

# 우주항공분야의 초소형 정밀기계

위성을 발사하는데 소요되는 비용은 위성의 질량과 직접적으로 관련이 있다. 위성에서 초소형 정밀기계 기술을 적용시키면 상당한 무게 감량이 있고 비용도 줄어들게 된다. 하지만, 지금까지 우주항공분야에서는 초소형 정밀기계 기술이 드물게 사용되었다. 본고에서는 우주항공분야에서 초소형 정밀기계 기술을 사용하면 얻게 되는 장점을 제시하고, 또 우주항공분야에 이 기술이 보급되는데 있어서 어려운 점을 알아본다. 그리고 초소형 정밀기계 기술의 응용사례와 앞으로 응용될 분야를 제시한다.

백 경갑\*, 주 병권, 김 희중, 오 명환

대전대 전자통신공학부\*, KIST 정보재료소자연구센터

## 개요

대부분 우주항공센터의 중장기적인 주요 목적은 우주항공 서비스에 관련된 비용과 지연을 줄이는데 있다. 이러한 것은 성능을 줄이지 않고 우주선에 들어가는 비용과 lead time을 줄이는데 있다. 이로 인해 유사한 서비스를 제공하는 지상 시스템과 동등한 수준으로 우주항공 시스템을 활용할 수 있다는 것이다. 과학과 실험이 목적인 경우, mission에 대한 허가가 나오면 짧은 기간에 그리고 예산 범위 내에서 더욱 많은 양질의 데이터와 관심을 끌어들이는 것이다. 업그레이드와 유지보수가 어렵고 직접적인 관제가 어려운 우주항공의 단점을 보완하기 위해서, 상용 부문에서 우주항공 서비스는 동등한 지상 서비스에 비해 비용이 적어야 한다.

우주선 제작은 현재 노동집약적이며 숙련공의 일이다. 유사한 장치는 다시 만들어지지 않는다. 이러

## - 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



한 사실 때문에 새로운 설계 및 제조 패러다임, modularity, 조립과 같은 기존의 방법은 비용절감에는 도움이 되지만, 원하는 수준에는 미치지 못한다. 비용을 상당히 줄이고 상용화할 수 있는 방법은 우주항공 subsystem의 대량생산과 분산 시스템 및 서비스에 기초한 기술 또는 공학의 획기적인 발전을 통해서만이 가능하다.

초소형 정밀기계 기술의 장점은 우주항공분야에서는 상당하며, 비용에 많은 영향을 미친다. 초소형화는 새로운 위성을 설계할때 대단히 중요한 역할을 하며, 전세계시장을 석권하기 위해 북미 및 유럽의 여러 우주산업체들이 활발한 연구활동을 하고 있다. 이러한 충격은 집적회로를 통해서 얻는 충격과 유사하며, 거대한 consumer electronics 시장을 형성한다.

## 우주항공 메카니즘

위성을 발사하는데 소요되는 비용은 위성의 질량과 직접적으로 관련이 있다. 위성에서 초소형 정밀기계 기술을 집중적으로 사용하면 상당한 무게 감량이 있고 비용도 줄어들게 된다. 하지만, 지금까지 우주항공분야에서는 초소형 정밀기계 기술이 드물게 사용되었다.

우주항공분야에서, 기존에 사용되었던 대형의 우주항공 메카니즘 소자들을 대체하기 위해 초소형 정밀기계 기술을 사용할 수 있다. 일반적으로 우주항공 메카니즘은 다음과 같은 기능을 갖고 있다.

- 태양 전지 어레이, 안테나, boom, 거울의 전개
- 안테나, 망원경, 거울의 pointing
- 망원경과 카메라의 focusing
- launch restraint와 separation device의 release
- door, aperture, end stop latch의 closing
- payload 분야(예 : cooling loop와 experiment

solution loop에서 fluid의 pumping)

- momentum storage
- 위성의 위치 및 각속도 감지

현재 전체 우주선 시스템은 일반적으로 크기가 크고 질량이 크기 때문에, 초소형 정밀기계 기술의 사용이 매우 한정되어 있다. 결과적으로 질량이 크고 관성이 큰 물질을 상당한 거리로 이동시킨다는 것은 cm에서 0.1m 크기로 물질을 이동시키는 기존의 메카니즘과 연관된다. 하지만, 작은 양의 media를 움직이거나, 미세한 힘을 측정하려는 몇몇 분야에서는 초소형 정밀기계 기술의 등장으로 인해 이미 특정 우주항공분야를 만들어 냈다. 우주선과 payload subsystem의 초소형화와 작은 크기의 위성으로 축소되는 경향 때문에 앞으로 초소형 정밀기계 기술이 더욱 많이 사용될 것이다.

다음과 같은 2가지 실례가 우주항공 기구에서 초소형 정밀기계 기술을 사용하게 될 가능성을 설명해준다.

- 매우 민감한 가속도 센서 패키지(PAX)는 Olympus 통신 위성에 탑재되었었다. PAX의 목적은 내장 설비가 작동함으로 인해 발생하는 미세 왜란(disturbance)을 측정하는 것이다. PAX에는 3개의 가속도 센서, 보정 더미스터(calibration thermistor), 전자장치가 들어있다.

- 1994년에 Shuttle에 탑재되었던 International Microgravity Laboratory(IML-2)의 일부였던 세포배양 목적의 생물반응기(bioreactor)에는 micropump, microvalve, 온도와 pH 측정용 chemical microsensor가 들어있다.

생물반응기는 ETHZ(CH)와 Mecanex의 Gruppe Weltraumbiologie가 개발했다.

앞으로 초소형 정밀기계 기술은 다음과 같은 분야에서 사용될 수 있다.



- 고체 자이로스코프
- 기존의 cm 크기인 microswitch를 대체할  $\mu\text{m}$  크기의 microswitch
- 기존 메커니즘의 disturbing reaction force와 torque에 의해 발생하는 microvibration environment를 줄여주는 소자
- robotic grappling 소자에서 미세 힘 센서
- 메커니즘에서 건강진단 소자
- scientific payload experiment에서의 소자
- micropump로 구동되는 cooling loop를 사용함으로써 저온에서도 동작되는 적외선 감지기

넓은 우주항공분야에서 성공적으로 초소형 정밀기계를 구현하려면 다음과 같은 사항을 고려할 필요가 있다.

- 매우 동적인 발사환경을 극복하고 5-10년의 궤도생활 동안에 제대로 동작하기 위해서, 초소형 정밀기계 적용시 필요한 기계적 부하와 접촉 스트레스의 허용치에 대한 설계기준
- 주요 설계의 변경없이, 기존의 onground 분야에서 우주항공분야로 효율적으로 이전시키는데 가능한 비용
- 일반적으로 우주항공분야가 적기 때문에 몇 개(일반적으로 10-100)의 소자를 요구하는 분야에 초소형 정밀기계 기술의 적용가능성
- 현재의 기술로 우주환경에서 메커니즘이 얼마만큼의 수명시간 동안 동작할 수 있는지와 앞으로의 개선가능성 정도
- 우주항공분야에서 필요한 높은 신뢰도를 얻기 위해, 초소형 정밀기계의 신뢰도가 얼마만큼이 될지 그리고 redundancy 개념의 수용가능성 정도

## 우주항공분야에서의 응용사례

### 발사 시스템(Launch System)

우주선의 높은 발사 비용은 현재 우주항공 산업에서 주요 문제이다. 우주선 발사비용은 전체 mission 비용의 25-50%를 차지한다. 초소형 정밀기계 위성은 크기가 작고 질량이 작아 발사 비용이 상당히 줄어든다. 이러한 장점을 이용하려면, 초소형 정밀기계 위성을 발사하기 위해 초소형 정밀기계 위성 전용 발사 시스템을 개발해야 한다. 초소형 정밀기계 기술은 직접적으로 발사대에 적용되는데, 발사대의 질량이 줄어들고 payload가 늘어난다.

짧은 기간동안 초소형 정밀기계 기술이 현재 발사 시스템의 2가지 분야에서 사용되는데, 이는 유도 시스템과 감시 장비 분야이다. 대형 발사 장치의 유도관제 시스템은 payload 바로 아래에 위치해 있다. 그래서 유도관제 시스템의 소형화로 인해 가능한 모든 무게를 줄일 수 있다. 현재 초소형 정밀기계 유도 소자가 개발중이며 향후 소형 유도 시스템에 통합될 수 있다. 지금 문제 중 하나는 초소형 정밀기계 유도소자의 상대적인 비정확도이지만, 앞으로 점진적으로 개선될 전망이다. 이러한 유도 시스템의 정확도를 향상시키기 위해 GPS를 사용할 수 있다. 초소형 정밀기계 소자들이 연속적으로 이를 개선시킬 것이다. 더욱 작은 소자들은 더욱 작은 질량과 에너지 소비를 가져올 것인데, 이는 전지의 크기가 작아지게 되고 설비대의 크기가 줄어들게 된다. 이것은 발사대의 성능을 상당히 개선시킨다.

소형 발사대의 경우, 초소형 정밀기계 기술은 더욱 높은 궤도진입 정확도를 제공해준다. 이러한 발사대는 궤도진입을 수행하는 고체로켓 모터의 스핀을 안정하게 한다. 이러한 stage는 유도관제 시스템이 필요가 없어서 더욱 큰 payload를 적재할 수 있다. 만약 유도관제 시스템을 궤도로 가져와야 한다면 이 발사대의 payload는 무시하거나 없게 된다. 이러한 기술에서 얻을 수 있는 단점은 비교적 낮은 궤도진입 정확도를 갖는 것이다. 마지막 stage가 spin-



up과 접화가 된 뒤에는 조향하거나 정지시킬 수 없다. 크기가 작고 20-30kg의 작은 질량을 갖는 유도 시스템이 사용될 때, 이러한 stage는 payload 기능을 떨어뜨리지 않고 로켓의 정확도를 크게 증가시키는 유도관제 시스템을 탑재할 수 있다. 그러한 비행체는 소형의 발사대에서 대형 발사 시스템이 갖는 복잡한 궤도진입 시나리오와 높은 정확도를 가질 수 있다.

발사대에서의 또다른 응용분야는 instrumentation이다. 발사 전이나 발사 중에 많은 다른 비행체 파라미터를 감시해야만 하고 다시 원격측정(telemetry)을 통해 지상으로 보내져야 한다. 보통 이런 일은 모든 전자장치가 장착된 비행체 설비대를 통해서 수행된다. 이것은 비행체 설비대에서 긴 케이블과 잉여 장비가 있어야 한다. 미국의 우주항공 협회는 ASIM(Application Specific Integrated Microinstrumentation)과 함께 발사대 instrumentation 실험을 하고 있다. ASIM의 instrumentation에서 데이터 처리 장비와 원격측정 시스템은 1개의 칩에 장착된다. 부가적인 배선없이 측정하려는 장소에 ASIM의 instrumentation을 부착할 수 있다. 더욱이 이들은 부착된 stage와 함께 투하되어 비행체 설비대에 있는 장비의 질량이 더욱 줄어든다.

이러한 응용분야는 발사대에서의 간단한 예이다. 하지만, 발사대 산업체들이 더욱 많은 초소형 정밀기계 기술을 응용할 수 있는 분야가 있다.

우주항공분야에서 초소형 정밀기계 기술을 응용하면 더욱 많은 소형 위성을 탑재한 비행체를 발사할 수 있을 것으로 기대된다. 그 수는 매우 클 것이고 현재 위성과 똑같은 성능을 가질 수 있다. 가까운 미래에는 100kg 대의 전용 위성이 개발되고, 장기적으로는 1kg 이하의 "nanosat"이 개발될 것이다. 많은 위성을 발사할 수 있다면, 현재 발사 시스템도 그 일을 해낼 수 있다. 더욱이, 목표궤도가 critical하지 않을 때는 큰 위성에 "piggy backing"하게

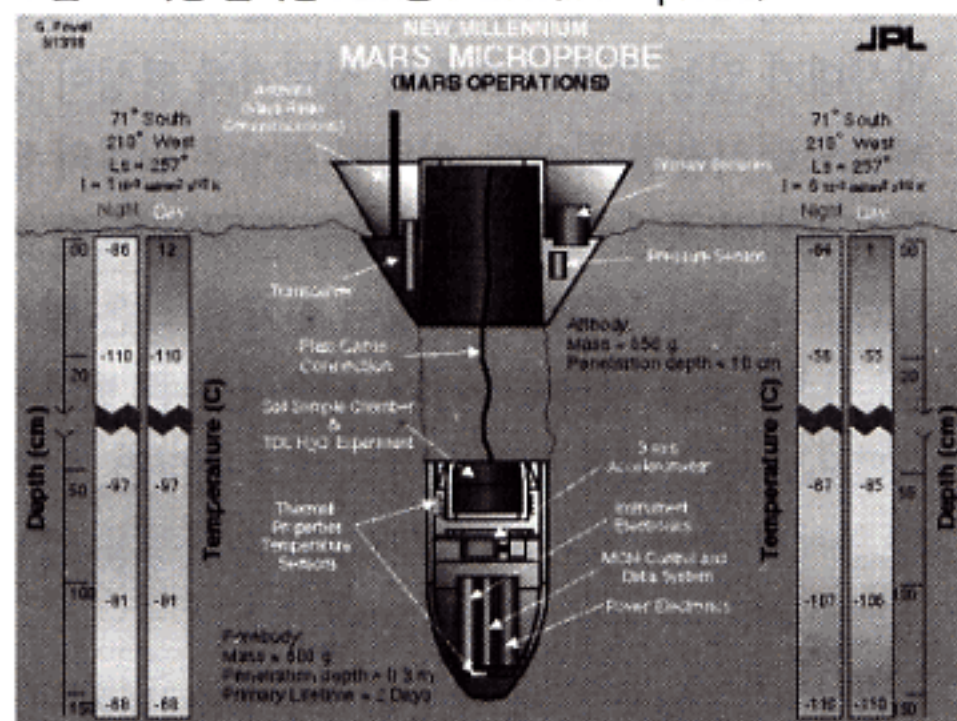
되면 비용이 적게 든다. 하지만, 그들 크기에 맞는 발사대가 있는 경우는 초소형 정밀기계 위성이 경제적으로 사용될 것이다. 이러한 위성은 위성의 임무에 적합한 특정 궤도로 발사되는 전용발사대가 필요하고 질량이 100kg이하 일때 현재의 작은 발사대는 너무 크고 비경제적이다. 더욱이 다른 발사시스템으로 더욱 많은 위성을 발사해야 한다면, 현재의 확장형 발사대는 초소형 정밀기계 위성을 발사하는데 최적의 비용이 드는 방법이다.

위성이 100kg을 넘게 되고 위성의 수가 1년에 20-30개 정도로 작을 때, US Pegasus, Conestoga, 러시아의 Start와 같은 소형 발사대가 사용된다. 발사 비용은 전용 발사대의 경우 보통 1,000-2,000 만 불이 소요된다. 이러한 발사대의 장점은 널리 사용되지만 비교적 비싸다는 단점을 갖고 있다.

전용 발사대가 필요한 100kg 이하의 위성이 많을 경우에는, 이러한 payload 크기에 적당한 새로운 발사대를 개발하는 것이 상업적으로 바람직하다. 이러한 방향으로 2가지 방법이 있는데 Pegasus와 유사하지만, 크기는 1/2인 공중발사 비행체가 있다. 소형 비행기를 이용하여 질량이 10톤 정도 되는 그러한 비행체를 쉽게 이동시키고 발사시킬 수 있다. 이러한 작은 크기로 인해, 개발과 제작비용은 현재의 소형 발사대보다 적게 든다. 유도 관제 시스템에 초소형 정밀기계 기술을 적용하면 합당한 payload를 갖는 정확한 발사대를 만들 수 있다. 또 다른 개념은 "궤도 탐사 로켓(orbital sounding rocket)"을 개발하는 것이다. 간단하면서 유도 시스템을 적재하지 않은 탐사 로켓 stage를 사용하여, payload와 궤도진입 stage를 부궤도 궤적으로 진입하게 하는 발사대를 만들 수 있다. 유도 시스템은 가장 높은 고도에서 마지막 stage를 추진시켜 위성을 궤도에 진입시킨다. 이 방법은 비용이 적게 들지만, 조잡하다. 하지만 일본은 1970년에 Lambda 4S 발사대를 가지고 이 방법으로 위성을 궤도에 진입



그림 1. 화성 탐사용 초소형 프로브(microprobe)



시켰다. 그러한 비행체를 발사하는데 몇 백만불이 소요된다.

소형의 초소형 정밀기계 위성 수가 상당히 늘어난다면(1년에 100개 이상), 소형의 재활용 발사대를 개발하는 것이 더욱 경제적이다. SSTO(Single Stage To Orbit) 소형 발사대의 개발에는 scale 효과가 적용되지 않는다. Mockingbird는 1,500kg의 발사질량을 가지며, 발사비용은 10만불 정도이다. 더욱 큰 payload의 경우, DC-X 시험 비행체(발사 질량은 15-20톤) 정도의 크기를 갖는 비행체가 사용될 수 있다. 이러한 비행체는 부궤도 궤적을 날아다니다가, 가장 높은 고도에서 최상단 stage와 위성을 놓아준다. 이어서 주요 비행체는 지상에 착륙하고 이를 재사용한다. 확장형 최상단 stage는 payload를 원하는 궤도로 가져온다. 이러한 비행체는 더욱 폭넓은 개발이 필요하지만, 발사당 소요비용이 더욱 적다. 이러한 경우는 발사 횟수가 많아 개발비용이 되찾아졌을 때만 적용된다.

초소형 정밀mechanical의 장점 중 하나는 소형 집적 소자가 가속에 대한 큰 저항을 갖는다는 것이다. 그래서 발사할 위성의 수가 많을 때는, railgun, gasgun, scram 가속도 센서와 같이 높은 가속을 갖는 발사 시스템이 적당하다. 그러한 대형 시스템에서는 위성이 로켓 엔진과 함께 protective shell에 적재된

다. 최고 가속이 붙는 경우, 초당 몇 km의 속도를 가지며, 탄도궤도에 진입한다. 궤도의 가장 높은 고도에 도달하면 로켓 엔진이 점화되어 위성이 궤도에 진입한다. 이러한 발사대의 경우에, 일반적인 가속도는 몇 1,000g 정도가 되지만, 이러한 수준의 많은 gun 발사형 군용 시스템이 제작되었다. 이러한 가속도 센서가 전세계적으로 초고속 충격(hyper-velocity impact) 연구용으로 많이 사용되고 있다. 우주항공 발사를 시도하기 위해 더욱 큰 시스템이 만들어져야 한다. 초고속 발사대의 비용은 kg당 3,000-5,000불 정도로 싸다. 하지만 주요 단점은 barrel이 고정되어 있어서 위성을 다른 궤도로 진입시키는 것이 어렵다는 점이다.

### 초소형 프로브(Microprobe)

1999년 10월에 농구공 크기의 aeroshell이 화성 표면에 초속 200m의 속도로 충돌할 것이다. 각각의 aeroshell은 충격에 부서져 소형인 2개의 science probe가 분리되는데, 이것이 2m 깊이의 흙 속으로 들어가게 된다. 초소형 probe의 주요 과학목적은 화성 표면에 얼음이 존재하는지 결정하기 위해서인데, 이는 화성에 생명체가 존재하는지 여부를 결정하는 중요한 단서가 된다. 조그마한 science station은 온도를 측정하여 화성의 날씨를 감시한다.

각각의 aeroshell에 높이 18cm 이하(제도용 표준연필의 길이 정도)의 초소형 프로브를 구성하는 forebody와 aftbody가 있는데, 이는 서로 2m 길이의 tether를 이용하여 상호 통신한다. 그림 1은 화성 탐사용 초소형 프로브이고, 그림 2와 3은 각각 화성 탐사용 초소형 프로브의 forebody와 aftbody를 보여준다.

초소형 프로브는 극히 추운 화성환경에서 약 50 시간동안 동작할 것이다. 화성탐사용 초소형 프로브는 21세기에서 중요한 기술인 "network" 임무가 포함되어 있다. 여기서는 1개의 우주선에서 분리되



어 나온 다중 초소형 프로브나 착륙선이 기후 시스템 및 지진활동과 같은 동적이고 복잡한 현상을 연구한다.

### 초소형 측후소(Micro Weather Station)

정확한 측정을 할 수 있는 센서를 작은 질량이면서 소비전력이 작은 패키지로 개발하기 위해, 미세 가공기술을 사용하고 있다. 지구와 화성의 대기에서 물의 중요성 때문에 초소형 습도계는 초소형 측후소에서 가장 중요한 소자이다. 직접적으로 이슬점을 측정하는 초소형 습도계가 개발되어 상층 대기권의 습도 측정용으로 NASA의 DC8에서 성공적으로 테스트 되고 있다. 초소형 습도계(Microhygrometer)는 기존의 무거운 chilled-mirror형 이슬점 습도계보다 탁월한 성능을 보여준다. 부가적으로 바람, 압력, 공기온도 측정용 초소형 정밀기계 센서와 방사능도계(Radiation Densitometer), micro laser Doppler 풍속계(Anemometer)를 현재 제작하고 테스트 중에 있다. 그림 4는 초소형 습도계이다.

상층 대기권의 특성을 정확하게 파악하면 지구의 대기에서 기후, 전반적인 변화, 오존 결핍을 이해할 수 있다. 이러한 특성화는 in-situ 센서를 필요로 한다. 초소형 측후소는 상층 대기권의 기능을 향상시켜 주는 초소형 측정장비의 개발과 관련된다. 측정장비는 항공기, 풍선에 탑재된 라디오존데(Radiosonde), 항공기에 탑재된 낙하존데(Dropsonde) 장비가 포함된다.

지구의 상층 대기권과 화성의 혹성 경계층에서의 유사한 측정 경계조건 때문에 지구와 화성에서 사용될 초소형 측후소를 개발할 수 있다. 지난 30년 동안 전자장치와 측정에 대한 기술이 고도화되면서, 대형 Voyager급 우주선이 비용이 적은 Discovery/Explorer 목적으로 진화했다. 초소형 정밀기계 기술과 microinstrumentation을 이용하여 성능을 떨어뜨리지 않고 크기를 줄일 수 있다. 초소형 측후

그림 2. 화성 탐사용 초소형 프로브의 forebody

흘속으로 0.3-2m 정도 들어간 forebody는 섭씨 0-120 degrees에서 동작하도록 설계되었다. 무게는 900g보다 작다. microcontroller, 2개의 온도센서, 물 감지 실험장치, 3축 충격 가속도 센서 등이 들어있다.

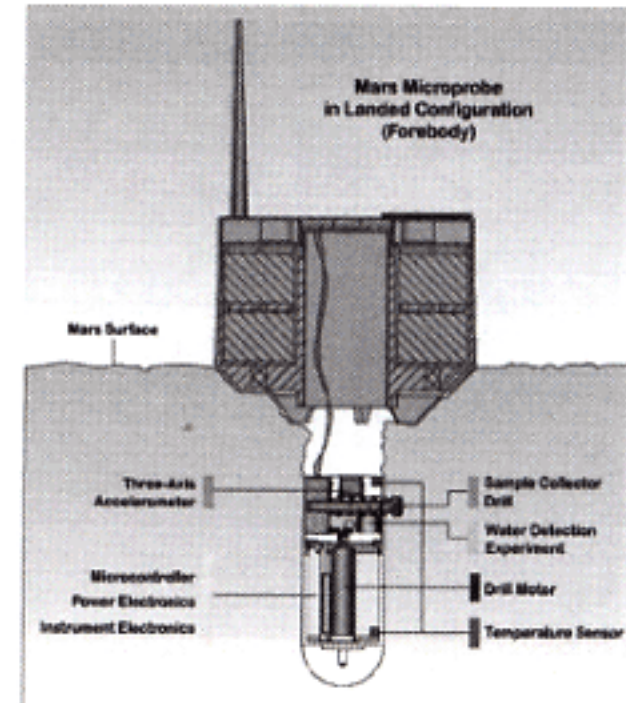


그림 3. 화성 탐사용 초소형 프로브의 aftbody

화성표면에 남아 있어 지구에 데이터를 보내는 aftbody는 섭씨 0-(-)80 degree에서 동작하도록 설계되었다. 무게는 1050g보다 작다. 2개의 리튬 전지, 안테나가 있는 TOC(Telecom On a Chip), 기상 압력센서, 하강 가속도 센서, 태양 감지기 등이 들어있다.

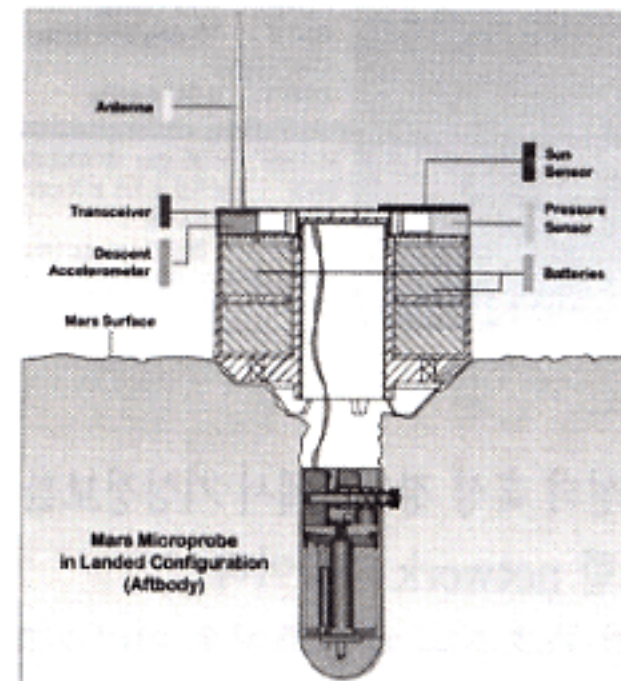


그림 4. 열전(thermo-electric) cooler에 탑재된 초소형 습도계





그림 5. JPL이 제작한 화성 지진계의 시제품

이 소자에서는, 3gm의 구리로 된 proof mass를 수직 방향으로 실리콘 결정 캔틸레버(cantilever)가 받쳐준다. 용량형 변위 센서는 수직 가속이 발생할 때 proof mass의 편향(deflection)을 측정한다. 이 소자는 10-(-)9 g/Hz 보다 좋은 감도와 40Hz의 대역폭을 갖는다.

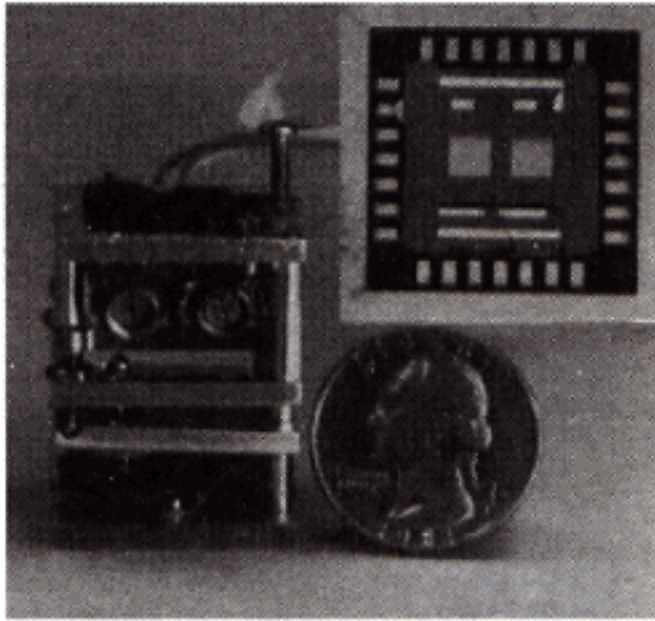


그림 6. 초소형 자이로스코프(Microgyroscope)의 변천사

1970 TECHNOLOGY → DRY TURN MOTOR GYROSCOPE BASED NADA STANDUP	MASS: 17 kg (6 AXES) SIZE: ~28 x 30 x 33 cm POWER: ~22 Watts, NOMINAL RATE 2 deg/sec (max); (HIGHER INPUT CAPTURE: RATES ALLOWABLE) DRIFT: 0.003 deg/hr
1980 TECHNOLOGY → CASSINI PHU MEMS LITTON MEMSICAL RESONATOR GYROSCOPE BASED	MASS: 5 kg (4 AXES) SIZE: ~28 x 20 x 10 cm POWER: ~18 Watts RATE 10 deg/sec (max); (TWO RANGES) CAPTURE: DRIFT: 0.01 deg/hr
2000 TECHNOLOGY JPL/UC LA Silicon Micromachined Microgyro	MASS: < 30 gm (3 AXES) SIZE: < 1.5 x 1.5 x 3 cm POWER: ~1.0 W RATE > 360 deg/sec (max) CAPTURE: ~90 deg/hr (mini) DRIFT: 30 deg/hr (goal: 0.1 deg/hr)

소는 화성의 혹성 경계층에서 기상정보를 얻는데 매우 중요한 network 기술이다.

초소형 측후소는 기상 측정용 라디오존데와 낙하존데에서 상용으로 사용된다. 이것은 기상 예측과 모델링 그리고 공항근처의 기상측정과 같은 곳에서 사용된다. 특히 습도에 대해서는 보고된 자료의 정확성이 떨어지는데도, 현재 10만개가 넘는 라디오존데를 미국에서 사용하고 있다. 대형의 일반 시장을 형성하기 위해서 라디오존데는 작아야 하고 비싸지 않아야 한다. 더 정확하고 더 비싼 센서를 사용하는 기준 라디오존데는 작은 시장을 형성한다. 풍선에 탑재된 라디오존데 외에 낙하존데는 항공기

에 탑재되어 하강시 낙하산을 이용한다. 응답시 정확도와 속도는 이러한 응용분야에서 성능을 결정하는 중요한 기준이다. 여기에는 장비가 대기권을 통과해 상승하거나 하강할 때 변화하는 상태를 어느 정도 추적할 수 있는 지가 포함된다.

표면 초소형 측후소는 군사적인 전술 상황에도 응용되는데, 육지나 해상의 표면 상태에 대한 중요한 정보를 수집하는 툴로서 사용된다. 이러한 분야에 사용되는 표면 측후소는 비밀작업을 할 수 있을 만큼 크기가 작고 값이 싸서 여러 가지 센서를 탑재할 수 있다. 해군은 이러한 기술을 사용할 앞으로의 고객이다. 완전한 초소형 측후소 외에도 개별 센서들은 개별 소자로서 응용범위가 넓다. 많은 회사들이 항공기에 탑재된 대기 센서에서부터 옥수수 건조 장치에 이르는 여러 분야에서 chilled-mirror 이슬점 습도계를 제작하여 사용하고 있다. 기존의 chilled-mirror 소자보다 속도와 정확성이 좋은 작고 값이싼 습도계가 앞으로 시장의 상당한 부분을 점유할 것이다. 이미 운동화에서부터 도뇨관(catheter)에 이르는 여러 분야에서 초소형 정밀기계 압력센서의 시장이 이미 상당한 규모이다. 마지막으로 laser Doppler 풍속계는 우주항공에서부터 종이제조에 이르는 응용 분야를 갖고 있다. 집적화된 소형 laser Doppler 풍속계는 이러한 응용분야에 영향을 주며, 최종 소자의 가격에 따라 새로운 시장이 형성될 것이다.

### 초소형 지진계(Microseismometer) 및 초소형 가속도 센서(Microaccelerometer)

NASA는 혹성과 microgravity science용 한벌의 소형 지진계와 가속도 센서를 개발하고 JPL의 CSMT(Center for Space Microelectronics Technology)는 초소형 정밀기계와 새로운 트랜스듀서 전자장치를 결합하여 강하고 크기가 작으면서 소비전력이 적은 패키지로 만들어진 매우 민감한 장치를



만들었다. 그림 5는 JPL이 제작한 화성 지진계의 시제품이다.

현재 감도가 좋은 지진계는 원거리 지진감시에 사용되는데, 크고 무겁고, 섬세하며 가격이 비싸다. 지진광물탐사의 경우 낮은 가격, 낮은 감도의 지중청음기(geophone)가 사용된다. 높은 감도로 매우 적은 양의 질량, 부피, 전력을 측정할 수 있다. 더욱이 초소형 정밀기계 기술을 이용하면 값싸면서 대량생산을 할 수 있다.

증가된 감도로 지진탐사를 하면 개선된 층서 해상도(stratigraphic resolution)를 제공해주어 광물과 오일의 축적량을 확인할 수 있다. 시추공 지진탐사(borehole seismometry)는 매우 감도가 좋으면서 크기가 작은 지진계로 할 수 있다. 그리고 관성 유도장치에서 고급의 가속도계가 사용된다. 그림 6은 초소형 자이로스코프(Microgyroscope)의 변천사를 그림으로 보여준다.

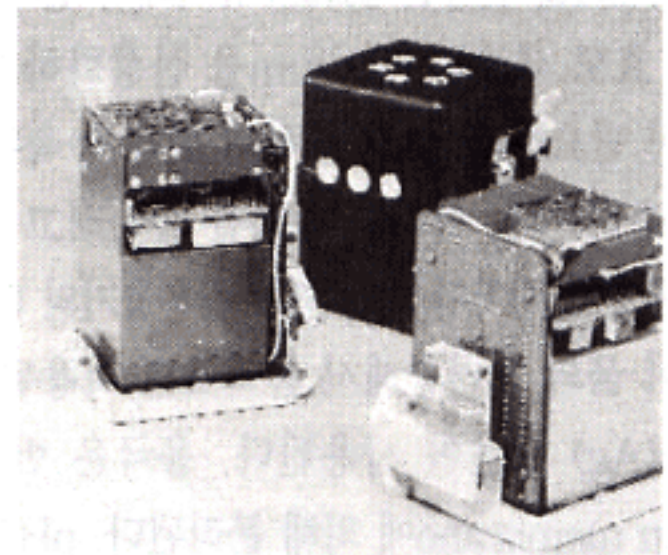
### 소형 우주 생물반응기(Miniature Space Bioreactor)

우주에서 세포를 가지고 실험해 보면 중요한 세포 기능이 microgravity 상태에서 변화한다는 것을 알 수 있다. 이러한 것에 관심을 크게 갖는 쪽은 기초 연구와 생물공학 분야이다. Spacelab에서 세포를 배양하기 위해, 소형 생물반응기를 개발했다. 목적은 통제된 생물반응기 실험에서 mixing하고 stirring하면 효모 세포(yeast cell)의 성장특성에 어떤 영향을 미치는지 평가하는 것이다. 1994년 7월에 ESA(유럽 우주항공센터)가 IML-2 mission 용 실험을 했다. 이 실험은 여러 가지 크기의 표준 용기 내에서 각각 실험을 하였다. 이 실험을 위해 할당된 type II 용기는 내부 크기가 63×63×85mm이다. 그림 7은 소형 우주 생물반응기이다.

우주 생물반응기는 다음과 같은 특징을 갖는다.

- 반응기에 적절한 속도(0.2-1.5 ml/h)로 9

그림 7. 소형 우주 생물반응기(Miniature Space Bioreactor)



일의 주기동안 신선한 medium을 공급한다.

- 배양세포에서 pH, 온도, 산화환원(redox) potential의 측정
- 배양세포의 pH 조절
- 지상으로 온라인 데이터 전송

장치의 복잡성과 type II 용기의 제한된 크기 면에서 보았을 때, 센서와 초소형 정밀기계 펌프와 흐름 센서를 제공해주는 실리콘 기술을 적용하게 되면 매우 큰 장점이다.

초소형 정밀기계 기술로 제작된 압전 펌프(Piezoelectric pump)를 이용하여, 생물반응기에 신선한 medium이 공급된다. 그렇게 사용될 때 펌프의 흐름속도는 제공되어야 하는 출력 압력에 의존하게 된다. 첫번째 비행시 유체전달이 충분히 제어되지 않았기 때문에, 생물반응기의 압력에 예측하지 못한 변화가 있다. 펌프가 페루프 제어 시스템에서 동작하여, 출력 압력에 관계없이 필요한 흐름을 제공할 수 있도록, 재비행시 흐름 센서가 추가된다.

생물반응기의 센서, pH-ISFET, 온도 감지 다이오드, 박막 백금(Pt) 산화환원 전극이 모두 단일 칩으로 집적되는데 크기는 3×53×5mm이다. 센서 칩은 캐리어에 탑재되어 반응기에 들어간다. 그래서 센서 표면이 반응용기의 부분이 된다. 화학 센서와 연결되어 사용되는 기준 전극은 gel로 채워진 Ag/AgCl 전극이다.

세포에 적절한 성장조건을 제공해주기 위해, 반



응기의 pH를 일정한 값으로 유지해야 한다. 일반 성장시, 효모 세포는 medium을 산성화하기 때문에 보상이 필요하다. 보상을 하기 위해 농축된 NaOH를 사용하는데, 이러한 위험을 줄이려고 전기화학적 pH 제어 장치가 개발된다. 반응용기의 티타늄(Ti) 전극이 물의 전기분해시 음극으로 사용된다. 양극은 은(Ag) 도선이 사용된다. 음극은 반응용기와 Nafion membrane에 의해 분리된다. pH의 전기화학적 보상은 매우 정확하게 제어할 수 있고, NaOH 보상을 위해 부가적인 펌프가 필요없다.


초소형 정밀기계 기술로 제작된 유체 제어용 소자와 실리콘 센서를 갖는 소형 생물반응기를 개발하면 microgravity 실험에서 폭넓게 사용될 것이다.

## 앞으로의 전망

21세기 초에 미국, 유럽의 NASA 및 ESA 그리고 우주항공 산업체들은 천문관측, 장거리 감지, 통신, 유인/무인 탐사, 여러 가지 다른 탐사용 우주선을 발사할 계획을 갖고 있다. 현재의 우주선보다 덜 비싸고, 더욱 많은 기능을 갖도록 하는 고급 우주항공기술이 필요하다. 국방성과 산업체들이 몇몇 기술들을 개발하겠지만, 우주항공센터만의 독특한

임무인 과학탐사 기술만은 다른 센터나 회사들이 개발하지 않을 것이다.

1996년 봄에 NASA는 NRC(국립 연구 위원회)로 하여금 2000년 후반에 필요한 민간 우주항공기술을 조사하여 이러한 요구를 충족하기 위해서 개발되어야 하는 기술이 무엇인가를 확인하도록 했다. NRC로 하여금 미래 기술사양을 수집하고 새로운 기능을 가질 수 있는 혁신적인 기술이 무엇인지 고려하여 연구기술개발로부터 어떤 기술을 얻을 수 있는지 결정하도록 하였다. 그리고 NASA가 더욱 효율적으로 산업체, 대학, 다른 정부기관과 협동하여 이러한 연구/기술개발(R&T)을 이끌어 나갈 수 있도록 하는 방안을 NRC가 제시한다.

NASA는 가격을 낮추고 기존의 우주항공 활동의 성능을 개선하여 새로운 우주항공 활동을 가능하도록 하는 고급 우주항공 기술을 개발할 책임이 있다. 최근 우주선에서 현대기술을 활용하는 기술이 NASA가 수준급이라고 하지만, 현재 센터는 장기적인 우주항공 기술개발에 지원하는 일이 비교적 없다. 앞으로 도전적인 우주항공 활동을 하도록 하고, 장기적인 목표를 이루기 위해서, NASA는 장기적으로 주요 영역에 우주항공 연구/기술개발(R&T)에 힘써야 할 필요가 있다. 

## 참고문헌

1. Christopher J. Welham, Julian W. Gardner and John Greenwood, "A laterally driven micromachined resonant pressure sensor," Sensors and Actuators, A52, pp.86-91, 1996.
2. Anthony Lawrence, Modern Inertial Technology : Navigation, Guidance, and Control, Springer-Verlag, New York, 1993.
3. George M. Siouris, Aerospace Avionics Systems, Academic Press, 1993.
4. R.L.Benoit, P.E.John B.Leonard, "Fluidics-A reliable alternative for aircraft control," Mechanical Engineering, pp.30-39, November 1983.
5. Garg, S.C., Morrow, L.D., and Mamen, R., "Strapdown Navigation Technology : A Literature survey," J. Guidance and Control, pp.161-172, May 1978.
6. K.R.Britting, Inertial Navigation Systems Analysis, New York : Wiley-Interscience, A Division of John Wiley & Sons, Inc., 1971