

트랙탐색 안정성과 베어링 강성 향상을 위한 공기윤활 슬라이더 베어링의 최적설계

A Design of Air-Lubricated Slider Bearings for Improving the Flying Stability in Track Seek and Increasing the Air-Bearing Stiffness

강태식, 박노열, 이성창, 최동훈*, 정태건**

Tae-Sik Kang, No-Yeol Park, Sung-Chang Lee, Doon-Hoon Choi*, Tae-Gun Jeong**

Key Words : Air-Lubricated Slider Bearing (공기윤활 슬라이더 베어링), Air-Bearing Stiffness (공기베어링 강성), Air-Bearing Surface (공기 윤활면), Flying Stability (부상 안정성), Hard Disk Drive (하드디스크 드라이브), Optimum design (최적설계)

ABSTRACT

Flying attitudes of the slider, which are flying height, pitch and roll, are affected by the air flow velocity, the skew angle, and the manufacturing tolerances. Traditional designs of the air bearing surface have considered only the flying performances for the variations in the air flow velocity and the skew angle, which are determined by the radial position. In this study, we present the new shape design of the air bearing surface by considering the track seek performance and the air bearing stiffness as well as the traditional design requirements. The optimization technique is used to improve the dynamic characteristics and operating performance of the newly proposed air bearing surface shape design further. The optimized configuration is obtained automatically and the optimally designed sliders show the enhanced flying and dynamic characteristics.

1. 서론

HDD (hard disk drive)는 Fig. 1 과 같은 헤드-디스크의 조합체 (head-disk assembly)이며, 이는 동압 공기윤활에 의해 디스크 위에 부상하는 슬라이더, 데이터의 기록/재생과 관련되며 슬라이더의 후미에 장착되는 헤드, 데이터의 저장 매체인 디스크, 슬라이더를 지지하는 서스펜션, 그리고 헤드를 디스크 상의 원하는 트랙위치로 제어하는 액츄에이터 등으로 구성된다. 스피들 모터에 의해 디스크가 고속으로 회전하게 되면, 디스크 표면에 접촉하고 있던 슬라이더는 동압 공기윤활에 의하여 부상하게 되며, 슬라이더의 후미에 장착된 헤드에서 디스크 트랙의 데이터를 기록 또는 재생하게 된다.

데이터 기록 및 재생에 가장 큰 영향을 끼치는 인자는 헤드와 디스크 사이의 윤활막 간극이며 50년대 후반 IBM 350 시스템의 20 μm 에서 90년 초반에는 100 nm 이하로 낮아지고, 현재 20 nm 이하까지 감소하고 있는데, 고기록밀도의 필요성에 따라 이러한 추세는 앞으로 지속될 전망이다. 그러나, 계속된 윤활막 간극의 감소에 따라 슬라이더의 빈번한 트랙 이동에 따른 공기윤활막의 안정성 문제와 제조오차에 따른 부상특성의 변화가 가

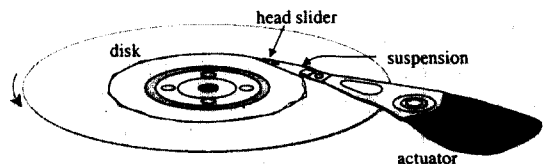


Fig. 1 Schematic view of the head-disk assembly

정희원, 삼성종합기술원

* 한양대학교

**건국대학교

장 큰 문제로 대두되었다. 따라서 다양한 운전조건 하에서 HDI (head-disk interface) 의 성능을 정확히 예측하는 공기유향막 해석에 관한 연구가 활발히 수행되었으며, 최근에는 부상능을 향상시키기 위한 슬라이더의 형상설계가 새로운 관심으로 부각되기에 이르렀다.

기존의 슬라이더의 ABS (air-bearing surface) 설계들은 새로운 슬라이더 개발을 위해 유용한 기초 자료로서 활용될 수 있다. 그러나 설계 방법에 있어서, 이들은 대부분 경험에 의존하는 시행착오적인 기법(trial and error)을 사용하며, 다양한 설계 요구사항 (design requirement) 들을 폭 넓게 고려하지 못하고 단지 하나의 설계 요건만을 충족시키는 비효율적인 설계방식을 사용하였다. 또한, 주어진 설계 요구사항을 만족시킨다 하더라도 설계자가 원하는 목표 부상높이 (target flying height)가 바뀔 때마다, 혹은 슬라이더의 운전조건 등이 바뀔 때마다, 기존 설계방식들은 그 동안의 시행오차들을 매번 반복해야 하는 불편함을 지닌다.

O'Hara 와 Bogy⁽¹⁾는 기존의 설계방법 대신에 TPC (transverse pressure contour) 슬라이더 레일의 내측 스텝 폭을 설계변수로 설정하여 데이터 영역 내에서 부상높이의 변화량을 최소화하는 형상설계를 전역 최적화 방법 (Global optimization method)인 유전자 알고리즘 (genetic algorithm)과 시뮬레이티드 어닐링 (simulated annealing) 방법을 이용하여 수행하였다. 그리고 O'Hara⁽²⁾ 등은 시뮬레이티드 어닐링 방법으로 NP (negative pressure) 슬라이더의 부상높이의 변화를 최소화하고 부상높이, 피치, 롤 방향에 대한 베어링의 민감도를 최소화하는 형상 최적설계를 수행하였다. 이와 같은 전역 최적화 방법은 설계 변수에 대한 민감도 계산이 필요하지 않은 장점을 지니고는 있으나, 설계변수가 많아지고 설계 영역이 커지게 되면 수치계산량이 급격히 증가하는 단점을 지니게 된다. 한편 Choi 와 Yoon^(3,4)은 TF (taper flat) 슬라이더와 TPC 슬라이더에 대한 최적의 부상상태를 결정하기 위하여 국소 최적화 기법 (local optimization method)을 사용하였다. 이 경우에는 디스크 반경에 대한 부상상태의 안정성을 고려하는 형상설계를 수행하였다. 그리고 Choi 와 Kang⁽⁵⁾은 국소 최적화 기법을 이용하여 NP 슬라이더의 형상 최적설계를 수행하였다. 이와 같은 국소 최적화 기법은 많은 설계 변수를 효율적으로 다룰 수 있으며, 제한조건도 쉽게 다룰 수 있는 장점을 지니고 있다.

기존 슬라이더 ABS 설계는 비효율적이고 시행착오적인 설계 방법이 대부분이다. 최적설계 기

법을 이용한 경우에도 디스크 반경에 따른 공기의 유입속도와 스큐각에 대한 부상상태만을 고려하는 설계가 주를 이루고 있다. 본 연구의 목적은 이와 같은 공기의 유입속도와 스큐각의 변화 뿐만 아니라 HDD의 작동조건인 트랙탐색과 공기베어링의 강성을 극대화하는 새로운 슬라이더 ABS 형상을 제안하고, 국소 최적화 방법을 이용하여 설계 요구사항들을 모두 만족시키는 개선된 슬라이더 ABS 형상을 제시하는데 있다.

2. 트랙탐색 모델링

디스크의 정보를 기록/재생하기 위해서 트랙탐색이 빈번하게 행해지며, 이로 인해 ABS로의 공기 유입속도와 방향이 변화되어 슬라이더 부상특성에 영향을 미치게 된다. Cha 등⁽⁶⁾은 트랙탐색시의 슬라이더 운동을 준정적 (quasi-static)으로 모델링하였으며, 수치해석 결과를 실험과 비교 검토함으로써 이와 같은 모델링의 유용성을 검증하였다. 그러나, 적용된 ABS 형태는 TPC 슬라이더로 한정하였으며 트랙탐색시의 물각의 변화를 고찰하지 않았다. Liu 와 Soh⁽⁷⁾도 트랙탐색 효과를 준정적 상태로 모델링하고, 세 가지 형태의 슬라이더에 대해서 트랙탐색의 영향을 고찰하였다. 한편, Deng 등⁽⁸⁾은 두 가지의 NP 슬라이더에 대한 트랙탐색의 영향을 고찰하기 위하여, 공기유향 방정식과 슬라이더의 운동방정식을 동시에 해석하였다. 그러나 이와 같은 해석 방법은 운동방정식 계산에 매 시간 구간에 대해 압력 계산이 필요하므로 많은 계산시간이 필요하다는 단점을 지니고 있다.

본 연구에서는 트랙탐색을 Cha 등⁽⁶⁾과 동일하게 준정적으로 모델링하였다. 준정적으로 모델링할 경우 슬라이더의 관성을 고려할 수 없는 단점을 지니고 있지만, 슬라이더 관성이 부상특성에 미치는 영향은 공기베어링의 강성과 감쇠의 영향에 비해 매우 작으므로 무시해도 결과에는 큰 차이를 보이지 않는다⁽⁷⁾.

슬라이더의 부상특성에 큰 영향을 미치는 인자로는 공기의 유입속도와 스큐각이다. HDD에서 스큐각은 슬라이더의 길이방향과 트랙 방향사이의 각을 의미하며, 이것을 기하학적 스큐각(geometric skew angle) γ_g 라 하고, 트랙탐색 속도에 의해 새롭게 형성된 스큐각을 공기베어링 스큐각(air-bearing skew angle) γ_a 로 명명한다. 트랙탐색시의 공기 유입속도 v_a 는 디스크 표면의 선형속도와 트랙탐색 속도의 합으로 얻어진다. 이를 도시하면 Fig. 2와 같다. 실제 트랙탐색은 트랙과 트랙사이

의 운동이지만, 본 연구에서는 디스크의 ID에서 디스크의 OD로, 그리고 OD에서 ID로 전체 트랙탐색이 이루어지는 경우 (full stroke seek)에 대한 부상특성을 살펴보았다. 이는 전체 트랙탐색의 속도 분포가 임의의 작은 트랙탐색 속도 분포를 모두 포함할 수 있기 때문이다.

Figure 3과 같이 트랙탐색 속도는 디스크 반경이 22 mm에서 26 mm까지는 속도가 2.5 m/s 가 될 때까지 가속되며, 26 mm에서 38 mm 구간에서는 최대속도 2.5 m/s를 가지며 등속 운동하게 된다. 그리고 38 mm에서 42 mm까지는 트랙탐색속도가 0이 될 때까지 감속하게 된다. 이와 같은 트랙탐색 속도 분포에 따라 공기베어링의 스쿠각 γ_a 과 공기유입 속도 v_a 의 변화량을 구해보면 Fig. 4와 같다.

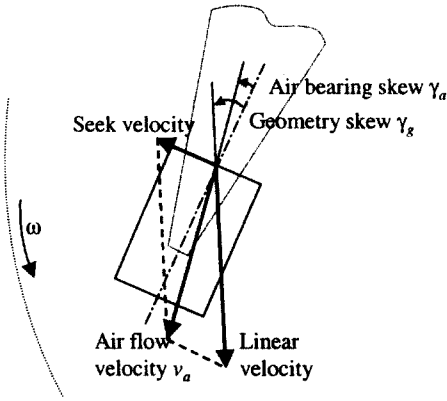


Fig. 2 Air bearing skew and air bearing velocity

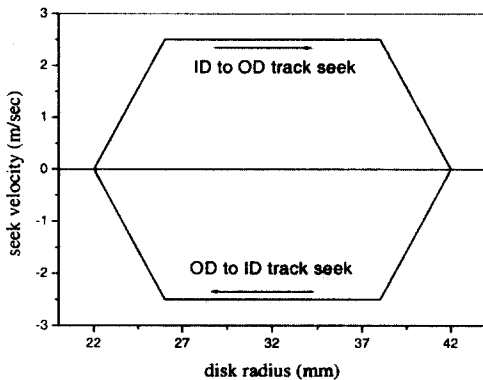


Fig. 3 Track seeking velocity profile

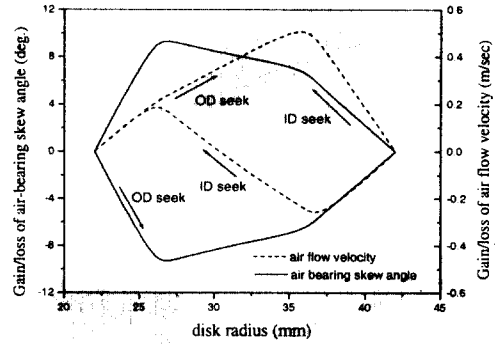


Fig. 4 Gain and loss of the air bearing skew angle and air flow velocity

3. 공기 베어링의 강성

베어링의 동특성 계수인 강성과 감쇠계수 계산에는 섭동법이 적용된다. 지배방정식으로는 Fukui-Kaneko⁽⁹⁾가 제안한 공기윤활 방정식이 사용되며, 수치해석 방법으로는 임의의 ABS 형상에 대해서도 유용한 해를 얻을 수 있는 제어체적법을 적용한 유한차분법이 사용된다. 섭동법은 공기베어링의 스쿠즈 효과를 고려할 수 있을 뿐만 아니라 계산시간도 작아 동특성 개선을 위한 ABS 형상설계에 유용하게 이용할 수 있다.

일반화된 공기윤활 방정식인 식 (1)에서 P , H , 그리고 Q 에 대한 각각의 미소변동에 대한 섭동량을 구해보면 식 (2)~(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot (QPH^3 \nabla P - \Lambda PH) - \sigma \frac{\partial PH}{\partial T} = 0 \quad (1)$$

$$H = H_0 + \Delta H \quad (2)$$

$$P = P_0 + \Delta P \quad (3)$$

$$Q = Q_0 + \Delta Q \quad (4)$$

여기서 하첨자 0은 정상상태의 값을 나타낸다. 즉, P_0 , H_0 , Q_0 는 각각 정상상태의 압력, 윤활간극, 포아제 유동항을 의미한다.

섭동량 ΔH 와 ΔP 는 Fig. 5의 병진 z , 피치 α , 롤 β 로 표현되는 슬라이더의 운동에 대하여 식 (5)

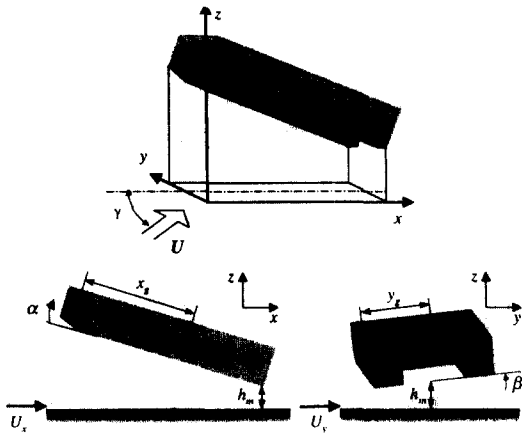


Fig. 5 Mathematical model of the slider

와 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\Delta H = Z + \Theta(X_G - X) + \Pi(Y_G - Y) \quad (5)$$

$$\Delta P = G_1 Z + G_2 \Theta + G_3 \Pi \quad (6)$$

여기서, $Z = z/h_m$, $\Theta = \alpha l/h_m$, $\Pi = \beta l/h_m$ 이며, G_1 , G_2 , G_3 는 각각 병진 z , 피치 α , 롤 β 에 대한 동압력 (dynamic pressure)을 나타낸다. 한편, 식 (4)에서 Q 의 섭동량 ΔQ 는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\Delta Q = D_0 \frac{\partial Q}{\partial D} (P_0 \Delta H + \Delta P H_0) \quad (7)$$

식 (5) ~ (7)을 각각 식 (2) ~ (4)에 대입한 후, 이를 식 (1)에 대입하고 라플라스 변환하면 식 (8)과 같이 동압력 G_i 에 대한 지배 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left\{ \Delta H - \left(Q_0 H_0^3 + D_0 \frac{\partial Q}{\partial D} P_0 H_0^4 \right) \nabla P \right\} G_i - Q_0 P_0 H_0^3 \nabla G_i \\ = -j \Omega \sigma (H_0 G_i + P_0 F_i) - \nabla \cdot \left\{ \Delta P_0 F_i - \left(3 Q_0 P_0 H_0^3 + D_0 \frac{\partial Q}{\partial D} P_0^2 H_0^3 \right) \nabla P_0 F_i \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)에서 Ω 는 무차원화된 각속도 (dimensionless angular frequency)로 각속도 ω (angular frequency)와

기준 각속도 ω_0 (normalizing angular frequency)의 비 (ratio)이며, F_i 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} F_1 &= 1 & \text{if } t=1 & : \text{병진운동} \\ &= X_G - X & \text{if } t=2 & : \text{피치운동} \\ &= Y_G - Y & \text{if } t=3 & : \text{롤운동} \end{aligned} \quad (9)$$

식 (8)로부터 G_i 를 계산한 후 이를 이용하여 공기 베어링의 무차원 강성행렬 K_{rs} 과 감쇠행렬 C_{rs} 를 식 (10)과 같이 구할 수 있다⁽¹⁰⁾.

$$K_{rs} + j \Omega C_{rs} = - \int_0^B \int_0^l F_r G_s dX dY \quad (10)$$

여기서, r, s 가 각각 1이면 병진운동, 2이면 피치운동, 3이면 롤운동과 관련된 동특성이며, B 는 슬라이더의 길이로 무차원화된 슬라이더의 너비를 나타낸다 ($B=b/l$). 식 (10)을 이용하여 강성행렬 k_{rs} 와 감쇠행렬 c_{rs} 는 식 (11)과 같이 구해진다.

$$k_{rs} + j \omega c_{rs} = \chi_{rs} (K_{rs} + j \Omega C_{rs}) \quad (11)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \chi_{rs} &= p_a b l / h_m & \text{if } r=1 \text{ and } s=1 \\ &= p_a b l^2 / h_m & \text{if } r=1 \text{ and } s=2,3 \\ &= p_a b l^2 / h_m & \text{if } r=2,3 \text{ and } s=1 \\ &= p_a b l^3 / h_m & \text{if } r=2,3 \text{ and } s=2,3 \end{aligned} \quad \text{이다.}$$

4. 설계 문제 정식화

슬라이더의 설계 요구사항들을 각 항목 별로 간단히 정리하면 다음과 같다.

- 디스크 반경에 따른 부상높이와 롤각의 변화가 작고 적절한 피치각 유지가 필요하다.
- 트랙탐색시의 부상높이와 롤각 변동이 작고 적절한 피치각 유지가 필요하다.
- ABS 제조와 HDA 조립 오차를 고려하여 공기베어링 강성은 커야 한다.

슬라이더는 액츄에이터의 회전구동에 의하여 디스크 상의 데이터 영역을 이동하므로, 슬라이더의 부상상태는 슬라이더가 위치한 디스크 트랙 반경에 의하여 결정된다. 따라서 부상상태를 나타내는 변수들, 즉 부상높이 h , 피치각 α , 롤각 β 는 디스크 트랙반경 r 에 대한 연속 함수로 표현되며, 디스크 상의 데이터 영역에 대한 이들의 경향은

부상상태 변수들의 최소 또는 최대값으로 대표된다. 부상상태 변수들의 최소값과 최대값을 각각 하첨자 \min 과 \max 로 나타내면, 상기 정리된 각 설계 요구사항들은 식 (12)와 같이 표현된다.

$$\text{Minimize } (h_{\min} - h^*)^2 + (h_{\max} - h^*)^2 \quad (12a)$$

$$\text{Minimize } \frac{1}{k_{zz}} + \frac{1}{k_{\alpha\alpha}} + \frac{1}{k_{\beta\beta}} \quad (12b)$$

$$\text{Satisfying } \alpha^L \leq \alpha \leq \alpha^U \quad (12c)$$

$$\text{Satisfying } \beta^L \leq \beta \leq \beta^U \quad (12d)$$

$$\text{Satisfying } h^* - \gamma_h \leq h' \leq h^* + \gamma_h, \quad \beta^L \leq \beta' \leq \beta^U \quad (12e)$$

여기서, 상첨자 *는 설계자가 원하는 목표값(target value)를 의미하며, L 과 U 는 각각 하한값과 상한값을 나타낸다. 그리고 t 는 트랙탐색(track seek)을 나타낸다. 식 (12b)의 하첨자 $zz, \alpha\alpha, \beta\beta$ 는 각각 부상높이, 피치, 롤에 대한 강성값을 나타낸다.

식 (12a)는 디스크 반경에서 계산된 부상높이의 목표 값에 대한 분산율, 식 (12b)는 각 부상변수들에 대한 배어링 강성의 역수의 합을 나타내며, 이들 각각은 설계 요구사항을 만족시키기 위하여 최소화되어야 한다. 식 (12c)와 식 (12d)는 하한값과 상한값 사이에 위치하는 피치각과 롤각의 적정범위를 나타낸다. 그리고, 식 (12e)는 트랙탐색을 고려할 경우의 부상높이와 롤각이 유지해야 하는 적정범위를 나타낸다.

\mathbf{X} 가 형상 최적설계를 위한 설계변수 벡터일 때, 앞의 설계 요구사항들은 식 (13)을 만족하면서 식 (14)를 최소화하는 다중 목적함수 최적화 문제(multi-criteria optimization problem)로 정식화된다.

Minimize

$$F = w_h \left\{ (H_{\min} - 1)^2 + (H_{\max} - 1)^2 \right\} + \left\{ w_{sh} \left(\frac{1}{K_{zz}} \right) + w_{\alpha\alpha} \left(\frac{1}{K_{\alpha\alpha}} \right) + w_{\beta\beta} \left(\frac{1}{K_{\beta\beta}} \right) \right\}, \quad (13)$$

subject to

$$A_{\min} \geq 1; A_{\max} \leq 1, \quad (14a)$$

$$B_{\min} \geq 1; B_{\max} \leq 1, \quad (14b)$$

$$H_{\min}^i \geq 1 - \Gamma_h, H_{\max}^i \leq 1 + \Gamma_h, \quad (14c)$$

$$B_{\min}^i \geq 1, B_{\max}^i \leq 1$$

$$x^L \leq x_i \leq x^U \quad (i=1, \dots, n). \quad (14d)$$

식 (13)은 최적설계 문제로 정식화된 목적함수를 나타내며, 설계 요구사항인 식 (12a)와 식 (12b)를 가중치의 곱으로 표현한 무차원화된 형식이다. 이는 부상높이의 분산과 배어링 강성의 역수 합이며, $w_h, w_{sh}, w_{\alpha\alpha}, w_{\beta\beta}$ 는 각각의 가중치를 나타낸다. 식 (14)은 무차원화된 구속 조건함수들을 나타낸다. $K_{zz}, K_{\alpha\alpha}, K_{\beta\beta}$ 는 무차원화된 공기 배어링 강성을 나타내며, $A_{\min}, A_{\max}, B_{\min}, B_{\max}$ 는 식 (15)로 표현되는 무차원화 피치각과 롤각을 나타낸다. 그리고 H 와 Γ_h 는 각각 무차원화된 부상높이와 부상높이 한계값으로 식 (16)과 같다.

$$A_{\min} = \frac{\alpha_{\min}}{\alpha^L}, \quad A_{\max} = \frac{\alpha_{\max}}{\alpha^U}, \quad (15)$$

$$B_{\min} = \frac{\beta_{\min}}{\beta^L}, \quad B_{\max} = \frac{\beta_{\max}}{\beta^U}.$$

$$H = \frac{h}{h^*}, \quad \Gamma_h = \frac{\gamma_h}{h^*}. \quad (16)$$

식 (14d)는 경계 구속조건(side constraint)으로 최적화 과정 중의 설계변수들의 실질적인 허용범위를 나타내며, n 은 설계변수의 개수를 나타낸다.

무차원화는 단위에 무관하게 동일한 차원을 갖게 하기 위한 것으로 최적설계시 성공적인 수렴성을 보장하는 중요한 요소중의 하나이다. 그리고 목적함수에 포함된 가중치는 전체 목적함수 값에 대한 그 항의 중요도를 나타낸다.

형상 최적설계 프로그램의 전반적인 알고리즘은 Fig. 6 과 같다. 주어진 슬라이더 모델에 대하여 수치계산에 필요한 모든 데이터들이 입력되면, 형상 최적설계를 위한 설계변수 초기값 \mathbf{X}_0 가 가정된다. 이로부터 슬라이더 ABS 의 형상치수들이 모두 정해지며, 부상상태 해석모듈(static analysis module)에서는 5 개의 디스크 반경에 대한 부상상태 값 h, α, β 와 ID 와 OD 로 트랙 탐색시에는 7 개의 디스크 반경에 대한 부상상태 값 h', α', β' 이 계산되며, 그리고 공기배어링의 강성계수 k_{zz} ,

k_{am} , k_{pp} 가 각각 계산된다. 목적함수/구속조건함수 평가모듈 (cost/constraints evaluation module)에서는 계산된 부상상태 값들과 공기베어링 강성계수를 이용하여 목적함수 F 와 구속조건함수 g 값들이 계산된다. 계산된 목적함수와 구속조건함수 값들은 최적화모듈 (optimization module)에서 사용되며, 설계변수들은 최적화 기법에 의하여 수렴조건이 만족될 때까지 개선된다. 최적화 과정에서 부상상태 해석 모듈과 목적함수/구속조건함수 평가모듈은 설계변수들이 개선될 때마다 요구된다.

부상상태 해석모듈에서 ABS에 발생하는 압력분포의 수치적 계산은 제어체적법 (control volume method)을 이용하며, 수렴성 향상을 위해 다중 격자법을 이용한다. 그리고 해석을 정확성을 고려하기 위하여 압력의 변화가 급격한 곳은 좀더 조밀한 격자를 구성한다. 최적화모듈에서는 Vanderplaats⁽¹¹⁾가 개발한 ADS (Automated Design Synthesis)를 사용하며 최적설계 방법으로 MMFD 방법 (modified method of feasible direction)을 적용한다.

5. 최적설계 수행 결과

최적설계를 위한 초기 ABS 설계는 Fig. 7과 같이 얇은 단(shallow step depth)을 가지는 NP 슬라이더이며 데이터의 기록 및 재생을 위한 헤드는 후미 중앙레일에 위치한다. 이와 같은 형태의 슬라이더는 얇은 단에 의해 보다 빠른 부상압력 형성을 이룰 수 있으며 중앙에 위치한 넓은 후퇴면적 (recess depth)에서는 큰 부압(negative pressure)을 발생시킬 수 있는 특징을 지니게 된다.

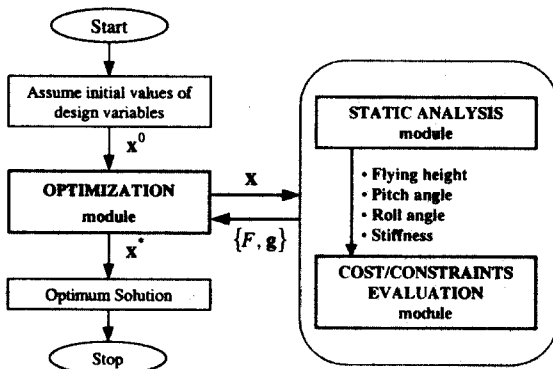


Fig. 6 Flow chart for the design optimization

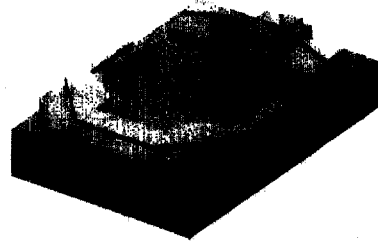


Fig. 7 Air bearing surfaces of the new design

식 (13)의 다중 목적함수에 포함된 가중치인 w_h , w_{sh} , w_{sa} , w_{sb} 의 값은 각각 100, 0.25, 0.05, 0.005를 사용하였다. 이와 같이 서로 다른 값을 사용하는 이유는 무차원화를 수행하더라도 부상상태 값과 베어링 강성계수의 값은 서로 크기가 다르므로 상호간의 크기를 고려하여 정하기 때문이다. 그리고 목표 부상높이 h^* 는 20 nm로 설정하고, 식 (14)에 포함되는 피치각의 설계 하한값 α^L 과 상한값 α^U 는 각각 100 μ rad과 200 μ rad으로, 톨각의 설계 하한값 β^L 과 상한값 β^U 는 각각 0 μ rad과 30 μ rad으로 정하였다. 그리고 트랙탐색에 대한 구속조건식에서 γ_h 를 5 nm로 정하여 트랙탐색으로 인한 부상상태의 변동량이 목표 부상높이에서 5 nm 이상 커지지 않도록 제한하였으며, 톨각의 변동량도 최소 0 μ rad, 최대 30 μ rad을 벗어나지 않도록 제한하였다.

부상높이, 피치각, 톨각에 큰 영향을 미치는 인자들을 중심으로 최적설계에서 적용되는 설계변수 X_0 가 결정된다. 우선 ABS 형상에 관련된 설계변수는 Fig. 8과 같이 8개이며, 설계변수의 경계조건은 각 그림의 사각형 박스와 화살표로 정하여 다양한 형상을 고려할 수 있도록 하였다. 그리고, 부상특성에 관련된 슬라이더 폭 방향으로의 피벗 위치(y_F), 홈 깊이 (δ), 그리고 얇은 단 (shallow step)의 깊이 (δ_s)를 설계변수로 선정하였다. 그리고 이들에 대한 초기값들은 Table 1의 값을 사용하였으며, 이들 각각의 경계조건은 피벗위치의 경우 0.44 mm ~ 0.56 mm로, 홈 깊이 (δ)의 경우는 1 μ m ~ 7 μ m로, 그리고 얇은 단의 깊이 (δ_s)는 0.1 μ m ~ 0.5 μ m정하였다. 그리고 슬라이더의 ABS 형상과 관련된 설계변수들은 슬라이더의 폭 방향으로 대칭을 이루도록 설정함으로써 설계변수의 개수를 줄일 수 있는 장점과 동시에, 이와 같이 ABS 형상이 대칭이면 디스크의 상·하면에 모두 장착하여 사용할 수 있는 장점을 지니게 된다.

다중격자법을 이용할 경우 가장 큰 격자는

슬라이더의 길이 방향과 너비 방향으로 동일하게 98 개의 격자를 사용하며, 초기 압력 및 경계조건은 대기압으로 설정한다. 부상높이는 헤드가 부착된 중앙 후미에서 측정된다. 그리고 트랙탐색을 표현하는 속도 분포는 Fig. 3 을 이용한다.

Figure 9 는 NEW 슬라이더 ABS 의 초기설계와 최적설계를 동시에 나타낸다. 피벗위치 y_F 의 최적값은 0.540 mm 로 초기설계보다 0.04 mm 증가하였다. 그리고 홈 깊이 δ 는 1.666 μm 로 초기설계보다 0.334 μm 감소하였으며, 얇은 단의 깊이 δ_s 는 0.197 μm 로 초기설계에서 많은 변화를 보이지 않는다.

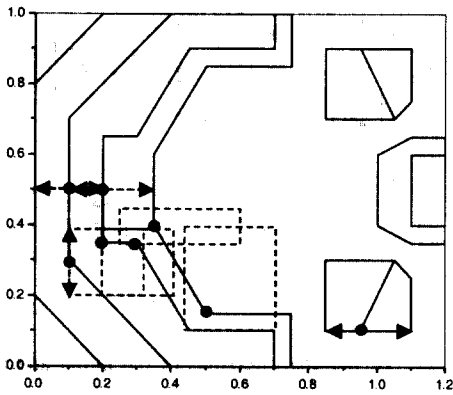


Fig. 8 Design variables and side constraints of the air bearing surfaces

Table 1 Dimensions and operating conditions

		NEW slider
Slider configuration	Slider dimension ($l \times b \times t$) (mm)	1.2×1.0×0.3
	Pivot location (x_F / y_F) (mm)	0.6 / 0.5
	Recess depth (μm)	2.0
	Shallow depth (μm)	0.2
	Crown (nm)	20
	Camber (nm)	10
	Twist (nm)	0
Operating condition	Disk rotation speed (rpm)	5400
	Pre-load (gf)	2.0
	Ambient pressure (Pa)	1.0135×10^5
	Mean free path (nm)	63.5
	Viscosity of air (kg/m/s)	1.806×10^{-5}

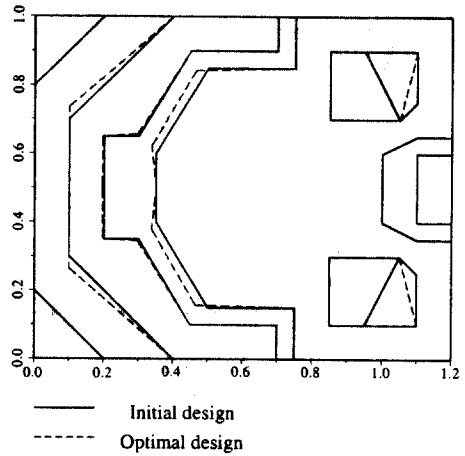


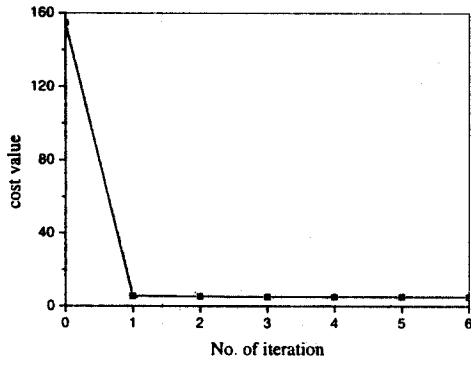
Fig. 9 Initial and optimized configuration of the slider

Figure 9 에서 얇은 단 영역을 제외한 부상압력이 발생하는 총 ABS 레일 면적은 최적설계의 경우 0.232 mm^2 로 초기설계의 0.255 mm^2 보다 약 9 % 이상 감소하였다. 이러한 면적 감소가 두드러지게 나타나는 부분은 슬라이더 양 측면 레일의 후방에서 나타난다. 그리고 슬라이더 중앙에 위치한 홈의 넓이는 얇은 단의 면적이 줄어들면서 보다 넓어지게 되어 많은 부압이 발생하게 된다.

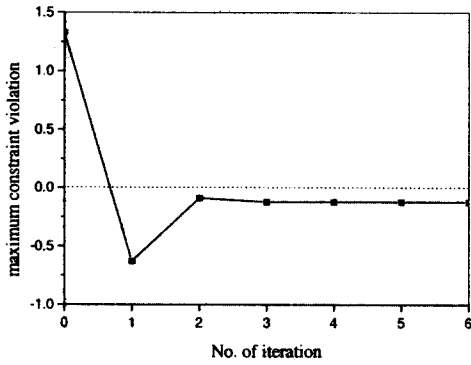
최적설계에서 최적화를 수행하는 동안 목적함수의 수렴 과정과 제한조건의 최대 위배량을 각각 Fig. 10 에 도시하였다.

최적값에 도달하기 위한 수행 횟수는 모두 6 번의 반복 실행이 수행되었으며, 최적값에서 제한조건의 최대 위배량은 만족할 만한 영역에 위치하고 있음을 알 수 있다. 반복 실행 횟수에 따른 목적함수의 변화를 살펴보면 단지 1 번의 반복 수행으로 이미 최적값에 접근하고 있음을 알 수 있으며, 최적화를 수행하는 동안 방향탐색과 선택탐색을 위한 함수계산은 각각 90 회와 21 회가 수행되었다.

Figure 11 은 각각 디스크 트랙반경에 대한 최적설계된 슬라이더의 부상높이, 피치각, 물각을 초기설계와 동시에 나타내어 비교한 것이다. 우선 Fig. 11 (a)에서 목표 부상높이에 대한 최적화된 슬라이더의 부상높이가 최대 편차는 1.54 nm 로 초기설계의 19.07 nm 와 비교하면 약 92 % 감소하였다. 그리고 Fig. 11 (b), (c)와 같이 최적화된 슬라이더의 피치각과 물각은 전 디스크 영역에서 제한조건을 모두 만족하고 있다.



(a)



(b)

Fig. 10 Results of the optimization process

(a) Convergence history of the cost value

(b) Maximum constraint violation

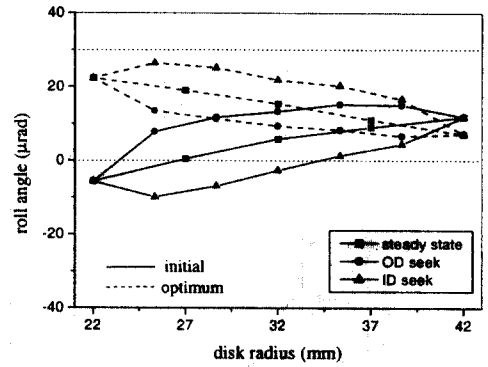
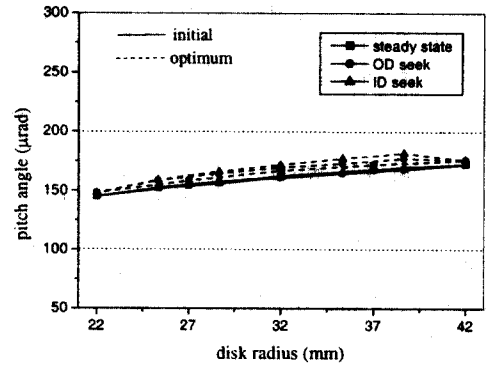
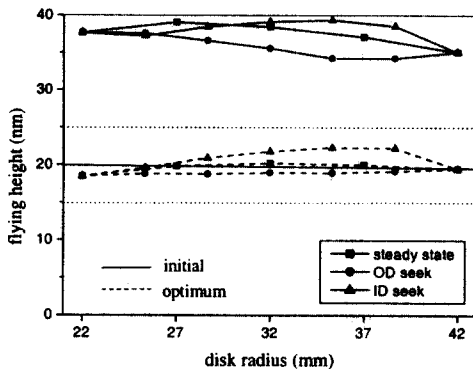


Fig. 11 Flying characteristics of the initial and optimal designs of the NEW slider

(a) Flying height (b) Pitch angle (c) Roll angle

Table 2는 초기설계와 최적설계에서 구한 공기 베어링 강성을 정리한 것이다.

Table 2 Air bearing stiffness of the NEW slider

	k_{zz} (kN/m)	$k_{\alpha\alpha}$ (N/rad)	$k_{\beta\beta}$ (N/rad)
Initial	468.30	0.102	0.038
Optimum	671.10	0.173	0.038

Table 2의 결과를 살펴보면, 최적설계에서 구한 공기 베어링의 강성인 k_{zz} , $k_{\alpha\alpha}$, $k_{\beta\beta}$ 는 초기설계보다 각각 43%, 70%, 0% 향상되었다. 피치각 방향의 베어링 강성의 증가가 두드러짐을 보인다.

최적화된 슬라이더의 ABS에 발생하는 압력 분포를 디스크 반경이 32 mm인 곳에서 계산하면 Fig. 12와 같다.

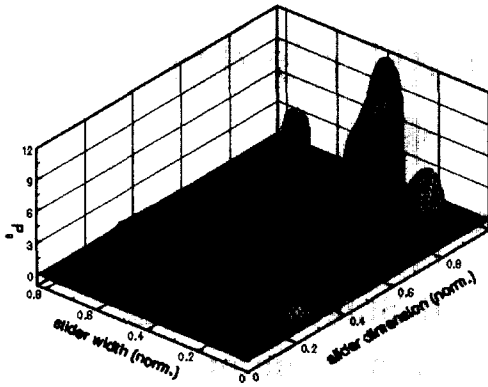


Fig. 12 Pressure distribution of the optimized NEW slider

6. 결론

동특성 및 작동성능에 관련된 슬라이더의 설계 고려사항을 최적화 문제로 정식화하였으며 새롭게 제안된 슬라이더 ABS 형상을 초기설계로 이용하여 보다 우수한 부상성능을 지닌 슬라이더 형상을 제시하였다. 그리고 새롭게 제안된 슬라이더에 대한 동특성 및 부상성능을 고찰하기 위하여 초기설계의 결과와 비교하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 디스크 반경에 대한 정적 부상성능을 살펴보면 목표 부상높이에 대한 최대 편차가 10% 내로 안정된 부상성능을 보인다.
2. 트랙탐색시의 목표 부상높이에 대한 최대 편차를 비교한 결과 10% 내외의 편차량을 보이고 있어 최적화된 슬라이더 형상이 HDD의 실제 작동조건에서 우수한 부상성능을 지님을 알 수 있었다.
3. 공기베어링의 강성은 초기설계에 비교하여 향상되었다. 특히, 수직방향과 피치각 방향의 강성이 크게 향상되었다.

참고문헌

- (1) O'Hara, M. A., and Bogy, D. B., 1995, "Robust Design Optimization Techniques for Ultra-Low Flying Sliders," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 31, No. 6, pp. 2955-2957.
- (2) O'Hara, M. A., Hu, Y., and Bogy, D. B., 1996,

"Effects of Slider Sensitivity Optimization," *IEEE Transactions of Magnetics*, Vol. 32., No.5, pp. 3744-3746

- (3) Yoon, S. J., and Choi, D. H., 1995, "Design Optimization of the Taper-Flat Slider Positioned by a Rotary Actuator," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 117, pp. 588-593
- (4) Yoon, S. J., and Choi, D. H., 1995, "An Optimum Design of the Transverse Pressure Contour Slider for Enhanced Flying Characteristics," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 119, pp. 520-524
- (5) Choi, D. H., and Kang, T. S., 1999, "An Optimization Method for Design of Subambient Pressure Shaped Rail Sliders," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 121, pp. 575-579
- (6) Cha, E., Chiang, C., Enguero, J., and Lee, J.K., 1996, "Effect of Temperature and Altitude on Flying Height," *IEEE Transactions on Magnetic*, Vol. 32, pp. 3729-3731
- (7) Liu, B., and Soh, S. h., 1996, "Effects of Seeking Velocity on Air Bearing Skew Angle, Air Flow Speed and Flying Performance of Sliders with Different ABS Design," *IEEE Transactions on Magnetic*, Vol. 32, pp. 3693-3695
- (8) Deng, Z., Mitsuya, Y., and Ohka, M, 1997, "Flying Characteristics of Head Sliders when Travelling over Magnetic Disk Surfaces," *International Conference Micromechatronics for Information and Precision Equipment*, Tokyo, pp. 90-95
- (9) Fukui, S., and Kaneko, R., 1988, "Analysis of Ultra-Thin Gas Film Lubrication Based on Linearized Boltzmann Equation: First Report-Derivation of a Generalized Lubrication Equation Including Thermal Creep Flow," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 110, pp. 253-262.
- (10) Li, W. L., Weng, C. I, and Hwang, C. C., 1996, "Roughness Effects on the Dynamic Coefficients of Ultra-Thin Gas Film in Magnetic Recording," *ASME Journal of Lubrication Technology*, Vol. 118, pp. 774-782
- (11) Vanderplaats, G. N., 1984, *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design*, McGraw-Hill.