

밀폐된 동시회전원판 내부유동에 관한 실험적 연구

유 승 철* · 주 원 구**

An Experimental Study on Inner Flow between Shrouded Corotating Disks

Seung-Chul Yu*, Won-Gu Joo**

Key Words: Corotating disks(동시회전원판), Hard disk drive(하드디스크 드라이브), shroud(덮개), Hub(허브), Flow(유동), LDV, Solid body rotation(강체회전), Boundary layer(경계층), Vortex(와류)

Abstract

The shrouded corotating disk flow has a simple figure on geometric basis, but has various and complicated forms of flow. This complicated flows can be variously applied to not only information storage device, but also turbomachinery which is greatly influenced by centrifugal force.

This study measured its velocity to measure inner flow field with unique flow field uninfluenced, using LDV and subminiature hot-wire.

The result of experiment shows that distribution limits of solid body rotation region, dimensionless velocity gradient and distribution limits of disk surface boundary layer(Ekman layer) are changed by the gap of disks and rotating speed. Circulating vortex which is near the shroud is effected by the gap of disks and rotating speed.

기호설명

a : 디스크와 슈라우드 사이의 거리[mm]
 b : 디스크 두께[mm]
 H : 디스크 사이의 거리[mm]
 N : 와류의 개수
 r : 반경방향
 r^* : 무차원 디스크 반경
 R_0 : 축 반경[mm]
 R_1 : 허브 반경[mm]
 R_2 : 디스크 반경[mm]
 Re : 레이놀즈 수(Reynolds number)

u : 원주방향 평균속도[m/s]
 u^* : 무차원 원주방향 평균속도
 z : 축 방향
 z^* : 무차원 디스크 간격

그리스문자

θ : 회전방향
 ν : 동점성계수
 Ω : 회전속도

상첨자

* : 무차원 성분

* 연세대 대학원 기계공학과

** 연세대학교 기계공학과

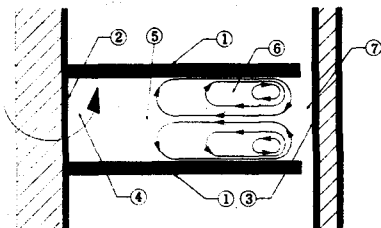
1. 서론

밀폐된 동시회전원판 내부 유동은 반경방향으로 몇 개의 영역으로 구분 될 수 있다.

허브 부근의 영역은 층류영역으로 디스크 회전 속도와 비슷한 속도로 안정하게 회전하는 강제회전(solid body rotation)을 보인다. 고정된 경계인 슈라우드(shroud) 부근에서는 빠른 속도로 강한전단을 받는 난류영역이 나타나고, 이보다 안쪽에서는 동시에 회전하는 위쪽 디스크와 아래쪽 디스크 중간(midspan)을 대칭면으로 순환하는 영역이 나타난다. 이 순환은 반경방향의 압력구배보다 바깥쪽으로 향하는 원심력의 영향이 큰 얇은 층이 슈라우드(shroud: enclosure side wall) 쪽으로 빠르게 가속되어 나가고, 유동중심의 유체는 낮은 속도로 허브 쪽으로 밀려들어오는 형태로 나타나고, 이러한 원인으로 나타나는 Cross-Stream Recirculating Flow는 어느 임계반경에 이르러서 디스크 사이의 공간을 가로지른다. 허브부근의 강제회전 영역과 순환 영역사이엔 천이 영역(transition region)이 존재하게 된다. 이러한 디스크의 유동형태는 Fig.1에 개략적으로 나타내었다.

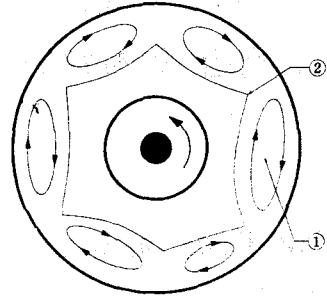
또한 가시화를 통한 실험적 연구^{(1),(2)}에서 관찰된 것처럼 슈라우드 근처에서는 회전속도와 회전하는 두 개의 디스크 사이의 간격에 따라 각기 다른 수의 와류(vortex)가 형성되어 디스크와 함께 비정상적(unsteady)으로 회전을 하게 된다.

이미 수행된 디스크 유동의 가시화 실험을 통해서 허브 부근의 안정한 영역과 바깥쪽의 와류의 경계가 되는 다각형 형상의 유동이 나타나고, 이 다각형 노드(node)의 수가 와류의 수와 관계가 있음이 밝혀졌다. 와류의 형태와 다각형 노드의 모양은 Fig.2에 나타내었다.



- | | |
|----------------------|------------------------|
| 1. Rotating disk | 5. Transition region |
| 2. Rotating hub | 6. Rotating disk sides |
| 3. Fixed shroud wall | 7. Near the fixed wall |
| 4. Near the hub | |

Fig.1 Inner flow field of corotating disks



1. Outer region vortex 2. Inner region boundary

Fig.2 Flow in the plane normal to the disks

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

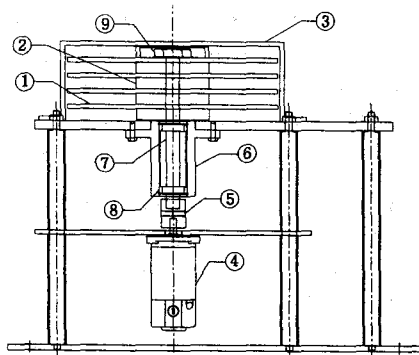
2.1.1 밀폐된 동시회전원판 실험장치

본 연구에서는 고정된 슈라우드(shroud)로 밀폐되어 동시에 회전하는 원판실험장치를 Fig.3과 같은 모양으로 제작하였다. 실험장치는 크기가 다른 두 가지 형태(case1, case2)를 하나의 구동장치를 통해 회전시킬 수 있도록 제작을 하였고, case1의 경우는 여러 두께의 허브를 교체할 수 있어 디스크와 디스크사이의 간격을 세 가지로 변화시키고, 디스크와 허브 그리고, 슈라우드로 이루어지는 측정부위(test section)의 기하학적 형상을 변화시킬 수 있도록 설계를 하였다.

디스크 회전은 case1의 경우 $92rpm(Re=2.2 \times 10^4)$ 에서 $1500rpm(Re=3.6 \times 10^5)$ 까지, case2의 경우 $366.5rpm(Re=2.2 \times 10^4)$ 에서 $6000rpm(Re=3.6 \times 10^5)$ 까지 범위에서 실험을 하였고, 실험을 실시한 회전 범위 내에서는 안정적인 회전을 하였다.

2.1.2 Nomenclature

내용을 서술하는데 필요한 기준이 되는 기호들을 Fig.4에 나타내었다. 주요하게 사용된 기호는 축의 반경을 R_0 , 허브의 반경을 R_1 , 디스크의 반경은 R_2 로 나타내었고, 디스크와 디스크 사이의 간격은 H , 디스크 끝단과 슈라우드 사이의 간격은 a 이다. 디스크의 두께 b 는 case1과 case2에 관계없이 동일하게 구성을 하였다. case1과 case2의 기하학적 크기는 Table 1에 제시하였다.



- 1. Disk
- 2. Hub
- 3. Shroud
- 4. Motor
- 5. Micro coupling
- 6. Bearing housing
- 7. Shaft
- 8. Bearing
- 9. Bearing nut

Fig.3 Large scale test rig

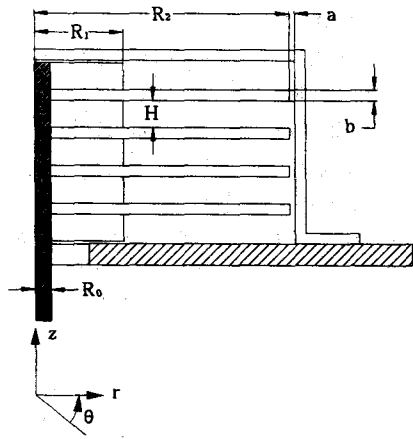


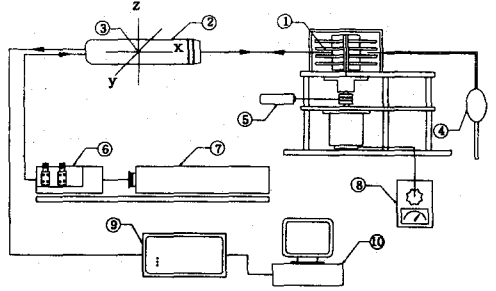
Fig.4 Nomenclature

Table 1 Geometry

	R_1	R_2	H	a	b
case1	66mm	190mm	10, 20, 40mm	4mm	8mm
case2	33mm	95mm	10mm	2mm	8mm

2.2 실험방법

속도측정장비로는 유동장을 방해하지 않고 정확한 측정이 가능한 LDV를 사용하였으며 개략도를 Fig.5에 나타내었다.



- 1. Test section
- 2. LDV probe
- 3. 3-D traverse
- 4. Seeding device
- 5. Tachometer
- 6. Beam transmitter
- 7. Laser generator
- 8. rpm controller
- 9. LDV counter
- 10. PC

Fig.5 The configuration of LDV system

측정에 있어서 레이저 입사광의 교차각 변경을 방지하기 위해 입사광(laser)의 통과 부위를 유동에 영향을 주지 않도록 주의하며 편평하게 하였다. 회전원판과 허브에서 빛의 반사를 최소화하고, 잡음(noise)의 영향을 방지하기 위하여 평면장 이외에는 주황색(orange)으로 착색하여 신호 대 잡음비(S/N ratio)를 향상하였고, 또한 충분한 데이터 획득율(data sampling rate)을 유지하여 원판의 회전수에 대하여 충분한 수의 산란입자를 검출하도록 하였다. 본 실험에서 산란입자는 에어로졸(aerosol)을 사용하였고, LDV 장치는 3차원 이송장치와 8G130 FVA, 58/N40 FVA처리 장치를 가진 후방 산란형(back scatter type) DANTEC LDV로 아르곤이온(Argon ion) 레이저의 최대출력은 5W이다. 본 실험의 LDV를 이용한 속도측정에서 속도성분은 5%이내의 오차를 가진다.⁽³⁾

3. 결과 및 고찰

원주방향 평균 속도성분(circumferential mean velocity)의 측정은 형상비가 동일하고 기하학적 크기가 2배 차이가나는 case1과 case2의 두 가지 경우와 case1의 경우에 디스크와 디스크 사이의 간격이 다른 두 가지 경우에 회전수에 변화를 주어 세 가지 다른 레이놀즈 수(Reynolds number)에 대해 실험을 실시하여 비교하였다.

정의된 레이놀즈 수는 식(1)에 그리고 Table 2에 각각의 회전수에 따른 레이놀즈 수를 제시하였다.

$$Re = \frac{\Omega R^2}{\nu} \tag{1}$$

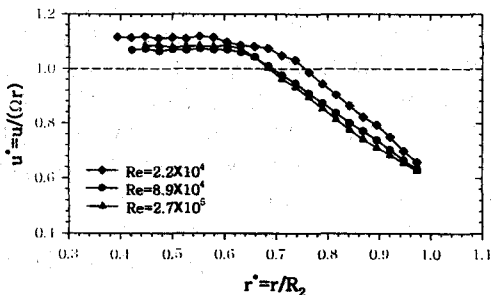
Table 2 Compare of Reynolds number

	$Re = 2.2 \times 10^4$	$Re = 8.9 \times 10^4$	$Re = 2.7 \times 10^5$
case1	91.6rpm	366.5rpm	1099.4rpm
case2	366.5rpm	1465.9rpm	4397.8rpm

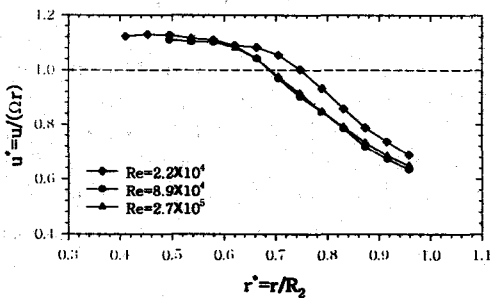
3.1 반경변화에 의한 효과

다음에 제시하는 결과는 디스크와 디스크 사이에서 측정된 원주방향 평균속도(circumferential mean velocity)의 분포이다.

반경방향 분포(radial profile)는 디스크 사이의 가운데에서의 원주방향 평균속도(u)를 각 반경 위치에서의 회전속도(Ωr)로 무차원화해서 그래프(graph)의 y축에, 측정된 반경 위치(r)를 디스크의 반경(R_2)으로 무차원화해서 그래프의 x축에 나타내었고, 축 방향 분포(axial profile)는 그래프의 y축에 디스크와 디스크 사이 중간(midspan)을 0으로 하고 두 디스크 사이의 거리를 1로 하여 축 방향 z^* 로 나타내었고, 그래프의 x축에는 원주방향 평균속도를 각 반경위치에서의 회전속도(Ωr)로 무차원화해서 나타내었다.



(a) Case1, $H/R_2 = 0.105$



(b) Case2, $H/R_2 = 0.105$

Fig.6 Radial profiles of the circumferential mean velocity, Compare different radius

3.1.1 반경방향 분포

Fig.6는 case1의 경우에서 디스크와 디스크사이의 간격(H)이 20mm인 경우와 case2의 결과를 비교하였다. case1의 경우는 case2의 두 배의 크기를 가지며, 디스크와 디스크사이의 간격(H)를 디스크의 반경(R_2)으로 무차원화한 H/R_2 도 0.105로 동일하게 하여 실험을 하였다.

측정시 회전속도에 차이를 두어 식(1)에 나타낸 레이놀즈 수(Reynolds number)를 같게 하여 기하학적상사의 관계를 확인하였다.

측정결과 강체회전(solid body rotation)영역이 분포하는 범위와 재 순환(re-circulating) 영역의 무차원 속도구배 그리고, 낮은 레이놀즈 수의 결과가 높은 레이놀즈 수의 결과 보다 더 높은 속도 분포를 보이는 등의 유사한 결과가 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 특히 회전속도가 고속으로 되어 레이놀즈 수가 커질수록 재 순환 영역 속도 분포의 두 가지 결과는 강하게 일치하는 결과를 보여주고 있다.

3.1.2 축 방향 분포

Fig.7, Fig.8, 그리고 Fig.9는 3.1.1에서의 경우와 마찬가지로 case1에서 디스크와 디스크사이의 간격(H)이 20mm인 경우와 case2의 결과를 비교하였고, 무차원화된 반경위치(r^*)를 같게 하여 실험 결과를 비교하였다.

측정결과는 3.1.1과 마찬가지로 유사하게 나타난다. 특히 고속으로 되어 레이놀즈 수가 커질수록 두 속도분포는 강하게 일치하는 결과를 보여준다.

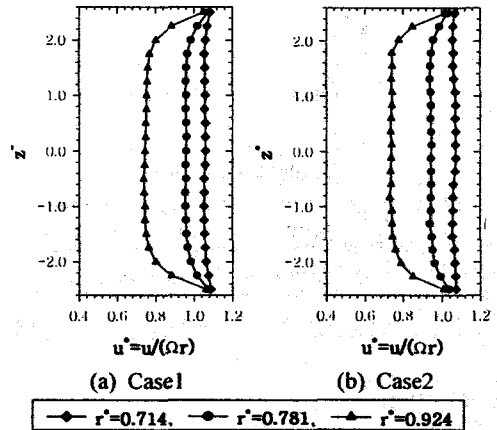


Fig.7 Axial profiles of the dimensionless circumferential mean velocity ($Re = 2.2 \times 10^4$)

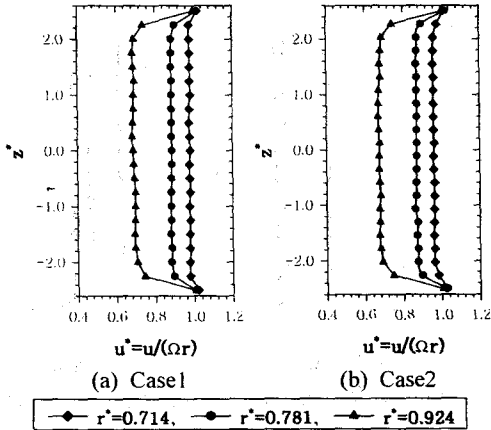


Fig.8 Axial profiles of the dimensionless circumferential mean velocity ($Re = 8.9 \times 10^4$)

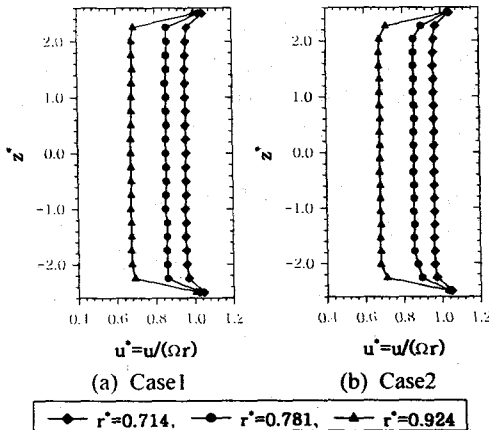


Fig.9 Axial profiles of the dimensionless circumferential mean velocity ($Re = 2.7 \times 10^5$)

그러나 Fig.9의 디스크 근처에서의 속도분포를 비교하여 보면, case1과 case2가 디스크 근처의 Ekman layer의 분포의 정도에서 차이를 보인다. 이 결과로 디스크 근처에서 발생하는 경계층은 H/R_2 뿐만 아니라 디스크로부터의 절대적인 거리에도 영향을 받는 것을 확인할 수 있다.

3.2 디스크사이 간격변화에 의한 효과

다음에 제시하는 결과는 디스크와 디스크 사이의 간격을 다르게 해서 측정한 원주방향 평균속도의 분포를 비교한 결과이다.

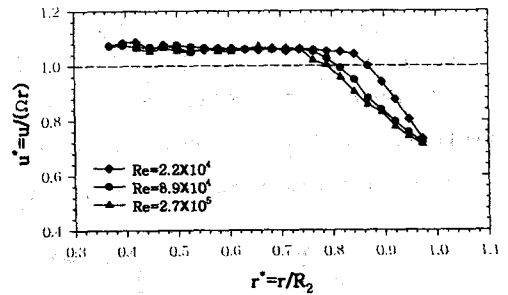
3.1에서의 경우와 마찬가지로 반경방향 분포(radial profile)는 디스크와 디스크사이의 가운데에

서의 원주방향 평균속도(u)를 각 반경위치에서의 회전속도(Ωr)로 무차원화 하고, 측정된 반경 위치(r)를 디스크의 반경(R_2)으로 무차원화해서 나타내었고, 축 방향 분포(axial profile)는 디스크와 디스크 사이 중간(midspan)을 0으로 하고 두 디스크 사이의 거리를 1로 하여 축 방향 z^* 로 나타내었고, 원주방향 평균속도를 각 반경위치에서의 회전속도(Ωr)로 무차원화해서 나타내었다.

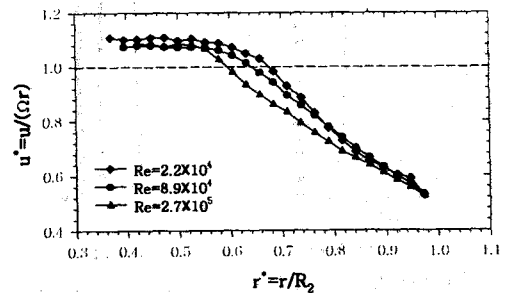
3.2.1 반경방향 분포

Fig.10은 본 연구의 case1의 경우 중 H/R_2 가 0.053인 경우와 H/R_2 가 0.211인 경우의 두 가지 결과를 비교하였다. 두 경우는 반경(R_2)과 디스크의 두께(b) 그리고, 슈라우드와 디스크 끝단 사이의 간격(a)는 동일하고 디스크사이의 간격(H)이 10mm와 40mm로 차이가 있다.

H/R_2 가 0.053인 결과는 H/R_2 가 0.211인 결과에 비해 강제회전 영역이 넓게 분포하는 것을 확인할 수가 있다. 이 결과는 디스크와 디스크 사이의 간격이 좁을수록 동시에 회전하는 위



(a) Case1, $H/R_2 = 0.053$



(b) Case1, $H/R_2 = 0.211$

Fig.10 Radial profiles of the circumferential mean velocity, Compare different disk space

· 아래 디스크의 경계층(Ekman layer)의 영향을 크게 받기 때문에 해석할 수가 있고, 재 순환 영역에서의 무차원 속도구배도 H/R_2 에 따라서 다르게 나타남을 확인 할 수 있다.

3.2.2 축 방향 분포

다음의 결과는 앞서와 마찬가지로 H/R_2 가 0.053인 경우와 H/R_2 가 0.211인 경우의 두 가지 결과를 비교하였다. H/R_2 가 0.053인 경우와 H/R_2 가 0.211인 경우에 비해 강제회전 영역이 넓게 분포하는 것을 원주방향 속도성분의 축 방향 분포를 통해서도 확인 할 수가 있다.

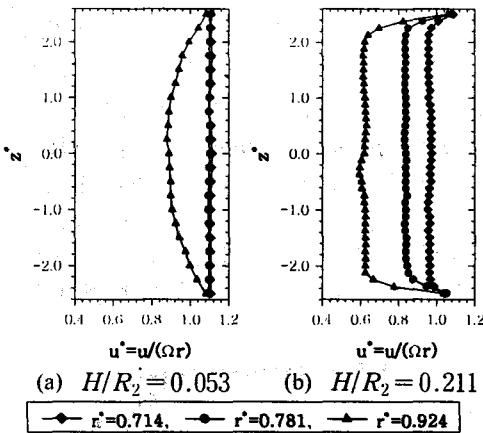


Fig.11 Axial profiles of the dimensionless circumferential mean velocity ($Re = 2.2 \times 10^4$)

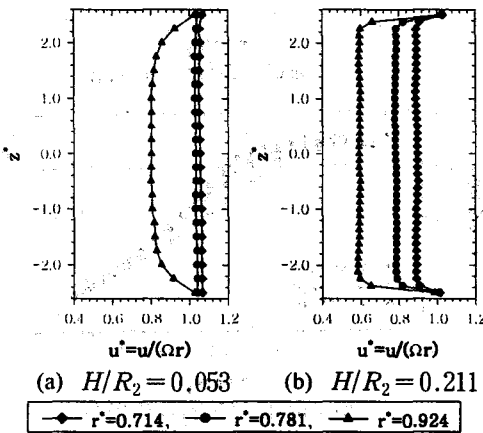


Fig.12 Axial profiles of the dimensionless circumferential mean velocity ($Re = 8.9 \times 10^4$)

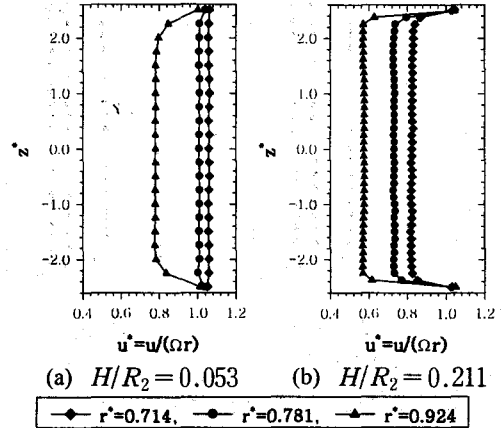


Fig.13 Axial profiles of the dimensionless circumferential mean velocity ($Re = 2.7 \times 10^5$)

이 결과는 앞서와 마찬가지로 디스크 사이의 간격이 좁을수록 동시에 회전하는 위·아래 디스크의 경계층(Ekman layer)의 영향이 크게 작용하는 원인으로 해석할 수가 있다.

3.3 슈라우드 부근의 비정상 와류

다음의 결과는 슈라우드 근처에서 형성되어 디스크와 함께 회전하는 비정상와류를 측정된 결과이다. 실험은 case1의 세 가지 경우와 case2의 경우에 대해 측정을 하였다.

슈라우드 부근에서 나타나는 와류의 주기성 관찰을 위하여 $r/R_2 = 0.88$ 인 점에서 LDV 스펙트럼(energy spectrum)데이터를 측정하였다.

측정된 스펙트럼중 case2의 H/R_2 가 0.105인 경우만을 Fig.14에 제시하였고, 나머지 결과는 생략하고 측정된 스펙트럼 데이터를 무차원화해서 Fig.15에 나타내었다.

실험을 실시한 레이놀즈 수(Reynolds number)의 범위는 2.42×10^4 에서 3.63×10^5 이다. H/R_2 가 변화함에 따라 $r/R_2 = 0.88$ 에서의 디스크 회전속도와 유동장의 상대 속도와는 큰 차이가 있으므로, 디스크 1회전당 와류개수의 추정을 위하여 각각의 데이터에서 원주방향 속도성분(u)과 디스크 회전속도(Ωr)를 이용해 다음에 나타낸 식(2)를 통해 무차원화하여 그래프를 제시한 결과, 회전수가 빠를수록 H/R_2 가 증가할수록 발생하는 와류의 개수(N)이 감소하는 경향을 확인 할 수 있다.

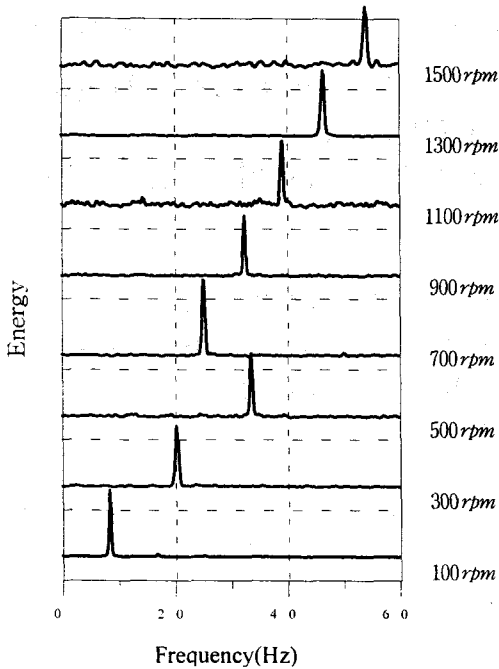
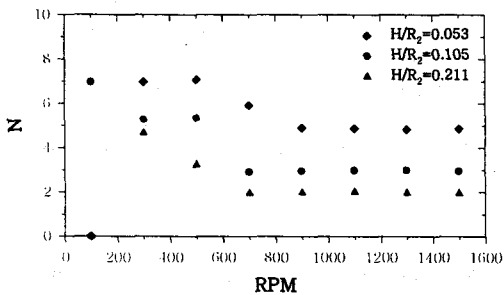
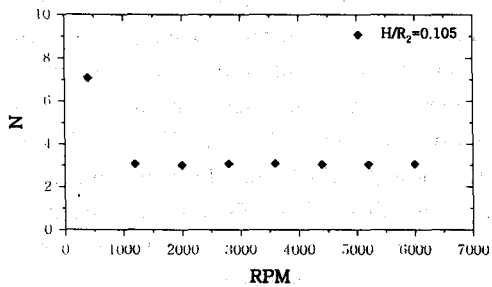


Fig.14 Energy spectra of the circumferential mean velocity (case1, $H/R_2=0.105$)



(a) Case1



(b) Case2

Fig.15 Non-dimensional dominant flow frequency for rpm

$$N = \frac{f}{\frac{u}{\Omega r} \times rps} \quad (2)$$

4. 결 론

1. 기하학적 상사를 가지고 레이놀즈 수를 일치시켜 H/R_2 가 0.105 로 같은 case1과 case2의 원주방향 평균속도의 분포는 강제회전 영역의 분포범위와 재순환 영역에서의 속도구배 등이 매우 유사하지만, 회전수에 따라 디스크 표면의 경계층의 분포는 일치하지 않는다.
2. 동일반경의 디스크에서 디스크와 디스크사이의 간격(H/R_2)의 변화에 따라 허브 근처에서 발생하는 강제회전(solid body rotating) 영역의 분포 범위와 재순환(Re-circulating) 영역에서의 속도구배는 차이가 나고, 디스크의 회전에 의해 발생하게 되는 디스크 표면의 경계층(Ekman layer)의 분포 범위는 달라진다.
3. 슈라우드 부근에 나타나는 비정상파류는 스펙트럼(energy spectrum)해석을 통해 확인이 가능하고, 비정상파류의 개수는 회전수가 빨라질수록 H/R_2 가 증가할수록 적게 나타난다.

후기

본 연구는 한국과학재단지정 정보저장기기 연구센터의 지원(과제번호:1999G0303)을 받아 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) E. Lennemann., "Aerodynamic Aspects of Disk Files", IBM J. RES. DEVELOP, Vol.18, No.6, pp.480~488, 1974.
- (2) Scott D. Abrahamson., John K. Eaton., and Dennis J. Koga., "The flow between shrouded corotating disks", Phys. Fluids A, Vol.1, No.2, February 1989.
- (3) Fiber Flow : Installation and User Guide, Dantec.