

## 비아를 이용한 CRLH 전송선로 안테나 소형화

# Miniaturization of CRLH Transmission Line Antennas Using Via Structure

유슬기\* · 서해교\*\* · 이소영\*\*\* · 박용배\*,\*\*\*

Seulgi Yu\* · Haekyo Seo\*\* · Soyeong Lee\*\*\* · Yong Bae Park\*,\*\*\*

### 요 약

본 논문에서는 비아를 이용하여 Composite Right/Left-Handed(CRLH) Transmission Line(TL) 안테나를 소형화한 구조를 제시한다. 제안된 CRLH TL 안테나는 PCB 다층구조상 비아를 이용하여 기존의 CRLH TL 안테나의 평면 인터디지털 커패시터(interdigital capacitor) 구조를 대체한다. 기존의 평면 인터디지털 커패시터를 구성하는 손가락 모양의 패턴 부분을 비아를 통하여 대체하여 직렬 커패시턴스 값을 얻는다. 제안된 모델은 동작주파수 2.9 GHz를 기준으로 1-cell이 증가할 때마다 기존의 8.34 mm의 길이 증가를 2.66 mm로 줄였다. 기존 모델의 3 cell 모델은 47.79 mm의 크기에 5.17 dBi이지만, 제안된 모델의 4 cell 모델은 33.41 mm의 크기에 5.35 dBi이다.

### Abstract

In this study, miniaturization of composite right-left handed (CRLH) transmission line (TL) antennas using via structure is proposed. The proposed CRLH TL antenna replaces the planar interdigital capacitor structure of the conventional CRLH TL antenna using vias in the printed circuit board multilayer structure. Via structure derives series capacitance values by replacing the finger-shaped patterned parts that comprise the conventional interdigital capacitor. The proposed model reduces the increased length of 8.34 mm to 2.66 mm for every one-cell increase based on an operating frequency of 2.9 GHz. Unlike the three-cell conventional model that utilizes 5.17 dBi at a size of 47.79 mm, the proposed four-cell model utilizes 5.35 dBi at a size of 33.41 mm.

Key words: CRLH TL Antenna, Interdigital Capacitor, Leaky Wave Antenna, Multilayer, Miniaturization

## I. 서 론

군용통신에서 사용되는 안테나는 VHF 및 UHF 대역을 사용하며, 주로 힙 안테나 및 다이폴 안테나를 사용한다. 안테나의 물리적인 크기는 파장에 비례하므로, 군용통신에 사용되는 안테나는 구조상 장비의 외부로 안테나가

노출되는 경우가 존재한다. 이는 저피탐 기능의 저하를 야기한다. 또한 군 작전 지역 및 반경은 항상 일정할 수 없기 때문에 넓은 범위를 커버할 수 있어야 한다. 따라서 군용 안테나의 소형화 및 고효율화는 항상 요구된다.

안테나 소형화와 효율을 개선시키는 기술 중 하나인 Composite Right/Left-Handed(CRLH) Transmission Line(TL)

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다(UD190033ED).」

\*아주대학교 전자공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University)

\*\*삼성전기(Samsung Electro-Mechanics)

\*\*\*아주대학교 AI 융합네트워크학과(Department of AI Convergence Network, Ajou University)

· Manuscript received April 16, 2021 ; Revised May 18, 2021 ; Accepted May 20, 2021. (ID No. 20210416-040)

· Corresponding Author: Yong Bae Park (e-mail: yong@ajou.ac.kr)

은 주파수에 따라 Left-Handed(LH)와 Right-Handed(RH)의 특성을 가질 수 있게 인위적으로 구현한 구조이다. 이 구조는 CRLH TL의 단위 셀이 가지고 있는 LH, RH 성분의 인덕턴스( $L_L, L_R$ )와 커패시턴스( $C_L, C_R$ )값으로 직렬 및 병렬 공진주파수를 조절할 수 있다. CRLH TL 구조를 이용한 안테나 두 종류의 방사 메커니즘을 가진다. 첫 번째는 공진 메커니즘을 이용한 안테나로 LH영역에서 RH영역으로 넘어가는 transition 영역의 주파수범위 내에서 전파상수가 0이 되는 0차 공진 주파수를 가질 수 있다<sup>[1],[2]</sup>. CRLH TL 안테나는 0차 공진 주파수에서 파장과 무관하게 설계할 수 있으므로, 기존 안테나에 비해 소형화된 장점을 가지고 있다<sup>[3]</sup>. 다른 하나는 누설파 매커니즘으로, 진행파(traveling wave)가 구조를 따라 나아가며, 점진적으로 누설된다. 단위 셀 내에서 open-ended에서 자유공간으로 나가는 구조를 갖고, 빛의 속도보다 빠른 위상속도를 가지는 fast wave mode를 가지면 누설파 안테나로 동작한다. 그러므로 transition 영역의 주파수범위 내에 있는 동작 주파수에서는 위상 상수가 0의 값을 가지므로 무한의 위상속도를 가지게 되는 반면, 군속도는 0이 아니게 되어 CRLH TL 구조는 누설파 안테나로 동작하게 된다<sup>[4]</sup>. CRLH TL 누설파 안테나는 단위 셀을 배열하여 구현하며, 추가적인 위상 변위기 및 전력 분배기 없이 동작 주파수를 변경하는 것만으로 빔 스캐닝이 가능하다. 따라서 기존의 누설파 안테나보다 소형화된 크기와 적은 비용으로 구현이 가능하다<sup>[5]</sup>.

기본적인 CRLH TL의 단위 셀은 인위적으로 LH 성분을 구현하기 위해 스텝에 접지층과 연결된 비아를 추가하여  $L_L$ 을 얻고 인터디지털 커패시터(interdigital capacitor)구조를 사용하여  $C_L$ 을 얻게 된다. 인터디지털 커패시터의 손가락 모양 패턴은 CRLH 단위 셀의 전체 크기에서 상당부분을 차지한다. 특히 CRLH TL 누설파 안테나는 단위 셀을 배열함에 따라 인터디지털 커패시턴스로 인해 안테나의 물리적 크기가 비약적으로 증가하게 된다.

최근 진행된 연구들을 살펴보면 CRLH TL 단위 셀의 인터디지털 커패시터에 비아를 추가하고, 비아의 직경을 조절하여 추가된 커패시터와 인덕턴스 값을 통하여 안테나의 공진점을 조절하거나, 반사 계수를 개선한 연구들이 수행되었다<sup>[6],[7]</sup>. 그러나 앞서 연구된 CRLH TL 안테나는

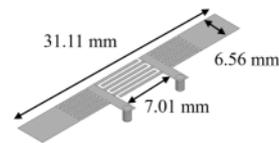
직렬 커패시턴스를 구현하기 위해 평면 인터디지털 커패시터의 손가락 모양 패턴이 사용되어 전체 안테나 크기에서 여전히 상당부분을 차지한다.

본 논문에서는 CRLH TL 단위 셀을 구성하는 평면 인터디지털 커패시터의 손가락 모양 패턴을 비아로 대체함으로써 근본적으로 평면 손가락 모양 패턴이 가지는 크기를 줄여 CRLH TL 단위 셀의 소형화를 제안한다. 제안된 안테나의 직렬 커패시턴스는 0.95 pF로 이를 구현하기 위하여 약  $6 \times 7 \text{ mm}^2$ 의 넓은 면적이 필요하며, 이는 전체 안테나의 길이와 비교하여 매우 큰 비중을 차지한다. 특히 CRLH TL 누설안테나의 경우, cell의 개수가 증가함에 따라 이득이 증가하므로 안테나의 이득 개선을 위해 여러 개의 단위 셀을 사용하면 안테나의 물리적 크기가 증가하게 된다. 여러 개의 단위 셀을 사용하는 안테나의 경우, 다중기판과 비아 구조를 이용하면 동작주파수 2.9 GHz를 기준으로 1-cell이 증가할 때 마다 기존의 8.34 mm의 길이 증가를 2.66 mm로 줄일 수 있다.

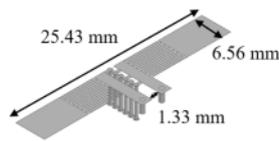
## II. 제안된 CRLH 안테나

### 2-1 단위 셀에 대한 안테나 비교

그림 1(a)는 단위 셀 하나로 구성된 1D CRLH TL 기반 안테나이다<sup>[8]</sup>. 1-cell 안테나의 전체 길이는 39.45 mm이며,



(a) 기본 CRLH 전송선로 안테나  
(a) Basic 1-cell CRLH transmission line antenna



(b) 제안된 1-cell CRLH 전송선로 안테나  
(b) Proposed 1-cell CRLH transmission line antenna

그림 1. CRLH 전송선로 안테나  
Fig. 1. CRLH transmission line antenna.

두께는 6.56 mm이다. 동작주파수는 2.9 GHz로 유전체는  $\epsilon_r=4.4$ 의 FR4 기판을 사용하였다. CRLH TL 안테나는 각각  $C_L=0.95$  pF,  $C_R=1.85$  pF,  $L_L=1.7$  nH,  $L_R=3.0$  nH로 구성된다. 이때 직렬 커패시터인  $C_L$ 의 경우, 인터디지털 커패시터로 구성되며, 약 7.01 mm의 길이로 안테나 크기에서 큰 비중을 차지한다.

그림 1(b)는 제안된 1-cell CRLH TL 안테나이다.  $C_L$ 를 구현하기 위해 비아를 이용한 모델로서 약 7.01 mm의 길이의  $C_L$  구조가 약 1.33 mm 길이로 대체되어 5.68 mm 작아졌다. 이때 커패시터 구조를 비아로 구현할 경우, 원기둥간의 커패시터로 계산되고, 비아의 길이에 따라 인덕턴스 값도 변하기 때문에 그 높이는 4.2 mm가 된다. 이때 비아 사이의 간격이 좁다면 더욱 높은 커패시터 값을 얻을 수 있지만 제작비용이 증가하게 된다.

그림 1(a)에서 일반적인 직렬 커패시터를 위한 인터디지털 커패시터가 0.95 pF의 커패시터를 만족하기 위해서 약 7.01 mm의 길이를 가지지만, 그림 1(b)의 제안된 비아를 이용한 구조를 사용한다면 비아를 연결하기 위한 구조만 필요하기 때문에 1.33 mm로 매우 짧아지게 된다.

그림 2는 기존 및 제안된 안테나의 반사계수를 보여준다. 비아를 활용하여 CRLH를 구현하여도 기존 안테나와 같이 동작주파수에서 약 -14 dB의 값을 가진다. 그림 3은 기존 및 제안된 안테나의 Far-field 방사패턴을 나타낸다. 일반적인 Broadside의 방사패턴을 가지며, 기존 및 제안된 모델 모두 유사한 방사패턴을 가진다. 그림 4의 E-plane에서 Far-field 방사패턴을 살펴보면 1-cell CRLH

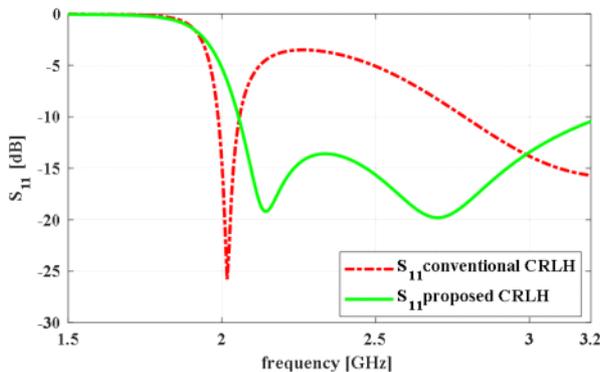


그림 2. 1 안테나 반사계수 특성  
Fig. 2. 1 Reflection coefficient of the antenna.

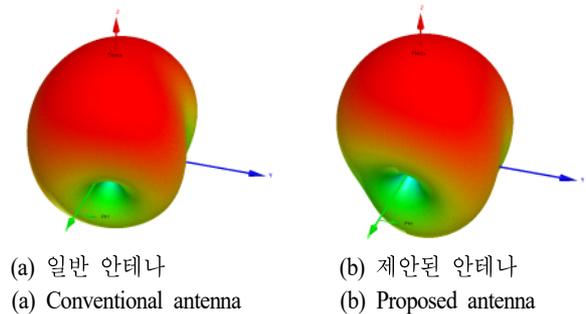


그림 3. 1 cell far-field 방사 패턴  
Fig. 3. 1 cell far-field radiation pattern.

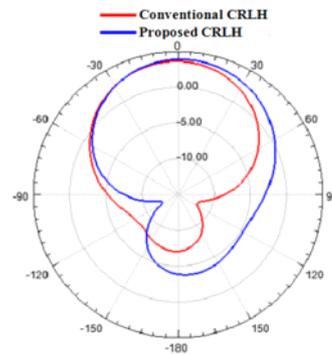


그림 4. E-plane에서 기존 모델과 제안된 모델의 far-field 방사 패턴 시뮬레이션 결과  
Fig. 4. Conventional and proposed models far-field radiation pattern in E-plane simulation result.

안테나가 동작하는 2.9 GHz에서는 일반적인 모델의 경우, 3.9 dBi이지만 제시된 모델의 경우, 3.83 dBi로 약 0.07 dB 낮은 값을 보인다. 하지만 제안된 모델의 경우, 조금 더 넓은 빔 넓이를 가진다.

## 2-2 다중 Cell에 대한 안테나 비교

1D 전송선로 기반 CRLH 안테나는 cell의 개수가 늘어남에 따라 이득이 증가하는 특성을 가진다. 제안된 안테나의 경우, 기본적으로 CRLH 안테나 기반이기 때문에 cell의 개수가 늘어남에 따라 이득이 증가하게 된다.

그림 5에서는 제안된 비아 모델을 차용한 3 cell~5 cell의 CRLH 안테나 구조이다. 3 cell의 CRLH 안테나 길이는 30.75 mm이며, 4 cell의 CRLH 안테나의 길이는 33.41mm, 5 cell의 CRLH 안테나의 길이는 36.07 mm이다. 기존의

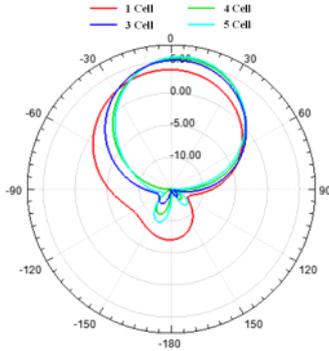


그림 5. E-plane에서 기존 모델의 far-field 방사 패턴 시뮬레이션 결과  
 Fig. 5. Conventional models far-field radiation patterns in E-plane simulation result.

1D 전송선로 기반 CRLH 안테나의 경우, 3 cell, 4 cell, 5 cell의 안테나 길이는 각각 47.79 mm, 56.13mm, 64.47 mm로 제안된 모델의 길이가 확연히 줄어든 것을 확인할 수 있다.

제안된 비아 모델의 경우, CRLH 안테나 특성에 맞게 cell이 증가할수록 이득 또한 증가한다. 기존의 1D CRLH 안테나의 경우, 3 cell~5 cell의 경우 최고 이득은 각각 5.17 dBi, 5.47 dBi, 6.19 dBi로 그림 5에 E-plane 방사패턴을 보여준다. 그림 6은 제안된 CRLH 안테나의 3 cell~5 cell의 경우 E-plane에서 Far-field 방사패턴을 나타내며, 각각 5.2 dBi, 5.35 dBi, 5.67 dBi 이다. 표 1은 기존의

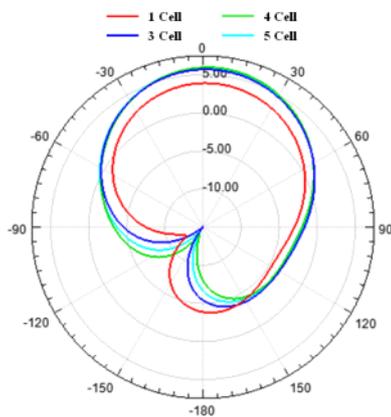


그림 6. E-plane에서 제안된 모델의 far-field 방사 패턴 시뮬레이션 결과  
 Fig. 6. Proposed models far-field radiation pattern in E-plane simulation result.

표 1. 기존 모델과 제안된 모델의 길이와 이득 비교  
 Table 1. Comparison with original and proposed models.

		Length (mm)	Gain (dBi)
Conventional model	1cell	31.11	3.9 (@2.9GHz)
	3cell	47.79	5.17 (@2.9GHz)
	4cell	56.13	5.47 (@2.9GHz)
	5cell	64.47	6.19 (@2.9GHz)
Proposed model	1cell	25.43	3.83 (@2.9GHz)
	3cell	30.75	5.2 (@2.9GHz)
	4cell	33.41	5.35 (@2.9GHz)
	5cell	36.07	5.67 (@2.9GHz)

CRLH 안테나와 제안된 CRLH 안테나의 동작 주파수에 따른 최고이득과 길이를 정리한 표이다. 기존의 모델과 비교하여 제안된 모델은 길이가 각각 30%, 40%, 45% 줄어드는 것을 확인하였다. 제안된 모델은 기존 모델과 같이 cell이 증가할수록 이득이 증가하며, 비아를 이용한 모델이 기존 모델을 대안할 수 있음을 나타낸다.

### III. CRLH 제작 및 측정

그림 7은 제안된 모델의 시뮬레이션 스펙과 동일하게 실제 제작한 CRLH 안테나이다. 그림 8에서 제안된 모델의 시뮬레이션 반사계수 특성과 측정된 반사계수 특성을 비교하였다. 동작 주파수에서 시뮬레이션과 측정된 반사계수 모두 약 -14 dB로 큰 오차 없이 매칭되어 있다. 또한 그림 9의 제작된 기존 안테나와 제안된 안테나는 시뮬레이션과 같이 비슷한 방사패턴으로 broadside 형태로 방사하고 있다. 그러나 안테나 패턴을 x-y평면이라 할 때, z 방향으로 방사를 하게 되는 시뮬레이션 결과 대비 약 15도 정도의 방사각도가 변하였다. 이는 LH영역과 RH영역을 정하는 공진주파수에 따라 방사각도가 변하게 되는데, 제작과정에서의 인덕턴스와 커패시턴스 값의 오차는 발생하게 되며, 이로 인한 것이지만, 안테나로서 작동하지 않고 있다는 의미가 아니다. 또한 유사한 방사패턴이 측정됨으로써 비아를 통해 구현한 인터디지털 커패시터가 평면 인터디지털 커패시터를 대체할 수 있음을 보여준다. 그림 10의 제안된 안테나의 측정을 진행하여 표 2에 정리하였다. 표 2에서 cell의 개수가 증가함에 따른 이득의 변

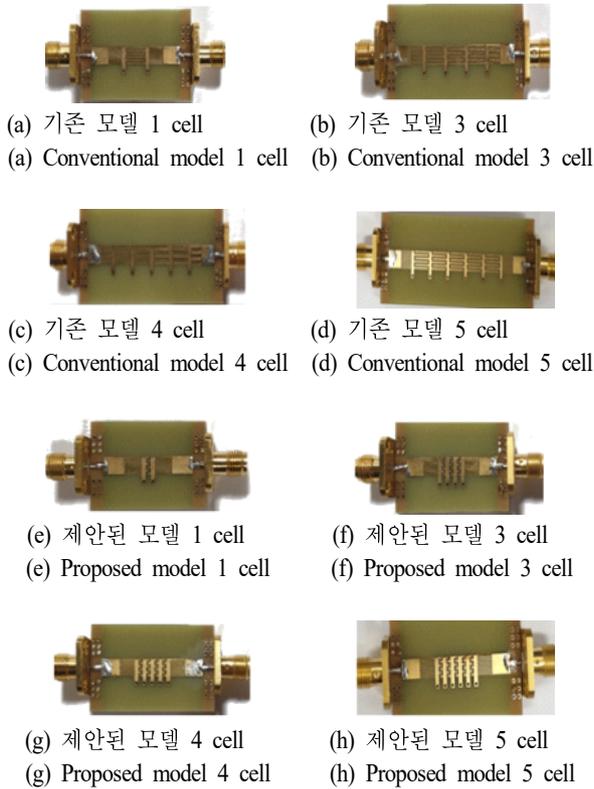


그림 7. 제작된 CRLH TL 안테나  
Fig. 7. Fabricated CRLH transmission line antenna.

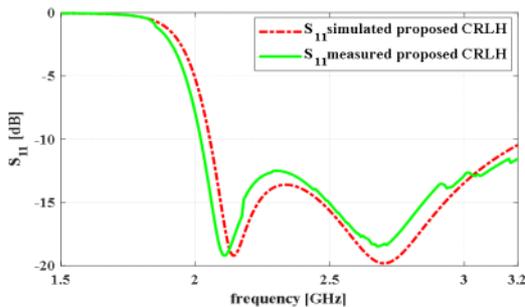


그림 8. 1-cell 안테나 반사계수 특성  
Fig. 8. 1-cell reflection coefficient of the antenna.

화를 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 정리한 표이다. 시뮬레이션에서 보았던 cell의 개수가 늘어남에 따라 이득이 증가하는 특성을 볼 수 있다. 한편, 측정 결과가 시뮬레이션의 결과에 비하여 일정하게 낮은 결과 값을 얻었지만, 이는 커넥터로 인한 손실로 충분히 고려할 수 있다. 이로서 단위 셀을 배열하여 구현하는 CRLH TL 누설안테

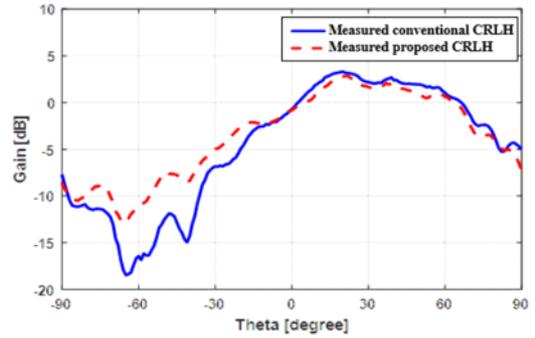


그림 9. E-plane에서 기존 모델과 제안된 모델의 1 cell far-field 방사 패턴 측정 결과

Fig. 9. Conventional and proposed models 1 cell far-field radiation pattern in E-plane measurement result.

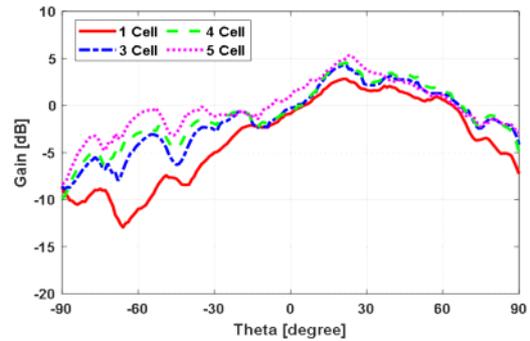


그림 10. E-plane에서 기존 모델과 제안된 모델의 far-field 방사 패턴 측정 결과

Fig. 10. Conventional and proposed models far-field radiation pattern in E-plane measurement result.

표 2. 시뮬레이션 결과와 측정결과의 cell 개수 증가 당 이득의 변화 비교

Table 2. Comparison with simulation and measurement results.

	Number of cells	Gain (dBi)
Simulation result	1 cell	3.83 (@2.9 GHz)
	3 cell	5.2 (@2.9 GHz)
	4 cell	5.35 (@2.9 GHz)
	5 cell	5.67 (@2.9 GHz)
Measurement result	1 cell	2.85 (@2.9 GHz)
	3 cell	4.32 (@2.9 GHz)
	4 cell	4.59 (@2.9 GHz)
	5 cell	5.36 (@2.9 GHz)

나의 작동방식을 실제 제작된 모델에서도 확인할 수 있으며, 기존 평면 인터디지털커패시터에 비해 소형화되었지만 본래의 수동 소자로서의 기능은 유지가 되므로, 앞으로 인터디지털 커패시터가 활용된 다양한 모델에서도 적용이 가능함을 시사한다.

#### IV. 토론 및 결론

본 논문에서는 비아 및 다층 구조를 이용하여 1D CRLH 안테나의 소형화에 대해 논의하였다. 1 cell, 3 cell, 4 cell, 5 cell에서의 기존 CRLH 안테나와 제안된 CRLH 안테나의 소형화와 이득을 비교하였다. Cell이 증가할 때 마다 안테나 길이는 약 6.5 mm가 줄어들며, 이득은 cell이 추가됨에 따라 시뮬레이션과 같이 증가하여 잘 작동함을 확인할 수 있다. 5 cell의 CRLH 전송선로 안테나의 경우, 길이의 45 % 소형화를 실현하였으며, 5.36 dBi이다. 이 결과로서, 비아를 이용한 인터디지털 커패시턴스 구현이 가능함을 확인하였으며, 인터디지털 커패시턴스를 이용한 많은 어플리케이션의 소형화에 좋은 대안을 제시할 수 있다.

#### References

[1] C. Caloz, I. Lin, and T. Itoh, "Characteristics and potential applications of nonlinear left-handed transmission lines," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 40, no. 6, pp. 471-473, Mar. 2004.

[2] 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.

[3] M. Alibakhshikenari, B. S. Virdee, L. Azpilicueta, M. Naser-Moghadasi, M. O. Akinsolu, and C. H. See, et al., "A comprehensive survey of 'metamaterial transmission-line based antennas: Design, challenges, and applications,'" *IEEE Access*, vol. 8, pp. 144778-144808, 2020.

[4] L. Lei, C. Caloz, and T. Itoh, "Dominant mode leaky-wave antenna with backfire-to-endfire scanning capability," *Electronics Letters*, vol. 38, no. 23, pp. 1414-1416, Nov. 2002.

[5] C. Caloz, T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, pp. 262-269, 2006.

[6] A. K. Nayak, S. B. Panda, H. B. Mohapatra, and K. C. Rout, "Compact antenna using IDC based CRLH-TL unit cell for L-band applications," in *2018 International Conference on Information Technology(ICIT)*, Dec. 2018, pp. 18-21.

[7] B. F. Zong, G. Wang, Y. Wang, L. Geng, and D. Wang, "Compact antenna using finger-connected interdigital capacitor-based composite right/left-handed transmission-line unit cell," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 5, pp. 1994-1999, May. 2016.

[8] F. P. Casares-Miranda, C. C. Penalosa, and C. Caloz, "High-gain active composite right/left-handed leaky-wave antenna," *IEEE Transactions on Antennas And Propagation*, vol. 54, no. 8, pp. 2292-2300, Aug. 2006.

유 슬 기 [아주대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-6141-6718>



2015년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)  
 2015년 3월 ~ 현재: 아주대학교 전자공학과 석·박사 통합과정  
 [주 관심분야] mmWave 패키징, SI/PI, 안테나, EMI

서 해 교 [삼성전기/Staff Engineer]

<https://orcid.org/0000-0002-5615-5912>



2012년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)  
 2020년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석·박사)  
 2020년 3월~현재: 삼성전기 Staff Engineer  
 [주 관심분야] mmWave, 안테나, SI/PI, EMI/EMC 안테나, 전자장 해석, EMI/EMC

이 소 영 [아주대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-4850-6268>



2019년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)

2019년 3월 ~ 현재: 아주대학교 AI 융합 네트워크학과 석·박사 통합과정  
[주 관심분야] 메타물질 안테나

박 용 배 [아주대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-7095-4614>



1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 (공학사)

2000년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 (공학석사)

2003년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 (공학박사)

2003년 2월~2006년 8월: KT인프라연구소 선임연구원

2006년 9월~현재: 아주대학교 전자공학과/AI 융합네트워크학과 교수

[주 관심분야] 안테나, 전자장 해석, EMI/EMC