

마이크로/나노기술과 바이오 및 의료기술의 융합



김 태 송

한국과학기술연구원 책임연구원
지식경제부 21세기 프론티어연구사업
지능형마이크로시스템개발사업단 단장
tskim@microsystem.re.kr/tskim@kist.re.kr

연세대학교 세라믹공학과 학사
KAIST 재료공학과 석사 및 박사
KIST 마이크로시스템연구센터 센터장
관심분야 : 극미세바이오 및 의료용 센서, 바이오MEMS 기술

1. 서론

연구도 일반 대중이 선호하는 머리모양이나 혹은 옷, 구두와 마찬가지로 유행이 있는 것 같다. 물론 이러한 연구의 유행은 단순한 기호에 따라 반복되고 진화하는 형태와 전혀 다른 형태로 발전된 것이다. 즉 그때까지 쌓여온 지식과 기술 그리고 know-how를 바탕으로 새로운 아이디어를 접목한 형태로 나타나며 이것은 전세계에서 그 분야를 리드하는 연구자들을 중심으로 동시 다발적으로 나타나는 경우가 대부분이다. 1960년부터 미세구조물 제작에 필요한 기초기술이 연구되어 오다가 1980년경 미국 버클리 대학, MIT, Sandia National Lab 등과 유럽의 독일, 네덜란드, 일본 동경대학 등을 중심으로 MEMS (Micro Electro Mechanical System) 기술이라 불리는 초소형 정밀 기계기술이 개발되었다. 이 기술은 기존의 IT기술의 근간인 반도체 제조 공정을 이용하였으나 고집적 회로가 아닌 3차원적인 움직이는 구동부분이 존재하는 초미세부품 구현에 대한 기술로서 유행처럼 연구되기 시작했다. 기존에 존재하던 가속도센서, 자이로센서, 압력센서 등 물리 센서의 크기를 수십에서 수백분의 일로 줄일 수 있는 결정적인 기술이 되어 TV 등의 전자기기, 자동차등 automobile 기기, 군사용기기, 의료진단분석기기 등에 적용되었다.[1] 이러한 MEMS 기술은 1990년대 후반부터 2000대 초에 걸쳐 과학 발전의 커다란 획을 그은 것 중의 하나인 인간유전자지도 완성

과 더불어 불기 시작한 생명과학 연구와 맞물려 극미세 유체조절 기술을 이용한 BioMEMS 기술과 또 다른 연구 분야인 나노기술과 연관되어 Bio, MEMS, Nano 그리고 Medical 기술까지 연관된 융합연구라는 화두가 나오기 시작했고 최근에는 학제간 융합 즉, IT-BT, IT-NT, BT-NT 을 포함한 융합연구로서 자리매김하고 있다.

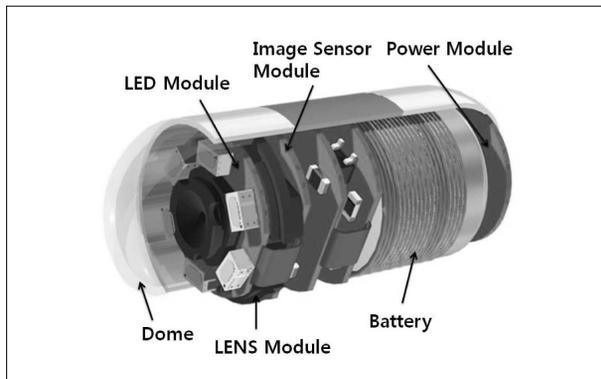
국내에서의 융합연구의 시작은 1990년대 말로 거슬러 올라간다. 당시 G7 MEMS 사업이 끝나갈 즈음으로 국내의 MEMS 연구가 뿌리를 내리기 시작한 시점이라고 해도 과언이 아니다. 이때 그동안 관심의 대상이었던 IT 분야 응용을 위한 MEMS 연구에서 눈을 돌려 바이오 및 분석화학 그리고 의료용 MEMS 연구에 관심을 갖게 되었다. 그렇게 시작한 첫 국가주도 연구가 21세기 프론티어연구개발사업이었고, 그중의 첫 번째 사업이 지능형 마이크로시스템연구개발사업과 ERC의 하나인 서울대학교 초미세생체전자시스템연구센터였다. 이 두 사업은 당시 융합이라는 화두는 없었지만 IT기술에 근간을 둔 MEMS 기술과 바이오 및 의료용 부품 및 시스템 개발을 목표로 하고 있으며 오늘날 나노, 바이오, IT, NT기술의 융합의 효시라고 하겠다. 본 글에서는 이러한 융합연구 중 가장 먼저 수행된 연구사업 중의 하나인 지식경제부 지원 21세기 프론티어사업 지능형마이크로시스템사업단의 연구현황에 대해서 발표 하고자 한다.

2. 소형화(miniaturization) 기술을 기반으로 한 의요기기 개발 연구

2000년 5월 당시 과학기술부 21세기 프론티어사업으로 출범한 지능형마이크로시스템기술개발사업의 주된 연구분야는 1단계 연구기간동안 정보통신 관련 분야도 있었지만 초소형 캡슐내시경, 미량의 혈액을 이용한 체외 극미세 진단 분석장치 및 약물전달 시스템이었다.[2] 본사업의 규모는 연간 약 90-100억의 연구자금이 투입되고 있고 총 참여연구원이 매년 약간의 차이는 있지만 2008년의 경우 323명 정도로 공학전공자 246명, 의학전공자 51명, 의학전공자 26명이 참여하고 있으며 이중 박사학위 소지자가 91명, 석사학위 소지자 119명, 학사이하가 115명으로 다학제 전공자들로 이루어진 융합연구의 현황을 잘 보여주고 있다.

2.1 캡슐내시경

의료분야의 진단 및 치료에 있어서 최소침습 또는 비침습적인 방법을 이용하여 환자의 고통을 최소화 하려는 노력으로부터 출발한 캡슐내시경은 알약 크기의 내시경으로 기존 내시경에 비해 환자들에게 마취나 구토 증상 등의 거부감이 없이 인체 장기를 점검할 수 있는 내시경을 말하며, 입으로 삼켜 식도, 소장 등의 건강 상태를 촬영하고 이 영상을 실시간으로 몸 안에서 몸밖의 저장장치에 전송한 후 향문을 통해 배출되는 일회용 검사기기이다. Fig. 1은 한국에서 개발한 캡슐내시경 미로캠(MiRoCam)의 내부 구조를 보여주는 그림으로 현재 국내 임상시험을 거쳐 KFDA인증을 통과하고 유럽 CE



▲ Fig. 1. Schematic View of Capsule-type Endoscope MiRoCam

인증을 획득하였으며 미국 FDA인증을 위하여 미국 현지에서 임상시험 중이다.[3]

2.1.1 캡슐내시경의 핵심기술

국내의 캡슐내시경 개발 연구를 시작할 초기부터 독자적인 통신기술의 개발에 연구의 상당 부분을 몰두해왔기 때문에 캡슐내시경 개발의 핵심은 고화질 영상정보(화질이 우수할수록 디지털 영상정보량은 급격히 늘어남)의 획득과 획득한 영상정보의 무선 전송기술이라고 해도 과언이 아니다. 물론 영상을 획득하는 CMOS 카메라는 대부분의 사람들이 가지고 있는 핸드폰에 적용하는 기술과 별반 차이가 없다. 그러나 문제는 소비 전력에 있다. 캡슐내시경은 워낙 크기가 작기 때문에 내장된 배터리의 용량이 극히 제한되므로 저전력 기술 개발을 통하여 가능한 오랫동안 동작이 가능하도록 하여 소화기관을 검사하는 동안에 동작이 멈추지 말아야 한다.

표 1은 십이지장 및 소장을 검사할 수 있는 캡슐내시경에 대한 국내개발 미로캠과 이스라엘의 필캠의 제원을 비교한 표이다. 둘다 상용화 되어 판매되는 제품의 성능 비교표로 국내개발 미로캠의 성능이 월등함을 알 수 있다. 가장 큰 기술적 차이는 세계에서 최초로 기존의 무선전송기술로 사용되던 rf(radio frequency)전송기술과 달리 독자적으로 개발한 인체 통신 기술에 있다. 이스라엘에서 개발한 캡슐에서 사용하는 256x256 픽셀의 영상정보 보다 두배 많은 화질의 영상정보를 획득하여 이스라엘 캡슐이 일초에 2프레임 전송할 수 있는데 반하여 3프레임을 전송하고도 동작시간이 거의 두배에 가까운 시간동안 동작가능 함을 알 수 있다. 이는 간접적으로 우리 캡슐의 소비전력 소모량이 이스라엘의 필캠보다 1/5-1/6 정도에 불과하다는 것을 보여준다.

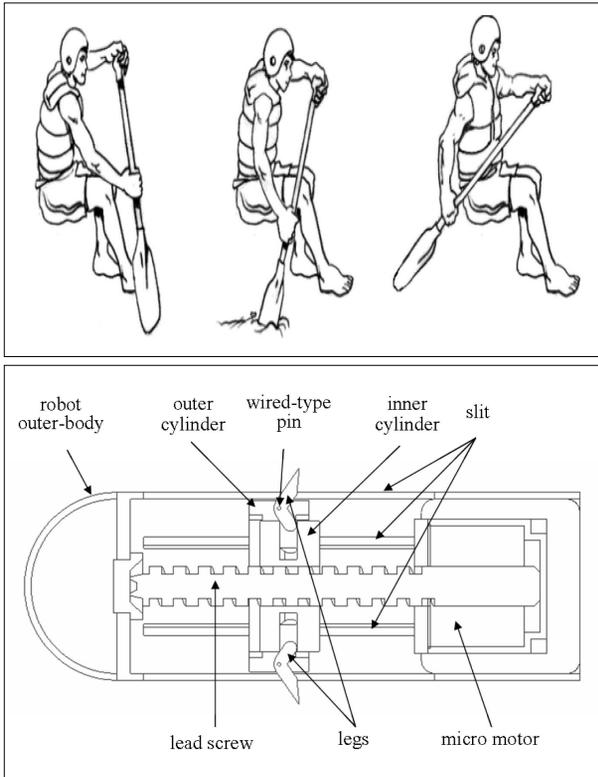
표 1. 국내개발 캡슐내시경 미로캠과 이스라엘 필캠의 성능 비교

	캡슐내시경 MiRoCam (국내)	PillCam (이스라엘)
영상품질	320x320 pixel	256x256 pixel
전송속도	3frames/sec	2frames/sec
동작시간	11-13시간	6-8시간
무선전송 방식	세계최초 인체 내외간 통신이 가능한 인체통신 방식	rf 방식
캡슐크기	11mm(직경)x24mm(길이)	11mm(직경)x26mm(길이)

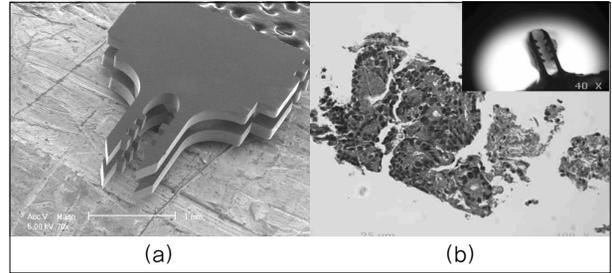
캡슐내시경은 현재 미국에서 10세 이상의 아동 및 청소년을 포함한 환자의 소장질병 및 원인모를 복통 진단에 표준 검사방법으로 자리잡고 있다.

2.2.2 캡슐내시경의 진화

현재 캡슐내시경은 식도용 및 소장용 캡슐내시경이 상용화 되어 출시되고 있다. 두 제품 모두 장기의 연동 운동에 의하여 소화기관을 자연스럽게 내려가면서 진단하는 방식이다. 그러나 앞으로의 캡슐내시경은 외부에서 그 속도가 조절이 가능한 능동 구동형 캡슐형태로 발전할 것이다. 이를 위하여 식도, 위, 소장 및 대장내의 장기의 구조와 표면 상태 그리고 장기의 기계적 특성 등에 대한 분석에 바탕을 둔 이동 기술이 연구되고 있다. 그중 대표적인 것이 자벌레와 같은 살아 있는 생물의 운동기능을 모방한 바이오미메틱기술을 이용한 이동기술이다. Fig. 2는 캡슐의 이동을 위하여 카누의 패들을 이용하여 물위를 나아가는 것과 같은 기능을 모사한 이동



▲ Fig. 2. Schematic View of Paddling a Canoe and Capsule Design Mimicking Paddling a Canoe Motion.



▲ Fig.3. (a) SEM picture of fabricated 3D silicon microspike array. (b) The glandular structure of human gastric adeno-carcinoma cells extracted with the microspike biopsy tool, which is H&E stained after paraffin section.

방식의 예를 보여주고 있다. 즉 캡슐내에 리니어 액츄에이터를 장착하고 앞,뒤로 패들이 순차적으로 움직임으로서 미끄러운 장내를 움직일 수 있도록 고안한 것이다.

Fig. 3은 캡슐내에 장착되어 장내의 병변을 확인하기 위한 조직채취용 마이크로 바이옵시(생검) 소자를 보여주고 있다. 이것은 MEMS 공정에 의하여 제작된 것으로 기존의 내시경의 바이옵시 툴에 비하여 1/10정도의 크기에 불과한데에도 불구하고 출혈이나 기타 부작용을 최소화하면서 검사에 필요한 양의 조직을 채취할 수 있도록 고안된 것이다. 이 장치로 채취된 조직의 염색된 사진에서 볼 수 있는 바와 같이 조직의 병변 유무를 확인하기에 충분한 임상적 성능을 보여주고 있다.[4]

이외에도 소화기 질환을 검사하기 위해 영상정보 뿐만 아니라 각종 센서를 활용하여 장내의 온도, pH, 압력 등의 정보를 획득하여 소화불량이나 혹은 기타 특정 병변에 기인한 것인지 심리적인 요인에 기인한 것인지를 판단할 수 있도록 센서통합 캡슐에 대한 연구를 진행하고 있다. 또한 외부에서 무선으로 캡슐에 전원을 공급하기 위한 무선에너지 전송기술도 연구하고 있으며 일부는 상용화를 앞두고 있다.

2.2 극미세 진단시스템

MEMS 기술이 지대한 영향을 준 부분의 하나는 바로 극미세 채널이나 혹은 극미세 구조물을 이용한 생물분자의 인식 또는 측정 기술에 기여하고 있다는 것이다.

즉 극미량의 혈액이나 또는 타액과 같은 체액샘플 그리고 동시에 미량의 시약을 써서 한번에 여러 가지(multiplexing)를 대량(high throughput)으로 처리할 수 있고, 기존의 벤치위에 놓여서 사용되던 기기가 환자의 침대 옆이나 혹은 손에 들고 다니는 소형 시스템으로 필요할 때 바로 의사가 질병의 정확한 진단을 내리는데 도와줄 수 있는 형태로 발전할 수 있는 가능성을 열었다고 할 수 있다.[5]

지능형마이크로시스템사업단은 지난 9년동안 크게 3 가지 영역에서 이와 같은 기술을 이용한 진단 및 분석기기 개발 연구를 수행하고 있다. 기능면에서는 극미세 전처리 칩 기술, 셀기반 진단 기술, 단백질 및 DNA를 이용한 진단 및 분석기술이 그것이다.

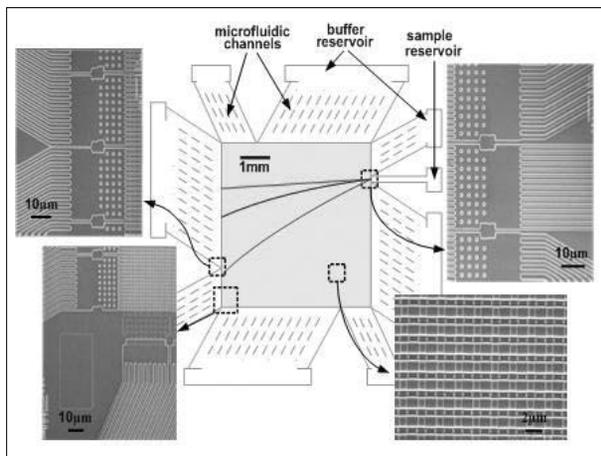
2.2.1 마이크로 분리 및 농축 칩 제작 기술

일반적으로 혈액내에는 수만종에서 수십만종에 이르는 단백질로 이루어져 있다. 이중 질병과 연관이 있다고 알려진 단백질을 특이적으로(specifically) ng/ml의 농도 이하까지 그리고 임상적으로 의미 있는 범위의 정량분석 기술이 혈액진단에 있어서 필수적이다. 따라서 연구의 핵심은 수많은 단백질 들 사이에 가능하면 감지하고자 하는 낮은 농도에 있는 극미량의 단백질을 감지할 수 있는 기술의 개발이 필요하며 이를 구현 할 수 있는 접근 방법은 크게 두가지라고 할 수 있다. 즉 샘플 중에서

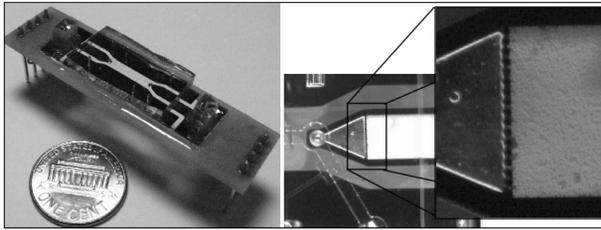
필요한 단백질만을 골라내고 이를 농축하여 특이도와 감도의 증진을 꾀하기 위한 전처리 기술이 그것이고 다른 하나는 기존의 감지방법과는 다른 고감도 감지 틀을 개발하는 것이다.

이러한 생체시료의 분리 및 농축을 위한 기술은 기존의 실험실에서 사용하고 있으나 10~100kD의 단백질 분석으로 제한되고 loading 된 단백질 중 20%만을 가시화할 수 있는 2차원 젤-전기영동법[6-8]과 달리, 분리해내는데 긴 소요시간, 재현성 문제, 복잡한 과정 그리고 감지장치와의 통합을 용이하게 할 수 있는 수평 및 수직 나노필터(vertical nanofilter) 2차원 어레이를 이용한 생체시료의 분리 방법을 연구하고 있다. Fig. 4에 이와 같은 2차원 어레이 형태의 소자의 원리와 x, y 두개의 방향에 걸리는 전압에 따라 분자크기의 크기에 따라 다른 궤적을 가지고 분리되는 모식도를 보여주고 있다. 이러한 향상된 2차원 나노필터 어레이로 높은 전기장의 하(~400V/cm)에서도 생체 시료 분리가 가능하게 되었다. 그러나 평면(2차원) 나노유체 필터의 경우 차원의 조절은 아주 좋으나 원하는 만큼의 throughput을 내지 못한다. 여기서 대량의 병렬적인 나노유체 멤브레인 구조를 이용한 높은 flow rate과 throughput을 얻고자 하는 연구가 필요하다.

또 다른 방법의 농축 및 분리 방법은 마이크로비드를 이용한 방법이다. 이 방법은 표면 개질을 통해 분리 농축해내려고 하는 생체분자를 선택적으로 바인딩이 가능한 캡춰 리간드를 고정화 하여 분리하며 일반 평면에 비하여 표면적이 넓어 생화학적 반응과 농축이 유리한 장점을 이용한 것이다. 이 방법은 바이오센서와의 연결을 통한 극미량의 타겟 마커의 감지뿐만아니라 MALDI와 같은 기존의 분석장치와의 연결을 통하여 프로테옴의 분석을 위하여 이용될 수 있다. 이를 위하여 극복해야 할 중요 기술로 시료의 cleanup, target protein fishing-out, pre-concentration 그리고 enzymatic digestion 을 하나의 칩 안으로 집적하는 것이 매우 중요하다.[9] 특정 단백질을 분리하거나 인식하기 위하여 그동안 분자 인식체(리간드)로서 항체를 주로 이용하기도 하지만 항체의 경우 제작 시간이 길고, 비용이 높으며 당이나 지질과



▲ Fig.4 Two dimension nanofilter array chip fabricated by using Si-MEMS process.



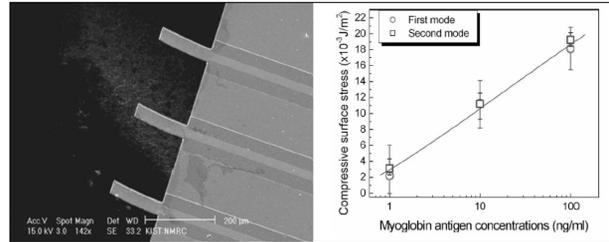
▲ Fig. 5. Integrated micro BAC chip(left) and magnified view of compacted microbead in BAC chip(right).

같은 단백질 이외의 분자에 결합하는 항체를 제작하기 어렵기 때문에 보다 다양한 질병 표지 단백질에 대하여 인식 능력이 뛰어난 대체 물질로서 핵산 앵타머 (aptamer)가 근래에 많은 조명을 받고 있으며 앵타머를 이용하여 BAC칩을 이용한 농축 및 분리에 적용하기 위한 연구도 진행되고 있다.

이러한 BAC 칩에 사용하는 마이크로 비드는 비특이적 단백질 흡착이라는 단점이 있어 질병 진단과 분석에 부정확성을 초래할 수도 있다. 따라서 이러한 비특이적 흡착이 없고, 선택적 단백질의 농축이 용이한 코어-셸 형태의 고성능 마이크로 비드를 개발이 중요하며 두 종류의 폴리스티렌기반 마이크로 비드(CutiCore, HiCore Resin)가 우수한 성능을 보임이 알려져 있으며 마이크로 칩에 적용되어 뛰어난 성능을 보여 주고 있다.[10]

2.2.2. 극미세 생체물질 감지기술

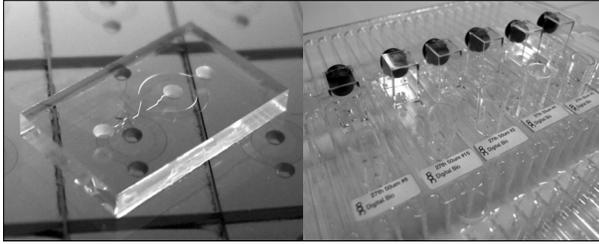
체액을 이용한 병변관련 극미량의 마커를 정량분석하기 위한 마이크로/나노진단기의 검출기기부분은 가장 핵심부분으로서 단백질의 상호작용이 화학적 반응과 단백질의 3차 구조와 같은 여러 가지 요인에 의해서 결정되기 때문에 특이적 반응을 이용하는 DNA 감지 분석에 비해 많은 어려움을 가지고 있다. 따라서 유리나 금속 표면 위에 aptamer, oligonucleotide, peptide, 항체 등을 집적화시키고 형광분석방법, 질량분석방법, AFM 분석방법, 그리고 SPR 분석방법 등 다양한 기술을 이용한 단백질 칩의 분석이 시도되고 있다. 가장 일반적으로 사용되는 형광법의 경우 ELISA나 마이크로어레이와 같은 형광 리더를 이용하여 감지 분석하는 방법과 산화환원 label을 채용한 전기화학법 등이 주류를 이루고 있다. 그



▲ Fig. 6. Microcantilever based biosensor and calculated surface stress change of microcantilever from the measured primary and secondary resonance frequency before and after myoglobin binding (1ng/ml - 100ng/ml) on the cantilever surface.

러나 이들 방법은 모두 형광이나 산화환원 label과 같은 고가의 화학물질을 이용하고 있어서 에세이 단가가 상승하며 바이오처리 공정이 복잡해지는 단점이 있다. 통상적으로 바이오공정의 단계가 늘어날수록 에세이 결과의 산포도 증가하는 경향이 있기 때문에 되도록이면 바이오공정을 간편화하는 것이 필요하다. 이와 같은 형광 방법과는 달리 무표지 방식의 공진형 압전 캔틸레버 바이오센서는 기본적으로 label이 필요 없는 장점을 가지고 있다. 따라서 바이오에세이공정이 간편하며, 산포를 줄이는데 용이하다. 이러한 공진형 마이크로캔틸레버를 이용하여 전립선암 특이 마커인 prostate specific antigen (PSA)를 10pg/ml 까지 검지하는 것이 보고되고 있다.[11] 이와 같이 극저 농도의 바이오마커의 검지가 가능한 것은 반응된 바이오물질의 질량 뿐만 아니라 바이오물질이 캔틸레버 표면에 반응하여 발생하는 표면응력에 의해서도 공진주파수가 크게 변화하기 때문이다. 이와 같은 감지성능의 해석을 위하여 기계역학적인 모델링을 통하여 바이오반응시 캔틸레버 표면에 발생하는 응력을 계산하는데 세계 최초로 성공하였다.[12] 1차 공진주파수 모드와 2차공진주파수 모드에서 모두 훌륭하게 일치함으로써 모델링이 정확함을 증명하였다.(fig. 6) 이 연구 성과는 향후 공진형 캔틸레버의 응력해석에 많은 도움을 줄 것으로 기대된다.

혈액내에는 이러한 단백질 이외에도 백혈구와 적혈구를 포함한 다양한 세포가 존재한다. 이러한 혈액내에 존재하는 면역세포의 종류와 그 숫자를 조사해서 백혈병이나 혹은 AIDS와 같은 질병을 진단하는데 활용한



▲ Fig.7 Plastic flow cytometry chip with microchannel (left) and integrated flow cytometry chip with plastic reservoir(right)

다. 이러한 시스템을 유세포분석기(Flow Cytometry)라 한다. 특히 AIDS가 창궐하고 있는 오지의 나라 아프리카의 경우 전력이나 혹은 기타 기반시설이 되어 있지 않아 배터리로 구동되는 소형 유세포분석시스템이 절대적으로 필요하다. Fig. 7은 이러한 마이크로 유체 채널을 이용한 유세포분석 칩과 이들 칩이 샘플의 주입 및 측정 후 환자의 오염된 혈액을 처리하기 쉽게 모을 수 있는 챔버가 일체화된 플라스틱 칩을 보여주고 있다. 이처럼 수 마이크로 리터의 미량의 혈액내에 타겟 세포의 분석을 위하여 플라스틱을 이용한 극소형 유세포분석 칩 및 분석 시스템을 개발하고 있으며 현재 세계에서 가장 작은 시스템이 개발되어 국내 KFDA를 통과하여 실용화에 성큼 다가서고 있다.

3. 요약

마이크로기술과 나노기술은 기존의 타 영역의 기술과 융합되어 세계적으로 앞서있는 선행주자들이 지배하고 있는 의료영역에서의 새로운 기술적 독자성을 확보할 수 있는 새로운 가능성을 제공해 주고 있다. 끝없는 경쟁 속에 효율적으로 우리가 추구해야 할 연구방향으로서 마이크로/나노기술의 연구를 해야 하는 당위성을 제시하고 있다고 할 수 있다. 이러한 상황 속에서 국내에서 가장 먼저 시작한 지능형마이크로시스템 사업단의 융합연구결과가 국내 융합연구의 저변을 다져왔고 그 열매는 국가의 새로운 산업으로 잘 이어져 국부창출로 나타나리라 기대한다.

감사의글

본 연구는 지식경제부 21세기 프론티어 기술개발사

업인 지능형마이크로시스템개발사업(IMC)으로부터 연구비 지원을 받아 수행된 것으로 이에 감사드리고 아울러 사업단 참여 연구진들에게 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Kaigham J. Gabriel, Scientific American, "Engineering Microscopic Machines", Vol. 273 No.3, pp150, 1995
- [2] Tae Song Kim, Sung June Kim, Bong Hyun Chung, Kyungwha Yoo and Seon Hee Park, "The Korean Research & development program on Micro-electro-Mechanical Systems (MEMS) in Medical Applications, Minimally Invasive Therapy, Vol. 16, 109, 2007
- [3] Seungmin Bang, Jeong Youp Park, Seok Jeong, Young Ho Kim, Han Bo Shim, Tae Song Kim, Don Haeng Lee, Si Young Song, "First clinical trial of the "MiRo" capsule endoscope by using a novel transmission technology: electric-field propagation", Gastrointestinal Endoscopy, Vol. 69 [2], 253, 2009
- [4] Tae Song Kim, Si Young Song, HAN Jung, Jinseok Kim, Eui Sung Kim, "Micro Capsule Endoscope for Gastro Intestinal Track", Proceedings of the 29th Annual International Conference of the IEEE EMBS, 2007, Lyon, France
- [5] Jim Kling Seattle, "Moving diagnostics from the bench to the bedside", Nature biotech., Vol 24, 891, 2006
- [6] RD Rocklin, RS Ramsey, JM Ramsey, "A microfabricated fluidic device for performing two-dimensional liquid-phase separations. Analytical Chemistry", Vol.72, 5244.2000
- [7] X Chen, H Wu, C Mao, GM Whitesides, "A Prototype Two-Dimensional Capillary Electrophoresis System Fabricated in Poly(dimethylsiloxane)", Analytical Chemistry Vo. 74, 1772, 2002
- [8] J Fu, J Han, "A nanofilter array chip for fast gel-free biomolecule separation in Proceedings of the MicroTAS 2005 conference, Vol. 2, 1531, 2005
- [9] Woo-Jae Chung, Min-Soo Kim, SuhYong Cho, Sung-Soo Park, Jong-Ho Kim, Byung-Gee Kim, Yong-Kweon Kim, Yoon-Sik Lee, "Microaffinity of proteins based on photolytic elution:toward an efficient microbead affinity chromatography on a chip", Electrophoresis Vol. 26, 694, 2005
- [10] Hanyoung Kim, Jin Ku Cho, Woo-Jea Chung, Yong-Kweon Kim, Yoon-Sik Lee, "Solid-phase core-shell type resins for solid-phase peptide synthesis resins in solid-phase photolytic cleavage reaction" Organic Letters Vol.69, 3273, 2004
- [11] JH Lee, KS Hwang, J Park, DS Yoon, KH Yoon, TS Kim, "Immunoassay of prostate specific antigen (PSA) using resonant frequency shift of piezoelectric nanomechanical microcantilever", Biosens & Bioelectr, Vol. 20, 2157, 2005
- [12] Kyo Seon Hwang, Kilho Eom, Jeong Hoon Lee, Dong Won Chun, Byung Hak Cha, Dae Sung Yoon, Tae Song Kim, Jung Ho Park, "Surface stress driven by biomolecular interactions dominated the dynamical response of nanomechanical microcantilevers" Applied Physics Letters, Vol. 89, 173905, 2006

기획: 이기성 편집위원 (keeslee@kookmin.ac.kr)