

근사화 기법을 이용한 Load/Unload 용 헤드 슬라이더 최적설계

Head Slider Design Using Approximation Method For Load/Unload Applications

손석호*, 윤상준**, 박노철***, 박영필***, 최동훈†
Seok-Ho Son*, Sang-Joon Yoon**, No-Cheol Park***,
Young-Pil Park*** and Dong-Hoon Choi†

Abstract

In this study, we present the optimization of a head slider using kriging method in order to reduce lift-off force during unloading process with satisfying reliable flying attitude in steady state. To perform an optimization process efficiently, a simplified lift-off force model, which is a function of air bearing suction force and flying attitudes, is created by kriging method. The EMDIOS, which is the process integration and design optimization software developed by iDOT, is used to automatically wrap the analysis with the optimization and efficiently implements the repetitive works between analyzer and optimizer. An optimization problem is formulated to reduce the lift-off force during unloading process while satisfying the flying attitude in reliable range over the entire recording band and reducing the probability of contact between slider and disk. The simulation result shows that the amplitude of lift-off force of optimized L/UL slider is reduced about 62%, compared with that of initial slider model. It is demonstrated by the dynamics L/UL simulation that the optimum slider incorporated with the suspension is not only smoothly loaded onto disk but also properly unloaded onto the ramp.

Key Words : Load/Unload (로드/언로드), lift-off force (부양력), kriging model (크리깅 모델)

기호설명

d_n	Distance between two experimental points	n_f	Negative force
R	Correlation matrix	h_m	Flying height
$R(x^i, x^j)$	Correlation function between x^i and x^j	α	Pitch angle
$\hat{\beta}$	Estimated regression coefficient	β	Roll angle
$y(x)$	Approximate function	h^*	Target flying height
$\hat{y}(x)$	Predicted response value at untried x	h_{\min}	Minimum flying height
θ	Correlation coefficient	γ_h	Allowable tolerance of flying height
$\hat{\sigma}^2$	Estimated sample variance	L, U	Upper and lower limit values
$\tilde{D}(s(x))$	Dynamics performance function	ID, OD	Inner Diameter, Outer Diameter
$s(x)$	Static performance function	n_{ss}	Number of independent values
\tilde{D}_f	Lift-off force from kriging model	y_i	Real value from dynamic L/UL
		\tilde{y}_i	Predicted value from kriging model

† 한양대학교 최적설계신기술연구센터
E-mail : dhchoi@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0478

* 한양대학교, 한양대학교, 기계공학과.

** 한양대학교, 최적설계신기술연구센터

*** 연세대학교, 정보저장기기연구센터
논문접수일 (2006년 6월 9일)

1. 서론

급변하는 현대 사회에서 기업 및 개인간에 필요한 정보 전달량이 급속히 증가하고 보다 빠른

정보처리속도에 대한 수요가 끊임없이 요구되고 있다. 이러한 시대적 요구는 하드디스크 드라이브 (HDD) 시장에도 큰 영향을 미쳐서 최근에는 고 용량, 고성능, 소형화 정보저장기기 개발을 위하여 기존 데스크탑 컴퓨터에서 사용되던 CSS (Contact Start Stop) 방식 대신 L/UL (Load/Unload) 방식이 채택되고 있다.

일반적으로 L/UL 기술의 주된 특징은 기록밀도와 디스크 용량 증가 그리고 충격에 강하다는 장점이 있는 반면, L/UL 구동 과정에서 슬라이더와 디스크 간의 접촉 가능성이 증가된다는 단점이 있다. 이러한 슬라이더와 디스크의 접촉 가능성을 줄이기 위하여 그 동안 많은 실험과 시뮬레이션이 활발히 수행되어 왔다. 하지만, 슬라이더의 공기베어링 형상이나 램프 (ramp)의 형상 그리고 서스펜션 (suspension) 형상 등에 의해 정의되는 L/UL 시스템의 샘플 제작이 비싸고 복잡한 이유로 그 동안 많은 연구에서는 L/UL 성능을 예측하는데 주로 시뮬레이션 방법을 사용하여 왔다.

Zeng and Bogy[1]는 L/UL 과정에서 공기 유회막 (Air Bearing Surface, ABS)의 영향을 고려한 L/UL 용 슬라이더 형상에 대한 연구를 수행하였으며, Bogy and Zeng[2]은 L/UL 시스템을 고려한 가장 이상적이고 적합한 슬라이더 형상과 서스펜션 그리고 다양한 L/UL 변수들에 대한 연구를 수행하였다. 또한, Dufresne and Menon[3]은 언로드 (unload) 과정이 부드러우면서도 짧은 시간에 이루어 질 수 있는 새로운 슬라이더 형상을 제안하였다. 하지만 이들 대부분은 해석을 통한 파라메트릭 연구와 연구자의 경험에 의하여 새로운 L/UL 용 슬라이더를 제안하는 방법에 국한되어 있다. 따라서 본 연구에서는 L/UL 시스템의 성능향상과 설계 요구 사항을 만족할 수 있는 슬라이더 형상에 대해 최적 설계를 수행하고자 한다.

한편, Zeng and Bogy[4]는 부양력 (lift-off force)를 가장 최소의 공기 유회력으로 가정하고, 이 부양력의 크기는 언로드 성능에 가장 큰 영향력을 주는 인자라고 정의하였다. 또한, 이 부양력을 줄일 수 있는 다양한 설계 인자들에 대한 시뮬레이션 연구를 수행하였다. Zeng and Bogy[5]는 슬라이더가 디스크에 부드럽게 안착하도록 하는 로드 (load) 성능 향상을 위하여 슬라이더의 음압력 (suction force)의 위치를 슬라이더 중심과 슬라이더 후면 끝단 (trailing edge) 사이에 위치시켜야 한다고 제안하였다. Hideaki and Hidekazu[6]는 슬라이더의 음압력을 감소시킴에 따라 슬라

이더는 램프 위에 부드럽고 쉽게 언로드 되며, 슬라이더의 진동 또한 감소되는 것을 실험을 통하여 확인하였다. 따라서 본 연구에서는 언로드 시 발생하는 부양력을 L/UL 시스템의 가장 주요한 성능지수로서 선정하고 이를 최소로 하는 슬라이더 형상을 설계하여 보다 부드럽고 안정되게 구동되는 새로운 L/UL 슬라이더를 개발하고자 한다.

그러나 동적 L/UL 시스템의 지배 방정식은 시간에 따라 슬라이더와 서스펜션 그리고 램프의 형상과 상태가 바뀌는 매우 복잡한 수식으로 이루어져 있어서 과도 해석을 통하여 부양력을 구하는 것은 상당한 시간을 요구하게 된다. 따라서, 최적설계 과정에서 매 function call 마다 동적 L/UL 해석을 통하여 부양력을 반복적으로 계산하는 것은 거의 불가능한 일이다. 따라서 본 연구에서는 상대적으로 간단한 정적 해석을 사용하여 동적 L/UL 해석 결과를 예측할 수 있도록 크리깅 방법 (kriging method)을 이용한 근사화 방법을 사용하고자 한다. 크리깅 모델은 수치 해석의 어려움이 있는 반면에 비선형적 모델을 가장 효과적으로 표현할 수 있다는 장점이 있어서 최근에는 전산실험 (computer experiments) 분야에서도 활발히 적용 [7-9] 되고 있다.

2. 근사화 기법

2.1 실험계획법

실험계획법이란 실험에 대한 계획 방법으로, 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 수행하고, 데이터를 어떻게 취하며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험회수에서의 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이다. 본 연구에서는 실험계획법 중 OLHD (Optimal Latin Hypercube Design)를 사용하였는데, 이는 임의적으로 생성된 LHD (Latin Hypercube Design)가 추출된 실험점들 간에 공간적으로 상관관계가 생기는 단점을 보완하기 위하여 최적계획법과 LHD를 결합한 방법이다. 즉, 설계영역에서 임의적으로 배치되는 실험점들을 제어함으로써 보다 좋은 성질을 갖는 실험점 세트 (optimal design)가 구성된다. 이때 다양한 최적성 조건 (optimal criteria)이 존재하는데, 그 중에서 space filling[10]에 대한 척도로 기존의 실험점 상속 시에 쉽게 이용되는 maximin criteria가 많이 사용된다.

maximin criteria는 주어진 실험점들로 구성된 두 실험점간 거리들 중에 가장 작은 값을 최대화하는

설계로써 Morris 와 Mitchell 은 이를 확장하여 하나의 식으로 주어지는 ϕ_p criterion 을 제안하였다.

이는 주어진 모든 실험점들에 대해서 떨어져 있는 두 점간의 거리 $d_{ij} = d(x_i, x_j) = \|x_i - x_j\|$ 를 모두 계산한 다음, 이를 크기 순으로 정렬하고 동시에 동일한 거리를 갖는 개수 J_{ij} 에 대해서는 거리와 짝을 이루도록 동일한 순서로 정리한다.

$$\{d_1, d_2, \dots, d_s\}, d_1 < d_2 < \dots < d_s, \quad \{J_1, J_2, \dots, J_s\} \quad (1)$$

이때 ϕ_p criterion 은 다음 식과 같다.

$$\min. \phi_p = \left[\sum_{i=1}^s J_i d_i^{-p} \right]^{1/p}, \quad p > 0 \quad (2)$$

만약 p 가 충분히 크다면, 이는 maximin criterion 과 동일하게 된다.

2.2 크리깅 기법 (Kriging Method)

크리깅 모델은 전산실험계획으로 얻어진 정보를 바탕으로 전역모델 (global model)과 국부편차 (localized deviation)의 합으로 식 (3)과 같이 구성된다.

$$y(x) = f(x) + z(x) \quad (3)$$

여기에서 $y(x)$ 는 우리가 알고자 하는 미지의 함수이며, $f(x)$ 는 설계영역에서의 전역모델로 주로 다항함수 (polynomial function)으로 표현된다. 또한, $z(x)$ 는 전역모델로부터 나온 지역적 편차를 표현해주는 부분으로 평균이 ' 0 ' 이고 분산이 σ^2 인 정규분포를 따르며, 응답모델의 불확실성을 나타낸다. 이때 $Z(x)$ 의 공분산 (covariance)는 다음과 같다.

$$\text{Cov}[Z(x^i), Z(x^j)] = \sigma^2 R[R(x^i, x^j)] \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

여기에서 R 은 상관행렬 (correlation matrix)이며, $R(x^i, x^j)$ 는 실험데이터 내의 임의의 두 점 x^i 와 x^j 사이의 상관함수 (correlation function)이다. 상관행렬은 대각요소가 모두 1 이고 $n \times n$ 의 대칭이며, 양정치 행렬 (positive definite matrix)이 되도록 상관함수에 대하여 제안된 특정모델[11]이 있다. 새로운 입력 값 x 에서의 반응 값 $y(x)$ 의 선형 예

측 모델을 $\hat{y}(x)$ 라 정의하고, $y(x)$ 와 $\hat{y}(x)$ 의 평균 제곱오차 (mean squared error)를 최소화하는 과정을 고려하면, $\hat{y}(x)$ 는 다음 식(5)와 같이 정리된다.

$$\hat{y}(x) = f^T(x) \hat{\beta} + r^T(x) R^{-1}(y_x - F \hat{\beta}) \quad (5)$$

여기에서 $\hat{\beta} = (F^T R^{-1} F)^{-1} F^T R^{-1} y_x$ 은 회귀계수 $\hat{\beta}$ 의 일반화된 최소제곱 (generalized least square method) 추정량이며, $r(x)$ 는 식 (6)과 같이 정의된다.

$$r(x) = [R(x, x^1), R(x, x^2), \dots, R(x, x^n)]^T \quad (6)$$

마지막으로 상관인자 θ 을 결정함으로써 최종적인 크리깅 모델을 결정할 수 있다. θ 는 어떠한 값을 취하든지 크리깅 모델을 얻을 수 있지만, 최대 우도추정법 (maximum likelihood estimation)을 통해 가장 적합한 크리깅 모델이 결정된다.

각 데이터 점에서의 오차가 정규분포를 따른다고 가정하면, 크리깅의 우도함수 (likelihood function)는 식 (7)을 최대화하는 문제와 같게 된다.

$$\phi(\theta) = -(n \ln \sigma^2 + \ln |R|) \quad (7)$$

3. 슬라이더 최적설계

3.1 최적화 문제 정식화

본 연구에서는 복잡한 동적 L/UL 해석 결과 $\tilde{D}(s(x))$ 를 간단한 정적 해석 (static analysis) 결과인 $s(x)$ 의 함수로 표현하였다. 따라서 x 를 설계변수라고 정의하면, L/UL 시스템의 슬라이더 최적화 문제는 다음과 같이 정의 된다.

$$\text{Find } x \quad \text{to minimize } \tilde{D}(s(x)) \quad (8)$$

$$\text{satisfying } g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

$$h_k(x) \leq 0 \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$x^L_i \leq x_i \leq x^U_i \quad (11)$$

기존 연구들에서 언급되었듯이 L/UL 성능지수는 부양력에 의해서 대표될 수 있으므로 본 최적설계 문제에서는 언로드 시에 부양력의 크기를 최소화함으로써 L/UL 성능지수를 높이는 것으로 정의하였다. 또한 슬라이더가 디스크 기록/재생 영역 위에서 정보를 정확히 전달할 수 있도록 헤드

(head)와 디스크 (disk)사이의 간극을 일정하게 유지하는 슬라이더의 부상 특성 즉, 부상높이, 피치, 롤 각을 갖도록 하였다. 또한 슬라이더와 디스크의 접촉 가능성을 줄일 수 있도록 디스크와 슬라이더의 간극을 최소 허용 부상높이 이상으로 유지하도록 하였다. 이와 같은 슬라이더의 기본적인 설계 요구사항들을 L/UL 시스템에 적용하여 슬라이더의 최적설계문제를 정식화 하였다.

Find x

to minimize $\tilde{D}_f(n_f, h_m, \alpha, \beta)$ (12)

satisfying $h^* - \gamma_h \leq h_{OD} \leq h^* + \gamma_h$ (13)

$h^* - \gamma_h \leq h_{ID} \leq h^* + \gamma_h$ (14)

$\alpha^L \leq \alpha_{OD} \leq \alpha^U$ (15)

$\alpha^L \leq \alpha_{ID} \leq \alpha^U$ (16)

$\beta^L \leq \beta_{OD} \leq \beta^U$ (17)

$\beta^L \leq \beta_{ID} \leq \beta^U$ (18)

$h^L_{min} \leq (h_{min})_{OD}$ (19)

$h^L_{min} \leq (h_{min})_{ID}$ (20)

여기에서 \tilde{D}_f 는 크리깅 모델에 의하여 근사화된 부양력으로, 앞서 설명한 바와 같이 정적 해석결과인 음압력 n_f , 부상높이 h_m , 피치 각 α , 롤 각 β 의 함수로 표현된다. h^* 는 슬라이더가 디스크 상 기록/재생 영역에서 구동될 때의 슬라이더의 목표 부상높이이며, γ_h 는 목표 부상높이에 대한 허용치를 나타내고, h_{min} 는 슬라이더와 디스크 사이의 최소 간극을 나타낸다. 상첨자 L 과 U 는 하한값과 상한값을 나타내며, n 은 설계변수의 개수이다. 하첨자 OD (Outer Diameter)와 ID (Inner Diameter)는 디스크의 외경과 내경을 나타내는데, 이는 슬라이더가 디스크 상의 전 기록/재생 영역에서 요구되는 성능을 만족시키기 위함이다. 결과적으로 최적설계 수행 시에 목적함수인 \tilde{D}_f 뿐만이 아니라 구속조건들 모두 한번의 정적 해석만으로도 계산되기 때문에 더 이상 복잡한 동적 L/UL 해석은 불 필요하게 된다.

수치계산시 사용된 최적화 모듈은 DOT[12]의 SQP (Sequential Quadratic Programming)이며, 근사화된 크리깅 모델과 최적화 모듈을 연결하고 통합하는 작업은 최적설계 통합 소프트웨어인 EMDIOS[13]를 사용하였다.

본 연구에서는 1 인치용 SFF (small form factor)

HDD를 예제로 하였다. 회전속도는 4500 rpm이며, 디스크 상 기록/재생 영역은 반지름 5.8 mm부터 11.83 mm까지이고, 상응하는 스큐각 (skew angle)은 0.2 deg에서 -15.9 deg이다.

L/UL 용에 적용된 초기 슬라이더모델은 부압용 pico 슬라이더로서 그 크기는 1.235 x 1 x 0.03 mm이고, 크라운 (crown), 캠버 (camber)와 트위스트 (twist)는 각각 30.48 nm, 5.08 nm, 0 nm이다. 서스펜션 하중 (suspension pre-load)는 1.5g이고, 피치 토크 (pitch torque)와 롤 토크 (roll torque)는 1.234 $\mu N\cdot m$ 와 0 $\mu N\cdot m$ 이다. 슬라이더가 디스크 위로 로드시에 수직방향 초기 속도는 25.4 mm/s이며, 언로드 시에 수직 방향 초기 속도는 100 mm/s이다.

Table 1에서 시뮬레이션을 하기 위한 슬라이더 모델 및 서스펜션 모델 그리고 초기 구동조건을 정리하였다. 슬라이더의 길이, 높이, 폭의 모든 방향으로 변화가 가능하도록 $x_i (i=1,2,\dots,10)$, 슬라이더의 깊이 (recess depth) x_{11} , 얇은 단의 깊이 (shallow step depth) x_{12} , PSA (Positive Static Attitude) x_{13} 을 설계변수로 설정하였다. 목표부상높이 h^* 는 슬라이더가 디스크의 외경에서 정상 상태하에 있을 때의 초기 부상높이로 설정하였으며, 목표부상

Table 1 Simulation run setup

Slider		
Length	(mm)	1.235
Width	(mm)	1
Height	(mm)	0.3
Recess Depth	(um)	1.22
Shallow Step Depth	(um)	0.127
Crown	(nm)	30.48
Camber	(nm)	5.08
Twist	(nm)	0
Suspension		
Load Gram	(g)	1.5
Pitch Offset	(um)	0.5
Roll Offset	(um)	0
PSA	(deg)	1
RSA	(deg)	0
Pitch Torque	(uN-m)	1.234
Roll Torque	(uN-m)	0
Operating condition		
Radius[Inner]	(mm)	5.8
Radius[Outer]	(mm)	11.83
Skew Angle[Inner]	(deg)	0.2
Skew Angle[Outer]	(deg)	-15.9
Disk Speed	(rpm)	4500
Unloading Velocity	(mm/s)	100
Loading Velocity	(mm/s)	25.4

높이에 대한 허용치 γ_s 는 $\pm 10\%$ 로 설정하여 슬라이더가 트랙 탐색으로 인한 부상높이의 변동이 크게 벗어나지 않도록 제한하였다. 피치 각의 상·하한 범위는 $150 \mu rad$ 에서 $200 \mu rad$ 으로 설정하였으며, 롤 각의 상·하한 범위는 $-5 \mu rad$ 에서 $5 \mu rad$ 으로 설정하였다. 또한 슬라이더와 디스크의 최소 간극은 $10 nm$ 이상 유지하도록 설정하였다.

3.2 크리깅 모델의 적용

크리깅 모델을 만들기 위한 준비단계로서 실험 계획법에 의해 독립변수와 종속변수의 실험점을 추출하였다. 본 연구에서는 OLHD 방법을 사용하였으며, 독립변수는 정적 해석 결과로 종속변수는 동적 L/UL 해석 결과로 정의하였다. 크리깅 모델을 만들기 위한 실험점의 개수는 $10n_{vs}$ 로 설정하였다. 여기에서 n_{vs} 는 독립변수의 개수로서 부양력에 상대적으로 큰 영향을 미치는 정적 해석 결과인 파라미터의 개수이다.

따라서 독립변수에 해당하는 정적 해석의 결과와 종속변수에 해당하는 부양력의 상관관계를 얻기 위하여 총 13 개의 설계 변수를 갖는 슬라이더 형상을 설계영역 안에 고르게 분포하도록 실험점을 추출하고, 이렇게 추출된 40 개의 슬라이더 형상들에 대한 정적 해석과 동적 L/UL 해석을 수행하여 총 40 개의 음압력, 부상높이, 피치 각, 롤 각 그리고 부양력을 추출하였다. 결국, 추출된 정적 해석결과를 입력변수로 그리고 동적 해석결과를 출력변수로 하는 크리깅 모델이 Fig. 1 과 같은 과정을 통하여 형성 된다. 한편, 근사화된 크리깅 모델의 정확성과 신뢰성을 평가하기 위하여 식 (21)과 같이 상대오차 (Root Mean Square Relative Error, RMSRE) 계산법에 의하여 근사 모델의 정확성을 비교하였다.

$$RMSRE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right)^2}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (21)$$

여기에서 y_i 는 임의의 점에서의 실제 부양력, \hat{y}_i 임의의 점에서의 근사값 이며, 상대오차 값을 예측하기 위하여 새로운 200 개의 실험점이 사용되었다. 먼저 Fig. 2 은 크리깅 모델의 정확성과 효율성 검증을 위하여 다른 근사화 모델들과 비교한 내용으로 보간법 방식 (interpolation method)인 RBF(Radial Basis Function)와 회귀분석방식인 (regression analysis)인 RSM (Response Surface Model) 과 SVR (Support Vector Regression)이 사용되었다. 이 결과를 보면 크리깅 모델의 상대오차 값은 0.2 로써 동적 L/UL 방정식의 비선형성을 표현하는데 상대적으로 충분히 효과적임을 알 수 있었다. 한편, 동적 L/UL 해석과 근사화된 크리깅 모델의 차이를 비교하기 위하여 임의의 실험점들에 대하여 직접 부양력의 크기를 Fig. 3 에 나타내 보았다. 여기서 보면 크리깅 모델로 근사화된 부양력이 설계 영역 범위 안에서 실제 부양력의 크기를 효과적으로 예측하고 있어서 Fig. 2 에서 기술된 상대오차 값 0.2 가 현 슬라이더 모델에 허용될 수 있는 오차임을 알 수 있었다.

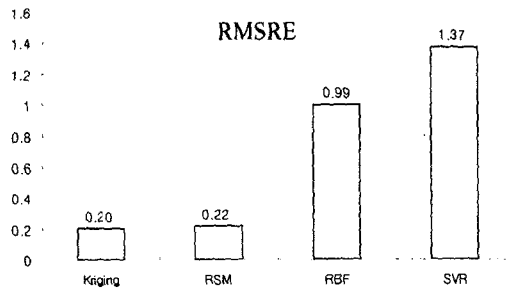


Fig. 2 RMSREs for each approximate model

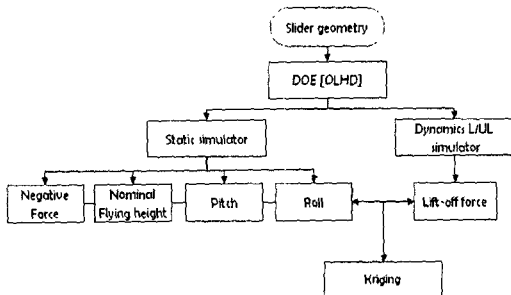


Fig. 1 Flowchart to build kriging model

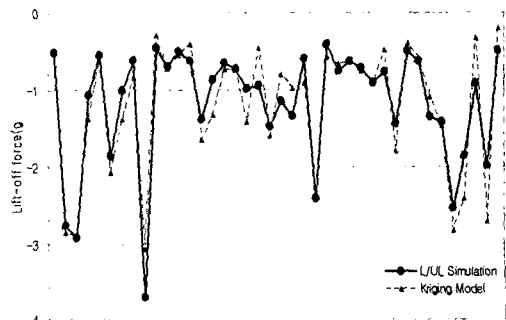


Fig. 3 Accuracy of kriging model at random points

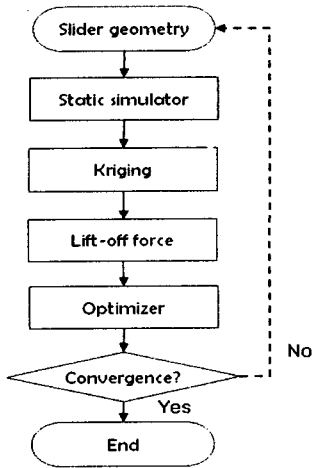


Fig. 4 Procedure of proposed optimization process

따라서 이와 같이 검증된 크리깅 모델을 하나의 근사화된 해석기로서 일반 해석기 대신 최적설계에 적용하게 되면 상대적으로 많은 시간과 비용을 절약하게 된다. 이에 본 연구에서는 Fig. 4에 도시된 바와 같이 크리깅 모델을 해석기로 사용한 최적설계를 수행하고자 하며, 이에 관한 상세한 내용은 다음 장에 기술하였다.

4. 최적설계 결과

4.1 슬라이더 최적설계 결과

Table 2에서는 L/UL 시스템용 슬라이더의 최적설계 결과를 초기 슬라이더 형상과 비교한 자료이다. 총 440 번의 반복적인 정적 해석을 통하여 목적함수인 근사화된 부양력의 크기가 초기 슬라이더의 -27.9 mN 에서 최적화된 슬라이더의 -9.11 mN 로 감소됨을 알 수 있었다.

또한, Table 3에서는 구속조건인 슬라이더의 정적 부상특성들이 디스크의 외경과 내경에서 모두 만족되고 있음을 알 수 있었다.

한편, Fig. 5에서는 슬라이더의 초기 레일 형상과 최적화 된 레일 형상을 하나의 그림으로 서로 비교해 보았다. 이 그림을 보면 양압력 (positive force)과 관계되어 있는 레일의 영역이 줄어들었음을 알 수 있다. 또한, 슬라이더의 두께 방향인 슬라이더 깊이는 $1.22\text{ }\mu\text{m}$ 에서 $5.52\text{ }\mu\text{m}$ 로 증가 하고, 얇은 단의 깊이는 $0.127\text{ }\mu\text{m}$ 에서 $0.031\text{ }\mu\text{m}$ 로 감소 하였으며, PSA 는 17.3 mrad 에서 11.2 mrad 으로 감소함을 알 수 있었다.

Table 2 Design variables of initial and optimum slider

Design Variables	Initial slider	Optimum slider
x1 [mm]	0	-1.91E-02
x2 [mm]	0	-9.97E-03
x3 [mm]	0	-6.41E-02
x4 [mm]	0	9.58E-03
x5 [mm]	0	-9.31E-03
x6 [mm]	0	-1.00E-01
x7 [mm]	0	8.00E-02
x8 [mm]	0	-5.06E-02
x9 [mm]	0	-9.24E-02
x10 [mm]	0	2.82E-02
Base Recess [um]	1.22	5.52
Shallow Step [um]	0.13	0.03
PSA [mrad]	17.3	11.2
\tilde{D}_F [mN]	27.9	9.11

따라서 부양력에 직접 영향을 미치는 음압력의 감소는 슬라이더 깊이의 증가뿐만이 아니라 음압력과 힘의 균형을 이루는 양압력의 감소를 위해 얇은 단 깊이를 감소시킴으로도 가능하다. 따라서 부양력을 감소를 위한 가장 영향력이 있는 슬라이더 형상 변수들은 슬라이더 깊이와 얇은 단 깊이라고 할 수 있다.

Table 3 Flying attitude of initial and optimum slider

Constraint	Initial slider	Optimum slider
$h_{(I)}$ [nm]	23.80	26.39
$h_{(II)}$ [nm]	22.30	23.81
$\alpha_{(I)}$ [mrad]	185.39	183.23
$\alpha_{(II)}$ [mrad]	138.80	151.06
$\beta_{(I)}$ [mrad]	-2.28	-5.00
$\beta_{(II)}$ [mrad]	-11.82	4.98
$(h_{\text{min}})_{(I)}$ [nm]	23.18	25.56
$(h_{\text{min}})_{(II)}$ [nm]	21.10	23.18

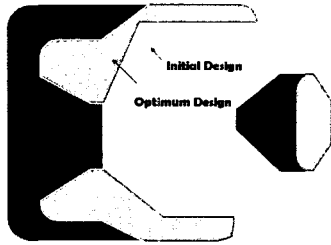


Fig. 5 Rail shape of initial and optimum design

4.2 최적화된 슬라이더의 동적 L/UL 성능

본 연구에서는 동적 L/UL 해석을 통하여 초기 슬라이더와 최적화된 슬라이더의 실제 동적 거동을 서로 비교 고찰하였다.

먼저 Fig. 6(a)와 5(a)는 언로드 시에 시간에 따른 슬라이더의 공기 유향력, 서스펜션 힘, 램프에 가해지는 힘을 나타내었다. 여기서 공기 유향력은 양압과 음압으로 이루어지며, 음압이 양압보다 커지게 되어 음압이 최대가 되는 공기유향력이 바로 부양력이 된다.

따라서 초기 슬라이더 형상에서의 실제 부양력은 약 -25.3 mV 이며, 최적화된 슬라이더 형상에서의 부양력은 약 -9.59 mV 으로써 초기값 대비 약 62% 감소한 것을 알 수 있었다. 램프에 걸리는 힘은 최적화된 슬라이더 형상의 경우는 약 19.1 mV 으로 초기 슬라이더 형상의 경우 24.1 mV 에 비하여 약 21% 감소되었다.

Fig. 6(b)와 5(b)는 L/UL tab 과 슬라이더 중심의 이동거리를 도시한 것이다. 램프의 이동거리는 시간에 따라 일정하게 증가하지만, 슬라이더 중심의 이동거리는 부양력의 영향력으로 인하여 진동하며 증가한다. Fig. 6(c)와 5(c)는 슬라이더와 디스크 사이의 간극을 시간의 변화에 대하여 나타낸 것이다. 특히, Fig. 6(c)에 보면 초기 슬라이더는 0.65 ms 에서 바운드 (bound)되어 디스크와 강하게 부딪히는 현상이 나타난다. 그러나 Fig. 7(c)의 최적화된 슬라이더에서는 이러한 바운드 현상이 제거되었음을 알 수 있었다. 이는 부양력이 클수록 슬라이더가 바운드되어 디스크에 충격을 가하고 결국 디스크에 심각한 피해줄 가능성이 커지게 됨을 나타낸다.

다음은 로드 시에 나타나는 슬라이더의 동적 거동을 살펴보았다. Fig. 8(a)와 9(a)를 보면, 공기 유향력과 서스펜션 힘이 거의 일치되며, 램프에 걸

리는 힘이 이와 반대 경향으로 나타남을 알 수 있었다. Fig. 8(b)와 9(b)에서 슬라이더 중심과 L/UL tab 은 비슷한 궤적을 나타내지만 약 1.5 ms 부근에서 공기 유향력이 발생하여 슬라이더에 영향을 주면서 다른 궤적을 나타내는 것을 알 수 있었다. Fig. 8(c)와 9(c)는 로드시의 슬라이더의 이동거리를 도시한 그림으로, 디스크와 슬라이더의 최소 간극이 양의 값을 유지하면서 접촉 없이 슬라이더가 디스크 위에 안착하는 것을 알 수 있었다.

결과적으로 위의 동적 L/UL 해석 결과들을 보면, 디스크 전 범위에 대한 설계요구조건을 만족하면서 부양력의 크기가 감소된 최적화된 슬라이더는 로드 성능뿐만이 아니라 언로드 성능에도 상당히 큰 영향을 미치고 있음을 확인 할 수 있었다.

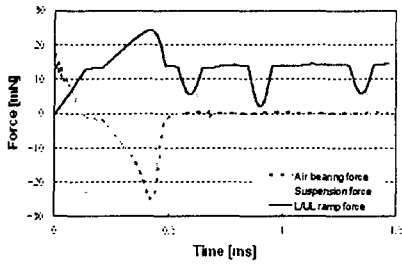
5. 결과 및 고찰

본 연구에서는 근사화 기법을 이용하여 요구되는 정적 부상특성을 모두 만족하면서 동시에 동적 L/UL 성능을 향상시키는 헤드 슬라이더의 형상 최적 설계가 수행되었다.

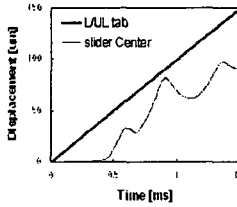
먼저, 동적 L/UL 성능 향상을 위하여 언로드시 발생하는 부양력을 L/UL 시스템의 성능지수로 선정하고 이를 목적함수로 취하여 최소가 되도록 하였으며, 슬라이더가 디스크 기록/재생 전 범위 영역에서 정보를 정확히 전달할 수 있도록 슬라이더의 정적 부상특성 즉, 부상 높이, 피치, 롤 각이 적절한 값을 유지하도록 하였다.

또한, 음압력, 부상높이, 피치와 롤 각의 정적 해석 결과들과 동적 L/UL 해석 결과인 부양력 사이의 상관 관계를 크리깁 모델을 사용하여 근사화 함으로써 최적설계 과정에서 수치적 부담이 큰 동적 L/UL 해석 없이 단지 정적 해석만으로 부양력을 산출하는 방법을 사용하였다. 최적화 수행은 정적 해석기와 크리깁 모델 그리고 최적화 모듈을 효과적으로 연결하고 통합한 최적설계 통합 소프트웨어인 EMDIOS 를 사용하였다.

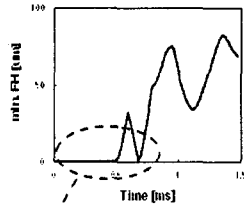
최적설계 결과, 목적함수인 부양력은 초기값 -25.3 mV 에 비하여 -9.59 mV 으로 약 62% 정도 감소를 확인할 수 있었으며, 이를 동적 L/UL 해석기로 검증한 결과, 최적화된 슬라이더의 로드와 언로드 성능이 실제 초기 슬라이더와 비교하여 상당히 향상되었음을 알 수 있었다.



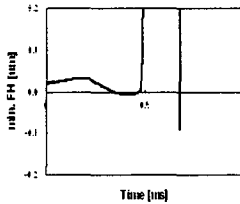
(a)



(b)

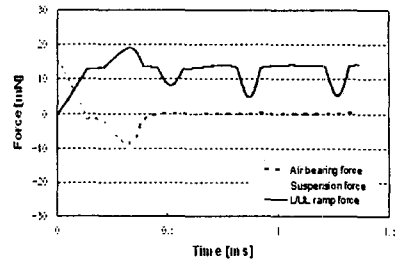


(c)

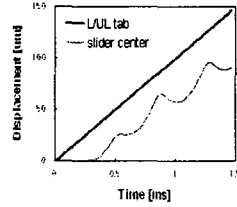


(d)

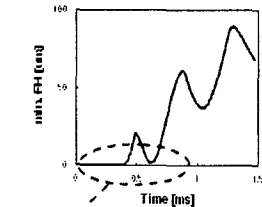
Fig. 6 Simulation results for unloading process of initial slider



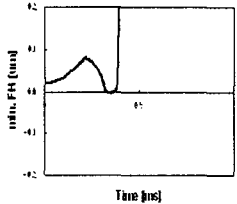
(a)



(b)

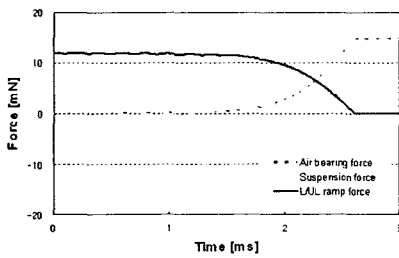


(c)

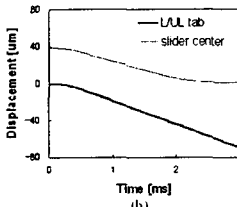


(d)

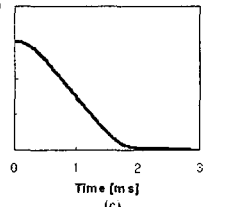
Fig. 7 Simulation results for unloading process of optimum slider



(a)

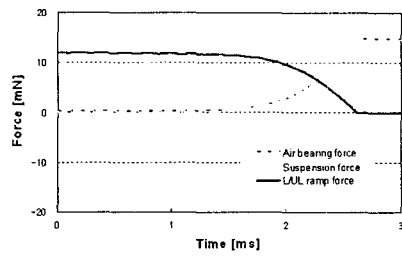


(b)

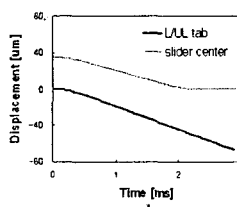


(c)

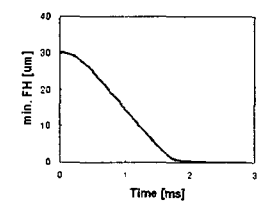
Fig. 8 Simulation results for loading process of initial slider



(a)



(b)



(c)

Fig. 9 Simulation result for loading process of optimum slider

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 최적설계신기술연구센터[iDOT]와 정보저장기기연구센터[CISD]의 지원에 의해 수행하였습니다.

참고문헌

- [1] Zeng, Q.-H. and Bogy, D. B., 1999, "Slider air bearing design for load/unload application," IEEE Transactions on Magnetics, Vol.35, pp.746-751.
- [2] Bogy, D. B. and Zeng, Q.-H., 2000, "Design and Operating Conditions for Reliable Load/Unload Systems," Tribology International, Vol.33, pp.357-366.
- [3] Dufresne, M. A. and Menon, A. K., 2000, "Ultra-Low Flying Height Air Bearing Designs," IEEE Transactions on Magnetics, Vol.36, pp.2733-2735.
- [4] Zeng, Q.-H. and Bogy, D. B., 2000, "A Simplified 4-DOF Suspension Model for Dynamic Load/Unload Simulation and Its Application," ASME Journal of Tribology, Vol.122, pp.274-279.
- [5] Q. H. Zeng and D. B. Bogy, 2000, "Effects of Certain Design Parameters on Load/Unload Performance", IEEE Transaction on MAGNETICS, Vol.36, pp.140-147.
- [6] Hideaki Tanaka, Hidekazu Kohira, 2001, "Effect of Air-Bearing Design on Slider Dynamics During Unloading Process", IEEE Transaction on MAGNETICS, Vol.37, pp.1818-1820.
- [7] Timothy W. Simpson, Timothy M. Mauery, 1998, "Comparison of Response Surface and Kriging Model for Multidisciplinary Design Optimization", AIAA, Vol.1, pp.381-391
- [8] Guinta, A. and Watson, L., 1998, "A Comparison of Approximation Modeling Techniques: Polynomial Versus Interpolating Models," Proceedings of 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, St. Louis, MO, AIAA, Vol. 2, Sep. 2-4, pp.392-440.
- [9] Simpson, T., Korte, J., Mauery, T. and Mistree, F., 1998, "Comparison of Response Surface and Kriging Models for Multidisciplinary Design Optimization," Proceedings of 7th AIAA/USAF/NASA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, St. Louis, MO, AIAA, Vol.2, Sep. 2-4, pp.381-391
- [10] Morris, M. D. and Mitchell, T. J., 1995, "Exploratory Design for computational Experiments", Journal of Statistical Planning and Inference, Vol.43, pp.281-402.
- [11] Ryu, J. S, Kim, M. S, Cha, K. J., Lee, T. H. and Choi, D. H., 2002, " Kriging Interpolation Methods in Geostatistics and DACE Model", KSME International Journal, Vol.16, No.5, pp.619~632
- [12] Vanderplaats, G. N., 1999, "DOT User's Manual version 5.0," VR & D, Inc.
- [13] EMDIOS [Online]. Available: <http://iframax.com>