

# 근접장 광 기록용 슬라이더의 부상 특성해석

서상원 · 임윤철\*

연세대학교 대학원 기계공학과

\*연세대학교 기계전자공학부

## An Analysis of the Slider for Near Field Recording

Sang-Won Seo and Yoon-Chul Rhim\*

Graduate School, Yonsei University

\*School of Electrical & Mechanical Eng., Yonsei University

**Abstract**-There are some concepts that could achieve Near-Field Recording (NFR). One of concepts is the use of the flying head with Solid Immersion Lens (SIL). The basic concept of this is almost same with that of Hard Disk Drive (HDD). This study presents the flying characteristics of the slider for NFR. Numerical simulations are performed using FEM and Broydon-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) method. Some modifications are considered to improve flying characteristics of the slider.

### 1. 서론

멀티미디어의 발달에 의한 컴퓨터의 사용이 더욱 증대하고 있는 현대산업사회에 있어 컴퓨터 산업은 매우 중요한 부분이며, 정보저장기기 특히 하드 디스크 드라이브(HDD) 등의 보조기억장치의 용량은 매우 빠른 속도로 늘어나고 있다. 그러나 현재 대표적인 보조기억장치인 HDD의 저장능력은 곧 한계에 이를 것으로 예견되고 있다.

따라서 HDD를 대체할 여러 종류의 저장장치들이 연구되고 있는데, 그 중 가장 실현 가능성이 높은 것으로 근접장 광기록(NFR, Near field recording)을 응용한 저장장치가 꼽히고 있다. 근접장을 응용한 기록기술도 여러 가지의 방법이 제시되고 있지만, 가장 가능성이 높은 것으로 생각되고 있는 것은 Solid Immersion Lens (SIL)를 이용한 방법이다. 이것을 실현하기 위해서는 광학헤드와 기록매체 간의 간극을 100nm 이하의 수준으로 유지시키는 슬라이더의 개발이 매우 중

요하다.

슬라이더에 대한 연구는 이미 HDD 분야에서 많은 연구가 수행되어 왔다. Peng(1995)[1] 등은 유한요소법을 이용하여 HDD 용 슬라이더의 부상특성을 연구하였으며, Kogure(1983)[2] 등과 강태식(1999)[3] 등은 제어체적법과 섭동법을 이용하여 슬라이더의 동특성에 대한 연구를 진행하였다. 최동훈(1994)[4] 등은 슬라이더의 부상높이를 구하는 데 있어 최적화 기법을 적용하였다.

본 연구에서는 극소 간극에서 발생하는 슬립현상을 고려하기 위해 Boltzmann 방정식을 근거로 한 Fukui-Kaneko 모델을 적용한 수정된 레이놀즈 방정식을 사용하였다. 임의의 형상의 슬라이더에 대해 해석의 용이성을 제공하는 유한 요소법을 사용하였으며, 슬라이더의 부상높이를 구하기 위해 최적화 기법의 하나인 BFGS 방법을 사용하였다. 근접장 광 기술에 응용이 가능할 것으로 생각되는 3종의 슬라이더를 선정하여 해석을 수행하였으며 슬라이더 시스템의 적절한 변경을 가함으로써 성능향상에 미칠 수 있는 영향도 살펴보았다.

## 2. 수치해석

### 2.1 지배방정식

슬라이더의 해석을 위해서는 극소유효간극에서 발생하는 벽면 미끄럼현상을 고려한 수정된 레이놀즈 방정식을 사용한다. 비연속성 효과를 고려하기 위한 슬립경계 모델은 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 Fukui 와 Kaneko 가 제시한 선형화된

Boltzmann 방정식에 의거하여 구한 식을 사용한다. 일정한 점성의 압축성 유체에 대한 무차원화된 레이놀즈 방정식은 다음과 같다

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial X}(PH^3Q\frac{\partial P}{\partial X}) + \frac{\partial}{\partial Y}(PH^3Q\frac{\partial P}{\partial Y}) \\ & = \Lambda_x \frac{\partial PH}{\partial X} + \Lambda_y \frac{\partial PH}{\partial Y} + \sigma \frac{\partial PH}{\partial T} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $Q$  는 포아제 유동항을 나타내며 간극과 공기분자의 평균자유거리의 비로 표현되는 역논센 수(D)의 함수이며 다음과 같이 표현된다.

$$Q = \frac{Q_p}{Q_{con}} \quad (2)$$

$$Q_{con} = D/6 \quad (3)$$

$$Q_p = \frac{D}{6} + 1.0162 + \frac{1.0653}{D} - \frac{2.1354}{D^2} \quad (4)$$

$$Q_p = 0.1358D + 1.2509 + \frac{0.1565}{D} - \frac{0.0097}{D^2} \quad (5)$$

$$Q_p = -2.2292D + 2.1067 + \frac{0.0165}{D} - \frac{0.0000694}{D^2} \quad (6)$$

식 (4)는  $5 \leq D$ , (5)는  $0.15 \leq D < 5$  그리고 (6)은  $0.01 \leq D < 0.15$  일 때를 나타내며,

$$D = D_0 PH \quad (7)$$

$$D_0 = \frac{p_a h_0}{\mu_0 \sqrt{2RT_0}} \quad (8)$$

이다.

2.2 유한 요소 수식화

정상상태에서의 레이놀즈 방정식은

$$\nabla \cdot (QPH^3 \nabla P - \Lambda PH) = 0 \tag{9}$$

이고, 경계조건은 다음과 같다.

$$P = P_a, \quad (QPH^3 \nabla P - \Lambda PH) \cdot n = q \tag{10}$$

가중함수  $v$  를 식 (9)에 곱하고, 적분을 수행한 후 Green 정리를 적용하면 다음과 같은 식 (11)를 얻을 수 있다.

$$G(P, v) = \int qvdC - \iint (QPH^3 \nabla P - \Lambda PH) \cdot \nabla v dx dy \tag{11}$$

식 (11)은 비선형 방정식이기 때문에 압력  $P$  는 Newton-Raphson 방법에 의해 구한다. 압력은 가정된 압력값에 대해 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$p^{(n+1)} = p^{(n)} + \psi^{(n)} \tag{12}$$

여기서  $\psi^{(n)}$  은 다음 식 (13)의 해이다.

$$G'(p^{(n)}, v)\psi^{(n)} + G(p^{(n)}, v) = 0 \tag{13}$$

식 (11), (12) 그리고 (13)를 정리하면 다음의 식 (14)을 얻는다.

$$\iint \{ QP^{(n)} H^3 \nabla \psi^{(n)} + (H^3 P^{(n)} - \Lambda H) \psi^{(n)} \} \cdot \nabla v dx dy = -\iint (QP^{(n)} H^3 \nabla P^{(n)} - \Lambda HP^{(n)}) \cdot \nabla v dx dy + \int v q dC \tag{14}$$

식 (14)에서  $v$ 를 형상 함수  $N$  으로 바꾸고 식을 정리하면 다음의 식을 얻는다.

$$[K_1^{(n)} - K_2] \{ \psi^{(n)} \} = \{ F^{(n)} \} + \{ Q \} \tag{15}$$

여기서

$$\begin{aligned} [K_1^{(n)}] &= \left[ \iint [N_{xy}]^T \left[ H^3 \left( QP^{(n)} [N_{xy}] + \begin{Bmatrix} P_{,x}^{(n)} \\ P_{,y}^{(n)} \end{Bmatrix} \{N\} \right) \right] dx dy \right] \\ [K_2] &= \left[ \iint [N_{xy}]^T \begin{Bmatrix} \Lambda_x \\ \Lambda_y \end{Bmatrix} \{N\} H dx dy \right] \\ \{F^{(n)}\} &= \left\{ -\iint [N_{xy}]^T \left[ HP^{(n)} \left( QH^2 \begin{Bmatrix} P_{,x}^{(n)} \\ P_{,y}^{(n)} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \Lambda_x \\ \Lambda_y \end{Bmatrix} \right) \right] dx dy \right\} \\ \{Q\} &= \left\{ \iint [N]^T q dC \right\} \\ [N_{xy}] &= \begin{bmatrix} N_{1,x} & N_{2,x} \Lambda \\ N_{1,y} & N_{2,y} \Lambda \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{16}$$

이다.

2.3 부상상태 해석

부상 상태의 해석을 위해 본 연구에서는 슬라이더에 작용하는 힘과 모멘트들이 정적 평형상태에 도달되도록 하는 최적화 기법을 사용하였으며 구속없는 최적화 방법의 하나인 BFGS 방법을 이용하였다.

각 방향의 힘과 모멘트의 식은

$$\begin{aligned} r_1 &= F + mg - W \\ r_2 &= x_F F + x_g mg - x_w W \\ r_3 &= y_F F + y_g mg - y_w W \end{aligned} \tag{17}$$

이며,  $m$  은 슬라이더의 질량,  $g$  는 중력가속도,  $F$  는 서스펜션에 의한 하중 그리고  $W$  는

공기베어링에서 발생하는 압력에 의한 힘을 나타낸다.  $x$ ,  $y$  는 각 아래첨자에 해당하는 힘이 작용하는 지점을 나타낸다. 이를 이용해 최적화 문제를 구성한다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & Y = R_1^2 + R_2^2 + R_3^2 \\ \text{Subject to} \quad & h_0^l \leq h_0 \leq h_0^u \\ & \alpha^l \leq \alpha \leq \alpha^u \\ & \beta^l \leq \beta \leq \beta^u \end{aligned} \quad (18)$$

여기서

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{r_1}{F + mg} \\ R_2 &= \frac{r_2}{x_f F + x_g mg} \\ R_3 &= \frac{r_2}{y_f F + y_g mg} \end{aligned} \quad (19)$$

이다.

### 3. 결과

#### 3.1 IBM 3380 슬라이더 결과 비교

본 연구에서 사용된 수치 해석프로그램의 타당성을 검증하기 위해 IBM 3380 슬라이더의 결과를 비교하여 보았다. 슬라이더의 자세한 사양은 참고문헌[5]에서 찾아볼 수 있다. 디스크의 선속도가 40m/s 일 때, 최동훈(1994)[4] 등은 수치해석프로그램을 통해 280nm 결과를 얻었고, Crone(1991)[5] 등은 실험적으로 290nm의 부상높이와 시뮬레이션을 통해 294nm의 결과를 얻었다. 본

연구에 사용된 수치 프로그램은 정적상태에서 284nm의 부상높이를 얻을 수 있었다. 이는 기존의 연구 결과와 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

#### 3.2 수치해석 조건

본 연구에서는 근접장 광 기록용 저장장치에 아직 어떠한 사양도 결정되어진 것이 없으므로, 기존의 하드디스크 드라이브에서 사용하던 사양을 토대로 하여 조건을 결정하였다. 디스크의 회전속도는 근접장 광 저장장치의 기록밀도가 매우 큼에 따라 선속도가 빠를 경우 정보의 재생이 힘들 것으로 예상되고 있으며, 따라서 디스크의 모든 곳에서 5m/s 이하의 선속도를 유지하도록 하였으며 서스펜션의 하중은 3.5 gf로 하였다. 디스크는 일정한 각속도를 가지고 회전하며 슬라이더는 디스크에서의 위치에 따라 특정한 선속도와 Skew 각을 가지게 된다.

수치해석에 사용된 슬라이더의 공기베어링 형상은 근접장 광 기록에 사용되는 렌즈가 슬라이더의 후미 중심부분에 위치될 수 있도록 하였다. 기존의 하드디스크 드라이브에서 사용되던 자기헤드에 비해 렌즈의 크기나 질량이 매우 크므로 공기베어링 형상 선정에 제약을 받는다. Figure 1은 슬라이더와 광학 헤드가 결합된 개념도를 보여준다. 슬라이더에 광학헤드를 장착하기 위해 기존의 하드디스크 드라이브에서 많이 사용되고 있는 두개의 공기 베어링을 가지는 3380 형태의 공기베어링 형상은 제외되었으며, 전체적으로 3개의 베어링부를 가지는 슬라이더에 대해 수치해석을 수행하였다.

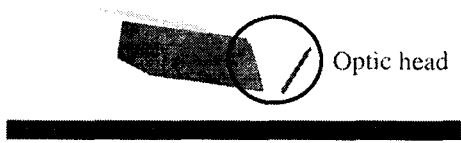


Fig.1 NFR slider

Figure 2 와 Fig. 3 은 각각 수치해석에 사용된 슬라이더의 공기베어링 형상과 그에 따른 정상상태에서의 압력분포를 보여준다. 각각의 공기베어링의 후미에 렌즈를 장착하



Fig. 2 ABS geometry

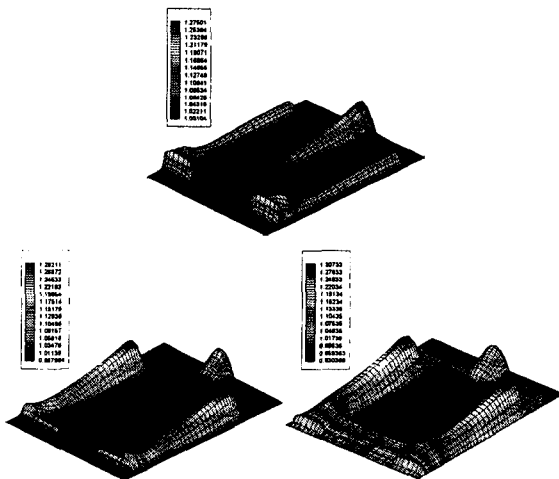


Fig. 3 Pressure distribution

기위한 베어링부를 볼 수 있다.

### 3.3 수치해석 결과

#### 3.3.1 속도와 Skew 각에 대한 민감도

일반적으로 하드디스크 드라이브 형태의 작동 조건에서 슬라이더는 속도에 따른 부상높이의 변화량과 Skew 각에 따른 변화량이 복합되어 나타난다. 하지만 슬라이더의 다른 특성들에 속도나 Skew 각에 대한 민감도가 미치는 영향이 있기 때문에, 각각에 대해 슬라이더의 민감도를 살펴보는 것도 중요하다.

Figure 4 는 Skew 각이 0 일 때, 디스크의 내경부터 외경까지 슬라이더를 위치시켰을 때 속도변화에 따른 부상높이 변화를 보여주고 있다. 이 결과는 슬라이더가 일반적인 광학저장장치에서 사용되는 선형구동기에서 작동할 경우의 부상높이 변화로 생각할 수도 있다. Tri-Rail, Tri-Pad 그리고 H 형태 순으로 속도에 대한 민감도가 작음을 알 수 있다.

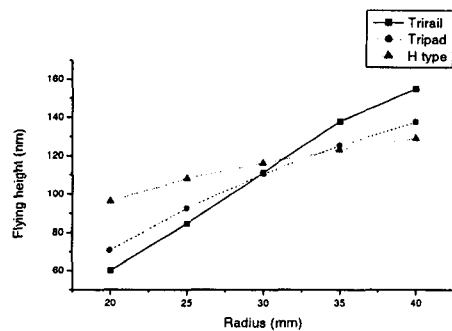


Fig. 4 Flying height vs. disk velocity. Slider is moved from disk ID to OD at 0 skew.

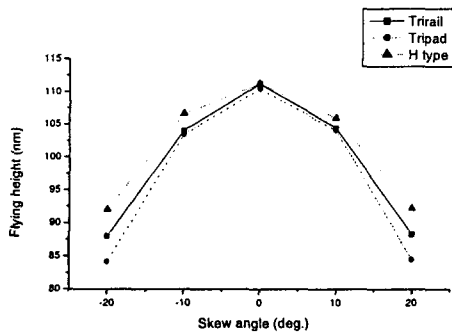


Fig. 5 Flying height vs. skew angle. Skew angle is varied while slider remains at 30 mm.

Figure 5 는 일정한 속도(반지름 30mm)에 서의 skew 각의 효과를 보여주고 있다. 속도에 대한 결과와는 다르게 H 형태, Tri-Rail 그리고 Tri-Pad 순으로 작은 민감도를 보이고 있다.

3 가지 형태의 슬라이더에서 속도에 대한 민감도의 차이에 비해 skew 각에 대한 민감도의 차이가 더 작음을 알 수 있다. 이것은 수치해석이 수행된 조건에서는 속도에 대한 민감도가 지배적임을 알 수 있으며, Tri-Pad 의 경우 skew 각에 대한 민감도가 크므로 디스크 외경에서 높이의 증가량을 보상하여 Tri-Rail 형식의 슬라이더에 비해 더욱 일정한 부상높이를 얻을 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

### 3.3.2 부상 높이

앞에서 전술한 바와 같이 하드디스크 형태의 회전구동기를 사용하는 경우에는 슬라이더가 내경에서 외경으로 위치가 변화함에 따라 속도와 skew 각의 변화에 따른 효과가 복합되어 부상높이를 결정하게 된다.

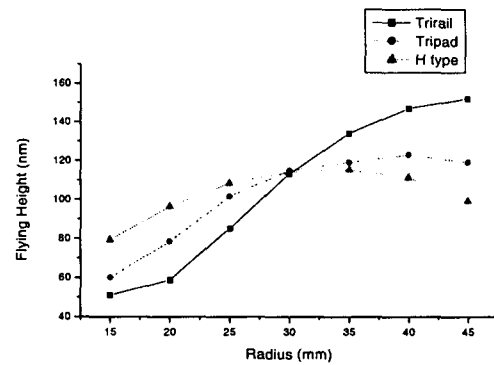


Fig. 6 Flying height profile

Figure 6 은 각각의 슬라이더의 내경에서 의 경으로 위치변화에 대한 부상높이의 변화를 보이고 있으며, H 형태, Tri-Pad 그리고 Tri-Rail 순으로 부상높이의 변화가 작은 것을 볼 수 있다.

### 3.3.3 이륙 성능

현재의 하드디스크의 경우 CSS(Contact-Start-Stop)방식을 채용한 경우가 많다. CSS 방식은 슬라이더와 디스크가 접촉한 상태에서 디스크가 회전함에 따라 슬라이더가 부상력을 점진적으로 얻어서 정상상태에 이르는 방식이다. 따라서 슬라이더의 이륙성능은 저장기기의 수명 및 신뢰도에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 근접장 광 기록 형태의 저장기기의 경우, 광학헤드가 슬라이더의 공기베어링 부에 삽입될 것으로 예상되므로 더욱 더 중요한 성능의 하나로 생각될 수 있다.

Figure 7 은 슬라이더가 디스크의 내경에 있을 때 디스크 회전 속도에 따른 슬라이더의 부상높이 변화량을 보여주고 있다.

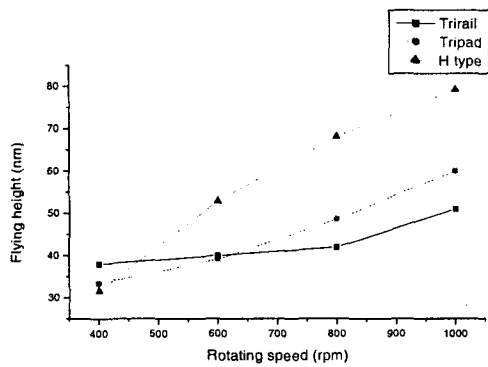


Fig. 7 Take-off performance

H 형태, Tri-Pad 그리고 Tri-Rail 순으로 그래프의 기울기가 높은 것을 볼 수 있다. 저속에서 속도증가에 따른 부상량 증가가 클수록 이륙성능이 좋은 것을 생각할 때, H 형태의 공기베어링이 디자인이 가장 좋은 결과를 보이고 있다.

### 3.3.4 Crown 민감도

Figure 7 은 각 슬라이더의 Crown 높이 변화에 따른 기준 부상높이에 대한 변화량을 보이고 있다. 전체적인 변화량의 폭은 Tri-Pad 가 가장 작으며, Tri-Rail 은 가장 좋지 않은 결과를 보여주고 있다. H 형태의 공기베어링의 경우 Tri-Pad 에 비해 변화량은 크지만 내경과 외경에서 큰 차이를 보이지 않는 특성을 보여주고 있다. 이러한 결과는 각 슬라이더의 속도에 대한 민감도의 차이 때문이다. 이러한 결과는 슬라이더의 제작 시의 오차에 따른 부상높이의 오차를 예상하는데 사용될 수 있으며, 슬라이더 공기베어링의 선택에도 자료로 활용될 수 있다.

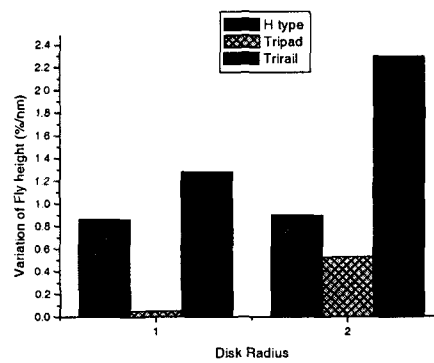


Fig. 7 Crown sensitivity at ID(1) and OD(2)

### 3.3.5 슬라이더 성능향상 방안

슬라이더 공기베어링의 디자인에 변경을 가하지 않고 슬라이더의 성능을 향상시킬 수 있는 방안을 고려하여 보았다. 이상의 결과를 종합하였을 때, 가장 좋은 결과를 보인 H 형태의 슬라이더에 대해 서스펜션과 슬라이더와의 각을 변화시킴으로써 슬라이더의 부상높이에 적절한 보상을 할 수 있도록 하였다. Figure 8 은 해석의 결과를 보여주고 있으며 부상특성의 향상을 살펴볼 수 있다.

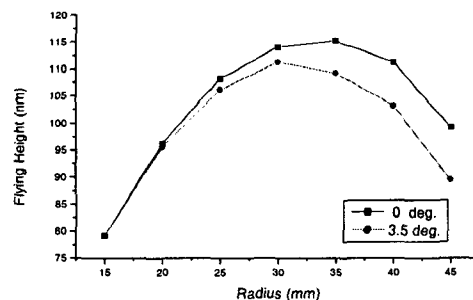


Fig. 8 Effect of slider/suspension skew angle modification(3.5 deg.)

## 4. 결론

본 연구에서는 공기베어링을 해석하기 위해 임의의 형상에 대한 적용이 용이한 유한 요소법을 이용하였다. 현재 많은 연구가 진행되고 있는 근접장 광 기록 방식의 저장 장치에서 사용될 수 있을 것으로 생각되는 3 개의 슬라이더 공기베어링 형상을 선정하여 각각의 부상특성에 대한 수치해석을 실시하였으며, H 형태의 공기베어링에서 가장 좋은 결과를 얻을 수 있었고 이는 슬라이더 중심부에서 발생하는 음압에 의한 특성이라고 생각된다. 하지만 실제 제작상의 오차에 따른 슬라이더의 특성에서는 일정한 부상량의 변화를 예상할 수 있었지만 그 크기에 있어서는 다른 슬라이더에 비해 커다란 이점을 찾을 수 없었다. 슬라이더의 부상특성을 개선하기 위해 서스펜션과 슬라이더에 변경을 가하였고, 이를 통해 슬라이더 공기베어링의 변경없이 성능을 향상시킬 수 있었다.

## 후기

본 연구는 한국과학재단지정 정보저장기 연구센터의 지원(과제번호 : 2000-G-0202)을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Peng, J.-P. and Hardie, C. E., 1995, "A Finite Element Scheme for Determining the Shaped Rail Slider Flying Characteristics With Experimental Confirmation," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 117, pp. 358-364
2. Kogure, K., Fukui, S., Mitsuya, Y., and Kaneko, R., 1983, "Design of Negative Pressure Slider for Magnetic Recording Disks," *ASME Journal of Lubrication Technology*, Vol. 105, pp. 496-502
3. 강태식, 정태건, 최동훈, 1999, "섭동법을 이용한 30% U형 공기유회 슬라이더 베어링의 동특성 해석," 한국윤활학회 춘계학술대회, pp. 291-296
4. Choi, D. H. and Yoon, S. H., 1994, "Static Analysis of Flying Characteristics of the Head Slider by Using an Optimization Technique," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 116, pp. 90-94
5. Crone, R. M., John, M. S., Bhushan, B., and Karis, T. E., 1991, "Modeling the Flying Characteristics of a Rough Magnetic Head Over a Rough Rigid-Disk Surface," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 113, pp. 739-749
6. Fukui, S. and Kaneko, R., 1990, "A Database for Interpolation of Poiseuille Flow Rates for High Knudsen Number Lubrication Problems," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 112, pp. 78-83
7. Nguyen, S. H., 1991, "Solution of Reynolds



Equation With Slip-Flow Effects by a Hierarchical Finite Element Formulation," STLE Tribology Transactions, pp. 565-568

8. Terris, B. D., Mamin, H. J., and Rugar, D., 1996, "Near-field Optical Data Storage," Appl. Phys. Lett. 68(2), pp. 141-143

9. 김도완, 2000, "하드디스크 슬라이더의 동적 수치 해석," 연세대학교 석사학위 논문

10. Kim, D. W., Seo, S. W., and Rhim, Y. C., 2000, "Dynamic Characteristics for NFR slider," The Satellite International Symposium on Optical Memory 2000

- $\Lambda$  : 베어링 수 ( $6\mu U l / p_a h_0^2$ )
- D : 역숫센수
- C : 베어링 경계
- q : 무차원 유량
- $\mu$  : 점성계수
- U : 디스크 선속도
- l : 슬라이더 길이
- $p_a$  : 대기압
- $h_0$  : 최소윤활간극
- Q :  $Q_{con}$  과  $Q_p$  의 비
- $Q_{con}$  : 연속체 포아제 유동항계수
- $Q_p$  : 포아제 유동항 계수
- R : 기체 상수
- $T_0$  : 특성 온도 (293 K)
- Y : 목적함수
- $r_{1,2,3}$  : 힘과 모멘트 잔류치
- $R_{1,2,3}$  : 무차원화된 잔류치
- $\alpha$  : 피치각
- $\beta$  : 롤각

## 기호 설명

- P : 무차원 압력 ( $p/p_a$ )
- H : 무차원 간극 ( $h/h_0$ )