

〈 논문 〉

입자 샘플러를 이용한 하드디스크 CSS 동작 시 발생한 입자 샘플링 및 분석

이재호* · 이대영* · 김상윤* · 황정호†

(2004년 12월 20일 접수, 2005년 4월 1일 심사완료)

Sampling and Analysis of Particles Generated in CSS-Mode of a Hard Disk Drive by Using a Particle Sampler

Jaeho Lee, Dae-Young Lee, Sang-Yoon Kim and Jungho Hwang

Key Words : Contamination(오염), HDD(하드디스크드라이브), Particle Sampler(입자샘플러), SEM(전자현미경), AES(오제이전자분광기)

Abstract

Controlling particle contamination is important to increase storage capacity as the flying height of a slider in a hard disk drive decreases. Since precise detection and analysis of particles are primary steps of particle control in a HDD, many researchers have used sampling methods. In this paper, we newly designed a particle sampler and conducted performance evaluation of the sampler. Also, we conducted particle sampling from the HDD using the particle sampler and analysis of sampled particles by SEM and AES. Experimental results show that the particles generated by the slide-disk interaction mainly came from the disk surface.

1. 서 론

최근의 우리 사회에서 인터넷 사용을 통한 세계화 및 정보화가 급속히 진행되면서 컴퓨터의 성능이 급속도로 발전하고, 이에 맞추어 정보저장기기의 용량 또한 급속히 증가해왔다. 정보저장기기의 한 종류인 하드디스크 드라이브(HDD)는 저장용량을 증가시키기 위하여 헤드-디스크 인터페이스(HDI)에서의 슬라이더 부상 높이(flying height) 감소가 요구된다.⁽¹⁾ 현재 사용되고 있는 하드디스크의 슬라이더 부상높이는 약 10 nm에 불과하기 때문에 구동시에 슬라이더와 디스크의 상호 접촉등에 의해 입자가 발생하고,⁽²⁾ 이와 같이 발생한 입자들은 기기의 신뢰성을 떨어뜨리는 결과를 초래한다.

이와 같이 하드디스크 내에서 발생한 입자의 오

염을 줄이기 위해서는 발생한 입자의 정확한 분석이 필요하다. 입자의 크기가 어느 정도인지를 분석함으로써, 그에 알맞은 필터(filter)의 종류를 선택 가능하게 하고, 필터 위치 선정에 있어서도 중요한 사항이 될 수 있다.⁽³⁾ 또한 입자의 화학적 성분을 분석함으로써, 발생한 오염원(source)을 파악할 수 있고, 연구에 필요한 물성치(property)를 알 수 있게 하여 결국 입자오염 저감의 연구에 큰 도움이 될 수 있다.

입자를 분석하기 위해서 SEM(scanning electron microscopy), AFM(atomic force microscopy), AES(auger electron spectroscopy) 등 여러 장비들이 사용하게 되는데, 현재까지의 기술로는 입자 발생의 근원지에서 직접 실시간으로 입자를 분석하는 것은 불가능하다. 따라서 간접적인 방법인 샘플링 방법을 이용하여 시편을 만들고, 분석기기에 옮겨서 정성적 또는 정량적인 분석을 해야한다.

입자를 샘플링하는 방법에는 몇 가지 종류의 방법이 있다. 우선 임팩터(impactor)를 사용하는 방법인데, 이 방법은 주로 대기중의 미세입자의 농도를 측정하는데 사용된다.⁽⁴⁾ 또 다른 샘플링 방법으로는 필터를 이용한 입자 포집 방법이 있는데, 샘

* 연세대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

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

플링 특성에 따라 섬유필터(fabric filter) 또는 멤브레인 필터(membrane filter) 등이 사용된다.⁽⁵⁾ 이 방법은 비교적 간단한 방법으로 입자들을 샘플링 할 수 있으나, 샘플링 시 압력강하 또는 필터의 손상 가능성 등의 문제가 발생하고, 정밀분석기기에서 분석을 하고자 할 때, 정해진 시편의 크기로 맞춰 주기 위해 추가적인 작업들이 필요하거나 작업 중에 샘플링 된 입자가 손상되는 등의 단점이 있다.

이와 같은 점들을 보완하기 위하여 전기집진 방식을 도입한 샘플러가 연구 제작된 바 있다. Liu 등⁽⁶⁾은 유동과 평행한 평판 전기집진기 형태의 샘플러를 연구 제작하였으며, Cheng 등⁽⁷⁾은 판대판(point-to-plate) 집진기 방식의 샘플러를 제작하였는데 이 샘플러의 경우 유동방향과 샘플링 기관과의 방향이 수직인 특징이 있다. 하지만 이 경우는 입자의 하전부와 포집부가 동일하기 때문에 샘플링 효율 저하 등의 문제점이 있었다. 이러한 문제를 보완하여 Dixkens 등⁽⁸⁾은 하전부와 포집부가 분리된 전기집진 샘플러를 제작, 평가하였고, 샘플링 효율이 기존의 것에 비해 향상된 결과를 나타냈다. 지금까지 언급한 기존 샘플러들의 경우, 샘플링 입자의 대상이 주로 대기중의 입자였기 때문에 입자발생원의 농도나 샘플러의 크기는 그리 중요한 사항이 아니었다. 그런데 본 연구를 위해서는 샘플링 입자의 대상이 하드디스크 내부 발생 입자이기 때문에 발생 입자의 농도가 적어 샘플링 시 입자 손실이 최소화 되어야 한다는 한계성을 지닌다. 또한 하드디스크라는 소형 정밀기기를 사용한 실험이므로 내부를 통과하는 유량이 지나치게 많을 시에는 유속이 빨라져서 기기 작동에 큰 영향을 주고, 샘플링 유량이 많아지면 상대적으로 입자 농도가 낮아지는 등의 문제가 발생하기 때문에 샘플링 유량의 최소화가 요구된다.

앞서 언급한 샘플러들은 전기집진 방식을 위해서는 추가적인 입자 대전 부분이 필요하였다. Lee 등⁽⁹⁾은 실험을 통해 슬라이더-디스크의 상호접촉으로 발생한 입자는 대전(charging)되어 일정 전하수를 지닌다는 것을 예측을 하였는데, 이와 같이 하드디스크 동작시 발생한 대전된 입자들을 샘플링 하기 위해 추가적인 입자대전 부분은 불필요하다.

본 연구에서는 기존에 제작된 다른 샘플러들에 비해, 용도에 알맞은 작은 크기의 입자 샘플러를 새롭게 제작하고 성능평가를 실시하였다. 또한 하드디스크에서 발생된 입자를 직접 샘플링하여, SEM 이미지 촬영과 AES 분석을 실시하였다.

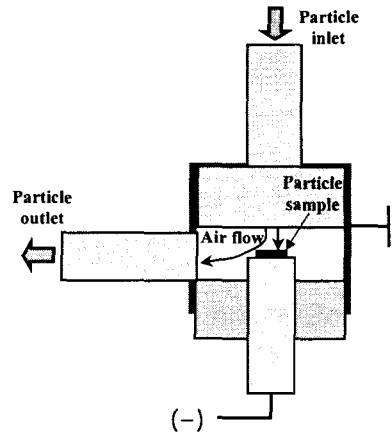


Fig. 1 Schematics of particle sampler for this study

본 연구에서 개발한 샘플러는 발생량이 적은 입자를 샘플링 하기 위해 포집하는 기관을 최소화 시켜 큰 부착면으로 구성된 기존의 샘플러에 비해 단위면적당 충분한 수의 입자를 빠른 시간 내에 포집할 수 있는 장점이 있다.

2. 입자 샘플러 제작 및 성능평가

2.1 샘플러 디자인

샘플러의 디자인(design)은 Fig. 1 과 같다. 외형적으로는 단일 노즐을 가진 임팩터의 형상이며, 전체적인 크기 또한 전기적 이동도 분석기(differential mobility analyzer, DMA) 전단에 위치하는 단일 노즐 임팩터와 비슷하다. 그림에서와 같이 샘플링 공기에 포함되어 있는 입자들이 샘플러 입구(inlet)을 지나 내부의 단일노즐을 통과하는데, 일부는 샘플링 기관에 포집되고 나머지 포집이 되지 않은 입자들은 출구(outlet)를 통해서 샘플러 외부로 배출되게 된다.

샘플러의 각 부분에 대한 그림이 Fig. 2 에 나타나 있다. 각 부분의 재료를 살펴보면, 우선 하부 전극은 알루미늄(Al) 재질을 사용하며 공급전원(power supply)로부터 (+) 또는 (-) 전원이 공급되어 전기적인 힘에 의해 포집기관(sampling plate)에 대전된 입자를 포집 할 수 있게 하였다. 본 실험에서는 (-) 전원을 공급하게 되는데, 그 이유는 하드디스크에서 발생하는 입자의 대전이 대부분 (+)로 이루어지기 때문이다.⁽⁹⁾ 샘플러의 벽면도 전극과 동일한 알루미늄(Al)의 재질을 사용해 접지 역할을 한다. 전극과 접지 사이는 전류가 통하지 않도록 비전도성 플라스틱의 재료를 선택하였다.

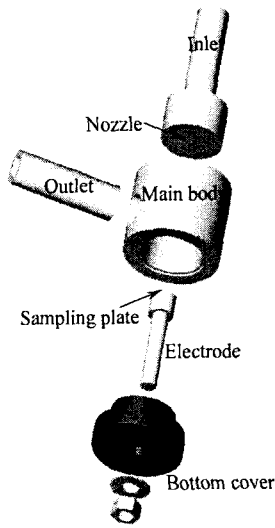


Fig. 2 Particle sampler assembly

2.2 샘플러 성능 평가

본 실험을 위해 제작된 입자 샘플러의 포집 효율에 영향을 미치는 실험요소로서, 샘플링 유량과 입자의 크기, 외부에서 인가된 전기장의 세기, 그리고 입자의 대전량이 있는데, 본 성능평가 실험에서는 샘플링 유량과 입자의 크기 변화를 주어, 샘플링 효율의 변화를 측정하였다.

입자 샘플러의 성능평가를 위한 실험장치도는 Fig. 3과 같다. 청정공기 공급 시스템(clean air supply system)을 통과한 압축공기는 공기중에 포함된 입자 또는 수분 등이 여과되어 청정상태로 분무입자 발생기(atomizer)로 공급된다. 분무입자 발생기에는 NaCl과 증류수의 혼합물 또는 DOS입자와 알코올의 혼합물이 담겨있는데, 청정공기가 분무입자 발생기 내부의 오리피스(orifice)를 통과하면서 고압/고속 상태로 내부 벽면으로 분사된다. 이 때에 분사된 혼합용액은 입자 발생기의 내부 벽면에 강하게 충돌하면서 매우 작은 입자상태로 깨어지고, 높은 압력에 의해 용기의 외부로 배출된다. 이와 같이 분무입자 발생기에서 발생한 입자들은 수분제거기(water trap)와 확산건조기(diffusion dryer)를 지나며 수분 등이 제거되고, 입자들은 다시 중화기(neutralizer, Kr^{85})를 통과하며 볼츠만 대전 평형(Boltzmann charge equilibrium)의 상태로 전기적 이동도 분석기(differential mobility analyzer, DMA)에 공급된다. 전기적 이동도 분석기는 분무입자 발생기에서 발생한 여러 입경의 입자들을, 전기적인 방법에 의해 원하는 크기의 단일 입경의 입자들로 선택 발생시켜주는 역할을 하며, 장치의 외부로 방출 시 대전량이 (+) 1개의 동일한 상태로

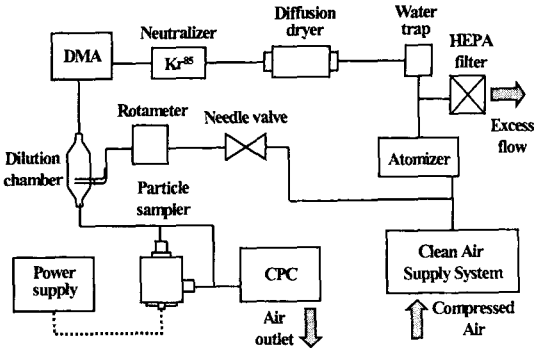
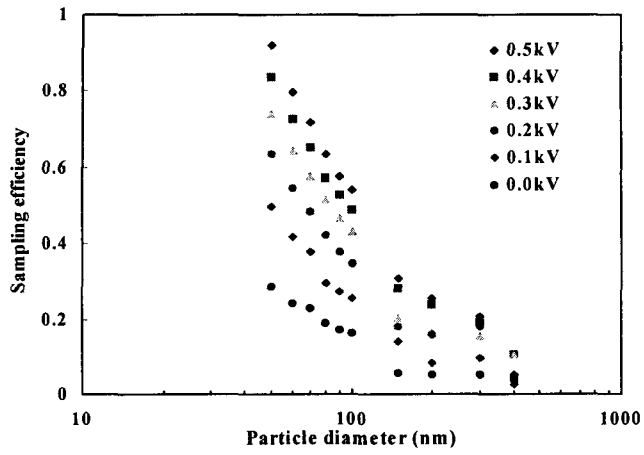


Fig. 3 Experimental setup for performance evaluation of the particle sampler

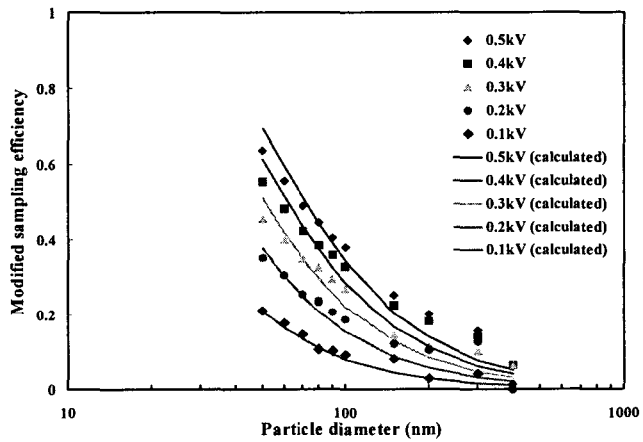
만든다. 이처럼 선택 발생된 단일입경의 입자들은 희석관(dilution chamber)을 지나며 농도가 희석된 상태로 입자 샘플러로 주입되는데, 이때에 샘플러에서 포집되지 않은 입자들에 대해서는 샘플러 외부로 배출되어 최종적으로 응축핵 계수기(condensation particle sizer, CPC)로 주입되어 개수가 측정된다. 이 때의 샘플링 효율 측정은 입자 샘플러를 통과하지 않고 직접 응축핵 계수기로 바이패스(bypass) 시켰을 때의 입자의 농도, 즉 샘플러의 입구영역에서의 입자농도와 (C_{inlet}) 샘플러를 통과 시키고 난후의 측정된 입자 농도 (C_{outlet}) 데이터를 가지고 다음과 같이 계산하였다.

$$\eta_V(d_p) = 1 - \frac{C_{outlet}(d_p)}{C_{inlet}(d_p)} \quad (1)$$

여기서 d_p 는 입자크기이며 $\eta_V(d_p)$ 는 인가전압 V에서의 입경별 샘플링 효율이다. 입자 샘플러의 성능평가는 응축핵 계수기의 고유한 샘플링 유량인 0.3 lpm과 1.5 lpm의 두가지 모드에서 실시하였으며, 결과는 Fig. 4~5와 같다. 두가지 유량 모두에서 동일한 입자 크기 영역인 50 nm로부터 400 nm까지 측정하였는데, 50~150 nm 크기의 입자는 NaCl을 사용하였고 150~400 nm의 입자는 DOS 입자를 사용하였다. 외부에서 인가해 준 전압 또한 0 kV로부터 0.5 kV까지 동일한 변화를 주었다. 우선 Fig. 4는 0.3 lpm의 유량조건의 실험결과인데, 그래프 (a)에서 전기장을 인가하지 않은 상태에서의 데이터를 보면 (0 kV), 입자의 크기가 감소할수록 샘플링 효율이 증가하는 현상을 관찰할 수 있다. 이는 입자의 크기가 작아질수록 브라운 확산 효과(Brownian diffusion effect)가 증가하기 때문이다. 또한 $V > 0$ 인 경우 역시, 입자의 크기와 샘플링 효율은 반비례의 관계에 있으며 외부 인가



(a) Experimental data



(b) Modified experimental data with calculated curves

Fig. 4 Sampling efficiency of particle sampler at 0.3 lpm

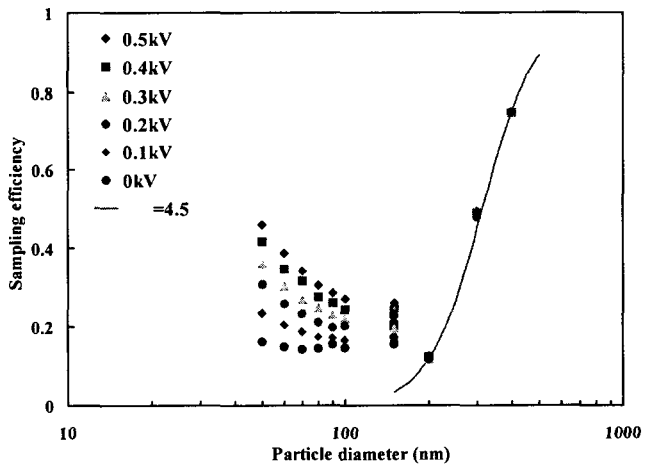


Fig. 5 Sampling efficiency of particle sampler at 1.5 lpm

전압과 샘플링 효율은 비례 관계가 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 일반 전기집진기 (electrostatic precipitator, ESP)의 집진 효율과 비슷한 경향을 보이는 것인데, 좀 더 자세한 분석을 위해 그래프 (b)를 추가하였다. 그래프에서는 샘플러에 외부전압을 인가하였을 때의 효율 (η_V)에서 전압을 인가하지 않았을 때의 효율(η_0) 만큼을 빼 준 실험 데이터와, 이론식을 사용하여 계산된 값을 동시에 보여준다. 이론값은 샘플러의 집진부를 평판형 전기집진기로 가정하여 아래와 같은 이론식을 사용하여 계산된 값이다.⁽¹⁰⁾

$$\eta_V(d_p) - \eta_0(d_p) = 1 - \exp\left(\frac{-V_{TE}A}{Q}\right) \quad (2)$$

여기서, Q 는 시스템을 통과하는 공기의 유량이며, A 는 집진부의 면적이다. V_{TE} 는 전기장 내에서의 입자의 종말속도이며, 아래와 같이 입자의 전기적 이동도 (electrical mobility, Z)와 외부에서 인가된 전기장의 세기 E 의 곱으로 표현된다.⁽¹⁰⁾

$$V_{TE} = ZE = \frac{neEC(d_p)}{3\pi\mu d_p} \approx \frac{nekVC(d_p)}{3\pi\mu d_p} \quad (3)$$

n 은 입자의 평균대전값 (본 연구에서는 $n=1$), e 는 단위 전하수 ($1.6 \times 10^{-19} \text{Coul.}$), μ 는 공기의 점성계수이다. 전기장의 세기 E 는 $-\nabla V$ 로 정의되며, 선형으로 가정하여 kV 로 표현될 수 있는데, k 는 샘플러의 형상에 의해 정해지는 임의의 상수 값이며, V 는 외부에서 인가되는 전압의 세기이다. $C(d_p)$ 는 입경 d_p 에 대한 미끄럼 보정계수 (Cunningham correction factor)이며, 본 실험에서의 입자크기 영역에 대해서는 다음의 식으로 표현된다.⁽¹¹⁾

$$C(d_p) = 3.69 \left(\frac{\lambda}{d_p}\right)^{1/2} \quad (4)$$

λ 는 공기분자의 평균자유행정 (mean free path)로써, 상온에서 약 68 nm이다. 이와 같은 이론식을 사용하여 계산한 결과, 집진효율은 외부에서 인가된 전기장의 세기와 비례하고, 입자의 크기에 반비례함을 알 수 있으며, 실험데이터와 이론값이 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

1.5 lpm 유량조건에서의 실험결과 Fig. 5에서도 200 nm 이하의 입경영역에서는 Fig. 4와 비슷한 결

과를 보이지만, 전체적인 효율은 감소하였다. 이는 샘플러 내부에서의 유량의 증가로 인하여 입자의 체류시간이 짧아지기 때문에 발생하는 현상으로 판단된다. 하지만 입경이 200 nm 이상의 영역에서는 감소하던 샘플링 효율이 급격히 증가하는 현상을 관찰할 수 있는데, 이러한 현상은 입자들이 샘플러 내부의 유량 증가로 인해 노즐에서의 단면속도가 증가하였기 때문에 샘플링 기판에 관성포집 (inertial impaction)이 이루어 지기 때문에 나타나는 현상이다. 여기서 입자 샘플러를 단일 노즐을 가지는 임팩터로 가정하면, 다음과 같은 식 (5)를 사용하여 입자의 분리효율을 구할 수 있으며 Fig. 5에 실선으로 계산값을 표현하였다.

$$\eta_V(d_p) \cong \frac{1}{1 + \left(d_{50}/d_p\right)^\alpha} \quad (5)$$

여기서 α 는 효율곡선의 기울기를 나타내는 성능계수이며, 50% 효율의 분리 입경 (cut diameter, d_{50})에 대한 공식은 아래와 같다.⁽¹⁰⁾

$$d_{50} = \sqrt{\frac{9\mu W Stk_{50}}{C(d_p)\rho_p U}} \quad (6)$$

μ 는 공기의 점성계수, W 는 노즐직경이다. 이 때, Stk_{50} 은 분리입경에서의 스토크스 수 (Stoke's number)인데, 상압 운전조건에서의 최적의 효율을 지니는 약 0.24의 값으로 계산되었다.⁽⁴⁾ ρ_p 는 입자의 밀도, 그리고 U 는 노즐목에서의 평균유속이다.

이와 같이 정의된 식 (6)에 샘플러의 치수 및 실험조건에 해당하는 값들을 대입하여 계산한 결과를 Table 1에 나타내었다. 우선 $d_{A, 50}$ 은 완전 구형으로 가정된 단위 밀도 (unit density)를 지닌 입자의 공기역학 분리입경 (aerodynamic cut-diameter)인데, 공기역학경 d_A 는 입자의 실제입경 d_p 와 다음과 같은 관계를 갖는다.⁽¹²⁾

$$d_A = d_p \left[\frac{\rho_p C(d_p)}{\kappa C(d_A)} \right]^{1/2} \quad (7)$$

여기서 ρ_p 는 입자의 밀도이며, κ 는 동역학적 형상계수 (dynamic shape factor)이다. $C(d_A)$ 와 $C(d_p)$ 는 각 장치의 입자 크기에 해당하는 미끄럼보정계수이다.⁽¹¹⁾ 만일 여기서의 입자들을 완전구형으로 가정한다면 ($\kappa=1$), NaCl 입자 ($\rho_{NaCl}: 2.2 \text{ g/cm}^3$)에 대한 분리입경과 ($d_{NaCl, 50}$), DOS 입자 ($\rho_{DOS}: 0.913 \text{ g/cm}^3$)에 대한 분리입경이 ($d_{DOS, 50}$) Table 1과 같이 계산되는 것이다. 유량이 1.5 lpm 조건에서 DOS 입자의

분리입경을 보면 약 313 nm 인데, Fig. 5 에서 300 nm 입경일 때 약 48%의 포집효율을 보인다. 결국 샘플러에서 DOS 입자 200 nm 이상 크기는 임팩터와 마찬가지로 입자가 지닌 관성력(*inertial force*)에 의해 포집되며, 외부에서 인가한 전기장의 영향에는 거의 영향을 받지 않는다는 사실을 알 수 있었다. 입자 샘플러의 성능평가를 통해 알 수 있었던 사실을 요약하자면 다음과 같다. 샘플러 내부 노즐을 통과하는 유속이 비교적 적은 조건 (0.3 lpm)의 나노입자는, 외부의 전기장이 없는 상태에서 확산효과에 의해 최대 25% 정도의 샘플링 효율을 보이지만, 전기장이 인가되면 최대 90% 이상의 효율을 보여준다. 따라서 본 유량조건에서는 입자가 주로 외부에서 인가하는 전기장에 의해 입자가 포집된다고 할 수 있겠다. 반면에 유속이 증가 (1.5 lpm)하게 되면, 확산효과와 전기장에 의해 포집되는 입자 영역이 각각 약 20%, 50%로 감소하게 되고 관성에 의해 포집되는 영역이 증가하며 (최대 80% 이상), 입자의 밀도가 커질수록 관성포집이 가능한 입자크기의 영역은 더욱 확대된다. 따라서 본 입자 샘플러를 사용할 시에는 샘플링 용도에 알맞게 샘플링 조건을 주되, 대전된 입자만 샘플링 하기를 원한다면 유량을 최소화하고 인가 전압을 높여주어서 샘플링 효율을 최대화해야 하고, 입자의 대전과 상관없이 포집 효율을 높이고자 한다면 유량을 가능한 최대화 하여 샘플링해야 한다.

3. 하드디스크 입자 샘플링 및 분석

3.1 실험장치 및 방법

하드디스크로부터 발생하는 입자를 자체제작된 입자 샘플러를 통하여 샘플링 하는 실험은 대기중의 미세먼지로부터 오염되는 것을 방지하기 위하여 class 100 의 클린부스에서 실시하였다. 하드디스크는 회전속도 5400 rpm 용으로 제작된 CSS (contact start/stop) 방식의 2 디스크 4 헤드 타입을 사용하였으며, 슬라이더가 완전부상하지 않고 디스크와 접촉상태에서 회전하는 Drag 조건을 만들도록 슬라이더에 일정부하를 가하였다. 이는 하드디스크 구동 시 발생하는 마멸입자의 수농도를 높여주기 위함이다. Fig. 6 은 본 실험을 위한 실험장치도인데, 크게 입자 샘플링을 위한 장치와 샘플링된 입자를 따로 분리하여 분석하는 장치의 두 부분으로 나뉜다.

우선 입자 샘플링을 위한 실험장치를 살펴보면, 청정공기공급기를 통해 주입되는 공기는 HEPA 필터를 통과함으로써 다시 한번 외부 오염 입자를 제거한 후 하드디스크로 공급되는데, 이 때 발생한 입자의 효율적인 샘플링을 위해 하드디스크 커버부분에 2 개의 제트 노즐을 설치하여 외부에서 주입되는 공기를 빠른 속도로 분사하였다. 이 때의 공급 유량은 2 lpm 이며, 이 때 각각의 제트 노즐에서 분사되는 공기 제트의 속도는 약 16.7 m/s 이다. 여기서 샘플링에 필요한 유량은 0.3 lpm 또는 1.5 lpm 이며, 나머지 유량에 대해서는 하드디스크 커버에 과잉공기 배출구를 만들어 외부로 배출하였다. 여기서 샘플링 튜브로 배출된 입자들이 입자 샘플러로 이동하게 되고, 전원공급기 (power supply)로부터 전압이 인가된 샘플러에 전기장이 형성되며, 전기적인 힘과 관성력에 의해 샘플러

Table 1 Calculated cut diameter

	$d_{A, 50}$	$d_{NaCl, 50}$	$d_{DOS, 50}$
1.5 lpm	300 nm	202 nm	313 nm

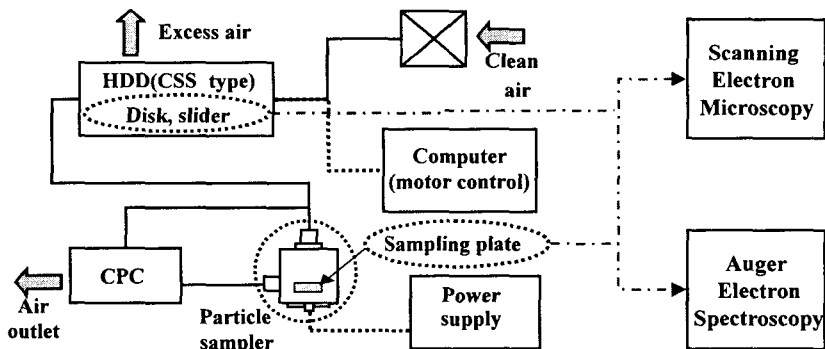


Fig. 6 Experimental setup for particle sampling

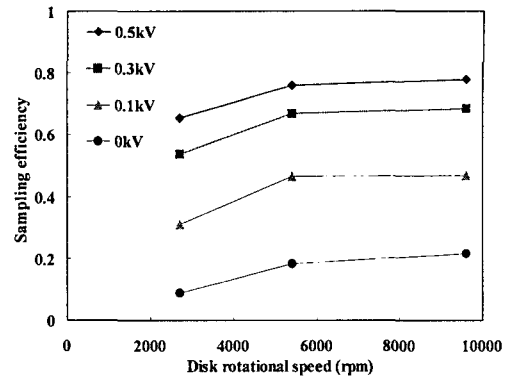
기판 (sampling plate)에서 입자가 포집되게 된다. 여기서 전기적인 힘에 의해 입자가 샘플링 되기 위해서는 입자 자체에서 일정 전하수를 지녀야 하는데, 기존의 연구에 의해 하드디스크 동작시 발생한 입자들은 대전 되었을 것으로 판단되므로⁽⁹⁾ 추가적인 입자 하전기 부분이 불필요하다. 앞에서 언급하였듯이 포집된 입자들은 기판 위에 부착되지만, 포집이 안 된 입자들은 원래의 유동을 따라 샘플러 외부로 흐르게 되어 응축핵 계수기로 흡입된다.

위와 같은 방법으로 샘플링된 입자들은 샘플러 기판만 따로 분리되어 또 다른 분석 장치에서 사용 목적에 따른 분석이 이루어진다. 본 실험에서는 샘플링 실험을 마친 후의 슬라이더-디스크 인터페이스 마멸 부분 및 샘플링 된 입자들을 SEM 이미지 촬영을 통해 대략적인 크기 및 형상을 관찰하고, AES 전자분광기로 측정하여 성분분석을 실시하였다.

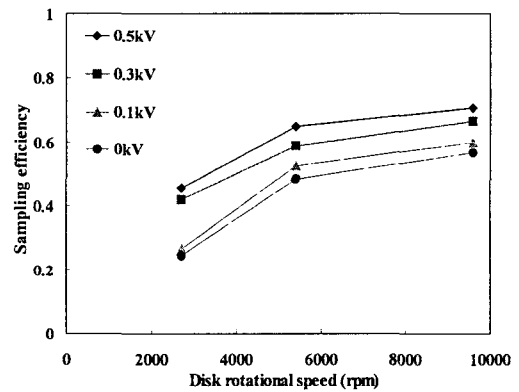
3.2 샘플링 효율

Fig. 7은 실제 하드디스크 구동시 발생하는 입자를 샘플링하여 식 (1)에 따라 포집효율을 계산한 그래프이다. 샘플링 효율 측정에 있어서 유량의 변화에 따라 (a)와 (b)로 분리하였고, 디스크 회전 속도 및 인가전압의 변화를 주었다. 결과를 살펴보면, 디스크의 회전속도가 높아질수록, 또한 외부에서 인가된 전압의 크기가 클수록 샘플링 효율이 높아짐을 그래프 (a)와 (b) 모두에서 관찰할 수 있었다. 우선 디스크의 회전속도가 높아지면 크기가 작은 입자들이 많이 발생하는데,⁽⁹⁾ 앞의 식 (3)에서 설명하였듯이, 입자의 크기가 작아질수록 입자의 전기이동도 (electrical mobility)가 크므로 샘플링이 큰 입자에 비해 잘 된다. 또한 전기적 샘플링효율은 외부 전기장의 세기와 비례하기 때문에, 전기장의 세기와 샘플링 효율이 비례하는 실험 결과는 예측된 결과라고 할 수 있다. 그런데 그래프 (b)에서 인가 전압이 0kV 일 때 샘플링 효율이 그래프 (a)에 비해 높은 이유는, 앞의 성능평가에서 언급하였듯이 샘플링 유량이 커지면 샘플러 노즐에서의 유동 속도가 커지므로 샘플링 기판에 입자가 전기력에 의해서가 아니라 관성충돌에 의해서 부착되는 확률이 높아지기 때문이다. 또한 그래프 (b)에서 유량이 커서 샘플러 내부에서 체류시간이 그래프 (a)에 비해 짧으므로, 인가전압 증가에 따른 샘플링 효율 증가량이 그래프 (b)의 결과가 (a)보다 낮음을 알 수 있다.

결론적으로 그래프 (a)에서, 전기력을 인가한 상태



(a) 0.3 lpm



(b) 1.5 lpm

Fig. 7 Particle sampling efficiency from HDD

에서의 입자 샘플링 효율이 60% 이상 증가한 현상으로 판단해보아, 입자 샘플링에 가장 큰 영향을 미친요인은 외부에서 인가된 전기력이라 할 수 있겠다. 한편, 그래프 (b)에서 전기력을 인가한 상태에서의 입자 샘플링 효율이 20% 정도만 증가한 반면, 전기장이 없어도 샘플링 효율이 최대 50% 이상 가능한 결과로 판단해볼 때, 입자 샘플링에 가장 큰 영향을 미친요인은 입자의 관성력이라 할 수 있다.

3.3 형상 및 성분 분석

3.3.1 슬라이더 표면

본 실험에서 사용된 하드디스크의 슬라이더의 종류는 피코-슬라이더 (30% slider)이며, 크기는 1 mm × 1.235 mm × 0.3 mm (shallow depth: 0.2 μm, deep cavity: 2 μm) 이다. 또한 슬라이더의 공기베어링 표면 (air bearing surface, ABS)은 Al₂O₃-TiC 재질의 기판 위에 DLC (diamond-like carbon)가 코팅되어 있다.

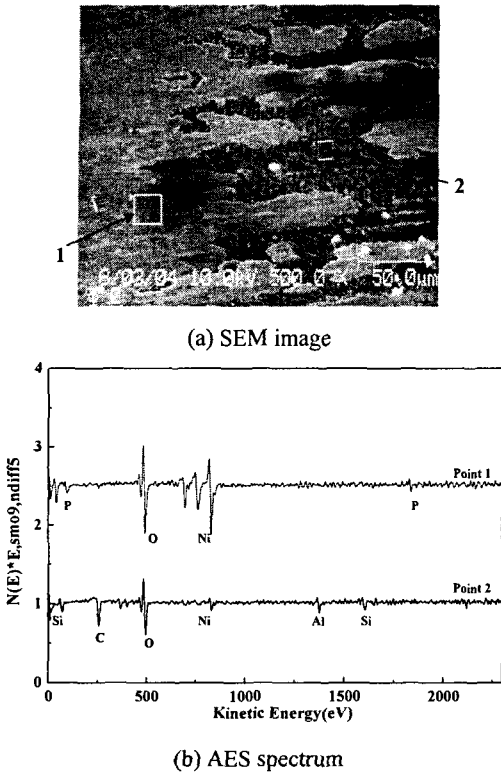


Fig. 8 SEM image and AES spectrum of slider surface

Fig. 8 은 입자 샘플링 후의 슬라이더 표면에 대한 SEM 이미지(a)와 AES 전자분광기(b) 분석 결과이다. Fig. 8(a)에서 보면, 슬라이더 표면 (1 지점)에 디스크의 성분 (지점 2)이 덮여 있음을 볼 수 있다. 이는 실험 시 슬라이더에 강제 하중을 부가하여, 슬라이더가 부상하지 못하는 상태 (near contact or drag mode)로 디스크를 회전 시켰기 때문에 슬라이더와 디스크가 회전시 상호접촉에 의해 표면에 마멸현상이 발생하여, 서로간의 물질이 부착되었음을 알 수 있게 해준다.

그래프 (b)는 Fig. 8(a)에서의 두 지점에 대한 Auger 스펙트럼인데, 지점 1에서는 추측대로 디스크의 구성 성분인 P, Ni 등이 관찰되었으며, 지점 2에서는 슬라이더의 구성 성분인 C, Al 등이 관찰되었다. 여기서 두 지점 모두 관찰된 성분인 O의 경우 원래 구성성분이 관찰되었을 가능성도 있지만, 슬라이더 표면 가공 시 또는 실험 시에 외부공기와 접촉하여 산화반응이 일어나기 때문에 슬라이더 표면물질이 산화하여 관찰될 가능성이 더 크다. 이러한 O 성분의 관찰결과는 뒤에서 언급할 디스크 표면 및 샘플링 입자의 경우 모두 해당된다.

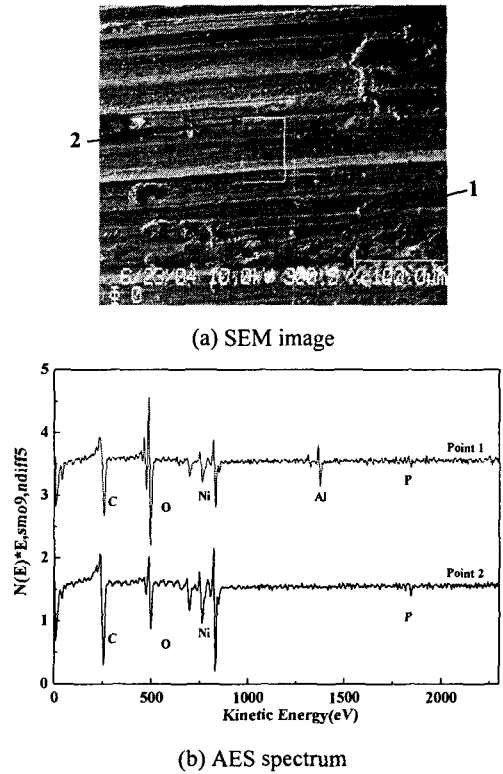


Fig. 9 SEM image and AES spectrum of disk surface

3.3.2 디스크 표면

디스크의 경우 재질이 Al-Mg 에 75Å DLC 코팅 되었으며, 범프 (bump) 높이는 165 Å 이고, 데이터 존에서의 표면 거칠기 (Ra)는 8 Å 인 외지름이 3.5 인치 디스크가 사용되었다. Fig. 9 의 (a)는 슬라이더와 접촉한 디스크 표면에 대한 SEM 측정 이미지인데, 슬라이더 표면과 마찬가지로 상호접촉에 의한 마멸흔적이 나타난다. 또한 마멸에 의한 표면 손상영역에서 미세 입자들이 부착되어 있는 것이 관찰되는데, 이는 디스크 표면에 코팅된 재료가 미세하게 분쇄 (crash)되어, 일부는 슬라이더 표면에 부착되고, 또 다른 일부는 입자의 형상으로 디스크로부터 탈착되어 감을 보여주는 흔적이다. Fig. 9(a)에서 임의의 두 지점에 대한 AES 전자분광기 분석에 대한 결과가 그래프 (b)에 나와 있다. 여기서 두 지점 모두에서 Fig. 8(b)의 지점 1과 동일하게 P, Ni 의 성분이 관찰되었으며, 추가적으로 C, Al 등의 성분도 관찰되었다.

3.3.3 샘플링 입자

Fig. 10 은 앞에서 설계된 입자 샘플러를 사용하여

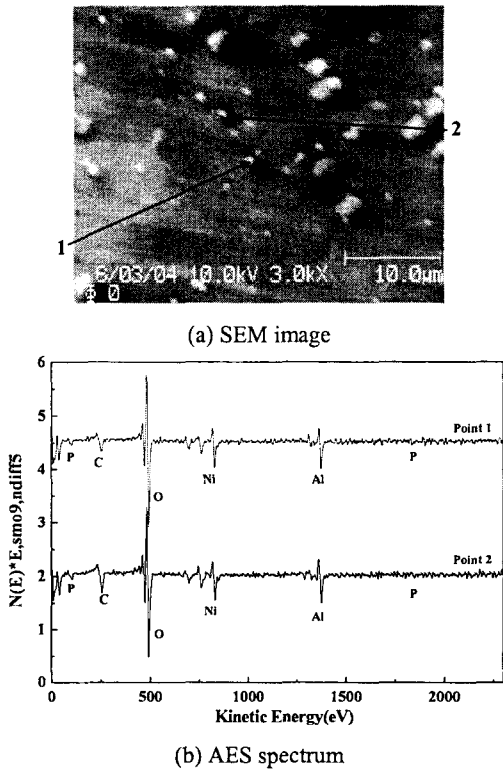


Fig. 10 SEM image and AES spectrum of particle sample

하드디스크로부터 발생한 입자를 샘플링(flow rate: 1.5 lpm)하고 분석한 결과이다. Fig. 10(a)에는 슬라이더와 디스크의 상호접촉에 의한 마멸입자들이 관찰되는데, 그 크기가 크게는 수 μm 로부터 작게는 수백 nm 도 채 안된다. 여기서 나노미터 수준의 입자들은 외부에서 인가된 전기력이 포집되는데 가장 큰 영향을 주었으리라 판단되지만, 그보다 큰 입자들은 전기력이 아닌 관성(inertia)에 의한 충돌에 의해 포집되었으리라 판단된다.

Fig. 10(a)에서 두 개의 입자를 선정하여 AES 분석을 실시한 결과가 그래프 (b)에 나와있다. 입자 1 과 2 모두 동일한 P, C, Ni, Al 등의 성분 함을 확인할 수 있었으며, 이 성분들은 앞에서 분석되었던 디스크 표면의 성분과 동일한 것들이다. 따라서 본 실험에서 하드디스크로부터 샘플링 된 입자들은 슬라이더와 디스크의 상호접촉으로 인한 마멸 입자임으로 판단이 되며, 입자들이 주로 디스크 표면으로부터 분리된 것임을 추측할 수 있다.

기존의 연구로써 Lee 등⁽¹³⁾은 맴브레인 필터를(membrane filter) 사용하여 5000 CSS (contact start/stop) 사이클 동안에 하드디스크로부터 발생한 입

자들을 샘플링하고 성분 분석을 실시하였는데, 그 결과에 있어서 본 연구의 결과와 미세한 차이는 존재하나, 주요한 성분들이 대부분 일치하는 결과를 나타냈다. 이 때의 미세한 결과 차이는, 성분 분석 장비 또는 입자의 크기의 차이로 인한 AES 스펙트럼 강도 차이 등이 주요 원인이라고 판단이 된다. 하지만 본 실험 조건에 있어서 슬라이더에 강제부하가 인가된 것을 고려하였을 때, 실제 정상적인 구동조건 하에서 발생한 마멸입자와 매우 유사한 실험 결과를 보인다고 판단된다.

4. 결론

하드디스크의 안정성 및 신뢰성을 높이기 위해 내부에서 발생하는 입자 제거는 필수적이며, 이를 위해서는 발생한 입자에 대한 정확한 분석이 필요한데 분석을 위한 전단계의 한가지 방법으로 샘플링 방법을 사용한다. 본 연구에서의 결론은 다음과 같다.

첫째, 본 연구에서는 실험특성에 알맞은 입자 샘플러를 새롭게 설계하고 성능평가 하였다. 제작된 입자 샘플러는 단일 입경의 소형 임팩터의 형상이며, 외부에서 인가되는 전기력 (0~0.5 kV)과 입자의 관성력에 의해 미세 입자를 샘플링하는데, 샘플링 목적에 따라 유량 또는 인가되는 전압을 조절하여 포집해야 한다.

둘째, 샘플러를 사용하여 하드디스크로부터 발생한 마멸입자들을 샘플링 하였을 시 최대 80 % 정도의 샘플링 효율을 보였으며, 샘플링 된 입자를 샘플러로부터 분리하여 SEM 이미지 및 AES 전자분광기를 사용하여 분석하였다. 그 결과, 샘플링 된 마멸입자는 대부분 디스크의 표면으로부터 탈락된 것으로 판단되며, 성분특성상 정상적인 구동조건 하에서 발생한 마멸입자와 유사한 실험 결과를 보인다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 선도연구자 지원(과제번호:2003-041-D00358)을 받아 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Jhon, M. S., Peck, P. R., Simmons, R. F. and Janstrom, T. J., 1994, "Behavior of the Head-Disk Interface in Future Disk Drives," *IEEE Trans.*

- Magnetics*, Vol. 30, No. 2, pp. 410~416.
- (2) Park, H. S., Yoo, Y. C., Bae, G. N. and Hwang, J., 1999, "Investigation of Particle Generation in a Hard Disk Drive During the Start/Stop Period," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 35, No. 5, pp. 2439~2441.
 - (3) Yoo, Y. C., 2000, "Numerical Calculations of Flow Field and Increase of Particle Capture Efficiency by a Recirculation Filter in a Hard Disk Drive," M. S. Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.
 - (4) Ji, J. H., Bae, G. N. and Hwang, J., 2001, "Design and Performance Evaluation of a Three Stage Impactor," *Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 17, No. 6, pp. 441~450.
 - (5) 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.
 - (6) Liu, B. Y. H., Whitby, K. T. and Yu, H. H. S., 1967, "Electrostatic Aerosol Sampler for Light and Electron Microscopy," *Review of Sci. Inst.*, Vol. 38, pp. 100~102.
 - (7) Cheng, Y. S., Yeh, H. C. and Kanapilly, G. M., 1981, "Collection Efficiency of a Point-to-Plane Electrostatic Precipitator," *AIHAJ*, Vol. 42, pp. 605~610.
 - (8) Dixkens, J. and Fissan, J., 1999, "Development of an Electrostatic Precipitator for Off-Line Particle Analysis," *Aerosol Sci. Technol.*, Vol. 30, pp. 438~453.
 - (9) Lee, J., Park, D., Lee, D. Y. and Hwang, J., 2005, "Measurements of Particles Size Distribution and Average Particle Charge in Operating a Hard Disk Drive," *Microsystem Technologies*, in press.
 - (10) Hinds, W. C., 1982, *Aerosol Technology*, John and Wiley & Sons.
 - (11) Lee, K. W. and Liu, B. Y. H., 1980, "On the Minimum Efficiency and the Most Penetrating Particle Size for Fibrous Filters," *Journal of the Air Pollution Control Association*, Vol. 30, pp. 377~381.
 - (12) 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.
 - (13) 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.