한국공작기계학회논문집 Vol.17 No.4 2008. 8.
Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers

# 3차원 측정기를 위한 원자간력 프로브 성능 연구

정판곤*, 배규현*, 홍성욱+

(논문접수일 2008. 2. 20, 심사완료일 2008. 4. 20)

# A Study on the Performance of Atomic Force Probe for Coordinate Measuring Machines

P. G. Jung*, G. H. Bae*, S. W. Hong+

Abstract

This paper presents an atomic force probe for triggering coordinate measuring machines(CMMs). A rigorous comparison is made between touch trigger probe and atomic force probe for CMMs. Typical CMMs(touch trigger probe based CMMs) often lead to some errors associated with object curvature and difference in triggering sensitivity. Their applicability is limited only to hard objects. The aim of this work is to develop a trigger sensor for CMMs using atomic force. In order to show the applicability of atomic force as a trigger sensor, a cylindrical shape is measured with a CMM and an atomic force microscope. Three different touch probe heads with different ball sizes are tested. The experiments show that smaller ball provides better results for curved objects. The experimental results also show that the performance of atomic force as a trigger sensor is about that of the smallest ball probe. In addition, experiments are also performed to measure soft objects. Finally, this paper suggests and verifies a trigger sensor using atomic force for CMMs.

**Key Words** : Atomic Force Microscope(원자간력 현미경), Coordinate Measurement Machine(3차원측정기), Contact Measurement (접촉식 측정), Shape measurement(형상측정), Cylindrical shape(실린더형상), Soft lens(소프트렌즈)

## 1. 서 론

기계가공 및 제작 시스템의 발달로 초정밀 가공 영역이 크게 확대되고 있다. 이와 더불어 가공된 정밀 제품의 제작 정밀도를 검사하는 시스템의 필요성이 증가하고 있다. 가공 정밀도를 검사하는 시스템 중 접촉식 3차원측정기는 가장 널리 사용되는 형상 정밀도 측정장치이다. 이 장치는 접촉식 프로브를 사용하여 측정물에 직접 접촉하여 측정하므로 측

* 금오공과대학교 대학원 기전공학과
+ 교신저자, 금오공과대학교 기계공학부 (swhong@kumoh.ac.kr)
주소: 730-701 경북 구미시 양호동 1번지

정물의 전 방향 측정이 가능하고 이물질의 영향을 적게 받는다. 그러나 측정력(Trigger Force)의 작용으로 측정물의 손상을 일으킬 수 있으며 측정면 자체의 변형이나 스타일러스의 굽힘 현상을 야기시켜 측정 오차를 유발할 수 있다. 또한 접촉식 프로브의 내부는 120도 간격의 지지 형태를 가지고 있기 때문에 측정물의 측정방향에 따라 측정력의 편심 현상이 발생하기도 하며, 측정물에 실제 접촉한 위치와 스위칭 발생 위치와의 차이에 의한 정지위치 오차가 발생하기도 한다. 그리고 볼이 경사진 측정물의 표면에 접촉하는 과정에서 정확한 접촉점의 위치를 검출하지 못하는 접촉점 오차가 발생한다. 특히 자유 곡면 일수록 접촉점에 의한 측정오차는 더 커지게 된다[1,2].

한편, 원자간력 현미경은 시료 표면을 가장 정밀하게 측정할 수 있는 장비로서 최근 각광을 받고 있는 나노분야의 연구/개발에 필수적인 장비이다. 최근 이와 같은 원자간력 현미경을 이용하여 형상을 측정하는 방법이 제안되었으며 그 가능성을 보인 바 있다[3-5]. 즉, 원자간력 현미경에 기장착된 이송계를 이용하여 XY 위치에 대해 이송을 한 후 Z축 좌표는 원자간력을 이용하여 측정 대상물과의 접촉 상태를 인지하여 좌표를 결정하는 방법이다. 이와 같은 원리를 이용하면 앞에서 언급한 기존의 3차원 측정기가 갖고 있는 여러 가지 단점을 보완할 수 있을 것으로 생각된다.

본 논문에서는 3차원 측정기에서 사용되고 있는 접촉식 프로브(Touch trigger probe)를 원자간력을 이용한 프로브로 대체하고자 하는 관점에서 원자간력 프로브를 이용한 결과와 3차원측정기의 접촉식 프로브에 의한 결과를 적극적으로 비교하였다. 비교를 위해 실린더 형상의 물체를 측정 대상체로 선택하였고 접촉식 프로브의 볼 직경을 여러 가지로 택하여 측정하였다. 또한 원자간력 현미경을 이용하여 동일 물체에 대해 동일 위치를 원자간력 트리거 방식으로 측정하였으며 3차원 측정기의 결과와 비교 분석하였다. 원자간력 트리거 센서의 유용성을 보이기 위해 기존의 접촉식 트리거 센서로 측정이 불가한 부드러운 물체에 대한 측정 결과도 제시하였다.

마지막에는 3차원 측정기에 사용될 수 있는 원자간력 트리거 센서의 개념도를 제시하였으며 이를 근거로 실험장치를 제작, 그 효용성을 검증하였다.

## 2. 측정시스템의 개념

### 2.1 원자간력 현미경

원자간력 현미경은 기존의 현미경으로는 관측이 불가능했던 원자의 관찰을 가능하게 함으로써 최근 각광 받고 있으며, 특히 1980년 발명된 주사형 터널 현미경(Scanning Tunneling Microscope)이 도체 시료에 대해서만 측정 가능했으나 이 같은 한계를 극복함으로서 더욱 널리 사용하게 되었다. 그 원리를 간략히 설명하면, 헤드부에 캔틸레버 탐침이 부착되는데 시료의 표면에 캔틸레버라고 불리는 이 작은 막대를 접근시키면 캔틸레버 끝에 붙어있는 탐침과 시료 표면의 원자 사이에 서로의 간격에 따른 인력과 척력이 작용하게 된다. 여기서 원자간력이라 불리는 이 힘에 의해 캔틸레버가 휘어지게 되는 정도를 직접 또는 간접적으로 활용하여 표면 형상을 측정하는 방식이다.

원자간력 중 척력구간을 이용하는 경우를 접촉식(Contact mode), 인력구간을 이용하는 경우를 비접촉식(Non-contact mode)라 하며, 특히 비접촉식의 경우에는 시료로부터 상대적으로 떨어진 상태에서 측정이 되므로 시료에 실제 인가하는 힘이 매우 작아 표면이 손상되거나 변형되기 쉬운 부드러운 시료도 측정이 가능하다.

원자간력을 이용하여 형상을 측정하는 경우에는 탐침을 포함한 캔틸레버를 시료에 접근시키면서 원자간력에 의한 캔틸레버의 변화를 감지할 수 있는 순간 트리거 신호를 발생시켜 해당 위치의 좌표값을 읽음으로서 형상을 측정하는 것을 의미한다. 접촉식과 비접촉식 모두 사용이 가능하다.

### 2.2 3차원측정기

3차원 측정기는 복잡한 입체 구조물의 치수 또는 좌표를 3차원 공간 이동을 통해 검출하는 장비이다. 최근에는 이를 측정결과를 소프트웨어에 의해 각종 기하학적 형체 예컨대, 점, 선, 원, 면 등으로 자유롭게 구성하여 결과를 출력하거나 또는 사용자가 궁극적으로 요구하는 이들 형상간의 상관관계를 자동으로 계산하는 등 많은 유용한 기능을 갖추고 있다. 용도에 따라 매우 다양하 종류가 있으며, 그 측정 범위 또한 매우 광범위 하다. 가장 널리 사용되고 있는 3차원측정기는 서로 직각으로 배치되어 있는 X, Y, Z 3개의 이송축을 가지도록 구성되며, 통상 접촉식 트리거 프로브(Touch trigger probe)를 Z축 상에 탑재하여 측정대상물과의 접촉을 통해 좌표값을 읽는 기준신호를 제공하게 된다. 측정의 정밀도는 이와 같은 3축 이송계와 접촉식 트리거 프로브의 영향을 받게 되는데 높은 정밀도를 유지하기 위해서는 주기적인 보정을 필요로 한다[6].

## 3. 실험 및 결과

### 3.1 실험 방법

Figs. 1과 2는 측정 대상이 되는 환봉을 원자간력 현미경

스테이지와 3차원측정기 정반 위 블록게이지에 설치한 모습을 보여주고 있다. Y축을 고정하고 X축을 이동하면서 형상 측정을 수행하였다. 실린더 형상의 환봉을 선택한 이유는 곡면 기울기 변화에 따른 트리거 정밀도의 분석이 용이하기 때문이다.

실제 측정과정은 다음과 같다. 먼저, 이송계에 측정대상 환봉을 올린 후 근사적으로 정점으로 추정되는 위치의 X축 초기기준을 잡은 후 X축 방향으로 일정한 간격 100㎛씩 이동시키며 Z축 높이 값을 구하여 그 데이터를 원형형상 보정하여 X축 중심점을 찾는다. 이와같이 선택된 X축 중심점에 대해 좌우로 일정한 영역을 X축 이송하면서 Z축 좌표를 얻는다. 여기서는 100㎛ 간격씩 17 포인트를 이송하였으며 데이터의 신뢰성을 높이기 위해 한 포인트 당 5회 반복하여 측정된 Z축 값을 평균하였다.

특히 원자간력 현미경에서는 이송간격을 100㎛이외에도 50㎛, 25㎛이송을 하며 측정을 실시하여 비교함으로서 측정의 불확실도를 검토하였다. 3차원측정기의 경우 접촉식 프로브의 볼 직경에 의한 차이를 보기 위해 2mm, 1mm와 0.5mm의 3가지 볼로 바꾸면서 동일 실험을 반복하였다.

**Fig. 1 Experimental setup with AFM**

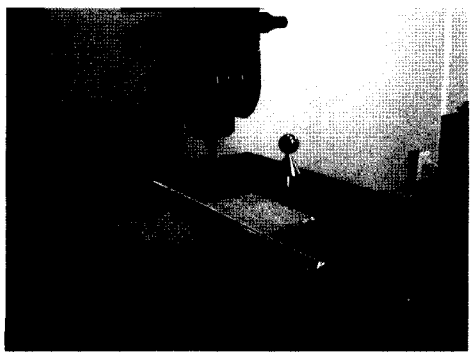

**Fig. 2 Experimental setup with a CMM**

### 3.2 측정 결과

3차원측정기와 원자간력 현미경 모두에 대해 동일한 환봉을 가로지르는 방향으로 측정한 후 최대점을 기준값으로 일치시켜 측정치를 비교하였다. 이는 실린더형상의 기준점이 명확하지 않으며, 측정 절대좌표가 각기 다르게 정의되어 있으므로 비교를 위해 반드시 필요한 조건이 된다.

Fig. 3은 측정대상인 실린더 형상의 봉을 원자간력 현미경을 이용하여 이송간격 100㎛, 50㎛, 25㎛로 이송을 하면서 측정한 결과이다. 3가지 측정결과에 대한 단순 수치 비교에 의하면 대체로 0.2~0.4㎛ 정도의 차이를 나타내고 있다. 이와 같은 범위는 원자간력 현미경에서 사용되고 있는 Z축 대면적 이송계(Coarse positioning unit)의 해상도가 0.4㎛인 점을 고려하면 이송계 오차 범위 내에 있음을 알 수 있다. 따라서 원자간력에 의한 측정 결과는 곡면에 대해 적용했음에도 이송계의 오차 범위 내에서 반복 측정됨을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 사용된 프로브 직경이 2mm, 1mm와 0.5mm로 하였을 때의 측정 결과를 비교해서 보여주고 있다. 결과를 단순 비교하여 볼 때 프로브의 지름이 작은 0.5mm에 수렴하는 양상을 볼 수 있다. 0.5mm와 1.0mm가 비교적 차이가 없는 것으로 나타나고 있으나 2.0mm의 경우 상대적으로 큰 오차를 보이고 있는데, 이는 지름이 클수록 접촉점 오차가 커지기 때문으로 생각된다. 따라서 프로브의 볼 직경이 클수록 곡면 측정 시 더 큰 오차가 발생할 가능성이 커짐을 알 수 있다.

이러한 3차원측정기의 프로브의 특성은 정밀한 측정을 위

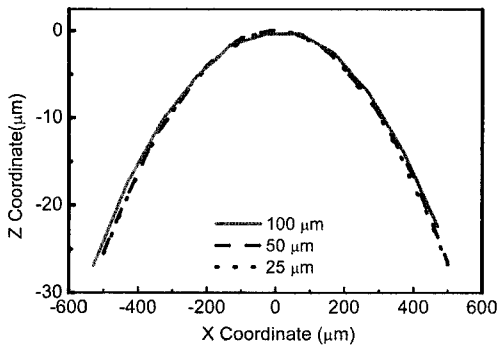


**Fig. 3 Measured profile by using AFM for the cylindrical shape object with the measurement interval changed**

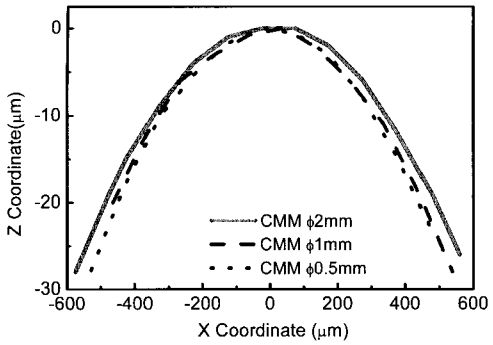


**Fig. 4 Measured profiles by using CMM for the cylindrical shape object with the probe ball size changed**

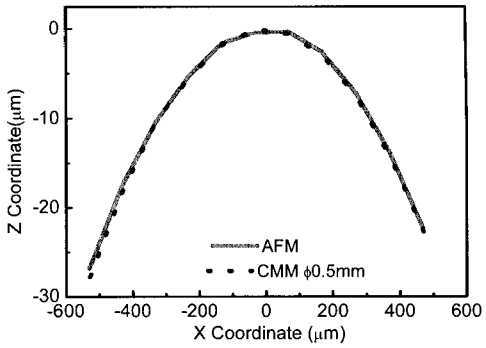


**Fig. 5 Comparison of profiles measured by AFM and CMM with ∅0.5mm probe**

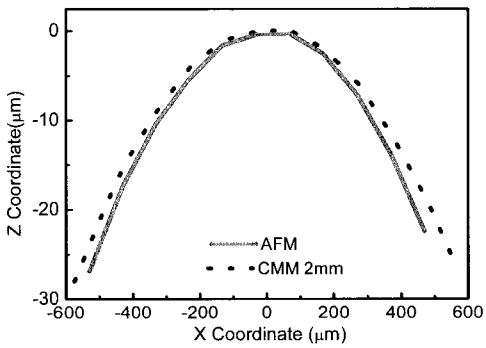


**Fig. 6 Comparison of profiles measured by AFM and CMM with ∅2.0mm probe**

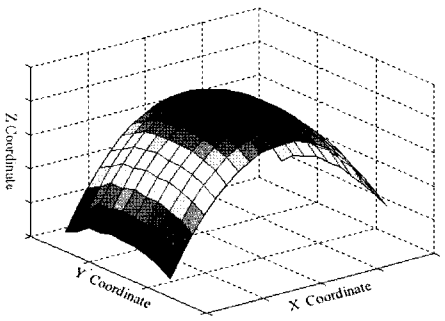


**Fig. 7 Measured surface of a soft contact lens: wide range with 100㎛ resolution**

해 더욱더 작은 프로브를 요구하게 되나 제작이 까다로워 비용이 증가되는 문제점이 있다. 또한 일반적으로 프로브 볼이 물체에 지속적으로 접촉함에 따라 마모가 발생하게 됨으로서 그 정밀도가 나빠지게 된다.

Figs. 5, 6은 원자간력 현미경 측정된 측정값과 3차원측정기 프로브 직경 2mm와 0.5mm을 비교하여 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 원자간력 현미경에 의해 측정된 값과 직경이 작은 볼을 사용한 경우의 3차원측정기의 측정값이 유사한 값을 갖고 있음을 알 수 있다. 반면, 직경이 큰 경우에는 비교적 큰 차이를 보이고 있다. 이는 앞에서도 언급한 바와 같이 본 실험의 경우 직경이 큰 볼을 사용한 프로브의 오차가 큰 것으로 확인되고 있으므로 원자간력에 의한 측정 결과가 신뢰성이 있음을 보여주고 있음을 알 수 있다.

한편, 상대적으로 큰 접촉력을 가진 접촉식 시스템은 재료의 표면을 손상시키고 왜곡된 측정결과를 초래한다는 것이 잘 알려져 있다[6]. 그러나 원자간력 프로브에서는 물체의 표면에 미치는 극히 미세한 힘을 이용하므로 매우 정확한 측정값을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 다른 측정 장치로 형상측정이 매우 곤란한 소프트렌즈를 원자간력을 이용한 트리거 방식으로 측정하였다. 기존의 3차원측정기를 이용하게 되면 이 제품은 부서지거나 변형이 됨으로 인해 측정 자체가 대단히 어렵다. 실제로 본 실험에 사용된 제품에 대해 3차원 측정기를 이용한 측정을 시도하였으나 원활한 측정을 수행하는 것이 불가능하였다.

Fig. 7은 렌즈 위를 100㎛간격으로 상하 좌우로 이송을 하며 측정을 한 측정결과이다. 렌즈의 구형 최상측을 측정을 한 것으로 가장 높은 곳을 중심으로 원형의 형상을 그리고 있다. 높이전체의 절대차이는 100㎛이고 렌즈의 표면이 가진 굴곡이 나타나 있다[9].

## 4. 원자간력을 이용한 트리거용 프로브

### 4.1 형상측정 트리거 개요

본 연구에서 사용한 원자간력 현미경은 탐침의 구조적 한

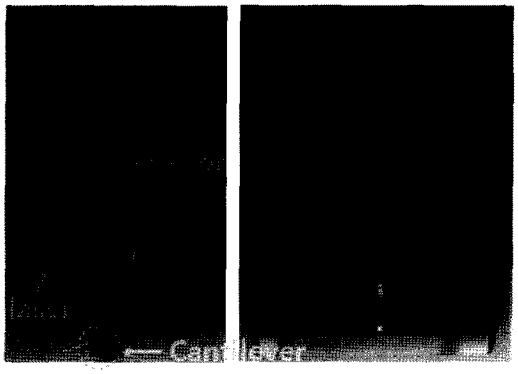

**Fig. 8 Conceptual Plot of the Atomic Force Based Trigger Sensor for Shape Measurement**

계로 인해 시료의 전 방향 측정이 불가능하다. 이와 같은 문제점을 해소를 위해 여러 방안을 제안하였으나[4] 일반적인 3차원측정기 트리거 프로브로 사용에는 적절하지 않았다.

그럼에도 불구하고, 앞에서 정리한 결과를 토대로 볼 때, 원자간력을 이용한 트리거 방식의 재현성과 정밀성이 매우 우수할 뿐만 아니라 기존의 접촉식 프로브가 갖는 단점, 즉 접촉력에 따른 변형이나 시료의 파손 등을 방지할 수 있는 매우 바람직한 방식임을 알 수 있다. Fig. 8은 3차원측정기에 적용될 목적으로 고안된 원자간력 트리거 장치 구상도이다. 좌측은 측정 트리거 센서를 개념적으로 설계하여 만든 구상도이며 우측의 그림은 측정 실험을 위하여 구성한 실험장치 셑업에 대한 그림이다.

형상측정 트리거 센서의 경우 캔틸레버의 끝단에 탐침을 두어 원자간력에 의해 변형될 수 있도록 하였고, 캔틸레버를 장치들에 대해 90°로 설치하여 측정면적을 확대하였으며 길게 내려진 캔틸레버 장착장치를 이용하여 측정 높이를 증대하였다. 탐침의 접근성을 용이하도록 하기 위해 광학계를 윗방향에 배치하였다. 4분할 다이오드센서와 레이저를 장착하였고 제어할 컨트롤 박스를 상측에 배치하였으며 반사경을 캔틸레버 장착장치에 연결하여 구조를 소형화하였다. 이와 같은 구성은 전체를 하나의 키트로 만들어 3차원측정기의 기존 접촉식 프로브를 대체할 수 있는 형식이다. 이 형상측정 트리거센서의 개념에 근거하여 실험을 위한 장비를 개발하여 검증하였다.

### 4.2 측정 장치 및 결과분석

측정 장치는 Z축 이송계, 헬륨-네온 레이저, 4분할 다이오드를 주요 부품으로 이용하여 구성하였다. 제작된 실제 측정장비는 Fig. 9에 나타나있다. Z축 이송장치 컨트롤러의 분해

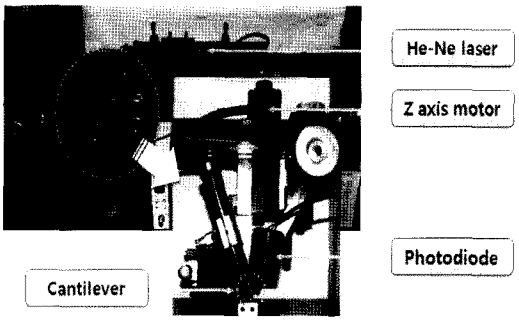


**Fig. 9 Experimental Setup with Atomic Force Trigger System**

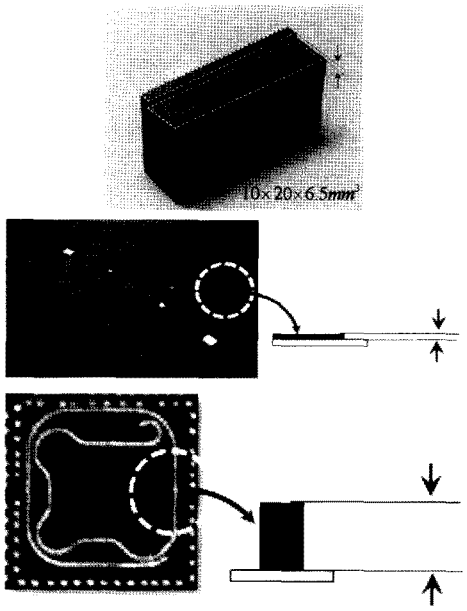


**Fig. 10 Test sample measurements**

능은 1㎛이고 X, Y축의 이송은 마이크로미터가 장착이 된 소형 스테이지를 이용하여 수동 이송장치를 설치하였다. X, Y축은 측정위치로 이송한 후 고정하여 측정하도록 하였다. 시스템의 단순화를 위해 반사경을 설치하지 않았다. 제작된 상태에서 측정에 필요한 정도의 출력을 얻을 수 있어 추가적인 신호증폭은 배제하였다.

측정시료로 Steel Bar, CD, Bumping Wafer를 고려하였다. Fig. 10에 나타낸 바와 같이 대상 물체 특정부분의 높이 차이를 반복 측정하였다. 측정결과는 Table 1에 나타나있다. 원자간력 현미경과 제작된 트리거에 의한 값은 2㎛정도의 일정한 차이를 보여주고 있다. 결과에서 보이는 일정한 차이

**Table 1 Measured Step Heights**

| Method | Type | Height(㎛) |
|---|---|---|
| Atomic Force Microscope | Steel | 530.30 |
| | CD | 50.69 |
| | Bumping Wafer | 44.97 |
| Atomic Force Trigger | Steel | 532 |
| | CD | 52.42 |
| | Bumping Wafer | 47 |

는 제작된 측정 시스템의 오차로 추정된다. 오차의 주요 요인은 원자간력 현미경과는 달리 외부환경이나 외란 차단이 가능하지 않은 개방공간에서 측정되었고, 사용장치의 정밀도 및 해상도가 상대적으로 낮기 때문으로 생각된다.

특히 측정 장치의 직각도가 정밀하지 않으며 해상도가 다소 떨어지는 것이 오차의 주요 요인으로 작용한 것으로 보인다. 즉, 장비에 사용이 된 이송장치의 분해능이 1㎛로 원자간력 현미경의 분해능인 0.4㎛과 보다 2배 이상 크기 때문에 이는 일정부분의 오차에 기여하였을 것으로 판단된다. 이상 열거한 오차 원인들은 장치의 제작과정을 통해 충분히 개선할 수 있는 사항으로 생각된다.

이상의 측정결과에 근거하여 보면 제안된 트리거 장치를 이용하여 형상 측정을 할 수 있다면 기존의 접촉식 트리거 장치를 사용할 수 없거나 보완해야하는 다양한 분야에서 널리 효율적으로 활용이 가능할 것으로 기대된다.

## 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 3차원측정기의 접촉식 프로브를 대체할 수 있는 원자간력 프로브 개발을 위해 원자간력 프로브에 의한 트리거 성능과 기존 3차원 측정기의 접촉식 프로브를 비교하였다. 실험 결과 3차원측정기 접촉식 프로브 보다 우수한 결과를 보이고 있음을 확인하였다. 이와 같은 실험결과를 토대로 캔틸레버형의 탐침을 이용한 트리거 프로브를 구상하였다. 새롭게 제안한 시스템은 측정 정밀도가 높을 뿐만 아니라 기존의 접촉식 프로브에 비해 저비용으로 구성이 가능할 것으로 예상된다. 또한 기존의 접촉식 프로브의 내재적 문제인 접촉력에 의한 변형이나 측정오차 등을 대폭 개선할 수 있을 것으로 기대된다. 특히, 소프트렌즈와 같이 표면의 변형이나 손상 등의 문제점이 있는 시편에 제안된 측정 방법을 이용하면 이와 같은 한계를 극복할 수 있다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부에서 지원하는 마이크로팩토리 사업의 연구비 지원에 의해 이루어졌으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

(1) Song, K. S., Kwon, K. H., Park, J. J., and Cho, N. G., 2003, "A study of development for contact CMM probe using three-component force sensor," *Journal of the KSPE*, Vol. 20, No. 8, pp. 101~107.

(2) Cho, N. G., Lee, J. H., and Choi, M. Y., 1999, "An Error Compensation in Rough Surface Measurement by Contact Stylus Profilometer," *Trans. KSMTE*, Vol. 8, No. 1, pp. 126~134.

(3) Hong, S. W., Ko, M. J., Shin, Y. H., and Lee, D. W., 2005, "Development of a measurement system for the surface shape of micro-parts by using atomic force microscope," *Trans. KSMTE*, Vol. 14, No. 6, pp. 22~30.

(4) Shin, Y. H., Jung, P. G., and Hong, S. W., 2006, "A spherical shape measurement by using atomic force microscope," *Proc. of the 2006 KSMTE Fall conference*, pp. 196~201.

(5) Hong, S. W., Shin, Y. H., Jung, P. G., and Lee, D. W., 2006, "Shape measurement for meso-scale objects using atomic force microscope," *The 2nd International Conference for Positioning Technology*, pp. 128~131.

(6) Yoo, S. B., Chang, I. C., and Kim, S. W., 2000, "Contact Probing Technique for Profile Measurement of Aspheric Lenses," *Proc. of the 2005 KSPE Spring Conference*, pp. 603~606.

(7) Meli, F. et al., 2003, "High precision, low force 3D touch probe for measurements on small objects," *Euspen Int. Topical Conference*, pp. 411~414.

(8) Lee, S. H., 2004, "Error analysis and performance improvement for flatness measurement system," MS Thesis, Kumoh National Institute of Technology, Republic of Korea.

(9) Jung, P. G., Bae, G. H., and Hong, S. W., 2007, "Soft lens measurement by using atomic force microscope," *Proc. of the 2007 KSPE Spring Conference*, pp. 665~666.