

# 자동차 분야의 초소형 정밀기계

본고에서는 초소형 정밀기계의 현재 및 미래 자동차 분야에 대해 알아본다. 또한 여러 가지 초소형 정밀기계 소자에 대한 현재 및 미래 시장 가치를 제시해보고 압력센서, 가속도계, 각속도 센서, 다른 종류의 초소형 정밀기계 소자에 대한 상품 개발 현황을 다룬다. 그 다음으로 자동차 분야에서 초소형 정밀기계의 시장 및 기술 경향을 다룬다.

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

## 개요

1979년 이래로 초소형 정밀기계는 자동차 엔진 제어 중 일부인 MAP(Manifold Absolute Pressure) 센서의 형태로 사용되고 있다. 오늘날, 많은 자동차는 전자식 엔진 제어 시스템에 이러한 소자중 하나를 장착하고 있다. 그림 1은 자동차에서 사용되는 센서를 나타냈다.

1990년대 초기의 자동차는 에어백 충돌 센서용 실리콘 가속도계를 장착했다. 이러한 소자는 일반 언론 및 상용 언론에서 대대적으로 보도되었다. 하지만, 이러한 2개 분야를 제외하고는 자동차 설계 엔지니어는 초소형 정밀기계 소자를 시스템에 채택하지 못했다. 앞으로 5~7년 동안 전혀 새로운 분야든 기존의 기술을 대체하는 분야든 간에 초소형 정밀기계 소자가 많이 응용될 것이다. 이러한 움직임은 다음과 같은 사항에 의해 더욱 재촉되고 있다.

-더욱 늘어난 보증 기간(최고 10년/150,000 마일)은 고신뢰성 소자를 요구한다.

## - 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



-연방 및 지방 법률이 연료효율, 배기가스, 안전에 대해 끊임없이 개선할 것을 요구한다.

-더욱 향상된 자동차 성능 및 편안함

-낮은 가격의 마이크로컨트롤러, 메모리, 향상된 자동차 진단 디스플레이

물론 초소형 정밀기계 소자의 현재 및 미래 시장의 상당한 부분은 자동차 부문에 있다. 1995년의 세계 초소형 정밀기계 시장은 27억달러였는데, 이중 자동차 부문이 41%(10억달러)를 차지했었다. 2000년경에는 세계 초소형 정밀기계 부품시장의 규모가 122억달러 정도 될 것이고, 이중 자동차 부문이 24%(30억달러)를 차지할 것으로 내다보고 있다.

## 기술적인 배경

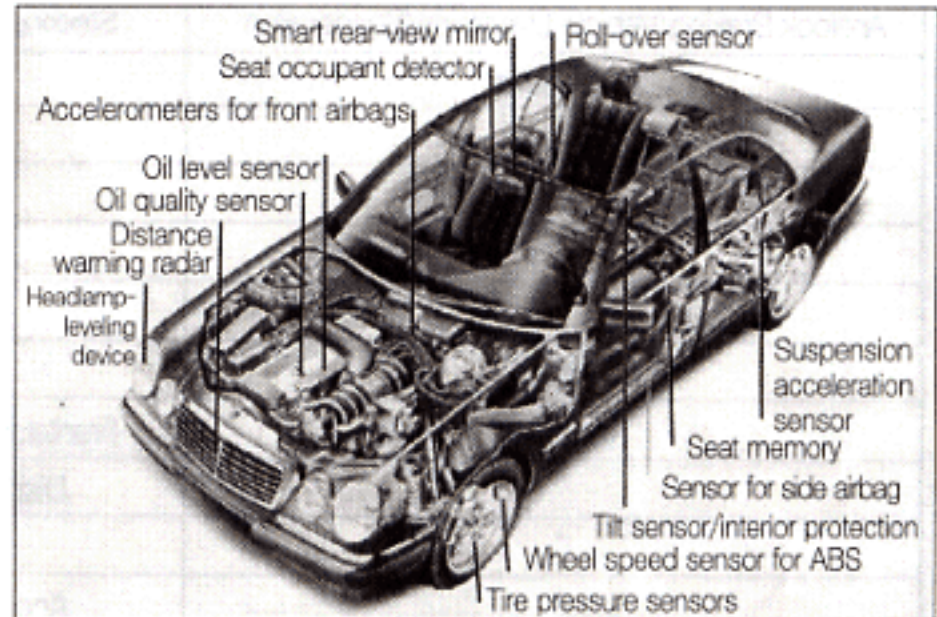
혹독한 환경에서의 성능과 신뢰성 유지, 가격저렴화 등과 같은 요구사항을 자동차 부품은 갖추어야 한다. 혹독한 자동차 환경에는 극심한 온도, 충격, 습도, 부식물, EMC, RFI, 다른 환경등이 포함되어 있다. 이러한 환경을 시뮬레이션하는데 사용되는 테스트 기준이 SAE J1211(전자식 설비 설계에서의 환경 실험 권고안)에 기술되어 있다.

덧붙여서 1년에 100만개 이상의 자동차 부품이 생산되어야 한다. 이는 자동차 수요뿐만 아니라, 고정적인 설계 및 제작경비와 관련된 대형 투자비를 빼내야 하기 때문에 필요하다. 최고 10년/150,000 마일의 수명과 대당 낮은 가격이 또한 필수적이다. 이는 일반소비제품의 가격을 갖는 군수부품과 같이 자동차 부품이 갖추어야 한다고 볼 수 있다. 이러한 특성은 초소형 정밀기계에 내재되어 있다.

부품비용은 자동차 시스템 설계업체들이 선택하는 기준으로서 중요하다. 센서/액츄에이터의 전체 비용에는 초소형 정밀기계 소자, 신호처리 전자공학(예를 들면, 온도보상, 필터링, 증폭), 패키징, 커

그림 1. 자동차에서 사용되는 센서.

오일 레벨 센서(최적의 오일 교환주기 확인), 가속도 센서(충돌시 인명구조 에어백의 작동), wheel-speed 센서(빙판도로에서의 미끄러짐 방지) 등이 사용된다.



넥터/케이블 장치, 테스트가 들어간다.

결과적으로 초소형 정밀기계 소자만의 가격은 전체 소자 가격중 매우 작은 부분을 차지한다. 그래서, 자동차 부문에서 성공하고자 하는 모든 공급업체들은 제작하기 쉽도록 매우 효율적인 설계를 하려고 한다.

초소형 정밀기계는 자동차 분야의 많은 부문에서 사용된다. 일괄공정 제작으로 인해 소자를 대량으로, 균일하게, 비교적 적은 비용으로 생산할 수 있다. 초소형 정밀기계는 마모되어 없어지는 움직이는 부품이 없기 때문에, 매우 신뢰성이 높다. 실리콘은 지난 20년동안 군수부문, 일반소비부문, 자동차부문과 같은 많은 분야에서 센서 재료로 사용되어 왔다. 많은 자동차 센서/액츄에이터에서 마이크로프로세서와의 호환이 가능함에 따라, 기존의 반도체 공정과 미세가공기술을 이용하여 높은 수직 기능집적도(vertical functional integration level)를 갖는 소자를 만들 수 있다.

## 시스템 응용분야

초소형 정밀기계는 다음과 같은 자동차 시스템에서 사용된다.

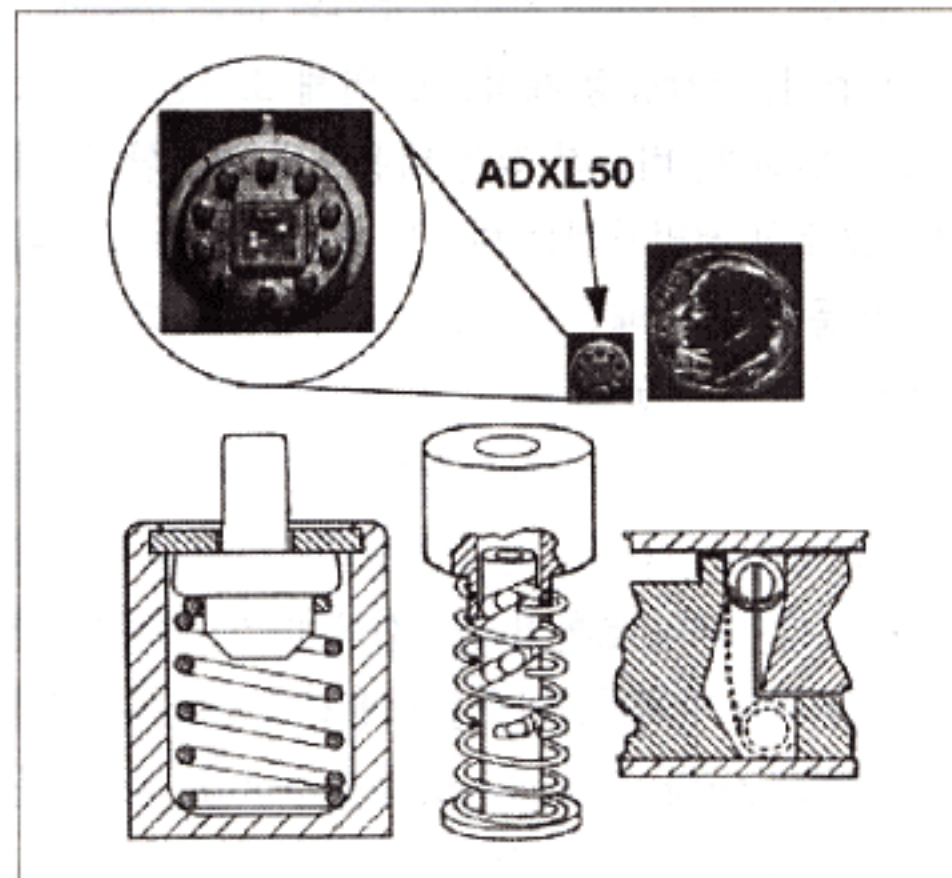


표 1. 안전성 분야에서의 초소형 정밀기계 응용

분야	센서구조	생산현황	초소형 정밀기계 적용 가능성
Antilock Braking/Vehicle Dynamics/Suspension	Steering Position/ Wheel Rotation	Production	Low
Suspension	Pressure	Ltd. Production	Med
"	Valve	Future	Low
"	Acceleration	Ltd. Production	High
"	Rate	Ltd. Production	High
"	Displacement	Ltd. Production	Low
Airbag	Acceleration	Production	High
Actuation	Frontal Impact Pressure(Canister)	Future	High
"	Displacement Side Impact	Ltd. Production	Low
"	Pressure	Future	Med.
"	Acceleration (Side Impact)	Ltd. Production	High
Seat Occupancy	Presence/	Ltd. Production	Low
"	Force Displacement	Ltd. Production	Low
Object Avoidance	Presence/	Ltd. Production	Low
"	Displacement	Future	
Navigation	Yaw Rate/Gyro	Ltd. Production	High
Navigation	Wheel Rotation	Ltd. Production	Low

그림 2. 기존에 헬리콥터의 safing, arming, fuzing 시스템에서 사용된 가속도 센서.

초소형 정밀기계의 표면 미세가공기술로 제작된 가속도계(ADX150)는 자체 보정, 자체-테스트, 자체-파괴 기능을 갖는다.



- 안전성(Safety)
- 엔진/전동장치(Engine/Drive Train)
- 안락성, 편의성, 보안(Comfort, Convenience, Security)

## -자동차 진단/모니터링(Vehicle Diagnostics/Monitoring)

각 시스템에서 디지털 엔진제어 연료 레벨과 같은 분야가 눈에 띈다. 그리고 특정 분야의 현재 및 미래 생산 현황을 보여준다. 다른 기술(예를 들면, 압전효과, 홀효과)과 초소형 정밀기계 기술의 사용 가능성에 대해 다루었다.

## 안전성

자동차 안전 시스템에서 초소형 정밀기계 적용 가능성에 대한 내용을 표 1에 기술했다.

에어백 액츄에이터는 현재도 쓰이고 있고, 앞으로도 계속 초소형 정밀기계의 주요 응용분야가 될 것이다. 현재 미국 자동차 시장에는 IC Sensors, Analog Devices, Motorola가 +/-50g 범위의 실리콘 가속도계를 공급하고 있으며, 유럽 자동차 시장에는 노르웨이의 Sensoror가 다수의 실리콘 가속도계를 공급하고 있고, 일본 자동차 시장에서는 Nippondenso가 주요 공급업체이다. Analog



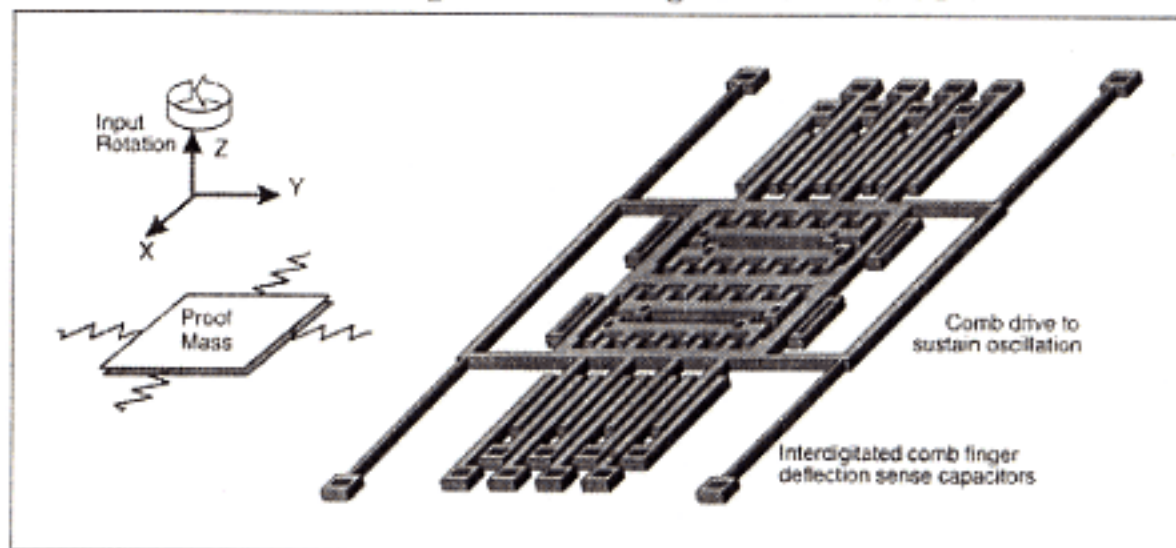
Devices를 제외한 모든 회사는 감지된 데이터로 적절한 신호로 바꾸어주는 다중 칩 가속도계를 사용한다. Analog Devices의 가속도계는 완전히 하나의 칩으로 집적되었다. 그림 2는 기존에 사용되었던 가속도 센서와 초소형 정밀기계의 표면 미세가공기술로 제작된 가속도계(ADXL50)를 비교한 실례이다.

더욱이 최근에, 많은 제작업체들이 에어백 팽창시 사용되는 sodium hazide 폭발방법 대신에 압축 가스의 사용을 고려하고 있다. 여기서, 가스 실린더 압력을 모니터링할 압력센서의 사용을 긍정적으로 검토하고 있다.

고속 코너링, 울퉁불퉁한 도로, 급제동 및 급가속시에 최적의 자동차 성능이 유지되도록 서스펜션 시스템을 고안했다. 여러 시스템들은 페루프 제어형 서스펜션 시스템을 채택했다. "fully active" 시스템은 매우 비싸고(5000달러 정도), 수력펌프를 작동시키는데 상당한 마력이 소비되며 자동차에 상당한 하중을 준다. 이러한 시스템이 얻은 향상된 성능과 투자된 비용을 비교하면 거의 수지가 맞지 않는다. 결과적으로 이러한 구현은 극히 제한되어 있다. 하지만, 많은 공급업체들은 "semi-active" 시스템을 사용한다. 이러한 몇몇 시스템은 shock absorber에서 변위센서를 사용하며, 많은 선형 가속도계를 사용한다. 이러한 응용분야에서는 초소형 정밀기계가 적절하다. Analog Devices, IC Sensors, Motorola와 같은 회사들은  $\pm 2g$  범위를 갖는 소자사양을 따르고 있다.

실리콘 압력센서는 1995년 생산 S급 Mercedes의 master cylinder brake pressure 부분에서 사용되고 있다. 압전형 각속도 센서 이외에 steering wheel angle 센서 및 wheel speed 센서가 VDC(Vehicle Dynamic Control)에서 사용된다. 현재 대부분의 다른 자동차는 VDC(ABS, 동륜 제어)

그림 3. spring-mass 시스템은 Z축 진동형 자이로스코프의 기본 동작을 말해준다(왼쪽 그림). 진동하는 proof mass의 속도와 기준 좌표계의 회전속도로 인해 Coriolis 가속이 발생한다. 오른쪽 그림은 표면 미세가공기술로 제작된 Z축 진동형 자이로스코프이다. X축을 따라 proof mass가 진동하도록 comb-drive를 이용했다. sense mode에서는, Coriolis 가속으로부터 발생하는 임의의 deflection을 interdigitated comb-finger를 이용하여 감지한다.



에서 wheel speed 센서만을 사용한다. Bosch의 압전형 진동형 실린더 또는 Matsushita의 tuning fork와 유사한 기존의 각속도 자이로스코프의 단위 가격은 50달러 정도가 되므로 비싸다. 그래서 현재 자동차 제작업체와 공급업체(예를 들면, Bosch, Lucas, Temic, Siemens)들이 좀더 비용면에서 효율적인 시스템을 고안하려는 연구를 많이 하고 있다. C.S. Draper Lab, G.M.과 BEI 전자가 개발한 제품과 유사한 저가의 각속도 초소형 정밀기계 센서를 가격이 저렴한 자동차에 채택할 것으로 기대하고 있다. 그림 3은 Z축 진동형 자이로스코프이다.

현재 항법 시스템 설계에는 wheel rotation 센서 및 자이로스코프 또는 나침반 이외에, GPS(Global Positioning Satellites)와 CD ROM map을 결합하여 사용한다. 이러한 시스템의 가격으로 인해 많이 사용하지 못하고 있다. 이러한 시스템은 현재 선택사항으로 제공되며 가격은 2000달러 정도가 된다. 시스템 제작업체는 가까운 미래에 900달러의 제품개발에, 그리고 장기적으로는 500달러의 제품개발에 목표를 두고 있다.

### 안락성, 편의성, 보안

자동차 안락성, 편의성, 보안 시스템에서 초소형 정밀기계 적용가능성에 대한 내용을 표 2에 기술했



표 2. 안락성, 편의성, 보안 분야에서의 초소형 정밀기계 응용

분야	기능	생산현황	초소형 정밀기계 적용 가능성
Seat	Presence	Ltd. Production	Low
Seat Control	Valve	Future	Med
"	Displacement	Future	Low
Climate	Mass Air Flow	Future	Med
"	Temperature	Production	Low
"	Humidity	Future	Low
"	Air Quality	Future	High
Compressor	Pressure	Production	High
Compressor Control	Temperature	Production	Low
Security	Proximity	Ltd. Production	Low
"	Motion	Ltd. Production	Low
"	Vibration	Ltd. Production	Low
"	Displacement	Ltd. Production	Low
"	Keyless Entry	Ltd. Production	Low

표 3. 엔진/전동장치 분야에서의 초소형 정밀기계 응용

분야	기능	생산현황	초소형 정밀기계 적용 가능성
Digital Engine Control :			
Fuel	Level	Production	Low
Cylinder	Pressure	Future	Low
Manifold(MAP)	Pressure	Production	High
Barometric	Pressure	Production	High
Engine Knock	Vibration	Ltd. Production	Low
Mass Airflow	Flow	Production	Med
Exhaust	Gas Analysis	Production	Low
Crankshaft	Position	Major Production	Low
Camshaft	Position	Ltd. Production	Low
Throttle	Position	Ltd. Production	Low
EGR	Pressure	Production	High
Fuel Pump	Pressure	Ltd. Production	High
Continuously Variable Transmission :			
	Temperature	Future	Low
	Pressure	Future	High
	Microvalve	Future	Low
Fuel	Pressure	Ltd. Production	High
Injection	Nozzle	Ltd. Production	High
Diesel turbo Boost	Pressure	Ltd. Production	High

다. 자동차 공기조절 시스템의 압축기 압력의 측정에서도 초소형 정밀기계가 사용된다. 현재는 다른 기술(예를 들면, TI의 세라믹 용량형 압력 센서)이 사용되고 있다. 많은 초소형 정밀기계 회사들이 적용할 새로운 분야를 찾기 위해 분주하고 있다.

### 엔진/전동장치

자동차 엔진/전동장치 시스템에서 초소형 정밀기계 적용가능성에 대한 내용을 표 3에 기술했다. 전자식 엔진 제어는 역사적으로 오래되었으며, 자동차 분야에서 초소형 정밀기계의 주요 응용 분야가 될 것으로 기대된다. Delco에서는 실리콘 MAP(Manifold Absolute Pressure) 센서가 100만개 씩 생산된다. 이러한 소자는 기관의 입력압을 측정하여 공기와 연료의 적당한 비가 되도록 해준다. MAP 센서를 MAF(Mass Air Flow) 소자로 대체하려고 많이 노력하고 있다. 현재 시장에서 쓰이고 있는 소자는 Hitachi의 열선(hot-wire) 풍속계이다. 풍속계의 구조 때문에 커지고 비싸지는 경향이 있다. 이 소자의 박막형 등가구조는 1995년에 Bosch가 최근에 사용했다. 이 소자의 초소형 정밀기계 구조는 현재 많은 연구기관에서 시험하고 있는 중이다. 연료와 공기의 혼합비를 적절하게 맞추기 위해, MAP/MAF 소자 이외에, 엔진 제어기에 고도정보를 제공해주는 기압 센서가 필요하다. 여기서 초소형 정밀기계 소자가 가장 적절하게 사용된다.



엔진성능을 최적화시키는데 실린더 압력치는 매우 중요하다. 하지만, 지나치게 높은 온도로 인해 이 분야에서는 Optran이 개발한 압전기술과 광섬유기술이 실제적으로 더욱 많이 사용된다. Ford와 Chrysler 시스템에서는 EGR(Exhaust Gas Recirculation)이 응용된다. Kavlico에서 제공하는 세라믹 용량형 압력 센서가 이 분야에서 현재 사용되고 있다. 여기서 초소형 정밀기계 소자는 더욱 저렴한 가격으로 이를 대체할 수 있다. 그림 4는 초소형 정밀기계의 벌크 미세가공기술을 이용하여 제작된 용량형 압력센서이다. CVT(Continuously Variable Transmission) 분야에서는 hydraulic fluids의 압력측정이 필요하다. 여러 가지 기술(예를 들면, isolated diaphragm)을 이용하여 media와 격리된 초소형 정밀기계 소자는 응용 분야가 많다. 이러한 독특한 방법을 이용해 실리콘 압력센서와 CMOS 신호처리 회로를 집적한다. 그림 5는 1개의 die에 증폭기를 함께 집적시킨 3축 가속도계이다. 그림 6은 압저항 압력센서와 가속도계를 비교한 실례이다.

기계구조물에서는 초소형 정밀기계 소자가 fuel injector nozzle에서 유일하게 사용된다. 여기서, Ford는 fuel injection 시스템용 orifice를 균일하면서 직사각형으로 만들기 위해 실리콘 미세가공기술을 사용했다. 이 소자는 300만개 이상이 제작되었다. 하지만, 지금은 생산되지 않고 있다.

## 자동차 진단/모니터링

자동차 진단/모니터링 분야에서는 초소형 정밀기계소가 표 4와 같이 응용된다.

초소형 정밀기계의 응용분야중 더욱 흥미있는 것은 타이어-압력 모니터링 분야이다. 안전성과 최적의 연료 성능을 갖추려면 적절한 타이어 공기압이 필요하다. 타이어 공기압을 실시간으로 측정하는 시스템이 현재 많이 있다. 초소형 정밀기계 소자가 적격이기 때문에 많은 제작업체들이 초소형 정밀기계

그림 4. 벌크 미세가공기술을 이용하여 제작된 용량형 압력센서

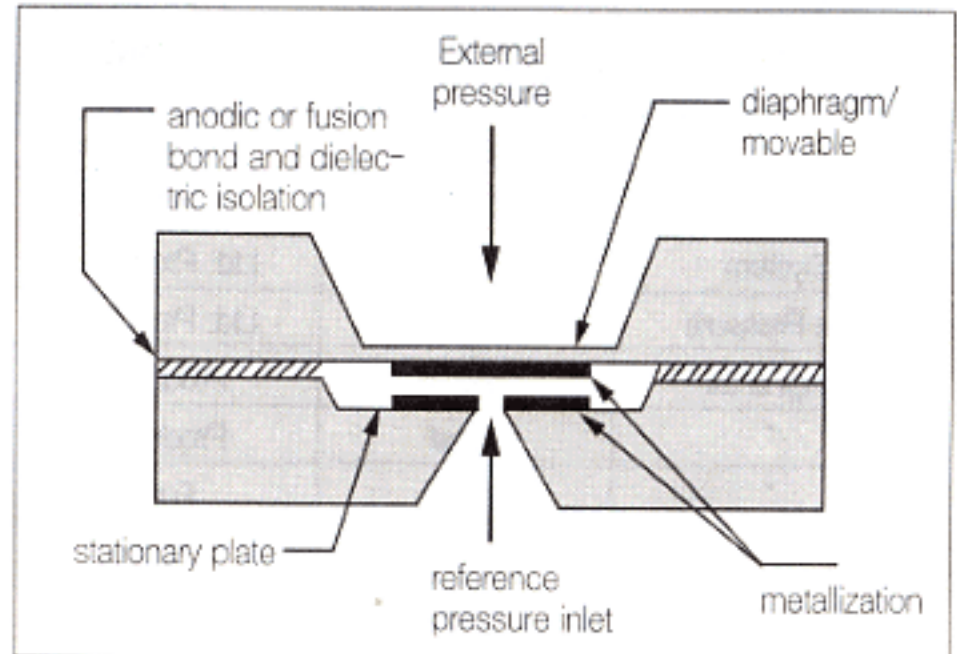


그림 5. 1개의 die에 증폭기를 함께 집적시킨 3축 가속도계

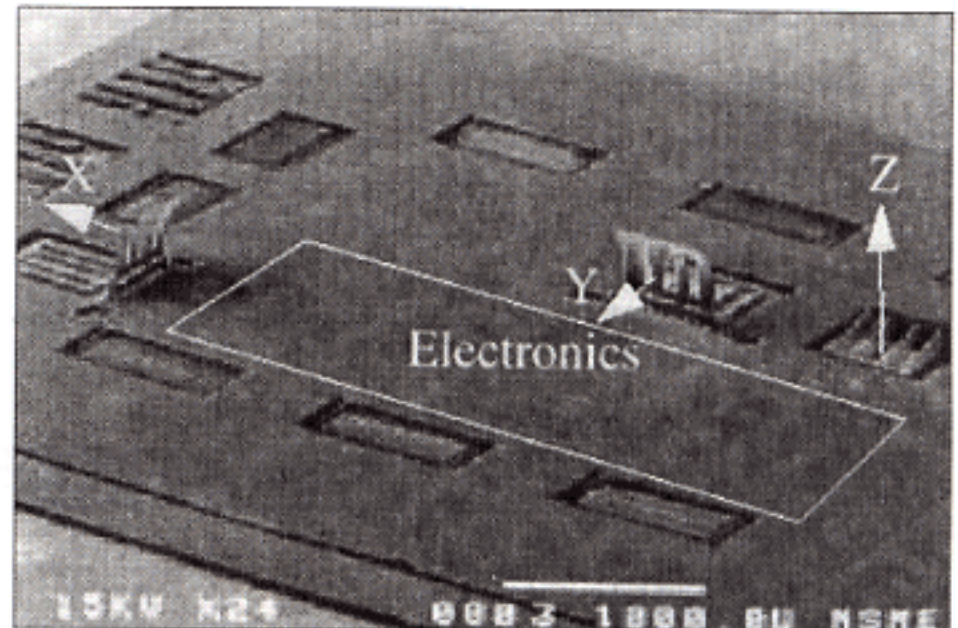
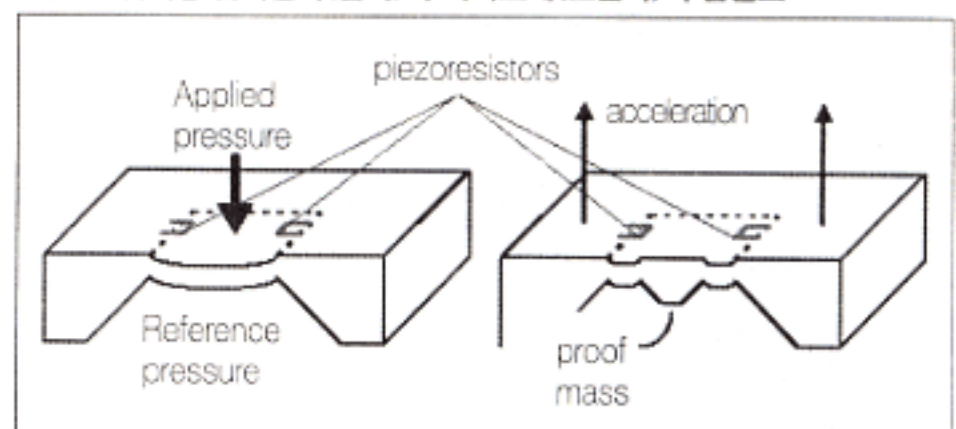


그림 6. 압저항 압력센서(왼쪽)와 가속도계(오른쪽)의 단면도



기술로 구현된 소자를 고려하고 있다. Run-flat 타이어를 가장 폭넓게 사용하기 때문에 2000년경에는 이러한 시스템이 널리 쓰일 것으로 기대한다. Michelin 60 계열과 같은 run-flat 타이어는 spare와 jack을 구입할 필요가 없어 무게도 가벼워진다. Lucas NovaSensor는 현재 공기압을 연속적으로 모니터링하는 플라스틱으로 패키징된 소자를 생



표 4. 자동차 진단/모니터링 분야에서의 초소형 정밀기계 응용

분야	기능	생산현황	초소형 정밀기계 적용 가능성
Coolant	Temperature	Production	Low
"	Quality	Future	High
System	Level	Ltd. Production	Low
Tire Pressure	Pressure	Ltd. Production	High
Engine Oil	Pressure	Production	High
"	Level	Production	Low
"	"	Future	Med
"	Quality	" Future	Med
Brake	Pressure	Ltd. Production	High
Brake System	Level	Future	Low
Transmission Fluid	Pressure	Ltd. Production	High
"	Level	Future	Low
"	Quality	Future	Med
Fuel	Pressure	Future	High
Fuel System	Level	Future	Low
"	Pressure(EVAP)	Ltd. Production	High
Vehicle Speed	Velocity	Production	Low

표 5. 북미시장에서의 초소형 정밀기계 소득(단위는 100만달러)

	1990	1995	2000
압력	174.4	402.2	738.3
가속도	0	17.0	114.0
화학	0	0	37.8
미세구조물	0	4.2	22.0
합계	174.4	423.4	912.1

표 6. 북미시장에서의 초소형 정밀기계 소비량(단위는 100만대)

	1990	1995	2000
압력	9.5	50.7	89.2
가속도	0	2.4	16.5
화학	0	0	2.4
미세 구조물	0	4.2	22.0
합계	19.5	57.3	130.1

산하고 있다.

엔진 오일 모니터링 분야는 초소형 정밀기계를 상당히 많이 응용할 수 있는 분야이다. 하지만 이러한 시스템을 채택하는데 가장 큰 장애는 가격이다. 이러한 압력 센서는 엔진 오일의 최악온도상황에서도 동작해야 하며 실리콘 칩과 media를 격리시켜야만

한다. 이러한 응용분야에서 신호가 완전히 제어되는 패키징 소자의 경우 10달러보다 적은 가격을 목표로 하고 있다. 여러 센서 제작업체들은 이런 중요한 기회를 공략하려 하고 있다.

최근 개정된 법률로 인해 연료 시스템에서는 압력센서를 채택해야만 한다. 이 분야에서, 압력센서는 연료탱크의 압력레벨을 모니터링하고 연료증기 누설이 없는지 확인하는데 사용된다.

## 향후 시장동향

북미 시장의 가치를 표 5와 표 6에 각각 달러와 수요량으로 나타내었다.

자동차 초소형 정밀기계에 대한 전체 달러 가치는 1990년의 174.4달러, 1995년의 423.4달러에서 2000년경에는 912달러로 성장할 것으로 예측하고 있다. 이것은 17.7%의 복합 연성장률(CAGR : Compounded Annual Growth Rate)을 보여준다.

자동차 초소형 정밀기계의 전체 소비량은 1990년의 19.5백만대, 1995년의 57.3백만대에서 2000년경에는 130.1백만대로 성장할 것으로 예측된다. 이것은 18.7%의 복합 연성장률을 보여준다. 압력센서 분야는 가속도/각속도 센서 분야를 훨씬 앞지른다. 화학 초소형 정밀기계와 미세구조물 분야는 2000년경에는 전체시장의 약 5%를 구성할 것으로 기대된다.

## 향후 기술 동향


초소형 정밀기계의 자동차 분야가 2000년경에는 초소형 정밀기계 시장의 상당한 부분을 구성할 것으로 예측된다. 자동차에는 가격 저렴화, 성능 및 신



뢰성 유지, 대량생산 때문에 초소형 정밀기계 소자를 적용해야 할 부분이 상당히 많다. 이전에 MAP 센서와 실리콘 에어백 가속도 센서는 초소형 정밀기계 응용분야에 대한 길을 다져놓았다. 자동차 제조업체의 개발주기(예를 들면, 미국은 5년, 유럽은 4년, 일본은 3.5년)가 길고 가격이 비싸기 때문에 다른 초소형 정밀기계 시스템을 채택하는 데 주저하게 만든다. 하지만, 초소형 정밀기계 기술이 성장하고 관련 비용이 줄어들게 되면 초소형 정밀기계 소자를 많이 사용할 것으로 생각한다. 응용 분야가 필요로 하는 엄격한 사양과 초소형 정밀기계는 이전의 기술을 대체하면 이러한 새로운 분야가 형성될 것이다.

단일칩 또는 다중칩이든시간에 수직 기능성

(vertical functionality)은 초소형 정밀기계는 성장하도록 하는데 중요한 역할을 한다. 초소형 정밀기계는 내부적으로 쉽게 개선되는 functionality를 갖고 있다.

다중 버스 통신과 다른 자동차 시스템과의 측정치 공유에 대한 요구가 늘어나게 되면 vertical integration에 대한 요구 또한 증가하게 될 것이다. 1988년에 유럽 자동차 제조업체의 CAN 버스 구현, 1989년에 Chrysler의 C2D 버스 구현은 통신에 대한 요구의 시작점이 되었다. SAE J1850은 미국의 통신 표준 프로토콜이다. 이러한 표준이 채택되게 되면 현재의 전자제어장치(ECU)에서가 아니라 초소형 정밀기계 소자를 갖는 원거리에서도 개선된 분산제어를 해야만 한다. 

#### [참고문헌]

1. Williams, M., "Worldwide Automotive GPS Navigation Markets New Direction for Semiconductors in Cars", Dataquest, July 7, 1997.
2. M. Mattes, J. Seefeldt, "A One Chip, Polysilicon, Surface Micromachined Pressure Sensor with Integrated CMOS Signal Conditioning Electronics," Society of Automotive Engineers International Conference Proceedings, pp.29-34, 1996.
3. Nakamura, Takesi Nagaokakyo-shi, Kyoto-Fu, "Acceleration Sensor" European Patent Application EP 0 744 622 A1, Murata Manufacturing Co., Ltd., May 1996.
4. I. Toshihiko, J. Terada, "Angular Rate Sensor for Automotive Application," Sensors and Actuators, Society of Automotive Engineers International Conference Proceedings, pp.49-56, 1995.
5. A. Reppich, R. Willig, "Yaw Rate Sensor for Vehicle Dynamics Control System, Sensors and Actuators," Society of Automotive Engineers International Conference Proceedings, pp.67-76, 1995.
6. J. Johnson, S. Zarabaldi, D. Sparks, "Surface Micromachined Angular Rate Sensor, Sensors and Actuators," Society of Automotive Engineers International Conference Proceedings, pp.77-83, 1995.