

에너지 및 환경분야의 초소형 정밀기계

본고에서는 초소형 정밀기계 기술의 에너지와 환경 분야에의 응용에 대해 개략적인 사항을 제시한다. 에너지 시스템 분야에서는 초소형 heat pump, heat pipes, evaporators, condensers, heat exchangers, compressors와 같은 소자 및 시스템을 다룬다. 환경분야에서는 토양의 오염 진단과 의료 폐기물을 줄이기 위해 초소형 정밀기계 기술이 사용되는 경우가 다루어진다. 마지막에는 앞으로 초소형 에너지 및 화학 시스템의 제작시 고려해야 할 사항을 다룬다.

백 경갑*, 주 병권, 김 희중, 오 명환
대전대 전자통신공학부*, KIST 정보재료소자연구센터

개요

지금까지는 개별적인 초소형 소자의 개발에 대한 연구에 집중되었기 때문에, 이러한 개별소자들이 시스템으로 집적된 예가 거의 없었다. 하지만, 에너지와 화학 변환 시스템에 적용될 때 초소형 정밀기계 기술은 몇 가지 매력을 갖는다.

◎ 빠른 흐름 - 열/물질 전달과 같은 표면 현상은 초소형 소자에서 더욱 효과적으로 활용된다. 초소형 heat exchanger의 현상에 대한 성능을 많은 연구자들이 문서로 작성하였다. 몇몇 전달 현상에 대한 유사한 성능 향상이 PNNL(Pacific Northwest National Laboratories)에서 보고되었다. 이러한 성능으로 인해 작고 빠른 흐름을 갖는 에너지/물질 전달 소자를 개발할 수 있게 됐다.

◎ 소형/경량 - 초소형 제작은 센서, 액추에이터, 에너지 및 화학 변환 시스템의 크기를 크게 줄여준다.

- 목 차 -

1. 초소형 정밀기계의 소개 및 국내외 기술동향
2. 자동차분야의 초소형 정밀기계
3. 의료분야의 초소형 정밀기계
4. 우주항공분야의 초소형 정밀기계
5. 정보통신분야의 초소형 정밀기계
6. 에너지 및 환경분야의 초소형 정밀기계

표 1. 초소형 정밀기계 - 청정기술

Consequences of Microdimensions	Possible Clean Production Implementation
Dematerialisation in Manufacture	
<ul style="list-style-type: none"> - less raw materials & transport costs, input energy, toxic wastes and packaging - short cycle times and high machine availability reduce production and environmental costs 	<ul style="list-style-type: none"> - smaller factories, desk-top manufacture, chip-factories, decentralized production - smaller machines instruments(e.g. chip laboratories), consumer goods, process intensification
Increased Accessibility	
<ul style="list-style-type: none"> - microenvironmental monitoring - macroenvironmental monitoring - genome mapping & genetic surgery - increased information availability, reduced travel needs 	<ul style="list-style-type: none"> - maintenance microrobots for inspection/repair - GIS nanosatellites for enhanced eco-management - new organism for waste recovery, agricultural processing and environmental management - remote home working, teleconferencing, cyberorganisations - satellite communication systems
High Density Functionality	
<ul style="list-style-type: none"> - compact lightweight systems - compact intelligent diagnostic/effector tools incorporating biomimetic sensor and precision dosing system, self-repair, autocalibrating, embedded intelligence, self-replicating biological sensors 	<ul style="list-style-type: none"> - power satellites - closed-looped process control in <ul style="list-style-type: none"> (a) manufacture and food production e.g. spatially agro-chemical application (b) photobioreactors for energy and biomass production (c) recovery systems e.g. biofiltration & mechanical vapour recompression - intelligent imaging systems for fault-free manufacture - personal sensory accessories for every 'man'
New Nanostructures	
<ul style="list-style-type: none"> - nanostructured matrices(e.g. nanotubes, porous media, reflective array structures) - precision fenestrated membranes - parallel microfluidic processors 	<ul style="list-style-type: none"> - reagent support material for cleaner synthesis, extremely high capacity battery systems, smart skin for intelligent clothing, ordered biocomposite materials for data storage, biophotovoltaic cladding, smart building materials, high efficiency multi-layer photovoltaics - selective recovery systems - cleaner particulate and phase separations, in (bio)chemicals processing, food processing, liquid & gaseous recovery systems
Organisational	
<ul style="list-style-type: none"> - ordered, addressable 3-dimensional arrays - embedded functionality in smart materials 	<ul style="list-style-type: none"> - data storage bio-memory chips - constructional skins with thermoregulatory self-repair

◎ 물질/에너지의 분산처리 - 원하는 요구를 만족하기 위해, 설계자들이 중앙집중 시스템보다도 분산처리 시스템을 활용할 수 있다.

◎ 적은 양산 비용 - 전자장치 분야에서 사용되었던 양산 기술을 사용하여, 초소형 에너지 시스템에 대한 하드웨어를 개발할 수 있다. 이러한 기술은 파격적인 비용 감소를 가져온다.

그리고 대부분의 농업 생산이 여전히 open-loop process로 처리되고 있으므로, process control 시에는 진단 기구가 매우 필요하다. 농업에서 분석 기구에 대한 필요성을 이전부터 고려해 왔었는데, 아래와 같이 요약하여 말할 수 있다.

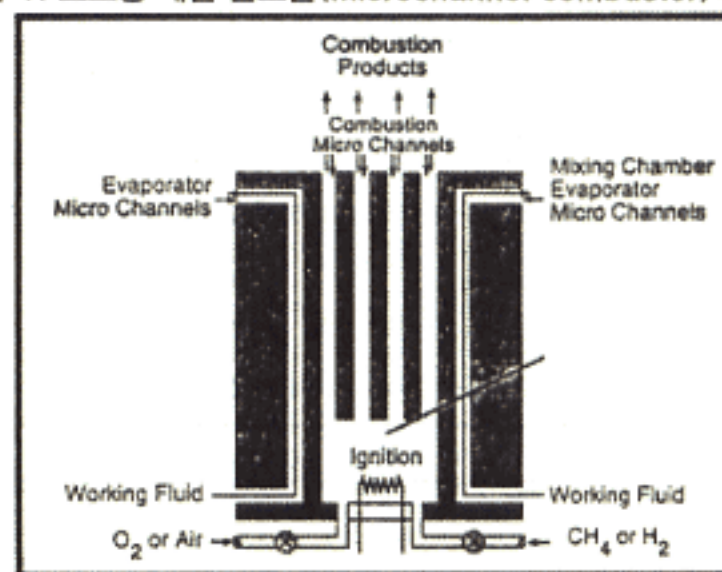
◎ 온실에서의 토양과 수경(hydroponic) 시스템의 영양물(N, P, S, Ca, 습기, RH, T, 토양 유기물질) 상태

- ◎ 성장식물에서의 압력 감지
- ◎ 해충의 통합 경영을 위한 곤충의 살충제에 대한 면역 프로파일
- ◎ 유기상태에서의 성장조건에 대한 검증
- ◎ 사일리지 용액과 슬러리의 논과 밭에서의 적합성
- ◎ 해충과 병원균 발생의 예측
- ◎ 가축건물에서의 풍매 먼지, 암모니아, 습도
- ◎ 토양전염 해충과 병원균에 대한 분석
- ◎ 토양과 곡식에 대한 농약의 내구성
- ◎ 곤충 해충의 변형에 대한 특정 확인

에너지 생산과 소비, 식품 생산과 유통과 같은 대량 활동으로부터 대부분의 생태학적 문제가 표 1과 같이 발생한다.

초소형 정밀기계 기술의 에너지와 환경 분야에의 응용

그림 1. 초소형 채널 연소실(Microchannel combustor)의 구조



에너지 분야

열에 의해 구동되는 중시(mesoscopic) heat pump의 중요한 부분은 microchannel 연소실이다(그림 1). 흡수식 heat pump는 thermochemical 압축기를 사용하여 압축이 수행되는 것만 제외하고는 증기 압축 소자와 유사하다. 간단한 thermochemical 압축기는 absorber, solution pump, heat exchanger, desorber(gas generator), desorber에 열에너지를 공급해주는 microchannel 연소실로 구성되어 있다. 마이크로 구조물의 높은 열/물질 전달 속도를 이용하여, 흡수식 heat pump의 크기를 60배 정도로 줄일 수 있다. 열에 의해 구동되는 mesoscopic heat pump가 많은 군사적 냉각 분야에 응용될 수 있는데, 여기서는 휴대용 냉각 소자 분야를 기술한다. 특히, 핵, 생물, 화학(NBC: Nuclear, Biological, Chemical) 방호복을 이용할 때, 뜨거운 환경에서 노동집약적인 일을 수행하는 요원은 열 압력을 받기 쉽다. 보충 냉각을 제공하면 뜨거운 날씨의 NBC 조건에서도 효율적으로 일을 수행할 수 있다. microchannel 연소실과 열에 의해 구동되는 냉각사이클을 이용하면, mesoscopic 흡수식 heat pump는 전기에너지를 열에너지로 대체하여 전력의 상당한 양이 줄어든다. 연료, fan과 pump 전력용 배터리, 공기에 의해 냉각되는 heat exchanger가 열에 의해 구동되는 mesoscopic heat pump에 덧붙여지면 전체 시스템 무게는 8시

간 동작 기준으로 3.7kg에서 5.0kg 사이가 된다. 이것의 무게는 기존에 있는 초소형 기후 통제 시스템(microclimate control system)의 무게의 1/3보다 작다. 효율적인 2상 열 전달용 초소형 열 파이프(micro heat pipe)를 실리콘으로 제작했다. 초소형 냉장고(micro-refrigerator)를 1개의 칩위에 구현하려는 연구가 진행되고 있다(그림 2). 그리고 그림 3은 PNNL에서 개발한 초소형 sheet heat pump 용 evaporator/condenser/expansion valve를 보여주고 있다. 우주항공 분야에서 사용되는 초소형 정밀기계 기술로 제작된 연료 분사기가 있다(그림 4). 이러한 혁신적인 소자는 엔진이 요구하는 즉시, 연료 분사 각도, 작은 물방울의 크기, 배출계수를 엔진의 전체 동작 범위에서 통제할 수 있다.

환경분야

■ 식량생산

청정생산에서 초소형 정밀기계 기술의 응용으로서는 농업에서의 진단기구를 고려할 수 있다. 현대의 농업기술이 서방경제의 국민들에게 기본적인 식사 요구량을 공급해 주었지만, 이러한 높은 생산성은 자원의 사용면에서는 준-최적이며 환경파괴와 자연계에서의 생물 다양성의 감소를 가져온다는 것은 널리 알고 있다. 지금 낮은 입력을 갖는, 지속적이고 더욱 효율적인 농업 process가 필요하다. 이것은 부분적으로는 process 입력을 최적으로 사용(예를 들면, 영양물의 정확한 적용)하여 성취할 수 있으며, 농업에서 청정기술의 지속적인 발전에 중요한 사항이다.

최적의 자원 활용을 위해서, 최소의 폐기물과 오염을 갖도록 정확한 입출력 파라미터의 측정을 통해 더욱 체계적이고 통합된 방법으로 농업 process가 수행되어야 한다. 하지만, 지금까지 비용면에서 효율적이고, 사용자들에게 친근한 분석 기구가 농부들에게는 없었고, 측정이 필요한 파라미터는

그림 2. 초소형 냉각 시스템(Micro Cooling Systems)의 구조

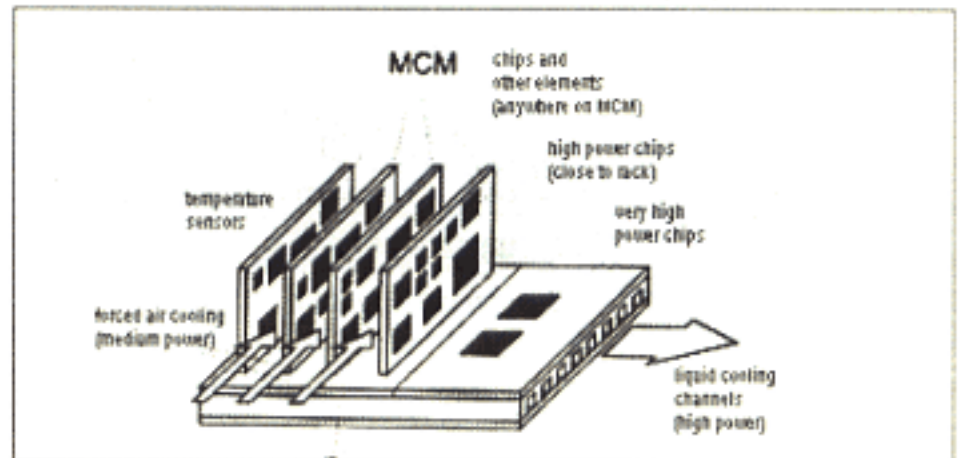


그림 3. 초소형 sheet heat pump용 evaporator/condenser/expansion valve의 구조

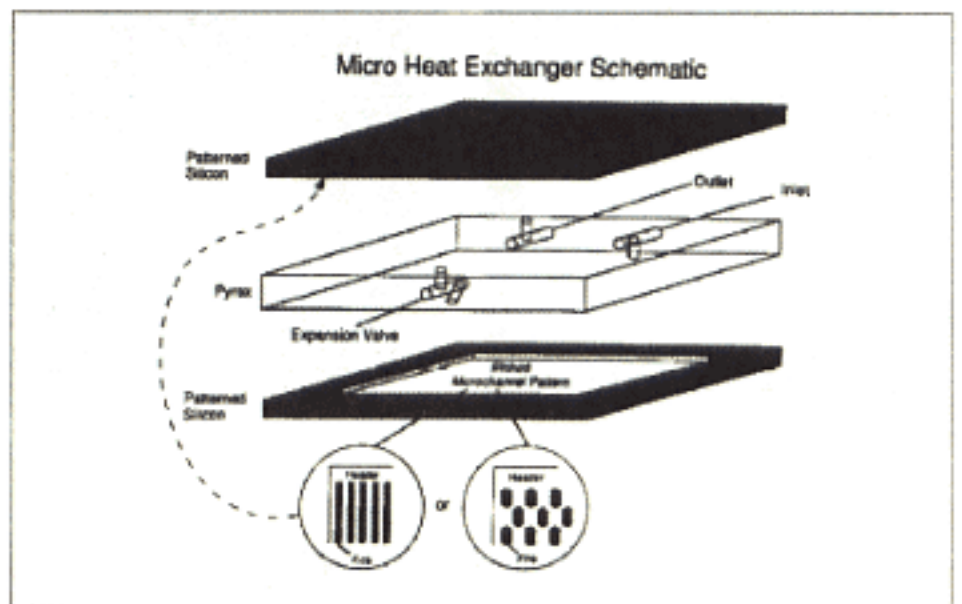
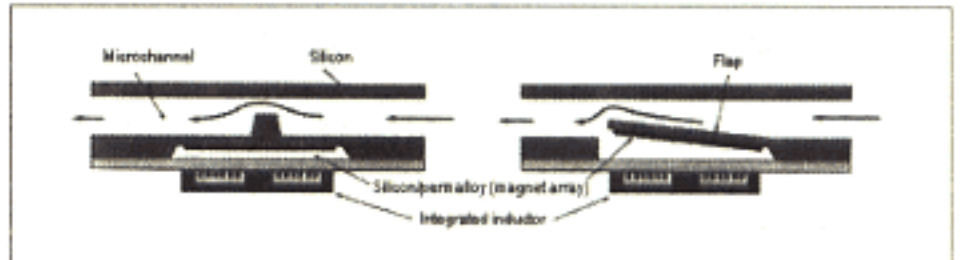


그림 4. 초소형 연료 분사기(Micro fuel injector)의 구조



matrix(예를 들면, 토양에서, 토양층, 식물재료, 연무질(aerosol))였는데, 이는 감시하기 어려운 파라미터이다. 생산성이 향상되고 환경/재정 비용이 상당히 줄어든 농업을 경영하기 위해서는 새로운 기술이 요구된다.

■ 정밀농업

가장 파괴적이고 환경적으로 위험한 농업활동 중 하나는 영양물, 살충제, 제초제, 살균제를 적용하는 것이다. 토양의 생리화학적 성질과 작물 질병과 곤충해충의 빈도는 시간과 공간의 heterogeneous 변수이다. 이것은 이러한 변수가 영향을 미치는 농업

그림 5. 고체 가스 센서의 구조

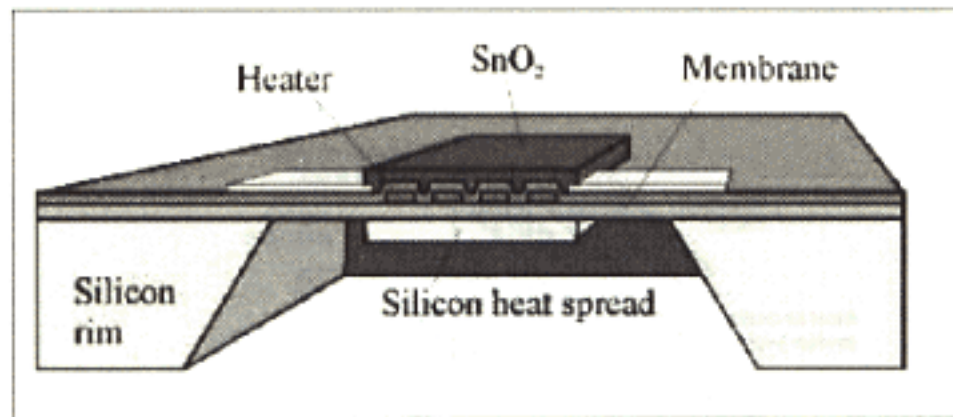
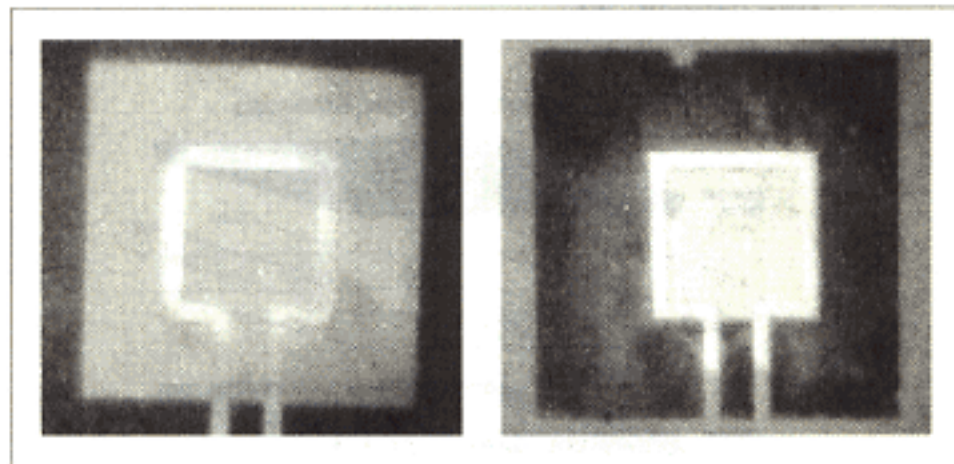


그림 6. 실리콘 플러그가 있는 경우와 없는 경우의 샘플에 대해 조사된 열분포의 비교



process의 감시와 통제에서 상당한 문제가 된다. 따라서, 이러한 변수 조건을 이해하면서, 변하는 공간 조건에 따른 어떤 농업 process에 대한 정확한 수행 방법을 찾아내는 방향으로 상당한 연구가 진행되고 있다. 농업의 청정기술 분야에서 초소형 정밀기계 기술로 구현된 예가 많다. 이것에는 잡초 분별용 지능 영상 시스템과 GPS nanosatellite에서부터 smart soil용 분산 감시 시스템의 즉석 진단 포켓 측정기(Lab-on-a-Chip)가 들어간다.

사람이 활동하게 되면서 자연환경이 나빠짐으로 인해 사회적, 경제적, 시장 분야에서 환경제어에 대한 관심이 최근 집중되고 있다. 오염, 산업폐기물, 일반 환경을 제어하면 산업, 건강관리, 농업, 시골 여행과 같은 여러 가지 분야에서는 혜택을 받을 수 있다. 이로 인해 화학 및 생화학 고체 센서분야의 활동이 촉진되어 더욱 좋은 파라미터(신뢰도, 감도, 동작범위, 선택도, 수명, 재현성)를 갖는 신 소자를 개발하려고 하고 있다.

이렇게 새로 개발된 센서는 현재의 정교하지만,

값이 비싼 분석 시스템을 교체하려고 환경제어에 도입하기 시작했다. 이러한 센서의 주요 이점은 사용하기 쉽고, 튼튼하고, 현대 기술을 이용한 대량생산으로 인해 비용이 적고, 동시에(in situ) 제어와 감시를 할 수 있다는 점이다. 공기, 물, 토양의 양을 결정하기 위해 새로운 가스, 이온, 생물 감지기를 개발하려고 하고 있다.

■ 자동차 분야에서의 가스 센서

자동차와 가전제품에서 연소가스와 배출 가스를 현장에서 감지하는 고체 가스 센서가 개발되었다. 센서 설계의 목표는 센서의 감지영역에서 낮은 전력 소비와 균일한 온도 분포를 갖도록 하는 것이다. 이러한 목적으로 새로운 초소형 정밀기계 기술로 만들어진 구조물이 개발되었는데, 이는 free-standing 유전체 멤브레인으로 구성되며, 실리콘 벌크가 지지하면서 멤브레인 아래의 실리콘 플러그가 보완해준다. 센서의 구조가 그림 5에 있다. 그러한 소자로 얻어진 온도 균일성으로 인해 heater element에서의 hot spot가 없어지고 목표 가스에 대한 선택도가 개선된다. 그림 6은 실리콘 플러그가 있는 경우와 없는 경우에 대해 열분포를 조사해본 결과를 보여준다. 이러한 경우에 heater는 loop 형태의 폴리실리콘 저항으로 구성된다.

■ 토양을 직접 측정하는 센서

이 센서의 목표는 바람직하지 않게 환경영향을 주는 과잉영양 성분을 줄이기 위해, 농업토양에서의 화학비료로부터 오는 식물 영양성분의 제어와 관리에 있다. 더욱이, 식물성장을 촉진시키고 생산비용을 줄이기 위해 적당한 영양분의 흡수도 필요하다. 그래서, "in-soil" 감시 기능이 있어 관개 시스템에서 사용되는 비료의 자동 공급기에 대한 설계를 할 수 있다. 더욱이, smart 센서를 이용하여 제어 시스템을 설계한다면 측정과 분석 방법에 대한 복잡도

가 상당히 줄어든다.

이러한 목적에서, 농업생산에서 관심이 많은 몇몇 파라미터(pH, 질산염, 칼슘, 칼륨)를 결정해주는 ISFET(Ion Selective Field Effect Transistors)을 설계하고 제작했는데, 이는 실리콘 질화물 게이트와 다른 이온 감도의 멤브레인을 갖는다. 이 강한 멤브레인은 그런 분야에서 필요하므로, 멤브레인 매트릭스로 photocurable polymer를 사용한다. 이러한 재료는 PVC 멤브레인에 비해, 실리콘 표면에 대해 향상된 점착력과 매우 큰 강인성을 갖는다. 직접적으로 ISFET를 작물토양에서 사용하기 위해 특별히 설계된 프로브가 개발되었다. 센서를 갖는 프로브를 토양에 직접 집어넣어 선택 처리에 대한 실시간 감시를 수행한다. 이러한 센서를 이용해 얻는 가치는 다른 분석 기구(적정(適定), 원자흡수 등)를 통해서 얻어지는 가치와 비교되며, 좋은 상관성을 보여준다.

■ 폐수관리 센서

산업 발전소, 특히 전기 및 표면처리 공장의 폐기물에서 매우 위험한 중금속 이온(구리, 납, 카드뮴, 수은 등)의 성분을 조절하기 위해 화학 센서가 개발 중에 있다. 이러한 센서는 감도높은 멤브레인을 갖는 ISFET(그림 7)에 기초하며, 다른 금속으로 도핑된 Ge-Sb-Se 시스템에서 칼코겐(화합물) 유리를 RF sputtering함으로써 증착된다. 센서는 20mg/L에서 0.04mg/L까지의 금속이온 농도를 감시할 수 있다.

■ 탄소 IDA(InterDigitated Arrays)를 갖는 혁신적인 제품설계

IDA는 낮은 감지 한계치가 요구되는 전자분석이 필요한 분야에서 매우 관심이 많다. 각지긴(inter-digitated) 구조는 2개의 전극으로 구성되는데, 이것의 간격은 매우 작아 산화환원 순환(redox

그림 7. MOSFET 구조와 ISFET 구조의 비교

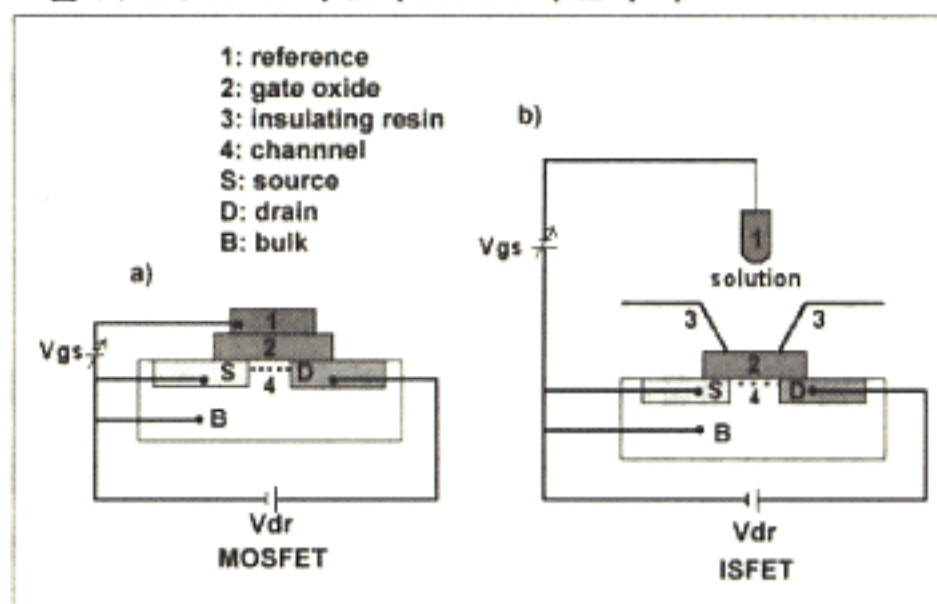
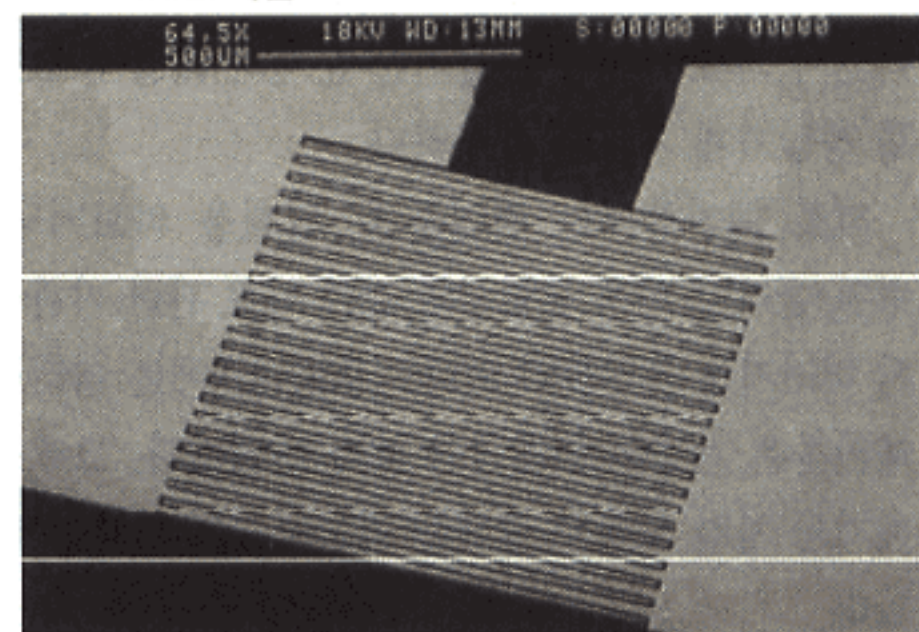


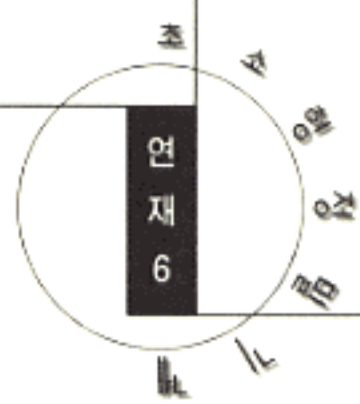
그림 8. finger 간격이 2 μ m인 깎지긴 탄소 미소전극에 대한 SEM 사진



cycling)에 적합하다(그림 8). 한 전극에서 물질의 산화 뒤에 다른 전극에서의 환원과정이 뒤따른다. 그래서 'collector' 전극 표면에 가까운 부분에서는 더욱 높은 농도가 유지되어, 높은 수집 효율을 보여준다.

탄소에 기초한 재료는 모든 생물학적 process에서 필수적이며, 전극재료로 특히 적당하다. 그들은 생물학적 호환성을 갖고 있고, 관련 포텐셜 영역에서 전자화학적으로 active하며, Au 또는 Pt와 같은 대체재료보다 더욱 높은 수소 overpotential을 갖는다.

탄소 미소전극 어레이로 납, 은, 카드뮴의 sub-ppm 농도를 감지할 수 있다. 더욱이, 염소는 0.01mg/L에서 10mg/L까지의 영역에서 전류측정법으로 측정이 가능하며, 이는 수질 제어에 적합하다. 높은



overpotential과 비교적 활성이 없는 표면(낮은 오염)을 갖게 되면, 멤브레인이 없는 감지를 할 수 있기 때문에 다이아몬드에 대한 관심이 특히 높다.

■ 의료 폐기물 문제와 이의 해결

다른 폐기물에 비해 의료 폐기물은 생체유해 특성 면에서 다르다. 전염물질을 포함한 의료 폐기물이 주변에 불법적으로 버려지고 있다는 것은 심각한 문제이다. 이 문제를 해결하기 위해서는 정부, 산업체, 의료공급상 등이 함께 협동해야 한다. 임상 혈액 테스트 시스템과 minimal invasive therapy 분야에서 의료 폐기물을 줄이는 문제의 해결에 초소형 정밀기계 기술은 유용하다.

의료 폐기물에는 전염물질, 일회용 의료기구, 병원/클리닉/위생 실험실과 같은 의료 관련 기관에서 버려지는 물질들이 있다. 1980년대에는 이러한 폐기물은 가정용 쓰레기와 함께 처리됐다. 그래서 폐기물 처리 노동자 중에는 바늘사고의 발생이 많았다.

discharge, recovery, disposal과 같이 의료 폐기물을 3 단계로 나누면, 여기서 문제가 드러난다. 처음 discharge 단계에서 의료관련 노동자들은 의료 폐기물 문제에 대해 충분히 이해를 못했고, 기존의 의료 기술 시스템이 환경을 고려하지 않았다. 두 번째로 recovery 단계에서 일본 전역에서 분리 recovery가 이행되지 않았다. 세 번째로 disposal 단계에서 의료 폐기물 처리에 드는 비용이 매우 높아서 불법적인 dumping이 있었고, 이에 대한 벌금도 없었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 정부, 환경단체, 산업체, 의료공급상이 함께 협동할 필요가 있다. 최근에 몇몇 의료 회사들이 의료 폐기물용 분리수거통을 개발하고 있으며, 몇몇 서비스 회사들은 의료 폐기물을 recovery에서 disposal 까지 책임지는 통합 경영 시스템을 제공하고 있다. 더욱이, 철강 산업이 자체의 전기로 연소되는 용광로를 이용하여 의

료 폐기물에 대한 recycle 사업을 확장하고 있다. 일본에서 의료 폐기물 처리 사업의 시장 크기는 2000년에는 3천불 정도가 되리라 예상한다. 이로 인해 의료 폐기물에 대한 recovery와 disposal에 대한 환경이 좀더 개선될 것이다.

의료 폐기물의 양을 줄이는 방법이 중요하다. 몇몇 의료 시설은 의료관련 노동자들을 훈련시켜 의료 폐기물을 줄이려 하고 있다. 이러한 운동은 의료에 관련된 기관에서는 널리 퍼져있는 일이다. 이는 의료 폐기물을 줄이는 것이 의료 폐기물 처리에 드는 비용을 줄여주기 때문이다. 의료 기술 시스템에 대한 의료 폐기물을 줄여주는 새로운 기술이 최근 개발되고 있다.

새로운 분야에서 초소형 정밀기계 기술은 의료 폐기물을 크게 줄이는데 기여할 것이다. 여기서는 초소형 정밀기계 기술이 사용된 2가지 예를 보여주려 한다. 즉, 임상 혈액 테스트 시스템과 minimal invasive therapy가 있다.

◎ 임상 혈액 테스트 시스템

병원의 임상 혈액 테스트 분과에서는 많은 양의 다양한 폐기물을 버린다. 혈액, 체액(body fluid), 폐기된 임상 시약/병리 폐기물과 같은 테스트 샘플 뿐만 아니라, 튜브, 주사기, 바늘과 같은 의료 장비가 전염성 폐기물로 처리된다.

1번 이상의 테스트를 수행하는 경우에, 여러 대의 테스트 기계가 필요하다. 그래서 각각의 기계에 대해 혈액 샘플을 준비하는데 여기서 여러 개의 튜브가 사용된다. 결과적으로 실제로 측정하는데 어느 정도의 혈액량이 필요한 지를 알 수 없다.

통신 기능을 갖는 더욱 간결한 테스트 기계를 개발하는 것이 바람직하다. 예를 들면, 모기가 혈액을 빠는 것과 같이 부드럽게 혈액을 채취하는 귀고리 형태(earring-type)의 테스트 기계를 고려할 수 있다. 임상 테스트, 응급시 측정, 수술에 대한 연속적인 감시의 경우에는 유용하며, 더욱 많은 전염성 폐

기물을 줄일 수 있다.

◎ Minimal invasive therapy

최근에는 비디오가 부착된 내시경과 원격 제어장치를 이용하여, 넓게 절개하지 않는 내시경 수술이 널리 보급되고 있다. 기존의 수술 방법에 비해, 이 방법은 혈액으로 얼룩진 재료와 같은 전염성 폐기물을 줄일 수 있고 수술후 통증이 적기 때문에 병원에 있는 기간이 줄어든다는 이점을 갖는다.

예를 들면, 일본에서는 1992년 이후 복강경 수술 시스템(laparoscopic surgical system)을 담낭조루(cholecystectomy)에 사용하여 왔다. 산화리튬 담낭 환자의 경우, 평균 병원에 있는 기간이 1990년에 37.7일에서 1993년에는 27.8일로 줄어들었다. 히로시마에 있는 시설을 이용하여 의료 폐기물을 처리한 병원의 데이터에 따르면, 의료 폐기물 처리 비용이 1993년에 병상당 약 9분의 비용이 들었다.

현재 minimal invasive therapy도 증후군에는 아직 한계가 있다. 초소형 정밀기계 기술을 이용한 새로운 minimal invasive therapy는 이러한 제한사항을 줄일 수 있을 것이다. 의료 폐기물을 줄이기 위해서, 이것과 같은 minimal invasive therapy가 미래에는 더욱 많이 사용될 것이다.

앞으로의 전망

앞으로 초소형 에너지 및 화학 시스템에 대한 연구는 다음과 같이 4가지 사항에 초점을 둘 필요가 있다.

◎ 고전력 밀도와 고효율 액츄에이터 - 열에 의해 구동되는 초소형 heat pump의 개념이 매력적으로

보이지 모르지만, 전기에 의해 구동되는 초소형 heat pump를 option으로 갖는 것이 바람직하다. 초소형 증기 압축 사이클의 성공적인 개발은 냉각 압축기를 구동할 수 있는 고에너지 밀도와 고효율을 갖는 액츄에이터를 사용할 수 있는 여부에 달려있다. 그러한 액츄에이터 또는 그러한 액츄에이터를 갖는 시스템은 $0.1-1.0 \text{ W/cm}^2$ 의 일을 냉각기에 전달할 수 있어야 한다. 이것은 기능적인 요구사항의 목표인데도, 이러한 수준의 전력 출력을 갖는 초소형 액츄에이터의 개발이 몇 년내에 가능할 것이다.

◎ 재료 사항-저온 재료가 일반적으로 사용된다. 가끔 재료 호환성 문제가 중요하겠지만, 보통 주의하여 설계를 하면 해결이 된다. 고온 분야의 경우는 다르다. 마이크로 구조물로 제작이 가능한 고온 재료는 고온과 매우 높은 정도와 반복되는 열적 cycling을 갖는 corrosive 환경에서도 동작해야만 한다.

◎ 신뢰도 - 초소형 에너지 및 화학 시스템이 상업적으로 활용이 가능하려면, 매우 신뢰도가 높아야 한다. 부품과 시스템의 신뢰도 및 결합 메커니즘을 결정할 필요가 있다. 궁극적으로는 초소형 에너지 및 화학 시스템은 대형 시스템의 동작수명에 근접하는 수명을 가져야 한다.

◎ 양산 비용 - 양산 비용을 결정하여 낮은 비용의 양산 기술을 개발할 필요가 있다. 초소형 에너지 시스템을 개발하여 일반적으로 에너지 변환 분야에서 사용하면, 생산가동량은 컴퓨터 칩과 관련된 생산가동량을 능히 앞지를 것이다. 그래서 양산 경제를 구현하는 중요한 기회가 된다. 따라서 새로운 초소형 시스템에 가치공학 기술을 다시 적용하여 복잡도를 줄일 필요가 있다. 