

곡률에 독립적인 플렉서블 기판 위에 설계된 영차 공진 안테나

Flexible Zeroth-Order Resonant(ZOR) Antenna Independent of Curvature Diameter

임 인 섭 · 정 진 우 · 임 성 준

Inseop Lim · Tony J. Chung · Sungjoon Lim

요 약

본 논문에서는 가요성(flexible) 있는 영차 공진 안테나를 제안하였다. 안테나의 성능을 결정하는 본 논문의 위상 상수는 영차 공진일 때 기판의 변형에 독립적이다. Composite right/left-handed(CRLH) 전송 선로를 영차 공진 현상을 실현하기 위해 coplanar waveguide technology(CPW)를 기반으로 구현되었다. CRLH는 병렬 인덕턴스와 직렬 캐패시턴스를 추가함으로써 메타 물질로 구현된다. 추가적인 회로 변수를 만들기 위해 칩 인덕터와 갭 캐패시터가 각각 추가되었다. 제안된 ZOR 안테나는 대역폭 6.5 %와 최대 이득 0.69~1.39 dBi로 좋은 성능을 보인다. 시뮬레이션과 측정 결과를 통해서 곡면의 지름이 서로 다른 각각 30, 50, 70 mm 뿐만 아니라 평면일 때 공진 주파수와 방사 패턴이 거의 변하지 않았음을 보였다.

Abstract

In this paper, we propose a flexible zeroth-order resonant(ZOR) antenna. Its zero phase constant ensures that the antenna performance is independent of substrate deformation. A composite right/left-handed transmission line is designed based on coplanar waveguide technology to realize the zeroth-order resonance phenomenon. The CRLH is an implementation of metamaterial(left handed material) which is composed of shunt inductance and series capacitance. In order to yield additional circuitual parameter, chip inductor and gap capacitor is added, respectively. The proposed ZOR antenna provides good performances: reasonable bandwidth(6.5 %) and peak gain(0.69~1.39 dBi). Simulated and measured results show that the antenna's resonant frequencies and radiation patterns are almost unchanged at different curvature diameters of 30, 50, 70 mm, as well as for a flat surface.

Key words : Zeroth-Order Resonant(ZOR) Antenna, Flexible Substrate, Co-Planar Waveguide(CPW), Composite Right/Left-Handed(CRLH) Transmission Line

I. 서 론

현재의 무선 이동 통신은 대부분의 분야에서 적용되어 활용되고 있다. 실생활에서 사용되고 있는 휴대전화는 물론, 무선 랜 서비스를 사용하는 휴대

용 컴퓨터, 차량용 내비게이션 등의 상업용 분야에 사용되고 있을 뿐만 아니라, 군용 및 산업용 통신에서의 RFID 시스템, 항공기 및 선박용 레이더 등 매우 널리 사용되고 있다. 이러한 이동 통신의 발달은 전자기기의 소형화를 이끌어냈고, 소형화에 의하여

「본 연구는 지식경제부, 방송통신위원회 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업(정보통신)의 일환으로 수행하였음. [K1001685, 전자과 기반 진단 및 방호 기술 연구]

중앙대학교 전자전기공학부(School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University)

· 논문 번호 : 20110916-104

· 교신저자 : 임성준(e-mail : sungjoon@cau.ac.kr)

· 심사일자 : 2011년 11월 2일 · 수정완료일자 : 2011년 12월 5일

RF 부품이 집적화 되는데 점점 한계를 가져오고 있다.

제한된 공간에서 효과적으로 실장하기 위해 RF 부품들은 제한된 공간뿐만 아니라 평평하지 않은 곡면에 실장되도록 요구되어지고 있다. 특히 RF 특성이 좋으면서 가요성(flexibility)이 좋은 새로운 유전 물질들이 개발되면서 이러한 요구는 더욱 가속화 되었다^{[1]-[3]}. 그러나 일반적으로 물리적 길이에 따라 공진이 정해지는 공진형 안테나의 경우에서 기판이 휘어지거나, 평면이 아닌 곡면에 부착될 경우, 안테나의 전기적 길이가 변화되기 때문에 공진 주파수가 설계된 주파수에서 변화하거나, 방사 패턴이 왜곡되는 현상이 발생한다. 그러므로 이런 곡률 변화에도 안테나의 공진 주파수 및 방사 특성이 변화하지 않도록 제한된 안테나의 연구는 지속적으로 발표되어 왔다. 그러나 기존의 연구는 광대역을 사용하여 공진 주파수가 변화해도 목표로 하는 대역폭을 포함하도록 설계된 안테나였다^{[1],[4],[5]}.

영차 공진은 안테나의 물리적 길이와는 관계없이 공진 주파수가 결정된다^[6]. 그러므로 곡률 변화에도 공진 주파수의 변화가 없는 안테나를 제안할 수 있다. 특히 CRLH 전송 선로의 음의 모드와 영차 모드는 가요성 안테나를 구현하는데 유용하다^{[7],[8]}.

본 논문에서는 기존의 연구와는 달리 물리적인 길이와 독립적인 특성을 가지는 영차 공진 안테나를 이용하여 가요성 안테나를 제안한다. 이전에 발표된 칩 인덕터의 비대칭 구조의 안테나^[9] 뿐만 아니라 병렬 인덕턴스를 구현하기 위해 미앤더 라인을 적용한 구조와 칩 인덕터의 대칭을 적용한 구조를 추가

하여 3가지 구조를 서로 비교하였다.

II. CRLH 전송 선로

일반적인 전송 선로는 직렬 인덕턴스와 병렬 커패시터로 이루어져 있다. 이것을 Right Hand(RH) 전송 선로라 한다. Left Hand(LH) 전송 선로는 직렬 커패시턴스와 병렬 인덕턴스로 구성되어 있다. 실제로 LH를 구현하여도 RH 전송 선로 위에 구현되기 때문에, LH 특성만 나타나는 것이 아니고 주파수에 따라 LH 또는 RH 영역이 나타나게 된다. 그림 1은 CRLH 전송 선로의 등가 모델을 도시하였다. 이런 CRLH 전송 선로를 이용하여 메타 물질에서 나타나는 음의 위상 상수($\beta < 0$)와 기존 물질의 양의 유전율과 투자율을 갖는 매질에서 나타나는 양의 전파 상수가 서로 합해져서 위상 상수가 0이 되는 영차 공진이 일어나게 된다. 이 모드에서는 전송 선로의 물리적인 길이와 관계 없이 공진 특성을 보이며, 본 논문에서는 이 모드를 이용하여 물리적인 변화에 관계없는 안테나를 제안한다.

CRLH 전송 선로를 구현하기 위해서는 직렬 커패시턴스와 병렬 인덕턴스를 기존의 RH 전송 선로에 추가하여 설계한다. 주기적 경계 조건을 Bloch - Floquet 이론에 적용하여 CRLH 전송 선로의 단위 셀 분산 특성은 다음 식 (1)에 의해 정해진다.

$$\beta(\omega) = \frac{1}{\Delta} \cos^{-1} \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_L^2}{\omega^2} + \frac{\omega^2}{\omega_R^2} - \frac{\omega_L^2}{\omega_R^2} - \frac{\omega_L^2}{\omega_{sh}^2} \right) \right)$$

$$\omega_L = \frac{1}{\sqrt{C_L L_L}}, \quad \omega_R = \frac{1}{\sqrt{C_R L_R}}$$

$$\omega_{sc} = \frac{1}{\sqrt{C_L L_R}}, \quad \omega_{sh} = \frac{1}{\sqrt{C_R L_L}}$$

β : 위상 상수 Δ : 단위 셀의 길이 (1)

영차 공진 주파수는 종단 개방 경계 조건과 공진기의 병렬 임피던스 값을 도입하면 식 (2)와 같은 영차 공진 주파수를 얻어낼 수 있다.

$$\omega_{ZOR} = \omega_{sh} = \frac{1}{\sqrt{C_R L_L}} \quad (2)$$

이 식에 따르면 영차 공진 주파수는 병렬 커패시턴스(C_R)와 병렬 인덕턴스(L_L)에 의해 결정된다.

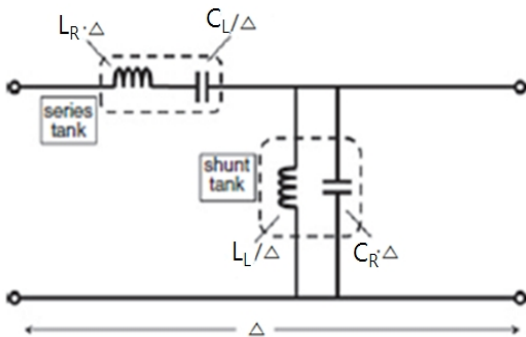


그림 1. CRLH 전송 선로의 등가 모델
Fig. 1. Equivalent circuit model of the CRLH TL.

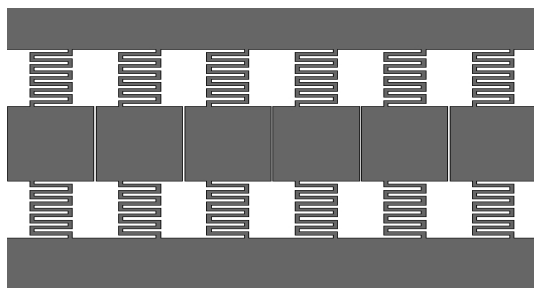
III. Coplanar Waveguide(CPW)를 이용한 CRLH의 구현

가장 널리 사용되는 구현된 전송 선로에는 마이크로스트립(microstrip) 전송 선로와 CPW(Coplanar Waveguide) 전송 선로가 있다. 마이크로스트립 구조의 경우는 기관이 결정되면 선로의 폭으로만 병렬 커패시턴스를 조절해야 하기 때문에 설계시 자유도가 작다. 반면에, CPW 전송 선로의 경우 선로의 폭과 접지면의 간격이 병렬 커패시턴스를 결정하기 때문에 더 높은 자유도를 가지고 있다. 또한, CPW 전송 선로의 경우 단랑 비아 없이 병렬 인덕턴스 구현이 가능하므로 추가적인 비아 공정이 필요 없다.

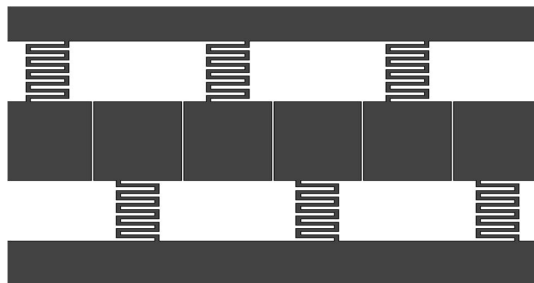
그림 2와 3은 본 논문에서 제안하는 CPW로 구현한 CRLH 전송 선로를 도시하고 있다. 그림 2(a)는 미엔더 라인 대칭 구조를 구현하였고, (b)는 비대칭 구조를 구현하였다. (a) 대칭 구조의 경우 병렬 인덕턴스(shunt inductance)가 병렬(parallel)로 연결되기 때문에 인덕턴스가 1/2로 감소하게 된다. 이는 원하는

인덕턴스를 설계하기 위해서는 2배의 크기를 가지는 인덕터가 요구되는 것이다. 특히 종단 개방 영차 공진의 경우에는 높은 병렬 인덕턴스가 더 넓은 대역폭을 이끌어 내고, 동일한 공진 주파수에서 공진할 경우 상대적으로 낮은 병렬 커패시턴스를 가지고 낮은 주파수, 즉 긴 파장에서 공진하는 영차 공진을 이끌어 낼 수 있기 때문에 대역폭이 넓으면서 전기적 소형 안테나 구현에 유리하다. 하지만 비대칭 구조의 경우 전송 선로에서의 전류 분포가 대칭적이지 않기 때문에, 방사가 발생할 때 기생 방사 성분이 높아지고, 그로 인하여 크로스 편파 레벨(cross polarization level)이 높을 수 있다. 두 구조 모두 미엔더 라인으로 병렬 인덕턴스를 구현하였다. 직렬 인덕턴스는 각각 신호선에 갭 커패시터를 추가하여 구현하였다.

미엔더 라인으로 인덕턴스를 구현할 경우, 큰 크기에 비해 인덕턴스가 높지 않고, 기생 커패시턴스가 높은 편이다. 그러므로 한정된 크기의 공간에서 높은 인덕턴스를 구현하기 어렵고, 만약 기관의 물리



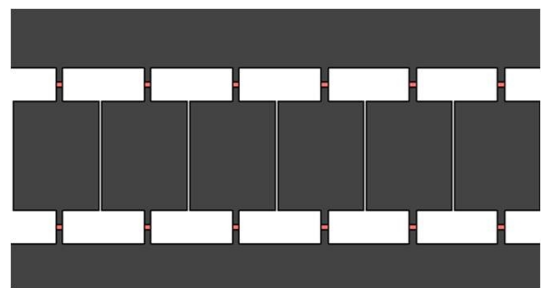
(a) 대칭 구조
(a) Symmetry structure



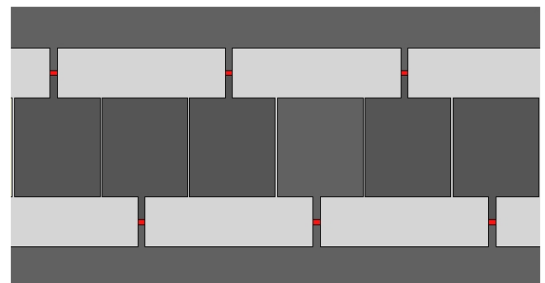
(b) 비대칭 구조
(b) Asymmetry structure

그림 2. 미엔더 라인으로 구현된 CRLH CPW 전송 선로 구조

Fig. 2. CRLH CPW using meander lines.



(a) 대칭 구조
(a) Symmetry structure



(b) 비대칭 구조
(b) Asymmetry structure

그림 3. 칩 인덕터로 구현된 CRLH CPW 전송 선로 구조

Fig. 3. CRLH CPW using chip inductors.

적인 변화가 있다면 인덕턴스의 변화가 무시하지 못할 만큼 크다. 그림 3에는 CRLH CPW구조에서 칩 인덕터(chip inductor)를 실장하여 구현한 구조를 도시하였다. 칩 인덕터를 적용하여 구현한 전송 선로는 높은 병렬 인덕턴스 구현이 가능하기 때문에 종단 개방 영차 공진 시 매우 작은 크기로 구현이 가능하다.

IV. 시뮬레이션 및 측정 결과

4.1 미앤더 라인 CRLH CPW

그림 4은 대칭 구조 미앤더 라인으로 구현한 2개의 단위 셀로 이루어진 영차 공진 안테나의 그림이다. 적절한 이득과 소형화를 위해서 2개의 단위 셀을 적용하였다. 그림 2(a)에 도시된 대칭 구조 CRLH CPW 구조를 적용하여 구현하였다. 설계 및 제작은 로저스 RO3003 기판을 사용하였다. 이 기판은 0.5 mm의 두께를 가지고 있기 때문에 가요성(flexibility)을 가지고 있어 쉽게 휘어지는 특성을 보인다. 기판의 비유전율(ϵ_r)은 3.0이며, 탄젠트 손실($\tan\delta$)은 0.0013이다. 안테나 크기는 $L_1=37.4$ mm, $W_1=40$ mm이고, 패치 크기는 $L_2=8$ mm, $W_2=10$ mm이다. 급전 선로는 CPW(Coplanar Waveguide) 형태로서 50 Ω 이 되도록 급전 선로와 패치 간의 간격(g_1)은 0.2 mm, 선로 폭(W_3)은 6 mm로 조절하여 설계하였다. 임피던스 정합을 하기 위하여 근접 급전(proximity feeding)을 선택하였다. 병렬 인덕턴스에 해당하는 부분이 미앤더

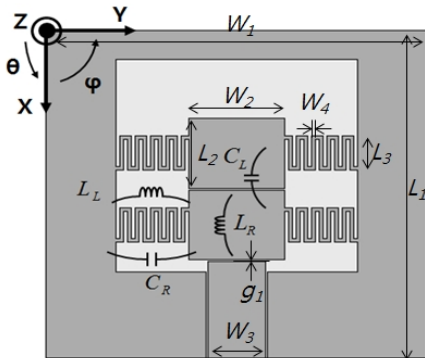
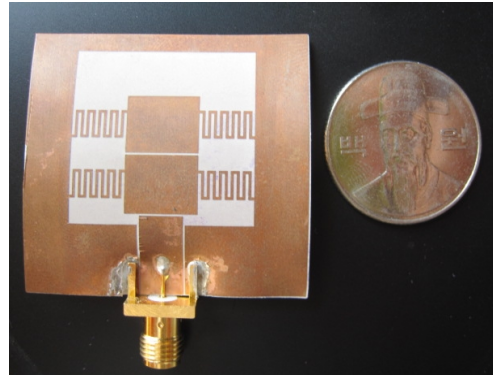
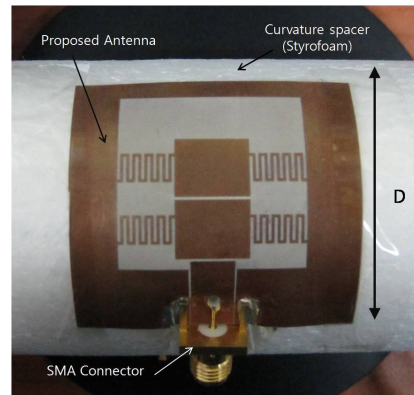


그림 4. 대칭 구조 미앤더 라인으로 구현한 CRLH TL 영차 공진 안테나

Fig. 4. Configuration of flexible CRLH TL antenna using symmetrical meander lines.



(a)



(b)

그림 5. (a) 대칭 구조 미앤더 라인으로 제작된 안테나, (b) 제작된 안테나를 스티로폼에 부착한 사진

Fig. 5. (a) Implemented antenna using symmetric meander lines, (b) antenna attached to a styrofoam.

라인으로 구형되어 있다. 미앤더 라인의 폭(W_4)은 0.4 mm이고, 길이(L_3)는 4 mm이다. 패치와 CPW 접지면 사이의 거리는 고정되어 있어 병렬 커패시턴스는 고정되어 있지만, 미앤더 라인의 길이(L_3)와 폭(W_4)을 조절함으로써 병렬 인덕턴스를 조절할 수 있다. 그러므로 식 (2)를 이용하여 원하는 공진 주파수를 얻을 수 있다.

그림 5는 제안된 안테나를 제작한 사진이다. 그림 5에는 스티로폼 원기둥이 도시되어 있고, 이는 기판의 곡률 변화를 주고 측정을 위하여 고정시킬 필요가 있기 때문에 부착되었다. 원기둥의 지름(D)은 각각 30 mm, 50 mm, 70 mm로 변경하며 측정을 하였다. 스티로폼의 유전율은 거의 1에 가까워서($\epsilon_r \approx 1.03$) 안테나에 영향을 거의 안 주므로 형태를 고정

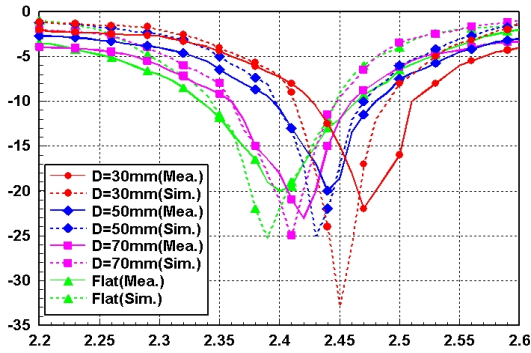


그림 6. 구부러지는 각도 변화에 따른 측정된 반사 계수 측정값
Fig. 6. Measured reflection coefficients at different curvature diameters.

하기에 매우 적절한 물질이다.

그림 6은 곡률 변화에 따른 반사 계수를 도시하였다. 반사 계수의 측정은 network 분석기를 사용하여 측정하였다. 측정된 결과와 시뮬레이션 결과, 모두 도시하였으며, 곡률이 변화되면서 반사 계수의 최저치가 오른쪽(주파수가 높은 쪽)으로 약간의 변화가 생긴다. 공진 주파수의 변화는 직경이 30 mm인 경우 평면의 경우 대비 2.51 %이다. 이는 기관의 변화에 따라 미엔더 라인의 병렬 인덕턴스가 감소하게 되고, 식 (2)에 의하여 공진 주파수가 높아짐을 의미한다. 이는 미엔더 라인의 단점이라 할 수 있다.

그림 7은 곡률 변화에 따르는 방사 패턴이다. 기관의 휘어짐에 따라 큰 변화는 관찰되지 않는다. 그러나 Null 방향이 약간씩 변화하는데, 이는 급전 선로의 방향의 변화에 기인하는 것으로 생각된다. 그

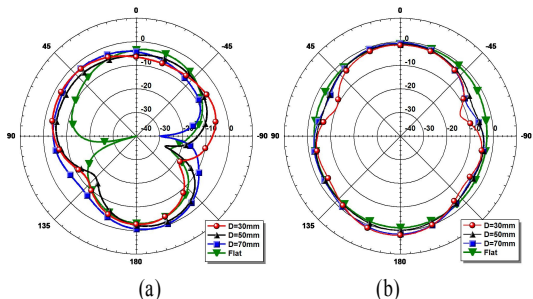


그림 7. 직경(D)의 변화에 따른 측정된 방사 패턴
(a) 전계 평면 X-Z plane, $\phi=0^\circ$, (b) H-plane X-Y plane, $\phi=90^\circ$
Fig. 7. Measured radiation patterns, $\phi=0^\circ$, (b) H-plane X-Y plane, $\phi=90^\circ$.

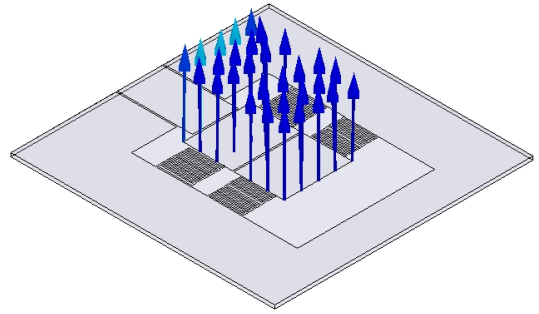


그림 8. 대칭 미엔더 라인 구조 안테나의 E-field 분포
Fig. 8. Electric-field distribution of the symmetric antenna.

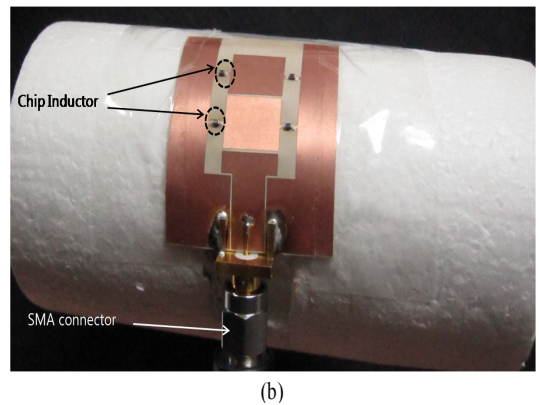
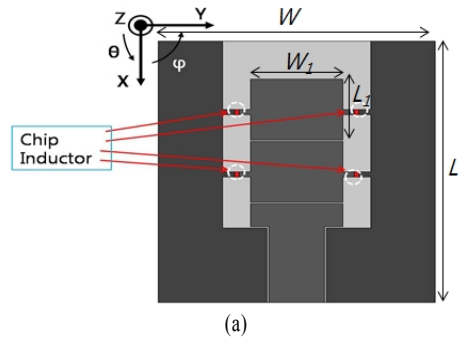


그림 9. (a) 대칭 구조 칩 인덕터로 구현한 2개의 단위 셀 안테나, (b) 제작된 대칭 구조 칩 인덕터로 구현한 2개의 단위 셀 안테나와 측정을 위한 스티로폼에 부착된 사진
Fig. 9. (a) Antenna design using symmetric chip inductors, (b) antenna attached to a styrofoam.

림 8은 기관이 평평할 때 공진 주파수 2.4 GHz에서는 E-field 분포를 나타낸 것이다. 이를 통해 방사체 상의 E-field의 위상 상수가 상수임을 보이고 있으며,

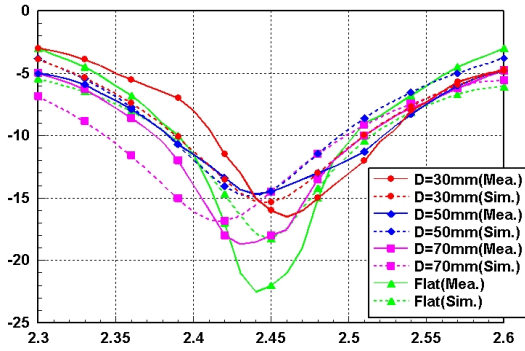


그림 10. 구부러지는 각종 변화에 따른 측정된 반사 계수 측정값
Fig. 10. Measured reflection coefficients at different curvature diameters.

이 결과를 통해 영차 공진 특성을 확인할 수 있다.

4-2 대칭 구조 칩 인덕터 CRLH CPW

그림 9는 대칭 구조를 이용하여 칩 인덕터를 실장하여 구현한 2개의 단위 셀 안테나의 도시이다. 칩 인덕터로 제작하였기 때문에 추가적인 공정이 필요하지만, 높은 인덕턴스 구현이 가능하여 공진 주파수의 튜닝이 쉽다. 제작에 사용된 인덕터는 12 nH를 이용하였다. 안테나 크기는 $L=34.4$ mm, $W=30$ mm이고, 패치 크기는 $L_1=8$ mm, $W_1=10$ mm이다. 그림 10는 제안된 안테나의 측정된 반사 계수를 도시하였다. 미엔더 라인을 적용한 구조에 비하여 반사 계수의 변화가 적음을 알 수 있다. 이는 미엔더 라인이 기판의 변화에 대하여 인덕턴스의 변화가 있음을 알 수 있다.

4-3 비대칭 구조 칩 인덕터 CRLH CPW

그림 11은 비대칭 구조를 이용하고 칩 인덕터를 실장하여 설계한 4단위 셀 안테나를 도시하였다. 안테나 크기는 $L=29.8$ mm, $W=30$ mm이고, 단위 셀은 $L_1=2$ mm, $W_1=10$ mm이다. 비대칭 구조이기 때문에 높은 병렬 인덕턴스를 가지고 있고, 매우 낮은 커패시턴스를 가져야 하기 때문에, 단위 셀의 크기가 작은 편이다. 그러므로 적절한 이득을 가지고 안정적인 진류 분포를 가지기 위해서 4개의 단위 셀을 사용하였다. 그림 12는 제안된 비대칭 안테나를 스티로폼 원기둥에 부착한 사진이며, 사진과 동일한 상황

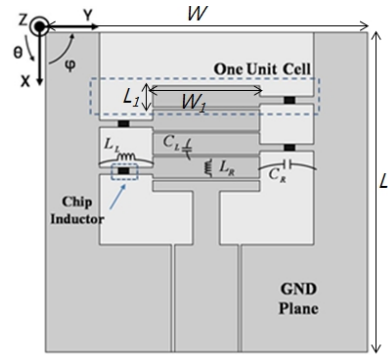


그림 11. 비대칭 구조 칩 인덕터로 구현된 4 단위 셀 안테나
Fig. 11. Geometry of the chip-inductor loaded asymmetric antenna with equivalent circuit parameters.

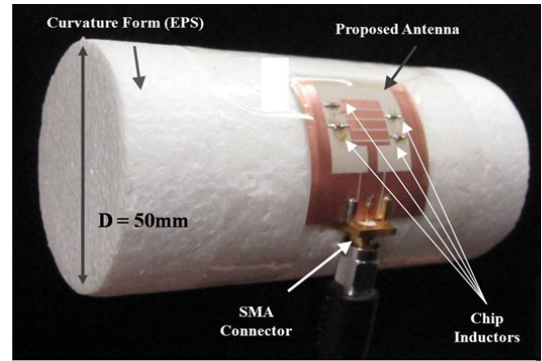


그림 12. 지름이 50 mm인 원기둥 스티로폼 위에 구현된 안테나의 원형
Fig. 12. Prototype of the chip-inductor loaded asymmetric antenna on cylindrical styrofoam with $D=50$ mm.

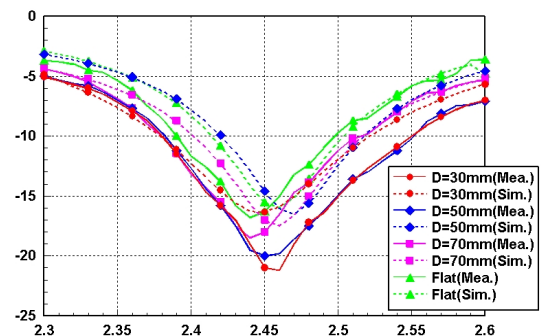


그림 13. 구부러지는 각도 변화에 따른 측정된 반사 계수 측정값
Fig. 13. Measured reflection coefficients of the chip-inductor loaded asymmetric antenna at different curvature diameters.

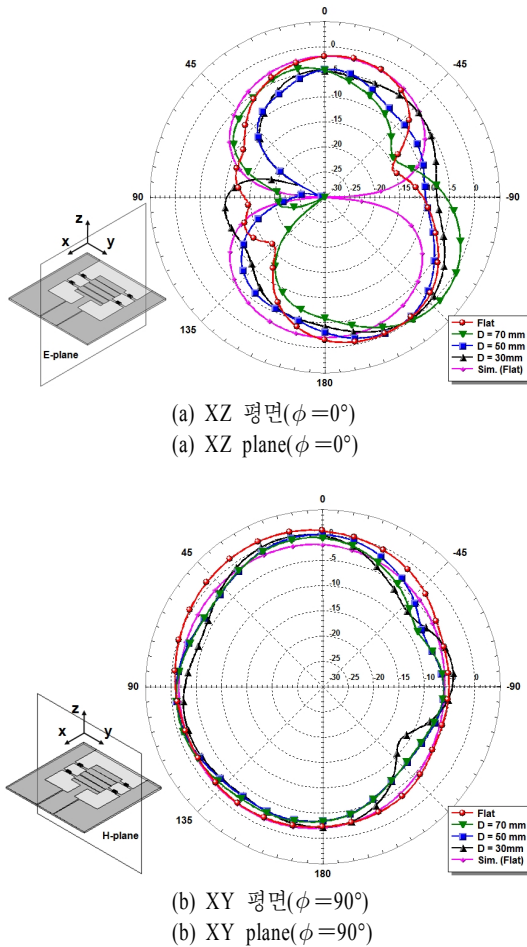


그림 14. 제안된 비대칭 구조 칩 인덕터로 구현한 안테나의 방사 패턴

Fig. 14. Radiation patterns of the chip-inductor loaded asymmetric antenna.

에서 반사 계수와 방사 패턴을 측정하였다.

그림 13은 제안된 안테나의 반사 계수를 도시한 그림으로 기관의 곡률 변화(30~70 mm)에도 상대적으로 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 특히 중심 주파수의 변화는 0.1 % 근처이며, 직경이 30 mm인 경우에만 0.5 %의 변화를 보인다. 최대 이득은 평면의 경우 1.30 dBi이며, 대역폭은 6.5 %의 값을 보인다. 그림 14는 제안된 안테나의 방사 패턴을 도시한 것으로 (a)는 XZ 평면, (b)는 XY 평면에서의 전체 크기를 도시하였다. XZ 평면에서의 방사 패턴 방향의 변화는 방사 패턴 측정 시에 정확한 broadside의 제어가 어렵기 때문에 측정상의 오차가 있을 것으로 사

료된다. 그리고 비대칭 구조이기 때문에, XY 평면에서 좌우 대칭이 약간 다를 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 곡률 변화에 독립적인 영차 공진 안테나를 제안하였다. CPW를 이용하여 구현된 CR-LH 종단 개방 안테나로 물리적인 길이에 독립적인 공진 특성을 가지고 있는 영차 공진 안테나이다. 대칭 구조이면서 미엔더 라인을 적용한 구조와 대칭 구조이면서 칩 인덕터를 적용한 구조, 마지막으로 비대칭 구조 칩 인덕터 라인을 적용한 구조를 비교하였다. 대칭 구조는 전류 분포가 안정적이기 때문에 대칭적인 방사 패턴을 보일 수 있으나, 병렬 인덕턴스가 비대칭 구조에 비하여 작아지므로 단위 셀의 크기가 상대적으로 커진다. 미엔더 라인으로 단위 셀을 구현할 경우 기관의 변화시에 미엔더 라인의 인덕턴스에 변화가 생기므로, 적합하지 않고 칩 인덕터를 이용하여 구현할 경우 추가적인 공정이 들어가지만, 인덕턴스에 변화가 거의 없으므로 적합하다고 할 수 있다. 비대칭 구조 칩 인덕터를 적용하여 구현 안테나의 경우 대역폭 6.5 %와 최대 이득 0.69~1.39 dBi로 좋은 성능을 보인다. 시뮬레이션과 측정 결과를 통해서 곡면의 지름이 서로 다른 각각 30, 50, 70 mm뿐만 아니라 평면일 때 1 % 미만의 주파수 변화가 관찰됐고, 방사 패턴의 변화가 적음이 관찰됐다.

제안된 안테나는 RFID 태그 안테나, 착용형 안테나, 곡면에 부착되는 배열 안테나 등 안테나의 실장 면이 임의적인 면을 형성하는 어플리케이션에 적용된다면 가장 효과적일 것이라고 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] S. Sheng, Z. Wu, P. Hallbjorn, K. Hjort, and A. Rydberg, "Foldable and stretchable liquid metal planar inverted cone antenna", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 57, no. 12, pp. 3765-3771, Dec. 2009.
- [2] Rogers Corporation, ULTRALAM® 3000 Liquid Crystalline Polymer Circuit Material.
- [3] A. Tronquo, H. Rogier, C. Hertleer, and L. Van Langenhove, "Robust planar textile antenna for wireless

body LANs operation in 2.45 GHz ISM band", *Electronics Letters*, vol. 42, no. 3, pp. 142-143, Feb. 2006.

[4] J. Jung, H. Lee, and Y. Lim, "Broad band flexible meander line antenna with vertical lines", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 49, no. 8, pp. 1984-1987, Aug. 2007.

[5] S. Nikollau, D. E. Anagnostou, G. E. Ponchak, M. M. Tentezeris, and J. Papapolymerou, "Compact ultra wide-band(UWB) CPW-fed elliptical monopole on liquid crystal polymer(LCP)", *IEEE Antenna and Propag. Intl. Symps.*, pp. 4657-4660, Jul. 2006.

[6] A. Lai, K. M. K. H. Leong, and T. Itoh, "Infinite wavelength resonant antennas with monopolar ra-

diation pattern based on periodic structures", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, pp. 868-876, Mar. 2007.

[7] A. Lai, T. Itoh, and C. Caloz, "Composite right/left-handed transmission line metamaterials", *IEEE Microw. Mag.*, vol. 5, no. 3, pp. 34-50, Sep. 2004.

[8] A. Sanada, C. Caloz, and T. Itoh, "Novel zeroth-order resonance in composite right/left-handed transmission line resonators", *Proc. Asia-Pacific Microwave Conf.*, vol. 3, pp. 1588-1592, Nov. 2003.

[9] T. J. Jung, J. H. Kwon, and S. Lim, "Flexible zeroth-order resonant antenna independent of substrate deformation", *Electronics Letters*, vol. 46, no. 11, May 2010.

임 인 섭



2011년 2월: 중앙대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2011년 3월~현재: 중앙대학교 전자전기공학부 석사과정
 [주 관심분야] Metamaterial, 재구성 안테나

임 성 준



2002년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 2004년 2월: University of California Los Angeles 전기공학과 (공학석사)
 2006년 2월: University of California Los Angeles 전기공학과 (공학박사)
 2006년~2007년: University of California, Irvine Post-Doc.
 2007년 3월~현재: 중앙대학교 전자전기공학부 조교수
 [주 관심분야] 마이크로파 회로 및 안테나

정 진 우



2008년 8월: 중앙대학교 전자전기공학부 (공학사)
 2010년 8월: 중앙대학교 전자전기공학부 (공학석사)
 2010년 9월~현재: (주)만도
 [주 관심분야] Metamaterial, 재구성 안테나, RF MEMS