

논문 2007-44TC-7-6

# 선형성 개선과 크기 축소를 위한 새로운 PBG 구조를 이용한 전력증폭기 설계

(Power Amplifier Design using the Novel PBG Structure for Linearity Improvement and Size Reduction)

최재원\*, 서철현\*\*

(Jaewon Choi and Chulhun Seo)

## 요약

본 논문은 전력증폭기의 크기를 줄이고 선형성을 개선하기 위한 새로운 광전자밴드갭 (PBG) 구조를 제시하였다. 제안된 구조는 비평면 제조 공정을 요구하지 않는 유전체 판위에 패턴을 뜬 2차원의 규칙적인 격자이다. 실험 결과를 통해서 보면, 이 구조는 접지 평면에 세 개의 셀을 식각시킨 기본적인 PBG와 distorted uniplanar compact PBG (DUC-PBG)보다 더 넓은 저지 대역과 더 높은 저지 특성을 갖는다. 이 새로운 PBG 구조는 선형성 개선을 위하여 전력증폭기에 적용되어 질 수 있다. 새로운 PBG 구조를 이용한 전력증폭기의 3차 혼변조 왜곡 (IMD3)은 코드분할 다중접속 (CDMA) 응용에서 -36.16 dBc이다. 제안된 PBG 구조가 없는 전력증폭기와 비교했을 때, 개선된 IMD3는 -13.49 dBc이다.

## Abstract

This paper presents a novel photonic bandgap (PBG) structure for size reduction and linearity improvement in power amplifier. The proposed structure is a two-dimensional (2-D) periodic lattice patterned on a dielectric slab that does not require nonplanar fabrication process. Throughout the experimental results, this structure has more broad stopband and high suppression performance than conventional three cell PBG and distorted uniplanar compact-PBG (DUC-PBG). This new PBG structure can be applied with power amplifier for linearity improvement. The 3rd intermodulation distortion (IMD3) of the power amplifier using new PBG structure is -36.16 dBc for (code division multiple access) CDMA applications. Compared with power amplifier without the proposed PBG structure, improved IMD3 is -13.49 dBc.

**Keywords :** PBG, open loop, IMD, power amplifier, CDMA

## I. 서론

최근에, PBG 공학 분야에 대한 많은 관심이 이어지고 있고, 다양한 종류의 PBG 구조들이 실질적인 사용을 위하여 광학과 마이크로파 및 밀리미터파 응용분야에서 제안되어 지고 있다. 마이크로파 대역에서 PBG 구조는 마이크로스트립 안테나, 공진 캐비티, 필터 등에

응용되어 지고 있다. 접지 평면에 식각된 주기적인 격자를 갖는 마이크로스트립 라인은 전자기적 전파에 대한 저지대역을 갖는 PBG 구조와 같이 동작하는 것을 알아냈다. 이러한 형태의 PBG 구조는 광대역 전력증폭기에서 고조파 조절을 위하여 적용되어 진다<sup>[1-4]</sup>.

PBG 격자의 주기가 저지대역 주파수에 대하여 반파장이기 때문에 PBG 구조의 실질적인 응용은 보통 물리적인 크기를 줄이는데 어려움을 갖는다. 최근에, PBG 구조의 물리적인 크기를 줄이는 것은 해결되어야 하는 가장 중요한 문제이다<sup>[3]</sup>.

무선 분야의 최근 동향은 제한된 대역폭에서 더 많은 소용량을 적용시키기 위하여 스펙트럼의 효율적인 변조

\* 학생회원, \* 정회원, 숭실대학교 정보통신전자공학부 (Information and Telecommunication Engineering, Soongsil University)

\*\* 이 연구는 2007학년도 숭실대학교 대학 연구비의 지원으로 연구되었음

접수일자: 2007년7월12일, 수정완료일: 2007년7월18일

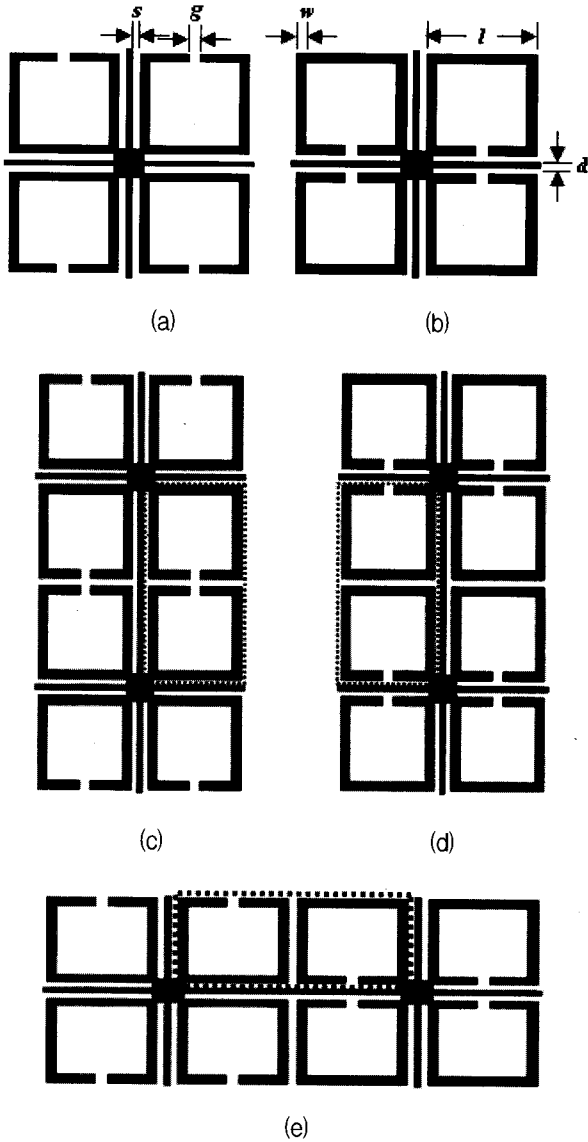


그림 1. (a) 단위 셀 타입 I, (b) 단위 셀 타입 II, (c) 전계를 이용하기 위한 제안된 PBG 부분 (점선 부분), (d) 자계를 이용하기 위한 제안된 PBG 부분 (점선 부분), (e) 혼합 결합을 이용하기 위한 제안된 PBG 부분 (점선 부분)

Fig. 1. (a) Unit cell type I, (b) unit cell type II, (c) part (dotted line) of the proposed PBG for using electric coupling, (d) part (dotted line) of the proposed PBG for using magnetic coupling, (e) part (dotted line) of the proposed PBG for using mixed coupling.

방식의 이용이 강조되고 있다. 이 신호가 RF 전력증폭기에 의해 증폭되어 질 때, IMD 신호는 인접 채널에서의 신호 간섭이 증가되어 발생된다. 추가적으로, 이 IMD 신호는 대역 내 간섭과 비트 에러율을 증가시키고, 전력증폭기의 효율을 감소시킨다. 현대 무선 통신 시스템에서, RF 전력증폭기의 선형성 개선을 위한 다양

한 기술들이 끊임없이 연구/개발되어지고 있다. 선형성에 관한 엄격한 요구 사항을 맞추기 위하여, 다양한 선형화 기법들이 적용되어 진다<sup>[5]</sup>.

본 논문에서, 선형성을 개선시키고 크기를 줄이기 위한 PBG 구조의 또 다른 새로운 개념을 제시하였다. 이 새로운 PBG 구조는 내부에 삽입된 얇은 선과 네 개의 개방형 루프들로 이루어진 단위 셀을 이용하여 설계된다. 최근에 보고된 다른 PBG 구조들과 비교했을 때, 이 새로운 PBG 구조는 동일한 저지 특성에서 작은 크기를 갖는다. 또한, 이 구조는 현재까지 보고된 다른 PBG 구조들 보다 동일한 크기에서 더 높은 저지 특성과 가파른 스퀘트 특성을 갖는다. 이 새로운 PBG 구조의 이러한 장점들 때문에, 이 PBG 구조를 전력증폭기의 선형성 개선을 위하여 적용하였다.

## II. 새로운 PBG 구조의 설계

그림 1은 내부에 삽입된 얇은 선들과 네 개의 개방형 루프들로 구성된 단위 셀을 이용하여 구현된 제안된 PBG 구조의 레이아웃을 보여준다. 그림 1에서 보는 것처럼, 결합된 PBG 구조들은 루프간의 간격  $s$ 만큼 분리되어지고, 선 두께  $w$ , 길이  $l$ , 내부에 삽입된 선의 폭  $d$ , 개방형 루프의 개방된 공간의 폭  $g$ 에 의해 구현된 한 쌍의 동일한 개방형 루프의 다른 방향에 의해 구현된다. 이러한 커플링 PBG 구조들에 의해 발생된 어떠한 커플링은 주변 장애 의한 근접 커플링임이 명백하다. 주변 장애의 성질과 강도는 커플링의 성질과 강도를 결정한다. 각각의 개방형 루프 PBG 구조들은 개방된 공간 부분에서 최고치의 전계 강도를 갖고, 반대 부분에서 최고치의 자계 강도를 갖는 것으로 설명될 수 있다. 주변 장애는 외부 영역으로 갈수록 기하급수적으로 감소하는 특성을 갖기 때문에, 주변 자계는 최고치의 전계 분포를 갖는 부분과 인접한 곳에서 더 강하고, 반면 주변 자계는 최고치의 자계 분포를 갖는 부분과 인접한 곳에서 더 강하다<sup>[6]</sup>. 그림 1 (a), (b)는 제안된 PBG 구조의 두 가지 형태의 단위 셀을 나타낸다. 그림 1 (a)는 개방형 루프들 사이에서 발생하는 전계를 이용하기 위한 단위 셀이다. 그림 1 (b)는 개방형 루프들 사이에서 발생하는 자계를 이용하기 위한 단위 셀을 보여준다. 그림 1 (c), (d), (e)는 그림 1 (a), (b)의 두 가지 형태의 단위 셀을 이용하여 만들 수 있는 세 가지의 기본적인 커플링 구조들은 보여준다. 만약 두 개의 결합된 개방형 루프들의 개방 부분이 그림 1 (c)와 같이 수직으로 설계

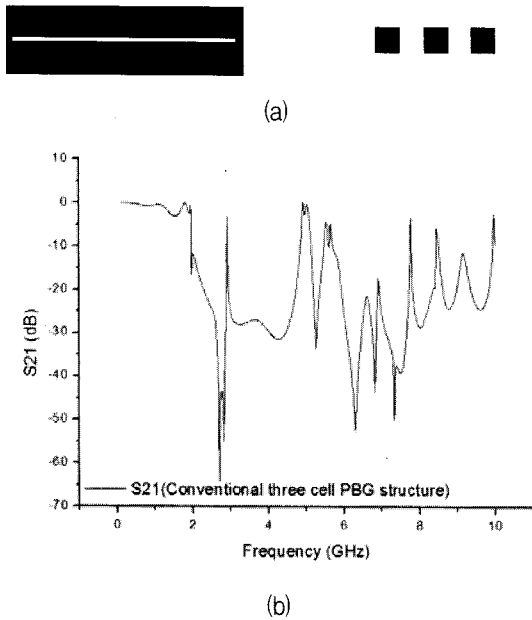


그림 2. (a) 접지 판에 세 개의 셀을 식각시킨 일반적인 PBG 구조의 시뮬레이션 모델, (b) 시뮬레이션 결과  $S_{21}$

Fig. 2. (a) Simulation model of the conventional three cell PBG structure, (b) simulated  $S_{21}$  parameter results.

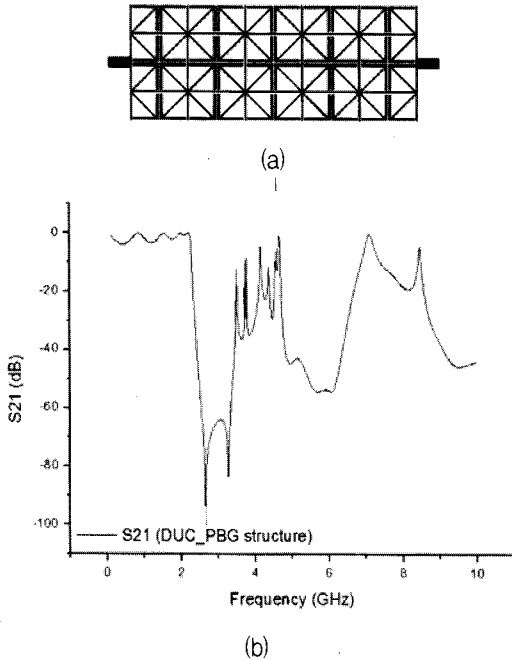


그림 3. (a) DUC\_PBG 구조의 시뮬레이션 모델, (b) 시뮬레이션 결과  $S_{21}$

Fig. 3. (a) Simulation model of the DUC\_PBG structure, (b) simulated  $S_{21}$  parameter results.

된다면, 전계가 발생될 수 있고, 반면 만약 두 개의 결합된 개방형 루프들의 최고치의 자계가 발생하는 부분이 그림 1 (d)와 같이 수직으로 설계된다면, 자계가 발

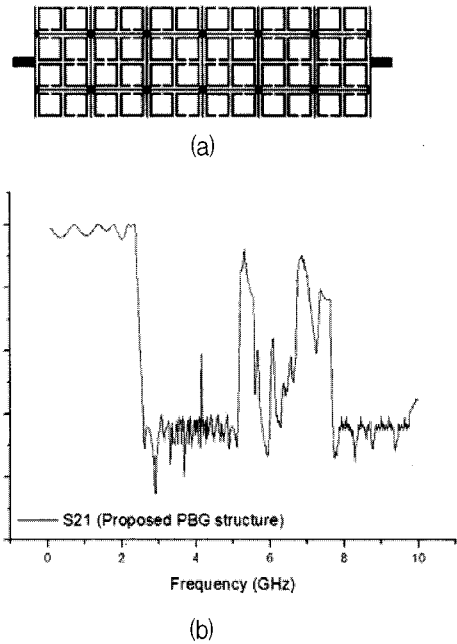


그림 4. (a) 제안된 PBG 구조의 시뮬레이션 모델, (b) 시뮬레이션 결과  $S_{21}$

Fig. 4. (a) Simulation model of the proposed PBG structure, (b) simulated  $S_{21}$  parameter results.

생될 수 있다. 그림 1 (e)는 그림 1 (a), (b)의 구조를 수평으로 연결하여 구현된 제안된 PBG 구조의 한 부분을 보여준다. 이 커플링 구조에서 두 개의 결합된 개방형 루프들의 결합 부분에서의 전계와 자계의 분포가 동시에 존재하기 때문에, 전계와 자계 모두 발생되고 강화될 수 있다. 그러므로 이러한 커플링을 혼합 결합이라고 한다<sup>[6]</sup>. 이 원리 때문에, 혼합 결합은 매우 높은 결합 효과를 얻을 수 있고, 그래서 등가 캐패시턴스  $C$  또한 매우 크다. 이러한 높은 캐패시턴스 때문에, 이 구조는 낮은 주파수 대역에서 크기를 줄이는데 이용될 수 있다. 연결 부분에 사용된 내부에 삽입된 얇은 선들과 개방형 루프들의 얇은 선들은 등가 인덕턴스  $L$ 을 만들어 낸다. 그래서 주기적인 LC-회로망이 구현되어 지고,  $\omega_o = 1/\sqrt{LC}$ 에 의해 결정되는 중심 주파수를 갖는 주파수 밴드갭을 만든다<sup>[3]</sup>.

### III. 수치적 시뮬레이션

개방형 루프들의 혼합 결합과 내부에 삽입된 얇은 선들을 이용한 제안된 PBG 구조의 특성을 확인하기 위하여, DUC\_PBG 구조, 앞 장에 설명한 기본적인 PBG 구조와 함께 새로운 PBG 구조가 서로 비교를 위하여 설계되었다. 수치적 시뮬레이션은 HFSS를 이용하여 수행

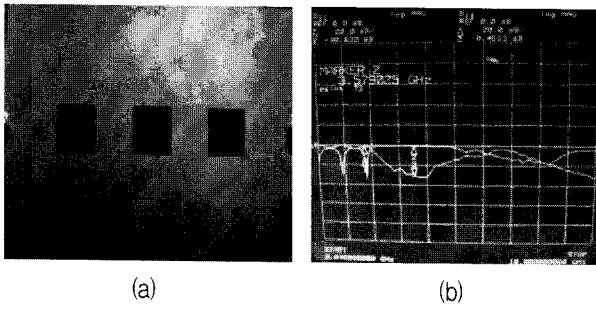


그림 5. (a) 기본적인 PBG 구조의 접지 평면 제작 모습, (b) 측정 결과  $S_{21}$ ,  $S_{11}$   
 Fig. 5. (a) Fabricated photograph of the conventional three cell PBG structure, (b) measured,  $S_{21}$ ,  $S_{11}$  parameter results.

물레이션 모델은 두 가지 형태의 단위 셀을 번갈아 배치한  $2 \times 6$  격자로 구성된다. 사용된 기판은 유전율 2.2와 두께 31 mils를 갖는 Rogers 5880이다. 세 가지 시물레이션 모델들의 설계 매개 변수들은 다음과 같다.

(1) 기본적인 PBG 구조:

사각 셀 크기 =  $13 \times 16$ ;

(2) DUC\_PBG 구조:

$s = 0.2$  mm,  $w = 0.5$  mm,

$l = 4.8$  mm,  $d = 0.3$  mm;

(3) 개방형 루프를 이용한 제안된 PBG 구조:

$s = 0.3$  mm,  $w = 0.4$  mm,

$l = 3.8$  mm,  $d = 0.3$  mm,  $g = 0.4$  mm;

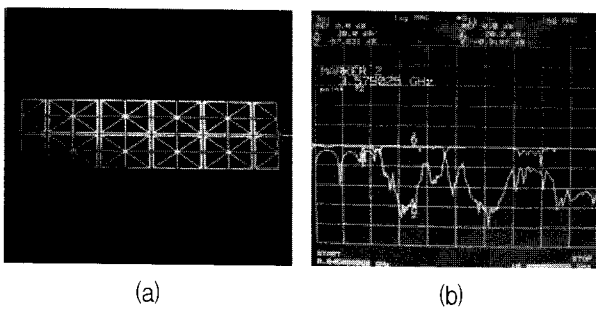


그림 6. (a) DUC\_PBG 구조 제작 모습, (b) 측정 결과  $S_{21}$ ,  $S_{11}$   
 Fig. 6. (a) Fabricated photograph of the DUC\_PBG structure, (b) measured  $S_{21}$ ,  $S_{11}$  parameter results.

그림 2~4는 각각의 PBG 구조의 시물레이션 모델과 결과를 보여준다. 그림에서 보는 것처럼, 세 가지 모델들의 저지 대역은 2 GHz 이상의 주파수에서 관찰되었다. 기본적인 PBG 구조의 길이는 120 mm이고, DUC\_PBG 구조와 제안된 PBG 구조는 60.8 mm의 같은 길이를 갖는다. 제안된 PBG 구조의 저지 특성은 -60 dB 이하이다. 저지 대역의 대역폭은 2.5 ~ 5.1 GHz로 2.6 GHz 이다. 또한, 7.6 GHz 이상의 주파수에서, 이 구조는 -60 dB 이하의 저지 특성을 갖는 저지 대역을 갖는다. 두 가지의 다른 구조들과 비교했을 때, 제안된 PBG 구조는 높은 저지 특성, 가파른 스퀘트 특성, 넓은 저지 대역폭의 개선된 특성들을 나타낸다. 그러므로 제안된 PBG 구조는 예상대로 동일한 특성에서 DUC\_PBG 보다 크기면에서 더 작을 수 있다. 본 논문에서는 선형성 개선과 크기를 줄이기 위하여 전력증폭기에 제안된 PBG 구조를 적용했다.

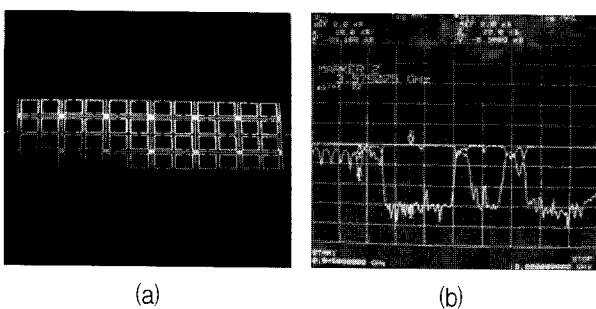


그림 7. (a) 제안된 PBG 구조 제작 모습, (b) 측정 결과  $S_{21}$ ,  $S_{11}$   
 Fig. 7. (a) Fabricated photograph of the proposed PBG structure, (b) measured  $S_{21}$ ,  $S_{11}$  parameter results.

IV. 측정 결과

1. 제안된 PBG 설계

되었는데, 이는 Ansoft에서 개발된 finite element method (FEM) 알고리즘을 기반으로 한 상업적인 전자기 시뮬레이터이다. 기본적인 PBG 구조의 시물레이션 모델은 접지 평면위에 식각된 세 개의 사각형 셀과 함께 마이크로스트립 라인으로 구성된다. DUC\_PBG 구조의 시물레이션 모델은 한 가지 형태의 단위 셀에 의해 배치된  $2 \times 5$  격자로 구성된다. 제안된 PBG 구조의 시

그림 5는 기본적인 PBG 구조의 제작된 기판 모습과 측정된 S-parameter 결과를 보여준다. 이 PBG 구조의 삽입 손실은 1.8 GHz의 통과 대역에서 -0.5 dB이다. 저지 특성은 3.6 GHz의 저지 대역에서 -30.6 dB 이하이다. 그림 6은 DUC\_PBG 구조의 제작된 기판 모습과 측정된 S-parameter 결과를 보여준다. 이 PBG 구조의 삽입 손실은 1.8 GHz의 통과 대역에서 -1.3 dB이다. 저지 특성은 3.6 GHz의 저지 대역에서 -57.6 dB 이하이다. 그림 7은 제안된 PBG 구조의 제작된 기판 모습과 측정

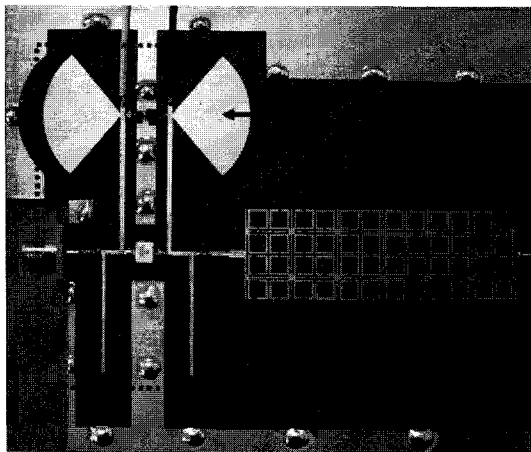
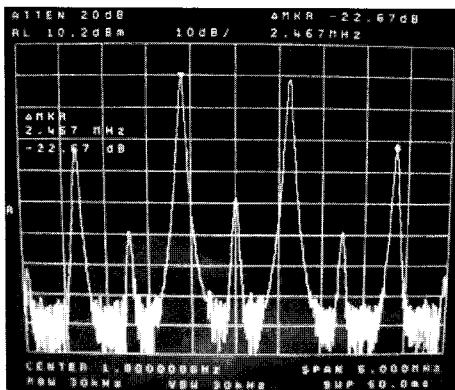
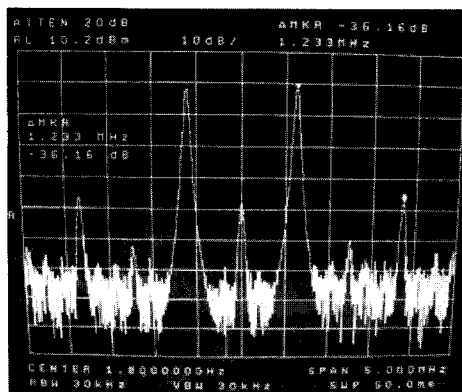


그림 8. 제안된 PBG 구조를 이용한 전력증폭기의 제작된 기판 모습

Fig. 8. Fabricated photograph of the power amplifier using the proposed PBG structure.



(a)



(b)

그림 9. IMD3 측정치 (a) PBG 구조가 없는 전력증폭기 (b) 제안된 PBG 구조를 적용한 전력증폭기

Fig. 9. Measured IMD3 results (a) power amplifier without the PBG structure (b) power amplifier with the proposed PBG structure.

된 S-parameter 결과를 보여준다. 이 PBG 구조의 삽입 손실은 1.8 GHz의 통과 대역에서 -0.85 dB이다. 저지 특성은 3.6 GHz의 저지 대역에서 -59.1 dB 이하이다.

또한 제안된 PBG 구조의 저지 대역폭은 2.6~5.0 GHz로 2.4 GHz이다. 기본적인 PBG 구조와 비교했을 때 제안된 PBG 구조의 저지특성은 약 -30 dB 개선되었고, 크기는 절반으로 줄었고 스킨트 특성과 저지 대역폭도 크게 개선되었다. DUC\_PBG 구조와 비교했을 때 제안된 PBG 구조의 크기는 60.8 mm로 동일하지만, 삽입 손실, 저지 대역에서의 저지 특성, 스킨트 특성, 저지 대역폭 등의 다른 특성들은 크게 개선되었다. 또한, 시뮬레이션 결과와 유사하게, 7.6 GHz 이상의 주파수에서, 이 구조는 -60 dB 이하의 저지 특성을 갖는 저지 대역을 갖는다. 이러한 결과들에서 보는 것처럼, 측정치는 HFSS를 이용한 시뮬레이션 결과와 유사하다.

## 2. 전력증폭기 설계

전력증폭기는  $I_{DQ} = 235$  mA,  $V_{DD} = 26$  V에서 Motorola사의 MRF281SR1을 이용하여 설계되었다. 제작에 사용된 기판은 중심 주파수 1.8 GHz에서 유전율 2.2와 두께 31 mils를 갖는 Rogers 5880이다. 그림 8은 제안된 PBG 구조를 이용한 전력증폭기의 제작된 기판을 보여준다. 비교 전력증폭기, 기본적인 PBG 구조를 이용한 전력증폭기, DUC\_PBG 구조를 이용한 전력증폭기는 제안된 PBG 구조를 이용한 전력증폭기와 비교하기 위하여 설계되었다. 비교 전력증폭기는 선형성과 효율을 강화하기 위한 어떠한 다른 기법들을 전혀 사용하지 않고 구현되었다. 구현된 비교 전력증폭기는  $P_{1dB}$ 점에서 33.18 dBm의 출력 전력, 15.18 dB의 전력 이득, 33%의 power added efficiency (PAE), -22.67 dBc의 IMD3를 갖는다. 그림 9 (a)는 비교 전력증폭기의 IMD3를 보여준다. 기본적인 PBG 구조를 이용한 전력증폭기는  $P_{1dB}$ 점에서 33 dBm의 출력 전력, 15 dB의 전력 이득, 31.6%의 power added efficiency (PAE), -27.83 dBc의 IMD3를 갖는다. DUC\_PBG 구조를 이용한 전력증폭기는  $P_{1dB}$ 점에서 32.87 dBm의 출력 전력, 14.87 dB의 전력 이득, 30.7%의 power added efficiency (PAE), -32.16 dBc의 IMD3를 갖는다. 제안된 PBG 구조를 이용한 전력증폭기는  $P_{1dB}$ 점에서 33 dBm의 출력 전력, 15 dB의 전력 이득, 31.6%의 power added efficiency (PAE), -36.16 dBc의 IMD3를 갖는다. 비교 전력증폭기와 비교했을 때, 제안된 PBG 구조를 이용한 전력증폭기의 IMD3는 출력 전력이 변하지 않은 상태에서 -13.49 dBc 개선되었다. 제안된 PBG 구조의 3.6 GHz의 2차 고조파 주파수에서의 높은 저지 특성 때문에, 전력증폭기의 선형성은 예상대로 크게 개선되었다.

## V. 결 론

본 논문은 전력증폭기의 선형성 개선과 크기를 줄이기 위한 새로운 PBG 구조를 제시하였다. 제안된 구조는 비평면 제조 공정을 요구하지 않는 두 가지 형태의 단위 셀에 의해 번갈아 배열된  $2 \times 6$  격자로 구성되었다. 측정 결과를 통하여, 이 구조는 기본적인 PBG 구조와 DUC\_PBG 구조보다 2.6 ~ 5.0 GHz의 더 넓은 저지 대역, 더 가파른 스킵트 특성, -60 dB 이하의 더 높은 저지 특성을 갖는다. 여기서는 선형성 개선과 크기를 줄이기 위하여 제안된 PBG 구조를 전력증폭기에 적용하였다. 비교 전력증폭기와 비교했을 때, IMD3는 CDMA 응용에서 출력 전력이 변하지 않은 상태에서 -13.49 dBc 개선되었다. 제안된 PBG 구조의 3.6 GHz의 2차 고조파 주파수에서의 높은 저지 특성 때문에, 전력증폭기의 선형성은 예상대로 크게 개선되었다.

## 참 고 문 헌

- [1] Fei-Ran Yang, Kuang-Ping Ma, Yongxi Qian, and Tatsuo Itoh, "A Uniplanar Compact Photonic-Bandgap (UC\_PBG) Structure and Its Applications for Microwave circuits," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 8, pp. 1509-1514, August 1999.
- [2] Roberto Coccioli, Fei-Ran Yang, Kuang-Ping Ma, and Tatsuo Itoh, "Aperture-Coupled Patch Antenna on UC\_PBG Substrate," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 47, no. 11, pp. 2123-2130, November 1999.
- [3] Bao-qin Lin, Qiu-rong Zheng, and Nai-chang Yuan, "A Novel Planar PBG Structure for Size Reduction," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 16, no. 5, pp. 269-271, May 2006.
- [4] Taesun Kim and Chulhun Seo, "A Novel Photonic Bandgap Structure for Low-Pass Filter of Wide Stopband," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 10, no. 1, pp. 13-15, January 2000.
- [5] Mi Ae Jang, Sung Yong Kim, Ki Kyung Jeon, Young Kim, and Yong Chae Jeong, "Linearity Improvement of Power Amplifier using Modulation of Low Frequency IMD Signals," *Asia Pacific Microwave Conference 2005 Proceedings*, vol. 2, 4-7 December 2005.
- [6] Jia-Sheng Hong, Michael J. Lancaster, "Couplings of Microstrip Square Open-Loop Resonators for Cross-Coupled Planar Microwave Filters," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, no. 12, pp. 2099-2109, December 1996.

tors for Cross-Coupled Planar Microwave Filters," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, no. 12, pp. 2099-2109, December 1996.

## 저 자 소 개



최 재 원(학생회원)  
2006년 2월 송실대학교 정보통신  
전자공학부 (공학사)  
2006년 3월~현재 송실대학교  
정보통신공학과 석사과정  
<주관심분야 : 초고주파 회로 설  
계, RF Power Amplifier, VCO,  
RFIC, RFID 등>

서 철 현(정회원)  
대한전자공학회 논문지  
제31권 TC편 6호 참조