

장애물을 포함한 동시회전 디스크 내부의 비정상 유동가시화 Visualization of the flow between co-rotating disks in shroud with an obstruction

공대위*·도덕희**·주원구***
Dae-Wee Kong, Deug-Hee Doh and Won-Gu Joo

Key Words : HDD(하드디스크드라이브), PIV(입자영상속도계)

ABSTRACT

Hard disk drives (HDD) in computer are used extensively as data storage capacity. The trend in the computer industry to produce smaller disk drives rotating at higher speeds requires an improved understanding of fluid motion in the space between disks. PIV measurement was used for the unsteady flow between the center pair of four disks of four times larger than common radius of HDD disk at several rpm in a fixed cylindrical enclosure. The boundary between inner region and outer region is detected using PIV measurement and the number of dominant vortices is determined clearly. Tip vortices generated by an obstruction with actual-like configuration can be found at inner region. Oscillating flow from the obstruction appears at outer region with complex flow pattern.

기호설명

- a : 디스크와 덮개 사이의 거리 (mm)
- b : 디스크의 두께 (mm)
- f : 원주속도의 교란 주파수
- H : 디스크 사이의 거리 (mm)
- N : 무차원 지배 주파수 또는 로브(lobe) 개수
- r : 반경방향, 디스크 반경(mm)
- R_0 : 축반경 (mm)
- R_1 : 허브 반경 (mm)
- R_2 : 디스크 반경 (mm)
- u_m : 원주방향 평균속도 (m/s)
- u_r : 반경방향 속도 (m/s)
- u_t : 원주방향 접선속도 (m/s)
- z : 축방향
- Ω : 디스크 회전 각속도 (rad/s)

1. 서론

컴퓨터 산업에서 정보저장기기의 하나로 중요시되는 하드디스크 드라이브(hard disk drive, 이하 HDD)는 크기가 소형화되고, 회전속도가 빨라지고 있다. 회전디스크로 인한 유동의 영향은 HDD의 성능에 영향을 미칠 정도로 중요하게 여겨지고 있다. HDD의 형태는 원통형 덮개(shroud)로 밀폐된 내부에서의 동시에 회전하는

허브(hub)와 디스크의 형태로 간단하게 묘사될 수 있다. 이러한 기본적인 형태는 HDD뿐만 아니라 터보기계와 같은 여러 가지 회전 기기 등에서도 발견할 수 있다.

Lenneman(1)은 장애물이 없는 경우에, 작동유체를 물, 산란입자는 알루미늄 가루를 사용하여, 슈라우드에 둘러 싸여 회전하는 단일 혹은 동시회전 디스크 내부의 유동장에 대해 가시화 하였다. 회전속도를 증가시키면서 원주 주변의 주기적인 유입, 유출 유동과 반경 방향의 유입 유출 유동에 의한 큰 스케일의 등각 나선구조의 붕괴를 관찰하였다.

Abrahamson 등(2)은 작동유체를 발로 하여 염색법을 이용해 톱니모양의 정다각형을 나타내는 유동이, 원주 방향으로 주기적인 축방향 와류성분과 관련이 있음을 보였다. Lenneman의 실험과 마찬가지로의 실험은 저레이놀즈 수에 해당하는 것으로 유동가시화에는 무리가 없었으나 고레이놀즈 수 유동장에 대해서는 적용할 수가 없었다. 현재도 고속 회전 디스크에 의한 유동장 내부 구조를 가시화 하는데에는 어려운 점이 많다.

Schuler 등(3)은 이론적, 수치적인 연구를 통해서 횡단류(cross-stream flow)가 원심력과 반경압력구배 사이의 불균형에 의해 발생되고 이로 인한 진동은 원주 속도 성분에 강한 진동을 일으키는 원인이라고 하였다. 낮은 속도에서 3 차원 비정상 유동의 계산은 다각형 노드들이 축방향 와류성분의 초점(foci)에 해당한다는 것을 보여주고 있다. 이러한 유동의 계산은 디스크 권의 압력을 구하는데 실험적으로 어려운 점을 보완해 줄 수 있다. 그러나 고속에서의 유동장의 계산은 여러

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

** 한국해양대 기계정보공학부

*** 연세대 기계공학부

가지 어려움이 있고 이제 까지 많은 난류 모델들이 이 유동장을 모사하기 위해 적용되어 왔으나, 비정상적 유동구조를 명확하게 계산하지는 못하고 있다.

Humphrey 등(4)은 디스크 바깥쪽 방향으로 향하는 원심력과 안쪽 방향으로의 반경 압력구배 사이의 불균형 때문에, 디스크 표면의 얇은 경계층에서 더 빠르게 회전하는 유체는 고정된 슈라우드 벽을 향하여 바깥쪽으로 가속이 되고 중심의 유체는 낮은 속도로 안쪽으로 이동하는 내부 유동의 형태를 상세히 기술하고 장애물이 있는 경우에서의 다양한 수치계산 결과도 제시하였다.

Masuda 등(5)은 두개의 열선을 이용하여 원주 방향 속도 성분을 디스크 사이 간격 중앙(mid-plane)에서 반경 방향 분포와 몇 가지 반경위치에서 축방향 분포의 결과를 제시하고, 비정상 와류가 발생하는 슈라우드 부근 영역에서의 속도성분을 열선으로 측정하였다. 특히 디스크 상하면에서의 유동이 디스크와 슈라우드의 틈새를 통해 연관성이 있다는 것을 보였다..

Joo 등(6,7)은 디스크 사이의 간격과 회전수에 따른 강제 회전영역의 크기변화를 조사하였다. 그리고 열선으로 측정한 외부영역(outer region)에서 원주방향 속도교란성분의 주파수를 조사하여 무자원 지배주파수가 변하는 천이속도의 특성을 조사하였다.

HDD 에서 고속 회전하는 디스크 주위의 유체는 디스크와 서스펜션/암 등의 구조에 동적 불안정(flutter)을 일으키는 주요인자이다. 현재 유동구조에 대한 특성이 명확하게 규명되지 않고 있다. 특히 디스크 사이(mid-span)에서의 2 차원 구조조차도 잘 알려져 있지 않다. 본 실험은 HDD 에서와 같이 동시회전 디스크 사이의 유동장 구조를 조사하기 위해 PIV 로 2 차원 측정을 하였다. 특히 HDD 내부의 액추에이터 암과 같은 형상의 장애물이 있을 경우에 대해서도 조사하였다.

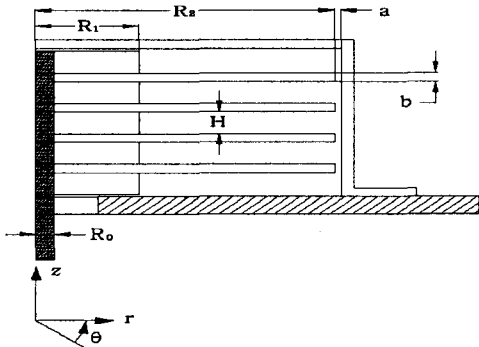


Fig.1 Schematic of the test rig

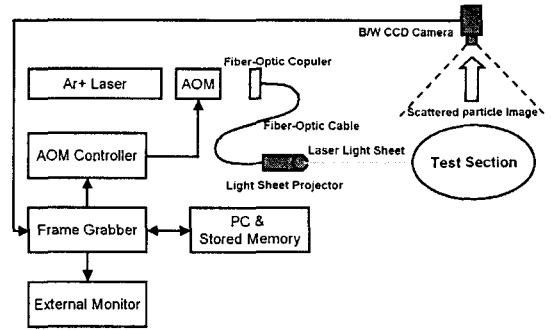


Fig.2 Schematic diagram of PIV measurement system

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

고정된 슈라우드로 밀폐되어 동시에 회전하는 디스크 실험장치를 Fig.1 과 같은 모양으로 제작하였다. 실험장치는 네 장의 디스크를 하나의 구동장치를 통하여 회전시킬 수 있도록 하였다. Fig.1 에서 축 반경 R_0 , 허브반경 R_1 , 디스크 반경 R_2 , 디스크의 간격은 H , 디스크 끝단과 슈라우드 사이의 간격은 a , 디스크의 두께는 b 이다. 제원은 $R_1=66\text{mm}$, $R_2=190\text{mm}$, $H=20\text{mm}$, $a=4\text{mm}$ 그리고 $b=8\text{mm}$ 이다. 유동장의 자세한 조사를 위해 디스크의 크기는 실제 HDD 의 디스크 크기 보다 약 네 배 크며, 케이스는 원통형으로 고정되어 있다.

2.2 실험방법

Fig.2 는 PIV 계측 시스템의 개략도이다. 2 차원 유동장을 측정하기 위해 하나의 CCD 카메라를 사용 했으며 NTSC 방식으로 속도는 30 fps 이고 해상도는 512x512 픽셀이다. 5W 급의 Argon 이온 레이저 발생기로부터 나온 레이저는 AOM (Acoustic Optical Modulator)에 의해 적정 간격으로 연속 차단된다. 우수와 기수 필드사이의 초평된 시간 간격은 1~5 ms 이다. AOM 과 CCD 카메라는 frame grabber 에 의해 동기 되어 있다. 레이저는 laser sheet projector 에 의해 평면을 조사할 수 있게 된다. 레이저 조사는 두 디스크 사이(mid-span)의 수평면과 특정위치에서의 수직면에 대해 잘 통과할 수 있도록 디스크와 슈라우드의 재질이 투명하게 제작되었다. 산란입자는 $5\mu\text{m}$ 의 glass wool 이며 슈라우드의 바깥쪽에서



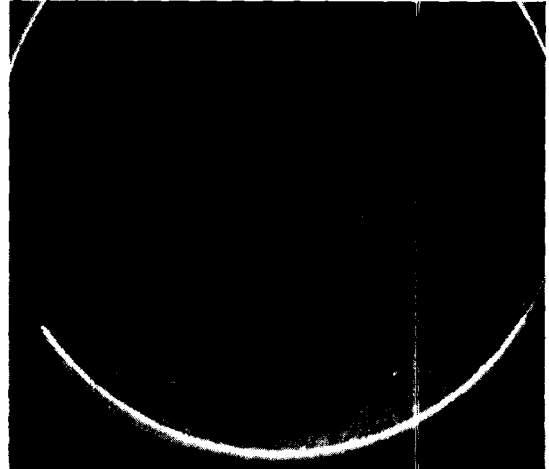
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig.3 Lobe structure between co-rotating disks; (a) $N=6$ at 93.4 rpm (b) $N=5$ at 400 rpm (c) $N=4$ at 50 rpm (d) $N=3$ at 600 rpm.

안쪽으로 주입되었다. PIV에 의해 얻어진 이미지로부터 속도장의 계산은 티엔텍의 PIV-PTV 해석 상용소프트웨어인 Thinkers를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 장애물이 없는 경우

Fig.3은 회전수에 따른 두 디스크 사이 정중앙면(mid-span)에서의 유동구조를 가시화한 것이다. 슈라우드 바깥 쪽에서 주입된 추적 입자(tracer particle)들은 외부영역(outer region)에

퍼지고 내부영역(inner region)으로는 확산되지 않는다. 따라서 내부영역은 추적 입자가 발견되지 않고 있다. 두 영역은 6 초 이상 경과 하여도 섞이지 않고 형태를 유지한다. 따라서 내부영역과 외부영역이 구분되어 나타난다. 그 경계선 또한 분명하게 나타나고 있다. 특히 내부영역과 외부영역 사이의 경계선의 형태는 로브(lobe)의 형태를 가지고 있다. 이 로브 구조는 Abrahamson(2)에 의해 가시화된 바 있다. 그는 두 장의 투명 디스크 사이에 작동유체를 물로 하여 염색법으로 가시화 하였다. 내부영역과 외부영역 사이의 경계

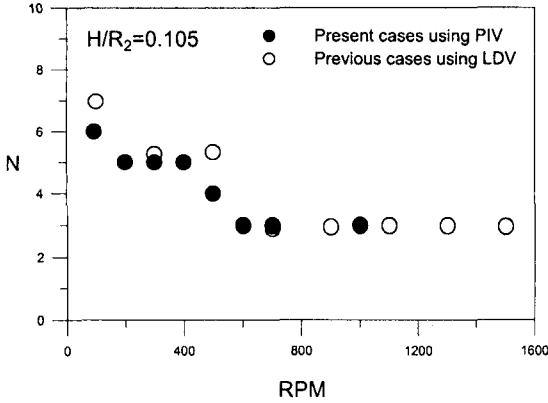


Fig.4 Comparison of the non-dimensional dominant frequencies measured using PIV and LDV(6).

면을 염색하여 이 로브 구조를 나타내었는데 공기에 대해서는 조사하지 못하였다. 로브 구조는 유동의 불안전성에 의해 나타나는 것으로 여겨지고 있다. 로브 구조는 축대칭을 이루고 있으나 천이 속도(transition speed)에서는 로브의 개수가 바뀌면서 축대칭성이 깨지기도 한다(Fig.3c).

Fig.4 는 디스크 회전속도에 따른 회전 디스크 사이에서의 로브의 개수를 나타낸 것이다. PIV 에 의한 가시화 실험에서 나타난 로브의 수는 육안으로도 개수를 명확하게 확인할 수 있다. LDV(laser Doppler velocimeter)에 의한 측정은 $r/R_2=0.88$ 에서 얻은 원주방향 속도에 대해 주파수 해석을 통해 구한 무차원 지배 주파수이다. $r/R_2=0.88$ 은 디스크 회전속도가 1,500 rpm 일 때 주파수의 진폭크기가 가장 큰 경우에 해당하는 무차원 반경위치에 해당한다. Fig.3 에 나타난 바와 같이 외부영역의 반경방향 크기는 회전수가 감소함에 따라 다소 증가한다. LDV 에 의한 무차원 지배 주파수의 크기는 식(1)에서 얻을 수 있다(5). 따라서 같은 무차원 반경위치에서 측정된 무차원 평균속도 ($u_m/r\Omega$)는 감소하며 그만큼 LDV 에 의한 N 값은 실제 가시화된 결과인 로브의 수보다 약간 높아진다. 500 rpm 에서는 가시화에서 4 개로 나타나지만 LDV 측정결과는 5 개로 계산된다. 500 rpm 은 로브의 개수가 변하는 천이속도에 근접해 있다고 볼 수 있다. 이는 가시화에서도 확인할 수가 있다(Fig.3c). LDV 측정시 측정위치가 $r/R_2=0.88$ 보다 더 내부에서 이루어져 무차원 평균속도가 커지면 $N=4$ 가 된다. 천이속도는 로브의 개수가 변하는 디스크의 회전속도 이므로 200-300 rpm, 400-500 rpm, 500-600 rpm 사이에 나타난다. PIV 에 의한 가시화는



(a)



(b)

Fig.5 Comparison of the flow between co-rotating disks with an actual like obstruction extended to (a) inner region and to (b) outer region. at 93.4 rpm.

1,000 rpm 까지 이루어 졌으나 LDV 에 의한 결과와 비교해 볼 때 1,500 rpm 까지는 로브의 개수가 3 개임을 알 수 있다.

$$N = \frac{f}{u_m / r\Omega \times rps} \quad (1)$$

3.2 장애물이 있는 경우

Fig.5 는 HDD 에 장착된 액추에이터 암(actuator arm)과 같은 형상화를 한 장애물을 설치하였을 때의 유동장을 가시화 한 것이다. 장애물은 팁의 위치가 내부영역(Fig.5a) 또는 외부영역(Fig.5b)에 놓이도록 설치되었다. Fig.5a 와 같이 팁이 허브에 가깝도록 놓인 경우는 팁에서 발생된 축방향 팁 볼텍스들이 잘 관찰된다. 이는 팁 볼텍스가 안정된 유동장 안에서 발생되어 후류를 따라 전파되어 가기 때문이다. 반면 외부영역에서는 원주방향으로 교란이 나타난다. 팁이 슈라우드 쪽에 가깝도록 놓인 경우는 팁에서 발생된 축방향 팁 볼텍스가 육안으로는 발견이 안되며 속도의 많은 교란성분이 복잡하게 나타난다. 그러나 내부영역은 장애물이 없을 경우에서처럼 안정된 영역이

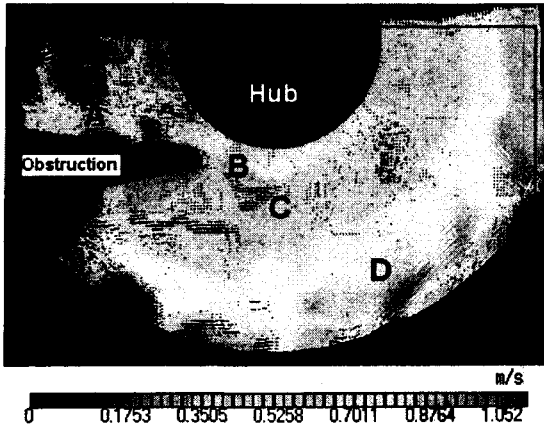


Fig.6 Velocity contour between co-rotating disks with an actual like obstruction extended to inner region at 93.4 rpm.

나타나고 있다. 하지만 로브와 같은 구조는 나타나지 않는다.

Fig.6 은 Fig.5a 와 같이 장애물의 팁이 허브에 가깝게 위치 했을 때의 디스크 중앙면에서의 속도 분포이다. 속도는 $(u_r^2 + u_t^2)^{1/2}$ 이다. 장애물이 레이저 시트(sheet) 면에 놓여져 있어 레이저 시트가 장애물을 투과하도록 표면처리를 하였다. 그럼에도 불구하고 레이저 광원에서 볼 때 장애물 후방에 그림자가 생겼기 때문에 이 부분은 PIV 에 의한 계측에 있어 속도의 불확실성이 큰 영역이다(A). 그러나 주유동은 비스듬한 장애물의 영향으로 국소적인 가속이 존재할 것으로 보인다. 장애물이 그림에서 나타난 바와 같이 장애물의 팁이 허브(Hub)의 근처에 위치한 경우에는 허브와 장애물 사이에 좁은 유로(flow passage)로 말미암아 유동은 가속이 된다(B). 팁볼텍스가 Fig.5a 에서 나타난 바와는 달리 계산결과에서는 보이지 않는다. 이유는 팁볼텍스의 회전성분이 주유동에 비해 크기가 작기 때문이다. 장애물의 존재는 장애물이 없을 때에 비하여 전체적으로 유동장의 속도를 감소시킨다. 특히 장애물 직후방에서 속도가 현저하게 떨어지고 회전방향으로 증가할수록 그 속도가 회복된다(C). 슈라우드에 가까운 영역에서는 주기적인 유동이 두드러지게 나타난다(D). 이는 장애물에 의한 후류가 주기적인 유동의 특성을 가지고 있음을 보여준다. 후류는 장애물 가까이에서 영역 C 와 같이 낮은 속도에서 점차로 회복되어, 후방으로 멀어질수록 넓은 영역으로 확장되어 간다.

4. 결론

HDD 의 기본적인 형태인 밀폐된 동시 회전하는 디스크 사이의 공기 유동장에 대해서 LDV 나 열선 등에 의한 측정은 더러 이루어져 왔으나 비정상의 2 차원 구조를 명확히 알기엔 한계가 있다. 본 연구진은 이러한 유동장에 대해 PIV 기법을 이용하여 가시화 하였다.

동시회전 디스크의 내부영역과 외부영역의 경계는 PIV 측정기법으로 가시화가 가능하다. 장애물이 없는 경우, 외부영역에서 LDV 로 측정한 지배적인 볼텍스의 수는 PIV 로 측정한 결과와 같다. 그리고 천이속도(본 실험에서 500 rpm 부근)에서 축대칭 로브 구조가 붕괴되어 나타난다. 장애물이 있는 경우, 내부영역에서 발생된 팁 볼텍스는 안정된 형태를 유지한다. 그리고 외부영역에서는 장애물의 후류의 영향으로 주기적인 속도교란이 나타난다.

후 기

본 연구는 한국과학재단지정 정보저장기연구센터의 지원(과제번호 : R11-1997-042-12002-0)을 받아 이루어졌으며, 이에 감사드립니다

참고문헌

- (1) Lenneman, E, 1974, Aerodynamic Aspect of Disk Files, IBM J. RES. DEVELOP, Vol. 18, No. 6, pp.480-488.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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, pp.620-626.
- (5) Masuda, S. and Obi, S., 1998, Flow instability between shrouded corotating disks, Proceedings of the 3rd China-Japan Workshop on Turbulent Flows, 228-236.
- (6) Kong, D. -W., and Joo, W. -G., 2001, The Effect of Distance Between Disks on the Flow Driven by Co-rotating Disks in a Cylindrical Enclosure, AFI 2001, 163-168.
- (7) Kong, D. -W., and Joo, W. -G., 2002, The Effect of a Hot-wire Supporter on the Flow Between Co-rotating Disks in Shroud, The 5th JSME-KSME Fluids Engineering Conference, pp. 1770-1775.