

초소형 공초점 현미경의 제작과 금속의 구조 측정

Measurement of metal materials structure by using the manufactured Scanning Confocal Microscopy

✉서명희¹, 김종배¹, 권남익²
✉Myeong Hee Seo¹, Jong Bae Kim¹ and Namic Kwon²

1 고등기술연구원 로봇생산기술센터 (Center for Robot technology & Manufacturing, Institute for Advanced Engineering.)

2 한국외국어대학교 물리학과 (Physics, Hankuk Univ. of Foreign Studies)

✉ Corresponding author: sign0924@iae.re.kr, Tel: 031-330-7163

Manuscript received: 2008.2.25 / Revised: 2008.9.5 / Accepted: 2008.9.7

We demonstrate the operation of an apparatus that we call the laser scanning confocal microscopy. It is valuable tool of the investigations for imaging process. We measured the thin metal structure through the SCM manufacture. Confocal microscopy offers several advantages including shallow depth of field, elimination of out-of-focus glare, and the ability to collect serial optical sections from thick specimens than conventional optical microscope. This research is manufactured of scanning confocal microscopy and after measured of metal materials structure.

Key Words: Microscopy (현미경), Confocal (공초점), SCM (공초점 현미경), Metal (금속), Resolution (분해능), Image (영상)

1. 서론

공초점 현미경은 단일과장의 레이저가 조리개를 통과하면서 초점과 맞지 않는 빛은 제거되고 초점과 일치하는 빛만을 검출기에 전달하는 기술로서, 재료 공학은 물론 생물학이나 의학 분야에 이르기까지 광범위하게 쓰일 수 있는 도구이다. 기존의 광학 현미경과는 달리 광원을 레이저로 사용하여 분해능이 높은 고해상도의 이미지를 얻을 수 있다. 공초점이란 개념은 1957년 하버드 대학의 연구원인 Marvin Minsky에 의해 처음 소개되었으나, 그로부터 10년 후인 1967년에야 최초로 염색되지 않은 신경조직을 관찰하는 데에 성공하였으며, 광학 및 컴퓨터 공학의 급속한 발전과 더불어 상품화되고 다양한 형광물질이 개발되면서 1970년 말부터 실질적으로 생명과학 분야에 활용

이 가능하게 되었다.¹

이러한 공초점 현미경이 가지고 있는 장점은 기존의 광학현미경에 비해 초점심도가 낮기 때문에 초점을 벗어난 영상을 제거할 수 있으므로 선명하고 감도 높은 영상을 얻을 수 있고 조직에 대한 침해 없이 광학적인 절편영상을 만들기 때문에 기존의 전자현미경 기법에서 문제가 되는 물리적인 절편 제작 과정에서 발생하는 인위구조 (artifact)를 없앨 수 있다.

또한 광학적인 절편영상을 만들 때 수평면뿐 아니라 수직면으로도 단면의 영상을 얻을 수 있기 때문에 현미경의 광축에 평행한 영상을 얻을 수 있다. 이러한 기술은 시료를 옆에서 보는 효과를 주기 때문에 시료의 높이 변화를 관찰할 수 있다.² 이러한 공초점 현미경으로는 4분할 광검출기³나 마이켈슨 간섭계⁴ 그리고 광섬유⁵를 이용

한 공초점 현미경이 연구되었다.

본 연구에서는 CD pick-up 장치의 모듈을 y 축 스캐너에 사용하여 매우 작고 간단하며 가격이 싼 공초점 현미경을 구성할 수 있었다.⁶ 공초점 현미경과 비슷한 원리가 CD player, CD-ROM driver, DVD player 장치에도 이용되고 있는데, 대물렌즈에 의해 CD 의 표면에 초점이 맞았다가 반사된 레이저 빛이 광 분할기를 통해 광검출기로 입사 되고, 초점이 맞힌 CD 의 표면에 0.11m 깊이의 홈이 있으면 공초점 현미경에서처럼 바늘구멍 광 검출기에 검출되는 빛의 세기가 달라지므로 CD 표면에 있는 디지털 정보를 재생할 수 있다. 이러한 장치들의 픽업 모듈(pick-up module)에는 대물렌즈를 레이저 진행 방향인 종축과 수직 된 방향인 횡축방향으로 움직일 수 있도록 마그네틱 갈바노미터(magnetic galvano meter)가 달려있는데, 이것을 y 축 스캐너로 사용 하였다.

공초점 현미경을 사용하면 반사되는 레이저의 양으로 시료 표면 정보를 빠르게 분석할 수 있으며 2 차원 표면 정보뿐만 아니라 3 차원 영상까지 얻을 수 있다.

2. 공초점 현미경

2.1 기존 공초점 현미경

기존의 형광현미경의 한계를 보완하여, laser 를 광원으로 이용하고 표본으로부터 발산된 형광 신호를 별도의 검출기인 PMT (Photo multiplier tube)로 받아들이고 디지털 영상으로 변환하여 관찰하는 새로운 개념의 confocal microscope⁷⁻¹⁰ 이 등장하게 되었다. 즉 confocal microscopy 에서는 laser 광원을 사용하여 표본에 표지한 형광물질에 적합한 파장대의 빛만을 조사(excitation)하여 형광물질의 발산(emission) 을 유도한다. 이때 beam splitter 등 다양한 종류의 필터를 선택할 수 있으며, 최종적으로 편 홀을 검출기 앞에 위치하여 초점이 맞은 상만을 볼 수 있도록 구성되어 있다.

2.2 일반 공초점 현미경의 장점

Confocal microscopy 는 표본 제작 시에 적당한 두께의 커버 글라스를 사용하고, 적합한 대물렌즈를 선택하며, 기존의 형광현미경에 비하여 초점에서 벗어난 부분의 상을 제거할 수 있기 때문에 기존의 형광현미경에 비하여 40% 정도의 해상도 향상을 기대할 수 있다. 이 밖에도 Confocal 의 두드

러진 장점은 재료를 기계적인 절단 없이 레이저를 사용하여 광 절편으로 상을 구성할 수 있기 때문에 컴퓨터상에서 삼차원 구조를 재현할 수 있으며, 다양한 영상 처리를 할 수 있다는 매력을 갖고 있다.

2.3 개발한 공초점 현미경

2.3.1 공초점 현미경의 설계

공초점 현미경이란, 시료에서의 초점과 검출기에서의 초점을 공유한다는 의미로 시료에 초점이 맞았을 때 가장 많은 빛이 검출되고, 초점을 벗어날수록 검출되는 빛의 양이 감소하게 된다. 이때 시료를 x 축과 y 축의 두 방향으로 스캐닝(scanning) 하면서 검출되는 빛의 양을 화면으로 구성하면 시료 표면의 2D 영상을 얻을 수 있다.

본 실험에서 광섬유를 이용하여 제작한 초소형 공초점 현미경은 기존의 공초점 현미경 방식과 비교하면 다음과 같은 장점이 있다. 두 개의 편 홀(pin hole)이 필요 없어서 광학계가 간단해지고, 광섬유를 사용함으로써 광학계 및 헤드의 크기가 작아져 소형 제작이 가능하다. 소형으로 만들면 이동이 편리하고 광학부와 헤드가 광섬유로 연결되어 있어서 유연성이 좋기 때문에 반도체 장비 등에 장착이 쉽다.

전체적인 실험 장치는 Fig. 1 과 같고, 광섬유를 직접 구동하는 레이저 주사 타입의 공초점 현미경으로 구성하였다. 본 실험에서 사용한 광원은 660 nm 파장을 사용하였고, 반경이 3 mm 인 대물렌즈를 사용하였다. 편광유지 단일모드 광섬유(single mode polarization maintaining fiber)를 사용하였고, 수평 편광 된 레이저 빔은 PBS (Polarized beam splitter)를 통과하여 광섬유로 커플링(coupling) 된다. 광섬유를 통과한 레이저 빔은 PBS(Polarized beam splitter)를 사용하여 빛을 분할하게 된다. 단순히 빔을 나누어주는 역할만 하는 BS 와는 달리 PBS 를 사용하면 수평 빔은 통과시키고 수직 빔은 반사시킬 수 있다. 이때 편광방향에 따라 빔을 바꾸어줄 수 있으며 산란 된 빛을 제거하는 효과가 있다. 그러나 직선편광이 들어오면 1/4λ plate(Quarter wave plate)에 의하여 원 편광으로 바뀌어줄 필요가 있다. 이 때 1/4λ plate 를 사용하면 수평 편광으로 입사 된 빛이 원형 편광으로 바뀐다. 이 빛이 시료에 반사되고, 반사된 빛은 회전 방향이 반대인 원형 편광인 상태로 바뀌어 다시 1/4λ plate 를 지나 수직 편광인 상태로 입사하게

된다. 따라서 PBS 에 도달한 빛은 이미 편광 된 빛일지라도 적절한 비율로 반사하게 된다. PBS 를 통하여 나온 빔은 y 축 스캐너인 볼록렌즈를 통과 하여 시료에 조사된다. 시료에서 반사된 레이저 빔은 다시 한번 더 1/4λ plate 를 통과하면서 수직 편광으로 바뀌고 광섬유를 통과한 후 PBS 에 반사 되어 APD 로 검출된다. 이렇게 검출된 신호는 0~1V 의 전압 값에 따라 흑백의 명암을 모니터에 나타내게 되는데, offset 과 gain 회로를 사용하므로 시료마다 다른 반사율을 조절할 수 있게 구성하였다.

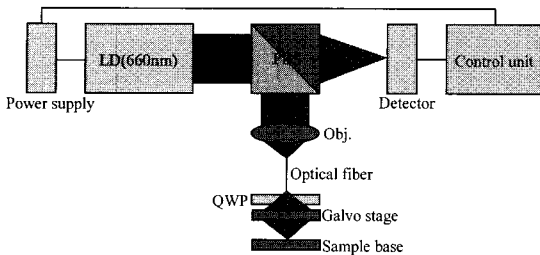


Fig. 1 The scheme of developed Confocal microscope. QWP represent the quarter wavelength plate, PBS is a polarization beam splitter, obj is a microscope-objective, respectively

측정된 레이저 반사 신호를 처리하기 위하여 variable scan 방식의 영상획득보드(frame grabber board) 인 DT3152 를 사용하였다. 영상의 시작이나 선을 표현하는 시간 및 y 축 스캐너는 톱니 파를 공급하고 각기 나오는 동기 신호 (synchronization pulses)를 이용하여 수평 동기 신호(H-sync)는 새로운 선의 시작을, 수직 동기 신호(V-sync)는 새로운 영상의 시작을 맞추는데 사용하였다.

x 축 구동은 얇은 금속판에 영구자석과 거울 (mirror)을 붙이고 자석과 솔레노이드 코일에 교류 전류를 공급하면 변화하는 자속과 금속판의 영구 자석이 상호 작용하게 되고, 이렇게 형성된 튜닝 포크에 의해 광섬유가 x 축으로 진동하게 된다.

여기에 y 축 스캐너는 CD pick-up 장치의 모듈을 사용하여 전체 헤드부분의 크기를 작고 간단하며 값싸게 제작할 수 있다.

2.3.2 레이저 빔

광학부와 모든 물질은 그 특성에 따라서 레이저 빔을 흡수하고 반사하는 양이 모두 다르기 때

문에 측정하고자 하는 물질의 특성을 파악하여 적합한 파장의 레이저를 적용하는 것이 중요하다. 레이저 빔이 재료에 입사 되면 입사 된 빔은 반사 되고 투과되며 흡수된다. 산란 된 빔은 무시할 수 있을 정도로 아주 작다. 이러한 특성 중에서 공초점 현미경은 물질의 반사 특성과 상당한 관련이 있다. 재료가 금속인 경우에는 대부분의 빔은 투과되지 못하고, 반사하고 일부는 흡수된다. 그리하여 레이저를 사용한 공초점 현미경은 금속의 영상 측정을 하는데 유용하게 사용될 수 있다.

광섬유를 지나서 광학모듈에 조사되는 레이저 빔은 광섬유를 통하여 광학모듈에 전달되어 콜리메이션 렌즈(collimation lens)를 통과하여 나오게 된다. Fig. 2는 광섬유를 통과하여 나온 레이저 빔을 나타낸 것이다. 이 빔은 콜리메이션 렌즈를 통하여 나오도록 구성하였다. 광섬유 광원이 다중모드 광섬유에 입력되었을 때 소자 끝 단에서 나오는 광은 광섬유의 길이, 입력된 빔의 크기, 광원이 소자 중심에서 벗어난 정도에 따라 빔의 효율에 미치는 영향이 다르게 나타난다. 그림 2 에서처럼 손실이 가장 적고 효율이 높은 빔 모양을 찾아서 실험에 적용하였다.

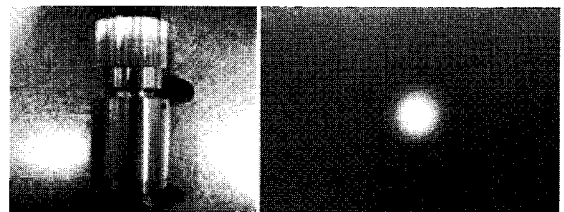


Fig. 2 Input beam shape through the collimation lens at the laser using the optical fiber

2.3.3 공초점 현미경의 소형화

본 논문에서는 개발된 공초점 현미경을 소형화하기 위하여 헤드부와 광학부를 재구성하고, 전원부 (power supply)와 디텍터 (detector) 부분의 회로도들을 구성하였다.

기존 광학 테이블 상에서 구동하던 시스템은 FC 타입이 아닌 피복이 없는 광파이버를 사용하였기 때문에 덩치가 큰 스테이지를 구동해야 하는 불편함이 있었다. 이를 마이크로 스테이지로 대체하여 프로토타입 (prototype) 으로 시스템을 변경하고, 헤드 부분은 미세한 틸팅(tilting)만을 이용하여 조작이 가능하도록 장비를 축소화 하였다. 마이크로 스테이지를 사용하면 정밀도가 높을 뿐 아

니라 기존 사양을 최대한 유지할 수 있다는 점에서 바로 적용할 수 있다.

소형화 된 시스템은 광학부분이나 헤드(head) 부분의 탈 부착이 수월하도록 제작되었으며 빔의 매개체로서 사용되는 파이버는 FC type (HB-600-Custom Patch Cord)의 광섬유로 재구성하였다. 이 광섬유는 0.14-0.18NA, 코어 크기가 3.2 μ m 이다.

이 시스템은 사용의 간편화와 컨트롤 부분의 소형화를 위하여 회로부를 재구성하였다. 두 개의 함수 발생기(Function generator)를 사용하여 제어하던 방법에서 필요한 기능만을 회로로 제작하여 시스템 내부에 장착하였고, 전원부와 디텍터 부분을 회로로 구성하여 함께 조합하였다.

2.3.4 회로부의 설계 및 구성

시스템의 간편화, 소형화를 위하여 재구성한 회로부는 다음과 같이 구성되어 있다. 전원부, 디텍터 회로부, 전류 공급기 (current source), 함수발생기로 되어 있으며, 필요한 기능만을 회로에 넣어 제작함으로써 소형 제작이 가능하게 된다.

우선, 전원부는 정 전압 (constant voltage) IC 를 사용한 것으로 출력은 15V 를 사용하였다. 이때 18V 를 사용하여야 노이즈를 최소화하고 15V 의 전압을 공급할 수 있다. 정 전압 IC 는 7815 가 사용되었으므로 아무리 앞 단의 전원 트랜스포머가 전원이 높다 해도 출력전압은 올라가지 않는다. 지정된 전압을 내어주는 정 전압 레귤레이터 IC 로서 양(+) 전압용의 7815 시리즈와 음(-) 전압용의 7915 시리즈를 사용한다. 각각의 시리즈는 15V 의 전압을 출력해주며, 보통 18V(15V+3V) 정도의 전압을 입력해야 15V 의 전압이 출력된다.

디텍터 회로부는 DC-DC 컨버터를 이용하는 데 APD 를 구동하는데 필요한 고전압을 얻기 위하여 사용하였다. DC-DC 컨버터는 반도체의 스위칭 (switching)을 이용하여 직류전류를 변환하는 회로를 말하는 것이다.

노트북, PDA, MP3 플레이어, 디지털 카메라, 디지털 캠코더 등의 휴대용 가전(portable electronics) 들은 대부분 DC-DC 컨버터를 통하여 변환해서 사용한다. 본 실험에서 사용된 APD 는 130V~160V 의 전압이 필요하므로 DC-DC 컨버터를 사용하여 전압을 공급하였다. 이렇게 구동 된 APD 는 레이저 빛의 광자를 전류로 전환시켜주는 작용을 하는데 이 전류를 PC 의 영상 처리 보드로 인식하기 위해서는 전압으로 변화시켜주어야 한다. 그래서

I-V 컨버터를 사용하여 전류신호를 전압신호로 변화시켰고, PC 에서 처리 가능한 전압으로 만들어 주기 위하여 증폭시켜주었다. 또한 PBS 와 렌즈 같은 광학소자에서 반사되는 레이저 빛은 영상 처리 과정에서 노이즈로 처리되는데, 이러한 노이즈는 DC 전압으로 Offset 회로를 사용하여 처리하였다. 이렇게 처리된 전압은 영상 처리 보드를 통하여 영상으로 처리 된다.

또한 x-y 축 스캐너에 공급된 사인파 (sine wave) 및 삼각파 (pyramidal wave)는 ICL 8038 을 사용하였다. 이와 같이 시스템의 소형화를 위하여 모든 하드웨어를 하나로 구성하였고, 이것으로 초소형 공초점 현미경 시스템을 제작할 수 있었다.

3. 공초점 현미경의 영상 분석

3.1 금속 영상 분석

공초점 현미경은 금속이나 바이오(bio)의 영상을 획득하는데 다양하게 이용된다. 본 실험에서는 금속 그리드와 실리콘 웨이퍼를 사용하였다. 금속으로 제작된 그리드는 음극에서 양극으로 흐르는 전자빔을 제어하는 구실을 하며, 보통은 니켈 선에 일 함수가 큰 금 또는 지르코늄을 도금하여 만들고, 또 그리드로부터의 2 차 전자방사를 방지한다. 다시 말해 그리드에는 그 기능에 따라 전자빔을 제어하는 제어 그리드 (control grid), 제어격자와 양극간의 정전용량을 감소시키는 차폐 그리드 (screen grid), 양극에 충돌한 전자에 의한 2 차 전자 방사를 억제하는 억제 그리드(suppressor grid)가 있다. 이러한 그리드를 제작하고 격자의 두께와 정밀도를 조사하기 위하여 현미경으로 영상을 획득하고 이를 통하여 그리드의 품질을 검사할 수 있다.

웨이퍼의 경우를 보면, 웨이퍼의 총 두께는 300 μ m 이하이고 크기는 200mm² 의 원형이다. 각 층의 두께는 1 μ m 이고, 총 두께는 10 μ m 이하이다. 이러한 웨이퍼는 높은 에너지의 레이저 출력으로 가공하고 가공한 웨이퍼를 검사하기 위하여 현미경을 이용하여 영상을 측정한다.

레이저를 이용하여 금속 샘플에 그리드로 영상화하고, 디스플레이 산업 공정에서 많이 쓰이는 웨이퍼를 사용하여 각 부분의 영상을 촬영하였다.

공초점 현미경의 영상은 영상 크기 320x240 픽셀의 영상을 초당 1 프레임 획득하여 나타낸 것이다. 이때 x-y 축 분해능은 1 μ m 이고, z 축 분해능

은 10 nm 이다.

Fig. 3 은 공초점 현미경 영상과 광학 현미경의 영상을 비교하기 위하여 각각의 이미지를 얻었고 이때 시료는 그리드 샘플 ($150 \times 120 \mu\text{m}^2$)이 사용되었다. 각각의 영상은 거의 비슷해 보이면서도 차이점이 있다. 광학 현미경으로 획득한 영상은 그리드의 표면만이 나타나고 공초점 현미경으로 획득한 영상은 표면의 미세한 부분까지 빛의 반사로 인한 선명한 영상이 나타나 입체감이 나타나는 것을 볼 수 있다.

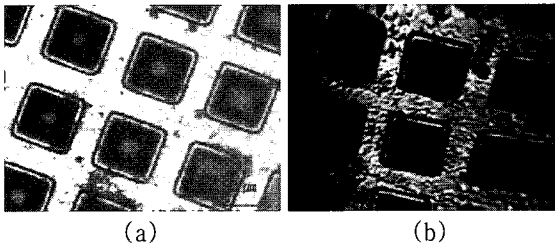


Fig. 3 Comparison and contrast of high-resolution grid ($150 \times 120 \mu\text{m}^2$) images with Scanning Confocal Microscopy (b) and optical microscopy(a)

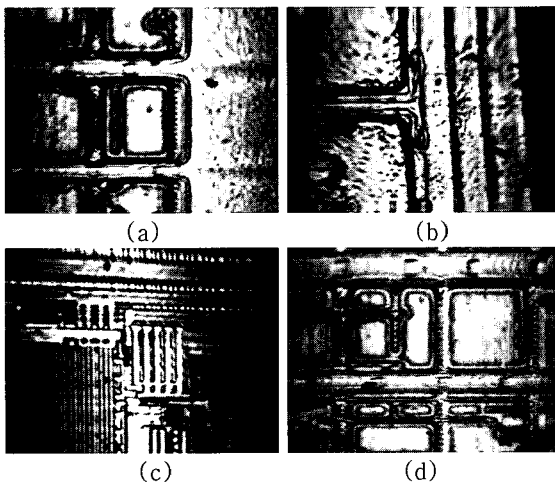


Fig. 4 The wafer images ($150 \times 120 \mu\text{m}^2$) after engraving acquired with reflected light scanning confocal microscopy (SCM) with excitation at 660nm. Images were acquired from the low-k wafer at different position (a),(b),(c),(d)

Fig. 4 는 레이저 (660nm)를 사용하여 반도체 웨이퍼($150 \times 120 \mu\text{m}^2$)를 인그레이빙(engraving)한 후

웨이퍼의 영상을 획득한 것이다. 반사된 빔을 스캐닝해서 얻은 공초점 현미경의 영상을 나타낸 것이며, 각각 다른 위치에서 영상을 획득하였고 각각의 위치에서 영상을 선명하게 나옴을 확인하였다.

Fig. 5 는 그리드 샘플의 3D 영상을 나타낸 것이다. 전체 스캔 영역은 $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ 이고, 분해능은 Fig. 3 과 동일하다. 이 그리드의 영상은 소형 공초점 현미경을 사용하여 2 차원 영상을 측정 한 후 영상 처리 프로그램을 이용하여 3 차원 영상으로 나타내었다. 3D 영상으로 변화하기 위한 분석 방법은 다음과 같다. 우선 원하는 영상의 2D 이미지를 취득한 후 등고선 기법을 이용하여 등고선 형태의 3 차원 영상을 얻는다.

컬링(culling)의 한 방법인 절두체 컬링 (frustum culling)을 사용하면 이러한 이미지의 명암 처리를 할 수 있고 카메라 기법인 칼라 변환을 통하여 3D 영상을 최종 획득하게 된다. Fig. 5 의 (a) 는 원형 그리드를 가지고 영상 처리한 것이고, (b) 는 사각형 그리드를 이용하여 영상 처리한 것이다.

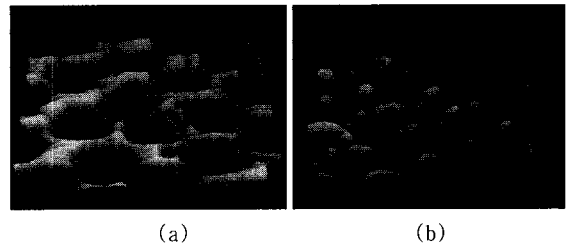


Fig. 5 Three-dimensional image of grid in confocal microscopy (a) Circle shape of grid (b) Square shape of grid

이처럼 절두체 컬링 기법을 사용하여 영상 획득을 하면 렌더링(rendering) 처리를 하지 않기 때문에 많은 처리 시간과 비용 없이 품질 좋은 3D 영상을 획득할 수 있다는 장점이 있다. 이를 통하여 레이저를 이용한 공초점 현미경은 금속 시료의 2D 영상은 물론 3D 영상까지 선명하게 얻을 수 있음을 확인하였다. 금속 시료의 경우 반사율이 높아서 공초점 현미경을 이용하기에 적합하였고, Fig. 3 과 Fig. 4 에서 밝게 나타난 부분은 반사율이 높은 부분이고 어둡게 나타난 부분은 반사율이 낮은 부분이다. 이처럼 반사율의 차를 이용하여 시료의 영상을 얻을 수가 있다.

4. 결론

본 논문에서 제작된 공초점 현미경은 기존의 편 홀 공초점 현미경에 비하여 초소형화가 가능하였다. 이러한 초소형 공초점 현미경의 장점은 편 홀 대신 광섬유를 이용함으로써 광학계의 구성이 간편해져 그 크기를 작게 구성할 수 있었다. 또한 유연성이 좋고, 기존의 방식보다 소형으로 제작이 가능하다. 소형 시스템 제작이 가능하므로 이동이 편리하고, 다른 시스템에 장착이 용이하다. 이러한 이동하기 쉬운 공초점 현미경을 사용하여 금속 시료의 2D 영상을 측정한 후 영상처리 시스템을 이용하여 3D 영상으로 얻었다.

전체 영상 크기는 최대 $200 \times 200 \text{ mm}^2$ 이고 전체 스캔 영역도 동일하게 나타난다. 이때 x 축이 1kHz 로 왕복하는 동안 y 축은 1Hz 를 움직여야만 x 축 왕복 시간에 맞추어 영상을 얻을 수가 있다. 다음과 같이 제작된 초소형 공초점 현미경은 x 축의 속도가 1kHz 이고, y 축 속도는 1Hz 로 초당 $320 \times 240 \text{ pixel}$ 의 영상을 초당 한 장씩 획득할 수가 있다.

향후 이를 이용하여 바이오 셀이나 금속 시료의 자동화 시스템에 장착하여 활용할 계획이다.

후 기

본 연구는 2007 년도 중소기업청 (Small and Medium Business Administration)의 중기 혁신 기술 개발 사업의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- Jung, G. B., "Confocal Microscopy and 3-D image analysis," *Bric Biowave*, Vol. 5, No. 3, pp. 2-7, 2003.
- Wilson, T., "Optical sectioning in Confocal Fluorescent Microscopes," *J. of Microsc*, Vol. 154, pp. 143-156, 1989.
- Born, M. and Wolf, E., "Principles of Optics 7th Edition," Cambridge University Press, pp. 517-521, 1990.
- Yoo, S. J. and Kwon, N. I., "Scanning Confocal microscope using a quad-detector," *J. of Optical Society of Korea*, Vol. 8, No. 2, pp. 165-168, 1997.
- Kim, K. S. and Kwon, N. I., "The study property on the michelson interferometric microscopy," *J. of Optical Society of Korea*, Vol. 10, No. 5, pp. 369-372, 1999.
- Kim, J. B., Ryu, K. H., Park, D. S., Noh, J. E. and Kwon, N. I., "Scanning confocal microscope by oscillation of an optical fiber," *J. of Optical Society of Korea*, Vol. 14, No. 1, pp. 80-84, 2003.
- Kim, J. B. and Kim, H. S., "Analysis of a processed sample surface using SCM and AFM," *J. of KSPE*, Vol. 23, No. 4, pp. 53-55, 2006.
- Sheppard, C. J. R. and Shotton, D. M., "Image formation in the confocal laser scanning microscope," Springer-Verlag, New York Ins., pp. 1-13, 1997.
- Tsien, R. Y. and Waggoner, A., "Fluorophores for confocal microscopy: photophysics and photochemistry," *Handbook of Biological Confocal Microscopy*, Springer, pp. 267-280, 1995.
- Sheppard, C. J. R. and Shotton, D. M., "Introduction in Confocal Laser Scanning Microscopy," Springer-Verlag, New York Ins., pp. 15-31, 1997.
- Robert, H., "Confocal optical microscopy," *Reports on Progress in Physics*, Vol. 59, No. 3, pp. 427-471, 1996.