

하드디스크 드라이브의 내부 유동에 의한 액추에이터 암의 진동 저감을 위한 연구

조광표[†] · 유진규^{*} · 임윤철^{**}

The Experimental Studies for Reducing Airflow-induced Vibration of Actuator Arms in HDDs

Kwang-Pyo Cho, Jin-Gyoo Yoo, Yoon-Chul Rhim

Key Words : Airflow (유동), Track Mis-Registration(TMR)(헤드의 트랙 위치오차), LDV(레이저 도플러 진동계), LDA(레이저 도플러 풍속계)

Abstract

With the increase in recording density and higher rotation speeds, the aerodynamic aspect of hard disk drives (HDDs) is now quite significant. To achieve high TPI (tracks per inch) for hard disk drives, the actuator must induce less air turbulence. Also, alternative cross sections for the actuator arms are proposed for the reduction of air turbulence. In this study, off-track vibration of actuator arms used in of 3.5" hard disk drives with different cross sections have been measured by using Laser Doppler Vibrometer (LDV). It has been found that the vibration of the actuator arms with modified cross sections is lower than the conventional one.

1. 서 론

자기장을 이용하여 정보를 저장하고 재생하는 대표적인 정보저장기기인 HDD는 3~40년의 짧은 역사에 비해 성능과 기록밀도가 빠른 속도로 증대되어 왔고, 미디어의 고밀도화와 헤드의 초정밀 위치제어가 가능해짐에 따라 대용량화가 이루어졌다. HDD의 기록밀도는 BPI(Bits per inch)와 TPI(Track per inch)의 곱으로 결정되는데, 기록밀도를 향상시키기 위해서는 TPI 증대 기술이 더 많은 개선의 여지를 가지고 있으며, 급격한 성장을 보이고 있다. 저장 밀도의 증가와 더불어 데이터 전송율(data transfer rate)을 향상시키기 위하여 디스크의 회전 속도를 증가시키고 있다. 디스크의 회전 속도가 증가함에 따라 HDD 내부 공기의 유동은 난류화 되고 매우 복잡한 유동장을 형성한다. 이

는 디스크의 면진동을 유발시키고, 서스펜션/E-블록 등과 충돌하여 TMR(Track Mis-Registration)에 좋지 않은 영향을 주게 되므로, 유동현상 해석을 통한 TMR 저감 연구는 고밀도 저장기기 개발에 반드시 필요하다.

HDD의 디스크의 회전에 의해 유발되는 유동과, 유동에 의해 가진되는 액추에이터 암(actuator arms)의 진동을 줄이기 위한 연구는 다양하게 이루어졌다. Yufeng 등⁽¹⁾은 HDD 내부 유동에 의한 서스펜션의 가진을 LDV로 측정하고, 이를 제어할 듀얼 스테이지 서보(Dual Stage Servo)시스템을 제안하였고, Naozumi 등⁽²⁾은 액추에이터 암의 관성(inertia)을 줄여 접근시간(access time)을 빠르게 하고자 만든 액추에이터 암의 홀(weight-saving hole)에 와류가 생성되고 이에 의해 액추에이터의 진동이 유발되는 것을 유동장 측정 실험과 수치해석으로 확인하였다.

본 연구에서는 디스크의 회전에 의한 유동으로 발생하는 TMR을 최소화하기 위하여 HDD 액추에이터 암 주위의 유동분포를 측정하고 유동이 서스펜션 및 E-블록에 미치는 영향을 조사하여, 진동발생을 최소화할 수 있는 E-블록 구조의 제안을 본 연구의 목표로 한다.

[†] 연세대학교 대학원 기계공학과

E-mail : kwang2@yonsei.ac.kr
TEL : (02)2123-3854

^{*} 삼성종합기술원

^{**} 연세대학교 기계공학과

2. 실험 내용 및 방법

본 연구에서는 Laser Doppler Anemometry(LDA)를 사용하여 액추에이터 주위의 유동장을 측정하고, Laser Doppler Vibrometer (LDV)를 사용하여 유동에 의한 슬라이더/서스펜션의 진동을 측정한다.

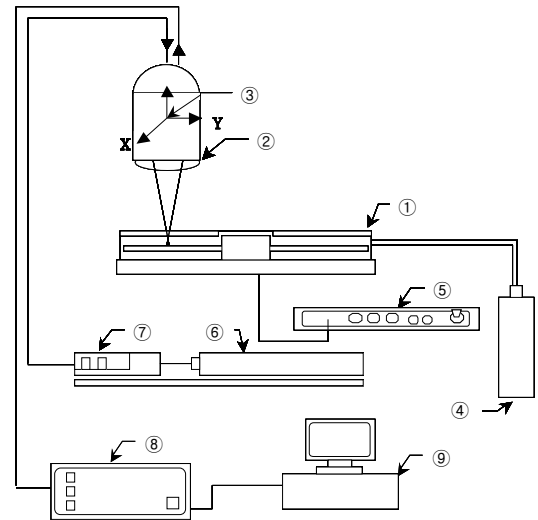
2.1 E-블록 주위의 유동장 측정

밀폐된 단일 회전원판에 의해 유발되는 유동은 3 차원 유동 성분으로 매우 복잡하게 나타난다. HDD 내부 공간이 협소하므로 유동 속도를 측정하기 위하여 열선 풍속계(Hot-Wire Anemometer)를 사용할 경우는 유동장에 방해가 발생하여 정확한 측정이 이루어지기 어렵다. 이런 문제점을 방지하고 유동에 영향을 주지 않으면서 유동 속도를 측정하기 위해 LDA 를 이용해 유동을 측정하였다.

사용한 LDA 는 2 차원 LDA 로 녹색(514.5 nm)과 파란색(488.0 nm)의 두가지 다른 파장의 빛을 사용하며, 한 측정 포인트에서 두 방향 속도 성분을 동시에 측정이 가능하다. 측정에 있어서 HDD 케이스를 레이저가 투과할 수 있도록 투명한 재질로 만들고, 입사광을 디스크면에 수직 방향으로 입사하여 원주 방향의 속도 성분과 RMS 원주속도를 측정하였고, 디스크면과 E-블록과 같은 금속면 부근에서 산란에 의한 잡음(noise)의 영향을 방지하기 위하여 빛이 입사하는 투명 Top Cover 이외에는 녹색과 파란색의 보색인 주황색(orange)으로 착색하여 신호 대 잡음비(S/N ratio)를 향상하였다.

산란입자로써는 담배연기를 사용하였으며, 실험에 사용한 LDA 장치는 3 차원 이송장치(3-D traverse)와 58G130 FVA, 58/ N40 FVA 처리 장치를 가진 후방 산란형 (back scatter type) DANTEC LDA 로서 아르곤 이온 (Argon ion)레이저의 최대출력은 5W 이다. 측정대상은 기록용량이 3.5 inch 디스크 플래터 (Platter)당 80GB 이고 정격 회전수 7200RPM 인 상용 HDD 를 사용하였다.

LDA 는 측정 원리상 유동에 레이저 빔이 유동을 감지할 수 있는 산란입자를 유동 중에 살포 (seeding) 하여야 하는데, 좁은 HDD 의 내부에서 7,200RPM 의 고속회전에 대한 유동을 지속적으로 추종하여 충분한 데이터 획득율 (data sampling rate) 을 유지할 산란입자의 선정과 공급의 어려움으로 인하여 디스크의 회전수를 1,000RPM 으로 낮추어 HDD 내부의 유동 속도 측정을 행하였다. 디스크면의 위에서 Z 축방향으로 레이저를 입사하였고, 서스펜션과 슬라이더를 제거한 E-블록과 VCM(Voice Coil Motor)으로 구성된 액추에이터를 장착하여 측정하였다.



- 1. Test section
- 2. LDV probe
- 3. 3-D traverse
- 4. Seeding device
- 5. rpm controller
- 6. Argon Laser generator
- 7. Beam transmitter
- 8. LDV counter
- 9. PC

Fig. 1 The configuration of LDV system

Table 1 Test conditions

Number of disks	2
Disk Diameter (inch)	3.5
Seeding Particle	담배연기
Sampling Data	500
Traverse	2mm

2.2 E-블록 및 슬라이더 진동 측정 장치

디스크의 회전에 따른 유동이 서스펜션 / 슬라이더의 TMR 에 미치는 영향을 확인하기 위하여 E-블록 및 슬라이더의 반경방향 진동을 측정하였다. 측정에 사용된 HDD 는 위의 실험과 동일한 플래터당 80GB 용량을 갖는 상용 HDD 로 Fig. 2 와같이 실험장치를 구성하고, HDD 의 케이스에 LDV 의 레이저가 투과할 수 있도록 작은 구멍을 뚫었으며, 측정 위치는 HDD 의 VCM 을 이용하여 디스크의 회전에 의한 공기의 유동이 빠른 디스크의 끝단($r/R=0.98$)에 액추에이터를 위치시킨 후 측정하였다. 측정에 사용된 슬라이더는 가로 1.25mm, 세로 1.0mm 높이 0.3mm 의 직사각형 형태의 피코 (Pico) 슬라이더이다. 실험에 사용된 LDV 는 OFV-3001 controller 와 OFV-512 Sensor Head 로 레이저 최소직경 (spot size)는 20 μ m 이다.

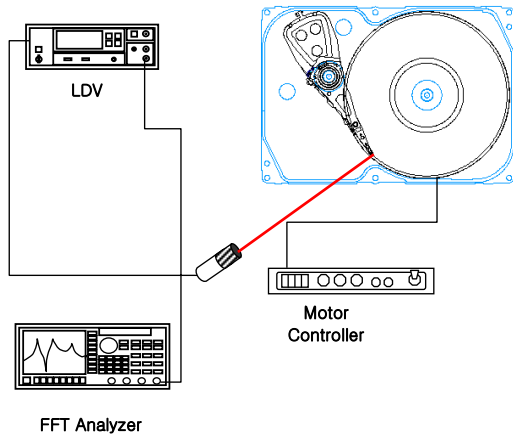


Fig. 2 E-Block and slider vibration measurement setup

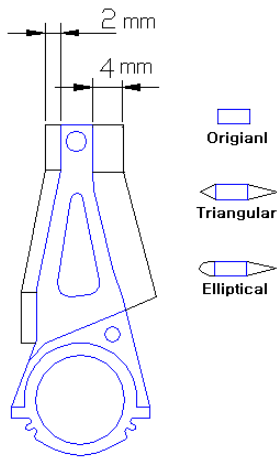


Fig. 3 Modified cross section of the actuator arms

Fig. 3 와 같이 기존의 사각단면 형상을 가진 E-블록의 유동에 의한 진동을 저감할 수 있도록 하기 위하여 기존의 직사각 단면형상을 갖는 알루미늄 재질의 E-블록에 질량이 매우 작은 플라스틱으로 제작한 타원형 및 삼각형 단면의 앞전(leading edge)과 삼각형 단면의 뒷전(trailing edge)을 붙여 개선된 단면형상의 E-블록을 제작하였고, 디스크의 회전수를 3600, 5400, 7200, 10000RPM 으로 변화시키면서 진동량을 측정 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 E-블록 주위의 유동장 측정 결과

회전하는 디스크에 헤드 슬라이더, 서스펜션, E-블록과 같은 유동 장애물이 있는 경우, 이 주위에 후류(wake)와 와류발산(vortex shedding) 등이 나타나고, 또한 비정상적으로 회전하는 와류는 매우 복잡한 3 차원 유동을 보인다. 본 실험에 사용된

LDA 는 한 측정 포인트에서 X, Y 두 방향의 속도만 측정이 가능하므로, 복잡한 3 차원 유동을 관찰하기 위하여 E-블록의 두께를 고려하여 디스크 면으로부터의 높이를 달리하여 측정하였다. 디스크의 회전수는 1000RPM 각 측정 위치간 이송거리는 X, Y 방향으로 2mm, Z 방향은 1mm 로 하였고, 각 측정 위치에서 유효(validated) 샘플링 데이터 개수는 500 개이다.

Fig. 4 는 측정부위의 높이(Z 축방향) 변화에 따른 원주방향의 속도분포를 나타내고 있다. Fig. 4 에서 E-블록의 영향으로 E-블록의 상류와 하류 부분에 급격히 유동의 방향과 속도가 변화하는 것을 관찰할 수 있다. 디스크의 반경증가에 따라 유속이 증가하고, 유동 장애물인 E-블록 끝단에서 주위보다 빠른 속도분포를 보이며, E-블록의 뒤쪽에 디스크 면으로부터의 높이 변화에 따라 유속의 증감을 관찰할 수 있다.

Fig. 5 는 E-블록 후방의 유동을 좀 더 자세히 관찰하기 위하여 Fig. 5 의 사진의 위치에서 자른 단면의 원주방향 속도 분포이다. 디스크면으로부터 높이를 Z 축에, 디스크반경을 Y 축에 나타내었다.

Fig. 4 과 Fig. 5 의 결과로 E-블록 후방의 높이에 따른 유동속도의 변화와 벡터 방향의 변화는 E-블록 후방에 후류(wake)와 와류발산(vortex shedding) 등이 나타나고 있음을 확인 할 수 있다.

유동에 의한 진동은 주로 후류(wake)와 와류발산(vortex shedding)에 의하여 발생되므로, 실험결과 측정된 복잡한 3 차원 유동은 E-블록과 연결된 서스펜션과 슬라이더 및 디스크의 진동을 유발시켜 TMR 을 증가시키는 원인이 된다.

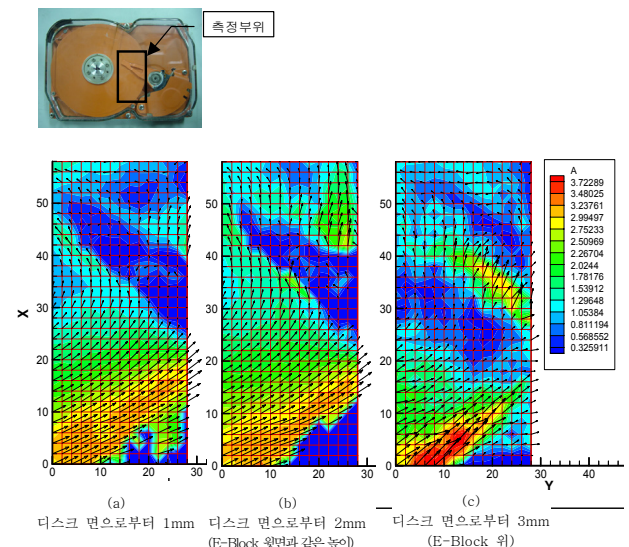


Fig. 4 Contours of velocity amplitude (XY-Direction component) around the actuator arms

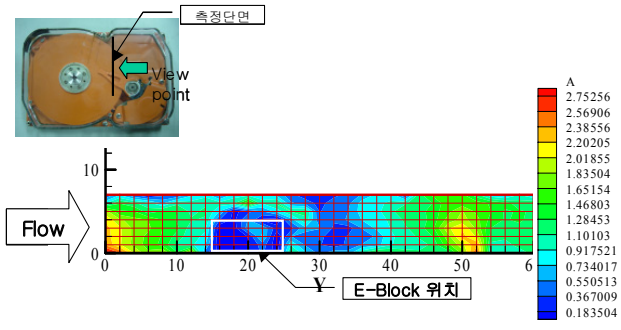


Fig. 5 Contours of circumferential velocity amplitude around the actuator arms

3.2 E-블록 및 슬라이더의 진동(Off-Track Vibration) 측정 결과

유동 가진에 의한 E-블록의 진동 스펙트럼을 얻기 위해 FFT Analyzer 의 주파수 전폭을 1kHz 로 하였으며 모든 측정은 5 번 이상 반복하여 평균값을 얻었다.

3.2.1 E-블록의 진동측정 결과

E-블록의 단면형상의 개선에 의한 진동저감의 효과를 확인하기 위하여 슬라이더/서스펜션을 제거하고 VCM 으로 E-블록을 디스크의 외주에 고정시킨 상태로, E-블록의 끝단(tip)에 LDV 의 레이저를 조사하여 반경방향의 진동을 측정하였다.

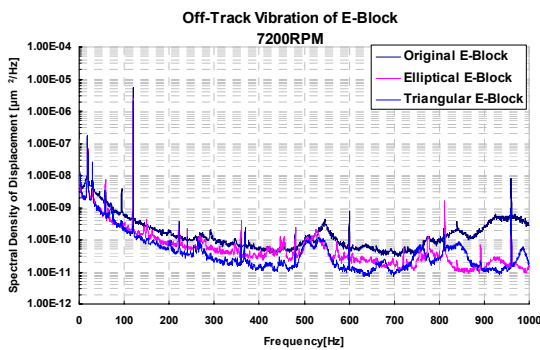


Fig. 6 Power spectrum of E-Block vibration at 7200RPM.

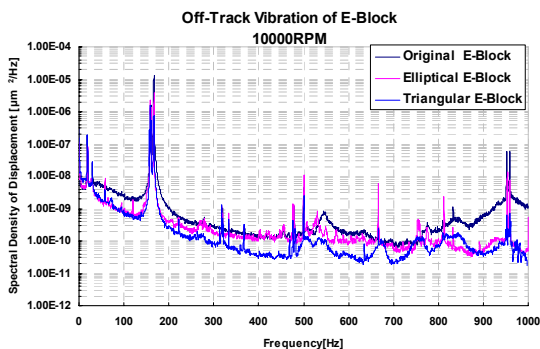


Fig. 7 Power spectrum of E-Block vibration at 10000RPM

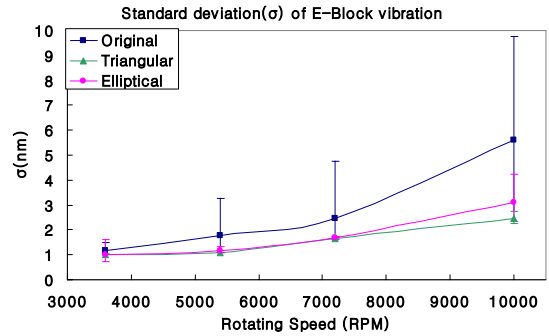


Fig. 8 Standard derivation of E-Block vibration with different speeds and cross section of E-Block

Fig. 6 과 7 은 직사각 단면을 갖는 원래의 E-블록과 Fig.3 처럼 개선된 형상의 단면을 갖는 E-블록의 각각의 회전수에서 측정된 진동량의 파워 스펙트럼이다.

Fig. 6 과 7 의 파워 스펙트럼에서 200~300Hz 의 피크들은 유동에 의한 피크이고, 500~600Hz 의 피크는 E-블록의 Rocking 모드(554.49Hz)⁽⁶⁾와, 약 950Hz 의 큰 피크들은 액추에이터 암의 피벗 베어링을 중심으로 강제운동을 하는 모드(927.1Hz)⁽⁶⁾와 의 공진(resonance)에 생성된 피크이다.

Fig.8 은 진동량의 파워 스펙트럼으로부터 구한 1σ TMR (Track Mis-reistration) 값을 나타낸다.

여기서 σ 는 standard deviation 으로 아래와 같다.

$$\sigma = \sqrt{\int_0^f S_f(f)df} \dots\dots\dots(1)$$

S_f(f) = the power spectrum of vibration of slider

Fig. 6 과 7 의 파워 스펙트럼으로부터 모두 디스크의 회전수가 증가할수록 E-블록 단면의 개선에 의한 진동량의 감소의 효과는 증가한다.

측정된 모든 회전수에서 개선된 형상의 단면을 갖는 E-블록의 진동 스펙트럼이 낮아짐을 알 수 있고, 삼각형으로 단면 형상이 타원형 단면으로 개선된 E-블록보다 좀더 낮음을 확인할 수 있다.

3.2.2 슬라이더의 진동측정 결과

Fig. 9 와 10 은 각 회전수에서 측정된 슬라이더의 진동량을 주파수 분석한 결과이다. Masayuki Tatewaki⁽⁵⁾는 동시회전하는 디스크와 단순화 시킨 액추에이터 암 그리고 디스크의 회전수를 10000RPM 으로 하고, LES 난류모델을 이용하여 HDD 내부의 유동을 수치적으로 해석하였으며, 디스크의 진동(flutter)에 의한 압력변동을 주파수 분석한 결과 320Hz 에서 피크(peak)가 생성됨을 알 수 있었다. 이는 유동에 의한 가진으로 Fig.10 에

서도 약 320Hz 에서 피크가 생성되며 개선된 단면형상의 E-블록에서는 피크의 크기가 감소하였다. 디스크의 회전수가 7200RPM 인 Fig. 9 에서도 10000RPM 인 Fig. 10 에서보다 낮은 주파수(200~300Hz)에서 유동에 의한 피크들이 발생하고 있으며, E-블록의 단면형상 개선에 의해 그 크기가 줄어들었음을 확인할 수 있다.

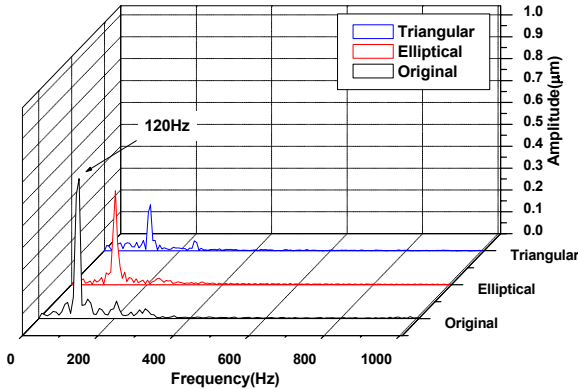


Fig. 9 Frequency analysis result of slider vibration at 7200RPM

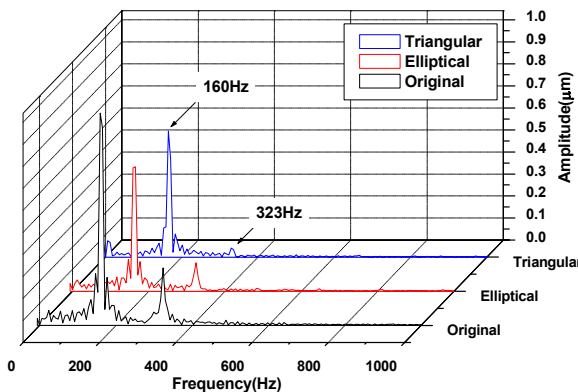


Fig. 10 Frequency analysis result of slider vibration at 10000RPM

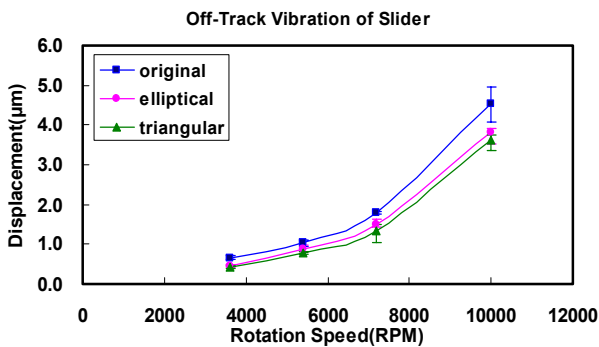


Fig. 11 Off-Track vibration of slider with different speeds and cross sections of E-Block (Peak to peak Value)

Table 2 Comparison of measured peak to peak value of slider vibration with different speeds and cross sections of E-Block

RPM	Peak to peak Value[µ m] (Track pitch 0.27µ m)		
	Original E-Block	Elliptical E-Block	Triangular E-Block
3600	0.6625(245%)	0.4438(164%)	0.4219(156%)
5400	1.0299(381%)	0.0875(324%)	0.7938(294%)
7200	1.7938(664%)	1.5352(568%)	1.2930(479%)
10000	3.667(1674%)	3.8281(1417%)	3.4727(1286%)

Fig.11 과 Table 2 는 디스크의 회전수와 E-블록의 단면 변화에 따른 측정된 진동량(time trace) 의 가장 큰 진폭과 작은 진폭의 차이(peak to peak)를 나타낸 것이며 괄호안의 숫자는 실험에 사용된 상용 HDD 의 트랙피치 값으로 나누어 백분율로 나타낸 값이다. Fig. 12 과 Table. 3 은 측정된 진동량으로부터 식(1)로 구한 1σ TMR 값을 나타낸 것이다. Table 3 에서 괄호안의 값은 측정대상 모델의 상용 HDD 의 TMR budget (σ value 7.6 nm)으로 나누어 백분율로 나타낸 값이다.

Fig. 9 와 10, 11 에서 원래의 직사각형 단면의 E-블록에 비해 개선된(타원형, 삼각형)단면을 갖는 E-블록에서 진동량이 줄어들었음을 알 수 있다. 진동량의 감소로 나타내는 개선의 효과는 디스크의 회전수가 빠를수록 증가함을 알 수 있다.

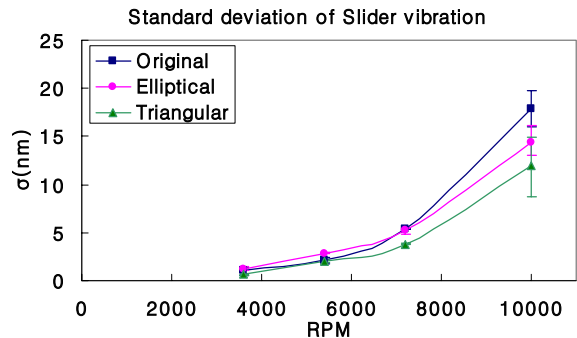


Fig. 12 Standard derivation of slider vibration with different speeds and cross sections of E-Block

Table 3 Comparison of measured TMR value(1σ standard deviation)

RPM	Standard derivation of Slider Vibration (7200RPM TMR budget σ value 7.6nm)		
	Original E-Block	Elliptical E-Block	Original E-Block
3600	1.317(17.3%)	1.219(16.0%)	0.651(8.50%)
5400	2.170(28.6%)	2.885(38.0%)	2.022(26.6%)
7200	5.404(71.1%)	5.177(68.0%)	3.801(50.0%)
10000	17.866(235%)	14.330(189%)	12.01(158%)

4. 결 론

HDD 디스크의 회전에 의한 유동이 액추에이터를 가진하고 이로 인해 발생하는 TMR 을 최소화하기 위하여 액추에이터 주변의 유동장을 측정하고, E-블록 및 슬라이더의 진동을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

E-블록 주위의 속도 분포 측정을 통해 E-블록 후방의 하류에서 와류발산(vortex shedding)이 발생하고 있음을 확인할 수 있었고, 이는 서스펜션 및 슬라이더의 진동을 유발하여 TMR 을 증가시키는 원인이 됨을 알 수 있었다.

직사각형 단면을 갖는 원래의 E-블록에 비해 타원형, 삼각형 단면으로 개선된 형태의 E-블록에서 진동량이 감소하고, 이는 디스크의 회전속도가 증가할수록 E-블록 단면 개선효과가 커짐을 알 수 있다.

5. 후 기

본 연구는 (주) 삼성전자의 지원(과제번호: 2002-2-0263)을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) E. Lennemann, "Aerodynamic Aspects of Disk Files", IBM J. RES. DEVELOP. Vol.18, No. 6, pp.480-488, 1974
- (2) Hayato Shimizu, 2003, "Numerical Simulation of Positioning Error Caused by Air-Flow-Induced Vibration of Head Gimbals Assembly in Hard Disk Drive", IEEE. Trans. On Magnetics, VOL.39, NO 2, pp.806-811
- (3) Naozumi Tsuda, 2003, "Unsteady Analysis and Experimental verification of the Aerodynamic vibration Mechanism of HDD Arms" IEEE Transactions on magnetics. Vol. 39, No.2, March, pp.819-825
- (4) Yunfeng Li , 2001, "Active Suspension Vibration Control with Dual Stage Actuators in Hard Disk Drives", Proceeding of the American Control Conference, VA June 25-27, pp. 2786-2791
- (5) Masayuki Tatewaki, 2001, "An Analysis of Disk Flutter in Hard Disk Drives in Aerodynamic Simulations", IEEE. Trans. On Magnetics, VOL.37, NO 2, pp.842-846
- (6) Tae-Kon Jung, 1999, "Development of positioning systems for High TPI HDD ". Technical Report Part2. Konkuk Univ. Dep. Mechanical Engineering
- (7) Seung-Chul Yu, 1999, "An Experimental Study on Inner Flow between Shrouded Corotating Disk",

Yonsei Univ.

- (8) Dae-Wee Kong, 2001, "Characteristic of inner flow driven by a rotating disk in shroud", Yonsei Univ.
- (9) Robert D. Blevins, 1990 "Flow-Induced Vibration", Van Nostrand Reinhold
- (10) Fiber Flow : Installation and User Guide, Dantec.
- (11) Laser Doppler Vibrometer : User Manual Polytec