

## PCB에 제작된 광대역 소형 평면 발룬 설계

### Design of a Compact Broadband Planar Balun on a PCB

김 재 현 · 이 지 원 · 김 부 균

Jae-Hyun Kim · Ji-Won Lee · Boo-Gyoun Kim

#### 요 약

주 전송선로의 길이가  $\lambda/2$ 인 기존의 광대역 180° 위상 천이기보다 크기가 작은 주 전송선로의 길이가  $\lambda/4$ 인 새로운 광대역 180° 위상 천이기를 설계하였다. 주 전송선로의 길이가  $\lambda/4$ 인 광대역 180° 위상 천이기와 3 dB 윌킨슨 전력 분배기가 직렬로 연결된 소형  $\lambda/4$  광대역 평면 발룬을 PCB에 구현하고 특성을 측정하였다. 입력 포트의 반사손실이 15 dB 이상인 임피던스 대역폭은 52.1 % (7.62~13 GHz)이고, 두 출력 포트의 위상 차이가 175°와 185° 사이인 대역폭은 56.6 % (7.09~12.7 GHz)이다. 본 논문에서 구현한  $\lambda/4$  광대역 평면 발룬은 기존의  $\lambda/2$  광대역 평면 발룬과 특성이 비슷하지만, 길이가  $\lambda/4$  짧아져 크기가 11.6 % 이상 작아지는 장점을 가진다.

#### Abstract

The design of a novel broadband 180° phase shifter, with the main transmission line length of  $\lambda/4$ , which is smaller than a conventional broadband 180° phase shifter with a main transmission line length of  $\lambda/2$ , is proposed in this study. The proposed compact broadband planar balun, consisting of the  $\lambda/4$  broadband 180° phase shifter and a 3 dB Wilkinson power divider, is implemented on a single-layer PCB and its characteristics are measured. The impedance bandwidth with a return loss of more than 15 dB at the input port is 52.1 % (7.62~13 GHz), and the bandwidth of the phase differences between the two output ports within the phases 175° and 185° is 56.6 % (7.09~12.7 GHz). The characteristics of the  $\lambda/4$  broadband planar balun implemented in this paper are similar to those of the conventional  $\lambda/2$  broadband planar balun. The length of the  $\lambda/4$  broadband planar balun is lesser than that of the conventional  $\lambda/2$  broadband planar balun, thus reducing the overall size by more than 11.6 %.

Key words: Balun, Broadband, PCB, 180° Phase Shifter, Planar

#### I. 서 론

발룬(balun)은 비평형 회로(unbalanced circuit) 구조와 평형 회로(balanced circuit) 구조 사이에 위치하여 신호를 변환하는 소자이다. 평형 회로 구조에 사용되는 신호는 크기는 같으나, 위상차가 180° 발생하는 두 개의 신호로 구

성되는 차동 신호이다. 많은 아날로그 회로는 잡음과 고조파 성분들을 줄이기 위하여 차동 신호를 사용한다<sup>[1]</sup>. 또한, 발룬은 차동 증폭기, 평형 믹서(balanced mixer)와 안테나 급전 네트워크를 구현하는데 필요한 소자이다. 지금까지 많은 형태의 발룬이 개발되었다. 그중에서 평면 발룬(planar balun)은 제작하기가 쉽고 좋은 특성을 가지기

「이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1D1A1A01059745).」  
승실대학교 전자공학과(School of Electronic Engineering, Soongsil University)

· Manuscript received July 18, 2019 ; Revised September 9, 2019 ; Accepted September 18, 2019. (ID No. 20190718-066)

· Corresponding Author: Boo-Gyoun Kim (e-mail: bgkim0325@ssu.ac.kr)

때문에 많이 사용되는 발룬 구조 중 하나다<sup>[2]</sup>. 무선통신의 발달에 따라 처리해야 하는 신호의 종류가 많아지고, 사용 주파수 대역이 넓어짐에 따라 광대역 신호처리 회로가 요구되므로 광대역 특성을 가지는 발룬의 개발이 요구된다.

평면 발룬에 관한 많은 연구가 있었다. 다만 반과장 발룬은 PCB에 쉽게 제작하여 구현할 수 있고, 3단 이상으로 구현할 때 약 38 % 대역폭을 달성할 수 있지만, 단을 추가할수록 크기가 커지는 단점이 있다. 또한, 평형 포트의 반사손실과 격리도 특성이 나빠지는 단점이 있다<sup>[3]</sup>. 다른 구조로는 Marchand 발룬<sup>[4]~[6]</sup>과 전력 분배기와 결합 선로(coupled-line) 180° 위상 천이기로 구성된 발룬이 있다<sup>[7]</sup>. 결합선로를 이용하는 경우, 60 %~175 %의 매우 넓은 대역폭 특성을 가지지만 이러한 발룬들은 MMIC(monolithic microwave integrated circuit) 설계가 아닌 PCB(printed circuit board) 설계의 경우 결합 선로 사이의 강한 결합(tight coupling)을 달성하기 위한 비용이 증가하거나 다층 기판 사용이 요구되어 구조가 복잡해진다. 결합 선로를 사용하지 않는 발룬으로는 윌킨슨(Wilkinson) 전력 분배기와 주 전송선로의 길이가  $\lambda/2$ 인 광대역 180° 위상 천이기가 직렬로 연결된 광대역 평면 발룬에 관한 연구가 있었다<sup>[8]</sup>. 입력 포트인 비평형 포트의 10 dB 임피던스 대역폭(반사손실이 10 dB 이상인 대역폭)은 64 % (1.7~3.3 GHz)이고, 임피던스 대역폭 내에서 출력 포트인 두 평형 포트의 반사손실은 10 dB 이상이었으며, 두 출력 포트 간의 격리도는 15 dB 이상이었다. 두 출력 포트의 신호전달 특성은 임피던스 대역폭 내에서 포트 간의 신호 크기 차이는  $\pm 0.3$  dB 이내이고, 위상 차이는  $180^\circ \pm 5^\circ$  이내였다. 이 평면 발룬은 결합 선로 구조를 사용하지 않기 때문에 다양한 유전상수를 가지는 기판에 제작할 수 있다. 따라서 안테나와 같은 PCB 기판에 제작할 수 있어 안테나와 발룬을 집적할 수 있다는 매우 좋은 특성을 가진다. 그러나 주 전송선로의 길이가  $\lambda/2$ 이기 때문에 크기가 커진다는 단점이 있다. 발룬의 크기가 커지면 불요파 방사(spurious radiation)가 커지고, 다른 소자와의 상호결합(mutual coupling)이 커지는 단점이 존재한다. 특히 발룬을 배열 안테나의 급전 네트워크로 사용할 때 이러한 현상은 시스템 특성에 큰 영향을 미친다<sup>[9]</sup>. 따라서 본 논문에서는 주 전송선

로의 길이가  $\lambda/4$ 인 광대역 180° 위상 천이기와 3 dB 윌킨슨 전력 분배기가 직렬로 연결된 소형 광대역 평면 발룬을 PCB에 구현하고 그 특성에 관하여 보고한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 광대역 평면 발룬의 등가회로를 보이고, 광대역 180° 위상 천이기가 광대역에서 좋은 특성을 가지기 위한 조건을 보인다. 유도된 반사손실과 위상 천이에 관한 식을 이용하여 위상 천이기의 특성을 보인다. III장에서는 광대역 평면 발룬을 설계하고, 전산모의로 얻은 위상 천이기의 특성을 보인다. IV장에서는 설계한 광대역 평면 발룬의 전산모의 및 측정 결과를 보인다. 마지막으로 V장에서는 논문의 결론을 맺는다. 본 논문에서는 Ansys사의 HFSS(High Frequency Structure Simulator)를 이용하여 전산모의를 진행하였다.

## II. 광대역 평면 발룬 설계 이론

그림 1은 본 논문에서 구현한 광대역 평면 발룬의 등가회로를 보인다. 광대역 평면 발룬은 하나의 입력 신호를 같은 크기와 같은 위상을 가지는 두 개의 출력 신호로 변환하는 3 dB 전력 분배기와 위상과 크기가 같은 두 개의 입력 신호를 크기가 같고, 위상 차이가 180° 발생하는 두 개의 출력 신호로 변환하는 광대역 180° 위상 천이기를 직렬로 연결하여 구성한다. 본 논문에서는 반사된 신호로 인한 입출력 특성 변화를 줄이기 위해 두 출력 포트 간의 격리도가 높은 윌킨슨 전력 분배기를 사용했다.

그림 1에서  $Z_a$ 와  $Z_b$ 는 각각 발룬의 입력 포트인 비평형 포트의 임피던스와 출력 포트인 평형 포트의 임피던스를 나타낸다. 편의상 논문에서  $Z_a$ 와  $Z_b$ 는 모두 50 Ω으로 설정하였다.  $Z_1$ 은 윌킨슨 전력 분배기에 있는  $\lambda/4$  마이

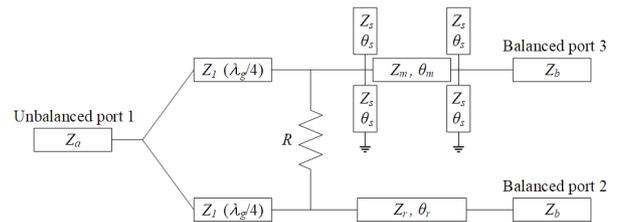


그림 1. 광대역 평면 발룬의 등가 회로  
Fig. 1. Equivalent circuit of the broadband planar balun.

크로스스트립 선로의 특성 임피던스를 나타낸다.  $Z_1$ 은 70.7  $\Omega$ 이고, 저항  $R$ 은 100  $\Omega$ 이다<sup>[10]</sup>.

### 2.1 광대역 180° 위상 천이기

본 논문에서 사용한 광대역 180° 위상 천이기의 등가 전송선로 회로도를 그림 2에 보인다<sup>[11]</sup>. 위상 천이기는 경로 1 및 경로 2의 두 가지 경로로 구성된다, 경로 1은 기준 전송선로이고, 특성 임피던스  $Z_r$ 을 가지며 전송선로에서 신호의 위상 변화는  $\theta_r$ 이다. 신호의 위상 변화  $\theta_r$ 은 입력 신호의 주파수에 선형적으로 비례한다. 또한, 경로 2는 특성 임피던스가  $Z_m$ 이고, 신호의 위상 변화  $\theta_m$ 을 가지는 주 전송선로에 특성 임피던스가  $Z_s$ 이고, 신호의 위상 변화  $\theta_s$ 를 가지는 개방 스테르브와 단락 스테르브가 주 전송선로의 양 끝단에 각각 병렬로 연결된 복합 구조를 가진다. 경로 2 회로망은 경로 1의 기준 전송선로보다 더 산란적인 위상 특성을 가지며, 주파수에 따른 위상의 기울기는 원하는 위상 천이량에 따라 주 전송선로의 특성 임피던스  $Z_m$ 과 스테르브의 특성 임피던스  $Z_s$ 를 조정함으로써 얻을 수 있다.

기준 전송선로인 경로 1의 포트 1과 포트 2에서의 반사 계수( $S_{11}$ ,  $S_{22}$ )와 포트 1에서 포트 2로 전달되는 신호의 전달 계수( $S_{21}$ )는 각각 다음 식으로 표현된다.

$$S_{11} = S_{22} = 0 \tag{1}$$

$$S_{21} = S_{12} = (\cos\theta_r - j\sin\theta_r) = e^{-j\theta_r} \tag{2}$$

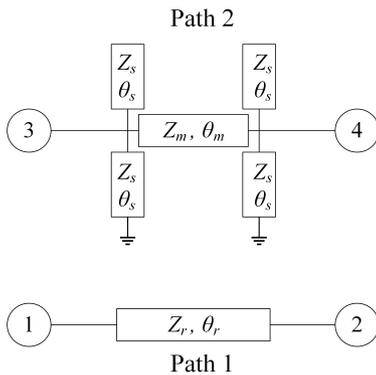


그림 2. 광대역 180° 위상 천이기의 등가 전송선로 회로도  
Fig. 2. Equivalent transmission line circuit of the broadband 180° phase shifter.

주 전송선로와 주 전송선로의 양 끝단에 개방 및 단락 스테르브들이 각각 병렬로 연결된 복합 구조를 가지는 경로 2의 포트 3과 포트 4에서의 반사 계수( $S_{33}$ ,  $S_{44}$ )와 포트 3에서 포트 4로 전달되는 신호의 전달 계수( $S_{43}$ )는 각각 다음 식으로 표현된다<sup>[11]</sup>.

$$S_{33} = S_{44} = \frac{1}{2} \left( \frac{1-jT_1}{1+jT_1} + \frac{1+jT_2}{1-jT_2} \right) \tag{3}$$

$$S_{43} = S_{34} = \frac{1}{2} \left( \frac{1-jT_1}{1+jT_1} - \frac{1+jT_2}{1-jT_2} \right) \tag{4}$$

여기서

$$T_1 = y_m \tan \frac{\theta_m}{2} - 2y_s \cot 2\theta_s \tag{5}$$

이고

$$T_2 = y_m \cot \frac{\theta_m}{2} + 2y_s \cot 2\theta_s \tag{6}$$

이다. 여기서  $y_m = Y_m/Y_r$  이고,  $y_s = Y_s/Y_r$ 이다.  $Y_m$ 은 주 전송선로의 특성 어드미턴스로서  $1/Z_m$ 이고,  $Y_s$ 는 스테르브의 특성 어드미턴스로서  $1/Z_s$ 이다. 또한  $Y_r$ 은 기준 전송선로의 특성 어드미턴스로서  $1/Z_r$ 이다. 경로 2와 경로 1의 위상차는 다음 식으로 표현된다.

$$\angle(S_{21}) - \angle(S_{43}) = -\theta_r - \tan^{-1} \left( \frac{1+T_1T_2}{T_1-T_2} \right) \tag{7}$$

중심주파수  $f = f_0$ 에서 두 경로의 위상차를 나타내는 식 (7)이 주 전송선로의 특성 임피던스  $Z_m$ 과 스테르브의 특성 임피던스  $Z_s$ 와 관계없이 일정한 값을 가지기 위한 조건은 다음 2가지 경우이다.

$$\theta_m(f_0) = \pi \quad \& \quad \theta_s(f_0) = \pi/4 \tag{8}$$

$$\theta_m(f_0) = \pi/2 \quad \& \quad \theta_s(f_0) = \pi/4 \tag{9}$$

식 (8)과 식 (9)를 만족하는 광대역 180° 위상 천이기의 주 전송선로 길이와 스테르브 길이는 다음 두 가지 경우이다.

- 1) 중심주파수에서  $\lambda_g/2$ 의 길이를 가지는 주 전송선로 ( $\theta_m(f_0) = \pi \rightarrow L_m = \lambda_g/2$ )와  $\lambda_g/8$ 의 길이를 가지는

개방 및 단락 스테르브( $\theta_s(f_0) = \pi/4 \rightarrow L_s = \lambda_g/8$ )로 구성되는 경로 2.

- 중심주파수에서  $\lambda_g/4$ 의 길이를 가지는 주 전송선로 ( $\theta_m(f_0) = \pi/2 \rightarrow L_m = \lambda_g/4$ )와  $\lambda_g/8$ 의 길이를 가지는 개방 및 단락 스테르브( $\theta_s(f_0) = \pi/4 \rightarrow L_s = \lambda_g/8$ )로 구성되는 경로 2.

여기서  $L_m$ 은 주 전송선로의 길이,  $L_s$ 는 개방 및 단락 스테르브의 길이,  $\lambda_g$ 는 전송선 내에서의 파장을 나타낸다. 위의 두 경우를 만족하는 광대역 180° 위상 천이기가 중심주파수에서 두 출력 신호의 위상 차이가 180°가 되기 위해서는 기준 전송선로의 길이  $L_r$ 이 주 전송선로의 길이  $L_m$ 보다  $\lambda_g/2$  만큼 길어야 한다.

많은 응용에서 광대역 평면 발룬의 두 출력 신호의 위상 차이가 175°와 185° 사이여야 하고, 입력 포트의 반사 손실이 15 dB 이상이어야 한다. 따라서 광대역 180° 위상 천이기의 임피던스 대역폭은 반사 손실이 15 dB 이상인 대역폭(15 dB 임피던스 대역폭)으로, 위상 천이기의 두 출력 신호의 위상 차이가 175°와 185° 사이인 대역폭(위상 오차 대역폭)으로 설정하고, 이러한 대역폭을 최대화 하는 광대역 180° 위상 천이기를 설계하였다.

주 전송선로의 길이가  $\lambda/2$ 인 광대역 180° 위상 천이기 ( $\lambda/2$  광대역 180° 위상 천이기)와 주 전송선로의 길이가  $\lambda/4$ 인 광대역 180° 위상 천이기( $\lambda/4$  광대역 180° 위상 천이기)의 15 dB 임피던스 대역폭과 위상 오차 대역폭을 동시에 만족하는 동작 대역폭이 최대가 되는  $Z_m$ 과  $Z_s$ 를 식 (3)과 식 (7)을 이용하여 구하였다. Matlab으로 구한  $\lambda/2$ ( $\lambda/4$ ) 광대역 180° 위상 천이기의  $Z_m$ 과  $Z_s$ 는 각각 67  $\Omega$ (42.5  $\Omega$ )과 60  $\Omega$ (54  $\Omega$ )이다.

그림 3(a)와 그림 (b)는 각각 주 전송선로의 길이가  $\lambda/2$ 와  $\lambda/4$ 인 광대역 180° 위상 천이기의 정규화된 주파수에 따른 반사손실과 위상 천이를 보인다. 그림 3(a)에서  $\lambda/2$  광대역 180° 위상 천이기의 15 dB 임피던스 대역폭은 62 %이고,  $\lambda/4$  광대역 180° 위상 천이기의 15 dB 임피던스 대역폭은 40 %였다. 그림 3(b)에서  $\lambda/2$  광대역 180° 위상 천이기의 위상 오차 대역폭은 65 %이고,  $\lambda/4$  광대역 180° 위상 천이기의 위상 오차 대역폭은 105 %임을 볼 수 있다. 15 dB 임피던스 대역폭과 위상 오차 대역폭을 동시에

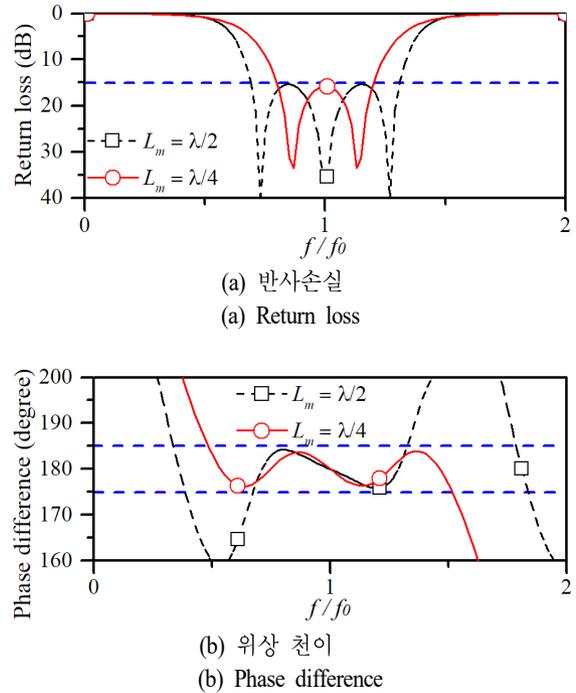


그림 3. 주 전송선로의 길이가  $\lambda/2$ 와  $\lambda/4$ 인 광대역 180° 위상 천이기의 특성  
Fig. 3. Calculated characteristics of two broadband 180° phase shifters with main transmission line lengths of  $\lambda/2$  and  $\lambda/4$ .

만족하는 대역폭(동작 대역폭)은  $\lambda/2$  광대역 180° 위상 천이기의 경우 62 %였고,  $\lambda/4$  광대역 180° 위상 천이기의 경우 40 %였다.

### III. 광대역 평면 발룬 설계

그림 4는 본 논문에서 구현한 윌킨슨 전력 분배기와 광대역 180° 위상 천이기가 직렬로 연결된 광대역 평면 발룬의 구조도를 보인다. X-대역에서 동작하도록 설계하였으며, 유전상수가 2.2이고, loss tangent가 0.0009인 Taconic사의 TLY-5 기판을 사용하였다. 사용된 기판의 두께는 0.78 mm이다. 단락 스테르브는 접지면과 연결된 via를 사용하여 구현하였다. 윌킨슨 전력 분배기의  $\lambda_g/4$  마이크로스트립 선로 길이  $L_w$ 는 5.1 mm이고, 폭  $W_w$ 는 1.38 mm이다.

그림 5는 평면 발룬에서 윌킨슨 전력 분배기를 제외한 광대역 180° 위상 천이기의 구조도를 보인다. 그림 5에서

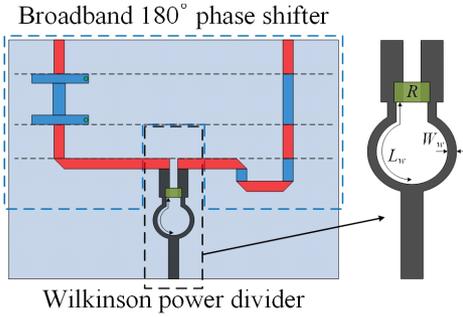


그림 4. 윌킨슨 전력 분배기와 광대역 180° 위상 천이기가 직렬로 연결된 광대역 평면 발룬의 구조도  
 Fig. 4. Layout graph of a broadband planar balun consisting of a Wilkinson power divider and a broadband 180° phase shifter.

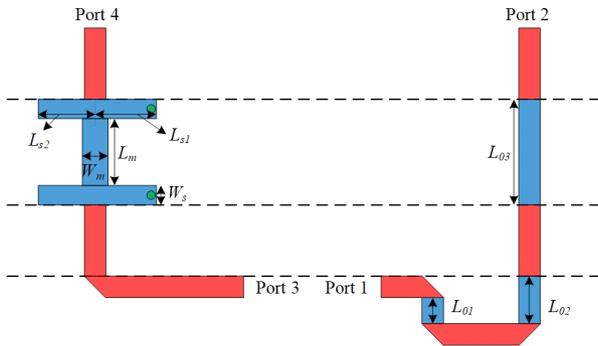
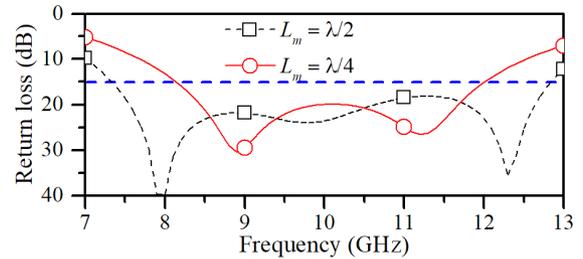


그림 5. 광대역 180° 위상 천이기 구조도  
 Fig. 5. Geometry of a broadband 180° phase shifter.

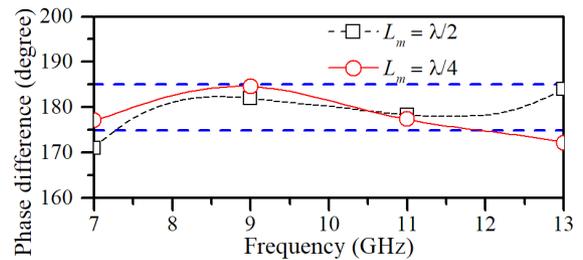
파란색으로 표시된 구조는 그림 2의 경로 1과 경로 2를 나타내며, 두 경로에서 발생하는 위상 차이로 인해 광대역 발룬의 두 출력 포트가 180°의 위상 차이를 가지게 된다. 붉은색으로 표시된 구조는 윌킨슨 전력 분배기와의 연결 및 발룬이 출력 신호를 공급하는 외부 소자와의 연결을 위한 구조로써 경로 1과 경로 2에서 같은 길이를 가지는 특성 임피던스가 50 Ω인 마이크로스트립 선로이다. 특성 임피던스가 50 Ω인 마이크로스트립 선로의 폭  $W_0$ 는 2.45 mm이다. 경로 2의 주 전송선로의 길이와 폭은 각각  $L_m$ 과  $W_m$ 으로 표현하였다. 단락 스테브와 개방 스테브의 길이는 각각  $L_{s1}$ 과  $L_{s2}$ 로 표현하였고, 두 스테브의 폭은  $W_s$ 로 같다. 경로 2의 기준 선로 길이는 세 구역으로 분리되어 있으며, 각각  $L_{01}$ ,  $L_{02}$ 와  $L_{03}$ 으로 표현하였고,

선로의 폭은 2.45 mm이다. 그림 5의 구조를 가지는  $\lambda/2$  광대역 180° 위상 천이기와  $\lambda/4$  광대역 180° 위상 천이기의 설계 파라미터를 표 1에 보인다.

그림 6(a)와 그림 6(b)는 각각 그림 5의 구조와 표 1의 설계 파라미터를 가지는 두 가지 광대역 180° 위상 천이기의 주파수에 따른 반사손실과 두 출력 포트 사이의 위상 차이에 관한 전산모의 결과를 보인다. 그림 6(a)에서  $\lambda/2$  광대역 180° 위상 천이기의 15 dB 임피던스 대역폭은 55.8 % (7.34~12.84 GHz)로 광대역 특성을 보였다.  $\lambda/4$  광대역 180° 위상 천이기의 15 dB 임피던스 대역폭은 38.5 % (8.15~12 GHz)로  $\lambda/2$  광대역 180° 위상 천이기보다 작았지만 넓은 대역폭을 보였다. 그림 6(b)에서  $\lambda/2$  광대역 180° 위상 천이기의 위상 오차 대역폭은 58.7 % (7.26~13.13 GHz)였고,  $\lambda/4$  광대역 180° 위상 천이기의 위상 오차 대역폭은 55 % (6.4~11.9 GHz)로 두 위상 천이기의 차이가 작았다.  $\lambda/2$  광대역 180° 위상 천이기의 동작 대역폭은



(a) 반사손실  
 (a) Return loss



(b) 위상 천이  
 (b) Phase difference

그림 6. 주 전송선로의 길이가  $\lambda/2$ 와  $\lambda/4$ 인 광대역 180° 위상 천이기의 전산모의 특성

Fig. 6. Simulated characteristics of two broadband 180° phase shifters with main transmission line lengths of  $\lambda/2$  and  $\lambda/4$ .

표 1. 주 전송선로의 길이가  $\lambda/2$ 와  $\lambda/4$ 인 광대역  $180^\circ$  위상 천이기의 설계 파라미터

Table 1. Design parameters of two broadband  $180^\circ$  phase shifters with main transmission line lengths of  $\lambda/2$  and  $\lambda/4$ .

Main transmission line(mm)	$\lambda/2$ broadband $180^\circ$ phase shifter		$\lambda/4$ broadband $180^\circ$ phase shifter			
	$L_m$	$W_m$	$L_m$	$W_m$		
	10	1.04	4.8	2.61		
Open stub(mm)	$L_{s2}$	$W_s$	$L_{s2}$	$W_s$		
	3.22	1.6	3.3	2.05		
Short stub(mm)	$L_{s1}$	$W_s$	$L_{s1}$	$W_s$		
	3.7	1.6	3.8	2.05		
Reference transmission line(mm)	$L_{01}$	$L_{02}$	$L_{03}$	$L_{01}$	$L_{02}$	$L_{03}$
	3.28	5.98	13.2	3.1	5.8	8.9

55.8%(7.34~12.84 GHz)로 넓은 대역폭에서 우수한 특성을 가졌다.  $\lambda/4$  광대역  $180^\circ$  위상 천이기의 동작 대역폭은 38.4%(8.15~11.9 GHz)로  $\lambda/2$  광대역  $180^\circ$  위상 천이기보다 작지만, 광대역 특성을 가지는 것을 볼 수 있다.

#### IV. 광대역 평면 발룬 특성 전산모의 및 측정 결과

##### 4-1 $\lambda/2$ 광대역 $180^\circ$ 위상 천이기를 가지는 광대역 평면 발룬 특성 전산모의 및 측정 결과

그림 7은 윌킨슨 전력 분배기와 표 1의 설계 파라미터

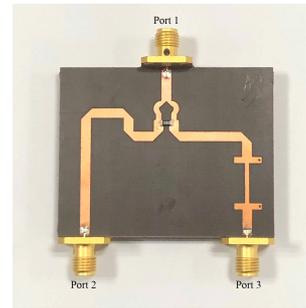


그림 7.  $\lambda/2$  광대역 평면 발룬의 제작 사진  
Fig. 7. Photograph of the fabricated  $\lambda/2$  broadband planar balun.

를 가지는  $\lambda/2$  광대역  $180^\circ$  위상 천이기가 직렬로 연결된 그림 4의 구조를 가지는  $\lambda/2$  광대역 평면 발룬을 제작한 사진을 보인다. 제작된  $\lambda/2$  광대역 평면 발룬의 크기는 43 mm×54 mm이다.

그림 8(a)~그림 8(c)는 각각  $\lambda/2$  광대역 평면 발룬의 주파수에 따른 두 출력 포트의 위상 차이, 입력 포트의 반사손실과 두 출력 포트 간 격리도 그리고 두 출력 포트의 전송손실에 관한 전산모의 및 측정 결과를 보인다. 그림 8에서  $\lambda/2$  광대역 평면 발룬의 주파수에 따른 특성에 관한 전산모의 결과와 측정 결과가 잘 일치함을 볼 수 있다. 그림 8(a)에서 위상 오차 대역폭의 전산모의 결과는 58.7%(7~12.8 GHz)이고, 측정 결과는 53.2%(7.36~12.7 GHz)로 나타났다. 그림 8(b)에서 15 dB 임피던스 대역폭의 전산모의 결과는 58%(7.15~13 GHz)이고, 측정 결과는 58.4%(7.12~13 GHz)로 나타났다. 동작 대역폭의 전산

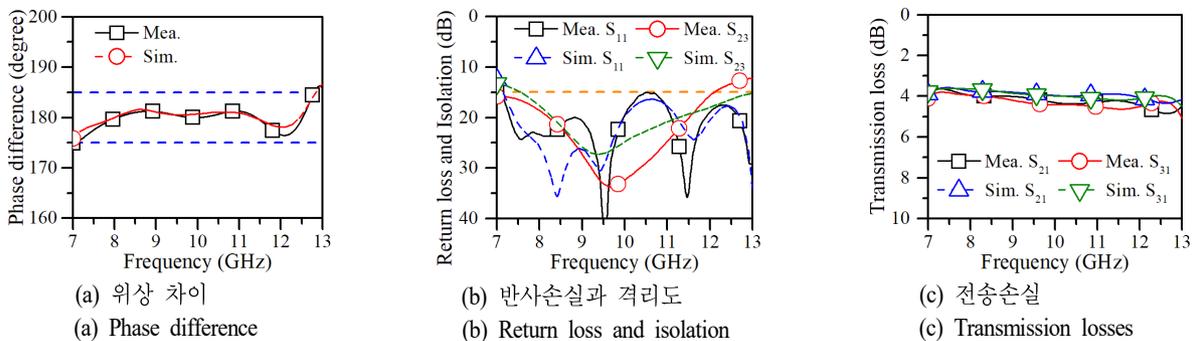


그림 8.  $\lambda/2$  광대역 평면 발룬의 특성을 전산모의 및 측정한 결과  
Fig. 8. Measured and simulated characteristics of the  $\lambda/2$  broadband planar balun.

모의 결과는 56.6 %(7.15~12.8 GHz)이고, 측정 결과는 53.2 %(7.36~12.7 GHz)로 광대역 특성을 가졌다. 동작 대역폭 내에서 두 출력 포트 간 격리도는 전산모의에서 13.6 dB 이상이었고, 측정 결과에서 12.7 dB 이상으로 나타났다. 그림 8(c)에서 전산모의로 구한 출력 포트 2(3)의 전송손실은 동작 대역폭 내에서 최대 4.34 dB(4.17 dB)를 가졌고, 최소 3.57 dB(3.62 dB)를 가져 주파수가 증가함에 따라 전송손실이 증가하는 것을 볼 수 있다. 출력 포트 2(3)의 측정된 전송손실은 동작 대역폭 내에서 최대 4.83 dB(4.62 dB)를 가졌고, 최소 3.61 dB(3.79 dB)를 가졌다. 동작 대역폭 내에서 두 출력 포트의 전송손실 차이는 전산모의 결과에서 0.28 dB 이내였고, 측정 결과에서는 0.57 dB 이내로 작은 값을 가졌다.

#### 4-2 $\lambda/4$ 광대역 180° 위상 천이기를 가지는 광대역 평면 발룬 특성 전산모의 및 측정 결과

그림 9는 윌킨슨 전력 분배기와 표 1의 설계 파라미터를 가지는  $\lambda/4$  광대역 평면 발룬을 제작한 사진을 보인다. 제작된 광대역 평면 발룬의 크기는 38 mm×54 mm이다. 그림 7의  $\lambda/2$  광대역 평면 발룬보다 5 mm( $\approx \lambda/4$ ) 짧아진 기판 크기를 가져 전체 면적이 11.6 % 작아진 것을 볼 수 있다.

그림 10(a), (b)와 (c)는 각각  $\lambda/4$  광대역 평면 발룬의 주파수에 따른 두 출력 포트의 위상 차이, 입력 포트의 반사손실과 두 출력 포트 간 격리도 그리고 두 출력 포트의 전송손실에 관한 전산모의 및 측정 결과를 보인다. 그림

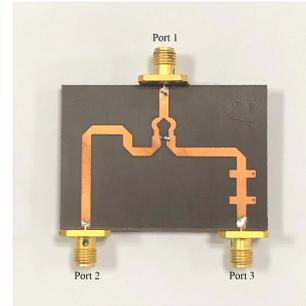


그림 9.  $\lambda/4$  광대역 발룬의 제작 사진  
Fig. 9. Photograph of the fabricated  $\lambda/4$  broadband planar balun.

10에서  $\lambda/4$  광대역 평면 발룬의 주파수에 따른 특성에 관한 전산모의 결과와 측정 결과가 잘 일치함을 볼 수 있었다. 그림 10(a)에서 위상 오차 대역폭의 전산모의 결과는 59.2 %(7~12.9 GHz)이고, 측정 결과는 56.6 %(7.09~12.7 GHz)로 나타났다. 그림 10(b)에서 15 dB 임피던스 대역폭의 전산모의 결과는 52 %(7.63~13 GHz)이고, 측정 결과는 52.1 %(7.62~13 GHz)임을 볼 수 있다. 동작 대역폭의 전산모의 결과는 51.3 %(7.63~12.9 GHz)이고, 측정 결과는 50 %(7.62~12.7 GHz)로 광대역 특성을 가졌다. 동작 대역폭 내에서 두 출력 포트 간 격리도는 전산모의에서 16.2 dB 이상이었고, 측정 결과에서는 14.7 dB 이상으로 나타났다. 그림 10(c)에서 전산모의로 구한 출력 포트 2(3)의 전송손실은 동작 대역폭 내에서 최대 5.58 dB(4.28 dB)였고, 최소 3.71 dB(3.58 dB)로 나타났다. 출력 포트 2(3)의 측정된 전송손실은 동작 대역폭 내에서 최대

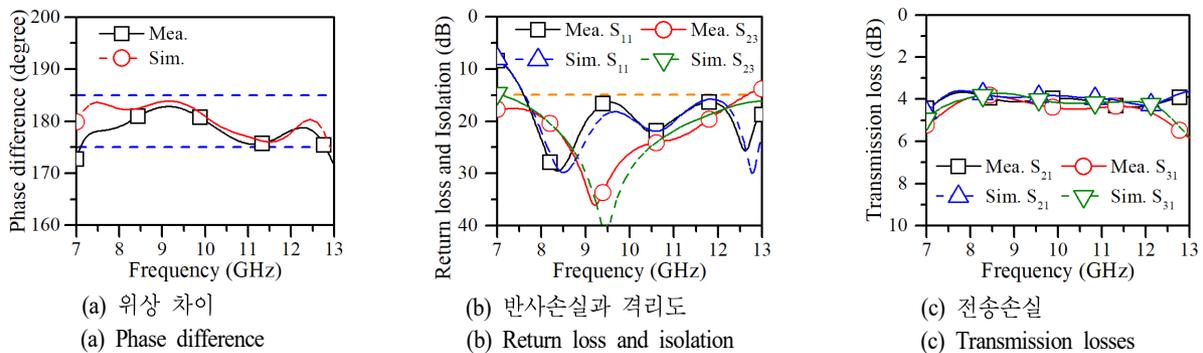


그림 10.  $\lambda/4$  광대역 평면 발룬의 특성을 전산모의 및 측정한 결과  
Fig. 10. Measured and simulated characteristics of the  $\lambda/4$  broadband planar balun.

5.43 dB(4.36 dB)였고, 최소 3.88 dB(3.66 dB)로 나타났다. 동작 대역폭 내에서 두 출력 포트의 전송손실 차이는 전산모의 결과에서 2.14 dB 이내였고, 측정 결과에서는 1.43 dB 이내로  $\lambda/2$  광대역 평면 발룬과 비교하여 큰 값을 가졌다. 이는 발룬을 구성하는  $\lambda/4$  광대역  $180^\circ$  위상 천이기의 15 dB 임피던스 대역폭(8.15~12 GHz) 바깥의 주파수에서 경로 2의 반사손실이 감소하기 때문에 포트 3으로 전달되는 신호의 전송손실이 포트 2로 전달되는 신호의 전송손실보다 커지기 때문이라 생각된다.

전산모의로 구한  $\lambda/4$   $180^\circ$  위상 천이기의 임피던스 대역폭 38.2%(8.15~12 GHz) 내에서 전산모의로 구한 입력 포트에서 출력 포트 2(3)로의 전송손실은 4.18 dB(4.28 dB)의 최댓값을 가졌고, 3.71 dB(3.68 dB)의 최솟값을 가졌다. 또한,  $\lambda/4$   $180^\circ$  위상 천이기의 임피던스 대역폭 내에서 측정된 출력 포트 2(3)의 전송손실은 4.58 dB(4.36 dB)의 최댓값을 가졌고, 3.88 dB(3.77 dB)의 최솟값을 가졌다.  $\lambda/4$   $180^\circ$  위상 천이기의 임피던스 대역폭 내에서 두 출력 포트의 전송손실 차이의 전산모의 결과는 0.34 dB 이내이고, 측정 결과는 0.5 dB 이내로 작은 값을 가졌다. 두 출력 포트의 전송손실을 고려한  $\lambda/4$  광대역 평면 발룬의 동작 대역폭은  $\lambda/4$  위상 천이기의 임피던스 대역폭인 38.2%(8.15~12 GHz)로 생각할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 PCB에 제작 가능한 기존의 주 전송선로의 길이가  $\lambda/2$ 인 광대역  $180^\circ$  위상 천이기보다 크기가 작은 새로운 주 전송선로의 길이가  $\lambda/4$ 인 광대역  $180^\circ$  위상 천이기를 PCB에 제작할 수 있음을 보였다. 주 전송선로의 길이가  $\lambda/4$ 인 광대역  $180^\circ$  위상 천이기와 3 dB 윌킨슨 전력 분배기가 직렬로 연결된 소형  $\lambda/4$  광대역 평면 발룬을 PCB에 구현하고 그 특성을 살펴보았다.  $\lambda/4$  광대역  $180^\circ$  위상 천이기와 3 dB 윌킨슨 전력 분배기가 직렬로 연결된 소형  $\lambda/4$  광대역 평면 발룬의 동작 대역폭은 50%로서 기존의  $\lambda/2$  광대역 평면 발룬과 비슷한 동작 대역폭을 가졌다. 두 출력 포트 사이의 전송손실 차이가 0.5 dB 이하인  $\lambda/4$  광대역 평면 발룬의 대역폭은  $\lambda/4$  광대역  $180^\circ$  위상 천이기의 15 dB 임피던스 대역폭인

38.2%로서 충분히 넓은 대역폭을 가진다.  $\lambda/4$  광대역 평면 발룬은 35% 이상의 대역폭을 요구하는 응용에서  $\lambda/2$  광대역 평면 발룬과 비교하여  $\lambda/4$  짧아진 길이로 더 작은 크기를 가지고 구현할 수 있어, 배열 안테나의 급전 네트워크와 같이 전송선로가 밀집된 응용에 크게 활용될 수 있으리라 생각된다.

## References

- [1] J.-H. Yoon, "Input balun design method for CMOS differential LNA," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 5, pp. 366-372, May 2017.
- [2] R. Mongia, I. Bahl, and P. Bhartia, *RF and Microwave Coupled-Line Circuits*, Norwood, MA, Artech House, pp. 391-445, 1998.
- [3] R. Sturdivant, "Balun designs for wireless, ... mixers, amplifiers and antennas," *Applied Microwave Magazine*, vol. 5, pp. 34-44, Jul. 1993.
- [4] Z. Zhang, Y.-X. Guo, L. C. Ong, and M. Y. W. Chia, "Improved planar marchand balun a patterned ground plane," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 307-316, May 2005.
- [5] E. Jafari, F. Hodjatkashani, and R. Rezaiesarlak, "A wideband compact planar balun for UHF DTV applications," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 23, no. 14-15, pp. 2047-2053, Apr. 2012.
- [6] K.-C. Lin, Y.-C. Lin, "A simple printed compensated balun for enhanced ultra-wideband performances," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 24, no. 1, pp. 5-7, Jan. 2014.
- [7] J. Rogers, R. Bhartia, "A 6 to 20 GHz planar balun using a Wilkinson divider and lange couplers," in *1991 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Boston, MA, 1991, vol. 2, pp. 865-868.
- [8] Z. Y. Zhang, Y. X. Guo, L. C. Ong, and M. Y. W. Chia, "A new wide-band planar balun on a single-layer

PCB," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 15, no. 6, pp. 416-418, Jun. 2005.

- [9] S.-G. Zhou, J.-J. Yang, and T.-H. Chio, "Design of L/X-band shared aperture antenna array for SAR application," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 57, no. 9, pp. 2197-2204, Sep. 2015.
- [10] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 3rd ed. Hoboken,

NJ, John Wiley & Sons, 2005.

- [11] S.-Y. Eom, Y.-B. Jung, S.-I. Jeon, J.-K. Yook, and H.-K. Park, "A study on new broadband phase shifter using  $\lambda/8$  parallel stubs," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 13, no. 7, pp. 657-666, Aug. 2002.

김 재 현 [송실대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-7403-7135>



2012년 2월: 송실대학교 전자통신전자공학부 (공학사)  
 2014년 2월: 송실대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2014년 3월~현재: 송실대학교 전자공학과 박사과정  
 [주 관심분야] 마이크로스트립 안테나, 위

상 배열 안테나

김 부 균 [송실대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-4795-9369>



1979년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)  
 1981년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
 1989년 8월: University of Southern California 전기공학과 (공학박사)  
 1981년 3월~현재: 송실대학교 전자정보

공학부 교수

2008년 3월~2010년 2월: 송실대학교 IT대학 학장  
 2011년 4월~2014년 4월: 산업기술연구회 이사  
 2011년 7월~2013년 6월: 중앙전파관리소 전파관리자문위원회 자문위원  
 [주 관심분야] 위상 배열 안테나, 마이크로스트립 안테나, EMC

이 지 원 [송실대학교/학사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-8067-8609>



2013년 3월~현재: 송실대학교 전자정보공학부 학사과정  
 [주 관심분야] 마이크로스트립 안테나