

## 직선운동베어링 성능평가방법의 표준화 및 내구성 시험에 관한 연구

김태범\*, 김동길(연세대 대학원 기계공학과), 이상조(연세대 기계전자공학부),  
김익수, 이위로, 이동규(산업자원부 기술표준원)

### A Study on the Fatigue Test and Performance Evaluation for Linear Motion Rolling Bearing

T. Kim, D. Kim (Mech. Eng. Dept., Yonsei Univ.), S. Lee (Yonsei Univ.),  
I. Kim, W. Lee, D. Lee (ATS, MOCIE)

#### ABSTRACT

The objective of this paper is to introduce the standard of evaluation methods and fatigue test for linear motion rolling bearing. In particular, attention well be given to the list of evaluation and fatigue results in this paper. The life of a linear motion rolling bearing is given by the length of distance covered between the connection parts before the first evidence of fatigue develops in the material of one of the raceways of rolling elements. The main factors that contribute to fatigue failures include: Number of load cycles experienced; Range of stress experienced in each load cycle; Mean stress experienced in each load cycle; Presence of local stress concentrations.

**Key Words :** Linear Motion Rolling Bearing (직선운동베어링), LM Block (LM블록), LM Rail (LM레일), Fatigue (피로), Design Life (설계수명/무한수명), Safety Factor (안전계수)

#### 1. 서론

현재 직선운동베어링은 주로 공작기계를 비롯하여 반도체 제조장비, 산업용 로봇, 각종 자동화기기, 일반 산업 기계 등의 직선운동에 사용되고 있는 기계요소이다. 기계의 운동요소는 회전운동과 직선운동으로 대별되는데 회전부분에는 회전용 베어링이 오래 전부터 표준화되어 있으나 직선운동 부분에는 직선운동베어링이 필수적으로 사용되고 보편화되고 있음에도 불구하고 제조업체마다 용어 호칭 및 규정 등이 다르고 성능에 차이가 있으므로 표준화가 시급하다. 따라서 본 연구에서는 현재 제정 중인 ISO/CD 1209 01~02 규격안을 토대로 직선운동베어링의 기계적 성질을 평가하기 위한 방법의 표준화가 그 목적이다.

국내에서 직선운동베어링 성능평가 관련 규격 및 근거로는 산업자원부 기술표준원의 품질인증기준이 있다. 이 규격은 삼익공업(주)에서 제조하는 일반 산업용 기계 및 공작기계 직선운동 슬라이드부에 사용되는

직선운동 가이드(이하 LM 가이드)에 대하여 규정한다. 아직 국외 및 국내에서 표준화된 규격이 없으므로 국내에서는 현재 이 기준이 통용되고 있다. 본 연구에 시험 평가 방법은 현재 제정 중인 ISO/CD 규격안과 국내 업체들의 화사 지침서, EM 품질인증기준을 토대로 이론식과 실험식, 컴퓨터 시뮬레이션의 등을 토대로 직선운동베어링의 기계적 성능을 평가 할 수 있는 시험 항목을 선별하고 성능 평가 방법안을 구체화 하였다.

또한 이 논문에서는 직선운동베어링 성능평가에 관한 시험 항목 중에서 내구성 시험에 대하여 기술하였다. 직선운동베어링의 내구성(수명)은 '마모수명(마모에 의한 정밀도저하)'과 '피로수명'의 두 가지로 나누어진다. 마모수명은 볼이나 전주면이 사용 시간의 경과와 더불어 마모를 계속하여 위치 결정 정밀도를 유지 할 수 없게 되기까지의 수명을 가리키는데 직선운동베어링의 고정정밀도, 사용조건, 환경, 윤활 상태 등의 영향을 받는다. 그리고 사용되는 용도에 따라 기기, 장치의 보증정밀도가 각각 다르기 때문에 수명을 예측하는 것은

매우 어렵다. 일반적으로 직선운동베어링의 수명은 구름 베어링과 마찬가지로 '피로수명'을 말하며 볼 전주면 또는 볼의 어느 한쪽에 반복응력에 의한 피로로 인하여 플레이킹(박리현상)이 일어나기까지의 총주행거리로 나타낸다. 이 연구에서는 직선운동 내구성 시험기를 소개하고 현재 국내에서 제안하고 있는 직선운동베어링 성능평가 관련 내구성시험 규격안의 방법으로 시험하고 그 내구성 시험의 시뮬레이션을 통한 피로수명을 예측하였다.

## 2. 직선운동베어링 성능시험평가 항목

이 장에서는 현재 제정중인 ISO/CD 규격안과 국내 업체들의 화사 지침서, EM 품질인증기준을 토대로 이론식과 실험식, 컴퓨터 시뮬레이션의 등을 토대로 직선운동베어링의 기계적 성능을 평가 할 수 있는 직선운동 베어링의 시험평가 항목들에 대하여 간단히 설명하였다.

### 2.1 치수 및 조립공차

치수 측정은 제품의 길이, 두께 및 내·외경 등을 측정하는 것이 대부분이다. 치수의 측정방법은 측정 원리에 따라 직접 측정법과 상태 측정법이 있다. 직접 측정법은 기준점을 별도로 설정함이 없이 치수값을 측정하는 방법이고, 상대측정법은 기준점과 피측정물과의 상대적 변위를 측정하는 방식이다.

직선운동베어링의 주요 치수는 ISO/CD 12090-1 (Rolling bearings, linear motion, recirculating ball, linear guideway - Part 1 : Dimensions for series 1, 2 and 3)에 규정한 치수 및 조립공차를 따른다. 일반적인 치수의 경우 직접법을 사용하여 측정하며 조립공차는 LM블록과 LM레일이 조립된 상태에서 상대측정법을 이용하여 측정을 한다.

### 2.2 표면거칠기

직선운동베어링은 LM블록, LM레일, 볼 등으로 구성되어 있는 기계요소로서 각 기계요소들의 결합으로 인해 상호 마찰이 발생한다. 이로 인하여 적절한 표면처리를 하지 않을 경우 상호 마모로 인해 발생하는 텁과 같은 금속분말이 주행 중에 영향을 미쳐 내구성 및 주행정도를 저하시킨다. 또한 주행할 때 표면 거칠기가 좋지 않을 경우 이송 중에 미세한 진동이 발생할 수 있으며 이는 주행평행도에 영향을 미치게 된다. 표면 거칠기는 제품 생산과정의 마지막 단계에서 측정되며 때문에 표면거칠기 측정은 제품의 규격 통제에 있어 효율적인 방법 중의 하나이며 기계적 성능향상과 수명을 연장하기 위해 표면거칠기를 측정하는 것은 중요하다.

### 2.3 경도 및 조직

인장강도와 경도는 모두 재료의 소성변형에 대한 저항성을 나타내며, 두 성질 사이에는 비례관계가 있다. 직선운동베어링은 LM블록, LM레일의 전주홈에 볼이 접촉하여 구름운동을 하는데, 이 접촉부위에는 하중에 의해 탄·소성적 거동을 하게 된다. 따라서 각 접촉부는 일정정도의 경도를 지녀야만 한다. 일반적으로 경도계수가 낮을 경우 기본 동정격하중 및 기본 정정격하중이 저하된다. 즉, 적절한 강성을 갖도록 열처리를 하므로서 주행평행도와 내구성을 향상시킬 수 있다. 이 시험에서는 금속현미경과 경도시험기를 이용하여 LM블록, LM레일, 볼의 금속조직 및 경도를 측정한다.

### 2.4 주행평행도

직선운동베어링의 주행평행도는 제품의 등급을 평가하는 주요 성능평가항목이며, 일반적으로 주행방향의 상·하, 좌·우의 변위량을 측정한다. 주행정밀도는 직선운동베어링의 위치결정도와 내구성에 영향을 미치는데 일반적으로 주행정밀도에 영향을 미치는 요인은 다음과 같다. 볼의 진원도, 볼트 체결에 의한 레일의 변형, 구름 매개체인 볼의 구름으로 인해 생기는 진동 및 변위, 예압, 취부면의 정도, LM블록의 길이 등이 있다. 이중에서 주행정밀도에 크게 영향을 미치는 요인은 볼베어링이 주행에 따른 변위와 레일의 진진도, 평행도, 볼트체결력에 의한 변위, 취부면의 정도 등이다.

### 2.5 내구성

직선운동베어링의 내구성은 일반적으로 직선운동 베어링의 수명을 가리며 구름 베어링과 마찬가지로 '피로수명'을 말한다. 볼 전주면 또는 볼의 어느 한쪽에 반복응력에 의한 피로로 인하여 플레이킹(박리현상)이 일어나기까지의 총주행거리로 나타낸다. 내구성 시험에 관해서는 다음 장에서 직선운동 내구성 시험기와 국내에서 제안하고 있는 내구성시험 방법에 대하여 시험 결과 및 시뮬레이션에 대하여 기술하였다.

## 3. 직선운동베어링의 내구성 시험

### 3.1 내구성 시험기

#### 3.1.1 국내 보유 내구성 시험기

국내에서 직선운동베어링 내구성시험기를 보유하고 있는 곳은 삼익LMS(주) 한곳이며 Fig. 1은 국내 보유 내구성 시험기를 보여준다. 그리고 설비 사양은 다음과 같다.

- 크기: 2700 x 1620 x 1700mm

- 구동: 유압실린더(직선운동베어링 장착)
- 테이블 크기: 1500 x 780mm
- 가압방법: 유압실린더사용 (8대-내경 ø 90)
- 치대 스트로크: 1000mm

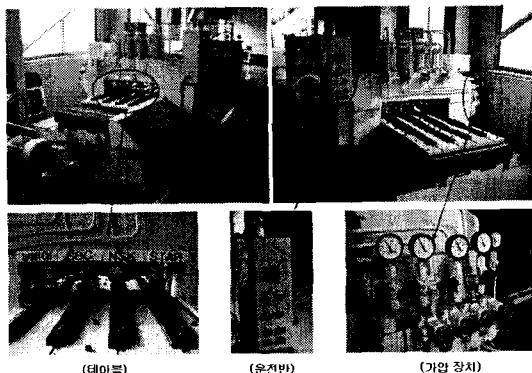


Fig. 1 내구성 시험기(삼익LMS사 제공)

### 3.1.2 일본의 내구성 시험기

직선운동베어링의 선진 기술을 보유하고 있는 일본 업체들의 내구성 시험기의 구조는 약간의 차이는 있지만 큰 차이는 없다. 여러 개의 라인별로 스트로크 길이, 이송속도, 및 유압을 통해 부하하중을 조절하면서 내구성 테스트를 수행하고 있으며, 윤활유의 변색, 볼의 변색 및 플레이킹 진행사항을 체크한다.

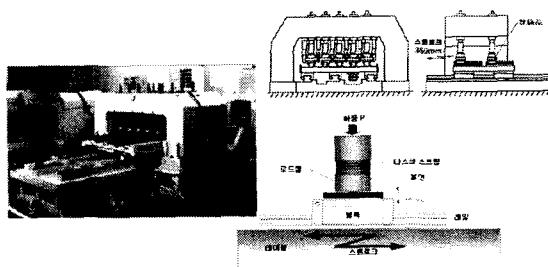


Fig. 2(a) 내구성 시험기(THK사 제공)

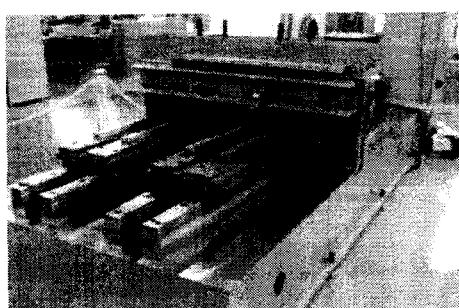


Fig. 2(b) 내구성 시험기(NSK사 제공)

THK의 경우 부하하중을 자사 내규에 의하여 정하는데, 이에 대해 NSK에서는 새로 진행중인 ISO/TC4/SC8과 ISO/TC4/SC11 P-Member이다. 따라서 새로 진행중인 ISO/TC4/SC8에서 규정하고 있는 부하하중인  $P=0.5C$  ( $P$  : 부하하중,  $C$  : 동적격하중)로 하여 실험하고 있다. Fig. 2(a) 와 Fig. 2(b)는 일본의 내구성 시험기를 보여준다.

## 3.2 내구성 시험 및 결과

### 3.2.1 형번 25, 30의 시험조건 및 결과

형번 25, 30의 시험조건은 각각의 선정된 모델의 카탈로그에서 제시하는 기본 동정격하중을 시험하중으로 사용하여 시험하였다. 예를 들면, 형번 25 (HSR25A)의 삼익LMS사의 카탈로그에서 제시하는 기본 동정격 하중은 19.9[kN]이며 kgf로 환산하면 2030 [kgf]을 내구성 시험기에 압력계를 확인하면서 기본 동정격하중을 가한다. 단, 1kN ≈ 102kgf 이다. 형번 30 (HSR30A)의 기본 동정격 하중은 28[kN]이며 kgf로 환산하면 2856 [kgf]이다. 다음은 시험하중의 시험조건과 시험결과(Table 1. 내구성 시험결과)이다.

- 스트로크: 600~700mm
- 시험속도: 약 250mm/s
- 시험기사용속도 범위: 200~300mm/s
- 시험거리: 10, 20, 30, 40, 50km (왕복 횟수를考慮 후 거리 계산한다.)
- 결과판정: 50km 주행 후 흠부(볼 구름부) 플레이킹 유무확인

구분	제작자	5km	10km	15km	20km	25km	30km	35km	40km	45km	50km	결과	판정
STAR	#25	상호	9회	2회	1회	교체하지 않음	OK						
	#30	상호	9회	1회	교체하지 않음	OK							
NSK	#25	상호										교체하지 않음	OK
	#30	상호										교체하지 않음	OK
SBC	#25	상호										교체하지 않음	OK
	#30	상호										교체하지 않음	OK
SAMICK	#25	상호										교체하지 않음	OK
	#30	상호										교체하지 않음	OK

※7장로는 해당 장면별 기본동정 및 기종을 기반 장비에서 50km를 전구축별로 통합하여 적용된다.

Table 1 내구성 시험결과

### 3.2.2 플레이킹 발생까지의 내구성 시험

시험에 사용된 모델은 HSR20A이며 시험조건은 앞에서와 같이 형번 25, 30시험과 같다. 시험하중은 HSR20A에 대한 기본 동정격하중 1430[kgf] 하에서 윤활유는 1회 주입으로 시험하였다. 50km까지는 전주면에 플레이킹이 발생하지 않았지만 160km 쯤에서 습도의 영향으로 갑작스럽게 다수의 압흔이 발생하여 급격하게 주행거리는 185km에서 플레이킹으로 진전하여 결국 파손에 이르렀다.

### 3.3 내구성 시험 시뮬레이션

시뮬레이션 모델은 앞 절에서 내구성 시험을 한 모델로 형변25 종 HSR25A와 플레이킹이 발생할 때 까지 내구성 시험한 HSR20A로 시험 조건은 각각의 기본동정격 하중, 스트로크, 시험 속도를 사용하여 피로수명 예측을 하였다. 단, 피로수명 예측 시뮬레이션에서 사용된 시험 모델의 물성치와 S-N 선도는 일반적인 쓰이는 구조철(structural steel)의 값 또는 해석 툴에서 제공하는 값을 사용하였다. 따라서 시뮬레이션의 결과의 신뢰성을 떨어지지만, 생산업체에서 자체적으로 쌓은 시험 데이터 또는 정확한 물성치를 사용한다면 신뢰성 있는 피로수명 예측을 할 수 있을 것이다.

#### 3.3.1 형변 25 HSR25A의 시뮬레이션(I)

시험하중은 기본동정격하중 19.9[N]이며 이 기본 동정격하중에서 블록과 레일의 전주면에 작용하는 반력을 구하면 각각의 블과 접하는 전주면 대하여  $45^{\circ}$ 각도로 방향성을 갖는 반력 67.04[N]이 발생한다. 이 반력을 X축, Y축으로 + 또는 - 의 요소의 힘으로 각각 47.4[N]으로 분해하여 ANSYS 해석툴에서 시뮬레이션 하였다. 내구성 시험에서 스트로크는 600[mm]이고 시험속도는 약 250[mm/s]이다. 주행거리를 왕복 횟수로 카운터하면 다음 Table 2와 같다.

주행거리(km)	왕복 횟수	
	LM 레일	LM 블록
10	8333	83330
20	16667	166670
30	25000	250000
40	33333	333330
50	41667	416670

Table. 2 주행거리 환산

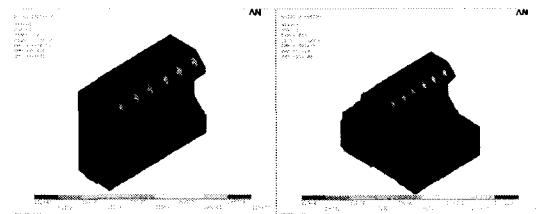


Fig. 3 HSR25A의 FEA해석

Fig. 3은 HSR25A의 FEA구조해석에 대한 응력분포를 보여주며, 시뮬레이션 결과를 보면 LM블록의 결과 값이 LM 레일의 결과 보다 큰 것을 알 수 있다. 그것은 블록이 계속적으로 기본 동정격하중을 받기 때문이다. Table 2의 주행거리 환산에서 보면 HSR25A모델의 각각의 주행 거리를 비교해 보면 블록이 왕복횟수가 10배정도 큰 것을 알 수 있다.

Table 3과 Table 4는 각각 LM레일의 피로수명과 LM블록의 피로수명의 결과를 보여준다. 따라서 블록의 피로수명의 값으로 직선운동 베어링의 피로수명을 예측 할 수 있다. LM블록의 주행거리 50km 주행 후 CUMULATIVE FATIGUE USAGE = 0.4167 값이 나왔다. 이것은 50km 보다 2.4배 더 사용할 수 있다는 것을 의미한다.

PERFORM FATIGUE CALCULATION AT LOCATION 0 NODE 843	
*** POSTI FATIGUE CALCULATION ***	
LOCATION 1 NODE 843	
EVENT/LOADS 1 1 AND 1 2	
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.1000E-29 WITH TEMP = 0.0000	
CYCLES USED/ALLOWED = 0.4167E+06 / 0.1000E+07 = PARTIAL USAGE = 0.04167	
CUMULATIVE FATIGUE USAGE = 0.04167	

Table 3 LM레일의 피로수명 결과

PERFORM FATIGUE CALCULATION AT LOCATION 0 NODE 4938	
*** POSTI FATIGUE CALCULATION ***	
LOCATION 1 NODE 4938	
EVENT/LOADS 1 1 AND 1 2	
PRODUCE ALTERNATING SI (SALT) = 0.1000E-29 WITH TEMP = 0.0000	
CYCLES USED/ALLOWED = 0.4167E+06 / 0.1000E+07 = PARTIAL USAGE = 0.4167	
CUMULATIVE FATIGUE USAGE = 0.4167	

Table 4 LM블록의 피로수명 결과

Name	LM Rail		LM Block	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
Equivalent Stress	1.277.07 Pa	308.50851 Pa	1.210.44 Pa	689.264.44 Pa
Maximum Shear Stress	732.8 Pa	174.985.53 Pa	685.46 Pa	386.626.69 Pa
Total Deformation	0.0 m	$9.7 \times 10^{-5}$ m	0.0 m	$6.5 \times 10^{-5}$ m
Safety Factor	15.0		15.0	

Table 5 구조해석 결과

Table 5은 HSR25A의 구조해석 결과이며 Fig. 4 은 안전계수의 해석 결과를 보여준다.

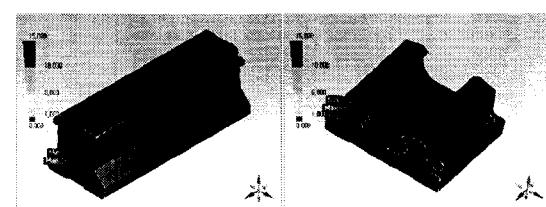


Fig. 4 HSR25A의 안전계수

그 결과로 수명(Life)은 무한수명(또는 Design Life)인  $1.0 \times 10^9$  같은 값  $1.0 \times 10^9$ 와 안전계수 15의 해석 결과 나왔다. 이 결과로 피로수명이 Design Life

같음으로 피로에 의한 과순보다 직선운동베어링은 사용조건, 환경, 윤활상태 등의 영향을 받는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

직선운동베어링의 표준화는 국내 생산업체의 제품에 대한 표준화에 따른 품질 향상에 일조를 하며 해당제품의 신뢰성을 높일 수 있을 것이다. 본 연구에는 직선운동베어링의 시험 평가 방법에 관한 표준화를 위하여 현재 제정중인 ISO/CD 규격안과 국내 업체들의 화사 지침서, EM 품질인증기준을 토대로 이론식과 실험식, 컴퓨터 시뮬레이션의 등을 토대로 직선운동베어링의 기계적 성능을 평가 할 수 있는 시험 항목을 선별하였다. 이 논문에서는 직선운동베어링의 시험평가 항목들에 대하여 간단히 설명하였다. 또한 이 논문에서 직선운동베어링 성능평가에 관한 시험항목 중에서 내구성 시험에 결과 및 시뮬레이션은 삼익LMS(주)의 내구성시험기를 기본으로 하여 EM 및 삼익LMS의 내규를 기본으로 하여 시험하였다. 이는 일본의 THK의 시험과 유사하나 NSK사에서 제안하고 있는 시험 조건 특히, 동정격하증과 윤활 조건에서 큰 차이를 보이고 있다. 향후 NSK에서 제안하고 있는 시험 조건에 대하여 연구가 필요할 것으로 사료된다.

#### 후기

본 연구는 산업자원부에서 지원하는 산업기술개발사업의 연구결과임을 밝히며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. THK LM System General Catalog, CATALOG.  
No.300-E, A-110.
2. LM 레일 정도검사규격, 삼익공업(주) 지침서.
3. IKO Linear Motion Rolling Guide Series,  
CAT-5504.
4. Rexroth-STAR Ball Rail System Catalog.
5. SBC Linear Rail System Catalog.