

구속된 단일 회전원판과 동시 회전원판 내부의 유동 특성

원정호*·류구영*·조형희**
(1999년 4월 13일 접수)

Flow Characteristics In a Cavity Due to a Single Rotating Disk and Co-Rotating Disks

Chung Ho Won, Goo Young Ryu and Hyung Hee Cho

Key Words: Single Rotating Disk(단일 회전 원판), Co-Rotating Disk(동시 회전 원판), Ekman Boundary Layer(Ekman 경계층), HDD(하드 디스크 드라이브), LDA Measurement(광학 속도 측정)

Abstract

The present study investigates flow characteristics in a cavity with one rotating disk and co-rotating disks for application to HDD. The experiments are conducted for rotating Reynolds numbers of 5.5×10^4 to 1.10×10^5 and for gap ratios of 0.059 to 0.175 in a single rotating and 0.047 to 0.094 in co-rotating disk. Time-resolved velocity components and turbulence intensity on the rotating disks are obtained by using LDA measurements. Detailed knowledge of the flow characteristics is essential to analyze flow vibration and heat transfer and to design head-arm assembly and hub height in HDD. The results indicate that the velocity field in HDD is changed largely by the rotating Reynolds numbers and hub height of the disk.

기호설명

- a : 회전 원판과 슈라우드사이 간격
Ek : Ekman 수 ($=1/\text{Re}_D$)
f : 주파수 (Hz)
G : 간격비 ($=H/R_2$)
H : 허브(hub) 높이
r : 반경 방향 위치
 R_1 : 허브 반경
 R_2 : 회전 원판 반경
 Re_D : 회전 Reynolds 수 ($=R_2^2 \omega / \nu$)
 Re_s : 간격 Reynolds 수 ($=H^2 \omega / \nu = G^2 \text{Re}_D$)
T.I. : 난류 강도

- U : 원주 방향 속도 성분
 V : 반경 방향 속도 성분
 z : 축 방향 위치
 η : 무차원 축방향 위치 ($=z \times \sqrt{\omega / \nu}$)
 θ : 장애물에서 하류 방향의 각도
 ν : 공기의 동점성 계수
 ψ : 무차원 유동 특성 주파수 ($=f/0.51\text{rps}$)
 ω : 원판 회전 각속도 (rad/sec)

1. 서 론

회전 장치 내에는 회전하는 물체와 점성유체 사이에 발생하는 복잡한 유동 구조를 가지는 3차원 와류 유동 형태를 포함하게 되고, 이러한 복

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 연세대학교 기계공학과

잡한 유동장의 해석은 장치 내부의 유동 소음 및 진동, 강제 대류에 의한 열전달의 해석 및 내부 온도 분포의 예측, 점성에 의한 손실동력의 예측 등을 통한 최적의 기계 설계를 위한 필수 요소이다. 특히, 덮개(cover)와 슈라우드(shroud)로 밀폐된 단일 회전원판(single rotating disk)과 동시 회전원판(co-rotating disk)에서의 유동해석은 고정도 (high precision), 고밀도(high density)의 정보 저장 기기인 컴퓨터 HDD (Hard Disk Drive)내의 회전 디스크에 의한 유동을 설명하기 위한 적절한 모델링이 된다. 또한, 헤드-암(head-arm)과 같은 장애물이 삽입되었을 경우 항력과 후류의 영향으로 전체 유동장의 운동량의 감소와 난류성분의 증가로 발생하는 유동장의 불균일성은 수 마이크론의 거리로 이격되어 디스크와 정보를 주고받는 헤드의 기능을 심각히 저하시키고 데이터 처리의 오류를 발생시킬 수 있다. 그러므로 유동장내 이러한 장애물에 의한 유동구조 변화의 해석은 적절한 HDD설계를 위한 중요한 자료가 된다.

덮개에 의하여 밀폐된 단일 회전 원판의 경계 층 유동은 임계 회전 레이놀즈수($r^2/R_2^2 \times Re_2 = 1/Ek - r^2 \omega / v$)를 경계로 하여 허브에서부터 충류 경계층을 이루며, 이후 천이 영역을 지나 난류 경계층으로 발달하는데, 단일 회전원판에서의 임계 회전 레이놀즈수는 자유 회전원판(free disk)의 경우 약 2.0×10^5 부근이 된다.⁽¹⁾ 이러한 회전 원판 위의 유동을 특성 짓는 주요 인자는 회전 원판과 정지된 덮개사이의 간격(G)과 회전 원판과 슈라우드와 간격(a), 원판의 회전수가 된다. 특히 천이 영역에서 유동은 미소한 외부 영향에 의해 서도 쉽게 난류로 발달하며 열전달의 상당한 증가를 수반하게 된다.

동시 회전원판에 의한 유동구조는 그 유동 특성상 크게 내부 영역(inner region), 외부 영역(outer region), 슈라우드 경계 영역(shroud boundary region)의 세 영역으로 구분되며 내부 영역과 외부 영역의 변동은 원판의 회전수, 두 회전 원판 사이의 간격(G), 원판과 슈라우드 사이의 간격(a) 등이 변수가 된다.

Abrahamson 등⁽²⁾은 동시 회전원판에 대하여 를을 작동 유체로 하여 염료 주입에 의한 유동 가시화와 함께 PIV (Particle Image Velocimetry)를 이용

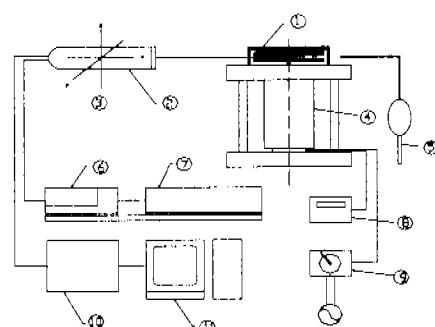
한 다양한 형상의 허브 냉각플과 냉각류의 유입 유량의 변화에 따른 내부 유동 구조의 변화를 연구하였으며, Humphery 등⁽³⁾과 Usry 등⁽⁴⁾은 LDA (Laser Doppler Anemometer)를 이용하여 동시 회전원판에 장애물이 있는 경우 다양한 회전 레이놀즈수에 대하여 내부 유동의 변화를 측정하였으며, 스펙트럼 분석을 통하여 그 외부 유동 구조의 주기성을 보여 주었다. Tzeng과 Munce Jr.⁽⁵⁾은 동시 회전원판에 의한 유동장에 외부 영역 깊이 만큼 경사지게 장애물을 삽입하여 이 경사각의 변화에 따른 유동구조의 변화를 연구하였다.

본 연구는 HDD내부 디스크 중 최상단 디스크(단일 회전원판)와 중간 부분 회전 디스크(동시 회전원판)에 의한 유동 구조의 고찰을 위한 것으로 1) 원판의 회전수, 2) 허브 높이, 3) 장애물(head arm)의 삽입에 따른 유동 구조의 변화와 4) 동시 회전 원판에서 외부 영역의 주기성의 관찰을 LDA를 이용한 유동 성분의 측정과 FLUENT를 이용한 수치해석, 연기 열선법(Smoke-wire visualization)을 통한 유동가시화를 병행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 유동 성분의 측정

덮개를 포함한 회전 원판의 형상은 현재 상용 HDD ($3.5''$ -5400 rpm, $Re_2 = 8.50 \times 10^4$)를 기준으로 역학적 상사를 통하여, 회전수 1700 rpm, $R_2 = 85$ mm,



① test section, ② LDA probe, ③ 3-D traverse,
④ DC motor, ⑤ seeding device, ⑥ beam transmitter,
⑦ Argon Laser, ⑧ rpm dector, ⑨ rpm controller,
⑩ LDA counter, ⑪ computer

Fig. 1 Schematic diagram of LDA system.

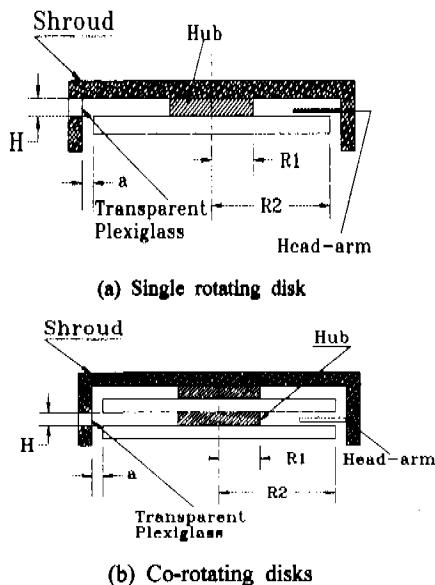


Fig. 2 Schematic diagrams of test section.

$R_1 = 30 \text{ mm}$, $a = 8 \text{ mm}$ 로 설정하였으며, 단일 회전 원판과 동시 회전원판에서 H 변화에 따른 유동 변화 효과를 관찰하기 위하여 단일 회전원판의 경우 $H = 5 \text{ mm}$ ($G = 0.059$), 10 mm ($G = 0.118$), 15 mm ($G = 0.177$), 동시 회전원판의 경우 $H = 4 \text{ mm}$ ($G = 0.047$), 6 mm ($G = 0.051$), 8 mm ($G = 0.094$)로 각각 제작 실험하였다. Fig. 1은 실험 장치의 개략도이며, Fig. 2는 회전 원판을 포함한 유동 측정 부분의 단면도를 나타낸다.

1100 rpm ($Re_\theta = 5.50 \times 10^5$), 1700 rpm, 2200 rpm ($Re_\theta = 1.10 \times 10^6$)의 정확한 원판의 속도 제어는 정량적 데이터의 신뢰성의 향상을 위하여 필수적이므로 회전수 감지 장치가 있는 DC 모터를 사용하여 그 회전수 오차를 $\pm 1\%$ 이내로 유지하였다. 장애물의 형상은 단면 $15 \times 3 \text{ mm}$, 길이 31.5 mm로 단일 회전원판의 경우 바닥에서 1 mm, 동시 회전 원판의 경우 두 회전 디스크 사이 간격의 중간 부분에 고정되며, 허브와 디스크 외경 외 중간 부분까지 삽입된다.

LDA는 유체의 유동에 편승한 산란 입자에 대한 레이저 입사광의 산란으로 발생한 도플러 주파수 편이(Doppler shift)를 검출하여 이로부터 유체의 속도를 측정하는 장치이다. 허브의 근접부분과 회전 원판 부근의 경계층에서 난 반사로 인한 잡음을 최소화하기 위하여 입사광이 투파

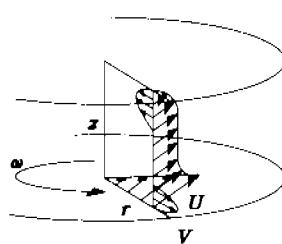


Fig. 3 Schematic view of flow pattern in a cavity with a single rotating disk.

되는 투명의 플렉시글라스(Plexiglas)를 제외한 모든 실험 장치는 무광의 검은색 도료로 칠하여 신호대 잡음비(S/N ratio)를 향상하였다. 또한, 데이터 획득률(data rate)은 2000 Hz 이상을 유지하여 원판의 회전수에 대하여 충분한 수의 산란입자를 검출하도록 하였으며 본 실험에서 산란입자는 에어로졸을 사용하였고, LDA 장치는 3차원 이송장치(3-D traverse)와 58G130 FVA, 58/N40 FVA 처리장치를 가진 후방 산란형(back scatter type) DANTEC LDA로 아르곤이온(Argon ion) 레이저의 최대 출력력은 5 W이다. 본 실험의 LDA를 이용한 속도 측정에서 U , V 속도 성분은 4%, 섭동 속도(RMS velocity)와 난류 강도(T.I.)는 5% 이내의 오차를 가진다.⁽⁶⁾

2.2 유동 가시화

회전하는 원판에 의한 기본 유동 특성의 파악을 위하여 연기 열선법을 이용하여 가시화를 하였다. 최적의 축면 평면광을 얻기 위하여 단일 회전 원판의 경우에는 500 W 할로겐광, 동시 회전 원판의 경우에는 레이저 시트(laser sheet)를 슈리우드의 슬릿을 통하여 주사하였다. 중발 액체를 발생시키는 열선은 직경 0.1 mm의 닉크롬선을 이용하였고, 여기에 적당한 전압을 가함으로써 발생하는 중발 액체의 유백선(streakline)을 이루며 이동하게 되는데 이 유백선을 비디오 카메라(SONY NTSC Video Camera CCD-F36)로 촬영하고, 화상처리 보드(MIL-Lite Matrox II)와 화상처리 프로그램(Matrox INSPECTOR)을 이용 처리하여 순간 유선을 획득하였다.

2.3 수치 해석 조건

HDD내 유동 현상을 이해하기 위해 범용 열유

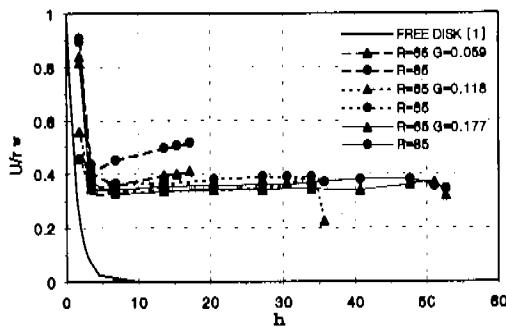


Fig. 4 Nondimensional velocity profiles.

동 해석 프로그램인 FLUENT을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 수치 계산을 수행하기 위하여 각각 $r-z$ 방향으로 93×33 개의 2차원 축대칭 격자체를 형성하였으며 난류를 고려하기 위하여 RNG k-e 난류모델을 적용하였다. 수치해석 형상조건과 경계조건은 실험 조건과 유사하게 선택하여 회전 속도는 1700 rpm을 기본 회전수로 하여 허브 형상 및 회전 원판의 크기 등은 실험에서의 기하학적 형상과 동일하게 주었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 단일 회전 원판(single rotating disk)

회전하는 원판 표면에서 유동은 비활 조건(no slip condition)에 의하여 원판의 회전속도와 동일하고 이러한 원주속도 성분(U)은 유체의 점성 유동으로 z 방향으로 에크만(Ekman) 경계층을 형성하면서 감소하다가 일정한 U 를 가지고 V 가 0인 비점성 유동층인 코어(core)를 형성하게 된다. 이러한 비점성 유동층은 매우 작은 $Re_s (=G^2 \times Re_\infty)$ 에서는 보이지 않으며, 전체적인 유동이 매우 안정적인 코에테 유동(Couette Flow)을 형성하게 된다.⁽¹⁾ 이러한 유동의 개략도가 Fig. 3에 나타나 있고, $Re_s = 8.50 \times 10^5$ 일 때 $G = 0.059, 0.118, 0.177$ 의 세 경우에 대하여 실증적으로 측정한 속도성분 U 의 결과가 Fig. 4, 수치 해석에 의한 V, W 의 속도장이 Fig. 5이다.

회전 원판 위 경계층 유동이 완전 충류이고 미끄러짐의 방향이 반경에 무관하다면 경계층의 두께⁽⁶⁾는 다음과 같이 표시되며,

$$\delta \cong \sqrt{\frac{Vr}{U}} = \sqrt{\frac{\nu}{\omega}} \quad (U = r \times \omega) \quad (1)$$

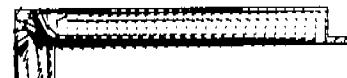
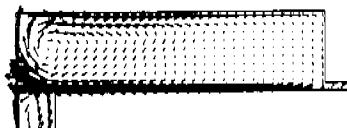
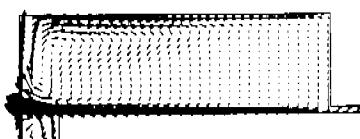
(a) $G = 0.059$ (b) $G = 0.118$ (c) $G = 0.177$

Fig. 5 Calculated flow patterns in single disk cavity for hub height variation.



(a) Flow near the disk



(b) Flow near the cover

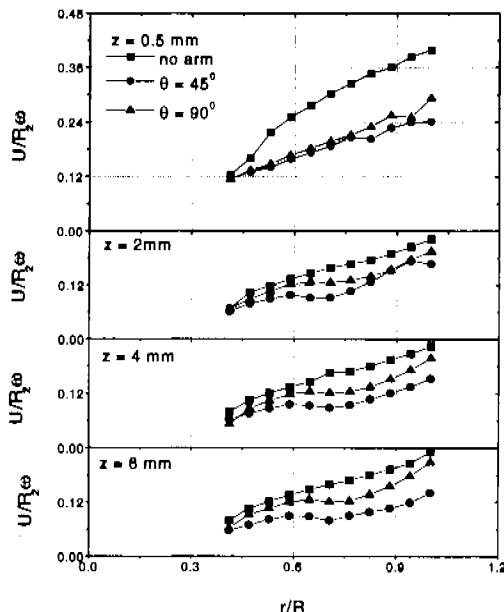
Fig. 6 Flow visualization on a single disk.

이를 이용하면 무차원 z 위치, η 는 다음과 같다.

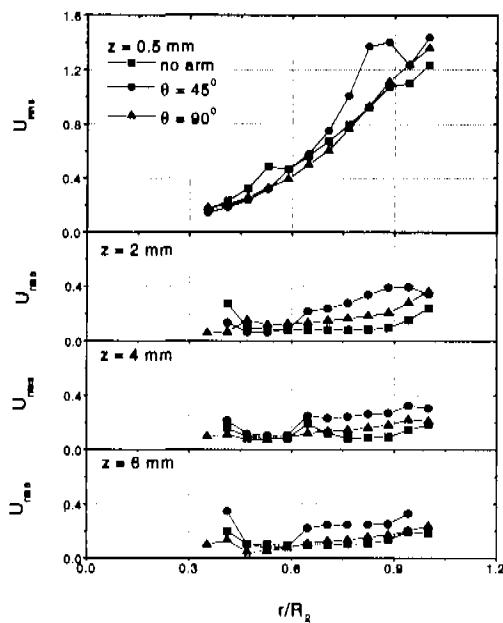
$$\eta = \frac{z}{\delta} = z / \sqrt{\frac{\nu}{\omega}} \quad (2)$$

Fig. 4의 결과에서 코어층의 회전 속도는 $G = 0.118$ 의 경우 원판의 회전 속도의 약 30~40 %정도로 일정하며, 동일 Re_s 에 대하여 G 가 감소하면 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다.

회전 원판의 표면에서는 원심력으로 인한 반경 방향의 이차유동(V)이 발생하게 되는데 이러한 회전 원판에 대한 수평한 면의 속도 벡터합($U+V$)



(a) Circumferential velocity profiles



(b) RMS velocity profiles

Fig. 7 Radial profiles of the dimensionless circumferential mean velocity and root mean square velocity on a single disk at 1700rpm.

은 z 방향에 대하여 에크만 나선구조(Ekman spiral)를 이루게 되는데 이는 Fig. 6의 유동 가시화 사



Fig. 8 Flow visualization in co-rotating disks.

진을 통하여 확인할 수 있다. 원판 표면의 주유동은 코리올리 효과(Corioli effects)와 경계층 내의 점성유동의 영향으로 나선 모양의 와류(spiral vortex) 형태를 띠며 회전 원판의 외곽으로 이동하게 된다.

Fig. 5의 수치해석의 결과 회전 원판과 정지된 덤개사이의 공간에서 발생하는 이차유동의 회전 중심은 원판의 끝 부분에 위치하고 슈라우드 벽면을 따라 고정덤개 부분으로 상당히 강한 유동을 형성함을 알 수 있다.

회전 원판에 의하여 형성된 유동장에 삽입된 장애물은 유동의 원주방향 운동량 결손을 발생하여 원주속도의 감소와 난류 강도의 향상을 야기한다. Fig. 7은 $G = 0.118$, $Re_0 = 8.50 \times 10^4$ 인 경우 허브와 회전 원판 끝단 사이 중간위치까지 장방형의 장애물을 삽입하여 그 하류 $\theta = 45^\circ, 90^\circ$ 에서 측정한 U 와 셀동 속도(RMS velocity)를 장애물이 없는 경우의 속도 성분과 함께 나타낸다. 삽입된 장애물에 의한 운동량의 결손은 장애물의 하류 45° 이후 90° 까지도 상당함을 보이는데 이러한 속도의 감소는 상대적으로 유동장내의 난류성분을 증가시켜서, 허브 부분의 이차유동으로 인하여 증가한 난류성분은 장애물이 없는 경우 슈라우드의 영향 전까지 평탄한 분포를 보이나 장애물이 삽입되면 그 하류에서 유동의 교란으로 인한 상당한 난류성분의 증가를 보인다. 이러한 후류 영역의 유동의 교란은 장애물의 하류방향과 동시에 축 방향으로도 발달하여 전체적으로 하강하는 이차유동에도 불구하고 하류 45° 지점에서 회전 원판으로부터 축 방향 6 mm지점까지도 유동의 교란을 보인다.

3.2 동시 회전 원판(co-rotating disk)

회전 원판이 일정 간격을 두고 슈라우드로 차폐되어진 경우 동시에 회전하는 원판 내부의 유동

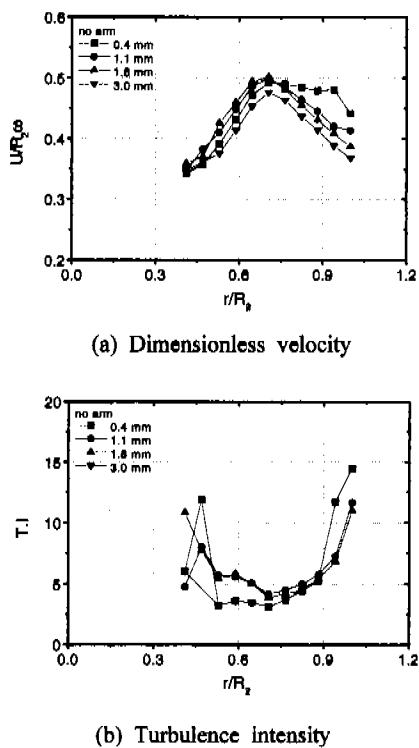


Fig. 9 Velocity profiles for co-rotating disks.

온 단일 원판에 의하여 발생하는 유동과 상당히 다른 유동 구조를 나타낸다. 원판의 안쪽 허브 부근에 유동의 혼합이나 상대 운동이 거의 없이 강체회전(solid body rotation)을 하는 내부영역이 존재하고 그 외곽에 슈라우드의 영향에 의하여 원판의 회전 방향과 반대 방향으로 회전하며 난류 성분의 증가와 유동의 혼합을 야기하는 와류(vortices)가 지배적인 외부영역이 발생한다. 이러한 외부영역의 와류는 원판 외곽에서 슈라우드의 영향으로 상당히 불안정한 유동 형태를 갖는 슈라우드 경계영역을 형성한다. Fig. 8의 가시화 사진은 이러한 경계영역을 명확히 보여준다. 유동장 외부영역에서 발생한 중발 액적은 유동의 교란이 적은 내부의 강체회전 영역으로 침투하지 못하고 그 경계부분에서 상당히 교란됨을 보이나 대부분 외부의 와류영역에서 순환함이 관찰된다. 이것은 내부영역에서 중발 액적을 발생시킨 경우에도 동일한 결과를 보인다.

원판 표면 외부 영역의 경계층에서의 유체는 원심력으로 인하여 원판의 외곽 방향으로 반경 방향의 이차 유동을 일으키고 이로 인한 압력 구배는 중심 회전하는 원판사이에서 원판의 중심을 향하는 이차유동을 야기한다.

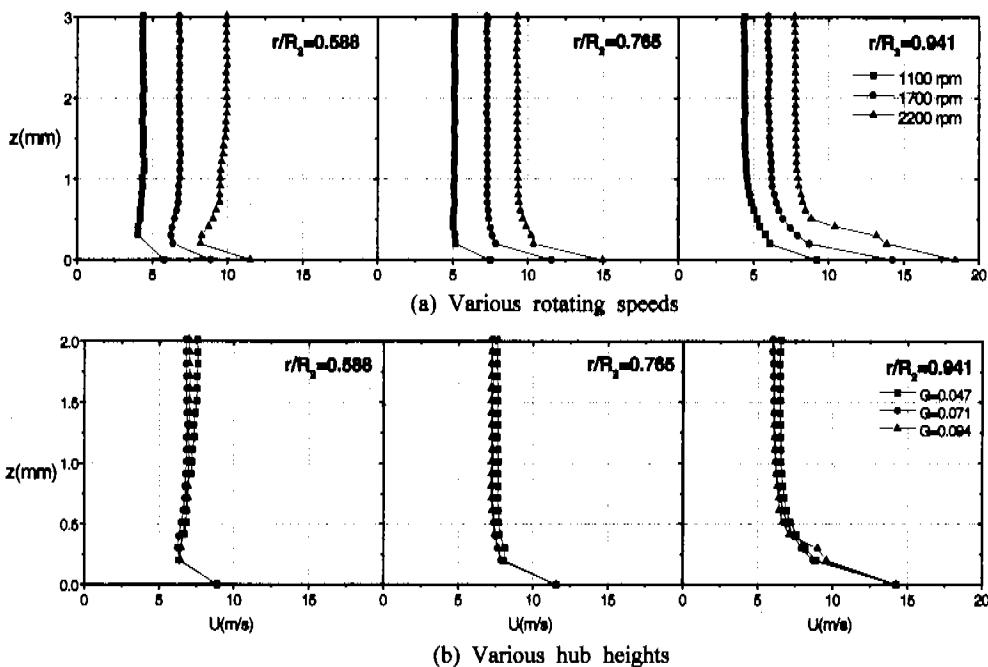


Fig. 10 Mean velocity profiles for co-rotating disks.

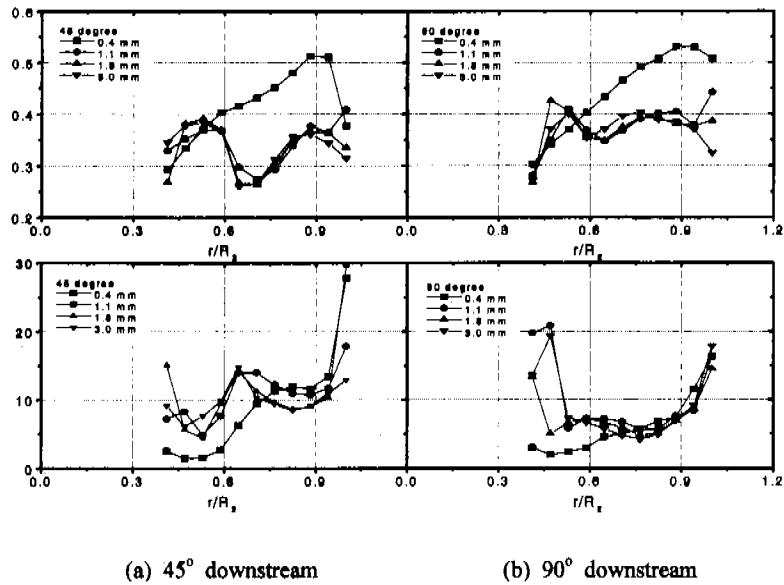
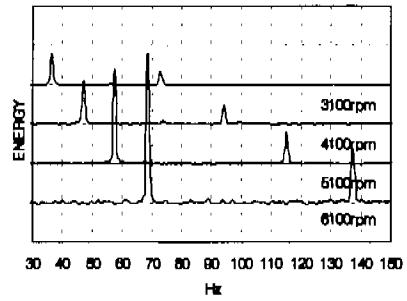


Fig. 11 Dimensionless circumferential velocity and turbulence intensity with a head-arm for co-rotating disks.

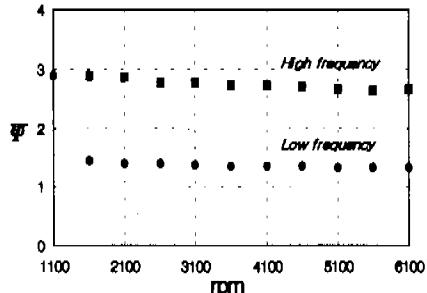
Fig. 9는 장애물이 없는 경우 $G = 0.071$, $Re_D = 8.50 \times 10^4$ 인 동시 회전 원판내의 원주방향의 속도와 난류강도의 분포를 나타낸다. r/R_2 가 약 0.7 부근부터 U 의 감소와 함께 난류성분의 급격한 증가를 보이는데 이 부분은 내·외부 영역의 경계 영역을 의미하며 이 영역의 위치변화는 원판 외 회전수보다는 G 와 a 에 의존하는 것으로 알려져 있다.^(2,3)

Fig. 10은 Fig. 9와 동일 형상의 원판에 대하여 $Re_D = 5.50 \times 10^4$, 8.50×10^4 , 1.10×10^5 로 변화시키는 경우, $G = 0.047$, 0.071 , 0.094 로 변화시키는 경우 원주방향의 속도 분포를 몇 개의 r 에 대하여 z 축으로 미소 이송(0.1 mm)하면서 측정한 결과이다. 회전 원판 표면의 애크만 경계층은 회전 원판의 외곽으로 갈수록 발달하고 이러한 경계층 위의 내부영역의 회전 속도는 1700 rpm의 경우 원판회전 속도의 79% 정도이며, $r/R_2 = 0.77$ 부근의 외부영역의 회전 속도는 약 65%이다. 이러한 원판의 외부영역의 속도감소는 원판의 회전수가 감소함에 따라 더불어 줄어들지만 G 의 변화에 대해서는 변화가 거의 없는 것으로 나타났다.

$Re_D = 8.50 \times 10^4$, $G = 0.071$ 인 경우 동시 회전하는 원판에 의하여 발생된 유동장내 삽입된 장



(a) Energy spectra of the circumferential velocity fluctuation



(b) Nondimensional dominant flow frequency for rpm

Fig. 12 Energy spectra of the flow in outer region.

장애물에 의한 원주속도와 난류강도의 변동을 장애물의 하류 $\theta = 45^\circ, 90^\circ$ 지점에서 측정한 값을 Fig. 11에 나타내었다. $r/R_2 = 0.72$ 까지 삽입된 장애물에 의한 유동의 교란은 회전 원판의 안쪽으로 발달하면서 하류 90° 영역까지도 상당한 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 장애물에 의한 후류의 영향으로 장애물의 외곽, 허브 근처의 유동 속도는 장애물이 없는 경우보다 상대적으로 증가하게 되고, 장애물의 후류 영역은 유동 속도의 감소와 함께 난류성분의 증가를 가져오게 되는데 이러한 유동의 원주방향 운동량 감소는 원판의 회전 선속도가 작은 장애물의 끝 모서리 부분에서 더욱 심해서 반경방향의 원주 속도의 분포는 영문자 M과 같은 형상을 나타내게 된다.

Fig. 12는 원판의 회전수를 변화시킬 때 발생하는 외부 영역 유동장의 주기성의 관찰을 위하여 $r/R_2 = 0.88$ 지점에서 측정한 LDA 스펙트럼(power spectrum) 데이터이다. 원판의 회전수는 1600 rpm부터 증가량 500 rpm으로 6100 rpm ($7.87 \times 10^4 \leq Re_d \leq 3.0 \times 10^5$)까지 변화시키면서 측정하였다. $r/R_2 = 0.88$ 의 외부영역의 유동장의 상대속도는 원판 회전 속도의 약 51%가 되므로 $0.51 \times rps$ 로 측정된 주파수(f)를 무차원화(Ψ)하여 원판의 회전수에 대한 외부유동의 와류형태를 예측하였다.

$$\Psi = \frac{f}{(0.51 \times rps)} \quad (3)$$

Fig. 12(a)에서 본 실험조건하 외부영역의 스펙트럼은 2개의 주된 절점이 존재하며 이 절점은 원판의 회전수가 증가할 수록 그 강도가 증가하고 절점 주파수 또한 증가함을 보이는데 이는 외부영역의 와류가 원판의 회전수가 증가함에 따라 이에 추종함으로 생각된다. 이 절점 주파수는 외부영역의 유력한 와류의 주파수로 예상되며, 절점 주파수로 무차원화된 유동 주파수는 외부영역 와류의 수와 관계가 있다. 회전수 증가에 대하여 무차원 유동 주파수는 Fig. 12(b)를 통하여 거의 일정한 값을 가지는데, 이러한 외부영역은 원판의 회전수가 증가함에 따라 지배적인 와류의 강도 증가로 유동장내 안정성을 더욱 증가하는 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 실험의 자유 회전원판의 임계회전 레이놀즈

수 2.0×10^5 이하의 완전 층류 유동 경계층에 대한 단일 회전원판과 동시 회전원판의 기본 유동 구조와 파악 및 회전수 변화, 허브 형상변화, 장애물의 영향에 의한 유동 형태 변동에 대한 실험 결과는 다음과 같다.

(1) 장애물이 없는 단일 회전원판 $Re_d = 8.50 \times 10^4$ 의 경우 회전원판에 의한 주유동은 $\eta = 3 \sim 4$ 정도의 에크만 경계층내 나선 형태로 원판외곽으로 이동하며, 회전 원판과 고정 덮개사이의 중간부분에는 반경방향의 이차 유동없이 원판 회전 속도의 약 35%로 비점성 유동을 하는 코어부분이 존재하며 이러한 코어층의 접선 방향의 유동 성분은 허브 높이가 감소함에 따라 증가하는 경향을 띤다.

(2) $Re_d = 8.50 \times 10^4$ 의 단일 회전원판에 의한 유동장에 장애물을 삽입에 의한 유동의 원주방향 운동량의 감소는 장애물 하류 90° 영역까지도 미치며 이러한 후류는 축방향으로도 상당히 발전함을 보인다.

(3) $Re_d = 8.50 \times 10^4$ 으로 동시 회전하는 원판의 내·외부 영역의 경계는 $r/R_2 = 0.7$ 부근에 나타나며 이러한 영역을 연기 열선법을 이용한 유동가시화를 통하여 확인하였다. 또한 외부 영역의 원판 회전 속도에 추종정도는 그 회전수에 반비례함을 보인다.

(4) 동시 회전원판 내 $r/R_2 = 0.88$ 지점의 외부영역에 대한 스펙트럼 분석결과 외부영역의 와류의 수는 본 실험에서는 원판의 회전수가 증가함에 따라 거의 일정함을 보이나, 그 스펙트럼의 강도는 증가하는 것으로 관찰되는데, 이것은 외부영역의 와류가 증가하는 원판의 회전 속도에 추종하여 그 강도가 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 정보저장기기 연구센터와 지원(과제번호: 97K3-0905-02-01-1)을 받아 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- Owen, J. M. and Rogers, R. H., 1989, "Flow

- and Heat Transfer in Rotating-Disc Systems Rotor-Stator Systems," pp. 65~92, 125~156., Research Studies Press Ltd., Taunton, Somerset, England.
- (2) Abraharnson, S. D., Chiang, C. and Eaton, J. K., 1991, "Flow Structure in Head-disk Assemblies and Implications for Design," *Adv. Info. Storage Syst.*, Vol. 1, pp. 111~132.
- (3) Humphrey, J. A. C., Chang C. J. and Schuler, C. A., 1991, "Unobstructed and Obstructed Rotating Disk Flows : A Summary Review Relevant to Information Storage Systems," *Adv. Info. Storage Syst.*, Vol. 1, pp. 79~110.
- (4) Usry, W. R. and Humphrey, J. A. C., 1991, "Unsteady Flow in the Obstructed Space between Disks Co-rotating in a Cylindrical Enclosure," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 115, pp. 620~626.
- (5) Tzeng, H. M. and Munce Jr., A. C., 1992, "Flows between Shrouded Co-rotating Disks with Radial and Oblique Obstructions," *Adv. Info. Storage Syst.*, Vol. 115, pp. 620~626.
- (6) Dantec, 1996, "Fiber Flow : Installation and User Guide."