

링 공진기를 사용한 저속파 대역통과 여파기의 저지대역 확장

*배은규, 석창현, 심보환, 제영태, 이문수
경상대학교 컴퓨터정보통신연구소

e-mail : baramm@galtronics.ac.kr, munslee@nongae.gsnu.ac.kr

Stopband Extension of Slow-wave Bandpass Filters Using Ring Resonators

*Eun-Gyu Bae, Chang-Heon Seok, Bo-Hwan Shim, young-Tea Je,
Mun-Soo Lee

Research Institute of Computer and Information Communication(RICIC)
Gyeongsang National University

Abstract

In this paper, we design a slow-wave bandpass filter that uses a microstrip line periodically loaded with microstrip ring resonators for WLAN(5 GHz). Unlike conventional slow-wave filters, this filter is designed to produce a narrow passband at the fundamental mode of the resonators and provide lower insertion loss than that of parallel- or cross-coupled ring bandpass filters. A PBG(Photonic Band Gap) structure patterned in the ground plane is used to suppress the spurious transmission and extend out-of-band rejections.

Experimental result shows that the first spurious response in the stopband of the slow-wave bandpass filter can be rejected using a PBG structure

I. 서론

통신 시스템에 가장 많이 사용되는 여파기의 특성은 주파수 간섭과 잡음 등에 관계가 있으며, 무선 통신의 품질을 결정하는데 중요한 요소 중의 하나로 이

에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 또한 마이크로스트립 필터는 통과대역과 저지대역에서 원하는 특성을 만족해야 한다.

마이크로스트립 링 공진기는 여러 가지 형태가 있으며 각종 무선 통신 시스템에 사용된다. 마이크로스트립 링 공진기는 크기가 작고 쉬운 공정을 가지며 좁은 대역폭 그리고 다른 공진기에 비해 낮은 방사손실을 가진다. 본 논문에서는 이러한 이점을 가진 링공진기를 사용하여 5 GHz대 무선 LAN 용으로, 마이크로스트립 선로 상에 마이크로스트립 링 공진기를 주기적으로 배열시킨 저속파(slow-wave) 대역통과 여파기를 설계한다. 링 공진기의 병렬공진과 직렬공진 특성을 사용하면 저속파 주기적 구조는 대역통과 여파기로 동작한다. 그리고 본 연구에서 설계된 여파기는 공진기 사이에 간격을 둔 병렬결합 공진기와 교차결합 공진기로 구성된 대역통과 여파기보다 동일 공진 주파수에서 삽입손실이 작은 이점이 있다.

한 주파수에서만 공진하는 집중정수소자를 사용한 대역통과 여파기와 달리 마이크로스트립 여파기는 여러 개의 공진 주파수를 가진다. 이러한 여파기에 발생한 고조파 성분을 억제시키고 저지대역을 확장하기 위해서 최근에 활발히 연구되고 있는 PBG(Photonic Bandgap) 구조를 도입한다.

II. 저속파 주기적 구조 해석

2.1 무한 주기적 구조의 해석

그림 1은 마이크로스트립 선로상에 개방스텝이 주기적으로 놓인 구조를 나타낸 것이다. 여기서, 단위 요소는 전송선로길이 d , 스텝길이 l , 그리고 특성임피던스 Z_0 로 정규화 된 써셉턴스 b 로 구성되며 Z_{in1} 은 개방스텝을 쳐다본 입력임피던스이다.

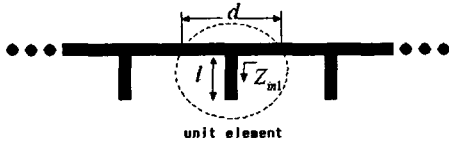


Fig 1. Slow-wave periodic structure

2.2 Z_L 이 장하된 저속과 주기적 구조

그림 2는 저속과 주기적 구조를 가진 전송선로와 길이가 d 인 단위 요소를 나타낸 것으로, 주기적으로 놓인 길이 l 인 스텝 끝에 임피던스 Z_L 이 연결되어 있다. 이 때 스텝의 입력임피던스 Z_{in2} 는

$$Z_{in2} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan(\beta l)}{Z_0 + jZ_L \tan(\beta l)} \quad (2-1)$$

이고, 여기서 Z_0 는 스텝의 특성임피던스, β 는 위상정수이다. $\tan(\beta l)$ 의 값이 아주 작을 때, Z_L 에 따라 Z_{in2} 가 결정된다. 즉, Z_L 이 ∞ 이면 Z_{in2} 가 ∞ 이고, Z_L 이 0이면 Z_{in2} 도 0이 된다. 이런 경우에, Z_{in2} 로 장하된 저속과 주기적 구조는 통과대역($Z_{in2} \rightarrow \infty$)과 저지대역($Z_{in2} \rightarrow 0$) 특성을 가질 수 있다.

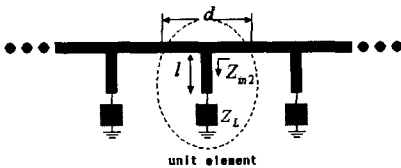


Fig 2. Slow-wave periodic structure with loading Z_L at open end.

마이크로스트립 링 공진기의 입력임피던스는 병렬 공진주파수와 직렬 공진주파수에서 각각 ∞ 와 0이 되므로, 그림 2의 Z_L 을 마이크로스트립 링 공진기로 구현하여 여파기에 적용할 수 있다.

그림 3은 용량결합으로 장하된 마이크로스트립 링

공진기를 사용하여 구현된 저속과 대역통과 여파기와 그 등가회로를 나타낸 것이다.

여기서 Z_{in3} 는 길이 l_b 인 스텝의 주 전송선로 쪽에서 본 입력임피던스이다.

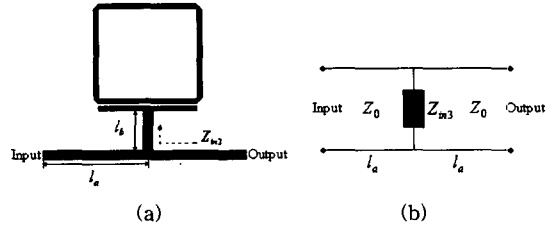


Fig 3. Slow-wave bandpass filter using one ring resonator with one coupling gap. (a) Layout, (b) Simplified equivalent circuit.

그림 4는 결합선로와 마이크로스트립 링 공진기의 한 변의 결합된 구조를 나타낸 것으로, 그림 4 (a)는 위에서 본 그림이고, 그림 4 (b)는 옆에서 본 그림이며, 그림 4 (c)는 그 등가회로를 나타낸 것이다. 여기서 C_p 는 결합선로의 단위 길이당 정전용량이고, C_s 는 접지면과 주 전송선로간의 단위 길이당 정전용량이며, 이들은 대칭결합선로의 우수모드와 기수모드 용량으로부터 구할 수 있다.

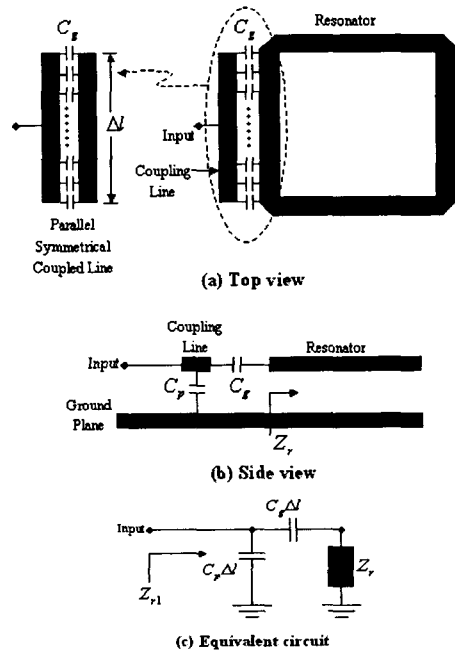


Fig 4. Line-to-ring coupling structure. (a) Top view, (b) Side view, (c) Equivalent circuit.

그리고 그림 4 (c)에서 Z_r 는 링 공진기의 입력임피던스이고 Z_{r1} 은 결합선로에서 본 입력임피던스이다. 이 때 Z_{in3} 는

$$Z_{in3} = Z_0 \frac{Z_{r1} + jZ_0 \tan(\beta l_b)}{Z_0 + jZ_{r1} \tan(\beta l_b)} \quad (2-2)$$

이며, 여기서 $Z_{r1} = (Z_r + Z_g) \parallel Z_p$, $Z_g = 1/j\omega C_g \Delta l$, $Z_p = 1/j\omega C_p \Delta l$ 이다. 링 공진기의 병렬공진 주파수는 $|Y_{in3}| = |1/Z_{in3}| \approx 0$ 으로 놓고 구하고, 직렬공진 주파수는 $|Z_{in3}| \approx 0$ 으로 놓고 구할 수 있다.

그림 3 (b)의 여파기의 ABCD 행렬은

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos(\beta l_a) & jZ_0 \sin(\beta l_a) \\ jY_0 \sin(\beta l_a) & \cos(\beta l_a) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_{in3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\beta l_a) & jZ_0 \sin(\beta l_a) \\ jY_0 \sin(\beta l_a) & \cos(\beta l_a) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 - 2\sin^2(\beta l_a) + jZ_0 Y_{in3} \sin(\beta l_a) \cos(\beta l_a) & \\ Y_{in3} \cos^2(\beta l_a) + j2Y_0 \sin(\beta l_a) \cos(\beta l_a) & \\ -Z_0^2 Y_{in3} \sin^2(\beta l_a) + j2Z_0 \sin(\beta l_a) \cos(\beta l_a) & \\ 1 - 2\sin^2(\beta l_a) + jZ_0 Y_{in3} \sin(\beta l_a) \cos(\beta l_a) & \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-3)$$

이고, 여기서 $Y_0 = 1/Z_0$ 이다. 이 ABCD 행렬을 S-파라미터로 변환하여 여파기의 주파수특성을 계산할 수 있다.

III. 고조파 억제를 위한 PBG 구조

3.1 Spurious 억제를 위한 PBG 구조

마이크로파 대역에서 PBG 구조는 안테나의 방사 패턴 개선, 전력 증폭기의 출력전력 및 효율증대, 반사기, 광대역 전파 흡수체, 주파수 선택 표면 등에서 이용된다.

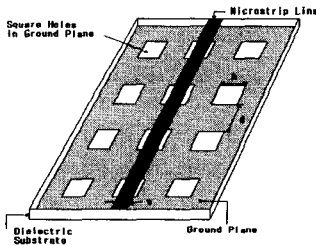


Fig 5. Three-dimensional view of the PBG structure. The 3×4 squares are etched periodically in the ground plane of a microstrip line.

그림 5는 50 Ω 마이크로스트립 전송선로의 접지면에 슬롯을 주기적으로 배열시킨 PBG 구조를 나타낸 것으로, 슬롯의 크기는 a, 슬롯간의 간격은 d이다. 그림 6은 단위 PBG 구조의 등가회로로서 단위 셀은 슬롯과 그 양쪽에 전기적 길이가 $k_0 d/2$ 인 전송선로로 구성되고, 슬롯은 RLC 병렬 공진회로로 나타낼 수 있으며, R, L, C 값은

$$\begin{aligned} R &= \frac{2Z_0}{\sqrt{\frac{1}{|S_{11}(\omega)|^2} - \left(2Z_0\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)\right)^2} - 1} \\ L &= \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 C} \\ C &= \frac{\omega_c}{2Z_0(\omega_0^2 - \omega_c^2)} \end{aligned} \quad (3-1)$$

이다. 여기서 ω_0 는 저지대역의 중심 주파수이고 ω_c 는 차단주파수를 나타낸다.

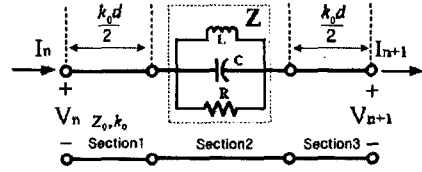


Fig 6. Unit cell for PBG structure.

그림 6에서, PBG 구조 단위 셀의 ABCD 파라미터를 구하면

$$\begin{bmatrix} Y \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \frac{k_0 d}{2} & jZ_0 \sin \frac{k_0 d}{2} \\ jY_0 \sin \frac{k_0 d}{2} & \cos \frac{k_0 d}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \frac{k_0 d}{2} & jZ_0 \sin \frac{k_0 d}{2} \\ jY_0 \sin \frac{k_0 d}{2} & \cos \frac{k_0 d}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{n+1} \\ I_{n+1} \end{bmatrix}$$

의 관계로부터

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos k_0 d + \frac{jZ}{2Z_0} \sin k_0 d & \frac{Z}{2} \cos k_0 d + jZ_0 \sin k_0 d + \frac{Z}{2} \\ \frac{Z}{2Z_0} \cos k_0 d + \frac{j}{Z_0} \sin k_0 d - \frac{Z}{2Z_0} & \cos k_0 d + \frac{jZ}{2Z_0} \sin k_0 d \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

이 된다. PBG 단위 셀의 이 ABCD 파라미터를 S-파라미터로 변환하면 PBG 구조의 주파수특성을 계산할 수 있다.

IV. 설계 및 실험

4.1 세 개의 링공진기를 사용한 저속과여파기설계
 예리한 여파기 차단특성을 얻기 위해, 그림 9에 사용된 공진기와 같은 세 개의 마이크로스트립 링 공진기로 저속과 대역통과 여파기를 설계하고자 한다.

그림 7 (a)에서 세 개의 마이크로스트립 링 공진기가 주 전송선로에 주기적으로 놓여있다. 여기서 Z_{in3} 는 주 전송선로에서 아래쪽 링을 본 입력임피던스이다. 이 여파기의 등가회로는 그림 7 (b)와 같으며, 이 등가회로로부터 여파기의 특성을 계산할 수 있다. 여기서 l_d 와 l_e 의 조정으로 저지대역을 약간 확장할 수 있다.

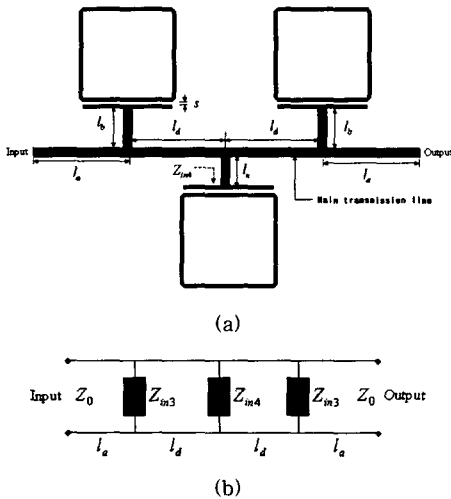


Fig 7. Slow-wave bandpass filter using 3 ring resonators. (a) Layout, (b) Simplified equivalent circuit.

그림 8은 저속과 여파기의 스퓨리어스(spurious) 응답특성을 고찰하기 위해 12 GHz까지 확장하여 계산된 삽입손실과 반사손실을 나타낸 것이다. 3 dB 대역폭은 중심주파수 5.75 GHz에서 약 5.3 %이고, 통과대역의 대부분 영역에서 삽입손실은 1 dB 정도로 작게 나타났다. 그리고 8 GHz에서부터 높은 삽입손실로 스퓨리어스 성분들이 발생한다는 것을 알 수 있다.

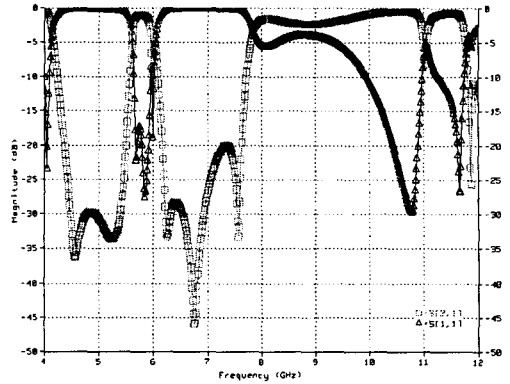


Fig 8. Expanded view of the insertion loss and return loss for the slow-wave bandpass filter.

4.2 PBG 구조를 사용한 여파기 설계

그림 8의 여파기에서 나타나는 스퓨리어스 고조파 대역을 억제시키기 위해서 그림 9와 같이 여파기 이면에 정방형 PBG 구조를 적용한다.

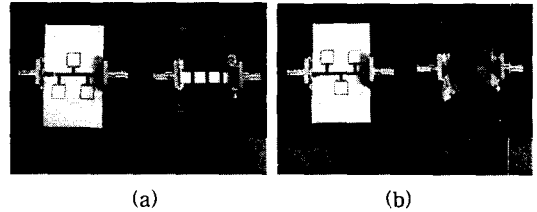


Fig 9. Photographs of the fabricated slow-wave bandpass filters using ring resonators : (a) Top and bottom view without PBG structures, and (b) With square PBG structures in the ground plane.

그림 10은 PBG 구조가 여파기의 저지대역을 확장시키는 것을 고찰하기 위해 12 GHz까지 주파수 범위를 넓혀 계산한 여파기의 특성으로, 3 dB 대역폭은 2.5 %로 PBG를 적용하지 않은 필터보다 2.8 % 좁아졌으며, 삽입손실도 1.7 dB로 0.7 dB정도 높아졌다. 그렇지만 8 GHz에서 11 GHz까지의 스퓨리어스 성분들이 억제됨을 알 수 있다.

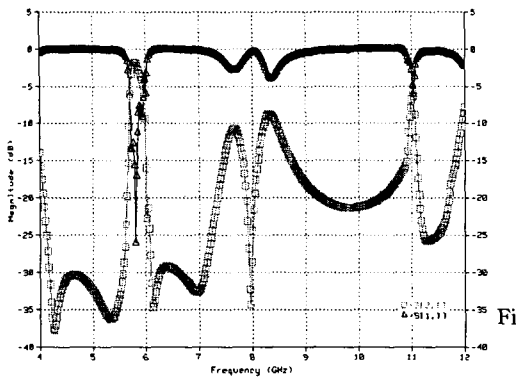
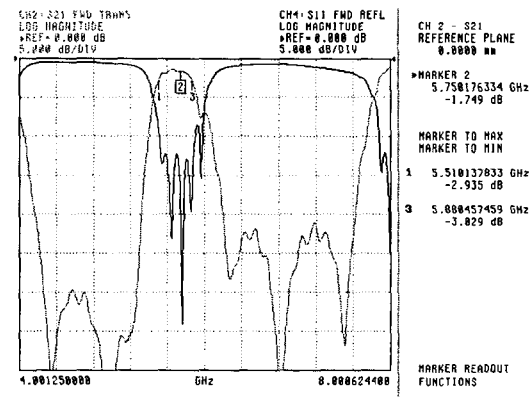


Fig 10. Calculated insertion loss and return loss of the filter with square slot PBG structures in the ground plane.

4.3 여파기의 특성 측정

그림 11은 그림 9와 같이 제작된 여파기의 측정결과로 PBG 구조가 적용되지 않은 세 개의 마이크로스트립 링 공진기를 사용한 저속파 대역통과 여파기의 반사손실과 삽입손실을 나타낸 것이다. 중심주파수에서 삽입손실은 1.75 dB이고 6 %의 대역폭을 가지며 예리한 차단특성을 보인다.



Fi. 11. Measured return loss and insertion loss of the slow-wave bandpass filter using ring resonators.

그림 12는 세 개의 마이크로스트립 링 공진기를 사용한 저속파 대역통과 여파기에 발행하는 고조파 응답 특성을 고찰하기 위해 주파수 범위를 12 GHz까지 확장하여 측정한 삽입손실과 반사손실을 나타낸다. 8 GHz와 10 GHz 근처에서 스퓨리어스 성분들이 발생한다는 것을 알 수 있다.

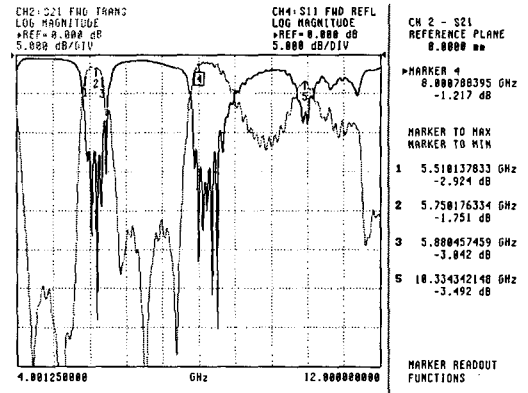


Fig 12. Expanded view of the measured return loss and insertion loss for the filter without PBG structures.

그림 13은 정방형 PBG 구조를 적용한 저속파 대역 통과 마이크로스트립 여파기의 반사손실과 삽입손실을 기본공진 주파수대역에서만 측정된 결과를 나타낸 것이다. 중심주파수의 삽입손실은 2.5 dB로 PBG를 사용하지 않은 여파기보다 0.78 dB 더 크고 대역폭이 크게 감소하지만(6 %에서 2.7 %로), 더 예리한 차단특성을 가짐을 알 수 있다.

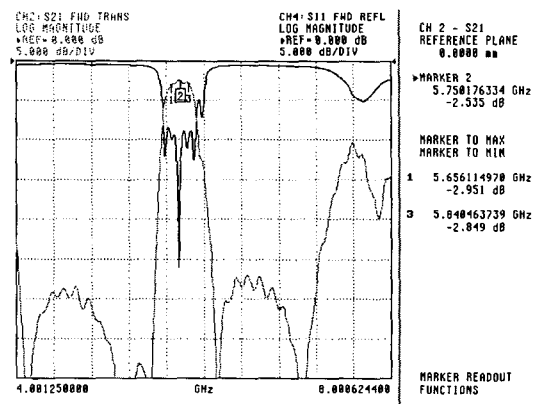


Fig 13. Measured return loss and insertion loss of the slow-wave bandpass filter using ring resonators with square PBG structures in the ground plane.

저지대역이 확장됨을 고찰하기 위해 그림 14에서 PBG 구조를 적용한 여파기의 삽입손실과 PBG 구조를 적용하지 않은 여파기의 삽입손실을 12 GHz까지 확장하여 비교한 결과 8 GHz와 10 GHz에서 발생하던 스퓨리어스 성분들이 -10 dB이하로 억제되어 저지대역

이 크게 확장됨을 알 수 있다.

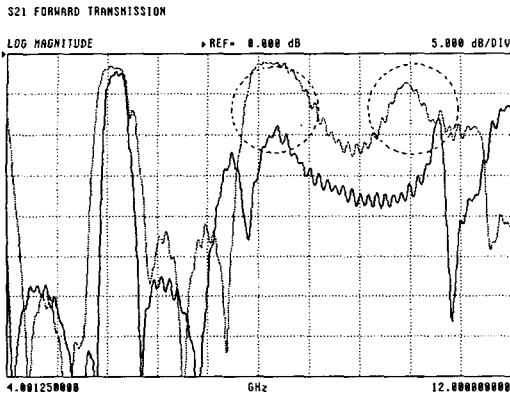


Fig. 14. Measured return loss and insertion loss of the slow-wave bandpass filter with square PBG structures, and without PBG structures.

V. 결론

5 GHz대 WLAN용으로 마이크로스트립 링 공간기를 사용한 저속파 대역통과 여파기와 이 여파기의 저지대역을 확장하기 위해 PBG 구조를 적용한 여파기를 설계·제작하였다. 주기적 구조인 마이크로스트립선로 상에 마이크로스트립 링 공간기들을 배열한 이 여파기는 기본모드에서 대역통과 여파기로 동작한다. 그리고 PBG 구조는 접지면에 동일한 크기의 슬롯을 일정한 주기로 식각한 것으로 특정 주파수 대역내의 전파를 억제시키는 역할을 한다. 이러한 PBG 구조는 슬롯의 모양, 슬롯의 크기 그리고 슬롯의 주기에 따라 PBG 구조의 저지대역 특성을 조절할 수 있다.

PBG 구조를 적용한 여파기 특성의 계산시간을 단축시키기 위해 정방형 슬롯을 사용하였고, Ensemble (Version 5.0) 소프트웨어를 사용하여 여파기를 설계하였다. 여파기의 크기를 작게 하고, 방사손실과 유전체 손실을 줄이기 위해 유전율 10.2, 두께 50 mil인 RT/Duroid/6010 기판을 사용하였다.

제작된 여파기는 타원함수 특성을 가지며 중심주파수에서 1.75 dB의 삽입손실을 가지고 예리한 차단특성을 가진다. 그리고 이 여파기의 저지대역을 확장하기 위해 PBG 구조를 적용한 결과, PBG 구조가 없는 여파기에 비해 중심주파수에서의 삽입손실이 0.78 dB 만큼 증가하고 대역폭이 크게 감소하였지만(6 %에서 2.7 %로), 더 예리한 차단특성을 보이며 저지대역이 11.5 GHz까지 확장됨을 알 수 있다.

앞으로의 연구과제는 비 균등 슬롯크기와 비 등간격 슬롯주기를 가지는 PBG 구조의 특성연구를 통해, 보다 많은 고조파 성분들을 제거하는 것이다.

참 고 문 헌

- [1] L. Hsieh and K. Chang. July. 2002. Slow-wave bandpass filters using ring or stepped-impedance hairpin resonators. *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.* vol(50) no(7) : 1795-1800.
- [2] J. S. Hong and M. J. Lancaster. Nov. 1996. Coupling of microstrip square open-loop resonators for cross-coupled planar microwave filters. *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.* vol(44) : 2099-2109.
- [3] F. R. Yang, K. P. Ma, Y. Qian. and T. Itoh. Aug. 1999. A uniplanar compact photonic-bandgap(UC-PBG) structure and its applications for microwave circuits. *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.* vol(47) : 1509-1514.
- [4] H. C. Bell. Dec. 1991. Narrow bandpass filters. *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.* vol(39) : 2188-2191.
- [5] 김상철. (2001). PBG 구조가 적용된 평행 결합 마이크로스트립 대역통과 여파기 설계에 관한 연구. 경상대학교, 석사학위논문.
- [6] David M. Pozar. (1998). *Microwave engineering.* 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc. :422-426.
- [7] K. Chang. (1996). *Microwave ring circuits and antennas.* John Wiley & Sons, Inc. : 25-30.