

## 구동토크의 고주파 변동 성분이 존재하는 회전원판의 횡진동 거동에 대한 실험 검증

이기녕\*, 신응수+, 김옥현+  
(논문접수일 2005. 5. 25, 심사완료일 2005. 7. 5)

### Experimental Verification for Transverse Vibration Behavior of a Spinning Disk with Torque Variation

Kee-Nyeong Lee\*, Eung-Soo Shin+, Ock-Hyun Kim+

#### Abstract

This paper intends to identify experimentally the relationship between transverse vibration behavior of a spinning disk and high-frequency fluctuation in the driving torque. A testrig has been developed using a CD-ROM disk, a driving motor with torque-varying capability and a power transmission belt and a laser vibrometer was employed to measure the transverse vibration displacements of the disk for a certain range of the spinning speed. The results show that the spinning speed and the magnitude and frequency of the torque fluctuation affect the stability of the disk. In other word, the torque fluctuation causes the instability of the disk at several ranges of the spinning speed below the critical speed and its effects become larger as the disk spins faster or the magnitude of torque fluctuation becomes bigger. The experimental results are found to be in good agreement with analytical estimation.

**Key Words** : Transverse Vibration(횡진동), Spinning Disk(회전 원판), Torque Fluctuation(토크 변동), Stability(안정성), Critical Speed(임계속도)

## 1. 서 론

회전 원판은 하드디스크 드라이브 및 광디스크 드라이브와 같은 컴퓨터 저장기기를 비롯하여 반도체 및 디스플레

이 부품 가공용 원형 톱 등 많은 분야에서 활용되고 있는데 고속화, 고정밀화 추세에 따라 동적 거동에 대한 보다 면밀한 해석과 진동저감에 대한 요구가 높아지고 있다. 회전 원판에서 발생하는 진동에 관해서는 많은 연구가 발표되었는

\* 한국산업기술평가원 기술평가실 (leekee@mail.itep.re.kr)  
주소 : 135-080 서울시 강남구 역삼동 701-7  
+ 충북대학교 공과대학 기계공학부

데 특히 여러 진동 발생 요인이 원판의 안정성에 미치는 영향에 관하여 많은 연구가 수행되었다. 초기에는 회전원판의 모드해석을 통한 고유주파수에서의 공진 회피를 고려한 설계를 시작으로, 컴퓨터 하드디스크 드라이브에서 베어링으로부터의 가진과<sup>(1)</sup> 헤드와 같은 외부 시스템과의 간섭<sup>(2)</sup> 등 기계적 가진의 영향에 대한 많은 연구가 수행되었으며 공기역학적 측면에서 회전 원판과 주변 유체를 동시에 고려한 안정성 해석 연구<sup>(3)</sup>로 유체의 강성 및 감쇠 특성에 따라 플러터 현상이 발생하기 이전에 불안정 영역이 존재함을 수치적으로 확인하기도 하였다. 또한 초임계 속도에서 발생하는 플러터에 의한 불안정 발생을 줄이기 위해 원판에 초기 응력을 주는 방안이<sup>(4)</sup> 제시된 바 있다.

한편 회전 원판을 구동하는 모터가 원판의 진동에 미치는 영향에 대한 연구도 많이 수행되어 왔는데 모터 스피들의 축방향 및 반경 방향의 운동이 회전 원판의 동특성에 미치는 영향을 분석한 경우와<sup>(5-6)</sup> 코깅 토크와 같이 모터 자체의 특성에 의한 가진원을 분석한 사례를<sup>(7)</sup> 들 수 있다. 특히 코깅 토크의 저감 방안에 관해서는 영구자석 모터의 설계 분야에서 활발하게 논의되고 있으나 코깅 토크가 회전 원판의 진동에 미치는 영향에 관한 직접적인 연구는 거의 발표된 바가 없으며, 회전원판의 실험적인 연구도 웨이퍼 가공용 회전 톱 및 광디스크드라이브 등에 대해 회전속도에 변화에 따른 모드 특성의 실험적 검증<sup>(8-9)</sup>이 진행되고 있는 정도이다.

본 연구에서는 속도변동성분을 갖는 회전 원판의 이론 및 수치적인 안정성 해석결과<sup>(10)</sup>에서 얻어진 불안정 현상과 고주파수의 토크 변동이 회전 원판의 횡진동에 미치는 영향을 실험적으로 검증하고자한다.

## 2. 섭동법에 의한 안정성 해석

Fig. 1에 보이는 바와 같이 회전 속도  $\Omega$ 가 변동 성분을 갖는 유연 원판에 대하여 키리호프의 평판이론과 갈만의 비선형 변형을 이론에 근거하여 횡방향 변위  $w$ 에 대한 운동방정식을 고정좌표계에 대해 유도할 수 있다.

한편 회전 속도  $\Omega$ 의 변동은 토크 변동에 비례한다는 가정 하에 조화 함수의 형태로 토크와 회전속도를 아래와 같이 나타내었다.

$$T(t) = T_o + T_F \cos(\omega_F t) \equiv T_o \{1 + \varepsilon \cos(P\Omega_o t)\} \quad (1)$$

$$\Omega(t) = \Omega_o + \Omega_F \cos(\omega_F t) \equiv \Omega_o \{1 + \varepsilon \cos(P\Omega_o t)\} \quad (2)$$

위 식에서  $\varepsilon$ 과  $P$ 는 토크 및 속도 변동을 정속 토크  $T_o$  및 회전속도  $\Omega_o$ 에 관해 무차원화시킨 변수로서  $\varepsilon$ 은 변동의 크

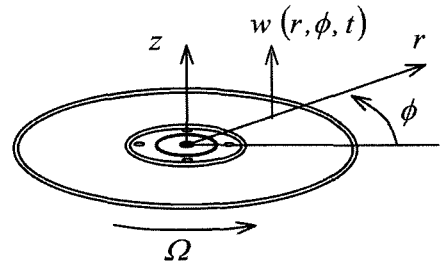


Fig. 1 Schematic of a spinning disk

기를,  $P$ 는 변동의 주파수를 각각 나타내며 영구자석 모터 구동시 발생하는 코깅토크에서는 모터의 극수와 슬롯 수의 최소공배수에 해당한다.

무차원의 이산화된 운동방정식을 구하기 위해 가정모드법 및 깰러킨 방법을 적용하였으며, 가정 모드로서 회전하지 않는 원판의 고유모드를 사용하였다.

다중척도법을 근거한 섭동법을 적용하여 단일모드 공진 및 복합모드 공진에 대한 불안정 영역을 찾기 위해, Table 1에 나타낸 바와 같이 강성이 낮아 상대적으로 진동 발생이 크고 및 불안정 영역이 낮은 주파수에서 나타나는 CD-ROM 드라이브를 대상으로 모드 및 안정성 해석을 수행하였다. 우선 정지시 원판에 대한 베셀 함수의 형태로 주어지는 고유 진동모드의 이론해를 구할 수 있으며, 이를 가정모드로 하여 회전하는 CD-ROM 드라이브의 고유주파수를 구하면 Fig. 2에 도시한 바와 같은 모드 분리에 의한 후진파의 고유주파수가 0이 되는 임계 속도는 7058rpm이다.

이를 기초로 하여 정격 회전속도  $\Omega_o$ , 속도 변동 파라미터  $P$  및  $\varepsilon$ 의 변화에 따라 CD-ROM 드라이브의 불안정 영역을 구할 수 있으며, Fig. 3은  $P$ 가 32인 경우의 속도변동 크기

Table 1 Geometric and material properties of a CD-ROM drive

Properties	Numerical values
Inner radius( $b$ )	15mm
Outer radius( $a$ )	60mm
Thickness( $h$ )	1.2mm
Density( $\rho$ )	1220kg/mm <sup>3</sup>
Young's modulus( $E$ )	2.2×10 <sup>9</sup> N/m <sup>2</sup>
Poison ratio( $\nu$ )	0.3

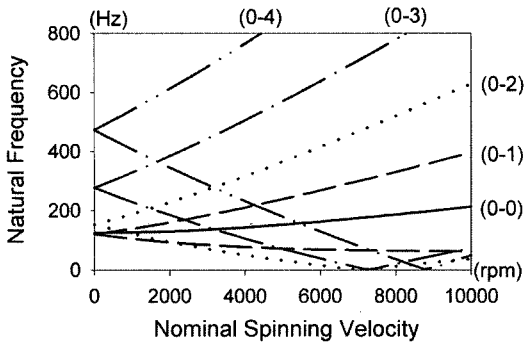
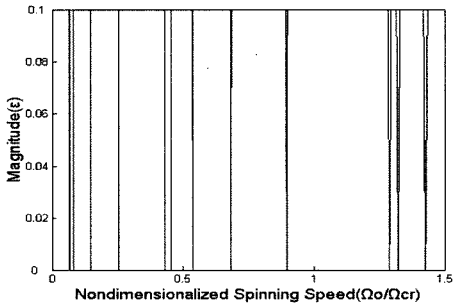
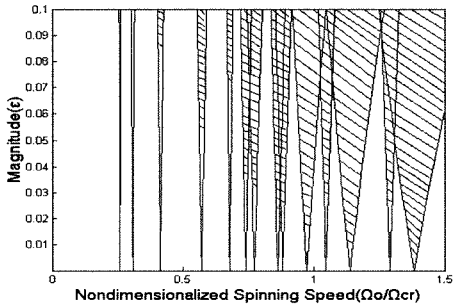


Fig. 2 Natural frequencies of a CD-ROM drive vs. spinning speed



(a) Single mode resonance



(b) Combination mode resonance

Fig. 3 Stability diagram with respect to fluctuation magnitude vs. spinning speed(P=32)

$\epsilon$ 의 변화에 따른 정격 회전속도의 불안정 영역을 나타낸다. 단일 모드 공진 시 불안정 영역은 아주 좁은 회전속도 구간에서 발생하며 속도 변동의 크기가 증가함에 따라 아주 작은 폭으로 불안정 구간이 커짐을 알 수 있다.

한편 복합 모드 공진 경우의 불안정 영역은  $\epsilon$ 값이 커지거나 CD-ROM 드라이브의 회전속도가 커짐에 따라 불안정

영역이 넓어지는 것을 알 수 있으며 단일모드 공진과 비교하여 불안정 영역이 큰 폭으로 변하는 것을 알 수 있다. 또한 속도 변동의 크기가 클 경우 일정한 회전속도 이상에서는 대부분의 영역이 불안정하게 나타난다.

### 3. 토크 변동에 따른 회전 원판의 횡진동 특성 실험

안정성 해석 결과와 토크 변동에 의한 원판의 횡진동 거동을 확인하기 위해 Fig. 4와 같이 실험 장치를 구성하였다.

회전 디스크는 안정성 해석에서와 동일한 Table 1의 물성치를 갖는 CD-ROM 디스크를 사용하였으며, 실험 모드 해석을 수행한 결과는 Fig. 6과 같다.

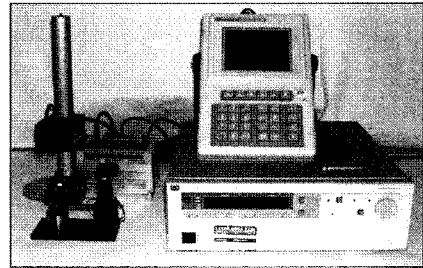


Fig. 4 Experimental setup

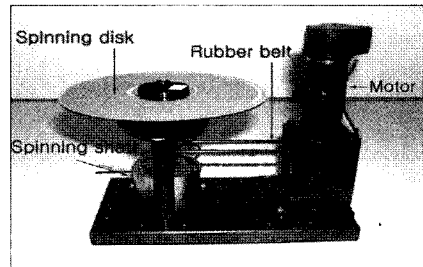


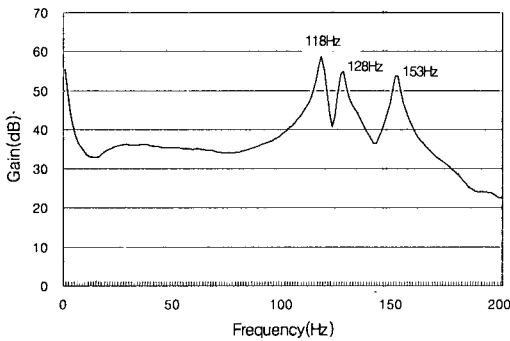
Fig. 5 Spinning disk system

Table 2 Natural frequencies of a CD-ROM drive(in Hz)

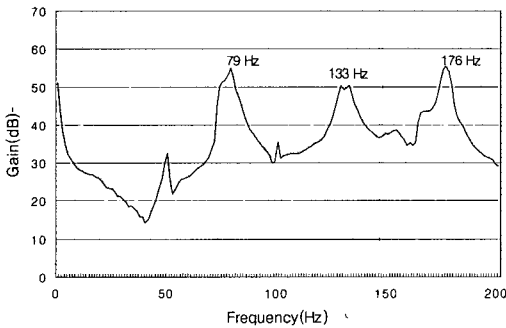
Spinning velocity( $\Omega_0$ )		(0,1) mode	(0,0) mode	(0,2) mode
0 rpm	Numerical	121	126	153
	Experimental	118	128	153
3000 rpm	Numerical	Backward	136	71
		Forward		271
	Experimental	Backward	133	-
		Forward		176

정지 시 고유주파수는 (0,1)모드, (0,0)모드 및 (0,2)모드가 각각 118Hz, 128Hz, 153Hz로 측정되어 Table 2에서 나타난 바와 같이 가정모드법에 의한 모드해석 결과와 2.3%이내의 오차를 나타내었으며, 회전속도 3000rpm에서도 고유주파수와 모드분리 해석 결과의 오차가 크지 않음을 확인하였다.

고주파수의 토크 변동을 구현하기 위하여 Fig. 5의 회전 원판 시스템에서 Fig. 7과 같이 회전축(Rotor)에 32개의 홈을 가공하고 영구자석(Stator)를 부착하였다.



(a)  $\Omega_0 = 0\text{rpm}$



(b)  $\Omega_0 = 3000\text{rpm}$

Fig. 6 Frequency response functions of CD-ROM drive

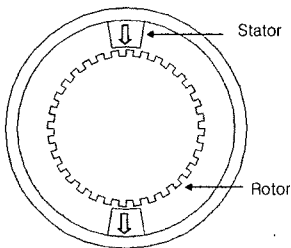


Fig. 7 Implementation of torque variation

Fig. 8은 토크측정결과 회전당 32번의 주기로 토크 변동이 발생함을 나타내며, 이는 영구자석수와 회전축 홈 수의 최소공배수와 같다. 또한, 구동을 위해 사용한 DC모터 자체에서 발생하는 다른 주파수의 진동을 차단하기 위해 강성이 낮은 고무벨트로 동력을 전달토록 하였다.

토크 변동의 횡진동에 대한 영향을 검증하기 위해 영구자석을 부착하여 토크 변동이 발생하는 경우와 영구자석을 제거하여 토크 변동이 없는 경우에 대해 각각 일정한 회전속도에서의 횡방향 변위 측정을 수행하였다.

Fig. 9에서 Fig. 14는 회전속도를 증가시키면서 여러 회전

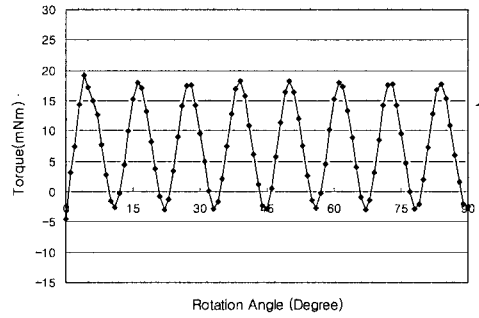
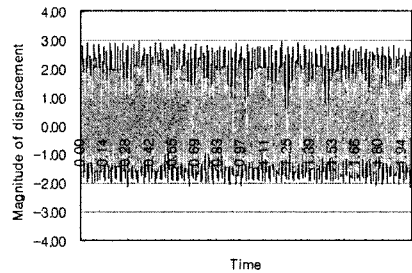
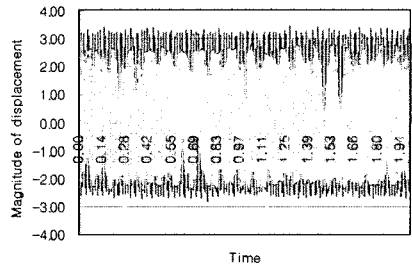


Fig. 8 Torque variation of spinning system

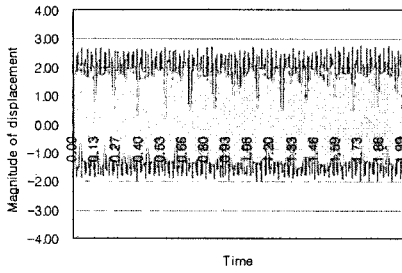


(a) without torque variation

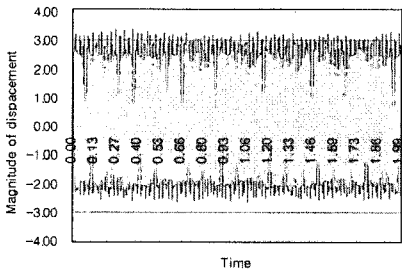


(b) with torque variation

Fig. 9 Displacement with spinning velocity 5400rpm ( $\Omega_0/\Omega_{cr} = 0.77$ )

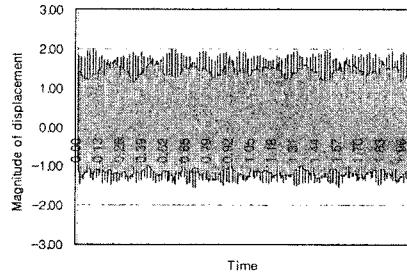


(a) without torque variation

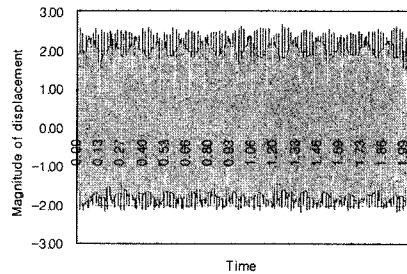


(b) with torque variation

Fig. 10 Displacement with spinning velocity 5700rpm ( $\Omega_0/\Omega_{cr} = 0.81$ )

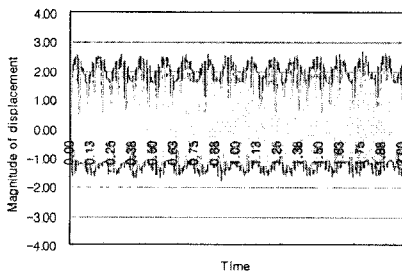


(a) without torque variation

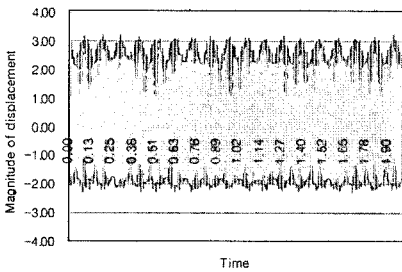


(b) with torque variation

Fig. 12 Displacement with Spinning velocity 6800rpm ( $\Omega_0/\Omega_{cr} = 0.96$ )

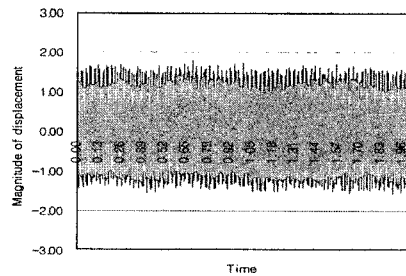


(a) without torque variation

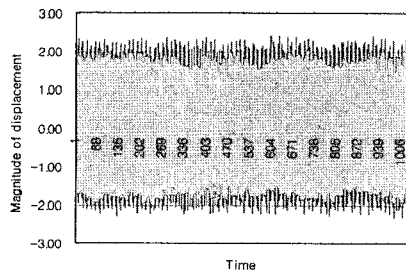


(b) with torque variation

Fig. 11 Displacement with Spinning velocity 6046rpm ( $\Omega_0/\Omega_{cr} = 0.86$ )



(a) without torque variation



(b) with torque variation

Fig. 13 Displacement with Spinning velocity 7100rpm ( $\Omega_0/\Omega_{cr} = 1.01$ )

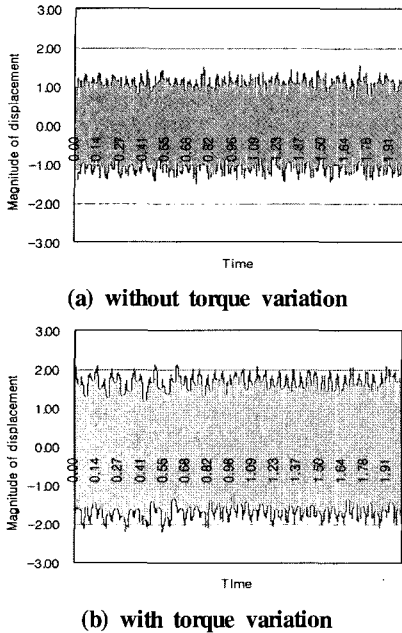


Fig. 14 Displacement with Spinning velocity 8000rpm ( $\Omega_o/\Omega_{cr} = 1.13$ )

속도에서의 토크변동이 없을 경우와 있을 경우에 측정된 진폭의 시간응답을 나타내며, Fig. 15는 각 회전속도에서의 토크 변동이 없을 경우에 비해 토크 변동이 있을 경우의 진폭 증가율(%)을 나타낸다.

실험 결과, 모든 회전속도에서 코킹토크가 있는 경우 진폭이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 회전속도가 증가할수록 불안정영역이 커지며 공진 발생가능성이 높은 이론적 해석과 동일한 경향으로 실험에서도 저속보다는 고속에서 증가율이 큰 폭으로 상승하였다. 또한 앞에서 설명한 바와 같이 회전속

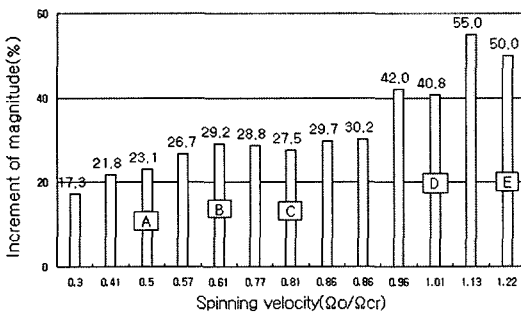


Fig. 15 Increment of Vibration

도에 따른 고유주파수 등 동특성이 이론해석 결과와 유사하다는 가정 하에 섭동법에 의한 각 회전속도에서의 안정성 해석 결과를 실험에서 직접 비교할 수 있으며, 이론해석 결과인 Fig. 3에서 불안정 가능성이 없거나 상대적으로 낮게 예상되는 회전속도 3500, 4300, 5700, 7100 및 8600rpm에서 진폭 증가율이 대체로 낮게 나타나는 현상을 실험결과인 Fig. 15의 A에서 E로 확인할 수 있다. 특히 회전속도가 저속인 A와 B의 경우 보다는 고속인 C, D 및 E의 경우 불안정 영역에 비해 진폭증가를 감소 현상이 크게 나타난다.

#### 4. 결과 고찰

고주파수의 토크 및 회전속도 변동이 원판의 횡방향 진동 안정성에 미치는 영향은 섭동법에 의한 해석 결과 임계속도 또는 1차 고유주파수보다 낮은 정격 회전 속도의 여러 구간에서 불안정한 응답을 발생시킬 수 있다.

이러한 토크 변동의 영향을 실험적으로 검증하기 위해 비교적 강성이 낮은 CD-ROM 드라이브 회전원판을 대상으로 진동 측정 실험을 수행하였고, 토크 변동이 없을 때에 비해 모든 회전속도 구간에서 진동 크기가 증가하였으며, 섭동법을 적용한 이론해석 결과와 유사한 경향으로 저속보다는 고속에서 증가폭이 크게 나타나고 불안정 발생 가능성이 낮은 회전속도에서는 진동 증가율이 상대적으로 작았으며 이러한 현상도 저속보다는 고속에서 크게 나타났다.

이로서 고주파수의 토크 및 회전속도의 변동이 회전 원판의 횡진동에서 진폭이 증가되는 현상을 확인하였으며 임계속도 또는 고유진동수 이하의 회전속도에서도 공진 대역이 존재할 수 있으므로, 정밀도 사양이 높아지고 있는 고속 정보저장기기 설계 및 원형 톱을 이용한 반도체 부품 가공 등에서 안정성에 영향을 주는 파라미터인  $P$ ,  $\epsilon$  및  $\Omega_o$ 를 조절하여 공진 대역을 피할 필요가 있다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 토크 변동이 존재하는 회전 원판에 대해서 섭동법에 근거한 안정성 해석을 수행하여 안정 경계 조건을 구하고, 그 결과를 CD-ROM 드라이브에 적용하여 안정성 검토 및 진동 측정 실험을 수행하였다. 고주파수의 회전속도 변동성분 구현과 저속에서의 공진 현상 확인을 위해 고유주파수가 비교적 낮은 CD-ROM을 대상으로 연구를 수행하였으나, 코킹토크를 갖는 정보저장기기는 물론 원형 톱 등 정밀도 사양이 급격히 높아지고 있는 고속 가공시스템에서도

절삭력 변화 또는 회전 구동시 발생하는 코깅토크 등 고주파수의 토크변동성분이 회전 원판의 횡진동에 미치는 영향을 예측할 수 있으며, 그에 따른 결론은 다음과 같다.

- (1) 토크 및 속도 변동에 의한 매개 가진에 의해 여러 회전속도 구간에서 불안정 현상이 발생할 수 있으며 그 영역은 플러터 현상 또는 고유주파수에 의한 속도보다 낮은 범위에 존재한다.
- (2) 토크 변동 발생시 모든 회전속도에서 진동 크기가 증가하며 고속 회전시 공진 발생 가능성 및 진폭 증가가 크게 나타난다.
- (3) 고속으로 회전하는 원판이 포함된 정밀기기의 설계시 정격 회전속도와 토크 변동 주파수를 적절하게 조절하여 임계속도 이하에서도 발생할 수 있는 공진 현상을 피하는 것이 바람직하다.

### 참 고 문 헌

- (1) Chung, J. T., 1995, "A study on Selection for the Rotating Speeds of Spindle Motors to Stability Computer Hard Disks," *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 5, No 2, pp. 163~168.
- (2) Rim, K. H., 2000, "Stability Analysis of Rotating Discs Due to Head Interference," *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 10, No 5, pp. 163~168.
- (3) Huang, F. Y., and Mote, C. D., 1995, "On the Stability Mechanisms of a Disk Rotating Close to a Rigid Surface," *ASME J. of Applied Mechanics*, Vol. 62, pp. 764~771.
- (4) Lee, S. Y., Kim, J. K., and Kim, S. K., 1999, "Vibration

Characteristics of a New Optical Disk (2): Natural Frequencies of Initially Stressed Disks," *Proceedings of the Autumn Congress 1999 by Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, pp. 455~461.

- (5) Lee, C. W., and Chun, S. B., 1998, "Vibration Analysis of a Rotor With Multiple Flexible Disks Using Assumed Modes Method," *ASME J. of Vibration and Acoustics*, Vol. 120, pp. 87~94.
- (6) Wang, J. H., and Huang, W. C., 2001, "The Improvement of the Dynamic Behaviour of a Spindle Motor for a CD-ROM Drive," *Int. J. of Acoustics and Vibration*, Vol. 6, No. 2, pp. 57~64.
- (7) Rahman, B. S., and Lieu, D. K., 1994, "Optimization of a Magnetic Pole Geometry for Field Harmonic Control in Electric Motors," *J. of Vibration and Acoustics*, Vol. 116, pp. 173~178.
- (8) Kim, M. E., Rim, K. H., and Lee, C. W., 1992, "Vibraion Analysis of Wafer Cutting Machine and its Experimental Verification," *Transactions the KSME*, Vol. 16, No. 1, pp. 22~30.
- (9) Kim, S. K., Han, G. H., and Son, H. G., 1998, "A Study of characteristics of Disk Vibration and Rotating Airflow in Magneto Optical Disk Drive," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 44, No. 3, pp. 601~605.
- (10) Shin, E. S., Lee, K. N., Shin, T. M., and Kim, O. H., 2002,, "Stability Analysis of Transverse Vibration of a Spinning Disk with Speed Fluctuation," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 21~28.