

미세 구조물 진동과 마이크로/나노 기술

문 원 규*

(포항공과대학교 기계공학과)

1. 머리말

현재 사용되고 있는 대부분의 기계에서 진동은 제거하거나 저감해야 하는 물리량이다. 물론 오디오 스피커에서와 같이 진동을 이용하여 원하는 소리를 발생시키는 것이 주요 기능인 기기도 존재한다. 그러나 대부분의 경우에 진동은 없고자 하는 기능을 만들어 내는 과정에서 부가적으로 생기는 성가신 것이고 따라서 제거 또는 저감해야 하는 대상이다.

과거에 기계의 크기가 크거나 정밀도가 높지 않아 충분히 무시될 수 있었던 작은 변위의 진동들이 이제는 기계의 높은 정밀도가 요구되면서 적극적으로 제거하거나 저감해야 하는 대상으로 바뀌어가고 있다. 특히 마이크로/나노 기술에서처럼 구조물 진동의 진폭이 결코 무시할 수 없는 수준인 경우에는 진동의 제거가 매우 중요하다. 특히 나노 기술처럼 온도에 따라서 진동하는 분자나 원자의 운동이 측정하고자 하는 물리량에 영향을 줄 수 있는 경우에는 진동을 생각하지 않고 실험을 하거나 현상을 분석한다는 것은 어리석은 일

이 된다. 또 음향과 같은 외란도 충분히 미세 구조물을 가진시킬 수 있으므로 이를 이용하는 마이크로/나노 기술에서는 진동에 대한 이해는 매우 중요하다 할 수 있다.

한편 진동은 어떠한 시스템이 작동하는 과정에서 부가적으로 발생하는 것이므로 시스템 자체에 대한 정보를 가지고 있을 수 있다. 그 정보를 진동을 측정하여 해독해내고자 하는 연구가 계속되었고 이를 통하여 어떤 기계의 상태를 진단하고자 하는 기술이 개발되었다. 이러한 기술은 진동과 시스템의 상태의 상관 관계를 이끌어 내어 이를 이용한 센서의 개발을 가능하게 했다. 마이크로 기술에는 이렇게 진동을 이용하여 다른 물리량을 측정하는 기기들이 있는데 대표적인 것이 최근 개발되고 있는 마이크로 자이로스코프(gyroscope)이다. 마이크로 자이로스코프는 소위 micro-machining이라 불리는 초소형 기계를 만드는 생산 기술과 진동 및 동역학 기술, 전기-기계 결합 기술, 전기 회로 기술을 결합하여 각속도를 재는 매우 작은 크기의 센서로, 진동하는 물체의 속도를 이용하고 있다.

미세 구조물은 매우 민감해서 원자간의 힘과 같은 매우 미세한 힘에도 상당한 변형을 나타낼 수 있다. 원자간의 힘에 반응하여

* E-mail : wkmoon@postech.ac.kr

나타나는 미세 구조의 변형에 의한 변위는 매우 작아서 측정이 힘들다. 그래서 진동의 공진 현상을 이용하여 외력의 변화에 따른 변위의 변화를 증폭하는 기술 등이 개발되어 실용화 되었다. 나노 기술의 기반이라고 할 수 있는 원자현미경의 비접촉(non-contact) AFM(atomic force microscopy)이나 EFM(electrostatic force microscopy) 등이 그러한 예이다. 이러한 나노 기술에서 공통적으로 이용되는 것은 구조물의 공진 주파수 근처에서 진동의 진폭이 급격하게 변화하는 성질인데, 이는 정적인 변위 변화를 측정해서는 감지할 수 없는 매우 미세한 힘의 측정을 가능하게 하고 있다.

이와 같이 마이크로/나노 기술에서는 미세 구조물의 진동을 이용하거나 분석해야 할 필요가 있기 때문에, 진동 현상을 잘 이해하고 있는 엔지니어가 새로운 기회를 찾을 수 있는 분야라 할 수 있다. 그러나 현재 기계의 진동을 다룰 때에는 달리 기계적인 진동에 대한 이해나 지식만으로는 실제 문제를 해결할 수 없는 경우가 대부분이다. 왜냐하면 진동을 일으키는 가진력이 일반적인 기계 시스템에서 다루는 종류의 외력이 아니라 전자기장이나 원자간의 작용력, 압전 등과 같이 기계 구조물의 응답과 상호 작용을 하는 것들인 경우가 많고, 또 필요한 경우에 진동을 측정하는 방식도 압전이나 압저항 등과 같이 구조물에 일체화된 트랜스듀서들을 이용하는 방식이기 때문이다. 다시 말하면 미세 구조물을 이용하는 시스템에서는 센서와 액추에이터, 그리고 구조물을 각기 다른 시스템으로 분리하여 구성할 수 없고 하나의 시스템으로 취급하여 설계/제작/평가 되어야 한다는 의미이다.

본 논문에서는 위에서 열거한 특징을 가진 미세 구조물의 진동과 관련된 마이크로/나노 기술을 간단히 살펴보고자 한다.

2. 미세 구조물의 진동과 MEMS

2.1 마이크로 자이로스코프

운동의 관성을 이용하여 각속도 측정에 쓰이는 자이로스코프는 회전체를 이용한 방식과 진동체를 이용한 방식이 있는데 *micro-machining* 기술을 이용하여 제작 가능한 것은 진동을 이용한 방식이다. 마이크로 자이로스코프는 MEMS 기술이 출현하는 것과 거의 동시에 연구되기 시작하여 많은 사람들에게 의하여 오랫동안 연구되어 왔다. 마이크로 자이로스코프의 기초적인 이론은 잘 알려져 있고 진동자의 구조 설계나 각속도에 대한 진동자의 반응에 대한 응답과 이의 측정 방식도 많이 연구되어 왔으나 아직 상용화에 성공하지 못하고 있다.

마이크로 자이로스코프의 구조는 일반적으로 정전력을 이용하는 마이크로 빗살 구동기(micro electrostatic comb drive)로 가진 된다. 그림 1은 연구되었던 여러 마이크로 자이로스코프 중 하나에 대한 사진이다. 그림 1에서 진동자는 가운데 부분의 넓적한 사각형 구조물인데 이는 수평 방향으로 수kHz 이상의 주파수로 진동을 한다. 일반적으로 각속도에 대한 반응을 높이기 위해서는 진동자의 속도가 클수록 좋으므로 구조물을 고유진동수로 가진하여 진폭을 극대화하고 구조물의 고유진동수를 가능한 한 높게 되도록 설계한다. 스프링에 해당하는 보는 길이가 약 500 μm 정도 되는데, 진동자의 진폭을 늘리면 보는 길이를 구속하는 구조로 인하여 등가 스프링 계수가

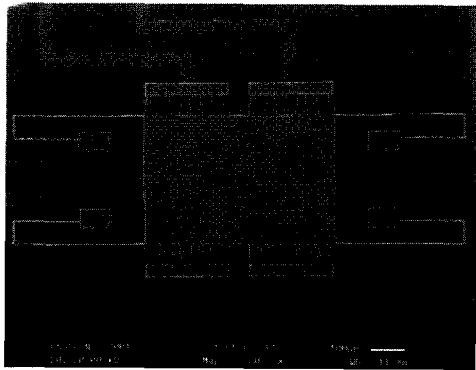


그림 1 마이크로 자이로스코프

증가하는 비선형 진동의 특징을 보여준다.

그림 1에서 예시한 마이크로 자이로스코프는 진동을 이용한 기기이지만 진동 전공자에 의하여 설계되지 않는 것이 일반적이었다. 실제로 많은 마이크로 자이로스코프 연구자들은 이의 상용화에 가장 커다란 걸림돌인 진동의 측정과 안정적인 시스템 특성을 얻기 위한 방안으로, 정확한 진동 해석과 특성 파악보다는 생산 기술 향상을 통한 해결이나 전기 회로 등의 개선 등을 염두에 두고 있다.

현실적으로 마이크로 자이로스코프와 같은 MEMS 연구에서는 진동이 주요 작동 메커니즘이라 하더라도 이와 함께 다른 종류 특히 전기적인 영향이 함께 결합하여 고려되어야 하므로 기계 진동에 대한 지식만으로는 문제 해결의 열쇠를 찾기 힘든 경우가 대부분이다. 따라서 진동에 대한 깊이 있는 지식과 함께 시스템 측면에서 문제를 볼 수 있는 지식과 시야가 필요하다.

2.2 원자현미경용 미세 외팔보의 진동

원자현미경 중에서 원자간의 힘이나 분자간의 힘과 같이 표면의 미세한 힘을 측정하여 표면에 대한 정보를 알아내는 것을 통틀어 SFM(scanning force microscopy)라 한다.

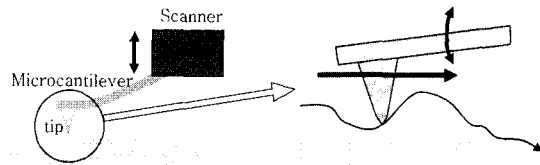


그림 2 비접촉 AFM의 원리 개략도

이의 근간이 되는 AFM은 원자간의 힘을 측정할 수 있는 매우 날카로운 탐침(probe)이 부착된 미세 외팔보의 제작이 가능해진 후에야 비로서 현실화되어 요즈음 원자간력 탐지기로 널리 사용하고 있다.

최근의 비접촉 AFM은, 접촉 AFM이 원자간의 척력을 이용하는 것과는 달리, 원자간에 작용하는 인력인 반데르발스 힘(van der Waals force)을 이용한다. 이 반데르발스 힘은 접촉 AFM에서 사용하는 힘보다 매우 작아서 이로 인해 발생하는 외팔보 변형을 정적으로 감지하기는 현재의 광학계 변위 센서로는 불가능에 가깝다. 그래서 반데르발스 힘을 간접 측정하는 방식으로 미세 외팔보의 고유진동수 변화를 이용한다. 적당한 거리에서는 반데르발스 힘이 거리에 따라서 그 크기가 변하여 외팔보의 감성이 변화하는 것과 같은 효과를 준다. 따라서 AFM probe인 미세 외팔보의 고유진동수가 이 반데르발스 힘에 의하여 변화하게 된다. 이 고유진동수의 변화를 감지하여 일정하게 유지되도록 제어하면 AFM 외팔보 끝에 부착되어 있는 탐침과 시편의 표면 간의 거리를 일정하게 유지할 수 있다.

AFM의 측정 방식은, 그림 2와 같이 먼저 미세 외팔보의 고정단을 압전체로 가진하여 반데르발스 힘을 작용시키지 않은 상태에서의 고유진동수를 찾아내고, 외팔보를 고유진동수로 진동시키면서 진폭의 변화가 없는 상

태가 유지될 수 있는 한도 내에서 시편 표면에 가장 가까운 위치로 탐침을 접근시킨다. 그리고 그 상태가 유지되도록 탐침의 높낮이를 조절하면서 시편의 표면을 주사한다. 즉, 만약 시편의 표면에 굴곡이 있으면 고유진동수가 변화하게 되고 그러면 진폭에 변화가 있으므로 그러한 변화가 일어나지 않도록 외팔보 고정단의 높이를 조절해 주는 방식이다. 이 조절한 높이가 바로 시편 표면의 모양과 같으므로 이러한 조작을 하면서 탐침으로 정해진 표면을 주사하면 그 표면의 topography를 얻게 된다.

외팔보 등의 진동 이론은 비교적 잘 알려져 있는데 반해서 미세한 물체 간에 작용하는 반데르발스 힘을 계산하는 방법은 일반적인 공학에서는 잘 다루지 않는다. 그러나 이 두 가지의 결합은 원자 현미경의 성능을 향상시켜 접촉 AFM으로는 관찰할 수 없는 것들을 측정할 수 있게 만들었다. 이러한 비접촉 AFM 기술의 개발은 엔지니어 그룹이라기 보다는 물리학자에 가까운 사람들에 의하여 이루어졌지만 이의 발전과 이를 바탕으로 한 새로운 기술의 개발은 진동 전공한 공학자들의 몫일 수도 있다.

3. 나노 기술에서의 미세 진동

최근에 나노 기술에 대한 관심이 무척 높아졌다. 원자 현미경이라 불리는 SPM (scanning probe microscope)은 기본적으로 탐침(probe)을 기계적으로 운동 시켜서 위치를 나노미터 이하의 정밀도로 변화시키면서 얻어내는 신호들을 이미지로 표현하는 것에 불과 하다. 더군다나 AFM 등 SFM에서의 probe의 원리는 기계적인 스프링 요소로 볼 수 있는 구조물의 응답을 이용하는 것이다.

따라서 기계적 운동 및 위치 제어기술은 가장 중요한 핵심 기술이 된다. 아직까지 많은 사람들이 공상으로 여기는 molecular 나노 기술의 실현을 위해서는 IBM 연구소 등에서 발표한 연구결과와 같은 매우 정밀한 위치 제어와 나노 물체를 다룰 수 있는 기술이 필요하다. 이를 위해서는 나노 세계에서 일어나는 다양한 종류의 현상들을 이해하고 제어할 수 있어야 한다. 여기서는 특히 위치 제어와 관련하여 극히 미세한 진동이, 나노 기술 실현을 위한 위치 제어 시스템에 주는 영향과, 나노 물체를 움직이거나 나노미터 이하의 분해능을 가진 이미지를 얻을 수 있는 probe의 설계에 주는 영향에 대하여 언급하고자 한다.

3.1 나노 위치 제어와 진동

앞서 언급한 바와 같이 원자 현미경에서는 probe의 위치를 나노미터 이하의 정확도로 제어해야 한다. 현재 이러한 위치 제어를 위한 구동 시스템은 압전체의 변형을 이용하여 만들어진다. 실제 원자 현미경에서는 압전체의 히스테리시스를 소프트웨어를 이용하여 보상해서 나노미터 이하의 정밀도를 얻어내고 있다. 그러나 이는 압전체가 포함된 구동기가 일정한 운동을 반복할 때 얻을 수 있는 것이고 한 지점에서 다른 지점으로 나노미터의 정밀도로 probe를 이동시키지 못 한다. 이러한 위치 제어 기능이 나노미터 이하의 정밀도로 반복적으로 수행될 수 있을 때 앞서 언급한 원자 조작 등을 조금 더 쉽게 시도할 수 있다.

기계 공학에서 보통 다루는 구조물이 나노미터 정도의 진폭을 가지고 진동한다면 - 물론 주파수에 따라 다를 수 있겠으나 보통 - 그것은 거의 무시할 수 있을 정도로 작은 구조 진동이다. 그러나 원자 현미경이나 이를 이용한 나노 물체 조작 시스템, 또는 몇몇 연

구 그룹들에 의하여 진행되고 있는 원자 현미경을 응용한 정보 저장기 시스템 등에서는 나노미터 수준의 진동은 시스템의 동작을 마비시킬 수 있는 진동 레벨이다. 따라서 나노 기술 응용 시스템에서는 매우 작은 진동도 저감해야 할 필요가 있다. 여기서 나노미터 정밀도가 필요한 곳은 강제 모드와 같이 시스템 전체가 진동하는 것보다는 구조물 간의 상대적 진동의 진폭이다. 그러므로 시스템의 일부분인 실제 나노미터 정밀도가 유지될 필요가 있는 부분들의 상대 위치가 외부의 진동에 의하여 변화되지 않도록 구조물과 구동기 등이 설계되어야 한다. 따라서 미소한 진동도 차단할 수 있는 능동형 방진 테이블이나 진동 저감을 위한 구조 설계가 요구된다.

위치 변화를 위하여 탐침 등을 이동시키는 구동기도 나노미터 이하의 정밀도를 가지려면 널리 쓰이고 있는 미끄럼 부분이 있는 요소가 없어야 한다. 그래서 원자 현미경 등에 사용되고 주사기(scanner)용 구동 시스템은 flexure 형의 이음새를 가진 압전체를 사용하는 것들이 대부분이다. 이러한 구동 시스템은 항상 진동 문제를 유발할 수 있다. 매우 작은 외란에 의해서도 시스템의 응답 특성이 달라질 수 있다는 의미이다. 쉬운 예로 AFM을 작동시킨 상태에서 외부에 작은 소리가 발생되면 AFM에서 읽어 들이는 topography에 변화가 생긴다는 잘 알려진 사실을 들 수 있다.

이상과 같이 나노 기술의 실현을 위한 중요한 기기인 원자 현미경의 설계 및 작동 조건 확립에는 진동 문제의 해결이 선행 과제이며 이는 새로운 도전이 시도될 때마다 새롭게 수행되어야 하는 과제이다.

3.2 SFM에서의 주사 속도

현재 하드디스크드라이브(HDD)에서 사용

하고 있는 자기 헤드 대신 SPM 용 probe를 이용하여 기록 밀도를 획기적으로 올리 고자 노력하는 것이 SPM응용 정보저장기이다. SPM 방식을 정보저장기에 이용하려면 공학적 측면에서 가장 고려해보아야 할 것이 주사 속도(scanning speed)의 한계이다. 현재 AFM에서 물질 표면의 topography를 얻기 위하여 이루어지는 주사 속도는 정보 저장기에는 너무 느리다고 판단되기 때문이다. 주사 속도의 한계를 결정하는 인자들로는, 탐침과 시편 표면 사이의 간격을 유지해야 한다고 가정할 때, 시편의 표면 거칠기, 수직 방향 간극 제어용 구동기의 주파수 특성, 미세 외팔보의 진동 특성 및 접촉력의 크기 등을 들 수 있다. 시편의 표면 거칠기는 될 수 있는 한 작게 만들려고 노력하겠지만 표면이 완벽한 평면일 수는 없으므로 어차피 주사 과정에서 탐침의 진동은 발생하기 마련이다. 이러한 진동이 시스템의 오 동작을 유발하지 않으면서도 주사 속도를 최대한 높이는 설계가 이루어져야 한다.

3.3 Tapping Mode AFM

앞서 설명한 비접촉식 AFM은 매우 미소한 반데르발스 힘을 이용하므로 이미지의 해상도가 떨어진다. 이를 보완하기 위해서 탐침을 접촉하지 않은 상태에서 진동을 시키다가 간헐적으로 시료 표면에 접촉시키는 방식이 개발되었는데 이를 tapping(또는 intermittent contact) mode AFM이라 한다. 이러한 새로운 방식의 AFM은 비접촉식에서 이용하는 진동보다 훨씬 복잡한 형태의 진동을 다루어야 한다. 물론 이 방식의 AFM은 이미 상용화되어 널리 쓰이고 있지만 이의 성능을 향상시키고 속도를 증가시키는 등의 과제는 아직 많이 남아 있다. 이

를 제대로 하기 위해서는 미세 외팔보의 기계 진동적 특징을 제대로 이해하는 것도 중요하겠지만 탐침 끝과 표면과의 상호 작용력이 어떤 식으로 작동하는가를 이해하고 적당한 모델을 만들 수 있어야 할 것이다.

3.4 SFM Probe와 진동

SFM 기술의 대상이 표면에 있는 분(원)자와 탐침 끝에 있는 분(원)자의 상호 작용력이므로 분자의 열진동과 같이 미세한 진동도 고려해야 할 때가 많다. 실제로 원자의 조작을 극저온에서 행하는 이유는 열에너지에 의한 분자 또는 원자의 운동이 극저온에서는 매우 작아지기 때문이다. 특히 접촉 EFM(electrostatic force microscopy)에서는 topography 신호와 섞여 있는 정전력에 의한 진동 신호를 lock-in amplifier를 이용하여 골라내는데 그 신호의 크기가 매우 작으므로 열 에너지에 의한 진동과 구별할 수 있는가 등 근본적인 문제에 대한 이론적 해답을 찾고자 하는 연구도 진행되고 있다. 이는 기계 진동과는 다르지만 향후 나노 기술의 발전과 더불어 공학의 한 부분으로 자리매김할 분야인 것만은 틀림 없다.

만약 분자나 원자를 탐침을 이용하여 조작하고자 한다면 이 둘 간의 상호 작용을 정확히 측정할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 나노미터 이하의 분해능으로 탐침의 위치와 나노 물체의 상대 위치를 측정할 수 있는 시스템과 함께 이들 간의 상호 작용력에 의한 응답을 예측할 수 있는 기술이 필요하다. 이러한 기술은 아직 꿈에 불과할 수 있는 나노 기술을 현실화시키는 원동력이 될 것이며 이를 위해서는 원자 및 나노 물체의 진동 특성 규명이 꼭 필요할 것으로 생각된다. 이와 함께 양자 역학 등 기존에

기계공학과에서 다루지 않았던 분야에 대한 지식을 기계 진동에 대한 지식과 결합하는 과정이 필요할 것이다.

3.5 EFM

EFM은 시료 표면의 전기적 성질을 감지하여 이미지로 보여주는 것으로 그 원리는 다음과 같다. 매우 날카로운 탐침이 끝에 부착된 AFM probe와 같은 모양의 초소형 외팔보가 전도체(conductor)로 만들어져 있거나 전도성 표면 처리가 되어 있어 전압을 인가할 수 있다고 하자. 이러한 probe에 전압을 가하여 시료 표면에 접근시키면 시료 표면에 존재하는 다양한 종류의 전하나 시료 표면에 부가된 전압과의 전위차가 발생하게 되고 이로 인하여 탐침과 시료 표면에는 미세한 정전기력이 발생되는데 이를 측정하면 표면의 전기적 성질을 얻을 수 있다. 이때 미세한 정전기력을 측정하기 위하여 미세 외팔보의 진동이 이용된다.

그림 3에서 보는 바와 같이 표면의 전압을 V_s , probe의 팁 끝의 전압을 V , 그리고 팁 끝과 표면까지의 거리를 d_0 라 하면 팁과 표면 사이에 작용하는 정전기력의 크기는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

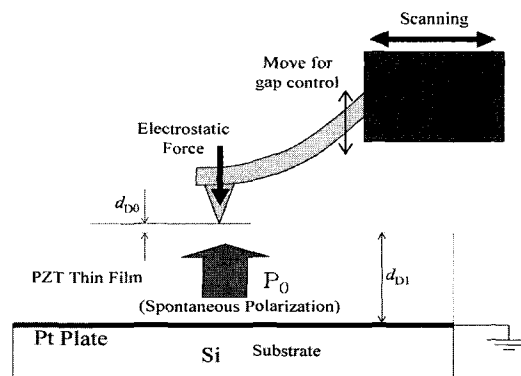


그림 3 EFM의 원리 개략도

$$F = q \cdot E = C(V - V_s) \cdot \frac{V - V_s}{d_0} = \frac{C}{d_0}(V - V_s)^2 \quad (1)$$

여기서 C 는 팁 끝과 표면 사이의 정전용량(capacitance)이다. 팁 끝에 부가하는 전압 V 가 직류전압 V_{dc} 와 교류전압 $V_{ac} \cdot \sin(\omega t)$ 의 합으로 표현되면 (1)의 정전기력은 아래와 같이 직류 성분과 ω 및 2ω 의 주파수를 갖는 교류 성분으로 이루어진다.

$$F = \frac{C}{d_0} \left[(V_{dc} - V_s)^2 + \frac{1}{2} V_{ac}^2 \right] + \frac{2C}{d_0} (V_{dc} - V_s) \cdot V_{ac} \sin \omega t - \frac{C}{2d_0} V_{ac}^2 \cos 2\omega t \quad (2)$$

식 (2)의 힘을 다음과 같이 분석하면 미세 외팔보의 변형을 감지하여 중요한 정보를 얻을 수 있다. 먼저, 2ω 성분의 진폭은 정전용량과 부가한 교류전압 진폭, 그리고 팁 끝과 시료 표면까지의 거리에 의하여 결정되는데, 부가 교류전압을 알고 있고 팁과 시료 표면 사이의 거리는 일정하게 유지되므로 정전용량, C 를 계산해낼 수 있다. 또 ω 성분은 교류전압 진폭과 정전용량, 팁 끝과 표면 사이의 거리, 그리고 직류전압과 표면 전압의 차이에 의하여 결정되는데 교류 성분 진폭과 직류전압을 알고 있고 팁 끝과 시료 표면 사이의 거리는 일정하고, 정전용량, C 는 2ω 성분에서 구할 수 있으므로 V_s 를 구할 수 있다. 좀더 쉽게 V_s 를 구하는 방법은 ω 성분이 사라지도록 직류 전압 V_{dc} 를 조절하는 것으로 이는 되먹임 제어로 할 수 있다. 이 ω 성분이 0이 되도록 하는 되먹임

제어의 제어 신호가 곧 V_s 가 되기 때문이다.

그러나 사용하는 원자현미경이 되먹임 제어 기능을 포함하고 있지 않다면 ω 성분을 그대로 보여 주는 EFM 이미지밖에 얻을 수 없다. 따라서 이런 경우에 얻은 EFM 이미지는 표면의 전압과 정전용량의 변화량에 대한 정보를 모두 포함하고 있다는 사실을 주지할 필요가 있다. 또 정전용량 C 도 박막의 전기적 성질과 두께에 따라 달라질 수 있어서 표면 전압 V_s 를 정확하게 측정할 수 없다. 그러나 이러한 작동은 탐침과 시료 표면 사이의 거리 d_0 가 일정하게 유지될 때에만 성립하는 것이므로 매우 정확하게 d_0 를 유지하는 제어가 필요하다.

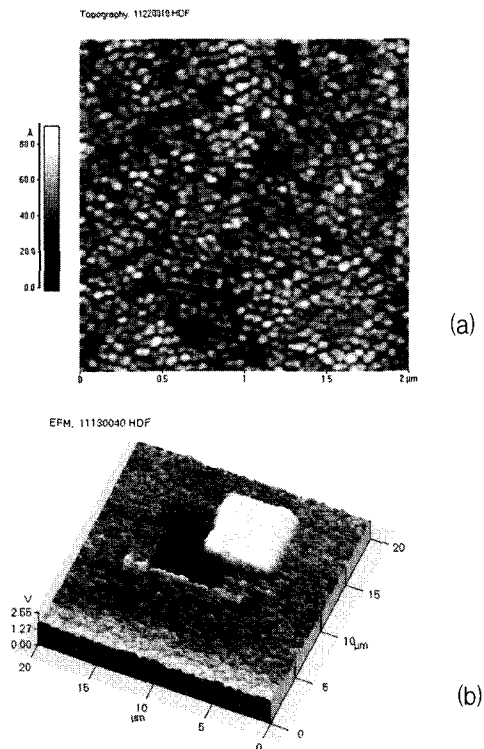


그림 4 EFM을 이용하여 측정된 (a) PZT 박막 표면 topography, (b) PZT 박막의 분극화

이상과 같이 EFM에서도 진동에 대한 이해는 매우 중요한 지식이다. 그림 4에 나타난 것과 같이 PZT 박막의 전극화를 감지하기 위해 사용하고 있는 접촉식 EFM은 전기적 성질에 의한 진동과 열적 진동, 그리고 원자들간의 작용력에 대하여 종합적인 지식을 요구하고 있다. 이러한 EFM 방식에 대한 연구는 이미지의 해상도나 속도 향상에 기여할 수 있을 것이며 이러한 발전은 현재 다양하게 시도되고 있는 차세대 정보 저장기의 핵심 요소에 응용될 수 있는 가능성을 높일 것이다.

4. 맺음 말

본 논문에서는 미세 구조물의 진동이 마이크로 기술이나 나노 기술에서 어떻게 이용되고 있는가를 몇몇 예를 들어 살펴보았다. 마이크로 기술에서는 미세 구조물의 진동을 능동적으로 응용하는 기기들을 쉽게 찾아 볼 수 있으나 실제 문제가 되는 것들이 진동의 특성과 측정 방식이 결합되어 나타나는 것이어서 기계 진동에 대한 지식만으로는 해결하기 힘든 것들이 많다.

나노 기술에서는 진동의 저감도 매우 중요한 이슈이나 미세한 물리량 측정을 위하여 진동을 응용하는 것도 중요하다. 이런 점은 비접촉 AFM, EFM 등의 예들에서 쉽게 찾을 수 있다. 나노 기술을 위한 진동에 대한 분석에서는 진동을 일으키는 가진력이나 스프링 역할을 하는 보존력이 기계 공학에서 다루지 않는 영역의 지식을 필요로 하는 경우가 많다는 특징이 있다. 미세한 물리량 측정을 위하여 또는 나노 물체를 조작하기

위하여 진동을 응용하는 경우에는 마이크로 기술에서와 마찬가지로 전기-기계 결합 현상 등과 같은 결합 현상의 이해가 필요하며 나아가 아직 공학에 널리 사용되지 않아 왔던 양자역학과 같은 분야에 대한 지식도 필요하게 될 것이다

참고 문헌

- (1) Wolsky, S. P. and Zdanuk, E. J. (Editors), 1969, Ultra Micro Weight Determination in Controlled Environments, Interscience Publishers.
- (2) Sarid, D., 1994, Scanning Force Microscopy, Oxford University Press.
- (3) Weisendanger, R., 1994, Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy, Cambridge University Press.
- (4) "User's Guide to Autoprobe M5", Park Scientific Instruments, 1997.
- (5) Luthi, R., Haefke, H., Meyer, K. P., Meyer, E., Howald, L. and Guntherodt, H. -J. 1993, "Surface and Domain Structures of Ferroelectric Crystals Studied with Scanning Force Microscopy," J. Appl. Phys., 74, 7461~71.
- (6) Lee, K., Shin, H., Moon, W., Jeon, J. and Pak, Y. 1999, "Detection Mechanism of Spontaneous Polarization in Ferroelectric Thin Films Using Electrostatic Force Microscopy," Jpn. J Appl. Phy., Vol. 38 L264~L266.
- (7) Shin, H., Lee, K., Moon, W. et al., 2000, "An Application of Polarized Domains in Ferroelectric Thin Films Using Scanning Probe Microscopy," IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 47(4), 801~807.