

에어베어링 타입의 기상측정장치를 이용한 구면 프로파일의 측정에 관한 연구

Study on the on-machine profile measurement of surface of sphere using an air-bearing stylus

**이찬희¹, 이정훈¹, 김호상¹, 김민기², 김태형²

**C. H. Lee(leecl@iae.re.kr)¹, J. Lee¹, H. S. Kim¹, M. K. Kim², T. H. Kim²

¹고등기술연구원 로봇/생산기술센터, ²두산인프라코어 공기자동차 BG 연구개발 1팀

Key words : OMM(On-Machine Measurement), Error compensation,

1. 서론

최근 제품의 정밀도를 높이고, 품질을 개선하기 위하여 공작기계의 가공 정도를 향상시키려는 노력이 급격히 증가하고 있다. 이를 위하여 공작기계가 가지고 있는 3 차원 위치 오차를 측정하고 해석해야 할 뿐만 아니라 가공이 끝난 제품을 측정 및 검사를 통하여 제품 가공시 제시된 설계를 만족하는지를 검사하고, 여기서 얻어지는 오차 정보를 가공 공정으로 다시 피드백(Feedback)하는 기능이 필요하다. 일반적으로 공작기계의 3 차원 위치오차는 무부하시의 위치정밀도를 나타내는데, 기계의 상태에 따라 가변적으로 변하며, 공작기계의 가공 정도에 큰 영향을 끼친다. 3 차원 위치오차가 보상된 후 가공된 가공물을 측정 및 검사를 통하여 가공물의 설계와 일치하는지를 확인하고 분석할 필요가 있다. 현재는 가공이 끝난 제품을 검사하기 위하여 3 차원 좌표 측정기(Coordinate Measuring Machine, CMM)를 사용하여 측정하고 있다. 이는 생산현장의 품질관리에 필수적인 장비로 고도의 정밀도를 요구하는 부품이나 자유곡면과 같은 복잡한 형상을 가지고 있는 금형의 정도 측정을 위한 효과적인 검사설비로 중요한 역할을 하고 있지만, 관리가 어렵고 설치 및 측정시간이 길어져 비경제적이며, 측정을 한 가공물의 이동시간은 생산성 저하의 요인이 되고 있다.¹ 또한 3 차원 측정기의 한정된 크기 때문에 대형 공작물이나 공정 특성상 가공물의 분리가 어려운 경우에는 마땅한 측정 방법이 없는 실정이다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 가공이 끝난 제품을 공작기계 위에서 떼어내지 않은 상태에서 직접 측정이 가능한 기상측정장치를 제작하였다. 또한 제작한 기상측정장치의 측정정밀도를 높이기 위해 가공이 완료된 제품의 형상 측정에서 생길 수 있는 이송축에 대한 직각도 오차에 대한 보정 알고리즘을 제안하고, 이를 실제 마스터 볼 측정 실험에 적용시켜 마스터 볼 측정에서 생기는 직각도 오차성분을 구했고 마스터 볼과 측정결과의 비교를 통해 제안한 OMM에서의 초정밀 측정의 타당성을 나타내었다.

2. 기상측정장치 제작

기상측정장치 측정 시스템²은 측정 분해능을 10 nm로 만족시키고 측정정밀도를 서브마이크로미터 오더로 하기 위해 공기베어링으로 지지되는 가동부인 공기 베어링 CAP(Air-bearing contact adapter probe)과 이 가동부의 한쪽 끝에 직경 4mm의 Ruby로 구성된 Touch-ball 장착하고 한쪽 끝에는 정전용량형 센서(Capacitive displacement sensor)를 설치하여 Touch-ball이 시편하고 접촉해서 힘을 받으며 가동부가 움직이고 정전용량형 센서가 움직인 길이를 측정하는 방식으로 구성된 접촉식 프로브를 사용한다.

Fig. 1에서는 Z축으로 움직이는 측정 프로브의 터치볼, 정전용량센서, CAP이 조립된 상태와 각 요소들의 명칭에 대해 나타내고 있다.

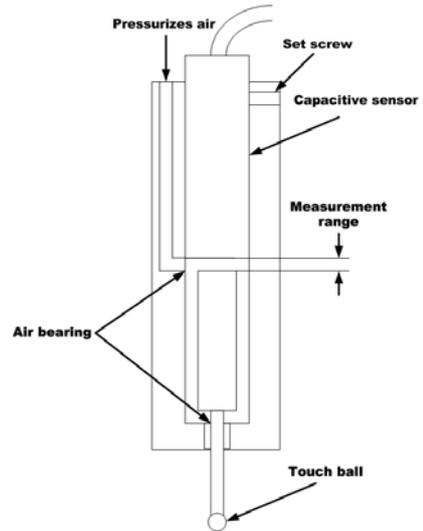


Fig. 1 Schematic cross section of OMM probe

3. OMM 기반의 마스터 볼 측정

OMM(On-Machine Measurement) 장치의 초정밀 측정의 적용 여부를 검증하기 위한 방안으로써 Precitech사의 R12.7004의 마스터 볼(Master-ball)을 측정하고 실제 참값과 측정값의 비교를 진행하였다. 여기서 Precitech사의 마스터 볼을 사용한 것은 현재 초정밀 가공기 시장에서 가장 우위를 점하고 있는 회사에서 제공하는 측정기준 시편을 사용함으로써 본 연구에서 개발한 OMM 장치의 타당성을 보다 객관적으로 검증하기 위함이다. 측정은 Fig. 2에서 나타낸 개략도와 같이 FTS(Fast Tool Servo)를 이용해서 정밀한 가공을 하고 있는 DTM(Diamond Turning Machine)에서 OMM 장치를 설치하고 빨간색 화살표 경로를 따라 DTM을 움직이며 마스터 볼을 측정하는 실험을 진행하였다.

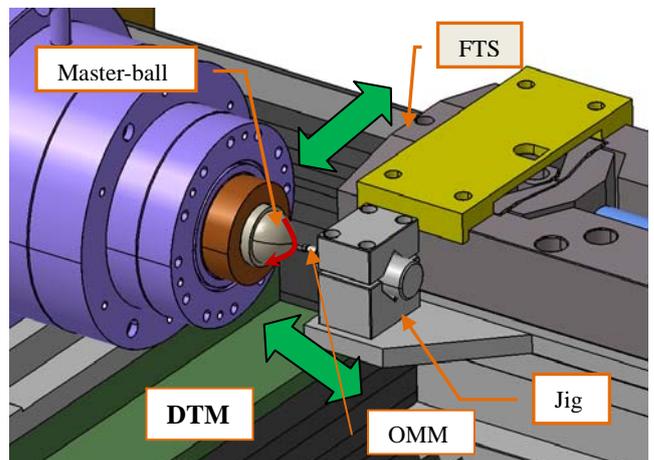


Fig. 2 Schematic of measuring the master-ball using OMM probe

4. 직각도 영향에 대한 오차보정 알고리즘

OMM 장치를 사용한 마스터 볼 측정데이터는 미소하지만 X 축과 Z 축의 직각도(Squareness)에 의하여 왜곡되어 있으며, 직각도에 의한 측정데이터에의 영향은 Fig. 3 에 나타내었다.

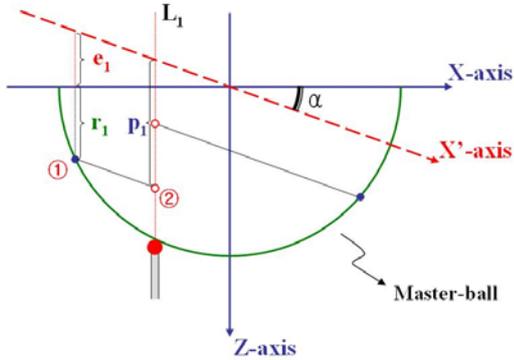


Fig. 3 Squareness error of X-axis and Z-axis

여기서 변수 α 는 X 축과 Z 축 사이의 직각도, 직선 L_1 는 OMM 의 측정 방향을 의미한다. 이러한 경우 마스터 볼의 측정점 ①은 X 축의 이송에 의하여 ②에서 측정되며, 측정값 P_1 은 식 (1)과 같이 주어진다.

$$P_1 = r_1 + e_1 \tag{1}$$

여기서 변수 r_1 은 실제 마스터 볼의 참값을 의미하며 변수 e_1 은 측정점 ①에서 직각도 α 에 의하여 발생된 오차를 나타낸다. 이를 일반화하기 위하여 마스터 볼이 X 축에 대하여 $d_i(i=1, \dots, n)$ 만큼 이송한 경우 OMM 의 측정값은 P_i 라고 정의하면 X 축과 Z 축에서 정의되는 값 (x_i, y_i) 은 식 (2)과 같이 결정된다.

$$(x_i, y_i) = (d_i \times \cos \alpha, P_i - d_i \times \sin \alpha) \tag{2}$$

따라서 식 (2)를 기반으로 OMM 의 측정데이터 (d_i, P_i) 를 사용하여 최소자승 원정의(Least square circle fitting)을 하면 추정된 마스터 볼의 변수는 식 (3)와 같이 주어진다.

$$\sum \begin{bmatrix} x_i^2 & x_i^2 z_i & x_i z_i & x_i \\ x_i^2 & x_i^2 z_i^2 & x_i z_i^2 & x_i z_i \\ x_i z_i & x_i z_i^2 & z_i^2 & z_i \\ x_i & x_i z_i & z_i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} = \sum \begin{bmatrix} -x_i^3 & -x_i z_i^2 \\ -x_i^3 z_i & -x_i z_i^3 \\ -x_i^2 z_i & -z_i^3 \\ -x_i^2 & -z_i^2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ \alpha \\ R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-A - Bz_0}{\sqrt{4 - B^2}} \\ \frac{-C}{2} \\ \sin^{-1} \frac{B}{2} \\ \sqrt{x_0^2 + z_0^2 - D} \end{bmatrix} \tag{3}$$

여기서 좌표 (x_0, y_0) 는 마스터 볼의 중심좌표의 추정값(Estimated value)이며 변수 α 는 직각도, 변수 R 은 마스터 볼의 추정 반지름을 의미한다.

5. 실험결과

마스터 볼을 3 회 반복 측정하였으며, 식(1)~식(3)를 사용하여 측정데이터를 변환하였다. 그리고 최소자승 원정의에 있어서 반경 R 을 R12.7004 로 구속한 경우와 그렇지 않은

경우에 대하여 데이터를 정리하였으며 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Measurement results of master-ball using OMM probe

	Constrained radius		Unconstrained radius	
	Radius	PV-error	Radius	PV-error
1 st measurement	12.700400	0.000085	12.700384	0.000085
2 nd measurement	12.700400	0.000100	12.700321	0.000100
3 rd measurement	12.700400	0.000095	12.700876	0.000100

(Unit : mm.)

여기서 반경 R 을 구속한 경우와 그렇지 않은 경우 모두를 나타내는 것은 추후 자유곡면의 수정가공에 있어서의 반경 R 이 구속되지 않은 경우를 기준으로 수정가공을 진행하기 위함이다. PV-error 는 최소자승 원정의 알고리즘을 사용하여 정의된 원과 측정데이터 사이의 오차를 나타내며 3 회 측정데이터에서 첫 번째 데이터를 분석한 결과는 Fig. 4 에 나타내었다.

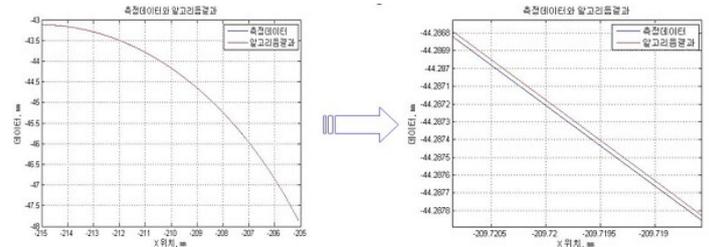


Fig. 4 Measured data and Algorithm result data

6. 결론

개발한 OMM 의 신뢰성을 검증하기 위하여 R12.7004 의 마스터 볼을 측정 및 분석한 결과 참값 R12.7004 에 대하여 약 100 nm 이내의 잔류오차를 확인하였다. 이러한 결과는 OMM 을 사용한 초정밀 측정의 타당성을 나타낸다.

후기

본 연구는 지식경제부 전략기술개발사업으로 진행중인 대면적 미세가공 시스템 기술개발과제의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Rahman, M. Sazedur, Saleh, T., Lim, H.S. and Rahman, M., "Development of an on-machine profile measurement system in ELID grinding for machining aspheric surface with software compensation," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 48, pp. 887-895, 2007.
2. 김상인, 이광일, 김호상, 김민기, 김태형, "초정밀가공기 용 기상측정장치를 이용한 가공시편 센터오차 보상에 관한 연구," 한국정밀공학회 2008 년도 춘계학술대회논문집, pp. 355-356, 2008