

메타물질 기술 동향

메타재질(Metamaterial) CRLH 구조의 마이크로파 부품과 안테나 개발에의 적용 기술

강 승 택
인천대학교
정보통신공학과

I. 서 론

최근 RF 부품과 안테나 개발, 전파전파 대책에 있어 까다로운 요구사항들을 맞추기 위해서는 기존의 기법들을 능가하는 설계 기법들이 발굴되어야 한다. 오랜 기간 연구되어오면서 성숙해 온 RF 기술의 또 다른 진일보를 위해서는 재료와 공정 기법의 획기적인 발전이 필수적인 것이라고 공감하고 있을 때, 기존 전자기학의 한 패러다임을 바꾸는 사건이 생기게 된다. Pendry, Smith 등의 물리학자들이 실험을 통해 Veselago가 이론으로만 연구한 음의 굴절률을 가지는 구조를 만들고, 직접 실험으로 증명하는데 성공한 것이다. 음의 굴절률을 만들기 위해, 금속막대의 배열과 분리된 두 개의 금속 고리 쌍을 이용하여, 각각 유효 상대유전율과 유효 상대투자율을 음수로 이끌어 냈으며, 광의 주파수보다 훨씬 낮은 영역에서 왼손전파법칙이 통하는 MTM LH 구조를 얻었던 것이다. 이를 통해, 굳이 상당한 비용의 재질로 바꿀 필요 없이 전자파 전송구조의 변형으로도 새로운 특성에 접근이 가능하게 된 것이다^[1].

2002년과 2003년 무렵 Caloz는 마이크로스트립 형상을 띤 전송선형 MTM LH와 RH 결합 구조, 즉 주기적 CRLH 전송 선로를 구현하는데 성공하였다. 비슷한 시기에 Eleftheriadess는 완전한 프린팅형이 아닌 국부 소자와 분포 소자를 주기적으로 결합하여

누설과 렌즈 현상을 구현하여 발표하게 된다. 이들은 Pendry가 사용한 주파수를 더 낮춰 RF 영역으로 MTM 설계를 끌어들이는 점에 후한 평가를 받는다. 이 당시 Anthony Lai는 음의 공진과 0차 공진 특성을 이용하여 2~5 GHz에서 동작하는 초소형 마이크로스트립 패치 안테나를 선보였다. 이것의 Replica라고 할 수 있는 것이 현재 여기저기에서 보이는 ZOR 안테나, ENG 안테나, MNG 안테나들인 것이다^[1].

앞서 발표된 구조들의 단점들을 극복하기 위한 노력이 본진의 연구와 몇몇의 타 연구진에 의해 시도되고, 의미 있는 성과물로 대표되어진다. 무한주기 개념을 탈피하는 시도, UWB 통과 대역의 확보, ZOR의 결합을 유도한 구조의 제안, UHF 대역과 심지어 VHF T-DMB 대역에서 저렴한 마이크로스트립 프린팅형 구조에 의한 RF 부품 구현, 기존 공진기보다 훨씬 작은 파장/8 이하의 크기, 저지대역의 확장 등이 효과적으로 수행되었다. 또한 개발 구조의 3D 전자장 해석 결과나 측정 결과로부터 분산도 및 전자장 분포의 추출을 통해 MTM 설계를 충실히 따르고 있음을 증명해왔다.

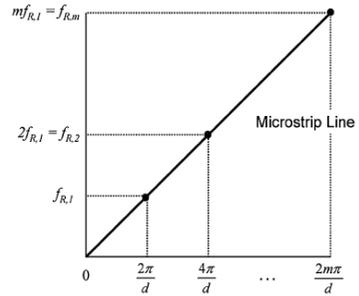
따라서 본고에서는 MTM의 배경과 간단한 기초 이론을 먼저 언급하고, LH와 RH 발생용 주기구조의 예(주기적 CRLH)를 들 것이다. 또한 응용 부품들의 사진과 함께 주파수 영역 특성을 확인하도록 한다. 다음으로는 전파 산란과 방사의 목적으로 사용되는

SNG와 ENZ형의 MTM 구조와 안테나 그리고 초전형성이 가능한 렌즈 분야를 살펴본다. Low profile이 가능하게 하는 MTM의 AMC(Artificial Magnetic Conductor)나 HIS(High Impedance)의 표면과 억제 기능에 대해서도 얘기할 것이다. 마지막으로 EBG(Electromagnetic Bandgap) 등을 포함한 FSS에 대한 언급을 하고 맺음을 할 것이다.

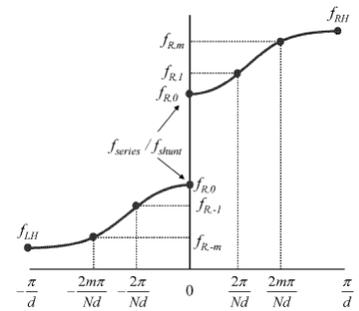
II. MTM과 주기 CRLH에 의한 전자파 전송의 기초

전자파 산란과 전송 현상은 평면파 전송에 기초를 둔 전송선 이론으로 설명이 가능하다. TEM 이외의 고차 모드나 하이브리드 모드에 대한 모델이 필요하다면 전송선의 특성 임피던스를 해당 모드 임피던스로 대체하면 된다. 전송선 모델을 기반으로, RF 부품의 대표적인 예인 여파기(Filter)와 안테나(Traveling 파는 논의)의 전자파 방사현상은 공진기 이론으로부터 시작된다. 일반 공진기는 반파장을 기본 모드로 가지는 것으로 잘 알려져 있다. 이에 반해, MTM 공진은 일반 공진기가 가지지 못한 특이한 현상(MTM이 되기 위한 조건인 ‘극부 소자형이 아닌 분포 소자형으로서 균일성(Homogeneity)을 가지는 극소형 구조’와 음의 전파상수)을 가지고 있다. 왼손전파법칙 LH 현상은 DNG의 경우에 발생한다. 그런데 순수한 RH 구조는 존재하지만, 순수한 LH 구조는 없고, RH 성분과 결합되어 있는 CRLH형이 보통이다.

일반 공진기와 CRLH 공진기는 위상이 π 나 배수가 되는 지점에서 공진이 발생하는 공통점이 있다. 하지만 두 공진 기간에는 차이점이 존재한다. 첫 번째는 [그림 1]과 같이 일반 공진기는 $\beta * l$ 이 $+n\pi$ ($n=1, 2, 3 \dots$)에서 공진이 일어나며, CRLH 공진기는 $\beta * l$ 이 0이나 $\pm n\pi$ ($n=1, 2, 3 \dots$)에서 일어난다. 이런 현상은 크기의 제한으로 생성되는 문제로 기본적으로 CRLH 공진기는 $\lambda/4$ 보다 작아, 인덕터나 캐패시



(a) 기존 전파 현상 RH



(b) MTM형 CRLH

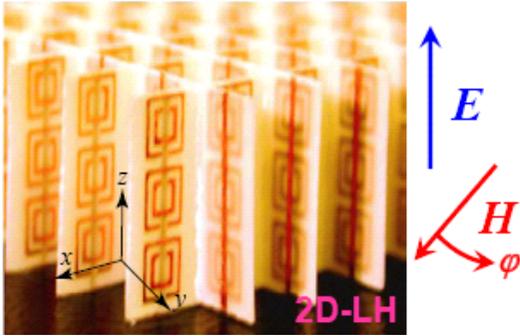
[그림 1] 분산도(dispersion diagram)

터로 등가 모델을 꾸밀 수 있으며, LH 전송선에 의하여 β 의 값이 음의 값을 가지고 LH 전송선과 RH(Right-handed) 전송선의 상호 영향에 의하여 β 의 값이 0를 가진다. 위상도 설계에 따라 일반 전송선과 같은 기울기를 가질 수 있다.

[그림 1]은 RH 전송 선로(양의 전파상수만 존재)와 CRLH 전송 선로(음과 양 β)의 분산도를 보여 주고 있으며, [그림 2]는 각각 공진기의 등가 회로를 보여 주고 있다.

[그림 2]는 일반 RH 재질상에서 구조 형성을 통해 LH 특성을 만들어 낸 2001 Pendry의 성과물이다. 분산 다이어그램을 통해 다음과 같은 CRLH 공진기의 성질을 알 수 있다.

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{L_R C_R}} \tag{1}$$



[그림 2] Pendry의 LH 구조

$$\omega_L = \frac{1}{\sqrt{L_L C_L}} \quad (2)$$

$$Z_L = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} \quad (3)$$

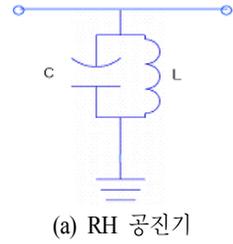
$$Z_R = \sqrt{\frac{L_R}{C_R}} \quad (4)$$

ω_{sc} 와 ω_{sh} 는 각각 CRLH 공진기의 직렬과 병렬 공진점이다. 마지막으로 Z_L 과 Z_R 각각의 모드에서 특성 임피던스이다.

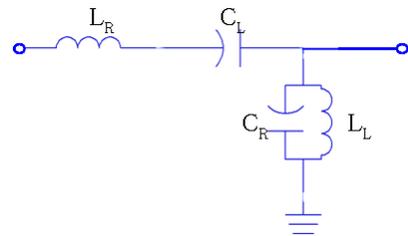
두 번째로 CRLH 공진기는 전기적 크기가 공진 주파수의 파장 길이인 $\lambda/4$ 보다 작다는 조건(Homogeneity) 하에서 [그림 3]처럼 국부소자인 L, C 등가회로로 표현할 수 있다.

Caloz는 위의 모델을 단위 셀로 하는 1차원과 2차원 무한주기 구조의 MTM 전송 구조를 [그림 4]와 같이 구현하였다.

Caloz의 경우, 주기 p 를 가지는 단위 셀의 L_R 과 C_R 이 무한 마이크로스트립 선로로부터 얻어지는 것이며, per-unit-length 개념과 함께 설명된다. 위의 구조에서 발생하는 전파 현상은 [그림 5]와 같다. CRLH가 ZOR 주파수 이하에서 LH가 되면 위상선도(Phase

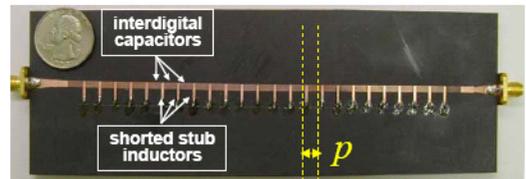


(a) RH 공진기

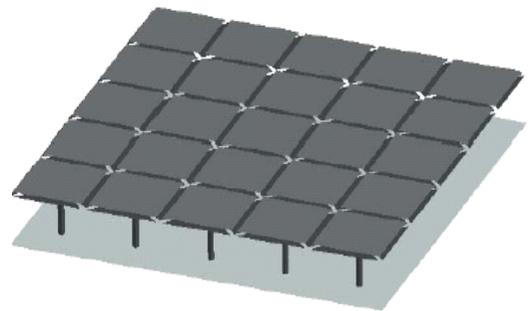


(b) CRLH 공진기

[그림 3] 공진기 등가 회로 모델



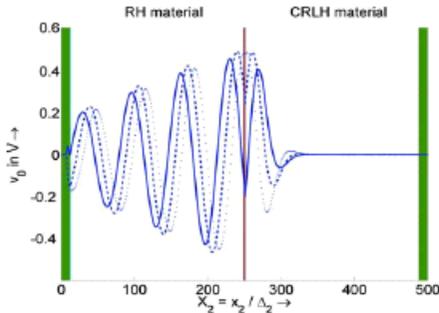
(a) 1D 주기 CRLH 전송선



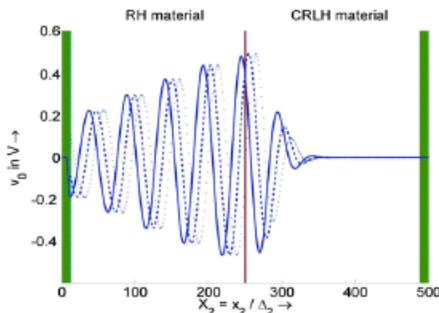
(b) 2D 주기 CRLH 전송선

[그림 4] 1D 및 2D 주기 CRLH 전송선

Lead) 현상을 보이며([그림 5] (a)), RH가 되면 위상지연(Phase Lag) 현상을 보인다. 굴절률(Negative Refrac-



(a) CRLH 전송선이 LH 특성이인 경우



(b) CRLH 전송선이 RH 특성이인 경우

[그림 5] LH에서의 위상선도와 RH의 위상지연 현상

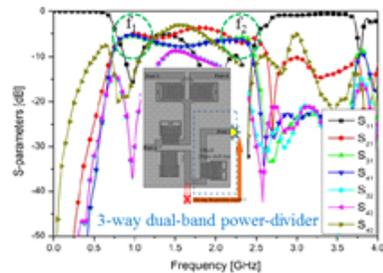
ive Index=NRI) 측면에서도 설명이 가능하다.

III. 메타재질구조의 마이크로파 부품 응용 기술

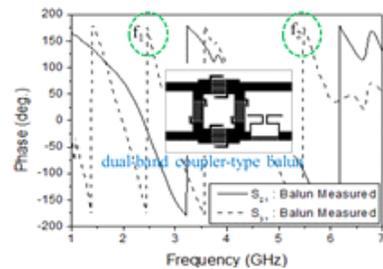
MTM의 구현이 있기 전부터 주기 구조를 연구하거나, EBG를 많이 만들어 왔다. 그런데, EBG를 MTM과 달리 저지대역을 형성하는 그 자체를 의미할 뿐이지만, 가끔 혼용되어 온 것도 사실이다. 또한 MTM으로 저지대역을 만들 수도 있으니, 주기 구조나 주기형 구조에서 저지대역 형성에는 큰 어려움이 없다. 그러나 MTM을 이용하여 대역 형성 외에도 실질적인 크기 축소와 위상선도 현상을 이용한 광대역 및 다중 대역화를 위해서는 먼저 비선형 분산 곡선을 가지는 초소형의 메타 재질 공진기를 만들고, 이

를 위상천이 소자나 여파기 결합소자를 통해 이전에 볼 수 없었던 새로운 종류의 결합기, 전력 분배기, 밸런, 채널 결합기로 응용할 수 있다. [그림 6]은 메타 재질 구조 전력 분배기와 결합기의 예이다.

메타 재질 공진기의 CRLH 위상천이 특성을 초소형의 전력 다중 분배기와 밸런 설계에 적용하였다. 이중 대역 특성을 가지는 기존 부품의 약 30 % 크기에 해당된다. 본 그룹의 빔 포밍 안테나의 핵심소자로 쓰고 있다. 메타 재질 공진기를 여파기에 활용하는 경우도 가능하다. Caloz는 [그림 4] (a)의 무한주기 구조 개념의 MTM을 이용하여 초광대역 여파기를 구현하였으나, 참고문헌 [1]에서 크기와 삽입 손실, 반사 손실의 문제가 큰 점이 현저하다. 이에 본진은 한 기본 셀에서 ZOR을 가질 수 있는 설계법을 제안하여 초광대역 여파기, UHF의 저주파 영역에서도 초소형화 된 여파기, ZOR 간 결합에 의한 차단 영역의 광대역화를 수행하였다^{[3]-[10]}.



(a) 3분기 이중대역 전력 분배기(기존 크기 30 %)



(b) 이중대역, 결합기형 발룬(기존 크기 30 %)

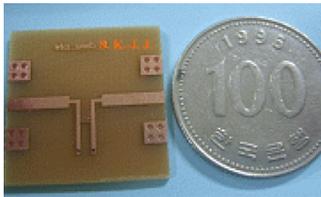
[그림 6] 전력 분배기와 결합기의 설계^[2]

[그림 7]처럼 일반 마이크로스트립 공정만으로도 MTM 조건을 만족시킴으로써 다른 초광대역 여파기 보다 훨씬 작은 구조가 가능했으며, 삽입 손실 등의 통과 특성이 확보되었다. 또한 일반 여파기나 ‘저주파 + 고주파 여파기’로서는 볼 수 없는 음의 전파상수 특성을 분산도를 통해 알 수 있다. 다음은 UHF 대역에서 MTM의 ZOR 여파기를 설계한 예이다.

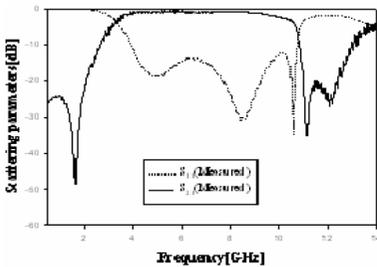
UHF 대역의 설계 결과의 크기가 일반 평행 결합 선로형 여파기 크기로부터 75% 이상의 줄일 수 있음을 확인하였다. 특히 [그림 8] (b)에서처럼 기본 주

파수의 거의 5배까지 저지대역을 확장할 수 있는 능력을 확인하였다. 또한 [그림 9]와 같이 교차 결합을 통한 전송 영점(Transmission zero) 발생 개념을 이용하여 차단 특성을 극대화 할 수 있다.

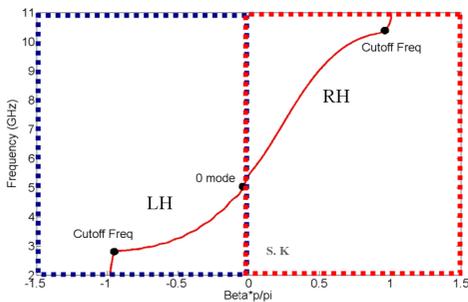
먼저, 3극 공진기(Cascaded-Triplet)를 0차 공진 현상으로 초소형화 하면서, 교차 결합을 형성하여 기본 그룹이 우수한 차단 특성을 가지게 한 것이 특징이며, 여파기 분야나 MTM에서 처음 시도된 기법이



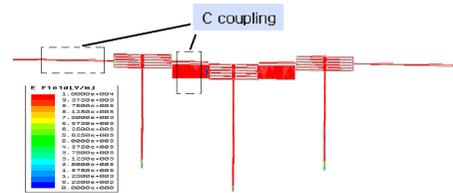
(a) 구현된 초광대역 대역 통과 여파기(크기 $\lambda_g/9.4$)



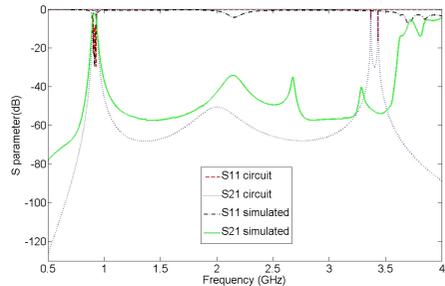
(b) 초광대역 대역통과 여파기의 S_{21} 과 S_{11}



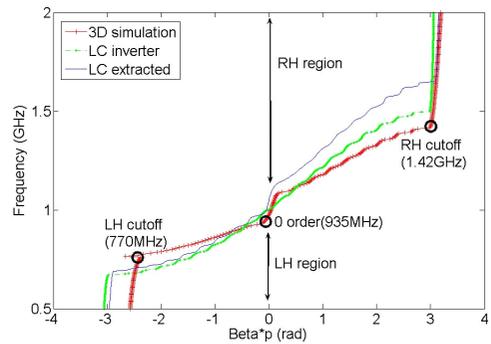
(c) 초광대역 대역통과 여파기의 분산도(LH & RH)



(a) 제안된 구조상에서 보이는 ZOR 전계 특성



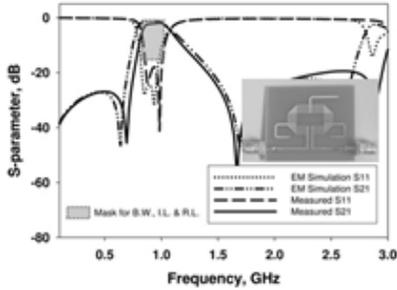
(b) UHF 대역 대역통과 여파기의 S_{21} 과 S_{11} (중심 주파수의 4.5배까지 저지하는 특성을 확인)



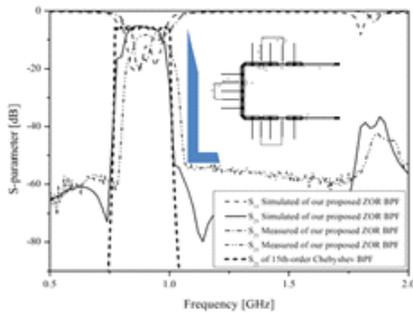
(c) UHF 대역 대역통과 여파기의 분산도(LH & RH)

[그림 7] MTM 초광대역 대역통과 여파기^[5]

[그림 8] MTM UHF 대역 대역통과 여파기^{[6]~[8]}



(a) 0차 공진, 3극 교차 결합형 대역 통과 여파기



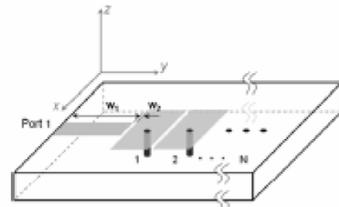
(b) 0차 공진, 세 그룹 3극 교차 결합형 대역 통과 여파기
[그림 9] MTM UHF 대역 대역 통과 여파기^[9]

다. 이를 세 그룹으로 확장하면서 위상조절기를 두어, 아홉 개의 공진기로 [그림 9] (b)에서 보듯이 15차 여파기의 차단 특성을 얻을 수 있어, 손실면에서 뛰어난 성능을 보인다. 이외에도 다양한 메타 재질 구조 수동소자들이 개발되어 왔으며, 이는 다음 절의 안테나와 결합되어 품질을 높일 수 있는 무선통신 시스템 개발에 사용되고 있다.

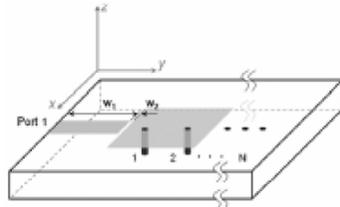
IV. MTM 구조의 안테나 및 전파산란 응용기술

ZOR을 이용한 모노폴 방사패턴 안테나 구조는 Anthony Lai와 Itoh에 의해 소개되었다^[11].

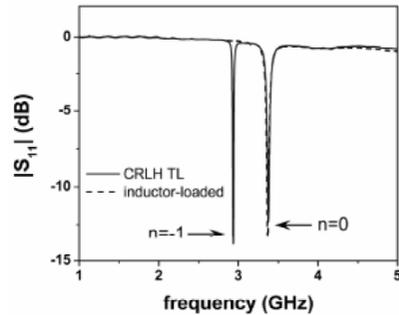
[그림 10]과 같은 MTM 안테나 역시 CRLH 전송선 기반으로 동작하고 있다. 따라서 0차 공진뿐만 아니라, 음의 공진까지 S_{11} 상에서 최저 반사손실을 보이도록 유도할 수 있으며, ZOR인 3.3 GHz에서



(a) 주기형 CRLH ZOR 안테나



(b) 주기형, 직렬 C 없는 ZOR 안테나

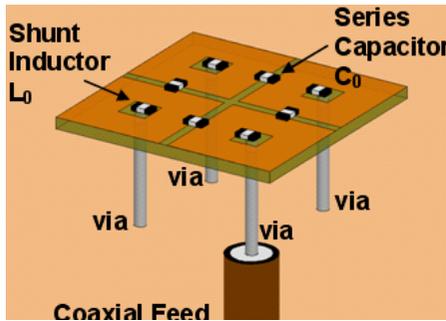


(c) MTM 초소형 안테나의 S_{11}

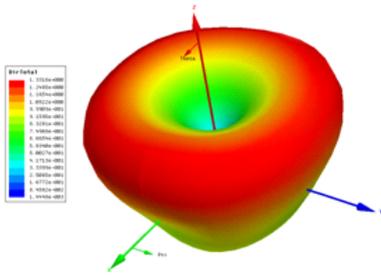
[그림 10] 모노폴 방사패턴의 0차 공진 안테나^[11]

$\lambda_g/8$ 이하의 크기로도 구현 가능하게 된다. 또한 국부소자를 주기적인 패치들 사이에 부착하여 ZOR 특성을 만든 경우도 있다.

[그림 11]처럼 G. Eleftheriades는 완전 프린팅형은 아니지만, 국부소자 값의 적합한 선정을 통해 한 방향의 전계를 발생시켜, 모노폴 안테나 방사패턴을 보인다. 그런데, 두 개의 0차 공진 안테나들은 주기형으로 길다는 것과 이동통신 단말기 장착에는 적합하지 않은 구조이다. 특히 이들의 구조를 기반으로 Rayspan이 단말기에 적용하려는 여러 가지 시나리오를 많이 만들었으나, 단말기 개발 대기업으로부터 메



(a) 주기 패치와 국부 C가 결합된 ZOR 안테나



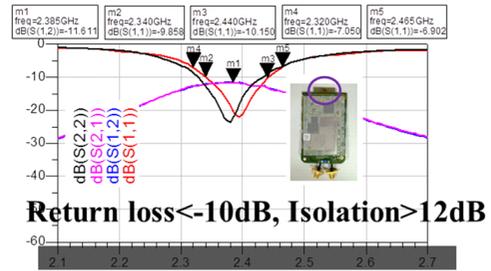
(b) 주기 패치와 국부 C가 결합된 ZOR 안테나

[그림 11] 높이가 큰, 0차 공진 안테나

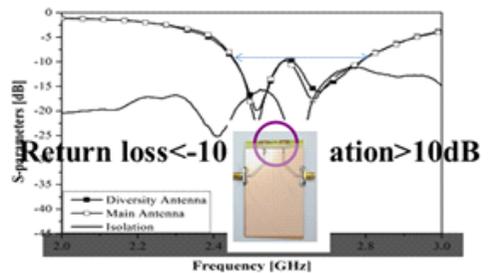
타 재질 구조의 특성이 사라지고, 장착형으로는 부적합하다는 평가를 받은 경우가 있다. 이에 본 그룹은 장착환경과 안테나 이득 조건을 만족하기 위한 다음과 같은 상용화 가능한 구조를 설계하였다.

[그림 12]는 긴 Via의 인덕턴스 대신 선로 간 강결합에 의한 공진주파수 근접을 통해 0차 공진하며, 방사하는 안테나를 만들고, 두 개로 만들어 MIMO 기능이 가능하게 하였다. 초소형(파장의 8분의 1 이하)인 요소 방사체들은 상대적으로 전기적으로 멀리 있어, 격리도 특성도 좋게 할 수 있다. 0차 공진 동일 방향 전계를 발생시키고 인접 공진점들과의 결합이 가능한 요소를 삽입하여 12% 이상의 비대역폭을 넘는 광대역화도 가능하다^[10]. 본 그룹은 이런 기초 기술들을 이용하여 다음과 같은 빔 포밍(형성) 구조 역시 소형이면서 다중기능이 가능하게 하였다.

MTM 급전회로를 만들어 소형 구조(기존의 5분의



(a) 비주기형 ZOR MIMO 안테나(소수 채널용)

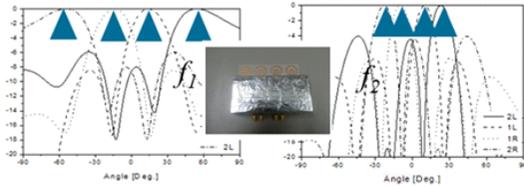


(b) 비주기형 ZOR MIMO 안테나(광대역: FBW>12%)

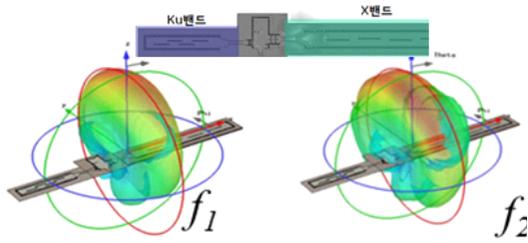
[그림 12] 비주기형 ZOR MIMO 안테나^[10]

1 가량)로서 빔 포밍이 가능한 구조들은 [그림 13]과 같다. 단말기에 장착이 가능한 정도도 되며, 스마트 가전과 적응형 이동통신에 적합할 것으로 사료된다. 이외에도 차량 장착이 가능한 2D 빔 스캐닝 구조와 3D 빔 포밍구조도 개발 중에 있다. 공진을 하여 전자파 에너지를 방사하는 구조가 있다면, MTM이나 NRI가 안테나 분야뿐만 아니라, 초점 형성에 사용 가능하다. 즉, 다음과 같은 빔이 발산 후 수렴되는 현상을 DPS-DNG 결합에서 확인할 수 있다.

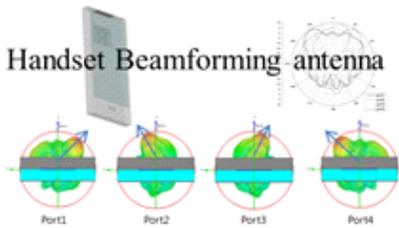
DPS가 NRI를 만나면서 매칭 조건이 성립되면 전 파원에서부터 발산되는 파가 수렴되게 되며, 이때 초점이 형성된다. 이를 증명하기 위한 구조가 [그림 14] (b)에 소개되었고, [그림 14] (c)에서 보듯이 초점(강한 전계 분포 지점)이 확인된다. 광선의 경로를 조정하게 되면 발산형을 수렴형이나 평면 파형으로 변환할 수 있고, 이는 안테나의 방향성을 놓여 이득이 증가하는 것과 같아진다. 마지막으로 본진이 연구하는



(a) MTM Butler matrix의 빔 포밍 특성(이중대역)



(b) MTM SIW 듀플렉서 장착한 빔 포밍 특성



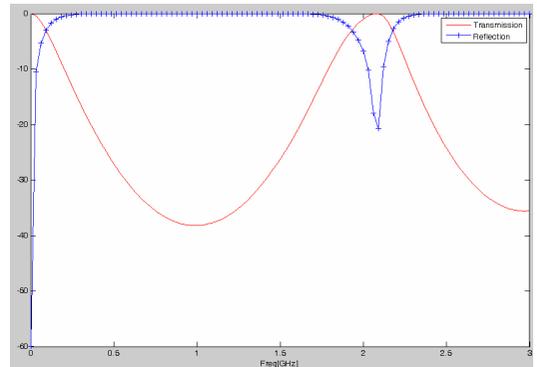
(c) MTM switched 빔 포밍 특성(단말기용)

[그림 13] MTM 기반 빔 포밍 안테나^[2]

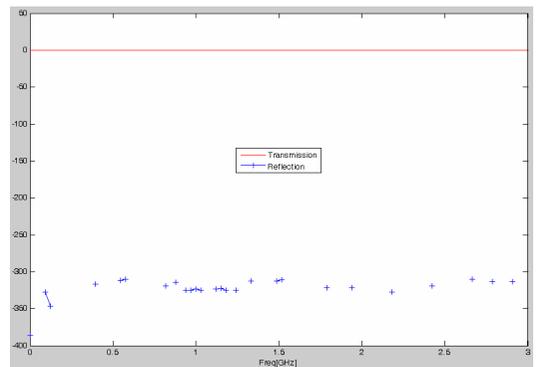
FSS 구조에서 입사파를 넓은 선택 영역에서 통과시키는 방법을 소개한다. 우선 1차원 EBG 구조에 MTM을 삽입하여 Ripple 없는 차단 영역 및 통과 영역을

얻는다.

또한 MTM 완전 매칭 조건을 부여하면 [그림 15]와 같이 전역 통과 특성을 가지게 된다.

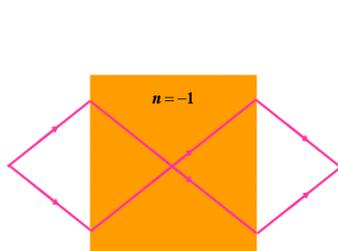


(a) 1D EBG 구조+MTM pairing에 의한 FSS 결과

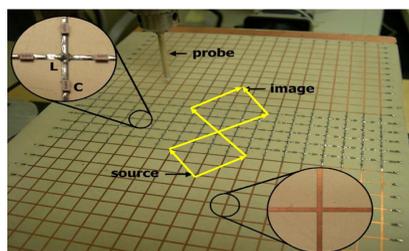


(b) 1D MTM pairing에 의한 ripple-free FSS 설계 결과

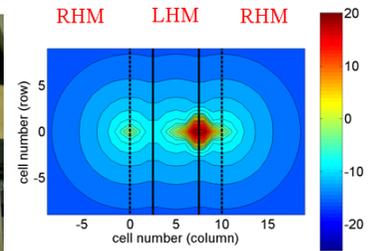
[그림 15] 1D EBG 구조+MTM pairing형 FSS



(a) DPS-DNG(NRI) 평면형 렌즈



(b) DPS-DNG(NRI) 평면형 렌즈 실제 구현



(c) DPS-DNG(NRI) 평면형 렌즈 성능

[그림 14] DPS-DNG(NRI) 평면형 렌즈 설계^[1]

V. 결 론

본 고에서는 초고주파와 무선통신 시스템 분야는 물론 물리광학, 어쿠스틱스 분야에서도 활발한 연구가 진행되고 있는 Metamaterial(MTM)구조 기술에 대해 돌아보았다. 우선, MTM의 대표적 현상인 Left-Handedness(LH) 왼손 전파법칙과 LH 발생 재질인 Double Negative(DNG) 재질에서의 전자기적 특성을 유효 유전율과 유효 투자율 관점에서 관찰하였고, 흔히 사용되는 Double Positive(DPS)형인 오른손 전파법칙 Right-Handedness(RH) 매질과의 결합(Composite Right-and Left-Handed: CRLH)에서 얻어지는 특징들에 대해 알아보았다. 특히 DPS와 DNG의 결합에서 얻을 수 있는 음의 공진과 0차 공진(Zero-Order Resonance)을 언급하고, ZOR을 응용한 마이크로파 부품의 크기 축소와 특성 개선 사례를 소개하였다. 또한 안테나와 전자파 산란 특성에 MTM의 특수한 성질을 이용하여, 소형화하거나 전자파 에너지를 교란하는 표면파를 억제하거나 혹은 방사개구를 확대하여 지향성을 높이는 사례도 언급하였다. 그리고 MTM 관점에서 주파수 선택성을 논의하고, 몇 년간 발표된 대표적 MTM 연구 결과에 대한 소개를 하였다.

참 고 문 헌

- [1] C. Caloz, T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Application*. John Wiley & Sons, 2006.
- [2] D. Eom, S. Kahng, et al, "A miniaturized multi-function artificial-material butler matrix for antenna beamforming/radars", *Proc. KICS 2012 Winter Conference*, vol. 1, no. 1, pp. 75-79, 2012.
- [3] S. Kahng, J. Ju, "Left-handedness based bandpass filter design for RFID UHF-band applications", *Proc. KJMW 2007*, vol. 1, pp. 165-168, Nov. 2007.
- [4] S. Kahng, J. Ju, "Miniaturized metamaterial UWB bandpass filter having improved passband and stopband performances with stubs", *Korea Intellectual Property Office Issue Number: 10-2007-0097825*.
- [5] J. Ju, S. Kahng, "Design of the 1-cell CRLH TX-Line metamaterial miniaturized UWB bandpass filter", *Journal of KIEES*, vol. 18, no. 12, pp. 1402-1407, Dec. 2007.
- [6] S. Kahng, J. Ju, "Miniaturized metamaterial UHF bandpass filter having E-coupling elements and stubs", *Korea Intellectual Property Office Issue Number: 10-2007-0098-085*.
- [7] S. Kahng, J. Ju, "Design to enhance the stopband performance of the 1-cell CRLH TX-line metamaterial miniaturized UWB bandpass filter", *Journal of IEEK, Section 4(TC) 8(374)*, pp. 47-52, Aug. 2008.
- [8] J. Ju, S. Kahng, "Miniaturized metamaterial UHF GSM bandpass filter having Inductive Coupled Inverters for Enlarging the Stopband", *Journal of KIEES*, vol. 19, no. 2, pp. 95-101, Feb. 2008.
- [9] B. Lee, S. Kahng, "Compact UHF 5th-order bandpass filter with sharp skirt by cascaded triplet CRLH-ZORs" *Microwave Journal*, vol. 55, no. 5, pp. 184-198, May 2012.
- [10] K. Kahng, S. Kahng, "A bandwidth-enlarged and isolation-enhanced ZOR MIMO antenna, shorter than $0.11\lambda_g$ ", *Microwave Journal*, vol. 57, no. 9, pp. 128-136, Sep. 2014.
- [11] S. Kahng, "Characteristics of the resonance and impedance of parallel plates due to the embedded metamaterial substrate", *Journal of IEEK, Section 4(TC) 8(374)*, pp. 41-46, Aug. 2008.
- [12] A. Alu, et al, "Antennas in epsilon-near-zero metamaterials filling narrow waveguide channels and bends", *USNC/URSI National Radio Science Mee.*

≡ 필자소개 ≡

강 승 택



1996년 3월~2000년 2월: 한양대학교
전자통신공학과 (공학박사)

2000년 2월~2000년 4월: 한양대학교
산업과학연구소 연구원

2000년 4월~2004년 2월: 한국전자통
신연구원 통신위성개발센터 선임연
구원

2004년 3월~현재: 인천대학교 정보통신공학과 교수

[주 관심분야] 초고주파 부품 및 안테나 최적 설계, Meta-
material 연구 및 응용, EMI/EMC 대책, 소자모델링, 전자파
수치 해석 기법 개발 및 응용