

틸트제어를 위한 하이브리드형 광픽업 구동기에 대한 연구 Study on Hybrid type Optical Pickup Actuator for Tilt Control

◦ 김 철 진*· 이 경 택*· 신 창 훈*· 박 노 철*· 박 영 필**

Chul-Jin Kim, Kyung-Taek Lee, Chang-Hun Shin, No-Cheol Park and Young-Pil Park

Key Words : Hybrid type actuator(하이브리드형 구동기), Tilt compensation(틸트 보정), Magnetizable yoke(자성 요크)

ABSTRACT

In optical disk drives (ODD), the demands of high data density and high speed have been increasing rapidly to achieve high data capacity and data transfer rate. The short wavelength laser, High NA objective lens, and high track following performance are needed to raise data density and data rate. For high-performance actuator, the improvement of linearity and acceleration become more important. Also, 3-axis actuator for active tilt compensation is introduced to overcome the decrease in disk tilt tolerance which is induced by short wavelength laser. In this paper, a hybrid type 3-axis actuator is presented and a new yoke structure, which can reduce the interaction between yoke and moving magnet, is designed to keep the efficiency of magnetic circuit. Experimental results show the validity of the yoke in the hybrid type actuator.

1. 서 론

광기록기에서 대물렌즈와 디스크 사이의 광축 경사의 허용한도는 파장에 비례하고 개구율의 3승에 반비례한다. 따라서, 고개구 대물렌즈와 짧은 파장의 레이저 광을 이용하는 고밀도 광기록기에서는 허용경사각이 급격하게 줄어들므로, 이를 보완하기 위한 연구가 진행 중이며 그 방향은 크게 두 가지로 나눌 수 있다[1]. HD-DVD와 같은 차세대 고밀도 광기록기에서는 주로 디스크 덮개층(cover layer)의 두께를 줄여서 경사에 대한 마진을 확보하고자 하는 연구가 진행 중이며, CD-RW/DVD와 같은 다중매체 재생기는 디스크의 구조가 정해져 있으므로 능동틸트 보정용 구동기(active tilt compensation actuator)를 채택하기도 한다.

능동틸트 보정용 구동기(이하 3축 구동기)는 크게 가동코일형(moving coil type) [2]과 가동자석형(moving magnet type) [3,4,5]으로 나뉘어진다. 가동자석형 구동기는 트래킹, 포커싱, 틸트 제어를 위한 영구자석이 가동부에 부착되어 있고, 코일은 고정부에 부착되어 있는 형태이다. 그리고 가동코일형 구동기는 그 반대의 배치형태를 가지므로 일반적인 2축 구동기와 유사한 형태임을 알

수 있다.

가동코일형 구동기의 구조를 분석하기 전에 우선 2축구동기의 구조를 살펴보면 다음과 같다. 2축 구동기는 4개의 와이어 스프링으로 가동부를 지지하고 있는데, 기계적으로는 서스펜션의 역할을 하여 기계적 동특성을 결정하고 정밀도를 좌우하게 된다. 전기적으로는 2축 구동 방향, 즉 포커싱과 트래킹 방향 구동을 위해 VCM의 코일에 전류를 흘려주는 전기적 도선의 역할을 한다. 따라서 3축, 혹은 4축 구동기를 설계하기 위해서는 전기적인 역할 때문에 와이어의 개수가 늘어날 수 있다는 점을 고려해야 한다. 이 경우 기존의 4와이어 방식과는 다른 기계적 동특성을 가질 수 있으므로 상당히 세심한 검토 및 해석이 필요하다. 기존의 4와이어 방식 2축 구동기에 틸트 구동기를 추가하게 되면 6개의 와이어 서스펜션을 갖게 되는데, 추가되는 두개의 와이어를 적극적으로 수용하여 4와이어 방식과 유사한 기계적 특성을 갖도록 설계하는 방식이 있고, 기계적인 강성이 거의 무시될 수 있으며 단순히 전기적 도선의 역할만 하도록 하는 저항성 재질의 와이어를 채택하는 경우[2]도 있다. 그러나 가동코일형 구동기는 추가되는 와이어 서스펜션의 위치를 정하기가 쉽지 않고, 또 조립이 어려워지는 문제점이 있다.

가동자석형 구동기는 위에서 살펴 본 가동코일형의 단점을 극복하기 위해 코일을 고정부에, 자석을 가동부에 두는 구조를 갖는다. 이 방식은 기존 2축구동기와 같이 4개의 와이어 서스펜션만으로 구성되므로 제작이 용이하다는 장점과 함께 코일이 고정부에 설치되므로 전기적인 배선과 코일의 감는 회수 조정이 용이하다는 장점이 있는 반면에, 영구자석이 가동부에 붙음으로써 가동부의 무게가 증가하여 기계적 동특성과 감도가 저하

* 연세대학교 정보저장기기연구센터

E-mail : kimjang77@vibcon.yonsei.ac.kr
Tel : (02) 2123-4677, Fax : (02) 365-8460

** 연세대학교 기계공학과

되는 문제를 갖고 있다. 또한 자기회로가 폐회로로 구성될 수 없어서 구동감도가 떨어지는 문제점도 갖고 있다.

본 논문에서는 가동코일형과 가동자석형의 절충형태인 하이브리드형 구동기에 대한 구조에 대해 연구했으며, 3 자유도 연성모델의 수식 전개를 통해 기본 설계특성을 정했다. 또한 하이브리드형이 기본적으로 갖는 비효율적인 자기회로의 개선을 위해 부분적으로 요크를 도입하여 구동감도를 개선하였다. 구조해석과 자기해석을 통해 설계, 제작된 하이브리드형 3 축 구동기에 대한 실험을 통해 새로운 구조의 3 축 구동기에 대한 가능성을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 하이브리드형 구동기의 구조 및 특징

하이브리드형 구동기에서 트래킹, 포커싱 구동력의 발생은 기존의 2 축 구동기와 동일하다. 그리고 틸트제어를 위한 구동력을 얻기 위해 가동부의 양 측면에 영구자석을 부착하고 고정부에는 코일을 배치하는 구조를 갖는다. 이렇게 함으로써 얻게 되는 이점은 다음과 같다. 우선 트래킹, 포커싱 구동력을 기존의 2 축 구동기와 동일한 방식으로 얻게 되므로 구조의 변경을 피할 필요가 없게 된다. 또한 틸트 구동력을 측면에서 만들게 되므로 큰 틸트 구동 모멘트를 얻을 수 있다. 가동 코일방식에 비해 큰 장점은 4 개의 와이어만으로 충분히 전기적인 연결이 가능하다는 점이다. 그러므로 구조가 단순해지며, 생산적인 측면에서도 큰 장점이 될 수 있다. 두 번째, 가동자석형에 비해 가동부의 무게가 가볍다는 점이다. 이는 고배속대응 기기에서 꼭 필요한 고속 접근성에서 절대적으로 필요한 가속도 감도를 좋게 할 수 있는 것이다. 또한 틸트 코일이 고정부에 부착되므로 낮은 저항으로 많은 회수의 코일을 감을 수가 있기 때문에 가동부의 중량 증가없이 쉽게 틸트 방향의 감도를 올릴 수 있다. 또한 코일의 온도 상승에 의한 전류제한치도 높일 수 있는 장점이 있다. 하지만 하이브리드형 구동기에서는 폐회로 구성을 통한 구동감도향상을 위해 자성 요크(magnetizable yoke)를 사용하게 되면 가동부에 부착되어 있는 틸트 자석과의 인력에 의해 정상적인 동작을 할 수가 없게 된다. 본 논문에서는 전체적으로는 비자성 요크를 사용하되, 부분적으로 자성 요크를 도입하여 이러한 문제를 해결하였다. 그리고 자성 요크의 유무에 따른 효율증대를 비교했다.

2.2 3 축 구동기의 운동방정식

3 축 구동기의 기본적인 사양 검토와 연성현상(coupling effect)을 분석하기 위해 수학적 모델을 만들었다. 기존의 2 축 구동기에서의 수학적 모델은 연성효과를 무시한 서로 독립적인 두개의 운동방정식으로 묘사되었지만, 틸트 방향으로의 회전 강성이 병진방향의 와이어 서스펜션의 강성에 의해 결정된다는 가정 하에 포커싱, 트래킹, 틸트 방향의 3 자유도 시스템으로 보고 연성이 고려된 운동방정식을 유도하였다. 물론 구동기 시스템은 6 자유도를 갖는다고 할 수 있지만 본 논문에서 다루는 구동기는 대칭형이므로 여타 방향사이의 연성이 대단히 미미할 것으로 생각되어 나머지 3 자유도는 고려 대상에서 제외되었다. Fig. 1 은 구동기에 설정된 축을 보여주고 있다. 가동부는 강체로 가정했고, 4 개의 와이어 서스펜션은 트래킹, 포커싱방향으로 각각 4 개의 선형 스프링 및 댐퍼($k_{1x}-c_{1x}$, $k_{2x}-c_{2x}$, $k_{3x}-c_{3x}$, $k_{4x}-c_{4x}$, $k_{1z}-c_{1z}$, $k_{2z}-c_{2z}$, $k_{3z}-c_{3z}$, $k_{4z}-c_{4z}$)로 모델링되었다. 렌즈중심은 원점(o), 질량중심은 c , 그리고 구동중심은 d 로 정의한다. 질량중심의 위치는 (l_{cx}, l_{cy}, l_{cz}) 로 표현되고 구동중심은 (l_{dx}, l_{dy}, l_{dz}) 로 표현된다. 또한 스프링의 지지위치는 각각 (l_{1x}, l_{1y}, l_{1z}) , (l_{2x}, l_{2y}, l_{2z}) , (l_{3x}, l_{3y}, l_{3z}) , (l_{4x}, l_{4y}, l_{4z}) 로 표현된다. VCM에 의한 구동력과 일반화 힘과의 관계는 다음과 같다.

$$F_x = f_{dx},$$

$$F_z = f_{dz},$$

$$M_y = -l_{dx}f_{dz} + l_{dz}f_{dx} + M_r,$$

여기에서 M_r 은 외부에서 가해진 틸트방향의 구동토크이다. 라그랑지식(Langrange's equation)을 이용해 운동방정식을 유도해 보면 다음과 같다

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = Pf,$$

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & ml_{cz} \\ 0 & m & -ml_{cx} \\ ml_{cz} & -ml_{cx} & ml_{cx}^2 + ml_{cz}^2 + I_{yy} \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} \sum c_{ix} & 0 & \sum c_{ix}l_{iz} \\ 0 & \sum c_{iz} & -\sum c_{iz}l_{ix} \\ \sum c_{ix}l_{iz} & -\sum c_{iz}l_{ix} & \sum c_{ix}l_{iz}^2 + \sum c_{iz}l_{ix}^2 \end{bmatrix},$$

$$K = \begin{bmatrix} \sum k_{ix} & 0 & \sum k_{ix}l_{iz} \\ 0 & \sum k_{iz} & -\sum k_{iz}l_{ix} \\ \sum k_{ix}l_{iz} & -\sum k_{iz}l_{ix} & \sum k_{ix}l_{iz}^2 + \sum k_{iz}l_{ix}^2 \end{bmatrix},$$

$$\underline{Q} = \underline{P}\underline{f} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ l_{dx} & -l_{dx} & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_{dx} \\ f_{dz} \\ M_r \end{Bmatrix}.$$

위의 식에서 알 수 있듯이 광폭업 모델의 진동 모드들은 서로 연성되어 있다. 그러나 기하학적 해석을 통해 비연성화시킬 수 있다. 모드 비연성의 조건은 다음과 같다. 좌표원점과 질량중심과 구동중심이 일치하는 경우이다.

$$l_{cx} = l_{cz} = l_{dx} = l_{dz} = 0.$$

일반적인 구동기에서는 스프링의 강성과 댐핑계수가 모두 같음은 자명한 것이다.

$$k_x = k_{ix}, \quad k_z = k_{iz},$$

$$c_x = c_{ix},$$

$$c_z = c_{iz}, \quad i = 1, 2, 3, 4.$$

그리고 스프링의 지지중심도 좌표원점과 일치한다고 하면, 스프링의 각 지지위치는

$$l_x = l_{1x} = l_{4x} = -l_{2x} = -l_{3x},$$

$$l_z = l_{1z} = l_{2z} = -l_{3z} = -l_{4z}.$$

그 결과 운동방정식에서 행렬의 각 항은 다음과 같이 대각 항만 남게 된다.

$$\underline{M} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I_{yy} \end{bmatrix},$$

$$\underline{C} = \begin{bmatrix} \sum c_{ix} & 0 & 0 \\ 0 & \sum c_{iz} & 0 \\ 0 & 0 & 4c_x l_z^2 + 4c_z l_x^2 \end{bmatrix},$$

$$\underline{K} = \begin{bmatrix} \sum k_{ix} & 0 & 0 \\ 0 & \sum k_{iz} & 0 \\ 0 & 0 & 4k_x l_z^2 + 4k_z l_x^2 \end{bmatrix},$$

$$\underline{Q} = \underline{P}\underline{f} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_{dx} \\ f_{dz} \\ M_r \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_{dx} \\ f_{dz} \\ M_r \end{Bmatrix}.$$

따라서, 비연성화된 3 축 구동기의 운동방정식을 얻게 된다. 그러나 렌즈중심이 트래킹이나 포커싱 방향으로 약간이라도 벗어나게 되면 위 행렬에서 비대각항이 제거되지 않으므로 트래킹과 포커싱방향의 구동력에 의해 회전생기게 됨을 알 수 있다.

VCM 에 의해 생성되는 트래킹, 포커싱, 틸트구동력은 다음과 같다.

$$f_{dx} = K_{xf} i_x,$$

$$f_{dz} = K_{zf} i_z,$$

$$M_r = K_r i_r,$$

여기에서 i_x, i_z, i_r 는 각 방향으로 구동하기 위해 코일에 흐르는 전류이다.

2.3 구동기를 위한 자기회로의 해석

구동기의 구동력은 구동기에 포함된 영구자석과, 요크 및 공기에 의해 구성되는 자기회로에 의한 자기장에 전류가 흐르는 코일을 배치함으로써 원하는 방향으로 발생시키게 된다. 구동기가 필요로 하는 추력은 설계 시에 설정한 감도를 얻기 위해 자석의 세기 즉 자속 밀도를 최대한 크게 확보함으로써 얻어질 수 있다. 또한 자기장의 대칭성이나 가동범위에 대한 충분한 검토를 통해 실제 운용중에 발생하는 부공진을 최대한 억제하는 것도 중요하다. 이를 위해 3 차원 자기해석프로그램으로 여러 가지 특성을 검토하였다. Fig. 2 는 구성된 자기회로를 보여주고 있다. 틸트 자석과 코일은 기본적으로 최소 1mm 정도 거리를 두어야 한다. 물론 틸트 모멘트가 작아지지만 트래킹 방향의 가동범위를 고려한다면 어쩔 수 없는 것이라고 할 수 있다. 그러므로 주어진 한계 내에서 최대한 효율적인 배치를 통해 큰 힘을 얻도록 하였다. Fig. 3 은 틸트 코일과 틸트 자석의 배치관계를 보여준다.

틸트 구동을 위한 자기회로 설계에서, 자석과 코일의 크기를 결정하기 위해 다음과 같은 몇 가지 해석을 3 차원 자기해석프로그램을 사용하여 수행했다.

가동부의 질량 증가를 피하기 위해 자석은 일정체적으로, 코일은 일정단면형상으로 두고 자석의 두께와 코일의 수평길이를 동시에 변화시키면서 최적값을 구했다. Fig. 4 에서 보면, 자석 두께 1mm, 코일의 수평 폭 4.5mm 일 때 가장 큰 힘을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

또한 틸트 자석의 극 배치 방향에 따른 기존 자석의 자기장 변화를 관찰하였다. Fig. 5 는 포커싱, 트래킹 코일의 중앙부에서 얻어진 자속밀도의 크기를 보여주는 그림이다. 틸트 자석의 N 극이 외부(out)로 향할 때 자속 밀도가 증가하고, 내부(in)로 향할 때 감소하는 것을 알 수 있다.

그리고 틸트 자석이 기존 포커싱, 트래킹 자석의 자속흐름에 영향을 미쳐서 구동력이 어떻게 달라지는가를 알아보기 위해, 틸트 자석이 있을 때와 없을 때에 대해, 포커싱, 트래킹 방향으로 가동부의 위치를 변경해 가면서 구동력을 구해보았다. Fig. 6 은 자기해석 프로그램에 의한 결과로서, 틸트 자석의 유무에 따른 힘의 차이는 포커싱, 트래킹 공히 위치에 관계없이 차이가 미미함을 알

수 있었다. 따라서 틸트 제어를 위한 자기 회로가 추가되어도 기존 자기회로에는 별로 영향이 없다고 할 수 있겠다.

2.4 고주파 공진을 위한 모드 해석

앞 절에서 제시했던 수학적 해석 모델은 진동특성과 설계변수사이의 관계를 파악하는데 유용하지만, 틸트 모션을 제외한 여타 부차공진이나 고주파에서 발생하는 유연모드의 해석은 불가능하다. 따라서 3 축 구동기의 주파수 특성을 알아보기 위해 상용 프로그램을 사용하여 유한요소해석을 했으며 Fig. 7 은 그 결과이다. 유연모드주파수가 상당히 낮음을 알 수 있는데, 이는 내부 요크를 위해 보빈에 구멍이 설치되어서 구조적으로 취약해진 탓으로 생각된다.

2.5 실험 및 고찰

Fig. 8 은 제작된 하이브리드형 3 축 구동기의 구조를 보여주는 그림이다. 요크의 재질을 비자성 재료 한 자기회로와 트래킹, 포커싱 방향으로의 감도의 향상을 위해 부분적으로 자성요크를 도입한 자기회로를 각각 따로 제작하여 실험을 통해 비교, 검증하였다. Fig. 9 는 실험으로부터 얻어진 3 축 방향의 진동특성이며 Table 1 은 실험 결과이다. Table 1 에 따르면 자성요크를 사용한 경우 포커싱 방향으로의 감도가 많이 개선되었음을 알 수 있었다. 그러나 트래킹 방향의 감도 변화는 거의 없는 것으로 나타났고, 틸트 방향은 오히려 약간 나빠졌음을 알 수 있었다. 이는 자기회로의 구조에 기인하는 것으로 생각된다. 포커싱 코일은 트래킹 코일에 비해 상대적으로 자석과의 공극이 더 크게 설계되어 있어서, 자성 요크에 의한 폐자 회로효과가 나타난 것으로 생각된다. 그런데 틸트 방향의 경우 자성 요크와 틸트 자석사이의 상호작용이 감도를 떨어뜨리는 요인이 된 것으로 판단되며, 보다 정확한 자기해석을 통해 개선해 나가야 할 부분이다. 그리고 전체적으로 볼 때 감도 면에서 고배속 대응을 위해서는 많이 부족하다는 점을 들 수 있겠다. 이는 하이브리드형 구동기에서 반드시 해결해야 할 부분이다.

Table 2 는 3 축 방향으로의 공진주파수를 유한요소 해석과 앞 절에서 전개한 수식 및 실험에 의한 것들을 비교 한 것이다. 유한요소 해석에 의한 것은 세계의 공진주파수가 일정한 비율로 실험치와 차이나는 것으로 판단하건대, 물성치의 차이로 인한 부분도 생각할 수 있지만, 틸트 자석과 내측 요크 및 메인 자석과의 상호작용에 의한 강성의

증가도 있을 것으로 판단된다. 한편 수학적 모델로부터 얻어진 공진주파수는 틸트 방향의 경우 상당히 작게 계산된 것인데, 이는 틸트 방향의 스프링강성을 구할 때 와이어의 회전 강성을 무시했기 때문인 것으로 생각된다.

3. 결 론

하이브리드형 3 축 구동기를 제안했으며, 가동 코일형이 갖는 자기회로의 효율성과 가동자석형이 갖는 구조의 장점을 살리기 위해 누설자속을 최소화하기 위한 요크 구조를 제시하고 이에 따른 구동감도의 향상을 확인하였으며, 기계적 동특성이 기존의 2 축 구동기와 유사하면서도 틸트 방향으로 기존의 3 축 구동기와 유사한 동적 특성을 볼 수 있었다. 그러나 상대적으로 저주파수에서 나타나는 유연모드와 포커싱, 트래킹 방향의 구동감도의 부족은 하이브리드형 구동기를 설계함에 있어서 주요한 난제임을 알 수 있었다. 틸트 방향의 구동감도는 큰 직경의 코일을 많이 감아서 해결할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 정보저장기기 연구센터의 지원(R11-1997-006101-0)을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Yourii V. MARTYNOV, Benno H. W. HENDRIKS, Ferry ZIJP, Jan AARTS, Jan-Peter BAARTMAN, Gerard van ROSMALEN, Jean J. H. B. SCHLEIPEN and Henk van HOUTEN, "High Numerical Aperture Optical Recording: Active Tilt Correction or Thin Cover Layer?", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 38, Part 1, No. 3B, pp. 1786-1792, 1999.
- (2) 김석중, 이용훈, 최한국, "고밀도 광저장 기기용 틸트 액추에이터 동특성 분석 및 평가", 한국소음진동 공학회지, 제 10 권, 제 4 호, pp. 584-595, 2000.
- (3) Hiroyuki Yamaguchi, Jun-ichi Asada, Hitoshi Fujii, Shin-ich Yamada, Jun-ichi, Hideo Okamura, "4.7GB DVD-RAM DRIVE", Matsushita Technical Journal, Vol. 45, No. 6, pp. 679-685, 1999.
- (4) Y. Motegi, M. Nagasato, Y. Ishibashi, H. Someya and N. Kikuri, "Development of Tilt Servo System using 4-Axis Lens Actuator for Disc Tilt Compensation", SPIE Vol. 3864, pp. 20-22, 1999.
- (5) Min-Suk SUH, Sam-Nyol HONG, In-Ho CHOI, Young-Joong KIM and Jin-Yong KIM, "A Study on the 4-Axis

Actuators for HD-DVD Optical Pick-Ups”, Proceedings of Satellite ISOM 2000, pp. 79~80, Sep. 22~23, 2000, Kyongju, Korea.

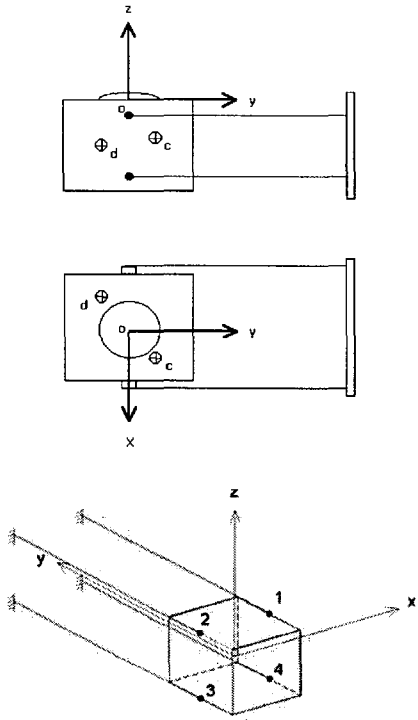


Fig. 1 Coordinate for mathematical model.

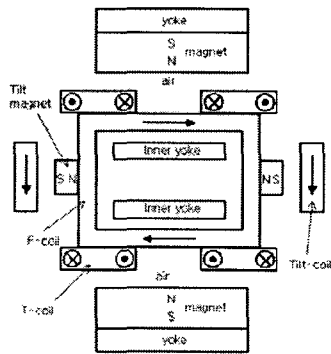


Fig. 2 Magnetic circuit for hybrid type actuator.

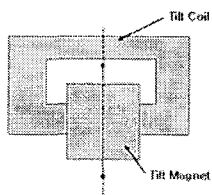


Fig. 3 Configuration of coil and magnet for tilting moment.

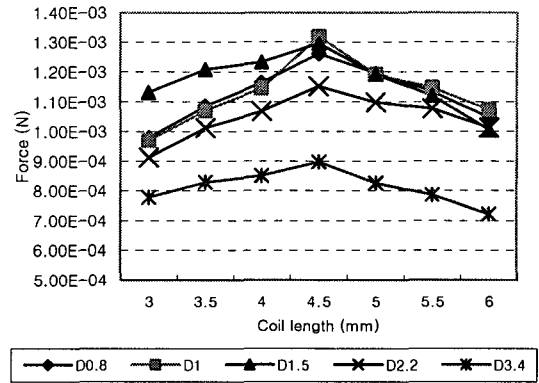
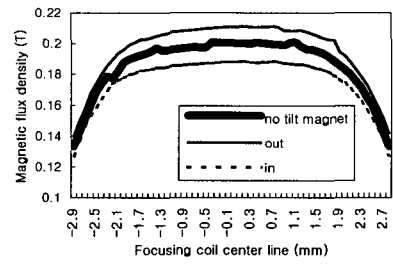
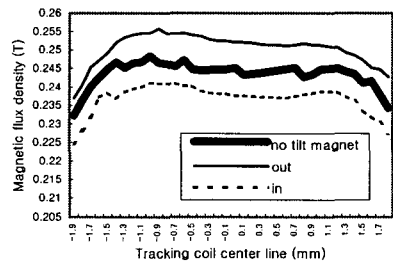


Fig. 4 Magnetic analysis for sizes of tilting coil and magnet.

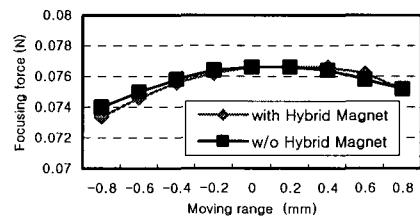


(a) B on focusing coil

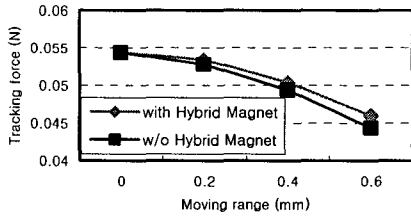


(b) B on tracking coil

Fig. 5 Magnetic density distribution as pole direction of tilting magnet.



(a) Focusing force

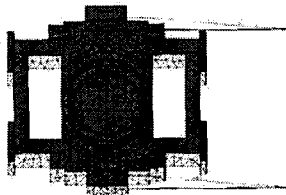


(b) Tracking force

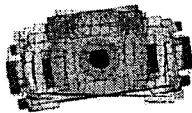
Fig. 6 The effect of tilting magnet on focusing and tracking force.



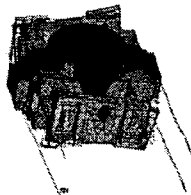
(a) Focusing mode : 45.4Hz



(b) Tracking mode : 45.4Hz



(c) Tilting mode : 76.4Hz



(d) Twist mode : 14.9kHz

Fig. 7 Vibration modes by FE analysis.

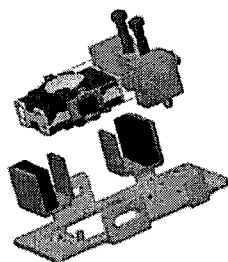
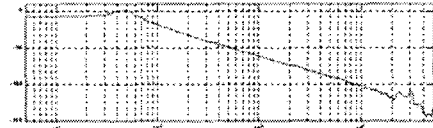
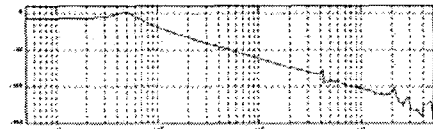


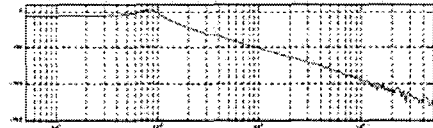
Fig. 8 Configuration of hybrid type actuator.



(a) Focusing



(b) Tracking



(c) Tilt

Fig. 9 Frequency responses of hybrid type actuator.

Table 1 Measured parameters by experiment.

	항목	No Yoke	Yoke
Focusing	고유진동수	48.9	47.7
	DC 감도(mm/V)	0.21	0.48
	AC 감도(200Hz)	10.7	23.6
Tracking	고유진동수	48.9	48.9
	DC 감도(mm/V)	0.44	0.46
	AC 감도(200Hz)	22.3	23.1
Tilting	고유진동수	83.0	83.0
	DC 감도(mm/V)	0.61	0.55
	AC 감도(200Hz)	93.3	85.1

Table 2 Resonant frequencies of hybrid type actuator.

	Mathematical model	Simulation	Experiment	Error
Focusing	←	45.4Hz	48.9Hz	7.7%
Tracking	←	45.4Hz	48.9Hz	7.7%
Tilting	←	65.4Hz	83Hz	8.6%