

윤활유 종류에 따른 주축 열변위의 특성 평가

강순준 *(조선대학교 대학원, 화천기공(주)), 이갑조 **(조선대학교
산업대학원), 김종관 *** (조선대학교 기계공학부),

Characteristics Evaluation of Spindle Thermal Displacement with kinds of Lubrication Oil

Kang, Soon Joon *(Graduate School, Chosun University, Hwacheon Machine Tool Co.),
Lee, Gab Jo ** (Graduate School, Industry Chosun University),
Kim, Jong Kwan *** (Dept. of Mechanical Eng., Chosun University)

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

고속가공기(High speed machine), 열변위(Thermal displacement), 윤활유(Lubrication Oil), 주축(Main Spindle)

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 금형가공을 위한 고속가공기의 등장이라고 할 수 있다. 고속가공기는 종래의 방전가공이나 연삭공정을 없애고 기계 가공공정에서 마무리함으로써 리드타입의 단축, 설비, 작업장, 작업자의 감축 등 효율성이 검증되어 수요가 증가하고 있다.

고속가공기는 높은 정도를 유지하면서 고속화가 요구되므로 주축 및 이송계의 발열은 필연적으로 해결해야 할 과제중의 하나이며, 설계단계에서부터 발열을 최소화하기 위한 노력이 필요하다. 특히 주축계통을 살펴보면, 대칭형 프레임의 설계, 고속용 베어링의 채용, 비 접촉센서에 의한 보정 시스템의 적용, 오일쿨러를 부착한 강제순환식 윤활 시스템등을 적용하고 있으며, 실제 기계를 사용하고 있는 산업현장에서도 사용하고 있는 기계의 열변위 특성 및 제품에 따라 항온실 설치, 자동보정 시스템 도입, 윤활유의 변경등 여러 가지 방법을 적용하고 있지만 완벽하게 발열을 줄이지

못하고 있는 실정이다. (1-7)

이에 본 연구에서는 강제순환식 윤활 시스템을 채용한 고속가공기에 대하여, 산업현장에서 가장 쉽게 적용할 수 있는 방법인 윤활유 종류에 따른 실험을 동일한 환경 및 조건으로 실시하여 산출된 주축 열변위의 특성을 산업현장에서 사용중인 고속가공기에 적용해서 기계의 도입효과를 극대화 하고자 한다.

2. 주축 열변위 이론적 배경

2-1. 베어링의 발열이론

주축에서 사용된 앵글러 볼베어링에서의 발열은 볼의 미끄럼 모멘트와 베어링의 동마찰 토크에 의해 발생하며, 미끄럼 모멘트에 의한 발열은 스핀 모멘트와 자이로 모멘트에 의해서 주로 발생한다.

베어링의 동마찰 토크에 의한 발열은 하중항의 동마찰토크 발열과 윤활유의 점도, 양, 회전수에 의해 결정되는 동마찰 토크의 발열로 나뉘어 진다. 따라서 베어링에 발생하는 총 발열량은 스핀모멘트에 의한 발열량과 자이로 모멘트의 발열량, 작용하중에 의한 발열량, 사용 윤활유의 점성마찰에 의한 발열량의 합으로 계산하였다.

4가지 베어링의 발열요소를 고려한 베어링의 총 발열량은 다음식으로 나타내어진다.

$$H_T = H_s + H_g + H_l + H_v$$

2-2. 윤활의 목적

구름베어링의 윤활 목적은 베어링의 내부 마찰 및 마모를 줄여 소착을 방지하는 것이다. 윤활의 효용은 다음과 같다

(1) 마찰 및 마모의 감소

베어링을 구성하는 궤도륜, 전동체 및 리터이너가 상호 접촉하는 부분에 있어서 급속접촉을 방지해 마찰, 마모를 줄인다.

(2) 피로수명의 연장

베어링의 구름 피로수명은 회전 중에 구름접촉면이 충분히 윤활되어 있을때는 길어진다. 반면 오일의 점도가 낮아 윤활유막의 두께가 불충분한 경우에는 짧아진다.

(3) 마찰열의 방열, 냉각

순환윤활법에서는 마찰에 의해 발생한 열, 혹은 외부에서 전해진 열을 오일에 의해 방열, 냉각해 베어링의 과열을 막아서 윤활유 자신의 열화를 방지한다.

2-3. 윤활방법

높은 가공정도가 요구되는 공작기계 주축은 단순히

고속회전이 가능한 것 뿐만 아니고, 주축의 온도상승을 억제, 열변형을 적게하는 것이 중요한 과제이다. 베어링의 발열은 베어링의 종류와 하중에 의해 결정되는 하중항과 윤활방법이나 회전속도에 의해 정해지는 속도항으로 나누어진다.. 하중항과 속도항에서는 속도항의 영향이 크지만, 속도항이 작은 윤활방법을 선정하면 하중항의 영향도 무시할 수 있다. 따라서 발열이 적은 베어링(하중항) 및 윤활방법(속도항)의 선정이 중요하다. 실제로 발열에 관해서는 윤활방법 및 윤활유량이 중요한 부분을 차지한다.

2-4. 젯트 윤활법

젯트 윤활법은 $d_m n$ (전동체 피치경mm x 회전수 rpm)이 100×10^4 를 초과하는 고속회전용 베어링에 쓰이고 있다. 1개 또는 여러개의 노즐로부터 일정한 압력으로 윤활유를 분사해서 베어링 내부를 관통시킨다. 고속인 경우 베어링 부근의 공기가 베어링과 함께 돌며 공기의 벽을 만들기 때문에 노즐로부터의 윤활유 분출속도는 내륜의경면 주축의 20%이상의 속도가 필요하다. 노즐수가 많은 쪽이 동일유량에 대해서 냉각의 편차가 적고 효과도 크다. 젯트 윤활법에서는 유량이 많기 때문에 오일의 교반저항을 적게하고, 열을 효과적으로 배출하도록 배출구를 크게하거나 강제배유를 실시하는 등의 배려가 바람직하다. 공작기계 주축 베어링용에는 설비는 커지게 되지만 초고속으로 안정되게 회전시키는 방법으로서 향후 증가할 것으로 생각된다.

3. 실험장치 및 방법

3-1. 실험장치

본 실험에서 사용된 기계는 국내에서 생산된 고속가공기(Vertical Machining Center)로서 기계의 세부사양은 Table 3-1과 같다.

Table 3-1. Specifications of Machine

구분	Specifications
기계명	SIRIUS-ULG
주축 최고회전수	20,000rpm
NC 장치	FANUC 18iM
주축 형식	BT40
주축 클링형식	Oil Jet
주축 모터	25HP

실험에 사용한 디지털 변위 측정기구를 기계 주축에 설치한 상태는 Photo. 3-1, 측정된 값을 수치적으로 해

석하기 위한 Computer System은 Photo. 3-2와 같다

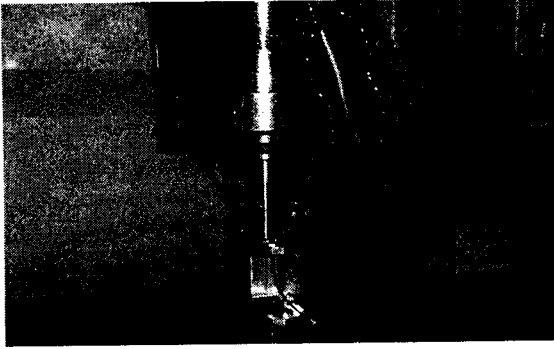


Photo. 3-1. Experimental set up

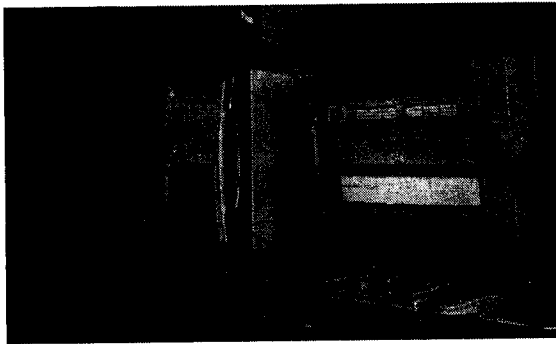


Photo. 3-2. Experimental set up(computer)

3-2. 실험방법

기계 가공에 있어서 정밀도에 영향을 미치는 요소 중의 하나가 외부환경인데 실제 기계 자체의 원인보다도 영향을 크게 미치는 경우가 있다. 그러한 문제를 제거하기 위하여 항온습습 시설이 갖추어진 장소에 기계를 설치하였다.

본 실험에 사용한 스펀들용 윤활유는 국내에서 일반적으로 유통되어 산업현장에서 사용중인 것을 선택하였는데 3종의 윤활유 성장표는 Table 3-1과 같다. 윤활유의 Maker는 편이상 거론하지 않았으며, 이는 제조하는 회사 보다는 그 윤활유가 가지고 있는 특성 즉 점도지수에 의한 실험이므로 사용자가 기계와 생산하고자하는 제품의 특성에 맞추도록 선택하는 것이 중요하다. 아울러 실험은 동점도 지수(40℃기준) 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 3-2. Specifications of each lubrication oil for spindle

구분	단위	Maker A	Maker B	Maker C
밀도	15℃, g/cm ³	0.747	0.805	0.832
유동점	℃	12.5	47.5	-30
동점도	40℃, mm ² /s(cSt)	1.58	2.10	2.23
	100℃, mm ² /s(cSt)	0.79	1.0	1.02
녹방지성분	증류수	발생부	발생부	발생부
색상	ASTM	L0.5	L0.5	L0.5

선택된 3종의 윤활유를 동일한 기계 및 환경(항온 20±1℃)에서 분당 급유량별로 실시하였다. 급유량은 가장 이상적이라고 판단된 3가지 조건, 즉 8 ℓ/min., 9 ℓ/min., 10.5 ℓ/min.로 결정하였으며, 오전에 항온실 온도가 20℃ 되도록 약 2시간을 대기한 후부터, 2시간 주축가동, 2시간 주축정지 방법으로 3회 반복하여 기계가 가동 중일때의 변위량 측정은 물론 기계가 정지한 상태에서의 변위량에 대해서도 동시에 관찰하였다.

실험한 기계의 주축 회전수는 기계가 가지고 있는 최대 회전수인 20,000rpm을 적용하였다. 주축의 회전으로 발생된 열을 냉각시키는 장치로는 오일콘(다이킨-AKZ907)을 사용하였으며 그 용량은 7,740kcal이다.

C형 타입의 기계(Vertical Machining Center)에서의 주축회전에 의한 축의 변위는 통상적으로 Y축과 Z축이 영향을 받게 되는데, 본 실험에서는 고속 급형가공시 가공정도에 영향을 많이 줄뿐만 아니라 일반적으로 변위량이 가장 큰 Z축만을 실험대상으로 결정하였으며, X, Y축은 참고적으로 관찰하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 저점도 윤활유 실험결과 및 고찰

동점도 지수 1.58(cSt) 윤활유에 대하여 분당 급유량에 따른 Z축 변위 안정화 시간 및 주축 열에 의한 Z축 변위량의 변화를 실험한 결과 Fig. 4-1~3과 같으며, 세부내용은 다음과 같다.

1. 급유량 8 ℓ/min. 일 때 Z축 변위 안정화 시간은 15~20분, Z축 변위량은 22~25μm,
2. 급유량 9 ℓ/min. 일 때 Z축 변위 안정화 시간은 14~15분, Z축 변위량은 15~22μm,
3. 급유량 10.5 ℓ/min. 일 때 Z축 변위 안정화 시간은 12분, Z축 변위량은 15~19μm으로서 분당 급유량이 적을 때 보다 많을수록 변위 안정화 시간이 짧아지고, Z축 변위량은 적어지는 것을 실험 결과 알 수 있었다.

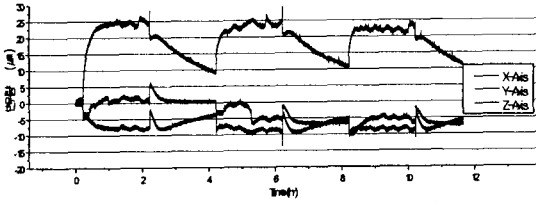


Fig. 4-1. Variation of Thermal Displacements according to time(8 l/min.)

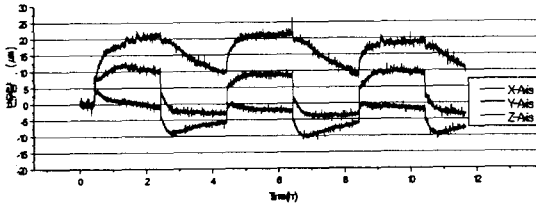


Fig. 4-2. Variation of Thermal Displacements according to time(9 l/min.)

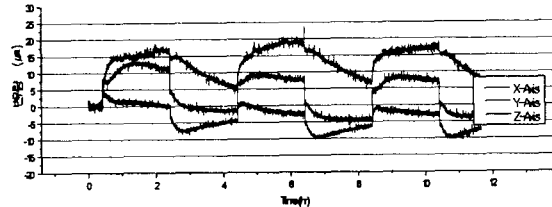


Fig. 4-3. Variation of Thermal Displacements according to time(10.5 l/min.)

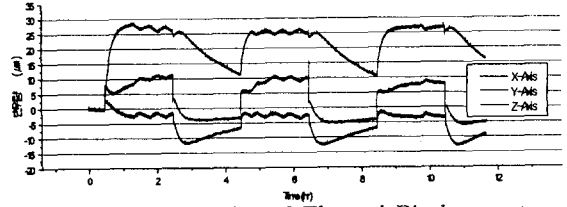


Fig. 4-4. Variation of Thermal Displacements according to time(8 l/min.)

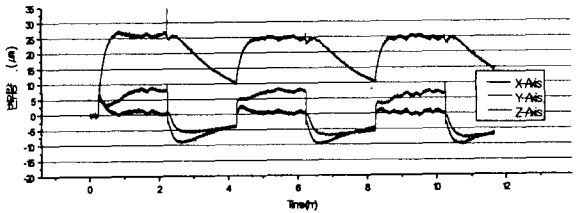


Fig. 4-5. Variation of Thermal Displacements according to time(9 l/min.)

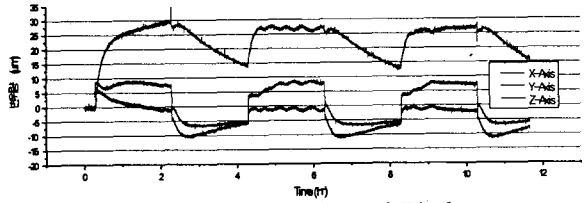


Fig. 4-6. Variation of Thermal Displacements according to time(10.5 l/min.)

4-2. 중점도 윤활유 실험결과 및 고찰

동점도 지수 2.10(cSt) 윤활유에 대하여 분당 급유량에 따른 Z축 변위 안정화 시간 및 주축 열에 의한 Z축 변위량의 변화를 실험한 결과 Fig. 4-4~6과 같으며, 세부내용은 다음과 같다.

1. 급유량 8 l/min. 일 때 Z축 변위 안정화 시간은 16~17분, Z축 변위량은 25~27 μ m,
2. 급유량 9 l/min. 일 때 Z축 변위 안정화 시간은 27~28분, Z축 변위량은 25~26 μ m,
3. 급유량 10.5 l/min. 일 때 Z축 변위 안정화 시간은 28~30분, Z축 변위량은 25~28 μ m으로서 분당 급유량이 적을수록 Z축 변위 안정화 시간이 짧아지며, Z축 변위량은 분당 급유량에 따라 큰 변화가 없으나 급유량이 9 l/min 일 때 가장 안정됨을 실험 결과 알 수 있었다.

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. 4-7~9과 같으며, 세부내용은 다음과 같다.

1. 급유량 8 l/min. 일 때 Z축 변위 안정화 시간은 15~16분, Z축 변위량은 22~23 μ m,
2. 급유량 9 l/min. 일 때 Z축 변위 안정화 시간은 18~22분, Z축 변위량은 26~29 μ m,
3. 급유량 10.5 l/min. 일 때 Z축 변위 안정화 시간은 18~21분, Z축 변위량은 26~28 μ m으로서 분당 급유량이 적을수록 Z축 변위 안정화 시간이 짧아지며, Z축 변위량은 분당 급유량이 가장 적은 8 l/min 일 때 가장 안정됨을 실험 결과 알 수 있었다.

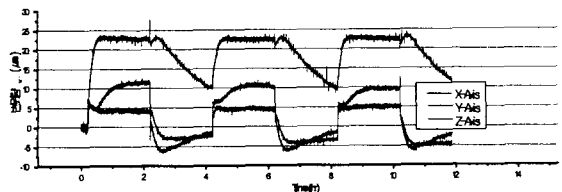


Fig. 4-7. Variation of Thermal Displacements according to time(8 l/min.)

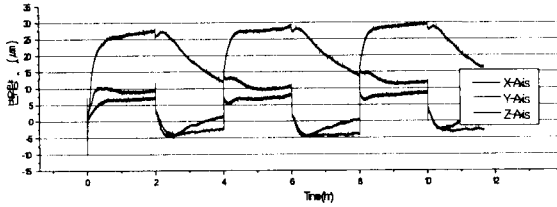


Fig. 4-8. Variation of Thermal Displacements according to time(9 l/min.)

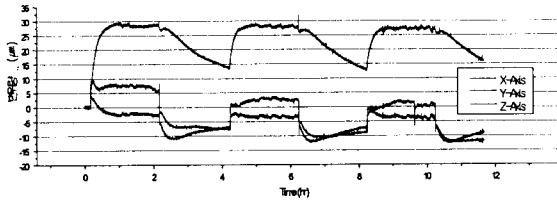


Fig. 4-9. Variation of Thermal Displacements according to time(10.5 l/min.)

4-4. 종합적 실험결과 및 고찰

Fig. 4-10은 사용 윤활유와 분당 급유량에 따른 Z축 안정시간을 비교한 결과로 저급유량 조건에서는 주축의 축방향에 해당되는 Z축의 안정 시간이 비교적 좁은 15~20min. 범위에 들었고, 고점도가 안정 시간이 짧았으나 분당 급유량이 많아짐에 따라 그림과 같이 저점도 윤활유 사용시 안정시간이 훨씬 짧아지는 결과를 확인하였다.

Fig. 4-11은 열변위량 측정결과로 안정시간의 결과와 유사하게 저급유량에서 보다 분당 급유량이 많아질수록 열변위 결과는 크게 변화되었고, 저점도 윤활유를 다량 사용하는 경우가 열변위량이 적어짐을 확인하였다.

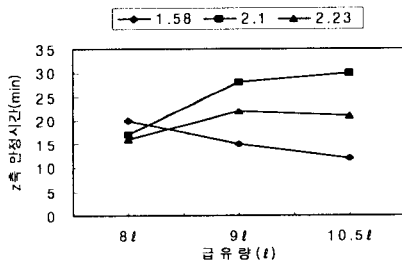


Fig. 4-10. A stability time of z-axis according to value of lubrication oil

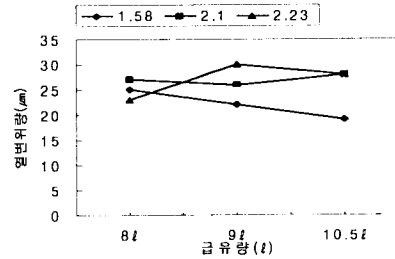


Fig. 4-11. Variation of Thermal Displacements according to value of lubrication oil

5. 결론

주축의 안정적인 회전으로 최소의 열변위량을 유지하는 특성을 확인하기 위하여 다른 점도지수를 가진 윤활유 조건에 따라 주축 베어링의 회전부에 공급하는 윤활유의 급유량을 변화시켜 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다

1. 동점도 지수가 1.58(cSt)인 저점도 윤활유 급유량이 10.5 l/min일 때 Z축 변위가 가장 안정화 되었고, 열변위가 가장 적었음을 확인하였다.
2. 2.0(cSt)이상일때의 Z축 열변위는 실험한 급유량에서는 큰 변화가 없다는 것을 확인하였으며, 분당 급유량이 8 l/min이하일 때 변위량의 실험이 필요함을 알 수 있었다.
3. 급유량이 적으면 사용 윤활유의 점도와 무관하게 Z축의 안정시간이나 열변위가 상호 근접되는 결과를 확인하였다.

참고문헌

1. M. Yang, J. Lee, " Measurement and Prediction of thermal Error of a CNC Machining Center using Two Spherical balls", J. of Materials Processing Technology, Vol. 75, No.1-3., 1998
2. Young Chule Lim, Jong Kwan Kim, "A Study on the Thermal Specific of Operational Spindle System of Machine Tool", KSMTE Fall Conference 2002, pp. 498~503
3. Jae Yeol Kim, Sung Un Yoon, " Thermo-Analysis of Machining Center main-axis Thermo-Displacement for Infrared Rays Thermo-Image Camera" KSMTE Fall Conference 2001, pp. 125~130

4. 高橋 信弘(三井精機工業), “熱” 日本 機械 設計 5, Vol. 40, No. 8, 1996, pp.60~63
5. NSK Technical documentation, “Super Precision Bearings”, Cat. No.1254 2002E-10
6. NTN Technical documentation, “工作機械用 精密 Roller Bearing”, Cat. No.8401-VI/J
7. Hee Sul Kim, Tae Jo Ko, Sun Ho Kim, Hyung Sik Kim, Jong Un Jung, " Research on the thermal deformation modeling using by regression analysis" KSMTE Fall Conference 2002, pp. 47~52