

## 하드 디스크 드라이브 회전수 변화가 내부 필터 입자 포집 성능에 미치는 영향

이대영\* · 박희성\* · 유용철\* · 황정호\*  
(2001년 10월 25일 접수, 2002년 5월 3일 심사완료)

### Effect of HDD Rotational Speed Variation on Filtration of Particles by Recirculation Filter

Dae-Young Lee, Hee-Sung Park, Yong-Chul Yoo and Jungho Hwang

**Key Words:** Particle(입자), Recirculation Filter(내부 필터), Concentration Decay(농도 감소), Percent Clean-up(입자제거효율), HDD(하드디스크드라이브)

#### Abstract

Contamination particles in a hard disk drive can cause serious problems including slider crash and thermal asperities. A recirculation filter is typically installed in the hard disk drive to remove the particles. Measurements and theoretical predictions of particle concentration decay with the filter are carried out for a commercially available HDD. Especially, the effect of disk rotational speed on the particle capture efficiency is investigated. Results show that filter efficiency is higher for higher disk rotational speed.

#### 1. 서 론

정보저장기기 중 HDD(hard disk drive)는 자기 저항(magneto resistive, 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.<sup>(1,2)</sup> TA는 주로 입자에 의해서 발생하기 때문에 현장에서 입자 발생원에 대한 규명이 중요하다.<sup>(3)</sup> 단위 면적 당 저장 밀도(areal density)를 높이기 되면서, 부상 높이를 낮추게 되었는데 그만큼 헤드와 디스크 사이의 마찰이 일어날 가능

성이 증가하게 되었고, 이 과정에서 마멸입자가 생성되게 된다. 이러한 입자를 제거하기 위해 HDD 내부에 재순환 필터(recirculation filter)를 장착하는데, 필터의 효율을 높이기 위해서는 내부 유동 및 입자 궤적을 고려하여 필터시스템을 최적화해야 한다. 이와 관련되어 다음과 같은 연구가 있었다.

Tsai<sup>(4)</sup>는 HDD 내의 유동장 및 전기장을 수치계산하여 입자가 HDD 내부에 부착하는 경로를 예측하였다. Anath<sup>(5)</sup>는 정전기분리기로 발생된 단분산 입자를 HDD 내부에 분사하여 내부 필터의 성능을 평가하였다. Bergin 등<sup>(6)</sup>은 드라이브 내로 분사하는 입자 크기와 유입 유량을 변화시켜 필터가 있을 때와 없을 때의 입자감소량을 비교하였다. Japuntich<sup>(7)</sup>는 HDD 내의 필터통과 유량, 압력강하를 변화시켜 TTCU(time to clean up)를 구하고 고려하여 적절한 필터를 제시하였다.

기존의 연구는 3000~4000 rpm의 속도로 디스크가 회전하는 HDD내에서 필터 시스템을 최적화하였는데, 현재는 HDD 회전속도가 5400 rpm 이상이므로 기존의 연구결과를 적용할 수 없다. 또한

\* 연세대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hwangjh@yonsei.ac.kr

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

고밀도 정보저장을 위해 디스크가 고속 회전하는 추세를 고려하면 입자에 의한 오염을 최소화하는 방안이 필요하다. 본 논문에서는 현재 상용되는 5400 rpm 드라이브 내부에서의 입자 농도감소를 이론적으로 예상하고 이를 실험 결과와 비교하여 HDD 내부필터가 오염입자 제거에 미치는 영향을 연구하였다. 또한 이와 같이 5400 rpm 드라이브 내부 구조에서 필터 성능을 테스트함과 동시에 회전수를 증가시켜 HDD의 회전수 변화가 내부 필터 입자 포집 성능에 미치는 영향에 대해 알아 보았다.

2. 계 산

일정한 부피( $V$ )가 있는 시스템 내의 입자 수농도( $N$ )의 시간변화율  $\frac{dN}{dt}$ 은 식 (1)에 나타난 바와 같이 유입되는 입자개수와 유출되는 입자개수의 차이와 같다.<sup>(6)</sup>

$$V \frac{dN}{dt} = N_{in} Q_{in} - N_{out} Q_{out} \quad (1)$$

$N_{in}, Q_{in}$ 은 유입되는 공기의 입자 수농도와 유량이며,  $N_{out}, Q_{out}$ 은 유출되는 공기의 입자 수농도와 유량이다. 외부로부터 유입되거나 HDD 내에 새롭게 생성되는 입자가 없다고 가정하고 식 (1)을 HDD에 적용시키면 식 (2)와 같이 표현된다.

$$V \frac{dN}{dt} = -N(\eta_f Q_r + Q_s + Q_w) \quad (2)$$

$\eta_f$ 는 필터의 효율,  $Q_r$ 은 필터의 통과유량,  $Q_s$ 는 샘플링 유량,  $Q_w$ 는 HDD 내부 벽으로의 손실 유량이다. 필터 통과유량은 HDD 내부에 장착된 재순환필터에 의해 입자가 제거될 때 고려되며, 샘플링 유량은 드라이브 내의 입자 수농도를 측정할 때 고려된다. 초기조건에서  $t=0$ 일 때  $N=N_0$ 임을 이용하여 식 (2)의 해를 구하면 다음의 식 (3)으로 표현된다.

$$\frac{N}{N_0} = \exp\left[-\frac{0.69t}{\tau_{1/2}}\right] \quad (3)$$

위에서  $\tau_{1/2}$ 는  $N=\frac{1}{2}N_0$ 가 되는 반감 시간이며,

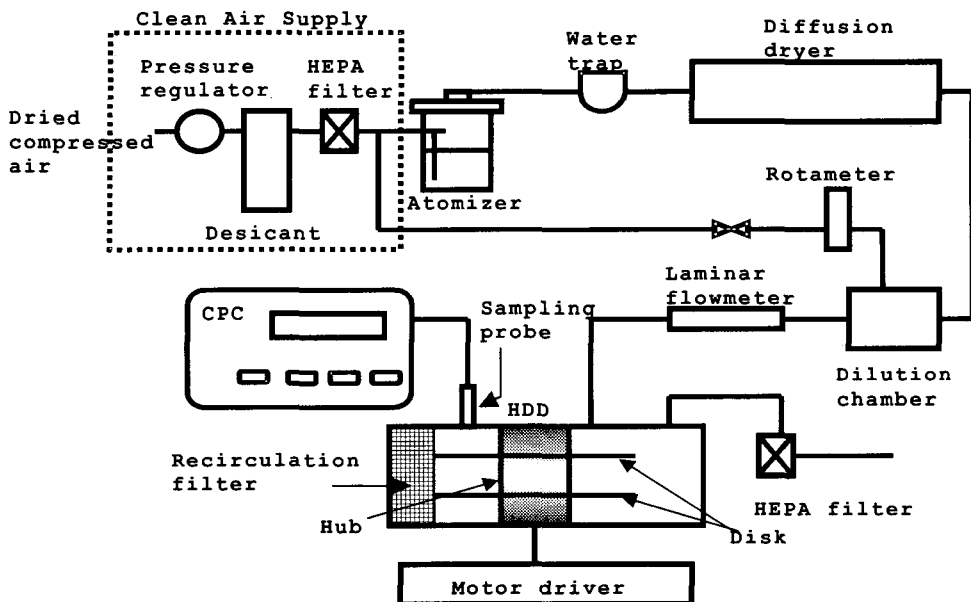


Fig. 1 Experimental setup

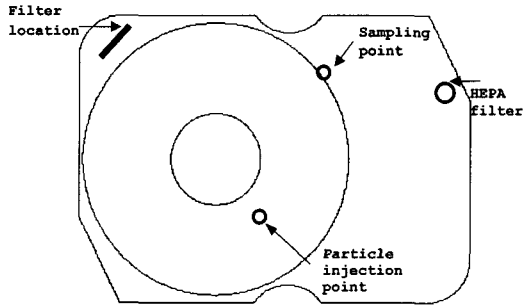


Fig. 2 Particle injection point, sampling point, and filter location

$\tau_{1/2} = 0.69 \frac{V}{(\eta_f Q_r + Q_s + Q_w)}$ 이다. 따라서  $\eta_f$ ,  $Q_r$ ,  $Q_s$ ,  $Q_w$ 를 구하면 드라이브 내의 입자농도 변화율을 예측할 수 있다. 필터의 입자제거효율은 다음과 같이 정의된다.

$$\% \text{ clean-up} = 100 \times \left[ 1 - \frac{N}{N_0} \right] \quad (4)$$

### 3. 실험

실험은 class 100의 클린 부스에서 이루어져 외부 입자에 의한 오염을 최소화하였다. 실험에 사용된 HDD는 5400 rpm용으로 제작된 상용모델이며, 본 실험에서 모터 드라이브는 스피들 모터의 회전속도를 최소 100 rpm에서 최대 40000 rpm까지 조절 가능한 것으로 이를 이용 HDD의 회전수를 조절하였다. 실험 장치의 전체적인 개략도는 Fig. 1에 나와 있다.

청정공기공급기는 압력계, HEPA 필터, 건조기로 구성되어 있어 압축공기의 수분과 입자를 제거하여 건조하고 청정한 공기를 공급한다. 분무기(atomizer)는 액적을 발생시키는 장치로, 작동압력에 따라서 유량이 변한다. 압축 공기가 오리피스관을 통과하면서 빠른 속도로 나오면 관 끝에서 저압 구간을 만들게 되고, 이 저압 구간에서 액체 저장소에 담긴 액체를 액체 공급 관을 통해서 빨아들이게 된다. 분출된 액체는 빠른 속도를 가진 공기에 의해서 액적이 된다. 수분 트랩

(Water trap)은 분무기에서 발생된 액적에서 수분을 1차로 거른다. 확산 건조기는 실리카겔로 채워져 있어 수분 트랩에서 제거되지 않은 수분을 완전히 제거한다. 액적에서 수분이 제거되면 완전한 고체 입자가 형성된다.

본 실험에서는 NaCl 0.1% 용액을 사용하여 분무기에서 NaCl 입자를 발생시켰다. 발생 입자의 평균 입경은 48 nm이며, 기하학적 표준 편차는 1.626이다.<sup>(9)</sup>

입자의 샘플링 위치는 필터 위치를 고려하여 선택하였다. 입자 분사 위치 및 입자의 샘플링 위치 등을 Fig. 2에 나타내었다.

입자 농도 측정은 응축입자계수기(condensation particle counter, CPC)를 사용했는데 CPC는 1 μm 이하의 미세 입자 측정에 주로 사용된다. 응축을 이용한 방법은 작은 입자들이 표준적인 입자 측정 방법으로 계측될 수 없을 때 사용된다. 알콜이 과포화된 환경에 입자를 노출시켜 입자 표면에 알콜이 응축되도록 한다. 알콜이 응축된 입자는 광학적인 입자 계수 방법으로 입자의 농도 또는 개수를 측정할 수 있다. 실험에서 사용한 CPC는 TSI사에서 제작한 Model 3022A이며, 7 nm크기 이상의 입자를 측정할 수 있다. CPC에서 요구되는 샘플링 유량은 0.3 L/min인데 샘플링 유량이 많은 경우 드라이브 내 유동을 변화시킬 수 있기 때문에 드라이브에서 0.1 L/min을 샘플링 하였고, 이는 청정공기 0.2 L/min과 합하여 CPC로 유입된다. 이때 드라이브에서 유출되는 0.1 L/min유량을 보충하기 위해 HEPA 필터를 통해 청정공기 0.1 L/min이 드라이브 내로 공급된다.

스피들 모터의 회전 속도, 필터의 유무를 변수로 설정하였다. 스피들 모터의 회전 속도는 5400, 7200, 10000 rpm으로 설정하였다. 실험은 다음과 같은 순서로 진행하였다.

- 1) HDD의 스피들 모터의 회전 속도를 일정하게 한다.
- 2) 압축 공기를 이용하여 분무기에서 NaCl 입자를 생성하고, 입자 수분 제거 역할을 하는 확산건조기를 통과시킨다.
- 3) HDD 내에 입자를 3분 동안 분사하였으며 분사된 입자는 HDD 내에서 균일하게 분포한다고 가정하였다.
- 4) 입자 분사를 정지한 후 CPC를 이용하여 시간에 따른 입자 농도를 측정하였다.

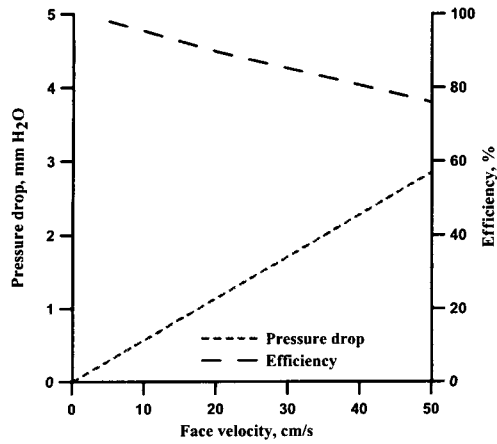


Fig. 3 Pressure drop, Efficiency verse face velocity of the filter

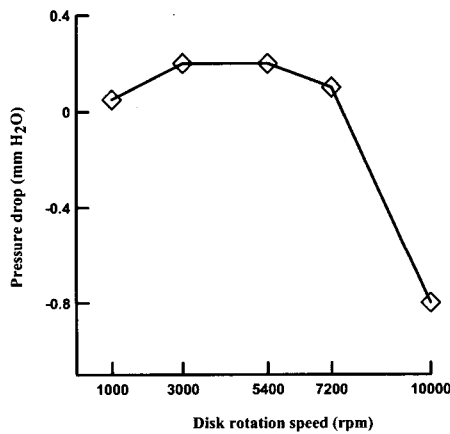


Fig. 4 Pressure differential across the filter in the drive

4. 결과 및 고찰

본 실험에 사용된 내부 재순환 필터는 정전 필터(Electret filter)로 Fig. 3은 필터 제작사로부터 제공받은 필터 성능 그래프이며 Class 100 클린룸 환경과 평균 입경 100 nm에서 테스트한 그래프이다.

본 실험에서 샘플링 유량( $Q_s$ )은 0.1 L/min, HDD 내부의 부피( $V$ )는  $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ , 필터효율( $\eta_f$ )은 실험을 통해 필터 전후의 압력강하(Fig. 4)를 측정 후 필터 성능 그래프를 이용해 구하였다.

여기서 필터 전후의 압력 강하는 필터의 전후

Table 1 Pressure drop, face velocity and efficiency w/ filter

	Pressure drop ( mmH <sub>2</sub> O )	Face velocity ( cm/s )	Efficiency ( % )
5400 rpm	0.2	3.51	98.4
7200 rpm	0.1	1.75	99
10000 rpm	-0.8	14.03	95

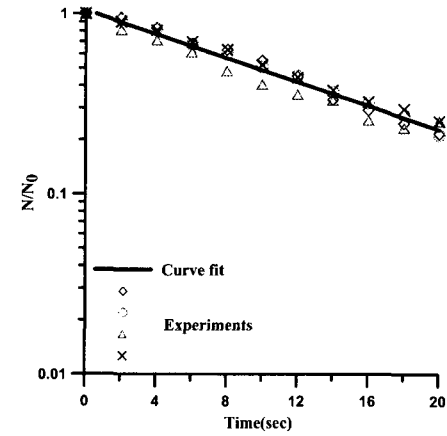
에 지름 1 mm의 측정 텀을 HDD의 커버에 만들어 압력계로 측정하였다.

Table 1은 본 실험 조건인 5400, 7200, 10000 rpm 회전속도에서 HDD내에 필터가 있는 경우 필터 전후의 압력강하, 면속도, 필터 효율을 보여주고 있다. Table 1에서 회전 속도가 증가함에 따라 발생하는 압력의 변화는 실험에 사용된 HDD가 5400 rpm용으로 제작된 상용 모델로 필터 전후의 유로에 의한 유동의 변화로 발생한 결과라 생각된다.

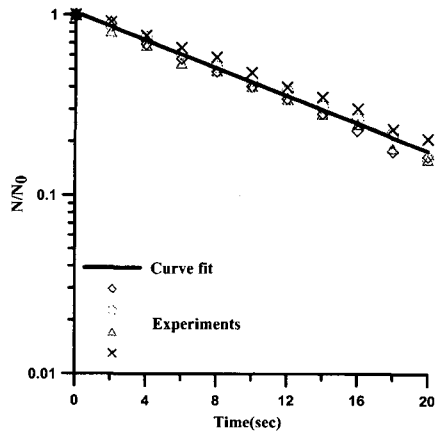
필터통과유량( $Q_f$ )을 구하기 위해서는 필터의 단면적과 유동의 면속도가 필요하다. 필터의 단면적은  $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$  이며, 각 스피들 모터의 회전속도에 따른 면속도는 Table 1 값을 이용하면 회전속도가 5400 rpm 일 경우 필터통과유량은  $3.51 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  이다.  $Q_w$ 는 HDD 내부 벽으로의 손실유량으로서 내부 벽이나 하드내에 존재하는 장치에 의한 입자 농도 감소도 고려를 해 구하였다. 따라서 필터가 없는 경우 입자농도 감소가 곧 내부 벽이나 장치에 의한 입자농도감소가 될 것이다.

Fig. 5는 필터가 없는 경우 내부 벽과 장치에 의한 하드내의 입자농도감소를 보여주는 것으로 반복 실험한 결과를 기하평균하고 통계학적 회귀를 통해 실선으로 보여주고 있다. Fig. 5에서 회귀분석의 신뢰성은 R-제곱값(Coefficient of determination)으로 0.98 이상이다.

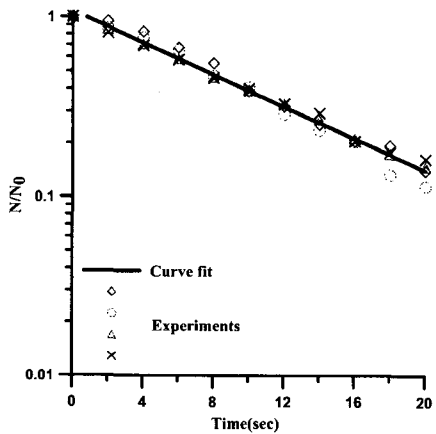
Fig. 6은 재순환 필터 설치시 HDD 내의 스피들 모터가 5400, 7200, 10000 rpm으로 회전할 때 입자 수농도 변화를 측정하여 식 (3)으로부터 이론적인 계산 값과 비교하여 나타내었다. 예를 들면 디스크가 5400 rpm의 속도로 회전할 때 반감기는 Fig. 5(a)에서 약 9.7 sec 정도로 이 값을 필터가 없을 경우 반감시간  $\tau_{1/2} = 0.69 \frac{V}{(Q_s + Q_w)}$



(a) 5400 rpm

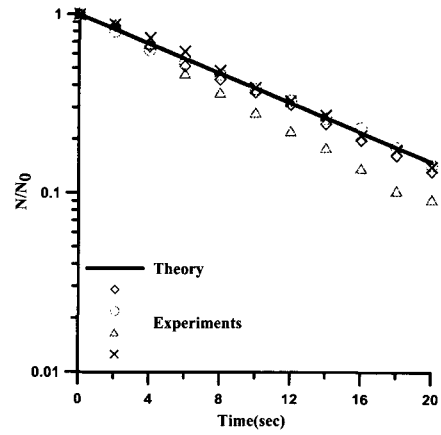


(b) 7200 rpm

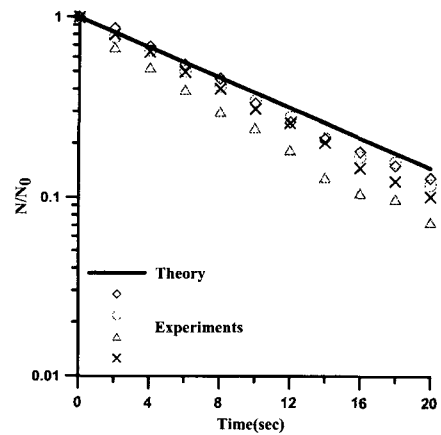


(c) 10000 rpm

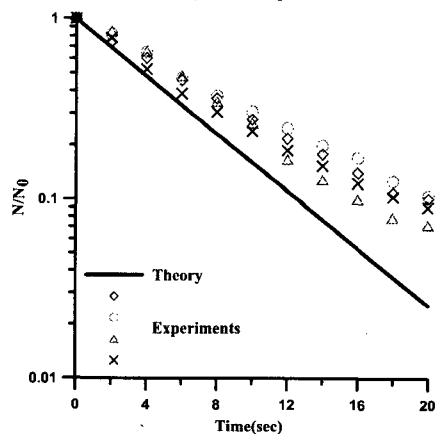
Fig. 5 Concentration decay in the drive by internal wall and apparatus ; w/o filter



(a) 5400 rpm



(b) 7200 rpm



(c) 10000 rpm

Fig. 6 Comparison between calculation and experiment

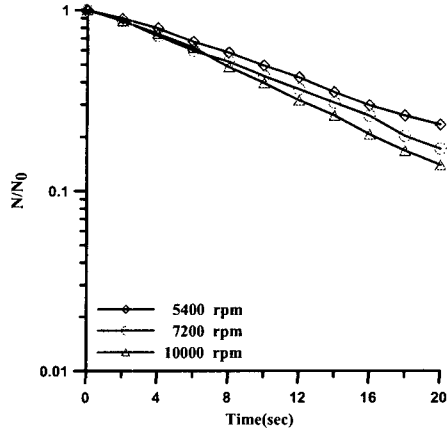


Fig. 7 Effect of rpm on concentration decay at sampling point ; w/o filter

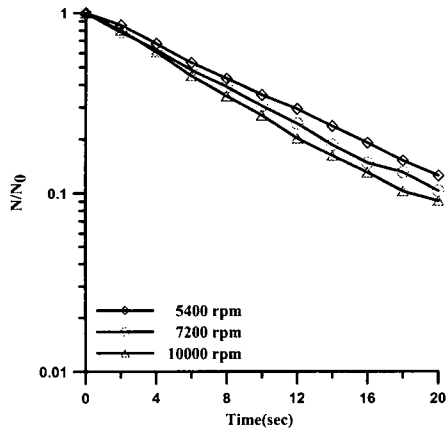


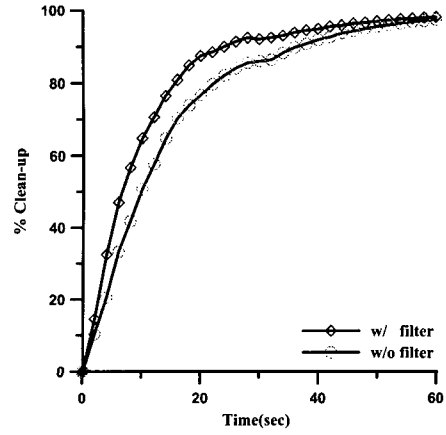
Fig. 8 Effect of rpm on concentration decay at sampling point ; w/ filter

에 대입해  $Q_w(8.68 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s})$ 를 구하고, 다시 이 값을 필터가 있는 경우인 다음 식

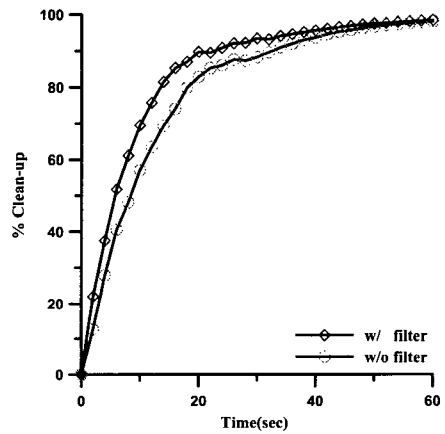
$$\tau_{1/2} = 0.69 \frac{V}{(\eta_f Q_r + Q_s + Q_w)}$$

에 대입  $\tau_{1/2}$ 이 7.41 sec로 계산된다. 이 값을 식 (3)에 대입해 하드내의 입자농도의 감소를 이론적으로 계산하였다. 나머지 7200 rpm 과 10000 rpm 에서도 같은 방법으로 계산하였다.

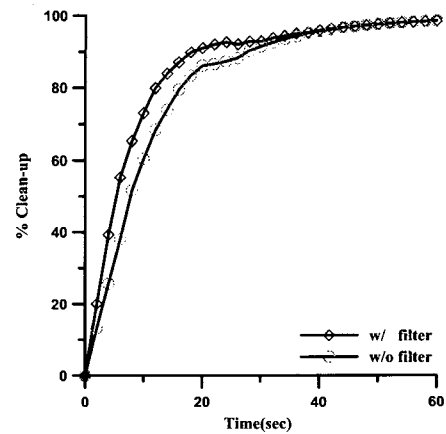
Fig. 6을 보면 이론식과 실험으로 구한 값이 회전수가 상대적으로 작을 때는 잘 일치하지만 회전수가 증가하면 오차가 커짐을 알 수 있다. 이



(a) 5400rpm



(b) 7200 rpm



(c) 10000 rpm

Fig. 9 Percent clean-up for w/ filter and w/o filter ; 10000 rpm

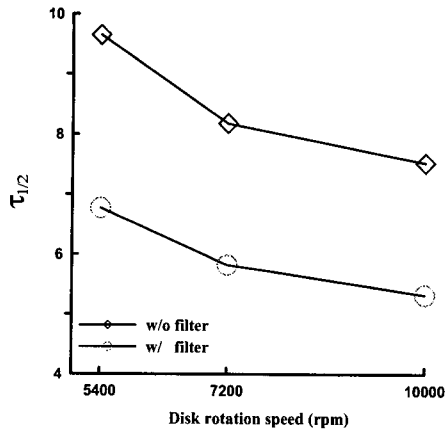


Fig. 10 Time to 50% clean-up

러한 오차는  $Q_w$ 를 계산하는데 있어 필터 장착 유무에 따른 하드디스크 드라이브 내부의 유동장 변화로 인한 오차, 필터 제조사의 필터 테스트 환경과 본 실험 환경 차이로 인한 필터 효율 오차라고 생각되며 회전수가 증가하면서 발생하는 오차는 압력측정시의 오차, 벽면에 부착된 입자의 재비산(re-entrainment) 등이 원인이 될 수 있다.

Fig. 5와 6의 결과에서 디스크 회전속도가 입자 농도 변화에 미치는 영향을 Fig. 7과 8에 정리했다. Fig. 7은 필터가 없는 경우이고 Fig. 8은 필터가 있는 경우인데 회전속도가 증가함에 따라 입자 농도의 변화율도 증가하는 것을 볼 수 있다. 디스크의 회전속도가 증가하면 입자에 작용하는 원심력이 증가하여 외부 벽이나 장치에 부착되는 입자의 수가 증가하여 입자 농도의 변화율이 커지는 것으로 생각된다.<sup>(10)</sup> 따라서 입자 농도 변화율은 디스크의 회전속도에 비례한다.

Fig. 9는 회전 속도 변화와 필터 유무에 따른 % clean-up 을 보여 준다. 결과를 보면 재순환 필터의 유무에 따른 입자제거 백분율 차이가 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10에는 디스크의 회전속도와 필터의 유무에 따른 드라이브 내의 입자농도 반감 시간을 나타내었다. 내부 순환 필터가 장착되고 스핀들 모터 회전속도가 10000 rpm일 때 입자농도 반감시간이 가장 낮았으며 디스크의 회전속도가 증가함에 따라 반감시간이 감소하였다.

### 5. 결론 및 향후계획

HDD 내의 청정도를 유지시키는 장치인 내부 필터(recirculation filter)에 의한 입자 포집에 대한 연구를 수행하였으며 회전수가 5400 rpm인 상용 HDD를 선정하여 디스크의 회전 속도를 변화시켰다. 이때 필터 전후단에 걸리는 압력을 측정하였으며, 이를 이용해 입자 농도 변화율을 이론적으로 예측하고 실험을 통해 비교하였다.

첫째, HDD내 필터 유무에 따른 실험결과 입자 농도감소가 내부 벽이나 장치에 의한 것뿐만 아니라 필터에 의한 것임을 확인했다. 따라서 HDD 내의 청정환경구현을 위한 필터사용의 필요성을 확인할 수 있었다.

둘째, 디스크 회전 속도가 증가하면 입자 농도 감소율이 증가하며 초기농도의 50%가 제거되는데 필요한 시간 즉 반감기는 감소한다.

셋째, 본 실험의 결과는 5400 rpm 용으로 설계 제작된 HDD에 대한 필터전후의 압력강하 측정 결과를 기초로 하고 있고 있으며 더 높은 회전속도에서의 결과는 유동장 변화로 인한  $Q_w$ 값의 오차, 필터 효율값 오차, 필터 전후의 압력강하 측정시의 오차, 벽면에 부착된 입자의 재비산(re-entrainment) 등으로 인해 이론적인 결과와 차이를 보였다.

넷째, 본 연구에서는 여러 조건들을 고려 실험하여야 하나 우선 회전수와 필터의 유무만을 변수로 실시하였다. 따라서 앞으로의 계획은 고속 유동환경으로 설계된 HDD에서 필터홀더, 덮개 유로의 형상 그리고 필터위치에 따른 입자포집 연구를 수행할 예정이다.

### 후 기

본 연구는 한국과학재단지정 정보저장기기연구센터(과제번호: 2001G0201)의 지원을 받아 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

### 참고문헌

- (1) Zhang, S., 1997, "Numerical Investigations of Particle Contamination and Thermal Effects in a Slider Disk Interface," Ph. D. Thesis, Dept. Mech.

- Eng., UC Berkeley.
- (2) Stupp, S. E., Baldwinson, M. A., McEwen, P., Crawford, T. M., and Rogers, C. T., 1999, "Thermal Asperity Trends," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 35, No. 2, pp. 752~757.
- (3) 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," *J. KSME(B)*, Vol. 23, No.6, pp. 744~752.
- (4) Tsai, C. J., 1990, "A Study of Particulate Phenomena in Computer Disk Drives," Ph. D. Thesis, Dept. Mech. Eng., Univ. of Minnesota.
- (5) Anath, G. P., 1988, "Experimental and Numerical Investigations of Particulate Contamination in Disk Drives," Ph. D. Thesis, Dept. Mech. Eng., Univ. of Minnesota.
- (6) Bergin, M. and Koka, R., 1993, "Measurement of Particulate Contamination Levels in Disk With Aerosol Counters," *Adv. Info. Storage Syst.*, Vol. 5, pp. 387~395.
- (7) Japuntich, D. A., 1982, "Disk-Drive Recirculation Filtration System Evaluation," *Microcontamination*, Jan., pp. 52~56.
- (8) Yoo, Y. C., 2000, "Numerical Calculations of Flow Field and Increase of Particle Capture Efficiency by a Recirculation Filter in a Hard Disk Drive," MS. Thesis, Dept. Mech. Eng., Yonsei Univ.
- (9) Ahn, K. H. and Bae, G. N., 1994, "Performance Evaluation of a Newly Built Atomizer," *KSME Proceeding of Spring Annual Conference*, Vol II, pp. 381~384.
- (10) Park, H. S., Lee, D. Y., Hwang, J., Kim, K., and Jang, D. S., 2001, "An Investigation of Particle Detachment Ratios From Rotating Data Storage Disks," *KSME(D) Proceeding of Spring Annual Conference*, pp. 585~588.