技術論文 한국공작기계기술학회지 제 5 권 제 4 호 1996. 12
Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers

공구 중량조건에 의한 주축변위 특성연구

김종관*, 이중기**, 김상복***

A Study on the Main Spindle Deformatin characteristics by the Tool Weight Condition

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

Abstract

In order to examine spindle deformation characteristics that affects the performance of dynamic cutting accuracy due to tool weight variation in a experimental spindle, thermal deformation value of operrative spindle by the axial displacement and the radial run out was measured according to the rise of spindle temperature through the laps of operation time and the change of rotational speed under the tool weight variation. A qualitative summary is as follows ;

1) The results show that the tool weight affects the spindle temperature variation in a experimental spindle.
2) Radial run out and axial displacement was measured according to the rise of the spindle temperature and the performance of dynamic cutting accuracy was affected by the tool weight variation.
3) Axial displacement is 1.3 times larger than the radial run out in a experimental spindle conditions.
4) Axial displacement is continuously elongated when the tool weight is repeatly exchanged since the spindle themal deformaion, however, when the same tool weight is used, the displacement is still constant.

Keyword : Spindle Deformation Characteristics(주축변위 특성), Axial Displacement (축방향변위), Radial Run Out(반경방향 흔들림), Spindle Accuracy(주축정밀도), Operative Spindle(가동주축).

* 조선대학교 기계공학과
** 조선대학교 대학원
*** 화천기공(주) 기술연구소

1. 서 론

고강성의 정밀급 구름베어링으로 지지되어 있는 다양한 형상과 중량을 갖는 절삭공구를 테이퍼에 접촉시켜 고속회전으로 절삭작업을 수행할때의 공작기계 주축은 자체중량 및 장착공구의 중량과 절삭력에 의하여 회전축과 베어링접촉부의 마찰저항으로 다량의 열에너지가 발생된다. 이 발생열량은 시간에 따라 증가되면서 주축내부에 축적되므로 결국 발열상태의 회전주축은 반경방향 흔들림과 축방향 변형량이 커져서 진동발생을 증대시키므로 주축 회전정밀도 성능을 저하시키게 된다.

구름베어링을 채용한 주축은 가동시 마찰저항으로 발생되는 열변형량[1~4] 이 주축계 구조, 회전체질량, 베어링조건과 회전속도, 가동시간 등에 의하여 좌우되며, 만일 고속으로 장시간 가동한다면 열변형량은 매우 크기 때문에 주축을 설계할때는 여러방법으로 주축 온도상승을 억제시켜 열변형량을 가급적 많지않도록 해야 한다. 또한 경절삭 비철합금 부품이 증가되면서 가공부품 정밀도향상에 대한 사용자의 요구에 부응하고자 주축계 설계방향[5~6]은 지금까지의 주축베어링 대신 다양한 회전 및 부하특성에 대응할 수 있는 정밀급베어링을 채용하여 주축 온도상승에서 문제가되는 발열저항도 감소시키고 있다.

본 논문에서는 국산제작된 최고회전수 8000rpm의 상용 실험주축을 대상으로 실제 가동실험을 통해 장착공구에 대한 중량변화로 저속에서 고속까지 가동시켜 주축온도의 상승에 따라 발열변형으로 인한 반경방향 흔들림과 축방향 신축량을 비접촉 레이져도플러 진동측정기로 정밀측정하고, 그 결과로부터 장착공구 중량과 주축온도 및 가동시간의 관계를 규명하고, 주축열변형이 생기기 전과 후에 주축온도차이로 인한 중량이 다른 공구를 반복교환시킬 때 축방향에서 열변형신축량의 변화특성을 고찰하는데 목적을 두었다.

2. 구름베어링 발열 및 변형량 측정이론[7~10]

2. 1 구름베어링 발열이론

주축에 앵귤러볼베어링을 채용하여 가동시키면 볼베어링의 전동체와 괘도륜사이 접촉부에서는 마찰저항으로 발열이 생긴다. 이 발열은 회전초기 기동마찰에 의한 미끄럼 모우멘트와 회전할 때 구름마찰인 동마찰 토오크에서 발생된다. 또한 미끄럼 모우멘트에 의한 발열은 볼의 스핀 모우멘트와 자이로 모우멘트에 의해 발생되며, 동마찰 토오크에 의한 발열은 베어링형식 및 하중의 크기에 의해 결정되는 하중항의 발열과, 오일점도, 양, 회전수에 의해 결정되는 속도항의 발열로 나누어 진다. 따라서 볼베어링에서 총발열량은 이들의 합으로 나타낼 수 있다.

지금 볼베어링에서 마찰 모우멘트 M은,

$$M = \mu F d/2 \quad (1)$$

여기서, μ는 마찰계수, F는 베어링 하중이다.

윗식에서 마찰모멘트 M인 베어링을 각속도 ω로 회전시키려면 단위시간당 $M \cdot \omega$의 동력이 필요하게 되며, 이 동력에 의한 일량이 베어링중 발생열로 변하게 되어 축과 하우징 및 윤활과 공기를 통해서 외부로 방출된다. 이때베어링에 대한 평형상태식에서 베어링온도가 결정된다. 따라서 볼베어링에서 발열에 의한 온도상승량(t_B-t_A)은 단위시간당 발열량(H_B)과 외부열전 달율(K_B)에서 다음식으로 계산할수 있다.

$$H_B = J\, 2\pi n M \quad (kcal/min)$$
$$K_B = H_B / t_B\text{-}t_A \quad (kcal/m^2 \cdot min \cdot ℃)$$
$$t_B\text{-}t_A = 2\pi J n M / K_B \quad (2)$$

여기서, J는 열의 일당량, n는 베어링회전수, t_A는 외기온도, t_B는 베어링온도를 나타낸다.

2. 2 주축에 대한 열변형량 측정이론

Fig. 1 은 주축의 열변형으로 증가되는 진동변형량의 정밀측정을 위하여 사용된 He-Ne 레이져 간섭계(OFV 302) 측정원리도이다.

이 원리는 레이저에서 나오는 기준 빔과 같은 강도로 beam splitter BS1에서 반사되어 나오는 측정 빔과 합쳐지면서 bit 신호를 발생킨다. 또한 다시 측정 빔은 beam splitter BS2와 렌즈 L을 지나서 진동하는 목표물에 집중되여 진동체에서 분산되는 빛의 순간적인 도플러주파수변조신호를 검출하여 beam splitter BS3에 전달된다. 이때 기준 빔은 브렉셀에서 주파수 변조되어 BS3에서 간섭현상을 일으켜 두 신호가 backscatter form으로 합쳐진 주파수 차이로 photo detector D1,

D2를 거쳐면서 전기신호로 변환되여 진동발생제어장치를 통해서 출력전압에 의하여 전동체에서의 진동크기를 얻게된다.

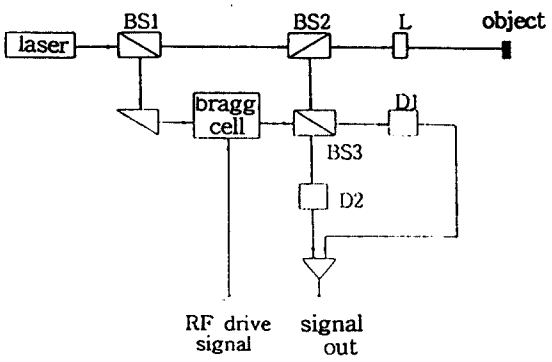


Fig. 1 The measurement principle of laser interferometer (He-Ne 레이져, OFV 302).

즉, Fig. 1에서 레이져 광원에서 반사되어 beam splitter BS3에 도달된 기준 빔과 측정 빔의 간섭결과에서 발생되는 전기장 Er, Em은 시간 t 에서 다음과 같이 복소함수로 나타낼수 있다.

$$Er = 1/2\ A\ e^{-i\omega t}\ e^{i\omega Tr}$$
$$Em = 1/2\ A\ e^{-i\omega t}\ e^{i\omega(Tr+Tm)} \quad \cdots\cdots (3)$$

여기서, Tr은 레이져 광에서 BS3 까지의 거리, Tm 은 측정물까지 거리를 나타낸다. 검출기에서 전기장강도는 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$I = (Er + Em)(E^{*}r + E^{*}m)$$
$$= Io / 2\ (1 + \cos\Delta\varphi) \quad \cdots\cdots (4)$$
$$\Delta\varphi = 2\pi\ z / \lambda$$
$$= 2\ \pi\ fD\ t$$

여기서 $\Delta\varphi$는 두 빔의 위상차이고, z는 경로차, λ는 레이져 파장을 나타낸다.

한편 측정대상물이 진동으로 인하여 경로차 z가 시간에 비례해서 변하면 주기적 신호주파수 f가 일정속도 v로 검출기에서 생성되며, 이 주파수가 음파로 알려진 도플러 주파수로 다음과 같은 식으로 표시된다. 즉,

$$f = f_D = 2\ v / \lambda \quad \cdots\cdots (5)$$

3. 주축의 열변형 실험장치 및 방법

3.1 실험 및 측정장치

구름베어링 마찰저항에 의한 발열로 주축 반경방향과 축방향에서 발생되는 변형량이 가동시간과 주축온도 및 장착공구 질량조건에 어떤 관계를 갖는지 고찰하고자 실험에 사용된 상용 실험주축은 Fig. 2와 같다. 수직형 머시닝센터 주축(SIRIUS 2)으로, 주축단 NT40에 최고회전수 8000rpm에 정밀급베어링(7012CDBP, 예압하중 : 28kgf, 축조립 죔새 : 3㎛, 구멍조립 틈새 : 4㎛)으로 조립되었고, 주축단에 공구장착은 접시스프링의 탄성력으로 인장볼트를 이용하여 고정시킨 구조로 1000kgf 인장력을 기준으로 조립되어있다. 주축의 온도상승을 억제하기 위하여 외벽하우징에는 방열홈을 가공하여 5℃ 냉각수를 강제순환시켰으며, 주축단 공구장착은 그림에서와 같이 밀링척을 사용하였고 공구 중량조절을 위하여 별도 중량을 척에 고정하였다.

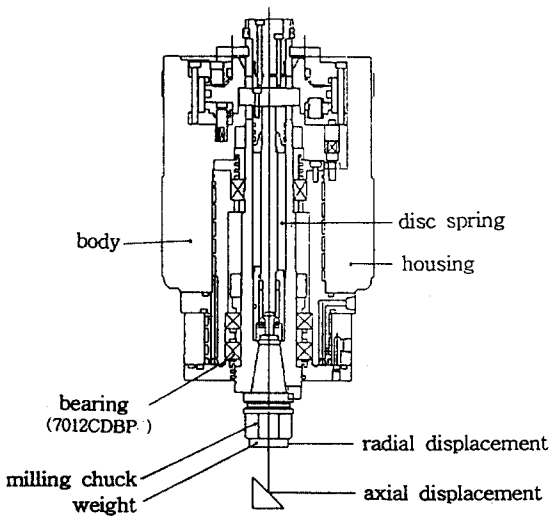


Fig. 2 Apparatus of experimental spindle (Max. speed 8000 rpm, NT 40).

Fig. 3은 실험주축의 발열변형에 의한 진동량 측정에 사용된 비접촉 레이져 도플러 진동측정계(Polytec OFV 3001 & OFV 302) 측정장치도이다.

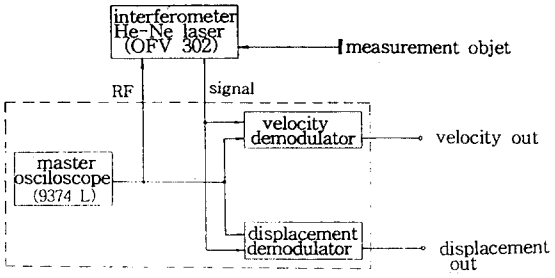


Fig. 3 The measurement principle of laser doppler vibrometer (Polytec OFV 3001 & OFV 302).

진동계 제어장치(OFV 3001)에 변위 디코더가 내장되어 있으며, 측정범위는 2㎛/V를 적용하였고, peak 값은 0.032mm(분해능 0.004㎛)로 측정하였으며, 여기에 오실로스코프를 연결하여 신호형상과 변형량값을 얻었다.

또한 주축은 온도상승 전.후에서 공구교환동작을 반복할 때 공구중량으로 인하여 공구가 축방향으로 변화되는 값을 측정하기위하여 기계 베드위에 전기마이크로미터를 장착시키고 두 조건에서 10회 교환동작을 반복하면서 측정하였다. 이때 주축의 온도측정은 타점온도계를 사용하였으며, 발열이 가장 크게 발생되는 주축 앞베어링 외경부에 열전대를 삽입하여 측정하였다.

Table 1 은 실험에 사용된 측정설비 및 장치의 명세들이고, Photo. 1 은실험주축과 측정장치의 형상들이다.

Table 1. Measuring equipment list.

기 기 명	형 식	비 고
머시닝센터	Sirius 2(NT40-8000 rpm)	수직형
He-Ne 레이저 진동측정계	진동측정계 제어장치 : CFV3001 (내장변위 디코더 : OVD 20) 간섭계 : OFV302	Polytec
오실로스코프	Lecroy 9374 L	
전기마이크로메타	Mitutoyo 510-311	
온도측정계	Konics HR-180R	

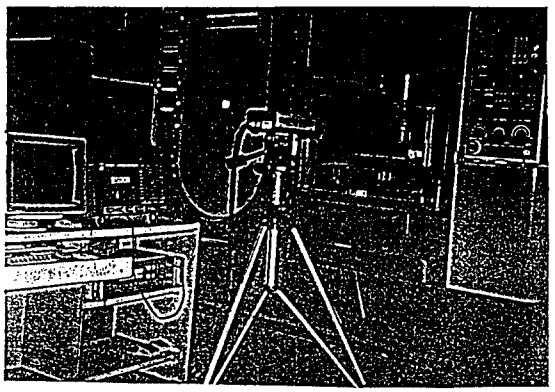


Photo. 1 Measuring equipment of thermal deformation value.

3.2 실험 및 측정방법

본실험에서 사용된 주축에 비접촉 레이져도플러 진동측정계를 설치하고 다음과 같은 조건과 방법으로 무부하 운전상태에서 주축가동에 따른 온도상승으로 주축 반경방향과 축방향에서 발생된 발열변형량을 열변형이 생기기 전과 후 주축의 온도차이로 공구 중량조건에 의해서 축방향신축량을 측정하였다.

1) 공구의 장착이 없는 가동직전 주축의 반경방향 흔들림 초기값을 확인하고 축방향 신축량 0을 설정한 후, 1000rpm 부터 최고회전수인 8000rpm까지 4단계로 각 45분간씩 가동시키면서 15분 간격으로 주축 반경방향과 축방향에서 발열변형량을 측정하므로 가동시간과 회전속도 및 온도상승의 관계를 고찰하였다. 여기서 회전수별 가동시간 간격을 45 분으로 한 이유는 실험주축조건에서 이 정도 시간이 경과되면 회전수역에 관계없이 온도상승이 안정되었기 때문이며, 온도측정치는 실온을 제외한 발열에 의한 실제 상승치만을 나타냈다.

2) 주축단에 밀링척을 장착시키고 척을 포함한 공구중량이 2kgf과 3kgf이 되도록 중량을 삽입하여 조절하고, 1)항과 같은 조건과 방법으로 주축의 발열변형량 측정을 통해서 공구중량과 주축온도 관계를 고찰하였다.

3) 열변형이 없는 가동전과 열변형이 발생했을 때 가동후의 주축조건과 공구질량조건에서 공구 교환동작을 10회 반복시켜 축방향의 신축량을 베드상에 장착된 전기마이크로미터로 측정하므로서 공구장착에 대한 안정성을 고찰하였다.

4. 측정결과 및 고찰

4. 1 장착공구 질량에 따른 온도상승과 열변형량

실험주축에 공구를 장착시키지않고 가동시킬때 주축 베어링부의 온도상승과 이에 따른 발열변형으로 주축의 반경방향 흔들림과 축방향에서 신축량의 변화상태 측정결과를 Fig. 4에 나타냈다.

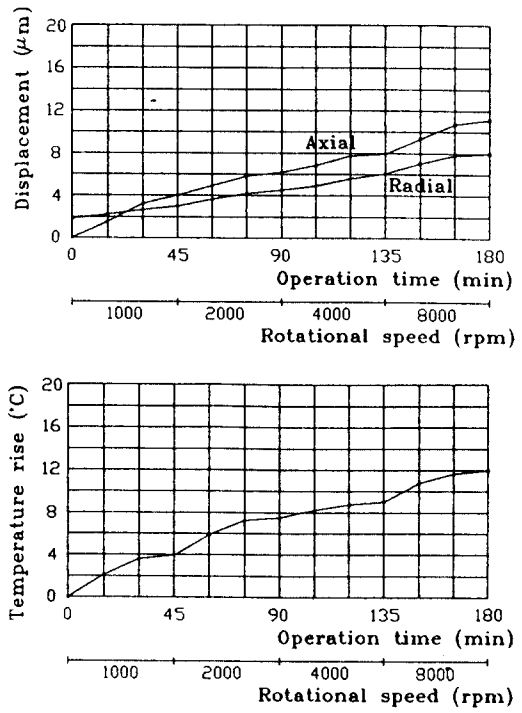


Fig.4 Spindle thermal displacement and temperature variation by operation time and rotational spped(tool weight : 0)

이때 주축회전수를 단계적으로 1000rpm, 2000rpm, 4000rpm, 8000rpm 까지 각 45 분간씩 180분동안 가동시킴에 따라 그림에서와 같이 주축 온도상승이 최대 4.0℃, 7.4℃, 9.0℃, 12.1℃까지 상승되었으며, 이 값은 정밀급베어링에 하우징외벽 냉각장치를 설치한 주축온도 상승 기준치(18℃)에도 훨씬 못미친 결과이다. 주축회전수가 증가되고 가동시간 경과에 따라 주축온도가 상승되면서 반경방향 흔들림은 실험주축의 자체정밀도에 해당하는 초기값인 1.9㎛에서 3.2㎛, 4.4㎛, 6㎛, 8.1㎛까지 증가되며, 최고회전수에서는 열변형에 의한 주축 반경방향흔들림 실제증가량이 약 6.2㎛이였으며, 축방향 신축량도 주축온도상승으로 4.0㎛, 6.1㎛, 8.0㎛, 11.1㎛까지 신장된 결과를 나타내고 있다. 축방향에서 열변형량이 반경방향에 비해서 약 1.37배 커짐이 확인되므로 상기 측정결과들이 주축의 동적 가공정밀도에 좌우하여 가공성능평가의 기준치가 된다.

다음은 장착공구 질량변화에 따른 주축 반경방향과 축방향에서 열변형량 변화상태를 고찰하기 위하여 밀링척에 중량을 삽입한 2kgf 공구를 장착시켜 측정한 결과를 Fig. 5에 나타냈다.

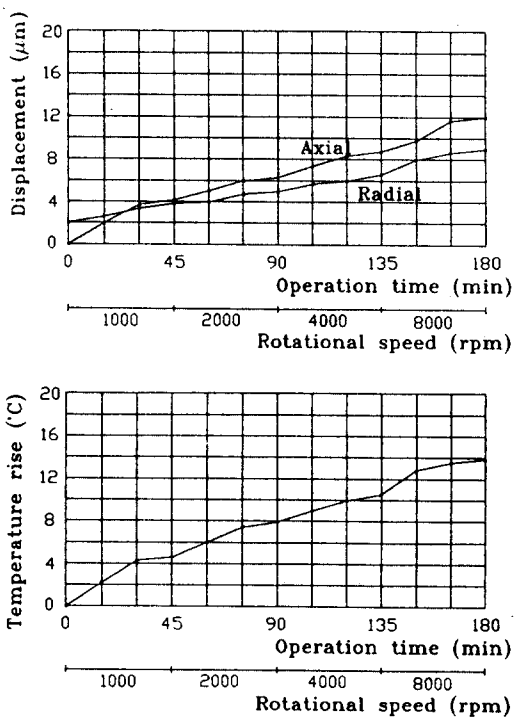


Fig.5 Spindle thermal displacement and temperature variation by operation time and rotational spped(tool weight : 2kg)

그림에서 주축온도가 각회전수에서 4.5℃, 8.0℃, 10.5℃, 13.9℃까지 상승되지만, 이 값도 상기 주축조건의 온도상승 기준치에는 도달하지 못하여 공구중량이 증가함에 따라서 공구가 미장착되었을때 보다 약 14.8% 상승된 변화결과를 확인하였다. 주축온도가 상승되면서 주축 반경방향 흔들림은 초기값 2.0㎛에서 3.7㎛, 5.0㎛, 6.5㎛, 9.1㎛ 까지 증가되지만 최고회전수에서 실제증가량은 약 7.1㎛으로, 공구중량 2kgf가 장착되었을때 가동할 경우 미장착시보다 12.3% 증가되었고, 축방향 신축량은 4.2㎛, 6.3㎛, 8.6㎛, 12.0㎛로 신장되여 약 8.1%가 증가되므로 축방향의 열변형량이 반경방향에 비하여 약 1.32배 커짐을 확인하였다.

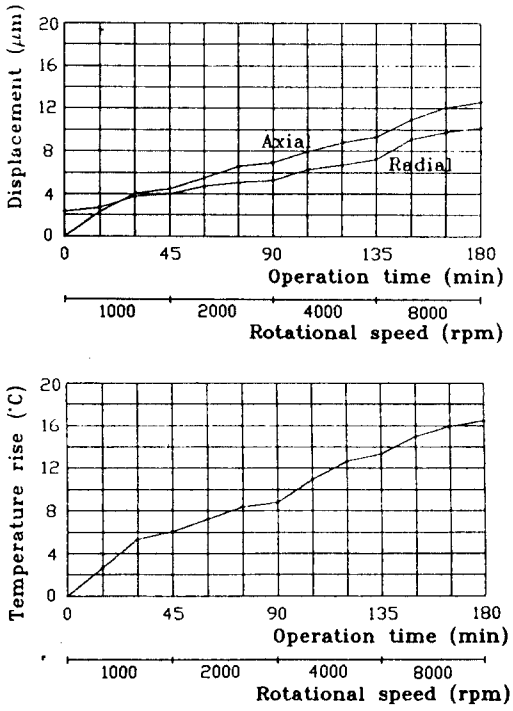


Fig. 6 Spindle thermal displacement and temperature variation by operation time and rotational speed(tool weight : 3kg)

Fig. 6은 공구중량 3kgf를 장착시킨 주축조건하에서 가동할때 열변형량의 측정결과들이다. 그림에서 주축온도가 각 회전전수에서 6.0℃, 8.8℃, 13.5℃, 16.3℃까지 상승되지만 이 값도 주축조건의 온도상승 기준치에는 못미치므로 2kgf 장착공구에서 보다 17.2%, 공구를 장착하지 않했을때 보다는 약 34.7%가 상승된 결과를 나타내고 있다. 공구의 중량이 추가될때 주축온도는 더욱 상승되면서 반경방향 흔들림은 초기값 2.2㎛에서 4.0㎛, 5.2㎛, 7.0㎛, 10.1㎛ 으로 증가되지만 최고회전수에서 실제증가량은 약 7.9㎛ 으로, 중량 2kgf의 공구에서 보다 10.9%, 공구를 장착하지 않했을때 보다는 약 24.7% 증가된 변화결과를 나타내고 있다. 여기서 주축흔들림의 반경방향 초기값 기준치는 5 ㎛이다. 축방향 신축량은 각회전수에서 최대 4.7㎛, 7.0㎛, 9.5㎛, 12.7㎛까지 신장되므로서 중량 2kgf 공구 보다 5.8%, 공구 장착하지 않했을때 보다는 약 14.4% 신장되는 변화결과를 나타냈으며, 그러므로 축방향의 열변형량이 반경방향에 비하여 약 1.26배 커짐을 확인하였다.

이상의 실험결과에 의하면 실험주축을 단계적으로 180분동안에 최고회전수 8000rpm까지 가동시키면서 측정결과를 정리하면 Table 2와 같으며, 이들 결과가 무부하 운전상태 실험주축의 회전정밀도 성능을 나타낸다

Table 2. The result of measurrment.

장착공구중량(kgf)	0(미장착)	2 kgf	3 kgf
주축온도상승치(℃)	12.1	13.9	16.3
반경방향흔들림(㎛)	8.1(1.9)	9.1(2.0)	10.1(2.2
축방향신장량 (㎛)	11.1	12.1	12.7

단, ( ) 안은 가동전 주축의 run out 초기값임.

4.2 주축의 발열변형 전후에서 공구교환에 의한 축방향 변형량

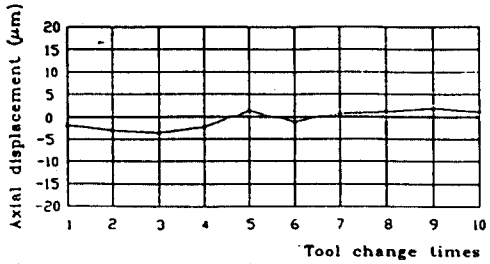
절삭가공시 주축은 수시로 공구교환의 동작이 행하여질뿐만아니라 장착되는 공구도 다양한 중량의 것들이 이용된다. 그러나 앞절의 측정결과에서와 같이 주축은 가동과 함께 온도상승에 의한 발열변형으로 인한 상당량의 반경방향 흔들림과 축방향 신축량이 발생되기 때문에 가공정밀도가 떨어지게된다. 따라서 발열변형 전.후의 주축조건하에서 공구가 반복교환됨과 동시에 축방향으로 공구자세 변화상태를 확인하기 위하여 장착공구 중량조

건에서 10회씩 공구교환을 반복시킬때 발생되는 축방향 자세변화량 측정결과를 Fig. 7에 나타냈다.

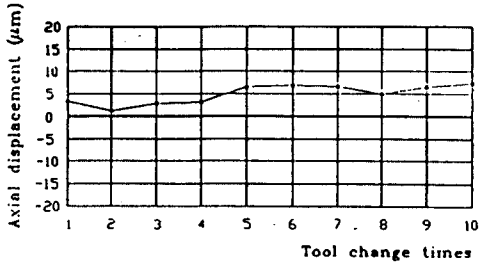
중량 2kgf 공구를 사용하여 주축가동전 상태에서 공구교환을 실시하였던바, 축방향으로 공구자세 변화량은 신장과 신축이 반복되면서 약 6㎛ 변화량을 나타냈으나, 동일한 방법에서 가동후 주축온도는 13.9℃로 상승되고 발열된 상태에서는 1-7㎛까지 매회 축방향으로 신장되는 결과를 나타냈지만, 반복교환에 따른 변화량 크기는 가동전에서와 동일한 결과를 확인할수 있었다.

중량 3kgf 공구로 동일조건하에서 공구교환을 실시할 때 측정결과는 앞에서와는 달리 가동전 축방향의 변화량은 1회째를 제외하고는 최고 5㎛ 까지 신장되면서 약 7㎛의 변화량을 나타냈으나, 가동후 주축온도가 16.3℃이고, 발열된 상태에서 공구중량 추가에 따라 매회 6-12㎛까지 신장되고 중량 2kgf 공구보다 약 5㎛가 더 신장되는 결과를 나타냈지만, 변화량 크기는 가동전과 거의 동일하였다.

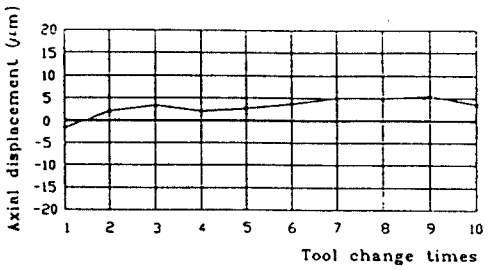
인장볼트에 접시스프링으로 1000kgf 인장력을 발생시켜 공구를 장착시켰을대 실험주축조건하에서의 발열변형된 상태로 장착공구를 반복교환시키면 축방향으로 공구자세 변화량은 공구질량의 추가에 따라 더욱 신장하지만, 동일한 질량공구를 반복교환시키면 그 변화량 크기는 주축의 발열상태와는 관계없이 일정함을 확인할 수 있었다.



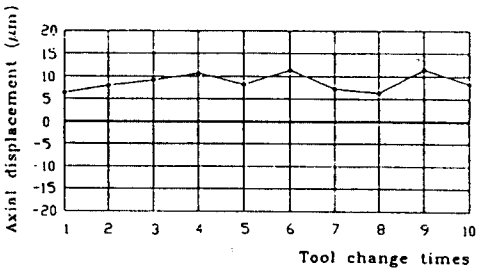
(a) Nonheated spindle(2kgf tool)



(b) Heated spindle(2kgf tool : 13.9℃)



(c) Nonheated spindle(3kgf Tool)



(d) Heated spindle(3kgf tool : 16.3℃)

Fig. 7 Axial displacement variation by tool change in spindle temperature condition

5. 결 론

주축의 발열변형으로 가공정밀도 성능에 영향을 미치는 반경방향 흔들림과 축방향 변형량 및 장착공구 반복교환에 따른 축방향 신축량이 장착공구 질량과 가동시간, 주축온도 변화에 따른 측정과 고찰을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 실험주축의 가혹한 운전조건에서 공구 미장착시 주축온도가 12.1℃ 로 상승하지만, 중량 3kgf의 공구를 장착시켜 가동하면 약 34.7%가 증가된 16.3℃로 상승되었음. 따라서 장착공구 중량이 주축온도를 크게 좌우함을 확인하였다.

2) 온도상승에 의한 주축의 발열변형으로 가공정밀도의 성능기준치가 되는 반경방향의 흔들림은 공구 미장착시 8.1㎛이였으나, 중량 3kgf 공구를 장착시켜 가동하면 약 24.7%가 증가된 10.1㎛이고, 축방향 신장량도 11.1㎛ 에서 14.4% 증가된 12.7㎛으로 커졌음. 따라서 실험주축의 무부하 운

전조건에서 장착공구 중량은 가공정밀도의 성능에 영향을 미침을 확인하였다.

3) 실험주축에서 축방향 변형량이 반경방향에 비해 평균 1.3배로 증가하지만 공구중량이 더욱 증가함에 따라 변형량은 점점 감소되므로 축방향 가공정밀도에서 고려할 사항이다.

4) 실험주축은 온도상승에 의한 발열변형으로 공구를 반복교환시키면 축방향으로는 공구중량 추가에 따라 더욱 신장되지만, 동일한 질량공구에서 온도상승 전후의 변화량 크기는 일정함을 확인할 수 있었다.

후기 : 본 논문은 1994년도 조선대학교 학술연구비 지원을 받아 연구되었음.

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 温度上昇, 機械の研究, 22卷8號, pp.78-85, 1970.

3) 田辺郁男, レシンコンクートを 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會論文集, C06, pp.81-82, 1987.

4) 門田陽宏, 主軸頭の温度上昇の影響, 日本精密工學會學術講演會論文集, C14, pp.109-110, 1990.

5) 幸田盛堂, 工作機械主軸系の温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) 中村晉哉, 高速スピンドルに おける 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.