

전기적으로 소형화된 안테나 설계

박익모 · 추호성*

· 조치현*

아주대학교 전자공학부,
*홍익대학교
전자전기공학부

I. 서 론

최근 급속도로 진화하는 무선통신은 기존의 라디오, TV, 군사 시스템 등의 용도를 넘어 개인 휴대 단말 시스템, 무선 인터넷, Radio Frequency Identification(RFID), Digital Media Broadcasting(DMB), Ultra Wideband(UWB) 통신 등 그 용도가 매우 다양해지며 우리의 일상 생활과 더욱 밀접해지고 있다. 이러한 무선 통신 시스템들은 집적회로 기술의 발달을 기반으로 점차 소형화되고 있으며, 이들 시스템에 장착하기 위한 소형 안테나가 절실히 요구된다.

소형 안테나는 일반적으로 전기적인 크기가 $kr < 1.0$ 이하를 말하며, 이때 k 는 안테나 동작 주파수의 파수(wave number)를 r 은 안테나를 포함하는 가장 작은 구의 반지름을 의미한다. 지금까지 소형 안테나에 대한 많은 연구가 진행되었으며^{[1]-[8]} 다양한 형태의 안테나 개발이 시도되었다. Goubau^[9]와 Friedman^[10]이 제안한 multi-element disk loaded monopole 안테나는 $kr=1.0$ 의 크기를 가지며 VSWR < 2 대역폭은 62 %, half power 대역폭(VSWR < 5.8)은 82 %로 광대역 특성을 보였다. 또한 Foltz의 disk-loaded monopole^[11]은 안테나의 크기를 $kr=0.63$ 까지 소형화하였고, 안테나의 대역폭(VSWR < 5.8)은 22 %로 안테나가 작은 전기적 크기임에도 광대역 특성을 유지하였으며, Dobbins의 folded conical helix^[12]는 $kr=0.70$ 에서 안테나 대역폭(VSWR < 5.8)을 29 %까지 증가시켰다.

이러한 전기적으로 소형화된 안테나는 그 크기(kr)를 소형화할수록 안테나의 입력 저항이 급격히 줄어들고 매우 리액티브 하게 되므로 다른 RF 시스템과의 정합을 어렵게 한다. 또한 복사되는 에너지보다 안테나 주변에 저장되는 에너지가 커져 안테나의 Q 가 높아지며 이로 인하여 대역폭과 복사효율도 감소하게 된다. 안테나의 복사 패턴은 무지향성에 가까워지며 안테나의 이득도 낮아지게 된다. Chu 등이 제시한 소형 안테나의 이론적 한계에 따르면 소형 안테나의 Q 는 주어진 물리적 공간을 얼마나 효율적으로 사용하였는가에 따라 결정되며, 성능이 우수한 소형 안테나의 설계를 위해서는 Q 를 낮추어 안테나의 대역폭과 복사효율 등의 성능을 좋게 하여야 한다^{[11]-[18]}.

본 논문에서는 안테나의 Q 를 중심으로 연구된 소형 안테나의 이론적 한계에 대하여 다시 정리함으로써 설계된 안테나의 성능을 비교·검토할 수 있도록 하였으며, 실제로 다양한 무선 통신에 활용될 수 있는 소형 전자기 결합 디스크 로디드 모노폴 안테나와 UHF 대역의 RFID 태그 안테나에 사용될 수 있는 소형 유도 결합 안테나에 대하여 살펴보았다. 디스크 로디드 모노폴 안테나는 $kr=0.563$ 의 크기를 가지며 30.2 %의 대역폭(VSWR < 5.8)과 약 95 %의 복사 효율 능력을 보였고, 소형 태그 안테나는 $kr=0.43$ 의 크기를 가지며 1.97 %의 대역폭(VSWR < 5.8)과 약 55 %의 복사 효율 능력을 보였다.

II. 소형 안테나의 대역폭 한계

안테나의 Q 는 일반적으로 다음 식 (1)과 같이 정의된다.

$$Q = \begin{cases} \frac{2\omega W'_e}{P_{rad}}, & (W'_e > W'_m) \\ \frac{2\omega W'_m}{P_{rad}}, & (W'_m > W'_e) \end{cases} \quad (1)$$

W'_e 와 W'_m 은 각각 복사되지 못하고 안테나의 주변에 저장되는 시 평균 전기 에너지(time average electric energy)와 시 평균 자계 에너지(time average magnetic energy)를 의미하며, P_{rad} 는 복사 전력(radiated power)을 말한다. 위의 정의는 회로이론에 기초를 두고 있으며, 리액티브 소자에 의한 손실이 없다는 가정을 포함하고 있다.

소형 안테나의 이론적 한계에 대한 최초의 본격적인 연구는 Chu^[2]에 의해 진행되었다. Chu는 선형 다이폴 안테나가 포함되는 가상의 구를 설정한 후, 다이폴 안테나에 의해서 복사되는 모든 TM 모드의 구형 진행파를 수식으로 정리하였다. 정리된 수식을 이용하여 안테나의 입력 임피던스를 계산하고, 이를 n 차 등가회로로 구성하여 안테나의 전기적 크기에 따른 Q 를 도출하였다. 그의 연구 결과에 따르면 안테나의 물리적 크기가 파장에 비해 작아질수록 Q 값이 증가하게 되어 복사되는 에너지보다 안테나 주변에 저장되는 에너지가 증가되어 복사체로서 실용성을 잃게 된다. 이후 Collin^[4]과 Fante^[5]는 안테나 주변에 저장되는 에너지로부터 보다 정확한 Q 를 계산하였다. 본 논문에서는 참고문헌 [7]의 McLean에 의해 다시 유도된 소형 안테나의 Q 계산법을 요약하였다. McLean은 안테나의 복사 에너지와 복사되지 못하고 안테나 주변에 저장되는 에너지를 구분하기 위하여 다음과 같은 방법을 사용하였다. 우선 미소 선형 다이폴 전류로부터 계산된 벡터 자기 포텐셜 (magnetic vector potential) A_r 은 식 (2)와 같다.

$$A_r = -\cos\theta e^{-jkr} \left(1 - \frac{j}{kr}\right) \quad (2)$$

이로부터 H 와 E 를 계산하면 식 (3)~(5)와 같다.

$$H_\phi = \sin\theta e^{-jkr} \left(\frac{j}{kr^2} - \frac{1}{r}\right) \quad (3)$$

$$E_\theta = \frac{1}{j\omega\epsilon} \sin\theta e^{-jkr} \left(-\frac{1}{r^2} - \frac{jk}{r} + \frac{j}{kr^3}\right) \quad (4)$$

$$E_r = \frac{2}{\omega\epsilon} \cos\theta e^{-jkr} \left(\frac{1}{kr^3} + \frac{j}{r^2}\right) \quad (5)$$

이중 복사에 관련되는 필드는 $1/r$ 과 관련된 부분이고, $1/r^2$ 과 $1/r^3$ 에 관련된 부분은 far-field까지 복사되지 못하고 안테나 주변에 저장되는 부분으로 간주할 수 있다. 따라서 복사되는 에너지 밀도 w_e^{rad} 는 전계 E 의 $1/r$ 과 관련된 일부 성분으로부터 식 (6)과 같이 계산된다.

$$w_e^{rad} = \frac{\epsilon}{2} |E_\theta^{rad}|^2 = \frac{\epsilon}{2} \left| -\eta \sin\theta \frac{e^{-jkr}}{r} \right|^2 = \frac{\eta^2}{r^2} \sin^2\theta \quad (6)$$

복사되지 못하고 안테나 주변에 저장되는 에너지는 전기적·자기적 에너지 밀도(electrical and magnetic energy density)와 복사되는 에너지 밀도 w_e^{rad} 의 차이를 이용하여 계산할 수 있다. 우선 전체 전기적 에너지 밀도는 다음의 식 (7)로 정리된다.

$$w_e = \frac{1}{2} \epsilon \bar{E} \cdot \bar{E}^* = \frac{\eta}{2\omega} \left\{ \sin^2\theta \left(\frac{1}{k^3 r^6} - \frac{1}{kr^4} + \frac{k}{r^2} \right) + 4\cos^2\theta \left(\frac{1}{k^3 r^6} + \frac{1}{kr^4} \right) \right\} \quad (7)$$

안테나 주변에 복사하지 못하고 저장되는 에너지 밀도(non-propagating electric energy density) w_e 는 식 (8)로 정리된다.

$$w_e' = w_e - w_e^{rad} = \frac{\eta}{2\omega} \left[\sin^2\theta \left(\frac{1}{k^3 r^6} - \frac{1}{kr^4} \right) + 4\cos^2\theta \left(\frac{1}{k^3 r^6} + \frac{1}{kr^4} \right) \right] \quad (8)$$

따라서 임의의 구면까지 저장된 에너지 W'_e 는

$$W'_e = \int_{r=0}^{\infty} \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\phi=0}^{2\pi} w'_e r^2 \sin\theta \, dr d\theta d\phi = \frac{4\pi\eta}{3\omega} \left[\frac{1}{(ka)^3} + \frac{1}{ka} \right] \quad (9)$$

로 계산되며, 복사 전력 P_{rad} 를 계산하여 앞의 식 (1)에 대입함으로써 안테나의 Q 를 계산할 수 있다. 복사 전력 P_{rad} 는 식 (10)으로 계산되며

$$P_{rad} = \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{\phi=0}^{2\pi} \text{Re}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*) \cdot \hat{\mathbf{a}}_r r^2 \sin\theta \, dr d\theta d\phi = \frac{8\pi}{3} \eta \quad (10)$$

Q 는 식 (11)로 정리된다.

$$Q = \frac{2\omega W'_e}{P_{rad}} = \frac{1}{(ka)^3} + \frac{1}{ka} \quad (11)$$

따라서 안테나의 대역폭은 RLC 회로망의 근사 대역폭 계산식 (12)을 이용하여 계산할 수 있다^[13].

$$\text{Bandwidth} = \frac{VSWR - 1}{Q\sqrt{VSWR}} \quad (12)$$

III. 최근 연구된 소형 안테나의 예

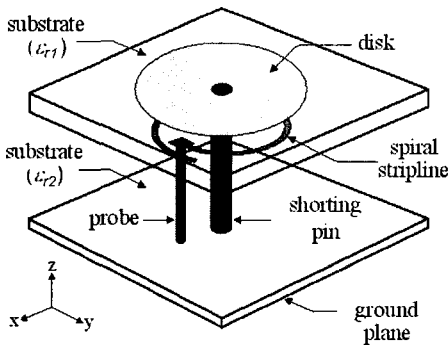
3-1 이동통신용 소형 안테나

이동 통신에 사용되고 있는 단말기들은 점점 소형화되고 있으며 고속 데이터 통신과 멀티미디어 서비스 등을 제공하는 W-CDMA 등의 상용화에 따라 단말기에 사용되는 안테나 역시 소형의 크기와 더불어 광대역의 특성을 필요로 한다^[14]. 현재 단말기에는 헬리컬(helical)이나 휘(whip) 형태의 모노폴 등과 같은 외장형 안테나를 많이 사용하고 있는데^[15], 단말기 외부에 장착되므로 외관상 보기가 나쁘고 충격에 쉽게 파손될 수 있으며, 단말기의 전체 크기를 증가시키는 단점이 있다. 이러한 외장형 안테나의 문제점을 해결하기 위해 단락 마이크로스트립 안테나

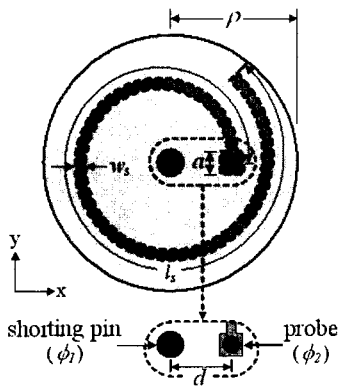
(short-circuit microstrip antenna)와 PIFA(Planar Inverted F Antenna) 안테나 등의 내장형 소형 안테나에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다^{[16][17]}. 그러나 내장형 소형 안테나들은 좁은 대역폭과 낮은 이득을 가지므로 단말기에 적용하기에는 어려움이 있다. 내장형 소형 안테나의 협대역 특성을 개선하기 위한 여러 가지 방법이 제시되었는데 그 중에서 단락된 패치 안테나 위에 기생 패치를 올림으로써 기생 패치에 의한 공진을 추가하여 대역폭을 넓히는 방법이 가장 널리 알려져 있다^[18]. 또한 단락된 패치를 L-형태의 프로브나 스트립 선로를 이용하여 급전한 구조와 단락된 패치에 U-형태 슬롯 또는 L-형태 슬롯을 형성한 구조들 역시 광대역 특성을 가진다^{[19]~[21]}. 그러나 이들 구조들은 단락된 패치의 공진과 U-형태 슬롯과 L-형태 슬롯에서 형성되는 공진을 결합함으로써 넓은 대역폭을 이룰 수는 있지만, 안테나의 크기를 감소시키는 것에는 한계가 있다.

소형 안테나의 또 다른 형태로써 연구되고 있는 구조로는 디스크-로디드 모노폴(disk-loaded monopole) 안테나가 있다. 디스크-로디드 모노폴 안테나는 캐패시턴스 성분을 가지는 디스크에 의해 공진주파수를 낮출 수 있으므로 안테나의 크기를 감소시킬 수 있으며, 디스크에 수직한 급전면과 단락면을 평행하게 배열하여 연결함으로써 대역폭을 확장시킬 수 있다^[11]. 또한, [그림 1]의 디스크-로디드 모노폴 안테나는 캐패시턴스 성분의 단락된 디스크와 인덕턴스 성분을 가지는 프로브 급전된 스파이럴 스트립 선로를 전자기적으로 결합함으로써 기존의 안테나보다 소형의 크기를 가지며 광대역 특성을 만족하는 안테나이다^[22].

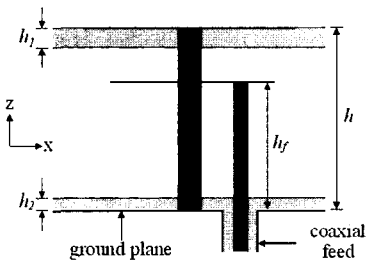
전자기적 결합 급전 디스크-로디드 모노폴 안테나는 단락된 디스크와 프로브 급전된 스파이럴 스트립 선로가 전자기적으로 결합되어 동작하게 된다. [그림 2]에는 전자기 결합 디스크 로디드 모노폴 안테나의 등가 모델을 나타내었다. 단락된 디스크는 캐



(a) 정면도



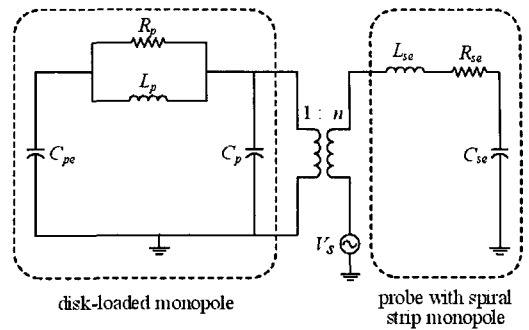
(b) 평면도



(c) 측면도

[그림 1] 소형 전자기 결합 디스크 로디드 안테나

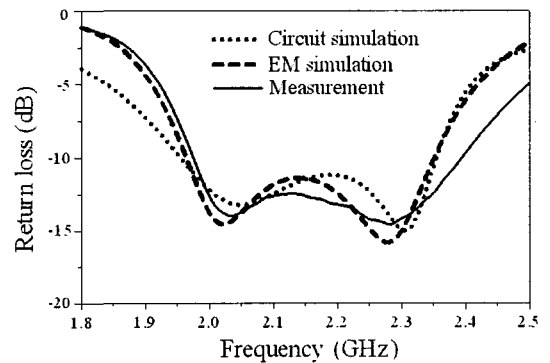
패시턴스 성분의 디스크 모노폴로 동작하게 되고 병렬 RLC 회로로 등가화 할 수 있으며, 프로브 급전된 스파이럴 스트립 선로는 인덕턴스 성분의 모노폴로써 직렬 RLC 회로로 등가화 된다. 디스크 모노폴은 디스크의 크기, 단락 핀의 지름 등을 변화하여 디스



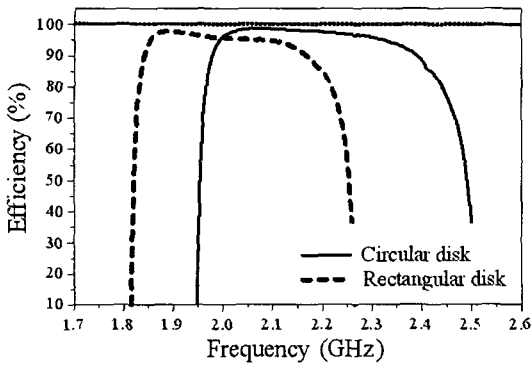
[그림 2] 소형 전자기 결합 디스크 로디드 안테나 등가 회로 모델

크의 캐패시턴스를 조절함으로써 공진주파수를 변화시킬 수 있고 프로브 급전된 스파이럴 스트립 선로 모노폴은 프로브의 높이, 스트립 선로의 길이와 폭을 변화하여 인덕턴스를 조절함으로써 공진주파수를 변화시킬 수 있다. 이러한 프로브 급전된 스파이럴 스트립 선로의 공진주파수를 단락된 디스크의 공진주파수와 인접하도록 설계함으로써 광대역 특성을 이룰 수 있다.

[그림 3]에는 등가회로와 EM 시뮬레이션을 통하여 계산한 안테나와 제작하여 측정된 안테나의 반사 손실 특성을 나타내었다. 측정된 안테나의 반사 손실은 $VWSR < 2$ 를 기준으로 1.97 GHz에서 2.4 GHz



[그림 3] 소형 전자기 결합 디스크 로디드 안테나의 반사 손실



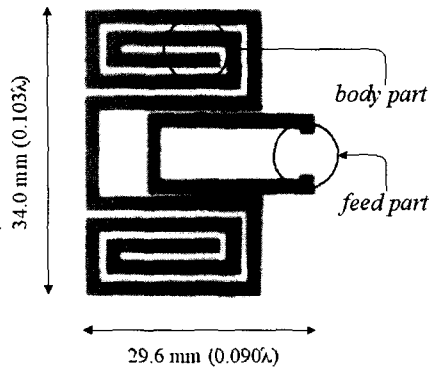
[그림 4] 소형 전자기 결합 디스크 로디드 안테나의 효율

까지 중심주파수 2.185 GHz에서 약 19.7 %의 대역폭을 나타낸다.

[그림 4]는 Wheeler cap방법^[3]을 이용하여 측정된 원형 디스크와 사각 디스크를 가진 안테나의 효율이며, 동작 주파수에서 안테나의 효율은 90 % 이상의 성능을 보인다.

3-2 RFID용 소형 태그 안테나

최근 UHF 대역의 RFID가 주목을 받고 있으며, 특히 수동형 태그 안테나의 소형화에 많은 관심이 집중되고 있다. 기존의 HF 대역의 RFID가 근거리 자기장(electromagnetic near field)의 결합을 이용하는데 비하여 UHF 대역 RFID는 far-field에서 복사되는 에너지를 이용하므로 태그 안테나의 크기가 동작 주파수의 파장 길이에 의해 제약된다^{[23],[24]}. 태그 안테나로 많이 사용되는 반파장 다이폴의 경우 안테나의 크기가 약 10~15 cm이며, 이러한 크기는 물건에 부착되어 사용될 태그의 응용에 많은 제약을 가져오므로 소형화된 태그 안테나의 요구가 점차 증대되고 있다. 소형 태그 안테나 설계 시 다음과 같은 조건들을 만족해야 한다. 우선 태그 안테나는 생산 비용이 저렴해야 하므로 구조가 단순하고 데이터를 저장하는 태그칩의 장치가 용이하도록 가능한 평면 형태를 가져야 한다. 원거리 인식을 위하여 복사효율이 높



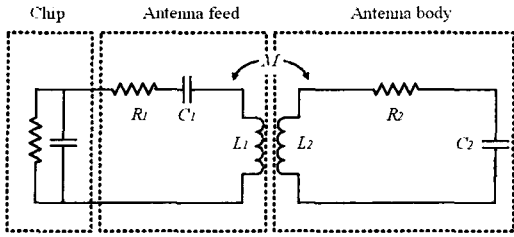
[그림 5] 제작된 소형 유도 결합 태그 안테나

아야 하며, 부착될 물체의 종류에 무관하게 가능한 성능이 유지되어야 한다. 또한 커패시티브 로딩된 수동형 태그칩^{[25],[26]}과의 임피던스 정합을 위해 안테나의 리액티브 성분 조절이 용이한 구조이어야 한다.

[그림 5]는 이러한 태그 안테나 설계조건을 고려하여 제작된 초소형 유도결합 태그 안테나를 나타낸다. 태그 안테나는 대량생산이 용이하도록 평면 형태로 구성되었으며, 가로 29.6 mm, 세로 34.0 mm ($kr=0.43$)의 작은 전기적 크기를 갖는다.

태그 안테나는 전력을 공급하는 급전부(feed part)와 실제로 복사되는 본체(body part)로 구분되며, 두 부분이 전자기적 유도결합(electromagnetic mutual coupling)되어 동작한다^[27]. 본체는 크기를 효과적으로 축소하기 위하여 안쪽으로 감아 돌아가는 스파이럴 형태를 취하고 있다. 이는 안테나의 소형화를 위하여 일반적으로 사용되는 미앤더 구조보다 본체의 물리적 길이를 줄여 안테나의 크기를 효과적으로 축소할 수 있기 때문이다^[28]. [그림 6]은 유도 결합 태그 안테나의 등가 회로 모델이다. 이때 안테나의 입력 임피던스는 다음의 식 (13)에 의해 계산된다.

$$Z_{in} = Z_{feed} + \frac{\omega^2 M^2}{Z_{body}}$$

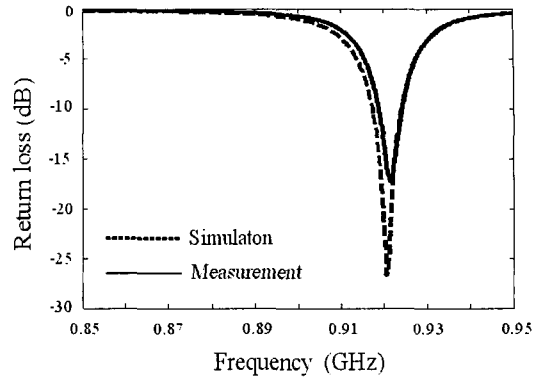


[그림 6] 소형 유도 결합 태그 안테나의 등가 회로 모델

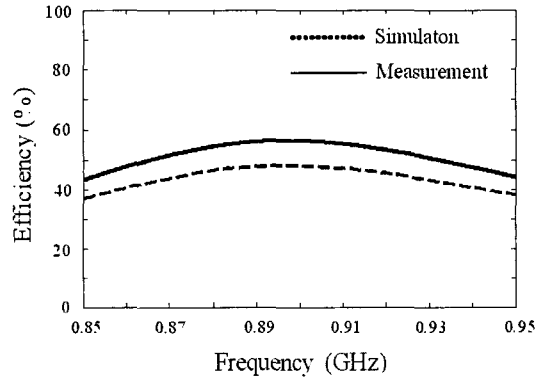
$$= \left(R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} \right) + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2}} \quad (13)$$

식 (13)은 태그 안테나 본체 크기가 축소됨에 따라 본체의 저항(R_2)는 감소되지만 안테나 입력단인 급전부에서 바라본 전체 입력저항은 본체 저항의 역수에 비례하고 유도결합 세기(M)에 의해 조절되므로 안테나 소형화에 의한 입력 저항 감소를 해결할 수 있음을 보인다. 또한 급전부의 크기와 위치에 따라 인덕턴스 L_1 을 보다 쉽게 조절할 수 있으므로 커패시티브 로딩된 상용 태그 칩에 정합이 용이하다. [그림 7]은 상용 태그 칩을 안테나에 장착하였을 때 안테나 입력단에서의 반사 손실을 보인다. 안테나의 반사 손실은 안테나가 대칭적 구조를 하고 있으므로, 대칭축을 중심으로 이등분한 후 충분한 크기의 접지면 위에 한쪽 면을 수직으로 세워 측정된 임피던스에 두 배를 하여 계산하는 영상법(image theory)을 이용하였다. 또한 평형신호(differential signal)를 측정할 수 있는 Agilent E5071B를 사용하여 측정 결과를 검증하였다. 시뮬레이션 결과는 측정 결과와 비교적 정확하게 일치하며, 측정 대역폭(VSWR < 5.8)은 약 1.97 %의 성능을 보인다.

[그림 7]은 Wheeler cap을 이용하여 측정된 안테나의 효율이며, 동작 주파수에서 약 55 %이다. 제작된 태그 안테나를 상용 태그 칩과 RFID 시스템을 이용하여 최대 인식거리를 측정한 결과 약 2 m의 우수한 성능을 보인다.



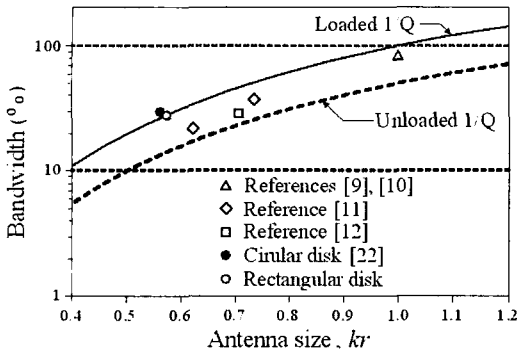
[그림 7] 소형 유도 결합 태그 안테나의 반사 손실



[그림 8] 소형 유도 결합 태그 안테나의 효율

<표 1> 대표적 소형 안테나의 전기적 크기와 대역폭

	kr (VSWR < 5.8)	Bandwidth (VSWR < 2)	Bandwidth (VSWR < 5.8)
Goubau antenna ^[9]	1.0	62.0 %	82.0 %
Foltz antenna ^[11]	0.729	9.52 %	41.12 %
	0.630	12.9 %	21.85 %
Dobbins antenna ^[12]	0.710	10.9 %	28.6 %
Rectangular disk	0.575	16.5 %	27.5 %
Circular disk ^[23]	0.563	19.7 %	30.2 %



[그림 9] 안테나의 크기에 따른 이론적 대역폭 한계

[그림 8]에는 <표 1>에 있는 대표적인 소형 안테나를 안테나의 전기적 크기에 따른 Chu의 이론적 대역폭 한계와 함께 표시하였다. Goubau, Foltz, Dobbins의 안테나들은 loaded Q 와 unloaded Q 대역폭 한계 사이에 위치하며, 그 중 Goubau의 안테나가 이론적 한계에 가장 근접해 있음을 알 수 있다. 본 논문에서 소개된 전자기 결합 사각 디스크 로디드 모노폴 안테나는 이론적 한계치에 도달해 있고 전자기 결합 원형 디스크 로디드 모노폴은 이론적 한계를 약간 넘는 성능을 보인다. 전자기 결합 디스크 로디드 모노폴 안테나의 대역폭 성능이 뛰어난 것은 커패시티브한 성분을 가진 디스크 로디드 모노폴과 인덕티브한 성분을 가진 스파이럴 로디드 모노폴이 전자기적으로 결합되어 리액티브 성분을 상쇄시킴으로써 좁은 공간에 위치한 두 개의 안테나가 효과적으로 복사하기 때문이다. 이러한 전자기 결합 디스크 로디드 안테나와 같이 두 개의 복사체가 서로 정합회로로 동작하는 고차 회로 모델 안테나의 경우, 2차 RLC 회로에 매칭 네트워크(matching network)가 첨가되어 대역폭이 넓어지는 효과를 보이며, 선형 미소 다이폴 안테나로부터 도출한 이론적 한계를 초과할 수 있는 것으로 사료된다^{[12],[29]}. 이러한 고차 회로로 동작되는 안테나의 대역폭 한계에 대해서는 보다 추가적인 연구가 진행되어야 할 것이다. 소형 태

그 안테나의 경우, 이론적 대역폭($1/Q$)보다 그 성능이 다소 떨어진다. 이는 태그 안테나의 설계조건을 만족시키기 위해 단순한 평면 형태로 안테나를 구성하였고, 3차원 공간을 사용하는 다른 안테나에 비해 공간 활용도가 다소 떨어지기 때문이다. 하지만 유도급전 방식을 이용하여 안테나의 전기적 크기 축소에 따른 입력 저항 감소 문제를 해결하여 $kr=0.43$ 까지 축소하였으며, 국내 RFID 규정보다 3배 이상의 넓은 대역폭 성능을 나타내므로 충분히 상용적 목적으로 사용될 수 있음을 보여준다.

IV. 결 론

본 논문에서는 안테나의 Q 를 중심으로 소형 안테나의 이론적 한계에 대하여 정리함으로 설계된 안테나의 성능을 비교·검토할 수 있도록 하였으며, 실제로 다양한 무선 통신에 활용될 수 있는 소형 전자기 결합 디스크 로디드 모노폴 안테나와 UHF 대역의 RFID 태그 안테나에 사용될 수 있는 소형 유도결합 안테나에 대하여 살펴보았다. 원형 디스크 로디드 모노폴 안테나는 $kr=0.563$ 의 크기를 가지며 30.2%의 대역폭($VSWR < 5.8$)과 90% 이상의 복사효율을 보였고, 소형 태그 안테나는 $kr=0.43$ 의 크기를 가지며 1.97%의 대역폭($VSWR < 5.8$)과 약 55%의 복사효율을 보였다. 특히 전자기 결합 원형 디스크 로디드 모노폴 안테나는 Chu가 제시한 이론적 한계를 뛰어 넘을 수 있음을 실험 결과를 통하여 보였다.

참 고 문 헌

[1] H. A. Wheeler, "Fundamental limitations of small antennas", *Proc. IRE*, vol. 35, pp. 1479-1484, Dec. 1947.
 [2] L. J. Chu, "Physical limitations of omni-directional antennas", *J. Appl. Phys.*, vol. 19, pp. 1163-1175,

- Dec. 1948.
- [3] H. A. Wheeler, "The radiansphere around a small antenna", *Proc. IRE*, vol. 47, pp. 1325-1331, Aug. 1959.
- [4] R. E. Collin, S. Rothschild, "Evaluation of antenna Q", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 12, pp. 23-27, Jan. 1964.
- [5] R. L. Fante, "Quality factor of general ideal antennas", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 12, pp. 23-27, Jan. 1964.
- [6] H. A. Wheeler, "Small antennas", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 23, pp. 462-469, Jul. 1975.
- [7] J. S. McLean, "A re-examination of the fundamental limits on the radiation Q of electrically small antennas", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 44, pp. 672-676, May 1996.
- [8] R. E. Collin, "Minimum Q of small antenna", *J. Electromagnetic Waves Appl.*, vol. 12, pp. 1369-1393, 1998.
- [9] G. Goubau, N. Puri, and F. Schwing, "Diakoptic theory for multielement antennas", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 30, pp. 15-26, Jan. 1982.
- [10] C. H. Friedman, "Wide-band matching of a small disk-loaded monopole", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 33, pp. 1142-1148, Oct. 1985.
- [11] H. D. Foltz, J. S. McLean, and G. Crook, "Disk-loaded monopoles with parallel strip elements", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 46, pp. 1894-1896, Dec. 1998.
- [12] J. A. Dobbins, R. L. Rogers, "Folded conical helix antenna", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 49, pp. 1777-1781, Dec. 2001.
- [13] C. A. Balanis, *Antenna Theory, Analysis and Design*, New York: John Wiley & Sons, pp. 760-762, 1997.
- [14] A. K. Skrivervik, J. -F. Zurcher, O. Staub, and J. R. Mosig, "PCS antenna design: the challenge of miniaturization", *IEEE Antennas Propagat. Mag.*, vol. 43, no. 4, pp. 12-26, Aug. 2001.
- [15] J. T. Rowley, R. B. Waterhouse, and K. H. Joyner, "Modeling of normal-mode helical antennas at 900 MHz and 1.8 GHz for mobile communications handsets using the FDTD technique", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 50, no. 6, pp. 812-819, Jun. 2002.
- [16] K. L. Virga, Y. Rahmat-Samii, "Low-profile enhanced-bandwidth PIFA antennas for wireless communications packaging", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 45, no. 10, pp. 1879-1888, Oct. 1997.
- [17] K. L. Wong, *Planar Antennas for Wireless Communications*, New York: Wiley, pp. 26-71, 2003.
- [18] J. Ollikainen, M. Fischer, and P. Vainikainen, "Thin dual-resonant stacked shorted patch antenna for mobile communications", *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 6, pp. 437-438, Mar. 1999.
- [19] Y. X. Guo, K. M. Luk, and K. F. Lee, "L-probe proximity-fed short-circuited patch antennas", *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 24, pp. 2069-2070, Nov. 1999.
- [20] A. K. Shackelford, K. F. Lee, K. M. Luk, and R. C. Chair, "U-slot patch antenna with shorting pin", *Electron. Lett.*, vol. 37, no. 12, pp. 729-730, Jun. 2001.
- [21] C. Y. Chiu, K. M. Shum, C. H. Hou, and K. M. Luk, "Bandwidth enhancement technique for quarter-wave patch antenna", *IEEE Antennas Wireless Propagat. Lett.*, vol. 2, pp. 130-131, 2003.
- [22] J. H. Jung, I. Park, "Electromagnetically coupled small broadband monopole antenna", *IEEE Antennas*

- Wireless Propagat. Lett.*, vol. 2, pp. 349-351, 2003.
- [23] R. Glidden, C. Bockorick, S. Cooper, C. Diorio, D. Dressler, V. Gutnik, C. Hagen, D. Hara, T. Hass, T. Humes, J. Hyde, R. Olive, O. Onen, A. Pesavento, K. Sundstrom, and M. Thomas, "Design of ultra-low-cost UHF RFID tags for supply chain application", *IEEE Communication Magazine*, pp. 140-151, Aug. 2004.
- [24] K. Finkenzeller, *RFID Handbook*, Reading, MA: Addison Wiley, 2002.
- [25] U. Karthaus, M. Fischer, "Fully integrated passive UHF RFID transponder IC with 16.7-mW minimum RF input power", *IEEE J. Solid-State. Circuits*, vol. 38, pp. 1602-1608, Oct. 2003.
- [26] 변상기, "RFID 태그 기술", *한국전자과학회지 전자파기술*, 15(2), pp. 32-43, 2004년 4월.
- [27] H. Choo, H. Ling, "Design of electrically small planar antennas using inductively coupled feed", *Electron. Lett.*, vol. 40, pp. 1563-1565, Oct. 2003.
- [28] 조치현, 추호성, 박익모, 김영길, "Pareto 유전자 알고리즘을 이용한 초소형 유도결합 안테나 설계", *한국전자과학회논문지*, 16(1), pp. 40-47, 2005년 1월.
- [29] H. A. Wheeler, "The wide-band matching area for a small antenna", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 31, pp. 364-367, Mar. 1983.

≡ 필자소개 ≡

박 익 모



1984년: 뉴욕주립대학교 전기전자공학과 (공학사)
 1989년: 일리노이대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과 (공학석사)
 1994년: 일리노이대학교 전기전자 및 컴퓨터공학과 (공학박사)
 1994년~1996년: LG 전자기술원

1996년~현재: 아주대학교 전자공학부

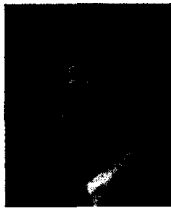
[주 관심분야] 초고주파 수동소자(안테나 포함) 설계 및 해석

조 치 현



2004년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2004년 3월~현재: 홍익대학교 전파통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] 초소형 안테나 설계 및 GA 유전자 알고리즘을 이용한 최적화

추 호 성



1998년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학사)
 2000년 8월: 미국 Univ. of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학석사)
 2003년 5월: 미국 Univ. of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학박사)
 2003년 6월~2003년 8월: 미국 Univ. of

Texas at Austin 전자전기공학부 (Post Doctor)

2003년 8월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 전임강사

[주 관심분야] 초소형 안테나, 최적화 알고리즘을 이용한 안테나 설계, RFID용 태그 및 리더 안테나