

SAW TECHNOLOGY I

(탄성표면파 기술에 대한 小考)

黃 金 燦*

目 次

- 1. 서 론
- 2. SAW와 SAW의 전파(傳播)
- 3. 여기 및 검출(ID transducer)

1. 서 론

고체에 존재하는 표면파, 즉 고체의 표면 위를 전파하는 어떤 기계적인 변위(음향파동; acoustic wave)가 갖는 성질에 관한 연구가 이미 1885년 영국의 Rayleigh 경에 의해 발표되었으나, 그 이후의 연구는 주로 지구 물리학적인 관점에서(지진파) 이루어져 왔으며, 1967년 Viktorov가 결정체의 표면을 따라 전파하는 표면 음향파(Surface Acoustic Wave, 이하 SAW)의 특성에 관한 연구를 발표한 뒤야 비로소 전기·전자공학에의 응용이 주목받게 되었다. 비교적 낮은 주파수(수십 MHz) 대역에서 SAW에 대한 몇가지 기초실험이 있는 뒤에, SAW가 전기·전자공학에 충분히 활용될 수 있다는 사실이 입증되었고, 1968년 미국의 Stanford 대학의 연구 팀은 새로운 형태의 트랜스듀서(transducer)를 LiNbO₃ 서브스트레이트(substrate)위에 증착시킨 장치에서, 전기신호에서 음향신호로의 변환손실을 4dB로 줄일 수 있었음을 발표하였는데, 이것은 당시의 Bulk Wave 소자에서의 변환손실 30dB에 비하면 가히 획기적인 것이었다. 한편, 미국의 Zenith사에서 이와 비슷한 정도의 변환손실을 PZT 서브스트레이트에서 얻었음을 발표하였고, 이때부터 SAW 소자에 관한 연구가 활발하게 진행되었다.

SAW가 이와 같은 주목을 받게 된 것은 다음과 같은 이유 때문이다.

(i) SAW 소자는 'planar structure'이므로 현재 IC 제작에서 사용되는 photolithography 기술을 그대로

이용하여 제작할 수 있다.

(ii) SAW 소자의 성능은 대부분이 트랜스듀서의 기하학적인 구조에 따라 결정된다. 따라서 정확도가 높을수록 'mask'를 사용해서, SAW 소자의 성능과 생산성을 높일 수 있다.

(iii) SAW의 전파속도는 전자파의 전파속도에 비해 약 10⁸배 느리다. 예를 들면, 3μsec 동안에 전자파가 1km를 전파하는데 비해 SAW는 고체의 표면 위를 1cm정도 전파한다. 따라서 SAW 소자의 넓은 대역폭 특성, 작은 감쇄도특성과 함께 이 특성을 이용해서, 작은 SAW 소자로 많은 양의 정보를 다룰 수 있다.

(iv) SAW 소자에서는 이런 정보들이 소자의 표면에 존재하기 때문에, 필요한 정보를 검출하거나, 서로 다른 신호를 조합하기가 쉽다.

(v) SAW는 안정한 파동이어서, 전체·자계의 영향을 받지 않으며, 대부분의 SAW 소자의 재료들은 온도변화에 대해서 우수한 성능을 갖고 있다.

SAW 소자는 이와 같은 장점들로 인하여 짧은 기간 동안임에도 불구하고 이미 많은 발전을 보았다. SAW 소자의 여러가지 응용형태를 표 1에서 볼 수 있다.

SAW 소자는 표 1에서 볼 수 있는 것 처럼 시그널 프로세싱(signal processing)에서 많은 기능을 수행할 수 있기 때문에 앞으로도 많은 발전과 응용이 기대된다.

따라서 필자는 이 글을 통하여 SAW 소자와 웨이퍼 및 통신에의 응용을 주로 소개하고자 하는 바, 이번호에서는 먼저 SAW의 기본적인 특성과 SAW 소자의 기본 성질에 대한 소개를 하고자 한다.

2. SAW와 SAW의 전파(傳播)

SAW 소자는 간단히 말해서, 그림 1에서 볼 수 있는 것 같이 트랜스듀서(transducer)를 통해 전기신호

* 正會員: 延世大 工大 電氣工學科 助教授·工博

표 1. SAW 소자의 응용

SAW소자		응용 분야
주요 이용되는 구조 및 특성	응용 소자	
ID 트랜스듀서	Frequency filter Inverse filter Discriminator Oscillator	Color TV integrated IF filter; Satellite multiplexers; ECM Clutter dominated Radar Analog FM demodulator Stable source(VHF-Microwave); Specialized communications Frequency synthesizer
지연선 (Delay Line)	Tapped delay line Bit matched filter Acoustic amplifier PSK matched filter PN PSK generator Digital delay line Touch Sensitive	Altimetry, Analog MTI Radar, Communications path length equalizer; Time ordering Radar clutter reference; ECM; SSR Digital communications PSK demodulator Long delay for TV frame storage Spread spectrum communications; IFF; Integrated communications; Navigation and Identification Link analysis; Spread spectrum communications Recirculating memory; Data and bandwidth compression; Sonar Man-machine interface; Glass intrusion
멀티스트립 결합장치 (Multistrip Coupler)	Improved devices	Signal routing
분산장치 (Disperser)	Compressive receiver Variable delay line	High resolution Radar; Navigation; Group delay equalizers Spectral analysis Range calibration; Target simulation; Electron timing; ECM
비선형성 (Nonlinearity)	Convolver Acoustic imaging Acousto-optic	Spread spectrum communications; Radio astronomy; FFT processor Non-destructive testing Displays, Cameras
웨이브 가이드 (Wave guide)	Acoustic IC,s	Signal routing Subminiature signal processing sub-systems

를 음향신호로 바꾼 다음, 다시 트랜스듀서를 통해 전기신호로 검출해 내는 장치라고 할 수 있다. 여기에서는, Rayleigh wave, Bleustein-Gulyaev wave 등의 SAW(그림 1의 acoustic medium)중에서, SAW 소자에 주로 쓰이는 Rayleigh wave의 기본적인 성격에 대하여 간단히 살펴보기로 한다.

SAW(Rayleigh wave)는 기계적인 變位·應力·變

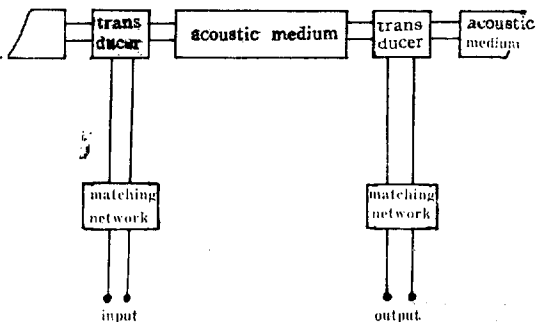


그림 1. SAW 소자의 기본 요소

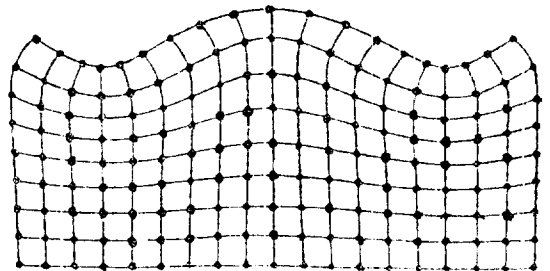


그림 2. SAW에 의해 이방성 고체에 발생하는 변위 형으로 이루어진 파동이 표면 가까이에서만 국한되어 전파하는 것을 말한다. 그림 2에 SAW의 전파(傳播)에 의해 異方性 물질에 생기는 변위가 보인다. 이때 표면의 변위와는 달리 어느 정도의 깊이 안에서는 변위가 일어나지 않는 것을 알 수 있다.

SAW는 물질의 내부에서는, 깊이에 대해 그 파장의

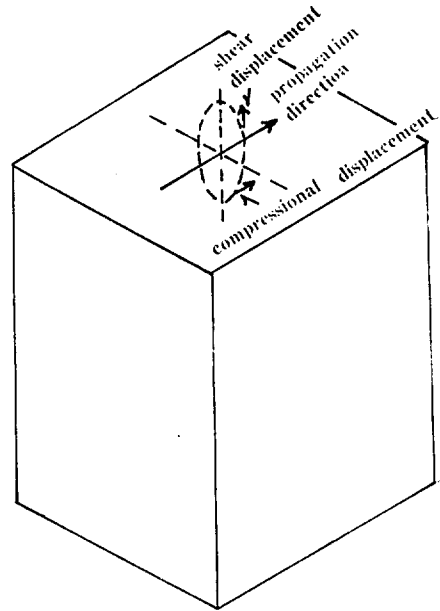
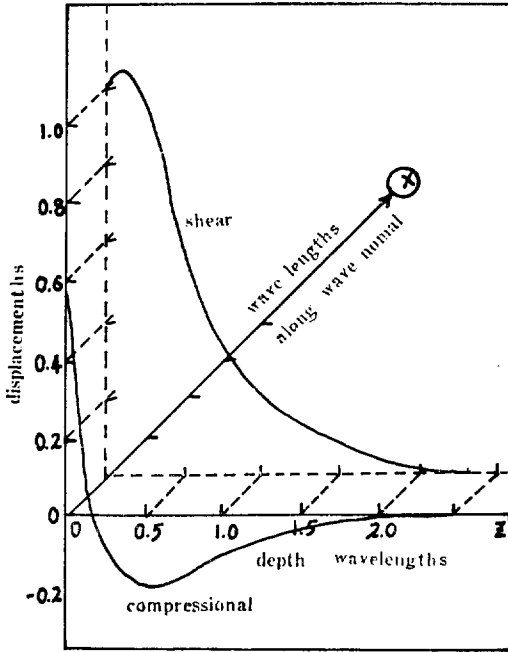


그림 3. Rayleigh Wave의 횡파성분과 종파성분의 변위진폭 그림 4. Rayleigh Wave의 입자변위 성분

표 2. 주요 재료에 대한 SAW 매개변수

재	료	질	단	면	진	파	방	향	진	파	속	도	진	파	감	쇄	도	온	도	계	수	전	기	합	계	수	최	적	핑	거	수	Photolithography	
											(km/s)	(dB/ μ s)				(ppm/ $^{\circ}$ C)																	방법으로 제작 가능한
																																	상한 주파수(MHz)
Bi ₁₂ GeO ₂₀		(110)			(T10)						1,680	~1.4				-140						1.4				7						280	
PZT-4		분극			입						2.20	~6.0*				-						2.4				6						370	
Quartz		ST			X						3,158					0						0.17				21						530	
Quartz		Y			X						3,173	4.1				-24						0.22				19						530	
LiNbO ₃		Y			Z						3,495	1.6				-85						4.5				4						580	
AlN-on		X			Z						6.17	-				-						0.63				11						1030	
Sapphire																																	

주 1. 측정에 사용한 트랜스듀서의 핑거폭은 1.5 μ m이다.

2. 진파 감쇄도는 주파수 1GHz에 대한 값이다.

* 주파수 37MHz에 대한 값.

지수함수적으로 감쇄하고, 대체로 파장의 두배정도 깊이와 표면 위에만 존재한다. 그림 3에 Rayleigh wave의 변위진폭과 깊이와의 관계를 보였다. Rayleigh wave는 서로 90°의 위상 차가 있는 횡파성분(shear component)과 종파성분(compressional component)이 합성된 타원형 입자운동을 한다.

SAW의 진파속도는 수 GHz까지의 주파수에 대해서, 주파수와 관계없이 일정하다(즉, 비분산적이다; dispersionless) SAW 소자에 사용될 수 있는 주요 재료들에 대한 진파속도와 방향등의 자료를 표 2에서 볼 수 있다.

SAW의 진파속도는 Bulk wave의 가장 늦은 속도

보다 약 10%정도 느린데, 이것은 결정체의 표면의 硬度(stiffness)가 bulk 전체의 硬度보다 상대적으로 작기 때문에 표면이 파동의 진파에 대하여 트랩(trap)을 형성하게 되어, 'slow wave' 구조를 갖기 때문이다.

실온에서 주파수 1GHz인 SAW의 감쇄도가 표 2에 있는데, 이 값들은 서브스트레이트의 표면을 충분히 잘 처리(연마·세척)한 다음에 측정된 것이다. 결정체에서의 진파감쇄도는 주파수 제곱의 법칙을 따르며, 따라서 SAW 소자의 사용 상한주파수가 수 GHz정도로 제한된다.

한편, SAW의 특성을 논하는데 있어서, SAW의 비선형성은 꼭 중요한 요소가 된다. 대체로 SAW의 매

개변수들을 산출할 때, 매체의 특성을 선형적으로 가정(근사화)해서 취급하였으나, 실제로는 SAW의 진폭이 커지면 이 가정이 성립하지 않으며, SAW의 방정식은 비선형항을 포함하게 된다. SAW의 비선형성을 고려할 때, 다음 두가지 점이 중요한 점으로 생각된다.

(i) SAW의 비선형항은, 선형적으로 증실도를 지킬 수 있는 동작의 한계점을 명확하게 알려준다.

(ii) harmonic generation, freq. mixing, parametric amplification 등의 비선형 효과를 일으켜서, convolution과 correlation을 행할 수 있는 SAW 소자의 개발을 가능하게 해준다.

표 2.에는 이 외에도 결정의 절단면, 전파방향, K^2 및 N_{opt} 등의 계수가 나타나 있는데, 이러한 사항들은 주로 SAW의 여기와 검출에 관계되기 때문에, 다음 절에서 설명하기로 한다.

3. 여기(Excitation) 및 검출(Detection), (IDtransducer)

그림 4에 나타난 Rayleigh wave의 변위성분을 좀더 자세히 보면 그림 5와 같은데, 그림의 u_1 과 u_3 의 조건을 만족시킬 수 있는 트랜스듀서 시스템(transducer system)이면, Rayleigh wave를 쉽게 여기할 수 있다. 이러한 트랜스듀서 시스템으로, 주로 ID 트랜스듀서(interdigital transducer)가 쓰이는데, ID 트랜스듀서는 1965년 White와 Voltmer에 의해 처음 소개되었으며, 보통 표준적인 photolithography 방법으로 약 1000Å 두께의 금속막(보통 Al)을 압전물질 위에 증착시킨 것이다. (그림 6)

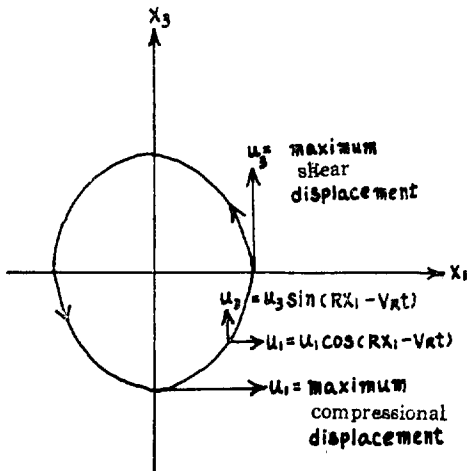


그림 5. Rayleigh Wave의 변위성분

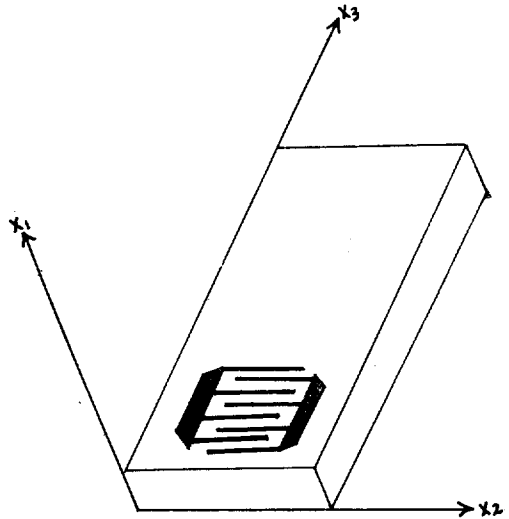


그림 6. SAW를 여기하기 위한 압전물질 표면의 ID 트랜스듀서.

그림 6과 같은 장치에서 압전물질을 Quartz라 하고, Rayleigh wave가 여기되는 메커니즘(mechanism)을 살펴보면 다음과 같다.

그림 7 (a)의 ID 트랜스듀서에 RF 신호를 인가하면 그림 7 (b), (c)와 같은 전계 성분이 발생된다. (그림에서 x_1 이 전파방향이다) E_1 과 E_2 사이에는 90°의 위상차가 있으며, 이 전계에 의해 Quar t_2 에 발생하는 탄성변형(elastic strain)은 역압전효과(converse piezoelectric effect)에 의해,

$$\epsilon_j = d_{ij} E_i \tag{1}$$

ϵ_j : 탄성변형(elastic strain)

d_{ij} : 압전계수(piezoelectric modulus)

E_i : 전계

로 주어진다.

Quartz(Symmetry class, 32)에 대한 압전변형행렬(piezoelectric strain matrix)은,

$$\begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdot & d_{14} & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & d_{25} & d_{26} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}$$

이므로, 전계 E_1 과 E_2 에 의해 Quartz에 발생된 탄성 변형은,

$$\epsilon_1 = d_{11} E_1 \tag{2}$$

$$\epsilon_6 = d_{26} E_2$$

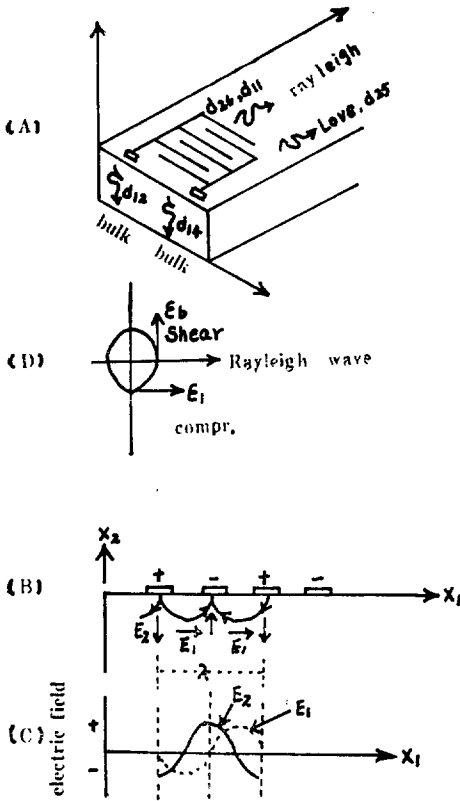


그림 7. ID 트랜스듀서를 이용한 Quartz 표면에서의 Rayleigh Wave의 여기

및. $\epsilon_2 = d_{12} E_1$
 $\epsilon_4 = d_{14} E_1$ (3)
 $\epsilon_5 = d_{25} E_2$
 가 된다.

여기에서, 식 2의 ϵ_1 과 ϵ_6 가 결합해서, Rayleigh wave를 구성한다. (그림 7 (d)) ϵ_1 은 Rayleigh wave의 종파성분(그림 5의 u_1)이며, ϵ_6 는 횡파성분(그림 5의 u_3)인데, 이와 관련된 전계 E_1 과 E_2 사이에 90° 의 위상차가 있으므로, ϵ_1 과 ϵ_6 —곧 u_1 과 u_3 사이에도 90° 의 위상차가 생긴다. (한편 $\epsilon_2, \epsilon_4, \epsilon_5$ 는 불필요한 bulk 상태의 파동으로 나타난다.)

이처럼 여기된 Rayleigh wave는 ID 트랜스듀서의 핑거(finger)에 수직인 반대방향 양쪽으로 전파하는 때 이때 파장은 핑거간의 간격과 같다. 전파된 Rayleigh wave는 다시 매질구조의 ID 트랜스듀서에 의해, 이번에는 직접압전효과(direct piezoelectric effect)를 통하여 전기적 신호로 변환되어 검출된다. 물론 이 밖에도 복잡한 문제가 많이 제기되지만, 간단한 특성으로 볼때, Rayleigh wave는 위와 같이 압전성의 가격적인 효과를 이용해서 여기·검출된다.

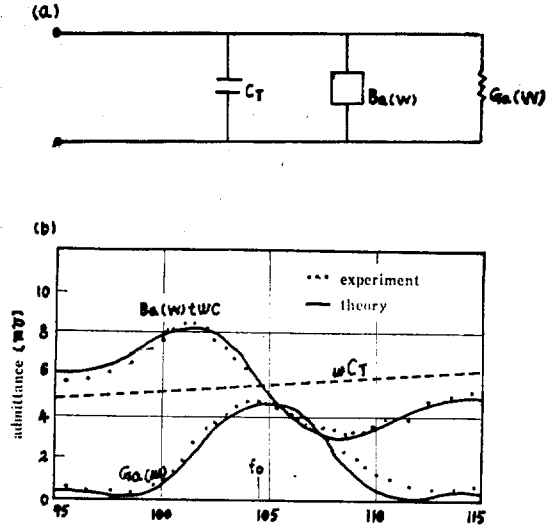


그림 8. (a) ID 트랜스듀서의 분로동가회로
 (b) 분로동가회로를 이용한 다섯쌍의 핑거를 가진 ID 트랜스듀서의 어드미턴스의 이론치와 실험치의 비교.

ID 트랜스듀서에 대한 자세한 해석은 처음 미국의 Stanford 대학의 연구진에 의해 이루어졌으며, 압전 동가회로(piezoelectric equivalent circuit)와 modal analysis에 의해 구할 수 있으나, 복잡성과 지면사정으로 생략하고, 그 결과만을 간단히 소개한다.

가장 간단한 동가회로는 트랜스듀서의 핑거쌍 하나에 대한 전기-기계적 동가회로로 구할 수 있는데, 그림 8 (a)에 보이는 것이 바로 핑거쌍 하나에 대한 분로동가회로(shunt equivalent circuit)이다.

그림 8 (a)의 동가회로의 $G_a(\omega)$ 는 방사콘덕턴스(radiation conductance), $B_a(\omega)$ 는 방사 서셉턴스(radiation susceptance), C_T 는 핑거쌍 사이의 용량(capacitance)을 나타낸다. 한편, 그림 8 (b)는 다섯쌍의 핑거가 있는 ID 트랜스듀서의 어드미턴스(admittance)의 이론치와 실험치를 비교해 놓은 것이다.

ID 트랜스듀서는 그 특성이 마치 전자장의 엔드 파이어 안테나 배열(end-fired antenna array)과 비슷하기 때문에, 그 대역폭(bandwidth)이 핑거 쌍의 수에 의해 결정된다. 만약 핑거 쌍이 많아서 ID 트랜스듀서가 차지하는 길이가 SAW의 파장보다 몇 배 이상 길면, 동기주파수(synchronism frequency)가 조금만 변화해도, 위상이 크게 부정합되고 순 여기량(net excitation)도 상대적으로 작아진다. 따라서 길이가 긴 트랜스듀서는 상대적으로 좁은 대역폭을 갖게 된다.

ID 트랜스듀서의 입력콘덕턴스 $G_a(\omega)$ 는,

$$G_s(\omega) = G_0 \cdot (\sin x/x)^2 \quad (4)$$

G_0 : 중심주파수 ω_0 에서의 방사손덕턴스

$$X = \pi N[(\omega - \omega_0)/\omega_0]$$

N : 핑거쌍의 수

로 주어지고, 트랜스듀서에 걸린 전압에 의해 방사되는 에너지는 핑거쌍의 수의 자승(N^2)에 비례하므로, G_0 는 N^2 에 비례한다. 한편, G_0 는 ID 트랜스듀서의 전기용량과 다음 관계를 가진다.

$$G_0 = (4/\pi) \cdot k^2 \omega_0 C_T N \quad (5)$$

K : 유효압전결합계수

C_T : 트랜스듀서 용량(N 과 비례)

트랜스듀서를 구동하는에는, 신호원(source)과의 정합회로(matching circuit)가 필요하기 때문에 트랜스듀서의 주파수응답(frequency response)은, 트랜스듀서의 주기적인 구조와 정합회로의 특성에 의해 결정된다. 트랜스듀서는 방사저셉턴스($B_s(\omega)$)가 비교적 작기 때문에 C_T 와 단순한 인덕턴스(inductance)를 조합함으로써 저항성 부하와 잘 정합되는데, 이 경우 정합회로의 Q 는,

$$Q = \omega C_T / G_0 = \pi / 4K^2 N \quad (6)$$

이 된다. 한편 식 4에서 트랜스듀서의 Q 는 N 과 같아진다. 트랜스듀서의 대역폭은 주로 이 Q 값들로 인해 제한되며, 가장 넓은 대역폭은 이 두값이 같을 때 얻어진다. 즉,

$$N^2 = \pi / 4K^2 \quad (7)$$

일 때이다. LiNbO_3 를 예로 들면, 최적 대역폭을 갖는 핑거쌍의 수(N)는, $\sqrt{5\pi} (\approx 4)$ 가 된다.

또, G_0 와 C_T 가 모두 핑거길이에 비례하므로, 트랜스듀서를 설계할 때 핑거의 길이를 조절해서 G_0 와 신호원을 정합시킬 수 있다. 그림 9는 50 ohm 신호원과 LiNbO_3 표면 위의 세가지 다른 트랜스듀서를 정합시킬 때 주파수의 함수로 나타낸 변환손실을 보여준다. 이 경우에는, 다섯쌍의 핑거가 가장 넓은 대역폭과 가장 적은 변환손실을 보여준다.

한편, 대부분의 SAW 소자에서, 트랜스듀서의 역할은 단순한 여기·검출에 그치지 않고, 소자의 응답을 제어하는 기능을 갖는다. 따라서 트랜스듀서의 설계는 가장 중요한 문제이다. 어떤 소자에 있어서 보통, 주파수응답($T(f)$: frequency response)이 중요한 문제가 되는데, SAW 소자의 ID 트랜스듀서의 경우에는 그 임펄스 응답($h(t)$: impulse response)이 중요한 문제가 된다. [$h(t)$ 는 Fourier변환에 의해서, $T(f)$ 로부터 구해진다.

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} T(f) \cdot \exp(i2\pi ft) \cdot df \quad (8)$$

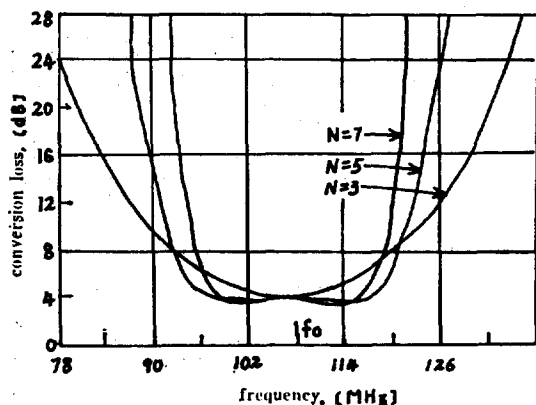


그림 9. ID 트랜스듀서의 핑거 수가 3, 5, 7인 경우의 변환손실

ID 트랜스듀서에 전압임펄스를 인가하면 서브스트레이트 위에 트랜스듀서의 전극구조에 따른 형태를 갖는 기계적인 변형이 생긴다. 이 변형의 SAW 성분은 (Rayleigh wave) 트랜스듀서에서 주위공간으로 방사되어 전파되는데, 그림 10의 ID 트랜스듀서에서 보면 트랜스듀서 축과 평행한 방향으로 전파하는 임펄스 응답의 요소가 트랜스듀서의 주기와 길이에 따라 정현파 형태를 갖는 것을 알 수 있다. 시간에 대한 임펄스 응답 $h(t)$ 는 SAW의 속도를 변환인자로 취급한 선형변환에 의해 얻을 수 있다. 식 8을 역변환하면, 이와같은 트랜스듀서 길이에 의해 펄스변조된 정현파(truncated sinusoidal wave)로부터 $\sin X/X$ 형태의 주파수 응답을 얻을 수 있다. 이와같은 해석에 따라서 임펄스 응답, 즉 SAW 소자의 주파수 응답이, 트랜스듀서의 핑거의 위치와 인접한 핑거간의 겹치는 길이 및 핑거의 폭에 의해 결정된다는 것을 알 수 있다. 트랜스듀서의 이런 제원들이 파원(wave source)에서 위상과 진폭을 조절하는 기능을 갖는 것인데, 트랜스듀서

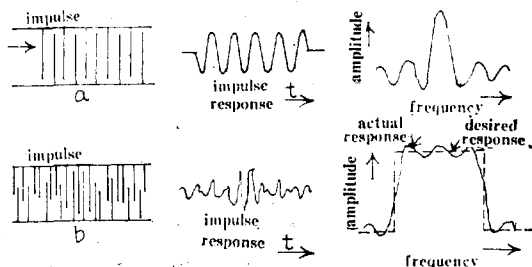


그림 10. ID 트랜스듀서의 임펄스 응답과 주파수 응답

에 의해 원하는 형태의 주파수 응답을 얻는 예를 들면 다음과 같다.

만약 직각형태의 주파수응답이 요구된다고 가정하자. 이때 임펄스 응답은 $\sin X/X$ 형태일 것인데, 이 함수의 계수는 그림 10 (b)에서 보이는 것과 같이, 핑거의 겹침으로 조절되며, $(\sin X/X)$ 함수에서 180° 위상변화는 트랜스듀서 핑거의 공통전극에 연결된 핑거접속을 바꿔서 만든다.

이 결과 나타나는 임펄스 응답과 주파수응답이 그림 10 (b)의 맨 끝에 보여지며, 여기에서 트랜스듀서 구조와 임펄스응답간의 관계를 볼 수 있다. 주파수 응답이 완전한 직각형태가 아닌 것은, $(\sin X/X)$ 함수의 잘라진 형태에서 생긴 맥동(ripple)들을 포함하고 있기 때문이다. 그러나 실제로는 트랜스듀서의 한 부분에서 발생된 파동이, 트랜스듀서의 무게로 인해 불균일하게 부하가 걸린 서보스트레이트의 표면을 전파할 때 생기는 'phase front distortion' 때문에 이와같은 이적된 임펄스응답이 얻어지지 않는다.

이러한 효과는 'finger breaking weighting' 방법에

의해 상쇄시킬 수 있는데 이 방법은 어떤 핑거를 전부 제거하는 대신에 그 핑거의 한 부분을 절단함으로써 개회로(open circuit)를 설치해서 진폭을 조절하는 것이며, 기타 많은 다른 방법들도 제시되고 있다.

참 고 문 헌

1. Signal Processing in Acoustic Surface Wave Devices. G.S. Kino, H. Matthews, IEEE Spectrum, Aug. 1971, pp.22~35
2. Past, Present and Future of Surface Elastic Waves. J. de Klerk, J. de physique, Nov.-Dec. 1972, pp.182~188
3. Materials for Elastic Surface Wave Applications. J. de Klerk,
4. Surface Acoustic Wave Components, Devices and Applications. J.D. Maines, E.G.S. Paige, IProc. IEE, vol. 120, No. 10R, Oct. 1973, pp. 1078~1110

原 稿 募 集

아래와 같이 會員여러분의 玉稿를 기다립니다.

技術資料, 技術展望, 技術解說, 技術報告, 技術情報, 製品紹介, 現場經驗談, 海外旅行記 등 많은 投稿 있으시기 바랍니다.

아 래

內 容 : 論文, 技術解說, 技術展望, 技術情報, 技術資料, 技術報告, 講座, 現場經驗談, 製品紹介, 國內外動靜, 國內外旅行記, 會員消息 等

要 領 : 200字 原稿用紙 30枚~50枚 內外

마 감 : 隨時接受(但 論文은 期日前이라도 接受順에 따름)

送付處 : 大韓電氣學會(編修委員會) 서울特別市 中區 水標洞 11-4 電氣會館 306號
206-2253, 267-0213

參 考 : ① 原稿 投稿時는 會誌投稿規程에 따를 것

② 論文提出時는 國文要旨도 꼭 提出하시되 本文中의 圖面은 바로 印刷에 들어갈 수 있도록 먹으로 깨끗이 그리시어 提出하시기 바람

③ 그림의 說明文句들은 축소할 경우를 고려하여 글자를 삽입하시기 바람