

마이크로파대역에서 메타전자파구조의 안테나 및 RF 이용 기술

Metamaterials Technologies Applied for Antenna and RF Devices in Microwave

뉴 미디어 시대를 이끌어갈
방송통신융합기술 특집

정영준 (Y.J. Chong)	안테나연구팀 책임연구원
홍주연 (J.Y. Hong)	안테나연구팀 선임연구원
김동호 (D.H. Kim)	안테나연구팀 선임연구원
주정호 (J.H. Ju)	안테나연구팀 연구원
이왕주 (W.J. Lee)	안테나연구팀 책임연구원
최재익 (J.I. Choi)	안테나연구팀 팀장

목 차

-
- I . 서론
 - II . MTM-TL 특성 개선 기술
 - III . MTM을 이용한 안테나 기술
 - IV . MTM을 이용한 RF 기술
 - V . 결론

메타전자파구조(메타물질: MTM(Metamaterials)) 기술은 기존의 기술로는 불가능했던 주파수 독립적인 파장, 위상 및 굴절률 제어가 가능한 신개념의 차세대 혁신 기술로서 정보통신기기, 전자제품 등의 초소형화, 고성능화 등의 실현이 가능하며 고성능/고효율의 전파통신 부품, 광통신 부품, 의료진단 영상장치, 보안 감시 시스템 등에 응용되어 유비쿼터스 사회의 산업 전반에 지대한 파급 효과를 미칠 것으로 보고 선진 각국에서는 차세대 핵심 원천 기술로서 개발을 경쟁적으로 추진하고 있다. 따라서 본 고에서는 이러한 기술적인 발전 추세에 맞추어 마이크로파 대역에서 MTM 설계 기술과 안테나 및 RF 부품의 성능 개선을 위한 MTM 응용 기술에 대하여 살펴보고자 한다.

I. 서론

1968년 러시아 물리학자 Veselago는 음의 유전율과 투자율을 가질 경우에 매질의 물리적 특성과 응용 잠재성을 광범위하게 제시하였다[1]. 음의 유전율을 갖는 구조는 Veselago 이전에도 이미 제시가 되었었지만[2],[3], 1999년 영국의 Imperial 대학 교수인 Pendry는 Swiss Roll 형태의 공진 구조를 이용하여 자성체를 쓰지 않고도 음의 투자율 실현 가능성을 처음 소개하였다[4]. 그 후 미국의 UCSD의 Smith 그룹에 의하여 SRR과 TW의 주기적 조합으로 음의 굴절률을 증명하게 되었다[5],[6]. UCLA에서는 전송선 구조를 이용한 메타전자파구조에 대한 이론을 정립하고 다양한 RF 부품 및 안테나에 적용한 구조를 제안하였다[7].

메타물질은 특정 주파수에서 자연 상태의 물질로는 존재하지 않은 음의 유전율 또는 음의 투자율을 가질 수 있도록 파장보다 훨씬 짧은 주기적 구조로 이루어져 있다. 메타물질(MTM)은 지금까지의 물리적 현상을 보다 확장한 것으로써 매우 신비롭고 흥미로운 다양한 특성(음의 굴절률, 파장과 주파수의 독립성, 위상속도와 군 지연(group delay) 특성의 역상, 역 도플러 효과, 역 초점, 비자화물질의 자화 현상, 표면 플라즈마 등)을 지니고 있다[7]. 이러한 메타물질은 인공적인 구조에 의하여 특이한 전자기적 특성 구현이 가능하므로 인공전자기구조라고도 한다[7]. 또한 M/W 영역에서 단위 셀 크기가 수 밀리미터 이상인 주기적 구조일 뿐만 아니라 일반적으로 알려진 전자파특성과 다른 특이한 특성을 나타내고 있기 때문에 본 고에서는 “메타전자파구조(MTM)”라고 하기로 한다.

메타전자파구조는 2003년과 2006년 Science지에 LHM과 미래 투명 망토가 가능한 M/W clock 기술로서 10대 혁신 기술로 각각 소개된 바 있으며, 2007년도에는 MIT 공대에서 10대 기술로 선정하여 연구개발을 하고 있다. 국내에서는 2009년 KISTI가 선정할 미래유망기술에 포함되었다.

메타전자파구조 기술은 기존의 기술로는 불가능

했던 주파수 독립적인 파장, 위상 및 굴절률 제어를 바탕으로 한 신개념의 차세대 기술로서 정보통신기기, 전자제품 등의 초소형화, 고성능화 등의 실현이 가능하며 고성능/고효율의 전파통신 부품, 광통신 부품, 의료진단 영상장치, 보안 감시 시스템 등에 응용되어 유비쿼터스 사회의 산업 전반에 지대한 파급효과를 미칠 것으로 보고 선진 각국에서는 차세대 핵심 원천 기술로서 개발을 경쟁적으로 추진하고 있어 미래의 전·후방 산업에 중요한 핵심 기술로 발전할 것으로 예측된다.

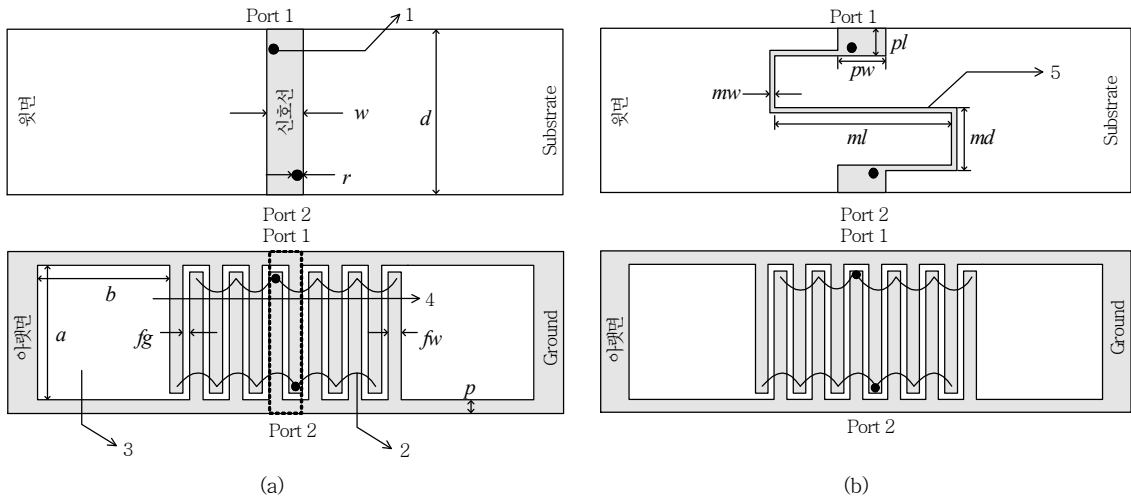
2000년 이후 새로운 전자파 제어기술인 메타전자파구조기술에 대한 연구가 미국, 유럽, 캐나다 등 선진국에서 활발히 이루어지고 있으며 이의 핵심 원천 기술개발에 심혈을 기울이고 있다. 차세대 RF 마이크로파 디바이스의 개발에 필수적인 핵심 기술로 전망하고 그 응용 연구를 가속화하고 있다.

본 고에서는 한국전자통신연구원과 국내 대학에서 공동으로 수행하고 있는 M/W 대역에서의 메타전자파구조 기반의 안테나 및 RF 부품들에 대한 연구 결과물들을 중심으로 기술 현황을 설명하기로 한다. 먼저, II장에서는 메타전자파구조 전송선 특성 개선 기술에 대하여, III장에서는 메타전자파구조를 이용한 광대역 ZOR 안테나, AMC 배열 안테나 및 고이득 안테나 기술에 대하여 서술한다. 또한, IV장에서는 메타전자파구조를 이용하여 high-Q 공진기 구현, VCO의 위상 잡음 개선, quad-band 전력증폭기의 혼변조 및 고조파 억압, 광대역 필터링 및 skirt 특성 개선 등을 위한 RF 부품 기술에 대하여 고찰하고, 마지막 V장에서 결론을 맺고자 한다.

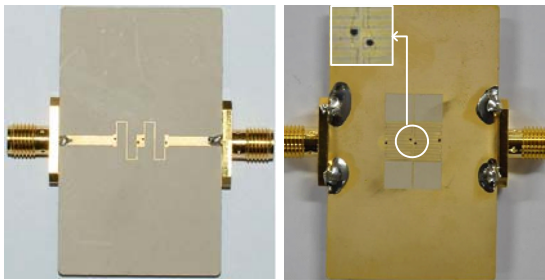
II. MTM-TL 특성 개선 기술

◎ 순수 왼손법칙 전송선 모델링

기존의 CRLH 전송선이 가지는 LH 대역의 상한 주파수의 제한으로 인해 넓은 대역의 LH 전송선을 구현하기 어렵다[7]. 따라서 기존의 CRLH 전송선이 가지는 LH 대역의 상한을 제거하기 위해 (그림



(그림 1) PLH 전송선로(a) 및 변형된 PLH 전송선로의 단위 셀 구조(b)

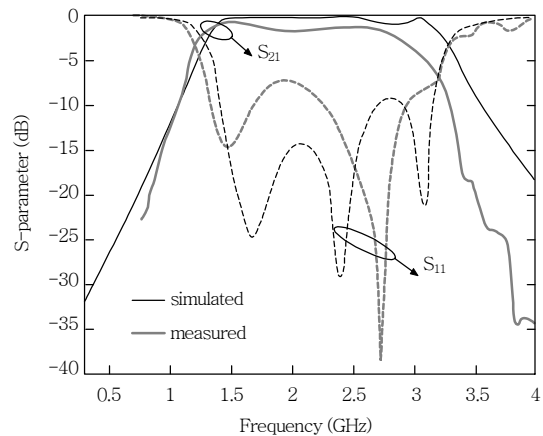


(그림 2) 변형된 PLH 전송선로의 제작

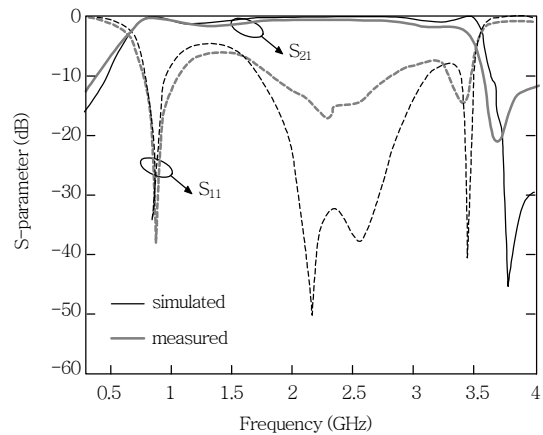
1)과 같이 교차회로를 이용하여 순수 LH 성분을 나타내는 전송선로가 됨을 확인하였다.

이를 위하여 참고문헌 [8]에서는 (그림 1a)와 같이 PLH 전송선은 단위 셀이 IDC 형태를 갖는 DGS로 접지면을 구성하여 비아(via)를 통해 교차회로를 구현하였고, 참고문헌 [9]에서는 이를 변형하여 (그림 1b) 및 (그림 2)와 같이 PLH 전송선의 넓이를 넓히고, 포트와 via 사이를 meander line type의 신호선 형태로 구성하였다. (그림 3)에 보듯이 변형된 PLH 전송선이 기존 PLH 전송선 비대역폭 89% (1.26~3.29GHz)에 비하여 140%(0.62~3.51GHz)의 매우 우수한 비대역폭 특성을 나타내고 있다.

결론적으로 제안된 단위 셀의 등가회로 모델링과 파라미터 연구를 통해 넓은 LH 전송밴드를 갖기 위하여 신호선이 변형된 PLH 전송선로 구조로 비대역폭 및 저손실 특성 등을 개선하고 있다.



(a) PLH



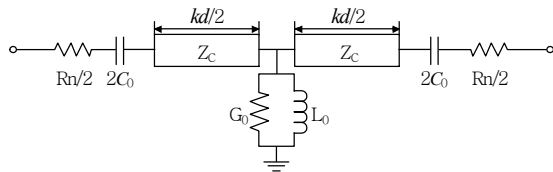
(b) Modified PLH

(그림 3) PLH 전송선의 S-parameter 특성

III. MTM을 이용한 안테나 기술

1. ENG & DNG ZOR 안테나

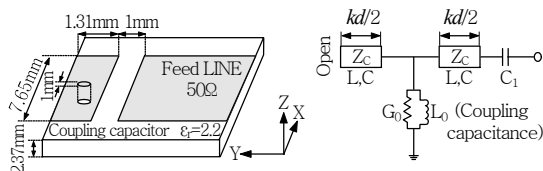
MTM 전송선 연구에서는 주로 방사효과를 고려하지 않은 모델링이 일반적으로 사용되었는데 참고문헌[10]에서는 (그림 4)과 같이 직렬 커패시터와 병렬 인덕터에서 발생하는 손실에 대한 모델링을 통하여 각 방사 소자의 손실 정도에 따른 감쇄 상수 변화 분석을 하고, MTM 셀의 파라미터 값을 추출하는 식을 도출하였다. 이를 바탕으로 천이 주파수 아래에서 음의 유전율을 가지는 ENG 물질 및 음의 유전율과 음의 투자율을 가지는 DNG 물질로 된 초소형 안테나를 설계하고 제작하여 그 특성을 실험적으로 검증하였다[11],[12]. 따라서 본 절에서는 이러한 광대역 ZOR 안테나 기술에 대해 살펴본다.



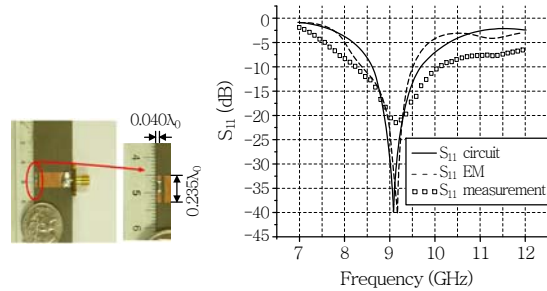
(그림 4) 손실을 고려한 MTM-TL 단일 셀 등가 모델

가. Wideband ENG ZOR Resonant 안테나

참고문헌 [13]에서 제시한 Wideband ENG ZOR Resonant 안테나는 (그림 5)와 같이 종단을 개방시킨 단일 셀에 결합 커패시터를 추가한 단일 셀 안테나로서 결합 커패시터의 갭(gap)을 포함하고 있다. 이러한 안테나는 (그림 6)과 같이 단일 셀로 소형으로 구현 가능하면서도 비대역폭 특성을 20%로 개선하고 있으며, 측정된 안테나 최대 이득은 7.4dBi로서 성능이 우수하다.



(그림 5) Wideband ENG ZOR 안테나 구조 및 등가 모델

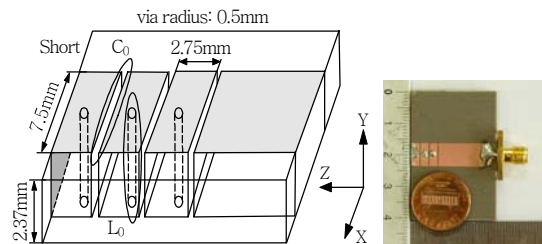


(그림 6) Wideband ENG ZOR 안테나 제작 및 S-parameter 측정 결과

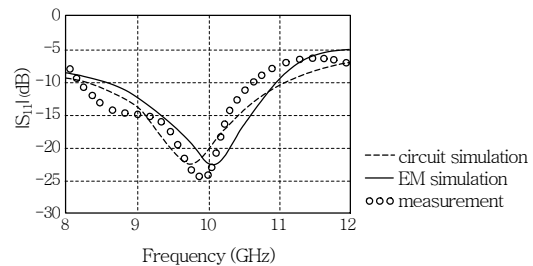
나. Wideband DNG ZOR Resonant 안테나

참고문헌 [14]에서 보여준 Wideband DNG ZOR Resonant 안테나는 (그림 7)과 같이 높은 주파수에서 병렬 스텐트 대신 via를 사용한 MTM 구조를 이용하고 있다. 이러한 구조는 높은 방사각으로 인하여 별도의 임피던스 매칭이 필요치 않다. (그림 8)에서 보듯이 25%의 넓은 대역폭과 5.9dBi의 안테나 최대 이득을 갖고 있음을 보여준다.

설계한 2개의 안테나[13],[14]와 참고문헌 [15],[16]에 언급된 MTM 소형 안테나의 성능 비교는 <표 1>과 같이 동등한 성능 내지는 매우 우수한 특성을 나타냄을 알 수 있다.



(그림 7) Wideband DNG ZOR 안테나 구조 및 제작



(그림 8) Wideband DNG ZOR 안테나 S-parameter

〈표 1〉 MTM 기반 소형 안테나 기술수준 비교

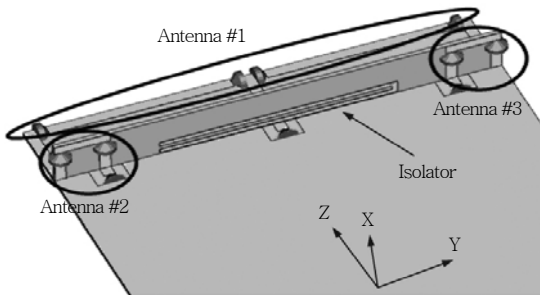
	크기	비대역폭	이득
Ref.[15]	$\lambda_o/4 \times \lambda_o/7$	3.1%	1.2dBi
Ref.[16]	$\lambda_o/26 \times \lambda_o/26$	17%	3.5dBi
Ref.[13]	$\lambda_o/25 \times \lambda_o/4$	20%	7.9dBi
Ref.[14]	$\lambda_o/4 \times \lambda_o/4$	25%	5.9dBi

〈표 2〉 측정된 Multi-antenna 최대 이득 특성

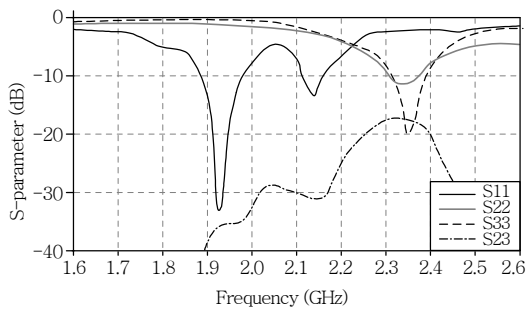
ANT #1		ANT #2	ANT #3
LB	UB		
3.8dBi	1.4dBi	1.2dBi	-0.95dBi

다. ENG-ZOR Multi-antenna

참고문헌 [17]에서는 WCDMA 및 WiBro MIMO 시스템용 internal multi-antenna를 위하여 (그림 9)와 같이 ENG-ZOR 단위 셀을 이용하고 있다. Antenna #1(ANT #1)은 2개의 ENG 셀을 이용하여 WCDMA의 LB(1920~1980MHz) 및 UB(2110~2170MHz)를 포함하고 있고, ENG 단위 셀을 이용한 Antenna #2(ANT #2) 및 Antenna #3(ANT #3)는 WiBro용 MIMO 안테나(2300~2400MHz)를 나타낸다. Multi-antenna의 S-parameter 측정 결과는 (그림 10)과 같고, ANT #1과 ANT #3 사이의 분리도 특성은 -12dB를 나타냈다. 안테나 최대 이득은 <표 2>와 같이 측정되어 안테나 이득 향상에 대한 개선이 요구된다.



(그림 9) ENG-ZOR 단위 셀을 이용한 Multi-antenna



(그림 10) Multi-antenna의 S-parameter 측정 결과

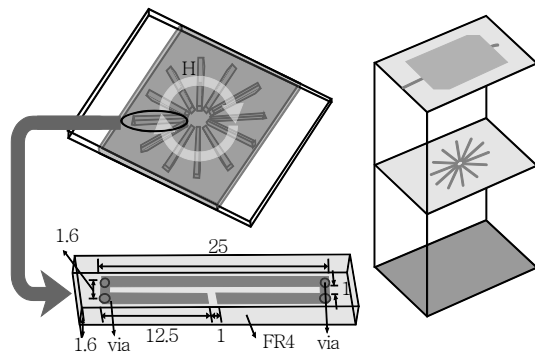
2. AMC 배열 안테나

가. AMC를 이용한 RFID 리더 안테나

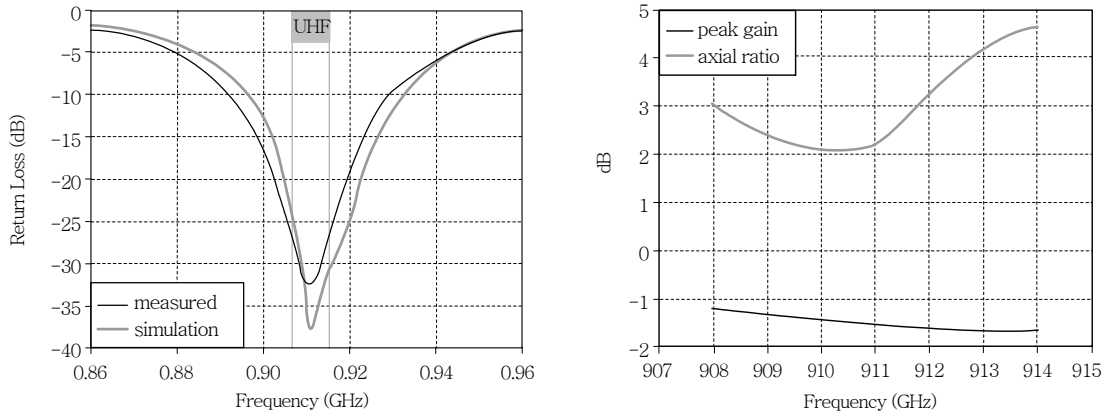
참고문헌 [18],[19] 및 [20]에서는 안테나를 소형화시키는 방법 중 높은 유전율을 갖는 유전체를 사용하지 않고, 1 이상의 투자율 특성을 갖는 MTM 구조를 적용하여 안테나의 효율이 낮아지는 것을 방지하고 있다. (그림 11)은 SRR로 구현된 AMC RFID 리더 안테나 구조를 나타내며, 제안된 안테나는 3개의 FR4 기판이 포개지는 형태로 구성되었다. 문헌[18]에서는 안테나 소형화를 위하여 사용된 AMC의 SRR은 원형편파로 인한 자계의 방향을 고려하여 방사형으로 배열하였다.

제안된 UHF 대역 RFID 리더 안테나는 AMC 구조를 적용하여 크기를 약 11.7% 감소시켰고, 또한, 안테나 패치와 접지면 사이에 삽입된 SRR의 수에 따라 공진 주파수가 저주파로 이동할 수 있음을 확인하였다. (그림 12)에서 보듯이 안테나는 좌선 원형 편파의 성질을 띄며, 이득은 -1~-1.6dBi를 갖고, 축비는 2~4.6dB를 나타냈다.

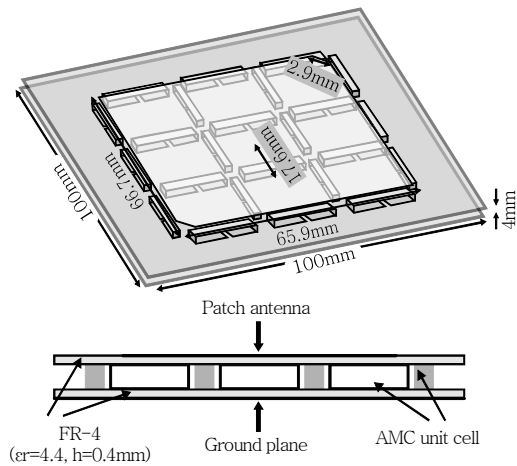
AMC를 이용한 또 다른 RFID 단말기 리더 패치 안테나로서 참고문헌[19]에서와 같이 격자형 단위



(그림 11) AMC를 이용한 RFID 리더 안테나 구조



(그림 12) 제작된 RFID 리더 안테나 반사손실 비교 및 축비, 이득 특성



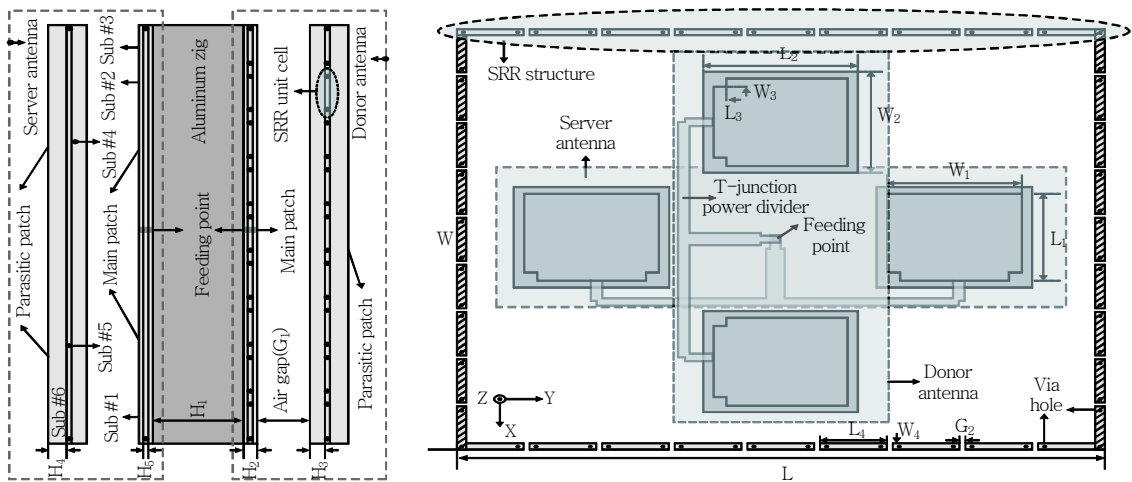
(그림 13) 제작된 AMC RFID 단말기 리더 패치안테나

셀을 이용하여 (그림 13)과 같이 설계하여 FR4 기판으로 제작된 안테나와 성능은 비슷하지만 소형화가 가능하다.

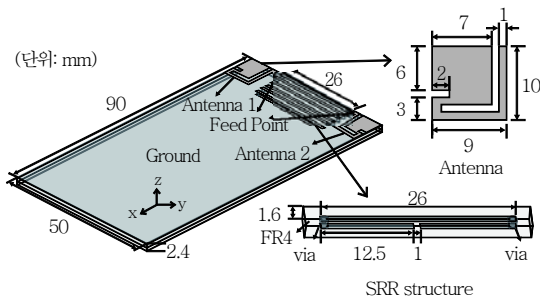
나. 음의 투자율 특성을 이용한 중계기 및 MIMO 안테나

SRR 구조의 음의 투자율을 가질 때 파가 전파가 되지 않는 특성을 이용하여 참고문헌[20]에서는 (그림 14)에서 보는 것처럼 WiBro 대역에서 사용되는 댁내형 중계기 안테나의 격리도 특성(-70dB)을 10dB 이상(<-80dB) 개선하고 있다.

또한, (그림 15)와 같은 구조의 음의 투자율을 이



(그림 14) SRR 구조를 이용한 댁내형 중계기 안테나



(그림 15) WiMax용 MIMO 안테나

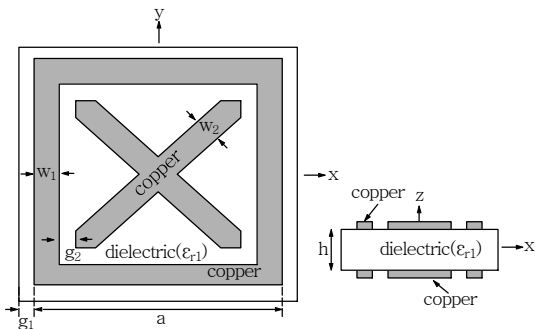
용하여 3.4~3.6GHz 대역 WiMax용 MIMO 안테나에 대하여 -20dB 이하의 격리도 특성을 향상시킬 수 있다고 보고 있다.

3. MTM 기반 고이득 안테나

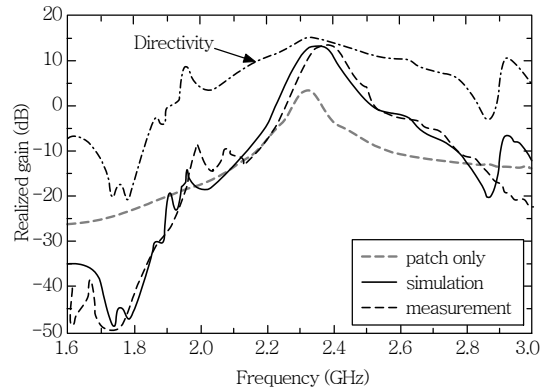
MTM의 반사 위상 특성을 안테나에 응용할 경우 높은 이득을 얻는 공진형 안테나 설계와 0의 굴절률 특성을 이용하여 안테나 이득을 효과적으로 향상시킬 수 있는 고이득 안테나에 대하여 소개한다.

메타 전자파 구조의 반사 위상 특성을 이용하여 높은 이득을 얻는 공진형 안테나를 설계할 수 있으며, FPCA가 그 대표적인 예이다[21]. FPCA의 경우 안테나 이득 최대화를 위해 공진기 내부의 반사 위상을 공진에 최적화 되도록 맞춰주어야 한다[22].

(그림 16)은 안테나의 덮개부분(superstrate)으로 사용될 메타전자파구조의 단위 셀이다. (그림 16)의 배열로 구성된 superstrate를 갖는 마이크로 스트립 피딩 FPCA의 방사 방향 높이는 (그림 16)의 반사 위상을 이용하여 안테나 높이를 계산하여 얻는



(그림 16) 반사 위상 조절용 Superstrate 셀 구조



(그림 17) FPCA의 안테나 이득

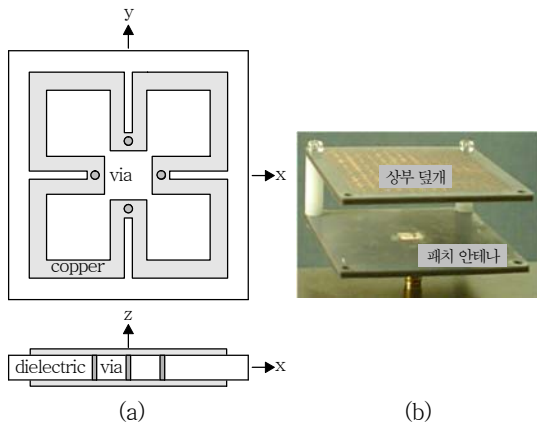
다. 이 높이를 기준으로 (그림 16)의 단위 셀을 x, y 방향으로 각각 11개씩 배열한 superstrate와 패치 안테나(32.5mm×32.5mm)로 구성된 FPCA의 복사 특성은 (그림 17)과 같다.

(그림 17)에서 회색 점선은 패치 안테나만 있을 때의 실현이득(realized gain)을, 검은 실선은 동일한 패치 안테나에 메타 전자파구조를 응용했을 때의 증가된 이득을 각각 나타낸다. 메타 전자파구조의 반사 특성과 안테나의 높이 조절을 통하여 비교적 작은 사이즈로도 높은 이득의 안테나 설계가 가능함을 제시하였다[22].

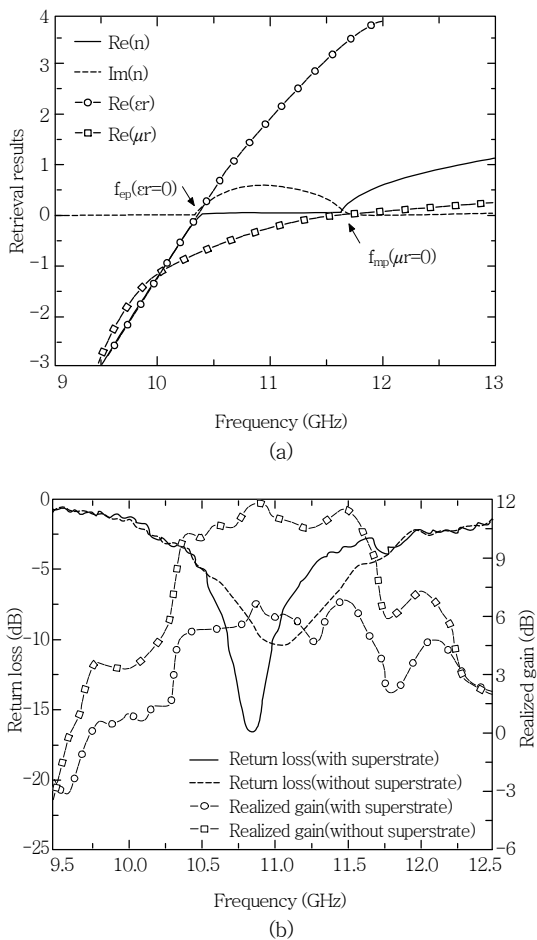
안테나 이득을 효과적으로 향상시킬 수 있는 또 다른 방법으로는 0의 굴절률을 가지는 메타전자파 구조에 전자기파를 입사시킬 경우 전자기파는 입사각에 관계없이 메타전자파구조 경계 면에서 모두 수직으로 방사가 된다. 이와 같은 원리를 이용하여 0의 굴절률을 가지는 메타전자파구조를 안테나의 상부로 사용하면 안테나의 이득을 증가시킬 수 있다[23].

(그림 18)은 굴절률 값이 0인 메타전자파구조를 구성하는 단위 셀과 메타전자파구조를 상부로 갖는 고이득 안테나 구조이다. 요철 모양의 금속선이 유전체 상하부 면에 형성되어 있으며 유전체 양면에 형성된 금속선은 4개의 금속 비아를 통해 연결되어 있다.

(그림 19)는 메타전자파구조의 단위 셀에 대하여 추출한 유전율, 투자율, 굴절률의 값과 반사 손실 및 이득을 보여준다. 추출 결과 플라즈마 주파수(10.32~11.66GHz) 사이에서 0의 굴절률이 형성되면서



(그림 18) 메타전자파구조 단위 셀(a)과 고이득 안테나(b)

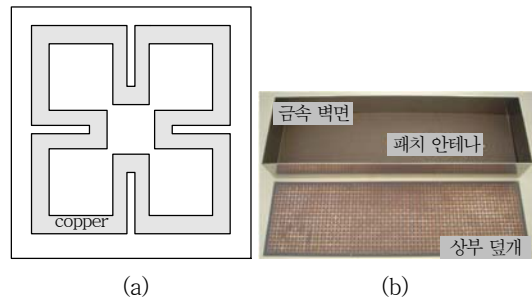


(그림 19) 단위 셀의 유효매질 추출 결과(a)와 안테나 이득 및 반사 손실(b)

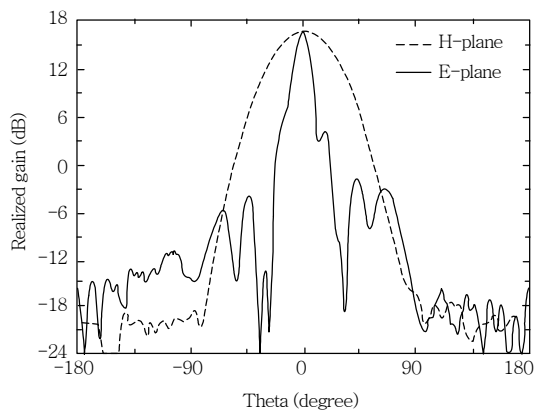
이 영역에서 높은 안테나 이득을 가지게 됨을 알 수 있다.

(그림 20)은 메타전자파구조의 단위 셀과 메타전자파구조를 기지국에 응용한 안테나의 구성도이다 [24]. 기지국에서는 넓은 빔 폭과 높은 이득의 안테나가 사용된다. 넓은 빔 폭을 얻기 위해서 전자기파가 방사되는 개구면의 모양을 직사각형으로 성형하였고 안테나의 주변에 금속벽을 설치함으로써 높은 전후방비(front-to-back ratio)와 높은 효율을 얻을 수 있다.

(그림 21)은 2.35GHz에서 동작하는 메타 전자파구조를 응용한 기지국 안테나의 측정된 방사 패턴을 보여준다. 측정된 3dB 빔 폭은 E, H 평면에서 각각 12° , 48° 였고, 전후방비는 E, H 평면 모두에서 30dB 이상의 값을 가지고 또한 안테나의 효율은 90% 이상으로써 성능이 매우 우수함을 보이고 있다.



(그림 20) 단위 셀 구조(a)와 기지국용 고이득 안테나(b)



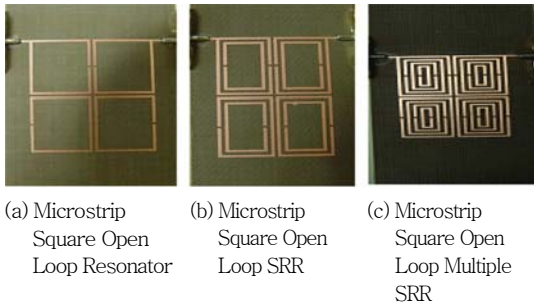
(그림 21) 기지국 안테나의 방사패턴

IV. MTM을 이용한 RF 기술

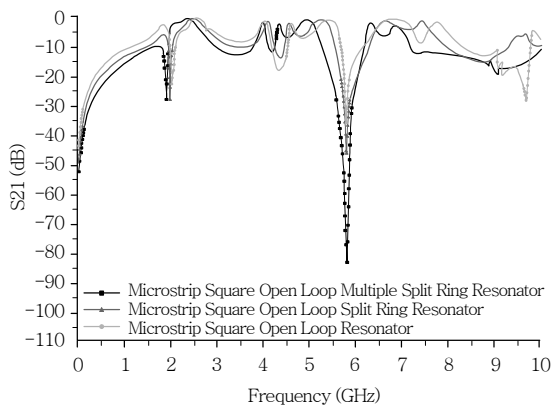
본 장에서는 메타전자파구조를 이용한 active 회로 중 저위상잡음을 위한 high-Q 공진기 설계를 통한 VCO 구현, 전력증폭기 비선형 특성에 의한 성능 저하를 방지하기 위한 전력증폭기 혼변조, 고조파 억제를 위한 메타전자파구조 적용 기술과 더불어 RF 수동 회로 중 광대역 필터링, skirt 특성 개선에 적용하기 위한 메타전자파구조 설계 기반 RF 기술에 대하여 설명하고자 한다.

1. Low Phase Noise VCO 기술

참고문헌 [25]에서는 (그림 22c)와 같이 저위상잡음 VCO를 위하여 microstrip square open loop multiple SRR을 이용하였다. 공진주파수 5.8GHz에서 S21 시뮬레이션 특성은 (그림 23)과 같이 -32.7dB, -43.56dB 및 -81.78dB로 (그림 22)의 (c)가 가장 높



(그림 22) 3가지 메타전자파 공진기 기본 구조

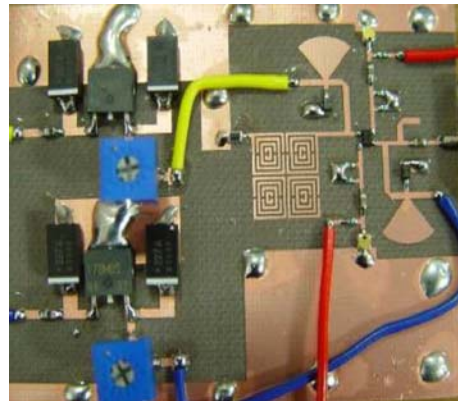


(그림 23) 3개의 공진기에 대한 S21 특성 시뮬레이션

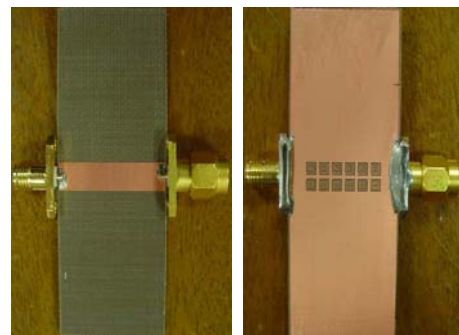
은 Q 값을 나타내었다. 이 공진기는 microstrip square open loop 구조에다 multiple SRR을 결합하여 기존 microstrip square open loop 공진기에 비하여 강한 coupling으로 인하여 high-Q 특성을 갖는다.

(그림 24)와 같이 제작된 VCO는 high-Q 특성으로 인하여 5.746~5.84GHz의 주파수 범위에서 -124.5~-122dBc/Hz(@100kHz)로 가장 우수한 위상 잡음 특성을 나타내고 있다[25].

또 다른 구조는 참고문헌 [26]의 (그림 25)와 같이 CSR 사이에 수평방향으로는 같은 방향의 전류가 흐르고 수직방향으로는 다른 방향의 전류가 흐르는 세 번 돌린 6개의 셀 쌍을 접지 평면에 식각하여 high-Q MTM-TL 공진기를 제안하였다. 측정결과 rejection level(S21)이 -59.85dB로 44,100의 high-Q 값을 얻었다. (그림 26)과 같이 CSR 기반 high-Q

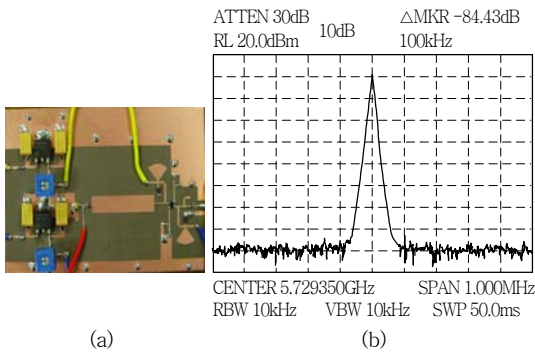


(그림 24) Microstrip Square Open Loop Multiple SRR을 이용한 VCO 제작

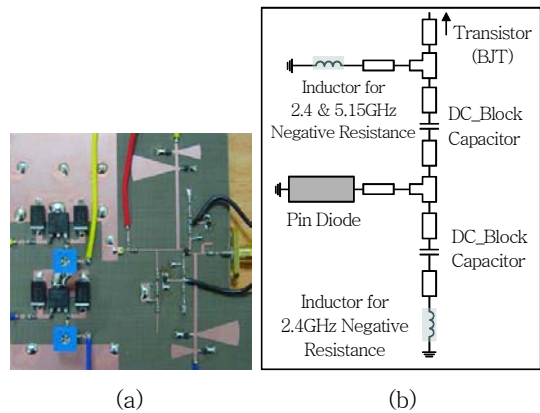


(a) Top-view(signal plane) (b) Bottom-view(ground)

(그림 25) CSR 기반 High-Q MTM-TL 제작



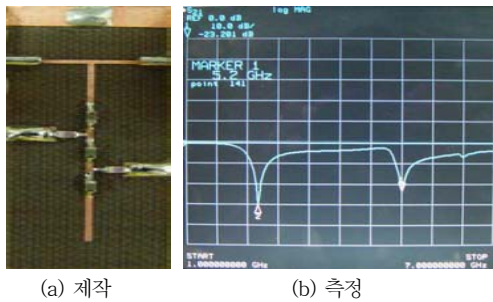
(그림 26) CSR에 근거를 둔 High-Q MTM-TL을 이용한 VCO 제작(a), 위상잡음 측정결과(b)



(그림 28) 제안된 Dual-band VCO 제작(a), PIN Diode 기반 Tunable Negative Resistance(b)

(표 3) 제작된 Dual-band VCO 성능 요약

Parameters	PIN Diode Forward Bias	PIN Diode Reverse Bias
발진 주파수(GHz)	2.423~2.597	5.137~5.354
출력전력(dBm)	9.5	10.17
Harmonics(dBc)	-16	-26.67
Phase Noise (@100kHz) (dBc)	-108.34~ -106.67	-114.16~ -113.33



(그림 27) λ/4 CRLH Open Circuit Stub

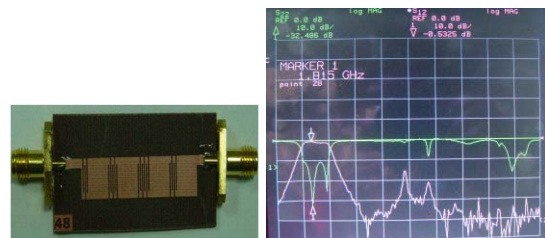
MTM-TL을 이용하여 저위상잡음 VCO를 제작하였으며, 5.73~5.85GHz의 주파수에서 -124.43~-122.60dBc/Hz(@100kHz)의 우수한 위상 잡음 특성을 보여준다.

또한, 참고문헌 [27]에서는 CRLH TL의 주파수 오프셋 및 위상 기울기 제어 특성을 이용하여 임의의 dual-band 동작이 가능하다. (그림 27)에서 보듯이 λ/4 CRLH open circuit stub를 사용함으로써 2.4GHz 및 5.2GHz의 공진 주파수에서 rejection level이 -31.37dB 및 -23.2dB로 각각 개선되고 있다. Dual-band VCO는 (그림 28)과 같이 CRLH TL 및 PIN 다이오드 기반 가변 부성저항을 이용하여 제작하였고, PIN diode의 순방향 및 역방향 바이어스에 의한 VCO 성능은 <표 3>과 같다.

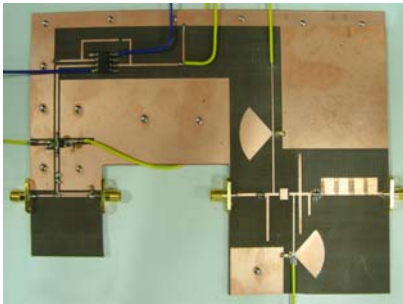
결론적으로 CRLH TL 및 PIN 다이오드를 이용하여 저가격화 및 소형화가 가능한 dual-band VCO 제작이 가능함을 알 수 있다.

2. MTM 기반 전력증폭기 기술

광대역 저지대역 특성을 갖는 MTM 구조를 (그림 29)와 같이 제작하여 1.8GHz에서 0.5dB의 삽입 손실로 전력증폭기 하모닉 및 고조파 성분들에 해당하는 주파수 성분들에 대하여 우수한 저지대역 특성을 나타냈다. 제안된 전력 증폭기는 (그림 30)과 같이 제작하여 같은 출력 전력에서 IMD 특성이 기존 class-F 구조보다는 12.83dB가, EER에 대해서는 12.33dB가 개선되었다.

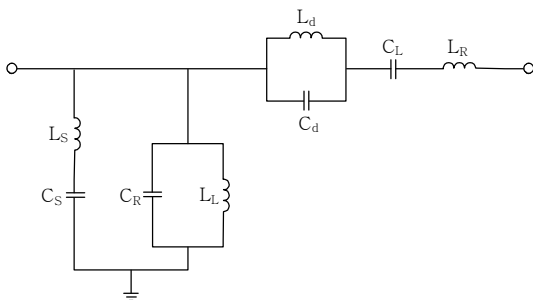


(그림 29) 광대역 저지대역 특성을 갖는 MTM 구조 및 측정 결과



(그림 30) 제안된 MTM 구조와 EER 구조를 이용한 전력증폭기 제작

또한, (그림 31)과 같은 quad-band CRLH TL 구조를 quad-band inverse class-F 전력증폭기 설계에 적용하였다[28]. Quad-band CRLH TL은 dispersion diagram 및 S-parameter simulation 특성을 통하여 두 개의 LH 및 두 개의 RH 통과 대역에서 quad-band로 동작함을 확인하였다. 2nd 및 3rd 하모닉 성분들은 고효율 inverse class-F 전력 증폭기를 위하여 출력단에서 open 및 short로 동작



(그림 31) Quad-band CRLH-TL의 회로 구조

〈표 4〉 제작된 Quad-band Inverse Class-F Power Amplifier 성능 요약

Parameters	Performance			
동작 주파수(MHz)	700	800	1800	2140
출력전력(dBm)	41.5	39.7	37.7	40.7
Gain(dB)	11.5	9.7	7.7	10.7
PAE(%)	58.2	50.3	48.6	56.6

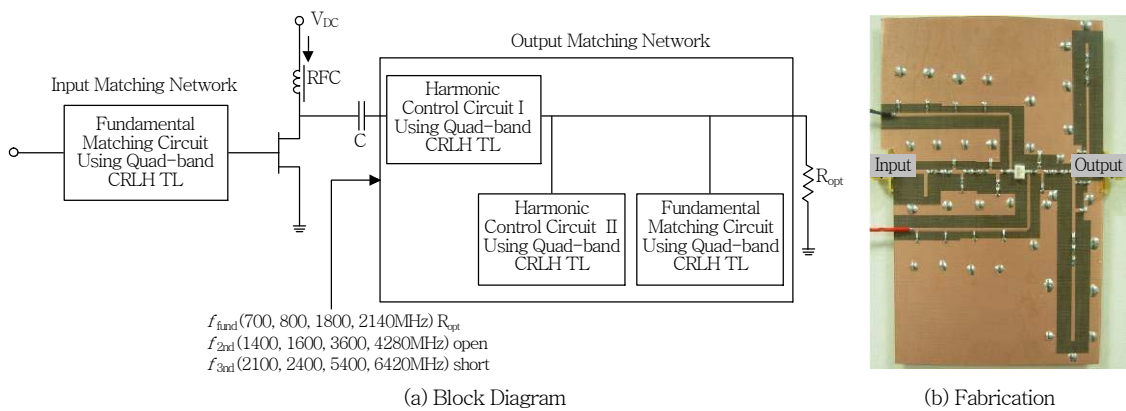
하도록 (그림 32)와 같이 제작하여 측정된 전력증폭기는 <표 4>와 같은 성능을 보여준다.

3. MTM 기반 마이크로파 필터 기술

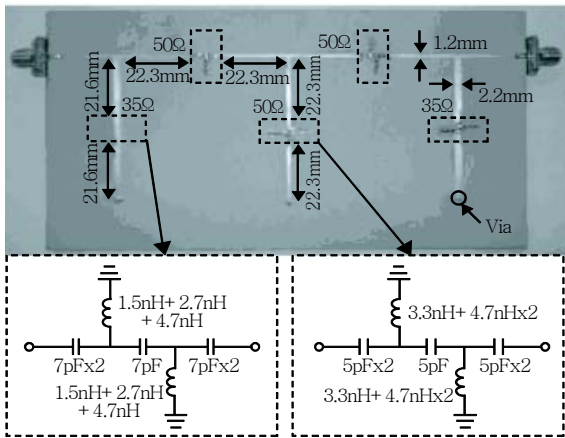
메타전자파구조에 전송선로 개념을 적용한 CRLH의 도입은 주기구조의 주파수 분산특성 해석을 통한 마이크로파 회로에의 응용이 가능하게 하였다. LH 특성과 RH 특성, ZOR 특성은 마이크로파 회로의 한계인 주파수에 대한 파장의 관계를 뛰어넘는다. CRLH와 SRR 공진구조를 포함하는 메타전자파구조를 이용한 응용으로 마이크로파 필터는 아래와 같은 장점을 갖는다.

- ZOR 특성을 이용한 필터 소형화
- MTM 특성을 이용한 광대역 통과/차단 필터
- MTM 특성을 이용한 대역 외 차단

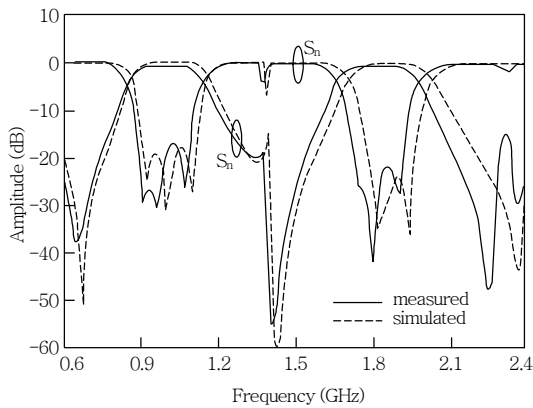
메타전자파구조를 마이크로파 필터에 응용하려는 노력으로 CRLH 기반구조 응용연구와 공진구조인 SRR 기반구조 응용연구가 활발하다[29]-[31].



(그림 32) Quad-band CRLH-TL을 이용한 Quad-band Inverse Class-F Power Amplifier



(그림 33) DCRLH 이중대역통과여파기

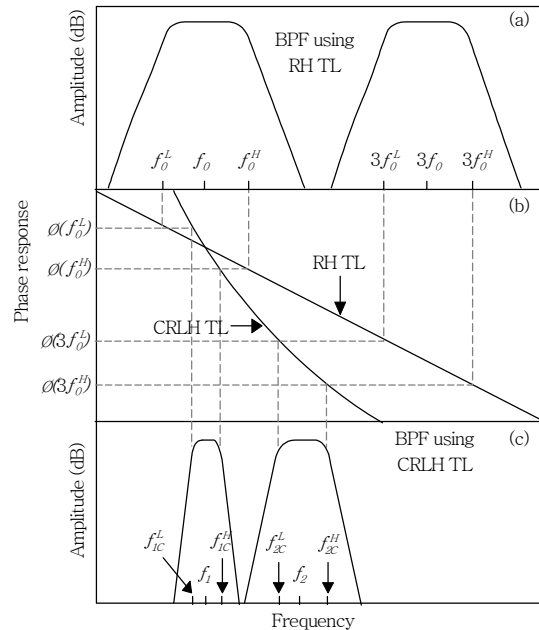


(그림 34) DCRLH 이중대역통과여파기 특성

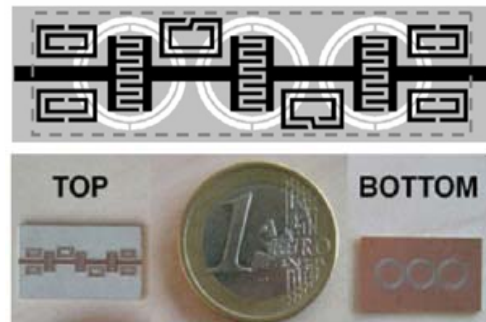
(그림 33)과 (그림 34)는 UCLA 대학 Itoh 그룹의 DCRLH를 이용한 이중대역통과여파기와 특성이다. (그림 35)는 Dual-CRLH(DCRLH)의 이중대역 분산도이다[32].

스페인인 F. Martin이 속한 BELLA-TERRA 그룹은 SRR과 CPW 또는 CSRR, CSR과 CRLH가 결합된 구조를 이용한 필터의 연구를 활발히 진행하고 있다. (그림 36)과 (그림 37)은 LH 특성을 갖는 CRLH 구조에 CSRR과 CSR 구조를 로딩시켜 UWB 대역 필터와 대역내 notch 특성을 구현하고 있다[33].

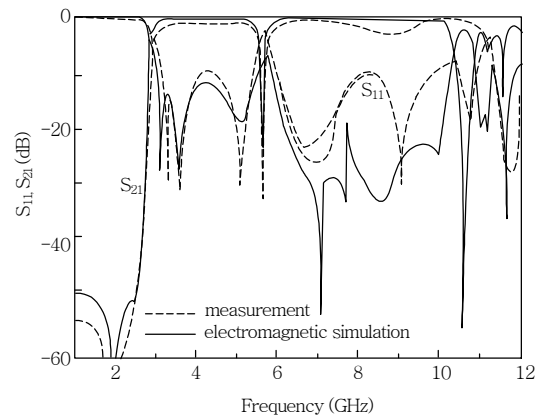
또한, (그림 38)과 (그림 39)와 같은 CRLH와 CSR 결합구조 필터는 고역통과여파기의 구조로서 광대역 특성을 보여준다[34].



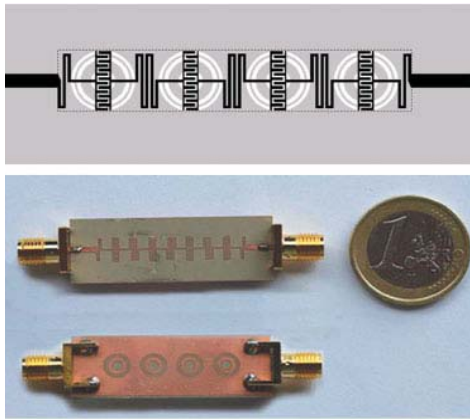
(그림 35) DCRLH 이중대역 셀 분산도



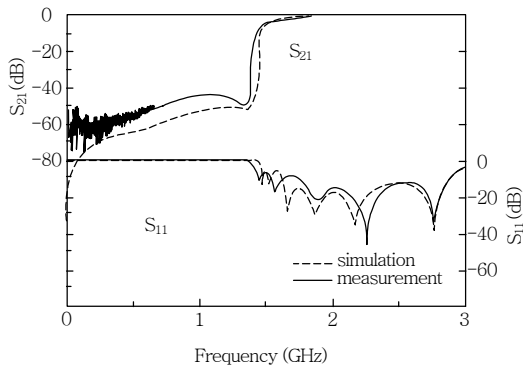
(그림 36) CRLH CSRR CSR 대역통과여파기



(그림 37) CRLH CSRR CSR 대역통과여파기 특성



(그림 38) CRLH CSR 고역통과여파기



(그림 39) CRLH CSR 고역통과여파기 특성

테나, MTM 반사위상 특성 및 0의 굴절률 특성을 이용한 고이득 안테나 기술 등 다양한 메타전자파구조를 활용하여 안테나의 이득 향상, 효율 증대 및 소형화 기술, 전후방비 향상 등에 적용될 수 있음을 확인하였다.

마지막으로 MTM 기반 RF 기술로는 저위상잡음을 위한 high-Q 공진기(microstrip square open loop multiple SRR 구조, CSR 구조) 설계를 통한 VCO 설계, 비선형 전력증폭기 설계 및 광대역 필터 설계 기술에 적절한 메타전자파구조를 적용함으로써 위상 잡음 개선, 하모닉 및 혼변조 억제, 대역 억제 및 skirt 특성 개선이 이루어지고 있음을 고찰하였다.

그럼에도 불구하고 메타전자파구조 응용을 제한하고 있는 협대역 및 손실 특성 등을 대폭 향상시키기 위한 노력과 실용화가 가능하도록 메타전자파구조 기반의 안테나 및 RF 부품의 성능 개선을 위한 지속적인 연구 개발이 이루어져야 할 것이다.

또한, 미래 다양한 응용 잠재성으로 선진국에서 경쟁적으로 추진하고 있는 메타전자파구조 기술에 대한 원천연구와 더불어 전파통신, 국방, 의료, 산업, 광학 분야 등 다양한 응용을 위한 활발한 연구가 요구된다.

V. 결론

본 기술 동향에서는 MTM 전송선 설계 기술, 급속히 성장하고 있는 MTM 기술을 이용함으로써 안테나 성능, RF 필터링, 전력증폭기의 혼변조 및 고조파 억제, VCO 위상잡음 특성을 향상시킴으로써 전파(RF) 스펙트럼 이용 효율을 개선할 수 있는 최근 연구 결과에 대하여 살펴보았다.

MTM-TL 기술 관련해서는 기존의 CRLH와 달리 PLH 전송 대역의 비대역폭을 확장시키면서 저손실화 할 수 있는 기술을 파악하였다.

안테나 기술로는 방사 손실을 고려한 ENG 및 DNG ZOR 안테나, AMC 배열을 이용한 RFID 안테나, 음의 투자율 특성을 이용한 중계기 및 MIMO 안

● 용어해설 ●

Metamaterial(MTM, 메타전자파구조): 자연 상태의 일반 매질에선 존재할 수 없는 특별한 전자기적 특성을 갖는 인공적인 전자기 구조물을 말함

- $0 < \text{유효 비유전율} < 1, 0 < \text{유효 비투자율} < 1$
- 유효 비유전율 < 0 , 유효 비투자율 < 0

약어 정리

AMC	Artificial Magnetic Conductor
CPW	Cp-Planar Waveguide
CRLH-TL	Composite Right/Left-Handed TL
CSR	Complementary Spiral Resonators
CSRR	Complementary Split Ring Resonator
DGS	Defected Ground Structure

DNG	Double Negative
ENG	Epsilon Negative
FPCA	Fabry-Perot Cavity Antenna
IDC	Interdigital Capacitor
LB	Lower Band
LHM	Left Handed Metamaterial
MTM-TL	Metamaterial Transmission Line
PAE	Power Added Efficiency
PLH	Pure Left Handed
RFID	Radio Frequency Identification
RHM	Right Handed Metamaterial
SRR	Sprit Ring Resonator
TW	Thin Wire
UB	Upper Band
UWB	Ultra Wideband
VCO	Voltage Controlled Oscillator
ZOR	Zeroth Order Resonator

참 고 문 헌

- [1] V.G. Veselago, "The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ ," *Soviet Physics*, Vol.10, No.4, 1968, pp.509-514.
- [2] W. Rotman, "Plasma Simulation by Artificial Dielectrics and Parallel-plate Media," *IRE Trans. Antennas and Propag.*, Vol.10, 1962, pp.82-95.
- [3] J.B. Pendry, A.J. Holden, W.J. Stewart, and I. Youngs, "Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures," *Phy. Rev. Lett.*, Vol.79, No.25, 1996, pp.4773-4776.
- [4] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins, and W.J. Stewart, "Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, Vol.47, No.11, 1999, pp.2075-2084.
- [5] D.R. Smith, Willie J. Padilla, D.C. Vier, S.C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity," *Physical Rev. Lett.*, Vol.84, 2000, p.4184.
- [6] R.A. Shelby, D.R. Smith, and S. Schultz, "Experimental Verification of a Negative Index of Refraction," *Science*, Vol.292, No.5514, 2001, pp.77-79.
- [7] C. Caloz and T. Itoh, *Transmission Line Theory and Microwave Applications*, John Wiley & Sons Inc, 2006.
- [8] F.P. Casares-Miranda, E. Márquez-Segura, P. Otero, and C. Camacho-Peñalosa, "Wire Bonded Interdigital Capacitor," *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, Vol.15, No.10, 2005, pp.700-702.
- [9] Young-Ho Ryu, Jae-Hyun Park, Jeong-Hae Lee, and Heung-Sik Tae, "Planar Meta-structured Transmission Lines," *2009 Korea-Japan Joint Conf. On AP/EMC/EMT*, May 2009, pp.319-322.
- [10] Changho Choi and Bomson Lee, "Investigation of Radiation Effects for 1-D Left-handed Transmission Lines," *Proc. Int'l Symp. on AP-S*, July 2008, pp.1-4.
- [11] S.-G. Mao, S.-L. Chen, and C.-W. Huang, "Effective Electromagnetic Parameters of Novel Distributed Left-handed Microstrip Lines," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, Vol.53, No.1, 2005, pp.1515-1521.
- [12] Tack-Gyu Kim and Bomson Lee, "Metamaterial-based Compact Zeroth-order Resonant Antenna," *Electron. Lett.*, Vol.45, No.1, 2009, pp.12-13.
- [13] W.-C. Chang and B. Lee, "Wideband One-unit-cell ENG Zerith-order Resonant Antenna," *Electronics Lett.*, Vol.45, No.25, Dec. 2009, pp.1289-1290.
- [14] 장성남 외 1인, "Wideband Zeroth-order Antenna with Mushroom Shape," *추계 마이크로파 및 전파 학술대회*, 2009년 9월.
- [15] Jiang Zhu and George V. Eleftheriades, "A Compact Transmission-line Metamaterial Antenna with Extended Bandwidth," *IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett.*, Vol.8, 2009.
- [16] M.A.W. Nordin and El-Raouf, "Bandwidth Enhancement of a Compact Antenna Based on the Composite Right/Left-handed(CRLH) Transmission-line(TL)," *Antennas and Propag., 3rd European Conf. on*, 2009.
- [17] Jeongpyo Kim and Jaehoon Choi, "Design of a Multiantenna Structure for WCDMA and WiBro MIMO Systems Using ENG-ZOR Unit

- Cells,” *MOTL*, Vol.52, No.1, Jan. 2010, pp.13-17.
- [18] 정해일 외 3인, “AMC를 이용한 RFID 리더 안테나의 소형화 기법,” 춘계 마이크로파 및 전파 전파학술대회, 2009년 5월.
- [19] Jeongpyo Kim and Jaehoon Choi, “Compact Circularly Polarized Patch Antenna Using AMC for RFID Handheld Readers,” *ITC-CSCC*, July 2009, pp.272-275.
- [20] 이영기 외 5인, “SRR 구조를 이용한 높은 격리도 특성을 갖는 통합형 맥내형 중계기 안테나 설계,” 추계 마이크로파 및 전파 학술대회, 2009년 9월.
- [21] A. Pirhadi, M. Hakkak, F. Keshmiri, and R. K. Bae, “Design of Compact Dual Band High Directive Electromagnetic Bandgap(EBG) Resonator Antenna Using Artificial Magnetic Conductor,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol.55, No.6, June 2007, pp.1682-1690.
- [22] 김동호, 최재익, “평판형 메타 물질로 구성된 상부 덮개를 갖는 와이브로 기지국용 고이득 Fabry-Perot 공진기 안테나,” 한국전자파학회논문지, 제12권 제12호, 2008, pp.1367-1374.
- [23] Jeongho Ju, Dongho Kim, Wangjoo Lee, and Jaeick Choi, “Wideband High-gain Antenna Using Metamaterial Superstrate with the Zero Refractive Index,” *Microwave Opt. Technol. Lett.*, Vol.51, No.8, Aug. 2009, pp.1973-1976.
- [24] J. Ju, D. Kim, and J. Choi, “Fabry-Pérot Cavity Antenna with Lateral Metallic Walls for WiBro Base Station Applications,” *Electronics Lett.*, Vol.45, No.3, 2009, pp.141-142.
- [25] Jaewon Choi and Chulhun Seo, “Microstrip Square Open-Loop Multiple Split Ring Resonator for Low Phase Noise VCO,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol.56, No.12, Dec. 2008, pp.3245-3251.
- [26] Jaewon Choi and Chulhun Seo, “Novel Low Phase Noise vco Using High-Q Metamaterial Transmission Line Based on Complementary Spiral Resonators,” *2009 IEEE MTT-S*, June 2009, pp.1501-1504.
- [27] Jaewon Choi and Chulhun Seo, “Dual-band VCO Using Composite Right/Left-handed Transmission Line and Tunable Negative Resistance Based on Pin Diode,” *2008 IEEE MTT-S*, June 2008, pp.241-244.
- [28] J. Choi and C. Seo, “Multi-band CRLH-TL for Quad-band Inverse Class-F Power Amplifier Design,” *GSMM 2010 proposed*.
- [29] J.S. Li, B. Chen, J. Yao, Y.Z. Zou, J.D. Hu, and S. He, “A Novel Notch Filter Utilizing a Composite Right/Left-handed Transmission Line,” *Microwave and Optical Technology Lett.*, Vol.48, No.3, Jan. 2006, pp.626-628.
- [30] Oscar García-Pérez, Javier Herraiz, Vicente González-Posadas, and Daniel Segovia-Vargas, “Design of a Dual-band Active Filter Using CRLH Structures,” *19th Int’l Conf. on Applied Electromagn. and Commun.*, Dubrovnik, Sep. 2007, pp.1-4.
- [31] Adolfo Vélez, Francisco Aznar, Jordi Bonache, Maria C. Velázquez-Ahumada, Jesús Martel, and Ferran Martín, “Open Complementary Split Ring Resonators(OCSRRs) and Their Application to Wideband CPW Band Pass Filters,” *IEEE Microwave and Wireless Compon. Lett.*, Vol.19, No.4, Apr. 2009.
- [32] Chao-Hsiung Tseng and Tatsuo Itoh, “Dual-Band Bandpass and Bandstop Filters Using Composite Right/Left-Handed Metamaterial Transmission Lines,” *Proc. of the IEEE MTT-S Int’l Microwave Symp. Digest*, June 2006, pp.931-934.
- [33] M. Gil, J. Bonache, F. Martín, “Metamaterial Filters with Attenuation Poles in the Pass Band for Ultra Wide Band Applications,” *Microwave and Optical Technol. Lett.*, Vol.49, No.12, Sep. 2007, pp.2909-2913.
- [34] Jordi Selga, Gerard Siso’, Marta Gil, Jordi Bonache, and Ferran Martin, “Microwave Circuit Miniaturization with Complementary Spiral Resonators: Application to High-Pass Filters and Dual-band Components,” *Microwave and Optical Technol. Lett.*, Vol.51, No.11, Nov. 2009, pp.2741-274.