

곡률이 있는 벽면근처에서 고속회전하는 유연디스크의 거동 해석

A Study on the Behavior of a Spinning Flexible Disk near a Curved Wall

이호렬[†], 임윤철^{*}

Ho-Ryul Lee[†] and Yoon-Chul Rhim^{*}

Abstract

Information storage devices have been studied to increase the storage capacity and the data transfer rate as well as to decrease the access time and their physical sizes. Optical information storage devices have been achieved high-capacity by reducing optical spot size remarkably due to the development of Blue-ray technology. Optical information storage devices usually use 1.2mm-thick polycarbonate(PC) media to get high enough stiffness. However, it would be better if we can decrease the thickness of a disk for achieving thinner device while keeping the capacity as large as possible. Decreasing the thickness of the storage media makes it difficult to read and write data because it increases the transverse vibration of the rotating disk due to the interaction with surrounding air and the vibration characteristics of thin flexible disk itself. Therefore, a special design based on the fluid mechanics is required to suppress the transverse vibration of the disk in non-contact manner so that the optical pickup can read/write data successfully. In this study, a curved wall is proposed as a stabilizer to suppress the transverse vibration of a 95 μ m-thick PC disk. The characteristics of disk vibration due to a curved wall have been studied through numerical and experimental analysis from the fluid mechanics point of view. The proposed shapes are possible candidates as stabilizers to suppress the transverse vibration of a flexible disk which rotates at high speed.

Key Words : Flexible disk, Transverse vibration, Air bearing, Stabilizer

기호설명

ρ_a	: density of the fluid
ρ_d	: density of the disk
μ	: viscosity of the air
r	: radius coordinate
θ	: rotating angular coordinate
r_a	: inner radius of the disk
E	: Young's modulus of the disk
ν	: Poisson's ratio of the disk
h	: thickness of the disk
d	: thickness of the air film(=gap size)
Ω	: angular velocity
P	: pressure generated in the gap
V_r	: disk velocity in r -direction
V_θ	: disk velocity in θ -direction
σ_r	: r -direction stress due to centrifugal force
σ_θ	: θ -direction stress due to centrifugal force

1. 서론

1.1 연구 배경

정보저장기기의 지속적인 연구동향은 저장용량의 증대, 전송속도 증가, 액세스 시간의 감소, 소형화, 박형화 등을 목표로 하고 있다. 광학식 정보저장기기에 사용할 청자색 레이저(Blue-ray)가 개발됨에 따라 Optical Spot의 크기가 현저히 감소되어 대용량을 실현하기에 이르렀다. 현재 주로 사용되는 광학식 정보저장매체는 상당한 강성을 갖도록 두께 1.2mm의 Poly-carbonate(PC) 재질의 디스크를 사용하고 있다. 저장용량을 유지하면서 박형화를 달성하기 위한 방법 중의 하나로 디스크의 두께를 감소시킬 수 있다. 그러나 디스크의 두께 감소는 디스크 강성의 감소로 이어져 축방향 진동(transverse vibration)을 증가시킬 뿐만 아니라 디스크 주변 유동장과 활발한 상호작용을 일으켜 데이터의 기록 및 재생을 어렵게 한다. 따라서 얇은 디스크의 진동을 저감하고 동적 안정성을 향상시킬 수 있는 유체역학적 시스템 설계를

[†] 연세대학교 기계공학과 대학원
E-mail : zorro37@yonsei.ac.kr
TEL : (02)2123-3854

^{*} 연세대학교 기계공학과 (rhimyc@yonsei.ac.kr)
논문접수일 (2006년 6월 9일)

요구된다.

본 연구에서는 두께 $95\mu\text{m}$ 인 PC 디스크를 저장 매체로 사용할 경우에 발생하는 축 방향 진동을 비접촉 방식으로 저감시키고자 세가지 형상의 안정기(Stabilizer)를 제시하고 수치 해석과 실험 결과를 바탕으로 고속으로 회전하는 디스크의 축 방향 진동을 효과적으로 저감시킬 수 있는 안정기 형상을 제안한다.

1.2 연구 동향

회전하는 디스크에 관한 연구는 다양한 수학적 모델을 사용하면서 이루어져 왔다. Lamb[1] 등은 굽힘 강성(bending stiffness)을 고려하여 회전하는 디스크의 진동에 관한 기초 연구를 수행하였고, Simmonds[2]는 디스크를 굽힘 강성이 무시된 막으로 가정하여 회전할 때 발생하는 축 방향 진동을 다루었다. Benson[3] 등은 디스크의 특정 위치에 축 방향으로 하중을 주는 경우, 즉 압력을 작용할 경우 디스크가 안정적으로 회전할 수 있음을 수치해석적으로 밝혔으며 Yasuda[4] 등은 디스크 모델에 주변공기 영향을 고려하여 디스크의 동적 불안정을 간단한 수학적 모델로 규명하고자 하였다. Naganathan[5] 등은 회전 디스크 모델과 레이놀즈 방정식의 연성해석을 통하여 회전 안정성과 외란의 영향에 대한 연구를 수행하였다.

Krauter[6] 등은 수학적 모델해석과 실험결과를 직접 비교함이 어렵다는 것을 실험을 통해 규명하고자 하였으며 Aman[7] 등은 실험을 통하여 반구형 안정기가 회전하는 유연 디스크의 진동저감에 효과가 있음을 입증하였고 엄요한[8] 등은 negative slider의 개념을 응용한 유연 디스크용 안정기를 제안하였다.

2. 연구 대상

2.1 유연 디스크 (Flexible disk)

Figure 1 과 같이 직경 120mm , 두께 $95\mu\text{m}$ 인 PC 재질의 유연한 디스크를 연구대상으로 선정하였다. 두께 1.2mm 의 CD 나 DVD 와 달리 상당히 얇은 $95\mu\text{m}$ 두께의 유연디스크는 여러 장을 간편하게 휴대할 수 있는 장점이 있어 기기의 박형화를 가능케 할 수 있다[9]. 그러나 유연디스크는 축 방향으로 강성이 작기 때문에 고속회전시 불안정해지기 쉬우며 또한 주변 유동장의 작은 간섭에도 쉽게 면진동을 유발하게 되어 동적 안정성이 크게 저하될 수 있다.

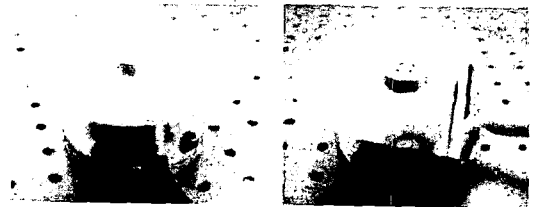


Fig. 1 Flexible disk and spindle system

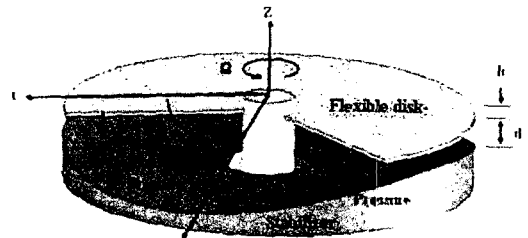


Fig. 2 Schematic of the fluid-disk model

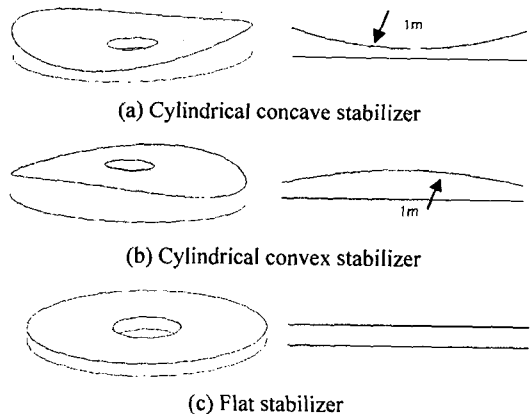


Fig. 3 Three stabilizer shapes

2.2 안정기 (Stabilizer)

본 연구에서는 작은 강성으로 인해 발생하는 유연 디스크의 동적 불안정성을 곡률이 있는 벽면을 이용하여 억제하고자 한다. 즉, 유연 디스크를 곡률이 있는 벽면 근처에서 회전시키면 디스크와 벽면 사이의 간극 변화에 따라 Fig. 2와 같이 양압과 음압이 발생되며 디스크의 회전에 따른 원심력과 균형을 이루워 디스크의 축 방향 진동을 비접촉으로 억제할 수 있다. 이 경우 벽면은 디스크의 진동을 억제하는 안정기의 역할을 하게 되는데 본 연구에서는 특징적인 곡률을 갖는 3 가지 형상의 안정기를 제안하였다. Figure 3의 (a)는 반경 1m 의 오목한 곡률을, (b)는 반경 1m 의 볼록한 곡률을 가지며 (c)는 곡률반경이 무한대인 평평한 형상의 안정기이다.

3. 수치 해석

3.1 지배방정식

안정기 위에서 회전하는 유연 디스크의 동적 거동을 해석하기 위해서는 디스크의 축 방향 변위와 응력의 관계식과 유체역학적 관점에서 압력을 구하는 레이놀즈식을 동시에 고려하여야 한다.

3.1.1 디스크 방정식

선형 판이론에 굽힘 강성 효과와 외력 성분을 고려하여 회전하는 디스크의 지배방정식을 나타내면 다음과 같다[5].

$$\rho_d \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \sigma_r \frac{\partial w}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sigma_\theta \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} \right) - \frac{D}{h} \nabla^4 w + \frac{P}{h} \quad (1)$$

식(1)에서 첫째 항은 관성성분의 항이며 둘째, 셋째 항은 회전에로 발생하는 in-plane membrane 응력성분의 항이다. 넷째 항은 굽힘 강성 항이며 다섯째 항은 안정기에서 디스크에 가하는 외력성분 항이다. 원심력으로 인한 응력 항 σ_r , σ_θ 와 굽힘 강성 항 D 는 식(2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\rho_d \Omega^2}{8} \left[(1+\nu)(r_a^2 + r_b^2 \Gamma) - (3+\nu)r^2 + (1-\nu)\Gamma \frac{r_a^2 r_b^2}{r^2} \right] \\ \sigma_\theta &= \frac{\rho_d \Omega^2}{8} \left[(1+\nu)(r_a^2 + r_b^2 \Gamma) - (1+3\nu)r^2 - (1-\nu)\Gamma \frac{r_a^2 r_b^2}{r^2} \right] \\ D &= \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \quad \Gamma = \frac{-(1+\nu)r_a^2 + (3+\nu)r_b^2}{(1-\nu)r_a^2 + (1+\nu)r_b^2} \end{aligned} \quad (2)$$

4 차 편미분방정식인 식(1)을 해석하기 위해서는 총 4 개의 경계조건이 필요하다. 경계조건은 디스크 내경과 외경에서 각각 2 개씩 정의되며 식(3), (4)와 같다.

디스크는 내경에서는 고정(clamp) 상태:

$$\begin{aligned} w(r, \theta, t) \Big|_{r=a} &= 0 \\ \frac{\partial w(r, \theta, t)}{\partial r} \Big|_{r=a} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

디스크는 외경에서는 자유단(Free) 상태:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{\nu}{r} \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) \Big|_{r=b} &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial r} (\nabla^2 w) + \frac{1-\nu}{r^2} \left(\frac{\partial^3 w}{\partial r \partial \theta^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) \Big|_{r=b} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

위 경계조건과 원주방향의 주기조건을 이용하여 식(1)을 유한차분법을 사용하여 계산하고 4th order Runge-Kutta method를 적용하여 과도(transient)해석을 수행하였다.

3.1.2 유체 방정식 (레이놀즈 방정식)

유연 디스크와 안정기 사이의 작은 간극에서 형성되는 압력분포를 구하기 위해서 레이놀즈 방정식을 사용하였으며 이를 원통좌표계로 나타내면 식(5)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{r \rho_e d^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\rho_e d^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) = V_r \frac{\partial(\rho_e r d)}{\partial r} + V_\theta \frac{\partial(\rho_e d)}{\partial \theta} + r \frac{\partial(\rho_e d)}{\partial t} \quad (5)$$

디스크와 안정기 사이의 간극이 작으므로 층류 유동으로 가정할 수 있으며 간극을 흐르는 유체는 공기이고 속도가 빠르지 않으므로 비압축성 유체로 가정할 수 있다. 또한 r 방향의 속도는 θ 방향의 속도에 비해 작기 때문에 무시하였고 θ 방향 속도를 $r\Omega$ 로 두면 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r d^3 \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(d^3 \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) = 6\mu r \Omega \frac{\partial d}{\partial \theta} + 12\mu r \frac{\partial d}{\partial t} \quad (6)$$

안정기에는 스피들 모터의 회전축이 통과할 수 있도록 구멍이 있으며 이 구멍의 직경과 모터의 회전축 사이에는 충분한 틈이 존재하여 안정기의 밀면으로부터 간극으로 공기가 흐를 수 있다. 따라서 레이놀즈 방정식에서 압력의 경계조건으로는 디스크 내경과 외경에서 대기압, 원주방향으로는 주기조건을 사용하였으며 식(6)을 유한차분법으로 차분화한 후 ADI 방법을 적용하여 해석하였다.

3.2 해석 방법

수치해석은 디스크의 진동방정식과 유체방정식의 연성 해석으로 이루어진다. Figure 4의 순서도에 나타낸 바와 같이 초기 가정된 디스크의 축방향 변위를 사용하여 레이놀즈 방정식으로부터 간극에서 발생하는 압력분포를 구하고 그 압력분포를 디스크 방정식에서의 외력항으로 대입하여 축 방향 변위(w)를 구한다. 이러한 과정을 정상상태에 도달할 때까지 반복하게 된다.

3.3 해석 결과

3.3.1 진동 저감 효과

안정기의 진동저감 효과를 수치해석적으로 밝히

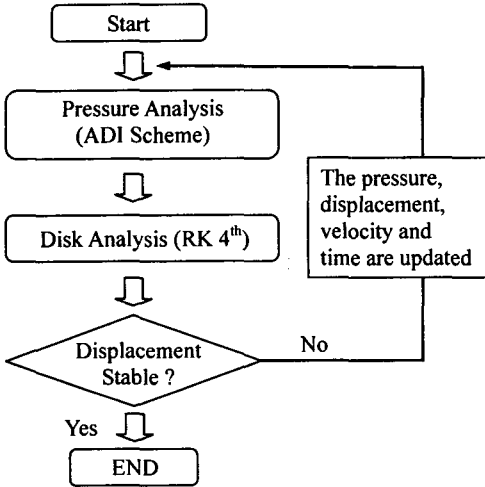


Fig. 4 Flow chart for numerical simulation

기 위하여 디스크의 초기변위를 Fig. 5 와 같이 원주방향으로 $40\mu\text{m}$ 진폭을 갖는 8 개의 파형으로 가정한 후 이를 계산하였다. 디스크를 5400RPM 으로 회전시켰을 때 안정기가 없는 경우와 Fig. 3(a)처럼 오목한 안정기를 사용하는 경우를 Fig.6 에 비교하였다. 안정기가 없는 경우의 디스크는 Fig. 6(a)처럼 초기조건 그대로 $40\mu\text{m}$ 의 진폭으로 계속 진동하는 반면 안정기가 있는 경우는 Fig. 6(b)처럼 대략 $10\mu\text{m}$ 의 진폭으로 감소되어 진동함을 확인할 수 있다. 이는 참고문헌 [8]에서 설명되었던 것과 같이 안정기에서 발생하는 양압과 음압의 압력분포가 디스크의 진동을 효율적으로 억제하는 역할을 하고 있음을 보여주며 다른 임의의 초기조건에 대해서도 유사한 진동 저감 효과를 보여준다.

3.3.2 정상상태 해석

위의 해석결과로 안정기가 진동저감에 효과가 있음을 확인할 수 있으며 진동저감이 된 후 정상상태진동(steady-state oscillation)을 함을 알 수 있다.

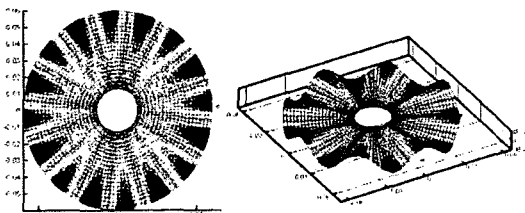
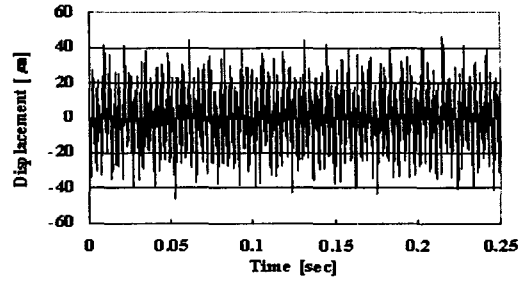
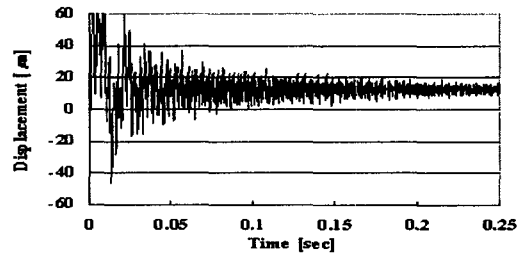


Fig. 5 Initial disturbance distribution



(a) Free vibration



(b) Using the stabilizer

Fig. 6 Displacement variations as a function of time at the point ($r=55\text{mm}$, $\Theta=0^\circ$)

Table 1 Simulation conditions

Initial gap size	Rotating speed	Time step	Stabilizer shape	Initial condition
$100\ \mu\text{m}$	5,400RPM	$0.5\ \mu\text{s}$	Concave	$w=0$

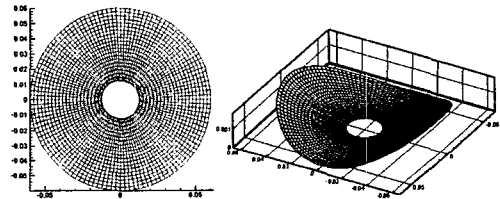


Fig. 7 Mesh generation (R-dir : 20, Θ -dir : 120)

정상상태에 도달한 후 디스크 전체의 변형된 모습을 보기 위해서 디스크의 초기조건을 평평하다고 가정한 다음 Table 1 의 해석조건을 사용하여 해석을 수행하였다. Figure 7 은 해석에서 사용한 디스크와 안정기의 격자형상이다.

Figure 8 은 정상상태에 도달하였을 때 디스크와 안정기 사이 간극에서 형성되는 압력분포도이다. 일반적인 공기베어링의 원리처럼 회전하는 디스크와 안정기 사이의 간극이 좁아지면서 양압이 형성

되고 다시 간극이 넓어지면서 음압이 형성된다. 안정기의 형상이 원주방향으로 크게 2 개의 주기 굴곡을 가지므로 압력분포 또한 이와 같은 주기를 가지며 형성된다. 안정기와 디스크 사이에서 발생되는 양압과 음압이 균형을 이루면서 디스크는 Fig. 9 와 같은 모양으로 안정기의 형상을 따라 변형되면서 10 μ m 이내의 진폭을 갖는 진동을 하며 안정된 상태로 회전하게 된다.

4. 실험

4.1 실험장치 및 방법

안정기가 유연 디스크의 진동저감에 효과가 있음을 수치해석으로 확인하였으며 이를 실험적으로 확인하기 위해서 세가지 형상의 안정기(Fig. 3)를 제작하여 실험을 하였다. Figure 10 은 디스크의 진동 변위량을 측정하기 위한 실험장치의 개략도이다. Figure 11 과 같이 디스크와 안정기 사이의 간극을 조절할 수 있도록 안정기, 지지대를 마이크로 스테이지에 조립한다. 스피들 모터를 비롯한 모든 실험장치를 방진테이블에 고정시키고 레이저 변위 센서를 이용하여 디스크의 진동 변위를 측정하였다.

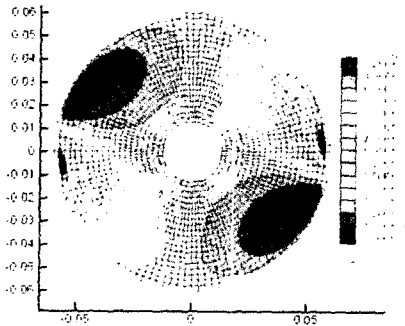


Fig. 8 Pressure distribution by simulation

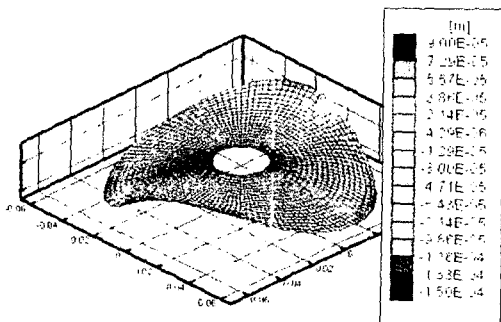


Fig. 9 Steady-state of the disk by simulation

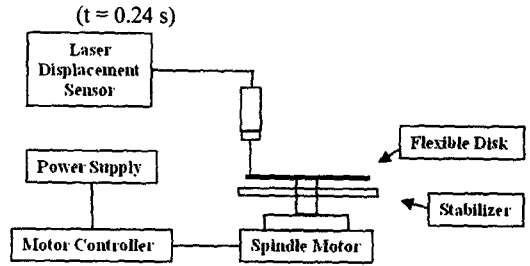


Fig. 10 Schematic of experimental apparatus

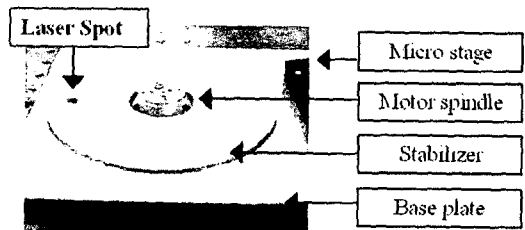


Fig. 11 Photograph of stabilizer and base plate

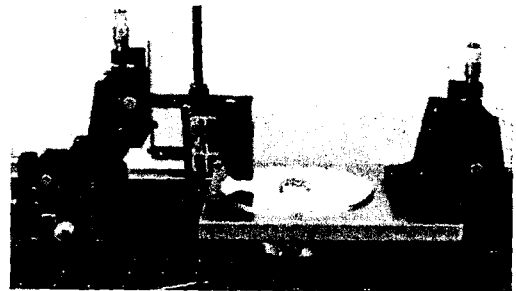


Fig. 12 Photograph of experimental apparatus

디스크는 안정기 위에서 모터 컨트롤러에 의해 5,400RPM 으로 회전하며 Fig. 12 는 전체 실험장치의 모습을 보여준다.

4.2 실험결과

Figure 13 은 5400RPM 으로 회전하는 유연디스크를 오목한 안정기로 진동을 저감시켰을 때 진동량을 측정한 결과이다. 대략 $\pm 2.5\mu$ m 의 진폭에 약 11ms 의 주기성을 띄며 정상상태 진동을 한다. 이는 안정기 없이 디스크가 회전할 경우에 발생하는 약 ± 1 mm 의 진동량에 비해서 매우 효과적으로 진동이 저감된 상태임을 알 수 있다.

유연 디스크를 정보저장매체로 사용하려면 두가지의 문제가 선행되어야 한다. 하나는 회전하는 디스크의 진동량을 줄여야 함이며 다른 하나는 정상상태일 때 디스크가 반경방향으로 수평해야 한다는 것이다. 즉, 반경방향으로 수평하게 움직이는 Optical pick-up 이 데이터를 읽고 쓰기 위해서는 디

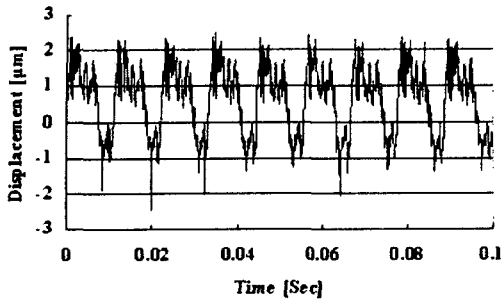


Fig. 13 Steady-state oscillation for flexible disk

스크도 수평한 부분이 존재하여야 한다. 위 두 문제를 확인하고자 각 안정기의 진동량과 간극을 측정하여서 서로 비교하였다. Figure 14는 세가지 형상의 안정기를 특정 원주에서 반경에 따른 진폭을 측정한 결과이다. 세가지 안정기 모두 20 μm 이내의 진폭으로 진동함을 확인할 수 있다. Figure 15는 회전하는 디스크와 안정기사이의 간극을 변위센서로 측정한 결과이다. 오목한 안정기의 경우 디스크의 처짐 정도가 약 30 μm 로 다른 형상의 안정기에 비해 비교적 수평한 상태를 유지하고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 안정기를 사용하여 유연 디스크의 축 방향 진동을 비접촉 방식으로 저감시킬 수 있음을 수치해석과 실험을 통하여 확인하였다.

먼저 적절한 가정을 바탕으로 수행한 수치해석 결과로부터 안정기의 진동저감 성능을 확인하였다. 그리고 디스크가 정상상태로 회전할 때 디스크와 안정기 사이의 압력분포와 디스크 변위분포를 해석하여 디스크 진동현상을 유체역학적으로 규명하였다.

실험을 수행하여 수치해석의 타당성을 확인하였

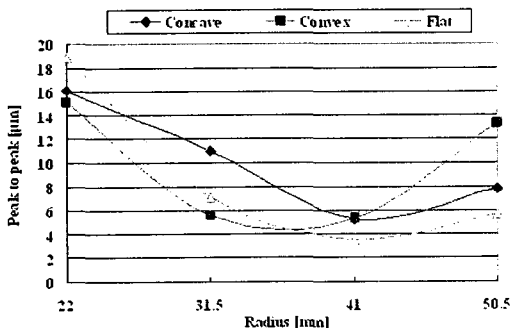


Fig. 14 Amplitude of disk vibration

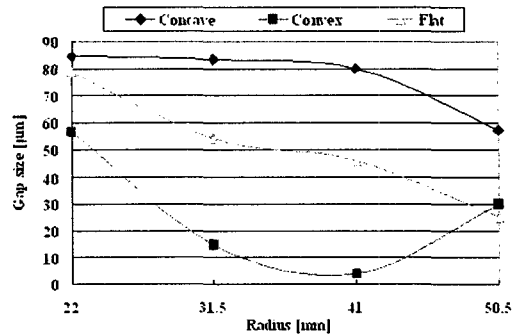


Fig. 15 Gap size in certain Θ -direction

으며 다음의 결과를 얻을 수 있었다. 디스크 내부 특정 포인트에서의 진동량을 측정한 결과 약 $\pm 2.5\mu\text{m}$ 진폭을 관찰할 수 있었는데 이는 안정기가 없는 상태인 약 $\pm 1\text{mm}$ 진폭에 비해 매우 작은 수치로써 안정기가 진동저감에 탁월한 효과가 있음을 확인하였다. 또한 유연 디스크가 정보저장매체로 사용될 때 optical pick-up 이 작동될 부분이 존재하여야 하는데 유연디스크와 안정기 사이의 간극을 측정하는 실험을 통하여 적절한 안정기 형상을 찾아보았다. 세가지 형상의 안정기에 대해서 진동량과 간극을 측정한 결과 오목한 형상의 안정기가 광학식 정보저장매체로 사용하기에 적합함을 확인하였다.

후기

본 연구는 한국과학기술원 지정 정보저장기연구센터와 RICOH 의 공동지원으로 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] H. Lamb and R.V. Southwell, 1921, "The vibrations of a Spinning Disk", Proceedings of the Royal Society of London, Vol.99, No.699, pp.272-280
- [2] J.G. Simmonds, 1962, "The transverse vibrations of a flat spinning membrane", J. Aeronaut. Sci.29, pp.16-18
- [3] R. C. Benson and D. B. Bogy, 1978, "Deflection of a Very Flexible Spinning Disk Due to a Stationary Transverse Load", ASME Journal of Applied Mechanics, Vol.45, pp.636-642
- [4] K. Yasuda, T. Torii, and T. Shimizu., 1992, "Self-Excited Oscillations of a Circular Disk Rotating in Air", JSME International Journal, Series III, Vol.35, No.3, pp.347-352

- [5] G. Naganathan, S. Ramadhayani and A. K. Bajaj, 2003, "Numerical Simulation of Flutter Instability of a Flexible Disk Rotating Close to a Rigid Wall", *Journal of Vibration and Control*, Vol.9, pp.95-118
- [6] A.I. Krauter and P.Z. Bulkeley, 1970, "Effect of Central Clamping on Transverse vibration of Spinning Membrane Disks", *ASME Journal of Applied Mechanics*, pp.1037-1042
- [7] Y. Aman, N. Onagi, S. Murata and K. Uchida, 2004, "Effect of Stabilizer in Reducing Effects of Axial Runnout on a Flexible Optical Disk," *International colloquium on optical memories*, Japan Society of Applied Physics, pp.4835-4838
- [8] Y-H Um, H-R Lee, S-H Lee, Y-C Rhim, 2005, "Non-contact Vibration Suppression of a Rotating Flexble Disk", *Journal of Society of Information Storage Systems*, Vol.1, No.2, pp.169-174
- [9] H. Awano, H. Ido, T. Iida, Y. Watanabe and H.Kishi, 2006, "Nanoprinted Thin Film Optical Discs TB Cartridge and Compact Auto Disk Changer named as SVOD", *Optical Data Storage Topical Meeting*, pp. 234-236