

HDD 내 유동장에 대한 PIV 계측 기술의 적용

Application to the Flow in HDD Using PIV Measurement

공대위*·주원구**·도덕희***

Dae-Wee Kong, Won-Gu Joo and Deug-Hee Do

Key Words : HDD(하드디스크드라이브), Flow Visualization(유동가시화), PIV(Particle Image Velocimetry)

ABSTRACT

Hard disk drives (HDD) in computer are used extensively as data storage capacity. PIV measurement system was used for 2-dimensional visualization of the unsteady flow between co-rotating disks in air both with a shroud and both with a actual-like case. Geometric parameters are gap height (H) between disks in the case of shroud. The lobe-structured boundary between inner region and outer region was visualized, 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 7.96×10^2 to 1.43×10^4 , and decreases as the disk speed increases. In the case of a actual-like case, the boundary between inner region and outer region appears clearly when head position located at outer diameter with no damper. It is detected with a case of head position middle diameter that the tip wake is generated behind HGA using PIV measurement and calculation.

1. 서론

컴퓨터 산업에서 정보저장기기중의 하나인 하드디스크 드라이브(이하 HDD)는 크기가 소형화 되고, 회전속도가 빨라지고 있다. 회전디스크는 유동 인한 유동의 영향은 HDD의 성능에 영향을 미칠 정도로 중요하게 여겨지고 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 계측이 주류를 이루어 왔다. 그러나 교란의 특성을 이해하기 위해서는 2차원 이상의 가시화 정보가 필요하다.

Lenneman⁽¹⁾은 장애물이 없는 경우에, 물 속에 산란 입자로서 알루미늄 가루를 사용하여, 슈라우드에 둘러 싸여 회전하는 단일 혹은 동시회전 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 등⁽²⁾은 역시 물을 작동 유체로 하여 염색법을 이용해 톱니모양의 정다각형을 나타내는 유동을 가시화 하였다. 이는 원주방향으로 주기적이며 축방향 외류 성분과 관련이 있음을 보였다.

PIV 계측기술이 발전하면서 회전디스크 유동장 가시화에 많은 변화가 이루어지고 있다. Nakamura 등⁽³⁾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⁽⁴⁾은 공기 중에서 동시회전하는 디스크에 대해 PIV 기법으로 내부유동을 가시화하였다. 디스크의 반경이 190 mm로 보통의 HDD내의 디스크보다 대략 4배 정도 크다. 그는 레이저에 CCD 카메라를 이용하고 추적 입자로는 glass sphere를 사용하였다. 이처럼 PIV 기법은 동시회전 디스크 유동장에 대한 새로운 조사를 가능하게 하고 있다.

본 연구는 공기 중에서 동시회전하는 디스크 사이의 유동장에 대해 2차원적인 유동 가시화를 PIV 기법을 응용하여 수행하였다. 디스크를 밀폐하고 있는 케이스는 두 가지로써 하나는 원통형(shroud)이고 다른 하나는 상부 케이스를 투명하게 만든 실제 HDD이다. 슈라우드 케이스에서는

* 연세대학교 기계공학과 대학원
E-mail : dw409@yonsei.ac.kr
Tel : (02) 2123-2815, Fax : (02) 312-2159

** 연세대학교 기계공학부

*** 한국해양대학교 기계정보공학부

동시회전 디스크 유동장의 내부영역 (inner region) 과 외부영역 (outer region) 사이의 경계를 가시화 하였으며 이를 통해 두 디스크 사이의 거리 (H) 가 어떤 영향을 미치는지에 대해 조사되었고, 실제 HDD 에서도 이와 같은 경계가 나타날 수 있는가를 확인하였다. 그리고 PIV 계산이 실제 존재하는 틱 볼텍스와 같은 작은 스케일의 교란성분도 감지할 수 있는지를 확인하는데 목적을 두고 있다.

두 디스크 사이의 크기와 레이놀즈 수 (Re_R) 의 범위가 Fig.1 에 나타나 있다. 영역 I 은 이차원 축대칭 정상 유동 (steady flow) 을 의미한다. 영역 II 와 III 은 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 디스크와 슈라우드 사이의 틱새가 없는 경우의 수치해석을 바탕으로 여러 저자들의 보고에 의해 구성된 것을 인용한 것이다. HDD 의 경우 5,400 rpm ~ 10,000 rpm 의 작동속도와 두 디스크 사이의 일반적인 간격을 고려하면 Fig.3 의 circular mark 영역과 같다.

내부영역과 외부영역의 경계 면에서 나타나는 로브 구조 (lobe structure) 는 영역 II 에서 발견되는 것이다. 영역 I 과 같은 층류 영역은 조사 대상이 아니지만 H/R 이 0.063 인 경우 영역 I 에 걸쳐져 있다.

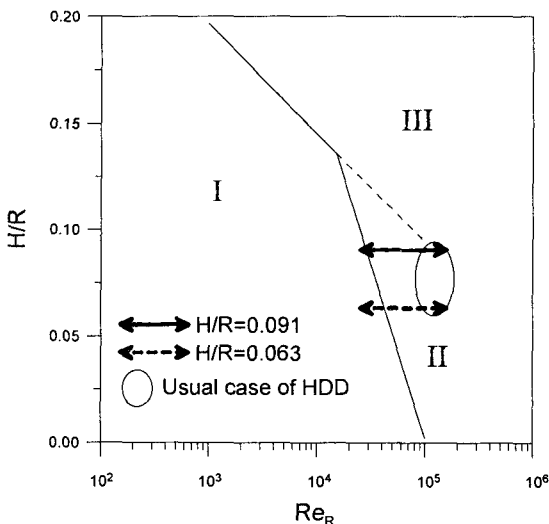


Fig. 1 Study case on the qualitative bifurcation diagram reported by (5) for the flow between a pair of disks co-rotating in a fixed cylindrical enclosure with no gap between the disk-edge and shroud.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 슈라우드 케이스 실험장치

고정된 슈라우드에 밀폐되어 동시에 회전하는 디스크 실험장치를 Fig.2 와 같은 모양으로 제작 하였다. 실험장치는 두 장의 디스크를 DC 모터로 회전시킬 수 있도록 하였고, 1 rpm 단위로 조절 가능한 모터 드라이브를 통해 회전속도를 제어하였다. 허브 반경, 디스크 반경 (R), 디스크 두께는 각각 30 mm, 47.5 mm, 1.3 mm 이다. 두 디스크 사이의 거리 (H) 는 3.0 mm 와 4.3 mm 의 두 가지 경우이다. 디스크 끝단과 슈라우드 사이의 거리 (G) 는 0.5 mm 이다. 케이스는 레이저 시트가 통과되고 위에서 측정영역이 보이도록 투명아크릴로 제작하였으며 연마를 통해 조도를 높였다.

Fig.3 은 가시화를 위한 계측시스템의 개략도 이다. 기본 구성은 일반적인 PIV 시스템과 유사하다. 2 차원 유동장을 측정하기 위해 하나의 CCD 카메라를 사용했으며 속도가 30 fps, 해상도는 1024x1024 pixels 이다. 120mJ/pulse, 15Hz 의 Nd:YAG 레이저가 사용되었으며 레이저와 카메라는 동기 되어 있다. 레이저 조사는 두 디스크 사이 (mid-span) 의 수평면에 놓이고 측정영역에서의 레이저 두께는 1mm 이다.

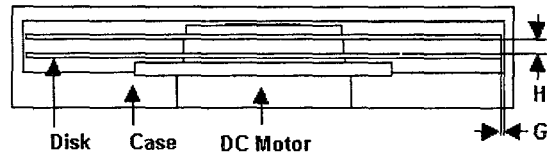


Fig. 2 Schematic of the test rig with a cylindrical case

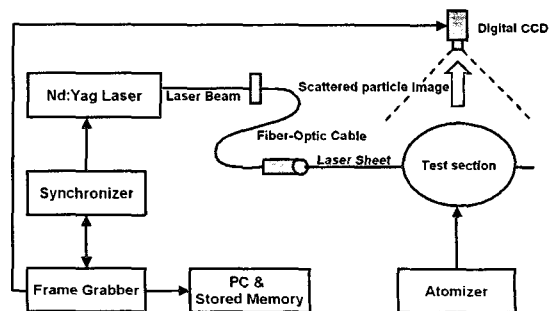


Fig. 3 Schematic diagram of visualization

유체는 회전하는 디스크의 면에 의해 Ekman 경계층을 이루면서 중심 축으로부터 바깥쪽으로 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. 가시화 입자는 평균 직경이 $1\mu\text{m}$ 가 안 되는 것을 사용하였다. 원심력에 의한 입자의 반경방향 속도는 CCD 카메라의 해상도 고려해 볼 때 노출시간 동안 반 픽셀의 크기를 넘기에 충분히 못 미치고 있다. 따라서 사용하고 있는 입자는 유동장을 충분히 따라가고 있다고 판단한다. 입자는 주입된 상태에서 주입구를 봉쇄하고 유동이 안정화 된 후에 가시화를 하였다.

실험은 디스크 간격과 틱-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 7.96×10^2 에서 1.43×10^4 이다.

2.2 실제 HDD 실험장치

암과 댐퍼가 없는 경우와 암만 있는 경우 그리고 댐퍼까지 포함한 세 경우에 대해 가시화를 하였다. 회전속도는 7,200 rpm 이다. 그리고 계산을 위해 영역을 Fig. 4 와 같이 다시 설정하여 측정하였다. 측정영역은 카메라 해상도와 레이저 밝기, 입자의 산란정도를 종합적으로 고려한 측정크기이다. 측정 위치는 슈라우드 케이스에서와 마찬가지로 동시 회전 디스크 사이(midspan)이다. 윗면과 옆면은 투명 케이스이며 옆면은 특히 실제 HDD 케이스의 형상(Samsung)을 모사하여 만들어 졌다.

슈라우드 케이스의 실험방법과 마찬가지로 입자를 충전한 이후에 충전입구를 봉쇄하고 안정화를 위한 시간을 가진 뒤에 측정을 시도하였다.

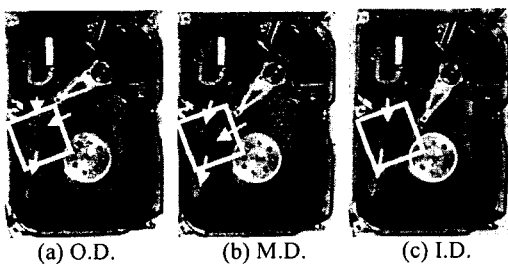


Fig. 4 Three cases of head positions. Squared area means view port by CCD camera.

3. 결과 및 고찰

3.1 로브 구조의 기본 형태

Fig.5 는 동시회전 디스크 사이의 유동장을 가시화 한 것으로 레이놀즈 수 Re_R 의 변화에 따른 유동 패턴을 보여주고 있다. 추적입자가 충전된 곳은 어둡게 나타난다. 천이 경계 속도 (transition boundary speed, 영역 I 과 II 사이) 보다 큰 레이놀즈 수에서는 잘 알려진 로브 형태의 내부 영역(inner region)과 외부 영역(outer region) 사이 경계면이 나타난다. 이러한 로브 구조는 외부영역의 볼텍스 들에 의해 나타난다. 특히 볼텍스 코어(core)가 디스크 회전방향과 반대이기 때문에 층류의 경계면이 슈라우드 쪽으로 끌려 들어감으로써 나타나는 구조이다.

3.2 두 디스크 사이 간격 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. 로브의 개수가 4 개이하인 경우에는 이러한 로브 구조가 볼텍스의 큰 length scale 로 말미암아 사각형 또는 삼각형처럼 나타나게 된다. 본 가시화는 디스크와 디스크 사이의 중간 면이므로 외부 영역에서의 유동은 음의 반경방향으로 향한다.

3.3 볼텍스 개수와 레이놀즈 수(Re_H)와의 관계

Fig.6 은 $Re_H = QRH/\nu$ 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. 이러한 경우는 유동이 천이경계속도 근방이기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다. 볼텍스의 개수와 관계하여 회전수에 대해 도시하는 방법에는 여러 가지가 있을 수 있다. 예를 들어 St number 나 wave number, 무차원 지배주파수 등으로 표현한다. 그러나 회전수의 경우에는 레이놀즈 수로 나타낼 수 있는데 Fig.6 에서 처럼 레이놀즈 수가 H 와 R 에 대해 모두 고려할 수 있도록 QRH/ν 로 정의되는 것이 바람직하다.

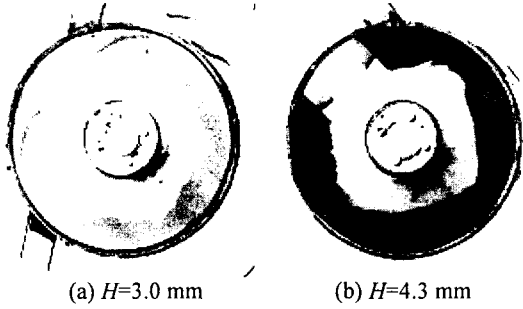


Fig. 5 Effect of length of space between disks on lobe structure at $Re_R = 1.56 \times 10^5$; $R = 47.5$ mm.

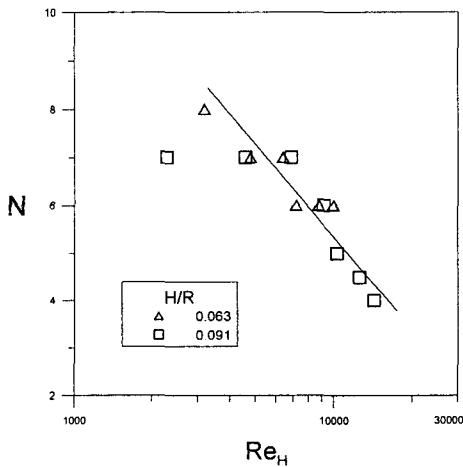
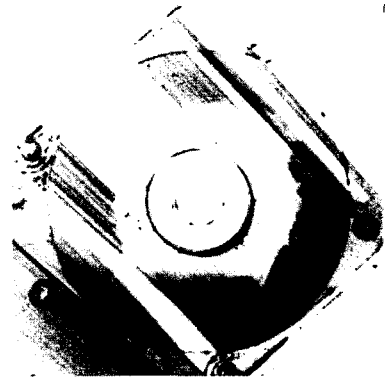


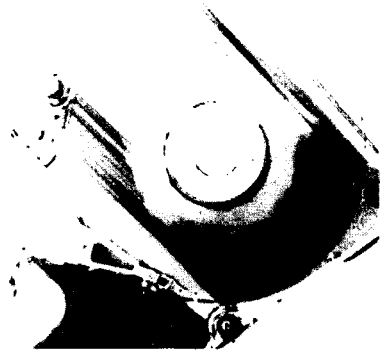
Fig. 6 Vortex number correlated with Reynolds number ($Re_H = \Omega R H / \nu$).

3.4 HDD에서의 내/외부 경계면의 관찰

실제 HDD에서도 Fig.5에서 가시화 된 내부영역과 외부영역 사이의 경계면이 어떻게 나타나는지를 Fig. 7에서 보여주고 있다. 슈라우드 케이스의 경우와는 다름을 볼 수 있다. Fig.5a는 암과 댐퍼를 제거한 경우이고 Fig.5b는 암을 설치하되 헤드 위치가 O.D인 경우이다. 이 두 가지 경우에서 보면 뚜렷하지는 않지만 내부 영역이 존재함을 알 수 있다. 케이스는 슈라우드와는 달리 개폐구간이 있고 또 원형도 아니기 때문에 로브 구조와 같은 유동패턴은 나타나지 않는다. 그러나 슈라우드 케이스에서와 마찬가지로 내부유동은 유동교란의 입장에서 안정된 영역이고 외부영역은 교란이 심한 영역이다. 따라서 슬라이더가 외부 영역에 걸치게 되면 유동교란을 많이 받을 것이라 예상된다. Fig.7c는 댐퍼를 설치한 경우로 내부유동의 반경



(a) Without arm and disk damper



(b) With an arm only



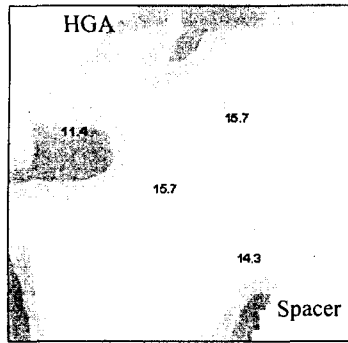
(c) With an arm and a disk damper

Fig. 7 Boundary between inner region and outer region, 7200 rpm.

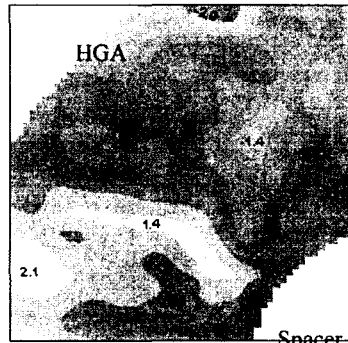
방향 크기가 댐퍼 내부 반경의 약 절반 정도의 크기 이하로 감소하였다. 댐퍼는 Squeeze film 댐핑 효과로써 디스크의 진동을 개선하는데 있다.

3.5 암 후방에서의 비정상 속도분포

Fig.8~10은 Fig.4에 나타난 측정영역에서의 PIV 측정결과를 보여준다. Fig.8, 9, 10은 각각 헤드의

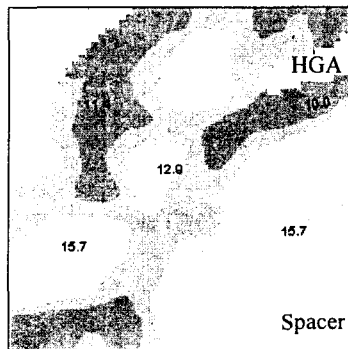


(a) Circumferential velocity contour

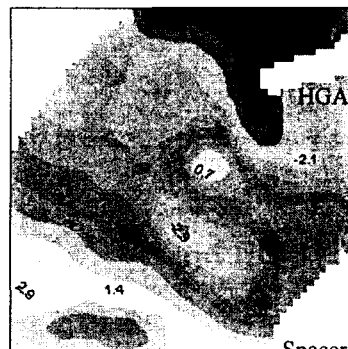


(b) Radial velocity contour

Fig. 8 Velocity contour between disks with head position O.D. using PIV measurement.

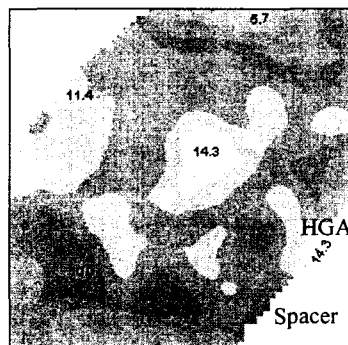


(a) Circumferential velocity contour

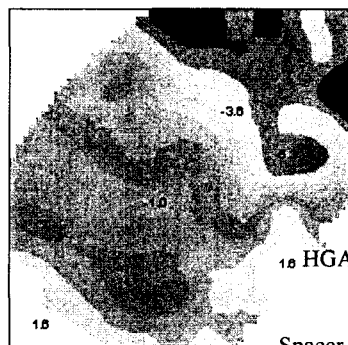


(b) Radial velocity contour

Fig. 9 Velocity contour between disks with head position M.D. using PIV measurement.



(a) Circumferential velocity contour



(b) Radial velocity contour

Fig. 10 Velocity contour between disks with head position I.D. using PIV measurement.

위치가 디스크 유로의 외각, 중간 그리고 spacer 에 근접한 세 가지 이다. 전반적으로 방향 속도의 크기는 원주속도의 약 10% 정도이다. 헤드위치가 O.D.인 경우 전체적으로 유로의 중간에서 유속이 크고 댐퍼가 외부영역에 걸쳐 있는 상태에서 Spacer 근방에서도 속도가 중간 유로의 것과 비슷하게 나타난다. 댐퍼가 없다면 Spacer 근방의 원주 속도는 현저하게 감소할 것이다. Fig.9 에서 HGA 가 M.D.일 경우 spacer 부근에서 원주속도가 크다. 이는 압과 spacer 사이에 노즐효과가 있기 때문이다. 반경방향 속도성분을 보면 HGA 위쪽(반경방향 바깥쪽)으로 유동이 흘러 들어오고 있는데 이는 압이 디스크 면 중앙으로 들어오면서 바깥쪽에서 틈이 생겼기 때문이다. 그리고 HGA 유로 후방으로 반경방향 속도 성분을 보면 크기의 부호가 반복되는 주기적인 작은 스케일의 성분이 있음을 알 수 있는데 이는 틈 볼텍스이다(Fig.9b). 압이 디스크 유로를 전체적으로 덮고 있는 경우(Fig.10), 바깥쪽에서 넓게 들어온 유동이 주유동에 합류하며 압 후방은 다른 두 가지의 경우보다 교란의 정도가 감소해 나타난다. 이는 압이 장애물로써 유동을 전반적으로 가로 막고 있기 때문이다. 현재 측정된 영역의 크기는 속도 교란 성분 주파수대를 폭 넓게 잡아내지 못한다. 따라서 영역을 확대하여 보다 넓은 영역에서 계산을 수행하는 것이 바람직하며 이를 위해서 HDD 유동장에 대한 PIV의 측정기술을 더욱 개선할 여지가 있다.

4. 결 론

본 연구는 공기 중에서 고속 회전하는 밀폐된 디스크 사이의 유동장에 대해 PIV 를 이용하여 유동의 내부영역과 외부 영역의 경계 면을 가시화하는 기술을 개발하였다. 이를 통해 실제 HDD 내의 고속 회전하는 디스크에 의한 유동장을 공기 중에서 가시화할 수 있게 되었다. 그리고 PIV 계산을 통해 틈 볼텍스가 나타남을 확인하였다.

실린더형 슈라우드 케이스의 경우 두 디스크 사이의 거리가 작을 수록 지배적인 볼텍스의 수는 감소한다. 이러한 로브는 알려진 바와 같이 외부영역의 지배적인 볼텍스의 거동에 의해 형성되는데, H 에 따라 각각 특정한 회전수 이상에서만 나타난다.

실제 HDD 유동장으로의 적용은 전체적인 가시화로 내부영역과 외부영역의 경계면을 확인할 수 있으나 계산을 위해서는 국소적인 영역만을 측정할 수 있었다. 보다 넓은 영역에 대해 계산이 가능하게 되기 위해선 입자 산란도, 레이저 강도, 카메라 해상도 등의 보다 높은 개선이 요구된다.

후 기

본 연구는 한국 과학재단 지정 정보 저장기기 연구센터의 지원(과제번호 : R11-1997-042-12002-0)을 받아 이루어졌으며, 이에 감사드립니다. 아울러 여러 도움을 주신 삼성종합기술원 관계자 여러분에게도 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (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.