

능동 집적 안테나에 관한 연구

이 병 무⁰, 윤 영 중
연세대학교 전기전자공학과

A Study on the Active Integrated Antenna

Byoung Moo Lee⁰, Young Joong Yoon

Microwave & Antenna Lab., Dept. of Electrical & Electronic Eng., Yonsei Univ.

E-mail : binny@mwant.yonsei.ac.kr

ABSTRACT

본 논문에서는 전력증폭기를 슬롯이 적재된 삼각형 마이크로스트립 패치 안테나와 동일 평면의 기판에 집적화하여 전력증폭기 출력단의 제 3 고조파 튜닝을 안테나가 수행함으로써 전력효율을 향상시키는 효과에 대해 고찰하였다. 또한 실제 집적화에 따른 송·수신 신호의 분리 문제를 위해 이중공진 특성을 이용한 inset 마이크로스트립 급전과 coax 급전의 이중급전 방식을 사용하였고, 이에 따라 두 ports 사이에 높은 격리 특성을 갖도록 능동 집적 안테나를 설계하였다. 선형성을 증대시키기 위해 제 3 고조파 튜닝 효과를 갖도록 안테나에 슬롯을 적재시켜 제 3 고조파에서 방사를 억제 구조를 갖게 함으로써 고조파 튜닝회로를 축소시킨 능동 집적 안테나를 설계, 제작하여 측정된 결과, B급 전력증폭기와 안테나를 각각 제작하여 결합한 형태보다 약 5%의 전력효율 개선 효과를 얻을 수 있었다. 그리고 능동 집적 안테나의 큰 문제점이었던 송·수신 분리에 대하여서도, IMT-2000 주파수 대역의 수신 port에서 송신 주파수의 신호를 -35dB 이하로 격리시키는 특성을 나타냄을 관찰할 수 있었다.

I. 서 론

고도의 정보화 사회로의 발전으로 인해 현재 세 3세대 이동통신 IMT-2000 서비스는 표준화를 위한 작업이 계속적으로 진행되고 있고, 제품의 개발을 연구하는 추세에서 이를 뒷받침하는 RF 핵심소자의 원천 기술 확보는 반드시 필요하다. 이러한 RF 핵심 소자 중에서 통신 품질에 직접적으로 영향을 미치는 것이 전력증폭기와 안테나이다. 송신부의 전력증폭기는 낮은 동작전압과 작은 크기, 선형성, 그리고 저비용 등의 시스템 요구사항을 만족시켜야 하며, 특히 효율을 높임으로써 전력 소모를 줄여야 한다^[1]. 그리고 무선통신 시스템에서 또다른 중요 분야인 안테나는 전력증폭기와 별도로 설계되어 서로 연결하는 것으로 인식되어왔다. 이는 증폭기의 출력 튜닝회로를 구성해야 하는 부담을 갖게 되고, 안테나 사이에 필터 등의 상호 연결회로를 추가하게 됨으로 비용적, 성능적인 면에서 상당히 비효율적이었다. 따라서 전력증폭기와 안테나를 결합시켜 저비용과 성능개선 효과

를 이루는 연구가 이루어진다면 여러 측면에서 바람직하다고 할 수 있다.

일반적으로 전력증폭기의 성능향상을 위한 전력첨가효율(Power Added Efficiency, PAE)을 증가시킬 수 있는 방법으로 많이 사용되는 기법중의 하나는 1967년 Snider에 의해 제안된 증폭기의 동작점을 B급으로 정하고 고조파 주파수들에 대한 전력증폭기의 출력 회로를 튜닝하여 출력단자에 인가되는 전압, 전류 파형을 최적화하는 방식이다^[2]. 최근에는 이러한 방법을 적용하여 튜닝회로를 마이크로스트립 안테나로 대체하는 연구가 진행되고 있는데, 대표적으로 원형 마이크로스트립 안테나에 120°의 섹터를 추가하여 제 3고조파를 억압하는 연구와 구형 마이크로스트립 안테나의 E-평면의 중심을 따라 단락 핀(shorting pin)을 삽입하여 제 2고조파를 억압하는 연구가 수행되었다^{[3][4]}.

본 논문에서는 IMT-2000 시스템에 응용할 수 있는 송수신 겸용 삼각형 마이크로스트립 안테나를 슬

못을 적재하여 제 3 고조파 억압구조를 갖도록 설계하고, 전력증폭기의 출력단 튜닝회로로 연결된 하나의 집적된 단일소자로 구성하여 IMT-2000 시스템의 상하향(Up & Down-link) 주파수에서 동작하는 삼각형 슬롯 적재 마이크로스트립 안테나를 연구하고자 한다. 또한 그림 1에서 보이는 바와 같이, 안테나의 급전방식으로 이중급전을 사용함으로써 송수신 분리 장치인 듀플렉서 사용을 제한하여 비용성, 효율성에서 장점을 가질 수 있도록, 소출력 BJT 증폭소자를 이용한 능동 집적 안테나(Active Integrated Antenna, AIA)로 구현하여 실험, 제작하며 그 결과를 고찰하고자 한다.

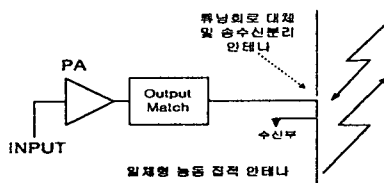


그림 1. 전력증폭기와 안테나의 일체형 능동 집적 안테나

II. 전력증폭기 설계

구동증폭기와 전력증폭기는 각각 HP사의 HBBP-0450과 AT-31625로 선정하였으며, 유전율(ϵ_r)=2.5, h=0.508mm, t=0.017, loss tangent 0.0019인 TACONIC사의 TLX9-0200 기판을 사용하였다. 이것의 전송구조는 마이크로스트립 선로이며 구동증폭소자는 6GHz 대역에 까지 성능을 보장하는 고성능 제품으로, 2GHz 대역에서 약 18dBm의 출력을 나타낼 수 있으므로 전력증폭기의 입력 레벨을 맞출 수 있고, 전력소자는 1.9GHz대역에서 5dB 내외의 전력이득과 25dBm의 출력전력을 갖는 저렴한 제품이다.

전력증폭기는 전력정합을 이루기 위해 증폭소자의 최적 임피던스를 구현해야 하며, 이것은 크게 임, 출력튜너(tuner)를 이용하여 측정에 의존하는 load/source pull 방법을 사용한다. 이 방법은 소자의 대 신호 등가회로를 알 필요가 없고 실제 전력증폭기에서 처리할 신호원을 직접 인가할 수 있으며, 측정용 구조물(jig)의 환경을 부품 실장 환경과 동일하게 구성하여 측정할 수 있어서 실제적으로 다른 설계 방법에 비해 많이 이용된다. 본 논문에서는 축소된 구성을 갖는 수동 측정장비로 입출력 튜닝을 통하여 최적의 임피던스를 구현하였다.

피 측정장치(D.U.T, Device Under Test)의 입력과 출력에 연결한 가변 커패시터로 구성된 튜너를 수동으로 조작하여, 신호발생기로 CW입력을 인가하고 주파수 분석기로부터 동작주파수 2.15GHz에서 18dBm의 입력으로 22.1dBm의 전력을 출력하는 임

피던스 점을 구현하였다. DC 바이어스의 조건은 $V_{CC}=4.8V$, $I_{C_{EQ}}=15mA$ 로 동작점을 두어 실제 능동 집적 안테나(Active Integrated Antenna, AIA)에서와 동일하게 B급으로 선정하였다. 이것은 사용된 BJT의 최대전류가 320mA임을 감안하면 약 4.7%로 거의 B급으로 가정할 수 있다. 표 1에서 최적 입출력 임피던스 및 전기적 특성을 요약하였다.

표 1 입출력 임피던스 및 전기적 특성

측정 항목	측정 결과
최적 임피던스	Γ_{s_opt} 0.578 \angle -121°
	Γ_{L_opt} 0.496 \angle 183°
이득	4.1dB
전력첨가효율(PAE)	28.6% (72mA)

구동증폭기의 출력단을 전력증폭기의 입력단에 연결되므로 입력전력 5dBm에 의해 출력전력이 18dBm이 되도록 설계하여야 한다(PAE=40%). 바이어스는 $V_{CC}=3V$, $I_{C_{EQ}}=50mA$ 로 선정하였으며 입력단에 직렬 안정화 저항 4.7Ω을 추가하였다. 이는 입력 전력에서 약간의 손실과 이득의 감소를 가져오지만, 안정영역 동작을 위해 추가된 저항이다.

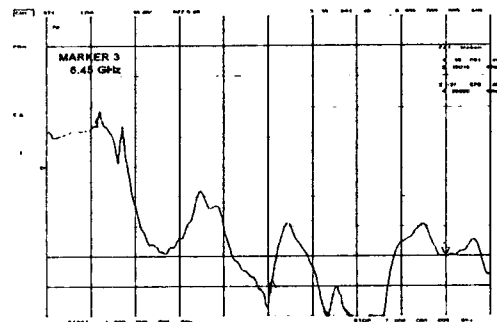


그림 2. 구동증폭기와 전력증폭기의 결합 이득

전력소자로 사용된 AT-31625의 최대 출력전력 임피던스(23dBm)는 22.1dBm의 출력전력을 갖는 임피던스에서보다 전류의 소모가 크기 때문에 적절한 임피던스인 $\Gamma_{s_opt}=0.578 \angle -121^\circ$, $\Gamma_{L_opt}=0.496 \angle 183^\circ$ 으로 정합회로를 구현하였으며 칩(chip) 부품은 (주)삼성정기의 1608 type의 저항과 커패시터를 사용하였다. 또 제 2고조파 성분의 제거를 위해 바이어스 회로의 RFC를 기본 주파수에서 $\lambda/4$ 길이의 마이크로스트립 라인과 바이패스(bypass) 커패시터를 조정하여 설계하였다. 안정도는 $K \approx 1$ 로서 발진 문제를 해결하였다. 그림 2는 구동증폭기와 전력증폭기의 결합 이득 특성을 측정한 결과이다.

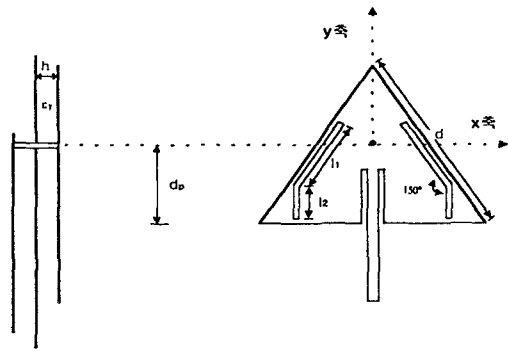


그림 3. 슬롯 적재 삼각형 패치 안테나의 입체도

III. 이중공진 능동 집적 안테나 구조

1. 삼각형 패치 이중공진 안테나

최근 구형 마이크로스트립 안테나를 이용한 이중공진 특성에 관한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 이러한 이중공진 구형 마이크로스트립 안테나는 대부분 높은 격리 특성을 얻기 위해 이중편파 기법이 적용되기도 한다. 두 주파수에서 공진이 일어나므로 이중공진 안테나는 하나의 방사체로 두 주파수에서 사용이 가능하다. 따라서 안테나의 효율적인 사용이 가능하다.

본 연구에서는 삼각형 공진기를 이용한 공동 모델의 구조를 갖는 패치에 폭이 좁은 슬롯(slot)을 추가함으로써 공진 모드의 변화를 조작하는 기법을 이용하였다. 그림 3에서 살펴보면, 슬롯을 정삼각형의 대칭 구조로 배열하여 기본 공진주파수 f_1 에 설정된 길이 d 를 갖는 빗면을 따라 슬롯을 첨가한 형태로, 슬롯 1과 슬롯 2는 굵어진 구조를 갖고 있으며 패치에 여기된 TM_{10} 모드의 표면 전류 경로는 일반적으로 슬롯의 방향과 평행하기 때문에 기본 공진주파수 f_1 에 큰 영향을 미치지 않는다. 따라서 매우 미약하게 낮은 쪽으로 주파수 천이가 일어난다. 반대 방향으로 굵어진 슬롯은 여기된 TM_{20} 모드의 표면 전류를 강하게 방해함으로써 공진주파수 f_2 는 명확하게 낮은 쪽 주파수 대역으로 천이하게 되며 기본 공진주파수 f_1 에 가깝게 f_2 를 발생시킬 수도 있다. 이러한 이론을 바탕으로 IMT-2000 시스템 상향 주파수(Up-link)인 1.92~1.98GHz와 하향 주파수(Down-link)인 2.11~2.17GHz 대역중에서 이중공진을 발생시킬 수 있다.

그림 3에서 삼각형 패치의 공진주파수와 빗면의 길이 d 는 식 (1), (2)를 이용하여서 구할 수 있는데, f_1 의 주파수 2GHz의 공진길이를 설정하였다. 주파수의 미약한 천이로 약간의 여유를 두고 공진주파수를 정하였다.

$$f_r = \frac{ck_{mn}}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{2c}{3d\sqrt{\epsilon_r}}(m^2 + mn + n^2)^{1/2} \quad (1)$$

여기서 mn 은 TM_{mn} 모드의 모드 번호이고, 빗면의 길이 d 는 유효값으로 계산할 수 있다.

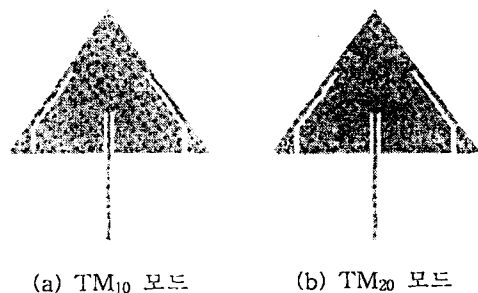
$$d_e = d + h(\epsilon_r)^{1/2} \quad (2)$$

2. 능동 집적 안테나

F급 동작 전력증폭기는 2장에서 살펴본 바와 같이 B급의 동작점에서 출력단에 고조파들에 대한 튜닝회로를 추가하여 고조파출력을 억제하고 구형파 형태로 출력파형을 구성하며 선형성을 개선한다. 하지만 실제 회로 구현에 있어서는 높은 고조파에 대해 모두 튜닝하기가 불가능하므로 상대적으로 전력의 크기가 큰 제 2고조파 내지는 제 3고조파까지만 튜닝을 한다. 안테나는 원하는 주파수에서 공진이 일어나며 입력 임피던스를 갖는다. 따라서 안테나 기본 공진주파수에서는 임피던스를 갖고, 제 2, 3고조파에서는 임피던스의 실수성분이 0이면 고조파 출력은 억제된다^{[3][4]}.

이중공진 구조를 갖는 슬롯 적재 삼각형 패치 안테나는 고조파의 공진모드를 천이시킴으로써 이중공진을 갖도록 설계한 것이다. 이는 공진모드의 패치상 표면 전류로 알 수 있는데, 그림 4에서는 Ansoft사의 Ensemble로 시뮬레이션을 수행한, 고조파 억압 및 이중공진을 위한 슬롯이 추가된 형태의 삼각형 패치의 전류분포를 도시하였다. 슬롯이 추가된 안테나에서 TM_{20} 모드는 TM_{10} 모드의 전류분포 형태와 비슷하게 변화된 것도 발견할 수 있다. 따라서 TM_{20} 모드의 공진주파수는 TM_{10} 모드의 공진주파수에 인접한 주파수 대역으로 이동하게 된다.

슬롯을 추가한 삼각형 마이크로스트립 패치 안테나는 이중공진의 특성을 만족시켜주며 동시에 고조파성분들에 대한 연속적인 천이를 가져오기 때문에 고조파의 실수 임피던스성분도 0에 가깝게 설계할 수 있다. 따라서 B급 전력증폭기의 출력파는 안테나에서 고조파 튜닝을 이루어 기본 주파수에서만 공진, 방사가 이루어진다.



(a) TM_{10} 모드 (b) TM_{20} 모드

그림 4. 이중공진 모드에 대한 전류 분포

이중공진 안테나의 공진주파수는 슬롯의 폭과 길이, 그리고 마이크로스트립선로 급전 부분의 inset의 영향을

받는다. 따라서 본 논문에서는 식 (1)과 (2)를 기준으로 trial and error 방식으로 반복수행의 과정을 통하여 사양을 설정하였다. 기판은 전력증폭기와 동일한 TLX9-0200 기판을 사용하였고 안테나의 설계 사양은 표 2와 같다.

표 2 삼각형 패치 안테나의 설계 사양

구분	분류	길이(mm)
패치	빗면(d)	62.124362
슬롯	폭(수직성분)	1
	폭(굽은 부분)	0.866025
	빗면과의 간격	1.732057
	길이(수직성분, l ₂)	9
	길이(굽은 부분, l ₁)	28.9
Inset	폭	0.605
	길이	19.4
수신 급전점	밀변으로부터의 동축 급전점	34
50Ω line	50Ω 폭	1.417

IV. 실험 및 고찰

그림 5의 lay-out에서 보인, 제작된 능동 집적 안테나는 회로망 분석기로는 측정이 불가능하다. 따라서 그림 6에서와 같이 입력은 CW 신호발생기를 사용하고 far-field 영역을 만족하는 거리 3m에서 주파수 분석기에 연결된 2.27dBi 다이폴 안테나로 수신하였다. 이때 측정된 data를 주파수 분석기에서 확인할 수 있었고 Friis 전달공식으로 출력전력을 계산하기 위해 아래의 식 (3)에 대입하였다.

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \quad (3)$$

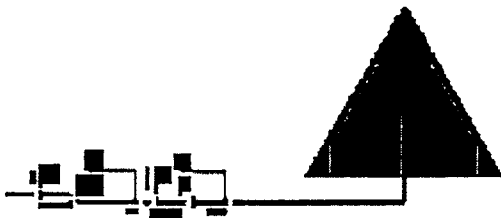


그림 4. 이중공진 모드에 대한 전류 분포

식 (3)에 의해서, 출력전력은 22.4dBm으로 계산되었는데, 이때 전력소자는 68mA의 전류를 소모하였다. 따라서 약 33.9%의 PAE를 유추할 수 있는데, 이것은 전력증폭기 실험보다도 5%이상의 전력 효율 향상 효과를 이루었음을 나타낸다. 또한 제 2고조파의 출력은 -39dBc, 제 3고조파의 출력은 -37dBc으로

계산되었으며, 이는 양호한 선형성을 나타낸 수치로 판단된다.

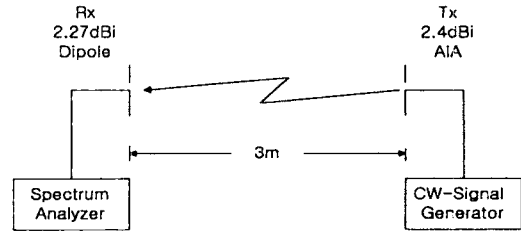


그림 6. 능동 집적 안테나 측정 시스템 구성도

이러한 능동 집적 안테나에 수신부에 대한 격리 특성을 살펴보기 위해 삼각형 패치 안테나의 이중공진 ports에 대해서 그 특성을 고찰하였다. 그림 7에서 보인 측정결과와 같이, 상하향 주파수가 각각 1.96GHz와 2.1557GHz로 약간씩 천이하는 특성을 나타낸다. 이때의 반사계수는 각각 -26dB와 -30dB로 시뮬레이션과 큰 차이 없이 -25dB이하로 측정되었다. 또한 1.96GHz에서 S₁₂는 -38dB로 우수한 격리 특성을 보였다.

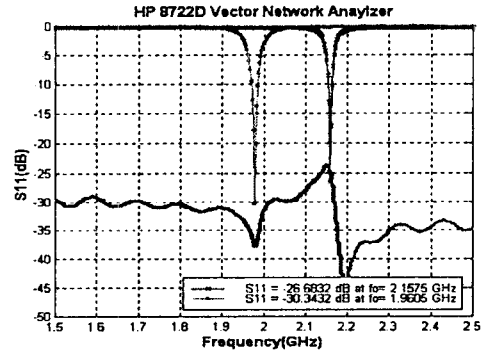


그림 7. 이중공진 공진주파수와 격리도

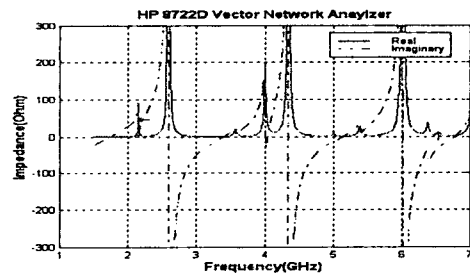


그림 8. f₁과 고조파의 입력 임피던스

그림 8은 표 2에 정리된 설계 사양으로 공진주파수와 제 2, 3고조파의 임피던스 실수 성분을 측정한

값이다. 기본 송신주파수 2.15GHz에서 정규화된 1.15 값을 가짐으로써 전력증폭기와 임피던스 정합을 통하여 방사를 예측할 수 있다. 그리고 제 3고조파에서는 0.098로 거의 0에 가까운 정규화된 실수값을 나타내는데 이것은 전력증폭기의 $\lambda/4$ RFC와 함께 고조파 튜닝의 효과를 나타낼 수 있음을 보여주고 있다.

그림 9의 (a), (b)는 제작된 안테나의 동축선로 급전부, 즉 IMT-2000 시스템의 상향 주파수인 1.965GHz로 동작할 경우의 안테나 방사패턴을 보이고 있다. 동일편파와 교차편파를 한 평면에 도시하였는데, E-평면에서는 -50° 이하에서만 교차편파가 -10dB 내외의 특성을 나타내고 있고 나머지 범위에서는 -15dB 이하의 양호한 특성을 나타낸다. 또한 H-평면의 방사패턴은 모든 범위에서 교차편파 특성이 -18dB 이하로 측정되었다.

또한 그림 9의 (c), (d)는 안테나의 마이크로스트립선로 급전부, 즉 IMT-2000 시스템의 하향 주파수인 2.158GHz로 동작할 경우의 안테나 방사패턴을 보이고 있다. 동축선로 급전부와 동일하게 동일편파와 교차편파를 한 평면에 도시하였는데, E-평면에서는 교차편파가 -10dB 이하의 특성을 나타내고 있으며, H-평면의 방사패턴은 모든 범위에서 교차편파가 -18dB 이하로 측정되었다.

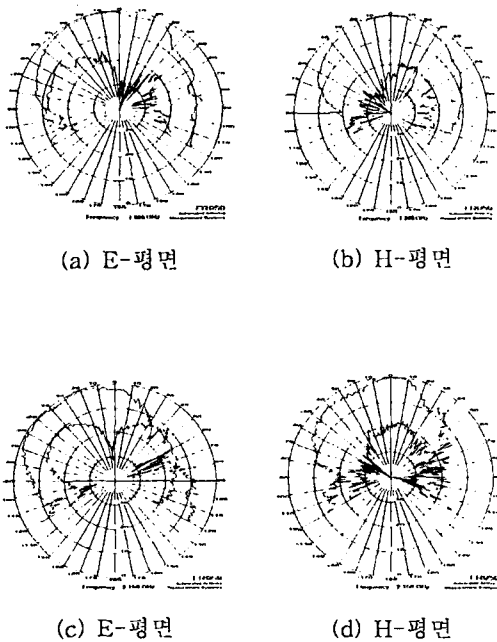


그림 9. 제안된 안테나의 측정된 E-, H-평면 방사패턴[(a),(b) : $f=1.965\text{GHz}$, (c),(d) : $f=2.158\text{GHz}$]

V. 결 론

본 논문에서는 저가의 IMT-2000 RF 시스템은

제안하기 위해서 송신부에서 전력증폭기의 출력단 튜닝회로를 안테나로 대체하여 구현하였는데, 이는 기존의 전력증폭기와 안테나를 분리하여 연구하던 방식에서 탈피하여 하나의 집적된 소자로 연구할 수 행한 것이다. 또한 송수신 겸용을 위한 안테나 소자를 연구하기 위해서 삼각형 마이크로스트립 패치 안테나의 광진특성과 방사특성을 살펴보고, 송수신 신호의 분리를 via-hole 동축선로 급전과 inset 마이크로스트립선로 급전을 통해 이중급전 방식을 연구하여 그 특성을 고찰하였다.

제안된 능동 집적 안테나는 Friss 전달 공식을 이용하여 22.4dBm 의 출력전력을 얻을 수 있었으며, RFC를 기본 주파수에서 $\lambda/4$ 길이의 마이크로스트립 라인과 바이패스(bypass) 커패시터 조정과 안테나의 슬롯에 의한 고조파 튜닝효과로, 각각 제작하여 결합한 형태보다 약 5%이상의 PAE 증가 효과와 제 2고조파의 출력은 -39dBc , 제 3고조파의 출력은 -37dBc 으로 비교적 양호한 선형성을 확보하였다. 또한 수신 port에서 송신신호에 대해 -35dB 이하의 높은 격리 특성을 얻을 수 있었다.

본 논문에서 제안된 방식으로 RF 시스템은 저렴하고 크기를 축소할 수 있으며, 효율을 증대시킬 수 있다. 따라서 앞으로는 대역폭의 확장과 수신부의 집적화를 통해 실제적으로 사용될 수 있는 능동 집적 안테나의 연구로 발전시키는 것이 필요할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 김범만, 노태문, 김영식, 허득현, 한기천, "이동통신용 전력증폭기의 설계이론 및 개발현황," 전자공학회지, 대한전자공학회, Vol.24, No.1, pp.21-37, 1997.
- [2] Steve C. Cripps, *RF Power Amplifier for Wireless Communications*, Artech House, INC., 1999.
- [3] Vesna Radisic, Yongxi Qian, and Tatsuo Itoh, "Class F Power Amplifier Integrated with Circular Sector Microstrip Antenna," *IEEE MTT-S Digest*, pp.687-690, 1997.
- [4] Vesna Radisic, Siou Teck Chew, Yongxi Qian, and Tatsuo Itoh, "High-Efficiency Power Amplifier Integrated with Antenna," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, Vol.7, No.2, pp.39-41, Feb. 1997.
- [5] Horng-Dean Chen and Shyh-Tirmg Fang, "Novel Designs of Broadband Equilateral Triangular Microstrip Antennas," *IEEE AP-S*, pp.1248-1251, 1999.