

넓은 저지대역을 가지는 압축된 PBG 링 구조

Pressed PBG Ring Structure with a Wide Stopband

김성일 · 기철식 · 박익모 · 임한조

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

요 약

본 논문에서는 두 마이크로스트립 라인으로 이루어진 압축된 마이크로스트립 PBG 링 구조에서 두 마이크로스트립 라인간의 간격변화에 따른 삽입손실 특성을 연구하였다. 두 라인이 가까워짐에 따라 라인간의 커플링으로 인하여 두 개의 감쇄폴이 생겨 넓은 저지대역을 가지며 갭 간격이 매우 가까워지면 2개의 감쇄폴이 3개로 늘어나 저지대역은 매우 넓어지고 cutoff 특성 또한 향상된다.

Abstract

In this paper, we have studied the dependence of insertion loss of the pressed microstrip PBG ring consisting of coupled two microstrip lines. When the distance decreases, two or three attenuation poles are created by the coupling between the lines. Thus the pressed PBG ring exhibits a wide stop band and sharp cutoff characteristics.

Key words : Photonic Band Gap(PBG), Microstrip Pressed PBG Ring, Wide Stop Band Filter

I. 서 론

최근 전자기파의 전파를 효과적으로 제어할 수 있는 포토닉 밴드갭^[1](Photonic Bandgap: PBG)을 이용한 전자기파의 제어가 마이크로파에서 큰 관심의 대상이 되고 있다^[2]. PBG는 전자기파의 전파가 허용되지 않는 특정 주파수 영역을 뜻한다. 이러한 주파수 영역은 특성 임피던스가 일정한 주기로 반복하여 바뀌는 구조에서 형성되며 저지대역의 폭은 반복되는 임피던스간의 비에 비례한다^{[3][4]}. PBG가 생기는 것은 주기적인 구조의 경계면들에서 특성임피던스의 차이 때문에 반사가 일어나고 또한 이 반사파들의 위상이 적절하여 반사면들에서 보강간섭을 형성하기 때문이다. 사실 PBG는 가시광 영역에서 제안된 것이지만 PBG 특성은 모든 전자기파에 적용되므로 마이크로파 소자의 성능 향상에도 매우

유용하다. 이미 PBG 구조를 이용해 안테나의 전력 이득 향상과 복사형태 개선^{[5][6]}, 고차 harmonic 주파수제거를 통한 전력 증폭기^[7], 낮은 손실을 갖는 slow-wave 마이크로스트립 구조^[8], 분할기^[9] 등이 제안되고 있으며 PBG 구조를 응용한 새로운 마이크로 및 밀리미터파 소자의 개발도 기대되고 있다. 하지만 PBG를 형성하기 위해서는 일정한 주기가 적어도 6 혹은 7번은 반복되어야 하기 때문에 마이크로파 영역에서의 PBG 구조를 이용한 소자의 크기는 기존의 마이크로파 소자에 비해 매우 크다는 단점을 가진다. 그러므로 마이크로파 PBG 구조에서 소자의 크기를 작게 줄이는 것이 중요하며 구조의 크기를 줄이고자 하는 선행 연구들이 있어 왔다^{[10][11]}.

최근 한 주기를 가지고도 PBG 특성을 얻을 수 있는 작은 갭을 가진 PBG 링 구조가 제안되었다^[12]. 그림 1(a)에 PBG 링 구조를 보였다. PBG 특성을 가

아주대학교 전자공학부 (School of Electrical and Computer Engineering, Ajou University)
· 논문 번호 : 20020906-107
· 수정완료일자 : 2002년 11월 7일

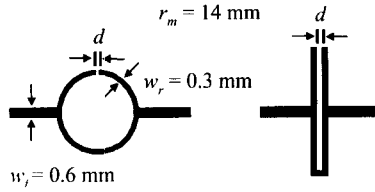


그림 1. (a) PBG 링 구조, (b) 압축된 PBG 링 구조
Fig. 1. (a) PBG ring structure, (b) pressed PBG ring structure.

지기 위해서는 주기적인 경계면에서 다중반사가 일어나야 한다. 즉 주기적인 경계면에서 적절한 위상을 가지고 반사되어 서로 보강간섭을 일으켜야 한다. 또한 PBG 구조를 큰 임피던스를 가지는 공진회로로 볼 수 있다^[11]. PBG 링에서 다중반사는 링의 갭에서 생긴 강한 임피던스 부정합에 의해서 생성된다^[12]. PBG 링의 경우 링과 갭간의 큰 임피던스 차이로 갭 부분에서 반사된 전자기파가 링을 따라 진행하다가 다시 갭에서 반사된다. 즉 링의 갭 부분이 2개의 반사면을 제공하기 때문에 PBG 특성을 가지기 위한 다중반사가 가능하다. PBG 링이 적절한 위상을 가지면서 다중반사가 일어나는 것을 확인하기 위해서 시뮬레이션을 통하여 PBG 링에서의 전기장 분포를 살펴보았다. 감쇄폴 부근에서 전기장 분포는 예상과 같이 링의 갭에서 최대가 되고, 입, 출력 포트에서 최소가 된다. 또한 PBG 링 구조는 병렬 연결된 LC 회로로 생각할 수 있다. 이는 병렬 LC 회로의 공진 주파수에서 특성 임피던스가 매우 커져서 PBG 링과 같이 전자기파를 모두 반사하기 때문이다. 이런 점에서 갭에 캐패시터를 추가하면 공진 주파수를 바꿀 수 있다. PBG 링의 갭에 varactor 다이오드를 연결하여 캐패시턴스를 조절할 수 있으며 이것으로 밴드갭의 위치를 조절할 수 있을 것이다^[12].

그림 1(a)의 PBG 링 구조는 한 주기로도 PBG 특성을 얻을 수 있기 때문에 구조의 크기가 작다는 장점을 가지고 있으나 밴드갭이 작고 cutoff 특성이 나쁘다는 단점 또한 가진다. 본 논문에서는 PBG 링 구조를 유지하면서도 앞의 단점을 개선시킬 수 있는 압축된 PBG 링 구조를 제안하고자 한다. 제안된 구조는 커플링 구조를 이용하여 감쇄폴의 숫자를 1개에서 3개로 증가시켜 소자의 특성을 개선하였다.

II. 본 론

그림 1(b)는 제안한 압축된 PBG 링 구조를 보여주고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 PBG 링을 압축하여 두 라인이 평행하게 하여 커플링 구조를 만들었다. 이 구조에서 두 라인 사이의 간격이 가까워지면 전자기파의 상호 간섭이 커져서 커플링(coupling) 현상이 생긴다. 최근 커플링을 이용한 계단 임피던스(steped impedance)를 가지는 저역통과 필터가 제안되었다. 그러나 이 구조는 압축된 PBG 링과 달리 두 스텝의 반대 부분, 즉 전송라인 부분이 거의 커플되지 않았으며 또한 밴드갭이 작고 밴드갭 중간에 spurious 통과 대역이 생긴다^[18]. 시뮬레이션과 제작은 기판의 두께가 0.635 mm이고 유전상수가 10.2인 RT/Duroid 6010 기판을 사용하였다. 시뮬레이션 결과에 의하면 스텝의 길이(l_s)는 $\lambda_g/4$ 가 되어야 하고 전송선로의 길이(l_t)는 $\lambda_g/2$ 가 되어야 spurious 통과 대역이 없는 넓은 밴드갭을 얻을 수 있다. 여기서 λ_g 는 저지지역의 중심 주파수에 해당하는 관내파장이다. 그림 2는 링의 둘레 길이(r_m)가 14 mm일 경우 PBG 링과 압축된 PBG 링의 갭 간격(d)가 0.1 mm, 0.17 mm일 때 삽입손실을 보여준다. 그림 2의 PBG 링을 가리키는 짧은 점선은 1개의 감쇄폴을 가지고 있으나 압축된 PBG 링의 경우 갭이 0.17 mm일 때 두 개의 감쇄폴이 나타나고 0.1 mm로 좁아질 때 감쇄폴이 세 개로 늘어났다. 커플링 때문에 감쇄폴의 숫자가 늘면서 밴드갭이

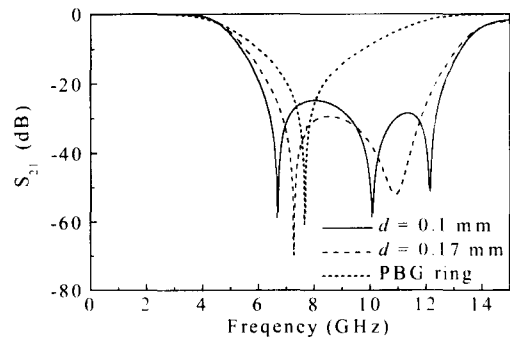


그림 2. PBG 링과 압축된 PBG 링의 $d = 0.1$ mm, 0.17 mm일 때 시뮬레이션 결과
Fig. 2. Simulated results for PBG ring and pressed PBG ring with $d = 0.1$ mm, 0.17 mm.

큰 폭으로 증가하였다.

압축된 PBG 링 구조의 특성을 알아보기 위해 2 단자망에 대한 [S] 파라미터를 구하였다. 첫째, 피드 라인을 중심으로 스텝 부분과 전송라인 부분으로 나누어 각각 [Z] 파라미터를 구하였다^[19]. 둘째, 각각의 [Z] 파라미터를 [Y] 파라미터로 변환한 후, 두 [Y] 파라미터를 하나로 합쳤다. 셋째, [Y] 파라미터를 [S] 파라미터로 변환하였다^[17]. 그림 2에서와 같이 압축된 PBG 링 구조는 두 라인이 커플되어 있기 때문에 2개의 감쇄폴이 나타날 것으로 예측하였으나 특이하게도 3개의 감쇄폴이 생긴다. 압축된 PBG 링 구조의 스텝 부분에 불연속(discontinuity)에 의한 edge 캐패시턴스(C_e)가 존재하며^[13] $C_e = 0$ pF일 때 위에 언급한 방식으로 [S] 파라미터를 구하였다.

$$S_{11} = \frac{Y_f^2 + 2Y_o Y_c \tan \beta_c l (\tan \beta_o l - \cot \beta_o l)}{\Delta Y} \quad (1)$$

$$S_{21} = \frac{jY_f [Y_o (\tan \beta_o l - \cot \beta_o l) - 2Y_c \tan \beta_c l]}{\Delta Y} \quad (2)$$

$$S_{22} = S_{11}, \quad S_{12} = S_{21}$$

$$\Delta Y = Y_f^2 + jY_f [Y_o (\tan \beta_o l - \cot \beta_o l) + 2Y_c \tan \beta_c l] + 2Y_c Y_o \tan \beta_c l (\tan \beta_o l - \cot \beta_o l)$$

여기서 Y_c, Y_o, Y_f 는 커플된 라인의 우, 기 모드와 피드라인의 특성 어드미턴스를 나타내며 β_c, β_o 는

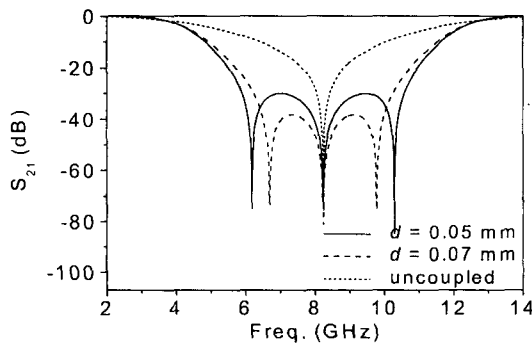


그림 3. Stripline 구조에서 압축된 PBG 링의 $r_m = 14$ mm, $w_r = 0.4$ mm, $b = 1$ mm일 때, $d = 0.05$ mm, 0.07 mm와 uncoupled 모드의 시뮬레이션 결과

Fig. 3. Simulation results for pressed PBG ring with $r_m = 14$ mm, $w_r = 0.4$ mm, and $b = 1$ mm for $d = 0.05$ mm, 0.07 mm, and uncoupled mode.

커플된 라인에 의한 우, 기 모드의 위상 상수, l 은 커플된 두 라인이 접하고 있는 물리적 길이, 즉 $r_m/4$ 이다. 수식에서 보는 것과 같이 커플된 라인의 전기적 특성은 특성 임피던스와 전파상수로 완벽히 기술할 수 있다.^[17]

압축된 PBG 링 구조의 특성을 알기 위해서 순수한 TEM 모드를 가지기 때문에 커플된 두 라인의 특성 임피던스만 기, 우 모드로 나뉘는 stripline 구조에서 제안된 구조를 먼저 생각해 보기로 하자. 즉, stripline 구조에서는 식 (1)과 (2)의 특성 어드미턴스만 기, 모드로 나뉘고 전파상수는 나뉘지 않는다 ($\beta = \beta_o = \beta_c$). 그림 3은 stripline 구조에서 급전선의 폭(w_f)이 0.6 mm일 때 50 Ω이 되도록 접지 사이의 간격 $b = 1$ mm으로 정하였고 $w_r = 0.3$ mm일 때 $C_e = 0$ pF의 경우 식 (2)로 계산한 삽입 손실을 보여 준다. d 가 0.07 mm에서 0.05 mm로 좁아질 때 중간 감쇄폴을 중심으로 위, 아래 감쇄폴의 간격이 넓어지며, 이때 각 감쇄폴은 거의 등간격이다. 위, 아래 감쇄폴은 수식 (2)의 분자항 즉, 기, 우 모드 특성 어드미턴스 (Y_c, Y_o)의 값들, 즉 커플링에 의해서 결정된다. 두 라인 사이의 커플링이 커질수록 기, 우 모드 특성 어드미턴스 값의 차가 커져서 중간 감쇄폴을 중심으로 위, 아래 감쇄폴의 위치가 더 크게 벌어진다. 또한 중간 감쇄폴과 uncoupled 모드(커플링이 없을 때 중심주파수)의 위치가 정확히 일치한다. 중간 감쇄폴은 식 (2)의 분모항이 무한대 값이 될 때 생긴다. 식 (2)의 분모항은 스텝과 전송라인 부분의 단락 ($-jY_c \cot \beta l$) 및 개방 ($jY_o \tan \beta l$) 어드미턴스의 조합으로 이루어져 있으나 중간 감쇄폴은 기, 우 모드 개방 어드미턴스 ($Y_{c,o} \tan \beta l$) 때문에 생기며 이때의 주파수는 uncoupled 모드 주파수와 같다. 이때 중간 감쇄폴의 중심 주파수에서 전기장 분포는 일반적인 uncoupled 모드와 달리 수식을 잘 살펴보면 스텝 부분에는 개방 어드미턴스의 기, 우 모드 ($Y_{c,o} \tan \beta l$)가 둘 다 존재하고 전송라인 부분에는 개방 어드미턴스의 우 모드 ($Y_o \tan \beta l$)만이 존재함을 알 수 있다. 이를 시뮬레이션 결과를 통해서 확인했으며 이때, 전기장의 세기는 입, 출력포트에서 최소가 된다.

마이크로스트립 구조는 전송라인의 한쪽은 기판

표 1. 마이크로스트립에서 커플된 라인의 기, 우 모드 특성 임피던스와 실효 유전상수

Table 1. Even and odd mode characteristic impedances and effective relative dielectric constants.

d (mm)	Z_e (Ω)	Z_o (Ω)	k	ϵ_e	ϵ_o	$\Delta\epsilon$
0.05	95.6	30.9	0.511	7.138	5.670	0.115
0.1	92.6	36.2	0.438	7.194	5.692	0.117
0.15	90.1	39.9	0.385	7.230	5.715	0.117
0.17	89.2	42.9	0.368	7.254	5.725	0.118
0.2	87.9	38.1	0.344	7.070	5.741	0.104
2.0	68.8	64.2	0.034	6.927	6.407	0.039
10.0	67.2	66.6	0.004	6.705	6.692	0.001
∞	67	0		6.693		0

이고 다른 쪽은 공기로 이루어져서 커플된 두 라인에 기, 우 모드를 여기시키면 특성 임피던스(Z_e, Z_o) 뿐만 아니라 실효 유전상수(ϵ_{eff})도 기, 우 모드로 나뉘게 되고¹⁹⁾ 이것 때문에 전파상수 $\beta = w\sqrt{\mu\epsilon_{eff}}$ 도 기, 우 모드로 나뉜다. 전파상수가 기, 우 모드로 나뉘는 것은 압축된 PBG 링에 큰 영향을 미치게 된다. 표 1은 두 라인이 커플된 마이크로스트립 구조에서 폭이 $w_r = 0.3$ mm일 경우 갭 간격(d)가 변할 때 Ansoft사의 Serenade 8.5를 이용하여 구한 기, 우 모드 특성 임피던스와 실효 유전상수를 나타낸다. 여기서 금속 손실은 포함되지 않았다. 커플된 마이크로스트립 구조의 경우 기, 우 모드 실효 유전상수의 차이가 압축된 마이크로스트립 PBG 링 구조의 특성을 크게 변화시키므로 기, 우 모드 실효 유전상수의 차이를 수치화하기 위해서 다음을 정의하자.

$$\Delta\epsilon = \frac{\epsilon_e - \epsilon_o}{\epsilon_e + \epsilon_o} \quad (3)$$

표 1에서 보는 것과 같이 갭이 $d = \infty$ 일 때, 즉 커플링이 없을 때(uncoupled 모드)를 중심으로 우(기) 모드 특성 임피던스는 증가(감소)하며 커플링 계수(k)는 크게 커진다. 그러나 실효 유전상수는 uncoupled 모드를 중심으로 기 모드에서는 감소하나 우 모드에서는 갭이 0.17 mm보다 좁아지면 거의 비슷하며 $\Delta\epsilon$ 도 0.17 mm보다 좁아지면 표 1과 같이 거의 일정해진다.

마이크로스트립 구조에서 edge 캐패시턴스(C_e)를 고려하여 구한 스텝부분의 [Z] 파라미터는 다음과

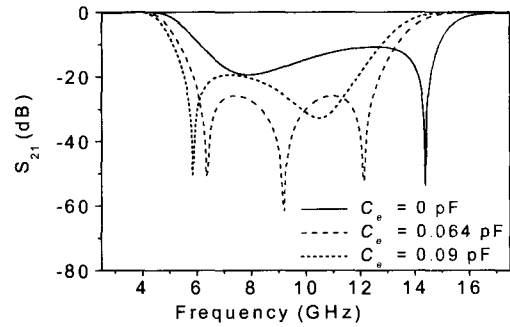


그림 4. $C_e = 0$ pF, 0.064 pF, 0.09 pF일 때 수식으로 구한 삽입손실 결과

Fig. 4. Insertion loss calculated by analytic model at $C_e = 0$ pF, 0.064 pF, 0.09 pF.

같다.

$$Z_{11} = Z_{22} = -\frac{j}{2} Z_e \cot \beta_e l - \frac{j}{2} Z_o \cot \beta_o l + \frac{Z_o^2 \csc^2 \beta_o l}{Z_{edge} - j2Z_o \cot \beta_o l} \quad (4)$$

$$Z_{21} = Z_{12} = -\frac{j}{2} Z_e \cot \beta_e l + \frac{j}{2} Z_o \cot \beta_o l - \frac{Z_o^2 \csc^2 \beta_o l}{Z_{edge} - j2Z_o \cot \beta_o l} \quad (5)$$

여기서 $Z_{edge} = \frac{1}{j\omega C_e}$ 로 edge 캐패시턴스(C_e)의 임피던스이며, Z_e, Z_o 는 커플된 두 라인에 의한 우, 기 모드 어드미턴스를 나타낸다.

식 (4)와 (5)를 이용하여 앞에서 구한 방법으로 [S] 파라미터를 구할 수 있다. 그림 4는 $d = 0.1$ mm, $r_m = 12.8$ mm로 고정시키고 C_e 가 0 pF, 0.064 pF, 0.09 pF로 변할 때 앞의 [Z] 파라미터들을 변환하여 구한 삽입손실을 보여준다. C_e 가 0 pF일 때는 실선과 같은 모습을 가지나 C_e 가 더 커져서 특정한 값을 가지게 되면 긴 점선과 같이 3개의 감쇄폭이 거의 등간격으로 나타나며 C_e 가 이것보다 더 커지면 짧은 점선과 같이 된다.

$C_e = 0$ pF일 때 그림 3의 stripline 경우와 달리 마이크로스트립에서 압축된 PBG 링 구조의 삽입손실은 그림 4의 실선과 같이 된다. 이것은 식 (2)의 전기적 길이 $\theta = \beta l = w\sqrt{\mu\epsilon} l$ 이기 때문인데, 즉 실효 유전상수가 기, 우 모드로 나뉘어져서 θ_e, θ_o 가 다르기 때문이다. 표 1의 $\Delta\epsilon$ 의 차이가 커지면 식

(2)의 θ_e 와 θ_o 의 차이가 커져서 실선의 모습과 같이 된다. 그래서 비록 $\Delta\epsilon$ 가 일정할지라도 커플링 길이(l)이 커지면 θ_e 와 θ_o 의 차이가 커져서 그림 4의 실선 모습을 닮아간다. 또한 압축된 마이크로스트립 PBG 링 구조의 2차 고조파는 주파수(w)가 커져서 θ_e 와 θ_o 의 차이가 커지므로 그림 4의 실선의 모습을 닮아간다. 이제 그림 2의 경우를 설명해 보자. 그림 2의 $d = 0.17$ mm인 경우 그림 4의 점선에 해당하고 여기서 $d = 0.1$ mm로 변하면 표 1과 같이 커플링 계수는 증가하나 $\Delta\epsilon$ 는 거의 일정하게 된다. 즉 그림 2의 $d = 0.17$ mm에서 $d = 0.1$ mm로 변할 때 $\Delta\epsilon$ 는 거의 일정한 상태에서 커플링 계수가 증가하여 3개의 감쇄폭이 나타나는 것이다. 압축된 마이크로스트립 PBG 링 구조의 전기장 분포는 stripline의 경우와 거의 비슷하였다. 실제 구조에서 C_e 는 갭 간격(d), 링의 폭(w_r)에 의존하므로^[15] 원하는 삽입손실은 구조변수 중에서 스텝 끝 부분의 갭 간격만을 조절하여 얻을 수 있을 것이다.

압축된 PBG 링 구조를 stripline 구조에서 계산한 결과 중간 감쇄폭의 위치와 uncoupled 모드의 위치가 같았으나 마이크로스트립 구조에서는 식 (6)에 의해서 위, 아래 감쇄폭의 위치가 표현된다^[14]. 즉 아래 수식과 같이 uncoupled 모드의 주파수(그림 2의 경우 8.27 GHz)는 아래와 중간 감쇄폭 사이에 위치한다.

$$f_{lower}^2 = \frac{f_0^2}{1+k}, \quad f_{upper}^2 = \frac{f_0^2}{1-k} \quad (6)$$

여기서 f_0 는 압축된 PBG링의 uncoupled 모드 주파수이다. 3개의 감쇄폭이 등간격으로 있을 때 위 수식이 잘 맞았다. 즉 위의 수식은 특성 임피던스뿐만 아니라 전파상수가 두 모드로 나누어지기 때문에 생긴다. 그림 3의 stripline 구조에서 uncoupled 모드와 압축된 PBG 링의 3 dB 저지대역 폭은 거의 같으나 그림 2의 마이크로스트립 구조의 경우 압축된 PBG 링의 3 dB 저지대역 폭이 크게 늘어나는데 이것은 커플링된 마이크로스트립 라인에서 θ_e 와 θ_o 의 차이 때문이다. 그러므로 그림 3의 stripline 구조와 달리 마이크로스트립 구조에서 제안된 구조는 저지대역을 크게 증가시킬 수 있다.

그림 5에서는 그림 1(b)의 압축된 PBG 링을 하

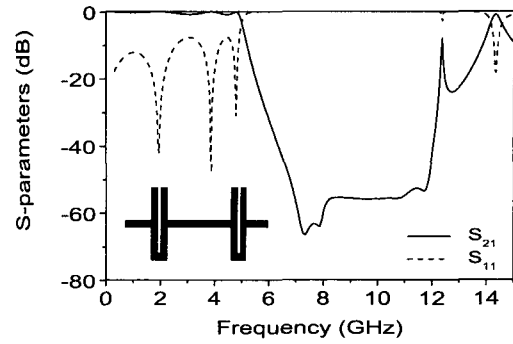


그림 5. 두 개의 단위셀로 이루어진 PBG 구조의 시뮬레이션 결과. $r_m = 14$ mm, $d = 0.2$ mm, $w_r = 0.6$ mm

Fig. 5. Simulation results for the PBG structure with two unit cells consisting of coupling structure: $r_m = 14$ mm, $d = 0.2$ mm, $w_r = 0.6$ mm.

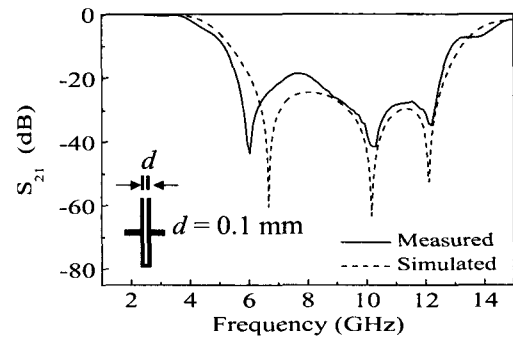


그림 6. $d = 0.1$ mm일 때 실험 및 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Measured and simulated results with $d = 0.1$ mm.

나의 단위 PBG 셀로 생각하여 두 개의 단위 셀을 그림 5의 삽입그림과 같이 연결하였을 때 삽입손실을 보여준다. 이때 $r_m = 14$ mm, $d = 0.2$ mm, $w_r = 0.6$ mm이고 단위 셀 사이의 간격은 6.8 mm로 $\lambda_g/2$ 에 해당한다. 그림 2의 $d = 0.1$ mm 일 때와 비교해 보면 저지대역이 50 dB 이하로 깊어졌고 저주파에서 cutoff 특성이 향상되었다. 그러므로 압축된 마이크로스트립 PBG 링을 PBG 구조의 단위셀로 사용하면 단지 2개의 단위셀로도 넓고 깊은 저지대역과 급격한 cutoff 특성을 얻을 수 있다. 일반적인 PBG 구조에서 PBG 특성을 얻기 위해서 5~6 개의 기본 셀이 필요하나 압축된 PBG 링을 기본 셀로 사용하면 2개의 기본 셀로도 충분한 PBG 특성을 얻을 수

있기 때문에 소자의 크기를 크게 줄일 수 있다.

그림 6은 $d = 0.1 \text{ mm}$, $r_m = 14\text{mm}$ 와 $w_r = 0.3 \text{ mm}$ 일 때 측정된 결과와 시뮬레이션 결과를 보여 주고 있다. 그림 5에서 압축된 PBG 링의 경우 적절한 조건에서 감쇄율이 3개가 생긴다는 것을 분명히 보여 준다. 측정은 HP8510C 망 분석기를 이용하였으며 20 dB에서 밴드갭은 5.6 GHz에서 12.5 GHz로 넓다. 제안된 구조는 작은 크기로 넓은 밴드갭과 급격한 cutoff 특성을 얻을 수 있으므로 저역통과 필터로 이용될 수 있을 것이다.

III. 결 론

PBG 링 구조를 개선한 압축된 PBG 링 구조를 제안하였으며 압축된 PBG 링의 특성을 [S] 파라미터를 구하여 알아보았다. 커플된 마이크로스트립 구조에서 실효 유전상수가 기, 우 모드로 나뉘기 때문에 제안한 소자의 특성이 크게 변하게 한다. 압축된 PBG 링 구조에서 구조 변수를 잘 조절할 경우 두 라인이 커플되어 있어도 3개의 감쇄율을 얻을 수 있고 3개의 감쇄율을 얻기 위해서는 적절한 edge 캐패시턴스(C_e) 값을 가져야 한다. 제안된 구조는 단일 소자로도 증가된 감쇄율 때문에 넓은 밴드갭과 급격한 cutoff 특성을 얻을 수 있다. 압축된 PBG 링을 단위 PBG 셀로 생각할 때 2개의 단위셀을 연결한 PBG 구조에 대한 특성을 알아보았다.

참 고 문 헌

- [1] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade and J. N. Winn, *Photonic Crystals*, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1995.
- [2] See for examples, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2059-2150, Nov. 1999.
- [3] C.-S. Kee, J.-E. Kim, H. Y. Park, S. J. Kim, H. C. Hong, Y. S. Kwon, N. H. Myung, S. Y. Shin and H. Lim, "Essential parameter in the formation of photonic bandgaps", *Phys. Rev. E*, vol. 59, no. 4, pp. 4695-4698, Apr. 1999.
- [4] C.-S. Kee, J.-E. Kim, H. Y. Park and H. Lim, "Roles of wave impedance and refractive index in photonic crystals with magnetic and dielectric properties", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2148-2150, Nov. 1999.
- [5] T. J. Ellis, G. M. Rebeiz, "MM-wave tapered slot antenna on micromachined photonic band-gap dielectrics", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1157-1160, June 1998.
- [6] J. S. Colburn, Y. Rahmat-Samii, "Patch antennas on externally perforated high dielectric constant substrates", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 47, no. 12, pp. 1785-1794, Dec. 1999.
- [7] V. Radisic, Y. Qian and T. Itoh, "Broadband power amplifier integrated with slot antenna and novel harmonic tuning structure," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1895-1898, June 1998.
- [8] V. Radisic, Y. Qian, R. Coccioli and T. Itoh, "Novel 2-D photonic bandgap structure for microstrip lines", *IEEE Trans. Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 8, no. 2, pp. 69-71, Feb. 1998.
- [9] S.-S. Oh, C.-S. Kee, J.-E. Kim, H. Y. Park, T. I. Kim, I. Park and H. Lim, "Duplexer using microwave photonic band gap structure," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, no. 16, pp. 2301-2303, Apr. 2000.
- [10] D. Ahn, J. S. Park, C. S. Kim, J. Kim, Y. Qian and T. Itoh, "A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 49, pp. 86-93, 2001.
- [11] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolous and E. Yablonovitch, "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2059-2074, Nov. 1999.
- [12] C.-S. Kee, M. Y. Jang, I. Park, H. Lim, J.-E. Kim, H. Y. Park and J. I. Lee, "Photonic band gap formation by microstrip ring: A way to

- reduce the size of microstrip photonic band gap structure", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, pp. 1520-1522, 2002.
- [13] A. Gopinath, C. Gupta, "Capacitance parameters of discontinuities in microstriplines", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-26, pp. 831-836, 1978.
- [14] R. Mongia, I. Bahl and P. Bhartia, *RF and Microwave Coupled-line Circuits*, Artech House, Ch. 4-5, 1999.
- [15] J.-S. Hong, M.J. Lancaster, "Coupling of microstrip square open-loop resonators for cross-coupled planar microwave filters", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 44, pp. 2099-2109, 1996.
- [16] R. Garg, I. J. Bahl, "Characteristics of coupled microstriplines", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-27, pp. 700-705, 1979.
- [17] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Wiley, pp. 206-212, 383-388, 1998.
- [18] L.-H. Hsieh, K. Chang, "Compact lowpass filter using stepped impedance hairpin resonator", *Electron. Lett.*, vol. 37, no. 14, pp. 899-900, 2001.
- [19] 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.

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 의 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