

개방스텝을 갖는 계단 임피던스 저역통과 필터의 해석

Analysis of Stepped Impedance Lowpass Filter with Coupled Open Stubs

김성일 · 기철식 · 박익모 · 임한조

Sung-Il Kim · Chul-Sik Kee · Ikmo Park · H. Lim

요 약

두 스텝이 커플된 마이크로스트립 계단 임피던스 저역통과 필터의 전송선로의 폭과 edge 캐패시턴스의 변화에 따른 삽입손실 특성을 연구하였다. 이 구조에서 커플링효과는 전송선로의 폭과 스텝의 갭 간격에 의존하며 적절한 조건에서 3개의 감쇄폴이 생겨 넓은 저지대역을 가진다. 또한, 두 스텝 사이에 존재하는 edge 캐패시턴스는 3개의 감쇄폴을 가지기 위해서 중요한 역할을 한다. 이것을 [S] 파라미터를 구하여 확인했다.

Abstract

In this paper, we have studied the dependence of insertion loss of a microstrip stepped impedance lowpass filter with coupled open stubs. Coupling mechanisms in the filter depend not only on the transmission line width of the filter but also the gap width of coupled open stubs and three attenuation poles are created with the proper conditions. Also edge capacitance between open stubs play an important role in having three attenuation poles. We verify the results by obtaining [S] matrices.

Key words : Stepped Impedance Lowpass Filter

I. 서 론

Shunt 스텝과 계단 임피던스 라인을 이용한 마이크로스트립 저역통과 필터는 이동통신과 위성통신 시스템에서 spurious와 고조파를 제거하기 위해서 많이 사용되고 있다. 그러나 Butterworth나 Chebyshev 특성을 가지는 필터는 완만한 주파수 차단(cutoff) 응답을 가지므로 좋은 응답을 얻기 위해서는 필터의 차수가 높아져야 한다. 이는 필터의 크기를 크게 할 뿐만 아니라 삽입손실을 증가시킨다.

계단 임피던스 공진기 (Stepped Impedance Resonator: SIR)를 이용한 대역통과 필터에 대한 연구가 많이 있어 왔다^{[9]~[11]}. SIR은 임피던스 비에 따라,

또는 라인을 서로 커플시켜서 크기를 줄일 수 있다^{[9],[10]}. 최근 SIR을 이용하여 저역통과 필터의 크기를 줄이고자 하는 연구가 제안되었다^[1]. 제안된 계단 임피던스 (Stepped impedance) 저역통과 필터는 소자의 크기를 줄이면서도 급격한 cutoff 특성을 얻을 수 있으나 저지대역 중간에 spurious 픽이 생기거나 2개의 감쇄폴을 가지므로 저지대역 폭이 좁다^{[1]~[3]}. 그러나 필터의 구조변수를 잘 조정하면 3개의 감쇄폴이 나타나 저지대역 폭을 크게 넓힐 수 있다. 본 논문에서는 이 구조에 대한 [S] 파라미터를 구하여 계단 임피던스 저역통과 필터를 분석하였다.

II. 본 론

아주대학교 전자공학부 (School of Electrical and Computer Engineering, Ajou University)

· 논문 번호 : 20020909-110

· 수정완료일자 : 2002년 10월 17일

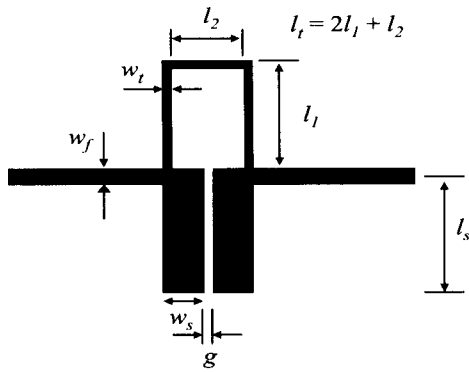


그림 1. 개방스텝을 갖는 계단 임피던스 저역통과 필터의 모습
 Fig. 1. Stepped impedance lowpass filter with coupled open stubs.

그림 1은 계단 임피던스를 가지는 저역통과 필터를 보여주고 있다. 두 라인 사이의 간격이 가까워지면 전자기파의 상호 간섭이 커져서 커플링(coupling) 현상이 생긴다. 이 커플링 효과를 이용하기 위해서 그림과 같이 두 스텝의 간격(g)을 매우 가깝게 하였다. 시뮬레이션 결과에 의하면 이 구조에서 스텝의 길이(l_s)는 $\lambda_g/4$ 가 되어야 하고 전송선로의 길이(l_t)는 $\lambda_g/2$ 가 되어야 넓은 저지대역을 얻을 수 있다. 만약 이 조건이 만족되지 않으면 저지대역에 spurious 픽이 생겨서 저지대역 폭이 좁아진다^[1].

일반적으로, 두 라인 사이에 커플링이 존재하면 한 개의 uncoupled 모드 (1개의 감쇄폴)에서 두 개

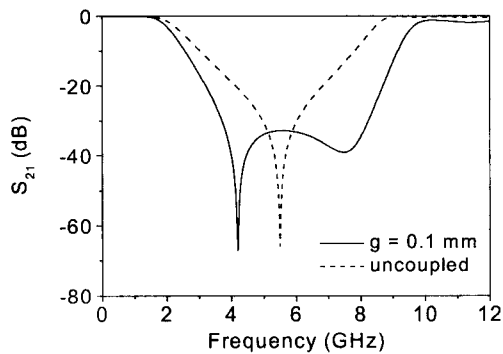


그림 2. $g = 0.1$ mm와 uncoupled 모드에서의 시뮬레이션한 삽입손실
 Fig. 2. Simulated insertion loss with $g = 0.1$ mm and uncoupled mode.

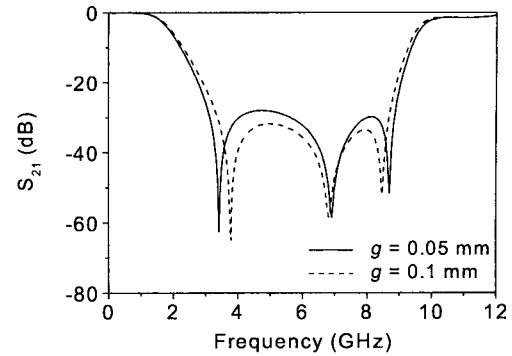


그림 3. w_t 를 고정하고 g 를 변화시킬 때 시뮬레이션한 삽입손실
 Fig. 3. Simulated insertion loss when g is changed and w_t fixed.

의 기, 우 모드 (2개의 감쇄폴)로 나뉘어진다. 이것은 커플링이 증가할 때 기, 우 모드 특성 임피던스의 차이가 커지기 때문이다. 그림 2는 두 스텝 사이에 상호간섭이 없을 때 (uncoupled 모드)와 갭 간격(g)을 0.1 mm로 하였을 때 삽입손실을 보여준다. 그림에서 스텝의 갭 간격(g)가 좁아지면 감쇄폴이 1개에서 2개로 늘어나 저지대역이 크게 넓어진다. 시뮬레이션과 제작에 사용된 기판은 RT/Duroid 6010이며 기판 두께 $h = 0.635$ mm이고 기판의 유전상수는 $\epsilon_r = 10.2$ 이다. 시뮬레이션에서 사용한 구조변수는 폭 $w_s = 1.2$ mm, $w_f = 0.6$ mm, $w_t = 0.2$ mm이고 길이 $l_1 = 11.3$ mm, $l_s = 4.3$ mm이다. 첨자 s, t, f 는 각각 스텝, 전송선로와 피드라인을 의미한다. 시뮬레이션은 모멘트 방식에 바탕을 둔 Ensemble을 이용하였다.

그림 3은 w_t 를 0.1 mm로 고정하고 g 가 0.1 mm와 0.05 mm일 때 삽입손실을 보여준다. 두 스텝이 커플되어 있기 때문에 2개의 감쇄폴이 존재할 것이라고 예상하였으나 특정한 조건에서 특이하게도 3개의 감쇄폴이 생긴다. 그림 3은 w_t 가 고정되어 있고 g 가 더 좁아질 때 3개의 감쇄폴 중에서 위, 아래 폴의 간격이 중심폴을 중심으로 넓어지는 것을 보여준다. 따라서 위, 아래 폴은 두 스텝 사이의 커플링이 증가하여 생긴 것임을 알 수 있다.

계단 임피던스 저역 필터에서 두 스텝 사이에 커플링이 존재하면 그림 3과 같이 위, 아래 감쇄폴의 간격이 변하지만 또한 전송선로의 특성 임피던스(w_t

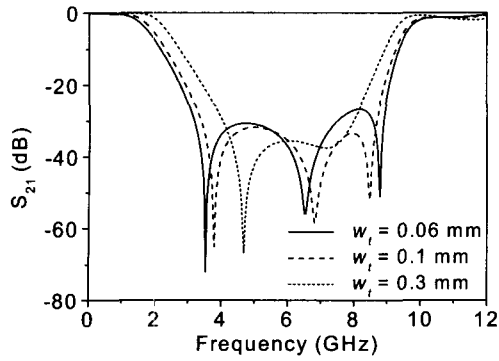


그림 4. $g = 0.1$ mm이고, w_1 가 변할 때 시뮬레이션한 삽입손실

Fig. 4. Insertion losses simulated with various w_1 and $g = 0.1$ mm.

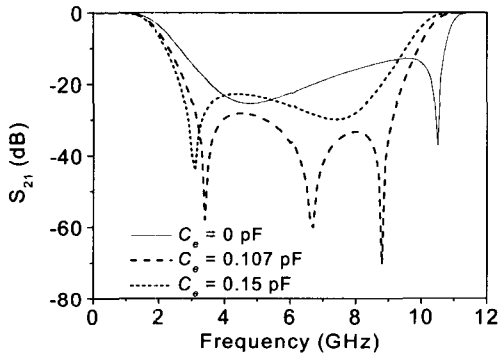


그림 5. C_e 가 0 pF, 0.107 pF 그리고 0.15 pF일 때 ADS로 계산한 삽입손실

Fig. 5. Simulated results by using ADS when C_e is 0 pF, 0.107 pF, and 0.15 pF.

의 두께)가 변할 때도 삽입손실이 크게 변한다. 그림 4는 g 를 0.1 mm로 고정하고, 전송선로의 폭(w_1)만 변화시킬 때 삽입손실을 보여준다. 즉 g 를 0.1mm로 고정시키고 w_1 가 0.3 mm에서 0.1 mm로 좁아질 때 위쪽의 감쇄폴이 2개로 갈라져 총 3개의 감쇄폴이 생기고 w_1 가 0.06 mm으로 더 얇아지면 그림 3과 같이 위, 아래 감쇄폴의 간격이 더 늘어난다. 그러므로 위, 아래 감쇄폴의 간격은 g 뿐만 아니라 w_1 에도 의존한다.

두 스텝의 끝에 존재하는 edge 캐패시턴스 (C_e)가^[5] 삽입손실에 어떤 영향을 미치는지를 알아보기 위해서 회로 시뮬레이터인 ADS를 사용하여 g 를 0.1 mm로 고정시키고 edge 캐패시턴스를 변화시킬 때

삽입손실을 그림 5에 나타내었다. ADS로 시뮬레이션할 때 스텝의 끝에 존재하는 C_e 는 캐패시터를 추가하여 계산하였다. C_e 가 변할 때 삽입손실은 그림과 같이 크게 변한다. 즉 C_e 가 0 pF일 때의 삽입손실은 실선과 같고 C_e 가 계속 증가하면 긴 점선과 같이 3개의 감쇄폴이 생기고 다시 짧은 점선의 모습으로 변한다. 즉, 넓고 깊은 저지대역을 가지기 위해서는 C_e 의 값이 중요하다. C_e 는 스텝의 간격(g)와 넓이(w_1)에 의존하므로^[5] 다른 구조변수는 고정하고 스텝 끝 부분의 갭 간격을 조절하여 감쇄폴의 개수를 조절할 수 있다.

계단 임피던스 저역 필터의 특성을 수식적으로 알아보기 위해서 [S] 파라미터들을 구하였다. 이 때 $\lambda_g/4$ 길이의 두 스텝은 커플된 마이크로스트립 라인으로 모델링하였고, $\lambda_g/2$ 길이의 전송라인은 직선의 전송선로로 모델링하였다. 먼저, 두 부분에 대한 [Y] 파라미터들을 구하고 이것을 하나의 [Y] 파라미터로 합한 후 [S] 파라미터들로 변환하여 아래와 같은 수식을 얻었다^{[7],[8]}.

$$S_{21} = \frac{iy_f(y_o \tan \beta_o l_s - y_e \tan \beta_e l_s - 2y_i \csc \beta_e l_i)}{\Delta y} \quad (1)$$

$$S_{11} = S_{22} = \frac{\Sigma}{\Delta y} \quad (2)$$

$$S_{12} = S_{21}$$

$$\begin{aligned} \Sigma = & y_f^2 - y_i^2 + y_i [y_o \tan \beta_o l_s (\csc \beta_e l_i - \cot \beta_e l_i) \\ & - y_e \tan \beta_e l_s (\csc \beta_e l_i + \cot \beta_e l_i)] \\ & + y_e y_o \tan \beta_e l_s \tan \beta_o l_s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta y = & y_f^2 + y_i^2 + y_i [y_o \tan \beta_o l_s (\cot \beta_e l_i - \csc \beta_e l_i) \\ & + y_e \tan \beta_e l_s (\cot \beta_e l_i + \csc \beta_e l_i)] \\ & - y_o y_e \tan \beta_o l_s \tan \beta_e l_s \\ & + iy_f (y_o \tan \beta_o l_s + y_e \tan \beta_e l_s - 2y_i \cot \beta_e l_i) \end{aligned}$$

여기서 y , β , l 은 각각 특성 어드미턴스, 전파상수와 물리적인 길이를 나타낸다. 그리고 첨자인 o , e 는 각각 기, 우 모드를 나타낸다. 여기서 주의해야 할 것은 위 수식에는 커플된 두 스텝의 끝에 존재하는 edge 캐패시턴스가 포함되지 않았다는 것이다^[5].

식 (1)로부터 얻은 삽입손실은 edge 캐패시턴스가 포함되지 않았기 때문에 그림 5의 실선 ($C_e = 0$ pF)과 비슷한 모습을 가진다. 식 (1)에서 위, 아래

감쇄폴은 분자항이 결정한다. 즉 앞에서 이야기 한 것과 같이 커플된 라인의 기, 우 모드 특성 어드미턴스(y_e, y_o)와 전송선로의 어드미턴스(y_i)가 위, 아래 감쇄폴의 위치를 결정한다. 만약 w_i 가 넓어지면 수식 (1)의 분자항 중 전송선로의 특성 어드미턴스 값이 커져서 커플링 효과가 사라진다. 마이크로스트립 구조에서 커플된 두 라인이 있을 때 모든 전자기파가 기판 안에 존재하지 않기 때문에 특성 임피던스 뿐만 아니라 전파상수 (phase constant)도 기, 우 모드로 나뉜다. 만약 특성 임피던스만 기, 우 모드로 나뉜다면 (stripline 구조) 식 (1)로 구한 삽입손실은 중간폴을 중심으로 위, 아래 폴이 등간격으로 위치한다. 그러나 마이크로스트립에서 $C_c = 0$ pF일 때 삽입손실은 그림 5의 실선과 같은데 이것은 마이크로스트립 구조에서 두 라인이 커플되면 전파상수 (phase constant)도 기, 우 모드로 나뉘기 때문이다. 위, 아래 감쇄폴은 커플링에 의한 것이고 stripline 구조에서 중간폴의 주파수는 uncoupled 모드와 정확히 일치했다. 마이크로스트립에서 그림 1의 구조를 계산하면 그림 2와 같이 3 dB 저지대역이 넓어지나 stripline에서 동일한 구조를 계산할 경우 3 dB 저지대역 폭은 거의 같았으며, 이때 마이크로스트립에서 저지대역이 넓어지는 것은 기, 우 모드 전파상수 때문임을 알 수 있었다. 마이크로스트립 라인에서 두 라인이 커플되어 있을 때 기, 우 모드 주파수는 다음과 같이 구할 수 있다⁴⁾.

$$f_{lower}^2 = \frac{f_0^2}{1+k}, \quad f_{upper}^2 = \frac{f_0^2}{1-k}. \quad (3)$$

여기서 k, f_0 는 각각 커플링 계수와 uncoupled 모드의 주파수를 나타낸다.

그림 6은 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 보여준다. 이때 갭 간격(g)는 0.05 mm이고 스텝의 폭(w_s)은 0.08 mm이며 그 외의 구조 변수는 앞과 같다. 두 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있고 앞에서 언급한 것과 같이 3개의 감쇄폴을 분명하게 구분할 수 있다. 측정은 HP8510C 망 분석기를 이용하였다. 20 dB를 기준으로 볼 때 저지대역은 2.48 GHz에서 8.65 GHz까지이고 3 dB 통과 대역폭은 DC부터 1.64 GHz까지이며 이 때의 반사손실은 30 dB 이하이다.

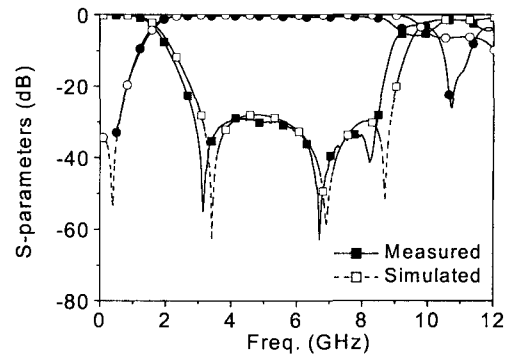


그림 6. $g = 0.05$ mm, $w_s = 0.08$ mm일 때의 시뮬레이션 결과와 실험 결과

Fig. 6. Simulated and measured results with $g = 0.05$ mm, $w_s = 0.08$ mm.

III. 결 론

계단 임피던스 저역통과 필터에서 비록 두 스텝이 커플되어 있어도 3개의 감쇄폴이 생기며 또한 전송선로와 커플된 스텝의 기, 우 모드 특성 임피던스 (z_i, z_o, z_e)가 위, 아래 감쇄폴의 위치를 결정한다. 또한 스텝의 갭 넓이(g)가 고정되어 있을 때 edge 캐패시턴스가 감쇄폴의 개수와 모습을 결정한다. 그러므로 계단 임피던스 저역통과 필터가 넓은 저지대역을 가지기 위해서는 갭 간격(g), 스텝의 두께(w_s)의 선택이 중요하다.

참 고 문 헌

- [1] L.-H. Hsieh, K. Chang, "Compact lowpass filter using stepped impedance hairpin resonator", *Electron. Lett.*, vol. 37, no. 14, pp. 899- 900, 2001.
- [2] D. H. Lee, Y. W. Lee, J. S. Park, D. Ahn, H. S. Kim and K. Y. Kang, "A design of the novel coupled line low-pass filter with attenuation poles", *IEEE MTT-S Digest*, pp. 1127-1130, 1999.
- [3] M.-W. Kwak, S. K. Kang, K. Y. Kang, D. Ahn, J. S. Suh and S. H. Kim, "Design of high-temperature superconducting low-pass filter for broad-band harmonic rejection", *IEEE Trans. Appl. Superconduc.*, vol. 11, no. 2, pp. 4023-4026, 2001.

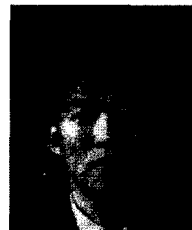
- [4] R. Mongia, I. Bahl and P. Bhartia, *RF and Microwave Coupled-line Circuits*, Artech House, Ch. 4-5, 1999.
- [5] A. Gopinath, C. Gupta, "Capacitance parameters of discontinuities in microstriplines", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-26, pp. 831-836, 1978.
- [6] R. Garg, I. J. Bahl, "Characteristics of coupled microstriplines", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-27, pp. 700-705, 1979.
- [7] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Wiley, pp. 206-212, 1998.
- [8] G. I. Zysman, A. K. Johnson, "Coupled transmission line networks in an inhomogeneous dielectric medium", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-17, pp. 753-759, 1969.
- [9] M. Makimoto, R. Yanashita, *Microwave Resonators and Filters for Wireless Communication*, Springer, 2001.
- [10] S.-Y. Lee, C.-M. Tsai, "New cross-coupled filter design using improved hairpin resonators", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 48, pp. 2482-2490, 2000.
- [11] J.-S. Hong, M. J. Lancaster, "Theory and experiment of novel microstrip slow-wave open-loop resonator filters", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 45, pp. 2258-2365, 1997.

김 성 일



1993년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
 1998년 8월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
 1999년 3월~현재: 아주대학교 전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] Microwave Photonic bandgap (PBG) 구조, 초고주파 수동 소자

박 익 모



1984년: 뉴욕 주립대학교 전기전자공학과 (공학사)
 1989년: 일리노이 대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 1994년: 일리노이 대학교 전기전자공학과 (공학박사)
 1996년~현재: 아주대학교 부교수
 [주 관심분야] EMI & EMC, 안테나 설계, 수치 해석

기 철 식



1992년 2월: 부산대학교 물리교육과 (이학사)
 1996년 2월: KAIST 물리학과 (이학석사)
 2000년 2월: KAIST 물리학과 (이학박사)
 2000년 8월~현재: 아주대학교 연

구교수
 [주 관심분야] Photonic crystals, transparent metal

임 한 조



1971년 2월: 서울대학교 문리과대학 물리학과 (이학사)
 1974년 2월: 서울대학교 대학원 물리학과 (이학석사)
 1982년: Montpellier II 대학 (USTL : 불) (이학박사)
 1975년 9월~현재: 아주대학교 전

자공학과 교수
 [주 관심분야] 결합 및 계면물리, III-V 족 반도체물성, III-V 족 반도체 소자, Photonic Crystal