

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.8.1029

ISSN 1226-4873

축차 2점법을 이용한 회전체의 진원도 프로파일 측정에 관한 연구

이민기* · 이응석*

* 충북대학교 기계공학부

A Study on the Measurement of Roundness Profile for Rotating Object Using Two Points in Succession Measuring Method

Min Ki Lee* and Eung Suk Lee*

* Dept. of Mechanical Engineering, Chungbuk Nat'l Univ.,

(Received July 30, 2009 ; Revised June 29, 2010 ; Accepted July 2, 2010)

Key Words: Fiber Optics Displacement Sensor(광변위 센서), Roundness(진원도), Run-Out(흔들림), Two Points Method with Succession Measurement(축차 2점법)

초록: 본 논문은 회전체의 진원도 및 흔들림 정밀도 측정에 관한 연구이다. 일반적으로 가공물 진원도 측정은 정밀한 회전테이블 또는 기준 원형 디스크를 필요로 하여, 고가의 비용이 소요된다. 축차2점법은 2개의 변위센서를 사용하여 직선가이드 등에서진직도 측정을 위하여 사용되었으며, 본 연구에서는 이 방법을 회전체에 적용하였다. 한 개의 디스크를 이용하여 측정된 회전체 변위 측정값에서 장치의 회전시 흔들림 오차를 제거하여 회전체의 순수한 진원도 프로파일을 측정하였다. 본 연구는 정밀한 기준 디스크 (Artifact)를 사용하지 않고 원형 가공물의 진원도 프로파일 측정에 유용할 것이다.

Abstract: In this paper, we present the roundness profile and run-out error measurement for a rotating shaft. The devices for measuring the roundness require a precision rotation table which is used as a reference to obtain the circular profile. Therefore, the roundness measuring system is expensive and requires precision manufacturing. The two-point method for succession measurement has been used to obtain a linear profile or used in straightness measurement using two displacement measuring devices. In this paper, the method is used for measuring the circular profile of a rotating shaft. A method to remove the vibration of the shaft, i.e., the run-out, is used, and the original circular profile is obtained from the measured raw data that excludes the run-out error of the rotating shaft. This method will be useful for obtaining the precise circular profile without using a precision reference circular artifact.

1. 서 론

대부분의 기계류들은 여러 개의 정밀 회전 부품들로 구성되어 있다. 가장 작은 마이크로 머신의 축에서부터 자동차의 실린더 헤드 및 기어의 동력전달장치와 원자력발전소의 동력기관에 이르기까지 회전부품으로 구성되지 않은 것이 없다. 이와 같이 원형 부품의 형상이 진원으로부터 벗어났을 경우 축 부품 부분에서의 마찰과 소음, 진동이 발생하게 되어 동력의 손실 및 마모에 의한 기계의 수명감소, 회전 및 부정밀한 이송 등 다양한 문제가 발생된다.^(1,2) 따라서 원형 부품을

가공하는 공작 기계는 정확하게 제작해야 할 뿐만 아니라 생산한 제품을 정확히 검사하여야 하는 매우 엄격한 공정 관리를 필요로 한다. 일반적인 방법인 원형 가공물의 진원도를 측정하는 진원도 측정장치는 정밀한 기준 회전 테이블을 필요로 한다. 한 개의 probe를 이용하여 정밀 회전 테이블상에서 회전하는 원형물의 회전방향 프로파일을 측정한다. 이때 회전 테이블의 정밀도가 좋지 못하면 회전 오차(run-out)가 측정된 probe 데이터에 포함되어 가공물의 정밀한 진원도 측정이 불가능하게 된다.⁽³⁻⁵⁾ 본 연구에서는 2개의 probe를 사용하는 축차 2점을 사용하여 기준체의 오차를 제거하고 정밀한 원형 가공물의 프로파일 및 진원도 측정방법을 연구하였다. 본 연구에서 사용된 방법으로 정밀한 회전 테이블

* Corresponding Author, eungsuk@chungbuk.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

없이 고속으로 회전하는 원형물(shaft)의 원형 프로파일, 진원도 측정이 가능함을 보였다. 또한 본 방법은 고속 회전체 축의 진동오차(run-out)를 정밀하게 측정하는 장치로도 사용가능 할 것이다.

2. 축차 2점법

2.1 직선축에 대한 축차 2점법

축차 2점법은 직진도 측정을 위한 기준체가 별도로 필요하지 않고, 기준체와 측정물의 진직도 프로파일을 동시에 구할 수 있는 방법으로 사용되고 있다.⁽⁶⁾ 기계 가공 방법 중 하나인 선반 가공에서(Fig. 1) 가이드와 법선방향의 변위를 X 라 하고 절삭 가공면 혹은 측정 대상면의 진직도 프로파일 오차를 Y 라 하고 이송체의 수직방향 변위(진직도) 측정이 가능한 2개의 센서를 설치한다. 2개의 변위센서는 측정 대상면 사이의 상대 변위를 센서 간격으로 이송하면서 연속적으로 측정한다. 이렇게 하면 가이드의 i 위치인 센서 2에서 측정한 데이터를 $i+1$ 위치의 센서 1에서 한번 더 측정된 데이터를 얻을 수 있다. 가공면의 진직도 및 가이드의 진직도를 구하는 방법은 식 (1)과 같이 간단히 정리된다.

$$Y_i = D_{i,B} - D_{i,A} + (X_i - X_0), \quad i = 0, n \quad (1)$$

여기서, $D_{i,A}$: data of the sensor A
 $D_{i,B}$: data of the sensor B
 Y_i : straightness of cutting surface
 X_i : straightness of guide

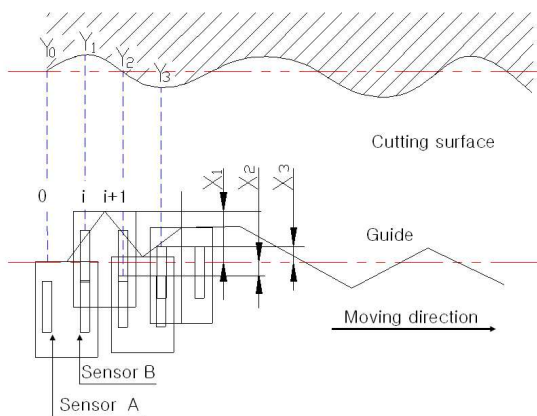


Fig. 1 Two points in succession measuring method for straightness measurement

2.2 회전체에 대한 축차 2점법

회전체에 적용하는 축차 2점법은 직선축의 축차 2점법과 유사한 방법으로 측정된다. 본 연구에서 적용된 직선축에서 측정하는 축차 2점법과 다른 점은 가이드에서 이송되는 센서가 고정되었다는 것과 측정 대상물이 회전하고 있다는 것이 차이가 있으며 원형 회전체의 프로파일 측정 및 계산하는 방법은 식 (1)을 사용한다.

두 개의 센서와 식 (1)을 회전체에 적용하게 되면 축이 흔들리는 진동값(run-out error)이 제거되어 원형 디스크의 순수한 진원도 오차만이 계산된다. 축의 흔들림을 측정하는 계산하는 방법은 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$R_i = D_{i,A} - Y_i$$

$$R_{runout} = \max R_i - \min R_i \quad (2)$$

여기서, R_i : removed roundness profile

3. 실험장치

고속 회전체의 축 측정의 경우 비접촉 근접센서(gap sensor)사용이 필수적이며 본 실험에서는 fiber optic 변위 센서는 Fig.3과 같다. 본 센서의 gain은 $1\mu\text{m} / 1\text{mV}$, sampling 주기는 $512\mu\text{s/sample}$ 의 비접촉 거리의 아날로그값을 출력한다. 데이터 수집장치는 (A/D) National Instruments, INC의 'NI-USB-6008'를 사용하였으며 분해능은 12bit이고 single channel data sampling time은 10k sample /sec이다.

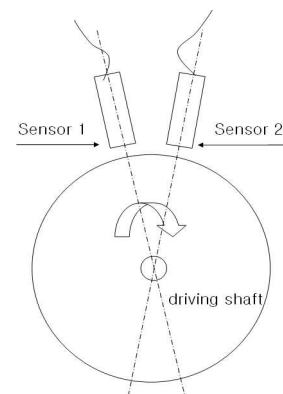


Fig. 2 Two points in succession measuring method for circular profile measurement in rotating disk



Fig. 3 Fiber Optic displacement sensor used in this study (PHILTEC.INC, USA, Model RC-60, $\phi 5\text{mm}$)

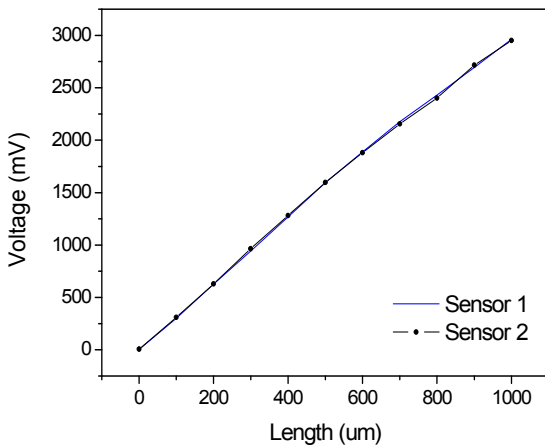


Fig. 4 Fiber optic displacement sensor calibration with a precision LVDT (Mahr Inc, $0.1\mu\text{m}$ resolution)

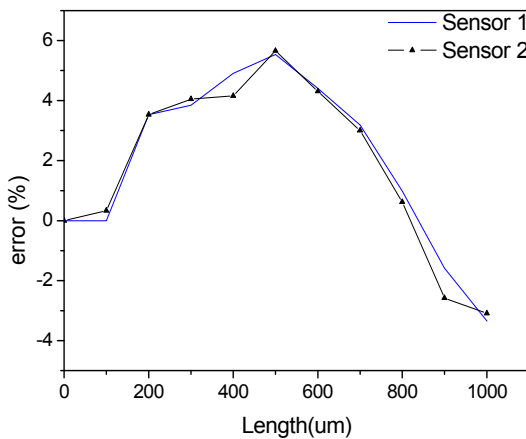


Fig. 5 Linearity error of the two sensors used in this test

본 실험을 실시하기 전 fiber optic 변위 센서의 교정을 위하여 Mahr사의 접촉식 LVDT (분해능 $0.1\mu\text{m}$)를 사용하여 비교 측정을 하였다. 측정 결과는 Fig. 4와 같으며 각각 센서의 linearity 값을 Fig. 5에 표시하였다.

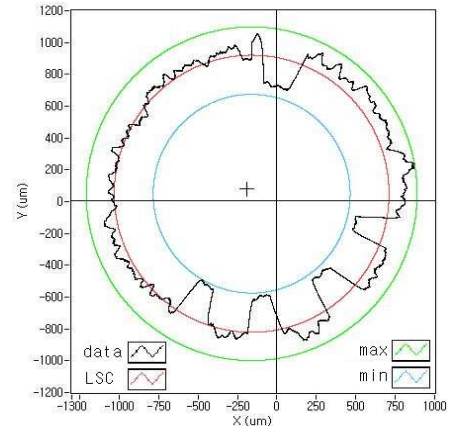


Fig. 6 Measured roundness profile and calculation by least squares method (LSM), (120,000points / revolution)

본 측정 방법의 경우, 2개의 센서의 정밀도가 다른 경우 각각의 센서오차에 의한 값이 누적되어 정확한 측정이 불가능하게 된다. $100\mu\text{m}$ 간격의 단위로 측정한 결과 fiber optics 변위 센서는 DC 전압 300mV를 출력하였으며 $1,000\mu\text{m}$ 측정범위에서 최대 두 센서의 차이는 $1\mu\text{m}$ 이내의 오차 값이 측정 되었다. Fig.5에서는 기준 길이(1,000 μm)에 대한 두 센서는 최대 8%의 linearity 오차를 보였으며 본 실험에서는 각 센서의 최소 linearity 구간을 설정하여 실험하였다.

4. 축차 2점법을 응용한 진원도 측정 및 분석

4.1 진원도 측정기를 이용한 회전체의 진원도 측정 및 분석

Fig. 6은 진원도 측정기에서 회전체 디스크를 측정한 것이다. 진원도 측정기는 Kosaka Laboratory Inc.의 6rpm 정속회전 장치이며 측정센서는 본 실험과 동일한 한 개의 fiber optics 변위센서를 사용하였다. 데이터 수집장치도 본 실험과 동일한 NI-USB-6008 (A/D) 본 실험에서 사용된 fiber optics 센서의 정밀도를 감안하여 회전체 디스크 주위에 금속성 테이프를 불규칙하게 접착하여 가공의 진원도 프로파일을 제작하였으며 진원도 밴드의 폭은 최대 $424\mu\text{m}$ 로 측정되었다.

4.2 회전체의 진원도 측정 및 분석

회전체에 적용하는 축차 2점법은 Fig. 7과 같이 두 센서가 측정 중 서로 간섭을 일으키지 않는

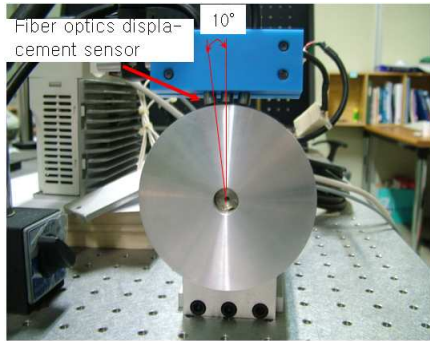
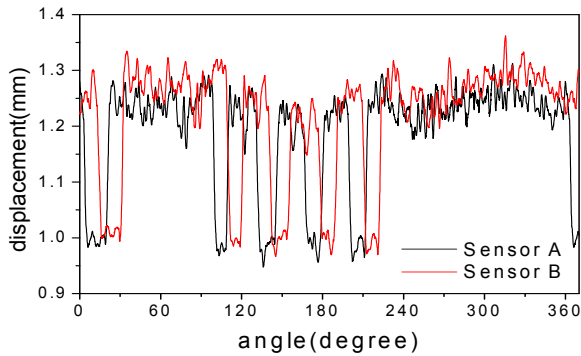
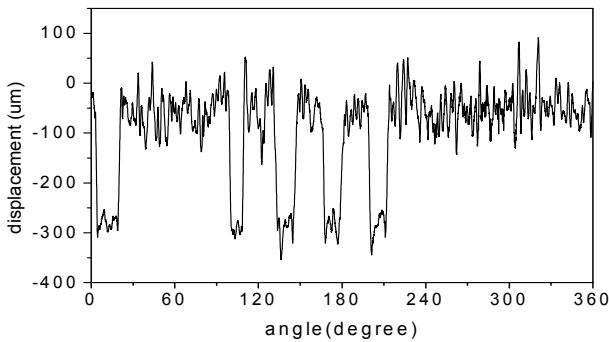


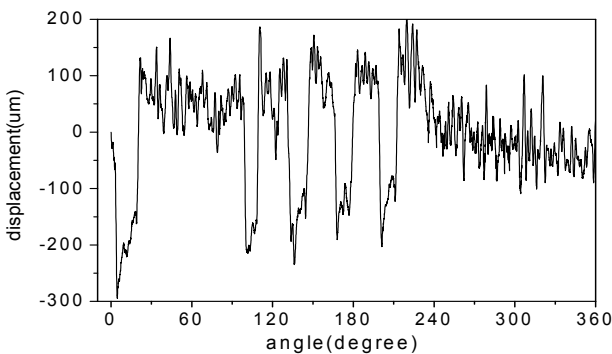
Fig. 7 Experimental setup for roundness measuring of rotating disk using two fiber optics sensor



(a) Measured sensor A,B data



(b) Calculated roundness profile - before filtering



(c) Calculated roundness profile - after filtering

Fig. 8 Measured data by two points sensors and calculated roundness profile of rotating disk (60 rpm)

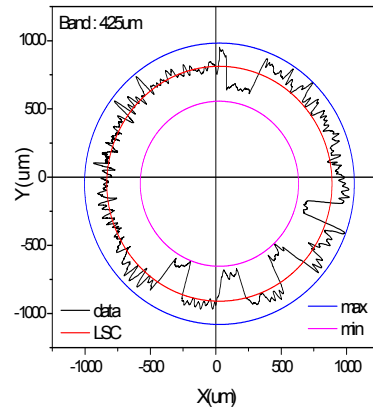


Fig. 9 Calculated roundness profile in polar coordinate by least squares circle (LSC), 60rpm (5,000 points / revolution)

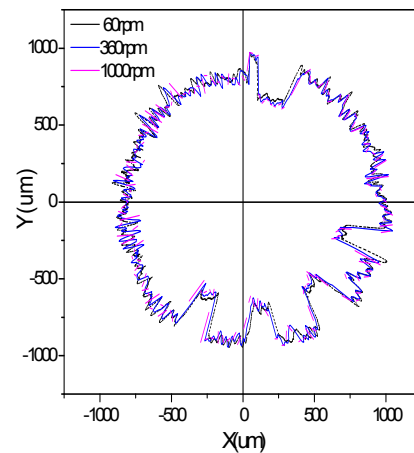
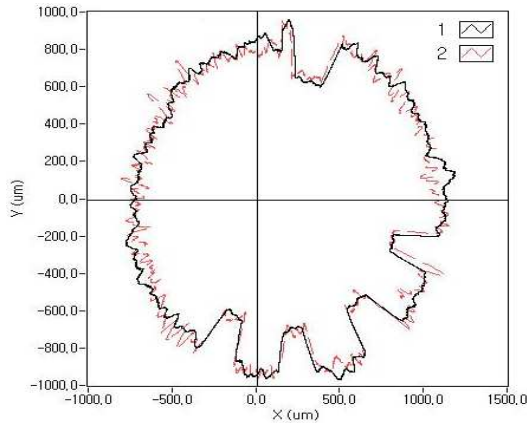


Fig. 10 Calculated roundness profile for 60, 360 and 1,000rpm of rotating disk

범위에서 최대한 가까이 원주 방향에 대하여 수직으로 설치하였다. 회전 장치는 서보모터를 사용하여 가능한 외부 진동의 영향을 배제하기 위하여 방진테이블에 설치하였다.

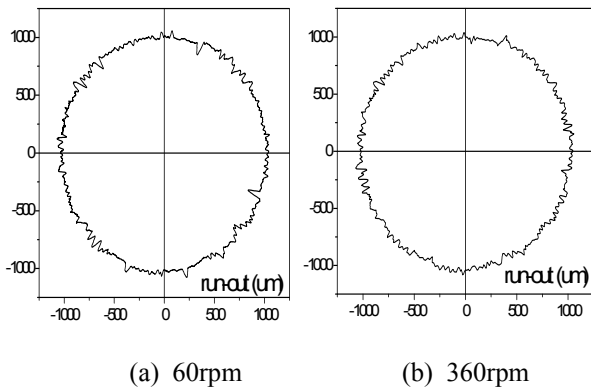
Fig. 8은 측정된 센서 데이터이며 앞에서 설명한 식 (1)을 사용하여 계산된 프로파일 결과를 Fig. 8(c)에 표시하였다. 센서를 디스크 중심에 정확하게 장착하는 것은 실제로 불가능할 것이며 미소의 중심 오차가 발생하게 된다. 본 연구에서는 측정된 데이터로부터 센서와 축의 중심 오차를 제어하기 위하여 Fig. 8(b)에서와 같이 hi-pass filtering 방법을 사용하였다. 중심 오차에 의하여 측정된 데이터에는 한 개의 sine 곡선이 존재하기 때문이다.

Fig. 9에서와 같이 원형좌표계로 표시된 진원도



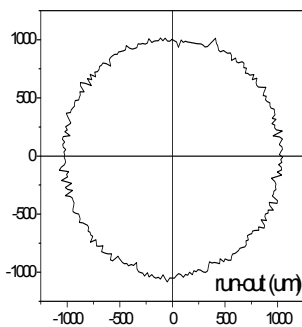
1 : roundness measuring device
2 : two points measurement method

Fig. 11 Compared roundness profiles data with two points method (60rpm) and roundness measuring device (12,000 points / revolution)



(a) 60rpm

(b) 360rpm



(c) 1000rpm

Fig. 12 Calculated shaft run-out in one revolution from the measured raw sensor data A

프로파일의 오차값은 least squares circle (LSC) 방법으로 $425\mu\text{m}$ 로 계산되었다. 두 센서를 이용한 축차 2점법으로 계산된 진원도 값은 진원도 측정

기에서 측정된 동일한 회전체와 근사한 프로파일 값($425\mu\text{m}$)을 보였다. Fig. 10은 60rpm, 360rpm, 1000rpm의 모터 속도로 측정된 두 개의 센서 A,B 데이터를 이용하여 계산된 회전체의 진원도 프로파일이며 속도별 오차값은 60rpm을 기준으로 $\pm 1\mu\text{m}$ 의 편차값을 보였다. Fig. 11은 진원도 측정기에서 측정된 동일 회전체의 프로파일과 축차 2점법을 이용한 진원도 프로파일(60rpm)을 비교한 것이며 전체적으로 유사한 형상임을 알 수 있다.

Fig. 12는 본 연구의 방법으로 제거되는 회전체 축의 진동 (run-out) 측정치이며 센서 데이터 A 또는 B로부터 회전체의 진원도 프로파일을 제거한 순수한 회전축의 run-out 계산 값이다. 그림에서 보면 60rpm에서의 축의 run-out 값은 $50\mu\text{m}$ 이상 다소 불규칙 성분이 보이나 360, 1,000 rpm에서는 거의 동일한 run-out 패턴으로 되는 것을 알 수 있다. 이것은 저속에서는 회전축의 베어링 마찰력이 고속에서 보다 크게 되어 불규칙(random) 오차 성분이 증가한 것으로 보인다.

5. 결론

본 연구에서는 회전체에 축차 2점법을 사용하여 고속으로 회전하는 축 또는 디스크의 진원도 측정 프로파일 정밀 측정이 가능함을 보였다. 고속 측정의 경우 회전체의 진동 (run-out)이 증가하게 되므로 특히 본 연구의 방법이 유용할 것으로 보인다. 또한 본 연구 방법은 기존의 정밀한 기준 회전 테이블 (run-out 오차가 거의 없는)을 사용하지 않고 원형물체의 정밀한 진원도 측정기 가능함을 보여준다. 고속 회전의 경우 정밀도 향상을 위하여 본 연구에서 사용된 fibre optic 센서의 비접촉 정전용량센서, eddy current 센서 등이 가능할 것이다. 축 직경이 적을 경우에는 디스크가 상대적으로 크게 되며, 따라서 기존의 축에 부착하는 경우에는 1mm 미만의 직경이 적은 fiber optic 센서 사용이 가능하게 보인다. (상업용 구매 가능)

참고문헌

- (1) ASME B89.3.4M, 1985, "Axes of Rotation - Methods for Specifying & Testing."
- (2) Martin, D. L., 1995, "Precision Spindle and Bearing Error Analysis," *Int. J. Mach. Tools*

- Manufac.*, Vol. 35, No.2, pp. 187~193.
- (3) Lee, E. S., Kim, J. G. and Shin, Y. G., 2000, "A Study on the Minimum Zone Algorithm for the Calculation of Roundness," *Journal of the KSPE*, Vol. 17, No. 7, pp. 156~161.
- (4) LEE, E. S., 1996, "Z-Approaching Minimum Zone Method for Flatness and Straightness Error Measurement," *IJSME*, Vol. 39, No. 3, pp. 667~670.
- (5) Scarr, A. T., 1968, "Use of the Least Squares Line and Plane in the Measurement of Straitness and Flatness," *Proc. Inst. Mech. Engrs*, Vol. 182, Pt. 1, No. 23, pp. 531~536
- (6) Park, J. H., 2001. "Precision Measurement System Engineering," *YaJeongMunHwaSa*, pp. 219~221, 243~256, 323~329