

CPW 전송선로의 유한접지면 폭에 따른 소형화된 마이크로파 CPW 180° 링 하이브리드 커플러의 특성 연구

임종식*, 이길영**, 윤원상***, 조영호****¹, 한상민****²

A Study on the Characteristics of Size-Reduced Microwave CPW 180° Ring Hybrid Couplers According to the Finite Ground Plane Width of the CPW Transmission Line

Jongsik Lim*, Gil-Young Lee**, Won-Sang Yoon***, Young-Ho Cho****¹, and Sang-Min Han****²

요약

본 논문에서는 접지면의 폭을 유한하게 제한한 CPW 전송선로와 180도 위상반전구조를 이용하여 마이크로파 180도 링 하이브리드 커플러(RHC, Ring Hybrid Coupler)를 소형화하여 설계한다. 또한 유한접지면(G)의 폭을 가변한 후 접지면 폭에 따른 RHC의 특성 변화에 대하여 기술한다. 유한접지면 CPW 선로 RHC 회로의 크기는 표준형 회로의 약 50% 정도인데, 전기적 특성은 거의 유사하게 유지된다. CPW 구조에서 중심 신호선의 폭을 W라 하고, 신호선과 양쪽 접지면과의 간격을 S라 할 때, G를 "W+2S"로 제한한 경우에 가장 우수한 특성을 보였다. G를 0.5mm 간격으로 점점 줄여 소형화시켜 설계한 회로들도 전기적 특성은 급격하게 나빠지지 않으면서 RHC 회로의 기본적인 성능을 유지하였다. 실제 회로 측정 성능에서도 G를 "W+2S"와 동일한 값으로 제한할 때 가장 우수한 특성을 보였다.

Abstract

In this paper, miniaturized microwave 180° Ring Hybrid Coupler (RHC) using a finitely constrained ground plane (CPW) transmission line and a 180° phase-converting structure are designed. Furthermore, the changes in RHC characteristics as a function of the width of the finite ground plane (G) is described. The RHC with finite ground plane CPW is approximately 50% the size of a standard circuit, yet its electrical characteristics remain almost unchanged. When the width of the central signal line in the CPW structure is W and the spacing between the signal line and the ground planes on either side is S, the optimal performance is achieved when G is limited to "W+2S". Miniaturized circuits designed with G gradually reduced to 0.5 mm intervals maintain the basic performance of the RHC circuit without a significant degradation in characteristics. In actual circuit measurement performance, the best characteristics are observed when G is limited to the value equal to "W+2S".

Keywords

ring hybrid coupler, RHC, coplanar waveguide, CPW, transmission lines

* 순천향대학교 전기공학과 교수(교신저자)
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8728-4979>
** 공군사관학교 전자통신공학과 교수
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4656-4162>
*** 호서대학교 전자공학과 교수
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1125-384X>
**** 순천향대학교 정보통신공학과 교수
- ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0002-6277-8534>
- ORCID²: <https://orcid.org/0000-0002-7521-6661>

• Received: Jan. 28, 2026, Revised: Mar. 05, 2026, Accepted: Mar. 08, 2026
• Corresponding Author: Jongsik Lim
Dept. of Electrical Engineering, Soonchunhyang University
Soonchunhyang-ro 22, Shinchang-myeon, Asan-si, Chungnam, Korea
Tel.: +82-41-530-1332, Email: jslim@sch.ac.kr

1. 서 론

무선통신 시스템을 구성하기 위하여 여러 가지 마이크로파 회로들이 필요하다. 180도 하이브리드 결합기도 이 가운데 하나인데, 다양한 응용을 위하여 무선시스템 구성에서 매우 널리 사용된다. 기본적인 회로 패턴의 모양 때문에 링 하이브리드 커플러(RHC, Ring Hybrid Coupler)라고도 불리는 180도 하이브리드 회로는 입력 단자가 어디냐에 따라 출력 신호간의 위상차가 달라질 수 있는데, 바로 이 특성이 무선통신 응용에서 널리 사용된다[1][2].

대부분의 무선통신용 마이크로파 회로는 기본적으로 평면형의 유전체 기판 위에서 필요한 회로 패턴의 도체면이 구현된다. 따라서 다수의 무선 회로는 여러 개의 마이크로파 전송선로들이 결합되거나 재구성되는 형태의 구조를 갖는다[3]-[5].

평면형 유전체 기판에 구현되는 전송선로로 가장 널리 사용되는 종류로는 마이크로스트립(MS, Microstrip) 선로와 동평면 도파관(CPW, Coplanar Waveguide,) 선로가 있다[6][7]. 동평면형 전송선로는 MS 선로에 없는 여러 가지 장점이 있는데, 대표적인 장점으로 신호선과 접지면이 모두 같은 평면에 존재한다는 것과 180도 위상반전구조(PCS, Phase Converting Structure)를 물리적 길이의 추가적 점유 없이 구현할 수 있다는 것을 들 수 있다[8].

RHC 회로 구조에는 설계주파수에서 $270\text{도}(3\lambda_g/4)$ 전송선로 부분이 포함되는데, 이로 인해 회로의 면적이 불필요하게 커진다는 단점이 있다. 그런데 270도 선로 부분에, 180도 위상반전구조를 삽입하면 전기적 길이를 같게 유지하면서도 180도에 해당하는 물리적 길이를 줄일 수 있어서, RHC 회로를 소형화할 수 있다는 장점이 있다[8]-[10].

그런데 CPW 선로는 이론적으로 무한접지면을 가져야 하는데, 현실적으로 무한접지면이 불가능하더라도 비교적 넓은 접지면을 사용해야 한다. 그런데 접지면을 유한하게 제한해도 전송선로로서 유사한 특성을 가진다면 마이크로파 회로 설계가 간단해질 수 있어서 유용할 것이다.

이에 본 연구에서는, 마이크로파 RHC를 설계함에 있어서, 접지면의 폭이 유한하게 제한된 CPW 선로로 RHC를 설계하여, RHC 회로를 크게 소형화

시키고 전기적 특성도 유사하게 얻을 수 있음을 보인다. 그리고 유한접지면의 폭을 몇 가지로 변화시키면서 RHC의 특성이 어떤지 살펴본다. 본 연구에서 언급하게 될, 유한접지면 CPW 선로를 이용한 마이크로파 회로 설계 방법은, RHC 회로뿐만 아니라 무선통신 시스템을 위한 여러 가지 마이크로파 회로 및 시스템 설계시 폭넓은 응용이 가능하다.

II. 마이크로파 전송선로와 RHC

2.1 마이크로파 전송선로

마이크로스트립 선로는 가장 널리 사용되는 마이크로파 전송선로 형태로 그림 1(a)의 구조를 갖는다. 두께가 H 이고 비유전율이 ϵ_r 인 유전체 기판상에 선폭이 W 인 선로가 구현되는데, W 에 따라 고주파 대역에서 어느 특정한 특성 임피던스(Characteristic impedance, 보통 Z_0 로 표시)를 갖는다. 따라서 주어진 어느 유전체 기판에 대해 W 와 Z_0 는 1:1로 유일하게 대응하는 쌍을 갖는다. 마이크로스트립 선로에서 도체면 두께 T 는 H 에 비해 현저하게 낮은 값을 가져 특성 임피던스에 미치는 영향이 미미하므로 보통은 고려하지 않는다[3].

이에 비하여 그림 1(b)의 CPW 선로는 구조적 차이를 지닌다. 가장 큰 차이는 접지면이 중심선로와 동일한 평면상에 존재한다는 점이다. 이론적으로는 유전체의 두께가 두꺼울수록 좋으나 현실적으로는 유전체 기판의 두께가 H 로 유한하게 주어진다. CPW 선로에서는 중심선로의 폭 W 와 접지면과의 간격 S 에 따라 Z_0 가 결정된다. 따라서 동일한 Z_0 에 대해 여러 가지의 (W, S) 쌍이 존재한다[11].

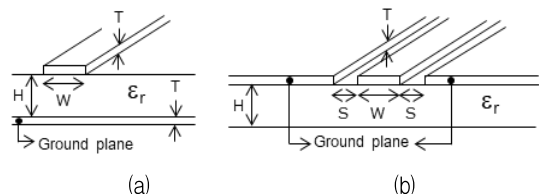


그림 1. 마이크로파 전송선로의 기본 구조
(a) 마이크로스트립 선로 (b) CPW 선로

Fig. 1. Basic structures of microwave transmission lines
(a) Microstrip line (b) CPW line

2.2 유한접지면 CPW 전송선로

CPW 선로의 동평면 접지면은 마이크로스트립 선로의 바닥 접지면이 윗면으로 올라온 꼴인데, 그래서 이론적으로는 CPW 선로 접지면 폭은 무한하다. 현실적으로 무한한 접지면이 있을 수 없다고 해도, 접지면이 넓을수록 좋기 때문에 실제 사용시 불편이 뒤따른다. 따라서 본 연구에서는 그림 2와 같이 접지면 폭이 G 로 제한된 유한접지면 CPW 선로를 사용하여 RHC를 설계하고자 한다. 이때 성능 저하가 거의 없이 더 작은 RHC 회로를 설계하기 위해 접지면 선폭을 어느 정도까지 유한하게 줄여도 되는지에 대한 본 연구가 의미를 지닌다.

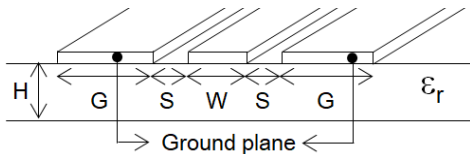


그림 2. 유한접지면을 갖는 CPW 선로의 구조
(a) 마이크로스트립 선로 (b) CPW 선로

Fig. 2. Structure of CPW transmission lines with finite ground planes (a) Microstrip line (b) CPW line

2.3 마이크로파 RHC 회로 구성

그림 3은 무선통신에서 널리 사용되는 마이크로파 180도 RHC 회로의 기본 구조이다[12]. 입력단자가 P1일 때 입력 신호는 두 출력단자 P2, P3에 동 위상으로 절반씩 분배되어 나타난다. P4로는 신호가 전달되지 않아서 P4를 격리단자라고 부른다. 이 경우 P1을 Σ -단자라고 부른다. 한편 입력 신호가 P4에 인가될 때는 P2, P3에 절반씩 180도 역위상으로 분배되고, P1이 격리단자가 된다. 이 때 P4를 Δ -단자라고 부른다. 따라서 P1과 P4는 상호 격리(Isolation) 관계이다. 이처럼 입력단자가 어디냐에 따라 출력신호간 위상차가 0도 또는 180도가 된다. 회로를 구성하는 선로의 총길이가 $6\lambda_g/4$ 로 전기적 길이가 540도인데, 이를 원형으로 구성하면 그림 3과 같이 되므로 180도 원형 하이브리드 커플러(RHC)라는 명칭으로 불린다.

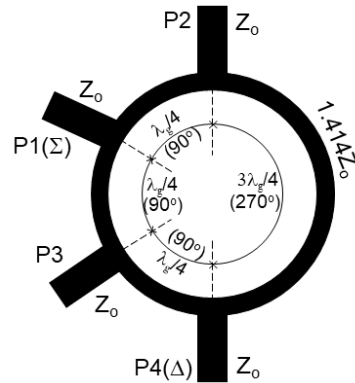


그림 3. 마이크로파 180도 RHC의 기본 구조
Fig. 3. Basic structure of microwave 180o ring hybrid coupler

III. CPW 선로를 이용한 RHC의 소형화

그림 3에 보인 RHC 회로의 핵심부(Core)를 구성하는 선로의 총길이는 $1.5\lambda_g$ 이다. 그런데 무선통신 시스템에서는 전체 마이크로파 대역에서 상대적으로 주파수가 낮은 L-C밴드를 많이 사용하고 있다. 따라서 RHC 단독 회로나 상위 레벨의 복합적인 회로 및 시스템을 구성하는데 있어서, 그림 3의 레이아웃이 차지하는 면적이 상당히 넓다. 따라서 이를 줄이기 위한 방안이 필요한데, 잘 알려진 방법 가운데 하나로 P2-P4 사이에 있는 270도 선로에 180도의 위상을 급격하게 갖는 위상반전구조(PCS)를 삽입하는 방법이 있다[8].

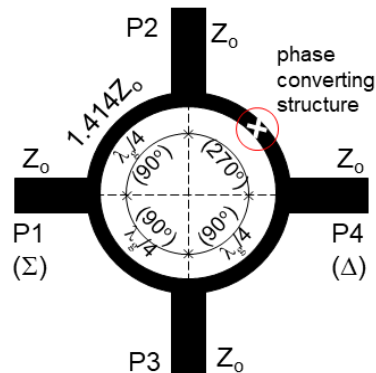


그림 4. 위상반전구조를 이용한 소형화된 RHC
Fig. 4. Size-reduced ring hybrid coupler using PCS

그림 4는 이에 대한 개념도를 보여주고 있다. 180도 PCS를 삽입하면 순간적으로 전기적 길이 $2\lambda_g/4$ 선로를 삽입한 꼴이 된다. 결과적으로는 필요한 전기적 길이인 270도를 유지시킨 채 물리적으로는 나머지 $\lambda_g/4$ 만 필요하므로 그림 4처럼 소형화할 수 있는 것이다.

그림 5는 CPW 선로를 이용한 180도 PCS 구조의 개념을 보여준다. 접지면이 유한하게 제한된 CPW 선로에서 가운데 신호선과 양쪽 접지면 사이에 순간적인 "X" 형태의 교차구조를 삽입하면 180도의 위상차가 얻어진다. 이것은 유한접지면 CPW 선로의 큰 장점 가운데 하나인데, 마이크로스트립 선로에서는 이런 교차구조가 불가능하다. 물론 교차구조를 만들어 주기 위한 간격(D)이 짧게나마 필요하고, 이로 인하여 이상적인 위상차에서 약간 벗어나는 오차가 발생한다. 하지만 발생하는 위상 오차는 180도에 비해 상대적으로 미약해서 RHC 성능을 현저하게 저하시킬 정도는 아니다.

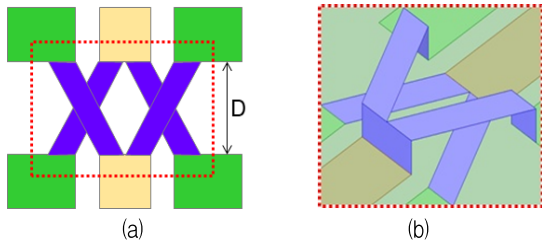


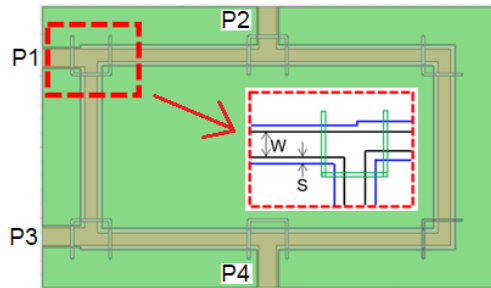
그림 5. CPW 선로를 이용한 위상반전구조의 개념도 (a) 정면도 (b) 3-D 형상

Fig. 5. Concept of the phase converting structure using CPW lines (a) Top view (b) 3-D view

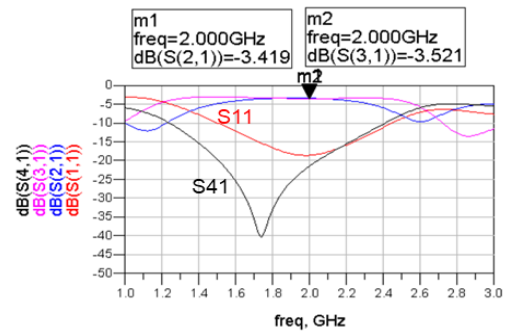
IV. CPW 선로의 유한접지면 폭에 따른 소형화된 RHC의 성능

본 장에서는 접지면이 유한하게 제한된 CPW 선로로 소형화된 마이크로파 180도 RHC를 설계하고, 또한 유한접지면의 폭을 여러 값으로 변화시킬 때도 RHC의 성능이 여전히 유지되는지에 대한 연구결과를 제시하고자 한다. 본 연구에서는 비유전율(ϵ_r)이 4.5이고 두께가 0.8mm인 FR-4 유전체 기판으로 설계 주파수 2GHz에서 모든 회로들을 설계하고 특성을 비교한다.

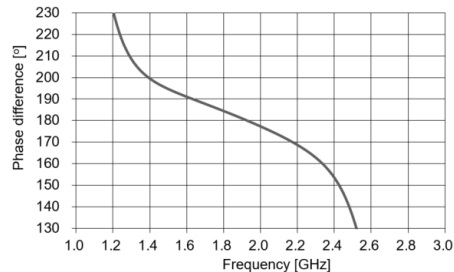
4.1 표준형 CPW RHC의 설계



(a)



freq. GHz



(b)

그림 6. 표준 CPW 선로로 설계된 2GHz 마이크로파 180도 RHC (a) 레이아웃 (b) 예측 특성

Fig. 6. Designed microwave 180o RHC using normal CPW lines for 2GHz (a) Layout (b) Predicted characteristics

그림 6(a)는 비교 대상으로 사용하기 위해, 접지면이 제한되지 않은 표준형 CPW 선로로 설계한 RHC 회로를 보여주고 있다. 시뮬레이션의 편의성을 위하여 $6\lambda_g/4$ 선로로 원형 대신 직사각형 형상의 레이아웃을 구성하였다. CPW 선로에서는 물리적으로 분리되어 있는 양쪽 접지면들이 마치 하나의 접지면인 것처럼 기능해야 하므로, 그림 6(a)에 보인 것처럼 선로간 접합 불연속 지점 주변에 브릿지(Bridge)를 다수 삽입해야 한다.

브릿지 구현을 위하여 반도체형 회로 제작 공정

에서는 에어 브릿지(Air-bridge)로 구성한다[13]. 그러나 본 연구에서는 유전체 기판으로 프로토타입(Prototype) 형태의 마이크로파 회로를 제작하므로 바닥면 에칭공정을 통하여 기판 바닥면에 브릿지(Bottom-bridge)를 구성한다. 여기에서는 자세하게 기술하지는 않으나 기판의 위쪽 접지면과 바닥의 브릿지를 연결하기 위하여 다수의 소형 비어홀(Via-hole)이 삽입되는데, 이 부분은 다음에 소개될 제작 사진으로 확인된다.

CPW 선로 설계시 어떤 특정한 Z_0 를 얻기 위해 여러 가지 조합의 (W,S)쌍이 가능하다. 본 연구에서는 모든 CPW 선로에서 " $W+2S=3\text{mm}$ "로 고정하여 설계의 편리성과 비교의 신뢰성을 도모하였다. 주어진 유전체 기판으로 CPW 선로를 설계한 결과, P1~P4가 연결되는 $Z_0=50\Omega$ 선로에서 (W,S)를 (2.5mm, 0.25mm)로 설계하였다. 또한 RHC의 코어(core) 회로를 형성하는 $1.414Z_0=70.7\Omega$ 선로 부분에서는 (1.78mm, 0.61mm)로 설계하였다.

그림 6(b)는 전자기적 시뮬레이터인 HFSS(high frequency structure simulator)로 구한 표준형 CPW RHC 회로의 신호 전달 및 위상 특성을 보여주고 있다. 설계주파수에서 S21과 S31이 각각 -3.42dB, -3.52dB로 입력전력이 두 출력단자에 1/2씩 나뉘어 전달되고 있으며, 위상차는 (180-2.64)도이다. 따라서 이상적인 RHC의 특성에 근접한 성능을 지닌다.

4.2 유한접지면 CPW 선로로 소형화된 RHC

그림 5를 통해 설명한 유한접지면 CPW 선로의 장점을 충분히 살려서 그림 7(a)와 같이 소형화된 RHC 회로를 설계하였다. 먼저 접지면의 폭(G)을 " $W+2S$ "와 동일하게 3mm로 하였다. 또한 교차구조를 위한 간격(D)도 편의상 3mm로 설정하였다.

소형화된 RHC를 그림 6(a)와 비교하면 회로의 core 부분 면적이 약 절반 정도임을 알 수 있다. $3\lambda_g/4$ 에 해당하는 선로 부분은 그림 5(a)와 같은 교차구조 때문에 전기적으로는 270도이면서도 물리적으로는 $\lambda_g/4$ 에 해당하는 길이만을 갖는다.

그림 7(b)는 시뮬레이션한 회로의 특성을 보여주고 있다. 전력분배 특성(S21, S31)이 각각 -3.56dB, -3.37dB이고, 위상차 특성도 (180-2.95)도이다. 입력 단자의 정합도(S11)는 중심주파수에서 약 -30dB이

고, 격리도(S41) 특성은 -25dB를 보이고 있다. 따라서 접지면이 유한하게 제한된 CPW 선로와 위상반전구조로 소형화된 RHC 회로가 기대한 장점을 충분히 가지고 있음이 확인된다.

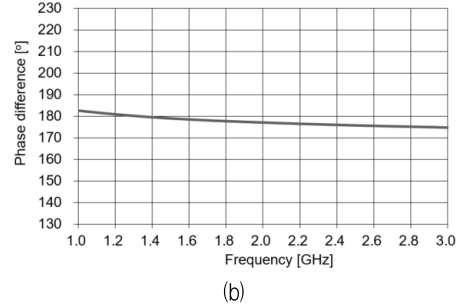
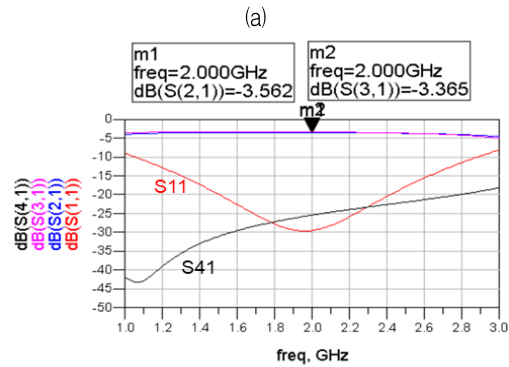
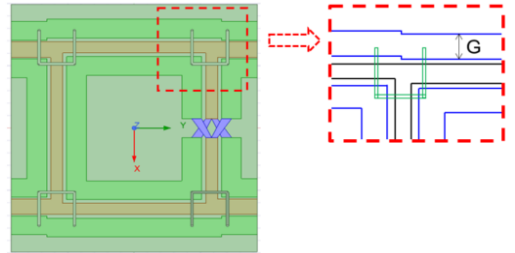


그림 7. 유한접지면 CPW 선로로 설계한 소형화된 마이크로파 180도 RHC (G=3mm)
(a) 레이아웃 (b) 예측 특성

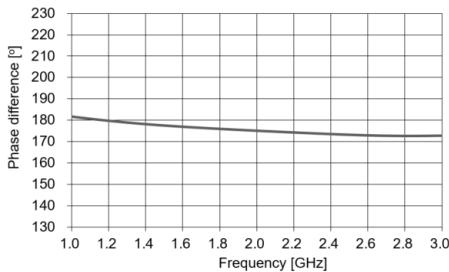
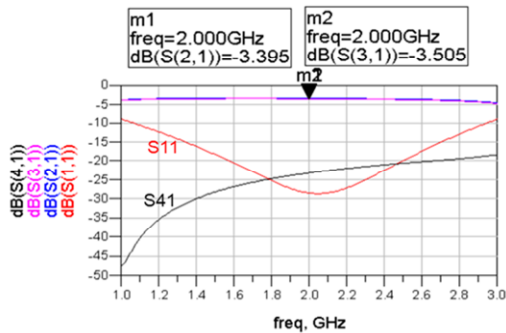
Fig. 7. Size-reduced microwave 180o RHC using the finite-grounded CPW lines (G=3mm)
(a) Layout (b) Predicted characteristics

4.3 유한접지면 폭에 따른 특성 변화

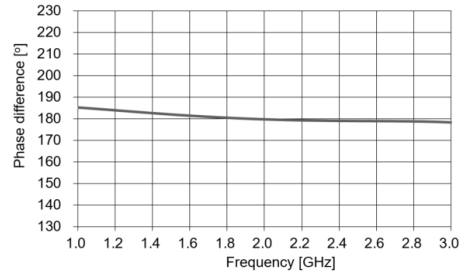
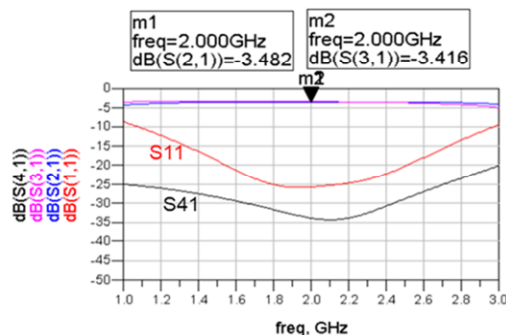
이제 그림 7(a)의 회로에서 유한접지면 폭(G)을 3mm로부터 0.5mm 간격으로 낮춰서 2mm까지 변화시킬 때 소형화된 RHC의 전기적 특성 변화를 살펴보고자 한다. G만 약간씩 줄이는 것이므로 다른 부분은 그림 7(a)와 동일하다.

그림 8(a), 8(b)는 G가 각각 2.5mm, 2mm일 때 시뮬레이션한 RHC의 특성을 보여준다. 먼저 G가 2.5mm일 때 전력분배비는 각각 -3.40dB, -3.51dB이고, 위상차 특성은 (180.4.82)도, 단자정합도는 -28dB, 격리도 특성은 -23dB 이하이다. 즉, 앞에 보인 G=3mm일 때의 전력분배 및 위상차 특성과 유사하여 유한접지면의 폭을 2.5mm로 줄여도 RHC의 특성을 충분히 얻을 수 있음을 알 수 있다.

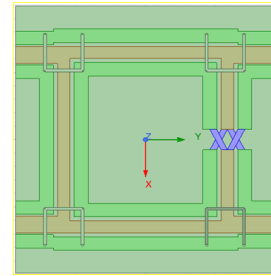
G를 2mm로 줄인 경우에도, 위상차 특성은 180도에서 크게 어긋나지 않았고, 단자 정합도는 -25dB 이하, 격리단자 특성도 -34dB 이하로 우수하며, 또한 전력분배 특성도 우수하다. 참고로 그림 7(a)의 레이아웃과 비교하기 위하여 G=2mm인 경우를 그림 8(c)에 보였다. 다른 모든 치수는 같고 단지 G만 3mm에서 2mm로 바뀌었을 뿐이다.



(a)



(b)



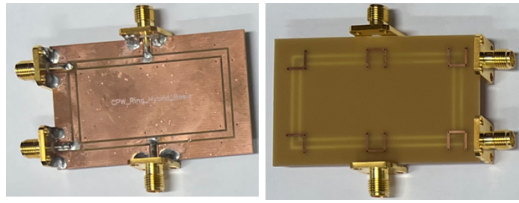
(c)

그림 8. 유한접지면 CPW 선로로 설계한 소형화된 마이크로파 180도 RHC의 레이아웃과 예측 특성 (a) G=2.5mm (b) G=2mm (c) G=2mm일 때의 레이아웃
Fig. 8. Predicted characteristics and layout of the size-reduced microwave 180° RHCs using finite-grounded CPW lines (a) G=2.5mm (b) G=2mm (c) Layout when G=2mm

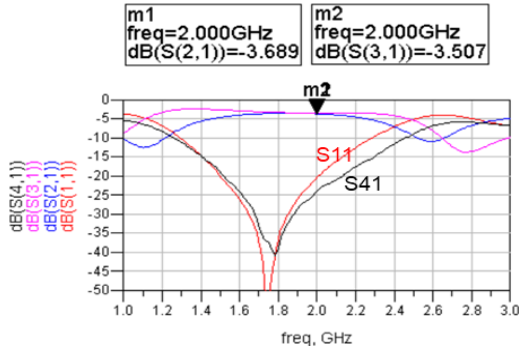
V. RHC 회로의 제작 및 측정

유한접지면 CPW선로와 위상반전구조를 이용하여 소형화된 마이크로파 180도 RHC 회로를 실험적으로 검증하기 위하여 실제 회로를 제작하고 성능을 측정하였다. 먼저 표준형 CPW 선로로 설계한 마이크로파 180도 RHC를 제작하고 성능을 측정하여 비교의 대상으로 삼았다. 그림 9(a)에서 볼 수 있듯이, 접지면의 폭이 제한되지 않았는데 이는 그림 6(a)에 보인 레이아웃 그대로이다. 위에서 언급한 브릿지는 유전체 기판의 바닥면에 구현하였고 비어홀(via-hole)로 위쪽 접지면과 연결하였다.

그림 9(b)는 벡터 회로망 분석기(VNA, Vector Network Analyzer)로 측정한 특성을 보여준다. 동작시 중심주파수가 약간 이동하기는 하였으나, 2GHz에서 전력 전력분배 특성은 -3.69dB, -3.51dB로 우수하며, 입력단자의 반사계수(S11), 격리단자에서의 격리특성(S41)도 우수하다. 위상차 특성도 179.32도로 180도에 거의 근접해 있다.



(a)



(b)

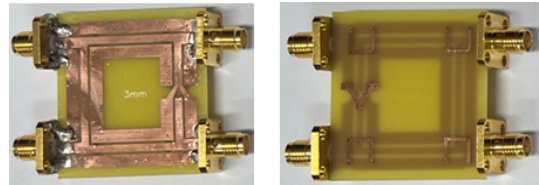
그림 9. 표준형 CPW 선로로 구성된 180도 RHC의 제작 및 측정 특성 (a)제작 사진 (b)측정 결과

Fig. 9. Fabrication and measured characteristics of the 180o RHC using normal CPW lines (a)photo (b)measured results

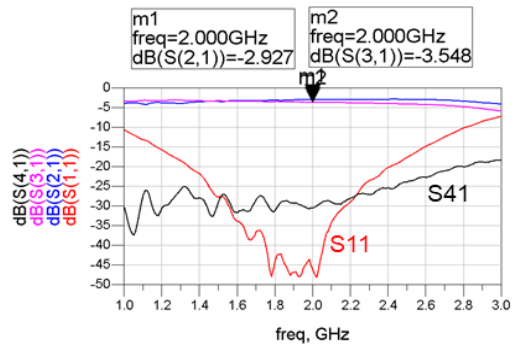
그림 10 (a), (b)는 CPW 선로의 접지면 폭(G)을 3mm로 제한한 후, 위상반전구조를 삽입하여 소형화된 RHC의 사진과 측정 성능을 보여준다. 회로의 크기는 그림 9(a)와 비교할 때 약 절반 정도이다. 측정 결과를 보면, 접지면의 폭이 유한함에 따라 이상적(Ideal)인 상태에서 벗어남에 따른 약간의 열화가 있을 수 있는데, 전력분배 성능은 -2.93dB, -3.55dB의 특성을 보인다. S11과 S41도 모두 -30dB 이하로 우수하다. 위상차 특성도 이상적인 180도로부터 5도 정도의 오차를 보일 뿐이다.

일반적으로 수동 마이크로파 표준형 회로들은 전송선로의 물리적 길이로 주파수 특성이 결정되기 때문에 대역폭이 좁기 마련이다. 그런데 그림 10(b)

와 그림 9(b)의 두 측정 결과를 비교하면, 전력분배, 단자 반사계수, 격리도, 위상차 특성 등에서 소형화된 RHC의 동작 대역폭이 대체적으로 넓어졌음을 알 수 있다. 이것은 회로 구성에서 270도 부분이 전송선로의 물리적 길이에 의해서가 아니라 “ $\lambda/4 + 180$ 도 위상반전구조”로 짧게 구현되었기 때문이다. 시뮬레이션 특성인 그림 7(b)와 그림 6(b)를 비교해도 소형화된 RHC의 광대역화 특성이 관찰된다.



(a)



(b)

그림 10. 유한접지면 CPW 선로로 소형화된 180도 RHC의 제작 및 측정 특성 (G=3mm) (a)제작 사진 (b)측정 결과

Fig. 10. Fabrication and measured characteristics of the size-reduced 180o RHC using the finite-grounded CPW lines (G=3mm) (a)photo (b)measured results

그림 11 (a), (b)는 G가 각각 2.5mm와 2mm 경우에 대한 측정 결과이다. 그리고 그림 11 (c)는 2mm 경우에 대한 제작 사진인데, 그림 10(a)와 비교하면 접지면 선폭만 다를 뿐 모두 같다. 두 가지 측정 결

과를 살펴보면, 전력분배 특성은 각각 -4.02dB, -3.77dB와 -4.01dB, -3.95dB로 약간의 손실이 추가되었으나 여전히 전력분배가 잘 되고 있음을 알 수 있다. S11과 S41도 모두 -25 ~ -30dB 정도로 우수하다. 그런데 위상차는 -172.43도와 -172.23도로 G가 좁아짐에 따라 3mm일 때보다 더 나빠진 특성을 보인다.

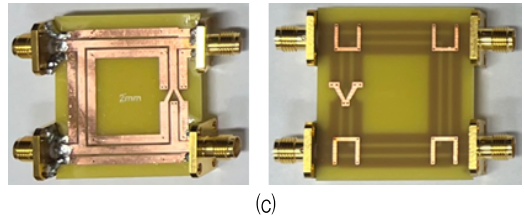
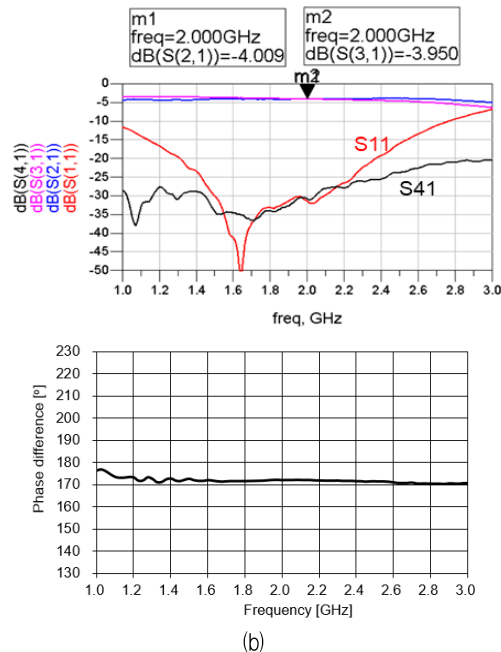
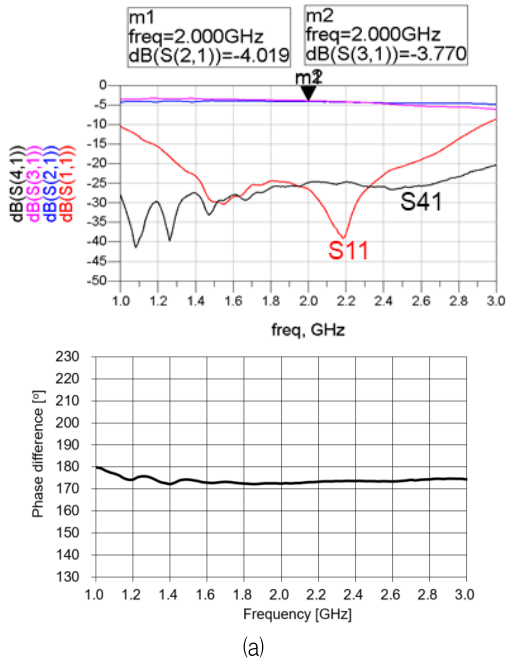


그림 11. 유한접지면 CPW 선로로 소형화된 180도 RHC의 제작 및 측정 특성 (a)G=2.5mm (b)G=2mm (c)G=2mm일 때의 제작 사진

Fig. 11. Fabrication and measured characteristics of the size-reduced 180o RHC using the finite-grounded CPW lines (a)G=2.5mm (b)G=2mm (c)photo when G=2mm

상기에서 언급한 네 가지의 설계와 측정 결과를 정리하여 표 1로 정리하였다. 시뮬레이션 결과만을 볼 때 접지면(G)의 폭을 2mm까지 줄여도 RHC 회로에 기대되는 성능을 보여줌을 알 수 있다. 또한 측정 성능을 보면, G를 유한하게 줄인 경우에는 G가 약간이라도 더 넓은 3mm의 경우에 더 우수한 특성을 보였다. 이와 같이 G를 유한하게 줄여도 이상적인 RHC의 성능과 유사한 특성을 얻을 수 있으므로 표준형 CPW선로를 이용하는 경우보다 더 작고 간단한 회로를 얻을 수 있다. 본 논문에서 측정된 결과를 기준으로 판단한다면 G를 "W+2S"와 같은 3mm일 때 가장 좋은 성능을 얻었다.

표 1. CPW 접지면에 따른 180도 RHC의 특성
Table 1. Characteristics of 180o RHCs according to the ground plane of CPW line

Structure (W+2S=3mm)		Power division (S21, S31) (dB)	Phase error (°)
simulation @2GHz	infinite ground (Fig. 6)	-3.42, -3.52	-2.64
	finite ground plane (Fig. 7, G=W+2S=3mm)	-3.56, -3.37	-2.95
	finite ground plane (Fig. 8(a), G=2.5mm)	-3.40, -3.51	-4.82
	finite ground plane (Fig. 8(b), G=2mm)	-3.48, -3.42	-0.36
measurement @2GHz	infinite ground (Fig. 9)	-3.69, -3.51	-0.68
	finite ground plane (Fig. 10, G=W+2S=3mm)	-2.93, -3.55	-4.97
	finite ground plane (Fig. 11(a), G=2.5mm)	-4.02, -3.77	-7.57
	finite ground plane (Fig. 11(b), G=2mm)	-4.01, -3.95	-7.77

표 1을 통해서 네 가지 회로 구조에 대하여 간단하게나마 HFSS 시뮬레이션 결과와 실제 측정 성능을 비교할 수 있다. 중심주파수에서 시뮬레이션 대비 측정된 전력분배를 보면 중심주파수에 각각 0.27dB, 0.18dB, 0.62dB, 0.53dB 정도의 손실이 더 크고, 위상차 오차도 최대 2~7도 정도 더 크다. 그런데 마이크로파 회로를 실제로 제작 및 측정하는 과정에서 명확하게 설명하기 어려운 오차 요인이 다소 추가된다는 점을 감안해야 한다. 오히려 이런 오차가 존재함에 불구하고 접지면의 폭을 크게 줄인 CPW 선로로 구성된 RHC 회로가 여전히 기대되는 특성을 지니면서 표준형 회로보다 대역폭도 더 넓음을 알 수 있다.

VI. 결 론

본 연구에서는 유한접지면 CPW 선로의 큰 장점 가운데 하나인 180도 위상반전구조를 이용하여 무선통신 시스템 구성이 널리 사용되는 마이크로파 180도 RHC 회로를 소형화하여 설계하고, 접지면의 폭을 다양하게 줄여도 RHC 회로의 특성이 여전히 유지됨을 살펴보았다. 크기에 있어서는, 무한접지면을 갖는 표준형 CPW 선로로 구성된 경우에 비해, 유한접지면 CPW 선로로 소형화한 회로가 약 절반 가까이로 줄어들음을 확인하였다.

소형화된 회로의 성능을 확인하기 위하여 유한접지면의 폭을 3mm부터 2mm까지 0.5mm 간격으로 줄여가면서 설계한 회로들에 대한 시뮬레이션 특성을 비교한 결과, 표준형 회로에 비하여 매우 미약한 차이만 보였을 뿐이며, 오히려 RHC가 가져야 할 전력분배 특성과 출력단자 사이의 위상차 특성이 여전히 잘 유지됨을 확인하였다.

측정으로 검증하기 위하여 접지면의 폭(G)이 3mm, 2.5mm, 2mm로 제한된 경우의 RHC 회로를 제작하여 특성을 측정하고 표준형 회로의 측정 결과와 비교하였다. 유한접지면을 갖는 회로의 경우 표준형 회로에 비하여 미약한 열화특성을 보였으나 RHC 회로가 가져야 할 전력분배 특성, 위상차 특성, 정합특성, 격리특성 등이 우수하게 유지됨을 확인하였다. 접지면 폭을 유한하게 줄이더라도 G가 조금이라도 더 넓을 때 전력분배비와 위상차 오차

특성이 더 우수하였다. 제작과정에서 가미된 미세한 공정 오차가 없을 수는 없으나, 보다 정밀한 제작과정과 측정을 통하여 오차를 줄일 수 있다고 판단된다. 측정된 특성으로 볼 때 G가 2.5mm와 2mm일 때 성능이 3mm인 경우보다 더 열화되었기 때문에, 본 연구에서 측정을 통해서 제안하는 최적의 유한 접지면 폭은 " $G=W+2S$ "이라고 판단된다.

본 연구의 결과를 통하여, 적절한 수준으로 제한된 접지면을 갖는 CPW 전송선로와 위상반전구조를 이용하여 다양한 무선통신용 회로 및 시스템을 소형화하여 설계하면서도, 동시에 표준형 CPW 선로로 구성된 회로의 성능과 유사한 전기적 특성을 갖는 얻을 수 있을 것이다. 또한 유한하게 접지면을 제한함으로써 발생하는 회로내 유휴 면적내에 다목적 회로 패턴들을 삽입하여 보다 확장된 응용에 사용할 수 있을 것이다. 그러므로 무선통신 회로 및 시스템의 소형화, 경량화 및 CPW 선로의 응용 분야 확장에 큰 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] G. Siso, J. Bonache, and F. Martin, "Dual-band rat race hybrid coupler implemented through artificial lines based on complementary split ring resonators", 2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Boston, MA, USA, pp. 625-628, Jun. 2009. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2009.5165774>.
- [2] T. Djerafi, H. Aubert, and K. Wu, "Ridge Substrate Integrated Waveguide (RSIW) Dual-Band Hybrid Ring Coupler", IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 22, No. 2, pp. 70-72, Feb. 2012. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2011.2181158>.
- [3] K. C. Gupta, R. Garg, I. Bahl, and P. Bhartia, Microstrip Lines and Slotlines(2/e), Ch. 1 and Ch. 2, Artech House, MA, 1996.
- [4] J. An, J. Lim, D. M. Kim, S.-H. Son, W.-S. Yoon, S.-M. Han, and D. Ahn, "A Consideration for Port Area in Electromagnetic Simulation for CPW Transmission Lines", Journal of KIIT, Vol.

20, No. 9, pp. 73-81, Sep. 2022. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2022.20.9.73>.

[5] J. Park, H. Mun, G.-Y. Lee, S.-M. Han, J. Lim, and D. Ahn, "Extraction of Equivalent Circuits of Microstrip Discontinuity Elements Utilizing Electromagnetic Simulation", *Journal of KIIT*, Vol. 21, No. 3, pp. 83-91, Mar. 2023. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2023.21.3.83>.

[6] H. R. Kaupp, "Characteristics of Microstrip Transmission Lines", *IEEE Transactions on Electronic Computers*, Vol. EC-16, No. 2, pp. 185-193, Apr. 1967. <https://doi.org/10.1109/PGEC.1967.264815>.

[7] A. Bagwari, R. Tiwari, and V. S. Kushwah, "CPW-Fed Micro-Strip Patch Antenna for Wireless Communication", 2020 Global Conference on Wireless and Optical Technologies (GCWOT), Malaga, Spain, pp. 1-5, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1109/GCWOT49901.2020.9391602>.

[8] T. Wang and K. Wu, "Size-reduction and band-broadening design technique of uniplanar hybrid ring coupler using phase inverter for M(H)MIC's", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 47, No. 2, pp. 198-206, Feb. 1999. <https://doi.org/10.1109/22.744295>.

[9] J. Lim, D. Kim, Y. Jeong, and D. Ahn, "A Size-Reduced CPW Balun using a "X"-Crossing Structure", 35th European Microwave Conference Proceedings, Paris, France, pp. 521-524, Oct. 2005. <https://doi.org/10.1109/EUMC.2005.1608908>.

[10] J. Lim, D. Kang, K. Park, G.-Y. Lee, S.-M. Han, D. Ahn, and Y. Jeong, "A Size-reduced CPW Ring Hybrid Coupler Using a Phase Converting Structure", *Proc. of the 2023 PIERS(Progress In Electromagnetic Research Symposium)*, Prague, Czech Republic, Jul. 2023. <https://doi.org/10.1109/PIERS59004.2023>.

[11] K. C. Gupta, R. Garg, I. Bahl, and P. Bhartia, *Microstrip Lines and Slotlines(2/e)*, Ch. 7, Artech House, MA, 1996.

[12] D. M. Pozar, "Microwave Engineering(4/e)", Ch. 7, John Wiley and Sons, Inc., New York, pp. 362-371, 2012.

[13] K. Hettak, G. A. Morin, and M. G. Stubbs, "Size Reduction of a MMIC Direct Up-Converter at 44 GHz in Multilayer CPW Technology Using Thin-Film Microstrip Stubs Loading", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 54, No. 9, pp. 3453-3461, Sep. 2006. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2006.879769>.

저자소개

임 종 식 (Jongsik Lim)



1991년 2월 : 서강대 전자공학과 (공학사)

1993년 2월 : 서강대 대학원 전자공학과(공학석사)

2003년 2월 : 서울대 대학원 전기컴퓨터공학부(공학박사)

1993년 2월 ~ 1999년 2월,

1993년 2월 ~ 1999년 2월, 2004년 9월 ~ 2005년 2월 : 한국전자통신연구원 선임연구원

2003년 3월 ~ 2003년 7월 : 서울대 BK21 정보기술사업단 박사후 연수연구원

2003년 7월 ~ 2004년 9월 : 특허청 특허심사관

2005년 3월 ~ 현재 : 순천향대학교 전기공학과 교수

관심분야 : 초고주파 및 무선통신용 회로·부품 설계, 능동·수동 소자 모델링 및 회로 응용, 주기 구조의 모델링 및 회로 응용

이 길 영 (Gil-Young Lee)



1997년 3월 : 공군사관학교 전자공학과(공학사)

2004년 2월 : 서울대 대학원 전기컴퓨터공학부(공학석사)

2012년 3월 : 美 Ohio 주립대 전기컴퓨터공학부(공학박사)

2018년 7월 ~ 2020년 6월 : 美

공군사관학교 전기컴퓨터공학부 교환교수

2007년 6월 ~ 현재 : 공군사관학교 전자통신공학과 교수

관심분야 : 항공전자 시스템, 전자전 시스템, 레이다 시스템, 안테나 설계 및 측정, 전파환경 분석

윤 원 상 (Won-Sang Yoon)



1997년 2월 : 고려대 전파공학과
(공학사)
1999년 2월 : 고려대 대학원
통신시스템공학과(공학석사)
2010년 8월 : 고려대 대학원
컴퓨터·전파통신공학과(공학박사)
1999년 3월 ~ 2015년 8월 :

한화탈레스(現 한화시스템) 통신연구소 수석연구원
2015년 9월 ~ 현재 : 호서대 전자공학과 교수
관심분야 : RF Transceivers, Reconfigurable Antenna
Systems, RF Sensor Systems

조 영 호 (Young-Ho Cho)



2005년 2월 : 서강대 전자공학과
(공학사)
2007년 2월 : 서강대 대학원
전자공학과(공학석사)
2012년 8월 : 서강대 대학원
전자공학과(공학박사)
2013년 4월 ~ 2014년 12월 :

University of California, San Diego 박사후연구원
2015년 1월 ~ 2018년 3월 : 국방과학연구소 방산기술센터
선임연구원
2025년 1월 ~ 현재 : 순천향대학교 정보통신공학과 교수
관심분야 : 지능형 RF 가변회로, 레이더 RF 소자,
위상배열안테나

한 상 민 (Sang-Min Han)



1996년 2월 : 고려대 전파공학과
(공학사)
1998년 8월 : 고려대 대학원
전파공학과(공학석사)
2003년 8월 : 고려대 대학원
전파공학과(공학박사)
2003년 10월 ~ 2004년 11월 :

UCLA Post Doctoral Research Fellow
2005년 1월 ~ 2007년 8월 : 삼성종합기술원 전문연구원
2007년 9월 ~ 현재 : 순천향대학교 정보통신공학과 교수
관심분야 : RF 시스템, Low power RF Transceivers,
Active Integrated Antenna Systems