

주축의 열변위를 고려한 초고속 스피ndl의 베어링 위치 선정

박수성*, 정원지†

(논문접수일 2011. 02. 07, 수정일 2011. 06. 30, 심사완료일 2011. 07. 08)

A Study on Select Bearing Position of High Speed Spindle Considering the Thermo Behavior

Su Seong Park*, Won Jee Chung†

Abstract

The thermal deformation of machine tool spindle influences the performance of the manufacturing systems for precision products. According to previous studies, major factors that will affect the stiffness of the spindle include spindle diameter, elasticity of the material, bearing stiffness and bearing span. It is difficult to change spindle diameter or elasticity of the material. but change of bearing position is easy in the given range compared to other factors.

In this paper, we will find a solution to minimize thermal deformation through Change the span of the bearing.

Key Words : High Speed Built-In Spindle(초고속 스피ndl), Bearing span(베어링 간격), FEM(Finite Element Model, 유한요소모델), Thermo Behavior(열적거동), Optimum Design(최적디자인)

1. 서론

최근의 공작기계는 항공, 자동차 산업등의 첨단산업과 관련한 소재공업의 고도화에 따라 부품가공의 고능률화와 고품위화가 요구되고 있다. 이에 부응하기 위해서는 공작기계의 고속화, 고정도화가 필수적인 요건으로 선진 각국에서 많은 연구가 수행되고 있다.

이러한 공작기계의 핵심 부품인 주축은 회전수가 높고, 강력 절삭과 정밀 절삭 능력 모두가 뛰어나야하며, 정적 및 동적 강성 또한 우수해야한다.

기존의 공작기계용 주축은 모터에서 커플링, 벨트, 기어등을 통하여 주축으로 동력을 전달하므로 이 때문에 고속 가공시 진동 및 소음을 유발하는 원인이 되었다.

이를 해결하고 만족하는 성능의 주축이 되기 위해서는 내장형 모터로 구동되는 형태가 되어야 한다.

모터 내장형 주축은 구조가 간단하고 벨트, 기어 등이 고속에서 발생시키는 문제점을 해결할 수 있지만 회전 시 내부발열로 인한 열변형 문제가 발생하게 된다. 이 열변형 문제는 정적이나 동적 변형에서 다루어지는 수 μm 와는 달리 그 변형 정도가 수십 μm 에 달하기 때문에 공작기계의 정도 개선에 있어서 우선적으로 다루어야할 문제이다.

기존 연구에서는 박성진, 김동현등은 베어링의 위치에 따른 스피ndl의 정적, 동적인 강성만 고려했을 뿐 베어링의 위치에 따른 주축의 열변위는 고려하지 않았다.

박기범등은 초고속 스피ndl의 설계 및 성능 예측에 관한 연구를 수행하였으나 단순히 실험계획법만을 이용하여 연구를 진행

* 창원대학교 기계설계공학과

† 교신저자, 창원대학교 기계설계공학과 (wjchung@changwon.ac.kr)

주소: 641-773 경상남도 창원시 의창구 사림동 창원대학교

하였기에 가장 최적화된 결과값을 도출하였다고 보기 힘들다.

또한 권구홍등은 iSIGHT 이용한 톨홀더 스피indle에 관한 최적화를 수행하였으나 ANSYS Workbench® 만 사용하여 해석을 수행하였으며 강성만을 고려하고 열변위를 고려하지 않았다.

이에 본 논문에서는 유한요소해석을 통하여 공작기계용 주축의 열적 거동을 최소화 하는 베어링의 위치를 선정하고자 한다.

2. 유한요소 모델의 구축

Fig. 1은 유한요소 해석 대상인 고주파 모터 내장형 주축계의 구조로 주축을 지지하는 전반부와 후반부의 베어링은 앵글러 콘택트 볼베어링을 사용하였고 베어링의 윤활은 오일&에어 방식을 적용하고 있다.

2.1 동특성 해석모델

베어링 간격에 따른 주축의 고유 진동수 변화를 해석하기 위하여 주축의 동특성 해석모델을 회전체 해석 전용 프로그램인 ARMD®를 이용하여 Fig. 2 와 같이 구축하였다.

2.2 열변위 해석모델

베어링 간격에 따른 주축의 열변위 변화를 해석하기 위해 상용 FEM(Finite Element Model) 해석 프로그램인 ANSYS Workbench® 12.1을 사용하여 해석 모델을 구축하였다. 주축계는 열적, 구조적으로 축대칭이므로 이를 고려하여 1/2만 모델링하였고 해석결과에 영향을 미치지 않는 부분인 조립 부분, 윤활유 및 에어 공급라인등은 근사화 하여 나타냈었다. 내장형 모터의 고정자의 곡면 부분은 직선형태로 단순화 하였고 베어

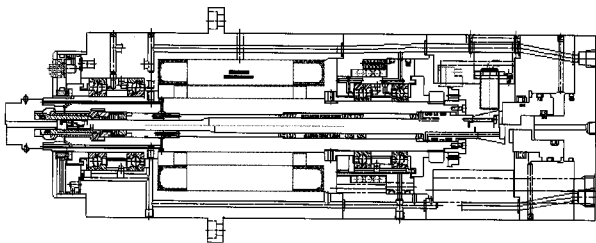


Fig. 1 Schematic diagram of spindle system

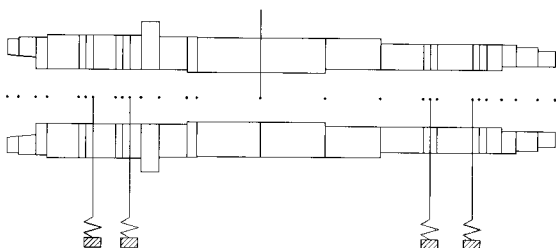


Fig. 2 FE model of spindle system using ARMD

링부도 모델링을 생략하고 발열에 대한 경계조건을 부여하였다. 구축된 모습은 Fig. 3과 같으며 Fig. 4에 고유진동수와 열변위 해석에 사용된 베어링의 간격 배치를 나타 내었다. 여기서 FB는 Front Bearing, RB는 Rear Bearing을 뜻한다.

Fig. 4 은 본 논문 연구 대상인 초고속 스피indle의 주축과 베어링의 위치를 나타내고 있다. 일반적으로 후반부 베어링에 비해 전반부 베어링이 질사력등 부가적인 요인으로 인해 후반부 베어링에 비해 발열이 높다.

또한 축방향 하중을 전반부 베어링이 지지하기 때문에 후반부 베어링은 축방향 하중을 지지할 필요가 없어서 대부분의 스피indle에서는 주축의 열변위가 앞쪽 보다는 뒤쪽으로 나타나도록 후반부 베어링이 밀리도록 설계하고 있다. 따라서 후반부 베어링은 간격의 조절이 비교적 전반부 베어링에 비해 용이하다. 본 논문에서는 전반부 베어링의 내부 조건을 고려하여 전반부와 후반부 베어링의 간격을 동일하게 ±5mm만큼 변경하여 해석을 수행하였다.

Table 1은 열변위 해석에 사용된 물성치를, Table 2는 베어링 간격의 초기값과 간격의 변화값을 나타 내었다.

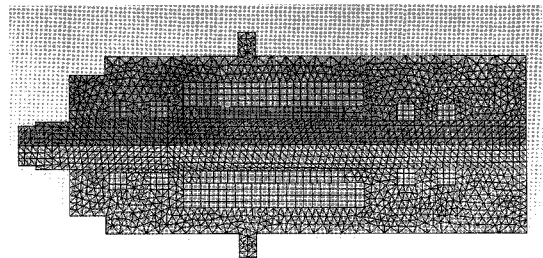


Fig. 3 FE model of spindle system using ANSYS

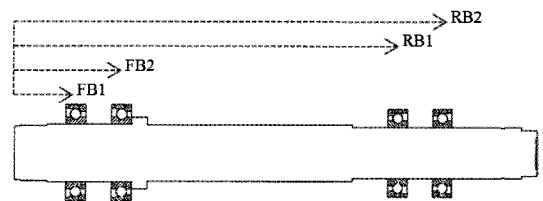


Fig. 4 Schematic diagram of bearing position

Table 1 Material properties of the spindle system

	Density ρ (kg/m ³)	Specific heat Cp (J/kg·°C)	Thermal conductivity k (W/m·°C)
Housing	7817	446	52
Rotor	6250	590	90
Stator	8124	437	148
Axis	1.165	1006	0.026
Air	7769	473	43

Table 2 Initial value and levels of experiments
(unit : mm)

	Initial Value	Lower Bound	Upper Bound
FB1	53	48	58
FB2	84	74	84
RB1	300.5	295.5	305.5
RB2	330.5	330.5	340.5

3. iSIGHT를 이용한 최적설계

실험에 있어서 데이터에 산포를 준다고 생각되는 무수히 많은 원인들 중에서 실험에 직접 취급되는 원인을 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 어떠한 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험 횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것이라고 정의할 수 있다. 하나의 실험계획법을 수립한다고 하는 것은 해결하고자 하는 문제에 대하여 인자, 실험방법, 실험 순서를 선정하여 실험 후 얻어지는 데이터에 대한 최적 분석방법을 선택하였다는 의미이다.

기존 연구 결과에 따르면 주축과 베어링의 강성, 베어링의 위치가 주축의 고유 진동수에 가장 영향을 많이 미치는 인자로 보고 있다. 본 연구에서도 베어링이 위치한 간격에 따라 고유 진동수와 열변위의 변화를 예측하여 최적의 베어링 위치를 선정하고자 한다. iSIGHT[®] 4.5에서 제공해 주는 OLH(Optimal Latin Hypercube)방법을 이용하여 100가지 경우의 인자값을 도출하였다.

OLH는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 샘플링을 할 때 랜덤방식이 아닌 일정한 규칙에 의해서 샘플링 하는 방식으로 iSIGHT[®] 4.5에서 제공하는 기능중의 하나이다. 신뢰도가 높은 ANOVA (Analysis of Variance)분석과 모델에 맞는 근사기법을 제공하여 준다는 이점이 있다.

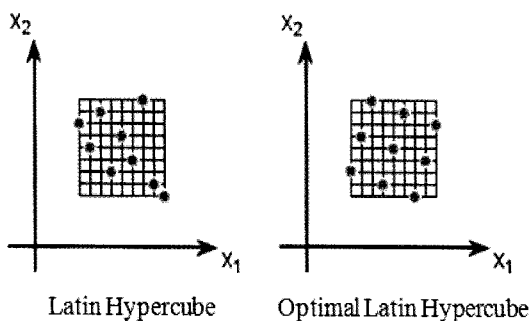


Fig. 5 Optimal Latin Hypercube

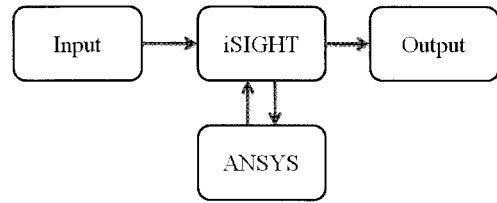


Fig. 6 Procedure of simulation using ANSYS workbench[®] and iSIGHT[®]

#	FB1	FB2	RB1	RB2	Result
1	55.37	77.03	297.22	331.21	26.967
2	55.27	82.99	297.82	333.93	27.3
3	57.6	74.4	300.85	336.36	26.567
4	50.83	78.04	305.4	334.34	28.667
5	57.39	77.74	297.72	336.76	27.567
6	54.26	74.71	304.49	337.27	27.533
7	51.33	78.44	304.99	333.33	27.167
8	56.28	75.92	298.63	335.35	28.367
9	48.51	82.69	302.07	333.53	27.567
10	53.15	75.62	298.13	339.69	26.633
11	54.87	80.36	305.5	334.64	27.633
12	57.29	79.25	302.97	334.94	27.733
...
87	49.11	81.68	297.62	332.22	26.6
88	49.31	78.65	296.41	338.48	26.967
89	57.09	80.16	302.27	330.6	27.367
90	53.25	83.6	299.64	330.7	28.033
91	52.75	83.7	303.98	336.26	27.667
92	49.41	80.67	299.84	330.9	28.433
93	50.63	83.09	298.53	336.56	28.267
94	54.77	82.79	298.03	332.92	27.167
95	53.35	81.17	301.96	337.47	26.1
96	48.4	77.33	302.37	335.55	28.2
97	48.0	78.95	301.06	335.45	27.5
98	48.2	76.02	296.61	336.86	27.533
99	56.18	76.12	304.69	331.81	26.967
100	57.9	80.57	296.31	335.85	28.1

Table 3 Levels of experiments

Fig. 6에서는 iSIGHT[®] 4.5와 ANSYS Workbench[®] 12.1과의 연동 방법에 관한 것을 나타내었다. 연동하는 방법은 우선 ANSYS Workbench[®] 12.1을 사용하여 처음 설계된 데이터를 바탕으로 해석을 실행하여 최초 해석 값을 Log 파일로 만들어서 iSIGHT[®] 4.5로 불러 들이고 input과 output 인자를 설정해 주면 된다.

OHL 방식에 의해 도출된 인자와 그에 따른 해석 결과 값을 Table 3에 나타 내었다.

iSIGHT[®] 4.5을 이용한 최적설계를 진행하기 위해선 상용 해석 프로그램과 iSIGHT[®] 4.5를 연동하는 과정이 필요하다. 사용빈도가 높은 상용 해석프로그램인 ANSYS Workbench[®] 12.1은 연동과정이 확립되어 있으나 ARMD[®]는 연동과정이 확립되어 있지 않아 OLH 방법을 이용하여 구해진 실험 데이터를 기반으로 실제 ARMD[®]로 100번 수행하여 최적설계를 진행하였다.

3.1 최적설계를 위한 근사기법 적용

현재까지 개발되어 온 전체 최적화 알고리즘은 통계적 요소가 포함되어 있는가의 유무에 따라 크게 결정론적 방법과 통계

적 방법의 두 가지로 나눌 수 있다.

최근에는 이러한 결정론적인 방법과 통계적인 방법을 모두 적용할 수 있는 최적 설계도구들이 개발되었다. 본 연구에서는 iSIGHT[®] 4.5를 이용하여 최적 설계를 수행하였다. iSIGHT[®] 4.5은 13 가지의 최적화 알고리즘을 이용하여 최적화를 수행하는데 크게 수리적 기법, 탐색적 기법, 경험적 기법으로 나눌 수 있다. 일반적으로 최적 설계를 수행할 때 FEM 으로 모든 경우의 해석 결과를 토대로 나온 값을 직접 이용해야 정확한 통계치가 나오지만, 비선형 해석 같은 해석 시간이 긴 해석이나 해석의 횟수가 많이 필요로 하는 경우 최적설계에 많은 시간이 걸리는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 RBF 근사기법을 이용하여 최적 설계의 데이터를 산출하였다.

RBF 근사기법을 이용하여 근사모델을 구축하고 열변위를 최소화 하는 베어링 간격을 구하였다.

RBF 신경망은 다차원 공간에서 curve fitting 하는 방법이다. 따라서 학습은 훈련 집합에 가장 잘 일치하는 다차원 공간에서

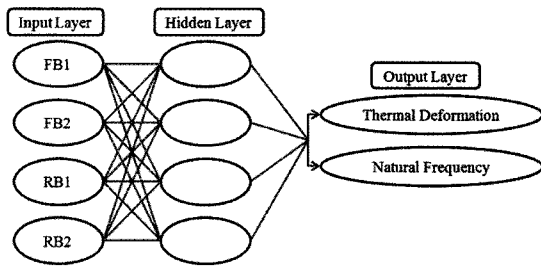


Fig. 7 Radial basis function neural network structure

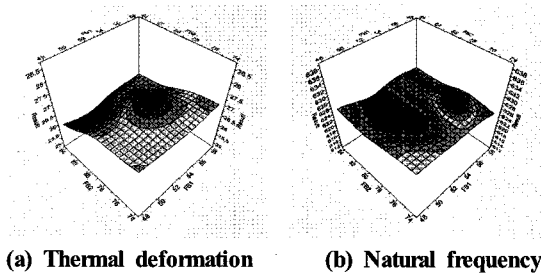


Fig. 8 Optimized approximation model

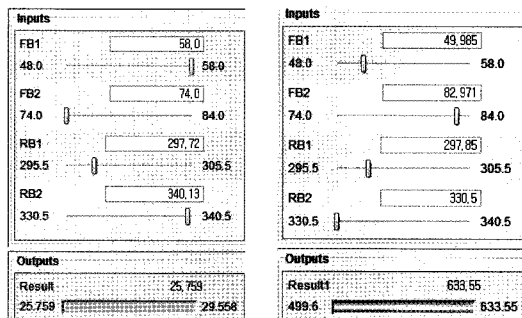


Fig. 9 Optimized approximation values

의 하나의 곡면을 찾는 것이다. 교사 있는 학습으로써 미리 구성된 정확한 입, 출력 훈련 쌍을 이용하여 학습하는 방법을 사용한다. RBF신경망의 구조는 Fig. 7에 도식화 하였다.

RBF 방법을 통하여 구축된 근사화 모델을 통해 1000개의 데이터를 해석 수행한 결과로 구해진 최적의 값은 Fig. 8, Fig 9와 같다.

동일한 RBF 방법을 통해 주축의 고유진동수를 최대화 시키는 베어링 위치의 최적 설계를 진행하였으며 열변위를 최소화 시키는 최적 설계와 함께 그 결과를 Table 4, Table 5에 나타내었다.

최초 설계 값에 비하여 고유진동수가 16.89% 증가하고 열변위가 4.23% 감소하였음을 알 수 있다. Fig. 9에 보이는 iSIGHT[®] 4.5에서 나온 최적 결과 값과 Table 5에서 보이는 결과 값이 다른 이유는 근사모델 구축으로 인한 오차 때문이다. Fig. 10 과 Fig. 11은 최적 결과값을 이용하여 각각의 상용 프로그램으로 해석한 결과이다.

Table 4 Initial values and optimized approximation values

	Initial Value (mm)	Optimized Approximation Value of Deformation (mm)	Optimized Approximation Value (Natural Frequency (Hz)
FB1	53	58	49.99
FB2	84	74	82.97
RB1	300.5	297.72	297.85
RB2	330.5	340.13	330.5

Table 5 Comparison of result using initial value and optimized approximation value

	Initial Value Result	Optimized Approximation Result	Optimization Rate
Deformation (μm)	27.16	26.004	4.23%
Natural Frequency (Hz)	520.18	625.88	16.89%

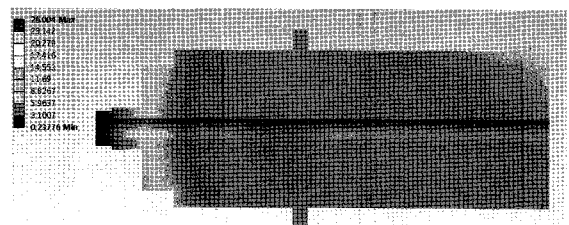


Fig. 10 Result of optimized approximation using ANSYS

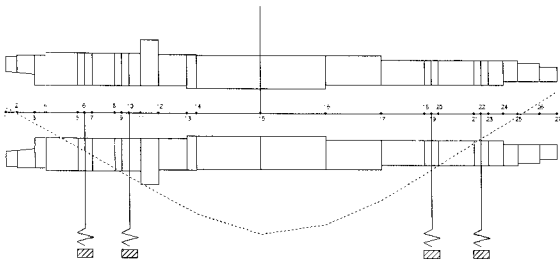


Fig. 11 Result of optimized approximation using ARMD

4. 최적 설계 도출

상용해석프로그램인 ARMD[®]와 ANSYS Workbench[®] 12.1를 활용하여 iSIGHT[®] 4.5에서 제공하는 최적설계 기법을 토대로 주축의 고유진동수와 열변위를 최적화 시키는 각각의 베어링의 위치를 구해 보았다. 이를 통해 고유진동수와 열변위,

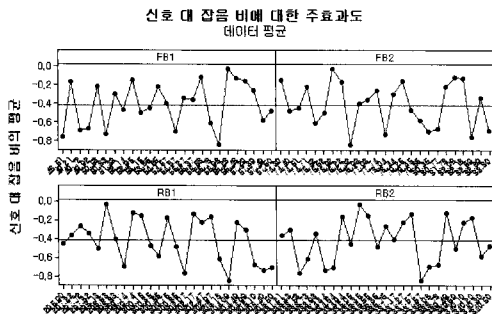


Fig. 12 Main effects plot for SN ratios

Table 6 Initial values and optimized approximation values (unit : mm)

	Initial Value	Optimized Approximation Value
FB1	53	56.48
FB2	84	75.62
RB1	300.5	298.63
RB2	330.5	335.35

Table 7 Comparison of initial value and optimized approximation result

	Initial Value Result	Optimized Approximation Result	Optimization Rate
Deformation (μm)	27.16	26.501	2.42%
Natural Frequency (Hz)	520.18	593.6	12.37%

두가지를 고려한 최적의 베어링 위치를 도출해 보고자 한다. 실무 경험자의 조언과 기존 선행 연구를 토대로 주축의 열적 거동에 열변위를 고려한 베어링의 위치가 8, 고유진동수를 고려한 베어링의 위치가 2의 영향을 준다고 가정하여 최적의 베어링의 위치를 Mitap[®]을 이용하여 선정하였다. Fig. 12에 S/N 비에 대한 주 효과도를 나타 내었고 선정된 최적 인자 값과 그에 따른 결과 값을 Table 6, Table 7에 나타 내었다.

5. 결론

본 연구에서는 초고속 스피들의 주축의 열적 변위를 최소화 시키는 베어링의 최적 위치를 고유진동수와 열변위 두가지를 고려하여 구해보았다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 고유진동수와 열변위, 각각의 경우에서 최적설계 결과 값은 625.88Hz, 26.501 μm 로 초기값 520.18Hz, 27.16 μm 에 비해 16.89%, 4.23% 향상된 결과를 보였다.
- (2) 고유진동수, 열변위를 2:8 가중치를 부여하여 최적 결과를 구했을 때 593.6Hz, 26.501 μm 로 12.37%, 2.42%의 향상된 결과를 보였다.
- (3) 근사모델과 실제 FEM 모델의 결과 값에서 오차는 0.94%~1.21%로 적은 오차를 보였다.

후기

본 연구는 지식경제부 지방기술혁신사업(RT104-01-03) 지원으로 수행 되었습니다.

참고 문헌

- (1) Lim, J. S., Yu, K. H., Chung, W. J., Kim, S. T., Lee, J. H., and Lee, C. M., 2009, "Thermal Characteristics Analysis of 30,000rpm High Speed Spindle," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 26, No. 7, pp. 120~126.
- (2) Kim, S. T., Kim, C. S., Choi, D. B., Kim, J. H., and Jeong, D. S., "The Temperature Distribution and Thermal Displacement Analysis of the High Speed Spindle According to the Bearing Preloads and Cooling Methods," *Engineering Research & Technology*, Vol. 5, pp. 13~18.
- (3) Lee, C. H., "Thermal Deformation Characteristics and Compensation of High Speed Spindle Unit," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 19, No. 5, pp. 7~12.

-
- (4) Kim, S. I., Jo, J. W., Lee, W. J., and Lee, Y. H., 2003, "Static/Dynamic/Thermal Characteristics Analysis of a High-speed Spindle System with 50,000rpm," *Korean Society of Precision Engineering, spring Conference*, pp. 494~499.
- (5) Report, 2004, *Study of the Clearance Control for High Speed Spindle Bearing and Optimization of Spindle Cooling System*, KIMM.
- (6) Kreith, F., and Bohn, M. S., 1993, *Heat Transfer Fifth Edition*, West Info Access, USA, pp. 315~356.
- (7) Lim, J. S., Lee C. M., Chung, W. J., and Lee, J. H., 2007, "FEM to Select Bearing Position of 40,000RPM High-speed Spindle," *Korean Society of Precision Engineering, Autumn Conference*, pp. 637~638.
- (8) Hwang, Y. K., and Lee, C. M., 2009, "A Study on the Determination of Shaft Size Using the Extreme Vertices Design," *KSMTE*, Vol. 18, No. 2, pp. 214~220.
- (9) Lee, C. M., Lim, J. S., and Chung, W. J., 2009, "Selection of Bearing Position for Improving Static and Dynamic Stiffness of 40,000rpm High-speed Spindle," *KSMPE* Vol. 8, No. 1, pp. 10~17.
- (10) Hwang, Y. K., and Lee C. M., 2009, "Determination of Shaft Size and Bearing Span Length using the Extreme Vertices Design," *KSMTE*, Vol. 18 No. 2, pp. 214~220.
- (11) Park, K. B., 2009, *A Study on Design and Performance Estimation of Super High Speed Spindle using iSIGHT[®]*, A Thesis for a Master's degree, Changwon University, Republic of Korea.
- (12) Kwon, K. H., 2010, *A Study on Optimal Design of the Tool Holder Spindle using iSIGHT[®]*, A Thesis for a Master's degree, Changwon University, Republic of Korea.