한국기계가공학회지, 제8권 제1호, pp. 3～9 (2009. 3)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.8 No.1, pp. 3～9 (2009. 3)

초고속 스핀들의 윤활조건 선정을 위한 기초 연구

안성환*, 이춘만#

A Foundation Study on the Selection of Bearing Lubrication Conditions in High-speed Spindle

Sung Hwan Ahn* and Choon Man Lee#

(Received 29 December 2008; received in revised form 25 February 2009; accepted 27 February 2009)

ABSTRACT

Recently, a high speed cutting is essential requirement to satisfy latest demand of high precision product and machining of hard materials. However heat generation by high speed rotation causes many problems. The machining error and shortening spindle lifetime by thermal stress is typical example. Generation of heat is mostly caused by sliding at the rotor and bearing. For minimization of heat generation at bearing, decision of the condition of proper lubrication is necessary. The thermal study about 40,000rpm spindle by changing the condition of oil-air lubrication method is carried out in this paper. The results of this paper can be used effectively in the decision of oil-air lubrication condition of other types of spindle for machine tools.

Key Words : Spindle(주축), Lubrication(윤활), Bearing(베어링), Thermal Experiment(열 실험), Thermal characteristic(열 특성), Oil-Air(오일-에어)

1. 서 론

최근 제조, 가공분야에서 다양한 난삭재의 등장과 제품의 고정밀화 요구 등으로 인해 고속가공은 금속의 절삭가공에서의 필수적인 요소가 되었고, 이러한 요구를 충족시키기 위해 주축의 회전속도는 더욱 증가하는 추세를 보이고 있다. 그러나 이런 고속화와 더불어 내부의 발열문제, 런-아웃(runout)에러, 강성의 저하 등의 여러 문제가 발생하였다. 이러한 문제들은 가공의 품질을 향상시키기 위해 반드시 극복해야할 과제들로 남아있으며, 이 중 발열 문제는 스핀들의 회전 속도 증가에 따라 수반되는 가장 큰 문제 중 하나로 남아있다.[1-3]

스핀들의 발열은 공작기계의 사용 가능한 최고 회전속도를 제한할 뿐만 아니라 절삭품질을 저하시키는 가장 큰 요인으로, 스핀들의 정적 또는 동적 위치오차에 영향을 주는 요인 중 약 70%가 이러한 발열 문제로 인한 것이라고 보고된 바 있다. 또 과도한 온도 상승은 위치 오차 외에도 주축을 구성하고 있는 이종 부품간의 상이한 열 팽창량으로 열응력을 발생시키며, 마찰 및 마모 증대의 원인이 되어 부품의 수명을 단축시킨다.[4-6]

* 창원대학교 기계설계공학과 대학원
# 교신저자:창원대학교 기계설계공학과 ()
E-mail : cmlee@changwon.ac.kr Tel. (055) 213-3622

일반적으로 스핀들에서의 발열은 빌트 인 모터(built-in-motor), 베어링, 윤활유, 외부 온도 등에 의해서 발생하는데, 이러한 발열 원인 중 베어링은 금속간의 직접적인 접촉을 일으키며 회전하므로 적절한 윤활을 통해서 금속간의 접촉을 막아주는 것이 필수적이다. 공작기계에서의 베어링은 회전하는 동안 지속적으로 윤활유를 공급받게 된다. 그러나 이러한 윤활의 조건이 적절치 못한 경우에 베어링에서의 발열이 증가할 뿐만 아니라 베어링 자체의 수명에도 좋지 않은 영향을 끼치기 때문에 적절한 윤활 조건을 선택하는 것은 스핀들의 발열 특성을 개선하여 절삭품질을 기여할 수 있을 뿐만 아니라 스핀들의 수명을 연장시키기 위해 필수적이다.[7-8]

본 연구에서는 오일-에어(oil-air)윤활 방식으로 초고속 스핀들(40,000rpm급)을 사용하여 다양한 회전속도에서 베어링 윤활 조건에 따른 발열 특성을 파악하기 위해 베어링부의 발열에 밀접한 영향을 미치는 윤활 주기와 공기의 압력 등의 변화에 따라 스핀들 발열 특성을 실험적으로 고찰하고자 한다. 이것은 초고속 스핀들의 운용 시에 윤활 조건을 선정할 때 사용될 지표의 기초 연구로 활용될 수 있을 것이다.

2. 실험 장치

Fig. 1은 윤활조건 선정실험을 하기위해 사용한 실험 장치를 보여주고 있다.

실험 장치는 크게 스핀들과 스핀들을 고정한 정반, 냉각 시스템, 윤활 시스템, 제어 시스템 그리고 온도 측정 시스템으로 구성되어 있다.

2.1 스핀들 시스템

실험에 사용된 스핀들은 16kW의 용량과 최대 회전 속도 40,000rpm을 가지고 있으며, 냉각과 오일-에어 윤활장치를 갖추고 있다. 스핀들에 사용된 베어링은 GMN사의 HY SM 6007C로 내경 35mm, 외경 62mm, 폭 14mm, 압력각 15°를 가지고 있는 고속 회전용 앵귤러 컨택트 볼 베어링(angular contact ball bearing)으로 전반부에 두 개, 후반부에 한 개를 사용하였다. 윤활 조건에 따른 온도 상승효과를 보다 정확히 확인하기 위해서 냉각 시스템은 가동하지 않았다.

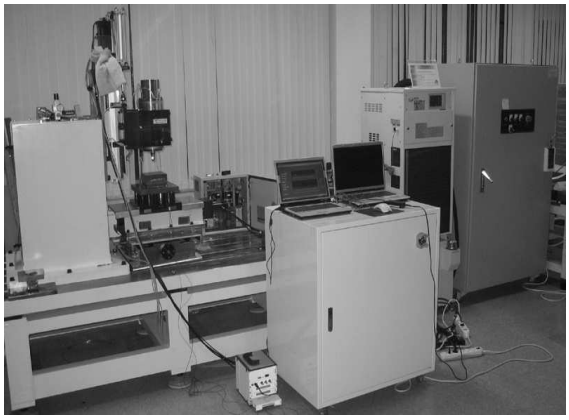

Fig. 1 Experimental set-up

2.2 온도 측정 시스템

온도센서로는 0~100℃에서 사용 가능한 T타입의 센서를 이용하였고, Fig. 2에 보이는 것과 같이 스핀들에 미리 제작된 구멍을 통해서 베어링에 센서를 직접 접촉시켜 온도를 측정하였다. 실험 데이터는 National Instrument사의 SCXI-1126을 사용해서 획득했고, Labview® 소프트웨어를 통해 데이터를 처리하였으며, 하드웨어 필터를 통해 노이즈를 제거했다.

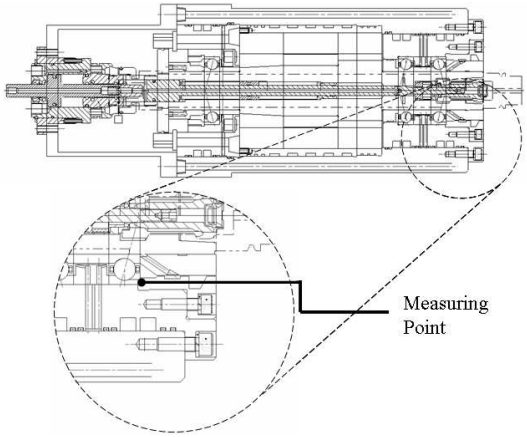

Fig. 2 A bearing temperature of Measuring point

2.3 윤활 시스템

윤활장치는 GMN사의 오일-에어 윤활장치인 PRELUB ST MV0를 사용하였다. 오일-에어 윤활방식은 적은 양의 윤활유가 튜브를 통해 이동하며 튜브 내부의 점성저항으로 인해 평균화가 이루어진다. 때문에 적은양의 윤활유를 일정하게 흘려줄 수 있는 장점이 있다. 윤활 장치에는 총 4개의 토출구가 있으며 그 중 2개를 이용하였고, 토출구에 장치되어 있는 조절장치를 이용해 공기의 압력을 조정 할 수 있고, 딥 스위치(DIP Switch)를 이용해서 윤활 주기를 결정 할 수 있다.

3. 실험

스핀들의 운전조건과 베어링의 윤활조건에 따른 스핀들의 발열특성을 분석하기위해 스핀들의 회전속도, 윤활주기, 공기압력의 변화에 대한 베어링외륜의 온도변화를 측정하였다. 실험에는 완전요인배치법(full factorial design)을 적용 총 세 가지 인자에 대해 세 수준을 적용하여 27회에 걸쳐 실험하였다.

3.1 1차 실험

3.1.1 실험 조건

1차 실험의 실험 조건은 Table 1과 같다. 윤활시간, 공기압력과 회전속도를 세 단계로 변화시켰고, 튜브의 길이는 2m로 고정하였다.

스핀들 가동 초기의 윤활유의 불균일한 공급과 이전 실험의 영향을 줄이고 갑작스런 스핀들의 가동으로 인한 영향을 줄이기 위해 최초 5분간 2,000rpm에서 가동시킨 후 윤활주기를 조정하기 위해서 윤활 타이머를 초기화하였다.

Table 1 Factors and Levels for First Experiments

Factors	Level 1	Level 2	Level 3
Lubrication interval (min)	2	3	4
Air pressure (bar)	3	4	5
Rotational speed (rpm)	10,000	20,000	30,000
Tube length (m)	2	2	2

윤활주기는 윤활유가 공급되는 주기를 의미하며, 본 연구에서 사용된 윤활장치는 매회 윤활유가 공급되는 양이 30㎣ 으로 정해져 있으므로 윤활주기에 따라 스핀들에 공급되는 윤활유의 양은 (1)식과 같이 표현되며, 공급주기가 짧아질수록 스핀들에 공급되는 윤활유의 양이 늘어남을 알 수 있다.

$$Q\,[mm^3/h] = \frac{n \times 30mm^3 \times 60}{Interval\ Time\,[\min]} \quad \cdots\cdots (1)$$

여기서, Q는 단위시간당 윤활유의 양, n은 실험에 사용된 노즐의 수로 본 연구에서는 2개가 사용 되었다. (1)식을 통해서 윤활주기가 2분인 경우 윤활유의 공급량은 1,800㎣/h이라고 할 수 있다.

공기의 압력은 압력 조절 밸브를 통해 조절하였다. 공기는 매회 공급되는 윤활유를 이동시켜 주며, 튜브 안에서 윤활유가 균일하게 잘 섞일 수 있도록 도와주는 역할을 한다. 또한 공기는 윤활유의 이동과 확산을 돕는 역할 외에도 스핀들을 직접 냉각시키는 기능이 있다. 그러나 압력에 비례해서 소음이 증가하는 문제점이 있다.[4,9]

스핀들의 회전 속도는 윤활 조건들이 각각의 회전속도에서의 영향을 분석하기 위해서 10,000rpm에서 30,000rpm까지 변화시키면서 실험을 수행하였다.

3.2.2 실험 결과 및 분석

실험으로부터 취득된 데이터는 상용 통계 프로그램인 MINITAB®을 이용하여 분석하였다.[10]

Fig. 3은 10,000rpm과 20,000rpm에서의 실험에서 측정된 데이터 값을 30,000rpm에서 측정된 온도 값의 평균값과 같아지도록 가중치를 주어 합산한 그래프이다. 전체 실험에서 윤활간격이 길어질수록 즉, 윤활유의 양이 작아질수록 발열양이 감소하는 것을 확인했다. 이러한 결과는 과도하게 공급된 윤활유의 교반저항에 의한 발열에 의한 것이라고 생각된다.

윤활주기가 2분일 때 약 31℃가 증가했고, 4분일 때는 약 27℃가 증가했다. 두 조건에 대한 온도 상승의 차이는 약 4℃이다. 이를 통해서 윤활주기를 조정하는 것만으로도 스핀들의 발열이 10%이상 줄일 수 있는 것을 확인 할 수 있다. 공기압력에 대한 영향을 보면 그 영향이 윤활주기보다는 작지만 공기의 압력은 증가할수록 베어링에서의 발열이 감소하

는 것을 확인하였다.

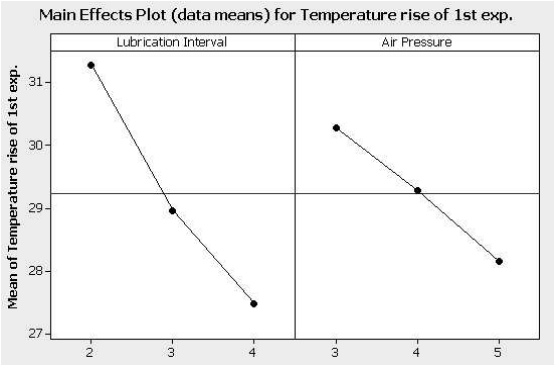

Fig. 3 Main effects plot of 1st experiments

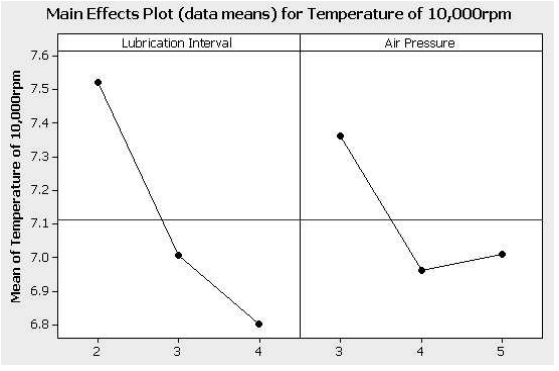

Fig. 4 Main effects plot of 10,000rpm experiments

Fig. 4, 5, 6은 각각 10,000rpm, 20,000rpm 그리고 30,000rpm에서의 윤활주기와 공기 압력이 온도 상승에 주는 주효과를 나타낸 그래프이다. 각각의 회전속도에서 윤활주기에 대한 효과는 모든 실험에서 동일하게 나타났다.

공기압력의 경우는 대체로 공기압력이 큰 경우에 발열이 적은 경향을 보였지만 각 회전속도에 따라 조금씩 다른 양상을 보여주고 있다. 10,000rpm에서는 3bar에서 발열량이 많으며, 4bar와 5bar에서는 비슷한 결과를 보였다. 그러나 20,000rpm과 30,000rpm에서는 공기의 압력이 증가할수록 발열량이 감소하였다. 본 실험만으로는 각 회전속도에 대한 공기압력에 대한 영향이 조금씩 다르게 나타나는 이유가 실제 회전속도와 공기압력과의 교호작용으로 인한 것인지, 실험에 의한 오차로 인한 것인지 알기 어려우나, 공기압력이 큰 경우에서 대부분 좋은 결과를 보였다.

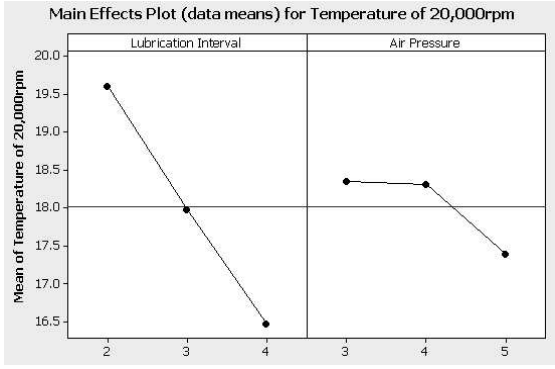

Fig. 5 Main effects plot of 20,000rpm experiments

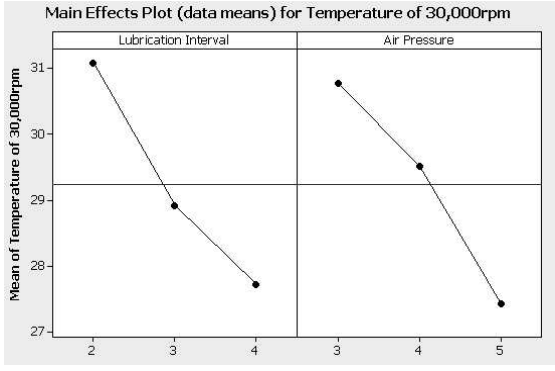

Fig. 6 Main effects plot of 30,000rpm experiments

3.2 2차 실험

앞서 수행하였던 1차 실험을 바탕으로 조금 더 정확하고 세부적인 데이터를 얻고자 회전속도를 고정하여 실험을 계획하였다. 2차 실험에서 회전속도가 높을 경우 베어링의 온도가 과도하게 상승하는 것을 피하기 위해 1차 실험 중 발열량이 가장 적은 10,000rpm으로 2차 실험을 계획하였다.

3.2.1 실험 조건

2차 실험의 실험 조건들은 Table 2에 보이는 것과 같다. 윤활 시간, 공기 압력과 튜브의 길이를 세단계

로 변화시켰고, 회전 속도는 10,000rpm으로 고정하였다

Table 2 Factors and levels for 2nd experiments

Factors	Level 1	Level 2	Level 3
Lubrication Interval (min)	2	4	10
Air pressure (bar)	3	4	5
Tube Length (m)	1	2	3
Rotational speed (rpm)	10,000	10,000	10,000

윤활 주기는 앞서 1차 실험에서 윤활유의 공급이 적을수록 발열이 작았던 실험 결과에 대한 확인, 더 넓은 윤활 주기에서의 효과를 보기 위해 윤활주기를 2분에서 10분까지 실험할 수 있도록 설정하였다. 윤활 주기가 10분일 때 (1)식을 통해서 윤활유의 공급량은 360㎣/h임을 알 수 있다.

윤활공급용 튜브의 길이는 오일-에어 윤활의 윤활유 공급 장치에서 스핀들로 이송시켜 주는 기능 외에 오일과 공기가 충분히 섞일 수 있는 공간을 제공하는 기능이 있다. 그러므로 적절한 길이의 튜브가 요구된다. 본 실험에서 사용된 윤활장치는 외경 6mm, 내경 4mm, 길이는 최소 1m에서 최대 10m의 길이를 추천하고 있다. 튜브 길이가 너무 짧은 경우에 오일과 에어가 적절히 섞일 수 있는 시간과 공간이 부족하게 되고 반대로 필요 이상으로 긴 경우에는 흩어졌던 오일이 이송 도중에 다시 뭉쳐 윤활유의 공급이 일정하지 않게 되는 영향이 있다.[11]

3.2.2 실험 결과 및 분석

Table 3 ANOVA table of 2nd experiments

Factors	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Lubrication Interval	2	10.78	10.78	5.39	13.43	0.000
Air pressure	2	1.73	1.73	0.86	2.16	0.142
Tube Length	2	1.33	1.33	0.66	1.66	0.216
Error	20	8.02	8.02	0.40		
Total	26	21.87	21.87			

Fig. 7은 2차 실험에서 윤활 주기, 공기 압력, 튜브의 길이가 온도 상승에 주는 주효과를 나타낸 그래프이고, Table 3은 2차실험에 대한 분산분석표이며 일반적으로 95%의 유의수준 P값이 0.05보다 작음으로 볼 때 분산분석결과 그 인자의 효과는 유의한 것으로 분석 할 수 있다.

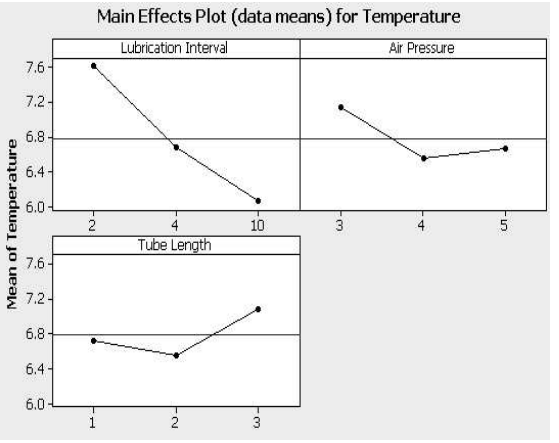

Fig. 7 Main effects plot of 2st experiments

윤활 주기에 대해서는 1차 실험과 동일한 온도 변화를 얻을 수 있었고, 더 넓은 윤활 간격에서도 동일한 효과를 얻을 수 있음을 확인했으며, P값을 통해서 매우 유의함을 확인하였다. 윤활유가 부족하여 유막이 파괴되지 않는 범위 내에서 윤활유의 양을 최소로 하는 것이 베어링의 발열을 억제하는 데 도움을 줄 것으로 판단된다. 베어링부의 발열을 최소로 할 수 있는 윤활유의 양은 현재 실험으로 정확하게 알기 어려우며 이를 확인하기 위해서 추가적인 실험이 요구된다.

공기의 압력에 대해서는 4bar이상일 때 발열이 최소가 됨을 알 수 있었다. 이는 오일이 공기와 충분히 섞이게 할 수 있는 압력 이상만 된다면 충분하다고 볼 수 있다. 필요 이상의 과도한 공기 압력은 많은 소음을 유발했다. 그러나 1차 실험의 20,000rpm 또는 30,000rpm의 회전 속도에서의 실험 결과와 비교해 보았을 때는 어느 정도의 차이가 있는 결과이며, P값 또한 0.142로 신뢰성이 높지 않다. 이러한 결과가 단순한 실험의 오차인지 회전속도에 따른 영향인지를 확인하기 위해서는 추가적인 실험이 필요

할 것으로 생각된다.

튜브의 길이는 2m일 때 베어링에서의 발열이 가장 작은 것으로 나타났으며, 3m일 때 가장 높았다. 그러나 P값이 0.216으로 세 가지 인자 중 가장 높게 나타났으며 그 영향도 비교적 작은 것으로 나타났다.

1, 2차 실험 중 실험 조건이 일치하는 데이터는 Table 5에 나타나 있다. 각 실험들의 오차 평균값은 0.463℃였다. 이는 실험에서의 온도 상승량의 약 6% 이상에 해당하는 수치이며, 공기 압력 또는 튜브 길이에 의한 주효과에 의한 온도 상승량의 차이인 0.58℃와 0.52℃에 근접하는 수치이다.

Table 4 Difference temperature rise of same lubrication condition

Lubrication Interval (min)	Air Pressure (bar)	1st Exp.	2nd Exp.	Difference
2	3	7.921	7.287	0.634
2	4	7.318	7.195	0.123
2	5	7.334	7.437	0.103
4	3	6.923	5.377	1.546
4	4	6.841	7.313	0.472
4	5	6.648	6.741	0.093

이러한 결과는 압축공기에 다 제거되지 못한 수분, 센서의 노이즈, 또는 다른 발견하지 못한 인자의 영향으로 생각된다. 이러한 오차요인을 배제하고 인자들에 영향을 보다 정확히 분석하여 신뢰성을 높이기 위해서는 더 많은 반복실험이 요구된다.

4. 결 론

본 연구에서는 40,000rpm급 초고속 스핀들에 대해 베어링의 윤활조건과 회전속도를 변경시켜가며 발열 특성을 비교분석하여 다음의 결론을 얻었다. 실험결과,

1) 윤활주기는 실험 조건 중 10분에서 가장 좋은 결과를 보였다. 윤활 주기가 짧은 경우 즉, 윤활유의 양이 많은 경우에 오히려 발열특성에 좋지 않은 영향을 주었다. 윤활주기 또는 윤활유의 양을 조정하는 것만으로 10~20%의 발열량을 감소시킬 수 있다. 이러한 결과는 10,000 ~ 30,000rpm 모두에서 유효하다.
2) 공기압력은 대체로 클수록 베어링부의 발열은 작은 경향을 보였다. 그러나 공기압력이 클수록 소음이 증가하는 단점이 있으며 10,000rpm에서 4bar가 넘는 공기의 압력의 효과는 없었다.
3) 튜브길이는 2m에서 가장 좋은 결과를 나타냈으나 그 영향은 크지 않다.
4) 본 연구의 결과는 초고속 스핀들의 운용 시 윤활조건을 선정할 때 지표의 기초연구로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

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

참고문헌

1. Lee, D. W., Lee, J. R. Lee, B. H. and Ahn, J. H., "A Study on Thermal Characteristics of Air Bearing System for High-Speed Spindle," Proc. of the KSPE, pp. 1021-1026, June 2000.
2. Choi, D. B., Kim, S. T., Jung, S. H. and Kim, Y. K., "Experimental study on the thermal characteristics according to the pre-load and cooling condition for the high Speed Spindle with grease lubrication," Proc. of the KSMT, pp. 41-46 November 2004.
3. Jung, D. S., Kim, S. T. and Choi, D. B., "An Analysis of the Thermal Characteristic according to the Cooling Method of the High Speed Spindle Housing," Proc. of the KSPE, pp. 447-448, June 2006.
4. Sheng-Hsien Wu, and Yu-Tai Kung, "A parametric study on oil/air lubrication of a high-speed spindle," Precision Engineering, 29, 162-167, 2005
5. Choi, D. K. and Lee, D. G., "Temperature Increase of the Spindle Bearing System Having a

Gear on the Bearing Span," J. of the KSME, Vol. 22, No. 1, pp. 33-34, 1998

6. Ahn, S. H., Lee, C. M. and Yun, S. H., "A Foundation Study on the Selection of Bearing Lubrication in High-speed Spindle," Proc. of the KSPE, pp. 457-458, November 2007.
7. Sim, D. G., Song, S. H., Cho, Y. H. and Cho, S. H., "Heat Analysis of Built-in Spindle Motor for High-Speed Machine Tools," J. of the KSPE Vol. 17, No. 8, pp. 71-77, 2000.
8. Jin Jian, Tae-Jo, Hee-Sool Kim, "An Analysis of the thermal Dformation of the Main Spindle for Small and Precision Lathe," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 6, No. 1, pp. 43-49, 2007
9. Jun S. H., Cha J. H. and Park T. J., "Temperature Characteristics of a High Speed Spindle Bearing," Proceedings of the KSPE, pp. 243-246, November 1999.
10. Lee, S. B., "MINITAB User Handbook," ERETEC, pp. 168-256, 2002,
11. Kim, S. I., Choi, D. B. and Park, K. H., "Oil-Air Lubrication Characteristics of a High Speed Spindle System for Machin Tools(I)," J. of the KSME, Vol. 17, No. 2, pp. 351-358, 1993.