

스텝 임피던스 공진기를 이용한 마이크로스트립 대역통과 필터와 광대역 마이크로스트립 대역통과 필터에 관한 연구

(Studies on the Microstrip Bandpass Filter Using Stepped Impedance Resonator and the Wideband Microstrip Bandpass Filter)

朴 奉 根* · 朴 東 徹**

(Bong Kun Park, Dong Chul Park)

要 約

기존의 평행 결합 전송선 공진기 필터에 입출력 탭핑과 스텝 임피던스 공진기 개념을 도입하여 3.5GHz 중심 주파수에서 20%의 대역폭을 갖는 마이크로스트립 대역통과 필터를 Teflon으로 구현하였다. 대역폭을 더 넓혀 30%의 대역폭을 갖도록 하기 위해 공진기 내부 결합부분의 임피던스를 조절하는 Crystal의 설계 방법과 입출력 탭핑을 이용해 Epsilam-10으로 구현하였다. 이 경우 이론치와 측정치가 잘 일치함을 확인하였다.

Abstract

A microstrip bandpass filter using stepped impedance resonators and tapped input / output is realized with Teflon substrate, whose center frequency is 3.5 GHz and fractional bandwidth is 20%. In order to realize a wider bandwidth of 30%, the Crystal's design method and the input / output tapping scheme are used. Another microstrip filter designed as mentioned above is realized with Epsilam-10 substrate. This case shows good agreement between the theoretical responses and the measured ones.

I. 서 론

최근 레이더, EW(Electronic Warfare) 시스템에서 시스템의 주파수 기민성을 위하여 기존의 시스템보다 대역

폭이 넓으며, 스푸리어스 특성이 좋은 시스템이 요구되고 있다. 이러한 요구에 부응하기 위해서 시스템에 사용되는 부품들의 광대역화가 중요한 문제점으로 부각되고 있으며 이에 따라 마이크로파를 이용하는 통신 시스템의 필수 소자인 대역통과 필터의 광대역화도 중요한 문제라 하겠다. 1958년 S. B. Cohn^[1]은 평행 결합 반파장 공진기를 이용한 대역통과 필터의 설계방법을 제시하였으나 대역폭이 10%이상이면 입출력단의 강한 결합으로 인

*忠南大學校 電子工學科

**正會員, 忠南大學校 電子工學科

하여 제작이 어렵게 되며 또한 이차 고조파 근처에서 통과대역이 또 나타나게 되어 능동소자와 관련된 응용에 장애요인으로 작용하여 왔다. 따라서 1983년 C. Y. Ho와 J. H. Weidman^[23]은 Cohn의 반파장 공진기의 일부를 스텝 임피던스 공진기(Stepped Impedance Resonator, SIR)로 대체시켜 이차 고조파 근처의 통과 대역을 억제시켰으며 아울러 J. S. Wong^[4]의 입출력 탭핑 개념도 함께 도입하여 마이크로스트립형 대역통과 필터의 대역폭을 20%까지 확장하였다. 그리고 1971년 E. G. Crystal^[6]은 S. B. Cohn의 설계이론식의 협대역 특성을 보완하여 30%이상의 광대역 필터에 대한 설계 기법을 독자적으로 확립하였다.

본 논문에서는 첫째로 Ho와 Weidman의 방법에 따라 SIR과 반파장 공진기를 혼용하고 입출력 탭핑 개념도 부가시킨 20%의 대역폭을 갖는 마이크로스트립 대역통과 필터를 Teflon기판을 이용해 구현해 보며 둘째로 Crystal 방법에 따라 설계하여 입출력 탭핑개념을 부가시켜 Epsilam-10 기판을 이용해 30%의 대역폭을 갖는 마이크로스트립형 대역통과 필터를 각각 중심 주파수 3.5GHz에서 구현해 보고자 한다. 이렇게 구현된 대역통과 필터는 발진기나 증폭기등 비선형 능동소자의 출력단으로서 사용이 가능하며 또한 근래에 이르러서는 광대역 마이크로파 통신 및 레이다 시스템의 송,수신부에 사용될 수 있을 것으로 생각되며 마이크로스트립 필터의 응용 범위를 넓히는데 기여할 것이다.

II. SIR을 이용한 마이크로스트립 필터

1. 반파장 공진기와 SIR의 설계식

반파장 공진기와 스텝 임피던스 공진기(SIR)를 이용

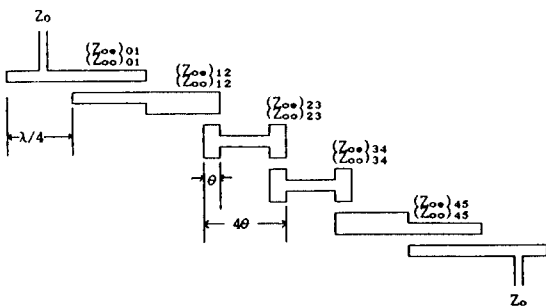


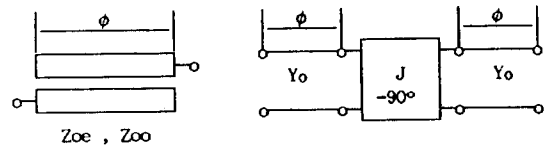
그림 1. 반파장 공진기와 스텝 임피던스 공진기를 이용한 마이크로 스트립 대역통과 필터

Fig. 1. Microstrip Bandpass Filter using Half-Wavelength Resonators and Stepped Impedance Resonators.

하며 입출력을 탭핑시킨 대역통과 필터를 중심 주파수가 3.5GHz, 균일 리플 대역폭 20%, 통과대역에서의 균일 리플이 0.1dB를 갖는 6차 Chebyshev형으로 설계하여 Teflon기판($\epsilon_r=2.45$) 상에 제작하였다.

그림 1은 6개의 기존 평행 결합 반파장 공진기 마이크로스트립 필터에서 가운데 2개의 반파장 공진기를 스텝 임피던스 공진기로 대체하고 입출력단의 강한 결합에 의한 제작상의 난점을 해결하기 위해서 탭핑을 한 대역통과 필터를 보여주고 있다.

윗 그림 1과 같은 반파장 공진기와 SIR을 혼용한 형태의 대역통과 필터를 설계하는 방법을 생각해 보자. 평행 결합 전송선 공진기 대역통과 필터의 공진기 평행 결합 부분을 아래와 같이 어드미턴스 인버터 J를 이용해 등가적으로 나타낼 수 있다.



평행 결합 부분에서 어드미턴스 인버터 J값은^[2]

$$\begin{aligned} \frac{J_{i,i+1}}{Y_0} &= \sqrt{\frac{W\pi}{2g_i g_{i+1}}} & i=0, n \\ \frac{J_{i,i+1}}{Y_0} &= \frac{W\pi}{2w_i} \frac{1}{\sqrt{g_i g_{i+1}}} & i=1, n-1 \end{aligned} \quad (1)$$

이고, 스텝 임피던스 공진기 부분에서는

$$\begin{aligned} \frac{J_{i,i+1}}{Y_0} &= W \sqrt{\frac{\pi\theta_0}{g_i g_{i+1}}} & i=2, n-2 \\ \frac{J_{i,i+1}}{Y_0} &= \frac{2W\theta_0}{\sqrt{g_i g_{i+1}}} & i=3 \text{ to } n-3 \end{aligned} \quad (2)$$

이다. 여기서 g_n 는 원형 소자값이며, W는 fractional bandwidth이고 w_i 는 1이다.

그리고 $\theta_0 = \tan^{-1} \sqrt{K}$ 이며 K는 스텝 임피던스 공진기의 두 임피던스의 비로 $K=0.5$ 이다. 윗 식에서 J-inverter의 값을 구한다음 다음 식들을 이용해 우모드 임피던스와 기모드 임피던스값을 구한다.

우모드, 기모드 임피던스 값은

$$(Z_{in})_{\pm} = \frac{1}{Y_0} \left[1 + \frac{J_{i,i+1}}{Y_0} + \left(\frac{J_{i,i+1}}{Y_0} \right)^2 \right] \quad i=0, 1, n-1, n$$

$$(Z_{0o})_i = \frac{1}{Y_o} \left[1 - \frac{J_{i,i+1}}{Y_o} + \left(\frac{J_{i,i+1}}{Y_o} \right)^2 \right] \quad i=0, 1, n-1, n$$

$$(Z_{oc})_i = \frac{1}{Y_o} \left[\frac{1 + \frac{J_{i,i+1}}{Y_o} \operatorname{cosec} \theta_o + \left(\frac{J_{i,i+1}}{Y_o} \right)^2}{1 - \left(\frac{J_{i,i+1}}{Y_o} \right)^2 \cot^2 \theta_o} \right]$$

$i=2$ to $n-2$

$$(Z_{oo})_i = \frac{1}{Y_o} \left[\frac{1 - \frac{J_{i,i+1}}{Y_o} \operatorname{cosec} \theta_o + \left(\frac{J_{i,i+1}}{Y_o} \right)^2}{1 - \left(\frac{J_{i,i+1}}{Y_o} \right)^2 \cot^2 \theta_o} \right]$$

$i=2$ to $n-2$ (3)

이다. 각 결합 부분의 우모드, 기모드 임피던스가 구해지면 이 임피던스들을 마이크로스트립으로 구현하기 위한 스트립의 폭과 간격은 참고 문헌[8,9]의 방법에 따라 구하였다.

2. 실험 및 결과

그림 2는 측정된 필터의 동작 특성을 보이고 있으며 동작 특성을 살펴보면 첫번째 통과대역에서 삽입손실이 1.5dB정도이며 대역폭이 23%(3.3GHz-4.1GHz)를 나타내지만 스텝 임피던스 공진기 필터의 도입으로 인해 특성인 스푸리어스 공진 특성인 두번째 통과대역이 약 40dB정도까지 억압되는 결과를 그림 2(a)에서 볼 수 있다. 다음으로는 가운데 공진기 4개를 스텝 임피던스 공진기로 대체했을 때에는 두번째 통과대역이 7 GHz에서 8.6GHz로 이동한 것을 볼 수 있다. 균일 임피던스의 반파장 공진기가 길이가 짧은 SIR로 대체될 경우 기본 공진주파수는 변함이 없으나 스푸리어스 공진주파수는 높아지게 된다. 또한 높아지게 되는 정도는 SIR의 임피던스 비인 K를 조절하여 조정할 수 있다. 이는 참고문헌[2]에 잘 설명되어 있으며 SIR의 이론대로 우리의 경우도 스푸리어스 특성이 개선되어 두번째 통과대역이 약 2.5f₀만큼 이동한 것을 알 수 있다. 이러한 필터의 동작 특성을 그림 3(a)에 나타내었다. SIR은 서로 다른 특성 임피던스를 갖는 전송선으로 되어 있는데 스푸리어스 공진주파수를 구해보면 임피던스의 비 K에 따라 조절될 수 있다는 것을 알 수 있다. 이 두 실험 결과로부터 미루어볼 때 스텝 임피던스 공진기가 반파장 공진기를 많이 대체할수록 SIR의 이론에서와 같이 두드러지는 것을 볼 수 있으나 SIR의 갯수가 적을 때에는 스푸리어스 공진 주파수의 이동보다는 스푸리어스 공진 특성을 크게 약화시키는 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그러나 SIR의 갯수를 늘리면 SIR사이의 도체 간격이 너무 좁아 제작상의 어려움에 부딪치게 되므로 반파장 공진기를 SIR로 치환할 때는 제작 가능성도 함께 고려하여야 한다.

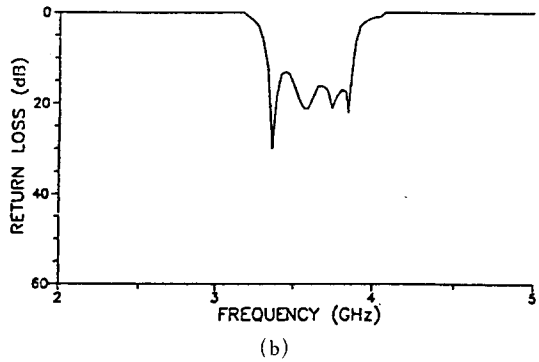
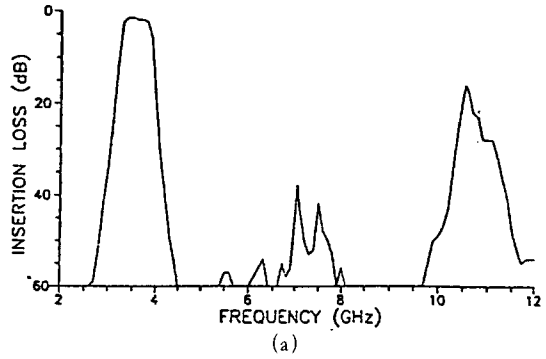


그림 2. 입출력 tapping된 SIR(2단) 필터의 동작 특성
(a)삽입손실 (b)반사손실
Fig. 2. The operating characteristics of SIR(2 step) filter tapped at input and output.
(a)insertion loss (b)return loss

Ⅲ. Crystal 방법을 이용한 광대역 마이크로스트립 필터

1. 대역통과 필터의 설계식

S.B.Cohn^[1]의 설계 이론을 이용하여 통과대역폭을 20%이상으로 확장시킬 경우 공진기의 입출력단을 실제 제작하기가 어려울 뿐 아니라 중간단 공진기의 우모드, 기모드의 임피던스차가 너무 큰 것으로 인해 중간단도 제작하기가 어렵기 때문에 광대역의 필터를 구현하는데에는 부적합하다. 그러므로 대역폭을 확장하기 위해서는 우모드와 기모드의 임피던스를 조정할 필요성이 요구되며 이를 위해 E.G.Crystal^[5,6]은 반파장 공진기의 내부 임피던스(interior immittance)를 결정하는 광대역 대역통과 필터의 설계식을 제시하였다.

마이크로스트립라인을 이용한 평행 결합 반파장 개방회로 공진필터가 그림 4에 보여지고 있다. 공진기가 n개인 평행 결합 개방회로 공진기 필터의 경우 n+1개의 결

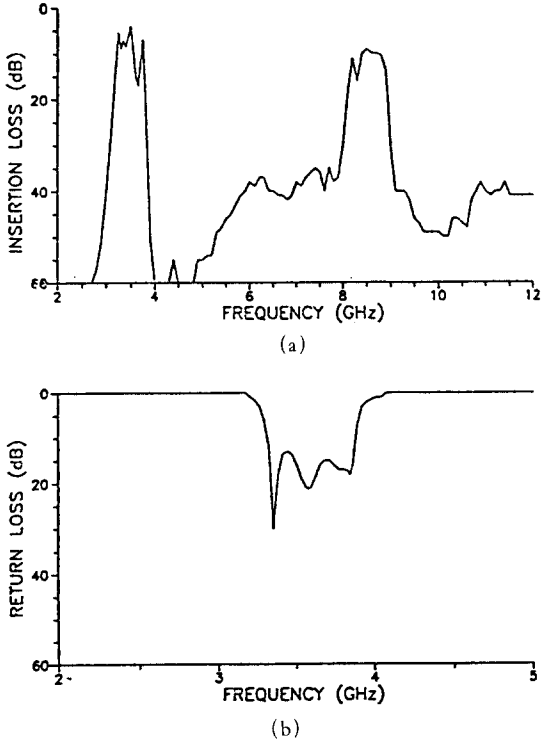


그림 3. 입출력 tapping된 SIR(4단) 필터의 동작 특성
(a) 삽입손실 (b) 반사손실

Fig. 3. The operating characteristics of SIR(4 step) filter tapped at input and output.
(a)insertion loss (b)return loss

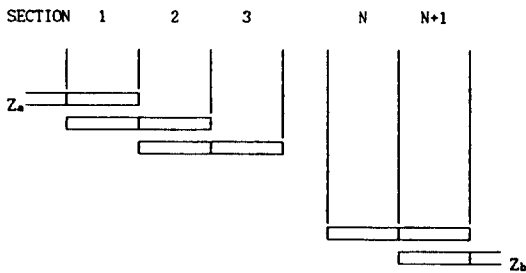


그림 4. 평행결합 개방회로 반파장 공진필터
Fig. 4. Parallel-Coupled Open-Circuit Half-Wavelength Resonator Filter.

합된 부분으로 구성되어 있고 각 공진기의 길이는 $\lambda/2$, 즉 공진 주파수 f_0 에서 반파장의 길이와 같다.

윗 그림 4의 평행 결합 개방회로 반파장 공진필터의 설계식의 다음과 같다.

$$W = (f_2 - f_1) / f_0$$

$$\theta = (\pi / 2)(1 - W / 2)$$

$$\tau = 1 / (2 \tan \theta) \quad (4)$$

여기에서 W 는 fractional bandwidth, f_2 는 통과대역 상한주파수. f_1 은 통과대역 하한 주파수이며 θ 는 스트립의 전기적 길이로 단위는 rad이다.

$$G_i = 1 / (\omega' g_{i-1} g_i)^{1/2}, i=1 \text{ and } N+1$$

$$G_i = 1 / (\omega' (g_{i-1} g_i)^{1/2}), i=2, 3, \dots, N \quad (5)$$

여기에서 g_i 는 저역 통과 원형 필터의 i 번째 소자 값으로 차수 및 리플 사이즈에 의해서 도표^[7]에서 구할 수 있으며 ω' 은 1이다.

section $i=1, N+1$	section $i=2, 3, \dots, N$
$A_{11}(i) = 1$	$A_{11}(i) = h \tau$
$A_{12}(i) = (h)^{1/2} G(i)$	$A_{12}(i) = h G_i \sin \theta$
$A_{22}(i) = h [G_i^2 + \tau]$	

여기서 h 는 필터 내부에서 immitance를 조절하는 1보다 작은 임의의 무차원인 양의 매개 변수로서

$$h = [G_i^2 + \tau]^{-1}$$

이다.

그림 4로 부터 개방회로 반파장 평행 결합 공진필터의 설계식은

section 1	section $N+1$	section $i=2, 3, \dots, N$
$Z_{11}^{(1)} = A_{11}^{(1)}$	$Z_{11}^{(N+1)} = (Z_b / Z_a) A_{11}^{(N+1)}$	$Z_{11}^{(i)} = A_{11}^{(i)}$
$Z_{12}^{(1)} = A_{12}^{(1)}$	$Z_{12}^{(N+1)} = (Z_b / Z_a)^{1/2} A_{12}^{(N+1)}$	$Z_{12}^{(i)} = A_{12}^{(i)}$
$Z_{22}^{(1)} = A_{22}^{(1)}$	$Z_{22}^{(N+1)} = A_{22}^{(N+1)}$	

이다.

최종적으로 각 구간에 대한 우모드 및 기모드 임피던스는

section $i=1, N+1$	section $i=2, 3, \dots, N$
$Z_{oea}^{(i)} = Z_{11}^{(i)} + Z_{12}^{(i)}$	$Z_{oe}^{(i)} = Z_{11}^{(i)} + Z_{12}^{(i)}$
$Z_{oeb}^{(i)} = Z_{22}^{(i)} + Z_{12}^{(i)}$	$Z_{oo}^{(i)} = Z_{11}^{(i)} - Z_{12}^{(i)}$
$Z_{eoa}^{(i)} = Z_{11}^{(i)} - Z_{12}^{(i)}$	
$Z_{oob}^{(i)} = Z_{11}^{(i)} - Z_{12}^{(i)}$	

이 된다.

각 결합 부분의 우모드, 기모드 임피던스가 구해지면 이 임피던스들을 마이크로스트립으로 구현하기 위한 스트립의 폭과 간격은 참고 문헌[8, 9]의 방법에 따라 구하였다.

2. 실험 및 결과

설계 사양은 중심 주파수 f_0 가 3.5 GHz, 균일 리플(equal ripple)이 0.1 dB, 균일 리플 대역폭이 30%, 하한 주파수(lower bandedge frequency) $f_1=2.975$ GHz, 상한 주파수(upper bandedge frequency) $f_2=4.025$ GHz, 그리고 2.85 GHz와 4.15 GHz에서 15dB이상의 전달손실을 주는 Chebyshev 대역통과 필터로 이때 필요한 공진기의 최소 갯수는 7개이다. 그림 5는 tapping하기 전의 평행 결합 입출력을 갖는 필터의 이론적 특성을 보여주고 그림 6은 입출력을 tapping시킨 후의 이론적 특성을 보여준다.

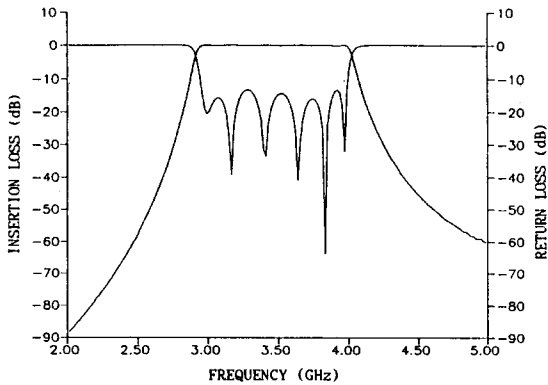


그림 5. 기존 평행결합 필터의 이론적인 삽입 손실과 반사 손실의 특성

Fig. 5. The theoretical insertion and return loss characteristics of the conventional parallel-coupled filter.

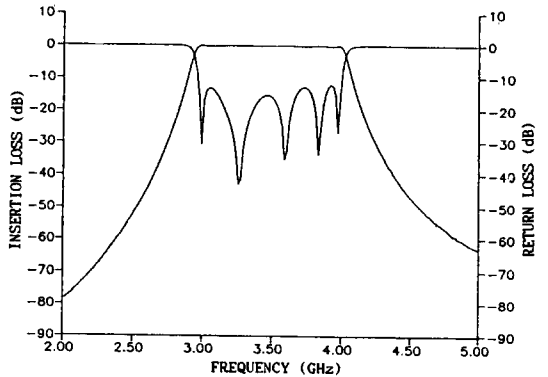


그림 6. tapping-후의 이론적인 삽입 손실과 반사 손실의 특성

Fig. 6. The theoretical insertion and return loss characteristics of the input / output tapped filter.

그러나 실제 제작에 있어서 tapping하기전의 특성은 입출력단의 평행결합부분이 너무 좁아서 제작하지는 못하였고 tapping한후의 필터를 제작, 실험하였는데 중심 주파수가 3.5GHz로 이론치와 일치하였고 통과대역(passband)에서의 삽입손실은 1.16dB로 이론치인 0.1dB보다 1.06dB큰데 이 차이는 방사 손실, 유전체 손실 등에 기인한다고 볼 수 있으며 이론치 계산때 이러한 손실은 고려되지 않았고 단지 설계 사양의 리플 크기만으로 하였다. 대역폭은 이론치인 30%(1.05GHz)보다 약간 커서 31.4%(1.1GHz)로 측정되었는데, 이와같은 대역

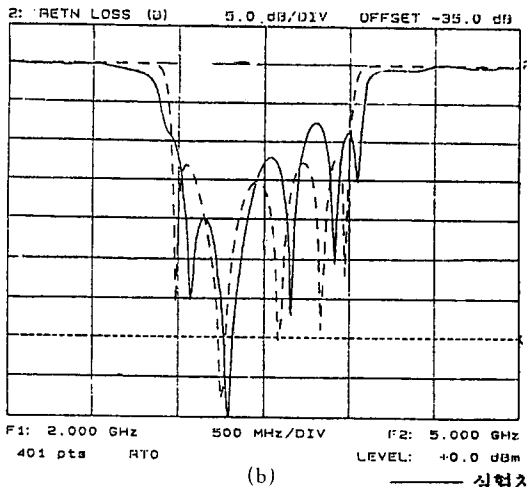
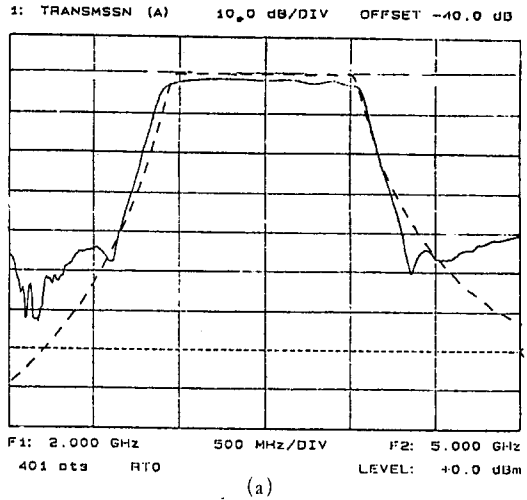


그림 7. 대역폭을 2~5GHz로 한 이론치와 실험치의 동작 특성 비교

(a)삽입 손실 (b)반사 손실

Fig. 7. The theoretical and measured results in 2~5GHz region.

(a)insertion loss (b) return loss

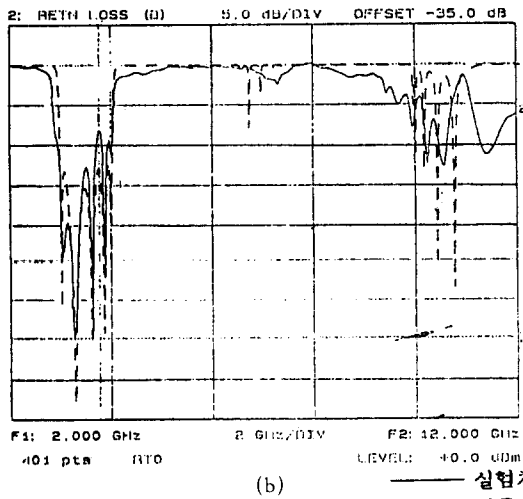
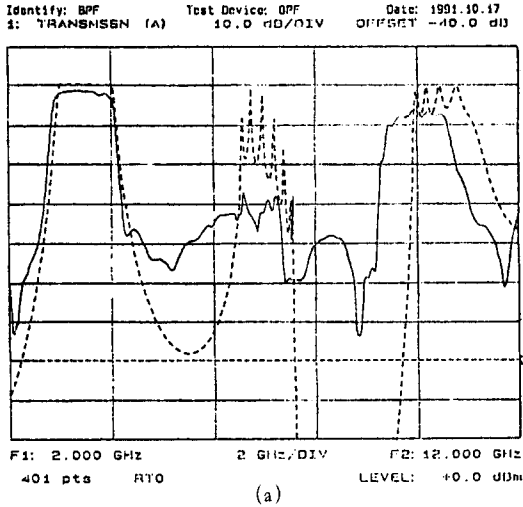


그림 8. 대역폭을 2~12GHz로 한 이론치와 실험치의 동작 특성 비교
(a)삽입손실 (b)반사손실
Fig. 8. The theoretical and measured results in 2~12GHz region.
(a)insertion loss (b)return loss

폭의 확장 현상은 필터를 제작하는 과정에서 결합 간격 (gap)이 이론치보다 크게 제작되어 원하는 결합량보다 더 강한 결합에 의해서 기인한다고 생각한다. 그리고 그림 7과 그림 8은 주파수 대역폭을 2-5GHz, 그리고 2-12GHz로 한 이론치와 측정치를 나타내었으며 그림 8에서 보면 중심 주파수의 이차 고조파 근처에서 두번째 통과대역이 나타남을 알 수 있는데 이와같은 현상을 스프리어스 공진 응답이라고 하며 기존의 Cohn의 설계보

다 두번째 통과 대역이 약 28(dB)정도까지 억압되는 결과를 알 수 있다.

IV. 광대역 SIR마이크로스트립 필터의 고찰

Crystal의 설계 기법을 이용해 III장에서 30%의 대역폭을 가지며 두번째 통과대역이 억제되는 광대역 필터를 구현하였다. II장에서 반파장 공진기를 스텝 임피던스 공진기로 치환했을 때 두번째 스프리어스 공진이 억제되든지 또는 이동하는 현상을 얻었으므로 이제는 III장의 기법에 II장의 기법을 가미하여 광대역은 유지하면서 스프리어스 공진 특성이 더 억제되는 현상을 얻어 보기로 하자. 그림 9는 평형 결합 개방회로의 가운데 공진기를 스텝 임피던스 공진기로 변환하고자 하는 부분을 나타낸 것이다.

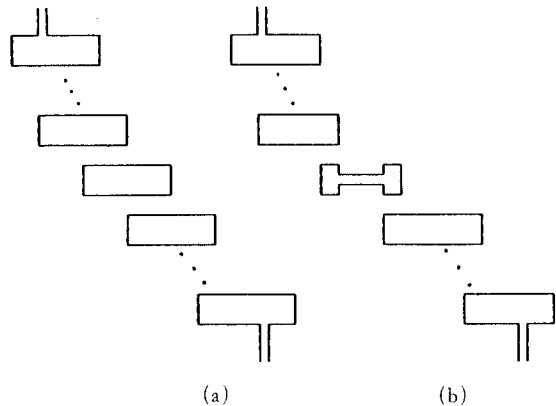


그림 9. (a)입출력이 탭핑된 반파장 공진기 필터
(b)중양의 반파장 공진기가 SIR로 대체된 필터
Fig. 9. (a)Half-Wavelength Resonator filter with input/output tapping.
(b)The same filter as (a) except that the center half-wavelength resonator is replaced by SIR.

tapping된 Crystal의 특성을 그대로 유지하며 중앙의 반파장 공진기를 스텝 임피던스 공진기로 변환시키기 위해 네번째의 공진기를 스텝 임피던스 공진기로 바꾸었으며 이전의 도체 폭 (stripwidth)과 특성 임피던스(Z_0)값을 원래의 값으로 유지하며 결합 도체간의 간격(gap)을 조정하여 작은 결합길이에서 원하는 결합량을 이루려고 시도해 보았다. 즉, 그림 9(b)의 특성과 그림 9(a)의 특성이 원하는 대역에서는 특성이 같고 이차 고조파 근처에서는 그림 9(b)의 특성이 개선되도록 시도해 보았다. 그 방법으로 다음과 같은 절차를 통해 시도하였다.

- i) 세번째와 네번째의 평행 결합 부분(parallel-coupled section)의 우모드 임피던스, 기모드 임피던스로부터 J-inverter의 값을 구한다.
- ii) 이렇게 구한 J-inverter의 값을 스텝 임피던스 공진기의 우모드 임피던스, 기모드 임피던스의 공식에 대입하여 스텝 임피던스 공진기 영역의 우모드 임피던스, 기모드 임피던스의 값을 구하였다.
- iii) 다음은 이러한 임피던스를 구현하기 위한 스텝 임피던스 공진기에서의 도체 폭과 결합 도체간의 간격을 구하였다.
- iv) 이러한 변수(parameter)들을 가지고 CAD program인 Puff을 통하여 simulation을 해 보았지만 본래의 그림 9(a)가 갖는 특성을 얻지 못하였다. 이 원인으로서는 위의 ii)과정에서 이용된 식은 S. B. Cohn의 근사식으로 부터 얻어진 결과식들이 이 식들이 대역폭이 30% 정도되는 영역까지는 활용되기에 적합치 못한 것으로 생각되며 광대역 설계기법에 맞는 어드미턴스인버터 값과 우모드, 기모드 임피던스와의 관계식이 새로이 유도되어야 하겠다.

V. 결 론

본 연구에서는 첫째로 광대역시 문제가 되는 입출력 결합 부분을 탭핑 기법을 도입해 해결해 보는 시도를 하였으며 둘째로 반파장 공진기를 스텝 임피던스 공진기로 대체하여 이차 고조파 부분의 원치 않는 통과대역을 억제내지는 이동시키는 시도를 하였으며 셋째로 Crystal 광대역 기법을 고찰하여 30%의 대역폭을 갖도록 시도하였다.

입출력 탭핑이 기존의 필터 특성을 크게 저하시키지 않으며 제작의 용이성 때문에 광대역화에 도움이 됨을 확인하였다. 스텝 임피던스 공진기와 입출력 탭핑을 이용한 마이크로스트립 대역통과 필터를 3.5GHz에서 20%의 대역폭을 갖도록 설계하여 Teflon 기판에서 제작하여 측정하였다. 30% 정도까지 대역폭을 넓히기 위해 Crystal의 내부 이미턴스를 조정하는 설계 기법을 고찰하여 설계해서 입출력 탭핑을 동시에 적용해 Epsilam-10 기판에서 제작하여 측정치와 이론치를 비교하였다.

그러나 Crystal의 설계 기법에 SIR개념을 부가시킨 설계 기법을 시도한 결과는 좋지 않아 계속 연구할 과제로 남아 있다. 이러한 마이크로스트립필터는 대역폭이 더욱 넓어져 응용이 더욱 다양할 것으로 생각되며 또한 이차 고조파 근처의 스푸리어스 반응도 억제시킬 수 있어 발

진기나 증폭기등 비선형 능동소자의 출력단으로서 가능하며 근래에 이르러서는 광대역 마이크로파 통신 및 레이다 시스템의 송,수신부에 사용될 수 있을 것이다.

參 考 文 獻

1. S. B. Cohn, "Parallel-Coupled Transmission-Line-Resonator Filters," IRE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-6, pp.223-232, April 1958.
2. C. Y. Ho and J. H. Weidman, "Half-Wavelength and Step Impedance Resonators Aid Microstrip Filter Design," Microwave Systems News, pp.88-103, Oct. 1983.
3. C. Y. Ho and J. H. Weidman, "Improved Design of Parallel Coupled Line Filters with Tapped Input / Output," Microwave Journal, pp.127-130, Oct. 1983.
4. J. S. Wong, "Microstrip Tapped-Line Filter Design," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. MTT-27, pp.44-50, Jan. 1979.
5. E. G. Cristal, "Design Equations for a Class of Wide-Band Bandpass Filters." IEEE Trans. Microwave Theory Tech., pp.696-699, Oct. 1972.
6. E. G. Cristal, "New Design Equations for Class of Microwave Filters." IEEE Trans. Microwave Theory Tech. vol. MTT-19, pp.486-490, May. 1971.
7. G. L. Matthaei, L. Young and E. M. T. Jones, Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures, New York : McGraw-Hill, 1964, pp.100-102.
8. K. C. Gupta, Ramesh Garg and Rakesh Chadha, Computer-Aided Design of Microwave Circuits, Artech House, 1981, Chapter 3.
9. T. C. Edwards, Foundations for Microstrip Circuit Design, New York : John Wiley & Sons, Inc. 1981.