

밀폐된 동시회전 디스크 유동장에 대한 열선 지지대의 영향

공대위*·주원구**

The Effect of a Hot-wire Supporter on the Flow Between Corotating Disks in Shroud

Dae-Wee Kong*, and Won-Gu Joo**

Key Words : Corotating Disk(동시회전원판), Hot-wire(열선), Velocity Fluctuation(속도교란), HDD(하드디스크드라이브)

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. The distribution of pressure disturbance on disks has relation to flow structure. To investigate the flow structure, time-resolved hot-wire measurements of the circumferential velocity component were obtained for the flow between the center pair of four disks of common radius R_2 corotating at angular velocity Ω in a fixed cylindrical enclosure. Hot-wire supporter acts as an obstruction in this case. The effects of rotating speed and size of hot-wire supporter diameter between disks on the flow driven by disks were investigated. Velocity spectra at the fixed space were measured to obtain the structure of inner and outer region in flow field.

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 덮개(shroud)로 밀폐된 내부에서 동시에 회전하는 허브(Hub)와 디스크의 형태로 간단하게 묘사될 수 있다. 이러한 기본적인 형태는 HDD 뿐만 아니라 터보기계와 같은 여러 가지 회전 기기 등에 응용될 수 있다.

Lenneman^[1]은 장애물이 없는 경우에, 작동유체를 물, 산란입자는 알루미늄 가루를 사용하여, 슈라우드에 둘러 싸여 회전하는 단일 혹은 동시 회전 디스크 내부의 유동장을 가시화 하였다. 회전속도를 증가시키면서 원주 주변의 주기적인 유입, 유출 유동과 반경 방향의 유입, 유출유동에 의한 큰 스케일의 등각 나선구조의 붕괴를 관찰하였다.

Abrahamson^[2]은 작동유체를 물로 하여 염색법을 이용해 톱니모양의 정다각형을 나타내는 유동이 원주방향으로 주기적이고 축방향 와류 성분과 관련이 있음을 보였다. Lennemann의 실험과 마찬가지로 그의 실험은 저레이놀즈 수에 해당하는 것으로 유동 가시화에는 무리가 없으나 고레이놀즈 수 유동장에 대해서는 적용할 수 없었다. 현재도 고속 회전 디스크에 의한 유동장의 내부 구조를 가시화 하는 데에는 어려운 점이 많다.

Schuler^[3]은 이론적, 수치적인 연구를 통해서 횡단류(cross-stream flow)가 원심력과 반경 압력구배 사이의 불균형에 의해 발생되고 이로 인한 진동은 원주 속도 성분에 강한 진동을

일으키는 원인이라고 하였다. 낮은 속도에서 3차원 비정상 유동의 계산은 다각형 노드들이 축방향 와류 성분의 초점(foci)에 해당한다는 것을 보여주고 있다. 이러한 유동의 계산은 디스크면의 압력을 구하는데 실험적으로 어려운 점을 보완해 줄 수 있다. 그러나 고속에서의 유동장의 계산은 여러 가지 어려움이 있고 이제 까지 많은 난류 모델들이 이 유동장을 묘사하기 위해 적용되어 왔으나, 비정상적 유동구조를 명확하게 계산하지는 못하고 있다.

Joo^[4]은 밀폐된 슈라우드 내부의 동시회전 디스크에 의한 유동장의 원주방향 속도성분을 laser Doppler velocimeter (LDV)로 측정하였다. 그는 디스크 사이의 간격이 강제회전영역에 미치는 영향에 대해서 조사하였다. 그리고 무차원 지배주파수를 도입하여 외부영역(outer region)에서의 와류의 개수를 속도 스펙트럼을 통해 구하였다. 그러나 모든 반경에 대해서는 조사되지 않았다.

디스크의 고유진동수를 구하는 데에 있어 디스크 주위의 유체는 동적불안정(flutter)을 일으키는 주요인자이다. 이러한 유체가 회전하는 디스크의 면에 의해 밀폐된 공간에서 어떤 구조를 가지고 회전한다. 이때 디스크의 면에는 압력이 작용하게 되는데 이러한 압력의 분포는 여러 가지 스케일(scale)을 가지는 유동의 교란성분이 된다. 이는 고속 회전일 때 디스크의 진동에 더욱 큰 영향을 미친다. 이러한 문제는 고속화 되어가는 HDD에서 중요한 관심사중 하나이다. 따라서 HDD 내부의 유동 구조를 파악하는 것은 중요하다. 그러나 실험적으로 해석적으로 어려운 점이 많다. 본 연구에서는 밀폐된 덮개 안에 동시 회전하는 디스크에 의해 유발된 유동장의 구조를 조사하기 위하여, 위·아래 디스크 중앙면에서 원주방향 속도성분을 열선으로 측정하였다. 열선은 속도센서로서 지지대(supporter)에 의해 내부 유동장

* 연세대학교 기계공학과 대학원, dw409@yonsei.ac.kr

** 연세대학교 기계전자공학부, joo_wg@yonsei.ac.kr

으로 삽입된다. 따라서 지지대 자체가 내부 유동장 자체에 하나의 교란유발 장애물(obstruction)로 작용하게 된다. 이는 장애물이 들어간 유동장을 해석하기에 앞선 기초 특성을 파악하기 위함이다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

고정된 슈라우드로 밀폐되어 동시에 회전하는 디스크 실험장치를 Fig.1과 같은 모양으로 제작하였다. 실험장치는 네 장의 디스크를 하나의 구동장치를 통하여 회전시킬 수 있도록 하였다. 측정부위의 기하학적 형상을 변화시키는 파라미터는 디스크 간격이다. 이는 디스크 사이의 허브를 교체하여 변화시킬 수 있다.

Fig.1에서 축 반경 R_0 , 허브 반경을 R_1 , 디스크의 반경을 R_2 로 나타내었고, 디스크와 디스크 사이의 간격은 H , 디스크 끝단과 슈라우드 사이의 간격은 a 이다. 디스크의 두께는 b 이다. 재료는 $R_1=66$ mm, $R_2=66$ mm, $H=20, 40$ mm, $a=4$ mm, 그리고 $b=8$ mm이다.

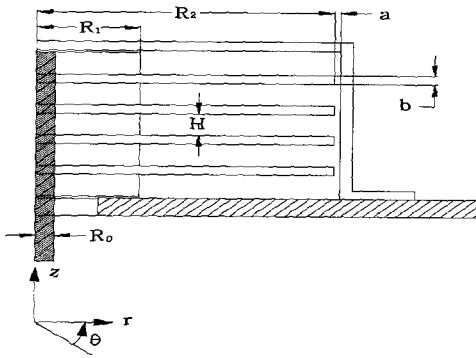


Fig. 1 Nomenclature

본 실험에서는 두 가지 크기를 가지는 열선을 사용하여 디스크 내부 유동의 원주방향 속도성분을 측정하였다. 열선에 대한 재료는 표 1에 제시되었다.

2.3 실험방법

열선 지지대가 슈라우드를 관통하기 위한 구멍은 직경이 약 $H/2$ 이다. 구멍은 밀폐되지 않고 지지대와 슈라우드가 비접촉되도록 하였다.

디스크의 회전속도는 50 rpm에서 1500 rpm이며 해당 레이놀즈 수는 1.26×10^4 에서 3.78×10^5 사이로써 실험이 이루어 졌다. 구동 모터는 삼상 AC 모터이며 인버터를 통해 회전수를 조절하였다. 실험을 실시한 회전범위 내에서는 안정적인 회전을 하였다.

신호는 하드웨어적으로 선형화처리가 되며 1만 Hz의 포집율로 1초간 데이터를 받아 그중 5000개의 데이터를 가지고 DFT를 수행하였다. DFT는 상용 프로그램인 Mathematica (Wolfram

Table 1 Hot-wire types

Hot-wire	Type	Wire length	Supporter diameter (d)
Large Hot-wire	I	2.0 mm	4.6 mm
Small Hot-wire	I	1.0 mm	2.6 mm

Research Co.)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 평균 유동장

(1) 원주방향 평균속도분포

Fig.2와 3은 큰 열선 (Large hot-wire)을 이용하여 디스크 중앙면에서 측정된 원주방향 평균속도 분포이다. Fig.2는 $Re=1.26 \times 10^4$ 부터 1.01×10^5 까지 일 때이고, Fig.3은 $Re=1.01 \times 10^5$ 부터 3.78×10^5 일 때이다. 열선은 슈라우드 면을 통해 내부 유동장으로 삽입된다. 따라서 무차원 반경이 작은 경우의 결과는 열선과 지지대가 주 유동장에 미치는 영향이 크다. 강제회전영역에서 상대적으로 저 레이놀즈 수의 경우를 제외하고 반경 대 원주방향 속도 비가 유지된다. 그러나 저 레이놀즈 수에서 허브면 쪽으로 갈수록 원주 속도가 더 낮아지고 있다. 이는 레이놀즈 수가 낮을 수록 점성의 영향이 커지는 것을 의미한다. $Re=1.01 \times 10^5$ 이하에서는 높은 레이놀즈 수 일 수록 무차원 원주속도가 점차 높아지지만, $Re=1.01 \times 10^5$ 이상에서는 높은 레이놀즈 수 일 수록 무차원 원주속도가 점차 낮아진다.

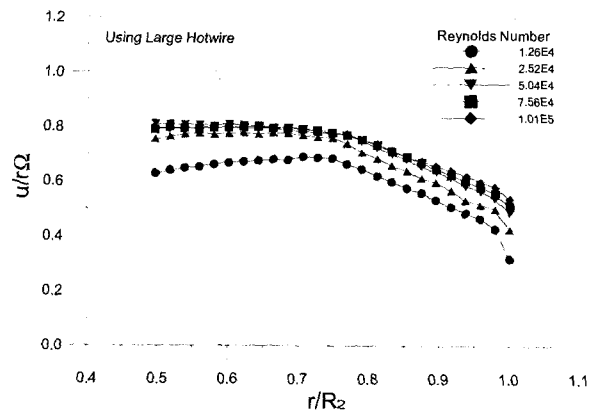


Fig. 2 Radial profiles of the circumferential mean velocity at the midplane between the center pair of the four disks using large hot-wire. ($H/R_2=0.105$, $Re=1.26 \times 10^4 \sim 1.01 \times 10^5$)

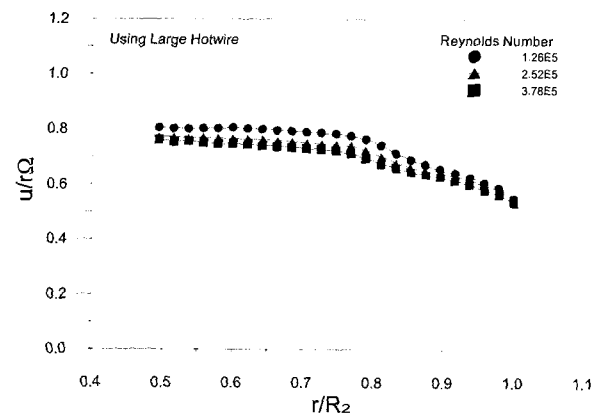


Fig. 3 Radial profiles of the circumferential mean velocity at the midplane between the center pair of the four disks using large hot-wire. ($H/R_2=0.105$, $Re=1.26 \times 10^5 \sim 3.78 \times 10^5$)

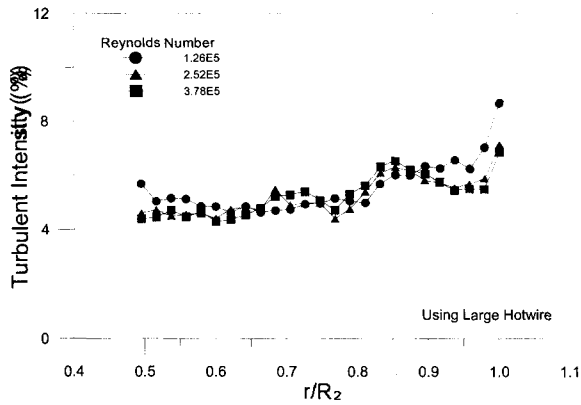


Fig. 4 Radial profiles of the turbulent intensity at the midplane between the center pair of the four disks using large hot-wire ($H/R_2=0.105$, $Re=1.26 \times 10^5 \sim 3.78 \times 10^5$)

(2) 원주방향 속도성분의 난류강도분포

Fig.4는 Fig.3의 원주방향 평균속도 분포에 해당하는 난류강도이다. 이는 큰 열선(large hot-wire)을 사용한 것이다. 디스크의 끝단에서는 높은 난류강도를 보인다. 이는 정지해 있는 슈라우드 면으로부터의 강한 전단력 때문이다. $Re=1.26 \times 10^5$ 일 때, 디스크 끝단, 슈라우드 면 가까이에 보다 높은 레이놀즈 수 유동의 경우에 비해 더 큰 난류강도 분포를 보인다. 강제회전영역과 외부영역(outer region)사이의 천이영역구간에서 난류강도의 피크가 감소하는데, 그 양상은 $Re=2.52 \times 10^5$ 와 3.78×10^5 의 경우에서도 분명하다. 특히 여기에서 나타나는 난류강도의 봉들은 주기적 진동의 유동교란과 관련이 있다. 이는 고회전 일 수록 잘 나타난다. 저주파 진동의 교란이 강하게 나타나는 반경위치에서 난류강도는 높다.

3.2 열선 지지대 직경에 따른 영향

Fig.5는 두 가지 경우의 열선 지지대로 측정된 원주속도분포를 laser Doppler velocimeter (LDV)로 측정된 결과와 비교한 것이다. LDV는 내부 유동장에 장애물이 없는 경우이다. 먼저 LDV의 경우 강제회전 영역은 모두 무차원 원주속도가 1보다 크게 관찰이 된다. 이러한 현상은 다른 저자들의 실험결과^[3]에서도 나타난다. 이는 유동의 비정상성(unsteadiness)에 기인하는 것으로 생각

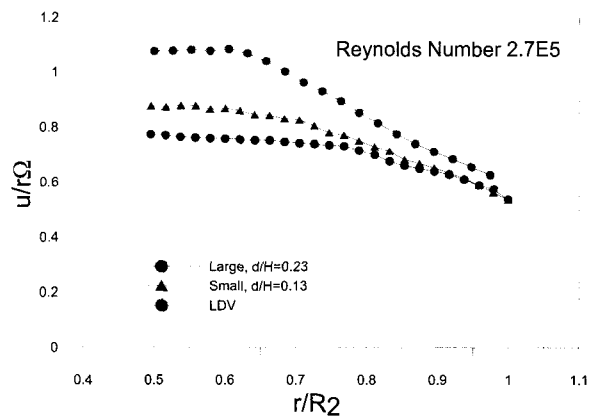


Fig. 5 The comparison of the radial profiles of the circumferential velocity using hot-wire to the one using LDV ($H/R_2=0.105$, $Re=2.70 \times 10^5$).

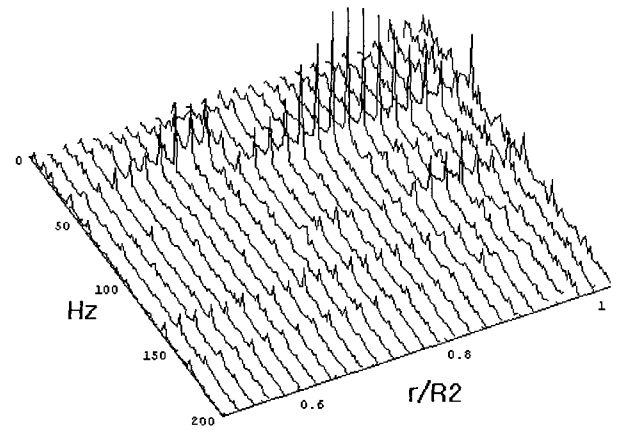


Fig. 6 Velocity spectra obtained with a small hot-wire anemometer in circumferential velocity component between the disks ($d/H=0.13$, $H/R_2=0.105$, $Re=3.78 \times 10^5$).

되고 있다. 디스크 사이 중앙면에서의 장애물로서의 열선 지지대는 주유동 방향의 속도성분을 감소시킨다. d/H 가 0.23일 때가 0.13일 때보다 더 크게 주 속도성분을 감소시킨다. 속도는 d/H 가 작을 수록 LDV 측정 결과에 회복되어야 한다. 그런데 속도회복은 주로 강제회전 영역에서의 이루어지고 있다. 외부영역은 그다지 속도회복이 나타나지 않는데 이는 열선 지지대가 슈라우드 부근에 측정시엔 그 영향이 작기 때문이다. 그러나 고레이놀즈 수 일 수록 강제회전 영역에서 속도를 회복하려는 성질이 급하게 크게 나타난다.

Fig.6은 작은 열선(small hot-wire)으로 측정된 원주방향 속도성분의 주파수 분석결과이다. d/H 가 0.13인 지지대가 사용되었다. 외부영역(outer region)에서의 두드러진 1차 피크가 나타나고 이는 이 유동장의 지배주파수(dominant frequency)가 된다. $Re=3.78 \times 10^5$ 일 때 지배주파수 값은 56 Hz이고 내부영역(inner region)에서의 주요 피크의 주파수는 36 Hz이다. 여기서 내부영역의 피크는 반경방향으로 자라다가 천이영역에서 급격히 사라진다. 지배주파수는 외부영역의 반경방향의 중간지점에 가장 큰 피크를 나타낸다. 디스크 간격 H/R_2 가 작아질수록 강제회전 영역의 크기가 커진다^[4]. 따라서 디스크에 작용하는 외부교란의 무게중심이 디스크 간격에 따라 이동할 수 있다.

Fig.7은 큰 열선(large hot-wire)으로 측정된 원주방향 속도성분의 주파수 분석으로써 회전에 따른 지배주파수의 거동을 나타내고 있다. 주파수 값들은 작은 열선으로 측정된 결과와 같기 때문에 이에 관한 그래프는 생략하였다. 열선에 의한 주파수 결과와 내부에 장애물이 없는 LDV에 의한 주파수 결과는 같은 기울기를 나타낸다. 그러나 400 rpm과 600 rpm회전수가 증가할수록 기울기가 변하는 시점은 열선으로 측정된 경우가 더 일찍 일어난다.

4. 결론

HDD에서와 같은 동시회전 디스크에 의한 내부 유동장은 고회전일 수록 더 큰 진폭을 가지는 저주파의 진동 교란성분을 가진다. 이러한 주파수는 열선이나 LDV 등에 의한 속도측정 장치들을 이용해 검출할 수 있다. 이러한 주파수 정보는 내부 유동장의 구조를 파악하기 위한 중요한 것이다. 본 실험에서는 다음과 같은 두드러진 결과들을 얻을 수 있었다.

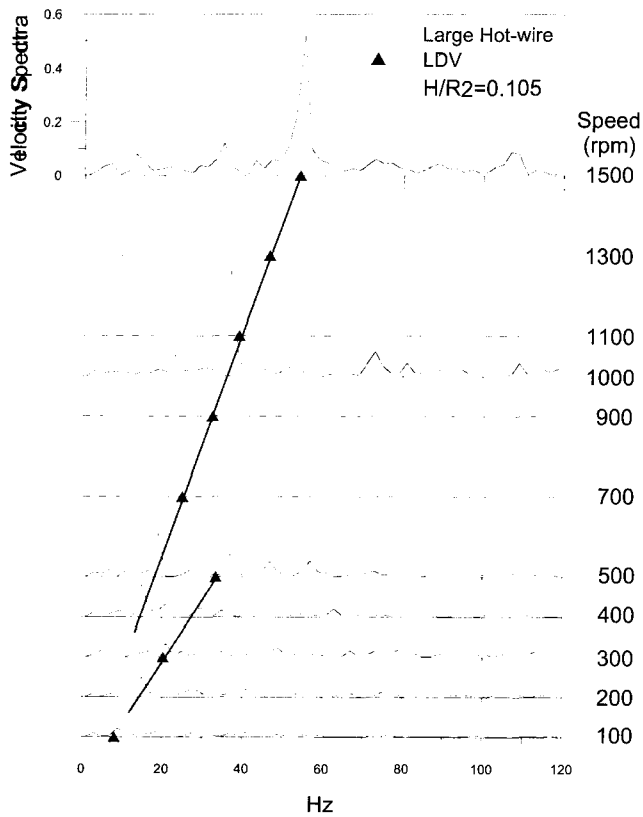


Fig. 7 Velocity spectra obtained with a large hot-wire anemometer in circumferential velocity component between the disks ($d/H=0.23$, $H/R_2=0.105$, $Re=1.26 \times 10^4 \sim 3.78 \times 10^5$, Gray mark by LDV measurement).

유동장에 삽입된 지지대의 영향으로 원주방향 속도성분의 평균크기가 감소한다. 더 큰 굽기의 지지대일 수록 원주방향 평균 속도의 감소는 더욱 크다. 지지대를 삽입한 열선에 의한 유동장의 주파수 특성과 여타의 장애물이 없는 경우의 유동장의 주파수 특성에는 차이가 나타나지 않았다. 고회전일 수록 반경방향에 따른 난류강도는 특정 반경위치에서 붐을 이루는데 고회전일 수록 내부영역(inner region)에서 두드러진다. 이러한 난류강도 수치는 저주파의 유동교란과 연관이 있다.

지지대가 삽입된 유동장에서 반경에 따른 속도교란 성분의 주파수분포는 외부 영역의 경우 지배주파수가, 내부 영역의 경우 2차 주파수가 나타난다. 지배주파수와 2차주파수의 값은 천이영역을 경계로 차이가 있다. 지배주파수의 피크들은 외부영역의 중심에 가장 큰 교란이 나타나지만, 2차주파수의 피크들은 천이영역에서 갑자기 소멸된다.

디스크의 회전이 커질 수록 지배주파수는 일정한 기울기를 가지고 증가한다. 그러나 그 기울기가 변하는 천이속도 구간이 LDV로 측정된 장애물이 없는 경우보다 지지대를 유동장에 삽입해 열선으로 측정된 경우에서 더 일찍 일어난다. 기울기 자체는 유동의 구조의 한 특성을 의미한다. 기울기가 변하면 유동구조의 특성이 달라진다. 이러한 천이속도는 직접적으로 회전 디스크가 서로 다른 모드로 진동하도록 하는 유동교란의 주파수특성의 차이를 구분하는 것으로 생각할 수 있다. 따라서 천이속도에서는 막대와 같은 장애물이 있는 동시회전 디스크 내부 유동장의 가진 모드수가 장애물이 없는 같은 회전수의 유동장에서 더 높은 차수로 나타난다.

후기

본 연구는 한국과학재단지정 정보저장기연구센터의 지원(과제번호 : R11-1997-042-100002-0)을 받아 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Lenneman, E., Aerodynamic Aspects of Disk Files, IBM J. RES. DEVELOP, Vol. 18, No. 6 (1974), pp.480-488
- [2] Abrahamson, Scott D., Eaton, John K., and Koga, Dennis J., The flow between shrouded corotating disks, Phys. Fluids A, Vol. 1, No. 2 (1989), pp.241-251
- [3] Schuler, C. A., Usry, W. Weber, B., J. A. C. Humphrey, and Grief, R., On the flow in the unobstructed space between shrouded corotating disks, Phys. Fluids A Vol. 2, No. 10 (1990), pp.1760-1770
- [4] Dae-Wee Kong and Won-Gu Joo, The Effect of Distance Between Disks on The Flow Driven by Co-rotating Disks in a Cylindrical Enclosure, AFI (2001), pp.163-168