

# 진공 실험을 통한 공기와 회전 디스크의 상호 작용 및 진동 특성

°이승엽\* · 윤동화\*\* · 박영필\*\*\*

Aero-Induced Vibration Analysis of a Rotating Disk using a Vacuum Chamber

Seung-Yop Lee, Dongwha Yoon and Yongpil Park

## ABSTRACT

The analytical and experimental studies on aerodynamic flutter instability of rotating disks in information storage devices are investigated. The theoretical analysis uses a fluid-structure model where the aerodynamic force on the rotating disk is represented in terms of lift and damping forces. Based on the analytical approach, it is shown that the backward natural frequency of the disk is equal to that of the case without aerodynamic effect at the flutter onset speed. In post-flutter regions, the natural frequencies are larger than those in vacuum conditions without aerodynamic effect. The analytical predictions on the natural frequencies of rotating disks with/without aerodynamic effect are experimentally verified using a vacuum chamber and ASMO optical disks.

## 1. 서론

정보저장기로서 CD-ROM이나 DVD-ROM과 같은 광디스크 드라이브는 최근에 데이터 전달률을 높이기 위해 디스크의 회전속도가 급격하게 증가하고 있다. 최근 4년 동안 CD-ROM의 회전속도는 8 배속에서 52배속으로 비약적으로 증가하였으며 최근에는 고밀도 광디스크인 DVD-ROM의 회전속도가 급격하게 증가되고 있다. 최근 출시되는 24배속 DVD-ROM의 경우 디스크 회전속도에 있어서 52배속 CD-ROM과 비슷하다. 현재 CD/DVD-ROM의 경우는 후진과 고유진동수가 영이 되는 회전 디스크의 임계속도(Critical speed) 약 7000 rpm 정도로 측정되어지는데 회전속도의 배속 경쟁 때문에 두 디스크 모두 이미 초임계속도(Supercritical speed)에서 회전하고 있다 [1]. 디스크가 임계속도로 회전할 경우, 외력이 존재하게 되면 디스크의

변위가 증가하는 좌굴 불안정성이 발생한다.

디스크가 임계속도 이상으로 고속으로 회전하게 될 때 후진과 고유진동수가 외부 공기와 연성에 의해 디스크가 심하게 떨리는 현상이 발생하게 되는데 이를 플러터(Flutter) 현상이라 한다. 디스크 드라이브내의 디스크 미디어가 회전하면서 플러터 불안정성을 일으킬 경우 치명적인 데이터 전달 에러를 유발하게 된다. 따라서 드라이브 및 디스크 설계 시 이러한 특성을 고려해야하며 실험적인 방법이나 해석적인 방법을 통하여 임계속도 및 플러터 속도를 규명하는 것이 요구된다.

본 저자에 의한 기존의 연구에서는 공기유동을 고려하는 실제 상황에서 디스크의 고유진동수가 진공상태에서 고유진동수와 같게 될 때가 플러터 불안정성이 일어남을 이론적으로 예측하였다 [2, 3]. 본 연구는 이러한 회전디스크의 플러터 속도에 관한 이론적인 예측 방법을 진공 챔버를 이용한 실험으로 증명하려고 한다. 또한 공기유동을 고려할 때의 디스크의 고유진동수와 진공상태에서의 고유진동수의 차이를 이론적인 결과와 비교한다.

## 2. 회전 디스크의 임계속도와 플러터

\* 정회원, 서강대학교 기계공학과  
E-mail : sylee@sogang.ac.kr  
TEL : (02)706-8280, FAX : (02)712-0799

\*\* 서강대학교 기계공학과 대학원, 현 LG전자

\*\*\* 정회원, 연세대학교 기계공학과

다음의 Fig. 1과 같이 클램핑 반지름, 바깥 반지름, 두께가 각각  $a, b, h$ 인 디스크가  $\Omega$ 의 각속도로 회전하는 경우를 생각해 보자.

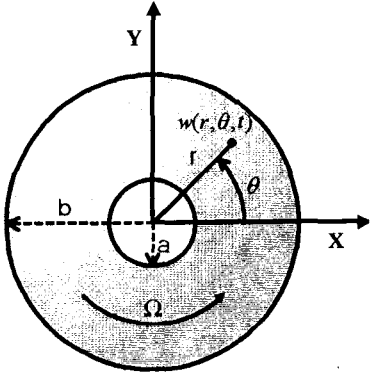


Fig. 1 Schematic of a rotating disk

Kirchhoff의 판 이론에 의해 디스크의 위치 및 운동에너지를 구하고 헤밀턴의 정리를 사용하여 디스크의 상하방향 진동  $w(r, \theta, t)$ 에 관한 운동방정식 및 경계조건을 구하면 다음과 같다 [4,5].

Equation of motion :

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

B.C. :

$$w = \frac{\partial w}{\partial r} = 0 \quad , \quad \text{at } r = a \quad (2)$$

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

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

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

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

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

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

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

이고,  $E, \rho, \nu$ 는 각각 디스크의 탄성 계수, 밀도, 포와송 비이다. 식 (1)을 무차원화 시키면,

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

이고, 운동방정식의 일반해는 다음과 같다.

$$w(r, \theta, t) = \Phi(r) \cos n\theta e^{st} \quad (5)$$

여기서,  $\Phi(r)$ 은 경계조건을 만족하는 모드함수로서 고유함수  $u_k(r)$ 의 1차 선형조합으로 표시된다.

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

식 (4)는 공기유동의 영향을 고려하지 않은 운동방정식으로 정지 좌표계에서에서는 회전에 의해 생기는 고유진동수가 다음과 같이 회전속도에 따라 증가하는 전진파 고유진동수  $\omega_n^f$ 와 회전속도에 따라 감소하는 후진파 고유진동수  $\omega_n^b$ 로 나뉘어 진다 [6].

$$\omega_n^f = \left| \sqrt{\omega_{sn}^2 + \Omega^2 (\alpha_n + n^2 \beta_n)} + n\Omega \right| \quad (6)$$

$$\omega_n^b = \left| \sqrt{\omega_{sn}^2 + \Omega^2 (\alpha_n + n^2 \beta_n)} - n\Omega \right| \quad (7)$$

식 (7)로부터 후진파 고유진동수가 0이 되는 속도를 디스크의 회전 임계속도라 정의하며

$$\Omega_n^{cr} = \frac{\omega_{sn}}{\sqrt{n^2(1-\beta_n) - \alpha_n}} \quad (8)$$

이 됨을 알 수 있다. 또한, 디스크와 함께 회전하는 회전 좌표계에서 본 고유진동수는 다음과 같다.

$$\omega_n = \sqrt{\omega_{sn}^2 + \Omega^2 (\alpha_n + n^2 \beta_n)} \quad (9)$$

다음으로는 공기유동을 고려한 회전 디스크의 운동방정식으로부터 고유진동수와 플러터 속도를 유도하는 과정을 살펴보자. 일반적으로 공기유동을 고려한 디스크의 회전 운동방정식은 공기유동효과에 의한 점성감쇠력과 양력을 고려하여 다음과 같이 모델링 할 수 있다 [2,7,8].

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + C_D \frac{\partial w}{\partial t} + \nabla^4 w - \Omega^2 L(w) - C_L \Omega \frac{\partial w}{\partial \theta} = 0 \quad (10)$$

여기서,  $C_D$ 와  $C_L$ 는 각각 점성감쇠계수 및 양력계수이다. 식 (10)을 만족하는 일반해는 다음과 같다.

$$w(r, \theta, t) = (\Phi(r) \cos n\theta + \bar{\Phi}(r) \sin n\theta) e^{st} \quad (11)$$

여기서,  $\bar{\Phi}(r)$ 는  $\Phi(r)$ 의 켈레 복소수이다. 식

(11)을 식 (10)에 대입하여 정리하면,

$$s^2 \Phi + C_D \Phi_s + \nabla^4 \Phi - \Omega^2 L(\Phi) - C_L n \Omega \bar{\Phi} = 0 \quad (12)$$

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

가 된다. 식 (12)의 모드함수를 다음과 같이

$$\Phi(r) = \sum_{k=1}^{\infty} q_k u_k(r), \quad \bar{\Phi}(r) = \sum_{k=1}^{\infty} \bar{q}_k u_k(r) \quad (13)$$

바꾸고, Galerkin 방법을 이용하여 정리하면

$$s^2 q_i + \mu_i^4 q_i - \Omega^2 \sum_{k=1}^{\infty} q_k \int_a^b L(u_k) r u_i dr + C_D s q_i - C_L n \Omega \bar{q}_i = 0 \quad (14)$$

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

이 된다. 식 (14)를 각각  $N$ 항까지 합하여 행렬형태로 표현하면 다음과 같은 고유치 문제가 된다.

$$\mathbf{A} \mathbf{q} + C_L n \Omega \bar{\mathbf{q}} = (s^2 + C_D s) \mathbf{q} \quad (15)$$

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

여기서,

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

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

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

위의 고유치 문제가 공기유동 효과를 고려한 경우의 고유진동수와 모드함수를 결정하게 된다. 먼저 공기유동 효과를 고려하지 않을 때의 고유치 및 모드벡터를 각각  $s_0$ 와  $\mathbf{q}_0$ 라 하면 이들은 다음 식을 만족한다.

$$\mathbf{A} \mathbf{q}_0 = s_0^2 \mathbf{q}_0 \quad (16)$$

선택된 해  $s_0$ 에 대해 다음 식을 만족하는 고유치  $s$ 를 결정한다.

$$s^2 + C_D s - s_0^2 = \pm i C_L n \Omega \quad (17)$$

여기서 양과 음의 부호가 사용되었다. 식 (16)과 식 (17)에 의해, 구해진 고유치  $s$

$$\mathbf{q} = \mathbf{q}_0 \quad (18)$$

$$\bar{\mathbf{q}} = \pm i \bar{\mathbf{q}}_0$$

도 식 (15)를 만족하게 된다. 따라서, 식 (17)에 의해 식(15)의 고유치들이 얻어지고 식 (18)에 의해 모드벡터들이 얻어진다. 공기 유동의 효과를 관찰하기 위하여, 식 (17)과 (18)의 해들을 구하였다. 양의 부호에 대한 식 (17)의 해  $s_1, s_2$ 는 다음과 같은 형태로 표시되고,

$$s_1 = \lambda_b + i\omega, \quad s_2 = \lambda_f - i\omega \quad (19)$$

이에 대응하는 모드함수는 식 (18)에 의해 각각 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$\Phi_1 = \Phi_0, \quad \Phi_2 = \Phi_0, \quad \bar{\Phi}_1 = i\Phi_0, \quad \bar{\Phi}_2 = i\Phi_0 \quad (20)$$

또한, 음의 부호에 대한 고유치 및 모드함수는 다음과 같다.

$$s_3 = \lambda_b - i\omega, \quad s_4 = \lambda_f + i\omega \quad (21)$$

이때의 모드함수는 마찬가지로 다음과 같다.

$$\Phi_3 = \Phi_0, \quad \Phi_4 = \Phi_0, \quad \bar{\Phi}_3 = -i\Phi_0, \quad \bar{\Phi}_4 = -i\Phi_0 \quad (22)$$

구해진 고유치와 모드함수들을 식(11)에 대입하면 다음과 같은 전진파 진동해

$$w(r, \theta, t) = (\Phi_2 \cos n\theta + \bar{\Phi}_4 \sin n\theta) e^{s_2 t} + (\Phi_2 \cos n\theta + \bar{\Phi}_4 \sin n\theta) e^{s_4 t} = \Phi_0 e^{\lambda_f t} \cos n(\omega t - n\theta) \quad (23)$$

및 후진파 진동해를 얻게된다.

$$w_b(r, \theta, t) = (\Phi_1 \cos n\theta + \bar{\Phi}_3 \sin n\theta) e^{s_1 t} + (\Phi_3 \cos n\theta + \bar{\Phi}_1 \sin n\theta) e^{s_3 t} = \Phi_0 e^{\lambda_b t} \cos n(\omega t + n\theta) \quad (24)$$

이때, 고유치의 실수부인  $\lambda_f$ 와  $\lambda_b$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\lambda_f = -\frac{1}{2} C_L n \frac{\Omega}{\omega} - \frac{1}{2} C_D \quad (25)$$

$$\lambda_b = \frac{1}{2} C_L n \frac{\Omega}{\omega} - \frac{1}{2} C_D \quad (26)$$

각 진행파의 고유진동수는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\omega_f^2 = \omega_n^2 + \lambda_f^2 + C_D \lambda_f \quad (27)$$

$$\omega_b^2 = \omega_n^2 + \lambda_b^2 + C_D \lambda_b \quad (28)$$

여기서,  $\omega_n$ 은 공기유동을 고려하지 않았을 때의 고유진동수이다. 식 (25)에서 보듯이,  $\lambda_f$ 는 항상 음수이므로 식 (23)의 전진파는 시간에 따라 감소하게 된다. 그러나, 식 (26)에 의해서 후진파 고유치의 실수부  $\lambda_b$ 는  $C_D$ 와  $C_L$  및  $\Omega$ 의 값에 따라 양수가 될 수도 있다. 만약  $\lambda_b$ 가 양수가 되면, 후진파 진동모드가 시간에 따라 증가하게 되어 플러터 불안정성이 발생하게 된다. 또한, 고유진동수도 공기유동을 고려하지 않았을 때의 고유진동수보다 커지게 된다. 진동의 수렴과 발산 사이의 임계값을 구하기 위하여 식 (26)에서  $\lambda_b$ 를 0으로 놓고 우변을 정리하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\Omega = \frac{C_D}{nC_L} \omega \quad (29)$$

따라서, 회전속도가 위의 위의 임계값보다 크게 될 때 플러터 불안정성이 발생하게 되며,  $C_D$ 와  $C_L$ 값이 주어지면 플러터 불안정성이 생기는 진동모드와 회전속도를 구할 수 있다. 그러나, 디스크 회전으로 발생하는 공기유동의 감쇠 및 양력계수를 구하는 것은 디스크 드라이브 구조의 복잡성을 고려할 때 매우 어려운 일이므로 실제로 플러터 속도를 예측할 수가 없다.

그러나 식 (28)을 이용하면 다른 방법으로 플러터

속도를 예측할 수가 있는데  $\lambda_b$  가 영이 될 때에

$$\omega_b = \omega_n \quad (30)$$

가 됨을 알 수 있다. 따라서 공기유동 효과를 고려할 때의 고유진동수와 진공 상태에서의 고유진동수가 같게 될 때가 플러터 속도가 발생하게 된다 [2,3].

### 3. 실험 및 분석

#### 3.1 실험장치 및 조건

공기 유동 조건에 따른 디스크의 회전 동특성 변화를 평가하기 위하여 Fig. 2와 같이 스테인레스 챔버(Stainless chamber)와 유압 진공펌프를 이용하는 실험 장치를 구성하였다. 실험대상 광디스크로는 CD/DVD ROM 드라이브에 장착이 가능한 0.6 mm 두께의 ASMO 디스크를 사용하였다.

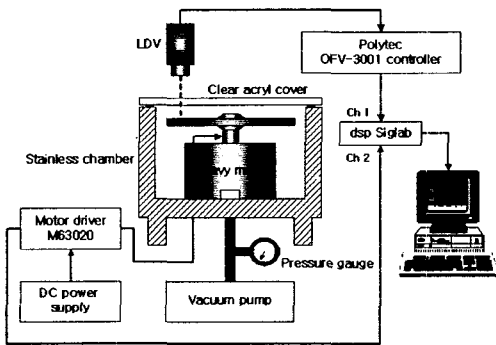


Fig. 2 Experimental setup for evaluating dynamic characteristics of rotating disks

실험 조건은 디스크가 외부 공기와 접촉하는 정도를 기준으로 하여 다음과 같이 3가지 경우를 적용하였다.

- case I) 진공상태의 챔버 내부
- case II) 대기압 상태의 밀폐된 챔버 내부
- case III) 상부의 투명 아크릴 커버가 제거된 상태의 챔버 내부

진공상태 실험을 위하여 투명 아크릴 커버로 고무 패킹 처리된 챔버 상부를 덮어 완전히 밀폐하고 유압진공 펌프를 이용하여 내부 대기압을 0으로 만들었다. 스피들 모터는 전용 드라이버를 이용하여 3000 rpm부터 10200 rpm 까지 240 rpm 단위로 회전시켰다. 디스크 표면의 상하방향 진동에 대한 변

위 측정은 Polytec의 LDV를 이용하였으며, 신호분석기인 Siglab을 이용하여 전압으로 변환된 변위 신호를 획득하고 주파수 분석을 실시하였다.

#### 3.2 실험결과 및 고찰

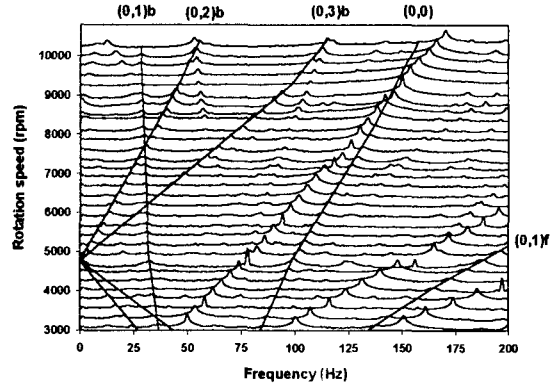


Fig. 3 Waterfall plot of a rotating ASMO in vacuum chamber condition

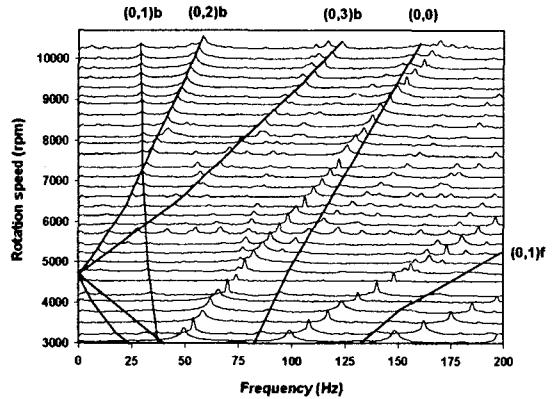


Fig. 4 Waterfall plot of a rotating ASMO in covered chamber condition

ASMO 디스크의 각 조건별 실험결과를 다음에 나타내었다. Fig. 3-5는 각각 ASMO 디스크를 진공 상태와 밀폐된 대기압 상태 그리고 상부가 개방된 챔버 내부에서 회전시킨 후 측정된 회전속도별 진동 스펙트럼의 Waterfall 선도이다. 각 디스크 모드별 전진파 및 후진파 고유진동수의 이동경향을 확인할 수 있다. 진공상태와 밀폐된 대기압 상태에서의 결과는 거의 동일하나 Fig. 5에서 보듯이 상부가 개방된 챔버 내부에서 회전시킨 경우는 약 10000 rpm 부근부터 그 이상의 회전속도까지 (0,2) 및

(0,3) 모드의 후진파 고유진동수들이 더 이상 증가하지 않고 그 진폭이 커짐을 알 수 있는데, 이를 플러터 현상이라 한다. 여기서, (m,n)모드란 m개의 절원(Nodal circle)과 n개의 절직경(Nodal diameter)을 갖는 디스크의 고유 진동 모드를 의미한다.

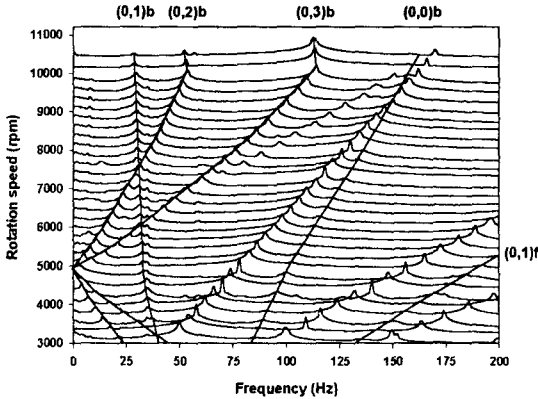


Fig. 5 Waterfall plot of a rotating ASMO in uncovered chamber condition (Magnitude : log scale)

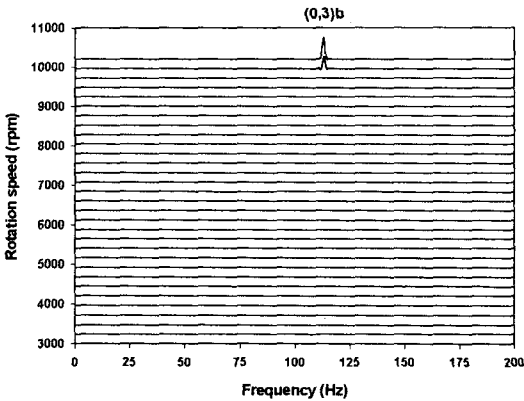


Fig. 6 Waterfall plot of a rotating ASMO in uncovered chamber condition (Magnitude : linear scale)

진동 불안정성이 발생하는 진동 모드를 알아보기 위해 Fig. 5의 그림에서 진폭을 선형(Linear)값으로 변환하여 Fig. 6에 나타내었다, ASMO 디스크의 플러터를 유발하는 디스크 모드가 (0,3) 모드임을 확인할 수 있다. 플러터 불안정성이 일어날 때 고유진동수가 회전속도 증가에 따라 더 이상 증가하지 않고 변화가 없게 되는데 이를 Frequency lock-on이라 하며 기존의 연구 결과와 일치한다 [9].

Waterfall 선도를 보면 각 조건별 전진파 및 후진파 고유진동수와 임계속도, 그리고 ASMO의 플러터 속도를 대략적으로 확인할 수 있다. 그러나, 좀 더 정확한 후진파 고유진동수의 이동양상을 파악하기 위하여 각 회전속도별 스펙트럼에서 후진파 고유진동수에 해당하는 피크 주파수들을 찾아내었다. 각 조건별 (0,2) 및 (0,3) 모드의 후진파 고유진동수를 선으로 연결한 결과들을 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다.

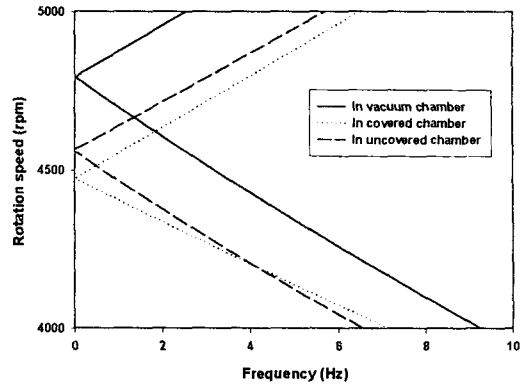


Fig. 7 (0,2)b mode traveling frequencies in stationary coordinate (ASMO)

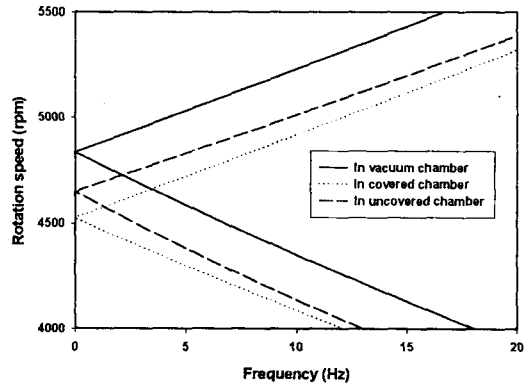


Fig. 8 (0,3)b mode traveling frequencies in stationary coordinate (ASMO)

실험에 의해 측정된 조건별 각 모드의 임계속도와 정지상태 고유진동수 값을 바탕으로 식 (34)에 의해 계산된 공기유동이 없는 상태의 임계속도를 비교한 결과가 Table 1에 나타나 있다. 일반적으로 공기유동이 없는 상태의 임계속도가 공기유동상태의 임계속도보다 커짐을 알 수 있다.

**Table 2** Critical speed of a rotating ASMO

mode	Analytical result (rpm)	Experimental result (rpm)		
		Vac.	Cov.	Unc.
(0,2)	4300	4793	4472	4562
(0,3)	4400	4832	4521	4646

표에서 Vac.는 진공상태의 챔버 내부를, Cov.는 밀폐된 대기압상태의 챔버 내부를, Unc.는 상부의 투명 아크릴 커버가 제거된 상태의 챔버 내부를 각각 의미한다.

회전 좌표계에서 본 후진파 고유진동수의 변화를 관찰하기 위하여 식(30)의 정지 좌표계 고유진동수를 다음과 같은 방법을 통해 식(31)의 회전 좌표계 고유진동수로 변환하였다.

정지 좌표계 후진파 고유진동수 :

$$\omega_n^b = |\sqrt{\omega_{sn}^2 + \Omega^2(\alpha_n + n^2\beta_n)} - n\Omega| \quad (30)$$

회전 좌표계 후진파 고유진동수 :

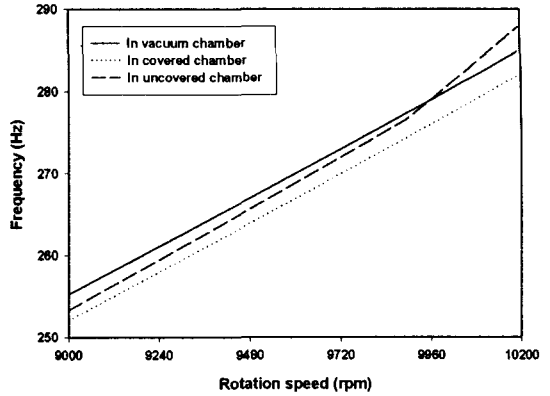
$$\begin{aligned} \omega_n &= \sqrt{\omega_{sn}^2 + \Omega^2(\alpha_n + n^2\beta_n)} \\ &= n\Omega + \omega_n^b, \text{ at } 0 \leq \Omega \leq \Omega_n^{cr} \\ &= n\Omega - \omega_n^b, \text{ at } \Omega \geq \Omega_n^{cr} \end{aligned} \quad (31)$$

변환된 좌표계에서 ASMO 디스크의 (0,2)와 (0,3) 모드 후진파 고유진동수를 각각 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. 상부커버가 개방된 챔버 내부의 조건에서의 후진파 고유진동수가 일정한 회전 속도 구간에서 진공 상태조건인 후진파 고유진동수와 교차하고 있는 것을 볼 수 있다. 이상의 실험 결과들을 통해 플러터 불안정성이 일어나는 속도에서는 진공상태와 공기유동을 고려한 고유진동수가 일치한다는 이론적으로 예측이 증명되었다.

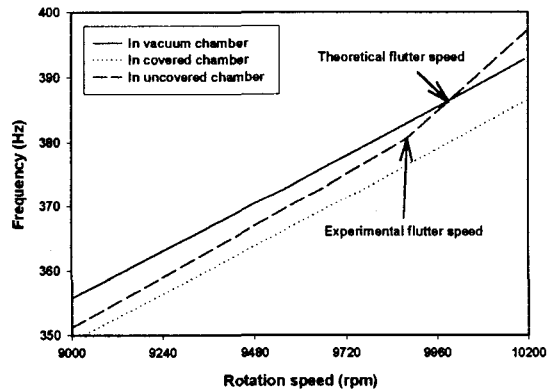
ASMO 디스크는 앞의 Fig. 5와 6에서 보는 바와 같이 챔버의 커버가 제거된 대기압 회전 조건에서 (0,3) 모드의 후진파 고유진동수가 약 9800 rpm 부근부터 공기와 연성되어 플러터를 일으키고 있음을 볼 수 있다. Fig. 9와 10에서 나타난 바와 같이 실험에서는 회전 속도 간격을 240 rpm단위로 하였기 때문에 진공상태와 공기유동 효과를 고려한 경우의 회전 속도가 같게 되는 경우가 9960에 나타남을 볼 수 있다.

상부 커버 안에서 공기 유동을 고려한 Case II의 경우에는 커버를 벗긴 경우와 다르게 플러터 불안정성이 발생하지 않는데 이는 디스크 상부에서

커버 사이가 2 cm 밖에 떨어져 있기 때문에 디스크 진동을 억제되기 때문에 발생하며 이는 기존에 벽 근처에서 회전하는 원판의 진동 현상과 일치한다.



**Fig. 9** (0,2)b mode traveling frequencies in rotating coordinate (ASMO)



**Fig. 10** (0,3)b mode traveling frequencies in rotating coordinate (ASMO)

#### 4. 결론

본 논문은 공기유동조건에 따른 회전 디스크의 동특성 변화에 대해 언급하고 플러터 속도를 예측하는 방법에 대해 실험적으로 검증하였다.

진공 챔버를 이용한 디스크 회전 동특성 평가를 통하여 공기유동정도에 따른 ASMO 디스크의 임계속도 변화를 관찰할 수 있었는데, 진공상태일 경우 고유진동수가 증가하고 따라서 임계속도도 증가함을 확인하였다. 또한, 플러터를 일으키는 회전속

도에서 진공상태와 공기유동상태의 후진과 고유진동수가 교차함을 확인하였고 이는 해석적으로 유도된 결과인 식 (30)과 일치한다. 따라서 스핀들 작동속도 내에서 플러터를 관찰할 수 없는 디스크의 경우, 두 상태의 후진과 고유진동수가 일치하는 지점을 찾음으로서 플러터 속도를 예측할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 한국과학기술원 지정 정보저장기기연구센터의 지원 (R11-1997-006101-0)으로 수행되었으며 실험에 도움을 주신 연세대학교 기계공학과 임윤철 교수님께 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] Lee, S.-Y. and Kim, S., 1998, "Trends and Mechanical Issues in Optical Disk Drives," *the 9th Symposium on Information Storage and Processing Systems, IMECE, ISPS*-Vol. 4, pp. 81-90.
- [2] 박관우, 이승엽, "CD-ROM 드라이브의 회전 임계속도 및 공기유동에 의한 불안정성 연구," 한국소음진동공학회 2000년 춘계학술대회 논문집, pp. 492-498, 2000
- [3] 김지덕, 이승엽, "고속 회전시 광디스크의 플러터 불안장성 : 이론적 예측과 실험 비교," 한국소음진동공학회 2000년 추계학술대회 논문집, pp. 777-783, 2001
- [4] H. Lamb, and R. V. Southwell, "The Vibration of a Spinning Disk," *Proceeding of the Royal Society*, Vol. 99, pp. 272-280, 1921
- [5] W. Eversman, and R. O. Dodson, "Free vibration of a centrally clamped spinning circular disk," *AIAA Vol. 7, No. 10*, p. 2010, 1969
- [6] Lee, S.-Y. and Kim, S., 2001, "Design and Vibration Analysis of a New Optical Disk with Initial Stress," *Journal of Information Storage and Processing Systems*, Vol. 3, pp. 177-184.
- [7] K. Yasuda, T. Torii, and T. Shimizu, "Self-excited oscillations of a circular disk rotating in air," *JSME International Journal*, Vol. 35, pp. 347-352, 1992
- [8] H. Hosaka, and S. H. Crandall, "Self excited vibrations of a flexible disk rotating on an air film above a flat surface," *Acta Mechanica* 3, pp.115-127, 1992
- [9] D'Angelo, C. and Mote, C. D. "Aero-dynamically excited vibration and flutter of a thin disk rotating at supercritical speed," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 168, pp. 15-30, 1993
- [10] Lee, S.-Y. and Kim J., "Critical and Flutter Speeds of Optical Disks," *Journal of Information Storage and Processing Systems*, (Published in April, 2002)
- [11] Kim, B. C., Raman, A. and Mote, C. D. "Prediction of Aeroelastic Flutter in a Hard Disk Drives", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 175, pp. 309-325, 2000