

# 결합도와 격리도를 개선한 이중층 Re-entrant 마이크로스트립 방향성 결합기 설계

## A Design of Two Layer Re-entrant Microstrip Directional Coupler Improving Coupling and Isolation

최문호 · 이진택 · 천동완 · 신철재

Mun-Ho Choi · Jin-Taek Lee · Dong-Wan Chun · Chull-Chai Shin

### 요 약

본 논문에서는 이중층 마이크로스트립 유전체 기판을 이용하여 결합도와 격리도를 개선한 방향성 결합기를 제안하고, 설계방법을 제시하였다. 제안된 구조는 re-entrant mode 방향성 결합기의 구조를 수정하여, 결합도를 향상시키기 위해 최하층의 접지면에 어퍼처를 적용시킨 형태이다. 또한, 부동도체에 슬릿을 적용함으로써 격리도,  $S_{11}$ 에 대한 정재파비, 그리고 위상차 등에서도 우수한 특성을 얻을 수 있었다. 그 결과, 제안된 re-entrant mode 방향성 결합기는 기존의 구조보다 약 1.5 dB 정도 높은 결합도를 가질 뿐 아니라 각각 20 dB 이상의 개선된 격리도와  $S_{11}$ 에 대한 정재파비를 가짐을 확인할 수 있었다. 또한 위상 특성에서도 우수한 특성을 가지므로, 이로부터 제안된 결합기는 강한 결합이 필요한 다단 결합기에 사용될 수 있을 것이다.

### Abstract

In this paper, we proposed the directional coupler using two layer microstrip substrate which is improved coupling and isolation. Also, we notified a design method. Modified re-entrant mode coupler is the structure added to the aperture on the ground plane in order to improving the coupling value. And, by adding to slits on the floating conductor, this structure has good performance in isolation, VSWR according to  $S_{11}$ , and phase difference. As a result, proposed re-entrant mode microstrip directional coupler has about 1.5 dB more higher coupling and 20 dB more higher isolation than conventional coupler. And because this coupler has good performance in phase difference, it can be used multi-section coupler.

Key words : Re-entrant Mode, Directional Coupler, Aperture

### I. 서 론

오늘날 신속하고 신뢰성 있는 정보 통신 서비스에 대한 수요가 급증하고 있고 초고주파 시스템의 복잡성이 증가하여, 고성능이면서 집적화된 초고주파 집적 회로(Microwave Integrated Circuit: MIC)의 필요가 요구되고 있는데, 방향성 결합기는 초고주파 시스템에서 중요한 역할을 담당하고 있으므로 그 관

심이 높아지고 있다. 특히, 위상변환기(phase shifter), 평형증폭기(balanced amplifier), 평형혼합기(balanced mixer), 밸런(balun) 등의 회로는 3 dB의 강한 결합과 대역 내에서 평탄한 위상 특성을 갖는 결합기가 필요하기 때문에 결합도와 위상특성을 개선시키려는 연구가 활발히 진행 중이다. 그 중 단일 평면상에서 결합이 이루어지는 단층 마이크로스트립 결합기는 구현이 용이하다는 장점 때문에 가장 일반적이나,

아주대학교 전자공학부(Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University)

· 논문 번호 : 20030605-083

· 수정완료일자 : 2003년 7월 14일

단일 평면에서 결합이 이루어지기 때문에 결합도가 낮아 3 dB 이상의 결합도를 얻기가 힘들고 대역 또한 제한된다. 단층 구조에서 대역을 넓히기 위한 방법 중의 하나는 다단(multi-section) 구조를 이용하는 것인데, 이러한 구조는 넓은 대역을 갖기 위해서 큰 결합도를 요구하기 때문에 단층 구조로 구현하는데 있어서 한계가 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 다층 구조를 이용한 결합기들이 많이 제안되어 왔다.

특히, re-entrant 구조는 두 유전체 사이의 부동도체가 기 모드에서 가상 접지면으로 작용하여 기 모드 정전용량을 증가시키기 때문에 두 전송선로 간에 결합도를 높이는 장점을 가지고 있어 많은 연구가 되어 왔다<sup>[1]-[7]</sup>. 또한, 접지면에 다양한 어퍼처를 적용하여 광대역의 새로운 결합기를 제안한 논문들도 있었다<sup>[8]-[12]</sup>. 대역특성은 결합기의 성능에서 중요한 요인으로써 작용하기 때문에 본 논문에서는 re-entrant 구조를 수정한 다층 마이크로스트립 구조를 사용하여 결합도를 향상시켜 이를 개선시켰다. 본 논문에서 제안된 구조는 접지면에 어퍼처를 적용한 형태인데, 이로 인해 우 모드 정전용량이 감소하여 3 dB 이상의 결합도를 얻을 수 있었다. 이 높은 결합도와 우수한 위상 특성으로 인해 제안된 결합기는 강한 결합이 필요한 다단 결합기에도 쓰일 수 있음을 알 수 있었다<sup>[5]</sup>. 그러나 접지면에 어퍼처를 적용함에 따라 전송선로의 특성 임피던스 변화로 격리도와  $S_{11}$ 에 대한 정재파비가 떨어지는 단점을 가진다. 그러므로 이러한 단점을 해결하기 위해 부동도체의 양 끝부분에 슬릿을 적용함으로써 임피던스 정합을 시켰다.

모의실험 및 측정결과 본 논문에서 제안한 결합기가 기존의 결합기에 비해 결합도 및 격리도, 그리고  $S_{11}$ 에 대한 정재파비에 있어서 우수한 특성을 보였고 위상 특성 또한 우수하여 다단 결합기에도 쓰일 수 있음을 알 수 있었다.

## II. 개선된 microstrip Re-entrant 방향성 결합기 구조

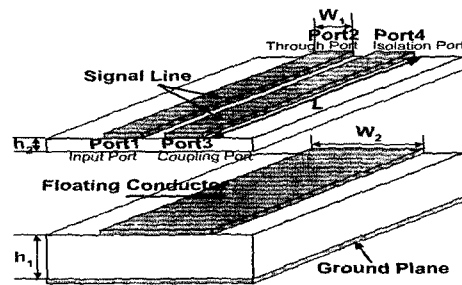
그림 1(a)는 기존의 이중층 re-entrant 마이크로스트립 방향성 결합기의 구조이다. 이 결합기는 그림

2와 같이 기 모드 상태에서 결합이 이루어지는 전송선로 사이에 만들어지는 전계벽(electric wall) 때문에 가상 접지면이 형성되어 부동도체(floating conductor)가 가상 접지면(ground plane)으로 작용하게 되는데, 이는 기 모드 정전용량을 증가시켜 두 전송선로간의 결합도(coupling)를 증가시키게 된다. 이 때 전송선로와 가상 접지면 사이에 형성되는 기 모드 정전용량은 식 (1)과 같이 주어지고, 전송선로와 가상 접지면 사이에 형성된 정전용량은  $2C_{12}$ 로 근사화할 수 있다.

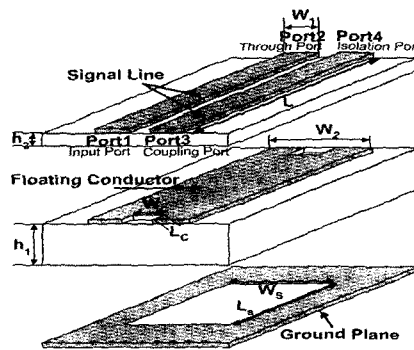
$$C_{odd} = C_2 \parallel 2C_{12} \tag{1}$$

우 모드에서는 전송선로 사이에 자계벽(magnetic wall)이 형성되어 두 전송선로 사이가 개방된 것처럼 동작하기 때문에, 우 모드 정전용량은 식 (2)와 같이 표시할 수 있다.

$$C_{even} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \parallel C_3 \tag{2}$$



(a) 기존의 결합기 구조  
(a) Conventional type



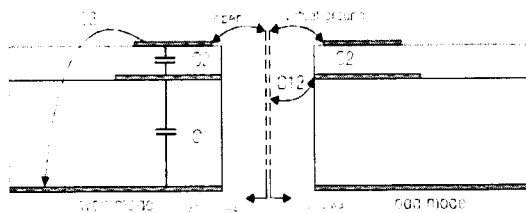
(b) 개선된 결합기 구조  
(b) Improved type

그림 1. Re-entrant mode 결합기 구조  
Fig. 1. A re-entrant mode coupler structure.

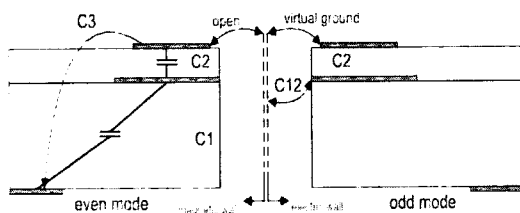
그림 1(b)는 본 논문에서 제안하는 결합기로 결합도를 향상시키기 위해 접지면에 어퍼처를 적용한 구조를 나타낸 것이다. 기 모드에서는 부동도체가 가상 접지면으로 작용하기 때문에, 기존의 re-entrant 구조와 제안된 re-entrant 구조의 기 모드 정전용량은 거의 비슷하다. 이는 어퍼처가 부동도체와 접지면 사이의 정전용량  $C_1$ 을 줄여주는 역할을 하는데, 기 모드에서는 부동도체가 가상 접지면으로 작용하기 때문에  $C_1$ 이 기 모드 정전용량에 거의 영향을 주지 못하기 때문이다. 우 모드에서 제안된 re-entrant 구조는, 접지면에 어퍼처를 적용함으로써 접지면과 부동도체 사이의 거리가 멀어져 두 도체 사이의 정전용량  $C_1$ 이 줄어든다. 따라서 식 (2)에 따라 어퍼처를 적용한 구조에서의 우 모드 정전용량  $C_{even}$ 은 적용하지 않은 구조에서보다 작음을 알 수 있고, 이는 결합도를 향상시키게 된다.

### III. 개선된 방향성 결합기의 특성

결합기의 특성을 비교하기 위해 먼저 기존의 re-entrant mode 결합기를 중심주파수  $f=1.5$  GHz에서 최대의 결합이 이루어지도록 설계하였다. 그림 1(a)



(a) 기존의 결합기 구조  
(a) Conventional type



(b) 개선된 결합기 구조  
(b) Improved type

그림 2. 우, 기 모드에서의 결합기 구조  
Fig. 2. The structure of the coupler in even, odd mode.

에서 하층 기판은  $\epsilon_{r1}=2.2$ ,  $h_1=1.57$  mm인, 상층 기판은  $\epsilon_{r2}=2.2$ ,  $h_2=0.254$  mm인 RT/duroid 5880으로 정했을 때 우, 기 모드 해석에 따라  $w_1$ ,  $w_2$  및  $L$ 을 찾으면 각각 2.2 mm, 5 mm 그리고 37 mm이었다<sup>[7]</sup>. 또한, 각 전송선로는 부동도체의 반쪽 면의 중심에 위치하도록 하였다.

본 논문에서 제안한 구조는 접지면에 어퍼처를 적용함에 따라 결합이 일어나는 두 전송선로의 특성 임피던스가 변한다. 따라서 접지면 어퍼처를 적용했을 때의 특성 임피던스를 모의실험을 통해 최대의 결합이 이루어지는  $w_1$ ,  $w_2$  및  $L$ 을 찾으면 각각 4.8 mm, 10.2 mm 그리고 37 mm이었다.

#### 3-1 접지面の 어퍼처에 따른 결합기의 특성 변화

그림 3의 (a), (b)는 접지면 어퍼처의 폭( $W_s$ )이 12 mm 일 때, 어퍼처의 길이( $L_s$ ) 변화에 따른 결합도와 격리도를 나타낸 것이다. 이때 어퍼처의 폭은 전송선로와 부동도체를 모두 덮을 정도의 크기로 임의 설정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 접지면 어퍼처가 길수록 결합도와 격리도가 향상되는 것을 볼 수 있다. 그러나 결합도의 경우, 어퍼처가 길수록 가장 좋지만 격리도의 경우는 어퍼처의 길이가 27 mm을 기준으로 다시 나빠짐을 볼 수 있다. 두 전송선로에 걸쳐진 접지면 어퍼처가 넓어질수록 우 모드 정전용량이 줄어들기 때문에 어퍼처의 길이가 길수록 결합도는 향상된다. 하지만 50  $\Omega$  SMA 타입의 커넥터를 이용하였기 때문에 포트 근처에 접지면 어퍼처가 위치하면 신호가 인가되는 전송선로에 영향을 주므로 격리도나  $S_{11}$ 에 대한 정재파비가 나빠진다. 따라서 접지면 어퍼처의 길이는 앞에서 최적화시킨 27 mm로 하였다.

그림 3의 (c), (d)는 접지면 어퍼처의 길이( $L_s$ )가 27 mm일 때, 어퍼처의 폭( $W_s$ )에 따른 결합도와 격리도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 어퍼처의 폭이 넓어질수록 결합도와 격리도 모두 향상되는 것을 볼 수 있다. 그러나 어퍼처의 폭이 16 mm 이상인 경우 결합도와 격리도의 변화가 거의 없으므로, 결합기의 전체 크기를 고려하여 접지면 어퍼처의 폭을 앞에서 최적화시킨 16 mm로 하였다.

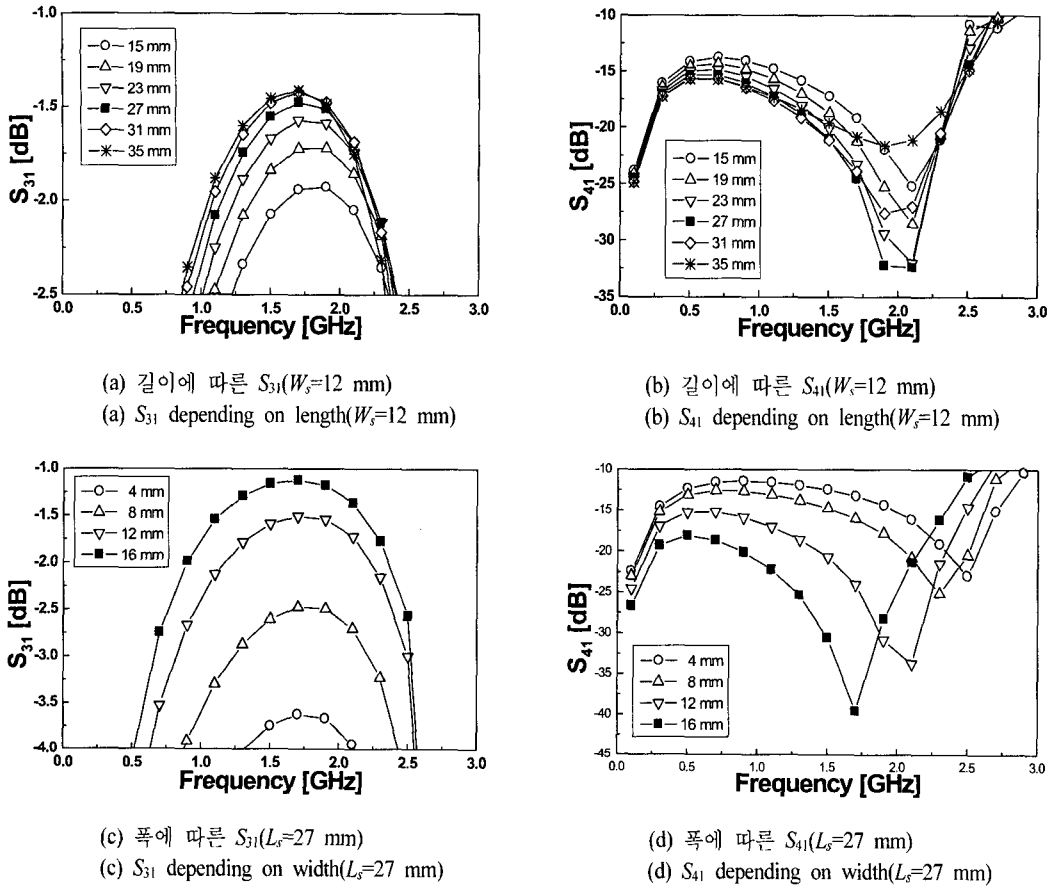


그림 3. 접지면의 어퍼처 변화에 따른 산란계수

Fig. 3. S-parameter for aperture's variation of the ground plane.

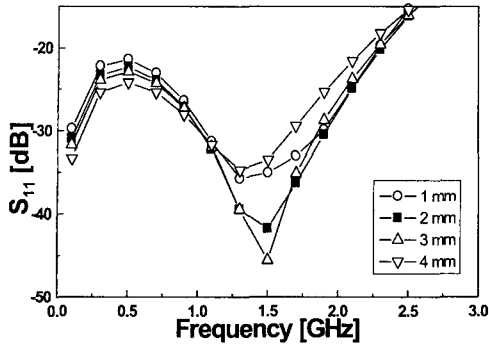
### 3-2 부동도체의 슬릿에 따른 결합기의 특성

3-1절에서 살펴보았듯이 접지면에 어퍼처를 적용하면, 기존의 re-entrant 결합기와 비교하여 1.5 dB 까지 향상된 결합도를 얻을 수 있지만 격리도나  $S_{11}$ 에 대한 정재파비는 오히려 나빠진다. 이는 접지면에 어퍼처의 적용으로 결합이 일어나는 두 전송선로의 특성 임피던스가 변하므로, 반사파의 임피던스 정합이 제대로 이루어지지 않아 격리도나  $S_{11}$ 에 대한 정재파비가 기존의 결합기에 비해 떨어지는 것으로 보인다. 따라서 부동도체에 슬릿을 적용하여 임피던스 정합을 하였다. 단, 이 때 어퍼처의 길이 및 폭은 각각 3-1절에서 최적화시킨 27 mm, 6 mm로 하였다.

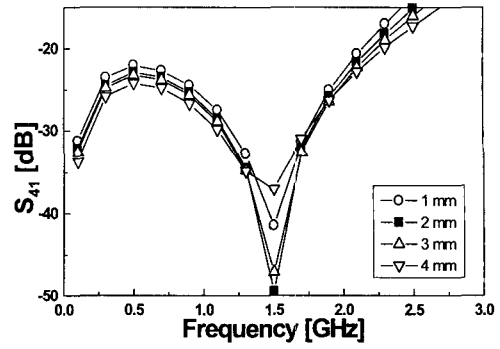
그림 4는 부동도체의 슬릿을 이용하여 임피던스 정합을 시킨 것이다. 결합이 비교적 적게 나타나는

포트 근처의 부동도체를 식각한 구조이므로 결합도는 거의 변화가 없다. 그림 4(a), (b)는 슬릿의 폭( $W_c$ )이 8 mm일 때 슬릿의 길이( $L_c$ )를 변화시킨 것이다. 격리도와  $S_{11}$ 에 대한 정재파비의 대역 및 산란계수를 모두 고려하여 슬릿의 길이는 2 mm로 하였다. 그리고 그림 4의 (c), (d)는 슬릿의 길이( $L_c$ )가 2 mm일 때 슬릿의 폭( $W_c$ ) 변화에 따른 격리도와  $S_{11}$ 에 대한 정재파비의 산란계수를 나타낸 것이다. 역시 대역 및 산란계수를 모두 고려하여 슬릿의 폭은 8 mm로 하였다. 이때, 모의실험 결과를 보면 결합기의 중심 주파수인 1.5 GHz에서는 격리도,  $S_{11}$ 에 대한 정재파비 모두 40 dB 이상의 결과를 얻었고, 20 dB 이상이 되는 대역이 0.1 GHz~2.3 GHz나 되는 결합기를 얻었다.

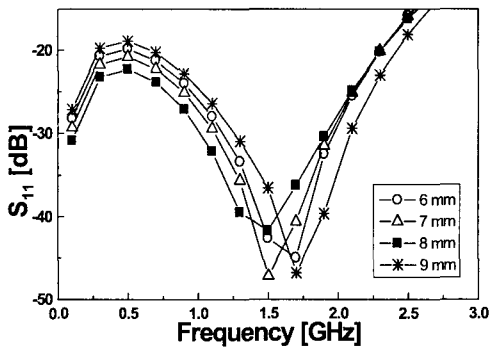
### IV. 개선된 결합기의 주파수 특성



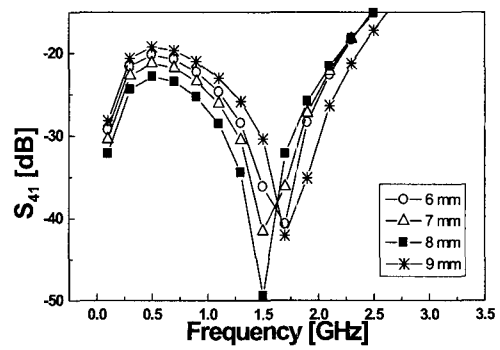
(a) 길이에 따른  $S_{11}(W_c=8 \text{ mm})$   
 (a)  $S_{11}$  depending on length( $W_c=8 \text{ mm}$ )



(b) 길이에 따른  $S_{41}(W_c=8 \text{ mm})$   
 (b)  $S_{41}$  depending on length( $W_c=8 \text{ mm}$ )



(c) 폭에 따른  $S_{11}(L_c=2 \text{ mm})$   
 (c)  $S_{11}$  depending on width( $L_c=2 \text{ mm}$ )



(d) 폭에 따른  $S_{41}(L_c=2 \text{ mm})$   
 (d)  $S_{41}$  depending on width( $L_c=2 \text{ mm}$ )

그림 4. 부동도체의 슬릿 변화에 따른 산란계수

Fig. 4. S-parameter in accordance with slit variation of the floating conductor.

표 1. 개선된 re-entrant 결합기의 설계 변수

Table 1. Design variable of improved re-entrant coupler. (단위 : mm)

설계변수	설계값	설계변수	설계값	설계변수	설계값
$W_1$	4.8	$W_c$	8	$W_3$	6.6
$S$	0.2	$L_c$	2	$L_1$	7
$W_2$	10.2	$W_s$	16	$L_2$	9
$L$	37	$L_s$	27		

그림 5는 앞의 모의실험 결과를 토대로 본 논문에서 제안하는 개선된 이중층 re-entrant 마이크로스트립 방향성 결합기의 구조를 나타낸 것인데, 각각의 설계 변수는 표 1에 정리하였다. 최상층에는 결합이 일어나는 두 전송선로가 놓여져 있고, 중간층에는 슬릿이 있는 부동도체가 전송선로 바로 밑에 놓여

기 모드에서 가상 접지면으로 작용한다. 그리고 최하층의 접지면은 결합이 많이 일어나게 하기 위해 어퍼처를 적용한 구조이다.

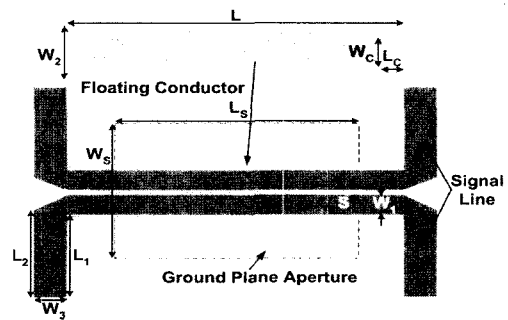


그림 5. 개선된 re-entrant 결합기의 구조

Fig. 5. Configuration of improved re-entrant coupler.

그림 5의 수정된 구조의 선택된 값을 가지고 MOM(method of moment) 방식의 시뮬레이션 tool인 IE3D(v. 9.3)를 이용한 결과 그림 6(a), (b)와 같은 산란계수 특성과 위상 특성을 얻을 수 있었다.

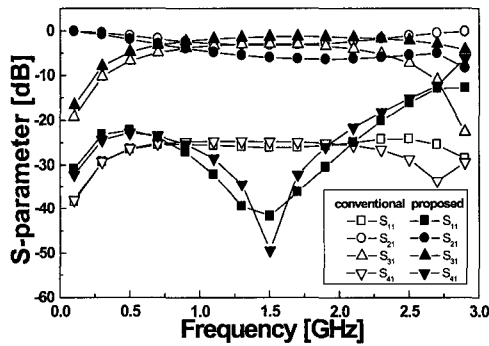
그림 6(a)에서 re-entrant mode 결합기의 산란계수 특성을 보면 기존의 re-entrant 결합기의 경우  $f=1.5$  GHz에서  $S_{21}=-3.2$  dB,  $S_{31}=-3.0$  dB이고  $S_{11}$ ,  $S_{41}$ 은 대역 내에서 대략  $-24$  dB였다. 본 논문에서 제안한 결합기의 산란계수의 특성을 보면  $f=1.5$  GHz에서  $S_{21}=-6.0$  dB,  $S_{31}=-1.4$  dB이고  $S_{11}$ ,  $S_{41}$ 은  $40$  dB 이상일 뿐 아니라 대역 내에서는  $-24$  dB 이상이었다. 그림 6(b)에서 제안된 re-entrant mode 결합기가 기존의 re-entrant mode 결합기보다 2, 3 포트 사이의 위상차

가 대역 내에서 동일함을 알 수 있다. 결과적으로 본 논문에서 제안한 결합기가 re-entrant mode 결합기에 비해 결합도나 격리도,  $S_{11}$ 에 대한 정재파비 그리고 위상 특성에서도 더 나은 결과를 보임을 알 수 있다.

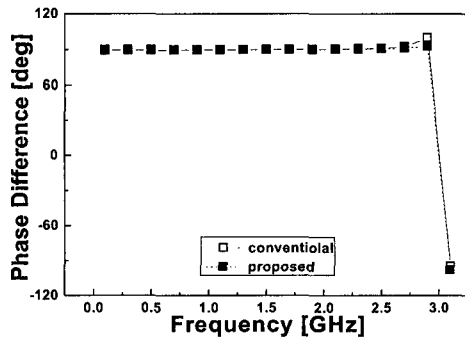
### V. 제작 및 측정결과

그림 7은 실제 제작된 결합기의 사진이다. 설계된 결합기는 SMA 타입의 커넥터를 이용하였으며, 측정은 HP-8357A Vector Network Analyzer를 이용하였다.

결합기를 실제 제작하여 측정한 결과 그림 8과 같은 특성을 얻을 수 있었다. 산란계수의 특성을 보면  $f=1.5$  GHz에서  $S_{21}=-6.0$  dB,  $S_{31}=-1.5$  dB이고  $S_{11}$ ,  $S_{41}$ 은 대역 내에서 대략  $-22$  dB 이상이었다. 그림에서 모의실험 결과에 비해 격리도나  $S_{11}$ 에 대한 정재파비가  $5\sim 10$  dB 정도 나빠졌음을 볼 수 있는데, 이는 단층기판을 접합시켜 다층기판으로 구현함에 따른 불안정한 접합에 의한 손실과, 정렬오차에 의한 임피던스의 변화 때문으로 여겨진다. 그러나 이는



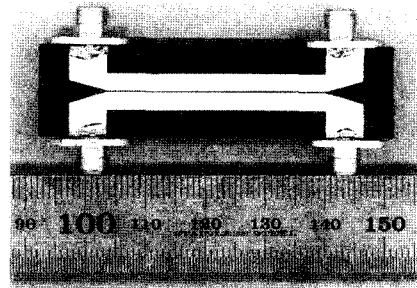
(a) 산란계수  
(a) S parameter



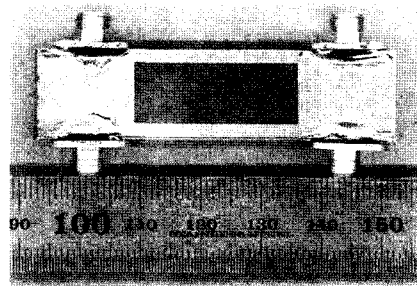
(b) 2, 3 포트간 위상차  
(b) Phase difference between 2, 3 port

그림 6. 제안된 결합기와 re-entrant mode 결합기의 산란계수 및 2, 3 포트간 위상차

Fig 6. S-parameter and phase difference between 2, 3 port of the re-entrant mode and proposed coupler.

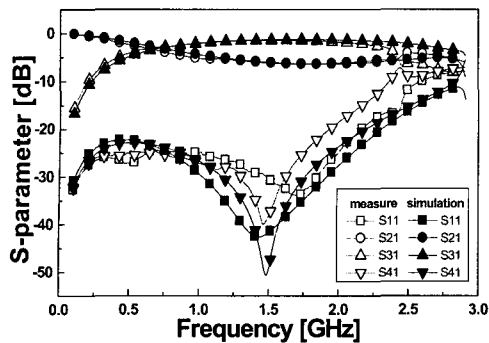


(a) 앞면  
(a) front side

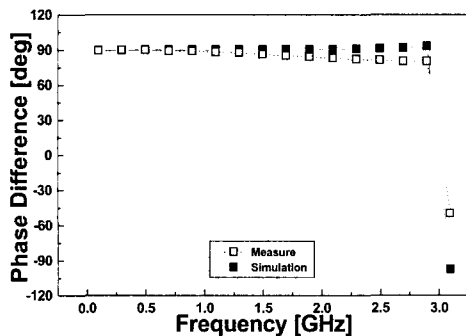


(b) 뒷면  
(b) back side

그림 7. 제작된 결합기의 사진  
Fig. 7. Photograph of fabricated coupler.



(a) 산란계수  
(a) S parameter



(b) 2, 3 포트간 위상차  
(b) Phase difference between 2, 3 port

그림 8. 제안된 결합기의 모의실험 및 측정 결과  
Fig. 8. Simulation and measurement result of the proposed coupler.

정밀한 제작기술이 뒷받침될 경우 충분히 극복될 수 있을 것으로 보인다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 기존의 이중층 re-entrant 마이크로 스트립 방향성 결합기의 결합도, 격리도 및  $S_{11}$ 에 대한 정재파비를 개선한 결합기를 제안하고 설계하였다. 특성을 개선하기 위해 부동도체 슬릿 및 접지면 어퍼처를 적용한 구조를 제안하고 최적의 설계 변수를 찾아내어 결합기를 설계하였다. 제안된 결합기가 기존의 결합기보다 1.5 dB 보다 높은 결합도를, 대역 내에서 높은 격리도와  $S_{11}$ 에 대한 정재파비를 가짐을 알 수 있었다. 또한 위상 특성이 우수하여 다단 결합에도 사용할 수 있음을 보였다.

## 참 고 문 헌

- [1] L. Lavendol, J. J. Taub, "Re-entrant directional coupler using strip transmission line", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 13, no. 5, pp. 700-701, Sep. 1965.
- [2] E. G. Cristal, "Re-entrant directional couplers having direct coupled center conductors", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 14, no. 4, pp. 207-208, Apr. 1966.
- [3] E. G. Cristal, "Nonsymmetrical coupled lines of reentrant cross section", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, pp. 529-530, Sep. 1967.
- [4] J. L. Allen, M. F. Estes, "Broadside-coupled strips in a layered dielectric medium", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 20, no. 10, pp. 662-669, Oct. 1972.
- [5] J. S. Izadian, "A new 6 ~ 18 GHz, -3 dB multi-section hybrid coupler using asymmetric broadside, and edge coupled lines", *1989 MTT International Microwave Symposium Digest*, vol. 1, pp. 243-246, 1989.
- [6] K. Sachse, A. Sawicki, "Quasi-ideal multilayer two- and three-strip directional couplers for monolithic and hybrid MICs", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 9, pp. 1873-1882, Sep. 1999.
- [7] 천동완, 신철재, "세 층 마이크로스트립 유전체 기판을 이용한 방향성 결합기 설계에 관한 연구", *한국전자과학회논문지*, 12(4), pp. 513- 520, 2001년 6월.
- [8] Jing-Feng Miao, T. Itoh, "Coupling Between Microstrip Line and Image Guide through Small Apertures in the Common Ground Plane", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 83, no. 4, pp. 361-363, Apr. 1983.
- [9] G. V. Jogiraju, V. M. Pandharipande, "Stripline to microstrip line aperture coupler", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 38, no. 4, pp. 440-443, Apr. 1990.
- [10] Chinglung Chen, Ming-Ju Tsai and N. G. Alexopoulos, "Mutual coupling between microstrips through a printed aperture of arbitrary shape in multi-layered media", *IEEE Microwave and Wireless*

*Components Letters*, vol. 6, no. 5, pp. 202-204, May 1996.

- [11] K. Rambabu, A. T. Kalghatgi, "Design equations for broad-band planar aperture coupler", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 8, no. 9, pp. 308-309, Sep. 1998.

- [12] Chunlei Wang, D. E. Kai Chang, "A 3-d broad-band dual-layer multiaperture microstrip directional coupler", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 12, no. 5, pp. 160-162, May 2002.

최 문 호



2002년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)  
 2002년 2월~현재: 아주대학교 전자공학과 석사과정  
 [주 관심분야] 이동통신 및 위성통신 부품설계

천 동 완



1999년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)  
 2001년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2001년 3월~현재: 아주대학교 전자공학과 박사과정  
 [주 관심분야] 마이크로파 회로 및 시스템

이 진 택



1997년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)  
 2002년 8월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2002년 8월~현재: 아주대학교 전자공학과 박사과정  
 [주 관심분야] 초고주파 능동, 수

동 소자

신 철 재



1964년: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
 1968년: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1983년: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)  
 1967년~1970년: 동양공업전문대

조교수

1970년~1977년: 광운대학교 조교수

1986년~1987년: 미국 Florida 대학 객원교수

1977년~현재: 아주대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] 안테나 설계 및 해석, EMI/EMC, 초고주파 통신부품 개발, 전파전파