

# 광대역 90° 위상 변이기의 등가 회로 설계

## Equivalent Circuit Design of Broadband 90° Phase Shifter

성 규 제

Gyu-Je Sung

### 요 약

본 논문에서는 마이크로스트립 선로를 이용하여 구조가 간단하고 광대역 특성을 갖는 90° 위상 변이기를 설계하고 LTCC 공정을 이용하여 제작하였다. 이 위상 변이기는 두 개의 한 쪽 끝이 접지된 90° 전송 선로 사이에 180° 전송 선로를 연결한 구조를 갖는다. 각 선로의 어드미턴스 행렬을 결합하여 제안된 90° 위상 변이기에 대한 설계 공식을 유도하고, 이를 적용하여 중심 주파수 5.75 GHz에서 대역폭 4.2 GHz, ±2°의 위상 편차를 갖는 광대역 90° 위상 변이기를 설계, 제작하였다.

### Abstract

A novel, simple and broadband 90° phase shifter was proposed and fabricated by the LTCC process. It is composed of a 180° transmission line between two 90° shorted transmission lines. Design equations for the proposed 90° phase shifter are derived by the method of admittance parameter analysis. Based on design equations, 90° phase shifter was designed and fabricated to operate in the C-band with ±2° of phase deviation.

Key words : Antenna Array, Transmission Line Analysis, LTCC, Phase Shifter, Phase Deviation

## I. 서 론

마이크로파나 밀리미터파 위상 변이기는 레이더나 위성 통신, 이동통신에 사용되고 있는 위상 배열 안테나의 핵심 부품으로 폭넓게 사용되고 있다<sup>[1]</sup>. Shiffman은  $\lambda/4$  평행 결합 선로의 한 쪽 끝을 단락 시켜서 광대역 특성을 갖는 90° 위상 변이기를 제안하였다<sup>[2]</sup>. Shiffman의 위상 변이기는 광대역 특성을 얻기 위해서 강한 결합의 평행 결합 선로를 사용하여 하므로 구현하는데 어려움이 있다<sup>[3]</sup>. Wilds는  $\lambda/4$  전송 선로 사이에  $\lambda/8$  길이의 개방, 단락 선로를 결합한 구조의 광대역 90° 위상 변이기를 제안하였다<sup>[4]</sup>. Shiffman의 위상 변이기를 개량한 다수의 광대역 특성을 갖는 90° 혹은 180° 위상 변이기가 제안되었다. Quirarte는 단락된  $\lambda/4$  평행 결합 선로를 병

렬로 연결하거나 캐스케이드로 연결하여 Shiffman의 위상 변이기에 비해 느슨한 결합으로 설계한 광대역 90° 위상 변이기를 제안하였다<sup>[5]</sup>. 최근에는 Shiffman 위상 변이기와 4개의 개방 혹은 단락 선로를 이용한 3 GHz 대역의 광대역 180° 위상 변이기가 제안되었다<sup>[6]</sup>. 이 위상 변이기는 광대역 특성을 갖고 있으나 복잡한 구조를 갖는다. 이를 보다 단순화한 구조의 X-대역의 광대역 180° 위상 변이기가 제안되었다<sup>[7]</sup>. 90°를 포함한 다양한 위상 변이 값을 갖는  $\lambda/2$  전송 선로와  $\lambda/8$  병렬 선로를 이용한 광대역 위상 변이기가 제안되었다<sup>[8]</sup>.

본 연구에서는 두 개의 한 쪽 끝이 접지된 90° 전송 선로 사이에 180° 전송 선로를 연결하여 보다 단순한 구조의 위상 변이기를 제안하였다. 각 선로의 등가 회로를 분리, 합성하고 어드미턴스 행렬 해석

한경대학교 전자공학과(Dept. of EE, Hankyong National University), 전자기술종합연구소(Institute of Electronic Technology)

· 논문 번호 : 20080218-019

· 수정완료일자 : 2008년 3월 28일

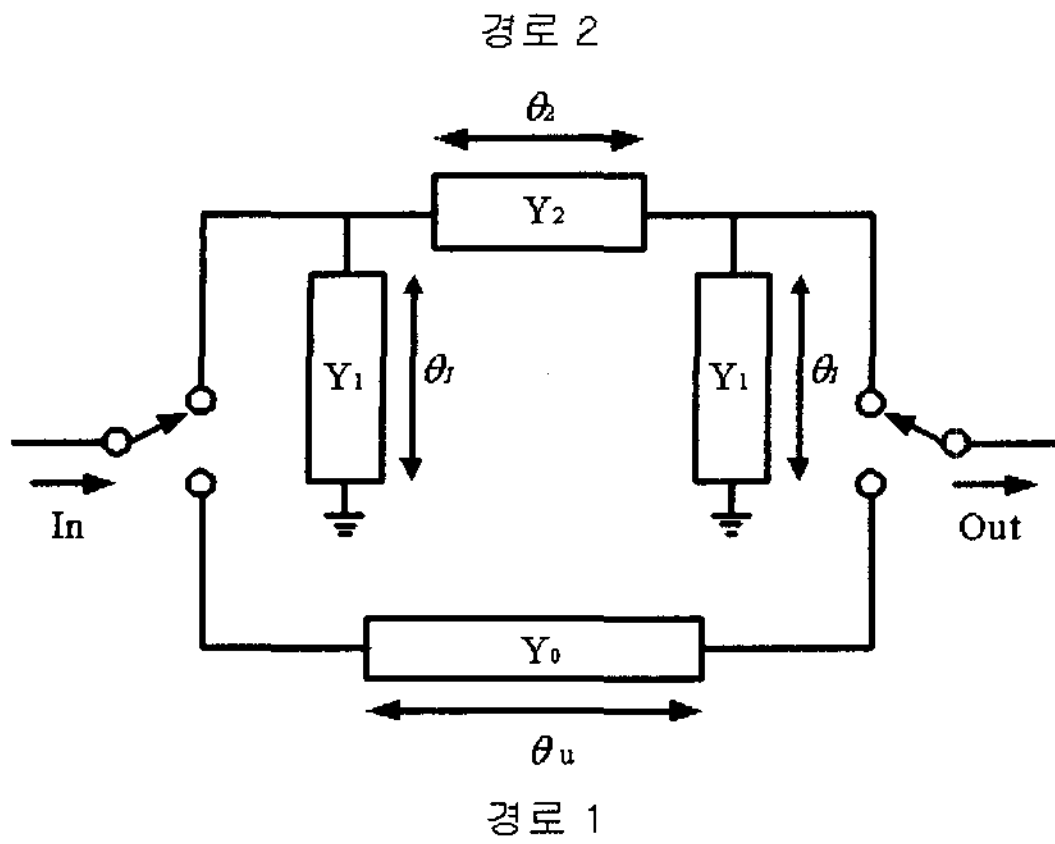


그림 1. 제안된 90° 위상 변이기  
Fig. 1. Schematic of proposed 90° phase shifter.

을 통해 설계 공식을 유도하였다. 광대역의 일정한 위상 편차를 얻기 위하여 전송 선로의 길이와 임피던스 등의 설계 변수를 고려하여 중심 주파수 5.75 GHz에서 대역폭 4.2 GHz, 위상변이 ±2°를 갖는 광대역 90° 위상 변이기를 설계하였고, LTCC 공정을 이용하여 제작하였다.

## II. 설계 이론

그림 1은 제안된 광대역 90° 위상 변이기를 보여주고 있다. 이 위상 변이기의 경로 1은 270°의 전기적 길이를 갖는 균일 전송 선로로 구성된다. 경로 2는 두 개의 한 쪽 끝이 접지된 90° 전송 선로 사이에 180° 전송 선로를 연결한 구조를 갖는다. 경로 2의 위상 변화는 중심 주파수에서 180°이다.

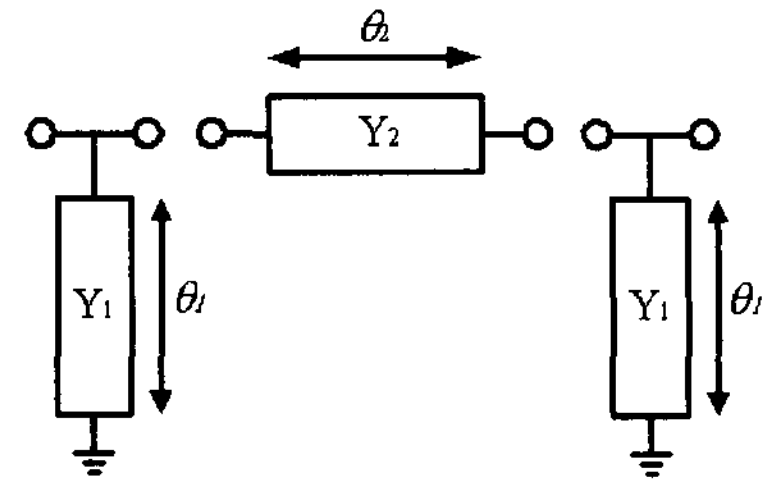
그림 2(a)는 제안된 위상 변이기 경로 2 구조의 어드미턴스 파라미터를 구하기 위해 두 개의 90° 단락 선로와 180° 전송 선로로 분리한 그림이다. 여기서 180° 전송 선로를 그림 2(b)의 π 등가 회로로 바꿔주면

$$Y_{2A} = Y_{2B} = jY_2 \tan \frac{\theta_2}{2} \quad (1)$$

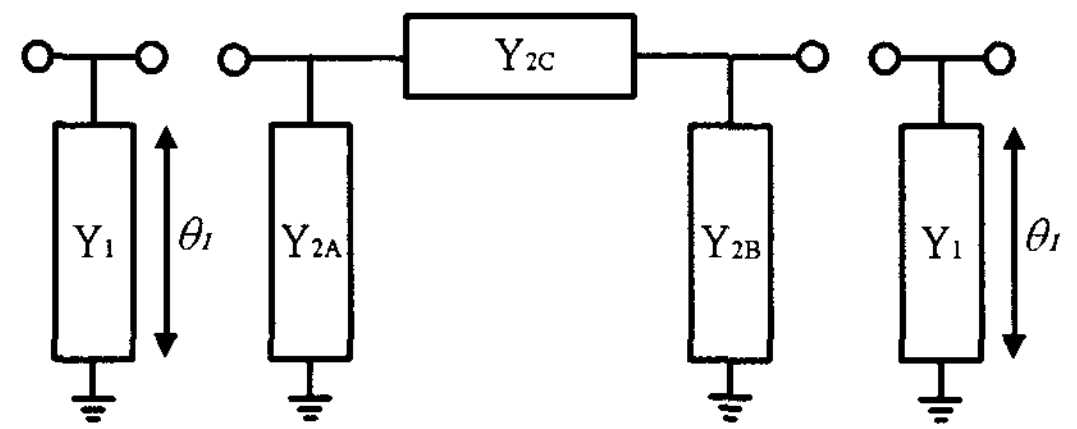
$$Y_{2C} = -jY_2 \csc \theta_2 \quad (2)$$

이 된다. 다시 그림 2(b)의 등가 회로를 그림 2(c)의 π 등가 회로로 단순화시키면

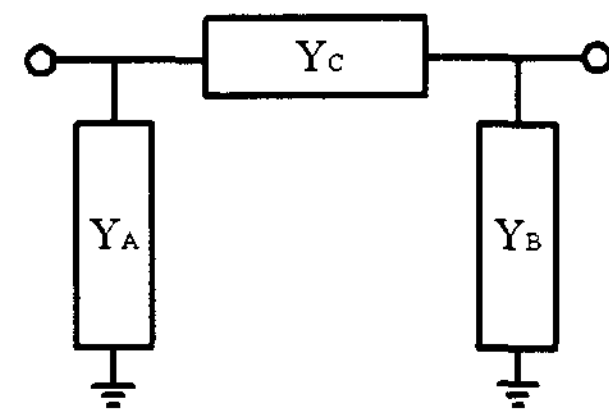
$$Y_A = Y_B = -jY_1 \cot \theta_1 + jY_2 \tan \frac{\theta_2}{2} \quad (3)$$



(a) 분리된 구조  
(a) Separated structure



(b) 180° 전송 선로의 π 등가 회로  
(b) π equivalent circuit of 180° transmission line



(c) 전체 회로의 π 등가 회로  
(c) π equivalent circuit of total structure

그림 2. 제안된 위상 변이기의 등가 회로  
Fig. 2. Equivalent circuit of proposed phase shifter.

$$Y_C = Y_{2C} = -jY_2 \csc \theta_2 \quad (4)$$

이 된다. 따라서 전체 회로의 2-포트 어드미턴스 파라미터는

$$Y_{11} = Y_A + Y_C = -jY_1 \cot \theta_1 + jY_2 \tan \frac{\theta_2}{2} - jY_2 \csc \theta_2 \quad (5)$$

$$Y_{12} = -Y_C = jY_2 \csc \theta_2 \quad (6)$$

이 된다. 여기서,  $\theta_2 = 2\theta_1 = 2\theta$  이면,

$$Y_{11} = -jY_1 \cot \theta - jY_2 \cot 2\theta \quad (7)$$

$$Y_{12} = jY_2 \csc 2\theta \quad (8)$$

이 된다. 그림 1의 90° 위상 변이기 경로 2의 전체 영

상 어드미턴스

$$Y_I = \sqrt{Y_{11}^2 - Y_{12}^2} = \sqrt{Y_2^2 - 2Y_1 Y_2 \cot \theta \cot 2\theta - Y_1^2 \cot^2 \theta} \quad (9)$$

이 된다. 그리고 위상 정수

$$\cos \phi = -\frac{Y_{11}}{Y_{12}} = 2 \frac{Y_1}{Y_2} \cos^2 \theta + \cos 2\theta \quad (10)$$

이 된다. 그리고  $Y_1=Y_2$ 이면, 전체 영상 어드미턴스

$$Y_I = Y_1 \sqrt{2(1 - \cot^2 \theta)} \quad (11)$$

이 된다. 그리고 위상 정수

$$\cos \phi = 4 \cos^2 \theta - 1 \quad (12)$$

이 된다. 따라서 그림 1에서  $\theta_2=2\theta_1=2\theta=180^\circ$ 이면 제안된 위상 변이기 경로 2의 위상 변화  $\phi=180^\circ$ 가 된다.

식 (9)와 (10)은 제안된 광대역 90° 위상 변이기의 일반적인 설계식이다. 이를 이용하여 산란 계수를 계산하면

$$S_{11} = \frac{j(Y_0^2 - Y_I^2) \tan \phi}{2Y_I Y_0 + j(Y_I^2 + Y_0^2) \tan \phi} \quad (13)$$

$$S_{21} = \frac{-Y_{12}}{Y_{11} + Y_0} (1 + S_{11}) \quad (14)$$

와 같다. 여기서  $Y_0$ 는 입출력 단자의 기준 어드미턴스다. 중심 주파수에서 임피던스 정합 상태일 때, 즉,  $Y_I=Y_0$  일 때,

$$S_{11} = 0 \quad (15)$$

$$S_{21} = \cos \phi - j \sin \phi = 1 \cdot e^{-j\phi} \quad (16)$$

가 된다.

따라서 제안된 90° 위상 변이기의 두 신호 경로 사이의 위상차는 다음과 같다.

$$\Delta\phi = \theta_u - \cos^{-1}(4\cos^2 \theta - 1) \quad (17)$$

여기서  $\theta_u$ 는 그림 1의 경로 1 균일 전송 선로의 전기적 길이이다. 그림 3은 제안된 90° 위상 변이기와

Shiffman의 위상 변이기의 특성을 비교한 것이다. 제안된 위상 변이기는 각 선로의 임피던스  $Z_1=Z_2=70.7 \Omega$ 으로 이미지 임피던스가 임피던스 정합일 때, 즉,  $Z_I=Z_0$ 일 때, 위상 편차  $\pm 2.2^\circ$ 의 값을 갖는다.  $Z_1=60 \Omega$ ,  $Z_2=50 \Omega$ 으로  $Z_1/Z_2=1.2$ 일 때, 위상 편차  $\pm 5^\circ$ 의 값을 갖는다. Shiffman의 위상 변이기는  $Z_e=80.96 \Omega$ ,  $Z_o=30.88 \Omega$ 이고,  $Z_e/Z_o=2.62$ 일 때 위상 편차  $\pm 2.2^\circ$ ,  $Z_e=86.9 \Omega$ ,  $Z_o=28.77 \Omega$ 이고,  $Z_e/Z_o=3.02$ 일 때 위상 편차  $\pm 5^\circ$ 의 특성이다. 따라서 위상 편차  $\pm 5^\circ$  이내의 위상 변이기를 마이크로스트립 라인으로 만드는 경우, 상대적으로 넓은 선폭과 좁은 선 간격의 평행 결합 선로가 요구된다. 위상 특성의 대역폭을 비교하면 위상 편차  $\pm 5^\circ$ 의 경우, Shiffman의 위상 변이기는 80%, 제안된 위상 변이기는 95%의 비대역폭, 위상 편차  $\pm 2.2^\circ$ 의 경우, Shiffman의 위상 변이기는 60%, 제안된 위상 변이기는 75%의 비대역폭을 갖는다. 그림 3에서 제안된 위상 변이기의 특성을 Shiffman의 위상 변이기와 구분하기 위하여 위상차 90°에 대해 반전시켜 표시하였다.

그림 4는 접지된 90° 전송 선로와 180° 전송 선로의 특성 임피던스에 따른 위상 특성의 변화를 보여주고 있다. 각 선로의 임피던스가 동일한  $Z_1=Z_2=50 \Omega$ ,  $55 \Omega$ ,  $60 \Omega$ 의 경우, 위상 편차가 각각  $\pm 1.3^\circ$ ,  $\pm 1.7^\circ$ ,  $\pm 2^\circ$ 로 나타났다. 표 1은 각 경우의 위상 및 크기 특성의 비대역폭을 보여주고 있다.

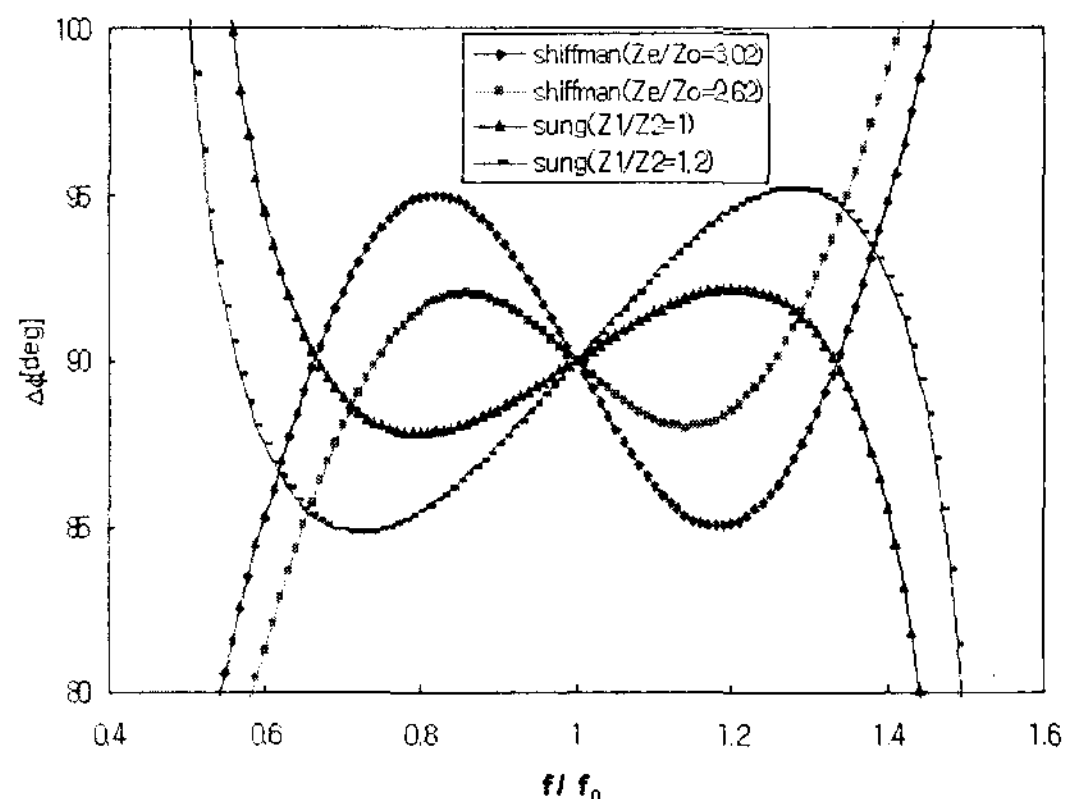


그림 3. Shiffman 위상 변이기와 제안된 90° 위상 변이기의 위상 특성 비교  
Fig. 3. Phase deviation comparison of Shiffman and proposed 90° phase shifter.

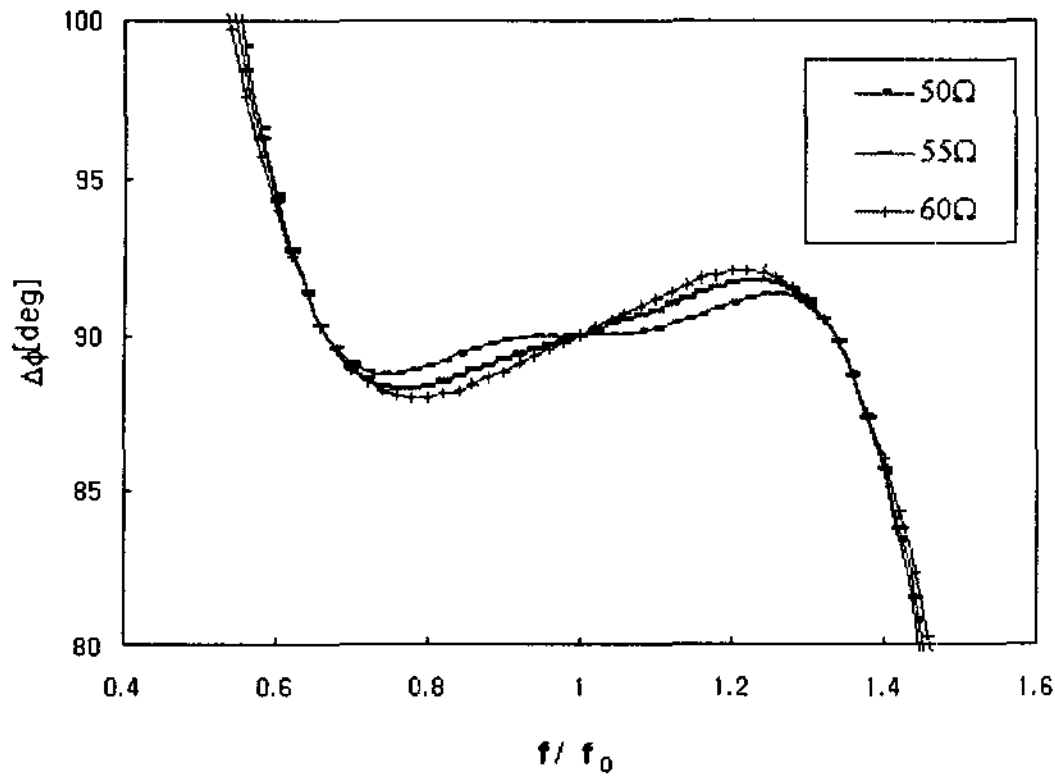


그림 4. 제안된 90° 위상 변이기의 위상 특성  
Fig. 4. Phase deviation of proposed 90° phase shifter.

표 1. 위상 편차와 반사 손실  
Table 1. Phase deviation and return loss.

$Z_1=Z_2$	위상		크기	
	$\Delta\phi$	비대역폭	R.L.	비대역폭
50 Ω	$\pm 1.3^\circ$	72 %	12.7 dB	90 %
55 Ω	$\pm 1.7^\circ$	73 %	16.3 dB	82 %
60 Ω	$\pm 2^\circ$	74 %	21.2 dB	72 %

### III. 설계 및 제작

앞 절의 설계 이론을 적용하여 표 2의 사양을 갖는 광대역 90° C-밴드 위상 변이기를 설계하였다. 위상 편차  $\pm 2^\circ$  이내에서 VSWR 1.3 이하의 특성을 만족시키기 위해 90° 전송 선로와 180° 전송 선로의 특성 임피던스를  $Z_1=Z_2=57 \Omega$ 로 설계하여 위상과 크기 특성에서 모두 대역폭을 만족시킬 수 있었다.

본 연구에서는  $\epsilon_r=41$ , 두께 0.5 mm인 LTCC 기판을 사용하였으며, 90° 전송 선로와 180° 전송 선로의 선폭이 50  $\mu\text{m}$ 인 마이크로스트립 구조로 제작하였다. 그림 5는 설계 및 제작된 위상 변이기의 크기 특성으로 설계 대역폭은 4.5 GHz이고, 제작 결과의 대역폭은 4.9 GHz로 설계 결과에 비해 반사 손실이 0.1 dB 증가하고 대역폭은 0.5 GHz 크게 나타났다. 그림 6은 위상 특성으로 설계 대역폭은 4.2 GHz이고, 제작 결과의 대역폭은 4.1 GHz로 설계 결과에 비해 위상 편차가  $-0.8 \sim 0.16^\circ$ 으로 감소하고, 대역폭은 0.1 GHz 작게 나타났다. 위와 같이 차이는 LTCC 공정에서의 여러 변수에 의한 것으로 판단된다. 그림 7은

표 2. 설계 사양  
Table 2. Design specification.

항목	사양
중심 주파수	5.75 GHz
대역폭	4.2 GHz
VSWR	1.3 이하
위상 편차	$\pm 2^\circ$ 이내

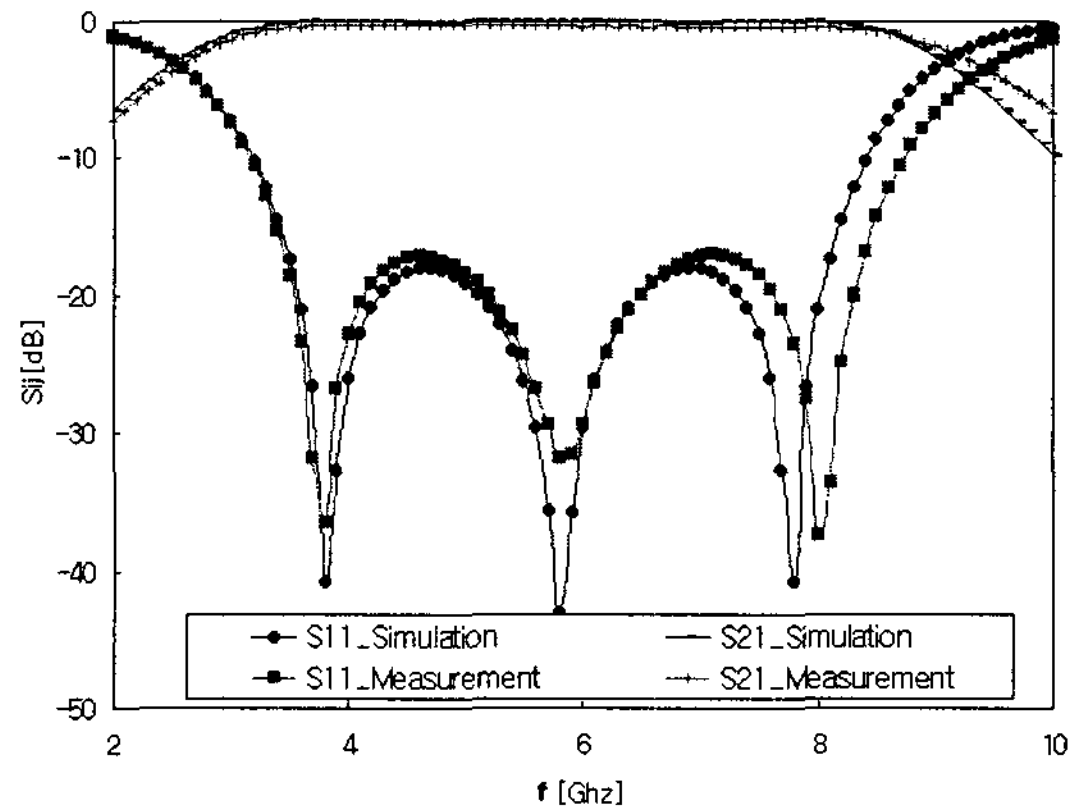


그림 5. 광대역 90° 위상 변이기의 크기 특성  
Fig. 5. Magnitude of broadband 90° phase shifter.

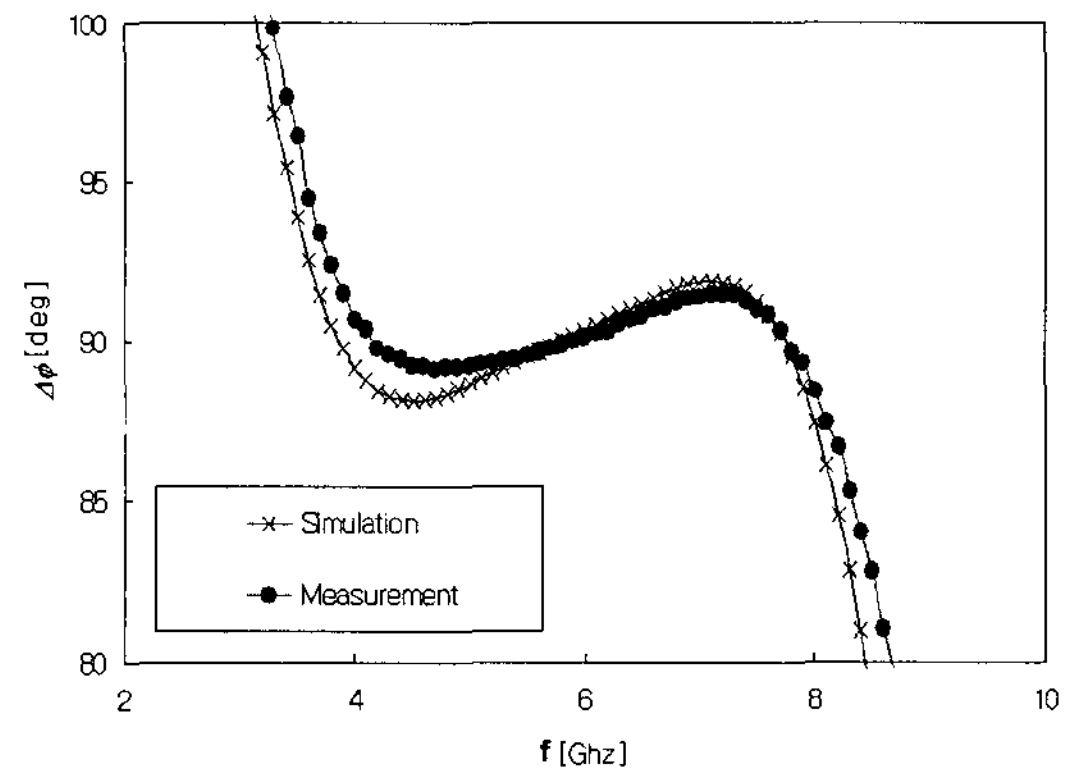


그림 6. 광대역 90° 위상 변이기의 위상 특성  
Fig. 6. Phase deviation of broadband 90° phase shifter.

제작된 위상 변이기의 사진이다.

### IV. 결론

본 연구에서는 단순한 구조의 새로운 광대역 90° 위상 변이기를 제안하고 설계, 제작하였다. 이 위상



그림 7. 제작된 위상 변위기  
Fig. 7. Outside view of proposed phase shifter.

변이기는 두 개의 한 쪽 끝이 접지된 90° 전송 선로 사이에 180° 전송 선로를 연결한 구조로 구성된다. 각 선로의 어드미턴스 파라미터를 결합하여 전체 구조의 어드미턴스 파라미터를 추출하였다. 이를 이용하여 균일 전송 선로와 제안된 구조의 위상 편차를 계산하여 설계 파라미터를 유도하였다. 이에 따라 90° 위상 변이기를 설계하여 중심 주파수 5.75 GHz에서 4.2 GHz의 대역폭, ±2°의 위상 편차를 갖는 위상 변이기를 LTCC 공정을 이용하여 제작하였다. 제안된 90° 위상 변이기는 Shiffman의 90° 위상 변이기와 비교하여 동일한 위상 편차에서 더 넓은 대역폭을 갖는다.

### 참 고 문 헌

[1] Shiban K. Koul, Bharathi Bhat, *Microwave and*

*Millimeter Wave Phase Shifters*, Artech House, 1991.

- [2] B. M. Shiffman, "A new class of broad-band microwave 90-degree phase shifter", *IRE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. MTT-6, no. 1, pp. 232-237, Apr. 1958.
- [3] J. L. R. Quirarte, J. P. Starski, "Synthesis of shiffman phase shifters", *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. MTT-39, no. 11, pp. 1885-1889, Nov. 1991.
- [4] R. B. Wilds, "Try  $\lambda/8$  stubs for fast fixed phase shifters", *Microwave*, pp. 67-68, Dec. 1979.
- [5] J. L. R. Quirarte, J. P. Starski, "A novel shiffman phase shifters", *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. MTT-41, no. 1, pp. 9-14, Jan. 1993.
- [6] 엄순영, "강한 위상 산란 특성을 갖는 회로망을 이용한 새로운 광대역 180° 위상 천이기에 대한 연구", *한국전자과학회논문지*, 14(4), pp. 401-412, 2003년 4월.
- [7] G. -J. Sung, R. Kasim, J. -Y. Ryu, and B. Kim, "Broadband 180° bit X-band phase shifter using parallel-coupled lines", *35th EUMC Proc.*, Paris, pp. 2043-2046, Oct. 2005.
- [8] 엄순영, 정영배, 전순익, 육종관, 박한규, " $\lambda/8$  병렬 스텐브들을 이용한 새로운 광대역 위상 천이기에 대한 연구", *한국전자과학회논문지*, 13(7), pp. 657-667, 2002년 8월.

성 규 제



1986년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)

1988년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)

1988년 2월~1993년 7월: 국방과학연구소 연구원

1998년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)

1998년 3월~현재: 한경대학교 전자공학과 부교수

2000년 2월~2004년 1월: 한원마이크로웨이브 기술고문

2004년 2월~2005년 1월: Arizona State University, Visiting Scholar

2006년 4월~현재: 한경대학교 전자기술종합연구소 소장  
[주 관심분야] 마이크로파 필드해석 및 회로 설계