

< 논문 >

광 디스크 드라이브 내부 유동장에 관한 연구

정지원* · 조형희* · 최명렬**

(2004년 9월 1일 접수, 2004년 11월 27일 심사완료)

A Study on Flow Fields in an Optical Disc Drive

Ji Won Jung, Hyung Hee Cho and Myung-Ryul Choi

Key Words : Optical Disc Drive(광 디스크 드라이브), LDA(레이저 도플러 속도계), Airflow(유동), Flow-Induced Noise(유동소음), Heat Source(열원)

Abstract

The present study investigates flow characteristics in an optical disc drive (ODD). Detailed knowledge of the flow characteristics is essential to analyze flow-induced noise and vibration, forced convection and flow friction loss. The ODD used in a personal computer is used for the experiment and rotating velocity of disc is under the 4500 rpm. Time-resolved velocity components and velocity spectrum are obtained using the laser Doppler anemometry (LDA), and the flow patterns induced by rotating disc in the ODD are calculated by a commercial finite volume method at the same time. The results show that the front holes reduce flow-induced noise and the position of pickup body only affects flow near the window. Furthermore, it is possible for cooling of heat sources in the drive through measuring the flow fields under the tray. In addition, the numerical results are well matched up to the experimental results, therefore, the validation of the numerical results can be achieved. From the validation of numerical results, it is possible to predict the flow characteristics of the region where it is unable to conduct the experiment.

1. 서론

기호설명

- x : 드라이브에서의 수평 방향좌표 [mm]
- y : 드라이브에서의 수직 방향좌표 [mm]
- U : x 방향 속도 [m/s]
- V : y 방향 속도 [m/s]
- Re : 회전 레이놀즈수
- Ω : 디스크 회전속도 [rad/s]
- r : 디스크 반경 [m]
- v : 동점성 계수 [m²/s]

정보화 시대에 발맞추어 컴퓨터의 정보 저장매체들은 놀랄만한 속도로 빠르게 발전하고 있다. 이러한 저장매체 가운데 CD-ROM, CD-RW, DVD-ROM 그리고 DVD±RW 등의 광 디스크 드라이브(ODD)는 저렴한 가격으로 고용량의 데이터를 저장할 수 있고, 휴대가 쉽다는 장점을 이용하여 널리 이용되고 있다. 또한 오늘날 광 디스크 드라이브는 기록 및 재생 속도를 향상시키기 위하여 디스크의 기록 밀도를 높이며, 동시에 회전속도를 증가시키고 있다.

광 디스크 드라이브는 구조상 내부에 탄성체의 디스크가 들어가고, 이것은 빠른 속도로 회전한다. 이때 디스크로부터 발생하는 회전유동은 드라이브의 복잡한 내부구조로 인하여 복잡한 3차원의 난류 유동이 되며, 이러한 복잡한 유동장의 해석은 장치 내부의 유동 소음 및 진동 해석, 강

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과
E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr
TEL : (02)2123-2828 FAX : (02)312-2159

* 회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

** Toshiba Samsung Storage Technology Korea 개발팀

제 대류에 의한 열전달 해석 및 내부 온도 분포의 예측, 점성에 의한 손실, 그리고 전달 동력의 예측 등의 기초가 되며, 이를 통하여 최적의 기기 설계가 가능하다.

현재까지 단일 회전 원판 주위의 층류 및 난류 유동장에 대한 기초적인 연구는 이미 많이 진행되었다.⁽¹⁻⁴⁾ 그리고 광 디스크 드라이브보다 오래된 하드 디스크의 경우 실제 적용을 위한 단일 회전 원판 및 동시 회전 원판 등의 연구가 다양한 각도에서 이루어졌다.⁽⁵⁻⁸⁾ 그러나 이전의 연구 결과들은 단순한 구조에서의 단일 회전 원판 및 동시 회전 원판, 그리고 하드 디스크를 모사하여 회전 원판에 장애물을 삽입하여 유동 구조의 변화를 보는 등의 연구가 수행되었다. 그러나 이러한 단순 회전원판이나 하드 디스크를 모사한 연구의 결과를 바로 적용하기에는 광 디스크 드라이브는 내부 구조가 다르고, 상대적으로 복잡하기 때문에 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 실제 PC에 적용되는 광 디스크 드라이브에서의 유동장을 측정하였으며, 이를 통해 광 디스크 드라이브 내에서의 유동에 의해 발생하는 여러 문제들에 대한 영향과 그 원인에 대해서 고찰하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 LDA를 이용한 유동장 측정

광 디스크 드라이브의 종류는 CD-ROM, CD-RW, DVD-ROM, 그리고 DVD±RW 등 다양하나, 이는 광 픽업(optical pickup)과 PCB(Printed Circuit Board)의 회로나 칩(chip)의 종류와 배열이 달라질 뿐, 전체적인 형상은 동일하다고 볼 수 있다. 따라서 회전하는 디스크에 의해 발생하는 복잡한 유동은 드라이브 모델에 의한 차이는 크지 않다.

그래서 본 연구에서는 실제 PC에 내장되어 사용되는 광 디스크 드라이브 모델 하나를 선정하여 유동 성분을 측정하였다. Fig. 1은 측정에 사용된 PC용 광 디스크 드라이브이며, 상부의 케이스를 제거한 모습이다. 또한, 설명을 용이하게 하기 위하여 디스크를 제거한 모습이며, 실제 실험에서는 디스크를 삽입하여 수행하였다. Fig. 1에서 중앙부분에 디스크를 구동하는 스피들 모터와

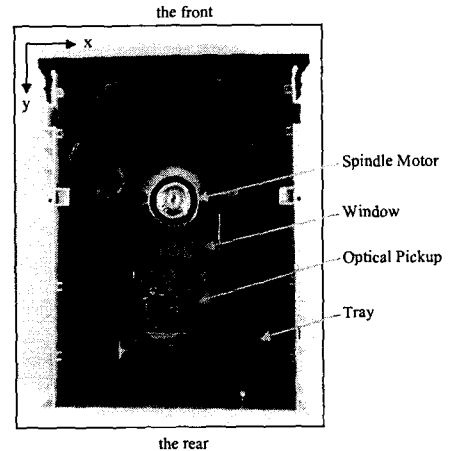
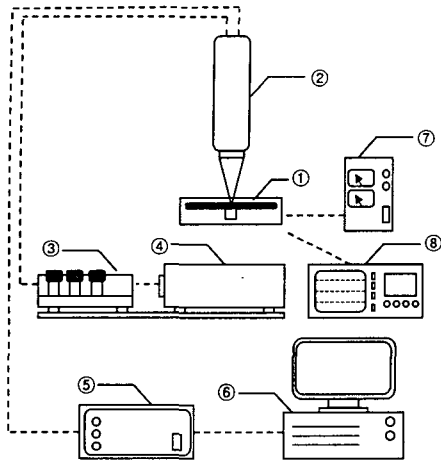


Fig. 1 Photograph of optical disc drive

광 픽업이 움직이는 공간인 윈도우가 있다. 광 픽업 아래 공간에는 PCB 기판이 위치한다. 그리고 디스크가 올라가는 트레이(tray)가 있다. 이 트레이는 드라이브를 크게 상부와 하부로 나누는 경계가 되며, 본 논문에서는 디스크가 있는 부분을 상부, 그 반대편을 하부로 하겠다. 그리고 디스크가 출입하는 부분을 전면, 그 반대편을 후면이라 하겠다. 또한 측정 및 데이터 처리를 위하여 좌표 기준을 그림과 같이 전면의 왼쪽 모서리로 잡았다.

측정영역은 x방향으로 120mm, y방향으로 168mm이며 디스크로부터 높이 방향으로 3.5mm 떨어진 지점에서 유동을 측정하였다. 그리고 디스크의 회전 속도를 4500rpm으로, 회전 레이놀즈 수($Re = \Omega r^2 / \nu$)는 1.123×10^5 으로 유지하며 유동장을 측정하였다. 실제 드라이브에서는 회전 속도가 가변적이거나, 정량적 데이터의 신뢰성을 향상시키기 위하여, 드라이브의 회로를 조작하여 입력 전압에 따라 회전수가 일정하게 유지되도록 하였으며, 회전수는 스피들 모터의 FG(Frame Ground) 신호를 받아 오실로스코프를 이용하여 확인하였다. 그리고 디스크의 회전 방향은 시계 방향(clock-wise)이다.

실험장치에 대한 유동장을 측정하기 위하여 LDA(Laser Doppler Anemometry)를 사용하였다. Fig. 2는 속도 측정을 위한 실험 장치이다. 트레이를 중심으로 상부와 하부 모두 측정하였으며, 측정 장비의 특성상 레이저의 투과에 방해가 되는 부분은 측정에 한계가 있었다. 입사광이 투과



1. Test section 2. LDA probe 3. Beam transmitter
4. Laser generator 5. LDA counter 6. Computer
7. rpm controller 8. Oscilloscope

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

되는 부분은 투명의 플렉시 글라스(plexiglass)를 사용하였으며, 회전 디스크와 트레이에 의한 입사광의 난반사를 줄이기 위하여 측정 부분은 무광의 검은색 도료로 착색하여 신호대 잡음비(S/N ratio)를 향상하였다. 또한 충분한 데이터 획득율을 유지하기 위하여 디스크의 회전수에 대하여 충분한 수의 산란입자를 사용하였다. 본 실험에서는 산란입자로 smoke를 사용하였으며, LDA 장치는 3차원 이송장치(3-D traverse)를 이용하여 이동하였다. 그리고 LDA 시스템은 58G130 FVA 보드와 58/N40 FVA 처리장치를 가진 후방 산란형(back scattering type) DANTEC LDA로 아르곤 이온(Argon ion) 레이저가 사용되며, 최대출력은 5W이다. 본 실험의 LDA를 이용한 속도 측정에서 U(x 방향), V(y 방향) 속도 성분은 4%, RMS 속도 성분과 난류 강도는 5% 이내의 오차를 가진다.⁽⁹⁾

2.2 수치해석 조건

광 디스크 드라이브내의 유동 측정과 더불어 상용 열, 유동 해석 프로그램인 FLUENT 6.1를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 광 디스크 드라이브는 여러 부품들이 조립되어 내부 구조가 복잡한데, 이는 공기 흐름에 방해가 되며 와류를 발생 시키는 원인이 된다. 따라서 드라이브 내부

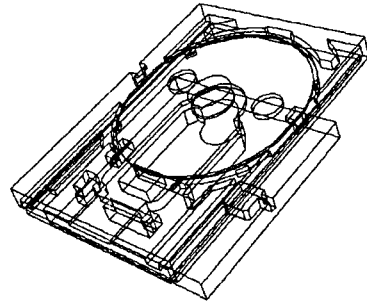


Fig. 3 Modeling for the numerical analysis

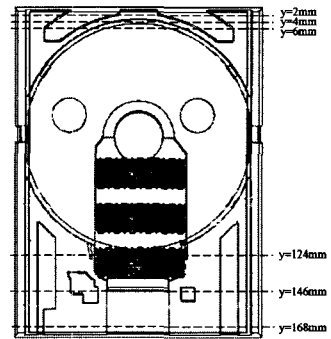


Fig. 4 Location of pickup body and measuring points for velocity

를 모델링 하는데 있어서, 이러한 복잡한 내부 구조를 최대한 반영시키며 적절한 단순화가 필요하다. Fig. 3은 수치해석을 위하여 실제 광 디스크 드라이브를 단순화시킨 그림이다.

내부의 유동을 해석하기 위하여 비압축성의 시간 평균된 운동 방정식(Navier-Stokes equation)을 유한체적법(FVM : Finite Volume Method)으로 해석하였으며, 난류유동을 해석하기 위하여 standard k-ε 모델을 개선한 RNG k-ε 모델을 사용하였다. 그리고 $y^+ > 12$ 로 하여 벽 함수(standard wall function)를 이용하였다. 그리고 격자는 약 1,100,000개이며, 잉여오차(residual error)가 0.0001보다 작아졌을 때 수렴된 것으로 간주하여 반복 계산을 중지하였다.

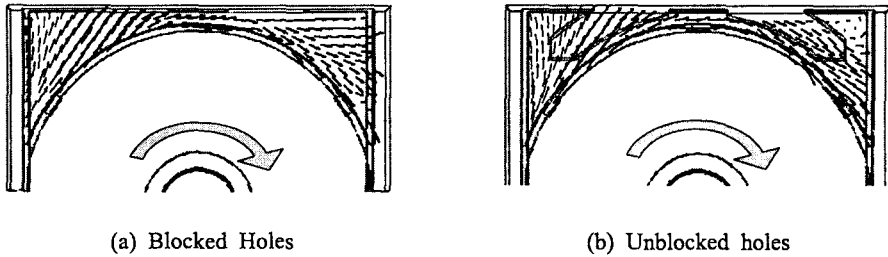


Fig. 5 Mean velocity vector plot near the holes

3. 결과 및 고찰

3.1 트레이 상부

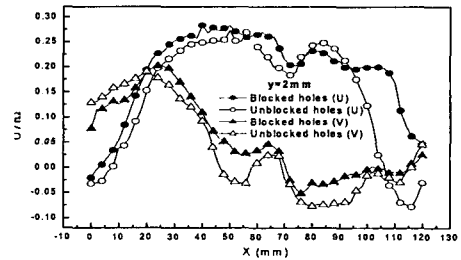
트레이 상부에서는 드라이브 전방 홀의 영향과 픽업 몸체(pickup body)의 영향을 살펴보기 위하여 LDA를 이용하여 유동을 측정하였으며, Fig. 4에 Figs. 6과 8의 측정 위치와 측정 중 픽업의 위치(case 1, case 2 그리고 case 3)를 표시하였다.

3.1.1 드라이브 전방 홀(hole)의 영향

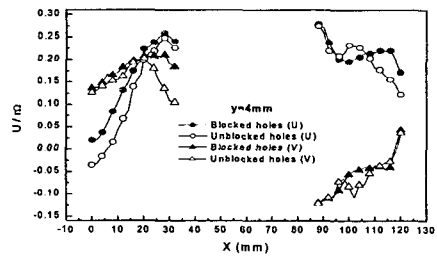
드라이브 상단 트레이 상의 2개 홀의 영향을 살펴보았다. 드라이브의 상단을 보면, 좌우 대칭형상의 홀이 있다. 이는 소음을 저감시키기 위하여 가공한 홀이며 실제로 2dB 정도의 소음 저감 효과가 있다.

Fig. 5는 측정결과를 벡터로 나타낸 그림이며, 오른쪽 상단부분을 살펴보면 (a)의 경우 회전유동이 바로 벽에 부딪치는 것을 볼 수 있으나, (b)의 경우 홀의 영향과 함께 유동 속도의 감소로 작은 와류(corner vortex)가 발생하였다. (a)의 경우와 비교하여 (b)의 경우 디스크 회전에 의해 발생한 유동이 벽에 바로 부딪쳐 발생하는 벽 섭동(wall fluctuation)에 의한 이중극자(dipole) 성분이 감소되어 전체 소음이 감소할 것이라 예상된다.

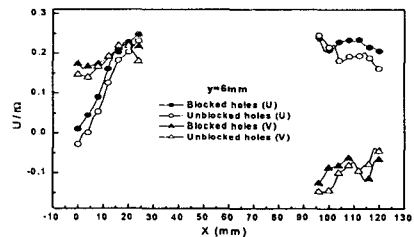
또한 Fig. 6는 디스크로부터 발생한 홀 주변의 유동을 측정한 결과이며, LDA를 이용하여 측정한 각 지점의 평균속도를 디스크의 원주속도($r\omega$)로 나누어 무차원화한 그래프이다. (b)에서 $34 < x < 86$ 와 (c)에서 $24 < x < 96$ 은 디스크가 있는 부분으로 측정에서 제외시켰다. (a)를 보면 x 가 100mm 이후부터 홀이 있는 경우와 없는 경우의 x 방향 속도가 많이 차이가 난다. 이는 모서리 와류의 모습을 보여주는 결과이다. 그리고 (b)와 (c)를 보면 홀이 있는 경우, x 방향의 U 속도는 전



(a) $y=2\text{mm}$



(b) $y=4\text{mm}$



(c) $y=6\text{mm}$

Fig. 6 U & V velocity near the holes

체 영역에서 홀이 없는 경우에 비하여 속도가 느리다. 그리고 y 방향의 V 속도는 홀이 없는 영역

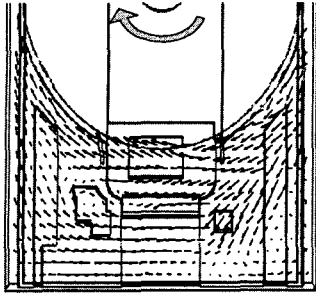
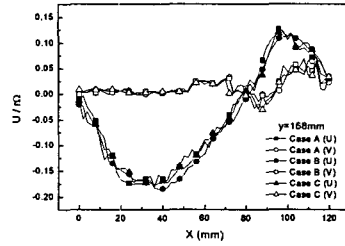


Fig. 7 Mean velocity vector plot near the pickup body

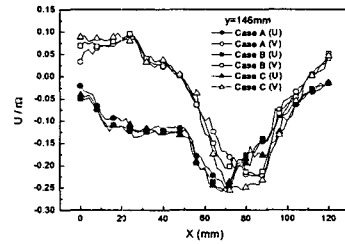
에서는 오히려 더 빠르나, 홀이 시작되는 부분에서부터 속도가 떨어진다. 이는 디스크로부터 발생된 유동이 홀 부근을 지나면서 홀로의 유입으로 인한 결과이다. 또한 (a)에서 $x=106$ 지점에서 V속도가 U속도보다 커지는데, 이는 Fig. 5의 (b)에서 보는 바와 같이 모서리 와류의 결과이다.

3.1.2 드라이브 후방 픽업몸체(pickup body)의 영향
 픽업 몸체(pickup body)의 위치가 디스크 최내주, 중간 그리고 최외주 3가지 경우에 대해서 속도분포를 측정하였다. 구별을 위해, 각각 case 1, case 2 그리고 case 3라 하며, 드라이브 상에서의 위치는 Fig. 4에 나타냈다. 3가지 경우에서 유동의 전반적인 경향은 큰 차이가 없다. Fig. 7은 실제 드라이브 내의 유동을 측정된 결과를 벡터로 나타낸 그림인데, 오른쪽 하단 부분의 모서리 부분에 와류(corner vortex)가 발생하였으며, 픽업 몸체를 중심으로 왼편 약간 아래쪽에 있는 홀로의 유동의 유입으로 인한 와류가 발생하는 것을 관찰할 수 있었다.

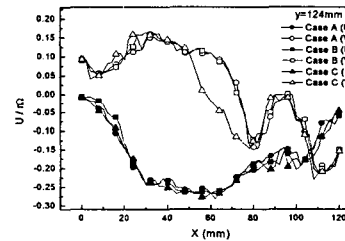
그리고 Fig. 8에서는 각 경우에 따른 무차원 속도를 비교하였다. (a) 그래프는 드라이브의 최하단 부근으로, 세 경우에 따른 차이가 거의 없다. 이는 디스크로부터 거리가 멀고, 아래쪽의 벽의 영향 때문이라고 생각된다. 그리고 (b)와 (c) 그래프를 살펴보면, U성분 속도는 큰 차이가 없으나, V성분은 중심을 지나면서 약간 차이가 난다. 이는 픽업 몸체가 움직이는 공간인 윈도우(window)가 case 1과 case 2의 경우 픽업이 안쪽으로 들어가서 홀이 생기지만, case 3의 경우 픽업 몸체가 최외주에 위치하여 윈도우 공간이 없어지게 된다. 따라서 case 1과 2의 경우 윈도우로의 유동의 유입으로 인하여, 윈도우 부근에서 V속도 성분이



(a) $y=168\text{mm}$



(b) $y=146\text{mm}$



(c) $y=124\text{mm}$

Fig. 8 U & V velocities near the pickup body

case 3과는 다른 모습을 보인다.

또한, 드라이브 내 유동의 특성을 파악하기 위하여 LDA의 측정결과를 이용하여 스펙트럼 분석(spectrum analysis)을 하였다.^(10,11) Fig. 9의 (d)에서 드라이브 왼편을 L, 중앙을 C 그리고 오른편은 R이라 하고 하단 부근에서부터 등간격으로 1에서 6까지 나누었으며, 결과는 다음과 같다. (a) 그래프는 드라이브의 왼편 벽 부근의 결과이며, 낮은 영역의 주파수가 지배적이다. 그리고 (b) 그래프는 드라이브의 가운데, 즉 픽업 몸체 아래 부분이며 낮은 주파수에서 높은 주파수까지 고루 섞여있는 매우 복잡한 형태이다. 그리고 (c) 그래프는 역시 오른편 벽 부근이다. 디스크 쪽으로 가

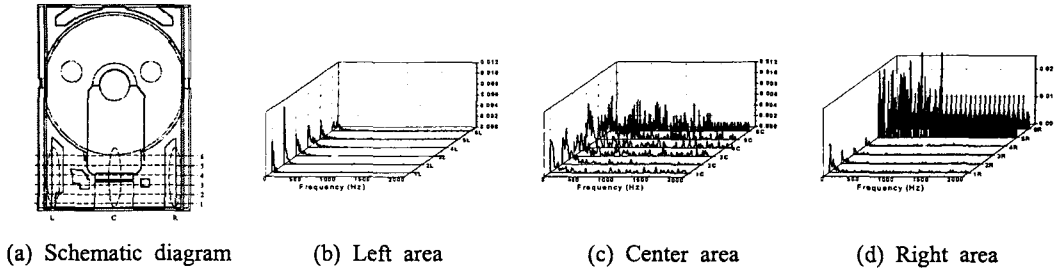


Fig. 9 Velocity Spectra

가워지면서 주파수 분포가 복잡한 형태를 보인다. 이와 같은 주파수 분석을 통하여 유동으로 인한 소음(flow-induced noise)을 이해할 수 있다.⁽¹²⁾ 광 디스크 드라이브에서 발생하는 소음 가운데 유동에 의한 소음이 주로 발생하는 주파수 영역은 1000~2000Hz 사이이므로, 드라이브의 왼편보다는 오른편에서 소음 발생이 크며, 픽업 주변의 윈도우 부근에서 소음이 상대적으로 심할 것으로 예상할 수 있다.

3.2 트레이 하부

광 디스크 드라이브의 내부 구조를 보면, 트레이를 기준으로 크게 상부와 하부로 나눌 수 있다. 상부는 디스크와 윗 부분 케이스와의 간격도 매우 협소하고, 디스크 회전에 의한 영향을 직접 받는 영역이고, 하부는 아래 부분 케이스와 거리가 멀고 하단 부분에 PCB가 있다. 실제 실험에서는 측정을 위하여 PCB를 제거하고 입사광의 투과가 가능한 글라스로 대체하여 기존의 PCB와 같은 크기와 두께로 실험하였다. 측정위치는 바닥 케이스에서 높이 방향으로 6mm 떨어진 지점이다.

트레이 상부와 하부의 유동은 다른 특징을 가지고 있다. 상부는 디스크 부분의 유동 속도가 크고, 디스크에서 멀어질수록 속도가 작다. 그러나 하부의 경우 Fig. 10에서 알 수 있듯이 전체적으로 유속이 고른 편이다. 디스크에 의해 발생된 유동에 의하여 스피indle 모터(spindle motor) 부근에서 반시계 방향으로 큰 와류가 하나 있고, 이 가운데 일부는 전면 벽에 부딪히면서 좌·우로 퍼져 나간다. 그리고 하단 부근에서는 디스크의 회전에 의하여 발생하는 디스크 하면에서의 흡입작용 때문에 전반적으로 하단에서 상단쪽으로 유동이 흐른다.

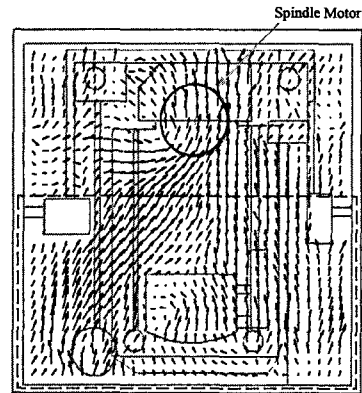


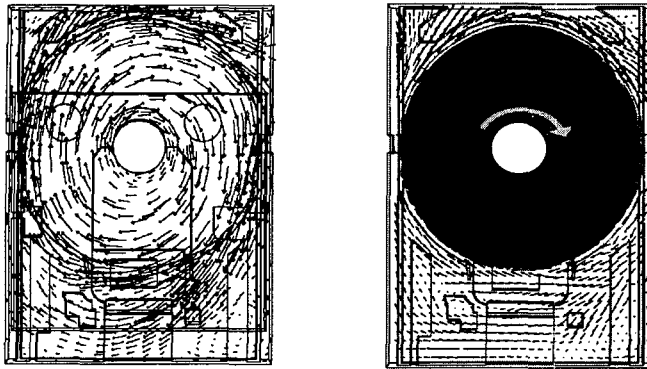
Fig. 10 Mean velocity vector plot under the tray

트레이 하부는 상부에 비하여 여러 부품이 직접 노출되어 있어 내부 구조가 복잡하므로, 유동의 형태 또한 복잡하다. 그러나 위의 측정 결과를 바탕으로 유로를 적절하게 설계하면, 디스크에 의해 발생하는 유동을 이용하여 광 디스크 드라이브 내의 열원(heat source)인 픽업 및 여러 칩(chip)들의 강제 대류 냉각에 이용할 수 있다.

3.3 수치해석 결과

실험에 사용한 광 디스크 드라이브와 같은 형상을 모델링하여 수치해석을 하였다. 유동 측정 장비로 사용하는 LDA는 레이저를 이용하므로, 측정하고자 하는 부분과 측정하는 LDA probe 사이에 레이저의 이동을 방해하는 물체가 존재해서는 안된다. 그러므로 실제 드라이브내 속도분포를 LDA를 이용하여 측정하는 것은 한계가 있다. 따라서 수치해석을 병행하면 실험으로 측정 불가능한 드라이브 내부의 특정 부분까지 정확한 유동장을 파악할 수 있다.

Fig. 11에서 측정결과와 수치해석 결과를 비교



(a) Numerical result

(b) Experimental result

Fig. 11 Comparison of experimental and numerical results

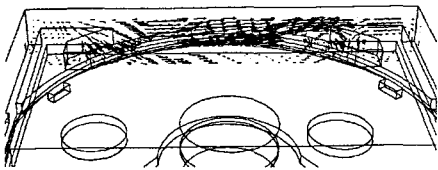


Fig. 12 Velocity vector plot near the front holes

하였다. 측정결과와 해석결과는 유동의 속도와 방향과 와류의 위치 등이 잘 일치하였다. 이를 통하여 해석 결과의 신뢰성을 확보하였다. 이러한 유동의 속도와 방향, 그리고 와류의 위치 예측을 통하여 추후에 소음 및 열전달 해석을 위한 기초 자료가 되며, 또한 Fig. 12와 같이 드라이브 내부의 측정 불가능한 지점에서의 유동 현상을 파악할 수 있었다. 이는 앞서 Fig. 5와 6에서 예측하였던 것을 확인할 수 있는 결과이다.

4. 결론

실제 PC에 내장되어 사용되는 광 디스크 드라이브 모델 하나를 선정하여 유동 측정 및 수치 해석을 수행하였다. 드라이브내 트레이를 중심으로 상부와 하부로 나누어 유속분포를 측정하였으며, 측정 결과를 수치 결과와 비교하였다.

우선 실험적 연구의 결과는 다음과 같다. 드라이브 전방 홀의 영향에 대한 영향을 알아보기 위하여 홀이 있는 경우와 없는 경우에 대해서 실험

하였다. 디스크의 회전으로 발생된 강한 회전유동은 홀로의 유동 유입으로 인해 속도가 감소하였고, 오른쪽 상단 모서리 부근에 작은 와류를 만들었다. 이러한 결과를 통하여 드라이브 전면 홀은 이중극자 소음성분의 감소와 관계되며, 따라서 유동에 의한 소음을 감소시키는 요인임을 예상할 수 있었다. 또한, 픽업 몸체가 움직이는 공간인 윈도우로의 유동 유입은 픽업 몸체의 위치에 의해 결정되며, 픽업의 위치가 다른 부분의 유동에는 큰 영향이 없다. 그리고 스펙트럼 분석을 통하여 드라이브의 왼편보다는 오른편에서 소음 발생이 크며, 픽업 주변의 윈도우 부근에서 소음이 상대적으로 심할 것으로 예상할 수 있었다. 또한 트레이 하부에서의 유동장 측정을 통하여 드라이브 내부의 열원에 대한 냉각에 이용할 수 있는 가능성을 보았다. 마지막으로 실험 측정으로는 한계가 있는 복잡한 내부 지점은 수치 해석을 병행하였으며, 실험 결과와 비교하여 신뢰성을 확보할 수 있었다.

후 기

본 연구는 Toshiba Samsung Storage Technology Korea의 지원(과제번호 2003-2-0386) 및 한국과학기술재단지정 정보저장기기 연구센터의 지원(과제번호 2004-2-0088)을 받아 이루어졌으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Schlichting, H. and Gersten, K., 2000, "Boundary Layer Theory," *Springer*.
- (2) Macey, J. P. and Wellman, E. J., 1969, "Instability Phenomenon Associated with an Enclosed Rotating Disk," *Phys. Fluids*, Vol. 12, pp. 710~722.
- (3) Erian, F. F. and Tong, Y. H., 1971, "Turbulent Flow Due to a Rotating Disk," *Phys. Fluids*, Vol. 14, pp. 2588~2591.
- (4) Kobayashi, R., 1994, "Review : Laminar to Turbulent Transition of Three-Dimensional Boundary Layers on Rotating Bodies," *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 116, pp. 200~211.
- (5) Sirivat, A., 1991, "Stability Experiment of Flow Between a Stationary and a Rotating Disk," *Phys. Fluids*, Vol. 3, pp. 2664~2671.
- (6) Lopez, L. M., 1996, "Flow Between a Stationary and a Rotating Disk Shrouded by a Co-rotating Cylinder," *Phys. Fluids*, Vol. 8, pp. 2605~2613.
- (7) Tzeng, H. M. and Munce, Jr. A. C., 1992, "Flow Between Shrouded Co-Rotating Disk with Radial and Oblique Obstructions," *Adv. Info. Storage Syst.*, Vol. 4, pp. 383~391.
- (8) Abrahamson, S. D., Eaton J. K. and Koga D. J., 1989, "The Flow Between Shrouded Co-Rotating Disks," *Phys. Fluids*, Vol. 1, pp. 241~251.
- (9) Dantec, 1995, "Fiber Flow : Installation and User Guide."
- (10) Adrian, R. J. and Yao, C. S., 1987, "Power Spectra of Fluid Velocities Measured by Laser Doppler Velocimetry," *Exp. in fluids*, Vol. 5, pp. 17~28.
- (11) Host-Madsen, A., 1994, "A New Method for Estimation of Turbulence Spectra for Laser Doppler Anemometry," *7th Int. Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*.
- (12) Park, Gunsoon, Song, Insang, Kim, Sookyung, Kim, Waeyul and Lee, Seungyop, 2000, "Airflow and Sound Induced by Disk Rotation in DVD Drives," *Info. Storage Proc. Syst.*, Vol. 2, pp. 3~11.