, 둘째, 높은 전달 비율, 셋째, 큰 데이터 용량 그리고 소형화로 나눌 수 있다⁽¹⁾. 이들 네 부분은 광디스크 드라이브의

성능 향상에 매우 중요한 부분을 차지하고 있어 다양한 연구가 진행되고 있다.

액세스 시간을 줄이기 위해서는 조동 액추에이터에서의 큰 구동 성능과 미세 액추에이터에서의 높은 서보 대역폭이 필요하다. 또한 높은 전달 비율을 갖기 위해서는 광 디스크를 회전 시키는 스피들(spindle) 모터의 고속화와 높은 서보 대역폭이 필요하다. 그러나 조동 및 미세 액추에이터의 성능 향상 없이는 액세스 시간 단축 및 고 전달 비율의 달성은 매우 어려운 과제이다. 특히 액추에이터 연구는 미세 액추에이터의 정적, 동적 진

© 2002년 5월 3일 접수

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 연세대학교 기계공학과

동 특성을 개선시켜 2 차 공진 주파수를 높은 대역으로 이동시키는 연구⁽¹⁾와 빠른 액세스를 위한 구동 메커니즘에 대한 연구가⁽²⁾ 수행되고 있다.

광디스크 드라이브의 동작 시퀀스(sequence)중 하나인 검색(seek) 동작은 일반적으로, 조동 액추에이터에 의한 거친 검색(coarse seek) 동작과 광픽업내의 미세 액추에이터에 의한 정밀 검색(fine seek)동작과의 조합에 의한 2 단 기구로 행해지고 있다. 검색 동작은 우선, 거친 검색을 해, 목표 어드레스(address) 근방에서 광픽업을 정지시키고 그 후에 정밀 검색을 하는 방법으로 이루어지고 있다. 그러나 거친 검색으로 광픽업을 목표 어드레스에 정지 시켜도, 광 픽업 내 액추에이터 가동부는 바로 정지시킬 수 없어 진동하게 되고, 과도 진동의 종료 되기를 기다리는 정정시간이 필요하게 된다. 이후에 디스크의 편심속도가 0 근방으로 되기까지 회전기다림 시간을 갖고 빔(beam)이 트랙(track)을 추적(tracking)해, 어드레스를 읽어내어, 목표 어드레스와의 차이 분을 알면, 그 만큼 정밀 검색을 하게 된다. 액세스 시간은 이러한 일련의 기록 · 재생 바로 전까지의 필요시간을 의미하며 다음과 같이 정의 한다.

$$\begin{aligned} \text{평균 액세스 시간} &= \text{평균 검색 시간} + \text{평균 회전기다림 시간} \\ &= 1/3 \text{ 스트로크 이동시간} + 1/2 \text{ 회전 기다림 시간} \end{aligned} \quad (1)$$

따라서 액세스 시간을 줄이기 위해서는 검색 시간을 줄일 필요가 있다. 검색 시간을 줄이는 방법으로 두 개의 액추에이터를 이용한 경우의 연구도 발표되고 있다⁽³⁾.

본 논문에서는 이러한 검색 시간 중에서 정정 시간을 줄임으로써 광픽업이 필요 없이 기다리는 시간을 줄여 액세스 시간을 빠르게 하고, 광픽업의 동특성을 향상시킬 수 있는 구동 메커니즘을 제안하고자 한다. 이를 위하여 코일 구동 방식의 포커싱 서보 액추에이터와 유도 전류에 의한 감쇠 시스템이 가능한 자석 구동 방식의 트래킹 서보 액추에이터를 설계하고 이들의 성능을 예측하여 그 타당성을 검토하도록 한다.

2. 광픽업 액추에이터

Fig. 1 은 본 연구에서 제안한 광픽업 액추에이

터를 나타낸 것이다.

구동부는 대물렌즈와 보빈(bobbin), 포커싱(focusing) 코일 그리고 트래킹(tracking) 영구 자석으로 이루어져 있다. 보빈에 부착된 포커싱 코일은 두 개의 'U'자형 요오크(yoke)에 부착된 각 두 개의 영구자석과의 작용에 의해 포커싱 방향으로 구동부를 운동시키며 두 개의 트래킹 영구 자석은 네 개의 공심 솔레노이드(air-core solenoid)와 작용하여 트래킹 방향으로 구동부를 운동시킨다.

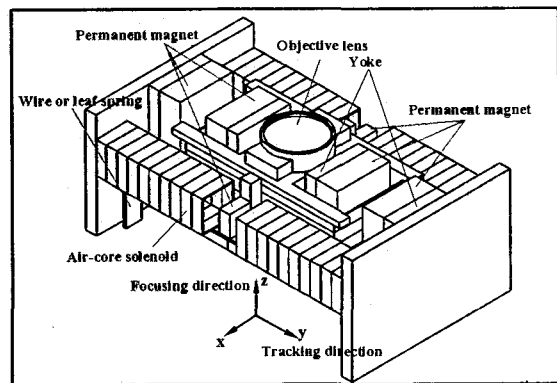


Fig. 1 Concept view of pickup actuator for fast access

일반적으로, 포커싱 액추에이터와 같이 코일 구동 방식은 힘과 전류가 비례하고 코일은 대체로 가볍기 때문에 관성력에 대하여 장점을 갖고 있다. 반면에 트래킹 액추에이터와 같이 자석 구동 방식은 고정자 부분의 코일의 크기나 길이 등을 적절히 선택할 수 있는 여유가 있고, 가속 능력 측면에서 장점을 갖고 있다⁽¹⁾. 또한 영구자석과 작용하는 공심 솔레노이드는 히스테리시스(hysteresis)가 없고, 와전류 손실이 없으며, 자속 밀도가 포화되지 않는 장점이⁽⁴⁾ 있어 정밀 위치 제어에 유리하다.

Fig. 1 에서 제안한 광픽업 액추에이터가 갖는 장점은 다음과 같이 요약될 수 있다.: 첫째, 검색 서보 동작 중에 유도 전류에 의한 감쇠 성능을 기대할 수 있다. 둘째, 검색 서보 동작 중에 공심 솔레노이드에 전류를 인가함으로써 간단하게 강성 성능을 부가할 수 있다. 셋째, 광픽업이 z 축 방향에 대하여 불필요한 틀어짐(tilting)이 발생했을 때, 또는 y 축 방향에 대하여 불필요한 틀어짐이 발생했을 때, 영구자석과 공심 솔레노이드의 복원력(Stabilizing force)에 의한 자가 정렬(self-alignment)

이 가능하여 이러한 불필요한 틀어짐을 감소시킬 수 있다.

따라서 위의 장점에 의해 본 논문에서 제안한 광픽업 액추에이터는 과도 진동의 정정 시간을 감소시켜 액세스 시간을 단축시킬 수 있다.

3. 액추에이터 메커니즘 설계

3.1 포커싱 액추에이터 설계

3.1.1 영구 자석 모델링

포커싱 액추에이터는 Fig. 2 와 같이 구성된다. 각 요오크에는 두 개의 영구자석이 부착되어 공극에 자기장을 형성하며 이 자기장과 포커싱 코일에 흐르는 전류에 의하여 포커싱 힘이 발생한다.

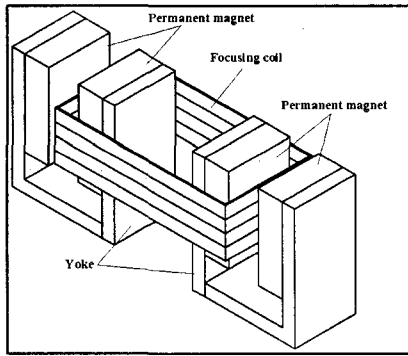


Fig. 2 Focusing actuator configuration

요오크와 두 개의 영구자석에 의해서 영구자석 사이의 공극(air gap) 사이에 형성되는 자기장은 자기 회로 해석을 통하여 구할 수 있다. 이를 위하여 우선 영구자석에 의한 기자력(magnetomotive force)을 구해야 하며, 영구자석을 해석할 필요가 있다.

솔레노이드의 자기장과 영구자석의 자기장은 실질적으로 동등하다. 따라서 두 자계(magnetic system)에는 상사성이 존재하며 솔레노이드를 영구자석으로, 또는 그 반대의 경우로의 모델링이 가능하다⁽⁵⁻⁶⁾. 따라서 영구자석을 등가의 공심 솔레노이드로 모델링을 한다.

영구자석을 코일이 두 번 감겨 있는 공심 솔레노이드로 모델링하면 영구자석의 자기장은 비오-사바르 법칙(Biot-Savart law)에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_z = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{\mu_0 2I \{2mn(z_p - z_0)^2 + m^3n + mn^3\}}{\pi L d_n^2 d_m^2 d_r} dz_0 \quad (2)$$

여기서,

$$d_n = \sqrt{n^2 + (z_p - z_0)^2}$$

$$d_m = \sqrt{m^2 + (z_p - z_0)^2}$$

$$d_r = \sqrt{m^2 + n^2 + (z_p - z_0)^2}$$

이다.

이 때, $2m$, $2n$ 은 영구 자석의 너비와 길이, I 는 전류, dz_0 는 코일의 미소 높이, L 은 높이를 나타내고, μ_0 는 진공의 자유 공간에서의 투자율로 $4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ 이며, z_p 는 영구자석의 중심으로부터의 z 축 거리를 나타낸다.

따라서 영구자석 표면에서의 자기장을 측정하여 식 (2)의 좌변에 대입하면 그 자기장의 세기를 얻을 수 있는 전류를 구할 수 있다. 이 전류는 영구자석이 갖고 있는 표면 전류, 즉 속박 전류(bound current)와 상사성을 갖는다.

Fig. 3 은 식 (2)에서 구한 영구자석의 거리에 따른 자기장과 FEM 해석을 통하여 영구자석의 자기장을 구한 값을 나타낸 것이다. 두 값이 거의 일치함을 알 수 있으며 이로부터 영구자석이 식 (2)로 모델링 될 수 있음을 알 수 있다.

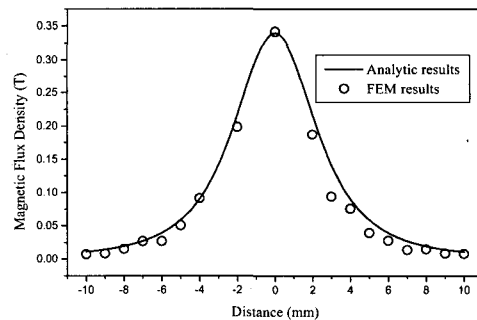


Fig. 3 Magnetic flux density of permanent magnet, where the origin point is the center of permanent magnet

3.1.2 자기회로 해석

포커싱 액추에이터의 요오크에 대한 자기 회로는 Fig. 4 와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 4(a)는 요

오크와 영구자석을 나타낸 것이고 Fig. 4(b)는 그에 대응하는 자기회로를 나타낸 것이다.

Fig. 4(b)의 자기회로에 대하여 키르히호프 법칙(Kirchhoff's law)을 적용하면 회로 전체에 흐르는 자속(magnetic flux)은 식 (3)과 같다.

$$\phi = \frac{V_N + V_S}{\frac{R_f R_g}{R_f + R_g} + (R_{Y1} + R_{Y2} + R_{Y3} + R_{Pg} + R_{Pg})} \quad (3)$$

이 때,

R_{Y1}, R_{Y2}, R_{Y3} : 요오크의 각 부분에 대한 자기 저항

R_f : 프린징(fringing) 효과에 대한 자기 저항

R_g : 공극의 자기 저항

R_{Pg} : 공심 솔레노이드로 모델링 된 영구자석의 자기 저항

V_N, V_S : 영구자석의 기자력

이다.

즉, V_N, V_S 는 공심 솔레노이드로 모델링 한 영구자석의 기자력, 즉 NI 이다.

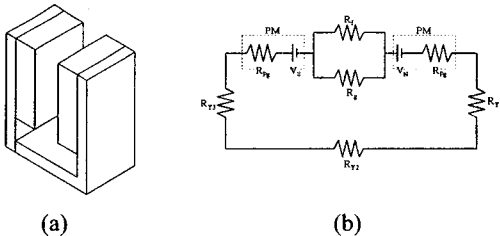


Fig. 4 Magnetic circuit for the yoke of the focusing actuator

식 (3)과 저항에 대한 전류 법칙에 의해서 공극 내에 흐르는 자속은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_g = (1/R_g) / (1/R_g + 1/R_f) \phi \quad (4)$$

또한 프린징 효과에 의한 자속은 식 (5)과 같다.

$$\phi_f = (1/R_f) / (1/R_g + 1/R_f) \phi \quad (5)$$

따라서 공극과 프린징에서의 자기장은 각각 다음과 같다.

$$B_g = \phi_g / S_g \quad (6)$$

$$B_f = \phi_f / S_f \quad (7)$$

여기서 S_g, S_f 는 공극과 프린징에서 자속이 통과하는 단면적을 나타낸다.

Fig. 5는 영구자석에 대한 등가의 공심 솔레노이드와 식 (4), (6)을 이용하여 구한 공극 내의 자기장과 FEM 해석을 통하여 구한 값을 나타낸 것이다. 자기 회로 이론에서는 공극이 일정하면 공극안에서의 위치에 상관없이 자기장은 일정하다. 그러나 FEM 해석에 대한 결과를 살펴 보면 공극 내에서도 어느 정도의 자기장 구배가 있는 것을 알 수 있다. 그러나 자기회로와 FEM 사이의 오차가 최대 7%(공극의 중심에서)이므로 위의 모델링 방법이 타당하다고 할 수 있다.

Fig. 6은 FEM 해석을 통한 공극에서의 자속선(magnetic flux line)을 나타내고 있다.

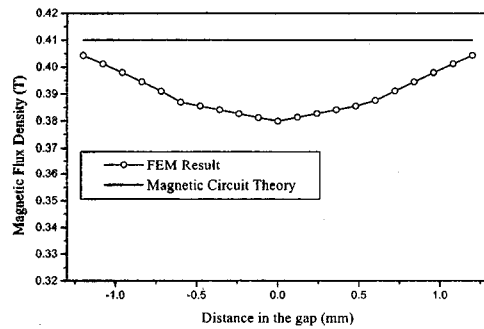


Fig. 5 Magnetic flux density of the air gap between yokes (two permanent magnets), where origin point is the center of the gap

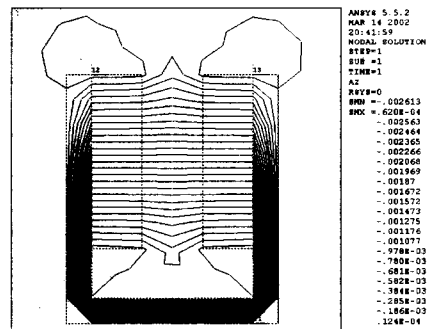


Fig. 6 Magnetic flux line of the yoke system

3.1.3 포커싱 힘 모델링

포커싱 액추에이터의 구동력은 로렌츠 법칙(Lorentz's law)에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = BIl \quad (8)$$

여기서 B 는 자기장, I 는 코일에 흐르는 전류, l 은 코일의 유효 길이를 나타낸다.

코일의 유효 길이를 보다 정확히 근사(approximation)할 수 있도록 Fig. 7 과 같이 코일에 미치는 자기장을 공극에서의 자기장과 프린징에서의 자기장으로 나누어 생각한다.

프린징 경로는 Fig. 7 의 Fringe Path1, Fringe Path2 외에 모델링 할 수 있는 여러 경로⁽⁷⁾가 있지만, z 축 방향으로 영구자석이 충분히 길어서 포커싱 작동 범위 안에서 코일이 프린징의 영향을 받지 않는다고 가정하여, z 축 방향 성분을 가진 경로를 무시하면 Fig. 8 과 같이 Fringe Path1, Fringe Path2 만 남는다. 또한 코일에 영향을 주는 프린징 경로는 Fringe Path1 만 있으므로, 공극의 자기장의 영향을 받는 코일 길이 l_g 와 Fringe Path1 에 영향을 받는 코일 길이 l_f 로 나누면, 식 (8)은 식 (9) 와 같이 나타낼 수 있다.

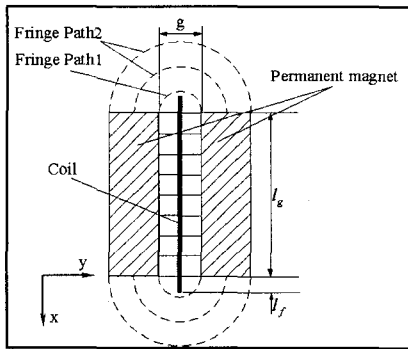


Fig. 7 Effective length of coil for air gap path and fringe path

$$F = B_g N l_g I + 2 \cdot B_{f1} N l_f I \quad (9)$$

$$B_{f1} = \frac{1/R_{f1}}{\sum_n 1/R_{fn}} \cdot \phi_f \cdot \frac{1}{S_{f1}} \quad (10)$$

여기서 N 은 포커싱 코일의 권선수 이고, S_{f1} 은 Fringe Path1 의 단면적이다.

3.2 트래킹 액추에이터 설계

3.2.1 트래킹 액추에이터의 구성

Fig. 8 은 본 논문에서 제안한 광픽업 액추에이터의 트래킹 액추에이터의 개념을 나타낸 것이다.

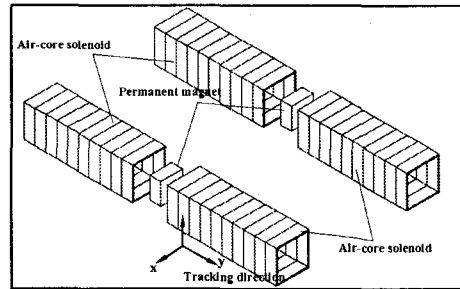


Fig. 8 Concept view of tracking actuator mechanism

네 개의 공심 솔레노이드와 두 개의 영구자석을 Fig. 8 과 같이 구성하여 공심 솔레노이드와 영구자석의 상호작용에 의해 트래킹 힘이 발생하도록 하였으며 이를 트래킹 방향과 일치하도록 배치하여 x 축 방향으로 영구자석과 공심 솔레노이드의 y 축이 어긋났을 때 복원력이 발생하여 자가정렬(self-alignment)이 가능하도록 하였다.

이러한 자가 정렬은 포커싱에 의해 영구자석과 공심 솔레노이드의 y 축이 z 축 방향으로 어긋났을 경우에도 복원력을 발생시킨다. 따라서 이 복원력은 포커싱에 대하여는 외란(disturbance)으로 작용한다. 따라서 포커싱 액추에이터의 힘상수(force constant)가 이를 극복할 수 있도록 충분히 커야 한다. 또한 이러한 복원력은 트래킹 힘에도 영향을 미치게 된다.

3.2.2 트래킹 힘 모델링

영구자석과 솔레노이드 사이에 발생하는 힘은 로렌츠 법칙(Lorentz's law)에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽⁸⁻¹⁰⁾.

$$F = \nabla(\mathbf{m} \cdot \mathbf{B}) \quad (11)$$

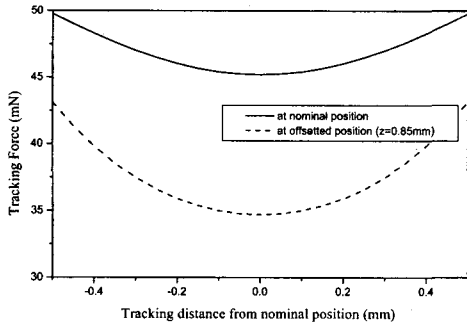
여기서, \mathbf{m} 은 영구자석의 자기 쌍극자 모멘트(magnetic dipole moment), \mathbf{B} 는 공심 솔레노이드의

자기장을 나타낸다. 따라서 자기 쌍극자 모멘트의 y 성분을 m_y 라 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

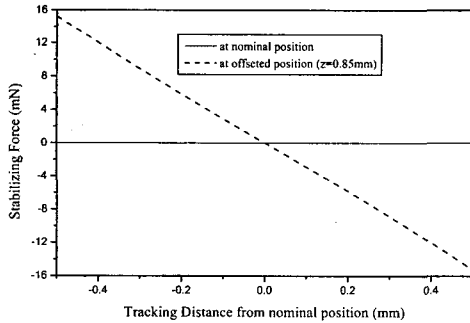
$$F_x = m_y \frac{\partial B_x}{\partial y} \quad (12)$$

$$F_y = m_y \frac{\partial B_y}{\partial y} \quad (13)$$

$$F_z = m_y \frac{\partial B_z}{\partial y} \quad (14)$$



(a) Tracking force



(b) Stabilizing force

Fig. 9 Magnitude of the tracking force and stabilizing force along the tracking distance, where $I = 0.3A$

Fig. 9(a)는 4 개의 공심 솔레노이드에 0.3A 를 인가하였을 때의 트래킹 힘을 예측한 것이다. 실 선은 z 축에 대한 공칭 위치, 즉 포커싱 방향으로 변위가 없을 때를 나타낸 것이고 점선은 포커싱 방향으로 0.85mm 오프셋(offset) 되었을 경우이다. 이러한 오프셋이 발생하였을 경우 두 값은 트래킹 방향의 공칭 위치에서 최대 약 11mN, 양 끝단에

서 최소 약 6mN 의 차이가 있다. 이 차이는 각각 약 0.1A 와 0.05A 의 전류 손실을 가져오지만, 트래킹 액추에이터의 힘 상수가 충분히 크므로 이를 극복할 수 있다.

Fig. 9(b)의 점선은 z 축 방향으로 0.85mm 오프 셋 되었을 경우에 발생하는 포커싱 방향으로의 힘을 예측한 것이다. 최대 $\pm 16mN$ 으로 포커싱 액추에이터는 약 0.07A 의 전류 손실이 예상된다. 그러나 이 역시 포커싱 액추에이터의 힘 상수가 충분히 크기 때문에 극복 가능하다.

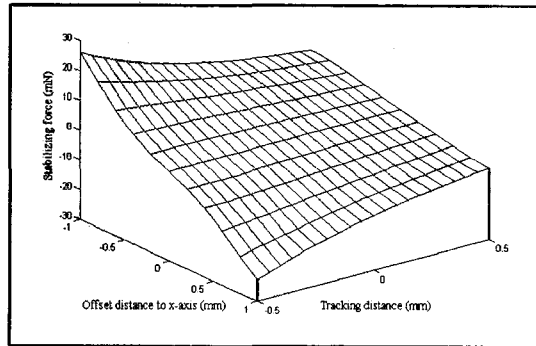


Fig. 10 Stabilizing force for the x-axis offset with various tracking distance, where $I = 0.3A$

Fig. 10 은 x 축으로 오프셋이 생겼을 때 이를 복원하는 복원력(stabilizing force)을 나타낸 것이다. 트래킹 거리에 따라 복원력이 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이는 두 개의 공심 솔레노이드와 영구자석이 트래킹을 위해 인력(attractive force)과 척력(repulsive force)을 발생시키기 때문이다. 즉 복원력은 인력의 경우에 가능하므로 척력이 보다 지배적인 부분에서는 복원력은 감소하게 된다.

4. 검색 동작을 위한 유도 감쇠와 가변 강성

4.1 유도 감쇠 계수

거친 검색 동작(coarse seeking motion)과 정밀 검색 동작(fine seeking motion)사이에는 과도진동(transient vibration)이 존재하며 과도진동 동안에는 미세 액추에이터는 정밀 검색을 하지 않고 진동이 안정 될 때까지 기다리는 정정 시간이 필요하다. 고속 액세스를 위해서는 이 정정 시간을 줄이는 것이 중요하다. 본 연구에서 제안한 광 픽업 액추

에이터는 과도진동시 유도전류에 의한 유도 감쇠를 이용하여 정정시간을 줄일 수 있다.

조동 액추에이터가 멈추고, 관성에 의해 광 픽업이 과도 진동을 할 때, 광 픽업에 부착된 트래킹용 영구자석의 운동에 의해 트래킹용 공심 솔레노이드에 유도 전류가 흐른다. 유도 전류를 흐르게 하는 역기전력은 다음과 같이 정의된다⁽⁸⁾.

$$\varepsilon_{emf} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (15)$$

여기서 Φ 는 코일을 지나는 자속을 나타내며, 자기장과 식 (16)과 같은 관계에 있다.

$$\Phi = B \cdot s \quad (16)$$

이 때 s 는 자속이 통과하는 단면적을 나타낸다. 따라서 트래킹용 영구자석이 운동하여 공심 솔레노이드의 코일에 발생하는 역기전력은 단면적이 일정하다고 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_{emf} = -\frac{d(s \cdot B_{PM})}{dt} = -s \cdot \frac{dB_{PM}}{dt} \quad (17)$$

여기서 B_{PM} 은 영구자석의 자기장을 나타내고, s 는 영구자석의 자속이 통과하는 코일 고리의 단면적을 나타낸다. 광픽업의 진동 속도를 v 라 하면 자기장의 시간에 대한 미분은 식 (18)과 같이 치환될 수 있다.

$$\frac{dB_{PM}}{dt} = \frac{dB_{PM}}{dy} \cdot \frac{dy}{dt} = v \cdot \frac{dB_{PM}}{dy} \quad (18)$$

따라서 영구자석의 운동에 의해 공심 솔레노이드에 생성되는 역기전력은 식 (19)처럼 나타낼 수 있고 이 때, 코일에 흐르는 유도전류는 식 (20)과 같다.

$$\varepsilon_{emf} = -\frac{s dB_{PM}}{dt} = -s \cdot \frac{dB_{PM}}{dy} \cdot v \quad (19)$$

$$I_{emf} = -\frac{s}{R_{coil}} \cdot \frac{dB_{PM}}{dy} \cdot v \quad (20)$$

여기서 R_{coil} 은 공심 솔레노이드 코일의 저항을 나타낸다.

식 (20)의 유도 전류에 의해 생성된 공심 솔레노이드의 자기장과 영구자석에 의해 발생한 유도 감쇠력(induced damping force)은 식 (11)에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_d = \nabla(m \cdot B_{air}(I_{emf}, y)) \quad (21)$$

여기서 $B_{air}(I_{emf}, y)$ 는 유도전류에 의해 생성된 공심 솔레노이드의 자기장을 나타낸다. 식 (21)에서 전류에 대한 항을 분리하면 식 (22)와 같고 유도 전류 I_{emf} 는 ‘ ∇ ’ 연산자와 무관하게 식 (20)에 의해 결정되는 값이므로 식 (23)과 같이 ‘ ∇ ’ 연산자 앞으로 나올 수 있다. 이때, $B_{re,air}(y)$ 는 $B_{air}(I_{emf}, y)$ 에서 전류항을 제외한 나머지 항을 의미한다.

$$F_d = \nabla(m \cdot I_{emf} \cdot B_{re,air}(y)) \quad (22)$$

$$F_d = I_{emf} \cdot \nabla(m \cdot B_{re,air}(y)) \quad (23)$$

따라서 식 (23)에 식 (20)을 대입하여 정리하면 식 (24)와 같으며 속도 항을 제외한 부분을 거리에 따른 감쇠 계수 함수로 나타낼 수 있다.

$$F_d = -\frac{s}{R_{coil}} \cdot \frac{dB_{PM}}{dz} \cdot \nabla(m \cdot B_{re,air}(y)) \cdot v = -c(y) \cdot v \quad (24)$$

Fig. 11 은 거리에 따른 유도 감쇠력을 예측한 것이다. 거리에 따라서 유도 감쇠력은 비선형적으로 변하지만, 속도에는 비례한 것을 알 수 있다. 이를 평균값을 취해서 감쇠계수를 상수로 가정하면 식 (25)과 같다.

$$F_d = -0.0084 \cdot v \quad (25)$$

4.2 가변 강성 상수(variable spring constant)

4.1 절에서 거친 검색 동작과 정밀 검색 동작 사이에 발생하는 과도 진동에 대하여 유도 전류에 의한 감쇠 성능을 언급하였다. 또한 검색 동작 중에 공심 솔레노이드에 적절한 전류를 인가함으로써 광픽업의 강성 성능을 향상시킬 수 있다.

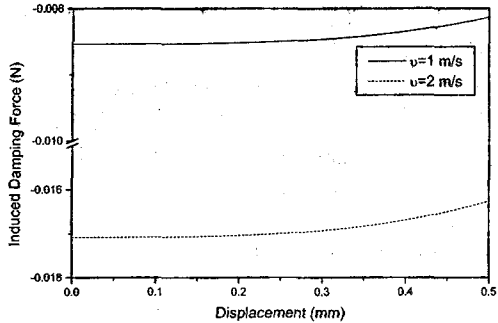


Fig. 11 Induced damping force along the tracking distance

가변 강성은 영구자석 양 쪽에 있는 공심 솔레노이드의 극(pole)이 일렬로 되도록 전류를 인가하면 얻을 수 있다. 즉 영구자석은 양 쪽의 공심 솔레노이드로부터 서로 척력을 받을 때 강성이 발생한다. 그러나 영구자석과 공심 솔레노이드 사이의 척력은 축 방향을 제외한 나머지 자유도에서는 불안정하므로 광픽업을 지지하는 판 스프링이나 와이어 스프링의 강성에 유의하여 전류를 인가하여야 한다.

Fig. 12 는 이러한 가변 강성을 다양한 전류에 대하여 나타낸 것이다. 일반 스프링의 경우처럼 거리에 대하여 선형적인 강성력이 발생하는 것을 알 수 있다. 이를 곡선 적합(curve fitting)을 통하여 강성 계수(spring constant)를 구하면 식 (26)과 같다.

$$F_k = -(156.55429I) \cdot y \quad (26)$$

여기서 음(-)의 부호는 관성력과 반대방향으로 작용함을 의미한다.

식 (26)처럼 강성계수가 전류에 의해 변할 수 있기 때문에 본 논문에서는 가변 강성으로 정의하였다.

5. 광 픽업 액추에이터의 성능 예측

5.1 광 픽업 액추에이터의 동특성 예측

고속 액세스를 위한 광 픽업 액추에이터의 예측된 사양은 Table 1 과 같다.

Table 1 에서 강성 계수는 판 스프링 또는 와이어 스프링의 강성 계수로 1차 공진 주파수를 55Hz

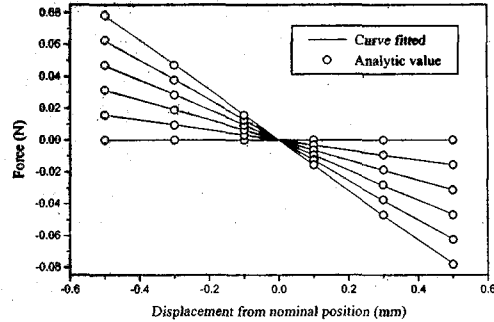


Fig. 12 Variable stiffness with various currents

Table 1 Predicted Specifications of proposed optical pickup actuator

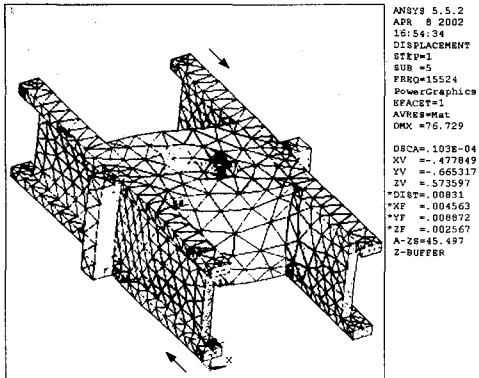
	Focusing actuator	Tracking actuator
Mass of actuator	0.5g	0.5g
Number of turns	40turns	525turns ×4
Resistance of coils	3.72Ω	9.22Ω ×4
Spring constant	63N/m	63N/m
Natural frequency	56.5Hz	56.5Hz
Force constant	0.2104N/A	0.1509N/A at nominal position

근방에 위치시키기 위한 강성 계수를 의미한다. 본 연구에서 제안한 광 픽업 액추에이터에서는 판 스프링 또는 와이어 스프링을 모두 사용할 수 있지만 광 픽업 장치의 사이즈를 보다 줄일 수 있도록 판 스프링을 광 픽업의 아래 부분에 부착시키는 것이 더 효과적이다. 또한 이 경우 포커싱 방향과 트래킹 방향을 제외한 나머지 자유도에 대하여는 판 스프링이 갖는 구조의 장점, 즉 그 방향에 대한 굽힘 모멘트(bending moment)가 작기 때문에 고강성을 유지할 수 있다. 따라서 가변 강성도 높일 수 있는 장점이 있다.

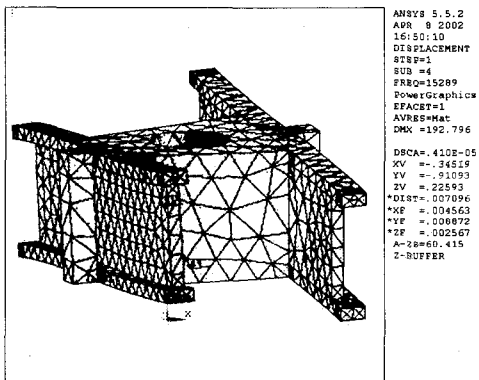
Fig. 13 은 광 픽업 액추에이터의 2 차 공진 주파수를 알아보기 위하여 FEM 해석한 결과이다. 광 픽업 장치의 구조 특성에 의하여 트래킹 방향에 대한 굽힘이나, 포커싱 방향에 대한 굽힘 보다는 틀어짐 현상이 먼저 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한, 2 차 공진은 모두 10kHz 이상의 고주파에 위치해 있어 제어기의 서보 대역폭에 영향을 미치지 않는다.

5.2 유도 감쇠 실험

유도 감쇠의 성능을 검증 하기 위하여 간단한



(a) Shear mode for tracking direction at 15.524kHz



(b) Tilt mode for focusing direction 15.289kHz

Fig. 13 The second natural frequency by flexible mode

장치를 구성하여 유도 감쇠의 성능을 실험하였다. 실험 장치는 Fig. 14 와 같이 시험 바(test bar)와 중심 솔레노이드 그리고 영구자석으로 구성되며 그 주요 사양은 Table 2 와 같다.

실험은 유도 감쇠가 없을 때 시험 바에 초기 위치를 주고 그 자유 진동의 시간 응답과 유도 감쇠가 있을 경우의 시간응답을 구하여 그 결과를 비교하였다.

시험 바의 강성과 등가 질량은 감쇠가 없는 자유 진동 시스템의 충격 응답을 통해 구하였다. 시험 바, 영구 자석 그리고 가속도계를 포함한 등가 질량은 8g 나타났으며 그 때의 강성은 Table 2 와 같이 23N/m로 구해졌다.

영구 자석의 자기 쌍극자 모멘트는 $0.41A \cdot m^2$ 이며 식 (24)를 이용하여 이 때의 유도 감쇠를 구

하면 Fig. 15 와 같다.

Table 2 Specification of experiment setup

	Specifications	Maker
Testing bar	0.5×15×160(mm)	
	k = 23 (N/m)	
Solenoid	Inner diameter 11.2(mm)	
	Outer diameter 19.4(mm)	
	Length 17 (mm)	
	N = 400 (turn)	
	R = 2.5 (Ohm)	
	Weight 1.2 (g)	
Accelerometer	Sensitivity 2mV/G	Rion
	Band Width 25kHz	
Accelerometer	Range 0.5Hz ~ 30 kHz	Rion
	Amp. ~100 G	

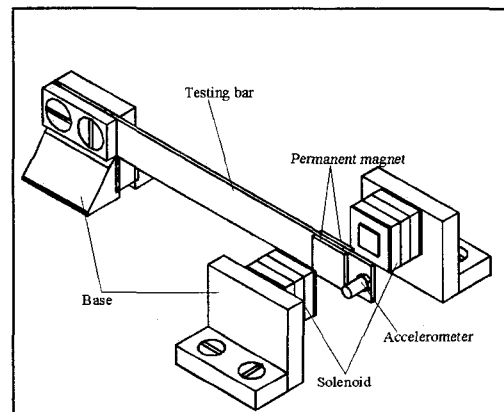


Fig. 14 Experiment setup for induced damper

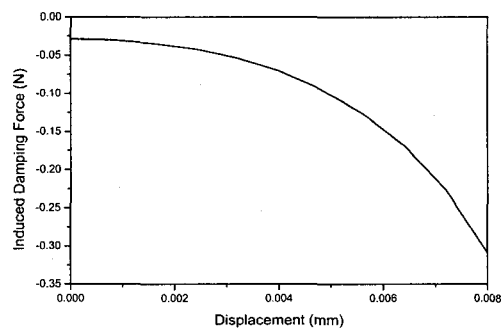


Fig. 15 Induced damping force for experiment setup

Fig. 16 은 유도 감쇠가 없는 시험 바의 자유진동과 유도 감쇠가 있을 때의 자유 진동을 나타낸 것이다. 유도 감쇠가 효과적으로 작용하여 진동이 급격하게 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

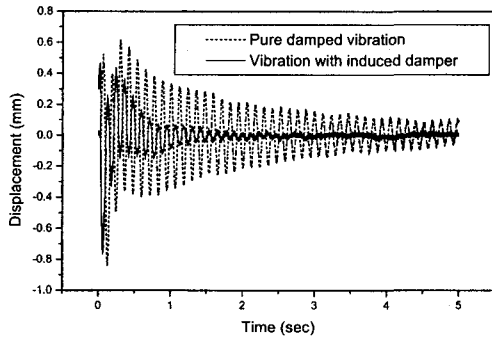


Fig. 16 Experiment result of induced damped vibration compared with free vibration

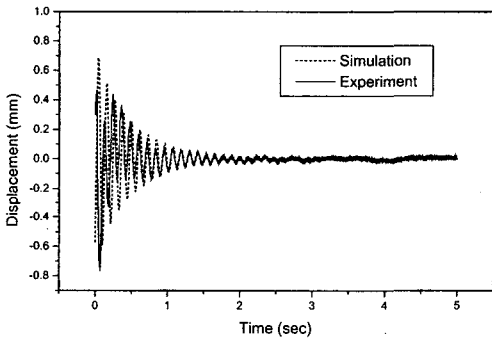


Fig. 17 Experiment result of induced damped vibration compared with simulation

Fig. 17 은 Fig. 15 의 유도 감쇠를 이용한 모의 실험 결과와 실제 실험 결과를 비교한 것이다. 모의 실험 결과 보다 실제 실험이 감쇠 효과가 약간 더 큰 것은 공기의 마찰 그리고 시험 바가 갖고 있는 고유 감쇠에 대한 영향에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 18 은 자유 진동시에 나타나는 유도 감쇠 계수를 나타낸 것이고, Fig. 19 는 그 때의 감쇠력을 나타낸 것이다. 약 2 초 후부터는 유도 감쇠 효과가 매우 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 또한 진동의 크기가 매우 줄어들었다는 것을 나타낸다고 할 수 있다.

Fig. 20 은 본 논문에서 제안한 광 픽업 액추에어의 유도 감쇠 성능을 예측하기 위한 충격 응답

에 대한 모의 실험 결과이다. 유도 감쇠에 의해 정착 시간(settling time)이 약 14.7% 감소하는 것을 알 수 있다.

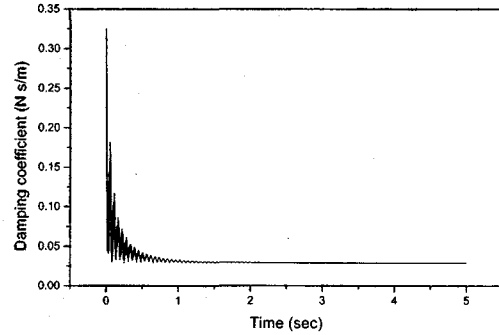


Fig. 18 Induced damping coefficient for free vibration

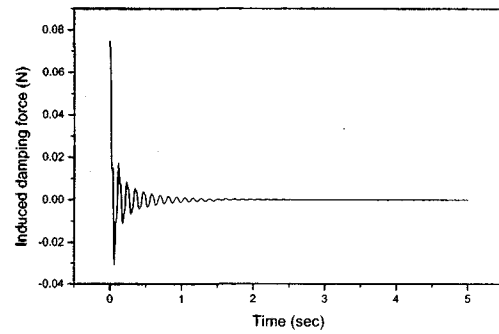


Fig. 19 Induced damping force for free vibration

따라서 위 실험과 모의 실험에 의해 광 픽업의 경우에도 유도 감쇠가 효과적으로 작용될 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 이러한 유도 감쇠에 의해 광 픽업의 과도 진동에 의한 정정 시간을 줄여 액세스 시간을 보다 빠르게 할 수 있다.

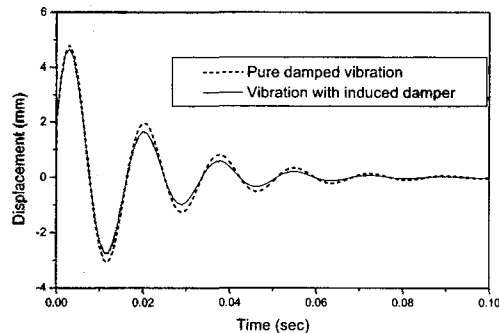


Fig. 20 Impulse response simulation of pickup actuator

이 때, 순수 감쇠 진동의 경우, 기존 광 픽업에 액추에이터의 감쇠 계수⁽¹¹⁾를 갖고 있다고 가정하였다.

6. 결론

본 논문에서는 고속 액세스를 위한 광 픽업 액추에이터 메커니즘을 제안하고 이를 모의 실험 및 FEM 그리고 간단한 실험을 통해 그 성능을 예측하였다.

본 논문에서 제안한 광 픽업 액추에이터는 코일 구동 방식의 포커싱 액추에이터와 자석 구동 방식의 트래킹 액추에이터로 이루어져 있으며 트래킹 액추에이터는 두 개의 영구자석과 네 개의 공심 솔레노이드로 구성 되어 있다. 이러한 구성에 의해 유도 전류에 의해 발생하는 감쇠력과 공심 솔레노이드에 간단하게 전류를 인가함으로써 부가되는 강성을 이용하여 거친 검색 동작과 정밀 검색 동작 사이에 발생하는 광픽업의 과도 진동에 대한 정정 시간을 감소시켜 고속 액세스를 실현할 수 있다.

모의 실험 결과 정착 시간은 약 14.7% 감소되었다. 향후, 2 차 공진 주파수를 좀더 높여 제어기의 서보 대역폭을 좀더 확대할 수 있도록 광픽업의 구조를 개선하고, 트래킹 및 포커싱 액추에이터의 여러 파라미터에 대한 최적 설계 기법을 도입하여 액추에이터의 디자인을 보완한 후 시작품을 제작하여 본 논문에서 제시한 성능 향상을 더 정밀히 검증하고자 한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 연세대학교 정보저장기기연구센터(CISD)의 지원을 받아 수행되었음을 밝히며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. K.H. Park, Choi, J. Ryu, "Hybrid actuator for high speed and high precision optical disk drives," *Mechatronics*, 11, pp. 527~543, 2001.
2. Jeroen Wals, Jadranko Dovic, Arnold J. Niessen, Marcel Rieck and M.G. Rus, "Fast-Access Optical

Drive," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 39, pp. 862~866, 2000.

3. Sorin G. Stan, "Twin-Actuator For Ultra-Fast Access in CD-ROM Systems," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 42, No. 4, pp. 1073~1084, 1996.
4. 박준혁, 3 자유도 모터 제어를 위한 영구자석과 철심 솔레노이드간의 힘 특성에 관한 연구, 석사학위 논문, 기계공학과, 연세대학교, 1999.
5. 박준혁, 백윤수, "3 자유도 모터 제어를 위한 철심 솔레노이드 특성의 실험적 해석에 관한 연구," *대한기계학회논문집 A 권*, 제 25 권, 제 9 호, pp. 1334~1340, 2001.
6. Derek Craik, *Magnetism*, John Wiley & Sons, 1995.
7. Herbert C. Roters, *Electromagnetic devices*, John Wiley & Sons, 1951.
8. Roald K. Wangsness, *Electromagnetic fields*, John Wiley & Sons, 1997.
9. Kwang Suk Jung, *Contact-Free Precision Stage Using Magnetic Levitation*, Ph.D thesis, Dep. Mech. Eng., Yonsei University, 2001.
10. T. Kabashima, A. Kawahara, T. Goto, "Force Calculation Using Magnetizing Currents," *IEEE Transactions on magnetics*, Vol. 25, No. 1, pp. 451~457, 1985.
11. 박준태, LQG 제어기 설계에 의한 광픽업 미세 트래킹 액추에이터의 위치제어, 석사학위 논문, 기계설계학과, 연세대학교, 1998.