

포물선형 혼 도파관을 이용한 탄성 표면파 콘벌버 연구

A Study for the SAW Convolver Using Parabolic Horn Waveguide

박용욱*, 신현용*, 이승대*, 박정흠**, 윤석진***, 김현재***

(Yong-Wook Park*, Hyun-Yong Shin*, Seung-Dae Lee*, Jeong-Heum Park**,
Seok-Jin Yoon***, Hyun-Jai Kim***)

Abstract

In this paper, a wideband SAW convolver using a parabolic horn waveguide was designed and its characteristics were investigated. The convolver was made with parabolic horn waveguide at compression ratio 9:1 for reducing propagation loss and for improving convolution efficiency between two input IDTs of center frequency 193.78 MHz. The SAW convolver utilizing acoustic nonlinearities of piezoelectric material demonstrated that it can provide large S/N ratio and can be use for programmable matched filter(PMF) in spread spectrum communication system.

Key Words : SAW(surface acoustic wave), horn, convolver, IDT(interdigital transducer), MF(matched filter)

1. 서론

광대역 통신 방식인 스펙트럼 확산 통신(spread spectrum multiple access)을 항공 우주통신 및 군사통신 등에 응용하기 위하여 가장 중요한 부분은 수신단의 동기 및 복조회로에서 쓰이는 정합필터(MF)이다[1,2]. 특히, 스펙트럼 확산 통신을 사용하는 경우 채널간의 간섭을 최소화하여 수신단에서 S/N을 높이기 위해 각 데이터 bit마다 서로 다른 코드에 의해 스펙트럼 확산을 하므로 수신단에서

의 정합필터는 신호처리이득(processing gain)이 높고 자기상관(auto-correlation)을 일으키는 PMF가 필요하고 이 PMF로 SAW 콘벌버가 널리 이용되고 있다[3].

SAW 콘벌버는 넓은 대역폭의 신호를 처리할 수 있고 연속적으로 변화하는 코드 패턴의 신호도 처리 가능하다. 또한, 디지털회로로 이와 같은 PMF의 역할을 하기 위해서는 1초에 약 10억회 정도의 연산을 하여야 하므로 고속 신호처리가 어렵고 전력 손실이 높은 단점으로 인하여 고속처리가 가능하고 제작이 간편하며 안정된 주파수 응답을 가지는 SAW 콘벌버를 스펙트럼 확산 통신에 적용하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다.

SAW 콘벌버는 두 개의 탄성표면파(SAW)가 서로 반대방향으로 통과할 때 소자내에서 두 신호의 곱이 적분되고, 두 주파수의 합을 주파수 출력 신호로 얻는 소자로, 압전체의 비선형 상호 작용에 기초를 두고 압전체위에 IDT로 구성된 2개의 입력

* : 남서울대학교 전자정보통신공학부
(충남 천안시 성환읍 매주리 21,
Fax : 041-580-2120
E-mail : pyw@nsu.ac.kr)

** : 김포대학교 전자정보공학부

*** : KIST Thin film research center

2001년 8월 20일 접수, 2001년 9월 12일 1차심사완료
2001년 10월 6일 2차심사완료

단자와 중앙에 하나의 출력단자로 구성된다[4].

본 논문에서는 탄성표면파의 전력밀도를 증가시킬 수 있는 포물선형 혼 도파관 콘벌버(parabolic horn waveguide convolver)를[5-7] 혼 압축비 9:1로 최적 설계하고, 전기기계결합계수가 큰 YZ-LiNbO₃ 압전 단결정위에 제작하여 입사파의 에너지 밀도를 증가시킴으로써, 높은 주파수 대역(~400MHz)에서 신호처리이득인 BT(bandwidth×time)가 300이상의 고효율 특성을 갖는 포물선형 혼 도파관 콘벌버가 스펙트럼 확산통신에 S/N비가 높은 프로그램 가능한 정합필터(PMF)로 사용될 수 있음을 보이고자 한다.

2. 이론

2.1 SAW 콘벌버의 이론

두 입력신호에 대한 출력인 콘벌루션은 다음과 같다.

$$V_{out}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_1(\tau) \cdot V_2(t-\tau) d\tau \quad (1)$$

콘벌루션 연산은 시간변이, 곱셈연산 및 적분연산으로 표시되는데, 콘벌버는 한 소자 내에서 이러한 연산을 연속적으로 수행하여 두 입력신호에 대한 콘벌루션 출력을 얻을 수 있다. SAW 콘벌버는 고주파 광대역 신호인 $V_1(t)$ 과 $V_2(t)$ 를 한 소자 안에서 시간변이, 곱셈연산 및 적분연산이 연속적으로 행하여지는 두 개의 신호로 취급함으로써 이러한 해석이 아날로그 형태로 이루어 질 수 있다. 여기서 시간변이는 압전체에서 서로 마주보고 진행하는 두 신호 $V_1(t)$ 과 $V_2(t)$ 의 변환으로 얻어지며, 곱셈연산은 압전체의 압전 비선형성에 의해 얻어진다. 또한 적분 연산은 압전체위에 증착된 출력 단자에서 전극의 길이에 따라 공간적인 적분 연산이 수행된다. 그림 1의 SAW 콘벌버에서 주파수 ω_1 과 ω_2 인 두 입력 신호를 양 IDT에 인가하고, 출력단자의 중심을 $z=0$ 에 놓으면 각각의 두 입력신호는 다음과 같은 형태로 전파하게 된다.

$$u_1(t, z) = f_1(t - \frac{z}{v}) \exp[j\omega_1(t - \frac{z}{v})] \quad (2)$$

$$u_2(t, z) = f_2(t + \frac{z}{v}) \exp[j\omega_2(t + \frac{z}{v})] \quad (3)$$

여기서, v : SAW velocity

식 (2)와 (3)으로 표시된 각각의 입력 탄성표면파는 압전체의 압전 비선형 효과에 의하여 곱셈연산을 얻으며, 출력단자에서는 전극의 길이에 대하여 공간적으로 적분이 수행되어 출력 전압은 두 입력신호의 주파수가 같다면, 즉 $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ 이면 식 (4)와 같이 얻을 수 있다.

$$V_{out} = A \exp(j2\omega t) \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} f_1(t - \frac{z}{v}) \cdot f_2(t + \frac{z}{v}) dz \quad (4)$$

여기서, L : 출력단자의 길이

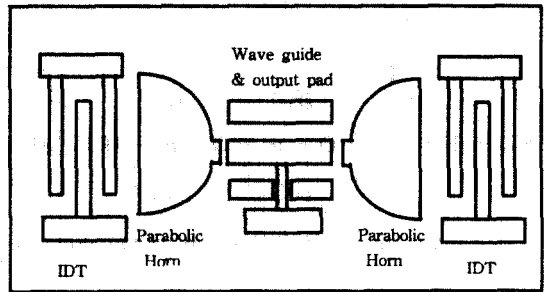


그림 1. 포물선형 혼 콘벌버 구조.

Fig. 1. Configuration of parabolic horn waveguide SAW convolver.

만약 펄스 변조된 입력신호의 지속시간과 탄성표면파 속도의 곱이 L보다 작으면 식 (4)는 적분 구간을 무한대로 취급할 수 있으므로 식 (5)와 같이 시간적으로 2배 압축된 두 입력신호의 콘벌루션 출력을 나타낸다.

$$V_{out} = A \exp(j2\omega t) \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\tau) \cdot f_2(2t-\tau) d\tau \quad (5)$$

여기서, $\tau = t - \frac{z}{v}$

선형필터에서 임펄스 응답은 고정되어 있으나 만약 임의로 임펄스 응답을 변화시킬 수 있다면 정합필터를 구현할 수 있다. 송신단에서 데이터를 PN code로 변조하여 스펙트럼 확산된 PSK(phase shift keying)신호를 송신하면, 수신단에서는 S/N비를 높이기 위해 신호처리 이득이 높은 자기상관 정합필터가 요구된다. 그러므로 식 (1)에서 두 입력신호중 한 신호를 시간반전 시켜서 즉 $V_2(t) = V_1(t)$ 로 인가하면 식 (6)과 같은 입력신호에 대한 자기 상관이 나타난다.

$$V_{out}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} V_1(\tau) \cdot V_2(t-\tau) d\tau \quad (6)$$

2.2 포물선형 혼 도파관 설계

평면 도파관에서 빔폭이 압축되어 도파관 내로 들어가는 조건을 선형 혼 형태의 모드 전파로 알아보면 θ_p 를 혼의 평면에서 가장 낮은 차수 모드의 광각이라 놓고 θ_h 를 혼의 각도라 놓으면 입사된 빔이 도파관 속으로 들어가는 θ_h 는 θ_p 보다 작아야만 한다.

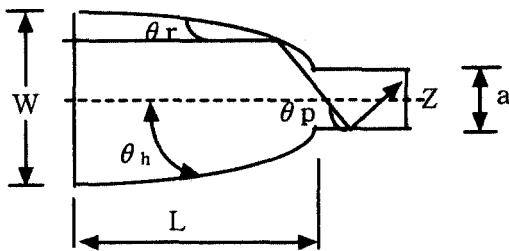


그림 2. 포물선형 혼 모델.
Fig. 2. Model of parabolic horn.

$\theta_h(z) = a \theta_p(z)$ ($a \leq 1$) 이며, $\theta_r = \frac{1}{2} \theta_p$ 이므로 θ_p 를 임계각으로 놓으면 혼의 경계로부터 반사된 빔의 각 θ_r 은 $\frac{1}{2} \theta_p$ 보다 작은 각도이어야만 도파관 안에서 전반사 된다. 따라서 포물선형 혼도파관의 설계식은 식(7)과 같다.

$$\frac{dW}{dL} = \frac{2a K_0}{n_s^2 \beta_0} \quad (7)$$

여기서, W : 혼의 폭, L : 혼의 길이, n_s : 압전체 (YZ-LiNbO₃)의 비등방성 인자, a : 상수, K_0 : x성분 전파상수, β_0 : z성분 전파상수

3. 포물선형 혼 도파관을 이용한 콘벌버 제작 및 실험

본 실험에서 사용된 압전 기관은 전기기계결합계수가 큰 Y-Z propagation LiNbO₃ 단결정 wafer를

사용하였다. 콘벌버의 설계는 탄성표면파의 음향 전력 밀도 압축 효율이 좋은 포물선형 혼 도파관을 채택하였으며, 입력단에 사용된 IDT는 z 방향의 전파속도가 3,488 %인 Y-Z LiNbO₃에서 최적의 표면파를 발생시킬 수 있도록, IDT 전극 쌍수를 $N_{opt} = \frac{\sqrt{\pi}}{2K}$ (K : 전기기계결합계수)을 이용하여 계산한 결과 4.5 finger pair였고, 파장은 18 μ m로 중심 주파수가 193.78MHz이며 동일한 주파수를 발생시키기 위해 양쪽 IDT의 규격은 같고 uniform 형태로써 자세한 구조 및 규격은 그림 3 및 표 1과 같다. 또한, 본 실험에서 전력 밀도 압축효율을 효과적으로 압축시키기 위한 최적의 혼 압축비는 콘벌버의 크기 등을 고려하여 IDT의 중심주파수 193.78MHz에서 혼 압축비가 9:1 되게 그림 2와 같이 설계하였으며, 탄성 표면파의 입사파가 포물선형 도파관에서 전반사 되도록 설계한 포물선형 혼 도파관의 규격은 표 2와 같다.

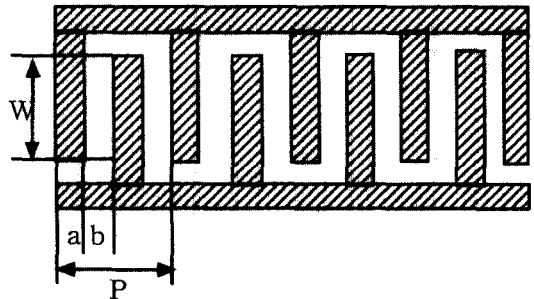


그림 3. IDT 구조.
Fig. 3. Configuration of IDT.

표 1. IDT의 규격.

Table 1. Specification of IDT.

IDT 길이[W]	IDT 폭[a]	IDT 간격[b]	IDT 주기[P]	IDT 쌍수
486 μ m	4.5 μ m	4.5 μ m	18 μ m	4.5개

표 2. 포물선형 혼 규격.

Table 2. Specification of parabolic horn.

압축비 [W:a]	입력측 폭 [W]	출력측 폭 [a]	horn 길이 [L]
9:1	486 μ m	54 μ m	13,082 μ m

최적 설계된 입력 IDT와 포물선형 혼을 이용한 콘벌버의 개략도는 그림 1과 같고 콘벌버의 규격은 표 3과 같다. 설계된 콘벌버를 제작하기 위하여 표 3과 같은 규격의 포토마스크를 제작하여 Y-Z LiNbO₃ 기판위에 3,000Å의 Al을 증착한 후 그림 4와 같은 공정을 이용하여 콘벌버를 제작하였고, 제작된 소자의 크기는 4×60 mm였다. 제작된 콘벌버는 특성 측정 시 불필요한 신호의 반사를 막기 위해 소자 양끝에 흡음제(absorber)를 도포한 후 Ag wire를 연결하여 특성을 측정하였다.

표 3. 포물선형 혼 콘벌버 규격.

Table 3. Specification of parabolic horn waveguide SAW convolver.

Center frequency [MHz]	3dB Band width [MHz]	Wave length [μ m]	Length of waveguide [μ m]	Width of waveguide [μ m]	Length of horn [μ m]	Horn 압축비
193.78	42	18	31,392	54	13,082	9:1

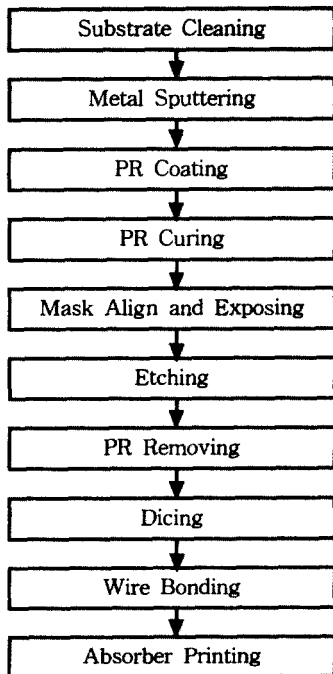


그림 4. 콘벌버의 제작 공정도.

Fig. 4. Fabrication flow chart of convolver.

4. 실험결과 및 고찰

제작된 포물선형 horn 콘벌버의 각 입력 IDT의 주파수 응답 특성을 측정하기 위하여 50Ω의 정합 회로를 구성한 후 IDT의 주파수 응답을 network analyzer (HP 8720C)를 이용하여 측정한 결과는 그림 5와 같다. 이 결과에서 IDT의 삽입손실은 -19dB였고 3dB 대역폭은 약 40MHz 정도로 설계한 값과 잘 일치하는 결과를 보이거나 중심주파수는 설계값 193MHz에서 약 3MHz 정도 이동한 190MHz의 값으로 약간의 오차를 보이고 있는데 이는 실제 포토 마스크의 제작과 콘벌버 제작 시 발생한 IDT pattern 오차에 의하여 완벽한 대칭형 입력 IDT 구조를 구현하지 못해 약간의 삽입손실 증가와

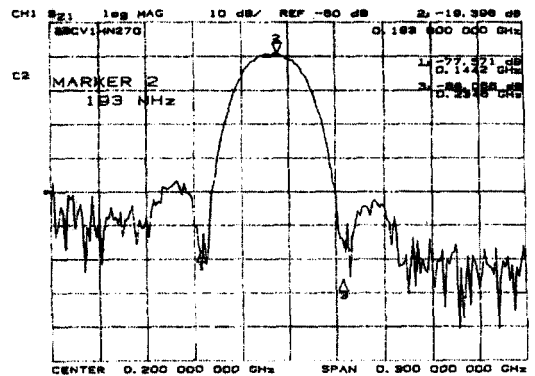


그림 5. 입력 IDT 주파수 응답.

Fig. 5. Frequency response of input IDT.



그림 6. 도파관의 시간 지연특성.

Fig. 6. Delay time characteristic of waveguide.

중심 주파수 이동의 변화가 발생한 것으로 생각된다.

그림 6은 콘벌버 신호의 적분 시간 및 콘벌루션 출력에 영향을 미치는 도파관의 입력과 출력에 대한 시간 지연을 측정된 결과로 파형의 지연 시간은 약 $9\mu s$ (도파관의 길이 : $31,392\mu m$)로 설계한 값과 잘 일치하였다. 한편, 입력 주파수의 변화에 따른 출력 3dB 대역폭은 약 40MHz정도이고, 도파관의 지연시간이 $9\mu s$ 이므로 콘벌루션 출력에 영향을

미치는 processing gain인 BT는 약 360의 큰 값을 가져 정밀도가 요구되는 정합필터에 응용될 수 있음을 보여준다. 음향 전력 밀도 압축기로 혼을 사용하여 제작한 포물선형 혼 도파관 콘벌버의 인가 신호에 대한 콘벌루션 출력을 측정하기 위해 그림 7과 같은 측정회로를 구성한 후 콘벌버의 주파수 응답 특성 즉 콘벌루션을 측정하였다.

입력 IDT에 193MHz로 펄스 변조된 구형파를 도파관의 길이에 해당되는 $9\mu s$ 동안 인가한 후 시간적으로 2배 압축된 삼각파 형태의 콘벌루션 출력 파형을 그림 8과 같이 얻었다. 이것은 구형펄스의 전형적인 콘벌루션을 보여주는 것이다. 제작된 콘벌버의 출력효율을 확인하기 위해 다음과 같은 변환효율계수 F_r 를 사용하여 계산하였다.

$$F_r = 10 \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in} P_z} [dBm],$$

여기서 P_{in} 과 P_z 는 입력신호이며 P_{out} 은 콘벌루션된 출력 값으로 포물선형 혼 도파관 콘벌버의 콘벌루션 효율은 -66dBm으로 기존의 일반적인 콘벌버보다는 콘벌루션 효율이 많이 개선되었음을 알 수 있다[8].

또한 설계 제작된 포물선형 혼 도파관 콘벌버가 스펙트럼 확산 통신 방식에서 프로그램 가능한 정

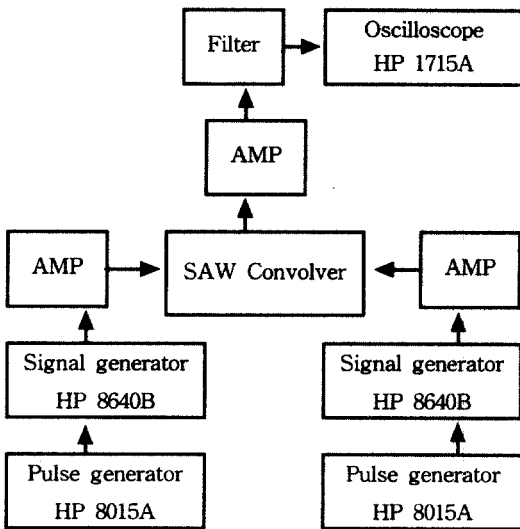


그림 7. 콘벌루션 특성 측정회로.

Fig. 7. Measuring circuit of convolution characteristic.

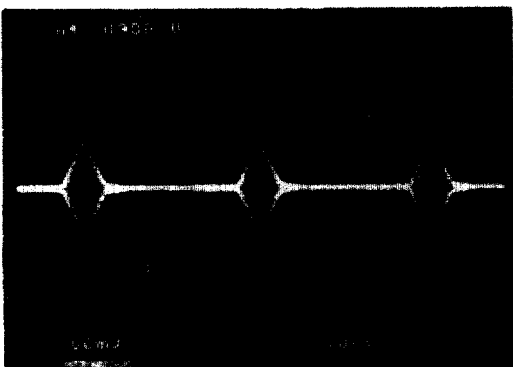


그림 8. 콘벌루션 특성.

Fig. 8. Characteristic of convolution.

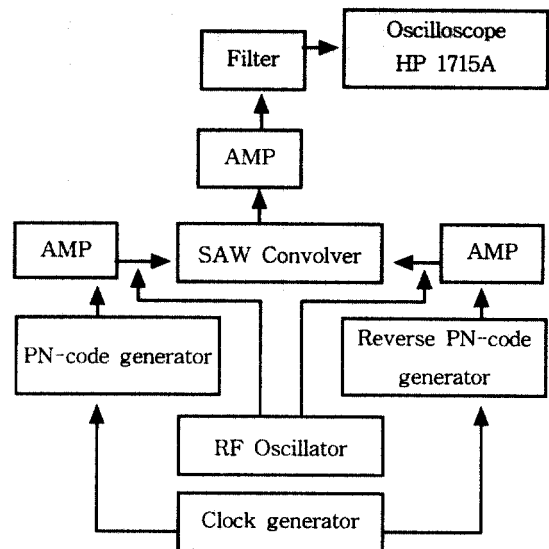


그림 9. 자기 상관 특성 측정회로.

Fig. 9. Measuring circuit auto-correlation characteristic.

합 필터로 사용될 수 있음을 보이기 위하여 그림 9와 같은 자기 상관특성을 측정할 수 있는 측정회로를 구성한 후 그림 10과 같은 512 PN신호를 발생시켜 193MHz로 PSK 변조하여 콘벌버에 인가한 후 PN신호에 대한 출력 특성인 자기상관 신호를 측정한 결과는 그림 11과 같다. 이 결과에서 제작된 포물선형 혼 도파관 콘벌버는 512 PN 신호에 대하여 우수한 자기 상관 출력 특성을 보임으로써 스펙트럼 확산 통신에서 프로그램 가능한 정합필터로 응용 될 수 있음을 보여준다.

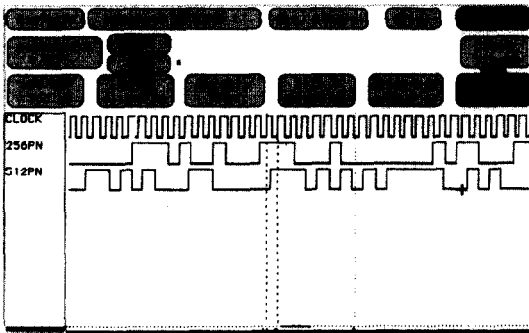


그림 10. 512 PN 신호.
Fig. 10. 512 PN code.

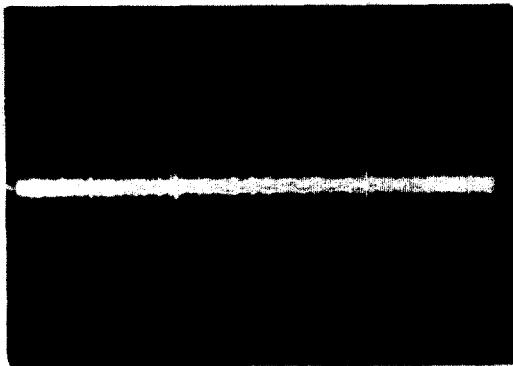


그림 11. 512 PN 신호의 자기상관 출력 특성.
Fig. 11. Auto-correlation characteristic of 512 PN code.

5. 결 론

음향 전력 밀도의 압축 효율이 좋은 포물선형 혼 도파관을 이용한 포물선형 혼 콘벌버를 설계

제작하여 특성을 측정한 결과는 다음과 같다.

1. 음향 전력 밀도 압축을 위하여 포물선형 horn의 압축비를 9:1로 설계하여 압전체의 압전 비선형성을 증가시켜 투입력 신호의 콘벌루션 효율이 -66dBm으로 개선된 콘벌루션 출력을 얻을 수 있었다.
2. 콘벌버에 기준 신호와 시간 반전 시킨 512 PN 신호를 인가하여 우수한 자기상관 출력 특성을 나타내었고, processing gain인 BT는 약 360의 큰 값을 가져 정밀도가 요구되는 스펙트럼 확산 통신에서 프로그램 가능한 어댑티브 정합필터로 응용될 수 있음을 보여 주었다.

참고 문헌

- [1] Fouad A. Tobagi, Richard Binder, and Barry Leiner, "Packet Radio and Satellite Networks", IEEE Comm., Vol. 22, No. 11, pp. 22-39, 1984.
- [2] S. A. Reidle, "Acoustoelectric Convolver Technology for Spread Spectrum Communications", IEEE Trans. Sonics Ultrason., Vol 1. su-28, pp. 185-195, 1981.
- [3] G. S. Kino, "Acoustoelectric Interaction in Acoustic Surface Wave Devices", IEEE Proc., Vol. 64, pp. 724-747, 1976.
- [4] P. D. Efranould and C. Maerfeld, "A SAW Planar Piezoelectric Convolver", IEEE Proc., Vol. 64 pp. 748-751, 1976.
- [5] Yao, "High Performance Elastic Convolver with Parabolic Horns", IEEE Ultrasonic Symp., pp. 37-42, 1980.
- [6] C. F. Quate and R. B. Thompson, "Convolution and Correlation in Real Time with Nonlinear Acoustics", Appl. Phys. Letts., Vol.16, p. 494, 1970.
- [7] R.A.Becker and D.H.Hurbert, "Wide Band LiNbO₃ Elastic Convolver with Parabolic Horns", IEEE Ultrasonics Symp. Proc., p. 729, 1979.
- [8] 이화용, 이우일, "단일모드 표면탄성파 Convolver의 제작", CAD 반도체 부품연구회 합동학술발표회, pp. 70-72, 1985.