

고정밀 스피ن들의 회전정밀도 측정 오차 분리법에 관한 연구

김상화*, 김병하#, 진용규**

(# 경일대학교 기계자동차학부, * 한국폴리텍대학 구미캠퍼스 자동화시스템과, ** (주)카스윈)

A study on the Error Separation Method in Rotation Accuracy Measurement of High Precision Spindle Unit

Sang-Hwa Kim*, Byung-Ha Kim[#], Yong-Gyoo Jin**

(Received 21 August 2013; received in revised form 29 November 2013; accepted 18 December 2013)

ABSTRACT

The rotation of a spindle unit must be accurate for high-quality machining and to improve the quality of the machine tools. Therefore, the proper measurement of the rotation accuracy and ensuring a proper analysis are very important. Separate processes are necessary because spindle errors and roundness errors associated with the test balls can both factor into the measured rotation error values. We used three methods to discern test ball errors and analyzed which could be deemed as the most proper technique in a test of the rotation accuracy of the main spindle of a machine tool.

Key Words : Spindle unit(회전체), Rotational error motion(회전오차운동), Machine tools(공작기계)
Rotation accuracy(회전정확도), Error separation methods(오차분리법)

1. 서 론

고정밀 공작기계의 주축은 고속화를 넘어 초고속화되고 있다. 공작기계에 사용되는 회전체의 중요한 평가요소는 가공부품의 정밀성이므로 이를 결정짓는 회전체의 회전정밀도 향상 기술이 필요하다.

주축 회전체의 회전정밀도에 영향을 미치는 요소

들 중에 베어링의 진원도 오차, 조립공차, 회전부품 간의 중심정렬(Alignment), 질량불평형 등 여러 가지가 있다^[1].

회전체의 회전정밀도 측정에서 기존의 전통적인 측정방법은 현재와 같은 고정밀의 회전체 측정에 불합리한 문제점들을 내포하고 있다. 스피ن들에 장착된 공구홀더(Tool holder)에 정밀하게 가공된 시험볼(Test ball)을 고정하여 시험볼의 측면 표면의 변위량을 측정하는데 이때 일어난 변위량은 홀더와 시험볼의 형상 오차를 포함하고 있으므로 회전체만의 오차량을 알 수 없다^[2].

따라서 본 연구에서는 공작기계 주축의 스피ن들 구

* Korea Aviation Polytechnic Gumi campus

** Kaswin Co., LTD

Corresponding Author :

Department of Mechanical Engineering, Kyungil University.
E-mail : bhkim@kiu.ac.kr

조를 가진 회전체에서의 회전정밀도 측정방법으로 비접촉센서를 사용하여 변위량을 측정하고 시험볼의 형상 오차와 회전체의 오차량을 분리하는 방법을 연구 하고자 한다^[3].

2. 회전오차 분리기법 이론

2.1 회전오차 측정

정밀 회전체의 오차 운동을 설명하는 데 중요한 개념의 하나는 회전하는 시험볼 표면의 마모(또는 진원도)로 발생하는 형상 오차 운동과 회전체 오차 운동 간의 구별이다. 변위 측정 인디케이터(센서)가 회전체 오차와 시험볼 표면의 결함(마모, 진원도 등 오차)이 결합되어 기여된 오차를 측정하는 것이다. Fig. 2-1은 회전체와 거의 같은 크기의 오차가 있는 시험볼의 구면에 대해 측정된 오차 운동 극좌표 그래프를 나타내며 회전체의 오차 운동은 시험볼의 형상 오차와는 완벽하게 다른 반경방향(Radial) 회전체 오차 운동을 나타내고 있다^[4,5,6].

회전체 오차 운동에서 시험볼의 마모나 진원도 형상 오차가 매우 적은 경우는 무시할 수 있지만 무시하기 불가능한 상황에서는 오차 분리 과정을 거쳐야 명확한 회전체만의 오차 운동값을 알 수 있다. 회전체 오차 운동을 측정하는 방법은 크게 3가지로 분류할 수 있다.

첫 번째로 공간(Spatial)적 개념으로 변위 센서의 위치와 가리키고 있는 방향에 따라 축(Axial), 단면(Face), 반경방향(Radial), 경사(Tilt) 오차 운동의 측정 방법이다.

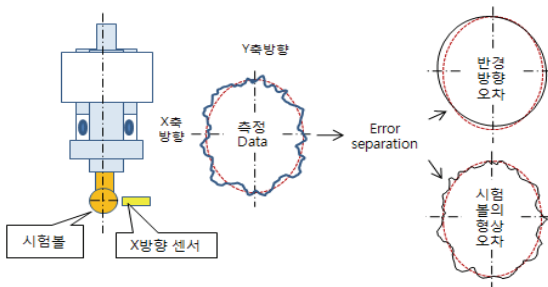


Fig. 2-1 The separation of a displacement into spindle and test ball

두 번째 분류는 회전당 변위의 파동수(UPR: Undulation per revolution)에 의한 것이다. 회전당 1회 발생하는 변위량의 파동을 기초(Fundamental)라 하면, 기초의 파동과 배수로 나타나는 동기(Synchronize) 성분과 배수로 나타나지 않는 비동기(Asynchronize) 성분들로 구성된다.

세 번째 분류는 감도 방향(Sensitive direction)이다. 공구가 고정되고(ex. 선반) 또는 회전하는(ex. 보링머신) 기계에서 다르게 나타날 수 있는 민감성에 관한 방법이다. 민감한 방향성의 선택은 측정량을 해석함에 따라 매우 다른 결과를 가지고 있다^[6].

본 연구에서는 공간적 개념의 반경방향에 대하여 주파수 측정방법으로 오차 운동값을 분리하고자 한다.

2.2 회전오차 분리 기법

회전체의 오차 성분 측정을 위해 사용하는 측정 기구에도 무시할 수 없는 진원도 오차가 있으므로 스핀들 동기 성분 측정 분석법을 적용하여 시험볼로 인하여 발생하는 오차 성분을 분리하는 3가지 방법을 연구 하고자 한다.^[6].

2.2.1 도널슨 반전법

(Donaldson reversals methods)

반전법은 회전체 오차의 하나의 성분(즉, 반경 또는 단면)을 계산하기 위해 2번의 측정이 필요하며 시험볼과 변위 센서는 움직여가며 측정한다. 반전법은 다른 방법에 비해 이론적으로 우수하나 나노수준의 결과를 얻기 위해서는 높은 수준의 하드웨어가 필요하다. Fig. 2-2은 2차원적 설명을 나타내고 있다.

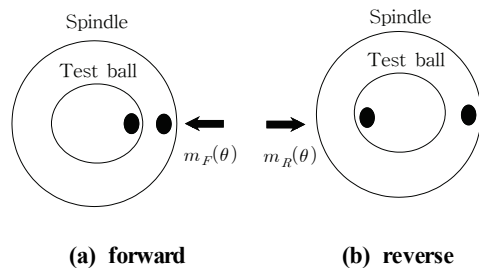


Fig. 2-2 2D illustration of reversal method

Fig. 2-1에서 측정된 양 m_F, m_R 은 회전체 반경 오차 운동 S 와 측정기구인 시험볼의 형상 오차 R 의 관계는 다음과 같다.

$$m_F = R + S \quad (2-1)$$

$$m_R = R - S \quad (2-2)$$

Fig. 2-2(b)의 시험은 측정기구인 시험볼의 형상 오차와 회전체 오차를 풀기위한 것이다. 식 (2-1)과 (2-2)를 계산하면 식 (2-3)과 (2-4)를 만들고 시험볼의 형상 오차 R 과 스피ن들 오차 운동 S 를 구한다. 측정된 양 m_F, m_R 와 결과값 R, S 는 각도 위치에 상응하는 벡터들이다.

$$R = \frac{m_F + m_R}{2} \quad (2-3)$$

$$S = \frac{m_F - m_R}{2} \quad (2-4)$$

2.2.2 멀티 프로브법(Multiprobe methods)

멀티 프로브에서의 오차 분리법은 3개 혹은 그 이상 프로브(센서)를 사용한다. Fig. 2-3는 3개의 변위 센서 m_A, m_B, m_C 와 시험볼의 형상오차 R 을 가지는 측정기구의 정렬을 보여주고 있다. 센서 m_B, m_C 는 xy 평면에서 센서 m_A 로부터 각도 ϕ 와 ψ 만큼 떨어져 있다. 여기서 θ 는 반시계방향 임의의 각도를 나타낸다.

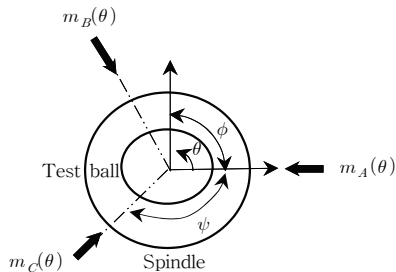


Fig. 2-3 Schematic of the three-probe error separation method

3개의 변위 센서로부터 기록된 측정값은 센서 위치로 인한 위상 변화(Phase shift)를 포함하는 시험볼의 형상 오차 R 를 요약하여 수학적으로 다시 나타내어진다. 그리고 $x(\theta), y(\theta)$ 성분의 스피ن들 오차는 다음과 같다.

$$m_A(\theta) = R(\theta) + x(\theta) \quad (2-5)$$

$$m_B(\theta) = R(\theta - \phi) + x(\theta)\cos\phi + y(\theta)\sin\phi \quad (2-6)$$

$$m_C(\theta) = R(\theta + \psi) + x(\theta)\cos\psi - y(\theta)\sin\psi \quad (2-7)$$

$M(\theta)$ 는 통합 계수 a, b 를 사용하여 3개의 뚜렷한 측정값의 선형적 조합으로 정의된다. 미지수인 계수 a, b 는 오차 운동의 순수 결과가 식 (2-6)과 (2-7)을 풀어서 M 값에서 상쇄된다.

$$M(\theta) = m_A(\theta) + am_B(\theta) + bm_C(\theta) \quad (2-8)$$

$$a\cos\phi + b\cos\psi + 1 = 0 \quad (2-9)$$

$$a\sin\phi - b\sin\psi = 0 \quad (2-10)$$

시험볼의 형상 오차 R 은 Fourier 시리즈로 풀면 다음과 같다.

$$R(\theta) = \sum_{k=1}^{\infty} \{ (A_k \cos k\theta) + (B_k \sin k\theta) \} \quad (2-11)$$

식 (2-11)은 시험볼 형상 오차 R 에 대한 Fourier 표현이 가중된 측정 $M(\theta)$ 값 내에 제출될 때의 결과를 보여준다. 이 결과를 얻기 위하여 부가 각도에 대해 삼각법 독창성이 적용되고 $A_k \cos k\theta, A_k \sin k\theta, B_k \cos k\theta, B_k \sin k\theta$ 의 일반적 항목들은 다음과 같이 수정된다.

$$\begin{aligned} M(\theta) &= m_A(\theta) + am_B(\theta) + bm_C(\theta) \\ &= \sum_{k=1}^{\infty} A_k (1 + a\cos\phi + b\cos\psi) \cos k\theta + \dots \\ &\quad \sum_{k=1}^{\infty} A_k (a\sin\phi + b\sin\psi) \sin k\theta + \dots \end{aligned}$$

$$\sum_{k=1}^{\infty} B_k(1 + a \cos k\phi + b \cos k\psi) \sin k\theta - \dots$$

$$\sum_{k=1}^{\infty} B_k(a \sin k\phi + b \sin k\psi) \cos k\theta \quad (2-12)$$

이 부분에서 $a_k = 1 + a \cos k\phi + b \cos k\psi) \sin k\theta$, $\beta_k = b \sin k\psi + a \sin k\phi$ 는 남은 단계가 A_k, B_k 를 결정하기 위해 Fourier 계수 $M(\theta), F_k, G_k$ 를 식 (2-13) 항목들과 비교하는 것으로 계산된다. 따라서 식 (2-13)은 Fourier 시리즈에서 각 항목들에 대해 풀 수 있다.

$$M(\theta) = \sum_{k=1}^{\infty} \{(F_k \cos k\theta) + (G_k \sin k\theta)\} \quad (2-13)$$

$$\begin{bmatrix} a_k & -\beta_k \\ \beta_k & a_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_k \\ B_k \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_k \\ G_k \end{Bmatrix} \quad (2-14)$$

A_k, B_k 는 알고 있는 값이며, 시험볼 형상 오차 R 로 충분히 정의된다. 오차는 식 (2-14)에서 보는 것처럼 스핀들 오차 운동 S 를 결정하기 위해 사용된다.

$$S(\theta) = m_A(\theta) - R(\theta) \quad (2-15)$$

이 방법의 수행은 센서들의 오리엔테이션 각도 ϕ, ψ 의 정확한 지식과 변위 센서의 정밀한 매칭 감도에 달려있고, 센서들은 정밀하게 정렬되어야 한다. 그래서 스핀들이 완벽하면 m_A, m_B, m_C 측정 차이는 단지 시험볼의 진원도 위상 변위(Phase shift)일 것이다.

2.2.3 멀티 스텝법(Multistep methods)

멀티 스텝법은 각각의 스핀들 에러 성분들에 대해 많은 측정이 필요하다. 변위 센서를 움직이지 않지만 대신 동일하게 배분된 증가분만큼 시험볼을 회전한다. 변위 센서 움직임이 어려울 때 좋은 상황이다. Fig. 2-3은 멀티스텝을 보여주고 있고, 이것은 측정 시험이 스핀들에 대해 N 회 각도 증가하는 인덱싱 처럼 각 위치를 만든다. 한 개의 고정 센서는 시험의 모든 각도 증가에 대해 같은 오리엔테이션 각도로부터 변위를 측정한다. 따라서 각 측정은 회전체

반경 오차 운동과 위상 변위 시험 형상 오차를 포함한다.

각각의 측정은 식 (2-16)의 형태로 나타낼 수 있다. 이것은 스핀들 반경 오차 운동 S 와 시험볼의 오차 R 의 복합된 기여분을 반영한다.

$$m_A = S(\theta) + R(\theta + (n-1)\phi) \quad (2-16)$$

그러나 시험 형상 에러는 각각 측정에서 ϕ 의 증가에 의해 위상이 변위된다. N 회 측정의 각 합계는 식 (2-17)에서 나타난다. 스핀들 반경 에러 모션을 푸는 것은 식 (2-18)로 부터 도출한다.

$$\sum_{n=1}^N m_n = NS(\theta) + \sum_{k=1}^{N-1} R(\theta + k\phi) \quad (2-17)$$

$$S(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N m_n + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} R(\theta + k\phi) \quad (2-18)$$

시험볼의 형상 오차는 Fourier시리즈로 손쉽게 모델된다. 이것은 식 (2-19)에서 오른쪽 2번째 항을 간단히 함으로서 계산된다.

$$R(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \{(A_n \cos n\theta) + (B_n \sin n\theta)\} \quad (2-19)$$

그리고 식 (2-18)에 식 (2-19)를 대입한 결과는 다음과 같다.

$$S(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N m_n + \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{n=1}^{\infty} \{(C_n e^{i(\theta+k\phi)}) + (D_n e^{-i(\theta+k\phi)})\} \quad (2-20)$$

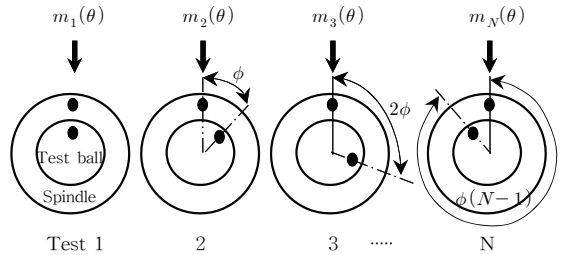


Fig. 2-4 Schematic of the multistep error separation method

이것은 복잡해 보이지만 이중 요약 내에서 대부분의 항목들은 스텝 N 의 정배수와 관련된 것들을 제외하고 실제로 0이 되도록 더한다.

$$\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{n=1}^{\infty} \{ (C_n e^{\in(\theta+k\phi)}) + (D_n e^{-\in(\theta+k\phi)}) \} \\ = \sum_{n=1}^{\infty} \{ (C_n e^{\in N\theta}) + (D_n e^{-\in N\theta}) \} \quad (2-21)$$

식 (2-21)에서 나머지 항목은 측정 스텝 수의 정배수만을 포함한다. 매우 정밀하게 제작된 시험볼의 경우 그 값이 매우 작을 것으로 예상되므로 스피ن들 오차 S 는 식 (2-22)와 같이 된다. 시험 형상 에러는 식(2-23)에서 보는 바와 같이 시험볼의 형상 오차 R 이 남는 어떤 측정 m_n 부터 스피ن들 오차 S 를 뺀 것으로서 평가된다.

$$S(\theta) \approx \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N m_n \quad (2-22)$$

$$R(\theta + n\phi) = m_n(\theta) - S(\theta) \quad (2-23)$$

멀티 스텝법은 오차 분리 과정을 매우 세밀하고 정확하게 실시해야만 정확한 결과를 얻을 수 있다.

3.오차 운동 분리 실험

회전체 유닛을 공작기계 주축의 조립상태와 같은 방법으로 수직 고정시킨 셋업상태를 마련하였고 이는 회전하는 공구를 이용하여 고정된 공작물을 가공하는 방식으로 오차 운동 측정의 분류에서는 회전 반경방향 오차 운동 측정 방법이다.

반전법은 식 (2-1)과 식 (2-2)을 사용한 측정법이



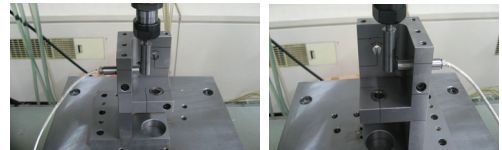
Fig. 3-1 Photo. of error motion measurement

며, 멀티프로브법은 식 (2-14)와 식 (2-15)을, 멀티스텝법은 식 (2-22)와 식 (2-23)을 사용하여 측정하였다.

회전체 유닛은 최고 40,000rpm까지 회전이 가능하지만 회전체의 균질성을 확보하기 위해 소음과 진동이 가장 안정적인 10,000rpm(주파수로 170Hz에 상당)에서 실시하였으며 측정 순서는 다음과 같다.

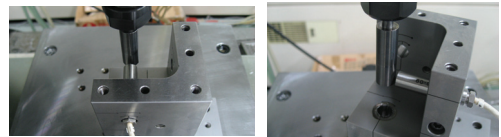
1) 시험 볼을 교환하고 셋업을 마친 상태에서 프로그램의 측정 조건 설정을 하고 반전법 프로그램을 실행한다. 0°와 180°방향에서 각각 10회 측정하여 평균화 한다.(Fig. 3-2)

2) 멀티 스텝법을 측정하기 위해 센서 위치를 0°, 60°, 120°, 180°, 240°, 300° 위치에서 각각 10회 측정하여

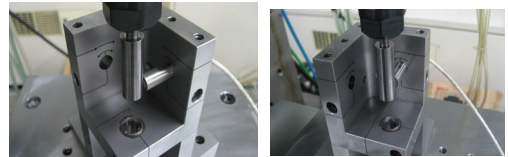


(a) 0° direction (b) 180° direction

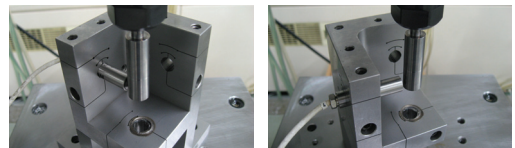
Fig. 3-2 Experimental setup of reversal error motion measurement



(a) 0° direction (b) 60° direction



(c) 120° direction (d) 180° direction



(e) 240° direction (f) 300° direction

Fig. 3-3 Experimental setup of multistep error motion measurement

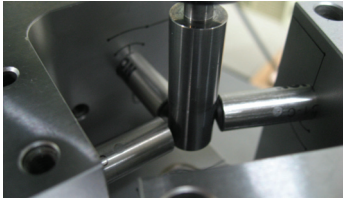


Fig. 3-4 Experimental setup of multiprober error motion measurement

데이터를 평균화 한다.(Fig. 3-3)

- 3) 멀티 프로브법 시험을 위해 3개의 센서를 120° 간격으로 배치하여 10회 반복측정한다.(Fig. 3-4)

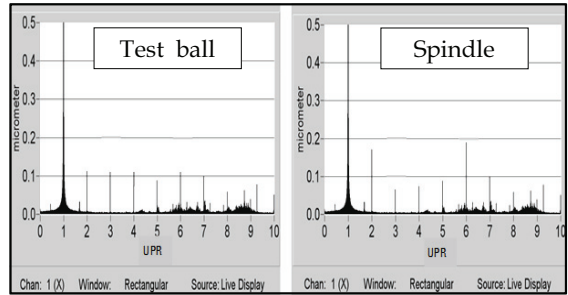
"각각의 오차분리 방법에 따라 시험볼의 형상 오차와 스핀들의 오차 성분에 대하여 회전당 변위의 파동수별 측정을 실시하였다."

4. 실험 결과

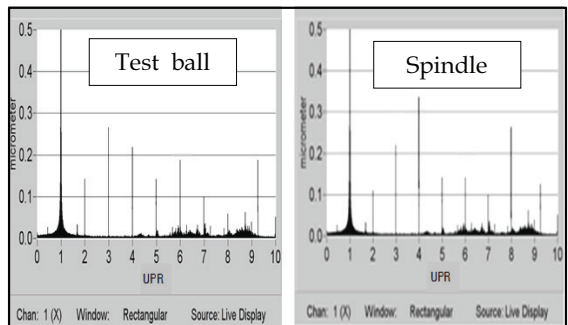
위의 2장에서 기술한 바와같이 시험방법에 따라 유도된 식으로부터 측정된 스핀들의 형상오차와 시험볼의 형상오차를 각각의 오차 분리 방법에 대하여 회전당 변위의 파동수(UPR)별로 측정을 실시하였다. 회전당 파동수별 측정방식은 불필요한 미세 주파수를 제거하는 효과를 볼 수 있어 동기 및 비동기 성분을 분석하는데 유용한 방법이다. Fig. 4-1은 오차 분리 방법별로 측정된 회전당 파동수 FFT분석 그래프이다. 파동의 수는 10개 까지 데이터만 분석하였고 1회전과 동기하는 1개의 주파수 값은 그 외 값과의 차이가 크다. 1회전 값이 큰 이유는 회전당 한번 생기는 변위가 크다는 것을 의미함을 알 수 있다.

또한 형상오차의 값은 파동수가 배수에서 크게 나타나고 비배수에서는 작게 나타나는데 이는 서론에서 설명한 바와 같이 동기오차 성분이 비동기오차 성분보다 크게 나타남을 알 수 있다. 시험볼에서 나타난 형상오차의 특징점은 5배수에서 가장 작은값을 보였고 배수가 증가할수록 점차 오차값이 작아지는 현상을 볼 수 있는데 이는 시험볼의 진원도 형상에서 유추할 수 있음을 알 수 있다.

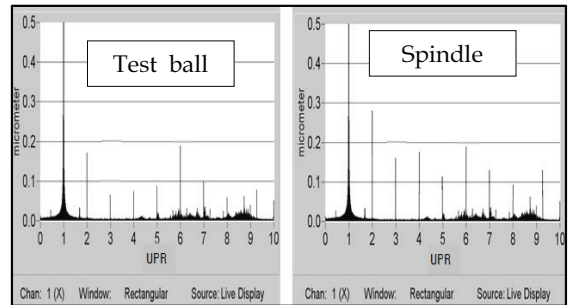
Fig. 4-2는 3가지 오차 분리법으로 측정된 파동수



(a) Reversal method



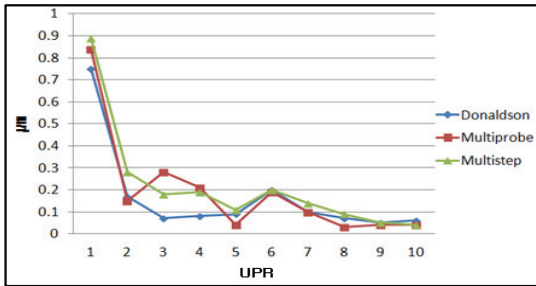
(b) Multiprobe method



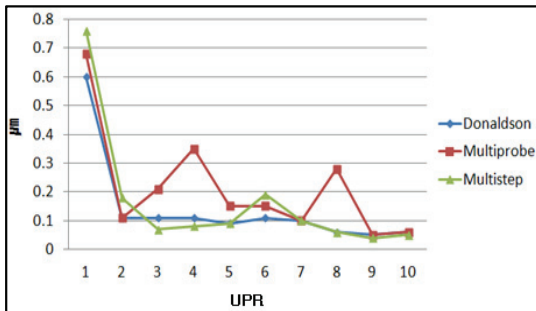
(c) Multistep method

Fig. 4-1 UPR measurement results of test ball and spindle

별 시험 볼과 스핀들의 오차 값을 합성하여 나타내었다. 그래프에서 보는 바와 같이 3가지 방법 모두 비슷한 결과를 보이고 있으나 멀티 프로브법은 3개의 주파수에서 차이를 나타내고 있는데 이는 총 오차 값에 비교하여 적은 값이므로 기법에서 오는 차이는 적다고 볼 수 있다.



(a) Test ball



(b) Spindle

Fig. 4-2 UPR measurement results comparison of test ball and spindle

5. 결론

연구 논문을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 3가지 오차 분리법에 의한 시험 볼의 형상 오차와 스피ndl의 오차 성분에 대한 회전당 과동수 분석 측정 결과 반전법과 멀티 스텝법은 매우 같은 결과를 보여주고 있으나 멀티 프로브법은 일부 주파수 영역에서 결과값이 다르게 나타나는 것을 알 수 있었다.
- 2) 따라서 오차 분리법에서 반전법과 멀티 스텝법이 공작기계 회전체의 회전정밀도 시험에서 가장 효과적인 방법으로 사료된다. 그렇지만 결과값 기준으로 볼 때 멀티 프로브법도 두 개의 방법과 10%내외의 차이를 보이고 있어 신뢰성이 높은 것으로 추정된다.
- 3) 3가지 오차 분리법 모두에서 1회전의 2배수 이

내 성분에서 높은 값을 나타내고 있으므로 회전체의 오차 성분을 줄이기 위한 방법으로 1회전의 4배수 이내(즉, 회전당 1~4번 반복하는 변동진동수)에서 반복적으로 변동하는 성분을 찾아내어 개선하는 방법이 회전체의 회전정밀도를 개선하는 가장 좋은 방법으로 판단된다.

후 기

본 연구는 동남광영경제권 선도산업 기술개발사업으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Jong-Kwan Kim, Joung-Kie Lee, 1995, "A Study on the Evaluation of Rotational Accuracy of High Speed Spindle", The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 5, no 4, pp 483~492
2. H. J. Shin, S. W. Lee, H. J. Park, 1996, "Combined Error Performance of Machine Tool Spindle", Korean Society for Precision Engineering, pp 333~337, Autumn Conference
3. In Bog Kong, Yun Chang Park, Seung Woo Kim, 1989, "A Digital Measurement Method for Rotational Errors of a Machine Spindle, The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 13, No. 3, pp 443~450
4. Eric R. Marsh, 2007, "Precision spindles metrology" Lion Precision co.
5. Sang-Hwa Kim, Byung-Ha Kim, Woo-Gak Choi, "A Study on the Measurement Method and Uncertainty Factors for Precision Inspection to Feed Unit of High Precision Machine Tool", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 4, pp. 55-61, 2012.
6. Sang-Hwa Kim, Byung-Ha Kim, Yong-Gyoo Jin, "A Study on the Rotation Accuracy According to Unbalance Variation of High Precision Spindle Unit for Machine Tool", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 3, pp. 174-181, 2012