

새로운 구조의 접촉식 미세구조 프로필러

최동준*, 최재성**, 최인묵**, 김수현**

A Newly Designed Contact Profiler for Microstructure

Dong-June Choi*, Jai-Seong Choi**, In-Mook Choi**, Soo Hyun Kim**

ABSTRACT

A simple and low cost stylus profiler made of ferrite cores is developed. The devised profiler consists of a contact probe, a measuring transducer, a signal processing unit, and a motorized stage. The contact probe attached to 4-bar spring maintains sufficient stiffness to protect disturbances. An overlap-area type inductive position sensing system is selected as a measuring transducer, which has high sensitivity, repeatability and linearity. The transducer is composed of coil bundles and ferrite cores which have good electromagnetic characteristics in spite of low cost. The repeatability of the profiler with the proposed inductive sensing system is better than 50nm. Experimental results are shown that the proposed profiler can measure the line or 3D profile of an object with sub-micron features.

Key Words : stylus profiler (스타일러스 프로필러), inductive sensor(인덕티브형 센서), ferrite (페라이트), 4-bar spring (4 바 스프링), gauge block (게이지 블록), 3D measurement (3 차원 측정)

1. 서론

정밀 형상 측정 프로필러(profiler)는 산업 현장 및 학계에서 많이 사용 되어지고 있고, 많은 상용 제품이 존재하고 있는 장비이다. 프로필러의 사용 용도로는 스텝 높이, 산화막의 두께, 미소 거칠기(micro roughness), 광학 렌즈의 반경, 고밀도 회로 기관 등의 측정과 LCD 생산 공정 검사, 반도체 산업에서 웨이퍼(wafer) 검사 등에 널리 쓰여지고 있다.¹⁻⁸⁾

요즘의 연구 추세는 구조가 단순하며, 휴대 가능한 측정기의 개발과 CD pick-up 을 이용하는 등 새로운 방식의 도입과 범용으로 쓰일 수 있으며, 저가로 구성이 가능한 시스템의 연구가 활발히 진

행중이다. 수백 마이크로미터의 측정 영역에 대해, 그 측정 정밀도는 수백내지 수십 나노미터 수준에 이른다.⁹⁻¹¹⁾

본 연구의 목적은 산업 현장이나 일반 실험실 수준에서 서브 마이크로 영역의 측정이 가능하며, 초저가로 구성이 가능한 범용 3 차원 형상 측정기를 구성하고, 그 성능을 평가하는 것이다.

정밀 형상 측정 프로필러는 크게 접촉 프로브(probe)부, 측정 트랜스듀서부, 신호 처리 및 출력부와 스테이지부로 구성된다. 접촉 프로브는 외란에 강인하며 측정하고자 하는 방향으로의 움직임이 용이하도록 설계된 4 바 스프링에 의해 지지된다. 프로필러의 측정 트랜스듀서로는 레이저나 캡 센서가 이용되기도 하는데, 본 연구에서는 생산

☆ 2001년 4월 4일 접수

* LG 전자기술원 소재재료연구소

** 한국과학기술원 기계공학과

원가, 구성상의 난이도, 측정영역 등을 고려하여 인덕턴스형 측정 방식을 선택하였다. 인덕턴스형 측정 시스템은 저가로 구성이 가능하며, 선형성, 반복능이 우수하고, 측정영역 대 분해능이 우수하다는 장점을 가지고 있다. 인덕턴스형 측정 장치의 구성 재료로 사용된 것은 코일 봉치와 전자기적인 성질이 우수한 페라이트 코어이다. 신호 처리부에서는 측정 트랜스듀서에서 발생한 신호의 필터링 및 증폭을 담당하게 되고, 평면 스테이지는 시편의 평면 이송을 담당한다.

본 연구에서 고안한 측정기는 수백 마이크로미터의 측정영역을 가지면서 동시에 서브 마이크로미터 이하의 측정 정밀도를 지니고 있어서, 초정밀 측정에 범용적으로 사용될 수 있다. 무엇보다도 큰 특징은 새롭게 고안된 간단한 구조와 저렴한 생산 비용이다. 특히, 가이드를 위한 판 스프링, 출력 장치에서의 코일 봉치와 페라이트 코어를 이용하여 구성된 측정 트랜스듀서부에 드는 비용은 매우 작다.

2. 측정기의 구조

2.1 측정 트랜스듀서부

프로필러 시스템에서 많이 이용되던 기존 센싱 장치는 Fig. 1 과 같은 구조로 미소 측정에 유리하도록 감도 향상에 중점을 둔 공극 변화형 인덕턴스 센서를 기본으로 하고 있다.¹⁴⁾

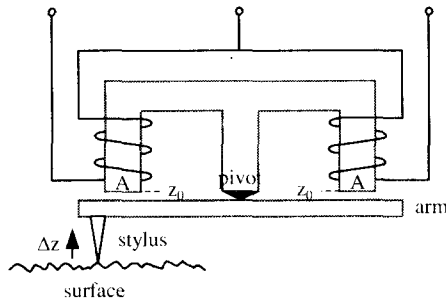


Fig. 1 Profiling system with a variable air-gap type inductive transducer

측정하고자 하는 시편의 윤곽을 스타일러스(stylus)가 따라간다. 이때 암(arm)은 피봇(pivot)을 중심으로 움직이게 된다. 암의 회전에 따라 'E'자형 자성체와 암간의 간격은 초기 z_0 에서 각각

$z_0 + \Delta z$ 와 $z_0 - \Delta z$ 로 변하게 된다. 식 (1)은 입력 변위에 따른 인덕턴스 값의 차와 측정하고자 하는 변위와의 관계를 나타내는데, 입력 Δz 와 인덕턴스 값의 차 ($L_2 - L_1$)과의 관계는 비선형 관계이다.

$$L_2 - L_1 = \mu_0 N^2 A \frac{2\Delta z}{z_0^2 - \Delta z^2} \quad (1)$$

여기서, N 은 코일의 턴수(turn number), μ_0 는 투자율(permeability), A 는 암과 맞닿는 자성체 단면의 면적이고, Δz 는 입력변위가 된다.

이러한 방식은 높은 감도를 얻을 수 있는 반면, 선형적인 구간이 전체 측정 영역에 비해 매우 작다. 이에 따라 선형기(linearizer)와 같은 추가 전기 회로가 필요함은 물론이요 선형성 확보를 위한 교정(calibration) 과정이 필요하다.

Fig. 2 는 새롭게 개발하여 본 스타일러스 프로파일러에 탑재된 면적 변화형 인덕턴스형 측정 시스템의 그림이다.

초기 설정 공극(l_0)는 일정하게 유지되고, 측정하고자 하는 변위 Δz 에 따라 출력이 발생하게 된다. 코어는 입력 변위와 동일한 방향인, Z 방향으로 움직이게 되며, 발생하는 두 코어의 인덕턴스 값의 차와 입력 변위 Δz 는 서로 비례하는 관계로서, 전체 측정 영역은 코어의 폭에 비례한다.¹²⁾

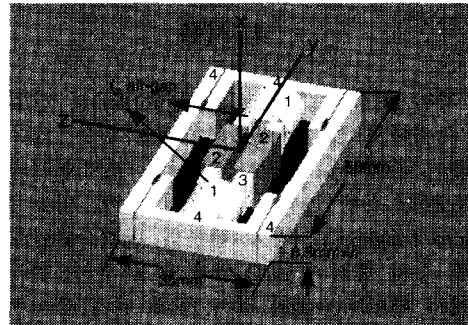


Fig. 2 Variable overlap-area type inductive type transducer; where, 1, 2: coil, 3: core, 4: ferromagnetic blocks

식 (2)는 시스템의 인덕턴스 값의 차와 입력 변위 Δz 와의 관계를 나타낸다. 여기서 식 (1)과는 달리 Δz 와 ($L_2 - L_1$)과의 관계는 선형 관계이다.¹³⁾

$$L_2 - L_1 = \mu_0 N_2^2 \frac{h \cdot \Delta z}{l_g} \quad (2)$$

여기서, N_2 는 위치탐지코일(Fig. 2에서 2)의 권선수(turn), h 는 자성체 높이, l_g 는 공극(air-gap)의 크기이다.

새롭게 개발된 측정 트랜스듀서부는 전자기적인 성질이 우수하며, 저가인 MnZn 계열의 페라이트 코어를 사용하였다. 페라이트 코어는 투자율이 높고, 내부 저항(resistivity)이 커서, 자기장을 강하게 발생시키고, 내부 유도 전류의 발생이 작아서 에너지 손실이 작다. 이러한 우수한 전자기적 성질을 바탕으로 직결한 모델링과 기초 실험을 통하여 장착된 측정 트랜스듀서의 감도와 선형성 오차는 각각 2289.70(mV/V/mm)와 $\pm 0.075\%$ 이하로 감도와 선형성이 매우 우수하다.

2.2 접촉 프로브부

접촉 프로브에서는 교환이 가능한 축침 스타일러스가 사용되며, 측정하고자 하는 시편의 윤곽을 따라가며 변위 입력 정보를 발생한다. 측정하고자 하는 재질과 크기에 따라 수백 마이크로미터 정도의 직경을 갖는 루비볼(ruby ball) 스타일러스¹⁵⁾, 전해 가공 축침¹⁶⁾¹⁷⁾, 또는 다이아몬드 축침 등을 측정 시편과 측정 목적에 따라 직결하게 사용하게 된다.

이러한 스타일러스의 가이드를 위해서 4 개의 바로 이루어진 환 스프링을 접촉 스타일러스에 연결하였다.

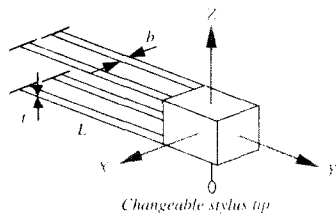


Fig. 3 Stylus tip probe attached to 4-bar spring

4 바 스프링은 측정하고자 하는 입력 변위 방향인 Z 축으로의 강성은 작아야 무른 시편에서도 힘 조절기구와 같은 기구의 추가 설치 없이 사용 가능한 재질이 다양하게 된다. 반면, 평면 방향으로

로의 강성은 커야 일정한 평면 샘플링이 가능하게 된다. 즉, 높이 방향으로 작은 강성을 지녀서 작은 접촉력으로 시편의 윤곽을 따라가며, 평면 방향으로 외란이나 충격에 강인 하도록 하는 것이 프로파일러 시스템의 재현성(fidelity)과 반복성(repeatability)의 향상에 기여하게 될 것이다.

환 스프링의 재질로는 베릴륨동(Be-Cu)을 사용하였다. Fig. 3에 접촉 스타일러스와 4 바 스프링의 연결 상태 및 설계 변수를 도시하였다.

4 바 스프링은 폭, 길이, 두께 등과 같은 설계 변수들의 적절한 선택으로 강성, 고유진동수 등의 조절이 가능하다. 4 개의 지지 스프링을 1 개의 등가의 스프링으로 치환하고, 스프링의 끝 단에 집중 질량이 달려 있는 것으로 모델링 하면, 다음과 같이 각각의 방향으로의 4 바 스프링 상수를 얻을 수 있다.

$$K_x = \frac{48EI_x}{L^3} \quad (3)$$

$$K_y = \frac{4Ebt}{L} \quad (4)$$

$$K_z = \frac{48EI_z}{L^3} \quad (5)$$

여기서, E 는 바의 탄성계수, I 는 질량 관성 모멘트 b 는 바의 폭, t 는 바의 두께, L 은 바의 길이이다.

Fig. 4는 매개 변수 b, L 에 대한 Z 축 방향으로의 강성의 분포를 모의 실험한 결과이다. b 만을 증가하는 경우 Z 축 강성은 증가하고, L 만을 증가하는 경우 Z 축 강성은 감소하게 된다. 또한, 두께 t 의 증가 시 강성은 더욱 증가한다.

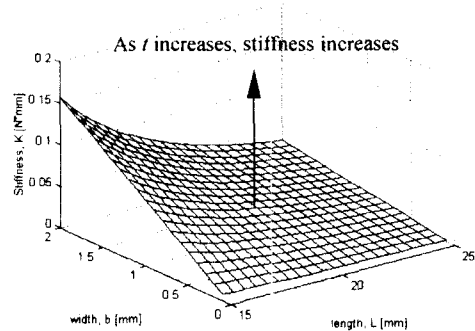


Fig. 4 Stiffness according to system parameters, L, b, t

Z 방향에 대한 X, Y 방향으로의 강성비는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{K_x}{K_z} = \frac{b^2}{t^2} \quad (6)$$

$$\frac{K_y}{K_z} = \frac{L^2}{t^2} \quad (7)$$

식 (6), (7)에서 보는 바와 같이, Z 방향 강성에 대해서 X 방향으로의 강성을 높이기 위해서는 t에 대해서 상대적으로 b를 크게 하고, Y 방향으로의 강성을 높이기 위해서는 t에 대해서 L을 길게 해야 한다.

폭이 0.5mm, 두께가 0.08mm, 길이가 23.5mm인 경우 Z 방향에 대한 X 방향 강성비는 (6.25)²이고, Z 방향에 대한 Y 방향의 강성비는 (293.75)² 배가 된다. 이 값들은 판 스프링의 소재, 형상 및 치수 선택을 위한 참고가 된다.

제작된 판 스프링에 대해 1.0kHz 까지의 주파수에 대한 실험 결과 Z 방향으로의 고유주파수는 18.8Hz가 나왔고, X 방향으로 102.6Hz가 나왔다. Y 방향으로 측정 주파수 범위를 넘어서 고유주파수를 얻지 못했다. 실험 결과에 따르면 Z 축에 대한 X 축 강성의 비는 (5.46)²이 나왔다. 이는 Z 축에 비해 X 축으로는 고유 주파수 및 강성이 각각 5.46과 (5.46)²만큼 더 크다는 것을 의미한다. 이론치와 실험치와의 약간의 차이가 발생하고 있는데, 이는 재료가공시의 치수오차 및 측정시의 오차로 발생하는 것으로 사료된다.

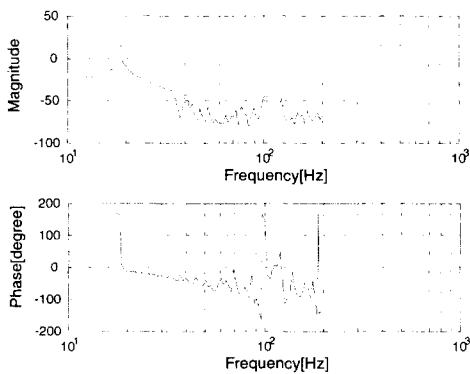


Fig. 5 Frequency responses of the 4-bar spring

Fig. 5에 Z 축 방향에 대한 주파수 응답 곡선을 도시하였다. 공진 주파수는 스프링 상수가 커지거나, 4바 스프링의 전체 유효 질량이 작아지면, 증가한다.

2.3 측정 트랜스듀서부와 접촉 프로브부의 결합

출력 발생부는 코어의 움직임에 따라 출력 크기가 결정된다. 따라서, 코어는 시편의 윤곽을 직접 추종하게 되는 접촉 프로브의 움직임과 비례하여 움직여야 한다. 접촉 프로브와 코어의 동일한 움직임이 발생하도록 박판을 사용하여 Fig. 6에서와 같이 서로 고정하여 조립하였다. 4바 스프링으로 지지되는 스타일러스 팁부는 두개의 박판(Plate #1, #2)으로 측정 트랜스듀서부의 코어와 체결된다. 즉, 접촉 프로브의 스타일러스 팁과 측정 트랜스듀서 내의 코어는 함께 4바 스프링에 의해 지지 및 가이드 된다.

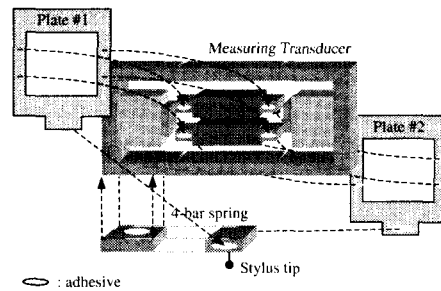


Fig. 6 Exploded view of the proposed profiler

2.4 신호 처리 및 출력부와 평면 구동 스테이지부

Z 축의 움직임에 대한 트랜스듀서의 출력은 인터페이스 보드의 16 비트 AD 변환기(Advantech 사 PCL-816)를 통해서 받아들여지며, 적절한 필터링과 증폭을 거친 후 데이터로 저장된다.

Fig. 7은 제작된 3차원 형상 측정 프로파일러 시스템의 사진이다. 시편의 평면 이송을 위해서 광학 마이크로 스테이지(Newport 사 M462)와 마이크로 스텝핑 모터(Oriental 사 CFK545A)가 사용되었다. 모터축과 마이크로미터의 축은 올덤 커플링(oldham coupling)을 사용하여 축 이음을 하였다. 광학 스테이지의 구동역은 25mm×25mm 이고, 모

터는 500ppr (pulses per revolution)에서 125,000ppr 까지 선택적으로 미소 스텝 운동이 가능한 장치이다. 본 연구에서는 한 회전당 5000 스텝으로 구동 되도록 맞추었고, 마이크로미터의 한회전당 500 μm 의 이송이 발생하므로, 모터축의 한 스텝당 스테이지는 100nm 씩 시편을 이송하게 된다.

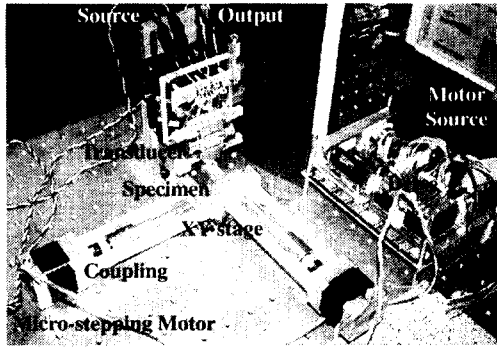


Fig. 7 Photo of the prototype system

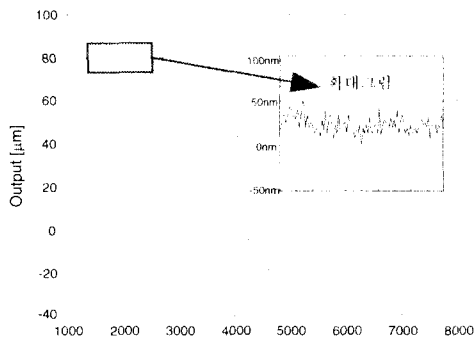


Fig. 8 The step response of 100 μm height

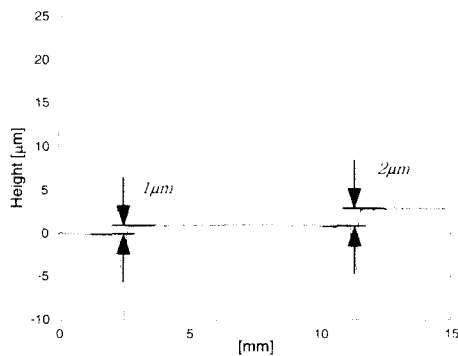


Fig. 9 Measuring results of Gauge blocks

3. 측정결과

3.1 특성 분석

구성된 저가형 3 차원 형상 측정기의 교정을 시도하였다. 입력 변위 50 μm 에 대해서 출력 전압이 10V가 나오도록 신호 증폭기의 게인을 조절하였다.

Fig. 8은 100 μm 높이를 갖는 게이지 블록 (gauge block)을 측정 한 결과이며, 편평한 측정 구간을 확대한 그림이 함께 나타나 있다. 확대된 그림에서 Peak to peak 값은 50nm 정도이다.

Fig. 9는 증폭된 출력에 대해서 더 작은 변위에서의 신호 상태를 확인하고자 서로 다른 높이를 갖는 게이지 블록들을 측정 한 결과이다. 사용된 게이지 블록들의 높이는 각각 2.000, 2.001, 2.003, 2.008, 2.020mm 이고, 일렬로 편평한 광학 글라스 (optically flat reference) 위에 정렬한 뒤 연속적으로 측정하였다.

블록의 높이 차는 각각 1 μm , 2 μm , 5 μm , 12 μm 이다. 그림으로부터 1 μm 의 높이차도 명확하게 구

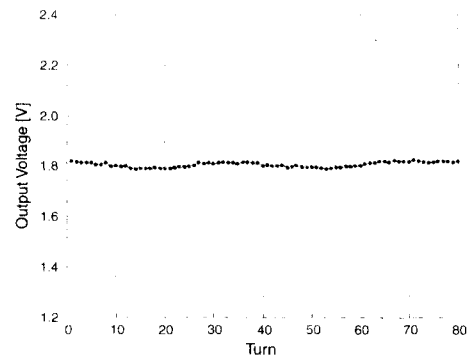
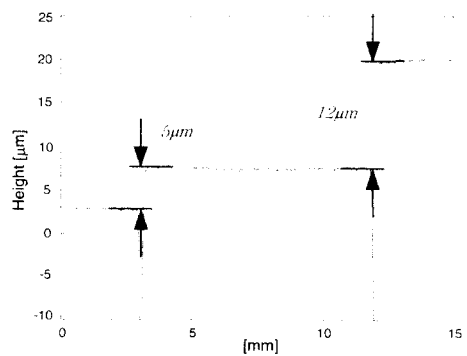


Fig. 10 Time drift of the prototype instrument



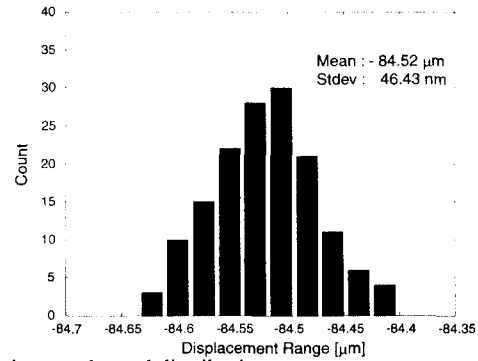
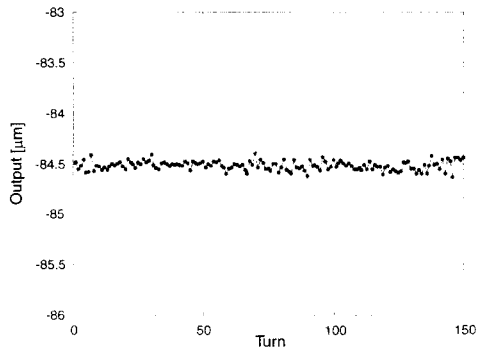


Fig. 11 Repeatability test: measuring results and distribution

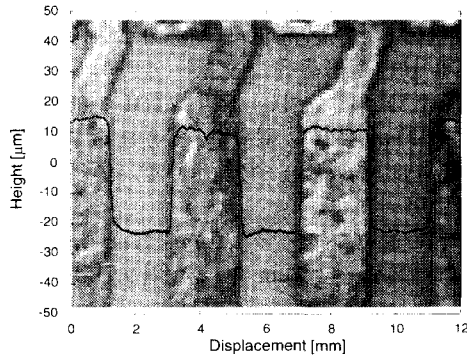


Fig. 12 Measuring result of scratched PCB

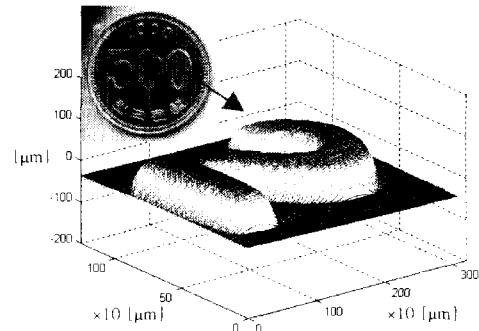


Fig. 13 3D profile of the digit '2' on a Korean coin

별할 수 있으며, 이로부터 서브 마이크로 수준의 분해능으로 측정이 가능함을 알 수 있다.

Fig. 10 은 시간 드리프팅 (time drifting)에 관한 실험 결과이다. 매 1 분 마다 측정하여, 총 80 분 동안 정지 상태에서의 프로필러의 출력 신호는 10.3mV 의 변동 결과를 보인다. 변위 정보로 환산 시 51.5nm 가 된다.

Fig. 11 은 개발된 프로필러의 반복성의 확인을 위해서 정면 가공된 매끄러운 표면의 같은 지점을 연속적으로 측정한 결과이다. 모터를 구동하여 임의의 위치로부터 측정점까지 반복적으로 이송을 하였고, 출력 신호를 얻었다. 150 번의 반복 측정 결과와 측정 분산의 결과이며, 측정 결과의 표준 편차는 46nm 가 나왔다.

본 특성 분석에서 보여진 데이터는 시스템의 출력단에서 직접 얻어진 데이터로 개발된 시스템의 특성을 좀 더 명확하게 보이게 필터링 (filtering)이나 후처리(post-processing)를 행하지 않은 상태로 본 연구에서 개발된 측정기는 신호 처리를 거치지 않은 상태에서 수백마이크론의 측정영

역에서 50nm 이하의 측정정밀도를 가지고 있다.

3.2 미소 형상의 측정

계속되는 그림은 제작된 프로필러의 실제 사용에 관한 결과를 보여준다. 출력단에서 얻은 데이터는 에버리징(averaging) 기법을 사용한 필터링을 적용하여 결과를 도출하였다.

Fig. 12 는 흠이 많이 발생한 PCB (Printed Circuit Board) 기판을 5 번에 걸쳐서 반복 측정한 결과를 동시에 플롯한 그림이다. 연속된 측정을 통해서 측정기의 재현성과 반복성을 확인할 수 있었다.

Fig. 13 은 500 원 동전의 연도 부분의 일부를 측정한 것으로 3 차원 측정 결과이다. 전체 측정 면적은 3200μm×1250μm 이고, 10μm 간격으로 샘플링을 하였다.

지금까지의 실험 결과는 공기 유동 차단, 향온 및 향습 장치 등이 이루어지지 않는 일반 실험실 환경에서 행한 결과로 좀더 안정한 사용환경에서 사용하는 경우 더욱 우수한 결과를 얻을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 단순하고, 저가로 구성이 가능하며, 서브 마이크론 영역의 측정이 가능한 접촉식 3 차원 형상 측정기를 소개하였다. 새롭게 개발된 면적변화를 이용한 인덕티브형 측정 시스템을 측정 트랜스듀서로 채용하였고, 스타일러스와 측정 트랜스듀서부의 코어의 가이드를 위해서 4 바 스프링이 사용되었다. 4 바 스프링과 트랜스듀서부는 판 스프링과 페라이트 코어 및 구리 코일 봉치로만 이루어져 있어, 초저가로 구성이 가능하다.

제작된 시스템을 실험실 수준에서 서브 마이크론 영역의 측정이 가능하였으며, 수백 μm 의 측정 영역에 대해서 50nm 이하의 반복능을 가지고 있었다. 단위 높이 측정, 출력 신호의 시간 변동량 측정, PCB 기관의 측정, 3 차원 입체 형상의 결과 등을 통해서 시스템의 특성 및 실제 측정 결과를 제시하였다.

후 기

본 연구는 두뇌 한국 21 사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Web site, <http://www.taylor-hobson.com>
2. Web site, <http://www.veeco.com>
3. Web site, <http://www.tencor.com>
4. Jeff Donnelly, Winston Sze, "Stylus profilers in AMLCD manufacturing," Solid State Technology, JUNE, pp.157-160, 1996.
5. Jeffrey B et al, "Stylus NanoProfilometry: A new approach to CD metrology," Solid State Technology, June, pp. 45-53, 1999.
6. E. C. Teague, F. E. Scire, S. M. Baker and S. W. Jensen, "Three-dimensional stylus profilometry," Wear, Vol. 83, pp. 1-12, 1982.
7. Euan Morrison, "A Prototype Scanning Stylus Profilometer for Rapid Measurement of Small Surface Areas," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 35, No. 2, pp. 325-331, 1995.
8. Euan Morrison, "The development of a prototype high-speed stylus profilometer and its application to

- rapid 3D surface measurement," Nanotechnology 7, pp. 37-42, 1996.
9. V. B. Badami, S. T. Smith, et al, "A portable three-dimensional stylus profile measuring instrument," Precision Engineering, Vol. 18, pp. 147-156, 1996.
10. 熊田毅史, 三井公之, 中嶋和雄, 生田日英幸, "粗微動連動制御による表面粗さ測定に関する研究," 精密工學會誌, Vol. 63, No. 10, pp. 1439-1443, 1997.
11. K. C. Fan, C. Y. Lin and L. H. Shyu, "The development of a low-cost focusing probe for profile measurement," Meas. Sci. Technol. 11, N1-N7, 2000.
12. 최동준, 최인복, 김수현, "인덕티브형 미소 변위 측정 시스템과 응답 특성의 분석," 한국정밀공학회지, 제 18 권, 제 3 호, pp. 189-194, 2001.
13. Dong-June Choi and Seo Hyun Kim, "Flexible Inductive Transducer with Magnetic Resistance Influenced by Variable Overlap Area," Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 40, pp. 5153-5158, 2001.
14. Barry E Jones, "Sensors in industrial metrology," J. Phys. E: Sci. Instrum., Vol.20, pp. 1113-1126, 1987.
15. Web site: <http://www.renishaw.com>
16. D. K. Biegelsen, F. A. Ponce and J. C. Tramontana and S. M. Koch, "Ion milled tips for scanning tunneling microscopy," Appl. Phys. Lett. Vol. 50, No. 11, pp. 696-698, 1987.
17. R. Nicolaidis, et al, "Scanning tunneling microscope tip structures," J. Vac. Sci. Technol., A, Vol. 6, No. 2, pp. 445-447, 1988.