

# 마이크로스트립 PBG를 이용한 대역통과 여파기 설계

이창언<sup>o</sup>, \*김상태, 신철재  
 아주대학교 전자공학과, \*한국산업기술평가원  
[freely@orgio.net](mailto:freely@orgio.net)

## Design of Bandpass Filters using Microstrip Line PBG

Chang On Lee<sup>o</sup>, \*Sang Tae Kim, Chull-Chai Shin  
 Dept. of E.E, Ajou University, \*ITEP

### Abstrat

In this paper, we proposed the effective serial connection methodology of PBG resonator with defect mode. We use the big difference of impedance ratio in connection region, for example dual PBG, for serial connection. This method reduces the PBG cells and is able to control the pole of bandpass filters. This result in flexibility in design of bandpass filter. Our PBG bandpass filter is modeled by using the ideal transmission line model. This model is very easy, fast, and effective for PBG structure.

Key Word : PBG, defect, Ideal transmission line model, Dual PBG, bandpass filter(BPF)

### I. 서론

PBG (Photonic bandgap) 구조는 원래 광학에서 연구된 분야였으나, 최근 마이크로파 분야에서 널리 응용되어지고 있다. PBG 구조는 기본적으로, 어떤 특정 주파수 대역이 통과하지 못하도록 하는 주기 구조이다<sup>[1]</sup>. 이러한 PBG구조는 굴절율(refractive index)이 다른 두 물질이 주기적인 반복으로 배열되었을 때, 주기에 의해 어떤 특정대역에서 전자기파가 통과하지 못한다고 알려졌으나<sup>[1]</sup>, 마이크로파 영역에서 증명된바와 같이 파동 임피던스(wave impedance)의 주기적 변화에도 PBG를 형성할 수 있다<sup>[2]-[4]</sup>. 따라서 마이크로파 영역에서는 유전체를 뚫어 air-hole을 만들거나<sup>[5]</sup>, 접지면을 식각하는 방법<sup>[6][7]</sup>, 마이크로스트립 라인 상에 PBG 구조를 구성하거나<sup>[3][4][8][9]</sup>, 이들 둘을 조합하는 방법<sup>[10]</sup> 등을 이용하여 파동 임피던스의 주기적 변화를 주는 방법으로 PBG 구조들이 구현되었다.

이러한 PBG구조는 넓은 저지대역을 효과적으로 형성시키므로, 저지대역 여파기(bandstop filters)뿐만 아니라<sup>[10][11]</sup>, 안테나에서의 이득 향상<sup>[12]</sup>과 빔 패턴의 개선<sup>[13]</sup>, 전력증폭기에서 효율을 높이는<sup>[14]</sup> 등,

다양한 구조로 응용가능하다. 또한 이러한 PBG구조에서 배열 중 한 부분에 주기의 배열에 변화를 부여 결합(defect)를 만들어 주면, 저지대역 내에 전자기파가 결합 부분에 갇히어, PBG구조의 다중 반사에 의해 대역 통과 특성을 나타낸다는 점을 이용하여 대역통과 여파기(bandpass filters)로 응용될 수 있다<sup>[3][4]</sup>. 이러한 결합모드를 이용한 PBG 대역통과 여파기는 통과 대역의 스킨트 특성과 저지대역의 효과적인 형성을 위하여 기본구조를 2개로 직렬연결 하는 구조도 제안되었다<sup>[3]</sup>. 하지만 이러한 구조는 전체 구조의 크기가 커진다는 단점 때문에, 기존의 논문<sup>[3]</sup>에서는 folded line형태를 사용한 방법으로 문제를 해결하고자 하였다. 이러한 형태는 기본주기의 변화에 효과적으로 대처할 수 없을 뿐만 아니라, PBG의 cell의 크기를 변화시키는 데도 제약을 받게 된다.

본 논문에서는 이러한 단점을 극복하고자, PBG 결합 구조를 이용한 대역통과 여파기의 직렬연결 시 cell수를 줄이면서, 기존과 동등한 효과를 나타내는 방법을 제안한다. 이러한 cell 수를 줄이는 방법은 dual-PBG<sup>[10]</sup>등을 이용한 방법을 사용하였으며,

단일 PBG 구조로도 가능성을 확인하였다. 제안된 구조는 ABCD 행렬을 이용하여, 보다 빠른 주기구조의 계산법을 통해 계산되었으며, EM solver와 측정을 통해 그 결과를 확인 하였다. 또한 제안된 구조는 직렬연결 시 발생하는 폴을 임의로 조절할 수 있어, 이러한 PBG 구조의 결합을 이용한 대역통과여파기의 응용을 보다 다양하게 할 수 있으리라 사료된다.

## II. 이상적 전송선로 모델을 이용한 효과적 PBG 구조 해석

마이크로파 대역에서 파동 임피던스의 변화가 주기적으로 일어나는 구조는 전술한 바와 같이 여러 가지 방법으로 만들어질 수 있다. 그림 1은 접지면을 식각한 기본적인 형태의 마이크로스트립 PBG 구조이다. 이때 저지 대역을 결정하는 것은 PBG 구조의 주기이다. 그림 1에 나타난 PBG 구조의 주기  $a$ 는 아래와 같다.

$$a = \frac{\lambda_g}{2} = \frac{c}{2f_0\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (1)$$

여기서  $\lambda_g$ 는 저지대역의 중심주파수  $f_0$ 에 해당하는 관내 파장이며,  $c$ 는 빛의 속도,  $\epsilon_{re}$ 는 마이크로스트립 기판의 유효유전율(effective dielectric constant)이다. PBG 구조에서 접지면의 식각된 부분은 coupled microstrip-slot라인 형태로 접지면의 식각으로 인하여 유효유전율이 낮아져서 임피던스가 높아지게 되며 관내 파장의 길이가 길어지게 된다<sup>[15][17]</sup>. 이러한 식각구조는 저지대역의 주기성을 없애기 위하여 최적화된 식각구조의 가지지만<sup>[15]</sup>, 논문에서는 저지대역 이외의 영역은 고려사항이 아니므로 편의상 식각구조의 크기를 3mm×3mm로 하고 대략적으로 10GHz에서 저지 대역의 중심이 나타나도록 주기  $a$ 를 6mm로 하였다.

이러한 PBG구조는 일반적으로 많은 주기를 가지고 있으므로, full-wave analysis를 이용한 수치 해석이나, 상용화 되어 있는 EM solver를 이용하여 계산을 할 경우에도 많은 시간이 소요된다. 따라서 설계를 보다 효율적으로 하면서 튜닝을 하기 위해선 보다 빠르고 효율적인 계산법이 필요하다. PBG 구조의 전체적인 특성을 빠른 시간에 계산하기 위하여 이상적인 전송선로 모델을 이용한 방법<sup>[15]</sup>이 소개되었다. 본 논문에서는 이러한 이상적인 전송모델을 이용하여 결합을 이용한 PBG 대역 통과 여파

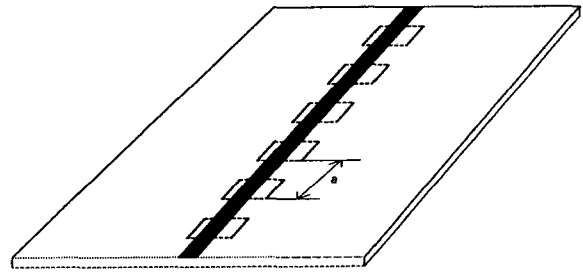


그림 1. 접지면이 사각형태로 식각된 기본적인 형태의 1-D PBG 구조

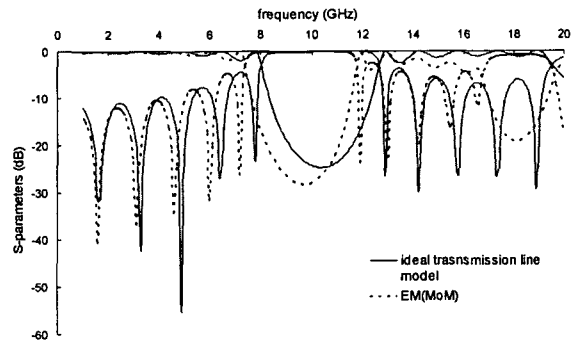


그림 2. 6 주기를 가지는 PBG 마이크로스트립라인의 이상적 전송선로 모델과 EM 해석 결과 비교

기를 보다 빠르고 쉬우면서 효율적으로 특성을 분석하였다.

그림 2는 그림 1의 PBG 구조가 6 주기를 가질 때, 이상적인 전송선로 모델과 모멘트 법(MoM: Method of Moments)에 기초한 full-wave analysis EM solver인 Ansoft사의 ENSEMBLE를 이용하여 계산한 결과를 비교한 것이다. 이상적인 전송선로 모델에서는 높은 임피던스 전송선로로 대치된 식각된 접지면 영역에서 발생할 수 있는 slot mode<sup>[17]</sup>의 효과와 etched hole 영역과 일반 마이크로스트립라인 전송선로의 경계면에서 발생할 수 있는 효과가 고려되지 않았다. 또한 이상적 전송선로의 모델에 사용된 임피던스와 관내 파장은 Spectral Domain Approach<sup>[16]</sup>를 이용하여 구하거나, FEM 방식의 수치해석 등을 이용하여 구할 수 있다. 본 논문에서는 FEM 방식의 수치해석을 이용하여 이상적 전송선로 모델에 사용될 구조의 임피던스와 관내 파장의 길이를 구하였다. 중심주파수를 10GHz로 하여 FEM 방식으로 계산한 결과 etched hole의 너비가 3mm인 전송선로는 대략적으로 91Ω의 임피던스를

가지고 3mm의 길이는 관내파장의 전기적 길이로 대략적으로 77°가 된다. 길이가 3mm인 50Ω의 일반적인 마이크로스트립라인은 관내파장의 전기적 길이가 대략적으로 97°가 된다. 그림 2의 결과에서 보는 바와 같이 이상적인 전송선로 모델은 MoM 방식의 계산 결과에 비해 조금 낮은 저지특성을 보여주며, 저지대역의 중심이 고주파 쪽으로 약간 이동하게 되는데, 이는 접지면의 식각부분에서 발생할 수 있는 slot-mode등이 고려되지 않는 결과로 보인다. 이러한 차이는 전체의 특성을 아는데 크게 영향을 주지 않으므로 빠른 초기 설계를 위해서 이상적 전송 모델을 사용하는 것이 시간을 절약하는 바람직한 방법이라 사료된다. 또한 이러한 방법은 좋은 저지 특성을 얻기 위하여 주기수를 증가시킬 경우 계산 시간과 컴퓨터 메모리 문제를 해결할 수 있는 최상의 대안으로 사료된다.

### III. 대역통과 여파기의 설계

PBG 구조를 이용하여 대역통과 여파기를 설계하기 위해서는 저지대역 내에서 통과대역을 결정하여 그에 맞게 결함의 크기를 결정하여야 한다<sup>[3][4]</sup>. 그림 3은 구현된 PBG 구조에서 결함 구조를 갖는 기본적인 PBG 공진기를 나타낸다. 그림에서처럼 임피던스가 낮은 영역이나 높은 영역 모두에서 결함구조를 가질 수 있다. 하지만 일반적으로 식각된 영역에서는 신호의 방사 문제 등이 발생할 수 있고, slot mode 등의 영향으로 정확한 전기적 길이를 상대적으로 구하기 힘든 단점이 있으므로, 본 논문에서는 낮은 임피던스 전송라인의 역할을 하는 50Ω 마이크로 스트립 라인 영역에 결함구조를 준 구조에 관하여 서술한다. 앞 절에서 설명한 이상적인 전송 모델을 이용하여 결함 영역의 전기적 길이가 변함에 따른 통과 대역의 위치를 그림 4에 나타내었다. 여기서 나타난 결과는 양쪽으로 3개의 식각된 영역을 가지고 그 가운데 부분에 결함구조를 준 구조에서의 결과이다. 이 모델에서는 10GHz 중심으로 모델링 했으나, 주기 a의 길이는 전술한 바와 같이 10GHz에서는 174°이므로 통과대역이 10GHz에 나타나기 위해서 결함부분이 길이가 180°가 아닌 194°에서 나타난다. 이는 결함부분의 길이가 PBG를 이루는 한쪽 셀의 2배이며, 중심주파수를 적절하게 잡을 경우, 중심주파수에서 통과대역이 나타나기 위해서는 180°의 전기적 길이가 되어야 한다. 그림에서 나타난 바와 같이 저지대역 내에서 통과대역은 결

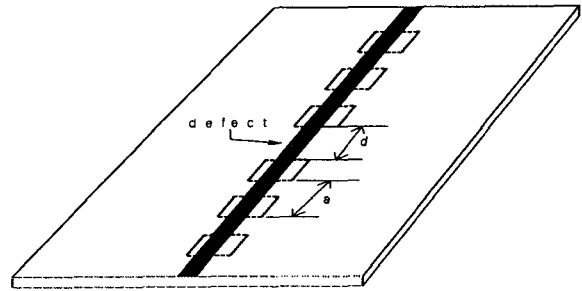


그림 3. 결함 구조를 갖는 PBG 공진기

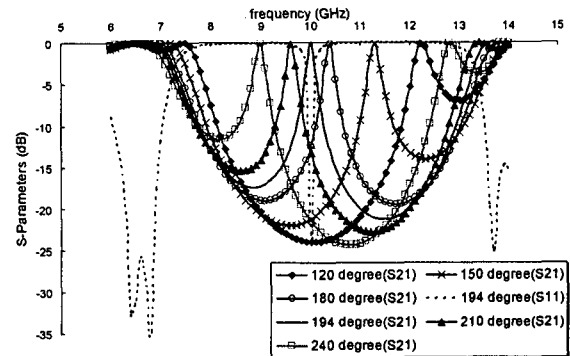


그림 4. 결함구조의 전기적 길이에 따라 나타나는 통과 대역(3.0mm×3.0mm의 식각 영역을 가지는 PBG 구조의 이상적인 전송모델을 사용)

함 영역의 전기적 길이에 의존한다.

이러한 PBG의 결함 구조를 이용한 공진기는 보다 좋은 스퀘어 특성을 얻기 위해 직렬연결을 취할 수 있다[3]. 그림 5는 단순한 PBG 공진기의 직렬 연결구조와 이 논문에서 제안된 연결 구조를 보여준다. PBG 공진기를 단순히 직렬연결을 할 경우 스퀘어 특성은 좋아지지만 폴을 임의로 조절하기 힘들고, 전체적인 크기가 크지는 단점이 있다. 이에 반해 제안된 구조는 연결부위의 임피던스 차이의 변경을 통하여 식각 영역의 수를 줄이면서 폴을 조절하여 단순 연결 구조와 유사한 결과를 얻을 수 있다. 이러한 구조는 임피던스 변경을 식각 영역의 너비를 변화시켜 임피던스의 차이를 크게 할 수 있으며, 또 다른 방식으로 신호선과 식각영역을 동시에 이용하는 Dual PBG 구조<sup>[10]</sup>를 취할 수 있다. 후자는 전자에 비해 임피던스 차이의 효과가 더욱 좋으며, 이러한 Dual PBG 구조에서 식각영역의 너비 변화와 신호선의 PBG 구조를 동시에 이용하면 보다 유동적으로 설계할 수 있다. 그림 6은 이상적

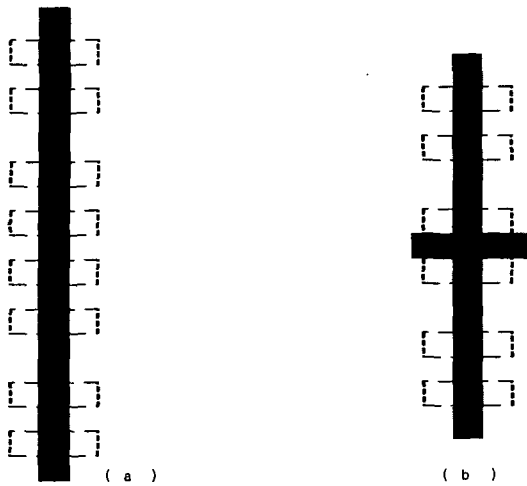


그림 5. 결합 구조를 연결한 PBG 공진기의 직렬연결 구조 (a) 일반적인 구조 (b)제안된 Dual-PBG를 이용한 구조

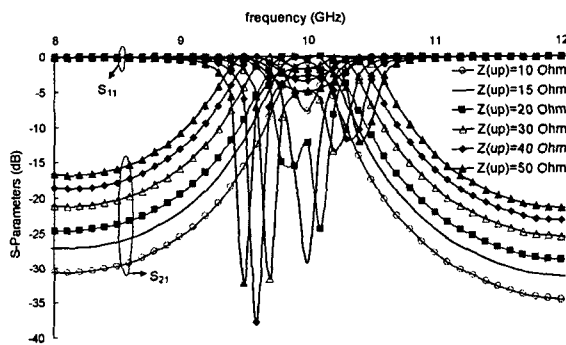


그림 6. 제안된 구조의 전송선 PBG의 임피던스 (Z(up))에 따른 폴(pole)의 변화 및 특성

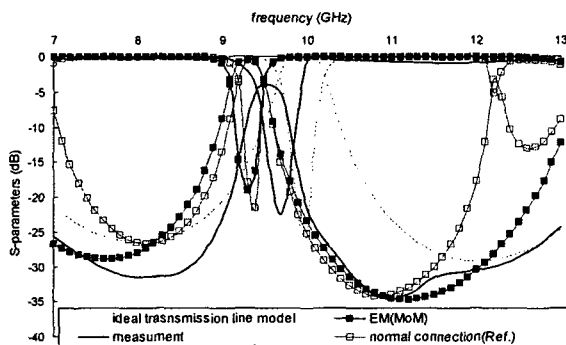


그림 7. 결합을 이용한 제안된 PBG 공진기의 결과인 전송선로 모델을 이용하여 연결 영역에서 식각 영역의 수를 반으로 줄인, 2개를 사용하고 그 식

각된 영역의 사이를 Dual PBG 형태로 구현하여, 그 임피던스 차이에 따라서 폴이 조절되며 전체적인 통과대역의 특성이 바뀌는 것을 보여준다. 여기서 사용된 기본적인 PBG 공진기는 결합 부분의 양쪽으로 2개의 식각 영역을 가지므로 단순연결 시 8개의 식각영역을 가지며, 제안된 형태를 사용할 경우 6개의 식각 영역을 가진다.

그림 7은 이러한 결과를 바탕으로 설계되어진 PBG 대역통과 여파기의 EM simulation의 계산 결과와 측정결과를 나타낸다. 제작에는 유전율이 10.2 이고 유전체의 두께가 0.635mm인 Duroid6010 기판이 사용되었으며, EM simulation으로 MoM 방식의 full-wave analysis solver 인 ENSEMBLE를 사용하였고, 측정에는 Agilent Technologies사의 HP9510C Vector Network Analyzer가 사용되었다. 여기서 식각된 영역은 모두 3.0mm×3.0mm로 6개가 사용되었고, 이외의 영역은 3.0mm×0.6mm이며, 연결영역의 Dual PBG 부분의 위쪽 PBG의 크기는 3.0mm×3.6mm이다. 그림에서 보는 바와 같이 연결구조에서 Dual PBG 구조를 사용하여 임피던스 변화를 주어 식각된 셀의 수를 줄여 전체 크기를 줄이면서 효과적인 PBG 대역통과 여파기를 구현할 수 있다. 또한 그림 6에 나타난 바와 같이 임피던스의 차이를 더 조정함으로써 폴의 위치를 조정하여 그림5(a)와 같은 단순 연결 구조와 유사한 통과대역 특성을 얻을 수 있다. 그림 7에 보인 측정 결과는 추가적인 튜닝 없는 초기 측정치이며, 방사 손실과 SMA 커넥터의 연결 시 발생하는 손실 등을 포함한다. 삽입 손실의 문제는 신호선상의 PBG등을 이용하면 우수하게 개선되리라 사료된다<sup>[3]</sup>.

#### IV. 결론

본 논문에서는 결합 구조를 이용한 PBG 공진기를 직렬 연결한 대역통과 여파기의 구현 시, 연결 영역에 임피던스의 변화를 주어 PBG 주기 수를 감소시키면서 대역통과 특성을 변화시킬 수 있는 방법에 관하여 제시하였다. 연결 영역에서의 임피던스 변화는 식각너비의 변화와 Dual PBG를 이용한 두 가지 방법을 제시하였다. 그리고 Dual PBG를 이용하여 연결 영역을 조절한 PBG 대역통과 여파기를 설계하고 제작하여 측정되었다. 제안된 PBG 대역통과 여파기는 기존의 구조보다 주기 수를 줄여 소형화 할 수 있으며, 임피던스 조절을 통하여 유동적인 대역통과 여파기를 설계할 수 있다.

이러한 PBG 대역통과 여파기는 많은 주기 수로 인하여 상용화된 full-wave analysis등을 이용할 경우 많은 계산 시간과 메모리가 요구된다. 따라서 본 논문에서는 이상적인 전송선로 모델을 이용하여 보다 빠르고 간편하게 PBG 대역 통과 여파기를 설계하였다. 이러한 방법을 사용하여 설계할 경우 여러 PBG 공진기가 결합된 대역통과여파기도 빠른 시간에 계산할 수 있어, 빠른 시간 내에 개략적 PBG 여파기 설계에 크게 기여하리라 사료된다.

#### 참고문헌

- [1] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn, *Photonic Crystals: Molding and Flow of Light*, Princeton University Press, 1995.
- [2] 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 and Tech.*, vol. 47, no. 11, pp.2148-2150. Nov. 1999.
- [3] 김태일, 김명기, 박익모, 임한조, "Photonic Bandgap 구조를 이용한 마이크로스트립 라인 대역통과 여파기 설계", *한국전자파학회논문지*, vol. 12, no. 4, pp. 611-621. 2001년 6월.
- [4] 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. April 2000.
- [5] Y. Quan, V. Radisic, and T. Itoh, "Simulation and Experiment of Photonic Band-Gap Structures for Microstrip Circuits", *Asia Pacific Microwave Conference*, pp. 585-588. 1997.
- [6] 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.
- [7] F. Falcone, T. Lopetegi, and M. Sorolla, "1-D and 2-D Photonic Bandgap Microstrip Structure", *Microwave and Optical Tech. Lett.*, vol. 22, no. 6. pp. 411-412. Sept. 1999.
- [8] 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.
- [9] Q. Xue, K. M. Shum, and C. H. Chan, "Novel 1-D Microstrip PBG Cells", *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 10, no. 10. pp. 403-405. Oct. 2000.
- [10] C. O. Lee, C. C. Shin and S. T. Kim, "Dual 1-D PBG Structures with Improved Ripple Characteristic in Passband and Wideband Band-Stop Filter Design", *Asia-Pacific Microwave Conference*, Vol. 2, pp. 870-873. Nov. 2002.
- [11] I. Rumsey, M. Piket-May, and P. K. Kelly, "Photonic Bandgap Structures Used as Filters in Microstrip Circuits", *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 8, no. 10. pp. 336-338. Oct. 1998.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] C. O. Lee, S. T. Kim, and C. C. Shin, "Optimized Etched Hole Size for Suppressing the Periodicity in the Frequency Response in Photonic Bandgap Microstrip Structures", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 3, pp. 1615-1618. June. 2003.
- [16] T. Itoh, "Spectral Domain Imittance Approach for Dispersion Characteristics of Generalized Printed Transmission Lines", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 28, no. 7. pp. 733-736. July 1980.
- [17] K. C. Gupta, R. Garg, I. Bahl, and P. Bhartia, *Microstrip Lines and Slotlines*, 2nd ed. Artech House, 1996.