

# FDTD를 이용한 PBG 구조를 갖는 마이크로스트립 대역저지 여파기에 관한 분석

Analysis of Microstrip Bandstop Filter Based  
on the Photonic Bandgap(PBG) Structure Using FDTD

호진기, 윤영실, 박상현, 최영완, 김형석, 김호성 · 중앙대학교 전자전기공학부  
Jin-Key Ho, Young-Seol Yun, Sang-Hyun Park, Young-Wan Choi, Hyeong-Seok Kim, Hoseong Kim  
· School of Electrical & Electronics Eng. Chung-Ang Univ.

## ABSTRACT

본 논문에서는 그라운드 판에 주기적으로 에칭된 원으로 구성된 Photonic Bandgap(PBG) 여파기가 광대역 하모닉 성분을 제거할 수 있음을 보인다. FDTD법과 제작, 실험을 통해 얻은 결과를 이용하여 PBG 구조의 특성을 분석해 보았고, FDTD법은 다양한 3차원 구조를 시뮬레이션을 할 수 있고 광대역의 주파수 응답을 볼 수 있다. 분석 결과는 에칭된 원들을 2차원으로 배열한 경우와 일렬로 배열한 경우 모두 똑같은 결과가 나오는 것을 나타냈다. 그리고 에칭된 원과 원 사이의 공진기의 특성을 필드패턴을 통해서 알아 보았고, 에칭된 원들의 수  $n$ , 에칭된 원의 반지름  $r$ 과 주기  $a$ 의 변화에 따른 주파수의 특성을 보았다.

In this paper, photonic bandgap(PBG) bandstop filters which are composed of periodically etched circles in the ground plane show good microwave characteristics with the harmonic suppression on stopband. The PBG structures were

analyzed using a finite-difference time-domain(FDTD) simulation and experimental measurement. The FDTD technique is used because it can simulate arbitrary 3-D structures and provide broadband frequency response. The analysis results are presented it is the same that only one row of etched circles and 2-dimension three rows of etched circles. And we show the PBG resonator characteristics between etched circles using field pattern and frequency characteristics as functions of etched circle number  $n$ , etched circle radius  $r$  and period  $a$ .

Keyword : PBG, Bandstop, Filter

## I. 서론

무선통신의 증가로 인해 무선통신 서비스의 질적인 향상과 작은 크기와 가벼운 무게 등이 요구되고 있다. 또한 무선통신 시스템에서 사

용되는 주파수도 점점 높은 주파수 대역으로 확장되고 있는 추세여서 보다 적당하고 다양한 RF기술의 개발이 필수적이다.

특히 무선통신 서비스에서는 통신 시스템에 지대한 영향을 미치는 고조파 신호 성분의 억제에 대한 관심이 증가함에 따라 이를 효율적으로 제거할 수 있는 여파기가 필요하다. 통신 시스템에서 많이 발생하는 고조파 신호 성분인 하모닉을 제거하는 방법으로 기준주파수(fundamental frequency)의  $\lambda/4$  파장의 개방 또는 단락 스티브를 사용하는데 협대역이라는 단점이 있다.

PBG(Photonic Band-Gap)구조는 특정 주파수 대역에 대해서 전자파의 진행을 저지하는 특성을 가지는 주기적인 구조이다[1]. 원래는 광학 영역에서 연구가 진행되었으나 이 이론은 마이크로파와 밀리미터파를 포함한 넓은 주파수 영역에 적용이 가능하다. 마이크로파 영역에서 PBG의 디자인은 [2]에서 제안되었다. 마이크로스트립 기술에서 PBG구조는 유전체 기판에 주기적 패턴을 드릴링하거나 그라운드 판에 원을 에칭하는 것이다. 전자에 비해 후자는 보다 제작이 쉬우며 집적화(monolithic) 기술에 알맞고 저지 대역에서 보다 좋은 특성을 얻을 수 있고, 스티브를 사용한 것에 비해서 보다 넓은 대역 저지 특성을 보인다.

기존에 제시되었던 PBG 구조는 마이크로스트립 그라운드 판에 에칭된 원들을 2차원 배열로 주기적으로 구성을 했지만, 본 논문에서는 2차원 배열이 아니라 일렬로 배열한 경우에도 똑같은 결과가 나오는 것을 보인다. 그 이유는 마이크로스트립 선로와 그라운드 판 사이에 생기는 필드가 넓게 퍼져 나가지 않고 선로 밑에 한정 되기 때문에 선로 바로 밑에 있는 에칭된 원만이 PBG 특성에 영향을 미치기 때문이다.

수치해석 방법은 FDTD(유한차분 시간영역 : Finite-Difference Time-Domain)을 사용했다. FDTD법은 현재 널리 알려진 수치해석법으로 전자계 분포를 구하기 위해 맥스웰 방정식의 미분형을 직접 사용하므로, 시간상의 전자계 분포를 직접 확인할 수 있다는 장점이 있고, 또 Fourier 변환에 의해서 주파수 영역의 해석도 가능하다.

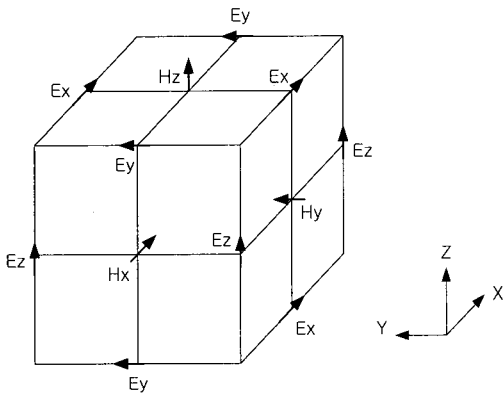
## II. 분석방법

FDTD(유한차분 시간영역 : Finite-Difference Time-Domain) 방법은 K. S. Yee가 1966년 제안한 이래 2차원 및 3차원 산란 문제에 광범위하게 사용되어져 왔다[3]. 3차원에서 전자파 전파를 계산하기 위해 Yee는 전계와 자계가 각기 다른 절점(node)에서 계산되도록 Maxwell의 미분방정식을 이산화된 단위격자로 표현하였다. [그림 1]에서처럼 계산공간을 단위격자로 이산화하여 공간 및 시간 영역에 중심차분을 각각 적용하면 식 (1)과 같은 3차원 차분방정식으로 변환할 수 있다. 나머지 필드분포도 마찬가지로 구할 수 있다. 여기서  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ 는 x, y, z 방향의 공간이산화 간격이며,  $\Delta t$ 는 이산화시간 간격이다.

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) = H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k) - \frac{\Delta t}{\mu} \left[ \frac{E_z^n(i, j, k) - E_z^n(i, j-1, k)}{\Delta y} - \frac{E_y^n(i, j, k) - E_y^n(i, j, k-1)}{\Delta z} \right] \quad (1)$$

[그림 1]에서 보는 바와 같이 전계절점과 자계절점은 시간, 공간적으로 반단위씩 서로에

대해 엇갈려 있다. 즉, 전계성분은 자계값으로부터 계산되고 자계성분은 전계값으로부터 계산된다. 이러한 방식으로 시간단위가 증가함에 따라 모든 공간에서의 필드값이 반복법에 의해 계산되어진다.



[그림 1] Yee의 격자구조  
[Fig. 1] Yee's mesh

FDTD에서는 컴퓨터의 처리속도와 메모리의 한정 때문에 계산영역을 유한한 경계로 나누고 경계면에 흡수경계조건을 두어 무한대의 평면으로 간주하여야 한다. 이러한 흡수경계조건은 인위적으로 한정된 계산영역의 가장자리 경계면에서 입사파가 반사되지 않고 개방구조에서와 같이 외부로 전파하여 나가도록 하는 수학적 기법이다.

FDTD에 의한 시간영역 데이터로부터 주파수 스펙트럼을 구하기 위한 이산 Fourier 변환식은 다음과 같다.

$$V(k\Delta f) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} V(n\Delta t) \exp\left(\frac{-j2\pi kn}{N}\right),$$

$$k=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2)$$

여기서  $N$ 은 시간반복횟수,  $\Delta f=1/(N\Delta t)$

는 주파수 해상도를 나타낸다.

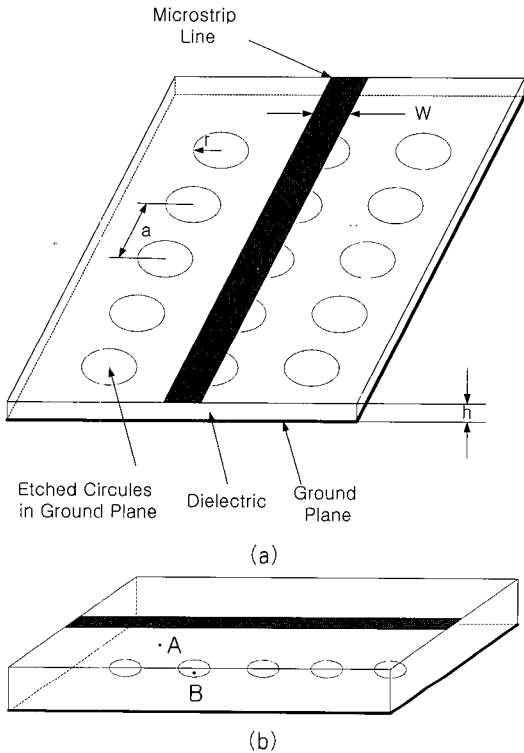
유한차분시간영역(FDTD)방법은 3차원 마이크로스트립 구조의 주파수 의존특성을 효율적으로 계산할 수 있다[4]. FDTD방법은 해석공간을 이산화한 후 각 격자점에서의 입사필드의 진행과정을 기록하므로 해석시간이 길어지게 되며 컴퓨터의 기억용량이 커진다는 단점이 있지만 효율적으로 전자기문제를 계산할 수 있다. 시간영역 데이터가 충분하면 Fourier 변환 알고리즘을 적용하여 정확한 주파수 스펙트럼을 얻을 수도 있다.

### III. Photonic Bandgap 여파기 설계와 실험

PBG는 광학 주파수 영역에서 연구가 시작되었다. 유전체나 크리스탈 반도체 기판에 3차원의 주기적인 배열로 구성되었다. 하지만 최근에는 마이크로파와 밀리미터파에서도 PBG의 관심이 증가되고 있다. PBG 구조는 주기적인 구조로 주파수의 특정 대역의 진행을 저지하는 특성을 나타낸다. PBG 특성은 넓은 주파수 범위에서 적용이 가능하고 안테나의 방사 패턴을 향상시키고, 전력 증폭기의 효율과 출력을 증가시키는데도 사용할 수 있다. PBG는 금속, 유전체, 페로마그네틱(ferromagnetic)이나 페로일렉트릭(ferroelectric) 물질에 주기적인 결합을 주어서 만들 수 있다.

그 중에서 마이크로스트립 회로에서 많이 사용하고 있는 구조는 기판의 유전체에 결합을 준 PBG 구조[5][6]와 그라운드 판에 결합을 준 PBG 구조가 있다[2]. 유전체에 결합을 준 PBG 구조는 기판에 주기적 패턴의 드릴링이 요구되어 제작이 어렵다는 단점을 가지고 있다. 하지만 [2]에서 제시된 [그림 2](a)와 같이 그

라운드 판에 결함을 준 PBG 구조는 단지 마이크로스트립 라인의 그라운드 판에 주기적으로 부분적인 에칭만 하면 되기 때문에 드릴링이 필요없어서 회로의 집적화 기술(MMIC)에도 적합하고 유전체에 결함[6]을 준 방법보다 넓고 깊은 대역 저지의 특성을 보여준다.



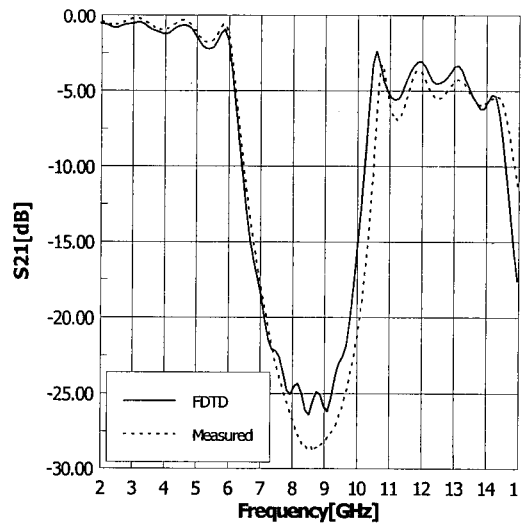
[그림 2] PBG 구조의 3차원 모양 (a) 그라운드 판에 에칭된 원이 2차원으로 배열된 구조 (b) 그라운드 판에 에칭된 원이 1차원으로 배열된 구조

[Fig. 2] 3-D view of the PBG structure (a) The ground plane has 2-dimension etched circles (b) The ground plane has 1-dimension etched circles

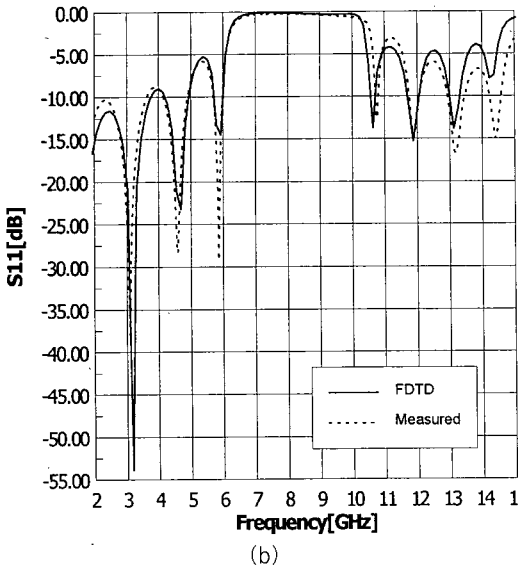
[그림 2](a)에서 보이는 PBG 구조는 임피던스가 50Ω인 마이크로 선로의 그라운드 판에 에칭된 원들로 2차원 배열을 이루고 있다. 하지

만 본 연구에 의하면 [그림 2](b)의 구조와 같이 마이크로스트립 선로 바로 밑에 있는 얇은 두 줄의 원들을 제거하고 한 줄로만 PBG를 구성했을 때도 3열의 2차원 구성 때와 같은 결과가 나오는 것을 보인다.

[그림 3]은 [그림 2](b)의 구조를 FDTD 시뮬레이션에 의해서 구한 PBG 여파기의 S-파라미터의 값과 HP8510으로부터 구한 S-파라미터의 값이다. 제작된 PBG 여파기는 기판의 유전율( $\epsilon_r$ )은 2.5, 두께는 0.8mm이고, 마이크로스트립 선로의 임피던스를 50Ω에 맞추기 위해 선로의 폭은 2.5mm로 하였다. 에칭된 원의 반지름  $r$ 은 2.75mm이고, 주기  $a$ 는 12.25mm이고, 선로 방향으로 5개의 원을 두었다. FDTD에서는 8.52GHz에서 최대 저지대역 깊이는 -26.4dB이고, 측정치에서는 8.69GHz에서 최대 저지대역 깊이가 -28.9dB였다. 시뮬레이션을 통해서 계산된 결과와 측정된 결과 값이 거의 일치함을 볼 수 있고, 따라서 FDTD는 이러한 구조를 정확하게 파악할 수 있는 좋은 방법이라는 것을 알 수 있다.

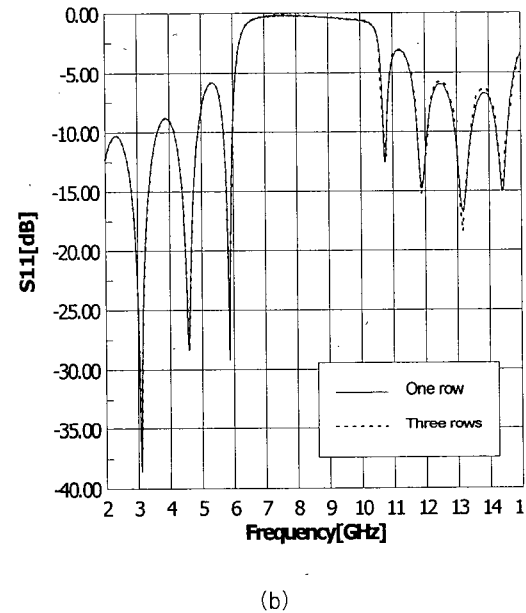
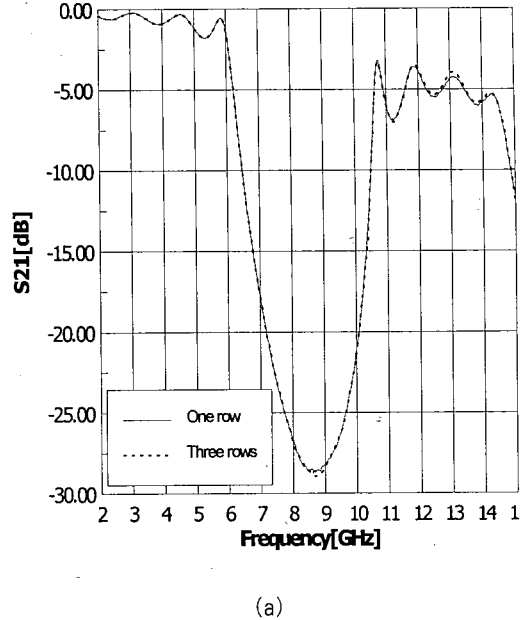


(a)



[그림 3] FDTD 계산치과 측정치 (a)  $S_{21}$  와 (b)  $S_{11}$   
 [Fig. 3] FDTD simulated and measured  
 (a)  $S_{21}$  and (b)  $S_{11}$

[그림 4]는 3줄의 2차원으로 구성된 배열과 한 줄의 1차원으로 구성된 배열을 제작을 통해 측정한 결과이다. 1차원 배열의 결과값과 2차원 배열의 결과값이 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 이것은 FDTD 시뮬레이션의 계산치에서도 똑같은 결과가 나왔는데 마이크로스트립 선로와 그라운드 판 사이에서 진행되는 전자파는 필드가 넓게 퍼져 나가지 않고 선로 근처에 집중되어 있기 때문에 선로 바로 밑에 있는 에칭된 원만이 PBG 특성에 영향을 미치고 선로에서 떨어져 있는 나머지 원들은 전송선로를 따라 진행되는 전자파에 거의 영향을 미치지 않아서 2차원으로 원들을 배열하지 않고 단지 한 줄의 원들을 마이크로스트립 선로 밑에 배열해도 같은 결과가 나오는 것을 볼 수 있다. 따라서 1차원의 간단한 배열로도 그 특성을 충분히 나타낼 수 있어서 기판의 폭을 줄여서 작은 크기의 PBG 여파기 제작이 가능하다.



[그림 4]  $5 \times 3$  PBG와  $5 \times 1$  PBG의 측정치  
 (a)  $S_{21}$  와 (b)  $S_{11}$   
 [Fig. 4] Measured of  $5 \times 3$  PBG and  $5 \times 1$  PBG  
 (a)  $S_{21}$  and (b)  $S_{11}$

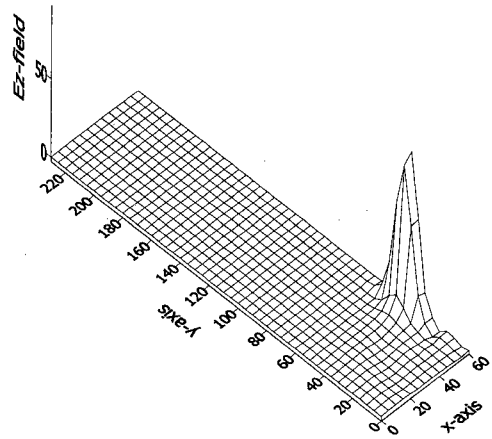
## IV. PBG 여파기의 특성

### 1. PBG 여파기의 공진 특성

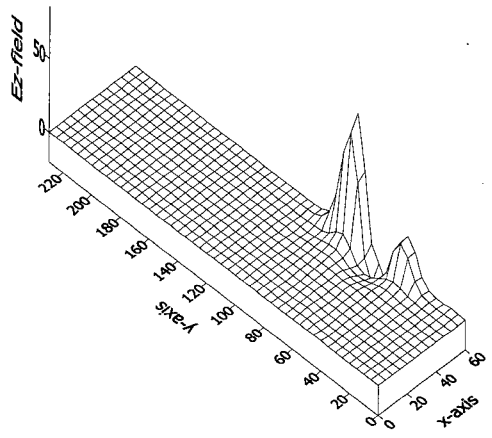
PBG 구조는 매질을 통과하는 전자파의 진행이 주기적 요소에 의해서 산란과 회절의 영향을 받게 되고, 전송선로의 물리적 특성을 변화시켜서 독특한 대역 저지 특성을 나타내게 된다.

[그림 5]는 입사된 가우시안 펄스가 마이크로스트립 전송 선로를 따라 진행하는 것을 시간 영역에서 보여주고 있다. PBG 구조는 마이크로스트립 선로를 중심으로 대칭이기 때문에 FDTD를 전 영역에 대해서 하지 않고 흡수 경계 조건을 이용하여 대칭되는 반쪽 영역에 대해서만 고려하였고 [그림 5]는 예칭된 원들이 4개인 구조에서 FDTD의 결과이다. [그림 5](a)는 입사파가 아직 예칭된 원에 도달하기 전으로 일반적인 마이크로스트립 선로에서의 전자파의 진행과 같은 형태를 보이고 있다.

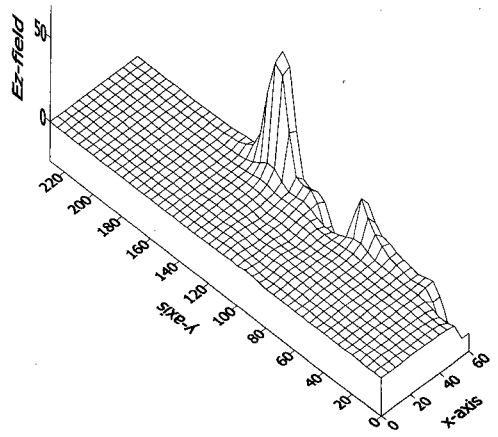
[그림 5](b)(c)(d)는 입사파가 예칭된 원과 만나서 일부파는 계속 진행을 하고 일부파는 반사되어 돌아오고 있음을 보인다. [그림 5](b)는 첫 번째 예칭된 원을 만난 뒤에 반사되는 파가 보이고 있고 (c)는 두 번째 원과 만난 뒤에 반사되는 파의 필드가 보이고 있고 마지막으로 (d)는 네 번째 원을 지난 뒤에 출력쪽으로 진행하고 있는 입사파와 4개의 원에서 각각 반사된 파가 원과 원 사이에서 계속 남아있음을 보여준다. 주기적으로 예칭된 원의 수가 많을수록 특정 주파수대의 반사량이 많을 것이고 대역저지 특성이 좋아지리라는 것을 예상할 수 있다. 또한 진행하는 파의 필드가 마이크로스트립 선로에 한정되어 다른 예칭된 원이 선로에 매우 가깝게 위치되지 않는 한 거의 영향을 미치지 않을 것임을 알 수 있다.



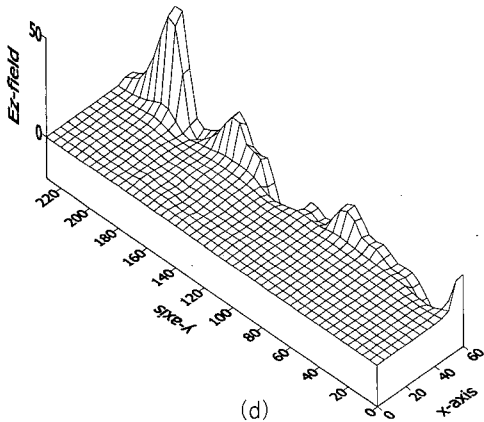
(a)



(b)



(c)

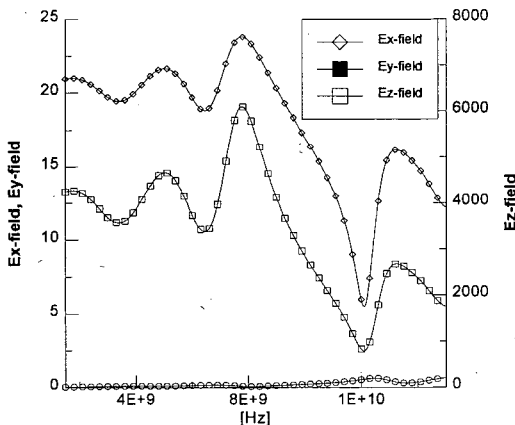


[그림 5] FDTD를 이용한 PBG 구조에서 전자파의 진행

(a) n=150 (b) n=250 (c) n=400 (d) n=600

[Fig. 5] Electromagnetic wave propagation in the PBG structure using FDTD (a) n=150 (b) n=250 (c) n=400 (d) n=600

[그림 6]은 PBG의 공진 특성을 보기 위한 FDTD의 결과이다. [그림 2](b)의 점 A에서와 같이 전자파의 진행 방향으로 첫번째 원과 두번째 원의 중간 지점에서의 필드의 세기를 주파수 영역에서 보이고 있는데 8GHz 대에서  $E_z$  필드의 세기가 큰 값을 보이고 있고 공진이 있다는 것을 알 수 있다.

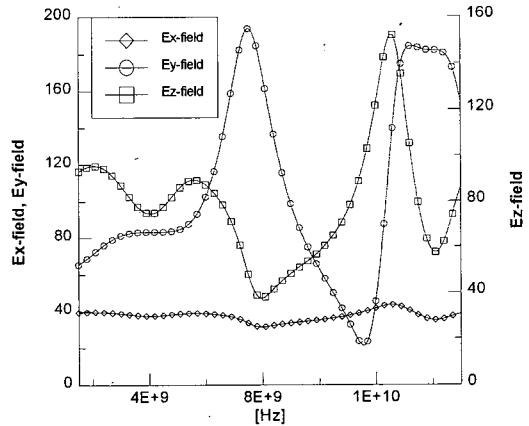


[그림 6] 주파수상에서 에칭된 원과 원 사이의 필드의 세기

[Fig. 6] Field intensity between etched circles in the frequency domain

## 2. 에칭된 원에서의 방사와 PBG 여파기의 여러 변수들

[그림 7]은 마이크로스트립 선로를 따라 진행하던 전자파가 그라운드 판의 에칭된 원에서 방사되는 필드의 세기를 나타내는 결과이다. [그림 7]에서 보이는 필드의 세기는 [그림 2](b)의 점 B에서 FDTD를 이용해서 구한 것으로 그라운드 판에 에칭된 원의 중심에서 한 그리드 아래 지점이다. [그림 6]과 비교하여 보면 에칭된 원에서 빠져나오는 필드가 매우 작음을 알 수 있다. 이것은 무선통신에서는 무척 중요한 사항으로 다른 시스템에 미치는 영향이 별로 없음 것임을 알 수 있다.



[그림 7] 에칭된 원에서 방사되는 필드의 세기  
[Fig. 7] Radiation Field intensity in the etched circle

마이크로스트립 PBG 구조의 여파기를 설계할 때에 중요한 것은 정확한 주파수 응답을 예측하는 것이다. 그 중에서도 저지대역의 중심 주파수를 구하는 것이 목적인데, 저지대역의 중심 주파수  $f_c$ 는 주기의 함수로 파장은 매질내에서 주기  $a$ 의 두 배로 식 (3)과 같다. 즉 주기  $a$ 를

변화시켜서 중심 주파수를 변화시킬 수 있다.

$$\lambda_c = 2a \quad (3)$$

여기서 매질내의 파장과 실효유전상수는 식 (4)와 식 (5)와 같고 이 식은 일반적인 마이크로스트립 선로에서 적용되는 식이다.

$$\lambda_c = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{ff}}} \quad (4)$$

$$\epsilon_{ff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{W}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

(for  $W/h \geq 1$ )

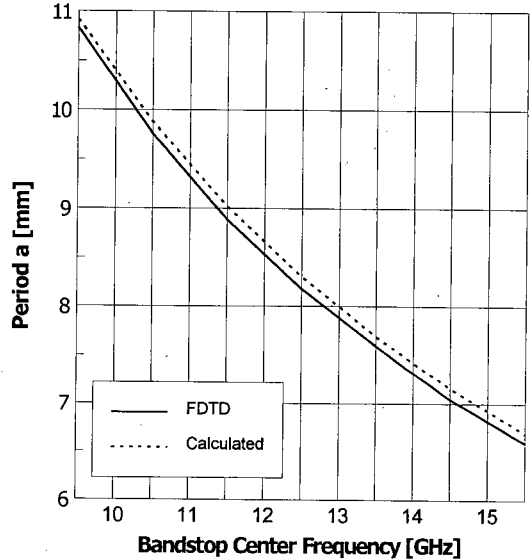
따라서 중심 주파수는 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$f_c = \frac{c}{2a \frac{\beta}{\beta_0}} \quad (6)$$

여기서  $c$ 는 빛의 속도이고,  $\beta$ 는 주기적인 구조에서의 전파상수,  $\beta_0$ 는 자유공간의 전파상수이고  $a$ 는 주기이다. 에칭된 원들은 전송선로의 물리적 특성을 변화시키기 때문에 주기적인 구조에서의 전파상수는 쉽게 결정할 수 없지만 일반적인 마이크로스트립 선로에서의 전파상수를 적용하여 근사화된 값을 얻을 수 있다.

[그림 8]은 에칭된 원의 반지름과 주기의 수는 고정시키고 주기  $a$ 의 길이를 변화시키면서 시뮬레이션을 해서 얻은 결과이다. 기판의 유전율  $\epsilon_r$ 은 2.5, 두께  $h$ 는 0.8mm이고, 에칭된 원의 반지름  $r$ 은 2mm이고, 주기의 수  $n$ 은 4개이다. 식 (6)에 의해서 계산된 값과 약간의 오차가 있는 것을 볼 수 있는데 이것은 식 (6)에

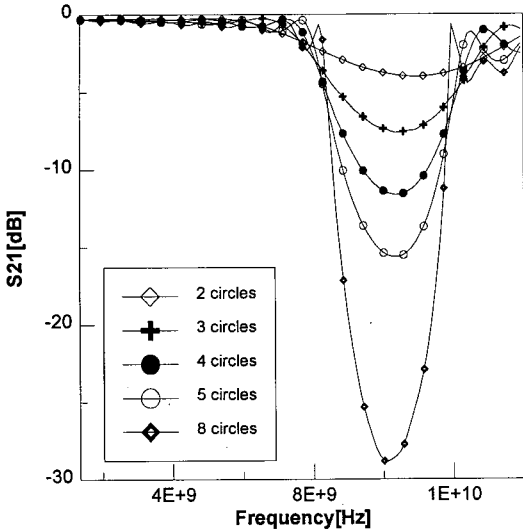
PBG 구조의 마이크로스트립 선로의 전파상수가 아닌 근사화된 전파상수를 넣었기 때문에 생기는 오차이다. 하지만 식 (6)을 이용하면 저지대역의 중심주파수를 근사적으로 구하고 PBG 여파기의 주기를 계산해 낼 수 있다.



[그림 8] 주기  $a$ 에 따른 저지대역의 중심 주파수의 변화 ( $r=2mm, n=4$ )  
 [Fig. 8] Varying center frequency of stopband according to period  $a$  ( $r=2mm, n=4$ )

에칭된 원의 반지름  $r$ 과 주기의 수  $n$ 은 저지대역의 깊이와 대역폭에 영향을 미친다. 특히 주기의 수는 저지대역의 깊이를 결정하는데 주기의 수를 결정하기 위한 간단한 식은 존재하지 않고 실험적으로나 full-wave analysis를 통해서나 알 수 있다. [그림 9]는 주기의 수에 따른 특성을 보이고 있다. 에칭된 원의 반지름  $r$ 은 2mm이고, 주기  $a$ 는 10mm이고, 주기적으로 배열되어 있는 원의 수가 많아질수록 저지대역의 깊이가 좋아진다는 것을 보인다.

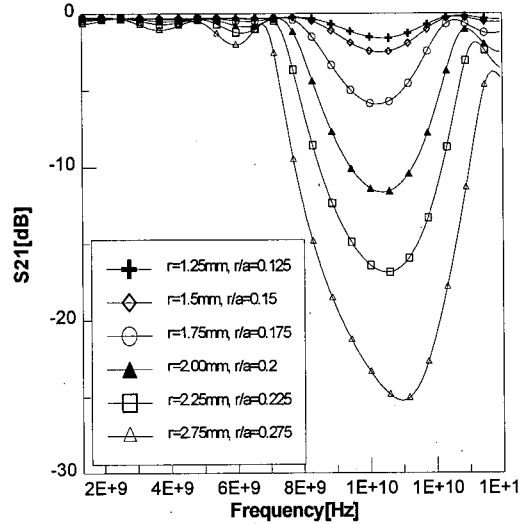




[그림 9] 주기의 수의 증가에 따른  $S_{21}$ 의 특성 ( $a=10mm, r=2mm$ )

[Fig. 9] Characteristics of  $S_{21}$  according to increasing the number of periods ( $a=10mm, r=2mm$ )

파이다. 원의 반지름  $a$ 와 주기  $r$ 사이에서 최적화된 값은  $0.15 < r/a < 0.25$ 라는 것을 볼 수 있다.



[그림 10] 에칭된 원의 반지름의 증가에 따른  $S_{21}$ 의 특성 ( $a=10mm, n=4$ )

[Fig. 10] Characteristics of  $S_{21}$  according to increasing the etched circle radius ( $a=10mm, n=4$ )

저지대역의 깊이에 영향을 미치는 요소가 주기의 수라면, PBG 구조에서 대역폭에 영향을 미치는 요소는 에칭된 원의 반지름  $r$ 이다. 반지름이 작아지면 저지대역의 폭이 작아지고 0에 가까워 질수록 마이크로스트립 선로의 본래 특성과 같아지게 된다. 반대로 원의 반지름이 증가하면 저지대역은 보다 넓어지고  $r$ 이 무한대로 가면 그라운드 판이 사라져서 어떠한 전자파도 더 이상 진행을 하지 않게 된다. 대역폭은 중심주파수를 결정하는 주기  $a$ 와 에칭된 원의 반지름  $r$ 의 비로 나타내게 되는데  $r/a$  값을 작게 하면 통과대역의 리플은 줄어들지만 저지 대역폭 역시 줄어들고,  $r/a$  값을 크게 하면 통과 대역의 리플은 커지지만 저지 대역이 넓어지는 상관관계를 가지고 있다. [그림 10]은 주기  $a$ 는 10mm로 고정시키고 주기의 수는 4개로 하고, 에칭된 원의 반지름을 변화시킨 결

## V. 결론

PBG의 구조를 갖는 주기적 여파기는 광대역의 대역 저지 특성을 가지기 때문에 광대역 하모닉 튜닝을 할 수 있다. 마이크로스트립 라인의 그라운드 판에 에칭된 원을 갖는 PBG 구조는 드릴링이 필요없어서 회로의 집적화 기술(MMIC)에도 적합하고 유전체에 결함을 준 방법보다 넓고 깊은 대역 저지의 특성을 보여 준다.

PBG 구조를 갖는 마이크로스트립 대역저지 여파기에 관한 특성을 정확하게 파악하기 위해

서는 full-wave analysis가 필요하다. 그래서 다양한 3차원 구조를 시뮬레이션할 수 있고 광대역의 주파수 응답을 볼 수 있는 FDTD법과 제작, 실험을 통해 얻은 결과를 이용하여 PBG 구조의 특성을 알아보았다.

본 논문에서 살펴본 1차원 구조의 PBG 여파기는 2차원의 복잡한 배열이 아니라 1차원의 간단한 배열로도 그 특성을 충분히 나타낼 수 있어서 작은 크기의 PBG 여파기 제작이 가능하고 마이크로스트립 선로의 그라운드 판에 일렬로 구성을 하면 되기 때문에 전력 증폭기나 마이크로스트립 패치 안테나 등의 여러 가지 다른 구조를 갖는 마이크로스트립 회로와 복합적으로 구성하는데 훨씬 효율적으로 사용될 수 있다는 장점을 가지고 있다.

에칭된 원과 원 사이의 공진기의 특성을 FDTD를 이용해서 시간 영역과 주파수 영역에서 필드패턴을 통해서 알아 보았고, 주기의 변화, 에칭된 원들의 수, 에칭된 원의 반지름의 변화에 따른 주파수 응답 특성을 보았다.

---

#### ■참고문헌

---

- [1] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn, Photonic Crystals: Molding the Flow of Light, Princeton: NJ, Princeton Univ. Press, 1995
- [2] V. Radisic, Y. Qian, and T. Itoh, "Novel 2-D photonic band-gap structure for microstrip lines," IEEE Microwave Guided Wave Lett., vol.8, no.2, pp.69-71, Feb. 1998
- [3] K. S. Yee, "Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equation in Isotropic Media," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol.14, pp.302-307, May 1966
- [4] D. M. Sheen, S. M. Ali, M. D. Abouzahra and J. A. Kong, "Application of the three-dimensional finite-difference time-domain method to the analysis of planar microstrip circuits," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.38, pp.849-857, July 1990.
- [5] T. J. Ellis and G. M. Rebeiz "MM-wave tapered slot antennas on micromachined photonic bandgap dielectrics," IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., pp. 1157-1160, June 1996
- [6] Y. Qian, V. Radisic, and T. Itoh, "Simulation and experiment of Photonic bandgap structures for microstrip circuits," APMC'97 Proc., Hong Kong, pp. 585-588 Dec. 1997
- [7] V. Radisic, Y. Qian, T. Itoh, "Novel Architectures for High-Efficiency Amplifiers for Wireless Applications," IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., vol.46, no.11, pp.1901-1909, Nov. 1998

#### 감사의 글

본 논문은 1999학년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의해 이루어졌습니다.

저자 소개



**호 진 기(Jin-Key Ho)**

1998년 2월 중앙대학교 전자공학과  
(공학사)

2000년 8월 중앙대학교 첨단영상대  
학교(공학석사)

2000년 8월~현재 테이콤

주관심분야 : Microwave-photonics,  
FDTD

1992년 버팔로 뉴욕주립대(SUNY  
at Buffalo), 전기 및 컴퓨  
터공학과(공학박사)

1992년~1995년 한국전자통신연구  
원(ETRI), 선임연구원

1995년~현재 중앙대학교 전자공학  
과 교수

주관심분야 Microwave-Photonics,  
Optical interconnection,  
광스위칭시스템 및 소자



**윤 영 설(Young-Seol Yun)**

1998년 2월 중앙대학교 전자공학과  
(공학사)

2000년 2월 중앙대학교 첨단영상대  
학원(공학석사)

2001년 3월~현재 중앙대학교 전자  
전기공학부 박사과정

주관심분야 Microwave-photonics,  
FDTD, Numerical analysis



**김 형 석(Hyeong-Seok Kim)**

1985년 서울대학교 전기공학과 공  
학사

1987년 동대학원 공학석사

1990년 동대학원 공학박사

1990년~2002년 순천향대학교 정보  
기술공학부

1997년~1998년 R.P.I. 미국 방문  
교수

2002년~현재 중앙대학교 전자전기  
공학부 부교수

주관심분야 RF 및 마이크로웨이브  
소자 및 시스템, 전자파해석



**박 상 현(Sang-Hyun Park)**

1995년 2월 중앙대학교 전자공학과  
(공학사)

1997년 2월 중앙대학교 첨단영상대  
학원(공학석사)

1997년 9월~현재 중앙대학교 전자  
전기공학부 박사과정

주관심분야 : Wireless System,  
Microwave Component

**金 鎬 成(Ho-Seong Kim)**

1980년 서울공대 전기공학과 학사

1982년 동 대학원 전기공학과 석사

1992년 SUNY ay Buffalo 전기공  
학과 박사

1983년 9월~1986년 8월 금성전기  
기술연구소 주임연구원

1993년 3월~현재 중앙대학교 전기  
공학과 교수



**최 영 완(Young-Wan Choi)**

1985년 서강대학교 전자공학과(공  
학사)

1987년 버팔로 뉴욕주립대(SUNY  
at Buffalo), 전기 및 컴퓨  
터공학과(공학석사)

