

다차원 뉴턴-랩슨 방법을 이용한 하드 디스크/헤드 시스템의 3차원 평형위치 검색

장 인 배

3-Dimensional Equilibrium Position Searching of HDD/Head System using Multi-Dimensional Newton-Raphson Method

In-Bae Chang

ABSTRACT

This paper suggests the three dimensional steady state searching techniques of hard disk/head system, which has some skew angle with flexure. In order to analyze the steady state behaviors of magnetic head slider, the localized Knudsen number and the localized bearing numbers are used. For finding the steady state of magnetic head slider under the pre-loaded condition, I proposed multi-dimensional Newton-Raphson method which traces the equilibrium position of magnetic head slider, which has 3-degrees of freedom, using Jacobian matrix. The multi-dimensional Newton-Raphson method is very efficient technique for finding the steady state position of magnetic head slider because it approaches to the equilibrium position with changing three parameters simultaneously.

1. 서 론

하드 디스크와 자기 기록용 헤드 사이에서 발생하는 좁은 공기막을 안정되게 유지하는 것은 자기 기록장치의 기억용량 증대에 매우 중요한 역할을 한다. 불안정하게 형성된 공기막에 의하여 유발되는 슬라이더와 디스크 사이의 순간적인 접촉은 디스크 상에 저장된 정보의 손실을 초래한다. 하드 디스크와 헤드 사이에 형성된 공기막

의 안정성을 판별하기 위해서는 자기 기록용 헤드의 하부에 설치된 두 개의 공기 유티용 슬라이더와 하드 디스크 사이에 형성된 공기막의 압력을 정확히 해석하여야 할 뿐만 아니라, 실제의 하드 디스크 구동 메카니즘을 고려한 작동위치에서 발생된 공기막 압력과 헤드 지지대(flexure) 사이의 힘의 평형관계로부터 구해지는 평형위치의 검색이 필요하다^[1]. 그러나 하나의 헤드 슬라이더와 디스크 사이에 형성된 압력 분포의 해석만으로도 많은 계산시간이 소요되기 때문에, 두개의 슬라이더로 구성된 자기

강원대학교 정밀기계공학과 전임강사

기록용 헤드와 3 자유도를 갖는 지지대 사이의 평형위치를 효율적으로 구하기 위하여 많은 연구가 수행되어 왔다. 본 논문에서는 자코비안 행렬식을 이용하여 최소유효 공기막 두께(h_{\min}), 피치각(θ), 롤링각(ϕ)의 3자유도를 갖는 헤드의 정상상태 평형위치를 3차원적으로 검색하는 방법에 대하여 논의한다^[2].

본 연구에서는 Fig. 1 에서와 같이 헤드의 지지대가 회전운동을 통하여 헤드의 위치를 선정해 주는 작동방식을 택하고 있는 Winchester 하드 디스크와 mini composite 형 헤드를 해석의 대상으로 선정하였다. 그리고 헤드 슬라이더의 유효면은 지지대의 회전에 따라 서로 다른 두 방향의 유속을 갖게 되므로, 각 노드점 마다 서로 다른 베어링 계수를 갖는 국부 베어링 계수를 사용하였으며, 국부 공기막 두께와 국부 공기분자의 평균 자유 비행거리 (molecular mean free path)에 근거한 국부 Knudsen 계수를 사용하였다.

본 연구에서 구해진 헤드의 평형위치는 헤드와 하드 디스크가 정상상태를 이루며 작동하고 있을 때의 거동형태를 나타내므로, 이 결과만으로는 순간적인 외부교란에 대한 헤드의 작동안정성을 판별할 수 없다.

그러나 본 연구의 결과는 헤드의 외부교란에 대한 응답특성 및 자기복원특성 등과 같은 동특성 해석을 위한 기준점으로 사용된다^[3].

2. 압력분포 해석

자기 기록용 헤드와 하드 디스크 사이의 공기막은 유효표면의 크기가 공기분자의 평균 자유비행거리에 비하여 무한히 크다는 가정이 성립하지 않는 저밀도의 영역으로 벽면 미끄럼 현상이 발생하기 때문에, 공기분자의 평균 자유비행거리에 대한 공기막 두께의 비인 Knudsen 계수를 고려한 수정된 레이놀즈 방정식^[4]을 사용하여야 한

다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} [ph^3 \frac{\partial p}{\partial x} (1+6 \frac{\lambda}{h})] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} [ph^3 \frac{\partial p}{\partial z} (1+6 \frac{\lambda}{h})] \\ & = 6\mu U \frac{\partial(ph)}{\partial x} + 6\mu V \frac{\partial(ph)}{\partial z} \end{aligned} \quad (1)$$

헤드 슬라이더의 기하학적인 경계면에서는 대기압이 작용한다고 가정하면,

$$\begin{aligned} p[x(b), z(b), y=0] \\ = p_{amb}[x(b), z(b)] \end{aligned} \quad (2)$$

$$b = \text{boundary}$$

계산을 간단히 하고 결과의 응용범위를 넓히기 위해서 식 (1) 을 헤드 슬라이더의 기하학적 형상과 공기막 두께 및 대기압 등과 같은 기준 값들을 사용하여 무차원화한다^[1].

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \xi} [PH^3 \frac{\partial P}{\partial \xi}] + \frac{\partial}{\partial \zeta} [PH^3 \frac{\partial P}{\partial \zeta}] \\ & + 6K_n [\frac{\partial}{\partial \xi} (H^2 \frac{\partial P}{\partial \xi}) + \frac{\partial}{\partial \zeta} (H^2 \frac{\partial P}{\partial \zeta})] \\ & = \Lambda_1 \frac{\partial(PH)}{\partial \xi} + \Lambda_2 \frac{\partial(PH)}{\partial \zeta} \end{aligned} \quad (3)$$

이에 따른 경계조건은

$$P_{\text{boundary}} = 1 \quad (4)$$

식 (3) 을 $Q=PH$ 인 새로운 변수 $Q(P,H)$ 를 도입하여 선형화 한 후, 뉴턴-랩슨 방법 및 column method 를 사용한 반복계산을 통하여 헤드 슬라이더와 하드 디스크 사이의 압력분포를 구하였다.

3. 다차원 뉴턴-랩슨 방법

본 장에서는 헤드가 하드 디스크 상의 지정된 위치에서 예하중을 받으며 정상상태를 이루고 있을 때, 자코비안 행렬식을 사용하여 최소유효 공기막 두께(h_{\min}), 피치각(θ) 및 롤링각(ϕ)의 3자유도를 갖는 헤드의 정상상태를 3차원적으로 검색하는 방법에 대하여 고찰한다.

헤드의 정상상태를 검색할 수 있는 기준

값들은 하중지지력(W_f)과 헤드의 길이방향(M_z) 및 폭방향 모멘트이다. 정상상태는 하중지지력이 주어진 예하중(W_p)과 동일하며, 헤드와 지지대 사이의 피보팅 점에서 두 방향의 모멘트가 0 이 되는 점으로, 이때 헤드의 거동은 최소유효 공기막 두께와 두 방향의 자세각인 피치각 및 롤링각으로 표현될 수 있다. 헤드 슬라이더의 하중지지력은 최소유효 공기막 두께에 의하여, 길이방향 모멘트는 피치각에 의하여, 그리고 폭방향 모멘트는 롤링각에 의하여 가장 크게 지배를 받는다. 그러므로, h_{min} , θ , ϕ 의 세 값을 입력변수로 선정하고, 0 으로 수렴시켜야 하는 목적함수로는

$$\begin{aligned} F_1(h_{min}, \theta, \phi) &= (W_f - W_p) \\ F_2(h_{min}, \theta, \phi) &= M_z \\ F_3(h_{min}, \theta, \phi) &= M_x \end{aligned} \quad (5)$$

을 선정한 후 입력변수를 적절히 조절하여 목적함수가 0 이 되는 정상상태를 찾아야 한다. 그런데, 식 (5) 의 목적함수들은 레이놀즈 방정식을 풀어야 얻을 수 있는 비선형 함수로, 입력변수간의 연계(coupling) 때문에 정상상태를 찾기 위해서는 다차원 뉴턴-랩슨 방법을 사용해야 한다.

입력변수를 $X = (h_{min}, \theta, \phi)^T$ 라 놓고, 이에 따른 목적함수 $F(X) = [F_1(X), F_2(X), F_3(X)]^T$ 라 놓으면 고려해야 할 비선형 방정식은 다음과 같아진다.

$$F(X) = 0 \quad (6)$$

여기서, F 는 독립변수 h_{min} , θ , ϕ 에 대한 자코비안 행렬을 J 로 표시하면,

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial h_{min}} & \frac{\partial F_1}{\partial \theta} & \frac{\partial F_1}{\partial \phi} \\ \frac{\partial F_2}{\partial h_{min}} & \frac{\partial F_2}{\partial \theta} & \frac{\partial F_2}{\partial \phi} \\ \frac{\partial F_3}{\partial h_{min}} & \frac{\partial F_3}{\partial \theta} & \frac{\partial F_3}{\partial \phi} \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (6) 의 해는 $X = (h_{min}, \theta, \phi)^T$ 이며, $F(X) = 0$ 인 벡터의 형태로 나타낼 때 J 는 X 근처에서 nonsingular 하다

고 가정한다. 식 (7) 에서 자코비안 행렬의 각 성분들은 독립변수 h_{min} , θ , ϕ 를 각각 Δh_{min} , $\Delta \theta$, $\Delta \phi$ 만큼 변화시켰을 때의 목적함수의 변화량을 이용하여 구한다. 그러므로 한 회의 반복계산 과정에는 4 회의 압력분포 계산이 소요된다.

이러한 비선형 방정식을 $F(X)$ 에 대한 뉴턴-랩슨 공식은 다음과 같다.

$$X^{(n)} = X^{(n-1)} - J^{-1} X^{(n-1)} F(X^{(n-1)}) \quad (8)$$

이 때, $X^{(0)}$ 는 해 X 를 구하기 위한 초기가정이다.

다차원 뉴턴-랩슨 방법은 세 개의 독립변수인 h_{min} , θ , ϕ 를 동시에 변화시켜 가며 평행위치를 3 차원적으로 검색하기 때문에 수렴성이 탁월하다.

본 절에서 언급한 자코비안 행렬식을 이용한 다차원 뉴턴-랩슨 방법을 이용하여 헤드의 정상상태 검색을 수행한 결과, 모든 경우에 대하여 반복계산이 5~6 회 이내에서 세 개의 독립변수 모두 이전의 계산값과 0.005 % 이내로 매우 안정되게 수렴하였다.

4. 해석조건

Fig. 1 에서와 같이 지지대가 회전운동을 통하여 헤드의 위치를 설정해 주는 작동방식을 택하고 있는 Winchester 형 하드 디스크와 mini-composite 형 헤드를 해석대상으로 선정하여, 예하중 9.6 g 하에서 헤드의 거동을 해석하였다. 해석의 대상이 된 하드 디스크와 헤드의 형상은 Fig. 1 과 Fig. 2 에, 그리고 각각의 제원은 Table 1 과 Table 2 에 도시되어 있다.

Fig. 1 에서와 같이 헤드의 구동부가 회전방식을 택하고 있다면, 헤드 슬라이더는 디스크의 원주방향 접선속도에 대하여 회전각(skew angle)을 갖게 되며, 이 회전각은 슬라이더의 폭방향 유동을 유발하는 원인이 된다. 그리고, 디스크의 형상에 기인하여, Fig. 3 에서와 같이 헤드 슬라이더의

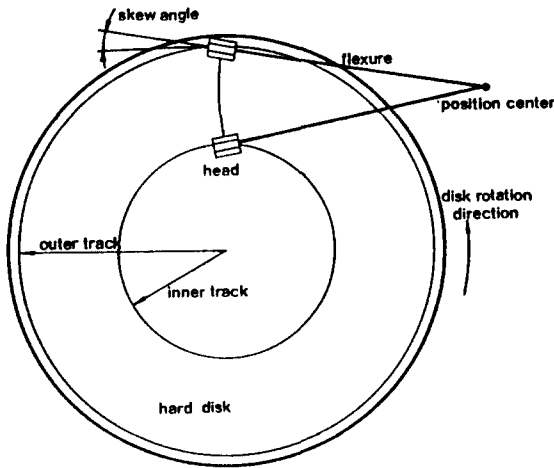


Fig. 1. Schematics of the flexure and hard disk

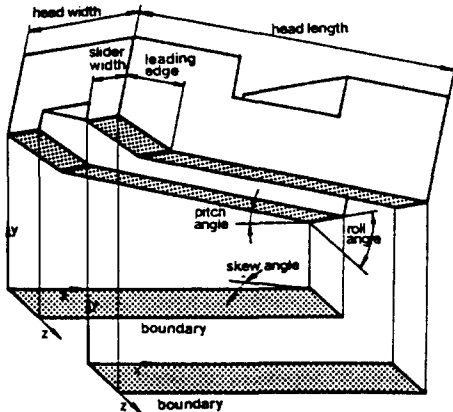


Fig. 2. Schematics of the mini composite type head

Table 1. Dimensions of Hard Disk

Parameter	Dimension
outer track radius	60.681 [mm]
inner track radius	31.750 [mm]
flexure length	75.184 [mm]
spindle center to flexure center	82.639 [mm]
disk rot. speed	3600 [rpm]

Table 2. Dimensions of mini-composite type head

Parameter	Dimension
head width	3.200 [mm]
head length	3.964 [mm]
slider width	0.584 [mm]
edge length	0.331 [mm]
edge angle	0.833 [mm]

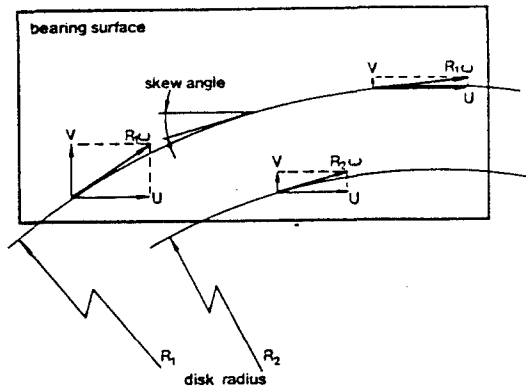


Fig. 3. Velocity relations of the 2-dimensional flow

바닥면은 지지대가 회전함에 따라 각 위치마다 서로 다른 두 방향의 유속을 갖게 되므로, 식 (3) 에서 두 방향의 유동특성을 나타내는 계수 Λ_1 , Λ_2 가 각 노드점마다 서로 다른 국부 베어링 계수를 사용하였다.

미끄럼 유동이론에 의하면, 레이놀즈 방정식의 전이영역에서의 보정항인 Knudsen 계수는 무차원화된 유막두께의 함수로

$$\begin{aligned}
 K_n = \lambda_n &= \frac{\lambda_{amb} \cdot P_{amb}}{P \cdot P_{amb} \cdot H \cdot h_{min}} \\
 &= \frac{\lambda_{amb}}{P \cdot H \cdot h_{min}} \quad (9) \\
 &= \frac{K_{amb}}{P \cdot H}
 \end{aligned}$$

그런데, 헤드 슬라이더의 공기막 내에서의

압력은 대기압보다 높으므로 식 (9) 에 따르면, 공기분자의 평균 자유비행거리가 대기압 하에서 보다 짧게 되어 국부 공기막 두께와 국부 공기분자의 평균 자유비행거리에 근거한 국부 Knudsen 계수의 개념을 도입하는 것이 필요하다.

Hsia 와 Domoto(6) 의 연구결과에 따르면 베어링 계수가 증가함에 따라, 즉, 공기막의 두께가 감소하거나 선 속도가 증가하면 헤드 슬라이더 표면에서의 미끄럼 현상이 증가함을 예견하였다.

5. 헤드의 거동

두 개의 슬라이더로 구성된 헤드가 임의의 회전각을 가지고 작동할 때 헤드의 정상상태 거동을 살펴보기 위하여, 하드 디스크의 기억표면 상에서 정보의 입출력이 수행되는 가장 안쪽트랙에서부터 가장 바깥쪽 트랙까지의 영역중 5 개의 위치를 선정하여 2 차원 유동을 고려한 비대칭 압력분포를 갖는 헤드 슬라이더의 정상상태 해석을 수행하였다.

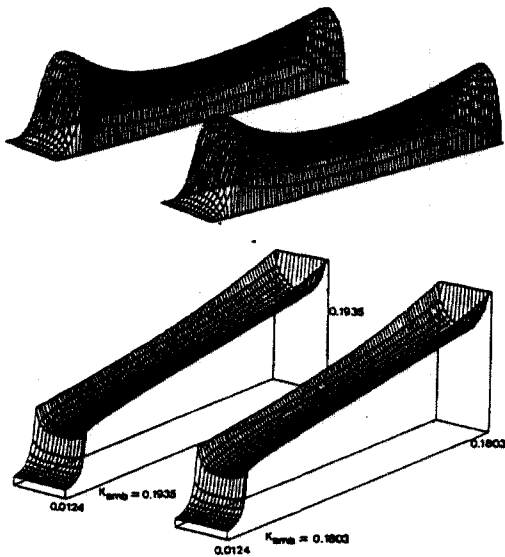


Fig. 4. Pressure and local Knudsen number profile ($R=31.75$ mm)

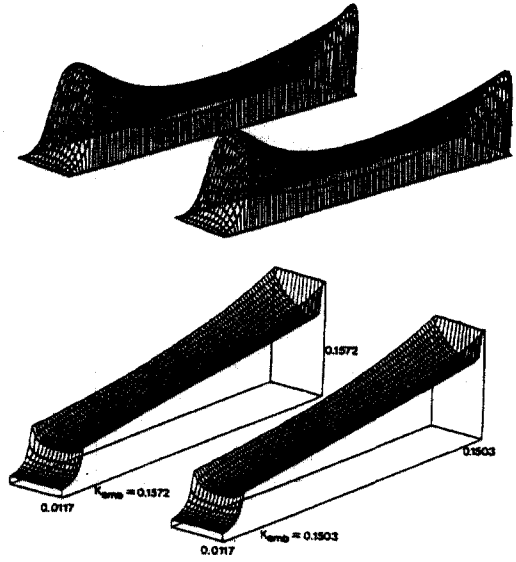


Fig. 5. Pressure and local Knudsen number profile ($R=60.68$ mm)

Fig. 4 는 가장 안쪽 트랙에서의 압력분포와 이때의 국부 Knudsen 계수의 변화를 도시한다. 헤드가 가장 안쪽 트랙에 위치했을 때 헤드의 회전각은 -1.787° 이므로, 헤드의 길이방향 유동에 비하여 폭방향 유동은 비교적 작은 값을 가지며, 이에 따라 압력도 거의 대칭적으로 나타난다.

Fig. 5 는 가장 바깥쪽 트랙에서의 압력분포와 이에 따른 국부 Knudsen 계수를 나타낸다. 헤드가 가장 바깥쪽 트랙에 위치했을 때 헤드의 회전각은 15.94° 이므로, 헤드의 길이방향 유동에 대하여 폭방향 유동이 약 30 % 에 달한다. 그러므로 압력분포의 비대칭 현상이 Fig. 4 의 경우보다 더욱 심화된다.

Fig. 6 은 헤드의 최소유효 공기막 두께를 가장 안쪽 트랙에서부터 가장 바깥쪽 트랙까지 5 개의 점에서 계산하여 곡선으로 연결한 그림이다. 이에 따르면 최소유효 공기막 두께는 디스크의 기억표면 상에서 포물선 형태로 증감함을 알 수 있다. 그리고 바깥쪽 슬라이더의 간극 변화율이

안쪽 슬라이더의 간극 변화율 보다 작다는 점도 그림에서 확인할 수 있다.

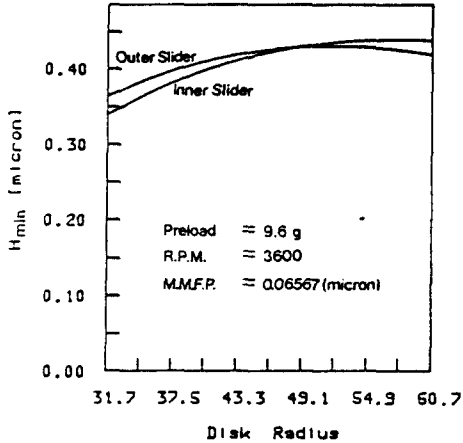


Fig. 6. Variation of h_{min} according to the head location

6. 결 론

회전 구동방식을 갖는 자기 기록용 헤드의 정상상태 거동을 해석하기 위하여 국부 Knudsen 계수와 국부 베어링 계수를 갖는 수정된 레이놀즈 방정식을 사용하였다. 헤드가 하드 디스크 상의 지정된 위치에서 예하중을 받으며 정상상태를 이루고 있을 때, 최소 공기막 두께 (h_{min}), 피치각 (θ) 및 롤링각 (ϕ) 의 3 자유도를 갖는 헤드의 정상상태 평형위치를 3 차원적으로 검색하기 위하여 자코비안 행렬식을 이용한 다차원 뉴턴-랩슨 방법을 사용하였다. 헤드의 정상상태 평형위치 검색을 수행한 결과, 헤드의 최소윤활 공기막 두께는 디스크의 기억 표면상에서 포물선 형태로 증감함을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] 장인배, 한동철, '마그네틱 헤드 슬라이더의 극소 공기막에 대한 정특성 해석', *대 한기계학회논문집*, 13권 4호, pp. 764-

770, 1989.

- [2] 장인배, '극소 공기막 하에서 작동하는 자려-공기윤활 슬라이더의 정상상태 해석', *서울대학교 석사학위논문*, 1989.
- [3] 장인배, 한동철, '마그네틱 헤드 슬라이더의 극소 공기막에 대한 동특성 해석', *대 한기계학회논문집*, 14권 6호, pp. 1487-1494, 1990.
- [4] Burgdorfer A., 'The Influence of the Molecular Mean Free Path on the Performance of Hydrodynamic Gas Lubricated Bearings', *ASME J. of Basic Eng.*, Vol. 81, No. 3, pp. 94-100, 1959.
- [5] Morris J. L., 'Computational Methods in Elementary Numerical Analysis', *John Wiley & Sons*, pp. 261-323, 1983.
- [6] Hesla Y. T., Domoto G. A., 'An Experimental Investigation of Molecular Rarefaction Effects in Gas Lubricated Bearings at Ultra Low Clearances', *ASME J. of Tribology*, Vol. 105, pp 120-129, Jan., 1983.