

캔틸레버를 이용한 나노기계적 바이오-화학센서 기술

임시형 교수 (국민대 기계자동차공학부)

1. 서론

분자진단 장치는 소형화 기술의 발달로 점점 더 작아지고 있다. 이러한 소형화된 플랫폼 하에서 바이오센서의 연구분야에 대한 관심은 날로 높아지고 있다. 소형화는 생체안에서 생리학적인 모니터링을 하거나, 다중 선택성을 지닌 센서 어레이를 구현하고, 센서의 휴대성과 샘플의 부피를 최소화하는 데에 필수적이다. 기존의 바이오센서는 대규모의 패키징, 복잡한 전기적인 인터페이싱과 정기적인 보수가 필요하다. 하나의 칩 위에 전기적 회로와 나노/마이크로 기계적인 구조물이 집적된 Nano/Micro Electro Mechanical System (NEMS/MEMS) 장치들을 사용함으로써 이런 약점들은 줄어들 수 있다. 마이크로캔틸레버는 물리적, 화학적 및 생물학적인 센싱을 하는데 쓰인다. 뿐만 아니라 의학 분야에서, 특히 질병의 검진, 점 돌연변이 (Point Mutation), 혈당 모니터링과 화학적 생물학적 Warfare Agents의 검출에 널리 응용되고 있다. 이런 센서들은 기존의 분석기술을 넘어서 높은 민감도, 낮은 가격, 간단한 절차, 낮은 분석대상물 요구량 ($\sim \mu\text{l}$), 무해한 과정과 빠른 응답 등 많은 장점들을 갖는다. 게다가, NEMS 기술의 성장으로 지난 몇년간 제작 기술과 나노캔틸레버를 이용한 센싱 응용이 발달하였다. 이런 발전은 민감도의 한계를 넓혔고, 연구자들이 분자들의 카운팅 (Counting)을 시각화할 수 있게 되었다. 분석 대상물들의 높은 분석처리 능력과 극도로 민감한 검출

능력으로 인해 마이크로캔틸레버 기술은 차세대 소형화, 초고감도 센서로 그 전망이 매우 밝다고 할 수 있다[1].

2. 나노/마이크로 캔틸레버의 기계공학적 작동원리

마이크로 캔틸레버는 그림 1에 보이는 바와 같이 다양한 형태의 모양들을 취하고 있고, 작동 방식은 크게 질량변화에 의한 동적 모드 및 표면 응력 변화에 의한 정적 모드로 분류되어진다 (그림 2).

마이크로캔틸레버는 캔틸레버의 변위나 공진 주파수의 변화를 감지함으로써 물리적, 화학적 또는 생물학적인 센서로서 사용될 수 있는 장치이다. 소형화된 다이빙 보드의 한쪽은 일정한 간격으로 위, 아래로 움직인다. 이 움직임은 사람이 다이빙 보드 위에서 떨 때처럼 분석 대상물의 특정한 질량이 캔틸레버의 표면에 흡착되면 변한다. 마이크로캔틸레버 위에 흡착된 분자들은 공진 주파수의 변화와 마이크로캔틸레버 굽힘의 원인이 된다. 질량 증가에 의한 공진 주파수의 변화를 검출함으로써 점도, 밀도 및 유량을 측정할 수 있다. 흡착된 분자를 검출하는 또 다른 방법은 캔틸레버의 한쪽 면에서만 흡착 응력 때문에 생기는 변위를 측정함으로써 가능하다. 분자의 화학적인 결합의 특징으로 인해 변위는 위 또는 아래로 발생할 수 있다.

기계적인 검출 시스템을 가지는 바이오칩은 대개

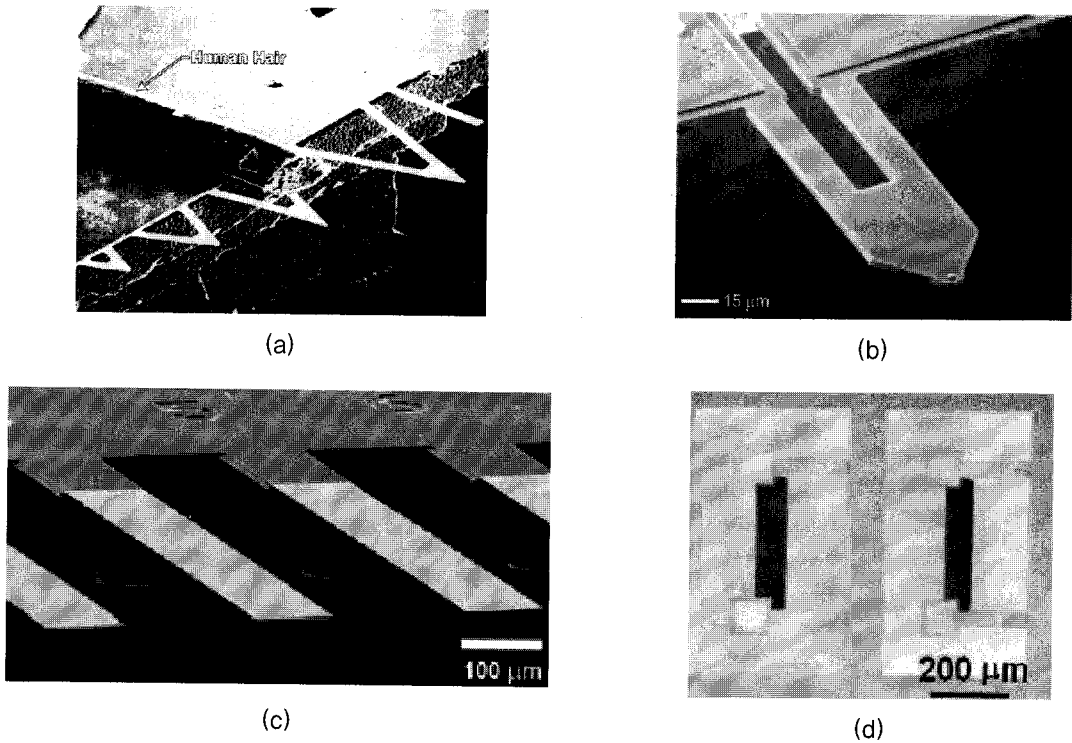


그림 1. 다양한 마이크로 캔틸레버 SEM[2].

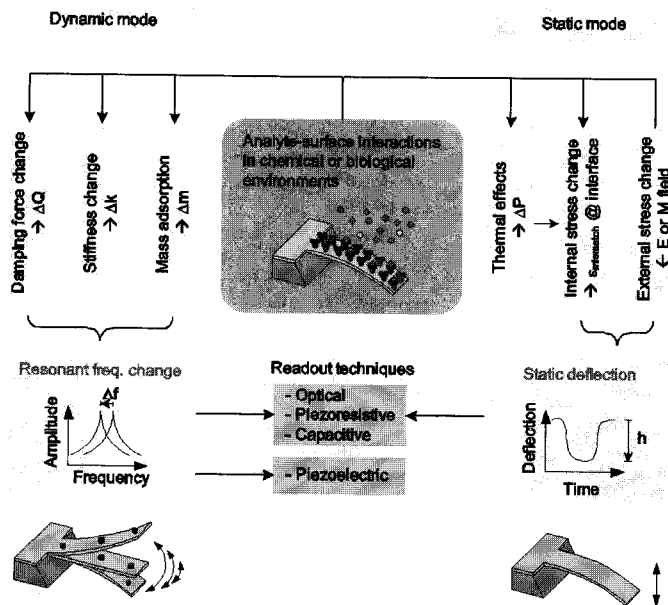


그림 2. 캔틸레버 센서의 작동 원리[2].

바이메탈 (예를 들면, Au-Si 또는 Au-SiN_x)의 캔틸레버를 사용한다. 금의 한쪽면은 리셉터로 코팅된다. 리셉터와 분석 대상물 (예를 들면, 단백질 또는 생물학적 병원균과 같은 생물학적 분자들)이 결합하면 표면은 팽팽해지거나 늘어난다. 이것은 마이크로캔틸레버의 굽힘이 발생하는 원인이 되는데, 대개 나노미터 정도이며 광학적, 전기적인 방법을 이용해 측정할 수 있다. 굽힘은 분석대상물의 농도에 비례하며, 압과 같은 질병의 검진이나 화학적 생물학적인 Warfare Agents의 고감도 검출에 쓰인다.

3. 나노/마이크로 캔틸레버의 기계적 응답 측정 방법

3.1 광학적 검출

광학적인 방법은 마이크로캔틸레버의 표면 위에 코팅된 생체분자들과 Position Sensitive Detector (PSD)에 영향을 주지 않을 정도의 매우 낮은 파워의 레이저 빔이 사용된다. 레이저 빔이 캔틸레버에 주사되고 반사된 빔은 PSD 위에 떨어진다. 캔틸레버가 구부러지지 않으면 즉, 다시 말해 어떤 분자도 캔틸레버에 흡착되지 않으면, 레이저 빔은 PSD 위의 하나의 지점에 주사될 것이다. 캔틸레버가 구부러지고 빔의 위치가 변하면 적절한 전자적인 방법을 이

용하여 그 변형량을 계산할 수 있다(그림 3). 이 측정 시스템의 장점은 나노미터 이하의 변형에 대한 측정이 가능하다는 것이다. 하지만, 이 방법 또한 특유의 단점들이 있다. 액체 측정 환경에서 캔틸레버에 조사되는 레이저 빔은 액체의 온도를 변화시키는 등의 영향을 주며, 이에 신호에 악영향을 주는 요소로 작용하게 된다. 따라서 액체 내 측정 시스템에서의 정밀한 온도 제어가 요구된다. 뿐만 아니라 광학시스템에서의 복잡한 정밀도의 요구는 경제적으로 시스템의 가격을 상승시킴으로써 휴대성 측면에서의 어려움이 있다.

3.2 피에조저항

피에조저항 변위 검출 방법은 캔틸레버의 표면에서 발생하는 응력의 변화를 기록하는 피에조저항재료를 캔틸레버의 표면 위쪽 가까이에 임베딩하는 과정이 포함된다. 마이크로캔틸레버의 변위가 발생하기 때문에, 응력의 변화가 생기면 그것은 피에조저항체에 변형률을 가하여 저항의 변화 요인이 되며, 그로 인해 발생하는 전기적인 변화가 측정될 수 있다(그림 4). 피에조저항 방법의 장점은 판독(Readout) 시스템이 칩 상에 통합될 수 있는 것이다. 그에 반해 단점으로 광학적인 검출 방법에 의한 분해능이 1 Å인데 반해 굽힘 분해능이 1 nm 정도라는 것이다. 또한, 피에조 저항이 캔틸레버에 임베딩되어야 한다는 것이다. 그로 인해 캔틸레버의 제작은 더욱 힘들어진다.

3.3 정전용량

정전용량을 이용한 방법은 캔틸레버가 분석 대상물의 흡착 때문에 변형이 일어날 때 평면 커패시터의 커패시턴스가 변하는 것을 기본 원리로 하였다. 여기에서 캔틸레버는 두개의 커패시터 중 하나이다. 이 구부러짐 기술은 매우 민감하며 절대적인 변위를 제공한다. 그러나 이 기술은 큰 변위를 측정하기에 적절하지 않다. 게다가, 이것은 커패시티브 플레이트 간의 유도전류 흐름 때문에 전해질 용액에서는 작동하지 않는다. 그러므로 위와 같은 환경에서의 센싱의 이용에는 한계가 있다.

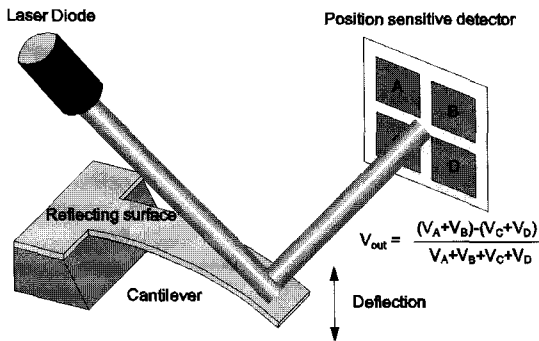
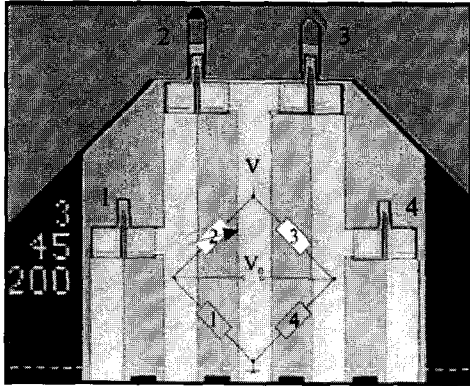


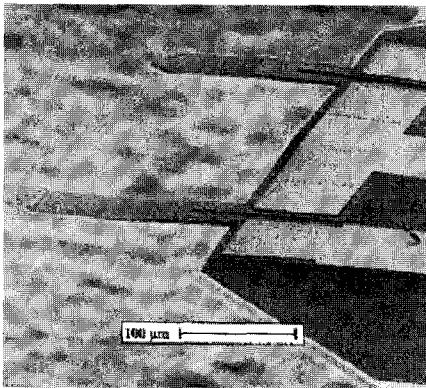
그림 3. 레이저 및 PSD에 의한 광학적 검출방법 (Optical Lever Method).

3.4 간섭계

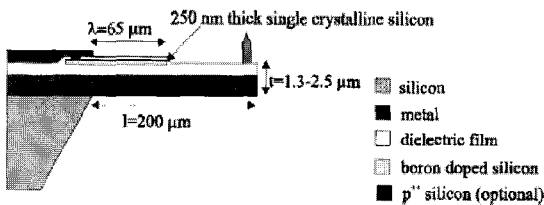
이 광학적인 측정 방법은 캔틸레버에 의해 반사되는 레이저 빔과 기준 레이저 빔의 간섭이 기초가 된다. 광학 섬유와 갈라진 끝을 캔틸레버의 표면에 가까이 가져간다. 빛의 한쪽 부분은 광학 섬유와 중간 매개체 간의 경계에서 반사되고 다른 부분은 섬



(a)



(b)



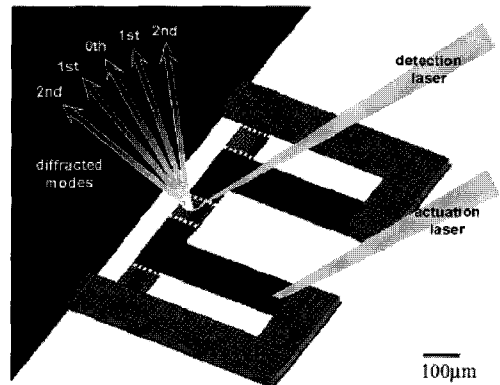
(c)

그림 4. 피에조저항체를 이용한 캔틸레버 센서[3].

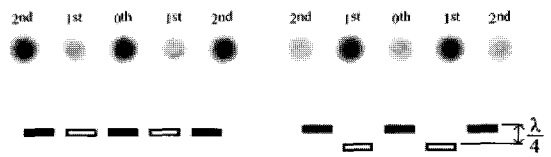
유 (Fiber)로 돌아가는 캔틸레버에서 반사된다. 이 두 개의 빔은 섬유 안에서 간섭하고, 그 간섭 신호는 포토다이오드로 측정이 가능하다. 간섭계는 변위의 측정을 직접적이고 절대적으로 제공하는 매우 민감한 방법이다. 이 방법은 반사되는 빛을 충분히 얻기 위해서 표면에 가까이 가져가야 한다. 캔틸레버의 자유단으로부터 수 마이크로 떨어진 광학 섬유는 0.01 Å의 범위까지 굽힘 측정이 가능하다. 그러나 광학 섬유의 자리를 잡는 것이 어렵다. 이 방법은 작은 변위 측정에 좋지만 액체에서는 덜 민감해서 바이오센서의 이용에 제한이 있다.

3.5 회절격자

Interdigitated 캔틸레버로부터 반사되는 레이저 빛은 캔틸레버의 변형에 비례하는 강도를 가지는 회절격자 패턴을 형성한다(그림 5). 이것은 Atomic Force Microscopy, 적외선 측정, 화학 센싱에 사용될 수 있다.



(a)

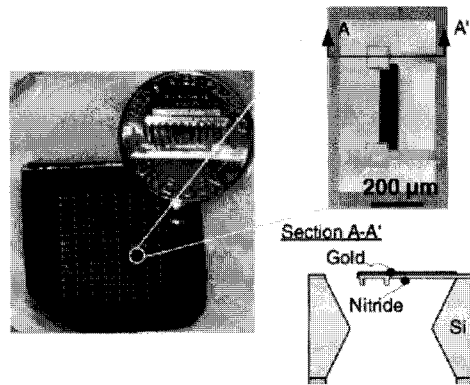


(b)

그림 5. 회절격자 빛의 강도 검출을 이용한 캔틸레버 센서[4].

3.6 CCD

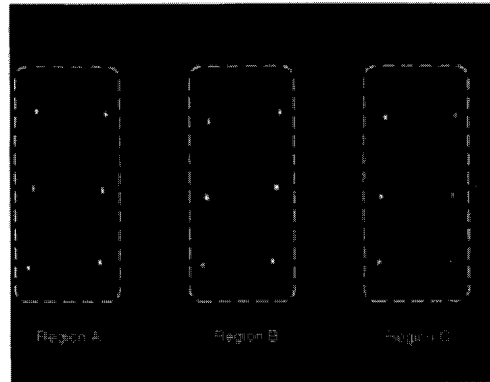
분석대상물에 반응하여 일어나는 캔틸레버의 굽힘을 측정하기 위해 CCD 카메라가 사용될 수 있다. CCD는 캔틸레버로부터 반사된 레이저 빔 Spot의 이동을 실시간으로 기록한다. CCD 카메라를 이용함으로써, 수백 개의 2차원 캔틸레버 센서 어레이의 생화학 물질 반응에 대한 정적 저장을 동시에 측정할 수 있게 된다(그림 6)[5].



(a)

4. 센싱 응용 분야

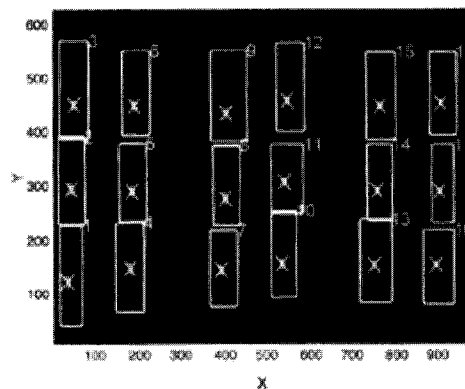
바이오센싱 응용분야는 고속스크리닝 (High-throughput Screening)을 위한 능력과 함께, 분석대상물을 검출하기 위한 빠르고, 사용하기 쉽고, 값싸며, 고감도의 성능들을 요구한다. 이 모든 요구 사항들은 마이크로 스케일의 캔틸레버 센서들에 의해 수행되어왔다. 그러므로 마이크로캔틸레버는 바이오센싱에 적용하기 위한 이상적인 후보이다. 마이크로캔틸레버를 기초로 한 센서들의 다양한 응용은 그림 7과 같이 요약된다. 그 중 대표적인 예를 살펴보면 다음과 같다.



(b)

4.1 암 측정 마이크로칩

Arun Majumdar와 그의 공동연구자들은 암 진단을 위해 민감한 약물검사에 기초한 마이크로캔틸레버를 실험하였다[6]. 전립선 특이 항원 (PSA)을 위한 특수 항체로 표면이 코팅되어진 마이크로캔틸레버는 전립선암을 가진 환자의 혈액 속의 전립선암을 일으키는 물질을 찾아낸다. 전립선암을 가진 환자의 혈액 샘플과 PSA로 코팅되어진 마이크로캔틸레버와 반응을 할 때 항원-항체 혼합물이 형성되면 캔틸레버표면의 응력의 변화에 의해 캔틸레버의 나노기계적 굽힘이 일어난다 (그림 8). 캔틸레버의 나노미터 스케일 굽힘은 광검출기가 사용하는 서브 나노미터의 정확성을 가진 저동력 레이저 빔에 의해서 광학적으로 검출된다. 마이크로캔틸레버에 기초한 검출방법은 임상적 한계 값보다 더 낮은 수준의 항원을 검출할 수 있으므로 PSA의 검출을 위한 기존 생화학기술보다 더 민감하다. 그 기술은 ELISA보다 더



(c)

그림 6. 2차원 캔틸레버 센서 어레이와 CCD를 이용한 캔틸레버 굽힘 측정[5].

나노/마이크로 캔틸레버의 바이오-화학센서 응용

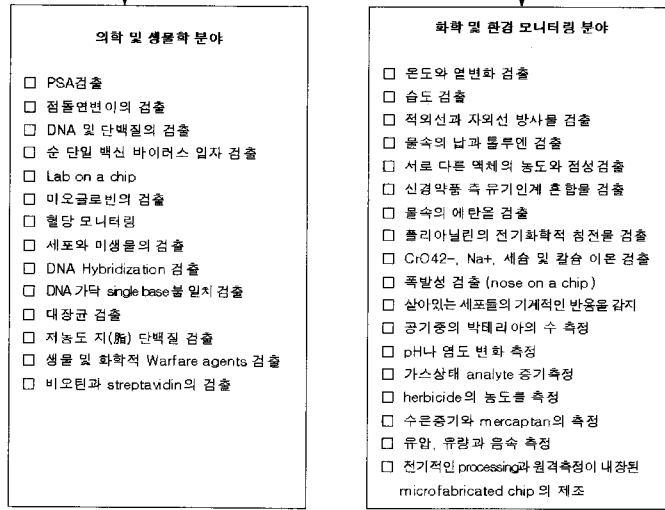


그림 7. 나노/마이크로 캔틸레버의 바이오-화학센서 응용 분야.

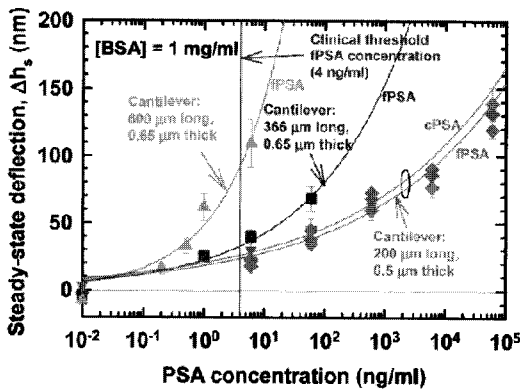


그림 8. 캔틸레버 센서를 이용한 Prostate Specific Antigen (PSA)검출[6].

좋고 가능성이 있다. 더욱이 분석당 비용은 형광성 물질 등을 붙일 필요가 없어서 더 낮다. 또한, Piezoelectric 나노기계 마이크로캔틸레버의 공진주파수 이동에 기초한 PSA의 검출은 Lee와 그의 공동 연구자들에 의해서 입증되어졌다[7].

4.2 싱글 뉴클레오타이드 다형성 검출

알려진 유전자 시퀀스와 게놈 내에서 싱글 뉴클레오타이드 다형성 (Single Nucleotide Polymorphisms ; SNPs) 은 게놈연구의 주된 관심사이다. 점 돌연변이들은 Thalassemia, Tay Sachs, Alzheimer병 등과 같은 여러 질병을 발생시킨다. 그래서 SNP 검출은 이 질병들의 초기 진단에 도움이 되고, 병을 가진 환자의 치료에 도움이 될 것이다. 단일 염기쌍 불일치를 검출하기 위해, 시험 DNA 시퀀스와 목표 DNA 시퀀스 사이의 선택적 바이오분자 인식작용에 극도로 민감한 마이크로 캔틸레버를 사용할 수 있다. Pico ~ femto gram 단위의 농도 측정이 가능하다. 목표 DNA시퀀스에 대해 선택적인 Thiolated DNA 프로브는 금으로 코팅되어진 마이크로캔틸레버에 고정되어진다. Complete Complimentary 목표 DNA 시퀀스와의 Hybridization은 캔틸레버의 순수 양의 처짐을 발생시킨다. 이 순수 양의 처짐은 이중 가닥 DNA 대 단일 가닥 DNA의 Configuration엔트로피 감소의



결과이다. 이러한 엔트로피의 변화는 캔틸레버의 금 코팅면에서의 압축력의 감소를 야기한다. 하나 또는 두개의 불일치를 가지는 프로브 DNA와 목표 DNA의 Hybridization은 캔틸레버의 순수음의 처짐을 야기한다. 이는 캔틸레버의 금 코팅표면에서의 반발력 증가 때문이다. 처짐은 하나의 염기쌍 불일치를 가지는 목표 DNA에서보다 두개의 염기쌍 불일치를 가지는 목표 DNA에서 더 크다. 반발 정도는 염기쌍 불일치개수의 증가만큼 커진다. McKendry는 나노기계 캔틸레버 배열에서 다중 Label-free 바이오 검출과 정량적 DNA 결합 어세이를 시험하였다[8].

이러한 DNA 기반 마이크로캔틸레버 처짐 어세이는 선택적으로 SNP를 타겟으로 하는 약을 개발하는 Pharmacogenomics 분야에 도움이 된다. 이 분석 방법은 SNP 검출을 위해 사용되어지는 다른 통상적인 방법보다 훨씬 싸고 30분보다 적은 시간 내에 빠른 반응을 한다. 마이크로캔틸레버로 만들어진 기술이 단지 생리적 버퍼와 상온 (25 °C)을 필요로 하는 반면, 현재 Southern Blotting 같은 Hybridization 검출 기술은 높은 수준의 엄격한 반응 조건을 필요로 한다. Southern Hybridization은 매우 지루하고, 값비싸고, 해로우며, 시간낭비적인 절차이다. 반면, 마이크로캔틸레버는 존재뿐만 아니라, 불일치의 위치를 찾을 수 있다.

4.3 제초제 센서

마이크로캔틸레버는 Roberto Raiteri와 공동연구자들에 의해서 액체 주위의 제초제의 농도를 측정하는데 사용되어진다[9]. Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D)는 캔틸레버의 위쪽표면에 코팅되어진다. 2,4-D에 대한 단일클론 항체는 그 뒤 캔틸레버에 공급된다. 캔틸레버에 단일클론의 항체와 제초제사이의 상호작용은 캔틸레버의 굽힘을 초래한다. 액상에서 ng/L 농도 수준의 유기염소와 유기인 살충제 및 제초제의 측정을 위하여 항체로 코팅되어진 캔틸레버 면역생물센서를 개발하기 위한 연구가 계속되고 있다. Alvarez와 그의 공동연구자들은 살충제인 Dichloro Dipheny Trichloroethane (DDT)의 검출을 위한 마이크로캔틸레버의 사용을

선보였다[10].

4.4 금속 이온 센서

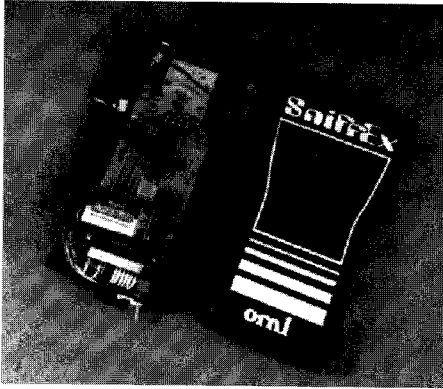
마이크로캔틸레버 센서는 유동 셀에서 10^{-9} M CrO_4^{2-} 의 농도측정에 쓰여졌다[11]. 이 장치에서는, 금 코팅 마이크로캔틸레버 표면에 코팅되어진 Tiethyl-12-mercaptododecyl Ammonium Bromide의 Self-assembly Monolayer가 사용되어졌다. 단일 마이크로캔틸레버를 확장하여 센서 어레이화 함으로써 동시에 다양한 금속 이온을 측정할 수도 있다.

4.5 폭발물 검출 센서

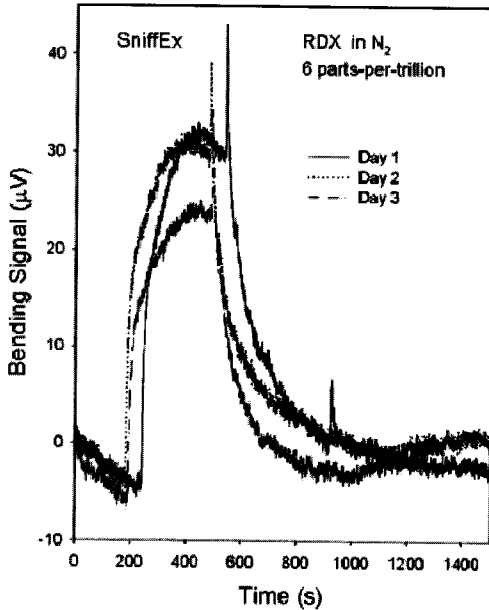
폭발물 검지에 개들의 놀라운 냄새 맡는 능력이 사용되어지고 있다. 개들은 ppb만큼 낮은 농도를 나타내는 증발된 유기화합물의 냄새에 의해서 쉽게 폭발물을 검지한다. 많은 회사들은 개의 코와 유사한 냄새맡는 능력을 가진 'Nose-on-a-Chip' 장치를 만들기 위해 활발한 연구를 하고 있다. 이 'Nose-on-a-Chip' 장치에서 마이크로캔틸레버 배열은 각 캔틸레버에 서로 다른 특별한 유기 혼합물을 선택적으로 코팅하여 사용되어진다. Tundat과 그의 공동연구자들은 마이크로 캔틸레버 센싱 기술을 이용하여 공항수화물과 지뢰에서 폭발물을 탐지하는 성냥갑 크기의 장치를 개발하였다(그림 9)[12].

5. 최근 연구 동향

Cornell 대학 Harold Craighead이 이끄는 연구원 그룹에 의해 사용되어진 Silicon Nitride로 만들어진 90 nm 두께의 마이크로캔틸레버들은 DNA 1578 염기쌍 길이의 단일 조각을 검출한다[13]. 그 그룹은 이러한 나노 캔틸레버를 써서 약 0.23 attogram (1 attogram = 10^{-18} gram)의 질량을 가진 분자를 정확히 측정하였다고 주장하였다. 황화된 이중가닥 DNA를 잡기위해 캔틸레버의 맨 끝부분에 위치한 금 나노점은 자유 황화물 그룹을 가진 바이오분자를 포착할 수 있었다. 스캐닝 레이저빔은 캔틸레버의 공진 주파수 측정에 사용된다. 연구원들은 나노캔틸



(a)



(a)

그림 9. 폭발물 검출 장치 [12].

레버에 기초한 나노장치가 초고감도의 검출이 가능하므로써 DNA시퀀스 검출에 PCR증폭의 필요성을 없애 줄 것이라고 믿는다.

유사하게, 캐나다 Alberta 대학의 N. Nelson-Fitzpatrick 등은 Aluminum-molybdenum을 혼합한 10 nm 크기의 미세 공진 나노캔틸레버를 만들었다. 그 그룹은 NEMS에 기초한 금속재질의 장치들이 다

양한 화학적 혼합물의 직접적인 센싱을 가능하게 하고, Intermediate Surface Derivatization의 필요성을 없앨 수 있다고 주장한다[14].

Purdue 대학의 연구자들도 나노 캔틸레버를 개발하고 있다[15]. 그들은 30 nm의 두께를 가지는 다양한 길이의 나노캔틸레버의 어레이를 채택했고, 바이러스에 대한 항체로 그들을 기능화하였다. 그들은 나노캔틸레버의 길이에 대한 항체의 밀도 변화에 관한 흥미로운 결과를 발견하였다.

6. 결론

마이크로캔틸레버는 물리적, 화학적 센싱에서 생물학적 질병 진단에 이르기까지 과학의 모든 영역에 걸쳐 적용할 수 있는 잠재력을 지니고 있다. 마이크로캔틸레버 사용의 주된 장점들은 전통적인 센서들을 뛰어넘는 센싱 메커니즘으로써 높은 민감도와 낮은 가격, 낮은 분석 대상물 요구량, 보다 간소한 단계와 함께 무해한 처리 과정, 빠른 응답 속도와 낮은 전력 요구량 등을 포함한다. 가장 중요한 사실은 마이크로캔틸레버의 어레이가 하나의 질병이 가지는 다양한 질병 바이오 마커들의 분석에 필요한 많은 분석 대상물의 진단을 위해 사용될 수 있다는 것이다. 그 기술이 매우 민감한 센서의 다음 세대로 가는 열쇠를 쥐고 있다. 나노 캔틸레버 기술의 발전과 함께, 센서들은 최근까지 연구자들의 꿈이었던 아토그램의 감도를 달성했다. 감도에서의 더 큰 향상은 연구자들이 분자들의 수를 세는 능력조차 가능하게 할 것이다.

최근 국내외에서는 캔틸레버 센싱 기술의 실험실 수준에서의 연구뿐 아니라, 이를 이용한 바이오-화학 센서 및 시스템에 대한 상품화가 시도되고 있다. 바이오 및 환경 물질 검출에 대한 사회적인 관심의 고조와 더불어 저가의 고성능 시스템에 대한 요구의 증가로 캔틸레버를 이용한 바이오-화학 센서 시스템 관련 시장이 크게 증가하리라 생각된다.

마지막으로, 본 원고는 Vashist, S. K.에 의해 쓰여진 참고문헌[1]을 토대로 캔틸레버의 바이오-화학센



서용용 기술에 대한 소개를 위하여 작성되었음을 밝혀둔다.

참고 문헌

- [1] Vashist, S.K., A review of microcantilevers for sensing applications, Journal of Nanotechnology Online, 2007.
- [2] Lim, S.H., Micro-opto-mechanical sensor array for physically and chemically induced nanoscale motion detection, Ph.D. Dissertation, UC Berkeley, 2005.
- [3] Thaysen, J., Boisen, A., Hansen, O., Bouwstra, S., Atomic force microscopy probe with piezoresistive read-out and a highly symmetrical Wheatstone bridge arrangement, Sensors and Actuators, vol. 83, 2000.
- [4] Savran, C., Sparks, A., Sihler, J., Li, J., Wu, W., Berlin, D., Burg, T., Schmidt, M., Manalis, S., Fabrication and characterization of a micromechanical sensor for differential detection of nanoscale motions, Journal of Microelectromechanical Systems, vol.11, 2002.
- [5] Lim, S.H., Raorane, D., Satyanarayana, S., Majumdar, A., Nano-chemo-mechanical sensor array platform for high-throughput chemical analysis, Sensors and Actuators B Chemical, vol. 119, 2006.
- [6] Wu, G.H., Datar, R.H., Hansen, K.M., Thundat, T., Cote, R.J. & Majumdar, A., Bioassay of prostate-specific antigen (PSA) using microcantilever, Nat. Biotechnol., vol. 19, 2001.
- [7] Lee, J.H., Hwang, K.S., Park, J., Yoon, K.H., Yoon, D.S., Kim, T.S., Immunoassay of prostate-specific antigen (PSA) using resonant frequency shift of piezoelectric nanomechanical microcantilever, Biosens. Bioelectron., vol. 20, 2005.
- [8] McKendry, R., Zhang, J., Arntz, Y., Strunz, T., Hegner, M., Lang, H.P., Baller, M.K., Certa, V., Meyer, E., Guntherodt, H.J., Gerber, C., Multiple label-free biodetection and quantitative DNA-binding assays on a nanomechanical cantilever array, Proc. Natl. Acad. Sci., vol. 99, 2002.
- [9] Raiteri, R., Nelles, G., Butt, H.J., Knoll, W., Skladal, P., Sensing of biological substances based on the bending of microfabricated cantilevers, Sens. Actuators B, vol. 61, 1999.
- [10] Alvarez, M., Calle, A., Tamayo, J., Lechuga, L.M., Abad, A., Montoya A., Development of nanomechanical biosensors for detection of the pesticide DDT, Biosens. Bioelectron., vol. 18, 2003.
- [11] Ji, H.F., Thundat, T., Dabestani, R., Brown, G.M., Britt, P.F., Bonnesen, P.V., Ultrasensitive detection of CrO4²⁻ using a microcantilever sensor, Anal. Chem., vol. 73, 2001.
- [12] Pinnaduwege, L., et al., A sensitive, handheld vapor sensor based on microcantilevers, Review of Scientific Instruments, vol. 11, 2004.
- [13] Llic, B., Yang, Y., Aubin, K., Reichenbach, R., Krylov, S., Craighead, H.G., Enumeration of DNA molecules bound to a nanomechanical oscillator, Nanoletters, vol. 5, 2005.
- [14] <http://www.nsti.org/Nanotech2006/showabstract.html?absno=488>
- [15] Gupta, A.K., Nair, P.R., Akin, D., Ladisch, M.R., Broyles, S., Alam, M.A., Bashir, R., Anomalous resonance in a nanomechanical biosensor, Proc. Natl. Acad. Sci., vol. 103, 2006.

저자약력



성명 : 임시형

◆ 학력

- 1994년 서울대 기계설계학과 공학사
- 1996년 서울대 대학원 기계설계학과 공학석사
- 2005년 UC Berkeley 기계공학과 공학박사

◆ 경력

- 1998년 - 2001년 공군사관학교 교관
- 2005년 - 2007년 Center of Integrated Nanomechanical Systems (COINS), UC Berkeley Postdoctoral Fellow
- 2007년 - 현재 국민대 기계자동차공학부 전임강사