

## 마이크로파용 고효율 Doherty 전력 증폭기 설계

오정균\* · 김동옥\*\*

\*한국정보통신기술대학, \*\*한국정보통신기술대학 이동통신과 교수

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

C. G. Oh\* · D. O. Kim\*\*

\*Dept. of Mobile Telecom. Korea Inform. & Communication Polytechnic College.

\*\*Dept. of Mobile Telecom. Korea Inform. & Communication Polytechnic College.

**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 보인다. 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

이동통신 시스템 기술의 발전에 따라 통신시스템에서 대부분의 전력을 소모하는 전력 증폭기의 효율이 중요시 되고 있다. 하지만 현재의 사용중인 CDMA 방식에서와 같이 넓은 대역에서 많은 양의 정보를 전송하기 위해 multi-carrier 이용하기 때문에 선형성도 전력 증폭기의 중요한 설계 사양이 되었다.

전력증폭기의 선형성을 증가시키는 방법으로는 Feedforward, Predistortion 방식처럼 구조적인 해결방법이 있다. 이러한 방법들은 최대 선형화 출력 전력 지점에서 선형성을 개선시키는데 초점이 맞추어 졌다. 하지만, 전력 증폭기에서 최대전력을 출력하도록 요구되는 시간이 전체 동작 시간 중 극히 일부뿐이므로 평균 작동 전력 효율은 나쁜 단점이

있다.

다른 방법으로, 최대 출력에서 2~3 dB 낮은 전력에서 class A나 class AB로 작동하도록 전력 증폭기를 설계 하도록 하는 것이다(Back-off 방식). 높은 선형성은 보장 되지만 효율이 크게 낮아지는 단점이 있다. 특히, CDMA처럼 첨두치 전력과 평균 전력의 차이가 큰 경우 첨두치 전력에서 back-off 시켜야 하므로 효율의 감소는 더 크게 된다.

최근에, CDMA와 같은 이동통신 시스템의 급격한 보급에 따라 차세대 무선통신환경에 적합한 새로운 고효율, 고효율 전력증폭기의 연구가 요구되고 있다.

일반적으로 사용되는 기법들은 고조파 주파수에서 특별한 부하의 기술을 근거로 한다.<sup>[1]</sup> 그러한 기법들은 높은 전력에서는 효율적이다.

더 최근에, 신호의 스펙트럼의 대역폭을 개선하는 목표와 더불어, 시스템은 비선형진폭의 발생에 의한 변조기법들을 사용했다. 변화하는 인벨로프 신호의 증폭은 전체 전력효율을 낮게한다. 전력 증폭기의 성능 향상에 대한 연구가 끊임없이 진행되고 있지만, 이러한 연구는 주로 전력 증폭기의 성능을 나타내는 출력전력, 선형성, 전력부가효율(Power Added Efficiency: PAE)등을 향상시키는 데 집중되고 있으며, 이를 위해 다양한 방법이 시도 되고 있다.<sup>[2]</sup> 일반적으로 기지국 및 중계기 시스템은 단말기와는 달리 DC 전력 공급이 풍부하기 때문에 효율은 떨어지더라도 요구되는 높은 선형성을 달성하기 위한 설계 방법의 기법들이 이용되어 왔다. 그러나 증폭기의 전력 레벨 증가 및 소형화에 따른 열 문제로 인해 최근에는 증폭기의 고선형성 뿐만 아니라 고효율 특성도 점차 중요한 특성 항목이 되어가고 있다. 따라서 이러한 요구에 부응하기 위해 차세대 무선통신 환경에 적합한 새로운 고효율, 고효율 전력증폭기가 요구되고 있다.<sup>[3]</sup>

일반적인 전력증폭기의 선형성과 전력효율의 관계를 개선하기 위해 제안된 다양한 방법들 중에서 현재 가장 주목받고 있는 것이 Doherty 전력증폭기이다. 이 기법은 다른 방식에 비해 불필요한 회로가 없어 비교적 구조가 간단하고 부하 임피던스 변조를 이용하여 높은 효율개선효과를 볼 수 있다. 또한, Doherty 기법의 사용은 입력전력의 넓은 변화 범위에 대해서 전력증폭기의 효율을 유지하게 한다.

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 마이크로 파용 고효율 도허티 전력 증폭기를 설계 및 제작하여 고효율 전력 증폭기의 효율특성을 향상시킬 수 있는 방법을 제시하였다. 본 논문의 II장에서는 도허티 증폭기에 관한 기본 이론을 소개하고, III장에서는 기본 이론을 바탕으로 설계된 마이크로 파용 도허티 증폭기의 시뮬레이션 결과를 제시하였으며, 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 고효율에서는 두 증폭기가 병행해서 동작하게 한다.

증폭기의 요구 특성에 따라서, 두 증폭기의 비를 다르게

할 수도 있는데, 이 때 발생하는 문제점인 임피던스 정합문제와 전력결합문제를 부하변조(load modulation)기법으로 해결한다.<sup>[6,7]</sup>

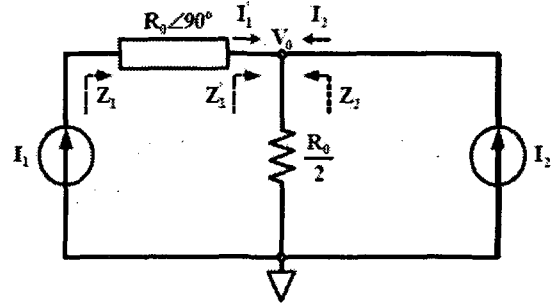


그림 1. 도허티 증폭기의 부하변조 등가회로

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. 도허티 증폭기의 동작 원리의 핵심은 앞서 언급한 바와 같이 부하 임피던스 변조 기법을 이용한다는 것이며, 그 원리는 그림1의 간소화된 도허티 증폭기의 출력부 회로를 이용하여 설명될 수 있으며 식 (1), (2)를 통해 설명할 수 있다.

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

$$Z_1 = \frac{R_o^2}{Z_1} = \frac{2R_o}{1 + I_2/I_1} = \frac{2R_o}{1 + \alpha} \quad (2)$$

그림 1에서 전류원  $I_1$ 과  $I_2$ 는 각각 캐리어 증폭기와 피킹 증폭기를 의미한다. 식(2)에서 전류원  $I_2$ 가 0부터  $I_1$ 까지 변함에 따라 전류원  $I_1$ 에서 본 부하 임피던스는  $2R_o$ 에서  $R_o$ 로 변조됨을 알 수 있다. 다시 말하면, 피킹 증폭기가 차단되었을 때 주 증폭기의 부하 임피던스는  $2R_o$ 가 되고 두 증폭기 모두 개방되면  $R_o$ 가 되며 그 중간 출력에서는 중간 값의 부하 임피던스를 가지게 된다. 피킹 증폭기의 동작 변화로 인한 이득의 변화는 이러한 부하 임피던스 변조를 통해 입력단에서 생기는 전력 분배기의 손실을 고려하여 보상된다. 그래서 증폭기 전체의 이득이 일정하게 유지되면서, 동시에 출력 단에서 비대칭적인 전력 결합이 이루어질 수 있다.<sup>[8]</sup> 그림2에서 일반적인 Doherty 증폭기의 AM-AM 특성을 나타낸다.

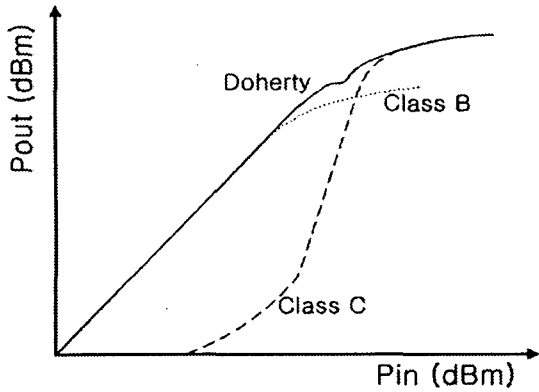


그림2. 일반적인 Doherty증폭기의 AM-AM특성

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

부하 임피던스 변조기법을 마이크로파 도허티 전력증폭기에 실제로 적용한 구조를 그림 3에 나타내었다.

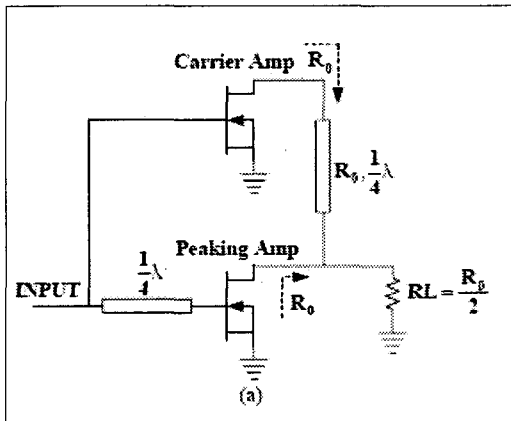


그림 3. 도허티 전력 증폭기의 구조

Fig. 3. Doherty power amplifier topology.

전류원  $I_1$ 과  $I_2$ 는 각각 완전 정합된 캐리어 증폭기와 피킹 증폭기로 대체되었다. 이 증폭기의 입력은 전력 분배기와 각 증폭기의 입력 정합회로로 구성되어 있고 출력단의 위상차이를 보상하기 위해서  $R_o$ 의 특성 임피던스를 갖는 지연선로가 첨가되어 있다. 출력단에는 이 소자들이 최대 출력일 때에  $R_o$ 의 정합회로가 첨가되어 있다.

## 2.2 Doherty 전력증폭기의 효율

AB급의 캐리어 증폭기와 C급 피킹 증폭기를 갖는 실제적인 고효율 Doherty 전력증폭기의 효율특성을 구하기 위해 먼저

도통각(Conduction Angle)에 따른 DC전류  $I_{DC}$ 의 값을 구하면 식(3)과 같다.<sup>[9,10]</sup>

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

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

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

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.

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

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

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

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

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

따라서 C급 피킹 증폭기를 사용하는 경우의 실제 Doherty 전력증폭기의 전체효율  $\eta_{real-C}$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\eta_{real-C} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\left( \frac{V_{in}}{V_{in\ max}} \right)^2}{\left( \frac{2.426 \cdot V_{in}}{V_{in\ max}} - 0.518 \right)} \quad (8)$$

## 3. 도허티 전력 증폭기의 시뮬레이션 결과

본 장에서는 앞서 설명한 도허티 전력 증폭기의 기본 이론을 바탕으로 마이크로파용 도허티 전력 증폭기를 설계하였다. 시뮬레이션을 위해 Freescale사의 4W(와트) 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 도허티 전력증폭기의 입력에는 90° Hybrid coupler를 사용하였고, 캐리어 증폭기의 출력에는 부하 변조를 위해 90° ( $\lambda/4$ ) 전송선로를 이용하였다.

일 부하를 갖도록 동일함에 틀림없다. 어떤 회로 제어에 대한 요구 없이 최적 피킹 드레인 전류를 이루는 단순한 방법은 피킹 증폭기를 C급으로 구성하는 것이다.

낮은 입력 전압에 대해 그러한 동작 Class는 드레인 전류를, turned off한다. 높은 레벨에서 드레인 전류는 캐리어 증폭기에 의해 생성되는 것만큼 중요하지 않다. 결과는 부하값이 이론적인 최대값에 도달할 수 없으며, 전체 출력전력은 감소한다는 것이다. 증폭기가 심한(deep) C급에서 동작할 때 breakdown 문제가 유도될 수 있다. 낮은 입력 전력에서 드레인 전류는 pinch-off 근처에서 드레인 전류원의 낮은 트랜스 컨덕턴스(transconductance) 때문에 캐리어 증폭기에 의해 발생된 전류와 비교해 볼 때 작다.

#### 4. 제작 및 측정결과

본 논문에서는 일반적인 AB급 비교 증폭기를 제작한 후, 고출력 전력 증폭기의 효율특성을 향상시킬 수 있는 마이크로 파용 도허티 전력증폭기를 제작하여 제작된 두 증폭기간의 이득, 전력부가효율(PAE), 최대출력전력 등을 비교하였다. 제작한 도허티 전력 증폭기는 Freescale사의 4W(와트) MRF 281 LDMOSFET를 사용하여 유전율 3.48이고 유전체 두께 1.016mm인 로저스 기판위에 실장 하였으며, 그림 5는 실제 제작된 제안한 도허티 전력 증폭기를 보여준다.

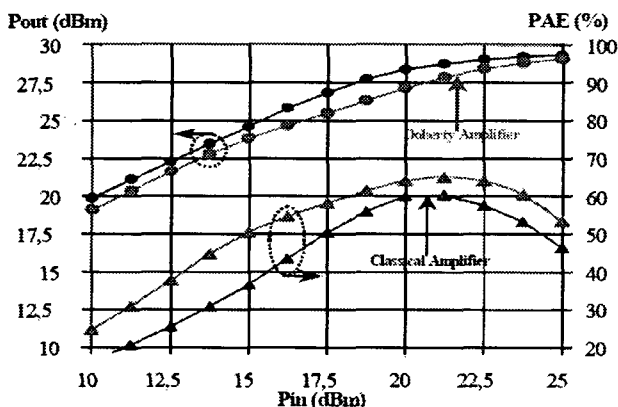


그림4. 입력 대 모의 실험한 출력전력과 전력부가 효율

Fig. 4 : Simulated Output Power and PAE versus Input Power

그림 4는 비선형 시뮬레이션의 입력 대 모의 실험한 출력전력과 전력부가 효율의 변화를 나타낸다. 두 증폭기는 AB급의 동일 게이트 바이어스 전압을 인가하며 평행 2단으로 구성되는 일반(기준) 증폭기로 함께 동작한다.

이 경우에, 전력부가효율은 입력전력의 높은 레벨에서는 최대이고 전력 backoff에서는 빠르게 감소한다. 캐리어 증폭기는 AB급 게이트 바이어스이고 피킹 증폭기는 C급 게이트 바이어스일 때 증폭기의 전력부가효율이 높은 값을 유지한다. 이 결과에서 피킹 증폭기의 출력전력의 증가는 캐리어 증폭기에서 나타나는 부하를 수정한다는 것을 입증하게 한다. 캐리어 증폭기에서, 높은 PAE는 입력과 출력 전력의 더 큰 범위를 위해서 이루어진다. 중요한 설계 요소는 피킹 트랜지스터의 이상적인 동작 파라미터에 대한 연구이다.

입력에, 1/4 파장의 전송선로는 두 드레인 전류사이에 최적의 90° 위상차를 얻게 한다. 드레인 부하가 요구되는 변화를 하기 위해서는, 피킹 드레인 전류는 입력 동작 레벨에 의해 제어되어야한다. 낮은 입력전력에 대해서는 피킹 드레인 전류는 turn off 되어야 한다. 캐리어 증폭기가 압축하기 시작할 때, 피킹 증폭기 전류는 부하 임피던스를 변화하기위해 증가해야 한다. 최대 입력전력에서 두 전류는 각 드레인에 나타난 동

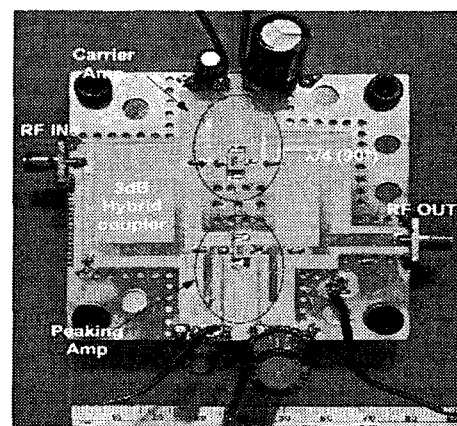


그림 5. 제작된 마이크로파용 도허티 전력증폭기 모듈

Fig. 5. The implementation of Doherty Power Amplifier.

제작된 일반적인 AB급 전력 증폭기는 2.3GHz에서 2.4GHz까지의 100MHz 대역에서 이득특성이(S21) 10.2dB, 이고 최대 반사특성이(S11) -21dB인 결과를 얻었으며 제한한 도허티 전력 증폭기는 11dB의 이득특성과 -17.8dB의 최대 반사특성을 얻었다. 제작한 도허티 전력 증폭기의 출력특성은 그림 6에서 보여주고 있으며, 1-톤 실험에서 22dBm의 입

력에서 33dBm의 출력을 나타내고 있다. 2차, 3차 고조파는 각각 33dBc, 43dBc로 억압되었다. 제작한 도허티 전력증폭기 바이어스는 캐리어와 피킹 증폭기의 Vgs를 각각 4.7V(AB급), 2.6V(C급)를 인가하였다. 그림 7은 일반적인 AB급 전력증폭기와 제안된 도허티 전력증폭기의 입력전력 변화에 따른 출력 전력 및 효율(PAE)을 보여주고 있다. 전체영역에서 도허티 전력증폭기의 효율이 개선되었고, 최대 33dBm의 출력전력에서 효율은 10%개선된 것을 볼 수 있다.

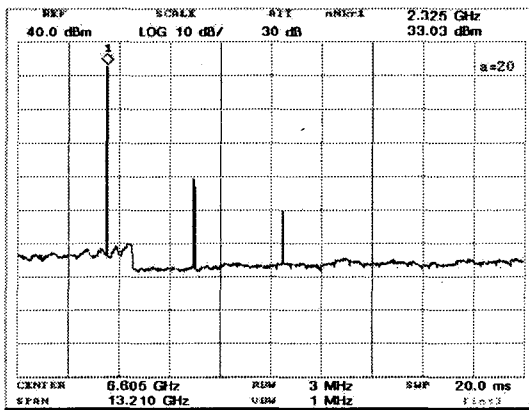
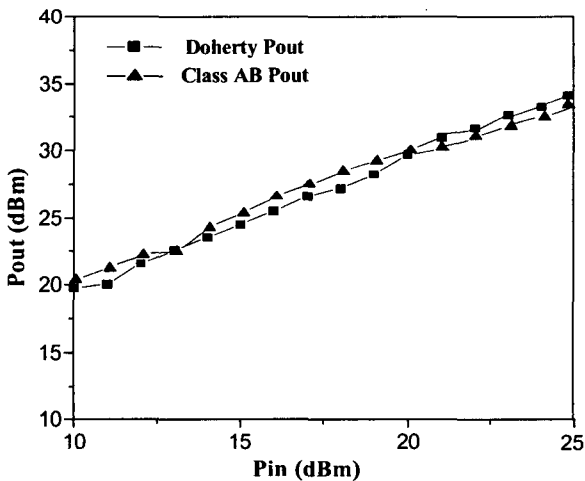
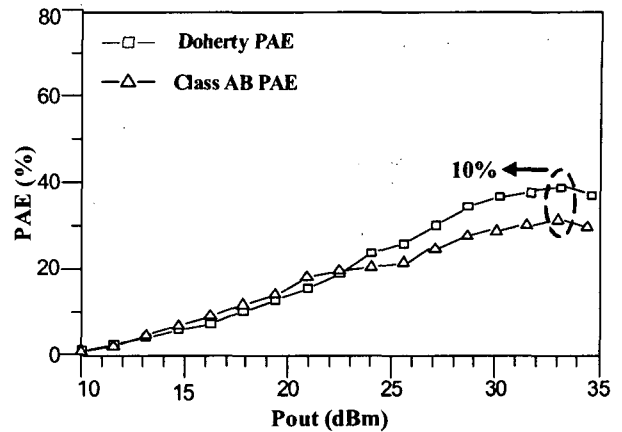


그림 6. 도허티 증폭기 출력 스펙트럼 측정결과

Fig. 6. Output Spectrum measurement result for Doherty amplifier.



(a)



(b)

그림 7. (a)입력전력 대 출력전력 측정 결과 (b)출력전력 대 전력부가효율 측정결과

Fig. 7. (a) Output Power measurement result versus Input Power.(b) Power Added Efficiency measurement result versus Output Power

표 1은 2.3 GHz에서 AB급과 도허티 전력 증폭기의 측정된 출력전력, 전력이득 그리고 PAE의 측정 결과에 대한 비교이다. 표 1에서 알 수 있듯이, 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, 효율에서 10%의 개선됨을 알 수 있다.

표 1. AB급, 도허티 전력증폭기의 측정결과 비교치  
Table 1. Comparison of experimental results for AB class, Doherty amplifier.

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

## 5. 결론

본 논문에서는 2.3GHz 대역의 주파수를 이용해 마이크로 파용 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 도허티 전력 증폭기의 실험결과와 비교하였다. 측정결과, 1-톤 실험에서 22dBm의 입력에서 33dBm의 출력을 나타내었으며, 기존의 일반적인 AB급 전력 증폭기와 비교하여 최대 33dBm의 출력전력과 주파수

18.GHz일 때 3.3% 효율 개선인데 반해, 본 논문에서는 주파수 2.3GHz에서 10%의 효율이 개선된 것을 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

제작한 도허티 전력 증폭기를 마이크로파용 기지국 전력 증폭기에 적절히 사용한다면 기지국 및 중계기 시스템의 효율성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단되며, 아울러 다른 주파수의 전력증폭기에도 적용 가능하리라 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구 중 일부는 한국정보통신기능대학의 지원을 받아 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- [1] Steve C. Cripps, RF Power Amplifier for Wireless Communications, Artech House, 1999.
- [2] F. H. Raab, et al, "Power amplifiers and transmitters for RF and microwave," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol. 50, no.3, pp.814-826, March 2002.
- [3] M. Iwamoto, et al., "An extended Doherty amplifier with high efficiency over a wide power range", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.49, no.12, pp. 2472-2479, Dec. 2001.
- [4] Y. Yang, J. Cha, B. Shin, and B. Kim, "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, September 2000.
- [5] S. Bousnina, and F. M. Ghannouchi, "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, May 2001.
- [6] W. H Doherty, "A new high efficiency power amplifier for modulated waves", Proc. IRE, vol. 24, no. 9, pp. 1163-1182, Sep. 1936.
- [7] F. H. Raab, "Efficiency of Doherty RF power amplifier systems." IEEE transactions on Broadcasting, vol BC-33, no. 3, September 1987.
- [8] Y. Yang, J. Yi, Y. Y. Woo, and B. Kim, "Optimum design for linearity and efficiency of a microwave Doherty amplifier using a new load matching technique." Microwave Journal, pp. 20-36 December 2001.
- [9] J. Staudinger, "Applying switched gain stage concepts to improve efficiency and linearity for mobile CDMA power amplification," Microwave Journal, pp. 152-162, Sep. 2000.
- [10] G. Hanington, "High-Efficiency Power Amplifier Using Dynamic Power-Supply Voltage for CDMA

Applications," IEEE Trans. Microwave Theory Tech vol. 47, pp. 1471-1476, Aug. 1999.