

초정밀 융합가공을 위한 주축이동식 자동선반의 구조해석에 관한 연구

박명규, 이봉구*
영남이공대학교 기계계열

A Study on the Structural Analysis of the Spindle of Swiss Turn Type Lathe for Ultra Precision Convergence Machining

Myung-Kyu Park, Bong-Gu Lee*

Division of Mechanical Engineering Technology, Yeungnam University College

요 약 공작기계의 주축은 황삭 가공에서 부터 정삭가공에 이르는 다양한 작업들이 가능해야 하고, 정속운동 또는 회전 위치결정의 기능을 수행해야 되므로 주축설계에 고려해야 할 변수들이 많다. 주축이동식자동선반은 고정식자동선반에 비해 샤프트가 가늘고 긴 핀 들을 작업할 때 좋은 선반이다. 고정식 자동선반에 비해 외경가공의 정밀도가 매우 높다. 주축 이송형 선반은 주로 소형 제품을 정밀가공 할 경우에 사용되므로 가공 정밀도가 높아야 한다. 최대 외경 가공 한계 치수는 $\varnothing 32$, 내경가공 한계 치수는 $\varnothing 6$ 까지 가공이 가능하게 제작되어야 한다. 본 연구에서는 주축이동식 자동선반에 사용되는 SCM440 소재의 정·동적특성을 이동식 선반에 적용하여 분석하였다. 주축의 정·동적 특성에 영향을 미치는 인자들을 고려하여 고속화 및 고정밀도를 갖는 최적설계기술이 확보하기 위하여 수치해석을 이용하여 분석하였다.

주제어 : 초정밀 융합가공, 유한요소해석, 공작기계, 구조해석, 주축설계, 베어링 수명

Abstract In the machine tool spindle, various tasks ranging from roughing to finishing must be possible, and the functions of constant speed movement or rotation positioning must be performed. Therefore, there are many variables to be considered in the spindle design. The Swiss Turn Type spindle automatic lathe is a good machine tool for working pins with thinner shafts than a fixed automatic lathe. The Swiss Turn Type spindle is mainly used for precision machining of small products, so the machining precision should be high. The maximum outer diameter limit shall be $\varnothing 32$ and the inner diameter limit shall be $\varnothing 6$. In this study, the static and dynamic characteristics of the SCM440 material used in the spindle type automatic lathe were analyzed by applying it to the Swiss turn type spindle automatic lathe. Numerical analysis was used to obtain optimal design technique with high speed and high accuracy considering the factors affecting the static and dynamic characteristics of the spindle.

Key Words : Ultra Precision Convergence Machining, Finite Element Method, Machine Tool, Main Spindle Design, Structural Analysis, Bearing Life

1. 서론

주축은 공작기계의 절삭력(cutting force)을 전달하는 핵심부분으로서 자중, 절삭저항, 회전력 등의 영향을 받

는다. 공작물의 가공정밀도를 높이기 위해서는 주축의 강성, 베어링의 지지 및 안전장치가 매우 중요한 요소이므로 주축의 설계에 있어서는 재질, 베어링의 위치와 구조, 주축과 베어링의 끼워 맞춤, 진동 등에 유의해야 한

*Corresponding Author : Bong-Gu Lee (positive@ync.ac.kr)

Received March 14, 2018

Accepted May 20, 2018

Revised April 26, 2018

Published May 28, 2018

다. 공작기계 주축에 요구되는 기본 기능은 저진동, 고정도, 고강성, 고강쇠, 긴수명 등의 요인들이 있다. 이러한 것과 동시에 주축의 고속화에 따라서 가공 능률과 가공정도를 향상시키기 위하여 최근에는 고속화에 대한 요구가 높아져 지속적인 연구개발에 심혈을 기울이고 있다. 일반적으로 주축계는 공작기계의 정밀도 및 가공성능을 결정짓는 중요한 요소로 간주되었다. 그러나 현재까지 공작기계용 주축의 설계는 주로 설계자의 경험에 의존하여 왔으며 정해진 설계과정이나 설계의 타당성에 대한 평가가 부족한 실정이었다. 어느 정도 안정화 되어 있는 범위 안에서 설계변경이 가능한 이유도 체계적인 설계와 설계도구의 부족에 있었다. 주축 시스템의 설계가 경험에 의존하는 설계를 극복하기 위해서는 보다 체계적인 설계과정과 유용한 설계 도구의 개발이 필요하다. 진보된 설계과정에서는 주축 설계용 프로그램을 도구로 사용하게 된다. 주축이 공작기계 일부지만 공작기계 전체의 성능을 결정하는 가장 중요한 부분이므로 주축 설계초기에 목표로 공작기계 전체의 성능을 만족시킬 수 있는 설계가 되어야 한다 [1].

회전축을 사용하는 공작기계 주축계에 있어서는, 주축의 베어링 끼워맞춤 구조로 되어 있어 절삭력 등의 부하가 전달되고 주축계의 구조 및 주축의 정적, 동적 강성에 의해서 가공점의 변이가 결정되었다 [2-4]. 게다가 열적 부하가 가해지면 주축의 열변형 뿐만 아니라 주축계의 정적, 동적 강성의 변화에 의한 운동오차도 생기게 된다. 즉 주축 베어링의 예압상태 및 강성에 따라서 주축에 발열이 있고, 그 열이 주축계의 요소 및 주변 구조체의 열변형을 일어나게 하고, 주축계의 강성이 변화하게 된다. 이것은 또 주축계의 발열상태의 변화를 초래해서 같은 변화를 반복하고, 주축의 도금 또는 주축의 열변위의 변동 및 운동오차를 생겨나게 한다 [5-13]. 공작기계에서 주축은 공작기계의 성능을 좌우하는 가장 중요한 핵심적인 부분이라 할 수 있으며 회전유닛으로 구성되어 있는 구조로 저속절삭에서부터 고속절삭에 이르기까지 절삭작업이 가능해야 하며 정속운동, 회전운동, 위치결정운동을 수행해야 하므로 설계 시 고려해야 변수들이 많다.

공작기계 주축의 설계 시 고려해야 할 사항으로 표준화된 주축 설계 방법, 절삭 방식, 체터 안정성 및 동적 특성 등이 있으며, 설계단계에서부터 주축의 정·동적 특성에 대한 신뢰성을 충분히 확보하여 정밀도를 향상시켜야 한다[14-16]. 따라서 주축의 정·동강성을 확보하고, 절

삭성능이 우수한 주축을 설계하기 위해서는 주축의 강성에 영향을 미치는 변수들을 고려하여 고속도, 고정밀도를 갖는 공작기계 주축의 최적설계방법이 필요하다.

대부분의 경우 주축의 요구특성에 따라 서로 다른 주축소재가 사용되고 있다. 일반적으로 보통 주축일 경우는 경화 열처리된 SM45C, SM50C와 같은 소재가 사용되며 고정밀주축일 경우는 유도경화 AISI 5140강과 미끄럼 베어링을 사용하는 주축일 경우는 AISI 5120강과 같이 주축의 종류와 특성에 따라 사용되는 주축 소재는 모두 다르다. 본 연구에서는 주축 이동식 자동선반(Swiss Turn Type)의 주축소재의 특성에 관한 연구를 유한요소 해석을 통하여 소재에 따른 최대응력과 최대변형을 비교 분석하였다. 주축 이동식 자동선반의 주축은 스위스 기계 산업을 위해 개발되었으며 현재는 작고 복잡하며 정밀 부품을 가공할 수 있도록 설계 되었다. 주축 이동식 자동 선반은 주로 소형 제품을 가공하기에 적합하고, 그만큼의 고정밀도가 요구되므로 소재 SM 45C와 AISI 5140 강 소재를 유한요소해석을 이용한 구조해석을 통해서 최대 응력과 최대 변형을 비교하여 주축의 강성에 미치는 영향을 분석하였다. 수치해석방법은 ANSYS Workbench를 사용하여 주축과 전륜부와 후륜부에 각각 2개의 앵글러 콘택 베어링이 지지하고 있는 모터내장형 구조로 설계된 주축을 3D 모델을 구성하여 수치해석을 수행하여 주축의 구조적 특징과 변형량을 예측하였다.

2. 주축계(spindle system)

주축계는 고속, 강력 절삭 상태에서도 회전 중에 열 발생이 적고 항상 기능을 유지해야 한다. 주축계는 공작기계의 종류와 가공하는 내용에 따라 주축계의 구조에 차이가 있다. 즉 주축의 직경, 사용할 베어링의 종류, 주축 베어링의 배치, 주축 구동 방식 및 윤활 등에 따라 설계자의 의도가 주축계의 구조에 나타난다.

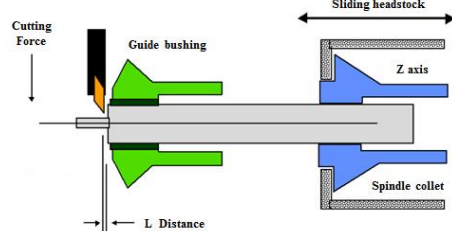


Fig. 1. Swiss Turn Type Spindle System

본 연구에서 사용한 주축계의 경우는 주축 카트리지와 서보모터 일체형인 모터 내장형 주축계의 한 형태로 현재 정밀가공 부품을 위한 12,000rpm의 주축 이동식 자동선반의 주축계를 사용하여 수치해석을 수행했으며, 주축이동식 선반 주축계의 구조를 Fig. 1에 도식화 하였다. 모터 내장형 주축계의 경우 주축모터와 주축이 결합된 구조로 고속회전에 주로 사용된다. 또한 벨트나 기어와 같은 동력전달장치가 없어 간단한 구조와 저동력손실, 저 소음으로 고속회전이 가능한 구조이며, 모터 및 베어링의 열원에 의한 주축 헤드의 열 변위 최소화를 위해 전륜부와 후륜부에 각각 2개씩 설치한 앵글러 콘택 베어링에 의해 주축이 지지되어 있는 모터내장형 방식을 채용하였다. 모터와 베어링 시스템의 적정 온도를 유지하기 위해 강제냉각방식인 페루프 냉각시스템을 적용하였으며 베어링을 윤활을 위해 오일분사 방식을 적용하였다. 유도기형 모터에 비해 약 90% 낮은 출력손실이 있는 동기모터를 사용함으로써 모터에 발생하는 열 또한 적다. 모터 내장형 주축계의 수치해석을 위하여 사용한 주축계 설계사양은 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of the spindle system

Item	Specification
Max. speed	12,000rpm
Bearing	Angular Contact ball bearing
Preload	Constant pressure preload
Motor	Built-in motor

3. 유한요소 모델링

모터 내장형 주축계의 유한요소모델은 솔리드 워크스를 이용하여 3차원 형상모델링을 하고 수치해석 프로그램인 ANSYS Workbench를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 3D 형상모델의 경우 모터내장형 주축계에서 발생하는 열을 강제 냉각방식인 페루프 냉각시스템을 적용하였으며 베어링을 윤활을 위해 오일분사 방식을 적용할 수 있는 구조로 실제 상용화된 주축계를 모델링하여 유한요소해석을 수행하였다. 수치해석에 사용한 주축계 모델은 좌우대칭 구조를 갖는 3D 축대칭 형상 모델을 가지고 해석을 수행하였다. 수치해석 모델은 평면 또는 곡면 위에 생성된 표면격자를 특정 경로 또는 회전 축을 따라 이동 시킴으로써 생성되는 스융격자를 생성하였다. 축 대칭 모델로 사용된 주축계의 모델의 절점(node)과 요소

(element)는 Table 2에 나타내었다.

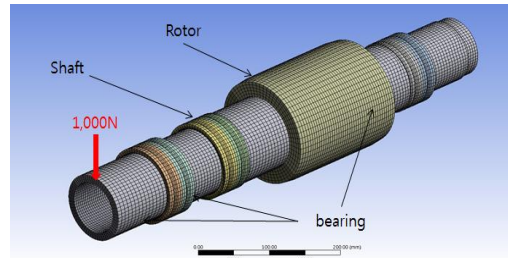


Fig. 2. Finite element mesh model

Table 2. Finite elements of spindle system

Spindle system	
Nodes	431,768
Elements	97,340

4. 경계조건

회전체에 일정한 격자를 얻기 위해 스융 격자법을 이용하여 주축요소모델에 적용하였다. 유한요소모델은 431,768개의 노드(node) 97,340개의 요소(element)로 구성되고 주축의 자중을 고려하였으며 반지름 방향은 완전 고정하고 축 방향으로 회전하도록 경계조건을 두었다.

해석을 위한 유한요소모델의 선단부 지점에 반경방향으로 1000N의 절삭력을 부여하였고, 주축의 자중을 고려하여 주축의 반경 방향으로 자중을 고려하였다. 주축 이동식 선반의 주축의 회전수를 고려하여 12,000rpm 정·동적 해석을 수행하였다. 주축의 구조적 특징과 변형량을 예측하기 위하여 사용한 주축모델의 재료는 크롬 몰리브덴강 SCM440을 사용하고, 해석 모델에 사용된 주축의 각부재의 재료의 물성은 Table 3와 같다.

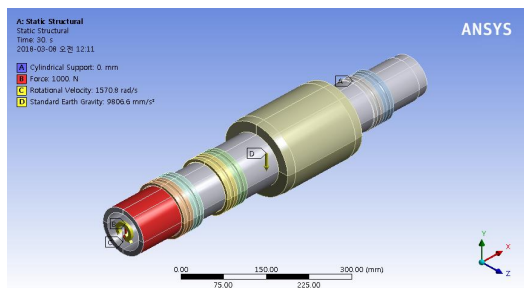


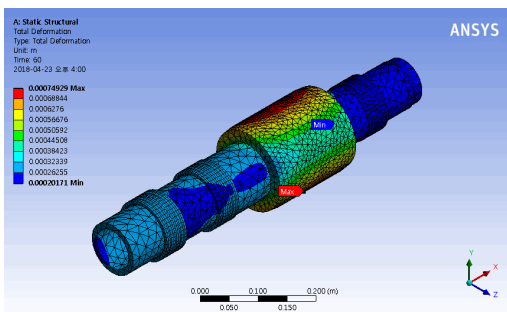
Fig. 3. Boundary conditions for spindle system

Table 3. Material property of spindle system

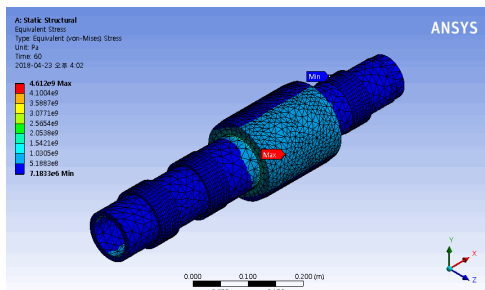
Part	Young's Modulus [GPa]	Density [kg/m ³]	Poisson's ratio
Shaft(SCM440)	200	7,850	0.30
Rotor(Steel 304)	193	8,000	0.29
Bearing(SUS440C)	200	7,850	0.30

5. 정적해석

수치해석은 해석 프로그램인 ANSYS Workbench를 이용하여 수치 해석을 수행하였다. 주축에 일정한 격자 구조를 얻기 위해 스융격자 기법을 이용하여 주축 이동식 선반 주축요소모델에 적용하였다. 유한요소모델은 주축의 자중을 고려하였으며 반지름 방향은 완전 고정하고 축 방향으로 회전운동을 경계조건을 두었다. 생성된 유한요소모델의 선단부 지점에 반경방향으로 1,000N의 절삭력을 부여하고, 축 방향으로 12,000rpm 으로 회전하는 주축의 정적 해석을 수행하였고 결과는 각 Fig. 4에서 나타난 최대변위와 최대응력 해석결과이다. 최대 변형과 최대 응력값은 Table 4와 같다.



(a) Maximum deformation



(b) Maximum stress

Fig. 4. SCM440 Analysis result of 12,000rpm

Table 4. Numerical results of SCM45 spindle

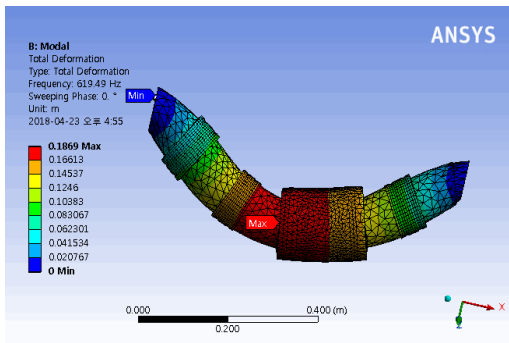
Mat.	[rpm]	Maximum Deformation [μm]	Maximum Stress[Mpa]
SCM440	12,000	26.97 μm	1660.3Mpa

Table 4는 수치해석을 통한 크롬 몰리브덴강 SCM440 재질의 주축의 최대 응력과 최대 변형율을 비교한 결과이다. 해석결과 12,000rpm인 경우에 최대 변형율 26.97 μm 와 최대 응력 1660.3Mpa으로 나타났다. 이는 절삭력 1,000N이 주축에 작용한 상태로 주축과 베어링의 마찰작용에 기인한 것으로 판단된다.

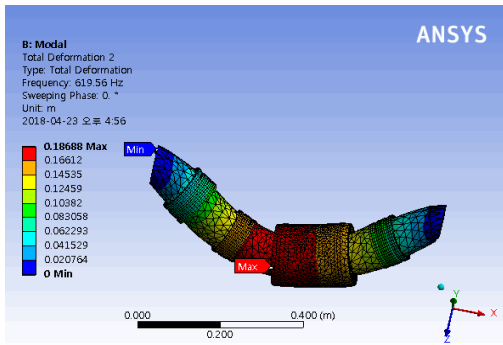
6. 동적해석

주축에서의 진동은 절삭작업 시 절삭공구가 공작물에 접촉되는 충격과 마찰력이 증폭되어 발생하며 고속으로 회전하는 주축의 회전중심과 질량 중심의 불일치로 오는 편심 회전운동으로 발생한다. 주축을 구동시키는 모터의 회전 진동수와 주축의 회전진동수의 일치로 발생하는 공진으로 인하여 큰 진동을 일으킨다. 이러한 공진현상은 주축의 내구성과 가공정밀도 심각한 영향을 미치고, 주축의 지지하는 베어링의 파괴에 영향을 미치게 된다. 스핀들의 회전에 의한 가진주파수는 가공시 주축의 회전에 기인한 것으로 동적 해석을 통해 모드별 고유 진동수와 회전수를 파악하여 공진이 발생하는 회전수를 제한할 수 있는 설계방안이 필요하다. 주축의 모드해석은 공진영역과 진동 주파수 대역을 분석하여 고속 주축설계에 반영할 우선 선행되어야 할 부분이다. 12,000rpm으로 회전하는 주축의 고유진동수를 4차진동 모드형상을 수치해석을 통하여 분석하였다.

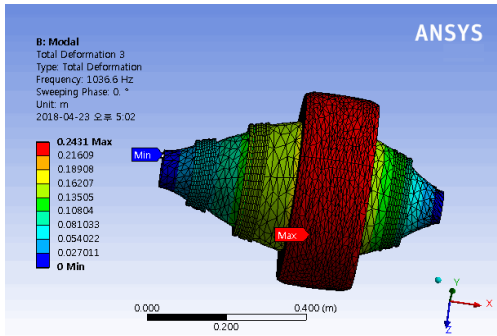
수치해석을 통해 주축의 고유주파수와 진동모드형상을 Fig.5와 Table 5에 나타내었다. 수치해석은 감쇠를 고려하였으며, 온도에 따른 스핀들의 탄성계수 변화와 베어링 지지부의 영향을 무시하고 해석을 수행하였다. 주축의 고유진동수는 1차, 2차 모드에서 약 619Hz 굵힘 고유 진동수를 확인하였다. 해석모델의 주축의 경우 12,000rpm(200Hz)인 것을 감안할 경우 충분히 높은 안정된 값을 나타내고 있다. 수치해석 모델의 최대 회전수는 12,000rpm 으로 공진주파수는 약 333Hz이므로 모드해석의 결과 충분한 안정된 값을 나타내고 있으므로 설계변수를 만족함을 확인하였다.



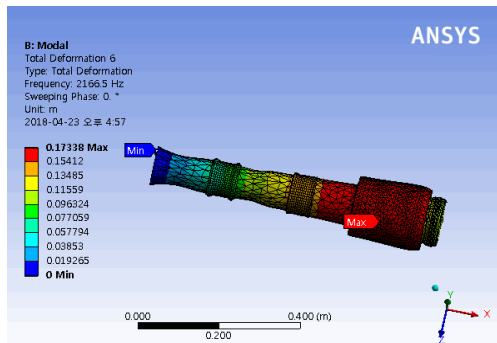
(a) 1st mode shape



(b) 2nd mode shape



(c) 3rd mode shape



(d) 4th mode shape

Fig. 5. SCM440 Analysis result of 12,000rpm

Table 5. Natural frequency of spindle

Mode	Frequency(HZ)
1	619.4
2	619.5
3	1036.6
4	2166.5

7. 결론

본 연구에서는 주축 이송형 선반(Swiss turn type) 에서 주축의 고유 진동수, 최대 변형량 및 등가응력 등을 수치해석을 통하여 평가하고 주축 설계에 필요한 동·정적 구조적 강성의 특징을 유한요소해석을 통하여 파악하였다. 가공정밀도에 영향을 미치는 주축 이송형 선반의 주축을 최적화 설계하기 위해 정·동적 수행하였다.

- 1) SCM440 소재의 주축이동식 자동선반의 주축설계를 위하여 주축 선단부에 절삭력 1000N을 가해진 상태에서 주축의 자중, 최고회전수 12,000 rpm의 경계조건하에 정적해석을 수행한 결과 최대 변형량은 26.97 μ m 최대 응력은 1,660MPa으로 나타났다.
- 2) 진동 모드해석 결과 주축의 1차 고유 진동수는 619 Hz로서 주축 회전수 12,000rpm에 비해서 상대적으로 2배이상 높기 때문에 주축의 동적 안정성은 우수하다고 판단된다. 본 연구에서는 초정밀 가공을 위한 주축 이동식 선반의 최고 12,000rpm 주축에 대해 수치해석을 통하여 최적설계의 동·정적, 구조적 안정성을 확인 할 수 있었다.

향후 본 연구의 해석 대상인 12,000rpm 주축 이동식 자동선반의 주축 설계시 주요변수로 베어링 강성, 주축의 열변형 등 주축설계의 기초 데이터로 활용하여 주축의 동·정적 특성개선을 위한 연구를 수행할 예정이다.

REFERENCES

- [1] E. G. Yoh, Y. R. Kim, K. K. Han, M. W. Park, Y. S. Lee & H. I. Yoo. (1998). A study on The Effects of the Bearing Parameters on the Main Spindle Design of Machine Tool, *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, 7(1), 119-125.
- [2] N. S. Oh, D. H. Kim & C. M. Lee. (2015). A Study on

- the Analysis of 20,000rpm Heavy-Cutting Spindle for Precision Machining, *Journal of Korea Society for Precision Engineering*, 32(1), 57-61.
- [3] M. J. Kim, C. M. Lee, J. H. Lee & G. B. Kim. (2014). The Measurement Method of a Vibration for Main Spindle of Machine Tool, *Journal of Korea Society for Precision Engineering*, 464.
- [4] J. W. Choi. (2015). Guidelines for Optimal Bearing Locations for High Dynamic Stiffness of a Machine Tool Spindle, *Korean Society of Mechanical Technology*, 17(5), 935-940.
- [5] T. J. Ko, H. S. Kim, H. S. Kim & S. H. Kim. (2001). Research on the Experiment Methods for the Compensation of Thermal Distortion of Machine Tool Spindle, *Journal of Korea Society for Precision Engineering*, 375-379.
- [6] C. H. Lee. (2002). Thermal Deformation Characteristics and Compensation of High Speed Spindle Unit, *Journal of Korea Society for Precision Engineering*, 19(5) 7-12.
- [7] I. J. Yoon, H. S. Kim, T. J. Ko & H. S. Kim. (2004). A Study on the Thermal Experiment for the Compensation of Thermal Deformation in Machine Tools, *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, 13(1), 1-8.
- [8] I. J. Yoon, H. S. Ryu, T. J. Ko & H. S. Kim. (2004). A Study on the Experimental Compensation of Thermal Deformation in Machine Tools, *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, 13(3), 16-23.
- [9] D. S. Son & J. H. Kook. (2017). A Study on Thermal Deformation of Spindle Unit at Machine Tool, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 140.
- [10] T. H. Lee. (2014). A Study on the Failure and Life Assessment of High Speed Spindle, *Journal of Korea Society for Precision Engineering*, 31(1), 67-73.
- [11] B. S. Kim, & J. K. Kim. (2001). A Study on the Static Stiffness in the Main Spindle Taper of Machine Tool, *Transactions of the Korean society of machine tool engineers*, 10(6), 15-20.
- [12] S. I. Kim, H. S. Lee & B. M. Kwak. (1991). Multiobjective Optimal Design of a Machine-Tool Spindle System, *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, 15(4), 1150-1159.
- [13] S. C. Lee, J. H. Hwang & C. H. Park. (2016). Kinematic Analysis for Calculating Loop Stiffness of Machine Tool, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 134.
- [14] O. Maeda, Y. Cao & Y. Altintas. (2005). Expert Spindle Design System, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45(4), 537-548.
- [15] C.-W. Lin & J. F. Tu. (2007). Model-based Design of Motorized Spindle Systems to Improve Dynamic Performance at High Speeds, *Journal of Manufacturing Processes*, 9(2), 94-108.
- [16] E. Abele, Y. Altintas & C. Brecher. (2010). Machine Tool Spindle Units, *CIRP Annals Manufacturing Technology*, 59(2) 781-802.

박 명 규(Park, Myung Kyu)

[정회원]



- 1993년 2월 : 경북대학교 기계공학과(공학석사)
- 2005년 2월 : 경북대학교 기계공학과(공학박사)
- 1992년 12월 ~ 1996년 12월 : 한국원자력연구원 연구원
- 2004년 5월 ~ 2007년 3월 : 대구전력산업기획단 선임 연구원
- 2007년 4월 ~ 현재 : 영남이공대학교 기계계열 교수
- 관심분야 : 산업기계, 탄소섬유복합재
- E-Mail : mkp@ync.ac.kr

이 봉 구(Lee, Bong Gu)

[정회원]



- 2003년 2월 : 연세대학교 기계공학과(공학석사)
- 2009년 2월 : 연세대학교 기계공학과(공학박사)
- 2000년 3월 ~ 2003년 7월 : 한국생산기술연구원 연구원
- 2009년 3월 ~ 2012년 2월 : 대림대학교 기계설계 교수
- 2012년 3월 ~ 현재 : 영남이공대학교 기계계열 교수
- 관심분야 : 초정밀 가공, CAD/CAM, 복합가공
- E-Mail : positive@ync.ac.kr