

# CD-ROM 드라이브의 회전임계속도 및 공기유동에 의한 불안정성 연구

°박 관우\* · 이 승엽\*\*

## Critical Speed and Flutter Instability of a Rotating Disk in CD-ROM Drives

Kwan-Woo Park, Seung-Yop Lee

### Abstract

As the disk rotation speed increases in information storage devices, aerodynamically excited disk vibration is induced by airflow around the disk. This paper investigates theoretical and experimental studies on the disk flutter instability in CD-ROM drives. The effect of airflow on the disk vibration is modeled as the distributed damping and lift forces. By analyzing the eigenvalue problem of the aero-elastic coupling model, we introduces a novel technique to predict the flutter speed by comparing experimental natural frequencies with analytical ones of a disk rotating in vacuum. The new method predicts that the vibration mode with two nodal diameters in a CD disk experiences the first flutter instability at 12,000 rpm.

### 1. 서 론

회전하는 디스크는 다양한 회전기계 시스템에 사용되는 부품으로 많은 연구가 있어왔고 최근에는 고속 회전하는 하드디스크 및 광디스크 드라이브 등의 정보저장기기 분야에 응용되고 있다. 현재 정보저장기기는 데이터전달율(data transfer rate) 향상을 위해 디스크 회전속도의 급격한 증가가 이루어지고 있는데 고속 회전시 디스크 진동 저감이 절대적으로 요구된다 [1].

하드디스크 드라이브의 경우 15,000 rpm의 디스크 회전속도를 갖는 제품이 출시되고 있고 CD-ROM 드라이브 경우 이미 초임계속도(supercritical speed)에서 광디스크가 회전하고

있다. 특별히 고속회전시 발생하는 공기유동이 디스크의 플러터(flutter) 불안정성을 초래하여 시스템에 치명적인 손상을 일으킨다. 이러한 유체유발진동(fluid-induced vibration) 문제는 복잡한 유체-구조물의 상호작용을 해석하여야하므로 그동안 많은 연구에도 불구하고 체계적인 연구가 매우 부족한 실정이다.

D'Angelo와 Mote [2]는 초임계속도에서 회전하는 얇은 원판의 플러터 현상을 실험적으로 측정하였고, Yasuda와 Torii [3]는 공기유동에 의한 효과를 분포감쇠와 양력으로 단순화하여 플러터 불안정성을 이론적으로 예측하였다. 고정된 벽 근처에서 회전하는 디스크의 진동은 연성된 레이놀즈 방정식을 이용하여 이론적으로 연구되었다 [4-6].

본 과제는 공기유동이 디스크에 미치는 영향을 나타내는 다양한 파라미터를 측정하거나 예측하지 않고 현재 디스크 고유진동수의 측정값과 공기유동을 고려하지 않은 이론적인 값을 비교하

\*서강대학교 기계공학과 대학원

\*\*서강대학교 기계공학과, 정회원

여 플러터 속도를 예측하는 새로운 방법을 제시한다. 공기유동에 의한 영향을 점성감쇠와 양력으로 모델링하여 디스크 진동을 지배하는 고유치 문제를 해석하여 플러터 불안정성이 일어나는 회전속도를 이론적으로 추론한다. 이 방법을 실제 CD-ROM 드라이브에 사용되는 광디스크에 적용하여 플러터가 일어나는 회전속도를 예측한다.

## 1. 회전디스크의 진동해석

### 2.1 공기유동을 고려하지 않을 때

디스크가  $\Omega$ 의 속도로 회전할 때에 관한 운동 방정식은 다음과 같이 구할 수 있다. Fig. 1과 같이 두께  $h$ , 바깥 반지름  $b$ , 안쪽 반지름  $a$ , 회전 각속도  $\Omega$ 인 디스크를 고려해 보기로 한다. 디스크의 횡방향 진동  $w(r, \theta, t)$ 에 관한 운동 방정식은 Kirchhoff의 판 이론에 의해 유도 될 수 있으며, 디스크에 고정된 회전 좌표계로 나타내면 다음과 같다 [7,8].

$$\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + D \nabla^4 w - \Omega^2 L(w) = 0 \quad (1)$$

여기에서, 
$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

$$L(w) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r Q_r \frac{\partial w}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (\frac{1}{r} Q_\theta \frac{\partial w}{\partial \theta})$$

$$Q_r = \frac{1}{8} \rho h \left\{ -(3+\nu)r^2 + c_1 + c_2 \frac{1}{r^2} \right\}$$

$$Q_\theta = \frac{1}{8} \rho h \left\{ -(1+3\nu)r^2 + c_1 - c_2 \frac{1}{r^2} \right\}$$

$$c_1 = \frac{(1+\nu)(3+\nu)a^4 + (1-\nu^2)b^4}{(1-\nu)b^2 + (1+\nu)a^2}$$

$$c_2 = a^2 b^2 \frac{(1-\nu)(3+\nu)a^2 - (1-\nu^2)b^2}{(1-\nu)b^2 + (1+\nu)a^2}$$

여기에서 위의 식에서  $E$ ,  $\rho$ ,  $\nu$ 는 각각 디스크의 탄성 계수, 밀도, 포아송 비이다. 경계조건은 다음과 같이 표현된다.

$$w=0, \quad \frac{\partial w}{\partial r} = 0 \quad \text{at } r=a$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{\nu}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\nu}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial r} (\nabla^2 w) + \frac{(1-\nu)}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2}) = 0 \quad \text{at } r=b$$

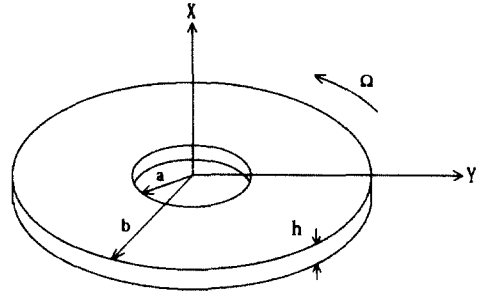


Fig. 1 Schematic of a rotating disk

운동방정식을 정규화하기 위하여 다음의 무차원 변수를 정의한다.

$$r' = \frac{r}{b}, \quad t' = \frac{t}{b^2} \sqrt{\frac{\rho h}{D}}, \quad \chi = \frac{a}{b}$$

$$w' = \frac{w}{h} \sqrt{12(1-\nu^2)}, \quad \Omega' = \Omega b^2 \sqrt{\frac{\rho h}{D}}$$

이 무차원 변수를 식 (1)에 적용하면 다음의 정규화된 운동방정식을 얻게 된다.

$$\frac{\partial^2 w'}{\partial t'^2} + \nabla^4 w' - \Omega'^2 L(w') = 0 \quad (2)$$

이후의 식은 무차원임을 나타내는 (')을 생략한다. 식 (2)의 해는 전형적인 변수 분리법을 이용하여 구한다.

$$w(r, \theta, t) = \Phi(r) \cos n\theta e^{st} \quad (3)$$

식 (3)을 식 (2)에 대입하면,

$$\rho h \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t'^2} (s^2 \Phi \cos n\theta e^{st}) + \nabla^4 \Phi \cos n\theta e^{st} + \Omega'^2 L(\Phi) = 0 \quad (4)$$

가 된다. 이로부터 반경방향 함수에 관련된 다음의 특성방정식을 얻게된다.

$$s^2 \Phi + \nabla^4 \Phi - \Omega'^2 L(\Phi) = 0 \quad (5)$$

식 (5)의 해는 다음과 같이 고유함수가 무한개의 Bessel 함수와 modified Bessel 함수로 표현된다.

$$\Phi(r) = \sum_{k=0}^{\infty} q_k u_k(r) \quad (6)$$

여기서,  $u_k(r) = c_1 J_n(\mu_k r) + c_2 I_n(\mu_k r)$

$$+ c_3 Y_n(\mu_k r) + c_4 K_n(\mu_k r) \quad (7)$$

각 계수는 경계조건으로부터 구해지고 식 (6)을 식 (4)를 대입하고  $\mu_k u_k(r)$ 을 곱하여 적분하면 고

유함수의 직교성질에 의해  $i$ 번째 모드계수에 관한 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$s^2 q_i + \mu_i^4 q_i - \Omega^2 \sum_{k=0}^{\infty} q_k \int_a^b L(u_k) r u_k dr = 0 \quad (8)$$

$N$ 개의 함수만을 이용하여 전개하면 다음과 같은 고유치 문제로 변환된다.

$$A \mathbf{q} = s^2 \mathbf{q} \quad (9)$$

여기에서,  $\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3, \dots, q_N]^T$ 이며

$$[A_{ij}] = -\delta_{ij} \mu_i^4 + \Omega^2 \int_a^b L(u_i) r u_j dr$$

위의 식을 풀이하여  $N$ 개의 고유진동수와 진동 모드를 구할 수 있다. 일반적으로 복잡한 Bessel 함수 대신에 용이성을 위해 반경방향 함수를 경계조건을 만족하는 다항식 형태의 유사 함수를 설정한다.

$$\Phi_n(r) = (r-a)^2 (1 + c_1 r + c_2 r^2) \quad (10)$$

식 (10)은 필수경계조건을 만족하며 상수  $c_1$ 과  $c_2$ 는 자연경계조건에서 구할 수 있다. 이러한 유사함수를 이용하면 디스크와 함께 하는 회전 좌표에서 본 고유진동수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_n^2 = \omega_{sn}^2 + \Omega^2 (\alpha_n + n^2 \beta_n) \quad (11)$$

여기서  $\omega_{sn}$ 는 디스크가 정지하고 있을 때의 고유진동수이고  $\alpha_n$ 과  $\beta_n$ 은 회전에 의한 반경방향과 원주방향 응력에 생기는 값으로 각각 다음과 같다.

$$\omega_{sn} = [\pi D \int_a^b (\nabla_n^4 \Phi_n) \Phi_n r dr]^{1/2} \quad (12)$$

$$\alpha_n = \pi \rho h \int_a^b Q_r \left( \frac{d\Phi_n}{dr} \right)^2 r dr$$

$$\beta_n = \pi \rho h \int_a^b Q_\theta \frac{\Phi_n^2}{r} dr \quad (13)$$

절대 좌표계에서 본 고유진동수는 디스크의 회전에 의해 각각 전진파(forward) 및 후진파 고유진동수(backward natural frequency)로 나누어지는데 이는 다음과 같다.

$$\omega_n^f = \sqrt{\omega_{sn}^2 + \Omega^2 (\alpha_n + n^2 \beta_n) + n\Omega} \quad (14)$$

$$\omega_n^b = \sqrt{\omega_{sn}^2 + \Omega^2 (\alpha_n + n^2 \beta_n) - n\Omega} \quad (15)$$

디스크의 회전속도가 증가하면서 후진파 고유진

동수는 영이 되는데 이때를 임계속도(critical speed)라 한다. 이를 나타내면 다음과 같다 [9].

$$\Omega_n^{cr} = \frac{\omega_{sn}}{\sqrt{n^2(1-\beta_n) - \alpha_n}} \quad (16)$$

앞에서 구한 식들을 이용하여 절직경(nodal diameter)을 갖는 디스크 모드에 대해서 고유진동수와 임계속도에 관련된 값들을 정리하면 다음과 같다.

Table. 1 Critical speeds of vibration modes and corresponding values of  $\alpha_n, \beta_n$

Mode	$\omega_{sn}$	$\alpha_n$	$\beta_n$	$\Omega_n^{cr}$
(0,0)	148.5	1.117	0.296	$\infty$
(0,1)	141.9	1.129	0.293	$\infty$
(0,2)	172.4	1.161	0.286	7950 rpm
(0,3)	307.8	1.193	0.279	8033 rpm
(0,4)	537.3	1.198	0.278	10221 rpm

여기서  $(m,n)$ 은  $m$ 개의 절점원(nodal circle)과  $n$ 개의 절직경을 갖는 진동모드를 뜻한다.

## 2.2 공기유동을 고려할 때

디스크가 회전시 공기유동을 고려할 때 디스크 진동을 고찰하기 위해 먼저 공기유동에 의한 영향을 다음의 두가지 분포력으로 모델링한다 [3, 10]. 하나는 점성 감쇠력(viscous damping force)이고, 다른 하나는 원주방향 기류기와 회전 속도에 비례하는 양력(lift force)이다. 따라서 공기유동의 효과를 고려한 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + C_D \frac{\partial w}{\partial t} + \nabla^4 w - \Omega^2 L(w) - C_L \Omega \frac{\partial w}{\partial \theta} = 0 \quad (17)$$

여기에서  $C_D$ 와  $C_L$ 은 각각 점성감쇠 및 양력 계수이다. 식 (17)을 만족하는 일반해는 다음과 같다.

$$w(r, \theta, t) = (\Phi(r) \cos n\theta + \bar{\Phi}(r) \sin n\theta) e^{st} \quad (18)$$

여기에서  $\bar{\Phi}(r)$ 는  $\Phi(r)$ 의 켈레 복소수이다. 식 (18)을 식 (17)에 대입하여 정리하면,

$$s^2 \Phi + C_D \Phi s + \nabla^4 \Phi - \Omega^2 L(\Phi) - C_L n \Omega \bar{\Phi} = 0$$

$$s^2 \bar{\Phi} + C_D \bar{\Phi} s + \nabla^4 \bar{\Phi} - \Omega^2 L(\bar{\Phi}) + C_L n \Omega \Phi = 0 \quad (19)$$

가 된다. 식 (19)에  $\Phi(r) = \sum_{k=1}^{\infty} q_k u_k(r)$  그리고

$\bar{\Phi}(r) = \sum_{k=1}^{\infty} \bar{q}_k u_k(r)$ 을 대입하여 정리하면 다음의 식과 같다.

$$s^2 q_i + \mu_i^4 q_i - \Omega^2 \sum_{k=1}^{\infty} q_k \int_a^b L(u_k) r u_i dr + C_{DS} q_i - C_L n \Omega \bar{q}_i = 0 \quad (20-1)$$

$$s^2 \bar{q}_i + \mu_i^4 \bar{q}_i - \Omega^2 \sum_{k=1}^{\infty} \bar{q}_k \int_a^b L(u_k) r u_i dr + C_{DS} \bar{q}_i + C_L n \Omega q_i = 0 \quad (20-2)$$

식 (20)을 고유치 문제로 변환하면 다음의 식으로 표현된다.

$$A \mathbf{q} + C_L n \Omega \bar{\mathbf{q}} = (s^2 + C_{DS}) \mathbf{q}$$

$$A \bar{\mathbf{q}} - C_L n \Omega \mathbf{q} = (s^2 + C_{DS}) \bar{\mathbf{q}} \quad (21)$$

여기서,  $[A_{ij}] = -\delta_{ij} \mu_i^4 + \Omega^2 \int_a^b L(u_i) r u_j dr$

$$\mathbf{q} = [q_1, q_2, q_3, \dots, q_N]^T$$

$$\bar{\mathbf{q}} = [\bar{q}_1, \bar{q}_2, \bar{q}_3, \dots, \bar{q}_N]^T$$

식 (9)으로부터 공기유동을 고려하지 않을 때의 고유치와 모드벡터를 각각  $s_0$ 와  $\mathbf{q}_0$ 라 하면 식 (21)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s^2 + C_{DS} - s_0^2 = \pm i C_L n \Omega \quad (22)$$

이때의 모드 벡터는  $\mathbf{q} = \mathbf{q}_0$ ,  $\bar{\mathbf{q}} = \pm i \bar{\mathbf{q}}_0$ 가 된다. 공기의 효과를 고려한 식 (22)의 해를 알아보기 위해  $s^2 + C_{DS} - s_0^2 = \pm i C_L n \Omega$ 인 경우를 살펴보면, 그 해는 다음과 같다.

$$s_1 = \lambda_b + i\omega, \quad s_2 = \lambda_f - i\omega \quad (23)$$

고유치  $s_1$ 과  $s_2$ 에 관련된 모드 함수는 다음과 같다.

$$\Phi_1 = \Phi_0, \quad \Phi_2 = \Phi_0, \quad \bar{\Phi}_1 = i\Phi_0, \quad \bar{\Phi}_2 = i\Phi_0 \quad (24)$$

이번에는  $s^2 + C_{DS} - s_0^2 = -i C_L n \Omega$ 의 고유치를 살펴보기로 하자.

$$s_3 = \lambda_b - i\omega, \quad s_4 = \lambda_f + i\omega \quad (25)$$

이때의 모드 함수는 다음과 같다.

$$\Phi_3 = \Phi_0, \quad \Phi_4 = \Phi_0, \quad \bar{\Phi}_3 = -i\Phi_0, \quad \bar{\Phi}_4 = -i\Phi_0 \quad (26)$$

디스크의 횡방향 진동은 다음과 같이 모드 함수의 합으로 표현할 수 있다.

$$w(r, \theta, t) = (\Phi_1 \cos n\theta + \bar{\Phi}_1 \sin n\theta) e^{s_1 t} + (\Phi_3 \cos n\theta + \bar{\Phi}_3 \sin n\theta) e^{s_3 t} \quad (27)$$

디스크 진동의 동적 안정성은 고유치 실수부의 부호에 관련되기 때문에 식 (23)을 식 (22)에 대입하여 관계식을 유도한다.

먼저,  $s_1 = \lambda_b + i\omega$ 을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$(\lambda_b^2 + C_D \lambda_b - \omega^2 + \omega_0^2) + i(2\lambda_b \omega - C_L n \Omega + C_D \omega) = 0 \quad (28)$$

마찬가지로  $s_2 = \lambda_f - i\omega$ 를 대입하여 정리하면 식 (29)와 같이 된다.

$$(\lambda_f^2 + C_D \lambda_f - \omega^2 + \omega_0^2) + i(-2\lambda_f \omega + C_L n \Omega - C_D \omega) = 0 \quad (29)$$

식 (28)과 식 (29)에서 허수부를 정리하면 고유치의 실수부를 감쇠 및 양력계수로 표현할 수 있다.

$$\lambda_f = -\frac{1}{2} C_L n \frac{\Omega}{\omega} - \frac{1}{2} C_D \quad (30)$$

$$\lambda_b = \frac{1}{2} C_L n \frac{\Omega}{\omega} - \frac{1}{2} C_D \quad (31)$$

식 (28)과 식 (29)에서 실수부를 정리하면 다음과 같은 전진파와 후진파의 고유진동수에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$\omega_f^2 = \omega_0^2 + \lambda_f^2 + C_D \lambda_f \quad (32)$$

$$\omega_b^2 = \omega_0^2 + \lambda_b^2 + C_D \lambda_b \quad (33)$$

식 (30)에서 알 수 있듯이  $\lambda_f$ 는 항상 음수이므로 전진파는 시간에 따라 감소함을 알 수 있다.

$\lambda_b$ 는 회전속도가 증가하면서 양수가 될 수 있는데 이때 디스크의 플러터 불안정성이 발생한다. 따라서,  $\lambda_b$ 의 임계값을 얻기 위해 식 (31)에  $\lambda_b = 0$ 일 때의 임계값을 구해보면 다음과 같다.

$$\omega = \frac{C_L}{C_D} n \Omega \quad (34)$$

따라서 후진파의 고유진동수가 식 (34)의 식으로 표현된 임계값보다 작게 될 때 바로 플러터가 발생하게 된다. 다시 말해서, 식 (34)에  $C_D$ 와  $C_L$  값이 주어지면 플러터 불안정성이 생기는 진동모

드와 속도를 구할 수 있다. 이때의 속도를 플러터 속도(flutter speed)라 한다. 그러나 디스크 회전으로 발생하는 공기유동의 감쇠 및 양력계수를 구하는 것은 디스크 드라이브 구조의 복잡성을 고려할 때 매우 어려운 일이다. 그러나 식 (33)을 이용하면 이러한 계수를 직접 구하지 않고도 플러터 속도를 구할 수 있는 방법을 제시할 수 있다. 공기 유동을 고려하지 않았을 때의 고유진동수  $\omega_0$ 는 이론적으로 구해진 식 (11)으로부터 구할 수 있기 때문에 실험적으로 구한 고유진동수  $\omega_b$ 와 비교하여 플러터 속도를 예측할 수 있다.

식 (33)을 보면 전플러터(pre-flutter) 구간에서는  $\lambda_b$ 가 음수이므로 고유진동수  $\omega_b$ 는  $\omega_0$ 보다 항상 작게 된다. 그러나 후플러터(post-flutter) 구간에서는  $\lambda_b$ 가 양수가 되어 공기유동을 고려할 때의 고유진동수가 공기유동을 고려하지 않을 때의 고유진동수 보다 커지게 된다. 그러므로 플러터 속도는  $\omega_b = \omega_0$ 가 될 때의 회전속도가 된다. 이상에서 제시한 방법을 이용하면 복잡한 공기유동 효과를 직접 계산하지 않고도 현재의 디스크의 고유진동수를 측정함으로써 플러터 속도를 쉽게 예측할 수 있다.

### 3. 실험 및 분석

#### 3.1 실험장치

앞에서 이론적으로 해석한 디스크의 임계속도와 플러터 속도를 실험적으로 검증하기 위해서 다음과 같은 실험장치를 구성하였다. Fig. 2는 실험장치의 대략도를 보여준다. 디스크 모드의 미세한 진동을 측정하기 위해 스피커를 이용하여 가진 하였다. 이 스피커는 함수 발생기와 연결하여 random 신호를 부여함으로써 다양한 대역폭의 디스크 모드가 가진 되도록 하였다. 변위 센서는 ADE사의 MicroSense 3401 비접촉 변위 센서를 사용하였다. 전체 시스템은 방진 테이블 위에서 실험을 하였으므로 외부의 진동 소스를 차단하였다.

센서에서 나오는 신호는 신호분석기인 siglab에 전달되어서 주파수 분석을 하였다. 전달된 신

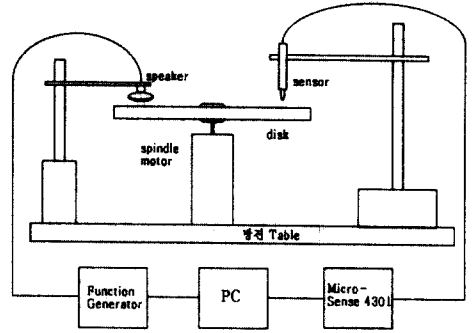


Fig. 2 Schematic of experimental setup

호에서 디스크의 진동모드는 다른 반복적인 신호를 제거한 비반복적 신호(NRRO)를 분석하여 구하였다.

#### 3.2 실험 결과

위의 실험 장치에서 얻은 결과를 가지고 회전 디스크의 임계속도 및 플러터 속도를 분석하면 다음과 같다. Fig. 3은 광디스크의 고유진동수를 스핀들 회전속도의 함수로 나타내었다. 디스크가 정지했을 때부터 9000 rpm까지 500 rpm의 간격으로 실험을 수행하였다.

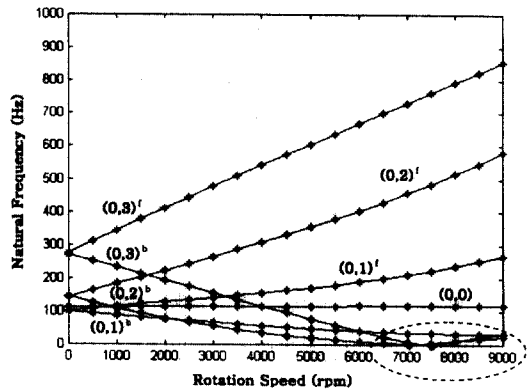


Fig. 3 Experimental natural frequencies of a CD disk in absolute coordinates

실험결과를 살펴보면, 약 7000-8000 rpm 사이에서 (0,2)와 (0,3) 모드의 고유진동수가 영이 됨을 알 수 있다. 이 부분을 자세히 관찰하기 위해

(Fig. 3의 점선부분) 회전속도 6000-10000 rpm 사이를 250 rpm 간격으로 실험을 하였고, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4를 통해 (0,2)와 (0,3) 모드의 임계속도를 정확히 알 수 있는데, 그 값은 (0,2) 모드는 6900 rpm, (0,3) 모드는 7500 rpm에서 임계속도를 갖는다. 임계속도 후에는 다시 고유진동수가 증가함을 볼 수 있다.

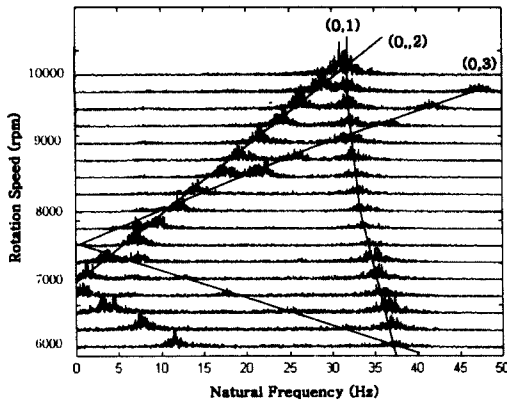


Fig. 4 Experimental natural frequencies (regions of 6000-10000 rpm)

절대 좌표계에서 측정된 고유진동수의 Fig. 3을 디스크와 함께 회전하는 회전 좌표계로 나타내면 Fig. 5와 같다. 이는 식 (32)와 (33)에서 예측한바와 같이 공기유동을 고려할 때는 후진파의 고유진동수가 전진파의 고유진동수보다 커지게 되는데 이를 실험적으로 관찰할 수 있다.

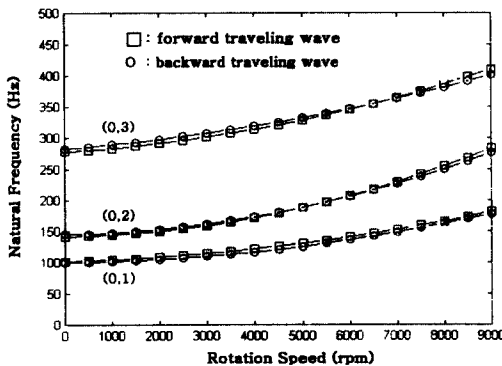


Fig. 5 Experimental natural frequencies of a CD disk in rotating coordinates

그리고, 플러터 속도를 예측하기 위해 공기유동을 고려하지 않을 때의 고유진동수와 Fig. 3에서 실험적으로 구한 후진파의 고유진동수를 15000 rpm 까지 Curve fitting 하여 Fig. 6에 나타내었다. (0,1) 모드는 플러터 불안정성이 일어나지 않으므로 (0,2) 모드와 (0,3) 모드만을 나타내었다.

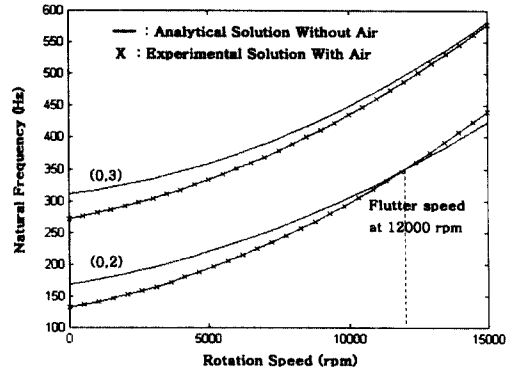


Fig. 6 Prediction of flutter speed using analytical and experimental data

이론적으로 식 (33)에서 예측한대로 (0,2) 모드는 공기유동을 고려하지 않을 때의 고유진동수가 12000 rpm 근처에서 공기유동을 고려한 실험값보다 작아짐을 알 수 있다. 그러므로 이때가 고유치의 실수부가 영이 되는 속도( $\lambda_b = 0$ )이며 이때의 속도가 플러터 속도가 된다. 이는 실험으로 관찰되어지는 12500-13000 rpm 사이에서의 플러터 속도와 비교할 때 약 5에서 8%의 오차 범위를 갖는다. 그러므로 본 논문에서 제시한 플러터 예측방법이 실제 플러터 속도를 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 CD/DVD ROM에서 고속회전시 발생하는 유체 유발 진동문제인 플러터 현상에 대해서 연구하였다. 이번 연구에서 플러터 속도를 예측하기 위해서 공기 유동을 점성 감쇠력과 양력으로 모델링한 수식을 세웠고, 이 수식에서 고유치의 실수부가 영이 되는 속도가 플러터 속도가 됨을 제시하였으며, 또한 실험적으로 디스크의 고유진동수만을 측정함으로써 플러터 속도를 예측할 수 있는 새로운 모델을 제시하였다.

따라서 본 논문에서 제시한 플러터 예측방법을 이용하면 다양한 정보저장기기의 플러터 불안정성을 예측할 수 있고 시스템의 동적 안정성을 높이는 데 기여할 것이다.

## 후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 981-1002-013-2)의 지원으로 수행되었으며 실험에 도움을 주신 LG정밀 조현래 선임연구원과 LG전자 김수경 박사님께 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] Lee, S.-Y., and Kim, S. K., "Mechanical Issues in Optical Disk Drives," *Information Storage and Processing Systems Division, IMECE : ASME Winter annual meeting, ISPS-Vol. 4*, pp. 81-90, 1998
- [2] D'Angelo, C. and C. D. Mote, Jr, "Aero dynamically excited vibration and flutter of a thin disk rotating at supercritical speed," *Journal of Sound and Vibration*, pp. 15-30, 1993
- [3] Yasuda, K., Torii, T. and Shimizu, T., "Self-excited oscillations of a circular disk rotating in air," *JSME International Journal*, Vol. 35, pp. 347-352, 1992
- [4] Hosaka, H. and Crandall, S. H., "Self excited vibrations of a flexible disk rotating on an air film above a flat surface," *Acta Mechanica* 3, pp.115-127, 1992
- [5] Huang, F. Y. and C. D. Mote, Jr, "On the instability mechanisms of a disk rotating close to a rigid surface," *Journal of Applied Mechanics* 62, pp. 764-771, 1995
- [6] Renshaw, A. A., "Critical speed for floppy disks," *Journal of Applied Mechanics* 65(1), pp.116-120, 1998
- [7] Lamb, H. and Southwell, R. V., "The Vibration of a Spinning Disk," *Proceeding of the Royal Society*, Vol. 99, pp. 272-280, 1921
- [8] Eversman, W. and Dodson, R. O., "Free vibration of a centrally clamped spinning circular disk," *AIAA Vol. 7, No. 10*, p. 2010, 1969
- [9] 이승엽, "정보저장기기의 회전 디스크 임계속도에 관한 연구," *한국소음진동공학회 1999년도 춘계 학술대회 논문집*, pp. 185-191, 1999
- [10] Hansen, M. H, Raman, A. and C. D. Mote, Jr, "Estimation of non-conservative aerodynamic pressure leading to flutter of spinning disks," *the CML technical report. U. C. Berkeley*