

## 비구면 초정밀절삭 공정기술에 관한 연구

김건희\*, 홍권희, 김효식, 김현배(한국기초과학지원연구원),  
양순철(충남대 원), 원중호(충남대)

### A study on Ultra Precision machining process for Aspheric

G. H. Kim, K. H. Hong, H. S. Kim, H. B. Kim(Korea basic science institute),  
S. C. Yang(Graduate School of Mech. Eng. CNU), J. H. Won(Mech. Eng. Dept., CNU)

#### ABSTRACT

This paper described about the ultra-precision profile measurement of aspheric surfaces using contact probing technique. A contact probe has been designed as a sensing device to obtain measuring resolutions in nanometer regime utilizing a circle leaf spring mechanism and a capacitive-type sensor. The contact probe is attached on the z-axis during measurement while aspheric objects are supported on the diamond turning machine(DTM). The machine xz-axis motions are monitored by a set of two orthogonal plane mirror type laser interferometers. Experimental results show that the contact probing technique developed of on-machine measurement system in this investigation is capable of providing a repeatability of 10 nanometers with a  $\pm 2\sigma$  uncertainty of 200nmPv.

Key Words : DTM(Diamond Turning Machine), On-machine measurement(기상측정), Contact probe(접촉식 프로브), Capacitive sensor(정전용량 센서), Leaf spring mechanism(관 스프링 구조), Aspheric(비구면)

#### 1. 서론

초정밀가공기는 단 결정 다이아몬드 공구를 사용하여 초정밀 부품을 가공하는 공작기계이다. 초정밀 가공기술은 광학부품 가공에 있어서, 많은 생산비용의 절감과 가공부분의 정밀도를 향상시켜 왔다. 다이아몬드 터닝의 중요한 연구 과제는 가공면의 표면 거칠기와 원하는 지수형상의 정밀도를 향상시키고 가공물의 새로운 재질에 응용하는 기술을 개발하는 것이다.<sup>1)</sup> 특히, 최근 초정밀가공기계는 비구면 형상의 자유로운 가공으로 비구면 급형 코어 등의 적용으로 그 수요가 급격히 확산되어가고 있다. 비구면 렌즈는 여러 개의 구면렌즈로 이루어진 광학계를 하나의 렌즈로 대체함으로써 광학계의 무게와 부피를 대폭 감소시키는 장점을 갖는다.

직경 120 mm이하의 이미 상품화된 비구면 측정기를 사용하고 있으며, 그 이상의 대구경 비구면 부품측정을 위해서는 보정측정용 볼 렌즈를 제작하여 측정에 사용하고 있으나, 가공시간과 많은 비용이 요구되는 단점이 있다.

본 논문에서는 초정밀가공기의 Z축 위에 공구와 함께 접촉식 프로브시스템을 설치하여 가공 직후 측정을 통해 초정밀가공정밀도를 측정하고, 보정 프로그램을 이용한 재 가공을 통하여 비구면의 형상가공정밀도 향상을 위하여 정전용량형 센서를 이용한 프로브 시스템을 설계 제작하였으며, 평면, 비구면의 시편을 제작하여 기존의 Form Talysurf와 비교 측정을 통하여 기상측정 시스템의 성능을 평가하였으며, 측정결과를 이용한 보정 가공으로 초정밀 비구면 형상가공정밀도를 개선하였다.

#### 2. 기상측정시스템

##### 2.1 기상측정시스템 설계 제작

본 연구에서 측정하고자하는 비구면 머리는 천체 망원경이나 위성용 카메라시스템에 사용되는 곡률반경이 크고, 비구면에 의한 급격한 변곡 부위가 적은 대형 비구면 반사경의 초정밀가공을 위하여 구비된 정전용량형 센서를 이용한 접촉식 측정시스템을

Table 2. 1 Measuring system requirement

	Specification
Measuring Uncertainty	0.2 $\mu$ m PV
Measuring Range	300mm
Resolution	20nm
Measuring Type	Contact Measurement
Contact Force	0.01 N or Less

설계 제작하여 실 제품의 가공에 적용하고자 한다. 대구경 비구면 형상정밀도를 측정하고 가공정밀도를 개선하기 위한 기상측정시스템의 요구 정밀도는 Table 2. 1과 같다.

기상측정시스템은 초정밀가공기의 공구대와 함께 설치하여 가공 직 후 측정을 가능하도록 구성하였다. 따라서 측정시 사용되는 대영역의 이동 슬라이드는 가공장비의 X축과 Z축 이송정밀도에 의하여 결정되며, 이송 슬라이드의 정밀도는 분해능 1.25nm와 축이송거리 300mm의 Nanoform600 초정밀가공기기를 이용하였다. 또한 비구면 형상 측정에 사용된 정전용량 센서는 ADE사의 2803모델이며, 측정 범위는 110 $\mu$ m범위이며, 분해능은 0.5nm이다. 센서의 직경은 1mm이며, 실험을 수행하기 위하여 센서를 실험 장치에 고정할 때는 클램핑 영역에서 스프링 링이나 볼트를 사용하여 고정한다. 본 센서의 특성은 수 마이크로미터의 낮은 변위 측정용으로 각도의 변화에 매우 민감한 특성을 갖고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 두 개의 원형 판 스프링구조를 갖는 접촉식 프로브 시스템을 설계하였다. 판 스프링의 재료는 인코넬 600을 사용하였으며, 판 스프링 구조에서 판의 두께에 따른 하중변화에 대하여 해석프로그램인 Ansys를 이용하여 분석하였다. Fig. 1은 변위를 최대  $\pm 50\mu$ m로 주었을 때 판의 두께에 따른 변위의 변화를 해석한 결과를 나타내며, 판의 두께를 0.1mm로 했을 경우 약 38g 정도의 하중과 0.37N 정도의 탄력이 작용함을 알 수 있었다. 실제 측정영역인  $\pm 2\mu$ m에서는 약 1.5g의 하중과 0.00148N의 탄력이 작용함을 해석결과 얻을 수 있었다.

Fig. 2는 본 연구에서 제작한 접촉식 프로브를 보여준다. 접촉식 측정에서 측정물의 훼손을 방지하기

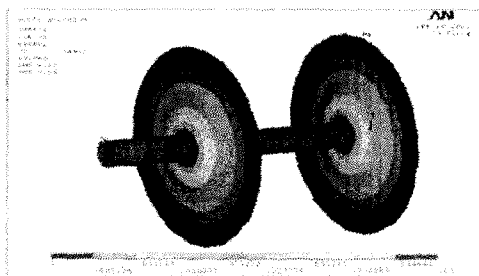


Fig. 1 Structural analysis of probe component

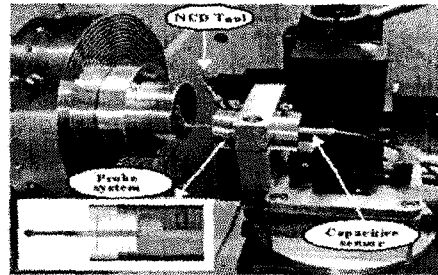


Fig. 2 Structure of precision contact probe

위하여 접촉력을 최대한 줄이는 것이 필요하다. 본 실험에 사용된 프로브는 접촉력 제어와 운동을 전달하는 요소로 한 쌍의 원형 평행 판 스프링 구조를 이용하였다. 정전용량형 센서가 갖는 측정영역의 각도 오차에 따른 오차를 줄이기 위하여 그림과 같이 평행한 두 개의 원판형 구조로 설계하였으며 축 방향에 대한 정렬오차를 줄이기 위하여 접촉 프로브와 센서를 하나의 구조로 조립할 수 있도록 설계하였다.

판 스프링의 유효 스프링 상수를 결정하는 또 한 가지 요인은 프로브 자체의 고유진동수이다. 연속적으로 측정을 수행하는 과정에서 접촉식 프로브는 외부로부터 여러 가지의 주파수에 해당하는 외력을 받게 된다. 이 과정에서 프로브의 공진이 일어날 수 있게 되는데 프로브의 공진 주파수가 높을수록 측정물에 의한 공진이 일어나는 것을 막을 수 있게 된다. 따라서 프로브의 공진 주파수를 크게 하기 위하여 유효 스프링 상수를 크게 설계 제작하였다.

판 스프링 구조에서 접촉력은 운동부의 변위에 비례하게 된다. 따라서 접촉력의 크기를 작고 일정하게 유지하기 위해서는 프로브의 위치를 측정물에 대하여 일정하게 유지하면서 제어하면 된다. 이렇게 접촉력을 작게 유지하기 위해서 초정밀가공 시스템이 갖고있는 X축과 Z축의 이송정밀도를 이용하여 상대 변위를 일정하게 유지하면서 제어하여 구현하게 된다.

운동부는 판 스프링으로 프로브의 분체와 연결되어서 한쪽 끝단에 위치한 프로브 팁에 측정물이 닿으면 운동부에 변위가 생기게 된다. 운동부의 다른 쪽 부분에는 도체로 된 기준평면이 존재하여 프로브의 분체에 고정된 정전용량센서가 운동부의 움직임을 측정해 측정물에 의해 생기는 운동부의 변위를 측정하게 된다.

## 2.2 기상측정시스템 성능평가

Fig. 3은 프로브의 동작 특성을 평가하기 위하여 충격실험 수행 결과를 나타낸다. 오실로스코프를 통한 실험의 분석결과 기상측정시스템의 고유진동수 파수는 약 330Hz로써 가공 장비가 갖는 고유진동수

50Hz보다 크게 제작되어 있음을 확인하였으며, 측정기가 갖추어야 할 민감성을 갖고 있음을 확인하였다.

측정을 수행할 때 프로브를 초정밀 가공기의 공구대 장착부위에 설치한 뒤, 프로브의 신호와 초정밀가공기의 축 이동위치 검출을 이용하여 측정물의 형상을 복원하게 된다. 제작된 접촉식 프로브가 프로브의 센서로 사용하고 있는 정전용량센서의 성능을 제대로 수행하고 있는가를 확인하기 위해서 프로브의 신호를 보정할 필요가 있다.

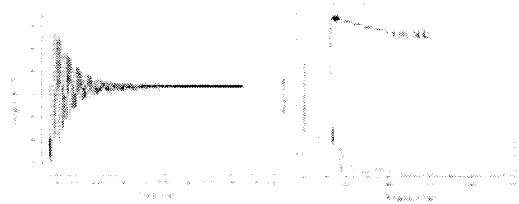


Fig. 3 Impact test of contact probe

Fig. 4(a)는 접촉식 프로브의 측정값은 실제 측정을 수행하게 되는 초정밀가공 이동축인 Z축의 변위 값에 대한 출력으로 5회 반복 측정한 결과이다. 그리고 Fig. 4(b)는 프로브의 측정범위내에서 전진과 후퇴시의 출력 오차를 측정한 결과이다. 그림에서 나타나듯이 접촉식 프로브의 측정값과 레이저 간섭계, 즉 Z축 변위의 측정값은 선형으로 나타나게 된다. 따라서 판 스프링 구조로 만든 접촉식 프로브는 Z축 스테이지의 이동에 의한 위치 변화량을 특별한 히스테리시스 없이 측정을 할 수 있음을 보여 준다.

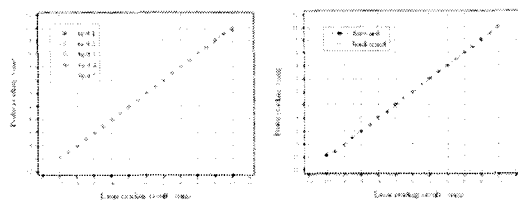


Fig. 4 Probe calibration to laser interferometer

### 3. 기상측정

#### 3.1 기상측정 방법

기상측정시스템에 사용된 초정밀가공기는 Nanoform 600이며, 측정결과와 비교측정은 Form Talysurf Series 2를 사용하였다.<sup>23,24</sup> Fig. 5는 본 연구에서 제작한 접촉식 프로브를 이용한 측정 방법의 개략도이다. 측정 대상물은 Z축 공구대 위에 고정되어 Z축의 이동에 따라 접촉식 프로브의 선단에 위치한 프로브 팁은 측정 물체의 형상에 대하여 그 위치

가 변화하게 되고, 이 변화량은 판 스프링 구조로 이루어진 접촉식 프로브를 통해 프로브의 반대쪽으로 전달되게 된다. 측정 물체의 형상에 대한 이 변화량은 프로브 팁의 반대쪽에 위치한 정전용량센서를 이용하여 측정한다.

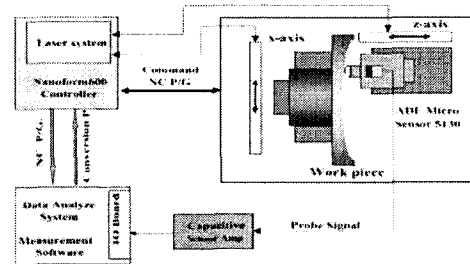
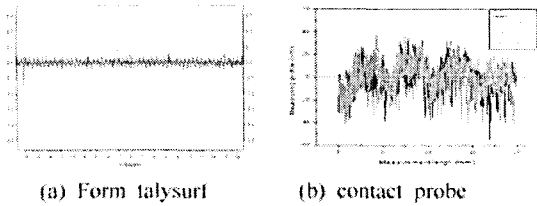


Fig. 5 Block diagram of contact measurement system

프로브 자체의 측정 영역은  $\pm 2\text{mm}$ 에 불과하다. 이러한 문제점은 정밀 스테이지를 이용하여 해결한다. 초정밀가공기기의 위치 변위는 레이저 간섭계에 의해 피드백 제어되며 위치 변위 분해능이 최소 1.25  $\mu\text{m}$ 까지 가능하다. 따라서 이러한 위치정밀도를 갖는 장비의 공구대 위치에 프로브 시스템을 장착하여 가공한 프로그램과 동일한 프로그램용 이용하여 프로브의 출력 값이 측정영역을 벗어나지 않도록 측정 프로브의 위치를 기계의 Z축 공구대 위치에 장착하였다. 비구면 형상의 측정시 발생하는 예러는 주로 X축 중심 위치의 오차로 인한 발생이 크게 영향을 주기 때문에 프로브 끝단의 정확한 위치 설정이 측정오차를 주게되는 주된 요인이 된다.

#### 3.2 기상측정 결과

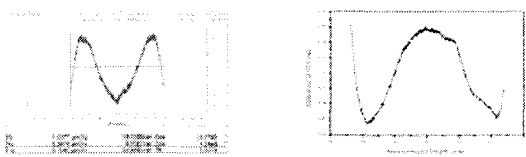
제작된 기상측정시스템의 성능을 검토하기 위하여 직경 20mm의 황동 평면을 가공 후 표면형상을 Form talysurf와 비교 측정하였다. Fig. 6 (a)는 Form talysurf로 측정한 결과를 나타내며, 오차 정도가 13.9nmRa, 80nmPv 이하의 결과를 보여준다. Fig. 6 (b)는 실제 제작한 접촉식 프로브로 평면을 측정한 결과를 보여준다. 측정을 수행한 20mm 영역 내부에서 약 15nmRa, 80nmPv 정도의 오차를 갖는 것을 확인하였다. 그리고 여러 번 반복측정결과 반복능은 약 10nm 정도의 편차가 발생함을 확인하였다. 측정결과에서 Y 축 방향으로 나타나는 곡률은 측정시스템에 사용된 스테이지가 갖는 전직도 오차 성분이 측정결과에 반영된 것으로 해석할 수 있다. 따라서 평면형상측정결과 제작된 시스템이 안정적이고 민감함을 확인하였다.



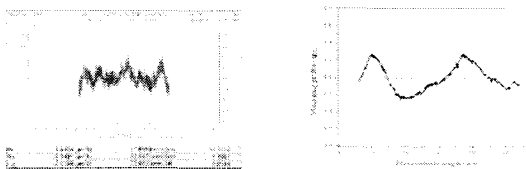
(a) Form talysurf (b) contact probe  
Fig. 6 Result of plan surface roughness measuring

Fig. 7은 비구면 형상을 초정밀가공 직후 측정된 결과로써 Fig. 7 (a)는 Form talysurf를 이용한 측정결과이며, Fig. 7 (b)는 접촉식 프로브를 이용한 비구면 형상을 측정된 결과이다. Form talysurf와 기성 측정시스템의 측정결과 반대 형상으로 나타나는 이유는 프로브시스템이 갖고 있는 측정원리가 접촉되는 프로브 팁에서 전달되는 프로브 축의 끝과 센서의 간격이 실제형상에서 높은 부분은 간격이 낮아지고 높은 부분은 간격이 증가되는 원리이기 때문에 반대형상의 결과를 나타낸다.

Fig. 7의 측정결과 비구면 형상정밀도는 폼 텔리서프에서 약  $1.538\mu\text{mPv}$ , 기상측정에서  $1.45\mu\text{mPv}$ 의 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 8은 기상측정결과 자료를 가공프로그램에 보상하여 보정 가공한 결과를 나타낸다. Fig. 8 (a)의 폼 텔리서프에서 약  $0.445\mu\text{mPv}$ , Fig. 8 (b)의 기상측정에서  $0.55\mu\text{mPv}$ 의 측정값을 얻을 수 있었다. Fig. 9는 직경 300mm, 곡률반경 1200mm인 구면형상을 초정밀가공 후 기상측정시스템을 이용하여 측정된 결과로써 반복측정편차  $0.2\mu\text{m}$ 와 형상오차  $1.8\mu\text{mPv}$ 의 측정값을 얻었다. 본 연구에서 제작된 접촉식 프로브를 이용하여 기성측정장비로 측정이 불가능한 직경 120 mm 이상의 대구경 비구면 방사경에 대하여 측정이 가능한 것을 확인할 수 있다.



(a) Form talysurf (b) contact probe  
Fig. 7 Result of Aspheric surface measuring



(a) Form talysurf (b) contact probe  
Fig. 8 Result of Aspheric conversion surface measuring

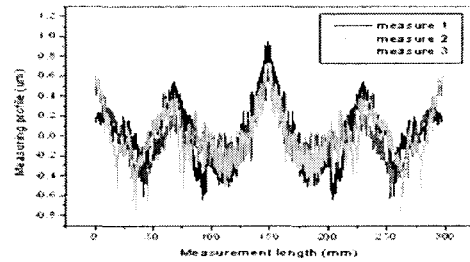


Fig. 9 Result of Aspheric form by contact probe

#### 4. 결론

비구면형상의 초정밀가공 정밀도를 향상시키기 위하여 접촉식 프로브를 개발하였다. 제작된 프로브를 이용하여 비구면 형상측정에 널리 이용되고 있는 Form talysurf와 비교 측정함으로써, 평면 비교 측정결과 분해능 5mm와 반복능 10mm의 편차를 갖으며, 비구면에 대한 비교측정결과 유사한 결과를 확인하였으며, 보정가공을 통하여 형상정밀도를 1/3 수준으로 향상시키고, 120mm이상의 대구경 측정 가능성을 확인하였다.

#### 후기

본 연구는 2002년도 과학재단 목적기초 연구비 지원으로 연구된 과제이며, 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

1. 이재강, 이응숙, 재대진, 심충건, 송동우, 고대조, 초정밀경면 절삭 가공 기술 개발, 과학기술처 최종보고서, 1992.
2. Geon-Hee Kim, Kwon-Hee Hong, Sang-Suk Kim, Jong-Ho Won, "Nano-turning Technology Using Ultraprecision Machining System", Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol.19, No.1, January pp.18-24, 2002.
3. J.B.Ko, G.H.Kim, J.H.Won, "A Study on the cutting characteristics of non-ferrous metals using diamond turning machine", Trans. of KSMTE., Vol.10, No.5, pp.124-129, 2001.
4. Ko Joon-Bin, Kim Geon-hi, Hong Kweon-hi, Song Hi-Duck, Won Jong-Ho, "Nanometer Scale Ultra Precision Machining of Oxygen-free Copper", KOSTET REVIEW Vol.6, No.2, pp.77-82, September 2001.