

결합 접지 구조를 이용한 고성능 위상 천이기

High Efficient Phase Shifters Using Defected Ground Structures

한 상 민 · 김 철 수 · 안 달*

Sang-Min Han · Chul-Soo Kim · Dal Ahn*

요 약

본 논문은 결합 접지 구조(DGS)를 이용하여 높은 위상 천이 특성을 갖는 새로운 위상 천이기를 제안하였다. 결합 접지 구조의 공진점 부근에서 발생하는 큰 위상 변화를 위상 천이기에 이용하기 위해 결합 접지 구조를 갖는 위상 천이기 부하에 바랙터 다이오드를 실장하였다. 두 가지 방식의 위상 천이기를 branch-line hybrid와 coupled line hybrid를 이용하여 구현하였으며, 실험 결과 제안된 위상 천이기는 기존의 방식을 이용한 것의 최대 위상 천이 값과 비교하여 각각 135 %와 221 %의 위상 천이값 증가를 보였다.

Abstract

New phase shifters with higher phase shift values are presented using defected ground structures(DGSs). The varactor diodes are mounted on DGSs of termination loads to control the large phase variation of the DGS at resonance. Two types of phase shifters are implemented with a branch-line and a coupled line hybrid. The experimental results of the proposed phase shifters show 135 % and 221 % increases in maximum phase shifts, respectively, compared with those of conventional ones.

Key words : Phase Shifters, Defected Ground Structures, Branch-line Hybrids, Coupled Line Hybrids

I. 서 론

위상 천이기는 응용 대역의 대역폭 내에서 원하는 위상 천이 값 뿐만 아니라, 낮은 삽입 손실과 위상 오차 등의 다양한 설계 요소들을 고려하여야 하는 초고주파 소자이다^[1]. 특히 이들 중 위상 천이 한계값은 위상 천이기에 사용된 능동 소자, 즉 다이오드나 트랜지스터의 내부 캐패시턴스 변화 정도에 의해 한정되어지므로, 위상 천이기의 응용 분야에 맞는 주파수 대역폭 등을 고려하여 이들 능동 소자가 선택되어지면, 주로 여러 단의 위상 천이기를 사용함으로써 높은 위상 천이값을 구현하여 왔다^[2]. 그러나 이러한 방식에 의한 반대 급부로 사용 대역 내의 삽입 손실이 증가하고, 회로의 크기가 커지는 단점

을 안고 있다.

본 논문에서는 결합 접지 구조(defected ground structure)를 이용하여 단일 구조의 위상 천이기에서 높은 위상 천이값을 갖는 새로운 구조의 위상 천이기를 제안하였다. 하이브리드 회로를 이용한 위상 천이기의 위상 천이값은 능동 소자가 실장되는 천이기 부하에서의 반사 계수의 위상 변화에 의해 결정되므로^{[3][4]}, 결합 접지 구조와 함께 바랙터 다이오드를 실장하여 결합 접지 구조의 공진 주파수 부근에서의 위상 변화를 조절함으로써 높은 위상 천이 값을 구현할 수 있다. 이는 공진기와 병렬로 연결된 가변 캐패시터에 의해 구현되었으며, 결합 접지 구조의 마이크로스트립 공진기는 기판위에 회로 크기의 증가 없이 구현될 수 있을 뿐만 아니라, 다이오드와

삼성종합기술원(Samsung Advanced Institute of Technology)

*순천향대학교 정보기술공학부(Division of Information Technology Engineering, Soonchunhyang University)

· 논문 번호 : 20050908-103

· 수정완료일자 : 2005년 12월 20일

병렬 연결 구조로 쉽게 구현될 수 있는 매우 효율적인 공진기 구현 방식이라 할 수 있다^{[5],[6]}. 따라서 결합 접지 구조의 마이크로스트립 공진기를 바렉터 다이오드와 함께 연결하여 평면형 위상 천이기의 천이기 부하를 구성하였다.

본 논문은 두 가지 구조의 위상 천이기를 결합 접지 구조를 이용하여 branch-line hybrid와 마이크로스트립 coupled line hybrid를 이용하여 구현하였다. 제2장에서는 높은 위상 천이 특성을 갖는 위상 천이기의 설계 원리를 설명하고, branch-line hybrid를 이용한 위상 천이기의 설계 및 구현 결과를 기술하였다. 제3장에서는 소형의 회로 구현을 위해 마이크로스트립 couple line을 이용하여 위상 천이기를 설계 및 구현하였으며, 제4장에서 결론을 맺었다.

II. DGS 부하를 이용한 Branch-Line Hybrid 방식 위상 천이기

그림 1은 결합 접지 구조를 이용한 branch-line hybrid 방식의 위상 천이기를 보이고 있다. 하이브리드는 2 GHz의 중심 주파수에서 50 Ω의 특성 임피던스를 갖도록 설계되었으며, 회색으로 표시된 quad-spiral line이 회로 기판 뒷면의 그라운드 면을 제거한 결합 접지 구조이다. 이러한 quad-spiral line은 회로

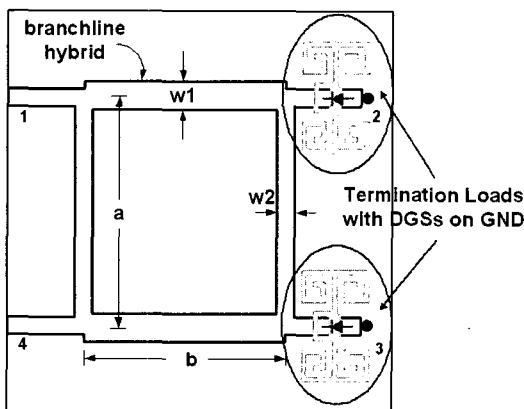
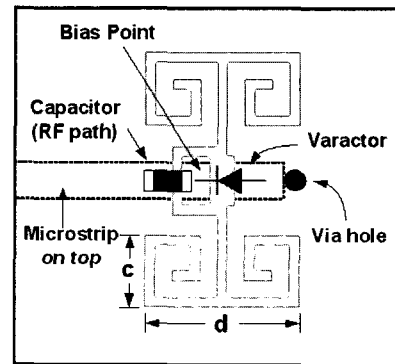


그림 1. Branch line 위상 천이기의 구조: $a = 29.75$ mm, $b = 25.5$ mm, $w1 = 3.75$ mm, $w2 = 2.0$ mm

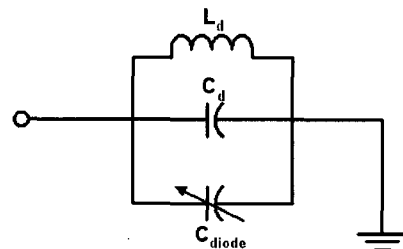
Fig. 1. Configuration of the phase shifter using a branch line hybrid: $a = 29.75$ mm, $b = 25.5$ mm, $w1 = 3.75$ mm, $w2 = 2.0$ mm.

뒷면으로의 방사 손실을 최소화하고, 다른 구조에 비해 높은 캐패시턴스 값을 가지므로 본 구조에 적합한 특성을 갖고 있다. 결합 접지 구조를 갖는 부하 부분의 뒷면을 그림 2(a)에서 자세히 보이고 있다. 윗면의 하이브리드와 연결된 마이크로스트립 라인은 종단에 via에 의해 접지되었으며, 동일 선상에 결합 접지 구조 패턴에 의해 전기적으로 고립된 지역과 그라운드 면 사이에 다이오드를 실장하였다. RF path 캐패시터는 윗면 마이크로스트립 라인에서의 신호 흐름을 다이오드까지 연결하기 위해 RF short로 사용되었다. 다이오드를 위한 급전은 다이오드 Anode 측의 고립 공간에 인덕터와 함께 전선으로 연결하였으며, 기존 구조의 경우와 같은 마이크로웨이브 전송 선로에 연결된 구조에 비해 그라운드 면에 연결되어 신호 특성에는 큰 영향이 없었다.

그림의 천이기 부하는 그림 2(b)와 같은 간단한



(a)



(b)

그림 2. (a) Branch line 위상 천이기의 DGS 부하 구조: $c = 4$ mm, $d = 5.5$ mm, (b) 등가 회로

Fig. 2. (a) Configuration of the DGS termination load for a branch line hybrid phase shifter: $c = 4$ mm, $d = 5.5$ mm, (b) The equivalent circuit.

병렬 공진기로 증가화되어 표현되어질 수 있다^[7]. 설계된 각각의 등가 회로의 값은 Ansoft 사의 HFSS 시뮬레이터의 설계 분석에 의해 각각 $L_d = 3.565$ nH, $C_d = 0.626$ pF의 값을 얻었으며, 바랙터 다이오드의 가변 캐패시터는 C_{diode} 로 표현된다. 천이기 부하는 다이오드가 실장된 공진기이므로 공진 주파수(f_R)는 다음 식 (1)과 같이 다이오드에 공급되는 바이어스 전원에 의해 조절된다.

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_d(C_d + C_{diode})}} \quad (1)$$

공진 주파수 주변에서의 임피던스의 위상 변화는 아래 그림 3에서 보이는 바와 같이 급격한 변화 특성을 보이므로, 결합 접지 구조를 갖는 천이기 부하의 반사 계수의 위상 변화 또한 매우 큰 값으로 표현되어짐을 알 수 있다.

반사형의 위상 천이기의 위상 천이는 이상적인 하이브리드의 경우, 중심 주파수에서 천이기 부하의 반사 계수(Γ)의 위상 변화 ($\angle \phi$)에 의해 얻어지므로, 천이기 부하의 임피던스에 의해 위상 천이 값이 결정된다고 할 수 있다^[11]. 따라서 가변 캐패시터를 포함한 천이기 부하의 임피던스는 간단히 다음 식과 같이 표현된다.

$$Z_{in} = R_d + jX \quad (2)$$

여기서 리액턴스는 $X = (\omega L_d - 1/\omega(C_d + C_{diode}))$ 이며,

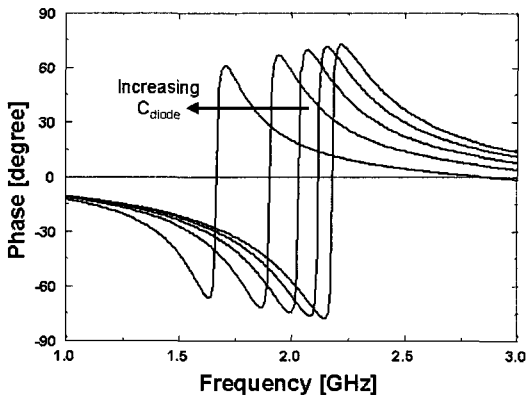


그림 3. DGS 부하의 공진 회로의 캐패시턴스 변화에 따른 위상 변화

Fig. 3. Phase variation due to changing capacitance of resonant circuit in DGS termination load.

천이기 부하에서의 반사 계수는 다음과 같이 표현된다.

$$\Gamma = |\Gamma|e^{j\phi} = \frac{(R_d - Z_0) + jX}{(R_d + Z_0) + jX} \quad (3)$$

여기서 위상 $\phi = \pi - 2\tan^{-1}(X/Z_0)$ 이다.

제안된 결합 접지 구조의 천이기 부하의 특성을 평가하기 위해 결합 접지 구조가 있는 천이기 부하와 없는 천이기 부하의 반사 계수 특성을 조사하였다. 각기 2 GHz에서 바이어스 전압의 변화에 따른 반사 계수를 Agilent 사의 ADS 시뮬레이터를 이용하여 평가하였다. 시뮬레이션에 사용된 결합 접지 구조는 앞의 HFSS 시뮬레이션에 의해 얻어진 병렬 등가회로를 이용하여 구현하였으며, 다이오드의 비선형 특성은 제조사로부터 공급받은 비선형 요소와 패키징 기생 성분으로 구성하였다. 구성된 ADS 시뮬레이션 회로도도 아래 그림 4에서 보는 바와 같다. 시뮬레이션 결과는 표 1에서 보는 바와 같이 최대 전압에서의 위상 변화 값은 결합 접지 구조를 이용한 경우 236.4°였으며, 기존의 방식을 이용한 단순 다이오드의 연결은 153.4°의 위상 변화를 보였다. 또한 반사 계수 값의 절대 값이 거의 '1'에 가까운 값을 보임으로써 회로 구조에 의한 손실도 거의 없는 것으로 예측되어졌다. 이로써 제안된 결합 접지 구조의 위상 천이기는 236.4°의 위상 천이 능력을 가질 것으로 예측되었으며, 또한 결합 접지 구조의 공진기가 위상 변화에 주요한 역할을 하였음을 알 수 있다.

제안된 위상 천이기를 유전율 2.5와 두께 31 mils을 갖는 기판에 Toshiba 사의 1SV245 바랙터 다이오드를 이용하여 구현하였다. 선택된 바랙터 다이오드

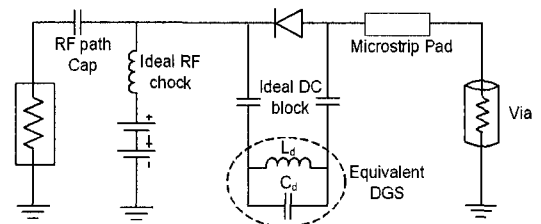


그림 4. Termination 부하의 반사계수 산출을 위한 ADS 시뮬레이션 회로도

Fig. 4. Schematics for evaluating reflection coefficients of the termination load on ADS simulation.

표 1. Branch line 위상천이기의 DGS 부하와 일반 부하의 반사 계수

Table 1. Reflection coefficients of termination loads with/without DGS in a phase shifter using a branch line hybrid.

Bias [V]	Γ [mag. / deg.]	
	With DGS	Without DGS
0	0.955 / 151.4	0.956 / 151.5
5	0.916 / -146.1	0.954 / -164.5
10	0.933 / -56.4	0.964 / -120.7
15	0.971 / -5.3	0.977 / -88.3
20	0.987 / 17.7	0.986 / -66.8
24	0.992 / 27.8	0.990 / -55.1

는 매우 큰 캐패시턴스 변화량(capacitance ratio: $C_{25V} / C_{2V} = 5.7$)을 갖는 다이오드로서 제안된 구조의 특성인 위상 변화의 차이를 보이기에 적합한 특성을 갖고 있다.

성능의 비교를 위해 동일한 주파수와 구조를 갖는 기존 방식의 천이기 부하를 갖는 위상 천이기도 제작되었다. 중심 주파수 2 GHz에서의 두 위상 천이기의 위상 천이 특성 측정 결과를 그림 5에서 나타내었다. 최대 바이어스 전압에서 기존 방식의 위상 천이값이 170°인데 반해, 제안된 위상 천이기는 최대 230°를 나타내어 동일한 회로 크기를 유지하면서

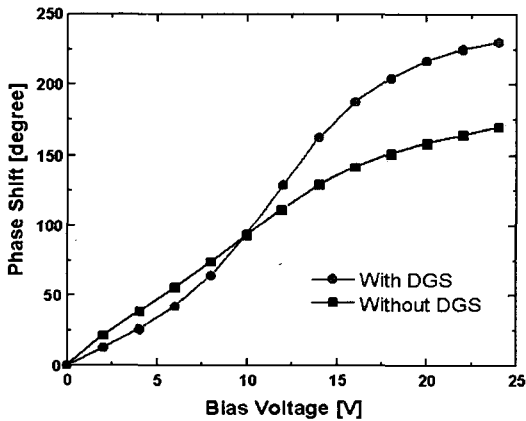
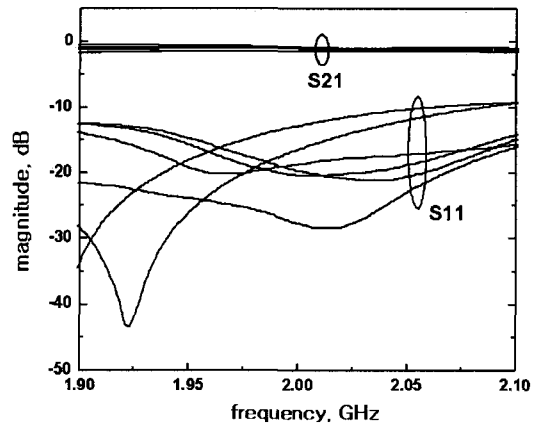


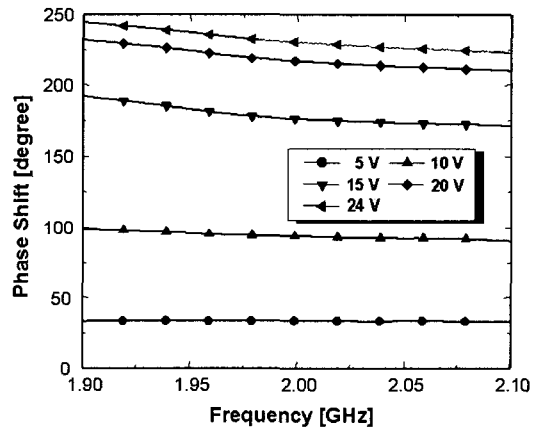
그림 5. 인가 전압에 따른 branch line 위상천이기의 위상 천이값 비교

Fig. 5. Comparison of measured phase bits of proposed and conventional phase shifters using branch line hybrid vs. bias voltages.

약 135 %의 성능 향상도를 나타내었으며, 이는 앞에서 예측한 위상천이 값에 거의 일치하는 특성을 나타내었다. 또한 그림 6에서 보이는 바와 같이 200 MHz 대역폭에서 약 1.5 dB의 삽입 손실 특성과 0.5 dB 내의 이득 평탄도를 보였으며, 10 dB 이상의 반사 손실을 나타내었다. 또한 각 바이어스 상태에서 약 5 % 이내의 위상 오차($\pm 0.4^\circ, \pm 4.3^\circ, \pm 10.4^\circ, \pm 11.0^\circ, \pm 10.8^\circ$)를 나타내었다. 기존의 결함 접지 구조가 없는 위상 천이기의 특성인 약 1 dB 삽입 손실, 0.5 dB 이내의 이득 평탄도, 최대 $\pm 3.0^\circ$ 의 위상 오차에 비해



(a) 반사 손실 및 삽입 손실
(a) Return losses and insertion losses



(b) 위상 천이값
(b) Phase bits of the proposed phase shifter

그림 6. 제안된 branch line 하이브리드 위상천이기의 성능

Fig. 6. Performance of the proposed phase shifter using a branch line hybrid with DGS termination loads.

대역폭 특성은 결합 접지 구조의 공진기 특성에 의해 일부 열화되는 것을 확인할 수 있었다.

III. DGS 부하를 이용한 Coupled Line Hybrid 방식 위상 천이기

소형 고성능의 위상 천이 특성을 갖는 결합 접지 구조의 위상 천이기를 1단의 coupled line hybrid를 이용하여 구현하였다. 소형화 구조를 위한 coupled line은 높은 결합력을 갖기 위해 유전율 10.2와 50 mils의 두께를 갖는 Duroid RO3210 기판에 2 GHz의 중심 주파수에서 14 mm의 길이와 0.45 mm의 폭, 0.1 mm의 간격으로 구현되었다. 아령 모양의 결합 접지 구조를 갖는 천이기 부하는 그림 7에서 보이는 바와 같이 구현되었으며, 회색 표시 부분이 그라운드에 에칭된 결합 접지 구조이다. Ansoft 사의 HFSS 시뮬레이션에 의해 등가 병렬 공진기의 소자 값을 추출하여 $C_d = 1.15 \text{ pF}$ and $L_d = 2.0 \text{ nH}$ 의 값을 얻었으며, 가변 캐패시터로는 Infineon 사의 BBY52-02W 바랙터 다이오드가 사용되었다. 선택된 다이오드는 소형 구성에 적합한 초소형 패키지($1.7 \times 0.8 \text{ mm}^2$)와 매우 낮은 기생 성분($R_s = 0.9 \text{ } \Omega$, $L_s = 0.6 \text{ nH}$)을 갖는 다이오드로 선택되었다.

설계된 천이기 부하의 특성을 평가하기 위해 ADS 시뮬레이션에 의해 각 바이어스 전압에 따른 반사 계수를 추출하였다. 표 2에서 나타내는 바와

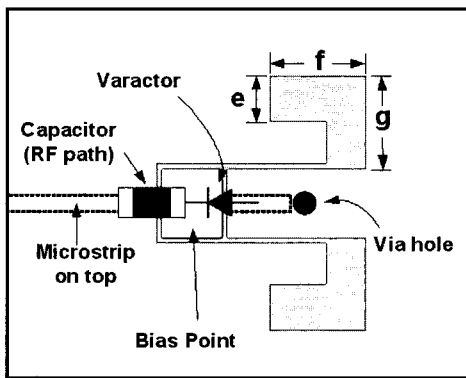


그림 7. Coupled Line 위상천이기의 DGS 부하의 구조: $e = 1.5 \text{ mm}$, $f = 3.0 \text{ mm}$, $g = 3.0 \text{ mm}$

Fig. 7. Configuration of the DGS termination load for a coupled line phase shifter: $e = 1.5 \text{ mm}$, $f = 3.0 \text{ mm}$, $g = 3.0 \text{ mm}$.

표 2. Coupled line 위상천이기의 DGS 부하와 일반 부하의 반사 계수

Table 2. Reflection coefficients of termination loads with/without DGS in coupled line phase shifter.

Bias [V]	Γ [mag. / deg.]	
	With DGS	Without DGS
0	0.949 / -102.2	0.983 / -144.4
1	0.996 / -24.7	0.987 / -120.3
2	0.977 / 10.6	0.989 / -106.2
3	0.985 / 28.6	0.990 / -96.5
4	0.989 / 39.3	0.992 / -89.2

같이 최대 바이어스 전압에서 기존 방식에 의한 위상 변화량을 약 55° 인 반면, 결합 접지 구조를 이용한 천이기 부하의 반사 계수에 의한 위상 변화는 약 141.5° 로 예측되었다. 반사 계수의 절대값 또한 거의 '1'에 가까운 값을 나타냄으로써 천이기 부하 구조에 의한 손실을 거의 없음을 알 수 있다.

그림 8은 바이어스 전압의 변화에 따른 결합 접지 구조가 있는 위상 천이기와 없는 위상 천이기의 위상 천이 비교를 나타내고 있다. 최대 위상 변위값에서 기존 방식의 위상 천이기는 65° 의 변화를 보였으며, 제안된 구조에서는 144° 의 위상 천이 특성을 나타내었다. 이는 동일 회로 크기에서 약 221%의 성

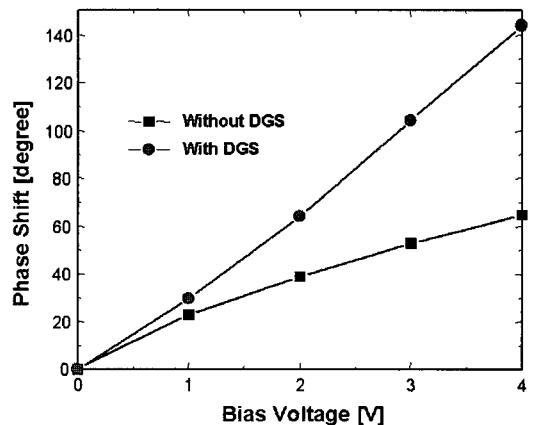
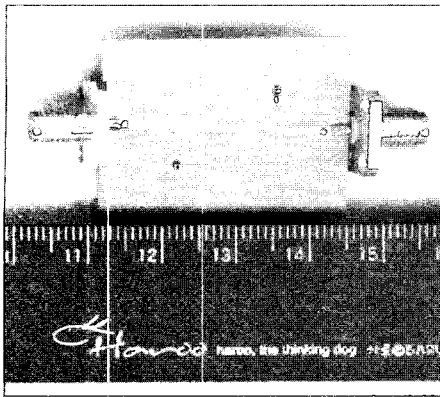
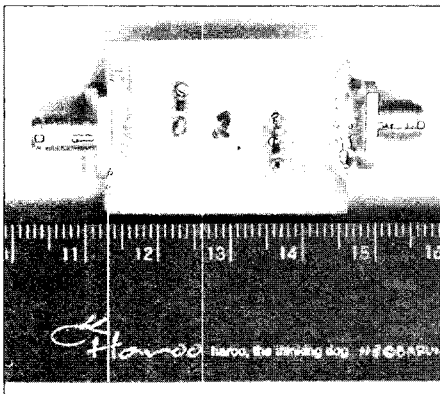


그림 8. 인가 전압에 따른 coupled line 위상천이기의 위상 천이값 비교

Fig. 8. Measured phase shifts of the phase shifters with and without DGS resonators vs. bias voltages.



(a) 앞면
(a) Front



(b) 뒷면
(b) Back

그림 9. DGS 부하를 갖는 coupled line 위상천이기 사진
Fig. 9. Photos of the coupled line phase shifter with DGS termination loads.

능 향상을 나타내고 있다. 측정된 삽입 손실은 약 3 dB이며, 반사 손실은 약 6 dB 정도로 측정되었다. 이 경우 소형화된 구조에서의 결합 접지 구조의 공진 특성으로 기존의 구조와 비교하여 삽입 손실과 반사 손실은 거의 동일하였으나, 위상 오차 특성이 동일 위상에서 약 $\pm 5^\circ$ 정도 열화되었다. 제안된 coupled line 방식의 결합 접지 구조를 갖는 위상 천이기는 동일 기판에서 구현한 기존 branch-line hybrid에 비해 1/4 크기로 구현이 가능하며, 실제 구현된 크기 또한 2 GHz 중심 주파수에서 $21.7 \times 15.0 \text{ mm}^2$ 로 구현되었다. 그림 9은 실제 구현된 위상 천이기의 앞 뒷면 사진을 보이고 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 결합 접지 구조를 이용하여 동일한 회로 크기에서 더 높은 위상 천이 특성을 가지는 고효율 위상 천이기를 제안하였다. 제안된 위상 천이기는 결합 접지 구조의 공진기 특성을 이용하여 평면형으로 설계되었다. Branch-line hybrid 방식과 coupled line hybrid 방식의 두 가지로 설계 구현되었으며, 실험 결과 동일한 크기의 기존 방식에 비해 높은 위상 천이 값을 나타내었다. 특히 couple line hybrid 방식의 경우 동일 기판에서 branch-line hybrid 방식에 비해 1/4 정도의 크기로 구현이 가능함을 보였다.

제안된 위상 천이기 설계 방식은 향후 MMIC 등의 응용 분야에 적용이 가능할 뿐만 아니라 시스템의 신호 제어기 설계를 여러 단의 위상 천이기 연결이 필요 없는 소형 저 손실의 회로 구현 방법으로 제안될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

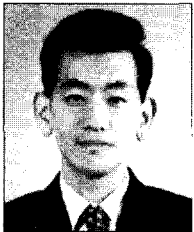
- [1] S. K. Koul, S. Mahapatra, *Microwave and Millimeter Wave Phase Shifters*, vol. 2, Artech House, Norwood, 1991.
- [2] S. Lucyszyn, I. D. Robertson, "Two-octave bandwidth monolithic analog phase shifter", *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 2, no. 8, pp. 343-345, Aug. 1992.
- [3] M. H. Kori, S. Mahapatra, "Integral analysis of hybrid coupled semiconductor phase shifters", *IEE Proc. Pt. H*, vol. 134, no. 2, pp. 156-162, Apr. 1987.
- [4] S. -M. Han, K. H. Kwon, and Y. -S. Kim, "New compact broadband phase shifters using coupled lines", *Microwave Opt. Tech. Lett.*, vol. 36, pp. 399-400, Mar. 2003.
- [5] C. -S. Kim, J. -S. Park, D. Ahn, and J. -B. Lim, "1-D periodic defected ground structure for planar circuits", *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, pp. 131-133, Apr. 2000.
- [6] C. -S. Kim, J. -S. Lim, S. Nam, K. -Y. Kang, and

D. Ahn, "Equivalent circuit modeling of spiral defected ground structure for microstrip line", *Electron. Lett.*, vol. 38, no. 19, pp. 1109-1110, Sep. 2002.

Park, G. -Y. Kim, and D. Ahn, "The equivalent circuit modeling of defected ground structure with spiral shape", *IEEE MTT-S Digest*, vol. 3, pp. 2125-2128, Jun. 2002.

[7] C. -S. Kim, J. -S. Lim, S. Nam, K. -Y. Kang, J. -I.

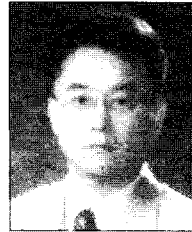
한 상 민



1996년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학사)
1998년 8월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)
2003년 8월: 고려대학교 전파공학과 (공학박사)
2003년 10월~2004년 11월: University of California, Los Angeles (UCLA), Dept. of EE, Post-Doctoral Research Fellow

2005년 1월~현재: 삼성중합기술원 전문연구원
[주 관심분야] Active Integrated Antennas, Re-configurable RF System, RF Integrated Circuits 등

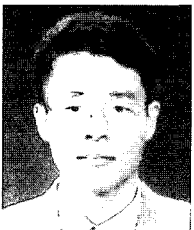
안 달



1984년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
1986년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
1990년 8월: 서강대학교 전자공학과 (공학박사)
1990년 8월~1992년 2월: 한국전자통신연구원 선임연구원

1992년 3월~현재: 순천향대학교 정보기술공학부 교수
[주 관심분야] RF, 마이크로파 수동소자 해석 및 설계 등

김 철 수



2002년 2월: 순천향대학교 전자공학과 (공학박사)
2001년 10월~2003년 2월: 한국전자통신연구원 연구원
2003년 3월~2004년 2월: 순천향대학교 차세대BIT무선부품연구센터 연구원

2004년 3월~2005년 2월: University of California, Los Angeles (UCLA) 박사후 연구원
2005년 3월~현재: 삼성중합기술원 전문연구원
[주 관심분야] RF MEMS, 마이크로파 수동 회로 모델링 및 설계 등