

최적화 기법을 이용한 HDD용 헤드 슬라이더의 부상상태 해석

윤상준* · 김종관* · 최동훈** · 이재현*** · 김광식****

*한양대학교 대학원 기계설계학과, **한양대학교 기계설계학과

한양대학교 기계공학과, *한양대학교 정밀기계학과

A Flying State Analysis of HDD Head Slider by Using An Optimization Technique

Sang-Joon Yoon, Jong-Kwan Kim, Dong-Hoon Choi,
Jae-Heon Lee and Kwang-Sik Kim

*Hanyang Univ., Dept. of Mech. Design & Production Eng. Graduate School

**Hanyang Univ., Dept. of Mech. Design & Production Eng.

***Hanyang Univ., Dept. of Mechanical Engineering

****Hanyang Univ., Dept. of Precision Mech. Eng.

Abstract—This paper suggests a method to predict the flying state of the head slider in a hard disk drive (HDD) by using an optimization technique. The modified Reynolds equation for the hydrodynamic lubrication theory under the slip flow condition is used to describe the air-bearing system and a Finite Volume Method (FVM) is applied to solve the equation. Especially, Augmented Lagrange Multiplier (ALM) method is employed to find the minimum flying height, the pitch angle and the roll angle of the slider, which is shown to be faster and more general than the conventional update schemes. By using the proposed method, the variations of the flying state are analyzed as a function of the slider position in the direction of the disk radius for various disk velocities and skew angles.

1. 서 론

자기 기억장치내의 디스크 정보시스템은 정보를 읽고 쓰는 자기 헤드, 정보를 저장하는 자기디스크, 그리고 헤드와 디스크 사이를 일정하게 유지하는 공기 윤활막 등으로 구성되어 있다. 현재까지 공기 윤활막의 두께는 높은 자기 기록 밀도와 신호 분해능을 얻기 위하여 끊임없이 줄어왔으나, 이는 헤드와 디스크 사이의 예기치 못한 충돌 가능성을 증가시켜 디스크 표면의 마멸과 이를 통한 정보손실을 초래하게 되었다. 따라서 이를 예방하기 위하여 고속으로 회전하는 HDD(hard disk drive)의 경우, 헤드 슬라이더와 하드 디스크 사이의 간격을 정확하고 안정되게 유지하는 자력 공기윤활 슬라이더의 부상상태(flying

state) 해석에 관한 연구가 중요한 과제로 나타났다.

1959년 Brunner등[1]은 처음으로 고전 레이놀즈 방정식을 사용하여 8~10 μm 의 공기막을 가진 평판 슬라이더의 압력분포를 예측하였고, Tseng[2]은 이를 1 μm 정도의 공기막을 가진 테이퍼가 있는 슬라이더에 적용하였다. 또한 Hsia 등[3]은 0.5 μm 의 극소 공기막을 해석하기 위하여 고전 레이놀즈 방정식에 공기분자의 벽면 미끄럼 현상을 고려한 수정된 레이놀즈 방정식[4, 5]을 사용하였으며, 이를 이중 패드(double pad)로 구성된 슬라이더 모델에 적용하였다. 현재는 최소 공기막 두께가 0.2 μm 이하까지 줄어들었으며, 이를 해석하는 방법으로 볼츠만(Boltzmann) 방정식[6] 등이 새로이 제안되어 있다.

헤드 슬라이더의 부상상태를 결정하기 위하여 장

인배 등[7]은 수정된 레이놀즈 방정식을 사용하여 극소 공기막에서의 압력분포를 구하고 Newton-Raphson 반복법을 사용하여 고정된 최소 공기막 두께에서의 자세각을 결정하는 1차원 문제를 해석하였으며, 김옥현 등[8]도 이와 비슷한 방법을 사용하여 최소 공기막 두께와 자세각을 결정하는 2차원 문제를 해석하였다. 또한 Ruiz[9]는 사용자가 수정된 레이놀즈 방정식들 또는 볼츠만 방정식중 하나를 선택하여 압력분포를 구하도록 하였으며 경험에 의하여 결정된 개선규칙(update scheme)을 사용하여 최소 공기막 두께(minimum flying height)와 자세각(pitch angle) 그리고 회전각(roll angle)을 결정하는 3차원 문제를 해석하였다. 그러나 장인배 등은 주어진 외부하중과 공기유향력의 균형을 고려하지 않고 단순히 고정된 최소 공기막 두께에서의 자세각만을 결정하는 1차원적인 문제를 해석하였으며, 김옥현 등은 실제 헤드 슬라이더의 운동을 표현하는 변수 중의 하나인 회전각을 무시하고 부상상태 변수들을 개선함에 있어서 변수 상호간의 관계를 고려하지 않는 순차적 반복법을 사용하였다. 또한 Ruiz는 부상상태 변수들을 모두 고려하는 3차원 문제를 해석함에 있어서 부상상태 변수들을 동시에 개선하는 개선규칙을 사용하였으나, 이는 특정 헤드 슬라이더 모델에 대하여 시행착오를 통한 경험에 의존하므로 임의의 모델에 대한 3차원 부상상태 해석법으로는 부적합하다.

따라서 본 연구에서는 헤드 슬라이더의 부상상태를 표현하는 최소 공기막 두께와 자세각 그리고 회전각을 효율적으로 결정하기 위하여 최적화 기법을 이용한 3차원 부상상태 결정방법을 제안하고, 이를 기존의 방법들과 비교하여 제안된 결정방법의 유효성을 보이고자 한다. 또한 제안된 해석법을 본 연구에서 선정한 헤드 슬라이더 모델에 적용하여 부상상태에 큰 영향을 미치는 인자들의 변화에 따른 3차원 부상상태 해석을 수행하고자 한다.

2. 모델링

2-1. 모델의 형상

본 연구에서 고려한 헤드 슬라이더의 형상은 Fig. 1에 보이는 바와 같이 하나의 평판 양측에 각각 전 공기유향 테이퍼(front air-bearing taper)와 후 공기유향 테이퍼(rear air-bearing taper)를 가지는 2개의 패드로 구성되어 있다. 슬라이더의 중앙에 위치한 평형한 홈(flat groove)은 패드에 비하여 상대적으로

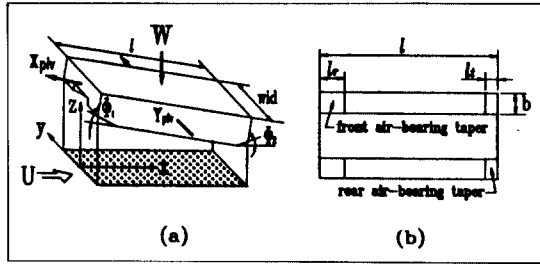


Fig. 1. Configuration of head slider
(a) schematic view (b) bottom view

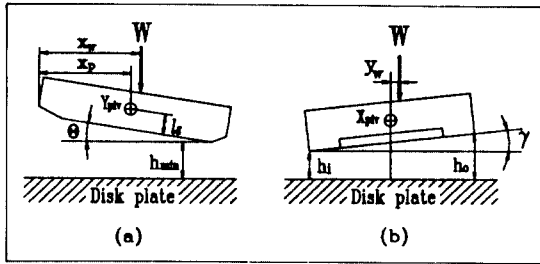


Fig. 2. Pitch and roll motions of head slider
(a) pitch angle (b) roll angle

높게 위치하여 헤드 슬라이더 부상에 거의 영향을 주지 않으므로 각각 $l \times b$ 의 면적을 가지는 2개의 패드로 헤드 슬라이더의 전체 거동을 나타내고자 한다.

또한 헤드 슬라이더의 디스크 반경방향으로의 이동방법에 따라 HDD는 선형구동형(linear type)과 회전구동형(rotary type)으로 분류된다. 특히 헤드 슬라이더가 디스크 반경방향으로 타원을 그리며 이동하는 회전구동형의 경우는 슬라이더가 멈춰선 트랙의 위치에 따라 스큐각(skew angle)의 크기가 달라지므로 힘의 균형을 이루는 슬라이더의 부상상태가 선형구동형과는 상당한 차이를 보이게 된다. 따라서 본 연구에서는 스큐각에 의하여 영향을 받는 회전구동형과 영향을 받지 않는 선형구동형의 경우를 구분하여 고찰하고자 한다.

2-2. 헤드 슬라이더의 부상상태

스핀들 모터(spindle motor)에 정착된 하드 디스크가 고속으로 정속회전하면 슬라이더와 디스크 사이에서는 공기유향에 의한 압력이 발생되며, 이 압력의 합인 공기유향력(air-bearing force)이 외부하중(W)과 평형을 이루고, x, y축에 대한 모멘트가 피부의 위치(X_{ipb} , Y_{ipb})에 대하여 평형을 이루도록 슬라이더는 부

상하게 된다. 따라서 이와 같은 슬라이더의 부상상태는 Fig. 2에 도시한 바와 같이 최소 공기막 두께 (h_{min})와 자세각(Θ) 그리고 회전각(γ)으로 표현될 수 있다.

결국 위의 3가지 변수에 의하여 표현되는 헤드 슬라이더의 3차원 부상상태는 슬라이더에 가해지는 외부하중과 압력분포 해석에 의한 공기유향력이 서로 평형을 이루게 하는 부상상태 변수(h_{min} , Θ , γ)에 의하여 표현된다.

3. 압력분포 해석

하드 디스크의 정속회전에 의하여 유입된 공기로 형성된 디스크와 슬라이더 사이의 극소공기막 내에서는 일정한 압력이 발생하게 된다. 이는 일반적으로 식 (1)과 같은 수정된 레이놀즈 방정식을 사용하여 해석하며 극소공기막의 경계에서는 대기압이 작용한다는 가정을 식 (2)와 같이 경계조건으로 사용한다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\rho h^3 \left[1 + 6 \frac{\lambda}{h} \right] \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho h^3 \left[1 + 6 \frac{\lambda}{h} \right] \frac{\partial p}{\partial y} \right] = 6\mu U \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} + 6\mu V \frac{\partial(\rho h)}{\partial y} \quad (1)$$

$$p = p_{amb} \text{ at } x=0, l \text{ or } y=0, b \quad (2)$$

식 (3)의 무차원 변수를 도입하면 식 (1)은 무차원화된 수정 레이놀즈 방정식으로 식 (4)와 같이 표현된다.

$$X = \frac{x}{l}, \quad Y = \frac{y}{l} \\ H = \frac{h}{h_{min}}, \quad P = \frac{p}{p_{amb}} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[PH^3 \left[1 + \frac{6K_n}{PH} \right] \frac{\partial P}{\partial X} \right] + \frac{\partial}{\partial Y} \left[PH^3 \left[1 + \frac{6K_n}{PH} \right] \frac{\partial P}{\partial Y} \right] = \Lambda_x \frac{\partial(PH)}{\partial X} + \Lambda_y \frac{\partial(PH)}{\partial Y} \quad (4)$$

여기서

$$\Lambda_x = \frac{6\mu Ul}{p_{amb}(h_{min})^2} \\ \Lambda_y = \frac{6\mu Vl}{p_{amb}(h_{min})^2}$$

유한체적법(FVM)을 이용한 범용 타원형(elliptic)

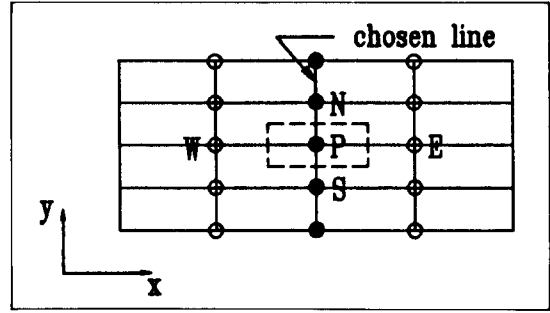


Fig. 3. Representation of the line-by-line method

방정식 수치해법을 적용하기 위하여 식 (4)를 보존형태의 일반형 방정식으로 식 (5)와 같이 표현하며, 이에 무차원 경계조건식을 식 (6)와 같이 설정한다.

$$\frac{\partial}{\partial X} \left[\Gamma \frac{\partial P}{\partial X} \right] + \frac{\partial}{\partial Y} \left[\Gamma \frac{\partial P}{\partial Y} \right] + S = 0 \quad (5)$$

여기서

$$\Gamma = PH^3 \left[1 + \frac{6K_n}{PH} \right] \\ S = -\Lambda_x \frac{\partial(PH)}{\partial X} - \Lambda_y \frac{\partial(PH)}{\partial Y} \\ P = 1 \text{ at } X=0, 1 \text{ or } Y=0, b/l \quad (6)$$

식 (5)로 주어진 비선형 편미분 방정식은 식 (7)과 같은 일반적인 이산화 방정식으로 표현되며, 이들의 해를 구하기 위한 반복적인 수치방법은 선순법(line-by-line method)을 이용하여 계산하였다.

$$a_P P_P = a_E P_E + a_W P_W + a_N P_N + a_S P_S + b \quad (7)$$

이를 Fig. 3과 같은 선택된 선에서의 각 격자점의 차분방정식으로 기술하면 식 (8)과 같다.

$$P_i = A_i P_{i-1} + B_i P_{i+1} + C_i, \quad (i=2, \text{ to } n-1) \quad (8)$$

여기서

$$P_i = P_P, \quad P_{i+1} = P_N, \quad P_{i-1} = P_S \\ A_i = \frac{a_N}{a_P}, \quad B_i = \frac{a_S}{a_P}, \quad C_i = \frac{a_E P_E + a_W P_W + b}{a_P}$$

이며, n 은 선택된 선상의 격자 갯수(grid number)이다.

식 (8)의 연립방정식을 풀기 위하여 선택된 선에서 그 선상의 모든 격자점에 대한 압력값들을 동시에

구할 수 있는 TDMA(tridiagonal-matrix algorithm)를 이용하였으며, 이를 이웃한 선에도 반복적용하여 결국 우리가 원하는 해를 얻는다. 또한 식 (9)와 같이 적당한 이완계수(relaxation factor) α 를 사용하여 수치 반복계산의 수렴성을 개선하고 해의 발산을 방지한다. 본 계산에서는 $\alpha=0.55\sim 0.6$ 인 under-relaxation 방법을 사용하였다.

$$P_p = \alpha P_p^{new} + (1-\alpha)P_p^{old} \quad (9)$$

제어 체적을 결정하는 격자점 사이의 압력구배는 부분선형 분포형태로 가정하였으며, $b \times l$ 인 관심영역은 100×20 개의 작은 제어체적으로 나뉘어 기존 개발된 수치해법[10]에 의하여 해석되었다. 이 결과는 이미 기존의 논문[11]과 비교하여 그 타당성이 검토되었으며[12], 이때 사용된 압력분포의 수렴조건식은 식 (10)과 같다.

$$\max \left| \frac{P^{n+1} - P^n}{P^{n+1}} \right| < \epsilon \quad (10)$$

이와 같이 구해진 압력분포 해석결과로부터 공기 유허력(F)과 피칭 및 로울링 모멘트가 각각 얻이되는 평형점의 위치(x_f, y_f)는 식 (11), 식 (12)와 같이 구하여진다.

$$F = \iint (p - p_{amb}) \, dx dy \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} x_f &= \frac{\iint x (p - p_{amb}) \, dx dy}{\iint (p - p_{amb}) \, dx dy} \\ y_f &= \frac{\iint y (p - p_{amb}) \, dx dy}{\iint (p - p_{amb}) \, dx dy} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

4. 최적화 기법을 이용한 부상상태 해석

기존의 연구에서는 부상상태 결정방법으로 가장 손쉽게 접할 수 있는 순차적 반복법[8]을 사용하였으나 이는 3차원 부상상태해석의 경우 엄청난 계산량이 요구되므로 실제로는 거의 사용하지 않는다. 또한 경험적인 개선규칙[9]을 사용하는 경우에는 일반성이 결여되어 있어서 임의의 슬라이더 모델에 적용하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 최적화 기법을 이용한 헤드 슬라이더 부상상태 결정 프로그램을 개발하고자 한다.

먼저 헤드 슬라이더의 부상상태 변수들(h_{min}, Θ, γ)을 최적화문제의 변수들로 설정하고, 식 (13)과 같이

공기유허력(F)과 외부하중(W)의 상대오차 제곱, 그리고 외부하중이 가해지는 작용점과 공기유허력의 모멘트 평형점까지 거리의 x, y 각 방향에 대한 상대오차 제곱을 최소화하도록 하는 목적함수를 설정한다. 또한 제한조건으로는 식 (14)와 같이 각 부상상태 변수의 한계조건(side constraint)과 힘 및 모멘트 평형점 사이의 상대오차가 각각 일정한 한계내에 있어야 한다는 것으로 수식화한다.

$$\text{Minimize } \Psi = (\text{errF})^2 + (\text{errXF})^2 + (\text{errYF})^2 \quad (13)$$

Subject to

$$\begin{aligned} (h_{min})^L &\leq h_{min} \leq (h_{min})^U \\ \Theta^L &\leq \Theta \leq \Theta^U \\ \gamma^L &\leq \gamma \leq \gamma^U \\ |\text{errF}| &\leq \epsilon_1 \\ |\text{errXF}| &\leq \epsilon_2 \\ |\text{errYF}| &\leq \epsilon_3 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{여기서 } \text{errF} = \left[\frac{W - F}{W} \right]$$

$$\text{errXF} = \left[\frac{X_w - X_f}{X_w} \right]$$

$$\text{errYF} = \left[\frac{Y_w - Y_f}{Y_w + 0.1 + |Y_f|} \right]$$

이며, X_w, Y_w 와 X_f, Y_f 는 각각 슬라이더의 길이로 무차원화된 외부하중 작용점과 모멘트 평형점까지의 거리를 나타낸다. 이 때 errYF 의 분모항은 Y_w 와 Y_f 가 영에 가까운 값을 가질 경우를 대비하고 다른 수렴 오차한도와 그 크기가 비교될 수 있도록 하기 위하여

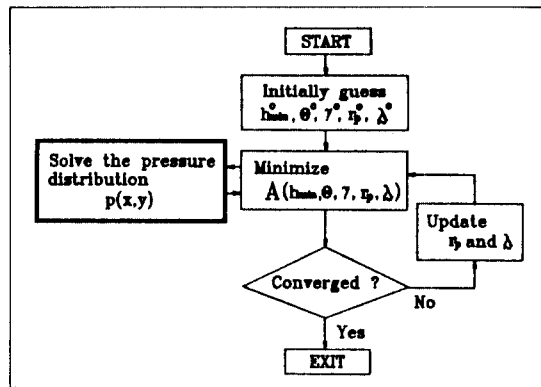


Fig. 4. Flow chart to find h_{min}^*, Θ^* and γ^* by an ALM optimization technique

Ruiz가 사용한 방식을 동일하게 사용하였다.

본 연구에서는 위의 최적화 문제를 풀기 위하여 구속조건이 있는 최적화 문제를 벌칙계수(r_p)와 Lagrange multiplier 벡터(λ)를 도입하여 구속조건이 없는 최적화 문제로 변환하여 최적해를 구하는 ALM(Augmented Lagrange Multiplier) 기법[13, 14]을 적용하였으며, 이를 이용한 부상상태 해석 프로그램의 흐름도를 Fig. 4에 도시하였다.

여기서 $A(h_{min}, \Theta, \gamma, r_p, \lambda)$ 는 ALM기법에서 사용되는 가목적함수(pseudo-objective)이며, 부상변수인 h_{min} , Θ , γ 는 서로 단위가 다르므로 각각 스케일링(scaling)하여 계산한다.

5. 결과 및 고찰

5-1. 제안된 프로그램의 신뢰성 검토

제안된 부상상태 해석 프로그램의 신뢰성을 입증하기 위하여 기존에 이미 발표된 Ruiz의 해석결과[9]를 비교하고자 한다. 이에 사용된 모델은 Ruiz가 기존의 논문에서 사용한 모델로 선정하였으며, 비교 결과는 Table 1에 나타내었다.

Table 2로부터 제안된 프로그램의 해석결과는 Ruiz 프로그램의 결과와 거의 일치하고 있음을 알 수 있으며, 미소한 오차는 압력분포 해석 알고리즘과 수치계산방법의 차이에 기인한 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서 제안된 부상상태 해석 프로그램은 기존의 프로그램과 비교하여 충분히 신뢰성을 지니고 있음을

Table 1. Comparison of the results obtained by using the developed program and Ruiz's program

	$h_{min}(\mu\text{m})$	$\Theta(\mu\text{rad})$	$\gamma(\mu\text{rad})$
Developed program	0.247	80.1	4.16
Ruiz's program	0.244	80.6	4.16

Table 2. The results obtained by using optimization technique and Ruiz's update scheme about Ruiz's model

	$h_{min}(\mu\text{m})$	$\Theta(\mu\text{rad})$	$\gamma(\mu\text{rad})$	Iter. no.
Optimization technique	0.247	80.1	4.16	46
Ruiz's update scheme	0.247	80.1	4.16	39

알 수 있다.

5-2. 부상상태변수 결정방법 비교

헤드 슬라이더의 정적평형을 이루는 부상상태 결정방법은 프로그램의 전반적인 계산수행량을 크게 좌우하므로 이에 관한 연구가 중요하다고 사료된다. 따라서 다음과 같은 방법을 통하여 결정방법들을 서로 비교하고자 한다. 먼저 반복횟수의 의미를 일치시키기 위하여 압력분포 해석부분은 3장에서 기술한 방법을 사용하였다. 이제 본 연구에서 제안한 최적화 기법을 이용한 결정방법과 Ruiz의 경험적인 개선규칙을 이용한 결정방법을 각각 Ruiz가 사용한 모델과 2장에서 제시한 실제 모델에 적용하여 그 결과를 Table 2와 Table 3에 수록하였다.

우선 Ruiz가 사용한 모델의 경우는 Ruiz의 결정방법이 최적화 기법을 이용한 방법보다 약 7회 정도 더 빠르다는 것을 알 수 있다. 하지만 본 연구에서 제안한 모델에 적용할 경우는 67회라는 상당히 큰 차이로 최적화 기법을 이용한 방법이 훨씬 빠르게 수렴하는 결과를 나타낸다. 이러한 결과는 Ruiz가 사용한 부상상태 결정방법이 특정모델에 대한 시행착오범으로 설정된 것으로 범용성이 없다는 것을 의미한다. 실제로 본 연구에서 사용한 실제 모델은 Ruiz의 모델과는 달리 슬라이더의 양 캐드에 후 공기운환 테이퍼가 존재하며, 특히 외부하중이 가해지는 위치가 양 캐드의 중앙에서 약간 벗어나 있다($Y_w \neq 0$). 따라서 이러한 새로운 모델을 Ruiz 방법으로 해석하기 위하여서는 이에 적합한 또다른 개선규칙을 설정하여야만 하는 어려움이 지니게 되는 반면, 최적화 기법을 이용한 결정방법은 주어진 슬라이더 모델에 관계없이 동일한 프로그램을 사용하여 효율적으로 부상상태를 결정할 수 있음을 알 수 있다.

이러한 결과들을 종합하여 볼 때, 임의의 모델에 적용할 수 있는 프로그램의 일반성면에서나 정확한

Table 3. The results obtained by using optimization technique and Ruiz's update scheme about the proposed model

	$h_{min}(\mu\text{m})$	$\Theta(\mu\text{rad})$	$\gamma(\mu\text{rad})$	Iter. no.
Optimization technique	0.226	53.5	0.444	53
Ruiz's update scheme	0.226	53.5	0.444	120

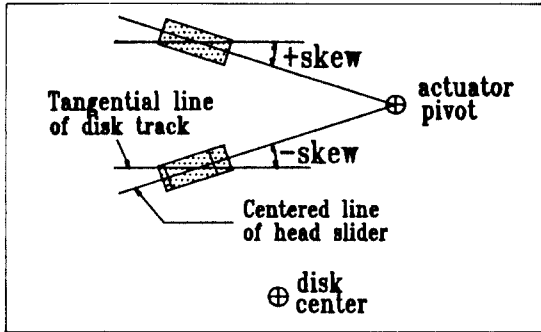


Fig. 5. Skew angle of head slider with rotary type actuator

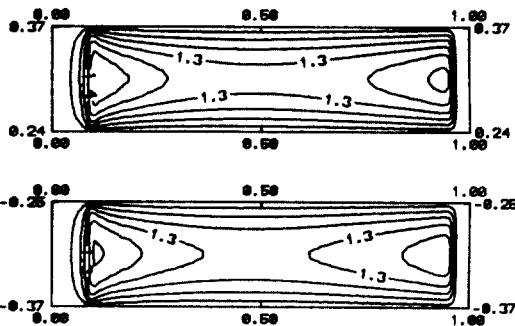


Fig. 6. Dimensionless pressure distribution and contour (skew = 0°)

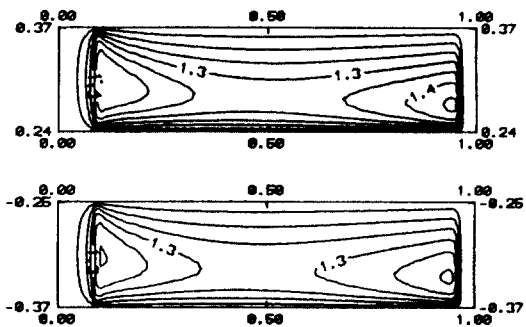


Fig. 7. Dimensionless pressure distribution and contour (skew = -12°)

값에 보다 빨리 수렴하게하는 프로그램의 효율성면에서 최적화 기법을 이용한 부상상태 결정방법은 Ruiz의 방법에 비하여 우수한 것으로 생각된다.

5-3. 3차원 부상상태해석 결과

실제 구동중인 HDD에서 슬라이더의 부상상태에

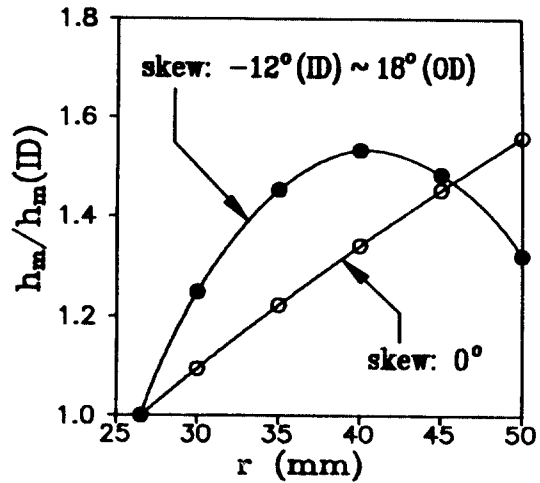


Fig. 8. Dimensionless flying height as a function of disk radius and skew

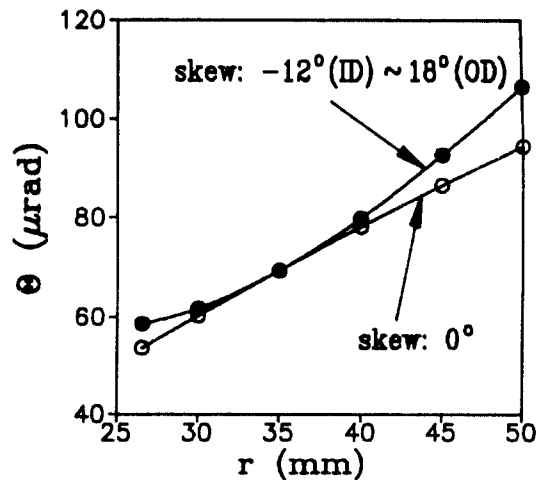


Fig. 9. Pitch angle as a function of disk radius and skew

영향을 미치는 인자들은 디스크 선속도[3, 8], 슬라이더의 기하학적 형상(패드 및 groove의 형상)[3, 7], 슬라이더에 가하여지는 외부하중, 스쿠악[15, 16], 액츄에이터의 형상 및 진동[9], HDD내부 유체유동에 의한 진동, HDD 내부유체의 성질[3] 및 온도변동 등이 있다. 따라서 본 논문에서는 상기 인자들중 기존의 자료로 보아 영향력이 큰 디스크 선속도와 스쿠악의 변동에 따른 부상상태($h_{m, \theta}$, γ)의 변화를 이미 앞에서 입증된 프로그램을 이용하여 선형과 회전구동형으로 구분하여 해석해 보고자 한다.

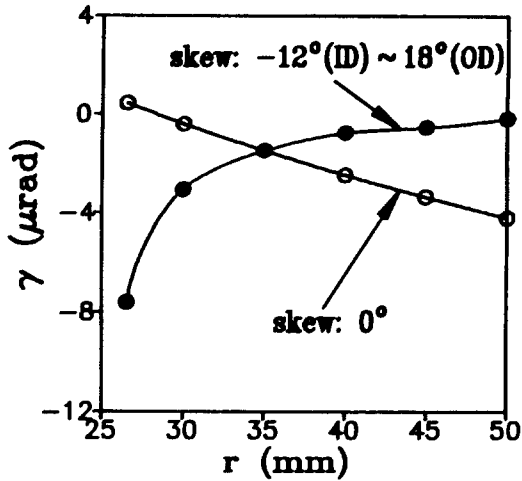


Fig. 10. Roll angle as a function of disk radius and skew

5-3-1. 선형과 회전구동형 HDD의 헤드 슬라이더 압력분포

우선 선형구동형 HDD의 경우를 고려해보자. 선형구동형 HDD에 장착된 헤드 슬라이더는 항상 디스크 트랙 접선에 평행하게 접근하므로 Fig.5에서와 같이 디스크의 트랙 접선과 슬라이더의 길이방향 중심선으로 이루어진 스큐각은 존재하지 않게 되며 단지 디스크 반경방향의 디스크 선속도만이 압력분포 형성에 영향을 미치게 된다. 따라서 슬라이더에서는 디스크 선속도 차이로 인하여 양쪽 패드 바닥면에서의 압력분포가 서로 달라지게 되며 이에 각 패드는 일정한 회전각을 가지고 서로 다른 부상높이를 유지하면서 모멘트의 평형을 유지한다. 그러나 회전각의 크기는 일반적으로 자세각의 크기에 비하여 상당히 작으며, 양 패드의 압력분포 형태는 Fig.6에서와 같이 거의 일치하고 각 패드의 중심선에 대칭이 되는 양상을 나타낸다.

다음에는 디스크의 반경방향 위치마다 스큐각이 변화하는, 즉 스큐각이 존재하는 회전구동형 HDD를 고려해보자. 헤드 슬라이더가 액뮌에이터의 회전으로 인하여 디스크상에서 원호를 그리며 이동하게 되면 슬라이더는 Fig.5에서와 같이 스큐각을 가지며, 이때 디스크 트랙 접선을 중심으로 후 공기유향 테이퍼가 디스크 중심쪽에 위치할 경우를 음의 스큐각(skew angle)으로 정의한다. 만약 선형구동형에서 정의된 똑같은 운행 상태에서 음의 스큐각이 존재하게 되면, 각 패드의 동압 중심은 y방향의 유속으로 인

하여 Fig.7에서와 같이 디스크 중심방향으로 이동하게 된다. 따라서 외부하중이 가해질 위치가 고정되어 있는 실제 헤드 슬라이더의 경우는 동압중심의 이동으로 인하여 회전구동형의 회전 모멘트가 선형구동형에 비하여 보다 큰 폭으로 변화한다. 결국 이와 균형을 이루기 위하여 회전각 γ 는 음의 방향으로 증가하고, 안쪽 패드의 부상높이 h_1 는 더 높아지게 되는 것이다.

5-3-2. 디스크 반경방향의 위치에 따른 부상상태 변화

디스크의 반경방향으로 슬라이더가 이동하게 되면, 디스크 선속도가 변화하게 되고, 이는 우리가 예상하는 바와 같이 헤드 슬라이더의 부상상태에 커다란 영향을 미치게 된다. 즉 디스크 중심에서 바깥쪽으로 헤드 슬라이더가 이동할수록 슬라이더 바닥면에서는 보다 큰 공기유향력이 발생되며, 이것이 일정한 외부하중을 지닌 슬라이더를 더 높이 부상시키는 역할을 한다[15].

Fig.8에서 보면 스큐각이 영인 경우(선형구동형)는 가장 안쪽 기록영역을 기준으로한 최소 공기막 두께의 비가 직선분포로 증가하였고, 스큐각이 -12° 에서 18° 까지 변화할 경우(회전구동형)는 포물선 형태로 바깥쪽으로 이동할수록 감소하였다. 결국 스큐각을 적절히 사용하면 헤드 슬라이더의 부상높이를 줄일 수 있으며, 회전구동형이 선형구동형 보다 디스크 기록 영역내에서 부상높이의 변동이 적고 안정될 수 있음을 나타낸다.

y축 방향의 모멘트 평형에 의하여 결정되는 자세각은 Fig.9에 보이는 것처럼 디스크 반경의 증가에 따라 전반적으로 증가함을 나타낸다. 이는 디스크 선속도의 증가에 따라 최소 공기막두께가 증가하게 되고, 이어서 공기막내의 베어링수가 감소하게 되어 x방향으로의 압력분포가 전반적으로 균일하게 유지될 수 없기 때문이다. 결국 슬라이더는 작은 자세각의 변화로는 쉽게 모멘트 평형을 이룰 수 없으므로 보다 큰 자세각을 요구하게 된다. 또한 선형구동형의 경우는 거의 직선으로 증가하는 반면 회전구동형의 경우는 항상 선형보다는 큰 자세각을 유지함을 볼 수 있다. 이는 스큐각의 존재가 양 패드에 생성되는 압력분포 형태에 상당한 영향을 미치고 있음을 나타낸다.

Fig.10에서는 디스크 외측으로 헤드 슬라이더가 이동함에 따라 선형구동형은 회전각의 크기가 음의 방향(시계방향)으로 증가하는 반면, 회전구동형은 양의 방향(반시계방향)으로 증가함을 나타낸다. 선형구

동형의 경우는 디스크 반경방향의 거리가 증가할수록 양 패드에 작용하는 선속도의 영향이 상대적으로 감소하므로 외측패드의 부상높이가 점점 낮아지기 때문이며, 스큐각이 음에서 양으로 변화하는 회전구동형의 경우는 앞에서 설명한 바와 같이 패드의 동압 중심이 점점 디스크 외측방향으로 밀리게 되어 이것과 균형을 이루기 위한 회전각이 양의 방향으로 증가하기 때문이다. 결국 회전각은 슬라이더의 부상형태를 결정하는 무시할 수 없는 중요한 요소임을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 HDD의 헤드 슬라이더와 디스크 사이에 생성되는 공기 분자의 벽면 미끄럼(molecular slip) 현상을 고려한 극소 공기유향력의 압력을 FVM을 사용하여 해석하였으며, 이에 최적화 기법을 적용하여 임의의 운전조건 하에서 슬라이더의 최소 공기막두께와 자세각 그리고 회전각을 결정할 수 있는 부상상태 결정 프로그램을 개발하였다.

이에 제안된 프로그램의 신뢰성을 입증하기 위하여 주어진 모델에 대한 해석결과를 Ruiz 프로그램의 결과와 비교검토했으며, 그 부상상태 결정방법을 서로 다른 모델에 적용하여 최적화 기법을 이용한 방법이 일반성과 효율성면에서 보다 우수함을 입증하였다. 또한 이 프로그램을 제안된 모델에 적용하여 다음과 같은 해석결과를 얻었다.

(1) 운행중인 헤드 슬라이더에 음의 스큐각이 존재하게 되면, 각 패드의 동압중심은 y방향의 유속으로 인하여 디스크 중심방향으로 이동하게 되고, 외부하중이 가해져야할 위치가 실제 슬라이더의 모멘트 평형점과 차이가 생겨서 안쪽 패드의 부상높이가 더 높아지게 된다.

(2) 헤드 슬라이더가 하드 디스크 기록영역내에서 이동할 때, 선형구동형의 경우는 가장 안쪽 기록영역을 기준으로한 최소 공기막 두께의 비가 직선분포로 증가하며 회전구동형의 경우는 포물선 형태로 바깥쪽으로 이동할수록 감소하는 양상을 나타낸다. 결국 스큐각을 적절히 사용하면 헤드 슬라이더의 부상높이를 줄일 수 있으며, 이는 회전구동형 HDD가 선형구동형 보다 디스크 기록 영역내에서 부상높이의 변동이 적고 안정될 수 있음을 나타낸다.

(3) 디스크의 반경방향으로 헤드 슬라이더가 이동하게 되면, y축 방향의 모멘트 평형에 의하여 결정되는 자세각은 전반적으로 증가하게 되며, 회전구동

형이 선형 구동형보다는 항상 큰 자세각을 유지한다.
 (4) 디스크의 외측으로 헤드 슬라이더가 이동함에 따라 선형구동형은 회전각의 역할이 일정하게 감소하는 반면, 회전구동형은 스큐각의 존재로 인하여 회전각의 역할이 크게 변화하는 현상을 나타낸다.

후 기

이 논문은 1990년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 대학부설 연구소 지원(과제명: 고속 경량 Hard Disk Drive의 설계에 관한 연구) 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음.

기호설명

- A : 가목적 함수(pseudo-objective)
- b : 패드폭
- F : 공기유향력(air-bearing force)
- h : 부상높이
- h_i : 슬라이더의 내측 부상높이(inside flying height)
- h_{min} : 최소 공기막두께
- h_o : 슬라이더의 외측 부상높이(outside flying height)
- K_n : Knudsen 수
- l : 슬라이더 길이
- l_f : 전 공기유향 테이퍼 길이
- l_r : 후 공기유향 테이퍼 길이
- p : 공기막 압력
- p_{amb} : 대기압
- P : 무차원 공기막 압력($P = p/p_{amb}$)
- r_p : 벌칙계수(penalty parameter)
- S : 생성항(source)
- U, V : x, y방향 디스크 선속도
- W : 외부하중
- wid : 슬라이더 폭
- x, y, z : 기준 좌표계
- x_o, y_o : 외부하중 작용점까지의 거리
- x_f, y_f : 모멘트 평형점까지의 거리
- x_p, y_p : 모멘트 계산을 위한 피벗축의 좌표
- X_{piv}, Y_{piv} : 모멘트 계산을 위한 피벗축
- Φ_1 : 전 공기유향 테이퍼 각도
- Φ_2 : 후 공기유향 테이퍼 각도
- λ : 공기분자의 평균 자유비행거리

μ	: 공기의 점성계수
ρ	: 공기의 밀도
ε	: 수렴오차한도
Λ_x, Λ_y	: x, y방향 베어링 수
Θ	: 자세각(pitch angle)
γ	: 회전각(roll angle)
Ψ	: 목적함수
λ	: Lagrange multiplier 벡터
Γ	: 확산계수(diffusion coefficient)

참 고 문 헌

1. Brunner, R.K., Harker, J.M., *et al.*, "A Gas Film Lubrication Study Part III: Experimental Investigation of Pivoted Slider Bearing", *IBM J. R. & D.*, Vol.8, July, pp.260-274, 1959.
2. Tseng, R.C., "Rarefaction Effects of Gas-Lubricated Bearings in a Magnetic Recording Disk File", *ASME J. of Lub.*, Vol.97, Oct., pp.624-629 1975.
3. Hsia, Y.T., Domoto, G.A., "An Experimental Investigation of Molecular Rarefaction Effects in Gas Lubricated Bearings at Ultra-Low Clearances", *ASME J. of Lub.*, Vol.105, Jan., pp.120-130, 1983.
4. Burgdorfer, A., "The Influence of the Molecular Mean Free Path on the Performance of Hydrodynamic Gas Lubricated Bearing", *ASME J. of Basic Eng.* Vol.81, No.3, Mar., pp.94-100, 1959.
5. Gross, W.A., *et al.*, Fluid Film Lubrication, John Willey & Sons, 1980.
6. Fukui, S., Kaneko, R., "Analysis of Flying Characteristics of Magnetic Heads with Ultra-Thin Spacings based on The Boltzmann Equation", *IEEE Trans. on Magn.*, Vol.24, Nov., pp.2751-2753, 1988.
7. 장인배, 한동철, "마그네틱 헤드 슬라이더의 極小空氣膜에 대한 正常狀態 解析", *大韓機械學會 論文集*, 제 13권, 제 4호, pp.764-770, 1989.
8. 김육현, 이형인, "Hard Disk Drive 공기막의 수치 해석", *大韓機械學會 '91年度 春季學術大會 論文集*, pp.651-655, 1991.
9. Ruiz, O.J., Numerical Simulation of the Head-Disk Assembly Dynamics in Magnetic Recording Disk Files, Doctoral Dissertation, 1989.
10. Patankar, S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, 1980.
11. 박상신, 장인배, *et al.*, "극소 공기막을 갖는 공기베어링의 직접 수치해석법을 이용한 정적해석", *大韓機械學會 論文集*, 제 15권, 제 1호, pp.120-126, 1991.
12. 이재현, 최동훈, *et al.*, "회전구동형 헤드 슬라이더의 부상높이에 관한 연구", *大韓機械學會 論文集*, 제 15권, 제 6호, pp.1886-1896, 1991.
13. Kim, M.S., Kim, H.S., *et al.*, IDOL V.1.5 User's Guide, Optimal Design Lab. Mechanical Design and Production Engineering in Han Yang Univeristy, 1990.
14. Vanderplaats, G.N., Numerical Optimization Techniques for Engineering Design, McGraw-Hill, 1984.
15. White, J.W., "Flying Characteristics of the 3370-Type Slider on a 5₁₆ inch Disk- Part I: Static Analysis", *ASLE*, Vol.1, pp.72-76, 1984.
16. White, J.W., "A Uniform Flying Height Rotary Actuated Air Bearing Slider", *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. Mag-22, Sept., pp.1028-1030, 1986.