

Left-Handedness 특성 Metamaterial 구조의  
마이크로파 부품과 안테나 개발에의 적용 기술

강 승 택

인천대학교 정보통신공학과

요 약

본고를 통해 초고주파 이론과 공학 분야는 물론 물리학, 재료공학의 기초 학문 분야에서도 지대한 관심을 모으고 있는 Metamaterial(MTM) 구조에 대해 조명하고자 한다. 먼저 MTM의 핵심이라고 할 수 있는 Left-Handedness(LH) 왼손 전파 법칙과 LH 발생 재료인 Double Negative(DNG) 재질에서의 전파 특성을 상대 유전율과 상대 투자율 평면에서 확인하고, 일반 매질인 Double Positive(DPS)형인 오른손 전파 법칙 Right-Handedness(=RH) 매질과의 결합(Composite Right- and Left-Handed=CRLH)에서 얻어지는 특징들을 살펴본다. 특히 DPS와 DNG의 결합에서 얻을 수 있는 음의 공진과 0차 공진(Zero-Order Resonance)을 언급하고 ZOR을 응용한 RF 부품의 소형화와 특성 개선 사례를 소개한다. 또한, 안테나와 전자파 산란 특성에 MTM의 특수한 성질을 이용하여, 크기를 줄이거나 표면파를 억제하거나 혹은 방사 개구를 확대 또는 렌즈 특성을 얻어낸 사례도 언급된다. 그리고 LH 특성은 아니지만 MTM 계열인 ENG(Epsilon Negative), MNG(Mu Negative), ENZ(Epsilon Near Zero)를 응용한 예들을 보이고, MTM 관점에서 FSS(Frequency Selective Surface)의 특성을 논의하고, 그간에 발표된 대표적 MTM 연구 결과에 대한 소개를 마치하고자 한다.

I. 서 론

최근 RF 부품과 안테나 개발, 전파전파 대책에 있어 까다로운 요구 사항들을 맞추기 위해서는 기존의 기법들을 능가하는 설계 기법들이 발굴되어야 한

다. 오랜 기간 연구되어 오면서 성숙해온 RF 기술의 또 다른 진일보를 위해서는 재료와 공정기법의 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 금속고리 쌍을 이용하여, 각각 유효 상대 유전율과 유효 상대 투자율을 음수로 이끌어냈으며, 광의 주파수보다 훨씬 낮은 영역에서 왼손 전파 법칙이 통하는 MTM LH 구조를 얻었던 것이다. 이를 통해, 굳이 상당한 비용의 재질로 바꿀 필요없이 전자파 전송 구조의 변형으로도 새로운 특성에 접근이 가능하게 된 것이다<sup>[1]</sup>.

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 누설파와 렌즈 현상을 구현하여 발표하게 된다<sup>[2]</sup>. 이들은 Pendry가 사용한 주파수를 더 낮춰 RF 영역으로 MTM 설계를 끌어들이었다는 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 여기저기서 보이는 ZOR 안테나, ENG 안테나, MNG 안테나들이었다<sup>[1]</sup>.

앞서 발표된 구조들의 단점들을 극복하기 위한

노력이 본진의 연구와 몇몇의 타 연구진에 의해 시도되고 의미있는 성과물로 대표되어진다. 무한 주기 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, 저지 대역의 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 초점 형성이 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

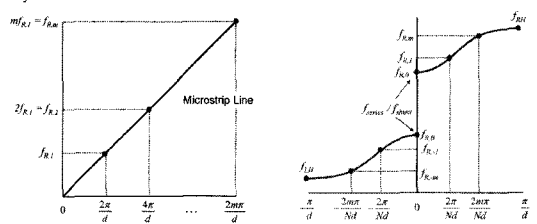
전자파 산란과 전송 현상은 평면파 전송에 기초를 둔 전송선 이론으로 설명이 가능하다. TEM 이외의 고차 모드나 하이브리드 모드에 대한 모델이 필요하다면 전송선의 특성 임피던스를 해당 모드 임피던스로 대체하면 된다. 전송선 모델을 기반으로, RF 부품의 대표적인 예인 여파기(filter)와 안테나(traveling 파는 논외)의 전자파 방사 현상은 공진기 이론으로부터 시작된다. 일반 공진기는 반파장을 기본 모

드로 가지는 것으로 잘 알려져 있다. 이에 반해, MTM 공진은 일반 공진기가 가지지 못한 특이한 현상(MTM이 되기 위한 조건인 ‘국부 소자형이 아닌 분포 소자형’으로서 균일성(homogeneity)을 가지는 극소형 구조’와 음의 전파 상수)을 가지고 있다. 왼손 전파 법칙 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  $\pi$ 나 배수가 되는 지점에서 공진이 발생하는 공통점이 있다. 하지만 두 공진기간에는 차이점이 존재한다. 첫 번째는 [그림 1]과 같이 일반 공진기는  $\beta \cdot l$ 이  $+n\pi$  ( $n=1,2,3,\dots$ )에서 공진이 일어나며, CRLH 공진기는  $\beta \cdot l$ 가 0이나  $n\pi$  ( $n=1,2,3,\dots$ )에서 일어난다. 이런 현상은 크기의 제한으로 생성되는 문제로 기본적으로 CRLH 공진기는  $\lambda/4$ 보다 작아 인덕터나 캐패시터로 등가 모델을 꾸밀 수 있으며, LH 전송선에 의하여  $\beta$ 의 값이 음의 값을 가지며, LH 전송선과 RH(Right-Handed) 전송선의 상호 영향에 의하여  $\beta$ 의 값이 0를 가진다. 위상도 설계에 따라 일반 전송선과 같은 기울기를 가질 수 있다.

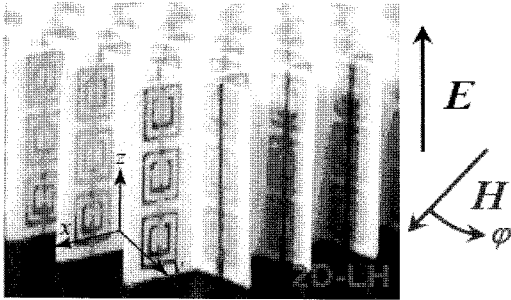
[그림 1]은 RH 전송선로(양의 전파상수만 존재)와 CRLH 전송선로(음과 양  $\beta$ )의 분산도를 보여 주고 있으며, [그림 2]는 각각 공진기의 등가 회로를 보여 주고 있다.

[그림 2]는 일반 RH 재질상에서 구조 형성을 통해



(a) 기존 전파 현상 RH (b) MTM형 CRLH

[그림 1] 분산도(Dispersion diagram)



[그림 2] Pendry의 LH 구조

LH 특성을 만들어낸 2001 Pendry의 성과물이다.

분산 다이어그램을 통해 다음과 같은 CRLH 공진기의 성질을 알 수 있다.

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{L_R C_R}} \quad (1)$$

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

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

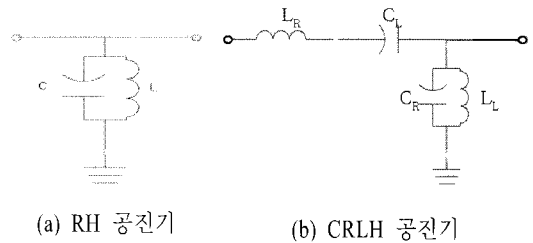
$$Z_R = \sqrt{\frac{L_R}{C_R}} \quad (4)$$

$\omega_{sc}$ 와  $\omega_{sh}$ 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 국부 소자인 L, C 등가회로로 표현할 수 있다.

Caloz는 위의 모델을 단위셀로 하는 1차원과 2차원 무한 주기 구조의 MTM 전송 구조를 다음과 같이 구현하였다.

Caloz의 경우, [그림 3]은 주기  $p$ 를 가지는 단위 셀의  $L_R$ 과  $C_R$ 이 무한 마이크로스트립 선로로부터 얻

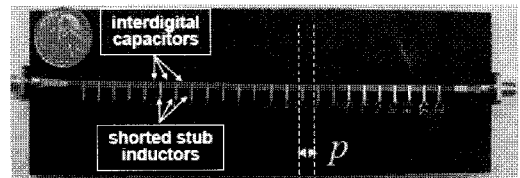


[그림 3] 공진기 등가 회로 모델

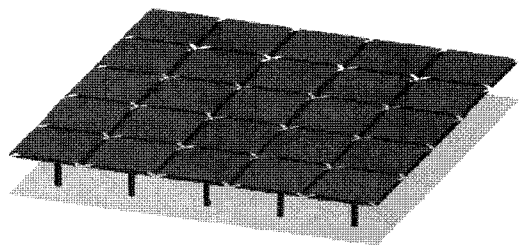
어지는 것이며, per-unit-length 개념과 함께 설명된다.

[그림 4]의 구조에서 발생하는 전파 현상은 [그림 5]와 같다.

CRLH가 ZOR 주파수 이하에서 LH가 되면 위상 선도(phase lead)현상을 보이며 [그림 5](a)에서 점선이 RH에서는 지연되다가 LH형 CRLH에서는 앞서는 현상), ZOR 주파수 이상에서 RH가 되면 위상 지연(phase lag) 현상을 보인다. Eleftheriades 등의 연구진에서도 비슷한 개념으로 접근하여 음의 굴절률(Negative Refractive Index=NRI) 구조와 응용 기술을 선보이고 있다.

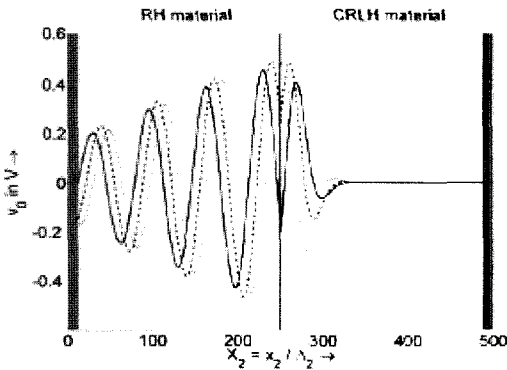


(a) 1D 주기 CRLH 전송선

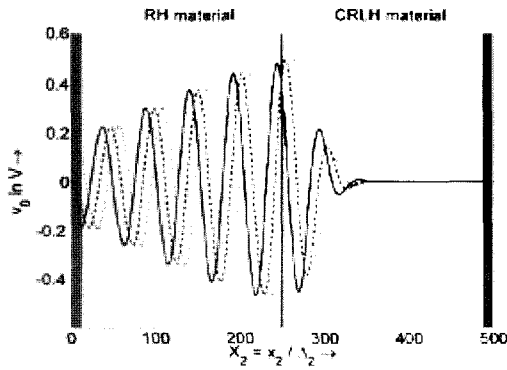


(b) 2D 주기 CRLH 전송선

[그림 4] 1D 및 2D 주기 CRLH 전송선



(a) CRLH 전송선이 LH 특성인 경우



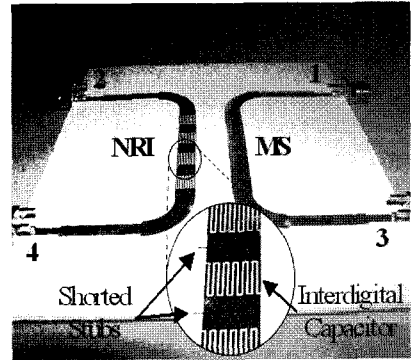
(b) CRLH 전송선이 RH 특성인 경우

[그림 5] LH에서의 위상 선도와 RH의 위상 지연 현상

### III. MTM 구조의 RF부품 응용 기술

MTM의 구현이 있기 전부터 주기 구조를 연구하거나 EBG를 많이 만들어 왔다. 그런데 EBG를 MTM과 달리 저자기 구조로 저지 대역을 형성하는 그 자체를 의미할 뿐이지만 가끔 혼용되어온 것도 사실이다. 또한, MTM으로 저지 대역을 만들 수도 있으니, 주기 구조나 주기형 구조에서 저지대역 형성에는 큰 어려움이 없다. 다음은 RF 부품의 하나인 방향성 결합기의 일부에 NRI 구조를 삽입하여 최대 격리 효과를 얻어낸 예이다.

Port 1에 입력을 가하면, port 4에 -72 dB의 신호



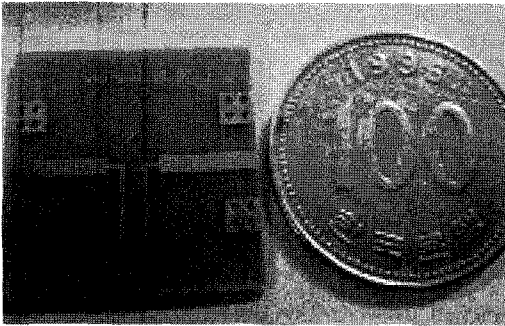
[그림 6] NRI 위상 선도와 RH의 위상 지연 현상

만 전달된다. 별도의 구조물 부착없이 격리도를 높여, 부품 소형화의 한 예라고 해도 된다. 그런데 mushroom, EBG 구조, SRR/CSRR형의 저지 대역 특성을 이용하는 구조는 매우 많았던 반면, 진정한 MTM의 구현을 통해 통과 대역과 인접 저지 대역 특성의 품질을 높이는 설계 방법은 더 난이도가 있어 예제가 드물었던 것도 사실이다. Caloz는 [그림 4](a)의 무한 주기 구조 개념의 MTM을 이용하여 초광대역 여파기를 구현하였다. 그런데 참고문헌 [1]에서 [그림 4](a)의  $S_{21}$  결과를 보면 24차(이상)에 의한 고차 여파 특성으로 주파수 선택도가 상당히 좋지만 구조와 삽입 손실이 크다.

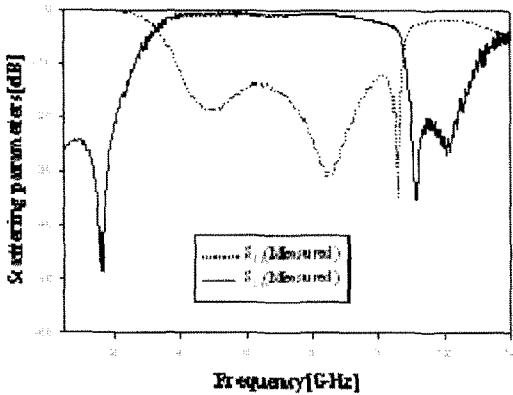
MTM의 특성을 제대로 구현한 점에서 팔목할만 하지만 homogeneity에 다른 장점을 살리지 못한 것이 아쉬웠다. 이에 본진은 한 기본 셀에서 ZOR을 가질 수 있는 설계법을 제안하여 MTM의 강결합을 확인할 수 있는 초광대역 여파기, GHz 이하 대역인 UHF와 VHF 대역인 낮은 주파수 영역에서의 초소형화된 여파기, ZOR간 결합에 의한 차단 영역의 광대역화를 수행하였다<sup>[3]~[10]</sup>.

일반 마이크로스트립 공정만으로도 MTM 조건을 만족시킴으로써 다른 초광 대역 여파기보다 훨씬 작은 구조가 가능했으며, 삽입 손실 등의 통과 특성이 확보되었다. 또한, 일반 여파기나 저주파·고주파 여

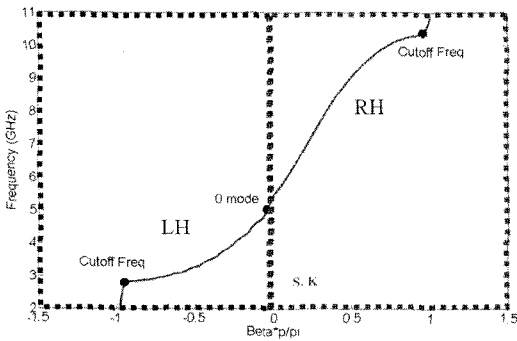
파기'로서는 볼 수 없는 음의 전파 상수 특성을 분산도를 통해 알 수 있다. [그림 8]은 UHF 대역에서 MTM의 ZOR 여파기를 설계한 예이다.



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



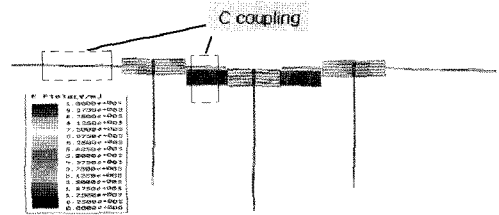
(b) 초광대역 대역 통과 여파기의  $S_{21}$ 과  $S_{11}$



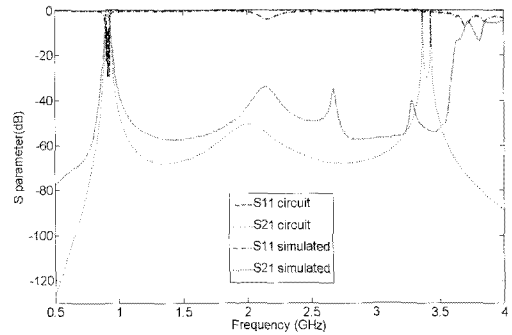
(c) 초광대역 대역 통과 여파기의 분산도(LH & RH)

[그림 7] MTM 초광대역 대역 통과 여파기<sup>[5]</sup>

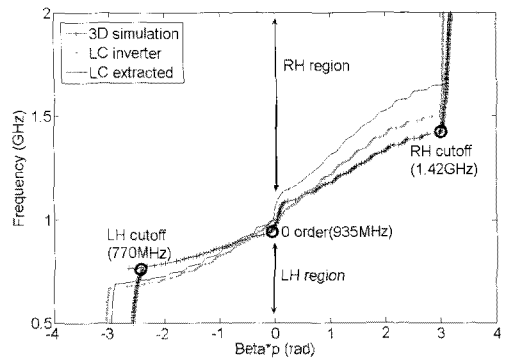
UHF 대역의 설계 결과의 크기가 일반 평행 결합 선로형 여파기 크기로부터 75 % 이상 줄일 수 있음을 확인하였다. 특히 [그림 8](b)에서처럼 기본 주파수의 거의 5배까지 저지 대역을 확장할 수 있는



(a) 제안된 구조상에서 보이는 ZOR 전개 특성



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



(c) UHF 대역 대역 통과 여파기의 분산도(LH & RH)

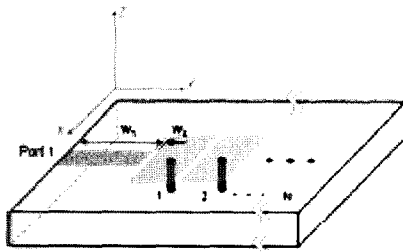
[그림 8] MTM UHF 대역 대역 통과 여파기<sup>[6]</sup>

능력을 확인하였다. 즉, 크기 축소와 특성 향상이 가능한 이 기술은 현재에도 진행 중이다.

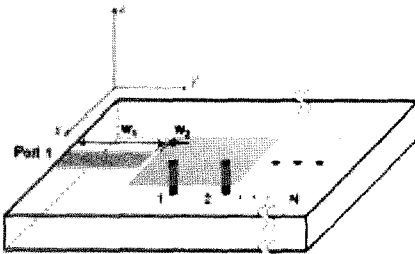
#### IV. MTM 구조의 안테나 및 전파 산란 응용 기술

MTM을 이용한 안테나 구조는 Lai에 의해 소개되었다.

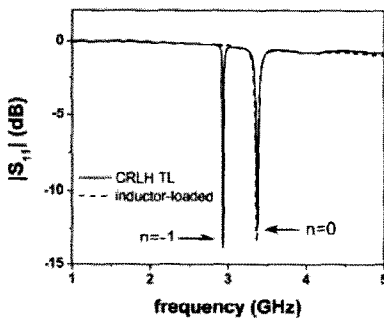
[그림 9]와 같은 MTM 안테나 역시 CRLH 전송선 기



(a) MTM-1 초소형 안테나

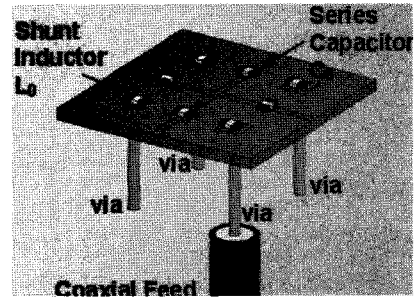


(b) MTM0 초소형 안테나



(c) MTM 초소형 안테나의  $S_{11}$

[그림 9] MTM 초소형 안테나<sup>[1]</sup>



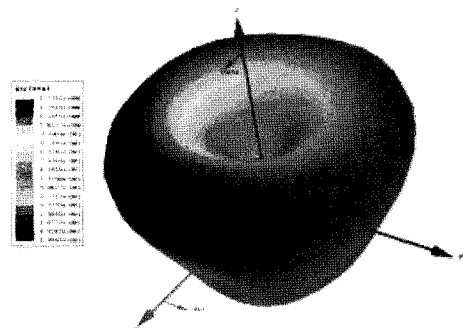
[그림 10] NRI+RH MTM 초소형 안테나<sup>[2]</sup>

반으로 동작하고 있다. 따라서 0차 공진뿐만 아니라 음의 공진까지  $S_{11}$  상에서 최저 반사 손실을 보이도록 유도할 수 있으며, ZOR인 3.3 GHz에서  $\lambda_g/8$  이하의 크기로도 구현 가능하게 된다. 또한, 국부 소자를 패치들 사이에 부착하여 ZOR 특성을 만든 경우도 있다.

완전 프린팅형은 아니지만 국부 소자값의 적합한 선정을 통해 NRI 특성이 나타나고 전계가 패치상면에서 한 방향을 이루고 있어 다음과 같은 패턴으로 이어진다.

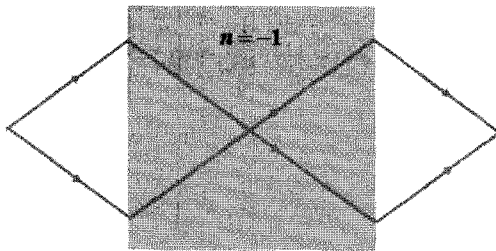
하나의 다이폴 안테나 특성을 패치상에서 만들어 낸 경우라고 할 수 있다. MTM이나 NRI가 안테나 분야뿐만 아니라 조점 형성에 사용되고 있다. 즉, 다음과 같은 발산-수렴을 이어지는 현상을 DPS-DNG 결합에서 확인할 수 있다.

DPS가 NRI를 만나면서 매칭 조건이 성립되면 전

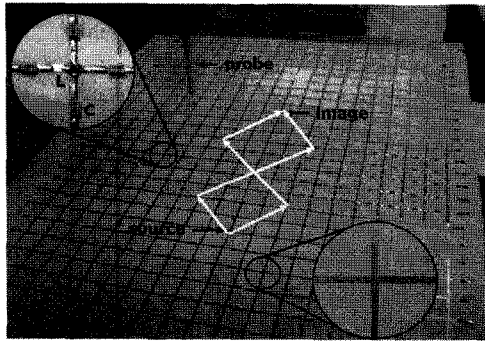


[그림 11] NRI+RH MTM 초소형 안테나의 패턴<sup>[2]</sup>

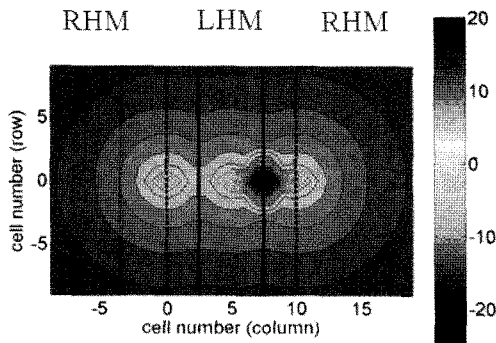
파원으로부터 발산되는 파가 수렴되게 되며, 이때 초점이 형성된다. 이를 증명하기 위한 구조가 [그림 12](b)에 소개되었고 [그림 12](c)에서 보듯이 초점(강한 전계분포지점)이 확인된다. 광선의 경로를 조정하게 되면 발산형을 수렴형이나 평면파형으로 변환할 수 있고, 이는 안테나의 방향성을 노여 이득이 증가하는 것



(a) DPS-DNG(NRI) 평면형 렌즈



(b) DPS-DNG(NRI) 평면형 렌즈 실제 구현



(c) DPS-DNG(NRI) 평면형 렌즈 성능

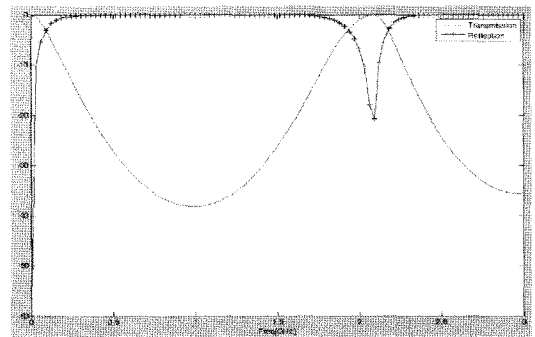
[그림 12] DPS-DNG(NRI) 평면형 렌즈 설계<sup>[2]</sup>

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

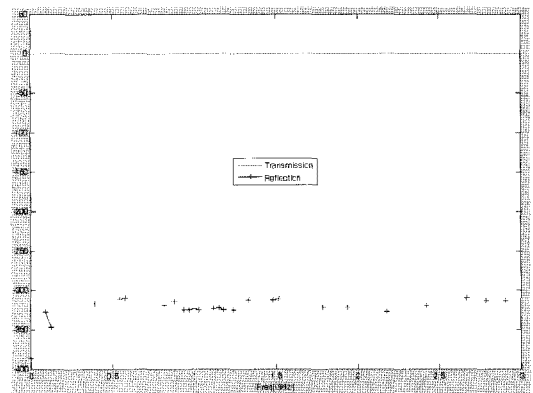
또한, MTM 완전 매칭 조건을 부여하면 [그림 13]과 같이 전역 통과 특성을 가지게 된다.

## V. 결론

본고를 통해 MTM의 여러 활용 범위와 그간의 성과들을 정리하였다. 정확한 MTM 조건을 찾아 구현



[그림 13] 1D EBG 구조+MTM pairing에 의한 ripple-free FSS 설계 결과



[그림 14] 1D MTM pairing에 의한 ripple-free FSS 설계 결과

함으로써 RF 부품과 안테나의 소형화 및 성능 향상을 꾀할 수 있으며, 전자파 산란 문제에 대한 대책도 효과적으로 수립할 수 있다고 판단된다.

### 참 고 문 헌

[1] Christophe Caloz, Tatsuo Itoh, *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Application*, John Wiley & Sons, 2006.

[2] George Eleftheriades, *Negative-Refractive Metamaterials*, John Wiley & Sons, 2006.

[3] S. Kahng, J. Ju, "Left-handedness based bandpass filter design for RFID UHF-band applications", in *Proc. KJMW 2007*, vol. 1, pp. 165-168, Nov. 2007.

[4] Sungtek Kahng, Jeongho Ju, "Miniaturized metamaterial UWB bandpass filter having improved passband and stopband performances with stubs", *Korea Intellectual Property Office Issue Number: 10-2007-0097825*.

[5] 주정호, 강승택, "일단 CRLH 전송선 구조를 이용한 소형 초광대역 대역 통과 여파기의 설계", *한국전자과학회논문지*, 18(12), pp. 1402-1407,

2007년 12월.

[6] Sungtek Kahng, Jeongho Ju, "Miniaturized metamaterial UHF bandpass filter having E-coupling elements and stubs", *Korea Intellectual Property Office Issue Number: 10-2007-0098-085*.

[7] Sungtek Kahng, Jeongho 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)*, vol. 8, no. 374, pp. 47-52, Aug. 2008.

[8] 주정호, 강승택, "유도 결합형 Inverter와 Metamaterial을 이용한 넓은 저지 대역을 갖는 소형 GSM 대역 통과 여파기의 설계", *한국전자과학회논문지*, 19(2), pp. 95-101, 2008년 2월.

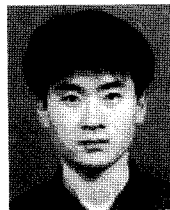
[9] Sungtek Kahng, "Characteristics of the resonance and impedance of parallel plates due to the embedded metamaterial substrate", *Journal of IEEK, Section 4(TC)*, vol. 8, no. 374, pp. 41-46, Aug. 2008.

[10] 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 전  
자통신공학과 (공학박사)

2000년 2월~2000년 4월: 한양대학교 산  
업과학연구소 연구원

2000년 4월~2004년 2월: 한국전자통신  
연구원 통신위성개발센터 선임연구원

2004년 3월~현재: 인천대학교 정보통신공학과 교수

신공학과 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