

다중 스트립 결합기를 이용한 탄성표면파 빔 궤적 변환기

Surface Acoustic Wave Track Changer

Using Multistrip Coupler

* 안 재 영 (Jae Young, Ahn)
* 박 용 서 (Yong Seo, Park)
** 황 금 찬 (Keum Chan, Whang)

ABSTRACT

In this paper surface acoustic wave beam track changers using symmetric multistrip coupler are designed on the basis of the perturbation theory, and its characteristics are studied.

SAW beam track changers, which have the configuration of the periodic array of metal strips, are designed with the following specifications; the number of strips: 140, the strip period: 0.25λ , the ratios of the strip width to the period a/p : 0.5, 0.375, 0.25, respectively.

In experiment track changers are fabricated by depositing Al using photolithographic method on the surface of YZ-LiNbO₃ substrate which is piezoelectric. The coupled losses between two tracks are 0.9dB, 0.1dB, 0.2dB in the case of $a/p = 0.5, 0.375, 0.25$, respectively, and approximately consistent with the theoretical values, and also the bulk wave mode and the 2nd-order effects are suppressed by these track changers.

I. 서 론

MSC (multistrip coupler)는 여러개의 금속 스트립 (metal strip)이 주기적으로 배열된 구조를 갖는 탄성표면파 (surface acoustic wave; SAW) 결합기¹⁾로서, 1970년대 초반부터 SAW 지연선에서의 벌크파 (bulk wave) 억제 및 2차효과를 감소시키기 위하여 그 연구가 진행되고 있다.

MSC 이론에는 Maerfeld에 의하여 제안된 장 이론에 의한 접근방법²⁾과 Marshall이 제안한 등가회로에 의한 접근방법³⁾이 있다. 여기서 Marshall이 제안한 등가회로에 의한 접근방법은 각 금속 스트립과 그 간격 (gap)을 개별적으로 모델화하여 전송선 이론을 도입한 것으로서, 임피던스 손실 및 전극 반사 등을 포함한 고차효과 (higher order effects)를 고려하여 해석할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 이 해석방법은 상대적으로 복잡한 프로그램이 요구되며, MSC의 간단한 수정에도 또 다른 프로그램이 요구된다는

단점이 있다. 반면에 Maerfeld가 제안한 접근방법은 Auld⁴⁾와 Lakin⁵⁾에 의하여 제안된 섭동의 근사화 (perturbational approximation)를 활용한 장 해석방법으로서, MSC를 수정하기 위해 그 기하학적 구조를 변화시킬 때 그에 따른 영향을 해석하기가 쉽다는 장점이 있다. 그러나 이 방법은 고차효과를 고려하기가 곤란하다는 단점이 있다.

본 논문에서는 기하학적 구조를 변화시키는데 따른 영향을 해석하기가 쉬우며 물리적인 설명이 가능한 Maerfeld의 장 이론에 의한 접근방법을 적용하여 대칭 MSC를 이용한 탄성표면파 빔 궤적 변환기 (SAW beam track changer)를 설계하고자 한다. 여기서 금속 스트립의 주기 p 를 0.25λ 스트립의 갯수 N 를 140개로 고정하고 스트립 폭과 스트립 주기의 비 a/p 를 각각 0.5, 0.375, 0.25로 설계하였으며 이와 같이 설계된 마스크 (mask)를 사용하여 전기기계 결합계수 (electro-mechanical coupling coefficient)가 큰 YZ-L

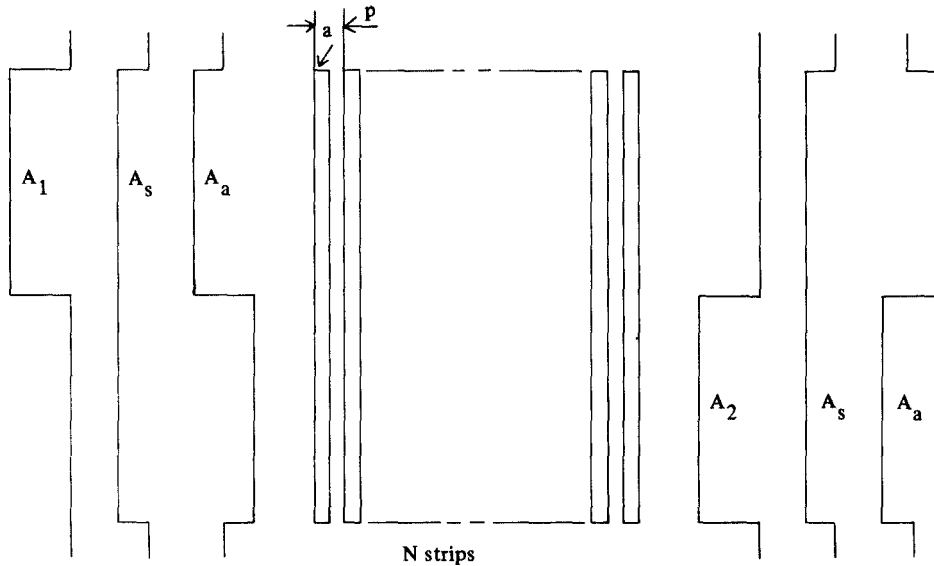
* 연세대학교 공과대학 전기공학과
** 연세대학교 공과대학 전기공학과 교수

iNbO₃의 압전 기관 위에 포토리토그래피(photo-lithography) 방법으로 제작하여 각 특성을 이론적인 결과와 비교 고찰하고자 한다.

II. MSC의 이론

MSC는 압전 물질의 기관 위에 연결되지 않

은 금속 스트립(metal strip)이 주기적으로 평행하게 배열된 구조로 되어 있다. 그림 2-1의 규칙적으로 배열된 금속 스트립은 파의 전파 방향으로는 전도도가 영(zero)이고 그와 직각인 방향으로는 전도도가 무한대인 연속적인 비등방성 박막(anisotropic film)으로 근사화 될 수 있다.



(그림 2-1) 대칭과 반대칭 모우드의 합과 차로써 표현된 A₁, A₂

이러한 조건에 따라 두 개의 전파 모우드가 존재하게 된다. 먼저 압전적으로 스티프된 속도 (piezoelectrically stiffened velocity) v_s로 전파하는 대칭 모우드(symmetric mode)가 존재하는데 이는 전파방향으로는 전류가 흐를 수 없기 때문에 나타난다. 다른 하나는 스티프되지 않은 속도 (unstiffened velocity) v_a로 전파하는 반대칭 모우드(antisymmetric mode)로서 이는 전파방향의 횡단방향으로 전하가 자유롭게 흐를 수 없기 때문에 나타나며, 이에 따라 전기장이 압전적인 스티퍼닝(piezoelectric stiffening)과 결합하지 못하게 된다.

이와 같이 제1과 제2의 탄성장(acoustic fields)은 대칭과 반대칭 성분 즉 A_s와 A_a로 분리될 수 있으며 exp[i(k_sz - ωt)]와 exp[i(k_az - ωt)]가 각각 대칭과 반대칭 모우드를 표현할 때 경계조건의 정합(matching of boundary conditions)을 위해 제1과 제2에서의 장 A₁과 A₂는 각각 식(2-1)과 식(2-2)로 되어야 한다.

$$A_1(z) = \frac{A}{2} \{ \exp[i(k_s z - \omega t)] + \exp[i(k_a z - \omega t)] \} \dots \dots \dots (2-1)$$

$$A_2(z) = \frac{A}{2} \{ \exp[i(k_s z - \omega t)] - \exp[i(k_a z - \omega t)] \} \dots \dots \dots (2-2)$$

여기서 A : 입력파의 진폭
k_s : 대칭 모우드의 파수(wave number)
k_a : 반대칭 모우드의 파수

$$\Delta k = k_a - k_s \dots \dots \dots (2-3)$$

$$k_e = (k_a + k_s) / 2 \dots \dots \dots (2-4)$$

라 놓으면 식(2-1)과 식(2-2)는 각각 다음과 같이 된다.

$$A_1(z) = A \exp[i(k_e z - \omega t)] \cos(\Delta k z / 2) \dots \dots \dots (2-5)$$

$$A_2(z) = A \exp(-i\pi/2) \exp[i(k_e z - \omega t)] \sin(\Delta k z / 2) \dots \dots \dots (2-6)$$

두 제적에서 두 파의 실효 전파 상수는 모두 k_0 이고 이는 대칭과 반대칭 모우드의 전파 상수의 평균이다. 또한 제적 2에서의 파는 제적 1에서의 파에 대해 90° 만큼 앞서게 되며 이와 같은 위상 차는 소자의 응용시 중요한 특성이 된다.

제적 1에서 제적 2로 전달되는 전력과 총전력의 비는 다음과 같이 주어진다.

$$P_{14} = \left| \frac{A_2(z)}{A} \right|^2 = \sin^2(\Delta kz/2) \dots\dots\dots (2-7)$$

따라서 $\Delta kz = \Delta k N p = \pi$ 일 때 또는

$$N = \pi / p \Delta k = N_T \dots\dots\dots (2-8)$$

일 때 모든 전력이 제적 2로 전달된다. 그러므로 N_T 는 완전한 에너지 전달을 위해 요구되는 스트립 수이다. 여기서 k_a 와 k_s 는 섭동 이론(perturbation theory)⁴⁾을 적용하고 표면 전하 분포⁵⁾를 결정하여 그 관계를 구할 수 있으며 관계식은 다음과 같다.

$$(k_s - k) / k = K_s^2 \eta_s / 2 \dots\dots\dots (2-9)$$

$$(k_a - k) / k = K_s^2 \eta_a / 2 \dots\dots\dots (2-10)$$

여기서 k_s : 대칭 모우드의 파수(wave number)

k_a : 반대칭 모우드의 파수

K_s^2 : 실효 결합계수(effective coupling coefficient)

$$\eta_s = [1 - P_\gamma(\cos\theta) / P - \gamma(\cos\theta)] / 2 \dots\dots (2-11)$$

$$\eta_a = [1 + P_\gamma(-\cos\theta) / P - \gamma(-\cos\theta)] / 2 \dots\dots\dots (2-12)$$

$P_\gamma(\cos\theta)$: 차수 γ (order γ) 자변수(argument) $\cos\theta$ 인 르장드르(Legendre function)

$$\gamma = k_s / k_0 \text{ 또는 } \gamma = k_a / k_0$$

$$\theta = \pi a / p$$

$$k_0 = 2\pi / p$$

a : 스트립의 폭

p : 스트립의 주기

식(2-11)과 식(2-12)의 두 개의 분산관계(dispersion relation)는 η_s 와 η_a 가 각각 k_s 와 k_a 의 함수 즉, $\eta_s = \eta_s(\gamma = k_s/k_0)$, $\eta_a = \eta_a(\gamma = k_a/k_0)$ 이므로 모두 비선형이다. 그러나 $\gamma = k/k_0$ 로 놓음으로써 근사화시킬 수 있으며 이에 따라 상당히 간단한 식이 된다.

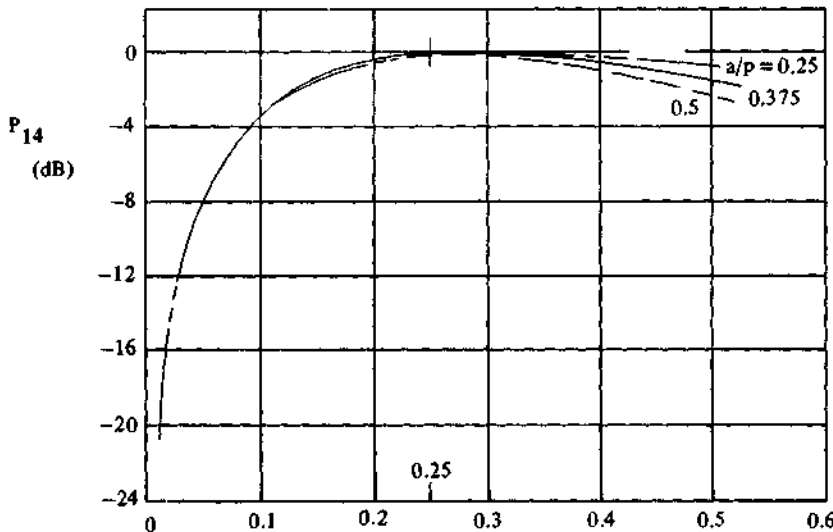
이렇게 해서 구한 k_s 와 k_a 의 값을 이용하면 P_{14} 와 N_T 는 다음과 같이 된다.

$$P_{14} = \sin^2[\pi N K_s^2 \gamma (\eta_a - \eta_s) / 2] \dots\dots\dots (2-13)$$

$$N_T = [K_s^2 \gamma_0 (\eta_a - \eta_s)]^{-1} \dots\dots\dots (2-14)$$

여기서 γ_0 : 정규화된 중심주파수(normalized center frequency)

$$\text{또한, } k_0 = k \left[1 + \frac{K_s^2}{4} (\eta_a + \eta_s) \right] \dots\dots\dots (2-15)$$



(그림 2-2) a/p 를 매개변수로 한 p/l 와 P_{14} 의 관계 : $N = 140$

이 결과를 이용하여 a/p 를 매개 변수로 하고 p/λ 와 이론적인 결합 출력 효율(coupled output efficiency)의 관계를 계산하였으며 이를 그림 2-2에 나타냈다. 여기서 $N=140$ 이다.

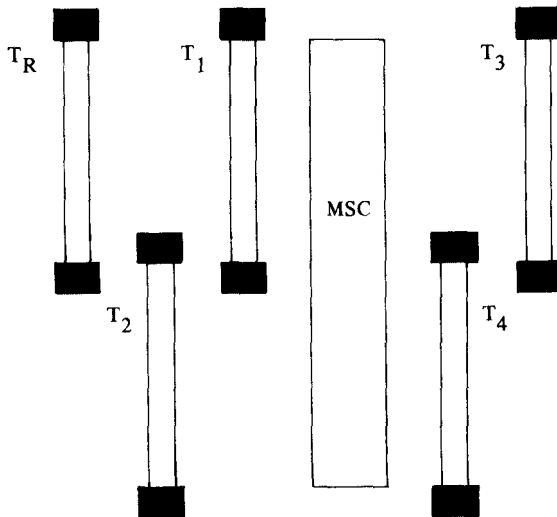
이때 p/λ 가 0.25 부근에서 $P_{1,2}$ 는 최대가 됨을 알 수 있으며 이에 따라 $p=0.25\lambda$ 로 고정하였다. 여기서 a/p 가 0.25일 때 완전 에너지 전달을 위해 필요한 스트립의 갯수 $N_r=140$ 이다.

따라서 제적 변환기의 완전 에너지 전달을 보기 위해 $\lambda/p=0.25$, $N=140$, $a/p=0.25$ 로 설계하였고, 또 $N=140$ 으로 고정하고 a/p 가 각각 0.375, 0.5인 MSC를 설계하였다.

III. 실험 및 결과 고찰

3-1. 제작

다중 스트립 결합기를 중심주파수 43.5MHz로 하여, 금속 스트립의 주기 p 를 0.25λ , 스트립의 갯수 $N=140$ 으로 고정하고 스트립 폭과 스트립 주기의 비 a/p 가 각각 0.5, 0.375 및 0.25로 설계하였다. 또 각 제적을 통해 전달된 에너지의 양과 벌크파의 유무를 알아 보고, 또 제적2에서의 반사를 관찰하기 위해 그림 3-1과 같은 구조로 IDT(interdigital transducers)와 MSC를 구성하였다.



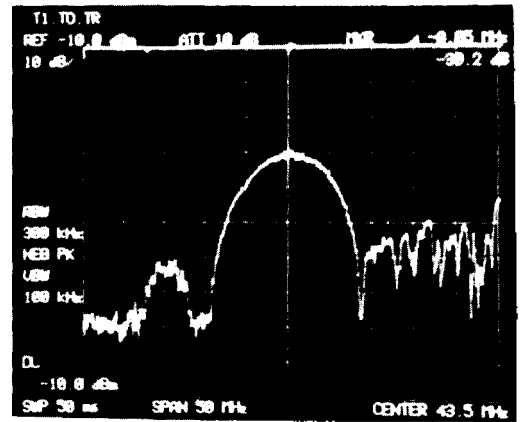
(그림 3-1) 제적 변환기의 구조

이와 같이 설계된 제적 변환기를 양전 물질인 YZ-LiNbO₃ 기판 위에 포토리토그래피 방법으로 제작하였다.

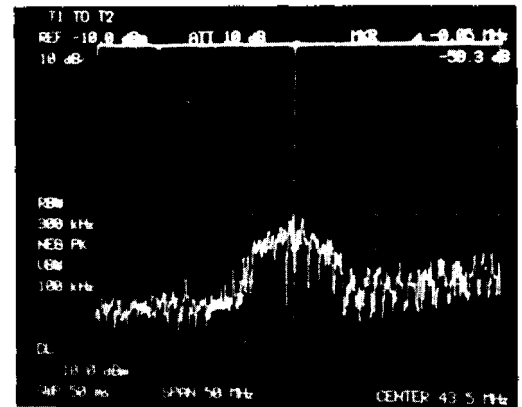
3-2. 실험 및 결과 고찰

그림3-2는 $a/p=0.5$ 인 경우의 주파수 응답이다. (a)는 SAW 지연선의 주파수 응답이며, (b)는 제적 변환되어 반사된 주파수 응답, (c)는 MSC를 투과한 주파수 응답, (d)는 MSC를 통해 제적 변환되어 결합된 주파수 응답이다.

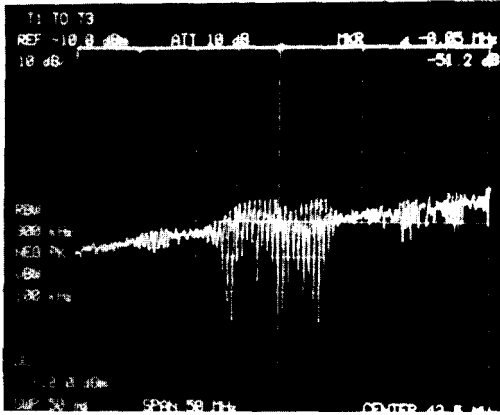
(a)와 (b)를 비교하면 중심 주파수 43.5MHz에서 제적 결합 손실이 0.9dB임을 알 수 있다. 이것은 식(2-13)을 사용하여 계산된 이론적인 값 0.1dB와 비교하여 조금 크나, 이는 제작시의 IDT 및 MSC의 손상에 기인한다고 생각된다.



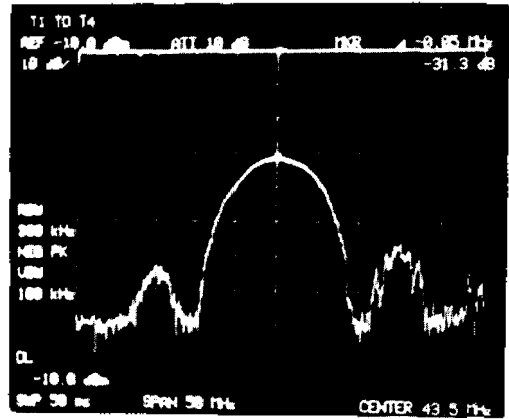
(a) T₁ - TR



(b) T₁ - T₂



(c) $T_1 - T_3$



(d) $T_1 - T_4$

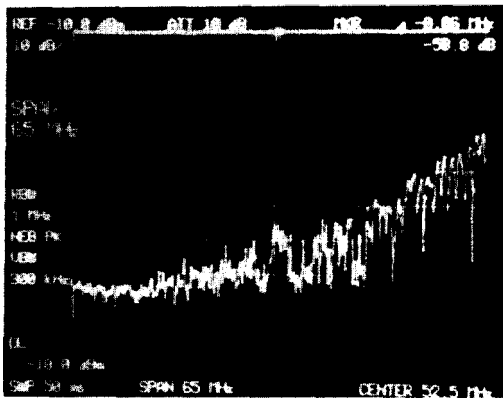
Ver: 10dB/div. Hor: 5MHz/div.

(그림 3-5) 빔 제적 변환기의 주파수 응답: $N=140$, $a/p=0.5$

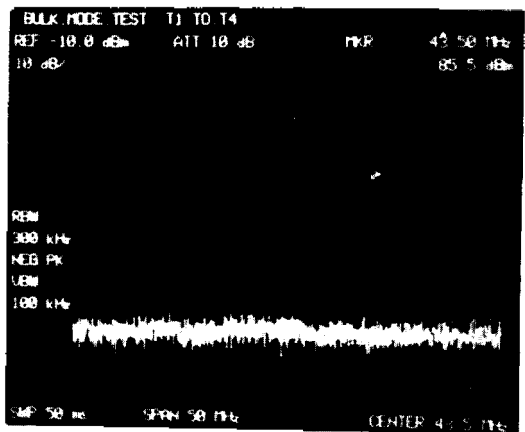
$T_1 - T_2$ 에는 이론적으로 전혀 응답이 없어야 하나 실제 측정 결과는 (b)와 같았다. 이는 제적 2에서의 반사에 기인한 것으로 (a)에 비해 중심 주파수 43.5MHz 부근에서 20dB 정도가 떨어지므로 무시할 수 있다.

또 (c)에서는 주파수 응답의 레벨이 전체적으로 상승했는데 이는 피이드드루(feedthrough)에 의한 것이라고 사료된다.

벌크 모우드의 존재를 보기 위하여 IDT 전극 전체에 흡수재(absorber)를 바르고 $T_1 - T_R$ 및 $T_1 - T_4$ 의 주파수 응답을 측정하였으며 이는 그림 3-3과 같다. 여기서 $T_1 - T_R$ 의 경우에는 고주파 부근에 벌크 모우드가 존재하나 MSC를 통해 결합된 $T_1 - T_4$ 의 경우에는 거의 존재하지 않음을 알 수 있다.



(a) $T_1 - T_R$



(b) $T_1 - T_4$

Ver: 10dB/div. Hor: 5MHz/div.

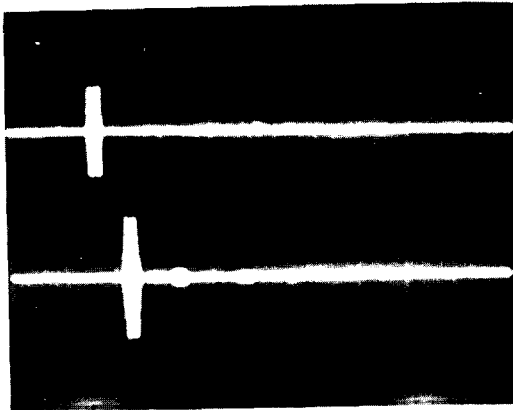
(그림 3-3) 벌크파 모우드

또한 그림3-4와 같이 T_R 에 나타난 TTE(triple transit echo) 및 반사가 T_4 에서는 제거됨을 알 수 있다.

이는 SAW 전파 제척이 바깥으로써 반사 및

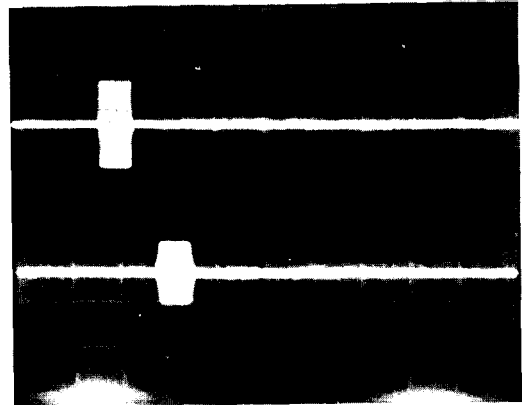
TTE가 제거된 것으로 생각된다.

a/p 가 각각 0.25 및 0.375인 경우의 T_1-T_R 과 T_1-T_4 의 주파수 응답을 비교 측정된 결과는 그림3-5와 같다.



(a) $T_1 - T_R$

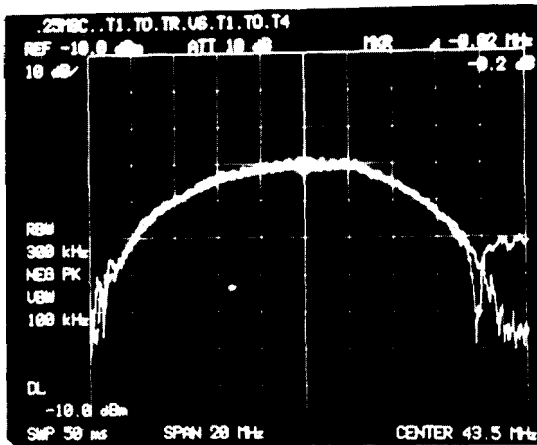
Ver: 0.1V/div. Hor: 2 μ s/div.



(b) $T_1 - T_4$

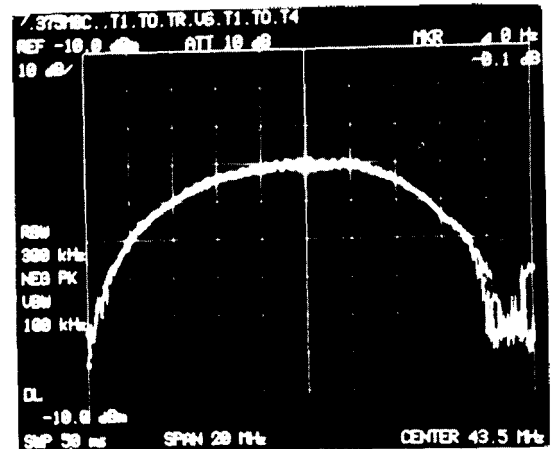
Ver: 0.2V/div. Hor: 2 μ s/div

(그림 3-4) TTE 및 반사 응답



(a) $a/p = 0.25$

Ver: 10dB/div.



(b) $a/p = 0.375$

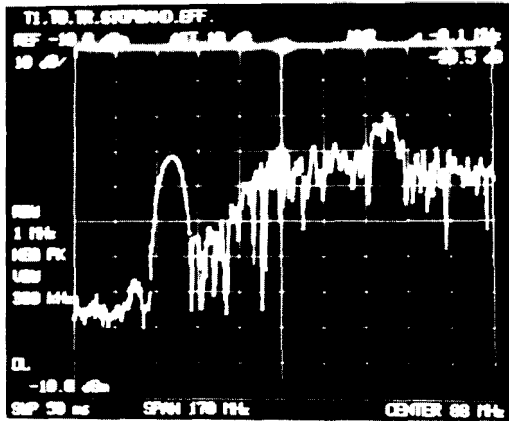
Hor: 2MHz/div.

(그림 3-5) T_1-T_R 과 T_1-T_4 의 주파수 응답

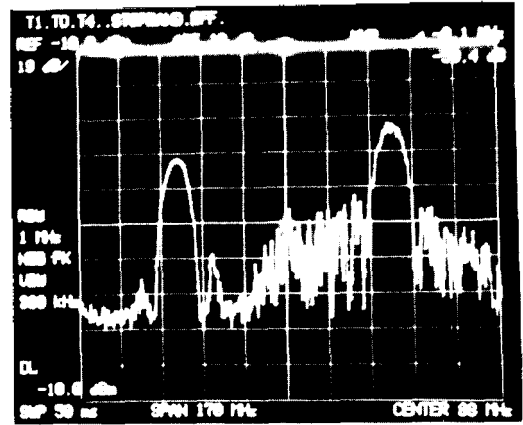
$N=140$, a/p 가 0.25 및 0.375인 경우 식(2-13)을 이용하여 계산된 이론적인 손실은 중심 주파수 43.5MHz에서 각각 0dB와 0.1dB였으나, 실제로 측정된 손실은 그림3-5의 (a)와 (b)에서 알 수 있듯이 각각 0.2dB와 0.1dB이었다. 이는 무시해도 좋을 정도의 오차이며 근사적으로

일치한다고 할 수 있다.

또한 저지대역을 포함한 주파수 응답은 그림 3-6과 같이 측정되었다.



(a) $T_1 - T_R$



(b) $T_1 - T_4$

Ver : 10dB/div.

Hor: 17MHz/div.

(그림 3-6) 확장된 주파수응답

여기서 MSC를 사용함으로써 저지대역에서의 2차 효과가 상당히 제거됨을 알 수 있다.

이와 같이 제작한 MSC는 대역통과 필터 또는 TV IF 필터에서 벌크파 및 2차 효과를 제거시키는 소자로서 이용할 수 있으며, BWC (beam-width compressor) 또는 J형, U형 MSC로 응용할 수 있다.

IV. 결 론

MSC를 이용한 탄성표면파 빔 제적 변환기를 중심 주파수 43.5MHz, $N=140$ 으로 고정하고 a/p를 각각 0.25, 0.375, 0.5로 하여 YZ-LiNbO₃ 압전 물질의 기판위에 제작한 후 각 IDT에서의 출력특성을 측정하였다.

이러한 출력특성으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) MSC를 이용하여 이론과 거의 일치하는 완전 에너지 전달 특성을 얻었다.
- (2) 제적이 변환됨으로써 벌크파 모두드는 나타나지 않았다.
- (3) SAW 지연선에서 발생하는 TTE 및 반사를 포함한 2차 효과를 제적의 변환에 의해 제거시킬 수 있었다.

따라서 MSC가 대역통과 필터 또는 TV IF 필터 등에서 벌크파 및 2차 효과를 제거시키는 소자로서 이용될 수 있음을 보였다.

REFERENCE

1. F.G. Marshall and E.G.S. Paige, "Novel Acoustic Surface Wave Directional Coupler with Diverse Applications," *Electron. Lett.*, Vol. 7, p. 460, Aug. 1971.
2. C. Maerfeld and P. Tournois, "Perturbation theory for the Surface Wave MSC," *Electron Lett.*, Vol. 9, p. 115, Mar., 1973.
3. F.G. Marshall and C.O. Newton, "Theory and Design of the Surface Wave MSC," *IEEE trans. on Micro. Theory and Tech.*, Vol. MTT-21, p. 206, April., 1973.
4. B.A. Auld, "Surface wave Theory," 1970 IEEE Ultrasonics Symp., Oct., 1970.
5. K.M. Lakin, "Perturbation Theory for Electromagnetic Coupling to Elastic Surface Waves on Piezoelectric Substrates," *J. Appl. Phys.*, Vol. 42, p.899, Mar., 1971.