

논문 2004-41TC-6-9

주기적 스텐브를 이용한 슬롯결합형 마이크로스트립 방향성결합기의 특성 개선

(Performance Improvement of Slot-Coupled Microstrip Directional Coupler Using Periodic Stubs)

김 중 성*

(Jong-Sung Kim)

요 약

슬롯결합형 마이크로스트립 방향성결합기의 반사계수와 분리도를 동시에 개선시키기 위하여 기존의 사각형 형태의 슬롯에 주기적으로 다수의 슬롯이 추가되었다. 방향성결합기의 2 개모드인 위상속도와 등가회로를 이용하여 설계 방정식을 도출하였다. 이상적인 성능이 설계 예제를 통하여 가능함을 확인하였다.

Abstract

Several stubs are added to a rectangular slot for giving an improvement in both return loss and isolation for a slot-coupled microstrip directional coupler. Its closed-form design equations are derived by velocity equalization of two normal modes and network equivalence. It was verified that nearly ideal performance is achievable by design examples.

Keywords : Microstrip, Slot, Coupler, Stub, Isolation

I. 서 론

마이크로스트립을 이용한 초고주파 집적회로는 작은 면적, 경량 및 저가를 특징으로 하기 때문에 매우 다양하게 응용된다. 1/4 파장의 길이를 이용한 평행선로형 방향성결합기와 브랜치 라인 방향성결합기는 초고주파 회로에서 매우 일반적인 네트워크로서 범용적으로 이용된다. 위의 2가지 방법중에서 평행선로형 방향성결합기는 커플링 강도가 강한 응용을 만들기가 어렵고, 반면에 브랜치 라인 커플러는 타이트 커플링이 가능하지만 많은 회로 면적을 필요로 한다. 이를 보완하기 위하여 브로드사이드(Broadside) 형태의 슬롯결합형 마이크로스트립 선로를 이용한 방향성 결합기는 1988년 다나카

에 의하여 처음으로 제안되었다^[1]. 이는 2개의 마이크로스트립 선로가 대칭적으로 위치하며 이들의 중심에 있는 접지면에 사각 모양의 슬롯을 형성하여 이를 통하여 커플링이 일어나는 구조로서 기존의 마이크로스트립 커플러와는 달리 작은 크기로서 커플링의 강도를 슬롯의 폭을 이용하여 자유로이 제어할 수 있는 특성을 갖는다. 이의 응용 분야로는 안테나의 빔포밍 네트워크나 다중 증폭기 회로에 적용되어 위상변위기나 전력증폭기와 같은 능동소자를 마운팅하는데 용이한 특성을 갖는다. 이러한 장점을 갖는 반면에 이 커플러는 기존의 것에 비해서 마이크로스트립 선로의 전송 매질의 비균질로 인한 기수모드와 우수모드의 위상속도의 차로 인한 격리도(Directivity)의 저하가 심하다는 단점이 생긴다. 이는 참고문헌 [2]에서 슬롯의 폭에 따른 기수모드와 우수모드의 위상속도의 차이를 나타낸 그래프에서 이 편차가 심하다는 것을 알 수 있다. 이 커플러 뿐만 아니라 마이크로스트립 선로를 이용한 커플러는 필연적으로

* 정회원, 한국정보통신대학교 공학부
(School of Engineering, Information and Communications University)
접수일자: 2003년11월10일, 수정완료일: 2004년5월21일

모드간 위상속도의 차이가 나타나지만 슬롯 결합형에서는 이 현상이 특히 심하다.

기존의 마이크로스트립 방향성결합기의 격리도를 개선하는 방식은 많은 논문에 의해서 발표되었다^{[3]-[7]}. 이의 예로서 2개의 도체 사이에 유전체에 홈을 형성시키거나, 커플러의 양끝점에 캐패시터를 붙이거나, 커플러의 에지면에 톱니모양의 주기성을 주거나, 다층구조에서 층간 두께나 유전율을 선택에 있어서 격리도를 개선시키는 설계를 고려하는 연구가 있어 왔다. 이의 응용 범위는 모두 제한된 범위내에서 적용되며 1999년 Dydyk 에 의하여 그 동안의 연구의 장단점을 잘 요약하였으며, 이 논문에서 단일 회로소자(L 또는 C)를 이용하여 이상적인 특성을 갖는 결합기를 설계하는 수식을 제시하였다^[8]. 이는 이상적인 특성의 커플러와 단일 회로소자가 커플러에 추가된 것의 수식상의 비교에 의하여 단일 소자와 커플러의 설계 파라미터를 구하는 방식이다. 이 논문에서와 같이 에지결합형 마이크로스트립 커플러에 대해서는 많은 연구가 수행된 반면 본 논문에서 다루고 있는 슬롯결합형 커플러에 대해서는 특성 개선에 대한 연구가 이루어지지 않았다. 본 고에서는 다나까에 의하여 제시된 슬롯결합형 커플러에 대해서 주기적으로 스테브를 배열하여 이를 이용하여 모드간 위상속도를 동일하게 하는 방식을 적용한다. 이 방법이 Dydyk 에 의한 단일소자에 의한 성능개선보다 더 일반적인 설계 과정이며 이를 실험적으로 검증하여 개선 효과를 검증하였다.

II. 본 론

1. 등가회로망 해석

그림 1은 본 논문에서 고려하는 슬롯결합형 방향성결합기의 일반적인 형태를 나타내는데 이는 다나까에 의하여 제시된 형태에서 슬롯에 추가적으로 스테브를 추가적으로 형성시켰다. 커플링의 동작은 상측과 하측에 위치하는 두께 $h/2$ 이고 유전율이 ϵ_r 인 2개의 마이크로스트립 라인 상호간에 이들 전송선로 사이에 위치하는 접지면에서의 슬롯을 통하여 커플링이 발생한다. 이 커플러의 길이는 기수모드의 중심주파수 파장의 1/4에 해당하며 동작 원리는 기존의 평행선로를 이용한 커플러와 동일하다.

스테브가 주기적으로 추가된 이 커플러를 등가회로로 표현하기 위해서 전체 커플러의 길이에서 하나의 주기에 해당하는 θ 를 우수모드와 기수모드에 대한 등가회

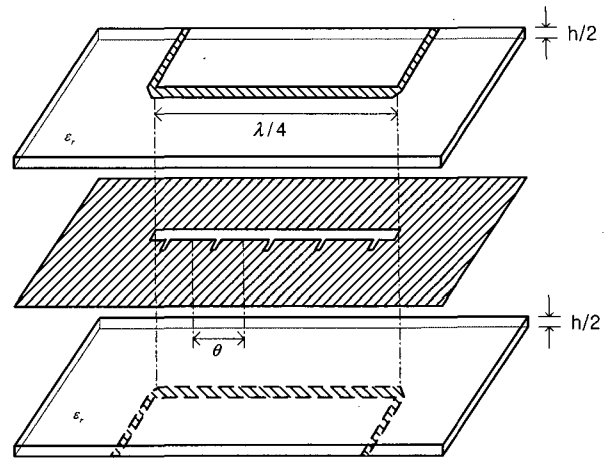


그림 1. 주기적으로 스테브가 추가된 슬롯결합형 마이크로스트립 방향성결합기 구조

Fig. 1. Structure of Slot-Coupled Microstrip Directional Coupler with Periodic Stubs.

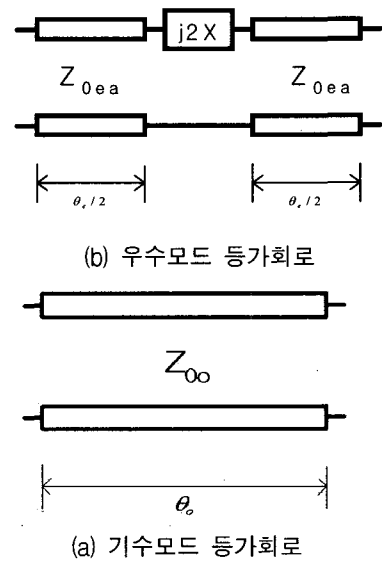


그림 2. 커플러의 하나의 주기 영역의 등가회로
Fig. 2. Equivalent Network of One Period for Slot-Coupled Directional Coupler

로를 추출해낼 수 있다. 그림1의 구조에서 기수모드와 우수모드에 대칭축은 슬롯축에 해당하며 기수모드에 대해서는 E-평면, 우수모드에 대해서는 H-평면의 역할을 한다. 기수모드는 슬롯축이 E-평면이 되므로 슬롯과 스테브의 크기와 존재 자체가 기수모드에는 전혀 영향을 주지 않는다. 따라서 기수모드는 높이 $h/2$ 이고 유전율이 ϵ_r 인 마이크로스트립 라인의 전송선로에 해당하므로 그림2(a)의 등가회로에 나타난 특성 임피던스 Z_{0o} 및 위상각(실효 유전상수), $\theta_o(\epsilon_{effo})$ 는 쉽게 구할 수 있다.

반면 우수모드에 대해서는 슬롯축이 H-평면의 역할

을 하며 이를 등가회로로 변환하면 특성 임피던스 Z_{0ea} , 위상각(실효 유전상수) $\theta_e/2(\epsilon_{reff})$ 인 전송선로, 리액턴스가 $j2X$ 인 스테브 그리고 추가적인 임피던스 Z_{0ea} , 위상각(실효 유전상수) $\theta_e/2(\epsilon_{reff})$ 인 전송선로 나타낼 수 있다. 여기에서 수식 전개와 단순화를 위하여 스테브의 폭에 의한 전기적인 길이는 없다고 가정한다. Z_{0ea} 는 슬롯영역의 우수모드 특성 임피던스를 나타내며 이는 참고문헌에 나타난 바와 같이 fullwave analysis 또는 Quasi-Static 해석에 의하여 구하는 것이 가능하다. 참고 문헌 [9]에는 슬롯의 폭에 따른 실효 유전율과 특성 임피던스를 나타내었다. 우수모드 등가회로에서 리액턴스 X 는 스테브에 의한 고려에서 발생한 것이다.

위의 각 모드에 대한 등가회로를 ABCD 파라미터로 나타내면 먼저 그림2(a)의 기수모드는 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}_o = \begin{pmatrix} \cos \theta_o & jZ_{0o} \sin \theta_o \\ jY_{0o} \sin \theta_o & \cos \theta_o \end{pmatrix} \quad (1)$$

그림2(b)의 우수모드는 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}_e = \begin{pmatrix} \cos \theta_e - XY_{0e} \sin \theta_e & jZ_{0e} (\sin \theta_e + XY_{0e} (1 + \cos \theta_e)) \\ jY_{0e} (\sin \theta_e - XY_{0e} (1 - \cos \theta_e)) & \cos \theta_e - XY_{0e} \sin \theta_e \end{pmatrix} \quad (2)$$

위의 2개의 ABCD 행렬식에서 이상적인 커플러가 되기 위한 2개의 모드간 위상속도가 동일하기 위해서는 $A_e = D_e = A_o = D_o$ 를 만족해야 한다. 이 관계로부터 다음의 설계식을 얻을 수 있다.

$$X = Z_{0ea} \frac{\cos \theta_e - \cos \theta_o}{\sin \theta_o} \quad (3)$$

여기에서 $\theta_o = \frac{\lambda}{4n}$, 그리고 $\theta_e = \frac{\lambda}{4n} \sqrt{\frac{\epsilon_{reff}}{\epsilon_{reffo}}}$ 이다. 그

리고 n 은 특성을 개선하기 위하여 추가된 스테브의 주기에 해당한다. 또한 Z_{0ea} 는 아래의 식의 유도 과정에서 구해진다. 위의 식(3)을 만족하는 리액턴스는 스테브의 길이와 폭에 의하여 설계되며 그림1 에서와 같이 임의의 폭 W_s , 임의의 길이 L_s 에 대해서 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$X = n_s^2 Z_s \tan \beta_s (L_s + \Delta L_s) \quad (4)$$

여기에서 Z_s 는 스테브의 특성 임피던스, β_s 는 스테브의 전파상수, L_s 는 스테브의 길이, ΔL_s 는 스테브의 끝에서 전자기 필드가 확장되는 현상을 길이로서 보정

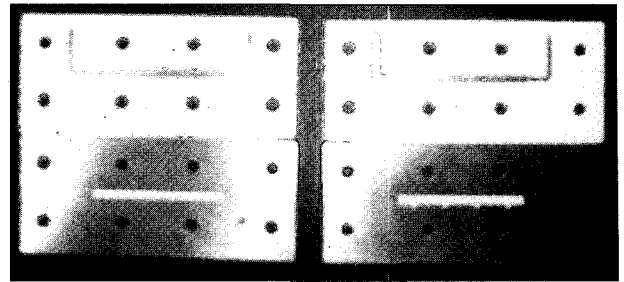


그림 3. 제작된 커플러의 단면 형상(좌측: 기존의 방식, 우측: 제안된 방식)

Fig. 3. Planar Views of Fabricated Couplers (Left: the Conventional Method, Right: the Proposed Method)

한 값이다. n_s 는 슬롯과 마이크로스트립 선로간의 천이에 해당하는 값이다. 이를 구하는 과정에 대하여는 기존의 많은 논문에서 언급하였다^[10]. 위의 식(2)의 ABCD 파라미터에서 등가 임피던스, $Z_{0ei} = \sqrt{B/C}$ 의 관계로 나타낼 수 있는데 이를 정리하면 다음의 설계식으로 나타낼 수 있다.

$$Z_{0ea} = Z_{0ei} \frac{\tan \frac{\theta_e}{2}}{\tan \frac{\theta_o}{2}} \quad (5)$$

위의 식으로부터 Z_{0ei} 는 다음의 커플러 관계식을 만족하는 값이다.

$$C = \frac{Z_{0ei} - Z_{0o}}{Z_{0ei} + Z_{0o}} \quad (6)$$

$$Z_0 = \sqrt{Z_{0ei} \cdot Z_{0o}} \quad (7)$$

위의 식 (5) 로부터 슬롯의 폭이 결정된다.

III. 실험

앞 절에서 구한 수식을 이용하여 주기적인 스테브를 갖는 슬롯결합형 방향성 결합기를 설계한다. 본 논문에서 제작하는 것은 10dB 의 커플링 지수를 가지며 중심 주파수는 1.5GHz 로 한다. 본 연구에서는 2개의 커플러를 제작하였는데 하나는 기존의 다나카 논문에서 처음으로 제시한 방식을 이용한 것이고 다른 하나는 스테브를 추가한 것을 제작하여 상호 특성을 비교하였다. 그림 3에는 실제 제작된 2개의 커플러의 조립되기 이전의 단면 형상을 나타내었다. 좌측에는 기존의 사각슬롯을 이용한 것이고 이 슬롯의 뒷면에 마이크로스트립 라인이 위치한다. 우측에는 스테브가 추가된 커플러를 나타

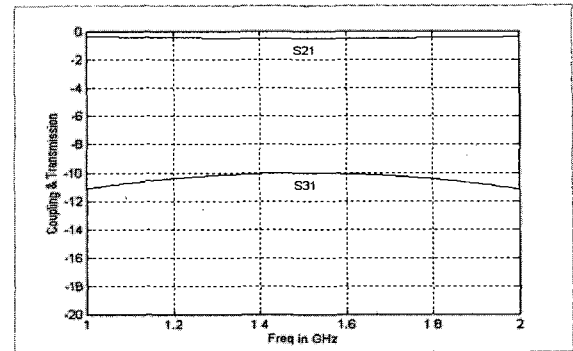
표 1. 설계 파라미터

Table 1. Design Parameters of Two Directional Couplers.

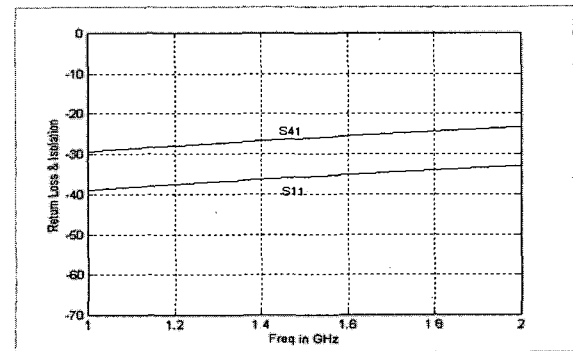
parameters	without stubs	with 4 stubs
Z_{0ea} [Ω]	69.37	64.59
Z_{0o} [Ω]	36	36
W_m [mm]	1.91	1.91
G [mm]	2.0	1.875
L [mm]	31.66	30
W_s [mm]		0.8
L_s [mm]		1.0
X [Ω]		1.77
h [mm]	1.016	1.016
ϵ_r	3.38	3.38
ϵ_{reffe}	2.42	2.45
ϵ_{reffo}	2.78	2.78

내었다. 표 1에는 2개의 커플러의 물리적 파라미터를 나열하였다. 기판의 유전율은 3.38 높이는 1.016mm 이며 스티브의 주기는 4로 결정하였다. 여기에서 커플러의 길이에서 주기격자의 수를 정하는 문제는 커플러의 설계와 특성에 영향을 준다. 너무 작으면 스티브의 길이가 길어져서 스티브의 물리적 구조에 따라서 커플러의 특성이 민감하다. 주기가 너무 많으면 스티브의 길이는 짧지만 스티브의 폭 자체의 전기적 위상을 무시하기 힘들어 설계에 이를 반영하여야 한다. 표에 나타난 리액턴스 값을 구현하기 위해서 스티브와 폭이 결정되어야 하는데 이는 식(4)에서 나타난 바와 같이 스티브의 폭과 길이 파라미터의 조합에 의하여 결정된다. 본 논문에서는 이를 개별적으로 구하지 않고 상용 시뮬레이터를 이용하여 리액턴스를 만족하는 스티브의 길이와 폭을 결정하였다. 스티브의 폭은 0.8mm, 스티브의 길이는 1.0mm에서 1.77 오옴의 리액턴스를 나타내었다.

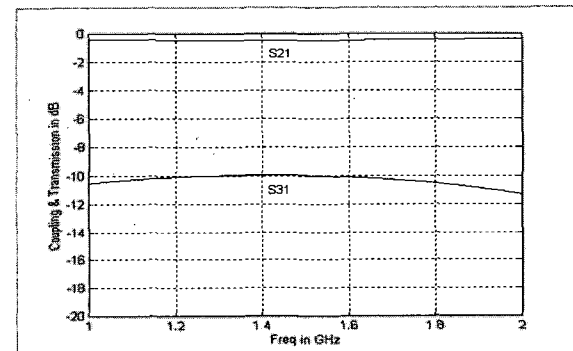
그림3의 좌측에 나타난 커플러의 길이는 31.66mm 이고 슬롯의 폭은 2.0mm 이다. 반면에 우측의 보상이 고려된 커플러의 길이는 30mm 이고 슬롯의 폭은 1.91로 줄어든다. 이는 커플러의 길이가 좌측은 우수모드와 기수모드의 파장길이를 평균한 값의 1/4인 반면에 우측의 커플러는 기수모드 파장의 1/4로 결정되기 때문이다. 슬롯의 폭이 차이가 나는 이유는 표에서 나타난 Z_{0ea} 의 값의 차이에서 비롯된다. 그림 4에는 표1에 나타난 파라미터를 이용하여 이로 계산에 의하여 산란계수를 구하였다. 그림4(a) 및 (b)는 기존의 방식(그림 3의 좌측), 그림4(c) 및 (d)는 스티브가 추가된 커플러(그림 3의 우측)의 특성을 표1에 나타난 파라미터를 이용하여 각각 계산한 것이다. 이 그림에서 제안하는 방식에 의



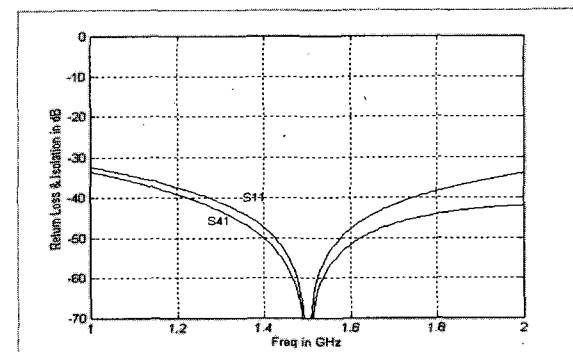
(a) Transmisson and Coupling



(b) Return Loss and Isolation

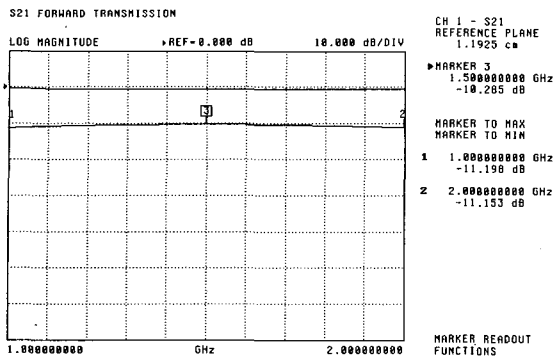


(c) Transmisson and Coupling

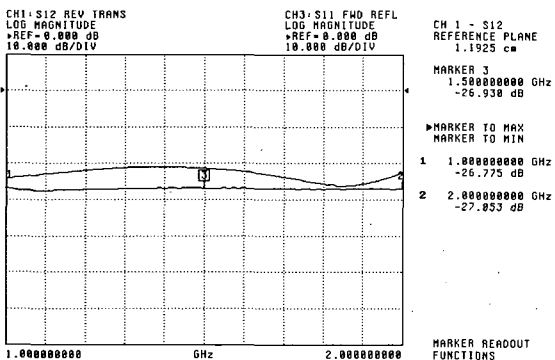


(d) Return Loss and Isolation

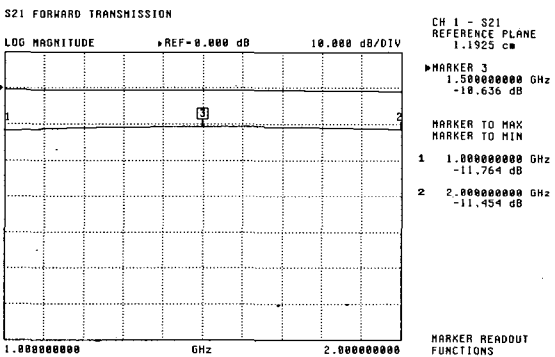
그림 4. 커플러의 산란계수 비교 (a),(b)기존구조, (c),(d) 제안구조(계산결과)
Fig. 4. Comparison of the Calculated Scattering Parameters for Two Couplers



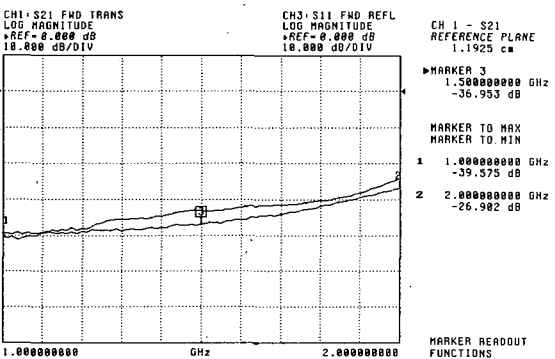
(a) Transmisson and Coupling



(b) Return Loss and Isolation



(c) Transmisson and Coupling



(d) Return Loss and Isolation

그림 5. 커플러의 산란 파라미터 (a),(b)기존구조, (c),(d) 제안구조(실험결과)

Fig. 5. Comparison of the Measured Scattering Parameters for Two Couplers.

하여 Coupling 과 Transmission 은 그대로 유지되는 반면에, 분리도와 반사손실은 개선된다는 것을 계산에 의하여 나타내고 있다. 그림 5에는 그림 4에서 계산한 파라미터에 대하여 그림3에 나타난 커플러를 조립후 측정된 결과이다. 그림 5(a) 및 (b) 는 기존의 방식이고 5(c) 및 (d) 는 제안하는 방식에 의한 결과이다. 그림 5(a) 및 (c) 에는 10dB 의 커플링과 스투 신호의 레벨을 나타내었다. 그림5(b) 와 (d)에는 반사손실 및 분리도를 나타내었다. 그림5(b) 에서는 보상이 전혀 안된 것으로 중심 주파수에서 약 16dB 의 격리도와 22dB 의 반사손실을 나타내었다. 그림5(d) 에는 본 논문에서 제시하는 주기적인 스투브를 적용한 것으로 26dB 의 격리도와 33dB 의 반사손실을 나타내었다. 이를 통하여 본 논문에서 제시하는 설계 개념이 실험적으로 관측되었음을 알 수 있다.

그림4의 계산 결과와 그림5의 측정 결과에서 반사손실과 분리도가 완전히 일치하지 않는 것은 마이크로스트립 기판의 적층의 부정확과 신호 입출력을 위한 커넥터의 접지와 기판의 그라운드층과의 연결의 부정확에서 기인한 것으로 생각된다. 가정에서 보인 분리도와 반사손실의 향상 효과는 실험에서 이용한 3.38 의 유전율보다 더 높은 유전율을 갖는 기판 재료와 동작 주파수가 높은 경우에는 특성 향상에 대한 효과가 더욱 뚜렷해진다. 그리고 그림 1에서 제시한 스투브 이외에 위상속도와 우수모드 특성 임피던스가 설계 가능한 다른 주기적인 배열을 도입해도 특성 개선이 가능하다.

IV. 결론

본 논문에서는 슬롯결합형 마이크로스트립 방향성결합기의 디렉티비티를 개선하는 방법으로 기존의 사각슬롯에 스투브를 주기적으로 추가하는 방법을 이용하였다. 이 방법은 Dydyk 이 에지결합형 마이크로스트립 방향성결합기에서 단일 집중중수형 소자를 추가하기 위해서 제시한 방식보다 간단한 설계식을 얻을 수 있었다. 이를 실제 회로 설계에 적용하여 기존의 방식과 함께 그 특성을 비교하였다. 설계상의 의도한 현상을 실험적으로 확인할 수 있었다.

참고 문헌

[1] T. Tanaka, K. Tsunoda, and M. Aikawa, "Slot-Coupled Directional Couplers between Double

- Sided Substrate Microstrip Lines and their Applications," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-36, No.12, pp.1752-1757, Dec., 1988.
- [2] M. F. Wong, V. F. Hanna, O. Picon, and H. Bau brand, "Analysis and Design of Slot-Coupled Directional Couplers between Double-Sided Substrate Microstrip Lines," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-39, No.12, pp.2123-2129, Dec., 1991.
- [3] Podell, "A High Directivity Microstrip Coupler Technique," IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig., pp.33-36, 1970.
- [4] Sheleg B. and B. E. Spielman, "Broadband Directional Couplers Using Microstrip With Dielectric Overlays," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-22, pp.1216-1220, 1974.
- [5] Kajfez D., "Raise Coupled Directivity with Lumped Components," Microwaves, Vol.17, No.3, pp.64-70, Mar., 1978.
- [6] March S. L., "Phase Velocity Compensation in Parallel-Coupled Microstrip," IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest, pp.410-412, 1982.
- [7] Horno M. and F. Medina, "Multilayer Planar Structures for High-Directivity Directional Coupler Design," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-34, pp.1442-1449, 1986.
- [8] M. Dydyk, "Microstrip Directional Couplers with Ideal Performance via Single-Element Compensation," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-47, No.6, pp.956-964, June, 1999.
- [9] J. P. Kim and W. S. Park, "Network Analysis and Synthesis of Multislot Back-to-Back Microstrip Microstrip Directional Couplers," IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. MTT-48, No.11, pp.1935-1942, Nov., 2000.
- [10] K. C. Gupta, R. Garg, I. Bahl and P. Bhartia, Microstrip Lines and Slotlines, 2nd ed., Norwood, MA: Artech House, 1996.

 저 자 소 개



김 중 성 (정회원)

1988년 경북대학교

전자공학과 학사 졸업.

1990년 한국과학기술원 전기및

전자공학과 석사 졸업.

2001년 포항공과대학교 전자전기

공학과 박사 졸업.

<주관심분야 : 초고주파공학, 광통신>