

# 마이크로파용 고효율 Doherty 전력증폭기 설계

오정균\* · 김동욱\*\*

\*한국정보통신기능대학, \*\*한국정보통신기능대학 이동통신과 교수

## A Design of High Efficiency Doherty Power Amplifier for Microwave Applications

Jeong-Kyun Oh\* · Dong-Ok Kim\*\*

\*Dept. of Mobile Telecom. Korea Inform. & Communication Polytechnic College, Gwangju 464-731, Korea

\*\*Dept. of Mobile Telecom. Korea Inform. & Communication Polytechnic College, Gwangju 464-731, Korea

**요 약** : 본 논문에서는 마이크로파 대역의 주파수를 이용해 고효율 도허티 전력 증폭기를 설계 및 제작하였다. 도허티 전력증폭기는 MRF 281 LDMOS FET를 사용하여 구현하였고, 도허티 전력 증폭기의 성능을 AB급 증폭기만 있을 때와 비교하였다. 측정결과, 구현한 도허티 전력 증폭기는 P1dB 출력전력이 2.3GHz 주파수에서 33.0dBm을 가진다. 또한, 도허티 증폭기는 주파수 2.3GHz~2.4GHz에서 이득은 11dB, 입력 반사손실 -17.8dB를 얻었다. 설계된 도허티 증폭기는 AB급 증폭기만 있을 때와 비교해서 평균 PAE는 10% 이상 개선됨을 보였고, 설계된 도허티 증폭기의 최대 PAE는 39%를 갖는다.

**핵심용어** : 마이크로파, 전력증폭기, 도허티 증폭기, 효율, 전력부가효율

**Abstract** : In this paper, the high efficiency Doherty power amplifier has been designed and realized for microwave applications. The Doherty amplifier has been implemented using silicon MRF 281 LDMOS FET. The RF performances of the Doherty power amplifier (a combination of a class AB carrier amplifier and a bias-tuned class C peaking amplifier) have been compared with those of a class AB amplifier alone. The realized Doherty power amplifier P1dB output power has 33dBm at 2.3GHz frequency. Also the Doherty power amplifier shows 11dB gain and -17.8dB input return loss at 2.3GHz to 2.4GHz. The designed Doherty amplifier has been improved the average PAE by 10% higher efficiency than a class AB amplifier alone. The Maximum PAE of designed Doherty power amplifier has been 39%.

**Key words** : Microwave, Power amplifier, Doherty amplifier, Efficiency, PAE

## 1. 서 론

근래에 들어와서 무선 통신 시스템의 중요한 부분을 차지하고 있는 전력 증폭기의 성능 향상에 대한 연구가 끊임없이 진행되고 있다. 이러한 연구는 주로 전력 증폭기의 성능을 나타내는 출력전력, 선형성, 전력부가효율 등을 향상시키는 데 집중되고 있으며, 이를 위해 다양한 방법이 시도되고 있다.(Cripps, 1999; Raab, 2002) 일반적으로 기지국 및 중계기 시스템은 단말기와는 달리 DC 전력 공급이 풍부하기 때문에 효율은 떨어지더라도 요구되는 높은 선형성을 얻기 위한 설계 기법들이 이용되어 왔다. 그러나 증폭기의 전력레벨 증가 및 소형화에 따른 열 문제로 인해 최근에는 증폭기의 고선형성 뿐만 아니라 고효율 특성도 점차 중요한 특성 항목이 되어가고 있다. 전력증폭기의 선형성과 전력효율의 관계를 개선하기 위해 제안된 다양한 방법들 중에서 현재 가장 주목받고 있는 것이 도허티 전력증폭기이다.

이 기법은 다른 방식에 비해 불필요한 회로가 없어 비교적 구조가 간단하고 부하 임피던스 변조를 이용하여 높은 효율개선 효과를 볼 수 있다. 최근 도허티 전력 증폭기 설계기법에 대한 많은 연구들이 진행되고 있으며, 특히 도허티 전력증폭기는 입력전력의 넓은 변화 범위에 대해서 고효율의 성능을 유지하게 한다. (Iwamoto,2001;Kim,2001;Doherty,1936)

현재 전력증폭기는 기지국용의 경우 10%, 단말기의 경우 30%의 이상의 효율이 힘들 정도로 이동통신 부품 중 전력소비가 가장 큰 부품이다. 결국 전력증폭기의 전력효율과 비선형성 특성을 개선하는 것은 차세대 이동통신 전력증폭기 연구에 직결되는 요인이다. 본 논문에서는 2.3GHz대역의 주파수를 이용해 마이크로파용 고효율 도허티 전력 증폭기를 설계 및 제작하여 고출력 전력 증폭기의 효율특성을 향상시킬 수 있는 방법을 제시하였다. 본 논문의 II장에서는 도허티 증폭기에 관한 기본 이론을 소개하고, III장에서는 기본 이론을 바탕으로 설계된 마이크로파용 도허티 증폭기의 시뮬레이션 결과를 제

\* 대표저자 : cgoh88@icpc.ac.kr, 031)760-3377

\*\* dokim@icpc.ac.kr, 031)760-3377

시하였으며, IV장에서는 측정결과를 통하여 제작한 도허티 전력증폭기의 출력 특성 및 효율 개선 정도를 나타내었다.

## 2. 도허티 전력 증폭기 설계 이론

### 2.1 도허티 전력 증폭기 설계 이론

도허티 증폭기는 효율을 개선하기 위해서 W.H. Doherty에 의해 1936년에 보고되었다. 이 증폭기는 캐리어 증폭기와 피킹 증폭기로 구성되어 있고 고효율을 유지하기 위해서 저출력에서는 캐리어 증폭기만 동작하고 고출력에서는 두 증폭기가 병행해서 동작하게 한다. 증폭기의 요구 특성에 따라서, 두 증폭기의 비를 다르게 할 수도 있는데, 이 때 발생하는 문제점인 임피던스 정합문제와 전력결합 문제를 부하변조(load modulation)기법으로 해결한다.(B. Kim, 2001)

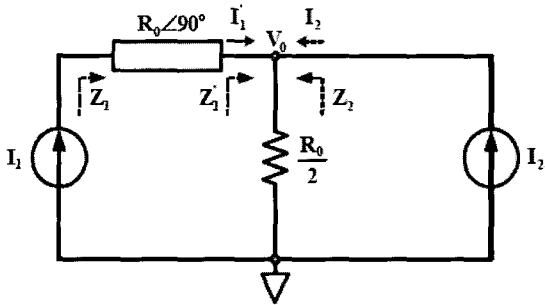


Fig. 1 The load modulation equivalent circuit of Doherty amplifier.

도허티 증폭기는 각기 다른 클래스의 두 증폭기를 사용하는데 캐리어 증폭기를 A급 또는 AB급으로 설계하면 피킹 증폭기는 B급 또는 C급으로 사용한다.(Y. Yang, J. Yi, Y. Y. Woo, and B. Kim, 2001) 도허티 증폭기의 동작원리의 핵심은 앞서 언급한 바와 같이 부하 임피던스 변조 기법을 이용하는 것이며, 그 원리는 Fig. 1.의 간소화된 도허티 증폭기의 출력부 회로를 이용하여 설명될 수 있으며 식(1),(2)를 통해 설명할 수 있다.

$$Z_1' = \frac{V_O}{I_1'} = \frac{R_O}{2} \left( \frac{I_1' + I_2}{I_1'} \right), 0 \leq I_2 \leq I_1' \quad (1)$$

$$Z_1 = \frac{R_O^2}{Z_1'} = \frac{2R_O}{1 + I_2/I_1'} = \frac{2R_O}{1 + \alpha}, 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (2)$$

Fig. 1.에서 전류원  $I_1$ 과  $I_2$  는 각각 캐리어 증폭기와 피킹 증폭기를 의미한다. 식(2)에서 전류원  $I_2$ 가 0부터  $I_1$ 까지 변환에 따라 전류원  $I_1$ 에서 본 부하 임피던스는  $2R_o[\Omega]$ 에서  $R_o[\Omega]$ 로 변조됨을 알 수 있다. 다시 말하면, 피킹 증폭기가 차단되었을 때 주 증폭기의 부하 임피던스는  $2R_o[\Omega]$ 가 되고, 두 증폭기 모두 개방되면  $R_o[\Omega]$ 가 되며 그 중간 출력에서는 중간값의 부하 임피던스를 가지게 된다.

피킹 증폭기의 동작 변화로 인한 이득의 변화는 이러한 부하 임피던스 변조를 통해 입력단에서 생기는 전력 분배의 손실을 고려하여 보상된다. 그래서 증폭기 전체의 이득이 일정하게 유지되면서, 동시에 출력 단에서 비대칭적인 전력 결합이 이루어질 수 있다.(B. Kim, 2001)

Fig. 2.는 일반적인 Doherty 증폭기의 AM-AM 특성을 나타내고 있으며, 이 증폭기는 고효율을 유지하기 위해서 저출력에서는 캐리어 증폭기만 동작하게 되고, 입력 신호레벨이 증가되면 즉, 고출력에서는 두 증폭기가 병행해서 동작함을 알 수 있다.(Doherty, 1936; Yang et al., 2001)

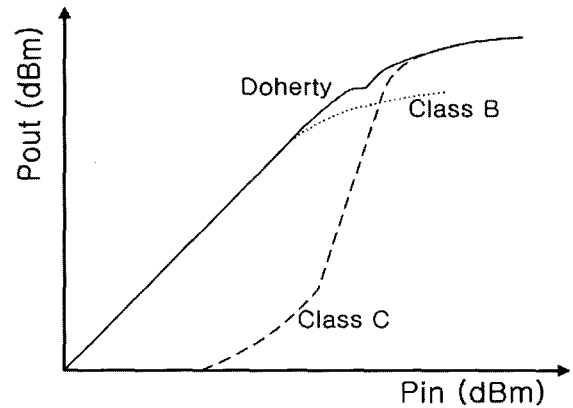


Fig. 2 AM-AM characteristics of the conventional Doherty amplifier

Fig. 3은 본 논문에서 구현한 부하 임피던스 변조기법을 도허티 전력증폭기에 실제로 적용한 구조를 나타내었다.

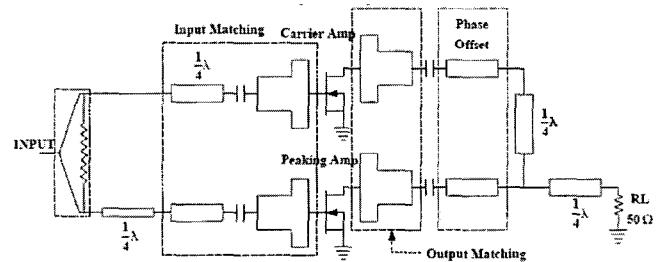


Fig. 3 Doherty power amplifier topology

전류원  $I_1$ 과  $I_2$ 는 각각 완전 정합된 캐리어 증폭기와 피킹 증폭기로 대체되었다. 이 증폭기의 입력단은 전력분배기와 각 증폭기의 입력 정합회로로 구성되어 있고 출력단에는 출력 정합회로와 위상 차이를 보상하기 위해서  $R_o[\Omega]$ 의 특성 임피던스를 갖는 지연선로가 첨가되어 있다. 정합된 캐리어 및 피킹 증폭기의 바로 뒷단에는 각각 소정의 길이를 갖는 오프셋 라인이 위치하는데, 이 두 라인의 역할은 부하 임피던스가 변조되는 상황에서 캐리어 증폭기의 출력정합을 이루게 하고, 피킹 증폭기가 단절되었을 때에 개방 출력 임피던스를 이루게 한다. 구체적인 역할은 참고문헌(Kim, 2001)에 잘 설명되어져 있다.

### 2.2 Doherty 전력증폭기의 효율

AB급의 캐리어 증폭기와 C급 피킹 증폭기를 갖는 실제적인 고풍력 Doherty 전력증폭기의 효율특성을 구하기 위해 먼저 도통각(Conduction Angle)에 따른 DC전류  $I_{DC}$ 의 값을 구하면 식(3)과 같다.(F. H. Raab,1987)

$$I_{DC} \cong \left\{ \begin{array}{l} \text{Class AB, } \alpha = \frac{3\pi}{2} \pi : \frac{I_{max}}{2\pi} \times 2.78 \\ \text{Class B, } \alpha = \pi : \frac{I_{max}}{2\pi} \times 2 \\ \text{Class C, } \alpha = \frac{\pi}{2} : \frac{I_{max}}{2\pi} \times 1.04 \end{array} \right\} \quad (9)$$

낮은 입력전압레벨( $0 < V_{in} < V_{max}/2$ )에서의 실제 Doherty 전력증폭기의 효율  $\eta_{Low}$ 은 식(4)과 같다.(F. H. Raab,1987)

$$\eta_{Low} = \frac{V_{in}}{V_{max}} \cdot \left[ \frac{2\pi}{2.78} \cdot \frac{1}{2} \right] \cdot 100 = 56.5\% \quad (4)$$

중간 입력전압레벨( $(V_{max}/2 < V_{in} < V_{max})$ 부터 최대 입력구간까지의 효율은 피킹 증폭기가 B급 또는 C급으로 동작하는 두 경우에 따라 달라진다. 먼저 피킹 증폭기가 B급으로 동작하는 경우에 소모되는 DC전력  $P_{DC}$ 를 구하면 다음과 같다.(F. H. Raab,1987)

$$P_{DC} = \left[ \frac{I_{max}}{\pi} \right] \cdot V_{dc} \cdot \left[ 3.39 \left( \frac{V_{in}}{V_{max}} \right) - 1 \right] \quad (5)$$

따라서, AB급의 캐리어 증폭기와 B급 바이어스의 피킹 증폭기를 가지는 Doherty 전력증폭기의 전체효율  $\eta_{real-B}$ 를 구하면 식(6)와 같다.(F. H. Raab,1987)

$$\eta_{real-B} = \frac{V_{out}}{P_{DC}} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\left( \frac{V_{in}}{V_{max}} \right)^2}{\left( \frac{3.39 \cdot V_{in}}{V_{max}} - 1 \right)} \quad (6)$$

실제 Doherty 전력증폭기가 AB급의 캐리어 증폭기와 C급의 피킹 증폭기로 동작하는 경우, 최대 입력 구간에서의 전체 소모되는 DC전력  $P_{DC}$ 는 식(7)과 같다.(F. H. Raab,1987)

$$P_{DC} = \left( \frac{I_{max}}{\pi} \right) \cdot V_{dc} \cdot \left[ 2.426 \left( \frac{V_{in}}{V_{max}} \right) - 0.518 \right] \quad (7)$$

따라서 C급 피킹 증폭기를 사용하는 경우의 실제 Doherty 전력증폭기의 전체효율  $\eta_{real-C}$ 을 구하면 다음과 같다.(F. H. Raab,1987)

$$\eta_{real-C} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\left( \frac{V_{in}}{V_{in,max}} \right)^2}{\left( \frac{2.426 \cdot V_{in}}{V_{in,max}} - 0.518 \right)} \quad (9)$$

### 3. 도허티 전력 증폭기의 시뮬레이션 결과

본 장에서는 앞서 설명한 도허티 전력 증폭기의 기본 이론을 바탕으로 마이크로파용 고효율 도허티 전력 증폭기를 설계하였다. 시뮬레이션을 위해 Freescale사의 4[W] MRF 281 LDMOSFET 디바이스 모델을 사용하였으며, 또한 캐리어 증폭기와 피킹 증폭기 모두 위의 소자를 사용하여 설계하였으며, 마이크로파 주파수 대역에 적용하기 위해서 동작주파수는 2.3GHz에서 2.4GHz까지 100MHz 대역에서 10dB이상의 이득, 최대출력 및 효율을 갖도록 설계하였다. 설계된 고풍율 도허티 전력증폭기의 입력에는 90°Hybrid coupler를 사용하였고, 캐리어 증폭기의 출력에는 부하 변조를 위해 90°( $\lambda/4$ )전송선로를 이용하였다.

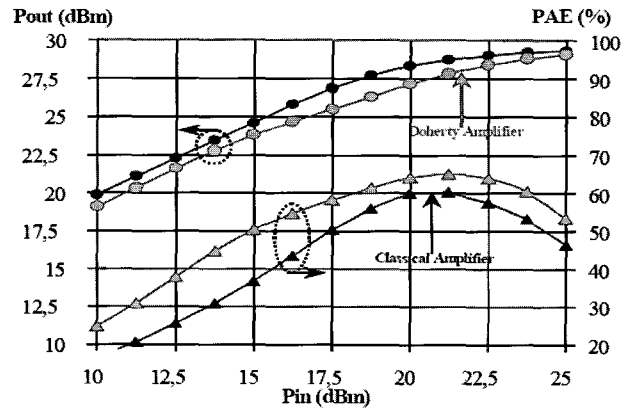


Fig. 4 Simulated Output Power and PAE versus Input Power

Fig. 4는 비선형 시뮬레이션의 입력 대 모의 실험한 출력전력과 전력부가 효율의 변화를 나타낸다. Classical 증폭기는 AB급 증폭기로서 Doherty 증폭기와 입, 출력 및 효율을 비교하기 위한 것으로, 두 증폭기는 AB급의 동일 게이트 바이어스 전압을 인가하며 평행 2단으로 구성되는 일반 증폭기로 함께 동작한다.

이 경우에, 전력부가효율은 입력전력의 높은 레벨에서는 최대이고 전력 backoff에서는 빠르게 감소한다. 그리고 Doherty 증폭기에서 캐리어 증폭기는 AB급 게이트 바이어스이고 피킹 증폭기는 C급 게이트 바이어스일 때 증폭기의 전력부가효율이 높은 값을 유지한다는 것을 알 수 있다. 이 결과에서 피킹 증폭기의 출력전력의 증가는 2.1절에 기술한 바와같이 캐리어 증폭기에서 나타나는 부하를 변화시킨다는 것을 알 수 있으며, 높은 전력부가효율은 입력과 출력전력이 더 넓은 범위에서 동작함을 알 수 있다. 이때 중요한 설계 요소는 피킹 트랜지스터의 이상적인 동작 파라미터에 대한 연구이다.

드레인 부하가 요구되는 변화를 하기 위해서는, 피킹 드레인 전류는 입력 동작 레벨에 따라서 제어되어야 한다. 또한, 낮은 입력전력에 대해서는 피킹 드레인 전류는 turn off 되어야 하

며, 캐리어 증폭기가 포화하기 시작할 때 피킹 증폭기가 turn-on하여 포화 응답을 보상하기 위해 전류는 증가해야 한다. 이것은 부하 임피던스가 전류증가를 위해 변화해야 함을 의미한다. 그리고 최대 입력전력에서 두 전류는 각 드레인에 나타난 동일 부하를 갖도록 해야 한다. 그러므로 어떤 회로 제어에 대한 요구 없이 최적의 피킹 드레인 전류를 이루는 단순한 방법은 피킹 증폭기를 C급으로 구성하는 것이다.

#### 4. 제작 및 측정결과

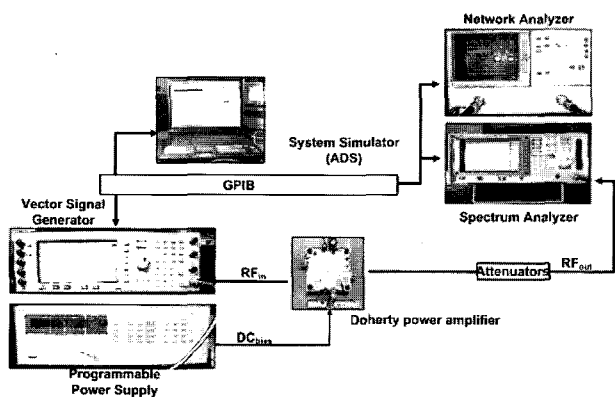


Fig. 5 Test set-up configuration

본 논문에서는 일반적인 AB급 비교 증폭기를 제작한 후, 고풍력 전력 증폭기의 효율특성을 향상시킬 수 있는 마이크로파용 고효율 도허티 전력증폭기를 제작하여 두 증폭기간의 이득, 전력부가효율, 최대출력전력 등을 비교하였다. 제작한 도허티 전력 증폭기는 Freescale사의 4[W] MRF 281 LDMOSFET를 사용하였으며, 유전율은 3.48이고 유전체 두께는 1.016mm인 로저스 기판위에 실장 하였다. Fig. 5는 본 논문에서 제작한 증폭기의 측정을 위한 셋업의 구성을 보여주며, Fig. 6은 본 논문에서 실제 제작한 고효율 도허티 전력증폭기를 보여준다.

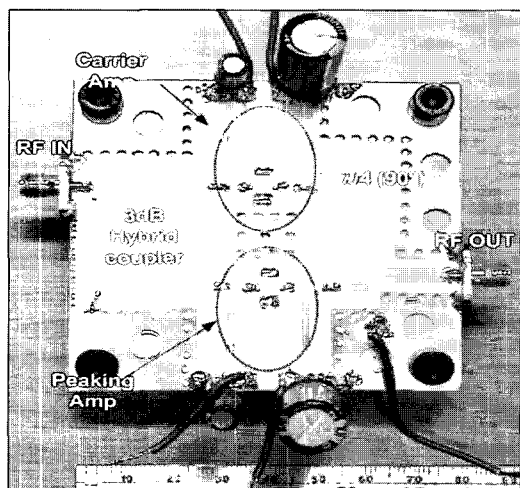


Fig. 6 The implementation of Doherty Power Amplifier

제작된 일반적인 AB급 전력 증폭기는 2.3GHz에서 2.4GHz까지의 100MHz 대역에서 이득특성이(S21) 10.2dB이고 최대 반사특성이(S11) -21dB인 결과를 얻었으며 제안한 고효율 도허티 전력 증폭기는 11dB의 이득특성과 -17.8dB의 최대 반사특성을 얻었다. 제작한 고효율 도허티 전력 증폭기의 출력특성은 Fig. 7에서 보여주고 있으며, 1-톤 실험에서 22dBm의 입력에서 33dBm의 출력을 나타내고 있다. 2차, 3차 고조파는 각각 33dBc, 43dBc로 억압되었다. 또한, 본 논문에서 제작한 고효율 도허티 전력증폭기의 바이어스는 캐리어와 피킹 증폭기의 Vgs를 각각 4.7V(AB급), 2.6V(C급)를 인가하였다.

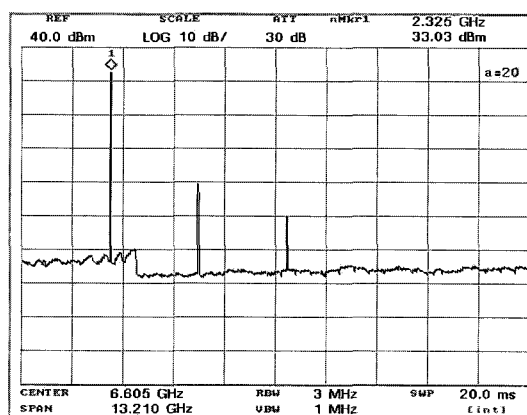


Fig. 7 Output Spectrum measurement result for Doherty amplifier.

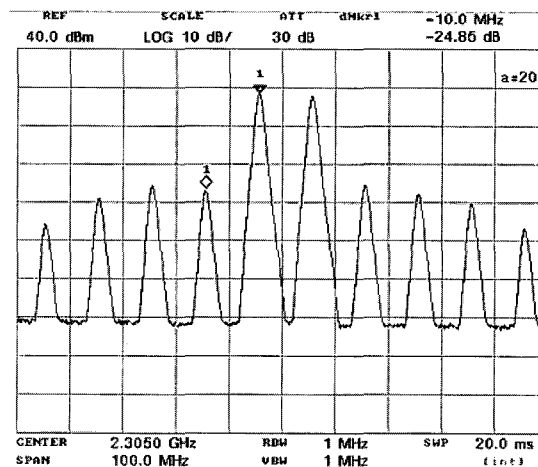


Fig. 8 IMD3 measurement result for Doherty amplifier

Fig. 8은 고효율 도허티 전력 증폭기의 IMD3 측정결과를 보여준다. 출력 30dBm에서 -24.9dBc로 일반적인 증폭기의 요구 사양을 만족함을 알 수 있다.

Fig. 9는 일반적인 AB급 전력증폭기와 본 논문에서 제안한 고효율 도허티 전력증폭기의 입력전력 변화에 따른 출력전력 및 전력부가효율을 보여주고 있다. 출력전력이 22.5dBm 이상에서 도허티 전력증폭기의 효율이 개선됨을 알 수 있으며, 최대 33dBm의 출력전력에서 효율은 10% 개선된 것을 알 수 있다.

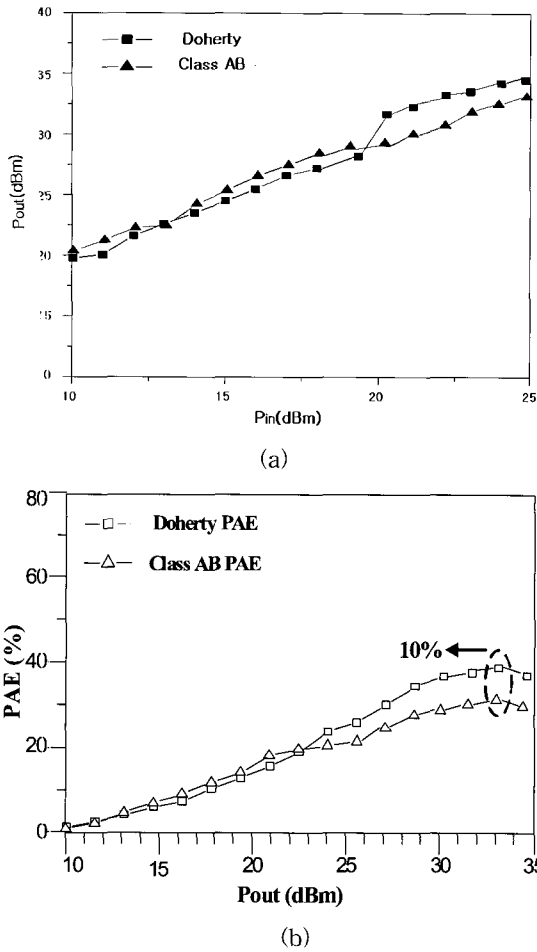


Fig. 9 (a) Output Power measurement result versus Input Power.(b) Power Added Efficiency measurement result versus Output Power

표 1은 2.3 GHz에서 AB급과 고효율 도허티 전력 증폭기의 측정된 출력전력, 전력이득 그리고 전력부가효율의 측정 결과에 대한 비교이다. 표1.에서 알 수 있듯이, 고효율 도허티 증폭기는 측정시 입력 신호를 22dBm으로 했을 때 P1dB에서의 출력 전력 33.0dBm과 39%의 PAE를 가진다. 따라서, 이 결과는 동일 입력레벨에서 AB급 증폭기와 비교해서 출력전력에서 1dB 이상, 효율에서 10%정도 개선됨을 알 수 있다.

Table 1 Comparison of experimental results for AB class, Doherty amplifier.(P<sub>in</sub>=22dBm)

측정 항목	PAE (%)	Gain (dB)	Pout (dBm)
AB급	29	10.2	31.9
Doherty	39	11	33.03

### 5. 결 론

본 논문에서는 2.3GHz 대역의 주파수를 이용해 마이크로파

용 고효율 도허티 전력 증폭기를 설계 및 제작하여 고효율 전력 증폭기의 효율특성을 향상시킬 수 있는 방법을 제시하였다. 이를 실험적으로 증명하기 위해 일반적인 AB급 전력증폭기를 제작한 후, 제안한 고효율 도허티 전력 증폭기의 실험결과와 비교하였다. 측정결과, 1-톤 실험에서 22dBm의 입력에서 33dBm의 출력을 나타내었고, 기존의 일반적인 AB급 전력 증폭기와 비교하여 최대 33dBm의 출력전력과 주파수 1.8GHz 일 때 3.3% 효율 개선인데 반해(Sangman Lee, Chulhun Seo,2005), 본 논문에서는 주파수 2.3GHz에서 10%의 효율이 개선된 것을 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 제작한 고효율 도허티 전력 증폭기를 마이크로파용 기저국 전력 증폭기에 적절히 사용하면 기저국 및 중계기 시스템의 효율성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단되며, 아울러 다른 주파수의 전력증폭기에도 적용 가능하리라 사료되며, 차후 연구과제로는 전력 증폭기의 크기의 축소와 고효율 및 선형성을 동시에 확보할 수 있는 연구가 요구된다.

### 참 고 문 헌

- [1] Bousnina, S., and Ghannouchi, F. M.(2001), "Analysis and experimental study of an L-Band new topology Doherty amplifier", 2001 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., vol. 2, pp. 935-938.
- [2] Doherty, W. H.(1936), "A new high efficiency power amplifier for modulated waves", Proc. IRE, vol. 24, no. 9, pp. 1163-1182.
- [3] Iwamoto, M.(2001), "An extended Doherty amplifier with high efficiency over a wide power range", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 49, no. 12, pp. 2472-2479.
- [4] Lee, S. M., Seo, Chulhun(2005), "Realization of High Linear Doherty Amplifier Using PBG", 전자공학회논문지 제42권 TC 제2호, pp.81-86.
- [5] Raab, F. H.(1987) "Efficiency of Doherty RF power amplifier systems", IEEE transactions on Broadcasting, vol BC-33, no. 3. pp. 77-83.
- [6] Raab, F. H.(2002), "Power amplifiers and transmitters for RF and microwave", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 50, no.3, pp.814-826.
- [7] Steve C. Cripps(1999). "RF Power Amplifier for Wireless Communications", Artech House.
- [8] Yang, Y., Cha, J., Shin, B., and Kim, B.(2000), "A microwave Doherty amplifier employing envelope tracking technique for high efficiency and linearity", IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 13, no. 9, pp. 370-372.
- [9] Yang, Y., Yi, J., Woo, Y. Y., and Kim, B.(2001), "Optimum design for linearity and efficiency of a

microwave Doherty amplifier using a new load matching technique". Microwave Journal, pp. 20-36.

- [10] Yang, Y., Yi, J., Woo, Y. Y. and Kim, B.(2001), "Experimental Investigation on Efficiency and Linearity of Microwave Doherty Amplifier", IEEE MTT-S Digest, pp. 1367-1370

---

원고접수일 : 2006년 6월 7일

원고채택일 : 2006년 7월 13일