

CPW 구조를 이용한 metamaterial 전송선로 특성에 관한 연구

A study of metamaterial transmission line characteristics using CPW structure

김진수* 황희용**
Kim, Jin-Su Hwang, Hee-Yong

Abstract

Metamaterial are artificial structures that can be designed to exhibit specific electromagnetic properties not commonly found in nature. Metamaterial transmission lines are usually fabricated with a microstrip structure and its equivalent circuit is composed of two series capacitances and a shunt inductance. However microstrip structure need a via hole for realizing a shunt inductance. To eliminate via hole, we proposed a CRLH transmission line using a CPW structure, and obtained equivalent circuit values, line parameters.

키워드 : CPW, metamaterial, 등가회로
Keywords : CPW, metamaterial, Equivalent circuit

1. 서론

Metamaterial이란 자연계에서 흔히 볼 수 없는 특수한 전자기적 성질을 나타내도록 인공적으로 합성된 물질을 통칭하는 용어이다. 이중 흔히 double negative material(DNG), 음의 굴절율(negative refractive index(NRI)) 혹은 left-handed material(LHM) 등 여러 이름으로 불리는 물질들은 어떤 특정 조건하에서 그 유효 유전율과 유효 투자율이 모두 음의 값을 가지게 되며 이에 따라 일반적인 물질과는 매우 상이한 전자파 전파 특성을 나타낸다.

이와 관련된 최초의 체계적인 연구는 러시아 물

리학자인 Veselago[1]로부터 시작된 것으로 알려져 있다. 그는 유전율과 투자율이 동시에 음의 값을 가지는 가상적인 물질을 상정하여 그 전자기적 성질을 최초로 규명하였는데 그 결과 이와 같은 매질 내에서 Snell의 법칙, Doppler 효과, Cerenkov 방사 등이 일반적인 매질에서와 반전되어 나타나는 현상을 이론적으로 예측하였다. 또한 같은 매질 내를 진행하는 전자파의 경우 전장, 자장, 그리고 전파 방향이 기존 매질에서의 오른손 법칙과는 반대로 왼손 법칙을 따르게 됨을 보이고 이런 특성을 "left handed"라고 명명하였다.

마이크로파 분야에서 LH 전파 현상의 실제적인 응용은 주로 전송선 방식의 LHM 구조[2][3]에 기반을 두고 있다. 직렬 L (inductance)과 병렬 C (capacitance)의 등가회로로 나타내어지는 통상의 전송선 등가회로 모델에서 L 과 C 의 위치를 바꾸어 직렬 C -병렬 L 로 구성된 전송선 구조에서는 이를 통해 전송되는 전자파의 위상 속도가 반전되는 현상이 나타

* 강원대학교 대학원 전기전자공학과 석사과정
** 강원대학교 전기전자공학과 부교수, 공학박사, 교신저자

나미[4], 이것을 PCB로 구현 시에는 기생적으로 생기는 직렬 인덕턴스와 병렬 캐패시턴스 값에 의해서 Composite right/left-handed(CRLH) 전송선로 특성을 가지게 된다[1].

PCB로 CRLH 전송선로를 구현하기 위한 기존의 방식은 인터디지털 캐패시터와 스텐브 인덕터를 이용하여 마이크로스트립 형태로 설계하는 방식이 많이 사용되었다. 하지만 스텐브 인덕터를 사용하기 위해서는 비아(via)를 사용[5]해야 하기 때문에 정확한 구현이 어렵다.

따라서 본 논문에서는 기존의 마이크로스트립 구조를 이용한 방식이 아닌 CPW 구조를 이용하여 CRLH 전송선로를 설계하고 이 구조가 LH line 특성을 보이는지 확인하고 line parameter를 구한다.

2. 본론

2.1 CRLH 전송선로 이론

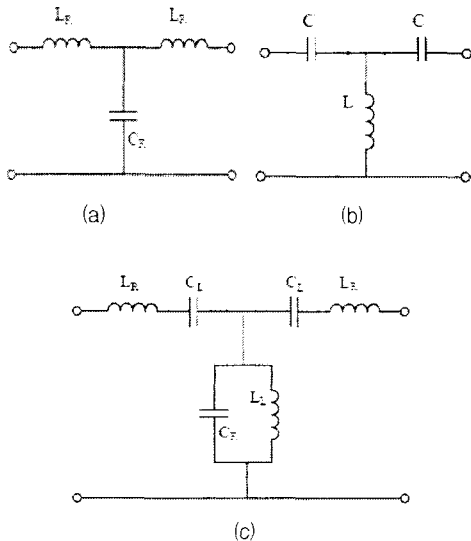


그림 1 RH(a)와 LH(b), CRLH(c) 전송선로의 T형 등가회로

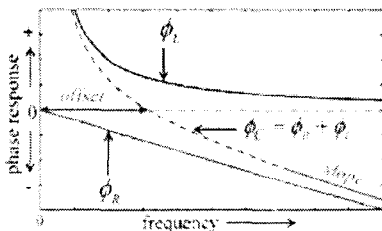


그림 2 RH와 LH, CRLH 전송선로의 위상 응답 특성

그림 1(a)는 Right-handed(RH) 전송선로의 등가회로이고, 그림 1(b)는 Left-handed(LH) 전송선로의 등가회로이다. 여기서 순수한 LH 전송선로는 없으며 그 이유는 L_R 은 직렬 캐패시터를 구현하는데 있어서 진류가 흐르는 것에 의해서 만들어진 마그네틱 플럭스에 의한 파라스틱 성분에 의한 것이고, C_R 은 트레이스와 접지판 사이에 존재하는 병렬판 전압 그라데이션트에 의한 기생 성분으로 LH에 기생 성분들이 추가된 형태의 그림 1(c)와 같은 CRLH 전송선로가 현실적으로 이용된다[1].

하나의 CRLH 전송선로의 위상 천이는 식 (1)과 같이 RH와 LH 전송선로 위상 천이의 합으로 나타낸다.

$$\Phi_C = \Phi_R + \Phi_L \quad (1)$$

이상적인 CRLH 전송선로의 위상 응답 특성은 그림 2와 같이 나타내어진다. CRLH 전송선로의 위상 응답 특성을 보면, 낮은 주파수에서는 LH 전송선로의 특성을 나타내고, 트랜지션 주파수를 지나서는 RH 전송선로의 위상 특성을 따라가는 것을 알 수 있다. 이는 저주파에서는 L_R 과 C_R 의 존재가 무시되고, 또한 높은 주파수에서는 L_L 과 C_L 의 존재가 무시되기 때문이다[6].

2.2 제안된 CRLH 구조 해석

그림 3은 제안된 CRLH 전송선로이다. 입·출력 선로의 임피던스는 50Ω 이며 길이는 5mm 이고 폭은 1.6mm 이다. 입·출력 선로와 그라운드 사이의 간격은 0.2mm 이고 병렬 스텐브의 폭은 0.2mm , 스텐브 각각의 간격은 0.1mm 이다. 사용된 기판은 유전율 4.4, loss tangent는 0.025인 FR 4 기판을 사용하였고, Ansoft社의 HFSS 8.0을 사용하여 시뮬레이션하였다.

제안된 구조는 입·출력 선로와 스텐브 사이에서 C_L 이 생기고, 그라운드에 연결된 스텐브가 L_L 로 동작하기 때문에 등가회로적으로 CRLH 전송선로로 볼 수 있다. 또한 그림 4에서 보이듯이 위상응답이 7.18GHz 까지는 양수이고 그 이상의 주파수에서는 음수이므로 그림 2에서와 같은 CRLH 전송선로의 위상 응답 특성과 동일한 특성을 보이므로 제안된 구조가 CRLH 전송선로가 된다. 그에 따라 7.18GHz 이하에서는 LH 전송선로 특성을 나타내게 된다. 하지만 그림 5를 보면 7.12GHz 대역을 제외하고 다른 주파수 대역에서는 S_{21} 값이 -3dB 보다 작기 때문에 7.12GHz 대역을 제외한 전 대역은 전송선로라고 볼 수 없다. 따라서 7.12GHz 대역에서만 LH 라인 특성이 나타나게 된다.

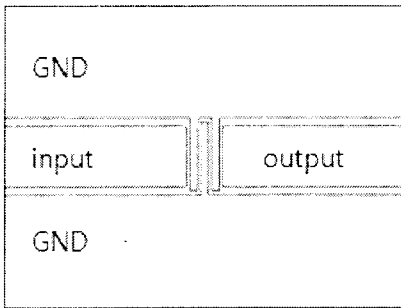
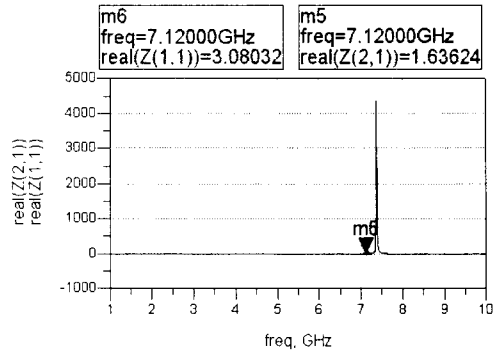


그림 3 제안된 CRLH 전송선로



(a) Z-parameter의 real part

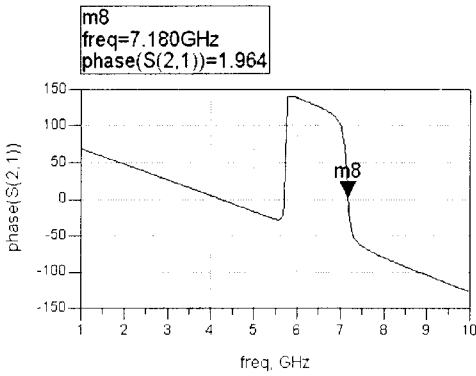
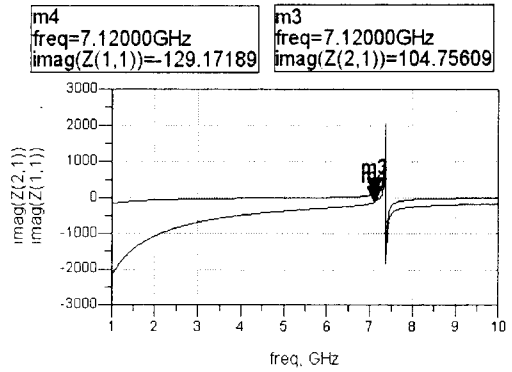


그림 4 제안된 CRLH 전송선로의 위상 응답 특성



(b) Z-parameter의 imaginary part

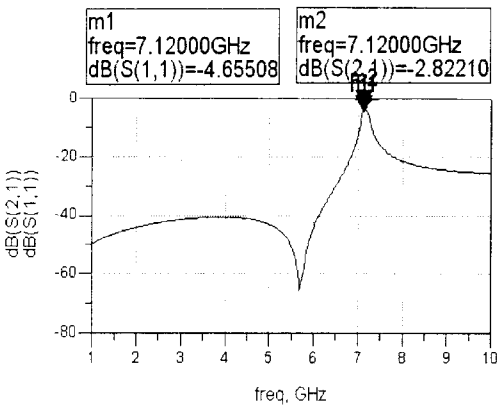


그림 5 제안된 CRLH 전송선로의 S-parameter

그림 6 de-embedding된 CRLH 전송선로의 Z-parameter

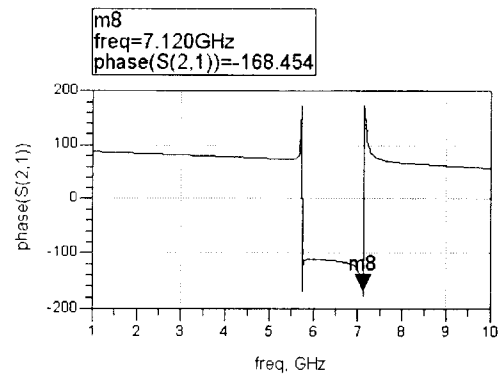


그림 7 de-embedding된 CRLH 전송선로의 위상 응답 특성

제안된 구조의 등가회로를 추출하기 위해서는 50Ω 라인인 입·출력 선로를 제거하고 unit cell만의 특성을 파악해야 하기 때문에 시뮬레이션을 통해 de-embedding을 하였다. 그 결과 그림 6에서와 같은 Z -parameter, 그림 7에서와 같은 위상응답 특성을 얻었다. 그런데 그림 7을 보면 7.12GHz에서 위상이 -168.454° 이 되어 LH 전송선로의 특성인 위상이 양수인 경우에 부합되지 않는 것처럼 보인다. 하지만 이는 180° 를 -180° 로 표현하는 시뮬레이터의 특성에 기인한 것으로 실제로는 168.454° 가 되어 LH 전송선로의 특성에 부합된다.

이제 LH 전송선로의 특성을 분석하기 위해 7.12GHz에서의 임피던스와 식 (2)를 통해 제안된 구조의 unit cell만의 T형 등가회로로 변환하였다. 그 결과 제안된 구조가 그림 9와 같은 등가회로로 변환이 되었다. 등가회로가 그림 1(b)와 달리 R 성분이 포함된 이유는 그림 6(a)에서 보이듯이 임피던스에 real part가 포함되었으므로, 즉 제안된 구조 자체에 손실 성분이 포함되었기 때문에 손실을 표현하기 위해 저항성분인 R이 추가된 등가회로로 표현하였다.

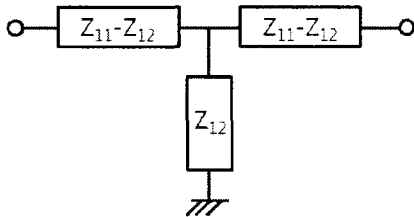


그림 8 일반적인 T형 등가회로의 임피던스

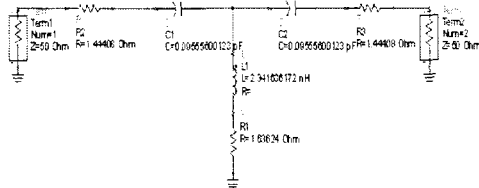


그림 9 제안된 CRLH 전송선로의 등가회로

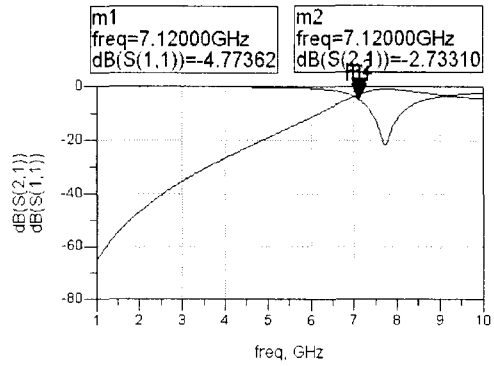
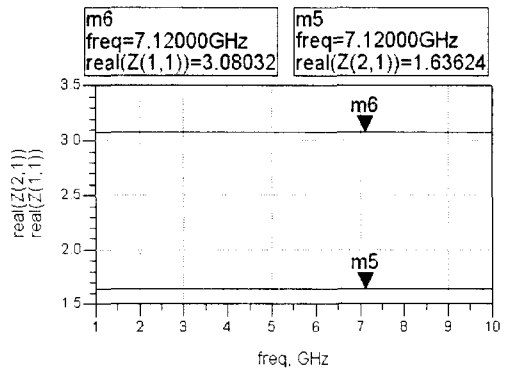
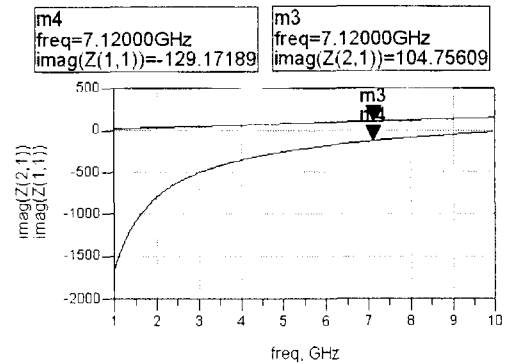


그림 10 등가회로의 S-parameter



(a) Z-parameter의 real part



(b) Z-parameter의 imaginary part

그림 11 제안된 CRLH 전송선로 등가회로의 Z-parameter

등가회로가 제안된 구조와 동일한 특성을 보이는지 확인하기 위해 Agilent社의 회로 시뮬레이터인 ADS™로 시뮬레이션한 결과가 그림 10부터 그림 12까지 나와 있다. 먼저 그림 10은 등가회로

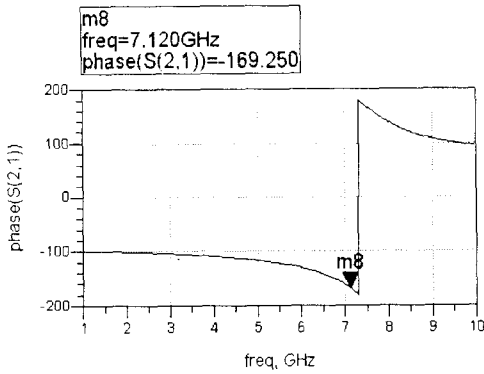


그림 12 제안된 CRLH 전송선로
등가회로의 위상응답 특성

의 S-parameter로 앞서 제안된 구조를 시뮬레이션 한 값에서 S_{11} 이 -4.65508dB 이고 S_{21} 이 -2.8221dB 인 반면 등가회로를 시뮬레이션한 값은 S_{11} 이 -4.77362dB 이고 S_{21} 이 -2.73310dB 로 서로 차이가 나고 있다. 하지만 이는 등가회로가 잘못된 것이 아니라 등가회로를 추출하기 위해 제안된 구조의 Z-parameter값을 추출하는 과정에서 Z-parameter값을 소수점 5번째 자리까지만 계산식에 사용하였기 때문에 발생한 오차이므로 등가회로는 제안된 구조와 동일하다고 볼 수 있다. 또한 그림 12의 위상응답 특성의 차이도 계산과정에서 발생한 오차로 볼 수 있다.

3. 결론

본 논문은 최근 많은 연구가 이루어지고 있는 CRLH 전송선로를 마이크로스트립 구조가 아닌 CPW 구조를 사용하여 설계하고 설계된 CRLH 전송선로가 트랜지션 주파수 이하에서 LH 전송선로 특성을 보이는 것을 3-D 시뮬레이션을 통해 알아 보았고, 이를 통해 각각의 추출된 각각의 parameter 값들을 이용해 등가회로와 line parameter를 구하고 회로 시뮬레이션을 통해 증명하였다.

제안된 구조는 위상응답 특성만 고려하면 7.18GHz 이하에서 LH 전송선로의 특성을 보이게 되지만 실제로는 7.12GHz에서만 전송선로로서 동작하고 다른 주파수 대역에서는 전송선로로서 동작하지 않기 때문에 7.12GHz에서만 LH 전송선로 특성을 보였다. 이는 제안된 구조로부터 등가회로를 추출하여 기존에 알려진 LH 전송선로의 등가회로와 비교하여 LH 전송선로로 동작함을 확인하였다.

본 연구를 통해 CPW 구조를 이용해서도

CRLH 전송선로를 구현할 수 있음을 증명하였다. 이는 마이크로스트립 구조를 이용하는 기존의 설계 방식보다 비아(via)를 사용하지 않는다는 장점이 있고 또한 PCB를 제작하는데 있어서 CPW 구조는 단면 구조로 제작이 용이하다.

하지만 대역폭이 협소한 점은 개선의 여지가 있다. 향후 대역폭을 넓히는 연구의 진행이 기대된다.

참고 문헌

- [1] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ", *Sov. Phys-Uspokhi*, Vol.10, pp.509-514, Jan-Feb. 1968.
- [2] C. Caloz, H. Okabe, T. Iwai, and T. Itoh, "Transmission line approach of left-handed(LH) materials", in *USNC/URSI Nat. Radio Science Meeting*, Vol.1, pp.39, Jun. 2002.
- [3] A. K. Iyer, G. V. Eleftheriades, "Negative refractive index metamaterials supporting 2-D waves", in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, Vol.2, pp.1067-1070, Jun. 2002.
- [4] S. Ramo, J. R. Whinnery, and T. Van Duzer, *Fields and Waves in Communication Electronics*, 2nd Ed. New York:Wiley, 1984.
- [5] Jae-Gon Lee and Jeong-Hae Lee, "Parallel Coupled Bandstop Filter Using Double Negative Coupled Transmission Line", *IEEE microwave and wireless components letters*, Vol.17, No.4, pp.283-285, April 2007.
- [6] 김승환, 손강호, 김일규, 김영, 이영순, 윤영철, "CRLH 전송선로 구조를 이용한 이중 대역 고전력 분배기의 설계", 2008년도 춘계 마이크로파 및 전파전파 학술대회 논문집, Vol.31, No.1, pp.253-256, 2008/5/23.