

# 하드디스크 드라이브 내부 유동에 의한 액추에이터의 진동 저감을 위한 수치해석 연구

박재현<sup>†</sup> • 유진규\* • 임윤철\*\*

## The Numerical Simulation of the Airflow for Reducing Vibrations of an Actuator in HDDs

Jae-Hyun Park, Jin-Gyoo Yoo, Yoon-Chul Rhim

**Key Words :** HDD, E-block, Actuator(액추에이터), Slider(슬라이더), Vortex(와류), Damper(댐퍼)

### Abstract

Recently, the recording density of hard disk drives has improved at an annual percentage rate of 100%. Therefore for faster access, higher disk rotational speeds will be required. The influence of the airflow produced by the rotation of a disk on the positioning accuracy has become a serious topic of research and the aerodynamic aspect of hard disk drives is now quite considerable with the increases in recording density and higher rotational speeds. Unsteady airflow in an actual hard disk drive is numerically simulated by using LES(Large Eddy Simulation) technique, we could predicted and aerodynamic mechanism that was related actuators' surroundings in HDD. At a result, with modifying the various shapes of the E-block and Damper, we estimated the characteristic of the influence of airflow in HDDs.

### 1. 서 론

근래의 정보저장기기 관련 연구는 데이터 전송률(data transfer rate) 증가를 위하여 많은 노력을 경주하고 있으며 이의 일환으로 디스크의 회전 속도를 더욱 증가시키고 있다. 또한 매년 약 100%씩 저장밀도를 증가시켜 온 Hard Disk Drive(HDD)는 트랙밀도가 이미 50KTPI(Track Per Inch)를 넘어 조만간 100KTPI를 달성하고 계속 증가할 것으로 예상된다.

디스크의 회전속도가 증가함에 따라 저장기기 내부 공기의 유동은 난류화 되면서 매우 복잡한 구조를 갖는 3 차원 와류가 발생하게 된다. 이러한

복잡한 유동장의 발생은 저장기기 내부의 구조와 밀접한 관계를 갖고 있으며 저장기기에서의 진동 발생의 원인이 되고 있다.

본 연구에서는 HDD 내부에 대한 유동해석을 수행하고 이로부터 내부에 대한 와류분포 및 유속분포를 해석하여 유동이 서스펜션(Suspension)/E-블록(E-block)에 미치는 간섭을 시뮬레이션을 통하여 분석하였다. 그리고 기존의 내부 구조물의 기하학적 형상기능을 고려한 상태에서 액추에이터(Actuator)와 슬라이더(Slider)주위에 미치는 유동의 영향을 능동적으로 제어할 수 있는 설계방안을 제시하는 것을 목표로 하였다. 특히, 디스크의 회전속도가 증가함에 따라 장애물에 의하여 교란된 유동이 소멸되기 전에 다시 슬라이더와 충돌하게 되어 슬라이더의 진동을 가중시키고 있으므로 진동 경감의 가능성을 검토한다.

또한 회전 유동장을 효과적으로 방해할 수 있는 장애물 또는 구조물의 설치를 고려하고 이에 따른 슬라이더 근처의 유동장과 압력분포의 변화 및 이로 인한 슬라이더의 가진량 변화를 회전속도에 따라 해석하였다.

<sup>†</sup> 연세대학교 대학원 기계공학과  
E-mail : jhpark7@yonsei.ac.kr  
TEL : (02)2123-3854

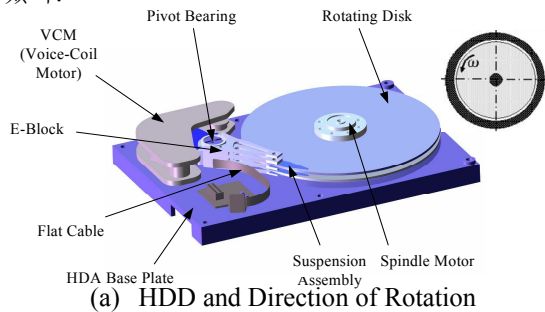
\* 삼성중합기술원

\*\* 연세대학교 기계공학부

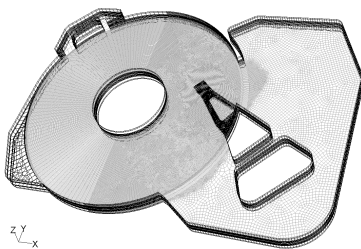
## 2. HDD 속도장 과 압력장 해석

### 2.1 해석방법

HDD의 구조는 Fig.1(a)와 같이 VCM(Voice-Coil Motor)과 VCM에 이어진 E-블록(E-block)이 있으며, 회전하는 디스크사이 에 액추에이터(Actuator)가 전진후퇴를 반복하고 있다. 해석을 위해 유한 체 적법이 적용되는 상용코드를 사용하였으며, 난류 모델은 LES(Large Eddy Simulation)로 유동의 비정상성을 그대로 보존할 수 있어 난류유동의 평균 유동장 뿐만 아니라 순간 유동장도 계산할 수 있으며, 기존의 HDD 유동에 관한 수치해석에 적용되고 있다.



(a) HDD and Direction of Rotation



(b) Mesh generation

Fig. 1 HDD and Mesh generation

Table. 1 Calculation methods.

Item	Calculation method
Basic equation	3-dimensional Navier-Stokes equation
Spatial discretization	2nd-order finite-volume method (FVM)
Time advancement	Unsteady(2nd-order implicit method)
Turbulence model	Large-Eddy Simulation(LES)

Table. 2 Analysis conditions.

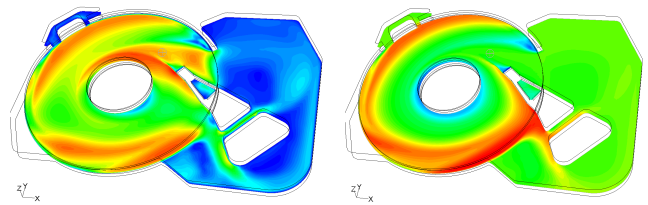
Item	Value
Number of disks	2
Disk thickness(mm)	1.27
Disk diameter (inch)	3.5
Disk rotation speed, $\omega$ (rpm)	5400/7200/10000
Disk gap(mm)	3.06
Time step $\Delta t$ (s)	0.001

Fig.1(b)의 형상으로 모델링된 HDD는 5400/7200/10000RPM의 회전속도로 두 장의 디스크와 스피들(Spindle)이 구동 되도록 시뮬레이션 하였고, 비정상 상태(unsteady)를 계산하였다.

### 2.2 HDD 유동장 및 변형모델 해석방법

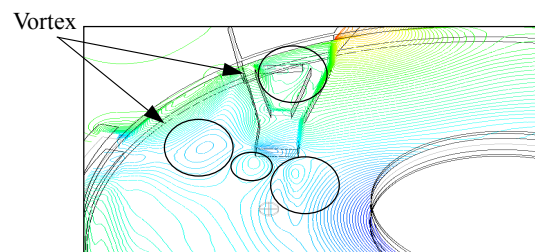
#### 2.2.1 기존 HDD 내부 유동장

디스크사이의 속도형상을 보여주는 Fig.2(a)에서 디스크가 반시계 방향으로 7200RPM의 속도로 회전할 경우 최외곽과 E-블록의 끝단에서 19m/s의 속도를 갖게 된다. 또한 E-블록과 스피들(Spindle)사이의 좁은 공간에서 특히 고속유동이 발생됨을 알 수 있다. 압력은 디스크의 OD(디스크외곽)를 돌아나온 유체는 VCM에서 최고가 되며, E-블록을 따라서 여전히 큰 압력이 형성된다. 그리고 Fig.3(a)는 두 장의 디스크사이의 압력분포를 수평으로 나타낸 것으로서, E-블록의 후부에서 와류(Vortex)가 발생하며, 이 와류(Vortex)는 Fig.3(b)에 표시되어 있는 슬라이더가 위치하는 곳에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 또한 E-블록의 후부에서 두 갈래로 나뉘어지는 후류 형성을 볼 수 있는데, 이는 슬라이더의 read/write 작동시 슬라이더를 끌어당기는 힘(Drag-force)으로 작용할 수 있다. 이러한 Drag-force의 시간에 대한 변동은 슬라이더의 가진에 영향을 미치며, 슬라이더의 포지션 에러(Position error)를 유발시키는 것으로 판단된다.

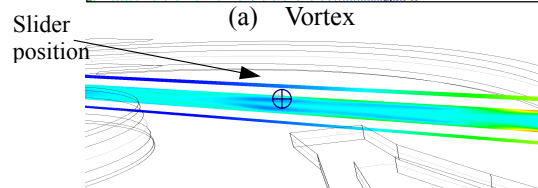


(a) HDD Velocity field (b) HDD Pressure field

Fig. 2 Unsteady Analysis of the original HDD



(a) Vortex



(b) Vertical pressure

Fig. 3 Vortex and Vertical pressure of the original HDD

2.2.2 HDD 변형모델에 대한 해석방법

앞서 살펴본 기존의 HDD 내부유동 해석에 의한 압력장과 속도장 분포를 통해, 유동에 의한 난류 및 와류(Vortex)를 제어하기 위한 방법을 모색하면 다음과 같다.

E-블록 후부에 발생하는 와류(Vortex)를 제어하도록 E-블록의 전면과 후면의 형상변화를 시키며, 유체의 와류(Vortex) 형성이 감소되도록 설계하여 동일한 조건에서 적용 및 분석하였다.

그리고, 압력변동 저감측면에서 VCM 에 걸리는 최대압력은 E-블록을 따라 액추에이터(Actuator)에 유입되는 데 이는 가진의 큰 요소가 될 것이라 판단하였으며, 이를 위해 시간에 따른 압력변동을 계산하고 적절한 블리킹(blocking)을 설계하였다.

Fig.2(b)처럼 반시계 방향으로 회전하는 유체는 E-블록에서 압력이 가중되어 액추에이터(Actuator) 후부의 와류(Vortex)를 더욱더 유발시킨다는 판단을 가능하게 한다. 따라서 회전에 의해 가중되는 난류요소를 최소화 시키기 위해 E-블록을 향해 유입되는 유량을 최소화 시켜 유동을 조절할 수 있는 형상변화를 시도하였다.

아울러 기존의 E-블록은 무게(Mass)를 줄이기 위한 목적으로 가운데 홀(hole)이 파여져 있는데, 이는 유체의 원활한 유동을 억제한다고 여겨지므로 이에 대한 방안을 모색하였다.

이러한 방법을 토대로 각 형상변화에 대한 비정상 상태(unsteady)해석을 통해 압력 변동값을 계산하고 이를 FFT 수행하여, 기존의 HDD 에서 형상변화를 하였을 때 유체 유동으로 인한 가진에 가장 효과적으로 대처할 수 있는 형상을 비교 분석하였다.

2.3 E-블록 측면 형상변화에 대한 해석

E-블록 후부에 발생하는 와류(vortex)는 E-블록의 형상에 따라 불규칙적으로 발생되며, 이에 대한 방안으로 기존형상 그대로인 사각단면의 Fig.4 (a) rectangle 과, 기존형상에 삼각형 모양의 tail 을 부착한 Fig.4 (b) tail, 타원모양의 Fig.4 (c) ellipse, 그리고 삼각모양의 Fig.4 (d) triangle, E-블록의 홀을 메운 Fig.4(e) hole-filling 의 5 가지 변화모델에 대해 계산하여 비교/분석 하였다. 또한  $\Delta t$  (0.001s)의 시간간격으로 비정상상태(unsteady)해석을 수행하였으며, Fig.5 와 같이 슬라이더(Slider)가 위치할 지점의 수직 압력분포를 통해 연구의 주요 목적인 슬라이더 주위의 유동의 형태를 분석하였다.

2.3.1 슬라이더 위치 부분의 수직비교

E-블록후부에 발생하는 와류(vortex)는 슬라이더 가진에 지배적인 영향을 미친다는 것을 Fig.6 을

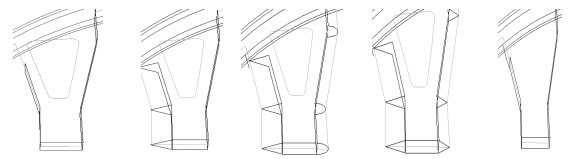


Fig. 4 Modifications of the side shape in E-block

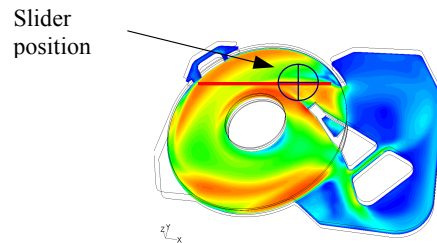


Fig. 5 Slider position

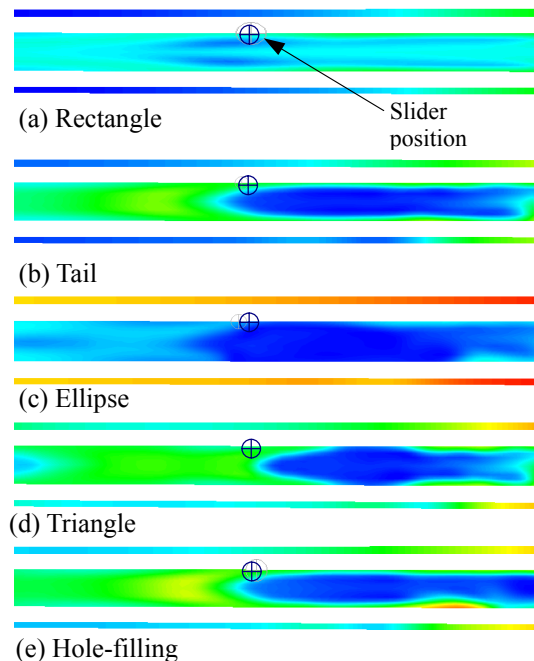


Fig. 6 Pressure of Vertical distributions in the slider position

통해 알 수 있다. 이러한 형상변화에 대해 슬라이더가 위치하는 지점의 단면을 수직으로 절단하여 압력장을 비교해 보면 기존의 사각단면 Fig.6 (a) rectangle 은 와류 쉼딩(Shedding)이 상하 대칭적으로 형성되어 있으며, 후류의 길이도 Fig.6 (b)의 tail 을 부착한 경우보다 길게 생김을 알 수 있다. 이 지점에 슬라이더가 위치하게 될 경우 큰 가진 요소로 작용될 수 있을 것이다. Fig.6(c)의 ellipse 와 Fig.6 (d)의 triangle 은 Fig.6 (a)에 비해 후류의 길이도 상대적으로 짧으며, 쉼딩(shedding)형성도 디스크의 사이(gap)중앙으로 몰려져 Fig.5 에 표시된 슬라이더가 작동하는 지점에서는 압력변동이 감소되는 것으로 판단된다.

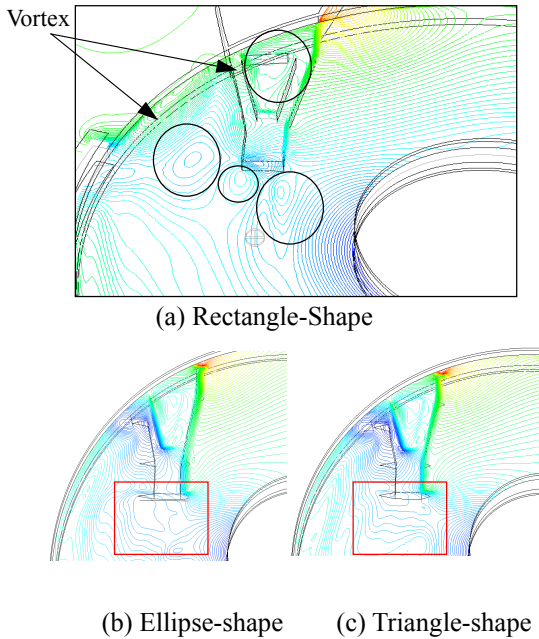


Fig. 7 Pressure of horizontal distributions

2.3.2 슬라이더 위치 부분의 수평비교

Fig.7 은 슬라이더가 두 장의 디스크 사이에서 read/write 작동을 수행하는 디스크 사이를 수평으로 절개한 모습이다. 2.3.1 에서 언급한 바와 같이 각 형상에 대해 수평으로 비교해 보았을 때 기존의 Fig.7 (a)rectangle 에서 발생하는 와류(vortex)의 위치를 파악할 수 있다. 이 와류는 Fig.7 (b)ellipse 와 Fig.7 (c) triangle 의 압력장 분포에서는 상당히 줄어든 것을 알 수 있다.

2.4 댐퍼 형상변화에 대한 해석

기존 HDD 의 댐퍼는 슬라이더의 진동측면보다는 디스크의 플러터링(fluttering)방지목적으로 고안되어 왔다. 그러나 HDD 의 E-블록 압력저감과 유량제어관점에서 댐퍼가 슬라이더 진동 저감에 적절하도록 변형시킨다면 디스크의 플러터링(fluttering)저감과 슬라이더 주위의 진동 저감효과 또한 볼 수 있을 것으로 판단했으며, 이러한 목적으로 설계변형/ 해석하였다.

2.4.1 압력 저감을 위한 댐퍼(1) 형상해석

HDD 의 VCM 에서 발생하는 최대압력은 E-블록과 이어져 액추에이터 Tip(끝단)에서도 최대가 됨을 Fig.8 을 통해 알 수 있다. 이를 막기위해 댐퍼의 끝단을 길게 연장시켜 Fig.9(a)와 같이 설계하여 해석한 결과, Fig. 9(b)에서와 같이 E-블록에 발생하는 압력을 감소시킬 수 있었으며 Fig.9(c)와 같이 와류(vortex)감소효과를 볼 수 있었다. 또한 수직압력분포를 비교한 결과, Fig.9 (d)의 기존 HDD 의

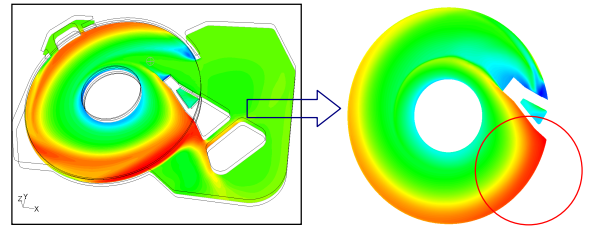
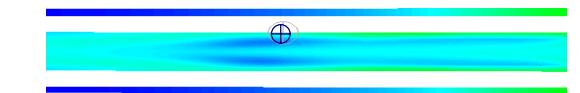
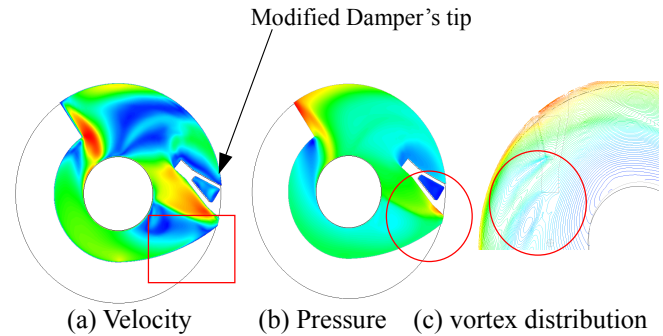
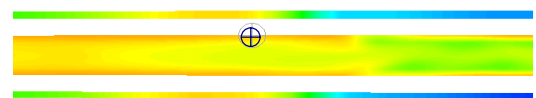


Fig. 8 Pressure distributions of the original HDD



(d) Vertical Pressure distribution in an original HDD



(e) Vertical Pressure distribution in a Modified Damper(1)

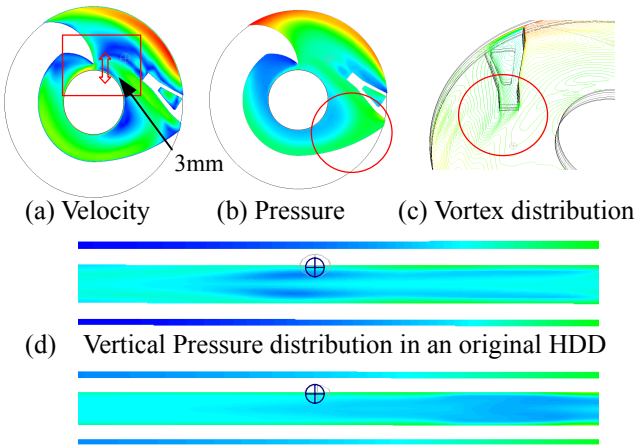
Fig. 9 The Damper modification for reducing pressure

수직압력 분포와 달리 Fig.9 (e)의 변형된 모델의 경우가 슬라이더가 위치할 지점에서 셰딩(shedding)에 의한 영향이 감소됨을 알 수 있다.

2.4.2 유량제어를 위한 댐퍼(2) 형상해석

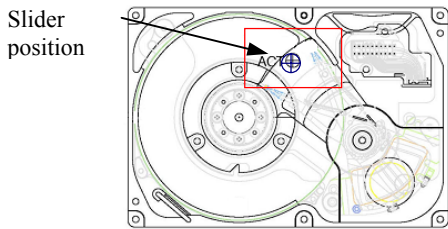
이러한 HDD 의 내부유동에 의해 E-block 후부의 불규칙적인 와류를 제어하는 직접적인 방법은 E-블록에 유입되는 유량을 줄이는 것이라는 판단을 하였고, 이에 Fig.10(a)와 같이 스피들(Spindle)과 댐퍼를 3mm 간격으로 밀착시켜 E-블록으로 유입되는 유량을 줄여 설계/해석한 결과, Fig.10 (b)과 같이 2.4.1 에서 언급한 댐퍼형상보다 압력이 더욱 균일하게 발생되었으며, Fig.10 (c)의 안정된 유체 후류를 볼 수 있었다. 또한 Fig.10(e)의 수직압력분포를 비교할 경우에도 유량이 줄어들어 E-블록 후류의 길이도 짧아짐을 알 수 있었다. 이러한 슬라이더의 가진을 줄이기 위한 댐퍼의 다각적인 시도는 슬라이더의 위치선 에러(Position error)를 줄이는 능동적인 방법이 될 수 있을 것이다.



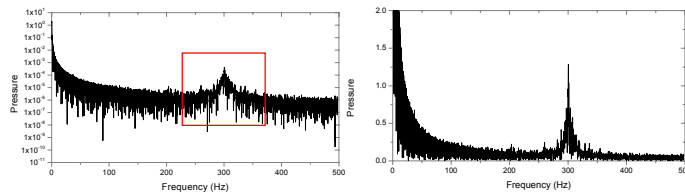


(e) Vertical Pressure distribution in a modified Damper(2)  
**Fig. 10** Damper modification for the flux control

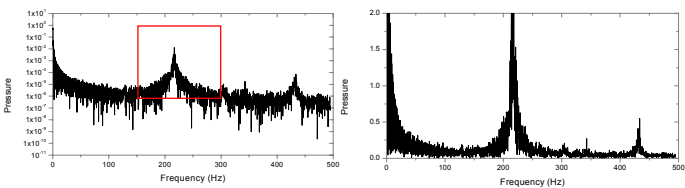
3. 액추에이터 주위의 진동해석



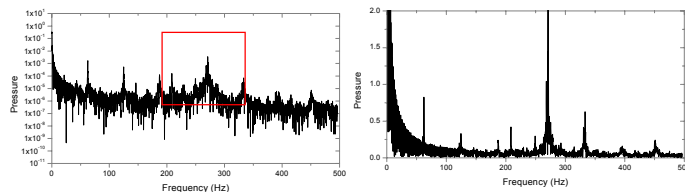
**Fig. 11** Slider Position



(a) Rectangle's pressure power and pressure fft spectrum



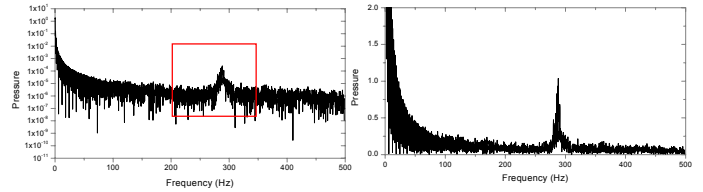
(b) Ellipse's pressure power and pressure fft spectrum



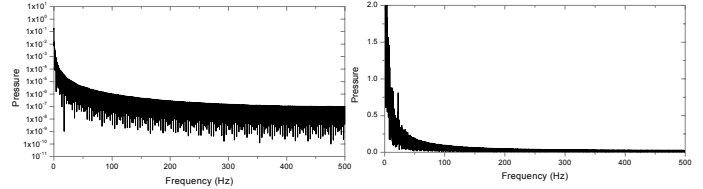
(c) Triangle's pressure power and pressure fft spectrum

**Fig. 12** FFT of pressure for E-block side modification

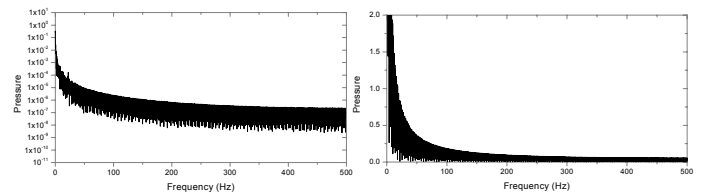
2 장에서 댐퍼 단면의 형상 및 댐퍼형상을 설계 /해석하여 HDD 의 속도 및 압력장을 비교 분석해



(a) Hole-filling pressure power and pressure fft spectrum



(b) Damper(1) pressure power and pressure fft spectrum



(c) Damper(2) pressure power and pressure fft spectrum

**Fig. 13** FFT of pressure for Damper and Hole-filling modifications

보았다. 이러한 결과로는 실제로 슬라이더에 미치는 가진 요소 및 형상변화에 따른 가진저감 효과가 어느 정도인지를 판단하기에는 어려움이 있었으며, 따라서 Fig.11 과 같이 실제의 슬라이더가 위치할 지점의 시간에 따른 압력변동 값을 계산해 이를 FFT 분석하는 것이 적절하다는 판단을 했다. Fig.12, 13 은 Fig.11 에서 보이는 슬라이더 지점의 시간에 대한 압력변동에 대한 FFT 이며,  $\Delta t(0.001s)$  의 시간간격으로 비정상 상태(unsteady)해석을 하였으며, 1KHz 이하의 저주파 성분에 중점을 두었다. 500Hz 이내의 결과를 FFT 해본 결과, 200-350Hz 의 주파수(frequency)에서 유동에 의한 슬라이더 가진의 영향이 크다는 것을 알 수 있었다.

3.1 E-블록 측면 형상변화에 대한 진동해석

FFT 스펙트럼은 7200RPM 의 회전속도를 갖을 때의 계산 결과이다. 구동조건 7200RPM 의 경우, 고체의 회전주파수 성분인 120Hz 와는 달리 유체의 가진은 불규칙적으로 발생되며, Fig.12 와 같이 E-블럭의 형상변화에 대해 슬라이더 위치의 가진은 200-350Hz 에서 유동에 의한 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 아울러 Fig.12(a)의 기존 HDD 의 rectangle 의 E-블록 형상에서는 300Hz 근처에서 큰 peak(최고점)이 발생하며, 전체적인 스펙트럼이 높게 형성되어 있다.

그러나 Fig.12(b) ellipse 와 (c) triangle 의 경우 Fig.12(a)의 스펙트럼 보다 가진량이 전체적으로 낮아지는 것을 알 수 있다.

3.2 댐퍼 형상변화에 대한 진동해석

Fig.13 은 댐퍼(1), 댐퍼(2), Hole-filling 의 경우에 대한 압력 변동값을 FFT 한 것으로 Hole-filling(Fig.13a)한 경우와 기존 HDD(Fig.12a) 보다 댐퍼(1)(Fig.13b)과 댐퍼(2) (Fig13c) 가 스펙트럼상에서 가진량이 줄어드는 향상효과를 보였으며 변형된 두가지의 댐퍼의 경우에는 기존 HDD 의 200-350Hz 에서 발생하였던 가진 peak 역시 현저하게 줄어든 것을 알 수 있다.

4. 결과 및 고찰

2 장과 3 장의 해석결과를 통해서 E-블럭의 형상 변화 모델들 중에서는 기존 HDD 의 E-블럭에 비해 Triangle 형상이 저속과 고속에서 슬라이더 위치의 가진량이 78-85%에 이르는 효과를 볼 수 있으며, 댐퍼변형 모델들 중에서는 E-블럭으로 유입되는 유량을 줄이기 위해 댐퍼를 변형시킨 댐퍼(2)모델이 기존 HDD 의 유동에 의한 슬라이더위치의 가진에 비해 81-83% 이르는 큰 효과가 있음을 알 수 있었다.

Table.3 Vibration-comparisons of the modifications

(RPM)	Ellip	Tri	Hole-filling	Damper (1)	Damper (2)
5400	73%	85%	5%	81%	89%
7200	69%	83%	4.7%	83.5%	90%
10000	66%	78%	8.3%	83.3%	91.6%

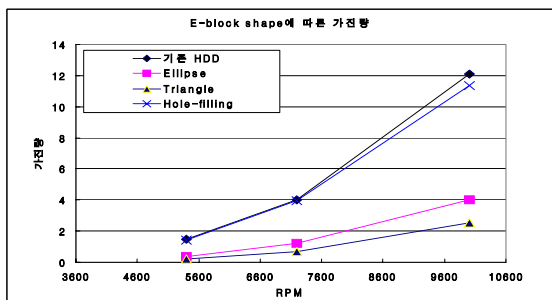


Fig. 14 Vibration-comparisons of E-block modifications

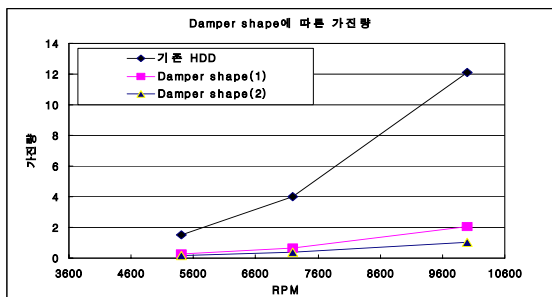


Fig. 15 Vibration-comparisons of Damper modifications

5. 결론

HDD 의 내부유동에 대한 Unsteady 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 슬라이더 주위의 가진은 고체의 진동 주파수와는 달리 불규칙하고 E-블럭의 형상을 변화시킴에 따라 달라진다. 또한 E-블럭의 형상에 따라 E-블럭으로 유입되는 Airflow 와 슬라이더 가진에 밀접한 관계가 있다.

2. HDD 의 내부유동에 의한 가진은 Fig.14 와 Fig.15 처럼 고속회전 할수록 유동에 의한 슬라이더 대부분의 가진은 급격히 증가하며, E-블럭 형상변화의 모델 중 triangle 형상이 슬라이더 부분의 가진 저감효과가 컸으며, E-블럭 후류에서 발생하는 와류의 감소를 위해서는 E-블럭의 후면에 tail 을 부착시킴으로써 효과를 증가시킬 수 있다.

3. 댐퍼의 구조변경을 통해 E-블럭과 슬라이더 주위로 유입되는 유량을 줄일 경우 가진량을 감소시킬 수 있다.

이처럼, HDD 가 고속회전 할수록 내부유동은 3 차원의 복잡한 난류가 되며, 이를 층류화 시킬 수 있는 능동적인 설계변형이 필요하다.

후 기

본 연구는 한국과학재단지정 정보저장기기연구센터의 지원(과제번호 : 2002-2-0263)을 받아 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Masayuki Tatewaki, Naozumi, Tsugito Maruyama 2001, "A Numerical Simulation of Unsteady Airflow in HDDs", JSME, Vol.37, pp 227-235
- (2) H. Shimizu, 2001, "Study of Aerodynamic characteristics in hard disk drives by numerical simulation", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 37, pp. 831-836
- (3) Hiroyuki Kubotera, Naozumi Tsuda, Masayuki Tatewaki, and Tsugito Maruyama 2002 "Aerodynamic Vibration Mechanism of HDD Arms predicted by Unsteady Numerical Simulation, Vol.38, No.5
- (4) Eng Hong Ong, Zhimin He, Ruiteng Chen, Hua Qian, and Guoxiao Guo, 2000, "A Low-Turbulence-High-Bandwidth Actuator for 3.5" Hard Disk Drives, IEEE, Vol.36, No.5
- (5) M. Tatewaki, 2001, "An analysis of disk flutter in hard disk drives in aerodynamic simulation", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 37, pp. 842-846.
- (6) H. Shimizu, 2001, "Study of Aerodynamic characteristics in hard disk drives by numerical simulation", IEEE. on Magnetics, Vol. 37, pp. 831-836