

밀폐된 동시 회전 디스크 내의 주기적 유동 교란의 분포 Distributions of oscillating flow fluctuation in the flow between corotating disks confined

공대위† · 주원구*
Dae-Wee Kong, Won-Gu Joo

Key Words : HDD(하드디스크드라이브), Corotating disks(동시회전원판), Flow fluctuation(유동교란), PSD(파워스펙트럼밀도)

ABSTRACT

The configuration of coaxial co-rotating contained in shroud provides a useful model for investigating the characteristics of flow in the HDD. Reynolds number is defined as $Re_R = \Omega R_o^2 / \nu$, $Re_H = \Omega R_o H / \nu$ in present study. An experimental investigation was performed for turbulence profiles and PSD distribution and vortices frequency behavior for various range of $Re_R = 2.43 \times 10^4 \sim 3.61 \times 10^5$. A laser Doppler anemometry (LDA) is used to obtain the velocity field of unobstructed co-rotating disks flow. Airflow pattern visualization between inner and outer region was compared with turbulence profiles measured from LDA. Outer detached shear layer and dead-zone without oscillating velocity fluctuation to circumferential mean were quantitatively traced.

기호설명

a, b	disk-shroud gap, disk thickness
f_c	eventual detecting frequency
H	hub height
N_v	vortices or lobe structure number
r	radial direction
Re_R	$\Omega R_o^2 / \nu$
Re_H	$\Omega R_o H / \nu$
R_s, R_i, R_o	axis radius, hub radius, disk radius
R_{vi}, R_{vo}	inner and outer detached layer location
R_{vc}	PSD dead-zone location
\bar{u}_θ	circumferential mean velocity
θ	circumferential direction
z	axial direction
μ	viscosity
ν	kinematic viscosity
Ω	disk angular velocity

(flow fluctuation)에 의해 수십 나노미터의 높이로 부상하여 정보를 기록 또는 재생하는 헤더(header)에 영향을 미치는 요인이 된다. 이에 따라 내부 유동의 교란을 제어하기 위한 많은 조사와 연구가 오래도록 진행되어 왔다. 근본적인 디스크 회전에 의한 유동의 본질을 찾기 위해 원통형과 같은 심플한 케이스에 밀폐된 회전 디스크에 대해 수치적 또는 실험적 연구성과들은 HDD의 성능 향상에 많은 영향을 주어 왔다.(1,2)

HDD 내부의 유동교란에 대한 수치해석적 조사에는 시대 흐름에 따라 관심있는 유동 교란의 주파수 대역의 폭이 높아지고 있다. 예를 들어 수백 Hz 대의 교란 주파수는 주로 디스크 공간 전체의 유동패턴과 밀접한 관계가 있고, 디스크의 플러터(global disk flutter)해석과 결부되었다. 유동 내부의 암(arm)에 대해서는 유동교란 주파수 대역이 1 k에서 수 k Hz의 범위를 가진다.(3) 이 대역의 유동을 해석하기 위해서 방대한 수치계산과 기법이 요구된다. 특히 서스펜션(suspension)의 FIV 해석은 한층 더 높은 기술과 계산머신을 요구하며 현재 이 영역에서는 교란의 주파수 대역이 만 k Hz에 이른다.

실험적으로는 고속회전 하는 공기의 유동에 대한 여러 가지 측정 및 계측 기법이 동원되었다. 유동패턴을 가시화 하기 위해 작동 유체를 물로 하여 패턴을 관찰하기도 하고, LDV(laser Doppler velocimetry)와 같은 비접촉식(non-intrusive) 속도 측정을 통해 교란의 본질을 찾아내는 많은 연구가 진행되어 왔다.(4,5,6) 근래에는 PIV (particle image velocimetry)와 같은 측정 기법의 발전으로

1. 서론

정보저장매체로서의 하드디스크드라이브(HDD)에는 동시에 회전하는 디스크 스택(stack)이 있으며 보통 여러 장의 디스크로 구성되어 있다. 고속회전하는 디스크는 밀폐된 내부의 공기유동을 매우 불안정하게 하는 요인이 된다. 이 유동교란

† 연세대 기계공학과 대학원
E-mail : dw409@yonsei.ac.kr
Tel : (02) 2123-2815, Fax : (02) 312-2159

* 연세대 기계공학부

부분적으로나마 실제 3.5" 디스크 내부의 유동에 대한 측정 가능한 수준이 되었다.(7,8,9)

유동 교란을 줄이기 위해 내부 유동 패턴을 제어하고 디스크 면에 감쇠를 주기 위한 damper 가 장착되거나 스포일러와 같이 유동구조를 깨고 주 속도 분포(mean passage velocity profile)를 감소시켜 암(arm)의 입구부 유동의 교란크기를 줄이는 장치 부속되기도 한다.

이렇게 HDD 내부의 유동은 수치적으로 또 실험적으로 매우 다양한 해석과 조사가 진행되어 오고 있음에도, 아직 까지 더욱 효율적인 해석과 측정 기법이 요구되고 있는 것이 현실이다. HDD 내부의 디스크는 도입부에서 언급한 바와 같이 틱간격이 여유공간이 없을 정도의 좁은 원통형 케이스로 밀폐되었다고 봐도 무방하며 실제 해석이나 실험도 이러한 구성은 해석이나 실험에서 유용한 근본적인 문제들을 연구하는 대상이 되어 왔다. 특히 내부의 장애물로서의 암이나 서스펜션과 같은 구조물이 OD(outer diameter)위치에 있을 경우 내부 유동의 패턴은 장애물이 없는 상태에서와 유사한 성격을 가진다. 더욱이 암이 OD 에서 다른 위치의 경우보다 유동에 의한 교란을 심하게 받는 것으로 조사된다. 따라서 유동의 외부영역, 즉 슈라우드(디스크 사이 원통형 케이스) 부근의 구조에 대한 면밀한 조사가 이루어 져야 한다. 보통 이 영역을 유동의 외부영역(outer region)이라 한다.

본 연구는 이 외부 영역에서의 PSD 분포를 실험적으로 조사하여 외부 유동에서의 와류의 분포 영역을 조사하고, 회전수에 의한 볼텍스의 수와 교란주파수와와의 상관 관계를 밝혀 내는 데에 목적이 있다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

HDD 내부의 디스크는 대체로 수 인치 에서 1 인치 이하의 직경까지 다양한 크기를 가지고 있다. 그러나 실험적으로 이와 같은 작은 형상의 구조 안에서 측정에 어려움이 있기 때문에 규모를 수배로 확장시켰다(그림 1). 실험에 사용하는 원판은 반경 R_o 가 190 mm 이고 AC 모터를 통해 구동된다. 슈라우드는 윗 면과 측면이 모두 plexiglass 로 구성되어 있고 LDV probe 에서의 레이저가 통과할 수 있는 평편한 창이 있다. H 는 10, 20, 40 mm 이고 a, b, Ri 는 각각 5, 8, 66 mm 이다.

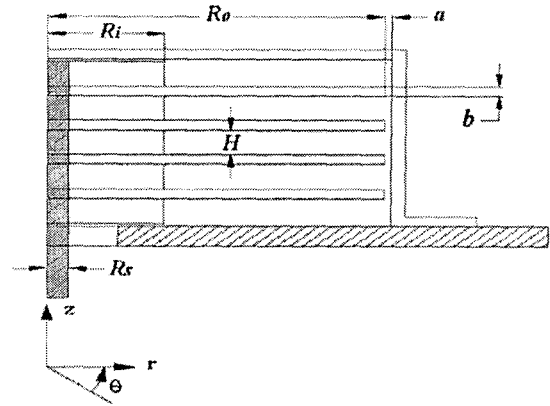


Fig.1 Schematic of the test section

LDV 는 back scatter 방식의 DANTEC 2-D Fiber Flow System 을 이용했고 5 W 급이다. 입자는 평균 지름이 대략 0.1 μm 의 올리브 오일을 사용했다.

2.2 실험 방법

여러 가지 회전속도에 대해 LDV 를 이용하여 반경의 여러 지점에서 1 차원의 원주방향 속도성분을 측정하였다. 측정은 두 번째와 세 번째 디스크의 사이 중앙면이다. LDV 계측 장비의 속도 측정은 비등간격(unevenly) 측정이며 포집된 데이터를 등간격으로 재정렬하고 내부와 외부 영역 경계면의 유동 패턴은 관심영역이 100 Hz 가 안되기 때문에 256 Hz 의 포집률로 재구성하여 PSD 를 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

레이놀즈 수는 디스크 반경에 의한 $Re_R = \Omega R_o^2 / \nu$ 과 디스크 사이 간격에 의한 $Re_H = \Omega R_o H / \nu$ 으로 정의한다. 여기서 주기적 교란의 원인인 외부 영역에서의 볼텍스의 반경 위치를 가시화와 난류강도 분포를 비교하여 조사하고, 외부영역에서의 PSD 계산을 통해 특정 위치에서의 주기적 교란특성을 규명하였다. 또한 측정된 교란 주파수와 볼텍스와의 상관계를 조사하였다.

3.1 볼텍스 유동 영역과 난류강도 분포의 관계

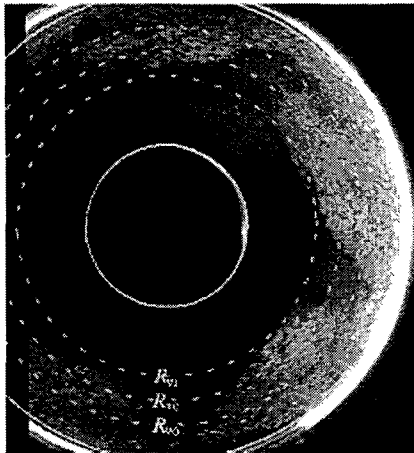


Fig. 2 Visualization of flow pattern at mid-plane of co-rotating disks with $H/R_o = 0.106$ using particles scattering by laser sheet ; $Re_H = 1.01 \times 10^4$.

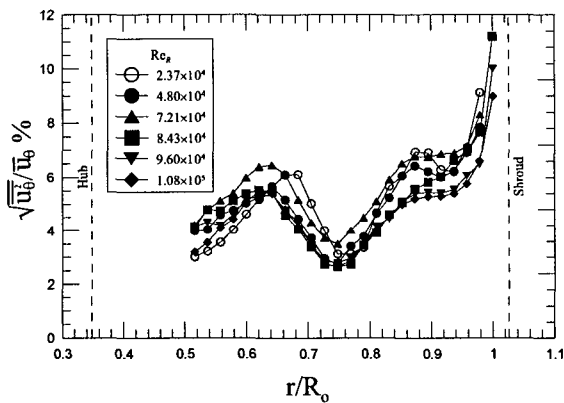
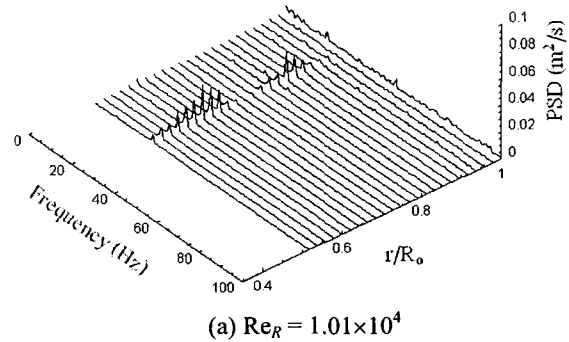
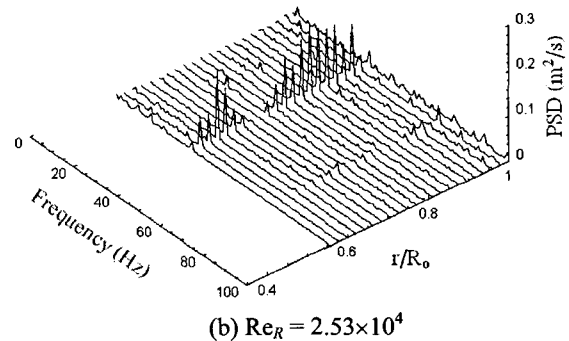


Fig. 3 Turbulence intensity profiles between disks at several Reynolds numbers.

그림 2 는 동시 회전하는 두 디스크 사이의 중앙면(mid-span)에서의 내부 및 외부 유동 경계면에서의 패턴을 가시화한 것으로 가시화 기법에 대해서는 공대위 등(1)의 문헌에 자세히 설명되어 있다. 관찰되는 로브 구조(lobe structure)는 외부영역의 볼텍스 영역을 보여준다. R_{vi} , R_{vo} 는 각각 내부 유동 경계면, 외부 영역의 볼텍스와 슈라우드 근방 3 차원 유동 사이의 경계면으로 그 사이에 볼텍스가 위치한다. R_{vsl} 의 반경은 detached shear layer 를 의미하며 안정된 내부 유동영역과 볼텍스의 외부영역 경계이다.(10) R_{vo} 는 그림 3 의 난류강도 분포의 골에 해당한다. 난류강도 분포에는 일반적으로 특이한 두 피크(peak)가 존재 하는데 하나는 무차원 반경이 대략 0.65 인 R_{vi} 에 위치하



(a) $Re_R = 1.01 \times 10^4$



(b) $Re_R = 2.53 \times 10^4$

Fig. 4 외부 영역에서의 PSD 분포

고 다른 하나는 무차원 반경이 대략 0.85 인 R_{vo} 에 위치한다. 따라서 외부 영역의 볼텍스는 이 두 반경 사이에 놓이고 있다. 난류강도는 실험장치에서 보면 벽면에서 크게 발생한다. 그런데 이처럼 공간에 떨어져 존재하는 피크는 볼텍스의 거동에 의한 주기적 교란의 영향에 의한 것임을 알 수 있다.

3.2 외부 영역(outer region)에서의 PSD 분포

그림 4 는 동시 회전하는 두 디스크 사이의 중앙면에서의 원주방향 속도 성분에 의한 PSD 분포를 나타내고 있다. 그림 4a 는 그림 2 의 가시화 결과와 같은 레이놀즈수에 해당한다. PSD 분포에는 반경 방향에서 두 피크가 존재한다. 안 쪽의 피크는 내부와 외부 영역의 경계면인 R_{vi} 에 해당하는 위치이다. 바깥 쪽의 피크는 그림 2 에서의 R_{vo} 에 해당하며 주기적 교란을 유발하는 볼텍스와 슈라우드 근방의 틈새를 포함한 복잡한 3 차원 유동 사이의 또 다른 detached shear layer 로 생각할 수 있다.

PSD 분포의 두 피크 사이에는 PSD의 값이 0인 반경(R_{vi})이 있는데, 의미는 그 반경에서의 원주속도가 평균유동에 대한 상대속도가 없거나 일정하다는 것이다. 즉, 이 지점에서는 주기적인 교란 성분이 없다. HDD에서의 헤더의 위치가 압이 주 유동에 크게 영향을 미치지 않는 경우, R_{vi} 와 R_{vo} 에서 가장 큰 교란을 받을 수 있다. 유동 교란의 크기는 회전수가 증가하면서 증폭된다. 디스크 회전속도의 제곱에 대한 PSD 크기의 비, $PSD/(r\Omega)^2$ 는 대략 1/2이다.

3.3 교란 주파수와 볼텍스 수와의 관계

PSD에서 계산된 주파수(f_e)는 정지 프레임에서 관찰된 외부 영역의 유동교란의 주파수를 의미한다. 회전수(rps)가 증가함에 따라 외부 영역의 볼텍스 수(N_v)가 감소하는데 본 실험의 레이놀즈수 범위에서 식 (1)과 같은 상관 관계를 가진다.

$$\frac{f_e}{(N_v - 1)rps} \approx 1.0, \quad 3 \leq N_v \leq 6 \quad (1)$$

4. 결론

본 연구는 HDD 내부의 동시회전 디스크와 같은 유동을 모사한 상사 실험을 통해 유동이 주기적인 교란을 가지는 외부 영역에서의 PSD 분포를 실험적으로 조사하였다. 이를 유동패턴의 가시화 및 난류분포의 피크위치와 비교함으로써 특정 반경에서의 교란특성을 규명하였다.

후 기

본 연구는 한국 과학재단 지정 정보 저장기기 연구센터의 지원(과제번호 : R11-1997-042-12002-0)을 받아 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Lennemann, E., 1974, Aerodynamic Aspects of Disk Files, IBM J. Res. Develop., Vol. 18, No.6, pp. 480-488
- (2) Abrahamson, Scott D., Chiang Chisin, and Eaton, John K., 1991, Flow Structure in Head-Disk Assemblies and Implications for Design, Adv. Info. Storage Syst., Vol. 1, pp. 111-132
- (3) Kubotera, H., Tsuda, N., Tatewaki, M., and Maruyama, T., 2002, Aerodynamic Vibration Mechanism of HDD Arms

Predicted by Unsteady Numerical Simulations, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, No.5, pp. 2201~2203

(4) Schuler, C. A., Usry, W., Weber, B., J. A. C. Humphrey, and Greif, R., 1990, On the flow in the unobstructed space between shrouded corotating disks, Phys. Fluids A Vol. 2, No. 10, pp. 1760-1770

(5) Abrahamson, Scott D., Eaton, John K., and Koga, Dennis J., 1989, The flow between shrouded corotating disks, Phys. Fluids A, Vol. 1, No. 2, pp. 241-251

(6) Usry, W. R., Humphrey, J. A. C., and Greif, R., 1993, Unsteady Flow in the Obstructed Space Between Disks Corotating in a Cylindrical Enclosure, J. Fluids Eng., Vol. 115 (1993), pp.620-626

(7) Kubo, T., Nishijima, N., Shimizu, H., Hirono, Y., Tokuyama, M., and Nakamura, S., 2003, Investigation of Flow Velocity in Actual Hard Disk Drives by Particle-Image Velocimetry and Fluid Simulation, IIP/ISPS Joint MIPE '03, pp.205~206

(8) 공대위, 주원구, 2003, "장애물을 포함한 동시회전 디스크 내부의 비정상 유동가시화", 춘계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. 1152~1156

(9) 공대위, 주원구, 도덕희, 2004, "HDD 내 유동장애에 대한 PIV 측정 기술의 적용", 춘계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. 742~747

(10) J. A. C. Humphrey and D. Gor, 1993, Experimental observations of an unsteady detached shear layer in enclosed corotating disk flow, Phys. Fluids A Vol. 5, No. 10, pp. 2438-2442