

광디스크 및 테크 진동 저감 기술

정진태*

(한양대학교 기계공학과)

1. 머리말

인터넷의 응용분야가 넓어지고 이에 관련된 문서, 음성, 동영상 등과 같은 데이터의 양이 급격하게 증가함에 따라 기존의 하드 디스크와 플로피 디스크만으로 데이터를 저장하는데 많은 어려움이 있다. 이에 대한 하나의 해결 방안으로 저장능력이 큰 광디스크 드라이브가 등장하게 되었다.

광디스크의 종류는 크게 CD, CD-ROM, DVD, CD-RW로 구분할 수 있다. 초기의 광디스크인 CD는 주로 오디오용 CD 플레이어에 사용되었는데, 기존의 아날로그 방식인 LP 레코드보다 디지털 방식의 CD가 용량이나 음질면에서 월등히 우수한 성질을 가지고 있다. 따라서 현재 LP 레코드는 더 이상 사용되지 않고 LP 레코드가 CD로 대체된 지 오래이다. CD-ROM은 CD의 방식을 컴퓨터에 적합한 광디스크로 컴퓨터의 보조기억장치로 널리 쓰이고 있다. CD-ROM 드라이브는 CD 플레이어의 회전속도와 같은 속도를 갖는 정배속의 CD-ROM 드라이브에서 발전하여, 32배속, 40배속과 같이 회전속도가 점점 빨라지는 추세이다. 요즘에는 큰 사이즈의 데이터를 갖는 영화와 같은 동영상 파일을 저장할 수 있는 DVD가 개발되어 급속하게 사용범위가 넓혀지고 있다. DVD는 MPEG2라는 압축방식으로 동영상을 압축하여 12cm의 광디스

* E-mail : jchung@hanyang.ac.kr

크 안에 수 GB 용량의 데이터를 저장할 수 있다. 한편 CD-RW는 데이터를 재생만 할 뿐 기록할 수 없는 CD-ROM 및 DVD의 단점을 극복하여 VTR 처럼 반복적으로 기록과 재생을 할 수 있는 기록 매체이다. 급격히 발전하고 있는 광디스크는 하드 디스크의 이동성에 대한 단점을 극복하여 멀티미디어 저장장치의 중심에 위치하고 있다.

2시간 분량의 고품위 디지털 영상을 디스크 한 면에 저장하는 DVD의 기록밀도는 CD-ROM의 기록밀도의 4배 이상이다. 따라서 기록밀도의 기준인 1인치 당 트랙수를 나타내는 TPI와 1인치 당 피트의 수를 나타내는 PPI가 DVD에서는 CD-ROM에 비해 각각 2배 이상이 요구된다. 이러한 고밀도의 광디스크로부터 데이터를 작동오차 없이 재생하기 위해서 레이저의 파장을 짧게 하고 대물렌즈의 개구수를 증가시키는 등 여러 가지 방법을 강구하고 있다. 이와 더불어 재생하려는 데이터가 기록된 트랙에 레이저가 빠른 시간 내에 정확히 초점을 맞추기 위해 트랙킹 서보와 포커싱 서보가 더욱 정밀해지고 있다.

과거의 저배속/저밀도 광디스크 드라이브에서 데이터를 재생할 때 진동은 관심의 대상이 아니었으며 진동의 제어도 비교적 용이하였다. 그러나 배속이 증가하고 저장밀도가 높아지면서 진동은 광디스크 드라이브의 개발에서 가장 극복하기 어려운 문제 중의 하나가 되었다. 고배속/고밀도 광

디스크 드라이브에서 트랙의 벗어남(off-track)과 초점의 벗어남(off-focusing)에 의한 작동오류를 서보제어 기술로만 극복하는 것은 거의 불가능하다. 진동을 감소시켜 광디스크 드라이브의 동적 안정성을 확보하지 않고서는 이와 같은 작동오류를 제거할 수 없다.

본 글에서는 광디스크 드라이브와 관련된 진동 현상 및 진동 저감기술에 대해 소개하고자 한다. 광디스크와 데크에 대한 많은 진동문제가 있겠지만, 본 글에서 다룰 내용은 (1) 광디스크의 회전 가속도 및 정렬불량에 의한 광디스크의 진동, (2) 광디스크의 질량불평형을 자동적으로 보상하는 기구인 자동평형장치, (3) 광디스크 드라이브 데크의 진동을 줄이는 동흡진장치, 그리고 (4) 디스크 결함으로 인한 파열 방지이다.

2. 광디스크의 진동

광디스크 드라이브에 사용되는 디스크는 하드디스크 드라이브에서 사용되는 디스크와 달리 매우 유연하며 운전 중에 회전속도에 변화가 있을 뿐만 아니라, 디스크의 회전축과 대칭축이 일치하지 않는 정렬불량으로 인하여 진동이 발생한다. 광디스크의 진동에 대한 여러 현상들이 있지만 본 글에서는 회전가속도와 정렬불량으로 인한 광디스크의 진동을 소개하고자 한다.

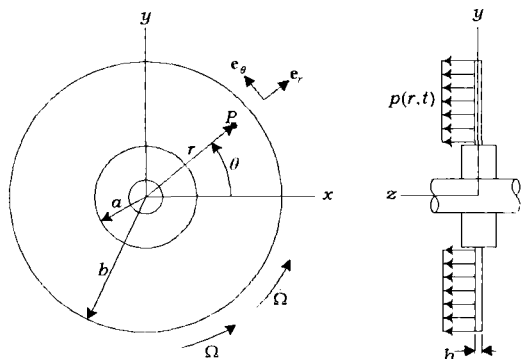


그림 1 광디스크의 개략도

2.1 회전속도 및 가속도의 영향⁽¹⁾

컴퓨터 플로피디스크나 하드디스크는 원판 상에 자성물질을 자화시키는 방법을 채택하고 있기 때문에 일정한 회전속도를 갖지만, CD-ROM 드라이브나 DVD 드라이브와 같은 광디스크 드라이브는 알루미늄 원판에 피트(pit)라는 일정한 크기의 홈을 파서 정보를 저장하기 때문에 회전속도 대신에 선속도가 일정하다. CD-ROM 드라이브나 DVD 드라이브의 픽업(pick-up)이 어느 한 트랙에서 다른 트랙으로 이동할 때, 원판이 회전 가속도를 갖기 때문에 정속도를 갖는 하드 디스크와는 다른 동적인 거동을 보여준다.

그림 1은 내경이 a , 외경이 b , 두께가 h 이며, 회전속도가 Ω , 회전 가속도가 $\dot{\Omega}$ 인 광디스크의 개략도를 나타낸다. 광디스크의 중립면에서의 r 방향(반경 방향), θ 방향(접선 방향), z 방향(면의 방향)의 변위를 각각 u , v , w 라고 할 때, 면내변위인 u 와 v 에 대한 고유진동수는 면외변위 w 에 대한 고유진동수보다 상당히 높기 때문에 면외변위에 대한 고유진동수만을 살펴보자. 광디스크 회전속도에 대한 면외변위의 고유진동수의 변화를 그림 2에 도시하였다. 그림 2에서 모드 (m, n) 는 m 개의 절점원과 n 개의 절점직경을 갖는 모드를 나타낸다. 회전속도가 증가함에 따라

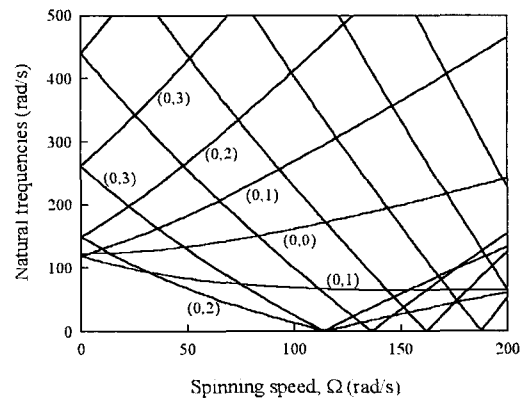


그림 2 회전속도에 대한 고유진동수의 변화

(0, 0) 모드를 제외한 모든 모드의 고유진동수가 2개로 분리되는데 높은 고유진동수를 순방향 파동 모드의 고유진동수이고 낮은 고유진동수가 역방향 파동 모드의 고유진동수를 나타낸다. 역방향 파동 모드의 고유진동수가 0이 되면 동적인 불안정성이 발생하므로 설계시 주의하여야 한다.

가속도의 영향을 분석하기 위하여 광디스크의 z 방향으로 단위충격력을 가하고 회전속도를 그림 3(a)와 같이 0에서 300 rad/s까지 0.1초 동안 가속하여 0.2초 동안 속도를 300 rad/s로 유지한 후 0.1초 동안 감속하여 속도를 0으로 제어하였을 때,

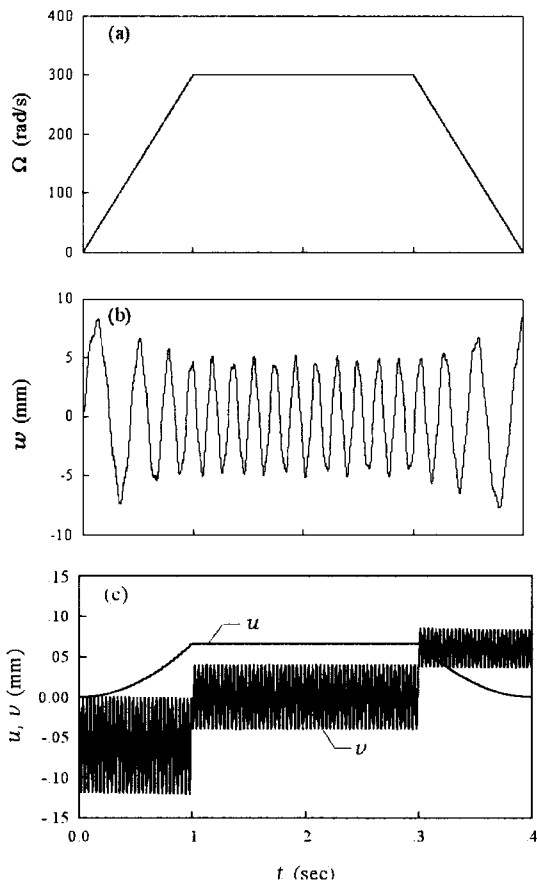


그림 3 회전 광디스크의 변위 시간응답: (a) 회전속도, (b) 면외방향 변위, (c) 면내방향 변위

반경방향, 접선방향과 면외방향의 변위들에 대한 시간응답을 구하여 그림 3(b)와 3(c)에 도시하였다. 그림 3에서 양의 회전 가속도는 면외방향 변위의 진동에 대한 진폭과 주기를 감소시키고 반대로 음의 회전 가속도는 진폭과 주기를 증가시키는 것을 알 수 있다. 그리고 반경방향과 접선방향의 주기가 면외방향 변위에 대한 주기보다 상당히 작음을 알 수 있다.

2.2 회전축 정렬불량의 영향⁽²⁻⁴⁾

광디스크 드라이브는 필요시에만 광디스크를 드라이브에 장착할 수 있도록 되어 있어 디스크 장착 조건이 매번 바뀔 수 있으므로 회전중심과 기하중심을 일치 시키지 못하는 경우가 발생한다. 이러한 현상은 디스크를 1회 장착하여 폐기할 때까지 분해를 하지 않는 하드디스크 드라이브에서는 거의 발생하지 않는다.

광디스크 드라이브에서 발생하는 정렬불량을 크게 병진정렬불량(translational misalignment)과 각정렬불량(angular mis-alignment)으로 구분할 수 있다. 병진정렬불량은 광디스크의 회전축과 대칭축이 서로 평행하나 일치하지 않는 경우로 그림 4(a)에 도시되어 있다. 반면 각정렬불량은 회전축과 대칭축이 서로 평행하지 않은 경우로서 그림 5(b)에 그려진 바와 같다. 일반적인 광디스크 드라이브에서는 병진 및 각정렬불량이 혼합된 형태의 정렬불량이 발생한다.

정렬불량은 축대칭인 광디스크에 비대칭적인 요소를 부과하는 역할을 한다. 일반적으로 축대칭인 구조물에 작은 양의 형상 또는 물성치에 대한 비대칭적인 요소가 부과되면 고유진동수가 2개로 분리되는 현상을 볼 수 있다.⁽⁵⁾ 불량정렬을 갖는 회전 광디스크에서도 이와 같은 모드분리 현상이 나타난다. 그림 5는 회전하는 광디스크가 정렬불량을 가질 때의 모드형상을 보여주고 있다. 첨자 s와 a는 각각 xz 평면에 대해 대칭 및 비대칭 모

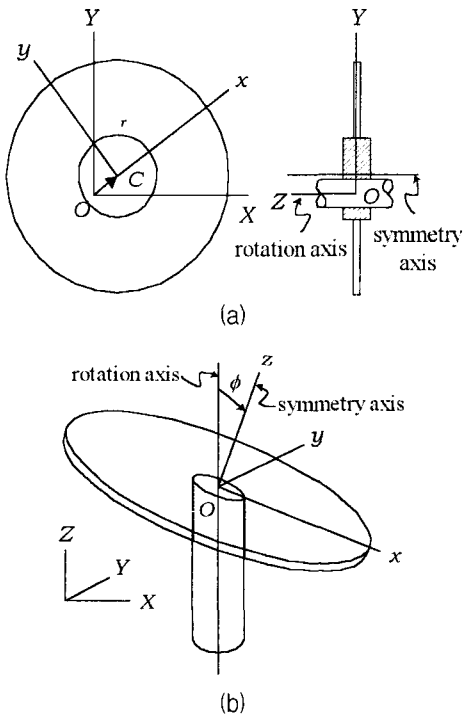


그림 4 정렬불량 광디스크: (a) 병렬정렬불량, (b) 각정렬불량

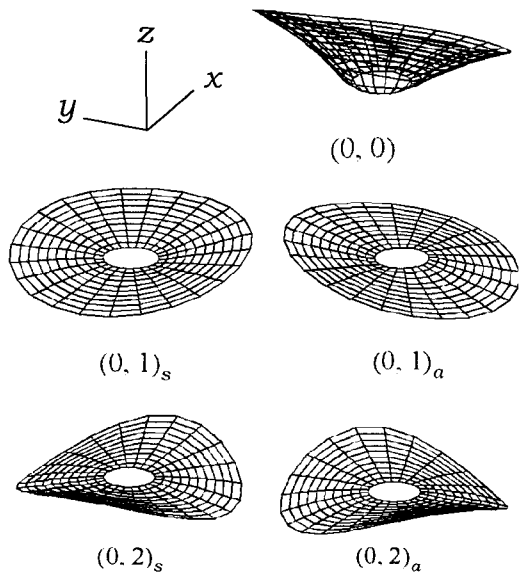


그림 5 정렬불량을 갖는 회전 광디스크에서의 진동모드

드를 표시한다. (0, 1) 및 (0, 2) 모드들이 대칭모드와 비대칭모드로 분리됨을 알 수 있으며, (0, 0) 모드가 한쪽으로 일그러지는 것을 관찰할 수 있다. 사실 정렬불량이 있는 경우의 (0, 1) 및 (0, 2) 등 다른 모드들도 정렬불량이 없는 모드들과 비교하면 모드형상에서의 변화가 있는데 이를 모드 오염(mode contamination)이라고 한다.

이와 같은 모드 분리는 시간응답에서 맥놀이 현상(beat frequency)을 발생시킨다. 광디스크의 면외방향으로 단위충격력을 가하고 회전속도를 0에서부터 1000 rad/s까지 0.1초까지 증가시키고 1000 rad/s의 속도를 일정하게 유지하는 경우 면외방향의 변위에 대한 시간응답을 구하면 그림 6과 같다. 그림 6(a)는 병렬질량불량을 갖는 경우의 시간응답이며, 그림 6(b)는 각정렬불량을 갖는 경우이다. 그림 6에서 보듯이 맥놀이 현상이 나타남을 알 수 있다.

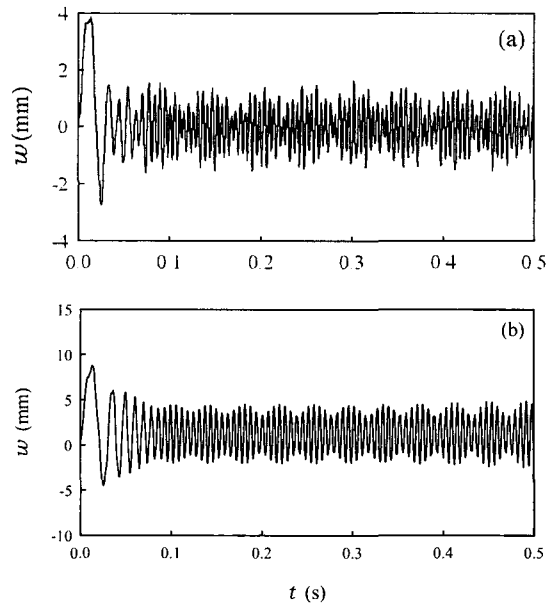


그림 6 정렬불량을 갖는 회전 광디스크의 면외방향 변위의 시간응답: (a) 병렬질량불량을 갖는 경우, (b) 각질량불량을 갖는 경우

3. 자동평형장치

자동평형장치는 광디스크 드라이브에서 회전체의 주 진동원으로 작용하는 가변적 질량불평형(variable mass unbalance)을 불의 질량에 의해 자동적으로 줄여주는 장치이다. 광디스크를 포함한 회전체는 정렬불량 및 제작결함에 의해서 질량 불평형을 줄이는 것이 매우 어렵기 때문에 자동평형장치를 이용하여 질량불평형을 자동적으로 제거하고 있다.

3.1 자동평형장치의 작동원리^(6~8)

자동평형장치는 그림 7에 도시된 것처럼 턴테이블과 일체로 제작되며 환형의 레이스 안에 여러 개의 불이 자유스럽게 움직일 수 있는 구조로 되어 있다. 그림 8은 자동평형장치의 모델을 보여준다. 회전속도가 w 인 광디스크와 자동평형장치를 포함한 회전체의 도심의 좌표를 그림 8과 같이 r 과 θ 로 표시하고, 회전체 질량중심 G 의 위치는 편심량 ϵ 과 X 축으로부터의 각도 wt 로 나타낼 수 있다. 그리고 각 불의 위치는 회전체의 도심과 질량중심을 잇는 직선을 기준으로 반시계방향으로 측정된 각도 ϕ_i (단, $i=1, 2, \dots, n$ n 은 불의 개수), 레이스의 반경 R 로 정의하여 동적해석을 수행할 수 있다.

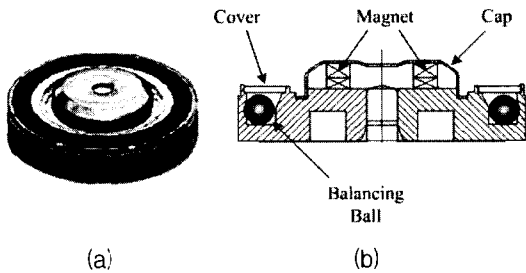


그림 7 자동평형장치가 장착된 턴테이블: (a) 외관, (b) 단면도

섭동법을 이용하여 얻어진 회전속도와 불의 질량의 변화에 대한 평형안정성 범위의 한 예를 그림 9에 표시하였다. 그림 9에서 m 은 불의 질량, M 은 회전체의 질량, w_n 은 회전체의 고유진동수를 나타낸다. 회전속도 및 관련 물성치가 그림 9의 평형안정성범위(balanced stable region)의 내부에 있을 때 자동평형장치가 평형의 목적을 달성한다. 특히 중요한 사항은 회전속도가 고유진동수보다 큰 경우에만 평형장치가 작동한다는 점이다. 따라서 자동평형장치를 설계할 때 관련 설계변수의 선택에 신중을 기하여야 한다. 그림 10(a)는

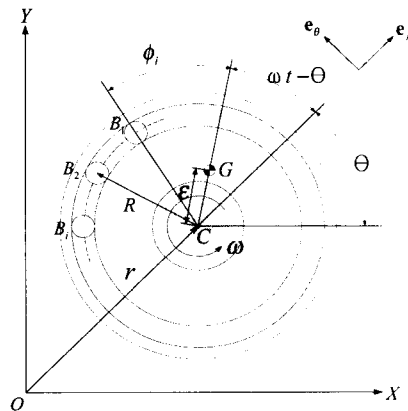


그림 8 자동평형장치의 모델링

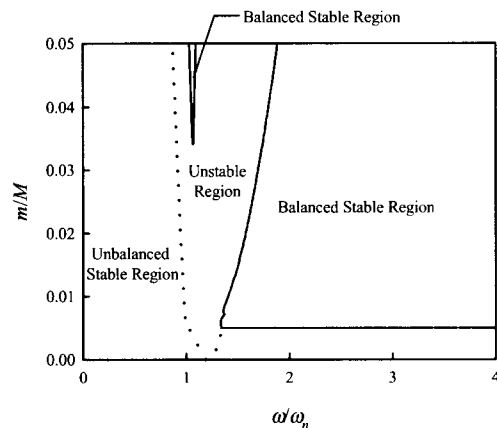


그림 9 자동평형장치의 평형안정성 선도

$w/w_n = 2$ 일 때 불이 불평형 질량을 보상하여 평형을 이루는 것을 보여주며, 그림 10(b)는 $w/w_n = 0.5$ 일 때 불이 질량 불평형을 심화시키는 것을 알 수 있다.

3.2 광디스크 드라이브에 장착된 자동평형장치^(9, 10)

자동불평형장치가 부착된 광디스크 드라이브에 대한 피딩계(feeding system)의 형상은 그림 11과 같다. 피딩테크의 중앙부분은 광픽업이 위치하는 부분이며 자동불평형장치는 피딩테크에 고정된 스피들모터에 장착되어 스피들 모터와 함께 회전한다. 그리고 피딩테크의 네 개의 모서리에 위치

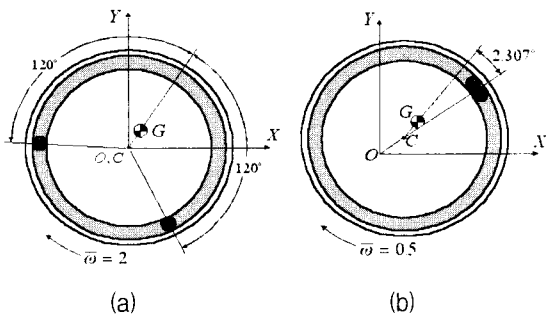


그림 10 불의 위치: (a) $w/w_n = 2$ 일 때, (b) $w/w_n = 0.5$ 일 때 단면도

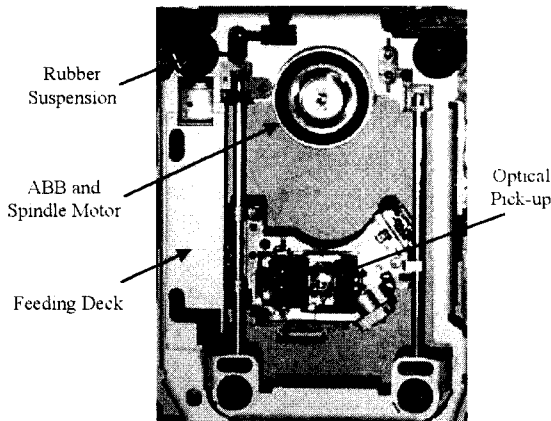


그림 11 자동평형장치가 부착된 피딩계

한 고무 서스펜션이 피딩계에 강성과 감쇠를 제공한다. 그림 11에 도시된 피딩계의 동적 해석을 하기 위한 물리적 모델을 그림 12에 도시하였다. 해석을 위하여 피딩테크를 강체로 가정하였고, 고무 서스펜션은 스프링과 댐퍼로 모델링하였다. 그리고 특히 피딩테크의 회전을 분석하기 위하여 γ 라는 좌표를 도입하였다.

그림 13은 광디스크 회전속도와 고무 서스펜션 감쇠의 변화에 대한 자동평형장치를 부착한 평형 안정성 선도인데, w_r 는 병진운동에 대한 고유진동수이며 w_γ 은 회전운동에 대한 고유진동수를 나타낸다. 그림 13에서 보듯이 평형은 w_r 보다 큰 회전속도에서 얻어질 수 있으나, 감쇠가 작은 w_r 근처의 회전속도에서 국부적으로 평형이 이루어지지 않음을 알 수 있다. 그림 13의 점 P_1 에 해당하는 물성치를 갖는 피딩테크의 변위와 불의 위치를 그림 14에 나타내었다. 그림 14에서 $|r|$ 은 자동평형장치의 중심의 반경방향 변위이며, ϕ_1 과 ϕ_2 는 불의 위치를 나타낸다. 시간이 지남에 따라 변위 $|r|$ 와 r 은 0으로 수렴하여 평형의 목적

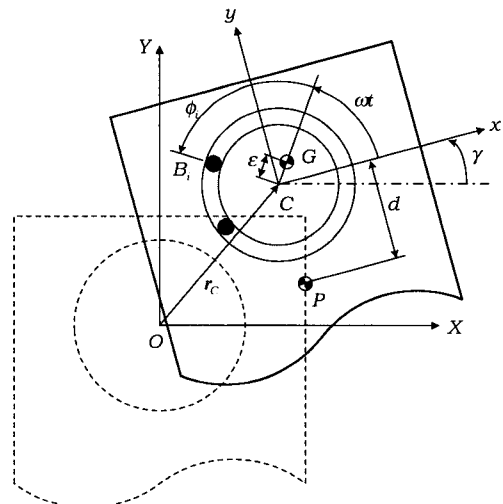


그림 12 자동평형장치가 부착된 피딩계 모델링

을 달성함을 알 수 있다. 이때 불은 회전체 전체의 질량중심이 도심과 일치할 수 있도록 불평형 질량의 반대에 접근해 감을 알 수 있다.

4. 동흡진장치⁽¹¹⁾

광디스크는 탈착식이기 때문에 사용중에 부주의로 인하여 심하게 변형되는 경우가 종종 있다. 변형된 광디스크는 고속으로 회전할 때 진동을 심하

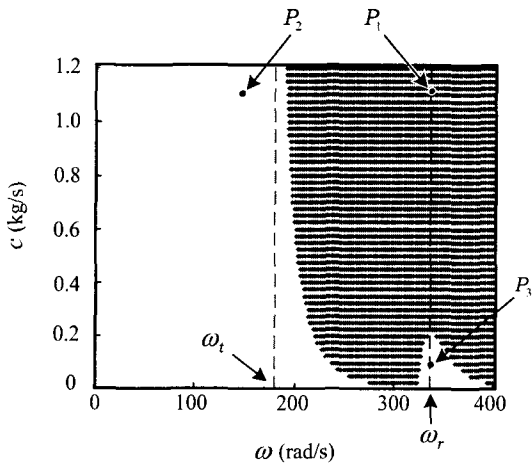


그림 13 자동평형장치가 부착된 피딩계의 평형안정성 선도

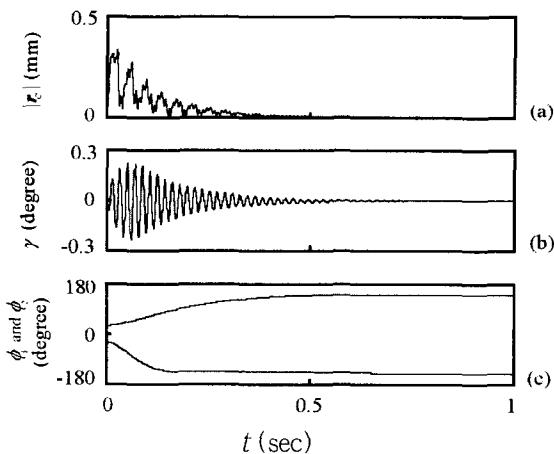


그림 14 자동평형장치에서의 변위

게 발생시키므로 서보제어를 이용하더라도 광디스크로부터 데이터를 읽어내는 것이 불가능하다. 이러한 경우 동흡진기를 이용하여 진동을 감소시킬 수 있다.

동흡진기를 장착한 피딩데크의 실물을 그림 15에서 볼 수 있다. 동흡진기는 피딩데크의 질량에 비해 작은 질량을 가지며 동흡진기와 피딩데크는 고무 와셔로 연결되어 있다. 피딩데크가 주시스템(primary system)이 되고 동흡진기가 부시스템(secondary system)이 되는 셈이다. 그리고 고무 서스펜션은 주시스템의 스프링과 댐퍼의 역할을 하며, 고무 와셔는 부시스템의 스프링과 댐퍼의 역할을 한다. 그림 16은 동흡진기가 부착된 피딩데크의 물리적 모델에 대한 도식적인 그림이다. 본 글에서의 동흡진장치는 상하방향 진동에 대한 장치이기 때문에 모델에서는 피딩데크의 상하방향 변위 w 와 회전변위 θ_x, θ_y 그리고 동흡진장치의 상하방향 변위 w_a 만을 고려하였다.

동흡진기의 설계는 공진에 의해 과도하게 진동이 발생하는 주파수영역의 진폭을 줄여주도록 설계한다. 그림 17은 동흡진기의 성능을 보여주는 주파수응답함수이다. 변형된 디스크가 장착된 스피들모터의 회전수를 정지상태에서 180 Hz에 해당하는 회전수까지 천천히 증가시키면서 피딩데크의

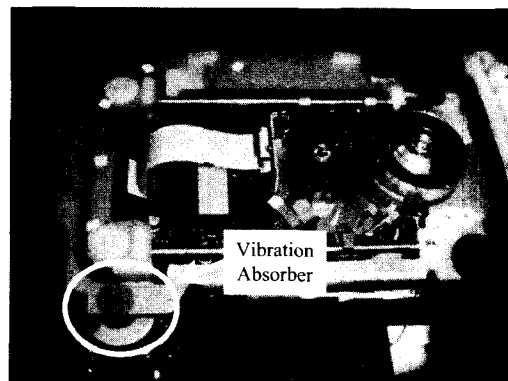


그림 15 동흡진기가 부착된 피딩계

진폭을 측정하였다. 그림 17에서 실선은 동흡진장치가 부착된 피딩데크의 진폭을 나타내며, 점선은 동흡진장치가 부착되지 않은 피딩데크의 진폭을 나타낸다. 피딩데크의 고유진동수인 58 Hz 부근의 진동이 상당히 감소함을 알 수 있다.

5. 디스크 파열 방지⁽¹²⁾

앞에서 언급하였듯이 광디스크는 탈착식이기 때문에 사용자의 취급 부주의가 광디스크에 균열을 발생하게 할 수 있다. 이러한 균열은 고배속 드라이브의 높은 회전속도의 영향을 받아 광디스크의 파열을 야기하며, 실제로 이러한 사례가 다수 발

생되어 광디스크 및 광디스크 드라이브 제작업체의 관심을 갖게 하고 있다. 거의 대부분의 광디스크가 취성재료인 폴리카보네이트로 제작되기 때문에 균열이 있는 경우 균열이 진전되어 파열로 이어질 가능성이 많다. 이러한 파열은 광디스크 드라이브에 손상을 줄 뿐만 아니라 사용자에게도 위험이 된다.

광디스크가 11,000 rpm으로 정속 회전하는 경우에 광디스크에 가해지는 응력 분포와 균열 선단의 응력 분포를 살펴보도록 하자. 그림 18은 균열이 없는 정상 광디스크에서 반경방향으로의 최대 주응력의 분포를 보여주고 있다. 일반적으로 균열이 없는 광디스크는 내주에서 큰 응력을 가지고 외주에서는 작은 응력을 가지며, 전반적인 회전속도가 커짐에 따라 응력의 크기가 증가한다. 그림 19는

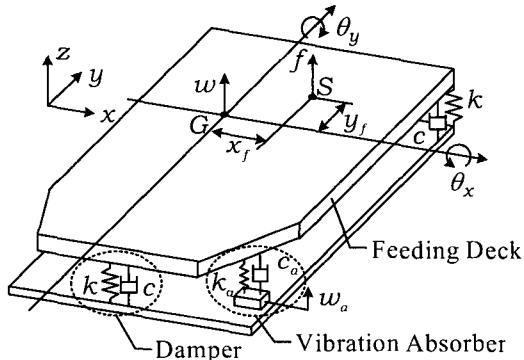


그림 16 동흡진기가 부착된 피딩데크의 모델링

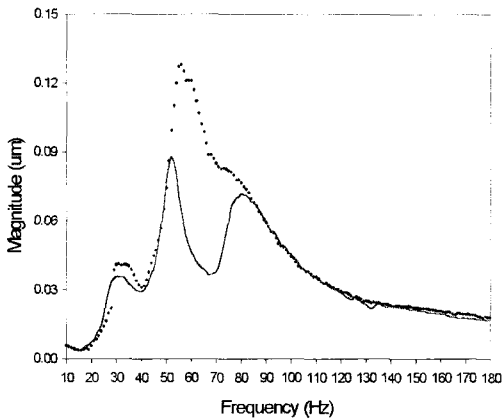


그림 17 동흡진기가 부착된 피딩데크의 모델링

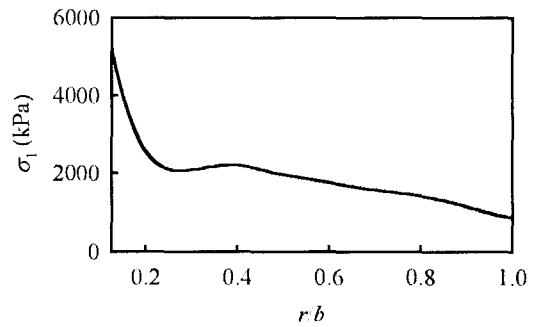


그림 18 균열이 없는 회전 광디스크에서의 반경방향으로의 주응력 분포

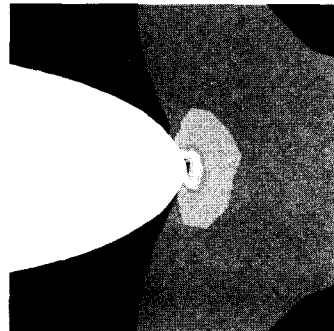
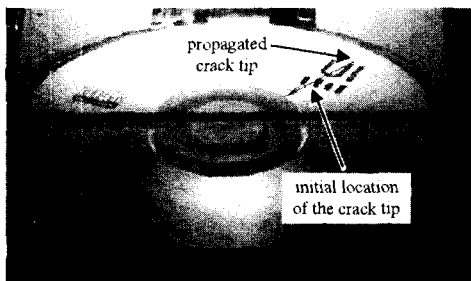


그림 19 균열 선단에서의 응력 집중

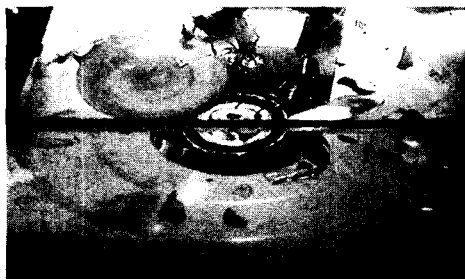
특집 광디스크 드라이브의 진동 기술

균열 선단에서의 응력분포를 보여주는데, 응력이 균열 선단에 집중됨을 알 수 있다. 그림 20은 광디스크가 11,000 rpm으로 회전할 때, 초기 균열이 성장하여 파열이 일어나는 과정을 보여준다. 그림 20(a)는 균열의 크기가 커가는 과정의 광디스크를 보여주고, 그림 20(b)는 광디스크가 파열되는 장면이다.

광디스크 드라이브의 고배속화 추세에 따라 균열을 갖는 광디스크의 파열 위험성은 계속 증대될

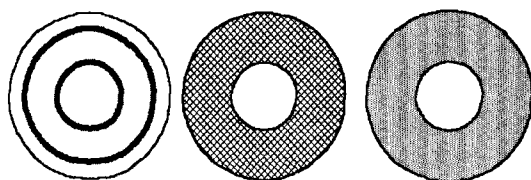


(a)



(b)

그림 20 균열에 의한 광디스크 파열 과정



wire ring

texture

rubber coating

(a)

(b)

(c)

그림 21 디스크 파열 방지 방안 예

것이다. 현재 디스크의 주재료인 폴리카보네이트는 내충격성, 초경량성, 투광성 및 표면광택, 유연한 가공성 등 여러 가지 우수한 기계적 성질을 가지고 있으나, 균열이 존재하면 파열의 가능성이 높아 향후 광디스크 드라이브의 고배속화 요구를 만족시키기 어렵다. 광디스크 파열 방지의 방안으로 그림 21에 도시된 바와 같이 광디스크에 철심을 보강하거나, (그림 21(a)) 데이터를 기록하는 면의 반대편에 섬유질 소재로 보강하거나, (그림 21(b)) 혹은 광디스크에 고무를 코팅하는 방법 (그림 21(c))을 고려할 수 있다.

6. 맺음 말

광디스크 드라이브가 고밀도화되고 고배속화됨에 따라 진동 문제가 앞으로도 광디스크 드라이브의 성능 향상에 병목기술(bottle-neck technology)이 될 것이다. 앞서 언급한 진동 저감 대책은 광디스크에서 발생하는 진동을 줄이는 방법의 일부이며, 현재 광디스크의 시스템의 작동 메커니즘을 대폭적으로 개선하는 창의적인 설계가 대두될 전망이다. 이러한 시도에 의해서 기존의 광디스크 드라이브에 비해 저진동, 고배속, 고밀도 광디스크 드라이브의 개발도 가능할 것으로 생각된다.

후 기

본 글의 일부는 삼성전자의 연구비 지원에 의해 얻어진 결과이며, 이에 감사하는 바이다.

참 고 문 헌

(1) Chung, J., Oh, J.-E. and Yoo, H. H., 2000, "Non-linear Vibration of Flexible Spinning Disc with Angular Acceleration," Journal of Sound and Vibration, Vol. 231, No. 2, 375~391.

- (2) Chung, J., Heo, J. W. and Han, C. S., 2003, "Natural Frequencies of a Flexible Spinning Disk Misaligned with the Axis of Rotation," *Journal of Sound and Vibration*, Accepted for Publication.
- (3) Heo, J. W., Chung, J. and Choi, K., 2003, "Dynamic Time Responses of a Flexible Spinning Disk Misaligned with the Axis of Rotation," *Journal of Sound and Vibration*, Accepted for Publication.
- (4) Heo, J. W. and Chung, J., 2003, "Vibration Analysis of a Flexible Rotating Disk With Angular Misalignment," *Journal of Sound and Vibration*, Submitted for Publication.
- (5) Chung, J. and Lee, J. M., 1999, "Vibration Analysis of a Nearly Axisymmetric Shell Structure by Using a New Finite Ring Element," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 219, No. 1, 35~50.
- (6) Chung, J. and Ro, D.-S., 1999, "Dynamic Analysis of an Automatic Dynamic Balancer for Rotating Mechanisms," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 228, No. 5, 1035~1056.
- (7) Hwang, C.-H. and Chung, J., 1999, "Dynamic Analysis of an Automatic Ball Balancer with Double Races," *JSME International Journal*, Vol. 42, No. 2, 265~272.
- (8) Chung, J. and Jang, I., 2003, "Dynamic Response and Stability Analysis of an Automatic Ball Balancer for a Flexible Rotor," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 259, No. 1, 31~43.
- (9) Kim, W. and Chung, J., 2002, "Performance of Automatic Ball Balancers on Optical Disc Drives," *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 216, 1071~1080.
- (10) Kim, W., Lee, D. J. and Chung, J., 2002, "Three-dimensional Modeling and Dynamic Analysis of an Automatic Ball Balancer in an Optical Disk Drive," *Journal of Sound and Vibration*, Submitted for Publication.
- (11) Heo, J. W., Chung, J. and Park, J. M., 2002, "Vibration and Noise Reduction of an Optical Disk Drive by Using a Vibration Absorber," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 48, No. 4, 874~878.
- (12) Kim, W. and Chung, J., 2002, "Fracture Identification and Prevention of a High-speed Optical Disk with a Crack," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 48, No. 2, 248~253.