Journal of the KSTLE Vol. 19, No. 5, October 2003, pp. 292~297
The Korean Society of Tribologists & Lubrication Engineers

밀폐된 단일 회전 원판 주위의 유동손실에 관한 연구

조성욱† · 임윤철*‡

삼성전자(주) DA연구소, *연세대학교 기계전자공학부

A Study on the Flow Friction Loss of a Shrouded Rotating Disk

Sung-oug Cho† and Yoon-chul Rhim*‡

DA R&D Center, Digital Applicane Network Business, Samsung Electroniscs Co. Ltd.,
**School of Electrical & Mechanical Engineering Yonsei University*

Abstract – The fundamental fluid mechanics associated with the rotation of a smooth plane disk enclosed within a cylindrical chamber have been studied experimentally. In order to acquire systematic information pertinent to this problem torque and friction loss data were obtained over a wide range of disk Reynolds numbers for axial clearance-disk radius ratio H/R from 0.025 to 0.2 and radial tip gap-disk radius ratio s/R from 0.021 to 0.105. Loss analysis of hard disk drive (HDD) is presented to describe the contribution of windage loss of a rotating disk. The minimum loss form factor of HDD can be obtained from this analysis at each operation conditions.

Key words – HDD(Hard disk drive), disk/spindle system, torque, friction loss, flexible disk windage.

1. 서 론

최근의 정보저장기기 관련 연구는 데이터 전송률(data transfer rate) 증가를 위하여 많은 노력을 경주하고 있으며 이의 일환으로 디스크의 회전 속도를 더욱 증가시키고 있다. 그러나, 디스크의 회전속도가 증가함에 따라 저장기기 내부 공기의 유동은 난류화 되면서 매우 복잡한 구조를 갖는 3차원 와류가 발생하게 된다. 이러한 복잡한 유동장의 발생은 저장기기 내부의 구조와 밀접한 관계를 갖고 있으며 저장기기에서의 소비전력의 증가와 유동 소음 및 진동발생의 원인이 된다.

특히 휴대용 정보저장기기의 개발을 위해서는 낮은 소비전력 조건을 만족시킬 수 있는 효율적인 손실저감 기술이 개발되어야 한다. 높은 기록 저장 밀도와 입출력 및 전송속도는 기존의 정보저장기기 관련 기술을 응용하면 될 것이나, 저소비전력과 관련된 유동 손실은 실제 사용되고 있는 정보저장기기에서 정확한 크기 및 기여도가 분석되지 않으면 실제 기기에 적용하는데 문제가 될 수도 있다.

본 연구에서는 단일 원판의 회전에 의해 발생하는 유동손실을 측정하기 위해 실제 상용으로 사용되고 있는 정보저장기기의 원판(Disk)을 이용할 수 있는 실험 장치를 개발하고, 이를 이용하여 회전 원판을 둘러싸고 있는 외부 형상인자의 변화가 유동손실에 미치는 영향을 분석하여 유동손실을 최소화하기 위한 설계안을 제시하려고 한다.

2. HDD의 손실 분석

그림 1은 정격 회전수가 5,400 RPM이고, 단일 원판을 사용하고 있는 상용의 3.5" HDD에서 실제 운전중에 사용되는 전력과 손실을 원인별로 측정하여 분석한 결과를 나타내고 있다.

전기입력 단자에 공급되는 직류 전원(5 V, 12 V)을 기준으로 분석한 결과 제어 및 통신회로 및 구동 IC에서 47%를 사용하며, 원판에 기록된 정보를 Read/Write 하는 헤드 서스펜션(Head suspension)의 위치 제어를 하기 위한 VCM(Voice coil motor)을 동작시키는 전원으로 23%를 사용하고, 스핀들 모터를 구동하기 위한

†주저자 : so.cho@samsung.com
‡책임저자 : rhimyc@bubble.yonsei.ac.kr

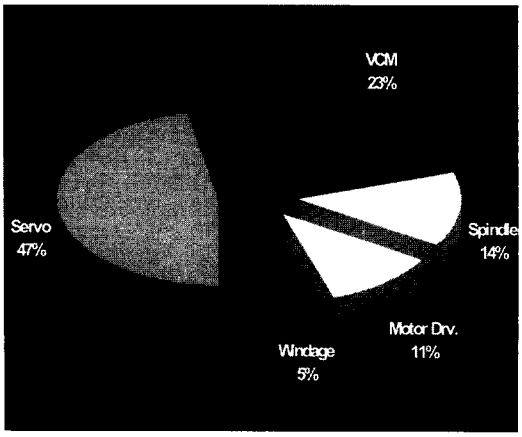

Fig. 1. Percentile power loss distribution of 3.5" HDD.

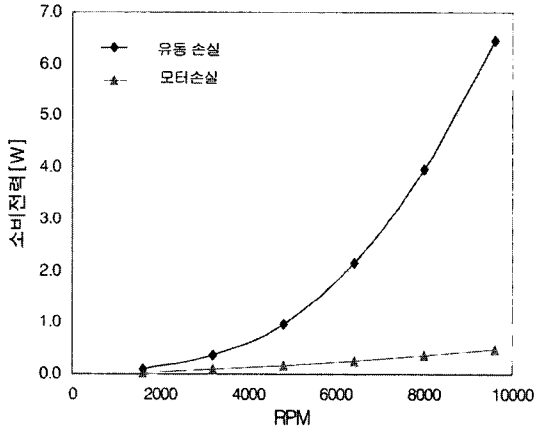

Fig. 2. Effects of rotating speed on power loss of 3.5" HDD.

모터 드라이브 회로에서 11%를 사용하고 있으며, 모터손실이 14%이고, 순수한 유동 손실은 5%를 차지하는 것을 알 수 있다.

하지만 고속의 데이터 전송률을 달성하기 위해서는 원판의 회전수가 급격하게 증가되어야 하고, 현재 7,200 RPM의 상용 HDD가 주력 제품으로 부상되고 있으며, 앞으로 10,000 RPM 이상의 HDD가 필요하게 될 것이다.

따라서, 위의 전력 및 손실분석을 기준으로 보면 유동손실이 5% 정도를 차지하고 있지만, 고속의 회전수에서 유동손실의 증가 경향을 파악하는 것이 필요하다.

그림 2는 HDD에서 모터부에 공급되는 전원과 회전수를 외부에서 제어할 수 있는 별도의 범용 모터 드라이브를 이용하여 운전 회전수를 증가 시킬 경우에 유동손실의 증가를 측정한 결과를 나타내고 있다.

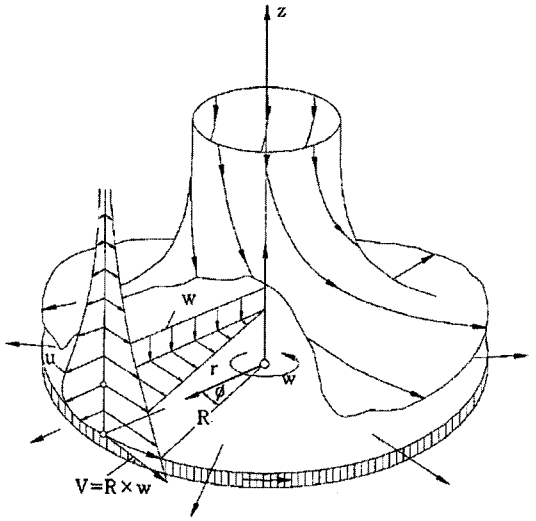

Fig. 3. Flow of a disk rotating in a fluid.

측정결과를 보면 유동손실은 원판의 회전수에 대해서 포물선 형태로 급격하게 증가하고, 9600 RPM의 경우에는 5400 RPM 대비 회전수는 1.8배 증가 하였지만 유동손실은 6.5배 증가함을 알 수 있다.

따라서, 이것이 HDD 전체 전력과 손실에 차지하는 비중은 유동손실의 증가에 비례하여 급격하게 증가됨을 알 수 있다.

3. 해 석

3-1. 이론해석

3-1-1. 층류

그림 3과 같이 원판이 외벽의 영향이 없는 상태에서 자유로이 회전하고 있고 층류상태의 유동을 나타내고 있는 경우에는 식 (1)과 같은 Navier-Stokes방정식으로 표현되고, 연속방정식은 식 (2)과 같이 된다.

$$u\frac{\partial u}{\partial r}-\frac{v^2}{r}+w\frac{\partial u}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial r}+\upsilon\left\{\frac{\partial^2 u}{\partial r^2}+\frac{\partial}{\partial}\left(\frac{u}{r}\right)+\frac{\partial^2 u}{\partial^2 z}\right\}$$

$$u\frac{\partial v}{\partial r}+\frac{uv}{r}+w\frac{\partial v}{\partial z}= \qquad \upsilon\left\{\frac{\partial^2 v}{\partial r^2}+\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{v}{r}\right)+\frac{\partial^2 v}{\partial^2 z}\right\}$$

$$u\frac{\partial w}{\partial r}+w\frac{\partial u}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}+\upsilon\left\{\frac{\partial^2 w}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial w}{\partial r}+\frac{\partial^2 w}{\partial^2 z}\right\} \qquad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{v}{r}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \qquad (2)$$

이 때의 경계조건은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$z=0 : u=0, \quad v=r\omega, \quad w=0$$
$$z=\infty : u=0, \quad v=0 \tag{3}$$

원판 위의 미세 유체 요소를 취하여 힘의 평형식에 대입하면 반경방향의 힘의 평형식 (4)와 원주방향의 힘의 평형식 (5)를 얻을 수 있다.

$$\rho r\omega^2\delta\, drds = \tau_w \sin\theta\, drds \tag{4}$$
$$\mu r\omega/\delta = \tau_w \cos\theta \tag{5}$$

원판의 벽면에서의 전단응력은 식 (6)과 같이 정의하고,

$$\tau_w = \mu\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)_0 \tag{6}$$

디스크 한 쪽면의 토크는 식 (7)과 같이 벽면에서의 전단응력을 적분하면 얻을 수 있다.

$$T = -\int_0^R \tau_w 2\pi r \cdot r dr \tag{7}$$

그리고, 토크 상수를 원판의 양면에 걸리는 토크 값으로 식 (8)과 같이 정의하고,

$$C_m = \frac{2T}{\frac{1}{2}\rho\varpi^2 R^5} \tag{8}$$

해석에서 구한 값을 대입하여 구하면 식 (9)과 같이 층류일 경우의 자유 회전 원판의 토크상수를 얻을 수 있다.

$$C_m = \frac{3.87}{\sqrt{Re}} \tag{9}$$

여기서 $Re = \frac{R^2\omega}{\nu}$

3-1-2. 난류

난류일 경우에는 Von Ka'rma'n approxima- tion solution에서 1/7 power law를 이용하여, 힘의 평형식을 구성하고 전단응력을 계산하여 토크 상수를 구하면 식 (10)과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$C_m = \frac{2T}{\frac{1}{2}\rho\varpi^2 R^5} = 0.146Re^{-1/5} \tag{10}$$

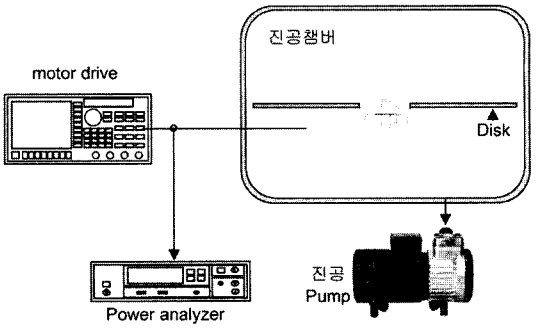

Fig. 4. Experimental setup.

4. 실험 방법

4-1. 자유 회전 원판의 손실 측정

그림 4는 자유 회전 원판의 유동 손실을 측정하기 위한 실험 장치를 나타내고 있다.

실험은 먼저 공기상태에서 운전시켜 점성 유동시 소비 전력을 측정한 결과와 진공챔버에 단일 회전 원판을 장착한 후 진공펌프를 이용하여 공기가 모두 배출된 진공 상태에서 운전하여 소비전력을 측정한 결과를 비교하여 유동손실 부분만을 추출해 내는 방법을 사용하였다.

유동 손실을 측정하기 위해서 모터에 공급되는 전류와 전압을 실시간으로 측정하여 식 (11)과 같이 시간에 대해서 적분하여 추출하였다.

$$P_k = \frac{1}{t_{total}}\int_0^t i_k(t)\cdot v_k(t)dt \qquad k=1,2,3 \tag{11}$$

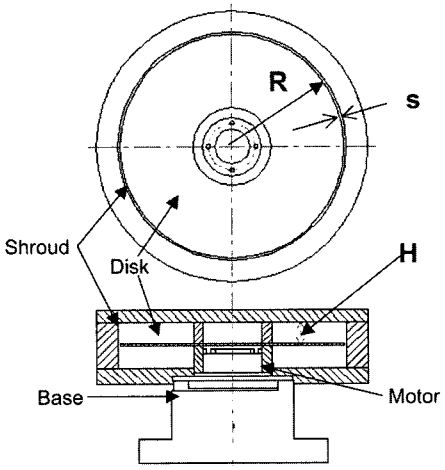

Fig. 5. Schematic assembly of test apparatus.

4-2. 외벽이 있는 회전 원판의 손실 측정

그림 5는 외벽의 형상이 단일 회전 원판의 유동손실에 미치는 영향을 분석하기 위한 손실 실험 장치를 나타내고 있다. 외벽 형상 변화는 원판과 상부 외벽사이의 축방향 거리 H와 실린더 형상으로 원판을 둘러싸는 측면외벽과 원판 사이의 반경방향의 간극 s를 변수로 하였다.

각각의 변수는 원판의 반경 R로 무차원한 변수 H/R과 s/R을 이용하였다. 축방향 거리는 H/R=0.025, 0.05, 0.1, 0.2 4가지 실험조건으로 구성하고, 측면 외벽과의 반경방향 간극은 s/R=0.021, 0.042, 0.105 3가지 실험조건으로 구성하여 실험을 수행하였다.

단일 회전 원판은 3.5" HDD에 사용되는 경면(鏡面)과 같이 매끈한 표면을 형성한 것을 사용하고, 외벽도 최대한 매끈하게 가공된 것을 사용하였다.

단일 원판의 운전회전수는 5 Hz 간격으로 변화시키면서 측정을 수행하였다.

5. 결과 및 고찰

5-1. 자유 회전 원판의 손실

그림 6은 손실 실험 장치를 이용하여 1", 2.5", 3.5" HDD에 사용되는 원판들을 사용하여 자유 회전시의 회전속도 변화에 따른 유동 손실을 측정한 실험결과를 나타내고 있다.

1" 원판은 레이놀즈수(Reynolds number) $Re=4\times10^3-1.5\times10^4$ 범위에서 운전되고 있으므로 층류영역에 해당되고, 이에 상응하는 이론해석 결과인 층류영역의 이론식 식 (9)과 잘 일치하고 있다.

2.5" 원판은 레이놀즈수 $Re=2.5\times10^4-9\times10^4$ 범위에서 운전되고 있으며, 유동 특성이 층류에서 난류영역으로 천이되고 있는 중간영역에 해당되고, 이론해석 결과를 기준으로 비교하여 보면 층류영역 보다는 난류영역의 유동 특성을 나타내고 있는 것을 알 수 있다.

3.5" 원판은 레이놀즈수 $Re=5\times10^4-2\times10^5$ 범위에서 운전되고 있으므로 완전히 난류영역에 해당되고, 이에 상응하는 이론해석 결과인 난류영역의 이론식 식 (10)과 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

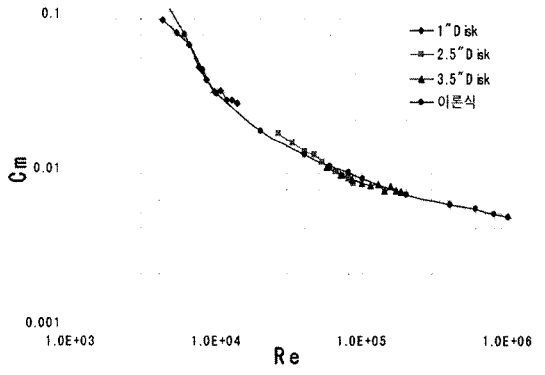

Fig. 6. Rotating disk torque coefficients data.

5-2. 외벽이 있는 회전 원판의 손실

그림 7과 8은 외벽의 형상이 단일 회전 원판에 미치는 영향을 분석하기 위한 손실 실험 장치를 이용하여 3.5" HDD에 사용되는 원판에 대해서 외벽 형상 변수 H/R, s/R의 변화와 회전속도 변화에 따른 유동 손실을 측정한 실험결과를 나타내고 있다.

그림 7은 원판의 반경방향 측면 간극 s/R=0.105일 경우에 축방향의 높이 H/R의 변화에 따른 유동손실 측정 결과를 나타내고 있다. 결과를 보면 레이놀즈수

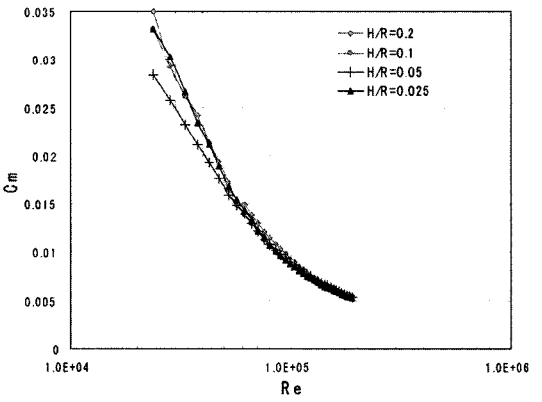

Fig. 7. Effects of chamber dimensions on a rotating disk torque coefficients data (s/R= 0.105).

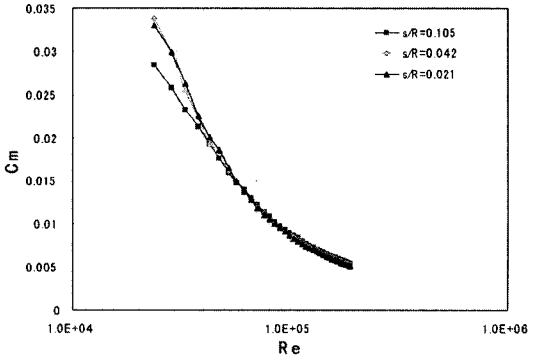

Fig. 8. Effects of chamber dimensions on a rotating disk torque coefficients data (H/R= 0.05).

가 Re<6×10⁴일 경우에는 H/R=0.05의 형상에서 유동손실이 최소값을 나타내고 있음을 알 수 있고, Re>6×10⁴일 경우에는 H/R=0.025의 형상에서 유동손실이 최소값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

그림 8은 원판의 축방향 높이 H/R=0.05일 경우에 반경방향 간극 s/R의 변화에 따른 유동손실 측정 결과를 나타내고 있다. 결과를 보면 레이놀즈수가 Re<4×10⁴일 경우에는 s/R=0.105의 형상에서 유동손실이 최소값을 나타내고 있음을 알 수 있고, Re>4×10⁴일 경우에는 s/R=0.021의 형상에서 유동손실이 최소값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

위의 결과를 종합하면, 외벽이 있는 단일 회전 원판의 최소 유동손실을 나타내는 외벽 형상 인자들의 설계안은 다음과 같다.

운전조건이 레이놀즈수가 Re<4×10⁴일 경우에는 유동손실이 최소값을 나타내는 외벽 형상 인자들의 조합은 H/R=0.05, s/R=0.105로 결정될 수 있고, Re>4×10⁴일 경우에는 유동손실이 최소값을 나타내는 외벽 형상 인자들의 조합은 H/R=0.025, s/R=0.021로 결정될 수 있다.

6. 결 론

외벽의 형상이 단일 회전 원판의 유동손실에 미치는 영향을 분석하기 위해 해석과 손실 측정 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 정격 회전수가 5,400 RPM이고, 단일 원판을 사용하고 있는 상용의 3.5" HDD는 순수한 유동 손실이 5%를 차지하고 있으며, 회전수가 1.8배 증가되면 유동손실은 6.5배 증가한다.

2. 자유 회전 원판의 유동손실 측정 실험 장치와 방법은 실제 사용되는 제품에 적용할 수 있고, 실험 결과 디스크의 크기에 따라 1" 원판은 층류영역에서 운전되고 있고, 3.5" 원판은 난류영역에서 운전되고 있다.

3. 외벽이 있는 회전 원판의 유동손실은 반경방향 측면 간극 s/R이 일정할 경우 축방향의 높이 H/R의 변화에 따라 Re<6×10⁴일 경우에는 H/R=0.05 Re>6×10⁴일 경우에는 H/R=0.025의 형상에서 유동손실이 최소값이 된다.

4. 외벽이 있는 회전 원판의 유동손실은 축방향 높이 H/R이 일정할 경우 반경방향의 간극 s/R의 변화에 따라 Re<4×10⁴일 경우에는 s/R=0.105 Re>4×10⁴일 경우에는 s/R=0.021의 형상에서 유동손실이 최소값이 된다.

5. 외벽이 있는 단일 회전 원판의 최소 유동손실을 나타내는 외벽 형상 인자들의 설계안은 Re<4×10⁴일 경우에는 H/R=0.05, s/R=0.105, Re>4×10⁴일 경우에는 H/R=0.025, s/R=0.021로 결정할 수 있다.

Nomenclature

C_m	: Torque Coefficient
H	: Height between disk and shroud
P_k	: Power [Watt]
R	: Radius of disk
Re	: Reynolds Number $Re = \frac{R^2\omega}{\nu}$
T	: Torque [N-m]
s	: Clearance between disk tip and shroud
t	: Time
u, v, w	: Velocity
z	: Direction of rotating axis
δ	: Boundary layer
μ	: Viscosity of fluid
ρ	: Density
τ_w	: Shear stress
ω	: Rotating speed

후 기

본 연구는 환국과학재단지정 정보저장기기연구센터의 지원(과제번호 : 97K3-0905-02-01-1)을 받아 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Hermann Schlichting, "Boundary layer theory," Mc Graw Hill, 1985.
2. A. J. Hudson and P. A. Eibeck, "Torque measurement of corotating disks in an axisymmetric enclosure," J. of Fluids Eng., pp. 648-653, 1991.
3. J.W. Daily and R. E. Nece, "Chamber dimension effects on induced flow and frictional resistance of enclosed rotating disks," J. of Basic Eng., pp. 217-232, 1960.
4. C. D. 'Angelo III and C. D. Mote, Jr, "Aerodynamically exited vibration and flutter of a thin disk rotating at supercritical speed," J. of Sound & Vibration, pp. 15-30, 1993.
5. M. Tatewaki, "An analysis of disk flutter in hard disk

drives in aerodynamic simulation," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 37, pp. 842-846, 2001.
6. H. Shimizu, "Study of Aerodynamic characteristics in hard disk drives by numerical simulation," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 37, pp. 831-836, 2001.
7. 유승철, "밀폐된 동시회전원판 내부 유동에 관한 실험적 연구," 연세대, 1999.
8. 류구영, "회전원판 주변에서의 열전달 및 유동현상에 대한 실험적 연구," 연세대, 1999.