

논문 2007-44TC-7-1

메타물질 전송선로를 이용한 소형 나선구조 Zeroth-order Resonance 안테나

(Compact Spiral Zeroth-order Resonance Antenna using metamaterial transmission line)

박재현*, 류영호**, 김동진*, 추호성***, 이정해***

(Jae-Hyun Park, Young-Ho Ryu, Dong-Jin Kim, Hosung Choo, and Jeong-Hae Lee)

요약

본 논문에서는 composite right- and left-handed (CRLH) 전송선로를 이용한 나선구조 zeroth-order resonance (ZOR) 안테나가 제안되었다. 안테나의 영차공진특성은 주기구조의 분산특성에 의해 이론적으로 분석되었다. 2×2 나선구조 안테나의 크기는 $0.155\lambda_0 \times 0.155\lambda_0$ 이며 CRLH 전송선로의 병렬 인덕턴스 값이 증가함으로 인해 제안된 안테나의 크기는 일반적인 버섯구조 ZOR 안테나보다 65%의 크기를 감소시킬 수 있었다. 또한, 제안된 안테나의 방사특성은 버섯구조 ZOR 안테나와 비슷한 전방향성 방사특성을 가짐을 확인하였다.

Abstract

In this paper, the spiral zeroth-order resonance (ZOR) antenna using composite right- and left-handed (CRLH) transmission line is proposed. The zeroth-order resonant characteristics of the antenna are described by dispersion relation of a periodic structure. The size of the 2×2 spiral ZOR antenna is $0.155\lambda_0 \times 0.155\lambda_0$. By increasing shunt inductance of CRLH transmission line, the size of this antenna is reduced by 65% compared with that of a mushroom ZOR antenna. The radiation pattern of this antenna have omnidirectional pattern which is similar to that of mushroom ZOR antenna

Keywords : Metamaterial, Composite right- and left-handed(CRLH), Zeroth-order resonance(ZOR) antenna

I. 서론

평면타입의 메타전송선로는 전송선로는 최근에 많이 연구되어지고 있는 새로운 개념의 전송선로를 뜻한다. 그 중에서도 composite right- and left-handed(CRLH) 전송선로는 유효 유전율과 유효 투자율이 주파수에 따

라 음수, 영, 양수의 값을 갖는다. 따라서 CRLH 전송선로는 비정상적인 유전율과 투자율의 값에 따라 음, 영, 양의 전파상수를 지원한다^[1-2]. 특히, 전송선로의 전파상수가 영이 된다는 것은 무한파장을 갖는다는 것과 같은 뜻이므로 이러한 특성을 이용하면 zeroth-order resonator (ZOR)와 같은 길이에 무관한 공진기의 설계가 가능하다^[3-4]. 이를 이용한 안테나로 버섯 구조의 ZOR 안테나는 공진주파수에서 무한 파장특성을 갖기 때문에 patch에서 접지면으로 모든 전계가 수직으로 형성된다. 따라서 버섯 구조의 ZOR 안테나는 수평 자계 루프 전류를 형성하게 되어 전방사형 방사패턴을 갖는 장점이 있다^[4]. 또한, 이론적으로 ZOR 안테나는 길이에 무관하게 공진이 발생한다는 장점이 있지만 버섯구조의

* 학생회원, *** 정회원, 홍익대학교 전자전기공학부 (School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University)

** 학생회원, 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부 (School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University)

※ 본 연구는 서울시 산학연 협력사업 지원으로 수행되었음.

접수일자: 2007년7월12일, 수정완료일: 2007년7월18일

ZOR 안테나는 zeroth-order 공진 주파수를 결정하는 via의 인덕턴스와 patch와 접지면 사이의 커패시턴스 값을 크게 하는데 제한을 갖고 있어 안테나 소형화에 한계가 있다.

본 논문에서는 버섯구조 ZOR 안테나^[4]의 전방향성 방사패턴을 유지하면서도 공진주파수의 실제적인 한계 점을 낮추기 위해 나선구조를 갖는 버섯구조의 패치 형태를 제안한다. 도입된 나선구조 패치는 병렬 인덕턴스 값을 증가시켜 더 낮은 주파수에서 ZOR 안테나의 공진을 발생시킨다. 제안된 안테나의 동작원리를 확인하기 위해 나선구조 CRLH 전송선로를 이용한 안테나의 zeroth-order 공진모드를 이론적으로 분석하고 모의실험과 측정 결과로 이를 확인하였다. 또한, 제안된 ZOR 안테나는 전방향성 복사패턴을 가지도록 설계되어 RFID를 이용한 위치추적 시스템의 리더 안테나로 적용될 수 있음을 확인하였다.

II. 나선구조 CRLH 전송선로

그림 1(a)는 나선구조 CRLH 전송선로의 구조를 보여준다. 제안된 CRLH 전송선로는 나선구조의 patch와 via로 구성되어있다. 즉, 일반적인 right-handed (RH) 전송선로의 등가회로를 구성하는 직렬 인덕턴스(L_R)와 병렬 커패시턴스(C_R) 이외에도 patch와 patch 사이의 gap에 의한 직렬 커패시턴스(C_L), via에 의한 병렬 인덕턴스(L_L)가 추가로 발생한다. 따라서 나선구조 CRLH 전송선로는 C_L 와 L_L 에 의해 left-handed (LH) 특성을 갖게 된다. 이때 patch의 나선구조와 via는 버섯구조의 via보다 신호선과 접지면 사이의 물리적 길이를 증가시키므로 나선구조 CRLH 전송선로는 버섯구조보다 큰 병렬 인덕턴스를 발생시킨다.

표 1은 버섯구조와 3가지 종류의 나선구조를 갖는 버섯구조 CRLH 전송선로의 등가회로(그림 1(b))를 구성하는 각 파라미터 값(L_R, C_R, L_L, C_L)을 모의 실험을 통해 얻어낸 결과이다. 단위 구조의 모의 실험을 통해 얻어낸 S-파라미터를 ABCD 파라미터로 변환한 후 등가회로와 비교하면 등가회로를 구성하는 파라미터 값을 얻어낼 수 있다. 모의실험은 Rogers duroid5880 ($\epsilon_r=2.2$, height = 1.57mm) 기판을 이용하였고 단위 구조의 치수는 $w=3\text{mm}$, $g=0.1\text{mm}$, $\text{gap}=0.2\text{mm}$, via의 지름 = 0.3mm 로 설정하였으며 나선구조의 k값은 각각 0.675mm (Type I), 0.52mm (Type II), 0.417mm (Type III)이다. 표 1에서 볼 수 있듯이 나선이 증가될수록 다

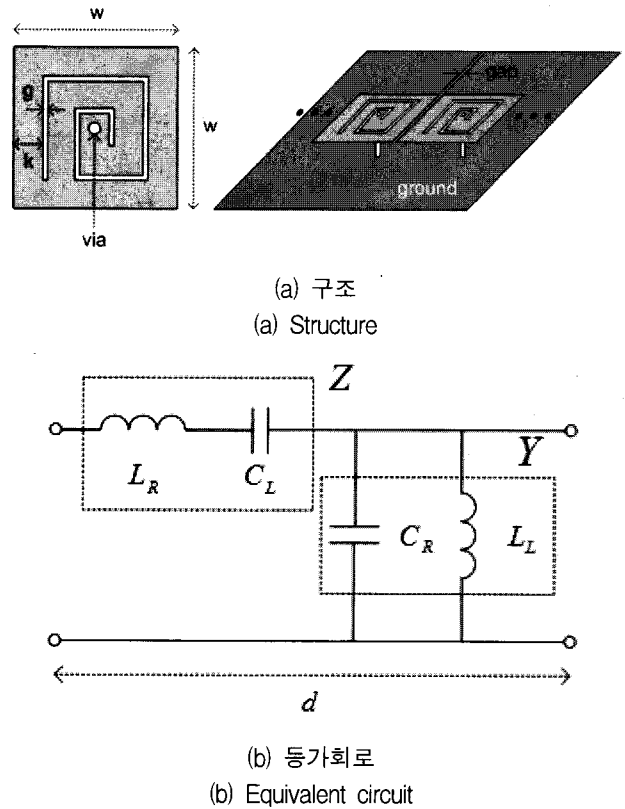


그림 1. 제안된 나선구조 CRLH 전송선로
Fig. 1. Proposed spiral CRLH transmission line.

표 1. 모의실험으로 분석된 각 구조의 파라미터 값
Table 1. Extracted parameter values using simulation data.

구조	버섯구조	나선구조		
		Type I	Type II	Type III
L_R (nH)	0.946	1.025	1.082	1.157
C_R (pF)	0.210	0.210	0.217	0.220
L_L (nH)	0.569	0.952	1.638	2.754
C_L (pF)	0.076	0.076	0.076	0.076

른 파라미터(L_R, C_R, C_L)의 값은 거의 변하지 않는 반면 병렬 인덕턴스(L_L) 값이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

단위 셀의 등가회로에 주기구조이론을 적용하면 전송선로의 전파상수를 다음 식 (1)을 이용하여 구할 수 있고 CRLH 전송선로를 이용한 공진기의 각 모드 (n) 들은 식(2)에 의해 계산될 수 있다. 여기서 $N(=l/d)$ 과 l 은 각각 단위 셀의 수와 공진기의 전체 길이를 나타내며 공진기는 단위 셀의 수에 따라 식(2)에서와 같은 공진 모드를 갖는다.

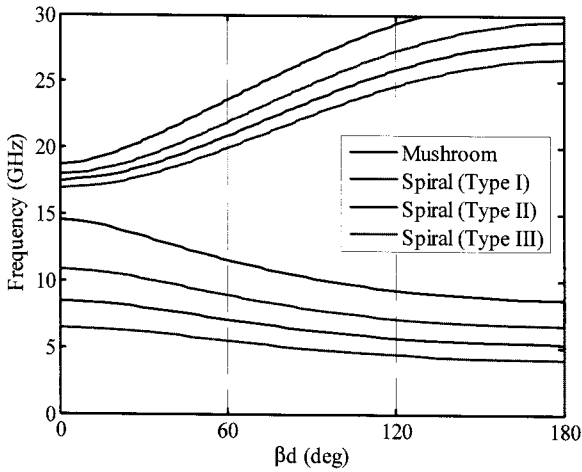


그림 2. CRLH 전송선로의 분산특성과 공진모드
Fig. 2. Dispersion relations and resonance modes of CRLH TL.

$$\beta d = \cos^{-1} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{\omega_L^2}{\omega^2} + \frac{\omega^2}{\omega_R^2} - \left(\frac{\omega_E^2}{\omega_R^2} + \frac{\omega_M^2}{\omega_R^2} \right) \right] \right\}$$

$$\omega_R = 1/\sqrt{L_R C_R}, \quad \omega_L = 1/\sqrt{L_L C_L}, \quad (1)$$

$$\omega_M = 1/\sqrt{L_R C_L}, \quad \omega_E = 1/\sqrt{L_L C_R}$$

β : phase constant, d : length of the unit cell

$$\beta_n d = \frac{n\pi d}{l} = \frac{n\pi}{N} \quad (2)$$

($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm(N-1)$)

그림 2는 표 1의 버섯구조와 나선구조 CRLH 전송선로들의 전파상수와 CRLH 전송선로를 구성하는 단위 셀이 3개일 경우의 공진모드를 표시한 것이다.

많은 모드들 중에서도 전파상수가 영이기 때문에 무한과장 특성을 지원하는 Zeroth-order ($n=0$) 공진 특성을 분석하기 위하여, open-ended 경계 조건상에서 공진기의 입력 임피던스를 유도해보면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$Z_{in} = -jZ_0 \cot \beta l \Big|_{\beta=0} = -jZ_0 \frac{1}{\beta l}$$

$$= -j \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} \left(\frac{1}{-j\sqrt{Z'Y'}} \right) \frac{1}{l} = \frac{1}{Y' N d} = \frac{1}{NY} \quad (3)$$

이때 $Y = j\omega C_R + 1/j\omega L_L$ 이고 N 은 단위 셀의 수이므로 공진주파수를 결정하는 파라미터는 CRLH 전송선로의 병렬 커패시턴스와 인덕턴스이다. 즉, ZOR 주파수

는 다음 식에 의해 결정된다.

$$\omega_{ZOR} = \omega_E = 1/\sqrt{L_L C_R} \quad (4)$$

식으로 구한 ZOR 주파수는 그림 2의 분산특성에서 확인할 수 있으며 각각의 ZOR 주파수는 14.56GHz (버섯구조), 10.85GHz (Type I), 8.44GHz (Type II), 6.47GHz (Type III)로 계산되었다. 나선이 증가됨에 따라 소형화가 가능함을 알 수 있다.

III. Zeroth-order resonance 안테나

그림 3은 나선구조 CRLH 전송선로(Type II)를 이용한 ZOR 안테나의 모습이다. 구조는 2x2 단위 셀로 구성되어 있으며 안테나와의 정합을 위해 gap이 있는 동축 급전을 사용하였다. 나선구조 2x2 ZOR 안테나의 HFSS 시뮬레이션과 측정된 반사계수는 그림 4에서 확인할 수 있으며 측정된 zeroth-order 공진 주파수는

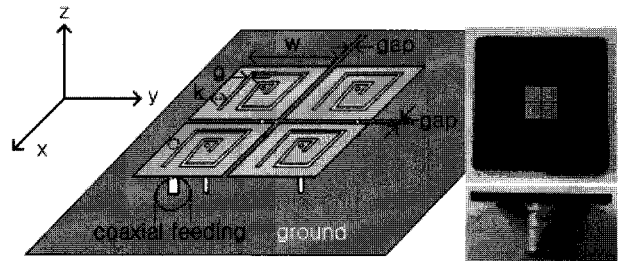


그림 3. 나선구조 CRLH 전송선로를 이용한 2x2 ZOR 안테나
Fig. 3. 2x2 ZOR antenna using spiral CRLH TL. (Rogers duroid5880: $\epsilon_r = 2.2$, height = 1.57mm)

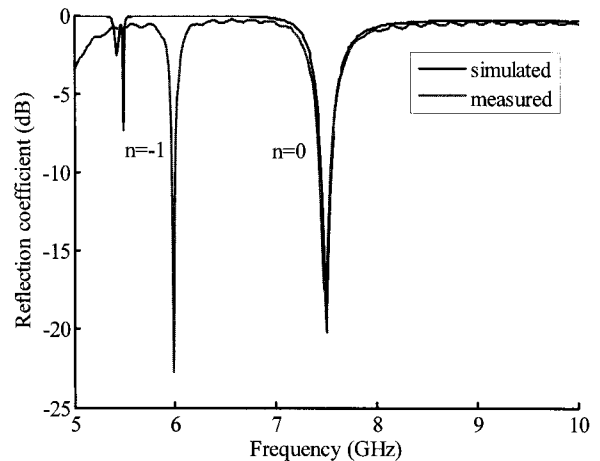


그림 4. 나선구조 ZOR 안테나의 모의 실험과 측정된 반사계수
Fig. 4. Simulated and measured return loss of spiral CRLH ZOR antenna.

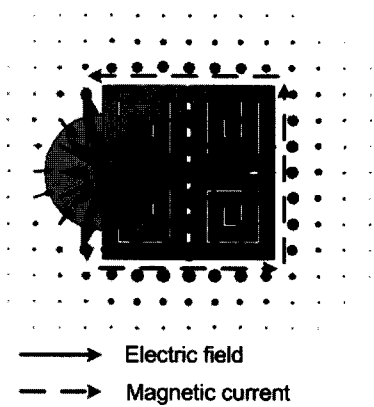
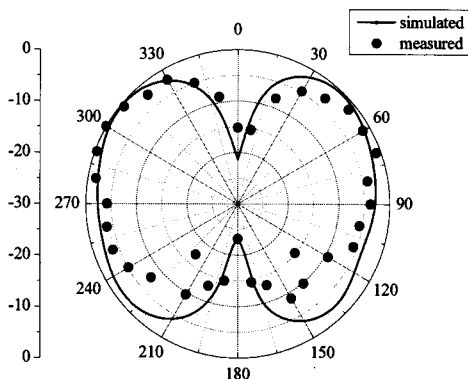
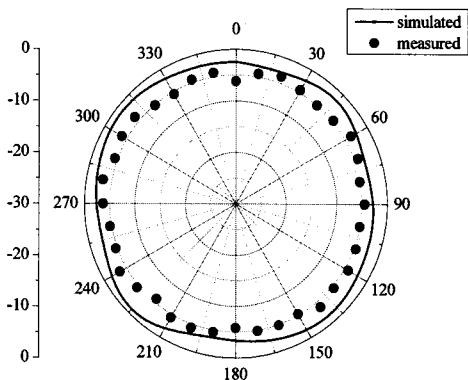


그림 5. ZOR 주파수(7.5GHz)에서의 필드분포
 Fig. 5. Field distribution of ZOR frequency (7.5GHz).



(a) E-plane (x-z plane)



(b) H-plane (x-y plane)

그림 6. 2x2 나선구조 ZOR 안테나의 방사 패턴
 Fig. 6. Radiation pattern of 2x2 spiral ZOR antenna

7.5GHz로서 이론(8.66GHz)과 시뮬레이션(7.5GHz)을 통해 얻어낸 결과와 근사한 값임을 확인하였다.

Zeroth-order 공진 주파수에서 각각의 공진기는 무한 파장을 지원하기 때문에 전체 구조에 균일한 수직 전계를 형성한다. 그림 5는 나선구조의 ZOR 주파수에서 형성되는 전계 분포를 시뮬레이션 한 결과이다. 이와 같

이 ZOR 주파수에서 형성되는 균일한 전계는 4개의 방사슬롯에서 자계루프진류를 형성하게 되며 전방향성 방사패턴을 가지게 한다. 그림 6은 ZOR 주파수에서의 모의실험과 측정을 통한 E-plane과 H-plane의 방사패턴이다. 유한한 접지면을 사용하였으므로 완전한 전방향성 방사특성에 비해 방사패턴이 약간 기울어져 있음을 확인할 수 있다. 모의실험을 통한 2x2 ZOR 안테나의 최대이득은 2.3dBi이며 이득변화는 3.6dB 임이 확인되었다. 2x2 나선구조 ZOR 안테나의 크기는 $0.155\lambda_0 \times 0.155\lambda_0$ 이며 이는 나선구조가 없는 버섯구조의 ZOR 안테나 ($0.26\lambda_0 \times 0.26\lambda_0$)와 비교했을 때 약 65%의 면적 감소 효과를 얻어 낼 수 있었다.

IV. 위치추적용 리더 ZOR 안테나 설계

본 절에서는 제안된 안테나를 전방향성의 방사특성을 요구하는 RFID를 이용한 위치 추적 시스템의 리더 안테나에 적용하였다. ZOR 안테나는 전방향성 방사특성을 가져 취치 추적 시스템의 리더용 안테나로 사용이 용이하다. 따라서 버섯구조의 ZOR 안테나보다 소형화되고 방사특성도 동일한 나선구조 ZOR 안테나를 UHF RFID 사용 주파수 대역 (908.5~914MHz)에 맞도록 설계하였다. 2x2 나선 구조 ZOR 안테나의 소형화와 완벽한 전방향성 방사패턴을 얻기 위해 앞서 설계한 2x2 나선구조 안테나와는 달리 접지면을 안테나의 크기와 동일하게 설계하였다. ϵ_r 은 1, 10mm 높이를 갖는 기판을 사용하였을 때, 설계 치수는 각각 $w=28\text{mm}$, $g=3.1\text{mm}$,

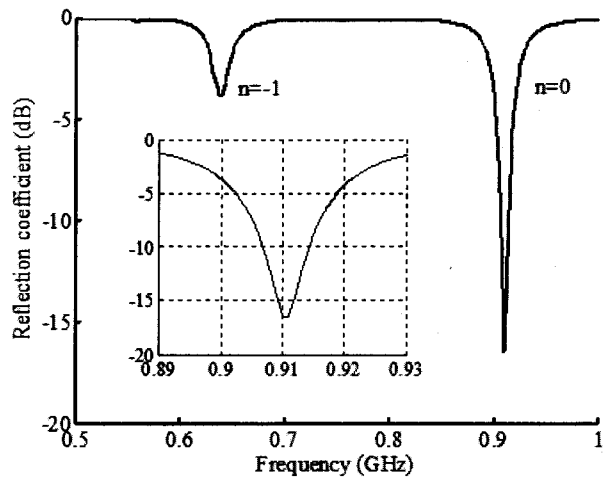


그림 7. 위치추적용 UHF RFID 리더 안테나의 모의실험된 반사계수

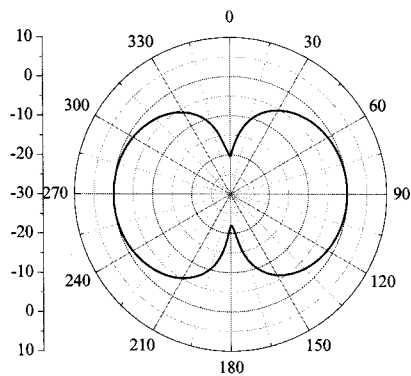
Fig. 7. Simulated return loss of location positioning UHF RFID reader antenna.

V. 결 론

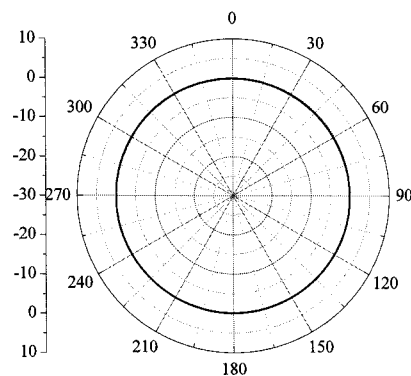
본 논문에서는 메타물질 전송선로를 이용한 나선구조를 갖는 버섯구조 ZOR 안테나를 제안하였다. 제안된 ZOR 안테나의 공진주파수는 이론을 통해 분석되었고 모의실험 결과와 측정 결과를 통해 그 타당성을 확인하였다. 2×2 나선구조를 갖는 버섯구조 ZOR 안테나의 크기는 $0.155\lambda_0 \times 0.155\lambda_0$ 이다. 이는 나선구조로 인한 병렬 인덕턴스 값의 증가로 ZOR 주파수가 낮아져 나선구조가 없는 버섯구조의 ZOR 안테나와 비교했을 때 약 65%의 크기 감소 효과를 얻어낼 수 있었다. 또한 위치 추적용 UHF RFID 리더 안테나에 적합한 2×2 나선구조 ZOR 안테나를 설계하였고 그 결과 UHF RFID 사용 주파수대역을 만족하며 전방향성 방사패턴을 갖는 것을 확인하였다. 안테나의 크기는 $0.176\lambda_0 \times 0.176\lambda_0 \times 0.03\lambda_0$ 로서 소형 RFID 리더 안테나로 사용 가능할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] G.V. Eleftheriades, A.K. Iyer, and P.C. Kremer, "Planar negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines" IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 50, No. 12, pp. 2702-2712, 2002.
- [2] A. Sanada, C. Caloz, and T. Itoh, "Planar distributed structures with negative refractive index" IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 52, No. 4, pp. 1252-1263, 2004.
- [3] A. Sanada, C. Caloz, and T. Itoh, "Novel zeroth-order resonance in composite right/left-handed transmission line resonators," Asia-Pacific Microwave Conference, Vol. 3, pp. 1588-1591, 2003.
- [4] J.G. Lee and J.H. Lee, "Zeroth order resonance loop antenna," IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol. 55, No. 3, pp. 994-997, 2007.



(a) E-plane (x-z plane)



(b) H-plane (x-y plane)

그림 8. 위치추적용 UHF RFID 리더 안테나의 모의 실험 된 방사패턴

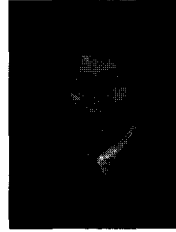
Fig. 8. Radiation pattern of location positioning UHF RFID reader antenna

$k=3.1\text{mm}$, $gap=2\text{mm}$, via의 지름=0.3mm 이고 CRLH 전송선로 등가회로의 파라미터 값은 $C_R=0.96\text{pF}$, $L_L=48.68\text{nH}$ 으로 확인되었다. 여기서 식(4)를 이용하면 ZOR 주파수는 736MHz로 계산될 수 있다. 그림 7은 모의실험 된 반사계수로서 ZOR 주파수는 910MHz이며 UHF 대역 RFID 리더 안테나의 사용 주파수 대역 (-10dB, 대역폭: 907~914MHz)을 만족하는 것을 확인할 수 있다. ZOR 주파수에서의 모의 실험된 방사패턴은 그림 8과 같이 나타나며 이때, 최대이득은 2.24dBi이며 이득변화는 0.3dB이다. 제안된 위치추적용 RFID 리더 안테나의 전체 크기는 $58\text{mm} \times 58\text{mm} \times 10\text{mm}$ ($0.176\lambda_0 \times 0.176\lambda_0 \times 0.03\lambda_0$)이며 그림 8과 같이 전방향성 방사특성을 가지면서도 구조적으로 안정한 형태이다. 또한, UHF RFID 사용 주파수 대역을 만족하므로 위치추적용 UHF RFID 리더 안테나에 적합한 것을 알 수 있다.

저 자 소 개



박 재 현(학생회원)
 2005년 2월 홍익대학교 전자전기
 공학부 (공학사)
 2005년 9월~현재 홍익대학교
 전파통신공학과 석사과정
 <주관심분야 : 마이크로파 및 밀리
 미터파 회로설계, Meta-material>



추 호 성(정회원)
 1998년 2월 한양대학교
 전파공학과 (공학사)
 2000년 8월 미국 Univ. of Texas
 at Austin 전자전기공학부
 (공학석사)
 2003년 5월 미국Univ. of Texas
 at Austin 전자전기공학부
 (공학박사)

2003년 6월~2003년 8월 미국Univ. of Texas at
 Austin 전자전기공학부 (Post Doctor)
 2003년 8월~현재 홍익대학교 전자전기공학부
 조교수

<주관심분야 : 초소형 안테나, 최적화 알고리즘을
 이용한 안테나 설계, RFID용 태그 및 리더 안테나>



류 영 호(학생회원)
 2003년 2월 제주대학교 전자전기
 공학부 (공학사)
 2005년 2월 경북대학교 전파통신
 공학과 석사 (공학석사)
 2007년 2월~현재 경북대학교
 전자공학과 박사과정

<주관심분야 :마이크로파 및 밀리미터파 회로설
 계, Meta-material>



이 정 해(정회원)
 1985년 2월 서울대학교
 전기공학과 (공학사)
 1988년 2월 서울대학교
 전기공학과 (공학석사)
 1996년 3월 UCLA 전기공학과
 (공학박사)

1993년 3월~1996년 2월 General mics
 교환연구원

1996년 3월~1996년 8월 UCLA 전기공학과
 Postdoctor

1996년 9월~현재 홍익대학교 전자전기공학부
 부교수

<주관심분야 :마이크로파 및 밀리미터파 회로설
 계, 밀리미터파 진단, Meta-material>



김 동 진(학생회원)
 2005년 2월 홍익대학교 전자전기
 공학부 (공학사)
 2007년 2월 홍익대학교 전파통신
 공학과 석사 (공학석사)
 2007년 2월~현재 홍익대학교
 전파통신공학과 박사과정

<주관심분야 :마이크로파 및 밀리미터파 회로설
 계>