열-기계적특성을 고려한 주축베어링하우징 최적설계

김선민, 이선규*
* 광주과기원 기전공학과

Optimal Design of the Spindle Housing Considering the Thermo-mechanical Behavior

S.M.Kim, S.K.Lee*
* Dept. Mechatronics, Gwangju Institute of Science and Technology

Key words : Spindle-bearing system, Thermo-mechanical behavior, Thermal displacement, Parameter optimization

1. 서 론

최근, 공작기계성능의 고도화에 따라 고속·고정도·저열변위 주축에 대한 요구가 일반화되게 되었다. 구름베어링으로 지지된 공작기계주축은 강성을 유지하기 위하여 적절한 예압을 가해서 조립하게 되어 있지만, 회전운전에 따른 주축-베어링 요소의 원심력과 하우징등의 열변형으로 인하여 베어링예압은 시간적으로 변동하고, 이로 인한 베어링 발열변화와 함께 주축의 열변위도 변화하여 베어링사고에 이르게 하는 경우도 발생한다. 이러한 사고를 미연에 방지하고 주축의 열변위를 최소화하기 위해서는 공작기계주축의 설계와 조립시에 이러한 변화인자들을 종합적으로 예측해서 최적조건을 설정할 수 있어야 한다.

본 논문에서는 주축-베어링계의 열-기계적 특성을 예측가능한 시뮬레이션 방법을 제안하고, 주축 및 하우징 치수, 베어링 조립공차, 냉각조건, 열변형과 같은 베어링주변 조건과 다양한 주축운전조건을 동시에 고려하여 안정적으로 고성능을 유지할 수 있는 주축을 실현하기 위한 하우징 설계인자를 최적화하는 방법을 제시하였다.

2. 주축-베어링시스템의 열-기계적변화

일반적으로 구름베어링으로 지지된 주축에 있어서는 그림 1 에 보이는 바와 같이 초기 예압과 원심팽창에 따른 베어링마찰열에 의하여 베어링요소, 주축 및 하우징이 열변형을 일으키고, 이 때문에 베어링의 압력이 변화하여 스핀들의 동적인 특성은 변화하게 되고, 동시에 베어링의 발열도 변하게 된다. 이러한 변화과정은 초기 조립공차와 운전조건 및 주축냉각조건이 상호작용하여 시스템이 안정될 때까지 지속되며, 일단 안정된 후에도 운전조건, 냉각조건 및 주위온도변화에 의해서 다시 변화를 일으켜서 새로운 안정상태로 이행하게 되는 소위 폐회로 작용을 하는 것이 잘 알려 져 있다.

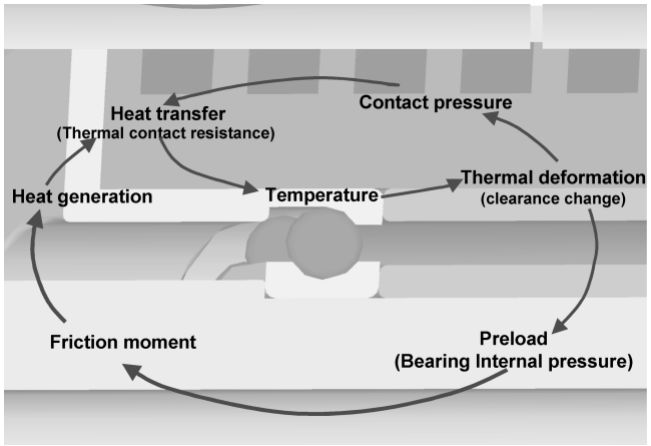

Fig. 1 Closed-loop of the spindle-bearing system

3. 최적화 모듈

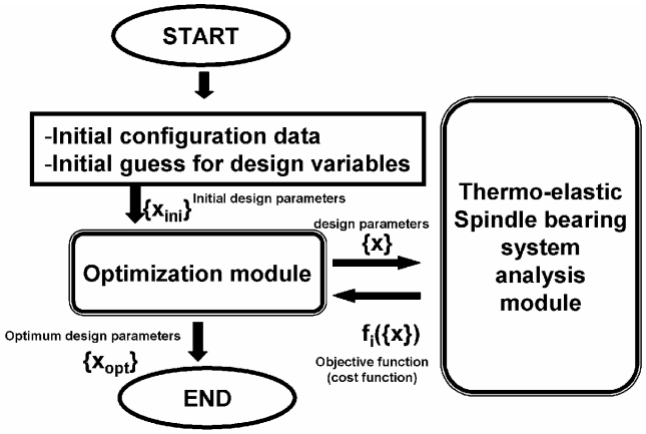

Fig. 2 Optimization procedure of the thermo-mechanical spindle bearing system

최적화 프로그램에서는 2 절에서 설명한 바와 같은 주축-베어링시스템의 기계적인 특성과 열 특성의 과도기적인 변화를 모두 고려하여 원하는 목적함수를 최적화할 수 있는 계산모듈을 구성하였다. 그림 2 에 보이는 바와 같이 프로그램은 주축-베어링시스템의 열-기계적인 해석모듈과 최적화과정을 수행하는 모듈로 구성되어 있다. 해석모듈에서는 주축베어링의 초기 조립공차, 원심팽창 및 예압에 의한 베어링발열과 베어링전동체, 주축과 하우징의 열전달 및 열변형 그리고 각 요소들의 열변형에 의한 베어링예압변화와 발열변화를 과도온도상태를 포함하여 고려하였다. 최적화계산모듈에서는 다양한 조립공차, 냉각방법 및 속도변화상태에서 하우징 내외경과 길이, 주축 내외경과 길이와 같은 설계변수를 주어진 구속조건에서 최적화를 수행하게 하였다. 본 논문에서 사용한 주축-베어링 시스템의 단순화모델과 설계변수를 그림 3 과 표 1 에 나타내고 있다.

본 논문에서는 공작기계주축의 정상상태에서의 열변위와 과도상태에서의 주축열변위 변화를 최소화하는 주축구

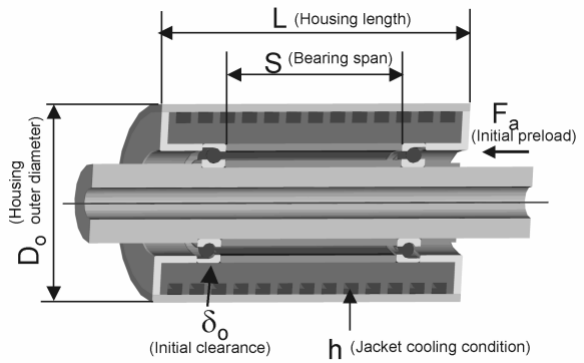

Fig. 3 Design parameter diagram

Table 1 Housing design parameters

Design parameter	Abbreviation	Meaning in spindle housing design
X_1	T_c	Jacket coolant temperature
X_2	F_a	Initial preload
X_3	δ_o	Initial clearance between housing and bearing outer race
X_4	L	Housing length
X_5	D_o	Housing outer diameter
X_6	S	Bearing span

조를 실현하는 것을 목표로 하우징 설계변수를 목적함수를 설정하였다. 본 논문에서는 목적함수의 최적화를 위하여 주축열변위와 베어링예압의 과도상태의 변동비율을 최소화하는 구속조건아래서 계산을 수행하였다. 2 절에서 기술한 바와 같이, 베어링발열을 포함한 주축구조에 있어서 일정한 운전상태를 부가했을 때 베어링에 작용하는 예압이나 발열은 베어링 주변요소의 과도적인 열변형영향 때문에 그림 4 에 보이는 바와 같이 단순한 1 차 시스템이 아닌 복잡한 거동을 나타내게 된다. 이러한 요인에 따른 주축열변위와 예압의 변화요인을 최소화하는 것은 운전조건변화에 강인한 정밀가공주축을 실현하는 관점에서 주요한 평가인자라 할 수 있다. 따라서, 그 변동율을 그림 5 에 나타내는 바와 같이 정의하고 (1)식으로 나타내서 제어시스템에서의 오버슈트와 같이 고려하였다.

$$g_{d_a} = \frac{(d_a)_{\max.}}{(d_a)_{steadystate}}, \quad g_{F_a} = \frac{(F_a)_{\max.}}{(F_a)_{steadystate}} \qquad (1)$$

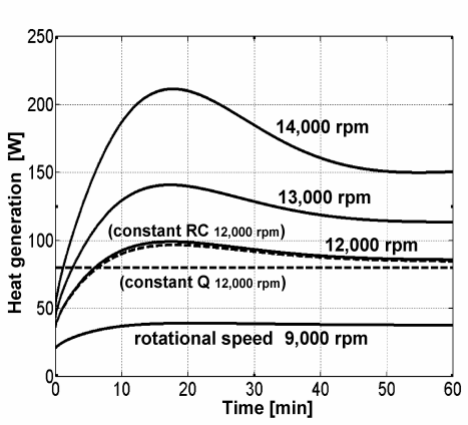

Fig. 4 Heat generation change according to rotational speed

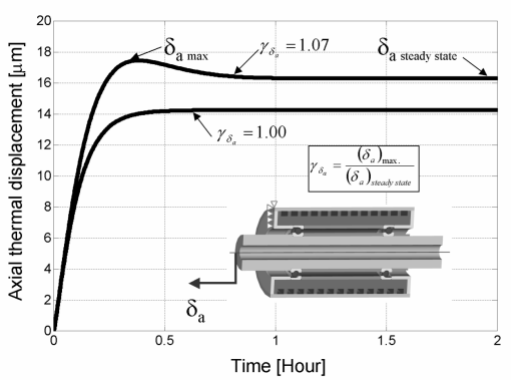

Fig.5 Fluctuation of axial thermal displacement

최적화 계산에서는 (2) 식으로 주어진 주축변위를 (3) 식 및 (4) 식의 예압증가 및 증가율의 구속조건하에 최소화하도록 하였다.

$$d_{a_{total}} = u_0 + \tilde{u}^T \tilde{x} + \tilde{x}^T U\ \tilde{x} \qquad (2)$$

$$F_{a_{increase}} = f_0 + \tilde{f}^T \tilde{x} + \tilde{x}^T F\ \tilde{x} \le 100\ [N] \qquad (3)$$

$$g_{F_a} = F_{a_{increase\ ratio}} = g_2 = g_0 + \tilde{g}^T \tilde{x} + \tilde{x}^T G\ \tilde{x} \le 1.05 \qquad (4)$$

4. 최적화 계산결과

그림 3 에 주어진 단순형태의 주축구조에 대해서 주축의 열변위와 그 변화율을 최소화하기 위한 최적화 설계결과를 표 2 에 나타내고, 그 결과, 최적화설계 전후의 베어링 발열변화를 비교하여 그림 6 에 나타내었다. 그림에서와 같이 주축하우징의 최적설계에 의하여 베어링의 발열이 30%이하까지 억제될 수 있음을 알 수 있다.

Table 2 Optimization of spindle housing design parameters : Numerical example

Design parameters	Range	Initial value	**Optimized value**
X_1 (T_c : Jacket coolant temperature)	$0 \le x_1 \le 100$	20 °C	**12.5 °C**
X_2 (F_a : Initial preload)	$50 \le x_2 \le 400$	125 N	**50.5 N**
X_3 (δ_0 :Initial clearance)	$10 \le x_3 \le 30$	20 μm	**18.9 μm**
X_4 (L : Housing length)	$200 \le x_4 \le 350$	275 mm	**271 mm**
X_5 (D_o : Housing outer diameter)	$100 \le x_5 \le 350$	250 mm	**101 mm**
X_6 (S : Bearing Span)	$50 \le x_6 \le 100$	75 mm	**71.7 mm**

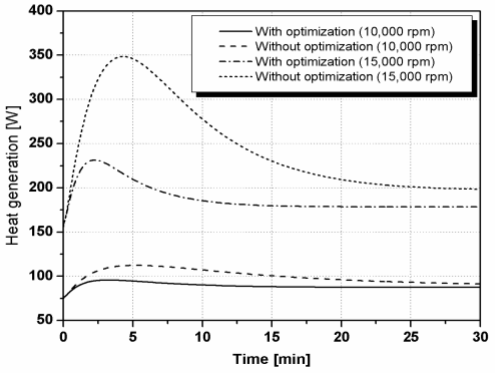

Fig.6 Optimization result comparison for heat generation

5. 결론

본 논문에서는 공작기계주축의 열변위를 억제하는 데 있어서 주축하우징 구조에 따른 베어링발열변화에 주목하여 하우징 냉각조건을 포함한 하우징구조설계와 조립공차를 최적화함으로써 베어링발열 및 그 변화율을 크게 저하시킬 수 있음을 제시했다.

참고문헌

1. Kim,S.M., "A Study on Optimal Housing Design and Compliance Control of a Spindle Bearing System on the basis of Thermo-Elastic Concept, PhD dissertation of GIST, 2002
2. Kim,S.M. ,Lee, S.K., "Prediction of Thermo-elastic behavior in Spindle Bearing System Considering Bearing Surroundings, Int.J.MachineTools and Manufacture, 41, 809-831(2001).