

## 간격 변화에 따른 DVD 디스크의 동특성 연구

### Dynamic Characteristics Research of DVD Disk due to Disk-Wall Gap

임효석\* · 이승엽\*\*

Hyosuk Lim and Seung-Yop Lee

**Key Words** : Critical speed(임계속도), Flutter Speed(플러터 속도), Air Induced Vibration(공기유동에 의한 진동)  
Rotating Disk(회전 디스크), Fluid-Structure Interaction (유체-구조물 연성) CD/DVD

#### ABSTRACT

Experimental studies on the aerodynamic coupling effect on natural frequencies, critical speed and flutter instability of DVD disks are investigated in this paper. The experimental results are compared with the theoretical analyses where the aerodynamic effects are represented in terms of elastic, lift and damping and stiffness components. The experiments are performed using a vacuum chamber and DVD disks rotating in vacuum, open and enclosure with several different gaps between disk and wall. The following three results are given. One is that the aerodynamic effect by the surrounding air reduces the natural frequencies and critical speeds of the vibration modes. The second is that natural frequency decreases as the disk-wall gap is decreased. Finally, it is shown that the disk vibration is reduced as the gap between the disk and the rigid wall decreases.

#### 1. 서 론

정보의 유통량의 급속한 증가로 인해 보다 많은 정보를 저장 및 재생하기 위해서는 정보 저장의 고밀도화와 정보 전송의 고속화가 요구된다. 널리 상용화되고 있는 CD나 DVD 및 HDD 등의 정보 저장기기들은 정보를 기록 및 재생하는 미디어로서 원형의 디스크를 사용하게 되는데 고밀도화와 고속화를 위해서는 트랙밀도인 TPI(Track per inch)와 선밀도인 BPI(Bit per inch)의 증가와 디스크의 빠른 회전속도가 요구된다. 한편 빠른 속도로 회전하는 디스크 경우 임계속도 이상의 속도에서는 외부의 가진원에 의해 진동이 발산하게 되는데 반복적인 외란인 RRO(Repeatable RunOut)는 액추에이터 서보 제어기에서 보정을 할 수 있으나 비반복적인 외란인 NRRO(Non-Repeatable RunOut)는 제어기로 보정할 수가 없다. 공기 유동과의 연성에 의해 발생하는 NRRO인 디스크 플러터는 공기 유동이 디스크를 가진하는 영향을 미치게 되어 자기 유발 가진으로 인해 심각한 디스크의 진동이 발생된

다. 이러한 디스크의 진동이 발산하게 되면 정보재생 및 기록실패를 야기할 뿐 아니라 디스크와 자기 헤드와의 간격이 수십에서 수 nm 정도인 자기 기록장치인 HDD의 경우는 자기 헤드가 디스크와의 충돌로 인해 헤드의 마모나 디스크의 손상이 생길 수도 있다.

공기 유동에 의한 회전 디스크의 진동 특성에 대한 많은 연구가 있어왔는데 Pelech and Shapiro는 하부의 벽 근처에서 회전하는 굽힘강성을 고려하지 않은 디스크와 축대칭의 정상유동에 대한 Navier 방정식을 고려한 연성해석과 실험적인 증명을 하였다 [1]. Benson and Boggy는 굽힘강성을 고려한 Kirchhoff 판이론을 적용하여 해석시 굽힘강성 고려되어야 함을 밝혔다 [2]. Adams는 굽힘강성을 고려한 지배방정식과 레이놀즈 방정식을 축대칭으로 선형화하여 수치해석을 하였고 [3] Yasuda and Torii는 덮개가 없는 상태에서 회전 시 공기유동에 의한 영향을 점성 감쇠력과 양력으로 고려하여 공기의 영향에 의한 디스크 불안정성에 대한 기준을 제시하였다 [4]. Chonan은 논문 [1]에서 구한 압력을 공기의 필름에 의한 탄성효과로 고려하여 안정성을 해석하였다 [5]. 또한 Renshaw는 고정된 벽 근처에서 회전하는 디스크의 안정성 해석을 Lyapunov 방법을 사용하여 연구하였으며 공기유동에 의한 플러터 불안정성이 발생하는 회전속도가 고유진동수가 제로가 되는 임계속도의 4배에서 10배 정도가 됨을 보였다

\* 서강대학교 대학원 기계공학과  
E-mail : sylee@sogang.ac.kr  
Tel: 02-705-8638, Fax: 02-712-0799

\*\* 서강대학교 기계공학과, 정회원

[6]. 최근에 Lee, et al은 ASMO 디스크를 사용하여 플러터 불안정성이 발생할 때 모드의 고유진동수가 진공상태의 고유진동수와 일치함을 이론적인 해석과 실험으로 증명하였다 [7,8].

본 논문에서는 공기유동에 의한 고유진동수의 변화를 진공상태 및 덮개가 없이 디스크가 회전하는 경우와 고정된 벽 가까이에서 디스크가 회전하게 될 때 간격 변화에 따른 고유진동수의 변화와 임계속도의 변화를 이론적인 식과 실험결과를 통하여 공기유동의 영향으로 인한 진동 특성을 연구하고자 한다. 공기유동에 의한 효과를 디스크의 수직방향의 속도에 비례하는 점성 감쇠력(viscous damping force)과 원주방향 기울기와 회전 속도에 비례하는 양력(lift force)으로 고려하고 디스크 주변의 벽과 회전하는 디스크 사이의 간격으로 인한 공기필름의 압축효과를 탄성력으로 모델링하여 구한 고유진동수와 임계속도를 실험에 의해 측정된 결과와 비교하여 각각의 계수의 변화와 영향을 추정한다.

## 2. 고유진동수(Natural Frequencies)

### 2.1 공기 유동을 무시하는 경우

디스크가  $\Omega$ 의 회전 속도로 회전하게 되는 경우 운동방정식은 Kirchhoff 판이론과 Von-Kalman 변형률 이론을 이용하여 디스크의 위치에너지를 운동에너지를 구하고 헤밀턴 정리를 적용하여 구할 수 있다 [10]. 디스크 내부의 변형은 축대칭이며 정성적이고 반경의 길이에 비해 두께의 길이가 충분히 작으므로 z방향으로 작용하는 응력은 무시하고 재료는 등방성의 탄성재료로 가정한다. 운동방정식을 만족하는 수직변위에 해당하는 해인  $w(r, \theta, t)$ 를 변수분리하고 반경방향에 대한 함수를 계산의 용이성을 위해 경계조건을 만족하는 다항식의 형태의 유사함수로 표현하여 고유진동수를 구하면 다음과 같이 표현할 수 있다 [7,8].

$$\omega_{0n}^2 = \omega_{sn}^2 + \Omega^2(\alpha_n + n^2\beta_n) \quad (1)$$

여기서  $\omega_{sn}$ 는 디스크가 정지하고 있을 때의 고유진동수이고  $n$ 은 절직경이며  $\alpha_n$ 과  $\beta_n$ 은 회전에 의한 반경과 원주방향 응력에 생기는 값으로 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

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

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

### 2.2 개방된 상태에서 회전하는 경우

공기유동에 의한 효과를 디스크의 수직방향의 속도에 비례하는 점성 감쇠력(viscous damping force)과 원주방향 기울기와 회전 속도에 비례하는 양력(lift force)으로 고려하여

고유진동수를 구하면 다음과 같이 표현할 수 있다 [9].

$$\omega_n^2 = \frac{1}{2} \left( \omega_{0n}^2 - \frac{C_D^2}{4} \right) + \frac{1}{2} \sqrt{\left( \omega_{0n}^2 - \frac{C_D^2}{4} \right)^2 + C_L^2 n^2 \Omega^2} \quad (2)$$

### 2.3 고정된 벽 근처에서 회전하는 경우

위의 개방된 상태에서 회전하는 경우에 적용한 점성 감쇠력과 양력을 고려하고 디스크 주변의 벽과 회전하는 디스크 사이의 간격으로 인한 공기필름의 압축효과를 탄성력으로 모델링하여 고유진동수를 구하면 다음과 같이 표현할 수 있다 [9].

$$\omega_n^2 = \frac{1}{2} \left( \omega_{0n}^2 + k - \frac{C_D^2}{4} \right) + \frac{1}{2} \sqrt{\left( \omega_{0n}^2 + k - \frac{C_D^2}{4} \right)^2 + C_L^2 n^2 \Omega^2} \quad (3)$$

## 3. 임계속도(Critical speeds)

회전하는 디스크의 경우 디스크의 회전속도가 증가하면 고유진동수도 증가하게 되는데 정지된 절대좌표계에서 관측했을 경우는 고유진동수가 전진파 고유진동수와 (forward natural frequency)와 후진파 고유진동수 (backward natural frequency)로 나누어지게 되며 이는 다음과 같이 표현된다.

$$\omega_n^b = \omega_n - n\Omega, \quad \omega_n^f = \omega_n + n\Omega \quad (4)$$

즉 회전 속도가 증가할수록 전진파 고유진동수는 증가하고 후진파 고유진동수는 감소하게 된다. 또한 후진파와 회전 속도가 같아지는 경우가 있을 수 있는데 이때는 정지된 절대좌표계에서 관측했을 때 고유진동수는 0이 된다. 이때의 속도를 임계속도(critical speed)라 하는데 임계속도 이상의 속도에서는 주변에서 수직방향으로의 외력이나 충격 또는 질량중심의 편심으로 인해 불안정하게 공진하게 되거나 버클링 현상 등이 일어나게 된다. 임계속도는 디스크의 형상과 디스크의 내부반경과 외부반경의 비율, 디스크의 물성치 등에 따라 달라지게 된다. 여기에서는 공기의 유무와 고정된 벽과의 간격의 변화에 따른 경향만을 고려하기로 하고 각각의 임계조건은 다음과 같이 표현할 수 있다.

가) 공기유동을 무시하는 경우

$$\Omega_n^{cr} = \frac{\omega_{sn}}{\sqrt{n^2(1-\beta_n) - \alpha_n}} \quad (5)$$

나) 개방된 상태에서 회전하는 경우

$$\Omega_n^{cr} = \sqrt{\frac{\omega_{sn}^2 + \frac{1}{4}(C_L^2 - C_D^2)}{n^2(1-\beta_n) - \alpha_n}} \quad (6)$$

다) 고정된 벽 근처에서 회전하는 경우

$$\Omega_n^{cr} = \sqrt{\frac{\omega_{sn}^2 + k + \frac{1}{4}(C_L^2 - C_D^2)}{n^2(1 - \beta_n) - a_n}} \quad (7)$$

## 5. 실험

### 5.1 실험장치

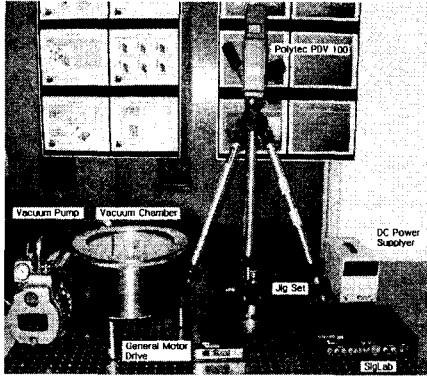


Fig 1 Experimental setup

이론식에서 얻은 고유진동수와 임계속도의 경향을 실험으로 확인하고 결과적으로 공기유동의 조건에 따른 회전 디스크의 동특성 변화를 측정하기 위해 그림 Fig. 1과 같이 스테인리스 챔버(Stainless chamber)와 챔버의 내부를 진공으로 만들 수 있는 유압 진공 펌프를 부착하였다. 또한 측정 장치로는 레이저 도플러 효과를 이용하여 속도를 측정하는 LDV(Polytec PDV 100)와 신호분석기인 Siglab을 사용하였다. 회전 디스크로는 두께가 1.2mm인 DVD 디스크와 두께를 사용하였다. 스피들 모터는 HDD용 스피들을 사용하였고 전용 드라이버를 이용하여 4000 ~ 9000 rpm 까지 200 rpm 단위로 회전시켜 각각의 신호를 측정하였다. 공기유동에 의해 고유진동수와 임계속도의 변화를 확인하기 위한 다음과 같이 실험을 수행하였다.

- Case 1) 진공상태에서 회전하는 경우
- Case 2) 개방된 상태에서 회전하는 경우
- Case 3) 주변의 둘레는 고정된 벽(shroud)이 130mm의 지름으로 되어 있고 개방된 뒷개에서 회전하는 경우
- Case 4) case 3과 동일하고 상부와 하부의 고정된 벽과의 간격이 20mm 인 경우
- Case 5) Case 3과 동일하고 상부와 하부의 고정된 벽과의 간격이 10mm 인 경우
- Case 6) Case 3과 동일하고 상부와 하부의 고정된 벽과의 간격이 5mm 인 경우
- Case 7) Case 3과 동일하고 상부와 하부의 고정된 벽과의

간격이 4mm 인 경우

Case 8) Case 3과 동일하고 상부와 하부의 고정된 벽과의 간격이 3mm 인 경우

Case 9) Case 3과 동일하고 상부와 하부의 고정된 벽과의 간격이 2mm 인 경우

## 6. 결과 및 고찰

### 6.1 DVD의 고유진동수

DVD 디스크의 각 조건별 실험결과를 다음에 나타내었다. Fig. 2에서 Fig. 5는 각각의 실험조건인 진공의 경우와 개방된 상태 그리고 상부와 하부의 고정된 벽과의 간격이 10mm와 3mm일 때의 waterfall 선도를 나타낸다. 여기서, (m,n) 모드란 m개의 절원(Nodal circle)과 n개의 절직경(Nodal diameter)을 갖는 디스크의 고유 진동 모드를 의미하며 그림의 waterfall 선도 상에서는 (0,1)후진파 모드와 (0,2)후진파 모드 그리고 (0,3)후진파 모드만을 구분하기 위해 실선으로 표시하였다.

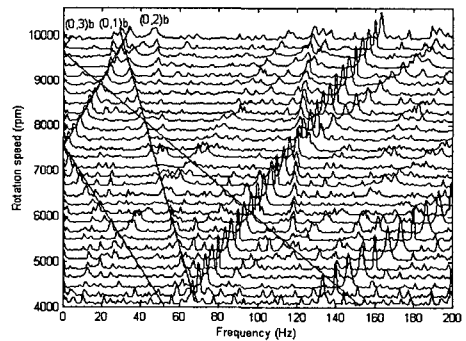


Fig 2 Waterfall plot of DVD in vacuum case

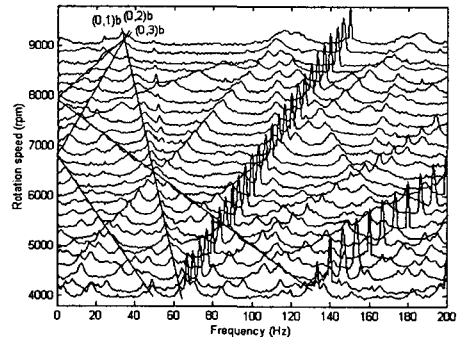


Fig 3 Waterfall plot of DVD in open case

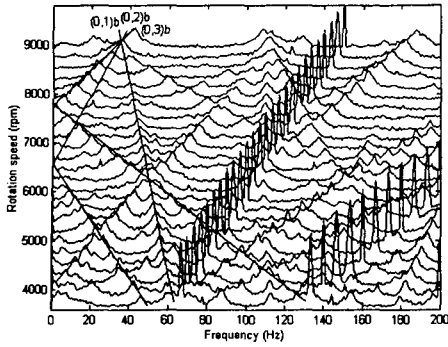


Fig 4 Waterfall plot of DVD in 10mm gap

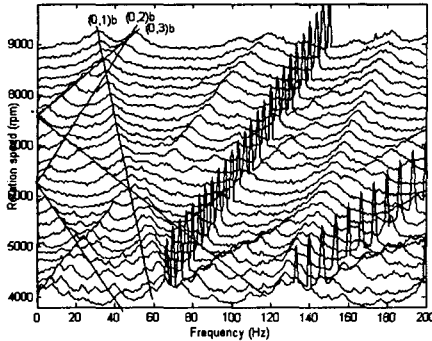


Fig 5 Waterfall plot of DVD in 3mm gap

또한 특정한 회전 속도인 6000rpm과 7000rpm에 대한 (0,2)과 (0,3)후진파 고유진동수의 경향을 각각 다음 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 이를 통하여 외부의 조건에 따른 모드별 고유진동수의 경향을 비교할 수 있다. 동일한 회전 속도에 대해서 (0,2)와 (0,3)후진파 모드의 고유진동수의 크기는 다음의 순으로 나타나게 되는데 이는 진공상태 > 주변의 물레가 고정된 벽(shroud)으로 되어있는 경우 > 개방된 상태 > 20mm 간격 > 10mm 간격 > 5mm 간격 > 4mm 간격 > 3mm 간격 > 2mm 간격으로 나타나게 됨을 확인할 수 있다. 이상의 실험적 결과를 이론의 식에 적용하여 살펴보면 식 (2)의 개방된 상태에서 회전하는 경우의 고유진동수는 양력계수의 영향이 항력계수의 영향보다 적다면 진공에서 측정된 고유진동수보다 작은 값을 갖게 된다. 진공 챔버의 내부에서 회전한 경우는 공기의 유동을 고려한 결과보다 높은 고유진동수와 임계속도를 갖게 된다. 이는 식 (2)과 식 (3)을 통해 항상  $C_D \gg C_L$ 이 됨을 알 수 있다. 또한 상부와 하부와의 고정된 벽과의 간격이 작아질수록 낮은 고유진동수와 임계속도를 갖게 된다. 이는 고정된 벽과의 간격의 감소로 인해  $k$ 와  $C_L$ 의 값이 증가하여서 고유진동수를 증

가시키는 영향을 미치지만  $C_D$ 의 값의 증가로 인한 고유진동수 감소의 영향이 더 크기 때문에 기인된 결과이다.[12] 그러나 충분히 작은 간격에서는 탄성계수의 항의 증가로 인한 영향이 항력계수와 양력계수의 변화로 인한 영향보다 커지게 되어 고유진동수가 증가되는 효과를 나타내게 될 것으로 예측할 수 있다. 실험에서 1mm이하의 간격조절에서는 공기 필름에 의해 디스크의 진동을 충분히 제거하여 주기 때문에 모드의 성분이 뚜렷하게 나타나지 않아서 경향을 비교하기에는 어려움이 있다.

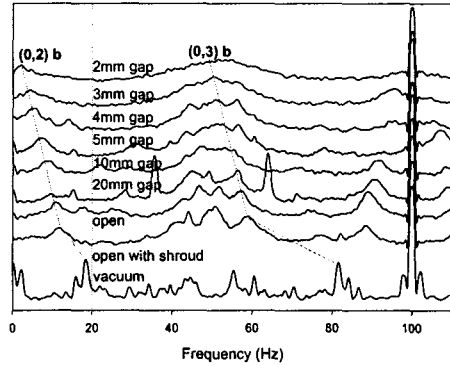


Fig. 6 natural frequencies of (0,2)b and (0,3)b for different gap conditions at 6000 rpm

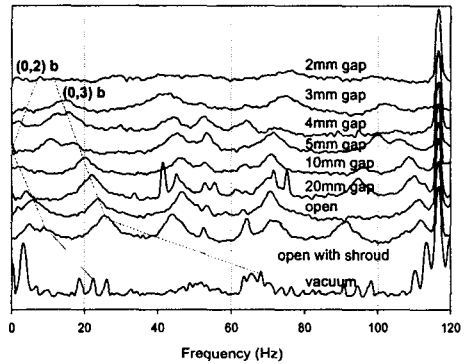


Fig. 7 natural frequencies of (0,2)b and (0,3)b for different gap conditions at 7000 rpm

## 6.2. DVD의 임계속도

각각의 조건에 따른 Waterfall 선도에서 후진파의 고유진동수는 회전 속도가 증가할수록 감소하다가 주파수가 0이 되는 임계속도를 지나면 다시 증가하게 된다. 조건에 따른 waterfall 선도에서 (0,2)후진파 모드를 구별하여 표현한 Fig. 8과 Fig. 9와 (0,3)후진파 모드를 구별하여 표현한 Fig. 10과 Fig. 11을 통해서 각 조건에 따른 고유진동수의 변화에 따른 임계속도의 경향을 나타내었고 또한 각각의 임계속도

는 Table 1에 정리하였다.

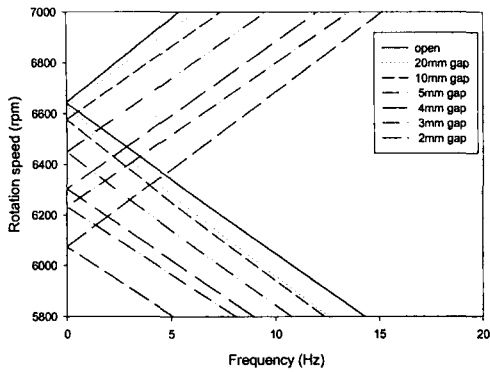


Fig. 8 (0,2)b mode traveling frequencies in stationary coordinate (DVD)

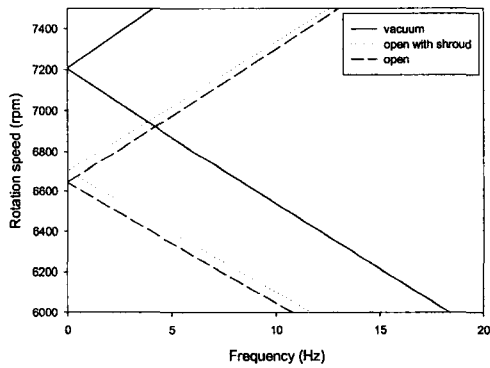


Fig. 9 (0,2)b mode traveling frequencies in stationary coordinate (DVD)

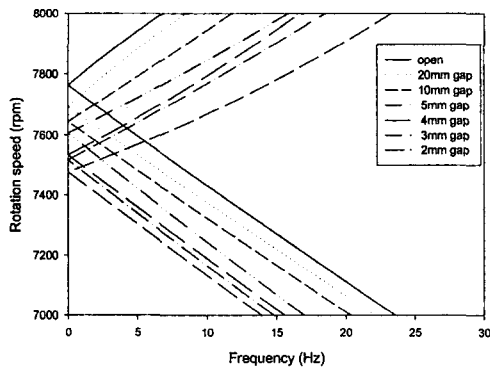


Fig. 10 (0,3)b mode traveling frequencies in stationary coordinate (DVD)

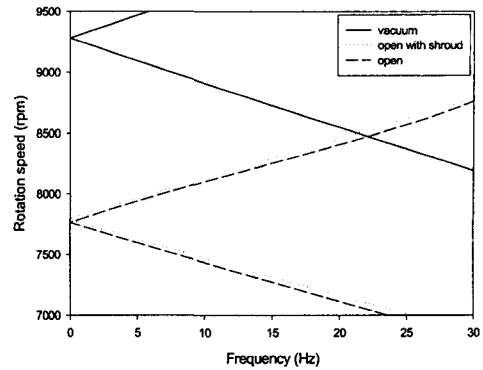


Fig. 11 (0,3)b mode traveling frequencies in stationary coordinate (DVD)

Table 1 Critical speed of a rotating DVD

Case	Critical speed (rpm)	
	(0,2) mode	(0,3) mode
Vacuum	7203	9279
Open	6641	7762
Open with Shroud	6700	7783
20mm gap	6629	7692
10mm gap	6576	7643
5mm gap	6447	7605
4mm gap	6303	7532
3mm gap	6232	7515
2mm gap	6073	7476

Table 2 Changes of natural frequency, critical speed and flutter speed due on changes of coefficients

Gap size ↑	$k$	$C_D$	$C_L$
Parameter effect	↓	↓	↓
Natural frequency	↓	↑	↓
Critical speed	↓	↑	↓

Table 1에 나타난 각 조건에 대한 임계속도를 살펴보면 각각의 모드의 고유진동수가 높은 경우가 높은 임계속도를 갖게 됨을 알 수 있다. 이 또한 임계속도에 대한 이론의 식 (6)과 식 (7)을 통해 양력계수와 탄성계수의 감소는 임계속도를 감소시키는 영향을 미치고 이와는 반대로 항력계수의 감소는 임계속도를 증가시키는 영향을 미치게 된다. 양력계

수와 항력계수 및 탄성계수의 변화에 의한 고유진동수와 임계속도의 변화의 경향은 Table 2에 정리되어 있다. 한편 Fig. 9와 Fig. 11에서는 진공 상태와 개방된 상태 및 주변의 둘레가 고정된 벽(shroud)으로 되어있고 개방된 덮개에서 회전하는 경우를 비교해 놓은 것이다. 주변의 둘레를 고정된 벽(shroud)으로 놓고 회전하는 경우는 개방된 상태로 회전하는 경우보다 높은 고유진동수와 임계속도가 나타난다. 이는 둘레의 고정된 벽으로 인해 탄성계수와 항력계수는 변화가 없으나 양력계수가 증가함으로 기인한 것이다.

## 7. 결론

본 논문은 공기 유동조건에 따른 계수들의 변화로 인한 회전 디스크의 동특성 변화와 플러터 속도의 경향에 대해 이론의 식을 적용하여 실험적으로 검증하였다. 디스크 회전 동특성 평가를 통하여 공기유동의 정도에 따른 DVD 디스크의 임계속도 변화를 관찰할 수 있었는데, 진공상태일 경우의 모드의 후진과 고유진동수와 임계속도가 공기의 유동을 고려한 경우보다 높게 나타나고 또한 고정된 벽과의 간격이 감소함으로 인해 양력계수와 항력계수 및 탄성계수가 증가하게 되고 이로 인해 고정된 벽과의 간격이 감소할수록 고유진동수와 임계속도가 낮게 나타나는 것을 실험을 통해서 확인할 수 있었다. 또한 주변의 둘레를 고정된 벽(shroud)은 양력계수를 증가시키는 영향만을 미치기 때문에 개방된 경우에 비해 주변의 둘레를 고정된 벽(shroud)으로 놓고 회전하는 경우 더 높은 고유진동수와 임계속도가 나타난다.

## 참 고 문 헌

(1) I. Pelech and A. H. Shapiro, 1964 "Flexible Disk Rotating on a Gas Film Next to a Wall "ASME J of Applied Mechanics, Vol. 31 pp. 577-584.  
 (2) B. C. Benson and D. B. Bogy, 1978 "Deflection of a

very flexible spinning disk due to a stationary transverse load" ASME J of Applied Mechanics, Vol. 45 pp. 636-642.  
 (3) R. Y. Wu and G. G. Adams, 1994 "The effects of baseplate warpage and skew on the configuration of a spinning flexible disk" ASME J of Tribology, Vol. 116 pp. 514-520.  
 (4) K. Yasuda , T. Torii and T. Shimizu, 1992 "Self-excited oscillations of a circular disk rotating in air" JSME International Journal, Vol. 35 pp. 347-352  
 (5) S. Chonan and Z. W. Jiang and Y. J. Shyu, 1992 "Stability analysis of a 2" floppy disk drive system and the optimum design of the disk stabilizer" Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 114 pp. 283-286  
 (6) A. A. Renshaw ,1998 "Critical Speed for Floppy Disks" ASME J of Applied Mechanics, Vol. 65 pp. 116- 120.  
 (7) S.-Y. Lee, D.-W. Yoon and K. Park, 2003, "Aerodynamic Effect on Natural Frequency and Flutter Instability in Rotating Optical Disks" Microsystem Technologies, Vol. 9, No. 5, pp. 369-374  
 (8) S.-Y. Lee, J. Yoon and S. Kim, 2002, "Critical and Flutter Speed of Optical Disks" Microsystem Technologies, Vol. 8, No. 2, pp. 206-211  
 (9) S.Y. Lee and H.-S. Lim. 2003, "CD 및 DVD 디스크의 진동 특성" 소음진동 공학회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. 998-1003.  
 (10) H. Lamb and R. V.Southwell, 1921, "The Vibration of a Spinning Disk," Proceeding of the Royal Society, Vol. 99, pp. 272-280.  
 (11) A.M.J. Davis, 1990, "Stokes drag on a disk sedimenting toward a plane or with other disks; additional effects of a side wall or free surface" Phys. Fluids Vol. 2, pp. 301-312  
 (12) Schlichting, Hermann, 1979, "Boundary-layer theory" McGraw-Hill.