

제로-로드 슬라이더의 부상특성에 관한 연구

윤상준 · 강태식 · 최동훈*

한양대학교 기계설계학과 대학원

*한양대학교 기계설계학과

A Study on the Flying Characteristics of Zero-Load Sliders

Sang-Joon Yoon, Tae-Sik Kang and Dong-Hoon Choi*

Department of Mechanical Design and Production Engineering, Graduate school, Hanyang University

*Department of Mechanical Design and Production Engineering, Hanyang University

Abstract—A zero-load slider is composed of two outside rails which produce a lift force pushing up the slider from the disk surface and a wide reverse step region which produces a suction force attracting the slider to the disk surface. In this paper, the flying characteristics of zero-load sliders are obtained by using an optimization technique. In the pressure calculation module, the FIFD scheme is used to solve the modified Reynolds equation. The BFGS method and a line search algorithm is employed to predict the static flying attitude. To investigate the effect of the geometric parameters of zero-load sliders on the flying characteristics, recess depth, front step width, rail width, and taper height are varied and the corresponding flying attitudes are obtained. Simulation results demonstrate that recess depth and rail width have significant influences on the flying characteristics.

1. 서 론

하드 디스크 드라이브(HDD)는 소형화와 대용량화 추세에 따라 디스크에 저장된 자기정보가 정확히 그리고 안정되게 전달될 수 있도록 HDI(head/disk interface)에 관한 연구에 그 초점이 맞추어지고 있다. 특히, 고속으로 회전하는 디스크 상에서 수많은 정보를 보다 정확히 기록하고 재생하도록 공기윤활막 두께를 안정되게 줄여나가는 기술은 하드 디스크 드라이브의 기록밀도를 좌우하는 중요한 요인으로 작용하고 있으며, 이를 기준으로 그 성능이 평가되고 있어서 실제로 헤드와 디스크 사이의 간극은 1957년 IBM 350 file의 20 μm 에서부터 현재 0.1 μm 이하까지 끊임없이 감소되어 왔다.

그러나 이와 같이 계속된 윤활막 두께의 감소는 슬라이더 이착륙시 디스크 표면과의 접촉문제를 야기시킬 수 있다는 슬라이더의 부하문제와 슬라이더가 디스크 트랙 사이를 이동할 때 주어진 외란에 상관없이 거의 일정한 간극을 유지해야 된다는 공기윤활막의 강성문제를 초래하게 되었다. 실제로 기존에

주로 많이 사용되었던 두개의 레일을 지닌 TF 슬라이더(taper-flat slider)의 경우를 살펴보면 공기윤활막 강성을 향상시키기 위하여 슬라이더에 상당히 큰 예하중을 주고 있으며 이로 인하여 슬라이더 이착륙시 디스크표면의 손상 또는 이로 인한 자료 및 정보손실 등 매우 심각한 문제를 야기시켰다. 따라서 적은 부하를 가지고도 낮은 윤활간극을 유지할 수 있는 새로운 슬라이더의 개발이 절실히 요구되었으며, 높은 공기윤활막 강성을 유지하면서 동시에 작은 부하를 갖는 제로-로드 슬라이더(zero-load slider)의 개발이 매우 절실하게 되었다.

일반적으로 제로-로드 슬라이더는 NP(negative pressure) 또는 SP(subambient pressure) 슬라이더로도 불리워지고 있으며, 이에 관한 기존의 연구내용들을 간략히 정리해 보면 다음과 같다. 먼저 1983년 White[1]는 기존의 TF 슬라이더에 reverse step을 첨가한 NP 슬라이더를 제로-로드 슬라이더로 명명하고, 이에 수치해석을 수행하여 기존 TF 슬라이더보다 공기윤활막 강성은 증가하고 서스펜션에 작용하는 예하중은 반대로 감소하는 새로운 슬라이더의

설계개념을 제안하였다. Kogure 등[2]은 White[1]와 상당히 유사한 형상을 지닌 또 다른 NP 슬라이더를 제시하였으며, 이를 통하여 제안된 NP 슬라이더가 기존 슬라이더에 비하여 약 6배나 높은 공기윤활막 강성을 지닐 수 있음을 주장하였다. 또한 Yoneko 등[3]은 NP 슬라이더가 일반적으로 낮은 디스크 회전 속도에서도 빠른 부상성능을 지닐 수 있음을 수치해석과 실험을 통하여 입증하였으며, Tagawa와 Hashimoto[4]는 제안된 NP 슬라이더가 그들의 자력공기윤활(self-loading) 성능으로 인하여 load/unload 방식에 상관없이 매우 효과적으로 적용될 수 있음을 수치해석을 통하여 입증하였다.

그러나 이들은 모두 NP 슬라이더의 정적 부상특성을 해석하기 위하여 불필요하게 슬라이더의 운동방정식을 각 시간구간마다 모두 해석하는 비효율적인 방법을 사용하고 있으며, 실제 NP 슬라이더의 부상특성을 지배하는 슬라이더 형상, 즉 각 형상설계변수들에 대하여 충분한 연구분석이 이루어지고 있지 않았다.

본 연구에서는 기존에 제안된 다양한 NP 슬라이더의 모델들 중에서 가장 기본적인 형상으로 여겨지는 제로-로드 슬라이더를 해석모델로 선정하였으며, 이에 효과적으로 슬라이더의 정상상태를 계산할 수 있는 최적화기법을 이용한 슬라이더의 부상상태 해석기법[5]을 도입하여 제로-로드 슬라이더의 부상상태 해석을 수행하였다. 또한 NP 슬라이더의 형상변화에 대한 부상특성을 고찰하기 위하여 모델 슬라이더의 중요한 형상치수들을 설계인자들로 가정하고, 이에 수치적인 민감도 해석을 수행하여 그들의 영향력을 고찰해 보았다.

2. 제로-로드 슬라이더 형상

기존의 Winchester file에서 주로 사용되어왔던 일반적인 TF 슬라이더는 대칭되는 두개의 레일과 이들 사이를 가로지르는 평평한 홈으로 구성되어 있어서 실제로 슬라이더와 디스크 사이에서 발생하는 공기윤활력은 오직 양 레일에서 생성되는 양의 공기윤활력에만 의존하여 왔었다. 그러나 본 연구의 해석모델인 제로-로드 슬라이더는 Fig. 1(a)에 도시한 바와 같이 기존의 테이퍼를 지닌 두개의 레일사이에 이들과 같은 높이의 front step과 이와는 대조적으로 약 10 μm 정도 깊이를 지닌 reverse step을 가지고 있다. 따라서 제로-로드 슬라이더의 양 레일은 기존의 TF

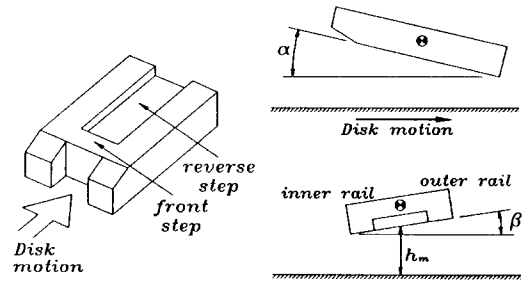


Fig. 1. Schematic view of the zero-load slider.

슬라이더와 마찬가지로 양의 공기윤활력을 발생하여 슬라이더가 디스크 상에서 멀어지도록 하는 양의 부상력을 발생하고, 반대로 reverse step은 음의 공기윤활력을 생성시켜 슬라이더를 디스크 방향으로 잡아당기는 흡인력(suction force 또는 negative force)을 발생시킨다. 결국 제로-로드 슬라이더가 지지할 수 있는 순수 부하용량은 전체적으로는 감소하며, 이로 인하여 작은 윤활간극을 형성하기 위하여 레일의 폭을 줄이거나 예하중을 무리하게 늘릴 필요가 없게 되었다. 또한 디스크의 고속회전 뿐만 아니라 저속으로 회전하는 경우에도 기존 슬라이더에 비하여 부상성능이 우수하게 되며, 이로 인하여 마멸 및 마찰 등에서도 큰 장점을 지니게 된다.

한편, 헤드 슬라이더는 서스펜션에 가해지는 예하중, 슬라이더의 자중, 그리고 슬라이더와 디스크 사이에서 발생하는 공기윤활력들의 크기와 그들의 작용위치가 서로 힘의 평형상태를 유지하면서 부상하게 된다. 따라서 슬라이더의 부상상태는 Fig. 1(b)와 같이 최소공기윤활막 두께(h_m), 피치각(α), 그리고 롤각(β)에 의하여 정의된다.

3. 제로-로드 슬라이더 부상상태 해석

3-1. 부상상태 해석이론

공기를 윤활제로 사용하는 하드 디스크 드라이브에서는 공기윤활막의 두께가 공기분자의 평균자유비행거리(molecular mean free path)와 비슷한 정도로 작으므로 공기 분자의 미끄럼(molecular slip) 현상[6]을 고려하면 수정된 레이놀즈 방정식이 식 (1)과 같이 정의된다. 따라서 이를 수치적분하면 공기윤활막에 작용되는 압력을 구할 수 있다.

$$\nabla \cdot (h^3 p \nabla p) + 6\lambda_a p_a \nabla \cdot (h^2 \nabla p)$$

$$= 6\mu \mathbf{u} \cdot \nabla(\text{ph}) + 12\mu \frac{\partial(\text{ph})}{\partial t} \quad (1)$$

한편, 본 연구에서는 슬라이더의 정적 부상상태를 결정하는 방법으로 슬라이더의 운동방정식을 점근적으로 따라가는 기존의 방식 대신 힘과 모멘트들의 합인 상대오차값들을 최적화 기법을 이용하여 효과적으로 줄여나가는 Choi와 Yoon[5]의 방법을 사용하였다. 이에 관한 내용을 간략히 기술하면 다음과 같다.

Minimize $\psi = R_1^2 + R_2^2 + R_3^2 \quad (2)$

Subject to $h_m^L \leq h_m \leq h_m^U,$
 $\alpha^L \leq \alpha \leq \alpha^U,$
 $\beta^L \leq \beta \leq \beta^U,$

여기서 $R_1 = \frac{r_1}{F + mg}, \quad (3)$

$$R_2 = \frac{r_2}{x_F F + x_C mg},$$

$$R_3 = \frac{r_3}{y_F F + y_C mg},$$

여기서, F는 슬라이더에 작용하는 예하중, mg은 슬라이더의 자중, x_F, y_F는 하중작용점, x_C, y_C는 슬라이더의 무게중심을 나타내고, r₁, r₂, r₃는 다음 식과 같이 나타나는 힘과 모멘트의 상대오차 값이다.

$$r_1 = F + mg - W,$$

$$r_2 = x_F F + x_C mg - x_W W,$$

$$r_3 = y_F F + y_C mg - y_W W$$

여기서 W는 공기베어링에 의한 부상력을, x_W, y_W는 이와 같은 힘의 작용점을 나타낸다.

먼저 최적화 문제의 설계변수로는 헤드 슬라이더의 부상상태 변수들(h_m, α, β)을 선정하였으며, 목적함수로는 식 (2)와 같이 무차원화 된 상대오차값들(R₁, R₂, R₃)의 제곱을 최소화하는 것으로 설정하였다. 또한 부상상태 변수들이 실제 사용가능한 범위 내에 반드시 존재하도록 하기 위하여 경계구속조건(side constraint)들을 식 (3)에 설정하였다. 여기서 상첨자 L과 U는 각각 경계값의 하한치와 상한치를 의미한다. 따라서 헤드 슬라이더의 정적부상상태는 위의 구속조건식을 모두 만족하면서 목적함수값이 거의 영에 근접되는 최적의 해에서 결정된다. 이하의 상세한 내

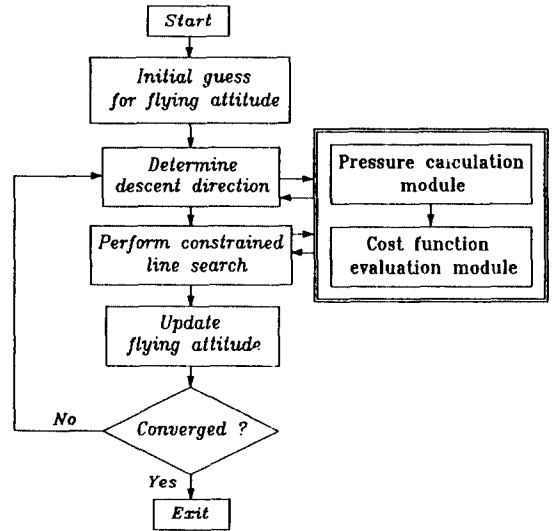


Fig. 2. Flow chart for the static analysis of the slider.

용은 Choi와 Yoon[5]에 기술되어 있다.

3-2. 수치해석 방법

앞에서 설명한 최적화 문제를 기초로 하여 헤드 슬라이더의 정적 부상상태를 결정하는 전반적인 수치계산과정을 흐름도로 표현하면 Fig. 2와 같다.

우선 초기 부상상태변수값(h_m, α, β)이 가정된다. 이와 같이 슬라이더의 부상상태가 주어지면 압력분포 해석모듈에서 수정된 레이놀즈 방정식이 해석되고 슬라이더 표면에서의 압력분포가 구해진다. 이는 다시 목적함수 결정모듈에서 순차적인 계산과정에 의하여 힘과 모멘트들의 합인 상대오차값들로 전환되며, 이에 상응하는 해석모듈값들을 제공하게 된다. 한편, 해석모듈을 이용하여 슬라이더의 부상상태를 결정하는 최적화 모듈은 현 위치에서 목적함수를 줄이는 감소방향 벡터와 이들에 대한 적절한 선택책을 사용하여 경계조건의 위배없이 목적함수를 최소화시키도록 하는 역할을 한다. 이때 사용된 감소방향벡터의 결정은 Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno(BFGS)방법을, 그리고 선택책은 순차적 다항식 근사기법(sequential polynomial approximation method)을 각각 사용하였다.

한편, 본 연구에서는 비선형 압축성 운항방정식인 식 (1)을 풀기 위하여 기존에 매우 효율적인 방법으로 알려진 factored implicit finite difference scheme (FIFD)[7]을 사용하였다. 또한 수치계산 시간의 효

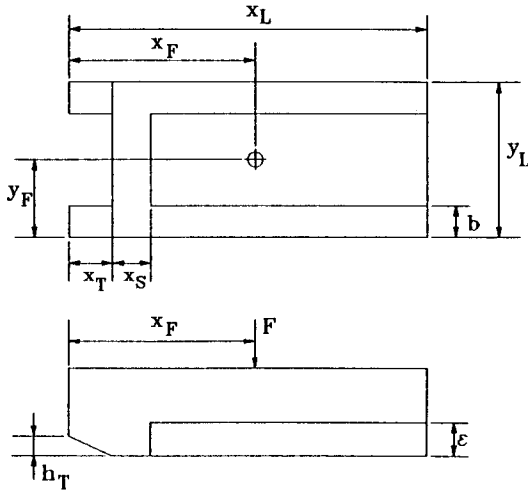


Fig. 3. Geometry of the zero-load slider.

Table 1. Configurations and operating conditions of the slider model

Slider configuration		Operating condition	
x_L (mm)	4.039	R_a (mm)	107.7
y_L (mm)	2.997	skew(deg)	0.0
b (mm)	0.483	p_a (MPa)	0.10135
x_T (mm)	0.381	μ (cp)	0.01806
h_T (μ m)	5.842	λ_c (μ m)	0.0635
x_S (mm)	0.483	RPM	3600
ϵ (μ m)	8.89	V_x (m/sec)	40.6
m (g)	0.04	V_y (m/sec)	0
F (gf)	2.0		
x_F (mm)	2.019		
y_F (mm)	1.49		

윤성을 향상시키기 위하여 불균일 격자계를 사용하였으며, 특히 제로-로드 슬라이더의 reverse step의 경계면에서 발생하는 불연속성을 해결하기 위하여 이 부분에 적절한 연속곡면을 도입하였으며, 그 결과 수치적인 안정성이 증가되었다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 앞서 기술된 수치계산 방법에 따라 헤드 슬라이더에 작용하는 압력분포와 그 부상상태를 계산하였으며, 이를 기존에 사용된 제로-로드 슬라이더 모델에 적용하여 그 결과들을 비교 고찰해 보았다. 또한 제로-로드 슬라이더의 공기윤활력 형성에 중요한 역할을 할 것으로 여겨지는 슬라이더의 다양한 형상

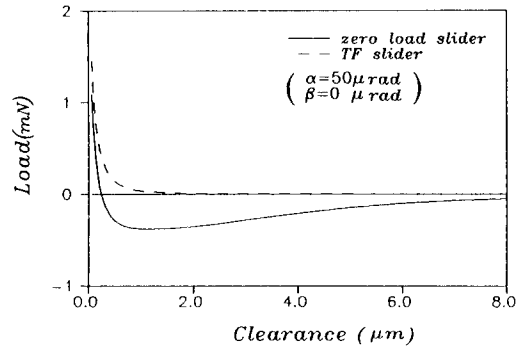


Fig. 4. Load/clearance relationship.

치수들을 설계인자들로 선정하고, 이들에 대한 민감도 해석을 수행하여 제로-로드 슬라이더의 부상특성을 파악하였다.

이를 위하여 실제로 사용된 제로-로드 슬라이더의 기하학적 형상은 Fig. 3에, 그리고 슬라이더의 상세한 치수와 운전조건 등은 Table 1에 각각 정리하였다. 또한 압력분포 해석시 수치계산의 효율성을 위하여 길이방향으로 150개, 너비방향으로 51개의 불균일 격자계를 사용하였으며, 부상상태를 결정하기 위하여 사용된 최적설계의 초기 설계변수값은 이하 모든 계산에서 $h_m^0 = 0.2 \mu\text{m}$, $\alpha^0 = 50 \mu\text{rad}$, $\beta^0 = 0 \mu\text{rad}$ 을 사용하였다.

4-1. 제로-로드 슬라이더의 공기윤활력 특성

Fig. 4에서는 앞서 제시된 제로-로드 슬라이더의 유막두께에 대한 공기윤활력, 즉 부하하중의 해석결과를 나타내고 있으며, 이들의 특성을 좀더 손쉽게 설명하기 위하여 기존의 TF 슬라이더의 해석결과와 함께 도시하였다. 이때 사용된 TF 슬라이더의 형상 치수는 reverse step을 제외한 제로-로드 슬라이더의 것과 일치한다.

먼저 공기윤활력의 크기를 살펴보면 전 윤활간극에 대하여 제로-로드 슬라이더의 결과값은 TF 슬라이더의 결과값에 비하여 전반적으로 작은 값을 갖게 되며, 따라서 그림 상에서는 주로 음의 값으로 존재하게 된다. 이것은 제로-로드 슬라이더가 reverse step에서 음의 윤활력을 발생시키기 때문이며, 특히 양의 공기윤활력을 지닌 작은 윤활간극(약 $0.5 \mu\text{m}$ 이하)에서는 제로-로드 슬라이더가 TF 슬라이더보다 작은 예측치를 필요로 함을 알 수 있다.

한편, 공기윤활력의 강성면에서 보면 제로-로드 슬라이더는 작은 윤활간극에서 TF 슬라이더 보다 상

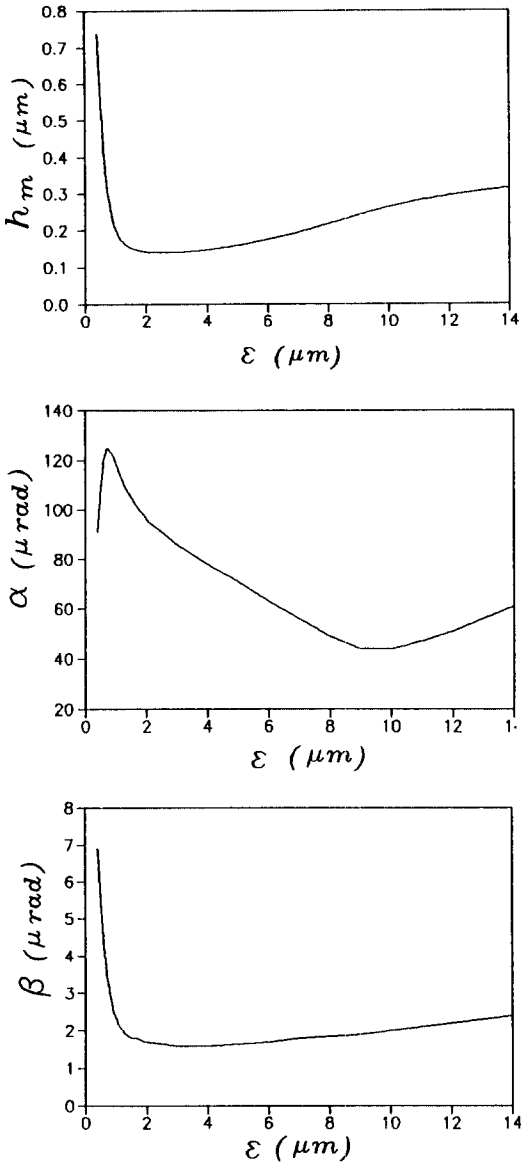


Fig. 5. Effect of recess depth on slider orientations.

당히 큰 값을 지니고 있으나, 큰 윤활간극에서는 음의 값을 갖는 특이한 현상을 나타낸다. 이는 reverse step의 영향으로 인하여 제로-로드 슬라이더가 유막 간극의 변화에 매우 민감하게 반응하고 있음을 나타내며, 특히 큰 윤활간극에서는 레일에서 발생하는 양의 공기유향력 감소가 reverse step의 음의 공기유향력 감소 보다 훨씬 빠르게 이루어지고 있음을 의미한다. 따라서 작은 윤활간극에서의 제로-로드 슬

라이더는 TF 슬라이더보다 더 빠른 부상성능을 나타내고, 반대로 큰 윤활간극에서는 음의 유향강성으로 인하여 TF 슬라이더보다 더 빠르게 윤활간극을 낮추면서 쉽게 평형상태에 도달한다.

4-2. 설계인자들에 대한 민감도 해석

레일의 양의 공기유향력과 reverse step의 음의 공기유향력의 조합으로 표현되는 제로-로드 슬라이더의 부하하중은 슬라이더 레일의 폭, 테이퍼 높이, front step의 두께, recess depth 등과 같이 다양한 기하학적 요소들의 변경에 의하여 상대적으로 손쉽게 조정될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이들 기하학적 요소들을 슬라이더 설계시 고려되어야 할 설계인자들로 가정하고 이에 부상상태에 대한 민감도 해석을 수행하여 그들의 영향력을 고찰해 보았다.

먼저 recess depth(ϵ)에 대한 슬라이더의 부상상태를 살펴보면 Fig.5와 같다. 그림에서 보면 recess depth가 상대적으로 작은 영역(약 $2 \mu m$ 이하)에서는 reverse step에서 생성되는 음의 공기유향력이 recess depth의 감소와 함께 급격히 작아지게 되어 최소유향막 두께, 피치각 및 롤각은 전반적으로 모두 크게 증가하는 성향을 나타낸다. 이보다 recess depth가 다소 증가하면 음의 공기유향력이 최대가 되는 임의의 정점에 도달하여 그림에서 윤활간극이 최소값을 가지며, 이어 그 정점을 지나면 다시 서서히 증가하는 현상을 나타낸다. 이러한 사실은 recess depth가 최대의 음압을 발생시키도록 하는 최대의 임계값을 가지고 있음을 시사하며, 결국 이것이 제로-로드 슬라이더의 특성을 표시하는 중요한 설계인자가 될 수 있음을 나타낸다.

한편 이들에 대한 좀더 상세한 고찰을 위하여 몇몇 recess depth의 위치에 대하여 그 압력분포도를 Fig.6에 나타내 보았다. 우선 슬라이더의 두 레일에서는 일반적인 TF 슬라이더와 마찬가지로 테이퍼의 썩기 현상에 의하여 급격한 압력상승이 발생하며, 슬라이더의 측면에서는 측면유출로 인한 압력감소 현상이 다소 나타난다. 두 레일 사이에는 reverse step영역으로 인하여 그림과 같이 음의 공기유향력이 발생하며, reverse step의 시작점에서 음의 공기유향력이 최대가 되고, 후미로 가면서 슬라이더의 압력 경계 조건을 만족시키기 위하여 점차 감소하는 경향을 나타낸다.

따라서 이러한 결과들을 모두 종합해 보면 최소 공기막두께와 롤각이 최소가 되는 약 $3 \mu m$ 의 recess

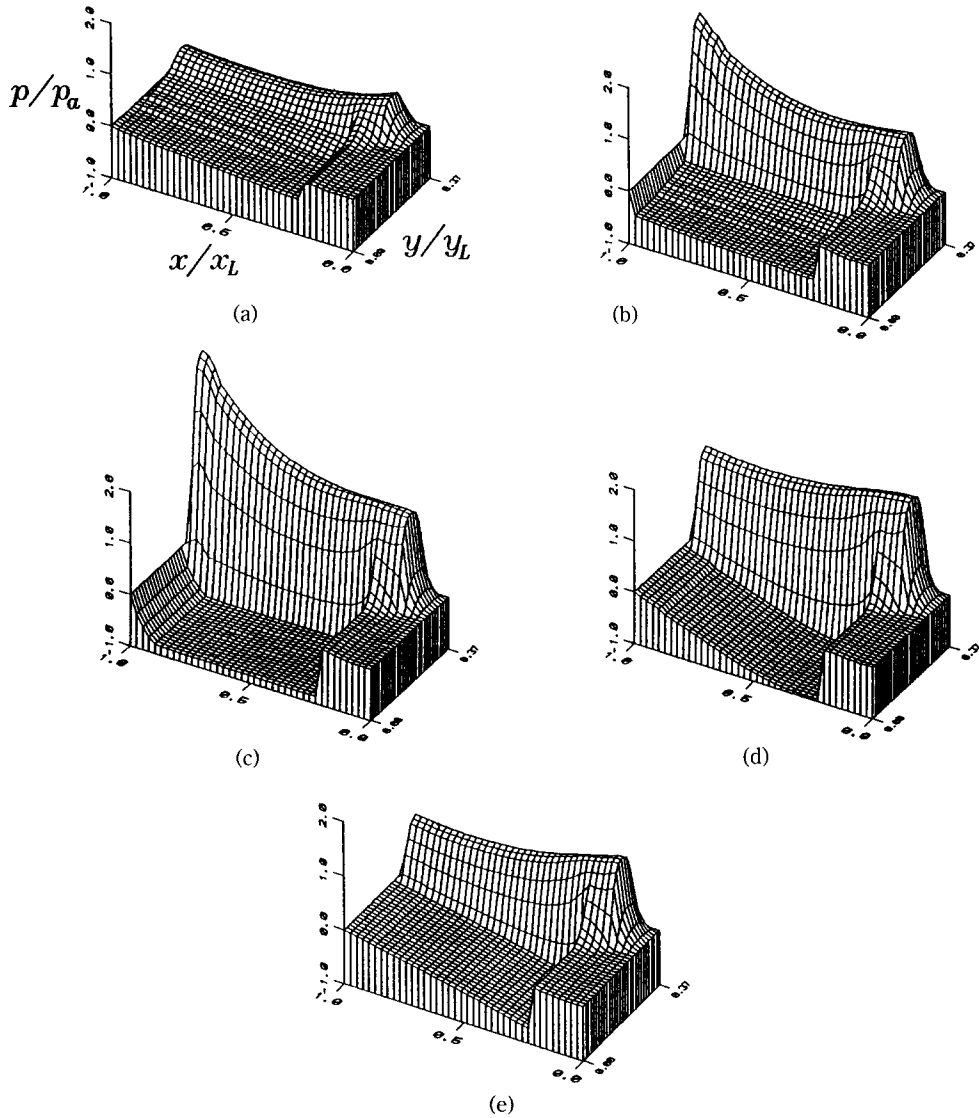


Fig. 6. Pressure distributions.

(a) $\epsilon=0.5 \mu\text{m}$; (b) $\epsilon=1.0 \mu\text{m}$; (c) $\epsilon=3.0 \mu\text{m}$; (d) $\epsilon=8.89 \mu\text{m}$; (e) $\epsilon=14.0 \mu\text{m}$

depth가 가장 최적의 상태로 보인다. 하지만 이는 가공상의 오차 또는 공기중의 오염물질이나 운행 중에 발생하는 마멸입자로 인해 그 크기가 조금만 작아지더라도 부상상태가 급격히 악화될 수 있다는 불안정성의 문제가 심각히 대두된다. 따라서 White[1]는 recess depth를 $8.89 \mu\text{m}$ 로 충분히 안정된 영역에서 선정할 것을 제안하였다. 실제로 이때 제로-로드 슬라이더의 정적 부상상태를 살펴보면 $h_m=0.239 \mu\text{m}$, $\alpha=44.7 \mu\text{rad}$, $\beta=1.9 \mu\text{rad}$ 이었으며 압력분포는 Fig. 6(d)

에 도시된 바와 같이 상대적으로 안정된 모습을 나타낸다.

그 밖에 제로-로드 슬라이더의 부상특성에 영향을 미치는 인자들로 front step의 두께(x_s), 레일의 폭(b), 테이퍼 높이(h_T) 등을 살펴보았다. 이를 위하여 본 연구에서는 Table 1에 표기된 설계값을 기준으로 각각 10%, 20%로 증감시켜 그들의 민감도 해석을 수행하였으며, 이들 해석결과를 제로-로드 슬라이더의 부상상태, 즉 최소 윤활막두께, 피치각 그리고 롤각

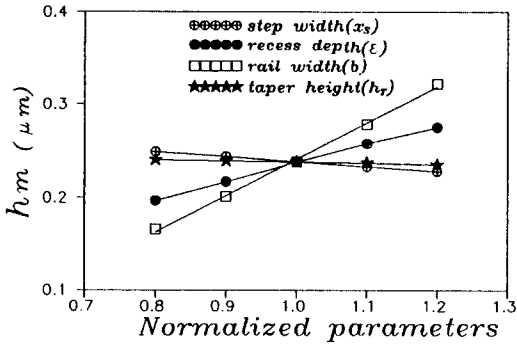


Fig. 7. Effects of design parameters on the minimum flying height.

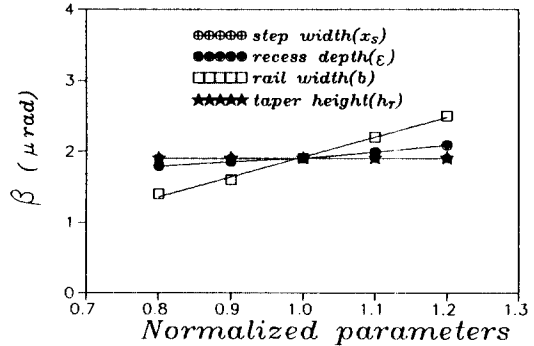


Fig. 9. Effects of design parameters on the roll angle.

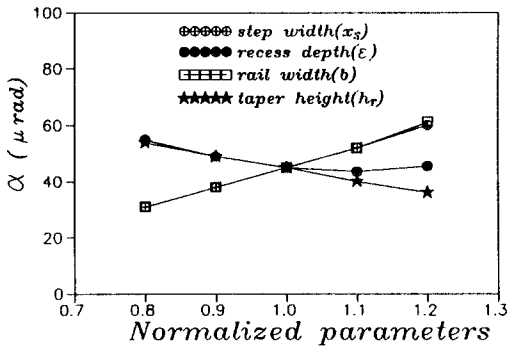


Fig. 8. Effects of design parameters on the pitch angle.

으로 구분하여 Fig. 7, Fig. 8, 그리고 Fig. 9에 각각 나타내었다. 따라서 그림에서 가로축은 설계인자의 치수를 x라 두었을 때 $1 - (x_0 - x)/x_0$ 가 되며, 여기서 x_0 는 Table 1에서 주어진 각 설계인자에 대한 값이다.

우선 front step 두께(x_s)에 대한 슬라이더의 부상 상태를 살펴보면, 슬라이더의 길이 방향으로 front step의 두께가 커짐에 따라 슬라이더의 피치각은 크게 증가하나 최소윤활막 두께와 롤각은 거의 변화없이 비교적 안정된 특성을 나타내고 있다. 따라서 front step 두께는 음압으로 표현되는 공기윤활력의 작용점 위치를 변화시켜서 슬라이더의 모멘트 평형을 좌우하는 매우 중요한 요소임을 알 수 있다. 본 모델 슬라이더의 경우, 이와 같은 front step 두께(x_s)의 변화에 대하여 최소 윤활막두께의 총 변화량은 $0.021 \mu\text{m}$ 이고, 피치각은 $29 \mu\text{rad}$, 롤각은 $0 \mu\text{rad}$ 이다.

다음으로는 양의 공기윤활력의 크기를 지배하는 레일 폭 (b)의 변경을 통해 슬라이더의 부상특성을

살펴보았다. 일반적으로 레일 폭이 증가하면 양의 공기윤활력은 이와 비례적으로 증가하고 이에 힘의 평형상태를 유지하는 최소 공기막두께도 함께 증가하게 된다. 또한 슬라이더의 롤 방향으로의 압력분포가 비대칭적으로 다소 증가하게 되어 롤각은 커지게 되고, 이어 테이퍼의 뺨기효과로 나타나는 압력상승의 영향이 레일너비가 작을 때보다 크게 되어 피치각 또한 커지게 된다. 이와 같은 레일 폭의 변화에 대하여 최소 윤활막두께는 $0.156 \mu\text{m}$, 피치각은 $30 \mu\text{rad}$, 롤각은 $1.1 \mu\text{rad}$ 의 총 변화량을 갖는다.

다음은 테이퍼 높이(h_r)의 변화에 대한 슬라이더의 부상상태를 고찰해 보았다. 그림에서 보면 테이퍼 높이가 증가할수록 최소 윤활막두께와 롤각은 거의 변화없이 일정하나 피치각은 상대적으로 매우 큰 영향을 보이고 있다. 이는 테이퍼 높이가 실제 슬라이더의 뺨기작용에 큰 영향을 미치고 있음을 나타내는 것으로 레일의 테이퍼 부분에서 발생하는 압력의 급상승량을 결정하는 매우 중요한 요소임을 암시한다. 본 슬라이더 모델의 경우 최소 윤활막두께, 피치각, 그리고 롤각은 각각 $0.005 \mu\text{m}$, $18 \mu\text{rad}$, 그리고 $0 \mu\text{rad}$ 의 총 변화량을 보였다.

마지막으로 앞서서 설명한 recess depth에 대하여 같은 방식으로 recess depth가 $8.89 \mu\text{m}$ 인 설계점을 기준으로 민감도 해석을 수행해 보았다. 이때 최소 윤활막두께의 변화량은 약 $0.08 \mu\text{m}$, 피치각의 변화량은 $11 \mu\text{rad}$, 롤각의 변화량은 $0.3 \mu\text{rad}$ 로 다른 설계인자들에 비해 상대적으로 두드러진 변화를 보이고는 있으나 앞서서도 설명한 바와같이 어느정도 안정된 영역에서 recess depth를 선정하였으므로 그 민감도는 그다지 크게는 나타나고 있지 않다.

5. 결 론

본 연구에서는 제로-로드 슬라이더의 부상상태를 효과적으로 계산하기 위하여 최적화 기법을 이용한 슬라이더의 정적부상상태 해석기법을 도입하였으며, 이에 제로-로드 슬라이더의 중요한 형상치수들을 설계인자로 선정하고 수치적인 민감도 해석을 수행하여 제로-로드 슬라이더의 부상특성을 고찰해 보았다. 이에 관한 내용을 정리하면 다음과 같다.

(1) Reverse step의 음의 공기유효력으로 인하여 제로-로드 슬라이더는 작은 예하중으로도 보다 낮은 유효간극을 형성하며, 기존의 TF 슬라이더와 비교하여 상대적으로 매우 큰 공기 베어링강성을 지닌다.

(2) 제로-로드 슬라이더의 recess depth는 흡인력이 최대가 되는 임계값을 지니고 있으나 이는 설계변수에 대하여 매우 민감하여 제조오차상에 불안정한 영역에 속한다. 따라서 실제 NP 슬라이더 설계시 매우 중요한 설계인자인 recess depth는 그 변화에 매우 둔감할 수 있도록 충분히 큰 값을 선정해야 한다.

(3) 양의 공기유효력에 지배적인 영향을 미치는 레일 폭은 슬라이더의 부상상태에 가장 커다란 영향을 미치는 인자로서, 다른 인자들과는 달리 최소 유효막두께, 피치각, 롤각 모두에 대해 비례적으로 증가하는 현상을 나타내고 있다.

(4) Step width(x_s), taper height(h_T)는 제로-로드 슬라이더의 피치각에 상당히 큰 영향을 미치며, 나머지 최소 유효막두께와 롤각에는 거의 영향을 미치지 않는다.

후 기

이 논문은 1993년도 한양대학교 산업과학연구소 교내학술 연구조성비 지원에 의하여 연구되었음.

기 호

h	: bearing clearance(μm)
p	: gas pressure
λ_a	: mean free path of air at ambient conditions
p_a	: ambient pressure
μ	: gas viscosity
u	: disk velocity vector
V_x, V_y	: disk velocity components(m/sec)

t	: time(sec)
h_m	: flying height at the trailing edge measured at the centerline of the slider
α	: pitch angle(rad)
β	: roll angle(rad)
h_m^0	: initial value of the flying height
α^0	: initial value of the pitch angle
β^0	: initial value of the roll angle
x, y	: space coordinates
x_L	: length of slider
y_L	: width of slider
b	: width of rail
x_T	: taper length
h_T	: taper height
x_S	: width of front step
ε	: recess depth(μm)
F	: applied load at pivot point(mN)
mg	: weight of slider
R_g	: Radial position of the slider's center of gravity measured from the center of the disk
skew	: skew angle of slider
RPM	: angular velocity of the disk
x_C, y_C	: coordinates of slider center of mass
x_F, y_F	: coordinates of pivot location
W	: net load generated by air bearing
x_W, y_W	: coordinate of gas film center of pressure
r_1, r_2, r_3	: residuals

참 고 문 헌

1. J. W. White, "Flying characteristics of the zero-load slider bearing", *ASME J. of Tribology*, Vol. 105, pp. 484-490, 1983.
2. K. Kogoe, S. Fukui, Y. Mitsuya and R. Kaneko, "Design of negative pressure slider for magnetic recording disks", *ASME J. of Tribology*, Vol. 105, pp. 496-502, 1983.
3. S. Yoneoka, K. Yamada, K. Aruga, T. Ooe and M. Takahashi, "Fast take-off negative pressure slider", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. MAG-23, pp. 3464-3466, 1987.
4. N. Tagawa and M. Hashimoto, "Criteria for reliable dynamic self-loading of negative pressure air-lubricated slider bearings in magnetics disk storage", *ASME, Advances in Information Storage Systems*,

- Vol. 4, pp. 155-167, 1992.
5. D. H. Choi and S. J. Yoon, "Static analysis of flying characteristics of the head slider by using an optimization technique", *ASME J. of Tribology*, Vol. 116, pp. 90-94, 1994.
 6. B. Burgdorfer, "The influence of the molecular mean free path on the performance of hydrodynamic gas lubrication bearings", *ASME J. Basic Eng.*, Vol. 81, No.3, pp94-100, 1959.
 7. J. W. White and A. Nigam, "A factored implicit scheme for the numerical solution of the reynolds equation at very low spacing", *ASME J. of Tribology*, Vol. 102, pp. 80-85, 1980.