

회전속도 증가에 의한 광디스크의 파괴현상에 관한 연구

조은형* · 박준민** · 서영선** · 정진태***

A Study on the Fracture Phenomena in Optical Disks due to Increase of the Rotating Speed

Eun-Hyoung Cho, Junmin Park, Young Sun Seo and Jintai Chung

Key Words : Spinning Disk (회전원판), Dynamic Analysis (동적해석), Galerkin Approximate Method (Galerkin 근사방법), Fracture Toughness (파괴인성), Critical Crack Length (임계균열길이)

Abstract

In this study, the fracture phenomena of optical disks are discussed and then some recommendations are presented to prevent the fracture. The fracture occurs when disks have crack on the inner radius of the disks. Since the crack growth and the fracture result from the stress concentration on the tip of the crack, a measure should be taken to overcome the stress concentration. This problem can be resolved by the structural modification of a disk. This study proposes 3 types of improved optical disks, which are robust to the disk fracture due to the high spinning speed of a disk. The first type is a disk reinforced by wire rings, the second type is a disk added by texture fibers, and the third type is a rubber-coated disk.

1. 서 론

CD-ROM 과 DVD-ROM 등의 광디스크 드라이브의 수요는 계속적인 증가 추세에 있으며 데이터 저장 용량과 데이터 전송속도의 증가에 대응하여 디스크의 고밀도화와, 고배속화에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 특히, 광디스크 고배속화에 따른 회전속도의 증가는 디스크 파손을 야기시켜, 현재 국내의 디스크 업체와 드라이브 업체의 주된 관심의 대상이 되고 있다. 디스크 파손은 디스크 내경에 균열이 있는 경우 발생 빈도가 높고 회전속도를 늘릴수록 파손의 가능성이 증가한다. 따라서 디스크 파손의 원인을 규명하기 위해서 디스크의 균열 및 회전속도에 따른 응력 집중 현상을 규명할 필요가 있다.

본 연구에서는 이론적 및 실험적 방법을 통해 디스크 파열 메커니즘에 대한 해석을 수행하였다.

먼저 기수행된 연구⁽¹⁻⁴⁾를 바탕으로 각가속도를 갖는 회전원판의 지배방정식을 유도하여 동적 해석을 수행하고 균열이 없는 회전원판의 운전 중 내부 응력분포를 구하였다. 그리고 균열이 있는 경우 응력 집중으로 인한 파열기준을 설정하였다. 이와 동시에 실험을 통해 균열진척 상황을 포함한 디스크 파열 현상을 관찰하였다. 아울러 이와 같은 디스크 파열 메커니즘에 대한 이론적 및 실험적 해석을 통해 얻어진 결론을 바탕으로 운전 중 디스크 파열을 막는 적극적인 대처방안을 제시하였다.

2. 회전원판의 면내 진동해석

2.1 지배방정식의 유도

본 연구에서는 각가속도를 갖는 회전원판에 대한 지배방정식을 유도하기 위하여 먼저 변형에너지와 운동에너지를 구한 후 이를 Hamilton의 원리에 적용시킨다. Fig. 1에 도시한 회전원판은 내반경이 a , 외반경이 b , 두께가 h 이며, 내륜은 고정되어 있고 외륜은 구속되어 있지 않다. 그리고

* 한양대학교 대학원 정밀기계공학과

** 삼성전자

*** 한양대학교 공학대학 기계공학과

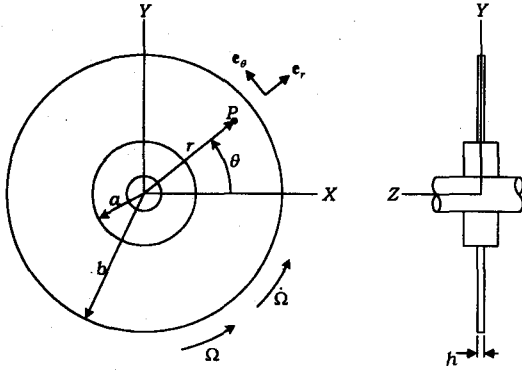


Fig. 1 Flexible spinning disk with angular acceleration.

X - Y 좌표계는 공간상에 고정된 관성 좌표계를 나타내고 r - θ 좌표계는 원판에 고정되어 원판과 함께 회전하는 좌표계이다.

축대칭인 회전원판 내부의 임의의 점에 대한 변위는 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$u_r = u, \quad u_\theta = v \quad (1)$$

여기서 u_r , u_θ 는 각각 원판 내부의 임의의 점에서 r , θ 방향의 변위를 나타내고, u , v 는 각각 중앙면 상에 있는 점에 대한 면내(in-plane) 변위를 나타낸다. 회전원판은 축대칭(axisymmetric)이므로 u , v 는 θ 에 대해서 독립적이고 r 과 시간만의 함수이다. 즉, $u = u(r, t)$, $v = v(r, t)$ 이다.

응력-변형을 관계는 Hooke의 법칙을 만족한다고 가정하고, 원판의 두께가 반경에 비하여 매우 작기 때문에 응력 상태가 평면응력 상태라고 가정하였다. 이 경우에 원판에 대한 변형에너지는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$U = \frac{1}{2} \int_A (q_r \epsilon_r + q_\theta \epsilon_\theta + q_{r\theta} \epsilon_{r\theta}) dA \quad (2)$$

여기서, A 는 원판의 면적을 나타내고, ϵ_r , ϵ_θ 과 $\epsilon_{r\theta}$ 는 각각 중앙면에서의 변형률을 나타내며, q_r , q_θ 과 $q_{r\theta}$ 는 중앙면에서의 단위길이당 내력을 나타낸다. 즉,

$$\epsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \epsilon_\theta = \frac{u}{r}, \quad \epsilon_{r\theta} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right) \quad (3)$$

$$q_r = D \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \nu \frac{u}{r} \right), \quad q_\theta = D \left(\frac{u}{r} + \nu \frac{\partial u}{\partial r} \right),$$

$$q_{r\theta} = \frac{1-\nu}{2} D \left(\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right) \quad (4)$$

여기서, D 는 인장강성(extensible rigidity)으로 영계수 E 와 포와송비 ν 를 가지고 다음으로 표시된다.

$$D = \frac{Eh}{1-\nu^2} \quad (5)$$

회전원판의 운동에너지를 계산하기 위하여 변형된 원판 내의 각 질점의 속도를 구해야 한다. 변형된 후의 임의의 점에 대한 위치벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{r} = (r+u)\mathbf{e}_r + v\mathbf{e}_\theta \quad (6)$$

여기서, r 은 원판의 중심에서 변형 전의 점까지의 반경을 나타낸다. 속도벡터는 위치벡터를 시간에 대해 전미분을 취하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{v} = \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \Omega v \right) \mathbf{e}_r + \left[\frac{\partial v}{\partial t} + \Omega(r+u) \right] \mathbf{e}_\theta \quad (7)$$

따라서, 회전원판의 운동에너지는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$T = \frac{1}{2} \rho h \int_A \mathbf{v} \cdot \mathbf{v} dA \quad (8)$$

여기서, ρ 는 원판의 밀도를 나타낸다.

변형에너지와 운동에너지의 변분을 취한 다음 Hamilton의 원리를 적용하여, 각가속도를 갖는 회전원판에 대한 선형 지배방정식을 다음과 같이 유도하였다.

$$\rho h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - 2\Omega \frac{\partial v}{\partial t} - \Omega^2 u - \dot{\Omega} v \right) - \frac{\partial q_r}{\partial r} - \frac{q_r - q_\theta}{r} \quad (9)$$

$$= \rho h \Omega^2 r$$

$$\rho h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + 2\Omega \frac{\partial u}{\partial t} - \Omega^2 v + \dot{\Omega} u \right) - \frac{\partial q_{r\theta}}{\partial r} - 2 \frac{q_{r\theta}}{r} \quad (10)$$

$$= -\rho h \dot{\Omega} r$$

한편, 회전원판의 고정단과 자유단의 경계조건은 다음 식으로 표현된다.

$$u = v = 0 \text{ at } r = a, \quad q_r = q_{r\theta} = 0 \text{ at } r = b \quad (11)$$

2.2 동적응답해석

각가속도를 갖는 회전원판의 동적거동을 알아보기 위해 본 연구에서는 근사해법인 Galerkin 방법을 이용하여 지배방정식을 이산화한다. 이렇게 이산화된 상미분방정식에 2 차 정확도와 무조건적 안정성을 갖는 암시적 시간적분법인 일반화된 α 방법⁽⁵⁾을 적용하여 회전원판의 동적응답해석을 수행한다.

모든 수치계산에 사용된 일반화된 α 방법의 알고리즘 상수 ρ_∞ 는 1 이며, 시간간격 Δt 는 0.001 sec 로 하였다. 또한, 수치계산에 사용된 원판은 실제 사용중인 디스크의 물성치를 사용하였다.

그 값은 Table 1 에 주어져 있다. 원판의 회전속도는 실제 작동조건과 거의 유사한 경우로 하였다. 즉, Fig. 2 에 주어진 바와 같이 8sec 까지 원판의 회전속도를 증가시키고 그 이후에는 11000rpm 으로 정속을 유지하는 운전조건이다. 다시 말해서 8sec 까지는 시간에 따라 변하는 각속도와 일정 각가속도를 가지게 되지만 그 이후에는 각가속도는 0 이고 일정 각속도 11000rpm 을 유지하게 된다. 먼저 운전중 원판의 어느 부분에서 가장 큰 응력이 작용하는지 알아보기 위해 가속구간에서 정속구간으로 바뀌는 시간인 8sec 일 때의 원판 내부의 변위와 응력분포를 구하고자 한다. Fig. 3 은 8sec 일 때 원판 내부의 응력분포이다. σ_r 과 $\sigma_{r\theta}$ 는 원판 외

Table 1 Material properties of a spinning disk.

E	$3 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
ν	0.35
ρ	$1.19 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
h	0.0012 m
a	0.0075 m
b	0.06 m

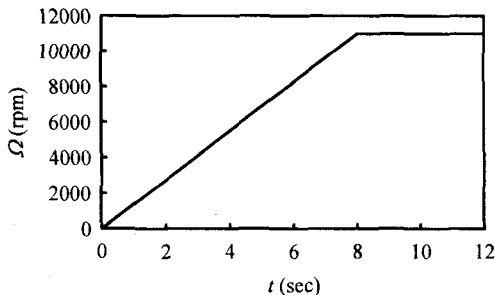


Fig. 2 Spinning speed of the disk.

주에서 0 이 됨을 알 수 있다. 주응력 σ_1 은 σ_r 과 σ_θ 의 값에 지배적이며 원판 내주에서 최대값을 갖는다. 따라서, 각가속도를 갖는 회전원판은 운전중 내륜에서 가장 큰 응력이 작용한다고 결론지을 수 있다. 이제 Fig. 2 의 속도로 원판을 회전시킬 때 가장 큰 응력이 작용하는 원판 내경에서 주응력의 동적 응답을 구하고자 한다. Fig. 4 는 주응력 σ_1 의 시간에 따른 동적 응답으로 회전속도가 증가함에 따라 증가하다가 8sec 이후에는 5.24MPa 의 일정한 값을 갖는다. 이 값이 운전중 원판에 작용하는 최대주응력이며 디스크 파열 기준의 설정에서 사용될 것이다.

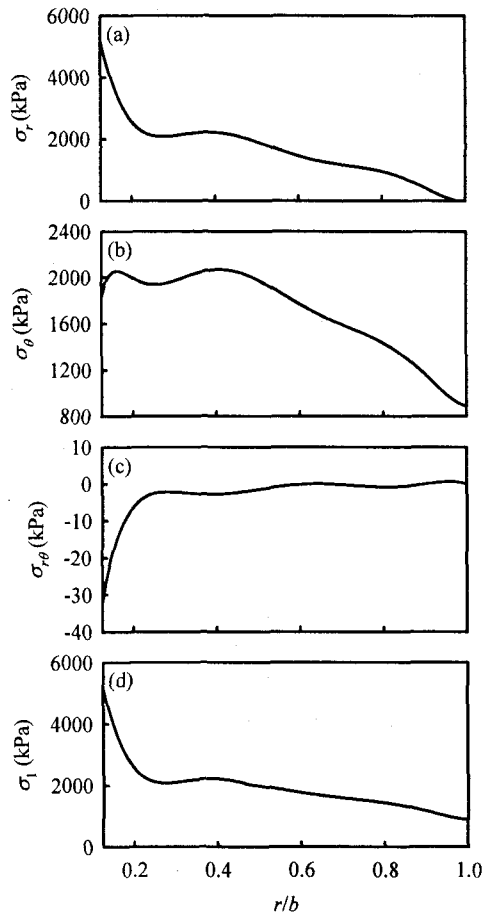


Fig. 3 Stress distribution of the disc with $a/b = 0.125$ when $t = 8\text{sec}$: (a) the radial stress; (b) the tangential stress; (c) the shear stress; and (d) 1st principal stress.

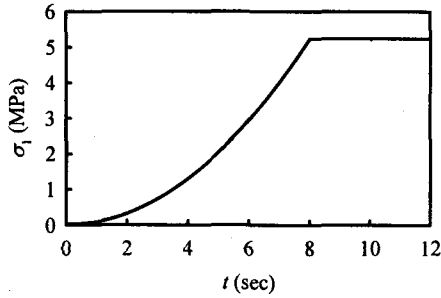


Fig. 4 1st principal stress time history at $r = a$.

3. 디스크 파열 기준의 설정

일반적인 재질의 변형이 탄성변형의 한계를 넘게 되면 소성변형 혹은 파괴가 발생하는데, 주어진 하중에 의해서 생성된 소성변형의 크기는 주로 그 하중에 의해서 야기된 전단응력의 크기에 따라 변화하는 반면, 파괴조건은 주로 그 하중에 의해 생성된 인장응력의 크기에 따라 변화하게 된다. 따라서, 주어진 하중하에 있는 재료의 모든 부분에 생성되는 응력의 상태를 알아야 할 필요가 있다. 그러나 거시적인 파괴강도의 값이 낮은 이유는 일반적으로 조직 내에 우연히 발생하는 길고 날카로운 균열(crack)때문이다. 이들 균열은 응력 집중인자(stress concentrator)로 작용하여 원자결합이 파괴되는 수준까지 국부적인 응력을 증가시킨다. 따라서 이론인장강도보다 훨씬 낮은 응력에서 파괴가 발생한다.

균열성장에 관한 조건은 다음 식과 같은 그리피스 기준이 사용된다. 파괴되지 않고 견딜 수 있는 응력 σ_F 는

$$\sigma_F = \left(\frac{EG_c}{\pi L} \right)^{1/2} \quad (12)$$

여기서, G_c 는 전체의 파괴일값이고 E 는 영률(Young's modulus)이며 L 는 균열의 길이이다. 식 (12)을 사용함으로써 균열이 전파되기 시작하는 임계균열길이값을 예측할 수 있다. 다시 말해 $\sigma\sqrt{\pi L}$ 가 $\sqrt{EG_c}$ 의 값에 도달하면 균열은 전파되기 시작한다. 이러한 의미에서 $\sigma\sqrt{\pi L}$ 는 균열전파에 대한 구동력의 척도로 취급되며, $\sigma\sqrt{\pi L}$ 를 다음과 같이 K 로 표시하고 이를 응력세기인자(stress intensity factor)라 하며 $\sqrt{EG_c}$ 는 임계응력세기인자(critical stress intensity factor)로 하고 K_c 로 표시한다.

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi L} \quad (13)$$

여기서, Y 는 균열의 기하학적 조건에 따라 결정되는 무차원 계수로 재료내부에 균열이 있는 경우는 1 이고 개구부 균열을 갖는 경우는 1.12 의 값을 갖는다. 응력세기인자 K 가 임계응력세기인자 K_c 와 같거나 크면 파괴가 발생하게 된다. 식 (13) 과 임계응력세기인자 K_c 로부터 우리는 재료의 임계균열길이를 구할 수 있다. 즉,

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_c}{Y\sigma} \right)^2 \quad (14)$$

식 (14)는 그리피스의 임계균열길이로서 이보다 짧은 균열은 균열 전단의 국부 응력이 매우(재료의 공칭강도를 윗도는 만큼) 커도 그 이상 확장되지 않는 안전한 경우이지만 이보다 긴 균열은 전파되어 재료를 파괴에 이르게 한다. 이러한 의미에서 이 값이 진정한 의미의 '안전율'이라 할 수 있다. 예를 들어 설계자는 '안전계수'를 사용하는 대신 구조물에 미리 정해진 길이의 균열을 내재시켜 파괴를 일으키지 않도록 하는 설계를 시도할 수 있다.

식 (14)로부터 회전원판의 임계균열길이를 계산할 수 있다. 논의중인 디스크는 그 재질이 폴리카보네이트로서 그 파괴인성은 $2.2\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ⁽⁶⁾이다. 2장에서 구한 주응력의 최대값은 5.24MPa 이므로 식 (14)로부터 임계균열길이는 44.73mm 이다. 이렇게 계산된 임계균열길이보다 작은 균열이 원판에 존재한다면 균열은 진행되지 않는다고 말할 수 있다. 그러나 재료에 응력의 반복이 작용하게 되면 재료 내부의 결정구조에 작은 변화가 발생한다. 이 변화는 특히 응력이 집중되고 있는 영역에서 생기기 쉽고, 균열이 임계길이보다 훨씬 짧은 경우에도 완만하게 진행하게 된다. 이와 같은 피로 균열은 빠르건 늦건간에 일반적인 균열의 임계길이까지 성장하게 된다. 일단 이 상태에 이르게 되면 균열의 성장은 갑자기 속도감이 생겨 재료를 절단시키게 되어 대형 사고를 초래하게 된다.

4. 디스크 파열의 실험적 규명

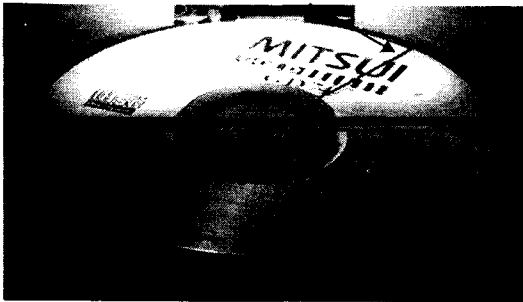
원판에 균열이 있는 경우 운전중 균열이 진행되는 과정과 파열에 이르는 과정을 실험을 통해

약 30 초~1 분후
균열진행상태



(a)

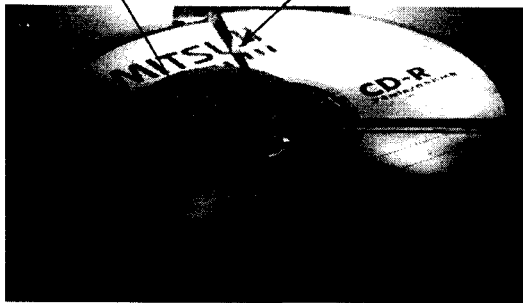
디스크 완전 전단



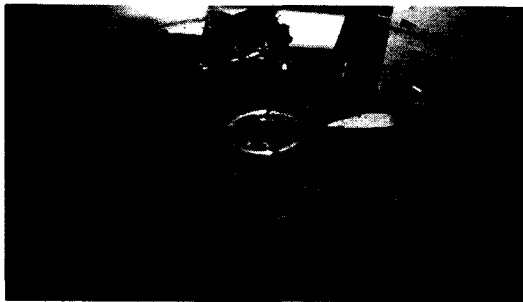
(b)

Chuck 이탈

디스크 변형 발생



(c)



(d)

Fig. 5 Disk fracture procedure.

관찰하고자 한다. 실험조건은 먼저 원판 내측에 균열을 인위적으로 생성시키고 10,200rpm 으로 강제 회전시킨다. 다음으로 원판의 회전수와 동기화된 신호를 갖는 섬광속도계(stroboscope)를 이용하여 균열진행상태를 관찰한다. Fig. 5 는 실험으로 구한 균열진행 및 파열 상황이다. 촬영시간은 1 프레임당 1/30sec 이다.

Fig. 5 의 디스크 파열상태를 요약하면 다음과 같다.

- (a) 초기 균열 부위가 중심의 수직방향으로 내주에서 외주로 진행되고 있는 상황
- (b) 균열이 최외주로 완전 진행하여 디스크가 전단(파손)된 상황
- (c) 전단과 동시에 원심력에 의한 디스크 굽힘 응력이 증가하여 디스크를 변형시키며 이에 따라 holder chuck 이 이탈하는 현상
- (d) 전단된 디스크(이미 파손)는 holder chuck 의 이탈과 동시에 스피들 모터로부터 엄청난 에너지를 소유한 채로 이탈되어 외부(보호벽)와의 충돌로 인해 썩하는 소리와 함께 파열

본 실험을 통해 내경에 균열이 있는 디스크 사용시 고배속 회전의 원심력에 의해 디스크 재질의 전단강도를 상회하는 집중응력이 균열선단에 집중되고 빠르게 균열이 전파되어 디스크를 전단, 즉 파손시키는 상황을 확인할 수 있었다.

디스크 내경에 균열이 있는 경우외에 외경에 균열이 있는 경우에 대해서도 동일한 실험을 반복했으나 균열전파에 의한 파손이 재현되는 확률은 거의 희박함을 알 수 있었다. 따라서 디스크 파열은 내부 균열이 있는 경우에 문제가 된다는 것을 확인할 수 있었다. 실험에서 사용된 인위적 균열을 갖는 디스크는 이론적으로 구한 임계균열길이와 가까운 정도에 따라 파손에 있어서 시간의 차이(2분~30분)를 가졌다. 하지만 대부분의 경우 디스크 내주에 크랙이 있는 경우 디스크 파손 현상을 피할 수 없었다. 만약 임계균열길이보다 상당히 작은 균열이 있더라도 피로파괴의 가능성을 배제할 수 없으므로 내부에 균열을 있는 디스크는 드라이브 고배속화에 따라 그 파손 가능성이 더욱 증대될 것이다.

5. 결론

지금까지 디스크 파열 메커니즘 해석을 위한 이론 및 실험적 연구에 대해 논의하였다. 이론적 방법을 통해 현재 문제가 되고 있는 디스크의 운전중 내부응력분포를 구하였고 이론적인 임계균열

길이(44.73mm)를 제시하였다. 그리고 실험을 통해 디스크 파열 진행 상황을 관찰하고 그 파손원인을 규명하였다. 문제가 되고 있는 디스크 내경의 균열은 현재 취급상 부주의로 추정되고 있다. 디스크 내부의 균열길이가 임계균열길이보다 작을 때에는 우선은 안전하다고 진단할 수 있으나 광디스크 드라이브와 같은 지속적인 반복하중을 받는 상황에서는 피로파괴의 위험성을 배제할 수가 없다. 지속적인 드라이브 고배속화 요구추세에 따라 균열을 갖는 디스크의 취성파괴 및 피로파괴의 위험성은 계속 증대될 것이다. 현재 디스크의 주재질은 폴리카보네이트로 이 소재는 내충격성(강화유

리의 150 배, 아크릴의 56 배), 초경량성, 투광성 및 표면광택, 유연한 가공성 등 여러가지 우수한 기계적 성질을 소유한 열가소성 플라스틱의 일종이다. 그리고 우수한 흐름성과 낮은 복굴절을 가져 정보저장능력이 우수하고 따라서 CD 나 DVD 같은 광학용 소재로 널리 사용되고 있다. 그러나 이러한 우수한 재질의 디스크라도 전술한 바와 같이 균열이 존재하면 높은 파괴의 위험성을 수반하게 되고 향후 지속적인 드라이브 고배속화 요구추세를 만족시키는 것은 불가능할 것으로 사료된다. 따라서, 본 연구의 결론으로 다음과 같은 균열로 인한 디스크 파열 방지를 위한 3 가지 강구책을 제시한다.

- (1) 디스크 내주에서 정보면 전까지 디스크 회전 속도에 따라 하나 또는 두개의 철심 보강 (Fig. 6(a))
- (2) 디스크 내주에서 정보면 전까지 섬유질 소재 보강 (Fig. 6(b))
- (3) 디스크 내주에서 정보면 전까지 고무 코팅 (Fig. 6(c))

참고문헌

- (1) Lamb, H. and Southwell, R. V., 1921, "The Vibration of a Spinning Disk," *Proceedings of the Royal Society*, Vol. 99, pp. 272~280.
- (2) Simmonds, J. G., 1962, "The Transverse Vibrations of a Flat Spinning Membrane," *Journal of the Aeronautical Sciences*, Vol. 29, No. 1, pp. 16~18.
- (3) Mote, Jr., C. D., 1965, "Free Vibration of Initially Stressed Circular Disks," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 89, pp. 258~265.
- (4) Everseman, W. and Dodson, R. O., 1969, "Free Vibrations of a Centrally Clamped Spinning Circular Disk," *AIAA Journal*, Vol. 7, No.10, pp. 2010~2012.
- (5) Chung, J. and Hulbert, G. M., 1993, "A Time Integration Algorithm for Structural Dynamics with Improved Numerical Dissipation: the Generalized- α Method," *ASME J. Appl. Mech.*, Vol. 60, pp. 371~375.
- (6) Norman, E. D., 1993, "Mechanical Behavior of Materials," Prentice-Hall, Inc.
- (7) Callister, Jr., W. D., 1994, "Materials Science and Engineering," John Wiley & Sons, Inc.

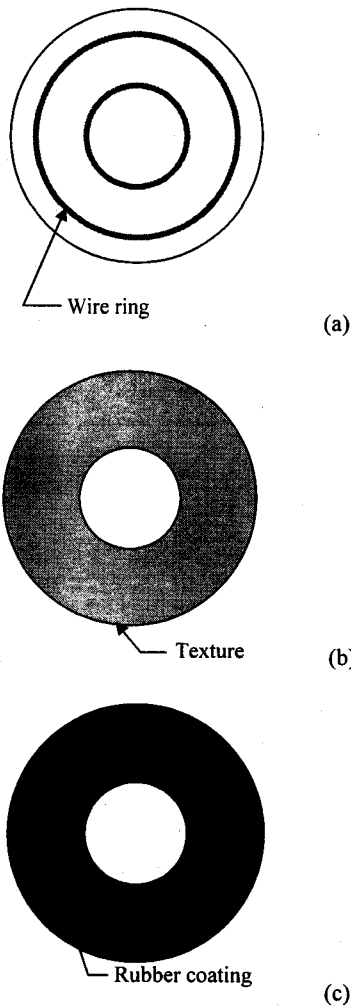


Fig. 6 3 types of improved optical disks: (a) first type of the clamping region reinforced by wire rings; (b) second type of the clamping region reinforced by texture fibers; (c) third type of the clamping region coated by a rubber layer.