

고밀도 기록용 광픽업의 ACTUATOR 동특성

'임경화', 이용훈, 김석중, 이재원'

(Dynamic Characteristics of Actuator for High Density Optical Recording Pick-Up)

(Kyung-Hwa Rim, Yong-Hoon Lee, Seok-Jung Kim, Jae-Won Lee)

1. 서론

미래 정보화 시대에서 중추적인 역할을 할 광판런 멀티미디어 장비들은 최근 관련 산업계에서 주목을 받기 시작하고 있고 특히 기존 VTR(Video Tape Recorder) 시장을 대체할 차세대 DVDR(Digital Video Disk Recorder)는 기술전쟁이라고 할 정도로 선진 기업의 연구가 치열해지고 있다. DVDR 시스템에서는 그림1에서 보는 바와 같이 필요한 정보들을 레이저빔을 이용한 광학신호로 바꾸어 광디스크에 기록, 재생하는 광픽업이 절대적으로 필요하게 된다. 그런데 광픽업의 위치추종기구인 Actuator는 정확한 위치추종($\pm 1\mu\text{m}$ 오차이내)을 할 수 있는 성능이 요구되며 서보의 특성상 20KHz 이하에서 불필요한 모우드가 가진되지 않는 정밀부품이어야 하므로 Actuator 각 부품의 동적인 특성을 명확히 규명할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 우선 Actuator 각 부품과 가동부 전체의 중량 및 진동해석을 통해 동특성을 조사하였다. 그리고 Actuator의 중요한 기본성능중 하나인 구동감도 확보여부를 검토할 필요가 있기 때문에 유한 요소법 프로그램인 ANSYS를 이용하여 자기회로 부분에 대한 해석을 구하였다. 또한 가동부와 자기회로 등 하위부품을 조립하는 과정에서 발생하는 조립오차로 인해 불필요한 공진과 회전현상이 야기될 수 있으므로 동특성 및 문제점 파악을 위한 민감도 분석이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 가동부의 관성 모멘트값과 강체에 대한 일반식을 이용한 자체 프로그램을 작성하여 조립공차를 구하였다. 이와같은 과정을 통해 구해진 설계값을 바탕으로 실제 제작된 Actuator에 대해서는 비접촉식 측정방법을 통해 동특성값을 측정하였고 이를 해석값과 상호 비교하였다

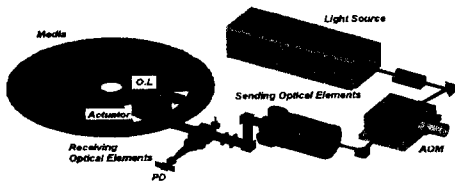


그림 1. 고밀도 기록용 광픽업

· 삼성종합기술원 V-T/F팀

2. 본론

2.1 Actuator 개요

광픽업의 위치추종기구인 Actuator는 그림2와 같이 x(트래킹)방향과 z(포커싱)방향으로 거의 완벽하게 각각 1자유도계로 지지한 다음에 영구자석 자계에 의한 가동코일 형태로 운동을 하여 원하는 위치에 대물렌즈를 이동시킨다. 이때 가동부에는 강성과 감쇠 특성을 갖는 지지대로 고정시켜 원하는 주파수 특성을 갖도록 설계를 한다. 가동부는 서로 수직인 두 방향인 포커싱과 트래킹 방향으로 병진 운동을 하고, 회전이나 비틀림과 같은 불필요한 진동이 없이 운동이 이루어지도록 하여야 한다.

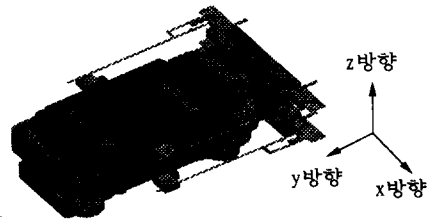


그림 2. Actuator 형태

2.2 동적 해석 및 실험

유한요소법 프로그램인 ANSYS 5.0을 이용하여 Actuator를 모델링한 다음 중량과 진동해석을 수행하여 Actuator를 구성하는 각 부품과 가동부 전체의 동특성을 구하였다. Actuator의 각 부품과 가동부의 중량을 해석하는 목적은 가동부의 지지점 중심, 무게중심 그리고 구동력 중심을 일치시켜 불필요한 모우드가 가진되지 않기 위함이다. 그림3에는 가동부를 구성하는 각 부품들의 형상을 나타내었다. 그림3처럼 Actuator 가동부는 보빈, 대물렌즈, 포커스와 트래코일, 무게밸런스(Weight Balancer) 등으로 구성되어 있는데 중량해석을 위해서는 이들 각 부품들의 정확한 재질과 밀도를 알아야 한다. 표1에는 각 부품들의 재질과 밀도를 나타내었고, 표2에는 각 부품의 형상 및 위치변경 등 조정을 통해 최종적으로 구해진 중량해석 결과를 나타내었다. 해석에 의한 가동부의 무게는 1.41g이고 실제로 제작된 경우의 무게는 1.37g이므로 해석값과 실제값의 차이는 무시할만한 수준이라고 판단된다.

표 1. 각 부품의 재질과 밀도

부 품	재 질	밀도 (Kg/m ³)
보 빈	플라스틱	1620
렌 즈	유 리	3400
W. B.	황 동	8750
코 일	폴리우레탄	6480
스프링	동	7920

표 2. 중량해석

구 분	해석값	
Mass (g)	1.41	
지지중심 (mm)	x (track)	0.00
	y (jitter)	0.00
	z (focus)	3.00
무게중심 (mm)	x (track)	0.00
	y (jitter)	0.02
	z (focus)	3.04



그림 3. 가동부를 구성하는 각 부품들의 형상
동적해석은 가동부의 초기 공진주파수, 정밀제어

를 위한 고차 공진의 위치파악을 통한 형상의 최적화, 재질 및 조립조건의 최적화 등을 달성하기 위한 작업이라고 할 수 있다. 해석은 유한요소법 프로그램인 ANSYS 5.0을 이용하였다.

Actuator의 경우 네개의 외팔보로 된 스프링이 점탄성 재료의 부착으로 감쇠처리되고 회전관성 모멘트가 비교적 큰 집중질량(가동부)에 의해 서로 견고하게 연결되어 있는 모델이다. 진동해석을 위한 모델링에서 스프링은 셸요소(shell element)에 의해 모델링되고 가동부는 고체요소(solid element)에 의해 모델링되었다. 그림4에 고유치 해석의 결과 구해진 가동부의 6개 강체 모우드를 나타내었다.

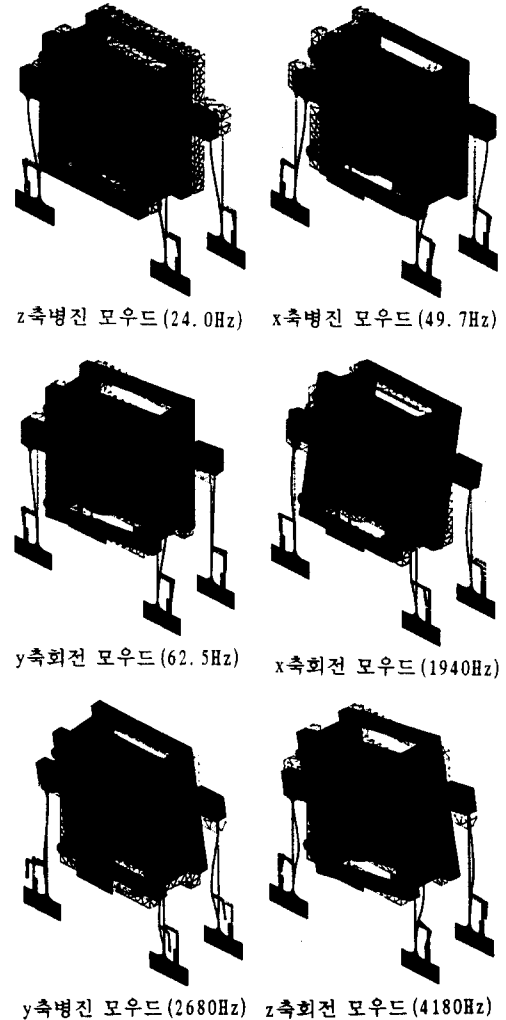


그림 4. 해석에 의한 가동부의 6개 강체 모우드
동특성 실험장치는 그림5와 같이 구성되어 있다. 실험

방법은 Dynamic Signal Analyzer에서 Actuator에 정현파(sine wave) 가진을 하여 레이저 도플러(Laser Doppler) 속도계로 검출한 속도, 변위특성을 FFT 장치를 통해 분석하는 것이다. Laser Doppler 속도계의 원리는 측정대상에 레이저를 조사하여 반사광과 도플러 효과에 의해 속도특성을 검출하는 것이며 변위특성을 측정하기 위해서는 적분기를 통과해야 한다. Actuator 가동부의 강제 모우드를 구하기 위해서는 포커스와 트랙 방향으로 보빈에 대해 각기 4개 이상의 점을 설정하고 각점의 주파수 응답함수(Frequency Response Function)을 구하면 된다. 이때 가동부는 포커스 혹은 트랙 방향으로 정현파 가진이 되도록 한다.

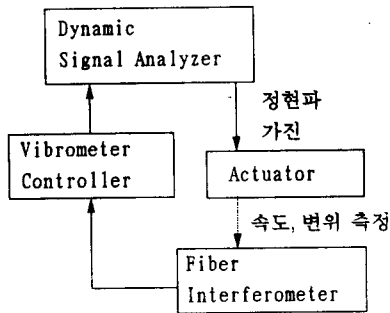


그림 5. 동특성 실험장치

표3에는 실험을 통해 구한 6개 강제 모우드에 대한 주파수를 해석에 의한 결과와 비교하였다.

표 3. 가동부의 6개 강제 모우드에 대한 해석과 실험의 비교

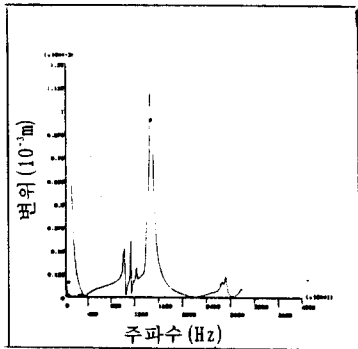
구 분	해석값(Hz)	측정값(Hz)
z축 병진	24.0	24.8
x축 병진	49.7	50.2
y축 회전	62.5	62.0
x축 회전	1940	1340
y축 병진	2680	2110
z축 회전	4180	2840

표3에서 보는 바와 같이 6개 강제 모우드를 실험적으로 구한 결과 해석값과 차이를 보이고 있다. z축 병진, x축 병진, y축 회전모드의 경우는 해석값과 측정값이 거의 일치하고 있는 반면에 x축 회전, y축 병진, z방향 회전모드는 차이가 크게 나타나는데 이는 스프링의 폭과 두께가 약 0.1mm이므로 buckling현상이 나타날 수 있음과 경계조건 모델링의 부족에 기인한다고 판단된다. 일반적으로 부공진 발생원인의 규명을 위해 가동부의 6개 강제 모우드의 해석과 측정은 이루어지게

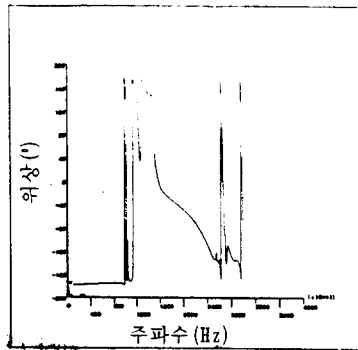
된다. 즉, Actuator에서 신호를 입력하는 대물렌즈가 부착되어 있는 가동부는 z축 병진, x축 병진의 2축 자유도 모델로 운동이 이루어지도록 되어 있는데 다른 방향의 강제 모우드와의 연성(coupling)에 의해 부공진이 발생한다. 따라서 부공진이 나타나는 위치와 관련된 강제 모우드를 알게 되면 그 모드를 가진시키거나 발생하도록 하는 구조적인 원인을 찾아 제거시키는 방법으로 부공진의 원인규명과 대책을 세울 수 있게 된다.

대물렌즈가 직접 접촉되어 있는 보빈의 경우 저주파수 대역에서는 강제 특성을 나타내지만 고주파수 대역에서는 자체의 진동 모우드에 의해 변형되는 탄성체 특성을 나타내게 되어 불필요한 진동을 야기하게 된다. 따라서 고주파수 대역에서 불필요한 진동의 발생이 없도록 하기 위해서는 보빈 자체의 진동 모우드를 높은 주파수로 이동시키고 진폭은 작게 해 줄 필요가 있다. 이는 보빈의 재질변경, 형상변경을 통해 가능한데 그 목적을 위한 해석수단으로 유한요소법에 의한 보빈의 고유치 해석과 주파수 응답법을 사용할 수 있다. 주파수 응답법은 보빈의 특정 위치에 대해 Actuator의 운동방향인 z축 병진, x축 병진방향으로 주기적인 조화 가진력(Harmonic force)을 관심영역 주파수 범위에서 가하고 이때 가동부 임의점의 변위 응답과 위상응답을 구하는 방법이다. 이 방법을 통해서 변위응답이 피크를 나타내고 위상응답의 경우 180° 회전하는 주파수를 구하게 되면 보빈의 고유치 해석 결과 구해지는 진동 모우드중 주로 어느 모우드에 의해 불필요한 진동이 발생하는지를 알 수 있으므로 고주파수 대역에서 발생하는 불필요한 진동과 관련된 보빈 자체의 진동 모우드를 선정하는데 매우 효과적인 방법이라고 할 수 있다. 그림6에는 보빈의 한 점에서 x축 방향의 주파수 응답 결과를 변위응답과 위상응답으로 나타내었다. 그림6에서 15.6KHz부근에 변위응답이 피크를 나타내고 위상의 경우 회전을 알 수 있는데 이는 보빈 자체의 진동모드에 의해 발생하는 고주파수 영역에서의 부공진이라고 할 수 있다. 표4에는 보빈 자체의 진동모드에 의해 야기된 불필요한 진동의 해석값과 측정값의 비교를 나타내었다.

이상과 같이 Actuator의 중량, 고유치 해석과 주파수 응답법을 통해 부공진의 위치와 원인 규명, 대책수립 등에 필요한 정보를 획득할 수 있다. 즉, 중량 해석을 통해 무게 불균형에 의한 부공진 영향 제거, 무게의 정확한 예측에 의한 설계의 정확성을 기할 수 있으며 가동부의 6개 강제 모우드를 구함으로써 부공진의 위치와 원인규명을 용이하게 할 수 있다. 그리고 보빈의 고유치 해석과 주파수 응답법을 통해 고주파수 영역에서의 부공진의 위치와 원인규명, 대책마련을 할 수 있다.



(a)



(b)

그림 6. 주파수 응답법에 의한 (a) x축 방향 변위응답
(b) x축 방향 위상응답

표 4. 2차공진에 대한 해석과 실험의 비교

구 분	해석값 (KHz)	측정값 (KHz)
z축 병진	25.7	20.6
x축 병진	15.6	16.8

2.3 자료 해석과 실험

Actuator에서 필요한 구동감도 확보여부를 검토하기 위하여 자기회로 부분에 대한 해석을 하였다. 자기회로중의 자속밀도는 통상 Permeance법에 의해 구해질 수 있는데 누출자속, 요크와 자석의 비선형성을 고려한 자기회로의 상세한 검토를 위해서는 유한요소법에 의한 자기회로 해석이 필요하다. 본 연구에서는 먼저 유한요소법에 의한 자기회로 해석값을 구하고 실제로 구현된 자기회로내의 자속밀도 측정결과를 비교하였다. Actuator에서 자기회로는 그림7에 나타낸 바와 같이 자석, 요크, 공기간극 등으로 구성되어 있다. 자석의 잔류자속밀도는 11.5KG, 보자력은 11K0e이다. 요크의 재질은 순철로 되어있으며 B-H선도는 측정을 통해 구하였다. 해석에 사용된 프로그램은 마찬가지로

ANSYS 5.0이다.

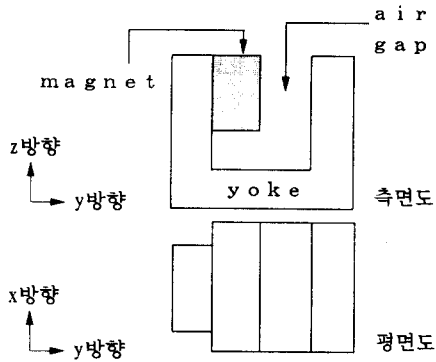


그림 7. Actuator 자기회로

그림8은 자기회로의 z방향(포커스 방향) 자속밀도 분포를 나타낸 것인데 가장 높은 자속밀도값을 가지는 부분은 자석의 z방향 중간지점이며 이 지점 상하로 일정한 간격은 거의 동일한 자속밀도 분포를 나타내고 있다. 그리고 자석 밑부분과 요크 사이의 공기간극(Undergap)의 경우는 크기가 클수록 z방향 자속밀도 분포의 대칭성이 성립함을 알 수 있었다. 그림9는 자기회로의 x방향(트랙 방향) 자속밀도 분포를 나타낸 것인데 가장 높은 자속밀도값을 가지는 부분은 자석의 x방향 중간지점이며 이 지점 좌우로 일정한 간격은 거의 같은 자속밀도값을 갖는다. 그리고 요크쪽 부근 공기간극에서는 자속밀도값의 변화폭이 크고 자석쪽 부근에서는 그 변화폭이 적음을 알 수 있었다.

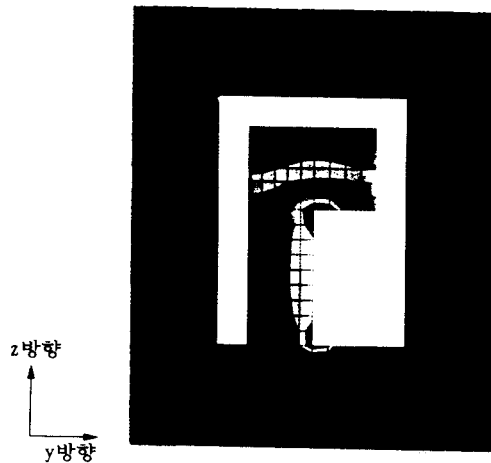


그림 8. 해석에 의한 자기회로의 z방향 자속밀도 분포

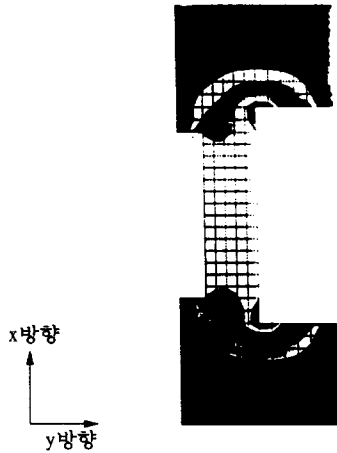


그림 9. 해석에 의한 자기회로의 x방향 자속밀도 분포

그림10은 해석과 측정에 의해 구해진 z방향의 자속밀도값을 나타낸 것이다.

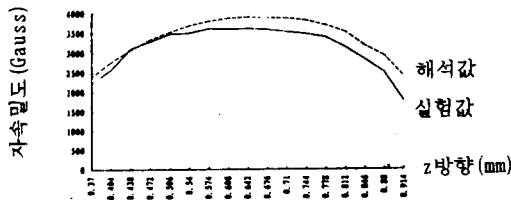


그림 10. z방향 자속밀도값의 해석과 측정

그림11은 x방향 자속밀도 분포를 나타낸 것이다. 측정값과 해석값의 차이는 약 0.3G정도로 10%이내의 오차이다. 차이가 발생한 원인은 해석과정에서 설정된 경계조건이 정확하게 실제 경계조건을 만족시키지 못한 점과 측정오차 등에 기인한다고 판단된다. 실제로 본 모델에서 공기간극의 크기가 협소한 점 때문에 정확한 측정을 하기가 힘든 점이 측정값의 오차를 유발시킬 가능성이 있다고 생각된다.

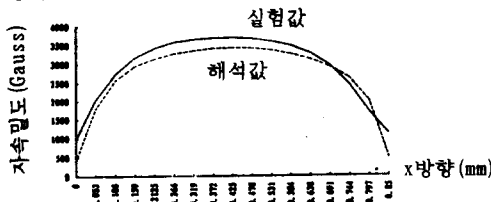


그림 11. x방향 자속밀도값의 해석과 측정

2. 3 부공진과 회전 해석

Actuator는 여러 종류의 하위부품으로 구성되어

있으므로 이들 하위부품을 조립하는 과정에서 발생할 수 있는 조립오차가 최종적으로 조립된 Actuator의 성능에 어느정도의 영향(부공진량과 회전량)을 미치는가에 대한 민감도 분석이 필요하다. 부공진과 회전의 야기원인은 크게 입력인 가진힘에 의한 것과 시스템에 의한 것으로 분류할 수 있다. 입력인 가진힘에 의한 것은 힘 불균형이며 시스템에 의한 것은 가동부의 무게 불균형, 스프링 강성 차이, 스프링 부착 위치의 차이 등을 들 수 있다. 본 연구에서는 Actuator 모델링을 통해 구해진 관성 모멘트값과 강체에 대한 일반식을 이용하여 부공진과 회전의 야기원인에 대해 각각의 발생량을 계산함으로써 중요한 요인을 분석하고자 하였다. Actuator는 그림 12처럼 간략히 모델링될 수 있다. 무게중심은 G점이며 무게중심과 지지점과의 길이는 a_x, a_y, a_z 로 나타내었다. 스프링의 포커스와 트랙방향 강성은 k_x, k_z 이고 지터방향 강성은 k_y 이다.

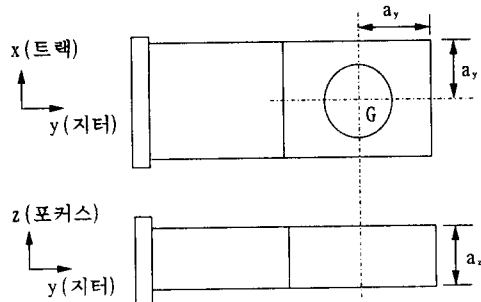


그림 12. Actuator 모델링

모델에 대해 강체의 운동방정식을 구하면 다음과 같다.

$$m\ddot{x}_c + \sum k_x^* x_c + \sum k_x^* a_z \beta - \sum k_x^* a_y \gamma = F_x \quad (1)$$

$$I_{xx}\ddot{\alpha} - \sum k_y^* a_z \gamma_c + \sum (k_y^* a_z^2 + k_z^* a_y^2) \alpha - \sum k_x^* a_x a_y \beta - \sum k_x^* a_x a_z \gamma = M_x \quad (2)$$

$$m\ddot{y}_c + \sum k_y^* y_c + \sum k_y^* a_z \gamma - \sum k_y^* a_x \alpha = F_y \quad (3)$$

$$I_{yy}\ddot{\beta} + \sum k_x^* a_x x_c - \sum k_x^* a_x z_c - \sum k_x^* a_x a_y \alpha - \sum (k_x^* a_z^2 + k_z^* a_x^2) \beta - \sum k_x^* a_x a_z \gamma = M_y \quad (4)$$

$$m\ddot{z}_c + \sum k_z^* z_c + \sum k_x^* a_x \alpha - \sum k_x^* a_z \beta = F_z \quad (5)$$

$$I_{zz}\ddot{\gamma} - \sum k_x^* a_x x_c + \sum k_y^* a_x \gamma_c - \sum k_y^* a_x a_z \alpha - \sum k_x^* a_x a_z \beta + \sum (k_x^* a_y^2 + k_z^* a_z^2) \gamma = M_z \quad (6)$$

운동 방정식에서 Σ 는 가동부를 지지하는 네개 스프링의 강성의 합을 나타내며 $k^* = k(1 + 0.1j)$ 는 스프링의 점성을 고려한 강성계수를 의미한다. 회전과 부공진의 현상을 모델화하기 위해서는 병진방향 힘의 평형식과 회전방향 모멘트 평형식의 연성(coupling)이 성립되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 다른 방향 강성에 비해 비교적 강성이 작은 k_x, k_z 에 관련된 힘의 평형식인 식(1), (5)와 y-rot 방향 강성계수에 관련된 식(4)의 연성을 가정하여 각각의 원인에 대한 부공진과 회

전량의 크기를 구하였다.

부공진의 크기는 전달함수상의 위상 특성의 혼란을 나타내는 물리량이므로 다음과 같은 과정을 통하여 구할 수 있었다. 즉 연성된 운동방정식을 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[m]\{\ddot{q}(t)\} + [k^*]\{q(t)\} = \{Q(t)\} \quad (7)$$

식(7)의 양변을 양변을 Laplace Transform한 다음 정리하면 다음과 같이 전달함수로 표현될 수 있다.

$$\{\bar{q}\}/\{\bar{Q}\} = (s^2[m] + [k^*])^{-1} = [Z(s)]^{-1} = [G(s)] \quad (8)$$

식(8)에 $s = j\omega$ 를 대입하여 전달함수를 magnitude와 위상 특성으로 표시하는 과정을 거치게 되면 부공진 위상의 크기를 구할 수 있게 된다.

회전량의 크기는 부공진의 크기를 구하는 과정과 동일한데 일반화 된 변위 $\{\bar{q}\}$ 를 병진 변위와 회전 변위의 두가지 경우에 대해 계산하게 된다. 수식에 적용된 관성 모멘트값은 Actuator의 동적 해석을 위한 모델링 과정에서 구하였다. 실제로 보빈을 포함한 가동부는 형상이 상당히 복잡하고 밀도가 각기 다른 여러가지 재질로 구성되어 있으므로 3차원 모델링을 거치지 않고서는 정확한 관성 모멘트값을 구하기가 힘들다. 표5에는 각각의 야기 원인에 대해 부공진의 크기를 나타내었고 표6에는 회전량의 크기를 나타내었다.

표 5. 부공진 야기원인과 위상크기

부공진 야기원인	편차 방향	민감도 ('/mm) (포커스 구동)	민감도 ('/mm) (트랙구동)
무게 불균형	x	23.0	0.0
	z	0.0	37.4
강성 불균일		0.03 ¹	0.08 ²
위치비대칭	x	6.7	0.0
	z	0.0	9.0

¹: '/%(z방향 강성편차비), ²: '/%(x방향 강성편차비)

표 6. 회전 야기원인과 크기

회전 야기원인	편차 방향	민감도 ('/mm) (포커스 구동)	민감도 ('/mm) (트랙구동)
무게불균형	x	27.0	0.0
	z	0.0	38.2
힘불균형	x	23.0	0.0
	z	0.0	37.4
강성 불균일		0.37 ¹	0.11 ²
위치비대칭	x	6.7	0.0
	z	0.0	9.0

¹: '/%(z방향 강성편차비), ²: '/%(x방향 강성편차비)

부공진 위상과 회전량의 크기에 대한 민감도를 각각의 야기원인에 대해 구해본 결과 무게 불균형과 힘 불균형이 주된 요인으로 나타났다. 실제로 실험결과를 토대로 Actuator 성능을 저해하는 중요 불량요인을 점검해 본 결과 무게 불균형과 힘 불균형 문제가 주로 부공진과 회전을 야기하는 것으로 나타나 본 연구의 타당성을 입증할 수 있었다.

3. 결 론

Actuator에 대한 동특성 규명을 위한 해석과 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 구하였다.

1. 중량해석을 통해 무게 불균형에 의한 부공진 제거, 무게의 정확한 예측에 의한 설계의 정확성을 기할 수 있었고 가동부의 6개 강체 모우드를 구함으로써 부공진의 위치와 원인규명을 용이하게 할 수 있었다. 또한 보빈의 고유치 해석과 주파수 응답법을 통해 고주파수 영역에서의 부공진의 위치와 원인규명, 대책마련을 할 수 있었다.
2. 자기회로 부분에 대한 해석과 실험을 수행함으로써 Actuator에 필요한 구동감도 확보여부를 검토하였다.
3. Actuator 모델링을 통해 구해진 관성 모멘트값과 강체에 대한 일반식을 이용하여 부공진과 회전의 야기 원인에 대해 각각의 발생량을 계산함으로써 주요 요인의 영향도 분석을 하였다. 이 결과 제작된 Actuator의 부공진과 회전량을 줄이는데 본 연구결과의 활용이 가능하였다.

참고문헌

1. Alan B. Marchant, 'Optical Recording,' Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
2. 'ANSYS User's Manual for Revision 5.0,' Swanson Analysis Systems, Inc., 1993.
3. Cyril M. Harris, 'Shock and Vibration Handbook,' McGRAW-HILL Book Company, 1988.
4. Leonard Meirovitch, 'Analytical Methods in Vibrations,' The Macmillan Company, 1967.
5. K. Kawakami et al., 'Development of the Super Compact Optical Pickup,' IEEE Translation Journal on Magnetics in Japan, Vol. 3, No. 4, April, 1988, pp. 310-321.