

논문 2008-45TC-11-8

# Composite Right/Left Handed 전송선과 PIN 다이오드를 이용한 이중대역 RF 스위치 연구

( Study of a Dual-band RF switch using a Composite Right/Left  
Handed Transmission Line and PIN Diode )

박 창 현\*, 최 병 하\*\*, 신 동 루\*, 성 원 모\*

( Chang-Hyun Park, Byung-Ha Choi, Dong-Ryul Shin, and Won-Mo Seong )

## 요 약

본 논문에서는 CRLH(Composite Right/Left Handed) 전송선과 PIN 다이오드를 이용한 이중대역 RF 스위치를 제안하였다. 일반적인 RF 스위치가 RH(Right Handed) 전송선 및 PIN 다이오드로 구성되는 것과는 달리, 제안된 RF 스위치는 CRLH 전송선을 이용함으로써 이중대역 특성을 만족하였다. 설계된 CRLH 전송선은 Open-Stub를 이용하여 PIN 다이오드 패키지 인덕턴스로 인한 격리도 감소를 해결하였다. RF 스위치는 GSM 주파수 대역인 900MHz와 DCS 주파수 대역인 1.8GHz의 이중 대역에서 설계 및 제작하였다.

## Abstract

This paper proposed a dual-band RF switch using a Composite Right/Left Handed transmission line(CRLH TL) and PIN diode. RF switch is usually consist of  $\lambda/4$  Right Handed transmission line(RH TL) and PIN diode. The dual band characteristics of RF switch was achieved by using CRLH transmission line instead of RH transmission line. CRLH Open-Stub was designed for resolve to reduction of isolation due to Package Inductance of PIN diode. The proposed RF switch was designed at GSM and DCS frequency-band. The measurement results showed a good agreement with theoretical result.

**Keywords :** RF Switch, Composite Right/Left Handed, PIN diode

## I. 서 론

초고주파대역의 시스템에서 다중 채널 신호경로를 가지는 경우, 원하지 않는 신호를 차단하는 RF 스위치가 필요하다. 또한 단일 안테나로 송수신하는 일체형의 시스템의 경우, 송신되는 고출력의 신호가 수신부로 유입되어 파손되는 것을 방지하기 위한 RF 스위치가 필요하다. 이러한 RF 스위치는 고출력, 높은 격리도, 낮은

삽입손실, 고속 스위칭 등이 가능해야 한다.<sup>[1]</sup> 일반적으로 많이 사용되어지는 RF 스위치 소자는 FET와 PIN 다이오드가 있다. FET는 고속 스위칭 및 낮은 전력소모의 장점을 가지지만, 고출력에 대한 선형성이 낮으며 높은 격리도를 얻기 어렵다. 이에 반해 PIN 다이오드를 이용한 RF 스위치는 고출력에도 뛰어난 선형성을 가지며, 특히 병렬 연결형 PIN 다이오드와 RH(Right-Handed) 전송선을 이용할 경우, 우수한 격리도를 구현할 수 있다.

RH 전송선과 PIN 다이오드를 이용한 RF 스위치는 구조 및 설계가 간단하며 단일 주파수에서 낮은 삽입손실 및 우수한 격리도를 구현할 수 있지만, 이중대역의 사용에는 제한을 가지며 이유는 다음과 같다.

\* 정희원, (주)이엠파블유 안테나 연구소  
(EMW Antenna Co., Ltd)

\*\* 평생회원, 목포해양대학교 해양전자통신공학부  
(Division of Marine Electronic & comm. Eng,  
Mokpo National Maritime University)

접수일자: 2008년7월21일, 수정완료일: 2008년11월14일

광대역에서 동일한 동작특성을 가지는 PIN 다이오드와는 달리 RH 전송선은  $-90^\circ$ 의 위상을 가지는 설계주파수 및 설계주파수의 기수배주파수에서만 동작특성이 만족된다. 이는 주파수증가에 따라 선형적인 위상변화를 가지는 RH 전송선을 이용하는 초고주파소자들의 일반적인 특성이다. 단 여기서 RH 전송선은 분산(Dispersion)에 의한 영향은 없는 조건하에서 고려된다. 이러한 RH 전송선의 위상변화특성으로 인해, PIN 다이오드 및 RH 전송선을 이용한 RF 스위치는 이중대역주파수 사용에 한계를 가진다.

본 논문에서는 RH 전송선을 대신하여 CRLH 전송선을 이용함으로써 이중대역의 동작특성을 만족하는 RF 스위치를 제안하였다. CRLH 전송선이란 일반적인 전송선, 즉 RH 전송선과 자연계에서 흔히 볼 수 없는 전기적 특성을 가지는 LH(Left-Handed) 전송선이 조합된 것이다. RH 전송선과는 달리 LH 전송선은 유전율 및 도전율이 음의 값을 가지며 이로 인해 위상과 군속도(Group velocity)가 서로 반대 방향, 음의 반사계수 등과 같은 특수한 전자기적 특성을 가진다. 하지만 이상적인 LH 전송선 구현은 전자파 전파에 따른 전류 및 전압의 유기로 인해 존재할 수 없으므로 RH 전송선의 특성이 조합된 것이 CRLH(Composite Right/Left Handed) 전송선이다.<sup>[2]</sup> 이러한 CRLH 전송선은 주파수에 따른 위상변화가 비선형적인 특징뿐만 아니라 양의 위상을 가질 수 있으며, 이를 이용하여 설계주파수 및 3체배 주파수와 동일한 동작 특성을 임의의 이중대역에서 얻을 수 있다.<sup>[3]</sup>

본 논문에서는 CRLH 전송선의 이중대역 설계 원리를 간략히 설명하였으며 이를 이용하여 RF 스위치를 설계 및 제작하였다. RF 스위치는 GSM 주파수대역과 DCS 주파수대역에서 설계되었으며 RF 스위치의 격리도 감소의 원인이 되는 PIN 다이오드 패키지 인덕턴스는 CRLH Open-Stub를 이용하여 해결하였다.

## II. 이중대역 RF 스위치 설계

### 2.1 RF 스위치 동작특성

RF 스위치 소자인 PIN 다이오드는 선형성이 뛰어나고 왜곡이 작으며 고속 동작이 가능한 소자로서 그림 1과 같이 등가회로 될 수 있다. 여기서  $L$  및  $R_s$ 는 다이오드의 패키지에 의한 기생성분이며  $C_j$  및  $R_j$ 는 다이오드의 자체 접합에 의해 발생하는 성분이다.<sup>[4]</sup>

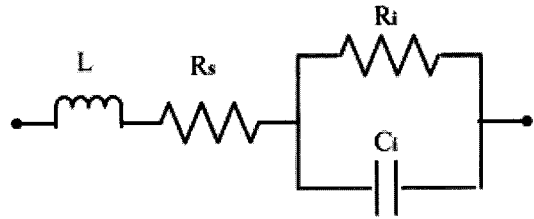


그림 1. PIN 다이오드 등가모델  
Fig. 1. PIN Diode equivalent circuit.

PIN 다이오드와 RH 전송선을 이용한 RF 스위치의 구조 및 이상적인 감쇄 동작은 그림 2와 같다.

바이어스가 인가되지 않거나 역방향 바이어스가 인가되면 병렬 연결된 PIN 다이오드는 이상적으로 무한대의 임피던스를 가지며 인가된 신호는 삽입손실 없이 통과된다. 하지만 순방향 바이어스가 인가되면 PIN 다이오드는 단락에 가까운 낮은 임피던스를 가지는 반면 단자 1에서 단자 2를 바라보는 입력 임피던스  $Z_{in}$ 는 무한대에 가까워지므로 인가된 신호는 병렬 연결된 PIN 다이오드를 통해 접지면으로 유입된다.

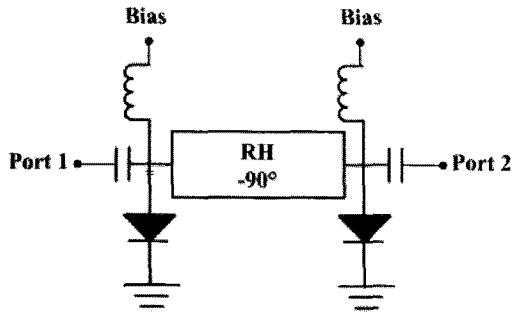
Bulk 칩 형태의 PIN 다이오드는 패키지 인덕턴스가 매우 낮는데 반해, 표면 실장형 PIN 다이오드는 패키지 인덕턴스가 높으며 이는 RF 스위치의 격리도 감소의 원인이 된다. 그럼으로 표면실장형 PIN 다이오드를 이용한 RF 스위치는 순방향 바이어스의 인가시 PIN 다이오드와의 단일 대역 공진을 이용하여 높은 격리도를 가지도록 구현한다.

### 2.2 이중대역 RF 스위치

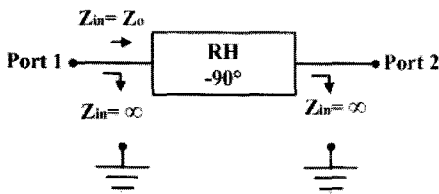
병렬연결형 PIN 다이오드와 전송선을 이용한 이중대역 RF 스위치를 설계하기 위해서는 설계주파수  $f_1$ 과  $f_2$ 에서 전송선의 동작특성이 동일해야 한다. 또한 PIN 다이오드 패키지 인덕턴스가 높을 경우, 이를 공진 혹은 정합을 통해 상쇄시켜주어야 한다. 여기서 설계주파수  $f_1$ 은 낮은 주파수를,  $f_2$ 는 높은 주파수를 의미한다.

일반적인 RF 스위치의 RH 전송선은 설계주파수  $f_1$ 에서  $-90^\circ$  위상을 가지도록 설계되면 기수배주파수에서만 동일한 동작특성을 만족한다. 반면 CRLH 전송선은 주파수변화에 따른 위상변화가 비선형적인 특성을 이용하여 설계되는 이중대역에서의 위상을 조절할 수 있으며 그 원리는 다음과 같다.

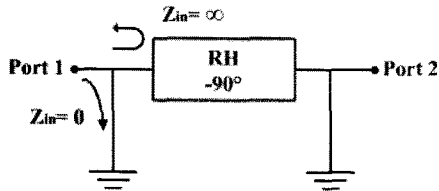
일반적인 CRLH 전송선은 단위 셀의 조합으로 구현되며 각 단위 셀은 RH 전송선과 LH 전송선이 통합된 구조를 가지며 그림 3과 같이 등가회로 되어 진다. RH 전



(a) RF 스위치 구조  
(a) Structure of RF Switch



(b) 역방향 바이어스  
(b) Reverse Bias



(c) 순방향 바이어스  
(c) Forward Bias

그림 2. RF 스위치 동작특성  
Fig. 2. Characteristics of RF Switch.

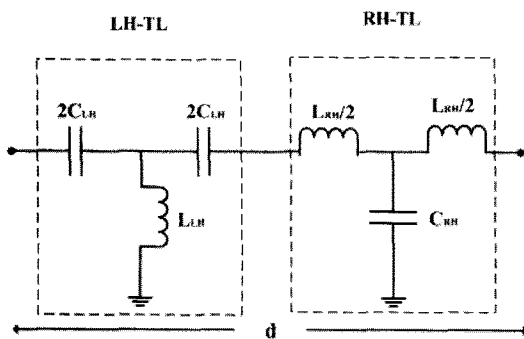


그림 3. CRLH전송선 단위셀  
Fig. 3. CRLH transmission line unit cell.

송선이 직렬 L과 병렬 C로 등가화 되는 것과는 달리, LH 전송선은 직렬 C와 병렬 L로 등가화 되어 진다.<sup>[4]</sup> 단 LH 전송선은 단위 셀로 이루어지며 셀의 크기 d는 관내파장이 1/4이하의 유효균질(Effective-homogeneity) 조건을 만족하여야만 한다. 이러한 CRLH 전송선 단위 셀의 위상은 식(1)과 같다.

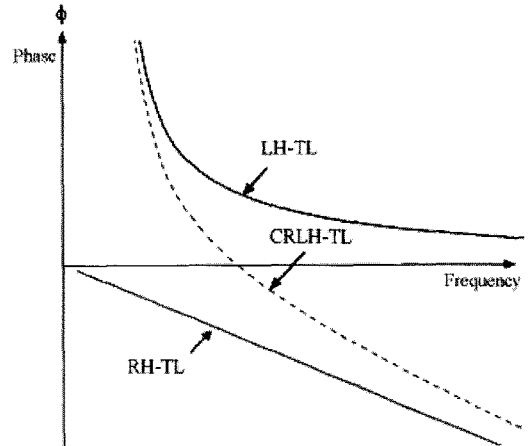


그림 4. 주파수에 따른 위상 변화  
Fig. 4. Phase deviation of frequency.

$$\Delta\phi_{CRLH} = -2\pi f \sqrt{L_R C_R} d + \frac{1}{2\pi f \sqrt{L_L C_L}} \quad (1)$$

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

CRLH 전송선은 단위 셀의 조합으로 이루어지며 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$\phi_{CRLH} = N \cdot \Delta\phi_{CRLH} \quad (2)$$

그림 4는 RH 전송선, LH 전송선, CRLH 전송선의 주파수변화에 따른 위상변화를 나타내었다. RH 전송선은 주파수변화에 따라 위상변화가 선형적이며 음의 값을 가지는데 반해 LH 전송선은 비선형적이며 양의 값을 가진다. RH 전송선과 LH 전송선의 조합인 CRLH 전송선은 낮은 주파수대역에서는 LH 전송선의 특성을, 높은 주파수대역에서는 RH 전송선의 특성을 가진다.

이러한 CRLH 전송선을 이용할 경우 RH 전송선과 LH 전송선의 조합을 이용하여 설계주파수  $f_1$ 에서 동작 특성을 만족하는 위상  $\phi_1$ 을,  $f_2$ 에서 동작특성을 만족하는 위상  $\phi_2$ 를 갖도록 설계할 수 있으며 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\phi_{CRLH}(f_1) = \phi_{RH}(f_1) + \phi_{LH}(f_1) = \phi_1 \quad (3-a)$$

$$\phi_{CRLH}(f_2) = \phi_{RH}(f_2) + \phi_{LH}(f_2) = \phi_2 \quad (3-b)$$

설계 주파수  $f_1$ 과  $f_2$ 가 결정될 경우 식 (3)의  $\sqrt{LC}$ 는 매칭 조건하에서 상수로 가정할 수 있으며 변수 및 식이 두 종인 함수의 풀이와 같으므로 LH 전송선의 L 과 C는 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$L_{LH} = \frac{N \cdot Z_0 \left(1 - \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2\right)}{2\pi f_1 \left(\phi_1 - \phi_2 \cdot \frac{f_1}{f_2}\right)} \quad (4-a)$$

$$C_{LH} = \frac{N \cdot \left(1 - \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^2\right)}{2\pi f_1 \left(\phi_1 - \phi_2 \cdot \frac{f_1}{f_2}\right)} \quad (4-b)$$

위의 식에서 N은 CRLH 전송선의 단위 셀 개수,  $\phi_1$ 는  $f_1$ 에서의 위상,  $\phi_2$ 는  $f_2$ 에서의 위상을 의미한다. RH 전송선은 주어진 LH 전송선을 이용하여  $\phi_{RH}(f)$ 를 구할 수 있으며 이를 이용하여 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$L_{RH} = \frac{Z_0 \cdot \phi_{LH}(f_1)}{2\pi f_1 \cdot N \cdot d} \quad (5-a)$$

$$C_{RH} = \frac{\phi_{RH}(f_1)}{2\pi f_1 \cdot Z_0 \cdot N \cdot d} \quad (5-b)$$

단 식 (4)-(5)은 다음 조건을 만족하여야만 한다.

$$\phi_1 \cdot f_2 > \phi_2 \cdot f_1 \quad (6)$$

위의 식을 이용한 CRLH 전송선 설계방법은 설계주파수  $f_1$ 에서  $-90^\circ$  및  $f_2$ 에서  $-270^\circ$ 의 위상 혹은  $f_1$ 에서  $+90^\circ$  및  $f_2$ 에서  $-90^\circ$ 를 가지도록 하여 동작특성을 만족시킨다.

병렬 연결형 PIN 다이오드구조에서 표면 실장형 PIN 다이오드를 이용할 경우, 격리도 감소의 원인이 되는 패키지 인덕턴스는 그림 5와 같이 CRLH Open-Stub를 이용하여 상쇄시킬 수 있다. 패키지 인덕

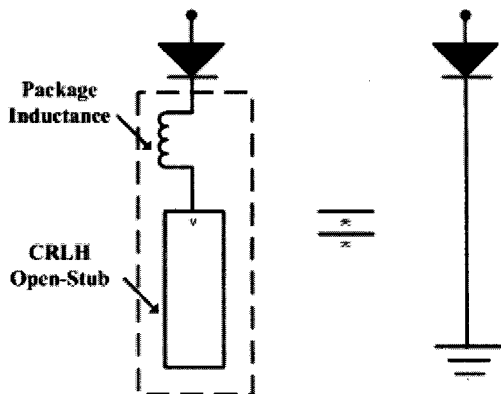


그림 5. CRLH 전송선을 이용한 이중대역 Open-Stub  
Fig. 5. Dual-Band Open-Stub using CRLH TL

턴스를 고려한 Open-Stub는 설계 주파수  $f_1$  및  $f_2$ 에서 접지면으로 등가화 될 수 있다. 여기서 CRLH Open-Stub는 CRLH 전송선의 설계 방법과 동일하며 패키지 인덕턴스 및 fringing field의 영향으로 전송선보다 짧은 길이를 가진다.

### III. 제작 및 측정결과

CRLH 전송선 및 PIN 다이오드를 이용한 이중대역 RF 스위치 구조는 그림 6과 같다.

설계 주파수  $f_1$ 은 GSM주파수대역인 900MHz를,  $f_2$ 는 DCS주파수대역인 1.8GHz를 선정하였으며 CRLH 전송선은 이중대역 특성을 만족하기 위해 900MHz에서  $+90^\circ$ , 1.8GHz에서  $-90^\circ$ 의 위상을 가지도록 설계되었다. CRLH 전송선의 설계 파라미터를 표 1에서 보여주고 있으며, 전송선중 RH 전송선은 마이크로스트립라인을, LH 전송선은 집중 LC 소자를 사용하였으며 집중 LC 소자 값이 유한함으로 인해 설계 값에 근사한 소자를 이용하였다.

제작에 사용된 기판은 유전율 4.4, 높이 0.8 mm의 FR-4이며 PIN 다이오드는 Infineon사의 BAR64-02V를 선정하였으며 등가 파라미터는 표 2와 같다.

선정된 PIN 다이오드는 표면실장형으로써 높은 패키지 인덕턴스를 가진다. 이러한 패키지 인덕턴스로 인한 격리도 감소문제를 해결하기 위해, 설계된 CRLH 전송선을 Open-Stub로 이용하였다.

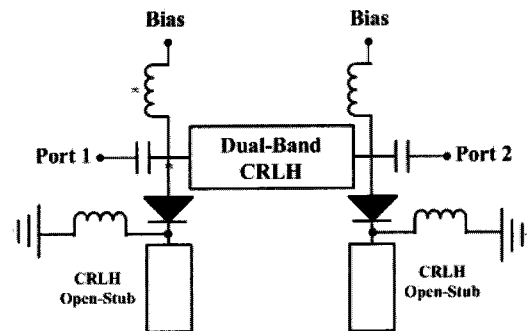


그림 6. 이중대역 RF 스위치 구조  
Fig. 6. Dual-Band RF Switch.

표 1. CRLH 전송선의 설계 파라미터  
Table 1. Design parameter of CRLH TL.

	Cell (N)	Lo (nH)	Co (pF)	d (mm)
Designed	4	11.26	4.5	46
Fabricated	4	10	4.7	46

표 2. PIN 다이오드 파라미터  
Table 2. Parameter of PIN Diode.

	L (nH)	C (pF)	Rs (Ω)	Ri (kΩ)
Value	0.6	0.17	0.8	3

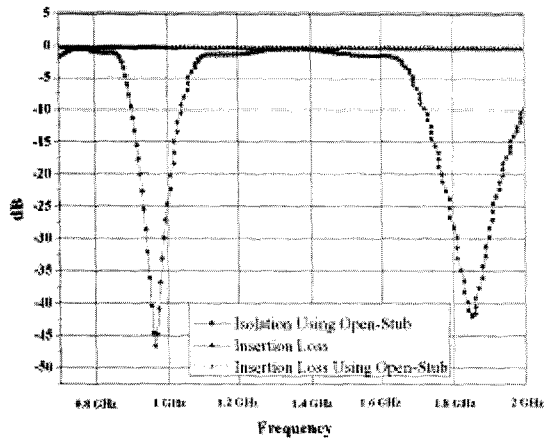


그림 7. 이중대역 RF 스위치 특성  
Fig. 7. Characteristics of Dual-Band RF switch.

그림 7은 선정된 PIN 다이오드에서 Open-Stub가 삽입된 경우의 이중대역 RF 스위치 격리도를 Agilent-ADS 2005A를 이용하여 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션 결과, 900MHz 대역에서 대역폭이 좁은 편이며 이는 패키지 인덕턴스를 고려한 CRLH Open-Stub가 주요 원인이 된다. 설계된 CRLH 전송선의 특성 중, 900MHz 대역은 LH된 CRLH 전송선의 삽입손실은 선정된 전송선 손실 및 특성이 중요하다. LH 전송선은 RH 전송선에 비해 저주파대역에서 주파수에 따른 위상 변화가 급격한 편이며 이는 패키지 인덕턴스를 고려한

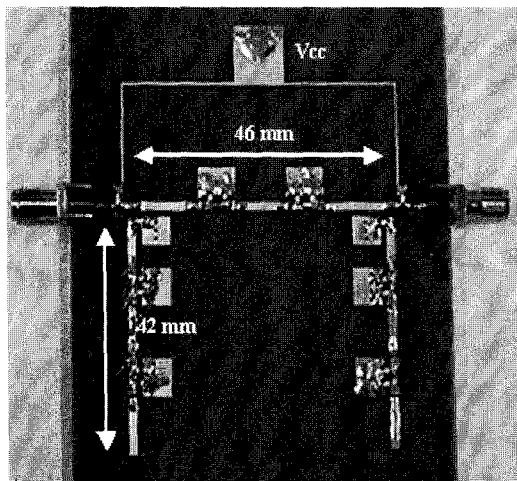
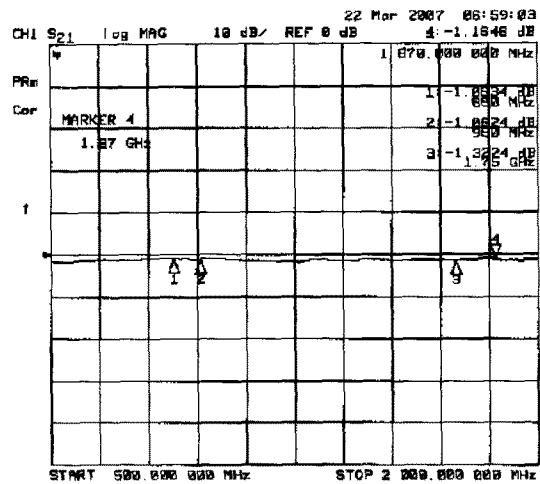


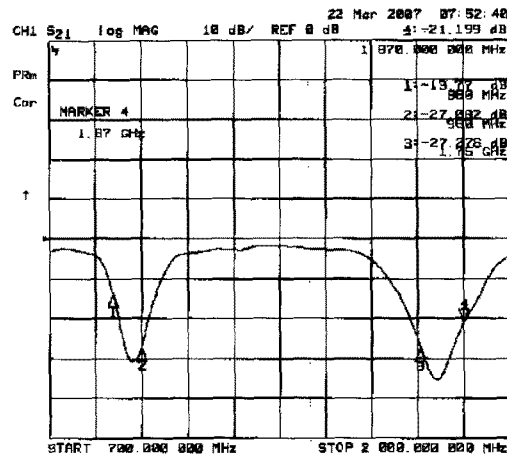
그림 8. 제작된 이중대역 RF 스위치  
Fig. 8. Fabricated Dual-Band RF switch.

표 3. 설계된 RF 스위치의 측정결과  
Table 3. Measured Result of Fabricated RF switch.

	Dual-band RF Switch
Insertion Loss	1.036-1.06(GSM)
	1.16-1.32(DCS)
Isolation	13.77-30.76(GSM)
	21.199-35.63(DCS)



(a) 삽입손실  
(a) Insertion loss



(b) 격리도  
(b) Isolation

그림 9. 이중대역 RF 스위치 측정결과  
Fig. 9. Measurement result of Dual-Band RF switch.

Open-Stub가 900MHz 대역에서 협대역 특성을 가지게 된다.

그림 8은 제작된 이중대역 RF 스위치를 나타내었으며 측정된 삽입손실 및 격리도 특성은 표 3과 같다.

측정된 삽입손실은 전송선 및 집중 LC소자로 인한

손실이며, 격리도는 0.9V의 바이어스 인가시 측정된 결과이며 시뮬레이션 결과와 매우 유사함을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 CRLH 전송선 및 PIN 다이오드를 이용한 이중대역 RF 스위치를 연구하였다. 종래의 이중대역 동작특성에 한계를 가지는 RH 전송선을 대신하여 4개의 단위 셀을 가지는 CRLH 전송선을 이용하였으며, 특히 이중대역에서 각각  $+90^\circ$  및  $-90^\circ$ 의 위상을 가지도록 설계하였다. 설계된 CRLH 전송선은 마이크로스트립 라인을 통해 RH 전송선을, 집중(Lumped) LC 소자를 통해 LH 전송선을 구현하였다. 선정된 표면실장형 PIN 다이오드의 패키지 인덕턴스로 인한 격리도 감소는 CRLH Open-Stub를 이용하여 해결하였다. 본 논문에서 제작된 RF 스위치는 이중대역의 특성을 만족하지만, CRLH 전송선 및 Open-Stub로 인해 협대역의 특성을 가지며 이는 900MHz 대역의 격리도 특성이 대역폭 내에서 큰 차이를 가지게 되는 단점을 가진다. 향후 Bulk

형태의 PIN 다이오드를 선정하여 제작할 경우, 이러한 협대역으로 인한 문제를 해결할 수 있을 것으로 사려 된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 주인권, 염인복, 박종홍, “높은 격리도와 고속 스위칭의 PIN 다이오드 스위치”, 한국전자과학회논문지, 16권 2호, 2005년 2월
- [2] C. Caloz, T. Itoh. Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Application. John Wiley & Sons, 2006.
- [3] I. H. Lin, M. Devincenis, C. Caloz, T. Itoh, “Arbitrary Dual-Band Components Using Composite Right/Left-Handed Transmission Lines”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 52, pp. 1142-1149, April. 2004.
- [4] 박면주, “LH Metamaterial의 마이크로파 응용”, 전자과학기술, 16권 4호, 2005년 10월

#### 저 자 소 개



**박 창 현**(정회원)  
2002년 2월 국립목포해양대학교  
전자통신공학부(공학사)  
2004년 2월 국립목포해양대학교  
전자통신공학과(공학석사)  
2006년 3월~현재 국립목포해양  
대학교 전자통신공학과  
(박사과정)

2005년12월~현재 (주)EMW Antenna  
선임연구원  
<주관심분야 : RFID, RF System, MMIC>



**신 동 룰**(정회원)  
2004년 2월 경북대학교 전자전기  
공학부(공학사)  
2006년 2월 경북대학교 전자공학  
(공학석사)  
2006년 1월~현재 (주) EMW  
Antenna 주임 연구원

<주관심분야 : 마이크로파 소자 및 시스템, RFID  
시스템>



**최 병 하**(평생회원)  
1969년 2월 한국항공대학교 항공  
전자공학과 공학사  
1981년 3월~1983년 2월 건국대학  
교 대학원 전자공학과  
공학석사  
1987년 통신 기술사

1988년 3월~1993년 2월 한국 항공대학교 대학원  
전자공학과 공학 박사  
1972년~현재 국립 목포해양대학교  
해양전자통신공학부 교수  
<주관심분야 : 안테나, 해상 이동통신 및 위성통  
신>



**성 원 모**(정회원)  
1995년 2월 단국대학교  
전자공학과 (공학사)  
1997년 2월 단국대학교  
전자공학과 (공학석사)  
2007년 2월 단국대학교  
전자공학과 (공학박사)

1998년 6월~현재 (주) EMW Antenna 연구소장  
<주관심분야 : 안테나 설계 및 해석>