

예압과 냉각조건에 따른 고주파 모터 내장형 주축계의 열특성

최대봉*, 김수태⁺, 정성훈⁺, 김진한⁺, 김용기⁺⁺
(논문접수일 2005. 8. 7, 심사완료일 2005. 10. 14)

Thermal Characteristics of the High Frequency Motor Spindle according to the Bearing Preloads and Cooling Conditions

Dae Bong Choi*, Soo Tae Kim⁺, Sung Hun Jung⁺, Jin Han Kim⁺, Yong Kee Kim⁺⁺

Abstract

Use of the high frequency motor spindles are increasing for the high speed machine tools recently. The important problem in the high speed spindles is to reduce and minimize the thermal effect by the motor and ball bearings. Thermal characteristics according to the bearing preload and spindle cooling are studied for the spindle with the oil mist lubrication and high frequency motor. Temperature distribution and thermal displacement according to the spindle speed, preload and flow rate are measured. Temperature distribution and thermal displacement of the high speed spindle system can be estimated reasonably by using the three dimensional model through the finite element method. The results of analysis are compared with the measured data. This study supports thermal optimization and find out more effective cooling condition. This paper show that the suitable preload and spindle cooling are very effective to minimize the thermal effect by the motor and ball bearings.

Key Words : High Frequency Motor(고주파 모터), High Speed Spindle(고속 주축), Bearing Preload(베어링 예압), Spindle Cooling(주축냉각), Cooing Condition(냉각조건)

1. 서론

최근 공작기계의 발전경향을 보면 제품의 고도화, 즉 고

속화, 고정도화, 고강성화에 초점을 주고 있으며 공작기계 시스템에 있어서 주축계의 고속화는 공작기계의 성능을 좌우하는 필수적인 핵심 기술 요소라 할 수 있다^(1~3).

* 한국기계연구원 초정밀기계팀 (dbchoi@kimm.re.kr)
주소: 305-343 대전시 유성구 장동 171
⁺ 창원대학교 대학원 기계공학과
⁺⁺ (주)코스핀

고주파 모터 내장형 주축은 구조가 간단하고, 고속에서 벨트, 기어 등의 문제점을 해결하고 가격이 저렴한 장점이 있다. 소형 정밀 제품의 가공을 위하여 조각기, 내경 연삭기, 전용기, 소형 금형 가공기 등의 소형 가공기에 고속용 고주파 모터를 내장한 주축의 활용이 증대되고 있다. 그러나 모터가 주축에 내장되어 있기 때문에 열발생이 크므로 이의 대책이 필요하다.

고속 가공기에 큰 영향을 미치는 열변형을 감소시키기 위해 동작기계 주축의 열특성을 정확히 예측하는 것이 중요하고 또한 주축의 냉각과 베어링 예압의 방법과 조건을 설정하는 연구가 필요하다^(4~6).

따라서 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 여러 가지 열전달 현상을 고려하여 회전에 의한 주축계의 발열특성에 따라 주축계의 온도분포 및 열변형을 이론적으로 해석하고, 오일미스트 윤활장치와 증공축 냉각장치가 장착된 고속주축에서 베어링 예압 변화와 냉각 자켓-증공축 냉각유량에 따른 주축 각부의 온도상승 및 열변위를 측정하였다.

본 연구를 통하여 열변형을 예측하고 최소화할 수 있는 예압과 냉각의 조건을 파악함으로써 고속 주축계의 설계 및 가동 시에 열변형이 가공 정도에 미치는 영향을 최소화하는데 활용될 수 있을 것이다.

2. 실험

2.1 고속 주축계의 구조

Fig. 1은 해석 대상인 고속 주축계의 구조로서 주축을 지지하는 전반부와 후반부의 베어링은 접촉각(contact angle)이 15°인 세라믹 앵글러 콘택트 볼 베어링(ceramic angular contact ball bearing)을 사용하였다. 전반부에는 $\phi 55$ 베어링을 2개, 후반부에는 $\phi 35$ 베어링을 2개를 각각 설치하였다.

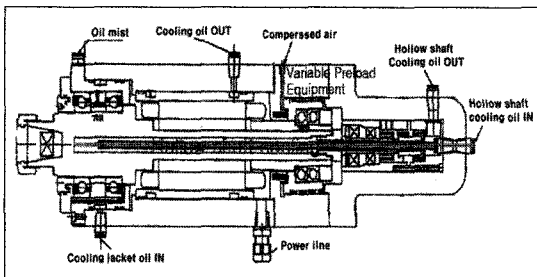


Fig. 1 Schematic diagram of the high speed motor spindle system

윤활방식은 오일미스트(oil mist) 윤활방식을 채택하였고 베어링 가변 예압장치를 장착하였다. (주)코스핀에서 제작한 모터내장형 고속주축을 사용하였으며 내장형 모터와 전반부 베어링의 발열을 냉각시키기 위해서 주축 하우징 외부에 냉각 자켓을 설치하고 증공축 냉각 장치를 장착하여 냉각오일을 강제로 순환시킬 수 있는 구조를 하고 있다.

2.2 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 장비의 제원과 실험조건은 Table 1, 2와 같다. Fig. 2는 실험 장치 구성의 실물사진이며, 주축에 부착된 열전대와 변위 센서의 신호는 앰프를 거쳐 데이터 획득 장치를 통해서 컴퓨터에 저장된다.

주축의 온도측정 부위에는 열전대를 전반부 베어링에 두 개, 스테이터 코일에 한 개, 모터 냉각 자켓에 두 개, 후반부 베어링에 한 개 등 총 여섯 개를 주축 하우징 속에 설치하고

Table 1 Specification of the experimental equipment

Item	Specification
Spindle	variable preload spindle (KOSPIN CO., Ltd)
Spindle dimension	diameter : 138mm length : 515mm
Spindle speed	max 18,000rpm
Bearing	7011, 7007
Bearing lubrication	Oil mist
Thermocouple	T type
Displacement sensor	gap sensor
Data acquisition device	HP/Agilent 34970A
Oil cooler	KD-55K
Inverter	OD-22040-KR
Compressor	S20-40-2hp

Table 2 The test conditions

Spindle speed(rpm)	10,000, 15,000, 18,000	
Preload(N)	290, 510, 730, 950	
Cooling flow rate(l/min)	Cooling jacket	3.7, 6.7, 9.7, 12.7
	Hollow shaft	0, 1.6, 2.3, 3.0
Cooler temp.(°C)	Atmosphere Temp. - 2°C	

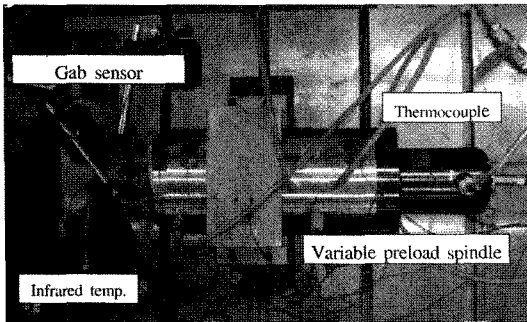


Fig. 2 Photograph of the experimental setup

오일 쿨러의 입구, 출구와 하우징 표면 등 다섯 개를 부착하였으며, 주축 선단부의 온도는 비접촉 적외선 온도계로 측정하였다. 변위 센서는 주축의 z축, y축과 하우징의 z축 변위를 측정하였다. x축은 좌우 대칭으로 열변위가 미소하여 측정을 생략하였다. 베어링 예압은 공기압 조절에 의하여 290~950N, 냉각 자켓의 냉각유량은 3.7~12.7l/min, 중공축의 냉각유량은 0~3.0l/min까지 가변하였다. 쿨러에서 공급되는 오일 온도는 실온보다 2°C 낮게 설정하였다.

3. 수치 해석

3.1 주축계의 모델링

주축계의 모터 발열, 베어링 발열, 냉각수 유량, 베어링 예압을 고려하여 온도분포 및 열변형을 해석하기 위하여 다음과 같이 근사화 하여 모델링을 하였다.

주축계는 열적, 구조적으로 축대칭이기 때문에 1/4 모델링하여 해석 시간을 단축하였다. 주축계의 윤활유 및 에어공급 라인, 부품과 부품의 조립 부분을 생략하거나 단순화하였고 내장형 모터의 고정자의 곡면부분은 직선 형태로 단순화하였다. 베어링(bearing)부는 모델링을 생략하고 발열 대한 경계조건을 부여하였고 주축계를 구성하는 각 부품들의 상태량은 온도의존성이 없고 일정하며, 주축계의 요소분할시 균일하게 분할하였고, 베어링부와 하우징의 온도 측정부위에 절점을 생성하였다.

Fig. 3에서는 이상의 근사에 의해서 생성된 주축계의 유한 요소 모델을 나타내고 있으며 모델의 치수 단위는 미터(m) 단위로 통일하여 실물과 동일하게 모델링 하였다. 분할요소는 Thermal-Solid70의 3차원요소를 사용하였고, 요소수는 16,932이고, 절점수는 29,868이다.

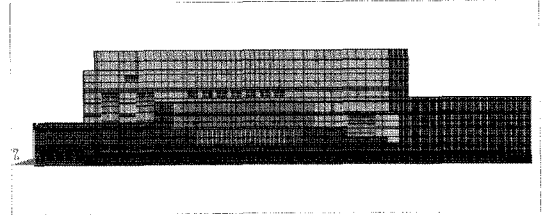


Fig. 3 FEM model of the high speed spindle system

3.2 베어링의 발열특성

고속 회전시 가장 문제가 되는 것은 자이로스코픽 모멘트에 의한 미끄럼이다. 앵귤러 콘택트 볼 베어링에서 일정한 접촉각이 있는 형식의 베어링에서 발생하는 모멘트이다.

베어링의 형식과 하중의 크기에 의해 결정되는 하중에 의한 동마찰 모멘트는 베어링 제작사에서 추천하는 계산식을 참조하여 계산하였다⁽⁷⁾.

베어링의 총발열량은 자이로스코픽 모멘트, 하중에 의한 동마찰 모멘트, 속도상의 동마찰 모멘트, 각각의 모멘트를 합하여 계산하였다⁽⁸⁾.

3.3 내장형 모터의 발열특성

주축계에 사용된 고주파 모터(5.5kW, 4극, 600Hz)의 발열량은 무부하 구동시 소비전력을 측정하여 Table 3에 주축의 회전수에 따른 모터발열량을 제시하였다.

3.4 냉각 자켓의 냉각특성

내장형 모터와 베어링을 냉각시키는 냉각 자켓을 따라 흐르는 냉각유는 비원형 사각 직관 속을 흐르는 것으로 가정할 수 있기 때문에 수력직경(hydraulic diameter)를 도입하여 냉각능력을 계산한다. 레이놀즈수가 2,300이상인 난류유동(turbulent flow)에 대한 관내부유동의 너셀트 수(Nusselt number)는 다음식과 같다⁽⁹⁾.

$$N = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^n$$

Table 3 Heat generation of the built-in motor

Spindle speed(rpm)	Stator(W)	Rotor(W)
10,000	578	289
15,000	866	433
18,000	963	482

여기서, Re : 레이놀즈 수
 Pr : 냉각 오일의 플랜틀 수
 n : 벽면과 내부 온도에 따른 지수

4. 결과 및 고찰

주축의 회전수와 베어링 예압 변화에 따른 주축의 온도와 열변위 측정 실험을 하였고, 베어링 부위에 해당하는 부분과 모터의 발열조건을 적용하였으며, 해석 주축계의 시간에 따른 온도분포와 열변위를 해석하였다.

4.1 베어링 예압에 따른 해석 및 실험 결과

Fig. 4는 주축 회전수 18,000rpm에서 베어링 예압 290N의 온도분포 해석 결과이다. 베어링과 모터의 로터 및 스테이터에 의해 주축대의 온도분포가 많이 차이가 나고 있어 모터의 발열과 후반부 베어링의 온도상승을 억제할 수 있는 냉각방법이 요구된다. Fig. 5는 주축의 회전수 18,000rpm에서 베어링 예압 290N에 따른 열변형 해석 결과이다.

Fig. 6은 베어링 예압이 290N일때 주축의 회전수에 따른 전·후반부 베어링과 모터 스테이터의 온도 변화에 대한 실험결과를 나타내고 있다. 전반부 베어링의 온도는 실온 18°C에 비해 10,000rpm일 때 23°C, 18,000rpm일 때 26°C로 주축의 회전수가 증가에 의해 크게 증가하지 않은 것은 전반부 베어링과 모터 부위에는 냉각 자켓이 설치되어 있기 때문이다. 주축의 회전수 18,000rpm일 때 상대적으로 후반부 베어링의 온도가 전반부 베어링보다 12°C 정도 높게 나타난 것은 후반부 베어링 측에 냉각 자켓의 구조상 미설치와 모터의

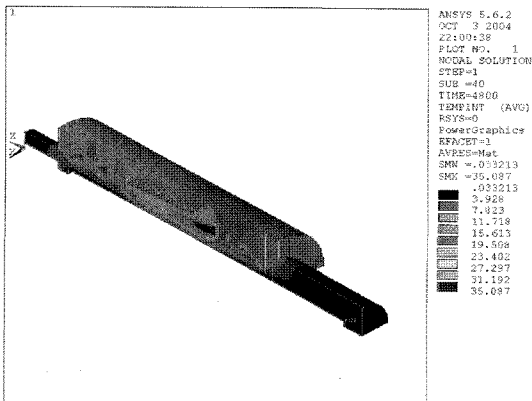


Fig. 4 Temperature distribution of the spindle at 18,000rpm

전선이 설치되어 있기 때문이다.

주축의 변형은 지그에 의해 고정된 부위를 중심으로 $\pm z$ 축으로 발생하고 있으며 전체적으로 온도분포 및 변위차가 크게 나타나고 있다. 베어링 예압에 따른 베어링의 온도, 주축변위 값은 Fig. 7, Fig. 8에서 그래프에 나타내었다.

Fig. 7과 Fig. 8은 주축 회전수, 베어링 예압에 따른 베어링의 온도와 주축 선단부의 z축 방향 변위의 실험과 해석결과를 나타낸 것으로, 비교적 잘 일치하고 있으며 예압 증가에 비례하여 온도와 변위도 증가한다. 실험결과를 비교해 보면 예압에 의한 전반부, 후반부 베어링 온도와 변위는 주축

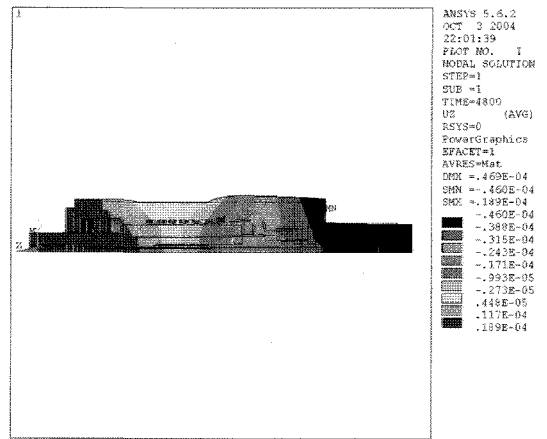


Fig. 5 Thermal displacement of the spindle at 18,000rpm

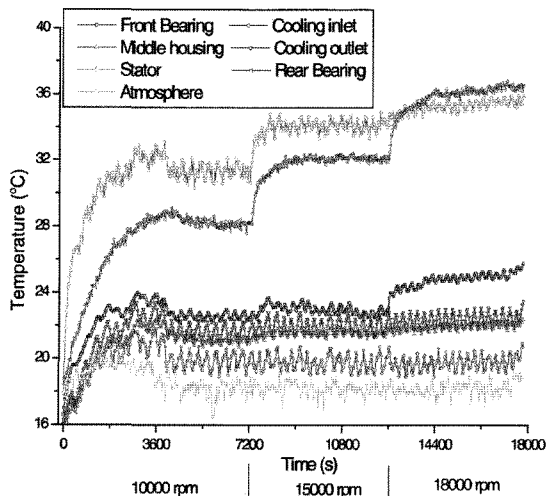
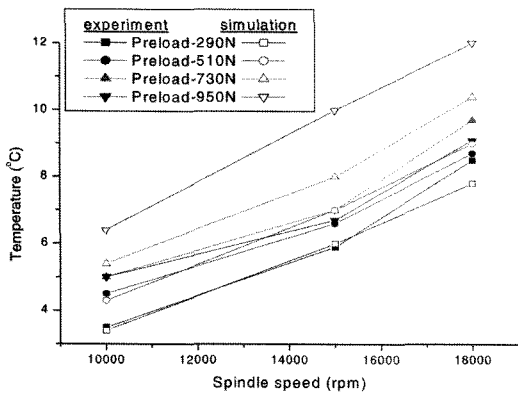


Fig. 6 Temperature of spindle according to the rotation (Preload : 290N)

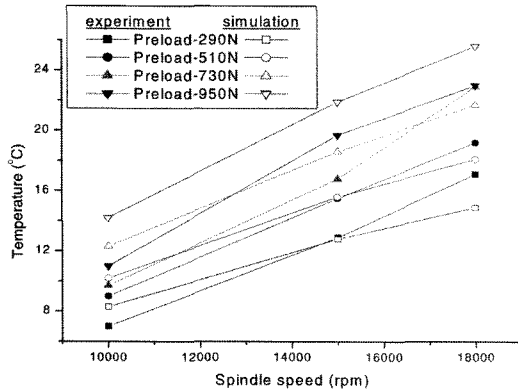
회전수 18,000rpm, 예압 290N 일때, 각각 실온 대비 전반부 베어링 8°C, 후반부 베어링 17°C, 주축 선단부 변위는 19 μ m 이며, 예압이 950N 일때 전반부 베어링 9°C, 후반부 베어링 23°C, 주축 선단부 변위는 26 μ m 증가하였다. 예압이 290N 일때 최소의 베어링 온도와 주축 변위를 나타내며, 베어링의 적절한 예압 임을 알 수 있었다.

4.2 냉각 유량에 따른 실험 및 해석결과

Fig. 9는 18,000rpm, 예압 290N인 경우 증공축 내부를 냉각하지 않은 상태에서 주축회전수와 모터 스테이터 외부 냉각 자켓의 냉각유량에 따른 전·후반부 베어링 온도와 주축의 변위를 비교하였다. 해석과 실험이 비교적 잘 일치하고 있으며 냉각 자켓의 냉각유량이 6.7l/min 이상일 때 모든 주축 회전수에서 베어링 온도와 변위의 증가량이 최소를 나타낸다. 증공축을 냉각하지 않은 경우와 비교해 보면 전반부 베어링은 1°C, 후반부 베어링은 약 8°C 정도로 효과가 크며, 열변위는 약 4 μ m 정도 감소효과가 있었다. 따



(a) The front bearing



(b) The rear bearing

Fig. 7 Temperature rise of the bearing according to the spindle speed and preload

다. 9.7l/min인 경우 다른 것에 비해 4 μ m 정도 높게 나타난 것은 베어링 조립공차와 모터의 발열에 기인한 것으로 생각된다. 온도와 변위를 비교해 보면 냉각 자켓의 적절한 유량을 6.7l/min으로 설정할 수 있다.

Fig. 10은 적절한 냉각 자켓의 냉각유량이 6.7l/min일 때 주축 회전수와 증공축을 내부냉각할 때 냉각 유량에 따라서 전·후반부 베어링 온도와 주축의 변위를 비교하였다. 해석과 실험이 잘 일치하고 있으며 냉각유량이 2.3l/min 이상일 때 모든 주축 회전수에서 베어링 온도와 변위의 증가량이 최소를 나타낸다. 증공축을 냉각하지 않은 경우와 비교해 보면 전반부 베어링은 1°C, 후반부 베어링은 약 8°C 정도로 효과가 크며, 열변위는 약 4 μ m 정도 감소효과가 있었다. 따

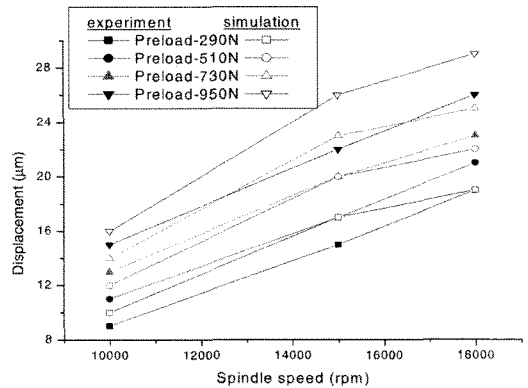


Fig. 8 Displacement of z axis according to the spindle speed and preload

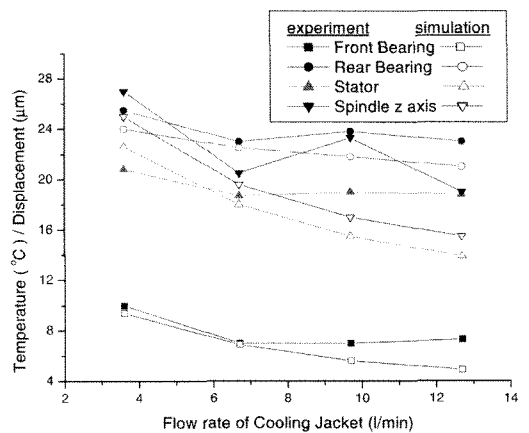


Fig. 9 Comparison of temperature rise and displacement according to the flow rate of cooling jacket at 18,000rpm

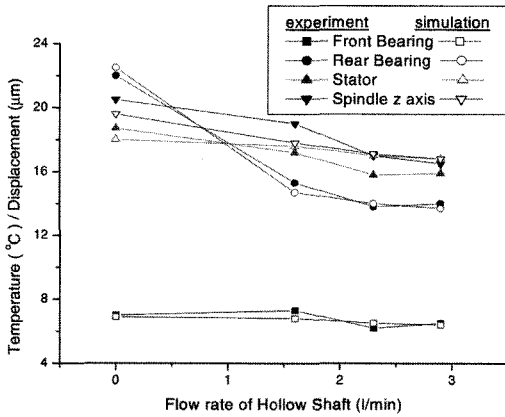


Fig. 10 Comparison of temperature rise and displacement according to the flow rate of hollow shaft at 18,000rpm

라서 온도와 변위를 비교해보면 중공축의 냉각 유량은 2.3 l/min 이상이 적절하다.

5. 결론

본 연구는 $d_m N=130$ 만인 고주파 모터 내장형 오일미스트 윤활 고속주축의 온도분포와 열변위 특성을 알아 보기 위하여, 가변 예압 장치 및 중공축 냉각장치를 설치하여, 주축회전수, 베어링 예압과 냉각 유량 변화에 대한 열특성 실험을 수행하였다. 유한요소법을 해석기법으로 하는 프로그램을 사용하여 열전달을 고려하여 고속 주축계의 온도분포 및 열변형을 해석하고 실험과 수치해석 값을 비교 검토함으로써 고속 주축계의 열적거동을 밝히고자 하였다. 또한 효과적으로 주축계의 온도와 열변형을 최소화하는 예압과 냉각조건에 대한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 주축계의 하우징과 전만부 베어링부는 냉각 자켓에 의하여 강제 냉각되므로 전체적으로 온도가 낮으며, 중공축 냉각은 후반부 베어링과 모터 스테이터의 냉각에 효과적임을 알 수 있었다.
- (2) 냉각 자켓과 동시에 중공축 내부를 냉각하여 주축의 온도상승 및 변위를 최소화하는 적절한 냉각 유량과 베어링 예압을 얻었다.
- (3) 냉각 자켓과 주축표면의 열전달, 내장 모터와 베어링의 발열을 고려하여 열전달해석을 수행한 수치해석 결과와 실험의 경향이 일치함을 확인할 수 있었다.

- (4) 유한요소법을 사용하여 복잡한 형상을 가진 고속주축계의 비정상 열전달 해석을 수행한 결과 이론적으로 온도 분포 및 열변형을 추정하는 것이 가능하고 고속 주축계의 초기 설계 단계에서 열적 최적화에 활용할 수 있다.

후기

본 연구는 과학기술연구부 및 창원대학교 공작기계기술 연구센터의 지원에 의한 것입니다

참고문헌

- (1) Nakamura, S., 1991, "High Performed Machine Tool Spindles," *J. of JSPE.*, Vol. 4. No. 57, pp. 605~609.
- (2) Muramatsu, A., Nakamura, S., Yoneyama, H., and Iwasaki, O., 1994, "Heat Conduction Analysis for Motor Integrated Spindle," *NSK Technical Journal*, No. 658, pp. 32~39.
- (3) Bossmanns, B., and Tu, J. F., 2001, "A Power Flow Model for High Speed Motorized Spindles - Heat Generation Characterization," *ASME J. of manufacturing science and engineering*, Vol. 123, No. 3, pp. 494~505.
- (4) Choi, D. B., Kim, S. T., Jung, S. H., and Kim, Y. K., 2004, "Thermal Characteristics of the High Speed Motor Spindle by the Variation of Bearing Preload and Cooling Conditions," *Machine engineering*, Vol. 4, No. 1~2.
- (5) Choi, D. B., Kim, S. T., Jung, S. H., and Kim, Y. K., 2004, "Thermal characteristics according to the preload and cooling conditions for the high frequency motor spindle with grease lubrication," *Proc. of 2004 KSMTE spring Conf.*, pp. 439~444.
- (6) Kim, J. K., Kim, S. B., Lee, J. K., and Kim, H. J., 1999, "A Study on the Thermal Behavior of Machine Tool Spindle System," *J. of KSMTE*, Vol. 8, No. 1, pp. 28~34.
- (7) FAG Hanwha Bearings Corp., Catalogue, WL 41 520/2 KA.
- (8) Harris, T. A., 2001, "Rolling Bearing Analysis," John Wiley & Sons, Inc..
- (9) Kreith, F., and Bohn, M. S., 1993, *Principles of "Heat Transfer*, Fifth edition," Thomson Learning College.