

축소기초모델개념을 이용한 공기윤활 슬라이더 베어링의 최적설계

윤상준*, 김동인*, 강태식**, 정태건***, 최동훈†

(2001년 12월 19일 접수, 2003년 1월 27일 심사완료)

An Optimization of Air-Lubricated Slider Bearings Using the Reduced Basis Concept

Sang-Joon Yoon, Dong-In Kim, Tae-Sik Kang, Tac-Gun Jeong and Dong-Hoon Choi

Key Words : Reduced Basis Concept(축소기초모델개념), Optimum Design(최적설계), Air-Lubricated Slider Bearing(공기윤활 슬라이더 베어링)

Abstract

In this study, optimum designs of the air-bearing surface (ABS) are achieved using the reduced basis concept which can effectively reduce the number of design variables without cutting down on the design space. Even though the optimization method is easier and more applicable to handle than the trial-and-error method, its efficiency is largely dependent on the number of the design variables. Hence, the reduced basis concept is applied, by which the desired design can be defined as a linear combination of basis designs. The simulation results show the effectiveness of the proposed approach by obtaining the optimum solutions of the sliders whose target flying heights are 25, 20, and 15nm.

1. 서 론

하드디스크 드라이브의 기록밀도향상이 지속적으로 요구됨에 따라 디스크와 헤드의 간격이 15nm 이하까지 감소하였다. 따라서 낮은 부상 높이를 유지하면서 전체 데이터 영역 내에서 안정된 공기윤활막을 유지하는 공기윤활 슬라이더 베어링의 형상설계가 중요시 되고 있다.

그러나 기존의 설계방식은 대부분 시행착오적인 기법(trial-and-error method)으로 설계자의 경험에 의존적이었고, 목표 부상높이나 슬라이더의 운전조건이 변경될 때마다 동일한 시행오차가 반복

되어야 하는 비효율성을 지니고 있었다. 이와 같은 비효율성을 극복하기 위해, Yoon과 Choi^(1,2)는 국소 최적화 기법(local optimization method)을 사용하여 최적의 부상상태를 지니는 TF(taper flat) 및 TPC(transverse pressure contour)슬라이더를 설계하였으며, O'Hara와 Bogy⁽³⁾ 전역 최적화 방법(global optimization method)인 GA(genetic algorithm)와 SA(simulated annealing)를 적용하여 TPC 슬라이더에 대해 부상높이의 변화량을 최소화하는 형상 설계문제를 수행하였다. 그러나 이러한 설계방법들은 설계변수가 많아지면 수치계산량이 기하급수적으로 증가되는 문제점을 지니고 있었다.

이와 같은 문제점 때문에 Choi와 Kang^(4,5) 복잡한 형상의 NP(negative pressure)슬라이더의 최적 설계를 수행함에 있어서, 슬라이더의 형상을 좌우 대칭이라 가정하고, 부상성능에 지배적으로 영향을 주는 소수의 형상 파라미터만을 설계자의 경험이나 시행착오적 방법으로 선택하여 설계변수로 선정함으로써 수치계산량의 증가를 피하고자 하였다. 그러나 위와 같은 방법은 여전히 설계자의 경

* 한양대학교 최적설계신기술연구센터
** 삼성전자 스토리지 사업부
*** 회원, 건국대학교 기계항공공학부
† 책임저자, 회원, 한양대학교 최적설계신기술연구센터
E-mail : dhchoi@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2290-0478 FAX : (02)2291-4070

험에 의존적이고, 실제로는 비대칭의 형상을 지니는 슬라이더의 전체 영역을 다룰 수 없다는 한계가 있었다. 따라서 슬라이더의 전영역을 설계하면서 설계변수의 효과적인 감소를 통해 수치계산량의 증가를 피할 수 있는 설계문제에 대한 적절한 근사화가 요구된다.

전역·문제 근사화(global problem approximation) 방법⁽⁶⁾ 가운데 하나인 축소기초모델개념은 Picket과 Rubinstein에⁽⁷⁾ 의하여 처음으로 제안되었다. 그는 트러스 구조물의 최적설계를 수행함에 있어서 설계변수의 개수가 많아짐에 따라 수치 계산량이 크게 증가되는 문제를 해결하기 위해, 현 설계문제를 여러 시험설계(trial design)들의 최적의 조합을 찾는 문제로 변환하여 설계변수의 개수를 성공적으로 줄였다. Rajamaran과 Schmit는⁽⁸⁾ 응력, 변형량 및 좌굴 등에 대한 각각의 조건만을 적용한 하위문제(subproblem)들을 사용하여 효과적으로 시험설계를 얻는 방법을 제시하였다. 또한 설계변수가 많은 익형모델의 효율적인 설계를 위해 축소기초 모델개념을 도입한 Vanderplaats는⁽⁹⁾ 시험설계 대신에 기존의 익형들을 기본형상(basis shape)으로 선정하고 이들을 겹침(superposition)으로써 개선된 형상을 찾고자 하였다.

본 연구에서는 슬라이더의 형상설계에 도입되었던 기존의 최적설계 방법에서 설계변수가 많아짐에 따라 수치계산량이 크게 증가하는 문제점을 해결하기 위하여 축소기초모델개념을 적용하고, 기존의 몇몇 상용 슬라이더 형상을 기초모델로 선정하여 목표 부상특성에 맞는 개선된 슬라이더를 제안하고자 한다.

2. 정식화 및 수치해석방법

2.1 축소기초모델개념의 적용

설계변수를 Fig. 1에서 슬라이더 후미의 ABS를 제외한 전 영역으로 지정하면, 설계영역내의 ABS와 얇은 단의 형상은 28개의 꼭지점으로 표현된다. 따라서 기존의 최적설계 방법을 적용할 경우, 설계변수는 각 꼭지점의 x, y 좌표값으로 총 58개가 된다. 그러나 축소기초모델 개념을 적용할 경우, 슬라이더 ABS의 형상을 표현하는 58개의 설계변수 $\{X\}$ 는 다음과 같이 n 개의 기본형상들의 조합으로 대체될 수 있다.

$$\{X\} = [A]\{Q\} \quad (1)$$

여기서 $[A]$ 의 i 번째 열(column)은 i 번째 기본형상을 나타내는 벡터이고, Q_i 는 i 번째 기본형

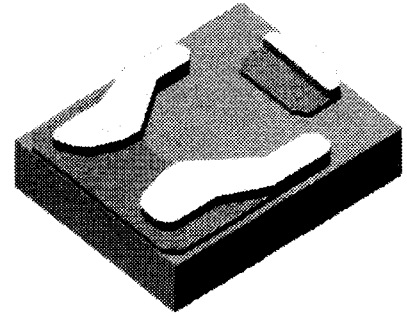


Fig. 1 Current air bearing surface

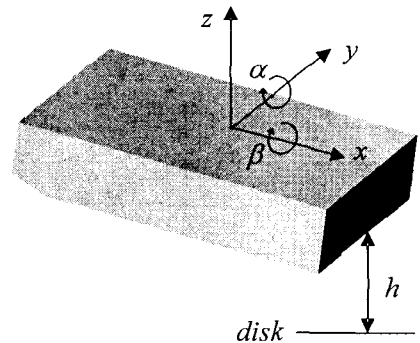


Fig. 2 Free body diagrams of the slider

상에 해당하는 조합계수이다($i = 1, \dots, n$). 즉 i 번째 기본형상에 대한 j 번째 설계변수를 A_{ji} 라 할 때 n 개의 기본형상을 조합하여 만들 수 있는 j 번째 설계변수는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$X_j = Q_1 A_{j1} + Q_2 A_{j2} + \dots + Q_n A_{jn} \quad (2)$$

따라서 변환된 문제에서는 Q_i 가 설계변수가 되므로 설계변수의 개수가 n 개로 크게 감소된다.

2.2 최적화 문제 정식화

액추에이터(actuator)의 회전구동에 의해 슬라이더는 디스크 상의 데이터 영역의 내측과 외측을 반복적으로 이동하게 된다. 슬라이더의 위치에 따른 부상상태 값을 얻기 위해서 데이터 영역이 다섯 등분되고, 각 위치에서의 부상높이 h , 피치각 α , 롤각 β 의 값이 해석을 통해 얻어진다. 한편 h, α , 및 β 는 Fig. 2에 도시 되었으며, h 는 헤드가 부착된 슬라이더의 후미 중앙 ABS에서의 윤

활막 간극의 값으로 표현된다.

슬라이더의 최적설계를 위한 설계 요구사항들은 다음과 같다.

- 디스크 반경에 따른 부상높이가 일정하게 유지되어야 한다.
- 디스크 반경에 따른 피치각의 변화가 적절한 범위 내에서 유지되어야 한다.
- 디스크 반경에 따른 톨각의 변화가 적절한 범위 내에서 유지되어야 한다.

슬라이더의 부상특성에 크게 영향을 미치는 인자로는 ABS의 형상 외에도 Fig. 4에 표기된 부압 영역(negative pressure pocket)까지의 깊이인 리세스딴스(recess depth) δ_1 과 얇은 단의 두께 (shallow step depth) δ_2 의 값이 포함된다. 조합계수 Q_i 와 함께 δ_1 및 δ_2 를 설계변수로 정하면, 위의 설계 요구사항들로부터 다음과 같이 최적화문제가 정식화된다.

Minimize

$$F = 100 \times \{(H_{\max} - 1)^2 + (H_{\min} - 1)^2\} \quad (3)$$

subject to

$$1 - A_{\min} \leq 0 \quad (4a)$$

$$A_{\max} - 1 \leq 0$$

$$B_{\min} - 1 \leq 0 \quad (4b)$$

$$B_{\max} - 1 \leq 0$$

$$\Delta^l \leq \Delta_{1,2} \leq \Delta^u \quad (4c)$$

$$-1 \leq Q_i \leq 1$$

$$\sum Q_i = 1 \quad (i = 1, \dots, n). \quad (4d)$$

여기서 H_{\max} , H_{\min} , A_{\max} , A_{\min} , B_{\max} , B_{\min} 과 Δ_1 , Δ_2 는 무차원화된 부상상태 및 리세스딴스와 얇은 단의 두께를 나타내고 식 (5)로 표현되며 하첨자 max와 min은 슬라이더 위치에 따른 각 부상상태의 최대값과 최소값을 의미한다. 목적함수는 데이터 영역 내에서 슬라이더의 위치변화에 따른 목표 부상높이 h^* 로부터 벗어난 정도를 나타내며 식 (3)으로 표현된다. 또한, 피치각 및 톨각이 트랙탐색시에 주어진 영역을 벗어나지 않도록 식 (4a), 식 (4b)와 같이 구속조건함수가 정의 되었다. 또한 식 (4c)는 무차원화된 설계변수들의 경계구속조건(side constraint)이다. 마지막으로 ABS가 슬라이더 상에서 합당한 영역을 차지하도록 하기 위해 식 (4d)와 같이 설계변수의 구속 조건식이 추가 되었고, Q_n 은 종속변수로 처리 되었다.

$$\begin{aligned} H_{\max} &= \frac{h_{\max}}{h^*}, & H_{\min} &= \frac{h_{\min}}{h^*}, \\ A_{\max} &= \frac{\alpha_{\max}}{\alpha^l}, & A_{\min} &= \frac{\alpha_{\min}}{\alpha^l}, \\ B_{\max} &= \frac{\beta_{\max}}{\beta^u}, & B_{\min} &= \frac{\beta_{\min}}{\beta^l}, \\ \Delta_1 &= \frac{\delta_1}{\delta_1^0}, & \Delta_2 &= \frac{\delta_2}{\delta_2^0}. \end{aligned} \quad (5)$$

2.3 수치해석 방법

축소기초모델개념을 이용한 형상 최적설계의 전체적인 알고리즘은 Fig. 3과 같다. 먼저 기본형상들에 대한 데이터 및 작동조건 등 수치계산에 필요한 모든 데이터와 설계변수의 초기값이 입력된다. 주어진 데이터와 설계변수 값을 통하여 슬라이더의 형상이 결정되면, 해석기에서는 기체의

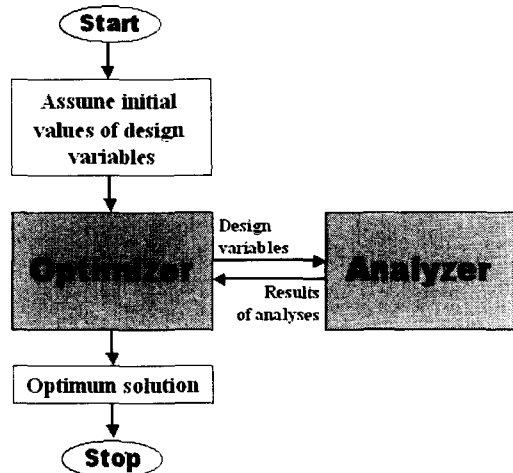


Fig. 3 Flow chart for the design optimization

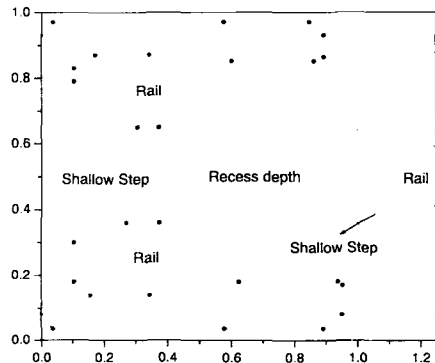


Fig. 4 Initial design and design space

속도분포 함수를 유체의 연속방정식에 대입하여 얻어진 일반화된 공기윤활 방정식 (generalized lubrication equation)의 해석에 의하여 슬라이더의 압력분포와 부상상태가 결정된다.⁽¹⁰⁾ 또한 해석 결과는 최적화 모듈로 입력되어 DOT의 MMFD (modified method of feasible directions)방법에 의해 설계변수가 갱신된다.⁽¹¹⁾ 새로운 설계변수의 값은 다시 해석기로 받아들여지고 위와 같은 작업은 설계변수가 최적 값에 수렴될 때까지 반복되어 모든 구속조건을 만족하고 목적함수를 최소화하는 최적 값을 얻으면 프로그램이 종료된다.

3. 결과 및 고찰

초기 ABS 설계는 Fig. 4에 도시 되었고, 작동 조건은 Table 1과 같다. 여기서 정적피치각 (static pitch angle)과 정적롤각 (static roll angle)은 각각 제 조시에 기본적으로 갖게 되는 피치각과 롤각을 의미한다. 피치각의 하한값 α^L 과 상한값 α^U 는 각각 $100 \mu rad$ 과 $200 \mu rad$, 롤각의 하한값 β^L 과 상한값 β^U 는 헤드 (head or transducer)가 슬라이더 후미의 중앙에 부착 되어 있으므로 $-10 \mu rad$ 과 $10 \mu rad$ 으로 정해 졌으며, 단의 제작구배도 고려 되었다.

설계영역은 데이터의 기록 및 재생을 위한 헤드가 부착되는 후미 중앙의 ABS를 제외한 전 영역으로 Fig. 4에 점선으로 표시되었다. 설계변수는 리세스맵스 δ_1 과 얇은 단의 두께 δ_2 , 그리고 Fig. 5에 도시된 각 기본형상들의 조합계수 Q_i ($i=1, \dots, 3$)로 총 5개가 된다. 여기서 기본형상들은 모두 상용 슬라이더 모델이고, 4번째 기본형상이 초기값으로 사용되었다. 따라서 설계변수의 초기 값 중에서 δ_1^0 과 δ_2^0 은 각각 $1.80 \mu m$ 와 $0.25 \mu m$ 으로 4번째 기본형상의 값과 동일하게 설정되었으며, 조합계수 $\{Q^0\}$ 는 $\{0 \ 0 \ 0 \ 1\}$ 로 정해졌고 Q_4 는 종속 변수로 처리되었다. 본 논문에서는 목표 부상높이를 $25nm$, $20nm$, $15nm$ 로 변경하면서 임의의 목표 부상높이에 대한 최적설계를 수행하였다.

3.1 25nm 슬라이더

목표 부상높이가 $25nm$ 인 경우에 대한 5개의 설계변수의 최적 값은 Table 2와 같고, 슬라이더 ABS의 최적화된 형상은 Fig. 6에 도시 되었다. 또한 최적화 과정에서 6번의 반복실행이 수행되었고 방향탐색과 선탐색을 위한 함수계산은 총 49

Table 1 Configuration and operating conditions

size	1.23 × 1.0 × 0.3 mm	rpm	5400
crown	24.0 nm	camber	8.2 nm
twist	0.0 nm	gram load	3.0 g
static pitch angle	1.0 deg	static roll angle	0.0 deg

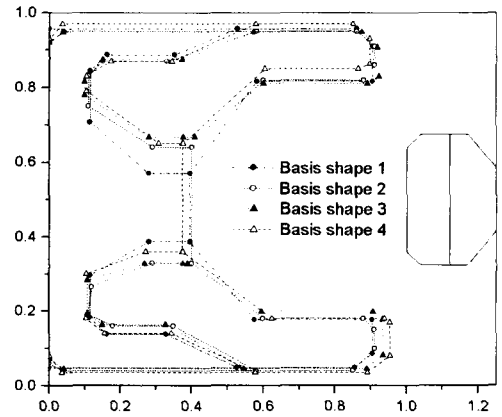


Fig. 5 Basis shapes

회가 수행되었으며, 이때 구속조건은 모두 만족되었다.

개선된 설계에서는 첫번째 기본형상의 영향을 크게 받아 내외측 ABS의 앞부분이 초기설계에서보다 보강되고 뒷부분이 슬라이더의 외측으로 밀려나가서 결과적으로 부압영역이 강화되었다. 그리고 부상높이에 크게 영향을 미치는 인자인 얇은 단의 두께가 매우 큰 폭으로 변하여 슬라이더의 부상높이를 목표 값에 가깝게 하향 조절한 것으로 보인다. 또한 기존의 형상 최적설계 기법 과 비교하여 설계변수의 수가 기존 대비 10%이내로 감소함에 따라 적은 함수 계산량으로 최적 해를 구함을 알 수 있다.

3.2 20nm 슬라이더

목표 부상높이가 $20nm$ 인 경우에 대해서 Table 3과 같은 설계변수의 최적 값을 얻었고, 슬라이더 ABS의 최적화된 형상은 Fig. 7에 도시 되었다. 최적화 과정에서 10번의 반복실행이 수행되었고 방향탐색과 선탐색을 위한 함수계산은 총 80회가 수행되었으며, 구속조건은 모두 만족 되었다. 개선된 슬라이더는 외측 ABS의 앞부분이 눈에 띄게 강화되고 내측 ABS의 뒷부분이 좁아져 결과적으로 비대칭성이 강조되었다. 마찬가지로 적은 회수의 함수계산으로 최적 값을 얻을 수 있었다.

Table 2 Optimum values (target FH=25nm)

Δ_1	Δ_2	Q_1	Q_2	Q_3
1.086	0.553	0.428	-0.100	-0.903

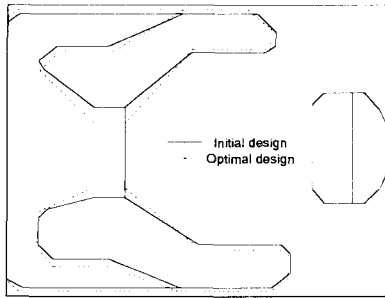


Fig. 6 Initial and optimal design (target FH=25nm)

Table 3 Optimum values (target FH=20nm)

Δ_1	Δ_2	Q_1	Q_2	Q_3
1.073	0.443	0.611	0.284	-0.958

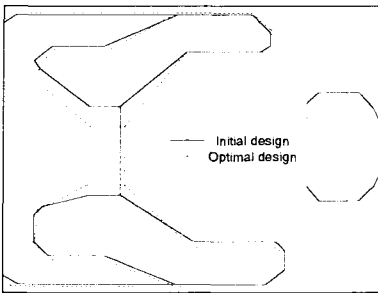


Fig. 7 Initial and optimal design (target FH=20nm)

Table 4 Optimum values (target FH=15nm)

Δ_1	Δ_2	Q_1	Q_2	Q_3
1.093	0.341	0.906	-0.102	-0.936

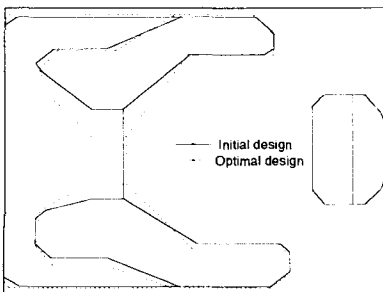
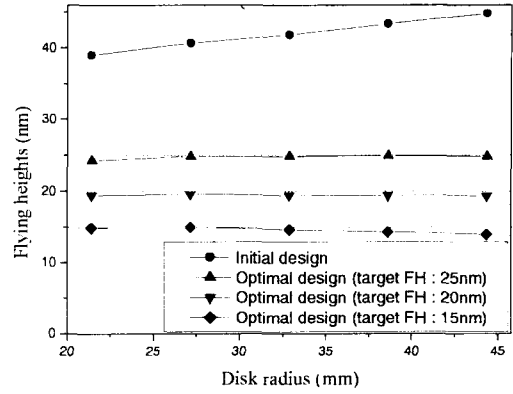
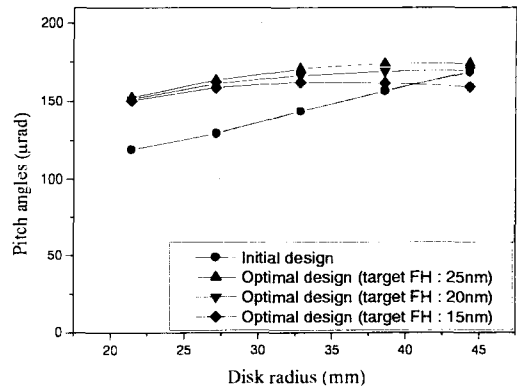


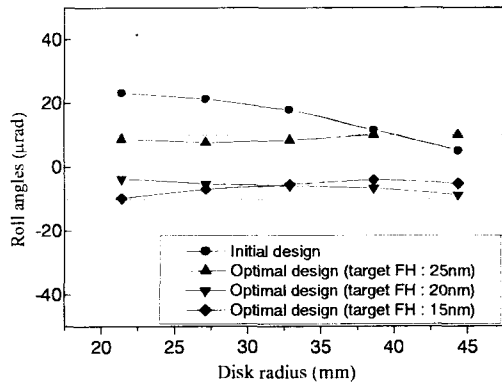
Fig. 8 Initial and optimal design (target FH=15nm)



(a)



(b)



(c)

Fig. 9 Flying characteristics of the initial and optimal designs : (a) flying heights (b) pitch angles (c) roll angles

3.3 15 nm 슬라이더

목표 부상높이가 15 nm 인 경우에 대한 설계변수의 최적 값과 슬라이더 ABS의 최적화된 형상은 각각 Table 4와 Fig. 8 과 같다. 최적화 과정에서 16번의 반복실행이 수행되었고 함수계산은 총 125 회가 수행되었으며 모든 구속조건에 위배됨이 없었다.

결과적으로 축소기초모델개념을 적용함으로써 Fig. 9에서 보는 것과 같이 목표 부상성능에 만족될 만큼 개선된 슬라이더를 얻을 수 있었다. 동일한 설계영역의 설정 하에서, 기존의 슬라이더 설계에 사용됐던 최적설계 방법과 축소기초모델개념을 적용한 경우의 수치계산량을 설계변수의 개수로 비교해보면 그 효율성을 쉽게 확인할 수 있다. 기존의 방법에서는 리세스맵스, 얇은 단의 두께와 꼭지점들의 좌표값을 포함하여 총 60개의 설계변수가 설정된다. 그러나 4개의 기본형상들로 축소기초모델개념을 사용할 경우 총 5개의 설계변수만으로 개선된 슬라이더의 형상을 얻을 수가 있기 때문에 결과적으로 기존대비 10%이내의 수치계산만으로 설계를 수행할 수 있어 매우 효율적이다.

4. 결론

본 연구에서는 수치계산량의 증가를 피하면서 설계영역을 설계자가 원하는 전영역으로 확장할 수 있도록 축소기초모델개념을 도입하였으며, 이를 다양한 목표 부상높이를 지닌 슬라이더 ABS 설계에 적용하였다. 이를 위해 디스크 전 기록영역에서의 부상높이와 피치각 및 물각의 특성이 고려된 설계요구사항을 기반으로 최적화 문제를 정식화 하였으며, 리세스맵스와 얇은 단의 두께 및 4개의 상용 슬라이더의 조합계수를 설계변수로 하여 슬라이더 ABS형상을 결정하는 수치해석 방법을 제시하였다. 수치해석 결과 임의의 25, 20, 15 nm 인 슬라이더에 대하여 설계 요구사항을 모두 만족하고 부상성능이 개선된 슬라이더 형상을 얻을 수 있었다. 또한 기존대비 10%가량의 적은 함수계산으로 최적 해를 구함으로써 본 연구에서 적용된 축소기초모델개념의 효율성을 입증할 수 있었다.

축소기초모델개념을 적용할 경우 기본형상들의 조합으로 새로운 설계를 얻기 때문에 도달할 수 있는 최적해에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 하한값을 -1로 가정하여 조합 가능한 형상의 영역을 확장하였으며, 향후 보다 다양한 기본형상들의 추가선정을 통하여 이를 보완하고자 한다.

후 기

이 연구는 한국과학재단 지정 최적설계신기술 연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Yoon, S. J., and Choi, D. H. 1995, "Design Optimization of the Taper-Flat Slider Positioned by a Rotary Actuator," *ASME Journal of Tribology*, 117, pp. 588~593.
- (2) Yoon, S. J., and Choi, D. H. 1997, "An Optimum Design of the Transverse Pressure Contour Slider for Enhanced Flying Characteristics," *ASME Journal of Tribology*, 119, pp. 520~524.
- (3) O'Hara, M. A., Bogy, D. B., 1995, "Robust Design Optimization Techniques for Ultra-Low Flying Sliders," *IEEE Transactions on Magnetics*, 31, pp. 2955~2957.
- (4) Choi, D. H., Kang, T. S., Jeong, T. G., 1999, "An Optimum Design of the Sub-Ambient Pressure Shaped Rail Sliders on Flying Characteristics Considering the High Altitude Condition," *IEEE Transactions on Magnetics*, 35, pp. 2424~2426.
- (5) Kang, T. S., Choi, D. H., Jeong, T. G., 2001, "Optimal Design of HDD Air-Lubricated Slider Bearings for Improving Dynamic Characteristics and Operating Performance," *ASME Journal of Tribology*, 123, pp. 541~547.
- (6) Barthelemy, J.-F. M., Haftka, R. T., 1993, "Approximation Concepts for Optimum Structural Design - a Review," *Structural Optimization*, 5, pp. 129~144.
- (7) Pickett, R. M. Jr., Rubinstein, M. F., Nelson, R. B. 1973, "Automated Structural Synthesis Using a Reduced Number of Design Coordinates," *AIAA J.* 11, pp. 489~494.
- (8) Rajamaran, A., Schmit, L.A., Jr. 1981, "Basis Reduction Concepts in Large Scale Structural Synthesis," *Eng. Optim.* 5, pp. 91~104.
- (9) Vanderplaats, G. N., 1979, "Efficient Algorithm for Numerical Airfoil Optimization," *J. Aircraft* 16, pp. 842~847.
- (10) Kang, T. S., 1999, "Optimal Design of HDD Air-Lubricated Slider Bearings for Improving Dynamic Characteristics and Operating Performance," Ph. D. Thesis, Hanyang University, Seoul.
- (11) Vanderplaats, G. N., 1995, "DOT Design Optimization Tools Users Manual," Vanderplaats Research & Development, Inc., 1767 S. 8th Street, Suite M-210, Colorado Springs, Co.