

초고속 스피ن들의 모델 개선법

박기범*, 정원지+, 이춘만++

(논문접수일 2007. 6. 12, 심사완료일 2007. 11. 29)

Model Updating of High-Speed Spindle

Park Ki Beom*, Chung Won Jee+, Lee Choon Man++

Abstract

In the design of modern rotating machinery, it is often necessary to increase the performance of rotor-bearing system. Since a critical speed range influences the performance and safety of the whole system, it should be necessary to constrain the critical speed and thus resonance response in design process to result in large vibration. Consequently the minimization of resonance response amplitudes within the operation range of the rotor system becomes the most primary design objective. In this paper, based on the assumption that the external shape of rotating-shaft, bearing supporting positions and etc, the natural frequency analysis of spindle is performed by ANSYS 10.0[®]. Optimum design is conducted using the RBF model.

Key Words : High-speed spindle(초고속 스피ن들), Natural frequency analysis(고유진동수 해석), RBF model(RBF 모델)

1. 서론

현재의 산업구조에서 소비자의 다양한 욕구를 충족시키기 위해서는 우수한 품질의 다양한 제품을 생산하여야 한다. 따라서 제품의 수명주기가 급격히 단축되고 있으며 새로운 모델을 제작하기 위한 시간도 단축되고 있다. 이에 따른 정밀한 금형을 신속하게 제작하기 위한 기술이 필요하며 최근 이러한 기술적 대안으로 고속 가공이 부각 되고 있다.

고속 가공의 정의는 공작물, 절삭공정, 절삭공구의 선정에 따라 다르게 정의되지만, 밀링작업의 경우 공작물 재료에 따라 고속가공의 영역이 구분되고 일반적으로 10,000rpm 이상의 스피ن들 속도에서의 가공을 엔드밀 가공에서의 고속가공이라 부른다. 이러한 고속가공은 범용가공에 비해 고 정도 고 품위 가공이 가능하며 이를 위해서 고속공작기계, 고속가공용 공구 그리고 특정절삭재료에 대한 절삭특성 데이터가 필요하다.

* 창원대학교 기계설계공학과 대학원

+ 교신저자, 창원대학교 기계설계공학과 (wjchung@changwon.ac.kr)
주소: 641-773 경남 창원시 사림동 9번지 소나무 5길 65, 53호관 214호

++ 창원대학교 기계설계공학과

고속 절삭을 하는 가공기에서 진동의 발생은 생산 제품의 불량을 초래한다. 고속 가공기는 높은 회전 정밀도가 요구되는 기계이며 장시간 운전에 의한 기계의 손상과 베어링부의 마모로 인한 이상진동이 발생할 수 있으며 이러한 이상 진동으로 인하여 가공기의 수명이 단축되고 생산 제품의 불량이 발생하게 된다. 고속가공기계의 불량 발생 원인으로서는 회전 부품의 불평형, 베어링이나 커플링의 축 정렬 불량, 축의 휨, 비틀림 진동, 기계적 느슨함, 공진, 베어링의 불량 등을 들 수 있으며 이상진동의 원인은 복합적인 요인에 의해 일어나는 경우가 많다⁽¹⁾.

공작기계의 생산 효율과 가공 정밀도는 생산성에 대한 평가로 직접적으로 나타나는 인자이며 주축설계의 기본적인 고려 사항이 된다. 주축 설계에 있어 일반적으로 높은 회전 정밀도와 고속 회전 성능, 그리고 큰 강성이 요구된다. 고속 주축의 설계에 있어서 가장 먼저 수행되어야 하는 것이 주축의 진동 모드 분석이다⁽²⁾.

따라서 본 연구에서는 초고속 가공기에서 스피ndl의 출력과 치수를 고려한 스피ndl 시스템의 외형, 즉 외경과 내경 길이 등이 주어지고 고속 주축을 지지하는 베어링이 최적의

상태로 주어졌을 경우 베어링의 위치, 즉 스피ndl 지지점에 따른 주축의 진동특성을 분석하고자 한다.

Fig. 1의 설계도면은 설계자의 경험에 의한 것이므로 이를 검증해 볼 필요가 있다. 설계 검증을 위하여 Fig. 1과 같은 40,000rpm 급 고속 머시닝 센터용 주축 계에 대하여 Fig. 2와 같은 FEM(유한요소 모델)을 구축하고 지지하는 베어링의 위치에 따른 진동모드를 예측하고 검증하고자 한다.

2. 40,000rpm 스피ndl의 모델링

본 해석을 위해 상용 FEM 해석 도구인 ANSYS 10.0[®]을 사용하였다. 사용한 요소는 Shell 63과 Solid 186을 사용하였다. Fig. 2에서 베어링의 위치는 A, B, C로 표현을 하였다. Fig. 2는 주축계의 유한 요소 모델을 나타내고 있다. 해석에 사용된 스피ndl의 물성치는 Table 1과 같다.

스피ndl의 총 길이는 310mm 이며 스피ndl 전방에 2개의 베어링과 후방에 1개의 베어링으로 지지되어 있는 구조이다. 40,000rpm 스피ndl은 엔드밀 가공을 에서 공구의 탈착을 위하여 스프링이 사용되는 형태이며 뒷부분의 유압실린더가 공구 탈 착시 드로우바를 밀어주어 조우를 벌리는 역할을 하게 된다. 이 드로우바가 스피ndl의 내부에 위치를 하게 되므로 스피ndl은 중공이 될 수밖에 없다.

해석에 사용된 베어링의 강성은 Table 2와 같다.

3. 실험계획 및 최적설계

3.1 실험계획법을 위한 파라미터 선정

실험에 있어서 데이터에 산포를 준다고 생각되는 무수히 많은 존재하는 원인들 중에서 실험에 직접 취급되는 원인을

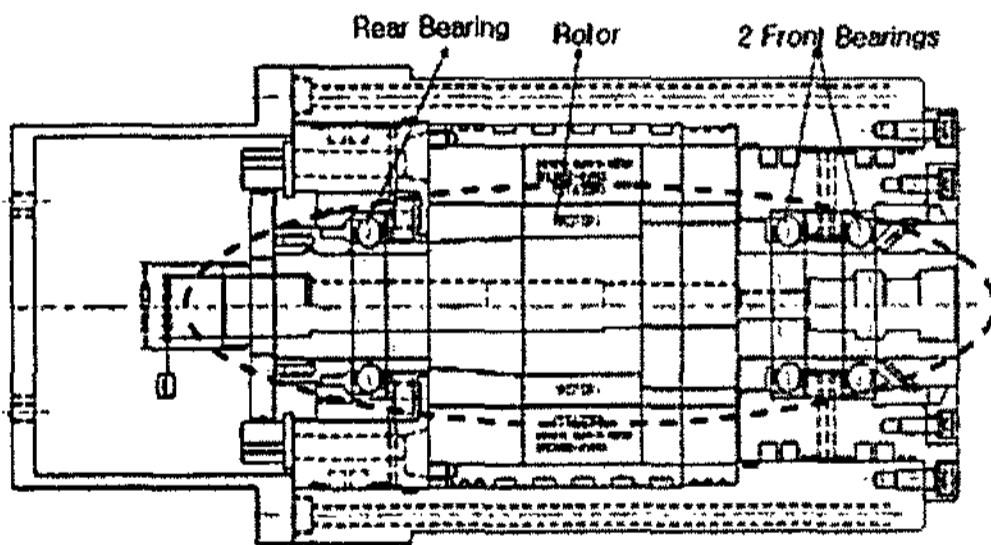


Fig. 1 The schematic of 40,000rpm spindle

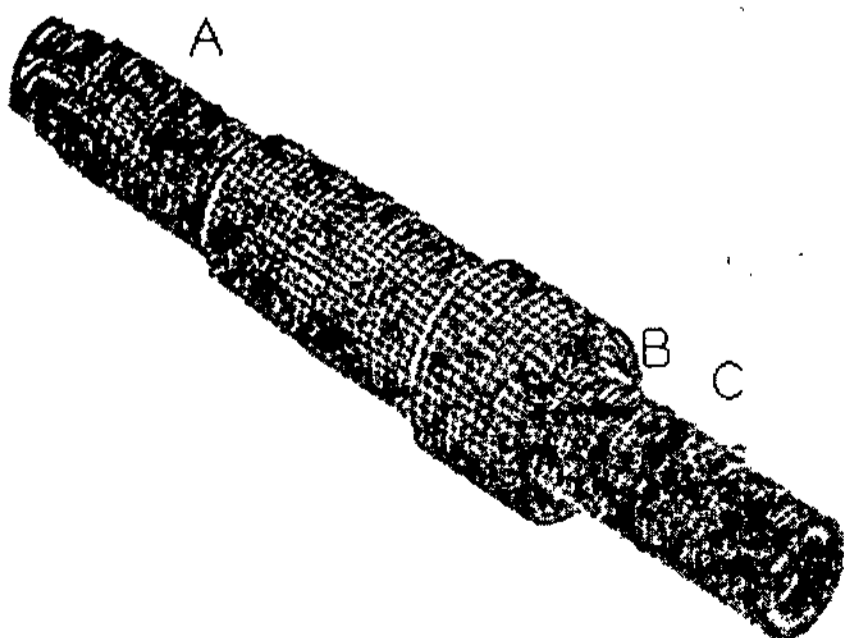


Fig. 2 Mesh for FEM analysis

Table 1 Material properties of Spindle

Part name	E (GPa)	Density (g/cm ³)	Poisson's ratio
Spindle	200	7.817	0.3

Table 2 Bearing stiffness of 40,000rpm spindle

	Axial rigidity (N/μm)	Radial rigidity (N/μm)
Front bearing	40	180
Rear bearing	X	90

인자라고 부른다. 실험을 실시하기 이전에 대한 충분한 계획이 없이는 원하는 실험의 목적을 달성하기 어렵다. 실험계획법이란 실험에 대한 계획 방법을 의미하는 것으로, 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행하고, 데이터를 어떻게 취하여 어떠한 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는 가를 계획하는 것이라고 정의할 수 있다. 따라서 하나의 실험계획법을 수립한다고 하는 것은 해결하고자 하는 문제에 대하여 인자를 선정하고 실험방법을 선택하였으며, 실험 순서를 정하고 실험 후 얻어지는 데이터에 대한 최적분석방법을 선택하였다는 의미이다⁽⁴⁾.

기존 문헌을 통해 알 수 있듯이 스피ndl의 강성에 가장 큰 영향을 미치는 파라미터로는 주축의 직경, 스피ndl에 사용된 소재의 탄성, 사용된 베어링의 강성 등을 들 수 있다. 본 연구에서 설계된 고속 주축 계는 기존의 공작기계 스피ndl의 대체품으로 개발된 것이므로 주축 외관과 치수는 변화시킬 수 없다. 그리고 스피ndl의 소재 역시 이미 정해져 있는 실정이다. 베어링 역시 상용제품을 사용하게 됨으로써 규격이 이미 정해져 있다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 초고속 가공기에서 스피ndl 시스템의 출력과 치수를 고려한 스피ndl 시스템의 외형, 즉 외경과 길이와 구속 주축을 지지하는 베어링이 발열이나 윤활 등에서 최적의 조건으로 선정되었다는 가정아래 베어링의 위치에 따른 1차 고유진동수 해석을 통하여 전방, 후방 베어링이 위치가 1차 고유진동수에 얼마만큼의 영향을 미치는지 알아보고 iSight 10.0[®]을 통하여 RBF 근사기법^(3,5)을 이용하여 근사모델을 구축하여 베어링의 최적의 위치를 찾아보았다.

스피ndl의 베어링의 초기위치와 Lower boundary와 Upper boundary를 Table 3과 같이 주어졌다.

Base line은 설계 초기치를 나타내며 Lower boundary와 Upper boundary 는 설계의 하한치와 상한치를 보여준다.

Table 3 베어링의 위치

	Initial condition	Lower boundary	Upper boundary
First Bearing	62	44	80
Second Bearing	239	225	240.5
Third Bearing	269	267.1	278

Table 3의 Base line의 값을 전산해석을 위하여 FEM 모델에 적용시킨 모습은 Fig. 3에 나타내었다.

먼저 초기 설계치(62, 239, 269)에 대한 전산 해석 결과 값을 나타내면 1차 고유진동수는 758.30Hz, 2차 고유진동수는 1373.0Hz, 3차고유진동수는 2914.7Hz로 나타났다. 758.30Hz를 rpm단위로 환산을 해보면 약 45,500rpm이다. 이는 스피ndl의 운전 rpm인 최대 40,000rpm과 13.7%의 상한치를 선회하는 주파수 대역이므로 1차고유진동수를 높이는 방향으로 설계변수가 지정되어야 함을 알 수 있다.

DOE는 iSight 10.0[®]의 DOE 방법 중의 하나인 Optimal Latin Hypercube⁽³⁾을 사용하여 베어링들의 Lower boundary와 Upper boundary사이의 값들을 적절히 샘플링 하여 30회의 실험계획을 수립하여 각각의 경우마다 ANSYS의 전산해석을 통하여 수행한 뒤 결과를 iSight 10.0[®]의 주 효과 선도를 통하여 분석하였다. Optimal Latin Hypercube는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 샘플링을 할 때 랜덤방식이 아닌 일정한 규칙에 의해서 샘플링을 하는 방식으로서 iSight 10.0[®]에서 제공하는 기능 중의 하나로 신뢰도 높은 ANOVA (Analysis of Variance)분석⁽³⁾과 모델에 맞는 근사기법을 제공하여 준다는 이점이 있다.

Table 3에 주어진 3개의 베어링에 위치에 따른 1차 고유진동수에 대한 주 효과 선도를 나타내면 Fig. 5와 같다. 주 효과 선도는 설계의 방향을 결정하는데 도움을 준다. 즉

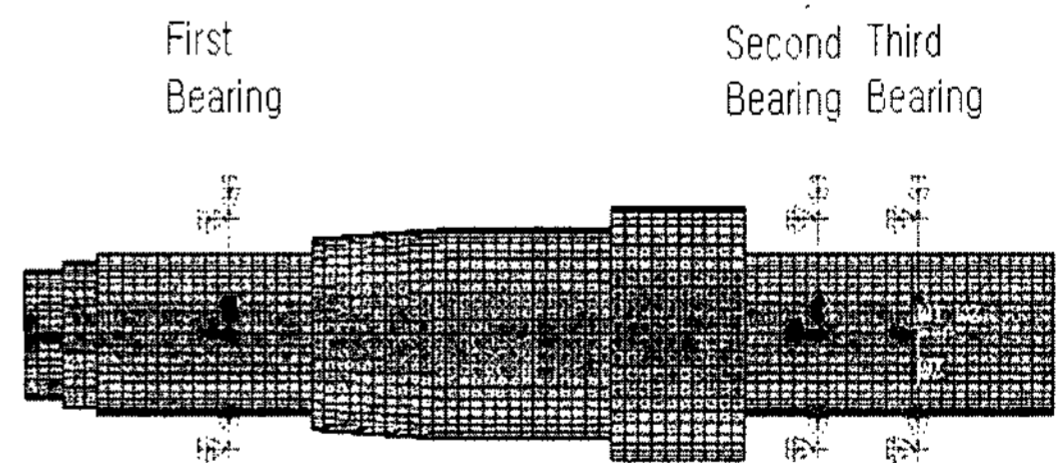


Fig. 3 Initial Bearing Position

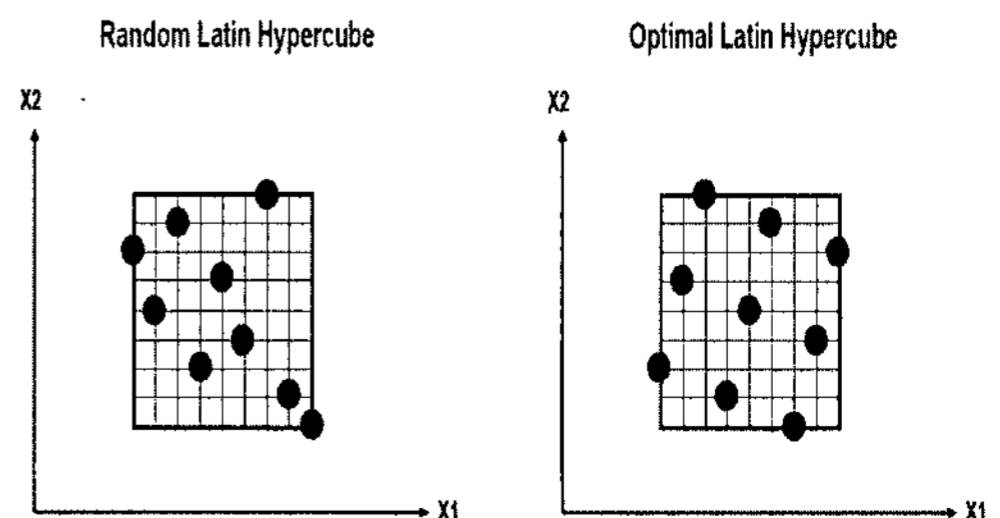


Fig. 4 Optimal Latin Hypercube Method

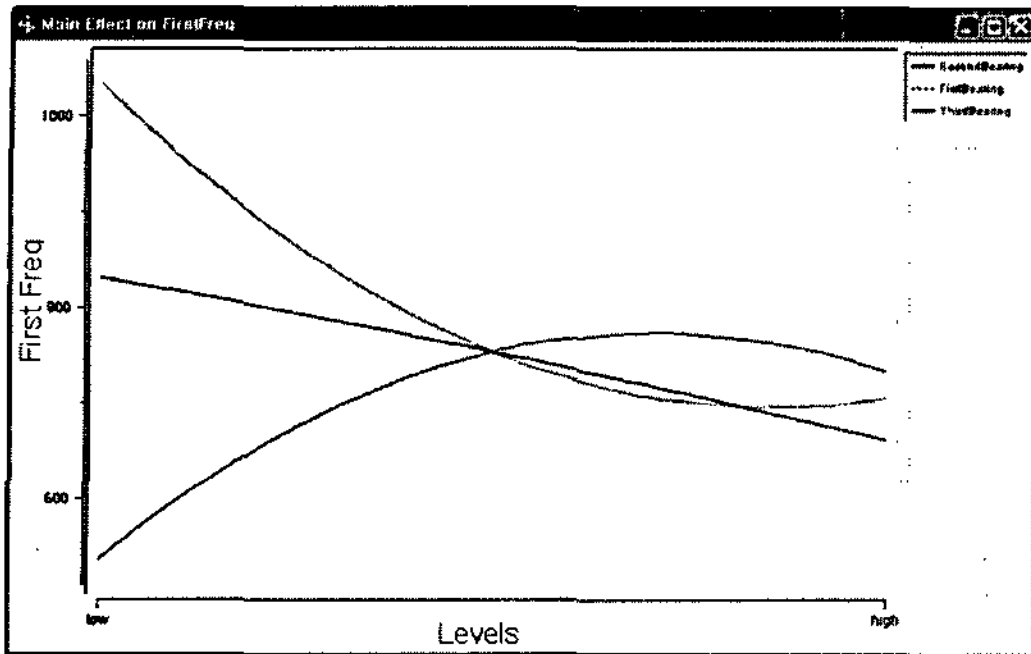


Fig. 5 Main effect plot of First Freq.

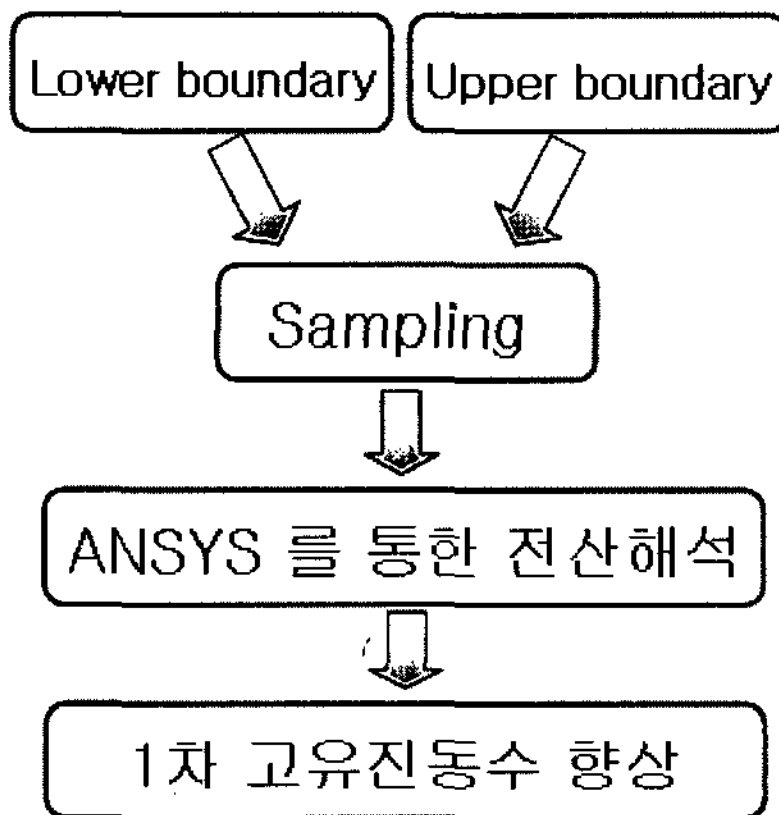


Fig. 6 Design Process

First Bearing, Second Bearing, Third Bearing 은 First Frequency를 높이기 위하여 설계가 되어야 한다. Fig. 6에 는 설계 진행과정을 간략하게 도식화 하여 나타내었다.

3.2 최적설계

현재까지 개발되어 온 전체 최적화 알고리즘은 통계적 요소가 포함되어 있는가의 유무에 따라 크게 결정론적 방법과 통계적 방법의 두 가지로 나눌 수 있다.

최근에는 이러한 결정론적인 방법과 통계적인 방법을 모두 적용 할 수 있는 최적 설계도구들이 개발 되었다. 본 연구에서는 (주)Engineous 사의 iSight 10.0[®]을 이용하여 최적 설계를 수행하였다. iSight 10.0[®]는 13가지의 최적화 알고리즘을 이용하여 최적화를 수행하는데 크게 수리적 기법, 탐색적 기법, 경험적 기법으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 RBF 근사기법을 이용하여 근사모델을 구축하여 베어링의 최적의 위치를 찾아보았다.

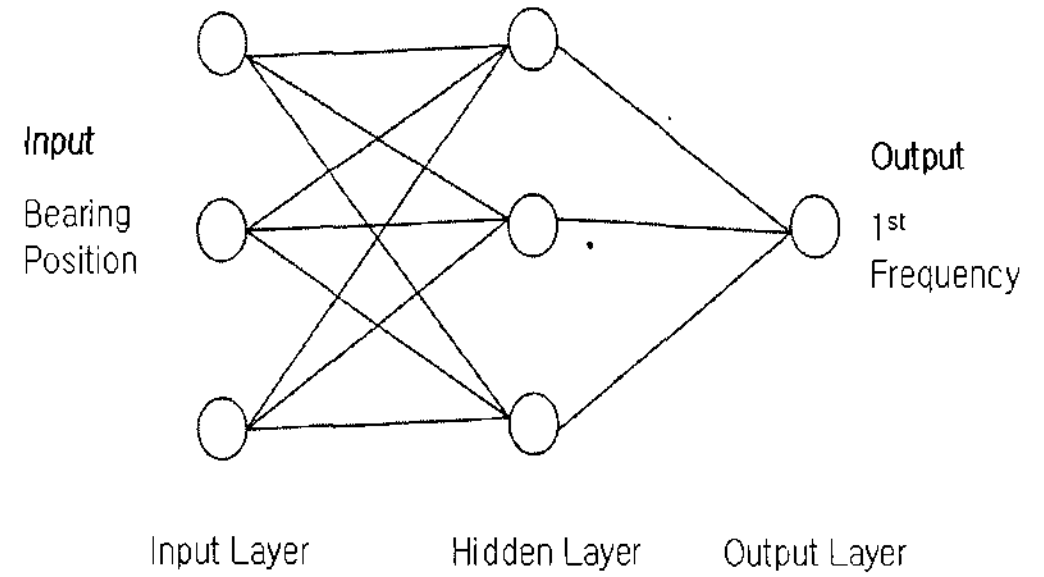


Fig. 7 Radial basis function neural network structure

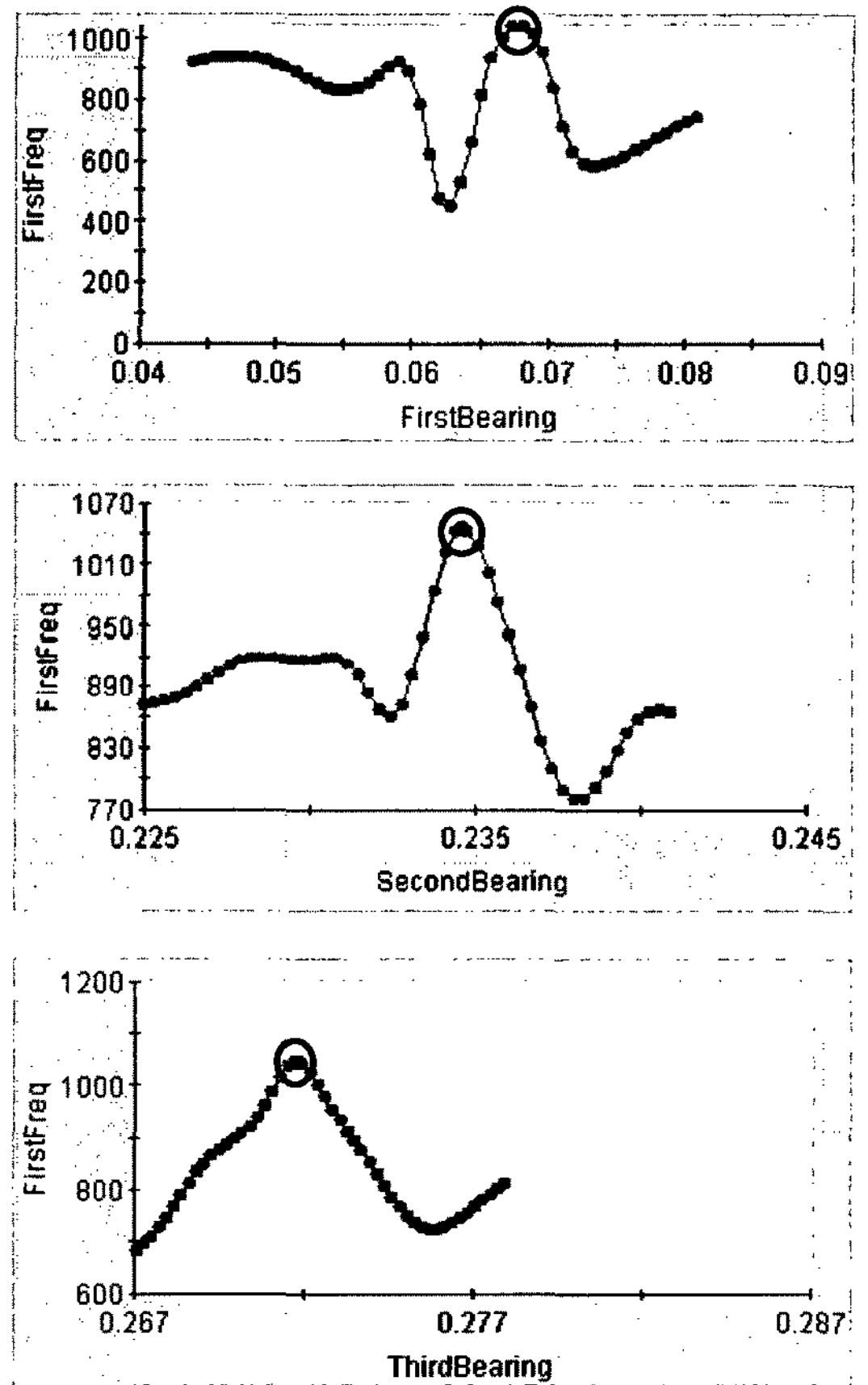


Fig. 8 Approximation of RBF model

일반적으로 최적 설계를 수행할 때 FEM으로 모든 경우의 해석 결과를 토대로 나온 값을 직접 이용한다면 정확한 통계치가 나오지만, 비선형 해석 같은 해석 시간이 긴 해석이나 해석의 횟수가 많이 필요로 하는 경우 최적설계에 많은 시간이 걸리는 단점이 있을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 RBF

근사기법을 이용하여 최적 설계의 데이터를 산출하였다.

RBF 신경망은 다차원 공간에서 curve fitting 하는 방법이다. 따라서 학습은 훈련 집합에 가장 잘 일치하는 다차원 공간에서의 하나의 곡면을 찾는 것이다. 교사 있는 학습으로써 미리 구성된 정확한 입, 출력 훈련 쌍을 이용하여 학습하는 방법을 사용한다. RBF 신경망의 구조는 Fig. 7에 도식화하였다.

RBF 근사기법에 의하여 구해진 근사모델을 First Bearing, Second Bearing, Third Bearing로 각각 나타내면 Fig. 8과 같다.

Fig. 8에서 주어진 데이터의 최고지점인 First Bearing 68.018mm과 Second Bearing 234.585mm, Third Bearing 271.182mm 일 때의 Output 결과는 1045.32Hz로 약 37.8% 정도 상승한 것을 알 수 있었으며 이를 통해 스피들이 1차 고유진동수에 한해서 설계가 향상되었음을 알 수 있었다. 자세한 데이터는 Fig. 9에 나타내었다.

그러나 Fig. 9에서 구해진 값들은 근사모델을 이용하여 구한 값이므로 타당성을 확보하기 위하여 최적 설계 값을 이용하여 다시 한 번 유한요소 해석을 직접 수행하는 재현성 해석을 수행하였다. 재현성 해석결과 1차 고유진동수는 1023Hz로 나타났으며 약 2.2%의 오차를 나타내었다. 이것은 근사모델의 한계 때문에 발생한 것으로 여겨진다.

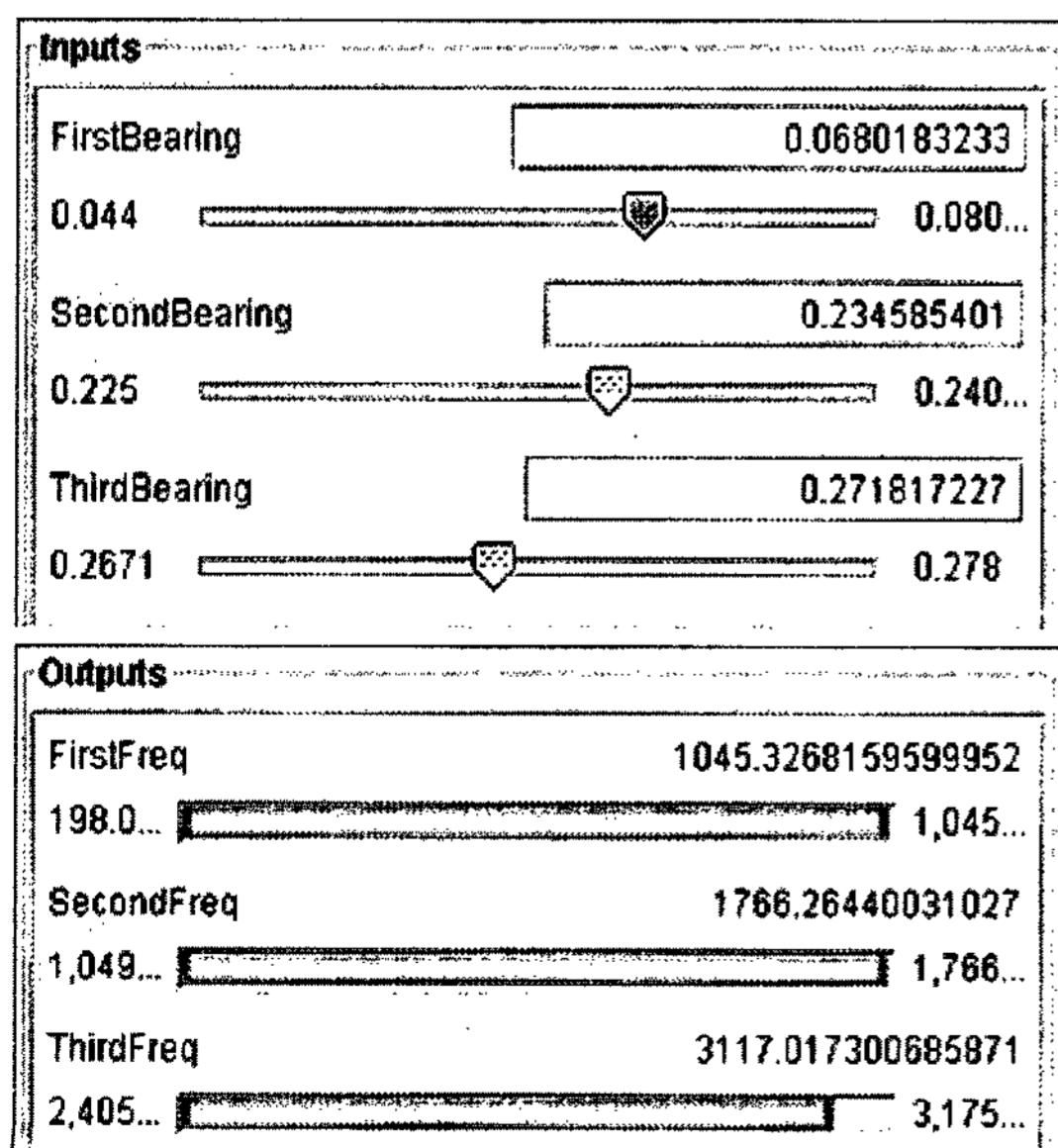
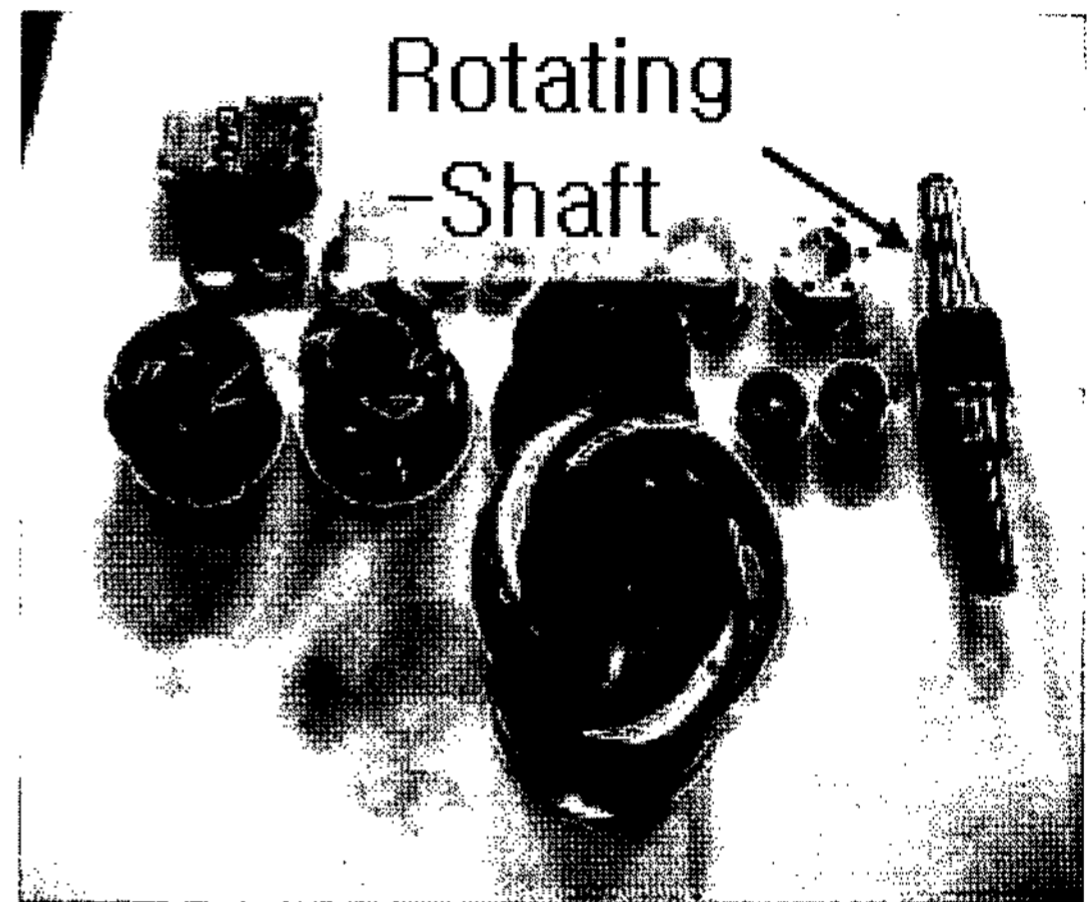


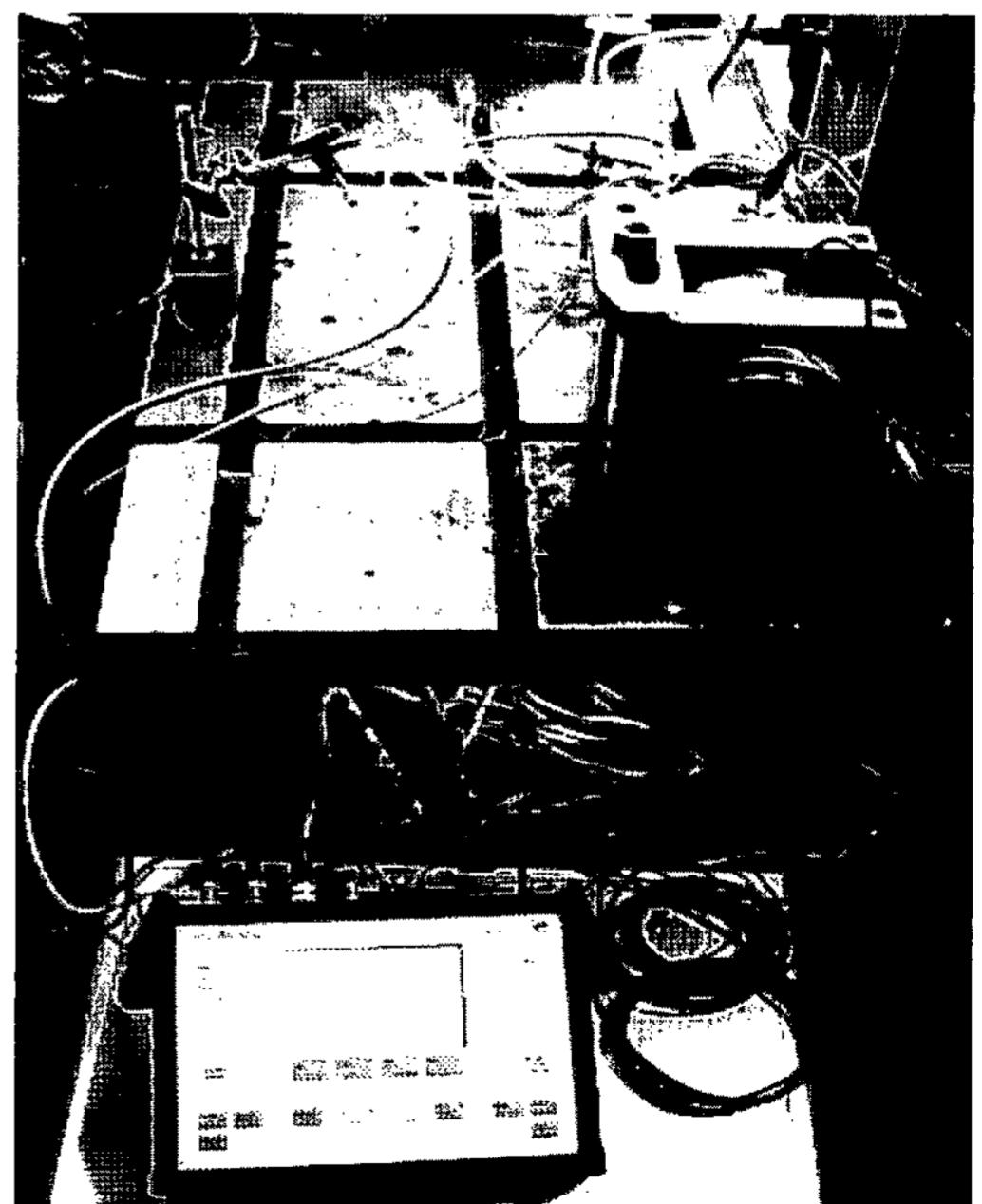
Fig. 9 Input and Output RBF model

3.3 40,000rpm 시제품 제작

설계된 40,000rpm 초고속 스피들에 대하여 RBF 근사모델에 의한 각 파라미터의 수준인 First Bearing 68mm과 Second Bearing 234mm, Third Bearing 271mm에 맞추어 Fig. 10 (a)와 같이 제작하였으며 Fig. 10 (b)에서 보는바와 같이 현재 성능테스트 중에 있다.



(a)



(b)

Fig. 10 Prototype of 40,000rpm Spindle

4. 결론

본 연구에 초고속 40,000rpm Built-In type 스피들의 1차 고유진동수를 높이기 위한 설계인자 중 First Bearing, Second Bearing, Third Bearing의 3 위치에서 베어링의 위치를 변화시켜 주었을 때, 1차 고유진동수의 변화를 알아보았다. RBF 근사기법에 의하여 구해진 근사모델의 베어링의 위치데이터의 최고지점인 First Bearing 68.018mm과 Second Bearing 234.585mm, Third Bearing 271.182mm 일 때의 Output 예상 결과는 1045.32Hz로 초기 데이터인 758.30Hz 보다 약 37.8%정도 상승한 것을 알 수 있었다. 그러나 이것은 근사모델을 이용하여 구한 값이므로 타당성을 확보하기 위하여 재현성 해석결과 1차 고유진동수는 1023Hz로 나타났으며 근사모델과는 약 2.2%의 오차를 나타내었다. 이를 통해 스피들이 1차 고유진동수 설계가 향상되었음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업[RTI04-01-03]의 지원으로 수행되었습니다.

이 연구에 참여자(의 일부)는 [2단계 BK21 사업]의 지원비를 받았습니다.

참 고 문 헌

- (1) Lim, J. S., Nam, K. Y., Chung, W. J., and Lee, C. M., 2006, "Development of 24,000rpm high-speed spindle by statistical Method," *KSMTE*, Spring Conference, pp. 285~290.
- (2) Chung, W. J., Cho, Y. D., Lee, C. M., Jung, D. W., and Song, T. J., 2006, "A Study on the Reduction of Unclamping Time by Design of Experiments," *J. of KSMTE*, Vol. 15, No. 3, pp. 1~7.
- (3) iSight Training Book, Engineous Korea, 2006.
- (4) Park, S. H., 2003, *Modern Design of Experiments (in Korean)*, Min-Young, Republic of Korea.
- (5) Yang, B. S. and Kim, Y. H., 2001, "Optimum Shape Design of a Rotating-Shaft Using ESO method," *Journal of the Korean Noise and Vibration Engineering*, Autumn conference pp. 360~364
- (6) Kim, K. K., Choi, S. P., Kim, Y. C., and Yang, B. S., 2000, "Model Updating Using Radial Basis Function Neural Network," *Journal of Korean Fluid Machinery Association*, Vol. 3, pp. 19~24.