대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 E pp. 179~184 KSME 01S539

단일회전원판을 포함하는 밀폐된 내부 유동장 특성

공 대 위*· 주 원 구**

Characteristics of inner flow driven by a rotating disk in shroud

Dae-Wee Kong, Won-Gu Joo

Key Words: Airflow(유동), Swirling flow(선회류), Vortex distribution(와류분포), LDV(레이저도플러속도계)

Abstract

A shrouded rotating disk airflow has a simple figure on geometric basis, but has various and complicated forms of flow. This flow type can be applied to many turbo devices such as information storage device(optical disk). Circumferential velocity frequency in the middle plane between disk and shroud wall is measured using laser Doppler velocimeter. Solid body region of flow was founded when low Reynolds number relatively. Through the informations of the experimental results, we could examine the number and distribution of the vortices. When Reynolds number 3.80×10^5 there is a dominant frequency of which vortices number is 5.

기호설명

- a : distance between disk edge and shroud [mm]
- b : disk thickness [mm]
- f : frequency [1/s]
- H_1 : gap between shroud wall and disk [mm]
- H_2 : gap between disks [mm]
- N : number of vortice
- r : disk radius [mm]
- R_1 : disk radius [mm]
- R_2 : hub radius [mm]
- Re : Reynolds number
- u : circumferential mean velocity
- θ : circumferential angle [rad]
- ν : kinetic viscosity [m^2/s]
- Ω : angular velocity {rad/s]

* 연세대학교 대학원 기계공학과
** 연세대학교 기전공학부

1. 서 론

회전원판에 의해 유발되는 유동장은 매우 복잡하다. 회전원판으로써 플로피 디스크와 같이 좁은 극간을 가지는 경우와 그보다 더 큰 극간을 가지는 하드디스크 광디스크 등이 있다.

원판의 회전에 의해 유발되는 유동장에 대한 연구는 여러 가지 관점에서 이루어 졌다. Abrahamson등[1]은 물에 잠긴 동시회전 원판 사이의 유동장을 염색법으로 가시화 하였다. 그의 실험에서 다각형 구조의 내부 영역 경계면이 관찰되었다. 또 속도 스펙트럼으로 회전수의 변화에 따른 로브(lobe) 주파수를 통해 내부 유동장으로 냉각류를 유입시켰을 경우와 장애물을 넣었을 경우의 실험과 비교하여 차이점을 고찰하였다. Kobayashi등[2]은 회전원판과 회전원뿔 그리고 회

전구의 각 표면에서의 유동 천이 현상을 실험하였다. 여러 경우의 임계 및 천이 레이놀즈 수를 제시하였고 이들을 모멘텀 두께와 국소 속도의 항으로 표현하였다. 또 천이 영역에서의 나선 와류들과 유동의 불안정성에 대해 고찰하였다. Tzeng등[3]은 하드디스크와 같은 구조물 안에서 허브(spacer)를 통해 유동장으로 유입되는 제트(jet)에 대해 실험적으로 가시화하고 이로부터 층류 Ekman 경계층 두께를 얻어내었다. Girard등[4]은 Abrahamson등[1]의 실험에 이어서 동시회전원판 내부 유동장에 회전 암(arm)을 설치했을 경우의 유동장 특성을 관찰하였다. 난류강도는 암을 가로지르는 방위각상의 압력 차의 강하게 기인함을 발견하였다. 회전암이 허브로 깊이 들어갈 수록 유동장의 변화도 현저하게 나타났다.

공력학적으로 회전원판면 위에 영향을 줄 수 있는 것은 유동에 의한 표면 압력의 비정상성(unsteady)으로 간주된다. 이러한 유동의 비정상성은 아주 작은 난류 스케일로부터 큰 유동 구조까지 다양하다. 어느 스케일이 또 어느 주파수를 가지는 유동 구조가 디스크에 동적인 영향을 주는지를 발견하는 것은 쉬운 문제가 아니다.

그러나 최근 들어 하드디스크나 광디스크와 같이 회전속도가 증대할 필요가 있는 부분에 있어서 내부 유동교란의 주파수에 의한 압력장의 비정상적 영향이 중요한 인자로 여겨지고 있다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 광디스크와 같이 단일회전원판을 포함하는 슈라우드내의 유동장의 구조를 유동패턴을 가려내기 위해 슈라우드 벽면과 원판면 사이의 중심부에서 반경방향으로 원주속도와 교란주파수를 실험을 통해 조사하였다.

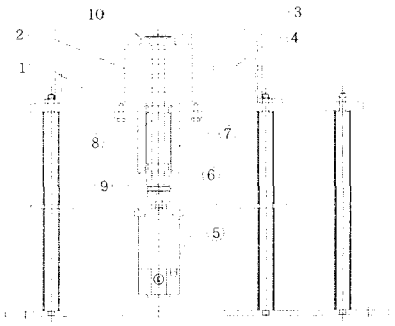
2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 고정된 슈라우드로 밀폐되어 동시에 회전하는 원판실험장치를 Fig. 1과 같은 모양으로 제작하여 실험을 실시하였다. 실험에 사용하는 원판은 반경이 190 mm로서 구동장치를 통해 회전시킬 수 있도록 제작을 하였고, 슈라우드는 측면 또는 윗면에서 측정이 가능하도록 하였다. 그리고 동시회전원판에 대해 또는 고정 벽면에 대해 모두 측정할 수 있도록 배려하여 설계되었다.

각각의 소재를 정밀하게 가공하고 조립한 결과 원판은 ±0.05 mm의 상하 흔들림과 ±0.02 mm의 좌우 흔들림이 있었다. 상하 흔들림과 좌우 흔들림은 원판을 천천히 회전시키면서 다이얼 게이지를 설치하여 변위를 측정하였다.

원판의 회전은 500 rpm에서 1500 rpm까지 범위에서 실험을 하였고, 실험을 실시한 회전 범위 내에서는 어떠한 공진 현상도 관찰할 수 없었다. 그림에 나타나 있는 각 부분의 상세한 설명은 다음과 같다.



1. Disk
2. Hub
3. Shroud
4. Obstruction(optional)
5. Motor
6. Micro Coupling
7. Bearing housing
8. Shaft
9. Bearing
10. Bearing nut

Fig. 1 Large scale test rig

축의 반경을 R_0, 허브의 반경을 R_1, 원판의 반경은 R_2로 나타내었고, 원판과 벽면사이 극간의 크기는 H_1, 원판과 원판 사이의 간격은 H_2, 원판 끝단과 슈라우드 사이의 간격은 a이다. b는 원판의 두께이다. 여기서 R_1=66 mm, R_2=190 mm, H_1=20 mm, H_2=22.9 mm, a=4 mm, b=8 mm이다.(Fig. 2)

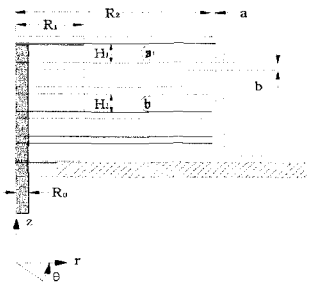
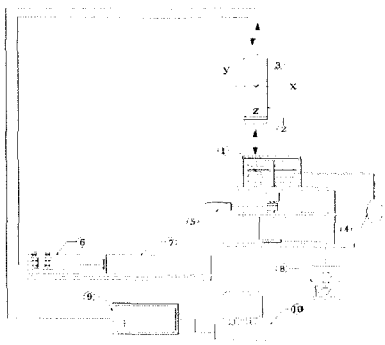


Fig. 2 Specification

2.2 실험방법



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

Fig. 3 The configuration of LDV system

회전원판이 있는 실험장치에 대한 속도측정 장비로는 LDV를 사용하였다. Fig. 3은 전체적인 실험장비의 개략도이다. 측정 속도 성분은 원주방향의 속도와 축 방향 속도 그리고 rms 원주속도로서 회전원판과 허브에서 빛의 반사를 최소화하고, 벽 근처에서의 속도를 측정하면서도 잡음의 영향을 방지하기 위하여 빛이 입사하는 맨 위쪽의 평면창 이외에는 녹색과 파랑색의 보색인 주황색으로 착색하여 신호 대 잡음비를 향상하였고, 또한 충분한 데이터 획득율을 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 FVA처리 장치를 가진 후방 산란형(back scatter type) DANTEC LDV로 아르곤이온 레이저의 최대출력은 5 W이다. 본 실험의 LDV를 이용한 속도측정에서 U, V속도 성분은 4 %, rms 속도성분과 난류강도는 5 %이내의 오차를 가진다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2에서 측정구간 ⓐ 또는 ⓑ에서와 같은 중간지점(midspan)의 원주속도성분의 반경방향분포는 고정벽면 또는 동시회전 원판의 유동장을 기술하는 기본적인 정보가 된다. 그중 ⓑ지점에 대한 유동장에 대한 실험이 보고되었다. 실험장치에서 각 원판 사이의 간격은 원판면 경계층에 비해 충분히 넓게 설계되었다. 벽면에 대한 원판의 유동장 영역 또한 상대적으로 넓은 비점성 영역을 발견할 수 있었다. 그런데 ⓐ지점에서 벽면과 원판면의 경계층 측정은 잘 이루어지지 않았다. 따라서 원주속도성분의 축방향 분포는 제시되지 않았다.

동시 회전원판 사이(ⓑ)의 속도 스펙트럼의 조사를 통해 낮은 주파수대의 특성을 고찰한 시도가 보고되어 왔다[1, 5]. 이 방법은 유동장내 와류의 개수에 대한 정보를 제공한다. 본 실험에서는 벽면-원판(ⓐ) 사이에서의 속도 스팩트럼의 조사를 통해 와류로 추정되는 유동 구조물의 분포 범위를 알아내고자 하였다.

본 실험장치는 하드디스크(HDD)에 대한 기하학적 상사를 고려하여 만들어 진 장치이다. 따라서 CD-ROM/DVD 카트리지의 구성을 고려한 기하학적 상사와는 별개이며 차후에 논의될 속도 스펙트럼의 양상비교를 위해 벽면에 대한 원판의 유동장 측정은 같은 실험장치 내에서 이루어 졌다. 레이놀즈 수는 $Re = \Omega R_2^2/\nu$으로 레이놀즈 레이놀즈 수 1.27, 2.53, 3.80×10^5에 대해 회전수는 각각 504.9, 1003.7, 1506.5 rpm이다.

3.1 원주속도성분의 반경방향분포

Fig. 4는 벽면과 원판 사이의 중간지점인 ⓐ

(Fig. 2)에서의 원주방향 평균속도의 반경방향 분포을 나타낸 것이다. 원주방향 평균속도 u를 y축에, 측정된 원판의 반경 위치 r를 원판 외경 R_2로 무차원하여 x축에 나타내었다.

레이놀즈 수 1.27×10^5의 경우 전 반경구간에 걸쳐 반경이 증가함에 원주속도는 원판의 회전수에 따라 증가하는 양상을 보인다. 레이놀즈 수 2.53×10^5과 3.80×10^5에서는 무차원 반경 0.47까지는 감소하다가 다시 원판 끝단(무차원 반경 1.0)까지 증가한다. 세 가지 레이놀즈 수에 대해 무차원 반경 0.7까지는 안정된 분포를 보이고 있다. 동시회전 원판의 경우(ⓑ)는 무차원 반경 0.6에서 0.85까지 두 원판 중앙에서의 원주방향 속도성분이 원판의 회전속도와 정비례하다가 감소하는 반대적 성향을 나타내었다. 이와 같은 정비례의 구간은 강체회전 영역이라고 하고 두 원판사이의 거리 변화에 따라 그 크기에 변화가 있음이 보고되었다[5].

Fig. 5는 Fig. 4의 원주방향 평균속도를 각 반경위치에서의 원판의 원주속도(Ωr)로 나누어 무차원화한 그래프이다. 여기서 더욱 확실하게 나타나는 것은 강체 회전 영역이 레이놀즈 수 1.27×10^5의 경우 0.52에서 0.77의 무차원 반경의 영역에 걸쳐 있고, 이보다 높은 레이놀즈 수의 경우 거의 강체 회전 영역이 나타나지 않았다. 즉 어느 정도의 레이놀즈 수까지는 강체 영역의 크기가 레이놀즈 수에 따라 변화를 가진다는 것이다. 이와는 다르게 동시회전 원판(ⓑ)의 경우는 넓은 레이놀즈 수에 걸쳐 동일한 강체 회전 영역을 가짐이 보고되었다[5]. 특히 무차원 반경 0.7 부근까지는 레이놀즈 수 1.27×10^5과 다른 두 경우 상이한 차이를 보였는데 이는 저레이놀즈 수에서 더 큰 점성의 영향이 있기 때문인 것으로 보인다.

레이놀즈 수 2.53×10^5와 3.80×10^5에서 무차원 반경 0.7이상의 경우 매우 다른 속도 유형들을 나타내는데 이를 자세히 보기 위해 두 경우의 회전속도 사이를 다섯 구간으로 세밀하게 나누어 원주방향 속도성분을 나타낸 것이 Fig. 6이다. 무차원 반경 구간 0.7이상의 경우 이 레이놀즈 수 범위에서 원주방향 속도성분은 회전수에 따라 증가하는 양상이지만 예외적으로 레이놀즈 수 3.80×10^5에서는 무차원 반경 0.9에서 갑자기 무차원 속도가 떨어지는 현상을 보이고 있다. 원판 끝단으로 갈수록 이런 여러 가지 형태의 속도 유형을 가지는 이유는 곡률을 가진 슈라우드 면의 영향으로 인한 유동장의 3차원적 효과 때문으로 보인다. 특히 상대운동을 하는 면들(원판과 벽면, 또는 원판과 슈라우드면) 사이의 유동장은 동시회전 원판의 경우보다 벽면과 회전원판의 경우가 더 복잡한 와류를 형성한다.

Fig. 7부터 10까지는 LDV로부터의 원주방향 속도 스펙트럼이다. 속도의 FFT 결과는 LDV로부터 직접 얻어진다. Fig. 7과 8은 특정 무차원 반경에서의 속도 스펙트럼이다. 모두 같은 속도 교란 주파수의 범위(0~100 Hz)내에서 보면 괄목할 만한 피크들이 있음이 발견된다. 여기서 실험장치 시스템의 기계적 진동에 의한 피크는 관찰되지 않았다.

여러 회전수에 대해서 주목되는 피크들은 연관성을 가지고 있었다. Fig. 7의 피크는 레이놀즈 수가 2.53×10^5일 때, 무차원 반경이 0.95인 거의 원판의 끝단에 가까운 지점으로 여러 피크들이 발견된다. 원판의 끝단에서의 데이터는 노이즈가 심하여 피크를 알아 볼 수가 없었다. Fig. 8은 레이놀즈 수가 3.80×10^5일 때, 무차원 반경이 0.82인 지점으로 하나의 피크가 두드러지게 나타났다.

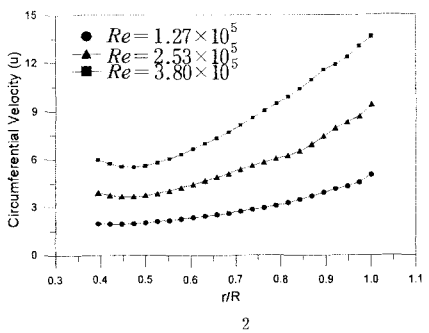


Fig. 4 Radial profiles of the circumferential velocity

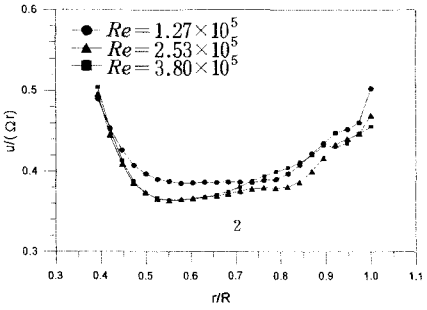


Fig. 5 Radial profiles of the dimention-less circumferential velocity

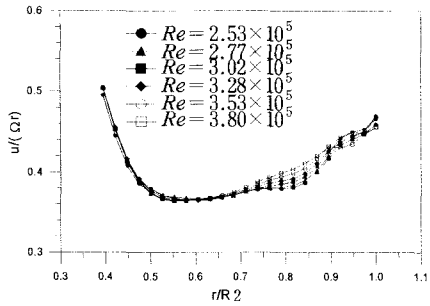


Fig. 6 Radial profiles of the dimention-less circumferential velocity; *detail from* $Re=1.27\times10^5$ *to* 3.80×10^5

Fig. 7과 8을 비교하면 전자는 피크가 여러 가지로 나타나지만 크기가 서로 비슷한 무리로 나타난다. 반면 후자는 대부분의 피크들은 사라지고 단 하나의 지배적인 피크가 크게 나타난다.

Fig. 9와 10은 무차원 반경범위에 따른 피크를 각기 다른 주파수 범위대로 관찰한 것이다. 모두 무차원 반경비가 이 그래프들에서 반경에 따른 피크들의 분포를 잘 이해할 수 있다. Fig. 9는 무차원 반경비가 0.68에서 0.97까지로써 0.68보다 안쪽의 범위는 이렇다 할 피크가 발견되지 않고 있고 0.97보다 큰 경우는 노이즈가 심하게 나타났다. Fig. 9는 주파수 범위가 0~100 Hz인 경우의 속도 스펙트럼이다. 이때 여러 피크들의 혼합양상이 곡률을 가진 슈라우드면 가까이 부터 생성되어 있고 안쪽 허브방향으로 갈수록 그 크기가 대체적으로 감소하고 있음을 볼 수 있다. 그러나 속도 피크들의 주파수들은 그 크기가 관찰되는 동안은 다른 반경에서도 같은 주파수의 값을 가지고 있다. Fig. 10은 같은 무차원 반경비에 대해 주파수의 범위가 43~64 Hz인 경우의 속도 스펙트럼이다. 여기서는 괄목할 만한 피크가 하나 나타나고 그 크기는 대략 무차원 반경비가 0.8부근에서 최대로 나타나고 있다.

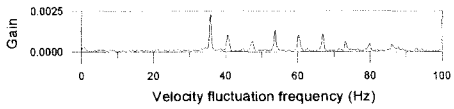


Fig. 7 Velocity spectra; $r/R_2=0.95$, $Re=2.53\times10^5$, 0~100 Hz

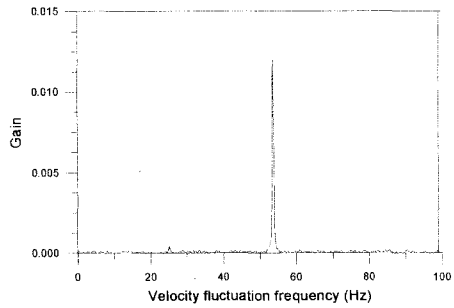


Fig. 8 Velocity spectra; $r/R_2=0.82$, $Re=3.80\times10^5$, 0~100 Hz

원주속도 스펙트럼의 피크가 관찰되는 낮은 주파수 영역은 유동의 거시적 교란에 의한 것이다. 측정점(ⓐ또는ⓑ)에서의 평균유속은 원판면의 국소 원주속도와는 상이하게 다르다(Fig. 4~6). 만약 평균유속이 유동장내 와류의 거동에 의한 총체적인 평균속도로서 나타난다고 가정하면 다음과 같이 간단하게 비정상 와류의 개수를 알아낼 수 있다. 즉 각각의 측정점에서의 데이터에서 원주방향 속도성분(u)과 원판의 접선속도($r\times\Omega$)를 이용해 다음에 나타낸 식 (1)를 통해 무차원화하여 와류의 개수를 추정할 수 있다. 이상적인 상태에서 N은 정수로 계산된다.

$$N=\frac{f}{\frac{u}{r\times\Omega}\times rps} \qquad (1)$$

동시회전원판의 실험에서는 회전수 rps가 빠를수록 그리고 원판사이의 거리가 증가할수록

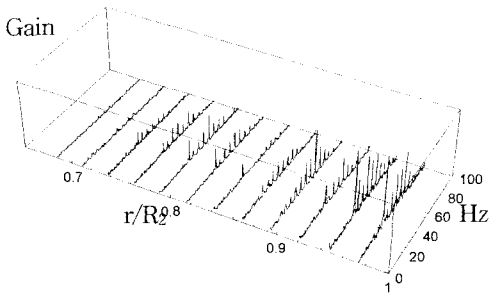


Fig. 9 Velocity spectra; r/R_2=0.68~0.97, $Re=2.53\times10^5$, 0~100 Hz

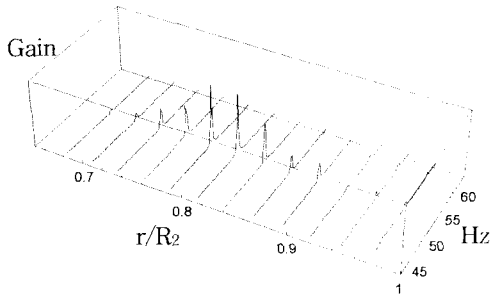


Fig. 10 Velocity spectra; r/R_2=0.68~0.97, $Re=3.80\times10^5$, 43~64 Hz

발생하는 와류의 개수 N이 감소하는 경향이 보고되었다[5]. 이러한 와류의 형태는 물을 사용한 저속 레이놀즈 수의 경우에서 실험적으로 관찰이 되기도 한다[1]. 그러나 공기의 고 레이놀즈 수에서는 가시화가 어렵다. 따라서 속도 스펙트럼은 이러한 경우에 내부 유동구조의 파악에 도움을 준다.

벽면-원판(ⓐ)의 경우 N의 수는 원판-원판(ⓑ)의 경우와 직접적으로 비교하긴 어렵다. 속도 스펙트럼은 회전수에 따라서 동시회전 원판의 경우가 잘 나타나지만 원판 반경을 따라 데이터를 잡아내는데는 어려움이 많았다. 그러나 본 실험(ⓐ)의 경우는 회전수에 따라 피크를 일관성 있게 얻기란 어려웠지만 반경에 따른 변화는 동시회전 원판의 경우보다 더 잘 관찰되었다. 레이놀즈 수가 3.80×10^5일 때 비정상 와류의 개수는 5개로 나타났다. 그러나 레이놀즈 수가 2.53×10^5일 때는 3~7개의 유동 구조물들이 분포되었다. 이러한 와류들은 주로 원판의 바깥쪽에 나타났으며 빠른 회전에서 강한 압력의 변화를 일으켜 벽면, 슈라우드면 그리고 원판에 큰 압력변동을 줄 수가 있다. 이러한 문제들은 하드디스크 드라이브나 광디스크 드라이브와 같은 정보 저장 기기등에서 디스크의 진동에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 오고 있으며 회전면에 대한 압력 분포력의 변동 주기와 크기는 중요한 연구 대상으로 생각된다.

3. 결 론

밀폐된 회전 원판의 내부 유동장 특성은 동시회전 원판과는 다른 양상을 나타낸다. 극간 중앙부의 원주속도는 무차원 반경 0.7까지 안정된 유동분포를 가진다. 강체 회전 영역은 상대적으로 낮은 레이놀즈 수에서 분명하다. 그리고 비정상 와류는 낮은 레이놀즈 수에서 와류군을 이루고 높은 레이놀즈 수에서 지배적인 와류가 존재하며 대략 무차원 반경 0.8 부근에 중심을 가진다.

4. 참고문헌

(1) Abrahamson,, S. D., Koga, D. J., and Eaton, J. K., 1988, "Flow Visualization and Spectral Measurements in a Simulated Rigid Disk Drive," IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. 11, No. 4, pp. 576-584

(2) Kobayashi, R., 1994, "Review : Laminar-to-Turbulent Transition of Tree-Dimensional Boundary Layers on Rotating Bodies," *Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering*, Vol. 116, pp. 200-211

(3) Tzeng, H. M., Munce, A. C., and Crawforth, L., 1994, "Quantitative Visualization of Surface Flows on Rotating Disks," *Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering*, Vol. 116, pp. 494-498

(4) Girard, J., Abrahamson, S., and Uznanski,, Kevin, 1995, "The Effect of Rotary Arms on Corotating Disk Flow," *Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering*, Vol. 117, pp. 259-262

(5) 유승철, 2000, "밀폐된 동시회전원판 내부유동에 관한 실험적 연구," 대한기계학회 춘계학술대회논문집 B, pp. 637-643