

Meta-Material을 이용한 Active 회로의 설계

조 춘 식
한국항공대학교 항공전자 및
정보통신공학부

I. 서 론

Viktor Veselago가 1967년 “음의 유전율과 투자율을 동시에 지닌 물질이 존재할 수 있음”^[1]을 이론적으로 고찰한 이후 이를 실현하기 위한 많은 연구가 이루어졌으며, 이후 유전율(ϵ)과 투자율(μ)의 부호에 따라 물질을 4가지로 분류하는 것이 가능하여졌으므로 두 가지 모두 음의 부호를 가지는 Left-Handed Material(LHM)을 실제로 구현하기 위한 많은 연구를 여러 연구 그룹들이 수행하여 왔다. 그 결과, 여러 가지 3차원 구조에 의한 LHM이 구현되었으며, 3차원 구조에 의한 LHM을 바탕으로 기관 위에서 쉽게 구현할 수 있는 전송로 구조를 UCLA의 Itoh 그룹이 제안하여 2차원 구조로 이루어진 Left-Handed Transmission Line(LH TL)을 발표하였다^[2]. 전송로의 특성상 완전한 의미의 순수한 LH TL은 존재하지 않으므로 Right-Handed Transmission Line(RH TL)과 결합한 Composite Right/Left-Handed Transmission Line(CRLH-TL)을 제안 발표하였다. 이러한 CRLH-TL은 balanced 조건(직렬 공진 주파수와 병렬 공진 주파수가 같게 됨)을 만족하는 경우 Brillouin 영역 근처에서 동작하는 것이 아니라 천이 주파수 근처에서 동작하므로 전체 회로의 크기를 대폭 줄일 수 있는 장점이 존재한다.

CRLH-TL은 LH TL과 RH TL을 결합하여 만든 전송로의 구조를 띠고 있으므로, LH TL이 본래 가지고 있는 독특한 성질을 이용하여 많은 새로운 개념의 회로 및 물질을 계속하여 구현할 수 있다. LH TL의 가장 큰 독특한 특징은 주파수에 따른 위상 변화가 비선형적이라는 것이다. 이러한 비선형적인 성질

을 RH TL과 결합시키면 보통의 RH TL이 가지는 선형적인 위상 변화와는 아주 다른 독특한 비선형 위상특성을 구현할 수 있다. 또한, 파장이 작은 형태로도 전파 특성이 우수한 점을 이용하여 전체 회로의 크기를 줄이는 역할도 가능하다. 이를 바탕으로 각종 회로 및 안테나의 성능을 개선하고 보완하는 연구를 세계 여러 나라의 연구 그룹에서 수행하여 왔고 지금도 이러한 독특한 성질을 이용하여 보다 작고 보다 성능을 향상시킨 회로, 안테나 및 시스템을 개발하고 있다.

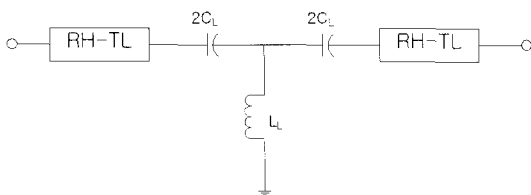
CRLH-TL을 사용하여 성능을 개선하거나 보완하여 구현한 예는 주로 전송로를 이용하는 회로에 적용이 가능하며, 수동 회로, 능동 회로 및 안테나에 이르기까지 다양하게 구현이 되고 있다. 수동 회로는 대역폭을 대폭 확장한 coupler, power divider, balun, filter, hybrid 및 T-junction 등에 CRLH-TL을 사용하였고, 이중 대역 이상의 다중대역 수동 회로에도 많이 사용하고 있다. 공진기의 Q-factor를 높여서 성능을 개선하는 데 사용할 수도 있고, 안테나의 빔 조절을 보다 용이하게 하는 경우에도 사용할 수 있다. 각종 Leaky-wave 안테나 및 end-fire 안테나에도 적용하여 우수한 성능을 보이고 있다. CRLH-TL 외에도 3차원 또는 2차원 구조의 각종 Meta-material, 즉 Electronic Band Gap(EBG), Photonic Band Gap(PBG) 또는 Artificial Magnetic Conductor 등을 적용하여 지금까지 불가능하였던 성능을 보이거나 새로운 형태의 구조물을 선보이기도 하였다. 빔 집속을 위하여 meta-material을 사용하면 super-lens를 구현하는 것도 가능하다.

수동 회로나 안테나/렌즈 외에 CRLH-TL 또는 여

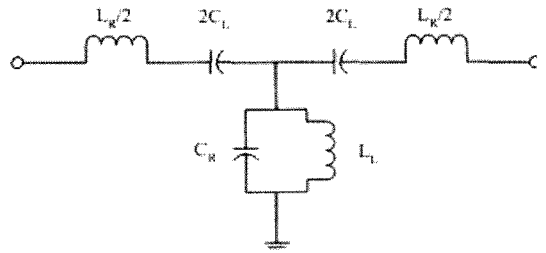
러 가지 다른 형태의 meta-material을 이용하여 각종 능동 회로를 구현하고 기존의 회로 성능을 개선하는 연구 또한 진행되고 있으며, 상대적으로 수동 회로나 안테나에 비하여 아직은 제한적으로 구현이 되고 있는 실정이다. 본 기고에서는 현재까지 meta-material 또는 CRLH-TL을 사용하여 구현한 능동 회로의 연구 현황을 살펴보고, 저자가 속한 한국항공대학교에서 주로 진행하고 구현한 여러 가지 CRLH-TL 응용 능동 회로에 대하여 기술하고자 한다.

II. CRLH-TL을 이용한 Active 회로의 설계

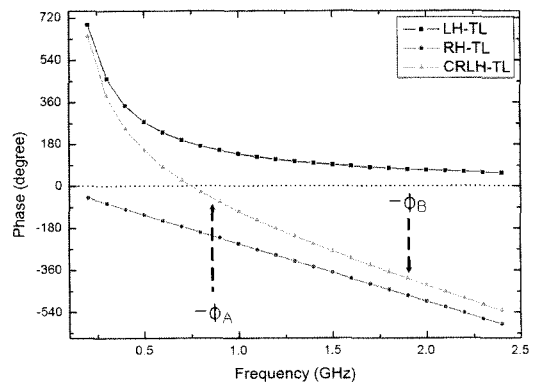
[그림 1]과 같이 순수한 LH TL을 구성하려고 하는 경우 자체의 Shunt inductor인 L_L 에 존재하는 Capacitance 성분과, Series capacitor(C_L)에 존재하는 Inductance 성분 때문에 전송로에 존재하는 RH TL이 자연스럽게 합쳐지면서 [그림 2]와 같이 생성된다. 이러한 [그림 1]의 순수한 LH TL은 전송로에 존재하는 RH TL 성분을 합친 구조이므로 두 TL의 상이한 위상 특성을 결합하여 아주 독특한 특성을 만들어 낼 수 있다. CRLH-TL의 위상특성을 살펴보면 [그림 3]에 나타낸 것처럼 LH TL은 backward 비선형 위상 변화를 보여주고 있고, RH TL은 forward 선형 위상 변화를 보여주고 있으므로 이 둘을 합친 CRLH-TL의 위상 특성은 비선형적으로 변화함을 볼 수 있다. 특정한 두 개 이상의 주파수에서 원하는 위상을 제한적으로 조절할 수 있는 여지를 보여주고 있으므로 이를 잘 활용하여 이중 대역 특성을 구현하는 데 사



[그림 1] LH TL의 이상적인 구조도



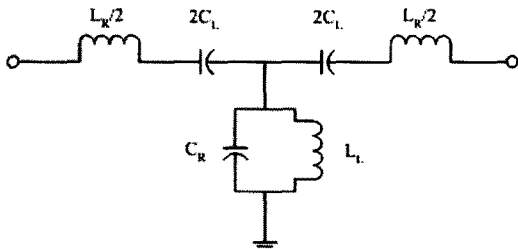
[그림 2] CRLH-TL의 실제 구조도



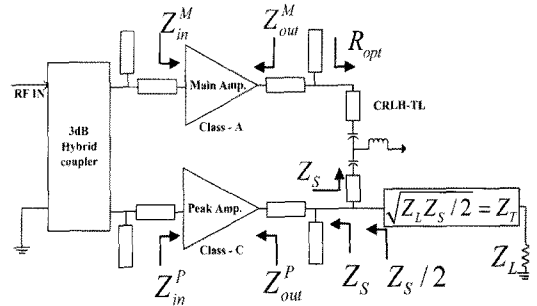
[그림 3] CRLH-TL의 위상 특성

용할 수 있다.

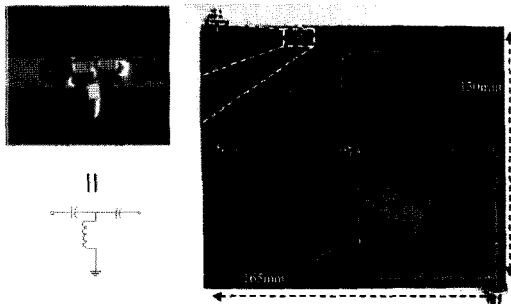
이와 같은 CRLH-TL을 적용하여 동시에 이중 대역에서 동작하는 전력 증폭기를 한국항공대학교에서 구현하였으며, Class-E를 사용하여 836 MHz 및 1.95 GHz 양 대역에서 동시에 동작하도록 설계하였다^[1]. 입력과 출력의 정합회로를 양 주파수 대역에서 동시에 동작하게끔 설계하는 것이 목표이므로 각 대역에서 필요로 하는 정합 임피던스를 전송로 길이로 변환하여 구현하면 이 목표를 만족할 수 있다. 각 주파수에서 전송로 길이를 위상으로 환산하여 비선형적으로 변하는 특성을 CRLH-TL을 사용하여 적절하게 조절하여 이중대역에서 정합이 가능하도록 구현하였다. 이를 위하여 구성된 구조도와 실제 구현한 회로는 [그림 4]와 [그림 5]에 나타내었다. 제작 결과, 830 MHz 대역에서 22 dBm의 출력과 45 % PAE를,



[그림 4] CRLH-TL을 사용한 이중대역 Class-E 전력 증폭기 구조도



[그림 6] CRLH-TL을 이용한 Doherty 전력 증폭기의 구조도



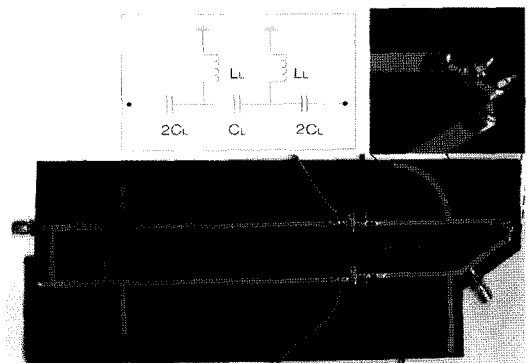
[그림 5] CRLH-TL을 사용한 이중대역 Class-E 전력 증폭기의 실제 구현

1.8 GHz 대역에서 19 dBm의 출력과 43 % PAE를 획득하여, 두 주파수 대역에서 원래 목적으로 하였던 동시 대역 특성을 만족하고 있음을 확인하였다.

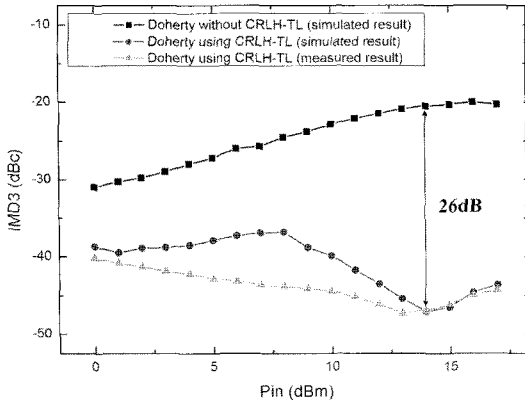
Doherty 전력 증폭기는 주 증폭기와 보조 증폭기를 사용하여 주 증폭기가 어느 정도 출력이 포화되는 순간 보조 증폭기를 가동하여 효율을 지속적으로 확보하는 구조인데, 선형 증폭기(Class-A)를 주 증폭기에 사용하여 효율 개선에 집중하는 것을 설계에 주로 반영하고 있다. 이에 저자는 Doherty 증폭기의 90° 전송로를 CRLH-TL로 대체하여 주 증폭기의 2차 고조파의 위상을 보조 증폭기의 2차 고조파의 위상과 반대로 하여 서로 상쇄시킴으로써 선형성을 향상시키는 구조를 설계하여 구현에 성공하였다.

[그림 6]에서는 CRLH-TL을 사용하여 선형성을 향상시킨 Doherty 전력 증폭기의 구조도를 나타내었다

데^[4], 주 증폭기의 뒷단에 위치한 90° 전송선로 대신 CRLH-TL로 대체하였고, 이는 기본 주파수(2.4 GHz)에서 90°를 나타내고, 2차 고조파에서는 360°를 나타내어 보조 증폭기에서 나오는 2차 고조파와 상쇄시키는 역할을 수행하게 하는 것이 이 회로의 열쇠고리이다. [그림 7]에 나타난 것처럼 구성한 실제 제작 회로를 사용하여 측정한 결과 2.3 GHz에서 31 dBm 최대 출력을, 32 %의 PAE를 보여주고 있으며, 선형성 성능 지표인 IMD3는 CRLH-TL을 사용하지 않은 일반적인 Doherty 전력 증폭기에 비하여 최대 26 dB의 성능 향상을 가져왔다. [그림 8]에 IMD3의 개선 결과를 나타내었다.

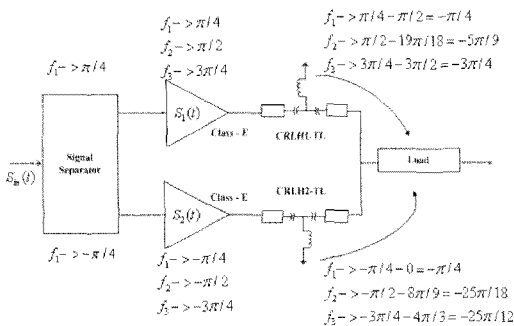


[그림 7] CRLH-TL을 이용하여 선형성을 향상시킨 Doherty 전력 증폭기의 실제 구현

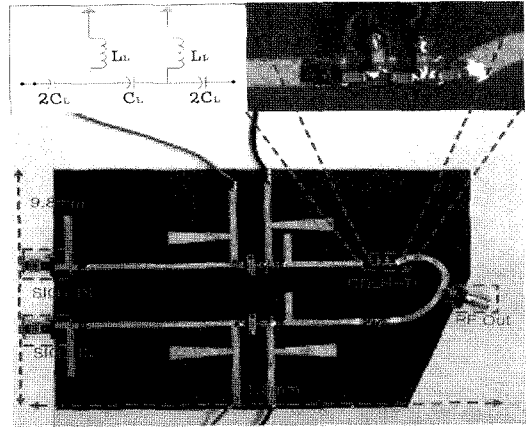


[그림 8] CRLH-TL을 사용한 Doherty 전력 증폭기의 IMD3 개선 결과

Outphasing 전력 증폭기는 Chireix에 의하여 오래전부터 연구가 진행되어 온 구조로서, 크기가 같고 위상이 90° 상이한 두 개의 신호로 변조되어 서로 다른 증폭기를 통과하여 이득을 얻는 형태를 가진다. 백터 합으로 동일한 크기의 두 신호가 합쳐지는 특성 때문에 크기는 이득은 2가 아닌 $\sqrt{2}$ 에 머무르고, 2차 고조파는 상쇄되지만 3차 고조파는 상쇄되지 않고 출력에 나타나므로, CRLH-TL을 사용하여 이득을 2로 향상시키고, 3차 고조파도 상쇄하는 구조를 한국항공대학교에서 실현하였다^[5]. [그림 9]에 구조도를 상세하게 나타내었으며, Class-E 증폭기를 사용하여 효



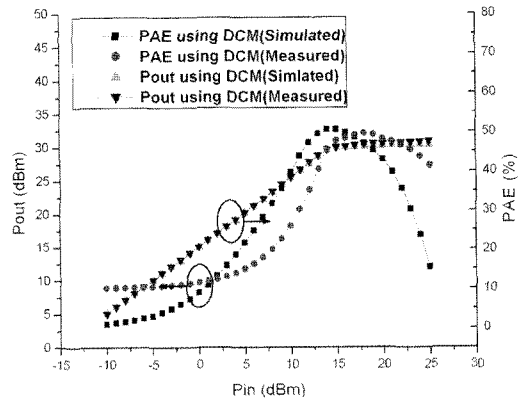
[그림 9] CRLH-TL을 이용한 outphasing 전력 증폭기의 구조도



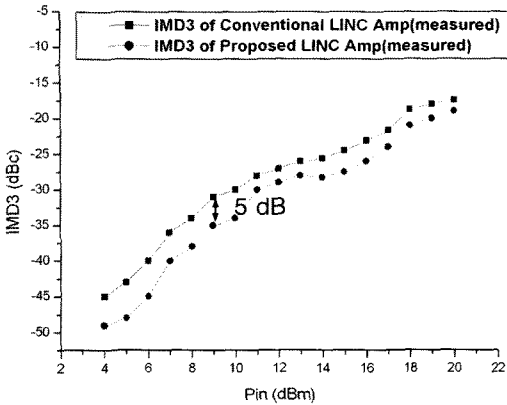
[그림 10] CRLH-TL을 이용한 outphasing 전력 증폭기의 구현

율을 향상시켰고, 마지막의 결합기를 CRLH-TL로 대체하였다.

[그림 10]에 실제 제작한 outphasing 전력 증폭기를 나타내었고, 이를 사용한 측정 결과는 [그림 11]과 [그림 12]에 나타내었으며, 최대 출력 전력은 32 dBm으로 나타났고, PAE는 50%로 향상되었으며, IMD3는 일반적인 결합기를 사용한 outphasing 전력 증폭기에 비하여 약 5 dB 정도의 개선 결과가 나타남을 알 수 있다.

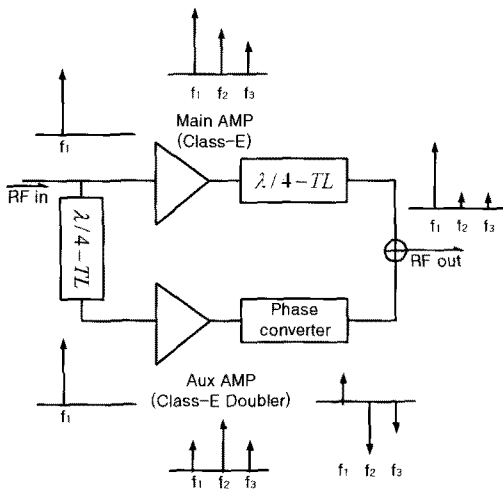


[그림 11] CRLH-TL을 이용한 outphasing 전력 증폭기의 측정 결과



[그림 12] CRLH-TL을 사용한 outphasing 전력 증폭기와 기존의 outphasing 전력 증폭기의 IMD3 결과 비교

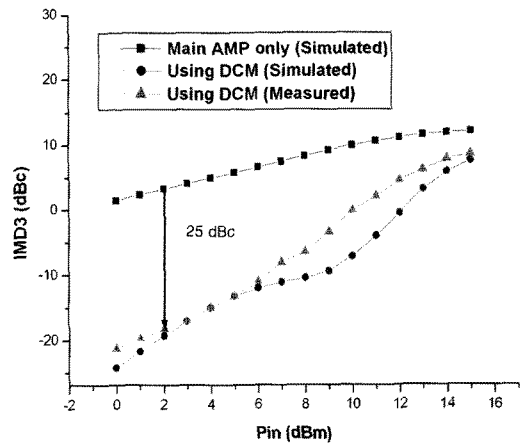
이외에도 Duty cycle modulation(DCM)을 사용하여 Class-E 전력 증폭기의 선형성을 개선한 구조도 설계하였는데, [그림 13]에 나타난 것처럼 Class-E 전력 증폭기와 Class-E doubler를 결합하여 2차 고조파를 결합기에서 서로 상쇄시키는 구성을 이루고 있다⁶⁾. phase converter에서는 Class-E doubler의 기본 주파수



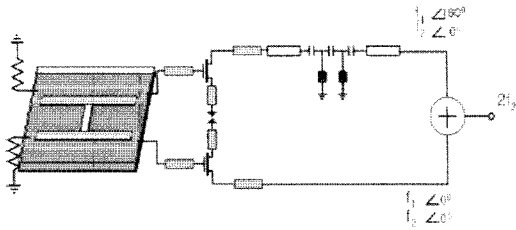
[그림 13] DCM과 CRLH-TL을 사용한 Class-E 전력 증폭기의 구조도

는 위상을 0으로 하고, 2차 고조파는 180°로 하여 결합기에서 상쇄하면 [그림 14]에 나타난 것과 같이 IMD3가 최대 25 dBc 정도의 개선 효과를 볼 수 있다.

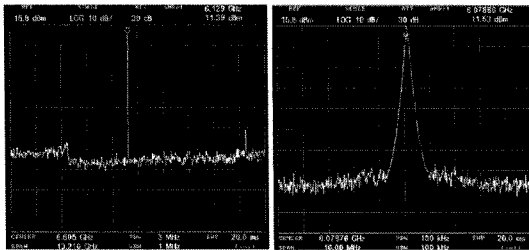
전력 증폭기에 CRLH-TL을 적용하여 이중 대역에서 동시에 동작하는 구조 및 선형성을 향상시키는 구조를 설계하고 구현한 외에도 저자는 push-push 발진기에도 CRLH-TL을 적용하였다⁷⁾. Push-push 발진기는 낮은 주파수의 발진기를 differential로 2개 연결하여 기본 주파수는 상쇄시키고 2차 고조파를 2배로 합하여 2배의 높은 주파수를 만들어 내는 구조이다. Defected Ground Structure(DGS)는 주로 기본 주파수와 2.5~3.5배 주파수에서 아주 크기가 큰 공진을 주로 일으키는데, H-slot 형태의 DGS를 구성하여 기본 주파수 및 3차 고조파에서 공진이 되는 공진기를 구현하고 난 후, 이를 push-push 발진기 형태로 변형하였다. 3차 고조파가 CRLH-TL을 통하여 결합할 때 2배의 전력으로 되게끔 설계하는 구조를 [그림 15]에 나타내었다. 기본 주파수를 2.1 GHz로 설계한 DGS 공진기를 사용하여 출력 주파수는 6.13 GHz에서 생성되도록 실제 설계 후 제작하였고, 측정 결과는 [그림 16]에 나타내었다. 발진 주파수에서 출력 전력은



[그림 14] DCM과 CRLH-TL을 사용한 Class-E 전력 증폭기의 선형성 향상 정도



[그림 15] CRLH-TL을 사용한 3배 주파수 push-push 발진기의 구조



[그림 16] CRLH-TL을 사용한 3배 주파수(6.13 GHz) push-push 발진기의 측정 결과

11.5 dBm을 기록하였고, 위상 잡음은 1 MHz offset에서 -128 dBc/Hz로 나타나 아주 우수한 성능을 보여주고 있다.

Ⅲ. CRLH-TL을 이용한 Active 회로 설계 현황

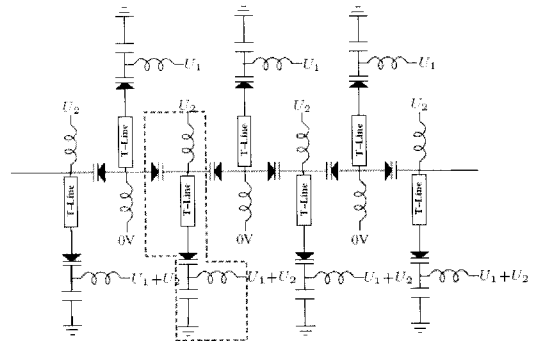
앞장에서 언급한 전력 증폭기 및 발진기 외에도 국내외에서 여러 연구 그룹들이 CRLH-TL 및 meta-material을 적용하여 active 회로의 성능을 개선시키거나 획기적으로 새로운 구조를 구현한 예를 살펴보면 여러 가지 형태들이 속속 나타나고 있는데, 주로 frequency multiplier, distributed 전력 증폭기, PPM 송신기, distributed mixer, dual band mixer, 발진기 및 위상 천이기 등에 적용하고 있으며, 위상의 비선형적 변화를 이용한 이중 대역 구현, 광대역 특성 구현, tunable 특성 그리고 고조파의 억압에 사용하여 성능 개선에 많은 기여를 하고 있으며, 기존의 구조에서

는 불가능한 성능 개선이 이루어지고 있고, 전체 회로의 크기도 획기적으로 감소함을 확인할 수 있다.

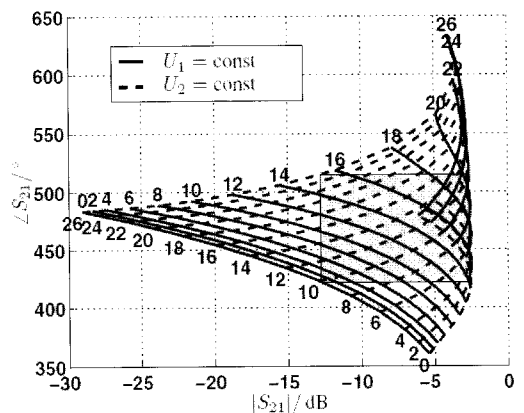
독일의 다름슈타트 공대에서 CRLH-TL을 이용하여 위상과 선로 임피던스를 독립적으로 조절할 수 있는 위상 천이기를 구현하였으며, [그림 17]에 이를 나타내었다^[8].

[그림 17]에 나타난 위상 천이기를 사용하여 조절 전압(U_1 , U_2)을 변화시키면서 측정된 위상 변화 추이를 [그림 18]에 나타내었으며, 6.5 GHz 대역에서 0~90° 위상 천이 및 0~-10 dB의 감쇄를 자유롭게 조절할 수 있는 결과를 보이고 있다.

스페인의 바르셀로나 대학에서는 CRLH-TL을 이



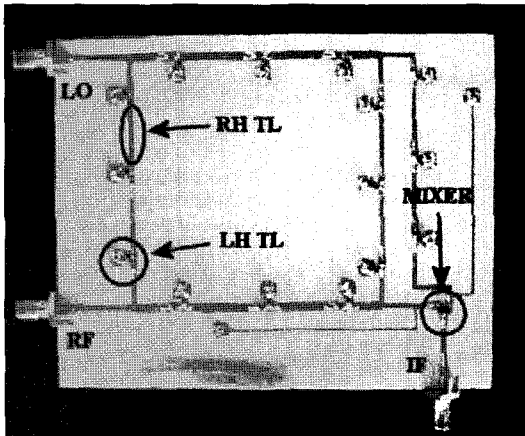
[그림 17] CRLH-TL을 사용한 위상 천이기^[8]



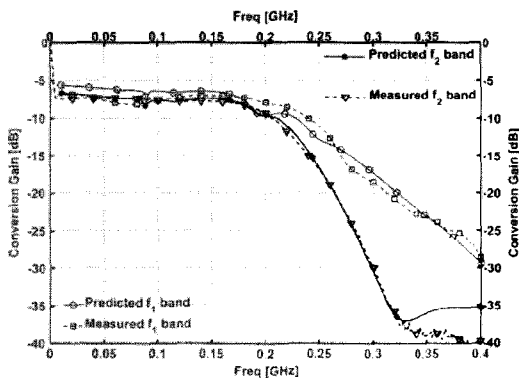
[그림 18] CRLH-TL을 사용한 위상천이기의 측정 결과

용하여 이중대역 mixer를 [그림 19]와 같이 구현하였으며, LO 주파수가 860 MHz 및 2.15 GHz일 때, RF 주파수를 460~860 MHz, 1.75~2.15 GHz까지 변환하면서 측정된 변환 손실은 최대 8.5 dB를 기록한 것을 [그림 20]에서 확인할 수 있다^[9]. CRLH-TL의 비선형적으로 변하는 위상 특성을 이용하여 대역폭이 약 200 MHz 이상 되게끔 구현한 훌륭한 설계라고 할 수 있다.

스페인의 다른 그룹인 말라가 대학에서도 distributed mixer를 CRLH-TL을 적용하여 구현하였는데,



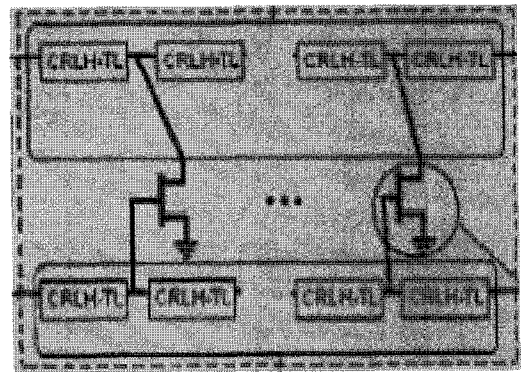
[그림 19] CRLH-TL을 사용한 이중대역 mixer^[9]



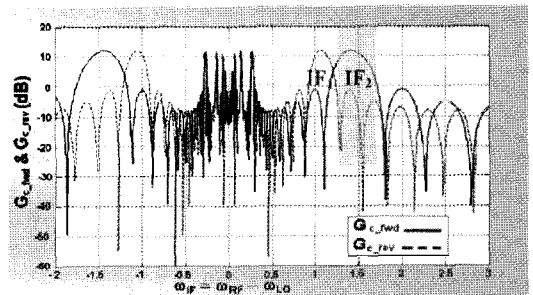
[그림 20] CRLH-TL을 사용한 이중대역 mixer의 측정 결과

기존의 RH TL을 대체하여 상하향 변환기를 구성하여 본 결과, IF 주파수를 1 GHz로 하여 변환 이득이 10 dB 근처까지 상승하는 것으로 나타났다^[10].

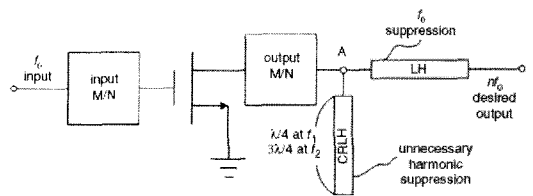
국내의 전북대 연구 그룹은 CRLH-TL을 사용하여 L-band frequency quadrupler를 구성하였는데, 기본 주파수, 2차 고조파 및 3차 고조파를 억압하는데 CRLH-TL을 적용한 구조도가 [그림 23]에 나타나 있다^[11]. 기



[그림 21] CRLH-TL을 사용한 distributed mixer^[10]



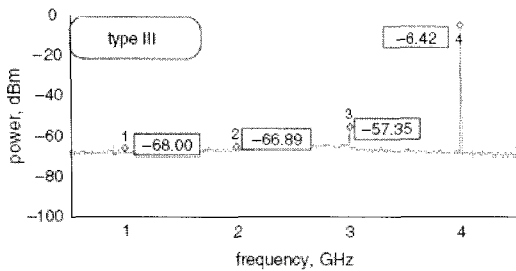
[그림 22] CRLH-TL distributed mixer의 변환 이득



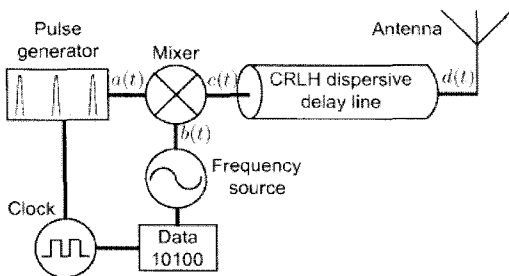
[그림 23] CRLH-TL을 사용한 주파수 4채배기^[11]

본 주파수는 LH TL로 억압하고 제2, 제3 고조파는 병렬로 연결한 CRLH-TL로 억압하여 제4 고조파만 [그림 24]와 같이 상대적으로 크게 추출하는 데 성공하였다.

그리고 초창기 UCLA 연구 그룹이었던 Caloz가 최근 구성한 Pulse Position Modulation(PPM) 송신기를 설계 예로 들고자 한다^[12]. 기존의 PPM 송신기에 사용한 delay line은 주로 active delay line 또는 switch를 사용한 delay line으로 구성되어, noise를 발생하고 소모 전력이 별도로 추가되고 또한 discrete한 time step으로만 동작되었다. Caloz가 구현한 CRLH delay line based PPM 송신기는 L과 C로 이루어진 완전한 수동 회로이므로 잡음 추가나 소모 전력의 추가가 없고 더군다나 time step을 연속적으로 조절할 수 있는 장점을 지니고 있어서 CRLH-TL을 훌륭하게 적용한 PPM 송신기라 할 수 있겠다. [그림 26]에 binary PPM 전송을 한 결과를 보이고 있는데, time step을 연속적



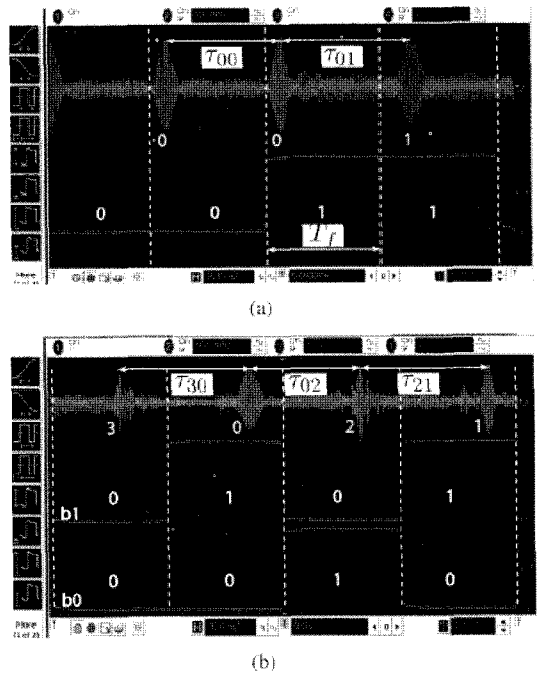
[그림 24] CRLH-TL 주파수 4채배기의 측정 결과



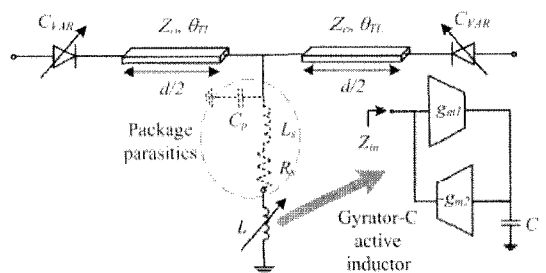
[그림 25] CRLH delay line을 이용한 PPM 송신기^[12]

으로 조절하여 bit 0과 1을 전송하고 있음을 나타내고 있다.

한편, 캐나다의 Toronto 대학에서는 CMOS active inductor를 사용하여 CRLH-TL을 구현하고, 이와 함께 직렬 Varactor를 사용하여 [그림 27]과 같이 tunable 위상 천이기를 설계하였다^[13]. CRLH-TL을 사용함으로써



[그림 26] CRLH delay line PPM 송신기의 측정 결과



[그림 27] Active inductor를 사용하여 구현한 CRLH-TL과 varactor를 이용하여 설계한 위상천이기의 구조도^[13]

써 위상의 조절 범위를 대폭 확장하였고 또한 입출력 임피던스 매칭을 용이하게 수행하였다. 위상 조절 범위는 2.5 GHz에서 $\pm 20^\circ$ 이며 삽입 손실은 0.6 dB 이하로 아주 작게 구현하였고, 반사 손실은 -30 dB 이하로 유지하였다. [그림 28]에 그 결과를 나타내 보였다.

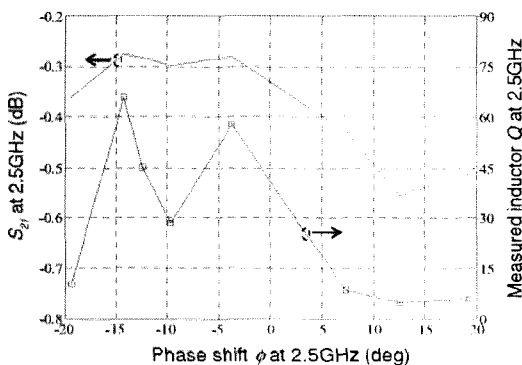
이 외에도 Split-Ring Resonator(SRR)를 바탕으로 한 meta-material transmission line을 사용하여 tuning range를 향상시킨 VCO를 설계한 예를 국내의 송실대에서 발표하였으며^[14], 5.6 GHz 근처에서 300~500 MHz의 넓은 tuning range와 보다 향상된 위상 잡음 특성을 구현하여 CRLH-TL과는 다른 구조를 사용하여 발진기의 성능을 향상시키기도 하였다. 그리고 위에서 언급한 설계 외에도 적지 않은 연구 그룹에 의하여 전력 증폭기, 전압 제어 발진기^[15], 위상 천이기, mixer 및 기타 각종 active 회로가 meta-material을 이용하여 보다 성능이 향상되고 크기 및 부피가 작아진 구조로 진화하고 있음을 볼 수 있다. Active 회로의 특성상 주로 평면 구조에 기반하고 있으므로 CRLH-TL을 적용하여 위상의 자유로운 조절, 고조파 억압, 이중 대역의 구현 및 광대역 특성의 구현에 많은 중점을 두어 회로 설계에 적용하여 왔고 앞으로도 이러한 경향은 계속되리라 예상된다. CRLH-TL과는 다

른 구성 방법으로 구현한 meta-material에 의한 active 회로 설계도 초보적인 단계를 지나 응용이 확산되기 시작하고 있으며, 특히 SRR 등을 이용하여 음의 유전율 단독으로 또는 음의 투자율 단독으로만 구현한 물질 또는 구조를 이용하여 Q-factor의 값을 획기적으로 향상시켜 이를 발진기의 공진기에 적용하는 예도 위에서 선보였다.

그리고 평면 기판 위에서 성능을 개선하고 향상시킨 회로 구성 외에도 meta-material을 MMIC 상에서 구현한 경우도 연구를 선보이기 시작하고 있고, 나아가 3-D 구조를 meta-material로 구현하여 보다 더 성능을 향상시킨 새로운 개념의 회로 설계를 여러 연구 그룹이 진행하고 있음은 이 분야의 발전을 위하여 고무적인 현상이다.

IV. 결 론

지금까지 meta-material 중에서 주로 CRLH-TL을 잘 적용하여 active 회로를 설계한 예를 저자가 속한 한국항공대학교에서 연구한 결과와 세계 여러 연구 그룹이 연구한 결과를 살펴보았다. CRLH-TL의 특성상 전송로 또는 lumped 소자를 이용하여 구현하여야 하므로 기판위에서 Active 회로와 결합하여 여러 가지 다양한 성능을 향상시키고 보다 새로운 관점에서 회로 구조를 시도하는 방향으로 연구를 진행하고 있음을 알 수 있다. 기판 위에서 CRLH-TL과 active회로의 결합을 통하여 위상을 비선형적으로 자유롭게 조절하여 이중 대역 특성 구현, 고조파 억압, 광대역 특성 구현 및 연속적인 위상이나 time step 설정을 주로 적용하였다. 이렇게 하여 증폭기, 전력 증폭기, 믹서, 위상 천이기 및 전압 제어 발진기의 성능을 향상시키는 효과를 거두고 있다. 또한, SSR 등을 이용한 유전율이나 투자율 하나만을 음으로 만들어 meta-material을 형성시킨 후 이를 적용한 회로도 구현하고 있다. 앞으로는 Q-factor를 대폭 향상시킨 공진기를 meta-



[그림 28] CRLH-TL 및 active inductor를 사용한 위상천이기의 위상 변화 추이

material로 구현하여 이를 발진기에 응용하는 연구, MMIC에 집적하여 선형성, 효율 및 대역 특성을 개선시키는 연구, 밀리미터파 대역이나 THz 대역의 각종 active 회로와 결합하여 성능을 개선시키는 새로운 구조에 대한 연구 그리고 3-D 구조로 이루어진 meta-material을 active회로에 능동적으로 응용하는 연구 등을 세계 여러 연구 그룹이 수행할 것으로 예상하며, 이에 발맞추어 우리나라에서도 지금까지 수행한 역량을 바탕으로 훌륭한 업적을 낼 수 있을 것으로 보인다.

참 고 문 헌

- [1] V. 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] C. Caloz, T. Itoh, "Novel microwave devices and structures based on the transmission line approach of meta-materials", *IEEE International Microwave Symposium*, pp. 195-198, 2003.
- [3] S. H. Ji, C. S. Cho, J. W. Lee, and J. Kim, "Concurrent dual-band class-E power amplifier using composite right/left-handed transmission lines", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 55, no. 6, pp. 1341-1347, Jun. 2007.
- [4] S. H. Ji, S. K. Eun, C. S. Cho, J. W. Lee, and J. Kim, "Linearity improved doherthy power amplifier using composite right/left-handed transmission lines", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 18, no. 8, pp. 533-535, Aug. 2008.
- [5] 은상기, 조춘식, 이재욱, 김재홍, "Composite right/left-handed transmission lines 결합기를 이용하여 선형성과 효율을 향상한 Outphasing E급 전력 증폭기", *한국전자파학회논문지*, 19(12), pp. 1131-1321, 2008년 12월.
- [6] S. K. Eun, C. S. Cho, J. W. Lee, and J. Kim, "Linearity enhancement for the RF class-E power amplifiers using duty-cycle modulation at the feed-forward path", *European Microwave Conference*, pp. 1675-1678, Oct. 2007.
- [7] C. W. Ryu, C. S. Cho, J. W. Lee, and J. Kim, "A triple-folded frequency push-push oscillator using DGS resonator and composite right/left-handed transmission lines", *Asia Pacific Microwave Conference*, Dec. 2008.
- [8] C. Damm, M. Schüßler, J. Freese, R. Jakoby, "Artificial line phase shifter with separately tunable phase and line impedance", *European Microwave Conference*, pp. 423-426, 2006.
- [9] P. Paco, R. Villarino, G. Junkin, Ó. Menéndez, E. Corrales, and J. Parrón, "Dual-band mixer using composite right/left-handed transmission lines", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 17, no. 8, pp. 607-609, Aug. 2007.
- [10] J. Mata-Contreras, T. M. Martin-Guerrero, and C. Camacho-Peñalosa, "Distributed mixers with composite right/left-handed transmission lines", *IEEE International Microwave Symposium*, pp. 98-101, 2006.
- [11] H. Choi, J. Lim, and Y. Jeong, "Harmonics terminated L-band frequency quadrupler using composite right/left-handed transmission line", *Electronics Letters*, vol. 45, no. 4, pp. 208-210, Feb. 2009.
- [12] H. V. Nguyen, C. Caloz, "CRLH delay line pulse position modulation transmitter", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 18, no. 8, pp. 527-529, Aug. 2008.
- [13] M. A. Y. Abdalla, K. Phang, and G. V. Eleftheriades, "A tunable metamaterial phase-shifter struc-

- ture based on a 0.13 gm CMOS active inductor", *European Microwave Conference*, pp. 325-328, 2006.
- [14] J. Choi, C. Seo, "Broadband and low phase noise VCO using tunable metamaterial transmission line based on varactor-loaded split-ring resonator", *Korea-Japan Microwave Conference*, pp. 145-148, 2007.
- [15] A. Dupuy, K. Leong, and T. Itoh, "Power combining tunnel diode oscillators using metamaterial transmission line at infinite wavelength frequency", *IEEE International Microwave Symposium*, pp. 751-754, 2006.

≡ 필자소개 ≡

조 춘 식



1887년 2월: 서울대학교 제어계측공학과 (공학사)

1998년 12월: 미국 Colorado대학교 전기 및 컴퓨터공학과 (공학박사)

2004년 3월~현재: 한국항공대학교 정보통신공학과 교수

[주 관심분야] RFIC/MMIC 설계, Power Amplifier 설계, THz Imaging