압전센서 기술

임종인
요업(세라믹) 기술원
기술응용확산센터 선임연구원

1. 서 론

현대 기술에서는 다양한 물리량을 측정하여 전기적 신호로 변환할 수 있는 센서에 대한 필요성이 증가하고 있다. 센서로 수집된 전기적 신호는 데이터 처리장치에 입력되어 전기적으로 계산 및 처리하게 된다. 따라서 센서는 비 전기적인 주위 환경과 전기적 데이터 처리장치를 연결시키는 중요한 수단이라고 말할 수 있다.

물리량 및 화학량 중에서 힘, 가속도 혹은 각속도, 압력 등 역학적인 특성과 소리 등 음향학적 특성을 측정할 필요가 있다. 압전센서는 이와 같은 역학적 및 음향학적 물리량을 측정하여 전기신호로 변환할 수 있는 가장 이상적인 센서이다.

압전재료란 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환(piezoelectric direct effect) 혹은 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환(piezoelectric converse effect)할 수 잇는 기능성 재료를 지칭한다. 수정(Quartz), $BaTiO_3$, $Pb(Zr,Ti)O_3$(PZT)계 소재, $Pb(Zr,Ti)O_3$-$Pb(Fe_{\frac{1}{2}},Ta_{\frac{1}{2}})O_3$-$Pb(Mg_{\frac{1}{3}},Nb_{\frac{2}{3}})O_3$ 등 복합 페로브스카이트 화합물 및 3성분계 소재, PVDF로 대표되는 고분자 압전소재, PZT-PVDF 및 PZT-Epoxy 복합체 등 다양한 압전재료가 존재한다[1-4].

압전재료는 역학량 측정센서 혹은 음향센서, 가스렌지 착화소자, 각종 세정기 및 가공기용 진동소자, 용소자, 부저 등의 음향 발생소자와 각종 전자기기의 음향필터 등으로 널리 응용되고 있다. 특히 PZT계 세라믹스는 가공성이나 제반 압전특성이 우수하고, 가격이 저렴하여 각종 센서 및 초음파 진동자, 필터, 레조네이터 등에 가장 널리 응용되고 있다. 또한 고분자/PZT계 복합재료는 시트형태로 가공이 쉽기 때문에 각종 키보드나 수중 음향부품, 의료용 탐촉자 등에 주로 응용되고 있다[2-6].

압전체의 응용분야로는 표1에 나타낸 것과 같이 기계에너지를 전기에너지로 변환시키는 기능을 활용한 센서분야, 전기에너지를 기계에너지로 변환시키는 기능을 활용한 기계적 힘 발생원분야, 그리고 전기에너지를 기계에너지로 이를 다시 전기에너지로 변환되는 복합적 기능을 활용한 전기회로 부품분야 등으로 나눌 수 있다[1-6].

본 고에서는 이러한 압전재료를 이용한 센서기술에 대하여 보다 자세히 알아보고, 향후 확대될 응용분야 및 전망에 대하여 고찰해보고자 한다. 압전센서 기술은 크게 나누어 역학량 측정분야, 음향 및 초음파 분야, 복합 압전효과를 이용한 센서분야로 나누어 살펴보고자 한다. 본 고에서는 자세한 이론적 배경이나 원

표 1. 압전재료의 에너지 변환방식에 따른 응용제품.

변환방식	기 능	응 용 예
압전효과	고압 발생	가스 점화 소자, 가스 라이터
	음향센서	Hydrophone, Microphone
	역학센서	가속도계, 진동계, 유량계, 압전자이로, AE센서 등
역압전효과	초음파 발생	초음파 세척기, 프라스틱 용접기, 초음파 가공기 등
	음파 발생	부저, 알람, 스피커, 전화기, Ringer
	액츄에이터	초음파 모터, 잉크-젯 프린터, Parts Feeder, 압전 Fan, 압전 펌프, 서보밸브 등
복합압전 효과	전기회로부품	세라믹 필터, SAW필터, 공진자, 메카니칼 필터 등
	거리측정	어군탐지, Sonar, NDT초음파 Probe, 의료용 초음파 Probe
	전압 변환	압전 트랜스

리보다는 실제 산업현장에 응용되고 있는 사례에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 압전 역학센서

기계적인 물리량 중 측정이 필요한 역학량으로는 힘, 충격, 가속도, 각속도, 힘과 가속도의 비로 표현되는 기계적 임피던스 등이 있다. 압전센서는 이 들 역학량 측정에 모두 이용이 가능하고, 압전 가속도센서, 힘센서, 임피던스 헤드, 각속도센서, 자동차용 충격센서, 유리 파손센서 및 금고도난 방지센서, 차량 와이퍼 속도조절용 빗방울 감지센서 등 용도에 따라 아주 다양하게 분류된다. 이중 압전 임피던스 헤드는 압전 가속도센서와 힘센서를 결합하여 하나의 센서로 만들어 놓은 것이다.

압전 가속도센서의 경우, 넓은 사용 주파수특성 및 선형성, 넓은 동적범위, 소형, 고감도 특성을 보유하고 있어 가속도 측정에 가장 보편적으로 사용되고 있는 센서이다. 이에 대하여 좀 더 자세하게 살펴보고자 한다[2-3].

압전소자를 그림1(a)와 같이 질량체와 베이스 판 사이에 단단하게 고정시키게 되면 가속도센서로 동작하게 된다. 이런 압전 가속도센서는 그림1(b)와 같이 질량 및 스프링으로 구성된 단순한 기계적 진동계로 표현할 수 있다. 압전 가속도센서에 축 방향의 가속도(a)가 인가될 경우, 질량체(M)이 압전소자에 가하는 힘은

$$F = M \times a \qquad (1)$$

이다. 이에 의해 압전소자에 발생하는 기계적 응력은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다(A는 표면적).

$$T3 = -a \times M / A \qquad (2)$$

이러한 기계적 응력에 의해 가속도센서에 발생하는 전압(V)은 식(3)과 같이 표현된다.

$$V = g \times t \times M \times a / A \qquad (3)$$

여기서 g는 압전소자의 전압상수 이고, t는 압전소자의 두께를 의미한다.

압전 가속도센서의 특성을 정확하게 평가하기 위해서는 전하 혹은 전압감도, 사용 주파수범위, 동적 사용범위, 지향성 특성, 사용 온도범위, 주위환경에 의한 영향성을 평가하여야 한다. 가속도센서의 감도 및 사용 주파수범위는 1 m/s²의 가속도를 원하는 주파수에 입력하여 센서의 출력특성을 측정한 주파수 응답특성 곡선으로부터 평가한다.

압전 가속도센서는 출력방식에 따라 전하형 및 전압형으로 분류하고, 측정 축방향에 따라 1축형 및 다

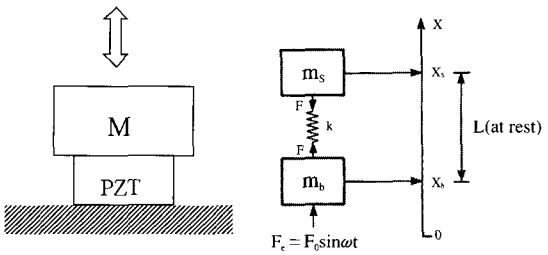


그림 2. (a) 압전 가속도센서 및 (b) 기계적 단순화 모델[2].

축형 센서로 분류된다(그림 3(b)참조). 또한 센서 내부 구조에 따라 압축형, 전단형, 굴곡형으로 분류되고, 사용 온도범위 및 크기, 감도특성, 사용 주파수, 고정방법에 따라 다양한 센서가 판매되고 있다. 최근 저주파수에 적용이 가능하도록 압전 바이몰프 액츄에이터를 채용한 센서가 개발되었고, MEMS 기술을 적용한 압전센서가 개발되고 있다.

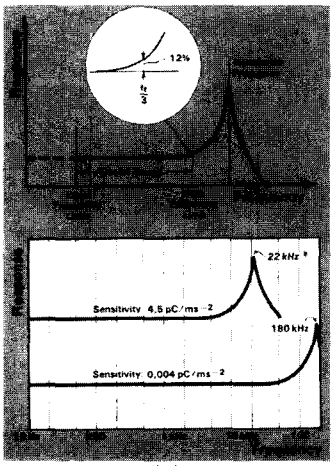
비디오 카메라의 손 떨림 방지 및 차량 자동 항법장치의 GPS(Global Position System)에 사용되고 있는 압전 자이로는 회전하는 운동체의 Coriolis 관성력을 이용하여 각속도를 측정하는 센서로 그림 4에 나타낸 것과 같이 압전체 기둥 및 튜닝 포크, 실린더 형상 등을 이용하고 있다[5].

회전하는 물체(질량 : m)는 각가속도(ω) 및 각속도(ν)에 비례한 Coriolis 힘(Fc)

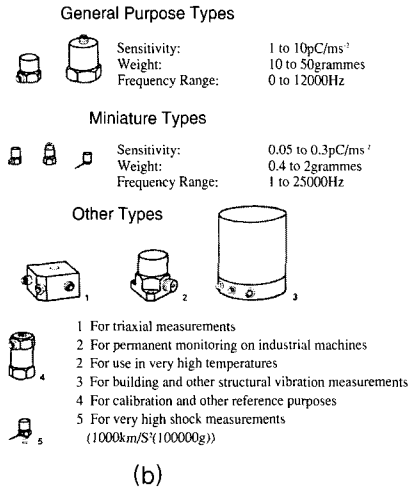
$$Fc = 2m\omega \times \nu \qquad (4)$$

를 받는다. 그림 4의 압전 자이로를 이용할 경우, 왼쪽 혹은 오른쪽으로 회전하는 물체의 Coriolis 힘(Fc)에 비례한 전기적 신호를 얻게 되어 회전체의 각속도를 정확하게 측정하는 것이 가능하게 된다.

압전 충격센서의 가장 대표적인 예가 자동차의 노킹(Knocking)센서이다. 압전 노킹센서는 공진형 및 비공진형 센서로 나눌 수 있고, 자동차 엔진주위에 설치되어 고온환경에서 사용된다. 따라서 센서의 구조의 설계도 중요하지만 보다 내구성이 좋은 센서를 개발하기 위해서는 그림 5에 나타낸 것과 같이 고온 및 고압환경에 대한 압전소자의 특성변화를 분석하여야 한다.



(a)



(b)

그림 3. (a) 압전 가속도센서의 주파수 응답특성 및 (b) 다양한 센서 [2].

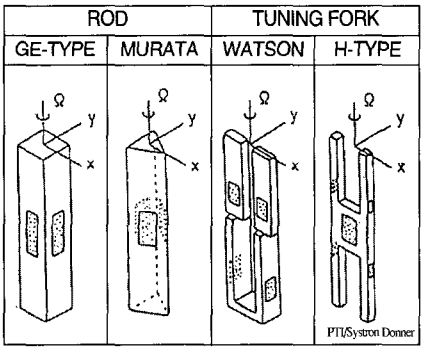
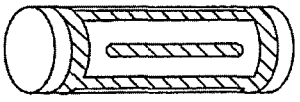
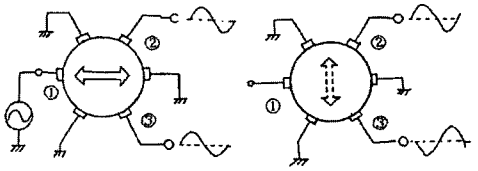


Fig. Various types of gyroscope.

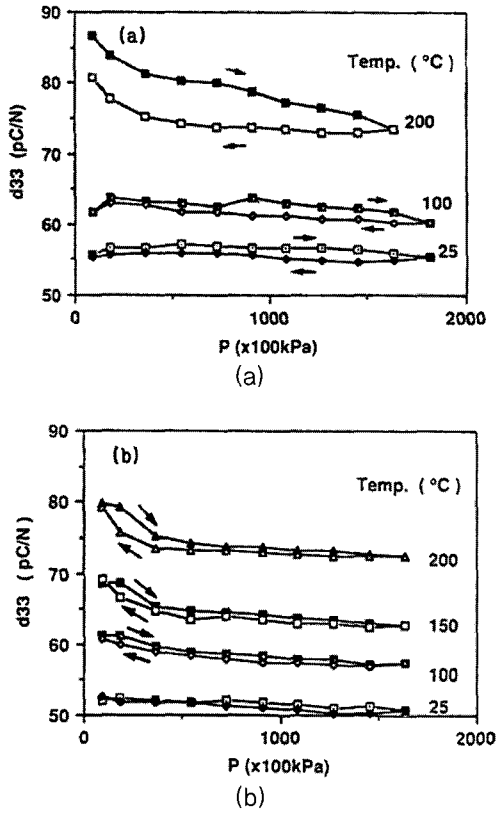


the piezoelectric-ceramic cylinder used for the bending vibrator of the gyroscope.



Bending direction vs. output waveform [Tokin사:Ceramic Gyro.]

그림 4. 다양한 형태의 압전 자이로 각속도센서.



d33 of PT as a function of pressure and temp: (a) no prior aging and (b) after aging.

그림 5. 압전소자의 압력 및 온도에 따른 특성변화.

3. 압전 초음파센서

초음파는 고체 혹은 액체 등 전파하는 매질에 따라서 그 성질이 바뀐다. 또한 각 매질에 따라 전파속도와 감쇄 정도가 달라지고, 같은 매질이라도 이방성 재료일 경우 각 전파 방향에 따라 그 특성이 모두 달리 나타나며, 서로 다른 매질들의 경계면에서 반사와 투과 현상이 나타나고, 둘 이상의 초음파 성분이 만나면 서로 동적결합(Dynamic Coupling)을 한다. 그리고 초음파 발생 위치로부터 거리에 따라, 즉 Fresnel Zone내부이냐 외부이냐에 따라 파형의 형태가 달라진다. 이러한 성질들은 물리량을 측정하는 초음파센서로 이용할 수 있는데, 예를 들어서 횡파가 전파를 하다가 더 이상 전파를 못하는 부분이 나타나서 전반사가 되면 유체층이 있다는 것을 알 수가 있을 것이고, 매질에 따라 초음파의 특성이 변한다면 역으로 초음파의 특성을 측정하여 전파매질의 물성을 알아내는 비파괴시험을 할 수 있을 것이다. 동적 결합특성을 이용한다면 유속이나 이동중인 물체의 속도측정에 이용될 수 있다[7].

현재 가장 많이 이용되고 있는 압전 초음파센서의 응용제품으로는 의료용 초음파센서, 비파괴검사용 초음파센서, 유량 및 유속검출용 센서, 어군감지기, SONAR, 두께측정용 센서, 후방 물체감지기 등을 들 수 있다.

압전 초음파센서는 그림 6에 나타낸 것과 같이 핵심소자인 압전소자, 음향정합층, 후면층, 튜닝층으로 구성되는 것이 일반적이다. 그리고 압전 초음파센서의 특성으로는 감도, 파형, 주파수 특성, 거리에 따른 진폭특성, 지향성 등을 들 수 있다(그림 7 참조).

압전 초음파센서의 대표적인 응용 예와 그 작동원리들을 정리하면 표 2와 같다. 초음파를 측정 및 시험

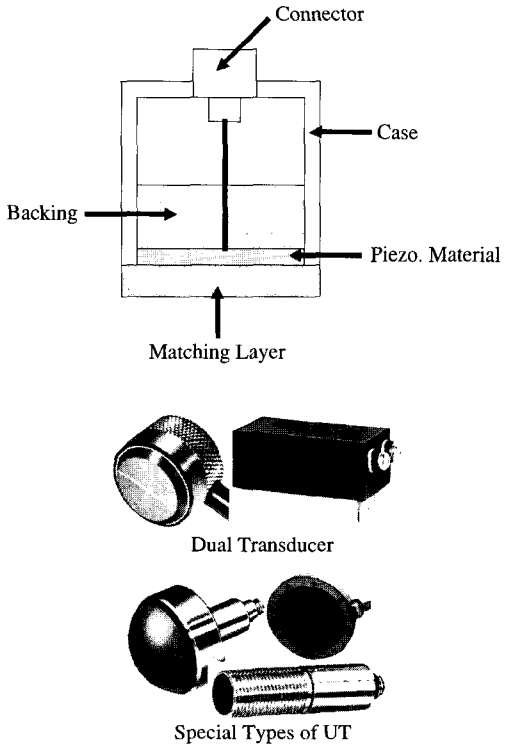


그림 6. 압전 초음파센서의 단면도 및 제품사진[6].

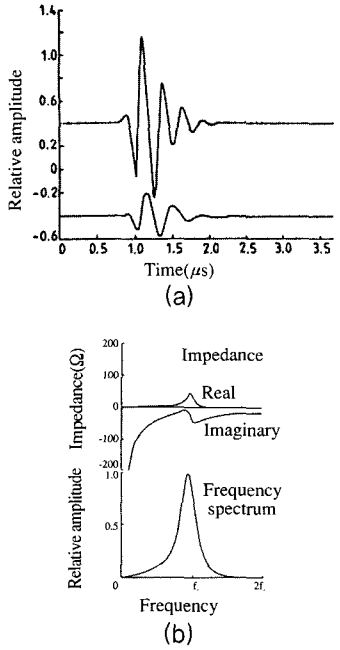


그림 7. 압전 초음파센서의 (a)파형 및 (b)주파수특성.

용으로 이용하는데 있어 가장 큰 장점은 비교적 사용 원리가 간단하다는 점과, 동일한 센서로 필요에 따라 여러 가지 변수의 측정이 가능하다는 점이다[7].

4. 압전 탄성 표면파센서의 응용

탄성 표면파 기기는 원래 신호 처리용 기기로 개발된 후, 최근까지도 주로 신호처리 분야에서 급속한 발전이 이루어진 기기이다. 이후 주위 환경에 민감한 탄성 표면파의 유용한 성질이 발견이 되어 센서로 응용, 개발이 되기 시작했는데. 센서로서의 실질적인 연구는 1970년대 중반에 들어서야 본격적으로 이루어졌다고 할 수 있다. 그러나 그 후 15년이라는 짧은 기간 동안 세계적으로 실로 방대한 규모의 연구가 이루어져 현재로는 일부 분야(온도, 습도, 압력 등)에서는 실용화가 이루어졌을 뿐만 아니라 그 응용, 실용화 분야가 나날이 기하 급수적으로 불어가고 있다. 기본적인 물리량의 측정에 관한 연구는 이미 상당한 수준에 이르

표 2. 압전 초음파센서의 응용분야.

측 정 대 상	측 정 원 리
Flowmetry	유속과의 동적결합에 의한 속도 변화(그림 2)
thermometry	온도에 따른 매질 물성변화에 의한 속도 변화
density, porosity	매질 밀도변화에 의한 속도변화
pressure	압력에 따른 트랜스듀서 공진주파수 변화
dynamic force, vibration, acceleration	외부진동에 의해 진동자에 발생되는 전하
displacement	기준점에서 변위점까지의 비행시간변화
viscosity in fluids	점성변화에 의한 속도, 감쇄도 변화
level	기준점에서 수면까지의 비행시간 변화
location	기준점에서 목표점까지의 비행시간 변화
humidity, gas	가스농도변화에 따른 속도, 감쇄도 변화
phase, microstructure	매질 물성변화에 의한 속도, 감쇄도 변화
thickness	두께변화에 따른 비행시간 변화
composition	매질 조성변화에 따른 속도 변화
anisotropy, texture	매질 이방성, 조직에 따른 속도, 감쇄도 변화
nondestructive testing	매질 내부구조에 따른 진폭, 속도 변화
stress and strain	매질 물성변화에 의한 속도, 감쇄도 변화
acoustic emission	매질 내부상태에 따른 신호의 크기, 빈도
imaging, holography	대상체 형상에 따른 속도 감쇄도 변화
elastic properties	매질물성에 따른 속도, 감쇄도 변화
burglar detection	대상체의 존재유무에 따른 비행시간 변화
rotation angle, angular velocity	회전운동 성분과의 동적결합
medical inspection	대상체 위치, 형상, 물성에 따른 시간, 진폭변화
fish finding	대상체 위치, 형상에 따른 비행시간, 진폭변화

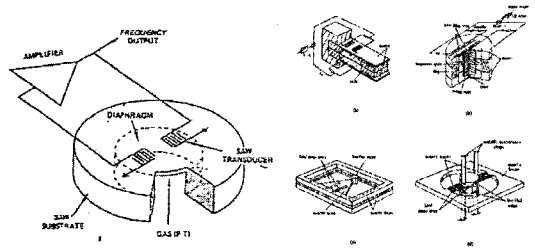
렀고, 최근의 연구동향은 화학, 생물학적 가스센서의 개발에 노력에 집중되고 있는데. 이는 단순한 표면파 지연선에 의한 발진기 (Oscillator) 외에 지연선 위에 측정하고자 하는 가스종류에만 민감한 얇은 피막 층을 증착시켜 그 신뢰성, 정확성, 내구성, 감도 등을 증가시켜야 하기 때문이다. 이러한 가스센서는 탄성 표면파 센서 중에서도 가장 구조도 복잡하고 설계, 제작시에 어려운 과정을 많이 거치므로 개발이 이루어졌을 경우에는 기술적 파급효과, 부가가치 그리고 시장성 면에서도 가장 유리하고 따라서 많은 연구가 이루어지고 있다. 기존의 센서들에 비해 탄성 표면파 센서가 가지는 장점들로는 (1) 고감도, (2) 우수한 선형성, (3) 광식자 기법의 사용(별도의 설비 투자 없이 IC 제작설비를 그대로 이용할 수 있다.), (4) 표면파 진행경로에의 접근 용이성, (5) 디지털 전자 시스템과의 접합 용이성, (6) 넓은 사용 주파수 대역, (7) 크기와 무게의 소형화 (8) 가격의 저렴성 등이 있다[8].

센서는 분류 방법에 따라 여러 가지로 나누어 질 수 있다. 일례로 측정대항에 따라 나누면 역학적, 음향적, 전기적, 자기적, 열적, 광학적, 화학적, 생물학적 그리고 이외의 변수들을 들 수 있는데 탄성 표면파 센서는 현재 보고된 사례들만을 들어도 이들 대부분의 변수들을 다 측정할 수 있고 이는 표 3에 나타나 있다.

SAW센서를 이용한 대표적인 압력센서 및 가속도 센서를 그림8에 나타내었다. 압력센서의 경우, 압력에 민감하도록 센서의 지연선을 얇게 해주는 것이 보통이며, 측정사례로는 0.001Pa까지 쉽게 측정이 되는 걸로 보고 되었다. SAW형 가속도센서의 경우, 지연선

표 3. SAW sensor의 응용분야 및 측정분야[8].

1. Acoustic	Wave amplitude, phase, polarization, spectrum
	Wave velocity
2. Biological	Biomass(identities, concentrations, states)
3. Chemical	Components(identities, concentrations, states)
4. Electric	Chare, current
	Potential, potential difference
	Electric field (amplitude, phase, polarization, spectrum)
	Conductivity
	Permeability
5. Magnetic	Magnetic field(amplitude, phase, polarization, spectrum)
	Magnetic flux
	Permeability
6. Mechanical	Position(linear, angular)
	Velocity
	Acceleration
	Force
	Stress, pressure
	Mass, density
	Moment, torque
	Speed of flow, rate of mass transport
	Stiffness, compliance
	Viscosity
7. Optical	Wave amplitude, phase, polarization, spectrum
	Wave velocity
8. Thermal	Temperature
	Flux
	Specific heat
	Thermal conductivity



(a) (b)

그림 8. (a) SAW pressure sensor 및 (b) 다양한 SAW accelerometers.

이 진동 가속도에 민감하게 반응할 수 있도록 독특한 구조를 취하는데, 현재 10-4 g까지 안정적으로 측정된 걸로 보고 되었다[9].

5. 결 론

최근 산업구조의 고도화로 고 정밀도 및 자동화가 요구되고 있고, 정보 통신산업의 눈부신 발전에 힘입어 정밀 센서개발 및 응용연구가 절실하게 필요한 실정이다. 센서기술의 소형화, 다차원화, 다기능 및 집적화, 지능화 추세에 대응하기 위해서는 압전소재 기술 및 센서기술, 시스템 기술 등에 대한 보다 체계적이고, 여러 학제간의 복합화된 연구개발 정책이 필요하다고 사료된다.

현재 전세계적으로 Pb를 함유하지 않는 친환경 압전재료 개발 및 압전 단결정개발, 고성능 새로운 재료개발, 600도 이상의 고온에서 사용 가능한 재료개발 등에 대하여 재료적인 측면에서 많은 연구개발 노력을 기울이고 있다. 그리고 제조공정 측면에서 압전 박막제조 및 압전 파이버제조, 금속/세라믹 복합체 제조기술 개발, 저온 소결 및 금속/세라믹 동시 소성기술 개발, 압출 및 사출을 통한 복잡형상 제조기술 등에 많은 인력을 투자하고 있다. 또한 센서 및 액츄에이터의 응용부품 측면에서는 MEMS기술 및 바이오 기술을 접목하여 소형화 및 다기능화를 추구하고 있다. 산업적인 측면에서 자동화 및 스마트 구조물, 스마트 홈 등에 대한 수요가 계속에서 증가하고 있으므로 여기에 핵심기술인 센서의 중요성이 크게 부각되고 있는 실정이다.

참고 문헌

[1] B. Jaffe, "Piezoelectric Ceramics", Academic Press(London and New York), 1971.

[2] B&K Product Catalogue, "Piezoelectric Accelerometer".

[3] NEC/TOKIN Product Catalogue, "Piezoelectric Ceramics".

[4] Murata Product Catalogue, "Piezoelectric Ceramic Applications".

[5] 임종인, "압전센서의 기술 및 제품동향", p. 49, 압전부품 및 MEMS(KAIST EMDEC), 1998.

[6] Panametrics Product Catalogue, "Ultrasonic Transducer".

[7] 노용래, "초음파의 산업 응용", 음향학회지, Vol. 12, No. 4, p. 72, 1993.

[8] 노용래, "탄성 표면파 센서", 음향학회지, Vol. 11, No. 4, p. 45, 1992.

[9] D. Hauden, "Miniaturized bulk and surface acoustic wave quartz oscillators used as sensor", IEEE-UFFC, Vol. 34, No. 2, p. 253, 1987.

· 저 · 자 · 약 · 력 ·

성명 : 임종인

◈ 학력

· 1986년 한양대 무기재료공학과 공학사
· 1989년 KAIST 재료공학과 공학석사
· 1999년 경북대 센서공학과 공학박사

◈ 경력

· 1989년-2002년 4월
RIST 재료공정연구센터 책임연구원
· 1991년 2월-1991년 8월
Penn. State Univ. MRL 객원연구원
· 2002년 9월-2003년 8월
한양대 무기재료공학과 겸임교수
· 2002년 5월-현재
KICET 선임연구원
· 2000년 세계인명록(Marquis Who's Who in the World) 게재