

## 技術解説

# 탄성 표면파 센서

## Surface Acoustic Wave Sensors

노용래  
(Yongrae Roh)  
(산업과학기술연구소)

### I. 서론

통상 성인이 들을 수 있는 주파수 범위 이상의 소리를 우리는 초음파라 부른다. 좁은 의미에서의 음파란 파의 진행 방향과 주진동 발생 방향이 일치하는 종파를 일컫는데서 그와 상이한 전자파와 구별이 된다. 그러나 넓은 의미의 음향이란 기계적인 파동 전체를 포함한다는 점에서 선단형 성분의 횡파도 음파의 영역을 넣을 수 있다. 이렇게 넓은 의미의 음파가 고체(혹은 침성을 가지는 유체)속을 통과할 때 이종 매질에 밀접하여 탄성파라 부른다.

초음파 영역의 탄성파는 실로 응용범위가 광범위하여, 대표적인 예로 고출력의 용접, 세척, 분분용기 등으로 쓰일 수 있고, 저출력의 측정, 시험용 센서 등으로 쓰일 수 있다. 또한 최근에 개발된 응용 예로는 보터, 잉크 제트 등이 있다.

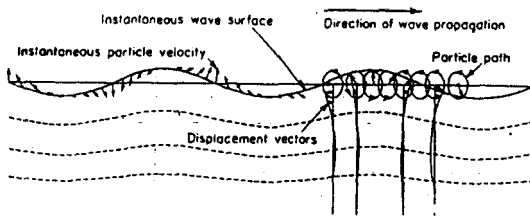
일반적인 탄성파 이론과 이의 응용에 관한 연구 및 학술자료는 이미 발표된 것이 많으므로 자세한 연구는 생략하고, 본고에서는 이러한 다양한 응용 분야중에서 초음파의 센서로의 응용중, 특히 제4에 관심이 집중되고 있고, 앞으로 연구해야 할 여지가 많은 탄성 표면파 센서에 대한 소개를 하고, 현재까지의 문제점과 발전방향에 대하여 알아보도록 한다.

2절에서는 탄성 표면파에 관한 연구가 많은 역사를 개략적으로 알아보고, 3절에서는 탄성 표면파 센서의 구조를 알아본다. 탄성 표면파 기기는 원래는 신호처리용 기기도 개발이 되었으나, 후에 센서로 응용이 확립된 기기이다. 따라서 센서의 설계 및 제작과정에

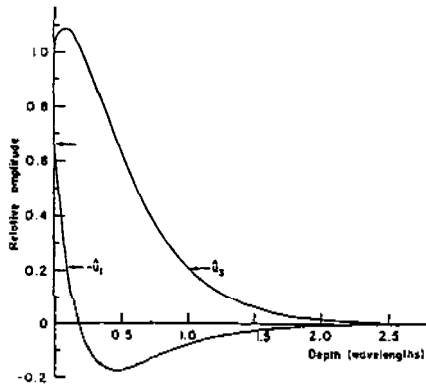
서 신호처리 기기용 기술이 상당 부분 이용이 되는데, 신호처리용 탄성 표면파 기기에 대해서는 이미 기술 해설이 이루어졌는지라, 3절에서는 센서로의 특성을 부가하는 구조 및 기술에 대해서만 알아본다. 4절에서는 이미 보고된 탄성 표면파 센서의 주요한 개발 및 응용 예를 알아보고, 끝으로 5절에서는 앞으로의 발전 방향 및 이에 필요한 요소 기술에 대하여 살펴보겠다.

### II. 탄성 표면파와 탄성 표면파 기기

탄성 표면파는 1885년 Rayleigh에 의해 처음 그 존재가 확인된 이후 꾸준히 특성 및 응용에 관한 연구가 진행되어 왔다. Rayleigh는 등방체(Isotropic Materials) 상의 표면파의 특성을 해석하여, 이 파가 지진과 고체의 충돌시 발생하는 파형의 중요한 부분을 이룬다는 점을 밝혀내었는데, 이를 연구자를 따라 Rayleigh파라 부르게 되었다. 그림 1에서 보듯이 Rayleigh파는 항유에너지가 반부한 평판의 표면에만 분포하며 진파하는 특성을 가지고 있고, 표면에서의 깊이에 따라 변위량이 지수함수적으로 감소한다. 즉, 거의 모든 에너지가 표면에서 불과 몇 파장내에 집중되며, 파형은 진파방향을 도모하는 수직 평면에 다원형 모양을 이룬다. 이후 계속된 연구는 진파 매질의 구성에 따라 여러 가지 다른 특성의 표면파가 동시에 존재할 수 있다는 것을 밝혀내었다. 즉, 층이 진 반부한 평판내에서는 Love파, 두 반부한 평판의 집합층에서는 Stoneley파, 액체와 고체 반부한 평판의 집합층에서는 Sholtz파, 유한 두께의 탄성체 내에서는



(a) horizontal view of wave propagation



(b) vertical decay of wave amplitude

Figure 1. Schematic drawing of Rayleigh waves

Lamb파 등, 각각 고유한 특성을 가지는 여러 탄성 표면파가 속속 연구, 발견되었다. 단, 이러한 여러 종류의 탄성 표면파들은 세세한 특성은 각기 다르나, 표면에만 전파를 한다는 기본 성질은 공통적으로 가지는 것들이다. 또한 Stoneley는 이러한 표면파는 전파 매질이 이방성(Anisotropic)일 때, 매질의 각 절단면과 전파방향에 따라 상이한 성질을 가지는 것을 발견했고, Cubic형 결정구조를 가지는 물질에 대한 탄성 표면파 연구결과를 발표했다. 이렇게 여러 선각자들에 의해 주도된 연구결과는 1967년 Viktorov에 의해 유한, 무한 매질에서의 특성과 응용에 대해 이론적, 실험적으로 집대성 되었는데, 이는 당시에 이르러서야 어느 정도 수준에 오른 컴퓨터와 측정기기의 발전에 기인하는 바 크다.

탄성 표면파에 대한 초기의 연구는 주로 지진학자들에 의해 주도가 되었으나, 그 유용성이 확인된 이후 비파괴 검사, 신호처리용 기기들로 응용이 확대되었다. 그러나 체적파(Bulk Wave)에 비해 아직은 적용사례가 미미한 편이었는데, 1965년 White와 Vol-

tmer가 빗살형 전극(IDT: Inter-Digital Transducer)을 압전체(Piezoelectric Materials)에 적절히 설치하면 표면파를 효과적이고 선택적으로 발진할 수 있다는 것을 밝힌 후<sup>8)</sup>, 이 분야에 대한 연구는 급격히 발전하였다. 이들이 제안한 그림 2에 보인 바와 같은 구조를 가지는 표면파 기기는 종래의 체적파 기기들에 비해

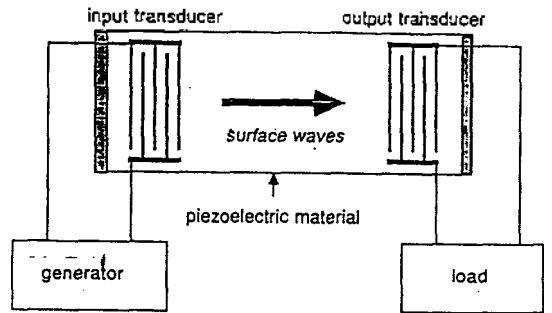


Figure 2. Schematic drawing of a SAW device invented by White and Voltmer

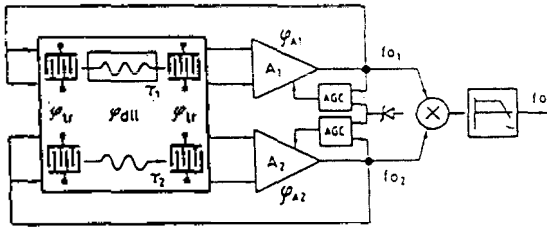
- (1) 평면적 구조를 가지므로 통상적인 광식자 기법을 사용해 복잡한 회로를 표면에 쉽게 실재, 제작할 수 있고,
- (2) 제작 후 기기의 재현성(Reproducibility)이 우수하며,
- (3) 양산이 용이하고, 따라서 단가가 저렴하며,
- (4) 표면파의 낮은 전파속도로 인해 지연선의 길이가 짧아져 소형화가 용이하며,
- (5) 파형의 수정 및 차단이 쉽다.

는 장점들이 있다. 이러한 사실들이 밝혀진 후, 이 탄성 표면파 및 탄성 표면파 기기에 대한 연구는 전세계적으로 확산되었고, 주요 연구사례만 들어도 Farnell<sup>9)</sup>, Auld<sup>10)</sup>, Matthews<sup>11)</sup>, Oliner<sup>12)</sup>, Dieulesaint와 Royer<sup>13)</sup>, Morgan<sup>14)</sup>, Campbell<sup>15)</sup> 등이 있다. 최근까지 이루어진 주요 응용 예로는, 지연선, 신호처리 기기, 센서, 비파괴 검사 기기 등을 들 수 있다.

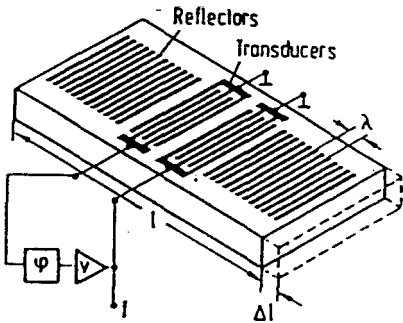
### III. 탄성 표면파 센서의 구조

앞절에서 언급한 탄성 표면파 기기는 센서로 사용하기에 아주 적절한 기기이다. 파가 매질의 표면에만 분포를 하므로 파를 둘러싼 주위 환경에 직접 노출이 되어 있고, 따라서 주위 환경이 변하면 그 영향이 파

형의 변화로 바로 나타나기 때문이다. 이때 관심의 대상이 무엇이나에 따라 일반적인 탄성 표면과 기기를 적절히 재구성 할 수 있고, 이미 적용된 응용 사례에서는 이러한 탄성 표면과 센서의 우수성이 입증되었다. 대표적인 탄성 표면과 센서의 구조는 그림 3에



(a) dual delay line oscillator sensor



(b) dual delay line resonator sensor

Figure 3. Typical types of SAW sensors

나타난 바와 같다. 두 타입에서 구조와 작동 원리의 차이는 있으나 원칙적으로 동일한 기술로 모두 제작이 가능한 형태이다. 통상 많이 쓰이는 형태는 Dual Delay Line Oscillator 센서인데, 이때 두개의 지연선(Delay Line)을 동시에 쓰는 이유는 센서의 측정 대상에 대한 선택성을 향상시키기 위해서이다. 즉, 표면파를 둘러싸고 있는 여러 환경들(온도, 습도, 압력, 전자기장, 가스.....)이 동시에 변할 경우, 하나의 지연선은 이들 환경의 변화를 똑같이 노출이 되어 있을 뿐 아니고, 다른 하나의 지연선에는 이들 환경에 동일하게 노출이 되어 있지 특히 측정 대상이 되는 변수에 좀더 민감히 반응을 하도록 감지층을 증착하였다. 측정 대상의 특성에 따라 감지층 내면에 적당량의 불리성 가산을 가할 수도 있다. 이렇게 주위 환경의 변

화에 비례하는 파장의 변화는 파의 속도, 감쇄도의 변화로서 감지가 되며, 신호처리의 편의를 위해서는 주로 전자(파의 속도)가 위상변화 혹은 주파수변화의 형태로 감지된다. 감지된 파의 변화량은 주파수 카운터 등에 의해 전기신호로 읽어진다. 이때 두 지연선을 통과한 신호를 서로 비교하면, 두 신호의 차이는 순수히 측정 대상이 되는 변수의 영향만을 나타낼 것이고, 측정 변수와 이 신호차 사이에 적절한 상관관계가 성립될 수 있다면 센서로서의 기능이 이루어지는 것이다. 통상 센서의 감도와 정밀도는 작동 중심 주파수에 비례한다. 따라서, 고주파로 갈수록 센서로서는 유리하나 미소 Lining 공정과 신호 잡음에 따른 어려움이 증가하므로, 통상 몇 십~몇 백 MHz 범위의 센서가 많이 쓰인다.

탄성 표면과 센서는 크게 나누어 (1) 파가 전파하는 압전 기관, (2) 파를 발진, 수신하는 트랜스듀서의 역할을 하는 빗살형 전극, (3) 지연선과 감지층, (4) 발진기 회로부 및 측정부의 크게 네가지 부분으로 구성이 된다. 기존의 신호 처리용 기계에 비해 독특한 부분은, 용도에 따라 지연선 상에 설치하는 감지층과 측정 감도를 높이기 위해 적용되는 다양한 가공기술을 들 수 있다. 다음에서 이상의 각 부분품들에 대해 좀더 자세히 알아보겠다.

### 3.1. 압전 기관

탄성 표면과 센서의 기관으로는 압전 물질이 주로 사용된다. 전왜(Electrostrictive), 자왜(Magnetostrictive) 재료를 기관 재료로 사용하는 경우도 있으나 효율성, 안정성 등의 문제로 인하여 아직은 압전 물질이 기관 재료의 대종을 이룬다. 저주파 대역에서는 압전 복합체나 세라믹도 사용할 수 있으나, 고주파 대역에서는 신호잡음과 재료를 구성하는 입자크기의 한계로 인해 단결정을 사용하여야 한다. 기관으로 가장 널리 쓰이는 재료로는 Quartz, LiNbO<sub>3</sub>와 LiTaO<sub>3</sub>를 들 수 있다. 최근엔 Silicon 기관 위에 압전 박막층을 증착해, 전체를 기관으로 사용하며 Silicon 처리공정을 그대로 이용하려는 연구도 많이 이루어진다(6). 탄성 표면과 센서의 기관으로서 압전 단결정이 갖추어야 할 대표적인 조건으로는 (1) 전기기계 결합계수(electromechanical coupling factor)가 높아야 하고 (2) 온도 변화 계수(temperature coefficient)가 낮아야 하고 (3) 가공 시편의 크기가 커야 하고 (4) 결정내에 결함이 없어야 한다. 이러한 조건들을 동시에 다 만족시키기는 어려운 일로 전적으로 얻을 수 있는 단결정의 조성과 결정 육성 및 가공기술

이 필요하다.

### 3.2. 빗살형 전극(IDTs)

빗살형 전극은 신호 처리용 탄성 표면과 기기에 사용되는 IDT의 설계 및 제작 기법을 바로 응용할 수 있으므로 Ref. 3을 참고하기로 하고 상세한 설명은 생략한다. 일반적으로 고려해야 할 사항으로는 (1) 압전 단결정의 물성과악과 (2) 압전단결정의 이방성을 분석해 표면과의 최대 발전, 수신 효과를 이룰 수 있는 결정의 특정 절단면과 탄성 표면과의 전파방향을 결정해야하며 (3) 표면과와 단결정, IDT 그리고 감지층간의 전체적인 상호작용을 고려한 파형 해석과 (4) 해석 결과에 따른 최적형 IDT의 설계와 발전기(Oscillator)의 회로와 연결하기 위한 정합회로의 설계 (5) 정합회로를 포함한 전체 자연선상의 파형 진행양태의 Simulation 등을 들 수 있다.

### 3.3. 자연선 및 감지층

자연선은 입력 IDT에서 출력 IDT까지의 표면파가 전파하는 압전기관 구간을 일컬으며, 측정 대상에 따라 감지층을 필요로 할수도, 그렇지 않을 수도 있다. 즉 온도의 경우 기관 자체의 열전 특성(Pyroelectric)에 의해 감지층이 없어도 측정이 가능하고, 압력의 경우에도 설계 방법에 따라 감지층의 필요 유무가 결정된다. 그러나 습도, 개스, 전자기장, 방사능 등의 경우에는 이 감지층이 필수적인데, 감지층은 (1)특정 측정 대상물만을 흡착하는 흡착성이 높아야 하고 (2) 표면적이 많으면서도 탈착속도가 빨라야 하고 (3) 감지층과 압전결정 표면간의 경계면이 안정해야만 한다. 따라서 선택성이 좋은 흡착제를 개발하고 자연선 위에 정착하기 위해 (1) 선택성이 뛰어난 흡착 재질 (2) 박막 제조 방법 (3) 자연선상의 감지층 증착 기술의 개발이 선행되어야 한다.

### 3.4. 발전기 회로부 및 측정부

앞에서 언급한 단결정, IDT회로, 감지층 등을 결합하고 앰프, 필터 등을 부착해 공진을 이룰 수 있는 발전기를 구성하고, 나아가 센서로서의 성능 향상을 위해 필요한 자동 증폭 제어기 (automatic gain controller), 믹서 및 최종 측정치의 추출을 위한 필터의 개발 및 제작까지를 포함한다. 구성된 발전기 센서에서 요구되는 사항은 (1) 발전기 구성품, 즉 앰프, 필터, 자동 증폭 제어기, 믹서 등이 소형화 되어야 하고 (2) 발전기 자체의 잡음이 극소화 되어야 하고 (3) 발전기의 단기, 장기 안정성이 확보되어야 하며 (4)

IDT 기술과 연계되어 센서의 작동 주파수 대역이 좁은, 즉 높은 Quality Factor가 이루어져야 한다. 구성 및 조립된 표면파 발전기형 센서를 측정하고자 하는 대상에 적용해 감도, 정확성, 신뢰성, 안정성, 내구성 등을 검사하여 실제 센서의 사용상에 나타날 수 있는 문제점들을 제거하고, 센서로부터 나오는 측정량을 용도에 맞게 제시, 저장, 처리할 수 있는 신호 처리 기술 및 최종 조립, 생산 단계를 포함한다.

## IV. 탄성 표면과 센서의 응용

탄성 표면과 기기는 원래 신호 처리용 기기로 White와 Voltemer에 의해 처음 개발이 이루어진 후, 최근까지도 주로 신호처리 분야에서 급속한 발전이 이루어진 기기이다. 이후 주위 환경에 민감한 탄성 표면과의 유용한 성질이 발견되어 센서로 응용, 개발이 되기 시작했는데, 센서로서의 실질적인 연구는 70년대 중반에 들어서야 본격적으로 이루어졌다고 할 수 있다. 이는 센서의 개발에 필요한 복잡, 정밀한 IC 공정기술이 최근에 들어서야 발전, 보급되기 시작했고, 측정치를 수합, 저장, 처리하는 비용의 하락에 기인한 것이다. 그러나 그후 불과 15년이라는 짧은 기간동안 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 불리량의 측정에 관한 연구는 이미 상당한 수준에 이르렀고, 최근의 연구동향은 화학, 생물학적 개스 센서의 개발에 노력이 집중되고 있는데, 이는 단순한 표면파 자연선에 의한 발전기 (Oscillator) 외에 자연선 위에 측정하고자 하는 개스종류에만 민감한 얇은 피막층을 증착시켜 그 신뢰성, 정확성, 내구성, 감도 등을 증가시켜야 하기 때문이다. 이러한 개스 센서는 탄성 표면과 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 표면과 센서가 가지는 장점들은 (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 결합 용이성, (6) 넓은 사용 주파수 대역, (7) 크기와 무게의 소형화 (8) 가격의 저렴성 등이 있다.

센서는 분류 방법에 따라 여러가지로 나누어질 수 있다. 일례로 측정대상에 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 1에 나타나 있다. 다음으로는 표 1에 나타난 응용범위 중, 이미 보고된 대표적인 몇가지에 대해 간략히 알아보겠다.

Table 1. List of measurands detectable by SAW sensors! • denotes the items for which experimental results are available)

A1. Acoustic	
A1.1 •	Wave amplitude, phase, polarization, spectrum
A1.2 •	Wave velocity
A1.3	Other(specify)
A2. Biological	
A2.1 •	Biomass(identities, concentrations, states)
A2.2	Other(specify)
A3. Chemical	
A3.1 •	Components(identities, concentrations, states)
A3.2	Other(specify)
A4. Electric	
A4.1	Charge, current
A4.2	Potential, potential difference
A4.3 •	Electric field (amplitude, phase, polarization, spectrum)
A4.4 •	Conductivity
A4.5 •	Permeability
A4.6 •	Other(specify)
A5. Magnetic	
A5.1 •	Magnetic field(amplitude, phase, polarization, spectrum)
A5.2	Magnetic flux
A5.3	Permeability
A5.4	Other(specify)
A6. Mechanical	
A6.1 •	Position(linear, angular)
A6.2 •	Velocity
A6.3 •	Acceleration
A6.4 •	Force
A6.5 •	Stress, pressure
A6.6 •	Strain
A6.7 •	Mass, density
A6.8	Moment, torque
A6.9 •	Speed of flow, rate of mass transport
A6.10 •	Shape, roughness, orientation
A6.11 •	Stiffness, compliance
A6.12 •	Viscosity
A6.13 •	Crystallinity, structural integrity
A6.14	Other(specify)
A7. Optical	
A7.1	Wave amplitude, phase, polarization, spectrum
A7.2	Wave velocity
A7.3	Other(specify)
A8. Radiation	
A8.1	Type
A8.2	Energy
A8.3	Intensity
A8.4	Other(specify)
A9. Thermal	
A9.1 •	Temperature
A9.2	Flux
A9.3	Specific heat
A9.4	Thermal conductivity
A9.5	Other(specify)

#### 4.1. 온도 센서

온도센서는 압전물질 고유의 열전특성을 바로 이용하는 것으로, 탄성 표면파 센서중 가장 간단한 구조를 가지고 있고, 실제 상용화까지 이루어진 부분이다. 구조는 그림 2에 나타난 그대로를 사용하되, 단습도나 압력같은 여타 외부 영향을 받지 않도록 밀봉이 잘 이루어져야 한다. 현재  $1 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}$ 까지 안정적으로 측정된걸로 보고되었다<sup>17)</sup>.

#### 4.2. 압력센서

압력에 민감하도록 센서의 지연선을 얇게해주는 것이 보통이며, 대표적인 구조는 그림 4에 나타나 있다. 측정사례로는 0.001 Pa까지 쉽게 측정이 되는 걸로 보고 되었다<sup>18)</sup>.

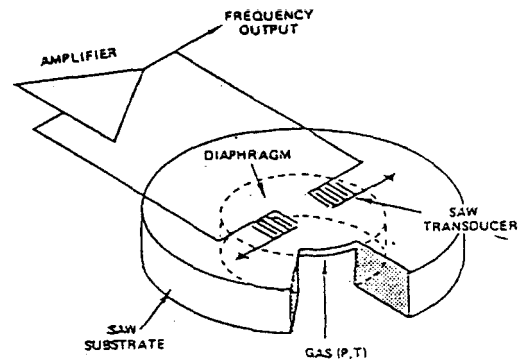


Figure 4. Typical SAW pressure sensor

#### 4.3. 가속도센서

지연선이 진동 가속도에 민감하게 반응할 수 있도록 독특한 구조를 취하는데, 그림 5는 그 몇가지 사례를 보이며, 현재 10<sup>-6</sup>g까지 안정적으로 측정된 걸로 보고 되었다<sup>19)</sup>.

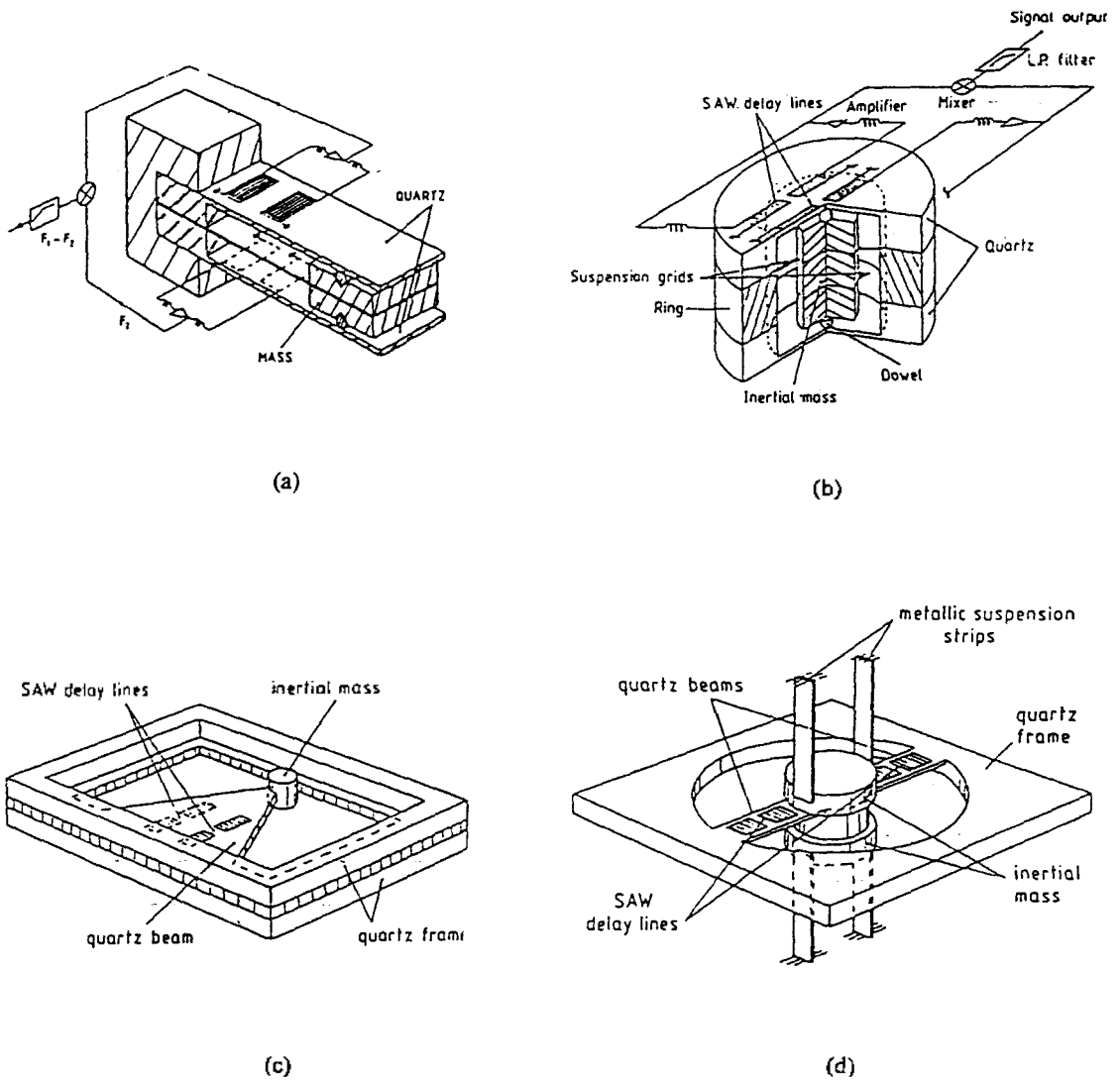


Figure 5. Various types of SAW accelerometers

4.4. 가스센서

그림 3a에 보인 것과 같은 구조를 가지며, 측정 대상 가스에 따라 특정 감지층을 사용해야하는데, H<sub>2</sub>S의 경우 WO<sub>3</sub>층을 증착시키 10ppb까지 측정된 것으로 보고되고 있다. 이 습도 센서인 경우, 가스센서의 경우 구조는 약자가 다 작 같 작용으로 습도에 민감

한 것을 사용하면 된다. 유기물 복합체 박막을 사용하여 3×10<sup>-11</sup>g/cm<sup>2</sup>까지의 측정 사례가 있다<sup>11)</sup>.

4.5. 수중 음향 센서

작은 크기의 음향에 따라 수중 음향 센서로 사용 될 수 있는데, 대표적인 예가 그림 6에 나타나 있다.

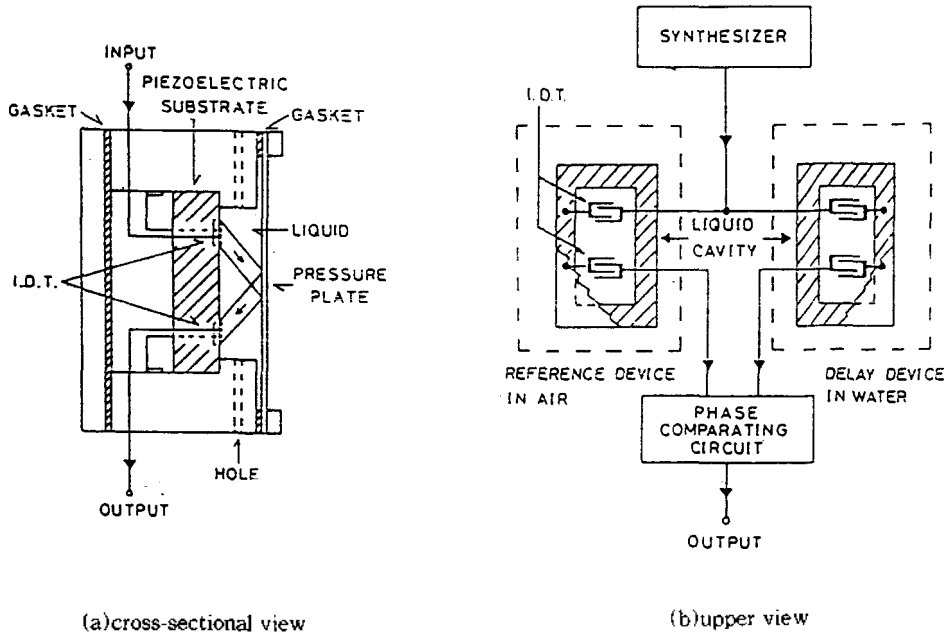


Figure 6. Schematic view of a SAW underwater sound sensor (hydrophone)

V. 결 론

탄성 표면파 센서의 개발은 재료공학, 응용역학, 전자공학, 화학공학 등 여러분야의 기술들이 유기적으로 잘 연결, 조합이 이루어져야만 가능하며, 또 센서의 개발이 이루어지면 역으로 이상의 여러분야에 응용, 사용이 될 수 있다. 일반적으로 동일한 목적으로 쓰이는 여타 센서들에 비해 표면파 센서의 우수한 점은 신뢰성, 정확성, 선택성, 정밀성, 응답성 등이 뛰어나며, 개개 미소센서들을 모아 전체 시스템의 고기능, 다차원화 나아가 인공 지능화를 이룰수 있다는 점이다. 그러나 아직도 응답 시간의 단축, 감도의 증가, 온도 안정성, 시효성 등 해결해야 할 여지가 많은 것이 사실이다. 일단 센서로서의 우수성이 확인된 만큼 선진국에서는 연구, 실용화에 박차를 가하고 있고, 관련 논문이 매년 수천편씩 쏟아지는 실정이다.

개발방향은 고감도의 생체, 화학 센서의 개발과 더불어, 수중에서의 Rayleigh파의 산재를 극복하기 위해 SSBW(Surface Skimming Bulk Wave)나 평판형 파 (Plate Mode Waves) 같은 다양한 형태의 파형을 이용하려는 추세이다. 선진국에서는 단일 미소형 탄성 표면파 센서의 개발에서 한걸음 더 나아가,

이들 미소 센서들을 집적화 시켜 여러가지 변수들을 한꺼번에 잴 수 있는 다차원화, 다기능화 센서를 이루고자 하고 있으며 동시에 컴퓨터나 액츄에이터와 결합시켜 스마트화 시키고자 하고 있다.

참 고 문 헌

1. A. Shoh, "Industrial applications of ultrasound-a review :I. high power ultrasound," IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol.22, No.2, pp.60-71, Mar, 1975.
2. L. C. Lynnworth, "Industrial applications of ultrasound-a review :II. measurements, tests, and process control using low intensity ultrasound," IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol. 22, No.2, pp 71-101 Mar 1975
3. 황금찬, 이동욱, "탄성 표면파 신호처리 소자," 한국 음향학회지, 10권 1호, pp.71-81, 1991.
4. L. Rayleigh, "On waves propagating along the plane surface of an elastic solid," Proceedings of London Mathematical Society, Vol. 7, pp.4-11, 1885.
5. W. M. Ewing, W. S. Jardetzky and F. Press, Elastic Waves in Layered Media, McGraw-Hill, New

- York, 1957.
6. R. Stoneley, "Elastic waves at the surface of separation of two solids." *Proceedings of Royal Society, Series A*, Vol. 106, pp.416-428, 1924.
  7. I. A. Viktorov, *Rayleigh and Lamb Waves*, Plenum Press, New York, 1967.
  8. R. M. White and F. W. Voltmer, "Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves," *Applied Physics Letter*, Vol.7, pp.314-316, 1965.
  9. G. W. Farnell, "Properties of elastic surface waves," *Physical Acoustics*, W. P. Mason and R. H. Thurston(eds.), Academic Press, vol. 6, pp.109-166, 1970.
  10. B. A. Auld, *Acoustic Fields and Waves in Solids*, Vol. 1-2, John Wiley, New York, 1973.
  11. H. Matthews, *Surface Wave Filters*, John Wiley, New York, 1977.
  12. A. Oliner, *Acoustic Surface Waves*, Springer-Verlag, New York, 1978.
  13. E. Dieulesaint and D. Yoyer, *Elastic Waves in Solids*, John Wiley, New York, 1980.
  14. D. P. Morgan, *Surface Wave Devices for Signal Processing*, Elsevier, New York, 1985.
  15. C. Campbell, *SAW Devices and Their Signal Processing Applications*, Academic Press, New York, 1989.
  16. M. J. Vellekoop, "All-silicon plate wave oscillator system for sensors," *Sensors and Actuators, Part A*, Vol. 25, pp.699-703, 1991.
  17. D. Hauden, "Pressure and temperature measurements with SAW sensors," *Proceedings of 36th Annual Frequency Control Symposium*, pp.284-289, 1982.
  18. Y. R. Roh, "SAW sensors for measurement of surface forces in fluid flows," *Journal of Acoustical Society of Korea*, Vol.9, No.6, pp.81-90, 1990.
  19. D. Hauden, "Miniaturized bulk and surface acoustic wave quartz oscillators used as sensors," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol.34, No. 2, pp.253-258, Mar. 1987.
  20. J. F. Vetelino, "Hydrogen sulfide surface acoustic wave gas detector," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 34, No.2, pp.157-161, Mar. 1987.
  21. H. Wohltjen, "Trace chemical vapor detection using SAW delay line oscillators," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol.34, No.2, pp.172-178, Mar. 1987.
  22. K. Toda, K. Katayama and H. Urabe, "An underwater sound sensor with interdigital transducers operating at liquid-solid interface," *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.70, No.4, pp. 936-938, Oct. 1981.