

## 극소 공기막을 갖는 헤드 슬라이더 부상상태 해석

이상순 · 김광선 · 임경화

한국기술교육대학교 메카트로닉스 공학부

### Flying State Analysis of Head Slider with Ultra-Thin Spacing

Sang-Soon Lee, Kwang-Sun Kim, Kyung-Hwa Lim

School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

**초 록:** 본 연구에서는 초고밀도 광디스크 시스템이나 하드 디스크 시스템의 헤드 슬라이더의 부상상태를 안정되고 효율적으로 예측하는 수치해석법을 다루고 있다. 뉴턴법과 유사 뉴턴법을 이용하여 정상적인 부상상태들을 예측하기 위해서 Dual Solver를 개발하였다. 수치해석 결과에 의하면, Dual Solver는 초고밀도 광디스크 시스템이나 하드 디스크 시스템용 슬라이더의 부상상태를 해석하는데 효과적이고 신뢰성있는 방법이 될 수 있다.

**Abstract:** A method that predicts the flying state of the head slider in an optical disk drive (ODD) or a hard disk drive(HDD) was investigated. The dual solver based on the Newton method and the quasi-Newton method have been developed to simulate the steady-state flying conditions. The numerical results show the effectiveness and reliability of this new solver.

**Keywords:** Head Slider, Dual Solver, Quasi-Newton, Newton

#### 1. 서 론

초고밀도 광디스크 시스템이나 HDD(hard disk drive)시스템은 정보를 읽고 쓰는 헤드, 정보를 저장하는 디스크, 그리고 헤드와 디스크 사이를 일정하게 유지하는 극소 공기 유향막으로 구성되어 있다. 공기 유향막의 두께는 높은 신호 분해능을 얻기 위하여 작을수록 좋으나, 지나치게 작아지는 경우 헤드와 디스크의 충돌가능성이 발생하게 되어 정보손실은 물론, 시스템의 손상을 야기 시킬 수 있다. 따라서 헤드 슬라이더와 디스크의 간격을 안정되고 효율적으로 유지하는 문제는 매우 중요하다고 볼 수 있다.

헤드 슬라이더의 부상상태에 대한 연구는 HDD 분야에서 오래 전부터 활발하게 진행되어 왔다.<sup>1)</sup> 그중에서, Miu와 Bogy<sup>2)</sup>는 공기 유향막에서의 압력분포를 구하기 위해서 유한차분법을 사용하

여 수정된 레이놀즈 방정식을 계산하였다. 계산 결과로 얻어진 압력분포를 운동방정식에 대입하여, 4차 Runge-Kutta법을 적용하여 슬라이더의 부상상태를 예측하였다. 그러나, 이 논문에서 적용하고 있는 수치해법은 많은 수의 반복과정을 요구하고 있어서 효율적이라고 보기 어렵다. 윤상준등<sup>3)</sup>은 슬라이더의 부상상태 해석을 효율적으로 진행하기 위해서 최적화 기법을 도입하였다. 그러나, 이러한 접근방법도 여전히 많은 수의 반복과정을 요구하고 있다는 점에서 개선이 요구된다고 볼 수 있다. Cha와 Bogy<sup>7)</sup>는 보다 효율적인 수치해석 방법으로서 유사 뉴턴(Quasi-Newton) 방법과 Line-Search 알고리즘을 결합한 방법을 적용하여 운동방정식에 대한 반복계산 횟수가 많이 줄어든 결과를 제시하였다. 그러나 이러한 방법도 초기 근사값이 적절하지 않으면 해에 수렴하지 못하는 단점을 보이고 있다.

본 연구의 목적은 극소 공기 윤활막을 갖는 헤드 슬라이더의 정상 부상상태를 안정되고 효율적으로 예측하는 수치해석법을 개발하는데 있다. 현재까지 발표된 수치해석법 중에서 Cha와 Bogy가 발표한 접근법이 가장 효율이 좋으나, 안정성 문제가 나타나고 있으므로, 이를 개선한 새로운 접근법을 개발하였다. 개발된 접근법을 기존의 방법들과 비교해 안정성과 효율성의 측면을 비교 분석하였다.

2. 압력분포 해석

Fig. 1은 부상상태를 해석하는데 사용된 헤드 슬라이더의 형상을 나타내고 있다. 본 논문에서 사용한 헤드 슬라이더는 평판에 2개의 패드를 지닌 형상을 하고 있는데, 각각의 패드에는 공기 윤활 테이퍼(air-bearing taper)가 있다. 스피들 모터에 장착된 디스크가 일정한 크기의 속도로 회전하면 슬라이더 헤드와 디스크 사이에는 디스크의 정속회전에 의해 유입된 공기로 인해 극소 공기 윤활막이 형성되는데, 윤활막 내에는 일정한 크기의 압력이 발생하게 된다. 이 압력의 합인 공기윤활력이 외부 하중과 힘의 평형을 이루고, 피봇의 위치에 대한 모멘트가 평형을 이루도록 슬라이더는 부상하게 된다. 이러한 슬라이더의 부상상태는 Fig. 1에 나타낸 것처럼 최소 공기막 두께( $h_m$ )와 자세각( $\theta$ ) 그리고 회전각( $\phi$ )로 표현될 수 있다.

디스크의 정속회전에 의해 형성된 공기 윤활막

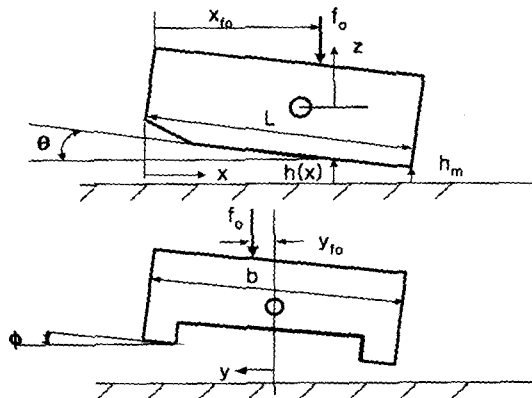


Fig. 1. Pitch and roll angle of head slider.

에 발생한 압력은 수정된 레이놀즈 방정식을 사용하여 해석할 수 있다. 대기압을, 슬라이더 길이를, 디스크의 각속도를 로 표현하고, 먼저 다음과 같은 무차원 변수를 도입한다(Fig. 1 참조).

$$P = \frac{p}{p_a}, \quad H = \frac{h}{h_m} \tag{1}$$

$$X = \frac{x}{L}, \quad Y = \frac{y}{L}, \quad T = \omega T$$

식 (1)로 표현된 무차원 변수를 사용하면 수정된 레이놀즈 방정식은 다음과 같이 표현된다<sup>7)</sup>.

$$\sigma \frac{\partial PH}{\partial T} = \frac{\partial F}{\partial X} + \frac{\partial G}{\partial Y} \tag{2}$$

극소 공기막의 경계에서는 대기압이 작용하므로, 식 (2)에 대한 경계조건으로 공기막 경계에서  $P=1$ 로 설정한다. 위 식 (2)에서

$$\sigma = \frac{12\mu\omega L^2}{p_a h_m^2} \tag{3}$$

$$F = QH^2 \frac{\partial P}{\partial X} - \Lambda_x PH \tag{4}$$

$$G = QH^2 \frac{\partial P}{\partial Y} - \Lambda_y PH \tag{5}$$

이다. 식 (3)에서  $\mu$ 는 공기막의 점성을 나타내고, 식 (4)와 식 (5)에서,

$$\Lambda_x = \frac{6\mu UL}{p_a h_m^2} \tag{6}$$

$$\Lambda_y = \frac{6\mu VL}{p_a h_m^2} \tag{7}$$

이다. 위 식에서,  $U$ 와  $V$ 는  $x$ 와  $y$ 방향으로의 공기막의 미끄럼 속도를 나타낸다.

위의 관계식은 다음과 같이 변환될 수 있다.<sup>7)</sup>

$$\int_z \sigma \frac{\partial PH}{\partial T} dA \tag{8}$$

$$\begin{aligned}
 &= \int_{\partial \Sigma} \left\{ \left[ F^n + \frac{\partial F^n}{\partial P}(P - P^n) + \frac{\partial F^n}{\partial P_x}(P_x - P_x^n) \right] \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\partial F^n}{\partial H_x}(H - H^n) \right\} n_x \\
 &+ \left[ G^n + \frac{\partial G^n}{\partial P}(P - P^n) + \frac{\partial G^n}{\partial P_y}(P_y - P_y^n) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\partial G^n}{\partial H}(H - H^n) \right] n_y \Big] dS
 \end{aligned}$$

식(8)에서,  $\Sigma$ 는 관제역(control volume)을 나타내고,  $\partial \Sigma$ 는 관제면(boundary of control volume)을 가리키며, 위 첨자  $n$ 은 현재의 시간 간격을 나타낸다.  $n_x$ 와  $n_y$ 는 관제면에서의 법선 단위외향 벡터 성분을 나타낸다. 식 (8)은 유한차분법에 의해 효율적으로 계산될 수 있다. 보다 자세한 방정식의 전개과정과 계산과정은 참고문헌[1]과[7]에 설명되어 있다.

### 3. 부상상태 해석

앞장에서 기술한 수정된 레이놀즈 방정식의 계산결과로부터 압력분포 상태가 얻어지면, 최소 공기막 두께( $h_m$ )와 자세각( $\theta$ ) 그리고 회전각( $\phi$ )를 계산할 수 있다. 슬라이더 부상상태는 슬라이더에 작용하는 서스펜션 하중과 공기 유회력이 평형을 이루고, 서스펜션하중과 공기 유회력으로 인한 피칭 및 로울링 모멘트가 평형을 이룰 때의 최소 공기막 두께( $h_m$ )와 자세각( $\theta$ ) 그리고 회전각( $\phi$ )의 값으로 표현된다. 이러한 값들은 다음의 식 (9), 식 (10), 그리고 식 (11)이 영이 되는 값을 찾으려면 구해진다.

$$R_1 = \int (P - 1) dA - F_o \tag{9}$$

$$R_2 = \frac{\int (P - 1) X dA}{\int (P - 1) dA} - X_{F_o} \tag{10}$$

$$R_3 = \frac{\int (P - 1) Y dA}{\int (P - 1) dA} - Y_{F_o} \tag{11}$$

즉,  $R = [R_1, R_2, R_3]^T = 0$  이 되는  $Z^* = (h_m^*, \theta^*, \phi^*)$  를 찾는 문제이다. 위 식에서  $F_o = f_o/p_a$ ,  $X_{F_o} = x_{f_o}/L$ , 그리고  $Y_{F_o} = y_{f_o}/L$ 를 나타낸다. 위 식 (9)-(11)은 비선형 연립방정식을 나타내므로,  $R_1, R_2$ , 그리고  $R_3$ 가 동시에 영이 되는 최소 공기막 두께( $h_m$ )와 자세각( $\theta$ ) 그리고 회전각( $\phi$ )의 값들은 반복법을 이용해서 구해야 한다. Cha와 Bogy는 위의 비선형 연립방정식에 대하여 유사 뉴턴법<sup>8)</sup>을 Line-Search 알고리즘과 결합하여 해를 구하는 방법을 제시하였다. 그러한 수치해석법은 적절한 초기값을 사용하는 경우에는 매우 효율적이지만, 초기 값이 적절하지 않을 경우에 해가 구해지지 않는 단점을 지니고 있다.

이 논문에서는 Cha와 Bogy의 장점을 살리고 단점을 개선하는 시도로서, 유사 뉴턴법의 장점을 살리고, 초기 값의 선택에 크게 영향을 받지 않는 Dual Solver를 개발하였다. Dual Solver는 뉴턴법과 유사 뉴턴법을 결합하여, 주어진 초기 값에 대해 Line-Search 알고리즘과 결합된 뉴턴법으로 계산하다가, 해에 수렴하지 않으면 계산을 멈추고 유사 뉴턴법으로 계속해서 반복하는 과정을 담고 있다.

Dual Solver의 첫 번째 단계는 초기 값  $Z^{(1)}$ 을 가정한 후, 다음 단계의 값을 계산한다. 즉,

$$Z^{(2)} = Z^{(1)} - J^{-1}(Z^{(1)})R(Z^{(1)}) \tag{12}$$

식 (12)에서,  $J$ 는  $Z^{(1)}$ 에서의  $R$ 의 Jacobian 행렬<sup>8)</sup>을 나타낸다.  $R$ 의 각 성분들은 수정 레이놀즈 방정식의 해를 적분하여 얻어지므로,  $R$ 에 대한 Jacobian 행렬을 해석적 형태로 표현하는 일은 불가능하다. 따라서, Jacobian 행렬의 각 성분은 다음과 같은 유한차분 근사법 사용하여 수치적으로 계산될 수 있다.

$$\frac{\partial P_i}{\partial h} \approx \frac{R_i(h + \Delta h) - R_i(h)}{\Delta h} \tag{13}$$

( $i = 1, 2, 3$ )

다음 단계의  $Z$ 값들은 다음과 같이 주어진다.

$$Z^{(n+1)} = Z^{(n)} + s^{(n)} \tag{14}$$

식 (14)에서

$$s^{(n)} = -J^{-1}(Z^{(n)})R(Z^{(n)}) \quad (15)$$

이다.

Cha와 Bogy는 식 (14)와 식 (15)를 이용하여  $Z$ 를 구하기 위해 Broyden에 의해 제안된 할선(secant)법을 적용하였다. 즉, 반복과정에서 Jacobian 행렬  $J^{(n)}$ 이 구해지면, 다음 단계의 Jacobian 행렬은 다음의 근사식을 이용하여 계산하였다.

$$J^{(n+1)} = J + \frac{(y^{(n)} - J^{(n)}s^{(n)})s^{(n)T}}{s^{(n)T}s^{(n)}} \quad (16)$$

식 (16)에서,

$$y^{(n)} = R(Z^{(n+1)}) - R(Z^{(n)}) \quad (17)$$

이다.

위와 같은 접근 방법은 반복과정마다 요구되는 Jacobian 행렬을 계산하지 않고 근사행렬로 대체한다는 면에서 계산상의 효율성이 높아진 장점을 지니고 있다. 반면에, 이 방법에서는 반복이 계속됨에 따라 발생하는 라운드 오프 오차가 수정되지 못하는 단점을 지니고 있다. 이러한 점은 슬라이더의 부상상태를 해석하는 과정에서 초기 값의 선택이 적절하지 못하면 해가 수렴하지 못하는 단점을 보이고 있다. Cha와 Bogy는 이러한 단점을 보완하기 위해서 Line-Search 알고리즘을 결합시킨 방법을 제시하였다. 그러한 보완책은 실제 계산과정에서 계산의 효율성을 부분적으로 향상시킨 면은 있으나, 선택된 초기 값에 따라 해가 수렴하지 못하는 단점을 근본적으로 극복하지는 못하고 있다.

위에서 설명한 방법의 단점을 개선하는 방법으로, Line-Search 알고리즘과 결합된 뉴턴 방법을 적용하는 과정을 생각해 볼 수 있다. 이러한 방법에서는 반복이 계속됨에 따라 발생하는 라운드 오프 오차를 일반적으로 수정하고 있으며, 초기 값이 적절할 때는 빠르게 해에 수렴하는 장점을 지니고 있다. 뉴턴법을 적용하기 위해서는 각 반복에서 Jacobian 행렬을 계산해야 한다. 각 반복에서 Jacobian 행렬의 성분은 다음과 같이 수치적으로 계산된다.

$$\frac{\partial R_i}{\partial h} \approx \frac{R_i[h + (n+1)\Delta h] - R_i[h + n\Delta h]}{\Delta h} \quad (18)$$

$$\frac{\partial R_i}{\partial \theta} \approx \frac{R_i[\theta + (n+1)\Delta \theta] - R_i[\theta + n\Delta \theta]}{\Delta \theta} \quad (19)$$

$$\frac{\partial R_i}{\partial \phi} \approx \frac{R_i[\phi + (n+1)\Delta \phi] - R_i[\phi + n\Delta \phi]}{\Delta \phi} \quad (20)$$

( $i = 1, 2, 3$ )

뉴턴법을 포함하는 방법은 식 (18), 식 (19), 식 (20)을 이용하여 각 반복과정에서 Jacobian 행렬을 계산해야 하는 단점을 가지고 있으나, 부상상태 해석에 사용되는 행렬의 크기는 ( $3 \times 3$ )이므로, 이러한 계산 증가는 큰 부담이 아니며, 각 반복과정에서 발생하는 라운드 오프 오차가 계속 증가할 수 있는 단점을 개선하여 해의 수렴성을 향상시키는 장점을 지니고 있다. 이러한 결과는 예제로 다룬 수치해석 결과에서 설명되어 진다.

Fig. 2는 부상상태 해석의 흐름도를 나타내고 있다.  $Z^* = (h_{min}^*, \theta^*, \phi^*)$ 을 찾는 과정에서 사용되는 Dual Solver는 Cha와 Bogy가 적용한 유사 뉴턴법을 근간으로 하고, 거기에다가 뉴턴법의 장점을 결합한 방법을 택하고 있다. 주어진 초기 값에 대해 Line-Search 알고리즘을 결합한 뉴턴 방법으로 계산을 하여 해를 얻게 되는데, 해에 수렴하지 않으면, 중간과정에서 유사 뉴턴 방법으로 해를 구하는 과정을 수행하게 된다.

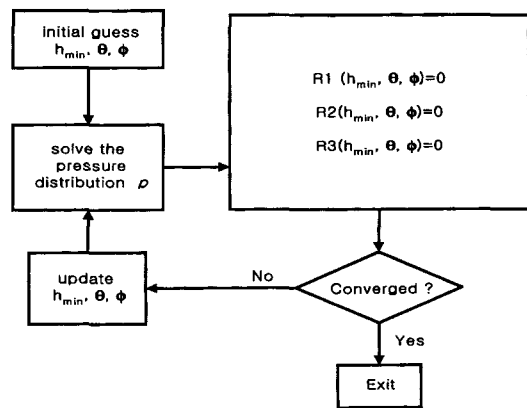


Fig. 2. Flow chart to find  $h_{min}, \theta,$  and  $\phi$ .

4. 수치해석 결과 및 고찰

제안된 방법의 신뢰성과 효율성을 입증하기 위해서 기존에 발표된 Cha와 Bogy방법과 Dual Solver의 방법을 2가지 예제들에 적용하였다.

첫 번째 예제로서 White와 Nigam<sup>5)</sup>이 사용한 TF (taper flat)형 슬라이더(Fig. 3)에 대한 수치해석 결과가 Table 1에 나타나 있다. 해석과정에 디스크의 회전수는 5400rpm으로 가정하였다. Table 1에는 비교 목적을 위하여, Cha와 Bogy방법이외에도, Broyden법(Quasi-Newton법)과 급경사법(Steepest Descent method)을 적용하여 해를 구한 결과가 열거되었다. 해석에 선택된 문제의 해는  $h_m=0.579e-6(m)$ ,  $\theta=0.7108e-04(rad)$ , 그리고  $\phi=0.247e-04(rad)$ 이다. Table 2에는, 초기 값으로서,  $h_m=1.0e-0.7$ ,  $1.0e-0.8$ ,  $5.0e-0.9$ 를 지정한 경우에 대한 결과가 나타나 있다.

먼저, Cha와 Bogy방법을 사용한 경우를 살펴보면,  $h_m=1.0e-07(m)$ 을 초기 값으로 사용한 경우에는 35회의 반복이 요구되었다. 그러나, 나머지  $h_m$ 값들에 대해서는 해에 수렴하지 못하고 있다. Cha와 Bogy방법은 적절한 초기 값이 선택되지 않으면 해가 수렴하지 못하는 결과를 보여주고 있다. Broyden법은 Cha와 Bogy방법에서 Line-Search 알고리즘과 결합하여 사용된 방법으로, 이 방법만 단독으

로 적용한 경우에 대해서 살펴본다.  $h_m=1.0e-07(m)$ 을 초기 값으로 사용한 경우에는 40회의 반복이 요구되었다. 그러나, 나머지  $h_m$ 값에 대해서는 Cha와 Bogy방법과 마찬가지로 해에 수렴하지 못하고 있다. 이러한 결과를 Cha와 Bogy방법의 결과와 비교할 때, Line-Search 알고리즘을 결합한 방법이 계산에서 약간 효율적이지만, 근본적인 해결책은 아님을 보여주고 있다. 급경사법(Steepest Descent method)을 적용하여 해를 구하는 경우를 살펴보면, 세 가지 초기 값에 대해서는 120회에서 195회의 반복계산을 통해서 해에 수렴하는 결과를 나타내고 있다. 해에 수렴하는 결과를 앞의 두 방법과 비교하면 초기 값의 선택에 덜 민감하지만, 수렴속도가 너무 느려 부상상태의 해석에는 적합하다고 보기 어렵다. Dual Solver를 사용하는 경우를 살펴보면, 모든 초기 값에 대해서 해에 수렴하는 결과를 보이고 있다.

위에서 살펴본 결과에 의하면, 본 논문에서 개발한 Dual Solver는 초기 근사 값에 큰 영향을 받지 않고, 효율적으로 해에 수렴하는 결과를 나타내고 있다. 따라서, Dual Solver는 슬라이더의 부상상태를 해석하는데, 효과적이고 신뢰성있는 방법이 될 수 있다고 판단된다.

두 번째, 참고 문헌[9]에서 사용된 모델(Fig. 4)에 대해서 해석을 시도하였다. Table 2에는 디스크

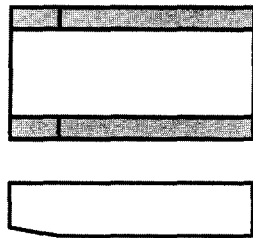


Fig. 3. A taper flat type slider

Table 1. Comparison of number of iteration for a TF type slider.

Initial values of $h_m$ (m)	1.0e-07	1.0e-8	5.0e-09
Cha & Bogy	35	발산	발산
Broyden	40	발산	발산
Steepest Descent	120	180	195
Dual Solver	7	10	10

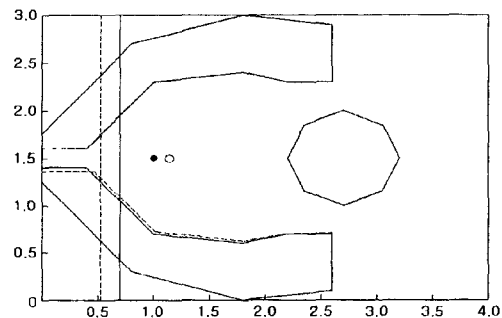


Fig. 4. New slider model<sup>9)</sup>

Table 2. Comparison of number of iteration for a new slider model<sup>9)</sup>.

	RPM	2400	3600	5400
Cha & Bogy		11	20	74
Dual Solver		5	6	7

의 3가지 회전수(2400, 3600, 5400rpm)에 대한 해석결과를 보여주고 있는데, Cha와 Bogy방법의 결과를 Dual Solver와 비교하고 있다. 동일한 초기 값 ( $h_m = 1.0e-07(m)$ )을 사용하여 해석한 결과, Dual Solver의 경우가 Cha와 Bogy방법보다 반복 횟수에서 좋은 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

위에서 살펴본 결과에 의하면, 본 논문에서 개발한 Dual Solver는 Cha와 Bogy 방법보다 적은 수의 반복 횟수에서 해에 수렴할 뿐만 아니라 초기 값의 선택에도 안정됨을 알 수 있다. 따라서, Dual Solver는 초고밀도 광디스크 시스템이나 하드 디스크 시스템의 헤드 슬라이더의 부상상태를 해석하는데, 효과적이고 신뢰성있는 방법이 될 수 있다고 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 초고밀도 광디스크 시스템이나 하드 디스크 시스템의 헤드 슬라이더의 부상상태를 안정되고 효율적으로 예측하는 수치해석법을 개발하였다. 현재까지 발표된 수치 해석법 중에서 Cha와 Bogy가 발표한 접근법이 가장 효율이 좋으나, 안정성에 문제가 나타나고 있다. 즉, Cha와 Bogy는 비선형 연립방정식에 대하여 유사 뉴턴법을 Line-Search 알고리즘과 결합하여 해를 구하는 방법을 제시하였다. 그러한 수치해석법은 적절한 초기값을 사용하는 경우에는 매우 효율적이지만, 초기 값이 적절하지 않을 경우에 해가 구해지지 않는 단점을 지니고 있다. 본 연구에서는 Cha와 Bogy의 장점을 살리고 단점을 개선하는 시도로서, 유사 뉴턴법의 장점을 살리고, 초기 값의 선택에 크게 영향을 받지 않는 Dual Solver를 개발하였다.

Dual Solver는 뉴턴법과 유사 뉴턴법을 결합하여, 주어진 초기 값에 대해 Line-Search 알고리즘과 결합된 뉴턴법으로 계산하다가, 해에 수렴하지 않으면, 계산을 멈추고 유사 뉴턴법으로 다시 해를 구하는 과정을 반복하는 과정을 담고 있다. 개발된 Solver의 신뢰성과 효율성을 입증하기 위해서 기존에 발표된 Cha와 Bogy방법과 Dual Solver의 방법을 2가지 예제들에 적용하였다. Dual Solver는 Cha와 Bogy방법보다 적은 수의 반복 계산으로 해에 수렴할 뿐만 아니라 초기 값의 선택에도 안

정됨을 알 수 있다. 따라서, Dual Solver는 초고밀도 광디스크 시스템이나 하드 디스크 시스템용 슬라이더의 부상상태를 해석하는데, 효과적이고 신뢰성있는 방법이 될 수 있다고 결론 내릴 수 있다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 1999-1-304-007-3)지원으로 이루어졌으며, 재단의 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. S. Fukui and R. Kaneko, "Analysis of ultra-thin gas film lubrication based on linearized boltzmann equation : first report-derivation of a generalized lubrication equation including thermal creep flow", ASME Journal of Tribology, 110, 253, (1988).
2. J.P. Peng and C.E. Hardie, "A finite element scheme for determining the shaped rail slider flying characteristics with experimental confirmation", ASME Journal of Tribology, 117, 358, (1995).
3. J.W. White and A. Nigam, "A factored implicit scheme for the numerical solution of the Reynolds equation at very low spacing", ASME Journal of Tribology, 102, 80, (1980).
4. O.J. Ruiz and D.B. Bogy, "A numerical simulation of the head-disk assembly in magnetic hard disk files : part II - solution of the coupled system", ASME Journal of Tribology, 112, 603, (1990).
5. D.K. Miu and D.B. Bogy, "Dynamics of Gas-Lubricated Slider Bearings in Magnetic Recording Disk Files-Part II: Numerical Simulation", ASME Journal of Tribology, 117, 589, (1985).
6. 윤상준, 김종관, 최동훈, 이재현, 김광식, "최적화 기법을 이용한 HDD용 헤드 슬라이더의 부상상태 해석", 한국윤활학회지, 8(2), 30, (1992).
7. E. Cha and D.B. Bogy, "A Numerical scheme for static and dynamic simulation of subambient pressure shaped rail sliders", ASME Journal of Tribology, 117, 36, (1995).
8. R.L. Burden and J.D. Faires, Numerical Analysis, 6th ed., ITP, (1997).
9. 장 혁, 김현기, 김광선, 임경화, "SA 기법을 이용한 광디스크 드라이브 공기베어링 슬라이더의 최적설계", 대한기계학회논문집 A권, 26(8), 1545, (2002).