

# Balun-BPF 특성 구현을 위한 3-단자 링-공진기의 해석

## An Analysis of Three Port Ring Resonator for the Balun-BPF Characteristics

강성준 · 박응희 · 황희용

Seong-Jun Kang · Ung-Hee Park · Hee-Yong Hwang

### 요약

본 논문은 최근 발표된 이중 모드 링-공진기를 이용한 Balun-BPF를 3-단자 회로망 분석 방법을 이용하여 전체 어드미턴스 파라미터를 유도하고 이를 이용하여 Balun의 특성을 만족함을 수식적으로 증명하였다. BPF의 표준 설계법을 적용하여 손쉽게 임의의 특성을 갖는 Balun-BPF 설계가 가능하도록 Balun 동작 상태에서의 이미턴스 슬로프 파라미터를 도출하고, Balun-BPF 양단의 감쇄각 주파수를 예측하는 방법을 제시하였다. 회로 시뮬레이션과 실제 제작·측정을 통해 제안된 해석식들을 검증하였다. 제작된 Balun-BPF는 중심 주파수 2.46 GHz에서 71 MHz 대역폭과 삽입 손실 0.92 dB를 가지며, 174~181°의 위상 특성과 0.5 dB 이내의 크기 특성을 나타내었다.

### Abstract

In this paper, we derived the *Y*-parameter of the recently reported Balun-BPF with a dual mode ring resonator by using the network analysis method. Using the derived *Y*-parameter we verified that the Balun-BPF structure satisfy the balun conditions. In order to design the Balun-BPF with arbitrary characteristics using the standard BPF design method with ease we derived the immittance slope parameters of the dual mode ring resonator with a load. The notch frequencies are also predicted. By designing with the proposed equations, simulating with a circuit simulator, fabricated and measured a Balun-BPF we confirmed the validation of the equations. The measured data shows bandwidth of 71 MHz and insertion loss of 0.92 dB at the center frequency of 2.46 GHz. It shows the phase imbalance of 174~181 degree and the magnitude imbalance within 0.5 dB.

Key words : Balun, BPF, Balun-BPF, Dual-Mode, Ring Resonator

### I. 서론

최근 무선 랜, 블루투스, WiBro, DMB, GPS, UWB 등의 무선 통신 기술이 발달함에 따라 통신 모듈의 성능뿐만 아니라 소형화 및 집적화에 대한 중요성이 대두되고 있다. 현재 반도체 공정 기반의 집적 기술로 인해 능동 소자 집적 기술은 이미 보편화된 기술이 되었지만, 안테나, 여파기, 발룬, 커플러, 믹서 등

의 수동 소자 집적 기술은 아직 많은 연구가 필요하고, 수동 소자의 집적도 및 성능의 차이가 곧바로 전체 시스템의 차이를 결정짓는 중요 요소가 되었다. 최근에 수동 소자들은 LTCC 기술이나 Embedded-PCB 기술을 이용하여 집적시킴으로써 전체 시스템의 소형화를 기대할 수 있지만, 이러한 기술들은 설계와 제작상의 많은 어려움을 갖고 있다<sup>[1][2]</sup>.

이 수동 소자들 중에서 발룬은 초고주파 회로 상

「본 논문은 2007년도 강원대학교 캠퍼스간 공동연구비로 연구되었습니다.」

강원대학교 IT특성화학부대학(College of Information Technology, Kangwon National University)

· 논문 번호 : 20071231-152

· 수정완료일자 : 2008년 2월 25일

에서 믹서나 증폭기같이 평형 신호를 사용하는 부품과 불평형 신호를 입출력으로 하는 부품들의 상호 연결로서 특정 주파수 영역에서 두 출력단이 같은 크기와  $180^\circ$  위상차를 가지며, 보통 안테나나 저잡음 증폭기, 믹서 등과 연결된다<sup>[1]~[6]</sup>. 그리고 초고주파 회로에서 안테나를 통해 들어온 신호는 여파기와 발룬으로 연결되어 LNA를 포함한 MIC 또는 MIC와 주파수 믹서 사이를 통과하는 것이 일반적이다. 따라서 이와 같이 흔히 직결되어 같이 쓰이는 여파기와 발룬의 합성은 전체적인 모듈의 크기의 소형화를 가져올 수 있으므로, 최근 발룬과 대역 통과 여파기를 단일 구조로 설계한 부품으로서 이중 모드 링-공진기를 이용한 Balun-BPF<sup>[1],[2]</sup>가 제안되었다.

하지만 기존 Balun-BPF의 구조에 대한 해석식이 제시되지 않아 임의의 특성의 Balun-BPF의 설계에는 많은 반복 설계의 한계가 있었다.

이에 본 논문에서는 회로망 분석을 통하여 이 Balun-BPF의  $Y$ -파라미터를 추출하고 이 구조가 Balun의 일반적인 특성을 만족함을 보이며, 표준적인 대역 통과 여파기 설계를 위해 이중 모드 공진점에서의 이미턴스 슬로프 파라미터를 유도하고, 감쇄극 주파수의 예측 방법을 제시한다. 그리고 실제 설계 및 제작을 통하여 제안된 식들을 확인한다.

## II. Balun-BPF의 해석

### 2-1 Balun-BPF의 전체 구조식

그림 1은 원하는 BPF 특성을 구현하기 위하여 초단과 종단에  $\lambda/4$ -전송 선로 인버터를 이용한 Balun-BPF의 구조이다.

식 (1)은 3-포트로 구성된 회로의 일반적인 어드미턴스 행렬식이다.

$$Y_T = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix}$$

$$Y_{ij} = \left. \frac{I_i}{V_j} \right|_{V_k=0 \text{ for } k \neq j} \quad (1)$$

그림 1의 Balun-BPF의 링 부분의 전송 선로들을  $\pi$ -등가회로로 나타내고, 식 (1)의 정의식을 이용하면 Balun-BPF의 링부분의 어드미턴스 행렬을 식 (2)

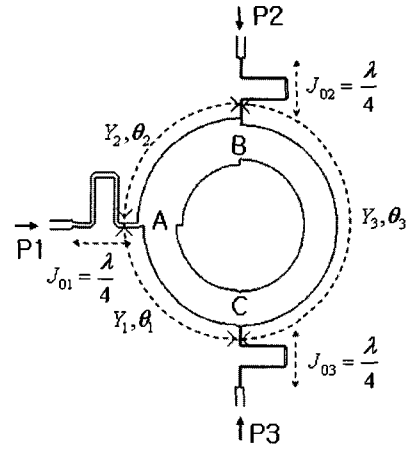


그림 1. Balun-BPF의 구조

Fig. 1. Structure of Balun-BPF.

와 같이 쉽게 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} Y_{11} &= -j(Y_1 \cot \theta_1 + Y_2 \cot \theta_2) \\ Y_{22} &= -j(Y_2 \cot \theta_2 + Y_3 \cot \theta_3) \\ Y_{33} &= -j(Y_1 \cot \theta_1 + Y_3 \cot \theta_3) \\ Y_{12} &= Y_{21} = jY_2 \csc \theta_2 \\ Y_{13} &= Y_{31} = jY_1 \csc \theta_1 \\ Y_{23} &= Y_{32} = jY_3 \csc \theta_3 \end{aligned} \quad (2)$$

등방성 매질에서 3-포트로 구성된 회로망은 가역성, 무손실, 모든 포트 매칭의 3가지 특성을 모두 만족할 수 없기<sup>[7]</sup> 때문에, 식 (2)에서  $Y$ -파라미터들은 가역성과 무손실의 특성은 만족하지만, 모든 포트의 매칭은 불가능하여 Balun-BPF의  $J_{01}$ 과  $J_{02}$ 의 값은 다른 값을 갖게 된다.

Balun-BPF의 포트 1과 2 및 포트 1과 3 사이에서의 대역 통과 특성을 확인하기 위하여 식 (2)의 3차 어드미턴스 행렬을 포트 1과 2에 관계된 2차 어드미턴스 행렬로 변환한다. 포트 1과 2의 관계에서 포트 3은  $50 \Omega$  종단으로 표현할 수 있다.

링 공진기의 C 지점에서 포트 3을 바라본 어드미턴스를  $Y_{03}$ 으로 놓고 정리한다. 식 (3)은 포트 1과 2의 어드미턴스 행렬이다. 여기서 포트 1과 3의 어드미턴스 행렬은 Balun-BPF의 구조적 대칭성 때문에 포트 1과 2의 어드미턴스 행렬에서  $Y_1$ 을  $Y_2$ 로,  $Y_{03}$ 을  $Y_{02}$ 로 치환함으로써 쉽게 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Y_{11} &= \frac{2A(B - jY_{03}D) - (2Y_1Y_2 + AY_3)F^2}{2(Y_{03} - j(Y_1D + Y_3E))} \\
 Y_{12} &= jF \left( Y_2 + \frac{Y_1Y_3G}{jY_{03} + Y_1D + Y_3E} \right) \\
 Y_{21} &= Y_{12} \\
 &\quad - (2Y_1Y_2 + AY_3)F^2 + 2BC \\
 Y_{22} &= \frac{-j((2Y_2 + Y_3)Y_{03}D + Y_3Y_{03}\tan\theta_1)}{2(Y_{03} - j(Y_1D + Y_3E))}
 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서,  $A=Y_1+Y_2$ ,  $B=Y_1+Y_3$ ,  $C=Y_2+Y_3$ ,  $D=\cot\theta_1$ ,  $E=\cot\theta_3$ ,  $F=\csc\theta_1$ ,  $G=\csc\theta_3$ 이고,  $\theta_1=\theta_2$ 라고 가정 후 가역성을 만족하기 때문에 그림 2의 등가회로로 표현할 수 있다. 그림 2의 등가회로를 그림 3의 인버터를 포함한 2단 BPF의 등가회로에 등가시키면,  $\pi$ -형 등가회로는 그림 3의 점선으로 표시한 부분인  $J_{12}$ 와 두 개의 공진기로 표현할 수 있다. 그림 2의  $Y_{12}$ 는 인버터 값으로 등가되기 때문에 식 (3)의  $Y_{12}$ 에 중심 주파수( $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ )를 대입해 주면 식 (4)를 구할 수 있다.

$$J_{12}|_{\omega=\omega_0} = |Y_1 - Y_2| \tag{4}$$

### 2-2 슬로프 파라미터

식 (3)을 일반적인 어드미턴스 슬로프 파라미터

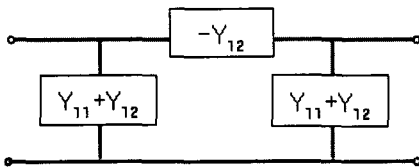


그림 2. 가역성을 갖는 2-포트 회로의  $\pi$ -형 등가회로  
Fig. 2. The  $\pi$ -type equivalent circuit for a reciprocal 2-port circuit.

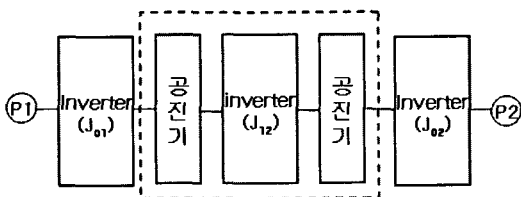


그림 3.  $J$  인버터를 갖는 2단 BPF 등가회로  
Fig. 3. The equivalent circuit for a 2-resonator BPF using  $J$ -inverter.

정의식 (5)에 대입해 주면 식 (6)과 같은 슬로프 파라미터를 구할 수 있다. 그림 1의 C점에서 포트 3을 바라본 임피던스  $Y_{03}$ 이 존재하므로 어드미턴스 행렬의  $Y_{11}, Y_{22}$ 의 값이 다르게 되어 두 개의 공진기는 서로 약간 다른 슬로프 파라미터를 가지게 된다.

$$b = \frac{\omega_0}{2} \left. \frac{dB(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} \tag{5}$$

$$b_1 = \frac{\pi}{4} \left( Y_1 + Y_2 + 2 \frac{Y_1^2}{Y_3} \right)$$

$$b_2 = \frac{\pi}{4} \left( Y_1 + Y_2 + 2 \frac{Y_3^2 - Y_{03}^2}{Y_3} \right) \tag{6}$$

### 2-3 Balun 특성

포트 1에서 보았을 때 포트 2와 3은 물리적으로 같은 길이를 갖기 때문에 위상차가 나타나지 않을 것으로 보이지만 포트 1로 입력된 신호는  $Y_1$  선로와  $Y_2$  선로로 똑같이 나누어지지 않고, 두 선로의 임피던스의 차에 의해서 주요하게 흐르는 방향이 결정되고 반파장의  $Y_3$  선로에 의해 포트 2와 3은  $180^\circ$  위상차를 갖게 된다. Balun은 중심 주파수에 두 출력 신호간에 동일한 크기와  $180^\circ$ 의 위상차의 조건을 만족해야 한다.

이를 확인하기 위해, 우선 식 (3)의 어드미턴스 행렬을 산란 행렬(S-parameter)로 변환하는 일반적인 식<sup>[7]</sup>을 일반화하여 서로 다른 포트 임피던스에 대한 변환식 (7)을 구하고, 이를 이용하여 식 (8)과 같이 중심 주파수( $\theta_1=\pi/2, \theta_2=\pi/2, \theta_3=\pi$ )에서의  $S_{21}$ 과  $S_{31}$ 의 특성을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 S_{11} &= \frac{(Y_{01} - Y_{11})(Y_{02} + Y_{22}) + Y_{12}Y_{21}}{\Delta Y} \\
 S_{12} &= \frac{-2Y_{12}Y_{02}}{\Delta Y} \sqrt{\frac{Y_{01}}{Y_{02}}} \\
 S_{21} &= \frac{-2Y_{21}Y_{01}}{\Delta Y} \sqrt{\frac{Y_{02}}{Y_{01}}} \\
 S_{22} &= \frac{(Y_{01} + Y_{11})(Y_{02} - Y_{22}) + Y_{12}Y_{21}}{\Delta Y}
 \end{aligned} \tag{7}$$

여기서  $Y_{01}, Y_{02}$ 는 포트 1과 2의 어드미턴스이고,  $\Delta Y = (Y_{11} + Y_{01})(Y_{22} + Y_{02}) - Y_{12}Y_{21}$ 이다.

$$\begin{aligned}
 S_{21}|_{\omega=\omega_0} &= +j \frac{2(Y_1 - Y_2)\sqrt{Y_{01}Y_{03}}}{(Y_1 - Y_2)^2 + Y_{01}(Y_{02} + Y_{03})} \\
 S_{31}|_{\omega=\omega_0} &= -j \frac{2(Y_1 - Y_2)\sqrt{Y_{01}Y_{03}}}{(Y_1 - Y_2)^2 + Y_{01}(Y_{02} + Y_{03})}
 \end{aligned} \tag{8}$$

여기서,  $Y_{02}=Y_{03}$ 의 조건을 사용하면, 두 포트간 신호 크기의 차이  $MD$ 는 식 (9)와 같이 영이 되고, 위상차  $DP$ 는 식 (10)에서와 같이  $180^\circ$ 의 위상차를 보인다. 따라서 그림 1의 구조는 Balun의 조건을 만족한다고 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 MD &= |S_{21}| - |S_{31}| \\
 &= |S_{21}| - |S_{21}| \\
 &= 0
 \end{aligned} \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
 DP &= \left| \tan^{-1} \frac{Im[S_{21}]}{Re[S_{21}]} - \tan^{-1} \frac{Im[S_{31}]}{Re[S_{31}]} \right| \\
 &= \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} \\
 &= 180^\circ
 \end{aligned} \tag{10}$$

2-4 감쇄극

그림 4는 임의로 설계된 Balun-BPF의 S-파라미터 특성이고, 그림 5는 동일한 대역에서  $Y_{21}$ 의 허수부를 나타낸 그래프이다.  $S_{21}=0$ 의 조건을 만족하기 위해서는 식 (7)과 식 (3)에서  $Im[Y_{21}]=0$ 인 지점에서 감쇄극이 나타날 수 있고, 그림 4 및 5에서 이를 확인할 수 있으며, 통과 대역 내 가장자리에서 급격하게  $\pm \infty$ 를 향해 진동하는 부분은 배제된다.

2-5  $Z_3$ 의 영향

그림 6은  $Y_3$  선로의 임피던스( $Z_3$ )를 변화시킴에 따라 포트 2와 3의 위상차의 기울기 변화를 나타낸 그래프이다. 중심 주파수에서는  $180^\circ$ 의 위상차를 갖고

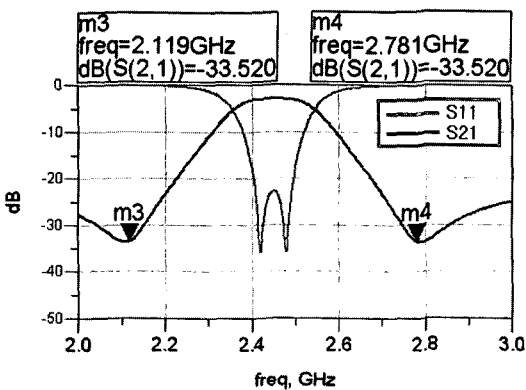


그림 4. 감쇄극 특성  
Fig. 4. The characteristic of attenuation poles.

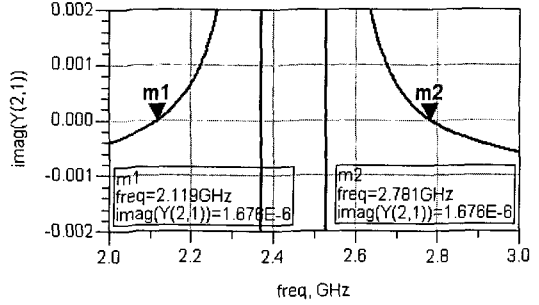


그림 5.  $Y_{21}$ 의 허수값  
Fig. 5. The image part of  $Y_{21}$  value.

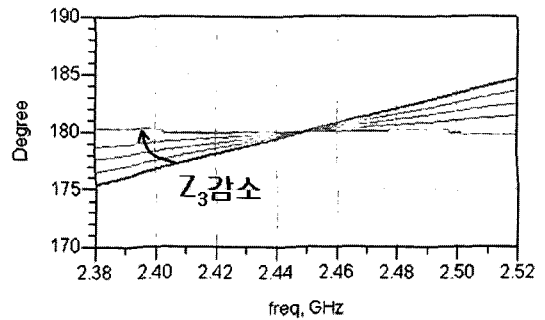


그림 6.  $Z_3$ 에 따른 위상차 ( $\phi_{21} \sim \phi_{31}$ ) 기울기의 변화  
Fig. 6. The variation of phase imbalance's ( $\phi_{21} \sim \phi_{31}$ ) slope by  $Z_3$  ( $Z_3=17, 13, 9, 5, 1 \Omega$ ).

임피던스 값이 줄어들수록 위상차의 기울기가 줄어들어 드는 특성을 보인다. 임피던스가 낮을수록 균일한 위상차를 보이지만 제작의 한계가 있다.  $Y_1$ 의 선로의 임피던스도 낮아질수록 기울기가 줄어들어 드는 특성을 보이지만 BPF의 커플링에 영향을 미친다는 단점이 있다. 이와 같은 trade-off 관계를 적절히 고려하여 Balun-BPF를 설계하여야 한다.

III. 설계 및 측정 결과

이상과 같이 제안된 설계식들을 검증하기 위하여, 중심 주파수 2.45 GHz, ripple 0.03 dB, Bandwidth 100 MHz로 Balun-BPF를 설계하였다. 여기서  $Z_1(1/Y_1)$ 는 설계의 간편화를 위하여  $Z_3$ 와 같다고 정의하고, 제작상의 편의(선로폭)를 고려하여 20  $\Omega$ 으로 정한 후 인버터를 이용한 대역 통과 여파기의 일반적인 표준 설계 절차<sup>[8]</sup>를 따라 설계하였다.

Agilent사의 ADS<sup>TM</sup>를 사용하여 시뮬레이션한 결과, 설계치와 일치하는 것을 확인하였고, 유전율  $\epsilon_r =$

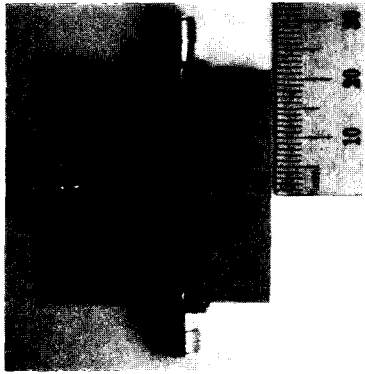


그림 7. 제작된 Balun-BPF  
Fig. 7. The fabricated Balun-BPF.

6.15, 두께 0.64 mm, 유전체손실  $\tan \delta=0.0025$ 인 Taconic社의 RF-60A 기판을 사용하여 제작하였다.

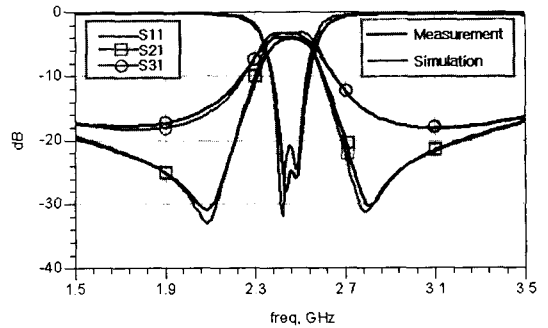
제작된 모습은 그림 7에 나타내었다. Anritsu社의 VNA 37397C를 이용하여 측정하였으며, 측정 결과는 그림 8과 같이 시뮬레이션 결과와 거의 일치하는 것을 확인하였다. 하지만 초단과 중단의 인버터를 높은 임피던스의 라인(초단=66.489  $\Omega$ , 중단=93.4473  $\Omega$ )을 사용하여 삽입 손실이 0.92 dB로 나타났다.

두 포트간 출력차는 통과 대역 내에서 0.5 dB 이내의 전력 분배 특성차를 나타내었고, 위상차는 그림 8(c)와 같이 제작상의 오차로 인하여 중심 주파수에서 178.5°의 위상차를 보였으며, 통과 대역 내에서 174~181°의 위상차를 보였다.

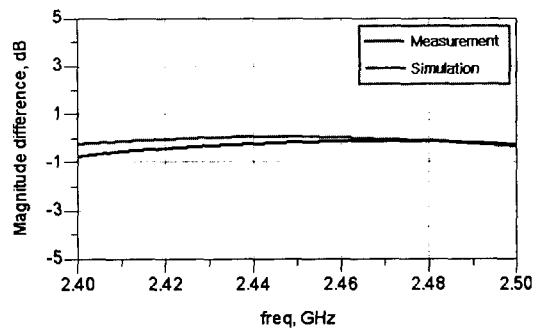
#### IV. 결 론

본 논문에서는 최근 발표된 Balun-BPF의 링 공진기를 3-단자 Y-파라미터 해석을 통하여 전체 구조식을 제시하고, 이를 이용하여 이중 모드 공진기의 두 가지 슬로프 파라미터를 도출하였다. 이를 이용하여 임의의 특성을 갖는 Balun-BPF를 기존의 표준적인 BPF 설계법으로 쉽게 설계할 수 있도록 하였고, 이는 실제 설계 및 제작을 통하여 그 타당성을 확인하였다.

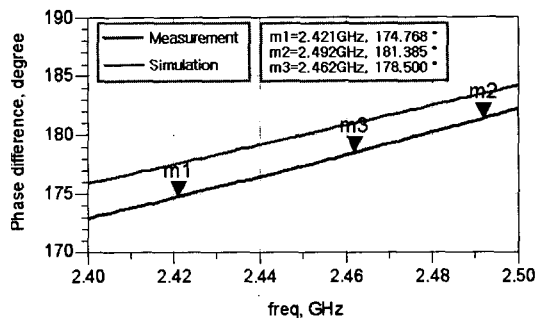
이런 Balun-BPF 기술은 블루투스에서와 같이 안테나와 평형 입력을 요구하는 LNA, 또는 평형 입력을 요구하는 안테나와 전력 증폭기 사이 등에 적용 가능하고, LTCC 기술 또는 Embedded-PCB 기술, MMIC 기술 등을 이용하여 더욱 집적시킴으로써 전



(a) S 파라미터  
(a) S-parameter



(b) 두 출력단의 출력차  
(b) Amplitude imbalances



(c) 위상차 특성  
(c) Phase imbalance

그림 8. 시뮬레이션 및 측정 결과  
Fig. 8. Simulation and measurement result.

체 시스템의 소형화에 도움을 줄 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 정을영, 황희용, "이중 모드 링 공진기를 이용한 Balun-BPF의 설계", 한국전자파학회논문지, 17 (12), pp. 1206-1211, 2006년 12월.
- [2] Eul-Young Jung, Hee Yong Hwang, "A Balun-BPF

using a dual mode ring resonator", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 17, no. 9, pp. 652-654, Sep. 2007.

[3] N. Marchand, "Transmission line conversion transformers", *Electronics*, vol. 17, pp. 142-145, Dec. 1944.

[4] 이병화, 박동석, 박상수, "새로운 3-라인 발룬 설계", *한국전자과학회논문지*, 14(7), pp. 750-754, 2003년 7월.

[5] 이종환, 염경환, "결합 선로를 이용한 평판 구조의 Marchand 발룬의 합성", *한국전자과학회논문*

지

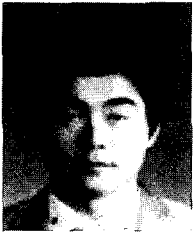
, 16(2), pp. 161-166, 2005년 2월.

[6] Dae-won Lew, Jun-Seok Park, Dal Ahn, Nam-Kee Kang, Chan Sei Yoo, and Jae-Bong Lim, "A design of the ceramic chip balun using the multilayer configuration", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, no. 1, pp. 220-224, Jan. 2001.

[7] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2005.

[8] G. L. Matthaei, L. Yong, and E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*, Artech House.

강 성 준



2007년 2월: 강원대학교 IT특성화 대학 전기전자공학과 (공학사)  
 2007년 3월~현재: 강원대학교 전기전자공학과 석사과정  
 [주 관심분야] 초고주파 수동 소자

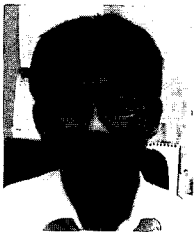
황 희 용\*



1992년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)  
 1995년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2000년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)  
 2001년 3월~2002년 4월: University of Maryland Research Scholar

2002년 5월~2003년 4월: (주)아모텍 연구소장  
 2003년 2월~현재: 강원대학교 IT특성화학부대학 전기전자공학전공 부교수  
 [주 관심분야] RF, Microwave, Millimeter Wave 분야의 부품 및 시스템  
 \*책임저자

박 응 희



1994년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)  
 1996년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2000년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)  
 2000년 3월~2006년 8월: 한국전자통신연구원 선임연구원

2006년 8월~현재: 강원대학교 삼척캠퍼스 공학대학 전자공학과 조교수  
 [주 관심분야] RF, Microwave 분야의 부품 및 시스템