

HDD 스핀들 시스템의 진동 해석 및 저감 설계 기술

장 건 희* · 한 재 혁** · 김 동 균**

(한양대학교 *정밀기계공학과 · **대학원 박사과정)

1. 머리말

1980년대 컴퓨터와 디지털 저장 매체의 대중화 이후 현대 사회는 이른바 정보화 사회로 급속히 변화하고 있으며 최근 인터넷의 등장과 멀티미디어의 확산은 정보 저장 장치의 대용량화를 더욱 가속화하고 있다.

현재 쓰이고 있는 정보 저장 장치는 RAM과 같은 반도체 메모리, 하드 디스크 드라이브(HDD : hard disk drive), 플로피 디스크 드라이브(floppy disk drive), 테이프와 같은 자기 저장 장치, CD, DVD (digital video disk)와 같은 광 디스크 드라이브 등으로 분류될 수 있다. 이 중에서 가장 널리 사용되는 것은 HDD로서 다른 저장 장치와 비교하여 가격 대비 성능 측면에서 비교 우위를 유지하고 있으며, 현재 기술 발전 속도로 볼 때 적어도 2010년까지는 정보 저장 기기의 주 역할을 담당할 것으로 예측되고 있다.

최초의 HDD는 1956년 IBM이 소개한 RAMAC으로 자료의 기록밀도가 2 KB/in²에 불과하였으나 1998년 12월 현재 기록밀도는 5.7 GB/in²(IBM Travelstar 6GN)에 이르렀으며, 2000년에는 10 GB/in²의 기록밀도가 가능할 것으로 예상된다.

이러한 고밀도의 HDD 개발을 위해서는 스핀들 모터와 디스크를 포함하는 스핀들 시스템의 진동 분석과 획기적인 진동 저감이 요구되는데 이는 스핀들 시스템의 진동이 HDD에서 헤드와 디스크 트랙위의 자료를 읽고 쓸 때 발생하는 오작동인 트랙비정렬

(track mis-registration)의 직접적인 원인이 되기 때문이다.

이 글에서는 HDD 성능향상에 있어서 스핀들 시스템의 진동이 갖는 중요성을 살펴보고, 그 진동을 해석하는 방법과 해석 결과를 통해 알 수 있는 시스템의 동특성을 알아보고자 한다. 아울러 HDD의 기계적 특성 향상을 위해 현재 활발히 진행되고 있는 연구 과제들에 대해서도 소개하고자 한다.

2. HDD 스핀들 시스템 진동의 중요성

HDD에서 자료를 읽고 쓰는 구조는 그림 1과 같이 디스크의 트랙 위에 쓰여진 자료를 헤드가 읽는 형식으로 이루어진다. 이 때 가장 이상적인 경우는 그림 2의 실선으로 그려진 원과 같이 디스크의 회전 궤적이 정확히

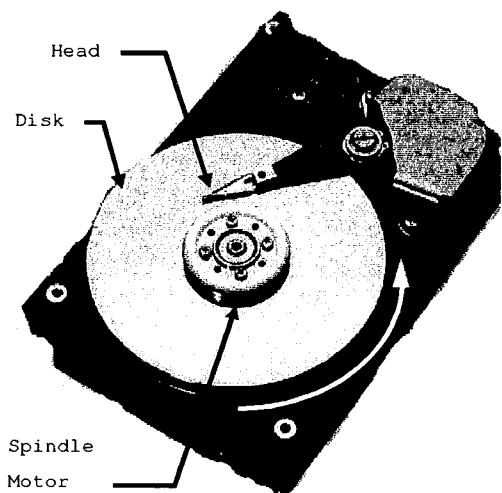


그림 1 HDD 스핀들 시스템의 구조

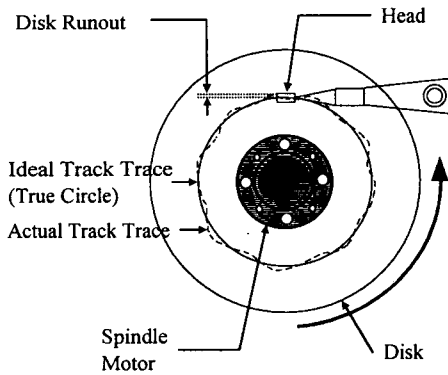


그림 2 HDD에서 발생하는 런아웃

진원(眞圓)을 이루는 경우라 하겠다. 하지만 실제의 경우 디스크의 회전은 스피들 모터의 진동 등의 원인에 의해 점선과 같이 왜곡된 모습을 그리게 되는데 이 때 발생하는 트랙과 헤드 사이의 위치의 차이를 런아웃(runout)이라 한다.

런아웃은 각 회전 시마다 반복되는 성분인 RRO와 반복되지 않는 성분인 NRRO로 나뉘며 이는 다음과 같이 표현된다.

$$TIR(t) = RRO(t) + NRRO(t)$$

TIR : Total Indicated Runout

RRO : Repeatable Runout

NRRO : Non-Repeatable Runout

이 중 RRO는 서보 제어 시스템에 의해 어느 정도 보상할 수 있으나 NRRO는 보상할 수 있는 방법이 없어 NRRO가 어느 정도 이상으로 커지면 헤드가 트랙을 제대로 읽지 못하는 트랙비정렬이 발생하게 된다. 따라서 NRRO는 디스크의 트랙간의 간격이 제한하는 중요한 요소가 되며, HDD업계에서는 NRRO를 트랙 간격의 약 5% 이내로 규제하고 있다. 최근 HDD에 장착되는 3.5" 디스크의 경우 약 12,000 TPI(track per inch) 정도의 자기기록밀도를 가지고 있는데 이 경우 트랙과 트랙사이의 간격은 약 2 μm 정도가 되고 NRRO는 0.1 μm 이하로 규제되고 있다. 2000년에는 자기기록밀도가 25,000 TPI 정도가 될 것으로 예상되며 이 경우 NRRO는 0.05 μm 이하로 규제될 것이다. 표 1은 12,000TPI의 자기기록밀도를 갖는 3.5" HDD의 NRRO가 30% 감소되었을 때 저장

표 1 NRRO 저감효과

NRRO(μm)	0.1	0.07(-30%)
트랙간격 (μm/track)	2.1	1.47(-30%)
자기기록밀도 (tracks/inch)	12,000	17,000(+43%)
디스크 저장용량 (giga bytes/disk)	3.5	5(+43%)

용량 증가효과를 나타낸 것이다. NRRO가 30% 감소되면 트랙 간격도 30% 줄일 수 있어 결과적으로 자기기록밀도와 디스크 저장용량을 43% 늘일 수 있음을 알 수 있다. 이와 같이 HDD 스피들 시스템에서 발생하는 진동의 측정, 해석 및 저감 문제는 갈수록 대용량화 되어가는 HDD에 있어서 그 중요성이 증대되고 있다.

3. HDD 스피들 시스템 진동 해석

HDD 스피들 시스템은 크게 스피들 모터, 디스크, 그리고 디스크를 모터에 고정시키는 스페이서 및 클램프등으로 구성되어 있다. 동역학적 관점에서 이러한 스피들 시스템은 여러장의 유연한 디스크를 짧은 회전축이 지지하여 회전하는 회전체로 생각할 수 있다.

이러한 HDD 스피들 시스템에서 발생하는 진동의 해석 및 저감을 위해서는 크게 가진원의 규명, 고유 진동 해석, 런아웃 해석 등을 통한 진동의 측정 분석 및 진동 전달특성 분석이 이루어져야 한다.

3.1 스피들 시스템의 가진원 해석

스피들 시스템의 진동을 유발하는 가진원은 크게 표 2와 같이 분류할 수 있다. 가진원은 구동 모터 회전자의 질량 편심과 베어링 결함과 같은 기계적 가진원 및 전자기력과 같은 전자기적 가진원이 존재하는데 대부분의 가진원을 직접 측정하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 해석적인 방법으로 가진 주파수를 유추하고, 진동측정을 통하여 이를 확인하게 된다. 특히 볼베어링의 결함에 의해 발생하는 결함주파수는 기구학적 해석을 통해 결함의 수까지 예측할 수 있으며⁽¹⁾, 전자기력의 경우 유한 요소 해석 및 주파수 분석

표 2 스피들 시스템에서 발생하는 가진원

가진원	특징
<ul style="list-style-type: none"> 스핀들 시스템 제작시의 질량 불평형 스핀들 시스템 설치시의 편심 	<ul style="list-style-type: none"> 회전수의 정수배 형태로 발생 밸런싱에 의한 진폭 저감이 가능
<ul style="list-style-type: none"> 볼베어링의 결합 	<ul style="list-style-type: none"> 기구학적 해석에 의한 결합 위치 및 결합수 해석 가능^(1,3) 예압 조절 등에 의한 진폭 저감이 가능
<ul style="list-style-type: none"> 유체베어링의 half-frequency whirl 	<ul style="list-style-type: none"> 회전수의 1/2에서 발생
<ul style="list-style-type: none"> 전자기력(비평형자력, 코깅토크, 토크리플) 	<ul style="list-style-type: none"> 극수, 상수 등의 함수로 발생⁽²⁾ 비평형 자력의 경우 극수 및 상수를 평형 대칭형으로 하면 제거 가능⁽³⁾ 코깅토크 저감을 통한 진폭 저감 가능

을 통해 가진 주파수 및 크기를 예측할 수 있다⁽²⁾.

3.2 스피들 시스템 고유 진동 해석

스핀들 시스템의 고유 진동수 및 고유 진동모드를 알기 위한 방법은 실험적인 방법과 해석적인 방법이 있다. 그림 3은 고유 진동 해석을 수행하기 위한 실험 장치 구성도이다. 실험 장치는 스피들 시스템을 가진하기 위한 가진기와 진동신호를 측정하기 위한 측정센서 및 증폭기와 신호분석기(signal analyzer)로 구성된다.

스핀들 시스템을 가진하기 위한 가진기로는 충격망치(impact hammer)나 셰이커(shaker) 등을 이용한다. 그림 4는 충격망치를 이용하여 HDD 스피들 모터를 가진하는 사진을 보여 주고 있다. 충격망치를 이용한

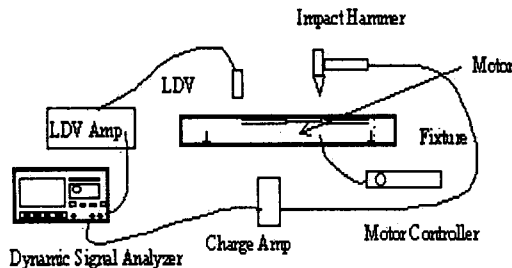


그림 3 고유 진동 해석을 위한 실험 장치 구성도

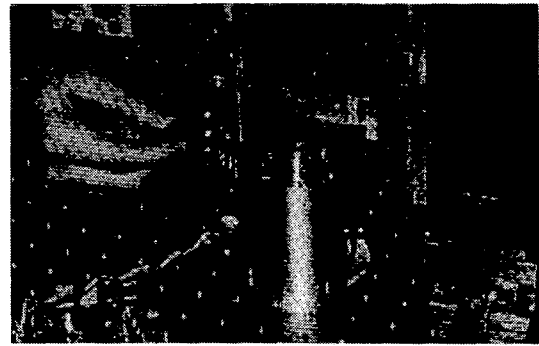


그림 4 충격망치를 이용한 가진실험

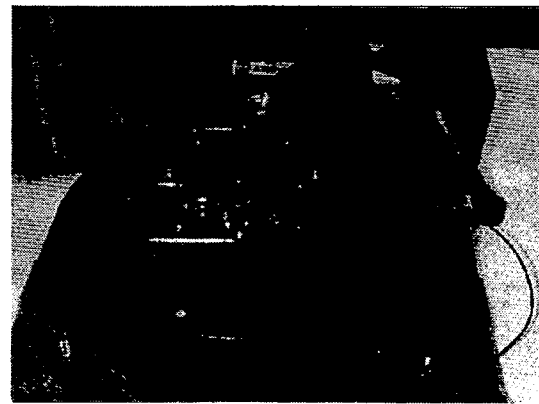


그림 5 셰이커를 이용한 가진 실험

실험은 비교적 단순한 실험장치를 구성할 수 있고 원하는 부위를 가진할 수 있는 장점이 있으나 사람의 손으로 가진하는 경우가 대부분이므로 일관된 결과를 얻기가 힘든 단점이 있다. 그림 5는 셰이커를 이용하여 HDD를 가진하는 사진을 보여 주고 있다. 셰이커의 원리는 측정 대상물에 일정한 주파수의 가진력으로 가진하고 측정점의 진폭을 측정하는 것으로 반복적으로 가진 주파수를 변화함으로써 주파수 응답함수를 구할 수 있다. 셰이커는 반복되는 실험에도 비교적 일관된 실험 결과를 얻을 수 있지만 장치가 복잡하며 특히 원하는 부위의 가진을 하기 어려운 단점이 있다.

스핀들 시스템의 진동을 측정하기 위한 측정센서로는 비접촉 방식인 레이저(laser doppler vibrometer) 혹은 정전변위계(capacitance probe)가 많이 사용된다. 일반적인 진동 측정에는 가속도계를 많이 사용하지만 HDD의 경우 가속도계를 HDD에 직접 부착함에 따라 HDD의 진동 특성을 변화시킬 수 있는

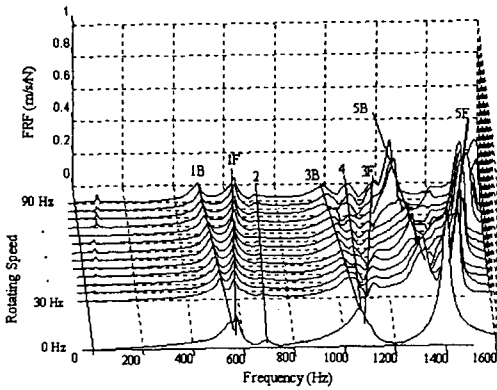


그림 6 스피들 시스템의 주파수 응답 함수

가능성이 있고 회전하는 물체에 가속도계를 부착하는 것이 부적절함으로 비접촉 방식을 많이 사용하게 된다. 현재 최신 레이저의 경우 2 nm, 갭센서의 경우 5 nm 정도의 정밀한 분해능을 가지고 있다.

그림 6은 충격망치를 이용하여 스피들 시스템의 주파수 응답함수를 구한 예로 y축은 스피들의 회전속도를 나타낸 것이다. HDD와 같은 회전체의 경우 자이로스코프 작용(gyroscopic effect)이 커지면 고유진동수중 일부는 회전속도의 증가에 따라 전, 후진모드로 분리되는데 그림 6에서는 스피들 모터에 부착된 디스크의 절점 직경이 있는 고유진동모드 등이 전, 후진 모드로 분리되는 것을 보여준다. 이와 같은 그림을 waterfall plot이라 하며 회전속도에 따른 시스템 특성을 한눈에 파악할 수 있는 장점이 있다. 그림에서와 같이 스피들 시스템이 회전할 때에는 하나의 모드가 두 개로 갈라지게 되어 고유주파수가 많아지게 되는 효과를 가지므로 공진할 수 있는 가능성이 더 많아진다. 따라서 예상되는 가진원(스피들 회전주파수, 베어링 결합 주파수나 전자기적 가진원)들이 고유주파수에 일치하지 않도록 설계하는 것이 반드시 필요하다.

회전하는 스피들 시스템의 고유진동수 및 고유진동모드를 해석하기 위한 이론적인 방법으로는 Assumed Mode Method⁽³⁾, 유한요소해석(finite element method)⁽⁴⁾ 등이 있다. 기존의 대형 회전체와는 달리 스피들 시스템은 지지축이 단축이며 유연한 디스크의 변위와 디스크를 지지하며 회전하는 허브

등의 강체 운동과의 연성효과가 크다. 따라서 정확한 해석을 위해서는 디스크의 연성과 모터 회전부위의 강체운동을 모두 고려하여야 한다. Assumed Mode Method는 유한개로 가정된 고유모드를 사용하여 변수를 이산화하여 고유진동을 해석하게 된다. 이 방법은 비교적 적은 자유도로도 정확한 고유진동수와 고유진동모드를 얻을 수 있는 장점이 있으나 임의의 형상을 갖는 지지구조의 스피들 시스템에 적용하기 어려운 단점이 있다. 유한요소해석법은 Hamilton의 원리를 이용하여 미소 강체 운동과 탄성 변형이 연성된 회전하는 유연 디스크의 운동방정식을 구한 후 이를 형상함수를 이용하여 해석 영역을 이산화시켜 해석하게 된다.

그림 7은 회전하지 않는 HDD 스피들 시스템을 ANSYS를 이용하여 유한요소해석하기 위해 모델링한 예이다. 유한요소법은 해석 영역을 이산화 시키므로 임의의 형상에 대하여도 해석이 가능하나 자유도가 많아지는 단점이 있다.

이러한 해석방법들을 사용할 때 회전부위와 지지부위간을 지지해 주는 베어링의 강성 및 감쇠 계수 해석은 동특성 해석에 중요한 부분을 차지하게 된다. 현재 대부분의 HDD 스피들 모터는 볼베어링이 사용되고 있는데 볼베어링의 경우 볼의 크기나 개수, 내외륜의 형상 그리고 예압에 따라 그 동특성이 크게 달라지므로 HDD 스피들 시스템의 동특성 해석을 위해서는 정확한 베어링 해석이 선행되어야 한다⁽⁷⁾.

이러한 해석적인 방법들은 시스템의 동특성을 예측할 수 있을 뿐만 아니라 구성품의

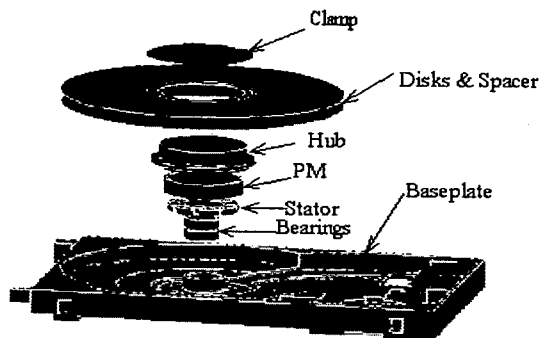


그림 7 스피들 시스템의 유한요소해석 모델

크기, 형상이나 재질, 베어링의 위치, 예압 등의 변화에 따른 동특성 변화를 알 수 있게 되므로 원하는 동특성을 가지게 되는 스피들 시스템을 제작하는데 매우 유용하게 사용될 수 있다.

3.3 런아웃 측정 및 해석

HDD 스피들 시스템은 반경방향과 축방향으로의 변위 즉 런아웃을 가지면서 회전운동을 하게 된다. 런아웃은 스피들 시스템의 강제 진동 현상의 하나로 런아웃을 측정 분석해 보면 스피들 시스템의 회전 정밀도 및 진동 특성을 해석 할 수 있다.

런아웃은 스피들 시스템의 윗면, 혹은 옆면에 변위를 측정할 수 있는 센서를 사용하여 측정하게 되며 정전 변위 센서를 많이 사용한다. 레이저 변위계의 경우 더욱 정밀한 해상도를 제공하지만 측정 시에 변위 이외에 표면 거칠기 등도 측정되어 런아웃 해석이 용이하지 않은 반면에 정전 변위 센서는 한 점을 측정하는 것이 아니라 일정 면적의 평균 변위를 측정하므로 표면 거칠기의 영향을 줄일 수 있는 장점이 있다. 그림 8은 이와 같은 정전 변위 센서를 이용한 HDD 스피들 모터의 런아웃 측정 실험을 보여주고 있다.

측정된 런아웃(TIR)을 회전주기마다 반복되는 RRO와 비반복적인 성분인 NRRO로 분리 해석하면 가진원의 규명 및 상대적인 기여도를 규명할 수 있다. 그림 9는 HDD 스피들 시스템에서 측정한 TIR, RRO와 NRRO를 나타낸 것이다. RRO의 원인은 회전체의 편심이나 축의 어긋남 또는 전자기적 가진원이며 이러한 RRO는 회전체의 밸런싱이나



그림 8 정전변위센서를 이용한 런아웃 측정

생산, 조립 정밀도를 높여서 줄일 수 있다. 비반복적 성분인 NRRO는 신호 처리 기법을 사용하여 런아웃에서 반복적인 성분을 제거함으로써 얻어질 수 있는데 NRRO를 주파수 분석하면 그 원인을 규명할 수 있다⁽⁸⁾. 그림 10은 HDD 스피들 시스템의 회전 속도를 65 Hz에서 85 Hz까지 5 Hz씩 증가시키면서 NRRO를 측정하여 주파수 분석한 것이다. 이와 같은 그림을 campbell diagram이라 하며 원의 크기는 해당 주파수에서의 NRRO의 크기, 실선은 회전속도에 따른 베어링의 결함에 의해 발생하는 결함 주파수, 점선은 스피들 시스템의 고유 진동수를 나타낸다. 볼 베어링을 사용하는 스피들 시스템의 경우 NRRO는 대부분 볼 베어링의 결함에 의해 발생함을 알 수 있다. 그림 10에서 11과 9번으로 표시된 성분을 살펴보면 처음에는 작았던 성분들이 회전속도가 각각 80 Hz와 85 Hz가 되면 볼베어링의 결함 주파수가 고유

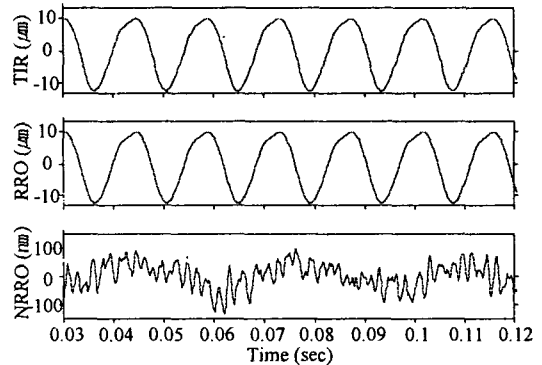


그림 9 TIR, RRO 및 NRRO

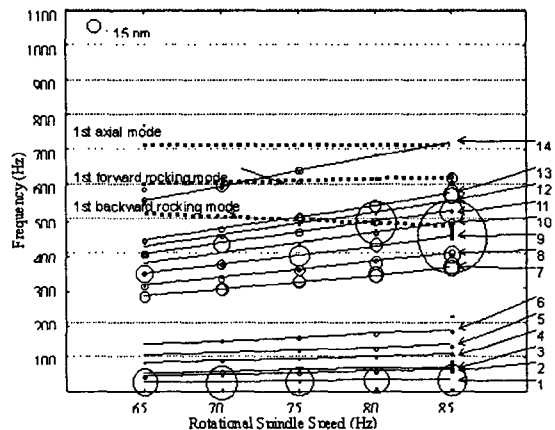


그림 10 NRRO campbell diagram

진동수와 일치하여 그 크기가 매우 커짐을 알 수 있다. 즉 동일한 스피들 시스템을 사용하더라도 회전 속도에 따라 그 진동특성이 변하게 되며 따라서 스피들 시스템의 작동 구간에 따라 정확한 동특성 해석을 수행하여 스피들 시스템을 설계해야 함을 알 수 있다.

4. HDD 스피들 시스템 진동의 저감

HDD 스피들 시스템에서 발생하는 진동을 저감시키기 위한 방법으로는 크게 가진원을 줄이는 방법과 가진원의 주파수 성분과 스피들 시스템의 고유 주파수가 일치하지 않도록 하는 방법 그리고 가진원의 전달 경로 등을 차단하는 방법 등이 있다.

4.1 가진원의 저감

스피들 시스템에서 발생하는 진동을 저감시키기 위한 가장 효과적인 방법은 가진원을 없애는 것이다. 표 2에서와 같이 HDD 스피들 시스템의 가진원은 크게 기계적인 가진원과 전자기적인 가진원으로 나눌 수 있다. 기계적인 가진원인 회전체의 질량 편심이나 축 어긋남, 제작, 조립 상의 오차 등은 회전체의 밸런싱, 조립, 제작 정밀도를 높힘으로써 저감할 수 있으며, 볼베어링 등에서 발생하는 결함 주파수는 볼베어링의 예압 변경 및 유체 베어링 등을 사용함으로써 저감할 수 있다. 스피들 모터의 토크는 자석 및 코일에 흐르는 전류에 의해 발생하지만, 때에 따라서는 토크이외에 회전하는 비평형 자력 및 공극내의 분포 자력의 형태로 스피들 시스템을 가진하게 된다⁽²⁾. 특히 이러한 자력은 공극내의 자속밀도의 제공에 비례하며 고에너지 밀도의 Nd-Fe-B 등의 자석이 개발되면서 주요한 가진원으로 나타나게 되었다. 이러한 전 자력에 의한 가진원은 스피들 모터의 극수, 치수 및 상수를 적절하게 변경함으로써 저감할 수 있다⁽⁵⁾.

4.2 동특성 개선

가진원 중 일부가 스피들 시스템의 고유 주파수와 일치할 경우에는 공진이 발생하여 작은 가진원에도 큰 런아웃을 발생시키게 된다. 또한 경우에 따라서는 가진원을 없앨 수

가 없으며, 이러한 경우 시스템의 동특성을 바꾸어, 즉 고유 주파수를 변경시켜 진동을 효과적으로 저감할 수 있다. 동특성은 시스템 구성 요소의 재질, 형상이나 질량, 관성 모멘트 등에 의해 결정되므로 적절한 설계 변경을 통해 동특성을 변경시킬 수 있다. 특히 볼베어링을 사용한 스피들 시스템은 구조를 크게 변경하지 않더라도 베어링 예압을 조절함으로써 고유진동수를 변경할 수 있다. 베어링 예압은 볼베어링을 모터에 장착시킬 때 베어링에 일정한 힘을 가한 상태를 유지하면서 부착시키는 것을 말한다. 베어링 예압의 크기는 베어링의 강성에 큰 영향을 미치므로 예압을 바꾸면 스피들 시스템의 설계를 변경하지 않고도 쉽게 동특성을 바꿀 수 있지만 예압 증가에 따라 베어링 수명이 감소하게 된다. 베어링의 장착 위치에 따라서도 스피들 시스템의 동특성은 크게 바뀐다. 베어링 사이의 간격이나 베어링과 회전체 중심과의 거리를 조절하면 전체 시스템의 등가 강성이 바뀌므로 이를 통해 동특성을 바꿀 수 있다. 그러나 이는 스피들 시스템의 구조를 변경해야 하므로 설계 사양에 따라 제한을 받을 수 있다.

4.3 유체 동압 베어링

볼베어링을 사용하면 항상 결함에 의한 베어링 결함주파수가 가진 주파수로 존재하게 되므로, 최근에는 볼베어링을 대체하기 위한 대안으로 유체 동압 베어링이나 공기 동압 베어링을 사용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 유체 동압 베어링은 회전체와 지

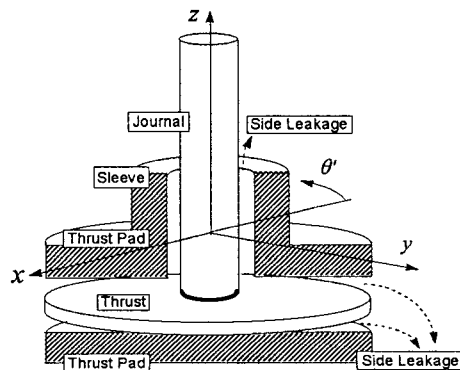


그림 11 유체 동압 베어링의 구조

지부 사이에 유체를 주입시켜 회전시에 유체의 썩기 효과를 이용하여 회전체를 지지하는 기계요소이다. 그림 11은 journal과 thrust가 결합된 유체 동압 베어링의 한 예를 나타낸 그림이다. 유체는 회전하는 journal, thrust와 정지해 있는 sleeve와 thrust pad사이에 삽입되어 있다. 모터가 회전하게 되면 유체는 썩기 효과에 의해 압력이 발생하게 되어 이 압력을 이용하여 회전체를 지지하게 되며 안정성 확보와 누설 저감 등을 위해 많은 경우 홈(groove)을 새긴다. 유체 동압 베어링은 윤활 유체에 의해 고정자와 회전자의 직접적인 접촉을 차단하고 또한 윤활 유체가 가지는 감쇠효과에 의해 진동, 소음에 우수한 성능을 제공하므로 최근 일부 HDD에 적용되고 있다. 그러나 매우 정밀한 가공 기술을 필요로 하며 볼베어링에 비해 초기 구동 토크가 크고 충격 등에 의한 유체의 손실, 볼베어링에 비해 하중 지지용량이 작은 단점 등이 있다.

한편 동압 유체 베어링내에서 윤활 유체가 액체상태를 유지하다가 고온저압에 의해서 가스나 증기가 발생되어 공동이 생기는 공동현상(cavitation)이 발생하게 된다. 따라서 이러한 공동 현상이 생기는 유체의 경계에서는 기포가 생성 소멸되며 이로 인한 NRRO가 발생할 염려가 있으므로 공동 현상을 고려하여 동압 유체 베어링을 해석 설계하는 것이 HDD의 동특성 개선에 중요하다.

공기 동압 베어링은 유체대신 공기의 썩기 효과를 이용하여 회전체를 지지하는 기계 요소이다. 공기를 사용하므로 누설 등의 우려가 없고 구조가 비교적 간단한 장점이 있지만 저속 회전시에 하중 지지 용량이 다른 베어링에 비해 크게 작아 이에 관한 많은 연구 개발이 필요한 실정이다.

4.4 댐핑 물질 삽입

스핀들 시스템에서 발생하는 진동을 저감하기 위한 한 방법으로 가진원에서 전달되는 진동 전달 경로에 댐핑 물질(damping material)을 적절히 삽입함으로써 진동을 저감할 수 있다. 댐핑물질은 진동에너지를 흡수 방사함으로써 진동 에너지를 감소시켜 진동을 줄여주는 것으로 유체 동압 베어링의 유막도

일종의 댐핑 물질이다. 스핀들 시스템에 사용될 수 있는 형태의 댐핑물질로는 테이프 형태의 점탄성 댐핑 물질(visco-elastic damping material)과 스프레이 형태의 댐핑 물질이 있다. 이러한 댐핑 물질은 작동 조건과 재료에 따라 진동을 흡수하는 주파수 영역이 바뀌며 진동에 의한 탄성 변형 에너지가 집중되는 곳에 부착할 경우에 흡진효과가 커지므로 진동 전달 경로를 파악하고 진동에 의한 탄성 변형이 집중되는 곳을 정확히 해석하여 부착시켜야 한다. 본 연구실에서는 노트북용 HDD 스핀들 시스템에 점탄성 댐핑 물질을 적절한 위치에 삽입한 결과 약 30% 정도의 NRRO 진동 저감효과를 얻을 수 있었다⁽⁹⁾.

5. 맺음 말

본 글에서는 HDD 스핀들 시스템의 진동 문제를 중심으로 그 해석방법 및 저감대책에 대해 살펴보았다. HDD는 매우 빠르게 소형, 경량화, 고속화되고 있으며 이에 따라 스핀들 시스템에 고도의 회전 정밀도를 요구하고 있다. 이에 부응하는 고부가 가치의 스핀들 시스템을 개발, 생산하기 위해서는 진동 문제에 관한 고려가 필수적이다. 이러한 저진동 스핀들 시스템을 생산하기 위해서는 전기 기계적 설계(electromechanical design)뿐 아니라 고도의 가공기술과 조립기술이 선행되어야 하며 진동의 측정 해석 기술에 대한 꾸준한 연구가 필요하다. 특히 HDD 스핀들 모터용 볼베어링을 전량 일본 등에서 수입하는 국내 산업계의 실정에 미루어 볼 때 유체 동압 베어링을 개발할 경우 보다 우수한 저진동 모터를 생산할 수 있으므로 국가 기술 및 산업 경쟁력 제고를 위하여도 이에 대한 연구도 활발히 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Tedric A. Harris, 1991, "Rolling Bearing Analysis", John Willey & Sons, Inc..
- (2) Gunhee Jang, 1993, "Analysis of Magnetic Force and Torque in a BLDC Motor", Ph. D. Thesis, University of

California, Berkeley.

(3) C. W. Lee and S.B. Chun, 1998, "Vibration Analysis of a Rotor with Multiple Flexible Disks Using Assume Modes Method", ASME J. of Vibration and Acoutics, Vol. 120.

(4) 정명수, 장건희, 1999, "유한 요소법을 이용한 회전 디스크-스핀들 계의 진동 해석", 한국소음진동공학회 1999년도 춘계 학술 논문집, pp. 146~154.

(5) G. H. Jang, J. W. Yoon, N. Y. Park, and S.M. Jang, 1996, "Torque and Unbalanced Magnetic Force in a Rotational Unsymmetric Brushless DC Motor", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32, No. 5, pp. 5157~5159.

(6) G.H. Jang and J.H. Han, 1997, "Analysis of the Vibration Characteristics in a HDD Spindle Motor by Transfer Matriax Method", Proceeding of the 26th Incremental Motion Control Systems and Devices, pp. 293~299.

(7) G.H. Jang and D.K. Jung, 1996, "Analysis of the Dynamic Characteristics of Ball Bearing in 3.5" HDD Spindle Motor", Proceeding of the 25th Incremental Motion Control Systems and Devices, pp. 167~174.

(8) G. H. Jang, D.K. Kim, and J. E. Oh, 1999, "New Frequency Domain Method of Nonrepeatable Runout Measurement in a Hard Disk Drive Spindle Motor", IEEE Trans. Magn., Vol. 35, No. 2, pp. 833~838.

(9) 김동균, 장건희, 홍선주, 한재혁, 이창조, 정대현, 박일웅, 1999, "점탄성 댐핑 물질을 이용한 하드 디스크 드라이브의 NRRO 저감", 한국소음진동공학회 1999년도 춘계 학술 논문집, pp. 311~317.

(10) G. H. Jang and D.I. Chang, "Analysis of a Hydrodynamic Herringbone Grooved Journal Bearing Considering Cavitation", Will be Printed in ASME Journal of Tribology

「아름다운 소리 100선」 공모

다가오는 21세기는 환경의 시대로 자연과 인간이 공존하는 환경공동체 구현을 위해 전 세계적으로 노력을 경주하여야 할 시기입니다.

아름답고 다양한 자연환경을 물려받은 우리는 환경오염으로 사라져 가는 무형의 자연유산인 아름다운 소리를 발굴·보전하여 미래 세대에 물려주어야 합니다.

환경부와 KBS는 아름다운 소리를 발굴하여 제작·보급함으로써 자연의 소리를 중심으로 소리환경을 지키고 이를 통하여 국민의 환경보전을 생활화하며, 21세기 환경의 시대에 적극 대비하고자 「아름다운 소리 100선」 공모 행사를 개최합니다. 환경보전과 소리환경 개선에 기여할 수 있으며, 사랑하는 고향의 자연환경의 상징으로 미래 세대를 위해 보전하여야 할 가치 있는 소리 공모에 많은 참여 바랍니다.

◎ 자격: 개인 또는 단체, 지방자치 단체

◎ 분야: 지역의 자연성, 장소성, 역사성을 가진 소리 중 음악적 요소가 없는 소리로서 자연생물체·자연현상의 소리, 지역주민이 가슴속에 간직하고픈 소리, 아름답다고 공감 할 수 있는 소리, 기타 환경보전이나 좋은 소리 환경에 도움이 되는 소리

◎ 신청서 배부 및 접수기간: 1999. 7. 20~1999. 10. 31

◎ 신청서 배부 및 접수처: 환경부 생활공해과 또는 시도 및 각 지방자치 단체 환경담당과

◎ 제출처: 응모신청서 1부와 소리의 내용, 형태, 배경 등을 기술한 설명서

(녹음 또는 촬영이 가능한 경우 오디오 또는 비디오테이프, 사진첨부 요망)

◎ 기타 자세한 사항은 환경부 홈페이지(www.me.go.kr)를 참조

주 최 : 환경부 · 한국방송공사