

HDD 내 디스크 표면 특성이 미세입자의 부착 및 이탈에 미치는 영향

박희성 · 좌성훈* · 황정호**

연세대학교 대학원 기계공학과

*삼성전자 중앙연구소

**연세대학교 기계공학과

Effect of Characteristics of Disk Surface on Particle Adhesion and Removal in a Hard Disk Drive

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

Graduate School Yonsei Univ.

*Samsung Electronics

**School of Electrical and Mechanical Eng. Yonsei Univ.

Abstract – The use of magnetoresistive (MR) head requires much tighter control of particle contamination in a drive since loose particles on the disk surface will generate thermal asperities (TA). In this study, a spin-off test was performed to investigate the adhesion and removal capability of a particle to disk surface. Numerical simulation was also performed to investigate dominant factor of particle detachment and to support experimental results. It was shown that particles are detached from the disk surface by the moment derived from the centrifugal force and the drag force and that the centrifugal force and capillary force are the dominant force, which determines spin-off of a particle on the disk surface. Removal of particles smaller than several micrometers, which are the main source of TA generation, is extremely difficult since the adhesion forces exceed the centrifugal force. Lubricant types and manufacturing process also influence the particle removal. Lower bonding ratio and lower viscosity of the lubricant will help to increase the removal rate of the particles from the disk surface.

Key words – hard disk drive, thermal asperity, spin-off test, particle, adhesion, and removal force.

1. 서 론

하드 디스크 드라이브(HDD)에서 미세입자에 의한 오염은 드라이브의 신뢰성 및 수명에 큰 영향을 미친다. 미세 입자는 Fig. 1에 나타난 슬라이더/디스크 인터페이스에 유입되어 슬라이더나 디스크 표면을 오염시키고, HDD내에 기록된 데이터의 손상을 초래한다. 또한 미세 입자는 슬라이더 후미나[1] 밑면에 부착되어[2] 슬라이더의 크래쉬를 유발하여 HDD를 물리적으로 손상시킬 수 있다. 특히 최근 자기저항 헤드(magneto-resistive head 또는 MR head)의 사용이

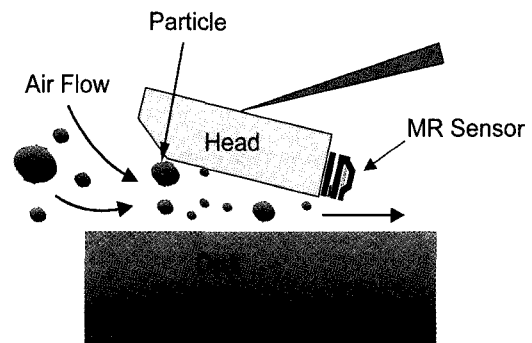


Fig. 1. Schematic diagram of a slider disk interface.

보편화되면서 입자 오염이 심각한 문제로 부각되고 있다. 디스크 표면에 존재하는 미세 입자가 부상하고 있는 헤드와 충돌할 경우 순간적으로 슬라이더에 열을 발생시키게 된다. 이때 발생된 열이 슬라이더의 후미에 부착된 MR 센서 또는 헤드에 전달되면 열에 의해 신호가 변형되어 데이터의 손실이 발생하는데, 이와 같은 현상을 TA(thermal asperity) 현상이라고 부르며, HDD의 안정성을 저해하는 가장 큰 요인으로 드라이브 제조회사의 관심사 중의 하나이다[3,4].

TA는 일반적으로 두 가지 원인에 의하여 발생된다. 첫째는 디스크에 존재하는 결함, 즉 스크래치(scratch) 및 오염물질 등에 의하여 발생된다. 이 경우에는 드라이브 제조 시에 burn-in 과정을 통하여 결함 부분에 데이터가 기록되지 않도록 결함 부분을 mapping 처리한다. 따라서 이 경우는 별로 문제가 되지 않는다. 둘째는 드라이브를 생산하여 소비자에게 전달된 후 발생하는 추가적인 TA이다. 이 경우는 주로 제조 과정 등에서 드라이브 내부로 들어간 미세 입자 및 드라이브 부품에 이미 부착되었던 미세 입자 또는 오염물질 등이 드라이브 동작 중에 디스크 표면으로 떨어지면서 부착되고 드라이브 동작 시에 헤드 슬라이더와 충돌하면서 새로운 TA를 발생시키는 것이다. TA를 감소 또는 제거하기 위해서는 부품 및 제조 공정의 청정도(cleanliness)가 중요하다. 드라이브의 씸(seal) 및 필터링 시스템을 개선하는 것도 하나의 방법이다. 그러나 청정도 유지에는 한계가 있으므로 드라이브 내에 미세입자가 전혀 존재하지 않도록 하는 것은 불가능하다. 따라서 어느 정도의 미세입자가 디스크 표면에 부착되게 된다.

그 동안의 연구결과에 의하면 드라이브 동작 중 TA가 발생된 디스크의 표면을 SEM(scanning electron microscopy) 및 EDX(electron diffraction X-ray) 또는 TOF-SIMS(time-of-flight secondary ion mass spectroscopy)로 정밀 성분 분석한 결과, TA를 유발시키는 입자들은 주로 평균 지름이 1~2 μm 크기의 Al_2O_3 및 실리콘 산화물(SiO_2)이었다. Al_2O_3 는 주로 슬라이더의 재료로 사용되며 슬라이더가 디스크와 충돌 시 슬라이더에 부착되어 있던 Al_2O_3 잔류물들이 이탈되어 디스크 표면에 부착된다. 또한 Al_2O_3 입자는 디스크를 표면 가공하는 연마재 또는 슬러리(slurry)로도 사용되며, 디스크 제작 공정에서 세척과정이 완전치 않을 경우 디스크 표면에 부착되기도 한다. 실리콘 산화물은 일반 대기 분위기에 항상 존재하는

입자로서 드라이브 공정 및 드라이브 부품에 접촉되었다가 드라이브 동작 중에 이탈되어 디스크 표면에 부착된 것으로 생각된다. 주로 1~2 μm 크기의 입자가 TA를 유발하는 이유는 헤드 슬라이더와 디스크 사이의 간격에 기인한다. 헤드와 디스크의 간격은 헤드 선단부(leading edge)에서 약 3.7 μm 이며 헤드 후단부(trailing edge)에서는 0.04 μm (40 nm)이다. 따라서 이 간격보다 더 큰 입자가 헤드와 충돌하였을 경우에는 입자들이 헤드와 디스크 사이로 들어갈 수 없어 튕겨져 나오며, 이 간격보다 작은 입자들은 디스크 표면에 박히지 않고 그냥 통과하게 된다. 한편 3~4 μm 인 입자들은 헤드 후단부에서 약 1 μm 정도 크기의 입자로 부수어져서 디스크에 박히기도 한다. 따라서 TA를 발생시키는 입자들의 크기는 대략 지름이 1~4 μm 크기의 입자들이다. 과거 수년간 TA의 감소를 위한 연구는 주로 TA가 발생하는 순간 발생된 신호의 왜곡을 전기적인 방법으로 보정하는 신호 처리 방법[5]과 드라이브 내의 입자 유체 유동을 해석하여 슬라이더/디스크 인터페이스를 적절히 설계함으로써 입자의 영향을 최소화할 수 있는 연구 등[6]이 있다. 또한 디스크와 미세 입자간의 충돌 메커니즘을 연구하여 TA의 발생에 영향을 미치는 주요 인자들에 관한 이론적인 접근이 시도되기도 하였다[7].

TA를 감소시키기 위한 또 다른 한 방법은 미세입자가 디스크에 부착되는 부착력(adhesion force)을 감소시키는 것이다. 특히 Li 등[8]은 디스크에 부착된 미세입자가 디스크 회전 시 이탈되는 현상을 연구함으로써 TA의 감소에 영향을 주는 여러 인자에 관하여 평가하였다. 본 연구에서는 Li 등에 의하여 고안된 이탈실험(spin-off test)을 이용하여 TA 감소에 영향을 미치는 디스크의 인자들을 실험적으로 연구하였으며, 이를 디스크 설계의 기초자료로 이용하고자 하였다. 또한 디스크 표면에서 미세입자를 이탈시키기 위한 이탈조건을 이론적으로 해석하였으며 이론적으로 해석된 결과와 이탈실험 결과가 일치하는지를 검토하였다. 이를 통하여 디스크 표면에서 입자가 이탈하는 조건을 예측할 수 있는 이론적인 식을 도출하였다.

2. 이론적 고찰

HDD에서 사용되는 디스크 표면과 미세입자에 작용하는 주요 부착력은 반 데르 발스 힘(Fvan)과 모

세관력(F_{cap})이다[9]. 한편 디스크가 회전하고 있을 경우에는 주로 원심력(F_{cen})과 공기항력(F_d)이 입자의 이탈력으로 작용하게 된다. 본 장에서는 각 힘들에 대한 표현 식 및 부착력에 미치는 상호 영향에 관해서 설명하였다.

2-1. 입자의 부착력

입자에 작용하는 부착력(F_{adh})은 입자와 디스크의 접촉면에 수직으로 작용하므로 반 데르 발스 힘과 모세관력의 합력으로 계산하였다.

반 데르 발스 힘

반 데르 발스 힘은 분자 극성의 상호작용으로부터 발생하는 힘으로, 본 논문에서는 입자를 구성하는 분자와 디스크 표면을 구성하는 분자의 인력에 의한 힘을 의미한다. 반 데르 발스 힘은 입자의 크기 및 표면에너지와 표면 재질등에 따라 그 표현식이 다르게 나타나는데 일반적으로 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$F_{van} = 2\pi\sigma R \tag{1}$$

여기서 σ 는 입자의 표면에너지이며, R 은 입자의 반지름이다.

모세관력

디스크 표면의 윤활막이나 외부 환경의 습도등에 의해서 입자와 디스크 표면사이에는 모세관력이 작용한다. 모세관력은 Fig. 2와 같이 디스크 윤활막에

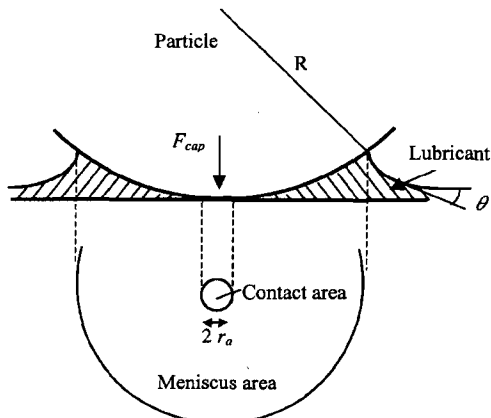


Fig. 2. Meniscus between a spherical particle and a flat disk surface.

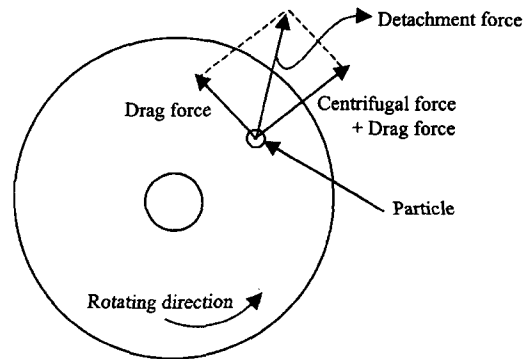


Fig. 3. Directions of particle detachment forces in the plane of a spinning disk surface.

의한 표면장력과 접촉각에 의하여 결정되며 다음과 같은 식으로 표현된다[10].

$$F_{cap} = 4\pi R \gamma \cos \theta \tag{2}$$

여기서 γ 는 표면장력, θ 는 접촉각을 나타낸다.

2-2. 입자의 이탈력

입자에 작용하는 외력의 방향을 Fig. 3에 나타내었다. 외력은 디스크의 반경방향과 원주방향의 두 가지 성분으로 구분할 수 있는데, 항력은 두 방향에 작용하며 원심력은 반경방향으로만 작용한다. 따라서 두 방향으로 작용하는 힘의 벡터 합력을 계산하여 입자에 작용하는 이탈력(F_{det})을 구하였다.

항력

디스크가 회전할 때 발생하는 유동이 입자에 작용하는 힘이다. 본 논문에서 계산하고자 하는 입자의 크기가 $10 \mu\text{m}$ 이하이므로, 입자는 디스크 표면의 경계층 내에 존재한다. 따라서 입자 주위의 유동이 선형전단유동이라고 가정할 수 있으므로 다음과 같이 항력이 표현된다[11].

$$F_d = \frac{6\pi\mu\dot{\gamma}R^2f}{C_c} \tag{3}$$

$$f = 1.7, \dot{\gamma} = \frac{du}{dy}, C_c = 1 + \frac{\lambda}{R} \left[1.252 + 0.399 \exp\left(-\frac{1.1R}{\lambda}\right) \right]$$

μ 는 공기의 점성계수, λ 는 평균 자유분자거리이며 C_c 는 공기 분자와 입자간의 미끄러짐을 보정하는 계수이다[12]. $\frac{du}{dy}$ 는 경계층 내에서의 속도변화로 본 논문에서는 무한원판이 회전한다고 가정하고 경계층

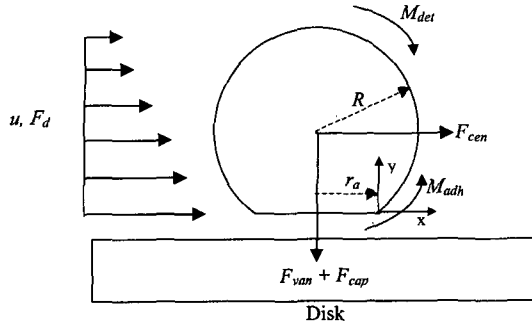


Fig. 4. Geometry features of a spherical particle attached to a smooth surface system.

유동을 해석하였다[13]. u , y 는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 x 방향의 속도와 좌표계이다.

원심력

디스크가 회전하므로 표면 위에 부착된 입자에 반경방향으로 작용하는 힘이 발생한다. 원심력은 다음과 같이 표현되며, ρ 는 입자의 밀도, ω 는 디스크의 회전각속도이고 R_D 는 입자의 디스크 반경방향 위치이다.

$$F_{cen} = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho \omega^2 R_D \quad (4)$$

여기에서 주목하여야 될 부분은 부착력인 반 데르 발스 힘과 모세관력은 입자의 지름의 일승(first power)에 비례하지만 원심력은 입자 지름의 삼승(third power)에 비례한다. 따라서 입자의 크기가 감소하면 원심력이 감소하는 비율이 부착력의 감소 비율보다 큼으로 입자가 디스크 표면을 이탈할 가능성이 점점 낮아지는 것이다.

2-3. 입자의 이탈조건

입자가 표면을 이탈하기 위해서는 외부에서 입자에 작용하는 힘이 입자와 표면사이에 작용하는 접촉력보다 커야 한다. 입자가 표면을 이탈하는 조건은 미끄럼에 의한 것(sliding)과 모멘트에 의한 것(rolling)으로 나눌 수 있다. 미끄럼에 의한 것은 식(5)에 나타난 바와 같이 입자와 표면사이에 작용하는 부착력에 의해 발생하는 마찰력보다 외부에서 작용하는 힘이 클 때 입자가 표면을 미끄러지면서 이탈한다.

$$F_{det} \geq \mu_k F_{adh} \quad (5)$$

여기서 μ_k 는 정지마찰계수이다. 이와 반면 Ziskind 등[14]은 표면에서 입자가 이탈하는 조건으로 모멘트에 의한 것을 제시하였다. 입자의 부착력과 접촉반경에 의한 모멘트는 특정한 부착력과 접촉반경(r_a)에서 최대값을 가지게 되는데, 이러한 최대 모멘트와 외력에 의해 발생하는 모멘트 값을 비교하여 입자가 표면에서 이탈되는 지를 결정한다[14]. Fig. 4에는 모멘트 이론을 적용하였을 때, 입자를 부착시키려는 모멘트(M_{adh})와 이탈시키려는 모멘트(M_{det})의 방향 및 이러한 모멘트를 발생시키는 힘의 방향을 도시하였다. 입자가 이탈하는 조건은 항력과 원심력에 의해 발생하는 이탈모멘트가 반 데르 발스 힘과 모세관력에 의해 발생하는 부착모멘트보다 더 클 때이다.

입자의 부착모델 중에서 DMT 모델[15]을 적용하면, 입자와 디스크 사이에 작용하는 힘(P)과 접촉반경사이에는 다음과 같은 무차원 관계식이 존재한다[14].

$$r_a^* \equiv \frac{r_a}{(3\pi\sigma R^2/k)^{1/3}} = \left(-P^* + \frac{2}{3}\right)^{1/3} \quad (6)$$

여기서, $P^* \equiv -P/3\pi\sigma R$, k 는 입자와 디스크 표면의 복합탄성계수이다. 무차원힘, P^* 가 무차원 반경 r_a^* 만큼 작용하는 모멘트는, $M^* = P^* r_a^*$ 이다. 디스크 표면의 윤활제로 인한 표면장력은 입자의 접촉반경에는 영향을 주지 않고 부착력에만 영향을 준다고 가정하면 반 데르 발스 힘과 모세관력에 의한 무차원 모멘트는 식(7)과 같이 표현된다.

$$M_{adh}^* = (P^* + F_{cap}^*) r_a^* \quad (7)$$

여기서 $M_{adh,max}^* = 58.73 \frac{\sigma^{4/3} R^{5/3}}{k^{1/3}}$ 이다. 필요한 물성치를 대입하고 P^* , r_a^* 및 M_{adh}^* 의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 그래프를 보면 $P^* = -0.286$, $r_a^* = 0.576$ 에서 $M_{adh,max}^* = 2.95$ 인 최대값을 갖는다. 최대모멘트를 차원화 시키면 다음과 같이 표현된다.

$$M_{adh,max} = 58.73 \frac{\sigma^{4/3} R^{5/3}}{k^{1/3}} \quad (\text{단위: } N \cdot m) \quad (8)$$

3. 실험

본 실험에 사용된 디스크는 지름이 95 mm인 AlMg/NiP 재질을 사용하였다. 디스크는 diamond-like-carbon(DLC)로 코팅되었고 그 윗 표면은 perfluoropolyether(PFPE) 종류의 Zdol 윤활류가 도포되어 있

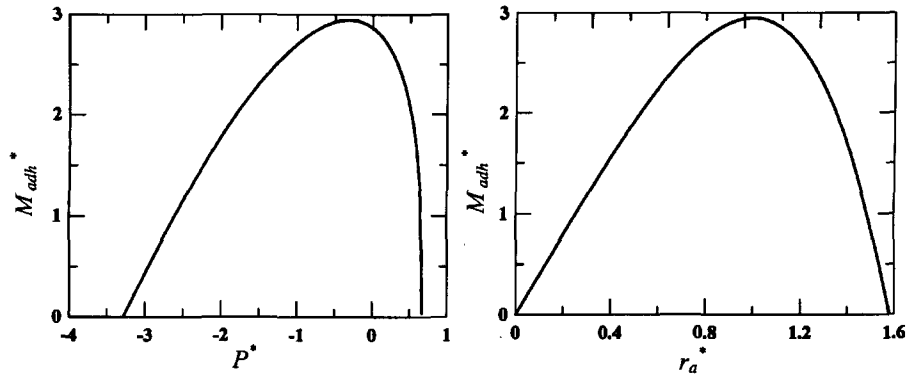


Fig. 5. Relationships of moment-force and moment-contact radius.

으며 윤활막의 평균 두께는 대략 15 \AA 이었다. 윤활막의 두께는 Fourier transform infra-red(FTIR) spectroscopy를 이용하여 측정하였다. 완성된 디스크의 표면조도는 Atomic Force Microscopy(AFM) 측정한 결과 평균 10 \AA 이었으며 한편, 디스크의 기록 밀도는 3 Gb/in^2 이었다.

디스크 표면의 특성이 입자의 부착력에 주는 영향을 관찰하기 위하여 여러 가지 윤활유 및 공정 조건을 변화 시켜 실험하였다. 특히 윤활유의 표면장력이 입자 이탈에 미치는 영향을 고찰하기 위한 하나의 방법으로 윤활유의 점착율(bonding ratio)을 변화 시켜 시험하였다. 점착율은 디스크 표면에 윤활유가 점착된 정도를 의미하는 것으로 보통 클로로포름(chloroform)과 같은 화학약품을 분사하여 윤활막을 세척한 후에 디스크 표면에 잔류하고 있는 윤활막의 두께를 측정하여 계산한다. 또한 윤활유의 점성이 이탈에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 윤활

유의 분자량을 변화 시켜 시험하였는데 이는 윤활유의 화학적 성질이 디스크 표면 특성에 미치는 영향을 최소화하기 위함이었다. 한편 Zdol 윤활유와 화학적 구조가 유사한 PFPE 계통의 윤활유로서, piperonyl end group을 갖는 AM 3001의 윤활유도 비교를 위하여 사용하여 보았다. 시험에 사용된 각 디스크의 주요 파라미터는 디스크 제작 업체로부터 입수하였으며 Table 1에 나타나 있다. 또한 현재 상용화된 4 종류의 디스크를 사용하여 디스크 제조 공정의 차이에 따른 이탈율의 실제 변화를 관찰하였으며, 사용된 각 디스크의 주요 파라미터가 Table 2에 나타나 있다.

본 실험에서는 TA를 발생시키는 실리콘 산화물과 유사한 분말형태의 SiO_2 유리입자를 사용하였는데 SiO_2 입자는 크기 분포가 매우 균일하여 실험에 적합하였다. 입자는 지름이 각각 $10 \mu\text{m}$ 와 $2.5 \mu\text{m}$ 인 두 종류가 사용되었다. 실험은 Li 등[8]이 행한 이탈실

Table 1. Design parameters of each tested disk

	Type	Lubricant type	Bonding ratio (%)	Lubricant thickness (\AA)
Group A (different bonding ratio sample)	A1	Zdol 2000	0	15
	A2	Zdol 2000	38	15
	A3	Zdol 2000	44.4	15
	A4	Zdol 2000	62	15
	Type	Lubricant type	Molecular Weight	Viscosity (cSt)
Group B (different molecular weight sample)	B1	Zdol 1900	1900	85
	B2	Zdol 4000	3800	110
	B3	Zdol 7500	≈ 7000	Unknown
	B4	AM 3001	3000	87

Table 2. Design parameters of four types of disks

Type	Lubricant	Lubricant thickness (Å)	Surface Roughness (Å)
C	Zdol 2500	18	5
D	AM 3000	14	5.5
E	Zdol 2000	14	11
F	Zdol 2000	18	13

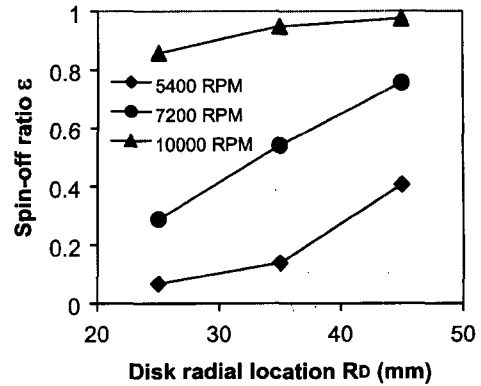
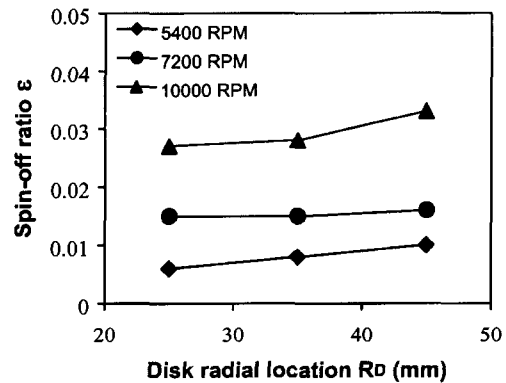
험 (spin-off test)과 동일한 방법으로 수행되었다. 우선 입자들을 디스크 표면의 일정 영역에 뿌린다. 그 다음 디스크를 초당 1500 rpm의 속도로 가속한 후, 디스크가 원하는 속도에 도달하면 5분 동안 디스크를 정속으로 구동한다. 이 5분 동안에 입자의 이탈이 발생되며 그 후에는 입자의 이동이 거의 없었다. 입자들이 디스크에 잘 부착되어 있는지를 측정하기 위하여 디스크를 회전하기 전과 후의 입자의 개수를 광학 현미경을 이용하여 측정하였다. 디스크가 회전하기 전 디스크 표면에 존재하는 입자의 개수를 N_0 라고 하고, 디스크가 회전한 후 디스크에 존재하는 입자의 개수를 N_r 라고 하면 이탈율(ϵ)은 다음과 같이 정의된다.

$$\epsilon = \frac{N_0 - N_r}{N_0} \quad (9)$$

따라서 높은 이탈율을 갖는 디스크는 보다 많은 입자들이 디스크 표면으로부터 이탈되고 헤드와 충돌될 수 있는 확률이 감소하므로 당연히 TA 감소에 유리하다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 6은 디스크 반경 방향의 위치 및 디스크의 회전 속도 변화에 따른 $10 \mu\text{m}$ 유리 입자의 이탈율을 나타내고 있다. 속도와 반경 방향 위치에 따라 이탈율이 변함을 알 수 있으며, 디스크 바깥쪽으로 갈수록 또는 디스크 회전 속도가 증가할수록 이탈율은 증가한다. 따라서 입자의 이탈율은 원심력에 많은 영향을 받는다고 생각된다. 한편 Fig. 7은 $2.5 \mu\text{m}$ 유리 입자의 이탈율은 나타내고 있는데 $10 \mu\text{m}$ 유리 입자에 비하여 이탈율이 현저히 감소함을 알 수 있으며 5400 rpm의 경우 이탈율이 0.01 미만으로 입자가 거의 이탈하지 않고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6. Spin-off ratio of $10 \mu\text{m}$ glass particle vs. disk radial location for various disk rotation speeds.Fig. 7. Spin-off ratio of $2.5 \mu\text{m}$ glass particle vs. disk radial location for various disk rotation speeds.

전술한 바와 같이 디스크 표면과 미세입자의 부착력은 디스크 윤활막의 특성, 즉 디스크 표면의 표면장력 또는 표면에너지에 좌우된다. 디스크의 표면장력 또는 표면에너지는 주로 윤활유의 종류 또는 윤활유 도포 공정에서 행해지는 가열(baking) 공정, 즉 디스크를 고온으로 가열하는 공정에서 가열 온도 및 시간을 조절함으로써 변경된다. 윤활유를 가열하게 되면 윤활유의 점착율이 변하는데 통상 점착율이 높을수록 표면장력은 크고 점착율이 작을수록 표면장력은 작다고 알려져 있다. Fig. 8은 각기 다른 점착율을 갖는 디스크의 입자의 이탈율을 나타내고 있다. 디스크에 윤활유가 없는 경우, 즉 점착율이 0%인 경우에는 이탈율이 매우 높음을 알 수 있다. 따라서 디스크 표면에 윤활막이 있을 경우 윤활유의 표면장력으로 인하여 입자의 부착력이 증가되는 것을 알 수 있다. 한편 예측한 바와 같이 점착율이 증

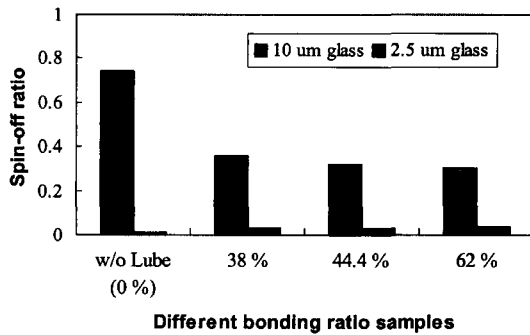


Fig. 8. Spin-off ratio for various bonding ratio disk sample for 10 μm and 2.5 μm glass particle.

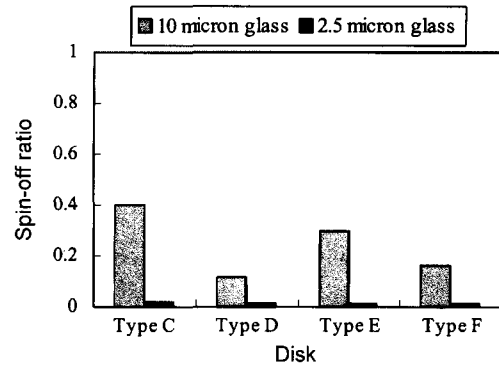


Fig. 10. Spin-off ratio for different disk samples for 10 μm and 2.5 μm glass particle.

가하면서 표면장력의 증가로 이탈율이 감소하고 있는데 그 감소의 정도는 그리 크지 않다. 따라서 모세관력이 이탈율에 미치는 영향은 그리 크지 않음을 알 수 있으며 2.5 μm glass 입자의 경우는 더욱 그러하다. 점착율이 38% 미만과 62% 보다 높은 경우는 실험하지 않았는데 통상적으로 디스크의 점착율은 30% 부터 60%의 사이이며, 이보다 낮거나 높을 경우는 stiction 및 마모 등 신뢰성에 나쁜 영향을 주기 때문이다.

Fig. 9는 점성이 다른 윤활유를 사용하였을 경우의 이탈율의 변화를 나타낸다. 본 실험에서는 윤활유의 화학적 특성의 변화가 부착력에 미치는 영향을 최소화 하기 위하여 기본 윤활유의 Zdol의 분자량 만을 변화시켜 점성을 다르게 하였다. 윤활유의 분자량이 커질 수록 이탈율이 감소함을 알 수 있다. 이는 분자량이 증가됨으로써 윤활유의 점성이 증가되는데 점

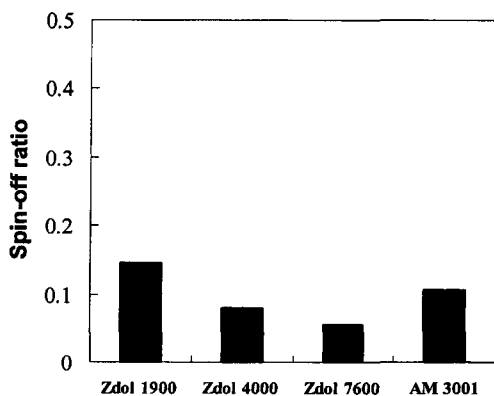


Fig. 9. Spin-off ratio for different molecular weight lubricants sample for 10 μm glass particle.

성의 증가로 입자와 디스크 표면과의 마찰력이 증가됨으로써 입자의 이탈이 감소되는 것으로 생각된다. 또한 각기 다른 윤활유를 사용함에 따른 이탈율의 변화는 점착율은 변화 시키는 것 보다는 크다. 한편 디스크 표면의 표면 조도 및 윤활유의 두께 등이 부착력 또는 이탈율에 영향을 미치는 인자로 작용할 수 있는데 Li 등[8]의 실험에 의하면 그 영향은 매우 미미하였다.

한편 Fig. 10은 각기 다른 제작 공정으로부터 생산된 4 종류의 디스크에서의 이탈율의 차이를 보여 주고 있다. 디스크 종류에 따라 이탈율이 크게 차이가 남을 알 수 있는데 디스크 제조 공정 및 재질, 윤활유의 종류 등에 따라 이탈율에 많은 변화를 줄 수 있음을 알 수 있다. 그러나 2.5 μm 유리입자를 사용한 경우에는 이탈율이 매우 적었으며 각 디스크 이탈율의 차이도 매우 미미하였다. 따라서 TA를 발생시키는 입자들의 크기가 1~4 μm 것을 감안하면 TA를 발생시키는 입자가 디스크 동작 중에 이탈될 수 있는 확률은 거의 없는 것으로 생각된다.

다음은 입자 이탈 모델을 설정하고 입자가 이탈되는 조건을 계산하여 그 결과가 실험 결과와 일치하는 지를 알아보았다. 입자가 표면에서 이탈되는 조건을 미끄러짐에 의한 것이라고 가정하여 식 (5)에 의해 계산된 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 실험 결과인 Fig. 6과 비교하기 위해 크기 10 μm, 표면에너지 0.01 N/m인 구형 유리 입자와, 표면장력 0.025 N/m인 윤활제를 계산에 이용하였다. 계산에 필요한 물성치를 대입하면, 입자의 부착력은 다음과 같다[16].

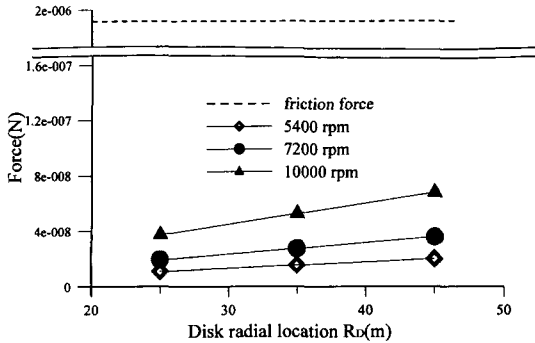


Fig. 11. Comparison of friction force and external forces with respect to the disk rotation speed.

$$F_{adh} = F_{van} + F_{cap} = 2\pi\sigma R + 4\pi R\gamma\cos\theta = 1.86 \times 10^{-6} \text{ N}$$

정지마찰계수 μ_k 를 0.2로 가정하면 입자의 부착력은 $3.72 \times 10^{-7} \text{ N}$ 으로, 입자가 디스크 표면에서 이탈하기 위해서는 외력이 이보다 커야 한다. Fig. 11을 보면 디스크의 회전속도가 5400 rpm, 7200 rpm, 10000 rpm일 때 입자에 작용하는 부착력이 이탈력보다 모든 경우에서 크므로, 입자는 이탈되지 않는다. 이는 Fig. 6에 나타나듯이 일정 비율이상의 입자가 이탈된 것과 일치하지 않는다. 이러한 결과로 볼 때 디스크가 회전할 때 발생하는 입자의 이탈은 미끄러짐에 의한 것은 아닌 것을 알 수 있다.

입자의 이탈 조건 중에서 모멘트에 의한 것을 계산하였다. 식 (8)에 앞의 계산과 동일한 물성치를 대입하여 구한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 입자의 부착력에 의해 작용하는 부착모멘트는 $4.13 \times 10^{-14} \text{ N}\cdot\text{m}$

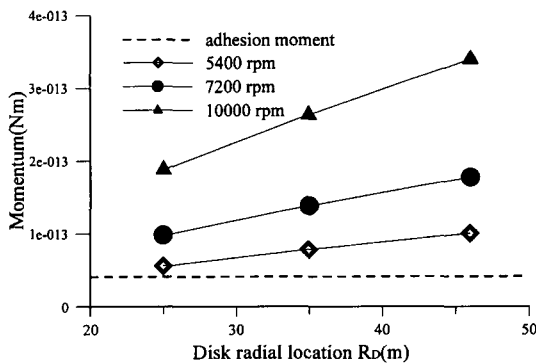


Fig. 12. Comparison of the detachment moments and the adhesion moments for 10 μm diameter glass particle.

m이다. 입자에 작용하는 이탈력(항력, 원심력)은 식 (3), (4)에 의해 구하였으므로, Fig. 3에 나타난 힘의 방향을 고려하여 모멘트를 구하였다. Fig. 12의 그래프를 보면 입자의 이탈 모멘트가 부착모멘트보다 모두 크다. 계산 결과에 의하면 모든 입자가 이탈되어야 하지만, 입자의 이탈률 측정 결과인 Fig. 6을 보면 부분적으로 입자가 이탈된 것을 알 수 있다. 입자의 이탈 모멘트와 부착 모멘트의 차수가 비슷한 영역에서는 실험 결과에서 입자의 이탈률이 0.5 이하이고, 이탈 모멘트의 차수가 높은 영역에서는 입자의 이탈률이 0.7 이상이다. 실험에서 입자의 부착모멘트가 계산 결과에 의한 부착모멘트보다 크기 때문에 이러한 결과가 나타난 것으로 생각되며, 그 이유는 입자와 디스크 사이에 윤활제 이외에 물이나 유기 물질 등이 응축되어 표면장력을 증가 시켰기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 영향과 실험 결과를 고려한다면 입자의 부착모멘트는 $10^{-13} \text{ N}\cdot\text{m}$ 의 차수인 것으로 예측된다.

Fig. 13에는 모멘트 모델을 적용하여, 입자의 크기가 $2.5 \mu\text{m}$ 인 경우에 대한 계산 결과로, 부착모멘트가 디스크 회전속도 및 입자의 위치에 관계없이 항상 크므로 입자의 이탈은 일어나지 않는 것을 나타낸다. 실험 결과인 Fig. 7에서 입자의 이탈률이 0.03 이하로 거의 대부분 입자가 이탈되지 않는 것과 비슷한 결과를 보인다. 이러한 결과로 보아 디스크가 회전 시에 입자가 이탈되는 메커니즘 중에서 모멘트 모델이 실험 결과와 유사한 경향을 보이며, 입자의 이탈 여부를 예측할 수 있는 모델이라고 생각된다.

입자의 이탈률이 입자의 위치 및 디스크의 회전속

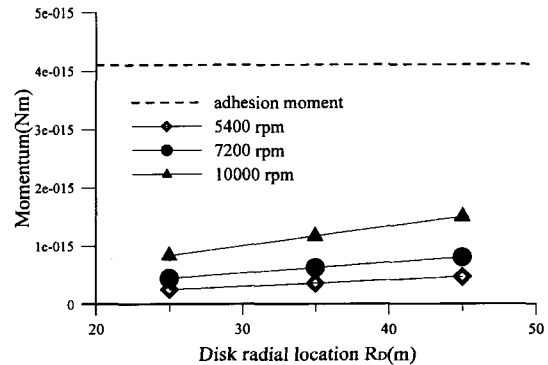


Fig. 13. Comparison of the detachment moments and the adhesion moment for 2.5 μm diameter glass particle.

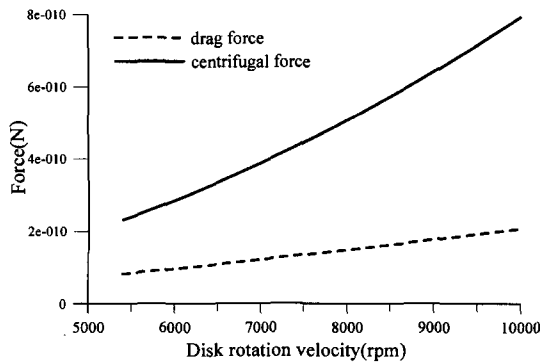


Fig. 14. Comparison of the centrifugal force and drag force (RD = 35 mm, 10 μm diameter particle).

도에 비례하는 것은 항력 및 원심력이 비례하여 증가하는 것과 관계가 있다. 디스크 반경방향으로 입자의 위치가 35 mm이고 입자 크기가 10 μm일 때 두 가지 외력을 Fig. 14에 표시하였는데, 디스크의 회전 속도가 증가함에 따라 원심력이 급격히 증가하고 항력은 완만히 증가하는 것을 볼 수 있다. 입자의 크기가 증가할수록 입자의 관성이 증가하므로 원심력은 더욱 가파르게 증가할 것이다. 따라서 10 μm 이상인 크기의 입자는 주로 원심력에 의해 이탈이 발생할 수 있다.

Fig. 15에는 입자의 크기가 0.1 μm에서 10 μm까지 변할 때 입자에 작용하는 반 데르 발스 힘, 모세관력, 항력, 원심력을 각각 나타내었다. 입자의 크기가 감소하면 이탈력으로 작용하는 항력과 원심력이 감소하는 비율이 부착력으로 작용하는 반데르 발스 힘과 모세관력보다 빨리 감소하므로 입자가 디스크 표면을 이탈할 가능성이 낮아진다. 이러한 계산결과로

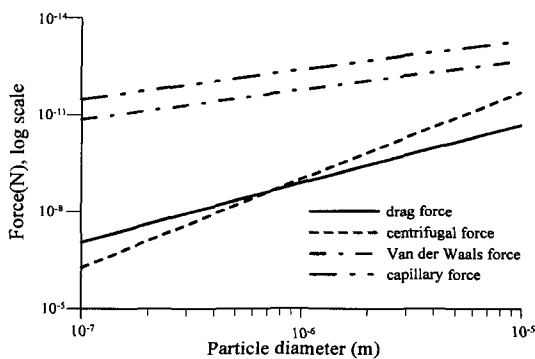


Fig. 15. Comparison of various forces acting on a particle with respect to particle diameter.

미루어 볼 때 10 μm의 입자는 원심력에 의해 이탈되었으며, 2.5 μm의 입자는 원심력이 작게 작용하므로 거의 이탈되지 않았을 것으로 생각된다.

5. 결 론

1. 회전하고 있는 디스크와 미세 입자사이에는 반 데르 발스 힘 및 모세관력에 의한 부착력과 원심력 및 항력에 의한 이탈력이 존재한다. 이중에서도 원심력이 입자의 이탈에 많은 영향을 미친다. 입자가 작아질 수록 부착력의 감소보다 원심력의 감소가 급격하여 TA 발생의 주요 원인인 1 μm 크기의 입자들은 거의 이탈하지 않는다.

2. 디스크 표면 상태에 따라 이탈율의 차이가 존재하며 윤활막의 점착율을 증가시키면 이탈율은 감소한다. 또한 윤활유의 분자량 또는 점성을 증가하면 이탈율은 감소한다. 디스크 재질 및 생산 공정의 차이에 따라 이탈율에 많은 차이가 있었다. 그러나 입자가 작을 경우 그 차이는 매우 미미하였다.

3. 입자가 디스크 표면을 이탈하는 메커니즘은 입자가 표면을 미끄러지면서 이탈하는 것보다 입자에 작용하는 모멘트에 의해 이탈할 가능성이 크다.

4. 입자 이탈력에 대한 수치계산 결과, 모멘트 모델에 의해 입자의 이탈조건을 구하였을 때 실험 결과와 일치하는 경향을 보이며, 입자를 이탈 시키는 주된 힘은 디스크의 회전으로 발생하는 원심력이다.

5. TA를 발생시키는 미세 입자의 크기가 1 μm인 것을 감안하면 현재의 시스템에서 TA를 감소시키는 방법에는 한계가 있다. 따라서 슬라이더의 air-bearing-surface(ABS) 설계 등과 같은 슬라이더/디스크 인터페이스의 적절한 설계가 필요하다. 한편 디스크의 회전 속도가 증가하면 원심력도 증가하므로 이탈율이 증가됨으로 TA 감소에는 도움이 될 것이다.

후 기

본 연구는 삼성전자와 한국과학기술연구원 정보저장기기연구센터 (과제번호: 1999G0101)의 지원을 받아 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

기호설명

F_{cap} 모세관력(N)

F_{cen}	원심력(N)
F_{van}	반 데르 발스 힘(N)
F_{adh}	부착력(N)
F_d	항력(N)
F_{det}	이탈력(N)
k	복합탄성계수
M	모멘트($N \cdot m$)
P	외력(N)
R	입자의 반경(m)
R_D	디스크 반경위치(m)
r_a	입자의 접촉반경(m)

그리스 문자

ε	이탈율
σ	표면에너지(N/m)
γ	표면장력(N/m)
λ	평균자유분자거리(m)
μ	점성계수($kg/(m \cdot s)$)
μ_k	정지마찰계수
θ	접촉각
ρ	밀도(kg/m^3)
ω	각속도(rad/s)

참고문헌

- Hiller, B. and Singh, G. P., "Mechanism for Formation of Whiskers on a Flying Magnetic Recording Slider," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 30, pp. 1499~1503, 1994.
- Zhu, L. and Fu, Y., "Debris Growth and Migration in the Slider-Disk Interface," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 33, pp. 3169~3171, 1997.
- Stupp, S. E., Baldwinson, M. A. and McEwen, P., "Thermal Asperity Trends," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 35, pp. 752~757, 1999.
- Sawatzky, E., "Thermal Asperites: MR Heads Face New Dangers," *Data Storage*, Feb., pp. 49~54, 1998.
- Bhushan, B., "Magnetic Head-Media Interface Temperatures-Part 3 : Application to Rigid Disks," *J. Tribology*, Vol. 114, pp. 420~430, 1992.
- Zhang, S. and Bogoy, D., "Motion of Particles in a Slider/Disk Interface Including Lift Force and Wall Effect," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 33, pp. 3166~3168, 1997.
- Li, Y., "The Formation and Reduction of New TA at a Head/Disk Interface," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 35, pp. 2478~2480, 1999.
- Li, Y. and Sharma, V., "The Spin-off of Particles on a Magnetic Disk," *J. Tribology STLE*, in press, 2000.
- Bhushan, B., 1995, *Handbook of Micro/Nano Tribology*, CRC Press.
- Gao, C., Tian, X. and Bhushan, B., "A Meniscus Model for Optimization of Texturing and Liquid Lubrication of Magnetic Thin-Film Rigid Disk," *Tribology Trans.*, Vol. 38, pp. 201~212, 1995.
- O'Neill, M. E., "A Sphere in Contact with a Plane Wall in a Slow Linear Shear Flow," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 23, pp. 1293~1298, 1968.
- Hinds, W. C., *Aerosol Technology*, John Wiley & Sons, 1982.
- Schlichting, *Boundary-Layer Theory*, McGraw-Hill, 1979
- Ziskind, G., Fichman, M. and Gutfinger, C., "Adhesion Moment Model for Estimating Particle Detachment from a Surface," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 28, No. 4, pp. 623~634, 1997.
- Tsai, C. J., *A Study of Particle Phenomena in Computer Disk Drives*, Ph. D. Thesis, Dept. Mech. Eng., Univ. Minnesota, 1990.
- Tsai, C. J., Pui, D. Y. H. and Liu, B. Y. H., "Elastic Flattening and Particle Adhesion," *Aerosol Sc. Tech.*, Vol. 15, pp. 239~255, 1991.