

수직머시닝센터 주축의 공구중량에 의한 열변형특성 연구

김종관(조선대 기계공학과), 이증기(조선대 대학원), 김상복(화천기공(주) 기술연구소)

A Study on the Thermal Deformation Characteristics by the Tool Weight in Vertical Machining Center Spindle

Jong Kwan-Kim, Jung Ki-Lee, Sang Bok-Kim

1. 서 론

다양한 형상과 무게를 갖는 절삭공구를 테이퍼접촉상태로 장착시키고 정밀급 구름베어링으로 지지되어 고속회전하면서 절삭하는 공작기계 주축은 장착공구의 중량을 포함한 자체중량과 절삭력이 작용하면서 회전하므로 축과 베어링접촉부의 구름마찰저항으로 많은 열이 발생된다. 이중 외륜방향으로는 하우징을 경유, 냉각채킷의 냉각유 및 주축대 구조물을 통하여 방출되고, 내륜방향으로는 주축을 경유, 공구 또는 주축단으로 방출되지만 점차 주축의 온도를 상승시켜 주축은 반경방향 및 축방향으로 팽창하게 된다. 이로 인하여 주축계는 베어링에압과 반경방향의 흔들림이 변하고, 축방향으로의 신장에 따라 공구 끝단위치가 변화하며 주축의 회전정밀도도 저하된다.

구름베어링을 채용한 주축가동시 발생하는 열변형¹⁻⁴⁾은 주축계 구조와 회전체중량 및 베어링에압과 회전속도, 가동시간에 따라서 달라지므로 주축설계시 발열의 억제 및 발생된 열의 방산을 통하여 주축 온도상승을 억제시켜 열변형을 줄이고자 하는 방안들이 강구되고 있다⁵⁻⁶⁾.

본 논문에서는 8000rpm급 수직 머시닝센터 실험주축을 대상으로 가동실험을 통해 장착된 공구의 중량을 변화시키면서 저속에서 고속역까지 가동시켜 주축온도상승에 따른 열변형으로 인한 주축의 자세변화 즉 반경방향 흔들림과 축방향 신장을 HeNe Laser Interferometer에 의해서 비접촉으로 정밀측정하여, 공구 중량변화에 따른 주축의 열변위특성과 이들 상호관계에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 열변형 측정방법과 측정이론

2.1 측정방법⁷⁻¹⁵⁾

공작기계 주축의 자세변화를 실험회전상태에서 측정하는 방법으로는 마스터 볼을 주축에 장착된 공구단에 부착하여 측정하는 방법과, 정압 공기 베어링 등의 회전오차를 측정하기 위한 광학적 측정법, 진원도 측정원리에 의해 공작물의 단면형상을 측정하므로써 주축의 회전오차 성분을 정밀하게 측정할수 있는 3점법에 의한 회전정밀도 측정법, 마스터 볼과 검출기를 0° 위치와 180° 회전시킨 상태에서 주축의 회전오차와 마스터 볼의 형상오차를 비교 분석하는 반전법, 3개의 비접촉식 와전류변위 갭 센서에 의한 측정방법들이 채용되고 있다. 본 논문에서는 HeNe Laser를 사용한 Interferometer에 의해서 비접촉으로 정밀측정하였다.

2.2 주축 열변형 측정이론

Fig. 1은 머시닝센터 주축의 흔들림 변화량의 정밀측정을 위하여 사용된 He-Ne Laser Interferometer (OFV 302)의 측정원리도이다.

이 간섭계의 원리는 Laser에서 나오는 Reference beam은 같은 강도로 Beam splitter BS1에서 반사되어 나오는 Measurement beam과 합쳐지면서 Bit signal을 발생시키고, 다시 Measurement Beam은 Beam splitter BS2와 Lens L을 지나서 진동하는 목표물에 집중되어 진동체에서 분산되는 빛의 순간적인 Doppler frequency shift 신호를 검출하여 Beam splitter BS3에 전달되고, Reference beam은 Bragg cell에서 주파수변조되어 BS3에서 간섭현상을 일으켜 두 신호가 Backscatter form으로 합쳐져 주파수차가 생기고 Photo detector D1, D2를 거쳐 전기신호로 바뀌어서 Vibration processor controller를 통해서 Output voltage로

진동체에서의 변위의 크기를 얻게된다.

즉 Fig. 1에서 Laser 광원에서 반사되어 Beam splitter BS3에 도달된 Reference beam과 Measurement beam의 간섭결과 Er, Em은 시간 t에서 다음과 같이 복소함수로 나타낼수 있다.

$$E_r = 1/2 A e^{-i\omega t} e^{i\omega Tr}$$

$$E_m = 1/2 A e^{-i\omega t} e^{i\omega(Tr+Tm)}$$

전기장 강도를 $I = E \cdot E^*$ 로 나타내면 Detector에서 강도는 다음과 같이 나타낼수 있으며, 여기서 $\Delta\phi$ 는 두 Beam의 Phase 차이이고 z는 경로차, λ 는 Laser 파장을 나타낸다.

$$I = (E_r + E_m)(E_r^* + E_m^*)$$

$$= I_0 / 2 (1 + \cos \Delta\phi)$$

$$\Delta\phi = 2\pi z / \lambda$$

$$= 2\pi f_D t$$

여기서 측정대상물이 진동으로 인하여 경로차 z가 시간에 비례해서 변하면 주기적 신호주파수 f가 일정속도 v로 Detector에서 생성되며, 이 주파수가 음파로 알려진 Doppler frequency로 다음식으로 나타낼수 있다.

$$f = f_D = 2v / \lambda$$

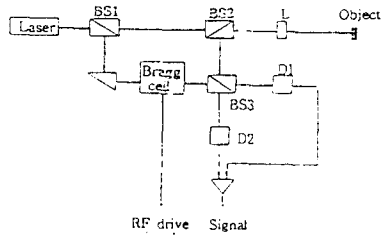


Fig. 1 The principle of laser interferometer (He-Ne Laser, OFV 302)

3. 주축 열변형 실험장치 및 방법

3.1 실험 및 측정장치

구름베어링의 구름마찰에 의한 발열로 주축 반경방향과 축방향에서 발생하는 변형이 가동시간과 주축온도 및 장착공구 중량조건에 어떤 관계를 갖는지 고찰하고자 실험에 사용된 상용 실험주축은 Fig. 2와 같은 수직형 머시닝센터 주축으로, NT40, 최고회전수 8000rpm, 정밀급베어링(7012CDBP4, 예압하중:28kgf, 축조립 틈새:3 μ m, 구멍조립 틈새:4 μ m)로 조립되고, 주축단 공구장착은 접시시스템에 의한 고정방식으로 클램프력은 1000kgf로 조립되어 있다. 주축의 열방산을 위하여 하우징에는 방열홀을 가공하여 주위온도+5°C 냉각유를 강제순환시키고, 주축단 공구장착은 그립에서와 같이 밀링척을 사용하였고, 공구중량조절을 위하여 Weight를 사용하였다.

Fig. 3은 실험주축의 열변형에 의한 변위 측정에 사용된 비접촉 Laser doppler vibrometer (Polytec OFV 3001 & OFV 302) 측정장치도이다.

여기서 Vibrometer controller (OFV 3001)에는 변위 Decoder가 내장되어 있으며, 이것의 측정범위는 2 μ m/V를 적용하여 peak치 0.032mm(분해능 0.004 μ m)로 측정하였으며, 여기에 Oscilloscope를 연결하여 Signal 형상과 변형량값을 얻었다.

또한 주축온도 측정은 열전대온도계를 사용하여 발열이 가장 큰 주축 앞베어링 외경부에 열전대를 삽입하여 측정하였다.

Table 1은 실험에 사용된 측정설비 및 장치의 사양이고, Photo. 1은 실험주축과 측정장치이다.

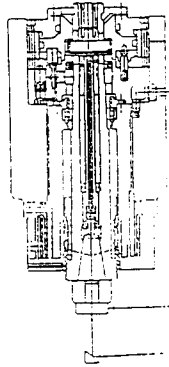


Fig. 2 Apparatus of experimental spindle (Max. speed 8000 rpm, NT 40)

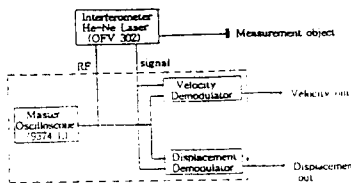


Fig. 3 The principle of laser doppler vibrometer (Polytec OFV 3001 & OFV 302)

Table 1. Measuring equipment list

기기명	형식	비고
Machining center	SIRIUS 2 (NT40-8000 rpm)	화천기공 Vertical type
He-Ne Laser vibrometer	Vibrometer controller : CFV3001 (내장변위Decoder : OVD20) Interferometer : OFV302	Polytec
Oscilloscope	Lecroy9374 L	
Electric micrometer	Mitutoyo510-311	
Thermometer	KONICS HR-180R	

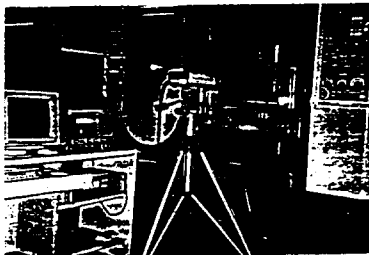


Photo. 1 Measuring equipment of thermal deformation value

3.2 실험방법 및 측정

Fig. 2의 실험주축에 비접촉 Laser doppler vibrometer를 사진과 같이 설치하고 다음과 같은 방법으로 무부하 운전 상태에서 주축가동에 따른 온도상승과 주축 반경방향의 흔들림과 축방향의 신장을 측정하였다.

1) 공구를 장착하지 않고 가동직전 주축의 반경방향 흔들림 (Runout) 초기치를 확인하고 축방향 신장을 0으로 설정한 다음, 1000rpm 부터 실험주축의 최고회전수인 8000rpm 까지 4단계로 각 45분간씩 가동시키면서 15분 간격으로 주축 반경방향과 축방향에서 변화를 측정하여 가동시간과 회전속도 및 온도상승 관계를 고찰하였다. 온도는 초기온도로 부터 상승값만을 나타냈다.

2) 주축단에 밀링척을 장착하고 밀링척을 포함한 공구중량이 2kg과 3kg이 되도록 Weight를 삽입 조절하고, 앞서와 같은 방법과 조건으로 주축 반경방향 측정을 통해서 장착공구 중량과 주축온도 관계를 고찰하였다.

4. 측정결과 및 고찰

4.1 장착공구 전장에 따른 온도상승과 열변형량

먼저 실험주축에 공구를 장착시키지않고 가동시킬때 주축 베어링부에서의 발열과 주축의 온도상승에 따른 주축의 반경방향 흔들림과 축방향에서 신장의 변화상태 측정결과를 Fig. 4에 나타냈다.

주축회전수를 1000-2000-4000-8000rpm 까지 단계적으로 상승시키면서 각 45 분간씩 180분동안 가동시킴에 따라 그림에서와 같이 주축온도상승은 최대4.0-7.4-9.0-12.1℃ 까지 상승되었으며, 이 값은 정밀급베어링에 하우징외벽 냉각장치를 채용한 실험주축에서 온도상승 기준치에 훨씬 못미친 결과이다. 주축회전수가 증가되고 가동시간 경과에 따라 주축온도는 상승되면서 반경방향 흔들림(Runout)은 실험주축의 초기값 1.9 μ m에서 최대 3.2-4.4-6-8.1 μ m으로 증가되어, 최고회전수에서 열변형에 의한 주축 반경방향흔들림 실제증가량은 약 6.2 μ m이었으며, 축방향 신장은 주축온도상승에 따라 최대 4.0-6.1-8.0-11.1 μ m 까지 신장된 결과로 축방향에서의 열변형량의 영향이 반경방향에 비해서 약 1.37배 큼을 확인하였다.

다음은 장착공구 중량변화에 따른 주축 반경방향의 흔들림과 축방향의 신장에 대한 변화상태 고찰을 위하여 2 kg 중량공구를 장착하여 측정된 결과를 Fig. 5에 나타냈다. 그림에서 주축온도는 각회전수에서 최대 4.5-8.0-10.5-13.9℃ 까지 상승되었으며, 공구중량이 증가됨에 따라서 공구가 미장착되었을때 보다 약 14.8% 상승됨을 확인하였다. 주축온도가 상승되면서 주축 반경방향 흔들림은 초기치 2.0 μ m에서 3.7-5.0-6.5-9.1 μ m 까지 증가되어 최고회전수에서의 실제증가량은 약 7.1 μ m으로, 공구중량 2 kg가 장착되어 가동됨에 따라 미장착시보다 12.3% 증가되었고, 축방향 신장은 최대 4.2-6.3-8.6-12.0 μ m 까지 신장되어 약 8.1% 증가되어 축방향의 신장이 반경방향의 흔들림변화에 비하여 약 1.32배 큼을 확인하였다.

Fig. 6은 공구중량 3 kg를 장착시켜 측정결과이다. 그림에서 주축온도는 각회전수에서 최대 6.0-8.8-13.5-16.3℃ 까지 상승되어, 2 kg 공구장착시 보다 17.2%, 공구 미장착시 보다는 약 34.7% 상승되었고, 반경방향 흔들림(Runout)은 초기값 2.2 μ m에서 4.0- 5.2-7.0-10.1 μ m 까지 증가되어 최고회전수에서의 증가량은 7.9 μ m으로, 2 kg 공구에서 보다 10.9%, 공구 미장착시 보다는 약 24.7% 증가된 변화를 나타내고 있다. 축방향 신장은 각 회전수에서 최대 4.7-7.0-9.5-12.7 μ m까지 신장되어 2 kg 공구에서 보다 5.8%, 각 회전수에서 최대 4.7-7.0-9.5-12.7 μ m 까지 신장되어 2 kg 공구에서 보다 5.8%, 공구 미장착시 보다는 약 14.4% 증가되어 축방향의 신장이 반경방향의 흔들림변화에 비하여 약 1.26배 큼을 확인하였다.

이상의 결과고찰에서 실험주축의 가장 가혹한 운전조건(최고회전수 8000 rpm, 가동시간 180min)에서 측정결과를 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2. The result of measurement

장착공구중량 (kg)	0 (미장착)	2 kg	3 kg
주축온도상승치 (°C)	12.1	13.9	16.3
반경방향흔들림 (μm)	8.1(1.9)	9.1(2.0)	10.1(2.2)
축방향신장 (μm)	11.1	12.1	12.7

() 안은 가동전 주축의 Runout 초기치임.

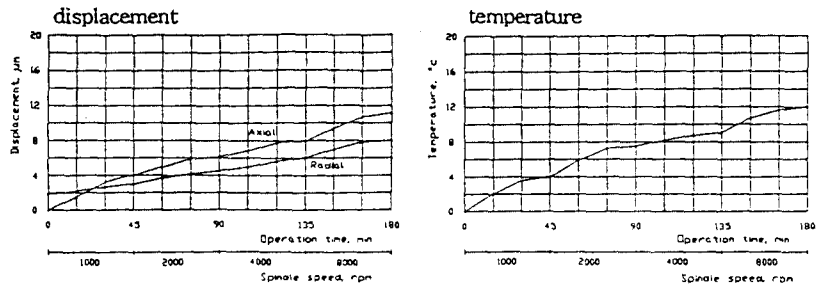


Fig. 4 Spindle thermal displacement and temperature variation by operation time and rotational speed (without tool)

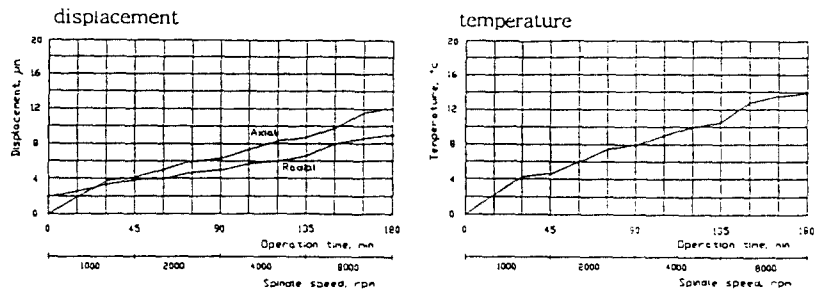


Fig. 5 Spindle thermal displacement and temperature variation by operation time and rotational speed (tool weight : 2 kg)

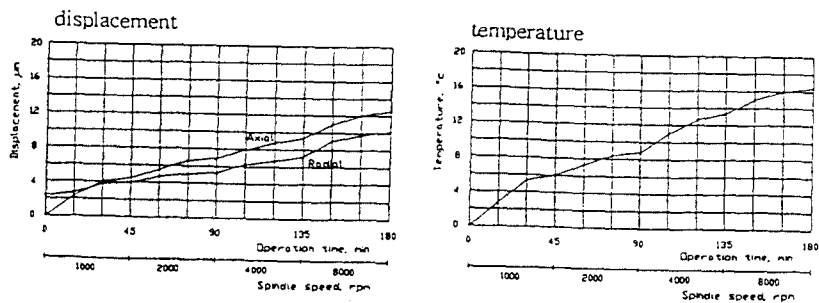


Fig. 6 Spindle thermal displacement and temperature variation by operation time and rotational speed (tool weight : 3 kg)

4. 결 론

주축의 열변형으로 가공정밀도 성능에 영향을 주는 반경방향 흔들림과 축방향 신장을 장착공구 질량과 가동시간, 주축 온도 변화에 따라 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 실험주축의 가혹한 운전조건에서 공구 미장착시 12.1℃ 상승되었던 주축온도는 중량 3 kg 공구를 장착시켜 가동하면 약 34.7% 증가된 16.3℃ 까지 상승 함을 확인하였다.

2) 온도상승에 따른 반경방향 흔들림은 공구 미장착시 8.1 μm 이었으나, 3 kg 공구를 장착시켜 가동하면 약 24.7% 증가된 10.1 μm 으로 커졌으며, 축방향 신장도 11.1 μm 에서 14.4% 증가된 12.7 μm 으로 커지므로, 실험주축의 무부하 운전조건에서 장착공구 중량은 주축 열변형에 영향을 미침을 확인하였다.

3) 실험주축에서 축방향 신장이 반경방향 흔들림의 변화에 비해 평균 1.3배 정도 더 증가하므로 축방향 가공정밀도에서 고려할 사항이다.

參 考 文 獻

- 1) Y. Onose, Bearing and Lubrication Methods for High-speed Machine Tool Spindles. NSK Technical Journal No. 646, pp.32-46, 1986-9.
- 2) 澤本 毅, ころがり軸受の 摩擦と 溫度上昇, 機械の 研究, 22卷8號, pp.78-85, 1970.
- 3) 田辺郁男, レンコンタクトを 併用した 工作機械主軸構造の 熱變形, 日本精密工學會學術講演論文集, C06, pp.81-82, 1987.
- 4) 門田陽宏, 主軸頭の溫度上昇の影響, 日本精密工學會學術講演論文集, C14, pp.109-110, 1990.
- 5) 幸田盛堂, 工作機械主軸系の溫度制御に 關する 研究, 日本精密工學會學術講演論文集, B20, pp.65-66, 1989.
- 6) 廣田忠雄, 工作機械主軸用軸受の高速運轉特性について, NACHI, Vol.41, No.1, pp.11-17, 1985.
- 7) Polytec, Laser Vibrometer manual, pp.1-15, 1995.
- 8) 中村晋哉, 高速スピンドルにおけ回轉中の軸受豫壓變化と主軸變位の解析, 日本精密工學會誌, 58/12, pp.75-80, 1992.
- 9) Harris T.A., Rolling Bearing Analysis, John Wiley & Sons, pp.4283 1984.
- 10) 岡本純三, 轉がり軸受, 幸書房, pp 190-194, 1986.
- 11) 垣野ほか, 1977, 軸回轉精度に 關する 研究(第1報)-工具回轉型の半徑方向回轉精度の新しい測定法-精密機械, 第43卷, 第6號, P720.
- 12) 三井公之, 1982, 精度診斷技術の 研究(3点式主軸回轉測定裝置の開發), 日本機械學會論文集(C編), 第48卷, 第425號, p.115.
- 13) 貴木, 大園, 1966, 3点眞圓度測定法の 一展開, 精密機械, 第32卷 第12號, p.831.
- 14) 三井公之, 精度診斷技術の 研究(3点式主軸回轉精度測定裝置の開發), 日本機械學會論文集(C編), 第48卷, 第425號, p.115.
- 15) 清水伸二 外, 1992, 超高速工作機械用主軸系の性能評價とその性能向上に 關する 研究.