

양면 중첩기법을 이용하는 새로운 광대역의 소형 포토닉 밴드갭 구조

A Novel Wideband and Compact Photonic Bandgap Structure using Double-Plane Superposition

김진양, 방현국
아주대학교 전자공학부

Abstract

A novel photonic bandgap(PBG) structure is proposed and measured for wide bandgap and compact circuit applications. The proposed structure realizes the ultra-wideband bandgap(2-octave) characteristics by superposing two different PBG structures into a coupled double-plane configuration. A low pass filter fabricated using 3-period of the PBG cells shows 2-octave 10 dB stopband from 4.3 to 16.2 GHz and 0.2 dB insertion loss in the passband. Moreover, we confirmed that 44 ~ 70 % size reduction can be achieved using the proposed PBG structures. We expect this novel double-plane PBG structure is widely used for compact and wideband circuit applications, such as compact high-efficiency power amplifiers using harmonic tuning techniques.

key words : PBG, DGS, Bragg's law, low pass filter, power amplifier

I. 서론

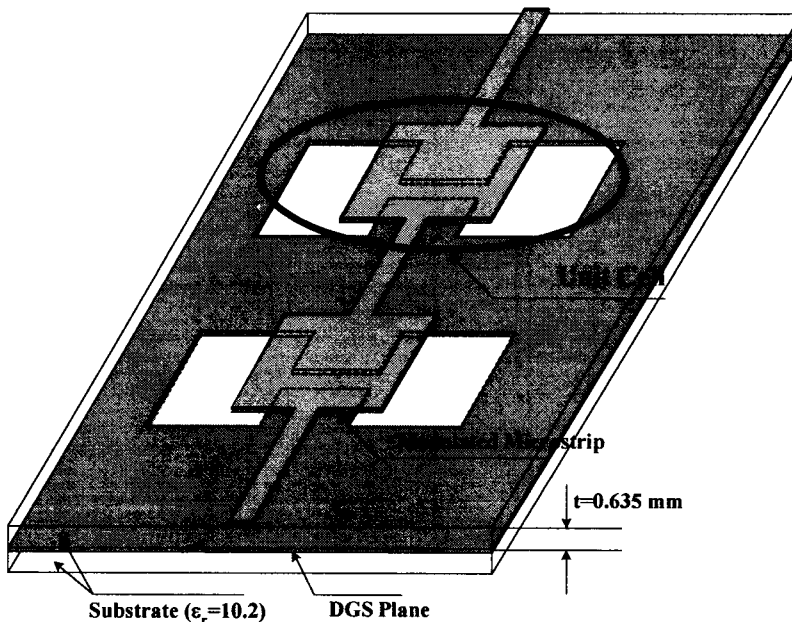
무선통신의 필수요소인 초고주파 및 밀리미터파 회로 설계에 있어서, 여파기는 회로의 성능을 좌우하는 대표적인 수동소자 중의 하나이다. 특히 무선통신 시스템의 front-end단에 사용되는 고주파 여파기들(RF filters)은 신호의 왜곡과 간섭을 줄임으로서, 시스템 성능을 극대화시키는 매우 중요한 소자라 할 수 있다. 그러나 기존의 여파기들은 차단특성(cut-off) 및 저지대역(stopband) 특성을 향상시키기 위해, 높은 차수(order)의 여파기를 사용하여야 하기 때문에 그 크기가 커진다는 단점을 지니고 있다[1]. 뿐만 아니라, 높은 차수의 여파기를 사용한다 하더라도 광대역의 저지대역 특성을 얻기 어렵다는 문제점을 안고 있다[1-2]. 기존 여파기의 상기 문제점들을 해결하기 위해, 수년전부터 연구되고 있는 것이 바로 PBG(Photonic Bandgap) 구조를 이용한 여파기의 구현이다.

PC(Photonic Crystal)라고도 일컫는 PBG 구조는 인위적으로 주기적 불연속을 형성함으로써 특정 주파수의 전자파(electromagnetic wave)를 감쇄 시킬 수 있는 구조이다[3-4]. 더욱이, 브래그 법칙(Bragg's law)을 만족하는 다중 반사(multiple reflection)를 형성하여 PBG의 중심 주파수를 제어할 수 있다[5]. 이때 다중 반사는 매질의 굴절율(refractive index)을 변화 시키거나, 혹은 전자파의 파동 임피던스(impedance)를 변화 시키는 것에 의해 이루어질 수 있다. 이러한 다중 반사를 적용하는 대표적인 예가 바로 DBR(Distributed Bragg Reflector) mirror를 이용한 VCSEL(Vertical Cavity Surface Emitting Laser)이다. 이처럼 PBG에 대한 연구는 광학

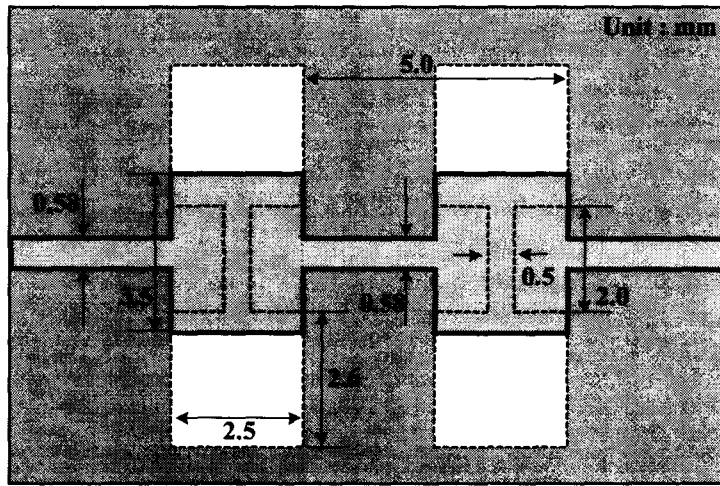
분야에서 처음으로 시작되었으나, 최근에는 무선 통신용 초고주파 소자에의 적용이 활발히 이루어지고 있는 실정이다. 특히 PBG를 이용한 광대역 여파기를 비롯하여, 고효율 전력 증폭기 및 안테나 등은 그 특성이 이미 검증 되었다[6-10]. 또한 PBG를 이용하여 공진기의 기생 모드를 효과적으로 억제 시킬 수 있다는 응용 예도 발표되었다[11]. 상기 나열된 다양한 응용 예로부터 확인할 수 있듯이, 초고주파 회로의 성능을 더욱 향상시키기 위해서는 보다 넓고 깊은 저지대역 특성을 갖는 PBG 구조가 요구되어지고 있다. 최근 광대역의 PBG 구조에 대한 연구 결과들이 발표되었지만, 대역이 넓어지는 만큼 크기가 커지고 저지대역 내에 불필요한 기생 방사 현상이 나타나며, 통과대역(passband)의 특성 또한 크게 저하된다는 단점들을 지니고 있다 [1-2]. 결과적으로, 우수한 저지대역 및 통과대역 특성을 갖는 광대역의 소형 PBG 구조의 설계는 무선통신용 초고주파 회로 설계에 있어서 매우 중요하다 할 수 있다.

본 논문에서는 작은 크기로 광대역의 깊은 저지대역 특성을 갖는 동시에 매우 평탄하고 우수한 통과대역 특성을 갖는 새로운 개념의 PBG 구조를 제안하였다. 제안된 구조는 서로 다른 중심 주파수를 갖는 PBG 단위 셀을 전송선로의 접지면과 신호선에 모두 구현함으로써 두 저지대역 특성이 중첩(superposition)되는 원리를 이용한 것이다. 즉 기존의 동일 평면상에 구현되었던 구조들에 비해 더욱 작은 크기로 더욱 넓은 저지대역 특성을 얻을 수 있다. 실제 제안된 구조의 측정 및 해석 결과 기존의 광대역 PBG 구조들[1-2]에 비해 40 %이상의 크기를 감소시킬 수 있었으며, 더욱 넓고 깊은 저지대역 특성을 얻을 수 있었다. 더욱이 제안된 3-셀 및 5-셀 PBG의 경우 각각 평균 0.2 dB, 0.3 dB이내의 우수한 통과 대역 특성을 나타내었다. 따라서 본 논문에서 제안된 새로운 개념의 양면(double-plane) 중첩기법을 이용한 PBG 구조는 경박단소화된 고성능의 광대역 초고주파 회로 설계에 매우 다양하게 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

II. 양면(Double-Plane) PBG 구조



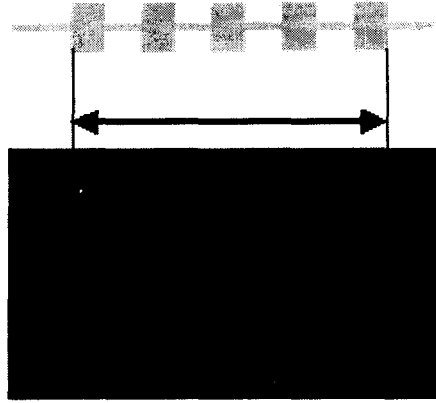
(a)



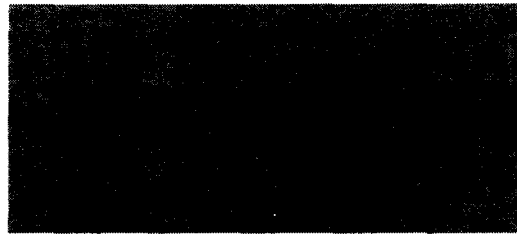
(b)

그림 1. 제안된 양면 PBG 구조 : (a) 3차원 view, (b) Top view

그림 1은 본 논문에서 제안된 새로운 양면 PBG 구조를 나타내고 있다. 우선 접지면에는 아령 모양의 공진기를 단위 셀로 갖는 기 잘 알려진 DGS(Defected Ground Structure)를 사용하였으며[12], 신호선에는 중심 주파수에서 각각 $\lambda_g/4$ 의 길이를 갖도록 낮은 임피던스 선로와 높은 임피던스 선로를 반복적으로 연결한 전형적인 마이크로 스트립 PBG 구조를 사용하였다. 이때 DGS는 약 6 GHz에서 공진하도록 설계되었으며, 신호선에 구현된 마이크로스트립 PBG는 저지대역의 중심주파수가 10 GHz에서 형성되도록 주기를 5 mm로 설계하였다. 이때 사용된 기판은 그림에 나타나 있는 것처럼 두께가 0.635 mm이고 비유전율이 10.2인 상용 Duroid 6010 기판이다. 또한 본 논문에서는 제안된 구조와의 특성 비교를 위하여 기존의 몇 가지 구조를 제작하여 측정하고자 하였으며, 그림 2에서는 제작된 제안구조를 비롯한 비교구조에 대한 사진을 나타내고 있다. 그림 2 (a)는 제안된 5 셀 PBG구조의 윗면과 아랫면을 나타내고 있으며, 전체 크기는 22.5 mm이다. 또한 3 셀의 경우에는 그 크기가 12.5 mm가 됨을 알 수 있다. (b)의 경우에는 최대 평탄(maximally flat) prototype의 전형적인 저역통과 여파기를 나타내고 있으며, 전체 23 mm의 크기를 가지고 있다. 마지막 비교 구조로서, 그림 2의 (c)는 참고문헌 [1]에서 제안된 방법을 사용하여 제작된 PBG구조를 나타내고 있으며, 40.5 mm의 크기를 가지고 있다. 따라서 제안된 3, 5 셀 PBG 구조의 크기가 (c)에 비해서 각각 70 %, 44 % 작다는 것을 확인 할 수 있다. 상기 제작구조들의 측정은 V-커넥터를 가지고 있는 UTF(Universal Test Fixture)를 사용하여 이루어 졌다.

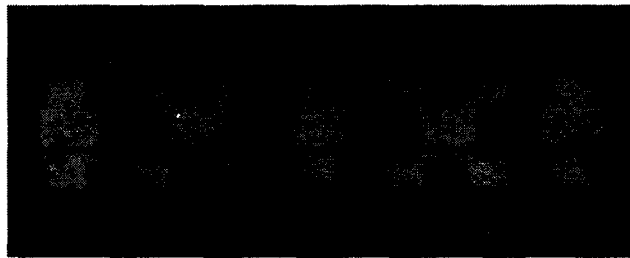


(a)



23 mm

(b)



(c)

그림 2. 제작 구조들의 사진 : (a) 제안된 양면 PBG 구조의 신호선과 접지면, (b) 9차 최대 평탄(maximally flat) 저역통과 여파기, (c) 참고문헌 [1]의 PBG 구조

III. 결과 및 고찰

1. 제안 구조에 대한 결과 및 고찰

본 논문에서는 제안 구조들을 해석하기 위해서 FEM(Finite Element Method) 알고리즘을 사용하는 상용 해석 툴을 사용하였으며, 이를 측정결과와 비교하여 나타내었다.

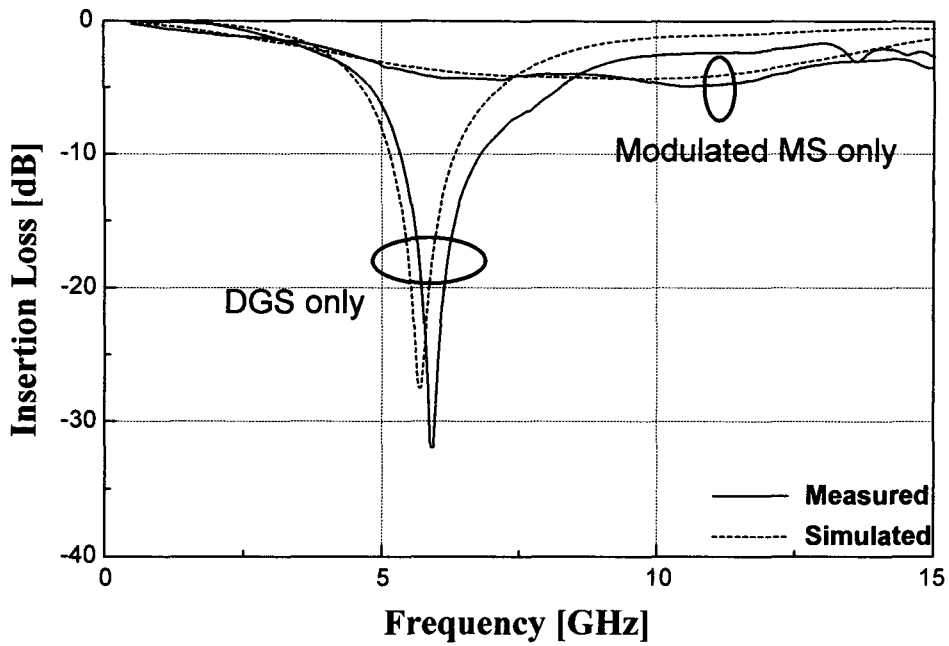


그림 3. 단일 마이크로스트립 PBG 구조와 단일 DGS 구조 각각의 측정 및 해석 결과

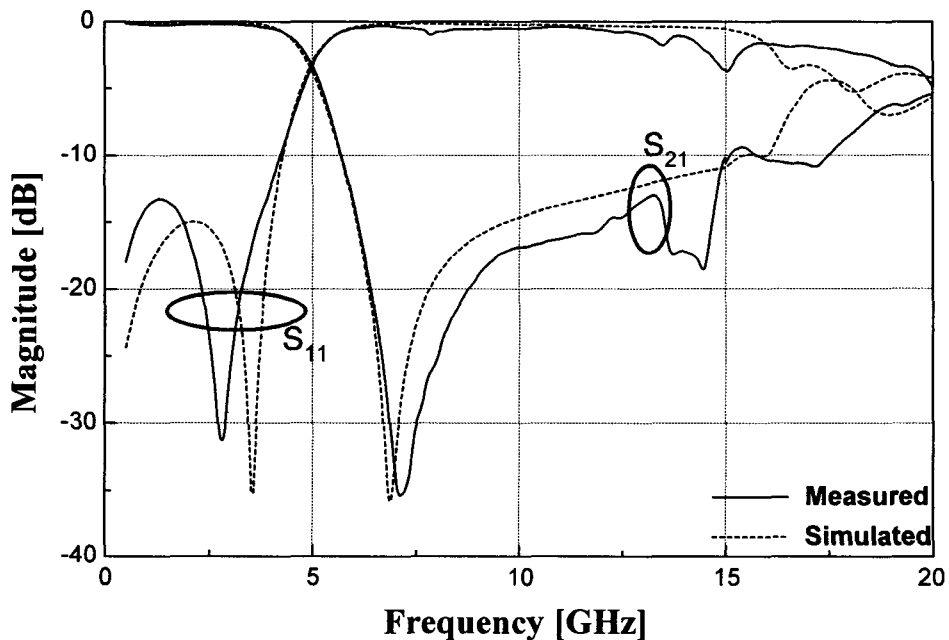


그림 4. 제안된 양면 PBG 단위 셀의 측정 및 해석 결과

우선 그림 3은 단일 마이크로스트립 PBG만 형성 되어 있을 경우와, 단일 DGS만 형성 되어 있을 경우의 측정 및 해석 결과를 나타내고 있다. 그림에서 나타나듯이 마이크로스트립 PBG 구조는 10 GHz를 중심으로 저지대역 특성이 넓게 퍼져 있는 반면, DGS의 경우에는 6 GHz 부근에서 매우 날카로운 공진특성이 나타남을 확인 할 수 있다. 본 논문에서는 바로 이와 같은 두 가지 상이한 특성을 중첩시킴으로써 효과적인 PBG 구조를 설계하고자 하였다. 그림 4는 상기 두 가지 구조를 하나의 기판 양면에 제작하여 측정한 결과와 해석 결과를 비교하여 나타내고 있다. 즉 제안된 단위 셀의 결과를 도시하고 있다.

그림 3과 4를 비교하여 확인 할 수 있듯이 저주파 영역의 저주파 영역은 DGS의 특성에 주로 지배되고 있는 반면, 고주파 영역은 마이크로스트립 PBG의 특성에 주로 지배되고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 제안된 단위 셀의 10 GHz 부근 특성이 중첩되기 전 특성들의 합보다 우수한 것은, 마이크로스트립 PBG의 구조적 불연속에 의한 다중 반사가 DGS의 삽입으로 인해서 효과적으로 증가되었기 때문이다. 일반적으로 PBG 구조는 구조적 불연속의 수를 증가시킴으로써, 즉 다중 반사의 양을 증가시킴으로써 그 특성을 향상시킬 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안된 개념이 그대로 적용되고 있음을 확인 할 수 있다.

그림 5와 6은 제안된 PBG 단위 셀을 여러 개 사용하였을 때의 특성들에 대한 측정 및 해석 결과를 도시하고 있다. 결과 그림에서 보이고 있듯이, 각각의 구조가 약 4 GHz에서 3 dB 차단 특성이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 또한 제안된 3, 5셀 PBG의 측정 결과 각각 11.9 GHz, 12.1 GHz의 10 dB 저지대역폭을 나타내고 있으며, 저지대역의 중심 주파수(10 GHz)에서는 각각 51 dB와 56 dB의 삽입손실 특성을 나타내고 있다. 또한 차단 주파수(4 GHz)에서 1 GHz의 offset을 갖을 때 3셀의 경우 25 dB, 5셀의 경우 62 dB의 감쇄(attenuation)특성을 나타내고 있다. 따라서 주목할만한 점은 기존의 광대역 PBG의 구조[1-2]와는 다르게, 제안된 PBG 구조는 날카로운 차단 특성과 광대역의 깊은 저지대역 특성을 나타내면서도 평균 0.3 dB이내의 매우 평탄한 통과대역 특성을 그대로 유지하고 있다는 것이다. 또한 제안된 PBG 구조는 DGS의 공진 주파수와 마이크로스트립 PBG 구조의 주기를 적당히 변화시킴으로써, 저지대역의 차단 주파수와 대역폭을 조절 할 수가 있다. 또한, 저지대역 내에 불필요한 방사현상이 전혀 없고 전체적으로 측정 결과와 해석 결과가 잘 일치하고 있음을 확인 할 수 있다. 특히, 참고문헌 [7]에 따르면 PBG 구조를 사용하여 전력 증폭기의 PAE(Power Added Efficiency)를 10 % 향상시킬 수가 있으며, 따라서 본 논문에서 제안된 PBG를 사용할 경우 더 작은 크기로 10 % 이상의 PAE 향상을 충분히 기대 할 수 있을 것이다.

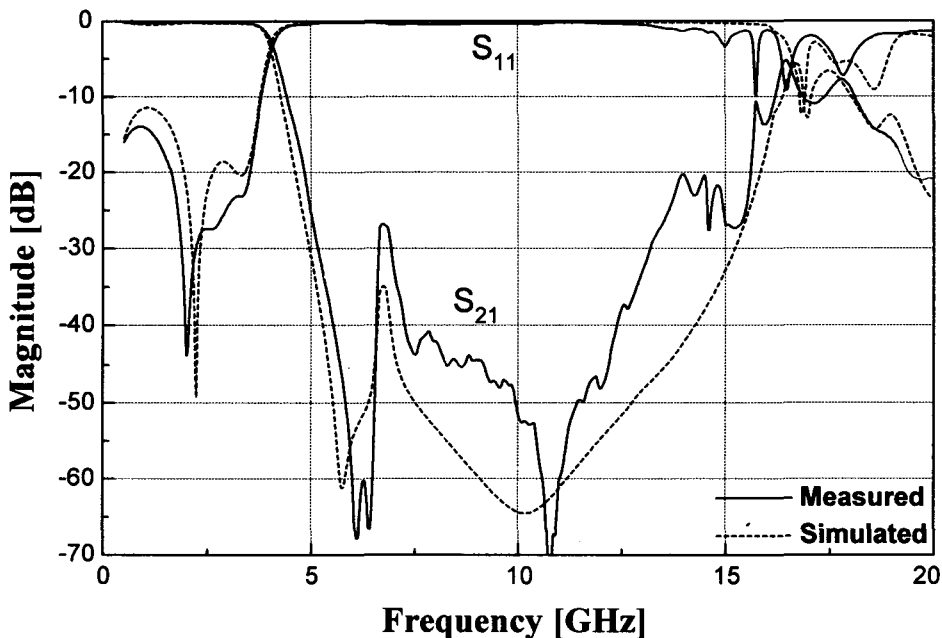


그림 5. 제안된 3 셀 양면 PBG 구조의 측정 및 해석 결과

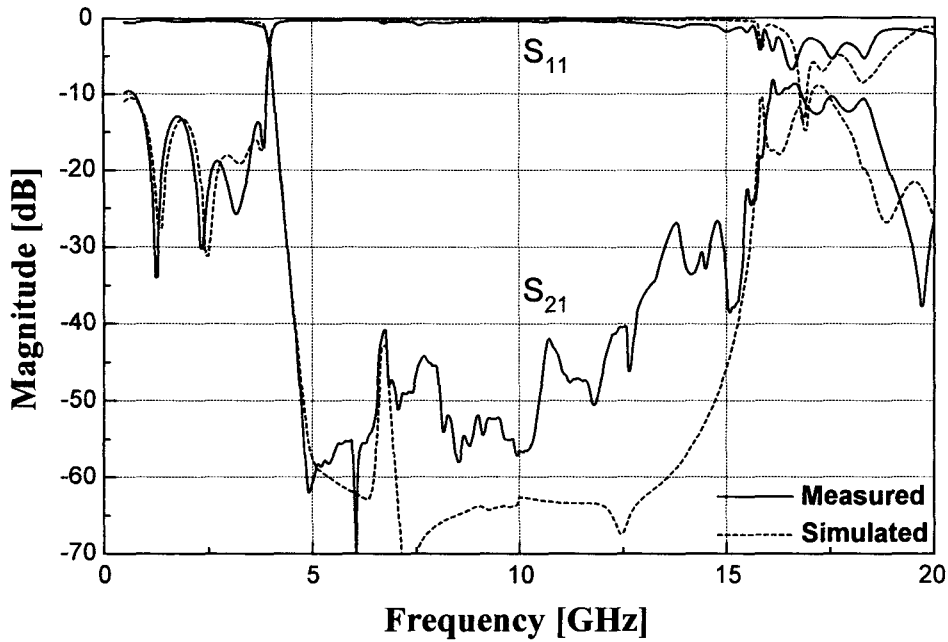


그림 6. 제안된 5 셀 양면 PBG 구조(그림 2(a))의 측정 및 해석 결과

2. 기존 구조에 대한 결과 및 고찰

본 논문의 소절에서는 기존의 몇 가지 구조들에 대하여 그 특성을 확인함으로써, 본 논문에서 제안된 PBG 구조와 그 특성을 정량적으로 비교하고자 하였다.

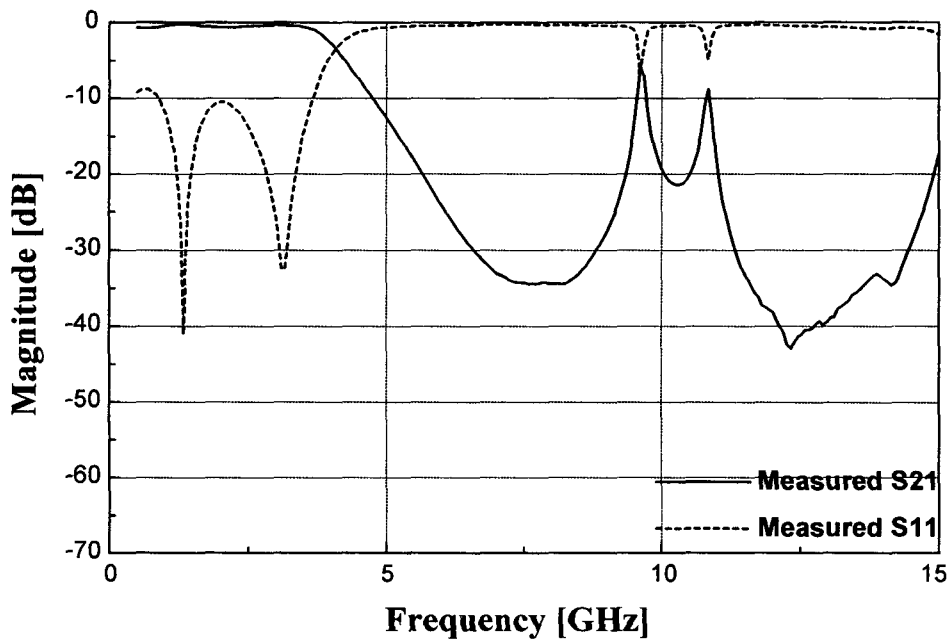


그림 7. 측정된 최대 평탄 저역통과 여파기(그림 2(b))의 특성

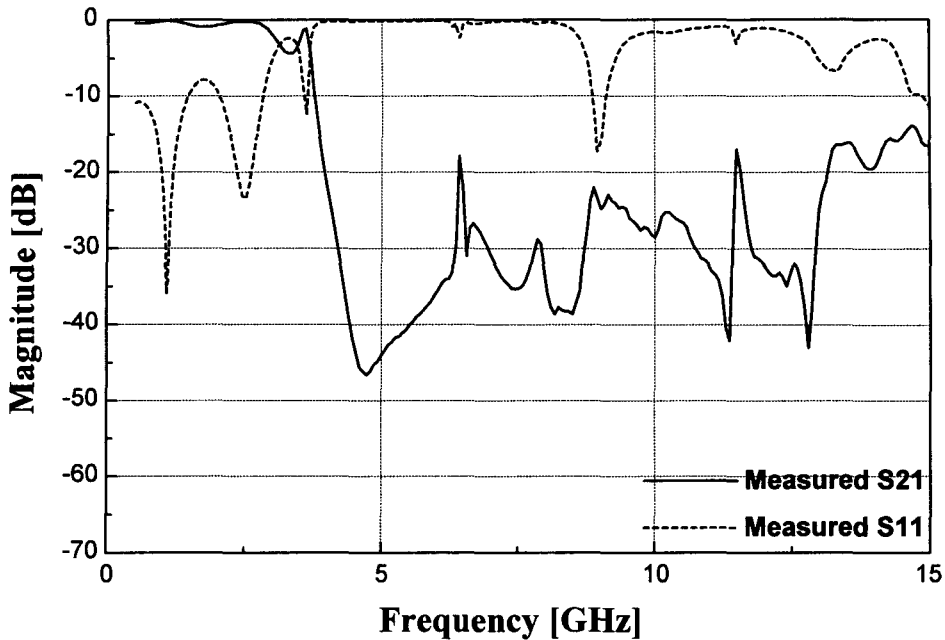


그림 8. 측정된 참고문헌 [1](그림 2(c))의 특성

그림 7의 결과는 최대 평탄 저역통과 여파기의 prototype을 이용하여 설계한 그림 2(b)의 특성을 나타내고 있으며, 그림 8은 참고문헌 [1]의 방법에 의해 설계된 그림 2(c)의 특성을 나타내고 있다. 전형적인 저역통과 여파기의 경우에는 차단 주파수로부터 1 GHz offset에서 13 dB의 감쇄 특성을 보이며, 그림 2(c)의 경우에는 45 dB의 비교적 좋은 감쇄 특성을 보이고 있다. 그러나 그림 2(c)는 저역통과 여파기에 비해 그 크기가 2배 가까이 크고, 통과대역 내에서도 큰 ripple이 형성되는 단점을 지니고 있다. 또한 상기 두 가지 경우 모두 저지대역 내에서 불필요한 기생 방사현상이 발생하는 것을 관찰 할 수 있다.

3. 제안 구조와 기존 구조의 특성 비교 및 요약

그림 9는 상기 측정 결과들의 삽입손실만을 비교하여 나타내고 있다. 작은 그림은 통과대역의 특성을 확대하여 도시하였다. 앞서 나타나 있는 것처럼 그림 2(a)는 제안된 5셀 PBG 구조이고 (b)는 최대 평탄 저역통과 여파기, 그리고 (c)는 참고문헌 [1]에 의한 구조를 나타내고 있다. 모든 조건들에 대해 제안된 구조의 우수성을 한 눈에 확인 할 수 있으며, 참고문헌 [7]에 대해서도 더욱 우수한 특성을 보이고 있다. 특히 제안된 PBG 구조의 개념을 사용하여, 일반적인 PBG 구조들을 적당한 조합으로써도 소형의 광대역 PBG 특성을 얻을 수 있다. 마지막으로 제안된 구조와 기존 구조들에 대한 특성을 표 1에 간략히 비교하여 정리하였다.

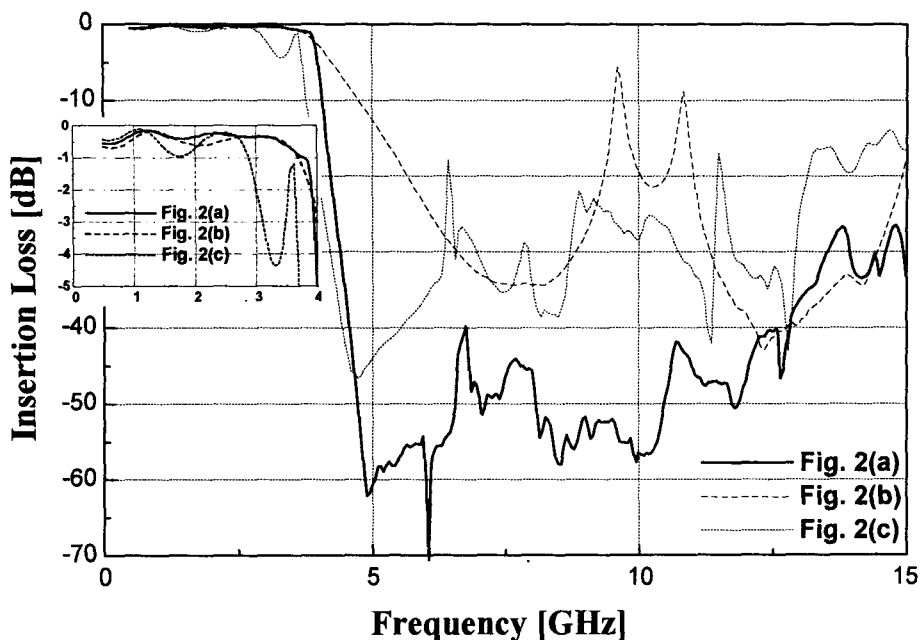


그림 9. 제안된 5 셀 양면 PBG 구조와 기존 구조들의 삽입손실 비교

	기존 구조		제안 구조	
	최대 평탄 저역통과 여파기	참고문헌 [1]	3-cell	5-cell
크 기[mm] (상대 % 크기)	23(56.8 %)	40.5(100 %)	12.5(30.8 %)	22.5(55.6 %)
감쇄정도[dB] @ 1 GHz offset	13	45	25	63
평균 저지대역[dB]	25	30	45	50
평균 통과대역[dB]	0.5	2	0.2	0.3

표 1. 측정 결과들의 비교

IV. 결론

본 논문에서는 소형의 광대역 특성을 갖는 새로운 개념의 PBG 구조를 제안하고, 측정을 통하여 기존의 구조들과 정량적으로 비교하였다. 제안된 구조는 기판의 양면을 모두 사용함으로써, 기존의 동일 평면상에 구현되었던 구조들에 비해 더욱 작은 크기로 더욱 향상된 저지대역 특성을 얻을 수 있다. 실제 제안된 구조의 측정 및 해석 결과 기존의 광대역 PBG 구조들에 비해 40 %이상의 크기를 감소시킬 수 있었으며, 2-octave의 넓은 대역폭과 평균 50 dB의 저지대역 특성을 얻을 수 있었다. 또한 제안된 3 셀 및 5 셀 양면 PBG의 경우 각각 평균 0.2 dB와 0.3 dB이내의 매우 우수한 통과 대역 특성을 나타내었다. 더욱이 본 논문에서 소개된 양면 PBG 개념을 다층구조의 제작이 가능한 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 및 LTCC(Low Temperature Co-fired Ceramic) 공정에 적용하여 다양한 소형의 광대역 PBG 구조를 개발할 수 있으며, 따라서 이러한 PBG 구조들은 경박단소화된 무선통신용 초고주파 회로 설계에 매우 다양하게 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] T. Kim and C. Seo, "A novel photonic bandgap structure for low-pass filter of wide stopband," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 10, no. 1, pp. 13~15, Jan. 2000.
- [2] I. Rumsey, P. M. Melinda, 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.
- [3] D. F. Sievenpiper, E. Yablonovitch, J. N. Winn, S. Fan, P. R. Villeneuve, and J. D. Joannopoulos, "3D metallo-dielectric photonic crystals with strong capacitive coupling between metallic islands," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 80, no. 13, pp. 2829~2832, Mar. 1998.
- [4] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*, Princeton, NJ, Princeton Univ. Press, 1995.
- [5] T. Lopetegi *et al.*, "Design of improved 2-D photonic bandgap microstrip structures," *Proc. 23rd Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves*, pp. 197~198, 1998.
- [6] F. R. Yang, K. P. Ma, Y. Qian, and T. Itoh, "A uniplanar compact photonic-bandgap (UC-PBG) structure and its applications for microwave circuits," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 8, pp. 1509~1514, Aug. 1999.
- [7] C. Y. Hang, V. Radisic, Y. Qian, and T. Itoh, "High efficiency power amplifier with novel PBG ground plane for harmonic tuning," *IEEE MTT-S Dig.*, vol. 2, pp. 807~810, 1999.
- [8] C. Y. Hang, W. R. Deal, Y. Qian, T. Itoh, "High efficiency transmitter front-ends integrated with planar an PBG," *2000 Asia-Pacific Microwave Conf. Dig.*, pp. 888~894, Dec. 2000.
- [9] J. Yoon and C. Seo, "Improvement of broadband feedforward amplifier using photonic bandgap," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 11, no. 11, pp. 450~452, Nov. 2001.
- [10] D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. Jimenez 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.
- [11] Y. Ji, X. S. Yao, and L. Maleki, "High-Q whispering gallery mode resonator filter with photonic bandgap spurious mode suppression," *2000 IEEE/EIA Int. Frequency Control Sym. and Exhibition*, pp. 471~474, 2000.
- [12] C. S. Kim, J. S. Park, D. Ahn, and J. B. Lim, "A novel 1-D periodic defected ground structure for planar circuits," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 10, no. 4, pp. 131~133, Apr. 2000.