

Photonic Bandgap 구조를 이용한 마이크로스트립 라인 대역통과 여파기 설계

Design of Microstrip Line Bandpass Filter using Photonic Bandgap Structures

김태일 · 김명기 · 박익모 · 임한조*

Tae-Il Kim · Myoung-Ki Kim · Ikmo Park · Hanjo Lim*

요 약

본 논문에서는 포토닉 밴드갭(PBG)의 결함모드(defect-mode)를 이용한 대역통과 여파기를 구현하는 방법에 대해 연구하였다. PBG 구조를 구현하기 위하여 마이크로스트립 라인의 폭을 달리하여 PBG 셀(cell)을 형성한 후, 이들 셀들을 주기적으로 배열하였으며, PBG 구조 일부분의 주기를 변화시킬 경우에 발생하는 결함모드를 이용하여 저지대역 내에서 통과대역을 구현하였다. 또한, 집중정수소자(lumped-element)를 이용하여 PBG 구조의 등가회로를 구현하였다.

Abstract

This paper presents a design methodology of bandpass filter by using defect modes in photonic bandgap (PBG) structures. PBG structures are realized with alternating section of microstrip line arranged in a periodical manner. A passband is created within the stopband of PBG structures with defect modes, which can be generated by changing the period of certain part of PBG structure. We also extract a simple equivalent circuit of a bandstop filter by using several LC sections.

I. 서 론

최근에 주목을 받는 분야 중의 하나인 포토닉 밴드갭 (PBG) 구조는 광학 분야에서 처음으로 연구가 시작되었지만^[1], 현재는 마이크로파 소자에의 응용 등 활용 분야가 증가하고 있다. 마이크로파 분야에서의 응용은 안테나에서 전력 이득 향상^[2]과 beam pattern 개선^[3] 등을 목적으로 이용하거나, 낮은 손실을 가지며 구조를 최소화시키기 위한 slow-wave 마이크로스트립 구조^[4], 넓은 주파수 대역에서 power added efficiency를 개선시키기 위한 전력증폭기

^[5], 그리고 광대역이나, 결함모드(defect-mode)를 이용한 여파기^{[6],[7]} 등으로 활용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

일반적으로 PBG는 유전상수가 서로 다른 두 물질을 일정한 주기로 반복적으로 배열하였을 때 굴절률(refractive index) $n = \sqrt{\mu\epsilon}$ 이 주기적으로 변함에 따라 주기상수에 의해 결정되는 특정한 주파수 대역에서의 전자기파가 통과하기 때문에 생성되는 것으로 알려져 있다^[8]. 그러나 최근에 마이크로파 영역에서 작동하는 PBG 구조에 관한 실험결과로부터 굴절률 n 의 주기적 변화가 아니라 파동 임

아주대학교 전자공학부(School of Electronics Engineering, Ajou University)

* 아주대학교 분자기술학과 및 전자공학부(Department of Molecular Science & Technology and School of Electronics Engineering, Ajou University)

· 논문 번호 : 20010214-021

· 수정완료일자 : 2001년 3월 30일

피던스(wave impedance)의 주기적 변화가 PBG를 형성하는 가장 기본적인 요소라는 것이 밝혀졌다^[9]. 또한 파동 임피던스의 변화가 PBG의 근원이라는 사실은 지금까지 설명이 불가능하였던 자성체 PBG 구조의 특성을 설명할 수 있게 하였다. 한편 Radisic 등은 마이크로스트립 라인의 접지면을 2차원적으로 식각할 경우 PBG 구조로 동작함을 보였는 바^[10], 이는 파동 임피던스의 주기적 변화가 PBG를 생성시키는 기본적인 요소임을 보여주는 다른 좋은 예라 할 수 있다. 이러한 결과들로부터 파동 임피던스를 주기적으로 변화시킬 수 있는 어떠한 구조도 PBG 구조로 동작할 수 있음을 알 수 있다.

이러한 PBG 구조는 넓은 저지대역을 효과적으로 형성시킬 수 있으므로 저지대역(stopband) 여파기로서 이용될 수 있다^[11]. 또한, PBG 구조의 주기적 배열의 일부를 변화시켜 결함(defect)을 만들어 주면 대역통과(passband) 특성을 얻을 수 있는데, 이는 저지대역내의 전자기파가 주기를 변화시킨 결함 부분에 갇히게 되고, 갇힌 전자기파가 결함 부분을 중심으로 한 대칭구조의 반사효과에 의해 다중반사 하면서 저지대역내의 일부 주파수 대역에서 전자기파의 통과 현상을 발생시키기 때문이다^[8]. 이러한 결함모드에 의한 통과현상을 이용하여 대역통과 여파기를 구현할 수 있으며, 통과대역이 저지대역내에서 형성되기 때문에 통과대역 이외의 영역에서 차단효과가 우수하다는 장점을 갖게 된다. 기존의 PBG 구조를 이용한 대역통과 여파기로는 유전체 기판에 구멍을 뚫어서 결함모드가 생성되도록 한 후 이를 이용하는 여파기들이 많다^{[5],[12]}. 그러나 이러한 PBG 구조는 그 특성상 약간의 오차에도 결과가 상당한 차이를 보이기 때문에, 정확한 위치에 구멍을 뚫어야 하는 등 제작 구현이 어려운 단점이 있으며, 저주파대역에 중심주파수를 갖는 경우에 소자의 크기가 커지는 문제점도 갖고 있었다.

본 논문은 이러한 단점들을 극복하기 위해 마이크로스트립 라인 상에 PBG 구조를 설계하는 방법^{[9],[13]}을 취하였다. 이 구조는 그림 1(a)과 같이 마이크로스트립 라인의 폭을 변화시켜 PBG 셀을 구성하여 주기적으로 배열된 셀과 50 Ω 마이크로스트립 라인 사이의 파동 임피던스 차이에 의해 전자파가 반사되고, 반사된 전자기파가 다중간섭(multiple-

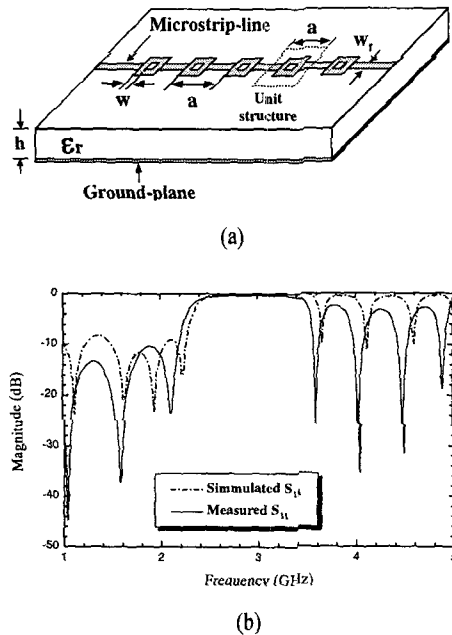


그림 1. (a) 마이크로스트립 라인을 이용한 정사각형 선형배열 PBG 구조
(b) 그림 1(a)에서 $W_f = 0.6$ mm, $w = 1$ mm, $a = 18$ mm, $h = 0.635$ mm일 때 측정과 시뮬레이션한 S_{11} 결과

Fig. 1. (a) Employed linear square lattice PBG structure formed on microstrip line with the parameters of $W_f = 0.6$ mm, $w = 1$ mm, $a = 18$ mm, $h = 0.635$ mm. (b) Measured and simulated S_{11} parameters for the PBG microstrip line of Fig. 1(a).

interference)을 일으키게 됨에 따라 PBG가 형성되도록 한다. 이렇게 특성임피던스를 주기적으로 변화시켜 제작한 PBG 구조는 기존에 마이크로스트립 라인의 유전체 기판에 구멍을 뚫어서 제작하는 PBG구조보다 특성제어가 쉬울 뿐만 아니라 저지대역 특성 역시 더욱 우수하다^[9]. 또한 이 논문에서 보인바와 같이 마이크로스트립 라인의 접지면에 2차원 식각으로 제작된 PBG 구조보다 소자의 크기를 작게 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그럼에도 불구하고 아직 마이크로스트립 라인에 변화를 준 PBG 구조로 마이크로파의 저지대역 여파기 혹은 통과대역 여파기로 작동시키고자 하는 노력은 본

연구진이 최근에 마이크로파용 멀티플렉서로 제안한 구조^[14]를 제외하고는 국내외적으로 아직 없다. 이 논문에서는 주기적 배열의 일부분을 변화시켜 PBG 내에 결함모드가 형성되도록 하여 효과적인 대역통과 여파기를 구현하였으며, 마이크로스트립 라인을 이용한 PBG를 집중정수소자(lumped-element)로 등가모델화 하였으며, 구조적 최적화로 소자의 크기가 커지는 문제점의 해결이 가능함을 보였다. 그리고 제작 결과를 통해 일반적으로 마이크로스트립 여파기들이 보이는 도체 손실로 인하여 높은 주파수대역에서 큰 삽입손실을 갖는 문제점을 PBG 구조를 사용하여 개선시킬 수 있음을 확인하였다.

II. 대역통과 여파기의 설계 방법

파동 임피던스에 주기적인 변화를 주어 다중반사를 일으키는 PBG 구조에 결함을 삽입하여 저지대역내에 특정 주파수의 전자기파가 통과하도록 하여 대역통과 여파기를 구현하고자 할 때 일반 대역통과 여파기의 경우와는 달리 그 특성을 수식으로 나타내는 것이 불가능하다. PBG 구조를 이용하여 대역통과 여파기를 설계하기 위해서는 가장 먼저 원하는 통과 주파수 대역을 선택한 다음 통과대역을 포함하는 저지대역을 형성하는데 필요한 주기를 결정하여야 한다. 이 때 PBG의 주기 a 는 저지대역의 중심주파수 f_0 에 해당되는 관내파장 λ_g 와

$$a = \frac{\lambda_g}{2} \tag{1}$$

의 관계를 가지며^[8],

$$\lambda_g = \frac{c}{f_0 \sqrt{\epsilon_{eff}}} \tag{2}$$

로 주어진다. 여기서 c 는 빛의 속도, ϵ_{eff} 는 마이크로스트립 기판의 실효유전상수(effective dielectric constant)이다. 그림 1은 마이크로스트립으로 구현된 일차원 PBG 구조와 그 반사계수 S_{11} 을 나타내고 있다. 시뮬레이션 한 반사계수는 III절에서 언급하는 바와 같이 모멘트방법(MoM)으로 계산하는 Ensemble 5.1을 사용하여 구하였다. 실측치와 시뮬레이션 된 S_{11} 에서 보는 바와 같이 원하는 PBG의 위치

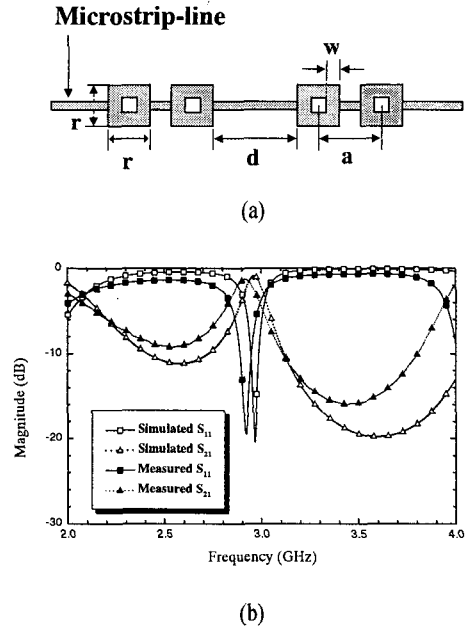


그림 2. (a) 마이크로스트립 라인을 이용한 대역통과 여파기의 기본 구조 (격자주기상수 $a = 18.0$ mm, 한 번 $r = 3.0$ mm, 거리 $d = 23.8$ mm, 셀 선폭 $w = 1.0$ mm). (b) 그림 2(a) 구조를 갖는 PBG의 반사계수 S_{11} 과 전달계수 S_{21} 의 측정 및 실험치.

Fig. 2. (a) Basic structure of microstrip line bandpass filter (cell period $a = 18$ mm, cell size $r = 3$ mm, defect length $d = 23.8$ mm, cell line width $w = 1$ mm). (b) Measured and simulated reflection coefficient S_{11} and transmission coefficient S_{21} of the PBG structure shown in Fig. 2(a).

를 결정하는 주기 a 의 값을 쉽게 결정할 수 있으며 PBG 주파수 영역에서는 반사계수가 1에 가까움을 알 수 있다. 두 결과 값이 약간의 차이를 보이는 것은 마이크로스트립 라인을 식각하는 과정에서 오는 부정확에 기인된 것으로 판단된다.

주기적인 구조가 결정되면 저지대역내에서 원하는 주파수 범위에 통과대역을 형성하기 위하여 결함의 크기를 결정하여야 한다. 이 경우 저지대역의 중심에 통과대역이 위치할 수 있도록 초기 설계를

한 후 결함의 크기를 조정함으로써 통과대역을 원하는 주파수 대역에 위치하도록 할 수 있다. 본 연구에서는 그림 2(a)에 나타난 것과 같이 주기를 변화시켜서 간단히 결함을 삽입시키는 방법을 사용하였으며 그 결과 그림 2(b)와 같이 결함모드를 생성시킬 수 있었다. 표 1에는 주기 a 에 따른 저지대역의 중심주파수 f_0 와 이 f_0 에 결함모드를 형성시키는데 필요한 결함 부분의 길이 d 를 시뮬레이션으로 구한 결과를 나타내었다. 이 표에서 볼 수 있듯이 저지대역의 중심에 통과대역이 나타나기 위해서는 결함의 길이 d 가 주기 a 의 약 1.3~1.4배가 되도록 선택할 필요가 있다. 표 2는 주기가 일정할 때 결함 부분의 길이가 바뀔 때 따른 결함모드의 중심주파수 f_d 의 변화를 조사한 결과이다. 결과에서 볼 수 있듯이 주기에 대한 결함의 길이를 증가시키기에 따라 통과대역의 중심주파수를 점차 낮은 주파수로 옮길 수 있으므로 주기와 결함길이를 선택하여 저지대역 및 그 내부의 통과대역을 임의의 주파수 영역에 형성

표 1. 저지대역의 중심에 통과대역이 위치하기 위한 결함 길이

Table 1. Appropriate defect length so that the passband is located at the center of the stopband.

α (mm)	f_0 (GHz)	d (mm)	d/a
14	3.95	19.2	1.37
16	3.50	21.6	1.35
18	3.15	24.0	1.33
20	2.83	27.0	1.35

표 2. 결함 길이에 따른 저지대역에서의 통과대역의 위치 변화

Table 2. Variation of the passband position in the stopband as a function of defect length.

α (mm)	d (mm)	d/a	f_d (GHz)
14	15.2	1.09	4.62
14	17.2	1.23	4.28
14	19.2	1.37	3.95
14	21.2	1.51	3.68
14	23.2	1.66	3.46

할 수 있다.

필터를 설계하는 마지막 단계는 셀의 선폭을 결정하여 다중간섭이 가장 효과적으로 발생할 수 있도록 하는 과정이다. 이때 셀의 선폭은 저지대역의 특성과 통과대역의 특성을 모두 고려하여야 하는데 이는 셀 선폭이 커질수록 저지대역폭이 증가되는 동시에 저지대역 이외의 특성이 나빠지고 통과대역에서의 삽입손실이 증가하기 때문이다. 그림 3 및 표 3에 주기 a , 결함길이 d 및 셀의 크기 r 를 각각 $a=18$ mm, $d=23.8$ mm, $r=3$ mm로 고정시킨 상태에서 셀 중앙에 구멍을 식각하여 셀의 선폭 w 를 변화시켰을 때 결함모드의 전달특성 S_{21} 의 변화를 나

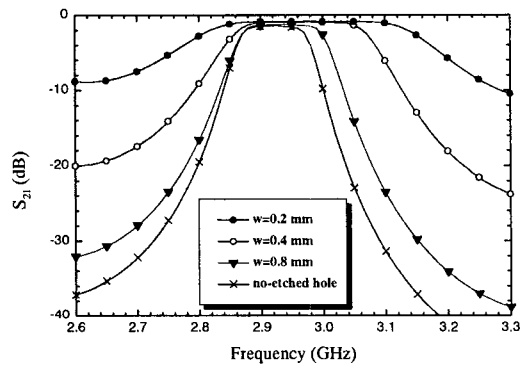


그림 3. 셀 선폭의 변화에 따른 대역특성의 변화
Fig. 3. Variation of the passband characteristics as a line width of the cell varies.

표 3. 셀 선폭에 따른 삽입손실과 백분율 대역폭의 비교

Table 3. Comparison of insertion loss and percent bandwidth for various line width of the cell.

Line width of cell (mm)	Impedence of cell (Ω)	% B.W	$S_{21} \cdot \max$ (dB)
No-etched hole	18.02	3.68	-1.45
1.2	17.03	3.85	-1.40
1.0	19.00	4.02	-1.30
0.8	21.53	4.60	-1.25
0.6	24.93	5.65	-1.10
0.4	29.98	7.51	-0.95
0.2	38.53	12.07	-0.85

타내었다. 이들 결과에서 볼 수 있듯이 셀과 마이크로스트립 라인의 임피던스 차이를 크게 함으로써 효과적인 다중간섭을 유도하여 저지대역의 특성을 향상시키고자 할 때 마이크로스트립 라인의 폭을 넓게 하면 그림 3에서 볼 수 있듯이 저지대역의 특성은 향상되나 불연속 구조에 의한 통과대역에서의 불필요한 삽입손실의 증가를 초래하고 통과대역폭도 감소하는 결과를 나타낸다. 결국 셀 폭을 결정하는데 있어서 통과대역의 특성과 저지대역의 특성이 서로 상호절충(trade-off)의 관계에 있으며 이 때 마이크로스트립 라인의 폭이 결정되면 (50 Ω 마이크로스트립 라인의 경우 0.6 mm) 임피던스의 변화 폭을 고려하여 $r=3$ mm인 경우에 결정된 선폭보다 셀의 선폭이 약 1~1.2배 정도일 때 우수한 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

III. 대역통과 여파기의 제작 및 측정

앞서 II절의 설계방법에서 조사된 내용을 바탕으로 본 논문에서는 그림 2 (a) 및 그림 4 (a)와 같은 PBG 구조로 결합모드에 의한 대역통과 여파기를 설계하였다. 이때 저지대역의 중심주파수가 2.5~3.5 GHz에서 나타나도록 격자주기는 $a=18$ mm로 선택하였고, 결합 길이는 $d=23.8$ mm로 고정시켰으며, 제작의 용이함과 통과대역에서의 삽입손실을 모두 고려하여 셀 한 변의 길이는 $r=3$ mm, 셀의 선폭 $w=1$ mm로 각각 고정하였다. 앞서 살펴본 바와 같이 셀의 선폭이 50 Ω 마이크로스트립 라인 폭에 근접하는 경우에 우수한 특성을 갖지만 본 연구에서는 기판을 제작하는 과정에서 발생하는 도체의 과도한 식각을 고려하여 약간의 여유를 주었다. 그림 2(a)는 PBG 구조를 이용한 대역통과 여파기의 기본구조인데, 셀의 개수가 충분히 많지 않기 때문에 전자기파의 다중반사가 제대로 이루어지지 않으므로 저지대역에서 S_{21} 이 비교적 큰 값을 갖게 되어 저지대역에서 통과대역으로 변환되는 스킨트(skirt) 특성이 나빠지게 된다. 이를 해결하기 위하여 그림 4(a)와 같이 기본구조 2개를 직렬로 연결한 구조의 특성도 살펴보았다.

제작에 사용한 기판은 비유전상수(ϵ_r)가 10.2이고 두께(h)가 0.635 mm인 RT/Duroid 6010 기판을

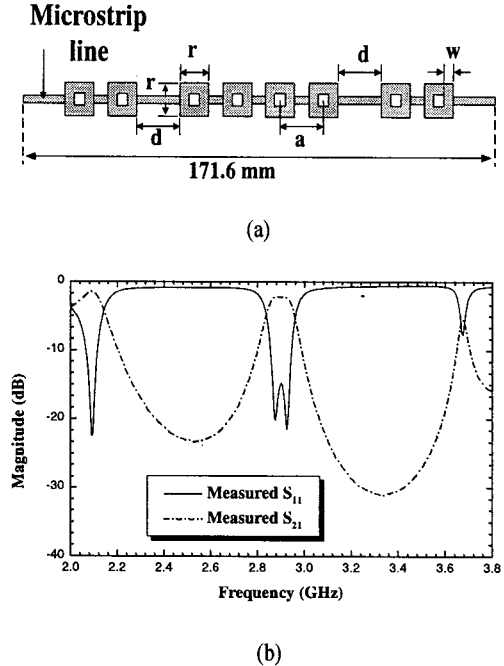


그림 4. (a) 50 Ω 마이크로스트립 라인을 이용한 대역통과 여파기 기본구조 2개를 직렬 연결한 구조 ($a=18.0$ mm, $r=3.0$ mm, $d=23.8$ mm, $w=1.0$ mm)
 (b) 그림 4(a) PBG 구조의 반사특성 및 전달특성 측정결과

Fig. 4. (a) The cascaded PBG structure of microstrip line bandpass filter formed by two basic PBG units connected series ($a=18$ mm, $r=3$ mm, $d=23.8$ mm, $w=1$ mm).
 (b) Measured reflection and transmission characteristics of the PBG structure shown in Fig. 4(a).

사용하였으며, 측정은 HP8510C network analyzer를 사용하였다. 그리고 각 구조에 대한 전자기파 특성은 모멘트 방법을 이용하는 ensemble 5.1을 사용하여 시뮬레이션 하였는데, 실제 제작한 PBG 구조가 유한한 크기를 가지는 구조이므로 무한접지면 구조로 시뮬레이션 한 경우에 비해 실효유전상수 값이 작아진다. 그러므로 제작된 구조의 관내파장이 길어지게 되어 중심주파수의 위치가 시뮬레이션 결과값보다 낮은 영역에서 나타나게 되고, 주기와 결합

부분의 관내과장 비율에 관련되는 정합특성도 바뀌게 되므로 두 구조상의 결과 값이 차이를 가지게 된다. 그러므로 본 연구에서는 측정치와 시뮬레이션 결과 값의 오차를 최소화하기 위하여 유한 접지면 구조로 시뮬레이션 하였다.

IV. 대역통과 여파기의 등가회로

마이크로스트립 라인의 PBG 특성을 해석하기 위하여 집중정수소자를 이용하여 그림 1(a)의 단위구조 (unit structure) 4개를 사용한 PBG 구조를 등가화 하였다. 등가모형을 만들기 위하여 본 논문에서 사용한 S_{11} -parameter들은 그림 1(a)의 구조에서 단위구조 하나만을 시뮬레이션하여 구하였으며, 주파수를 변수로 갖는 데이터 함수로부터 입력 임피던스 (Z_{in})을 구하기 위하여 curve fitting 방법을 사용하였다^[15]. Curve fitting에 의한 $Z_{in}(f)$ 은 식 (5)에 의해 Laplacian parameter인 's'를 포함하는 $Z_{in}(s)$ 으로 변환되고, 식 (6)의 가운데 식에서 보이는 바와 같이 실수부와 허수부로 분류된다. 이렇게 구해진 $Z_{in}(s)$ 은 식 (6)의 마지막 부분에 나타난 식처럼 "direct real-part interpolation approach"를 이용하여 실수부만을 사용한 rational function의 형태로 변환시킬 수 있다^[16]. 이렇게 변환된 함수는 식 (7)과 같이 L, C 소자를 포함하는 등가모델로의 변환이 용이해진다. 위에서 언급한 수식들을 (3)~(6)에 나타내었다.

$$\Gamma_{in} \approx S_{11} \quad (3)$$

$$Z_{in} = Z_0 \frac{1 + \Gamma_{in}}{1 - \Gamma_{in}} \quad (4)$$

$$Z_{in}(s) = Z_{in}(f) \Big|_{f = \frac{s}{j2\pi}} \quad (5)$$

$$Z_{in}(s) = R_{in}(s) + jX_{in}(s) \cong \frac{\sum_{i=0}^M a_i s^i}{\sum_{k=0}^N b_k s^k} \quad (6)$$

이때, $s = j\omega = j2\pi f$ 이고, 주파수는 1~5 GHz 범위를 사용하였다. 실제로 계수들 a_i , b_k 는 L, C 값을 결정하는데 사용한다.

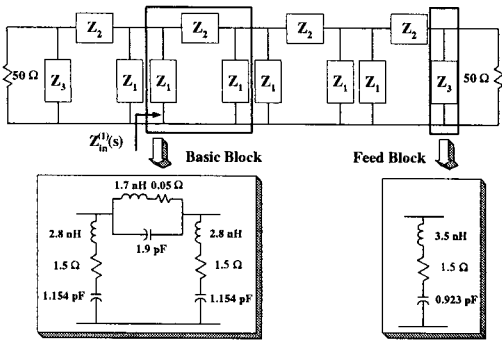
PBG와 같이 주기적인 구조를 형성하며 저지대역 여파기로 동작시킬 때의 입력임피던스는 일반적인 마이크로스트립 구조의 경우와는 달리 전체 응답이 매우 복잡한 rational function으로 표현된다. 또한,

rational function을 만족하는 모델은 여러 가지 형태를 가질 수 있으므로 수많은 경우를 적용하여야 하는 어려움을 갖고 있다. 그러므로 비교적 간편한 등가화 과정을 수행하기 위하여 특성에 적합한 모델을 선별한 후, 계수들을 대입함으로써 최종적으로 구해놓은 rational function의 결과와 유사한 응답을 찾아내는 방법이 효과적이다. 본 논문에서는 PBG 구조의 저지특성을 고려하여 저지대역 여파기 모델을 선별함으로써 등가모델을 비교적 간편하게 구할 수 있었으며, PBG 구조를 등가화 시키는데 있어서 마이크로스트립 구조의 방사나 누설성분에 의한 손실성분을 보상하기 위하여 저항성분을 포함하였다. 단위구조를 저지대역 여파기 모델에 적용하여 등가화시킨 식이 (7)에 나타나 있으며, 그림 1 (a)의 PBG 구조에 해당하는 등가모델을 그림 5(a)에 나타내었다.

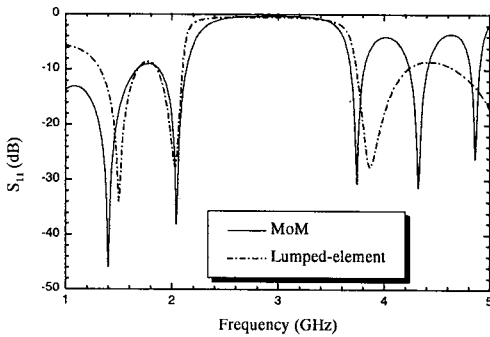
$$Z_{in}^{(1)}(s) = [(sL_1 + 1/(sC_1) + R_1) + ((sL_2 + R_2) / (1/sC_2))] / [(sL_1 + 1/(sC_1) + R_1)] \quad (7)$$

$$C(pF) = \frac{1}{\omega_0^2 L(nH)} \quad (8)$$

그림 5(a)에서 양쪽의 임피던스를 Z_1 으로 같게 놓은 이유는 다른 수동소자와 마찬가지로 단위구조 역시 중심의 셀을 기준으로 입력단과 출력단에서 바라보는 입력 임피던스가 일치하기 때문에 등가회로 역시 좌우가 대칭이 되는 구조를 갖기 때문이다. 셀을 포함한 단위구조의 전체 길이는 한 주기가 되도록 설정한 후 S_{11} 의 결과 값을 적용하였다. 단위구조 4개가 그림 1(a)와 같이 직렬로 연결되는 경우에는 마이크로스트립 라인의 불연속성에 의한 상호영향은 최소화되기 때문에 단위구조의 모델을 반복적으로 배열할 수 있다. 등가회로의 L, C 값들을 살펴보면 동일한 값을 갖는 단위구조가 반복되다가 양 끝의 급전선에서 L, C 값이 바뀌는 것을 볼 수 있다. 마이크로스트립 구조의 경우, 무한접지면 상에서의 급전선의 길이는 회로의 정합에 거의 영향을 미치지 않지만, 실제로 제작된 구조에서는 유한접지면이 되기 때문에 유한 경계면상의 종단효과(fringing field effect)에 의해 전자기파가 인식하는 실효유전상수 값이 차이를 갖게 되어 전자기파가 전파될 때의 특성을 변화시킨다. 이러한 현상을 집중정수소



(a)



(b)

그림 5. (a) 그림 1(a)의 단위구조 4개가 직렬로 연결된 PBG 구조의 등가회로

(b) 그림 5(a) PBG 구조에 대한 S_{11} 시뮬레이션 결과

Fig. 5. (a) Equivalent circuit of PBG structure formed by four unit structures of Fig. 1(a) in series.

(b) Simulated reflection characteristic of the PBG structure shown in Fig. 5(a).

자를 사용한 등가회로에서도 고려하여 양쪽 끝의 급전 부분에서의 L, C 값을 보정하였다.

이러한 등가화 과정은 식 (3)에서 사용되는 산란 계수의 주파수 범위 이외의 특성에 대해서는 결과가 일치하지 못하는 단점을 가진다^[15]. 그러므로 정교한 등가화에서는 부적합한 방법이 될 수 있으나, PBG 구조와 같이 반복적인 구조에 의해 저주파 특성을 보이는 구조에 있어서는 단위구조를 간단히 등가화 하여 반복적으로 배열해주면 되기 때문에 간편하게 사용할 수 있다. 그림 5(b)에서 볼 수 있듯

이 집중정수소자 모델을 통해 얻은 등가회로의 특성이 낮은 주파수 영역에서는 거의 유사한 특성을 보이고 있으며, 높은 주파수영역에서의 결과는 약간의 차이를 갖고 있다. 이것은 전자기파가 진행하면서 다양한 손실을 갖는 마이크로스트립 구조와는 달리 집중정수소자 구조는 손실이 없는 구조이고, 등가화 과정에서 마이크로스트립의 구조적인 영향을 모두 고려해준 것이 아니므로 전체대역에서 두 구조가 동일한 특성을 갖기란 어렵기 때문이다. 그리고 집중정수소자의 특성이 높은 주파수 영역에서 많은 오차를 보이는 것을 고려하여 약간의 오차는 무시하여도 무방할 것이다. 본 논문에서는 구조적으로 특성 임피던스와 PBG가 형성되는 관계를 살펴보기 위한 것이므로 집중정수소자 모델이 적합하다고 볼 수 있지만, 만약 결과상의 전체적인 오차를 줄이고자 한다면 전송선로 모델(transmission line model) 등을 사용하는 것도 좋은 방법이 될 것이다.

위의 PBG 구조의 등가화를 통해 마이크로스트립 라인을 이용한 PBG 구조의 특성을 해석할 수 있다. 기존의 PBG 구조를 살펴보면, 유전상수가 서로 다른 물질을 주기적으로 배열함으로써 파동임피던스가 반복적으로 변하여 전자기파가 다중반사를 일으키는 특성을 가진다. 또한, 마이크로스트립 라인을 이용한 PBG 구조의 등가모델을 통해 확인되었듯이 집중정수소자의 특성임피던스가 반복적으로 변하는 구조 역시 동일한 특성을 가진다. 그러므로 임의의 설계된 마이크로스트립 구조에서 특성임피던스가 주기를 가지고 변한다면 그 구조는 PBG 특성을 가진다는 사실을 알 수 있다.

V. 결과 및 토의

마이크로스트립 구조에서 PBG를 구현하기 위해 유전체 기판에 주기적으로 구멍을 뚫어 주는 구조는 제작의 어려움을 갖는다. 본 논문에서는 제작이 간편하고 효과적인 PBG 구조를 얻기 위하여 마이크로스트립 라인의 폭을 주기적으로 변화시켰다. 그림 1(b)의 결과에서 볼 수 있듯이 PBG 특성을 훌륭히 만족하며, 결합모드를 이용한 대역통과 여파기로 구현 가능할 정도의 충분히 넓은 대역폭을 갖는 것을 확인할 수 있다. 한편, 이러한 구조가 stepped

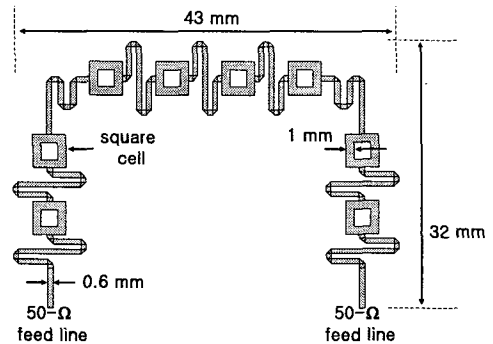
impedance filter와 전체적인 구조가 유사하다는 것을 쉽게 발견할 수 있다. 두 구조가 모두 임피던스의 변화에 따른 공진 특성을 이용했기 때문이다. 하지만, 원리에서 차이점을 갖는데, stepped impedance filter는 임피던스가 단계적으로 계속 변하면서 공진 특성이 변하지만, 위 PBG 구조는 마이크로스트립 라인을 지나가는 전자기파가 주기를 갖는 임피던스의 반복적 변화에 의한 다중간섭을 일으키는 것으로 원리적인 관점에서 차이를 갖는다. 이것은 PBG에 대한 등가회로를 통해 두 구조가 차이를 가짐을 이미 확인하였다.

대역통과 여파기는 그림 2(a)의 기본구조와 그림 4(a)에 그것을 직렬로 2개 연결시킨 구조가 제시되어 있으며, 기본구조에 대한 측정 및 실험 결과는 그림 2(b)에 나타나 있다. 결과를 살펴보면, 한 개의 pole을 형성하면서 대역통과 여파기로서의 특성을 잘 나타내고 있으며 통과대역에서의 삽입손실도 적은 것을 볼 수 있다. 그러나 저지대역에서의 S_{21} 값이 -15 dB 이상으로 큰 값을 갖는 것이 문제점으로 나타나는데, 이것은 주기적 셀의 개수가 충분히 많지 않아서 저지대역에서의 전자기파를 완전히 반사시키지 못하기 때문이다. 그러므로 저지대역에서의 S_{21} 값을 작게 하여 전자기파를 확실하게 차단하고, 통과대역의 스킨트 (skirt) 특성을 향상시키기 위하여 그림 4(a)와 같이 기본 구조 2개를 직렬로 연결하여 설계하였다^[11]. 측정 결과는 그림 4(b)에 나타나 있는 것처럼 저지대역에서의 S_{21} 값이 -30 dB 정도로 상당히 작아졌으며, 2개의 pole이 형성되면서 전체 스킨트 특성도 많이 향상된 것을 볼 수 있다. 또한 일반 마이크로스트립 구조보다 도체손실에 의한 통과대역에서의 삽입손실이 큰 문제점도 많이 개선된 것을 확인할 수 있다. 그러므로, 기본 구조를 3개 이상 직렬로 연결하면 더욱 향상된 대역통과 여파기의 결과를 기대할 수 있을 것이라 예상된다.

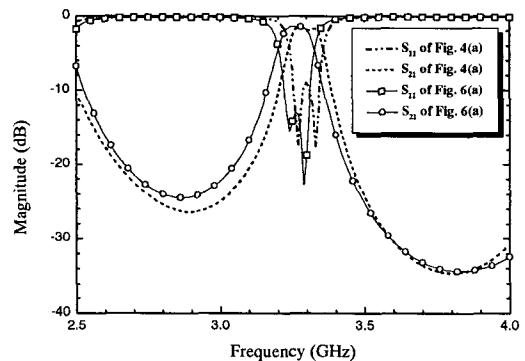
구조적인 특징으로는 셀의 중앙에 구멍을 식각함으로써 이것이 다중간섭에 영향을 주는 변수로 작용할 수 있도록 하였다. 구멍에 의한 효과는 임피던스의 변화 폭을 증가시키는 것으로서, 셀의 선폭이 변함에 따라서 마이크로스트립 라인의 폭에 해당하는 임피던스가 병렬로 연결된 구조를 통해 변화하면서 표 3과 같이 대역특성을 결정한다. 이것은 그

림 3에서도 확인할 수 있으며, 셀의 선폭이 $50-\Omega$ 마이크로스트립 라인에 근접할 경우 저지대역과 통과대역의 특성이 효과적으로 상호 절충된 결과를 갖는 것을 볼 수 있다.

PBG 구조를 이용하여 여파기를 구현하는데 있어서 고려해야 할 것은, 저주파대역에서 중심주파수가 정해지는 경우, 반파장에 의해 결정되는 주기가 커짐에 따라 전체적으로 마이크로스트립 구조의 크기



(a)



(b)

그림 6. (a) 그림 4(a)의 2-pole 대역통과 여파기를 기초로 하여 크기를 최적화시킨 구조
(b) 그림 4(a) 및 그림 6(a) PBG 구조를 갖는 여파기의 반사특성 및 전달특성에 대한 시뮬레이션 결과

Fig. 6. (a) Compact 2-pole bandpass filter obtained by bending the structure of Fig. 4 (a).
(b) Simulated reflection and transmission characteristics of the PBG structures shown in Fig. 4(a) and Fig. 6(a).

가 커진다는 사실이다. 본 논문에서는 그림 6(a)과 같은 구조를 설계함으로써 이러한 문제점을 해결할 수 방법을 제시하였다. 다른 마이크로스트립 구조와 달리 PBG 구조의 경우에는, 주기적인 구조를 만족시킨다면 모양이 바뀌더라도 원하는 특성을 얻을 수 있다는 원리를 이용하였다. 셀의 인덕턴스와 커패시턴스를 반복적으로 유지시킨다면 마이크로스트립 라인의 모양이 바뀌더라도 특성에는 큰 변화가 없기 때문이다. 이것을 적용한 것이 그림 6(a)에 나타나 있으며, folded line shape^{[17]~[18]}을 사용하여 크기를 감소시킬 수 있었다. 결과는 그림 6(b)에 나타나 있는데, 두 구조가 모두 유한접지면일 경우에 대한 시뮬레이션 결과이며 거의 동일한 결과를 갖는 것을 확인할 수 있다.

본 논문에서 연구한 PBG를 이용한 대역통과 여파기는 여러 분야에 응용이 가능하리라 생각된다. 그 중의 한 분야가 대역통과 여파기를 여러 개 사용하여 필요한 주파수를 선택하는 스위칭 구조의 멀티플렉서에 대한 연구이다. 이것은 PBG 구조를 이용한 대역통과 여파기의 주기는 고정시킨 상태에서 결합의 길이를 다르게 함으로써, 동일한 저지대역내에서 주파수가 통과되는 대역을 다르게 해줌으로써 구현할 수 있다. 격자주기를 동일하게 하는 이유는 각 여파기의 주기가 바뀌게 되는 경우에 발생하는 상호 간섭에 의해 불필요한 공진 모드가 형성되는 것을 방지하기 위해서이다. 이 밖에도 여러 다른 분야에 응용이 가능할 것이며, 또한 설계나 제작이 간편하다는 장점을 갖기 때문에 앞으로 그 이용이 증가될 것이라 생각한다.

VI. 결 론

본 논문에서는 마이크로스트립 라인의 폭을 주기적으로 변화시킴으로써 임피던스의 변화에 의한 다중간섭을 이용하여 효과적으로 저지대역을 구현하였고, 집중정수소자를 이용하여 등가회로를 구현하였다. 그리고 결합모드를 이용하여 대역통과 여파기를 제작한 결과, 중심주파수가 2.885 GHz에서 나타나고, 3-dB 대역폭은 약 120 MHz를 갖으며, 통과대역에서의 S_{11} 값은 -15 dB 이하로 떨어지고, S_{21} 값이 -2.5 dB 이상의 적은 손실을 갖는 결과를 얻을

수 있었다. 이러한 구조는 유전체 기판에 주기적으로 구멍을 뚫는 구조보다 훨씬 제작이 간편할 뿐만 아니라, 특성이 우수한 대역통과 여파기를 구현할 수 있다. 또한, PBG 구조를 사용하여 여파기를 제작하는 경우에 높은 주파수의 통과대역에서 도체손실에 의해 삽입손실이 증가되는 문제점을 어느 정도 개선할 수 있음을 확인하였다. 저주파대역에서 소자의 크기가 커지는 문제점은 공간을 효과적으로 사용하기 위해 folded line shape을 사용하여 해결하였다.

참 고 문 헌

- [1] E. Yablanovich, "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, no. 20, pp. 2059-2062, May, 1987.
- [2] 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.
- [3] T. J. Ellis and G. M. Rebeiz, "MM-wave tapered slot antenna on micromashed photonic bandgap dielectrics," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1157-1160, June, 1996.
- [4] F. R. Yang, Y. Qian, R. Coccioli, and T. Itoh, "A novel low-loss slow-wave microstrip structure," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 8, no. 11, pp. 372-374, Nov., 1998.
- [5] V. Radisic, Y. Qian, and T. Itoh, "Broadband power amplifier using dielectric photonic bandgap structure," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 8, no. 1, pp. 13-14, Jan., 1998.
- [6] S. Fan, J. N. Winn, A. Devenyi, J. C. Chen, R. D. Meade, and J. D. Joannopoulos, "Guided and defect modes in periodic waveguides," *J. Opt. Soc. Am. B.*, vol. 12, no. 7, pp. 1267-1272, July, 1995.
- [7] J. C. Chen, H. A. Haus, S. Fan, P. R. Villeneuve, and J. D. Joannopoulos, "Optical

- filters from photonic band gap air bridges," *IEEE J. of Lightwave Tech.*, vol. 14, no. 11, pp. 2575-2580, Nov., 1996.
- [8] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn, *Photonic Crystals*, Princeton University Press, Princeton NJ, 1995.
- [9] C.-S. Kee, J.-E. Kim, H. Y. Park, S. J. Kim, H. C. Song, Y. S. Kwon, N. H. Myung, S. Y. Shin, and H. Lim, *Phys. Rev. E* 59, 4695, April, 1999.
- [10] V. Radisic, Y. Qian, R. Coccioli, and T. Itoh, "Novel 2-D photonic bandgap structure for microstrip lines," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 8, no. 2, pp. 69-71, Feb., 1998.
- [11] I. Rumsey, M. P-May, and P. K. Kelly, "Photonic bandgap structure used as filters in microstrip circuits," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 8, no. 10, pp. 336-338, Oct., 1998.
- [12] B. Lenoir, D. Baillargeat, S. Verdeyme, and P. Guillzon, "Finite element method for rigorous design of microwave devices using photonic bandgap structures," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1061-1064, June, 1998.
- [13] H. Contopanagos, L. Zhang, and N. G. Alexopoulos, "Thin frequency-selective lattices integrated in novel compact MIC, MMIC, and PCA architecture," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 46, no. 11, pp. 1936-1948, Nov., 1998.
- [14] 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.*, pp. 2301-2303, Apr., 2000.
- [15] R. Mittra, S. Chebolu, W. D. Becker, "Efficient modeling of power planes in computer packages using the finite difference time domain method," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 42, no. 9, pp. 1791-1795, Sept., 1994.
- [16] D. Kuznetsov and J. E. Schutt-Aine, "The optimal transient simulation of distributed lines," *IEEE Trans. Circuits Sys.-I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 43, no. 2, pp. 110-120, Feb., 1996.
- [17] D. Zhang, G. C. Liang, C. F. Shin, M. E. Johansson, and R. S. Withers, "Narrowband lumped-element microstrip filters using capacitively-loaded inductors," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 43, no. 12, pp. 3030-3036, Dec., 1995.
- [18] Y. Kobayashi, D. Yamaguchi, K. Saito, N. Sakakibara, Y. Ueno, S. Narahashi, and T. Nojima, "Design of a 264 MHz superconductive thin film lumped element filter," *Proc. of Asia-Pacific Microwave Conf.*, vol. 3, pp. 1513-1516, Dec., 1998.

김 태 일



1998년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
 2000년 8월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
 2000년~현재: LG전자기술원 연구원
 [주 관심분야] 초고주파 능·수동

소자

김 명 기



1999년 2월: 아주대학교 전자공학부 (공학사)
 2001년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
 2001년 3월~현재: 아주대학교 전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 안테나 설계 및 해석, 수치해석

박 익 모



1984년: 뉴욕주립대학교 전기전자
공학과 (공학사)
1989년: 일리노이 대학교 전기전자
공학과 (공학석사)
1994년: 일리노이 대학교 전기전자
공학과 (공학박사)
1994년~1996년: LG전자기술원

선임연구원

1996년~현재: 아주대학교 전자공학부 부교수

[주 관심분야] 안테나 설계 및 해석, EMI/EMC, 수치해석

임 한 조



1947년 9월 2일생
1971년: 서울대학교 문리과학대 물
리학 (학사)
1974년: 서울대학교 물리학과 고체
물리학 (석사)
1982년: 프랑스 Montpellier 2대 물
리학과 고체물리학 (박사)

1982년 2월~8월: Montpellier Post Doc.,

1997년 2월~1997년 8월: Northwestern대 전기 및 컴퓨터
공학과 visiting scholar

1995년 4월~1997년 3월: 물리학회 응용물리지 편집간사

1993년 3월~1995년 2월: 아주대학교 연구처장

1986년 2월~1987년 1월: 프랑스 Ecole Normale 고체물
리 그룹 연구원

1975년 9월~현재 아주대학교 전자공학부 및 분자과학기
술학과 교수

[주 관심분야] 반도체 결함 관련 전기적·광학적 특성, 반
도체 계면 및 금속/반도체 계면의 전자적 특성, 양자구
조의 전자적 특성, 광자 결정(photonic crystals), III-V
족 반도체 소자, 화학 센서, 전자소자의 잡음현상