

# 원통형 케이스 내의 동시회전 디스크 내부 유동패턴의 가시화

공대위<sup>†</sup> · 주원구<sup>\*</sup>

## Visualization of the Flow Pattern Between Co-rotating Disks in Shroud

Dae-Wee Kong and Won-Gu Joo

**Key Words :** HDD(하드디스크드라이브), Flow visualization(유동가시화)

### 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. Laser sheet and digital camera was used for 2-dimensional visualization of the unsteady flow between co-rotating disks in air with a cylindrical enclosure (or shroud). Geometric parameters are gap height ( $H$ ) between disks, and gap distance ( $G$ ) between disk tip and shroud. The lobe-structured boundary between inner region and outer region was detected by inserted particles, and the number of dominant vortices was determined clearly. It is found from flow visualization that the number of vortex cells can be correlated with Reynolds number based on  $H$  which is defined as  $Re_H = \Omega RH/\nu$  ranging from  $7.96 \times 10^2$  to  $1.43 \times 10^4$ , and decreases as the disk speed increases. The lobe pattern by vortex cells is changed to a circular pattern for the wide gap than narrow one.

### 기호설명

$H$ : 두 디스크 사이의 간격 (mm)  
 $G$ : 디스크 끝단과 슈라우드 사이의 간격 (mm)  
 $\Omega$ : 디스크 각속도(rad/s)  
 $R$ : 디스크 반경 (mm)  
 $Re_H$ :  $H$ 에 의한 레이놀즈 수 ( $=\Omega RH/\nu$ )  
 $Re_R$ :  $R$ 에 의한 레이놀즈 수 ( $=\Omega R^2/\nu$ )  
 $N$ : 로브(lobe)의 개수

### 1. 서론

컴퓨터 산업에서 정보저장기기의 하나로 중요시 되는 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 덮개(shroud)로 밀폐된 내부에서 동시에 회전하는 허브(Hub)와 디스크의 형태로 간단하게 묘사될 수 있다. 이러한 기본적인 형태는 HDD뿐만 아니라 터보기계와 같은 여러 가지 회전 기기 등에 응용될 수 있다.

HDD의 정보저장능력이 향상될수록 슬라이더와 디스크 표면의 거리는 나노 스케일의 매우 작은 부상높이를 가진다. 이러한 정밀도를 가지는 요소들에 대해 고속회전에 의한 유동의 교란은 정보저장능력을 저해 시킨다. 세계적으로 이러한 유동 교란의 본질을 조사하기 위해 다양한 연구가 실험적, 수치적으로 수행되어 왔다. 특히 실험적으로는 동시회전 디스크 내부 유동장에 대해 LDV나 열선 등에 의한 측정이 주류를 이루어 왔다. 그러나 교란의 특성을 이해하기 위해서는 2차원 이상의 가시화 정보가 필요하다.

Lennehan<sup>(1)</sup>은 장애물이 없는 경우에, 물 속에 산란입자로서 알루미늄 가루를 사용하여, 슈라우드에 둘러 싸여 회전하는 단일 혹은 동시 회전 디

<sup>†</sup> 연세대학교 기계공학과 대학원  
 E-mail: dw409@yonsei.ac.kr  
 TEL: (02)2123-2815 FAX: (02)312-2159

<sup>\*</sup> 연세대학교 기계공학부

스크 내부의 유동장을 가시화 하였다. 회전속도를 증가시키면서 원주 주변의 주기적인 유입, 유출 유동과 반경 방향의 유입, 유출유동에 의한 큰 스케일의 등각 나선구조의 붕괴를 관찰하였다. Abrahamson 등<sup>(2)</sup>은 역시 물을 작동 유체로 하여 염색법을 이용해 튕니모양의 정다각형을 나타내는 유동을 가시화 하였다. 이는 원주방향으로 주기적이며 축방향 좌류 성분과 관련이 있음을 보였다.

PIV 계측기술이 발전하면서 회전디스크 유동장 가시화에 많은 변화가 이루어지고 있다. Nakamura 등<sup>(3)</sup>은 암(arm)을 포함한 HDD 내부에 대해 작동 유체를 물로 하여 레이놀즈 수를 일치시켜 540 rpm (HDD의 10,000rpm에 해당)에서 PIV 기법을 이용해 가시화를 시도하였다. 추적입자는 나이론 입자이고 YAG-레이저 빔과 CCD 카메라를 이용하였다. 주원구등<sup>(4)</sup>은 공기중에서 동시 회전하는 디스크에 대해 PIV 기법으로 내부유동을 가시화하였다. 디스크의 반경이 190 mm로 보통의 HDD 내의 디스크보다 대략 4 배 정도 크다. 그러나 실제 HDD의 작동속도보다 낮은 회전수에서 가시화 할 수 있었다. 그는 아르곤 레이저에 CCD 카메라를 이용하고 추적입자로 glass sphere를 사용하였다. 이처럼 PIV 기법은 동시회전 디스크 유동장에 대한 새로운 조사를 가능하게 하고 있다.

본 연구는 공기 중에서 동시에 회전하는 밀폐된 디스크 사이의 유동장에 대해 2 차원적인 유동 가시화를 PIV 기법을 응용하여 수행하였다. 여기서는 속도장 등의 정보 보다는 동시회전 디스크 유동장의 내부영역 (inner region)과 외부영역 (outer region) 사이의 경계를 가시화 하였으며 이를 통해 두 디스크 사이의 거리(H)와 디스크 틱과 슈라우드 사이의 거리(G)가 어떤 영향을 미치는지에 대해 조사되었다.

본 실험에서의 두 디스크 사이의 크기와 레이놀즈 수( $Re_R$ )의 범위가 Fig.1에 나타나 있다. 영역 I은 이차원 축대칭 정상 유동(steady flow)을 의미한다. 영역 II와 III은 삼차원 비정상 유동(unsteady flow)을 나타낸다. 특히 이 영역은 유동의 외부영역(outer region)에서의 비정상 유동이 디스크 사이 중간면(midspan)을 기준으로 대칭적 거동을 하거나 (II), 비대칭 거동을 하는 경우(III)로 나누어 볼 수 있다. 이 선도는  $G=0$ 인 경우의 수치해석을 바탕으로 여러 저자들의 보고에 의해 구성된 것을 인용한 것이다. HDD의 경우 5,400 rpm ~ 10,000 rpm의 작동속도와 두 디스크 사이의 일반적인 간격 3.0 mm ~ 4.3 mm로 고려하면 Fig.3의 빗금친 영역과 같다. 따라서 본 연구는 HDD의 작동속도와

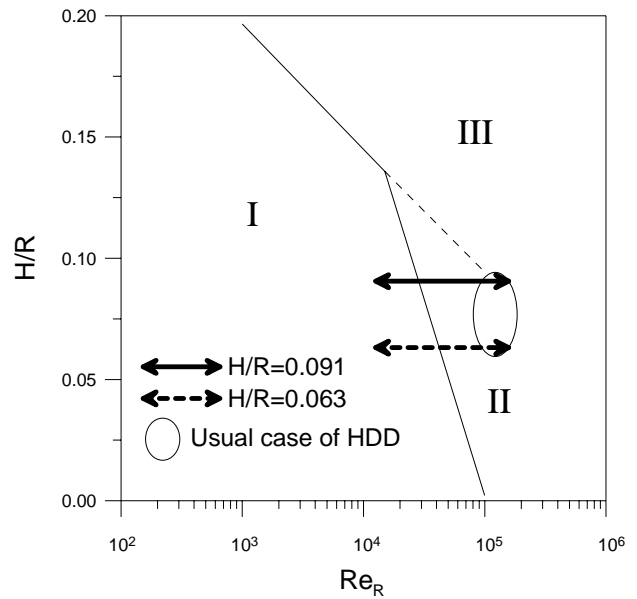


Fig. 1 Study case on the qualitative bifurcation diagram reported by (5) for the flow between a pair of disks co-rotating in a fixed cylindrical enclosure with  $G=0$ .

두 디스크 사이의 간격의 일반적인 경우를 포함하며 아울러 영역 I과 영역 II 사이의 유동 패턴의 차이를 확인하고자 하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

고정된 슈라우드로 밀폐되어 동시에 회전하는 디스크 실험장치를 Fig.2와 같은 모양으로 제작하였다. 실험장치는 두 장의 디스크를 DC 모터로 회전시킬 수 있도록 하였고, 1 rpm 단위로 조절 가능한 모터 드라이브를 통해 회전속도를 제어하였다. 허브반경, 디스크반경(R), 디스크두께는 각각 30 mm, 47.5 mm, 1.3 mm이다. 두 디스크 사이의 거리(H)는 3.0 mm와 4.3 mm의 두 가지 경우이고, 디스크 끝단과 슈라우드 사이의 거리(G)는 0.5 mm, 4.5 mm가 될 수 있도록 케이스를 제작하였다. 케이스는 레이저 시트가 통과되고 위에서 측정영역이 보이도록 투명아크릴로 제작하였으며 연마를 통해 조도를 높였다.

Fig.3은 가시화를 위한 계측시스템의 개략도이다. 기본 구성은 일반적인 PIV 시스템과 유사하다. 2 차원 유동장을 측정하기 위해 하나의 CCD 카메라를 사용했으며 속도가 30 fps, 해상도는 1024x1024 pixels이다. 120mJ/pulse, 15Hz의 Nd:YAG 레이저가 사용되었으며 레이저와 카메라는 동기 되어

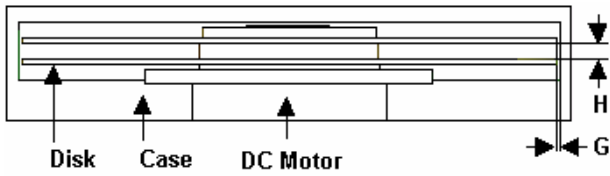


Fig. 2 Schematic of the test rig with a cylindrical case

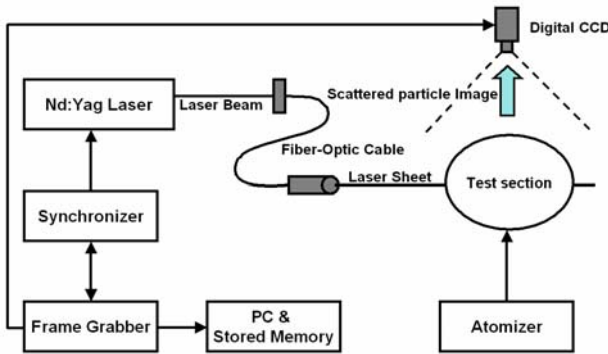


Fig. 3 Schematic diagram of visualization

있다. 레이저 조사는 두 디스크 사이 (mid-span)의 수평면에 놓고 측정영역에서의 레이저 두께는 1mm 이다.

내부영역은 외부영역에 비해 비교적 안정된 강제 회전유동의 특성을 보이는 곳이다. 외부영역은 스케일이 큰 볼텍스가 회전하는 곳으로 유동교란이 심하다. 유체는 회전하는 디스크의 면에 의해 Ekman 경계층을 이루면서 중심 축으로부터 바깥 쪽으로 가속된다. 이 유동은 정지면인 슈라우드 벽에 부딪혀 다시 두 디스크 사이 mid-span 면으로 들어오는데, 이 때 산란입자는 내부영역과 외부영역 사이의 경계면을 통해 안쪽으로 들어가지 못한다. 입자의 법선속도 성분을 최소화 하기 위해 평균 직경이 약 300 nm 인 입자를 사용하였다. 입자는 주입된 상태에서 주입구를 봉쇄하고 유동이 안정화 된 후에 가시화를 하였다.

실험은 디스크 간격과 팁-슈라우드 간격을 각각 두 가지로 변화시키면서 내-외부 영역사이의 경계면의 형상을 가시화하고 외부영역의 볼텍스 셀의 수를 측정하였다. 회전수에 따른 레이놀즈 수( $Re_H$ )의 범위는  $7.96 \times 10^2$  에서  $1.43 \times 10^4$  이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 회전수 변화에 의한 유동패턴의 변화

Fig.4 는 동시회전 디스크 사이의 유동장을 가시

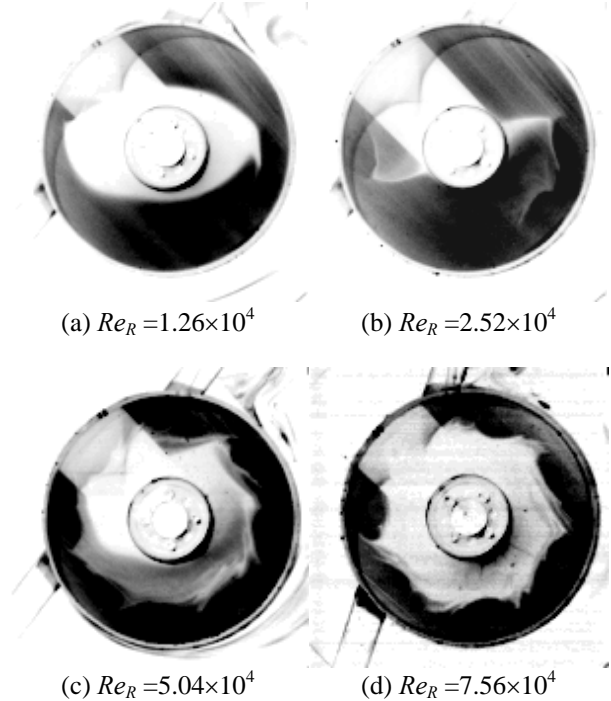


Fig. 4 The flow pattern between co-rotating disks with  $R=47.5$  mm,  $H/R=0.063$ . Transition Reynolds number between region I and II is about  $5.04 \times 10^4$ .

화 한 것으로 회전수의 변화 (또는 레이놀즈 수  $Re_R$  의 변화)에 따른 유동 패턴을 보여주고 있다. 추적입자가 충전된 곳은 어둡게 나타난다. 천이경계속도(transition boundary speed)보다 큰 레이놀즈 수에서는 잘 알려진 로브형태의 내부영역(inner region)과 외부영역(outer region) 사이 경계면이 나타난다(Fig.4(c),(d)). 천이경계속도보다 작은 레이놀즈 수에서는 타원 형태의 경계면이 형성되는데 마치 눈(eye)과도 같은 형상이다(Fig.4(a)). Fig.4(b)는 Fig.4(a)와 (d)의 중첩현상을 보여준다. Fig.4(c)와 같이 나타난 로브 구조의 개수는 8 개이다. 그러나 보다 높은 회전수에서는 보다 안정적인 로브 구조의 유동패턴을 보여주며  $Re_R = 7.56 \times 10^4$  일 때 7 개로 나타난다(Fig.4(d)).

#### 3.2 두 디스크 사이 간격과 슈라우드 갭의 변화에 의한 유동패턴의 변화

Fig.5 는  $Re_R = 1.56 \times 10^5$  에서 회전하는 디스크 사이의 서로 다른 spacer 의 높이에 따른 가시화 결과이다.  $H$  가 큰 경우가 작은 경우보다 로브의 개수가 적게 나타난다. 이는 외부영역의 볼텍스에 의한 거동의 length scale 이 커짐을 의미한다. 틸새에 의한 효과는 로브 모양의 다각형 경계면을 원형에 가깝게 한다. 디스크 끝단과 슈라우드 사이의 공간이 커지면서 이 사이의 유동의 영향이 증가되어

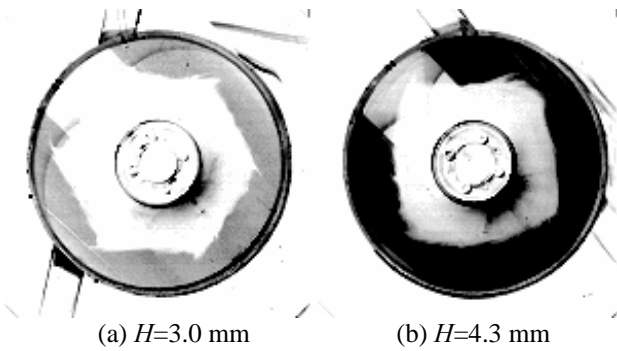


Fig. 5 Effect of length of space between disks on lobe structure at  $Re_R = 1.56 \times 10^5$ ;  $R=47.5$  mm,  $G=0.5$  mm.

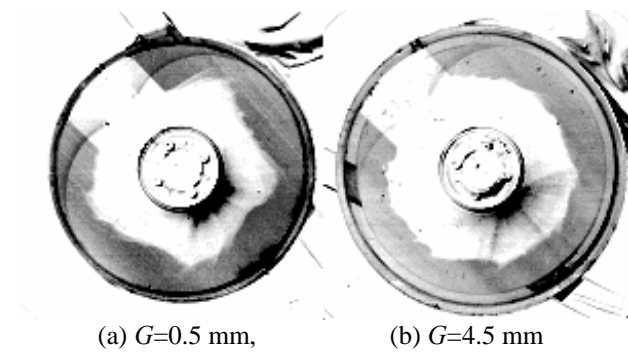


Fig. 6 Effect of gap between disk tip and shroud on lobe structure at  $Re_R = 1.13 \times 10^5$ ;  $R=47.5$  mm,  $H=4.3$  mm.

나타나는 것으로 보인다. 그러나 속도 교란의 강도는 PIV 계산을 통한 속도장 정보가 있어야 평가될 것으로 판단된다.

### 3.3 볼텍스 개수와 레이놀즈 수( $Re_H$ )와의 관계

Fig.7 은  $Re_H = \Omega RH/\nu$ 로 정의된 레이놀즈 수와 가시화에 의한 볼텍스 수( $N$ )의 관계를 도시한 것이다. 로그 축상에서  $N$  은 레이놀즈 수에 선형적인 관계를 보인다. 실험은 800 rpm 부터 이루어졌으나 로브 구조는 특정 회전수 이상에서만 나타났다.  $H/R=0.091$  의 경우,  $Re_H = 2,000$  부근에서  $N$  이 7 개로 나타나 있는데, 선상에서 벗어나 있다. 이 값은 로브 구조가 막 나타나기 시작하는 회전수의 가시화 결과에 따른 것이다. 즉, 외부영역에 지배적인 볼텍스 셀이 구성되는 과정상의 개수는 높은  $H$  에서 회전속도에 덜 민감하다는 것을 알 수 있다. 볼텍스의 개수와 관계하여 회전수에 대해 도시하는 방법에는 여러 가지가 있을 수 있다. 예를 들어 St number 나 wave number, 무차원 지배주파수 등으로 표현될 수 있다. 그러나 회전수의 경우에는 같은 공기중에서 레이놀즈 수로 나타낼 수

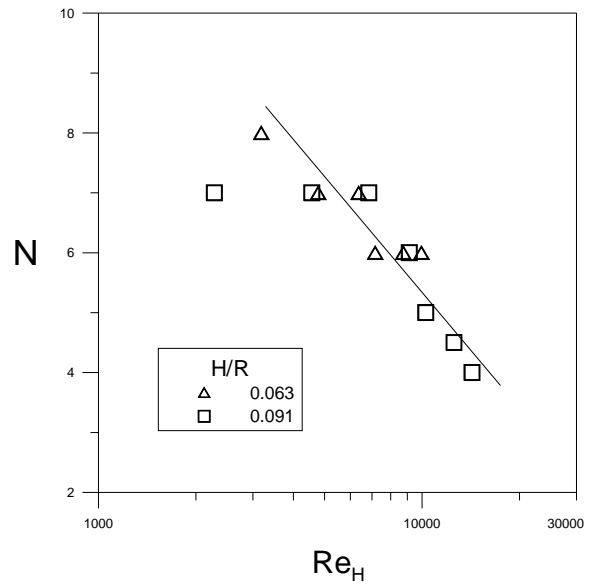


Fig. 7 Vortex number correlated with Reynolds number ( $Re_H = \Omega RH/\nu$ ).

있는데 Fig.7 에서 처럼 레이놀즈 수가  $H$  와  $R$  에 대해 모두 고려할 수 있도록  $\Omega RH/\nu$ 로 정의되는 것이 바람직하다. 앞서 언급된 바와 같이 로브 구조가 지배적인 3 차원 유동영역(Fig.1 의 영역 II)에 있어서 레이놀즈 수  $Re_H$  는 동시회전 디스크 내부 유동패턴의 로브 개수와 연관성이 강함을 알 수 있다.

## 4. 결론

본 연구는 공기 중에서 고속 회전하는 밀폐된 디스크 사이의 유동장에 대해 레이저와 고해상도 카메라를 이용하여 내부영역과 외부 영역의 경계면을 가시화하는 기술을 개발하였다. 이를 통해 실제 HDD 내의 고속 회전하는 디스크에 의한 유동장을 공기 중에서 가시화할 수 있게 되었다. 두 디스크 사이의 거리가 작을수록 지배적인 볼텍스의 수는 감소하며, 슈라우드-팁사이 거리가 작을수록 로브의 형태가 분명하게 나타난다. 이러한 로브는 알려진 바와 같이 외부영역의 지배적인 볼텍스의 거동에 의해 형성되는데,  $H$  에 따라 각각 특정한 회전수 이상에서만 나타난다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단지정 정보저장기기연구센

터의 지원(과제번호 : R11-1997-042-12002-0)을 받아 이루어졌으며, 이에 감사드립니다. 아울러 여러 도움을 주신 삼성종합기술원 관계자 여러분에게도 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 co-rotating disks," Phys. Fluid A, Vol. 1, No. 2, pp. 241-251.
- (3) Nakamura, S. etc., 2003, "Investigation of Flow Velocity in Actual Hard Disk Drives by Particle-image-velocimetry and Fluid Simulation," JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micro-mechatronics, pp. 205-206.
- (4) 공대위, 도덕회, 주원구, 2003, "장애물을 포함한 동시회전 디스크 내부의 비정상 유동 가시화," 소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 1152-1156.
- (5) Joan Herrero and Francesc Giralt, Joseph A. C. Humphrey, 1999, "Influence of the geometry on the structure of the flow between a pair of corotating disks," Physics of Fluids, Vol. 11, No. 1, pp. 88-96.