

Taguchi 기법에 의한 45,000rpm 주축의 베어링 위치 선정에 관한 연구

A Study on the Determination of Bearing location for 45,000rpm Spindle by Taguchi Method

*김동현¹, 박성진¹, #이훈만¹
 *D. H. Kim¹, S. J. Park¹, #C. M. Lee(cmlee@changwon.ac.kr)¹
¹ 창원대학교 기계설계공학과

Key words : Spindle, Bearing location, Taguchi Method

1. 서론

기계 산업을 비롯한 각종 산업의 급속한 변화에 발맞추어 제품의 생산 비용과 시간을 절약함과 동시에 고정밀도로 가공할 수 있는 고성능의 공작기계에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 고성능·고품질을 가지는 공작기계의 품질 대가격 경쟁력 강화에는 공작기계 전체 금액의 약 10% 이상을 차지하는 주축의 효율적인 설계가 가장 큰 영향을 미치게 된다. 향후 국가 산업이 IT·NT 및 BT 등 신산업을 중심으로 성장할 것임을 고려할 때, 고속·고정밀 주축 시스템의 개발은 기술적·경제적 및 전략적으로 매우 중요하다. 따라서 주축의 정적·동적 특성을 개선시키기 위해 최적 주축형상 설계 및 베어링 위치 선정을 통한 진동제어기술, 주축 가·감속 시간 단축, 열특성 향상 기술 등을 연구하고 적용하여 주축의 고속·고정밀화를 이루는 연구가 활발히 진행되고 있다.

공작기계용 주축 설계 시 주축의 구성이 결정되면 주축의 축경·길이·베어링 간격 등에 대한 검토가 필요하다. 주축의 크기에 대한 검토에서는 강성과 위험속도에 대한 해석이 주로 이루어진다. Fig. 1에 주축의 강성에 영향을 미치는 인자들을 나타내었다. 설계자는 이러한 해석을 바탕으로 최적의 설계 변수 조합을 찾는 것이 중요하다. 설계자의 입장에서 주축 선단의 변위를 최소화한다든가 고유진동수를 높이는 방법으로 주어진 주축의 요소부품을 적절히 조합하여 목적을 달성해야 한다. 주축의 설계에 있어서 가장 먼저 수행되어야 하는 것이 주축의 진동 모드 분석이다. 주축의 동적 강성에서는 진동모드 상관도를 이용하여 기여율을 분석하고 이에 따른 주축의 정동적 특성을 개선하여 주축의 성능을 높이는데 하나의 이정표를 제시한 예가 있다. 본 연구에서는 회전체해석 전용 프로그램인 ARMD를 이용하여 주축의 동특성 해석을 수행하였으며, 다구치 기법을 적용하여 주축의 고유 진동수를 높일 수 있는 최적 조건을 도출하였다.

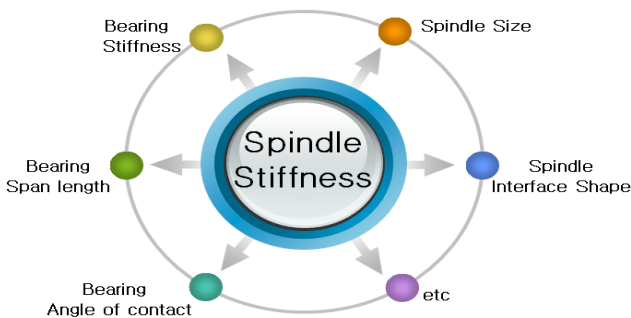


Fig. 1 Factors Affecting the Spindle Stiffness

2. 45,000rpm 주축 모델 및 다구치 기법

머시닝센터용 45,000rpm 주축 시스템은 Fig. 2 와 같다. 이 주축 시스템은 가공유연성을 위해서 모터내장형으로 설계되어 있다. 내장형 모터의 회전부(rotor)는 여러장의 얇은 강판으로 적층되어 있어 굽힘변형 및 전단 변형에 대해서 상당 수준의 강성효과를 나타낸다. 따라서 모터 회전부의 질량효과 외에도 강성효과를 고려하여 해석하였다.

다구치 기법을 적용함에 있어 파라미터 설계(Parameter design)는 제품설계와 공정설계에서 유용하게 사용되는 핵심이다. 파라미터는 제품성능의 특성에 영향을 주는 제어 가능한 인자

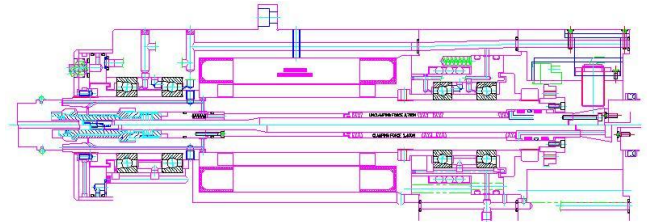


Fig. 2 Schematic diagram of 45,000rpm spindle system

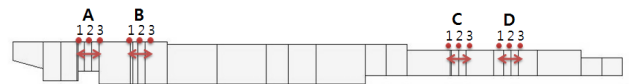


Fig. 3 Position of each bearing

(controllable factor)를 의미하며, 파라미터 설계는 이들 인자들의 최적수준을 정하여 주는 것을 말한다. 파라미터를 설계변수 (design variable)라고도 부르며, 파라미터 설계에서는 품질변동이 잡음에 둔감하면서 목표품질을 가질 수 있도록 설계 변수들의 최적조건을 구하여 준다.

본 연구의 대상인 주축은 주축 외관의 치수를 변화시킬 수 없다. 그에 따라 주축 자체의 직경 또한 변화시킬 수 있는 범위가 제한적이다. 주축의 소재도 정해져 있다. 베어링의 경우 상용 제품을 사용하게 되지만 주축에서 베어링 조립 시 위치와 예압에 따라 그 특성이 상당히 좌우된다. 본 연구에서는 다구치 기법을 적용하여 설계 수정이 가능한 베어링의 위치가 주축의 동강성에 얼마만큼의 영향을 미치는지 나타내었다.

Fig. 3은 다구치 기법에 적용하기 위한 각 베어링의 수준을 나타내었으며, 각각의 파라미터에 따른 수준 값을 Table 1에 나타내었다. 베어링의 위치는 A, B, C, D 인자로 각각 정의하였다.

Table 1 에서 보는 바와 같이 각 파라미터의 수준은 모두 3수준으로 정의하였다. 이 파라미터와 수준으로 Table 2 와 같이 L9의 다구치 직교배열 설계로 실험계획을 세웠다.

Table 1 Level value of each parameter for Taguchi Method

No.	A[mm]	B[mm]	C[mm]	D[mm]
1	43	79	295	330
2	48	84	300	335
3	53	89	305	340

Table 2 Experiment design for Taguchi Method

No.	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

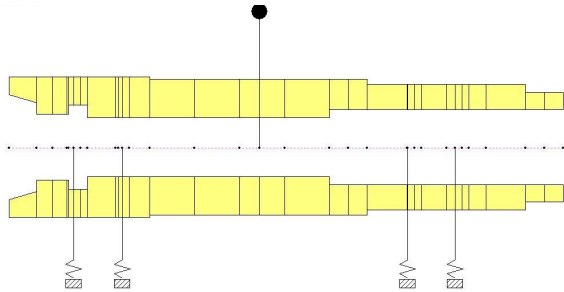


Fig. 4 FE Model of 45,000rpm spindle for dynamic analysis

Table 3 Material properties of the spindle

Property	Value
Density [kg/m ³]	7833
Young's Modulus [GPa]	210
Poisson's Ratio	0.3

Table 4 Result of analysis by FEM

No.	1st mode[Hz]	No.	1st mode[Hz]	No.	1st mode[Hz]
1	988.13	4	969.70	7	956.76
2	983.19	5	973.77	8	994.50
3	981.41	6	1010.02	9	1016.4

3. 주축계 동특성 해석 및 최적 설계

주축의 동특성 해석모델은 회전체해석 전용 프로그램인 ARMD에서 구축하였으며 Fig. 4 와 같다. 해석의 관심구간은 메인주축과 베어링 지지점이며, 구축된 해석 모델이 2 차원이므로 해석 모델의 베어링 자유도는 2 이다. Table 3 은 주축 해석 모델에 적용된 재료의 기계적 물성치이다.

고속 회전 주축계를 설계하는데 있어서 가장 우선적으로 수행되어야 할 것이 주축의 고유진동수 파악이다. 이는 실제 운용하고자 하는 주파수 대역에서부터 고유진동수를 피해서 설계를 하고자 함이다. 주축의 고유진동수와 실제 운용주파수가 일치하게 되면 공진이 발생해 기계의 정밀도를 떨어뜨리고 기계가 망가질 수도 있다. 위에서 제시한 실험계획에 따라 해석을 무작위로 실시하고 그에 대한 해석결과를 Table 4 에 나타내었다.

먼저, 주축의 고유진동수를 높일 수 있는 인자의 최적 조건을 도출하였다. 주축의 설계에서 가장 중요시 되는 주축의 1차 모드 값은 그 값이 높을수록 특성이 우수하다고 판단하기 때문에 망대특성을 적용하였다. Table 4 의 해석결과를 분석하여 베어링 위치에 따른 1차 모드 진동수의 신호 대 잡음비의 주 효과 플롯(plot)을 Fig. 5 에 나타내고 이에 대한 데이터를 Table 5 에 나타내었다.

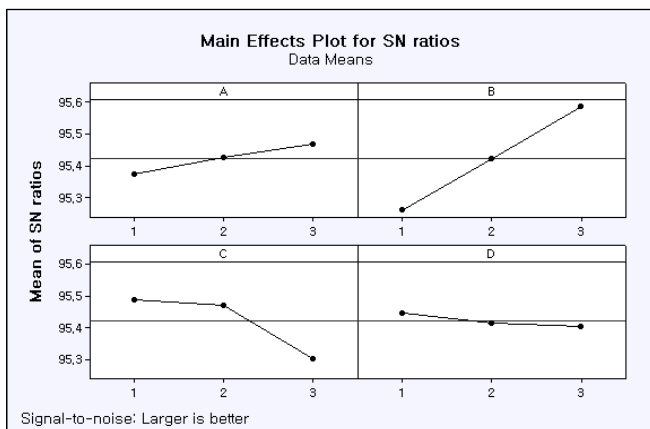


Fig. 5 Main effect plot of signal to noise for natural frequency according to bearing position

Table 5 Data of optimum design condition to improve natural frequency

Level	A	B	C	D
1	95.37	95.26	95.49	95.45
2	95.43	95.42	95.47	95.42
3	95.47	95.59	95.30	95.40
Delta	0.09	0.33	0.19	0.04
Rank	3	1	2	4

Fig. 5 와 Table 5 를 통하여 반응변수 B 인자가 가장 크게 영향을 미치고 D 인자가 가장 영향을 덜 미친다는 것을 알 수 있다. 이 결과를 종합하여 신호 대 잡음비를 크게 하는 조건을 정하고, 그때의 잡음비를 추정해 보았다. A 인자는 3수준, B 인자는 3수준, C 인자는 1수준, D 인자는 1수준 일 때 신호 대 잡음비가 가장 크므로 이들 인자의 조건을 A₃B₃C₁D₁ 으로 정했다. 따라서 이 조건에 대해 신호 대 잡음비를 예측하면 95.72이고, 이 조건으로 해석하면 주축의 1차 고유진동수는 1019.2 Hz로 초기 설계 되었던 주축의 1차 고유 진동수인 988.13 Hz 보다 3.14% 향상되었음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 45,000rpm 주축의 동특성을 파악하고 최적 설계 조건을 도출하여 초기 설계보다 향상된 성능을 가지는 주축을 설계하고자 하였다. 주축의 각 요소들 중 현 구조에서 설계 변경이 가능한 베어링의 위치를 설계 변수로 선정하였다. 주축의 설계에 있어 주안점이 되는 주축의 1차 고유진동수에 베어링의 위치가 얼마만큼의 영향을 미치는지 다구치 기법을 적용하여 분석하였다.

초기 설계 단계에서 주축의 1차 고유진동수는 988.13 Hz 였으나, 다구치 기법을 적용하여 최적 설계 조건을 도출하고 이 조건을 적용한 결과, 설계 변경된 주축의 1차 고유진동수는 1019.2 Hz로 초기 설계 조건에 비해 약 3.14% 향상됨을 확인하였다.

후기

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- Choi, D. B., Jo, J. J. and Kim, S. I., "Dynamic Characteristics of Spindle with a Built-in Motor", J. of KSPE, Vol. 11, No. 3, pp. 184-190, 1994.
- Lee, C. H., Park, C. H. and Lee, H. S., "The Contribution of Spindle Parts to Static, Dynamic Stiffness and Design Improvement", KSPE, Autumn Conference, pp. 985-988, 2002.
- Lim, J. S., Chung, W. J., Lee, C. M., and Lee, J. H., "Improvement of a Stiffness for High-Speed Spindle Using the Taguchi Method", KSPE, Vol. 24, No. 2, pp. 127-133, 2007.
- Lim, J. S., Chung, W. J., Lee, C. M., "Selection of Bearing Position for Improving Static and Dynamic Stiffness of 40,000rpm High-speed Spindle", J. of KSMPE, Vol. 8, No. 1, pp. 10-17, 2009.
- Hwang, Y. K., Lee, C. M., "A Study on the Determination of Shaft Size Using the Extreme Vertices Design", KSMTE, Vol. 18, No. 2, pp. 214-220, 2009.