

## 고속 주축에 있어서의 예압력 변화가 회전정도에 미치는 영향

송창규\*, 신영재\*

### Effect of Preload on Running Accuracy of High Speed Spindle

Chang-Kyu Song\*, Young-Jae Shin\*

#### Abstract

The rotational performance of a machine tool spindle has a direct influence upon the surface finish of the finished workpiece. This running accuracy of the spindle is improved by increasing preload on the bearings, while it results in higher temperature rise and larger thermal deformation. Therefore, finding the optimal preload condition for high speed spindle is very important factors in spindle motion. In this study, the effect of the preload on the roundness accuracy has been examined at the different cutting conditions. Experiments were carried out to investigate the effects of the bearing preload on the running accuracy of high speed spindle which was supported by two angular contact bearings.

**Key Words** : High Speed Spindle(고속주축), Preload(예압), Running Accuracy(회전정도), 3-Point Method(3점법)

### 1. 서론

공작기계 주축의 회전정도는 가공 후 공작물의 가공정밀도와 직결되는 중요한 요소이고 이 회전정도에 영향을 미치는 원인 중의 하나로 주축을 지지하는 베어링의 운동오차를 들 수 있다. 일반적으로 구름 베어링으로 지지되는 주축의 경우 베어링의 예압이 증가하면 베어링의 강성과 감쇠가 커져서 회전정도가 좋아진다<sup>(1-3)</sup>. 하지만 예압이 증가할수록 베어링내의 마찰도 증가하므로 이는 발열의 원인이 되어 베어링의 수명감소와 주축의 열변형 등의 문제를 야

기한다. 특히 최근에 가공능률을 향상시키기 위한 주축의 고속화에 대한 요구가 증대하면서 고속회전에 따른 열변형과 이로 인한 회전정도 저하현상이 해결과제로 대두되고 있다<sup>(4)</sup>. 따라서 본 연구의 목적은 고속주축에 있어서 예압력과 회전정도 및 베어링의 온도상승의 관계를 실험적으로 검토하여 주축의 고속화 및 고정도화에 대비할 수 있도록 하는 기초연구의 수행이다.

본 연구에서는 위와 같은 목적의 실험을 수행하기 위하여 고속회전(200만 DmN)이 가능한 주축과 이의 회전정도 및 예압력과 온도를 측정할 수 있는 실험장치를 구성하였다.

\* 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부  
(송창규 song@kimm.re.kr)

회전정도의 측정은 정전용량형 변위센서 3개를 이용하는 3점법(3-point method)이 사용되었는데 다음의 제2장에서 3점법<sup>(5,6)</sup>의 측정원리가 설명되고, 제3장에서는 고속회전용 주축의 실험장치에 대해 설명하고 제4장에서는 실험결과 및 분석에 대해 토론한다.

## 2. 3점법에 의한 회전정도 측정

### 2.1 회전정도의 개념과 측정방법

회전축의 회전오차(roundness error)란 회전축의 중심이 이론상의 회전중심으로부터 벗어나는 양을 말하고 회전정도(running accuracy)는 한 회전을 하는 동안에 회전오차의 궤적을 모두 포함하는 두 동심원의 반경 차이로 정의된다. 실제적인 회전운동의 측정에서 회전축은 일정한 형상을 갖고 있기 때문에 측정중심운동을 직접 측정할 수는 없고 축의 형상이 회전하는 것을 측정하여 측정중심운동을 간접적으로 계산하여야 한다. 공작기계 주축의 회전정도 측정은 대개 주축에 기준구(master ball)를 물리고 비접촉 변위 센서를 기준구에 설치하여 축의 반경방향 운동을 측정하게 된다. 이때 변위 센서의 출력값은 런아웃 오차(run-out error)로서 정의할 수 있는데 이 런아웃 오차에는 기준구의 편심오차와 기준구의 형상오차(geometrical error)가 모두 포함된다. 즉

$$\begin{aligned} \text{변위센서의 흔들림 오차} &= (\text{주축의 회전오차}) \\ &+ (\text{기준구의 편심오차}) + (\text{기준구의 형상오차}) \end{aligned} \quad (1)$$

정밀도가 높은 기준구를 전기 마이크로미터나 다이얼 게이지로 측정하며 정확히 주축에 장착하여 편심오차를 제거한 후 흔들림 오차를 측정하여 회전정도를 측정하는 방식이 현장에서 사용되지만 엄밀한 의미에선 회전오차라고 할 수 없다. 편심오차는 회전당 한번만 나오게 되므로 푸리에 변환(FFT)한 후 1산 성분을 제거하면 사라지게 된다. 따라서 주축의 회전오차를 계산해 내기 위해선 기준구의 형상오차를 제거하는 방법이 필요하게 되는데 이러한 회전정도 측정법의 대표적인 방법들이 3점법과 반전법<sup>(7,8)</sup>(reversal method)이다. 본 연구에서는 3점법을 채택하였다. 3점법에서는 측정대상물의 형상오차를 분리해 낼 수 있기 때문에 굳이 정밀한 기준구를 사용하지 않고 원형의 공작물을 주축에 장착하여 사용하여도 된다. 따라서 이후 기술에서는 변위센서의 측정대상물로 기준구란 표현 대신 공작물로 표현한다.

회전오차는 회전때마다 반복적으로 나타나는 계통오차(systematic error, synchronous error)와 각 회전시 다른

성분을 보이는 우연오차(random error, asynchronous error)로 나눌 수 있다. 따라서 한번의 회전에서 측정된 회전오차가 주축의 회전오차를 모두 나타낸다고 할 수 없기에 여러 번의 회전을 측정하여 회전오차를 표시한다. ANSI/ASME 규격<sup>(9)</sup>에서는 8회전 이상의 측정을 하도록 규정되어 있으며 본 연구에서도 이 규정을 따랐다.

### 2.2 3점법 회전정도 측정법

Fig. 1과 같이 변위계 A, B, C를 변위계 A에 대해 변위계 B와 C가 각각  $\phi$ 와  $\tau$ 의 각도가 되도록 공작물에 설치하고 변위계 출력값을 각각  $S_A(\theta)$ ,  $S_B(\theta)$ 와  $S_C(\theta)$ 라 하면 이들 변위계 출력값들은 Fig. 1에서의 기하학적인 관계에 의해 식 (2), (3), (4)와 같이 표현할 수 있다. 여기서  $R_A, R_B, R_C$ 는 각각의 변위계와 점 O간의 거리이고  $r(\theta)$ 는 공작물의 형상,  $x(\theta)$ ,  $y(\theta)$ 는 회전오차의 X, Y 방향 성분이다. 변위계의 부호는 변위계와 멀어질수록 양의 부호이고 공작물의 형상  $r(\theta)$ 의 부호는 점 O에서 멀어질수록 양의 부호이다.

$$S_A(\theta) = R_A - r(\theta) - y(\theta) \quad (2)$$

$$S_B(\theta) = R_B - r(\theta - \phi) - y(\theta) \cos \phi + x(\theta) \sin \phi \quad (3)$$

$$S_C(\theta) = R_C - r(\theta + \tau) - y(\theta) \cos \tau - x(\theta) \sin \tau \quad (4)$$

공작물의 평균반경을  $r_0$ 라 하면 공작물의 형상은 푸리에 급수에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r(\theta) = r_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (A_k \cos k\theta + B_k \sin k\theta) \quad (5)$$

각 변위계 출력에 임의의 계수 1, a, b를 곱하여 합한 합

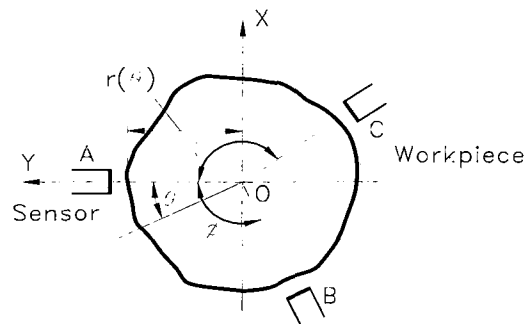


Fig. 1 Principle of 3-point method

출력  $S(\theta)$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$S(\theta) = S_A(\theta) + aS_B(\theta) + bS_C(\theta) \quad (6)$$

식 (6)에 식 (2), (3), (4)와 식 (5)를 대입하면 식 (7)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} S(\theta) = & R_A + aR_B + bR_C - r_0(1 + a + b) \\ & + x(\theta)(a \sin \phi - b \sin \tau) - y(\theta)(1 + a \cos \phi + b \cos \tau) \\ & - \sum_{k=1}^{\infty} [ \{ A_k(1 + a \cos k\phi + b \cos k\tau) + \\ & B_k(b \sin k\tau - a \sin k\phi) \} \cos k\theta \\ & + \{ B_k(1 + a \cos k\phi + b \cos k\tau) + \\ & A_k(b \sin k\phi - a \sin k\tau) \} \sin k\theta ] \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서  $a$ 와  $b$ 를 아래 식 (8)과 같이 되도록 정하면  $x(\theta)$ 와  $y(\theta)$ 의 항은 소거된다.

$$a \sin \phi - b \sin \tau = 0, \quad 1 + a \cos \phi + b \cos \tau = 0 \quad (8)$$

식을 간단히 하기 위해 다음과 같이 치환하면

$$\alpha_k = 1 + a \cos k\phi + b \cos k\tau, \quad \beta_k = -a \sin k\phi + b \sin k\tau \quad (9)$$

식 (7)은 아래와 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} S(\theta) = & R_A + aR_B + bR_C - r_0(1 + a + b) - \\ & \sum_{k=2}^{\infty} \{ (A_k \alpha_k + B_k \beta_k) \cos k\theta + (B_k \alpha_k - A_k \beta_k) \sin k\theta \} \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)을 보면 앞의 4항은 상수이므로 직류(dc)값으로 간주할 수 있고 따라서 식 (10)은  $S(\theta)$ 의 푸리에 급수 표현임을 알 수 있다.  $k$ 가 1일 때의 값은 회전당 1산 성분이므로 편심오차 제거를 위해 생략하였다. 따라서  $S(\theta)$ 의 푸리에 계수(Fourier coefficients)  $F_k$ 와  $G_k$ 는 (10)식에서 다음의 식으로 표현되어 있음을 알 수 있다.

$$F_k = -A_k \alpha_k - B_k \beta_k, \quad G_k = A_k \beta_k - B_k \alpha_k \quad (11)$$

이때  $F_k$ 와  $G_k$ 는 식 (6)의 합신호를 푸리에 변환(FFT)하면 얻어진다. 따라서 식 (11)로부터  $r(\theta)$ 의 푸리에 계수를

다음과 같이 얻을 수 있다.

$$A_k = \frac{(-\alpha_k F_k + \beta_k G_k)}{(a_k^2 + \beta_k^2)}, \quad B_k = \frac{(-\beta_k F_k - \alpha_k G_k)}{(a_k^2 + \beta_k^2)} \quad (12)$$

식 (12)를 식 (5)에 대입하면 공작물의 형상  $r(\theta)$ 를 구할 수 있고 이를 다시 식 (2), (3), (4)에 대입하면 다음과 같이 회전오차의 X, Y 성분을 구할 수 있다.

$$x(\theta) = \frac{\{S_B(\theta) + r(\theta - \phi)\} \cos \tau - \{S_C(\theta) + r(\theta + \tau)\} \cos \phi}{\sin(\phi + \tau)} \quad (13)$$

$$y(\theta) = -r(\theta) - S_A(\theta) \quad (14)$$

여기서  $R_A, R_B, R_C$ 의 항들은 처음 변위계를 설치할 때 0이 되도록 리셋시키기 때문에 식 (13), (14)에 나타내지 않았다.

3점법으로 회전정도를 측정하는 경우에 계수  $a$ 와  $b$ 를 정확하게 계산하기 위하여 변위계 사이의 각도  $\phi$ 와  $\tau$ 가 정밀하게 측정되어야 한다. 가장 정확하게 측정하는 방법은 변위계를 견고하게 고정할 수 있는 치구를 제작한 후 치구에서의 변위계간 각도를 삼차원 측정기에서 측정하는 방법이지만 보다 실제적인 방법은 측정대상인 공작물에 얇고 폭이 좁은 접착 테이프를 붙여서 측정하는 방법이다. 공작물을 저속으로 회전시키며 접착 테이프를 각 변위계들이 고정되어 있는 위치로 접근시키면 변위계의 출력값이 테이프의 두께만큼 변하게 된다. 한 회전 동안에 변위계 출력값들을 비교하면 테이프의 두께를 보이는 부분이 각 변위계의 위치가 된다. 이렇게 측정한 본 실험에서는 각도는  $\phi = 129.6^\circ$ ,  $\tau = 120.4^\circ$ 이다.

### 3. 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치는 Fig. 2에 도시한 바와 같이 주축이 2개의 앵글러 콘택트 볼 베어링으로 지지되어 있고, 축의 뒷부분에 장착된 베어링에 기계니컬 씰(mechanical seal)을 연결하여 이 씰에 공압을 가하여 베어링에 축방향 정압예압(constant pressure preload)을 주는 구조로 되어 있다. 예압력의 측정은 베어링과 씰 사이에 부착된 로드셀을 통하여 측정한다.

본 실험에 사용된 고속용 주축의 앵글러 콘택트 볼 베어링에는 탄성계수가 크고 원심력이 작은 세라믹 볼이 사용되어

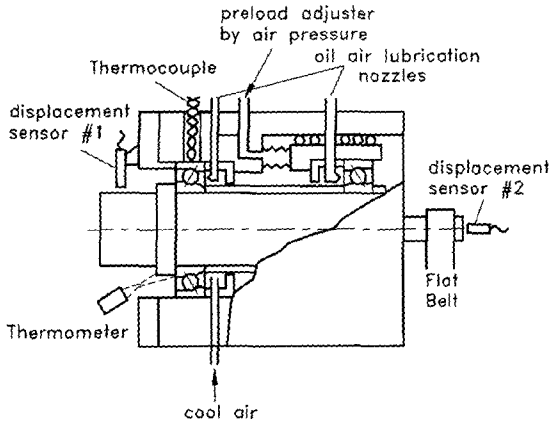


Fig. 2 Schematic diagram of experimental set-up

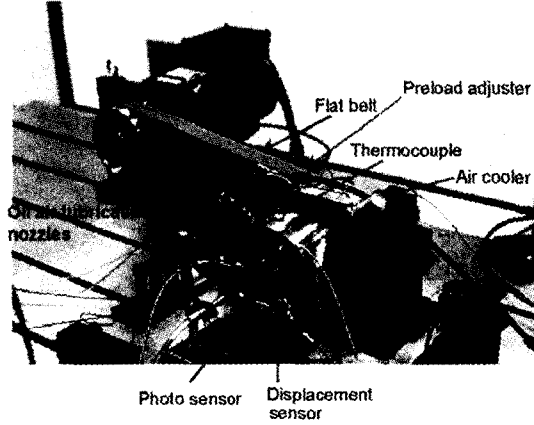


Fig. 3 Photography of experimental set-up

고속 회전시에도 마찰에 의한 발열을 줄여준다. 세라믹 볼과 더불어 베어링의 윤활에 채워진 오일 에어(oil air)윤활을 통하여 주축을 고속회전 시켜도 온도상승을 억제시키는 구조로 실험장치가 이루어져 있다. 축의 앞 부분에는 3점법을 위한 세 개의 변위계들을 설치하였다. 베어링의 온도변화에 의한 회전정도의 영향을 평가하기 위하여 베어링 외륜을 압축공기를 이용한 냉각기(air cooler)에 의해 냉각하였다. Fig. 3에 본 실험장치의 사진을 보였다. 사진에 보인 광센서(photo sensor)는 회전의 트리거링(triggering)을 위한 센서이다.

#### 4. 실험결과 및 분석

회전정도를 측정하기 위해서는 변위계에 의해 측정된 런

아웃(run-out) 오차로부터 공작물의 형상오차를 제거해야 한다. 3점법은 측정대상의 형상오차를 계산해 낼 수 있기 때문에 기준구나 기준링(master ring)과 같은 정밀한 측정 치구를 사용하지 않고도 축의 회전오차를 측정할 수 있다. Fig. 4에 3점법에 의해 추출된 형상  $r(\theta)$ 를 보였다. 1회전에 대하여 256개의 샘플링 개수로 총 8회전의 결과이며 형상정도를 계산할 때 공작물의 회전중심에 대한 편심오차는 앞절에서의 설명과 같이 푸리에 변환할 때 회전당 1산 성분을 제외하고 변환하는 방식으로 제거하였다. 회전당 샘플링 개수를 256개로 한 것은 푸리에 변환(Fast Fourier Transform) 알고리즘에서 요구되는 샘플링 개수가  $2^n$ 개인 점과 A/D 변환보드의 샘플링 속도를 모두 고려한 결과이다. Fig. 4에서 보면 주축의 회전속도가 2500rpm과 5000rpm으로 각각 다

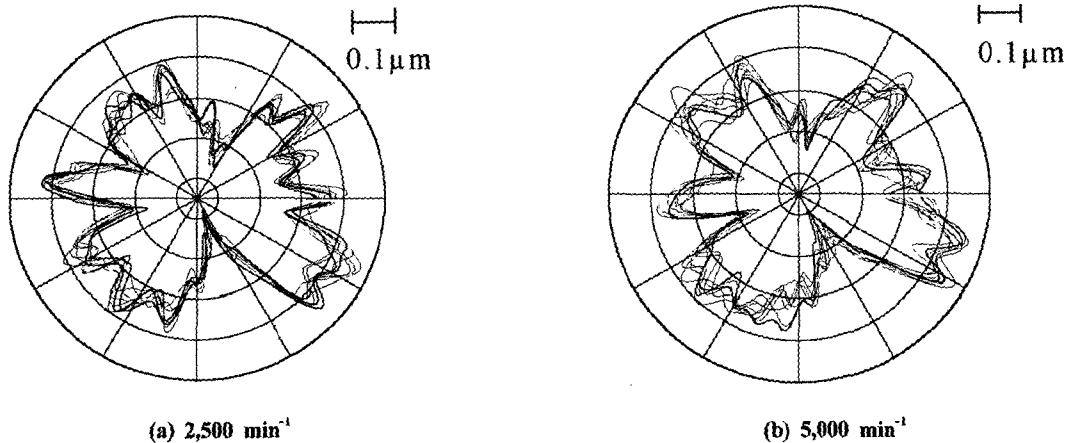


Fig. 4 Geometrical error of spindle

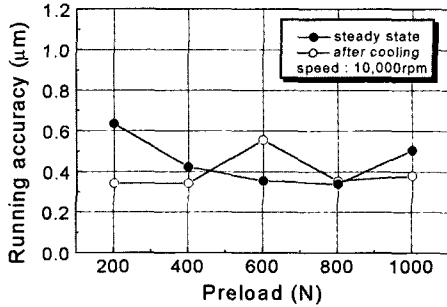


Fig. 5 The relationship of running accuracy and preload

름에도 형상오차는 같은 형태를 나타내고 있어 3점법에 의한 형상오차 추출이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다. Fig. 4를 보면 형상오차는  $0.4 \mu\text{m}$ 에 가까워서 기준구 등의 정밀 치구에 비해 크지만 3점법의 특성이 회전체의 형상오차를 알아내어 제거하는 것이므로 그 오차량이 크더라도 회전오차의 계산에는 영향을 끼치지 않는다.

Fig. 5과 6에 베어링의 예압력 변화에 대한 회전정도와 온도상승량의 측정결과를 보였다. 온도는 Fig. 2에 보이듯이 앞쪽 베어링 외륜의 온도이며, 회전정도의 계산시 중심원의 중심점은 ANSI/ASME 규격에 따라 최소자승법에 의해 구하였다. Fig. 5에서 예압을 증가시킬수록 회전정도는 좋아지지만 Fig. 6에서 보면 온도는 상승하고 있는 것을 볼 수 있는데 이는 예압의 증가로 인해 강성이 좋아지지만 베어링 볼과 레이스간의 마찰이 심해져서 발열도 증가함을 나타낸다. 이러한 결과는 발열량과 회전정도의 양 측면을 모두 고려하는 최적 예압조건의 설정 가능성을 보여준다. Fig. 5에서 정상상태의 온도는 2시간 이상 구동시킨 후 열적 평형에 도달했음을 확인한 후 측정하였는데 압축공기 냉각기를 사용하여 베어링의 외륜을 냉각한 후 다시 측정한 회전정도는 정상상태보다 좋아진 것을 확인할 수 있다. 이러한

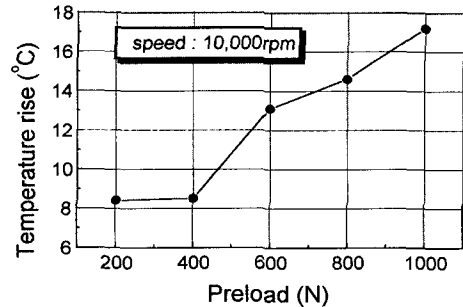


Fig. 6 The relationship of temperature and preload

결과는 열변형의 효과가 감소한 결과로 추정된다.

Fig. 7에는 온도가 정상상태에서의 각 예압에 따른 회전오차의 형태를 보이고 있다. Fig. 5에서 보면 예압이 200N, 600N, 1000N에서 회전정도값은 각각  $0.63 \mu\text{m}$ ,  $0.37 \mu\text{m}$ ,  $0.50 \mu\text{m}$ 인데 이러한 수치는 Fig. 7의 회전오차 형태로부터 계산한 값들이다.

Fig. 8과 Fig. 9에는 동일한 예압조건에서의 속도에 따른 회전정도와 온도 특성을 나타냈다. 속도가  $10,000\text{rpm}$ 을 넘어서는 고속에서 회전정도가 저속에 비해 100% 이상 급격히 나빠지고 온도도 급상승하는 것을 그림에서 알 수 있다. 이러한 현상은 주축의 고속화에 따른 문제점으로 해석할 수 있는데 그 원인으로서는 베어링 온도의 급상승에 따른 주축부의 열변형이 회전정도를 영향을 미친 것으로 추정되지만 향후 계속된 연구가 필요하다.

## 5. 결론

본 연구에서는 공작기계 주축의 고속화와 고정도화를 위한 기초 연구로서 주축의 속도 및 예압과 회전정도와 관계를 실험적으로 고찰하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

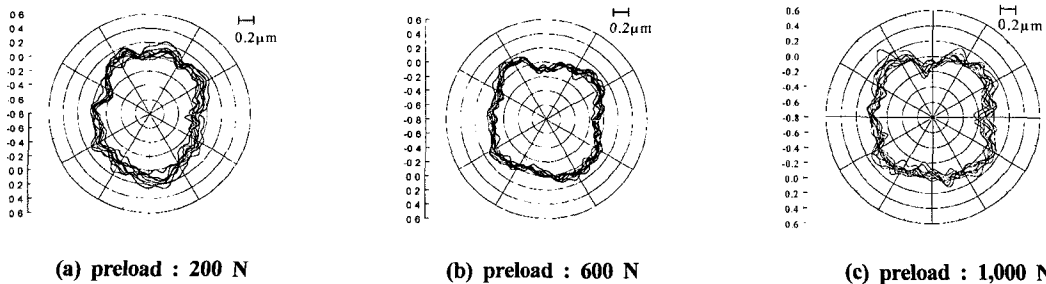


Fig. 7 Radial error motion ( $10,000 \text{ min}^{-1}$ )

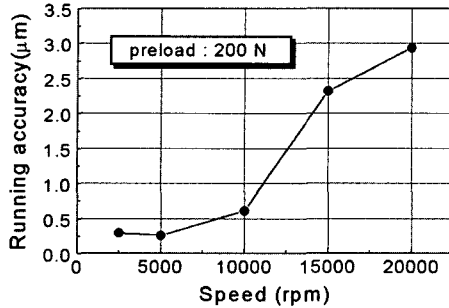


Fig. 8 The relationship of running accuracy and speed

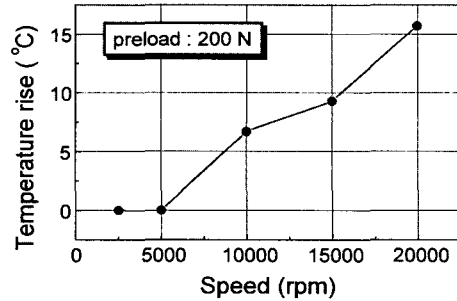


Fig. 9 The relationship of temperature and speed

- (1) 3점법에 의한 회전정도 측정장치를 구현하였고 반복성이 높은 형상오차를 추출할 수 있었다.
- (2) 예압이 증가할수록 회전정도는 0.63 μm(예압 200N)에서 0.33 μm(예압 800N)로 47% 개선되어서 예압 증가에 따른 회전정도 향상 효과를 확인할 수 있었지만 동시에 마찰에 의한 발열도 증가하여 예압이 1000 N에서는 도리어 0.5 μm로 회전정도가 나빠지는 것을 확인하였다.
- (3) 주축의 속도가 10,000 rpm을 넘는 고속에서는 회전오차 및 온도가 100% 이상 급상승한다.
- (4) 동일한 예압조건에서는 베어링을 냉각시키는 것이 정상상태의 온도에서보다 회전오차를 감소시킨다.

예압이 증가하는데 따라 보이는 회전정도와 온도상승간의 상충성은 최적의 예압조건이 존재한다는 것을 암시한다. 따라서 고속주축의 향후 연구과제는 이러한 최적예압조건을 찾아내는 것이라 할 수 있다. 또 앞의 (3)에서 주축의 속도가 고속이 될수록 열변형뿐만 아니라 회전정도의 관점에서 그 개선을 위한 연구가 진행되어야 함을 알 수 있다.

### 참 고 문 헌

- (1) K. Kim and S. S. Kim, "Effect of Preload On Running Accuracy of Spindle", *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 29, No. 1, pp. 99~105, 1989.
- (2) 櫻井誠, 田子辛雄, "高速工作機械主軸用アンギュラ玉軸受の豫壓特性", *NSK Technical Journal*, No. 656, pp. 37~43, 1993.
- (3) 横川 洪, 龍江 義孝, 水原 清司, "工作機械主軸の回轉精度-旋盤主軸の回轉精度に對する豫壓の效果", *機械技術研究所所報*, Vol. 26, No. 1, pp. 17~30, 1972.
- (4) Shinya Nakamura and Yoshiaki Kakino, "An Analysis on Preload Increment and Displacement of a Rotating High Speed Spindle", *JSPE*, Vol. 58, No. 12, pp. 2019~2024, 1992.
- (5) 青木 保雄, 大園 成夫, "3点法眞圓度測定法の一展開", *精密機械*, Vol. 32, No. 12, pp. 831~836, 1966.
- (6) 三井 公之, "精度診断技術の研究-3点式主軸回轉精度測定裝置の展開", *日本機械學會論文集(C編)*, Vol. 48, No. 425, pp. 115~123, 1982.
- (7) 박천홍, 이후상, 이찬홍, 김인찬, "반전법을 이용한 정밀주축의 회전정도 측정시스템 개발", *한국정밀공학회지*, 제12권, 제13호, pp. 168~174, 1995.
- (8) R.R. Donaldson, "A Simple Method for Separating Spindle Error from Test Ball Roundness Error", *Annals of the CIRP*, Vol. 21, No. 1, pp. 125~126, 1972.
- (9) ANSI/ASME B89.3.4M-1985.