

수평형 머시닝센터의 내구성 예측 시스템 개발

김기상*, 김석일**

Development of a Durability Estimation System for Horizontal Machining Centers

Ki-Sang Kim* and Seok-Il Kim**

Abstract

One of the important considerations in designing a machine tool is the durability. In this study, a durability estimation system for horizontal machining centers is developed to evaluate the effects of structural specification and driving conditions on the durability. All loads such as weights, inertia forces, cutting force and so on, are automatically transferred from the upper elements to the lower elements by the force flows which can be derived from the structural code of horizontal machining centers. And the external loads applied to the motion elements such as bearings, LM guides, ball screws and so on, are determined by the equilibrium conditions of force and moment. Especially, the durability of horizontal machining centers is estimated based on the lifes of motion elements operating under the desired driving conditions.

Key Words : 수평형 머시닝센터, 내구성, 수명, 하중

1. 서론

국내 공작기계 산업은 선진국 모델의 모방 수준에서 벗어나 서서히 독자 모델을 생산하는 단계에 접어들고 있다. 그러나 그 동안 지나치게 생산기술에 치중하였던 관계로 체계적인 설계, 해석, 평가기술은 아직 제대로 확보하지 못하고 있는 것이 현실이다. 특히 공작기계의 성능을 가늠하는 중요 항목의 하나인 내구성⁽¹⁾은 단편적으로 베어링, 안내면, 볼스크류 등과 같은 요소 단위로 다루는 수

준에 불과하고, 공작기계의 구조적 특징과 운동 형태를 모두 고려해서 공작기계의 내구성을 예측하는 연구 사례는 거의 찾아 볼 수 없는 실정이다.

지금까지 공작기계에 대한 설계, 해석, 평가는 대부분 표준부품 정보, 실험 정보, 경험식, 경험자의 판단 등을 복합적으로 고려해서 창의적이고 동시에 반복적인 작업 형태로 수행되어 왔다.⁽²⁾ 그러나 최근 대외경쟁력 확보 차원에서 공작기계에 대한 설계, 해석, 평가에 대한 중요성이 강조되고 있고, 이러한 작업의 체계화를 통해서 생산성을 극

* 한국항공대학교 대학원(kimks95@mail.hankong.ac.kr)

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

대화하려는 목적으로 전용 소프트웨어 시스템의 개발에 많은 관심을 가지기 시작하였다.

본 연구에서는 수평형 머시닝센터의 내구성을 설계단계에서 예측하고, 그 결과를 토대로 내구성을 고려한 설계를 수행할 수 있는 기반을 구축하기 위해서 수평형 머시닝센터의 구조적 제원과 운전조건이 내구성에 미치는 영향을 체계적으로 해석할 수 있는 시스템을 개발하였다. 일반적으로 내구시험이 속도 선도 및 하중 선도를 토대로 수행된다는 점을 고려하여 절삭공정을 모사하는 이송속도 선도와 절삭력 선도를 설정한 후, 그것들을 이용해서 시변적인 관성력과 절삭력을 매순간 얻어내는 방법을 사용하였다. 특히 운동체의 자중, 관성력, 절삭력 등과 같은 부가 하중은 기계의 구조 코드에 의해서 정의되는 힘의 흐름을 토대로 상위 구조요소에서 하위 구조요소로 자동 상속되도록 하였으며, 부가 하중과 구조적 제원에 의해서 결정되는 힘과 모멘트에 대한 평형조건을 토대로 베어링, LM(linear motion) 가이드, 볼스크류 등과 같은 운동요소에 작용하는 하중을 결정하였다. 그리고 각각의 운동요소에 대한 제원, 하중, 속도, 운전상태를 토대로 수명을 예측하였으며, 수평형 머시닝센터의 수명은 운동요소의 수명 중에서 가장 짧은 수명으로 간주하였다. 그리고 본 연구에서는 수평형 머시닝센터의 내구성 예측 시스템을 개발하기 위해서 윈도 우즈 98/NT 환경과 Visual C++6.0을 사용하였으며, 수평형 머시닝센터의 운전상태를 가시화하기 위해서 B-Rep 솔리드모델러인 SmartSolid⁽³⁾를 이용하였다.

2. 주축계의 내구성 예측

2.1 주축 베어링의 하중

공작기계의 주축계는 주축, 슬리브, 스페이서 등과 같은 회전부품들과 주축을 지지하는 베어링들로 구성된다. Timoshenko 이론에 토대로 둔 주축계의 수학적 모델은 Fig. 1에서와 같이 주축요소의 양쪽 경계점에서 각각 2개씩의 병진운동과 회전운동을 하는 8 자유도의 운동방정식을 조합함으로써 식 (1)의 형태로 구성할 수 있다.⁽⁴⁾

$$(M_T^e + M_R^e) \ddot{q}^e + (\eta_v^e K_B^e - \Omega G^e) \dot{q}^e + \left[\frac{1 + \eta_h^e}{\sqrt{1 + \eta_h^{e2}}} K_B^e - K_A^e + \left(\eta_v^e \Omega + \frac{\eta_h^e}{\sqrt{1 + \eta_h^{e2}}} \right) K_C^e \right] q^e = Q^e \quad (1)$$

여기서 $q^e = \{q_1^e \ q_2^e \ q_3^e \ q_4^e \ q_5^e \ q_6^e \ q_7^e \ q_8^e\}^T$ 는 주축 요소의 변위벡터, Q^e 는 주축요소에 작용하는 외력벡터, η_v^e 와 η_h^e 는 주축요소 재료의 점성감쇠계수와 이력감쇠계수, Ω 는 주축회전수이다. 또한 M_T^e 와 M_R^e 는 주축요소의 병진질량행렬과 회전질량행렬, K_A^e 와 K_B^e 는 축하중 강성행렬과 굽힘 강성행렬, G^e 와 K_C^e 는 자이로스코픽행렬과 순환행렬을 각각 의미한다.

수평형 머시닝센터의 주축 베어링으로 채용되고 있는 구름 베어링의 특성은 등방성이라고 간주할 수 있는데, 등방성 베어링의 수학적 모델은 식 (2)와 같이 주어진다.⁽⁴⁾

$$C^b \dot{q}^b + K^b q^b = Q^b \quad (2)$$

여기서 $q^b = \{q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4\}^T$ 는 베어링 지지부의 변위벡터, Q^b 는 베어링 지지부의 반력벡터이다. 또한 베어링의 감쇠행렬과 강성행렬인 C^b 와 K^b 는 반경방향의 감쇠계수 C_R 과 강성계수 K_R , 모멘트방향의 감쇠계수 C_M 과 강성계수 K_M 에 의해서 일반적으로 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$C^b = \begin{pmatrix} C_{Rxx} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{Ryy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{Mxx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{Myy} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$K^b = \begin{pmatrix} K_{Rxx} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{Ryy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{Mxx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{Myy} \end{pmatrix} \quad (4)$$

식 (3)과 (4)에 제시한 주축요소와 베어링의 운동방정식들을 절점에서의 연속조건과 평형조건을 토대로 조합하면 공작기계 주축계의 운동방정식은 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$M \ddot{q} + C \dot{q} + K q = Q \quad (5)$$

여기서 주축계의 변위벡터 q 와 외력벡터 Q 는 주축요소의 수가 n 인 경우에 $(4n+4)$ 의 크기를 갖는다. 또한 주

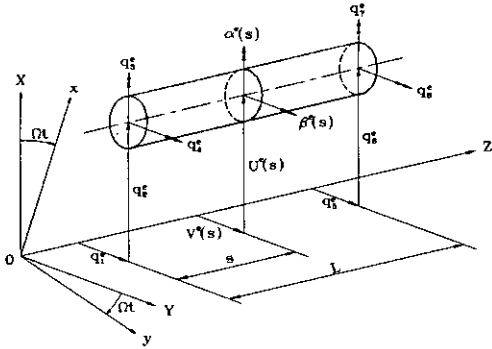


Fig. 1 Spindle element model

축계의 질량행렬 M , 감쇠행렬 C 및 강성행렬 K 의 크기는 모두 $(4n+4) \times (4n+4)$ 가 된다.

그리고 주축계의 변위벡터를 얻기 위해서는 2계 미분방정식인 식 (5)를 다음과 같은 1계 미분방정식의 형태로 재구성할 필요가 있다.

$$\dot{P} = -Dp + P \quad (6)$$

여기서 $D = \begin{pmatrix} 0 & -I \\ M^{-1}K & M^{-1}C \end{pmatrix}$, $p = \begin{pmatrix} q \\ \dot{q} \end{pmatrix}$, $P = \begin{pmatrix} 0 \\ M^{-1}Q \end{pmatrix}$ 를 의미한다.

결과적으로 베어링의 반경방향 하중 F_r 은 식 (6)을 적분하는 과정에서 얻어지는 베어링 지지부의 변위벡터 q^b 를 식 (2)에 대입해서 산정한 베어링 지지부의 반력벡터 Q^b 로부터 결정할 수 있다. 또한 i 번째 베어링의 축방향 하중 F_a^i 는 주축의 축방향 강성이 매우 크고, 축방향의 관성과 감쇠효과를 무시할 수 있다고 가정하면 주축에 작용하는 축방향 하중 Q_a 와 i 번째 베어링의 축방향 강성 K_a^i 에 의해서 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$F_a^i = K_a^i \cdot \frac{Q_a}{\sum_{j=1}^m K_a^j} \quad (7)$$

여기서 m 은 주축을 지지하는 베어링의 수이다.

2.2 주축 베어링의 수명

동하중 상태의 베어링 수명은 DIN ISO 76 및 281에서 베어링 파손의 원인이 되는 소재 파로에 기준을 두고 평

가하는데, 베어링의 호칭 정격수명 L 은 정격 동하중 C , 등가 동하중 P , 수명지수 p 에 의해서 식 (8)과 같이 주어진다.⁽⁶⁾

$$L = \left(\frac{C}{P} \right)^p (10^6 \text{ rev.}) \quad (8)$$

여기서 베어링의 호칭 정격수명 L 은 시험 베어링의 90% 이상이 얻을 수 있는 수명을 의미한다. 그리고 등가 동하중 P 는 반경방향 하중과 축방향 하중이 동시에 작용하는 경우의 복합 하중이며, 수명지수 p 는 볼 베어링과 롤러 베어링에 대해서 각각 3과 10/3으로 주어진다.

특히 반경방향 하중 F_r 과 축방향 하중 F_a 가 베어링에 작용하는 경우의 등가 동하중 P 는 다음과 같이 산정한다.

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \quad (9)$$

여기서 X 와 Y 는 베어링의 형식에 따라서 결정되는 반경방향 계수와 축방향 계수이다.

베어링의 회전속도가 일정한 경우에는 베어링의 수명을 식 (10)과 같이 시간 단위로 표현할 수 있다.

$$L_h = \frac{L \cdot 10^6}{n \cdot 60} (\text{hr}) \quad (10)$$

여기서 L_h 는 시간 단위로서 나타낸 베어링의 정격수명이고, n 은 회전속도(rpm)이다.

그러나 매순간 베어링의 회전속도와 하중이 변하는 경우에는 다음과 같이 주어지는 베어링의 평균 회전속도 n_m 과 평균 등가 동하중 P_m 을 토대로 베어링의 수명을 산정한다.

$$n_m = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T n_t dt \quad (11)$$

$$P_m = \sqrt[3]{\frac{1}{T \cdot n_m} \cdot \int_0^T P_t^3 \cdot n_t dt} \quad (12)$$

여기서 T 는 주기, n_t 와 P_t 는 매순간 주어지는 베어링의 회전속도와 하중을 의미한다.

앞에서 결정되는 정격수명 L 및 L_h 는 접촉면이 다량의 윤활유에 의해서 분리되어 있고, 높은 청결도와 정확한 베어링의 조립상태를 유지하는 경우에 적용된다. 따라서 베어링의 사용조건이 이와 다를 경우에는 베어링의 수명이 달라지게 된다. DIN ISO 28에서는 베어링의 재료상태, 제작방법, 사용조건 외에도 윤활조건에 의해서 베어링의 수명이 달라지는 것으로 규정하고 있다. 또한 DIN ISO 281에서는 규정되어 있지 않지만, 베어링의 온도도 수명에 많은 영향을 준다. 이러한 점을 고려한 베어링의 수명 L_{na} 및 L_{hna} 는 다음과 같다.

$$L_{na} = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot f_i \cdot L(10^6 \text{ rev.}) \quad (13)$$

$$L_{hna} = a_1 \cdot a_2 \cdot a_3 \cdot f_i \cdot L_h(\text{hr}) \quad (14)$$

여기서 a_1 은 파손 가능성을 고려한 수명 수정계수, a_2 는 소재를 고려한 수명 수정계수, a_3 는 사용조건을 고려한 수명 수정계수, f_i 는 베어링 온도를 고려한 온도계수이다. 특히 수명 수정계수 a_2 는 베어링 소재의 성분 및 열처리 상태에 따라 결정되며, 수명 수정계수 a_3 는 베어링 소재의 성분 변화에 영향을 주는 온도, 윤활상태의 적합성 여부에 따라서 결정된다.

동하중을 받는 베어링의 적정한 선정 여부를 판단하기 위해서는 동적 응력계수 f_L 과 속도계수 f_n 을 이용하게 되는데, 그 정의는 다음과 같다.

$$f_L = \rho \sqrt{\frac{L_h}{500}} \quad (15)$$

$$f_n = \rho \sqrt{\frac{L_h}{500}} \quad (16)$$

특히 베어링에 요구되는 동적 응력지수 f_L 은 베어링의 사용조건 외에도 강성, 무게, 상관 부품과의 관련성, 최대 하중 등을 고려해서 결정할 필요가 있으며, 머시닝센터의 경우에는 3~4.5 정도의 값을 가져야 한다. 그리고 동적 응력지수 f_L 과 속도계수 f_n 의 관계는 식 (17)과 같다.

$$f_L = \frac{C}{P} \cdot f_n \quad (17)$$

3. 이송계의 내구성 예측

3.1 이송계의 하중

급이송이나 절삭이송을 하는 이송계에는 운동체의 자중 외에도 관성력, 절삭력 등이 추가로 작용한다. 따라서 정적인 상태에서 얻은 하중만으로는 이송계의 하중을 모두 표현할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 LM 가이드와 볼스크류의 조합으로 구성된 이송계에 대해서 운동체의 자중, 관성력, 절삭력 등을 포함한 하중 해석을 수행하였다. 특히 이송계의 하중 해석에서는 LM 가이드의 블록에 작용하는 하중과 볼스크류 및 지지 베어링에 작용하는 하중을 예측하는 데 초점을 두었다.

Fig. 2, 3, 4는 칼럼이동형 수평형 머시닝센터의 X축, Y축, Z축 이송계에 대한 힘과 모멘트에 대한 평형조건을 도출하기 위한 모델을 보여주고 있으며, 그에 대응되는 하중 관계식은 식 (18), (19), (20)에 제시하였다. 각각의 식에서 W 는 운동체의 자중, a 는 운동체의 가속도, F 는 볼스크류에 의해서 전달되는 추력, R_x, R_y, R_z 는 운동체에 작용하는 X축, Y축, Z축 방향의 외력, P_x, P_y, P_z 는 LM

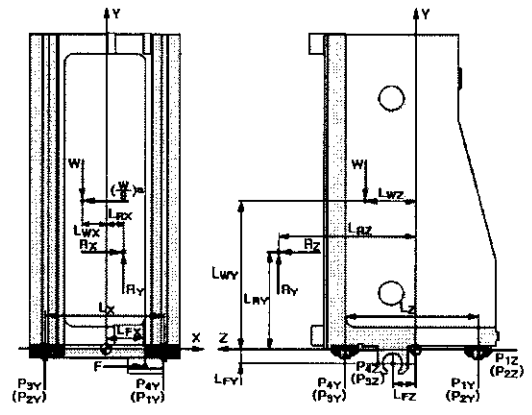


Fig. 2 X-axis slide model

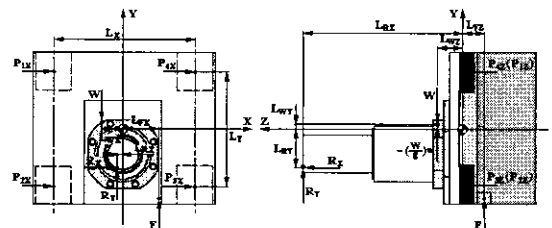


Fig. 3 Y-axis slide model

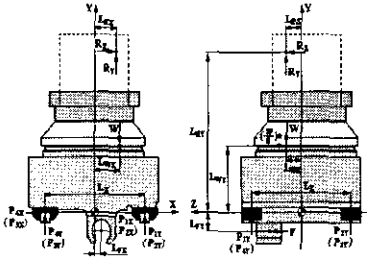


Fig. 4 Z-axis slide model

가이드 블록에 작용하는 X축, Y축, Z축 방향의 하중을 각각 의미한다.

$$P_{iv} = W \cdot \left(\frac{1}{4} - \frac{L_{WX}}{2L_X} - \frac{L_{WZ}}{2L_Z} \right) + R_X \cdot \frac{L_{RY}}{2L_X} + R_Y \cdot \left(-\frac{1}{4} - \frac{L_{RX}}{2L_X} + \frac{L_{RZ}}{2L_Z} \right) - R_Z \cdot \frac{L_{RY}}{2L_Z} - \frac{W}{g} \cdot a \cdot \frac{L_{WX}}{2L_X} - F \cdot \frac{L_{FY}}{2L_X} \quad (18-1)$$

$$P_{iv} = W \cdot \left(\frac{1}{4} + \frac{L_{WX}}{2L_X} - \frac{L_{WZ}}{2L_Z} \right) - R_X \cdot \frac{L_{RY}}{2L_X} + R_Y \cdot \left(-\frac{1}{4} + \frac{L_{RX}}{2L_X} + \frac{L_{RZ}}{2L_Z} \right) - R_Z \cdot \frac{L_{RY}}{2L_Z} + \frac{W}{g} \cdot a \cdot \frac{L_{WY}}{2L_X} + F \cdot \frac{L_{FY}}{2L_X} \quad (18-2)$$

$$P_{iv} = W \cdot \left(\frac{1}{4} + \frac{L_{WX}}{2L_X} + \frac{L_{WZ}}{2L_Z} \right) - R_X \cdot \frac{L_{RY}}{2L_X} + R_Y \cdot \left(-\frac{1}{4} + \frac{L_{RX}}{2L_X} + \frac{L_{RZ}}{2L_Z} \right) + R_Z \cdot \frac{L_{RY}}{2L_Z} + \frac{W}{g} \cdot a \cdot \frac{L_{WY}}{2L_X} + F \cdot \frac{L_{FY}}{2L_X} \quad (18-3)$$

$$P_{iv} = W \cdot \left(\frac{1}{4} - \frac{L_{WX}}{2L_X} + \frac{L_{WZ}}{2L_Z} \right) + R_X \cdot \frac{L_{RY}}{2L_X} + R_Y \cdot \left(-\frac{1}{4} - \frac{L_{RX}}{2L_X} - \frac{L_{RZ}}{2L_Z} \right) + R_Z \cdot \frac{L_{RY}}{2L_Z} - \frac{W}{g} \cdot a \cdot \frac{L_{WY}}{2L_X} - F \cdot \frac{L_{FY}}{2L_X} \quad (18-4)$$

$$P_{1z} = R_X \cdot \frac{L_{RZ}}{2L_X} + R_Z \cdot \left(-\frac{1}{4} - \frac{L_{RX}}{2L_X} \right) - \frac{W}{g} \cdot a \cdot \frac{L_{WZ}}{2L_X} + F \cdot \frac{L_{FZ}}{2L_X} \quad (18-5)$$

$$P_{2z} = -R_X \cdot \frac{L_{RZ}}{2L_X} + R_Z \cdot \left(-\frac{1}{4} + \frac{L_{RX}}{2L_X} \right) + \frac{W}{g} \cdot a \cdot \frac{L_{WZ}}{2L_X} - F \cdot \frac{L_{FZ}}{2L_X} \quad (18-6)$$

$$P_{3z} = -R_X \cdot \frac{L_{RZ}}{2L_X} + R_Z \cdot \left(-\frac{1}{4} + \frac{L_{RX}}{2L_X} \right) + \frac{W}{g} \cdot a \cdot \frac{L_{WZ}}{2L_X} - F \cdot \frac{L_{FZ}}{2L_X} \quad (18-7)$$

$$P_{4z} = R_X \cdot \frac{L_{RZ}}{2L_X} + R_Z \cdot \left(-\frac{1}{4} + \frac{L_{RX}}{2L_X} \right) + \frac{W}{g} \cdot a \cdot \frac{L_{WZ}}{2L_X} + F \cdot \frac{L_{FZ}}{2L_X} \quad (18-8)$$

$$P_{iz} = -W \cdot \frac{L_{WZ}}{2L_Y} - R_X \cdot \frac{L_{RZ}}{2L_X} + R_Y \cdot \frac{L_{RZ}}{2L_Y} + R_Z \cdot \left(-\frac{1}{4} + \frac{L_{RY}}{2L_Y} - \frac{L_{RX}}{2L_X} \right) - \frac{W}{g} \cdot a \cdot \frac{L_{WZ}}{2L_X} - F \cdot \frac{L_{FZ}}{2L_Y} \quad (19-1)$$

$$P_{iz} = W \cdot \frac{L_{WZ}}{2L_Y} - R_X \cdot \frac{L_{RZ}}{2L_X} - R_Y \cdot \frac{L_{RZ}}{2L_Y} + R_Z \cdot \left(-\frac{1}{4} + \frac{L_{RY}}{2L_Y} - \frac{L_{RX}}{2L_X} \right) + \frac{W}{g} \cdot a \cdot \frac{L_{WZ}}{2L_Y} + F \cdot \frac{L_{FZ}}{2L_Y} \quad (19-2)$$

$$P_{iz} = W \cdot \frac{L_{WZ}}{2L_Y} + R_X \cdot \frac{L_{RZ}}{2L_X} - R_Y \cdot \frac{L_{RZ}}{2L_Y} + R_Z \cdot \left(-\frac{1}{4} - \frac{L_{RY}}{2L_Y} - \frac{L_{RX}}{2L_X} \right) + \frac{W}{g} \cdot a \cdot \frac{L_{WZ}}{2L_Y} + F \cdot \frac{L_{FZ}}{2L_Y} \quad (19-3)$$

$$P_{4z} = -W \cdot \frac{L_{WZ}}{2L_Y} + R_X \cdot \frac{L_{RZ}}{2L_X} + R_Y \cdot \frac{L_{RZ}}{2L_Y} + R_Z \cdot \left(-\frac{1}{4} + \frac{L_{RY}}{2L_Y} - \frac{L_{RX}}{2L_X} \right) - \frac{W}{g} \cdot a \cdot \frac{L_{WZ}}{2L_Y} - F \cdot \frac{L_{FZ}}{2L_Y} \quad (19-4)$$

$$P_{1x} = W \cdot \frac{L_{WX}}{2L_Y} + R_X \cdot \left(-\frac{1}{4} + \frac{L_{RY}}{2L_Y} \right) - R_Y \cdot \frac{L_{RX}}{2L_Y} + \frac{W}{g} \cdot a \cdot \frac{L_{WX}}{2L_Y} + F \cdot \frac{L_{FX}}{2L_Y} \quad (19-5)$$

$$P_{2x} = -W \cdot \frac{L_{WX}}{2L_Y} + R_X \cdot \left(-\frac{1}{4} - \frac{L_{RY}}{2L_Y} \right) + R_Y \cdot \frac{L_{RX}}{2L_Y} - \frac{W}{g} \cdot a \cdot \frac{L_{WX}}{2L_Y} - F \cdot \frac{L_{FX}}{2L_Y} \quad (19-6)$$

$$P_{3x} = -W \cdot \frac{L_{WX}}{2L_Y} + R_X \cdot \left(-\frac{1}{4} - \frac{L_{RY}}{2L_Y} \right) + R_Y \cdot \frac{L_{RX}}{2L_Y} - \frac{W}{g} \cdot a \cdot \frac{L_{WX}}{2L_Y} - F \cdot \frac{L_{FX}}{2L_Y} \quad (19-7)$$

$$P_{4x} = W \cdot \frac{L_{WX}}{2L_Y} + R_X \cdot \left(-\frac{1}{4} + \frac{L_{RY}}{2L_Y} \right) - R_Y \cdot \frac{L_{RX}}{2L_Y} + \frac{W}{g} \cdot a \cdot \frac{L_{WX}}{2L_Y} + F \cdot \frac{L_{FX}}{2L_Y} \quad (19-8)$$

$$P_{1y} = W \cdot \left(\frac{1}{4} + \frac{L_{WX}}{2L_X} + \frac{L_{WZ}}{2L_Z} \right) + R_X \cdot \frac{L_{RZ}}{2L_X} + R_Y \cdot \left(-\frac{1}{4} - \frac{L_{RX}}{2L_X} - \frac{L_{RZ}}{2L_Z} \right) + R_Z \cdot \frac{L_{RY}}{2L_Z} - \frac{W}{g} \cdot a \cdot \frac{L_{WY}}{2L_Z} - F \cdot \frac{L_{FY}}{2L_Z} \quad (20-1)$$

$$P_{1r} = W \cdot \left(\frac{1}{4} + \frac{L_{WX}}{2L_X} - \frac{L_{WZ}}{2L_Z} \right) + R_X \cdot \frac{L_{RY}}{2L_X} + R_Y \cdot \left(-\frac{1}{4} - \frac{L_{RX}}{2L_X} + \frac{L_{RZ}}{2L_Z} \right) - R_Z \cdot \frac{L_{RY}}{2L_Z} + \frac{W}{g} \cdot a \cdot \frac{L_{WY}}{2L_Z} + F \cdot \frac{L_{FY}}{2L_Z} \quad (20-2)$$

$$P_{3y} = W \cdot \left(\frac{1}{4} - \frac{L_{WX}}{2L_X} - \frac{L_{WZ}}{2L_Z} \right) - R_X \cdot \frac{L_{RY}}{2L_X} + R_Y \cdot \left(-\frac{1}{4} + \frac{L_{RX}}{2L_X} + \frac{L_{RZ}}{2L_Z} \right) - R_Z \cdot \frac{L_{RY}}{2L_Z} + \frac{W}{g} \cdot a \cdot \frac{L_{WY}}{2L_Z} + F \cdot \frac{L_{FY}}{2L_Z} \quad (20-3)$$

$$P_{4y} = W \cdot \left(\frac{1}{4} - \frac{L_{WX}}{2L_X} + \frac{L_{WZ}}{2L_Z} \right) - R_X \cdot \frac{L_{RY}}{2L_X} + R_Y \cdot \left(-\frac{1}{4} + \frac{L_{RX}}{2L_X} - \frac{L_{RZ}}{2L_Z} \right) + R_Z \cdot \frac{L_{RY}}{2L_Z} - \frac{W}{g} \cdot a \cdot \frac{L_{WY}}{2L_Z} - F \cdot \frac{L_{FY}}{2L_Z} \quad (20-4)$$

$$P_{1x} = R_X \cdot \left(-\frac{1}{4} - \frac{L_{RZ}}{2L_Z} \right) + R_Z \cdot \frac{L_{RX}}{2L_Z} - \frac{W}{g} \cdot a \cdot \frac{L_{WX}}{2L_Z} + F \cdot \frac{L_{FX}}{2L_Z} \quad (20-5)$$

$$P_{2x} = R_X \cdot \left(-\frac{1}{4} + \frac{L_{RZ}}{2L_Z} \right) - R_Z \cdot \frac{L_{RX}}{2L_Z} + \frac{W}{g} \cdot a \cdot \frac{L_{WX}}{2L_Z} - F \cdot \frac{L_{FX}}{2L_Z} \quad (20-6)$$

$$P_{3x} = R_X \cdot \left(-\frac{1}{4} + \frac{L_{RZ}}{2L_Z} \right) - R_Z \cdot \frac{L_{RX}}{2L_Z} + \frac{W}{g} \cdot a \cdot \frac{L_{WX}}{2L_Z} - F \cdot \frac{L_{FX}}{2L_Z} \quad (20-7)$$

$$P_{4x} = R_X \cdot \left(-\frac{1}{4} - \frac{L_{RZ}}{2L_Z} \right) + R_Z \cdot \frac{L_{RX}}{2L_Z} - \frac{W}{g} \cdot a \cdot \frac{L_{WX}}{2L_Z} + F \cdot \frac{L_{FX}}{2L_Z} \quad (20-8)$$

3.2 LM 가이드의 수명

LM 가이드가 하중을 받으면서 구름운동을 하는 경우, 레일면과 전동체에는 계속적인 반복응력이 작용하기 때문에 한계에 도달하면 레일면이나 전동체는 피로 파손이 되고, 표면 일부가 고기 비늘 모양으로 벗겨지는 박리(flaking) 현상이 발생한다. 따라서 LM 가이드의 수명은 레일면이나 전동체에 박리 현상이 발생할 때까지의 총 주행거리를 의미한다.

LM 가이드의 수명은 동일한 운전조건에서도 큰 차이가 나타나므로 LM 가이드의 정격수명 L (km)은 여러 개의 LM 가이드를 동일한 조건으로 운동시켰을 때 90% 정도가 파괴 현상을 야기하지 않고 도달 가능한 총 주행거리로 표현하며, 그 정의는 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$L = \left(\frac{C}{P}\right)^p \cdot L_0 \quad (21)$$

여기서 C 는 기본 정격 동하중, P 는 등가 동하중이다. 그리고 수명지수 p 는 전동체가 볼인 경우에 3, 롤러인 경우에 10/3으로 주어지며, 기본 정격수명 L_0 (km)는 전동체가 볼인 경우에 50, 롤러인 경우에 100으로 주어진다.

또한 LM 가이드의 수명시간 L_h (hr)은 단위 시간당의 주행거리로부터 결정할 수 있는데, 속도 v (m/min)가 일정한 경우는 식 (22)와 같이 구할 수 있다.

$$L_h = \frac{L \cdot 10^3}{2 \cdot v \cdot 60} \quad (22)$$

그러나 매순간 LM 가이드의 속도와 하중이 변하는 경우에는 다음과 같이 주어지는 LM 가이드의 평균 속도 v_m 과 평균 등가 동하중 P_m 을 토대로 LM 가이드의 수명을 산정한다.

$$v_m = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T |v_t| dt \quad (23)$$

$$P_m = \sqrt[3]{\frac{1}{T \cdot v_m} \cdot \int_0^T P_t^3 \cdot v_t dt} \quad (24)$$

여기서 T 는 주기, v_t 와 P_t 는 매순간 주어지는 LM 가이드의 속도와 하중을 의미한다.

특히 이송계가 운동하는 상태에서는 진동이나 충격을 동반하는 경우가 많기 때문에 LM 가이드에 작용하는 하중을 계산하는 것은 쉽지 않다. 그리고 레일면의 경도, LM 가이드의 온도 등도 LM 가이드의 수명에 큰 영향을 미친다. 이러한 조건을 고려한 LM 가이드의 수명거리 L 은 식 (25)와 같이 주어진다.

$$L = \left(\frac{f_H \cdot f_T \cdot f_C \cdot C}{f_w}\right)^p \cdot L_0 \quad (25)$$

여기서 f_H 는 경도계수, f_T 는 온도계수, f_C 는 접촉계수, f_w 는 하중계수를 의미한다.

경도계수 f_H 는 레일면의 경도 저하(기준 경도 HRC 58~64)에 의한 LM 가이드의 수명 단축현상을 고려하기 위한 계수이며, 온도계수 f_T 는 LM 가이드의 온도 상승(기준 온도 100℃)때문에 나타나는 경도 저하에 의한 LM 가이드의 수명 단축현상을 고려하기 위한 계수이다. 그리고 접촉계수 f_C 는 가공정밀도에 의한 블록의 하중 불균형 때문에 발생하는 LM 가이드의 수명 단축현상을 고려하기 위한 계수이며, 하중계수 f_w 는 운동체의 자중, 속도 변화에 의한 관성력, 그리고 오버행(overhang)에 의한 모멘트 등과 같이 LM 가이드에 작용하는 하중 형태 때문에 야기되는 LM 가이드의 수명 단축현상을 고려하기 위한 계수이다.

3.3 볼스크류의 수명

볼스크류의 수명은 표면 파괴, 마찰에 의한 정밀도 저하 등에 의해서 제한을 받게 된다. 일반적으로 볼스크류의 수명은 구름 베어링과 같은 기본 정격 동하중을 이용해서 추정이 가능하다. 볼스크류의 기본 정격 동하중은 동일한 조건에서 회전하는 볼스크류의 90% 정도가 구름 피로에 의한 파괴현상을 유발하지 않고 10°회전을 할 수 있는 축방향 하중을 의미한다. 그리고 볼스크류의 수명은 다음과 같이 총 회전수 L (rev.), 총 회전시간 L_t (hr) 및 총 주행거리 L_s (km)로 표현한다.⁽⁷⁾

$$L = \left(\frac{C_a}{F_a \cdot f_w}\right)^3 \cdot 10^6 \quad (26)$$

$$L_t = \frac{L}{60 \cdot n} \quad (27)$$

$$L_s = \frac{L \cdot l}{10^6} \quad (28)$$

여기서 C_a 는 기본 정격 동하중, F_a 는 축방향 하중, n 은 회전수(rpm), l 은 리드(mm), f_w 는 하중계수를 의미한다.

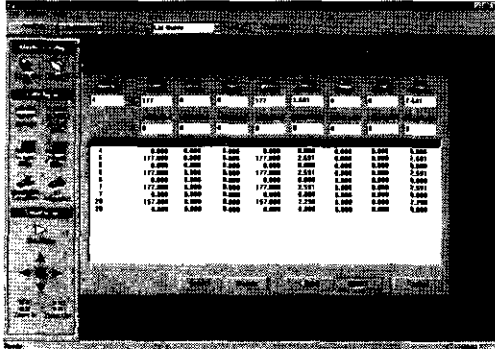


Fig. 6 Setup of spindle bearing coefficient

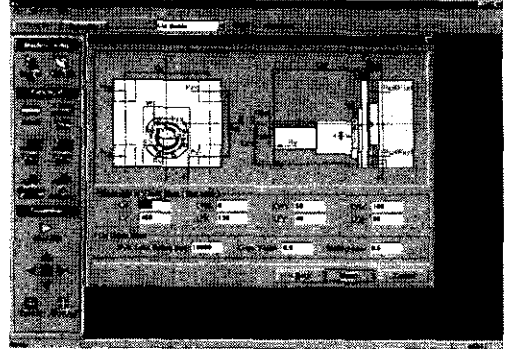


Fig. 9 Setup of Y-axis slide dimensiona

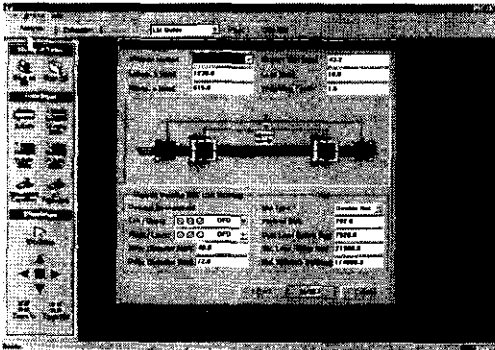


Fig. 7 Setup of ball screw dimension

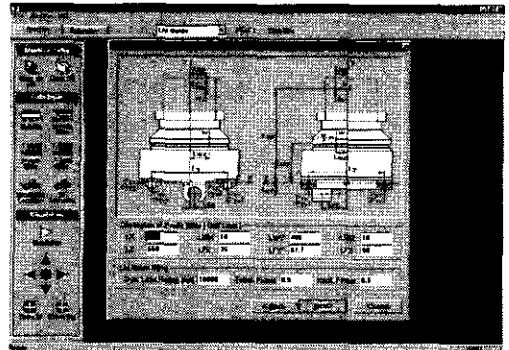


Fig. 10 Setup of Z-axis slide dimension

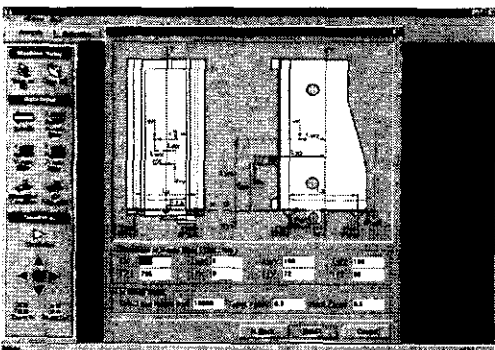


Fig. 8 Setup of X-axis slide dimension

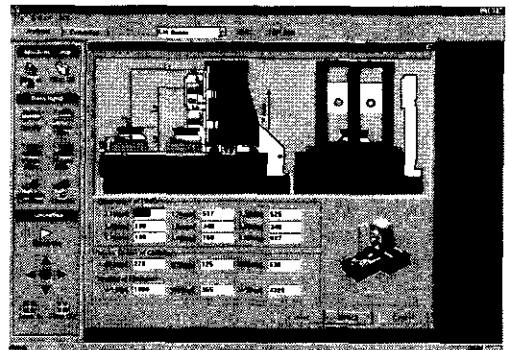


Fig. 11 Setup of machine specification

따라서 운동요소의 수명을 보다 체계적으로 예측하기 위해서는 기계 구조를 토대로 한 하중 전달과정을 명확하게 분석하는 것이 요구된다. Fig. 11은 수평형 머시닝센터의 기계 구조를 정의하기 위해서 요구되는 주축계, X축

이송계, Y축 이송계, Z축 이송계 사이의 상대 위치 정보와 운동체의 무게 및 질량 중심에 대한 정보를 설정하는 GUI를 보여주고 있다. 그리고 Fig. 12에는 기계의 운전조건과 공구 정보를 설정하기 위한 GUI를 나타내었다.

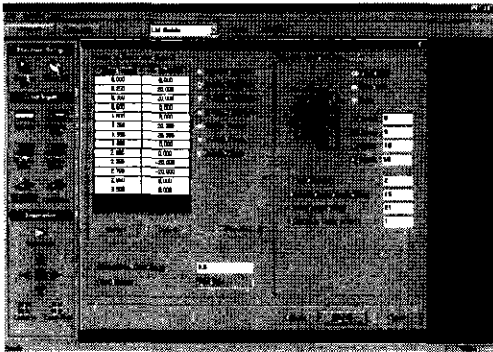


Fig. 12 Setup of simulation condition

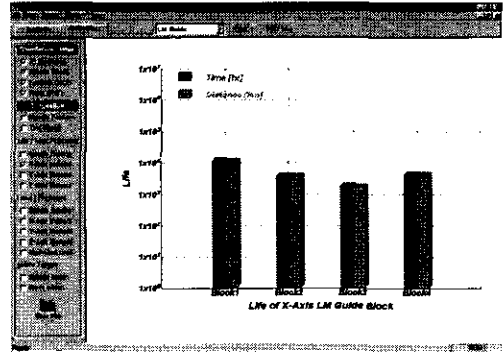


Fig. 15 Life of X-axis LM guide

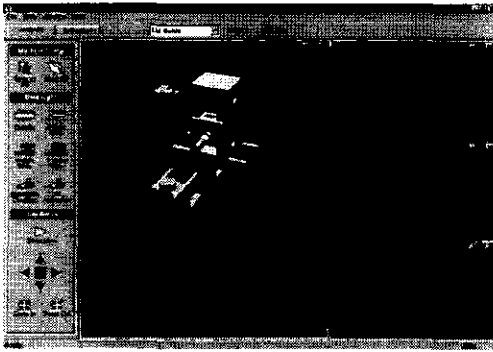


Fig. 13 Real time simulation

시닝센터의 운동상태를 3차원적으로 가시화한 모습을 나타내었으며, 화면 우측에는 테이블의 이송속도, 질삭력, 주축의 회전속도를 그래프 형태로 나타내었다. 그리고 이러한 해석과정을 통해서 얻어진 주축계의 운동요소인 주축 베어링과 X축 이송계의 운동요소인 LM 가이드에 대한 수명 예측 사례는 Fig. 14와 15에 제시하였는데, 본 연구에서 사용한 해석조건에서는 수평형 머시닝센터의 수명이 주축 선단부에 위치한 1번째 주축 베어링과 X축 LM 가이드의 3번째 블록에 의해서 좌우되고 있으며, 약 30,000시간 정도인 것으로 예측되었다.

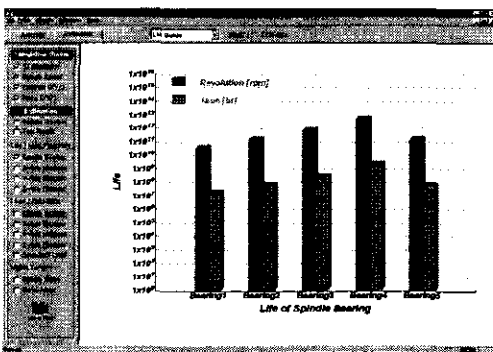


Fig. 14 Life of spindle bearing

Fig. 13은 GUI를 통해서 설정한 주축계, 이송계, 기계, 운전조건 등에 대한 정보들을 토대로 운동요소에 부가되는 하중과 수명을 실시간적으로 예측하는 사례를 보여주고 있다. 화면 중앙에는 운전조건을 토대로 한 수평형 머

5. 결론

본 연구에서는 수평형 머시닝센터의 수명을 설계단계에서 평가할 수 있는 기반을 구축하기 위한 노력의 하나로 수평형 머시닝센터의 구조적 제원과 운전조건이 내구성에 미치는 영향을 체계적으로 해석할 수 있는 시스템을 개발하였다. 그리고 본 연구를 수행하는 과정에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 운동체의 자중, 관성력, 질삭력 등과 같은 부가 하중들은 기계의 구조 코드에 의해서 정의되는 힘의 흐름을 토대로 상위 구조요소에서 하위 구조요소로 자동 상속시킴으로써 하중 해석의 효율화를 도모하였다.
- (2) 베어링, LM 가이드, 볼스크류 등과 같은 운동요소에 작용하는 하중은 부가 하중과 구조적 제원에 의해서 결정되는 힘과 모멘트에 대한 평형조건을 이용해서 결정하였다.

- (3) 베어링, LM 가이드, 볼스크류 등과 같은 운동요소의 수명은 다양한 운전조건을 모두 반영할 수 있도록 평균 속도와 평균 등가 동하중을 토대로 산정하였다.
- (4) 운동요소의 수명은 기계의 제원, 하중, 속도, 운전상태를 토대로 예측하였으며, 가장 짧은 운동요소의 수명을 수평형 머시닝센터의 수명으로 간주하였다.

참 고 문 헌

- (1) 김석일 외, 최신 공작기계 설계기술, 반도출판사, 1995.
- (2) A.E. Slocum, Precision Machine Design, Prentice Hall, 1992.
- (3) 양희구, 김석일, "B-Rep 솔리드모델을 이용한 머시닝센터용 CAD/CAM시스템 개발(1)" 한국정밀공학회 논문집, 제13권 제3호, 1996, pp. 150~157.
- (4) 김석일, 조정준, 최대봉, "모터내장형 주축의 동특성 해석", 한국정밀공학회 논문집, 제11권 3호, pp. 184~190, 1994.
- (5) SKF 공작기계용 정밀베어링 Catalog No. 3700E, SKF 코리아주식회사, 1997.
- (6) THK LM System Catalog No.100-1K, THK Co., Ltd. 1996.
- (7) NSK 精機製品 Catalog No.3101, NSK Co., Ltd., 1998.