

Subwavelength 결함접지구조(defected grounded structure : DGS)를 이용한 Homogeneous Dual Composite Right/Left-Handed 메타물질 구현

논 문
58-11-25

Homogeneous Dual Composite Right/Left-Handed Metamaterial Using Subwavelength Defected Ground Structure(DGS)

박 우 영* · 임 성 준†
(Woo-Young Park · Sung-Joon Lim)

Abstract - In this paper, a homogeneous dual composite right/left-handed (D-CRLH) transmission line (TL) is proposed by using a defected ground structure (DGS) on the ground plane. In order to satisfy a homogeneity condition of metamaterial, a subwavelength unit cell is designed by way of a spiral DGS and a meander stub. From a dispersion diagram, it is expected that the frequency bands for the left-handed (LH) property is 3.5 - 4.4 GHz. At 3.8 GHz in the LH band, backward propagating phenomenon is observed from full-wave analysis. The experimental results show that the proposed TL has a stop-band in 1.75 - 3.6 GHz.

Key Words : Composite Right- and Left-handed (CRLH TL), Dual CRLH (D-CRLH), Defected Ground Structure (DGS), Metamaterials, Homogeneity

1. 서 론

Left-Handed(LH) 물질에 대한 개념은 1967년 러시아 물리학자 Veselago에 의해 최초로 제안되었다. Veselago는 물질이 일반적으로 자연계에 존재하지 않는 음의 유전율과 투자율을 갖는다면 전기장(E-Field), 자기장(H-Field), 포인팅(Poynting) 벡터가 기존의 물리 법칙으로 알려진 오른손의 법칙이 아니라, 왼손의 법칙을 따르는 특이한 현상을 지닐 것이라고 이론적으로 제안하였다. 그의 이론에 따르면 LH 물질 내에서는 위상속도와 군속도의 진행방향이 서로 반대 방향을 이루는 backward wave를 형성하게 된다. 또한, 음의 굴절계수로 인하여 스넬(Snell)의 법칙이 역으로 바뀌게 되며, 도플러(Doppler) 효과와 체렌코프(Cherenkov) 방사 역시 기존의 물리법칙과 반대로 바뀌게 된다.[1-4]. 이와 상반되는 개념으로 일반적인 양의 유전율과 투자율을 가진 물질은 Right-Handed(RH) 물질이라고 부른다. LH 물질에 대한 실존은 Veselago에 의한 이론적 제안이후 30여년이 지난 뒤 University of California, San Diego(UCSD) 그룹에 의해 분할 원형 공진기(split ring resonator)와 얇은 도선(thin wire)을 결합한 방식으로 최초로 실험적으로 증명되었다[5]. 이러한 독특한 성질을 가진 LH 물질의 실험적 증명이후 물리학과 및 마이크로파 학계의 큰 관심을 불러일으켰다. 최근에는 나노 공정을 바탕으로 테라헤르쯔 대역으로 영역이

확장되고 있다. 기존 물리학적 법칙과 상반되는 LH 물질, 통상 메타물질의 특성은 그 동안 현대 과학이 지녔던 한계 성과, 기존의 제약성을 뚫고 새로운 분야에서 해결책을 제시할 수 있게 된다.

메타물질은 크게 두 가지 방법으로 구현 가능하다. 첫째로 분할 원형 공진기(split ring resonator)와 얇은 도선(thin wire)을 이용하는 공진형 방식이며, 둘째로 인덕턴스와 커패시턴스를 결합한 비공진형 전송선로 방식이 있다. 비공진형 전송선로 방식으로 구현한 메타물질은 composite right-/left-handed(CRLH) 구조라 하며, 이는 특정한 인위적 구조를 이용하여 RH 물질과 LH 메타물질이 결합된 형태이다[6-8]. 전자에 비해 전송선로 방식은 비공진형 특성으로 인하여 넓은 대역폭을 얻을 수 있으며, 적절한 임피던스 정합 조건하에서 기존의 전송선로와 비교했을 때 손실이 적다. 그리고 집중 정수 소자의 설계를 통하여 분산특성을 얻을 수 있다. 또한 CPW나 마이크로스트립 전송선로와 같은 평면형 기술의 적용이 편리하며, 기존의 간단한 전자기학 해석으로 전송선로의 정확한 분석이 가능하다[9]. CRLH 메타물질은 저주파에서는 LH 대역을 가지고, 고주파에서는 RH 대역을 가진다.

최근 CRLH 메타물질 구조를 변형한 dual-CRLH (D-CRLH) 구조가 제안되었다[10]. D-CRLH 구조는 CRLH 구조와 달리 저주파에서 RH 대역을 가지고, 고주파에서 LH 대역을 가지며 이후 다시 RH 대역을 갖는 특성을 나타낸다. CRLH 구조와 D-CRLH 구조와 같은 비공진형 전송선로 방식은 이를 구성하는 각 단위구조의 폭이 좁을수록 이상적으로 균질한(homogeneous) 구조에 가까워진다. 그리하여 실제적으로 균질한 구조를 만들기 위해 각 단위구조의 크기는

† 교신저자, 정회원 : 중앙대 공대 전자전기공학부 조교수

E-mail : sungjoon@cau.ac.kr

* 준 회원 : 중앙대 공대 전자전기공학부 석사과정

접수일자 : 2009년 8월 5일

최종완료 : 2009년 10월 7일

작을 필요가 있으며 이는 메타물질의 구현에 중요한 필수조건 중 하나이다. D-CRLH 전송선로는 DGS 구조에 의해 직렬 임피던스를 구성하고, 가장접지패치와 meander 스텝 구조에 의해 병렬 어드미턴스를 구성한다. 기존의 사각패치형태의 결함접지구조(defected ground structure; DGS)를 사용하여 D-CRLH 메타물질을 구현한 방식에 비하여[11] 본 논문에서는 나선형 결함접지구조(DGS)를 이용하여 더 작은 면적 내에서 더 넓은 범위의 직렬 커패시턴스 값을 조정할 수 있었으며, 또한 meander 스텝을 이용하여 효과적으로 병렬 인덕턴스 값을 조정할 수 있었다. 이러한 성질을 이용하여 나선형 결함접지구조와 meander 스텝의 사용은 기존의 사각패치형태의 DGS를 이용한 D-CRLH 전송선로의 각 단위구조의 길이를 $1/20\lambda_g$ 로 더욱 극소화하였고 메타물질의 중요한 조건인 균질성을 만족하는 전송선로를 구현할 수 있었다.

2. 일반적인 D-CRLH 전송선로 이론

D-CRLH 전송선로는 주기적인 단위 구조의 길이를 d 라고 한다면, $d \rightarrow 0$ 이 됨으로써 이상적으로 균질한 구조가 된다. 이는 D-CRLH 전송선로의 각 단위 구조마다 이산적 급전형태를 띄기 때문이다.

메타물질 D-CRLH 전송선로의 경우 $d \rightarrow 0$, 또는 더 정확하게 $d/\lambda_g \rightarrow 0$ 에 가까워지는 것은 실제로 균질한 전송선로의 구현에 있어 필수 조건이다. 균질한 D-CRLH 전송선로는 각각 $\epsilon < 0$ 와 $\mu < 0$ 의 성질을 만족하며, 이 두 가지 성질은 Veselago의 연구에 따라 융합될 수 있다.

일반적으로 각 단위 구조의 형태로부터 그림 1과 같은 직렬 임피던스 Z' 과 병렬 어드미턴스 Y' 이 얻어질 수 있으며, 그것의 관계식은 다음과 같다.

$$Z(\omega) = j \frac{\omega L_R}{1 - (\omega/\omega_{se})^2}, \omega_{se} = \frac{1}{\sqrt{L_R C_L}} \quad (1a)$$

$$Y(\omega) = j \frac{\omega C_R}{1 - (\omega/\omega_{sh})^2}, \omega_{sh} = \frac{1}{\sqrt{L_L C_R}} \quad (1b)$$

$$\mu(\omega) = \frac{Z(\omega)}{j\omega} \text{ and } \epsilon(\omega) = \frac{Y(\omega)}{j\omega} \quad (2)$$

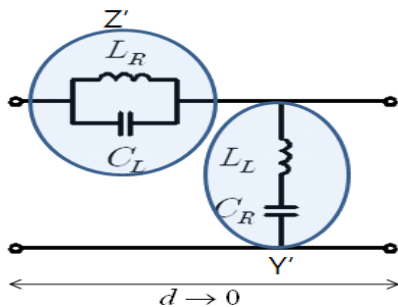


그림 1 이상적인 D-CRLH 전송선로 등가회로 모델
Fig. 1 Equivalent circuit model of ideal D-CRLH TL

D-CRLH 전송선로의 단위 구조 길이가 $d/\lambda_g \rightarrow 0$ 의 조건을 만족하게 되면 종속접속 형태로 배열된 주기구조는 균질한 전송선로가 되며, 또한 직렬 임피던스 Z' 과 병렬 어드미턴스 Y' 에 의해 구해지는 특성 임피던스의 계산이 가능해져 D-CRLH 전송선로의 전체 전파상수 $\beta(\omega)$ 가 얻어지며 그것의 관계식은 다음과 같다.

$$\beta(\omega) = \cos^{-1} \frac{1 + Z(\omega)Y(\omega)}{d} \quad (3)$$

$$Z_0(\omega) = \sqrt{\frac{Z(\omega)}{Y(\omega)}} \quad (4)$$

임피던스 관점에서 음수의 Z' 과 Y' 은 근본적으로 특성 임피던스의 크기와 부호를 결정짓는다. Z' 과 Y' 이 둘 다 양수인 RH 물질에서 위상속도와 군속도가 같은 방향을 가지게 된다. 반면에, Z' 과 Y' 이 모두 음수인 LH 메타물질에서 위상속도와 군속도는 서로 반대방향을 가지게 된다. 이러한 독특한 개념은 길이가 0인 이상적으로 균질한 D-CRLH 전송선로에 그대로 적용할 수 있다. 하지만 단위구조의 길이가 충분히 극소하다면 실제적으로 균질한 D-CRLH 전송선로로 간주하여 전자기학적 해석 방법이 적용 가능하다.

3. DGS를 활용한 제안된 D-CRLH 전송선로 설계 및 해석

완벽히 균질한 D-CRLH 전송선로는 자연적으로는 존재하지 않는다. 그렇지만, 그 유도과장에 비하여 매우 짧은 길이로 인하여 전자기파의 연속성의 조건을 충족시킬 경우 실제적으로 균질한 D-CRLH 전송선로가 될 수 있다. 본 논문에서는 그림 2와 같이 인덕턴스와 커패시턴스를 결합된 단위구조를 종속 연결하여 실제적으로 균질한 D-CRLH 전송선로를 제작하였다. 극소길이의 단위구조는 인덕턴스와 커패시턴스의 실제적인 구현과 연계되어 있다. 그러므로 결론적으로 단위구조의 길이 $d \rightarrow 0$ 의 조건을 만족시키는 것이 이상적으로 균질한 D-CRLH 전송선로이다. 균질한 상태는 전송선로가 전자기파에 균질한 것을 나타낸다.

제안된 D-CRLH 전송선로의 등가회로 모델은 이상적인 D-CRLH 모델과 다소 다르다. 수정된 D-CRLH 전송선로의 등가회로 모델은 그림 2에 제시되어 있다. 이 구조에서 나타난 직렬 임피던스 Z' 과 병렬 어드미턴스 Y' 의 관계식은 다음과 같다.

$$Z(\omega) = \left[j\omega L_p + \frac{1}{j\omega C_d} \right] \| j\omega L_d = j\omega L_d (1 - \omega^2 L_p C_d) / (1 - \frac{\omega}{\omega_{se}})^2$$

where $\omega_{se} = \frac{1}{\sqrt{L_d C_d}}$ (5)

$$Y(\omega) = 1 / \left[j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} \right] \| j\omega C_p = j\omega C_p + \frac{j\omega C_s}{1 - (\omega/\omega_{sh})^2}$$

where $\omega_{sh} = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}}$ (6)

그림 2에서 제안된 D-CRLH 전송선로 구조와 등가회로 모델의 단위구조는 접지면 상의 DGS 구조와 신호라인 상의 가상 접지된 패치에 meander 스텝으로 구성되어 있다. 직렬 임피던스는 1-D 전송선로의 접지면 상에 결합 예정된 DGS 구조에 연계되어 있다. 그림 2의 직렬상의 LC 회로인 커패시턴스(C_d)와 인덕턴스(L_d)는 DGS 구조의 스파이럴 회전수와 겹 폭에 따라 결정된다. 유사하게 병렬상의 LC회로인 커패시턴스(C_s)와 인덕턴스(L_s)는 각각 사각패치의 크기와 meander 스텝의 턴 수에 의해 결정된다.

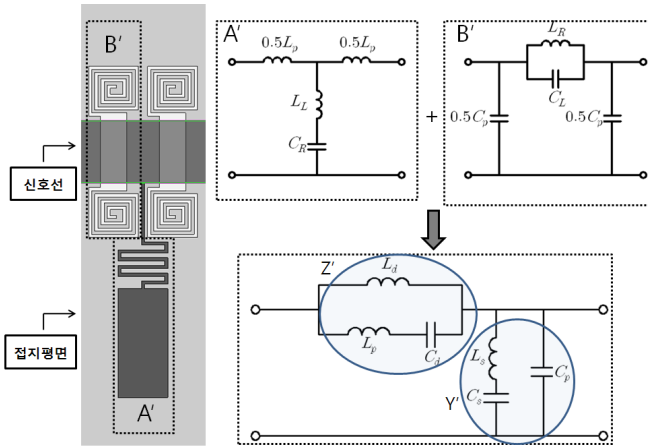


그림 2 제안된 D-CRLH 전송선로의 1개 단위구조와 제안된 구조에 따른 수정된 등가회로 모델

Fig. 2 Unit cell of proposed D-CRLH TL and its equivalent circuit model

각 소자값들이 그림 2와 같은 등가회로를 가질 때 그것은 ABCD 행렬로 표현 가능하며 관계식을 통해 소자값의 추출이 가능하다. 이러한 특성을 가지는 단위구조의 추출된 파라미터 값들은 각각 $C_p = 0.07pF$, $L_d = 0.61nH$, $C_d = 5.8pF$, $L_p = 0.45nH$, $C_s = 0.97pF$, $L_s = 8.39nH$ 이다. 추출된 인덕턴스와 커패시턴스 값은 단위구조의 치수를 변경하여 조절이 가능하다. 설계된 대역저지 L-C 회로는 음수의 유전율과 투자율을 구현하기 위한 것이다. 추출된 파라미터 값들을 이용하여 식 (2)에 적용시키면 주파수에 따른 유전율과 투자율을 각각 얻을 수 있으며 이는 그림 3에 잘 나타나 있다.

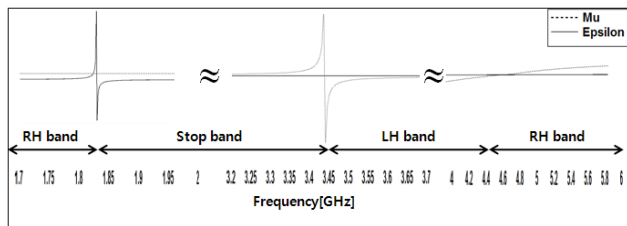


그림 3 제안된 D-CRLH 전송선로의 유전율과 투자율 곡선
Fig. 3 Permittivity and permeability curves of proposed D-CRLH TL

제안된 D-CRLH 전송선로의 분산 곡선은 식(3)과 ABCD 행렬식을 이용하여 MATLAB을 통해 구하였고 그려진 분산 곡선을 통하여 주파수에 따른 전파 상수 $\beta(\omega)$ 가 양수인 RH 대역과 음수인 LH 대역을 구분할 수 있다.

그림 4의 분산 곡선에서는 RH-LH-RH 대역 형태의 주파수 응답특성을 보이고 있다. 즉, 0~1.7 GHz와 4.4 GHz 이후의 주파수 구간에서 순방향 파가 진행되는 RH 대역을 형성하고 있으며, 3.5~4.4 GHz의 주파수 구간에서 역방향 파가 진행되는 LH 대역을 형성하고 있다. 또한 RH 대역과 LH 대역 사이 1.7~3.5 GHz의 주파수 구간에서 저지 대역을 형성함을 알 수 있다.

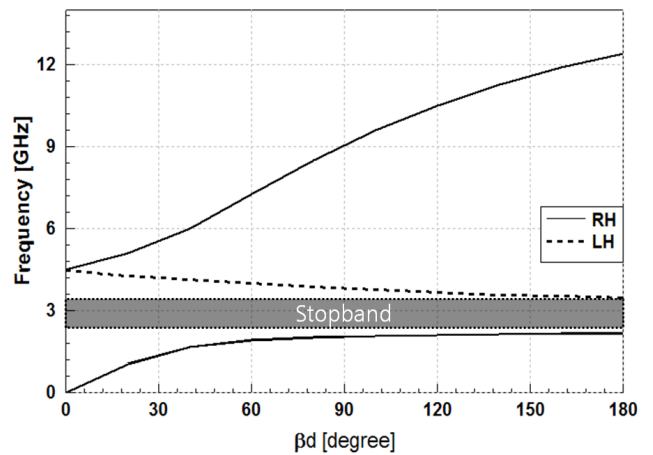
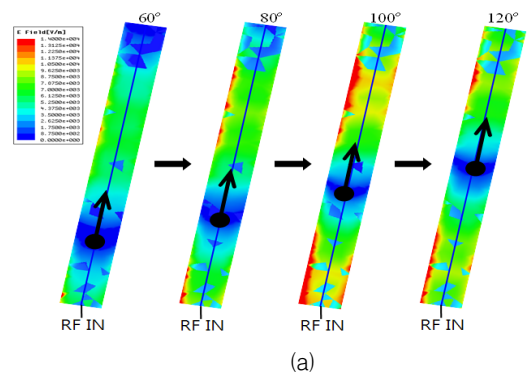
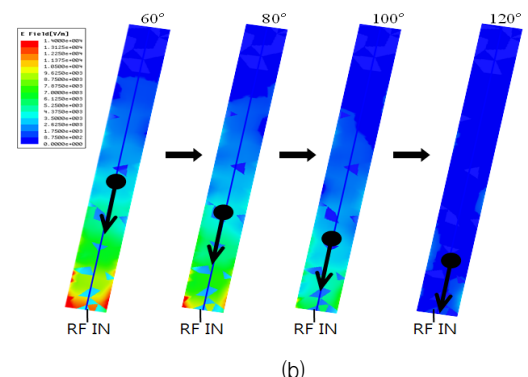


그림 4 제안된 D-CRLH 전송선로의 분산 곡선
Fig. 4 Dispersion curve of proposed D-CRLH TL



(a)



(b)

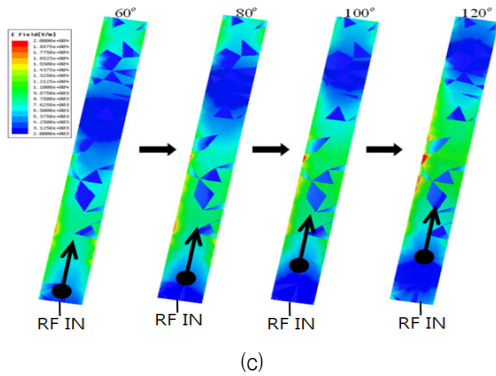


그림 5 HFSS로 Full-wave 모의 실험된 위상변화에 따른 전기장 분포 (a) RH 대역(1.0GHz)에서의 전기장 분포 (b) LH 대역(3.8GHz)에서의 전기장 분포 (c) RH 대역(5.0GHz)에서의 전기장 분포

Fig. 5 Full-wave simulated E-field distribution by HFSS as changing the phase at (a) 1.0 GHz (first RH band) (b) 3.8 GHz (LH band) (c) 5.0 GHz (second RH band)

그림 5에서는 그림 4의 예측된 분산 곡선이 실제 전송선로의 LH와 RH 대역과 일치하는지 확인하기 위하여 각 통과대역에서 위상속도와 군속도의 진행방향을 Ansoft HFSS를 통하여 확인하였다. LH 대역에서는 위상속도가 군속도 진행방향의 역방향으로 진행하며 RH 대역에서는 위상속도가 군속도 진행방향의 순방향으로 진행하는 성질이 있다. 그림 6의 Port 1에서 RF 신호를 입사하였을 때 매 20도의 위상변화에 따른 전기장 크기 분포를 관찰하였고 주파수에 따라 RH 특성과 LH 특성을 확인하였다. 이 주파수 대역에서의 위상에 따른 진행 방향은 그림 4의 분산 곡선에서 예측한 결과와 일치함을 확인할 수 있었다. 즉, 그림 5의 a와 c에서 보는 바와 같이 RH 영역으로 예측되는 주파수 대역 중 1.0 GHz와 5.0 GHz를 택하여 위상에 따른 전기장 분포가 군속도의 진행 방향과 동일함을 확인하였고, LH 영역에 해당되는 주파수 대역 중 3.8 GHz를 택하여 그림 5-b와 같이 전기장 분포가 군속도의 진행 방향과 반대임을 확인하였다.

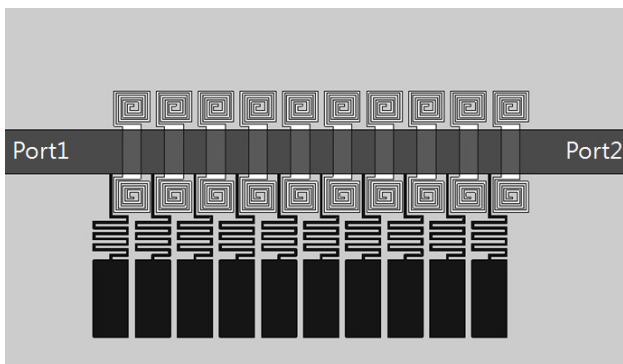


그림 6 제안된 10개 단위구조의 D-CRLH 전송선로 모델
Fig. 6 Proposed D-CRLH transmission line of 10 unit cells

최종적으로 그림 2의 단위 구조를 10개 주기적으로 연결함으로써 D-CRLH 전송선로를 설계하였으며 이는 그림 6에 도시되었다. 설계 시 사용한 기판 모델은 RT-Duroid 5880 ($\epsilon_r = 2.2, h = 1.57mm$)이고 전체적인 전송선로의 길이는 급진부까지 포함하여 57.8 mm 이다.

4. 측정 결과

그림 7은 10개의 단위 구조로 이루어진 실제 제작된 D-CRLH 전송선로 모델을 나타낸다. 포트1은 입력단으로 사용되었고 포트2는 출력단으로 사용되었으며 각 포트에는 50Ω SMA 커넥터를 사용하였다. 이 전송선로의 특성 임피던스는 단위구조의 치수에 따라 변하게 되며, 그것의 정합 정도를 알아보기 위해 네트워크 분석기를 이용하여 S-파라미터를 측정하였으며, 그 결과는 그림 8과 같다. S-파라미터 결과값을 통하여 삽입 손실과 반사 손실을 측정하였는데, 이것의 제곱합이 모든 주파수에서 1이 되지 않는 이유는 손실로 인한 것과 일부 누설파의 방사에 의한 것으로 판단된다. S-파라미터 결과값을 통해 LH와 RH의 통과대역을 형성하였으며, 그 사이 저지대역이 발생하지 않는 것을 통해 Balanced 모드를 확인할 수 있다. 저주파의 RH 대역은 0~1.75 GHz, 저지 대역은 1.75~3.6 GHz에 걸쳐 형성되었으며, LH 대역은 3.6~4.4 GHz까지, 두 번째 RH 대역은 4.4 GHz 이상의 범위에서 형성되었다. S-파라미터 그래프에서 반사손실은 통과대역 전 대역에서 9.5 dB 이상을 나타내고 있다. 그림 8에서의 관찰된 LH, RH 주파수 대역은 그림 3, 4에서 예측한 대역과 최대 0.1-GHz 차이가 나며, 이는 등가 회로모델의 파라미터값을 고정된 주파수에서 추출하였기 때문이다.

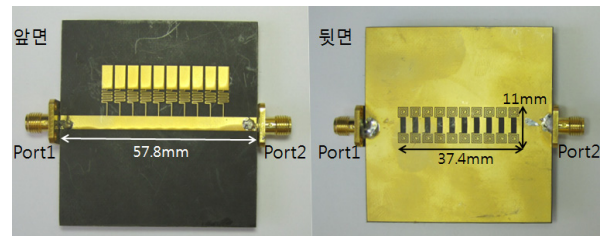


그림 7 제작된 10개 단위구조의 D-CRLH 전송선로
Fig. 7 Prototype of fabricated D-CRLH transmission line

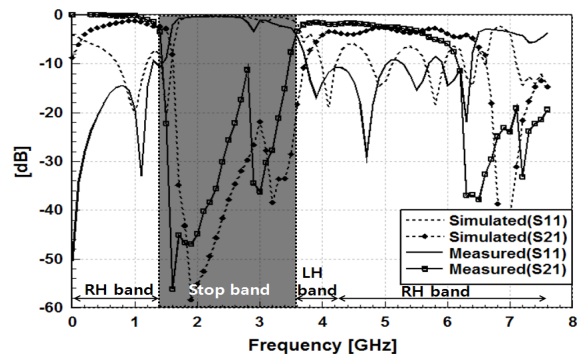


그림 8 실험 및 측정된 S-파라미터 결과값
Fig. 8 Simulated and measured s-parameter results

5. 결 론

본 논문에서는 나선형 DGS와 가상접지된 meander 스텝을 사용하여 극소화된 D-CRLH 메타물질 전송선로를 설계하였다. 단위 구조의 소형화를 통하여 균질한 메타물질 전송선로를 구현하였으며, 분산 곡선과 위상에 따른 전기과 분포를 통해 메타물질 특성을 예측하였다. 또한 S-파라미터 값을 통해 제안된 구조의 대역저지 특성을 실험적으로 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2008년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (KRF-2008-331-D00438)

참 고 문 헌

[1] V.G. Veselago, The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ , Sov. Phys. Usp., Vol. 10, no. 4, pp. 509-514, Jan-Feb. 1968.

[2] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robins, W.J. Stewart, Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena, IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech., vol. 47, no. 11, pp. 2075-2084, Nov. 1999

[3] A.K. Iyer and G.V. Eleftheriades, Negative refractive index media using periodically L-C loaded transmission lines, in IEEE-MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., June 2002, pp. 1067-1070.

[4] 윤재웅, 송석호, 오차환, 김필수, 금속과 원손잡이 메타물질의 경계면에서 형성되는 표면 플라즈몬의 전파 특성, 대학광학회지, Vol. 15, No.2, April. 2004

[5] R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, Experimental verification of a negative index of refraction, Science, vol. 292, pp. 77-79, Apr. 2001.

[6] A. Lai., T. Itoh, and C.Caloz, Composite right/left-handed transmission line metamaterials, IEEE Microwave Mag 5 (2004), 34-50

[7] C. Caloz and T. Itoh, Application of the transmission line theory of left-handed (LH) materials to the realization of a microstrip LH line, IEEE Antennas Propagation Symp. Dig. vol. 2, pp. 412-415, June 2002.

[8] 박재현, 류영호, 김동진, 추호성, 이정해, 메타물질 전송선로를 이용한 소형 나선구조 Zeroth-order Resonance 안테나, 대한전자공학회, Vol. 44, No.7, July. 2007.

[9] M.D. Pozar, Microwave Engineering, 3rd edn. (Wiley, 2004)

[10] C. Caloz, Dual composite right/left-handed (D-CRLH) transmission line metamaterial, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 16, pp. 585-587, Nov. 2006.

[11] Y.H. Ryu, J.H. Park, J.H. Lee, J.Y. Kim, H.S. Tae, DGS dual Composite Right/Left Handed Transmission Line, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 18, pp. 434-436, July 2008.

저 자 소 개



박우영 (朴宇榮)

1981년 7월 19일생.
2009년 8월 중앙대 공대 전자전기공학부 졸업 (학사).
2009년 9월~현재 중앙대학교 공대 전자전기공학부 석사과정.
Tel : (02) 812-7460
E-mail : eravgad@naver.com



임성준 (林成俊)

2002년 연세대 공대 전자공학과 졸업 (학사). 2004년 University of California, Los Angeles 전기공학과 졸업(석사).
2006년 동대학원 졸업(공학박사).
2006년 ~ 2007년 University of California, Irvine Post-Doc.
2007년 3월~현재 중앙대 전자전기공학부 조교수
Tel : (02) 820-5827
E-mail : sungjoon@cau.ac.kr