

포물선형 혼 도파관을 이용한 탄성표면파 콘벌버에 관한 연구

A Study on SAW Convolver Using Parabolic Horn Waveguide

* 전 영 준 (Jeon, Young Joon)
** 박 용 서 (Park, Yong Seo)
*** 황 금 찬 (Whang, Keum Chan)

요 약

본 논문에서는 포물선형 혼 도파관을 사용하여 입사파의 음향전력밀도를 중대 시킴으로써 압전물질의 압전 비선형성을 이용한 평판형 구조의 탄성 음향파 콘벌버를 제작하고 스펙트럼 확산 통신방식에서 S/N비가 높으며 프로그램이 가능한 자기상관정합 필터로 사용될 수 있음을 실험적으로 제시 하였다.

본 실험에서는 포물선형 혼 도파관을 사용한 탄성 음향파 콘벌버를 압전 재료인 YZ-LiNbO₃ 위에 중심 주파수 100(MHz) 압축비 11:1, 적분시간 6(μSec) 인 IDT, 포물선형 혼 도파관 및 출력단자를 설계한 후 이를 포토리토그래피 방법으로 제작하여 100(MHz)로 펄스 변조된 신호를 탄성 음향파 콘벌버의 양 입력에 인가하여 자기상관 출력을 얻음으로써 신호 처리 이득이 18dB 인 정합 필터를 구현 하였다.

ABSTRACT

In this paper a wideband SAW convolver which makes use of a parabolic horn waveguide has been designed. This device uses parabolic horn waveguide to reduce the acoustic beamwidth from the 33λ wide transducer aperture 3λ wide interaction region and thus increases the convolution efficiency.

The elastic convolver which directly utilizes the acoustic nonlinearities of piezoelectric materials like lithium niobate satisfies the requirements. It has been demonstrated experimentally that this convolver can efficiently provide large S/N ratio and programmable matched filter in spread spectrum communication system.

In experiment the SAW convolver, in which the parabolic horn is used, consists of the two wideband IDT's at center frequency 100MHz, parabolic horn with beamwidth compression ratio 11:1 and output pad with 6μ sec integration time on the surface of YZ-LiNbO₃, is fabricated by photolithographic method, the convolution output of two input signals is obtained from this SAW convolver by applying the single pulse modulated signals at 100MHz.

This device has shown to be used as a programmable matched filter with 18dB processing gain when phase shift keying signals modulated by 63 chip PN code were applied.

* 연세대학교 대학원
** 연세대학교 대학원
*** 연세대학교 전기공학과 교수

I. 서 론

1970년대 초반부터 압전물질의 압전 비선형성을 이용한 탄성 음향과 콘벌버에 관한 연구가 진행 되었는데 이는 평판형 구조로서 제작이 간편하다는 장점이 있는 반면에 압전 비선형성이 낮다는 단점이 있다.

그런데 Coldren과 Schmidt 등에 의하여 압전물질 위에 금속박막의 도전체를 증착하여 압전물질 위를 진행하는 SAW속도와 금속박막을 통과하는 SAW속도 차이를 이용한 $\Delta V/V$ 탄성 표면파 도파관의 이론적 해석이 발표됨에 따라 1979년 Becker와 Hurbert가 $\Delta V/V$ 도파관의 일종인 포물선형 혼(parabolic horn)을 SAW소자에 응용하여 음향 전력 밀도를 높임으로써 압전 비선형성을 이용할 수 있음이 발표 되었다.

본 연구에서는 제작이 간편하고 높은 주파수 대역($\sim 300\text{MHz}$)에서 광대역폭의 신호를 처리할 수 있는 포물선형 혼 도파관을 압축비 11:1로 최적 설계하여 SAW지연선의 음향경로 위에 설치하고 입사된 파의 에너지 밀도를 높임으로써 압전 비선형성을 이용하여, 출력단에서 공간적인 적분을 수행하여 콘벌루션 출력을 얻고자 한다.

또한 이를 SS(Spread spectrum)통신 방식에서 SN비가 높은 자기상관(auto-correlation) 정합필터로 응용될 수 있음을 보이고자 한다.

II. 포물선형 혼 도파관을 이용한 탄성 표면파 콘벌버의 이론

II-1 탄성 표면파 콘벌버의 이론

선형필터에서 출력신호 $V_0(t)$ 는 임펄스응답 $h(t)$ 와 입력신호 $V_1(t)$ 의 콘벌루션으로 표시된다.

$$V_0(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_1(\tau) \cdot h(t-\tau) d\tau \dots\dots\dots (2-1)$$

선형 필터에서 임펄스 응답 $h(t)$ 는 고정되어 있으나 만약 임의로 임펄스 응답을 변화시킬 수 있다면 어댑티브 필터(adaptive filter)를 구현할 수 있다.

SS 통신 방식은 송신단에서 데이터를 PN코드로 변조하여 스펙트럼 확산된 PSK(Phase Shift Keying) 신호를 송신하면 수신단에서는 S/N비를 높이기 위해 신호처리 이득이 높은 자기상관 정합필터가 요구되는데 이는 그림 2-1 과 같은 볼록선도를 이용하여 설명할 수 있다.

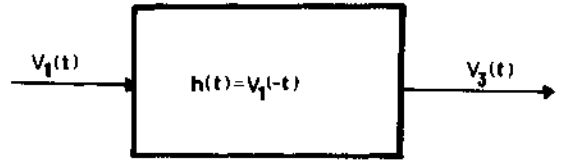


그림 2-1. 정합필터의 볼록 선도

그림 2-1에서 만약 임펄스 응답 $h(t)$ 가 입력신호 $V_1(t)$ 의 시간반전된 신호라면 출력 $V_3(t)$ 는 입력신호와 임펄스 응답의 자기상관으로 나타난다.

따라서 식 (2-1)에서 두 입력신호중 한 신호를 시간반전 시켜서 즉 $h(t) = V_1(-t)$ 를 인가하면

$$V_3(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_1(\tau) \cdot V_1(\tau - t) d\tau \dots\dots (2-2)$$

와 같이 입력신호에 대하여 자기상관이 되어 나타난다. 탄성 표면파 콘벌버는 높은 주파수와 광대역폭 신호인 $V_1(t)$ 와 $h(t)$ 를 한 소자 안에서 시간변이, 곱셈 및 적분연산이 연속적으로 행해지는 두개의 신호로 취급함으로써 이러한 해석이 아날로그 형태로 이루어질 수 있다.

여기서 시간변이는 압전물질에서 서로 마주보고 전파하는 두신호의 변환으로 얻어지며 곱셈연산은 압전물질의 압전 비선형성에 의해 얻어진다.

평판형 구조를 갖는 탄성 표면파 콘벌버는 그림 2-2와 같이 2개의 광대역 폭 IDT와 출력단자로 구성된다.

탄성 표면파 콘벌버는 양단의 IDT에 인가된 전기적인 신호가 탄성 표면파로 입사되어 출력단자에서 전극의 길이에 대한 공간적분을 수행한다.

그림 2-2의 탄성 표면파 콘벌버에서 주파수 ω 과 $\omega/2$ 인 두 입력신호를 양 IDT에 인가하고 출력단자의 중심을 $Z=0$ 에 놓으면 두 입력신호는 다음의 형태로 전파하게 된다.

$$f_1(t-Z/V) \exp[j\omega_1(t-Z/V)] \dots\dots\dots (2-3)$$

$$f_2(t+Z/V) \exp[j\omega_2(t-Z/V)] \dots\dots\dots (2-4)$$

여기서 V; 표면파 속도

식 (2-3) 과 식 (2-4) 로 표시된 표면파는 압전물질의 압전 비선형성 효과에 의해 곱셈연산을 얻는다. 출력단자는 전극의 길이에 대하여 공간적으로 적분을 수행하며 출력전압은 두 입력신호의 주파수가 같다면 즉 $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ 이면

$$V_{OP} = A \exp(j\omega t) \int_{-L/2}^{L/2} f_1(t-Z/V) f_2(t+Z/V) dz \dots\dots\dots (2-5)$$

여기서 L; 출력단자의 길이

만약 펄스변조된 입력신호의 지속시간과 표면파 속도의 곱이 L보다 작으면 식 (2-5) 는 적분구간을 무한대로 취급할 수 있으므로

$$V_{OP} = A \exp(j\omega t) \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\tau) f_2(2t-\tau) d\tau$$

여기서 $\tau = t-Z/V$

따라서 V_{OP} 는 시간적으로 2 배 압축된 두 입력신호의 콘벌루션 출력을 나타낸다.

그런데 그림 2-2 와 같은 구조의 탄성 표면파 콘벌버는 압전 비선형성이 약하므로 높은 입력전압을 인가하여야만 한다.

그러므로 그림 2-3 과 같은 IDT와 출력단자 사이에 포물선형 혼을 설치하여 음향 전력밀도를 증대시킴으로써 낮은 입력전압에서도 콘벌루션 출력을 얻을 수 있게 하였다.

그림 2-3 의 탄성 표면파 콘벌버는 양단의 IDT에 인가된 전기적인 신호가 폭 W를 가진 혼의 입구에서 탄성 표면파로 입사된다.

그리고 입사된 파는 혼의 경계면으로 부터 반사하여 폭 W_0 를 가진 혼의 출구로 전반사되어 출력단자에서 전극의 길이에 대한 공간적분을 수행한다.

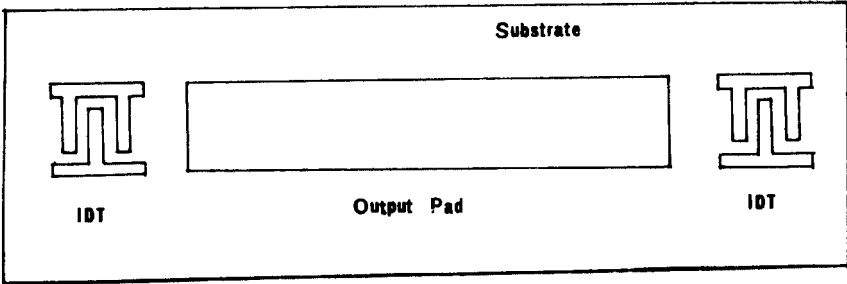


그림 2-2. 탄성 표면파 콘벌버의 구조

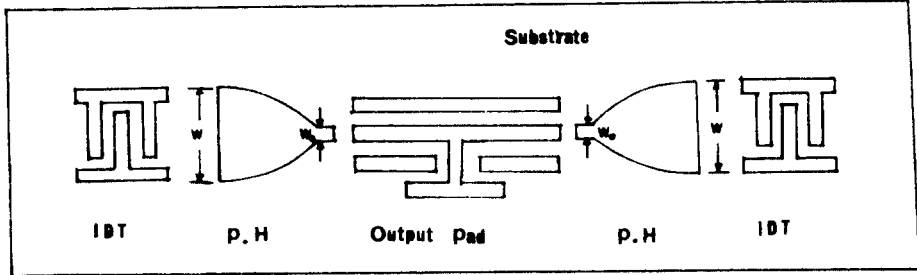


그림 2-3. 포물선형 혼 도파관을 이용한 탄성 표면파 콘벌버의 구조

II-2 $\Delta V/V$ 도파관의 원리

비동방성 압전물질위에 그림 2-4와 같은 얇은 금속박막을 입히면 금속박막이 입혀진 부분과 금속이 입혀지지 않은 부분에서 속도차이가 발생되는데 이 현상을 이용한 도파관을 $\Delta V/V$ 도파관이라 한다.

그림 2-4 와 같은 $\Delta V/V$ 도파관은 음향 속도가 느린, 금속이 입혀진 영역과 음향속도가 빠른, 금속이 입혀지지 않은 영역으로 구분된다.

따라서 그 음향속도는 다음과 같이 표현된다.

$$V_f(W, h_f) = V_{f_0} + \delta_f(h_f)W \quad \dots\dots\dots (2-7)$$

$$V_s(W, h_s) = V_{s_0} + \delta_s(h_s)W \quad \dots\dots\dots (2-8)$$

V_{f_0} ; 금속이 입혀지지 않은 부분의 속도

V_{s_0} ; 금속이 입혀진 부분의 속도

$$\delta_f(h_f) = \frac{dV_f}{dh_f}, \quad \delta_s(h_s) = \frac{dV_s}{dh_s}$$

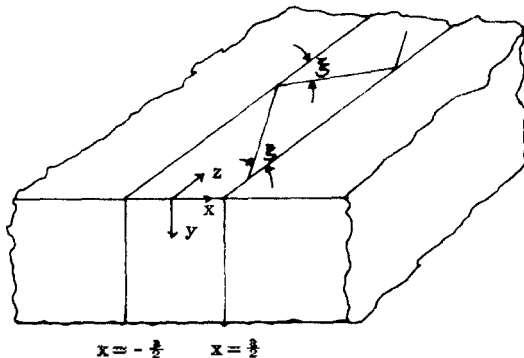
h_f, h_s ; 금속 박막의 두께

음향속도가 늦은 영역과 빠른 영역의 스칼라 포텐셜 Ψ_s 와 Ψ_f 는 다음과 같은 파동 방정식으로 표시된다.

$$\frac{\alpha^2 \Psi_s}{\alpha X^2} + \frac{\alpha^2 \Psi_s}{\alpha Z^2} + \frac{W^2}{V_s^2(W, h_s)} \Psi_s = 0 \quad \dots\dots\dots (2-9)$$

$$\frac{\alpha^2 \Psi_f}{\alpha X^2} + \frac{\alpha^2 \Psi_f}{\alpha Z^2} + \frac{W^2}{V_f^2(W, h_f)} \Psi_f = 0 \quad \dots\dots\dots (2-10)$$

그런데 분산관계에 대한 파동방정식의 해는 그림 2-4 의 $X = \pm a/2$ 지점인 금속박막이 입혀진 부분



과 입혀지지 않은 부분의 불연속점에서 스칼라 포텐셜에 대하여 경계조건을 만족해야만 한다.

$$\Psi_s = \Psi_f \quad \dots\dots\dots (2-11)$$

$$C_s \frac{\alpha \Psi_s}{\alpha X} = C_f \frac{\alpha \Psi_f}{\alpha X} \quad \dots\dots\dots (2-12)$$

C_s, C_f ; Stiffness 상수

낮은 분산에 대하여 두 영역의 Stiffness 상수는 같다고 보면 식 (2-12) 는 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\alpha \Psi_s}{\alpha X} = \frac{\alpha \Psi_f}{\alpha X}$$

따라서 파동방정식의 스칼라 포텐셜 해는 위상속도 V_p 와 전파상수 $\beta = W/V_p$ 인 모드에 대해서 다음과 같이 표시된다.

$$\Psi_f = A \exp(-K_{xf}|X|) \exp[-j(\beta Z - \omega t)] \quad \dots\dots (2-14)$$

$$\Psi_s = B \cos(K_{xs} X + \phi) \exp[-j(\beta Z - \omega t)] \quad \dots\dots (2-15)$$

K_s, K_f ; 교차 감쇄 상수

여기서 교차 감쇄상수는 식 (2-16) 과 식 (2-17)로 표시된다.

$$K_{xs} = [K_s^2 - \beta^2]^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (2-16)$$

$$K_{xf} = [\beta^2 - K_f^2]^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (2-17)$$

$$K_s = W/V_s$$

$$K_f = W/V_f$$

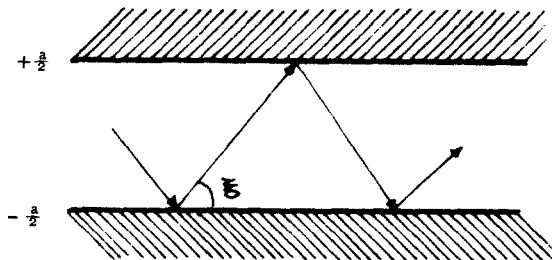


그림 2-4. $\Delta V/V$ 도파관의 모델

윗식에서 식 (2-14) 와 식 (2-15) 를 합하여 A, B, ϕ 를 제거하면 다음과 같은 분산 관계식이 얻어진다.

$$\frac{1}{2} a K_{xs} = m \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left[\frac{K_{xf}}{K_{xs}} \right] \quad m=0, 1, 2 \dots (2-18)$$

여기서 m ; 모드의 차수를 나타내는 정수

$\Delta V/V$ 도파관은 음향속도가 느린 영역과 빠른 영역사이의 접촉영역에서의 전반사에 의해 전파되는데, 비등방성 물질에 대해 도파관 축으로 입제각 ξ 의 광전파에 의한 모드는 전파상수 β 를 갖는다.

$$\beta = K_s(\xi, h_s) \cos(\xi) \quad \dots\dots\dots (2-19)$$

여기서

$K_s(\xi)$: 입제각 ξ 방향을 따라가는 평면파 전파상수

식 (2-18) 에 교차 감쇄 상수를 대입시키면 비등방성에 대한 분산 관계식은 식 (2-20) 과 같이 표시된다.

$$\frac{1}{2} a [K_s^2(\xi, h_s) - \beta^2]^{\frac{1}{2}} = m \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left[\frac{\beta^2 - K_f^2(O, h_f)}{K_s^2(\xi, h_s) - \beta^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (2-20)$$

따라서 비등방성 전파상수 $K_s(\xi)$ 를 수식적으로 계산하여 정리하면 식 (2-21) 과 식 (2-22) 가 된다.

$$K_s(\xi, h_s) = \frac{W(1+\alpha \xi^2)}{V_{s0} + S_s(h_s)w} \quad \dots\dots\dots (2-21)$$

$$K_f(O, h_f) = \frac{W}{V_{f0} + \delta_f(h_f)w} \quad \dots\dots\dots (2-22)$$

식 (2-21) 과 식 (2-22) 로 부터 입제각 ξ 를 근사적으로 식 (2-23) 과 같이 구할 수 있다.

$$\xi = \left[\frac{1 - \beta V_s / w}{\frac{1}{2} - \alpha} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (2-23)$$

α ; 비등방성 인자

II-3 포물선형 혼 도파관의 설계

먼저 평면 광학 도파관에서 빔폭이 압축되어 도파관내로 들어가는 조건을 선형 혼 형태의 모드전파로 알아보자

θ_p 를 혼의 평면에서 가장 낮은 차수의 모드의 광자이라 놓고 θ_h 를 혼의 각도라 놓으면 입사된 빔이 도파관 축으로 들어 가려면 θ_h 는 θ_p 보다 작아야 한다.

$$\theta_h(z) = \alpha \theta_p(z) \quad (\alpha \leq 1) \quad \dots\dots\dots (2-24)$$

그리고 $\theta_r = \frac{1}{2} \theta_p$ 이므로 θ_p 를 입제각으로 놓으면 혼의 경계로부터 반사된 빔의 각 θ_r 은 $\frac{1}{2} \theta_p$ 보다 작은 각도 이어야만 도파관 내에서 전반사가 된다.

그러나 그림 2-6 과 같은 선형 혼 도파관은 일정한 빔폭 압축비 ($W : W_0$) 에 대해 식 (2-24) 를 만족하여 입제각 이내로 전반사하기 위해서는 길이가 너무 커져 손실이 많아지므로 탄성 표면과 도파관으로 응용하기에 적합하지 않다.

이러한 단점을 보완하기 위해 포물선형 혼 도파관으로 설계 해야만 하고 그 포물선의 식은 다음과 같다.

$$\frac{dW}{dL} = \frac{2\alpha K_0}{n_s^2 \beta_0} \quad \dots\dots\dots (2-25)$$

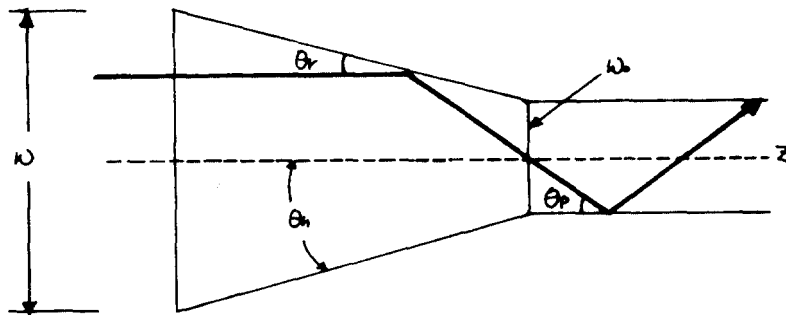


그림 2-6 선형 혼 도파관의 모델

여기서 W : 혼의 폭

L : 혼의 길이

α : 1 보다 작거나 같은 상수

n_s : $YZ-LiNbO_3$ 의 비등방성 인자

β_0 : 도파관 내의 전파상수

K_0 ; $K_0 = n_s (K_s^2 - \beta_0^2)^{\frac{1}{2}}$

K_s : 금속을 입힌 $YZ-LiNbO_3$ 의 전파상수

그림 2-9는 식 (2-25) 에서 얻어진 포물선의 그림이다.

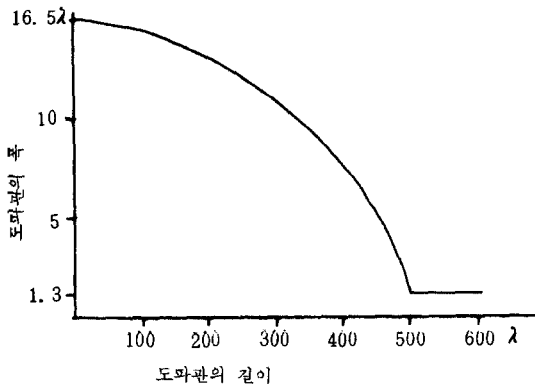


그림 2-9 설계된 포물선형 혼의 그래프

II. 실험 및 결과 고찰

II-1 탄성 표면파 콘벌버의 제작

SAW 콘벌버는 중심주파수가 100 [MHz] 이고 압축비를 11:1 로 하였다.

실험에서는 압전기판위에 2 개의 IDT 와 포물선형 혼 도파관 및 출력단자를 포토리토그래피 방법을 사용하여 A_8 증착하여 제작 하였다.

이때의 압전기판은 압전 비선형성이 매우 크고 전기 기계 결합계수가 큰 $YZ-LiNbO_3$ 를 사용하였는데 이러한 SAW 콘벌버의 구조는 다음과 같다.

II-2 실험 결과 및 고찰

SAW 콘벌버를 제작하여 그 특성을 측정하기 전에 중심 주파수 100 [MHz] 의 SAW 지연선의 주파수 특성과 출력 단자상에서 다른 공간의 점으로 부터 받는 신호의 균일성을 조사하였다.

콘벌부선 특성을 얻기 위해 SAW 콘벌버의 두 입력 단자에 100 [MHz] 로 펄스 변조한 입력신호를 인가하여 다음과 같은 콘벌부선 출력을 얻었다.

SAW 콘벌버가 SS 통신방식에서 오토코릴레이션 정합필터로 응용됨을 보이기 위해 PN 코드 발생기를 이용하여 63 칩 PN 코드에 의해 100 [MHz] 로 PSK 변조된 신호를 얻었다.

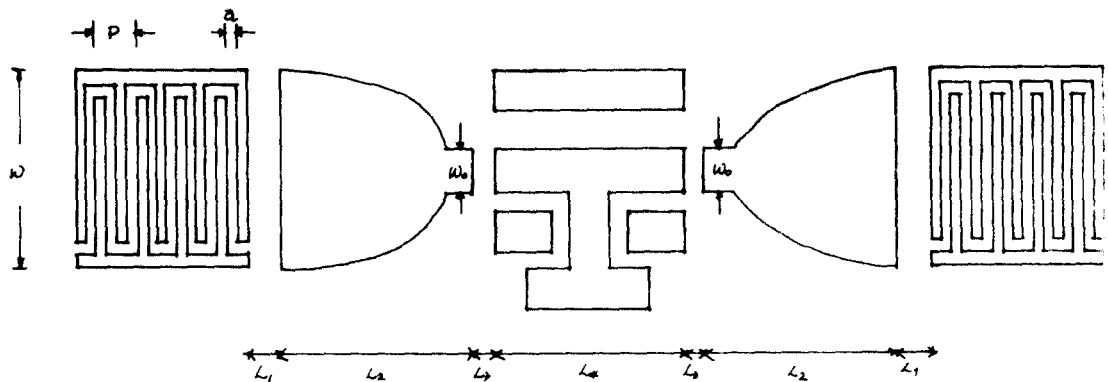


그림 3-1 탄성 표면파 콘벌버의 구조

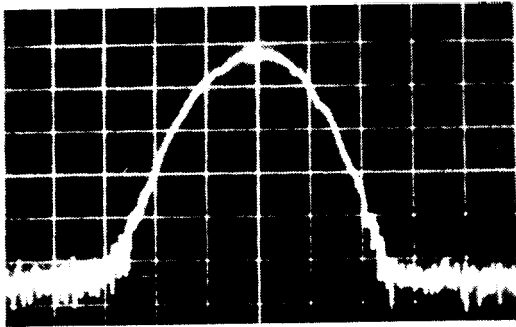


그림 3-2 SAW 지연선의 주파수 응답

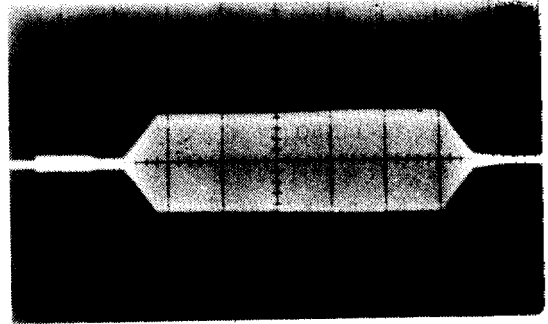
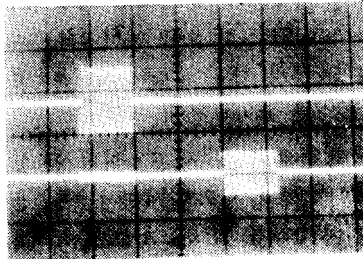
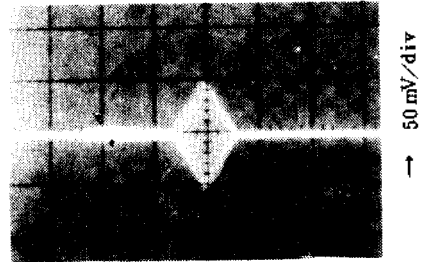


그림 3-3 출력 단자의 균일성 측정



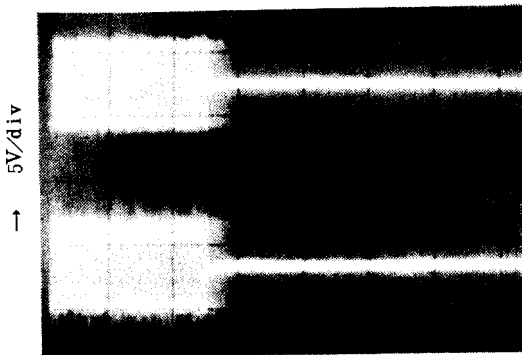
입력신호
 $5 \mu\text{sec}/\text{div}, 10\text{V}/\text{div}$
 시간지연된 $5 \mu\text{sec}/\text{div}$
 $0.2\text{V}/\text{div}$ 신호

그림 3-4 펄스변조된 지연선의 입력력



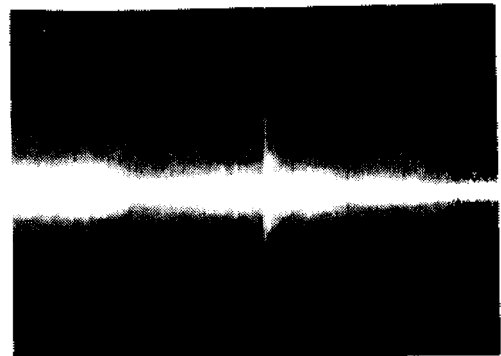
$\rightarrow 5 \mu\text{sec}/\text{div}$

그림 3-5 콘빔투선 출력



$5\text{V}/\text{div}$
 \uparrow

$\rightarrow 2 \mu\text{sec}/\text{div}$ (a)



$20\text{mV}/\text{div}$
 \uparrow

(b) $\rightarrow 2 \mu\text{sec}/\text{div}$

그림 3-8 PSK 입력신호와 자기상관 출력

- a) PSK 입력신호
- b) 자기상관 출력

그리고 SAW 콘벌버의 두 입력단자에 PSK 변조된 기준신호와 이를 시간 반전시킨 외부 신호를 인가하여 오토코릴레이션 출력을 다음과 같이 얻었다.

IV. 결 론

포물선형 혼 도파관을 사용하여 입사파의 음향 전력밀도를 증대시킴으로써 압전물질의 압전 비선형성을 이용하는 평판형 구조의 SAW 콘벌버를 제작하였으므로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 포물선형 혼 도파관을 사용하여 음향 전력밀도를 압축함으로써 압전물질의 압전 비선형성을 이용할 수 있었다.

2. 고주파 (~300MHz) 에서도 사용이 가능하며 광대역폭의 신호를 처리할 수 있었다.

3. 기준 신호와 이를 시간반전 시킨 외부 신호가 양 입력단에 인가 되었을때 자기 상관 특성을 얻었고 이때의 신호처리 이득은 약 18dB 였다.

따라서 SS 통신 방식에서 프로그램이 가능한 자기 상관 정합 필터로 응용될 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

- 1) L.O. Svaasand, "Interaction between Elastic Surface Waves in piezo-electric Materials", Appl. phys. Lett, Vol. 15, p. 30, 1969.
- 2) L.A. Coldren and R.V. Schmidt, "Acoustic surface wave $\Delta V/V$ waveguides on Anisotropic substrates", Appl. phys. Lett., Vol. 22, No. 10, pp. 481-482, May 15, 1973.
- 3) Yao, "High performance Elastic Convolver with parabolic Horns", 1980 Ultrasonics Symposium, pp. 37-42.