

## 개방 스텐브를 갖는 평행결합선로의 해석과 응용

# The Analysis and Application of the Parallel Coupled Line with Open Stub

이 원 균\*    이 홍 섭\*\*    황 희 용\*\*\*  
Lee, Won-Kyun    Lee, Hong-Seob    Hwang, Hee-Yong

### Abstract

In this paper, the exact analysis of the parallel coupled line with open stub is presented. This structure shows LPF characteristics with broad stopband and sharp skirt characteristics. We derived the exact Z-matrix expression of the structure. In order to show the validation of the expression we designed 3<sup>th</sup> order Chebyshev LPF using the structure. The simulated data excellently agreed with the predicted values by the calculation using the derived expression.

키워드 : 평행결합선로, Low-Pass Filter, 등가회로  
Keywords : Parallel Coupled line, Low-Pass Filter, Equivalent Circuit

### 1. 서론

초고주파 여파기(Microwave Filters)는 각종 통신 시스템과 레이더, 그리고 측정 시스템 등에 필수적으로 요구되어진다. 이러한 여파기의 역할은 시스템 내에서 불필요 신호를 제거하거나 원하는 주파수를 선택하는데 있다. 이러한 여파기의 종류는 매우 다양하며[1][2], 해석방법 또한 다양하다[3][4].

최근 평행결합선로(Parallel Coupled Line: PCL)에 개방 스텐브(Open Stub)를 추가하여 우수한 저역통과 특성을 갖는 구조가 발표되어 저역통과여

파기(Low-Pass Filter: LPF), 링하이브리드(Ring Hybrid)등에 활발히 적용되고 있다[1][5][6].

평행결합선로는 기본적으로 T형 등가회로로 나타낼 수 있으나 평행결합선로 자체의 등가적인 용량성 소자( $C_p$ )값은 일반적으로 매우 작기 때문에 여기에  $C_p$ 에 대응하는 오픈 스텐브를 병렬로 연결하여  $C_p$  값을 올려줌으로써 보다 실질적인 저역통과 여파기 기능을 갖도록 하는 것이 오픈 스텐브를 갖는 PCL구조의 기본원리이다. 이러한 오픈 스텐브를 갖는 PCL구조의 특성은 넓은 저지대역과 우수한 감쇄(sharp Skirt)특성을 지니는 장점을 가졌다.

하지만 기존의 설계식은 근사적으로 구한 것이기 때문에 이를 실제 적용하기 위해서는 많은 시간이 소요되는 반복설계가 필요하고, 원하는 정확한 저역통과 여파기의 특성을 얻을 수가 없는 단점이 있다.

본 논문에서는 임피던스 행렬(Z-matrix)법을 이

\* 강원대학교 IT 특성화학부 전기전자전공  
\*\* 강원대학교 전기전자학과 석사졸업  
\*\*\* 강원대학교 전기전자학과 부교수, 공학박사

용하여 개방 스테르브를 갖는 PCL구조의 특성을 해석하여 정확한 설계식을 제시하고 이의 검증은 위해 3단의 LPF를 설계하여 예측된 계산 값과 비교한다.

## 2. 본론

### 2.1 기존 근사 설계 방법

먼저 이상적인 LPF값과 기존의 근사 설계식[1]을 이용한 LPF를 비교하기위해서 차단주파수는 2.45 GHz이며 양쪽 포트 임피던스는 50 Ohm, 리플은 0.01 dB를 갖는 이상적인 3단 체브셰프(Chebyshev) 여파기를 설계하였다. 회로 시뮬레이션 프로그램인 ADS™을 사용하였다. 통상적인 저역통과 원형여파기 값에서 계산된 이상적인 3단 체브셰프 여파기의 L, C 값은 표 1, 시뮬레이션 결과는 그림 2와 3에 나타내었다.

표 1 이상적인 3단 체브셰프 여파기의 L,C 값

| 포트임피던스(Ohm) | L(nH)  | C(pF)  |
|-------------|--------|--------|
| 50          | 2.0434 | 1.2605 |

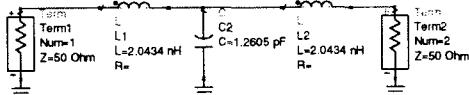
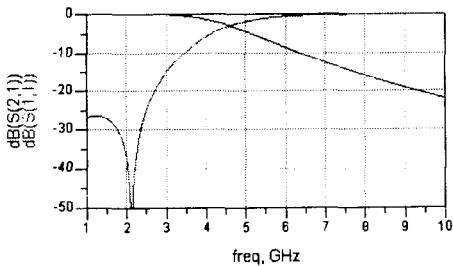
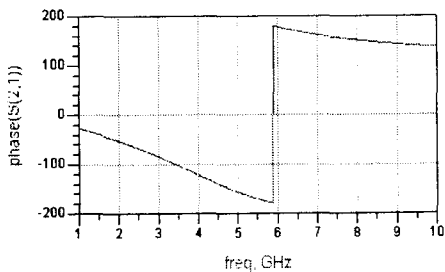


그림 1 이상적인 3단 체브셰프 여파기 회로도

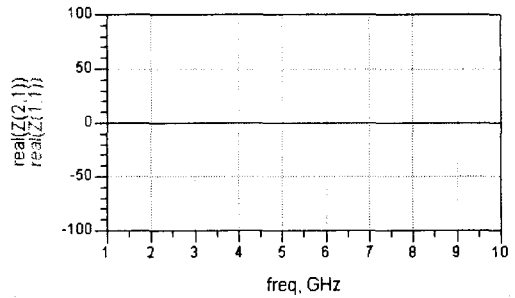


(a)

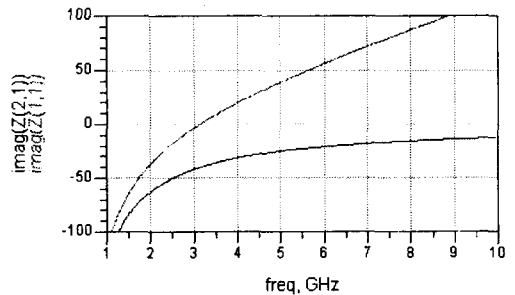


(b)

그림 2 그림 2의 회로 시뮬레이션 결과  
(a) S11과 S21 (b) S21의 위상



(a)



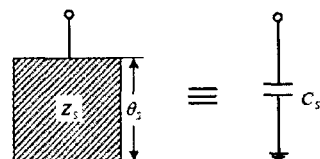
(b)

그림 3 그림 2의 회로에 대한 임피던스 행렬 시뮬레이션 결과

(a) 실수부(Real part) (b) 허수부(Imaginary part)

그림 2-(a),(b)에서 차단주파수 2.45 GHz에서의  $S_{11} = -26.389$  dB이며  $S_{21} = -0.01$  dB이다. 또한 위상값은  $-67.096^\circ$ 이다. 그림 3에서  $Z_{11}$ 과  $Z_{21}$ 의 실수부의 값은 모든 주파수에서 모두 0이며, 차단 주파수에서의 허수부의 값들은 각각  $Z_{11} = -20.080$  dB,  $Z_{21} = -51.536$  dB이다. 그림 1은 표1의 이상적인 회로를 ADS로 시뮬레이션하기위한 회로도면이다.

이제, 기존의 근사 설계식을 살펴보고 이를 이용하여 위의 이상적인 여파기의 사양대로 설계한다. 그림 4는 개방 스테르브, 평행결합선로의 등가회로와 전체적인 등가회로 모델을 나타낸 것으로 기존의 등가 파라미터에 대한 관계는 다음 식 (1)과 같다.



(a)

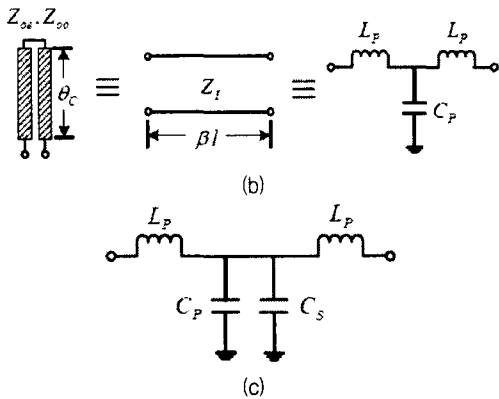


그림 4 (a) 개방스터브 (b) 평행결합선로 (c) 전체적인 등가회로[1]

$$C_S = \frac{Y_S \cdot \tan(\theta_S)}{\omega}$$

$$C_P = \frac{Y_I \cdot \sin(\beta l)}{\omega}$$

$$L_P = \frac{Z_I \cdot \tan\left(\frac{\beta l}{2}\right)}{\omega}$$

$$Z_I = \sqrt{Z_{e0} Z_{o0}}$$

$$\cos(\beta l) = \frac{\frac{Z_{e0}}{Z_{o0}} - \tan^2(\theta_c)}{\frac{Z_{e0}}{Z_{o0}} + \tan^2(\theta_c)} \quad (1)$$

여기서,  $\theta_S$ 는 오픈 스테르브의 전기적 길이(Electrical Length),  $\omega$ 는 각주파수(Angular frequency),  $Z_I$ 와  $\beta l$ 는 평행결합선로의 이미지 파라미터(Image Parameters),  $\theta_c$ 는 평행결합선로의 전기적 길이이다. 또한  $Z_{e0}$ ,  $Z_{o0}$ 는 각각 평행결합선로의 우수모드 임피던스(Even mode Impedance), 기수모드 임피던스(Odd mode Impedance)이다.

위 식으로부터 참고문헌[1] 계산 절차 대로 계산한 각 파라미터들을 표 2에 나타내었다.

표 2 그림 4의 3단 체브세브 여파기에 대한 등가 파라미터의 값

| 변수 | $C_S$<br>(pF) | $C_P$<br>(pF) | $L_P$<br>(nH) | $Z_I$<br>( $\Omega$ ) | $\beta l$ | $\theta_S$<br>( $^\circ$ ) | $\theta_c$<br>( $^\circ$ ) |
|----|---------------|---------------|---------------|-----------------------|-----------|----------------------------|----------------------------|
| 값  | 0.917         | 0.343         | 2.043         | 104.5                 | 33.50     | 35.23                      | 23.49                      |

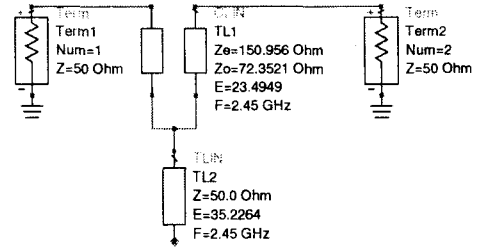
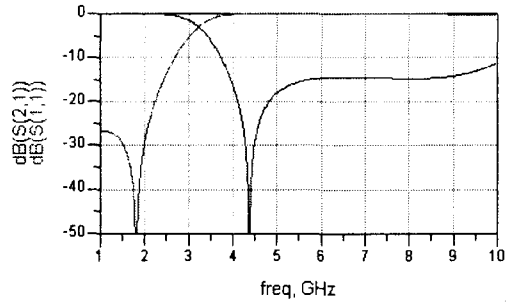
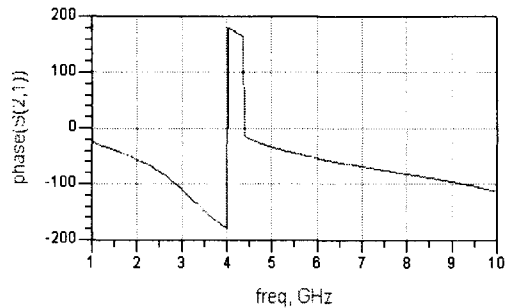


그림 5 개방 스테르브를 갖는 PLC구조에 대한 회로도



(a)



(b)

그림 6 회로 시뮬레이션 결과

(a)  $S_{11}$ 과  $S_{21}$  (b)  $S_{21}$ 의 위상

그림 5는 기존의 근사 설계식으로 개방 스테르브를 갖는 PCL구조를 시뮬레이션하기 위한 ADS 회로도이며, 그림 6은 시뮬레이션 결과이다. 그림 6-(a)(b)에서 차단주파수 2.45 GHz에서의  $S_{11} = -14.678$  dB,  $S_{21} = -0.150$  dB이다.  $S_{21}$ 의 위상은  $-74.978^\circ$ 이다. 이는 기존의 방식으로 개방 스테르브를 갖는 PCL구조의 특성과 3단 체브세브 여파기의 특성이 다름을 보여준다. 기존 논문의 해석 방식은 근사적으로 구하였기 때문에 약간의 오차가 있다. 따라서 설계자가 기존 논문을 이용하여 필터를 설계하기 위해서는 튜닝 과정을 거쳐야한다. 이는 설계자가 원하는 정확한 여파기를 제작하기 힘들어짐을 뜻한다.

2.2 정확한 설계방법

본 논문은 평행결합선로의 임피던스 행렬을 이용하여 해석을 하였다. 그림 7은 평행결합선로의 구조이다.

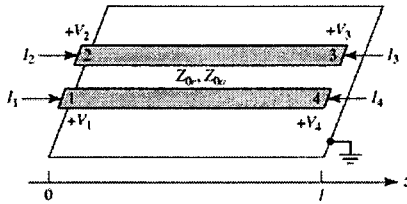


그림 7 PCL의 구조

그림 7의 평행결합선로의 임피던스 행렬은 식 2에 나타내었고, 그림 8은 개방 스테이블를 갖는 평행결합선로의 등가구조를 나타낸것이다[7]~[8].

$$\begin{aligned} Z_{11} = Z_{22} = Z_{33} = Z_{44} &= \frac{-j}{2} (Z_{0e} + Z_{0o}) \cot \theta \\ Z_{12} = Z_{21} = Z_{34} = Z_{43} &= \frac{-j}{2} (Z_{0e} - Z_{0o}) \cot \theta \\ Z_{13} = Z_{31} = Z_{24} = Z_{42} &= \frac{-j}{2} (Z_{0e} - Z_{0o}) \csc \theta \\ Z_{14} = Z_{41} = Z_{23} = Z_{32} &= \frac{-j}{2} (Z_{0e} + Z_{0o}) \csc \theta \end{aligned} \quad (2)$$

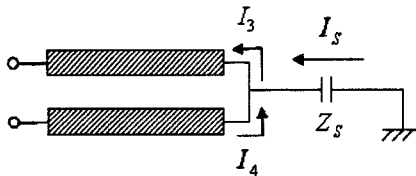


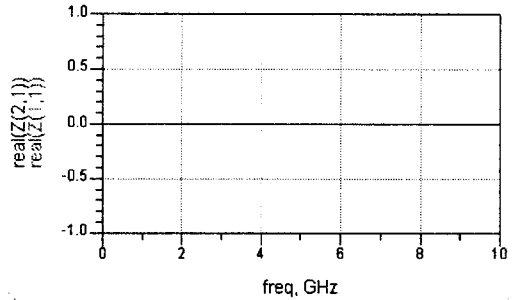
그림 8 개방 스테이블를 갖는 PCL구조의 등가구조

위 구조에서 키르히호프의 전압,전류 법칙에 의하여  $V_3=V_4=V_S=I_S Z_S$  와  $I_3=-(I_4+I_S)$  이 두 방정식을 이끌어 낼수 있으며 이를 식 (2)에 대입하여 풀면, 그림 8의 두 개의 포트에 관한 임피던스 행렬을 구할 수가 있다. 그림 8의 임피던스 행렬은 식 (3)에 나타내었다.

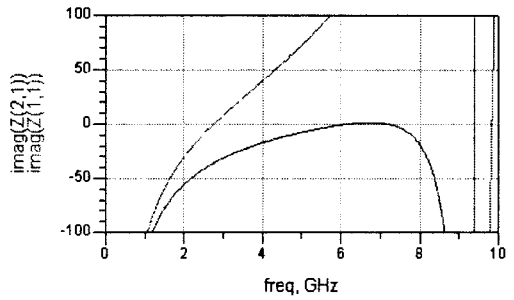
$$\begin{aligned} Z_{11}^* = Z_{22}^* &= -\frac{j}{2} \left( Z_{0e} \cot \theta - Z_{0o} \tan \theta + j \frac{(Z_{0e} \csc \theta)^2}{2Z_S - jZ_{0e} \cot \theta} \right) \\ Z_{12}^* = Z_{21}^* &= -\frac{j}{2} \left( Z_{0e} \cot \theta + Z_{0o} \tan \theta + j \frac{(Z_{0e} \csc \theta)^2}{2Z_S - jZ_{0e} \cot \theta} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $\theta$ 값은 평행결합선로의 전기적 길이며,  $Z_S$ 는 용량성 소자의 임피던스,  $Z_{0e}$ 와  $Z_{0o}$ 는 각각 우수,기수모드 임피던스이다. 이제 식 (3)이 옳은지 확인 하기 위하여 표 2의 등가 파라미터값을 대입

하여 그림 5의 개방 스테이블를 갖는 평행결합선로 구조의 시뮬레이션과 비교하여 보았다. 그림 5에 대한 임피던스 시뮬레이션결과는 그림 9에 나타내었다.



(a)



(b)

그림 9 표 2의 파라미터를 이용한 회로시뮬레이션 (a) 실수부 (b) 허수부

위의 시뮬레이션 그래프에서 차단주파수 2.45 GHz에서의  $Z_{11}$ 값은  $-11.266j$ ,  $Z_{21}$ 값은  $-42.718j$ 로써 앞에서 구한 식 (3)을 이용하여 구한 값과 동일하므로 그림 5에 관한  $Z$  파라미터 식은 식 (3)이 된다. 여기서  $Z_{11}$ 과  $Z_{21}$ 의 실수부 값은 모든 주파수에서 0 이되는 것을 그림 9의 (a)에서 보여준다.

그림 4 (b)의 구조에 대한 임피던스 행렬은 식 (2)와 키르히호프의 전압, 전류 법칙에 의한 연결된 부분의 전압, 전류가 같으므로 ( $V_3=V_4$ ,  $I_3=-I_4$ ) 이 두 방정식을 통해 이끌어 낼수 있으며, 그림 4 (b)에 관한 임피던스 행렬값은 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_{11} = Z_{22} &= -\frac{j}{2} (Z_{0e} \cot \theta - Z_{0o} \tan \theta) \\ Z_{12} = Z_{21} &= -\frac{j}{2} (Z_{0e} \cot \theta + Z_{0o} \tan \theta) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (3)과 (4)에 대하여 각각 그림 10처럼 임피던스 행렬에 대한 T형 등가회로로 바꿀수가 있다. T형 등가회로에 대응하는  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  에 관한 식은

식 (5)와 같다.

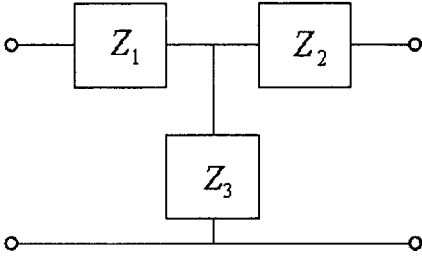


그림 10 임피던스 행렬에 대한 T형 등가회로

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_{11} - Z_{12} \\ Z_2 &= Z_{22} - Z_{12} \\ Z_3 &= Z_{12} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (3)을 임피던스 행렬에 대한 T형 등가회로로 바꾸면 식 (6)이 된다.

$$\begin{aligned} Z_1 &= jZ_{0c} \tan \theta \\ Z_2 &= jZ_{0c} \tan \theta \\ Z_3 &= -\frac{j}{2} \left( Z_{0c} \cot \theta + Z_{0c} \tan \theta + j \frac{(Z_{0c} \csc \theta)^2}{2Z_S - jZ_{0c} \cot \theta} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

또한 (4)을 임피던스 행렬에 대한 T형 등가회로로 바꾸면 식 (7)이 된다.

$$\begin{aligned} Z_1 &= jZ_{0c} \tan \theta \\ Z_2 &= jZ_{0c} \tan \theta \\ Z_3 &= -\frac{j}{2} (Z_{0c} \cot \theta + Z_{0c} \tan \theta) \end{aligned} \quad (7)$$

하지만 기존 설계식에서는  $C_s$  값을 더하였다. 따라서 (7)식을 다시 쓰면 식 (8)이 된다.

$$\begin{aligned} Z_1 &= jZ_{0c} \tan \theta \\ Z_2 &= jZ_{0c} \tan \theta \\ Z_3 &= -\frac{j}{2} \left( Z_{0c} \cot \theta + Z_{0c} \tan \theta + \frac{2}{\omega C_s} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

식 (6)과 (8)은  $Z_3$ 의 방정식중 세 번째 항이 틀리다. 이 세 번째 항으로 인하여 기존 설계식에서 오차가 생기게 된 것이다.

그림 8의  $Z_S$ 값은 3단 체브세브 여파기의 임피던스 행렬과 식 (3)을 비교함으로써 얻을 수 있다. 3단 체브세브 여파기의 ABCD 파라미터는 식 (9)와 같이 정의된다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_{CFP} = \begin{bmatrix} 1 - \omega^2 LC & 2j\omega L - j\omega^3 L^2 C \\ j\omega C & 1 - \omega^2 LC \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (9)를 이용하여 3단 체브세브 여파기의 임피던스 행렬을 구하면 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} Z_{11}^{CFP} &= Z_{22}^{CFP} = \frac{1 - \omega^2 LC}{2j\omega L - j\omega^3 L^2 C} \\ Z_{12}^{CFP} &= Z_{21}^{CFP} = \frac{1}{j\omega C} \end{aligned} \quad (10)$$

식 (3)과 식 (10)을 비교하여 그림 8의  $Z_S$ 의 값을 구하면 식 (11)이 된다. 식 (11)에서  $\theta$ 값은 식 (6)의  $Z_1^*$ 을 이용하여 구할 수가 있으며,  $Z_S = 1/j\omega C_s^*$ 이므로  $C_s^*$ 의 값을 구할 수 있다. 따라서 그림 3(c)의  $C_s$ 값은  $C_s^*$ 값이 되어서 그림 4(c)의 그림은 그림 10이 된다.

$$\begin{aligned} -\frac{j}{2} \left( Z_{0c} \cot \theta - Z_{0c} \tan \theta + j \frac{(Z_{0c} \csc \theta)^2}{2Z_S - jZ_{0c} \cot \theta} \right) &= \frac{1}{j\omega C} \\ Z_s^* &= -\frac{jZ_{0c} (-B \tan \theta \cos \theta + 2 \cos \theta + A \sin \theta)}{2(A \cos \theta - 2 \sin \theta + B \sin \theta \tan \theta)} \end{aligned} \quad (11)$$

where  $A = \omega C Z_{0c}$ ,  $B = \omega C Z_{0c}$

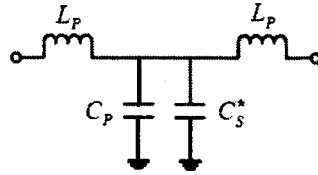


그림 10. 정확한 등가회로

표 1의 3단 체브세브 여파기의 L, C 값을 이용하여 정확한 평행결합선로와 개방 스테르브를 설계할 수 있다. 식 (1)(3)(6)(11)식을 이용하여 평행결합선로와 개방선로의 파라미터들을 계산하면 표 3과 같다. 포트 임피던스는 50 Ohm이다

표 3 정확한 평행결합선로와 개방 스테르브의 파라미터

| 변수 | L (nH) | C (pF) | Z <sub>0c</sub> | Z <sub>0o</sub> | θ      | C <sub>s</sub> * |
|----|--------|--------|-----------------|-----------------|--------|------------------|
| 값  | 2.043  | 1.261  | 150.956         | 72.352          | 23.497 | 0.751            |

표 3의 파라미터를 이용하여 정확한 설계식을 이용한 개방 스테르브를 갖는 PCL 구조를 시뮬레이

선 하기위한 ADS 회로도면은 그림 11과 같다. 그림 12와 13은 그림 11에 대한 시뮬레이션 결과이다.

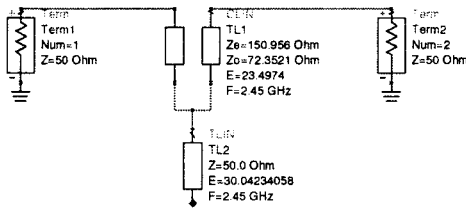
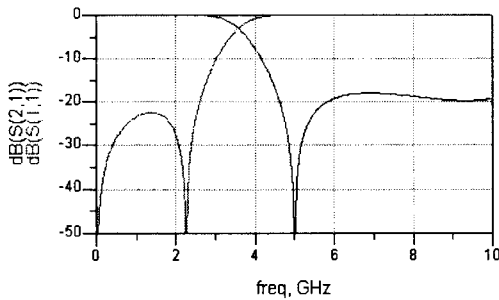
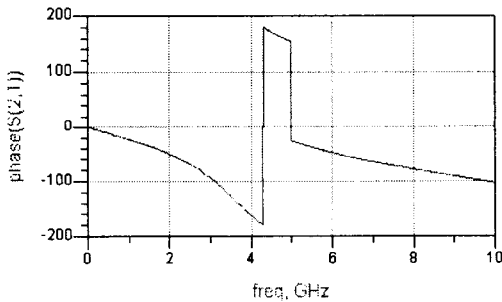


그림 11. 정확한 개방스터브를 갖는 PCL구조의 회로도



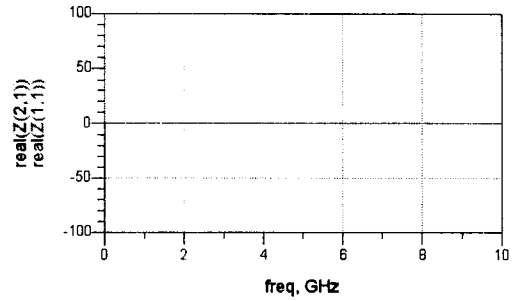
(a)



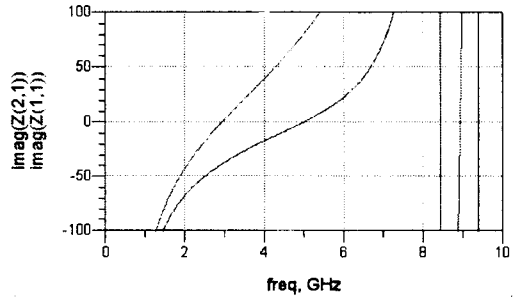
(b)

그림 12. 회로 시뮬레이션 결과 (a)  $S_{11}$ 과  $S_{21}$  (b)  $S_{21}$ 의 위상

그림 12(a)(b)에서 차단주파수 2.45 GHz에서의  $S_{11}=-26.389\ \text{dB}$ 이며  $S_{21}=-0.01\ \text{dB}$ 이고, 위상값은  $-67.096^\circ$ 이다. 또한 그림 13에서 임피던스 행렬의 실수부는 모든 주파수에서 0의 값을 가지며, 허수부는  $Z_{11}$ 에서  $-20.080\ \text{dB}$  값을 가지고,  $Z_{21}$ 에서  $-51.536\ \text{dB}$  값을 가진다. 이 결과는 그림 2와 동일한 결과값을 가진다. 따라서 정확한 해석을 하였다 는 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 13 임피던스 행렬 회로 시뮬레이션 결과 (a)실수부 (b)허수부

그림 11을 손실이 있는 매질에 대하여 시뮬레이션을 해보도록 한다. 기판에 대한 정보는 표 4에 나타내었고, 평행결합선로와 개방스터브의 물리적 길이는 표 5에 나타내었다.

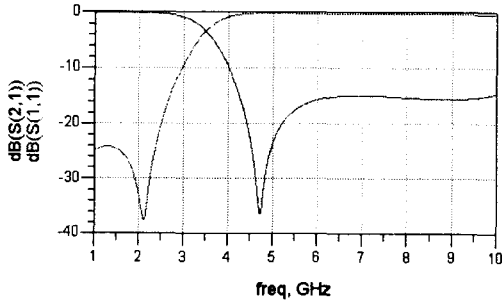
표 4. 기판 정보

| 유전율 | 높이       | 손실탄젠트<br>(Loss Tangent) |
|-----|----------|-------------------------|
| 4.4 | 0.762 mm | 0.025                   |

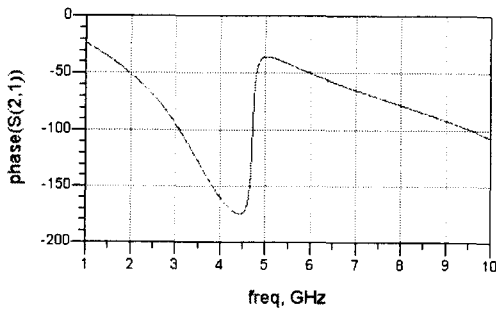
표 5. 평행결합선로와 개방스터브의 물리적 길이

|            | 평행결합선로 | 개방스터브  |
|------------|--------|--------|
| 폭 (mm)     | 0.2329 | 1.4573 |
| 길이 (mm)    | 4.6605 | 5.5791 |
| 선로간거리 (mm) | 0.2492 |        |

그림 14는 표 4,5에 대한 회로 시뮬레이션 결과이다. 차단주파수 2.45 GHz에서  $S_{11}$ 의 값은 -21.482 dB이고,  $S_{21}$ 의 값은 -0.206 dB이다. 위상값은 -59.229이다. 손실이 없는 경우와 비교하여 차이가 조금 나긴하지만, 차단주파수에서의  $S_{11}$ 값이 -20 dB이하이며,  $S_{21}$ 의 값은 4 GHz 이후에 -10 dB이하 값을 가지므로 필터로 쓰기에 부족함이 없다. 또한 3단 체브세브 여파기보다 우수한 감쇄특성을 가진다.



(a)



(b)

그림 14. 표 4,5에 대한 손실이 있는 매질에서의 회로 시뮬레이션 (a)  $S_{11}$ 과  $S_{21}$  (b)  $S_{21}$ 의 위상

그림 15는 표 5의 파라미터에 대한 3D 시뮬레이션 구조이며, 그림 16은 3D 시뮬레이션에 대한 결과값이다.

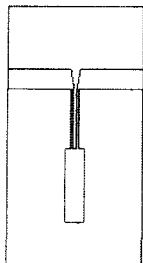


그림 15. 3D 시뮬레이션에 대한 구조

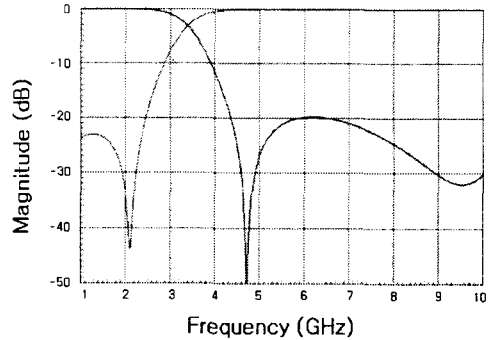


그림 16 3D 시뮬레이션 결과

그림 16에서  $S_{11}$ 의 값은 -20.3 dB이며  $S_{21}$ 의 값은 -0.18 dB이다. 이 값은 회로 시뮬레이션 결과와 일치한다고 볼수있다.  $S_{21}$ 에 관한 위상값은 그림 15에서 개방스테르브를 갖는 PCL구조의 양옆 전송선로로 인하여 변하기 때문에 생략하였다.

### 3. 결론

본 논문에서는 개방 스테르브를 갖는 PCL구조의 전체 Z 파라미터를 구하여, 이를 이상적인 3단 체브세브 여파기와 비교함으로써 정확한 설계식을 유도하였다. 회로시뮬레이션 결과와의 비교를 통해서 이 설계식의 정확함을 보였다.

기존의 설계식과 비교하여 더욱 정확한 지역통과 여파기의 특성을 얻을 수 있었으며, 많은 시간이 소요되는 반복설계가 필요없었다.

또한 오픈 스테르브를 갖는 PCL구조의 경우 크기에 비해 비교적 큰 위상을 가지고 있어서  $2/\lambda$  전송선로나  $4/\lambda$  전송선로등에 적용하여, 그 길이를 줄이고 고조파를 제거하는 특성을 얻을 수 있을것으로 기대된다.

### 참고 문헌

- [1] Rui Li, Dong Il Kim, "A new compact low-pass filter with broad stopband and sharp skirt characteristics", *IEEE AMPC 2005 Proceeding*, Vol. 3, No. 1, pp. 607-611.
- [2] Jia-Sheng Hong, Michael J. Lancaster, "Aperture-Coupled Microstrip Open-Loop Resonators and Their Applications to the Design of Novel Microstrip Bandpass Filters", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 47, No. 9, September 1999, pp. 1848-1855

- [3] Hyo-j. Eom, Hyun-H. Park, "An Approximate Scattering Analysis for Microstrip T-junction", *Journal of the Korea Electromagnetic Engineering Society*, Vol.2, No. 2, 2002.11, pp. 65-67
- [4] El-badawy El-sharawy, Robert W. Jackson, "Analysis and design of Microstrip-slot line for phase shifting applications", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 38, No. 3, March 1990, pp. 276-283
- [5] Hong-Seop Lee, Kyoung Choi, Hee-Yong Hwang, "A harmonic and size reduced ring hybrid using couple lines", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, Vol. 17, No. 4, April 2007, pp.259-261,
- [6] 이원균, 강성준, 황회용, "고조파 저지특성을 갖는 소형화된 브랜치라인 하이브리드", *한국전자과학회 종합학술발표회 논문집*, Vol. 16, No. 1, pp.431-434, 2006년 3월
- [7] David M. Pozar, "Microwave Engineering", 3rd Edition.
- [8] George L. Matthaei, Leo young, E. M. T. Jones, "Microwave Filters, Impedance-matching networks, and coupling structures".