

논문 2010-47TC-4-5

# 이중 대역 전송선로를 활용한 이중 대역 F급 전력 증폭기 개발

## (Dual-Band Class-F Power Amplifier based on dual-band transmission-lines)

이 창 민\*, 박 영 철\*\*

(Changmin Lee and Youngcheol Park)

### 요 약

본 논문에서는 셀룰러와 ISM 대역에서 동작하는 이중 대역 고효율 F급 전력증폭기를 제안하였으며, 이를 위해 우선적으로 E-pHEMT FET를 사용하여 두 (840MHz, 2.4GHz) 대역에서 동작하는 각각의 단일 F급 PA를 설계하여 효율을 확인하였다. 그 결과, 840MHz에서 동작하는 PA의 경우 출력 전력 24.4dBm에서 81.2%의 효율을 얻었고, 2.4GHz에서 동작하는 PA는 출력 전력 22.4dBm에서 93.5%의 효율을 얻었다. 이후 두 대역에서의 성능을 이중 대역 F급 전력증폭기에서 구현하기 위하여 이상적인 SPDT 스위치의 개념을 적용한 이중 대역 고조파 제어 회로를 설계하였다. 실제 SPDT 스위치를 적용하기 이전 단계로써 전송선로의 길이를 조절하여 이중 대역에서 동작하는 F급 증폭기를 개발하였다. 실험 결과, 840MHz 모드의 경우에 23.5dBm에서 60.5%의 효율을, 2.4GHz 모드는 19.62dBm에서 50.9%의 효율을 얻을 수 있었다. 이는 저가의 2GHz 이하에서 사용되는 FR-4기판에서도 그 이상의 고조파 제어가 가능하고 고효율의 F급 전력 증폭기 제작이 가능함을 보여준다.

### Abstract

In this paper, highly efficient dual-band class-F power amplifiers(PAs) for cellular and WLAN bands are suggested and implemented. For the first step, single-band class-F amplifiers at 840MHz, 2.4GHz are designed using commercial E-pHEMT FETs. The performance of two single band PAs are as much as 81.2% of efficiency with the output power of 24.4dBm with 840MHz PA and 93.5% of efficiency with 22.4dBm from the 2.4GHz. For the dual-band class-F PA, the harmonic controlling circuit with ideal SPDT switch was suggested. The length of transmission line is variable by a SPDT switch. As a results, the operation in 840MHz showed the peak efficiency of 60.5% with 23.5dBm, while in 2.4GHz mode the efficiency was 50.9% with the output power of 19.62dBm. Besides, it is shown that the harmonic controller of class-F above 2GHz could be implemented on the low cost FR-4 substrate.

**Keywords :** Class-F, efficiency, power amplifier, dual-band

### I. 서 론

시스템 효율은 무선 단말기의 RF Front-end에서 심도 있게 고려할 설계 요소이다. 배터리로 운영되는 모바일 커뮤니케이션 서비스 시스템의 확장으로 인하여 시스템에서 대부분의 배터리 전력을 소모하는 전력 증

폭기의 소모량이 어느 정도인지가 중요하다. 그러한 이유로 전력 증폭기의 효율을 높이기 위한 수많은 노력들이 이루어지고 있다<sup>[1]</sup>. 게다가 현 통신 시스템에 있어서 다중 대역 송, 수신단은 매우 중요한 기술이 되고 있다.

고효율 전력증폭기를 구현하기 위하여 E급, F급, Doherty 등의 많은 기술들이 제안되었다.<sup>[3~5]</sup> 언급한 기술들 중에 F급 전력 증폭기는 고효율을 얻을 수 있는 기술로써 이에 관한 많은 이론과 실험 논문들이 보고되어지고 있다. 비교적 간단한 고조파 제어 회로의 추가의 장점을 지닌 F급 기술은 도허티 시스템으로의 확장까지 이어지고 있다<sup>[4]</sup>.

\* 학생회원, \*\* 정회원, 한국외국어대학교 전자공학과 (Dept. of Electronics Eng., Hankuk Univ. of Foreign Studies)

※ 이 연구는 2010학년도 한국외국어대학교 교내 학술연구비의 지원에 의하여 이루어진 것임.

접수일자: 2009년9월24일, 수정완료일: 2010년4월13일

이 논문에서는 먼저 E-pHEMT FET 트랜지스터를 사용하여 셀룰러와 ISM 대역에서 동작하는 각각의 단일 F급 전력 증폭기를 설계하여 고효율의 성능을 확인하였다. 간단한 2차와 3차 고조파만을 short, open의 조건을 가지게 한 고조파 제어 회로를 이상적인 SPDT 스위치의 개념을 적용하여 840MHz와 2.4GHz에서 동작하는 이중 대역 F급 전력증폭기를 개발하였다.

## II. 전력증폭기 설계

### 1. F급 전력 증폭기

F급 전력 증폭기의 정의는 다음과 같다. 홀수와 짝수 고조파 성분을 제어하여 드레인 전압을 구형파형으로, 드레인 전류를 반파사인파형으로 만들어 주는 것이다<sup>[4]</sup>. 고조파 성분을 제어하는 기본 F급 전력 증폭기의 회로 예시를 그림 1에 나타내었다.

이러한 이론에 입각하여 전압, 전류의 파형은 신호 주기 동안 겹쳐지는 부분을 최소화 시켜 전력 증폭기의 전력 소모를 줄일 수 있다. 이론적으로는 100%의 효율

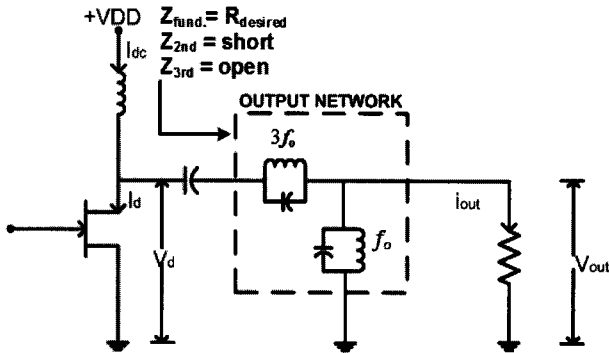


그림 1. 간단한 F급 전력 증폭기의 구성  
Fig. 1. Simplified circuit of class-F PA.

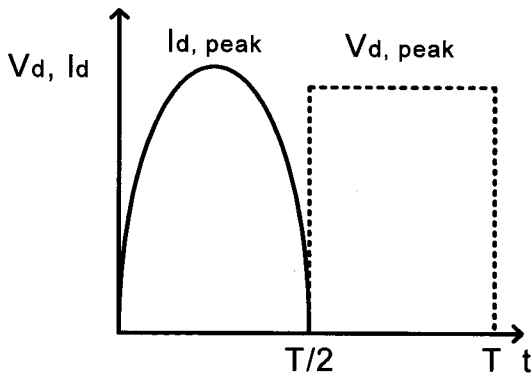


그림 2. F급 전력 증폭기의 이상적인 전압, 전류 파형  
Fig. 2. Ideal output voltage and current waveforms of class-F PA.

표 1. 고조파 조합에 따른 F급 전력 증폭기의 효율  
Table 1. Estimated Efficiency of class-F PA with combinations of harmonics<sup>[4]</sup>.

	1	3	5	$\infty$
1	50%	56.3%	58.6%	63.7%
2	66.7%	75%	78.1%	84.9%
4	71.1%	80%	83.3%	90.5%
$\infty$	78.5%	88.4%	92%	100%

을 얻을 수 있는 것이다. 두 파형 간의 겹쳐지는 부분이 없어지는 이상적인 전압, 전류의 파형을 그림 2에 나타내었다.

사실상, 동시에 홀수와 짝수의 모든 고조파 성분들을 조절하는 것은 불가능하다. 일반적으로 많은 논문에서 2차와 3차 고조파만을 제어한 것을 확인할 수 있으며 2, 3차 고조파만을 조절하는 구성으로 약 75% 정도의 효율을 얻을 수 있다고 보고되어 지고 있다. 표 1은 각 차수 고조파의 조합에 따른 효율을 나타낸 것이다.

### 2. 설계와 시뮬레이션

#### 가. 단일 대역 840MHz F급 전력 증폭기 (PA#1)

840MHz에서의 단일 동작 성능을 확인하기 위하여 F급 전력 증폭기(PA#1)를 설계하였다. 설계한 PA#1의 회로는 그림 3에 나타내었다. F급 증폭기 기술의 검증 을 위하여 Avago 사의 E-pHEMT FET ATF-53189 트랜지스터를 사용하였다.

2차 고조파를 short의 조건을 만족시키기 위하여  $\lambda/4$  전송 선로를 적용하였으며 3차 고조파의 open 조건을 만족시키기 위해서 그림 3과 같이 중심주파수 성분만을 통과시키는 직렬공진회로를 추가하였다. 위에 언급한 고조파 제어 회로를 가진 PA#1를 시뮬레이션 한 결과, 26.8dBm에서 51.4%의 효율을 얻을 수 있었다.

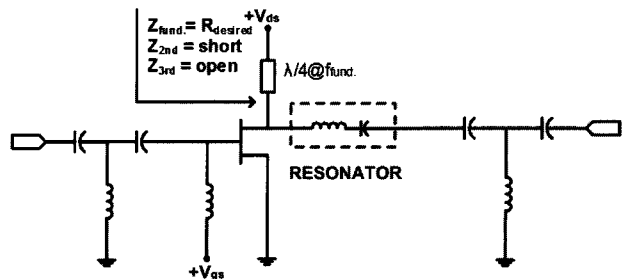


그림 3. PA#1의 회로도  
Fig. 3. Schematic diagram of the class-F PA#1.

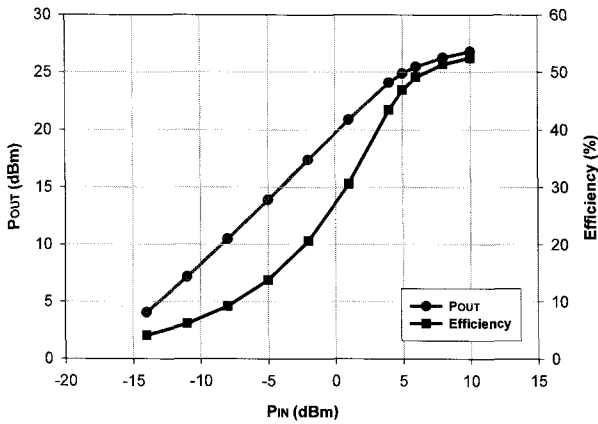


그림 4. PA#1의 시뮬레이션 결과  
Fig. 4. Simulated drain efficiency and output power of PA#1.

나. 단일 대역 2.4GHz F급 전력 증폭기 (PA#2)

이전과 동일 트랜지스터를 사용하여 ISM 대역에서 F급 증폭기를 적용 여부를 확인하였다. 동일한 고조파 제어 조건을 적용하여 2.4GHz에서 동작하는 F급 전력 증폭기를 설계하였다. 아래 그림 5와 같이 PA#1과 같은 트랜지스터를 사용하였고 PA#1과는 다르게 2, 3차 고조파를 모두 전송 선로로 제어하였다. 최대 출력전력을 위한 fundamental 성분은 인덕터와 캐패시터로 정합을 하였다. 이 회로를 가지고 시뮬레이션한 결과, 69.4%의 효율과 26.3dBm의 출력 전력을 예상하였다.

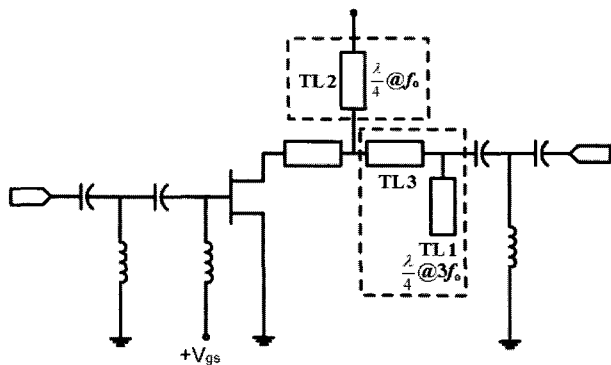


그림 5. PA#2의 회로 구성도  
Fig. 5. Schematic diagram of class-F PA#2.

다. 이중 대역 F급 전력 증폭기 (PA#3)

선택한 트랜지스터의 840MHz와 2.4GHz에서의 성능 시뮬레이션을 통하여 양 대역에서 F급 전력 증폭기 기술을 적용할 수 있음을 확인하였다. 이중 대역 F급 PA를 구현하기 위해서는 양 대역에 걸쳐 2, 3차 고조파 성

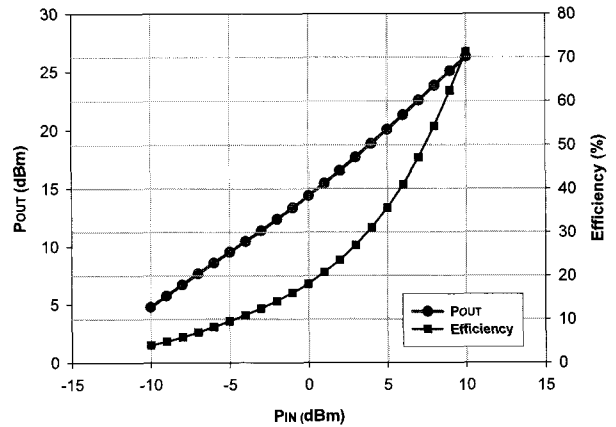


그림 6. PA#2의 시뮬레이션 결과  
Fig. 6. Simulated drain efficiency and output power of PA#2.

표 2. 이중 대역 고조파 주파수 (GHz)  
Table 2. The dual mode harmonic frequencies.(GHz)

Mode	$f_1$	$2f_1$	$3f_1$	$4f_1$	$5f_1$	$6f_1$	$7f_1$	$8f_1$	$9f_1$
0.84 GHz	0.84	1.68	2.52	3.36	4.2	5.04	5.88	6.72	7.56
2.4 GHz	-	-	$f_2$	-	$2f_2$	-	-	-	$3f_2$
Mode			2.4		4.8				7.2

분들을 포함한 두 개의 fundamental 주파수 성분까지 모두 6개의 주파수 성분을 각각 open과 short, 최적 임피던스를 가져야 한다.

표 2에 나타난 것처럼, 두 개의 대역에서 PA가 동시에 동작을 하게 되면 840MHz의 3차 고조파 (2.52GHz)의 큰 임피던스는 2.4GHz의 fundamental 성분에 loss의 영향을 미치어 2.4GHz 모드의 최대 출력을 가지기 위한  $R_{opt}$ 를 가지지 못하게 될 것을 예상하였다. 이는 양 대역에서의 성능을 고루 가지게 못하게 하는 원인이 될 것이다. 따라서 이상적인 SPDT 스위치의 개념을 적용하여 이중 대역 F급 전력 증폭기를 설계하였다.

$$\frac{\lambda_{(3f_1)}}{4} \cong \frac{\lambda_{(f_2)}}{4} \tag{1}$$

$\lambda/4$  전송 선로의 특성을 이용하여 840MHz 모드와 2.4GHz 모드는 2.52GHz에서의  $\lambda/4$  길이의 전송선로를 공유하게 된다. 그리고 2.4GHz의  $\lambda/4$  길이를 갖는 라인 사이에 SPDT 스위치를 삽입하여 스위치의 ON/

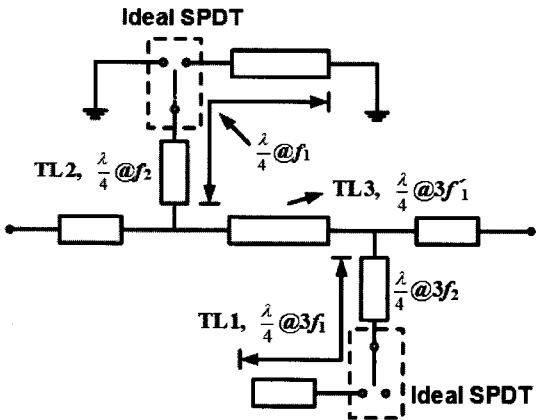


그림 7. 이중 대역 고조파 제어 회로  
 Fig. 7. Schematic diagram of the output harmonic control circuit for the dual band operation.

OFF 상태에 따라 라인의 길이에 변화를 주게 된다. 따라서 적절한 두 선로의 튜닝을 통하여 두 모드에 따라 각 밴드에 맞는 고조파 제어 회로를 가지게 된다. 앞서 제안한 이중 대역 고조파 제어 회로를 그림 7에 보였다.

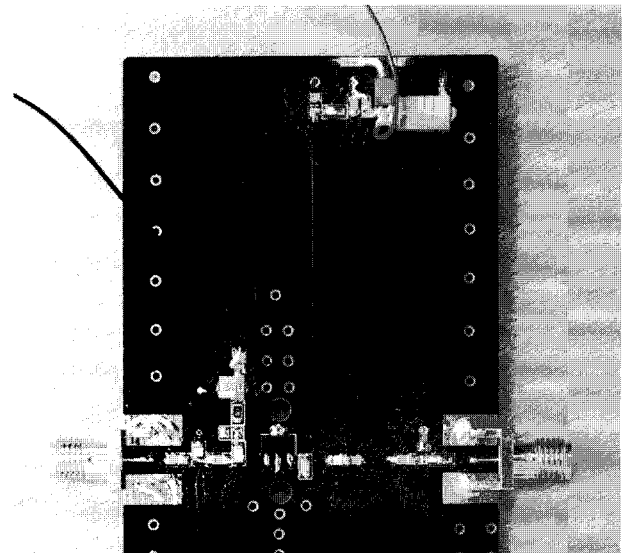
3. 실험

실제로 제작된 PA의 사진을 그림 8에 나타내었다. 제작된 PA의 특성을 확인하기 위하여 840MHz와 2.4GHz의 CW 신호를 가지고 측정하였다. 먼저 PA#1, 2의 결과를 그림 9, 10에 나타내었다. Single -Tone test 결과, 24.4dBm에서 81.2%의 효율을 보였다. PA#2의 경우, 22.8dBm에서 94.5%의 효율을 보였다.

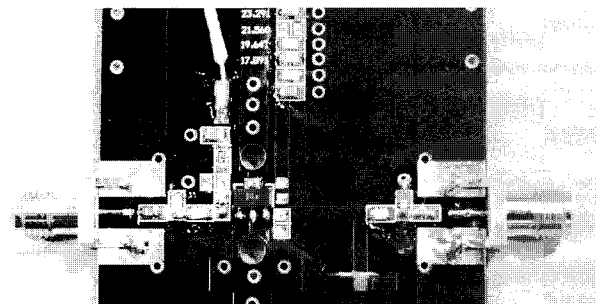
이러한 고효율의 실험 결과는 앞서 보인 시뮬레이션 결과보다 더 개선되어진 것을 나타낸다. 이는 트랜지스터의 모델이 고조파 성분의 영향을 고려하지 않았기에 발생하는 현상으로 추정된다.

동시에 두 개의 대역(840MHz, 2.4GHz)에서 각 4개의 고조파를 제어하고 있음을 확인하기 위하여 고조파 제어 회로가 포함된 출력 정합 회로를 따로 제작하여 확인하여 보았다. FR-4 기판의 특성상, 2GHz 이상의 주파수에서는 구현의 불가능이라는 일반적인 견해와는 다르게 2.4GHz의 경우,  $2f_2(4.8GHz)$ ,  $3f_2(7.2GHz)$ 에서 적절한 임피던스를 가지고 있음을 확인 할 수 있었다. 드레인에서의 임피던스를 그림 11, 12, 표 3에 나타내었다.

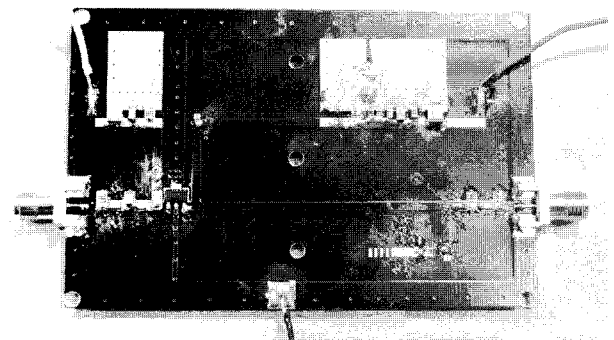
그림 8 (c)에 나타낸 바와 같이, SPDT 스위치를 실제 적용하기 전 단계로써 라인을 수동 연결하여 측정하였다. 2.4GHz 모드의 경우, FR-4 기판에서도 7.2GHz의 고조파 성분까지도 간단한 open stub으로 제어할 수 있음을 확인하였다. 이상적인 SPDT 스위치로써 고조파의



(a)



(b)



(c)

그림 8. 제작된 F급 전력 증폭기 (a) 840MHz PA#1 (b) 2.4GHz PA#2 (c) 이중 대역 PA#3

Fig. 8. Pictures of the implemented (a) PA#1 at 840MHz (b) PA#2 at 2.4GHz (c) dual band PA#3 at 840MHz and 2.4GHz.

제어는 가능하지만 PA의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 fundamental matching은 부가적으로 이중 대역에서 수동 소자를 사용하여 만족시켜야 했다. 서로 다른 길이의 short, open stub을 가지는 고조파 회로 이후 두

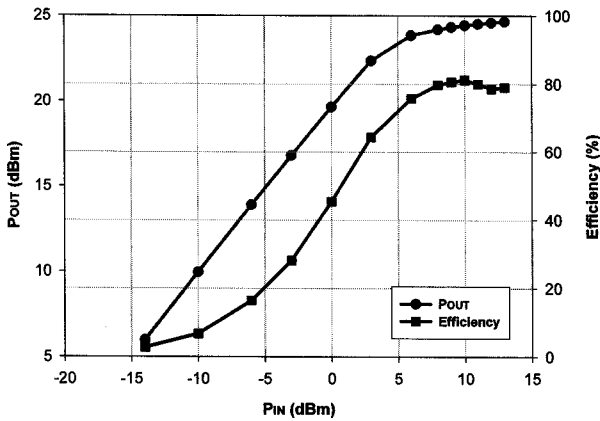


그림 9. 단일 840MHz F급 증폭기의 측정결과  
Fig. 9. Measured efficiency and output power of PA#1.

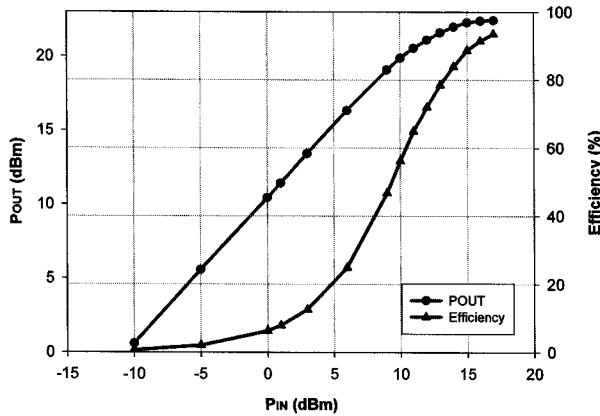


그림 10. 단일 2.4GHz F급 증폭기의 측정결과  
Fig. 10. Measured efficiency and output power of PA#2.

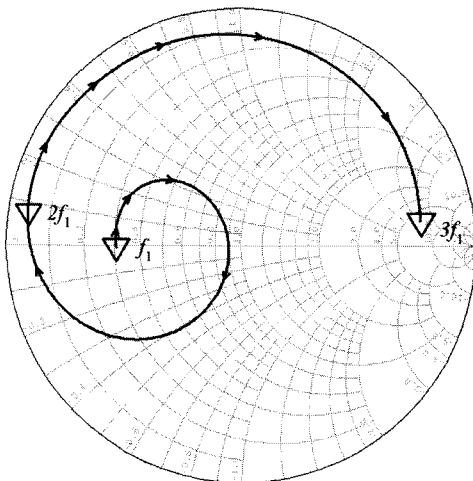


그림 11. 840MHz 모드 PA#3의 드레인에서 본 임피던스  
Fig. 11. Measured 840MHz mode PA#3's impedance at the drain.

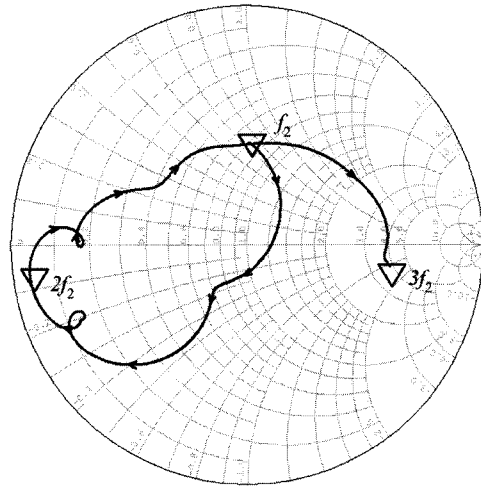


그림 12. 2.4GHz 모드 PA#3의 드레인에서 본 임피던스  
Fig. 12. Measured 2.4GHz mode PA#3's impedance at the drain.

표 3. 이중 대역에서의 고조파 임피던스  
Table 3. The dual mode harmonic impedance.

	fundamental	2nd	3rd
840MHz mode	15.3-j0.3	2+j5.9	305+j156.5
2.4GHz mode	35+j36.8	1.8-j4	191.9-j56

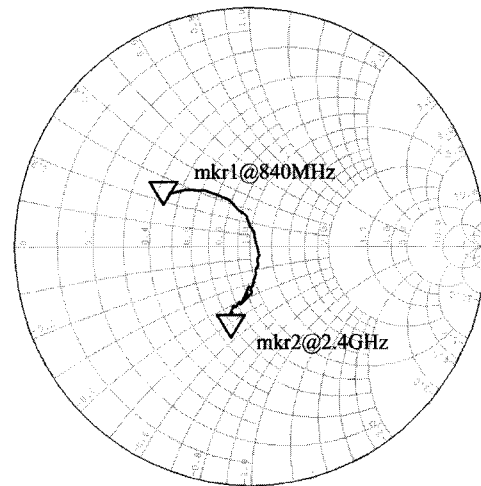


그림 13. 이중 대역 PA#3의 입력 임피던스  
Fig. 13. Measured dual mode PA#3's impedance at the gate.

모드는 서로 다른 임피던스를 가지게 되었기에 이러한 이유로 양 대역에서 가장 나은 성능을 얻기 위한 정합을 실험을 통하여 진행을 하였다.

출력 측 fundamental 정합의 경우처럼 입력 정합 회로는 동시에 양 모드에서 최고의 성능을 보일 수 있게 이중 대역 정합을 하였다. 그 결과를 아래 그림 13에 나타내었다. 마커 1,2는 각각 840MHz와 2.4GHz에서의 게이트 임피던스를 나타낸다.

그림 14, 15에 이중 대역 F급 PA의 출력 전력과 효율을 측정한 그래프를 나타내었다. 각 모드에서 측정된 결과, 840MHz 모드에서 출력 전력 23.4dBm에서 60.5%의 효율을, 2.4GHz 모드에서 19.62dBm에서 50.9%의 효율을 얻을 수 있었다. 단일 주파수 F급 PA보다는 성능이 떨어졌는데, 이는 입력과 출력의 이중 정합 회로 설계에서 양 대역 최적의 임피던스를 만족하기가 어렵기 때문이다.

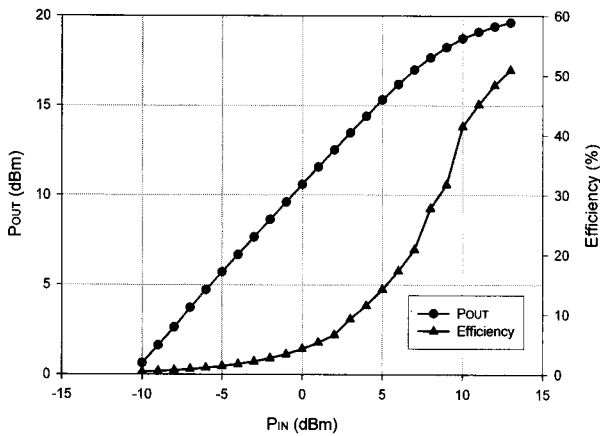


그림 14. 2.4GHz 모드의 효율과 출력전력  
Fig. 14. Measured drain efficiency and output power of PA#3 (2.4GHz mode).

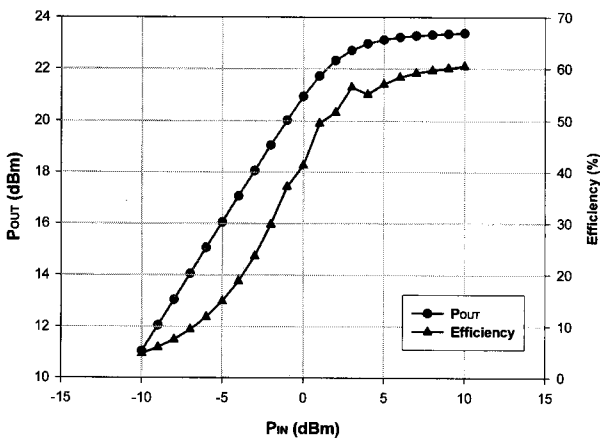
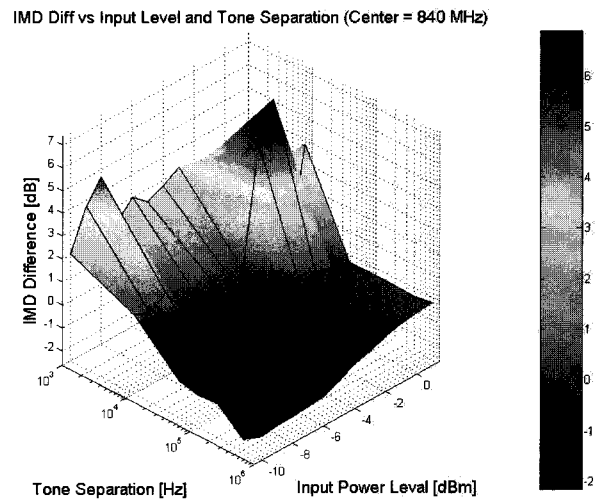
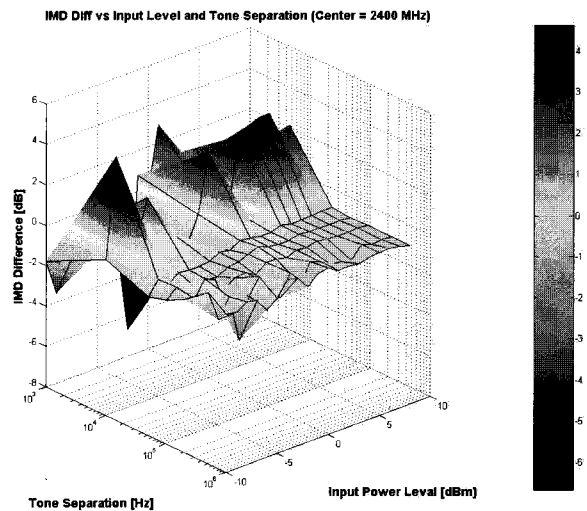


그림 15. 840MHz 모드의 효율과 출력전력  
Fig. 15. Measured drain efficiency and output power of PA#3 (840MHz mode).

F급 PA의 구현을 증명하는 방법에는 시간 영역에서 드레인 전압과 전류의 파형을 사각파와 구형파로 나타나는가를 확인하는 것이 있다. 하지만 이런 방법이 현실적으로 불가능하기에 지금까지 보고된 논문과 자료에 의하면 고조파 제어 회로의 임피던스와 향상된 효율을 토대로 F급 증폭기의 제작을 증명하고 있다. 제작한 증폭기의 실험 결과를 통하여 FR-4기판에서도 고효율의 PA를 제작할 수 있음을 확인했다. 그림 15는 각 모드에서의 IMD3 차이를 그래프로 나타낸 것으로, PA의 메모리효과가 약 10~100kHz에 집중되어 있어 일반적인 class-AB PA와 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

그림 16. 840MHz (a), 2.4GHz (b) 모드의 IMD3 차이  
Fig. 16. Measured IMD3 difference of PA#3.

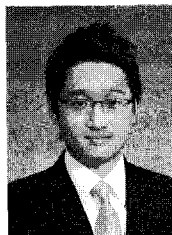
#### IV. 결 론

이 논문에서는 셀룰러와 ISM 밴드에서 동작하는 고 효율 F급 전력 증폭기를 제안하였고, 이를 개발하였다. 동일한 트랜지스터를 각 단일 대역에서 단일 F급 전력 증폭기를 설계하여 그 효율을 보였다. 그 결과, 840MHz에서 동작하는 PA의 경우 24.4dBm에서 81.2%의 효율을 얻었고, 2.4GHz 동작 PA는 22.8dBm에서 94.5%의 효율을 얻었다. 이 두 증폭기의 성능을 이중대역 F급 전력증폭기에서 보이기 위하여 SPDT개념의 이중 대역 고조파 제어 회로를 제안하였다. 실제 SPDT 스위치의 이전 단계로써 전송선로의 길이를 연결하여 이중 대역에서 동작하는 PA를 개발하였다. 840MHz 모드의 경우, 23.5dBm에서 60.5%의 효율을, 2.4GHz 모드는 19.62dBm에서 50.9%의 효율을 얻을 수 있었다. 이는 저가의 FR-4기판에서도 2GHz이상의 고조파도 제어하여 고효율의 F급 전력 증폭기를 제작할 수 있음을 보인다.

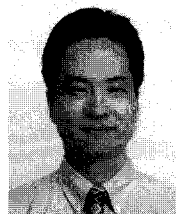
#### 참 고 문 헌

- [1] F.H. Raab, P. Asbeck, S. Cripps, et al., "Power amplifiers and transmitters for RF and Microwave" IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 50, no. 3, pp. 814-826, March 2002.
- [2] Uchida, K, et al.. "Dual-band GaAs FET power amplifier with two-frequency matching circuits", in Proc. Asia-Pacific Microwave Conf., Vol. 1., Suzhou, China, Dec. 2005.
- [3] F.H. Raab, "Idealized operation of the class E tuned power amplifier", IEEE Transactions Circuits and Systems, vol. 24, no. 12, pp. 725-735, December 1977.
- [4] F.H.Raab, "Class-F power amplifiers with maximally flat waveforms," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.45, no.11, pp.2007-2012, November 1997.
- [5] F.H. Raab, "Efficiency of Doherty RF Power-Amplifier Systems", IEEE Transactions Broadcasting, vol. BC-33, no. 3, pp. 77-83, September 1987.
- [6] Jangheon Kim, et al.. "Advanced Design of Linear Doherty Amplifier for High Efficiency using Saturation Amplifier" in 2007 IEEE Int. Microwave Symposium Digest, pp. 1573-1576, Honolulu, Hawaii, June 2007.

#### 저 자 소 개



이 창 민(학생회원)  
2008년 한국외국어대학교  
전자공학과 학사 졸업.  
2010년 한국외국어대학교  
전자공학과 석사 졸업.  
<주관심분야 : 전력증폭기설계>



박 영 철(정회원)-교신저자  
2004년 미국 Georgia 공과대학교  
전기전자공학과 박사졸업  
2004년~2007년 삼성전자 정보  
통신 총괄 책임연구원  
2007년~현재 한국외국어대학교  
전자공학과 부교수  
<주관심분야 : RF 전력증폭기 및 주파수채배기  
설계 및 모델링, 디지털 전치왜곡 시스템>