

초정밀 가공에서의 자유곡면을 위한 정전용량센서 기반의 기상측정

*김상인¹, 이광일¹, 김호상¹, 김민기², 김태형²

¹ 고등기술연구원 로봇/생산기술센터, ² 두산인프라코어 공기자동화 BG

On-machine measurement with capacitive displacement sensor for free form surface in diamond turning machine

*S. I. Kim¹, K. I. Lee¹, H. S. Kim¹, M. G. Kim², T. H. Kim²

¹ Center for robot and manufacturing, Institute for Advanced Engineering, ² Machine tool and FA BG, Doosan Infracore

Key words: On-machine measurement, diamond turning machine, free form surface, capacitive displacement sensor

1. 서론

최근 반도체 및 관련 전자산업의 급속한 발달에 따라 초정밀 광학부품의 수요가 급격히 증가하고 있으며 이를 뒷받침하기 위한 초정밀 가공기의 기술개발이 활발히 진행되고 있다. 이러한 초정밀 가공기의 가공능력 향상을 위해서 기계를 이루는 각종 요소별로 정밀도 향상이 이루어지고 있으며 특히, 최종적인 광학면의 생성을 위한 가공정밀도 향상에 대한 연구는 최근 들어 집중적으로 이루어지고 있는 실정이다. 특히, 다이아몬드 공구를 이용한 자유곡면 형태의 선삭 가공기의 경우 가공정밀도가 서브 마이크로미터급에 이르고 있어 가공정밀도의 측정 및 평가는 가공기의 최종적인 성능평가에 있어 가장 중요한 요소로 볼 수 있다.

일반적으로 초정밀 가공에 있어서 가공면의 정밀도는 외국 유수업체의 고가의 광학식 측정장비로 판별되고 있으나 최근 들어 정밀도 측정을 가공기내에서 수행하고자 하는 기상측정장치(On-machine measurement system)에 대한 시도가 진행되고 있다. 이러한 기상측정장치의 경우 가공 후 가공시편을 분리하지 않고 곧바로 측정을 수행하므로 착탈시 발생하는 오차를 감소시킬 수 있으며 1 차 가공 후 수정가공을 위한 공구경로 계산에 활용할 수 있는 장점이 있다. 그러나 가공기에 설치되므로 필수적으로 가공기의 이송오차에 좌우되는 단점이 있으며 기계의 특성을 정확히 반영해야 정확한 측정이 이루어진다는 점에서 초정밀 가공기 개발시 그 특성에 맞는 기상측정장치의 개발이 필수적이라고 볼 수 있다. 또한 기존 외국 유수의 기상측정장치의 경우 회전대칭 형태의 비구면에 적용된 사례만 있을 뿐 아직 회전 비대칭 형태의 자유곡면 가공에는 적용된 바 없다. 본 논문에서는 이러한 자유곡면 형태의 형상에 대해 정전용량 센서 기반의 기상측정장치를 제작하여 기상에서 형상정밀도 측정을 수행하였으며 사용한 기계의 오차를 이용한 보상방법을 제시하였다.

2. 본론

2.1 기상 측정 장치의 구성

초정밀 가공기에 사용되는 기상측정장치는 대부분 접촉식 측정방법을 사용하고 있다. 이는 가공기상에 설치되므로 광학치구의 조립이 난해한 점과 평면이 아닌 비구면 등의 측정에 아직 접촉식 방법이 광학식에 비해 널리 쓰이고 있기 때문이다. 접촉식 측정 방법은 크게 터치 트리거 프로브(Touch trigger probe)⁽¹⁾ 와 스캐닝 프로브(Scanning probe)⁽²⁾ 방식으로 나눌 수 있다. 일반적으로 PTP(point-to-point) 측정에서는 터치 트리거 프로브를 이용한 방법을 그리고 CP(continuous path)측정의 경우에는 스캐닝 프로브를 사용한 방법을 주로 적용하고 있다. 후자의 경우 프로브가 접촉한 상태에서 스캐닝을 통해 측정을 수행하기 때문에 시편 형상에 손상을 우려할 수 있으며 측정 후 사용할 때 문제가 발생할 수 있다. 이러한

이유로 시편에 손상을 최소화하고, 형상을 측정할 수 있는 터치 트리거 프로브 방식을 사용하였다.

사용한 측정용 센서는 정전용량 센서로서 분해능 10 nm 와 약 75 μ m 의 측정범위를 가지고 있다(Table 1). 이러한 정전용량센서의 경우 측정물과 비접촉 상태에서 측정을 수행하며 가공시편에 직접 측정을 수행하는 것보다는 간접적인 에어가이드 형태의 가동부를 제작하여 이송부의 끝점의 운동을 센서로 측정하는 것이 편리하다. Table 1 은 정전용량형 센서의 사양이고 Table 2 는 공기 베어링이 내장되어 있는 기상측정장치 CAP(Contact adapter probe)의 사양이고 Fig. 1(a)는 Probe 의 구조와 실제 초정밀 가공기에 장착된 사진을 나타낸다. 또한 Fig. 1(b)는 공기 필터 및 레귤레이터, Touch Ball, Capacitive 센서, CAP 이 조립된 기상측정장치가 실제 초정밀 가공기의 유정압 가이드 이송부에 장착된 사진을 나타낸다.

Table 1 Specifications of capacitive displacement sensor

사 양(specification)	값(Value)
분해능(Resolution)	10 nm
작동범위(Working Range)	75 μ m
출력신호(Output Signal)	10 V
대역폭(Bandwidth)	20 KHz
직경(Radius)	3/8" (9.53 mm)
길이(Length)	1.5" (38.1 mm)

Table 2 Specifications of contact adapter probe

사 양(specification)	값(Value)
접촉력(Contact Force)	0.2 ~ 100 g (0.002 ~ 1 N)
측정범위 (Measurement Range)	500 μ m
Air Unit	420 ~ 480 kPa (60 ~ 70 psi)

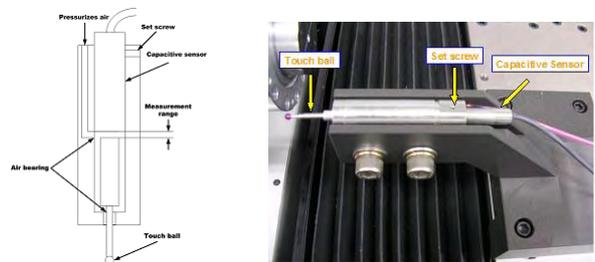


Fig. 1 On-machine measurement system in diamond turning machine

2.2 기상측정장치를 이용한 토릭 시편 측정

본 과제에서 구성한 기상측정 (on-machine measurement; OMM) 시스템의 성능을 나타내기 위하여 기 가공된 토릭 시편을 측정하였다. 기상측정 순서는 Fig. 3 의 순서도와 같다. 여기서 상수 Δr 은 시편의 반경 방향 증분값, 상수 $\Delta \theta$ 는 시편의 회전방향 증분값을 의미한다. 또한

측정과정에서 결정되는 상수 z_0 와 z_c 는 Z 축의 이송을 나타내는 기본 값이다. 그리고 $r=0, \theta=0$ 명령이 의미하는 것은 구동시스템을 $r=0, \theta=0$ 으로 이송하라는 것이다.



Fig. 3 Flow chart for on-machine measurement

시편 형상은 토릭 (toric)이며 반지름 r , 단차 h 는 각각 $r=25\text{mm}$, $h=5 \times 10^{-3}\text{mm}$ 이다. 측정 영역은 $0 \leq r \leq 24$, $0 \leq \theta \leq 360^\circ$ 이며 측정에서 사용한 반경 증분값 Δr , 각도 증분값 $\Delta \theta$ 는 각각 $\Delta r=2.0\text{mm}$, $\Delta \theta=15^\circ$ 로 정의하였다. 측정 순서는 일정 각도 θ_i ($i \leq 24$)에 대하여 $0 \leq r \leq 24$ 의 범위를 측정하고 각도 θ_{i+1} 에 대하여 반복 수행하였다. 총 측정 점의 개수는 312 ($=13 \times 24$)이다. 여기서 측정 점을 Matlab 의 보간 함수를 사용하는 경우에 Fig. 4 의 (a)와 같이 주어진다. 또한 Fig. 4 의 (b)에서는 동일한 반경에 대한 측정 데이터를 나타내었다. 측정에 사용한 시편은 동일한 반경에 대하여 삼각 함수인 사인함수가 2 회 위치하지만, 이러한 경향은 Fig. 4 에서는 나타나지 않는다. 이러한 현상을 유발하는 원인은 다음과 같다.

- a) 측정 과정에서 발생한 구동시스템의 오차
- b) 측정 과정에서 발생한 외란의 영향
- c) 시편의 법선 벡터와 기상측정 시스템의 센서 이송 방향의 불일치

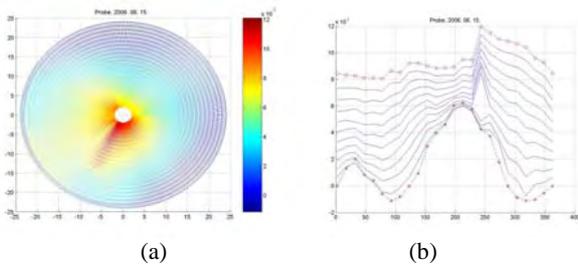


Fig. 4 (a) OMM data, (b) along the circumferential direction

측정 데이터에 대한 구동시스템의 오차를 최소화하기 위하여, 상기 측정 과정에서 레이저 간섭계 (모델명 : HP5529A)를 사용하여 구동시스템의 변위값을 각각 측정하였다. 이러한 경우에 기상측정 데이터와 레이저 간섭계 데이터를 조합한 결과는 Fig. 5 의 (a)에 나타난 바와 같다. 레이저 간섭계를 사용하여 측정한 구동시스템의 변위 오차는 일정값 이하로써 최종 데이터에 결정적인 영향을 미치지 않는다.

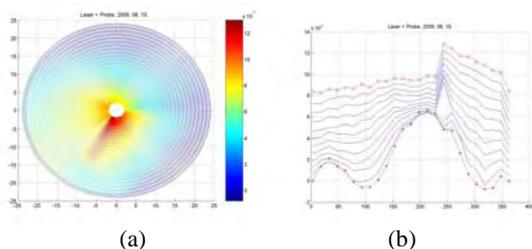


Fig. 5 (a) OMM data with laser interferometer compensation, (b) along the circumferential direction

Fig. 5 (a) Compensation of OMM data with laser interferometer (b) along the circumferential direction

외란이 존재하지 않으면 기상측정 데이터는 $r=0$ 인 경우에 센서의 변화성 (variability) 이내에 위치하여야 한다. 그러나 기상측정 데이터는 이러한 조건을 만족하지 않으며, 이는 측정 과정에서 외란이 발생한 것으로 추정된다. 따라서 일정 각도 θ_i ($i \leq 24$)에 측정된 데이터를 인 경우의 측정값만큼 이동 (centering)하였다. 또한 시편의 회전축과 기상측정시스템의 센서 이송방향의 차이인 직각도 (squareness)를 고려하였다. 이러한 경우에 최종 측정 데이터는 Fig. 3.6 의 (a)와 같이 주어진다.

Fig. 3.6 의 (b)를 Fig. 3.4 의 (b), Fig. 3.5 의 (b)와 비교하는 경우에 진폭은 다르지만 2 회위의 사인함수 경향을 명확히 나타낸다.

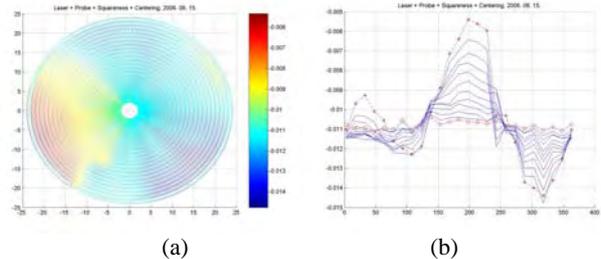


Fig. 3.6 (a) Compensation of OMM data with laser interferometer, centering and squareness (b) along the circumferential direction

Fig. 3.6 의 (b)에 나타난 바와 같이 진폭이 다른 2 회위의 사인함수가 나타나는 것은 시편의 법선 벡터와 기상측정 시스템의 센서 이송방향이 서로 다르기 때문이다. 이러한 영향을 고려하기 위하여 Fig. 3.6 의 (a)에 나타난 데이터를 사용하여 평면 PL1(plane)을 생성하였다. 그리고 평면 PL1 과 XY 평면의 변환관계를 정의하여 Fig. 3.6 의 (a)에 나타난 데이터를 변환하였다. 이러한 경우에 변환된 데이터는 Fig. 3.7 의 (a)에 나타난 바와 같이 주어진다.

Fig. 3.7 의 (b)를 고려하는 경우에 동일한 반경에 대하여 2 회위의 사인함수가 명확히 나타나는 것을 알 수 있다.

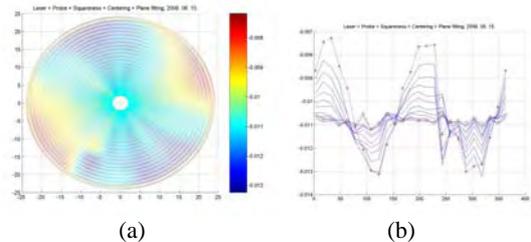


Fig. 3.7 (a) OMM data in XY plane (b) along the circumferential direction

3. 결론

본 연구에서 구성한 기상측정 시스템의 성능을 나타내기 위하여 기 가공된 토릭 형상의 시편을 측정하였다. 그리고 측정 과정에서 발생 가능한 다양한 오차 요인을 고려하였으며, 최종적으로 시편의 특성을 명확하게 나타내는 데이터를 획득하였다.

참고문헌

1. 유승봉, 장인철, 김승우, "비구면 렌즈의 형상 측정을 위한 접촉식 프로브 기술 개발", 한국정밀공학회 2000 춘계학술대회 논문집(II), pp.603-606, 2000
2. D. G. Chetwynd, X. Lin, and S.T. Smith, "A controlled-force stylus displacement probe," Precision Engineering 19:105-111, 1996