

인덕티브 포스트를 이용한 도파관형 마이크로파 협대역 대역통과 필터

(A Microwave Narrowband Bandpass Filter Using Inductive Post Obstacle in Rectangular Waveguide)

洪憲辰*, 金榮範**, 朴東徹*

(Heon Jin Hong, Young Bum Kim and Dong Chul Park)

要 約

인덕티브 포스트 장애물을 이용한 구형 도파관형 협대역 대역통과 필터에 관한 연구의 일환으로 중심 주파수 9GHz, 균일 리플 대역폭 50MHz (0.56%의 대역폭)인 chebyshev 대역통과 필터를 단일포스트 및 삼중포스트를 이용해 각각 설계, 제작하고 두 필터간의 특성을 비교하여 보았다. 단일포스트 필터와 삼중포스트 필터를 제작해 측정된 중심 주파수, 대역폭, 그리고 손실특성은 이론치와 잘 일치하였으며 삽입손실면에서 두 필터를 비교해 볼 때 삼중포스트를 이용한 필터가 단일포스트를 이용한 필터에 비해 통과대역 특성이 0.8dB 우수함을 알 수 있었다.

Abstract

Narrowband bandpass waveguide filters using inductive post obstacles in rectangular waveguide are designed and constructed to have an equal-ripple bandwidth of 50MHz (0.56% fractional bandwidth) at a center frequency of 9GHz. Both the triple-post and the single-post configurations are realized and compared. The measured center frequency, bandwidth, and attenuation characteristics for both filters show good agreement with the theoretical calculations. When the two filters are compared, the insertion loss characteristic of the triple-post filter is better than that of the single-post filter by 0.8 dB at the passband.

*正會員, 忠南大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Chungnam Nat'l Univ.)

**正會員, 韓國標準研究所
(Korea Standards Research Institute)
接受日字: 1989年 4月 10日
(※본 연구는 한국과학재단 1988년도 일반연구
881-0808-010-2의 일부임.)

I. 서 론

구형 도파관형 대역통과 필터로는 iris 결합형이 표준형으로 사용되어져 왔다. 그러나 iris 결합형 공진기 필터를 제작할 때 얇은 박막을 고정시키기 위해 공진기를 잘라야 하는 등 불편이 있어서 iris 대신 원통형 포스트(post)를 이용하는 필터가 사용되기 시작했다. 이러한 포스트 결합형 공진기 필터는 제작이

편리하고 삽입손실면에서도 iris형 필터보다 다소간 우수한 것으로 알려지고 있다.

단일포스트 장애물만을 이용한 협대역 도파관형 필터는 통과대역이 약 1% 정도까지 좁게 되도록 설계될 수 있으나 1%미만의 아주 작은 대역폭을 구현하기 위해서 단일포스트만을 이용할 경우 직경이 상당히 큰 포스트가 요구된다. 이러한 경우에는 포스트의 직경을 결정하는데 사용되어 왔던 Marcuvitz의 Waveguide Handbook¹⁾에 실려 있는 데이터의 범위를 벗어 나게 된다. Marcuvitz의 데이터를 이용하기 위하여 Craven과 Lewin^{2,3)}은 큰 직경의 단일포스트를 작은 직경의 삼중포스트로 대체 시킬 수 있는 방법을 제시 하였고, Mariani⁴⁾는 실험적으로 보상값(correction factor)을 얻어 삼중포스트 구조를 해석하였으며 이 해석을 토대로 C-밴드에서 삼중포스트를 이용한 협대역 구형 도파관형 대역통과 필터를 제작하였다. 그러나 최근에 와서 Adams⁵⁾는 모멘트 방법을 사용하 도파관내에서의 단일포스트를 해석하여 단일포스트만을 사용해서도 1%미만의 대역폭을 갖는 필터를 제작할 수 있도록 Marcuvitz의 데이터를 보완하여 큰 직경의 포스트도 커버될 수 있는 데이터를 얻었다.

본 논문에서는 위에서 언급된 삼중포스트의 해석 방법과 Adams의 단일포스트 해석방법의 결과를 이용하여 중심 주파수 9GHz, 통과대역 허용 리플 0.1dB, 대역폭 50MHz(이는 0.56%의 대역폭에 상당), 8.9 GHz와 9.1GHz에서 20dB 이상의 감쇠를 갖는 구형 도파관형 대역통과 필터를 단일포스트 및 삼중포스트를 이용해 각각 설계, 제작하고 그 특성을 비교하였다.

II. 대역통과 필터의 설계

그림 1에 최종적으로 구현될 구형 도파관형 대역 통과 필터들을 위에서 본 그림들이 보여지고 있다. 필터 제작에 사용될 도파관은 X-밴드용 WR-90이며 도파관의 폭 $a=2.286\text{cm}$, 도파관의 높이 $b=1.016\text{cm}$ 이다. 그림 1(a)에서 볼 수 있듯이 단일포스트만을 이용한 필터의 경우 공진기와 공진기사이의 결합과 관계되는 단일포스트들의 직경이 특히 커지게 되며 그림 1(b)에서는 이렇게 직경이 커진 단일포스트들을 직경이 작은 삼중포스트들로 대체하였다. 그림 1(a), (b)에서 양쪽끝의 단일포스트들은 직경이 크지 않아서 Marcuvitz의 데이터를 이용할 수 있어서 삼중포스트로 바꾸지 않고 단일포스트를 그대로 사용하였다. 단일포스트들의 경우 포스트의 중심이 $a/2$ 되는 지점, 즉 도파관의 중앙에 오도록 설치하였고 삼중포스트들의

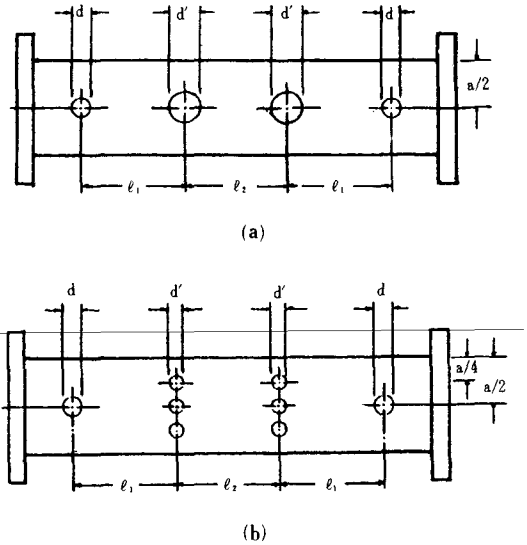


그림 1. (a) 단일포스트만을 이용한 대역통과 필터
(b) 삼중포스트를 이용한 대역통과 필터
Fig. 1. (a) A bandpass filter using only single-post obstacles.
(b) A bandpass filter using triple-post obstacles.

경우는 포스트간의 거리가 $a/4$ 가 되도록 배열하였다. 서론의 설계 사양을 만족하는 chebyshev형 대역통과 필터를 Matthaei⁶⁾의 설계방법에 따라 설계하면 3개의 반파장 공진기가 필요하며 이 세개의 공진기를 갖는 최종적인 대역통과 필터의 회로는 그림 2와 같다. 그림 2의 병렬 리액턴스 X값들은 구형 도파관내에서 적절한 직경의 포스트들을 사용함으로써 구현될 수 있고 전기적 길이 ϕ 값 및 π 값들은 공진기의 길이 즉 포스트와 포스트간의 거리들을 조절함으로써

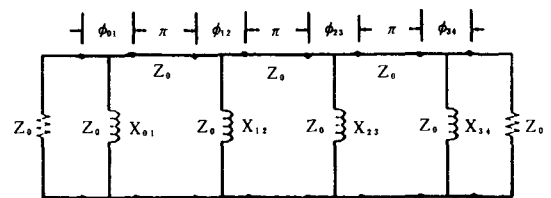


그림 2. 병렬 인덕턴스를 이용한 대역통과 필터의 회로
Fig. 2. A direct-coupled bandpass filter circuit with shunt-inductance couplings.

구현될 수 있다. 설계된 정규화된 X 값 및 ϕ 값들은 다음과 같다.

$$X_{01} = X_{34} = 0.1369$$

$$X_{12} = X_{23} = 0.01714$$

$$\phi_{01} = -\tan^{-1}(2X_{01}) = \phi_{34} = -0.2673$$

$$\phi_{12} = -\tan^{-1}(2X_{12}) = \phi_{23} = -0.03426$$

1. 단일포스트만을 이용한 대역통과 필터

그림 3에 직경이 유한한 단일포스트의 T-등가회로가 보여지고 있다. 단일포스트의 정규화된 병렬 리액턴스 X_a 는 $X_a = X_{j,j+1}$ 이고 정규화된 직렬 리액턴스 X_b 는 포스트와 구형 도파관 아래, 윗면과의 접합에서 생기는 포스트의 기생 커패시턴스(spurious capacitance)이다. 단일포스트를 그림 1(a)에서와 같이 구형 도파관내 $x = a/2$ 의 위치에 놓았을때 9GHz에서 포스트의 X_a, X_b 값과 포스트의 직경과의 관계를 그래프로 그려보면 그림 4와 같다. 여기서 포스트의 직경이 0.55cm까지는 Marcuvitz의 데이터를 이용하여 계산되었으며 직경이 0.55cm보다 클때의 데이터는 Adams의 데이터를 이용하여 계산된 데이터이다. 그림 4에서 보면 X_a 값이 0.1이하로 작아지면 포스트의 직경이 급격히 증가하고 이에 따라 기생 커패시턴스 X_b 값도 크게 증가함을 알 수 있다.

앞절에서 $X_{01} = X_{34} = 0.1369, X_{12} = X_{23} = 0.01714$ 이 있으므로 그림 4로부터 그림 1(a)에 보여진 단일포스트의 직경 d, d' 및 그때의 X_b, X_b' 를 구하면 $d = 0.278\text{cm}, d' = 0.68\text{cm}, X_b = 0.0669, X_b' = 0.3107$ 이 된다.

포스트의 기생 커패시턴스를 전기적 길이 θ 로 변환시켜 보상해 주기 위하여 그림 5의 등가관계를 이용하자. 그림 5(a)와 (b)를 등가라고 가정하고 각각의 단락 임피던스를 구하면 아래의 (1), (2)식과 같이 된다.

$$Z_{open} = -jX_b + j2X_a = \frac{j2X'_a + j\tan\theta}{1 - 2X'_a \tan\theta} \quad (1)$$

$$Z_{short} = -jX_b = j\tan\theta \quad (2)$$

(2)식을 (1)식에 대입하여 X'_a 에 대해 정리하면 $|X_b|, |X_a X_b| \ll 1$ 인 경우에 (3)식과 같다.

$$X'_a = \frac{X_a}{1 - 2X_a X_b + X_b^2} \approx X_a \quad (3)$$

(3)식으로 부터 그림 5의 X_a 와 X'_a 의 값이 같음을 알 수 있고 (2)식을 다시쓰면 $\theta = \tan^{-1}(-X_b)$ 이 됨으로 단일포스트의 커패시턴스 X_b 및 X_b' 에 해당되는 전기적 길이 θ 및 θ' 를 구해보면 $\theta = -0.0668, \theta' = -$

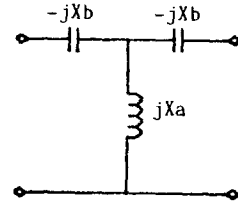


그림 3. 단일포스트의 T-등가회로
Fig. 3. The equivalent T-network of single-post obstacle.

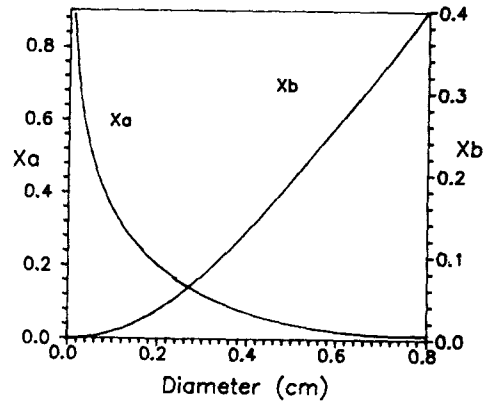


그림 4. 단일포스트의 X_a, X_b 값과 직경과의 관계그래프
Fig. 4. X_a, X_b vs single-post diameter curve for centered single-post obstacle in rectangular waveguide.

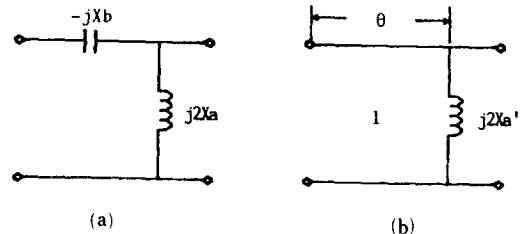


그림 5. (a) 단일포스트 T-등가회로의 반쪽
(b) T-등가회로와 등가인 직접결합 필터 회로의 반쪽
Fig. 5. (a) The half-section of T-network of single-post.
(b) The half-section of direct-coupled filter circuit equivalent to T-network.

0.3012(radians)이 된다. 기생 커패시턴스의 전기적 길이가 θ 가 '-' 값을 가지므로 실제 제작에서는 설계된 공진기의 길이에 $|\theta|$ 만큼 더해 주어 기생 커패시턴스를 보상해 주어야 한다.

2. 삼중포스트를 이용한 대역통과 필터

삼중포스트를 임의로 하나의 리액턴스 X_a 와 그에 따른 X_b 로 본다면 삼중포스트의 등가회로도 단일포스트의 등가회로인 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 이때 그림 1(b)에서와 같이 포스트간의 거리를 $a/4$ 로 하여 배열하였다면 정규화된 병렬 리액턴스 X_a 와 직경에 따른 X_b 는 각각 (4), (5)식과 같이 간단히 나타내질 수 있다.^[3,5]

$$X_a = \frac{a}{4\lambda_g} \left[\ln \frac{a}{12.33d} + 0.0404 \left(\frac{a}{\lambda} \right)^2 \right] + \frac{X_b}{2} \quad (4)$$

$$X_b = k \frac{a}{\lambda_g} \left(\frac{\pi d}{a} \right)^2 \quad (5)$$

(5)식에서 k 는 포스트간의 결합과 관계된 비례상수이다. 예를 들면 단일포스트를 $X=a/2$ 의 위치에 놓을 경우 $k = \sin^2(\pi X/a) = 1$ 이 된다. 삼중포스트의 경우는 삼중포스트간의 상호작용이 없다고 가정할 때 (6)식과 같지만 실제적으로 포스트간의 상호작용으로 인하여 $k < 2$ 가 되며, 이 k 값을 수학적으로 정확히 구해내는 것은 쉽지 않다.

$$k = \sin^2\left(\frac{\pi}{4}\right) + \sin^2\left(\frac{\pi}{2}\right) + \sin^2\left(\frac{3\pi}{4}\right) = 2 \quad (6)$$

그래서 이 포스트간의 결합량 k 값을 실험을 통해서 얻기 위해 직경이 다른 삼중포스트를 네쌍 제작하였다. 이 k 값을 실험적으로 구하기 위해 먼저 직경이 같은 한쌍의 삼중포스트를 임의의 거리 l_1 만큼 띄어 배열해 단일공진기를 구성한 후 이 공진기의 중심 주파수가 9GHz가 되도록 길이 l_1 를 조정하였다. 이때의 거리 l_1 를 측정하면 식(7)로부터 전기적 길이 $|\theta|$ 값을 알 수 있고 이 값을 식(2)에 대입하면 X_b 를 구할 수 있다. 식(7)의 ϕ 는 그림 2에 표시된 ϕ 와 같다. 다음 이 X_b 를 식(5)에 대입하여 삼중포스트의 k 값을 알 수 있고 식(4)에 대입하면 X_a 값도 알 수 있다.

$$l_1 = \frac{\lambda_g}{2\pi} (\pi - \phi + 2|\theta|) \quad (7)$$

본 논문에서는 이렇게 네쌍의 삼중포스트를 갖고 실험을 통해 얻은 데이터들을 이용해 평균제곱 오차를 최소화하는 근사직선(least square fitting line)을 구하고 이를 이용하여 삼중포스트 필터를 설계하였

다. 9GHz에서 삼중포스트의 직경과, 포스트의 직경을 변화시켜가며 $k=2$ 로 보고 구한 X_a, X_b 값과 실제 실험을 통해 얻은 X_a, X_b 값과의 관계를 그림 6에 나타내고 있다.

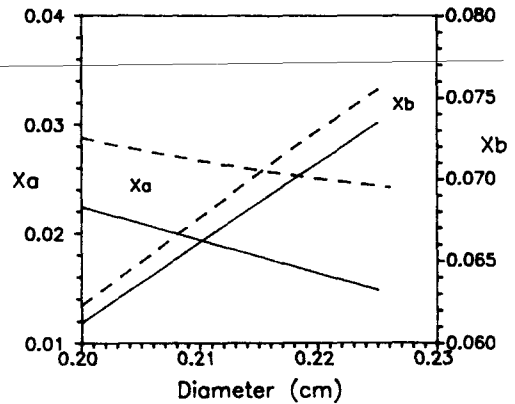


그림 6. X_a, X_b 값과 삼중포스트 직경과의 관계 그래프
(- - - ; $k=2$, ——— ; 측정치)

Fig. 6. X_a, X_b vs triple-post diameter curve for triple-post obstacle in rectangular waveguide.
(- - - ; $k=2$, ——— ; measurement).

그림 6을 이용해서 그림 1(b)에서의 삼중포스트의 직경 d' 를 구하고 이 때의 X_b' 를 구한 다음 이 X_b' 와 등가인 전기적 길이 θ' 를 단일포스트의 경우와 같은 방법으로 구하면 $d' = 0.217\text{cm}$, $X_b' = 0.06716$, $\theta' = -0.06705(\text{radians})$ 가 된다. 그림 1(b)에서 앞단과 끝단의 단일포스트의 직경 d 는 그림 1(a)에서의 d 와 같으므로 앞절에서 구한 값을 그대로 사용하면 된다.

III. 실험 및 고찰

이제까지 설계된 그림 1(a), (b)에서의 포스트들의 직경 및 포스트들간의 거리들을 정리하면 표 1과 같다. 표 1을 살펴보면 직경이 큰 단일포스트를 직경이 작은 삼중포스트로 대체 하였을때 직경 d' 은 약 1/3 이하로 줄어들음을 알 수 있다. 또한 포스트간의 거리인 l_1, l_2 는 단일포스트만을 이용한 필터가 삼중포스트를 이용한 필터에 비해 더 큰 값을 가짐을 알 수 있는데 이는 직경이 큰 포스트의 사용으로 인해 X_b' 값

표 1. 설계된 필터의 포스트 직경 및 공진기의 거리

Table 1. Dimensions of post diameters and resonator lengths designed for both filters.

필터	d	d'	ℓ_1	ℓ_2
그림 1(a)	0.278	0.680	2.604	2.876
그림 1(b)	0.278	0.217	2.422	2.511

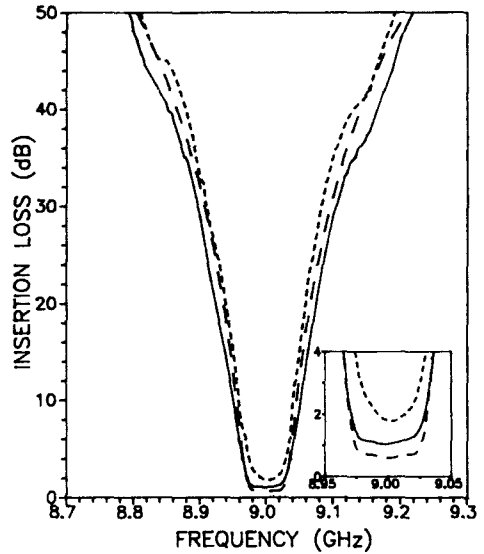
(단위 : cm)

이 커지고 이에 따라 전기적 길이 $|\theta'|$ 가 커져서 공진기의 길이가 길어졌기 때문이다.

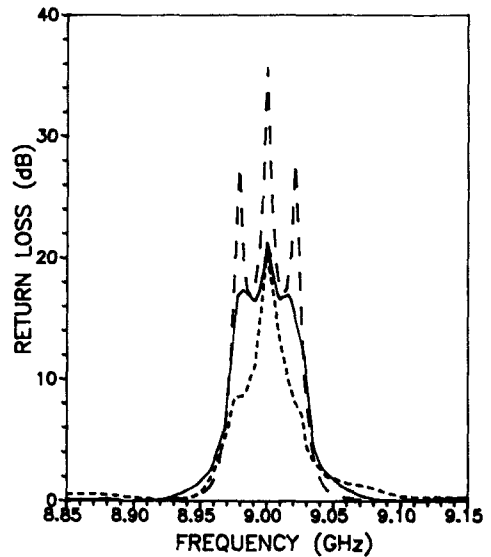
도파관과 포스트는 brass를 재질로 하여 제작되었다. 제작된 필터들의 삽입손실과 반사손실의 이론치 및 측정치가 각각 그림 7(a), (b)에 보여지고 있다. 이론치를 계산하는데는 참고문헌[6, pp. 245-246]의 brass에 대한 표피깊이(skin depth) δ 로부터 unloaded Q(Q_u)를 계산하였으며 계산된 Q_u 는 4050이었다.

그림 7(a), (b)에서 보듯이 제작된 필터들의 중심 주파수는 이론치인 9GHz에 잘 일치함을 알 수 있다. 삼중포스트를 이용한 필터의 경우 측정된 3-dB 대역폭은 70MHz로 이론치 68MHz와 잘 일치하였으나 단일포스트를 이용한 경우에는 56MHz로 이론치에 비해 17%정도 감소되었다. 이는 직경이 큰 단일포스트의 경우 그림 4에서 볼 수 있듯이 미세한 X_a 의 변화에도 직경은 민감하게 변화하기 때문에 저자들이 선정한 단일포스트의 직경에 약간 오차가 있는 것으로 생각된다. 그림 7(b)에 있는 단일포스트 필터의 반사손실 측정값을 보아도 포스트에서 반사가 많이되고 있음을 알 수 있어 직경이 아주 적절치는 않음을 알 수 있다. 그러나 삼중포스트의 경우 이론치와 실험치가 잘 일치하는 것으로 보아 그림 6의 평균제곱 오차를 최소로 한 근사방법(least square line fitting method)으로 얻어진 데이터와 실험으로 얻어진 k값은 정확했던 것으로 생각된다.

그림 7(a)에서 볼 수 있듯이 Q_u 가 4050인 경우의 삽입손실의 이론치는 약 0.7dB이고 삼중포스트를 이용한 필터의 측정 삽입손실은 약 1.0dB이어서 이론치와 측정치간에 0.3dB의 차이가 있음을 알 수 있는데 이는 Q_u 값의 부정확으로 인한 추가손실, 그리고 임피던스 부정합에 따른 손실과 가공과 관련된 추가적 손실들에 기인한다고 생각된다. 또 단일포스트만을 이용한 필터의 삽입손실은 약 1.8dB로 측정되어 삼



(a)



(b)

그림 7. (a) 필터들의 삽입손실 특성

(b) 필터들의 반사손실 특성

(- - - ; 이론치, ; 단일포스트만을 이용한 필터의 측정치, ——— ; 삼중포스트를 이용한 필터의 측정치)

Fig. 7. (a) Insertion loss characteristics of filters.

(b) Return loss characteristics of filters.

(- - - ; theoretical response, ; measured response of single-post filter, ——— ; measured response of triple-post filter).

중포스트를 이용한 필터의 측정 삽입손실에 비해 0.8 dB 큰것을 알 수 있는데 이렇게 두 필터의 특성이 차이가 나는 이유는 단일포스트만을 이용한 필터에서는 큰 직경의 단일포스트로 인한 전기적 길이 $|\theta'|$ 가 커져서 전체적인 공진기의 길이가 삼중포스트를 이용한 필터에 비해 길어졌기 때문으로 생각된다.

IV. 결 론

9GHz에서 대역폭이 50MHz (0.56% 대역폭)인 협대역 대역통과 필터를 단일포스트와 삼중포스트를 이용하여 각각 제작, 실험하였다. 실험결과 중심 주파수 및 대역폭 등이 이론치와 잘 일치하였으며 삼중포스트를 사용한 필터가 단일포스트만을 사용한 필터보다 특성이 더 양호한 것을 알 수 있었다. 그림 4와 그림 6을 비교할 때 삼중포스트의 경우에 비해 단일포스트의 경우가 포스트의 직경이 커질수록 X_b 값이 크게 증가하고 이에 따라 전기적 길이 $|\theta|$ 가 급격히 커짐을 알 수 있다. 따라서 더 좁은 대역폭이 요구되는 경우 삼중포스트 필터와 단일포스트 필터 간의 특성차는 더욱 커질 것을 예상할 수 있다.

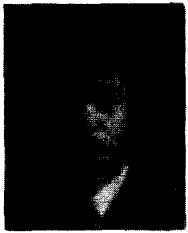
이러한 특성의 필터는 comb generator와 함께 사용되어 마이크로파 고조파 발생기(microwave harmonic generator)를 만들 수 있으며 기타 협대역 필터

를 필요로 하는 통신장비에 널리 응용되어질 수 있을 것으로 기대된다.

參 考 文 獻

- [1] N. Marcuvitz, Ed., Waveguide Handbook, M.I.T. Rad. Lab. Ser., vol. 10, New York: McGraw-Hill, pp. 257-262, 1951.
- [2] G. Craven and L. Lewin, "Design of microwave filters with quarter-wave couplings," *J. IEE*, vol. 103(B), pp. 173-177, 1956.
- [3] L. Lewin, Theory of Waveguides, New York: Wiley, 1975.
- [4] E.A. Mariani, "Designing narrow-band triple-post waveguide filters," *Microwaves*, vol. 4, pp. 93-97, 1965.
- [5] Y. Leviatan, P. Li, A.T. Adams, and J. Perini, "Single-post inductive obstacles in rectangular waveguides," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-31, pp. 806-811, Oct. 1983.
- [6] G.L. Matthaei, L. Young, and E.M.T. Jones, Microwave Filters, Impedance Matching Networks, and Coupling Structures, Dedham, MA: Artech House, 1980. *

著 者 紹 介



洪 憲 辰(正會員)

1963年 10月 28日生. 1986年 2月 충남대학교 전자공학과 졸업 공학사학위 취득. 1988年 3월~현재 충남대학교 대학원 전자공학과 석사과정 재학중. 주관심분야는 마이크로파 필터 설계, 이동통신 링

크 설계 등임.



朴 東 徹(正會員)

1952年 2月 5日生. 1974年 2月 서울대학교 전자공학과 학사학위 취득. 1976年 2月 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사학위 취득. 1977年~1978年 서독 Ruhr Univ. Bochum에서 집적광학 연구.

1981年~1984年 Univ. of California, Santa Barbara 박사학위 취득. 현재 충남대학교 전자공학과 부교수.



金 榮 範(正會員)

1954年 8月 13日生. 1982年 2月 충남대학교 전자공학과 공학사학위 취득. 1986年 1월~1986年 12월 서독 연방 물리 기술청(PTB) 연수(세습 원자 주파수 표준기에 관한 연구) 1989年 2월 충남대학교

대학원 전자공학과 졸업 공학석사학위 취득. 1982年 7월~현재 한국표준연구소 선임연구원으로 재직. 주관심분야는 마이크로파 신호발생기 및 합성기 설계 등임.