

〈 논문 〉

하드디스크 드라이브 동작 시 발생하는 입자 크기분포와 입자당 평균 대전량 측정

이재호* · 박동호* · 이대영* · 윤기영* · 황정호†

(2004년 10월 28일 접수, 2005년 5월 18일 심사완료)

Measurements of Particles Size Distribution and Average Particle Charge in Operating a Hard Disk Drive

Jaeho Lee, Dongho Park, Dae-Young Lee, Ki-Young Yoon and Jungho Hwang

Key Words : Charging(대전), Contamination(오염), HDD(하드디스크드라이브), APS(공기역학경 입자측정기), CPC(응축핵계수기)

Abstract

As the flying height of a slider in a hard disk drive decreases, the slider and disk are more likely to come in contact and generate contamination particles. Since particle contamination can cause serious problems including thermal asperity, it must be prevented to increase storage capacity. When particles are generated in a HDD, particles can be charged and have a few number of elementary charges. In this paper, the size distribution of particles and electrical current due to particle according to the disk rotational speed were measured. Also, the average number of elementary charges was calculated from experimental data. SEM images of particles were obtained by using a particle sampler designed in our laboratory.

1. 서론

하드디스크 드라이브(HDD)는 매년 저장용량과 저장밀도가 비약적으로 증가함에 따라 그 신뢰성에 대한 중요성이 부각되어 오는 추세이다. 하드디스크의 신뢰성에 결정적인 영향을 미치는 요소 중에 한가지가 바로 입자오염에 관한 사항이다. 하드디스크의 저장용량을 증가시키기 위해서는 헤드-디스크 인터페이스(HDI)에서의 슬라이더 부상높이(flying height) 감소가 필수적인데, 최근에는 그 높이가 수 nm로 감소하게 되어 슬라이더와 디스크 사이에서의 긁힘 또는 표면 변형 등의 현상이 일어나며 입자가 발생되고 있다. 또한 입자들은 하드디스크 드라이브의 조립과정에서도 내부로

유입이 가능하다.⁽¹⁾ 이러한 입자들은 공기의 흐름을 따라 움직이다가 디스크의 표면에 붙거나, 헤드에 충돌 또는 부착하게 되어, 순간적으로 슬라이더에 열을 발생시켜 자기저항헤드(magneto resistive)를 손상시키는 열점현상(thermal asperity)을 발생시킨다.⁽²⁾

하드디스크의 미세입자의 연구에 관련하여, Bhushan 등⁽³⁾은 슬라이더가 디스크 표면을 부상하지 않고 접촉하는 드래그(drag) 상태에서 작동할 때 발생하는 입자에 관해 연구하였고, 박희성 등⁽⁴⁾은 HDD 내의 입자발생의 원인이 구동 및 정지 후의 슬라이더와 디스크 접촉 시 발생하는 마멸에 관한 것으로 예측했다. 이러한 마멸입자에 대해 Lee 등⁽⁵⁾은 9500 rpm의 고속 회전 시 발생하는 입자의 크기가 주로 수십 nm 크기를 가진다는 연구 결과를 발표하였다.

한편 하드디스크 내의 슬라이더와 디스크의 마찰로 인해 내부에 전기장이 발생하는데, Brezoczky 등⁽⁶⁾은 헤드-디스크 인터페이스에서 마찰대전(tribocharging) 현상을 통하여 형성될 수 있는 전

* 연세대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2821 FAX : (02)312-2159

압의 차이를 연구하였고, Zhang 등^(7,8)은 정전기력을 추가한 입자 궤적 해석을 통해 입자가 지닌 정전기력이 헤드-디스크 표면 오염에 중요한 요인인 된다는 것을 연구하였다.

이와 같은 일련의 연구 결과로 판단할 때, 헤드-디스크의 마찰로 발생된 입자는 대전(charging)되어 일정 전하량을 지닌다는 것을 예측할 수 있다. 실제로 Pui 등⁽⁹⁾은 지름이 8" 인 하드디스크를 289 rpm 의 드래그(drag)상태로 회전시켰을 때 발생하는 마이크로미터 크기의 입자를 공기역학적 입자측정기(aerodynamic particle sizer, APS)로 측정하고 정전집진기를 통해 전하량에 대해 실험적으로 분석하였다. 하지만 최근에 사용되는 3.5" 고속회전 하드디스크에서 발생하는 입자 대전에 관한 문헌은 아직 발표되지 않고 있다.

하드디스크 드라이브 내에서 입자가 발생할 때의 대전 메커니즘은 다음과 같다. 우선 헤드-디스크 접촉 시 마찰에 의해 입자가 발생하므로 접촉대전(tribocharging) 현상이 발생 가능하고, 발생된 입자가 슬라이더와 디스크의 미세 간격, 또는 주위를 지나갈 때 전기장 대전(field charging)이 가능하다. 그 이유는 디스크의 구동/정지 시 헤드-디스크 사이에서 1V 정도의 마찰대전이 일어나는데,⁽¹⁰⁾ 슬라이더의 부상높이를 20 mm라고 가정할 때 전기장은 5×10^5 V/cm의 매우 강한 전기장을 형성하기 때문이다. 또한 하드디스크의 화학적 오염(chemical contamination)을 일으키는 요인으로, 외부로부터 침투하거나 밀폐 된 드라이브 내부에서 발생하는 이온들이 있는데,⁽¹¹⁾ 이들이 지닌 전기적 극성은 입자로 하여금 확산대전(diffusion charging)을 시킬 가능성도 있다.

이와 같이 다양한 메커니즘을 포함하는 입자의 대전방식 규명, 그리고 발생 입자의 정확한 분석에 관련된 연구는 매우 어려울 것으로 예상된다. 우선 실험이 실시되는 환경 조건은 고정정 상태이기 때문에 실험 조건 유지에 항상 주의해야 한다. 더욱이 하드디스크에서 발생하는 입자의 농도가 매우 낮고, 입자 발생/대전이 일어나는 시간이 매우 짧으므로, 측정장비의 성능이 따라가지 못하여 기술적 한계성이 뒤따르는 것이 사실이다. 따라서 현재까지 이루어진 연구 결과들을 살펴보면, 몇몇의 연구자들에 의해 드라이브 구동조건을 달리했을 시, 입자의 발생 농도 또는 경향성이 바뀐다는 결론을 얻었을 뿐이며, 정상 구동조건하의 하드디스크에서 발생하는 입자의 크기 분포 측정 또는 대전량 측정 등은 앞에서 언급한 연구의 어려움 때문에 현재까지 이루어지지 못하고 있다.

하지만 앞에서 언급한 실험상 한계점이 있음에

도 불구하고, 하드디스크에서 발생하는 입자오염에 관련된 문제는 반드시 해결되어야만 한다. 본 실험에서는 실험상의 한계를 보완해주고자 정상구동 조건이 아닌, 주어진 실험조건 하에서 실험을 실시하였다. 실험조건이란, 슬라이더에 임의의 부하를 가하고 디스크를 회전시켜서 입자 발생량을 증가해 주었음을 의미한다.

본 논문에서는 3.5" 드라이브 내 헤드-디스크에서 발생하는 마멸 입자에 대해 실험을 수행하였다. 실험 시 디스크의 회전속도를 변화시켜 주어, 발생하는 입자 크기의 농도와 크기 분포 변화를 측정했고, 그 때 발생하는 입자의 대전 특성에 대한 분석과 입자의 형상 관측 또한 실시하였다.

2. 실험

모든 실험은 class 100 의 클린부스에서 실시하여 외부로부터의 입자오염을 최소화 하였으며, 하드디스크는 회전속도 5400 rpm 용으로 제작된 CSS(contact start/stop) 방식의 2 디스크 4 헤드 타입을 사용하였다. 진행되는 모든 실험에서 연속되는 5 CSS(500 초)사이클을 측정하였는데, 1 사이클의 구성은 디스크 회전의 가속구간(20 초), 등속구간(20 초), 감속구간(20 초), 모터정지(40 초)의 5 구간으로 구성되어 있다. 또한 본 실험에서는 디스크의 회전속도 변화를 4 단계(2700 rpm, 5400 rpm, 7200 rpm, 9600 rpm)로 나누어 실험하였다.

Fig. 1 을 보면 하드디스크의 공기 주입부에 안지름 2 mm의 노즐 2 개를 설치하였는데, 2 층의 디스크에 접해있는 헤드의 바로 옆 부분을 공기 제트가 지나갈 수 있도록 하며, 디스크와 닿지 않을 만큼의 간격을 유지하여 드라이브 커버에 부착하였다. 또한 공기출구 부분은 폭이 좁아지는 형태의 소형 덕트(duct)를 정전기에 의한 입자 손실을 최소화하기 위하여 전도성 플라스틱으로 가공한 후 노즐 반대편에 부착하고 샘플링 튜브를 연결하였다. 이와 같이 제트 노즐이나 샘플링 덕트의 설치 목적은 헤드-디스크 인터페이스에서 발생하는 입자의 샘플링 양을 가능한 최대화하기 위함이다.

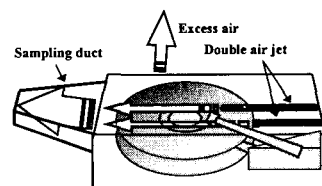


Fig. 1 Schematic of particle sampling nozzles and duct

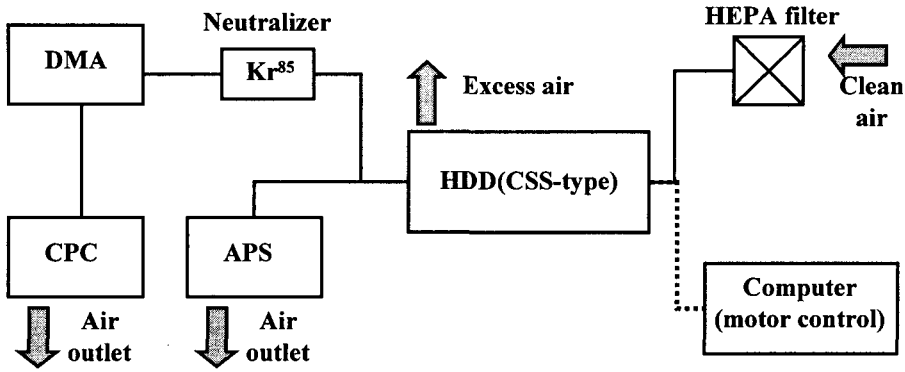


Fig. 2 Experimental setup for particle number concentration and size distribution

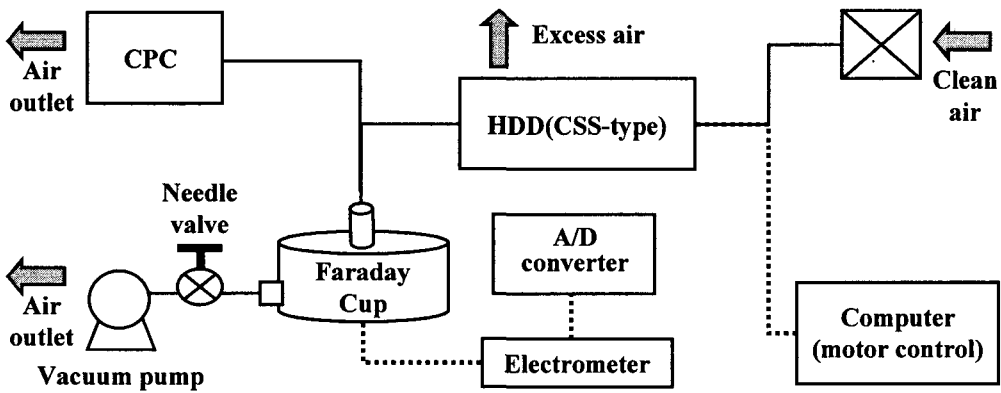


Fig. 3 Experimental setup for particle number concentration and average charge

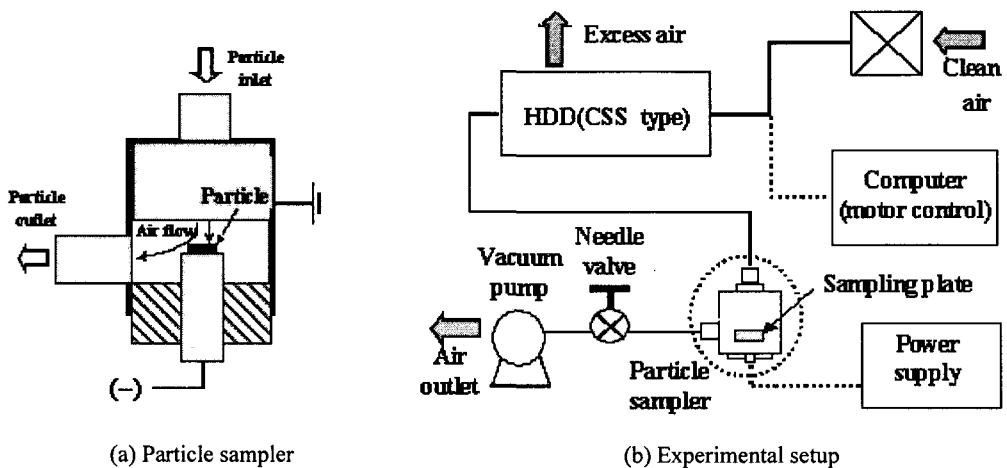


Fig. 4 Schematic of particle sampler and experimental setup for sampling

2.1 발생입자의 농도 및 크기 측정

Fig. 2 는 하드디스크로부터 발생한 입자의 수농도 및 크기분포 측정을 위한 실험장치의 구성도이다. 청정공기공급기를 통해 주입되는 공기는 HEPA 필터를 통과함으로써 다시 한 번 외부의 오염 입자를 제거한 후 하드디스크로 공급된다. 공급 유량은 2 lpm 으로 고정하였는데, 이 때 2 개의 제트 노즐에서 분사되는 공기 제트의 속도는 약 16.7 m/s이다. 여기서 샘플링에 필요한 유량은 1.3 lpm 이며, 나머지 유량에 대해서는 하드디스크 커버에 과잉공기 배출구를 만들어 외부로 배출하였다. 이와 같이 과잉공기를 생성하는 이유는, 드라이브의 내부의 압력이 외부의 압력보다 높게 하여 외부의 오염 입자가 침투하지 못하게 하기 위함이다.

샘플링 덕트를 통과한 입자들은 두 종류의 측정기기 방향으로 동시에 샘플링 되는데, 우선 마이크로 영역의 입자들은 공기역학적 입자측정기에 의해 측정되고, 크기가 작은 나노 영역의 입자들은 Kr⁸⁵ 를 사용한 중화기(neutralizer)와 전기적 이동도 분석기(differential mobility analyzer, DMA)를 통과하여 크기가 분류되고 분류된 단일입경의 입자들은 응축핵 계수기(condensation particle sizer, CPC)로 흡입되어 농도가 측정된다. 두 기기의 샘플링에 있어서 공기역학적 입자 측정기는 1.0lpm 의 유량을 샘플링하며, 응축핵 계수기는 0.3lpm 을 샘플링 하는 저유량(low flow rate) 모드를 사용하였다. 여기서 사용되는 측정기기들은 TSI 사에서 제작하였으며, 전기적 이동도 측정기는 3081 모델, 응축핵 계수기는 3022A 모델(측정오차 2 %미만)이며 공기역학적 입자 측정기는 3321 모델(측정오차 5 %미만)이다.

본 실험에서는 하드디스크의 속도 변화를 통해서 발생하는 입자의 농도 및 크기분포를 측정하였다.

2.2 입자의 평균 대전량 측정

Fig. 3 은 발생한 입자의 농도와 대전량을 동시에 측정할 수 있도록 꾸며진 실험장치의 그림이다. Fig. 2 에서와 마찬가지로 청정공기를 하드디스크로 공급하여 주었는데, 이 때의 공급 유량은 4 lpm (노즐단면속도 33.4 m/s)이었다. 여기서 샘플링에 필요한 유량은 3 lpm 이며, 나머지 유량은 외부로 배출된다. 샘플링 유량은 반으로 나뉘어 입자개수 측정 장치와 대전량 측정에 보내어지는데, 우선 입자 개수의 측정은 그 크기에 상관없이 응축핵 계수기에서 측정된다.

샘플링 유량의 나머지 절반은 입자의 대전량 측정을 위해 패러데이 컵(faraday cup)으로 이동하게 된다. 이 장비의 측정원리는 전기적으로 차폐된 전도성 필터를 두고 대전 된 입자가 필터에 포집할 때의 정전기 양을 측정하여 전류계로 보내주는 것이다. 여기서 전류계는 Keithley 모델 6517A(측정오차 0.03 %미만)를 사용하였으며, 10⁻¹⁶A 의 전류 변화까지 측정 가능하다. 또한 전류계에서의 데이터를 수신하기 위한 아날로그/디지털 변환기(A/D converter)를 사용하였다.

본 실험에서는 하드디스크의 속도 변화를 통해서 발생하는 입자의 대전량 측정 및 평균 크기/전하수를 계산하였다.

2.3 입자의 형상 관찰

Fig. 4 는 하드디스크에서 발생한 입자를 포집하기 위해 본 실험실에서 직접 제작한 샘플러(particle sampler)의 그림과 샘플링을 위한 실험장치도이다. 발생 입자를 포집하는 목적은 전자현미경(scanning electron microscope, SEM) 사진을 통해 형상 또는 그 크기분포를 분석하기 위함이다. 샘플러 설계에 의하면, 포집판에 샘플링 되는 입자 중 대부분의 서브 마이크로 입자(< 1 μm)들은 샘플러 외부에서 인가된 전기장의 영향을 받아 포집되고, 또한 마이크로에 가까운 서브마이크론 입자들과 마이크로 영역의 입자(> 1 μm)들은 관성충돌(inertial impaction)에 의해 포집되도록 되어있다.⁽¹²⁾ 샘플링 전극은 알루미늄(Al) 재질을 사용하며 공급전원(power supply)로부터 (+) 또는 (-)의 전원이 공급되어 전기적인 힘에 의해 포집기판(sampling plate)에 대전 된 입자를 포집하는데, 이 때 샘플러의 벽면 또한 알루미늄(Al)의 같은 재질을 사용해 접지 역할을 한다. 전극과 접지 사이는 전류가 통하지 않도록 비전도성 플라스틱의 재료를 선택하였다.

실험장치도를 보면, 앞에서와 마찬가지로 청정공기를 하드디스크로 공급하여 주었는데, 이 때의 공급 유량은 1 lpm(노즐단면속도 8.4 m/s)이었다. 여기서 샘플링에 필요한 유량은 0.3 lpm 이며, 나머지 유량은 외부로 배출된다. 이 때에, 1 개의 샘플링 입자 시편을 얻기 위하여 20 CSS (2000 초)사이클을 연속적으로 구동 시켰으며 인가 전압은 (-) 500 V 였다. 본 실험에서는 하드디스크의 속도 변화를 통해서 발생하는 입자를 앞에서 언급한 샘플러를 통하여 샘플링하고, 입자 형상을 전자현미경을 통해 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 발생입자의 농도와 크기분포

Fig. 5는 5400 rpm으로 모터 회전을 5번 반복시켰을 때 발생한 입자의 농도를 보여주는 전형적인 그래프인데, 이와 같은 발생 형태는 거의 모든 반복측정 시에 관찰되었다. 이 그래프에서는 샘플링 순간농도와 더불어 유량과 시간이 곱해진 입자 누적개수를 동시에 나타내고 있다. 발생입자는 매 순간순간마다 농도가 꾸준히 일치하지 않고 변화하는 것을 알 수 있는데, 이는 입자 발생 경향이 슬라이더의 부상 상태에 따라 지속적으로 변하기 때문이다. 또한 그래프에서, 모터가 정지하면 발생하지 않다가 구동 시 농도가 높게 발생하기 때문에, 누적 곡선이 계단 형태가 됨을 알 수 있다. 하지만 위의 입자발생 누적그래프에서 각 사이클마다 누적량을 보면, 매 사이클마다 비교적 비슷한 정도로 곡선이 증가함을 관찰할 수 있다.

그래프를 관찰하면, 첫번째 구동 시 입자 발생 농도가 가장 높은 현상을 볼 수 있는데, 이러한

현상은 슬라이더가 디스크에 접촉해있는 시간이 연속반복 구동 때보다 길었기 때문에 정지마찰이 증가하였음에 원인이 있다. 이러한 현상에 대해서는 Park 등⁽¹³⁾에 의해 연구된 바가 있다. Fig. 6은 각 회전속도 별 시간에 따른 발생입자 누적 그래프인데, 디스크의 회전속도가 높아짐에 따라 발생된 입자의 농도 역시 더 높아짐을 알 수 있다.

하드디스크에서 발생한 입자의 크기분포 측정에 있어서는 앞에서 언급하였듯이, 2개의 측정장비를 사용하였는데, 우선 공기역학적 입자 측정기(APS)에 의해 측정된 입자 크기분포의 결과는 Fig. 7에서와 같이 모두 log-normal 분포로 나타내었다. 이 때에 역시 드라이브의 구동을 5회 반복시켰을 때 얻어진 데이터인데, 각 데이터에서 평균/최고 표준편차(standard deviation) 값은 0.02/2.25 g/cm³이다. 그래프에서 디스크의 회전속도가 증가함에 따라 발생된 입자의 농도가 증가함을 알 수 있다. 하지만 입자의 크기 분포의 형태에 있어서는 각 회전속도별로 차이가 없어보인다.

한편, 전기적 이동도 분석기(DMA)와 응축핵 계수기(CPC)를 사용하여 입자의 크기분포를 측정하

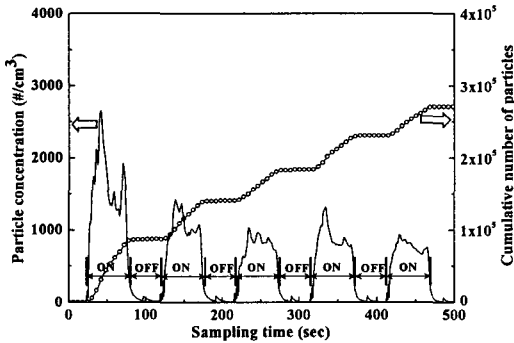


Fig. 5 Particle concentration at 5400rpm

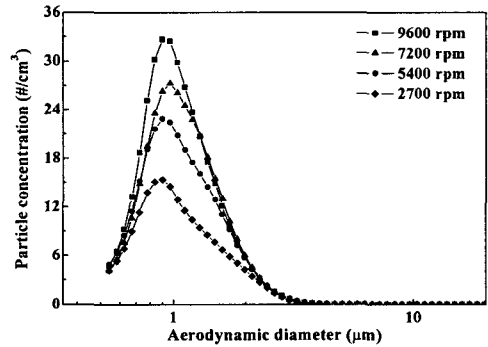


Fig. 7 Particle size distribution by APS

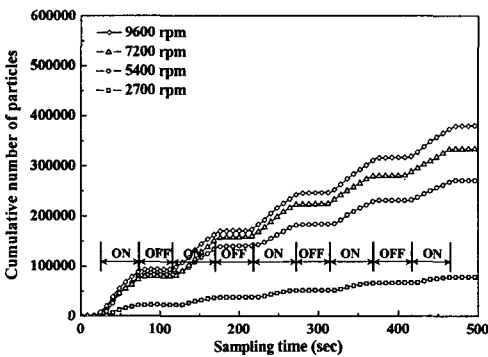


Fig. 6 Cumulative particle concentration with disk rotational speed

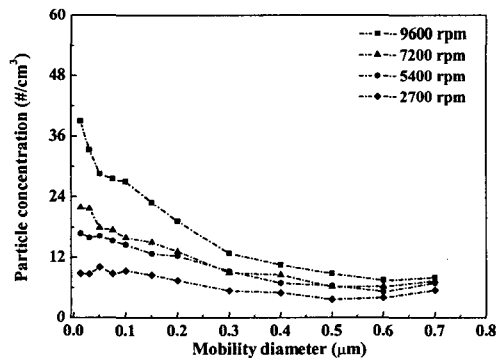


Fig. 8 Particle size distribution by DMA and CPC

기 위해서, 전기적 이동도 분석기에 원하는 샘플링 입경의 크기를 고정한 후, 드라이브 반복구동을 5 회 시켰을 발생하는 평균 농도를 측정하였다. 그 후, 한 그래프에 모든 입경에 대한 발생농도 데이터를 나타내었다.

최소입경 13 nm로부터 최대입경 700 nm까지 각 입경에 대한 측정 결과를 Fig. 8 의 한 그래프에 나타내었는데, 이 그래프의 각 포인트에서 평균/최고 표준편차는 1.37/5.96 g/cm³ 이다. 여기서의 결과 또한 공기역학적 입자 측정기의 측정결과와 마찬가지로 디스크의 회전속도가 증가함에 따라 발생된 입자의 농도가 증가함을 알 수 있다. 하지만 앞의 결과와는 다르게, 입자의 크기 분포에 있어서 회전속도가 증가함에 따라 미세/나노 입자 농도의 증가가 두드러짐을 알 수 있다.

이와 같이 입자크기 분포 측정에 있어서 두 종류의 측정장치를 사용하였는데, 각각의 측정 결과를 가지고 한 그래프로 합쳐서 나타내기 위해서는 다음의 사항을 고려해야 한다. 공기역학적 입자 측정기의 경우 공기역학적(aerodynamic diameter, d_{APS})을 측정하고, 전기이동도 분석기의 경우 이동도경(mobility diameter, d_{DMA})를 측정하기 때문에, 두 가지 크기에 있어서 한가지로 단일화 시키는 보정 작업이 필요하다.

두 종류의 입자크기의 관계를 구하기 위하여, 간단한 추가실험을 실시하였는데 이때에 필요한 관계식은 아래와 같다.⁽¹⁴⁾

$$d_{DMA} = \left[\frac{\kappa C(d_{APS})}{\rho_p C(d_{DMA})} \right]^{1/2} d_{APS} \quad (1)$$

여기서 κ 는 동역학적 형상계수(dynamic shape factor)이며, $C(d_{APS})$ 와 $C(d_{DMA})$ 는 각 장치의 입자 크기에 해당하는 미끄럼 보정계수(Cunningham correction factor)이다.⁽¹⁵⁾ 만일 여기서의 입자들이 완전구형으로 가정되면 ($\kappa=1$), 이동도 등가 입경(d_{DMA})은 등가 체적경과 같아진다. 여기서의 ρ_p 는 발생된 입자의 밀도이며, 알려지지 않은 값이다.

본 추가실험에서는 하드디스크에서 발생된 여러 입경의 입자들을 전기적 이동도 분석기로 주입하여 원하는 단일입경의 입자들로 통과시키고, 이 입자들을 다시 공기역학적 입자 측정기로 측정하였다. 측정 입경은 두 장치에서 공통으로 측정 가능한 입경인 0.5~0.7 μm 로 선택하였는데, 실험 결과는 Fig. 9 와 같다. 전기적 이동도 분석기에서 고정된 크기를 분류하였다 할지라도 공기역학적 입자 측정기에서는 일정한 입자 크기가 아닌 특정

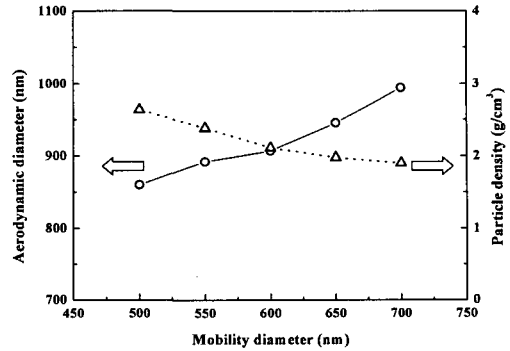


Fig. 9 Particle diameters from APS via DMA and calculated density

분포를 가지게 되는데, 측정된 분포의 중앙입경(median diameter)을 같은 그래프에 나타내었다. 그래프에서 이동도경이 증가함에 따라 공기역학적 역시 증가함을 알 수 있으며, 각 데이터 값을 앞에서 언급한 식 (1)에 대입하면 1.90~2.64 g/cm³의 값을 가진다. 이와 같이 계산된 밀도 값은 디스크 기판의 재료인 알루미늄(밀도: 2.70 g/cm³)의 밀도와 근접한다. Bhusan 등⁽³⁾과 Lee 등⁽⁵⁾은 기존에 실험을 통하여, 하드디스크 구동시 발생하는 상당수의 입자 구성물질이 알루미늄으로 되어있으며 이는 디스크로부터 발생되었을 것으로 예측한 바가 있다. 이와 같은 기존의 연구 결과와 본 실험에서의 결과를 가지고 판단해 볼 때, 앞에서 측정된 데이터를 통하여 두 입경간의 관계를 구하는 것은 타당성을 지닌다고 할 수 있겠다.

앞에서 다루었던 두 입경간의 관계를 고려하여, Fig. 10 에 전체 크기분포(total size distribution)에 대한 그래프를 나타내었다. 여기서는 그래프를 쉽게 볼 수 있도록, 앞의 그래프들과는 달리 각각의 회전속도별로 나누어서 크기분포를 표현하였다. 우선 발생입자의 크기를 나타낼 때 입자의 공기역학적이 아닌 입자이동도 경으로 나타내었는데, 공기역학적의 경우 실제 입자의 밀도가 고려되지 않은 단위밀도(unit density) 가정하의 크기이므로 실제 입자크기와 차이가 나기 마련이다. 하지만 입자의 이동도경의 경우는 앞에서 언급했듯이 입자를 구형으로 가정하면 등가 체적경과 같아지기 때문이다.

그런데 그래프에서 두 측정기기가 공통적으로 측정할 수 있는 영역(0.5~0.7 μm)을 관찰하면, 입자의 농도에서 차이가 발생함을 관찰할 수 있다. 이는 앞에서 언급한 이유와 마찬가지로, 공기역학적 입자 측정기의 경우 입자크기의 최소측정 범위가

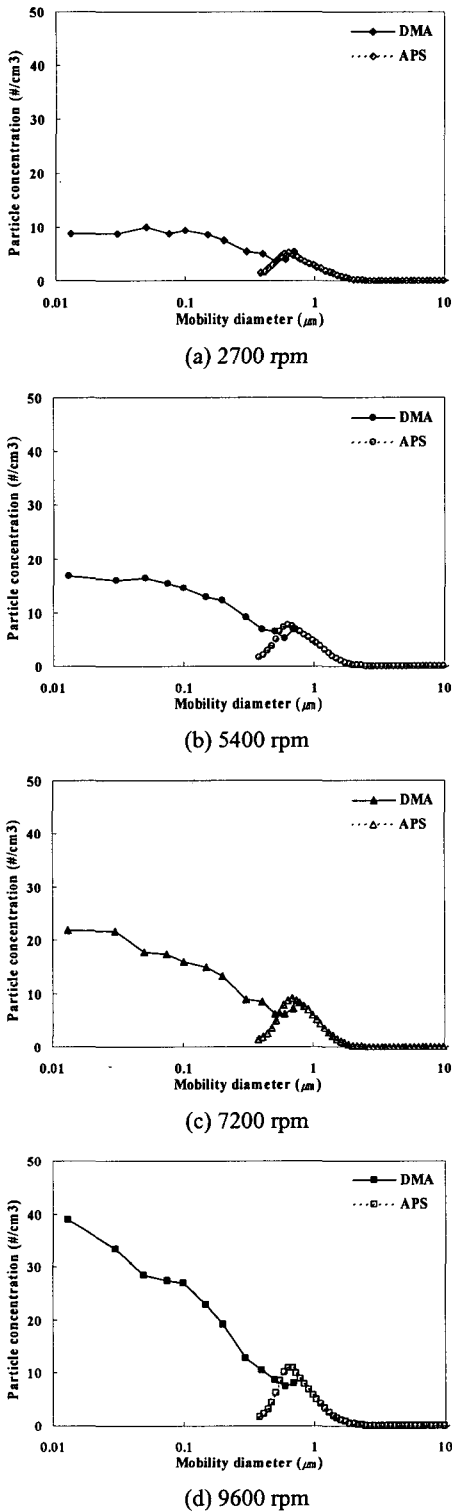


Fig. 10 Total size distribution

0.5 μm인데(공기역학경 기준) 측정기기가 레이저를 이용한 광학적 측정방법을 사용하고 있으므로 서브마이크론 영역에서는 그 측정효율이 감소하게 된다.⁽¹⁶⁾ 따라서 실제 발생한 입자의 농도에 비해 측정 농도가 감소하는 현상을 보인다. 또한 두 측정기에서 측정원리가 다르고 샘플링 손실(loss) 등이 다르게 발생하기 때문에 측정된 농도에서 차이가 발생하는 것으로 예측된다.

그래프를 요약하면, (a)부터 (d)에 이르기까지 디스크의 회전속도가 높아질수록 발생한 입자의 농도가 높아짐을 알 수 있으며, 미세 나노 영역에서의 입자 발생이 크게 증가함을 알 수 있다. 또한 하드디스크로부터 발생한 입자의 크기분포가 미세 나노 크기로부터 마이크로 크기까지 발생하지만, 거의 대부분의 입자가 서브마이크론의 크기를 가짐을 알 수 있다. 이와 같은 실험결과는, 앞으로 개발되는 하드디스크가 이보다 더 고속회전 방식의 추세임을 감안하면 나노입자 오염(nano particle contamination)에 대한 문제가 더 중요하다 할 수 있겠다.

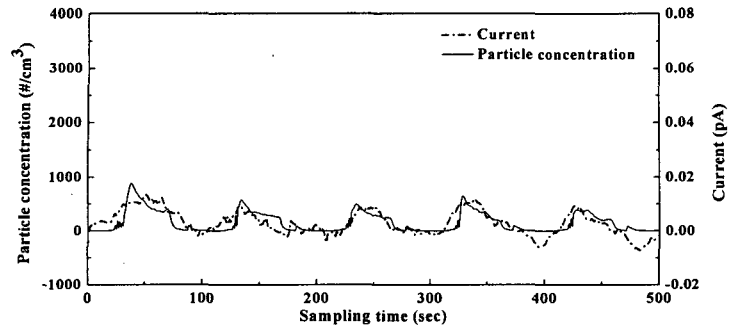
3.2 입자의 평균 대전량

Fig. 11 은 하드디스크를 5 회 반복구동 시켰을 때 발생하는 입자의 농도와 입자로부터 발생한 전류의 변화에 대해 동시에 보여주는 결과 그래프이다. 아날로그/디지털 변환기를 통해 발생한 입자의 대전량에 대한 데이터는 전류값(pA)으로 나타나며, 회전속도의 변화에 따라 그래프 (a), (b), (c), (d)로 분류하여 나타내었다. 각 그래프에서 공통적으로, 입자 발생 농도 변화와 전류값의 변화가 비슷한 경향성을 나타남을 관찰할 수 있다. 하지만 입자 발생의 경우 회전속도의 증가에 따라 농도증가가 명확하지만, 전류값의 경우는 그렇지 않다.

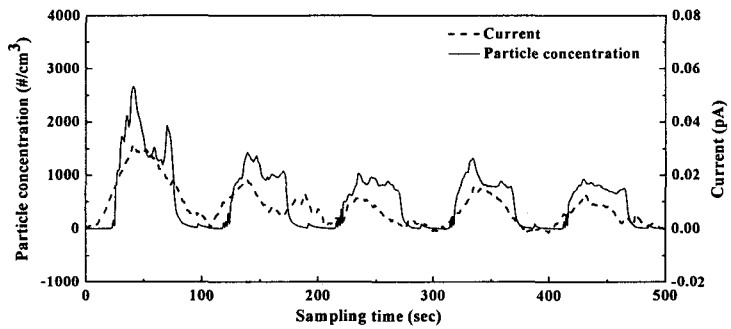
이러한 현상을 좀 더 분석해보면, 입자가 갖는 평균 전하수 (n)와 발생한 전류 (I)와의 관계는 아래와 같다.

$$n = \frac{\int_0^{t_s} I(t)dt}{Qe \int_0^{t_s} N(t)dt} \tag{2}$$

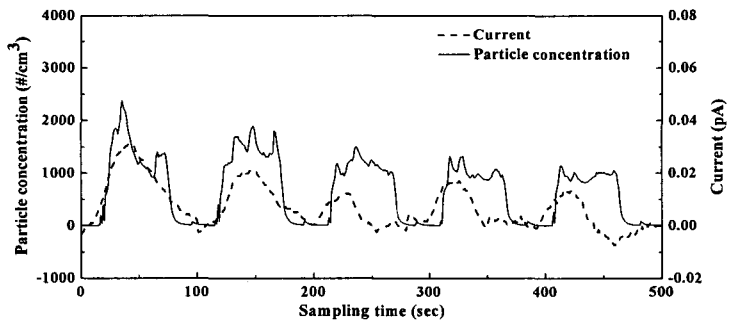
여기서 Q는 샘플링 유량이며, N은 입자의 농도 (#/cm³), t_s는 샘플링 시간 (500초)이다. Fig. 11에서 측정한 각각의 회전속도에 대해 발생한 입자농도와 입자 대전으로 인한 전류 변화 값을 식 (2)에 대입하여 전하수를 계산한 결과가 Fig. 12에 나타나 있다. 여기서는 전하수에 대해 평균값으로 계산하였는데, 각 그래프에서 발생한 전류 변화 누적 값



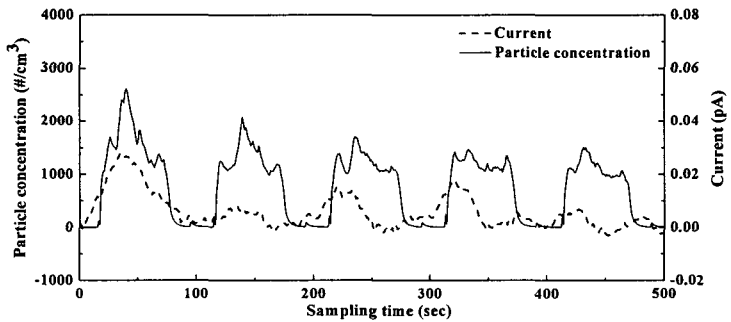
(a) 2700 rpm



(b) 5400 rpm



(c) 7200 rpm



(d) 9600 rpm

Fig. 11 Particle concentration and charge variations with sampling time

과 입자 농도 누적 값을 대입하여 계산하였다. 결과를 보면, 평균 전하수는 1.9~5.2 의 값을 가지게 되며, 디스크의 회전속도가 증가함에 따라서 평균 전하수가 감소하게 되는 것을 볼 수 있다.

일반적으로 에어로졸 입자는 대전이 가능한 한계값을 가지고 있으며, 이와 같은 한계값은 입자의 표면적에 비례하게 된다.⁽¹⁷⁾ 다시 말하면, 입자의 크기가 클수록 더 큰 대전값을 지니게 된다는 것이다. 그런데 앞에서의 입자발생 분포에 대한 결과를 보면 (Fig. 10), 디스크의 회전속도의 증가는 서브마이크론의 작은 입자들의 발생을 증가시킨다. 이와 같은 작은 입자들은 대전값을 지닐지라도 그 값의 크기가 작기 때문에 측정전류의 증가에 영향을 미치지 못할 것으로 예측된다.

결론적으로 Fig. 12 에서의 전하량 (n) 감소 현상은 앞에서 언급하였듯이, 디스크의 회전속도가 높아짐에 따라 발생 입자의 농도는 확연히 증가한 데 비해 발생하는 전류값은 증가하는 경향을 보이지 않기 때문이다.

3.3 샘플링 입자의 형상

본 실험실에서 제작한 입자 샘플러를 통해, 구동시 하드디스크로부터 발생하는 입자를 포집하여 전자현미경을 통해 촬영된 사진을 Fig. 13 에 나타내었다. Fig. 13(a)부터 (d)까지의 전체적인 입자 크기를 비교해볼 때, 발생한 입자의 크기분포가 (d)에서 가장 작은 크기임을 확인할 수 있다. 이는 앞에서 소개한 입자 크기분포에 있어서 디스크의 회전속도가 높아질수록 서브마이크론 입자의 발생량이 증가한다는 실험결과를 뒷받침 해주는 것이라 할 수 있다.

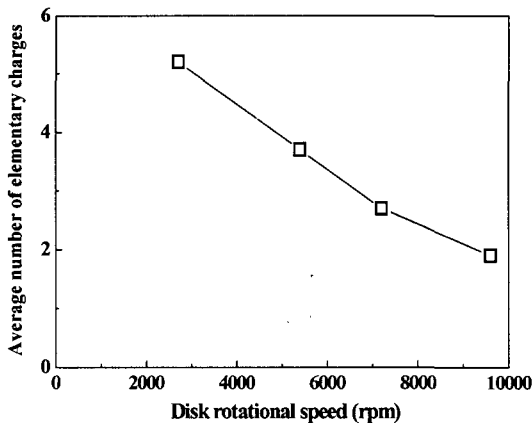
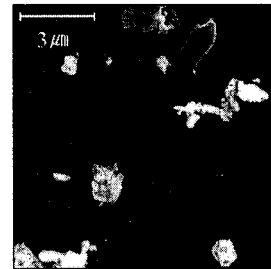


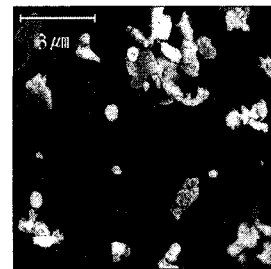
Fig. 12 Average number of elementary charges of particles

4. 결 론

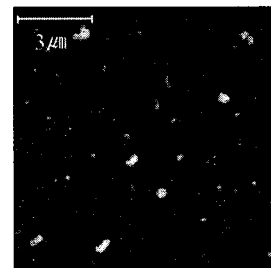
CSS 방식의 하드디스크 드라이브 내부에서 발생하는 입자에 대하여, 우선 회전속도 변화에 대한 농도변화 및 크기분포에 대해 측정하였고, 입자의 전체적인 대전량을 측정하고 그에 해당하는



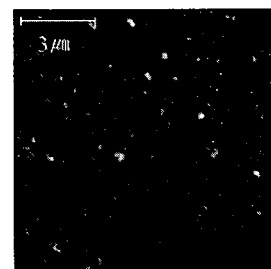
(a) 2700 rpm



(b) 5400 rpm



(c) 7200 rpm



(d) 9600 rpm

Fig. 13 SEM images of particle samples

평균 입자 전하량을 계산하였다. 또한 전자현미경 사진을 통해 대전된 입자들의 형상과 포집 밀도를 분석함으로써, 앞에서 실험을 통해 얻어진 경향에 대하여 확인할 수 있었다. 본 실험에서의 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 하드디스크 드라이브에서 발생하는 입자는 수 μm 로부터 약 4 μm 까지의 크기분포를 가지는데 대부분이 서브마이크론 크기이며, 드라이브가 고속으로 회전될 수록 발생하는 입자의 농도는 높아짐과 동시에 미세/나노영역 ($\sim 500 \text{ nm}$)에서의 입자 발생이 두드러지게 증가하게 된다.

(2) 발생된 입자의 대전량을 측정하고 평균 전하수를 계산하였을 때, 디스크 회전속도의 증가에 따라 발생된 입자의 평균 전하량은 감소하는 경향을 나타냈다.

(3) 대전된 입자의 형상을 SEM 사진으로 관찰해 보면 결론 (1)에서 언급한 것처럼 하드디스크 회전속도가 증가함에 따라 미세/나노입자가 많이 발생함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 삼성전자의 한국과학기술연구원 정보저장기기 연구센터의 지원(과제번호:R11-1997-042-12 001-0)을 받아 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Nagarajan, R. and Welker, R. W., 1993, "Size Distribution of Particles Extracted from Disk Drive Parts: Comparison with the MIL-STD-1246 Distribution," *J. Instit., Environ. Sci.*, Vol. 36, No. 1, pp. 43~48.
- (2) Stupp, S. E., Baldwinson, M. A. and McEwen, P., 1999, "Thermal Asperity Trends," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 35, pp. 752~757.
- (3) Bhushan, B., Chandra, S. and Smallen, M., 1999, "Analysis of Drive-Level Contaminant Particles," *J. Info. Storage Process. Syst.*, Vol. 1, pp. 115~124.
- (4) Park, H. S., Yoo, Y. C., Bae, G. N. and Hwang, J. H., 1999, "Investigation of Particle Generation in a Hard Disk Drive During the Start/Stop Period," *Trans. of the KSME B*, Vol. 23, No. 6, pp. 744~752.
- (5) Lee, D. Y., Hwang, J. and Bae, G. N., 2004, "Effect of Disk Rotational Speed on Contamination Particles Generated in a Hard Disk Drive," *Microsystem Technologies*, Vol. 10, pp. 103~108.
- (6) Brezoczky, B. and Seki, H., 1990, "Triboattraction: Friction under Negative Load," *Langmuir*, Vol. 6, pp. 1141~1145.
- (7) Zhang, S. and Bogy, D. B., 1997, "Effect of Lift on the Motion of Particles in the Recessed Regions of a Slider," *Physics of Fluids*, Vol. 9, No. 5, pp. 1265~1272.
- (8) 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.
- (9) Pui, D. Y. H., Tsai, C. J. and Lui, B. Y. H., 1988, "Charge Level on Aerosol Particle: Measurement of Particle Charge and Size Distribution in Disk Drive," *Proc. 34th annual technical meeting, Instit., Environ. Sci.*, King of Prussia, Pennsylvania, May 2~6.
- (10) Park, H. S., Hwang, J. and Choa, S. H., 2004, "Tribocharge Build-up and Decay at a Slider-Disk Interface," *Microsystem Technologies*, Vol. 10, pp. 109~114.
- (11) Edward, K., Jeff, R. and Faye, C., 2003, "Monitoring Trace Anion Contamination in Disk Drive Components," *J. Chromatography(A)*, Vol. 997, pp. 259~267.
- (12) Lee, J., Lee, D. Y., Kim, S. Y. and Hwang, J., 2004, "Sampling and Analysis of Particles Generated in CSS-Mode of a Hard Disk Drive by Using a Particle Sampler," *Trans. of the KSME B*, Vol. 29, No. 5, pp. 599~605.
- (13) Park, H. S., Hwang, J. and Choa, S. H., 2000, "Effect of Slider Rest Time and Slider Motion on Particle Generation in a Magnetic Hard Disk Drive Operation," *J. Info. Storage Proc. Syst.*, Vol. 2, pp. 179~183.
- (14) Sioutas, C., Abt, E., Wolfson, J. M. and Koutrakis, P., 1999, "Evaluation of the Measurement Performance of the Scanning Mobility Particle Sizer and Aerodynamic Particle Sizer," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 30, pp. 84~92.
- (15) Reist, P. C., 1993, *Aerosol Science and Technology*, McGraw-Hill, Inc., second edition.
- (16) Peters, T. M. and Leith, D., 2003, "Concentration Measurement and Counting Efficiency of the Aerodynamic Particle Sizer 3321," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 34, pp. 627~634.
- (17) Hinds, W. C., 1982, *Aerosol Technology*, John and Wiley & Sons.