

직각 링과 용량성 결합된 마이크로스트립 패치 구조의 새로운 2차원 메타 재질 구조 CRLH 0차 공진 안테나의 설계

Design of a Novel 2D-Metamaterial CRLH ZOR Antenna with a Microstrip Patch Capacitively Coupled to a Rectangular Ring

장 건 호 · 강 승 택

Geonho Jang · Sungtek Kahng

요 약

본 논문에서는 Metamaterial CRLH 구조 기반의 0차 공진현상이 발생하는 새로운 직각 패치 안테나가 제안된다. 일반 마이크로스트립 패치 구조의 기본 공진 모드인 반파장 공진이나 반파장 공진의 양의 정수배가 아닌 구조 전체에 전계가 같은 위상을 갖게 하면서, 기존에 발표된 다수의 금속 셀들이 일렬 연결된 1차원 0차 공진 안테나의 구조와 달리 금속 패치 주위에 하나의 용량성 결합 직각 링만을 부착하는 구조를 제안하는 것이다. 2.4 GHz에서 0차 공진 특성을 갖도록 설계된 등가회로에 따른 물리 구조의 치수들이 입력된 3차원 전자장 분석기에서 안테나의 성능에 대한 모의시험을 수행한다. 설계 결과 2.4 GHz에서 공진점을, 그리고 이득과 효율은 각각 5 dB와 98 %를 얻었다. 또한 본 논문이 제안하는 안테나가 마이크로스트립 패치 안테나의 장점인 low-profile과 모노폴 안테나의 장점인 전방향 패턴을 동시에 가지는 특징이 논의된다.

Abstract

In this paper, a novel rectangular patch antenna is proposed to have Zeroth Order Resonance(ZOR) generated based on the Metamaterial Composite Right- and Left-Handed(CRLH) structure. Making the in-phase electric field over the entire antenna other than a half-wavelength as the fundamental resonance mode of a standard microstrip patch or its positive multiple, the metallic patch is suggested to be capacitively coupled with only one surrounding rectangular ring, different from the previous 1D ZOR antennas commonly having several metal cells in line. The performance of the proposed antenna is simulated by a 3D field solver that inputs the sizes of the physical structure corresponding to the equivalent circuit designed to have ZOR at 2.4 GHz. Consequently, the resonance frequency, the gain and the antenna efficiency are observed 2.4 GHz, 5 dB and 98 %, respectively. Besides, the important property of the proposed antenna is addressed as the combination of the low profile as an advantage of microstrip patch antennas, and the omnidirectional field pattern typical of monopole antennas.

Key words : Metamaterial, CRLH, ZOR Antenna, Patch Antenna, Rectangular Ring

I. 서 론

무선 통신 서비스에 대한 수요가 급증하면서 기

술적 요구 사항이 까다로워지고 있다. 기존의 성능을 뛰어넘어야 시장에서 생존할 수 있는 가운데 통신 시스템 개발자들은 초고주파 부품과 안테나의 성

인천대학교 정보통신공학과(Department of Information and Telecommunication Engineering, University of Incheon)

· 논문 번호 : 20091127-06S

· 교신저자 : 강승택(e-mail : s-kahng@incheon.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 2월 17일

능 개선 기법과 소형화 설계법에서 해답을 찾고 있다.

최근 안테나 소형화나 성능 개선에 있어서 Metamaterial에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. Metamaterial은 특정 주파수에서 자연 상태의 물질로는 존재하지 않는 음의 유전율 또는 음의 투자율을 가지는 인공적인 물질로써, 전송 선로로 구현할 때는 기존의 right-handed(RH) 특성에 left-handed(LH) 특성을 가지는 전송 선로를 추가시켜 구현한다. 특히 전파상수가 0인 경우에는 파장이 무한대와 같아지게 되므로 전송 선로의 물리적인 길이와는 상관없이 구조상에 동위상의 전자장을 형성할 수 있으며, 부품의 소형화나 성능 개선을 얻을 수 있다^{[1][2]}.

Metamaterial을 안테나에 이용한 경우, CRLH 전송 선로의 단위 셀을 주기적으로 연결시켜 나타나는 누설파를 이용한 Leaky wave 안테나와 공진기를 이용하는 공진형(resonant) 안테나 등이 있다^{[3]-[6]}.

특히 0차 공진(ZOR)을 형성하여 안테나를 작게 만들되 성능 열화도 최소화한 설계 결과들이 발표되었다^{[2]-[6]}. 0차 공진 안테나로서 가장 최초이면서 기존의 0차 안테나 구조의 모태가 된 A. Lai의 논문을 보면 버섯(mushroom) 구조의 셀들을 일렬로 배열하고 개방형 종단을 취하면서 1~3 GHz 영역에서 공진하지만 동위상인 전계 분포를 통해 모노폴 안테나의 방사 패턴을 보인다^[3]. T. Itoh는 버섯 구조의 직접 연결과 갭 결합으로 다양한 구성을 시도하며, 0차 공진과 모노폴 패턴의 결과를 보고하고 있다^{[4][5]}. 참고문헌 [6]은 A. Lai 구조를 사용하면서 대역을 9~10 GHz로 옮겼으며, 갭을 없애며 ENG의 0차 공진을 얻었다. 참고문헌 [7]은 역시 버섯 구조를 단위 셀로 사용하지만 2x3의 2차원 배열형으로 확장하여 모노폴 패턴의 이득을 높였다.

본 논문에서는 기존의 0차 공진 안테나들이 취하는 버섯 구조 주기 배열 형태를 벗어나기 위해, 마이크로스트립 패치를 감싸는 하나의 직각 링만을 사용하여 용량성 갭 결합을 만들고, 이를 이용한 0차 공진을 얻고 있다. 특히 0차 공진 안테나를 2차원 주기 배열 방식을 따르지 않고, 단일 셀 형식으로도 큰 자기전류 루프가 형성되어 기존 0차 공진 소형 모노폴이 가지는 이득을 크게 향상시킬 수 있다. 이를 확인하기 위해 설계 과정과 등가회로 구성 및 요소의 계

산 과정 이후에 정확도가 높은 3차원 전자장 분석기인 CST-MWS를 이용하여 제안하는 물리적 구조에 대한 반사 손실, 0차 공진상의 전계 분포, 패턴 이득, 효율을 관찰한다. 특히, 설계 방법과 모의시험 결과의 타당성을 증명하기 위하여 CST-MWS의 예측치는 HFSS의 예측치와 비교된다. 그리고 제안된 구조와 설계 등가회로의 반사 손실 데이터의 일치성도 제시된다.

II. 이론

2-1 Metamaterial 구조의 특성

유전율과 투자율에 따라 매질의 특성을 나타낼 수 있다. 유전율과 투자율이 모두 양수인 경우 일반적인 RH 영역을 나타낸다. 이 영역에서는 에너지의 전달 방향인 군속도와 위상 속도가 동일한 방향을 나타낸다. 음의 유전율과 양의 투자율을 갖는 경우 Epsilon Negative(ENG) 영역이다. ENG 영역은 등가 회로적으로 직렬 커패시턴스가 없는 구조가 될 수 있다. 양의 유전율과 음의 투자율을 갖는 경우는 Mu Negative(MNG) 영역이다. MNG 영역은 병렬 인덕턴스가 없는 구조가 된다^[1].

Double Negative(DNG) 영역, 즉 음의 유전율과 음의 투자율을 갖는 경우, 군속도와 위상 속도가 반대 방향을 나타낸다. 본 논문에서는 DNG 영역 특성을 이용한 안테나 설계를 제안하도록 한다.

그림 1은 일반적인 Metamaterial CRLH 전송 선로

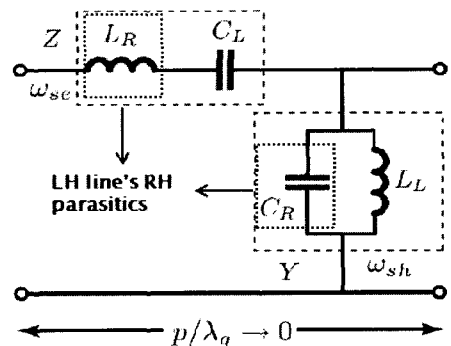


그림 1. 일반적인 Metamaterial CRLH 전송 선로
Fig. 1. Conventional CRLH Metamaterial CRLH transmission line.

직각 링과 용량성 결합된 마이크로스트립 패치 구조의 새로운 2차원 메타 재질 구조 CRLH 0차 공진 안테나의 설계

를 나타낸 것이다. CRLH 전송 선로는 직렬 L_R , C_L 와 병렬 C_R , L_L 로 구성되어 있다. 직렬 인덕턴스(L_R)와 병렬 커패시턴스(C_R)가 right-handed(RH) 특성을 나타내고, 직렬 커패시턴스(C_L)와 병렬 인덕턴스(L_L)가 left-handed(LH) 특성을 나타낸다.

각각의 RH, LH 특성에 의해 차단 주파수가 결정되어 통과 대역이 형성된다. 또한 L_R , C_L 에 의해 직렬공진(ω_{se}), C_R , L_L 에 의해 병렬 공진(ω_{sh})이 일어난다. 이 두 주파수가 서로 다를 경우에는 unbalanced 형태로 bandgap이 형성되어 차단 대역 특성이 나타나며, 서로 같을 경우에는 balanced 형태가 된다.

한편, CRLH 전송 선로 전체의 위상 속도인 β_{total} 은 RH 영역의 β_R 와 LH 영역의 β_L 의 합에 의해 결정되며, LH 영역의 β_L 이 음의 부호를 가지며 관련 수식들은 참고문헌 [1], [2]에서 확인된다.

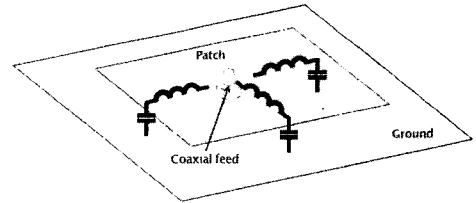
만약 β_{total} 이 0의 값을 가지게 되면 0차 공진이 발생하게 되고, $\beta_{total}=0$ 인 경우 파장이 무한대와 같아지므로 전송선 및 공진기의 전체에 걸쳐 동위상을 가지게 된다. 따라서 물리적인 길이에 상관없이 같은 변화를 가지는 전계와 자계의 형성이 가능하며, 이는 부품의 소형화 및 새로운 특성을 가질 수 있는 방법이 된다. 즉, 마이크로스트립 구조에서 모노폴의 방위각에서 보이는 전방향 특성이 형성될 수 있는 것이다

2-2 제안하는 안테나 구조의 등가회로

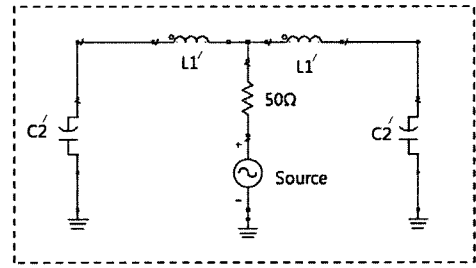
먼저 그림 2와 같이 일반 패치 안테나 구조를 소개하면 잘 알려져 있듯이 접지면 위에 직각 패치가 있으며, 프로우브를 통해 급전이 이뤄지고 있다.

일반적인 패치 안테나를 등가회로적으로 보았을 경우, 그림 2(b)처럼 패치에 흐르는 전류 경로의 직렬 인덕턴스 성분(L_R), 패치와 접지면 사이의 전계에 의한 병렬 커패시턴스 성분(C_R)을 가지고 있다. 0차 공진을 유도하기 위해 인위적으로 추가해야 될 직렬 커패시턴스(C_L)와 병렬 인덕턴스(L_L) 성분을 포함하면 그림 3(c)와 같은 등가회로가 된다. 2.4 GHz 공진을 위한 각 회로의 L , C 값은 표 1과 같다.

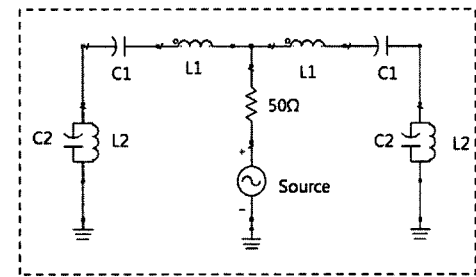
그림 3에서 보는 것과 같이 일반 패치 안테나를 위해 전송 선로 형태로 등가화한 모습이다. 전기적 길이는 $\lambda/4$ 인 단락 회로(open ended)이다^[1].



(a) 일반 마이크로스트립 패치 안테나의 L, C 성분
(a) Conventional patch antenna's L, C components



(b) 일반 패치 안테나 등가회로
(b) Equivalent circuit of conventional patch antenna



(c) CRLH 0차 공진용 패치 안테나 등가회로
(c) Equivalent circuit of CRLH ZOR patch antenna

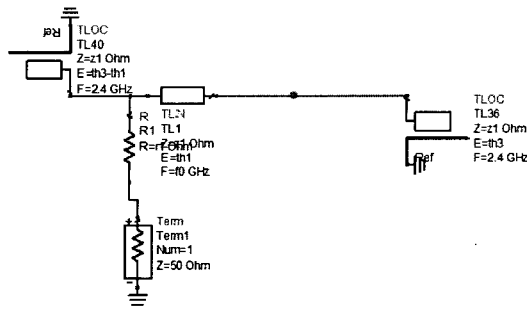
그림 2. 일반 및 제안 0차 공진 안테나 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of the standard and ZOR patch antenna(lumped element).

표 1. L, C로 구성된 등가회로 값

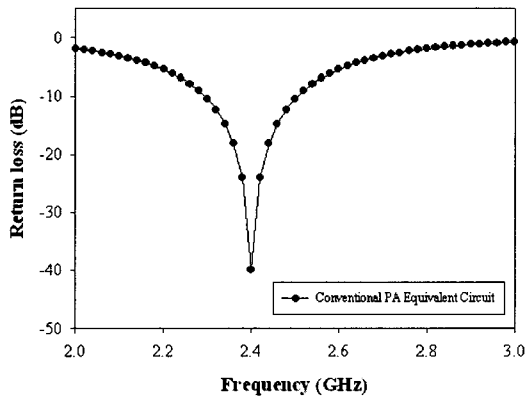
Table 1. Parameters of equivalent circuit(L, C).

구분	일반 패치 안테나	2D CRLH 안테나
중심 주파수	2.4 GHz	2.4 GHz
직렬 인덕턴스(L_1' or L_1)	2.8 nH	2.8 nH
직렬 커패시턴스(C_1)	-	0.9 pF
병렬 인덕턴스(L_2)	-	2.1 nH
병렬 커패시턴스 (C_2' or C_2)	1.57 pF	0.001 pF

그림 4는 일반적인 패치 안테나의 등가회로를 CRLH 전송 선로 형태로 직렬 커패시터와 병렬 인덕터



(a) 일반 패치 안테나의 등가회로
(a) Equivalent circuit of conventional patch antenna



(b) 일반 패치 안테나 등가회로의 주파수 응답
(b) Frequency response of equivalent circuit: Conventional patch antenna

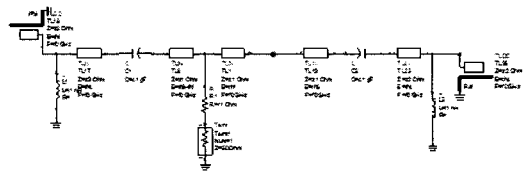
그림 3. 일반 패치 안테나의 전송 선로 등가회로
Fig. 3. Equivalent circuit of conventional patch antenna (transmission line).

표 2. 전송 선로 형태의 등가회로 값
Table 2. Parameters of equivalent circuit(transmission line).

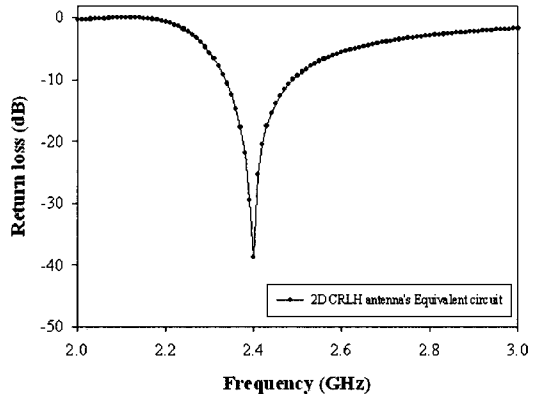
구분	일반 패치 안테나	2D CRLH 안테나
중심 주파수	2.4 GHz	2.4 GHz
전기적 길이	$\lambda/4(90^\circ)$	$\lambda/4(90^\circ)$
직렬 커패시턴스	-	2 pF
병렬 인덕턴스	-	3.5 nH

를 추가하였다. 전체적인 선로의 전기적 길이는 $\lambda/4$ 를 유지하였다. 등가회로에 적용된 파라미터들의 값은 표 2와 같다.

III. 직각 2차원-CRLH 안테나의 설계 및 모의 실험



(a) 제안된 0차 공진 안테나의 등가회로
(a) Equivalent circuit of proposed ZOR patch antenna



(b) 제안된 0차 공진 안테나 등가회로의 주파수 응답
(b) Frequency response of equivalent circuit: Proposed ZOR patch antenna

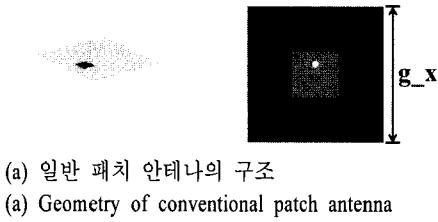
그림 4. 제안된 0차 패치 안테나의 전송 선로 등가회로
Fig. 4. Equivalent circuit of the proposed ZOR patch antenna(transmission line).

기존의 패치 안테나를 CRLH 0차 공진 안테나 형태로 변형하기 위해서 직각 링과 패치와 via를 이용한다. 패치 안테나와 직각 링 스트립의 간격에서 직렬 커패시턴스를 유도하며, 접지된 단락 핀(via)를 통하여 병렬 인덕턴스를 얻어 0차 공진을 발생시킨다.

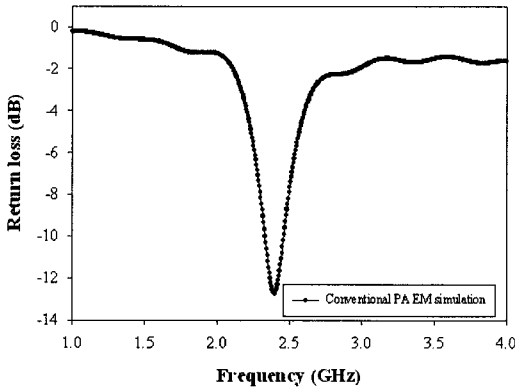
그에 앞서, 제안된 안테나 구조의 비교를 위해 먼저 기본 패치 안테나를 설계한다. 표 1, 2에서 보는 것과 같이 중심 주파수는 2.4 GHz로 설정하였으며, CST-MWS에 의한 3D EM 모의실험을 통해 설계된 안테나의 구조와 주파수 응답은 그림 5와 같다. 안테나의 크기는 패치의 크기 $p_x=53$ mm($\approx \lambda/2$), 접지판의 크기 $g_x=150$ mm, 패치의 높이 $h=5$ mm이다.

그림 5의 일반 패치 안테나의 등가회로 모의실험 반사 손실 결과는 그림 3과 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 마이크로스트립 패치 안테나의 전기적 특성을 잘 나타내는 다수의 모델들이 발표되어 왔으며, 본 논문의 설계의 기초에 해당하는 집중 정수 등가회로

직각 링과 용량성 결합된 마이크로스트립 패치 구조의 새로운 2차원 메타 재질 구조 CRLH 0차 공진 안테나의 설계



(a) 일반 패치 안테나의 구조
(a) Geometry of conventional patch antenna



(b) 일반 패치 안테나의 주파수 응답
(b) Frequency response of conventional patch antenna

그림 5. 일반 패치 안테나
Fig. 5. Conventional patch antenna.

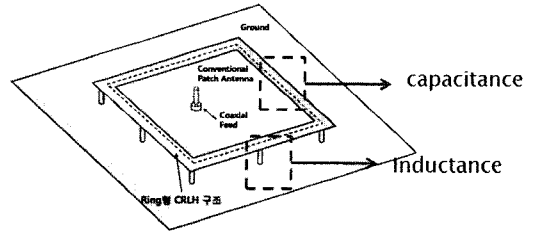
와 분포 정수(전송선 기반) 모델들 역시 마이크로스트립 패치 안테나의 전기적 특성을 잘 반영하고 있음을 확인할 수 있다.

여기에 사용된 등가회로의 ZOR version과 3차원 전자장 모의시험기를 기반으로 그림 4의 회로소자들을 고려한 물리적 구조를 다음과 같이 얻을 수 있다.

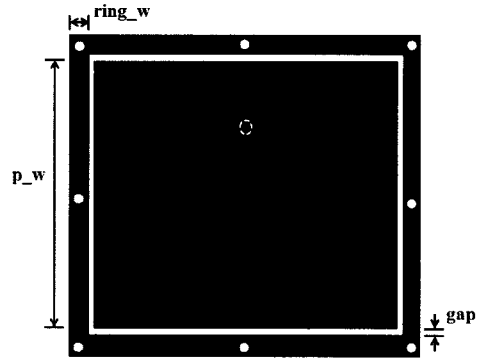
앞서 언급하였듯이, 기존의 마이크로스트립 패치 안테나에 유한 구조로서 CRLH형 0차 공진을 유도하기 위해 직렬 C 를 직각 링과의 갭으로, 병렬 L 을 직각 링의 단락 핀(via)로 구현하는 형태이다. 제안하는 구조가 원하는 특성에 도달하기 위해 다음의 파라미터 스테디를 수행하였다.

CRLH 구조의 직렬 C 를 결정하는 갭의 크기가 커질수록 공진점은 위쪽으로 이동한다. 변화하는 갭의 크기 중에서 0.2 mm가 가장 적합한 값을 알 수 있다. 또한 갭과 함께 중요한 파라미터의 하나인 단락 핀을 변화시키면서 공진점의 변화 특성을 살펴보고자 한다.

직각 링에 부착되는 단락 핀의 개수를 2개에서 16



(a) 제안된 0차 공진 패치 안테나: 3D 구조
(a) 3D geometry of proposed DNG ZOR antenna



(b) 제안된 0차 공진 패치 안테나의 방사체: 상면도
(b) Proposed DNG ZOR patch antenna: Top view

그림 6. 제안하는 DNG 0차 공진 패치 안테나의 구조
Fig. 6. Proposed DNG ZOR patch antenna's geometry.

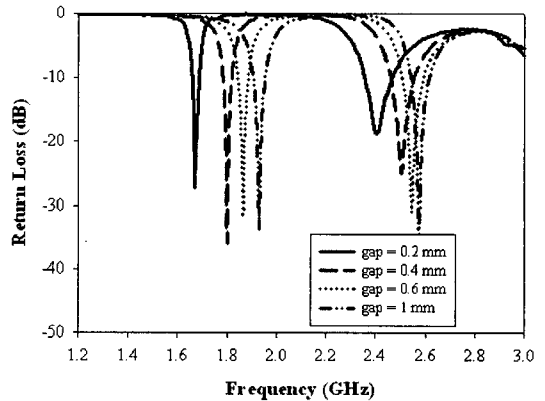


그림 7. 제안 구조의 갭 크기에 따른 공진점
Fig. 7. Proposed ZOR patch antenna's resonance vs. varied gap.

개까지 변화시켰다. 이 때 단락 핀들은 경우마다 등간격을 유지한다. 위의 실험 결과 8개가 가장 적합한 개수임을 알 수 있다. 증가되는 단락 핀들은 병렬 L 을 많이 늘리고 전류 경로를 나눠 공진점이 상승하게 하는 특성을 보인다.

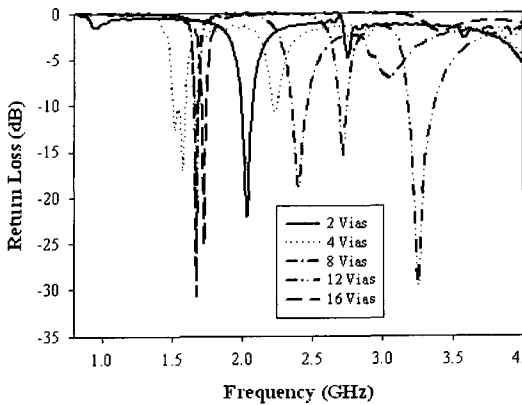


그림 8. 제안 구조의 단락 핀 갯수에 따른 공진점
Fig. 8. Proposed ZOR patch antenna's resonance vs. varied number of the vias for the ring.

이와 같은 중요 물리 파라미터들에 대한 영향 연구를 통해 최종적으로 얻은 제안한 직각 링-패치 안테나 구조의 치수는 $p_w=60$ mm ($\approx \lambda/2$), $ring_w=5$ mm ($\approx \lambda/25$), $gap=0.2$ mm이며, 반경이 0.1 mm인 via는 총 8개인 형태로 구성되어 있다. 패치의 높이 h 는 일반 패치 안테나와 동일하게 5 mm이다.

그림 9(b)는 2.4 GHz에서 공진하는 일반 패치 안테나, 제안된 직각 2차원-CRLH 안테나와 직각 2차원-CRLH 안테나에서 직각 링형 스트립만 제거한 후 안테나의 주파수 응답을 비교한 것이다.

일반적인 패치 안테나에 인위적으로 CRLH 구조인 링형 스트립을 적용하여 0차 공진이 발생하여도 주파수 응답 특성 및 대역폭이 크게 변하지 않는 것을 확인할 수 있다.

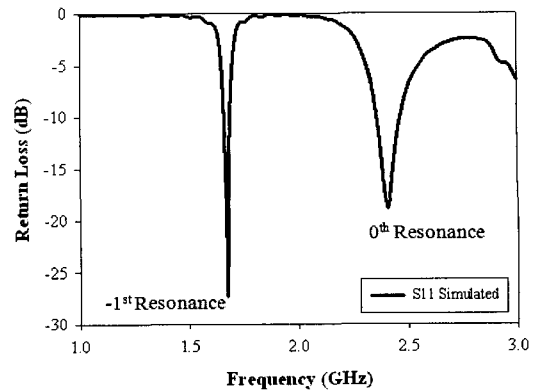
다음은 제안된 직각 2차원-CRLH 안테나의 0차 공진 조건을 확인하고자 한다.

0차 공진을 확인하는 방법들은 여러 가지가 있지만, 별도의 파라미터 추출 기법 없이 안테나의 전계 벡터 분포를 확인으로 0차 공진을 확인할 수 있다.

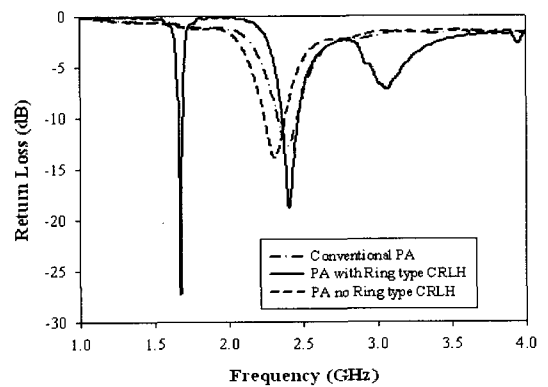
0차 공진이 발생하면 파장이 무한대와 같아지므로 안테나 전체에 걸쳐 위상 변화가 없게 되어 동일한 전계벡터 분포를 나타내게 된다.

그림 10(a)에서 보는 것과 같이 일반적인 패치 안테나의 경우 패치가 단락(open) 상태이기 때문에 양쪽 모서리에서의 전압이 최대로 발생하게 되어 전계 강도가 최대로 나타나며, 그 방향은 반대가 된다.

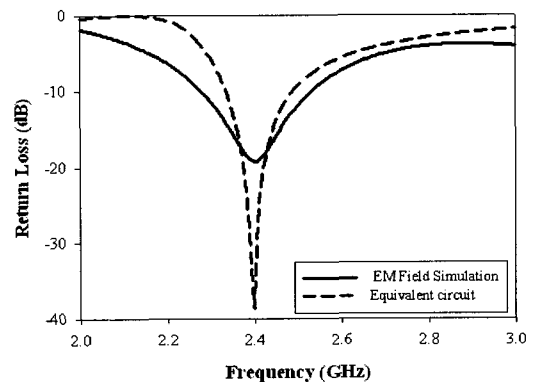
이와는 상대적으로 그림 10(b)의 제안된 직각 링



(a) 제안된 0차 공진 안테나의 주파수 응답
(a) Frequency response of proposed ZOR patch antenna



(b) 일반 패치 안테나와 제안된 0차 공진 안테나의 주파수 응답 비교
(b) Comparison between conventional patch antenna and proposed ZOR patch antenna

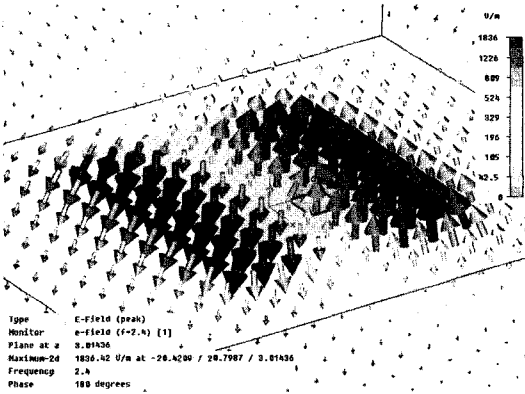


(c) 이론 값과 모의 실험의 주파수 응답 비교
(c) Comparison between equivalent circuit and EM field simulation result

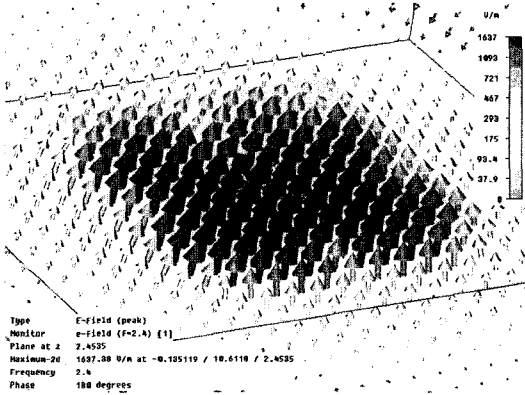
그림 9. 일반 패치 안테나와 제안된 0차 공진 안테나의 주파수 응답

Fig. 9. Frequency response between conventional patch antenna and proposed ZOR antenna.

직각 링과 용량성 결합된 마이크로스트립 패치 구조의 새로운 2차원 메타 재질 구조 CRLH 0차 공진 안테나의 설계



(a) 일반 패치 안테나의 전계 분포
(a) E-field distribution of conventional patch antenna



(b) 제안된 0차 공진 안테나의 전계 분포
(b) E-field distribution of proposed 2D-CRLH antenna

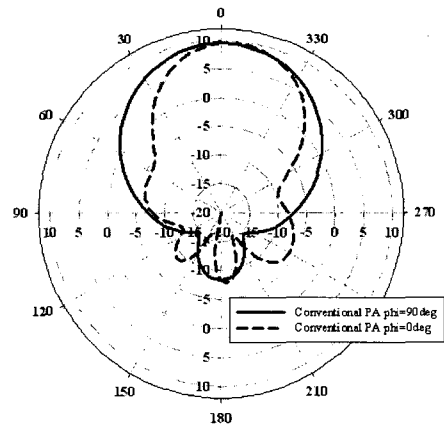
그림 10. 일반 패치 안테나와 제안된 0차 공진 안테나의 전계 분포 비교

Fig. 10. Comparison of E-field distribution between conventional patch antenna and proposed 2D-CRLH antenna.

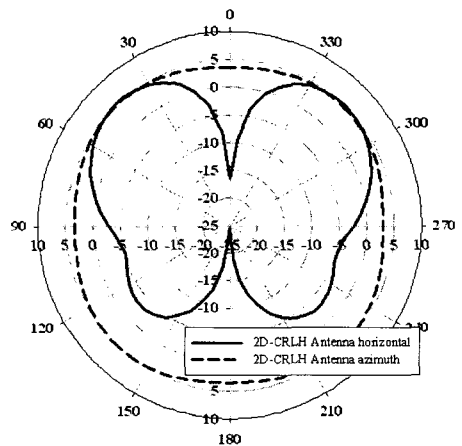
과 용량 결합의 0차 공진 패치 안테나의 경우, 0차 공진이 발생하게 되어 안테나 패치 전반에 걸쳐 동일한 전계벡터 분포 및 강도를 보이고 있다.

다음은 방사 패턴 결과이다. 그림 11(a)에서 일반적인 패치의 broadside 방사 패턴을 확인할 수 있는 것과는 달리 그림 11(b)는 고도각 방사 패턴 0°와 180°에 null점이 발생하는 모노폴 안테나 패턴이 발생한 것을 볼 수 있다.

이는 일반적인 패치에 인위적으로 0차 공진을 발생시키게 되면 패치와 수직으로 전계 벡터가 균일하게 분포되기 때문에 주위를 한 흐름을 가지는 자계 전류가 발생되어 모노폴과 같은 방사 패턴이 형성된



(a) 일반 패치 안테나의 방사 패턴
(a) Radiation pattern of conventional patch antenna



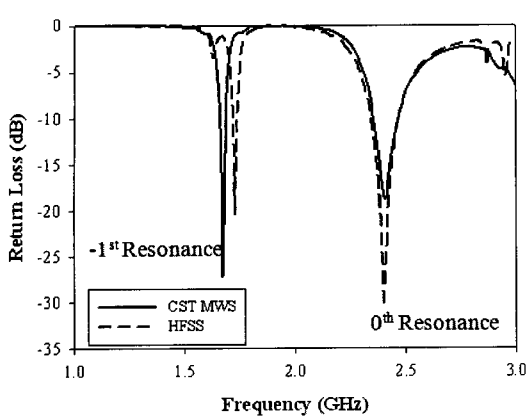
(b) 제안된 0차 공진 안테나의 고도각, 방위각 방사 패턴
(b) Horizontal and azimuth radiation pattern of proposed ZOR antenna

그림 11. 일반 패치 안테나와 제안된 0차 공진 안테나의 방사 패턴 비교

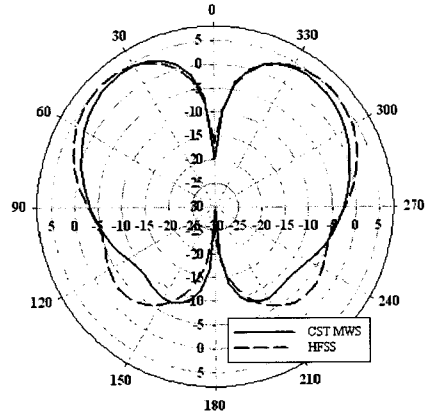
Fig. 11. Comparison of radiation patterns between the conventional patch antenna and proposed ZOR antenna.

다. 따라서 전계가 향하는 방향으로 null 점이 발생하게 된다. 이러한 방사 null 점의 영향으로 후방 방사를 줄일 수 있게 된다. 동시에 기존의 0차 공진 안테나와 달리 방사 면적이 큰 상태에서 0차 공진을 유도하여 이득도 많이 증가하였다.

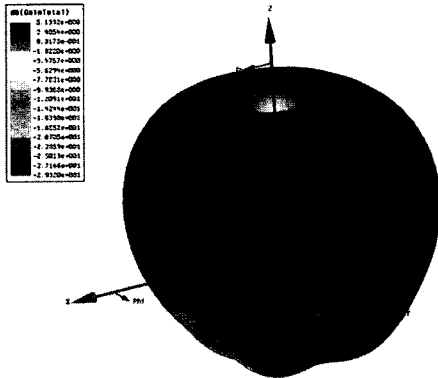
기존의 패치 안테나의 전체 이득은 9.5 dBi, 전체 효율은 86 %이고, 제안된 직각 링 2차원-0차 안테나의 최대 이득과 전체 효율은 각각 5 dBi, 95 %이다. 마이크로스트립 패치 계열로서는 이득이 다소 감



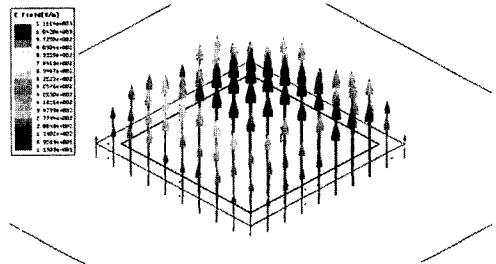
(a) CST-MWS와 HFSS의 반사 손실 비교
 (a) Comparison between CST-MWS and HFSS return loss simulation result



(b) CST-MWS와 HFSS의 방사 패턴 비교
 (b) Comparison between CST-MWS and HFSS radiation pattern simulation result



(c) HFSS의 3차원 방사 패턴 결과
 (c) 3D radiation pattern simulation result using HFSS



(d) HFSS의 2.4 GHz에서의 전계 분포
 (d) E-field distribution simulation result at 2.4 GHz using HFSS

그림 12. CST-MWS와 HFSS의 모의시험 비교
 Fig. 12. Comparison of simulation results using CST-MWS and HFSS.

소되어 보이지만 패치 안테나의 low-profile을 유지 하면서 이득이 증가한 모노폴 안테나 패턴을 가짐을 알 수 있다.

모의시험은 CST-MWS로 시행하였으며 모의시험의 정확도를 판단하기 위하여 HFSS로 추가 모의시험하였다. 두 모의시험 결과를 비교하여 모의시험기를 사용한 것의 타당성을 제시하고자 한다.

IV. 결 론

본 논문에서는 기존의 동축선 급전 일반 패치 안테나에 적합하면서도 지금까지 발표된 주기 배열 구조를 취한 0차 공진 안테나와 달리 단일 셀로 설계

가능하게 한 직각 링-패치 0차 공진 안테나를 제안 하였다. 2차원 CRLH 등가회로 모델을 만들고 이에 적합한 패치에 용량결합된 직각 링과 이에 병렬 L 을 위한 단락 핀을 부착한 물리적 구조를 얻어 원하는 반사 손실 상의 공진점과 0차 공진전계 분포를 얻었다. 또한, 마이크로스트립의 low-profile을 유지하면서 높은 효율과 전방향성의 모노폴 특성을 구현할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] Christophe Caloz, Tatsuo Itoh, *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Micro-*

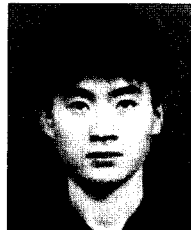
- wave Application*, John Wiley & Sons, 2006.
- [2] 주정호, 강승택, "메타 재질 CRLH 구조를 이용한 넓은 차단 대역을 갖는 UHF WLAN용 소형 대역 통과 여파기의 설계", 전자공학회논문지, 44 TC (12), 2007년 12월.
- [3] A. Lai, C. Caloz, and T. Itoh, "Composite right/left-handed transmission line metamaterials", *IEEE Microwave Magazine*, vol. 5, no. 3, pp. 34-50, Sep. 2004.
- [4] C. J. Lee, K. M. K. H. Leong, and T. Itoh, "Composite right/left-handed transmission line based compact resonant antennas for RF module integration", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, pp. 2283-2291, Aug. 2006.
- [5] A. Lai, K. M. K. H. Leong, and T. Itoh, "Infinite wavelength resonant antennas with monopolar radiation patterns based on periodic structures", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 3, pp. 868-876, Mar. 2007.
- [6] J. -H. Park, Y. -H. Ryu, J. -G. Lee, and J. -H. Lee, "Epsilon negative zeroth-order resonator antenna", *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 12, pp. 3710-3712, Dec. 2007.
- [7] J. -G. Lee, J. -H. Lee, "Zeroth order resonance loop antenna", *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 3, pp. 994-997, Mar. 2007.

장 건 호



2009년 2월: 인천대학교 정보통신 공학과 (공학사)
 2009년 3월~현재: 인천대학교 정보통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] Metamaterial, RF 부품, 적층형 및 고이득 안테나, SI/PI 등

강 승 택



2000년 2월: 한양대학교 전자통신 공학과 (공학박사)
 2000년 4월: 한양대학교 산업과학 연구소 연구원
 2004년 2월: 한국전자통신연구원 통신위성개발센터 선임연구원
 2004년~현재: 인천대학교 정보통신 공학과 교수
 [주 관심분야] 전자파 수치 해석 및 응용, EMI/EMC 대책, 초고주파 부품 및 안테나 설계