감쇄극 인버터를 이용한 반파장 Partial H-Plane 여파기

Half Wavelength Partial H-Plane Filter with Inverters having Attenuation Poles

김 동 진 · 이 정 해

Dong-Jin Kim · Jeong-Hae Lee

요 약

본 논문에서는 차단 영역 도파로로 구현된 협소한 형태의 H-plane slot을 이용하여 다수의 감쇄극을 가지는 반파장 partial H-plane filter를 제안하였다. 협소한 형태의 H-plane slot은 대역 통과 필터의 어드미턴스 인버터 역할을 하는 동시에 특정 주파수에서 공진을 발생시킨다. 따라서 제안된 필터는 어떠한 부가적인 coupling이나 추가적인 구조의 변형 없이 저지 대역에서 감쇄극을 가지는 간단한 구조로 구현되고, 감쇄극 수는 인가되는 slot의 수만큼 발생된다. 제안된 필터는 일반적인 도파로의 1/4의 단면적을 가지는 partial H-plane waveguide로 설계되므로 소형화에 유리하다. 저지 대역에서 각각 4개와 5개의 감쇄극을 갖는 3단과 4단 반파장 대역 통과 필터를 H-band에서 설계하여, 이론적 주파수 응답 특성이 실험적 응답 특성과 잘 일치함을 확인하였다.

Abstract

This paper presents half wavelength partial H-plane filters with multiple attenuation poles using narrow H-plane slot of evanescent waveguide. The narrow H-plane slot operates as an admittance inverter of the bandpass filter and, simultaneously, generates an attenuation pole at particular frequency. Therefore, proposed filters with attenuation poles are simply implemented without any additional coupling and extra modification of the structure. The number of attenuation poles of the filters equals to that of the H-plane slots. Moreover, proposed filters are compact waveguide filter since ones are embodied by partial H-plane waveguide which has 1/4 cross section of conventional waveguide. The third and fourth-order half wavelength filters having 4 and 5 attenuation poles, respectively, are designed in H-band and their frequency responses are confirmed by simulation and measurement.

Key words : Partial H-Plane Filter, Admittance Inverter with Attenuation Pole, Harmonic Suppression

Ⅰ. 서 론

감쇄극 특성을 가지는 직사각 도파로형 대역 통과 필터는 매우 우수한 저지 대역 특성을 요구하는 고출력 시스템에 널리 이용되고 있다. 이러한 감쇄극 특성의 대역 통과 필터는 일반적으로 접은 형태의 도파로를 이용한 cross-coupling 구조나 소스와 부하 사이의 직접 결합 구조 또는 도파로의 추가적인 특정한 구조를 인가하여 구현된다[1]~[3]. 이러한 대역 통과 필터는 우수한 저지 대역 특성을 만족하지만 인위적으로 접힌 형태를 요구하거나 정형화된 도파로 이외의 추가적인 구조의 변형을 피할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 부가적인 coupling이나 특수한 구조의 변형 없이 감쇄극 특성을 갖는 반파장 공진 partial H-plane 필터를 제안하였다.

제안된 대역 통과 필터의 차단 영역 도파로는

「본 연구는 서울시 산학연 협력사업 지원으로 수행되었음.」

홍익대학교 전자정보통신공학과(Department of Electronic Information and Communication Engineering, Hongik University)

· 논 문 번 호 : 20071130-03S

· 수정완료일자 : 2008년 1월 29일

partial H-plane 도파로에 삽입된 메탈 평판에 좁은 slot 모양으로 구현되고, 이는 대역 통과 필터의 어드미턴스 인버터 역할을 하는 동시에 감쇄 공진기로서 동작하게 된다[4],[5]. 따라서 제안된 반파장 partial H-plane 필터는 저지 대역에서 어드미턴스 인버터의 수만큼 감쇄극 특성을 가지게 되고, 이는 필터의 저지 대역 특성을 향상시키게 된다. 더욱이 제안된 필터는 기존의 도파로보다 1/4로 축소된 partial H-plane 도파로로 구현되어 소형 도파로 필터의 설계가 가능하다[6],[7]. 본 논문에서는 감쇄극 특성을 가지는 partial H-plane 도파로의 어드미턴스 인버터를 이용하여 3단과 4단 공진기 대역 통과 필터를 설계하였다. 4개의 H-plane slot으로 구현되는 3단 대역 통과 필터는 중심 주파수의 위와 아래 주파수에서 각각 2개의 감쇄극을 나타내고 매우 우수한 skirt 특성을 갖는다. 또한, 5개의 감쇄극을 가지는 4단 필터는 어드미턴스 인버터인 H-plane slot의 감쇄극이 spurious 공진이 일어나는 주파수에 위치하여 일반적인 반파장 대역 통과 필터에 비해 spurious 응답 특성이 향상되고, 실제 제작을 통하여 그 응답 특성을 확인하였다.

Ⅱ. 감쇄극 특성을 가지는 H-plane Slot

제안된 필터에 적용되는 차단 영역 도파로는 partial H-plane 도파로의 메탈 평판에 좁은 모양의 H-plane slot으로 구현되고, 이는 대역 통과 필터의 open-ended 차단 도파로의 역할을 하는 어드미턴스 인버터로 동작한다. 그림 1은 감쇄극 특성을 가지는 H-plane slot의 단위 셀과 이를 어드미턴스 인버터로 표현한 π-등가회로를 나타낸다. 일반적으로 등가회로의 서셉턴스 B_b는 inductor 성분으로 해석되지만 H-plane slot의 너비(w)가 좁거나 깊이(s)가 깊어지면 서셉턴스 B_b는 L과 C의 병렬 구조로 표현되고 이는 대역 통과 필터의 인버터에 의한 감쇄 공진이 일어남을 의미한다. 이러한 좁은 형태의 H-plane slot으로 구현된 partial H-plane 필터는 대역 통과 필터의 인버터 자체가 감쇄 공진을 발생하게 되므로 어떠한 부가적인 coupling이나 추가적인 구조의 변형 없이 저지 대역 부근에서 감쇄극 특성을 나타낼 수 있고, 그 감쇄극 수는 설계된 필터의 인버터 수에 의해 결정된다. 그림 2는 H-plane slot의 너비(w)와 깊이(s)에 따

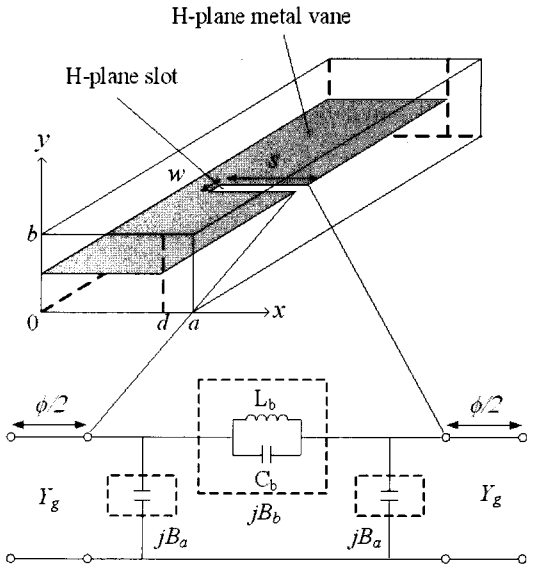

그림 1. 제안된 필터의 H-plane slot 단위 셀과 어드미턴스 인버터 등가회로

Fig. 1. Unit-cell of H-plane slot and equivalent circuit of admittance inverter.

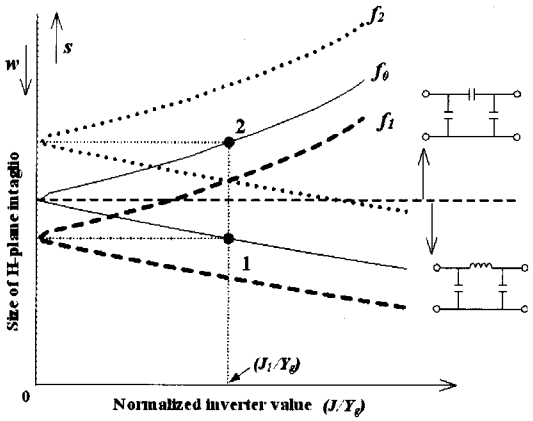

그림 2. 특정 주파수에서 해석된 H-plane slot의 정규화된 인버터 값 곡선($f_2<f_0<f_1$).

Fig. 2. Normalized inverter value of H-plane slot at the particular frequency($f_2<f_0<f_1$).

른 정규화된 어드미턴스 인버터 값을 특정한 주파수에서 해석한 것으로 이때 정규화된 인버터 값과 그에 따른 전기적 길이는 식 (1)과 (2)로 계산된다[8].

$$\frac{J}{Y_g}=\left|\tan\left(-\frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{2B_b}{Y_g}+\frac{B_a}{Y_g}\right)+\frac{1}{2}\tan^{-1}\frac{B_a}{Y_g}\right)\right| \quad (1)$$

$$\phi = -\tan^{-1}\left(\frac{2B_b}{Y_g}+\frac{B_a}{Y_g}\right)-\tan^{-1}\frac{B_a}{Y_g} \quad (2)$$

여기서 Y_g는 partial H-plane 도파로의 파동 어드미턴스를 나타내고, 각 서셉턴스 성분은 H-plane slot 크기 즉, 너비(w)와 깊이(s)에 의해 결정된다. 만약 서셉턴스 B_b가 0이면 정규화된 인버터 값은 식 (1)에 의해 0이 되고, 이는 해석된 특정 주파수에서 감쇄 공진이 일어나게 됨을 의미한다. 또한, 그림 2의 f_0에서 공진을 나타내는 H-plane slot 크기보다 깊어지거나 좁아지게 되면 해석된 주파수 f_0에서 서셉턴스 B_b는 capacitor 성분인 양수 값을 가지게 되고, 반대로 slot의 깊이(s)가 작아지거나 너비(w)가 넓어지면 B_b는 inductor 성분인 음수 값을 가지게 된다. 이러한 H- plane slot의 단위 셀을 f_0보다 높은 주파수인 f_1에서 해석하게 되면 그림 2에서 확인할 수 있듯이 그 정규화된 인버터 값의 곡선은 아래로 이동하게 되고, 이는 slot의 깊이(s)가 작아지거나 너비(w)가 커지면 그 H-plane slot에 의한 감쇄 공진 주파수가 높아지게 됨을 의미한다. 마찬가지로 f_0보다 낮은 주파수 f_2에서는 인버터 값의 곡선이 위로 이동하게 되고 따라서 slot이 깊어지거나 좁아지게 되면 공진 주파수는 낮아지게 된다. 즉, H-plane slot의 구조가 깊어지거나 좁아지게 되면 상대적으로 낮은 주파수에서 감쇄 공진이 발생하게 되고, 반대로 구조의 깊이(s)가 작아지거나 너비(w)가 커지게 되면 상대적으로 더 높은 주파수에서 공진이 발생하는 경향성을 나타내게 된다.

이러한 H-plane slot은 중심 주파수 f_0에서 대역 통과 필터 설계에 요구되는 특정한 인버터 값 (J/Y_g)에 대응되는 slot의 크기를 그림 2와 같이 2가지 경우로 결정할 수 있다. 이는 서로 다른 크기의 차단 영역 도파로인 2개의 H-plane slot을 동일한 값을 가지는 대역 통과 필터의 인버터로 구현할 수 있음을 의미하며, 따라서 중심 주파수(f_0)의 위(f_1), 아래(f_2) 주파수 영역에서 각각 감쇄극을 갖는 대역 통과 필터를 설계할 수 있다.

Ⅲ. 감쇄극 대역 통과 필터의 설계

그림 3은 제안된 partial H-plane 필터의 구조를 나타낸다. 감쇄극 특성을 갖는 필터는 open-ended 차단

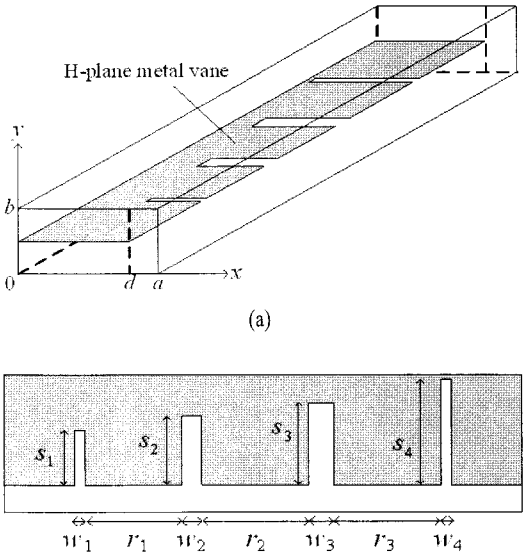

그림 3. 감쇄극 특성을 갖는 partial H-plane 필터의 구조

Fig. 3. Structure of partial H-plane filter with attenuation poles.

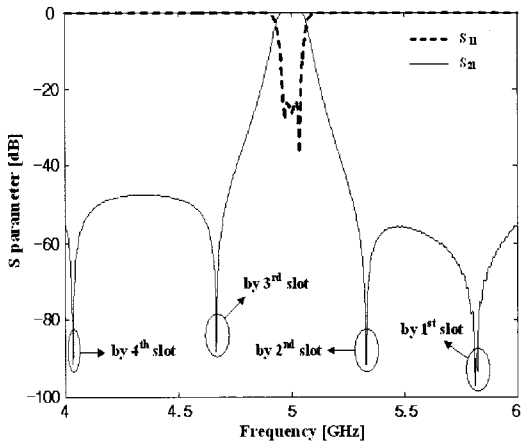

그림 4. 4개의 감쇄극을 갖는 3단 partial H-plane 필터의 시뮬레이션 응답 특성

Fig. 4. Simulated responses of third-order partial H-plane filter with 4 attenuation poles.

도파로인 좁은 형태의 H-plane slot을 이용하여 반파장 공진기로 설계되었다. 일반적으로 n단 직접 결합형 대역 통과 필터는 n개의 반파장 공진기와 n+1개의 차단 영역 도파로로 구현되므로 partial H-plane 필터 역시 차단 영역 도파로인 n+1개의 H-plane slot이

요구된다. 또한, 제안된 필터는 H-plane slot이 대역 통과 필터의 인버터 역할을 하는 동시에 각각의 slot이 특정한 주파수에서 감쇄 공진을 발생하므로 저지 대역에서 인가된 slot 수만큼의 감쇄극 특성을 나타낼 수 있고, 따라서 어떠한 추가적인 cross-coupling이나 부가적인 구조의 변형 없이 다수의 감쇄극을 갖는 우수한 저지 대역 특성의 대역 통과 필터를 설계할 수 있다.

먼저 통과 대역 부근에서 저지 대역 특성이 우수한 필터의 설계를 위하여 중심 주파수 5 GHz, 0.01 dB equal ripple, 2 %의 비 대역폭을 가지는 3단 대역 통과 필터를 설계하였다. 설계된 필터는 3단 공진이므로 H-plane slot의 수는 모두 4개로 구현되었고, 그 수치를 표 1에 나타내었다. 이때 대역 통과 필터의 정규화된 인버터 값과 공진기 길이는 식 (3), (4)로 계산된다[8].

$$\frac{J_{01}}{Y_g}=\sqrt{\frac{\pi\omega_\lambda}{2g_0g_1\omega_n}},\qquad \frac{J_{i,i+1}}{Y_g}=\frac{\pi\omega_\lambda}{2\omega_n}\frac{1}{\sqrt{g_ig_{i+1}}}$$
$$\frac{J_{n,n+1}}{Y_g}=\sqrt{\frac{\pi\omega_\lambda}{2g_ng_{n+1}\omega_n}},\qquad \omega_\lambda=\frac{\lambda_{g1}-\lambda_{g2}}{\lambda_{g0}} \tag{3}$$

$$r_k=\frac{\lambda_{g0}}{2\pi}\left[\pi+\frac{1}{2}(\phi_j+\phi_{j+1})\right] \tag{4}$$

여기서 g_0, g_1, …, g_{n+1}은 저역 통과 필터에 대한 Chebychev equal-ripple 기본 소자 값을 나타내고, ω_n은 정규화된 차단 주파수를 의미한다. 또한, λ_{g0}, λ_{g1}, λ_{g2}는 각각 중심 주파수, 통과 대역의 양쪽 한계 주파수에 대한 파장을, ϕ_j는 정규화된 인버터의 전기적 길이를 나타낸다. 이상의 설계 식을 만족하기 위해서는 대부분의 대역 통과 필터가 대칭 구조로 구현이 되지만, 제안된 필터의 경우 그림 2의 H- plane slot의 정규화된 인버터 값 해석에서 확인한 것과 같이 동일한 인버터 값에 대하여 서로 다른 크기를 가지는 차단 도파로를 선택할 수 있으므로 비대칭 구조의 대역 통과 필터로 설계할 수 있다. 따라서 제안된 필터는 서로 다른 크기를 가지는 4개의 H- plane slot으로 구현되고, 이에 따른 4개의 감쇄극을 중심 주파수의 아래, 위에 각각 2개씩 위치하도록 설계되었다. 즉, 첫 번째와 네 번째 H-plane slot은 대역 통과 필터의 첫 번 째 단과 마지막 단에 해당하는 어드미턴스 인버터를 나타내고, 식 (3)에서 계산된 결과로부터 동일한 정규화된 인버터 값을 갖지만 표 1에서 확인할 수 있듯이 서로 다른 크기를 가지므로 각각 5.81 GHz와 4.03 GHz에서 감쇄 공진을 발생하게 된다. 두 번째와 세 번째 H-plane slot 역시 동일한 인버터 값을 나타내지만 각각 5.33 GHz와 4.67 GHz의 공진 주파수를 가진다. 따라서 설계된 필터는 4개의 감쇄극이 통과 대역 부근에서 일어나는 비대칭 구조의 대역 통과 필터로서 매우 우수한 삽입 손실 skirt 특성을 나타낸다. 그림 4는 설계된 필터의 시뮬레이션 응답 특성을 나타낸 것으로 중심 주파수의 아래와 위에 각각 2개의 감쇄극 특성이 나타나는 매우 우수한 저지 대역 특성을 확인할 수 있다.

이러한 H-plane slot의 감쇄극 특성은 대역 통과 필터의 spurious 응답 특성을 개선하는데 응용될 수 있다. 표 2는 5개의 H-plane slot과 4개의 반파장 공진기로 구성된 중심 주파수 5 GHz, 0.01 dB equal-ripple, 4 %의 비 대역폭을 가지는 4단 대역 통과 필터의 설계 수치를 나타낸 것이다. 5개의 H-plane slot 역시 대역 통과 필터의 설계 식을 만족하면서 서로 다른 크기를 나타내므로 모두 5개의 감쇄극을 가지는 비대칭 구조의 대역 통과 필터 구현이 가능하고 H-plane slot에 의한 감쇄 공진점을 spurious 공진이 일어나는 주파수에 위치하게 함으로써 spurious 응답

표 1. 4개의 H-plane slot을 이용한 3단 공진 partial H-plane 필터의 설계 수치
Table 1. Size of third-order partial H-plane filter using 4 H-plane slots.

Cross section	Evanescent waveguides				Resonators			Total length
	H-plane slots				Half wavelength			
23.8×12.0	w_1 (s_1)	w_2 (s_2)	w_3 (s_3)	w_4 (s_4)	r_1	r_2	r_3	120.41
	0.5 (12.92)	1 (14.25)	1 (15.99)	0.5 (18.19)	43.57	39.02	34.82	

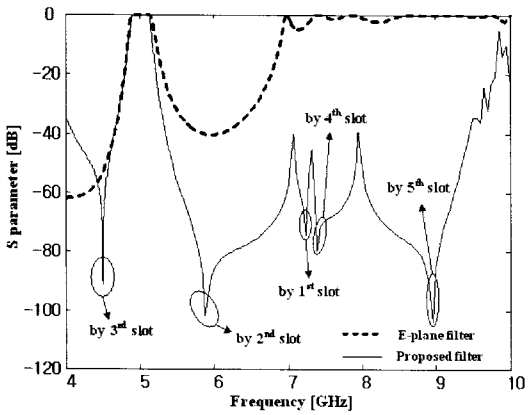

그림 5. 5개의 감쇄극을 갖는 partial H-plane 필터와 일반적인 E-plane 필터의 시뮬레이션 응답 특성

Fig. 5. Simulated responses of partial H-plane filter with 4 attenuation poles and conventional E-plane filter.

특성이 향상되는 partial H-plane filter를 설계할 수 있다. 즉, 두 번째와 세 번째 slot의 공진 주파수가 중심 주파수의 위, 아래인 5.85 GHz와 4.50 GHz에 위치하고, 첫 번째, 네 번째, 다섯 번째 slot은 spurious 공진이 발생하는 7.25 GHz, 7.40 GHz, 8.85 GHz에서 각각 공진이 일어나도록 설계하여 통과 대역 부근에서의 skirt 특성을 향상시키고 spurious 공진을 억제하게 된다. 그림 5는 일반적인 E-plane 필터와 제안된 필터의 시뮬레이션을 통한 주파수 응답 특성을 비교한 것으로, 일반적인 반파장 E-plane 필터의 경우 7 GHz 이상의 대역에서 spurious 공진이 일어나는 것에 비해 제안된 partial H-plane 필터는 slot에 의한 감쇄 공진이 spurious 공진을 억제하게 되어 전체적인 필터의 spurious 응답 특성이 일반적인 필터에 비해 매우 향상되었음을 확인할 수 있다. 그림 6은 실제 제작

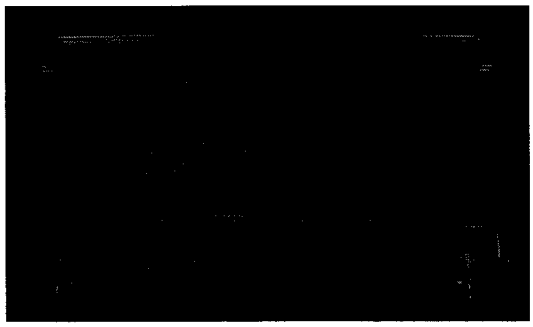

그림 6. 제작된 4단 공진 partial H-plane 필터

Fig. 6. Fabricated fourth-order partial H-plane filter.

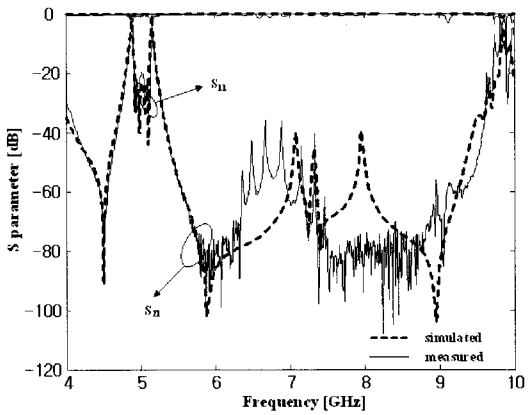

그림 7. 감쇄극 특성을 갖는 4단 공진 partial H-plane 필터의 시뮬레이션 응답 특성과 측정 응답 특성

Fig. 7. Simulated and measured responses of fourth-order partial H-plane filter with attenuation poles.

된 감쇄극 필터를 나타낸 것으로, 실제 측정에서 partial H-plane 도파로의 기본 모드를 여기하기 위하여 메탈 평판의 반대쪽 벽으로부터 동축 커넥터를 삽입하는 급전 방식을 도입하였다[7]. 그림 7은 실제

표 2. 5개의 H-plane slot을 이용한 4단 공진 partial H-plane 필터의 설계 수치

Table 2. Size of fourth-order partial H-plane filter using 5 H-plane slots.

Cross section	Evanescent waveguides					Resonators				Total length
	H-plane slots					Half wavelength				
23.8×12.0	w_1 (s_1)	w_2 (s_2)	w_3 (s_3)	w_4 (s_4)	w_5 (s_5)	r_1	r_2	r_3	r_3	179.04
	1.3 (10.79)	1.5 (13.32)	1 (16.52)	5 (12.49)	3 (9.45)	45.11	39.29	38.64	44.20	

측정된 주파수 응답 특성을 나타낸 것으로 시뮬레이션 응답 특성과 측정 응답 특성이 잘 일치함을 확인할 수 있다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 부가적인 coupling이나 구조적인 변형 없이 다수의 감쇄극 특성을 갖는 partial H-plane 필터를 제안하였다. 필터의 설계에 적용되는 차단 영역 도파로인 H-plane slot은 대역 통과 필터의 어드미턴스 인버터 역할을 하는 동시에 특정 주파수에서 감쇄 공진 특성을 나타낸다. 제안된 partial H-plane 필터는 차단 영역 도파로인 H-plane slot과 반파장 공진기로 구현되고 slot의 수만큼 저지 대역에서 여러 감쇄극을 가지는 비대칭 구조로 설계된다. 중심 주파수 5 GHz, 0.01 dB equal ripple, 2 %의 비 대역폭을 가지는 3단 공진 필터는 중심 주파수 부근의 위와 아래에 각각 2개, 즉 4.03 GHz, 4.67 GHz와 5.33 GHz, 5.81 GHz에서 감쇄극이 일어나므로 매우 우수한 삽입 손실 skirt 특성을 나타낸다. 모두 5개의 감쇄극이 발생되는 4단 공진 필터는 중심 주파수 5 GHz와 4 %의 비 대역폭으로 설계되었고, 중심 주파수의 아래와 위인 4.50 GHz, 5.85 GHz와 반파장 도파로 필터의 spurious 공진 주파수 대역인 7.25 GHz, 7.40 GHz, 8.85 GHz에서 각각 감쇄극이 위치하여 spurious 응답 특성이 향상되고, 이를 실제 제작과 측정을 통해 그 특성을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] T. Shen, H. -T. Hsu, K. Zaki, and A. E. Dolan, "Full-wave design of canonical waveguide filters by optimization", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 51, no. 2, pp. 504-511, Feb. 2003.

[2] J. R. Montejo-Garai, J. M. Rebollar, "Synthesis and design of N-order filter with N-transmission zeros by means of source-load direct coupling", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 29, no. 4, pp. 248-252, May 2001.

[3] U. Rosenberg, S. Amari, and J. Bornemann, "Inline TM_{110}-Mode filters with high-design flexibility by utilizing bypass couplings of nonresonating $TE_{10/01}$ modes", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 51, no. 6, pp. 1735-1742, Jun. 2003.

[4] D. J. Kim, J. H. Lee, "Partial H-plane filter with attenuation pole", *IEEE AP-S*, pp. 4260-4263, Jun. 2007.

[5] D. J. Kim, J. H. Lee, "Partial H-palne filters with multiple transmission zeros", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech*, 2007 (submitted).

[6] D. W. Kim, J. H. Lee, "A partial H-plane waveguide as a new type of compact waveguide", *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 43, no. 5, pp. 426-428, May 2004.

[7] D. W. Kim, D. J. Kim, and J. H. Lee, "Compact partial H-plane filters", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 54, no. 11, pp. 3923-3930, Nov. 2006.

[8] G. Mattaei, L. Young, and E. M. Jones, *Microwave filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*, Boston, MA: Artech House, 1980.

김 동 진

2005년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2007년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
2007년 3월~현재: 홍익대학교 전자정보통신공학과 박사과정
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 회로설계

이 정 해

1985년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1988년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
1996년 3월: UCLA 전기공학과 (공학박사)
1993년 3월~1996년 2월: General Atomics 교환 연구원
1996년 3월~1996년 8월: UCLA 전기공학과 Postdoctor
1996년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 부교수
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 회로 설계, 밀리미터파 진단, Meta-Materials