

윤활유 종류에 따른 주축 열변위의 특성 평가

강순준*, 이갑조⁺, 김종관⁺⁺

(논문접수일 2003. 9. 8, 심사완료일 2004. 1. 9)

Characteristics Evaluation of Spindle Thermal Displacement with kinds of Lubrication Oil

Soon-Joon Kang*, Kab-Jo Lee⁺, Jong-Kwan Kim⁺⁺

Abstract

High speed precision machines have been introduced to the CNC industry in order to improve productivity, shorten the appointed date of delivery and reduce the prime cost. High speed machines have more functions than general machines, and they were proved in performance. The production and sales of the high speed machines have been increased not only in domestic market but also all over the world. Accordingly, machines are faster, there are lots of problems to be solved. One of the most difficult problems is the thermal displacement on the main spindle due to generated heat while the spindle is rotated in high speed. Since the thermal displacement directly effects the quality of the machined parts, utmost efforts to minimize the thermal displacement have to be given from the beginning of designing machines. In practice, variety of methods are attempted and practiced to minimize the thermal displacement such as design of symmetrical frame, adoption of high speed bearings, application of compensation system using non-contact sensor and use of forced circulating lubrication system with oil cooler. Even if these variable methods have been practically used in the industrial field, generated heat has not been perfectly prevented. Hence, in this paper, the characteristics of thermal displacement were investigated when several kinds of oil were tested for a high speed machine with forced circulating lubrication system within the same atmosphere and under the same conditions.

Key Words : High Speed Machine(고속가공기), Thermal Displacement(열변위), Lubrication Oil(윤활유), Main Spindle(주축)

* 조선대학교 기계공학과 대학원 (ksj@hwacheon.co.kr)

주소: 501-759, 광주광역시 동구 서석동 375번지

+ 조선대학교 기계공학과 대학원

++ 조선대학교 기계공학과

1. 서론

최근, 산업현장에서의 생산 리드타임 단축 및 고 품질에 대한 요구는 날이 갈수록 더욱 엄격해지고 있다. 이에 따라 새로운 생산방식과 기술이 개발되고 있는데 그 중의 하나가 급형 가공을 위한 고속가공기의 등장이라고 할 수 있다. 고속가공기는 종래의 방전가공이나 연삭공정을 없애고 기계가공공정에서 마무리함으로서 리드타임의 단축, 설비, 작업장, 작업자의 감축 등 효율성이 검증되어 수요가 증가하고 있다⁽¹⁾.

고속가공기는 높은 정도를 유지하면서 고속화가 요구되므로 주축 및 이송계의 발열은 필연적으로 해결해야 할 과제 중의 하나이며, 설계 단계에서부터 발열을 최소화하기 위한 노력이 필요하다. 특히 주축계통을 살펴보면, 대칭형 프레임의 설계, 고속용 베어링의 채용, 비 접촉센서에 의한 보정 시스템의 적용, 오일쿨러를 부착한 강제순환식 윤활 시스템 등을 적용하고 있으며, 산업현장에서도 사용하고 있는 기계 및 제품의 특성에 따라 항온실 설치, 자동보정 시스템 도입, 윤활유 변경 등 여러 가지 방법이 활용되어지고 있다. 또한 학계 및 연구단체에서 주축에 대한 발열 및 대책안에 대하여 연구한 논문들이 발표되고 있다. Kim 등⁽²⁾은 적외선 열화상 카메라를 이용한 주축 열변위에 대하여 해석하였고, Lim 등⁽³⁾은 공작기계의 주축 열적특성을 FEM 해석결과와 실제 회전실험을 통한 주축 내부온도 분포를 예측하여 주축변위 최소화를 제시하였다. Kim 등⁽⁴⁾은 회귀분석을 이용한 열변형 오차 모델링에 관한 연구를 통하여 열변형 오차를 예측하였고, Lee 등⁽⁵⁾은 공작기계에서 온도와 열변위와의 상관관계를 1차 함수 식으로 모델링하여 열변위 보정량을 결정하는 방법을 제안하여 열변위 보정에 효과적인 방법을 제시하는 등 열변위 최소화를 위한 연구를 하고 있으나 주축에 공급하는 윤활유 점도지수에 따른 열변위 특성에 관한 연구는 미흡한 상태이다.

이에 본 연구에서는 강제순환식 윤활 시스템을 채용한 고속가공용 기계를 이용하여 산업현장에서 가장 쉽게 적용할 수 있는 방법인 윤활유 점도지수에 따른 실험을 동일한 환경 및 조건으로 실시하여 산출된 주축 열변위의 특성 및 데이터를 산업현장에서 효과적으로 활용하여 기계의 도입효과를 극대화 하고자 한다.

2. 이론적 배경

오일제트 윤활법은 $d_m n$ 값(전동체 피치경×회전수)이 100×10^4 를 초과하는 고속회전용 베어링에 쓰이고 있다⁽⁶⁾. 1 개 또는 여러 개의 노즐로부터 일정한 압력으로 윤활유를 분사해서 베어링 내부를 관통시킨다. 고속인 경우 베어링 부근의 공기가 베어링과 함께 돌며 공기의 벽을 만들기 때문에 노즐로부터의 윤활유 분출속도는 내륜 외경면 원주속도의 20% 이상 속도가 필요하다. 노즐수가 많은 쪽이 동일 유량에 대해서 냉각의 편차가 적고 효과도 크다. 제트 윤활법에서는 유량이 많기 때문에 오일의 교반저항을 적게 하고, 열을 효과적으로 배출하도록 배출구를 크게 하거나 강제배유를 실시하는 등의 배려가 바람직하다. 공작기계 주축 베어링용에는 설비는 커지게 되지만 초고속으로 안정되게 회전시키는 방법으로서 향후 증가할 것으로 사료된다.

베어링의 발열에 대한 이론을 살펴보면 구름베어링의 온도상승은 베어링 내부의 마찰 동력손실과 비례하는 관계를 갖으며, 베어링의 마찰 동력손실은 베어링의 미끄럼모멘트에 의해서 결정된다. 고속가공기의 주축에서 사용되고 있는 앵글러콘택트 볼베어링과 같이 접촉각을 갖는 베어링에서는 스핀미끄럼과 자이로스코픽미끄럼에 의한 미끄럼모멘트가 발생하고 베어링 하중과 윤활유 점성에 의한 마찰모멘트가 존재하게 된다. 따라서 주축 회전수, 베어링 하중, 윤활유 점도 등의 영향을 받게 되는 베어링의 전체 열발생률 H_t 는 식 (1)과 같이 스핀미끄럼에 의한 열발생률 H_s , 자이로스코픽미끄럼에 의한 열발생률 H_g , 베어링 하중에 의한 열발생률 H_p , 윤활유 점성마찰에 의한 열발생률 H_v 의 합으로 표현할 수 있다.

$$H_t = H_s + H_g + H_p + H_v \quad (1)$$

고속가공기의 주축계와 같이 주축회전수가 높은 경우, 식 (1)과 같이 주어지는 열발생률 중에서 스핀미끄럼에 의한 열발생률은 다른 열발생률에 비해서 매우 작기 때문에 본 연구에서는 그 영향을 무시하였다. 앵글러콘택트 볼베어링이 고속으로 회전할수록 문제가 되는 자이로스코픽미끄럼에 의한 열발생률을 결정하기 위해서는 먼저 식 (2)와 같이 주어지는 베어링 볼에 작용하는 자이로스코픽모멘트 M_g ($N \cdot m$)를 구할 필요가 있다.

$$M_g = 0.143 \cdot 10^{-15} \cdot \rho \cdot d_m \cdot d_b^4 \cdot n^2 \cdot \sin \beta \quad (2)$$

여기서 ρ 는 베어링의 볼의 밀도(g/cm^3), d_m 은 베어링의 피치원 직경(mm), d_b 는 베어링 볼의 직경(mm), n 은 주축 회전수(rpm), β 는 앵귤러콘택트 볼베어링의 접촉각(rad)을 의미한다. 또한 베어링 하중에 의한 마찰모멘트 M_p ($N \cdot m$)는 다음 식 (3)과 같이 주어진다.

$$M_p = 10^{-6} \cdot \left(\frac{P_0}{C_0} \right)^{0.33} \cdot p \cdot d_m \quad (3)$$

여기서 P_0 는 베어링의 정등가하중(N), C_0 는 베어링의 정정격하중(N), p 는 베어링 하중(N), d_m 은 베어링의 피치원 직경이다. 윤활유 점성에 의한 마찰모멘트 M_v ($N \cdot m$)는 베어링의 피치원 직경 d_m , 주축회전수 n , 그리고 윤활유의 점도 ν (cp), 급유량 q (kg/min.) 등에 의해서 결정되는데, 그 관계는 식 (4)에서 볼 수 있다.

$$M_v = 3.47 \cdot 10^{-13} \cdot d_b^3 \cdot n^{1.4} \cdot \nu^a \cdot q^b \quad (4)$$

여기서 a 와 b 는 점도와 급유량에 기인한 지수들로서 아래와 같이 주어진다.

$$a = 24 \cdot n^{-0.37}$$

$$b = 4 \cdot 10^{-9} \cdot n^{-1.6} + 0.33$$

따라서 베어링의 전체 마찰모멘트 M_t 는 식 (2), (3) 및 (4)에서 주어지는 마찰모멘트들의 합과 같게 된다.

$$M_t = M_g + M_p + M_v \quad (5)$$

그리고 베어링의 전체 마찰모멘트에 의한 베어링의 열발생률 H_t (W)는 식 (6)과 같이 주축회전수와 마찰모멘트 곱의 형태로 구할 수 있다.

$$H_t = 0.105 \cdot n \cdot M_t \quad (6)$$

오일제트 윤활방법이 적용된 고속가공기의 주축계의 경우에는 식 (6)과 같이 주어지는 베어링의 열발생률이 모두 스피들이나 하우징으로 전달되는 것이 아니라 윤활유에 의한 베어링의 냉각효과 때문에 스피들이나 하우징으로 전달되는 베어링의 열전달률은 식 (6)의 값보다 작게 된다. 고속가공기의 주축계에서 윤활유의 급유온도와 배유온도의 차이를 ΔT ($^{\circ}C$)라고 하면, 윤활유에 의한 베어링의 냉각효과 때문에 발생하는 열제거율 H_r (W)은 식 (7)과 같이 쓸 수

있다.

$$H_r = 51.59 \cdot s \cdot q \cdot \Delta T \quad (7)$$

여기서 s 는 윤활유의 비열(kcal/kg $^{\circ}C$), q 는 윤활유 급유량(kg/min.)이다. 결과적으로 고속가공용 주축계에서 스피들이나 하우징으로 전달되는 베어링의 열전달률 H_m 은 식 (6)의 열발생률과 식 (7)의 열제거율의 차이로 표현할 수 있다.

$$H_m = H_t - H_r \quad (8)$$

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 실험에서 사용된 기계는 국내 공작기계 업체에서 생산되어 고급 급형 가공에 효율적으로 활용되고 있는 수직형 고속가공기(Vertial Machining Center)로서 기계의 세부 사양은 Table 1과 같다.

실험에 사용한 디지털 변위 측정기구는 기계 주축과 테이블에 Fig. 1과 같이 설치하여 실험하였으며, 측정된 변위 값을 수치 및 그래프로 해석하기 위한 컴퓨터 시스템의 외관은 Fig. 2와 같다.

실험실 내부의 온도 변화에 따른 변위의 정확성을 위하여 주축부 상 하단에 온도 센서를 부착하여 실온 및 베어링에 의한 온도 변위를 참고적으로 측정하였다.

3.2 실험방법

기계 가공에 있어서 정밀도에 영향을 미치는 요소 중의 하나가 외부환경인데 실제 기계 자체의 원인보다도 영향을

Table 1 Specifications of test machine

Description	Specifications
Machine model	SIRIUS-ULG
Max. spindle speed	20,000rpm
Min. movement unit	0.001mm
Feed rate	10,000mm/min.
NC system	Fanuc 18iM
Spindle taper	BT40
Cooling system	Oil Jet
Spindle motor	25HP(Built In)

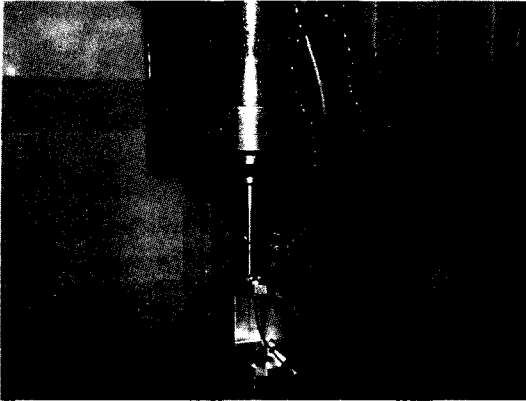


Fig. 1 Experimental set up

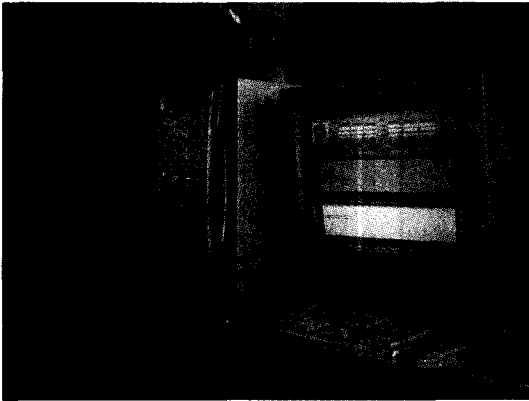


Fig. 2 Experimental set up(computer)

크게 미치는 경우가 있다. 그러한 문제를 제거하기 위하여 항온항습 시설이 갖추어진 장소에 기계를 설치하였다.

본 실험에 사용한 스피들용 윤활유는 국내에서 일반적으로 유통되어 산업현장에서 사용중인 것을 선택하였는데 3종의 윤활유 성상표는 Table 2와 같다. 윤활유의 제작사는 편이상 거론하지 않았으며, 이는 제조하는 회사보다는 그 윤활유가 가지고 있는 특성 즉 점도지수에 의한 실험이므로 사용자가 기계와 생산하고자하는 제품의 특성에 맞도록 선택하는 것이 중요하다. 아울러 실험은 동점도 지수(40℃ 기준)에 따라 ①저점도 1.58 cSt. ②중점도 2.10 cSt. ③고점도 2.23 cSt.으로 구분하여 실험 및 고찰하였다. 구분의 기준은 본 실험에 사용한 윤활유의 점도지수를 이해하기 쉽게 하기 위하여 저, 중, 고점도로 분류한 것이며, 실질적으로 명확한 기준이 있는 것은 아니다.

Table 2 Specifications of lubrication oil for spindle

Description	Unit	Low viscosity	Middle viscosity	High viscosity
Density	15℃, g/cm ³	0.747	0.805	0.832
Pour point	℃	-12.5	-47.5	-30
Kinematic viscosity	40℃, mm ² /s(cSt)	1.58	2.10	2.23
	100℃, mm ² /s(cSt)	0.79	1.0	1.02
Hue	ASTM	L0.5	L0.5	L0.5

선택된 윤활유를 동일한 기계 및 환경(항온 20±1℃)에서 분당 급유량별로 실시하였다. 급유량은 일반적으로 산업현장에서 가장 많이 적용되고 있는 조건인 8.0 l/min., 9.0 l/min., 10.5 l/min.로 결정하였으며, 항온실 온도가 20℃ 되도록 약 2 시간을 대기한 후부터, 2 시간 주축가동, 2 시간 주축정지 방법으로 3회 반복하여 기계가 가동 중 일 때의 변위측정은 물론 기계가 정지한 상태에서의 변위에 대해서도 동시에 관찰하였다. 또한 실험결과 산출된 데이터와 그래프는 노이즈 및 X, Y축과 혼합되어 정확한 값 해석이 어려워 1분 단위로 변위량 변화가 많은 시간대인 60분까지의 데이터를 별도로 산출하여 그래프화하였다.

실험한 기계의 주축 회전수는 기계가 가지고 있는 최대 회전수인 20,000rpm을 적용하였다. 주축의 회전으로 발생된 열을 냉각시키는 장치로는 오일콘(다이킨-AKZ907)을 사용하였으며 용량은 7,740kcal이다. C형 타입의 기계(Vertical Machining Center)에서의 주축회전에 의한 축 변위는 통상적으로 Y축과 Z축이 영향을 받게 되는데, 본 실험에서는 고속 급형 가공에서 가공정도에 영향을 많이 줄뿐만 아니라 일반적으로 변위량이 가장 큰 Z축만을 실험대상으로 결정하였으며, 변위량 평가는 변위안정 시작점으로부터 30분 이상 연속 가동시간 동안에 5μm이내로 변화될 경우를 선정하였고, Z축 변위 안정화 시간은 변위안정 시작점으로부터 30분 이내에서 최대 피크점이 나오는 점까지의 시간으로 결정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 저점도 윤활유 실험결과 및 고찰

동점도 지수 1.58 cSt. 윤활유에 대하여 분당 급유량에

다른 Z축 변위 안정화 시간 및 주축 열에 의한 Z축 변위량의 변화를 실험한 결과 Fig. 3과 같으며, 세부내용은 다음과 같다.

- (1) 급유량 8.0 l/min.일 때 기계가동을 시작하여 23분까지 변위가 급격하게 증가하여 전체 변위량의 80%인 20 μm 까지 증가함을 알 수 있다. 변위는 24분부터 안정되어 54분까지 미세하게 증감을 반복하였고, 최대 피크점인 53분까지의 총 변위량은 5 μm 이내이므로 변위 안정화 시간은 24~53분이며, 변위량은 20~25 μm 이다.
- (2) 급유량 9.0 l/min.일 때 기계가동을 시작하여 16분까지 변위가 급격하게 증가하여 전체 변위량의 79%인 15 μm 까지 증가함을 알 수 있다. 변위는 17분부터 안정되어 47분까지 미세하게 증감을 반복하였고, 최대 피크점인 39분까지의 총 변위량은 5 μm 이내인 4 μm 이므로 변위 안정화 시간은 17~39분이며, 변위량은 15~19 μm 이다.
- (3) 급유량 10.5 l/min.일 때 기계가동을 시작하여 11분까지 변위가 급격하게 증가하여 전체 변위량의 73%인 11 μm 까지 증가함을 알 수 있다. 변위는 12분부터 안정되어 42분까지 미세하게 증감을 반복하였고, 최대 피크점인 17분까지의 총 변위량은 5 μm 이내인 2 μm 이므로 변위 안정화 시간은 12~17분이며, 변위량은 11~13 μm 으로서 분당 급유량이 적을 때 보다 많을수록 변위 안정화 시간이 짧아지고, 변위량은 적어지는 것을 실험결과 알 수 있었다.

4.2 중점도 윤활유 실험결과 및 고찰

중점도 지수 2.10 cSt. 윤활유에 대하여 분당 급유량에

다른 Z축 변위 안정화 시간 및 주축 열에 의한 Z축 변위량의 변화를 실험한 결과 Fig. 4와 같으며, 세부내용은 다음과 같다.

- (1) 급유량 8.0 l/min.일 때 기계가동을 시작하여 19분까지 변위가 급격하게 증가하여 전체 변위량의 85%인 24 μm 까지 증가함을 알 수 있다. 변위는 20분부터 안정되어 50분까지 미세하게 증감을 반복하였고, 최대 피크점인 47분까지의 총 변위량은 5 μm 이내인 4 μm 이므로 변위 안정화 시간은 20~47분이며, 변위량은 24~28 μm 이다.
- (2) 급유량 9.0 l/min.일 때 기계가동을 시작하여 20분까지 변위가 급격하게 증가하여 전체 변위량의 90%인 24 μm 까지 증가함을 알 수 있다. 변위는 21분부터 안정되어 51분까지 미세하게 증감을 반복하였고, 최대 피크점인 39분까지의 총 변위량은 5 μm 이내인 3 μm 이므로 변위 안정화 시간은 21~39분이며, 변위량은 24~27 μm 이다.
- (3) 급유량 10.5 l/min.일 때 기계가동을 시작하여 24분까지 변위가 급격하게 증가하여 전체 변위량의 87%인 23 μm 까지 증가함을 알 수 있다. 변위는 25분부터 안정되어 55분까지 미세하게 증감을 반복하였고, 최대 피크점인 54분까지의 총 변위량은 5 μm 이내인 3 μm 이므로 변위 안정화 시간은 25~54분이며, 변위량은 23~26 μm 으로서 변위 안정화 시간은 분당 급유량에 따라 큰 변화가 없으나 9 l/min.일 때 비교적 안정됨을 알 수 있으며, 변위량은 분당 급유량에 따라 큰 변화가 없다는 것을 실험결과 알 수 있었다.

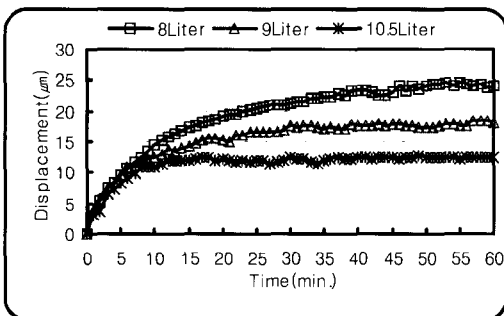


Fig. 3 Variation of thermal displacements according to time

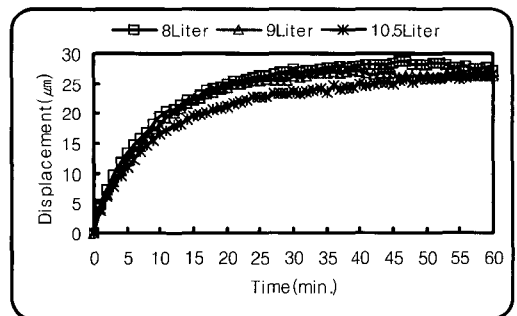


Fig. 4 Variation of thermal displacements according to time

4.3 고점도 윤활유 실험결과 및 고찰

동점도 지수 2.23 cSt. 윤활유에 대하여 분당 급유량에 따른 Z축 변위 안정화 시간 및 주축 열에 의한 Z축 변위량의 변화를 실험한 결과 Fig. 5와 같으며, 세부내용은 다음과 같다.

- (1) 급유량 8.0 l/min.일 때 기계가동을 시작하여 13분까지 변위가 급격하게 증가하여 전체 변위량의 87%인 20 μm 까지 증가함을 알 수 있다. 변위는 14분부터 안정되어 44분까지 미세하게 증감을 반복하였고, 최대 피크점인 25분까지의 총 변위량은 5 μm 이내인 3 μm 이므로 변위 안정화 시간은 14~25분이며, 변위량은 20~23 μm 이다.
- (2) 급유량 9.0 l/min.일 때 기계가동을 시작하여 22분까지 변위가 급격하게 증가하여 전체 변위량의 88%인 22 μm 까지 증가함을 알 수 있다. 변위는 23분부터 안정되어 53분까지 미세하게 증감을 반복하였고, 최대 피크점인 45분까지의 총 변위량은 5 μm 이내인 3 μm 이므로 변위 안정화 시간은 23~45분이며, 변위량은 22~25 μm 이다.
- (3) 급유량 10.5 l/min.일 때 기계가동을 시작하여 17분까지 변위가 급격하게 증가하여 전체 변위량의 85%인 25 μm 까지 증가함을 알 수 있다. 변위는 18분부터 안정되어 48분까지 미세하게 증감을 반복하였고, 최대 피크점인 42분까지의 총 변위량은 5 μm 이므로 변위 안정화 시간은 18~48분이며, 변위량은 25~30 μm 으로서 분당 급유량이 가장 적은 8.0 l/min.에서 변위 안정화 시간 및 변위량은 비교적 안정됨을 실험결과 알 수 있었다.

4.4 종합적 실험결과 및 고찰

Fig. 6은 사용 윤활유와 분당 급유량에 따른 주축의 축방향에 해당되는 Z축 안정화 시간을 비교한 결과로 중급유량 조건에서 비교적 좁은 30~34분 범위에 들었고, 분당 급유량이 많아짐에 따라 그림과 같이 저점도 윤활유 사용 시 안정시간이 훨씬 짧아지는 결과를 확인하였다.

Fig. 7은 열변위량 측정결과로 Z축 안정시간의 결과와는 다르게 저급유량 조건에서 변위량이 비교적 좁은 22~26분 범위에 들었고, 고점도 윤활유 사용 시 변위량이 적었으나, 분당 급유량이 많아짐에 따라 그림과 같이 변위가 커지고, 저점도 윤활유 사용 시에는 급격하게 적어지는 결과를 확인하였다.

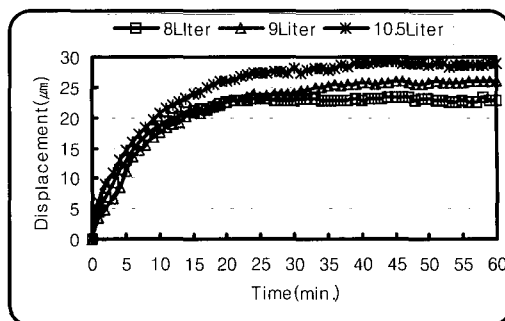


Fig. 5 Variation of thermal displacements according to time

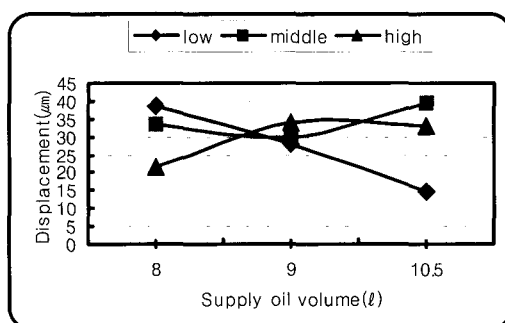


Fig. 6 A stability time of z-axis according to volume of lubrication oil

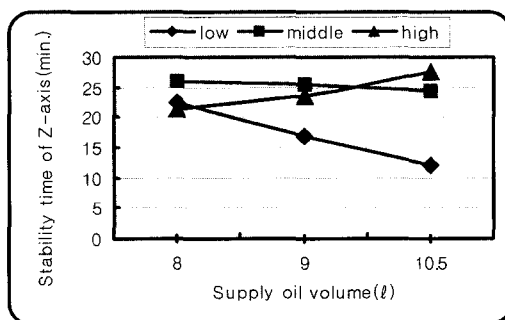


Fig. 7 Variation of thermal displacements according to volume of lubrication oil

5. 결론

주축의 안정적인 회전으로 최소의 열변위량을 유지하는 특성을 확인하기 위하여 다른 점도지수를 가진 윤활유 조건에 따라 주축 베어링의 회전부에 공급하는 윤활유의 급유량

을 변화시켜 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 동점도 지수가 1.58 cSt인 저점도 윤활유의 급유량이 10.5 ℓ/min.일 때 Z축 안정화 시간이 가장 짧았으며, 열변위가 가장 적었음을 확인하였다.
- (2) 2.10 cSt. 이상 일 때의 Z축 안정화 시간은 중 점도 윤활유의 급유량이 9.0 ℓ/min., 고점도 윤활유의 급유량이 8.0 ℓ/min.일 때 가장 짧았으며, 열변위는 중점도는 급유량의 증감에 큰 차이가 없으나, 고점도의 경우는 급유량이 8.0 ℓ/min.일 때 가장 안정됨을 확인하였다.
- (3) Z축 안정화 시간은 윤활유의 급유량이 9.0 ℓ/min., 열변위량은 8.0 ℓ/min.일 때 사용 윤활유의 점도지수와 무관하게 상호 근접되는 결과를 확인하였다.

참 고 문 헌

- (1) Ha, D. D., Kang, M. C., Kim, J. S., Kim, K. H., and Kang, H. Y., 2001, "Machinability evaluation according to variation of tool shape in high speed machining", *Proceedings of KSMTE, Spring Conference*, pp. 346~351.
- (2) Kim, J. Y., and Yoon, S. U., 2001, "Thermo-analysis of machining center main-axis thermo-displacement for infrared rays thermo-image camera", *Proceedings of KSMTE, Spring Conference*, pp. 125~130.
- (3) Lim, Y. C., and Kim, J. K., 2002, "A study on the thermal specific of operational spindle system of machine tool", *Proceedings of KSMTE, Fall Conference*, pp. 498~503.
- (4) Kim, H. S., Ko, T. J., Kim, S. H., Kim, H. S., and Jung, J. U., 2002, "Research on the thermal deformation modeling using by regression analysis", *Proceedings of KSMTE, Fall Conference*, pp. 47~52.
- (5) Lee, I. J., Choi, Y. H., and Chung, W. J., 2000, "A study on the compensation of the thermal errors for machine tool", *Trans. of KSMTE*, Vol. 9, No. 4, pp. 117~122.
- (6) Kim, S. I., Kim, K. S., Kim, K. T., and Na, S. P., 2001, "Thermal characteristics analysis of a high-speed HMC spindle system", *Proceedings of KSMTE, Spring Conference*, pp. 441~446.