

리니어 가이드 웨이의 접촉각에 관한 연구

이선곤[†] · 박영기

인하대학교 기계공학과

(2009. 1. 19. 접수 / 2009. 8. 4. 채택)

A Study on Contact angle of the Linear Guide Way

Sun Kon Lee[†] · Young Gee Park

Department of Mechanical Engineering, Inha University

(Received January 19, 2009 / Accepted August 4, 2009)

Abstract : This research investigates contact angle of Linear Guide Way through a experimental result and theoretical analysis. Since last ten years, most of researchers who concerned with the precision machinery and semiconductor device production etc. so the researches about Linear Guide Way have been unnoticed. The precision machinery and semiconductor device production system has the principle which transfers the mechanical moving to accuracy position control. The Linear Guide Way system has the principle which transfers mechanical moving to accuracy position control is very important to improve performance of the precision machinery and semiconductor device production system. So, In this research, in order to improvement for producing Linear Guide Way, bearing loading analysis and contact angle change through Linear Guide Way theoretical analysis and bearing modeling. Through this study, we may expect that there will be more improvement for producing Linear Guide Way

Key Words : linear guide way, linear motion bearing, angular contact ball bearing, contact angle

1. 서론

리니어 가이드 웨이는 약 40년 전에 실용화가 된 비교적 역사가 짧은 구름 기계요소이다. 리니어 가이드 웨이는 종래의 미끄럼 안내에 비하여 마찰계수가 1/50으로 대폭 감소되어 로스트 모션(Lost Motion) 없이 위치결정 정밀도가 1자리 향상됨과 동시에 고속운동이 가능하여 고정밀도의 생산성이 높은 기계를 만들 수 있다. 또한 회전용 구름베어링에 준하여 여러 가지 성능을 평가하면서 설계되어 고속화, 고정밀도화, 성력화 및 성에너지화 등 시대의 요망에 부응하기 위하여 공장기계를 비롯하여 각종 산업기계나 반도체 제조장치 등에 공급되어 사용되고 있다.

우리나라의 리니어 가이드 웨이 산업은 1997년 국내 S사에서 생산을 시작하였으며 지속적인 연구 개발로 근래에는 수출이 괄목한 성장을 보이고 있고, 신기술의 개발과 연구 활동이 꾸준하게 진행되고 있다.

최근 산업현장에서는 고능력, 고생산성을 요구하며, 고품질의 리니어 가이드 웨이를 요구하고 있으나, 아직 우리나라 리니어 가이드 웨이 생산기술은 외국기술 및 장비에 대한 의존도가 높다. 따라서 본 연구는 산업 분야의 기초가 되고 있는 리니어 가이드 웨이의 구름회전, 접촉응력, 변형에 대한 탄성 역학적 계산을 이용하여 접촉각의 변화에 대한 연구를 하고자 한다.

2. 직선베어링운동의 국내·외 동향

저소음화, 고속화로 발전하고 있으며, 제품의 특성상 높은 기술력을 갖는 기술집약적 품목으로서 가공기술, 금형제작기술, 열처리기술, 소재기술, 조립기술의 발달이 필수적이다¹⁾.

2.1. 해외동향

리니어 가이드 웨이의 최초 개발은 1932년 프랑스 특허청이 인가한 리니어 가이드 웨이가 시초라 할 수 있으며, 이를 바탕으로 하여 1944년 미국에서 Linear Bushing을 개발하여 Machine Tools에 사용

[†] To whom correspondence should be addressed.
sun643@chol.com

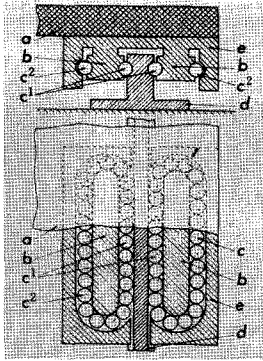


Fig. 1. patent in France, 1932.

한 것을 시작으로, 1971년 일본의 THK에서 볼스플라인의 생산과 이를 응용한 리니어 가이드 웨이를 개발하여 현재의 형상을 갖춘 리니어 가이드 웨이가 탄생하기 시작하였다²⁾.

2.2. 국내동향

1980년대 최초로 국내에 소개되어 수입을 통하여 공급되어 오다가, 1990년 국내 기업과 일본 THK의 합작을 통하여 Knock-Down 방식으로 조립생산 후 전용연삭기, 원재료 및 부품의 수입과 연삭가공 후 조립, 생산을 시작으로, 독자 설계과정을 거쳐 1997년 양산이 가능한 형태로 이루어져, 현재에 이르고 있으나 아직까지는 국내 기술 및 시장의 선도력이 약하여 외국에 대한 수입의존도가 높은 실정이다.

베어링 산업이 가지고 있는 문제 중 가장 크게 대두 되고 있는 것은 소재, 열처리 및 생산설비의 국내 개발 부진을 들 수 있다. 베어링 소재의 경우 국내 생산업체는 S55C를 사용하고 있으나, 일본이나 유럽의 각 메이커들은 S55C를 기반으로 하여 망간, 크롬 등을 첨가한 특수강을 사용하여, 내마모성 및 강도를 크게 향상시켜 사용하고 있다. 특수강을 일본 및 유럽지역에서 수입하여 사용할 경우 적기 공급부진과 원가상승 인한 원가 경쟁력 저하 요인으로 되고 있다. 이러한 베어링강의 국산 개발은 국내 수급 물량의 부족 및 관련업계의 저변 확대 부족등 국내 관련 업계와의 구조적인 문제점을 지니고 있다. 그 중 중요한 문제점은 원소재의 생산시 그 규모의 경제성이 형성되지 않아 완성품 산업의 원가상승요인이 발생되어 제품 경쟁력 저하 요인으로 영향을 미칠 수 있어, 투자 및 기술개발의 장애 요인이 되고 있다. 이러한 문제점 외에 소재의 정밀성을 기할 수 있는 관련 산업의 기술력

부족현상도 고려하지 않을 수 없다. 이러한 문제로 반도체산업, FPD 산업의 발달에 필수적인 정밀 메카트로닉스기기의 주요 부품인 리니어 가이드 웨이의 μm 의 초정밀성이 부족하다 할 수 있다. 따라서 좀 더 활발한 연구 활동과 제품개발, 생산기술을 통한 발전으로 선진국과의 기술격차를 줄여 나가야 된다.

3. 리니어 가이드 웨이의 종류

각종 산업기계 이송계에 설치되어 구조물을 직선으로 정확하게 안내하기 위한 안내기구이다.

3.1. 리니어 가이드 웨이의 구성요소

전동체의 종류에 따라 볼일 경우, 롤러일 경우, 또는 전동체가 순환운동을 하는 구조와 순환운동을 하지 않고 유한 스트로크 내에서 안내 작용을 하는 구조로 구분된다. 직선구름안내에서 가장 중요한 것은 안내를 구성하는 각 요소가 외부하중이나 모멘트 등을 어떻게 지지하고, 전동체에 어떤 부하가 분포하는가를 규명하는 일이다. 이 분포상태의 규명은 리니어 가이드 웨이가 어느 정도의 정적, 동적 부하능력을 갖고 있는가와 어느 정도의 주행수명이나 신뢰성을 갖게 되는 가를 예측할 수 있다. Fig. 2는 전동체 구름안내 방식요소 배치(configuration)를 제시한다. 전동체의 종류나 열수 및 접촉각과 그 방향에 따라, 배치(configuration)는 8종류가 되는데 이밖에도 볼 열수가 6열이거나 각 볼 열이 4점 접촉하는 형식, 롤러와 볼을 조합한 복합형 등 여러 가지 종류가 있다.

3.2. 리니어 가이드 웨이의 조합에 의한 분류

정면조합의 경우 두 베어링의 작용점 거리(a_0)가

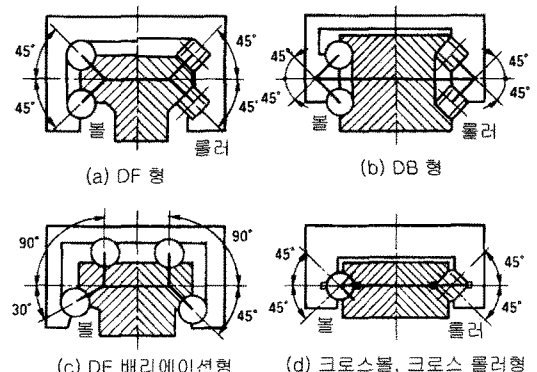


Fig. 2. Representative Configuration of Rolling Mechanism.

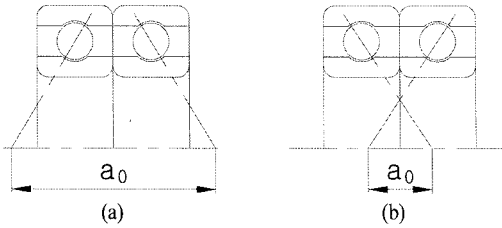


Fig. 3. (a) Angular Ball Bearings Mounted Front-to-front (DF type) and (b) Angular Ball Bearings Mounted Back-to-back (DB type).

작기 때문에 모멘트하중의 부하능력이 작은 반면에 허용 조심각이 작아 오차 흡수능력이 뛰어나다. 반면에 배면조합의 경우 두 베어링의 작용점 거리 (a_0)가 크기 때문에 모멘트하중의 부하능력이 크며, 허용조심각의 크므로 오차 흡수능력이 작다.⁴⁾

4. 이론 및 고찰

4.1. 리니어 가이드 웨이의 기본 이론

Hertz의 계산식에 근거하여 볼의 접촉응력, 변형

	$P_{max} = 0.388 \sqrt{\frac{16PE^2}{d^2}}$ $P = \left(\frac{P_{max}}{0.388}\right)^3 \frac{d^2}{16E^2}$
	$a = 1.109 \sqrt{\frac{P}{E} \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}}$ $\delta = 2.46 \sqrt{\frac{P^2}{E^2} \frac{r_1 + r_2}{r_1 r_2}}$ $P_m (\text{평균압력}) = \frac{P}{\pi a^2} = \frac{1}{1.109 \pi^2} \sqrt{PE^2 \left(\frac{r_1 + r_2}{r_1 r_2}\right)^2}$ $P_{max} = 1.5 P_m = 0.388 \sqrt{PE^2 \left(\frac{r_1 + r_2}{r_1 r_2}\right)^2}$
	$P_{max} = 0.388 \sqrt{\frac{PE^2}{d^2}}$ $P = \left(\frac{P_{max}}{0.388}\right)^3 \frac{d^2}{E^2}$
	$P_{max} = 0.388 \sqrt{\frac{4PE^2}{d^2}}$ $P = \left(\frac{P_{max}}{0.388}\right)^3 \frac{d^2}{4E^2}$

Fig. 4. contact stress per Ball.

에 대한 탄성 역학적 계산은 볼이 평면에 접촉할 때 σ_{max} 의 값은 압축력 크기가 같은 볼을 접할 때의 2배가 되고, 볼의 2배 지름이 볼면에 내접할 때는 4배가 된다. 즉, 볼끼리의 외접시키는 것보다 내접시키는 것이 좋다는 것이 리니어 가이드 웨이의 이론의 시작이다.

4.2. 베어링의 형상 및 모델링

볼베어링에서 리니어 가이드 웨이의 기본이론이 시작되었으며, 본 논문에서는 볼베어링의 접촉해석으로 형상함수를 선택하였다. 해석의 편의를 위해 Fig. 5는 볼과 궤도륵의 형상함수, 즉 두 표면간의 간극을 계산한 것으로 궤도륵의 경우 볼이 안착되는 홈부와 곡률부 그리고 쇼울더(shoulder)부로 나누어 각각 식 (1), (2), (3)에 나타내었다⁵⁾.

$$Z = \sqrt{\{R_r - (r_f^2 - X^2)^{1/2}\}^2 - Y^2} \quad \text{at } X_v \geq X \quad (1)$$

$$Z = \sqrt{\{R_r + (r_f^2 - (X_f - X)^2)^{1/2}\}^2 - Y^2}$$

$$\text{at } X_s \geq X \geq X_v \quad (2)$$

$$Z = \sqrt{(R_s^2 - Y^2)} \quad \text{at } X \geq X_s \quad (3)$$

여기서, R_r : 베어링 축중심에서 궤도륵의 곡률중심까지의 거리
 r_s : 궤도륵의 곡률반경
 $R_f = R_r - r_f$: 쇼울더의 반경
 r_f : 홈부와 쇼울더 사이 곡률부의 곡률반경

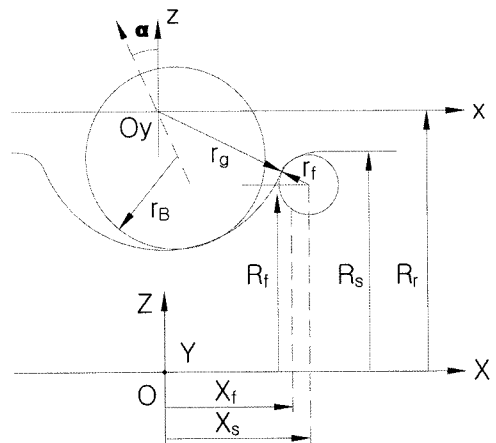


Fig. 5. Coordinates of raceway and ball.

4.3. 베어링의 하중해석

볼베어링의 기준 좌표계와 볼베어링에 작용하는 하중과 변위성분들을 Fig. 6에 나타내었다. 베어링 내륜의 기하학적 중심에 좌표계의 중심을 위치시켜 축 방향(X-axis)과 반경 방향(Y-axis, Z-axis) 기준 좌표를 표시하였으며, $F = \{F_x, F_y, F_z, M_y, M_z\}^T$ 로 베어링에 가해지는 5개의 외력성분을 나타내며, $\delta = \{\delta_x, \delta_y, \delta_z, \theta_y, \theta_z\}^T$ 로 고정 외륜에 대한 내륜의 5개의 상대 변위를 나타내었다. 각각의 전동체는 케이지에 의하여 원호 방향으로 등간격 위치하고, 각 전동체의 각 위치(ψ_j)는 $\frac{2\pi}{z}(j-1)$ 가 된다. 또한, 볼에 작용하는 원심력과 자이로스콥 모멘트를 무시하면 내·외륜의 전동체 하중은 $Q_{oj} = Q_{ij} = Q_j$ 이고 접촉각은 $\alpha_{oj} = \alpha_{ij} = \alpha_j$ 이다.

Fig. 7에서 변형 후 내·외륜 궤도 곡률 중심간의 거리(s_j)는 $Bd_B + \delta_{ij} + \delta_{oj} = \sqrt{A_{1j}^2 + A_{2j}^2}$ 로 여기서 $Bd_B = (f_i + f_o - 1)d_B$ 는 변형전의 궤도 곡률 중심간의 거리이고 δ_{ij} 는 j번째 볼과 내륜 궤도, δ_{oj} 는 볼과 외륜 궤도사이의 변형량이다.

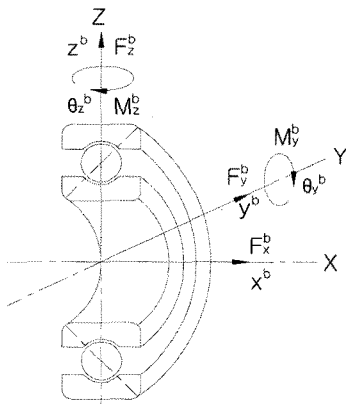


Fig. 6. Loads and displacement of ball bearing.

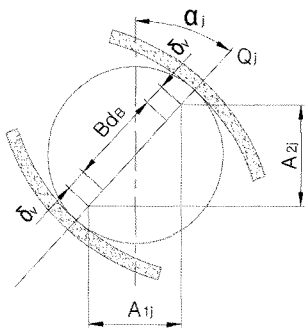


Fig. 7. Shape of ball-raceway contact under static loads.

$\delta_j = \delta_{ij} + \delta_{oj} = s_j - Bd_B = \sqrt{A_{1j}^2 + A_{2j}^2} - Bd_B$ 로 이 경우, 볼과 궤도륜의 접촉각(α_j)은 $\tan^{-1} \left[\frac{A_{1j}}{A_{2j}} \right]$ 로 구할 수 있다. 여기서 δ_j 는 볼과 내·외륜사이의 변형량의 합인 전체 변형량이다⁵⁾.

Hertz 식으로 부터 전동체 하중 Q_j 는 $K_n \delta_j^{3/2}$ 이며, 여기서 K_n 은 볼과 내륜, 볼과 외륜 접촉 변형상수의 조화평균으로 다음과 같다.

$$K_n = \left[\frac{1}{(1/K_i)^{2/3} + (1/K_o)^{2/3}} \right]^{3/2} \quad (4)$$

베어링에 가해지는 외력과 각 전동체 하중과의 힘·모멘트 평형 관계식은 다음과 같은 5개의 식으로 유도된다. 이들 식은 비선형 방정식으로 Newton-Raphson 방법에 의해 5개의 미지수 $\{\delta_x, \delta_y, \delta_z, \theta_y, \theta_z\}$, 전동체 하중(Q)과 접촉각(α)의 분포도 구할 수 있다⁵⁾.

$$F_x - \sum_{j=1}^z Q_{ij} \sin \alpha_{ij} = 0 \quad (5)$$

$$F_y - \sum_{j=1}^z Q_{ij} \cos \alpha_{ij} \sin \psi_j = 0 \quad (6)$$

$$F_z - \sum_{j=1}^z Q_{ij} \cos \alpha_{ij} \cos \psi_j = 0 \quad (7)$$

$$M_y - R_i \sum_{j=1}^z Q_{ij} \sin \alpha_{ij} \cos \psi_j = 0 \quad (8)$$

$$M_z - R_o \sum_{j=1}^z Q_{ij} \sin \alpha_{ij} \sin \psi_j = 0 \quad (9)$$

4.4. 전동 흡의 효과

Fig. 8에서 1개의 볼로 받을 수 있는 하중은 볼 직경이 클수록 커지고 전동 흡의 반경의 크기에 따라서도 변한다. 전동 흡 반경이 볼 경에 근접하여 접촉 면적이 커지면 허용하중도 커진다. 반대로

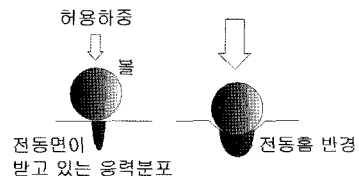


Fig. 8. Stress distribution of Contact area.

전동 홈 반경이 볼 반경보다 커지게 되면 볼의 허용하중도 작아진다.

전동 홈의 형상은 Fig. 9에서와 같이 크게 2가지로 구분하면 DF접촉구조인 서클러 아크 홈과 DB 접촉구조의 고딕아크 홈으로 나누어지며, 서클러 아크 홈의 단면형상은 1개의 원호로 이루어져 있다. 이 전동 홈을 맞대고 있는 레일과 캐리어 본체의 볼의 접촉이 2곳이 되어 2점 접촉구조로 되어 있는 반면 고딕아크 홈의 경우 단면형상은 2개의 원호로 이루어져 있어 레일과 볼의 접촉이 4인 4점 접촉구조로 되어 있다. 리니어 가이드 웨이가 상·하·좌·우 방향의 하중을 받을 경우 서클러 아크 홈의 경우 2점 접촉구조이기 때문에 레일의 전동 홈의 4열이 필요하고, 고딕아크 홈의 경우 4점 접촉구조로 레일의 전동 홈은 2열이 좋다.

4.5. 접촉부의 이동

레일과 블록의 가공형상을 Fig. 10에 나타내었다. 레일과 블록의 전동 홈은 볼 반경보다 조금 큰 반경($R=0.52\sim0.56 Da$)이 되도록 여러 가지 행정별로 연삭되고 있으며 레일 측 전동 홈 피치보다 블록 전동 홈 중심 피치 쪽이 작게 되도록 치수가 관리되고 있기에 블록을 레일에 조립할 때 레일과 블록 홈 간의 거리 A, A_b 가 발생하여 접촉각 α 가 발생하므로, 볼 접촉점 4곳의 치수는 오차가 발생하게 된다. 이 오차에 의하여 4곳의 볼 접촉부간 거리 A, A_b 와 접촉각 α 가 다르게 되어 내부하중이 균형을 이루지 않고 불안정한 상태가 된다. 이때 각 볼 접촉부에 있어 평행상태를 이루려고 상·하·좌·우 회전방향으로 균형이 되도록 블록은 미세이동을 한다. 이러한 일련의 과정을 통해 접촉각은 미세하게 변하게 되며, 이러한 현상을 자동조정능력이라 한다.

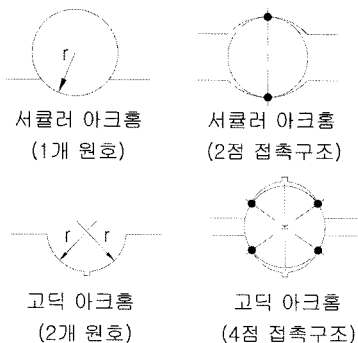


Fig. 9. Contact Structure of raceway.

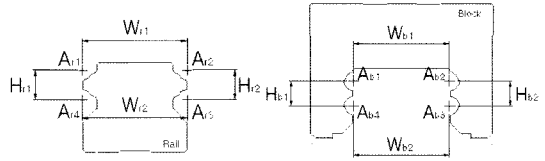


Fig. 10. Distance of Ball contact point.

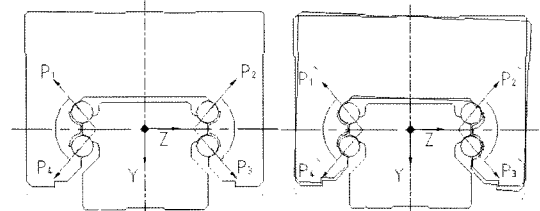


Fig. 11. A change of Internal load according to ball contact point change.

Fig. 11에 따르면 자동조정능력이 이루어지기전 4곳의 부하하중(P_1, P_2, P_3, P_4)은 상·하·좌·우, 회전 방향으로 불균형상태가 되며, 부하하중(P_1, P_2, P_3, P_4)이 균형이 되도록 블록은 $\delta_y, \delta_z, \tan\theta$ 만큼 미세이동을 하여 접촉각 α 는 $\alpha_1\sim\alpha_4$ 으로 되고, 부하하중 P_1, P_2, P_3, P_4 는 P_1', P_2', P_3', P_4' 로 된다. 이러한 과정으로 리니어 가이드 웨이는 블록 내부하중이 균형을 이루는 자동조정능력이 발생한다. 이러한 현상에 의해 리니어 가이드 웨이의 기능 저하를 일으키지 않고, 자동조정능력을 유지하는가 가장 중요한 요소가 되고, 이는 접촉각을 이루는 가장 중요한 요소이다.

4.6. 볼 접촉부의 해석

Fig. 12를 보면 초기상태(접촉각 α , 볼파선 표시)보다 볼이 δ 만큼 Y방향으로 변위하며, 레일 측, 홈 중심은 블록 측, 홈 중심 A_b 가 A_b' 로 이동하고 볼은 δ_b 만큼 탄성변형을 하여, P_b 가 되는 하중이 발생한다. 볼은 F 가 되는 마찰력의 偶力으로 홈을 따라서 회전하고, 볼의 위치가 파선표시 위치에서 실선표시 위치로 변화한다. 그리고 접촉각이 α 에서 α' 로 변화하고 이 볼과 홈간에 미끄럼은 일어나지 않아, 응력분포도 균일하게 된다. 따라서 리니어 가이드 웨이는 볼의 탄성변형, 접촉각 변화, 구름회전이라는 3가지의 동작으로 균형을 유지하기 위해 일련의 과정을 가지고 있으며, 이 과정 중에 미끄럼은 전혀 동반하지 않고 응력분포도 균일하게 유지하고 있다.

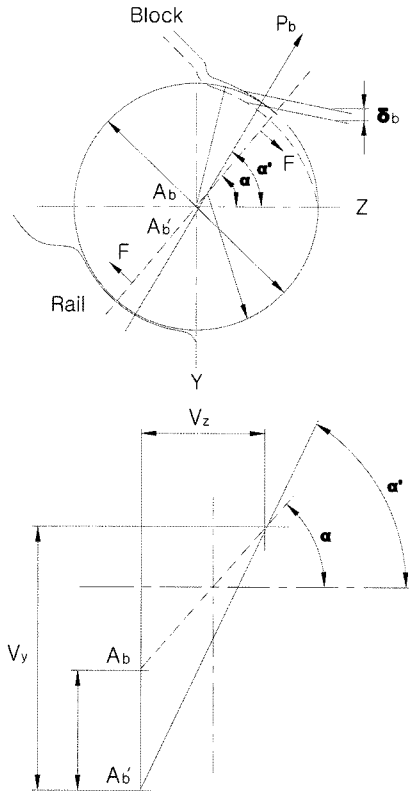


Fig. 12. Analysis of ball contact point.

5. 결론

최근 반도체 산업, FPD 산업의 발달에 필수적인 정밀 메카트로닉스기기의 주요 부품인 리니어 가이드 웨이의 μm 의 초정밀화 개발이 필연적으로 요구되고 있으며, 이와 관련하여 그 제조공정과 소재 산업 등 여러 제반 관련 산업의 발전이 리니어 가이드 웨이 발전에 필수불가결한 요소라고 생각된다. 따라서 본 연구에서는 리니어 가이드 웨이의 기본이론과 볼베어링의 형상 및 모델링을 통하여 볼과 궤도면의 곡률 형상 및 베어링의 하중 해석과 접촉각의 변화를 살펴보았으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 1개의 볼로 받을 수 있는 하중은 볼 직경이 클수록 커지지만, 전동 홈의 반경 크기에 따라서도 변한다. 전동 홈 반경이 볼 경에 근접하여 접촉 면적이 커지면 허용하중도 커지게 되고, 반대로 전동 홈 반경이 볼 반경보다 커지게 되면 볼의 허용하중도 작아진다.

2) 레일과 블록의 조립 시 볼 접촉점 4곳의 치수에서 오차가 발생하게 되며, 이 오차에 의해 4곳의 볼 접촉부간 거리와 접촉각은 다르게 된다. 이 상태에서는 내부하중이 균형을 이루지 않고 불안정한 상태가 되므로 각 볼 접촉부에 있어 평행상태를 이루려고 상·하·좌·우 회전방향으로 균형이 되도록 블록은 미세이동을 한다. 이러한 과정을 통해 접촉각은 미세하게 변하게 되며, 이러한 현상을 자동조정능력이라 한다.

3) 리니어 가이드 웨이는 볼의 탄성변형, 접촉각 변화, 구름회전이라는 3가지의 동작으로 균형을 유지하기 위해 일련의 과정을 가지고 있으며, 이 과정 중에 미끄럼은 전혀 동반하지 않고 응력분포도 균일하게 유지하고 있다.

참고문헌

- 1) Korea Industrial Technology Foundation, "Linear Motion Guide", Materials & Components, Technology Roadmap Project Report, pp. 265~268, 2003.
- 2) NSK, Japan, "NSK Catalog CAT. No. 3155a", pp. A-8, 2000.
- 3) 清水 武夫, 日本 日刊工業新聞社, "機械技術"直線 구름案内方式, 1995.
- 4) KBC BEARINGS, "Rolling Bearing Catalog No. GB 41 500 KA", pp. 157, 2000.
- 5) Tae-Wan Kim and Yong-Joo Cho, "Stress based Fatigue Life Prediction For Ball Bearing", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 5, pp. 44~55, May 2007.
- 6) 寺町 彰博, 日本 日刊工業新聞社, "リニアシステム事始め", pp. 39~40, June 2000.