

가동자석형 광 픽업 액츄에이터의 개발

Development of Moving Magnet Type Optical Pickup Actuator

허영준[†], 김윤기^{**}, 송명규^{**}, 김상룡^{*}, 박노철^{**}, 유정훈^{*}, 박영필^{*}

Young-Jun Hur, Yoon-Ki Kim, Myeong-Gyu Song, Sang-Ryong Kim, No-Cheol Park,
Jeong-Hoon Yoo and Young-Pil Park

Abstract

In this paper we suggested the moving magnet type actuator for optical disc drive which has high frequency of flexible mode. Generally, moving magnet type actuator has the advantage for increase the frequency of flexible mode. But it has low driving sensitivity due to the weight of its moving part. To overcome this shortcoming, we designed the model with the closed electromagnetic circuit for tracking direction. In addition, we improved the driving sensitivity and frequency of flexible mode by using of DOE (design of experiment) procedure for EM circuit. Consequently, it is verified that final designed model satisfied with the desired specifications

Key Words: Moving Magnet type Pickup Actuator, High Flexible Mode frequency, Electromagnetic circuit, Design of Experiments

1. 서론

광 정보저장기기는 첫째 세대인 CD 가 디지털 음악의 기록 및 재생을 위한 미디어로 최초 등장한 이후 하드디스크와 함께 개인 컴퓨터의 중요한 정보저장기기로써 발전해 왔다. 이후 90년대 중반에 나온 DVD 는 동영상의 기록 및 재생을 위한 미디어로써 그 용도를 확대하였다.[4] 현재는 HDTV 고화질 방송과 영화 등 대용량의 정보저장기기의 수요가 증가함에 따라 빠른 데이터 전송률과 높은 저장용량을 갖는 광 정보저장기기가 요구되고 있다. 이러한 추세에 따라서 광 저장기기는 고밀도화와 고배속화를 이루어 왔으며, 이를 위해 서보 시스템의 요구 성능도 보다 높아졌다. 광하드디스크드라이브 서보의 대역폭은 액츄에이터의 유연모드에 의해 제한되며 따라서 서보의 대역폭을 높이기 위해 높은 유연모드 주파수를 갖는 액츄에이터의 개발이 필요하게 되었

다.[1,2,3]

본 논문에서는 높은 유연모드 주파수를 갖는 가동 자석형 액츄에이터를 제안하였다. 일반적으로 가동 자석형 액츄에이터는 높은 유연모드 주파수의 구현이 가능한 장점을 가지고 있는 반면 가동부에 장착돼 있는 자석의 무게로 인해 감도가 떨어지는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 코일을 가동자석 사이에 배치하여 폐전자기회로와 유사한 효과를 얻는 자기회로를 제안하였다. 제안된 모델의 동특성을 전자기 해석과 구조해석을 통해 도출하고, 자기부의 최적화 과정을 통해 모델의 성능을 향상시켰다. 마지막으로 제작된 최종모델의 성능을 실험하였고, 앞서 전자기해석 및 구조해석의 결과로 예측한 최종모델의 성능과 일치함을 확인하였다.

2. 초기 모델

본 논문의 목적은 높은 유연모드 주파수를 가지는 액츄에이터의 제안에 있으며 이를 위하여 가동 자석형 액츄에이터를 선택하였다. 가동자석형 액츄에이터는 일반적으로 높은 유연모드 주파수의

[†] 연세대학교 기계공학과
E-mail :schezar@yonsei.ac.kr
TEL : (02)2123-3847, Fax: (02)365-8460

* 연세대학교 기계공학과
** 연세대학교 정보저장기연구센터

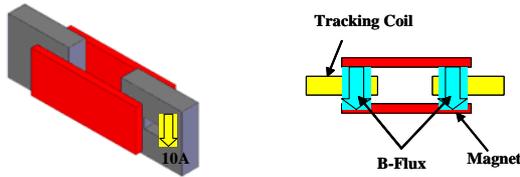


Fig. 1 Design of closed electromagnetic circuit for tracking direction

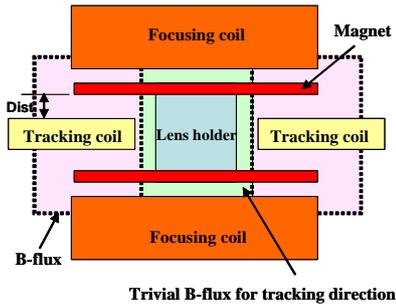


Fig. 2 Design of focusing coil

구현에 유리한 반면 가동부에 장착된 자석의 무게로 인하여 감도가 떨어지는 단점이 있다. 구동감도는 자석과 코일간의 관계, 그리고 가동부의 무게에 따라서 좌우되기 때문에 구동감도를 높이기 위해서는 특별한 자기회로의 구성과 가동부의 설계가 필요하다. 이를 위해서 가동자석 사이에 코일을 삽입하여 폐전자기회로를 구성하면서 높은 유연모드 주파수를 가질 수 있는 구조로 모델을 고안하였다.

2.1 자기회로 설계

자기회로는 가동부에 작용하는 전자기력의 크기에 영향을 주고 또한 가동부에 장착되어 있는 자석의 형상에 영향을 받는다. 높은 구동감도를 얻기 위해서는 큰 자기력과 작은 부피를 지닌 자기회로 설계가 필요하다. 이러한 조건을 만족시키기 위해 Figure 1 과 같이 두 자석 사이에 트래킹 코일을 수평방향으로 배치하였다. 이 설계는 유효 코일의 길이가 짧지만 자석 사이의 거리가 가까워 코일에 고밀도의 자속이 작용하는 장점이 있다.

포커싱 코일은 구동감도를 높이기 위해서 Figure 2 와 같이 자석과의 유효길이를 높이는 방향으로 설계하였다. 코일의 저항은 열적 안정성과 구동감도를 고려하여 트래킹 코일과 포커싱 코일 각각 4Ω 으로 고정하였다.

2.2 초기 모델의 동특성

위에서 살펴본 구조를 조합하여 고려한 전체적인 액츄에이터의 구조는 Figure 3 과 같다. 초기모델의 동특성을 시뮬레이션을 통하여 확인한 결과 Table1

Table 1 Dynamic characteristic of initial model

| | | |
|----------------------------------|-----------|-----------|
| 2 nd Reson. Frequency | Focusing | 90.5kHz |
| | Tracking | 149.5 kHz |
| Total Mass | 462.6mg | |
| Focusing | DC Sen. | AC Sen. |
| | 0.545mm/V | 5.503G/V |
| Tracking | 0.607mm/V | 6.047G/V |

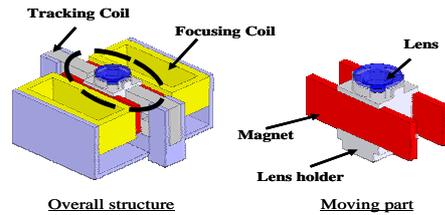


Fig. 3 Structure of initial model

과 같은 해석 결과를 얻었다. 포커싱 방향, 트래킹 방향 모두 높은 유연모드 주파수를 보였지만, 구동감도는 양 방향 모두 만족할 만한 수치를 얻지 못했다. 따라서 액츄에이터의 구동감도 향상을 위해 설계변수를 추출하고 최적화 과정을 수행하였다.

3. 모델 개선

3.1 최적화 과정을 통한 자기부의 개선

가동 감도를 높이기 위해 자기부의 개선에 사용될 변수들을 추출하였다. Figure 4 에서 자기력에 영향을 미치는 자석과 포커싱 코일, 트래킹 코일에서 총 11 개의 변수를 선정하였다. 각 변수들이 구동감도에 미치는 영향을 확인하기 위해 2 수준의 완전 배치법 DOE 과정을 수행하였다. 변수들간의 교호작용을 확인한 결과 Figure 5(a)와 같이 다른 변수들끼리의 교호작용은 미미한 반면 자석 높이 B 와 포커싱 코일 높이 E 사이에는 무시할 수 없는 교호 작용이 있음을 알 수 있었다 교호작용이 일어난 변수들을 독립시키기 위해서 식 (1) 과 같이 변수 E를 변수 B와의 비율로 표현하였다.

$$E^* = E / B \tag{1}$$

그리고 변수 B와 변수 E*를 대상으로 구동감도에 대한 DOE 과정을 다시 수행하였고, 두 변수간에 교호작용이 없음을 확인하였다. 변수들이 포커싱 방향과 트래킹 방향 가동 감도에 영향을 미치는 정도는 Figure 6 과 같다.

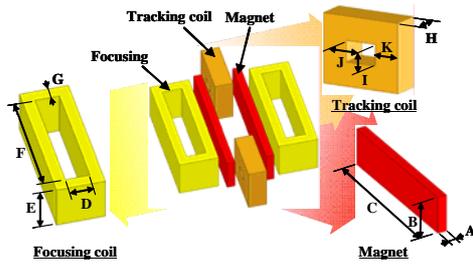
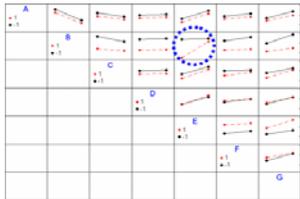
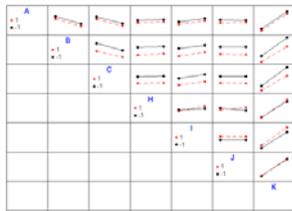


Fig. 4 Design variables



(a) Focusing direction



(b) Tracking direction

Fig. 5 Interaction between the parameters

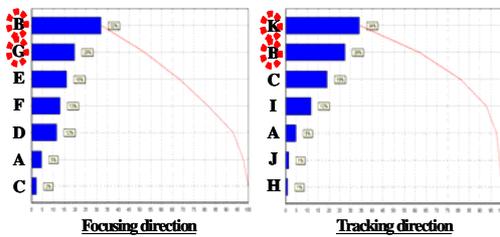


Fig. 6 Sensitivity of parameters

Table 2 Selected value of parameters

| | | | | | |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Variables | A | B | C | D | E |
| Unit(mm) | 0.6 | 2.4 | 10.6 | 1.5 | 2.88 |
| F | G | H | I | J | K |
| 7.5 | 1.3 | 1.4 | 0.5 | 1 | 2 |

Table 3 Sensitivity of improved model

| | | DC Sen. | AC Sen. |
|-----------------|-----------------------|-----------|----------|
| Focusing | Initial model | 0.545mm/V | 5.5G/V |
| | Improver model | 0.572mm/V | 7.9 G/V |
| Tracking | Initial model | 0.607mm/V | 6.04 G/V |
| | Improver model | 0.502mm/V | 6.9 G/V |

포커싱 방향 가동 감도에 큰 영향을 미치는 변수 G, 트래킹 방향에 큰 영향을 미치는 변수 K, 두

방향 모두에 큰 영향을 미치는 변수 B 를 최적화 변수로 선정하였다. 구동 감도에 큰 영향을 미치지 않는 나머지 변수들은 구조적 제한을 고려하여 최대한 감도를 높이는 수준의 변수를 선택하였다. 선정된 변수들은 포커싱 구동감도와 트래킹 구동감도를 최대화시키기 위해 목적함수를 식(2)와 같이 정하고 VMM 방식을 통해 최적화 과정을 수행하였다. 선정된 변수 결과값을 기준으로 자기부를 개선한 결과 표 3 과 같이 구동감도가 향상된 것을 확인할 수 있었다.

$$Object\ Function = \left(\frac{Initial\ Sensitivity\ of\ Focusing\ Direction}{Sensitivity\ of\ Focusing\ Direction} \right)^2 + \left(\frac{Initial\ Sensitivity\ of\ Tracking\ Direction}{Sensitivity\ of\ Tracking\ Direction} \right)^2 \quad (2)$$

3.2 제작을 고려한 구조부의 변경

설계된 개선모델은 제작을 고려할 때 구조부의 변경이 필요하였다. 액츄에이터의 가동범위가 포커싱방향으로 ±0.3mm 임을 고려해볼 때 렌즈 윗부분과 트래킹 코일 간의 높이 차이가 0.25mm 로 제작공차와 조립오차, 디스크의 진동을 고려했을 때 충분치 않은 거리라고 판단되었다. 따라서 Figure7 과 같이 렌즈 홀더의 높이를 늘여서 가동 거리를 확보하였다. Figure8 는 제작을 고려하여 렌즈 홀더의 높이를 늘인 최종 모델의 형상을 나타낸다. 최종적으로 설계된 모델의 시뮬레이션 과정은 재료의 강성이 높아 유연모드 주파수를 높이는 데 유리한 VECTRA B230 라는 재료를 사용하였다. 그러나 실제 제작에 있어서 이 재료는 구하기 어렵고 가격이 비싸기 때문에 생산적인 면을 고려하여 일반적으로 사용되는 PPS glass 40 을 사용하였다.



Fig. 7 Modify the moving part for manufacturing

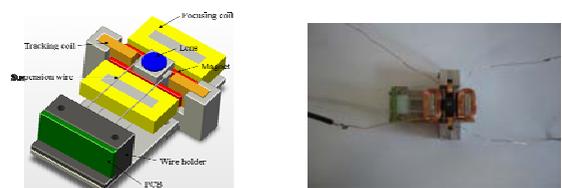


Fig. 8 Final manufactured model

4. 제작 모델의 동특성

4.1 포커싱 방향의 주파수 응답

제작한 모델의 동특성을 확인하기 위해서 주파수 응답 실험을 실시하였다. 먼저 포커싱 방향의 주파수 응답을 측정하였다.

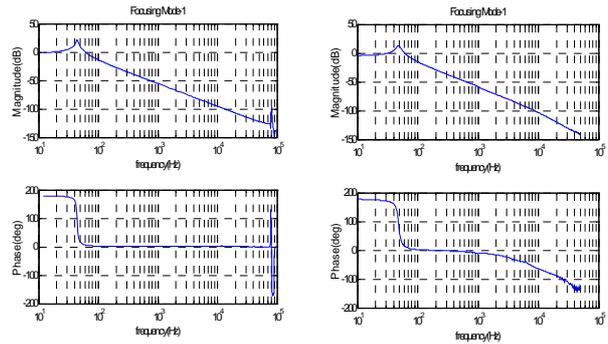
Figure 9(b)와 같이 실험결과 5Hz 부터 50kHz 까지의 주파수 범위에서는 공진 피크가 발생하지 않았다. 그러나 50kHz 부터 100kHz 까지의 주파수 범위에서는 Figure 10 (a)와 같이 65kHz, 73kHz, 79kHz 주파수에서 포커싱 방향의 공진 피크가 측정되었다. 시뮬레이션 상에서는 Figure10(b)와 같이 77kHz, 80kHz 주파수에서 공진피크가 나타나는 것을 확인하였다. 피크의 크기로 판단해 볼 때 시뮬레이션 상에서 나타난 첫 번째 피크와 실험상에서 나타난 두 번째 피크, 그리고 시뮬레이션 상에서 나타난 두 번째 피크와 실험상에서 나타난 세 번째 피크가 서로 연관이 있을 것으로 예상되었다. 따라서 액츄에이터의 모드 형상을 실험을 통해서 확인하고 시뮬레이션에서 발생한 모드와 제작된 액츄에이터에서 발생한 모드가 일치하는지를 확인하였다.

실험상에서 발생한 73kHz 주파수에서의 피크와 시뮬레이션 상에서 발생한 77kHz 주파수에서의 피크의 모드형상이 일치하는지 알아보기 위해서 Figure 11 와 같이 5 개의 측정 점을 정하여 73kHz 주파수에서의 시간응답을 확인하였다. Figure 12 을 보면 렌즈 중앙 측정 점에서의 시간응답과 나머지 자석 끝 단의 네 개의 측정 점에서의 시간응답이 약 180 도의 위상 차를 가짐을 알 수 있다. 따라서 측정 점을 연결하여 모드 형상을 예측하면 Figure 13(b)와 같고, 이는 Figure13(a)에 나와 있는 시뮬레이션 상의 모드형상과 비슷한 거동을 가짐을 알 수 있었다. 다음으로 실험상의 79kHz 주파수에서 발생한 피크의 모드형상이 시뮬레이션상의 80kHz 주파수에서 발생한 피크의 모드형상과 일치하는지 알아보기 위해서 Figure 11 와 같이 5 개의 측정 점을 정하여 79kHz 주파수에서의 시간응답을 확인하였다. Figure 14 를 보면 렌즈 중앙 측정 점에서의 그래프와 자석 끝 단의 네 개의 측정 점에서의 시간응답이 약 180 도의 위상 차를 가짐을 알 수 있다. 따라서 측정 점을 연결하여 모드 형상을 예측하면 Figure15(b)과 같고, 이는 이는 Figure 15 (a) 와 같이 시뮬레이션 상의 모드형상과 비슷한 거동을 가짐을 알 수 있었다.

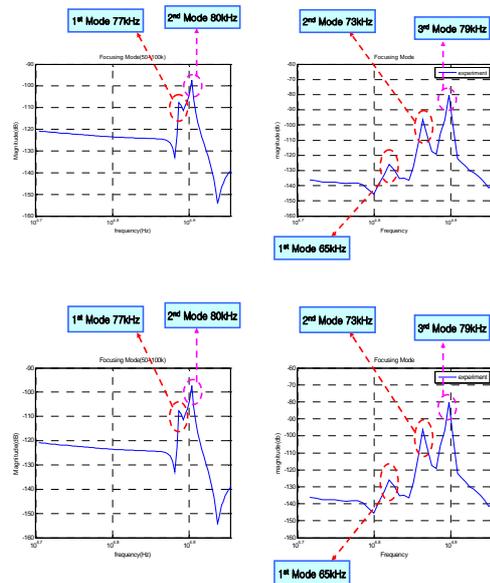
실험상에서 발생한 2 번째 피크와 3 번째 피크가 시뮬레이션상에서 발생한 피크와 일치함을 여러

측정 점에서의 실험결과를 토대로 모드 형상을 확인 함으로서 확인할 수 있었다.

실험상에서 발생한 1 번째 피크는 다른 피크에 비해서 우세하지는 않지만 여러 개의 시 모델 액츄에이터 실험 결과 다양한 크기로 발생하여 조립 오차에 의한 것으로 예상되었다. 시뮬레이션상으로 이를 확인하기 위해서 포커싱 방향으로 미세한 질량 불균형을 가정하고 다시 시뮬레이션을 확인하였다. 재해석 결과 Figure 16 과 같이 실험상에서 존재했던 피크가 시뮬레이션 상에서도 발생하였다. 재해석 결과 나타난 시뮬레이션 상의 첫 번째 피크가 실험상에서 발생한 첫 번째 피크와 같은 모드형상을 가지는지 확인하기 위해서 Figure 11 와 같이 5 개의 측정 점을 정하여 시간응답을 확인하였다. Figure 17 을 보면 측정 점 1 번, 2 번이 측정 점 3 번, 4 번과 약 180 도의 위상 차를 가짐을 알 수 있다.



(a) Simulation result (b) Experiment result
Fig. 9 FRF for focusing direction (5 Hz~100 kHz)



(a) Simulation result (b) Experiment result
Fig. 10 FRF for focusing direction (50 kHz~100 kHz)

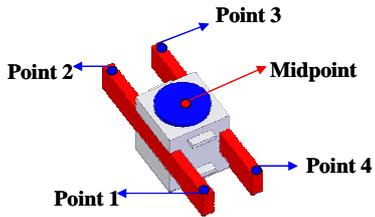


Fig. 11 Measuring point for focusing direction

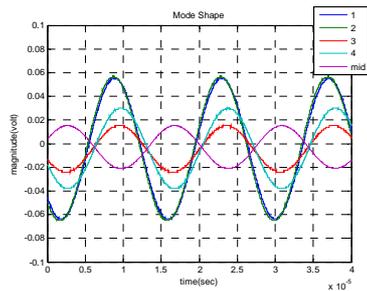
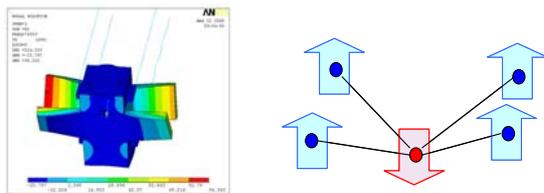


Fig. 12 Time response in measuring point (73 kHz)



(a) Simulation result (b) Experiment result
Fig. 13 Mode shape for focusing direction (73 kHz)

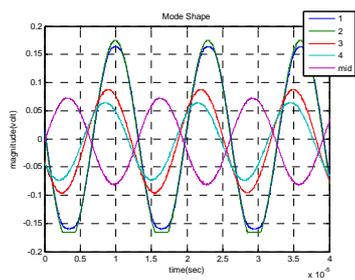
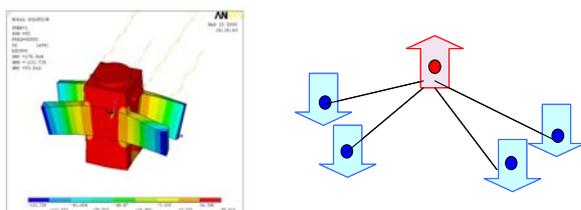
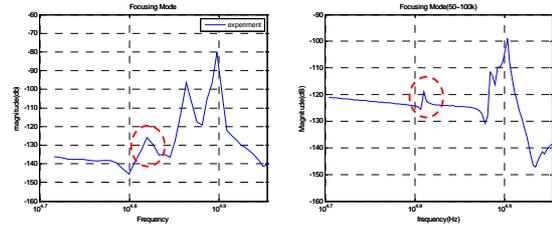


Fig. 14 Time response in measuring point (79 kHz)



(a) Simulation result (b) Experiment result
Fig. 15 Mode shape for focusing direction (79 kHz)



(a) Simulation result (b) Experiment result
Fig. 16 FRF for tracking direction after reanalysis (50 kHz~100 kHz)

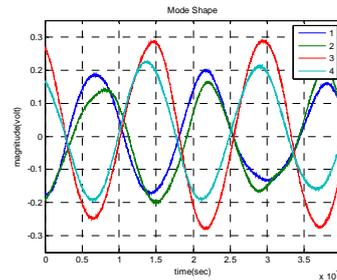
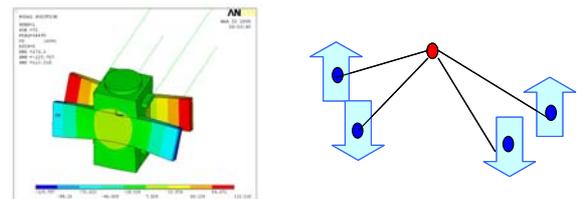


Fig. 17 Time response in measuring point (65 kHz)



(a) Simulation result (b) Experiment result
Fig. 18 Mode shape for focusing direction (65 kHz)

따라서 측정 점을 연결하여 모드 형상을 예측하면 Figure 18(b)와 같고, 이는 Figure 18(a)와 같이 시뮬레이션 상의 모드형상과 비슷한 거동을 가짐을 알 수 있었다. 첫번째 피크에서 나타나는 포커싱 모드는 제작과정에서 제작 오차를 줄임으로써 이 모드에서의 영향을 감소시킬 수 있다고 예측할 수 있었다.

결론적으로 포커싱 방향에서의 주파수 응답 실험을 통해서 시뮬레이션 결과의 타당성을 확인할 수 있었다

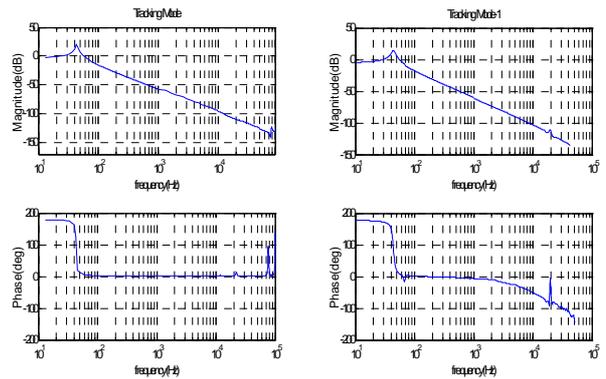
4.2 트래킹 방향의 주파수 응답

다음으로 트래킹 방향의 주파수 응답을 측정하였다. Figure 19(a)와 같이 시뮬레이션 상에서는 50kHz 주파수 이하에서는 트래킹 방향으로 공진피크가 발생하지 않았다. 그러나 실험결과에서 Figure 19(b)와 같이 20kHz 정도에서 작은 피크가 발생하였다. 시뮬레이션 상에서도 이 주파수에서 약간의 위상 차가 발생하였다. 시뮬레이션상에서 이 주파

수에서의 모드형상은 Figure 20 과 같이 자석이 좌우 반대 방향으로 움직이면서 보빈을 트랙킹 방향으로 움직이게 한다. 그러나 피크라고 인식하기에는 변위가 너무 작았다. 따라서 이 주파수에서 모드의 변위를 크게 하는 원인이 있을 것으로 예측하였다. 이 원인을 트랙킹 코일이 자석 사이에 삽입되어 있는 구조적 형상으로 인하여 발생하는 슬레노이드 효과로 추측하였다. 트랙킹 코일에 전류가 흐르면서 발생하는 자기장에 의해서 자석이 받는 힘을 시뮬레이션 통하여 계산한 결과 3.5mN의 힘이 발생하였다. 슬레노이드 효과에 의해 발생한 힘의 방향이 Figure 21 와 같이 모드 형상과 일치하였고, 따라서 이 주파수에서 모드 형상을 크게 만드는 원인이 될 것이라 추측하였다. 슬레노이드 효과에 의해서 발생하는 힘을 해석에 적용한 결과 Figure 22 과 같이 해석상에서도 실험에서 발생하였던 피크가 발생함을 확인하였다. 시뮬레이션에서 나타난 이 피크가 실험에서 나타난 피크와 같은 모드인지 확인하기 위해서 Figure 23(a)와 같이 자석 앞면의 좌우에 2 개의 측정 점을 정하여 20kHz 주파수에서의 시간응답을 확인하였다. Figure 24 를 보면 자석 왼쪽 측정 점과 오른쪽 측정 점에서의 시간응답이 약 180 도의 위상 차를 가짐을 알 수 있다. 따라서 측정 점을 연결하여 모드 형상을 예측하면 Figure 20 과 같이 시뮬레이션 상의 모드형상과 비슷한 거동을 가짐을 알 수 있었다.

Figure 25 은 50kHz 이상의 주파수에서 발생하는 피크를 실험과 시뮬레이션 상의 결과로 보여주고 있다. 시뮬레이션에서는 81kHz 주파수에서 피크가 발생하였고, 실험에서는 83kHz 주파수에서 피크가 발생하였다. 시뮬레이션 결과와 실험 결과의 피크가 같은 모드 형상을 갖는지 확인하기 위해서 Figure 23 (b)와 같이 자석 앞면의 네 모퉁이에서 네 개의 포인트를 정하여 주파수 응답을 확인하였다. 그 결과 Figure 26 과 같이 1,3 번 측정 점과 2,4 번 측정 점이 서로 180 도의 위상차이를 가짐을 알 수 있었다. 측정된 포인트를 가지고 예측한 자석의 모드 형상은 Figure 27(b)와 같고 이는 Figure 27(a)와 같이 시뮬레이션을 통해서 나온 모드 형상과 비슷한 거동을 가짐을 확인하였다.

결론적으로 실험에서 발생한 피크와 시뮬레이션에서 발생한 피크의 모드형상이 일치함을 확인하였고, 시뮬레이션 결과의 타당성을 확인할 수 있었다.



(a) Simulation result (b) Experiment result
Fig. 19 FRF for tracking direction (5~100 kHz)

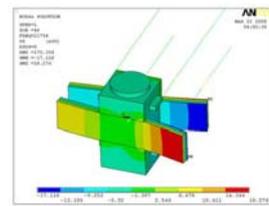


Fig. 20 Mode shape for tracking direction (20 kHz)

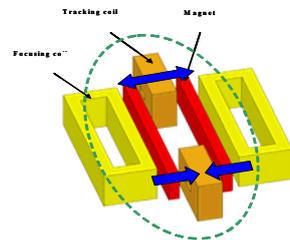


Fig. 21 Generated force direction by solenoid effect

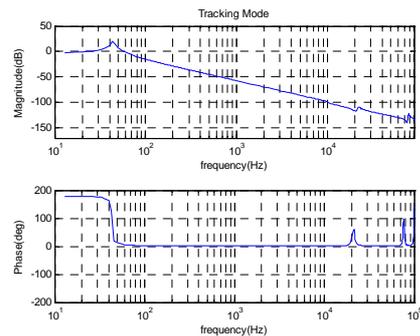
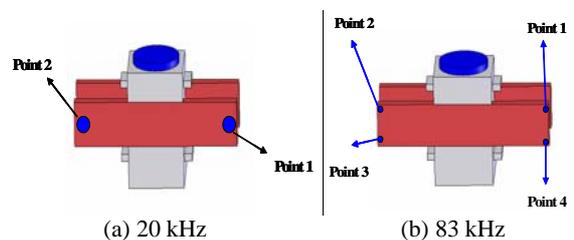


Fig. 22 FRF for focusing direction after reanalysis (5 Hz~100 kHz)



(a) 20 kHz (b) 83 kHz
Fig. 23 Measuring point for tracking direction

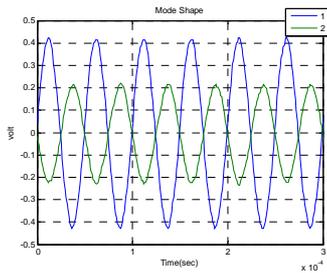
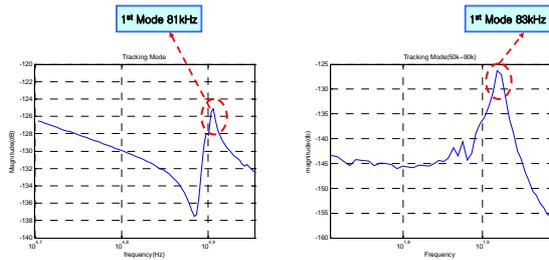


Fig. 24 Time response in measuring point (65 kHz)



(a) Simulation result (b) Experiment result
Fig. 25 FRF for tracking direction (50 kHz~100 kHz)

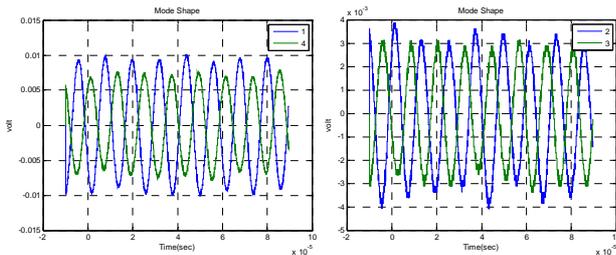
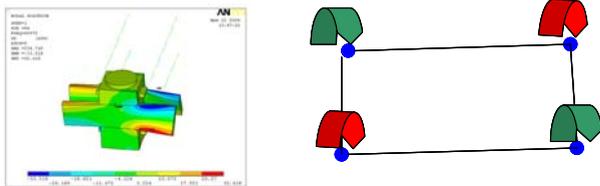


Fig. 26 Time response in measuring point (83 kHz)



(a) Simulation result (b) Experiment result
Fig. 27 Mode shape for tracking direction (83 kHz)

Table 4 Dynamic characteristic of final manufactured model

| | | |
|--|-----------------|----------------|
| 1st Reson. Frequency | Focusing | 44.98 Hz |
| | Tracking | 45.02 Hz |
| 2nd Reson. Frequency | Focusing | 80.5 kHz |
| | Tracking | 81.2 kHz |
| Total Mass | 292.7mg | |
| | DC Sen. | AC Sen. |
| Focusing | 0.572 mm/V | 7.9 G/V |
| Tracking | 0.502 mm/V | 6.9 G/V |

5. 결론

본 연구에서는 높은 유연모드 주파수를 가지는 가동자석형 액추에이터를 제안하였다. 감도를 높이기 위해 트래킹 코일의 자기부를 폐전자기 회로로 구성하였다. 또한 자기부의 최적화 과정을 통해 액추에이터의 성능을 향상시킬 수 있었다. 제작과정에서는 렌즈 홀더의 높이를 늘여서 가동거리를 확보하였다. 제작된 액추에이터의 주파수 응답을 실험을 통해서 확인하였고 최종 모델의 시뮬레이션 결과가 타당하다는 것을 검증하였다. Table 4는 제작된 최종모델의 동특성을 나타낸다.

후기

본 연구는 한국 과학재단 목적기초연구(과제 번호: R01-2006-000-10074-0)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] K. T. Lee, D. J. Lee, N. C. Park and Y. P. Park, 2002, "Improvement of dynamic characteristics for optical pickup actuator using sensitivity analysis", *Microsystem Technologies*, Vol.9, No. 1-2, pp.25-30
- [2] D. J. Lee, K. S. Woo, N. C. Park and Y. P. Park, 2005, "Design and Optimization of a Linear Actuator for Subminiature Optical Storage Devices", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 2, pp.1055-1057
- [3] Y. K. Kim, C. Kim, D. J. Lee, N. C. Park, Y. P. Park, N. Onagi and G. Akanuma, 2006, "Design of Hybrid Type's Optical Pickup Actuator for System Stability in High Density Reading and Recording", *Asia-Pacific Data Storage Conference 2006*, HsinChu, Taiwan, pp.112-113
- [4] Y. P. Park, Y. C. Rhim, H. S. Yang, S. Kang, N. C. Park, and Y. J. Kim. September 2005. *Transactions of the Society of Information Storage Systems*, vol. 1, no. pp. 1-22
- [5] C. Kim, 2006, *Design of Moving Magnet Type Pickup Actuator for Flexible Optical Disk Drive*, The Graduate School Yonsei University