

감도해석을 이용한 광픽업 액추에이터의 렌즈홀더 설계

°이 동주* 이 경택* 김 철진* 박 노철* 양 현석** 박 영필**

Lens-Holder Design in Pick-up Actuator using Sensitivity Analysis

Young-Pil Park**, Hyun-Seok Yang**, No-Cheol Park*, Chul-Jin Kim*,
Kyung-Taek Lee*, Dong-Joo Lee*

ABSTRACT

In order to modify flexible mode frequencies, finite element analysis is applied for a lens-holder in pick-up actuator. Several design parameters like shape and local dimension of a lens-holder were selected adequately and sensitivities of the design variables for vibration modes were obtained by FE analysis and this result was used for updating FE model. A sensitivity matrix between the natural frequencies and the design variables was calculated by finite difference method. By comparing the calculated natural frequencies with target frequencies, modification of the design variables was acquired and used for improving FE model. Calculated natural frequencies after several iterations by FE analysis coincided with target frequencies and the errors between them were minimized.

1. 도입

광디스크장치에서 광픽업 액추에이터는 대물렌즈를 정밀하게 구동하여 원하는 트랙의 정보를 읽고, 쓰게 하는 장치이다. 근래 고속, 대용량 광디스크장치를 위한 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있으며, 이에 따라 제어대역을 확장할 수 있도록 동특성이 개선된 광픽업 액추에이터가 필요하게 되었는데, 넓은 제어대역안에 불필요한 부공간이

적절히 억제되어야 한다. 이를 위해 렌즈홀더를 강체로 해석하는 연구[1]가 있었으며, 렌즈홀더를 유연한 구조물로 보고 이를 해석하여 제어계에 미치는 영향을 분석하고, 고주파대역으로 이동시키는 것에 관한 연구[2,3]가 있었다. 한편 고속성에 대응하기 위해서는 액추에이터내의 가동부의 무게를 감소시킬 필요가 있다. 가동부의 무게를 줄이기 위해서는 대물렌즈, 렌즈홀더, 코일 등의 크기를 줄여야하지만 대물렌즈의 경우 검출되는 광신호의 품질을 만족시키는 범위내에서는 설계변화의 여지가 적으며, 코일의 경우 발생하는 구동력과 직접적인 관계가 있으므로 변경설계가 용이하지 못하다. 또한 렌즈홀더에 대해 저중량화를 꾀하는 경우 강성의 저하가 일어나게 되어, 렌즈홀더의 변형모드

* 연세대학교 정보저장기연구센터

** 연세대학교 기계공학과

로 인해 제어계 설계의 마진이 적어지거나, 안정성에 악영향을 미칠 수 있다.

본 논문에서는 감도해석법을 도입하여 렌즈홀더의 질량 증가를 최소화하면서 강성을 올려 렌즈홀더의 변형모드 주파수를 높이기 위한 방안을 연구하였다.

2. 감도해석 이론

동적인 외력을 받는 기계구조물을 설계하는 경우, 유한요소해석을 통해 제작 전에 충분한 검토를 거쳐 만족할 만한 설계안을 구하는 것이 일반적인 설계과정이다. 그러나 동적으로 만족할만한 결과를 갖지 못하는 경우 설계변경과 해석을 시행착오적으로 반복하는 경우가 많은데, 이는 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라, 체계적인 방법이라 할 수 없다. 이때 유용한 방법으로는 감도해석[4]을 들 수 있다. 설계변수(Design variable)에 대한 목적변수(Modal parameter)의 변화를 계산함으로써 설계변경 후의 특성에 대한 예측이 가능하고, 계가 불확실한 요소를 포함하고 있는 경우, 그 오차가 계의 동특성에 어느 정도 민감하게 영향을 주는가를 파악하는 데에도 유용한 수단이다.

2.1 고유진동수의 감도

비감쇠 계의 고유치 문제는 다음과 같이 나타낼 수 있다[5].

$$[K] - \lambda_r [M] \phi_r = 0 \quad (1)$$

여기에서, λ_r 은 r 번째 고유치를, ϕ_r 는 r 번째 고유모드를 의미한다. 고유치 λ_r 의 설계변수 ζ_i 에 대한 감도를 구하면

$$\frac{\partial \lambda_r}{\partial \zeta_i} = \phi_r^T \left\{ -\frac{\partial [K]}{\partial \zeta_i} - \lambda_r \frac{\partial [M]}{\partial \zeta_i} \right\} \phi_r \quad (2)$$

이 된다. 위 식으로부터 고유진동수 f_r 의 감도를 구하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial f_r}{\partial \zeta_i} = \frac{1}{8\pi^2 f_r} \phi_r^T \frac{\partial [K]}{\partial \zeta_i} \phi_r - \frac{f_r}{2} \phi_r^T \frac{\partial [M]}{\partial \zeta_i} \phi_r \quad (3)$$

2.2 유한차분법에 의한 고유진동수의 감도

설계변수에 대한 고유진동수의 감도행렬을 구하기 위해서는 모델의 강성행렬, 질량행렬의 설계변수에 대한 미분값과 고유벡터가 필요하다. 그러나 모델의 구조가 복잡하거나 유한요소의 수가 많은 경우, 또는 행렬을 설계변수에 대해 함수화가 어려운 경우 적용이 쉽지 않다.

이러한 경우 특정 조건에서의 질량 및 강성행렬을 설계변수에 대한 차분의 형태로 근사화해서 위의 식 (3)에서 필요한 미분행렬을 구할 수 있다. 식 (3)으로부터 고유진동수를 차분의 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\Delta f_r}{\Delta \zeta_i} = \frac{1}{8\pi^2 f_r} \phi_r^T \frac{\Delta [K]}{\Delta \zeta_i} \phi_r - \frac{f_r}{2} \phi_r^T \frac{\Delta [M]}{\Delta \zeta_i} \phi_r \quad (4)$$

이렇게 구해진 고유진동수에 대한 감도를 사용하게 되면 근사화의 한계상 한번의 계산만으로 목표치에 도달할 수 없기 때문에 반복계산을 통해 근접시킬 수 있다.

한편 임의의 계의 강성 및 질량 행렬을 구해서 계산하는 방법 외에, 실제적인 형상 등을 목적변수로 선택하여 설계변수에 대한 감도를 구하는 방법으로 효과적인 설계변경을 피할 수 있는데, 간단한 계산을 통해 원하는 결과를 빨리 얻을 수 있는 장점이 있는 반면에 결과에 대한 수렴성과 정확성은 다소 떨어진다. 이 방법을 자세히 설명하면 다음과 같다.

i) 구조 변경을 위해 설계변수 ζ_i ($i=1, 2, \dots, m$) 를 결정한다. 주로 대상계의 두께, 치수, 영율 등이 적당한 설계변수가 된다. 설계변수의 오차벡터 $\Delta \zeta$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta \zeta = [\Delta \zeta_1, \Delta \zeta_2, \dots, \Delta \zeta_m]^T \quad (5)$$

이때 특정 조건에서 설정된 설계변수 ζ_C 와 원하는 목적변수를 얻기 위해 유한요소해석에 입력되어야 할 목표 설계변수를 ζ_E 라 하면 오차벡터는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta \zeta = \zeta_E - \zeta_C \quad (6)$$

ii) 만들어진 FE 모델로부터 목적변수벡터 θ 를 구한다.

$$\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_s]^T \quad (7)$$

이때 원하는 목적변수의 목표치를 θ_E 라 하고, 현재의 FE 모델로부터 구해진 값을 θ_C 라 하면, 오

차벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta\theta = \theta_E - \theta_C \quad (8)$$

iii) 유한차분법에 의한 감도행렬을 구하게 되며 설계변수에 대한 목적변수의 1계 감도는 다음과 같이 표현된다.

$$Z = \begin{bmatrix} \frac{\Delta\theta_1}{\Delta\xi_1}, & \frac{\Delta\theta_1}{\Delta\xi_2}, & \dots, & \frac{\Delta\theta_1}{\Delta\xi_m} \\ \frac{\Delta\theta_2}{\Delta\xi_1}, & \frac{\Delta\theta_2}{\Delta\xi_2}, & \dots, & \frac{\Delta\theta_2}{\Delta\xi_m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\Delta\theta_s}{\Delta\xi_1}, & \frac{\Delta\theta_s}{\Delta\xi_2}, & \dots, & \frac{\Delta\theta_s}{\Delta\xi_m} \end{bmatrix} \quad (9)$$

또한 구조변경에 따른 원하는 목적변수의 변화는 다음과 같다.

$$\Delta\theta = Z\Delta\xi \quad (10)$$

iv) 식 (10)을 사용하여 모드 튜닝을 하게 되며, 목표치와 수정된 FE 모델로부터 구해진 값의 차이인 목적변수의 오차벡터 $\Delta\theta$ 를 구한 후, 다음 식 (11)에 입력하여 계산하면 변경해야하는 설계변수의 크기 $\Delta\xi$ 가 구해진다.

$$\Delta\xi = Z^{-1}\Delta\theta, \quad s = m \quad (11)$$

일반적으로 목적변수의 개수 s 는 설계변수의 개수 m 과 같지 않다. 만약 s 가 m 보다 작으면, 최소자승법(least square method)을 사용하여 식 (11)을 구하게 된다. s 가 m 보다 크면, 의역행렬법(pseudo-inverse method)을 이용하여 식 (11)을 구하게 된다.

$$\Delta\xi = Z^T(ZZ^T)^{-1}\Delta\theta, \quad s < m \quad (12)$$

$$\Delta\xi = (Z^T Z)^{-1}Z^T\Delta\theta, \quad s > m \quad (13)$$

v) 위에서 구해진 새로운 설계변수의 변화를 기존의 설계변수에 추가하여 이를 새로운 설계치로 하는 유한요소해석을 하게 되는데, 목적변수의 변화 폭이 설정된 수렴조건내에 부합될 때까지 이 모든 과정을 반복하게 된다.

$$\xi_{i+1} = \xi_i + \Delta\xi \quad (14)$$

한편 설계변수의 변경량이 과도하게 되면 목표값으로 진행하지 못하고 발산할 우려가 있다. 그래서 다음과 같은 가중치(weighting factor) C_f 를 부여하여 설계변경량을 적절히 줄일 수 있다.

$$\Delta\xi_i^* = C_f \cdot \Delta\xi_i, \quad 0 < C_f \leq 1 \quad (15)$$

여기에서 $\Delta\xi_i^*$ 는 수정된 설계오차변수벡터의 i 번째 행의 성분이 된다.

3. 감도해석에 의한 렌즈홀더의 구조변경

렌즈홀더의 변형모드 중에서 디스크 위에 기록된 신호를 읽어내는 대물렌즈의 거동에 영향을 주며, 광픽업 액추에이터의 제어대역에 최대한 근접한 주파수를 갖는 모드의 공진주파수를 목적변수로 선정하였다. Fig. 1에 선정한 목적변수, 즉 변경하고자 하는 모드를 나타내었다.

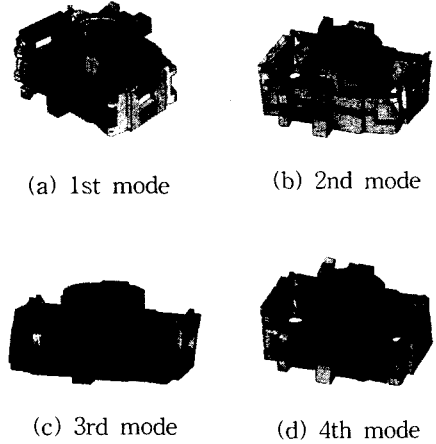


Fig.1 Selected modes for frequency modification.

시뮬레이션을 통해 위에서 정한 모드의 주파수에 영향을 크게 미치는 부분을 찾아내고, 그 부분의 치수를 설계변수로 선정하였다.

Fig. 2는 몇 개의 구조변경 안을 나타낸 것이다. 우선 현재 설계되어 있는 렌즈홀더를 유한요소해석을 통해 분석하였다. 그리고 변형이 큰 부분을 위주로 구조변경을 시도하여 목적변수, 즉 대상으로 삼은 공진주파수의 변화를 각각의 구조변경에 대해 관찰하였다. 구조변경은 주로 변형률이 높은 부위에 살을 덧붙이거나 빼는 방식으로 시도되었으며, 설계변경범위는 설계제한조건에 근거하여 정했다. 이때 공진주파수의 변화량과 그 변화에 일관성이 있는가를 주로 관찰하였다.

Fig. 3은 각 구조변경에 대한 공진주파수들의 변화를 보인 것이다. 7가지의 구조변경안에 대해 분석해 본 결과, 감도가 정(+)인 단방향의 변화를 갖는 변경안 1,2,3,4,7을 설계변수로 정할 수 있었다. 변화의 방향이 설계변수의 값에 따라 변화한다면 유한차분법의 가정에 위배되어 감도값으로 사용하

기가 곤란하다. 만약 이러한 값을 사용하게 된다면 목표치에 수렴하는 것을 기대하기가 어려워진다.

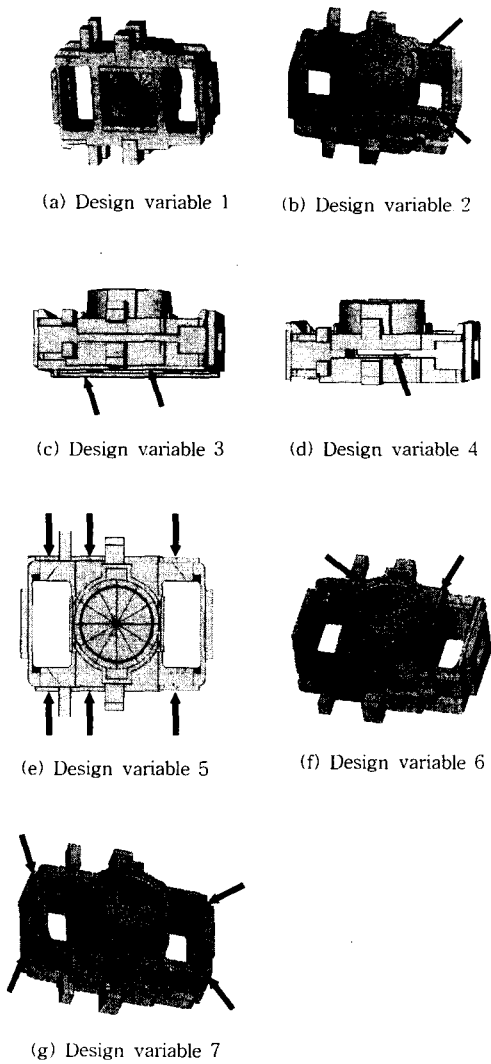


Fig. 2 Design variables for sensitivity analysis.

Table 1은 선정된 설계변수에 대한 목적변수의 변화를 유한요소해석을 통해 구하고, 이를 토대로 계산한 감도행렬이다.

목적변수의 목표값, 즉 공진주파수의 목표치를 기존 모델에서 구한 공진주파수보다 10% 증가한 값으로 정한 후, 구해진 감도행렬 Z 을 이용하여 설계변수 변경량 Δx 를 구하였으며, 이를 다시 기존 설계변수에 추가하여 재차 유한요소해석을 하였다

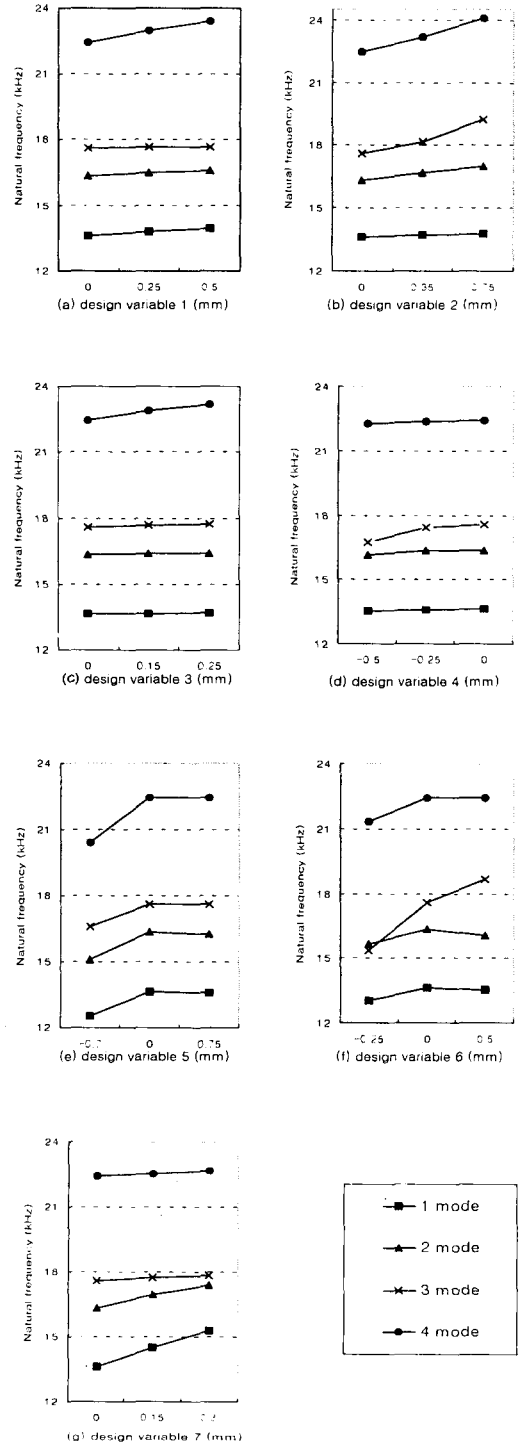


Fig.3 Sensitivity of design variables for natural frequencies.

Table 1 Sensitivity Matrix of the natural frequencies for the design variables.

D/V	1	2	3	4	5
Mode 1	702.0	214.7	216.0	190.0	5540.0
Mode 2	480.0	838.7	116.0	376.0	3453.3
Mode 3	148.0	2180.0	648.0	1680.0	876.7
Mode 4	1968.0	2230.7	3020.0	348.0	786.7

그리고 이 과정을 목표 값에 수렴할 때까지 반복하였다. 한편 계산되어진 설계변수의 변경량이 과도해져서 목표치에 추종하지 못하고 발산할 우려가 있으므로 1보다 작은 가중치 C_f 를 부여하여 설계 변경량을 적절히 억압하였다.

반복과정(Iteration)중에 계산된 공진주파수와 렌즈홀더를 포함한 가동부의 질량의 변화를 Table 2에 나타내었는데, 7번의 반복과정을 거쳐서 목표치에 잘 수렴하는 결과를 얻었다.

Fig. 4는 반복(Iteration)에 따라 각 공진주파수와 초기에 설정한 목표치와의 차이를 백분율(%)로 나타낸 것이다. 7번의 반복과정 중, 6번째에서 0.1% 내외의 수렴결과를 얻었다. 그리고 그 때의 가동부 질량 증가는 약 3.7%를 기록했다. 7번째부터는 다시 목표치로부터 멀어지는 것을 알 수 있었으며, 따라서 6번째 결과가 최적치임을 알 수 있었다.

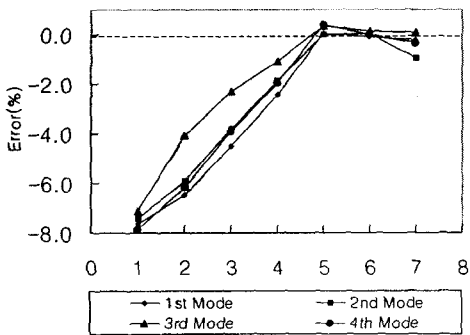


Fig.4 Error in modal tuning iteration.

반복과정에 따른 설계변수의 변화를 Table 3에 나타내었다. 앞에서 여섯 번째 반복과정에서 목표치에 근접했으므로 설계변수는 Table 3의 6번째를 취하면 된다.

Table 3 Design variables in modal tuning iteration.

D/V	1	2	3	4	5	6	7
Mode 1	0.063	0.132	0.217	0.310	0.414	0.418	0.415
Mode 2	0.200	0.400	0.600	0.800	0.999	1.016	0.992
Mode 3	-0.071	-0.136	-0.210	-0.283	-0.334	-0.378	-0.362
Mode 4	-0.090	-0.188	-0.327	-0.480	-0.628	-0.672	-0.662
Mode 5	0.028	0.058	0.089	0.125	0.178	0.178	0.180

Fig. 5는 변경 이후 렌즈홀더의 주파수특성으로서, 선택했던 모드의 공진주파수가 고주파로 이동하였음을 알 수 있었으며, 목적변수로 선정하지 않았던 공진모드도 고차로 이동함으로써 만족할만한 결과를 얻었다.

Fig. 6은 설계 변경전후의 광폭업 액추에이터 가동부의 동특성을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 렌즈홀더의 공진주파수 변경후, 렌즈홀더의 무게증가로 인해 발생할 수 있는 DC, AC감도의 저하와, 저주파수 대역의 액추에이터 1차공진주파수 저하가 거의 발생하지 않았다. 또한 10kHz이상에서 나타나는 렌즈홀더의 공진봉의 크기도 저감되었다.

4. 결론

유한차분을 이용한 감도해석법을 광폭업 액추에이터의 동특성 개선에 적용한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유한요소 모델에서의 동특성 개선에 유한차분감도를 적용한 결과 몇 번의 반복계산으로 목표치에 근접하는 결과를 얻었다.
2. 반복계산을 통해 변경된 가동부의 질량은 미소한 증가를 보였으며, 따라서 액추에이터의 DC, AC 감도와 1차공진주파수의 저하는 거의 없음을 알 수 있었다.
3. 형상이 복잡한 렌즈홀더에서 설계변수를 잘 선정하면 반복과정에서 목표치에 잘 수렴함을 알 수 있었다.

5. 후기

본 연구는 한국과학재단 지정 정보저장기기 연구센터의 지원(2000G0102)을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

Table 2 Natural frequencies of suspension system in modal tuning iteration.

		target	0	error	1	error	2	error	3	error	4	error	5	error	6	error	7	error
Mode	1	14983	13621	-9.09	13835	-7.66	14071	-6.48	14307	-4.51	14618	-2.44	14990	0.05	14973	-0.07	14953	-0.20
	2	17985	16350	-9.09	16648	-7.43	16982	-5.91	17294	-3.84	17650	-1.86	17988	0.02	17993	0.04	17814	-0.95
	3	19354	17595	-9.09	17975	-7.13	18591	-4.10	18905	-2.32	19141	-1.10	19419	0.34	19376	0.11	19371	-0.09
	4	24686	22442	-9.09	22742	-7.87	23250	-6.18	23717	-3.93	24201	-1.96	24788	0.41	24691	0.02	24598	-0.36
Mass (%)			100		100.58		101.27		101.96		102.79		102.03		103.74		103.81	

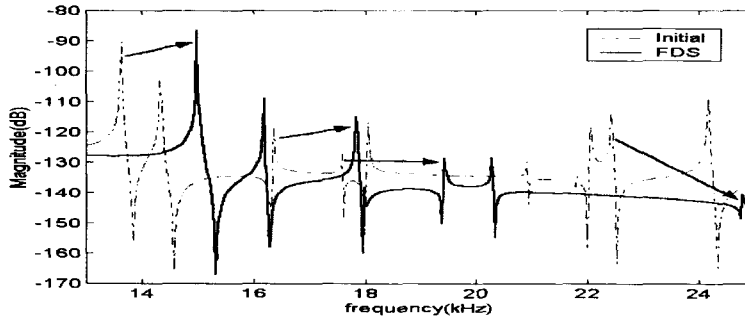


Fig. 5 FRF comparison in lens-holder.

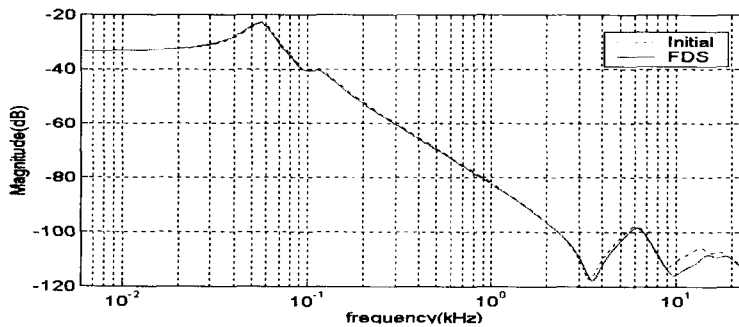


Fig. 6 FRF comparison in pick-up actuator.

6 참고문헌

- [1] 고상선, 류제하, 박기환, 정호섭, “고배속 CD-ROM용 비대칭형 광픽업 미세구동기의 구동특성”, 한국소음진동공학회지, 제8권, 제2호, pp. 346-352, 1998.
- [2] N. Takahashi, H. Sato, H. Osawa, and K. Nagai, “Digital Video Disk/Compact Disk (DVD/CD)-Compatible Pickup Head with Dual lens Rotating Actuator”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.36, pp.467-473, Part 1, No. 1B, January 1997.
- [3] 김석중, 이용훈, 최한국, “고밀도 광저장 기기용 틸트 액추에이터 동특성 분석 및 평가”, 한국소음진동공학회지, 제10권, 제4호, pp. 584-595, 2000.
- [4] R. M. Lin and M. K. Lim, “Method for calculating derivatives of eigenvalues and eigenvectors”, 11th IMAC, pp. 1554-1557, 1993 Florida.
- [5] R. L. Fox, and M. P. Kapoor, “Rates of change of eigenvalues and eigenvectors”, AIAA Journal, Vol. 6, pp. 2426-2429, Dec. 1968.