

NFR 방식 Optical Flying Head 의 형상 최적설계

Optimal Design of Optical Flying Head for Near-Field Recording

김석훈* · 윤상준** · 최동훈** · 정태건*** · 박진무**** · 김수경*****
 Seok-hun Kim, Sang-Joon Yoon, Dong-Hoon Choi, Jin-Moo Park and Soo-Kyung Kim

Key Words : Optimal Design(최적설계), Near-field Recording(근접장), Optical Flying Head(광학 헤드 슬라이더)

ABSTRACT

This paper presents an approach to optimally design the air-bearing surface (ABS) of the optical flying head for near-field recording technology (NFR). NFR is an optical recording technology using very small beam spot size by overcoming the limit of beam diffraction. One of the most important problems in NFR is a head disk interface (HDI) issue over the recording band during the operation. A multi-criteria optimization problem is formulated to enhance the flying performances over the entire recording band during the steady state. The optimal solution of the slider, whose target flying height is 50 nm, is automatically obtained. The flying height during the steady state operation becomes closer to the target values than those for the initial one. The pitch and roll angles are also kept within suitable ranges over the recording band. Especially, all of the air-bearing stiffness are drastically increased by the optimized geometry of the air bearing surface.

1. 서론

산업 발전과 함께 컴퓨터의 이용이 증대되고 정보화 시대로 인해 개인이 소지해야 할 정보량은 급격히 증가하여 언제 어디서나 정보를 전송 받아 보관 및 전달해야 할 필요성이 증가하고 있다. 특히 네트워크의 발달과 멀티미디어 기술의 발달로 높은 저장 밀도와 빠른 전송 속도를 가진 정보 저장 기기에 대한 요구는 날이 증가하고 있다.

정보 저장 기기는 정보를 읽고 쓰는 방식에 따라 크게 자기 기록 방식과 광기록 방식으로 분류된다. 자기 기록 방식의 대표적인 예라 할 수 있는 하드디스크 드라이브(HDD: hard disk drive)는 그 저장 용량이 선형 밀도와 트랙 밀도에 의해 결정된다. 그 중 선형 밀도는 자기 헤드와 디스크 사이의 간격에 의해 결정되므로 헤드 슬라이더의 부상높이를 최소화시킴으로써 선형 밀도를 극대화시키고 있다.⁽¹⁾

광기록 방식의 대표적 예인 CD와 DVD의 경우는 빛의 수렴을 이용하므로 HDD와 같이 선형 밀도를 높이기 위해 극단적으로 낮은 부상높이를 가질 필요는 없지만 적색 레이저보다 파장이 훨씬 짧은 청색, 자색 레이저를 이용하여 빔스팟(beam spot) 크기를 줄임으로써 선형 밀도를 높이고 있다.⁽²⁾

한편, 광의 회절 한계를 극복하기 위하여 근

접장 광학을 이용함으로써 기록 밀도를 크게 향상시키는 NFR(near-field recording) 방식에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽³⁾ 일반적인 NFR 광학 시스템의 원리와 OFH(optical flying head)의 구조는 Fig. 1과 같다.⁽⁴⁾ 대물렌즈로 레이저를 SIL에 모아주면 굴절률이 높은 SIL 내부를 지난 빛은 밀면에서 초점을 형성하고 이 초점 스폿 직경은 굴절률에 반비례하여 결국 빛의 회절한계 이하가 된다.

본 논문에서는 이러한 근접장 기록 방식중의 하나인 SIL(solid immersion lens)을 장착한 광학 헤드 슬라이더의 공기 베어링 특성을 해석하고, 이를 사용하여 시스템이 요구하는 다양한

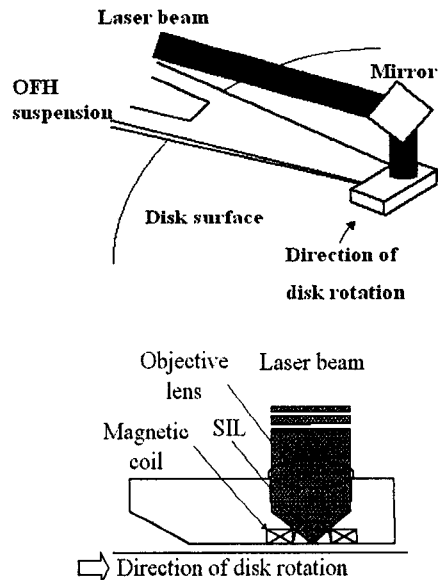


Fig. 1 Optical flying head

* 한양대학교 기계 설계과 대학원
 E-mail : ksgenius@hotmail.com
 Tel : (02) 2290-0478, Fax : (02) 2291-4070
 .. 한양대학교 최적설계신기술연구센터
 ... 건국대학교 기계항공공학부
 LG 디지털 연구소

설계조건을 만족할 수 있는 ABS 형상설계 방법을 제안하고자 한다.

2. 문제 정식화

2.1 설계 요구 사항

근접장 광은 물체 표면의 아주 가까운 곳에 존재하고 매체와의 거리에 따라 광의 세기와 진폭이 크게 바뀌게 된다.⁽⁵⁾ 따라서 빔의 수렴성을 향상시키기 위해서는 설계된 부상높이에서 10% 이내의 변화를 갖는 일정한 부상높이를 모든 작동영역에서 유지시켜줄 수 있는 능력이 요구되며⁽⁶⁾, 또한 빔의 초점을 정렬시키기 위해서 일정한 피치각과 롤각의 유지가 필요하게 된다.

특히, SIL 을 이용한 근접장 광학 정보 기기의 경우, 저장매체로 HDD 와는 달리 플라스틱 디스크를 사용하게 된다. 따라서 상대적으로 무거운 헤드와 상대적으로 작은 강성의 플라스틱 디스크와의 접촉 및 충돌로 인해 헤드와 디스크 모두에 대한 손상 가능성 문제가 심각하게 발생될 수 있다.

또한, 광기록 방식의 경우, 디스크가 카트리지 형태로 보급되기 때문에 액츄에이터 시스템은 CSS(contact start stop) type 이 아닌 L/UL(load/unload) type 이 채택된다. 따라서 L/UL type 적용시 고려되어야 하는 슬라이더의 설계 조건으로 보다 안정된 loading process 와 unloading force 를 감소시키기 위하여 부압력(suction force)의 중심을 슬라이더의 후미에 위치시키는 것이 필요하다.⁽⁷⁾

마지막으로 SIL 등 을 포함한 광학장치의 탑재로 인해서 자기 헤드에 비해 슬라이더에 부과되는 무게가 상대적으로 커지기 때문에 슬라이더의 질량 및 크기 또한 설계시 고려되어야 한다.⁽⁸⁾ 이를 위하여 본 논문에서는 광학장치의 치수를 고려하여 슬라이더의 사이즈를 늘리고 preload 의 초기값을 HDD 슬라이더 대비 높게 책정하는 것으로 이를 보완하였다.

따라서, 근접장 기록방식을 위한 SIL 을 지닌 헤드 슬라이더의 설계 요구사항들을 정리하면 다음과 같다.

- SIL 의 부상높이가 목표 값에 일정하게 유지될 것
- 피치각 및 롤각이 일정하게 유지될 것
- 공기 베어링의 강성을 증가시킬 것
- 부압력의 무게중심이 슬라이더의 후미에 존재하도록 피치각을 크게 할 것

2.2 문제 정식화

본 논문에서는 슬라이더의 부상특성에 결정적인 영향을 주는 파라미터로서 recess depth, taper angle, 그리고 레일의 형상을 결정하는 변수들을 설계변수들로 선정하였으며, 다음과 같이 설계 요구사항을 만족시키는 최적화 문제로 정식화하였다.

Find \mathbf{x}
to minimize

$$F = w_1 \left\{ (1 - h_{\max} / h^*)^2 + (1 - h_{\min} / h^*)^2 \right\} + w_2 \left\{ (\alpha_{\max} - \alpha_{\min} / \alpha_{\text{dif}}) \right\} + w_3 \left\{ (\beta_{\max} - \beta_{\min} / \beta_{\text{dif}}) \right\} \quad (1)$$

satisfying $1 - \alpha_{\min} / \alpha^L$, (2)

$$\alpha_{\max} / \alpha^U - 1, \quad (3)$$

$$\beta_{\min} / \beta^L - 1, \quad (4)$$

$$\beta_{\max} / \beta^U - 1, \quad (5)$$

$$1 - k_{zz} / \Gamma k_{zz}^*, \quad (6)$$

$$1 - k_{aa} / \Gamma k_{aa}^*, \quad (7)$$

$$1 - k_{\beta\beta} / \Gamma k_{\beta\beta}^*, \quad (8)$$

$$x_i^L < x_i < x_i^U, \quad (i = 1, \Lambda, n) \quad (9)$$

여기서 n 은 슬라이더의 형상을 결정짓는 설계변수의 개수를 나타낸다. h^* 는 목표 부상높이를 나타내며, w_j ($j=1,2,3$) 는 각각의 목적함수에 대한 가중치를 나타낸다. 상첨자 L 과 U 는 구속조건에 대한 각각의 상 하한값을 나타내며, Γ 는 초기값 대비 공기 베어링 강성에 대한 성능지수를 나타낸다. 하첨자 min 와 max 는 디스크 반경방향 변화에 따른 각 트랙에서의 값들 중에 가장 작은 값 그리고 가장 큰 값을 나타내며, 하첨자 dif 는 목적함수의 각 성능지수를 무차원화하기 위해 사용된 상수값을 나타낸다.

식 (1)은 디스크 반경 변화에 대해서도 목표 부상높이에 대해 전반적으로 일정한 부상높이를 유지할 것, 그리고 피치각과 롤각에 대하여 허용 가능한 범위 내에서 일정한 값을 유지할 것을 나타내는 다중 목적함수를 나타내고 있다. 식 (2)-(3)은 피치각에 대한 구속조건을, 식 (4)-(5)는 롤각에 대한 구속조건을, (6)-(8)은 공기 베어링의 강성들에 대한 구속조건을 나타내고 있으며, 식(9)는 각 설계변수들의 side constraint 를 나타낸다.

식 (1)-(7)의 최적설계를 위한 전반적인 수치해석 과정은 다음과 같다. 먼저 초기 ABS 형

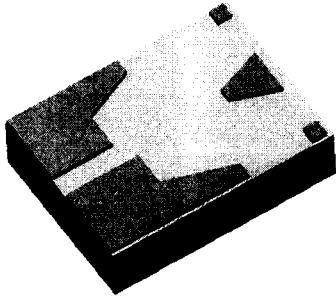


Fig. 2 Initial OFH

상과 작동조건 등 수치계산에 필요한 데이터와 설계변수 초기값이 결정된다. 주어진 데이터들이 해석기에 입력되면 결정된 슬라이더의 형상에 따라 디스크 반경 변화에 대한 부상특성들이 모두 계산된다.⁽⁹⁾ 이때 공기베어링에 대한 강성을 계산함에 있어서는 준 정상상태 방법(quasi-steady-state method)이 사용되었다. 한편, 다시 해석결과는 최적화 모듈로 입력되며, DOT의 SQP (sequential quadratic programming) 방법에 의하여 설계변수는 개선된다. 위와 같은 작업은 설계변수가 제안된 수렴 조건을 만족할 때까지 반복 수행되며, 결국 최적해를 얻으면 프로그램은 종료된다.

3. 수치해석 결과

최적설계를 수행하기 위한 초기 기준 슬라이더 형상은 Fig. 2 에 도시된 바와 같이 기존 문헌에서 선행 개발 중인 NFR 용 헤드 슬라이더를 선정하였다.⁽³⁾ 휴대용 전자기기의 응용을 위하여 저장 매체인 디스크 사이즈는 지름 1 inch 내외로 하여 내경과 외경이 각각 5.5 mm 와 10.0 mm 로 하였으며, 이때 반경에 따른 스쿠각은 5.15 deg 와 6.98 deg 로 가정하였다. 디스크의 분당 회전속도는 3600rpm 이며, preload 는 3.5 gf 이다. 부상높이는 광학 헤드가 장착된 위치에서의 값으로 계산되었으며, 피치각과 롤각의 상·하한값은 각각 250 μ rad 과 150 μ rad 그리고 4 μ rad 과 -4 μ rad 으로 주어졌다.

한편, L/UL 성능을 향상시키기 위하여 슬라이더에서 발생하는 음압의 무게 중심이 슬라이더 후미로 이동할 수 있도록 레일의 형상 좌표들을 설계변수로 선정하였으며, SIL 등 광학 장치가 탑재되어 설계변경이 쉽지 않은 슬라이더의 후미 부분은 설계 변수에서 제외하였다. 본 예제에서는 슬라이더의 목표 부상높이를 50 nm 로 하였다.

Table 1 Initial and optimum values

Design variable	Lower	Initial	Optimum	Upper
1	4.000	6.000	4.006	8.000
2	2.000	3.000	2.023	4.000
3	1.500	1.700	1.514	2.000
4	0.100	1.100	1.197	1.550
5	2.000	2.300	2.244	2.400
6	1.550	2.000	1.812	3.500
7	2.400	2.700	2.400	2.900
8	2.900	2.950	2.999	3.000
9	1.000	1.300	1.461	1.500
10	0.100	1.300	1.387	1.900
11	0.500	0.700	0.527	1.000
12	1.900	2.500	2.950	3.500
13	0.100	0.300	0.440	0.500
14	0.000	0.050	0.001	0.100
15	0.100	1.100	1.583	2.500
16	0.100	1.300	1.480	2.500

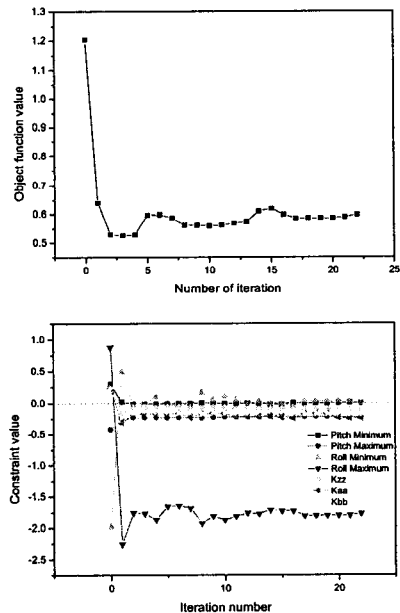


Fig. 3 Convergence history of the cost and constraints

수치해석 결과, Table 1 에서 보이는 바와 같이 주어진 설계변수 초기값에 대하여 최적값이 자동으로 결정되었다. 최적화 수치계산 과정을 보면, Fig. 3 에 도시된 바와 같이 반복계산에 의하여 효과적으로 최적해에 도달하였으며, 이때 설계고려사항들로 정의된 구속조건들이 모두

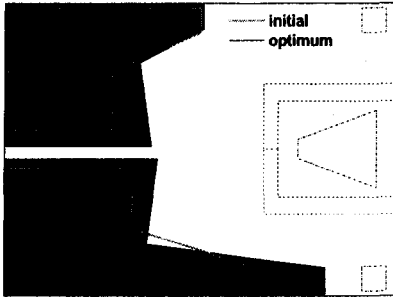


Fig. 4 Optimum OFH

만족되고 있음을 나타내고 있다. 특히, 목적함수의 변화를 보면 2 번의 반복 실행으로 이미 최적값에 근접하고 있음을 알 수 있다. 최적화 과정에서 22 번의 반복 실행이 수행되었으며, 방향탐색과 선탐색을 위한 함수계산은 총 418 회가 수행되었다.

최적설계된 슬라이더의 형상을 보면, Fig. 4 에 도시된 바와 같이 초기 형상에 비해 슬라이더 전반부의 레일면적이 증가되면서 비대칭성이 강조됨을 알 수 있다. 이는 발생하는 양압과 음압의 크기를 크게 함으로써 공기 베어링의 강성을 증가시키면서 부상능의 안정화를 유도하기 위한 것으로 판단된다.

Fig. 5 에서는 디스크 트랙 반경에 대하여 최적설계된 슬라이더의 부상능, 즉 부상높이, 피치각, 롤각에 대한 값을 초기 설계치와 함께 직접 비교하고 있다. 목표 부상높이에 대하여 최적화된 슬라이더의 부상높이는 최대편차가 0.597 로 초기설계의 1.203 에 비해 50.4% 가량 감소하였으며, 전 디스크 기록영역에 대하여 전반적으로 일정한 부상높이를 유지하고 있음을 나타내고 있다. 또한 최적화된 슬라이더의 피치각과 롤각 역시 디스크 전 영역에서 제한조건을 모두 만족하였으며 가능한 일정한 크기를 나타내고 있다.

한편, 슬라이더의 진동특성 및 충돌 가능성 지수인 공기베어링 강성은 Table 2 에 표기된 바와 같이 초기치 대비 모두 약 30% 이상 강화되고 있어서 헤드와 디스크 사이의 동적안정성 면에서도 매우 우수할 것으로 예상된다.

4. 결론

차세대 정보저장기로서 연구 개발되고 있는 NFR 방식의 광기록 장치는 빠른 데이터 전송

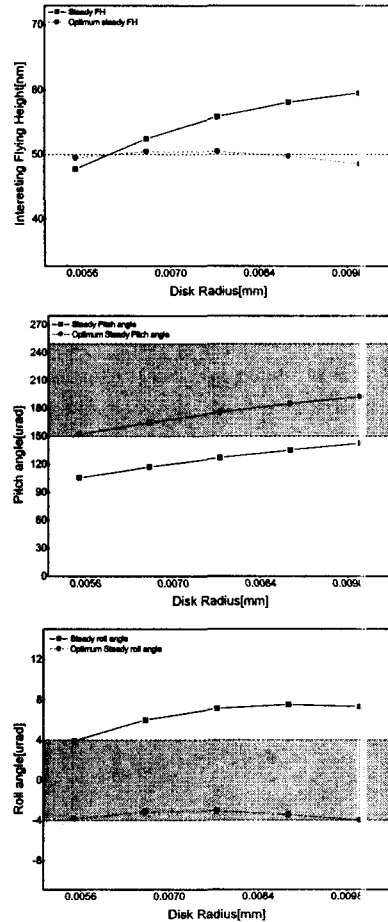


Fig. 5 Flying performance of the optimum design

Table 2 Air-bearing stiffness

	K_{zz} (g/nm)	K_{aa} (Nm/rad)	K_{bb} (Nm/rad)
Initial	0.049	1.29	0.31
Optimum	0.066	1.90	0.44
%	33.9	47.3	41.9

속도를 가지면서 헤드와 디스크 사이의 간격을 안정적으로 일정하게 유지하기 위하여 HDD 에서 사용되고 있는 flying head slider 를 도입하여 렌즈와 디스크 사이의 간극을 유지하고 있다.

이에 본 논문에서는 이러한 NFR 시스템에서 필요로 하는 슬라이더의 설계요구사항들을 L/UL 성능 및 SIL 을 장착함으로써 부과되는 질량과 크기의 문제들을 고려하여 정리하였으며, 이를 형상 최적설계문제로 정식화하여 요구되는

부상성능을 지닌 새로운 형상의 슬라이더를 설계방법을 제안하였다.

자동화된 최적설계 과정을 통하여 초기설계보다 우수한 부상성능을 지니는 최적해를 효과적으로 구할 수 있었으며, 그 결과값들을 부상상태변수들을 사용하여 직접 비교 검토함으로써 제안된 설계방법의 효율성을 입증할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 최적설계신기술 연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

(1) D. K. Miu, G. M. Frees, and R. S. Gompertz, 1990, "Tracking Dynamics of Read/Write Head Suspension in High-Performance Small Form Factor Rigid Disk Drives", ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 112, pp.33-39

(2) M. Shinoda, Y. Tanaka, Y. Akiyama, S. Imanishi, and M. Kanno, 2000, "High density magneto-optical recording using a blue laser and CAD-MSR media", Proceeding of the 2000 Optical Data Storage Conference Digest, IEEE, pp. 92-94

(3) Sookyung Kim, Youngsik Kim, Jin-Moo Park, Jin-Yong Kim, Jung-Kyu Lee, Koo-Hyun Chung and Dae-Eun Kim, 2002, "Design of Optical Flying Head for Near-Field Recording", Transaction of the Magnetics Society of Japan, Vol.2, No.4, pp. 341-344

(4) Seiichi Hata, Yutaka Yamada, Junichi Ichihara and Akira Shimokohbe, "A Micro Lens Actuator for Optical Flying Head", MEMS 2002 IEEE international conference, Las Vegas, Nevada, USA January, pp. 507-510

(5) K. Saito, A. Nakaoki, and M. Kaneko, 1999, "A simulation of magneto-optical signals in near-field recording", Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 38, pp. 6743-6749

(6) 김수완, 신서용, 왕지남, 1995, "Fiber 광 픽업을 이용한 pivot-arm 방식의 초고속 광디스크 드라이버 연구," 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 444-448

(7) Yong Hu, 1998, "Ramp-Load Dynamics of proximity Recording Air Bearing Sliders in Magnetic Hard Disk Drive", ASME/STLE Tribology Conference, Toronto, Canada, October 25-29, Paper No. 98-Trib-35

(8) A. Chekanov, M. Birukawa, Y. Itoh, and T. Suzuki, 1999, "Contact solid immersion lens near-field optical recording in magneto-optical TbFeCo media", Journal of Applied Physics, Vol. 85, No. 8, pp. 5324-5326

(9) 윤상준, 김동인, 강태식, 정태건, 최동훈, 2003, "축소기초모델개념을 이용한 공기윤활 슬라이더 베어링의 최적설계," 대한기계학회논문집 A 권, 제 27 권, 제 3 호, pp. 343-348