

특 집

고출력 전력 증폭기의 선형화 기술

하성재, 홍의석

광운대학교 전자공학과 초고주파연구실

요 약

기존의 아날로그 통신 방법이 디지털 통신 시스템으로 바뀌면서 신호 전송방법에 많은 변화를 일으키고 있다. 특히 이동통신 기기 중에서 통신 품질과 장비의 효율을 결정하는 고출력 전력증폭기는 기존의 전력증폭기에 비하여 더욱더 많은 기술들이 요구되어지고 있다. 본 고에서는 이러한 고출력 증폭기의 고유한 특성들과 이를 보상할 수 있는 선형화기술들에 관하여 고찰하고 이러한 기술의 동향에 관하여 살펴보았다.

I. 서 론

현재 디지털 이동통신 시스템은 한정된 주파수 대역을 효율적으로 사용하기 위해 CDMA 방식을 사용하고 있다. 디지털 방식에서는 Linear Modulation으로 신호의 선형성을 유지하여 전송을 하여야만 데이터 오류가 발생하지 않으므로 고출력 송신단에 사용되는 높은 효율과 높은 선형성을 가진 고출력 전력증폭기가 요구되어진다. 그러나 현존하는 LDMOS(Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor) FET, MOS(Metal Oxide Semiconductor) FET, Transistor, GaAs(Gallium Arsenide) FET 소자로 높은 효율 및 선형성을 갖는 고출력 증폭기를 제작하기에는 한계가 있다. 이러한 현실적인 문제를 극복하기 위해서 고출력 전력 증폭기의 선

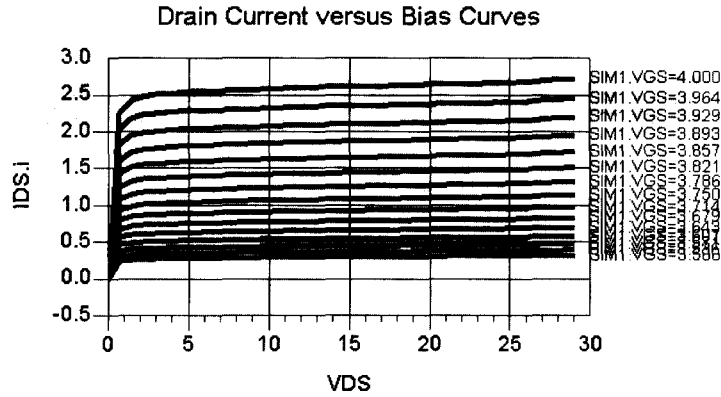
형화 기술이 필요하다.^[1]

본고에서는 현재 이동통신 기기의 RF모듈 중에서 가장 중요한 부품이며 통신기기의 품질과 소비 전력에 큰 영향을 미치는 고출력 전력증폭기의 비선형 특성과 이러한 특성을 개선할 수 있는 선형화 방법 및 동향에 관하여 살펴 보고 고출력 전력증폭기의 설계방법과 측정 기술에 관하여 고찰하여 보았다.

II. 고출력 증폭기의 비선형성

고주파 고출력 전력증폭기에서 신호 왜곡은 전력증폭기의 구성 소자들의 DC적인 비선형성과 전력증폭기의 포화영역에 의한 비선형성에 의해서 생긴다.^[2] <그림 1>은 LDMOS의 DC특성을 보인 것이다. <그림 1>에서 보인 것처럼 게이트 전압의 변화에 따라서 드레인의 전류가 일정한 증가분을 갖지 않는데서 생기는 비선형성이다. 이것은 전달 콘덕턴스 특성이 비선형성임을 의미한다.

포화영역에 의한 비선형성을 갖는 증폭기에 두 개 이상의 신호가 인가되면 IMD(Inter Modulation Distortion)라고 하는 주파수 성분들이 발생되어 왜곡이 생긴다. 예를 들어 식(1)과 같은 신호가 비선형적인 증폭기에 인가되면, 출력신호의 표현은 크기와 주파수의 정보를 나타내는 멱급수와 위상을 추가하여 나타내는 Volterra 급수로 취급할 수 있는데 IMD성분의 생성은 크기와 주파수의 정보만으로 고찰이 가능하다는 사실과



<그림 1> LDMOS의 DC특성

고찰의 편리성을 고려하여 먹급수로 취급하여 나타내면 식 (2)와 같다.^{[3][4]} 그러므로 출력신호는 DC, f_1 , f_2 , $2f_1$, $2f_2$, $3f_1$, $3f_2$, $f_1 \pm f_2$, $2f_1 \pm f_2$, $2f_1 \pm 2f_2$ 의 주파수 성분이 생성된다. 여기에서 $2f_1$, $2f_2$ 를 2차 고조파, $3f_1$, $3f_2$ 를 3차 고조파 그리고 $f_1 \pm f_2$, $2f_1 \pm f_2$, $2f_1 \pm 2f_2$ 를 2차, 3차 IMD라고 한다. <그림 2>는 위의 관계에 대한 입출력 스펙트럼을 나타내고 있는데 이 <그림 2>에서 알 수 있듯이 3차 IMD $2f_1 \pm f_2$, $2f_1 \pm 2f_2$ 는 증폭기의 대역폭 내에서 기본 주파수와 근접해 있기 때문에 출력에서의 왜곡현상에 가장 큰 영향을 주게된다.

$$v_i(t) = A \cos(2\pi f_1 t) + A \cos(2\pi f_2 t) \quad (1)$$

$$v_o(t) = a_1 v_i(t) + a_2 v_i^2(t) + a_3 v_i^3(t) \quad (2)$$

또 다른 신호 왜곡현상은 비선형적인 위상특성에 의해 일어난다. 신호가 왜곡 없이 증폭되기 위해서 전력이득 전달함수의 크기는 주파수의 함수이어야 한다. 그러면 주파수에 대한 위상천이는 신호의 모든 주파수 성분들에 대해 일정한 시간 지연을 일으키게 된다. 그러나 위상천이가 주파수

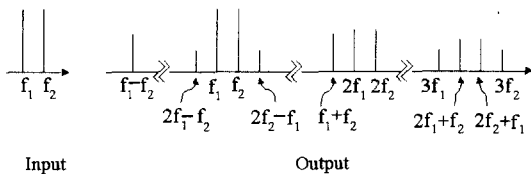
에 대해 비선형 함수가 된다면 신호의 여러 가지 주파수성분들에 대해서 여러 가지 다른 시간지연들을 일으키게 된다. 이것은 결국 출력 위상왜곡을 일으키게 되며 군 지연(Group delay)특성으로 식(3)과 같이 나타낸다.

$$t_d = -\frac{d\phi}{d\omega} \quad (3)$$

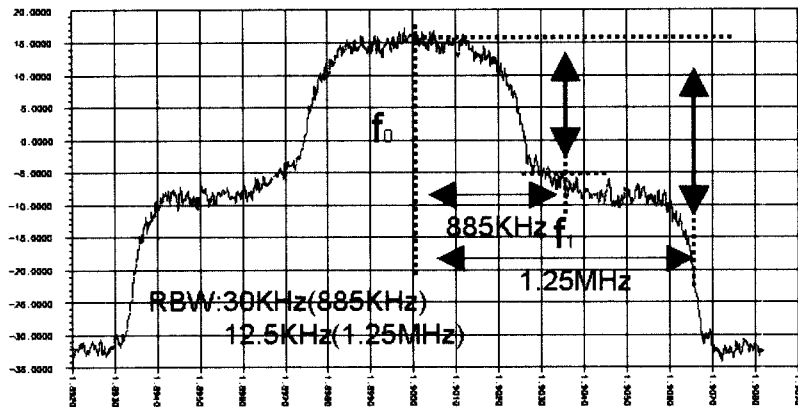
또한 주파수에 대해 비선형적인 위상 특성에 의한 왜곡 외에도 또 다른 형태의 위상왜곡을 가질 수 있다. 즉 AM과 같은 신호들이 전력증폭기를 통해 전달될 때 위상천이는 신호의 순간적인 크기의 함수가 되고, 출력 위상은 약간의 리플을 갖는 평균치로 구성되는데, 이러한 형태의 위상 왜곡을 AM/PM 변환이라고 하고, 입력이 1dB 증가할 때, 출력 위상의 변화로써 정의한다.

일반적으로 고출력 전력증폭기의 선형성을 나타내는 척도로는 IMD₃, ACPR(Adjacent Channel Power Ratio), Spurious emissions, 1dB 억압점, IP₃(Intercept Point)등으로 나타내어진다. 그러나, 채널에 대한 간섭이 중요한 특성인 이동통신 중계기용, 기지국용, 전력증폭기에서는 ACPR과 Spurious emissions, IMD₃ 특성이 주로 사용된다.^[5] <그림 3>은 ACPR의 정의를 나타낸 것이다.

ACPR의 정의는 신호의 채널 전력을 인접 채널 전력으로 나눈 값이므로 측정된 전력비에 보 상값을 취하여야 한다. 여기에서 측정된 값을



<그림 2> 입출력 전력 스펙트럼

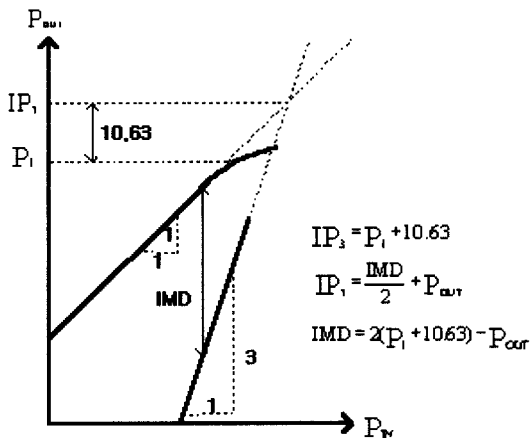


〈그림 3〉 ACPR 정의

ACLR(Adjacent Channel Leakage Ratio) 이라고 한다. 〈그림 4〉는 1dB 억압점, IP_3 의 정의를 나타내었다.

$$ACPR = P(f_0) - P(f_1) + 10 \log \left(\frac{\text{Channel Bandwidth}}{RBW (\text{Spectrum analyzer})} \right)$$

〈그림 4〉에서 나타낸 것처럼 IMD_3 , IP_3 , P_1 이 서로 연관되어 있으며, 어느 한 값을 알면 다른 값도 계산된다는 사실을 알 수 있다. 여기에서 10.63의 수치는 이론적인 값이며 소자의 종류에 따라 약간씩 차이를 갖게 된다.^[6]



〈그림 4〉 IMD 및 IP_3 정의

$$IP_3 = P_1 + 10.63$$

$$IP_1 = \frac{IMD}{2} + P_{cor}$$

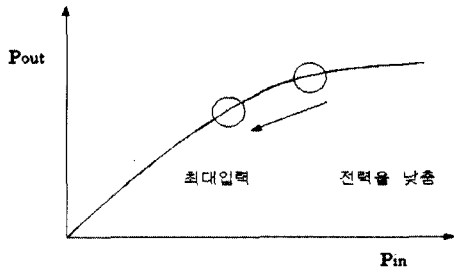
$$IMD = 2(P_1 + 10.63) - P_{cor}$$

III. 고출력 전력증폭기의 선형화 방법

앞서 고찰한 전력증폭기의 비선형성에서 고출력 전력증폭기는 전력소자의 포화전력 부근에서 동작하기 때문에 ACPR과 IMD_3 특성이 악화된다는 사실을 알 수 있다. 이것은 출력하고자 하는 전력이 전력소자의 포화 전력보다 더 낮은 출력 특성을 갖으면 ACPR과 IMD_3 특성이 개선됨을 의미한다. 전력 증폭기의 선형화 방법은 전력증폭기의 포화전력을 출력하고 있는 전력보다 더 높은 전력을 갖도록 하는 것이다. 이러한 방법들은 주파수에 따라서 다양한 형태로 제시되어 왔다. 현재까지 선진 각 국에서 위성 기지국용, 이동통신기지국용, 지상 M/W중계기용 등의 목적으로 개발된 선형화기의 구성형태 중에서 널리 사용되고 있는 것은 크게 Back-off 방식, Pre-distortion 방식, Feed forward 방식으로 나누어 볼 수 있다.

1. Back-off 방식

Back-off 방식은 사용하고자 하는 전력보다 큰 증폭기를 사용하여 입력전력을 낮추어 사용하는 방식이다. 이는 출력하고자 하는 전력이 사용하는 증폭기의 포화전력보다 상당히 낮게 출력하게 하므로 선형성을 개선시키는 방법이다. 〈그림 5〉는 Back-off 방식의 동작 특성을 나타내고 있



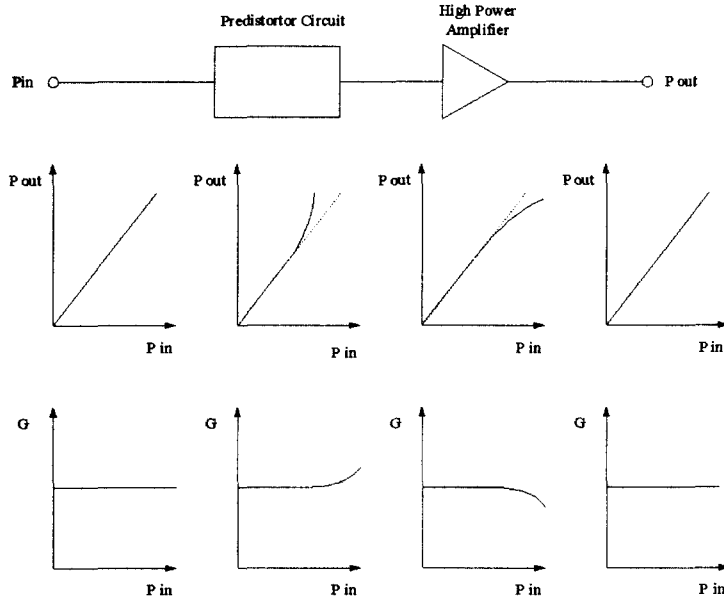
〈그림 5〉 Back-off 방식

다. 이 방식은 전력증폭기의 효율이 떨어져 열이 많이 발생한다는 점과 비용이 증가한다는 단점이 존재한다. Back-off 방식의 선형화 개선도는 전력증폭기의 Class에 의존하므로 설계하고자 하는 증폭기의 출력전력과 현재 존재하는 A급 소자와 AB급 소자의 정보를 고찰한 후에 설계하여야 한다. 본 방식은 전력증폭기의 포화전력에서 약 10dB 이하의 낮은 전력을 출력하도록 CCDF (Complementary Cumulative Distribution Function) 분석을 통하여 권고하고 있다.^{[1][6][7]}

2. Pre-distortion 방식

Pre-distortion 방식은 현재 사용되는 증폭기

용 전력증폭기의 선형성 개선을 위하여 TWTA (Traveling Wave Tube Amplifier)에서부터 현재까지 가장 널리 사용되어 오고 있는 방법이다. 전력증폭기가 포화영역에 들어가게면 이득이 줄어들고 위상이 증가하는 왜곡특성의 반대가 되는 왜곡신호 특성을 갖는 전치왜곡 회로를 미리 고출력 증폭기의 입력 측에 장착하여 주 증폭기의 출력에 의한 왜곡성분을 상쇄시키는 방식이다.^{[1][7]} 즉 다시 말하면 전치 왜곡기를 증폭기 앞단에 달아주어 AM to AM, AM to PM 왜곡을 보상해 준다. 이 방법은 두 개의 서로 다른 왜곡 특성을 지닌 신호원을 정합시켜야 하므로 최종 출력에서 제거될 수 있는 왜곡의 정도에 한계가 있다. 이 방식의 회로는 쇼트키 다이오드 (Schottky Diode)와 FET의 비선형 특성을 이용해 만들어지며 회로 구성 방법으로는 전송형과 반사형의 두 종류로 나뉘어진다. 전송형의 경우는 선형 경로와 비선형 경로로 구성되어 있다. 이 경로의 회로에 따라서 복잡성과 크기가 결정되어진다. 반사형의 경우는 선형과 비선형 구간이 명확하게 구분할 수 없으므로 비교적 간단하게 구성되어진다. 이 방식의 경우에 선형성 개선도는



〈그림 6〉 Pre-distortion 방식의 동작 원리

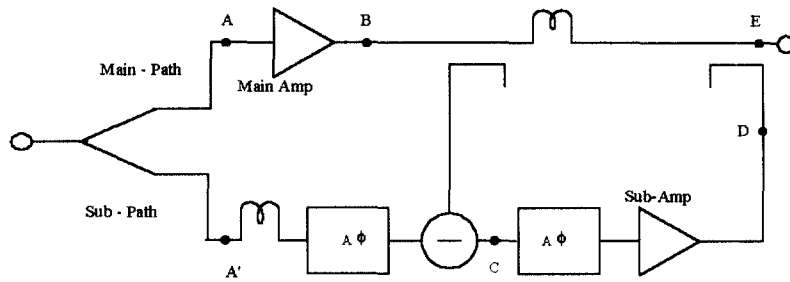
전력증폭기의 Class와 설계되어진 Pre-distortor의 혼 변조 특성에 의존하게 된다. 경험적으로 A Class 전력증폭기의 경우 IMD_3 특성의 20 dB 개선도와, AB Class 경우 13dB의 IMD_3 개선도를 확인하였다. 본 방식을 이용하기 위하여 선형화 전력증폭기를 제작할 경우에는 전력증폭기만의 혼 변조특성이 최적일 필요는 없다. <그림 6>은 Pre-distortion 방식의 동작 원리를 나타내고 있다.

현재 상용되고 제품에 적용할 경우 Pre-distortion 방식의 전력증폭기는 Back-off된 전력증폭기에 Pre-distortor를 장착하게 된다. 이것

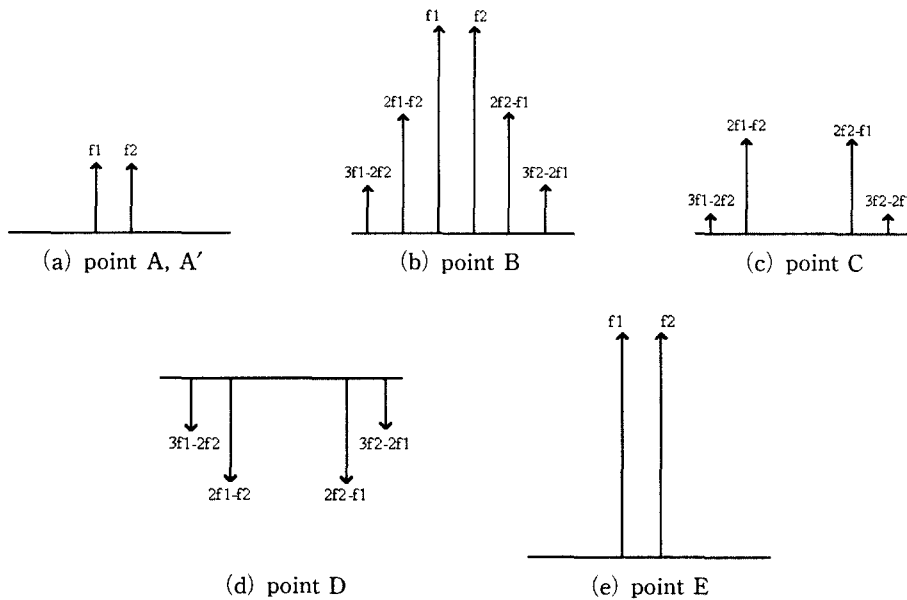
은 Pre-distortion 방식의 선형성 개선의 한계를 극복하고, CCDF 조건을 만족하기 위해서이다. 그러므로 Pre-distortor의 출력이 Back-off된 전력증폭기의 입력 전력과 거의 동일하여야 하며 그 특성은 전력증폭기와 반대의 특성을 갖도록 하여야한다. 이러한 특성 때문에 Pre-distortor의 미세한 출력전력과 위상이 선형화 개선도에 중요한 요인이 된다.

3. Feed forward 방식

Feed forward 방식은 현재 사용되는 기지국용 전력증폭기로 가장 많이 사용되는 전력 증폭



<그림 7> Feed forward 방식의 기본 블록도



<그림 8> Feed forward 동작 원리

기이다. 이 방식은 출력에서 혼 변조 신호성분만을 추출하여 다시 증폭기의 출력에 역으로 결합 시킴으로써 C/I비(Carrier to Inter Modulation Ratio)를 개선시키고자 하는 것이다.^[117] <그림 7>에서 볼 수 있듯이 주 증폭기에 실제 신호의 증폭과는 관계없이 단지 선형화를 시켜주기 위한 오차증폭기가 들어가 복잡하고 비용이 다른 방식보다 많이 소요되는 단점이 있으나 25dB 이상의 우수한 선형성 개선효과를 얻을 수 있다. 일반적으로 LPA(Linear Power Amplifier)라고 하면 Feed forward 방식의 전력증폭기를 지칭하며 또한 4개 이상의 입력신호가 주입될 수 있는 증폭기를 가리키게 된다. <그림 8>은 Feed forward 방식의 동작원리를 나타낸 것이다.

4. 선형화 기술의 동향

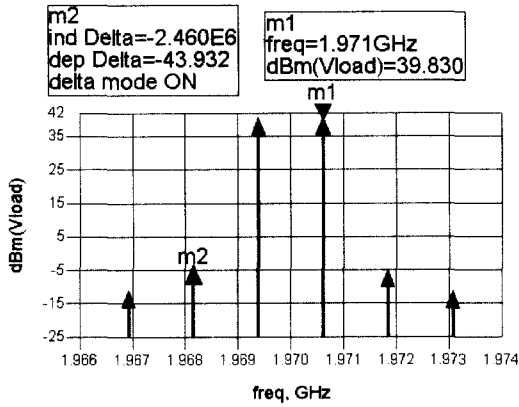
앞서 설명한 선형화 방법은 현재 상용되는 기지국이나 중계기에 적용되는 방법들이다. 이러한 방법들의 문제점을 극복하기 위해서 여러 가지 방법이 제시되어지고 있다. Pre-distortion 방식의 경우에는 Adaptive (Baseband) Pre-distortion 방법이 DSP(Digital Signal Processing)기술의 발전에 힘입어 활발한 연구가 진행되어지고 있다. 그러나 Baseband부터 선형화기술을 적용하므로 이를 구성하는 A/D(Analog to Digital Converter), D/A(Digital to Analog Converter), DSP칩, Memory 등의 전력 소모 문제와 기존의 개루프 형태의 선형화기가 아닌 폐루프를 구성하므로 선형화 대역이 협소하다는 단점이 있다. 또한 복잡한 DSP처리 기술을 요한다는 문제가 존재한다. 이로 인하여 전력증폭기의 연구분야가 RF 분야에서 신호처리 분야까지 확대되어가고 있는 추세이며 Pre-distortor는 ASIC(Application Specific Intergrated Circuit), RFIC(Radio Frequency Intergrated Circuit), MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)분야의 사회적 시장성으로 인하여 IC화되어 일부 주파수 대역에서는 상용화되고 있는 실정이다. Feed forward 방식 또한 Pilot라고 불리는 신호를 주입하여 이 신호의 크

기가 전력증폭기의 출력에 나타나지 않도록 DSP기술을 이용하여 최적화 제어하는 기술이 사용되고 있다.^[117] 향후 선형화 기술은 Adaptive 제어 기술이 접목되어 좀더 지능적인 RF/Microwave 전력증폭기가 될 것으로 기대되어 진다.

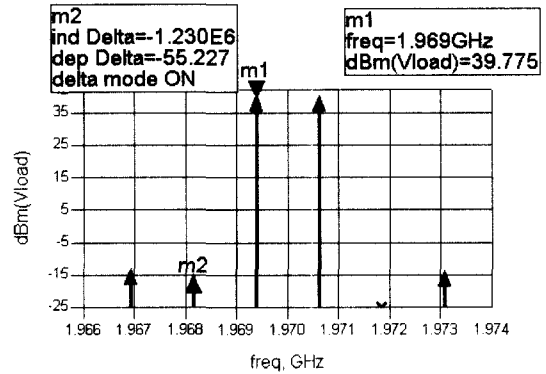
IV. 고출력 전력증폭기의 설계 및 측정 방법

1. 고출력 전력증폭기의 설계 방법

일반적으로 고출력 전력증폭기를 설계할 때는 가장 먼저 증폭기의 Class를 결정하고 사용될 A Class 소자와 AB Class소자를 결정하게 된다. 전력 증폭 증폭기를 설계하는 방법에는 부품회사에서 제공하는 S 파라미터를 이용하는 방법, Data Sheet에서 제공하는 입력 및 출력 임피던스를 이용하여 정합하는 방법, CAD를 이용할 경우에는 소자 비선형 모델을 이용하는 방법 등이 있다. 이러한 방법들은 부품회사에서 제공하는 정보를 이용하여 설계하는 방법들이며 이러한 정보가 없을 경우에는 Load-Line 해석 방법, Source-Load Pull방법 등을 이용하여 원하는 정보를 추출하여 설계하게 된다.^[8] 그러나 일반적으로 S 파라미터를 이용한 설계 방법은 전력증폭기의 비선형성의 특성으로 인하여 정확한 설계가 될 수 없다. Data Sheet에서 제공하는 입력 및 출력 임피던스를 이용한 설계방법은 제공되는 임피던스들이 Source-Load Pull 방법이나 실제 제작하여 추출한 임피던스이기 때문에 널리 사용되고 있는 방법이다. 최근 들어서 CAD Tool의 발전으로 소자의 비선형 모델을 이용하여 설계하는 방법이 사용되어지고 있는데 CAD Tool에서 제공하는 비선형 모델의 정확성에 의존하기 때문에 완전한 예측에는 한계가 있는 것으로 알려져 있다. 그리고 Load-Line 해석 방법은 A Class 증폭기에서 유효한 방법이므로 그 응용에는 제한점이 있으며, 해석된 임피던스가 저항 값만을 나타내고 위상에 관한 정보가 없으므로 정확한 예측



<그림 9> 비선형 모델을 이용한 증폭기설계



<그림 10> 비선형 모델을 이용한 Pre-distortion 방식 설계

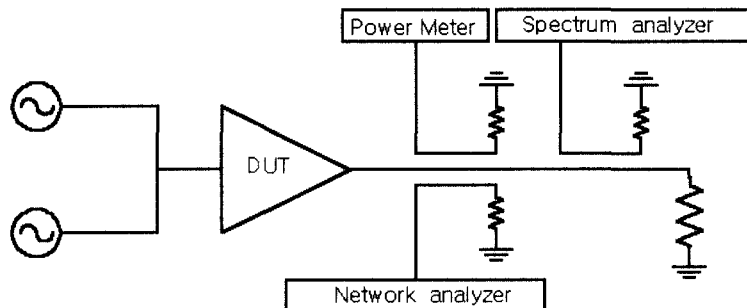
에는 어려움이 있다. 이러한 Load-Line 해석을 발전시킨 방법이 Source-Load Pull 해석 방법이다. 이 방법은 전력소자의 최대 출력특성을 낼 때 입력 및 출력 임피던스를 추출하는 방법으로 실제로 실험에 의해서 추출을 하게되며 널리 사용되고 있는 방법이다. 그러나 고조파의 출력 특성에 관하여 알 수 없는 단점이 있다.

<그림 9>는 CAD Tool에서 제공하는 비선형 모델을 이용하여 전력 증폭기를 설계한 예를 보인 것이며 <그림 10>은 Pre-distortor를 장착한 후 전력증폭기의 IMD 특성을 예측한 결과이다.

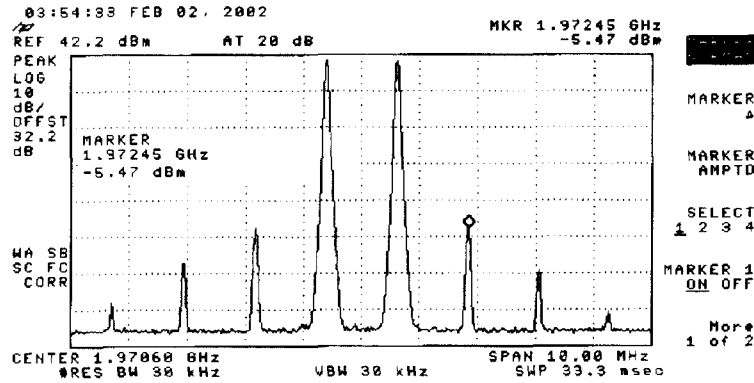
2. 고출력 전력증폭기의 측정 방법

전력 증폭기를 측정하고자 할 경우에는 측정장비의 Calibration이 매우 중요하다. 전력 증폭

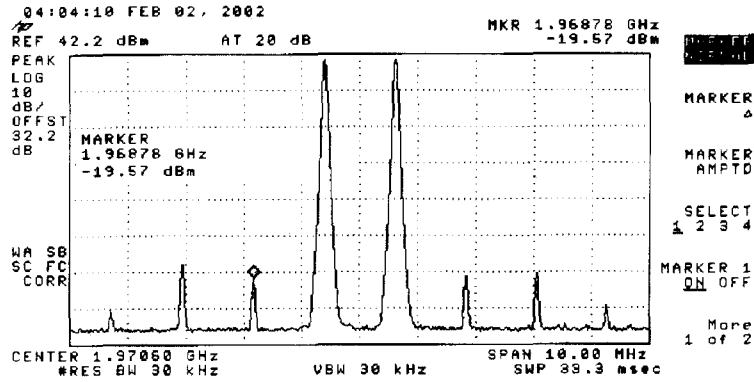
기의 출력전력이 높을수록 출력단의 아주 작은 손실도 큰 고출력 전력 증폭기의 특성에 아주 큰 영향을 주기 때문이다. 또한 고출력 전력 증폭기를 측정할 때 계측기의 최대 입력전력의 범위를 정확하게 파악하여 순간적인 고출력 전력증폭기의 출력에 의한 장비 파손이 없도록 주의하여야 한다. 일반적으로 선형화 증폭기를 제작할 경우에 원하는 출력전력 값보다 10dB 이상 더 출력할 수 있는 증폭기를 제작하기 때문에 실험과정 중에 장비에 무리를 줄 수 있다. 또한 적절한 방열 처리로 전력 소자의 열 폭주 현상을 방지하여야 한다. <그림 11>에서는 일반적으로 사용되어지고 있는 전력증폭기의 측정 구성도이다. <그림 12>는 CAD Tool를 이용하여 설계한 전력증폭기를 측정 결과이며 <그림 13>은 Pre-distortor를 장착한 후 전력증폭기의 측정된 결과이다.



<그림 11> 선형화 전력증폭기 측정 구성도



〈그림 12〉 비선형 모델을 이용한 설계 증폭기 측정



〈그림 13〉 비선형 모델을 이용한 Pre-distortion 방식 측정

V. 결 론

지금까지 전력증폭기의 비선형 왜곡 특성 및 선형화 방법들과 전력 증폭기의 설계 및 측정 방법들에 대해서 고찰하였다. 통신기기의 품질과 소비 전력에 큰 영향을 미치는 전력증폭기는 높은 효율 및 선형성을 갖는 것이 중요하다.

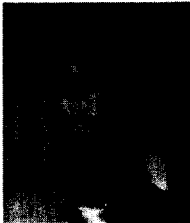
현재 국내 증계기 및 기지국의 전력증폭기는 아직 외국기업의 제품 의존도가 크다 하겠다. 또한 최근 중국의 이동통신 설비로 인하여 전력 증폭기의 시장은 날로 확대되어 가고 있는 실정이다. 이러한 사회적인 요구에 맞추어서 전력증폭기 및 선형화기술에 대한 연구는 필수적으로 진행되어야 한다.

참 고 문 헌

- [1] N. Potheary. "Feedforward Linear Power Amplifiers," Artech House Microwave Library, 1999.
- [2] S. Mass, "Nonlinear Microwave Circuits, Artech House, 1988.
- [3] G. Gonzalez, "Microwave Transistor Amplifier Analysis and Design," Prentice Hall, 1984.
- [4] L. Walker, "High-Power GaAs FET Amplifier," Artech House, 1993.
- [5] 한국 휴렛팩커드 "W-CDMA 솔루션 워크샵(설계, 제조솔루션)."
- [6] Tri T. Ha, "Solid-state Microwave Am-

- plifier Design,*" John Willey Interscience Publication, 1981.
- [7] B. Kenington, "High-linearity RF Amplifier Design," Artech House Microwave Library, 2000.
- [8] Steve C. Cripps, "RF Power Amplifiers for Wireless Communications Design," Artech House Microwave Library, 1999.

저자 소개



河成淬

1999년 2월 광운대학교 제어계측 공학과 학사, 2001년 2월 광운대학교 전파공학과 석사, 2002년 3월 현재 광운대학교 전파공학과 박사 과정, <주관심 분야: 선형화 전력 증폭기 및 RF/Micro-

wave 회로 설계>



洪義錫

1968년 2월 광운대학교 전자통신 공학과 학사, 1973년 9월 연세대학교 전자 공학과 석사, 1982년 12월 독일 Aachen 공대 전기 공학과 박사, 1986년 2월~1987년 2월: 미국 Univ. of Texas (Austin) 객원교수, 2001년 1월~2001년 12월: 한국 통신학회 회장, 2002년 3월 현재: 광운대학교 전자공학부 교수, <주관심 분야: RF/Microwave 회로 설계 및 MMIC 설계>