

하드 디스크 드라이브 회전수 변화가 드라이브 내 나노 오염 입자 발생에 미치는 영향

이대영* · 황정호† · 배귀남**

(2004년 3월 18일 접수, 2004년 5월 28일 심사완료)

Effect of Disk Rotational Speed on Contamination Nano Particles Generated in a Hard Disk Drive

Dae-Young Lee, Jungho Hwang and Gwi-Nam Bae

Key Words : Hard Disk Drive (하드 디스크 드라이브), Slider Disk Interaction(슬라이더 디스크 상호작용), Nano Particle Generation(나노입자발생), Particle Contamination(입자오염)

Abstract

In high-density hard disk drives, the slider should be made to fly close to the magnetic recording disk to generate better signal resolution and at an increasingly high velocity to achieve better data rate. The slider disk interaction in CSS (contact-start-stop) mode is an important source of particle generation. Contamination particles in the hard disk drive can cause serious problems including slider crash and thermal asperities. We investigated the number and the sizes of particles generated in the hard disk drive, operating at increasing disk rotational speeds, in the CSS mode. CNC (condensation nucleus counter) and PSS (particle size selector) were used for this investigation. In addition, we examined the particle components by using SEM (scanning electron microscopes), AES (auger electron spectroscopy), and TOF-SIMS (time of flight-secondary ions mass spectrometry). The increasing disk rotational speed directly affected the particle generation by slider disk interaction. The number of particles that were generated increased with the disk rotational speed. The particle generation rate increased rapidly at motor speeds above 8000 rpm. This increase may be due to the increased slider disk interaction. Particle sizes ranged from 14 to 200 nm. The particles generated by slider disk interaction came from the lubricant on the disk, coating layer of the disk, and also slider surface.

1. 서론

현재 거의 모든 PC에서 주 정보 저장매체로 사용되고 있는 하드 디스크 드라이브(HDD, Hard disk drive)는 보급이 활발 했던 1980년대부터 지금까지 많은 기술적 진보를 거쳐왔다. 그 중 기록밀도의 향상은 매우 빠르게 진행 됐으며 현재까지도 기술 개발에 있어 매우 중요한 것으로 받아 들여지고

있다. 또한 최근 용량이 크고 다양한 소프트웨어가 일반적으로 사용되고, 방대한 용량을 갖는 음악 및 동영상 등의 멀티미디어를 구현하기 위해 높은 저장 밀도를 갖는 HDD가 요구되고 있어 HDD의 단위면적당 저장 밀도를 높이기 위한 연구가 앞으로도 계속될 전망이다.

Fig. 1에서는 HDD내에서 읽고 쓰기를 하는데 필요한 헤드가 장착되어 있는 슬라이더와 디스크 사이의 인터페이스(slider disk interface, SDI)를 표현한 것으로 슬라이더와 디스크의 상호작용으로 입자가 발생되고 마찰 및 대전 현상이 발생함을 보여 주고 있다. 그리고 이런 입자 발생 및 마찰 대

* 연세대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학부

E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

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

** 회원, 한국과학기술연구원 지구환경연구센터

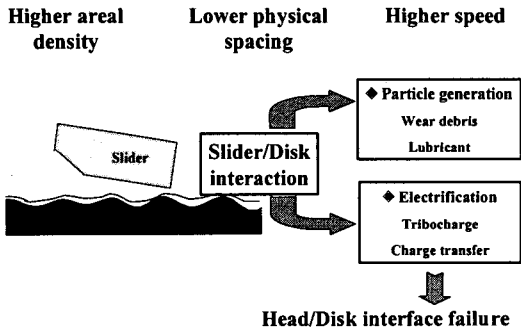


Fig. 1 Slider/Disk interaction in HDD

전 현상으로 인해 HDD내에서 결함이 생길 수 있음을 보여 주고 있다.⁽¹⁾ 예로 HDD는 자기저항 (magnetoresistive, MR) 헤드를 사용하게 되면서 입자에 의한 TA(thermal asperity) 문제가 대두되었다. MR 헤드 변환기가 입자와 충돌시의 급격한 온도 상승(flash temperature)으로 인해 데이터의 출력이 불가능해지는 현상을 TA라 한다. TA는 주로 입자에 의해서 발생하기 때문에 입자 발생원에 대한 규명이 중요하다.

현재 대부분의 하드 디스크 드라이브 구동방식으로 사용되고 있는 CSS(contact-start-stop)방식은 슬라이더를 랜딩존(landing zone)에 위치 한 상태에서 디스크를 회전시켜 발생하는 공기베어링층으로 슬라이더를 부상시키고 데이터존(data zone)으로 옮기는 방식이다. 하지만 슬라이더의 부상과 착륙 시에는 회전수의 변화로 인해 공기베어링층이 불안정하게 형성되어 슬라이더는 디스크와 미끄럼 접촉을 하게 되며 이때 디스크와 슬라이더의 상호 작용에 의해 입자들이 발생하게 된다.⁽²⁾

하드 디스크 드라이브에서 기록 밀도를 가장 효과적으로 증가시킬 수 있는 방법은 헤드와 디스크 간격을 줄이는 것이다. 오늘날 헤드와 디스크 사이 간격크기는 약 10nm 정도로 매우 작다. 향후 200~400Gb/in² 용량의 하드 디스크 드라이브를 개발하기 위해서는 간격이 5~10nm 정도로 더 작아져야 할 것이다. 높은 성능의 디스크 드라이브는 또한 높은 디스크 회전속도를 요구한다. 최근 일반적인 하드 디스크 드라이브의 회전속도는 5400 rpm에서 10000 rpm까지 증가하고 있으며 후에 더욱더 빠른 회전속도가 구현될 전망이다.⁽³⁾

이와 관련된 연구로 Hiller 등⁽⁴⁾은 슬라이더와 디스크의 마찰에 의해 입자가 발생하고 입자가 슬라이더의 가장 자리에 입자가 부착하여 휘스커(whisker)를 형성시킨다는 것을 밝혔다. 그리고 부착된 휘스커는 슬라이더의 부상 시 부상 특성에

영향을 준다고 언급하였다. Zhang 등⁽⁵⁾은 입자오염에 의한 발생된 슬라이더와 디스크 사이의 물리적인 손상됨을 연구하였는데 손상이 가벼운 손상에 서부터 깊은 원형의 스크래치 형상의 손상이 입자에 의해 디스크표면에 발생된다는 것을 보여줬다. Koka 등⁽⁶⁾은 슬라이더 도입부의 테이퍼 부분과 디스크의 마찰로 인해 작은 입자들이 발생함을 밝혀 냈고 형성 과정을 가시화하여 보여주었다. Park 등⁽⁷⁾은 응축핵 계수기 (CNC, condensation nucleus counter)를 이용해 디스크 드라이브 구동과 정지 시에 입자가 많이 발생함을 보여줘 발생된 입자가 슬라이더와 디스크의 마찰에 의해서 발생됨을 보여주었다. 또한 슬라이더의 정지시간이 입자 발생에 영향을 주며 이는 슬라이더와 디스크 사이에 발생하는 Stiction (정지 상태에서 두 표면을 분리 하는데 필요한 힘)에 의한 것임을 보여주었다. Yoon 등⁽⁸⁾은 드라이브내 입자오염이 슬라이더와 디스크 사이에 발생하는 마찰과 마멸에 미치는 영향에 대해 연구하였으며 오염도가 증가한 환경에서는 마찰이 증가하였고 슬라이더와 손상도 또한 증가했음을 보여줬다. Choa 등⁽⁹⁾은 디스크 드라이브의 열점 반응에 미치는 요소들에 대해 연구를 하였다. 물질들의 재료 성질과 기하학적인 형상이 MR 과 거대 자기저항 (giant magnetoresistive, GMR) 헤드의 센서의 성능에 미치는 영향을 확인하였으며 열점의 반응도 또한 많이 달라짐을 확인하였다. Bhushan 등⁽¹⁰⁾은 상용하드디스크 드라이브를 이용해 디스크 드라이브내 발생된 입자를 water trap 방법을 이용해 포집하였다. 그리고 포집한 물질의 성분을 분석해 발생된 입자들의 성분 대부분이 알루미늄 성분이었으며 다른 다양한 물질 (Si, Ca, Mg, Ti 등)도 발생됨을 확인하였다.

기존의 연구는 3000~5400rpm의 속도로 디스크가 회전하는 HDD 내에서 연구를 한 것으로 최근의 높은 회전속도 증가로 인한 입자 발생 경향에 관한 연구는 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 앞으로 계속될 디스크의 회전 속도 증가가 하드 디스크 드라이브내의 입자 발생에 어떤 영향을 주며 이때 발생하는 입자들의 크기를 CSS 구동방식 환경에서 분석하였다. 또한 발생하는 입자들의 성분들을 전자현미경 (SEM, scanning electron microscopy), 오제이 전자분광기 (AES, auger electron spectroscopy), 2 차 이온 질량 분석기 (TOF-SIMS, time of flight-secondary ions mass spectrometry) 등을 이용해 분석했다. 본 논문에서는 실험 장치와 순서에 대해 우선 논하고 발생된 입자의 양과 크기를 디스크 회전속도에 대해 분석한 다음 발생된

입자의 성분들에 대해 논하려고 한다.

2. 실험

본 실험에서는 하드 디스크의 회전수 변화에 따라 발생하는 입자 발생 경향을 확인하기 위해 다음과 같이 실험 장치를 구성하였다.

본 실험에서는 상용 HDD(14.61×10.16×2.54 cm)를 사용하였다. 실험 장치는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 HDD, 입자 샘플링 프로브, 외부에서 유입되는 공기의 청정도를 유지하기 위한 고성능 에어 필터(HEPA)필터, HDD의 CSS 상태 구현 및 모터구동을 조절하기 위한 컴퓨터 그리고 응축핵 계수기로 실험 장치를 구성하였다. 본 실험의 모든 환경은 Class 100(0.5µm 기준)의 청정공간(cleanbooth)에서 이루어 졌다.

샘플링 프로브는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 HDD 덮개에 디스크 회전으로 인한 유동의 영향을 최소화하기 위해 수직으로 설치하였으며 실제 구동하는 HDD 내에서 발생하는 입자들의 발생 경향을 확인하기 위해 Fig. 3과 같이 샘플링 프로브를 입

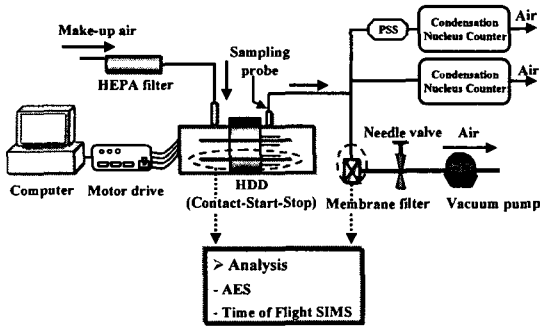


Fig. 2 Experimental set-up

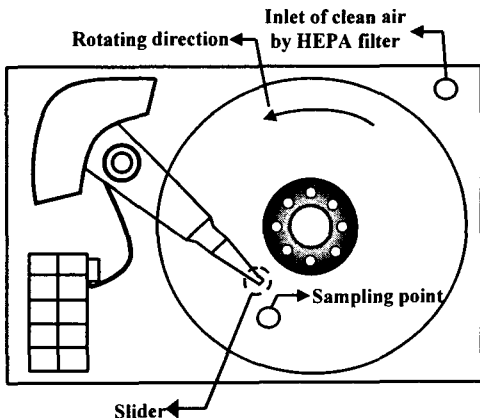


Fig. 3 Schematic of particle sampling point

자 발생원인 슬라이더 부근에 설치하였다.⁽⁷⁾ 이때 샘플링 프로브의 크기는 내경 3mm 인 크기의 SUS 튜브를 사용하였다. 그리고 본 실험에서는 HDD 내부에 설치되어 있는 내부 공기 순환 필터(recirculation filter)를 제거하여 발생한 입자가 필터에 의해 제거되지 않도록 하였다. 응축 핵 계수기는 HDD 내에 발생한 입자의 수농도를 측정하는 것으로 HDD 내의 공기를 일정하게 샘플링하여 측정을 하게 된다. 그리고 이때 샘플링 된 양만큼의 공기를 보충해 주기 위해 HEPA 필터를 이용하여 깨끗한 공기가 내부로 유입되도록 하였다. 본 실험에서 입자수 측정에 사용된 응축핵 계수기는 샘플링 유량이 0.3L/min, 최소 측정 가능 입자 크기가 7nm (50% detection)인 CNC(TSI 3022A)를 사용하였다. 그리고 입자들의 크기분석을 위한 응축핵 계수기는 PSS (particle size selector, TSI 376060)와 함께 사용되는 것으로 CNC(TSI 3760)를 사용하였으며 샘플링 유량이 1.4L/min, 최소 측정 가능 입자 크기가 14nm (50% detection)이다. PSS는 입자들의 확산성질을 이용해 크기를 분류하여 측정하는 것으로 큰 입자들은 지나가고 작은 입자들은 선택적으로 부착시켜 크기를 분류하는 장치이다. 이 장치는 매쉬로 이루어진 확산 스크린과 본체로 이루어졌으며 응축핵 계수기의 앞에 장착을 하여 사용한다. 14nm ~200nm 까지의 입자들의 크기 분포를 분석할 수 있다.⁽¹¹⁾

입자들의 성분 분석을 위해 본 실험에서는 전자현미경, 2차 이온 질량 분석기 (trift II system, Physical electronics) 그리고 오제이 전자 현미경 (smart-200, Physical electronics)을 사용하였다. 프로브로부터 채취된 입자들은 멤브레인 필터 (nuclepore track-etched membrane, Whatman)로 포집한다. 이들 입자들은 전자현미경 그리고 2차 이온 질량분석기를 이용해 분석하고, 슬라이더 표면에 부착된 입자들은 드라이브에서 제거하여 오제이 전자분광기를 이용해 분석한다.

2차 이온질량분석기(TOF-SIMS, Time of flight-Secondary Ion Mass Spectroscopy)는 비전도체물질을 분석하는데 가장 널리 사용되는 표면 분석 장비로서 수 keV~10keV 로 가속된 이온 빔을 재료의 표면에 입사시켜 방출되는 2차 이온들의 질량을 측정하여 재료표면을 구성하고 있는 원소 및 분자의 종류 및 양을 분석해내는 장비이다. 오제이 전자현미경(AES, Auger Electron Spectroscopy)은 수 백 Å 크기로 집속된 전자 빔을 재료의 표면에 입사시켜 방출되는 오제이 전자의 에너지를 측정하여 재료표면을 구성하고 있는 원소의 종류 및 양을 분

석해내는 표면분석 장비이다. 본 실험에서 니들 벨브와 진공 펌프는 입자들을 샘플링하는데 사용하였다.

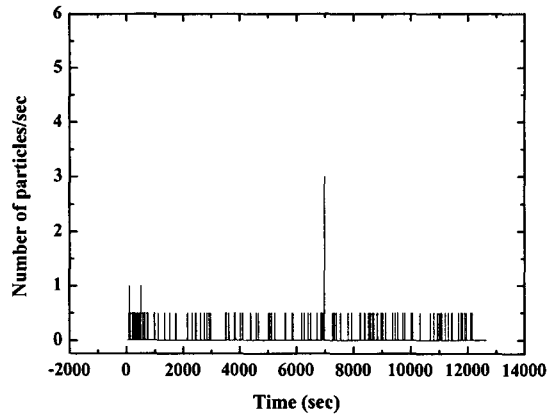
실험은 다음과 같은 순서로 진행하였다. 먼저 HDD 를 구동하지 않은 상태에서 약 1분 동안 CNC 로 배경오염도를 측정한다. 다음으로 HDD 를 구동 시켜 발생된 입자들을 샘플링 프로브를 이용해 샘플하고 응축핵 계수기를 이용해 측정한다. 다음으로 드라이브가 켜진 상태에서 발생된 입자들의 크기를 응축핵 계수기화 입자 크기 분류기를 이용해 측정한다. 디스크 회전속도에 의한 영향을 연구하기 위해 이와 같은 실험을 디스크 회전속도가 5400, 6000, 7200, 8000 그리고 9500 rpm 일 때 각각 반복하였다. 모든 실험에서 디스크의 가속 구간 시간은 3초로 고정하였다. 입자들의 성분 분석을 위해 드라이브내에서 발생하는 입자들을 디스크가 5400rpm 으로 회전할 때 샘플링 프로브를 이용해서 샘플링하고 멤브레인 필터를 이용해 포집하였다. 포집된 입자들은 전자현미경과 2차 이온 질량 분석기를 이용해 분석하였고 슬라이더 표면에 부착된 입자들은 전자현미경과 오제이 전자 분광기를 이용해 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

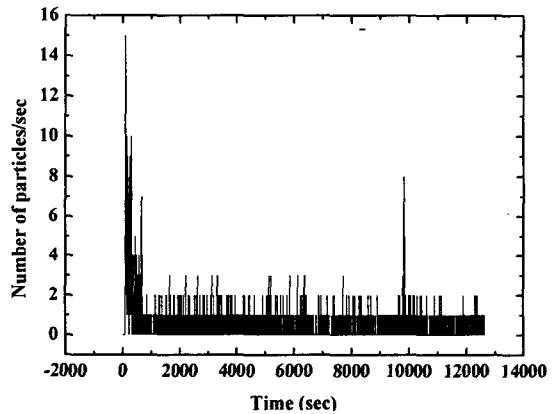
3.1 발생하는 입자들의 수와 크기

본 실험에서는 슬라이더를 랜딩존에 13,000초 동안 고정하여 구동하였다. Fig. 4는 HDD 내에서 구동 시 발생된 입자들을 샘플링 한 결과이다. 구동 시간 13000sec 동안 샘플링을 계속 실시 하였다. 결과를 보면 HDD 의 구동과 동시에 입자가 측정되었으며 이는 Park 등⁽²⁾의 연구결과와 같은 결과를 보였다. 이때 발생한 입자는 슬라이더와 디스크의 상호작용에 의해 발생 된 것이다.

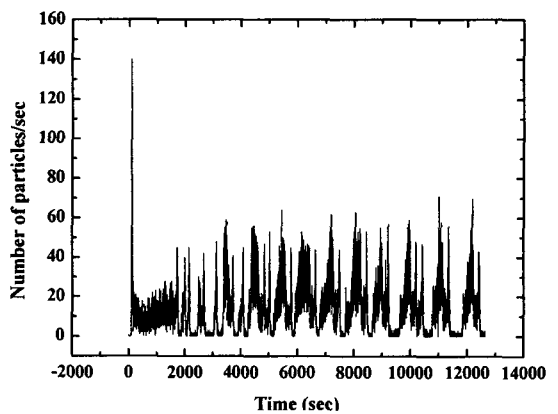
Gao 등⁽¹²⁾은 슬라이더를 디스크 표면에서 부상시킨 후에 슬라이더 ABS(Air Bearing Surface)에서 마멸흔적을 발견하여 슬라이더가 부상하는 상태에서도 디스크와 접촉이 발생하고 있음을 예측하였다. 그리고 Park 등⁽⁷⁾은 슬라이더를 랜딩존에서 부상시킨 후 여러 위치의 데이터존으로 위치를 변경하여 발생하는 입자 수들을 측정한 결과 부상 시에도 간헐적으로 입자들이 발생함을 확인하였으며 이때 발생한 입자들은 슬라이더와 디스크의 간헐적인 접촉으로 인한 것이라고 언급하였다.



(a) 5400 rpm



(b) 7200 rpm



(c) 9500 rpm

Fig. 4 Distribution of particle generation with time

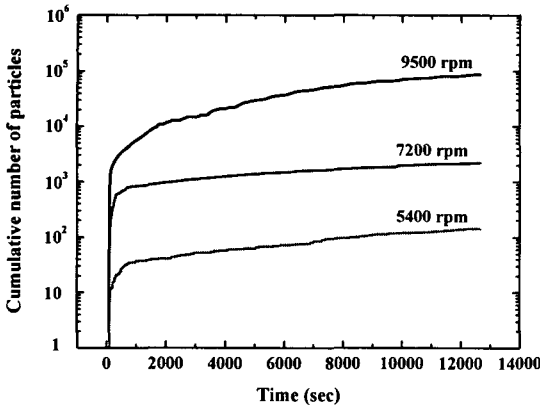


Fig. 5 Cumulative number of particles versus disk rotational speed

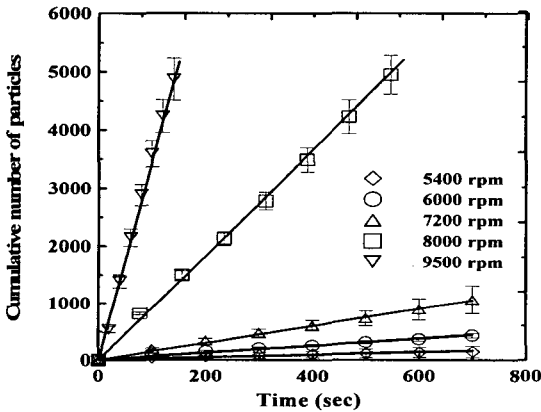


Fig. 6 Cumulative number of particles versus disk rotational speed

본 실험 조건은 슬라이더를 랜딩존에서 부상시켜 13,000초 동안 부상 시킨 것으로 실질적으로 슬라이더가 완전한 부상을 한 경우에도 Fig. 4와 같이 간헐적으로 접촉이 일어나고 있음을 확인 할 수 있었다. 특히 디스크 회전속도가 증가할수록 접촉의 빈도는 증가하며 발생량 또한 상당히 증가함을 알 수 있다. 또한 구동시간 1000초 미만에서는 간헐적인 입자 발생과는 다른 빈번한 입자 발생경향이 이루어 지고 있음을 확인 할 수 있었다. Fig. 5는 Fig. 4의 결과에서 입자 수를 누적해서 경향을 본 것으로 모두 회전속도가 증가함에 따라 값들이 증가했으며 특히 전체 구동시간을 봤을 때 1000sec 미만에서 입자 발생이 집중적으로 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

일반적으로 CSS 방식의 HDD 에서는 슬라이더가 랜딩존에 머무르는 시간이 10초 내외로 매우 짧다.

그리고 대부분의 입자가 구동과 동시에 발생한다는 것을 고려했을 때 이 부분에 대한 좀 더 상세한 분석이 필요할 것이다. 그리고 이때 발생하는 입자 발생 경향에 대한 분석은 HDD 내에서 슬라이더와 디스크의 상호작용에 의해 발생하는 입자 발생의 경향을 예측하는데 매우 중요할 것이라 생각된다.

Fig. 6은 1000sec 미만인 구동시간에서의 입자 발생 경향을 분석하기 위해 시간을 700초로 설정하고 반복 실험을 한 결과이다. 결과를 보면 회전 속도 증가가 하드 디스크 드라이브내 입자 발생에 직접적으로 영향을 준다는 것을 확인 할 수 있다. 특히 8000rpm 이상의 회전속도에서는 급격하게 입자 발생율이 증가함을 Fig. 7은 보여주고 있다.

하드 디스크 드라이브의 CSS(contact-start-stop) 구동 방식은 현재 하드 디스크 드라이브에서 널리 사용되는 작동 방식이다. 이 작동 방식은 드라이브 전원이 꺼진 상태에서는 슬라이더가 디스크 표면 랜딩존에 부착되어 있는 상태이며 모터가 구동을 하면 슬라이더와 디스크 표면에 공기베어링층이 형성이 되어 슬라이더가 디스크 표면을 부상하게 된다. 그러나 디스크가 처음 회전하여 속도를 증가시키는 구간과 감속하는 구간에서는 공기베어링층이 충분히 형성되지 않아 슬라이더와 디스크의 접촉이 일어나게 되고 이 원인으로 인해 입자가 발생하게 된다. 높은 디스크 회전속도 환경에서 많은 입자들의 발생은 슬라이더의 불안정한 진동이 하나의 원인이 될 수 있다. 슬라이더의 진동 특성은 디스크 회전수 증가에 의해 변할 수 있다.^(13,14) 특히 높은 디스크 회전수에서 발생하는 슬라이더의 진동은 슬라이더와 디스크의 접촉을 야기한다.⁽¹⁵⁾ 이 같은 영향으로 높은 회전수에서 많은 입자들이 발생한 것으로 생각된다. Fig. 8은 디스크 회전수가 9500 rpm 일 때 하드 디스크 드라이브내에서 발생된 입자들의 크기 분포를 입자 수 기준으로 나타낸 것으로 0.014 to 0.2 μm까지의 크기 분포를 보여 주고 있다. 결과를 보면 작은 크기의 입자들이 많음을 보여 주고 있다. 본 결과는 9500 rpm 환경에서 측정된 것으로 5400, 7200 rpm 에서의 입자 크기 분포는 적은 농도로 인해 얻을 수 없었다.

3.2 발생하는 입자들의 성분

Fig. 9는 슬라이더의 표면에서 서로 다른 두 부분에 부착된 입자들을 전자현미경을 이용해 측정 한 사진이다. Fig. 9(a)와 9(b)는 마이크론 크기의 입자들과 나노 크기 입자들이 슬라이더 표면에 부

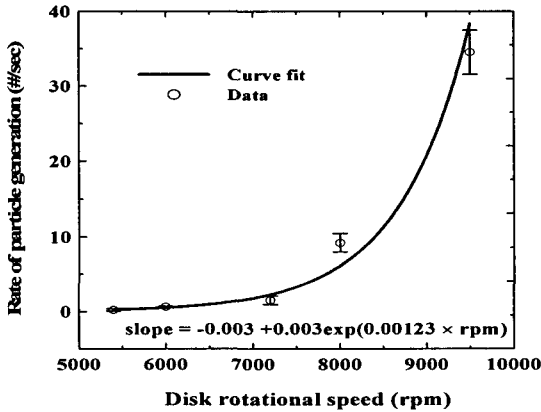


Fig. 7 Rate of particle generation versus disk rotational speed

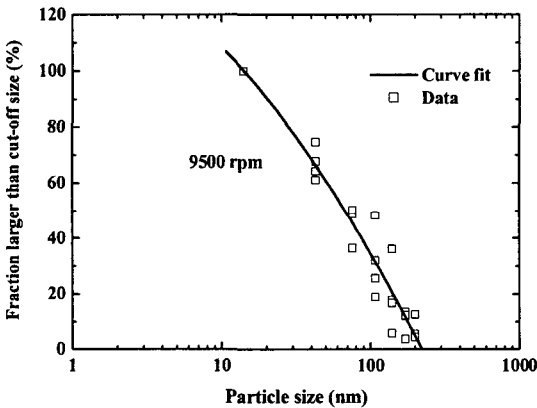
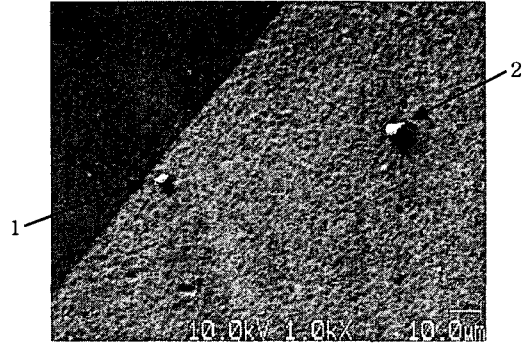
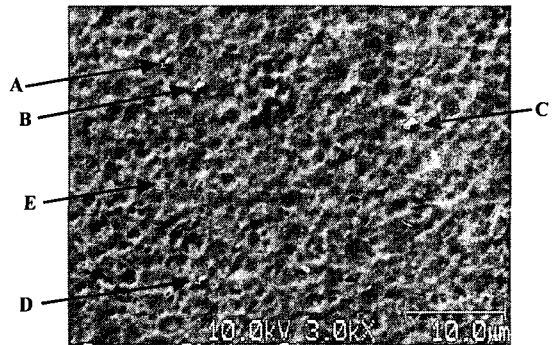


Fig. 8 Particle size distribution

착된 모습이다. Fig. 10(a)와 (b)는 Fig. 9(a)와 9(b)에서의 입자들을 오제이 전자 분광법을 이용해 분석한 것이다. Fig. 10(a)에서 슬라이더에 부착된 마이크론 사이즈의 큰 입자들은 주로 F, Fe, Cr, Al 과 Ni 등으로 성분을 가지고 있음을 알 수 있다. 그리고 몇몇 입자들은 F 를 함유하고 있어 디스크 표면의 윤활유 PFPE(perfluoropolyether)로부터 발생했다는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 10(b)의 오제이 분석 결과에서 E 지점은 입자가 없는 슬라이더 자체 표면을 분석한 부분으로 다른 입자들의 성분과 비교하기 위해 선택한 지점이다. 결과를 보면 C, Al 과 Ti 으로 성분이 나타나 기판이 Al_2O_3 -TiC 로 이루어졌으며 표면은 DLC (diamond-like carbon) 코팅이 되어있는 슬라이더라는 것을 알 수 있다. Fig. 10(b)에서 다른 나노 크기의 입자들의 성분분석 결과를 보면 슬라이더 표면과 거의 같은 성분이 나왔다는 것을 볼 수 있다. 따라서 나노 크기의



(a) Micro-particles



(b) Nano-particles

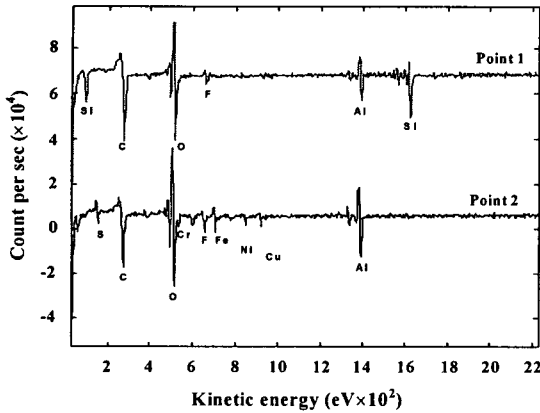
Fig. 9 SEM image of particles that adhered to slider surface

작은 입자들은 슬라이더와 디스크의 상호작용에 의해 슬라이더의 표면에서 나온 것임을 알 수 있다.

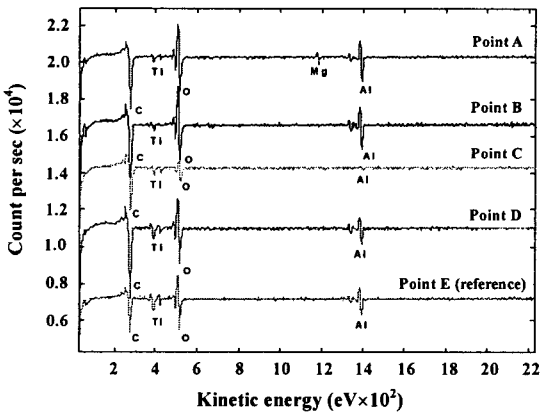
멤브레인 필터에 의해 포집된 입자들을 분석하기 위해 본 실험에서는 2 차 이온 질량 분석기를 사용하였다. Fig. 11(a)와 (b)는 멤브레인 필터 표면에 부착된 입자들의 모습을 나타낸 것이다. 여기서 Fig. 11(b)는 Cr 성분만을 나타낸 모습으로 부착된 입자성분이 Cr임을 알 수 있다. Cr 성분은 디스크의 기판 코팅 물질로서 이는 슬라이더와 디스크의 상호작용에 의해 발생한 것으로 보인다.

4. 결론

본 실험에서는 기존의 CSS (contact-start-stop) 방식에서 속도를 증가시켰을 경우 발생하는 입자의 크기와 수를 연구하였다. 게다가 이때 발생하는 입자들의 성분들을 표면분석 장치를 이용해 측정하였다.



(a) Micro-particles



(b) Nano-particles

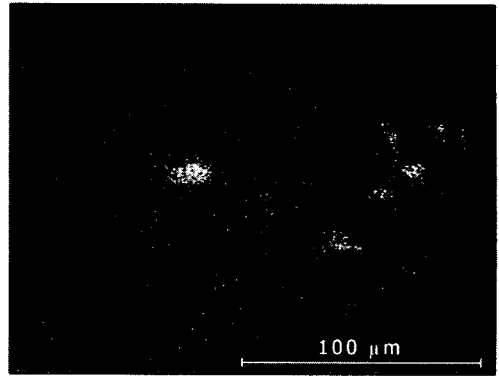
Fig. 10 AES spectrum of particles that adhered to slider surface

첫째, 증가하는 디스크 회전속도는 드라이브내 슬라이더와 디스크의 상호작용에 의한 입자 발생에 직접적으로 영향을 준다. 이때 발생하는 입자 발생은 디스크 회전속도에 따라 증가한다. 특히 회전속도가 8000 rpm 이상일 때 입자 발생율이 급격히 증가하며 이는 슬라이더와 디스크의 상호작용의 강도가 증가했기 때문이다. 발생하는 입자들의 사이즈를 14 nm~200 nm 까지 측정하였으며 작은 입자들이 상대적으로 많았다.

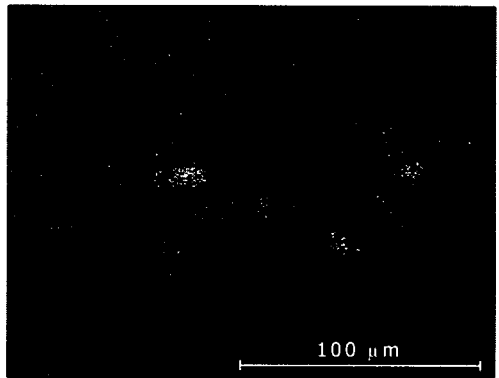
둘째, 슬라이더와 디스크의 상호작용에 의해 발생하는 입자들은 디스크의 윤활유와 코팅물질 그리고 슬라이더 표면 재질의 물질이었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단특정기초사업 (R01-2003



(a) Total ion



(b) Cr ion

Fig. 11 Ion image of particles

-000-10142-0)과 정보저장기기연구센터 (과제번호: R11-1997-042-100001-0)의 지원을 받아 이루어 졌으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) 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.
- (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) Zhao, Q. and Talke, F. E., 1999, "Experimental Investigation of the Effect of Disk Acceleration and Velocity on the Tribology of the Head/Disk Interface," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 35, pp. 2406~2408.
- (4) Hiller, B. P. and Singh, G., 1994, "Mechanism for Formation of Whiskers on a Flying Magnetic Recording Slider," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 4, pp. 1499~1503.
- (5) 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, pp. 927~932.
- (6) 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.
- (7) Park, H. S., Hwang, J. and Choa, S. H., 2000, "Particle Generation Trend with Variation of Rest Time and Seek Mode in Hard Disk Drive Operation," *Trans. of the KSME B*, Vol. 24, No.8, pp. 1056~1061.
- (8) Yoon, E. and Bhushan, B., 2001, "Effect of Particulate Concentration, Materials and Size on the Friction and Wear of a Negative-Pressure Picoslider Flying on a Laser-textured Disk," *Wear*, Vol. 247, pp. 180~190.
- (9) Choa, S. H. and Sharma, V., 2002, "Sensitivity and Rejection Capability of Thermal Asperities in a Hard Disk Drive," *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 241, pp. 466~474.
- (10) Bhushan, B., Chandra, S. and Smallen, M., 1999, "Analysis of Drive-Level Contaminant Particles," *J. Info. Storage Process. Syst.*, Vol. 1, pp. 115~124.
- (11) Cheng, Y. S. and Yeh, H. C., 1980, "Theory of a Screen-Type Diffusion Battery," *J. Aerosol Sci.*, Vol. 11, pp. 313~320.
- (12) Gao, C., Dai, P. and Vu, V., 1999, "Flying Stiction, Lubricant Pick-Up and Carbon-Overcoat Wear of Magnetic Heads," *J. Tribology*, Vol. 121, pp. 97~101.
- (13) Briggs, C. A. and Talke, F. E., 1990, "The Dynamics of Micro Sliders Using Laser Doppler Vibrometry," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 26, pp. 2442~2444.
- (14) Yamaguchi, Y., Talukder, A. A., Shibuya, T. and Tokuyama, M., 1990, "Air Flow Around a Magnetic-Head-Slider Suspension and Its Effects on Slider Flying-Height Fluctuation," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 26, pp. 2430~2432.
- (15) Tanaka, H., Yonemura, S. and Tokisue, H., 2001, "Slider Dynamics During Continuous Contact with Textured and Smooth Disks in Ultra Low Flying Height," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 37, pp. 906~911.
- (16) Lee, D. Y., Park, H. S., Yoo, Y. C. and Hwang, J., 2002, "Effect of HDD Rotational Speed Variation on Filtration of Particles by Recirculation Filter," *Trans. of the KSME B*, Vol. 26, No. 8, pp. 1069~1076.