

헤드/디스크 인터페이스 내에서 오염 입자의 거동에 관한 수치적 연구

박희성* · 황정호** · 좌성훈***
(1999년 9월 13일 접수)

Numerical Investigation of Contamination Particle's Trajectory in a Head/slider Disk Interface

Hee-Sung Park, Jung-Ho Hwang and Sung-Hoon Choa

Key Words: Flying Height(부상 높이), Head/Disk Interface(HDI), Particle(입자), Saffman Force (사프만 힘), Electrostatic Force(정전기력), Trajectory(궤적)

Abstract

Microcontamination caused by particle deposition on the head disk interface threatens the reliability of hard disk drive. Design of slider rail to control contamination becomes an important issue in magnetic recording. In this paper, how particles adhere to the slider and the disk is examined. To investigate accumulation mechanism of the particles, trajectory of the particles in a slider/disk interface is simulated with considering various forces including drag force, gravitational force, Saffman lift force, and electrostatic force. It is found that the charged particles can easily adhere to the slider or disk surface, if an electric field exists between the slider and the disk. It is supposed that the vertical motion of the particles should be related with not only Saffman force but also electrostatic force.

기호설명

C_d :항력 계수
 d :슬라이더 두께
 d_p :입자의 지름
 e :단위전하량
 \vec{E} :전기장 세기
 \vec{F} :힘
 h :에어베어링 두께
 L :슬라이더의 길이
 m_p :입자의 질량
 n :입자의 전하수

p :압력
 p_a :대기의 압력
 q :입자의 전하량
 u :유동의 속도
 U_D :디스크의 x 방향 선속도
 v_p :입자의 속도

그리스문자

ϵ :유전율
 ϵ_0 :진공의 유전율
 λ :평균자유분자거리
 μ :점성계수
 ν :동점성계수
 ρ :밀도
 σ :표면전하밀도

* 연세대학교 대학원 기계공학과
 ** 회원, 연세대학교 기계공학과
 E-mail : hwangjh@bubble.yonsei.ac.kr
 TEL : (02)361-2821 FAX : (02)312-2159
 *** 회원, 삼성전자 스토리지 사업부

하첨자
 ave :평균

p : 입자
 x : x 방향
 z : z 방향

1. 서론

하드디스크 드라이브(HDD)는 크기가 서브 마이크로 미터인 미세 입자에 의해 오작동이 발생할 수 있다. 미세 입자는 Fig. 1에 나타낸 슬라이더/디스크 인터페이스에 유입되어 슬라이더나 디스크 표면을 오염시키고, HDD내에 기록된 데이터의 손상을 초래한다.⁽¹⁾ 또한 미세 입자는 슬라이더 후미에 응집되거나⁽²⁾ 슬라이더 밑면에 부착되어⁽³⁾ 슬라이더의 크래쉬를 유발하여 HDD를 물리적으로 손상시킬 수 있다. 이러한 입자가 HDD내에 미치는 영향에 관한 연구로 최근에 Zhang 등⁽⁴⁾에 의해 수행되었는데, 미세 입자가 슬라이더나 디스크 표면을 손상시킬 수 있음을 밝혔다.

특히 미세 입자가 디스크 표면에 존재하여 부상하고 있는 헤드와 충돌할 경우 순간적으로 슬라이더에 열을 발생시키게 된다. 이러한 현상을 TA(thermal asperity)라 하며, 발생된 열이 슬라이더의 후미에 부착된 MR(magneto-resistive) 센서에 전달되면 열에 의해 신호가 변형되어 데이터의 손실이 발생하는데 HDD의 안정성을 저해하는 가장 큰 요인으로 드라이브 제조회사의 관심사 중의 하나이다.⁽⁵⁻⁷⁾

HDD의 안정된 구동을 저해하는 미세 입자의 발생 메커니즘에 관하여 박희성 등⁽⁸⁾은 구동 및 정지 시에 미세 입자가 발생함을 밝혔고, 최근에 상용중인 대용량의 HDD 내에서도 입자가 발생함을 밝혔다.⁽⁹⁾ Bhushan 등⁽¹⁰⁾은 디스크를 200 rpm과 1200 rpm에서 회전시켜 슬라이더가 디스크 표면을 부상하지 않고 접촉하는 "drag" 상태에서 작동

할 때 입자가 발생함을 측정하였다.

따라서 HDD 내부에는 여러 가지 요인에 의해 입자가 존재할 수 있으므로 입자의 영향을 가장 많이 받는 슬라이더/디스크 인터페이스를 적절히 설계하여 입자의 영향을 최소화할 수 있는 연구가 필요하다. 이러한 관점에서 진행된 연구로는 Zhang 등^(11,12)에 의해 수행되었는데, Zhang 등⁽¹¹⁾은 먼저 Fig. 1에 표시된 슬라이더의 오목한 영역(recessed region)을 통과하는 입자의 궤적을 구하였으며 입자의 운동에 영향을 미치는 인자로 중력, 유동의 항력 및 Saffman 힘⁽¹³⁾만을 고려하였다. 또한 Zhang 등⁽¹²⁾은 이러한 결과를 슬라이더 밑면의 모양에 따라 입자가 부착하는 정도를 구하였다.

한편 HDD에 MR헤드를 사용하면서 슬라이더/디스크 인터페이스 내에서 정전방전(ESD, Electrostatic Discharge)에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있는데 이는 자기저항 센서가 정전방전에 매우 약하기 때문이다. Tian 등⁽¹⁴⁾은 ESD로 인해 발생하는 열로 MR 센서와 보호코팅이 파괴되는 현상을 연구하였다. Wallash⁽¹⁵⁾는 ESD가 MR헤드에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였고, Wallash⁽¹⁶⁾는 표준화된 ESD 실험장치를 구성하여 MR헤드의 구조적인 영향을 분석하였다. 이러한 연구는 ESD의 관점에서 수행되었는데, 슬라이더가 디스크 표면에서 부상했을 때 발생하는 대전 현상에 관해서는 Feng 등⁽¹⁷⁾의 연구에서 슬라이더의 부상높이에 따라 슬라이더와 디스크 사이에 1 V ~ 2 V의 전압차이가 나타남을 실험적으로 규명하였다. 또한 이전에 Brezoczky 등⁽¹⁸⁾은 슬라이더/디스크 인터페이스를 축전기 모델을 사용하여 수치적으로 슬라이더와 디스크 사이에 형성될 수 있는 전압차이를 예측하고 실험결과와 비교하였다.

실제 HDD내에서 존재하는 입자가 락 전하수에 관한 문헌은 아직 발표되지 않았으나 Pui 등⁽¹⁹⁾이 슬라이더/디스크 사이의 마멸입자에 관하여 측정 한 바 있다. Pui 등⁽¹⁹⁾은 지름이 8 인치인 디스크를 289 rpm으로 회전시켜, 슬라이더를 "drag" 상태로 작동시켰을 때 발생하는 마멸입자를 정전 집진기와 APS(Aerodynamic Particle Sizer)를 이용하여 입자의 크기 d_p 와 전하수 n 은 $n = 17d_p\sqrt{\rho_p}$ (d_p 와 ρ_p 의 단위는 각각 μm , g/cm^3)의 관계가 있음을 실험적으로 규명하였다.

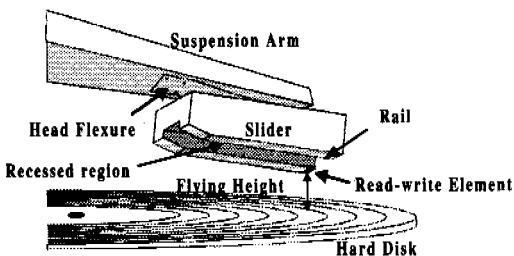


Fig. 1 Schematic of a slider disk interface

Table 1 Coefficients B(s)⁽²¹⁾

s	10 ⁻⁵	10 ⁻²	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
B(s)	0.149	0.149	0.150	0.150	0.151	0.153	0.154	0.155	0.156	0.154	0.152	0.148

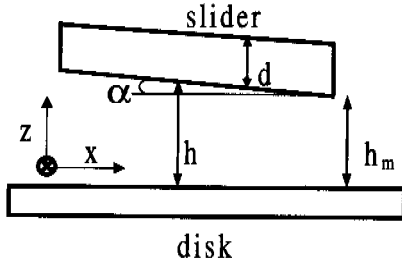


Fig. 2 Geometry and coordinate system of HDI

또한 슬라이더와 디스크 사이에 전기장이 형성되면 마멸입자가 정전기력에 의해 운동이 지배받을 수 있음을 제시하였다.

이러한 일련의 연구 결과에서 보여지듯이 슬라이더/디스크 인터페이스에서 발생하는 입자가 전하를 띄고 있다면, 슬라이더와 디스크 사이에서는 전압차이가 존재하므로 전압차이에 의해 발생하는 전기력이 슬라이더/디스크 인터페이스를 통과하는 입자의 궤적에도 영향을 미칠 수 있다.

따라서 본 논문에서는 Zhang 등^(11,12)이 고려하지 않은 전기력을 추가하여 입자의 궤적을 해석하였다. 그 결과, 슬라이더의 오목한 영역에서 입자의 부착을 유발하는 주된 힘으로 Zhang 등⁽¹¹⁾이 제시한 Saffman 힘뿐만 아니라 정전기력도 중요한 요인임을 밝혔다.

2. 이론

2.1 모델링

HDD에 사용되는 슬라이더의 밑면은 HDI의 마찰특성과 공기베어링의 동적 특성을 향상시키기 위해 다양한 모양의 레일이 가공되어 있다. Fig. 1에 표시된 레일과 슬라이더의 오목한 부분과는 약 3 μ m의 높이차이가 있으며, 이 영역에서 입자의 부착을 해석하였다.

이러한 영역에서 입자의 운동을 해석하고자 슬라이더를 Fig. 2와 같이 레일이 없는 슬라이더로 가정하였다. 슬라이더와 디스크 사이의 간격에 비

해 슬라이더의 폭의 넓이(1 mm~2 mm)를 무한히 길다고 가정할 수 있으므로, 슬라이더의 길이방향을 x , 디스크 표면부터의 높이를 z 로 하여 2차원 유동 및 입자의 운동을 해석하였다. 이 곳에는 크기가 0.1 μ m~0.5 μ m인 단 한 개의 구형 입자가 유입된다고 가정하였다.

시스템의 특성 길이를 슬라이더와 디스크 사이의 간격 h 로 선정하고 공기의 평균 자유분자거리 λ 와 비교하여 크누센 수 ($Kn_h = \lambda/h$)를 계산하면 0.1~1 사이이므로 미끄럼을 고려하여 입자의 운동을 해석하였다. 이때 공기의 λ 는 25 $^{\circ}$ C, 1atm에서 0.065 μ m이다.⁽²⁰⁾ 또한, 공기의 평균자유분자거리와 입자 크기의 비율인 $Kn_p (= \lambda/d_p)$ 수가 0.01 이상이므로 공기분자와 입자와의 상호작용을 고려하였다.

2.2 입자의 운동 방정식

입자의 운동방정식은 힘의 평형식으로 표현된다.

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = \vec{F}_d + \vec{F}_g + \vec{F}_s + \vec{F}_e \quad (1)$$

여기서 m_p , v_p 는 각각 입자의 질량과 속도이다. 입자의 운동을 결정하는 힘들은 여러 가지가 있겠으나 Zhang 등⁽¹¹⁾은 항력, 중력, Saffman 힘을 고려하였고, 본 논문에서는 정전기력을 추가하여 해석함으로써 이 힘이 입자의 운동에 미치는 영향을 구하였다.

항력

유체의 유동에 의한 항력은 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{F}_d = \frac{\pi}{8} C_d \rho d_p^2 |\vec{u} - \vec{v}_p| (\vec{u} - \vec{v}_p) \quad (2)$$

여기서 C_d 는 항력계수, ρ 는 공기의 밀도, 그리고

u 는 유동속도이다. C_d 는 다음과 같다.⁽²¹⁾

$$C_d = C_{dfm} \left[1 - \frac{B(S)}{Kn_p} \right] \quad (3)$$

$$C_{dfm} = \frac{2}{S^3} \left[\frac{4S^4 + 4S^2 - 1}{4s} \operatorname{erf}(S) \right. \\ \left. + \frac{e^{-\frac{S^2}{2}}}{\sqrt{\pi}} \left(S^2 + \frac{1}{2} \right) \right] + \frac{2}{3} \frac{\sqrt{\pi}}{S} \sqrt{\frac{T_p}{T_\infty}}$$

S 는 무차원 속도비로 $S = |\vec{u} - \vec{v}_p| / \sqrt{2RT_\infty}$ 이다. 입자의 온도 T_p 와 공기의 온도 T_∞ 는 같다고 가정하였고, $B(S)$ 는 Table 1에 나타내었다.

중력

중력은 입자와 공기의 밀도차에 의해 생기는 힘으로 z 방향으로 작용한다.

$$\vec{F}_g = -\frac{1}{6} \pi d_p^3 (\rho_p - \rho) \vec{g}_z \quad (4)$$

Saffman 힘

Saffman⁽¹³⁾의 연구에 의하면 선형전단유동에서 구형 입자에 작용하는 힘은 유동의 방향에 대하여 직각방향으로 작용한다. 이 힘에 의해서 입자가 위쪽 또는 아래쪽으로 움직이게 되는데 식 (5)에서 나타나듯이 입자가 유동의 속도보다 크면 입자는 위쪽으로 이동하게 되고 유동속도보다 작으면 입자는 아래로 움직이게 된다.

$$\vec{F}_s = 1.615 \mu \Delta U k^{1/2} \frac{d_p^2}{\nu^{1/2}} \vec{z} \quad (5)$$

$$\Delta U = (v_{px} - u_x), \quad k = \left| \frac{\partial u_x}{\partial z} \right|$$

μ 와 ν 는 각각 동점성계수와 점성계수이고 하첨자는 방향을 나타낸다. Saffman⁽¹³⁾에 의하면 식 (5)가 타당성을 갖는 영역은 $Re_{\Delta U} = \Delta U d_p / \nu$, $Re_k = k d_p^2 / \nu$ 가 1보다 작을 때이다. 본 연구에서 입자의 크기가 0.1 μm ~0.5 μm 라고 가정하였고, ΔU 는 수 m/s 정도이므로, $Re_{\Delta U}$, Re_k 는 모두 1보다 훨씬 작아서 Saffman 힘을 식 (5)와 같

이 정의할 수 있다.

정전기력

HDI에서 입자가 전하 q 를 띠고 있고 슬라이더와 디스크 사이에 전기장 \vec{E} 가 형성되어 있다면 입자가 받는 정전기력은 다음과 같다.⁽²⁰⁾

$$\vec{F}_e = q\vec{E} + \frac{\pi}{4} \left(\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p - 2} \right) \epsilon_0 d_p^3 \nabla (\vec{E} \cdot \vec{E}) \quad (6) \\ + \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 z^2} \vec{z}$$

여기서 $q = ne$ ($e = 1.6 \times 10^{-19}$ C), \vec{z} 는 z 방향 단위벡터, ϵ_0 , ϵ_p 는 각각 진공과 입자의 유전율이다.

슬라이더 표면 전하의 ESD가 없다고 가정하면 마찰대전(triboelectrification)⁽²²⁾에 의해 슬라이더와 디스크 표면 사이에 형성된 전기장의 세기 \vec{E} 는 식 (7)과 같이 슬라이더의 두께 d 와 슬라이더 및 공기의 유전율(ϵ , ϵ_0), 그리고 슬라이더 표면전하밀도 σ 에 의해 결정된다.⁽¹⁸⁾

$$\vec{E} = -\frac{\sigma}{\epsilon_0} \left(\frac{d}{d + \epsilon z} \right)^2 \vec{z} \quad (7)$$

입자의 궤적을 구하기 위해 식 (2)~(7)을 힘의 평형식 (1)에 대입하고 x , z 에 대해 전개하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$x: \frac{dv_{px}}{dt} = u_{rel} \rho d_p^2 \frac{\pi}{8} \frac{C_d}{m_p} (u_x - v_{px}) \quad (8)$$

z :

$$\frac{dv_{pz}}{dt} = u_{rel} \rho d_p^2 \frac{\pi}{8} \frac{C_d}{m_p} (u_z - v_{pz}) - \left(1 - \frac{\rho}{\rho_p} \right) g \\ + 1.615 \mu \Delta U k^{1/2} \frac{d_p^2}{\nu^{1/2} m_p} + \frac{qE}{m_p} \quad (9) \\ + \frac{\pi \epsilon_0 d_p^3}{4m_p} \left(\frac{\epsilon_p - 1}{\epsilon_p - 2} \right) 2E \frac{\partial E}{\partial z} - \frac{q^2}{16\pi \epsilon_0 z^2 m_p}$$

여기서, $u_{rel} = \sqrt{(u_x - v_{px})^2 + (u_z - v_{pz})^2}$

$$m_p = \frac{\pi}{6} \rho_p d_p^3 \text{이다.}$$

식 (8), (9)를 해석하여 HDI내에서 입자의 궤적을 구하였다.

2.3 HDI의 유동해석

HDI내의 유동은 Fig. 2와 같이 2차원 유동이고, 압력은 z 방향의 길이가 매우 작으므로 변화량을 무시하면 x만의 함수가 되고, HDI의 영역이 매우 좁기 때문에 운동량 보존식(Navier-Stokes' equation)에서 유체의 자중에 의한 영향을 무시하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\frac{dp}{dx} = \mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \quad (10)$$

여기서 p는 압력을 나타낸다. 식 (10)은 유동의 z 방향에 대한 2계 미분방정식이다. 압력구배를 상수로 가정하여 적분하면 해석적인 해를 얻을 수 있다. 필요한 경계조건은 시스템이 slip 영역이므로 1st order slip을 고려하면 다음과 같다.⁽¹¹⁾

$$u_x(z=0) \cong U_D + \lambda \frac{\partial u_x}{\partial z} \Big|_{z=0} \quad (11)$$

$$u_x(z=h) \cong -\lambda \frac{\partial u_x}{\partial z} \Big|_{z=h} \quad (12)$$

여기서 U_D 는 슬라이더가 있는 위치에서 디스크의 선속도이다. 식 (10)을 경계조건식 (11), (12)을 적용하면 유동의 해석적 해는 다음과 같다.

$$\frac{\partial u_x}{\partial z} = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} z - \frac{h}{2\mu} \frac{dp}{dx} - \frac{U_D}{2\lambda + h} \quad (13)$$

$$u_x = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} z^2 - \left(\frac{h}{2\mu} \frac{dp}{dx} + \frac{U_D}{2\lambda + h} \right) z + U_D - \frac{\lambda h}{2\mu} - \frac{U_D \lambda}{2\lambda + h} \quad (14)$$

식 (13), (14)로부터 유동을 구하기 위해 필요한 압력 분포는 slip을 고려한 일반적인 레이놀즈 식을 해석하여 구할 수 있다.⁽²³⁾

$$\nabla \cdot (h^3 p \nabla p) + 6\lambda p_a \nabla \cdot (h^2 \nabla p) = 6\mu V \cdot \nabla p h + 12\mu \frac{\partial p h}{\partial t} \quad (15)$$

3. 수치계산

입자의 운동 방정식에 유동에 관련된 항들이 포함되어 있으므로 먼저 유동을 해석하였다. 식 (13), (14)를 해석하기 위해서는 압력 분포에 관한 정보가 필요하므로 식 (15)의 레이놀즈 식을 먼저 해석하였다.

본 연구에서는 White 등⁽²³⁾의 Factored implicit scheme 방법을 사용하여 압력분포를 구하였다. 압력분포를 구하면 계산영역의 격자점마다 압력의 정보가 저장된다. 유동을 구하기 위해서는 x에 관한 압력구배를 먼저 알아야 하므로, x 방향으로 각각의 격자의 중심에 새로운 격자를 만들었다. 그리고 격자점의 압력을 격자의 크기로 나누어서 새로운 격자마다 압력구배값을 지정하였다. 유동은 해석적인 해가 존재하므로 지정된 압력구배의 값으로 구해진다. 따라서 압력구배 및 유동속도에 관한 정보는 새로운 격자값에 지정된다.

입자의 운동방정식 (8), (9)는 시간에 대한 2계 상미분 방정식이므로 Fourth order Rounge-Kutta 방법으로 해석하였다. 각각의 격자점을 지날 때마다 입자가 받는 힘을 운동방정식에 대입하여 입자의 궤적을 구하였다.

4. 결과 및 고찰

본 논문에서는 입자의 크기가 변할 때 Zhang 등⁽¹¹⁾이 제시한 Saffman 힘과 정전기력을 비교하여 입자의 운동에 미치는 영향을 고찰하였다.

4.1 Saffman 힘의 영향

HDI의 최소높이(h_m): 3.05 μm , 피치 각도(a): 150 μrad , 디스크의 선속도(U_D): 13 m/s, 입자의 크기는 0.1 μm ~0.5 μm 사이에서 적절히 변화시켜서 결과를 얻었다. 계산에 필요한 입자의 초기 위치는 x 방향 '0', z 방향은 임의로 가정하였으며 입자의 크기가 작아서 유동을 잘 따르기 때문에 입자의 초기 속도를 0.8 U_D 로 계산하였다.

Fig. 3은 입자의 크기가 100 nm, 250 nm, 300 nm, 330 nm 일 때의 입자의 궤적을 그래프로 표시한 것이다. 입자의 크기가 330 nm 일 때 슬라이더 표면으로 입자가 이동하는데, Zhang 등⁽¹¹⁾의

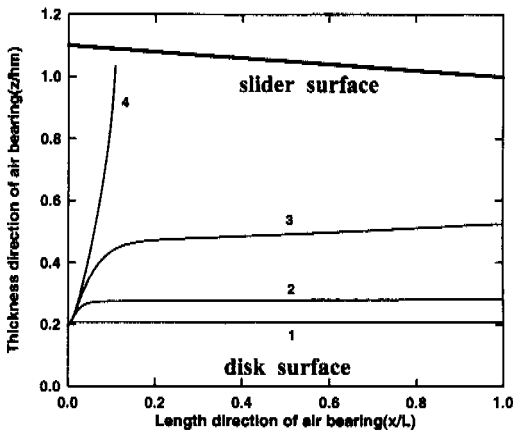


Fig. 3 Comparison of the particle trajectory in the HDI : 1-100 nm, 2-250 nm 3-300nm, 4-330 nm

결과와 일치한다.

입자의 x 방향위치가 $x/L=0.1$ 정도일 때까지는 입자의 초기속도와 유동과의 속도차이가 크므로 Saffman 힘이 커지게 되어 입자가 위쪽으로 약간 상승하는 경향을 나타낸다. 입자가 HDI의 출구 쪽으로 이동함에 따라 300 nm 이하의 입자의 속도는 유동의 속도와 거의 같아지므로 입자에 작용하는 항력이 작게 작용하여 Saffman 힘도 역시 작아진다. 따라서 입자가 더 이상 상승하지 못한다. 330 nm 이상의 입자는 HDI의 입구에서의 입자와 유동과의 차이가 크고 입자가 위로 상승할수록 유동과 입자의 상대속도가 커지므로 Saffman 힘에 의해 계속 상승하여 슬라이더 밀면에 부착하게 된다. 즉, 입자와 유동의 상대속도에 의해 Saffman 힘의 크기가 결정되고, 입자와 유동의 상대속도는 입자가 유동에 의해 받는 항력에 의해 결정되므로 입자의 수직운동은 항력과도 관계가 있다.

또한 입자의 초기 속도가 유동의 속도보다 작은 경우에는 식 (5)에 나타난 바와 같이 Saffman 힘이 디스크 쪽으로 작용하므로 입자는 디스크 쪽으로 이동한다.⁽¹¹⁾

4.2 정전기력의 효과

입자가 발생된 후 HDD 내부의 유동에 의해 HDI내로 유입되었을 때 입자의 궤적을 해석하고자 하였으므로, 입자가 발생초기에 지닌 전하량이 변화했을 가능성이 있다. 따라서 HDI 유입시

의 정전기력의 효과를 해석할 때에는 입자가 단위전하량(+1, -1 가)을 지닌다고 가정하였다.

Brezoczky 등⁽¹⁸⁾이 구한 슬라이더의 표면에 형성된 전하 밀도($\sigma=4 \times 10^{-4} C/m^2$)와 입자가 편전하량을 -1 또는 +1을 적용하고, 입자의 초기속도 $0.8 U_D$, 초기위치 $0.5 h_m$, 밀도 4000 kg/m^3 일 때의 입자의 궤적을 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4(a)는 입자가 지닌 전하량이 -1, 크기가 각각 100 nm, 200 nm, 400 nm 일 때 입자의 궤적을 나타낸 것이다. 전기장의 영향이 없다면 Fig. 3의 결과에 나타났듯이 100 nm, 200 nm 크기의 입자에 작용하는 Saffman 힘이 작기 때문에 입자는 수직방향으로의 이동 없이 슬라이더/디스크 사이를 빠져나가지만, 전기장이 존재한다면 전기장의 세기만큼 힘이 입자에 작용하므로 슬라이더 밀면으로 이동한다. 400 nm 크기의 입자는 Saffman 힘이 매우 크게 작용하여 정전기력의 영향을 고려하지 않아도 슬라이더의 앞쪽으로 이동하지만, 전기장이 존재하면 Saffman 힘과 정전기력이 합력으로 작용하여 더 가파른 기울기로 입자가 슬라이더 쪽으로 상승한다.

Fig. 4(b)는 입자가 지닌 전하량이 +1, 크기가 100 nm, 200 nm, 400 nm, 410 nm, 450 nm, 500 nm 일 때의 입자의 궤적을 나타내었다. 입자가 지닌 전하량이 '+'이므로 '+'로 대전된 슬라이더 표면에 대하여 척력이 작용한다. 따라서 입자는 전기장의 세기만큼 디스크 쪽으로 이동하게 된다. 입자의 크기가 100 nm, 200 nm 일 때에는 Fig. 4(a)에서와 마찬가지로 반대 극성의 표면, 즉 디스크 표면으로 이동하게 된다. 입자의 크기가 400 nm 이면 입자의 궤적은 슬라이더 앞부분에서 약간 슬라이더 쪽으로 이동하다가 다시 디스크 쪽으로 움직인다. 이러한 이유는 초기에 HDI로 유입시에 Saffman 힘이 정전기력보다 커서 순간적으로 슬라이더 쪽으로 이동하지만, 이후 공기의 항력에 의해 입자와 유동의 속도차이(ΔU)가 작아지면서 Saffman 힘또한 작아지므로 정전기력에 의한 영향을 받게 되어 디스크 쪽으로 이동하게 된다. 입자의 크기가 410 nm 이상이면 Saffman 힘이 정전기력보다 커서 입자는 디스크 표면으로 이동하지 않고, 슬라이더 쪽으로 이동하게 된다. 입자의 이동에 미치는 힘이 정전기력보다 Saffman 힘이 더 커서 입자가 슬라이더 쪽으로 이동하는 것이다. 즉 입자의 크기가 410 nm

이상이면 정전기력보다 Saffman 힘의 더 크다.

지금까지 HDI내에서 입자가 슬라이더 및 디스크 표면으로 이동하는 메커니즘에 관하여 해석하였다. 그 결과 Zhang 등⁽¹¹⁾이 제시한 Saffman 힘 이외에 정전기력도 입자의 이동에 중요한 요소임을 알았다. 식 (17)에서 보여지듯이 정전기력은 전하량과 전기장세기의 곱으로, 입자의 크기에 상관없이 일정한 힘을 가하므로 입자의 크기가 작을수록 효과가 더 크며, Fig. 4에 나타나듯이 HDI로 유입된 입자는 Saffman 힘과 정전기력에 의해 슬라이더의 앞쪽이나 디스크 표면으로 이동된다. Brezoczky 등⁽¹⁸⁾의 실험결과에서 나타난 전기장이 슬라이더/디스크 사이에 존재한다면, 슬라이더 밀면

의 레일과 레일사이의 오목한 부분에는 큰 입자뿐만 아니라 작은 크기의 입자도 부착이 일어날 수 있으며, 정전기력에 의한 작은 입자의 부착 위치 역시, Saffman 힘만을 고려할 때와 마찬가지로 공기 베어링 유입부분의 앞쪽에서 발생한다.

따라서 전기장이 슬라이더와 디스크 사이에 존재하는 시간동안은 슬라이더의 테이퍼부분과, 레일의 오목한 부분의 경계 안쪽에서 입자의 부착이 발생할 것으로 예상되므로 슬라이더 재질 및 표면 레일의 설계시에 슬라이더 밀면에 대전된 전하를 빠른 시간 내에 방전시킬 수 있는 방안에 관한 고려가 필요하다고 생각된다.

5. 결론

HDI내에서 입자의 운동을 해석하기 위해 먼저 White 등⁽²³⁾의 Factored implicit scheme을 사용하여 레이놀즈 식의 해를 구하였으며, 입자의 운동 방정식은 Fourth Order Runge-Kutta 방법을 이용하였다. 입자의 운동에 영향을 미치는 힘으로 Zhang 등⁽¹¹⁾이 고려한 항력, 중력, Saffman 힘 외에 정전기력을 고려하였다. 정전기력은 Brezoczky 등⁽¹⁸⁾의 연구결과를 이용하였다.

그 결과, 정전기력이 슬라이더/디스크 표면의 오염에 매우 중요한 요인이며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

입자의 크기가 410 nm 보다 작으면 정전기력이 입자의 수직운동에 지배적인 요인이 되며 410 nm 이상이면 Saffman 힘이 입자의 수직운동에 지배적인 요인이 된다. 또한 정전기력에 의해 슬라이더에 밀면과 디스크 표면에 입자의 부착이 발생할 수 있으므로 슬라이더의 설계시 정전기에 관한 검토가 필요하다고 생각된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단지정 정보저장기연구센터(과제번호: 1999G0101)와 삼성전자의 지원을 받아 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다. 그리고 압력분포해석 프로그램을 작성하는데 도움을 주신 건국대학교 정태건 교수님께도 감사드립니다.

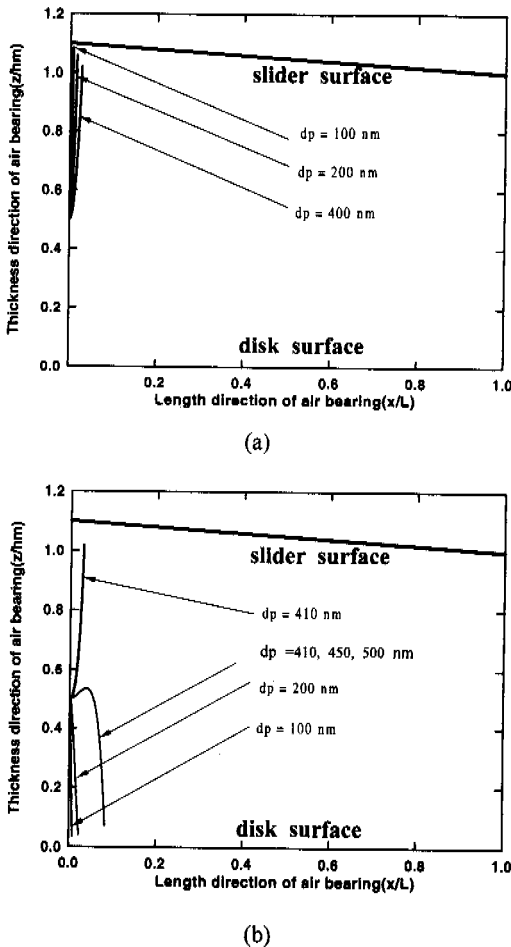


Fig. 4 Effect of electrostatic force with positive and negative charge of particle, (a) -1 charge, (b) +1 charge

참고문헌

- (1) Koka, R. and Kumaran, A. R., 1991, "Visualization and Analysis of Particulate Buildup on the Leading Edge Tapers of Sliders," *Adv. Info. Storage Syst.*, Vol. 2, pp. 161~171.
- (2) Hiller, B. and Singh, G. P., 1994, "Mechanism for Formation of Whiskers on a Flying Magnetic Recording Slider," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 30, No. 4, pp. 1499~1503.
- (3) Zhu, L. and Fu, Y., 1997, "Debris Growth and Migration in the Slider-Disk Interface," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 33, No. 5, pp. 3169~3171.
- (4) Zhang, L., Koka, R., Yuen, Y., and Lam, E., 1999, "Particle Induced Damage on Heads and Discs Due to Fine Particles of Different Materials," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 35, No. 2, pp. 927~932.
- (5) Leo, H. and Sinclair, G. B., 1998, "Flash Temperature Distributions at the Head-Disk Interface in Hard Disk Drives," *J. Tribology*, Vol. 120, pp. 536~541.
- (6) Bhushan, B., 1992, "Magnetic Head-Media Interface Temperatures - Part 3 : Application to Rigid Disks," *J. Tribology*, Vol. 114, pp. 420~430.
- (7) Stupp, S. E., Baldwinson, M. A., and McEwen, P., 1999, "Thermal Asperity Trends," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 35, No. 2, pp. 752~757.
- (8) 박희성, 유용철, 배귀남, 황정호, 1999, "구동 및 정지시 하드디스크 드라이브 내 입자 발생 특성에 관한 실험적 연구," *대한기계학회논문집 B권*, 23권 6호, pp. 744~752.
- (9) 박희성, 황정호, 좌성훈, 1999, "하드디스크 드라이브의 구동조건에 따른 입자 발생 경향에 관한 실험적 연구," *심사중*
- (10) Bhushan, B. and Chandra, S., 1999, "Detection and Sizing of Particulate Contamination in Rigid Disk Drives: Instruments and Sampling Techniques," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 35, No. 2, pp. 956~962.
- (11) Zhang, S. and Bogy, D. B., 1997, "Effect of Lift on the Motion of Particles in the Recessed Regions of a Slider," *Physics of Fluid*, Vol. 9, No. 5, pp. 1265~1272.
- (12) Zhang, S. and Bogy, D. B., 1997, "Motion of Particles in a Slider/Disk Interface Including Lift Force and Wall Effect," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 33, No. 5, pp. 3166~3168.
- (13) Saffman, P. G., 1965, "The Lift on a Small Sphere in a Slow Shear Flow," *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 22, pp. 385~400.
- (14) Tian, H. and Lee, J. J. K., 1995, "Electrostatic Discharge Damage of MR Heads," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 31, No. 6, pp. 2624~2626.
- (15) Wallash, A. J., 1996, "Electrostatic Modeling and ESD Damage of Magnetoresistive Sensors," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 32, No. 1, pp. 49~53.
- (16) Wallash, A. J., 1997, "Standardized ESD Test for Magnetoresistive Recording Heads," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 33, No. 5, pp. 2911~2913.
- (17) Feng, Z., Shih, C., Gubbi, V., and Poon, F., 1999, "A Study of Tribo-charge/Emission at the Head-Disk Interface," *J. Applied Physics*, Vol. 85, No. 8, pp. 5615~5617.
- (18) Brezoczky, B. and Seki, H., 1990, "Tribo-attraction: Friction under Negative Load," *Langmuir*, pp. 1141~1145.
- (19) Pui, D. Y. H., Tsai, C. J., and Liu, B. Y. H., 1988, "Charge Level on Aerosol Particles: Measurement of Particle Charge and Size Distribution in Disk Drive," *Proceedings: 34th Annual Technical Meeting, Institute of Environ. Sci., King of Prussia, Pennsylvania, May 2-6*.
- (20) Reist, P. C., 1993, *Aerosol Science and Technology*, 2nd ed. McGraw-Hill.
- (21) Liu, V. C., Pang, S. C., and Jew, H., 1965, "Sphere Drag in Flows of Almost-Free Molecules," *Physics of Fluids*, Vol. 8, No. 5, pp. 788~796.
- (22) Harper, W. R., 1967, *Contact and Frictional Electrification*, Clarendon Press.
- (23) White, J. W. and Nigam, A., 1980, "A Factored Implicit Scheme for the Numerical Solution of the Reynolds Equation at Very Low Spacing," *Trans. of the ASME*, Vol. 102, pp. 80~85.
- (24) Hinds, W. C., 1982, *Aerosol Technology*, Wiley.