

신뢰성 향상을 위한 HDD 용 헤드 슬라이더의 형상최적설계 Shape Optimization of HDD Head Slider for Enhancing Reliabilities

윤상준* · 최병렬** · 최동훈**

Sang-Joon Yoon, Byung-Lyul Choi and Dong-Hoon Choi

Key Words : Head Slider(헤드 슬라이더), Uncertainty(불확정성), Reliability-based design optimization (신뢰성기반 최적설계)

ABSTRACT

This study is to suggest a probabilistic design determining configurations of slider air bearings with the dimensional manufacturing tolerances of the ABS. The probabilistic design problem is formulated to minimize the variation in flying height from a target value while satisfying the desired probabilities keeping the pitch and roll angles within a suitable range. The proposed approach first solves the deterministic optimization problem. Then, beginning with this solution, the RBDO is continued with the probabilistic constraints affected by the random variables with a fixed standard deviation in normal distribution. The RBDO results are directly compared with the values of the initial design and the results of the deterministic optimization, respectively. The reliability analyses are performed by the descriptive sampling (DS) to show the effectiveness and accuracy of the proposed approach. It is demonstrated that the proposed RBDO approach can efficiently obtain an optimum solution satisfying all the desired probabilistic constraints.

1. 서론

하드 디스크 드라이브 (HDD)에 중요한 정보를 읽고 쓰는 헤드 슬라이더 (head slider)는 회전하는 디스크 위에서 air-bearing surface (ABS)의 기하학적 형상에 의한 동압 효과로 부상을 하게 된다. ABS 형상은 일련의 반도체 공정과 마찬가지로 초정밀 에칭 가공에 의하여 제작되므로 가공치수 단위 자체가 매우 작고 각 치수들의 편차는 상대적으로 크게 된다. 제작공차 (manufacturing tolerance)의 크기와 형태는 사용된 장비, 가공방법과 순서 그리고 가공자의 숙련도 등에 따라 상이하게 나타나기는 하나 대부분 일정한 형태의 통계적 분포를 나타내는 것이 일반적이다. 특히, 대량생산의 경우, 제작공차로 인해 발생하는 헤드 슬라이더의 부상성능 변화는 제품의 성능뿐만 아니라 제품브랜드의 신뢰도를 좌우하는 주요한 요인으로 자리잡고 있다.

헤드 슬라이더의 부상성능에 지대한 영향을 미치는 인자들을 보면, 크게 헤드 슬라이더의 형상, 서스펜션의 특성치, 그리고 HDD 를 구동하는 다양한 운전조건 등으로 구분된다. 그러나 대량생산 체제 하에서는 이들 중 어느 하나도 엄격히 관리하는 것이 거의 불가능하므로, 제품의 수율을 높이기 위하여 전수검사를 하고 추가적인 후 공정을 도입하는 경우가 실제로 발생된다. 다른 한편으로는 안전계수 등을 도입하여 형상 치수 자체를 충분히 여유 있게 설계하는 과도 설계를 도입하는 경우도 있다.

그러나 이러한 과도설계는 오랜 시간 동안 시행오차를 겪은 후 설계자의 경험에 의하여 이루어 지는 것이므로 불필요하게 많은 비용을 지불해야 되는 경우가 대부분이다.

1995 년 Yoon 과 Choi⁽¹⁾로부터 최근까지도 헤드 슬라이더의 최적설계에 관한 많은 연구들이 성공적으로 수행되어 왔다.⁽²⁻⁵⁾ 그러나 이들 대부분의 설계들은 설계변수들의 불확정성을 고려하지 않은 확정론적 최적설계 (deterministic design optimization)를 수행한 결과들로서, 실제 제작공차를 고려한다면 목표로 하는 설계요구사항들을 만족시킬 확률이 50% 정도로 신뢰도가 낮은 결과를 초래할 수도 있다. 따라서, 컴퓨터 시뮬레이션뿐 만이 아니라 이를 이용한 제품 설계에서는 반드시 제품의 제작공차를 고려한 신뢰성을 평가하고 이를 기반으로 제품설계가 이루어 지는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 상용 pico 슬라이더의 ABS 형상 치수를 설계변수로 선정하고, 이들 설계변수들의 불확정성을 고려하여 신뢰성 기반 형상최적설계를 수행하고자 한다. 효과적인 수치계산을 위하여 단일루프-단일벡터 방법 (Single-Loop-Single -Vector method, SLSV) 알고리즘을 이용한 신뢰성 기반 최적설계 프로그램을 개발하고, 이를 헤드 슬라이더 문제에 적용하여 본 프로그램의 효율성을 입증하고자 한다. 수치계산 방법으로는 ABS 의 초기 형상을 기초로 확정적 최적설계를 수행하고 이를 기점으로 다시 신뢰성 기반 최적설계 수행하는 순차적인 방법을 사용하였다.

* 한양대학교 최적설계기술연구센터, 연구교수

E-mail : ysjoon@hanyang.ac.kr

Tel : (02) 2290-1639, Fax : (02) 2291-4070

** 한양대학교 최적설계기술연구센터

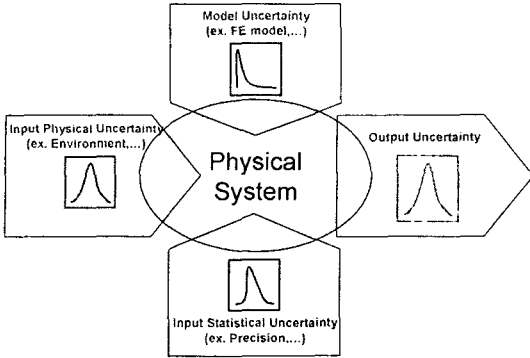


Fig. 1 Uncertainties

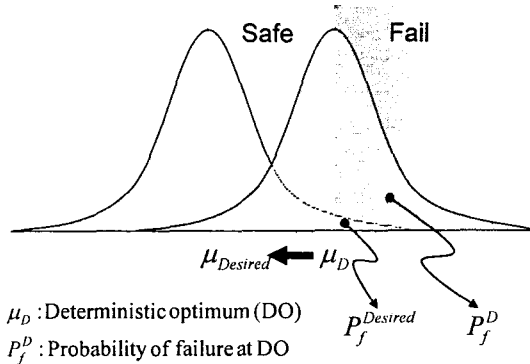


Fig. 2 Design considering uncertainty

2. 신뢰성 기반 최적설계

2.1 신뢰성 해석 및 설계

Fig. 1 에서 도시된 바와 같이 설계 과정에서 존재할 수 있는 다양한 불확정성 (모델링에 의한 불확정성, 계측 환경에 의한 입력의 불확정성, 계측 정밀도에 의한 입력의 불확정성 등)으로 인하여 실제 시스템의 성능인자들도 불확정성이 내포 된다. 따라서, Fig. 2 에 보이듯이 불확정성을 고려하지 않은 기존의 확정론적 설계 방법으로 설계자가 원하는 신뢰도를 요구하는 것은 더 이상 불가능한 일이 되었다.

구조물이 점차 복잡해지면서, 시스템 불확정성의 정량화에 대한 필요성이 증대되어 안전계수 등이 적용되어 왔으나 이는 확률 해석적인 접근방식이 아니므로 시스템의 불확정성을 정량화하기에는 부족하였다. 불확정성의 정량화를 위한 기본적인 확률 접근 방식인 다중 적분법을 이용한 해석 방식은 시스템의 결합 밀도함수 형태를 알기 힘들고 다중 적분이 어려워 실용적이지 못하였다. 대안으로 사용되어 온 MCS (Monte Carlo simulation)는 가장 정확한 방법이나 방대한 해석 회수로 인해 실제 문

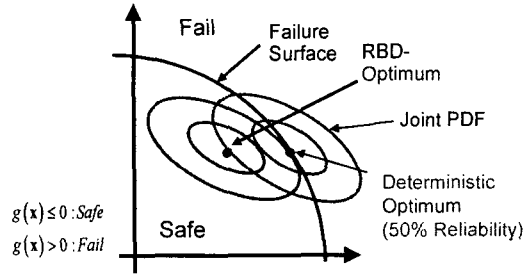


Fig. 3 Reliability-based design optimization

제에 적용하기는 쉽지 않았다. 이에 근사적으로 파괴 확률을 계산하는 다양한 신뢰성 해석(reliability analysis) 기법들이 활발히 연구되어 왔다.

신뢰성 해석의 목적은 불확정성에 의해 발생하는 주어진 성능 변동량을 정량화 하는 것으로 신뢰성을 일반적인 수식으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$R = \int \int \dots \int_{g(\mathbf{X}) \leq 0} f_{\mathbf{X}}(X_1, X_2, \dots, X_n) d\mathbf{X} \quad (1)$$

여기서, $\mathbf{x} = [X_1, X_2, \dots, X_n]^T$ 이고, 랜덤변수이다. $g(\mathbf{X})$ 는 한계 상태 방정식 (limit state function)이고, $f_{\mathbf{X}}(\mathbf{X})$ 는 랜덤변수 \mathbf{X} 의 조건부 확률 밀도 함수 (joint probability density function)이다. 그리고, R 은 신뢰성을 의미한다.

일반적으로 조건부 확률 밀도 함수의 명시적인 형태를 알기 힘들고, 수치적인 다중 적분을 수행하려면 많은 계산 시간이 소요된다. 따라서 이를 위해 근사화된 기법으로 FORM (First-Order Reliability Method)을 주로 사용하는데, 이는 표준 정규화 공간 (standard normal space)에서의 원점으로부터 파괴면 (failure surface)까지의 최단거리를 신뢰도 지수 (reliability index, β)로 정의하고, 이로부터 신뢰성을 계산하는 방식이다. FORM 을 수행하기 위해서는 기본 공간으로부터 표준 정규화 공간으로의 변환을 거친 후, 신뢰도 지수를 구하는 최적화 문제를 수행하는데, 이때 신뢰성은 식 (2)과 같이 표현 된다.

$$R = \Phi(\beta) \quad (2)$$

여기서, $\Phi(\cdot)$ 는 표준 정규 누적 확률 밀도 함수를 의미한다.

한편, 설계변수의 불확정성으로 인해 확정론적 최적해가 실제 설계요구 성능을 만족시킬 확률은 Fig. 3 에 도시된 바와 같이 약 50% 밖에는 미치지 못한다. 이러한 불확정성을 정량화하여 신뢰성을 예측할 수 있도록 하는 설계 기술이 신뢰성 기반 최적설계 (reliability-based design optimization, RBDO) 이다.

일반적인 신뢰성 기반 최적설계의 방식은 확률 구속조건을 정의하는 방식에 따라 RIA (reliability index approach)와 PMA (performance measure

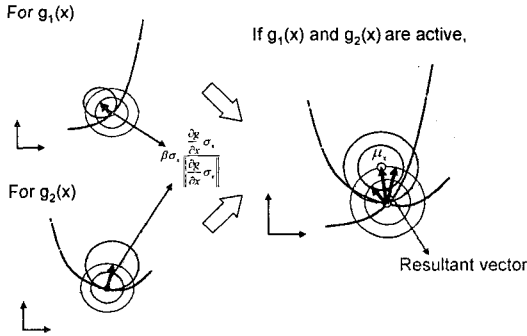


Fig. 4 Moving initially inactive design

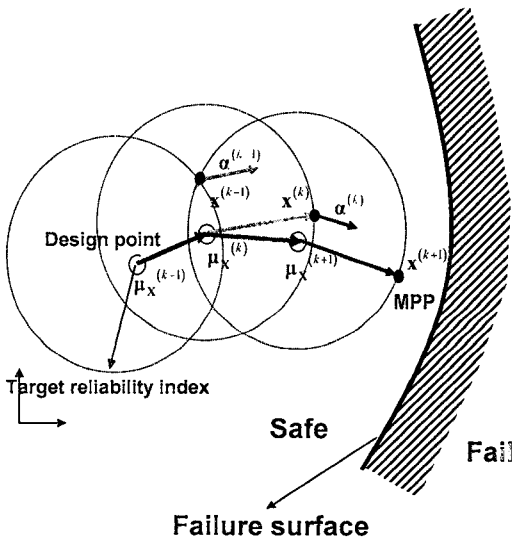


Fig. 5 SLSV concept

approach)로 나뉜다. RIA는 신뢰도 해석의 관점에서 출발하여 신뢰도 지수로 확률 구속조건을 정의한 반면, PMA는 신뢰도 기반 최적설계의 관점에서 시작하여 신뢰도 측정 인자를 성능으로 변환하는 기법을 택하고 있다.

최적설계 정식화에 따라 이중루프-단일벡터 방법 (Double-Loop-Single-Vector method, DLSV), 단일루프-이중벡터 방법 (Single-Loop-Double-Vector method, SLDV), 그리고 단일루프-단일벡터 방법으로 나뉜다. 우선, 이중루프-단일벡터 방법은 각 구속 조건의 MPP (most probable point)를 찾는 반복과정을 내포하고 있다. 한편, 단일루프-이중벡터 방법은 랜덤변수의 평균값과 MPP를 설계 변수로 설정하고, 최적화 루프를 단일화 시킨다. 하지만 확률

구속조건의 개수에 비례하여 설계변수가 증가하는 단점으로 인해 실제 설계문제에 적용하기에는 어렵다는 한계가 있다. 반면, 단일루프-단일벡터 방법은 신뢰성 기반 최적화를 진행하는 동시에 개선 규칙을 이용하여 MPP를 계산하는 방식을 택하여 이중루프 구조에 비해 매우 효율적이다.

2.2 수치해석 알고리즘

본 연구에서 사용된 신뢰성 기반 최적설계 모듈은 MDO framework인 EMDIOS⁽⁶⁾의 RBDO 모듈 중 개선된 SLSV를 사용하였다. 제안된 방법에서는 알고리즘 측면에서 기존의 SLSV 방법⁽⁷⁾을 기초로 하고 있으나, 수치계산의 효율성 및 강건성을 향상시키기 위하여 RBDO 해에 근접한 초기치 선정 과정을 SLSV 수행 이전에 수행하고 있다.⁽⁸⁾

우선, RBDO 해에 근접한 초기치 선정 과정을 설명하면 Fig. 4와 같다. 일반적으로 RBDO의 초기치는 확정론적 최적해를 사용하고 있으므로 이들 최적해에서 활성화된 구속조건의 민감도 정보를 이용하여 feasible region 방향으로 초기치를 이동시키는 방법을 취하였다. 여기서 사용된 이동 벡터는 Kuhn-Tucker necessary condition으로부터 유도된다.

한편, 사용된 SLSV의 기본 개념을 그림으로 나타내면 Fig. 5와 같다. 여기서, μ_x 는 설계 변수를 나타내며, x 는 MPP로서 신뢰성 해석에서 가장 파괴확률에 많은 영향을 주는 점을 의미한다. 그리고, α 는 구속조건의 민감도를 나타내고, k 는 최적화 단계의 반복 회수를 나타낸다. SLSV는 기존 이중루프 구조를 갖는 RBDO 기법의 해석회수가 기하급수적으로 많아지는 단점을 보완하기 위해 제안되었다. 이중루프 구조에서는 반복적인 최적화 과정에서 반복수행을 필요로 하는 신뢰성 해석을 내포하고 있는 반면, SLSV는 이러한 연성 (couple) 구조를 제거하기 위해 반복적으로 MPP를 찾는 신뢰성 해석을 개선 규칙으로 대체하여 최적화 과정과 신뢰성 해석 모듈을 동시에 수행시켜가는 방법을 택하고 있다.

결국, 개발된 프로그램은 RBDO의 최적해 근처로 이동하는 과정을 수행한 이후에 SLSV를 수행하게 되므로, 민감도를 기반으로 하는 최적화 알고리즘의 경우, 최적해 근처에서 최적화를 수행하게 되며, 주어진 함수의 비선형성이 증가하더라도 비선형성의 영향을 덜 받게 되는 장점을 지니게 된다. 따라서, 개선된 방법은 기존의 SLSV에 비해 효율성이나 강건성 면에서 보다 우수하다.⁽⁸⁾

3. 헤드 슬라이더의 형상 최적설계

디스크와 헤드 슬라이더간 불필요한 접촉현상을 방지하면서 동시에 원하는 헤드 슬라이더의 부상성능을 유지하기 위해서는 엄격히 제한된 부상상태가 헤드 슬라이더의 설계 단계부터 요구된다. HDD 용 헤드 슬라이더의 기본적인 부상성능 지수는 전 디스크 트랙 내에서 헤드 슬라이더가 일정한 부상높이를 유지하는 것, 그리고 동시에 원하는 피치각과 롤각을 지니는 것이다. 다시 말해서, 헤드 슬라이더의 부상높이는 디스크 트랙의 변화에 둔감하면서 일정한 값을 유지하여야 하며, 동시에 피치각과 롤각들은 목표로하는 설계 영역내에 존재해야 하는 것이다.

기존의 형상 최적설계가 수행되면, 헤드 슬라이더의 부상높이의 평균값들이 디스크 전 기록영역에서의 일정하게 유지되므로 비록 각 디스크 트랙에서 부상높이의 변화들이 존재할지라도 전 트랙영역 관점에서 보면 전반적으로는 그 변화가 감소하는 양상을 보이게 된다. 그러나, 피치와 롤각은 목표로하는 영역내에서만 존재하면 되며, 특히 슬라이더 형상변수들의 불확정성에 대하여 그들의 변화 정도가 크므로 이들의 신뢰성이 설계단계에서부터 고려되어야 한다.

신뢰성 향상을 위한 헤드 슬라이더의 형상 최적 설계문제를 정의하면 다음과 같다.

Minimize

$$\text{Variation in flying height from 12 nm} \quad (3)$$

Subject to

$$\text{Pr}(\text{min. pitch} < 200 \mu\text{rad}) \leq 10\%, \quad (4)$$

$$\text{Pr}(\text{max. pitch} > 280 \mu\text{rad}) \leq 10\%, \quad (5)$$

$$\text{Pr}(\text{min. roll} < -15 \mu\text{rad}) \leq 10\%, \quad (6)$$

$$\text{Pr}(\text{max. roll} > 15 \mu\text{rad}) \leq 10\%. \quad (7)$$

여기서, 목적함수인 식 (3)은 슬라이더의 목표 부상높이 12 nm 와 실제 계산된 부상높이의 최대 차이를 최소화하는 것을 나타내며, 식 (4)~(7)은 피치와 롤각들에 대한 구속조건들을 신뢰도 함수를 사용하여 나타낸 것이다. 피치각의 상 하한치는 안정된 부상성능을 위하여 200 μrad 과 280 μrad 으로 좀더 높게 주어졌으며, 롤각의 상 하한치는 해석의 feasible region 을 고려하여 $\pm 15 \mu\text{rad}$ 으로 가정하였다. 각 구속조건들이 설계변수들의 불확정성 때문에 위배될 확률은 10%보다 작아야 하는 것을 정의하였으며, 이는 각 구속조건들의 신뢰도가 모두 90%를 넘어야 함을 나타낸다.

Table 1 Results of the reliability-based optimization

x_i [e-6]	Initial	Deterministic	RBDO
x_1	0	9.3e-2	8.8e-2
x_2	0	-4.2e-2	-4.4e-2
x_3	0	-23.3	-22.0
x_4	0	2.9	3.6
x_5	0	-2.6	-4.6
x_6	0	19.7	25.9
x_7	0	-5.7	-2.0
x_8	0	-11.9	-16.4
x_9	0	27.6	28.0
x_{10}	0	7.5	6.4
x_{11}	0	-23.0	-22.9
x_{12}	0	-13.5	-21.0
x_{13}	0	12.6	11.0
Cost value	12.774	0.003	0.01

4. 수치해석 결과

초기 슬라이더 모델로는 상용화된 pico 슬라이더를 모델로 하였으며, 설계변수는 총 13 개로 슬라이더의 두께방향으로는 recess depth (x_1)와 shallow step depth (x_2)가, 그리고 슬라이더의 길이와 폭 방향의 형상을 결정하는 절점들 ($x_3 \sim x_{13}$)로 구성하였다.⁽⁹⁾ 설계변수들의 불확정성에 대해서는 모두 표준 정규분포를 나타내는 것으로 정의하였으며, 이중 상대적으로 정밀한 치수를 요하는 recess depth 와 shallow step depth 는 각각 0.1 μm 와 0.01 μm 의 표준편차를, 그리고 나머지 슬라이더 형상을 정의하는 변수들은 가공기술을 고려하여 모두 슬라이더 길이의 0.5%의 표준편차를 지니는 것으로 하였다. 그 밖의 수치해석에 필요한 모든 운전조건 등은 Yoon 등⁽³⁾과 같다.

컴퓨터 시뮬레이션 결과, Table 1 에 보이듯이 설계변수 초기값으로부터 효과적인 최적해를 얻을 수 있었다. 목적함수 크기는 초기값 12.774 에서 RBDO

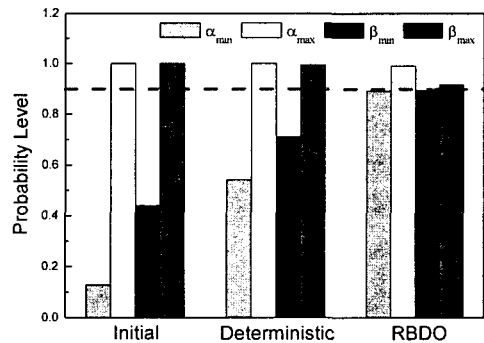


Fig. 6 Probability of the RBDO

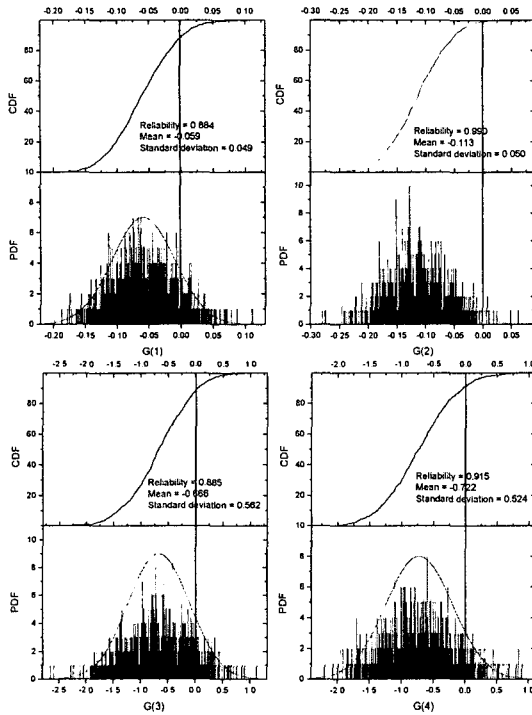
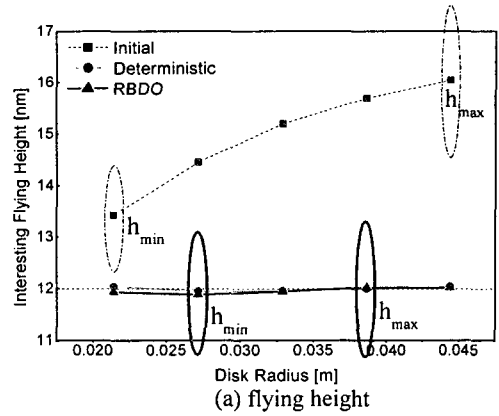


Fig. 7 Reliability distributions of constraints

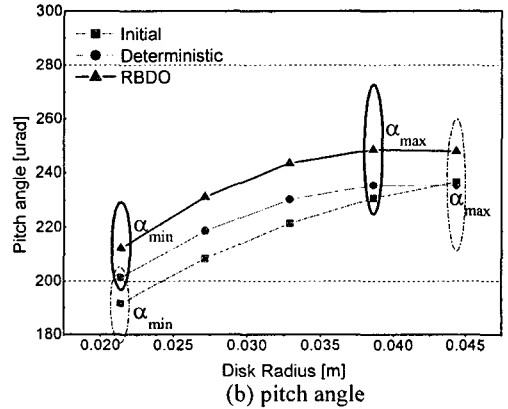
결과인 0.01 로 약 99% 감소하였으며, 동시에 모든 신뢰도 구속조건 함수 값들이 0 보다 작게 되어 목표 하는 신뢰도가 모두 만족됨을 나타내었다. 특히, 이들의 설계변수 변화량을 보면, 헤드 슬라이더 형상 변화에 대하여 부상능이 얼마나 민감하게 반응하는지를 다시 한번 확인할 수 있다.

개발된 SLSV 프로그램의 정확성을 입증하기 위하여 초기값, 확정론적 그리고 신뢰성 기반 최적설계 결과들에 대하여 각 구속조건 함수들의 신뢰도를 descriptive sampling 방법으로 검토해 보았다. Fig. 6의 RBDO 결과를 보면, 가장 낮은 신뢰도가 첫 번째 구속조건의 89.3%로 나타나 나머지 모든 구속조건들에서 실제로 90% 이상의 신뢰도가 있음을 보여준다. 그러나, 이러한 신뢰도를 증가시키기 위해서는 Table 1에 나타났듯이 확정론적 결과의 목적 함수 값이 0.003에서 0.01로 약간 증가되는 것을 감수하여야 한다. 한편, RBDO 결과들의 실제 확률 분포를 검증하기 위하여 Fig. 7에 그들의 empirical CDF (cumulative distribution function)와 histogram을 도시하였다. 여기서 각 도표에 색깔로 칠해진 부분은 설계변수의 불확정성으로 인해 발생하는 구속조건의 비 신뢰성 구간을 나타낸다.

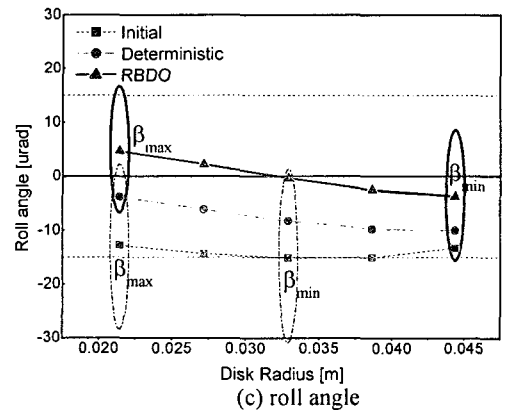
또한, RBDO 결과에 대한 헤드 슬라이더의 부상 성능을 직접 비교 검토하기 위하여 초기값, 확정론적 그리고 신뢰성 기반 최적설계 결과들에 대하여 전 디스크 영역에서의 부상높이, 피치각, 그리고 롤



(a) flying height



(b) pitch angle



(c) roll angle

Fig. 8 Comparisons of flying performances

각의 영향을 살펴보았다. Fig. 8에서 보면, 전 디스크 기록영역에서 목표 부상높이 대비 최대 편차가 초기값 4.04 nm에서 0.12 nm로 약 97% 줄어들었으며, 피치와 롤각은 모두 90%의 신뢰도 이상으로 모두 증가되었음을 알 수 있다.

본 논문에서는 제작공차와 같은 설계변수의 불확정성을 고려할 수 있도록 신뢰성 기반 최적설계를 이용하여 HDD 용 헤드 슬라이더의 형상 최적설계를 수행하였다. 최적설계 문제 정식화 과정을 통하여 슬라이더의 목표 부상높이와 실제 계산된 부상높이의 최대 차이를 최소화하면서 동시에 피치와 롤각들에 대한 구속조건들이 신뢰도가 90% 이상 되도록 정의하였다. 수치계산을 위하여 개선된 SLSV 기법을 이용한 RBDO 프로그램이 사용되었으며 이를 상용 pico 슬라이더의 형상 최적설계에 적용하여 그 결과들을 비교 검토하였다.

시뮬레이션 결과, 목적함수 크기가 초기값 대비 약 99% 이상 감소함을 나타내었다. 이들 구속조건 함수들의 결과치를 descriptive sampling 방법으로 검증해 본 결과, 그 신뢰도가 대부분 90% 이상으로 만족되었으며, 그 확률분포를 CDF 와 PDF 를 통하여 직접 시각적으로 확인하였다. 한편, RBDO 결과에 대한 헤드 슬라이더의 부상성능을 직접 비교 검토하기 위하여 전 디스크 기록영역에서의 부상높이, 피치각, 그리고 롤각의 영향을 살펴보았다. 그 결과, 헤드 슬라이더의 형상과 같이 그 크기가 작으면서도 상대적으로 설계변수의 불확정성의 영향이 큰 설계문제에 있어서는 신뢰성 기반 최적설계가 매우 효율적임을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 최적설계신기술 연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

- (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, Vol. 117, pp. 588-593.
- (2) 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.
- (3) Yoon, S.-J., Kim, D.-I., Jeong, T.-G., and Choi, D.-H., 2002, "Optimizations of Air-Lubricated Slider Bearings Using the Reduced-Basis Concept," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, pp. 2174~2176.
- (4) Zhu, H. and Bogoy, D. B., 2002, "DIRECT Algorithm and Its Application to Slider Air-Bearing Surface Optimization," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, pp. 2168~2170.
- (5) Hanke, A. V. and Talke, F. E., 2003, "A New Universal Approach for Slider Optimization," ASME/STLE Joint International Tribology Conference, 2002-TRIB-263.
- (6) <http://emdios.hyu.ac.kr>
- (7) Chen, X., Hasselman, T. K. and Neill, D. J., 1997, "Reliability Based Structural Design Optimization for Practical Applications," AIAA-97-1403, pp. 2724~2732.
- (8) Choi, B.-L., Choi, J.-H., and Choi, D.-H., 2004, "A Multi-Stage Reliability-Based Design Optimization for Enhancing Efficiency," Summated in 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference.
- (9) Yoon, S.-J., and Choi, D.-H., 2004, "Reliability-Based Design Optimization of Slider Air Bearings," Submitted in KSME International Journal.