

소형 정밀 모터 진동 해석 및 저감 설계 기술

장 건 회*

(*한양대 공대 기계공학부 교수)

1. 서 론

현대 산업의 고도화, 정보화, 자동화와 더불어 멀티미디어 시대가 도래함에 따라 A/V, OA기기, 가전 제품 등의 수요가 폭발적으로 증가하고 있다. 소형 정밀 모터는 이러한 제품들의 구동원이 될뿐 아니라, 진동 발생원이 되며 곧바로 제품의 성능을 결정하는 중요한 요소가 된다. 특히, 소형 정밀 모터가 사용되는 분야 중 수요가 급증하고 있는 정보 기억 장치, 즉 HDD, DVD, CD-ROM이나 VCR 등의 경우 제품이 경량, 박형화 하고 초정밀화 함에 따라 고도의 회전 정밀도를 요구하게 된다. 이 글에서는 최근 그 수요가 크게 늘어나고 있는 정보 기억 장치에 사용되는 소형 정밀 모터를 중심으로 회전 정밀도를 저해하는 소형 정밀 모터의 진동의 중요성을 살펴보고 진동의 해석, 평가 및 저감 기술에 대해 소개하고자 한다.

2. 소형 정밀 모터 진동의 중요성

소형 정밀 모터에서 발생하는 진동이 제품의 성능을 좌우하는 예는 여러 곳에서 쉽게 발견할 수 있다. VCR의 경우 캡스턴 및 드럼모터에서 발생하는 진동은 주행하는 테잎을 가진시켜 헤드의 오작동을 유발하여 화면이 흔들리고 소리가 왜곡되는 jittering 및 wow/flutter 등을 발생시켜 결국 VCR의 성능에 큰 영향을 미친다. CD 혹은 HDD 등에 정보기억장치에 사용되는 스피들 모터의 경우 테이터를 읽고 쓰는 디스크를 직접 구동하게 되며 따라서 모터의 진동은 곧바로 디스크에 전달되어 오작동의 원인이 될 수 있다. 그리고 HDD의 스피들 모터에서 발생하는 진동은 저장 매체인 디스크의 자기 기록 밀도를 결정하는 중요한 인자가 된다. 그림 1은 HDD에 사용되는 스피들 모터와 디스크를

나타낸 것이다. 스피들 모터는 정속으로 회전하고 있으며 테이터는 디스크 위에 track이라고 불리는 여러개의 동심원의 형태로 자료를 저장하고 있고 디스크가 회전함에 따라 head가 track을 따라 테이터를 읽는다. 최근 HDD에 장착되는 3.5" 디스크의 경우 약 12,000 TPI(track per inch) 정도의 트랙 밀도를 가지고 있으며 track과 track사이의 거리인 track pitch는 약 2 μ m정도가 되는데, 이 경우 디스크 한 장 당 약 3.5 GB의 자료를 저장할 수 있다. 이전에 자료가 쓰여진 track과 현재 테이터를 읽고 쓸 때의 head와의 위치의 차이를 런아웃(runout)이라 하며 이는 회전 주기마다 반복되는 RRO (Repeatable Run Out)과 회전 주기와는 무관하게 발생하는 NRRO (Non-Repeatable Run Out)으로 대별할 수 있다. RRO의 경우 서보 제어 시스템에 의해 보상할 수 있으나, NRRO는 보상할 수 있는 방법이 없어 NRRO가 어느정도이상으로 커지면 head가 track을 읽을 수 없는 track-misregistration 발생하게 되며, HDD업계에서는 NRRO를 track pitch의 약 5% 이하로 규제하고 있다. 이러한 NRRO는 대부분 구동 스피들 모터에서 발생하게 되는데 NRRO를 저감할 경우 고밀도의 TPI를 구현할 수 있어, HDD 스피들 모터의 진동 저감은 HDD 기억 용량을 높이는 가장 효과적인 방법이 된다.

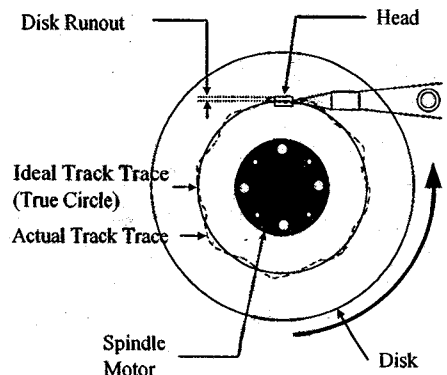


그림 3. HDD에서 발생하는 runout

3. 소형 정밀 모터 진동 해석

소형 정밀 모터에서 발생하는 진동을 해석하기 위해서는 크게 가진원의 규명, 고유 진동 해석, runout 해석 등을 통한 진동의 측정 분석 및 진동 전달 특성 분석이 이루어져야 한다.

3.1 소형 정밀 모터의 가진원 해석

소형정밀 모터의 진동을 유발하는 가진원은 표 1과 같다. 가진원은 회전자의 질량 불평형과 베어링 결함과 같은 기계적 가진원 및 전자기력과 같은 전자기적 가진원이 존재하는데 대부분의 가진원을 직접 측정하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 해석적인 방법으로 가진 주파수를 유추하고, 진동 측정을 통하여 이를 확인하게 된다. 특히 볼베어링의 결함에 의해 발생하는 결함주파수는 기구학적 해석을 통해 결함의 수까지 예측할 수 있으며[1], 전자기력의 경우 유한요소 해석 및 주파수 분석을 통해 가진 주파수 및 크기를 예측할 수 있다[2].

표 1. 소형 정밀 모터의 가진원

가진원	특징
1. 회전체 제작시의 질량 불평형 2. 회전체 설치시의 편심	1. 회전수의 정수배 형태로 발생 2. Balancing에 의한 진폭 저감이 가능
1. 볼베어링의 결함	1. 기구학적 해석에 의한 결함 위치 및 결함수 해석 가능[1,5] 2. 예압 조절 등에 의한 진폭 저감이 가능
1. 유체베어링의 half-frequency whirl	1. 회전수의 1/2에서 발생
1. 전자기력 (비평형자력, 코강토오크, 토오크리플)	1. 극수, 상수 등의 함수로 발생[2] 2. 비평형 자력의 경우 극수 및 상수를 평형 대칭형으로 하면 제거 가능[3] 3. 코강토오크 저감을 통한 진폭 저감 가능

3.2 소형 정밀 모터의 고유 진동 해석

소형 정밀 모터를 포함한 모든 기계 구조물은 주파수 응답 함수라는 고유한 진동 특성을 가지고 있으며 특히 고유 진동수라고 불리는 주파수로 외부에서 가진 하게 되면 고유 진동 모드로 진폭이 크게 되는 공진 현상이 나타나게 된다. 따라서 이러한 공진 현상을 피하기 위해서는 고유 진동 해석을 하여 소형 정밀 모터의 동특성을 명확히 알아내야 한다. 소형 정밀 모터의 고유 진동수 및 고유 진동모드를 알기 위한 방법은 실험적인 방법과 해석적인 방법이 있다. 그림 2는 고유 진동 해석을 수행하기 위한 실험 장치 구성도이다. 실험 장치는 소형 정밀 모터를 가진하기 위한

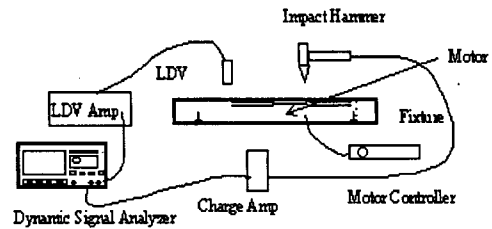


그림 2. 고유진동 해석 실험 장치 구성도

가진기와 진동신호를 측정하기 위한 측정센서 및 증폭기와 신호분석기(signal analyzer)로 구성된다.

소형 정밀 모터를 가진하기 위한 가진기로는 impact hammer나 shaker 등을 이용한다. 그림 3은 impact hammer를 이용하여 소형 정밀 모터를 가진하는 사진을 보여 주고 있다. Impact hammer의 원리는 측정대상물에 충격(impulse)을 가함으로서 주파수 응답 함수(frequency response function)를 얻는 것으로, 수박을 두드려 잘 익었는지의 여부를 확인하는 것과 같은 원리이다. Impact hammer는 망치 끝단에 force transducer가 달려 있어 가진하는 힘을 전기적 신호로 바꾸어 가진력을 알 수 있게 된다. 비교적 단순한 실험장치를 구성할 수 있고 원하는 부위를 가진할 수 있는 장점이 있으나 사람의 손으로 가진하는 경우가 대부분이므로 일관적인 결과를 얻기가 힘든 단점이 있다. 그림 4는 shaker를 이용하여 소형 정밀 모터를 가진하는 사진을

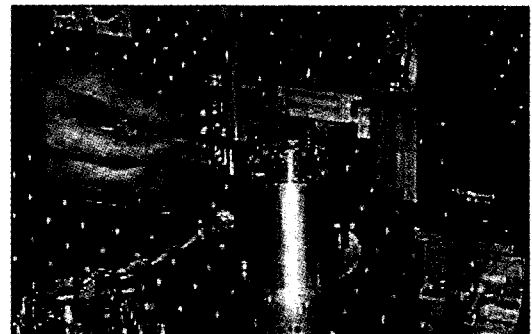


그림 3. Impact hammer를 이용한 가진 실험

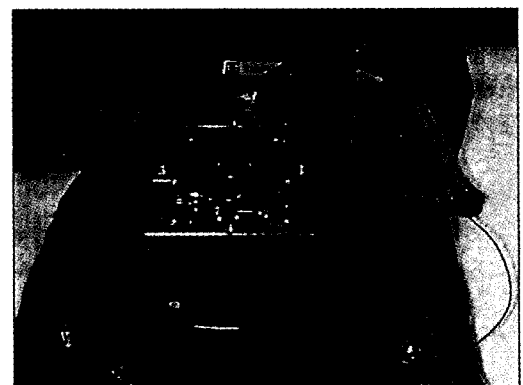


그림 4. Shaker를 이용한 가진 실험

보여 주고 있다. Shaker의 원리는 측정 대상물에 일정한 주파수의 가진력으로 가진하고 측정점의 진폭을 측정하는 것으로 반복적으로 가진 주파수를 변화함으로 주파수 응답함수를 구할수 있다. Shaker는 반복되는 실험에도 비교적 일관적인 실험 결과를 얻을 수 있지만 장치가 복잡하며 특히 원하는 부위의 가진을 하기 어려운 단점이 있다.

소형 정밀 모터의 진동을 측정하기 위한 측정센서로는 비접촉 방식인 레이저(laser doppler vibrometer) 혹은 정전 변위계(capacitance probe)가 많이 사용된다. 일반적인 진동 측정에는 가속도계를 많이 사용하지만 소형 정밀 모터 측정의 경우 대상물에 직접 접촉하여 측정하는 가속도계의 경우 가속도계를 모터에 직접 부착함에 따라 모터의 진동 특성을 변화시킬 수 있는 가능성이 있고 회전하는 물체에 가속도계를 부착하는 것이 부적절함으로 비접촉 방식을 많이 사용하게 되는 것이다. 현재 최신 레이저의 경우 2 nm, 캡센서의 경우 10 nm 정도의 정밀한 분해능을 가지고 있다.

그림 5는 impact hammer를 이용하여 HDD에 사용되는 스피들 모터의 주파수 응답함수를 구한 것으로 y축은 스피들 모터의 회전속도를 나타낸 것이다. 소형 정밀 모터와 같은 회전체의 경우 gyroscopic effect가 커지면 고유진동수중 일부는 회전속도의 증가에 따라 전, 후진모드로 분리되는데 그림 5에서는 스피들 모터에 부착된 디스크에 의해 일부 고유진동 모드가 전, 후진 모드로 분리되는 것을 보여준다. 이와 같은 그림을 waterfall plot이라 하며 회전속도에 따른 시스템 특성을 한눈에 파악할 수 있는 장점이 있다. 그림에서와 같이 모터가 회전할 때에는 하나의 모드가 두 개로 갈라지게 되어 고유주파수가 많아지게 되는 효과를 가지므로 공진할 수 있는 가능성이 더 많아진다. 따라서 예상되는 가진원(모터 회전주파수, 베어링 결함 주파수나 전자기적 가진원)들이 고유주파수에 일치하지 않도록 설계하는 것이 반드시 필요하다.

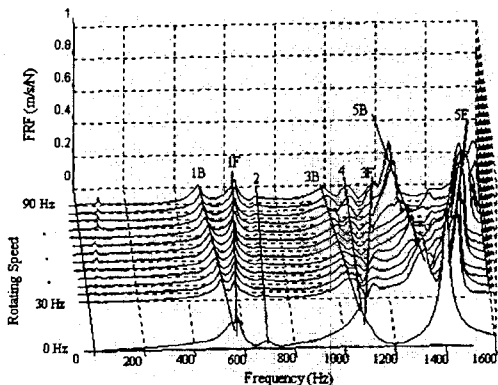


그림 5. 소형 정밀 모터의 주파수 응답 함수

소형 정밀 모터의 고유 진동수 및 고유 진동모드를 전달 행렬법(transfer matrix method) 및 유한요소해석 (finite element method) 등의 해석적인 방법을 사용하여 구할 수 있다[4]. 이러한 해석방법을 사용할 때에는 회전부위와 지지

부위간을 지지해 주는 베어링의 강성 및 감쇠 계수 해석은 동특성 해석에 중요한 부분을 차지하게 된다. 현재 대부분의 소형 정밀 모터는 볼베어링이 사용되고 있는데 볼베어링의 경우 볼의 크기나 개수, 내외륜의 형상 그리고 예압에 따라 그 동특성이 크게 달라지므로 전체 모터 시스템의 동특성 해석을 위해서는 정확한 베어링 해석이 선행되어야 한다[5].

그림 6은 소형 정밀 모터를 유한요소모델로 모델링한 예이다. 소형 정밀 모터의 고유 진동 해석을 수행하게 되면 모터의 동특성을 예측할 수 있을 뿐만 아니라 구성품의 크기, 형상이나 재질, 베어링의 위치, 예압 등의 변화에 따른 동특성 변화를 알 수 있게 되므로 원하는 동특성을 가지게 되는 소형 정밀 모터를 제작하는데 매우 유용하게 사용될 수 있다.

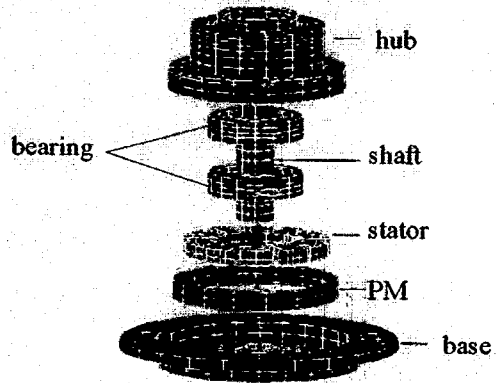


그림 6. 소형 정밀 모터의 유한 요소 모델

3.3 런아웃 측정 및 해석

소형 정밀 모터는 반경방향과 축방향으로의 변위 즉 런아웃(runout)을 가지면서 회전운동을 하게 된다. 런아웃은 소형 정밀 모터의 강제 진동 현상의 하나로 런아웃을 측정 분석해 보면 소형 정밀 모터의 회전 정밀도 및 진동 특성을 해석 할 수 있다.

런아웃은 모터의 윗면, 혹은 옆면에 변위를 측정할 수 있는 센서를 사용하여 측정하게 된다. 소형 정밀 모터의 런아웃 측정 시에는 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 7은 이와 같은 정전 변위 센서를 이용한 런아웃 측정 실험 장치를 나타낸 것이다.

측정된 런아웃(TIR : total indicated runout)을 회전주기마다 반복되는 RRO와 비반복적인 성분인 NRRO로 분리 해석하면 가진원의 규명 및 상대적인 기여도를 규명할 수 있다. 그림 8은 HDD 스피들 모터에서 측정된 TIR, RRO와

NRRO를 나타낸 것이다. RRO의 원인은 회전체의 편심이나 축의 어긋남 또는 전자기적 가진원이며 이러한 RRO는 회전체의 밸런싱이나 생산, 조립 정밀도를 높여서 줄일 수 있다.

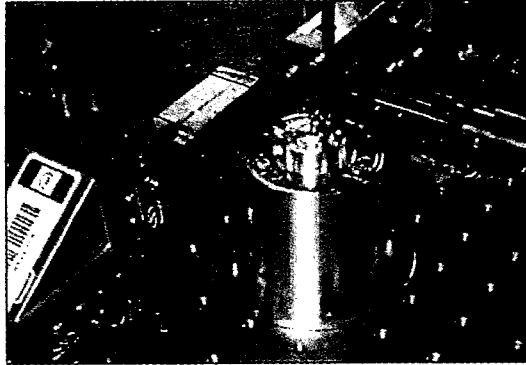


그림 7. 정전 변위 센서를 이용한 런아웃 측정

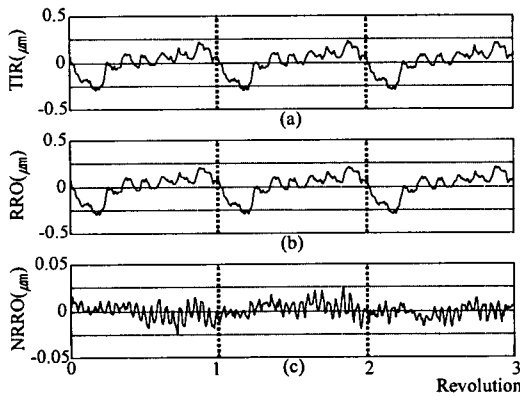


그림 8. TIR, RRO와 NRRO

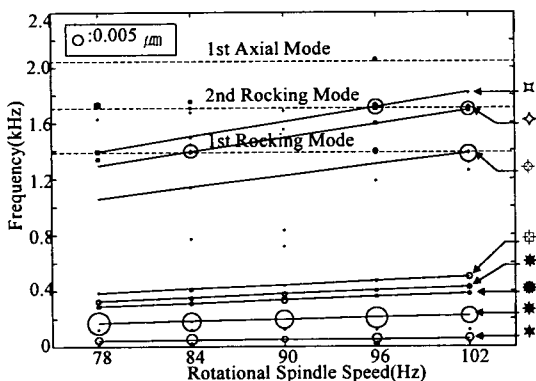


그림 9. NRRO의 Campbell diagram

비반복적 성분인 NRRO는 신호 처리 기법을 사용하여 런아웃에서 반복적인 성분을 제거함으로써 얻어질 수 있는데 NRRO를 주파수 분석하면 그 원인을 규명할 수 있다. 그림 9는 HDD 스피들 모터의 회전 속도를 78 Hz에서 6 Hz 씩 증가시키면서 NRRO를 측정 주파수 분석한 것으로 원의 크기는 해당 주파수에서의 NRRO의 크기를 나타낸다[6]. 이와

같은 그림을 Campbell Diagram이라 하며 원의 크기는 해당 주파수에서의 NRRO의 크기, 실선은 회전속도에 따른 베어링의 결합에 의해 발생하는 결합 주파수, 점선은 모터의 고유 진동수를 나타낸다. 볼 베어링을 사용하는 소형 정밀 모터의 경우 NRRO는 대부분 볼 베어링의 내 외륜 혹은 볼의 결합에 의해 발생함을 알 수 있다. 그림에서 ⑥, ⑦로 표시된 성분을 살펴보면 처음에는 작았던 성분들이 회전속도가 102Hz가 되면 볼베어링의 결합 주파수가 고유 진동수와 일치하여 그 크기가 매우 커짐을 알 수 있다. 즉 동일한 모터를 사용하더라도 회전 속도에 따라 그 진동특성이 변하게 되며 따라서 모터의 작동 구간에 따라 정확한 동특성 해석을 수행하여 모터를 설계해야 함을 알 수 있다.

4. 소형 정밀 모터의 진동 저감

소형 정밀 모터에서 발생하는 진동을 저감시키기 위한 방법으로는 크게 가진원을 줄이는 방법과 가진원의 주파수 성분과 모터의 고유 주파수가 일치하지 않도록 하는 방법 그리고 가진원의 전달 경로 등을 차단하는 방법 등이 있다.

4.1 가진원의 저감

소형 정밀 모터에서 발생하는 진동을 저감시키기 위한 가장 효과적인 방법은 가진원을 없애는 것이다. 표 1에서와 같이 소형 정밀 모터의 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 높임으로써 저감할 수 있으며, 볼베어링 등에서 발생하는 결합 주파수는 볼베어링의 예압 변경 및 유체 베어링 등을 사용함으로써 저감할 수 있다. 소형 정밀 모터의 토오크는 자석 및 코일에 흐르는 전류에 의해 발생하지만, 때에 따라서는 토오크 이외에 회전하는 비평형 자력 및 공극내의 분포 자력의 형태로 모터를 가진하게 된다[2]. 특히 이러한 자력은 공극내의 자속밀도의 제곱에 비례하며 고에너지 밀도의 Nd-Fe-B 등의 자석이 개발되면서 주요한 가진원으로 나타나게 되었다. 이러한 전자력에 의한 가진원은 소형 정밀 모터의 극수, 치수 및 상수를 적절하게 변경함으로써 저감할 수 있다[3].

4.2 동특성 개선

가진원 중 일부가 모터의 고유 주파수와 일치할 경우에는 공진이 발생하여 이 경우 작은 가진원에도 큰 런아웃을 발생시키게 된다. 또한 경우에 따라서는 가진원을 없앨 수가 없으며, 이러한 경우 모터의 동특성을 바꾸어, 즉 고유 주파수를 변경시켜 진동을 효과적으로 저감할 수 있다. 동특성은 모터 구성 요소의 재질, 형상이나 질량, 관성 모멘트 등에 의해 결정되므로 적절한 설계 변경을 통해 동특성을 변경시킬 수 있다. 특히 볼베어링을 사용한 모터는 구조를

크게 변경하지 않더라도 베어링 예압을 조절함으로써 고유 진동수를 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 모터 설계를 변경하지 않고도 쉽게 동특성을 바꿀 수 있지만 예압 증가에 따라 베어링 수명이 감소하게 된다. 베어링의 장착 위치에 따라 모터의 동특성은 크게 바뀐다. 베어링 사이의 간격이나 베어링과 회전체 중심과의 거리를 조절하면 전체 시스템의 등가 강성이 크게 바뀌므로 이를 통해 동특성을 바꿀 수 있다. 그러나 이는 모터의 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 지지부 사이에 유체를 주입시켜 회전시에 유체의 썩기 효과를 이용하여 회전체를 지지하는 기계요소이다. 그림 10은 journal과 thrust가 결합된 유체 동압 베어링의 한 예를 나타낸 그림이다. 유체는 회전하는 journal, thrust와 정지해 있는 sleeve와 thrust pad 사이에 삽입되어 있다. 모터가 회전하게 되면 유체는 썩기 효과에 의해 압력이 발생하게 되며 이 압력을 이용하여 회전체를 지지하게 되며 부하용량과 누설 저감 등을 위해 많은 경우 홈(groove)이 파여 있다. 이러한 유체 동압 베어링은 최근 일부 소형 모터에 점차 적용되고 있으며 볼베어링과 달리 고체 접촉이 없으므로 소음, 진동이 적고 감쇠 효과를 갖는 장점이 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.

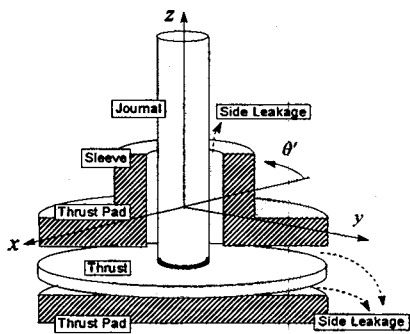


그림 10. 유체 동압 베어링

공기 동압 베어링은 유체대신 공기의 썩기 효과를 이용하여 회전체를 지지하는 기계 요소이다. 공기를 사용하므로 누설 등의 우려가 없고 구조가 비교적 간단한 장점이 있지

만 저속 회전시에 하중 지지 용량이 다른 베어링에 비해 크게 작아 이에 관한 많은 연구 개발이 필요한 실정이다.

특히 소형 정밀 모터용 볼베어링을 전량 일본 등에서 수입하는 국내 산업계의 실정에 미루어 볼 때 유체 동압 베어링이나 공기 동압 베어링을 개발할 경우 보다 저진동의 우수한 성능을 가진 모터를 생산할 수 있으므로 국가 기술 및 산업 경쟁력 제고를 위하여도 이에 대한 연구도 활발히 진행되어야 할 것이다.

4.4 댐핑 물질 삽입

소형 정밀 모터에서 발생하는 진동을 저감하기 위한 한 방법으로 가진원에서 발생 전달되는 진동 전달 경로에 댐핑 물질(damping material)을 적절히 삽입함으로써 진동을 저감할 수 있다. 댐핑물질은 진동에너지가 흡수 방사함으로써 진동 에너지를 감소시켜 진동을 줄여주는 것으로 유체 동압 베어링의 유막도 일종의 댐핑 물질이다. 소형 정밀 모터에 사용될 수 있는 또 다른 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 HDD의 스피너 모터에 점탄성 댐핑 물질을 적절한 위치에 삽입한 결과 약 30% 정도의 NRRO 진동 저감효과를 얻을 수 있었다[7].

4. 결 언

본 글에서는 최근 수요가 급격히 증가하고 있는 소형 정밀 모터 진동문제를 중심으로 진동의 중요성과 해석 방법 및 진동 저감 대책에 대해 언급하였다. 소형 정밀 모터는 매우 빠르게 소형, 경량화, 고속화 및 고도의 회전 정밀도를 요구하고 있으며 이에 부응하는 교부가 가치의 모터를 개발, 생산하기 위해서는 진동 문제에 관한 고려가 필수적이다. 이러한 저진동 소형 정밀 모터를 생산하기 위해서는 전기 기계적 설계(electromechanical design)뿐만 아니라 고도의 가공기술과 조립기술이 선행되어야 하며 진동의 측정 해석 기술에 대한 꾸준한 연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] Tedric A. Harris, "Rolling Bearing Analysis", John Wiley & Sons, Inc. 1991.
- [2] Gunhee Jang, "Analysis of Magnetic Force and Torque in a BLDC Motor", Ph. D. Thesis, University of California, Berkeley, 1993
- [3] G.H. Jang, J.W. Yoon, N.Y. Park, and S.M. Jang,

- "Torque and Unbalanced Magnetic Force in a Rotational Unsymmetric Brushless DC Motor", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.32, No.5, pp5157-5159, September, 1996
- [4] G.H. Jang and J.H. Han, "Analysis of the Vibration Characteristics in a HDD Spindle Motor by Transfer Matriax Method", Proceeding of the 26th Incremental Motion Control Systems and Devices, p293-299, July, 1997
- [5] G.H. Jang and D.K. Jung, "Analysis of the Dynamic Characteristics of Ball Bearing in 3.5" HDD Spindle Motor", Proceeding of the 25th Incremental Motion Control Systems and Devices, pp167-174, June, 1996
- [6] G. H. Jang, D.K. Kim, J. E. Oh, "New Frequency Domain Method of Nonrepeatable Runout Measurement in a Hard Disk Drive Spindle Motor", IEEE Trans. Magn., Vol. 35, No. 2, March 1999, pp833-838.
- [7] 홍선주 "하드 디스크 드라이브에서 발생하는 비반복적 런아웃의 저감에 대한 연구", 한양대학교 석사 학위 논문, 1998
- [8] Kenneth G McConnell, "Vibration Testing, Theory and Practice", John Willey & Sons, Inc. 1995
- [9] Daniel J. Inman, "Engineering Vibration", Prentice Hall International, 1994

저 자 소 개



장건희(張健熙)

1961년 2월 5일생. 1984년 한양대 공대 기계공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 1993년 UC Berkeley 기계공학과 졸업(공학). 1986년-89년 한국통신 전임연구원. 1993년-94년 미국 Quantum Corporation 연구원. 현재 한양대 정밀기계과 조교수. 관심 분야: 기전연성계해석, 소형정밀모터 진동해석 및 설계, 유체동압베어링 해석 및 설계.