볼나사일체형 LM가이드 설계에 관한 연구

윤영식*·신동우†

Case Study on the Safety Working Load of a LM-Guide Structure

Young Sik, Yoon and Dong Woo, Shin

Key Words: Ball Bearing(볼베어링), Finite-Element Method(유한요소해석), Linear Motion Guide (선형운동 가이드), Safety Working Load(정격하중)

Abstract

A ballscrew-linear motion(LM) guide is well-described by its name: it is a LM guide that runs by ballscrew. It consists of LM rail, LM block, end plate, screw, nut and bearing balls. The ballscrew-LM guide has many advantages compared with conventional LM guide. The high efficiency achieved with rolling contact devices permits the employment of antibacklash methods. The balls provide the only physical contact between nut rail and block and ball screw and nut replacing the sliding friction with a rolling motion. The life of the ballscrew-LM is determinated by the balls. The objective of this paper is to introduce the design of the ballscrew-LM with the safety working load.

기호설명

C = 허용 동 정격하중
C_0 : 기본 정레이디얼 정격 하중 (N)
C_{0a} : 기본 정액시얼 정격하중
D_w : 볼의 지름
F : 실제의 베어링 하중 (N)
f_0 : 베어링 각 부의 모양 및 적용하는 응력 수준에 따라 정하는 계수
F_a : 베어링 액시얼 하중. 즉, 실제 베어링 하중의 액시얼 분력(N)
F_H : 수평방향 외부하중 (N)
F_1, F_2,⋯,F_n : 개별하중 (N)
F_r : 베어링 레이디얼 하중. 즉, 실제 베어링 하중의 레이디얼 분력 (N)
F_V : 수직방향 외부하중 (N)
i : 1개 베어링 내의 전동체의 열수
k_{0F} : 정하중 계수
M = 정격 모멘트 (Nm)
M_t = 허용 동정격 모멘트 (Nm)
P_{0r} : 정등가 레이디얼 하중(N)
P_{0a} : 정등가 엑시얼 하중(N)
q_1, q_2,⋯,q_n : F_1, F_2,⋯,F_n의 스트로크율(%)
S_0 : 안전계수
X_0 : 정레이디얼 하중 계수
Y_0 : 정액시얼 하중 계수
Z : 단열 베어링 전동체의 수 또는 각 열이 같은 수의 전동체를 갖는 다열 베어링의 1열당 전동체 수
α : 베어링의 호칭 접촉각(___°)

* 윤영식, 건양대학교 기계공학과
E-mail : ysyoon@konyang.ac.kr
TEL : (041)730-5282 FAX : (041)736-0205
† 신동우, 건양대학교 기계공학과
E-mail : zeroa1@nate.com
TEL : (041)730-5282 FAX : (041)736-0205

1. 서 론

볼나사 일체형 LM가이드는 정밀 직선운동이

가능한 기구로서, 각종 정밀 공작기계나 반도체 제조 및 측정장비, 산업용 로봇, 일반 산업기계 등의의 직선운동에 사용되는 기계요소이다.

볼나사 일체형 LM가이드 볼베어링을 사용하는 LM가이드와 LM가이드의 런너 블록을 직선방향으로 이송시켜주는 볼나사로 구성되어 있다. 이러한 정밀한 LM가이드의 성능과 수명은 가이드 레일과 런너 블록 사이의 볼 베어링에 의해서 결정되게 된다.

레일과 런너 블록 사이의 베어링에는 점접촉의 극단적인 압력의 응력이 작용하게 된다.

이러한 응력집중은 영구변형과, 크랙, 마멸, 막피 현상을 초래하여 베어링의 수명을 단축시키는 요인이 되게 된다.

본 연구에서는 볼나사 일체형 LM가이드의 설계과정으로서 구조물에 상, 하, 좌, 우 방향의 힘과 XY 평면, XZ 평면, YZ 평면의 3방향의 모멘트를 적용하였을때, Von Mises Stress, Deformation, Safety Factor 등의 변화를 상용유한요소프로그램을 사용하여 연구하였다.

2. 문제의 정식화

2.1 구름베어링의 용어 정리와 조건

2.1.1 기본용어설명

정격하중은 볼과 구름면의 접촉 형태 ≤0.542에서 롤링 요소와 궤도(레일) 사이의 최대 부하를 받는 접촉 중심 방향으로 4200MPa 강도 값에 해당한다. 이때 접촉점에서 롤링 요소와 궤도에 롤링 요소 직경의 약 0.0001 배에 해당하는 지속되는 영구변형이 일어날 때를 일컫는다.

정등가 레이디얼 하중은 실제 하중 조건하에서 생기는 접촉응력과 같은 접촉 응력을 최대 하중을 받고 있는 전동체와 궤도의 접촉부 중앙에 생기도록 하는 정레이디얼 하중을 뜻한다.

정등가 액시얼 하중은 실재의 하중 조건하에서 생기는 접촉 응력과 같은 접촉 응력을 최대 응력을 받고 있는 전동체와 궤도의 접촉 중앙부에 생기도록 하는 정중심 액시얼 하중을 뜻한다.

2.1.2 기본조건

다음 계산의 기본 조건은 구름접촉면의 모양이 기본적으로 통상의 경도를 가지고 KS D3525에 의한 재료 또는 이것과 동등한 정정격 하중이 얻어지는 재료를 사용하여 높은 제조 기술에 의하여 만들어 진 베어링에 적용한다. 전동체의 궤도의 접촉면에 많은 불연속부가 존재하는 경우 적용할 수 없고, 베어링 내부의 부하 분포가 정상이 아닌 경우 적용할 수 없다.

다음에 사용될 주된 용어는 KS B 0104에 따랐다. 정하중은 내륜과 외륜이 상대적으로 회전하고 있지 않는 베어링에 걸리는 하중을 뜻한다.

기본 정레이디얼 정격 하중은 최대 하중을 받고 있는 전동체와 궤도의 접촉부 중앙에서 다음에 표시하는 계산 접촉 응력에 대응하는 정중심 레이디얼 하중에 해당한다.

계산에 사용하는 롤러의 지름은 롤러 중앙에서의 지름을 사용하였다.

2.2 레디얼 볼베어링 계산

2.2.1 기본 정레이디얼 정격하중

레이디얼 볼 베어링의 기본 정레이디얼 정격하중(C_0)은 다음 식으로 구한다.

$$C_0 = f_0 \times K_{0i} \times Z_t \times {D_W}^2$$

$$\text{일때} \quad k_{0i} = \frac{\sum_{j=1}^{j=i_t} (\cos \varphi_j)^{2.5}}{(\cos \varphi_j)^{1.5}}$$

하중 방향에 대해 -90 < φ_j <+90 의 범위 에 있는 강구는 하중을 받는 강구인 i_t로 정의 한다. 강구 열에 대한 종속 계수 k_{0i} 는 **Table.1** 에 따른다. f_0는 **Table.2** 에 따른다.

Table.1 Values of k_{0i}

i	k_{0i}
3	1,000
4	1,000
5	1,106
6	1,354
7	1,614
8	1,841
9	2,052
10	2,284

Table 2 Values of f_0

$\frac{D_w}{D_{pw}}$	f_0	$\frac{D_w}{D_{pw}}$	f_0	$\frac{D_w}{D_{pw}}$	f_0
0,005	14,801	0,105	13,297	0,205	11,77
0,01	14,726	0,11	13,221	0,21	11,693
0,015	14,651	0,115	13,146	0,215	11,616
0,02	14,577	0,12	13,07	0,22	11,539
0,025	14,502	0,125	12,994	0,225	11,462
0,03	14,427	0,13	12,918	0,23	11,384
0,035	14,352	0,135	12,842	0,235	11,307
0,04	14,277	0,14	12,765	0,24	11,23
0,045	14,202	0,145	12,689	0,245	11,152
0,05	14,127	0,15	12,613	0,25	11,075
0,055	14,052	0,155	12,537	0,255	10,997
0,06	13,977	0,16	12,46	0,26	10,92
0,065	13,902	0,165	12,384	0,265	10,842
0,07	13,826	0,17	12,307	0,27	10,765
0,075	13,751	0,175	12,231	0,275	10,687
0,08	13,675	0,18	12,154	0,28	10,609
0,085	13,6	0,185	12,077	0,285	10,531
0,09	13,524	0,19	12	0,29	10,454
0,095	13,449	0,195	11,924	0,295	10,376
0,1	13,373	0,2	11,847	0,3	10,298

2.2.2 정적 등가 하중

리니어 베어링의 정적 등가 하중은 다음 식을 따른다.

$$P_0 = k_{oF} \times F$$

정하중 계수 k_{0F}는 Bearing Load F 가 수직 방향일 때, 그리고 bearing clearance 가 일반 영역에 있을 때 1로 한다. 만약 이러한 조건을 만족 시키지 못할 경우 베어링 제작자는 적절한 k_{0F}값을 제시해야 한다.

2.2.3 복합 하중일 경우

수평과 수직의 하중이 작용할 경우 Bearing Load F는 다음의 공식을 이용하여 계산한다.

$$F = |F_V| + |F_H|$$

가변 하중일 F_V, F_H를 다음의 개별적인 공식에 의하여 계산하게 된다.

$$F_1 = \sqrt[3]{F_1^3 \frac{q_1}{100} + F_2^3 \frac{q_2}{100} + \cdots + F_n^3 \frac{q_n}{100}}$$

복합 하중이 모멘트와 함께 작용할 경우 하중 F는 다음과 같이 계산한다.

임의의 각도에서 런너 블록상에 작용하는 외부하중을 F_V와 F_H로 나누고 다음 공식을 적용한다.

$$F = |F_V| + |F_H| + C\frac{|M|}{M_t}$$

정 등가하중의 경우는 위의 공식을 이용하여 다음과 같이 계산하게 된다.

$$F_0 = |F_{V0}| + |F_{H0}| + C_0\frac{|M_0|}{M_{t0}}$$

2.1.3 정 하중 안전 계수

정하중 안전 계수는 다음 식에 따른다.

$$S_0 = \frac{C_0}{P_0}$$

일반적인 운전조건에서 안전계수는 2 이상이어야 한다.

3. 유한요소법에 의한 해석

3.1 전처리과정

3.1.1 모델 생성

CATIA를 통하여 3차원 설계를 한 후 Ansys Workbench를 통하여 선형해석을 수행하였다. 원활한 해석을 위하여 해석 값에 영향을 미치지 못하는 기계요소 들은 생략하였다. 해석에 사용된 부분은는 블럭과 레일 그리고 블록과 레일사이에서 구름운동을 하는 강구(3/16 inch) 그리고 레일의 양단을 고정하는 Cover가 해석에 사용되었다. 해석을 위한 모델은 **Fig.1** 와 같다.

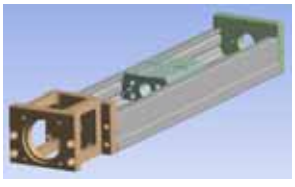

Fig. 1 FEM model

해석을 위하여 Mesh 작업을 하였으며 Mesh된 형태는 **Fig.2**와 같다. Mesh는 프로그램에서 제공하는 자동 Mesh기능을 사용하였으며 생성된 노

Table 3 Material properties of structural steel

Young's Modulus	200000 MPa
Poisson's Ratio	0.3
Density	0.00000785 kg/mm
Tensile Yield Strength	250 MPa
Compressive Yield Strength	250 MPa
Tensile Ultimate Strength	460 MPa

드수는 108557개 이고, Element의 개수는 63899개가 생성되었다.

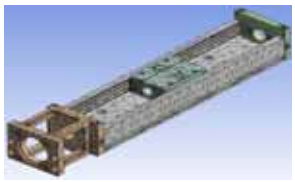

Fig. 2 Mesh model

3.1.2 구속조건

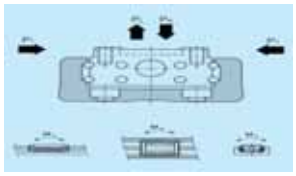

Fig.3 Loads and moments

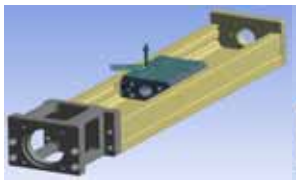

Fig.4 Static load PL

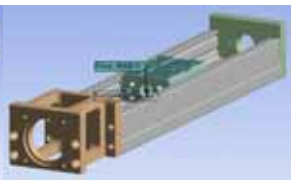

Fig.5 Static load PR

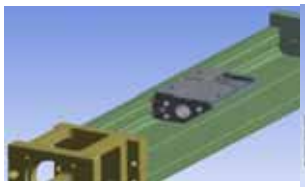

Fig.6 Static load PT

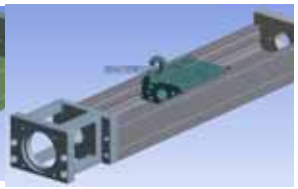

Fig.7 Moment A

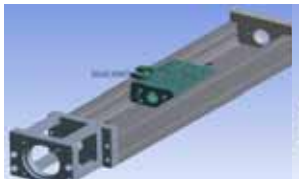

Fig.8 Moment B

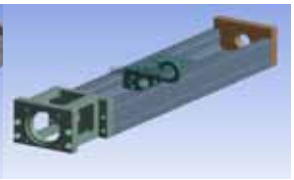

Fig.9 Moment C

Fig.4 Fig.5 Fig.6 의 하중은 블록의 상면에 부여하였으며 **Fig.7 Fig.8 Fig.9**의 모멘트는 블록 전체에 대하여 모멘트를 적용하였다.

각 조건에 대한 하중과 모멘트는 **Table 4**와 **Table 5** 의해 입력하였으며 각 조건에 대한 결과값은 다음과 같다.

Table.4 Static load rating

Type	기본정정격 하중 C_0 (N)
KR20	6300
KR26	12150
KR30H	20200
KR33	20200
KR45	39200
KR46	45500
KR55	61700
KR65	80900

Table.5 Working moment

Type	정격 허용 모멘트 (Nm)		
	M_A	M_B	M_C
KR46-A	547	547	1400
KR46-B	2940	2940	2800
KR46-C	149	149	700
KR46-D	1010	1010	1400
KR55-A	870	870	2280
KR55-B	4890	4890	4570
KR65-A	1300	1300	3920
KR65-B	7230	7230	7840

해석값의 평가 기준은 ISO 규격 “ISO 1472-2 Rolling bearings . Linear motion rolling bearings .Part 2 Static load ratings" 에 의하였다. 주요 내용은 강구와 강구가 닿아 있는 Rail 부의 영구변형의 합이 강구 지름의 0.0001배가 되게 하는 하중을 정 정격하중이라 하며 이에 대한 내용은 ISO 1472-2 의 3.9항에 정의 되어 있다.

3.2 후처리과정

3.2.1 정적하중 PL의 해석결과

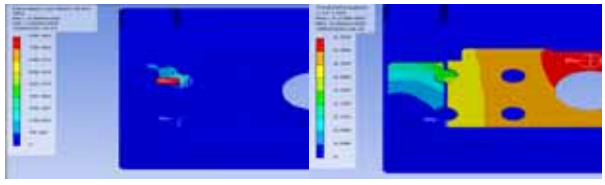

Fig.10 Von Mises stress

Fig.11 Deformation

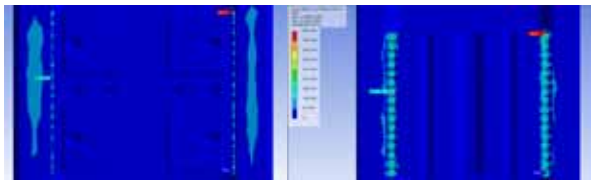

Fig.12 Von Mises stress top view **Fig.13** Cut view of Von Mises stress

정적하중 PL의 해석결과는 **Fig.10**과 **Fig.11**와 같으며 **Fig.10**에서 최대응력은 강구에서 910.49 MPa 이며, 최대 변위는 너트의 상면에서 0.044mm이다.

ISO 1472-2 의 3.9항 을 보면 '베어링과 접촉부에 회전체 직경의 0.0001배의 영구 변형을 일으키는 하중'으로 명기 되어 있으며 이때의 응력은 4200MPa로 정의 되어 있다.

위의 결과에 의한 응력은 910.49 MPa 로 기본 정 정격 하중에 의해 일어나는 응력의 약 1/5 해당 된다. ISO 규격 14728-2에 의하면 정 하중 안전 계수는 2 이상을 제시하므로 충분한 안전계수가 확보 되었다고 할 수 있을 것이다.

3.2.2 정적하중 PR의 해석결과

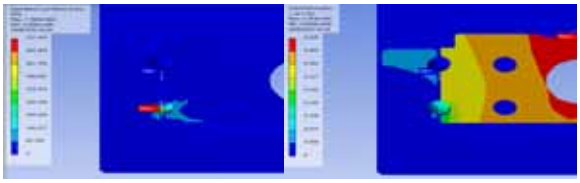

Fig.14 Von Mises stress **Fig.15** Deformation

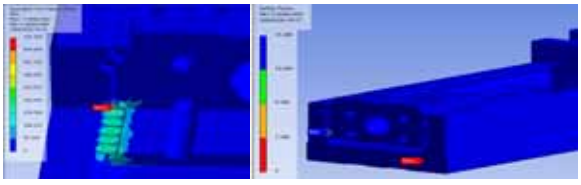

Fig.16 Cut view of Von Mises stress **Fig.17** Cut view of safety factor

정적하중 PR의 해석결과는 **Fig.14**과 **Fig.15**과 같으며 **Fig.14**에서 최대응력은 강구에서 754.16 MPa 이며 최대 변위는 너트의 상면에서 0.32mm 로 나타났다. 결과의 특성은 정 적격하중 PL과 같다. 또한 안전 계수 에서도 최저 4.6 이상의 안전계수가 확보 되어 충분한 안전계수가 있다고 판단된다.

3.2.3 정적하중 PT의 해석결과

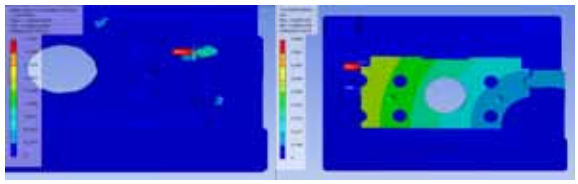

Fig.18 Von Mises tress **Fig.19** Deformation

Fig.20 Cut view of safety factor

정적하중 PT의 해석결과는 **Fig.18** **Fig.19**과 같으며 **Fig.18**에서 최대응력은 블록의 강구와의 접촉면에서 2462 MPa 로 계산되었으며 최대 변위는 0.9mm로 계산되었다. 응력의 특징은 정 정격 하중 Pr Pl 과 같다. 또한 **Fig.20**에서 안전 계수는 최저 2.5 이상으로 ISO 기준에 부합하고 있다.

3.2.4 moment A 의 해석결과

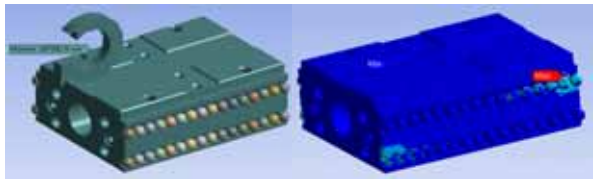

Fig.21 Moment A **Fig.22** Von Mises stress

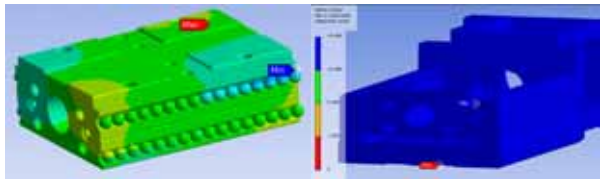

Fig.23 Deformation **Fig.24** Cut view of safety factor

모멘트 A는 **Fig.18**에서 보이는 방향으로 547Nm 의 모멘트를 적용하였다 . 모멘트 A의 해석결과는 **Fig.19**과 **Fig.20**와 같다. **Fig.19**의 응력분포를 보면 모멘트의 영향을 받아 강구의 상하열이 서로 대각 방향으로 응력분포가 일어나는 것을 볼 수 있다. 최대 응력은 강구에서 627.7MPa 이며 최대 변위는 6.77 ㎛ 로 계산 되었다. 안전계수는 **Fig.24**에서 최소 6.7256으로 평

가되어 14728-2에 의해 충분한 안전계수가 있다고 판단되어 진다.

3.2.5 Moment B 의 해석결과

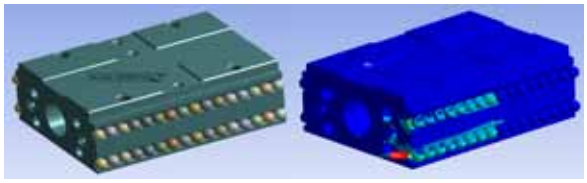

Fig.25 Moment B **Fig.26** Von Mises stress

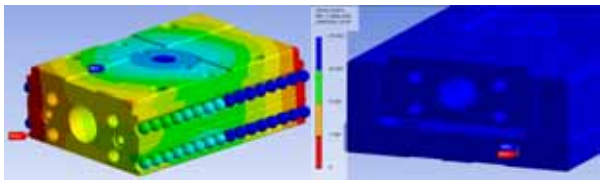

Fig.27 Deformation **Fig.28** Cut view of safety factor

모멘트 B는 **Fig.25**에서 보이는 방향으로 547Nm의 하중을 주었다. 모멘트 B의 해석결과는 **Fig.26**과 **Fig.27**와 같다. **Fig.26**의 응력 분포를 보면 모멘트의 영향을 받아 강구의 좌우열이 서로 대각 방향으로 응력분포가 일어나는 것을 볼 수 있다. 최대 응력은 205.3MPa 이며 최대 변위는 0.119㎛ 로 계산 되었다. 최대 응력값은 강구와 접촉부의 영구변형이 강구 지름의 0.0001배가 되는 응력값인 4200Mpa에 비해 약 1/20 정도이므로 전체적으로 10 이상의 충분한 안전계수가 있다고 판단되어 진다.

3.2.6 Moment C의 해석결과

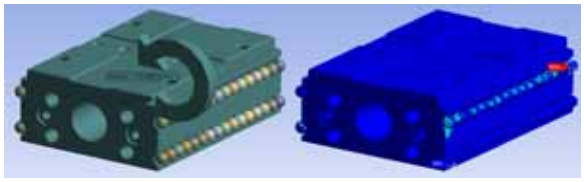

Fig.29 Moment C **Fig.30** Von Mises tress

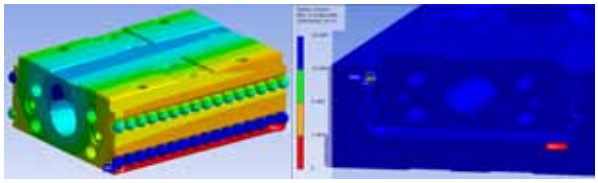

Fig.31 Deformation **Fig.32** Cut view of safety factor

모멘트 C는 **Fig.29**에서 보이는 방향으로 하중을 주었다. 모멘트 C의 해석결과는 **Fig.30**와 **Fig.31**과 같다. **Fig.30**의 응력 분포를 보면 모멘트의 영향을 받아 상하강구의 좌우열이 서로 대각 방향으로 응력분포가 일어나는 것을 볼 수 있다. 최대 응력은 강구에서 1713MPa 이며 최대 변위는 0.029mm 로 계산 되었다. **Fig.32**에서 안전계수를 보면 최저 2.4로 ISO 규격에 부합됨을 알 수 있다.

4. 결 론

유한요소 해석을 통해 해석대상에 대한 최대 응력값과 최대 변위를 계산 하여 보았다. ISO 1472-2 의 '기본 정 정격 하중' 항을 보면 '전체 영구 변형량이 회전체 직경의 0.0001배'로 정의 되어 있으며 이때의 응력값은 4200MPa로 정의 되어 있다. 이 규약에 따르면 안전 계수는 2이상 되도록 정의 하고 있으며 Model은 위의 하중조건에서 약 최저 2.4에서 최고 20 이상 까지 안전계수가 있다고 평가 되었다.

따라서 정하중 상태에서의 구조적 결함이 없을 것으로 판단된다.

참고문헌

(1) Choi, Jae Seok, 2004, "Vibration Analysis and Application to a Linear Motion Guide Supported by Rolling Ball Vearings", Yonsei University.

(2) "ISO 14728-1 Rolling bearings . Linear motion rolling bearings .Part 1 Dynamic load ratings and rating life"

(3) "ISO 1472-2 Rolling bearings . Linear motion rolling bearings .Part 2 Static load ratings"

(4) KS B-2012, 1995, "Rolling Bearing-Designation", Korean Standards Association

(5) KS B-2013, 1990, "Boundary Dimensions For Rolling Bearings", Korean Standards Association

(6) KS B-2015, 1990, "Measuring Methods for Rolling Bearings", Korean Standards Association

(7) Kang Hak Koung, 2007, "Ansys Workbench", Sigmapress Co.,Ltd

(8) KS B-2020, 1991, "Static Load Ratings for Rolling Bearings, Korean Standards Association

(9) "Total Linear Motion Solution", SBC Linear Co.,Ltd