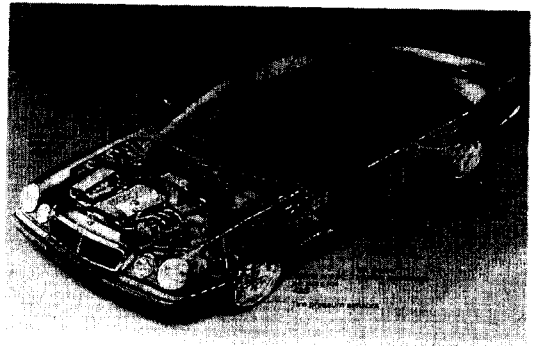


## MEMS의 자동차 산업에의 응용

조 영 호  
한국과학기술원 기계공학과

### I. 서 론

최근 기술선진국에서는 첨단기술을 이용한 자동차 전장시스템의 개발을 통해 국제시장에서의 자동차 경쟁력 강화와 부가가치 극대화를 꾀하고 있으며, 이로 인해 자동차의 전자화 추세가 날로 가속되고 있다. 이러한 자동차 첨단전장시스템의 성능과 신뢰성 그리고 경제성 확보를 위해서는 자동차의 운행상태에 관한 정확하고도 신뢰성 높은 정보를 제공해 줄 수 있는 고성능 저가 센서(Fig.1) 개발이 필수적인 선결과제로 부각되고 있다.



〈그림 1〉 MEMS-based automotive sensors [TE-MIC]

자동차용 센서개발은 혹독한 환경내에서의 성능과 신뢰성 유지, 그리고 가격 저렴화를 동시에 만족시켜야 하는 추가적인 기술 및 가격부담을 안고 있다. 한편, MEMS 기술을 응용한 자동차용 센서는 물리량 감지를 위한 미세구조물과 감지신호의 보정, 증폭, 처리를 위한 전자회로를 하나의 패키지 형태로 구성함으로써 전장시스템 감지부의 소형화, 다기능화, 고성능화 및 가격저렴화를 꾀할 수 있다. 이러한 MEMS 기술의 자동차 산업에의 적용은 자동차 전장시스템의 혁신을 예고하고 있다. 예를 들어, MEMS 기술을 응용한 자동차용 센서는 주요 전장시스템(Airbag, Anti-locking Brake System, Traction Control System, Active Suspension, Intelligent Steering, Navigation, Engine Control, Emission Control 등)의 핵심부

품으로 사용되고 있으며, 이러한 고성능 저가 감지 소자의 개발은 새로운 기능의 차세대 전장시스템 개발을 통해 자동차의 안전성, 신뢰성, 안락성, 편의성 및 환경성 향상을 주도하고 있다.

본문에서는 먼저 자동차용 MEMS 센서의 시장과 기술배경을 소개하고, 첨단 전장시스템과 핵심 소자의 개발현황 그리고 향후 발전방향을 전망해 본다.

## II. 시장 및 기술배경

최근 시장조사[1]에 의하면 2000년 전세계 MEMS 시장은 약 120~140억불 규모로 전망되고 있으며, 관련제품으로의 기술 파급효과를 고려할 경우 약 1,000억불 규모의 시장으로 급속히 성장할 것으로 예측되고 있다. 산업별 시장구성을 살펴보면, 자동차분야가 현 국제 MEMS 시장에서 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 특히 자동차용 센서가 시장성장의 견인차적인 역할을 담당하고 있다.

그 실례로서, 1994년 미국산 자동차에 평균 14개의 센서가 사용되었으며, 이 중 MEMS 기술을 이용한 센서가 차지하는 비율은 25%, 자동차 대당 MEMS 센서 사용갯수의 연평균 성장률은 20%였다. MEMS 센서 중, 현재 시장성숙기에 있는 자동차 압력센서의 경우 전세계적으로 연간 2,000만개 이상이 생산되고 있으며, 최근 시장이 형성되기 시작한 자동차 에어백용 가속도계는 1994년 총 500만개가 생산·장착되었다. MEMS 기술을 탄생시키고 주도적으로 기술을 선도하여온 미국이 현재 전세계 압력센서 및 가속도계 시장의 45% 및 50%를 각각 선점하고 있다.

## III. 전장시스템 및 MEMS 센서 개발현황

자동차 전장시스템의 사용목적은 첫째, 배기가스(emission), 연료경제성(fuel economy), 승객 안

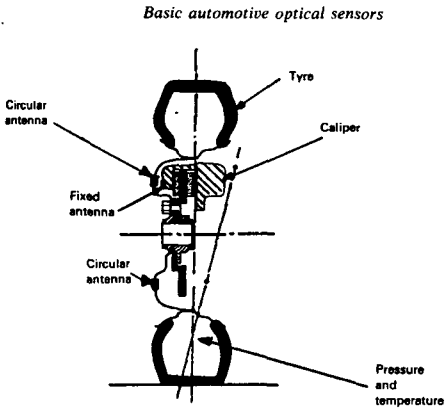
정성(occupant protection) 등에 관한 법적 규정을 만족시키는 것과 둘째, 자동차의 품질, 신뢰성, 사용 및 운전편의성 등에 대한 소비자 만족도 향상에 있다. 따라서, 근래 자동차 전장품 시장 팽창의 주된 요인은 자동차 생산대수의 증가에 있다기보다, 날로 엄격해지는 자동차관계 법적 규정과 자동차 기능에 대한 소비자의 선호를 충족시키기 위한 전장기능시스템 첨가의 필요성 증대와 이로 인한 전장품의 고급화 및 고성능 부품 수요의 급증에 있다고 볼 수 있다.

이러한 전자기능시스템의 판단기능은 센서로부터 공급되는 정보를 기준으로 이루어지므로, 전장기능시스템의 효과적인 작동과 주어진 기능의 성공적 실현을 위해서는 자동차 운행상태 및 기능시스템 자체의 동작상태에 관한 정확하고 신뢰도 높은 정보를 ECU에 제공해 줄 수 있는 고성능센서 개발이 필수적인 선결과제 중의 하나이다. 이러한 이유에서 최근 전장기능시스템용 센서개발에 관한 관심이 날로 증대되고 있다. 본문에서는 자동차 전장기능시스템 구성에 필요한 센서들 중, 시장의 규모나 기술의 중요성 등의 요인에 의해 비교적 관심이 크다고 할 수 있는 압력센서, 가속도계, 자이로, 유량계 및 레이더 등에 관해 살펴보기로 한다.

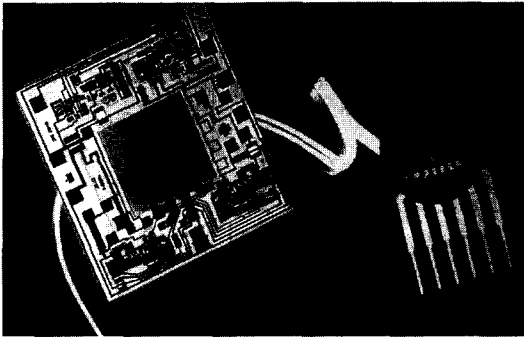
### 1. 압력센서

자동차용 압력센서는 연료압력과 연소실 및 기관(manifold)압력을 측정하는 등 전자식 엔진제어 시스템 작동에 있어서 중추적인 역할을 담당하고 있을 뿐 아니라, 타이어 공기압 측정(Fig.2)과 브레이크 오일 및 변속기오일 압력측정 등 다방면에 걸쳐 사용되고 있어 자동차용 센서 중 가장 큰 시장규모를 차지하고 있다.

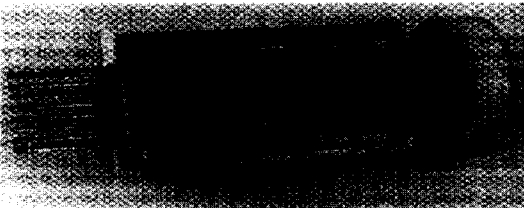
일반적인 압력센서(Fig.3)의 작동원리는 압력차에 의한 박판의 변형을 측정하는 것으로, 최근 디지털 보상기능(Fig.4) 첨가를 통해 압력측정의 정확성과 신뢰성 향상, 그리고 여러 가지 기능의 전자회로의 집적을 통한 소형화 및 다기능화추세를 관찰할 수 있다.



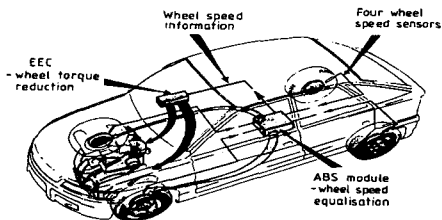
〈그림 2〉 Wireless tire pressure monitoring system.



〈그림 3〉 Pressure sensor. [Motorola]



〈그림 4〉 Digitally compensated pressure sensor.

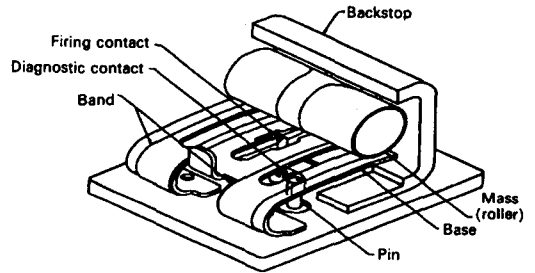


〈그림 5〉 Intelligent anti-lock brake system.

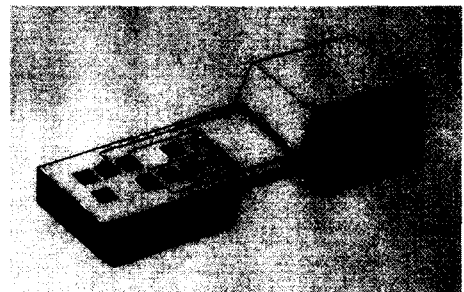
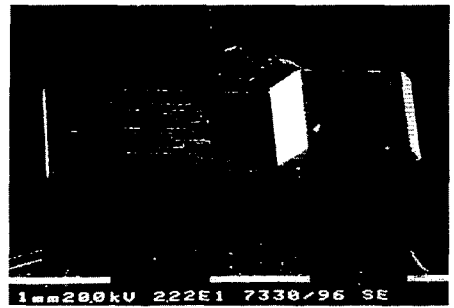
## 2. 가속도계

자동차용 가속도계는 압력센서의 반도체화 이후, 최근들어 가장 큰 관심이 집중되고 있는 센서로써, 전자식 엔진제어시스템(knock 센서), ABS(Fig. 5), 에어백, 전자식현가시스템 등 거의 대부분의 주요 전장기능시스템의 핵심요소로 주목받고 있다.

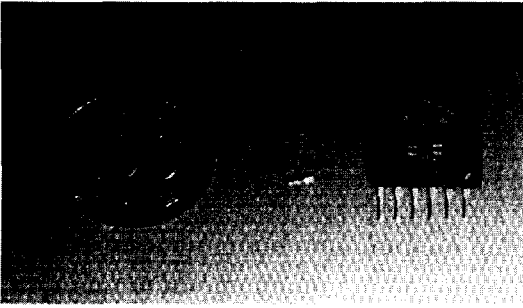
에어백 센서의 경우, 기존의 기전 접촉식 가속도계를 소형화시킨 접촉식 충격센서(Fig.6)에서 견고성, 신뢰성 그리고 노이즈 측면에서 많은 문제점이 제기되었고, 이를 보완하기 위한 센서로써 기판 미세가공(bulk-micromachining) 기술에 의한 실리콘 가속도계(Fig.7, 8)가 개발되었다.



〈그림 6〉 Miniatured Rolamite airbag sensor.

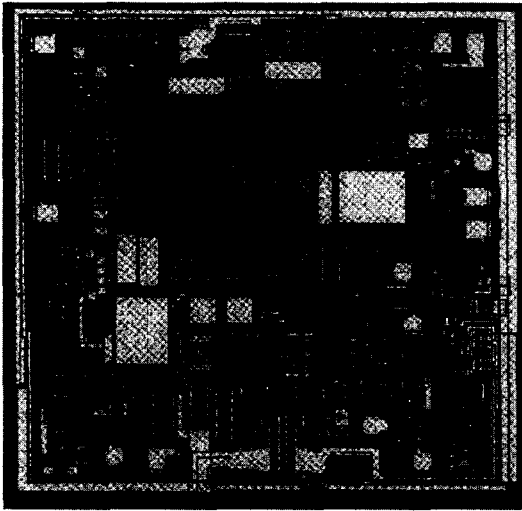


〈그림 7〉 Bulk-micromachined airbag accelerometer. [KAIST]

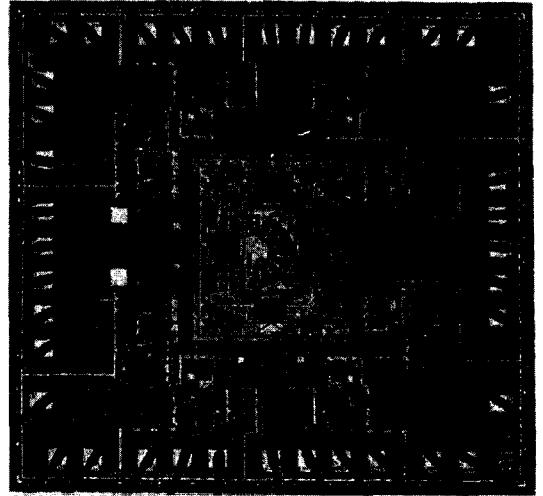


〈그림 8〉 Packaged airbag accelerometer [KAIST]

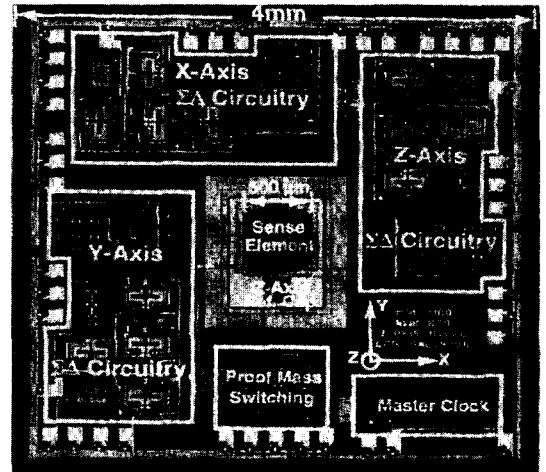
한편 미국 Analog Device에서는 박막미세가공 (surface-micromachining) 기술에 의한 에어백 가속도계 (Fig.9) 를 개발함으로써 질량, 스프링 등 미세구조물 뿐만 아니라 증폭회로, 보정회로 및 자체진단기능까지 모두 하나의 칩으로 집적화시키는 데 성공하였다. 이 가속도계는 Fig.9에서 보는 바와 같이, 빗살모양의 구조물을 이용한 정전용량형 (capacitive) 감지기능과 미세구동기능을 결합시킴으로써 폐회로제어 (closed-loop control) 방식에 의한 force-balancing 시스템을 구현시킨 것이다. 또한 고정도 감지를 위한 공진형 가속도계와 3차원 가속도계가 개발되었다.



〈그림 9〉 Integrated airbag accelerometer. [Analog Devices]

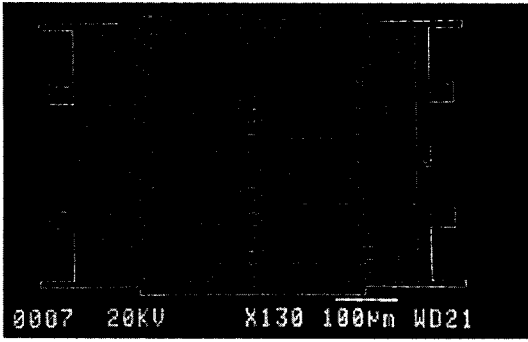


〈그림 10〉 Integrated resonant accelerometer. [UCB/SNL]

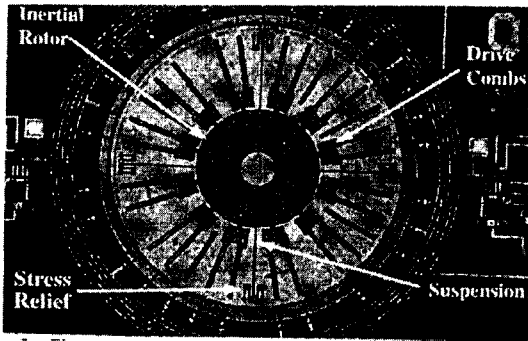


〈그림 11〉 Closed-loop 3-dimension accelerometer. [UCB/SNL]

이상과 같은 일련의 가속도계 개발예를 통하여 볼 때, 압력센서 경우와 마찬가지로 감지를 위한 미세구조물과 전자회로의 집적을 통한 센서의 다기능화 및 고성능화 경향이 지배적이며, 센서내에 액추에이터를 내장시킴으로써 폐회로 제어를 실현 시킴과 동시에 성능향상을 꾀하고 있다.



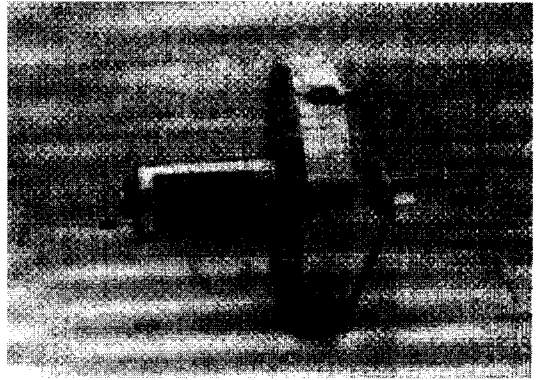
〈그림 12〉 Force-balanced microgyroscope [KAIST/SAIT]



〈그림 13〉 Two-axis microgyroscope. [UCB/SNL]



〈그림 14〉 Hot-wire flowmeter. [IC Sensors]



〈그림 15〉 Radar antenna.

물 감지 및 충돌회피를 위한 전장시스템에 응용되고 있다.

### 3. 자이로

Navigation, 지능형 ABS 등 위치파악 및 차체 거동조정에 관한 전장시스템 구성을 위해서는 고정도 가속도계와 자이로가 필요하다. 고정도 감지를 위한 공진형 가속도계(Fig.12)와 각도 및 각속도 측정을 위한 자이로(Fig.13) 등이 개발되었다.

### 4. 유량계 및 레이더

자동차용 유량계는 전자식 엔진제어시스템에서 공기 및 연료 등의 유량을 측정하는데 사용되며, 반도체 미세가공 기술에 의한 유량계는 크기가 작아 유체의 흐름에 큰 저항을 주지 않고 측정할 수 있다는 장점이 있다. Fig.14는 열선(hot-wire)방식의 자동차용 반도체 유량계로서 박막가공기술에 의해 제작된 것이다. 한편 레이더(Fig.15)는 장애

## IV. 관련 기술내용 및 개발시 고려사항

자동차용 센서의 해석, 설계, 제작과 관련된 기술내용 및 특성을 개략적으로 기술한다.

### 1. 제작기술

반도체 센서용 미소구조물 제작기술은 실제제작을 통하여 설계기능 및 관련기술을 실현함에 있어서도 중요한 역할을 담당하고 있을 뿐아니라, 이후에 설명할 미소영역에서의 물리적 현상규명을 위한 각종 시험기 제작과 미소기계요소 설계과정에서 치수 및 형상 제한조건을 제공하는 등 반도체

센서의 개발단계에서 매우 큰 비중을 차지한다.

또한 센서의 작동원리, 구조 및 형태 뿐만 아니라 성능, 가격에 이르기까지 거의 모든 특성이 센서가공 기술에 의해 좌우되는 바가 크므로, 자동차용 센서를 개발함에 있어서 설계이전단계부터 특정가공기술의 선정이 필요하며, 그 이후 센서개발의 모든 단계에서는 선정된 가공기술을 바탕으로 모든 결정이 이루어져야 한다. 따라서 자동차용 센서의 가공기술을 결정함에 있어서 가장 중요한 판단의 기준은 선정된 가공기술을 기반으로 센서를 설계, 제작하였을 때 자동차용 센서의 요구기능을 어느 정도까지 실현시킬 수 있는가 하는 것이다.

미소구조물 제작을 위한 마이크로머시닝 기술은 집적회로 제조기술을 기반으로 하고 있으나, 공정 자체가 반드시 일치하는 것은 아니다. 이러한 공정상의 차이점 이면에는 두가지 근본적인 원인이 있는데, 하나는 가공소재 및 재료 특성의 차이이고 또 다른 하나는 가공물의 형상 및 기하학적 특징의 차이에서 기인한다.

우선, 기계요소와 전자요소의 소재 및 재료특성에서 기인하는 제작기술의 차이를 살펴보자. 미소기계요소를 제작함에 있어서 집적회로 등 전자요소 제작에 사용하지 않던 재료를 쓰기도 하고, 동일한 재료를 사용하더라도 그 재료의 전기적 성질 뿐만 아니라 기계적 성질 또한 고려해야 하므로 박막제조공정의 변화를 요한다.

가공공정상 제기되는 또다른 문제 중 하나는 미소기계요소와 미소전자요소의 기하학적 특징차이이다. 전자요소는 거의 평면(2차원) 구조물로 구성되는 반면, 미소기계에서는 입체(3차원) 구조물이 요구된다는 점이다. 따라서 미소기계제작을 위하여 필요한 것은 고단면비(high-aspect-ratio) 혹은 꼭면구조물 가공기술의 개발이다.

이상에서 본 바와 같이, 미소기계요소제작을 위한 마이크로머시닝 기술은 반도체 집적회로 제작 기술과는 다른 면모를 지니고 있지만, 기전집적 형태의 마이크로머신 제작을 위해서는 두가지 제작 기술이 호완성(compatibility), 공정의 재현성(reproducibility) 및 안정성(stability)을 유지하는 범위내에서 함께 발전하여야 하며, 이러한 측면에

서 두 제작기술간의 특이성과 함께 상호보완성이 강조된다.

## 2. 접합 및 패키징

실리콘 기판을 또다른 실리콘 기판 혹은 다른 물체와 접합시키는 기술은 반도체 센서 제조분야에서 매우 중요한 기술이다. 그 이유는 메모리 등 전자소자 제조분야에서와 마찬가지로, 패키징 기술이 최종제품의 성능과 신뢰도를 좌우하는 요인이 될 뿐만 아니라, 패키징 비용이 전체 제작비용의 대부분을 차지하기 때문이다. 특히 마이크로머신분야에서의 접합기술은 패키징 뿐만 아니라 입체적인 미소구조물 및 다층구조의 미소기계제작에 매우 유용하게 응용된다.

자이로, 압력센서 등 밀봉을 요하는 센서제작에 사용되는 기본적인 접합공정기술로는 양극접합(anodic bonding)과 용융접합(fusion bonding)을 들 수 있는데, 양극접합은 실리콘(양극)과 유리(음극)를 고전압(400~1,000V)하에서 접합시키는 방법이고, 용융접합은 고온(1,000℃)에서 실리콘과 실리콘을 접합시키는 방법이다.

패키징 분야에서 접합공정기술 자체도 중요하지만 무엇보다 패키징 설계기술의 비중이 크다. 패키징의 주요 설계변수로는 칩 크기, 핀의 구조 및 위치, 소자보호(passivation) 재료, 두께 및 공정선정 등을 들 수 있으며, 이러한 설계변수를 결정함에 있어서 재료의 물리적 성질, 접합부위의 강도, 잔류응력, 열응력 그리고 열전달 측면에서의 효율성 등이 고려되어야 한다.

## 3. 설계 및 해석

MEMS 센서의 설계 및 해석을 위하여서는 제작 기술에 대한 이해를 기반으로 한 미소재료의 물성 및 거동 특성, 미소영역에서의 물리적 현상의 이해, 기전 복합시스템의 모델링과 작동 시뮬레이션 기법 등이 필요하다. 마이크로머신의 크기가 원자 단위(atomic scale)로 접근함에 따라, 통상적인 크기의 기계시스템 설계 및 해석에 사용하던 이론 및 방법론을 그대로 적용하기에는 여러가지 문제점이 발생할 수 있다. 따라서 마이크로머신의 경

우, 통상적으로 사용하던 기계설계 및 해석이론의 적용 이전에 그 타당성을 우선 검토되어야 한다. 즉 기존의 설계, 해석이론이 내포하고 있는 여러가지 가정과 경계조건, 재료의 물성 및 거동 특성 모델 등이 미소영역에서도 그 타당성을 유지할 수 있는지를 따져 보아야 한다. 이와 관련하여 우선 기계공학과 관련되는 분야만 하더라도, 재료역학, 구조역학, 동역학 뿐만 아니라 전기, 자기, 광학, 온도, 압력장에서의 입자 및 에너지 이송(transport) 및 이와 관련된 유체역학, 열전달 등 여러가지 문제점이 산재해 있다. 현재 관심의 대상이 되고 있는 것은 기존 매크로한 크기에서의 설계, 해석이론을 마이크로 영역에서 적용시킬 수 있는 한계를 밝히고자 하는 것과 그 한계 밖에서의 기존이론의 확장 또는 신이론의 정립에 관한 것이다.

#### 4. 미소재료

재료의 물성치에 관한 이해없이 어떠한 기계라도 해석하거나 설계할 수 없다. 마이크로머신분야에서 기계요소의 크기가 작아짐에 따라, 재료의 거시적 성질(bulk property)보다 미시적 표면성질(thin-film 혹은 surface property)의 중요성이 강조되고 있으며, 필요로 하는 박막재료의 물성치로는 탄성계수, 포아손비, 경도, 인장강도(tensile strength), 파괴인성(fracture toughness), 피로강도(fatigue strength), 선팽창계수, 열전달계수 등을 들 수 있다. 이러한 박막재료의 물성치는 동일한 성분의 재료를 사용하더라도 박막의 두께, 입자(grain) 크기, 전위(dislocation) 밀도, 조직(texture) 등에 따라 변화를 나타내기도 한다. 이러한 미소재료의 물성치 측정(on-chip/in-situ measurement)을 위해서는 시편 뿐만 아니라 재료시험기 자체를 마이크로머신으로 설계, 제작하여 재료시험을 행한다.

#### 4. 미소 유체 및 점성감소

미소유동(microfluid flow)에서의 관심은 유체의 연속체(continuum) 가정의 한계와 점성력, 표면장력, 분자확산(molecular diffusion) 등에 관한

실험 및 이론적 기반의 정립에 있다. 미소열전달(micro heat transfer) 분야에서는 물체의 두께가 열전하의 자유이동거리(mean-free-path)로 접근하는 경우와 극저온에서의 열전도(heat conductor) 현상 등이 관심의 대상이 되고 있으며, 복사전달(radiation)의 경우 비흡수재질과 흡수내질에서의 파장비, 표면 혹은 입자면(grain boundary)에서의 산란(scattering)문제 등이 제기되고 있다.

#### 5. 전산응용 미소설계(Micro CAD)

MEMS 센서의 경우 초기설계단계에서부터 구조설계, 마스크 및 공정설계, 제작, 시험에 이르기까지 소요되는 인력과 경비를 절감하고 설계주기(design cycle)를 단축시키기 위한 마이크로머신 전용 CAD시스템의 필요성이 대두되고 있다.

향후 MEMS 센서분야에서의 종합적이고 실용적인 미소 CAD시스템을 완성하기 위해서는, 치수 및 형상 최적설계, 자동메스크설계, 제작공정 시뮬레이션 및 마이크로머싱 결과예측 등의 기능이 첨가되어야 하며, 이러한 전산응용 설계, 해석, 제작 및 작동시뮬레이션에 관한 일련의 작업들이 미소재료의 물성자료(material data base) 및 마이크로머싱 공정자료(process data base)와 연계되어 이루어져야 할 것이다.

### V. 기술발전 전망

자동차 전장시스템 개발측면에서 볼 때, 지능형(intelligent or smart)센서의 출현과 함께 센서와 논리회로(logic), 프로세서, 기억장치 등 ECU와의 집적이 가속화되고 있으며, 전장기능시스템 간의 집적에 의해 지능형 센서 사이의 정보교환 및 접속(interface)의 중요성이 증대되고 있다.

이러한 자동차 전장기능시스템 및 센서에서의 집적화 경향은 기능요소 집적을 통한 작동의 정확성, 신뢰성, 성능 및 가격경쟁력 향상에 그 목적이 있으며, 기능 집적화 이면에는 감지를 위한 미세구

조물과 전자회로의 집적화를 가능케한 박막가공 기술의 발전이 중요한 원동력이 되고 있음을 주목할 필요가 있다.

## VI. 맺음말

최근 기술선진국의 자동차업계에서는 첨단기술을 기반으로한 자동차 전장기능시스템이 첨가로, 자동차관련 법적규정 준수와 소비자선호도 만족을 통한 제품경쟁력 향상과 함께, 부가가치의 극대화를 동시에 꾀하고 있다. 이러한 자동차 전장기능시스템의 성공적 실현을 위하여서는 자동차 특성에 부합하는 기능논리개발과 함께 기능논리에 정확하고 신뢰도 높은 정보를 제공해 줄 수 있는 고성능, 저가, 고신뢰도 센서 개발이 중요한 관건이다.

자동차 핵심 전장기능시스템과 센서를 개발함에 있어서 자동차의 정적, 동적 특성에 관한 이해가 우선적으로 필요하며, 이러한 관점에서 볼 때 최근 기술선진국의 자동차 업계와 같이 국내 각 자동차회사마다 자사제품 특성에 부합하는 전장시스템과 센서개발에 중점을 두어야 할 것이다.

또한, 제작기술의 발전으로 박막가공기술에 의한 미세감지구조물과 전자회로, 보조센서, 액츄에이터 등의 기능요소들의 집적이 가능하게 되었고, 자동차용 센서의 소형화, 다기능화, 제작경비의 저렴화와 함께 전장기능시스템간의 집적화 경향이 지배적이다. 이와같은 제작기술의 발전추세에 비추어 볼 때, 앞으로 자동차 전장기능시스템과 센서 제작에 있어서 IC제작기술을 응용한 박막가공기술의 수요증대와 함께 전자회사의 역할이 날로 증가

할 것으로 예상된다.

이러한 자동차 전장기능시스템과 센서관련 첨단 핵심기술의 확보 및 국제기술 경쟁력 향상을 위해서는 기계, 전자, 재료, 전산 등 복합적(interdisciplinary)인 전문기술을 갖춘 인력양성과 전자 및 자동차회사의 공동연구를 통한 복합기술의 창의적 종합이 요구되며, 나아가 관련제품 및 산업으로의 응용을 통한 기술응용력 개발에 중점을 두어야 할 것이다.

마이크로머신에서의 기계요소의 크기와 이들이 작동하는 주변환경을 규정하는 단위가 원자단위(atomic scale)로 축소됨에 따라, 마이크로머신 관련연구는 물리, 화학, 생물, 의학 등 기초과학 분야에서부터 기계, 전자, 재료, 전산 등 응용공학분야에 이르기까지 광범위한 분야에 걸쳐 새로운 문제점을 제기함과 동시에 관련기술의 창의적 종합을 요구하고 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] Microelectromechanical Systems Market Study, System Planning Corporation, July, 1994.
- [2] JTEC Panel Report on Microelectromechanical Systems in Japan, Japanese Technology Evaluation Center, September, 1994.
- [3] 조영호, 1992, "자동차용 반도체 집적센서 및 마이크로 액츄에이터," 한국자동차공학회지, 제14권, 제3호, pp. 12-25.



## 저 자 소개



曹 永 昊

1957年 8月 10日生

1980年 2月 영남대학교(학사)

1982年 2月 한국과학기술원(석사)

1990年 12月 University of California at Berkeley(박사)

1987年 8月~1990年 12月 Berkeley Sensor & Actuator Center 연구원

1991年 1月~1991年 7月 Berkeley Sensor & Actuator Center Post-Doc.

1991年 8月~1994年 7月 KAIST 기계기술연구소 연구원

1994年 8月~현재 KAIST 기계공학과 교수

주관심 분야: 마이크로머신, 반도체 센서 및 마이크로 액추에이터, 광기전집적시스템,  
미소물리현상 및 미소에너지 변환.