

고속회전 유연디스크의 거동해석과 경험식

Behavior Analysis and Empirical Relation for a Flexible Disk with High Speed Rotation

이호렬[†], 임윤철^{*}

Ho-Ryul Lee and Yoon-Chul Rhim

Abstract

Organizations such as broadcasting stations and libraries which deal with huge amount of information require high-capacity storage systems for archiving their materials and information. It is necessary and urgent for the storage people to develop a compact, high capacity, and low-cost data storage systems. Even though the Blue-ray technology is commercialized and now it is on the market, demand for the compact and low-cost system is still increasing. A flexible disk system has been introduced recently to satisfy above mentioned requirements. The system uses multiple of thin disks and is expected to achieve technical requirements. However, decreasing the disk thickness makes it difficult to read and write data because it decreases the disk rigidity so that the transverse vibration of the rotating disk increases easily due to both the interaction with surrounding air and the vibration characteristics of thin flexible disk itself. In this study, flat-type stabilizer is proposed to suppress the transverse vibration of a 95 μ m-thick polycarbonate disk. Characteristics of disk vibration have been studied through the results of numerical analysis from the fluid mechanics point of view. Numerical simulation is verified through the experiment by measuring the gap between the rotating disk and the stationary flat stabilizer. The axial deflections of the disk are computed for various rotating speeds and reference gap sizes and then a method of regression is applied to those data. As a result, an empirical relation is proposed for the steady deformation shape of the rotating disk.

Key Words : Flexible disk, Transverse vibration, Stabilizer, Numerical simulation, Empirical relation

기호설명

- ρ_a : density of the fluid
- ρ_d : density of the disk
- r_a : inner radius of the disk
- r_b : outer 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)
- μ : viscosity of the air
- Ω : angular velocity
- P : pressure generated in the gap
- σ_r : r-direction stress due to centrifugal force
- σ_θ : θ -direction stress due to centrifugal force

1. 서론

1.1 연구 배경

최근 방송국, 도서관에서는 방송자료, 서적, 신문 등 대량의 자료들을 디지털화하여 보관하려는 움직임을 보이고 있다. 이를 달성하기 위해서는 정보저장기기의 대용량화, 저가격화, 소형화가 필히 요구되는데 최근 청자색 레이저(blue-ray)의 개발로 Optical Spot의 크기를 현저히 감소시켜 대용량화가 가능하게 된 광학식 정보저장기기가 이에 가장 적합하다. 그럼에도 불구하고 저장해야 할 자료가 방대하므로 다량의 디스크가 필요하며 저렴한 가격과 더불어 소형화가 가능해야 한다.

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

^{*} 연세대학교 기계공학과 (rhimyc@yonsei.ac.kr)
논문접수일 (2006년 11월 14일)

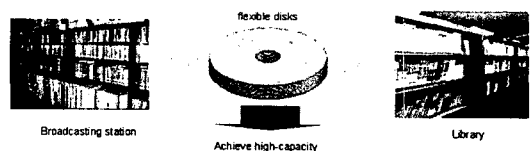


Fig. 1 Application of the flexible disk system

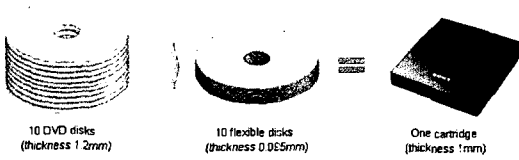


Fig. 2 Advantage of the flexible disk

다량의 디스크를 용이하게 보관하기 위해서는 디스크의 부피감소가 요구되는데 디스크 저장용량을 유지하면서 소형화를 달성하기 위해서는 박형화 즉, 디스크의 두께 감소가 요구된다. Figure 2와 같이 두께 95 μ m의 유연디스크는 여러 장을 간편하게 휴대할 수 있는 장점이 있어 기기의 박형화를 가능하게 한다. 그러나 디스크 두께의 감소는 디스크 강성의 감소로 이어져 축 방향 진동(transverse vibration)을 증가시킬 뿐만 아니라 디스크 주변 유동장과 활발한 상호작용을 일으켜 데이터의 기록 및 재생을 어렵게 한다. 따라서 유연디스크 시스템을 개발하기 위해서는 고속회전하는 얇은 디스크의 거동에 대한 정확한 이해가 선행되어야 하며 디스크의 진동을 억제하고 동적 불안정성을 저감시킬 수 있는 유체역학적 개념에 근거한 시스템 설계가 바탕이 되어야 한다.

회전 디스크에 관한 연구는 Lamb[1]등이 굽힘 강성을 고려한 수학적 모델을 시초로 Benson[2]등이 회전 디스크에 축 방향 힘을 인가할 경우 디스크가 안정적으로 회전할 수 있음을 수치해석적으로 밝혔으며 Naganathan[3]등은 회전 디스크 모델식과 레이놀즈식을 연립한 해석으로 회전 안정성과 외란의 영향에 대한 연구를 수행하였다. Aman[4]등은 실험을 통하여 회전하는 유연 디스크의 진동저감에 안정기가 효과적임을 입증하였고 엄요한[5]등은 negative slider의 개념을 응용한 유연 디스크용 안정기를 제안하였다. 이호렬[6]은 다양한 곡률을 갖는 안정기 형상에 대한 유연 디스크의 축 방향 진동을 해석하였다.

1.2 연구 목적

본 연구에서 사용한 유연디스크의 물성치는 Table 1과 같다. 디스크의 얇은 두께로 인해서 발생하는 축 방향 진동을 Fig. 3과 같은 평편한 형상의 안정기로 비접촉 방식으로 저감시키고자 한다. 즉, 디스크와 안정기 사이에 얇은 유체 막(thin fluid film)을 형성하여 막에서 형성되는 압력을 이용하여 디스크 진동을 저감시키고자 하는 것이다. 수치해석과 실험을 병행하여 각 결과의 타당성을 확인하고 수치해석 결과로부터 경험식을 제안하는 것을 목표로 한다.

Table 1 Material properties of the flexible disk

Disk thickness (h)	0.095 mm
Inner diameter (r_a)	25 mm
Outer diameter (r_b)	120 mm
Elastic modulus (E)	2.5 GPa
Disk density (ρ_d)	1200 kg/m ³
Poisson's ratio (ν)	0.23

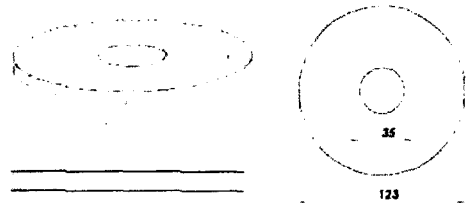


Fig. 3 The flat-type stabilizer

2. 수치 해석

2.1 모델

안정기 위에서 회전하는 유연디스크의 동적 거동해석은 디스크 축 방향 변위와 응력의 관계식인 디스크 변위방정식과 유체역학적 관점에서 압력을 구하는 레이놀즈식을 동시에 고려하여야 한다. 본 연구에서 사용한 수치해석 모델을 Fig. 4에 도시하였으며 Fig. 5는 해석에서의 중요변수인 기준간극(reference gap)을 유연디스크가 결합된 clamp 부분과 안정기 사이의 거리로 정의하였음을 보여준다. 두 지배방정식을 광범위하게 적용할 수 있도록 원주방향으로의 변화도 고려하였다.

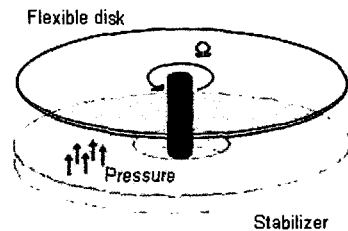


Fig. 4 Numerical simulation model

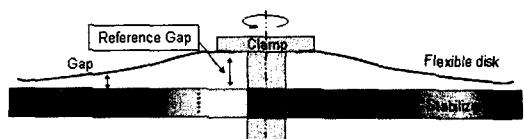


Fig. 5 Definition of the reference gap

2.2 레이놀즈식

유연디스크와 안정기 사이의 간극에서 형성되는 압력분포는 유막의 두께가 얇다는 가정을 사용하여 Navier-Stokes 방정식을 간략화한 레이놀즈식을 이용하여 해석하였다[3].

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r h^3 \frac{\partial P}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(h^3 \frac{\partial P}{\partial \theta} \right) = \left(\frac{3\rho\Omega^2}{10} \right) \frac{\partial}{\partial r} (r^2 h^3) - 6\mu r \Omega \frac{\partial h}{\partial \theta} + 12\mu r \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\rho}{10\mu^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu\Omega h^5 \frac{\partial P}{\partial \theta} - \frac{3}{28} \frac{h^7}{r^2} \left(\frac{\partial P}{\partial \theta} \right)^2 \right] \quad (1)$$

디스크의 내경과 외경에서는 주위 공기와 쉽게 통하기 때문에 대기압조건을 사용하였으며 원주방향으로는 주기조건을 사용하여 식(1)을 무차원화하고 유한차분법으로 차분화한 후 Alternative Directional Implicit(ADI) 방법으로 해석하였다.

2.3 디스크 변위방정식

선형 판이론에 굽힘 강성과 외력 성분을 고려하여 회전하는 디스크의 지배방정식을 나타내면 식(2)와 같다[6]. 첫째 항은 관성성분 항이고 둘째, 셋째 항은 회전에 의해 발생하는 in-plane 응력성분 항이며 넷째, 다섯째 항은 각각 굽힘 강성과 외력을 의미한다. 식(3)에 원심력으로 인한 응력 항 σ_r , σ_θ 와 굽힘 강성 항 D 를 나타내었다.

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

$$\sigma_r = \frac{\rho_a \Omega^2}{8} \left[(1+\nu)(r_a^2 + r_b^2 \Gamma) - (3+\nu)r^2 + (1-\nu)\Gamma \frac{r_a^2 r_b^2}{r^2} \right]$$

$$\sigma_\theta = \frac{\rho_a \Omega^2}{8} \left[(1+\nu)(r_a^2 + r_b^2 \Gamma) - (1+3\nu)r^2 - (1-\nu)\Gamma \frac{r_a^2 r_b^2}{r^2} \right] \quad (3)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \quad \Gamma = \frac{-(1+\nu)r_a^2 + (3+\nu)r_b^2}{(1-\nu)r_a^2 + (1+\nu)r_b^2}$$

$$w(r, \theta, t)|_{r=a} = 0, \quad \left. \frac{\partial w(r, \theta, t)}{\partial r} \right|_{r=a} = 0 \quad (4)$$

$$\left. \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{\nu}{r} \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) \right|_{r=b} = 0$$

$$\left. \frac{\partial}{\partial r} (\nabla^2 w) + \frac{1-\nu}{r^2} \left(\frac{\partial^3 w}{\partial r \partial \theta^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) \right|_{r=b} = 0 \quad (5)$$

디스크 내경에서는 고정단 조건(식(4)), 외경에서는 자유단 조건(식(5)), 그리고 원주방향으로는 주기조건을 사용하였다[6]. 식(2)를 무차원화한 후 차분화하고 4th order Runge-Kutta method를 적용하여 steady oscillation의 결과를 얻을 때까지 과도해석(transient)의 형식을 빌어 반복계산하였다.

2.4 해석 방법

디스크의 변위방정식과 레이놀즈식의 연립 해석으로 수치해석은 수행된다. 초기 가정된 디스크의 축 방향 변위를 사용하여 레이놀즈식으로부터 간극에서 발생하는 압력분포를 구한 후 그 압력분포를 디스크 변위방정식의 외력 항에 대입하여 축 방향 변위(w)를 구한다. 이 과정을 정상상태에 도달할 때까지 반복한다.

2.5 해석 결과

디스크의 초기조건을 평면하다고 가정한 다음 Table 2의 해석조건을 사용하여 해석을 수행하였다. Figures 6, 7은 기준간극 100 μ m, 회전속도가 5400RPM의 경우 정상상태에 도달하였을 때 간극에서의 압력분포와 디스크의 변위분포 형상이다.

Table 2 Simulation conditions

Fluid	air
Reference gap	80 / 100 / 120 μ m
Rotating speed	3,600/5,400/7,200 RPM
Time step	0.5 μ s
Grid number (Disk)	R-dir: 20, Θ -dir: 120
Grid number (Stabilizer)	R-dir: 20, Θ -dir: 120

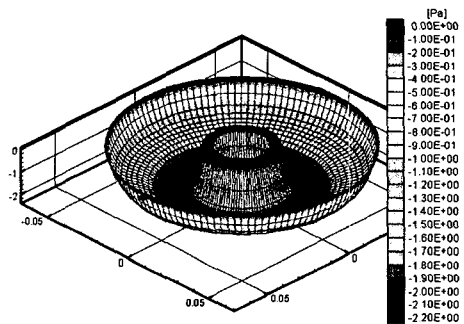


Fig. 6 Pressure in the gap at the steady-state

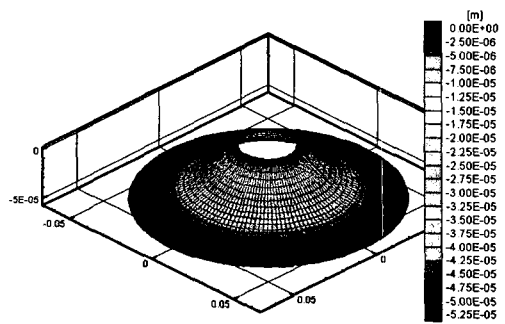


Fig. 7 Displacement of the disk at the steady-state

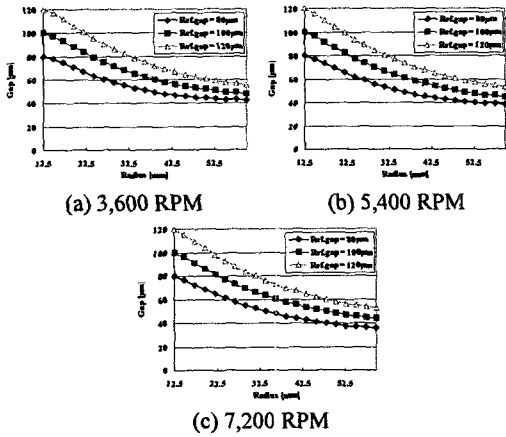


Fig. 8 Axisymmetric displacement at steady-state

수치해석 결과인 디스크와 안정기 사이의 간극 변화를 Fig. 8 과 같이 반경 방향에 대해 나타내었다. 디스크의 회전에 따른 원심력에 의한 디스크 내부의 응력분포와 안정기 사이의 공기 유동에 따른 압력분포가 평형을 이루는 상태로 변위가 발생하며 디스크 끝으로 갈수록 원심력 및 원주방향 선속이 증가하여 처짐이 크게 나타난다.

3. 실험

3.1 실험 장치

실험으로 디스크와 안정기 사이의 간극을 측정하여 수치해석 결과와 비교해서 수치해석의 타당성을 확인하고자 한다. Figure 9 는 전체 실험장치의 모습이며 Fig. 10 은 실험장치의 개략도이다. 디스크와 안정기 사이의 간극을 조절할 수 있도록 안정기, 지지대를 마이크로 스테이지에 조립하고 스피들 모터를 비롯한 모든 실험장치를 방진테이블에 고정시킨 다음 레이저 변위센서를 이용하여 디스크 진동량과 간극을 측정하였다.

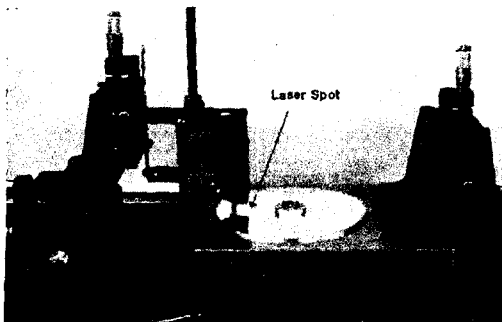


Fig. 9 Photograph of experiment apparatus

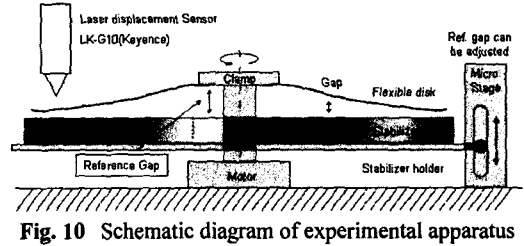


Fig. 10 Schematic diagram of experimental apparatus

3.2 실험 결과

Figure 11 은 기준간극이 120 μ m 일 때의 수치해석으로 계산한 간극과 실험으로 측정된 간극을 비교한 것이다. 디스크 중심으로부터 22 / 31.5 / 41 / 50.5 / 57.6 mm 떨어진 지점에서 측정하였다. 막대로 나타낸 실험값은 그 크기가 디스크의 진동량을 의미한다. 이는 안정기가 없는 상태인 ± 1 mm 진동량에 비해 매우 작은 수치로써 안정기가 진동저감에 탁월한 효과가 있음을 확인할 수 있다. 외경 근처에서의 실험값이 계산 결과와 비교적 큰 차이를 보이는데 해석에서 사용한 변위방정식과 경계조건이 실제와 차이가 있음을 의미하며 이에 대한 해석은 많은 추가적인 실험이 필요하다고 생각한다.

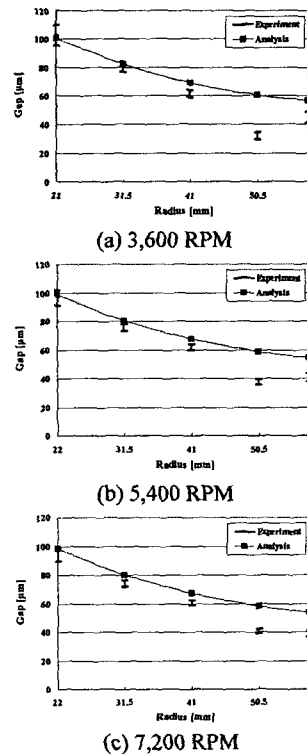


Fig. 11 Comparison between experiment and numerical simulation [ref. gap = 120 μ m]

4. 변위분포도

4.1 유연디스크 변위의 유사성

각 조건에서 해석한 결과인 Fig. 8 의 디스크 변위 곡선들은 그 모양이 유사하므로 regression 을 통해 경험식을 구해보고자 한다. 디스크 변위 곡선들을 각각의 기준간극으로 무차원화(normalize) 하여 나타내면 그 유사성을 더 확실하게 확인할 수 있는데 그 결과는 Fig. 12 와 같으며 대부분 유사한 경향을 나타내지만 해석조건에 따라서 조금씩 차이가 있다.

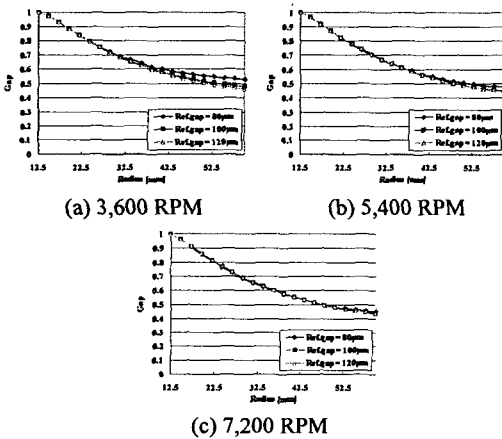


Fig. 12 Normalized displacement

식(6)과 같이 보정계수를 정의하여 식(7)의 관계식으로 Fig. 12 의 결과들을 하나의 선도로 나타내려고 한다. 식(6)의 지수 값들은 regression 을 통하여 찾았으며 이 결과를 변위분포도라 정하였고 Fig. 13 과 같다. 변위분포도를 역으로 이용하면 별도의 수치해석 없이도 원하는 조건에서의 디스크 처짐을 구할 수 있다. 즉, 구하고 싶은 회전수, 기준간극, 반지름, 등을 식(6)에 대입하여 보정계수를 계산하고, 계산된 보정계수를 다시 식(8)에 대입하면 디스크의 변위분포를 구할 수 있다.

$$factor(r, \omega, h) = \alpha \times \left(\frac{\omega_0 [RPM]}{\omega [RPM]} \right)^{18} \times \left(\frac{h_0 [\mu m]}{h [\mu m]} \right)^2 \times \left(\frac{r [mm]}{r_i [mm]} \cdot \frac{r_o [mm]}{r_i [mm]} \right) \quad (6)$$

r : radius [mm] r_o : Inner radius = 12.5 [mm]
 ω : rotating speed [RPM] r_i : Outer radius = 60 [mm]
 h : reference gap [µm] α : coefficient = 0.027
 ω_0 : 5400 [RPM]
 h_0 : 100 [µm]

Displacement Chart = Numerical sol. - factor (7)

Empirical sol. = Displacement Chart + factor (8)

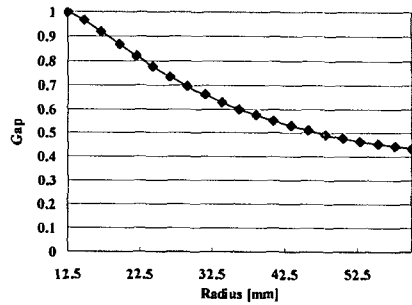


Fig. 13 Displacement chart for the flexible disk

4.2 변위분포도의 타당성

Figure 14 는 변위분포도의 유도에 사용한 해석조건으로 수치해석 결과와 경험식을 비교한 것이고 Fig. 15 는 변위분포도의 유도에 사용하지 않은 결과로서 경험식과 비교한 것이다. Figures 14, 15 의 결과에서 확인할 수 있듯이 수치해석 결과와 경험식은 거의 일치함을 확인할 수 있다. Figures 14, 15 의 수치해석 결과와 경험식에 대해서 식(9)로 오차를 계산하였을 때 평균적으로 약 1.7%정도의 오차를 가진다.

$$Error(\%) = \left| \frac{Numerical\ sol. - Empirical\ sol.}{Numerical\ sol.} \right| \times 100(\%) \quad (9)$$

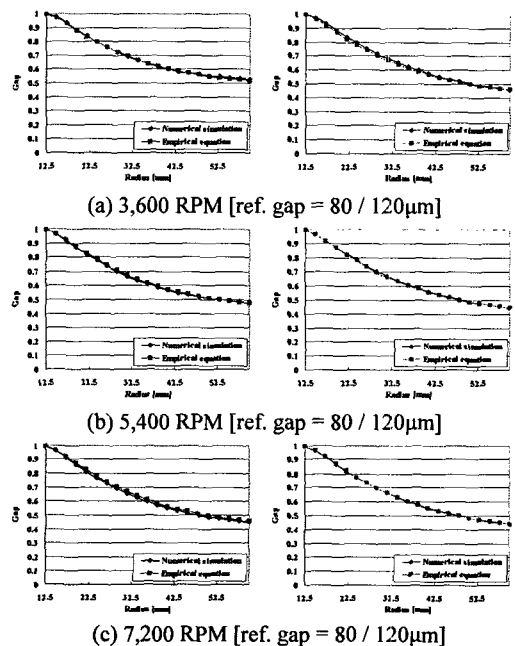


Fig. 14 Comparison between empirical equation and numerical simulation

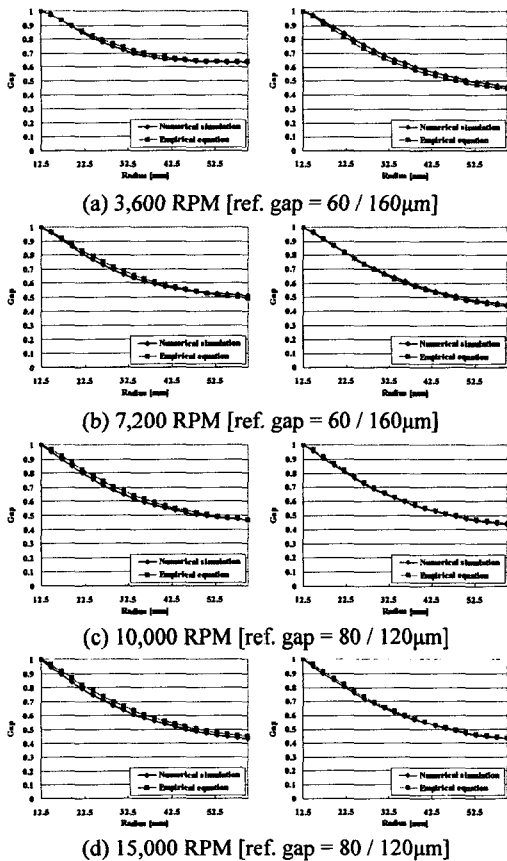


Fig. 15 Comparison between empirical equation and numerical simulation

5. 결론

차세대 광학식 정보저장기기의 응용으로 연구되고 있는 유연디스크는 얇은 두께로 인해서 여러 장을 간편하게 휴대할 수 있는 장점이 있다. 그러나 얇은 두께 때문에 원하지 않는 진동이 발생되는데 본 연구에서는 평면한 형상의 안정기를 사용하여 디스크의 진동을 비접촉 방식으로 저감시킬 수 있음을 수치해석과 실험을 통하여 확인하였다.

디스크가 정상상태로 회전할 때 디스크와 안정기 사이의 압력분포와 디스크 변위를 수치해석으로 계산하여 디스크 진동현상을 유체역학적으로 규명하였다. 또한 간극측정 실험을 수행한 후 수치해석 결과와 비교하여 수치해석의 타당성을 확인하였다. 다양한 회전속도와 기준간극으로 수치해석하고 무차원화한 결과들로부터 디스크 처짐의 유사성을 찾았으며 조금씩 차이가 나는 부분을 보

정계수를 정의하여 그 차이를 보정하여 하나의 선도인 변위분포도를 구하였다. 수치계산 결과의 유사성에 근거한 경험적인 보정식과 변위분포도를 이용하여 수치계산 없이도 원하는 해석조건에서 디스크의 처짐을 구할 수 있음을 밝혔다.

본 논문에서 제시된 변위분포도는 그 활용이 제한적이므로(회전속도 3,600 RPM ~ 10,000 RPM, 기준간격 60 m ~ 160 m, polycarbonate disk, 직경 120mm, 두께 95 m) 현재 사용하고 있는 유연디스크의 물성치 뿐만 아니라 기하학적 형상이 다른 디스크일 경우에도 적용 가능하도록 디스크의 두께, 밀도, 강성, Poisson 비 등에 대해서도 보완되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 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] 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
- [3] 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
- [4] 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
- [5] Yo-Han Um, Ho-Ryul Lee, Sung-Ho Lee, and Yoon-Chul Rhim, 2005, "Non-contact Vibration Suppression of a Rotating Flexible Disk," Transactions of the Society of Information Storage Systems, Vol.1, No.2, pp.169-174
- [6] Ho-Ryul Lee and Yoon-Chul Rhim, 2006, "A Study on the Behavior of a Spinning Flexible Disk near a Curved Wall," Transactions of the Society of Information Storage Systems, Vol.2, No.3, pp.201-207