

# 구름 베어링의 소음·진동 제어인자

윤기찬\* · 박창남\*\*

(FAG한화베어링(주) 연구소)

## 1. 머리말

대부분의 기계시스템은 회전 및 직선운동 면을 필요로 하며, 이들 상대운동면의 거동은 미끄럼(sliding), 구름(rolling), 스피닝(spinning) 운동의 조합으로 이루어진다. 이들 상대운동면의 상대운동을 가능하게 하는 기계요소를 베어링이라 하며, 주요 운동 메카니즘에 따라 베어링은 크게 미끄럼 베어링(sliding bearing)과 구름 베어링(rolling bearing)으로 구분되며, 하중전달 매개체의 종류에 따라 유체(fluid), 기체(air), 자기(magnetic), 전동체(rolling element) 베어링으로 구분된다. 이들 다양한 종류의 베어링들은 부하용량, 동력손실, 회전수, 지지강성, 설치공간, 가격 등과 같은 다양한 종류의 적용분야 요구조건을 충족시킬 수 있도록 용도에 맞는 적절한 종류의 베어링이 설계(선정)되어 기계시스템을 구성하게 된다.

이 글에서는 다루게될 구름 베어링은 동력 손실이 비교적 적고, 변동속도의 허용이 가능하며, 크기 대비 부하용량이 크고, 높은 지지강성 특성을 갖고 있는 표준화가 잘 발달된 저가의 베어링이다. 재료기술, 가공기술 및 설계기술의 발달로 구

름 베어링은 점점 까다로워지고 있는 적용부위의 요구조건을 만족시키면서 눈부신 발전을 거듭해온 기계요소이다. 구름 베어링은 지난 세기에 걸쳐 회전속도의 한계, 회전정밀도의 한계, 사용온도의 한계, 사용환경의 한계를 극복해온 그리고 극복하고 있는 베어링 중 가장 둔감한(robust) 베어링 형식으로 사용범위가 가장 광범위한 베어링 형식이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 구름 베어링은 하중 지지를 담당하는 전동체의 형식에 따라 볼 베어링, 원통 롤러 베어링, 구면롤러 베어링, 테이퍼드 롤러 베어링, 니들 롤러 베어링 등으로 구분된다.

최근까지 구름 베어링에 대한 주요 설계 요구조건은 장수명(long life), 저마찰토크(low friction torque), 고강성(high stiffness), 고회전속도(high speed)로 대변될 수 있었으며, 연구의 방향도 이들 요구조건을 만족시키기 위한 성능인자를 최적화하는 방향으로 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나, 최근 기계시스템의 고속화, 소형화, 고급화 등의 발전 추세로 인하여 진동/소음 특성이 베어링 본연의 성능으로 인식되기 시작하였다. 그림 2에서 보는 바와 같이 구름 베어링은 이산 전동체에 의하여 베어링 하중을 지지하는 기계요소이며, 궤도와 전동체는 탄성접촉을 하게되며, 이들 사이에는 높은 접촉응력이 발생하게 된다. 따라서, 하중 전달 매개체의 기본 특성이 연속성을 띠고

\* E-mail : brg4u@hanwha.co.kr

\*\* E-mail : parkcn@hanwha.co.kr

# 특집 베어링

있는 유체, 기체, 마그네틱 베어링과는 달리 구름 베어링은 본질적으로 진동발생기(vibration generator) 역할을 할 수밖에 없는 구조를 갖고 있다.

구름 베어링에서 진동과 소음은 동일하게 취급되는 경우가 많으나, 구름 베어링의 일반 사용조건에서 1,000 Hz 이하는 진동, 그 이상은 소음으로 취급하는 경우가 일반적이다. 소음에 특히 민감한 응용분야로는 전기모터의 정숙성이 요구되는 사무기기(office equipment)나 가정용기기(household appliance)가 있으며, 진동에 특히 민감한 응용분야로는 고도의 회전정밀도 및 위치정밀도가 요구되는 공작기계 및 재난 또는 극도의 경제적인 손실을 야기할 수 있는 안전장비 등이 있다. 그러나,

대부분의 응용분야에서는 소음·진동 문제가 함께 해결되어야 할 과제로 상주하고 있는 것이 일반적이라 할 수 있다.

기계 시스템의 소음·진동 수준은 (1) 구름 베어링의 탄성이 관여하는 시스템 진동, (2) 이산(discrete) 전동체 하중분포에 의하여 주기적으로 반복되는 진동, (3) 베어링의 제작, 조립, 마멸에 의한 기하학적 불완전성에 의한 진동 등 3가지 주요인에 의하여 구름 베어링의 영향을 받게된다. 본고에서는 소음·진동과 관련된 구름 베어링의 제어인자에 대하여 고찰하고 구름 베어링과 관련된 소음·진동 문제의 접근방법을 소개하고자 한다.

## 2. 구름 베어링의 탄성이 관여하는 시스템 진동

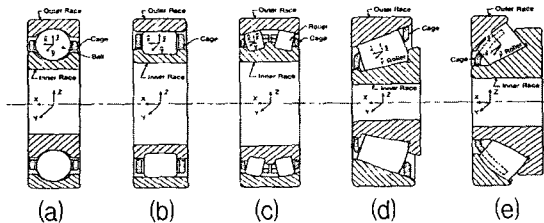


그림 1 다양한 형식의 구름 베어링 (a) ball Bearing ; (b) cylindrical roller bearing ; (c) spherical roller bearing ; (d) tapered roller bearing ; (e) spherical tapered roller bearing<sup>(1)</sup>

그림 3은 10 mm 강구에 수직하중( $P$ )이 작용할 때, Hertzian 접촉응력 해석을 수행한 결과로 두 개의 탄성체의 비선형 접촉거동을 도식적으로 나타낸 것이다. 이는 그림 4에서 보는 바와 같이 내, 외륜 궤도와 전동체가 베어링에 작용하는 하중을 지지하는 구름 베어링은 비선형 시스템 거동을 한다는 사실을 단적으로 보여주는 해석 결과이다. 실제로 구름 베어링으로 지지되어 있는 회전기계시스템의 거동을 정밀하게 해석하기 위해서는 구름 베어링은 단순지지 강체(rigid body) 모델이

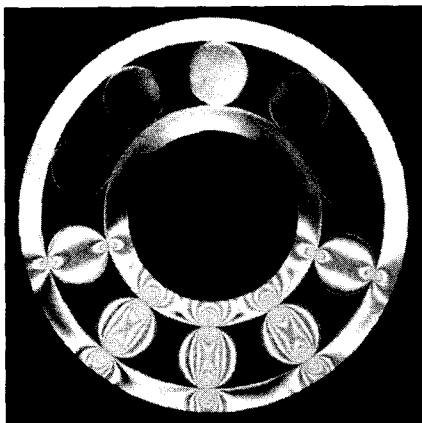


그림 2 반지름방향 하중을 받는 구름 베어링의 전동체 하중분포

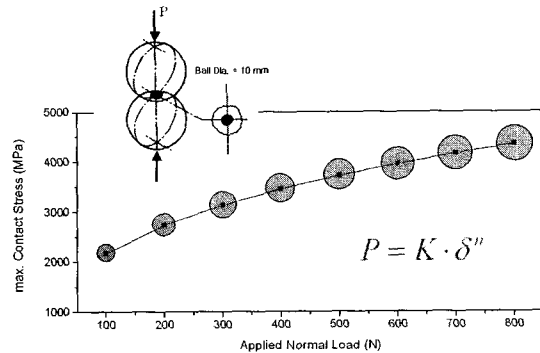


그림 3 탄성접촉체의 비선형 본질

아닌 비선형 스프링( $K$ )과 질량( $m$ )을 갖도록 그림 5와 같이 모델링되어야 한다.

실제 구름 베어링의 비선형 거동의 영향으로 구름 베어링으로 지지되는 회전축계의 본질적인 거동은 비선형 거동을 하게된다. 지지 베어링의 비선형성을 고려한 회전축계 해석에 대한 연구 결과는 계속해서 발표되고 있으나, 베어링 시스템 해석의 강건성 미확보 문제로 단순모델에 국한되고 있는 실정이다.

보다 현실적인 접근을 위하여 운전조건에 상응하는 회전속도와 하중영역에서 준정적해석(quasi-static) 해를 이용하여 베어링의 그림 6과 같은  $5 \times 5$  강성 행렬을 구하고 회전축계 모델을 해석하는 시도가 많이 사용되고 있다. 그림 7은 실제 준정적 해석해를 이용한 볼 베어링의 강성변화를 도식적으로 나타낸 그래프이다. 그림 7(a)는 회전속도 변화에 따른 정규화한 축방향 강성 변화를 나타낸 것으로 회전속도가 증가할수록 강성 저하

가 현저하게 나타나며, 작용 축방향 하중이 작을 수록 변화의 폭이 크게 나타남을 알 수 있다. 그림 7(b)는 초기 접촉각의 변화에 따른 축방향 강성 변화를 고찰하기 위한 그래프로 축방향하중을

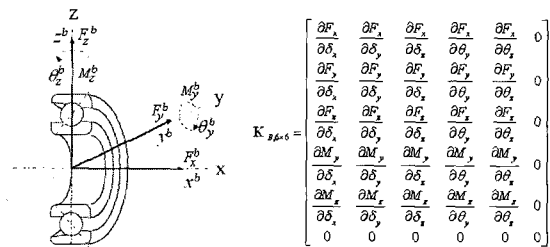


그림 6 볼 베어링의 강성 matrix

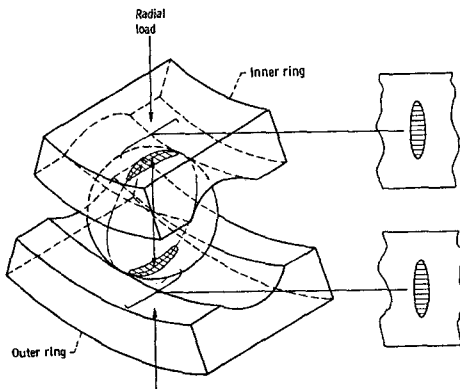


그림 4 볼 베어링의 Hertzian 접촉<sup>(4)</sup>

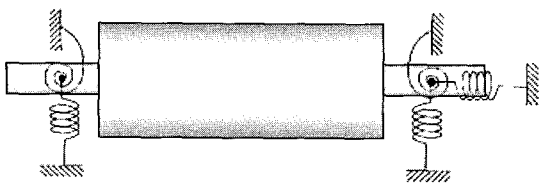
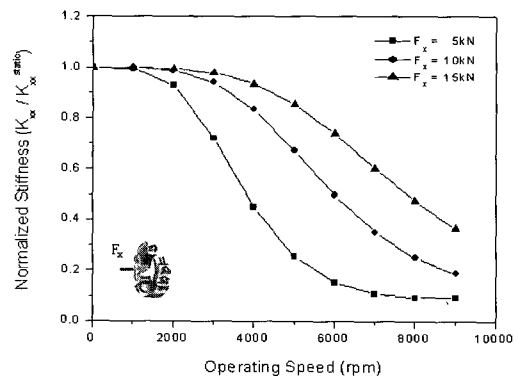
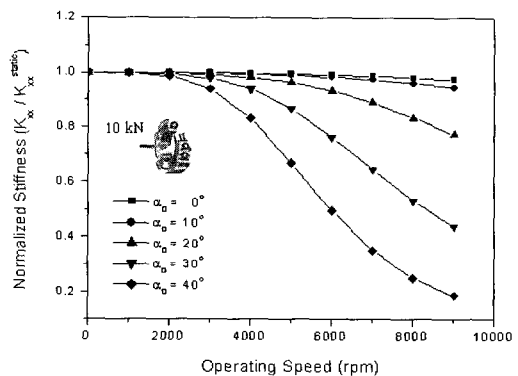


그림 5 구름 베어링의 스프링 모델<sup>(5)</sup>



(a) 축방향하중에 따른 회전속도의 영향



(b) 초기 접촉각에 따른 회전속도의 영향

그림 7 회전속도 변화에 따른 베어링 강성변화

## 특집 베어링

10 kN으로 고정하고 초기 접촉각을 달리하여 해석을 수행한 결과이다. 접촉각이 클수록 회전속도의 영향을 크게 받을 수 있다. 이는 접촉각이 클수록 유도 자이로스코픽 모멘트의 영향을 크게 받기 때문인 것으로 판단된다. 회전속도의 영향으로 베어링의 강성은 정지상태(static)에서 구한 것 보다 현저한 변화를 보이고 있으므로 dmN 값이 큰 고속 응용분야에서 시스템의 거동을 정밀하게 예측하기 위해서는 정확한 베어링 강성값을 찾는 것이 매우 중요하다.

보다 경제적인 방법으로 static 모델을 이용하여 운전 하중영역에서 그림 8과 같이 축방하중-변위 또는 반지름방향하중-변위 곡선을 구하고 선형화해서 베어링의 스프링 계수를 결정하는 방법이 가장 보편적으로 사용되고 있다. FE 상용패키지를 이용한 구조해석 문제에서 구름 베어링의 전동체

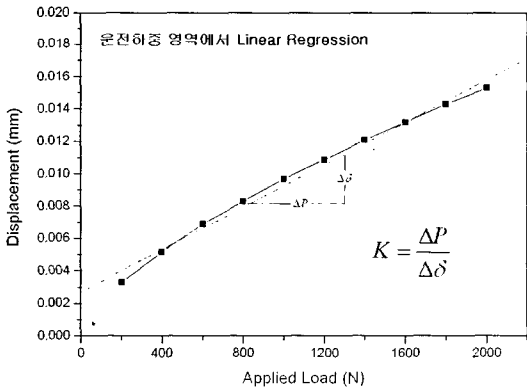


그림 8 비선형 모델의 선형화

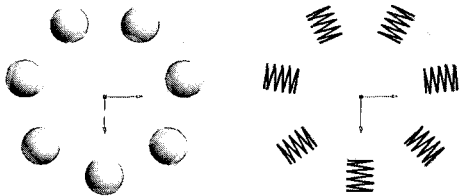


그림 9 탄성 스프링으로 모델링된 전동체

모델링을 그림 9에서 보는바와 같이 선형 스프링으로 모델링함으로써 비선형 문제를 선형 시스템 해석 문제로 전환하여 해석 해를 구하는 방법이 보다 현실적이다. 구름 베어링의 강성 오더는  $10^6 \sim 10^8$  N/mm 범위로 매우 큰 강성값을 갖기 때문에 일반적인 회전축계 시스템에서의 베어링 강성 영향은 그다지 크게 나타나지 않는 것이 현실이나, 구조 유연성이 큰 유연 시스템(flexibility system) 및 고속 회전시스템에서는 구름 베어링의 비선형성 영향이 크게 나타나므로 보다 섬세한 해석기술이 필요하다.

### 3. 이산 전동체 하중분포에 의한 진동

구름 베어링의 제작오차가 전혀 없는 상태 즉, 궤도와 전동체는 완전한 원형(ideal circle)을 이룬다고 가정하더라도 발생하는 구름 베어링 고유의 진동특성이다. 이중 가장 기본적인 요인으로는 전동체 통과 진동(ball pass frequency) 특성과 전동체의 탄성변형에 기인한 진동특성 두 종류이며, 회전체의 위험속도에서 이 두가지 요인에 의한 진동이 특징적으로 발생된다. 반지름방향 틈새가 존재하는 베어링에 반지름방향 하중만 가해질 경우, 베어링을 회전시키면 부하권에 있는 전동체에 걸리는 하중의 상태가 전동체의 위치에 따라 달라진다. 즉, 그림 10에서와 같이 (a) 반지름방향 하중

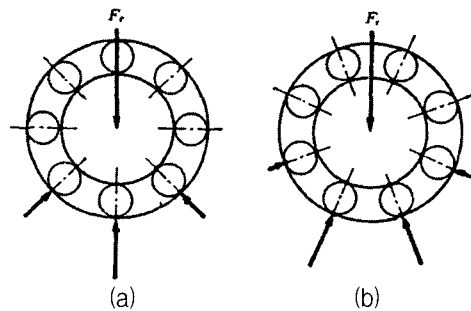


그림 10 전동체 위치에 따른 부하상태

Fr 방향의 바로 아래 전동체가 왔을 때와 (b)와 같이 하중 방향에 대칭위치에 전동체가 왔을 때에 각 전동체에 가해지는 힘은 변화하게 된다. 이는 구름 베어링의 유한개의 전동체에 의해 하중을 받는 것과 궤도륜과 전동체의 각 접촉부분의 탄성변형 때문에 발생하는 진동의 형태이다. 이 때문에 축의 회전에 따라 축의 중심이 아래위로 이동하게 된다. 따라서 축이 회전하면 전동체가 반지름방향 하중 방향의 위치를 통과하는 주기의 진동이 발생되고 이 진동을 전동체 통과 진동이라 부른다.

앞서 설명한 바와 마찬가지로 구름 베어링은 탄성 전동체에 의하여 하중을 지지하는 구조를 갖고 있다. 전동체 하중 분포에 영향을 미치는 인자로는 외력, 회전속도, 예압, 장착 구조물 등을 들 수 있으며 이들 조건에 의하여 구름 베어링의 전동체는 고유한 부하권(load zone)을 형성하게 된다. 그림 11은 베어링에 작용하는 하중에 따른 전동체 하중 분포의 예를 보여주는 그림으로 그림 11(a)는 반지름방향 하중만 작용하는 볼 베어링으로 부하하중 아래쪽 전동체 몇 개가 하중을 분담하게 된다. 그림 11(b)는 축방향 하중과 반지름방향 하중을 동시에 받는 베어링으로 축방향 하중으로 인하여 대부분의 전동체가 하중을 분담하고 있으며, 반지름방향 하중 아래쪽 위치한 전동체는 위쪽에 위치한 전동체보다 큰 부하를 받고 있는 양상을 띠고 있다. 이는 예압하중을 받는 일반 응용 분야의 베어링에서 볼 수 있는 하중 분포로 전체

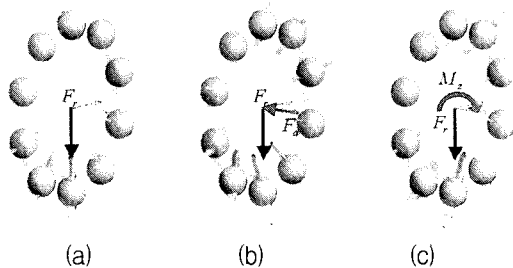


그림 11 하중조건에 따른 전동체 접촉응력 변화

전동체가 하중을 분담함으로써 시스템 강성이 높아지고 최대 전동체 하중이 작아지는 결과를 유추할 수 있다. 실제 예압 베어링의 거동은 그림 12에서 보는 바와 같이 예압을 부여하지 않은 베어링에 비하여 동일한 하중에 대한 변위 변화가 작게 나타나므로 베어링의 지지 강성을 높일 수 있는 것이다. 그림 12 (c)는 반지름방향 하중과 모멘트 하중이 작용하는 경우로 축 중심으로 상하 위치의 전동체가 비교적 큰 하중을 분담하고 있는 양상을 띠고 있다. 이러한 하중조건은 축 처짐 또는 하우징 구조 변형에 의한 축경사(misalignment)에 기인하는 하중 조건으로 모멘트 지지 강성의 영향이 축 시스템 거동에 영향을 미치는 경우이다.

결론적으로 진동문제의 해결을 위해서는 구름 베어링은 하중조건 및 운전조건에 따라 고유한 하중분포를 갖는다는 점을 이해하고, 해석의 정밀도 수준에 맞는 적절한 모델과 이러한 현상을 고려한 실험 결과의 분석 능력을 갖추는 것이 필수적이라 할 수 있겠다.

#### 4. 기하학적 불완전성에 의한 진동

이론 전개의 편의성을 고려하여 상대 운동면은

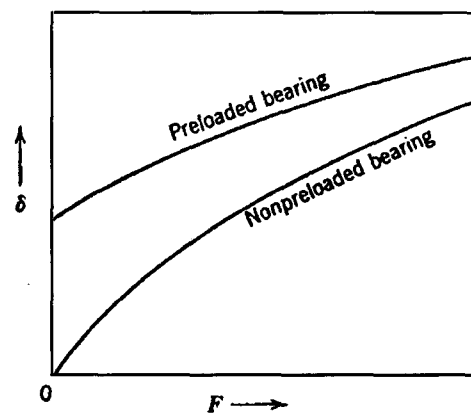


그림 12 베어링 예압(preload) 효과<sup>(2)</sup>

## 특집 베어링

완전한(ideal) 곡률로 가정하는 것이 일반적이나, 실제 상대운동면은 가공방법, 가공정밀도 및 운전 중에 발생하는 마멸에 기인하여 기하학적 불완전한 면을 갖게된다. 그림 13에서 보는 바와 같이 공학에서 다루는 실제면(engineering surface)은 형상에러(form error), 웨이비니스(waviness), 거칠기(roughness) 성분의 조합으로 구성된다. 그림 14는 볼 베어링 구성 요소에서 상대운동이 발생하는 내,외륜 궤도와 전동체의 형상을 실측한 그림이다. 이러한 기하학적 불완전면에서 상대운동이 일어나면 이로 인한 미세 진동이 발생하게 되며, 기계 시스템의 진동에 영향을 미치게 된다. 회전체 진동에 영향을 미치는 진동성분은 반복적으로 나타나는 성분(repeatable)과 비반복적으로 나타나는 성분(non-repeatable)이 있으며, 반복적으로 나타나는 진동성분은 시스템 레벨에서 제어가 가능하나 비반복적인 성분은 그러하지 못하므로 회전정밀도 관점에서 비반복적인 진동성분은 최소화 되어야 한다.

회전기계 시스템의 진동저감을 위해서는 진동성분의 규명 및 불규칙적인 진동(이하 NRRO, non-repeatable runout)의 저감이 필수적이다. NRRO

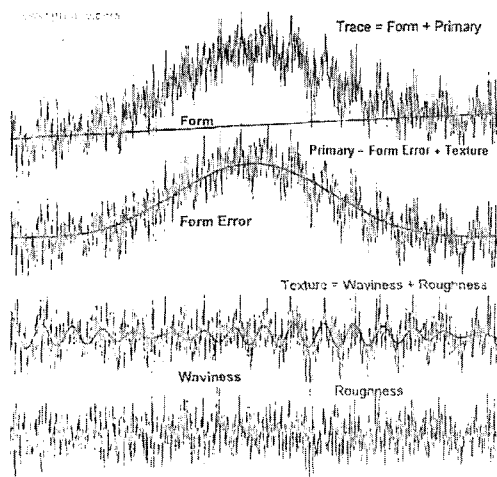


그림 13 Nature of engineering surface

의 발생의 주요인자는 베어링 내부의 가공정밀도 및 볼 진원도의 불완전성에 기인하며, 윤활제의 윤활 불량 및 충격에 의해서도 발생되어진다. 가공장에서 발생하는 waviness의 일반적인 특성은 정확하게 파악되어야 하며, 이를 통하여 발생하는 진동성분은 규명되어야 한다. 구름 베어링의 진동해석에 관한 선행된 연구들을 보면 다음과 같다. Yhland는 볼 베어링의 waviness에 의해 발생하는 축방향 진동과 반경방향 진동을 실험을 통해 연구하였으며, Wardle과 Poon은 볼의 개수와 waviness 차수와의 관계를 연구하였으며, Akturk은 강제축을 지지하는 볼 베어링에 대해서 waviness를 적용하여 3자유도 모델을 제안하여, 예압과 볼의 수의 변화 및 waviness의 효과를 고려한 베어링 진동해석을 수행하여 기존 연구결과와 비교하였다. Ono는 반경방향만을 고려한 2자유도 계에서 NRRO 성분을 해석적으로 구하고, 실측한 waviness의 차수별 크기를 이용하여 볼 개수의 변화에 따른 NRRO의 저감을 위한 방안을 실험을 수반하여 연구하였다. 또한 waviness를 가지고 있는 볼의 배열에 따른 NRRO 크기에 대해서 논하였다. 장건희 등<sup>(6)</sup>은 waviness가 존재하며 볼의 원심력과 자이로스콕 모멘트가 작용하는 볼 베어링으로 지지된 5자유도 회전계의 진동해석을 수행하였다. 김영철 등<sup>(7)</sup>은 볼 베어링 구성요소에서 측정된 waviness의 차수별 크기를 이용하여 반경방향과 축방향의 NRRO 진동성분을 파악하였고, 이를 이용하여 NRRO의 저감을 위해서 축방향 예압과 반경방향 틈새와의 관계를 통한 경향을 파악하였다.

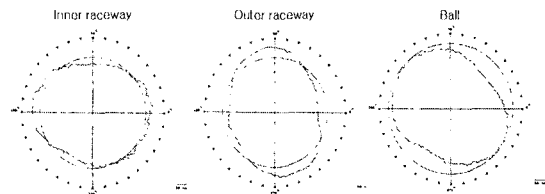


그림 14 베어링 구성부품 실측형상

## 5. 구름 베어링의 소음 원인

구름 베어링에서 소음특성으로 분류되는 인자로는 케이지, 그리스, 미소결함 등에 의한 것이 있다 이들 인자들에 대하여 살펴보자.

### 5.1 케이지 소음

케이지는 전동체의 위상유지를 위한 구름 베어링의 필수 부품이다. 그림 15는 구름 베어링에 사용되는 케이지를 소개한 그림으로 가공방법 및 재질에 따라 다양한 종류의 케이지가 존재한다. 케이지 소음은 어떠한 케이지 형식을 채용하더라도 피할 수 없는 베어링의 소음원이다. 케이지 소음은 한가지 성분이 아닌 복잡한 발생 메카니즘을 갖고 있는 것으로 보고되고 있다. 케이지는 베어링의 전동체와 함께 회전하면서, 불규칙한 전동체와의 충돌, 궤도궤과의 접촉 또는 비접촉 등 매우 복잡한 6자유도 운동을 하는 부품이므로 이에 의해 유도된 소음·진동의 특성은 매우 복잡하다. 케이지 진동에 대한 해석적인 접근은 Gupta에 의해 정립되었으며, 그림 16은 베어링 회전에 따른 케이지 중심궤적을 나타낸 예이다. 케이지 소음은 채터소음(chattering) 또는 덜그럭소음(rattling) 양상을 띠고 있으며 각각의 소음 메카니즘 또한 서로 다르기 때문에 접근이 용이하지 않다. 기본적으로 케이지 소음은 과도한 런아웃, 불규칙적인

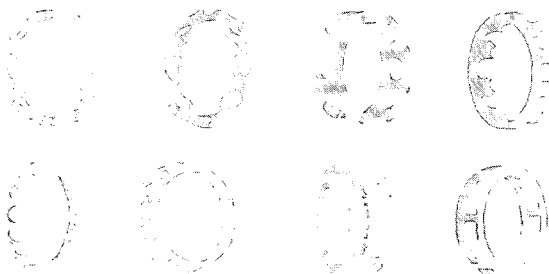


그림 15 구름 베어링 케이지의 종류<sup>(3)</sup>

운동, 케이지 휠(whil) 운동 때문에 발생된다. 따라서, 케이지의 접촉면 틈새(cage riding clearance) 범위를 온도문제가 허용하는 범주내에서 최소화함으로써 효과를 기대할 수 있다. 그러나, 이러한 조치는 케이지 운동을 자유롭게 하지 못하는 결과를 야기시킬 수 있으므로 회전토크의 증가 또는 윤활관점에서 좋지 않은 결과를 야기할 수도 있으므로 주의를 요한다. 케이지 소음을 줄이기 위해서는 운전조건에 맞는 적절한 종류의 케이지 채용이 주요하므로 베어링 제조업체의 가이드를 참고해서 결정해야 한다.

### 5.2 그리스 소음

별도의 윤활장치가 필요 없다는 장점과 유지보수의 편의성으로 구름 베어링에는 밀봉장치와 함께 그리스 윤활을 사용하는 종류가 많이 있다. 그리스 윤활의 경우, 그리스의 특이한 유동성 때문에 이상음을 발생시키는 일이 있다. 따라서 구름 베어링의 우수한 소음특성을 위하여 그리스 소음특성을 개선하는 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.

그리스는 기유, 증주제, 첨가제로 구성되며, 이들 특성에 따라 그리스의 소음특성이 결정된다. 일반

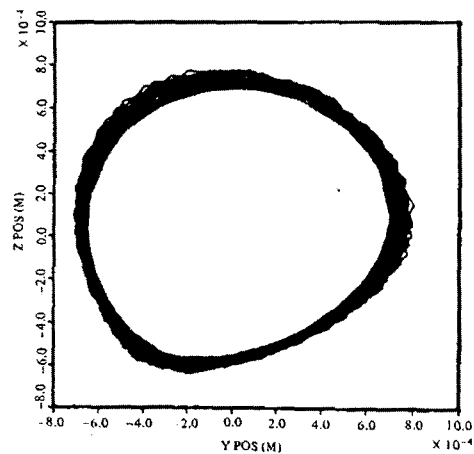
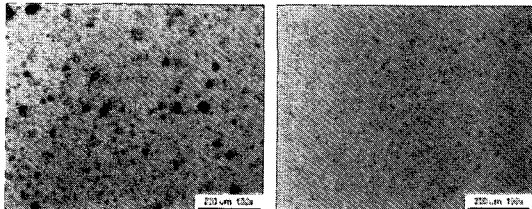


그림 16 회전하는 케이지 중심 궤적<sup>(1)</sup>

## 특집 베어링

적으로 그리스의 주도가 높을수록(유동성이 좋은), 온도 영향(고온 또는 저온)에 따라 경화되는 정도가 낮을수록, 증주제의 입자 크기가 작을수록 소음특성이 우수한 그리스로 알려져 왔다. 베어링의 저소음 특성을 고려 할 경우, 그리스를 제조하는 환경의 청정성이 매우 중요하다. 그리스에서 이물의 혼입은 베어링의 수명 저하에 기인하며 동시에 소음 발생의 요인이 되기 때문에 충분한 주의가 필요하다. 그리스가 청정환경 하에서 사용되는 경우 본래 그리스의 요구되는 내구성, 내열성,



(a) 일반 그리스 (b) 저소음 그리스  
그림 17 청정 그리스의 고형 이물질 관리(예)

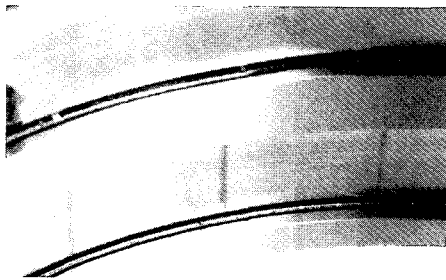


그림 18 장착오류에 의한 궤도 압흔

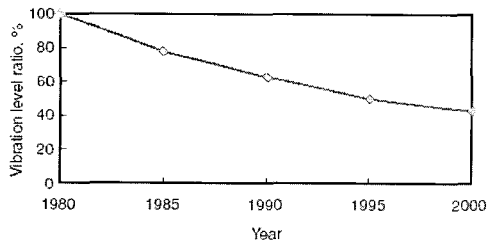


그림 19 휠 모터에서의 진동 레벨 변화 추이<sup>(8)</sup>

내한성, 내마모성 등의 윤활특성 외에 저발진성, 저Out-gas성이 대단히 중요한 항목이 되고 있다. 이러한 저발진성, 저Out-gas성은 그리스가 갖는 특성 중에 저증발성, 저비산성(저누설성) 등과 관계가 있다.

그리스에서 고형 이물의 크기가 10  $\mu\text{m}$ 이상인 경우 이음으로 검출되는 것으로 알려져 왔으며, 그리스 수명을 음향수명으로 생각할 때 통상의 그리스 수명의 1/3~1/2정도라는 보고가 있다. 저소음용 그리스의 제조에 있어서는 이물의 혼입방지 또는 혼입이물의 제거가 중요하다.

### 5.3 결함에 의한 소음

구름 베어링을 구성하는 부품에 결함이 존재하게 된다면 결함진동(fault vibration)이 발생된다. 이러한 결함은 부적절한 베어링 취급 불량, 이물의 침입, 녹발생 또는 이송 중에 발생할 수 있다. 그림 18은 장착오류에 의한 궤도부에 나타난 미소 압흔 형상 예이다. 볼 베어링의 경우, 결함이 궤도륜에 존재하게 되면 소음 및 진동은 반복적으로 발생하지만 전동체에 존재하게 되면 주기성 없이 발생되기도 한다. 이러한 후천적인 요인에 의하여 발생하는 소음·진동원을 최소화하기 위하여 베어링 설계와 재료 선정에 있어서 결함에 대한 높은 저항성을 갖도록 하고 있다. 특히, 플레팅(fretting, wear corrosion or friction oxidation) 방지 능력이 탁월한 윤활제 개발이 개선 방향에 매인이 되기도 한다.

## 6. 맺음 말

구름 베어링은 회전륜, 전동체, 케이지 등 몇 개의 구성부품으로 이루어진 비교적 간단한 기계요소이다. 그러나, 이러한 단순한 기계요소는 10가지 이상의 원인에 의한 진동발생기 역할을 하고 있다. 그림 19는 에어컨디셔너와 진공청소기에 사용



되는 가장 대표적인 치수의 베어링에 대한 연도별 진동수준의 감소추위를 도식적으로 나타낸 것으로 볼 베어링의 진동수준 개선으로 해당 응용분야의 정숙성 향상에 크게 기여하였다. 최근 유체동압(FDB) 베어링으로 대체되고 있기는 하지만, HDD 스피들 모터에 적용되는 볼 베어링의 경우, 괄목한 만한 소음·진동 수준의 개선을 이루와 왔다. 가장 최신의 기계가공 프로세스를 적용하더라도 구름 베어링 상대운동 가공면의 불규칙성을 완전히 제거할 수는 없다. 따라서, 베어링 제조업체에서는 가공기술 뿐만아니라 내부설계, 예압, 저소음 부품 개발, 소재기술 등의 최적화를 통하여 대응하고 있다.

구름 베어링은 매우 민감한 고정밀 가공 기술에 의해 제조된 회전기계 핵심 부품이다. 구름 베어링은 쉽게 접근하기 어려울 정도로 작동 메카니즘이 복잡한 기계요소이다. 이러한 베어링을 회전기계 시스템 설계에 활용하기 위해서는 앞에서 살펴본 구름 베어링의 소음·진동 제어인자들에 대한 이해를 통해 유용한 가정을 도출하여 접근하는 것이 중요하다. 회전기계의 진동문제 해결을 위하여 구름 베어링에 들인 작은 노력과 정성이 의외로 큰 효과를 도출할 수 있음을 많은 사례에서 보여 주고 있다는 사실을 간과해서는 안될 것이다.

### 참 고 문 헌

- (1) Gupta, P. K., 1984, "Advanced Dynamics of Rolling Elements," Springer-Verlag.
- (2) Harris, T. A., 1991, "Rolling Bearing Analysis : 3rd ed.," John Wiley and Sons, Inc.
- (3) FAG한화베어링(주), 1999, 구름 베어링 카탈로그 WL 41 520/2 KA.
- (4) Hamrock, B. J. and Dowson D., 1981, "Ball Bearing Lubrication," John Wiley and Sons, Inc.
- (5) 윤기찬, 최동훈, 2000, "축-베어링 시스템의 연성 특성을 고려한 볼 베어링의 선정," Journal of the KSTLE, Vol. 16, No. 1, pp. 39~45.
- (6) 정성원, 장건희, 2001, "다수의 각접촉 볼 베어링으로 지지된 5장도 회전계에서 볼 베어링의 Waviness에 의해 발생하는 비선형진동모델," 한국소음진동공학회, 제 11 권, 제 2 호, pp. 336~345.
- (7) Kim, Y. C., Choi, S. K. and Yoon, K. C., 2002, "Clearance and Preload Effects on NRRO of Miniature Ball Bearings with Waviness," ASIATRIBO International Conference.
- (8) Banda Noda, 2002, "NSK Products and Technologies Contributing to Low Noise and Low Vibration," Motion & Control, No. 12, NSK.