

논문 2008-45TC-8-5

# Metamaterial을 이용한 이중대역 발룬의 설계

(Dual-Band Balun using Metamaterial)

오 회 석\*, 남 상 욱\*\*

(Heeseok Oh and Sangwook Nam)

## 요 약

본 논문에서는 이중대역에서 작동하는 발룬을 제안하고 모의실험을 실시하였다. 기본적인 형태는 Wilkinson Power Divider에서 출발하여 각 단자(Port)간의 고립도(Isolation)를 향상시키기 위하여  $\lambda/2$  전송선을 단자 2와 3 사이에 삽입하였고, 이중대역 및 크기의 소형화를 위해서  $\lambda/4$  길이의 전송선을 metamaterial 구조인 CRLH(Composite Right/Left-Handed) 형태와 D-CRLH(Dual Composite Right/Left-Handed) 형태를 사용하여 TDMB 주파수대역인 195MHz, 그리고 DVB-H 주파수대역인 670MHz에서 작동하는 발룬을 설계하였다. 제안된 구조로 설계된 발룬의 반사손실(return loss)에 대한 최소값은  $-12.98\text{dB}(S_{11})$ 이며, 고립도(isolation)는 최소  $-12.4\text{dB}$ , 그리고 출력신호간의 불균형은  $0.08\text{dB}$ 보다 작고, 위상오차는 최대  $2.8^\circ$ 이다.

## Abstract

This paper proposes a dual-band balun which is based on Wilkinson power divider. By inserting  $\lambda/2$  transmission line between port 2 and 3, this balun shows good matching at all ports and improved isolation. We use metamaterial(CRLH, D-CRLH) structure for a miniaturization of the circuit implementation and dual-band operation at TDMB frequency range(195MHz) and DVB-H frequency range(670MHz). The proposed balun is designed with return loss larger than  $-12.98\text{dB}$  at all port, and isolation larger than  $-12.4\text{dB}$ , the amplitude imbalance between output signals less than  $0.08\text{dB}$ , also phase differences of outputs less than  $2.8^\circ$ .

**Keywords :** Balun, Balance(unbalance) Signal, CRLH, D-CRLH, Improve Isolation and return loss.

## I. 서 론

이동 통신 서비스의 다양화에 따라 고속의 데이터 전송과 함께 이동 통신에 적합한 소형화, 다중대역 서비스에 대한 요구가 커지고 있다. 하지만 통신에 필요한 송수신 모듈의 경우에는 주파수에 따라 공진 구조의 크기나 위상응답이 정해져 있어 기존의 기술로는 마이크로파 소자의 소형화와 성능 향상 및 다중 주파수 대역에서 동작하는 구조와 같은 여러 가지 특성을 동시에 만족시키기가 힘들어진다. 따라서 기존의 기술을 극복

하여 더 새로운 구조 및 재료를 이용한 송수신 모듈의 부품 연구 개발 요구가 커지고 있으며 그 대안으로 meta-material이 최근 많은 관심을 끌고 있다.<sup>[1-3]</sup>

본 논문에서는 TDMB (Terrestrial Digital Multimedia Broadcasting) 주파수인  $f_1 = 195\text{MHz}$ 와 DVB-H(Digital Video Broadcasting - Handheld)에서 사용되는 주파수  $f_2 = 670\text{MHz}$ 에서 작동하는 이중대역 (Dual-band) 발룬을 설계하였다. 발룬은 Balanced signal에서의 Unbalanced signal로의 변환 혹은 그 반대의 변환기능을 수행하는 회로/구조물로서 출력 신호의 크기는 동일하지만 두 신호의 위상차가  $180^\circ$  발생하게 된다. 이는 다이폴 안테나에서와 같은 Feeding Network에서 unbalanced signal을 balanced signal로 변환해줌으로써 대칭적인 방사패턴을 이루어 안테나의 성능을 향상시킬 수 있다.<sup>[4]</sup>

II장에서는 이중밴드와 고립도(Isolation)개선을 위한

\* 학생회원, \*\* 정회원, 서울대학교 전기공학부  
(School of Electrical Engineering, Seoul National University, INMC)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT 핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였음. (2006-S018-03, 휴대방송 서비스가 가능한 초소형 안테나 기술 개발)

접수일자: 2008년7월20일, 수정완료일: 2008년8월4일

발룬의 구조적 접근방법과 III장에서는 제안된 구조의 각 소자(parameter)값을 통한 Simulation 결과를 제시할 것이며, IV장에서 본 논문의 결론을 맺도록 한다.

### II. 발룬의 구조

본 논문에 제안된 발룬의 구조는 그림 1의 Wilkinson Power Divider 구조를 바탕으로 한다.

1 : 1 Wilkinson Power Divider는 입력포트에 전력을 인가하면 전력의 크기와 위상이 동일하게 두 부분으로 나뉘어 두 개의 출력 포트에 나타난다. 입력포트와 두 개의 출력 포트 간의 고립도(Isolation)와 위상 특성을 확보하기 위해 특성 임피던스가  $\sqrt{2 \cdot Z_0}$ 이고, 길이가  $\pm\lambda/4$ 인 전송선로를 이용한다.<sup>[5]</sup> 또한 기존의  $\pm\lambda/4$  발룬과<sup>[6]</sup> 달리 2번 포트와 3번 포트 사이에  $\pm\lambda/2$  Line을 삽입함으로써 두 출력 포트간의 고립도(Isolation)를 개선하였으며 R=100Ω을 2번 포트와 3번 포트간의 대칭성을 위해  $\lambda/2$  좌, 우측에 각각 50Ω씩 삽입하였다. 이 회로의 특성은 출력포트에서 대칭 신호원과 비대칭 신호원으로 구동되는 두 개의 회로(우수-기수모드)로 나누어 해석할 수 있다.

간단히 하기 위해 모든 임피던스를 특성 임피던스  $Z_0$ 으로 정규화하고 출력 포트에 전압원을 연결한다. 이 회로는 중앙면에 대해 대칭으로 그릴 수 있다.  $\lambda/4$  전송선로는 정규화 특성 임피던스가 Z이며 병렬저항은 정규화 값 r을 가진다. 그림 2-(b)의 회로와 같이 우수 모드인 경우  $V_{g2}=V_{g3}=2V$ 이므로  $V_2^e=V_3^e$ 이다. 포트 2를 볼 때 병렬 연결된 전송 선로 길이가  $\lambda/4$  이고 포트 1에서 단락되어 포트 2에서는 개방회로처럼 보이므로 임피던스가 r/2로 된다. 따라서 r=2로 정의하면 포트 2는 정

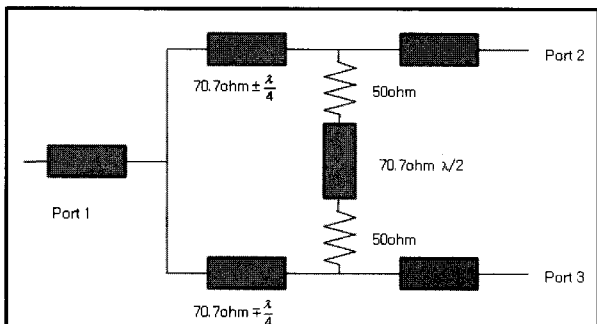


그림 1. Wilkinson Power Divider 구조를 이용한 제안된 발룬 구조  
Fig. 1. Proposed Balun structure with the Wilkinson Power Divider

합된다. 이때,  $V_2^e=V$  이고,  $V_1^e=0$  이다. 그림 2-(c)의 회로와 같이 기수 모드일 경우  $V_{g2}=-V_{g3}=2V$ 이므로  $V_2^o=-V_3^o$ 이며,  $\lambda/4$  단락회로는 개방회로와 같다. 이때 포트 2를 본 임피던스는 전송선로가  $\lambda/4$  임피던스 변환기와 같으므로  $Z_{in}^o=Z^2/2$  이다. 따라서  $Z=\sqrt{2}$ 이면 포트 2는 정합된다. 이때  $Z_{in}^o=1$ 이므로  $V_2^o=V$ 이다. 다음에 전송선로 방정식으로부터  $V_1^e$ 를 구한다. 포트 1을  $\chi=0$  포트 2를  $\chi=\lambda/4$ 로 놓으면 전송 선로상의 전압은 다음과 같다.

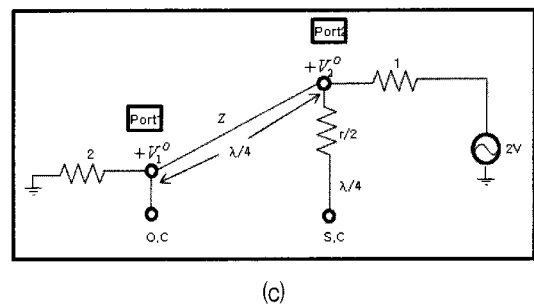
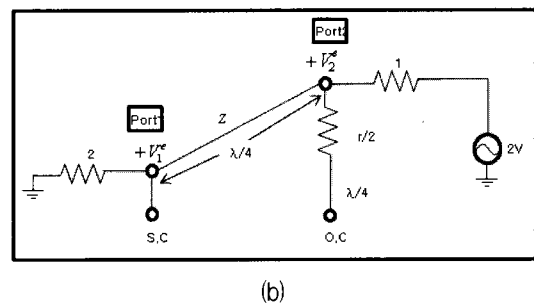
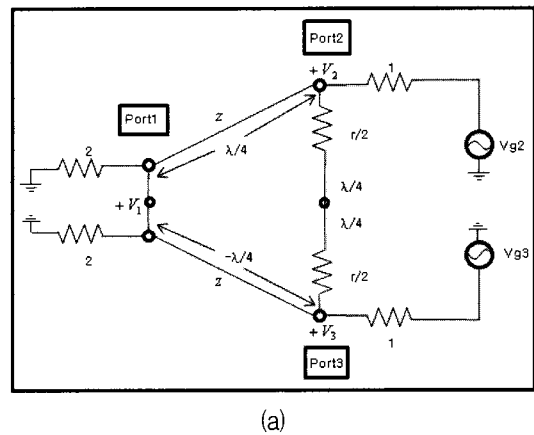


그림 2. 제안된 발룬의 우수-기수 모드  
(a) 제안된 발룬의 정규화된 회로 구조  
(b) 우수 모드 급전  
(c) 기수 모드 급전  
Fig. 2. Evne- and Odd- mode decomposition of proposed dual band Balun.  
(a) The proposed Balun circuit in normalized  
(b) Even-mode excitation  
(c) Odd-mode excitation

$$V(\chi) = V^+(e^{-j\beta\chi} + \Gamma e^{j\beta\chi}) \quad (1)$$

따라서 각 포트에서의 전압은

$$V_2^o = V(\lambda/4) = -jV^+(1-\Gamma) = V \quad (2)$$

$$V_1^o = V(0) = V^+(1+\Gamma) = jV \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \quad (3)$$

이고, 반사 계수  $\Gamma$ 는 포트 1에서 정규화(normalized)된 저항값이 2인 저항을 볼 때의 것으로

$$\Gamma = \frac{2-\sqrt{2}}{2+\sqrt{2}} \quad (4)$$

$$V_1^o = jV\sqrt{2} \quad (5)$$

이다.

이를 종합하면 다음과 같은 결과를 얻게 된다.

$$S_{11} = 0$$

$$S_{22} = S_{33} = 0$$

$$S_{12} = S_{21} = \frac{V_1^e + V_1^o}{V_2^e + V_2^o} = \frac{j}{\sqrt{2}}$$

$$S_{13} = S_{31} = \frac{-j}{\sqrt{2}}$$

$$S_{23} = S_{32} = 0$$

이를 바탕으로 이중 대역에서 동작하기 위하여 입력 포트와 출력 포트간의  $\lambda/4$  Line은 그림 3에서와 같이 각각 CRLH(Composite Right/Left handed) 구조와 D-CRLH(Dual Composite Right/Left Handed) 구조를 사용하였다.

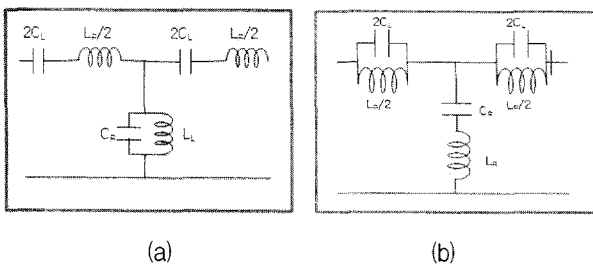


그림 3. CRLH, D-CRLH 전송선의 구조 ( 1 단위 셀)  
 (a) CRLH 전송선의 구조  
 (b) D-CRLH 전송선의 구조

Fig. 3. Structure of Transmission line ( 1 unit cell).  
 (a) Structure of CRLH Transmission line  
 (b) Structure of D-CRLH Transmission line

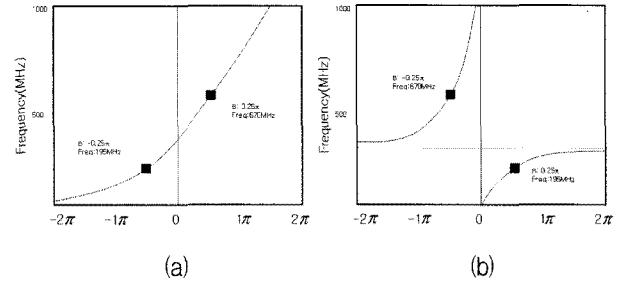


그림 4. CRLH, D-CRLH 전송선의 dispersion 그래프  
 (a) CRLH 전송선의 dispersion 그래프  
 (b) D-CRLH 전송선의 dispersion 그래프

Fig. 4. Dispersion graph of CRLH, D-CRLH Transmission line.

(a) dispersion graph of CRLH Transmission line  
 (b) dispersion graph of D-CRLH Transmission line

이는 그림 4에서 알 수 있듯이 D-CRLH 전송선은 저주파에서 직렬 인덕턴스( $L_R$ )와 병렬 캐패시턴스( $C_R$ )가 주 성분이 되어 RH 특성을 보이게 되며 주파수가 높아질수록 직렬 캐패시턴스( $C_L$ )와 병렬 인덕턴스( $L_L$ )가 주 성분이 되어 전송선은 LH특성을 가지게 된다. 반면, CRLH 전송선은 D-CRLH 전송선과 달리 저주파에서는 LH특성을 고주파에서는 RH 특성을 가진다.

밸런스 특성을 갖는 CRLH 전송선의 전파 상수와 특성 임피던스는 각각 식 (6)과 (7)와 같이 표현된다.<sup>[7]</sup>

$$\beta = w\sqrt{L_R C_R'} - \frac{1}{w\sqrt{L_L C_L}} \quad (6)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{L_R'}{C_R'}} = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} \quad (7)$$

CRLH 전송선이 임피던스  $Z_t$ 로 정합되고  $\omega_1$ 과  $\omega_2$ 의 이중대역에서 각각 전송 상수  $\beta_1$ 과  $\beta_2$ 를 갖는 조건은 식 (8)과 (9)와 같이 주어진다.<sup>[7]</sup>

$$Z_c = Z_t \quad (8)$$

$$\beta(\omega_1) = \beta_1, \beta(\omega_2) = \beta_2 \quad (9)$$

여기서 (8)의 매칭 조건은 2개의 방정식으로 나누어 지므로 식(7)에 대입하면 2개의 식을 얻게 되어 총 4개의 방정식을 얻을 수 있다. 이러한 4개의 방정식에 4개의 미지수  $L_R', C_L', C_R', L_L'$ 이 존재하므로 CRLH 전송선 등가회로의 파라미터 값들을 구할 수 있으며 그 값들은 다음과 같다.<sup>[7]</sup>

$$L'_L = \frac{Zt [1 - (w_1/w_2)^2]}{w_1 [(w_1/w_2)\beta_2 - \beta_1]}$$

$$C'_L = \frac{1 - (w_1/w_2)^2}{w_1 Zt [(w_1/w_2)\beta_2 - \beta_1]}$$

$$L'_R = \frac{Zt [\beta_2 - \beta_1 (w_1/w_2)]}{w_2 [1 - (w_1/w_2)^2]}$$

$$C'_R = \frac{\beta_2 - \beta_1 (w_1/w_2)}{w_2 Zt [1 - (w_1/w_2)^2]}$$

위와 같이 CRLH 전송선을 이용하면 임의의 이중대역에서 원하는 전송상수를 얻을 수 있다. 또한 일반적인 CRLH 전송선과 Dual 관계에 있는 Dual Composite Right/Left Handed(D-CRLH) 전송선 이론<sup>[8]</sup>을 이용하게 되면 이중대역 발룬을 구현할 수 있게 된다. 여기서는 2개의 단위 셀(Unit cell)을 'T-type' 형태로 설계하였으며 D-CRLH의 각 소자 값들은 다음과 같으며 표 1에 정리 하였다.<sup>[7]</sup>

$$L_r = \frac{Z_l [1 - (w_1/w_2)^2]}{w_1 [2 \times b_1 - (2b_2 w_1/w_2)]}$$

$$C_r = \frac{1 - (w_1/w_2)^2}{Z_l w_1 [2\beta_1 - (2\beta_2 w_1/w_2)]}$$

$$L_l = \frac{Z_l [(2\beta_1 w_1/w_2) - 2\beta_2]}{w_2 [1 - (w_1/w_2)^2]}$$

$$C_l = \frac{(2\beta_1 w_1/w_2) - 2\beta_2}{w_2 Z_l [1 - (w_1/w_2)^2]}$$

하지만, D-CRLH 전송선을 구현하기 위해서는 항상 Right-Handed 파트가 기생적으로 생길 수밖에 없으며

표 1. 이중대역 발룬의 각 소자의 이론값  
Table 1. The values of each parameter before optimization.

	L'R	C'L	C'R	L'L
CRLH ( $\Theta=\pi/2$ )	18.6 nH	10.4 pF	3.4 pF	52.1 nH
D-CRLH ( $\Theta=\pi/2$ )	26 nH	6.8 pF	5.2 pF	37.2 nH
CRLH ( $\Theta=\pi$ )	37.2 nH	5.2 pF	6.8 pF	26 nH

표 2. 이중대역 발룬의 각 소자 값

Table 2. The values of each parameter after optimization.

	L'R	C'L	C'R	L'L
CRLH ( $\Theta=\pi/2$ )	15 nH	13 pF	3.9 pF	47 nH
D-CRLH ( $\Theta=\pi/2$ )	27 nH	8 pF	6.8 pF	39 nH
CRLH ( $\Theta=\pi$ )	24 nH	11 pF	9 pF	16 nH

실제 제작을 위한 각 parameter 값을 고려하여 최적화(Optimization) 된 값을 도출하면 표 2와 같다.

### III. 모의실험

설계된 이중대역 발룬은 그림 5와 같다.

각각의  $\lambda/4$  부분은  $f_1, f_2$ 에 대해 CRLH를 통한 (+90°, -90°), 그리고 D-CRLH 구조를 통한(-90°, +90°) 위상변화를 유도함으로써 각 출력포트에 180° 위상차와 1:1의 전력을 유도하였다. 이에 따른 모의실험의 결과는 그림 6에 나타나있다.  $f_1 = 195\text{MHz}$ 에서의 전력분배는  $S_{21}, S_{31}$  값을 살펴보면 각각 -3.35dB, -3.4dB이며 위상 변화는 -114.4°, 64.8°의 위상차가 발생함을 확인할 수 있다. 또한  $f_2 = 670\text{MHz}$ 에서의  $S_{21}, S_{31}$  값을 살펴보면 각각 -3.32dB, -3.29dB이며 위상 변화는 27.9°, -149.2°의 위상차가 발생함을 확인할 수 있다. Return loss의 경우  $f_1$ 에서의  $S_{11}, S_{22}, S_{33}$ , 각각 -21.2dB, -18.7dB, -19.3dB이며  $f_2$ 에서의  $S_{11}, S_{22}, S_{33}$ , 각각 -13dB, -27.1dB, -37.9dB로 나타나며 Isolation( $S_{23}$ )  $f_1$ 에서 -17.85dB,  $f_2$ 에서 -12.44dB값을 보이며 이를 표 3에 종합하였다.

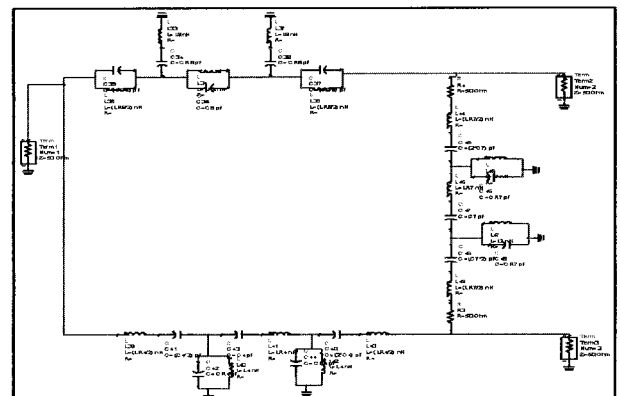
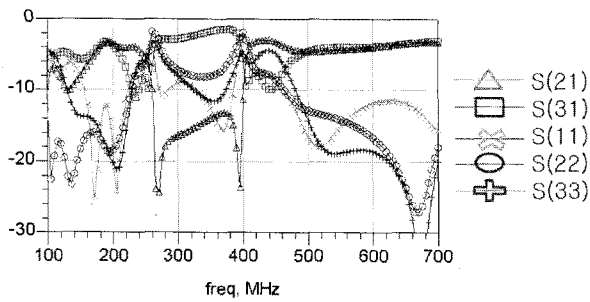
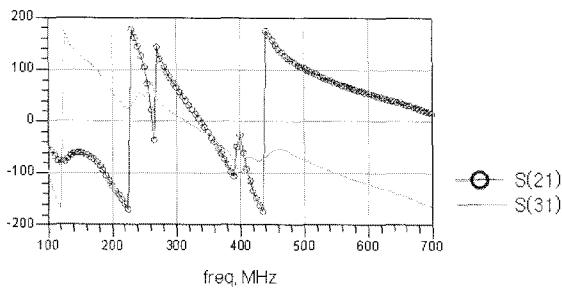


그림 5. 제안된 발룬의 구조  
Fig. 5. Balun's Schematic.



(a)



(b)

그림 6. 모의실험 결과

(a) S-parameter 측정 (b) 위상 측정

Fig. 6. Simulation result.

(a) S-parameter Simulation result

(b) Phase Simulation result

표 3. 모의실험 결과

Table 3. Simulation result.

	Simulation Results	
	195MHz	670MHz
Output( $S_{21}$ ) [dB]	-3.35	-3.32
Output( $S_{31}$ ) [dB]	-3.43	-3.29
Output imbalance [dB]	0.08	0.03
1dB BW [%]	25.6	37.9
Phase balance [deg]	$180 \pm 10^\circ$	$180 \pm 10^\circ$
Frequency range [MHz]	148~222	462~757
BW [%]	37.9	44
Isolation [dB]	< -10	< -10
Frequency range [MHz]	131~242	532~798
BW [%]	57	39.7
Return loss [dB]	< -10	< -10
$S_{11}$ Frequency range [MHz] /BW [%]	156~223/ 34.4	464~739/ 41
$S_{22}$ Frequency range [MHz] /BW [%]	98~228/ 66.7	465~741/ 41.2
$S_{33}$ Frequency range [MHz] /BW [%]	130~229/ 51	482~741/ 38.7

#### IV. 결 론

본 논문에서는 CRLH, D-CRLH 전송선을 이용한 이중대역( $f_1, f_2$ ) 발륜을 제안하고 설계해 보았다. 설계된

이중대역 발륜은 두 주파수에서의 출력 신호간의 불균형은 0.08dB보다 작았으며, 위상오차는  $2.8^\circ$ 보다 작음을 확인할 수 있었다. 그리고 고립도(Isolation)의 최소값이 12.4dB이며 return loss의 최소값은 -12.98dB을 확인 하였다. 설계된 회로는 집중소자(Lumped element)만으로 구성되어 있어서 마이크로파 대역 소자에 대해 metamaterial 구조를 이용할 경우 효율 향상 및 소자의 소형화 등에 많은 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다.

#### 참고 문헌

- [1] Anthony Lai, Tatsuo Itoh and Christophe Caloz, "Composite Right/Left-Handed Transmission Line Metamaterials," IEEE Microwave Magazine, pp. 34-50, 2004 .
- [2] Marco A. Antoniade ,and George V. Eleftheriades, "A Broadband Wilkinson Balun Using Microstrip Metamaterial Lines," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Vol. 4, pp. 209-212, 2005.
- [3] Seungjun Lee, Jong-sik Lim, Hoe-sung Yang, and Sangwook Nam, "A Novel Design of Balun using Left-Handed Transmission Line," Proceedings of ISAP 2005, Seoul, Korea, pp.503-506, Aug. 2005.
- [4] Warren L. Stutzman, and Gary A. Thiele, "Antenna Theory and Design 2nd edition," Wiley, pp.180-187, 1998.
- [5] David M. Pozar, "Microwave engineering 2nd edition," Wiley, pp.363-365, 1998.\
- [6] Jung-Hyun Sung, Geun-Young Kim, Seok-Ho Son, Hyo-Jong Lee, Young-Joo Song, Yong-Woo Jeong, Hyung-Sik Park, Dal Ahn, "Design Method of a Dual Band Balun and Divider," IEEE MTT-S Digest, pp.1177-1180, 2002.
- [7] Christophe Caloz, and Tatsuo Itoh, "Electromagnetic metamaterials: Theory and Microwave applications," Wiley, pp.193-197, 2006.
- [8] Christophe Caloz, "Dual Composite Right/Left-Handed(D-CRLH) Transmission Line Metamaterial," IEEE Microwave and wireless components letter, Vol. 16, pp. 585-587, 2006.

## 저 자 소 개



오 희 석(학생회원)

2001년 공군사관학교 전자공학과  
학사 졸업.

2007년~현재 서울대학교 전자  
공학과 석사과정.

<주관심분야 : metamaterial,  
radar>



남 상 옥(정회원)

1981년 서울대학교 전자공학과  
학사 졸업.

1983년 KAIST 전자공학과 석사  
졸업.

1989년 Electrical engineering at  
the University of Texas  
at Austin 박사 졸업

1990년~현재 서울대학교 전기공학부 교수

<주관심분야 : 마이크로파 능동/수동회로 설계,  
안테나 및 전파전파, 전자파 수치해석>