

초고주파 부품에 활용되는 Meta-Material

김 영 · 윤 영 철*

금오공과대학교 ·
*관동대학교

I. 서 론

최근에 일반적인 매질과는 달리 유전율과 투자율이 모두 음을 갖는 메타 물질(meta-material)의 전기적인 특성을 이용한 다양한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 여기서 얘기하는 전자기적인 메타 물질은 자연 세계에서는 관찰되지 않는 유전율과 투자율이 모두 음인 전자기적인 성질을 인공적 구조를 통하여 구현한 것이다.

유전율과 투자율의 부호에 따라서 [그림 1]과 같이 네 가지 가능한 결합이 가능하다^[1].

[그림 1]에서 I, II, IV 분면의 물질은 자연계에 존재하는 것으로 알려져 있다. 하지만, 음 투자율과 음 유전율을 갖는 자연계 물질은 아직 발견되지 않았다. 1967년 러시아 과학자 Veselago는 그의 논문에서 두 가지가 모두 음수인 물질에 대해서 발표하였다. 여기서 그는 음 투자율과 유전율을 갖는 물질 안에서만 발생하는 1) 전자파의 Left-Handed(LH) 경향; 이것은 backward wave라고 언급하는데, 전자기파의

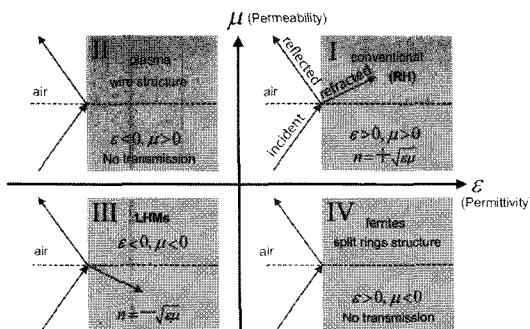
군속도와 위상 속도가 서로 반대가 되는 파, 2) 기존 Snell 법칙, 도플러 효과 그리고 Vavilov-Cerenkov 방사; 음의 굴절율을 갖음을 설명함, 3) 주파수 분산; 주파수에 대한 비선형적 특성을 갖음 등의 전자기적 현상을 언급하였다.

처음 발표 이후 2000년에 J.B. Pendry와 D.R. Smith에 의해 주기적인 금속 wire와 Split Ring Resonator (SSR)을 이용하여 처음으로 LH 메타 재료의 특성을 시험적으로 증명^{[2],[3]} 이후 국내외의 대학, 연구소들은 1-D 형태와 물질 개념으로서 2,3-D 형태의 메타 재료에 대한 연구가 활발하게 진행하고 있다. 특히, LH 메타 재료의 개념을 전송 선로에 적용한 평면 타입의 1차원 Composite Right-/Left-Handed(CRLH) 전송 선로는 제작하기 쉽고 폭넓은 응용 분야를 갖기 때문에 이전에는 구현하기 어려웠던 리키 웨이브 안테나, 음 굴절율 렌즈, 작은 공진 안테나 그리고 듀얼 밴드 소자 등을 구현하는데 응용되고 있다^[4].

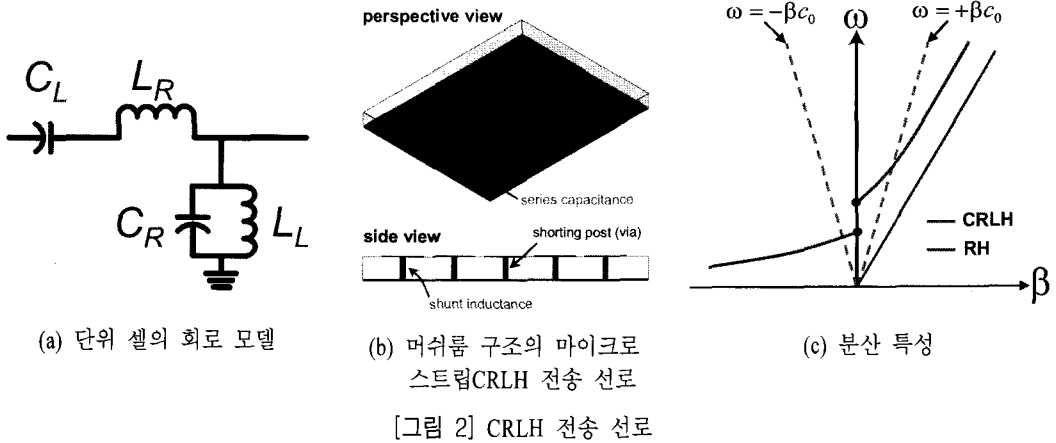
II. 메타 재질을 이용한 수동 부품

2-1 CRLH 전송 선로의 특성

순수한 LH 전송 선로는 Right-Handed(RH)의 파라스틱 효과 때문에 물리적으로 구현할 수 없다. 그래서 LH 전송 선로는 RH 효과가 고려된 CRLH 전송 선로로 모델할 수 있다. CRLH 전송 선로의 모델은 [그림 2](a)와 같이 직렬 RH 인덕턴스(L_R), 직렬 LH 캐패시턴스(C_L), 병렬 RH 캐패시턴스(C_R) 그리고 병렬 LH 인덕턴스(L_L)로 구성되어 있다. 이 회로의 모델은 [그림 2](b)의 머쉬룸 구조의 마이크로스트립 전송 선로



[그림 1] 투자율과 유전율에 따른 물질 분류



로 나타낼 수 있다. CRLH 단위 셀의 전파상수는 아래와 같은 식으로 표현되고, 분산 특성은 [그림 2](c)에 나타내었다^[3].

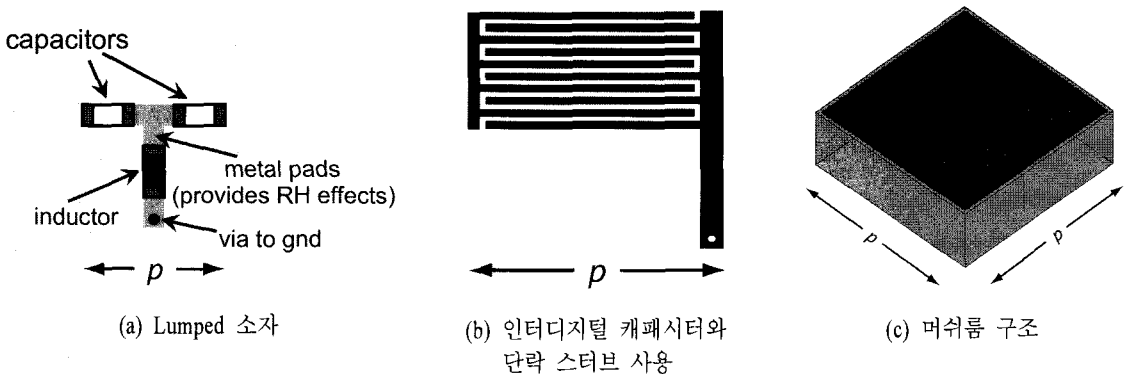
$$\beta_{CRLH} = s(\omega) \sqrt{\omega^2 L_R C_R + \frac{1}{\omega^2 L_L C_L} - \left(\frac{L_R}{L_L} + \frac{C_R}{C_L} \right)}$$

여기서

$$s(\omega) = \begin{cases} -1 & \text{if } \omega < \omega_{\Gamma_1} = \min\left(\frac{1}{\sqrt{L_R C_L}}, \frac{1}{\sqrt{L_L C_R}}\right) \\ +1 & \text{if } \omega > \omega_{\Gamma_2} = \max\left(\frac{1}{\sqrt{L_R C_L}}, \frac{1}{\sqrt{L_L C_R}}\right) \end{cases}$$

[그림 2]에서 나타낸 CRLH 전송 선로를 물리적으로 구현하기 위해서는 lumped 소자, 분산(distributed) 소자, 그리고 이 둘이 결합된 형태를 사용할 수 있다. CRLH 단위 셀의 구현은 [그림 3]과 같이 할 수 있다. 일반적으로 분포 소자를 사용한 구현이 제작의 간편성과 방사 특성을 이용할 수 있기 때문에 lumped 소자를 이용하는 것보다 더 좋다. [그림 3](b)의 인터디지털 커패시터와 단락 스테브를 이용한 단위 셀은 1차원 CRLH 전송 선로를 구현하는데 가장 일반적으로 사용된다. 또한, [그림 3](c)는 머쉬룸 구조로 구현한 것이다.

여기서 우리는 주기적 구조를 다루고 있기 때문



[그림 3] CRLH 단위 셀의 물리적 구현 방법

<표 1> [그림 4]의 각 영역 설명

영역	Supported wave
I	Slow-wave ; $\beta < 0$
II	Fast-wave ; $\beta < 0$
III	Fast-wave ; $\beta > 0$
IV	Slow-wave ; $\beta > 0$

에, 하나의 단위 셀 분산 특성은 전체 구조의 특성을 나타내는데 사용된다. 주기가 p 인 단위 셀에서의 분산 특성은 위상 대 주파수로 나타낼 것이고, 위상은 0에서 $|\pi|$ 까지 그릴 것이다. [그림 4]는 길이가 p 인 평형 CRLH 단위 셀 분산 특성이다. 또, <표 1>은 [그림 4]의 각 영역을 설명한 것이다.

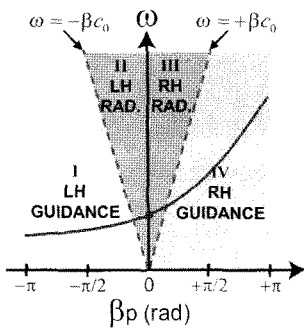
2-2 CRLH 전송 선로를 이용한 소자들의 특성

2-2-1 이중 대역 분배기^{[6]~[9]}

앞에서 설명한 CRLH 전송 선로는 LH 전송 선로에 RH 전송 선로가 결합된 것으로 위상 천이를 살펴보면 RH와 LH 전송 선로 위상 천이의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\phi_{CRLH} = \phi_{RH} + \phi_{LH}$$

또, CRLH 전송 선로의 분산 특성을 보면 낮은 주파수에서는 LH 전송 선로의 특성을 나타내고, 변이



[그림 4] 주기 p 인 단위 셀의 분산 특성

주파수를 지나서는 RH 전송 선로의 분산 특성을 따라 가는 것을 알 수 있다.

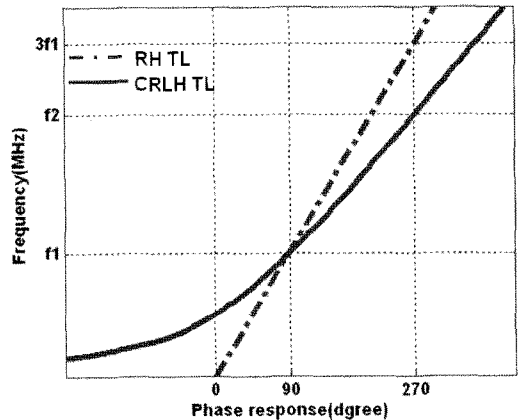
[그림 5]는 이상적으로 설계된 $\lambda/4$ RH 전송 선로의 위상 특성은 직선적으로 변하여 주파수가 f_1 일 때 위상이 -90° 이면, $3f_1$ 일 때는 위상이 -270° 임을 보여준다. 이와는 달리 CRLH 전송 선로에서의 위상은 주파수 f_1 에서 -90° 이면, 임의의 주파수 f_2 에서 그 위상 값이 -270° 가 되도록 만들 수 있음을 보여준다.

이와 같은 특성을 이용하여 전송 선로를 이중대역으로 설계하기 위해서 주파수 f_1, f_2 를 결정하고, 이들의 위상 특성을 $(\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2})$ 를 아래와 같은 관계가 되도록 결정한다.

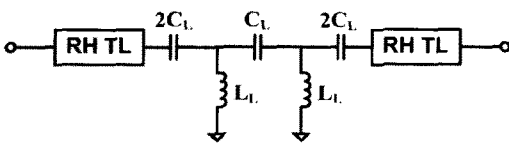
$$\phi_c(f_1) = \frac{\pi}{2}, \quad \phi_c(f_2) = -\frac{\pi}{2}, \quad f_2 = af_1$$

[그림 6]의 구조로 이중 대역에서 동작하는 전송 선로를 설계하였다. 각 소자의 값은 사용하고자 하는 주파수에 맞는 소자 값을 구할 수 있다. $\phi_1 = -\beta_1 l$ 와 $\phi_2 = -\beta_2 l$ 이며, 여기서 l 은 전송 선로의 물리적 길이를 의미한다.

$$\beta(\omega_1) = \beta_1, \quad \beta(\omega_2) = \beta_2$$



[그림 5] 전기적 길이가 90° 인 RH와 CRLH 전송 선로의 위상 특성



[그림 6] 설계된 2단 CRLH 전송 선로

위의 식에서 정의한 것 같이 사용하고자 하는 두 개의 주파수에 해당하는 전달상수를 정한다. 그리고 이렇게 정해진 값들로 다음 식을 이용하여 소자 값들을 구할 수 있다.

$$\beta^{CRLH} = \omega \sqrt{L_R C_R} - \frac{1}{\omega \sqrt{L_L C_L}},$$

$$Z_C^{CRLH} = \sqrt{\frac{L_R}{C_R}} = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}}$$

위의 식들을 이용하여 정리하면 이중 대역을 만족하는 L 과 C 값을 찾아 낼 수 있다.

$$L_R = \frac{Z_0 [\phi_1(w_1/w_2) - \phi_2]}{Nw_2 [1 - (w_1/w_2)^2]},$$

$$C_R = \frac{\phi_1(w_1/w_2) - \phi_2}{Nw_2 Z_0 [1 - (w_1/w_2)^2]}$$

$$L_L = \frac{Z_0 [\phi_1(w_1/w_2) - \phi_2]}{Nw_2 [1 - (w_1/w_2)^2]},$$

$$C_L = \frac{M[1 - (w_1/w_2)^2]}{w_1 Z_0 [\phi_1 - (w_1/w_2)\phi_2]}$$

여기서 Z_0 는 특성 임피던스, ϕ_1 , ϕ_2 는 전체 위상 변화, N 은 단위 셀의 수를 나타낸다.

위의 식들로부터 구해진 소자의 값들을 사용하여 전송 선로를 설계하고 L_R , C_R 값들은 다음 식으로 RH 전송 선로로 구현하는데 사용한다.

$$Z_{cR} = \sqrt{\frac{L_R}{C_R}}, \quad \phi_1^{RH} = -Nw_1 \sqrt{L_R C_R}$$

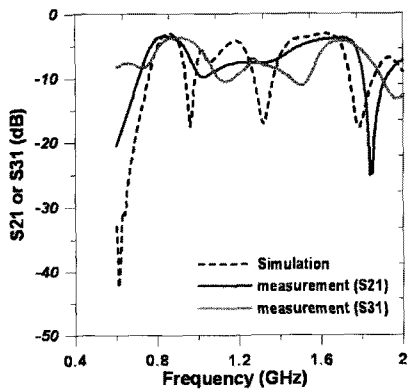
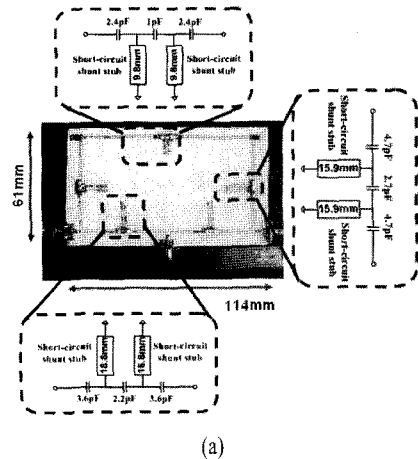
또, LH 전송 선로는 소자 C_L 과 L_L 을 이용하여 구현할 수 있다.

이와 같이 CRLH 전송 선로를 이용하여 $f_2=0.88$

GHz, $f_2=1.67$ GHz로 선택하여 이중 대역 전력 분배기를 구현하여 [그림 7]과 같은 특성을 얻을 수 있다.

2-2-2 컴팩트 사이즈 링 하이브리드 커플러^{[10]~[12]}

또 다른 CRLH 전송 선로를 링 하이브리드 커플러의 크기를 줄이는 곳에 사용할 수 있는데, 사이즈는 각각의 마이크로스트립 전송 선로를 통하여 줄이고, LH 전송 선로의 구조를 구현할 때 Lumped 소자를 이용하여 그 크기를 최소화 하고, LH 전송 선로의 비선형 위상 특성으로 기존의 링 하이브리드보다 넓



[그림 7] (a) 제작된 이중 대역 분배기 사진 (b) S_{21} 시뮬레이션 결과와 실제 측정값 비교

어진 대역폭을 가지도록 설계할 수 있다.

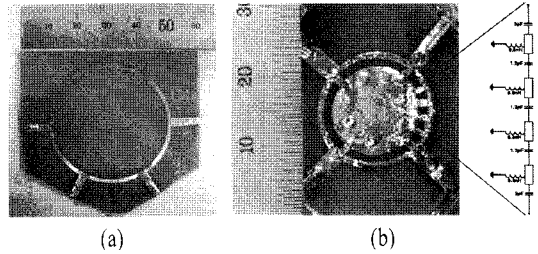
링 하이브리드 커플러에서 $\lambda/4$ 의 길이의 전송 선로는 모두 캐패시터를 이용하여 등가적인 전송 선로로 대체할 수 있고, 또한 $3\lambda/4$ 전송 선로는 세 개의 $\lambda/4$ 의 길이를 가지고 있기 때문에 그 중 하나의 $\lambda/4$ 길이 전송 선로를 캐패시터를 이용하며 그 길이를 줄이고 남은 전송 선로를 LH의 구조로 대체한다.

각각의 90° 전송 선로는 θ 값이 60° 인 전송 선로로 대체되었고 이때 캐패시터의 값은 0.5 pF 이다. 또, 길이가 $3\lambda/4$ 인 즉, 270° 의 전기적 길이를 가지는 전송 선로는 240° 의 길이로 줄어들었다. 따라서 이와 등가적인 값인 -120° 의 LH 또는 CRLH 전송 선로로 대체할 수 있다. 여기에서는 캐패시터와 인덕터를 연결할 수 있도록 CRLH 전송 선로 구조를 사용하였다. 구현하고자 하는 기본 LH 전송 선로는 [그림 8](a)와 같이 나타낼 수 있는데, 하나의 단위 구조가 -30° 의 전송 선로를 값을 가진다. 하지만 실제로 부품을 연결하기 위해서는 패턴이 필요하므로 5° 의 RH 전송 선로를 삽입하여 구현하였다.

이러한 방법으로 2 GHz에서 링 하이브리드 커플러를 구현했을 때 [그림 9](a)는 기존의 방법으로 구현한 것이고, [그림 9](b)는 기존 것 대비 면적이 20%로 줄어들고 전기적 특성은 동등 이상으로 얻은 커플러이다.

2-2-3 가변 저지대역 필터^{[13]~[17]}

또 다른 응용으로는 RH 전송 선로의 저역 통과 특성과 LH 전송 선로의 고역 통과 특성을 결합하여 [그



[그림 9] (a) 기존의 링 하이브리드 커플러, (b) 제안한 소형 광대역 링 하이브리드 커플러

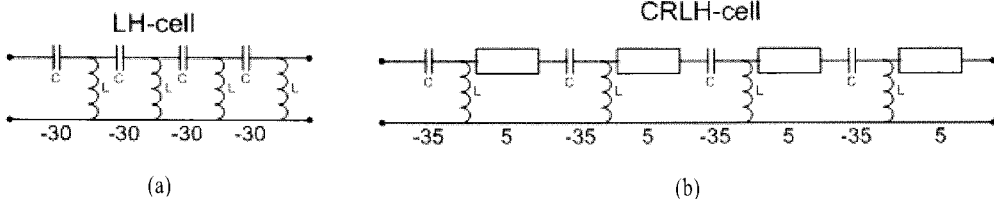
림 11]과 같이 대역 저지 특성을 만들고 바랙터 다이오드를 이용하여 가변 대역 저지 필터를 구현할 수 있다. 이것은 차단 주파수를 독립적으로 변화시킬 수 있어서 임의의 중심 주파수와 대역폭을 구현할 수 있다.

이와 같은 대역 저지 필터는 고역 필터처럼 동작하는 LH 전송 선로의 저지대역 주파수를 저역 필터처럼 동작하는 RH 전송 선로의 차단 주파수보다 더 높게 설정하면 특성을 얻을 수 있다.

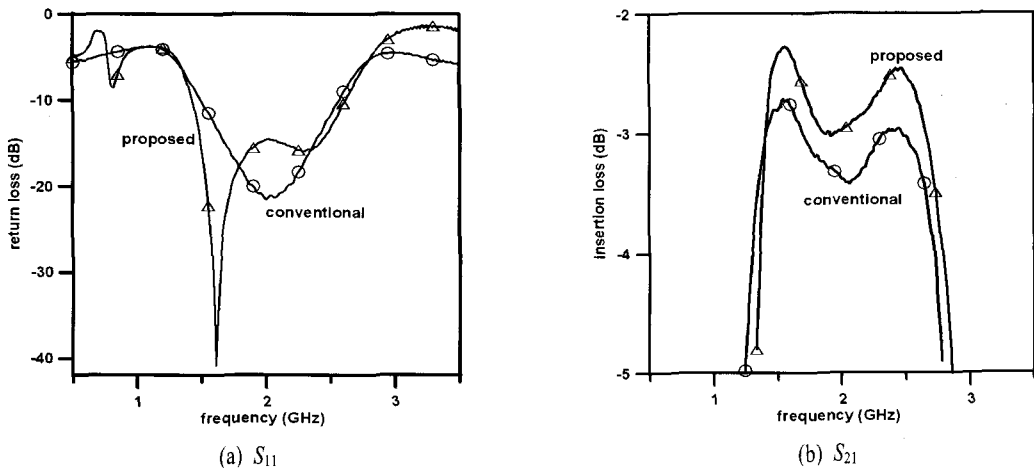
[그림 12]는 각각 2개의 단위 셀로 구성된 right/left-handed 전송 선로를 이용한 가변 대역 저지 필터 회로다. 통과 대역의 특성을 독립적으로 조정하기 위해 RH 전송 선로와 LH 전송 선로를 구성하는 바랙터 다이오드의 바이어스 전원을 분리하여 인가했다. 다이오드의 커패시턴스는

$$C_d(V_{dc}) = \frac{C_{j0}}{\left(1 + \frac{V_{dc}}{V_j}\right)^M} + C_p$$

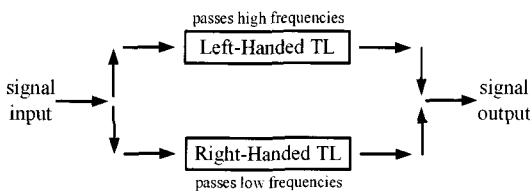
와 같다. 여기서, C_{j0} 는 zero-bias 다이오드 커패시턴



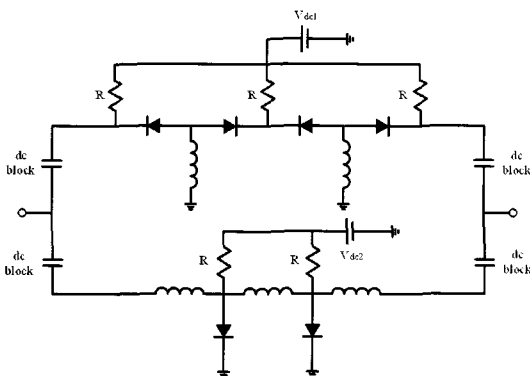
[그림 8] -120° 길이의 (a) LH 전송 선로의 등가회로, (b) CRLH 전송 선로의 등가회로



[그림 10] 기존 링 하이브리드와 제안한 링 하이브리드의 측정 결과 비교



[그림 11] Right/Left-Handed 구조를 결합한 대역 저지 필터



[그림 12] Right/left-handed 전송 선로를 이용한 가변 대역저지 필터 회로

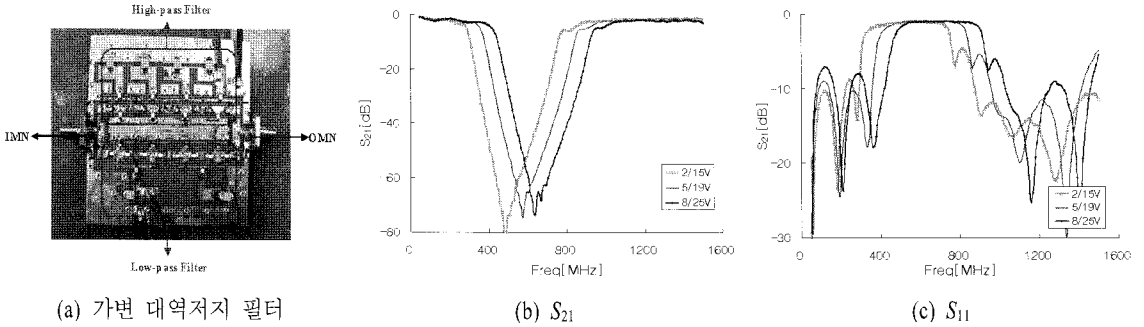
스, V_j 는 접합 전압, M 은 grading 상수, C_p 는 패키징 커패시턴스이다.

앞의 설계 이론을 적용하여 각각 4개의 단위 셀로 구성된 right/left-handed 전송 선로를 이용한 UHF 대역의 가변 대역 저지 필터를 설계하였다. [그림 13](a)는 제작된 가변 대역 저지 필터의 사진이고, [그림 13](b)는 제작된 가변 대역 저지 필터의 측정 결과로 $V_{dc1}=15\text{ V}$, $V_{dc2}=2\text{ V}$ 일 때, $V_{dc1}=19\text{ V}$, $V_{dc2}=5\text{ V}$ 일 때, $V_{dc1}=25\text{ V}$, $V_{dc2}=8\text{ V}$ 일 때의 삽입 손실이고, [그림 13](c)는 각 경우의 반사손실을 나타낸 데이터이다.

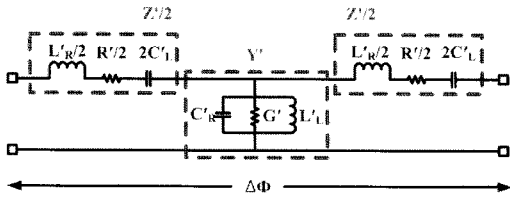
2-2-4 가변 감쇠기^{[18]~[20]}

가변 감쇠기는 가변 위상 변환기와 함께 시스템 내에 신호의 크기와 위상을 조정하기 위해 널리 사용되고 있다. 여기서는 CRLH 전송 선로 구조에 편 다이오드를 이용하여 다이오드의 전압 값에 따라 내부 저항 값을 변하게 하여 광대역에서 감쇠 상수를 조정하는 감쇠기에 관한 것을 설명할 것이다.

손실 저항을 가지는 CRLH 전송 선로를 이용하여 가변 감쇠기를 제작하였고, 저항 성분을 제어하기 위해 전압에 따라 다른 저항 값을 만들어 주는 편 다이오드를 이용하여 전압 값을 변화시키면 출력이 가변되는 특성을 이용하여 광대역 가변 감쇠기를 설계하였다.



[그림 13] 제작된 가변 대역저지 필터와 측정 결과



[그림 14] 내부 손실이 존재하는 CRLH 전송 선로 T-등가회로

[그림 14]는 CRLH 전송 선로 단위 셀에서 손실을 가지는 직렬 공진 소자와 병렬 공진 소자로 구성되어 있다. 이때 각각의 단위길이 당 임피던스와 어드미턴스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z' = R' + jX' \quad \text{with} \quad X' = \left(\omega L'_{R'} - \frac{1}{\omega C'_{L'}} \right)$$

$$Y' = G' + jB' \quad \text{with} \quad B' = \left(\omega C'_{R'} - \frac{1}{\omega L'_{L'}} \right)$$

이 두 식을 이용하여 복소 전파 상수를 계산하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{Z'Y'} = \sqrt{(R'G' - X'B') - j(R'B' + G'X')}$$

또한, 특성 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_c = R_0 + jX_0 = \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} = \sqrt{\frac{R' + jX'}{G' + jB'}}$$

그러나 이상적이지 않은 CRLH 전송 선로의 손실 효과를 알아보기 위해서는 위의 복소 전파 상수를 간소화 할 필요가 있다, 또한, 저 대역 통과 특성을 갖는 RH 소자의 영향을 받지 않는 상대적으로 낮은 주파수에서 해석한다면 $L'_R = C'_R = 0$ 으로 복소 전파 상수를 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma_L &= -j\sqrt{\frac{1 - R'G'(\omega/\omega'_L)^2 + j\omega(C'_{L'}R' + L'_{L'}G')}{\omega/\omega'_L}} \\ &= \alpha_L + j\beta_L \end{aligned}$$

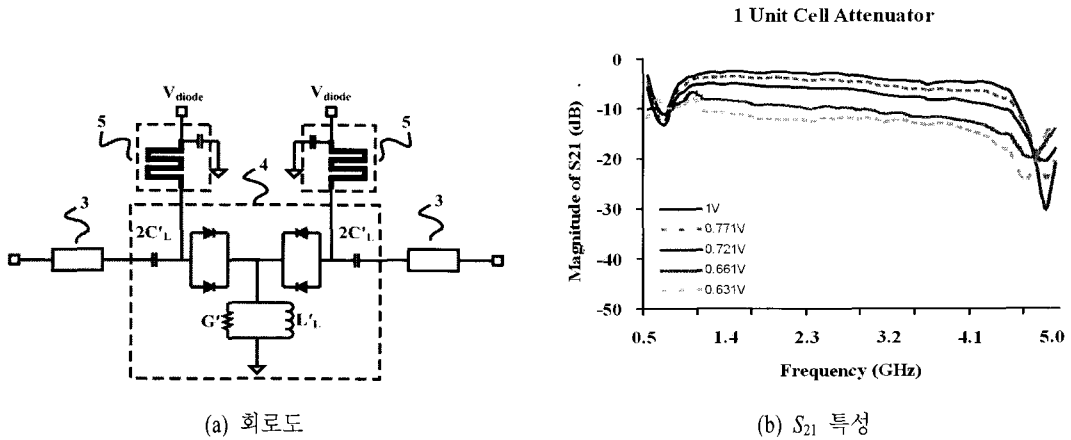
[그림 14]의 전송 선로를 N 단위 셀로 연결하면, S -파라미터로 표현할 수 있고, 이때 감쇠상수 α 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha = -\ln |S_{21,N}|/l, \quad Z_{cR} = \sqrt{\frac{L_R}{C_R}}$$

$$\Phi^{RH} = -N\omega\sqrt{L_R \cdot C_R}$$

이때 $S_{21,N} = |S_{21,N}|e^{j\phi(S_{21,N})} = e^{-\alpha l} e^{-j\beta l}$ 으로 정의할 수 있다.

[그림 15](a)는 내부 저항값에 따라 감쇠상수를 조정하기 위해 설계된 감쇠기의 도면이고, [그림 15](b)는 단위 셀로 구현된 가변 감쇠기의 특성을 나타낸 것이다. 이와 같은 단위 셀을 직렬로 연결하면 단위 셀의 감쇠량에 정수 배 만큼의 감쇠를 얻을 수 있다.



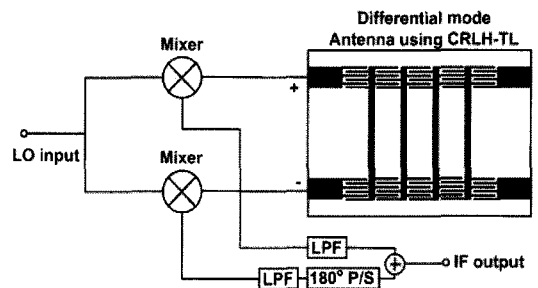
[그림 15] 설계된 감쇠기

2-2-5 리키 웨이브 안테나를 이용한 평형 믹서 [21~[25]

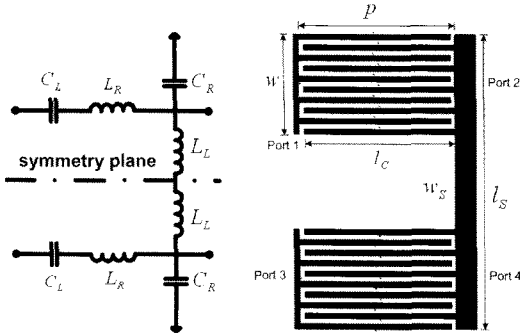
이 회로는 작은 크기와 시스템 확장을 위해서 안테나를 집적화시킨 수신기를 위해서 메타 재질을 응용한 분야에 대한 것이다. 특별히, 차동/공통 모드로 동작하는 메타 재질의 응용 분야를 제안한 것으로, 차동 모드일 때는, 메타 재질의 단위 셀은 평형 CRLH 단위 셀처럼 동작하며, 기본적인 백워드 웨이브는 단위 셀의 직렬 공진 주파수(f_{sc})보다 낮은 쪽에서 동작한다. 그러나 공통 모드일 때는, 메타 재질의 단위 셀은 직렬 공진 주파수 아래에서는 차단된다. 평형 CRLH 단위 셀은 그것의 기본 모드가 fast 웨이브 영역에 있고, 브로드사이드 누설이 가능하기 때문에 사용한다. 결과적으로 여기서 사용되는 메타 재질은 차동 모드에서 동작하는 후방에서 전방으로 스캐닝 할 수 있는 리키 웨이브 안테나로 사용할 수 있다. 몇 개의 단위 셀을 직렬 연결하여 구성된 리키 웨이브 안테나는 수신기의 평형 믹서에 응용할 수 있는 직렬 공진 주파수 아래에서 공통 모드 여파기를 갖고 있다. 이때는 공통 모드 LO 신호를 제거하기 위해서 별도의 RF 여파기가 필요 없다. 더욱이, 리키 웨이브 안테나는 차동 모드에서만 동작하기 때문에

LO 영역의 여파기는 역시 필요가 없다. 이러한 성질은 공간과 소자를 줄일 수 있어 컴팩트한 수신기 설계에 적합하다.

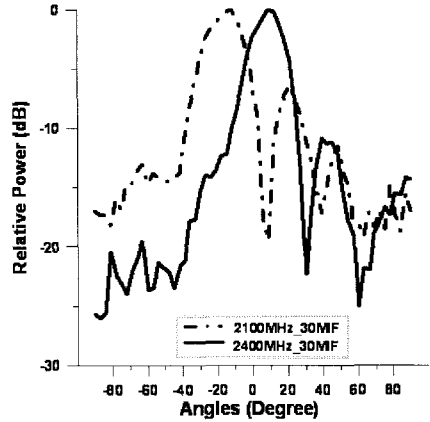
차동/공통 모드 메타 재질을 기본으로 한 집적화한 안테나의 블록 다이어그램은 [그림 16]에 나타내었다. 또, 리키 웨이브 안테나의 단위 셀의 등기 회로와 마이크로스트립으로 구현한 것은 [그림 17]에 나타내었다. 이 단위 셀의 분산 특성은 [그림 18]처럼 1.9~2.4 GHz까지는 LH 영역 그리고 2.4~3.6 GHz까지는 RH 영역의 fast wave 영역을 나타내었다. 또, 이것이 차동 모드에서 동작하는 것을 확인하기 위해서 [그림 20]에 제작한 회로를 보였으며, 측정 결과를 [그림 21]에 나타내었다.



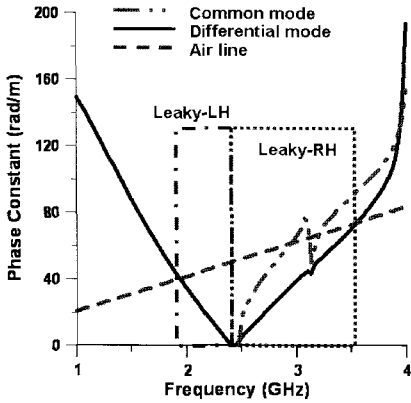
[그림 16] 믹서와 집적화된 안테나의 블록 다이어그램



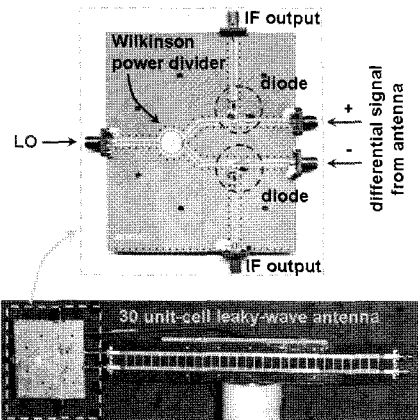
[그림 17] 차동/공통 모드 메타 재질 단위 셀의 등가 회로 모델과 마이크로스트립 구현



[그림 20] 측정된 IF 수신 패턴 (IF=30 MHz)



[그림 18] 차동/공통 모드 여기에 의한 평형 단위 셀의 분산 다이어그램



[그림 19] 안테나와 결합된 집적화된 평형 믹서의 사진

III. 결 론

최근 들어 메타 재질에 대한 관심이 증폭되면서 수동 소자에 메타 재질이 적용되는 연구 내용 즉, 다중 대역 분배기, 콤팩트 커플러, 가변 저지 대역 필터, 감쇠기, 리키 웨이브 안테나를 이용한 평형 믹서 등에 대해서 소개하였다. 이 밖에도 위상 변환기, 발룬 등 수동 분야뿐만 아니라 증폭기 등의 능동 분야와 안테나 개발 등으로 활발한 연구가 진행되고 있는 실정이다. 국내외적으로 현재 많은 연구 그룹들이 연구하고 있는 기술이므로, 국내에서도 메타 재질을 이용한 다양한 연구가 활발히 이루어져야 할 것이다.

이 분야는 현재 개발 중인 부품은 많이 있지만 상용화 된 것은 아직 없으므로 이 기술을 이용한 상용화에 많은 관심을 가져야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[1] V. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ", *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10, no. 4, pp. 509-514, Jan. 1968.
 [2] J. Pendry, A. Holden, D. Robbins, and W. Stewart,

- "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2075-2084, Nov. 1999.
- [3] R. Shelby, D. Smith, and S. Schiltz, "Experimental verification of a negative index of refraction", *Science*, vol. 292, pp. 77-79, Apr. 2001.
- [4] C. Caloz, T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications*, New York: John Wiley & Sons, 2005.
- [5] A. Lai, *Left-handed Metamaterial using Ansoft Designer and HFSS*, Ansoft Corp., Aug. 2007.
- [6] H. Okabe, C. Caloz, and T. Itoh, "A compact enhanced-bandwidth hybrid ring using an artificial lumped-element left-handed transmission line section", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, no. 3, pp. 837-804, Mar. 2004.
- [7] 임종식, 박용희, 정용채, 안달, 오성민, 구재진, 김광수, "다단 윌킨슨 구조의 초광대역 CPW 발룬", *한국전자과학회논문지*, 17(9), pp. 811-820, 2006년 9월.
- [8] Ulrich H. Gygel., "A new n-way divider /combiner suitable for high-power applications", *IEEE MTT Int'l Symp.*, vol. 75, Issue 1, pp. 116-118, May 1975.
- [9] 김승환, 손강호, 김일규, 김영, 이영순, 윤영철, "CRLH 전송 선로 구조를 이용한 이중 대역 전력 분배기", *한국전자과학회논문지*, 19(8), pp. 837-843, 2008년 8월.
- [10] H. Okabe, C. Caloz, and T. Itoh, "A compact enhanced-bandwidth hybrid ring using an artificial lumped-element left-handed transmission line section", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, no. 3, pp. 798-804, Mar. 2004.
- [11] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, pp. 368-373, 2005.
- [12] T. Hirota, A. Minakawa, and M. Muraguchi, "Reduced-size branch-line and rat-race hybrids for uniplanar MMIC's" *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 38, Issue 3, pp. 270-275, Mar. 1990.
- [13] B. Kim, S. Yun, "Varactor-tuned combline band-pass filter using step-impedance microstrip lines", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-52, no. 4, pp. 1279-1283, Apr. 2004.
- [14] C. Caloz, A. Sanada, and T. Itoh, "A novel composite right-/left-handed coupled-line directional coupler with arbitrary coupling level and broad bandwidth", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-52, no. 3, pp. 980-992, Mar. 2004.
- [15] S. Lim, C. Caloz, and T. Itoh, "Meta-material based electronically controlled transmission-line structure as a novel leaky-wave antenna with tunable radiation angle and beamwidth", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-52, no. 12, pp. 2678-2690, Dec. 2004.
- [16] H. Kim, A. B. Kozyrev, A. Karbassi, and D. W. van der Weide, "Linear tunable phase shifter using a left-handed transmission line", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. MWCL-15, no. 5, pp. 366-368, May 2005.
- [17] 성규제, 김일규, 김영, 윤영철, "Right/left-handed 전송 선로를 결합한 가변 대역 저지 필터", *한국전자과학회논문지*, 19(10), pp. 1122-1128, 2008년 10월.
- [18] L-H. Lin, M.De Vincentis, C. Caloz, and T. Itoh. "Arbitrary dual-band components using composite right/left-handed transmission lines", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol.

- 52, no. 4, pp. 1142-1149, Apr. 2004.
- [19] C. Caloz, T. Itoh, "Transmission line approach of Left-Handed (LH) materials and microstrip implementation of an artificial LH transmission lin", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, no. 5, May 2004.
- [20] 김승환, 손강호, 김일규, 김영, "메타 재질 구조를 이용한 가변 감쇠기 설계", 2008 한국항행학회 학술발표대회 및 워크숍, pp. 232-235, Oct. 2008.
- [21] C. W. Pobanz, T. Itoh, "A microwave noncontact identification transponder using subharmonic interrogation", *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. 43, pp. 1673-1679, Jul. 1995.
- [22] V. D. Hwang, T. Itoh, "Quasi-optical HEMT and MESFET self-oscillation mixers", *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. 36, pp. 1701-1705, Dec. 1988.
- [23] C. W. Pobanz, T. Itoh, "A microwave noncontact identification transponder using subharmonic interrogation", *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. 43, pp. 1673-1679, Jul. 1995.
- [24] V. D. Hwang, T. Itoh, "Quasi-optical HEMT and MESFET self-oscillation mixers", *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. 36, pp. 1701-1705, Dec. 1988.
- [25] 김영, "CRLH 전송 선로 리키 웨이브 안테나를 이용한 평형 믹서", 한국전자과학회논문지, 19(9), pp. 985-991, 2008년 9월.

≡ 필자소개 ≡

김 영



1988년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
 2002년 8월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)
 1988년 1월~1993년 5월: 이즈텔시스템즈(주) 연구소 선임연구원
 1993년 6월~1998년 2월: 삼성전자(주)

정보통신사업본부 선임연구원
 1998년 3월~2003년 2월: 두원공과대학 정보통신과 조교수
 2003년 3월~현재: 금오공과대학교 전자공학부 조교수
 [주 관심분야] RF 및 Microwave 회로해석 및 설계, 전력 증폭기 및 선형화기 설계

윤 영 철



1978년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
 1982년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)
 1989년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)
 1987년 9월~현재: 관동대학교 전자정

보통신공학부 교수
 [주 관심분야] RF 및 Microwave 회로설계