

근접장 기록을 위한 부상형 광학 헤드의 최적설계

Optimal Design of Optical Flying Head for Near-field Recording

윤 상 준* · 김 석 훈* · 최 동 훈† · 정 태 건** · 김 수 경***

Sang-Joon Yoon, Seok-Hun Kim, Dong-Hoon Choi, Tae-Gun Jeong and Soo-Kyung Kim

(2003년 6월 27일 접수 : 2003년 9월 17일 심사완료)

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

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. 서 론

산업 발전과 함께 컴퓨터의 이용이 증대되고 정보화 시대로 인해 개인이 소지해야 할 정보량은 급격히 증가하여 언제 어디서나 정보를 전송받아 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 나날이 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⁾

광 기록 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 빔 스폿(beam spot) 크기를 줄임으로써 선형 밀도를 높이고 있다.⁽²⁾

그러나, 광의 회절한계로 인하여 레이저 파장보다 작은 스폿을 만들 수 없다는 물리적 한계성은 고용량 광기록 기기의 개발에 커다란 걸림돌로 작용하였으며, 이러한 한계를 극복하기 위한 노력중의 하나로 근접장 광학(NFR : near-field recording) 기술이 대두되기 시작하였다.⁽³⁾

† 책임저자, 정희원, 한양대학교 최적설계신기술연구센터
E-mail : dhchoi@hanyang.ac.kr

Tel : (02) 2290-0443, Fax : (02) 2291-4070

* 한양대학교 최적설계신기술연구센터

** 건국대학교 기계항공공학부

*** 정희원, LG 디지털 연구소

근접장 광학 기술 방식은 크게 SIL(solid immersion lens)을 이용한 방식과 SPM(scanning probe microscopy)을 이용한 방식으로 구분될 수 있다. Fig. 1에는 SIL을 이용한 근접장 기록방식의 원리와 SIL을 장착하기 위한 OFH(optical flying head)의 구조를 간략히 도시하였다. 대물렌즈로 레이저를 SIL에 모아 주면 굴절률이 높은 SIL 내부를 통과한 빛은 밀면에서 초점을 형성하고 이 초점 스폿 직경은 굴절률에 반비례하게 되며, 결국 빛의 회절한계 이하가 된다. 그러나 이러한 근접장 방식의 표면기록에는 광학 헤드와 디스크간 거리가 100 nm 이하로 되면서 가능한 일정한 간격이 유지되어야 하는 응용기술이 전제된다.⁽⁴⁾

본 논문에서는 SIL을 이용한 근접장 기록 방식을 구현하기 위한 설계기술로서 광학 헤드 슬라이더의 다양한 설계요구사항들을 만족시키는 OFH의 ABS(air-bearing surface) 형상설계방법을 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

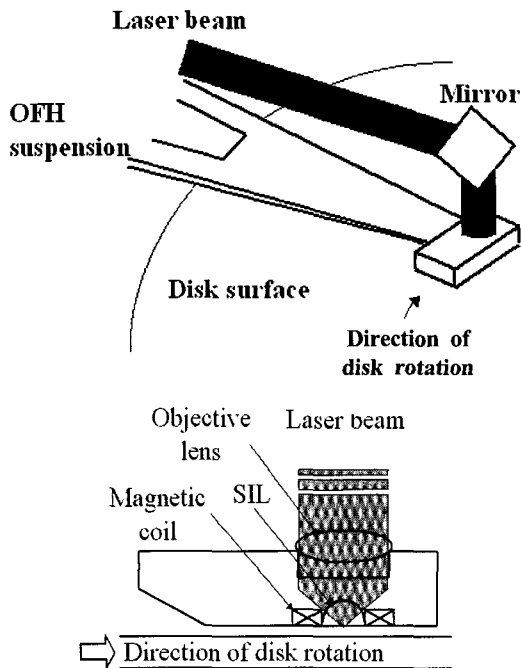


Fig. 1 Optical flying head

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 톨각의 유지가 필요하게 된다.

특히, SIL을 이용한 근접장 광학 정보기기의 경우, 저장매체로 HDD와는 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) 형태가 아닌 L/UL(load/unload) 형태가 채택된다. 따라서 L/UL 형태 적용시 고려되어야 하는 슬라이더의 설계 조건으로는 보다 안정된 로딩 과정(load process)과 보다 감소된 로딩 제거력(unloading force)을 위하여 부압력(suction force)의 중심을 슬라이더의 후미에 위치시키는 것이 필요하다.⁽⁷⁾

마지막으로 SIL 등을 포함한 광학장치의 탑재로 인해서 자기 헤드에 비해 슬라이더에 부과되는 무게가 상대적으로 커지기 때문에 슬라이더의 질량 및 크기 또한 기초 설계시 고려되어야 하는 주요인자가 된다.⁽⁸⁾ 그러나 이는 조절될 수 있는 설계인자가 아니므로 본 논문에서는 광학장치의 전체 치수를 고려하여 슬라이더의 사이즈를 좀더 크게 결정하고, 이때 헤드 슬라이더에 가해지는 예하중(preload)의 값을 HDD 슬라이더 대비 높게 책정하는 것으로 보완하였다.

결국, 근접장 기록방식을 위한 헤드 슬라이더의 설계 요구사항들을 정리하면 다음과 같다. 헤드 슬라이더가 전체 디스크 기록영역 내에서 움직일 때,

- SIL의 부상높이가 주어진 설계 목표값에 대해 일정하게 유지될 것
- SIL의 피치각 및 톨각⁽⁹⁾이 일정하게 유지될 것
- 공기 베어링의 강성⁽¹⁰⁾이 초기값 대비 향상될 것
- 부압력의 무게중심이 슬라이더의 후미에 존재할 수 있도록 전반적인 피치각이 증가될 것

2.2 문제 정식화

본 논문에서는 슬라이더의 부상특성에 결정적인 영

향을 주는 파라미터로서 리세스 두께(recess depth), 테이퍼 각(taper angle), 그리고 레일의 형상을 결정하는 변수들을 설계변수들로 선정하였으며, 다음과 같이 설계 요구사항을 만족시키는 다중목적 최적설계 문제로 정식화하였다.

Find \mathbf{x}
to minimize

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

satisfying

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

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

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

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

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

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

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

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

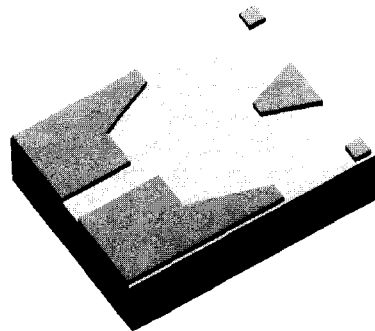
여기서 n 은 슬라이더의 ABS형상을 결정짓는 설계 변수의 개수를 나타낸다. h^* 는 목표 부상높이를 나타내며, w_j ($j=1, 2, 3$)는 각각의 목적함수에 대한 가중치를 나타낸다. 상첨자 L 과 U 는 구속조건에 대한 각각의 상하한 값을 나타내며, Γ 는 초기값 대비 공기 베어링 강성에 대한 성능지수를 나타낸다. 하첨자 min과 max는 디스크 반경방향 변화에 따른 각 트랙에서의 값들 중에 가장 작은 값 그리고 가장 큰 값을 나타내며, 하첨자 dif 는 목적함수의 각 성능지수를 무차원화하기 위해 사용된 상수값을 나타낸다.

식 (1)은 디스크 반경 변화에 대해서도 목표 부상높이에 대해 전반적으로 일정한 부상높이를 유지할 것, 그리고 피치각과 톨각에 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 톨각에 대한 구속조건을, 식 (6)~(8)은 공기 베어링의 강성들에 대한 구속조건을 나타내고 있으며, 식 (9)는 각 설계변수들의 상한 값과 하한 값을 나타낸다.

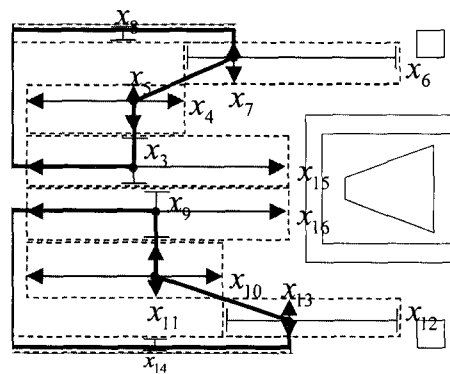
식 (1)~(7)의 최적설계를 위한 전반적인 수치해석 과정은 다음과 같다. 먼저 초기 ABS 형상과 작동조건 등 수치계산에 필요한 데이터와 설계변수 초기값이 가정된다. 주어진 데이터들이 해석기에 입력되면 결정된 슬라이더의 형상에 따라 디스크 반경 변화에 대한 부상특성들이 모두 계산된다.⁽⁹⁾ 여기서 공기베어링에 대한 강성을 계산함에 있어서는 준 정상상태 방법(quasi steady-state method)이 사용되었다. 한편, 이는 다시 최적화 모듈로 입력되어 DOT(design optimization tools)의 SQP(sequential quadratic programming) 방법에 의하여 설계변수가 개선된다. 위와 같은 작업은 설계변수가 제안된 수렴 조건을 만족할 때까지 반복 수행되며, 결국 최적해를 얻으면 프로그램은 종료된다.

3. 수치해석 결과

최적설계를 수행하기 위한 초기 슬라이더 형상은 Fig. 2(a)에 도시된 바와 같이 기존 문헌에서 선행 개발 중인 NFR용 부상형 광학 헤드 슬라이더를 선



(a) Initial design



(b) Geometric design variables

Fig. 2 OFH for NFR

정하였다.⁽³⁾ 설계변수들은 리세스 두께(x_1), 테이퍼 각(x_2), 그리고 레일의 형상을 결정하는 변수들($x_3 \sim x_{16}$)을 Fig. 2(b)에 도시된 바와 같이 선정하였다.

휴대용 전자기기의 응용을 위하여 저장 매체인 디스크 사이즈는 지름 1 inch 내외로 하여 내경과 외경이 각각 5.5 mm와 10.0 mm로 하였으며, 이때 반경에 따른 스쿠각은 5.15 deg와 -6.98 deg로 가정하였다. 디스크의 분당 회전속도는 3600 rpm이며, 예하중은 3.5 gf이다. 부상높이는 광학 헤드가 장착된 위치에서의 값으로 계산되었으며, 피치각과 롤각의 상·하한값은 각각 250 μ rad과 150 μ rad 그리고 4 μ rad과 -4 μ rad로 주어졌다. 공기 베어링 강성은 기존값 대비 30% 이상의 성능을 향상시키는 것으로 가정하였다.

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 nm로 하였다.

컴퓨터 시뮬레이션 결과, Table 1에서 보이는 바와 같이 설계변수 초기값에 대하여 의미 있는 최적해를 얻을 수 있었다. 최적화 과정을 보면, Fig. 3에 도시된 바와 같은 반복계산에 의하여 효과적으로 최적해에

도달하였으며, 이때 정의된 구속조건들은 그림과 같이 모두 만족되었음을 알 수 있었다. 특히, 목적함수의 변화를 보면, 두번의 반복 실행으로 이미 최적값에 근접하고 있었으며, 22번의 반복 실행을 통하여 최적해에 도달하였다. 이때, 방향탐색과 선탐색을 위한 함수계산은 총 418회가 수행되었다.

최적설계된 슬라이더의 형상을 보면, Fig. 4에 도시

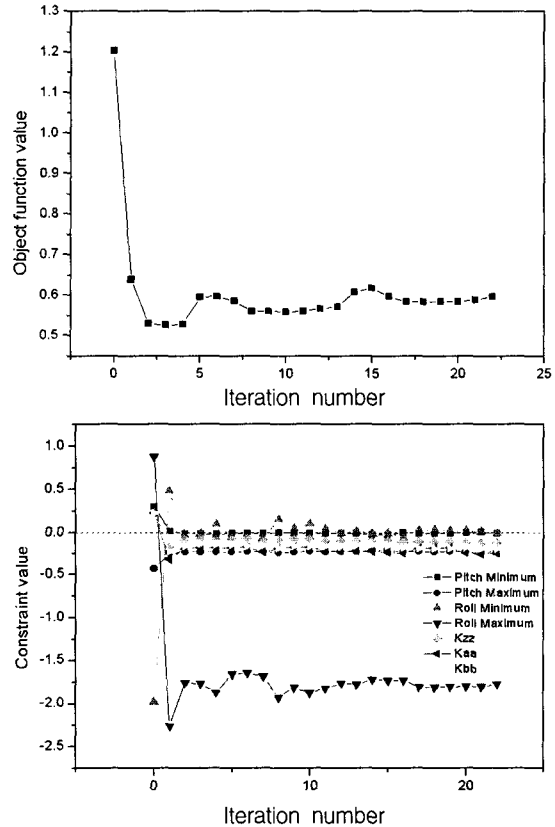


Fig. 3 Convergence history of the cost and constraints

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

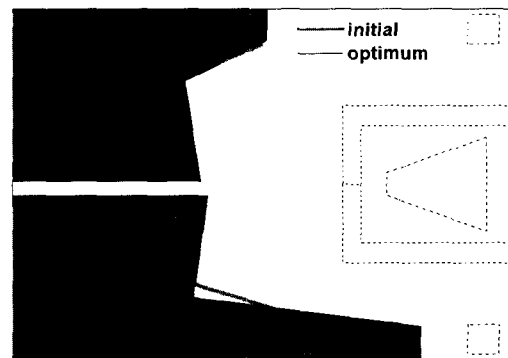


Fig. 4 Optimum OFH

된 바와 같이 초기 형상에 비해 슬라이더 전반부의 레일면적이 증가되면서 비대칭성이 강조되었음을 알 수 있다. 이는 발생하는 양압과 음압의 크기를 크게 함으로써 공기 베어링의 강성을 증가시키면서 부상성능의 안정화를 유도하기 위한 것으로 판단된다.

Fig. 5에서는 디스크 트랙 반경에 대하여 최적설계된 슬라이더의 부상성능, 즉 부상높이, 피치각, 롤각의 크기를 초기 설계치와 함께 직접 비교하고 있다.

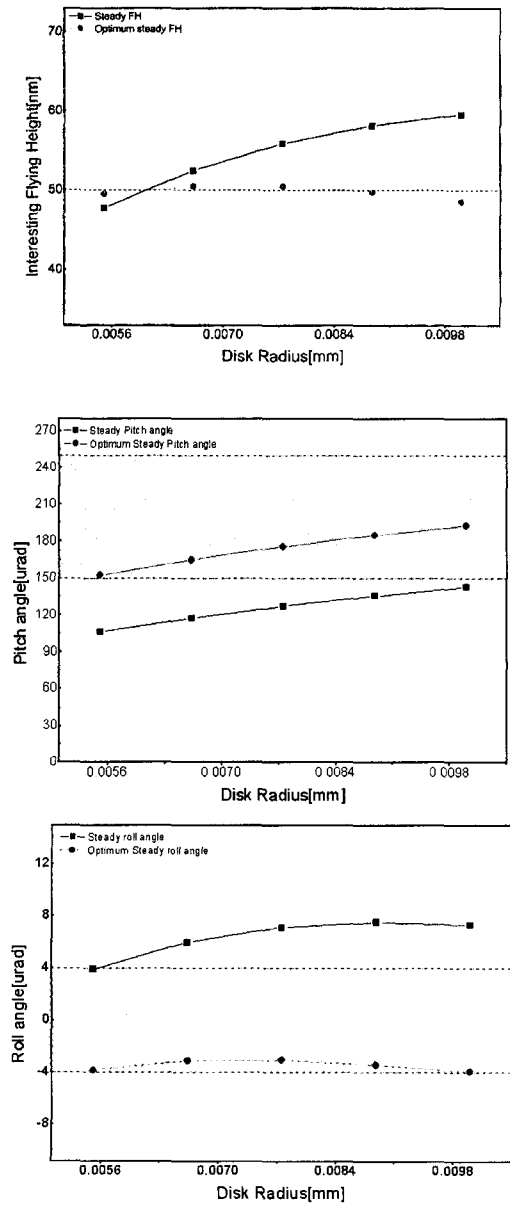


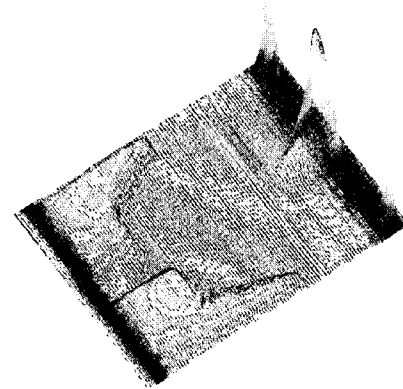
Fig. 5 Flying performances of the optimal design

목표 부상높이에 대하여 최적화된 슬라이더의 부상높이 분포는 최대편차가 0.597로 초기설계의 1.203에 비해 50.4% 정도 감소하였으며, 전 디스크 기록영역에 대하여 전반적으로 일정한 부상높이를 유지하고 있음을 나타내고 있다. 또한 최적화된 슬라이더의 피치각과 롤각 역시 디스크 전 기록영역에서 제한조건을 모두 만족하고 있으며, 가능한 일정한 크기를 나타내고 있다.

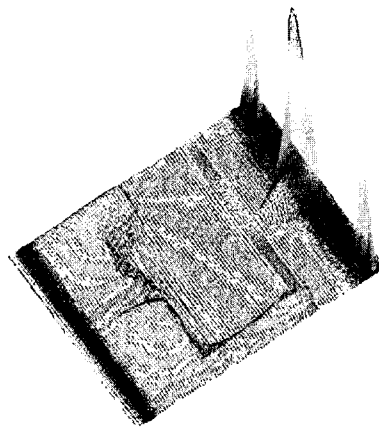
한편, 슬라이더의 진동특성 및 충돌 가능성 지수인 공기베어링 강성은 Table 2에 표기된 바와 같이 초

Table 2 Air-bearing stiffness

	K_{zz} (kN/m)	K_{aa} (N-m/rad)	K_{hh} (N-m/rad)
Initial	480	1.29	0.31
Optimum	647	1.90	0.44
Increment (%)	33.9	47.3	41.9



(a) Initial design



(b) Optimum design

Fig. 6 Pressure distributions

기치 대비 모두 약 30% 이상 강화되고 있어서 헤드와 디스크 사이의 동적안정성 면에서도 매우 우수할 것으로 예상된다.

슬라이더의 초기 형상과 최적 형상에서의 압력분포도를 비교해 보면, Fig. 6에서 보는 바와 같이 음압 발생 영역의 무게 중심이 슬라이더의 후미쪽으로 이동하였음을 알 수 있다. 이는 L/UL 성능을 향상시키기 위하여 슬라이더의 피치각을 적정 수준 이상으로 증가시킨 결과이다. 기존 HDD 슬라이더와 달리 OFH의 경우는 SIL의 장착으로 슬라이더 피트의 길이방향 위치를 더 이상 슬라이더 후미로 이동시킬 수 없게 된다. 따라서 슬라이더의 형상 변수들만을 사용하여 슬라이더의 피치각 성능을 향상시키는 최적설계 문제의 도입은 매우 효과적임을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 차세대 정보저장기기로 개발되고 있는 SIL을 이용한 근접장 방식의 부상형 광학 헤드의 개발을 수행하고자 한다. 이를 위하여 슬라이더의 설계요구사항들을 L/UL 형태 도입 및 SIL의 장착조건 등을 고려하여 설계문제로 정의하였으며, 이를 형상 최적설계문제로 정식화하여 요구되는 부상성능을 지닌 슬라이더의 형상 설계방법을 제안하였다. 자동화된 수치해석 과정을 통하여 초기설계보다 우수한 부상성능을 지닌 최적해를 효과적으로 얻을 수 있었으며, 그 결과값들에 대한 부상성능들을 초기값과 직접 비교 검토함으로써 제안된 설계방법의 효율성을 입증할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 최적설계신기술연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Miu, D. K., Frees, G. M. and Gompertz R. S., 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) Shinoda, M., Tanaka, Y., Akiyama, Y., Imanishi, S. and Kanno, M., 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) Kim, S., Kim, Y., Park, J.-M., Kim, J.-Y., Lee, J.-K., Chung, K.-H. and Kim, D.-E., 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) 안채현, 임경화, 2003, "근접장 광기록용 슬라이더의 동특성 분석," 한국소음진동공학회논문집, 제 13 권, 제 3 호, pp. 164~171.

(5) Saito, K., Nakaoki, A. and Kaneko, M., 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 드라이브 연구," 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 444~448.

(7) Hu, Y., 1999, "Ramp-load Dynamics of proximity Recording Air Bearing Sliders in Magnetic Hard Disk Drive," ASME Journal of Tribology, Vol. 121, pp. 560~567.

(8) Chekanov, A., Birukawa, M., Itoh, Y. and Suzuki, T., 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 A권, 제 27 권, 제 3 호, pp. 343~348.

(10) Kang, T.-S., Choi, D.-H. and Jeong, T.-G., 2001, "Optimal Design of HDD Air-Lubricated Slider Bearings for Improving Dynamic Characteristics and Operating Performance," ASME Journal of Tribology, Vol. 123, pp. 541~547.