

탭 선로를 이용한 새로운 결합선로 여파기 설계법

A New Design Method of Tapped Coupled-Line Filters

우 동 식 · 김 강 욱

Dong-Sik Woo · Kang-Wook Kim

요 약

본 논문에서는 다단 결합선로 여파기(edge coupled-line filter)의 입출력단을 탭 선로(tapped-line)의 형태로 구현하기 위하여 등가회로 기반의 새로운 설계법을 개발하여 적용하였다. 다단 결합선로 여파기는 입출력단의 선로 간격이 매우 좁아서(수 mil) 제작하기가 힘든 결함이 있는데, 이를 탭 선로로 대체함으로써 제작 시 오차에 덜 민감하고 밀링머신으로 쉽게 제작할 수 있도록 하였다. 또한, 본 논문에서 제안된 간단한 설계법을 사용하면 20 GHz 이하의 주파수 대역에서 20% 이하의 대역폭 특성을 갖는 탭 선로의 파라미터를 얻을 수 있으며, 이를 바탕으로 정확한 탭 선로 여파기를 설계할 수 있다.

Abstract

In this paper, a new design method for tapped coupled-line filters has been developed. The design equations for this tapped-line filter have been obtained using a new equivalent circuit model of tapped lines. These tapped-lines replace input/output coupled lines of the conventional edge coupled-line filters, which tend to have very narrow line gaps(few mils). Therefore, tapped coupled-line filters tend to be less sensitive to filter fabrication tolerances and to be easily fabricated using milling tools. The new filter design algorithm allows very accurate filter design for frequencies up to 20 GHz and bandwidth less than 20%.

Key words : Tapped-Line, Coupled Line Filter, Equivalent Model

I. 서 론

최근 마이크로파 통신 시스템이 발달함에 따라 마이크로파 소자들의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 이러한 마이크로파 소자들 가운데 여파기는 마이크로파 시스템에서 필수적인 부품으로 모양이나 특성, 규모, 설계방법에 따라서 다양한 형태의 여파기가 사용되고 있다. 특히 마이크로파 대역에서는 20% 이내의 넓은 대역폭을 가지는 다단 결합선로 여파기(coupled line filter)가 가장 많이 사용되고 있다^{[1],[2]}. 그러나 주파수가 높아질수록 결합선로 여파기는 첫째단과 마지막단 결합선로간의 간격이 좁아

제작하기에 어려우며, 단의 수가 많아 크기가 크다는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하는 방법의 하나로, 탭(tab) 선로를 이용한 결합선로 여파기가 연구되었다^{[3]~[7]}. 탭 선로를 이용한 결합선로 여파기의 종류로는 인터 디지털(interdigital) 여파기, 콤라인(comblin) 여파기, 평행결합(parallel coupling) 여파기 및 머리핀(hairpin) 여파기 등의 종류가 있다^{[3],[5],[6],[8]~[10]}. 본 논문에서는 결합선로 여파기(edge coupled-line filter)의 입출력단을 탭 선로 형태로 변형시킨 탭 결합선로 여파기의 새로운 설계방법과 구현에 대해 설명하고 있다. 탭으로 된 입출력력을 가진 콤라인 및 머리핀 형태의 여파기의 설계에 대해서는 여러 참고

「이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2002-003-D002000).」

경북대학교 전자전기컴퓨터공학과(School of Electrical Engineering, and Computer Science, Kyungpook National University)

· 논문 번호 : 20040915-119

· 수정완료일자 : 2004년 10월 25일

문헌에서 다루고 있지만, 결합선로 여파기 설계를 다른 경우는 많지가 않다. 주로 탭 선로를 이용한 결합선로 여파기(tapped coupled-line filter)는 실험적인 방법 혹은 EM 시뮬레이션을 통하여 입력과 출력 공진기의 외부 Q 값과 공진기 사이의 결합계수를 측정해서 설계하게 된다^{[5],[9]}. 그러나 본 논문에서는 입력과 출력부분의 단일 결합선로와 탭 선로의 모델을 등가화한 후 계산을 통해 이론적으로 설계하였다^[11].

본 논문에서 설계된 탭 결합선로 여파기는 일반적인 다단 결합선로 여파기(edge coupled-line filter)의 입력단과 출력단의 결합선로를 탭 선로로 대체함으로 얻어진다. 이러한 탭 선로 여파기는 첫째단과 마지막 단 결합선로 사이의 간격이 매우 좁아 제작하기 어려운 다단 결합선로 여파기의 단점을 보완할 수 있다. 본 논문에서는 결합선로와 탭 선로의 등가적인 관계를 수식적으로 유도하고, 그 식을 바탕으로 간단한 탭 결합선로 여파기의 설계방법을 도출하였다. 이 설계 방법을 사용하여 설계, 제작한 여파기의 특성을 비교하고 분석하였다.

II. 탭 선로를 사용한 여파기 설계

2-1 결합선로의 등가모델

일반적인 다단 결합선로 여파기의 구조를 그림 1에서 보여주고 있다^[1].

그림 2는 그림 1의 구성요소인 단일 결합선로의 등가회로를 J-인버터를 이용하여 나타낸 것을 보여준다. 이때 결합선로의 선폭은 a와 b이고, 전기적 길이를 θ^c 라고 한다. 이 경우의 ABCD 행렬은 식 (1)과 같다.

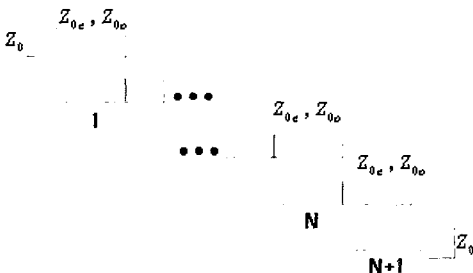


그림 1. 다단 결합 선로 여파기
Fig. 1. Edge coupled-line filter.

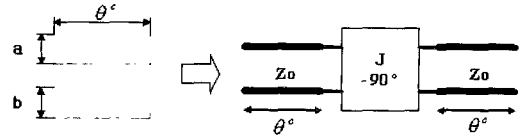


그림 2. J-인버터를 이용한 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of the coupled-line using a J-inverter.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_c = \begin{bmatrix} \cos\theta & jZ_0 \sin\theta \\ j\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -j/J \\ -jJ & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & jZ_0 \sin\theta \\ j\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \left(JZ_0 + \frac{1}{JZ_0} \right) \sin\theta \cos\theta & j \left(JZ_0^2 \sin^2\theta - \frac{\cos^2\theta}{J} \right) \\ j \left(\frac{1}{JZ_0^2} \sin^2\theta - J \cos^2\theta \right) & \left(JZ_0 + \frac{1}{JZ_0} \right) \sin\theta \cos\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

다음의 식 (2)를 이용하면 식 (1)의 ABCD 행렬의 요소를 Z_{0e} , Z_{0o} , θ^c 로 나타낼 수 있다^[1].

$$\frac{1}{2}(Z_{0e} - Z_{0o}) = JZ_0^2, \quad \frac{Z_{0e} + Z_{0o}}{Z_{0e} - Z_{0o}} = JZ_0 + \frac{1}{JZ_0} \quad (2)$$

이때 Z_{0e} , Z_{0o} 는 각각 우모드 및 기모드의 특성 임피던스이다. 만약, θ^c 가 $\pi/2$ 라면 식 (1)의 ABCD 행렬의 각 요소들은 식 (3)과 같이 간단하게 표현된다.

$$A^c = D^c = 0, \quad B^c = j \frac{(Z_{0e} - Z_{0o})}{2}, \quad C^c = j \frac{2}{(Z_{0e} - Z_{0o})} \quad (3)$$

θ^c 가 $\pi/2$ 가 아닌 일반적인 값을 가질 때의 단일 결합선로는 그림 3과 같이 개방 스텐브 형태의 결합선로로 등가화할 수 있다^[8]. 그림 3에서 결합선로의 선폭 a와 b가 서로 같으면 선로 임피던스 Z_1 과 Z_2 그리고 Z_3 는 식 (4)와 같이 표현된다^[8].

$$Z_1 = \frac{Z_e - Z_o}{2}, \quad Z_2 = Z_3 = Z_o \quad (4)$$

위의 결합선로의 등가회로를 ABCD 행렬로 나타

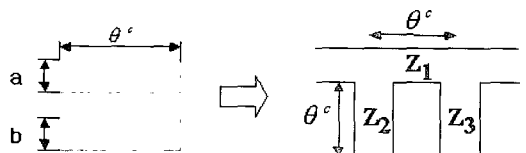


그림 3. 결합선로의 등가회로
Fig. 3. Equivalent circuit of the coupled-line.

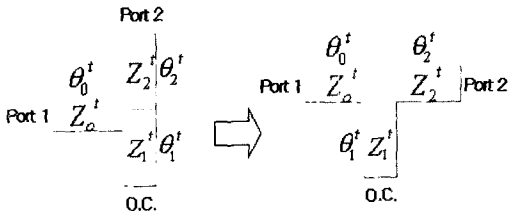


그림 4. 탭 선로의 변형모델
Fig. 4. Transformed model of the tapped-line.

내면 식 (5)와 같다. 단, 여기서는 무손실로 가정한다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_c = \begin{bmatrix} 1 & Z_2^t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta^c & jZ_1 \sin \theta^c \\ j \sin \theta^c & \cos \theta^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z_3^t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta^c (1 + \frac{Z_2^t}{Z_1^t}) & j \left\{ Z_1 \sin \theta^c - \left(Z_3 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_1} + Z_2 \right) \cot \theta^c \cos \theta^c \right\} \\ j \frac{1}{Z_1} \sin \theta^c & \cos \theta^c \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1} \right) \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서 $Z_2 = -jZ_2 \cot \theta^c$, $Z_3 = -jZ_3 \cot \theta^c$ 이다.

2-2 탭 선로의 등가모델

탭을 사용한 결합선로 여파기 설계를 위해 먼저 그림 4에서 보는 것과 같이 탭 선로를 변형시켰다. 이는 ABCD 행렬을 구하여 그 특성을 쉽게 파악하기 위해서이다. 이러한 변형은 약 20 GHz 이하의 주파수에서는 크게 영향을 받지 않는다.

그림 4의 변형된 탭 선로의 ABCD 행렬은 아래의 수식들과 같이 나타낼 수 있다. 단, 여기서도 손실이 없다고 가정하였다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_r = \begin{bmatrix} \cos \theta_0^t & jZ_0^t \sin \theta_0^t \\ j \sin \theta_0^t & \cos \theta_0^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_1^t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2^t & jZ_2^t \sin \theta_2^t \\ j \sin \theta_2^t & \cos \theta_2^t \end{bmatrix}$$

여기서 $Y_1^t = \frac{j}{Z_1^t} \tan \theta_1^t$ 이다. 이 값을 위에서 구한 ABCD 행렬에 대입하여 정리하면 식 (6)을 얻는다.

$$A' = \cos \theta_2^t \left(\cos \theta_0^t - \frac{Z_0^t}{Z_1^t} \sin \theta_0^t \tan \theta_1^t \right) - \frac{Z_0^t}{Z_2^t} \sin \theta_0^t \sin \theta_2^t \quad (6a)$$

$$B' = jZ_2^t \sin \theta_2^t \left(\cos \theta_0^t - \frac{Z_0^t}{Z_1^t} \sin \theta_0^t \tan \theta_1^t \right) + jZ_0^t \sin \theta_0^t \cos \theta_2^t \quad (6b)$$

$$C' = j \cos \theta_2^t \left(\frac{1}{Z_0^t} \sin \theta_0^t + \frac{1}{Z_1^t} \cos \theta_0^t \tan \theta_1^t \right) + \frac{j}{Z_2^t} \cos \theta_0^t \sin \theta_2^t \quad (6c)$$

$$D' = \cos \theta_0^t \left(\cos \theta_2^t - \frac{Z_2^t}{Z_1^t} \sin \theta_2^t \tan \theta_1^t \right) - \frac{Z_2^t}{Z_0^t} \sin \theta_0^t \sin \theta_2^t \quad (6d)$$

2-3 탭 선로의 여파기 설계

단일 결합선로에 대한 ABCD 행렬 식 (5)와 탭 선로의 ABCD 행렬 식 (6)이 서로 같다고 하면 두 개의 수식을 비교하여 등가모델을 추출해 낼 수 있다. 즉,

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_c = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_r \quad (7)$$

만약 결합선로의 선폭 a와 b가 같으면 식 (4)와 (5)에 의하여 $A_c = D_c$ 이므로, A_r 와 D_r 는 같아야 한다. 여기서 탭 선로 파라미터의 수많은 조합을 통해 식 (7)을 만족할 수 있다. 그러나 간단하고 구현하기 용이한 탭 선로 파라미터를 얻기 위하여 아래와 같은 가정을 한다.

$$Z_0' = Z_2', \quad \theta_0' = \theta_2' \quad (8)$$

식 (8)과 같이 가정을 하였을 때, 탭의 ABCD 행렬 (식 (6))은 식 (9)로 표현된다.

$$A' = D' = (\cos \theta_2')^2 - \frac{Z_2'}{Z_1'} \sin \theta_2' \cos \theta_2' \tan \theta_1' - (\sin \theta_2')^2 \quad (9a)$$

$$B' = jZ_2' \sin \theta_2' \left(2 \cos \theta_2' - \frac{Z_2'}{Z_1'} \sin \theta_2' \tan \theta_1' \right) \quad (9b)$$

$$C' = j \cos \theta_2' \left(\frac{2}{Z_2'} \sin \theta_2' + \frac{1}{Z_1'} \cos \theta_2' \tan \theta_1' \right) \quad (9c)$$

식 (8)을 식 (7)에 적용한 것을 그림으로 나타내면 그림 5와 같이 나타낼 수 있다.

이때 식 (9)를 간략화하기 위하여 $\theta_1' + \theta_2' = \pi/2$ 라고 가정한다. 여기서 $\theta_1' = \theta$, $\theta_2' = \pi/2 - \theta$ 로 표현하고 그림 5의 등가회로를 서로 비교하여 해를 구한다. 일반적인 해를 구하기 위하여 식 (5)로부터 아래의

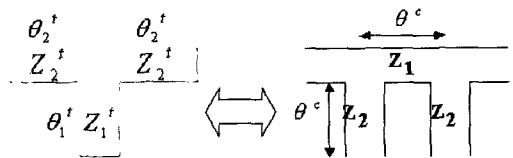


그림 5. 변형된 탭 선로의 등가회로
Fig. 5. Equivalent circuit of the transformed tapped-line.

식 (10)을 정의하였다.

$$X = \cos \theta^c \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1} \right) \quad (10a)$$

$$Y = Z_1 \sin \theta^c - \left\{ \left[\frac{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_3 + Z_3 Z_1}{Z_1} \right] \cot \theta^c \cos \theta^c \right\} \quad (10b)$$

$$Z = \frac{1}{Z_1} \sin \theta^c \quad (10c)$$

식 (10)과 식 (7)로부터 식 (11)을 얻을 수 있고, 이를 풀면 식 (12)와 같은 해를 구하게 된다.

$$\sin^2 \theta \left\{ 2 - \frac{Z_2'}{Z_1'} \right\} - 1 = X \quad (11a)$$

$$Z_2' \sin \theta \cos \theta \left(2 - \frac{Z_2'}{Z_1'} \right) = Y \quad (11b)$$

$$\sin \theta \left(\frac{2}{Z_2'} \cos \theta + \frac{1}{Z_1'} \sin \theta \tan \theta \right) = Z \quad (11c)$$

$$Z_1' = \frac{Y \tan \theta \sin^2 \theta}{\{2 \sin^2 \theta - (X+1)\}(X+1)} = \frac{\tan \theta \sin^2 \theta}{\left\{ Z - \frac{2(X+1)}{Y} \cos^2 \theta \right\}} \quad (12a)$$

$$Z_2' = \frac{Y \sin \theta}{(X+1) \cos \theta} = \frac{Y}{(X+1)} \tan \theta \quad (12b)$$

이때 일반적인 다단 결합선로 여파기는 $\theta^c = \pi/2$ 를 사용하고 있다. 따라서 일반화된 식 (12)에서 $\theta^c = \pi/2$ 라는 조건을 만족시키는 해를 구하기 위해서 J-인버터를 사용해서 얻은 ABCD 행렬 식 (3)과 탭 선로의 변형모델 식 (9)를 연립해서 해를 구할 수 있다. $\theta^c = \pi/2$ 라는 조건을 만족시킨 식 (12)의 해는 식 (13)과 같이 표현된다.

$$Z_1' = \frac{Z_{0c} - Z_{0o} \tan \theta \sin^2 \theta}{2 \cdot 2 \sin^2 \theta - 1} \quad (13a)$$

$$Z_2' = \frac{Z_{0c} - Z_{0o} \tan \theta}{2} \quad (\text{단, } \pi/4 < \theta < \pi/2) \quad (13b)$$

식 (13a)와 (13b)에서 θ 값을 선택하면 Z_1' , Z_2' 를 얻을 수 있다. 여파기의 특성을 위해 최적화된 θ 값은 결합선로와 탭 선로의 S-파라미터 특성과 각각의 탭 선로 파라미터를 사용한 여파기 시뮬레이션 결과로부터 구할 수 있다.

그림 6은 전송선로에서 스텝(step)의 효과와 T-junction의 효과를 무시한 이상적인 소자로 시뮬레이

션된 탭 선로 여파기와 결합선로 여파기의 특성을 비교하여 나타내었다. 여파기들은 중심주파수 6 GHz, 대역폭 400 MHz, 그리고 $N=3$ 으로 설계하였다. 그림 6과 같은 이상적인 탭 선로 여파기인 경우에는 θ 값이 $\pi/4$ 에 매우 근접하는 경우를 제외하고 θ 값이 작을수록 삽입손실이 좋은 여파기 특성을 보였지만 전체적 특성은 비슷한 결과를 얻었다. 이것은 등가회로화한 단일 결합선로와 탭 선로의 S-파라미터 특성이 그림 7과 같이 θ 값이 작을수록 중심주파수를 기준으로 비슷한 특성을 나타내고, θ 값이 커질수록 중심주파수 주변에서 S-파라미터 특성이 서로 많은 차이를 내기 때문이다. 실제적인 여파기 설계의 경우에는 스텝부분과 T-junction 부분의 임피던스의 차이로 인하여 θ 값의 선택에 따라 여파기 특성이 많이 변화하였다. 즉, 높은 주파수에서 탭 선로 여파기를 설계할 경우에는 반드시 전송선로 사이의 스텝 부분

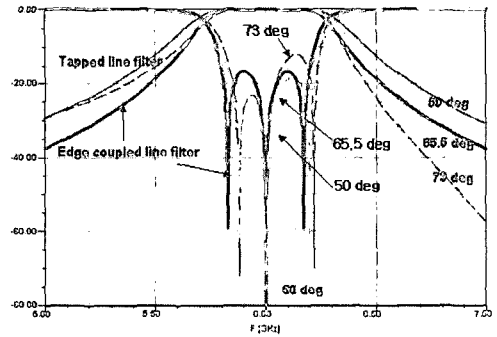


그림 6. θ 의 변화에 따른 이상적인 여파기의 특성
Fig. 6. Characteristic of ideal filters as function of θ .

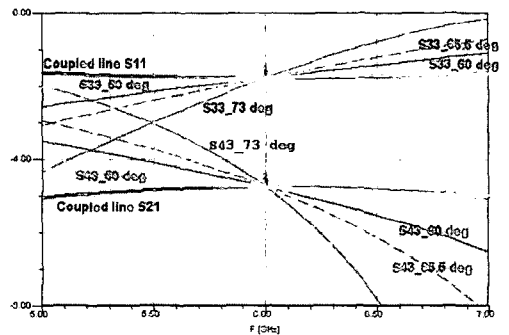


그림 7. θ 의 변화에 따른 결합선로와 탭 선로의 S-파라미터
Fig. 7. S-parameters of coupled-line and tapped-line as a function of θ .

과 T-junction 부분이 고려되어야 하며, 좋은 여파기의 특성을 나타낼 수 있는 적합한 θ 값을 구해야 한다.

대역폭이 5 %인 경우 식 (13)을 통해 θ 의 변화에 따른 Z'_1 와 Z'_2 를 구하고, Ansoft Designer™를 사용하여 시뮬레이션한 결과 그림 8과 같이 탭 선로의 Z'_1 가 약 35 Ω 이 되는 θ 값을 선택했을 때 최적화된 여파기 특성을 얻을 수 있었다. 또한 대역폭을 변화시키며 θ 의 변화에 대한 Z'_1, Z'_2 를 구해서 시뮬레이션을 한 결과 역시 Z'_1 가 약 35 Ω 인 경우에 최적임을 알았다. 이것은 θ 가 작을 경우 결합선로와 탭 선로의 S-파라미터는 유사하게 되지만 Z'_2 가 작아져서 다음 단 결합선로의 전송선 임피던스간에 큰 부정합(mismatch)이 생기게 된다. 또한 θ 가 크게 되면 다음 결합선로와 부정합은 개선되지만 결합선로와 탭 선로의 S-파라미터의 차이가 많이 나게 된다. 따라서 시뮬레이션을 통해 최적 θ 의 값은 $Z'_1 \approx 35 \Omega$ 일 때 얻을 수 있음을 확인하였다.

따라서 탭 결합선로 여파기의 설계는 식 (13)을 이용하여 다단 결합선로 여파기의 첫째단과 마지막 단의 결합선로를 등가회로로써 탭 선로로 대체하고, 여파기의 나머지 부분은 다단 결합선로 여파기와 동일하게 한다. 여기에서 여파기 설계를 간편화하기 위해 식 (8)을 가정하였는데, 만일 다른 가정을 할 경우 추가적인 변수의 발생으로 인해 여파기의 정확한 설계가 어렵게 됨을 확인하였다.

III. 여파기 설계 및 결과

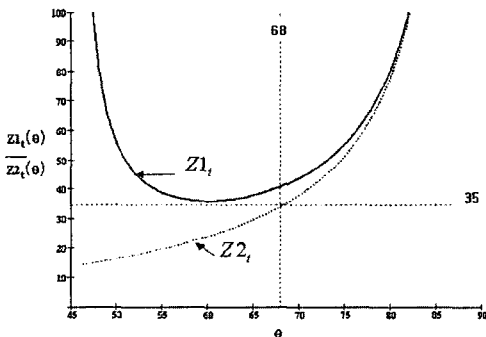


그림 8. 5 % 대역폭에서의 θ 의 변화에 따른 Z'_1, Z'_2
 Fig. 8. Z'_1 and Z'_2 as a function of θ with 5 % filter bandwidth.

다단 결합선로 여파기와 탭 선로 여파기의 비교를 위해 표 1과 같이 6 GHz에서 10 %의 주파수 대역폭을 가진 5단의 여파기를 설계하였다. 다단 결합선로 여파기를 설계하기 위하여 표 2와 같이 우모드 및 기모드 임피던스를 구한 후, Ansoft Designer™를 이용하여 각각의 결합선로 길이(P)와 폭(W), 간격(S) 등을 구하여 레이아웃(Layout)을 하고 시뮬레이션하여 결과를 얻었다. 표 2를 살펴보면 첫째단과 마지막 단의 결합선로 간격이 4 mil로서 나머지 결합선로 간격이 20 mil 이상인 것에 비교하여 매우 작은 값을 갖는다.

탭 선로 여파기를 설계하기 위해서는 식 (13)의 θ 값을 결정하여야 한다. 본 논문에서는 θ 값의 변화에 따른 여파기 특성을 시뮬레이션 하고, 여파기 특성을 최적화 시키는 실험적인 공식(empirical fitting formula)을 얻어서 θ 값을 결정하였다. θ 값은 대역폭에 따라서 달라지는데 10 %의 대역폭에서는 $\theta=60.5^\circ$ 의 값을 갖는다. 이때 $Z'_1=48.105 \Omega$ 값을 가지며 $Z'_2=32.71 \Omega$ 으로 35 Ω 에 근접한 값을 얻는다. 그림 9(a)와 (b)는 5단 결합선로 여파기와 탭선로

표 1. 6 GHz 대역통과 여파기 설계 목표
 Table 1. Design specifications of a 6 GHz bandpass filter.

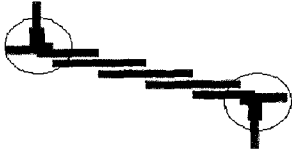
대역통과 여파기 설계 목표	
응답특성	Chebyshev 함수
중심 주파수(f_0)	6 GHz
주파수 대역폭(BW)	600 MHz
Ripple 특성	0.1 dB
여파기 단수(N)	5
기판(두께)	Rogers 4003(20 mil)

표 2. 5단 결합선로 여파기 파라미터(단위: Ω , mils)
 Table 2. Parameters for the 5th-order edge coupled-line filter(Units: Ω , mils).

	1	2	3	4	5	6
Z_{1e}	75.35	57.05	55.23	55.23	57.05	75.35
Z_{1o}	38.34	44.52	45.68	45.68	44.52	38.34
W	33	44	44	44	44	33
S	4	20	27	27	20	4
P	309	302	301	301	302	309



(a) 5단 결합선로 여파기
(a) 5th-order edge-coupled filter



(b) 탭 선로 여파기
(b) Tapped coupled-line filter

그림 9. 레이아웃
Fig. 9. Layout.

여파기의 레이아웃을 나타내고 있다. 그림 9에서 보듯이 첫째단과 마지막단의 결합선로가 탭 선로로 대체되어진 것을 볼 수 있다.

그림 9의 여파기들의 시뮬레이션 결과를 그림 10에 비교하여 나타내었다. 그림 10을 살펴보면 설계 목표와 비교하여 중심주파수가 6 GHz에서 5.85 GHz로 약간 이동하였다. 대역폭은 5단 결합선로 여파기는 500 MHz의 대역폭을 나타내고 있고 탭 선로 여파기는 570 MHz로 목표에 비해 조금씩 감소하였다.

그림 11은 설계이론과 시뮬레이션 결과를 바탕으로 제작된 5단 탭 선로 여파기이다. 사용된 기판은 Rogers 4003($E_r=3.38$, $H=20$ mil)을 사용하였고 LPKF C60 Milling machine을 이용하여 제작하였다.

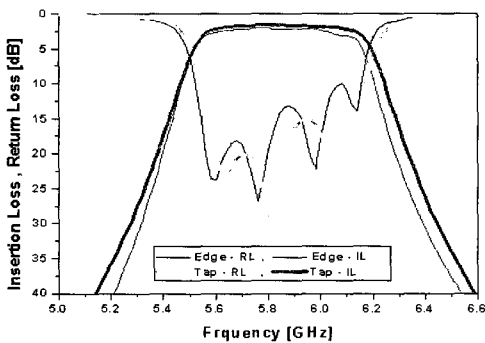


그림 10. 결합선로 여파기와 탭 선로 여파기 특성 비교
Fig. 10. Performance comparison of an edge-coupled filter with a tapped coupled-line filter.

그림 11. 제작된 6 GHz 5단 탭 선로 여파기
Fig. 11. Fabricated tapped coupled-line filter with $N=5$ ($f_0=6$ GHz).

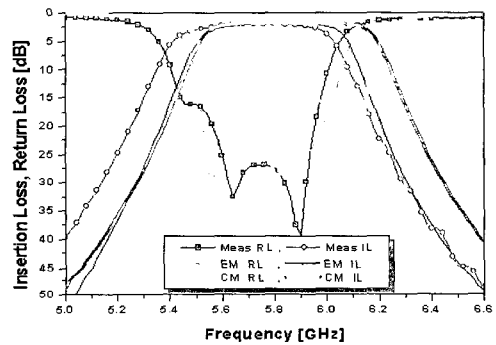


그림 12. 탭 선로 여파기의 삽입손실(IL) 및 반사손실(RL) 비교 (측정, CM, EM)
Fig. 12. Comparison of insertion loss and return loss between measurement, circuit simulation, and EM simulation.

그림 12에서는 탭 선로 여파기에 대한 측정값, 회로 시뮬레이션(CM)과 EM 시뮬레이션(EM) 결과 값을 비교하여 나타내었다. 이때 이상적인 전송선로 소자를 사용한 회로 시뮬레이션의 결과가 측정과 EM 시뮬레이션 결과에 비해 다소 차이를 보이고 있다.

본 논문에서 제시한 설계 검증을 위하여 15 GHz에서 또 하나의 탭 선로 여파기를 설계하였다. 이 여파기의 중심주파수는 15 GHz, 단수는 5단, 리플은 0.1 dB, 대역폭은 약 2 GHz로 기판은 Rogers 4003 기판($E_r=3.38$, $H=20$ mil)을 사용하여 설계하였다. 이때 시뮬레이션을 통해 확인한 최적의 탭 선로의 파라미터는 $\theta=58.7^\circ$, $Z_1=55.76 \Omega$, $Z_2=35.09 \Omega$ 로 구하여졌는데, 이 경우에도 $Z_2=35 \Omega$ 근처에서 최적의 θ 값이 결정됨을 알 수 있다. 그림 13에서는 여파기 설계에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 중심주

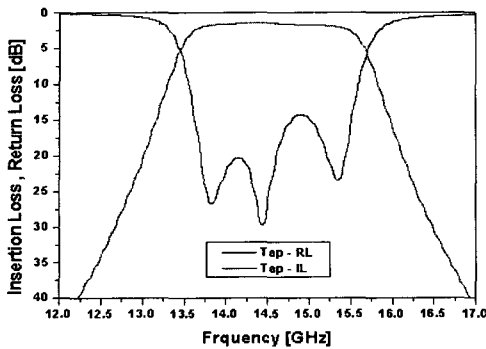


그림 13. 15 GHz 탭 선로 여파기의 삽입손실과 반사손실
 Fig. 13. Insertion loss and return loss of the apped-line filter at 15 GHz.

파수는 설계 목표치인 15 GHz로부터 약 400 MHz 떨어진 14.6 GHz로 이동이 되었지만 대역폭은 약 2 GHz로 설계 값과 거의 비슷한 결과를 얻었다. 다른 중심 주파수에서와 다른 대역폭을 가진 탭선로 여파기의 경우에도, $Z_0 = 35 \Omega$ 로 하여 θ 값을 결정하고, 나머지 Z_0 를 결정함으로써 간단히 탭선로 파라미터를 구할 수 있다.

따라서 본 논문에서 제시한 설계 과정을 통해 탭 결합선로의 파라미터를 간단하고도 비교적 정확하게 계산해 낼 수 있으며, 추가적으로 탭 선로 파라미터를 소폭으로 최적화함으로써 원하는 여파기 특성을 얻을 수 있다.

IV. 결 론

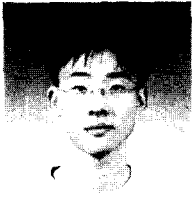
본 논문에서는 기존의 다단 결합선로 여파기와 비슷한 주파수 응답 특성을 가지며, 제작이 더 용이하고 제작 오차에 덜 민감한 탭을 사용한 결합선로 여파기를 탭 선로 등가회로를 사용하여 설계하였다. 등가회로를 통해 얻은 수식을 이용하여 탭 선로 여파기 파라미터를 쉽게 얻을 수 있었으며, 이를 6 GHz와 15 GHz 탭 선로 여파기 설계에 적용하였고, 그 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 또한 6 GHz 여파기를 제작하고 측정한 결과 설계 목표와 측정 결과가 거의 일치하였다. 따라서 본 논문에서는 20 GHz 이하의 주파수까지 비교적 정확히 탭 선로 여파기를 설계할 수 있는 새로운 방법을 보여주

었다. 20 GHz 이상의 높은 주파수 대역에서도 본 논문에서 제시한 방법으로 탭 선로 결합선로 여파기의 파라미터를 얻은 후, 이 파라미터를 중심으로 여파기의 특성을 쉽게 최적화할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, 1998.
- [2] 박준석, "초고주파 필터 최신 기술동향", 전자파 기술, vol. 14, no. 3, pp. 1-2, 2003년 7월.
- [3] E. G. Cristal, "Tapped-Line Coupled Transmission Lines with Applications to Interdigital and Combline Filters", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 23, no. 12, pp. 1007-1012, Dec. 1975.
- [4] J. S. Wong, "Microstrip tapped-line filter design", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 27, no. 1, pp. 44-50, Jan. 1979.
- [5] C. Y. Ho, J. H. Weidman, "Improved design of parallel coupled line filters with tapped input/output", *Microwave Journal*, Oct. 1983.
- [6] S. Caspi, J. Adelman, "Design of combline and interdigital filters with tapped-line input", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 36, no. 4, pp. 759-763, Apr. 1988.
- [7] S. B. Cohn, "Parallel-coupled transmission-line resonator filtes", *IRE Transaction on Microwave Theory Tech.*, vol. 6, pp. 223-232, Apr. 1958.
- [8] G. Matthaei, L. Young and E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structure*, Artech House, 1980.
- [9] J. S. Hong, M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, John Wiley & Sons, 2001.
- [10] R. Mongia, I. Bahl and P. Bhartia, *RF and Microwave Coupled-Line Circuits*, Artech House, 1999.
- [11] K. W. Kim, C. H. Park and S. J. Han, "A new design procedure of tapped coupled-line filters", *IEEE AP Symp. Dig.*, Monterey, CA, USA, vol. 3, pp. 2863-2866, Jun. 2004.

우 동 식



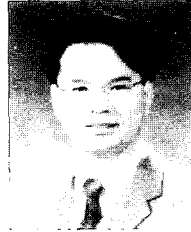
2002년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)

2004년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)

2004년 3월~현재: 경북대학교 전자공학과 박사과정

[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 회로 및 시스템 설계, 마이크로파 발진기 설계

김 강 욱



1985년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)

1987년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)

1996년 7월: University of California, Los Angeles. 전자공학과 (공학박사)

1987년~1990년: 한국전기연구소 연구원

1996년~1998년: University of California Los Angeles. post-doctor 연구원

1998년~1999년: P-Com, Inc. 마이크로파 설계 연구원

1999년~2001년: Narda DBS Microwave, RF 설계 연구원

2001년 9월~현재: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 조교수

[주 관심분야] 마이크로파 통신시스템 및 서브시스템, 마이크로파 및 밀리미터파 부품 및 패키징, 무선통신용 안테나, 전자기 상호작용 및 전자기 수치해석