

디스크 댐퍼 형상이 HDD 내부 유동 및 TMR 에 미치는 영향

엄요한[†], 임윤철*

Effects on TMR and Airflow in HDD Cavity due to Disk Damper Shapes

Yo-Han Um, Yoon-Chul Rhim

Key Words : HDD, TMR(Track Mis-Registration), Airflow, Disk Damper, FIV(Flow Induced Vibration)

ABSTRACT

The recording density of a hard disk drive is increasing so rapidly that the storage capacity of a commercial HDD in PC reaches several hundred giga bytes recently. Many technologies related to the HDD, such as servo, media, actuator dynamics, thermo and fluid dynamics, etc. must be developed together to realize high recording density. Especially, researches in the airflow inside the HDD cavity become important as the rotational speed of a disk increases. Typical problem due to the airflow is the vibration of an actuator as the airflow collides with an E-block, suspensions and sliders, that is, FIV(Flow Induced Vibration). This problem is one of the significant sources of increasing TMR so that it must be resolved. In this research, a disk damper shape has been modified to minimize the effects of airflow on the actuator. Modified disk dampers which change flow field inside HDD cavity show good effects not only on the disk flutter but also on the vibration of an actuator. Vibrations of E-block and slider have been measured with LDV and the airflow field inside the HDD cavity has been analyzed using a commercial package to verify these effects.

1. 서론

고용량 하드 디스크를 개발하기 위해서는 디스크의 반경 방향 저장 밀도인 TPI(Track Per Inch) 증가 기술이 필수적이다. 최근에는 디지털 미디어 산업의 수요로 인해 HDD의 정보저장 용량이 수백 기가바이트에 이르면서 기록밀도 또한 100kTPI를 초과하여 가파르게 상승하고 있다. 하지만 서브미크론 단위의 트랙 폭 내에 슬라이더의 위치를 정확히 제어하기란 쉽지 않다. 서보, 스피들 시스템, 액추에이터 설계, HDD 내부 유동 제어 등 여러 분야의 기술들이 집약되어야 하기 때문이다. 이 중에서도 특히 HDD 내부 유동 분야는 디스크

회전속도가 증가하면서 점차 중요성이 부각되고 있다. HDD cavity 내 공기의 흐름은 Disk flutter를 야기시킬 뿐 아니라 HSA(Head Stack Assembly) 주변부에 복잡한 유동장을 형성하여 헤드의 Off-track 진동을 일으키기 때문이다[1-2]. 특히 유동으로 인한 HSA의 진동은 전체 NRRO PES의 70%를 차지하는 중요한 요인이며, 이러한 windage를 얼마나 효과적으로 감소시키느냐가 High TPI 구현의 핵심이라 해도 과언이 아니다[3].

HSA에 대한 유동의 영향을 줄이기 위한 연구는 여러 방면에서 이루어졌는데 E-block의 단면 형상을 유체역학적으로 디자인하여 Drag 및 vortex 생성을 감소시킨 사례가 주목할 만 하다[4]. 더불어 최근 HDD 업계에 등장하여 Air Guide나 Flow Suppressor 또는 spoiler로 불리는 내부 구조물들은 HSA로 향하는 유동의 양 또는 방향을 직접적으로 제한시킨다는 점에서 효과적인 대안이 되고 있다[5]. 본 연구에서는 HDD의 또 다른 내

[†] 연세대학교 기계공학부 대학원

E-mail : johny81@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-3854 FAX : (02)312-2159

* 연세대학교 기계공학부 대학원

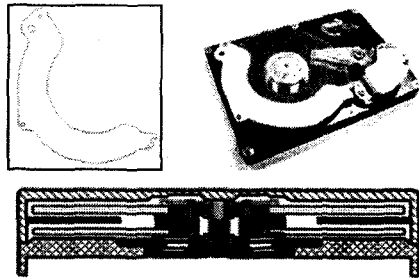


Fig. 1 Original shape and position of disk damper

부 구조물인 디스크 댐퍼의 FIV 저감 효과의 원인을 규명하고, 유체역학적 형상 변경을 통해 이러한 효과를 확대시킬 수 있는 가능성을 제시하고자 한다.

2. 디스크 댐퍼의 개요

디스크 댐퍼는 원래 Disk Flutter 를 감소시키기 위해 고안된 부품이다. 디스크와 디스크 사이에 2mm 내외의 plate 를 삽입하면 얇아진 간극 사이로 Squeeze Air Bearing 층이 형성되어 축방향 디스크 진동의 damping 개수를 높이는 효과를 얻게 된다. 일반적으로 디스크가 축방향으로 진동하면 벤딩 되는 디스크를 슬라이더가 추종하는 과정에서 Off-track 이 일어나므로 TMR 의 원인이 된다. 따라서 디스크 댐퍼를 통해 원천적으로 Flutter 현상을 줄이면 TMR 도 개선할 수 있는 것이다.

디스크 댐퍼가 가지는 또 하나의 효과는 windage 감소이다. 태생적으로 Disk Flutter 감소를 목표로 고안됐지만, 연구결과에 의하면 디스크 댐퍼가 삽입된 HDD 의 경우 그렇지 않은 경우에 비해 HSA 의 반경방향 진동 또한 감소된 것으로 밝혀졌다[6]. 이는 디스크 댐퍼가 원주방향으로 회전하는 HDD 내부 유동장에 변화를 일으켜 HSA 에 대한 유동의 영향력이 감소했음을 말해준다. 따라서 windage 저감을 고려하는 관점에서 디스크 댐퍼의 형상에 변화를 준다면 기존의 효과를 확대시킬 수 있는 가능성이 있다. 현재까지의 디스크 댐퍼는 단지 Disk Flutter 에 대해서만 최적화된 상태이기 때문이다[6].

3. 디스크 댐퍼의 영향 분석

Windage 저감의 관점에서 개선된 모델을 제안하기 위해서는 먼저 기존의 디스크 댐퍼가 windage 를 저감시키는 원리를 규명해야 한다. 디스크 댐퍼가 있는 경우와 그렇지 않은 경우의

HSA 의 진동량 측정결과를 비교하여 windage 가 감소하는 패턴을 확인한 후, 수치해석을 통해 HDD 내 유동장을 분석하여 그 원리를 규명한다.

3.1 Slider 진동량 측정

3.1.1 측정방법

LDV(Laser Doppler Vibrometer)의 빔을 슬라이더의 옆면에 조사하여 슬라이더의 반경방향 진동을 측정하였다. Fig. 2 는 실험장치의 구성을 나타낸 그림이다. 실험대상이 되는 HDD 는 플래터당 80GB 용량을 갖는 상용 HDD 이며 탑재된 슬라이더는 가로 1.25mm, 세로 1.0mm 높이 0.3mm 의 직사각형 형태의 피코(Pico) 슬라이더이다. 유동에 의한 진동측정은 공기의 유동이 가장 빠른 디스크의 외경(OD)에서 가장 유효한 값을 얻을 수 있으므로 슬라이더가 디스크의 가장자리에 위치할 수 있도록 VCM 에 일정 전압을 가해주었다. LDV 는 OFV-2200 controller 와 OFV-512 Fiber Interferometer (최소 spot 직경 20 μ m)를 사용하였고, 레이저가 슬라이더에 도달할 수 있도록 HDD 케이스 옆면에 구멍을 뚫었는데, 구멍이 내부 유동장이 변화를 일으키지 않도록 크기를 최소화 하였다. 사용된 디스크 댐퍼는 현재 상용 HDD (Samsung SP series)에 탑재되고 있는 Original 형상(Fig. 1)이다.

3.1.2 측정결과

Fig. 3 은 슬라이더의 진동양상을 power spectrum 으로 나타낸 그래프이다. Windage 영역으로 알려진 [6] 100~700Hz 에서 진동량 감소가 뚜렷하게 나타나며, 200~400Hz 대역의 큰 피크 두 개가 사라진 것

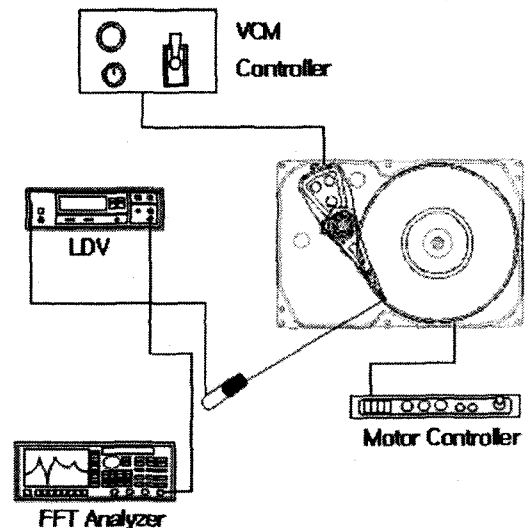


Fig. 2 HSA vibration measurement setup

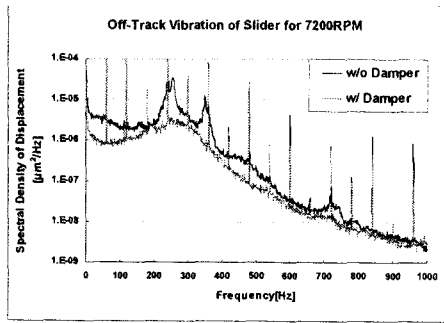


Fig. 3 Power spectrum of slider vibration for 7200rpm

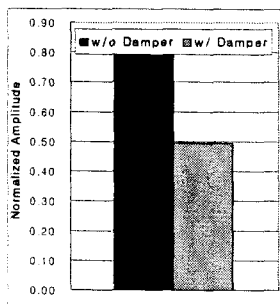


Fig. 4 Normalized amplitude of slider vibration with and without disk damper for 7200rpm

이 특징이다. Fig. 4 는 두 경우의 진동량을 Normalized amplitude로 변환하여 비교한 그래프이다. 여기서 amplitude는 power spectrum의 100~700Hz 대역에서 각 주파수의 값들의 제곱근을 적분한 값으로 정의한다.

3.2 HDD 내부 유동 해석

3.2.1 수치해석방법

수치해석을 위해 실험에 사용된 HDD의 내부와 동일한 형상의 체적을 모델링 하였다. 단 서스펜션과 슬라이더는 크기가 극히 작고, E-block에 비해 windage의 영향이 미미하므로 모델의 단순화를 위해 생략하였다. 또한 element 개수, 해석시간 등의 제한된 자원을 효율적으로 사용하기 위해 계산 영역을 디스크 사이의 공간으로 축소하였다. 이 기법은 디스크 댐퍼의 삽입으로 좁아진 디스크 사이의 간극에도 충분한 수의 element를 줄 수 있어 유동의 축방향 변화를 자세히 계산할 수 있는 이점이 있다. 해석의 정확도 면에서도 HDD내에서 디스크 사이의 유동이 지배적인데 반해 디스크 위와 아래의 층간 상호작용은 미미하므로 본 연구의 목적 하에서만은 유효하다고 할 수 있다. 또한 여러 장의 디스크로 이루어진 HDD 내부 유동 해석을 동일하게 1 layer로 제한한 기존의 연구결

과[2]에서도 해석결과와 실험결과가 일치함을 검증한 바 있다. Fig. 6은 해석 영역 및 경계조건을 나타낸 그림이며 수치해석에 관한 상세조건은 Table. 1과 같다. 계산에 사용된 프로그램은 유한체적법을 적용하는 상용코드를 사용했고, Time step은 디스크가 1도 회전하는 동안의 시간으로 설정하였다.

3.2.2 수치해석결과

Fig. 7은 디스크 댐퍼를 삽입한 경우와 그렇지 않은 경우의 속도장을 비교한 그림이다. 각 경우마다 세 평면(upper plane, middle plane, lower plane)에서의 속도장을 나타내었다. 세 평면은 HSA가 포함되는 영역과 HSA의 위와 아래 세 영역으로 해석 영역을 나누었을 때 각 영역의 중심 면이다.

먼저 가장 쉽게 알 수 있는 것은 전체적인 속도의 감소이다. 디스크 댐퍼가 공기 흐름을 방해하

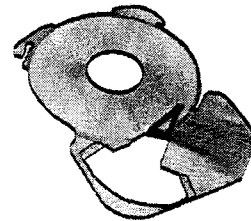


Fig. 5 Computational model of HDD

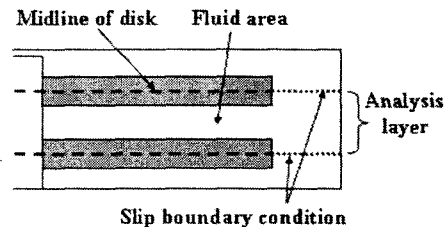


Fig. 6 Analysis area and boundary condition

Table. 1 Computational condition

Item	Specification
Disk diameter	95 mm
Rotational Speed	7200rpm
Analysis region	1 layer(between disks)
Number of elements	538,679(without damper case)
Mesh type	hexahedral mesh
Basic equation	3-D Navier-Stokes equation
Spatial differencing	2 nd order upwind
Time advancement	Unsteady(2 nd order implicit)
Time step	2.314×10^{-5} s
Turbulence model	Large-Eddy Simulation(LES)

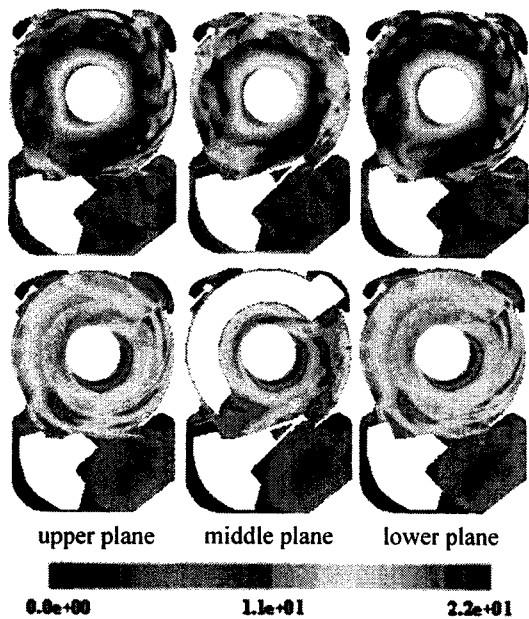


Fig. 7 Velocity distribution of upper, middle and lower plane with and without disk damper

는 장애물(air suppressor) 역할을 하면서 전 영역에서 속도의 감소를 가져왔다. 특히 댐퍼가 없는 경우는 디스크의 반경방향 전 영역에서 비슷한 속도를 보이지만 댐퍼를 설치한 경우 상대적으로 고속 유동이 외경 보다 내경 부근에 집중되는 경향을 발견할 수 있다. 외경 위치에 설치된 디스크 댐퍼가 공기흐름을 내경 방향으로 몰아내는 Air guide 역할을 했기 때문이다.

속도장의 2 차원적인 변화뿐 아니라 축방향의 변화도 눈에 띈다. 댐퍼가 없는 경우 E-block 부근에서 세 평면이 비슷한 속도 분포를 보이지만 댐퍼를 설치한 경우 upper plane 과 lower plane 의 속도가 midplane 의 그것과 비교적 큰 차이가 난다는 사실을 알 수 있다. 이는 디스크 댐퍼가 높이상 midplane 에 위치하기 때문에 동일하게 midplane 에 위치하는 E-block 으로 향하는 공기 흐름을 상대적으로 더 제한시키면서 생기는 현상이다. 위 속도장의 분석을 요약해보면 디스크 댐퍼가 HDD 내 유속을 전체적으로 감소시키며, 특히 E-block 을 지나는 유량을 감소시킨다는 결론을 얻을 수 있다.

유속 또는 유량의 감소는 유동이 E-block 에 미치는 영향력 즉, HSA 를 가진할 수 있는 운동에너지의 감소를 의미한다. 하지만 단순히 E-block 주변 유속의 감소가 진동량의 감소를 규명하는 직접적인 단서로 보기에 충분치 않다. 유동에 의



$$\text{Left side force} - \text{Right side force} = \text{Net force}$$

Fig. 8 Definition of net force vibrating E-block

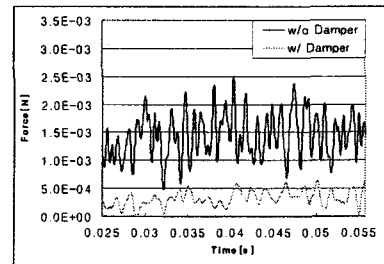


Fig. 9 Fluctuation of net force vibrating E-block

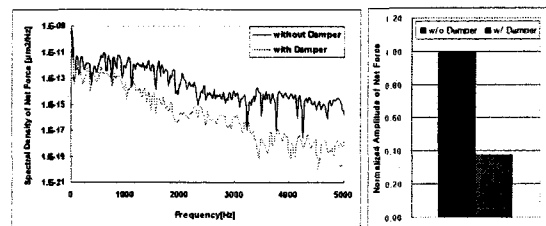


Fig. 10 Power spectrum and normalized amplitude of net force vibrating E-block

한 물체의 진동은 표면에 작용하는 압력의 변화에서 보다 직접적인 원인을 찾을 수 있다.

E-block 을 직접적으로 가진하는 힘은 Fig. 8 과 같이 정의할 수 있다. 유동이 디스크의 회전에 따라 반시계 방향으로 회전할 때 E-block 의 왼쪽 면은 상류가 되고 오른쪽 면은 하류가 된다. 표면 압력을 적분하면 힘이 되고 양 표면에 가해지는 힘의 차는 net force 가 된다.

Fig. 9 는 HDD 내부 유동이 충분히 정상화된 후 시간에 따른 가진력의 fluctuation 을 나타낸 그래프이다. 댐퍼가 있는 경우가 없는 경우보다 진폭이 훨씬 작음을 알 수 있다. Fig. 10 의 두 그래프는 각각 power spectrum 과 Power spectrum 의 100~700Hz 대역을 Normalized amplitude 값으로 변환시킨 그래프이다. Amplitude 의 정의는 실험에서의 것과 동일하다. Power spectrum 에서는 전 frequency 영역에서 진동량이 현저하게 감소하였고, amplitude 그래프에서는 실험에서의 동일한 100~700Hz 대역의 진동성분을 비교할 수 있는데 역시 눈에 띄는 감소를 보인다.

이상의 수치해석결과를 놓고 볼 때 내릴 수 있

는 결론은 디스크 댐퍼가 air suppressor 또는 air guide 역할을 하여 E-block 을 지나는 유속(또는 유량)을 감소시켰고 이는 직접적인 가진 원인인 압력 변동량 역시 감소시키는 작용을 했다는 사실이다. 이상은 실험에서 얻어진 결과와 일치하며 windage 영역으로 알려진 저주파(100~700Hz)에서 특히 상호보완적인 결과를 보임을 알 수 있다.

4. 디스크 댐퍼의 형상 변화와 효과

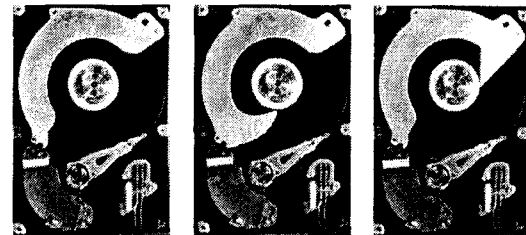
4.1 디스크 댐퍼 형상 제안

디스크 댐퍼의 windage 저감 효과 분석을 통해 HSA 진동저감을 위해서는 air suppressor로서의 기능을 극대화 시키는 것이 관건임을 확인하였다. E-block 으로 향하는 유동의 경로를 막는 방법은 수직방향과 수평방향 모두가 가능하다. 하지만 디스크 댐퍼의 두께를 늘일 경우 shock 에 대한 위험이 커지기 때문에 이 방법은 업계에서도 가능하면 피하는 것으로 알려져 있다. 결국 수평방향의 유동 제어에 초점을 맞출 수 밖에 없는데 Fig. 11 은 이러한 아이디어에 입각하여 제안하는 디스크 댐퍼 형상이다.

Type B 는 하류 영역 즉, HSA 의 앞에서 내경 영역까지 유동의 흐름을 제한할 수 있는 형상이다. 반면 Type C 는 상류 영역에서 내경 영역의 유동을 차단할 수 있는 형상이다. 새로운 형상의 디스크 댐퍼와 구별하기 위해 기존 댐퍼는 Type A 로 구분한다.

4.2 수치해석을 통한 형상변화 효과 분석

Fig. 12 는 디스크 댐퍼 형상을 달리 하였을 때 HDD 내부 유동장이 달라지는 양상을 보여준다. 기본적으로 Type B 와 Type C 에서 기존의 형상에 비해 내경 영역의 유속이 현저하게 줄어든 것을 알 수 있다. 내경 쪽으로 굽어진 형상이 유동의 경로를 차단하였기 때문이다. 하지만 HSA 진동에 영향을 미치는 E-block 주변 유동장의 경우 Type B 와 Type C 는 차이가 있다. Type B 는 E-block 하단부를 제외하면 Type A 에 비해 훨씬 낮은 속도 분포를 보여준다. 반면 Type C 의 경우 E-block 상단 부근에도 높은 속도가 분포하는데, 이는 Type A 와 유사한 수준이다. Type B 의 경우 E-block 근처의 속도장에서 내경과 외경의 차이가 거의 없다. 즉, 내경과 외경의 속도가 골고루 줄어든 양상이다. 하지만 Type C 의 경우에는 댐퍼를 벗어나면서 내경 영역과 외경 영역의 속도차이가 급격히 벌어진다. Type C 는 전체적인 속도 감소 면에서는 세



Type A Type B Type C

Fig. 11 Modified damper shapes



0.0e+00 1.1e+01 2.2e+01

Fig. 12 Velocity distribution of midplane in HDD with Type A, Type B and Type C

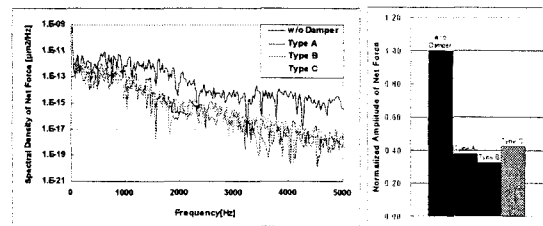


Fig. 13 Power spectrum and normalized amplitude of net force vibrating E-block

경우 중 가장 성공했으나 E-block 부근에서 내경 영역의 유속이 지나치게 줄어들면서 상대적으로 외경 영역의 속도 증가를 가져왔는데 E-block 이 외경영역에 위치한다는 점을 감안하면 결코 바람직하지 못한 현상이다.

Fig. 13 은 E-block 에 대한 유동의 가진력의 power spectrum 및 normalized amplitude 이다. 계산 방법은 Fig. 10 과 동일하다. 진동량 면에서 Type B 가 Type A 에 비해 개선된 반면 Type C 의 경우 오히려 증가한 결과를 보여준다. 이는 속도장에서의 분석과 맥을 같이한다고 볼 수 있다.

4.3 E-block 진동 측정

E-block 의 진동을 측정하여 해석결과와 비교하고자 한다. E-block 진동의 측정은 Slider 진동과는 달리 Fig. 13 의 결과와 직접적인 비교가 가능하다는 장점이 있다. 수치해석의 결과와 마찬가지로

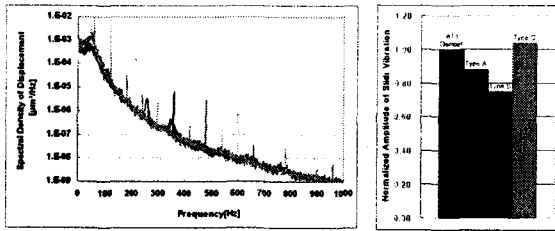


Fig. 10 Power spectrum and normalized amplitude of E-block vibration with various disk damper shapes

Type B 는 기존의 댐퍼에 비해 진동량을 줄이지만 Type C 는 오히려 진동을 심화시키는 결과를 보여 준다.

5. 결론

디스크 댐퍼의 적용은 본래의 기능인 flutter 저감 외에도 HSA 에 대한 windage 를 감소시키는 효과가 있음을 실험을 통해 확인하였다. 수치해석을 통한 분석을 통해 windage 저감의 관건은 디스크 댐퍼의 air suppressor 또는 air guide 로서의 역할의 확대라는 사실 또한 밝힐 수 있었다.

디스크 내경 방향의 유동 차단을 목표로 제안된 새로운 댐퍼 형상 Type B 와 Type C 는 전체적인 속도 감소라는 측면에서는 동일한 결과를 보였지만 E-block 주변 유동장에서는 다른 양상을 보였다. Type B 의 경우 E-block 주변의 유속을 성공적으로 감소시킨 반면 Type C 의 경우 내경 영역과 외경 영역의 속도차의 격차가 커지면서 상대적으로 E-block 상단에 높은 속도가 분포됐다. E-block 진동 측정은 수치해석의 결과를 보완해주는 결과를 보여줬다.

이상의 연구를 통해 디스크 댐퍼 형상 변화가 HDD 내부 유동장은 물론 HSA 진동에도 영향을 끼침을 확인하였다. 하지만 유동을 차단하는 형상이 유속을 제한할 수 있으나 그 양상은 형상에 따라 얼마든지 달라질 수 있다는 사실도 밝혀졌다.

참고문헌

(1) Masayuki Tatewaki, Naozumi Tsuda, Tsugito Maruyama, 2001, "A Numerical Simulation of Unsteady Airflow in HDDs," FUJITSU SCI. TECH. J., 37, 2, p.227-235

(2) Naozumi Tsuda, Hiroyuki Kubotera, Masayuki Tatewaki, Shigeo Noda, Masanori Hashiguchi, et al., 2003, "Unsteady Analysis and Experimental Verification of the Aerodynamic Vibration Mechanism of HDD Arms," IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 39, NO. 2, p.819-825

(3) Yong-Han Song, Yun-Sik Han, Ho Seong Lee, 2005, "Effects of Disk Thickness and Pemto Slider on Position Error Signal for High TPI Hard Disk Drive," SISS, VOL. 1, NO.1 September, p.23-28

(4) Kwang-Pyo Cho, Jin-Gyoo Yoo, Yoon-Chul Rhim, 2003, "The Experimental Studies for Reducing Airflow-induced Vibration of Actuator Arms in HDDs," KSME Conference, Autumn 2003, p.670-675

(5) Yoshiyuki Hirono, Toshihiro Arisaka, Noriyo Nishijima, Toshihiko Shimizu, Shigeo Nakamura, et al., 2004, "Flow-Induced Vibration Reduction in HDD by Using a Spoiler," IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 40, NO. 4, p.3168-3170

(6) Yun-sik Han, Seong-Woo Kang, Dong-Ho Oh, Tae-Yeon Hwang, Greg Tran, "A Study On the Disk Vibration Control by Disk Damper for 80GB/Platter Hard Disk Drive Design," Samsung Advanced Institute of Technology