

〈논 문〉

## 고밀도 광저장 기기용 틸트 액추에이터 동특성 분석 및 평가

### Evaluation and Analysis of Dynamic Characteristics in Tilt Actuator for High Density Optical Storage Devices

김 석 중\* · 이 용 훈\*\* · 최 한 국\*\*

Seok-Jung Kim, Yong-Hoon Lee and Han-Kook Choi

(1999년 12월 22일 접수 : 2000년 7월 14일 심사완료)

**Key Words :** Actuator(액추에이터), Tilt Motion(틸트 액추에이터), Modal Analysis(모달해석), Dynamic Modeling(동적 모델링), 3-axis Driving(구축구동), Optical Device(광기기)

#### ABSTRACT

We design a new actuator for high density optical device in order to control the radial tilting motion. The newly designed actuator makes it possible to control the tilting motion actively, while the conventional actuator compress tilting motion with passive spring. First of all, We present 3-dimensional modeling of actuator and accomplish the modal analysis and magnetic analysis of actuator. Due to these results, a new designed actuator has performance of high sensitivity and high second resonance frequency. Secondly, We present the 3-DOF dynamic modeling of the 4-wire spring type actuator. Sensitivity analysis is performed to consider the assembling error, such as the difference of mass center and force center. From these results, the sensitivities of rotation due to the assembly error are revealed and design criteria of rotation is presented. And experimental results of a newly designed actuator are presented and compared with theoretical results. Finally, We propose a dynamic tilt compensation and high acceleration actuator for high density optical storage devices.

#### 1. 서 론

정보화 시대의 도래와 함께 동영상을 포함한 다양한 정보의 저장과 재생을 위한 정보저장 장치의 대용량화 및 고속 전송 그리고 저가격화 등은 매우 중요한 기술적인 의미를 가지게 된다. 특히 인터넷의 대중화를 계기로 전세계에 퍼져있는 숫자와 문자정보 뿐만 아니라 음성과 화상 정보를 쉽게 접하고 얻을 수 있게 되었고 이로 인해 대용량 및 고속 전송이 가능한 정보저장 기기에 대한 폭발적인 수요가 발생하고 있는 실정이다. 현재 가장 대중화되어 있는 정보저장 기기는 자기 기록 매체인 하드

디스크 드라이브와 광기록 및 재생 시스템이라고 할 수 있다. 이 중에서 광기록 및 재생 시스템으로는 현재 음악 용으로 광범위한 시장을 형성하고 있는 CDP(compact disc player)와 개인용 컴퓨터에서 다양한 정보 재생 장치로 활용되고 있고 정보배포매체의 역할을 수행하고 있는 CD-ROM(compact disc-read only memory) 등이 있으며, 기존의 CD-ROM보다 약 7배의 저장용량을 가지며 데이터 전송속도의 고속화가 이루어져 향후 정보재생 매체 또는 정보기록 매체로 주목 받고 있는 DVD-ROM(digital versatile disc-read only memory) 및 DVD-RAM(digital versatile disc-random access memory) 등이 있다. 현재는 차세대 광기록 매체라고 할 수 있는 HD-DVD ROM과 HD-DVD RAM 등이 120 mm 디스크 한 면을 기준으로 15 내지 20 Gb/in<sup>2</sup> 수준의 기록밀도를

\* 정회원, 삼성전자(주) 중앙연구소

\*\* 삼성전자(주) 중앙연구소

가지는 매체로 향후 디지털 정보 미디어 시대를 주도할 제품군으로 개발 과정 중에 있다.<sup>(1)</sup> 그리고 자기기록이 가지게 되는 초상자성 한계(superpara-magnetic limit)에 의한 고밀도 기록·재생의 한계를 극복함과 함께 향후 고밀도의 대용량 저장기기 시장을 주도할 수 있는 가능성이 큰 기기로 기존의 하드 디스크 드라이브로 대변되는 자기기록 기술과 DVD-ROM 등으로 대변되는 광기록 기술간 결합에 의한 근접 광기록(near field optical recording) 방식이 최근 주목을 받고 있는 실정이다. 이와 같이 현재까지 자기기록 매체와 광기록 매체간의 정보저장기기의 시장 주도권을 쥐기 위한 치열한 연구경쟁이 이루어져 향후 3~5년 이내에 100 GB/in<sup>2</sup> 수준의 정보 저장기기가 대중화될 수 있을 것으로 예측되고 있다. 이와 같은 광기록 매체에는 대물렌즈를 디스크상의 원하는 위치에 정확하게 위치시켜 디스크에 기록된 정보를 읽어내거나 디스크에 정보를 기록하는 역할을 하게 되는 광학계의 정밀위치 추종기구로 액추에이터가 필요하게 된다. 그런데 종래의 광저장 기기에서 사용되는 위치추정 기구의 경우에는 2축 병진운동이 가능하도록 하며 원하는 동특성을 확보하기 위한 체계적인 설계과정의 수립과 함께 설계 과정에서 유한요소법을 응용한 성능 검증의 방법들을 제시하였다.<sup>(2~5)</sup> 또한 광기록 매체에서 디스크의 신호 재생 및 기록 과정에서 신호 열화의 주요 원인으로 지적되고 있는 대물렌즈의 경사량을 줄이기 위한 시도로 액추에이터의 경사량 저감 관련 설계변수 제시와 함께 경사 발생의 원인 분석과 대책제시가 있어왔다.<sup>(6~10)</sup> 그러나 이러한 시도들은 액추에이터에서 2축병진 운동만 가능하도록 하고 회전운동이 억제되기 위한 수동적인 대책이라고 할 수 있으며 최근에는 능동적으로 디스크와 대물렌즈간의 상대적인 경사량을 감지하고 이를 보정하기 위해 대물렌즈를 기울이게 되는 3축구동 혹은 4축구동 액추에이터에 관한 연구가 시작되고 있다.<sup>(11)</sup> 따라서 본 논문에서는 이렇게 활발한 연구가 진행중인 정보저장 기술중 고밀도 광기록 기술과 밀접한 관련을 갖고 있는 틸트 액추에이터(tilt actuator)에 대해서 자체적으로 고안된 모델을 효율적으로 개발하기 위한 목적으로 먼저 설계 단계에서 복합적인 해석방법을 적용하여 문제점을 분석하고 해결방안을 도출한 결과 우수한 성능 확보가 가능함을 제시하고자 한다. 그리고 동역학적 모델링이 된 액추에이터 모델에 대해 각 부품간 민감도 및 동특성에 관한 분석을 하여 각 부품의 제작공차 및 조립공차에 대한 분석결과를 도출하고자 한다. 또한 이 결과를 바탕으로 고안된 모델을 조립·평가하는 과정을 거쳐 디스크의 트랙 열을 기준으로 레이디얼(radial) 방향의 회전운동이 가능하도록 한 3축구동 액추에이터를 개발한

결과를 제시하여 향후 고밀도 광기록·재생 기술에 필요한 핵심부품 확보가 가능함을 제시하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 틸트 액추에이터 구조 및 원리

광픽업의 위치추종기구인 액추에이터는 Fig. 1과 같이 x(트래킹)방향과 z(포커싱)방향으로 거의 완벽하게 각각 1자유도계로 지지한 다음에 영구자석 자계에 의한 가동 코일 형태로 운동을 하여 원하는 위치에 대물렌즈를 이동시키는 역할을 담당하고 있다. 이때 가동부에는 강성과 감쇠 특성을 갖는 스프링으로 고정시켜 원하는 주파수 특성을 갖도록 설계를 한다. 그리고 가동부는 서로 수직인 두 방향인 포커싱과 트랙킹 방향으로 병진 운동을 할 수 있도록 되어 있다. 즉 기존의 광픽업용 액추에이터의 경우에는 디스크 면을 기준으로 수직 방향인 포커싱 방향과 수평 방향인 트랙킹 방향의 2자유도 병진운동만 가능하도록 설계되어 왔다. 여기서 포커싱 방향 병진운동은 디스크와 대물렌즈간의 상대적 거리를 정확하게 유지하기 위한 목적으로 활용되며 트랙킹 방향 병진운동은 대물렌즈로부터 출사된 광이 디스크상에 멧히게 될 때의 광스팟(beam spot)이 트랙 중앙에 위치하도록 하는 역할을 수행한다. 최근 대용량 저장기기의 필요성이 대두되는 상황에 부합하여 광기록·재생 시스템의 고밀도 기술을 달성하기 위해서는 광학적으로 단파장 레이저 다이오드와 고개구수(high numerical aperture) 대물렌즈를 적용하여야 한다. 그런데 고개구수 대물렌즈를 사용하면 광픽업상의 대물렌즈에서 출사되는 광과 디스크간의 상대각도가 직각에서 약간의 크기만 벗어나더라도 출사된 광이 디스크상에 멧히게 될 때의 광스팟의 콤마수차(commata aberration)가 급격히 증가하기 때문에 디스크 사양 및 시스템의 제작공차에 대한 엄격한 관리가 필요하게 된다. 따라서 고개구수 대물렌즈를 사용하면서 고밀도 기술을 달성함과 동시에 경제성을 확보하기 위해서는 대물렌즈를 포함한 액추에이터 가동부가 기존의 2자유도 병진운동 이외에 디스크의 기울어짐을 보정하기 위한 목적으로 디스크의 트랙 열을 기준으로 레이디얼 방향의 회전운동이 가능하여야 하고 각 방향 운동이 서로 연성(coupling)되지 않는 3자유도 운동이 이루어져야 한다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 기존의 와이어 스프링(wire spring) 방식 2축구동 액추에이터에 추가로 회전운동을 위한 별도의 자기회로를 구비하여 디스크의 트랙 열을 기준으로 레이디얼 방향의 회전운동이 가능하도록 한 3축구동 액추에이터 모델을 고안하고 설계·제작

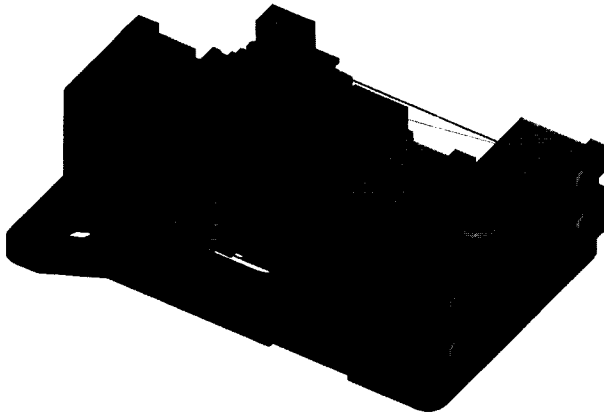


Fig. 1 3-axis driving actuator

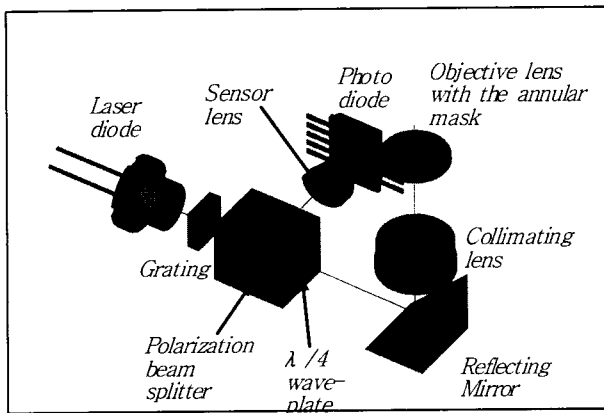


Fig. 2 Optical Pickup for HD-DVD

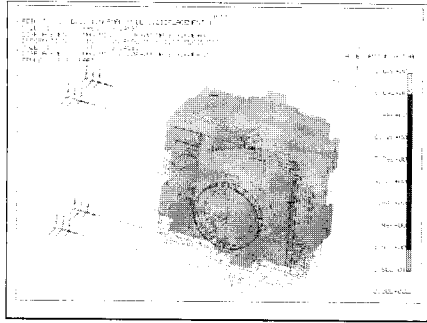
한 결과를 제시하고자 한다. 그리고 각 방향 운동이 서로 연성되지 않고 원하는 성능이 확보되는 3축구동 액추에이터를 설계·제작하기 위한 목적으로 기본 설계도면을 작성한 후 중량해석, 진동해석, 자기회로 해석, 민감도 및 동특성 분석 등을 수행하여 설계 단계에서 중요한 기본성능을 확인하고 제작시 예상되는 문제점 해결방안이 도출되어야 하는 필요성을 제기하고자 한다.<sup>(3)</sup> 그리고 동역학적 모델링이 된 3축구동 액추에이터 모델에 대해서는 부품간의 민감도 및 동특성에 관한 분석을 하여 각 부품의 제작공차 및 조립공차에 대한 분석결과를 도출하고 이 결과를 바탕으로 고안된 모델을 조립·평가하는 과정을 거쳐 고밀도 광기록 기술에서 필요로 하는 정밀 3축구동 액추에이터를 개발한 결과를 제시하고자 한다.

## 2.2 모달해석(Modal Analysis)

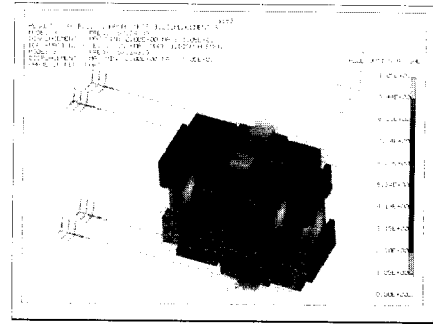
액추에이터는 대물렌즈를 포함한 가동부를 원하는 위치에 이동시키는 역할을 수행하고 있는 광픽업의 핵심부품으로 매우 넓은 주파수 대역에 걸쳐 동특성이 양호할

것을 요구받고 있다. 일반적으로 진동해석은 가동부의 초기 공진주파수 및 정밀 제어시 이득여유와 관련된 고차 공진주파수의 위치 및 피크량 파악, 재질 및 조립조건 최적화 등을 달성하기 위한 작업이라고 할 수 있다. HD-DVD 시스템에서는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 필요한 정보들을 레이저빔을 이용한 광학신호로 바꾸어 광디스크에 기록, 재생하는 광픽업이 절대적으로 필요하게 된다. 그런데 광픽업의 위치추종기구인 액추에이터는 다양한 환경조건에 따른 광디스크의 흔들림을 보정하기 위해 정확한 위치추종( $\pm 0.5\mu\text{m}$  오차 이내)을 할 수 있는 성능이 요구되며 정밀제어의 특성상 약 30 kHz 이하에서 3축운동 이외의 불필요한 모드가 가진되지 않는 정밀부품이어야 하므로 액추에이터 각 부품의 동적인 특성을 명확히 규명하고 진동특성을 파악하여야 할 필요가 있다.

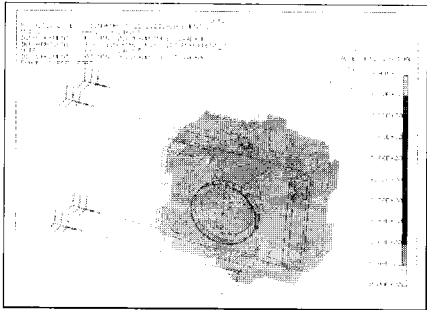
Fig. 1과 같이 3축구동 액추에이터의 경우 네개의 외팔보로된 선스프링이 점탄성 재료의 부착으로 감쇠성을 가지고 있고 회전관성 모멘트가 비교적 큰 집중질량에 의해 서로 견고하게 연결되어 있는 모델이라고 가정할 수 있다. 이 경우 먼저 상용 CAD 프로그램인 IDEAS를 통해 집중질량인 가동부에 대한 상세한 모델링을 수행하여 가동부 무게 및 질량관성 모멘트에 대한 정보를 획득하였다. 이렇게 구해진 가동부의 무게와 질량관성 모멘트는 액추에이터에 대한 동역학적 모델링 과정에서 중요한 설계변수로 활용된다. 일반적으로 가동부는 대물렌즈와 대물렌즈를 지지하는 역할을 하는 보빈 그리고 가동부를 움직이기 위한 코일과 무게 밸런스 등 여러 가지 부품으로 이루어져 있고 이들 부품은 각기 다른 재질 및 복잡한 형상으로 이루어져 있기 때문에 3차원 모델링을 통해 질량 및 질량관성 모멘트에 대한 정보를 획득하는 방법이 가장 정확하고 유용하다고 할 수 있다. 이와 같이 구해진 가동부를 다른 한쪽 끝부분이 고정되어 있는 네개의 빔(beam)에 의해 지지된 형태로 모델링하고 이 모델에 대한 모달해석을 IDEAS 프로그램을 통해 수행하여 가동부의 주요 강제 모드를 구한 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 모달해석을 위한 모델링에서 가동부를 지지하기 위한 스프링은 빔요소(beam element)로 모델링되었고 가동부를 구성하는 각 부품은 고체요소(solid element)로 모델링되었다. 일반적으로 부공진(sub-resonance) 발생원인의 규명 및 크기 저감을 위해 가동부의 주요 강제 모드의 해석 결과가 활용될 수 있다. 부공진이란 대물렌즈가 부착되어 있는 가동부가 각각 포커스 방향(z축방향) 병진, 트랙방향(x축방향) 병진 운동이 이루어질 때 다른 방향 회전운동과의 연성에 의해 전달함수상에서 이득이나 위상의 왜곡이나 교란이 나타나는 현상으로 액추에이터에 대한 페루프 제어계의 위상여유를 축소시켜



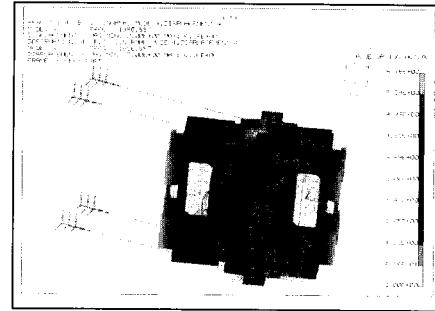
(a) Translation mode in focus direction(37.5 Hz)



(b) Translation mode in track direction(37.5Hz)

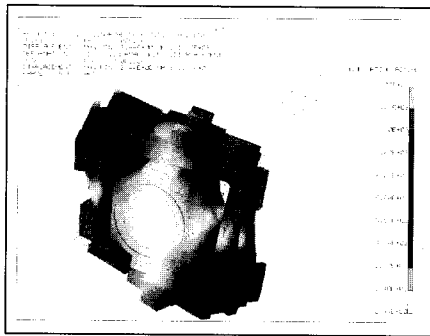


(c) Rotation mode in radial tilt direction(57.3 Hz)

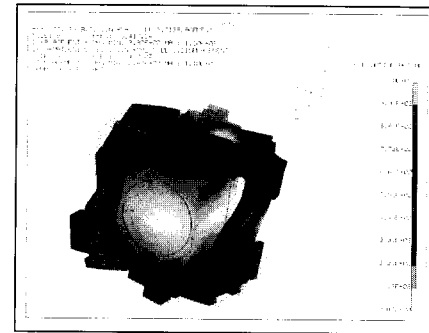


(d) Rotation mode in tangential tilt direction(1857 Hz)

Fig. 3 Rigid body modes of actuator



(a) First twisting mode of moving part (27 kHz)



(b) Second twisting mode of moving part (33.4 kHz)

Fig. 4 Mode shapes of moving part in actuator

제어계를 불안정하게 할 수 있다. 따라서 부공진이 나타나는 주파수 위치와 관련된 강제 모드를 알게 되면 그 모드를 가진시키거나 발생하도록 하는 구조적인 원인을 찾아 제거시키는 방법으로 부공진의 원인규명과 크기 저감을 위한 대책을 세울 수 있게 된다. 그리고 대물렌즈가 직접 접촉되어 있는 보빈의 경우 일종의 유리섬유강화 플라스틱 재질로 이루어져 있으며, 저주파수 대역에서는 강제 특성을 나타내지만 고주파수 대역에서는 자체의 진동 모드에 의해 변형되는 탄성체 특성을 나타내게 되어 불필요한 진동을 야기하게 된다. 따라서 고주파수

대역에서 불필요한 진동의 발생이 없도록 하기 위해서는 보빈을 포함한 가동부 자체의 진동 모드를 높은 주파수로 이동시키고 진폭은 작게 해 줄 필요가 있다. 따라서 모달 해석에 의해 가동부의 주요 진동 모드들을 구하게 되면 이를 통해 진동 모드를 고차 주파수역으로 이동시키기 위한 형상변경의 방향을 결정할 수 있다.

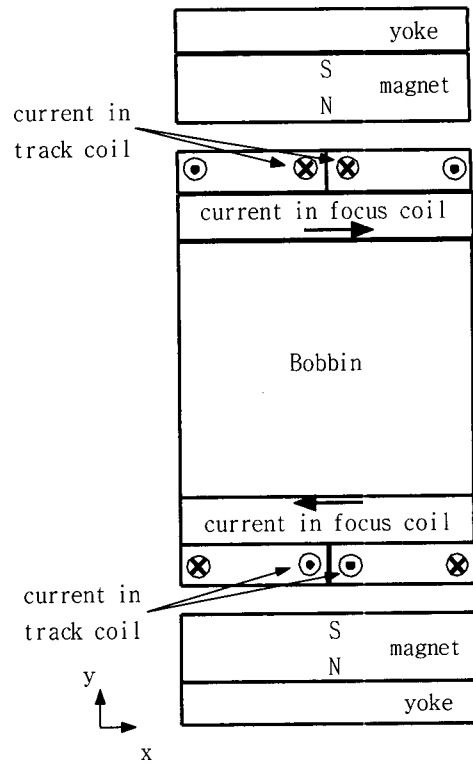
모달해석 결과 구해진 보빈의 주요 진동 모드는 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보는바와 같이 가동부의 주요 진동 모드는 비틀림 모드이므로 이 모드가 발생하는 것을 억제하기 위해 대물렌즈 양측방 부분을 보강하여 2

차공진 주파수를 27 kHz 수준의 높은 주파수 대역으로 이동시킬 수 있었다.

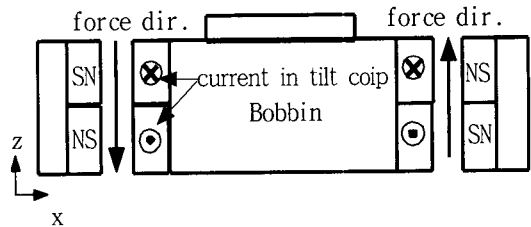
### 2.3 자기회로 해석

액추에이터에서는 영구자석과 요크, 공기간극에 의해 형성된 자기회로에 의해 자기장이 형성되고 가동부에 부착된 가동코일에 전류를 인가함에 의해 3축구동이 이루어질 수 있게 된다. 그런데 액추에이터가 필요한 추력을 확보하기 위해서는 설계 단계에서 추력의 크기와 비례관계를 가지는 자기장의 자속밀도값을 일정수준의 크기 이상으로 확보하여야 하며, 가동코일이 놓이게 되는 공기간극에서 자기장의 대칭성을 확보하여 부공진, 롤링 현상 등의 불필요한 동특성을 최대한 억제해 주어야 하므로 상기 목적을 달성하기 위해 유한요소법에 의한 자기회로 해석을 수행하였다. 간략한 자기회로를 대상으로 구하는 자속밀도값은 통상 퍼미언스법(permeance method)에 의해 구해질 수도 있는데 요크와 자속의 비선형성, 영구자석 및 요크의 형상을 고려한 자기회로의 상세한 검토를 위해서는 유한요소법에 의한 자기회로 해석이 필요하다고 할 수 있다. 액추에이터에서 자기회로는 Fig. 5와 같이 자석, 요크, 공기간극 등으로 구성되어 있으며 3축방향 구동원리는 Fig. 6에 도시한 바와 같이 자기회로에서 플레밍의 법칙에 의한 전자기력의 발생에 의한다.

자기회로 해석에 사용된 영구자석의 재질은 희토류철계(NdFeCo) 자석으로 대략적인 특성은 잔류자속밀도(residual magnetic flux density)가 13,600 Gauss, 보자력(coercive force)이 13,100 Oe이다. 요크의 재질은 순철로 되어 있으며 B-H선도는 측정을 통해 구하여 적용하였다. 그리고 공기간극의 상대 투자율(relative permeability)은 1이다. 자기회로 해석에 사용된 프로그램은 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS/EMAG로 비선형 자기회로 해석이 가능하다. Fig. 7은 중심 기준으로



(a) Force generation in focus and track direction



(b) Force generation in radial tilt direction

Fig. 6 Forces generation according to Fleming's law in actuator

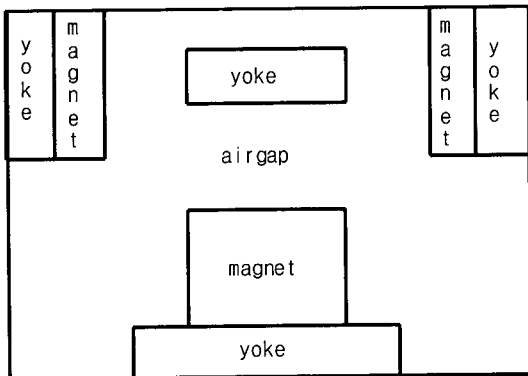


Fig. 5 Type of magnet circuit in actuator

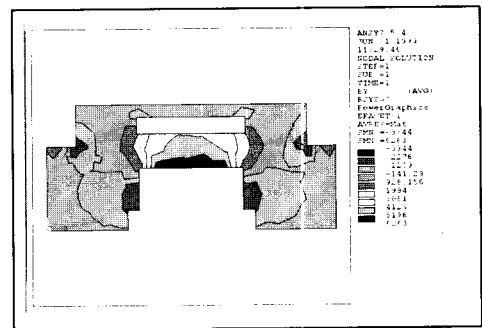


Fig. 7 Distribution of  $B_y$  in XY Plane of magnetic circuit

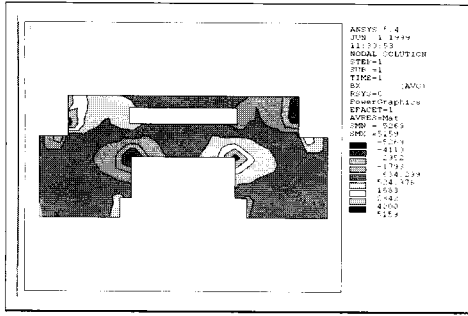


Fig. 8 Distribution of Bx in XY Plane of magnetic circuit

단면이 절단된 상태로 포커스와 트랙방향 자기회로의 자속 밀도값 분포인 By를 나타낸 것이고 Fig. 8은 중심기준으로 단면이 절단된 상태로 레이디얼 틸트 방향 자기회로의 자속 밀도값 분포인 Bx를 나타낸 것이다. Fig. 7, Fig. 8로부터 코일이 놓이게 되는 공기간극의 자속밀도값을 알 수 있으므로 액추에이터가 확보할 수 있는 추력의 크기를 계산할 수 있고 자속분포의 대칭성 여부를 확인할 수 있으므로 자석과 요크, 공기간극의 형상 변경을 통해 자속분포의 대칭성을 확보할 수 있다. 이와 같이 자기회로 해석을 통해 설계 단계에서 액추에이터의 추력 크기를 예측할 수 있고 부공진, 회전현상 등 성능저하의 주요원인인 힘 불균형의 원인 제거 등을 할 수 있게 된다.

### 2.4 동역학적 모델링

설계된 3축구동 액추에이터의 성능이 필요한 사양을 만족하고 있는지 확인하고 기존의 2개 병진운동과 레이디얼 회전운동간의 연관성을 확인하는 과정을 밝기 위해서는 먼저 고안된 모델에 대한 동역학적 모델링이 필요하다. 그리고 위치추종기구인 액추에이터가 제 역할을 원활하게 수행하기 위한 제어 보상기의 최적 설계를 위해서는 시스템의 주파수 응답 특성에 대한 수학적 모델이 필요하다고 할 수 있다. 액추에이터 모델에서 가동부는 집중질량을 가지는 강체로 가정할 수 있고 한쪽 끝이 고정된 네개의 스프링에 의해 외팔보 형태로 지지되어 있다고 할 수 있다. 이 경우 가동부는 6개 자유도를 가지는 강체운동이 가능하지만 실제로 본 연구에 의한 3축구동 액추에이터의 경우에는 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 포커싱과 트랙킹을 담당하는 2개의 병진운동과 레이디얼 회전운동의 3축구동이 이루어질 수 있게 되어 있다. 탄성부재에 의해 지지된 강체의 운동(resilient supported rigid body motion)에 대한 운동방정식을 참고로 하여 3축구동 액추에이터에 대한 운동방정식을 유도할 수 있다. 이때 모델링에 적용된 가정은 다음과 같다.

- 스프링과 댐퍼가 지지되는 홀더는 고정되어 있다.

- 탄성주축(principal axes)은 기하학적인 좌표계와 동일하다.
  - Y축 병진운동과 Z축 회전운동은 해당 방향의 강성 계수가 너무 높아서 무시한다.
- 이상과 같은 가정에 의해 식 (1)과 같이 운동방정식이 유도되었다.

$$m\ddot{x} + 4k_x x - 4k_x e_z \eta = K_{xf} i_x$$

$$m\ddot{z} + 4k_z z - 4k_z e_y \zeta + 4k_z e_x \eta = K_{zf} i_z$$

$$I_{xx} \ddot{\zeta} - 4k_z e_y z + (4k_y (a_z^2 + e_z^2) + 4k_z (a_x^2 + e_x^2)) \zeta + 4k_z (a_x e_y + a_y e_x) \eta = K_{zf} i_\zeta \quad (1)$$

$$I_{yy} \ddot{\eta} - 4k_x e_x x + 4k_z e_x z + 4k_z (a_x e_y + a_y e_x) \zeta + (4k_x (a_z^2 + e_z^2) + 4k_z (a_x^2 + e_x^2)) \eta = K_{zf} i_\eta$$

여기서 분석 대상인 3축구동 액추에이터는 집중질량인 가동부를 지지하는 스프링이 한쪽 끝부분이 고정이고 집중질량과 연결된 다른쪽 끝부분은 미끄럼 접촉 조건인 모델로 가정할 수 있다. 식 (1)로 표현된 감쇠항이 생략된 운동방정식을 상태공간 모델로 변환하기 위해 매트릭스 형태로 정리하면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다. 식 (2)는 감쇠항을 추가하였고 Q-factor로 나타내었다.

$$M\dot{q} + D\dot{q} + Kq = P_i$$

여기서  $q = [x \ z \ \zeta \ \eta]^T$

$$i = [i_x \ i_z \ i_\zeta \ i_\eta]^T$$

$$M = \text{diag}(m, m, I_{xx}, I_{yy})$$

$$D = \begin{bmatrix} 4c_x & 0 & 0 & -4c_x e_z \\ 0 & 4c_z & -4c_z e_y & 4c_z e_x \\ 0 & -4c_z e_y & 4c_z (a_z^2 + e_z^2) + 4c_z (a_x^2 + e_x^2) & 4c_z (a_x e_y + e_x a_y) \\ -4c_z e_x & 4c_z e_x & 4c_z (a_x e_y + e_x a_y) & 4c_z (a_z^2 + e_z^2) + 4c_z (a_x^2 + e_x^2) \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 4k_x & 0 & 0 & -4k_x e_z \\ 0 & 4k_z & -4k_z e_y & 4k_z e_x \\ 0 & -4k_z e_y & 4k_z (a_z^2 + e_z^2) + 4k_z (a_x^2 + e_x^2) & 4k_z (a_x e_y + e_x a_y) \\ -4k_z e_x & 4k_z e_x & 4k_z (a_x e_y + e_x a_y) & 4k_z (a_z^2 + e_z^2) + 4k_z (a_x^2 + e_x^2) \end{bmatrix}$$

$$c_i = \frac{1}{2Q} m k_i$$

$$P = \text{diag}(K_x, K_y, K_z, K_\eta) = \text{diag}(B_1 I_x, B_1 I_z, -\gamma B_1 I_x, B_1 I_x - \gamma B_1 I_z + \gamma B_1 I_x) \quad (2)$$

식 (2)를 시간 영역에서 주파수 영역으로 변환하기 위해 라플라스 변환하면 식 (3)과 같이 정리될 수 있다.

$$(Ms^2 + Ds + K)Q(s) = P(s) \quad (3)$$

식 (3)과 같이 매트릭스 형태로 표현된 운동방정식을

상태공간의 형태로 나타내는 것이 가능하다. 이 과정을 통해 3개의 제어입력과 4개의 시스템 출력으로 이루어진 운동방정식의 상태공간 모델링이 가능하게 된다. 우선적으로 상태변수를 식 (4)과 같이 정의한다.

$$\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8]^T$$

여기서

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ z \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

그리고 상태공간에서 제어입력 벡터는 식 (2)에 정의한 P를 의미한다. 따라서 3축구동 틸트 액추에이터의 상태공간 모델은 식 (5)와 같이 정리된다.

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}P \quad (5)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} O_{4 \times 4} & I_{4 \times 4} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}D \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} O_{4 \times 4} \\ M^{-1}P \end{pmatrix}$$

그리고 최종적으로 출력 벡터는 식 (6)과 같이 정의된다.

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = (I_{4 \times 4} \ O_{4 \times 4})\mathbf{X} \cong \mathbf{C}\mathbf{X} \quad (6)$$

이상과 같이 구해진 상태공간 모델에 대한 단위응답 함수 혹은 보드선도를 계산하면 액추에이터의 동특성을 쉽게 이해할 수 있다.

### 2.5 민감도 및 동특성 분석

Fig. 9에 나타낸 바와 같은 3축구동 틸트 액추에이터에 대해 간략하게 모델링된 상태공간 모델에 대해 단위응답 함수 혹은 보드선도를 계산하면 액추에이터의 동특성을 쉽게 이해할 수 있을 뿐만 아니라 병진운동과 회전운동의 연성 정도를 계산하는 기초자료로 활용이 가능해진다. 그리고 무게중심점과 힘중심점, 지지스프링 중심점간의 편차(eccentricity)발생으로 인해 발생하는 회전량이

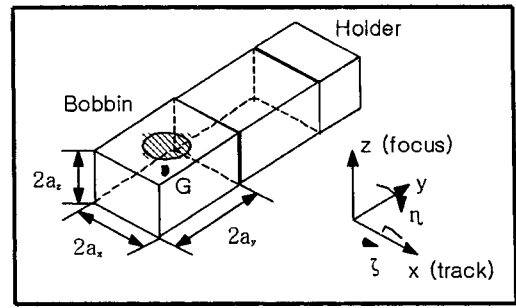


Fig. 9 Modeling of 3-axis tilt actuator

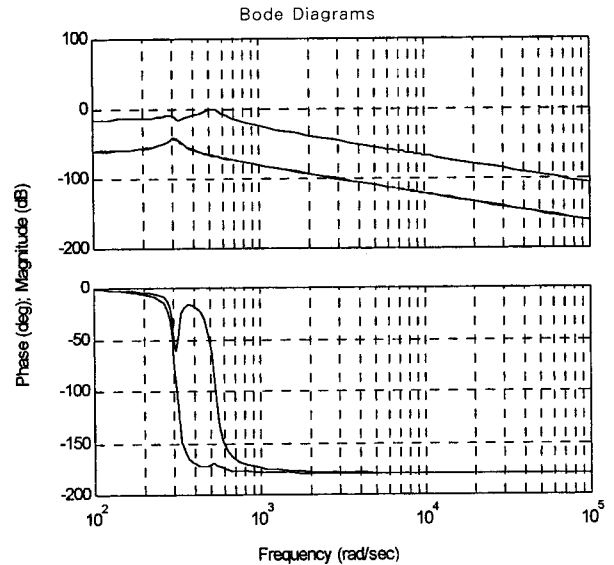
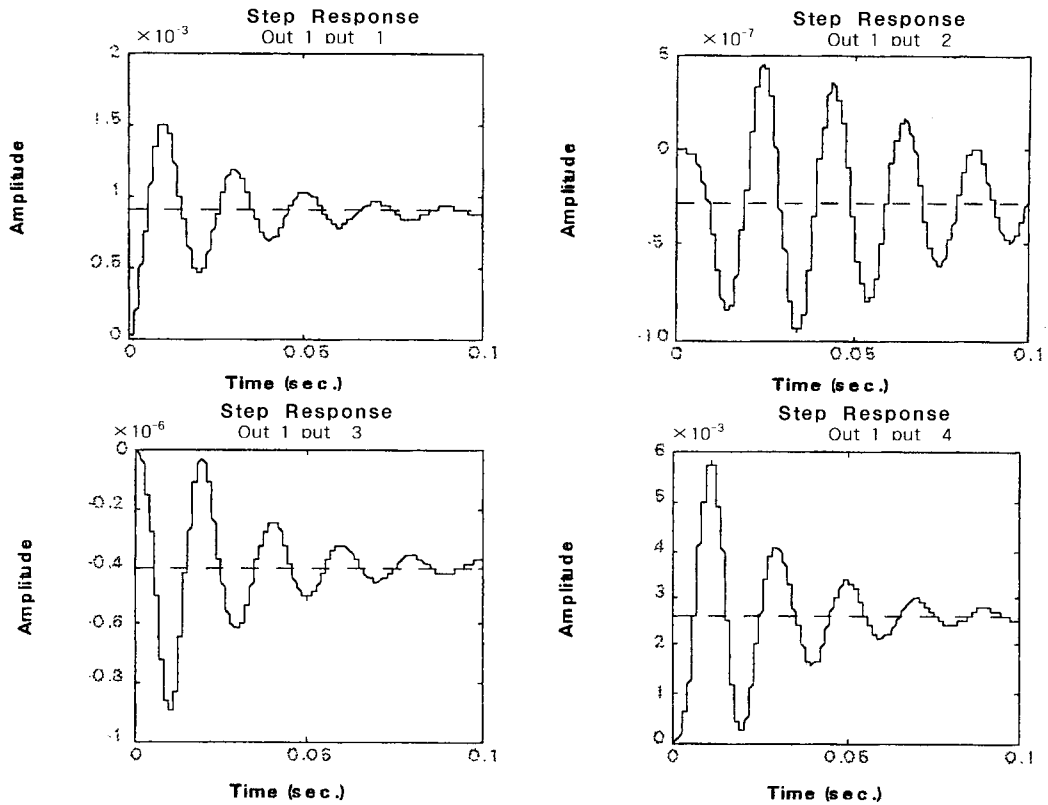


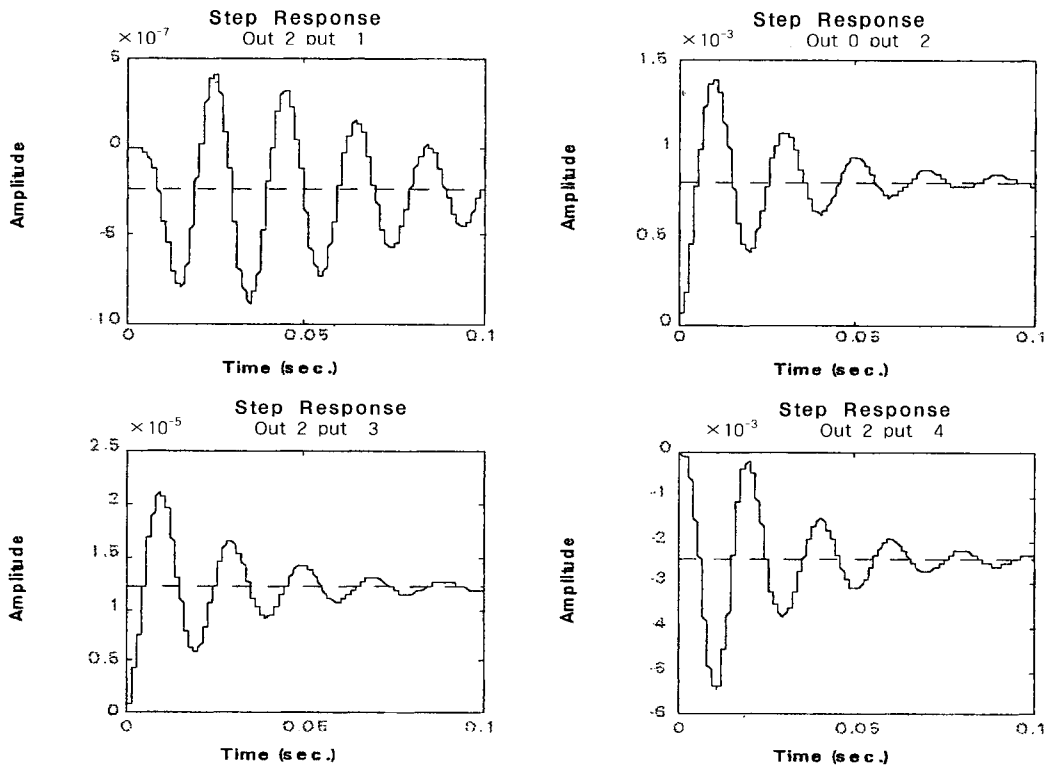
Fig. 10 Frequency response function in 3-axis tilt actuator

나 부공진 등의 동특성의 크기 변화를 계산함으로써 민감도 분석자료로도 활용이 가능해진다.

Fig. 10는 3축구동 액추에이터의 각 방향 주파수응답 함수를 나타낸 것으로 포커스와 트랙방향 보드선도를 살펴 보면 거의 유사한 감도와 고유진동수를 가지게 됨을 알 수 있다. 그리고 레이디얼 틸트 방향 보드선도를 살펴 보면 포커스와 트랙 방향 고유진동수보다 25 Hz 높은 고유진동수를 가지고 있음을 알 수 있다. 포커스와 트랙 방향과 같은 병진운동의 경우 주파수 전달함수의 단위는 변위/전압[mm/V]이고 레이디얼 틸트 방향 회전운동의 경우 주파수 전달함수의 단위는 각변위/전압[rad/V]이므로 Fig. 9에서 포커스, 트랙 방향 주파수 전달함수와 레이디얼 틸트 방향 주파수 전달함수의 직접 비교는 할 수 없다. Fig. 11에는 편차발생시 각 방향의 단위응답 함수를 도시하였다. 포커스와 트랙 방향 그리고 레이디얼 틸트 방향에 대해 독립적인 전류인가에 의한 구동이 이루어질 때 단위응답 함수를 구한 결과이다.

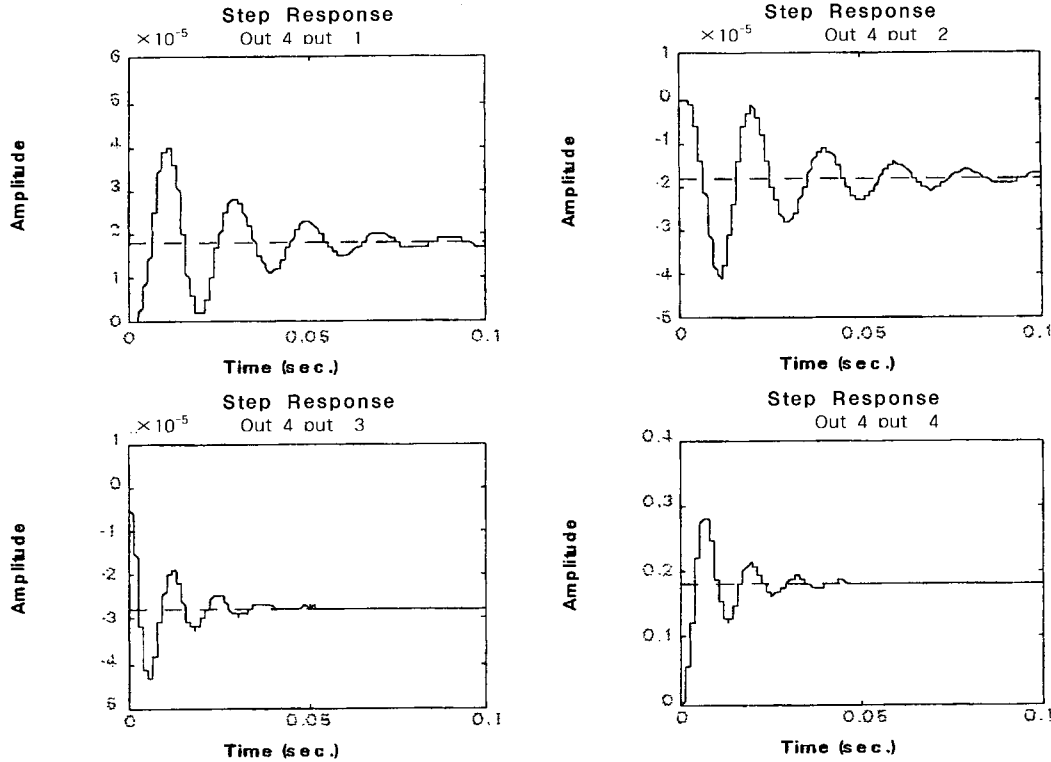


(a) Step response function in driving of focus direction



(b) Step response function in driving of track direction





(c) Step response function in driving of tilt direction

Fig. 11 Step response function in 3-axis tilt actuator in case there is the occurrences of deviation

Table 1 Sensitivity analysis according to occurrences of deviation in 3-axis tilt actuator

Item	$r_x$	$r_y$	$r_z$	$a_x$	$a_y$	$a_z$
Results						
Direction	Focus					
Deviation(mm)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Rotation(min)	17.0	13.0	12.0	15.0	13.0	13.0
Item	$r_x$	$r_y$	$r_z$	$a_x$	$a_y$	$a_z$
Results						
Direction	Track					
Direction(mm)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Rotation(min)	4.0	3.0	8.0	3.0	3.0	5.0

Table 1에는 3축구동 틸트 액추에이터에서 포커스와 트랙방향 구동시 단위응답 함수 및 보드선도로부터 구해진 민감도 분석 결과를 정리한 것이다. 편차의 크기에 따른 회전량의 크기를 살펴본 결과 트랙방향 구동에 비해 포커스방향 구동의 경우에 상당히 큰 회전량이 발생한다는 사실을 확인할 수 있었다. 이 결과는 액추에이터를 조립하여 포커스와 트랙 구동에 대한 회전량의 크기를 측정하고 결과 또한 포커스 구동시 회전량이 크게 나타나는 것으로 밝혀져 실험결과와 부합되는 것으로 판단된다. 따라서 액추에이터의 회전량 관리는 주로 액추에이

터의 포커스 방향 구동에 집중해서 관리할 필요가 있다고 판단된다. 그리고 편차의 크기에 따른 부공진의 크기를 계산한 결과 부공진의 경우에는 거의 발생하지 않았는데 그 원인은 주파수 전달함수의 계산이 가동부의 무게중심점을 기준으로 이루어졌기 때문이다. 그러나 틸트 방향 구동시 주파수 전달함수를 살펴보면 포커스나 트랙 방향 병진운동과의 연성에 의해 야기되는 부공진이 존재함을 확인할 수 있고 그 크기가 약 20° 수준으로 나타나 성능구현에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

### 2.6 실험 방법

동특성 실험장치는 Fig. 12와 같이 구성되어 있다. 실험방법은 HP Dynamic Signal Analyzer 장치에서 액추에이터에 모드실험 방법의 하나인 swept-sine 가진을 하여 레이저 도플러 속도계로 검출한 속도, 변위특성을 FFT 장치를 통해 분석하는 것이다. 레이저 도플러 속도계의 원리는 측정대상에 레이저를 조사하여 반사광과 도플러 효과에 의해 속도특성을 검출하는 것이며 변위특성을 측정하기 위해서는 적분기를 통과해야 한다. 이 장치를 이용하여 액추에이터에서 포커스와 트랙 방향 전달함수를 구할 수 있다.

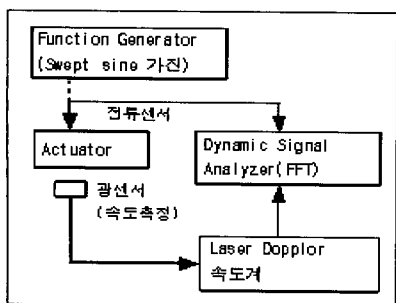


Fig. 12 Measurement constitution of actuator

### 2.7 실험 결과 및 분석

3축구동 틸트 액추에이터의 각방향 보드선도를 측정한 결과를 Fig. 13, Fig. 14, Fig. 15에 나타내었다. 포커스와 트랙방향을 포함한 병진방향 주파수 전달함수를 살펴보면 포커스나 트랙방향 구동시 레이디얼 틸트방향 회전운동과의 연성이 무시할 정도로 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 그러나 레이디얼 틸트방향 회전모드를 측정된 결과를 살펴보면 병진모드와의 연성이 발생하여 병진모드 주파수인 포커스와 트랙방향 1차공진주파수 부근에서 약 15~20° 크기의 부공진을 야기하는 것으로 나타나고 있다. 그 원인은 주로 틸트 코일을 포함한 가동부가 조립시 한쪽으로 치우쳐 있어서 무게 중심점과 힘 중심점간의 편차가 발생하였기 때문으로 판단할 수 있다. 그러나 포커스 방향과 트랙 방향 서보 루프에 비해 레이디얼 틸트 방향 제어기 개루프의 차단주파수(cut-off frequency)가 매우 낮게 설정되어 저주파수 대역의 제어가 이루어지기 때문에 상대적으로 큰 부공진이 존재하여도 서보의 성능에 별다른 영향이 없다고 할 수 있다.

Table 2에 3축구동 틸트 액추에이터에 대한 설계값과 평균 성능값의 비교를 나타내었다. 설계값과 평균 성능값을 비교한 결과 포커스와 트랙방향 고유진동수는 평균

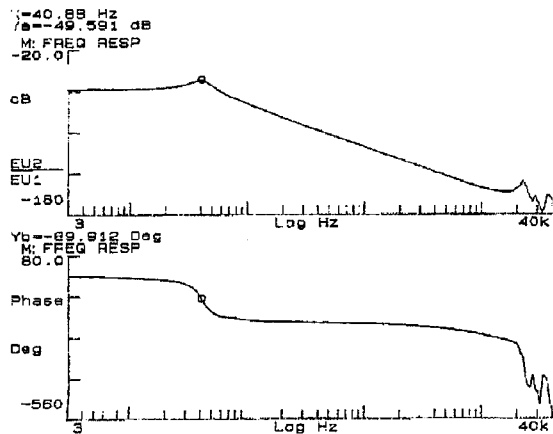


Fig. 13 Bode plot in focus direction

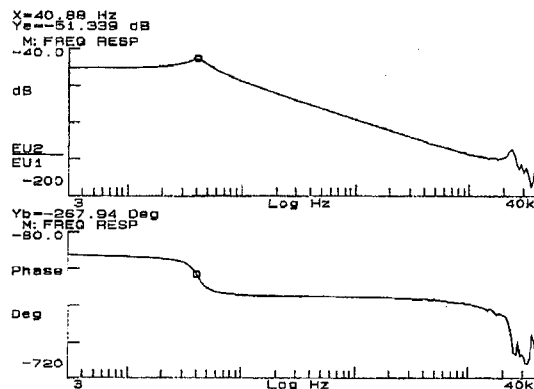


Fig. 14 Bode plot in track direction

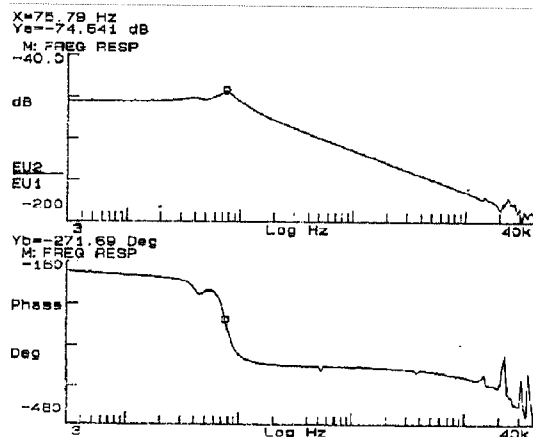


Fig. 15 Bode plot in radial tilt direction

성능값이 약간 낮게 나타나고 있는데 그 원인은 설계된 스프링 직경인 0.13 mm보다 선경이 작은 직경 0.125 mm의 스프링이 사용된 것에 주로 기인한다고 판단된다. 그리고 포커스와 트랙 방향의 DC감도는 스프링의 강성계수에 의해 결정되기 때문에 고유진동수와 마찬가지로 스프링의 직경 차이에 일부 기인하며, 자기회로내의 자속밀도값이 설계값에 비해 실제값이 떨어지는 데 따른 추력 저하에도 일부 기인된다고 판단된다. 그리고 포커스와 트랙 방향의 AC감도 또한 자기회로내의 자속 밀도값이 설계값에 비해 실제값이 떨어지는데 따른 추력 저하에 주로 기인한다고 유추할 수 있다. 자기회로내 자속밀도값의 저하는 주로 설계값보다 grade가 한단계 낮은 자석이 제작된 것에 기인한다고 볼 수 있다. 한편 틸트방향 고유진동수를 살펴보면 설계값에 비해 평균 성능값이 약간 높게 차이가 나타나며 큰 차이가 없는 것으로 보아 가동부에 대해 계산된 질량관성 모멘트에 대한 계산값과 실제값이 일치하고 있다는 사실을 유추할 수 있다. 그러나 틸트방향 DC감도와 AC감도는 설계값에 비해 평균 성

**Table 2** Comparison of design values and performance values in 3-axis tilt actuator

	Item	Design value	Performance value
F o c u s	Resonant Freq.(Hz)	44.8	42.4
	DC Sensitivity(mm/A) [mm/V]	5.3[1.2]	5.0[1.1]
	AC Sensitivity(G/A)[G/V]	39.1[8.5]	31.3[7.0]
	Rolling in movable range(mrad)	$\leq \pm 5$	$\leq \pm 5$
	Q factor(dB)	10.0	8.9
	Coil Resistance( $\Omega$ )	4.6	4.5
T r a c k	Resonant Freq.(Hz)	45.7	44.6
	DC Sensitivity (mm/A)[mm/V]	4.6[1.0]	3.9[0.8]
	AC Sensitivity(G/A)[G/V]	34.8[7.4]	25.7[5.5]
	Rolling in movable range(mrad)	$\leq \pm 5$	$\leq \pm 5$
	Q factor(dB)	10.0	9.6
	Coil Resistance( $\Omega$ )	4.7	4.7
T i l t	Resonance Freq.(Hz)	69.0	78.6
	DC Sensitivity(rad/A) [rad/V]	0.10[0.0250]	0.0681[0.0162]
	AC Sensitivity(rad/s <sup>2</sup> ) [rad/s <sup>2</sup> /V]	18488[4622]	10073[2398]
	Coil Resistance( $\Omega$ )	4.0	4.2

능값이 약 64% 수준으로 낮게 나타나고 있으므로 자기회로내의 자속밀도값에 대한 계산값에 비해 실제값이 40% 정도 낮게 나타나고 있다는 것을 유추할 수 있으며 자석의 잔류자속밀도값을 측정된 결과 실제값보다 약 30% 낮게 나타나는 것으로 나타났다. 따라서 틸트방향 DC감도와 AC감도는 자석의 재제작을 통해 높이는 방향으로 이루어질 수 있는 것으로 판단되었다. 한편 틸트방향 전달함수 측정 시 포커스나 트랙방향 병진운동과의 연성에 의해 야기되는 부공진은 크기가 약 20° 수준이고 틸트방향 고유진동수에 비해 낮은 주파수대역에서 발생하고 있기 때문에 저역 주파수대역에서 이득 증가를 통해 보상할 수 있는 수준으로 판단된다. 이상과 같이 액추에이터의 주파수 전달특성에 대한 평가 결과 매우 양호한 3축구동 액추에이터가 제작되었음을 확인할 수 있었고 그 결과 고밀도의 기록·재생을 위한 광기기장치에 다양하게 활용될 수 있는 틸트 보정 액추에이터의 개발이 이루어질 수 있게 되었다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 기존의 와이어 스프링 방식 2축구동

액추에이터에 추가로 회전운동을 위한 별도의 자기회로를 구비하여 디스크의 트랙 열을 기준으로 레이디얼 방향의 회전운동이 가능하도록 한 3축구동 액추에이터 모델을 고안하고 설계·제작한 결과를 제시하고자 하였다. 이러한 목적을 달성하기 위해 틸트 액추에이터 개발 과정에서 다음과 같은 작업들을 수행하였다.

(1) 각 방향 운동이 서로 연성되지 않고 원하는 성능이 확보되는 3축구동 액추에이터를 설계·제작하기 위한 목적으로 기본 설계도면을 작성한 후 중량해석, 진동해석, 자기회로 해석, 민감도 및 동특성 분석 등을 수행하여 설계 단계에서 중요한 기본성능을 확인하고 확보하기 위한 설계수정이 이루어질 수 있었고 제작시 예상되는 문제점을 분석하고 해결방안을 도출한 결과 우수한 성능 확보가 가능하였다.

(2) 동역학적 모델링이 된 3축구동 액추에이터 모델에 대해서는 부품간의 민감도 및 동특성에 관한 분석을 하여 각 부품의 제작공차 및 조립공차에 대한 분석결과를 도출하고 이 결과를 바탕으로 고안된 모델을 조립·평가하는 과정을 거쳤다.

(3) 고안된 모델에 대해 실제로 조립·평가하는 과정을 거쳐 고밀도 광기록기술에서 필요로 하는 정밀 3축구동 액추에이터를 개발한 결과를 제시하였다.

### 참 고 문 헌

- (1) Bouwhuis, G., Braat, J., Huijser, A., Pasman, J., Gvan Rosmalen, Schouhamer Irmink, K., 1986, "Principles of Optical Disc Systems", Adams Hilger Ltd., USA, pp. 7~87.
- (2) 김윤영, 이호철, 1996, "광픽업 지지부 초기설계를 위한 외팔보 구조진동해석", 한국소음진동공학회지, 제 6권 제 6호, pp. 763~770.
- (3) 김석중, 이용훈, 손용기, 이철우, 임경화, 1998, "고밀도 기록용 광픽업의 정밀 액추에이터 동특성 연구", 한국소음진동공학회지, 제 8권 제 1호, pp. 87~98.
- (4) 고상선, 류제하, 박기환, 정호섭, 1998, "고배속 CD-ROM용 비대칭형 광픽업 미세구동기의 구동특성", 한국소음진동공학회지, 제 8권 제 2호, pp. 346~352.
- (5) 정호섭, 오관영, 유익형, 1998, "FP 코일형 광픽업 액추에이터의 설계 및 부공진의 진동저감 대책", 한국소음진동공학회지, 제 8권 제 4호, pp. 643~653.
- (6) Makato, N., Isao, H., 1996, "Development of Two-Axis Actuator with Small Tilt Angles for One-Piece Optical Heads", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.35, pp. 392~397.

(7) Naomasa, T., Hiroharu, S., Hideaki, O., Koichi, N., Hisao I., Ikuo, K., 1997, "Digital Video Disk/Compact Disk(DVD/CD)-Compatible Pickup Head with Dual Lens Rotating Actuator", Japanese Journal Applied Physics, Vol.36, pp. 467~473.

(8) Niizawa, H., Tsuruta, H., Nakagawa, T., Sugaya, S., Yamanaka, Y., 1997, "A Compact and Stabilized Lens Actuator for DVD Drivers", Proceedings of the International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment, pp. 546~549

(9) Atsushi Ichikawa, Hiromitsu Mori, Masamichi

Itoh, 1997, "Development of High Acceleration Optical Disk Actuator", Proceedings of the International Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment, pp. 550~553.

(10) 한창수, 서현석, 이정현, 원종화, 김수현, 박윤근, 1998, "광디스크용 4와이어 구동기의 경사에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제15권 제7호, pp. 52~60.

(11) Motegi, Y., Nagasato, M., Ishbashi, Y., Someya, H., Kikuri, N., 1999, "Development of Tilt Servo System using 4-Axis Lens Actuator for Disc Tilt Compensation", ISOM/ODS'99, pp. 20~22.