

공초점 원리를 이용한 3차원 표면형상 측정에 관한 연구

A Study on 3-Dimensional Surface Measurement using Confocal Principle

강영준*, 송대호**, 유원재**

Young-June Kang*, Dae-Ho Song** and Weon-Jae You**

초 록 근대 산업에서 기계 부품들의 정밀도와 표면 마무리 조건은 그 어느 때보다 더 철박하게 요구되고 있는 가운데, 표면 형상의 측정과 이해는 공학 기술자뿐만 아니라 물리학자나 화학자도 높은 관심을 갖게 되었다. 이런 상황에서 광학적 측정 방법은 opto-mechatronics의 이점을 가지고 진동 측정이나 균열, 결함의 검출 등의 분야에서 유용한 측정 방법으로 사용되고 있고, 표면 형상학의 분야에서 다시 한 번 중요한 역할을 할 것으로 기대를 받고 있다. 본 연구에서는 공초점 현미경의 원리에 대해 서술하였고, 기존의 스캔 방식 공초점 현미경보다 한 차원 개선된 3차원 표면형상 측정 시스템을 개발하였다. 그리고, 표면의 기하적인 형상에 대한 정보를 얻고 그 형상을 가시화하기 위해 컴퓨터 시스템과 통합하고 그에 필요한 소프트웨어를 개발하였다.

주요용어: 형상측정, 공초점 현미경, 초점평면, 사준빔

Abstract In modern industry, the accuracy and the surface-finish requirements for machined parts have been becoming ever more stringent. In addition, the measurement and understanding of surface topography is rapidly attracting the attention of the physicist and chemist as well as the engineer. Optical measuring method is used in vibration measurement, crack and defect detection with the advent of opto-mechatronics, and it is expected to play an important role in surface topography. In this study, the principle of confocal microscope is described, and the advanced 3-D surface measuring system that has better performance than the traditional confocal microscope is developed. Suitable fixtures are developed and integrated with the computer system for generating 3-D surface and form data. Software for data acquisition and analysis of various parameters in surface geometrical features has been developed.

Keywords: surface measurement, confocal microscope(CFM), focal plane, collimation lens

1. 서 론

최근 각종 산업이 고도로 발달함에 따라 기계 부품들의 소형화와 정밀화가 이루어지고 1970년대 후반부터 생산공학 분야에서 기계 가공의 정밀도와 생산성 향상을 꾀하면서 자동화 기술이 급진적인 발전을 이루게 되었다. 이러한 소형·정밀 부품들의 성능은 그 부품의 표면 조도 및 형상

오차에 의해 크게 좌우된다. 이에 따라 소형·정밀 부품의 품질 검사 등을 신속하면서도 자동으로 수행하기 위한 초정밀 표면형상측정 시스템의 필요성이 날이 증대되고 있다. 특히, 현대 정밀 산업의 핵심이 되고 있는 반도체 산업에 있어서 이러한 초정밀 표면형상측정 시스템은 더욱 절실하게 요구되고 있다.

표면 형상학 특히 조도와 형상은 기계 부품들의 기능적

인 성능을 결정하는 중요한 요소이다. 기계 부품의 품질은 진동, 열적 변형, 공구와 공정상의 기하 형상, 그리고 설치 및 운영 요소들과 같은 다양한 요소들의 영향을 받고 있다. 만약 기계의 결함이 어떤 단계를 넘어서면 그 제품의 기능이 영향을 받게 된다[1].

현재 표면 형상 측정을 위해 주로 사용되고 있는 방법으로는 다이아몬드 축침법[2,4], 삼각 측정을 이용한 방법 [2,3] 그리고, 레이저 간섭계를 이용한 방법[3,7,8] 등이 이용되고 있다. 다이아몬드 축침법과 같은 기계적인 접촉식 측정법은 과거 50년 이상동안 사용되어온 측정 방법으로 축침의 움직임을 전기적인 신호로 변환하여 표면 정보를 얻는다. 이와 같은 접촉식 방법은 축침의 끝이 매우 날카롭고 접촉 면적이 아주 작다. 그래서, 그 접촉 부분에 집중되는 압력으로 인해 측정 대상물에 손상이나 변형을 일으키게 된다[2,4]. 이런 이유로 요즘은 삼각 측정 방법과 동적 초점 프로파일러(dynamic focusing profiler) 그리고, 간섭계를 이용한 측정 방법과 같은 비접촉식 측정 방법이 선호하고 있다. 삼각 측정 방법은 측정 속도와 측정 범위면에서 아주 좋은 성능을 보이지만 분해능이 매우 낮은 단점이 있고, 동적 초점 프로파일러는 상당히 높은 분해능을 가지지만 측정 범위와 측정 가능한 최대 표면 경사도가 매우 작다[2]. 간섭계를 이용한 방법은 유일하게 표면을 한꺼번에 측정할 수 있는 방법으로 분해능이 아주 좋다. 하지만 그 측정 범위가 제한된다는 단점이 있다[2,3,6,7]. 그리고, 측정 대상물의 불연속적인 표면에서 2π 모호성이라는 결정적인 오차요인을 내재하고 있다[3,5,8]. 이렇듯 여러 가지 측정 방법들이 각각의 장단점을 가지고 있어서 그 단점을 극복할 수 있는 새로운 측정 방법들이 개발되고 있다. 공초점 원리를 이용한 측정 방법은 그중 가장 실용성이 큰 측정 방법으로 인식되고 있는 방법이다. 이 측정 방법은 원래 세포나 조직의 형상을 측정하기 위해 생명 공학 분야에서 사용되던 것으로 현재는 반도체 표면 검사 등에 많이 응용되고 있다. 1980년대 초반 이후 해외에서는 이 방법을 이용한 3차원 측정 기술을 개발함으로써 위에서 언급한 단점들을 극복하려는 연구를 활발히 진행하여 이미 상당한 성과를 이루었다[1,2]. 하지만, 국내에서는 이에 대한 연구가 거의 이루어지지 않고 있는 실정인어서 후발주자로서 더 많은 연구가 요구되고 있다.

본 연구에서는 공초점 현미경의 원리에 대해 서술하였고, 기존에 사용되던 점대점(point to point) 스캔 방식의 공초점 현미경을 개선하여 측정에 소요되는 시간을 줄일 수 있는 3차원 표면형상 측정 시스템을 개발하였다. 그리고, 표면의 기하적인 형상에 대한 정보를 얻고 그 형상을

가시화하기 위해 컴퓨터 시스템과 통합하고 그에 필요한 소프트웨어를 개발하였다. 그리고, 이 측정 시스템을 이용하여 수행한 3차원 측정 결과를 보이고 그에 대한 분석을 수행하였다.

2. 공초점 원리를 이용한 측정 방법

2.1. 공초점 원리

공초점 원리는 Fig. 1에서 보는 것처럼 광원에서 나오는 빔을 집속 렌즈를 통해 시료 표면에 조사하고, 시료 표면에서 반사되어 나오는 빔의 세기 변화를 광 검출기로 검출하여 전기적 신호로 변환해서 표면 정보를 획득하는 원리이다. Fig. 1에서 (a)와 (c)는 물체 표면이 초점 평면과 어긋나 있어서 물체 표면에서 반사되는 빔의 일부만이 핀홀을 통해서 광 검출기에 검출된다. 반면에 Fig. 1 (b)의 경우, 물체 표면이 초점 평면과 일치하여 반사된 빔의 전부가 핀홀을 통과하여 광 검출기에 검출된다. 그래서, 물체를 Fig. 1 (a)의 위치에서 (c)의 위치까지 이동시키면 서광 검출기로 반사되는 빔을 검출해 보면 Fig. 2와 같은 결과를 얻을 수 있다. 즉, Fig. 2의 그래프에서 곡선의 최고 점이 바로 물체 표면과 초점 평면이 일치하는 위치를 나타내는 것이다.

이러한 원리를 이용하는 공초점 현미경(CFM)은 일반적인 광학 현미경으로는 관측할 수 없는 시료 표면의 거칠기나 높이의 변화를 3차원 영상으로 얻을 수 있으며, 영상 처리 속도가 빠르고 사용에 편리하다.

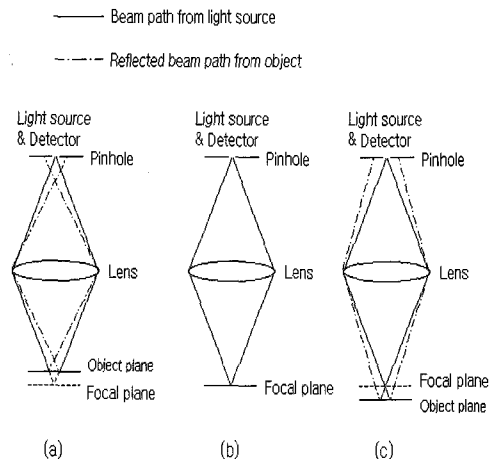


Fig. 1 The principle of confocal microscope

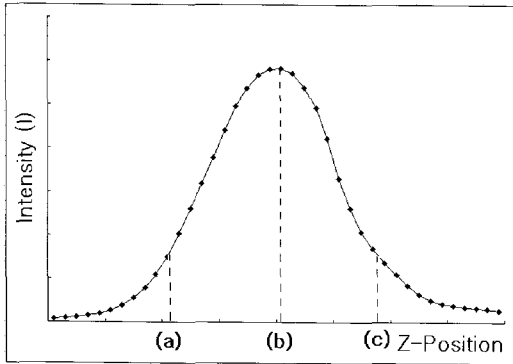


Fig. 2 Intensity variation according to the position of object surface

그런데, 공초점 현미경은 그 작동 방식에 따라 다음과 같이 구분할 수 있다.

- 1) Stage scanning 방식 : 물체를 3축 방향으로 움직이며 정보를 얻는 방식
- 2) Beam scanning 방식 : 입사광을 3축 방향으로 움직이며 정보를 얻는 방식
- 3) 회전원판 기법 : 회전원판(spinning disk)라는 공간 필터(spatial filter)를 사용하는 기법
- 4) 마이크로렌즈 기법 : 규칙적으로 배열된 마이크로렌즈와 핀홀을 사용하는 기법

2.2. 기존의 공초점 현미경

Fig. 3은 가장 간단하고 일반적인 공초점 현미경을 보이고 있다. 그림에 표시된 것처럼 이 방법을 이용하여 3차원

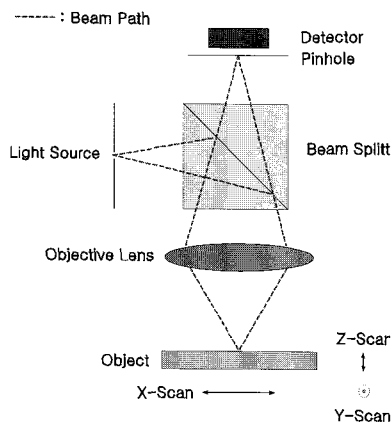
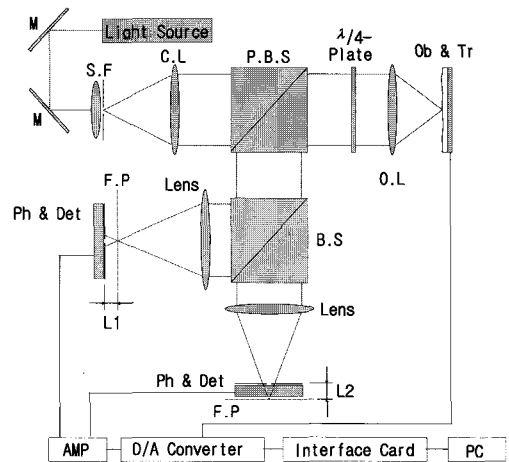


Fig. 3 Diagram of the most general confocal microscope

표면 형상을 측정하기 위해서 먼저 Z 방향 스캔을 수행하여 측정 대상물 표면 위의 한 점에 대해 Fig. 2와 같은 데이터를 얻어 그 점에 대한 Z 위치를 검출한다. 그리고 나서 X 방향의 이웃한 점으로 측정 대상물을 이동시켜 다시 Z 방향 스캔을 수행한다. 이 과정을 한 라인에 대해 수행한 다음 Y 방향의 다음 라인으로 이동하여 Z 방향 스캔과 X 방향 스캔을 반복하게 된다. 이렇듯 3축에 대해 스캔을 해야 하기 때문에 측정 시간이 많이 소요되게 된다. 이런 단점 때문에 일반적으로 회전원판 기법이나 마이크로렌즈 기법이 선호되는 경향이 있기는 하지만 스캔 방식도 많이 사용되고 있다.

3. 실험 방법

Fig. 4는 본 연구를 수행하기 위한 측정 시스템의 구성도이고 일반적으로 사용되는 stage scanning 방식에 기초하고 있다. 레이저 광원으로는 출력 1mW, 파장(λ) 632.8 nm의 He-Ne 레이저를 사용하였다. 그리고, 대물렌즈를 포함한 렌즈들은 아크로메틱 렌즈(achromatic lens)와 메니스커스 렌즈(meniscus lens)를 조합하여 구성한 렌즈로 초



- : Beam Path
- M : Mirror
- S.F : Spatial Filter
- C.L : Collimation Lens
- PBS : Polarized Beam Splitter
- O.L : Objective Lens
- Ob & Tr : Object & Translator
- BS : Beam Splitter
- F.P : Focal Plane
- Ph & Det : Pinhole & Detector

Fig. 4 Diagram of the measuring system

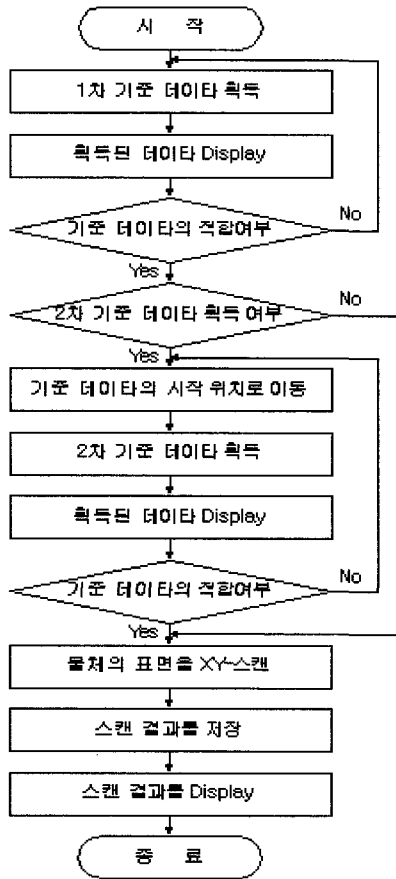


Fig. 5 Flow chart of the software for confocal microscope

점거리는 54.1mm이다. 그 외에도 광 검출기(Thorlabs 사의 DET 110), 두 종류의 핀홀($10\mu\text{m}$, $25\mu\text{m}$)을 사용하여 실험을 수행하였고 그 결과를 비교하였다. 또, 대물렌즈(O.L)에 입사되는 평행 빔의 직경을 5mm와 20mm 두 가지의 경우에 대해 실험을 수행하여 결과를 비교하였다. D/A 변환기로는 NI사의 Lab PC'를 사용하였고 물체의 표면 정보 획득과 X-방향, Y-방향 및 Z-방향 스캔을 제어하기 위해 Visual C++ 6.0 컴파일러를 이용하여 소프트웨어를 자체 개발하였다. Fig. 5는 이 소프트웨어를 개발하기 위해 실험을 진행하는 과정을 나타낸 순서도이다. Fig. 4에서 보듯이 공간 필터(S.F)를 통과하면서 확대된 빔은 시준 렌즈(C.L)를 지나면서 평행하게 진행하게 된다. 그리고, 편광 빔 분할기(P.B.S)에서 s 편광된 빔은 반사되어 소멸되고, p 편광된 빔은 그대로 진행하여 $\lambda/4$ -Plate와 대물 렌즈를 거쳐 물체까지 진행하게 된다. 물체에서 반사된 빔은

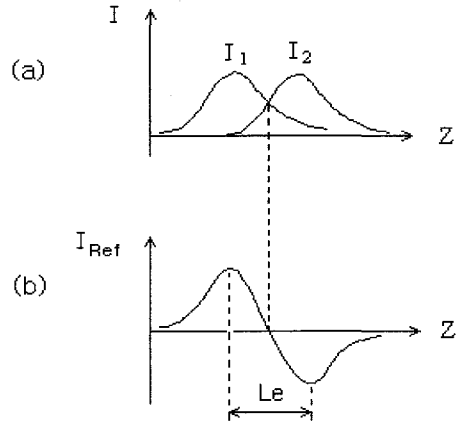


Fig. 6 Graph of the reference signal

다시 편광 빔 분할기(P.B.S)에 도달하게 된다. 하지만 그 과정에서 $\lambda/4$ -Plate를 두 번 통과하면서 p 편광된 빔이 다시 s 편광된 빔으로 바뀌게 된다. 그래서 이번에는 반사빔이 편광 빔 분할기(P.B.S)를 통과하지 않고 반사하여 빔 분할기(B.S)로 진행하게 된다. 다시 빔 분할기(B.S)에서 두 개의 빔으로 갈라져서 각각 렌즈와 핀홀(Pinhole) 등을 통해 광 검출기(Detector)에 검출되게 된다. 편광 빔 분할기 대신 일반 빔 분할기를 사용할 수도 있지만 그렇게 하면 실제로 검출기로 진행되는 빔은 레이저 출력의 $1/4$ 정도여서 효율이 많이 떨어지게 된다. 그래서 빔의 효율을 증가시키고자 편광 빔 분할기를 사용하게 되었다. 그리고, 두 개의 핀홀과 검출기를 초점 평면(F.P)과 일치시키지 않고 각각 L1과 L2만큼 떨어져 위치시키고, L1과 L2를 같게 하여 초점 평면(F.P)를 중심으로 대칭적인 위치에 두으로써 Fig. 6 (a)와 같이 I_1 곡선과 I_2 곡선을 얻을 수 있다. 이때 두 곡선이 만나는 즉, 두 검출기에서 검출되는 빔의 강도가 같을 때가 바로 렌즈의 초점 평면(F.P)과 물체의 표면이 일치하였을 때이다. 위에서 언급한 것처럼 초기의 공 초점 현미경은 물체 표면의 한 점에 대해 Z-방향 스캔을 하여 렌즈의 초점 평면과 물체 표면이 일치하는 Z 위치를 찾은 다음 XY-Translator를 이용하여 이웃한 점으로 이동한 후 Z 방향 스캔을 하는 방식으로 물체의 표면 형상을 측정하였다. 하지만 이러한 방식은 표면 각각의 점에 대해 Z 방향 스캔을 해야 하기 때문에 측정 시간이 상당히 요구되었다. 본 연구에서는 이 측정 시간을 단축하기 위해서 기존의 위치 정보 획득 과정과 다른 알고리즘을 적용하였다. 즉, 이 알고리즘을 적용하기 위해서는 물체 표면 중

Fig. 6 (b)와 같은 레퍼런스를 먼저 얻어야 한다. 첫 번째 검출기로부터 얻은 신호를 I_1 라 하고, 두 번째 검출기로부터 얻은 신호를 I_2 라 할 때, 레퍼런스 I_{Ref} 를 얻는 방법은 다양하지만, [1,8] 본 연구에서는 다음과 같은 식을 제안하여 I_{Ref} 를 얻는데 사용하였다.

$$I_{xy} = I_{Ref} = \frac{(I_1 - I_2)}{(I_1 + I_2)} \quad (1)$$

Fig. 6 (b)에서 L_e 로 표시된 구간은 이 측정 시스템의 Z 방향 측정 가능 범위를 나타낸다. 물론 좀 더 복잡한 해석 과정을 거친다면 L_e 구간을 벗어난 영역에 대해서도 해석이 가능하겠지만 본 연구에서는 L_e 구간만으로도 충분히 측정 범위를 만족하였다. 이 L_e 구간은 사용되는 렌즈의 초점 거리에 따라, 렌즈의 초점 평면과 핀홀과의 거리에 따라 조정될 수 있다. 이렇게 해서 레퍼런스가 얻어진 후에는 Z 방향 스캔 과정을 생략하고 XY 방향 스캔만을 하면서 얻어지는 I_1 과 I_2 로 (1) 식을 통해 I_{xy} 를 얻어 $I_{xy} = I_{Ref}$ 가 되는 Z_{xy} 를 결정함으로써 표면 형상을 측정할 수 있다.

본 연구에서는 다음 세 가지 실험 조건에 대해서 실험을 수행하였다.

(조건 1)

- 입사되는 빔 직경 : 5mm
- 핀홀 직경 : 25 μ m

(조건 2)

- 입사되는 빔 직경 : 20mm
- 핀홀 직경 : 25 μ m

(조건 3)

- 입사되는 빔 직경 : 20mm
- 핀홀 직경 : 10 μ m

4. 결과 및 고찰

Fig. 7에서 Fig. 9까지는 각 실험 조건에 대해서 거울 표면을 스캔한 결과이다. Mirror로 표시된 곡선은 거울 표면을 일직선으로 스캔한 것이고 object로 표시된 곡선은 거울 표면을 두 번에 걸쳐서 Z-방향 위치를 변동 시켜 스캔한 것이다. Fig. 7은 (조건 1)의 실험을 수행한 결과이다. 즉, 대물렌즈(O.L)에 입사되는 평행광선의 직경은 5mm 이고 사용된 핀홀은 25 μ m인 경우이다. 이 경우의 측정 가능한 Z-방향영역은 0.5mm이었다. 그리고 X-방향의 스캔 길이는 3mm이었다. 마찬가지로, Fig. 8은 (조건 2)의 경우 이고 Fig. 9는 (조건 3)의 경우이다. (조건 2)의 경우 측정

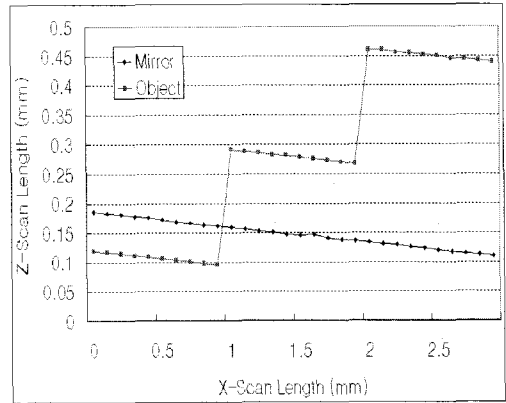


Fig. 7 Experimental results of mirror & object (Beam Dia. : 5mm, Pinhole Dia. : 25 μ m)

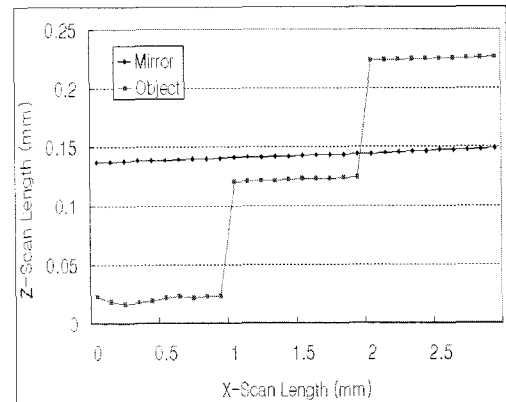


Fig. 8 Experimental results of mirror & object (Beam Dia. : 20mm, Pinhole Dia. : 25 μ m)

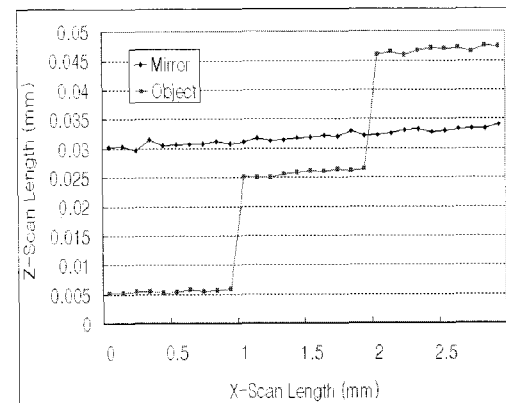


Fig. 9 Experimental results of mirror & object (Beam Dia. : 20mm, Pinhole Dia. : 10 μ m)

가능한 Z-방향 영역은 0.25mm이고 (조건 3)의 경우에는 0.05mm이었다. 두 경우 모두 X-방향의 스캔 길이는 3mm이었다. 이 세 가지의 실험에서 대물렌즈에 입사하는 빔의 크기가 클수록, 그리고 핀홀의 크기가 작아질수록 분해능이 좋아지고 그 측정 가능한 영역은 줄어들어 가는 것을 알 수 있다. 따라서, 측정 대상물의 크기에 맞추어 실험 조건을 맞추어 주는 것이 필요하다.

Fig. 10과 Fig. 11은 0.3mm 정도의 단차를 갖는 금속성 시편을 제작하여 (조건 1)의 시스템을 이용하여 측정한 결과를 보여주고 있다. 공조점 현미경에서 정보 전달자는 측정 대상물에서 반사된 빔이기 때문에 금속성 물체처럼 반사율이 낮은 물체는 그 표면에 백색 도료를 칠하여 측정을 수행하게 된다. Fig. 10은 시편의 표면을 무광택 백색 도료를 칠한 물체를, Fig. 11은 유광택 백색 도료를 칠한 물체의 표면을 3차원 측정된 결과이다. 실험은 시편 전체를 측정하지는 않고 시편 중에서 단차가 있는 부분을 중심으로 일부분만을 측정한 것으로 그 측정영역의 크기는 5 mm(X) × 3 mm(Y) 이고 분해능은 0.1 mm(X) × 0.1 mm(Y) 이다. (조건 1)의 경우 측정 가능한 Z-방향 영역이 0.5 mm 였다. 하지만 이 실험을 수행할 때는 초점 평면과 핀홀 사이의 간격(Fig. 4에서 L1과 L2)를 키워줌으로써 측정 가능 영역을 1.128 mm로 확대하였다. Fig. 10과 Fig. 11을 보면 눈에 띄게 튀어나온 peak가 많이 존재하는데 이것은 물체 표면의 거칠기에 의한 결과라기보다는 도료의 입자 크기에 의한 영향으로 추측된다. 이것은 무광택 백색 도료의 입자 크기가 유광택 백색 도료보다 커서 Fig. 10에서 Fig. 11에서 보다 peak가 더 많이 나타난 것을 보면 추측 가능하다. 이러한 오차를 제거하기 위해서 무광택 백색 도료를 칠한 물체의 실험 결과를 smoothing 처리하여 Fig. 12와 같은 결과를 얻었다. smoothing 처리에는 여러 가지 알고리즘이 사용되고 있지만 여기서는 가장 이해하기 쉬운 평균 smoothing 처리 방법을 사용하였다. smoothing 처리 과정은 오차를 줄이기도 하지만 측정 대상물의 표면 정보 또한 상실시키기 때문에 smoothing 영역을 3×3의 작은 영역으로 설정하여 수행하였다.

Fig. 13은 실험에 사용한 백원짜리 동전의 뒷면이다. 실제로 측정에 사용된 영역은 그림에서 사각형으로 표시된 부분이다. Fig. 14는 그 측정 결과를 보여주고 있다. 이 동전 역시 반사율이 낮은 물체이기 때문에 유광택 백색 도료를 칠한 후 실험을 수행하였다. 결과를 살펴보면 ~100~이라는 숫자의 아래 부분으로 갈수록 오차가 커지는 것을 볼 수 있는데 이것은 측정 시간이 길어지고 동전을 이동시키기 위한 translator에서 발생한 진동으로 광학 부품들의 정렬

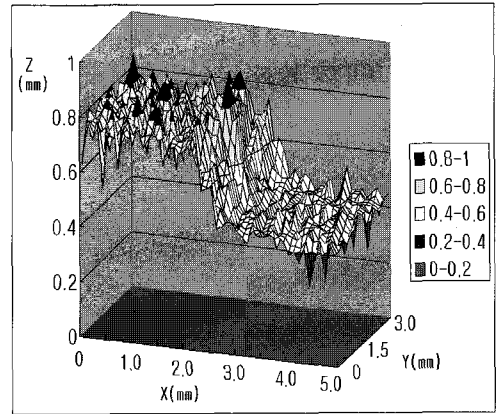


Fig. 10 Experimental result of the lustrousless painted object

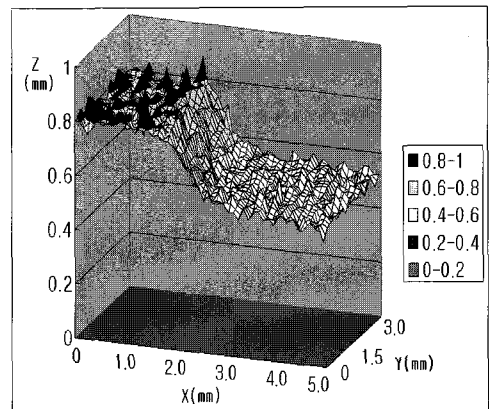


Fig. 11 Experimental result of the lustrous painted object

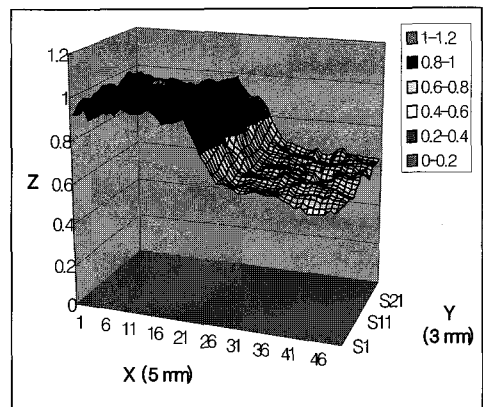


Fig. 12 Smoothed(3x3) result of the lustrousless painted object

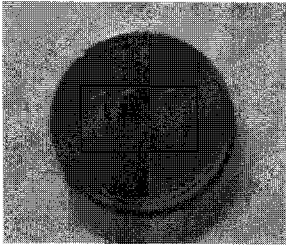


Fig. 13 Experimental specimen

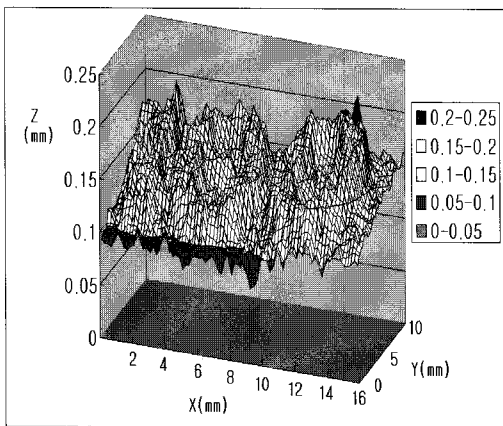


Fig. 14 Experimental result of Korean coin

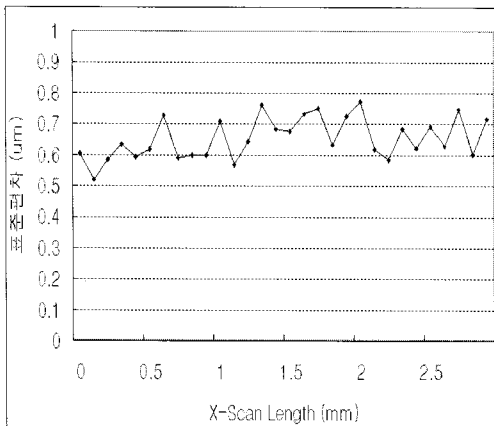


Fig. 15 Repeatability of the measuring system

상태가 악화되어 감에 따른 현상이다. 따라서, 이 방법을 실용화하기 위해서는 좀더 정숙하고 진동이 발생되지 않는 translator를 사용하여야 할 것이다.

Fig. 15는 이 측정 시스템의 반복성을 알아보기 위해 거울

표면의 같은 위치를 30번 반복해서 측정한 결과를 가지고 표준편차를 구한 결과를 보여주고 있다. 그래프에서 보듯이 이 시스템은 $0.8\mu\text{m}$ 이내의 반복성을 가지고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 3차원 형상 측정을 위해 사용되고 있는 다양한 측정 방법의 장단점과 공초점 현미경의 원리 및 종류에 대해서 알아보았다. 또, 3축 스캔이 아닌 2축 스캔만으로도 물체 표면의 3차원 형상을 측정하고 재현할 수 있는 측정 시스템을 stage scanning 방식을 기반으로 구성하여 기존에 사용해오던 공초점 현미경에 비해 측정 시간을 훨씬 단축시켰고, 편광 빔 분할기와 $\lambda/4$ -plate를 이용하여 빔의 효율 또한 개선하였다.

이 측정 시스템의 신뢰도와 성능을 알아보기 위해 실험 조건을 바꾸어 가며 실험을 수행하기도 하고, 다양한 물체를 대상으로 3차원 표면을 측정하기도 하였다. 그 측정 결과에서 얻은 본 연구의 결론을 간단히 정리해보면 다음과 같다.

- (1) 간섭계를 이용한 측정 방법에서는 2π 모호성으로 인해 측정이 불가능한 단차를 가지는 물체도 본 측정 방법으로 측정이 가능하다.
- (2) 시스템에 사용되는 핀홀의 크기가 작아질수록, 그리고 대물렌즈에 입사되는 빔의 크기가 클수록 시스템의 분해능은 좋아지지만 측정 가능 범위가 작아진다.
- (3) 거울과 같이 반사율이 좋은 물체에 대해서 상당히 정밀한 데이터를 얻을 수 있다.
- (4) 반사율이 좋지 않은 물체는 표면에 백색 도료를 칠하여 측정을 함에 따라 도료의 영향에 의한 오차가 수반된다. 이때 무광 백색 도료의 영향이 유광 백색 도료의 영향보다 크게 나타난다.
- (5) 이 시스템의 측정 가능 범위는 대물렌즈를 포함한 렌즈들의 초점 거리를 바꾸어 주거나 초점 평면과 핀홀 간의 거리를 조정함으로써 어느 정도 조절할 수 있다.
- (6) 이 측정시스템은 $0.8\mu\text{m}$ 이내의 반복성을 가지고 상당히 안정적으로 측정을 수행한다.

본 실험을 수행하면서 translator에서 발생하는 진동의 영향으로 광학 부품들의 정렬 상태가 악화되는 것을 볼 수 있었다. 따라서 좀더 안정적인 translator의 사용이 필요하다는 것을 알아냈고, 또한 측정 방법을 개선하여 측정에 소요되는 시간을 단축시키기는 했으나 이 시스템 역시 스캔 방식을 벗어나지는 못했기 때문에 아직은 측정 시간이

다소 길다. 하지만, 더 나은 성능의 data acquisition board 나 translator를 사용함으로써 측정 속도를 좀더 개선할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Ganesha Udupa, M. Singaperumal, R. S. Sirohi, and M. P. Kothiyal, "Characterization of surface topography by confocal microscopy," *Meas. Sci. Technol.* 11, pp. 305-314, (2000)
- [2] F. Laguarda, I. Al-Khatib, and R. Artigas, "Laser profiler based on the depth from focus principle," *J. Opt.* 29, pp. 236-240, (1998)
- [3] Mitsuhiro Ishihara, and Hiromi Sasaki, "High-speed surface measurement using a non-scanning multiple-beam confocal microscope," *Opt. Eng.* 38(6), pp. 1035-1040, (1999)
- [4] D. K. Hamilton, and T. Wilson, "Three-Dimensional Surface Measurement Using the Confocal Scanning Microscope," *Applied Physics B*, Vol. 27, pp. 211-213, (1982)
- [5] M. J. Downs, W. H. McGivern, and H. J. Ferguson, "Optical system for measuring the profiles of super-smooth surfaces," *Precision Engineering*, Vol. 7(4), pp. 211-215, (1985)
- [6] Peisen S. Huang, and Xiaorong R. Xu, "Design of an optical probe for surface profile measurement," *Opt. Eng.* 38(7), pp. 1223-1228, (1999)
- [7] Fieguth P. W. and Staelin D. H., "High-accuracy profiler that uses depth from focus," *Applied Optics*, Vol.33, pp. 686-689, (1994)
- [8] H. J. Tiziani, "High resolution optical surface topography measurements," *Proceeding of SPIE*, Vol. 2252, pp. 23-32, (1993)