

論文98-35D-11-3

마이크로스트립 소자의 소형화를 위한 천공된 마이크로스트립 Slow-wave 구조 및 해석

(Perforated Microstrip Slow-wave Structure and the
Characterization for Miniaturizing Microstrip Devices)

李 啓 安 * , 尹 皓 聖 * , 李 海 英 *

(Gye-An Lee, Ho-Sung Yoon, and Hai-Young Lee)

요 약

수동 소자를 위한 대표적 구성요소의 하나인 마이크로스트립을 이용하는 소자는 넓은 점유면적으로 인하여 고주파 집적회로의 소형화를 제한하는 중요한 요인이 되고 있다. 본 논문에서는 신호의 진행 방향으로 마이크로스트립 도체를 주기적으로 천공함으로써 slow-wave 효과를 얻는 천공된 마이크로스트립을 제안하고 해석과 실험을 통하여 성능의 우수성을 확인하였다. 천공된 마이크로스트립의 특성 임피던스 정합(50 Ω)과 Q 값들은 기존의 변조된 폭을 갖는 마이크로스트립보다 향상됨을 관찰하였다. 본 천공된 마이크로스트립은 그 구조의 단순함으로 보다 우수한 Q 값을 얻을 수 있으며 초고주파 소자의 소형화에 매우 효과적으로 이용될 것이다.

Abstract

The use of microstrip is very common for various passive microwave devices because of the rather simple and planar structure. However, many microstrip devices require fairly large surface areas, which results in real estate problems of finite substrates. In this paper, we proposed a perforated microstrip with longitudinal slow-wave effect and characterized experimentally and theoretically. The impedance matching to the reference impedance(50 Ω) and the quality factor are greatly improved compared to the conventional slow-wave structure with modulated strip. Because of the structural simplicity, it can be easily applied to miniaturize many microstrip devices.

I. 서 론

최근 정보 사용자의 보다 편리한 통신 욕구로 인하여 이동통신의 위상이 부각되고 있으며, 이동통신의 특성상 시스템에 사용되는 소자들은 소형화 및 견고성

을 기본전제로 하고 있다. 이로 인하여 고집적 정보통신용 반도체 소자 개발의 중요성이 강조되고 있으며, 이는 반도체 칩 자체의 설계 제작 기술 뿐 아니라, 수동소자의 설계 기술 개발을 기본 전제로 한다. 특히, 전송선을 이용하여 구현되는 필터 및 위상 천이기 등의 수동소자는 상대적으로 낮은 주파수 범위에서는 긴 파장으로 인하여 넓은 점유면적을 요구한다. 실제의 경우 수동소자를 위한 대표적 구성요소의 하나인 마이크로스트립을 이용하는 소자는 넓은 점유면적으로 인하여 고주파 집적회로의 소형화를 제한하는 중요한 요인이 되고 있고, 면적을 줄이기 위하여 곡선배치를 할

* 正會員, 亞洲大學校 電子工學部

(School of Electronics Engineering, Ajou University)

※ 이 연구는 1996년도 정보통신부의 연구비 지원(과제번호 : U96-135)에 의한 결과임.

接受日字:1998年6月2日, 수정완료일:1998年9月22日

경우 불연속 효과 및 상호 간섭으로 인하여 대역폭과 혼신 특성이 열화되는 경우가 발생된다.

이러한 공간적 경제적 제한을 개선하기 위하여, 사용되는 재료를 그대로 유지하면서 전송선의 구조를 변화시키므로써 전송속도를 효과적으로 줄일 수 있는 여러 slow-wave 구조들이 알려져 있다. 현재 slow-wave 구조를 구성하기 위한 방법으로는 크게 전송축의 단면상에 변화를 주는 Metal-Insulator-Semiconductor(MIS)구조와 전송축 방향으로 사용 파장보다 매우 짧은 길이의 주기적 구조 변화를 주는 방법등이 제안되어 있다. MIS 구조는 도체 스트립을 도핑된 기판위의 얇은 절연층 상에 구성하여 전계와 자계 에너지를 단면상에서 분리하여 전송 속도를 늦추게 하나, 도핑된 기판에 의한 큰 유전체 손실과 공정의 복잡성과 비선형 특성등의 문제가 있다^{[1] [2]}. 마이크로스트립의 폭을 진행방향으로 주기적으로 변화시키는 변조된 마이크로스트립 구조는 MIS 구조에 비하여 낮은 유전체 손실, 선형적 특성등의 장점이 있으나, 마이크로스트립폭의 급격한 변조로 도체 가장자리에서 발생하는 불연속성에 의하여 큰 분산 및 증가된 도체 손실을 갖는다^[3].

본 논문에서는 상기한 slow-wave 구조들의 높은 유전체, 도체 손실과 높은 분산 및 비선형 특성의 개선과 함께 제조의 수월성과 응용성이 우수한 천공된 slow-wave 마이크로스트립을 제안하고자 한다.

이 구조는 마이크로스트립 도체를 진행방향으로 주기적으로 천공하므로써 유효 인덕턴스 성분을 증가시키고 유효 정전용량은 근사적으로 유지하므로써 slow-wave factor를 저손실 상태에서 효과적으로 증가시킨다. 특히, 본 구조는 전류와 전하분포가 대부분 집중되는 스트립의 가장자리 부분을 진행방향으로 일정하게 유지하므로써 주파수 변화에 따른 전송 특성변화를 최소화하고 방사 및 고차 모드 발생등을 효과적으로 제거한다^{[4] [5]}. 본 구조는 모멘트법(Method of Moments)을 이용하여 완전해석(Full-wave analysis)되었고, 확대된 크기의 소자 제작 및 측정(7 GHz 까지)을 통하여 정량적 해석의 정확성과 천공된 마이크로스트립의 우수한 slow-wave 특성을 확인하였다. 특히, 천공된 마이크로스트립의 slow-wave factor는 일반적인 마이크로스트립에 비하여 수십 % 이상 개선되었고 전송 손실과 특성 임피던스는 기존의 변조된 폭을 갖는 마이크로스트립에 비하여 상대적으로 적은 불연속 영향으로 현저하게 향상됨을 관찰하였다.

II. 주기적 Slow-wave 구조 및 전송 특성 해석

1. 주기적 마이크로스트립 slow-wave 구조

그림 1(a)는 일반적인 마이크로스트립 구조이고 (b)는 마이크로스트립 폭을 진행방향으로 주기적으로 변화시킨 변조된 마이크로스트립 slow-wave 구조이다. 그림 (c)와 (d)는 본 논문에서 제안된 진행 방향을 따라 I형으로 천공된 마이크로스트립 구조와 H형으로 천공된 구조이다. 이러한 주기적 구조 변화를 갖는 slow-wave 구조들은 그 한 주기가 사용되는 파장의 수십 배 이상 짧으므로 넓은 주파수 범위에서 균일한 전송선로로 가정될 수 있으며, Quasi-TEM 전송특성을 유지한다^[6].

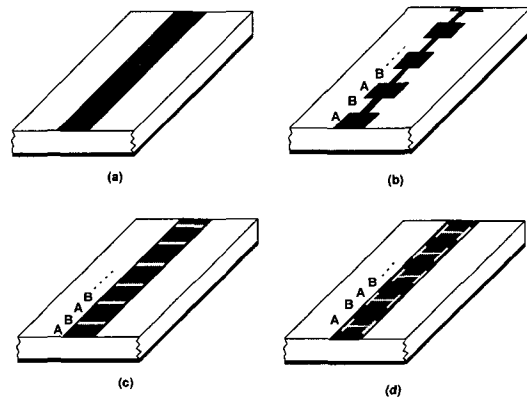


그림 1. (a) 일반적인 마이크로스트립 (b) 변조된 신호선 폭의 마이크로스트립 (c) I형과 (d) H형으로 천공된 마이크로스트립 구조

Fig. 1. Geometries of (a) Conventional, (b) Modulated Stripwidth, (c) I type and (d) H type Perforated Microstrip.

그림 2는 이들 slow-wave 구조의 전송선 모델로서 각기 다른 두 전송선 구간들이 주기적으로 배열되어 있다. 일반 전송선에서는 정전용량(C)과 인덕턴스(L)가 상호 결합되어 인덕턴스가 증가하면 정전용량이 감소하여 LC공이 구조에 무관하게 하나, 본 slow-wave 구조에서는 전기 에너지와 자기 에너지가 진행 방향으로 분리되므로 각각의 크기를 자유로이 조절할 수 있다.

그림 2. (a)는 각기 정전용량과 인덕턴스를 주로 갖는 선로구간 A와 B의 주기적 배열에 의해 전기와 자기 에너지가 신호의 진행방향으로 주기적으로 분리됨을 나타낸다. 이와같은 주기적인 정전용량과 인덕턴스

의 배열은 정전용량 구간으로의 전기 에너지 집중과 인덕턴스 구간으로의 자기 에너지 집중으로 진행방향을 따라 전기와 자기 에너지의 분리를 가능하게 한다. 따라서, 주기적인 전기와 자기 에너지의 분리는 정전용량과 인덕턴스의 개별적 증가를 가능하게 한다. 이와 같이 자기 증가된 정전용량과 인덕턴스는 그 곱에 반비례하는 위상속도($v_p = 1/\sqrt{LC}$)를 감소시키고 slow-wave 효과를 갖는다.

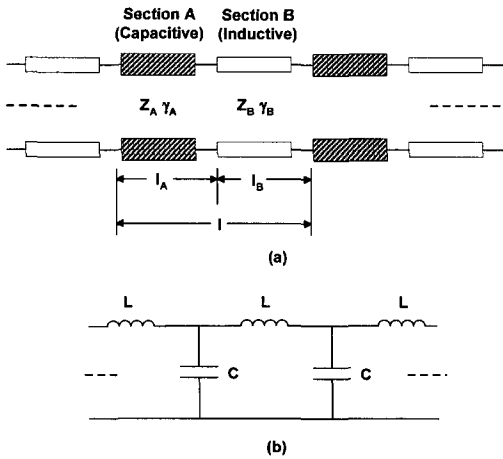


그림 2. (a) 두 다른 전송선 구간에서의 전기와 자기 에너지의 주기적 분리 및 (b) 등가회로

Fig. 2. (a) Periodic Separation of Electrical and Magnetic Energies into Two Different Transmission Line Section and (b) Equivalent Circuit

그림 1에서 천공된 마이크로스트립을 구조적 측면에서 등가회로를 살펴보면 구간 A는 마이크로스트립의 정전용량이 주요한 구간에 대응되며, 구간 B는 천공에 의해 증가되는 인덕턴스 구간을 의미한다.

II. 특성 임피던스 및 복소 전송상수 해석

그림 1의 여러 무한 주기의 slow-wave 구조의 해석은 각 구간의 전송선 해석 결과 (전송상수 및 특성 임피던스)에 Floquet's theorem^[7]을 적용하여 수행될 수 있으며, 유한한 주기의 구조의 경우는 전체구조를 모멘트법^[8]을 이용하여 해석할 수 있다. 본 논문에서는 제안 되어진 천공된 마이크로스트립 구조를 이미 정확성이 입증되어 마이크로스트립 안테나 및 마이크로스트립 해석에 널리 사용되는 상용 tool인

Ensemble을 이용하여 10개 이상의 주기에서 그 해석 결과가 매우 잘 일치함을 측정 결과와 비교하여 확인하였다. 또한, 광대역 주파수 범위에서 구조적 불연속에 의한 난류효과(Turbulent effect)를 고려한 도체 손실과 유전체 손실을 포함하는 전송 손실 그리고 미세한 방사 손실도 고려되었다. 본 논문에서는 Ensemble을 통한 모멘트법 해석으로부터 구한 유한 주기 구조의 S-parameter를 다음식 (1)에 적용하여 ABCD parameter를 구하고 이로부터 복소 전송상수($\gamma = \alpha + j\beta$)와 복소 특성 임피던스(Z_0)를 구하였다^[9].

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(1+s_{11})(1-s_{22})+s_{12}s_{21}}{2s_{21}} & Z_0 \frac{(1+s_{11})(1+s_{22})-s_{12}s_{21}}{2s_{21}} \\ \frac{1}{Z_0} \frac{(1-s_{11})(1-s_{22})-s_{12}s_{21}}{2s_{21}} & \frac{(1-s_{11})(1+s_{22})+s_{12}s_{21}}{2s_{21}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

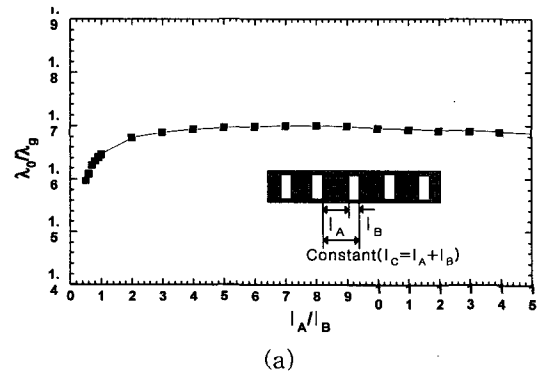
$$Z_0 = \sqrt{\frac{B}{C}}$$

$$\gamma = \frac{1}{l} \cosh^{-1}(A) = \frac{1}{l} \ln(A \pm \sqrt{A^2 - 1})$$

여기서 l은 전송선의 전체길이를 나타낸다.

III. 천공 길이 비율에 따른 slow-wave factor 및 특성 임피던스

그림 3에 제안된 I형으로 천공된 부분(l_A)의 길이와 안된 부분(l_B) 길이의 비에 따른 slow-wave factor와 특성 임피던스 변화를 도시하였다. 이 결과로부터 천공길이의 비를 변화하여 최대의 slow-wave factor를 얻을 수 있으며 임피던스를 조절할 수 있음을 확인하였다. 이로부터 천공 길이비에 따라 특성 임피던스 변화가 slow-wave factor의 변화보다 크므로 향상된 slow-wave 효과를 유지하며 특성 임피던스 정합이 가능함을 알 수 있다.



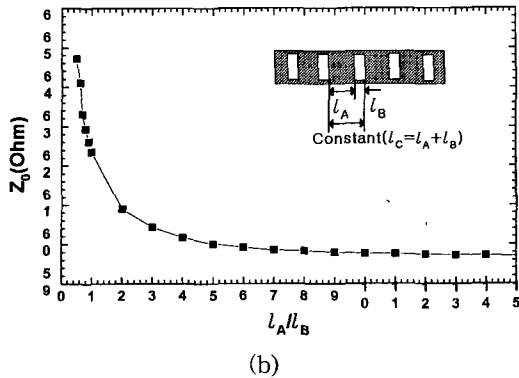


그림 3. 천공 구조 변화에 따른 (a) Slow-wave Factor와 (b) 특성 임피던스

Fig. 3. (a) Slow-wave Factor and (b) Characteristic Impedance to Perforation Structure.

특히, 주기적으로 배열된 인덕턴스 구간의 길이는 최상의 slow-wave factor 결정에 영향을 미침을 알 수 있다. 그러나, 정전 용량 구간보다 긴 인덕턴스 구간($l_A/l_B < 1$)의 배열은 감소된 정전 용량으로 인하여 slow-wave factor와 특성 임피던스가 급격히 변화됨을 보인다.

IV. 전송특성 해석 결과

같은 기판상에서 높은 특성 임피던스를 갖는 slow-wave 구조는 임피던스 매칭을 위하여 특성 임피던스를 낮추어야 하므로, 도체의 폭을 넓히게 되어 차지하는 면적이 증가하게 된다. 따라서, 본 논문에서는 동일 기판상에 동일 유효 점유면적(최대 폭 \times 길이)을 차지하는 공간적 동일 조건에서 제안된 천공된 마이크로스트립 slow-wave 구조들과 기존의 변조된 마이크로스트립 slow-wave 구조간의 전송특성 해석 결과를 정량적으로 비교하였다. 이를 위하여 본 논문에서는 제안되어진 천공된 마이크로스트립 및 변조된 마이크로스트립의 천공 면적 및 천공 주기에 의한 영향을 제거하고 천공 구조 형태에 의한 slow-wave 효과를 관찰하기 위하여 동일 천공 면적 그리고 동일 천공 주기를 갖는 구조를 설정하였다. 해석 결과, 특성 임피던스는 천공된 구조의 경우 60~65(Ω)으로 기존의 변조된 구조의 75(Ω)보다 50(Ω) 임피던스 매칭에 적합하다. 7 GHz에서 직선형으로 천공된 구조의 전송 손실과 slow-wave factor(λ/λ_g)는 각각 0.035 dB/cm, 1.72로서 변조된 경우 0.096 dB/cm, 2.03 보다 낮다.

1. 특성 임피던스

그림 4의 계산된 특성 임피던스로부터 변조된 스트립 폭을 갖는 마이크로스트립은 천공된 마이크로스트립 보다 큰 특성 임피던스 증가로 인하여 최적의 정합 특성을 갖는 50 Ω 구조를 위하여 상대적으로 큰 도체 점유 면적을 요구함을 알 수 있다. 이것은 변조된 마이크로스트립의 경우 좁아진 스트립 폭이 높은 특성 임피던스를 유발하기 때문이다. 따라서, 천공된 구조의 경우 변조된 스트립 폭의 구조에 비하여 정합 특성이 크게 향상되며, 50 Ω 구조를 위하여 좁은 점유 면적이 요구되어짐을 확인하였다.

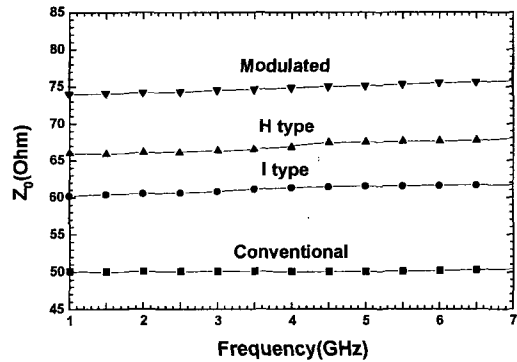


그림 4. Slow-wave 구조에 따른 특성 임피던스

Fig. 4. Characteristic Impedance to the Slow-wave Structure

2. 전송 손실 및 slow-wave factor

그림 5 (a)의 전송 손실로부터 천공된 마이크로스트립은 동일한 면적의 변조된 마이크로스트립에 비하여 적은 전송 손실을 가지며 상대적으로 적은 slow-wave factor를 가진다. 이러한 전송 손실의 감소는 전류와 전하 분포가 집중되는 신호선 가장자리 구조의 불연속성이 감소하기 때문이다. 본 논문에서 제안된 천공된 구조는 주기적으로 증가된 인덕턴스 구간에 의해 증가된 slow-wave factor를 가지므로 H 형태의 천공 부분에서의 인덕턴스 증가가 두드러지므로 I 형태로 천공된 마이크로스트립 보다 향상된 slow-wave 효과를 가진다. 이와 같은 천공된 마이크로스트립은 적은 구조적 변화 때문에 변조된 구조보다 상대적으로 적은 slow-wave factor를 가지나 낮은 전송 손실과 향상된 임피던스 정합특성을 갖게 된다. 또한, 변조된 마이크로스트립의 경우 불연속 효과가 크므로 상대적으로 높은 slow-wave factor의 주파수 의존성

(Dispersion) 광대역 소자로의 응용에는 부적합하다.

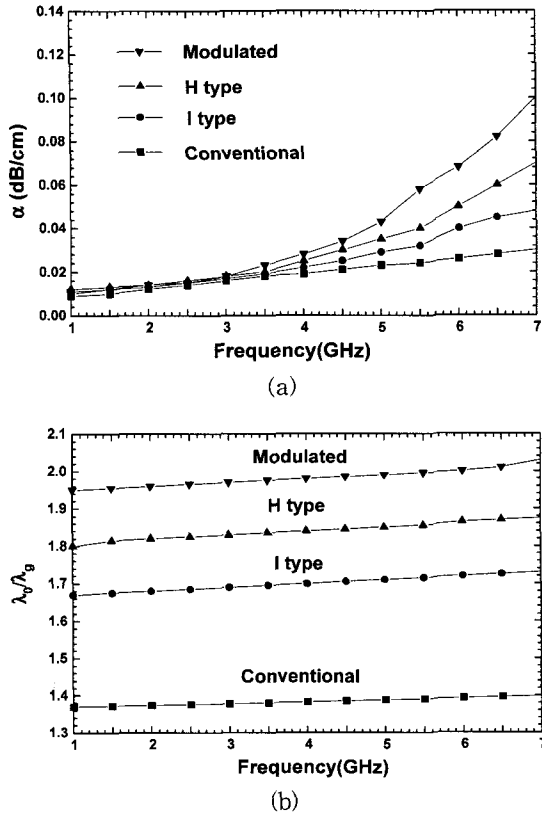


그림 5. Slow-wave 구조에 따른 (a) 전송 손실과 (b) Slow-wave Factor
Fig. 5. (a) Attenuation and (b) Slow-wave factor to Slow-wave Structure

3. 전송선의 Quality-factor

최적 성능 특성과 구조에 따른 성능 변화를 확인하기 위하여 여러 slow-wave 구조에 대한 전송 손실 (α)과 위상상수(β)를 이용하여 Q-factor($Q = \beta/2\alpha$)를 계산하였다. 그림 6에서 마이크로스트립의 폭을 진행방향으로 주기적으로 변화시키는 변조된 마이크로스트립 구조의 Q-factor는 1 GHz에서 상대적으로 큰 slow-wave 효과에 의해 높은 Q-factor를 가지나 주파수가 증가함에 따라 급격한 전송손실 증가로 인하여 Q-factor가 크게 열화됨을 알 수 있다. 이와 비교하여 천공된 마이크로스트립은 Q-factor가 급격히 증가하여 2.8 GHz 이상의 영역에서 I형으로 천공된 마이크로스트립이 최상의 성능을 가짐을 확인하였다. 이와 같은 결과는 마이크로스트립의 폭이 변조된 구조가 큰 slow-wave factor를 가짐에도 상대적으로 큰 도체

손실 및 분산 특성을 갖기 때문이다. 또한, 그림 3, 4, 5, 6의 결과는 실험의 용이성을 위하여 확대된 구조에 대한 것이므로 실제 사용되는 작은 구조의 경우 도체 손실이 더욱 증가되어 본 천공된 마이크로스트립이 상대적으로 더욱 큰 Q-factor를 나타내게 된다.

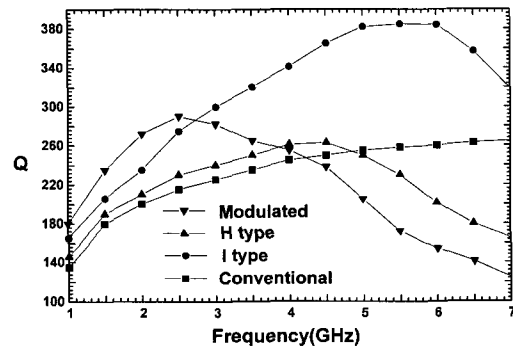


그림 6. Slow-wave 구조에 따른 Quality-factor
Fig. 6. Quality-factor to Slow-wave Structure.

III. 천공된 마이크로스트립의 제작 및 특성 측정

1. 소자의 제작 및 측정 방법

모멘트법을 이용한 천공된 마이크로스트립의 해석 결과를 검증하기 위하여 실제 천공된 마이크로스트립을 제작하고 측정하였다. 본 실험에서 제작된 천공된 구조는 확대 기법(Scale-up)으로서 제작되었으며 이는 여러 가지 미세한 구조의 제작상의 문제점과 기타 기생 효과를 최소화하여 측정의 정확도를 높이기 위함이다.

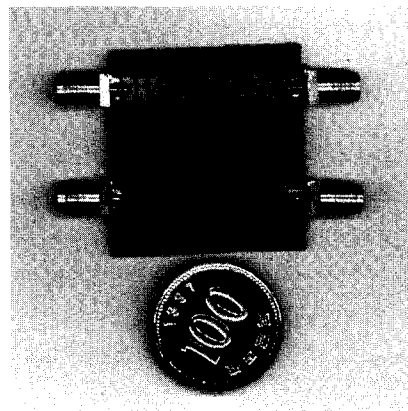


그림 7. 제작되어진 천공된 마이크로스트립
Fig. 7. Fabricated Perforated Microstrip.

그림 7은 실제 제작된 천공된 마이크로스트립의 사진으로 H형태의 천공을 갖는 마이크로스트립과 I형태의 천공을 갖는 마이크로스트립구조이다. 제작된 구조는 중심 주파수 4 GHz에서 50 Ω의 특성 임피던스를 갖는 마이크로스트립과 같은 점유 면적에서 성능을 비교하기 위하여 4.796 mm의 동일한 선폭과 반 파장의 27.36 mm 길이를 가진다.

본 제작에 사용된 기판의 재질은 듀로이드 (RT/Duroid 5880)로 유전손실이 작으며 ($\tan \delta=0.0004$), 두꺼운 기판 두께(1.575 mm)와 0.5 oz의 도체 두께를 가지며 주파수에 대해 일정한 비유전율($\epsilon_r = 2.2$)을 가진다.

2. 산란 계수의 측정 및 결과 해석

그림 8은 실제 제작된 I형으로 천공된 마이크로스트립과 H형으로 천공된 마이크로스트립의 구조도이다. 제작되어진 I, H형태의 천공된 마이크로스트립은 천공 면적 및 천공 주기에 의한 영향을 제거하고 천공 구조 형태에 의한 전송 특성을 관찰하기 위하여 동일 천공 면적 그리고 동일 천공 주기를 갖는 구조로 제작하였다.

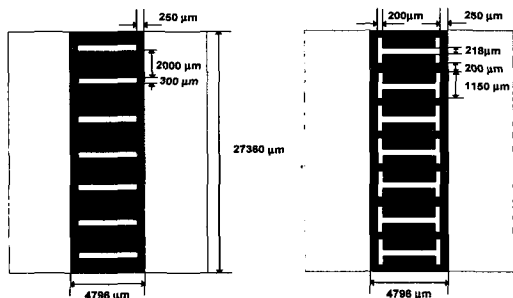
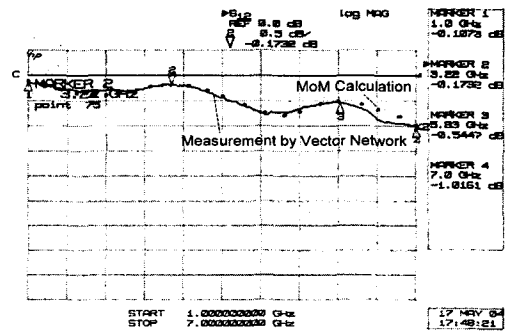


그림 8. 제작된 마이크로스트립의 개략도
Fig. 8. Schematic Diagram of the Fabricated Microstrip.

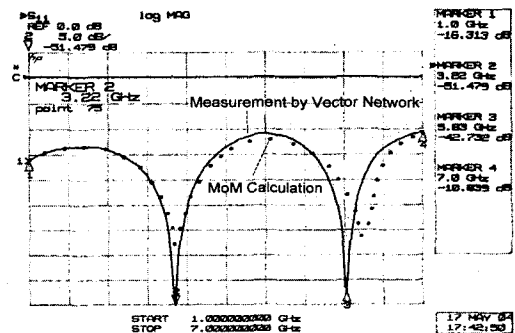
그림 9과 10는 각각의 구조에 대하여 계산 및 측정된 삽입 손실(S21)과 반사 손실(S11)을 나타낸다. 본 측정 및 해석 결과에는 SMA와 slow-wave 마이크로스트립에 연결되는 일반 마이크로스트립의 길이 (4mm) 효과가 포함되었다.

그림 9에서 삽입 손실 및 반사 손실이 1 GHz에서 7 GHz까지 측정 결과와 모멘트 해석 결과가 잘 일치함을 볼 수 있으며 3.22 GHz, 5.83 GHz 근처의 공진 주파수 오차는 SMA 커넥터에서 발생하는 기생효

과에 기인한다. 그림 9 (a)에서 제안된 I형으로 천공된 마이크로스트립의 삽입 손실은 1 GHz에서 4 GHz까지 0.5 dB 이하로 우수한 특성을 보였다. 또한 그림 9 (b)에서 제안된 I형 구조의 공진 주파수의 경우 3.22 GHz로 일반적인 마이크로스트립의 4 GHz에 대하여 24 % 이상 감소되었다. 이처럼 감소되어진 공진 주파수는 반파장 마이크로스트립 소형화에 유리하며 증가된 반사 손실은 적절한 천공 크기에 의해 조절할 수 있다.



(a)

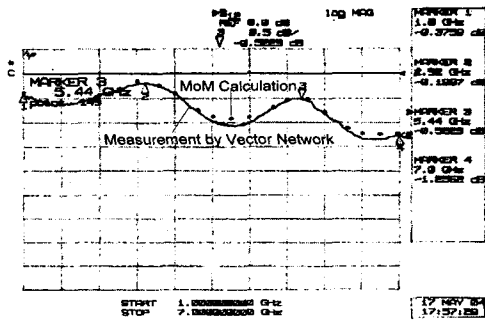


(b)

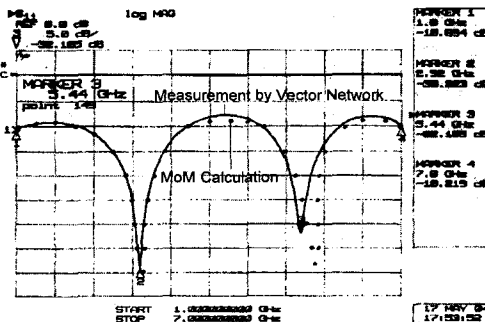
그림 9. I형으로 천공된 마이크로스트립의 측정 결과 및 해석 결과 (a) 삽입 손실 (b) 반사 손실
Fig. 9. Measured and Simulated Results of I-type Perforated Microstrip (a) Insertion Loss (b) Reflection Loss

그림 10에서 제안된 H형 천공 마이크로스트립의 삽입 손실(S21)과 반사 손실(S11)을 나타내었다. H형으로 천공된 마이크로스트립은 증가된 인덕턴스 구간의 길이로 인하여 일반적인 마이크로스트립 보다 29%, 직선형으로 천공된 마이크로스트립 보다 12% 감소된 공진 주파수를 갖는다. 그림 10 (a)에 보이는 삽입손실 증가는 H형 천공의 증가된 구조적 불연속성에 의

한다.



(a)



(b)

그림 10. H형으로 천공된 마이크로스트립의 측정 결과 및 해석 결과 (a) 삽입 손실 (b) 반사 손실

Fig. 10. Measured and Simulated Results of H-type Perforated Microstrip (a) Insertion Loss (b) Reflection Loss

IV. 결론

본 논문에서는 고밀도 초고주파 회로에 사용되는 수동소자 및 전송선의 크기 및 점유면적을 축소시키기 위하여 주기적으로 천공된 본 구조의 마이크로스트립을 제안하였다. 본 구조의 삽입 손실(S_{21}), 반사 손실(S_{11}), 특성 임피던스, 그리고 slow-wave factor를 모멘트법을 이용하여 해석하였고, 일반 마이크로스트립 및 기존의 변조된 신호선 폭을 갖는 마이크로스트립 slow-wave 구조의 전송특성과 비교하였다. 또한, 확대된 실제 구조를 제작하고 회로망 분석기(HP 8510C)를 이용하여 측정한 결과로부터 본 제안의 실효성과 해석 결과의 정확성을 검증하였다. 측정 및 해석 결과로부터 천공된 마이크로스트립의 특성 임피던

스는 약 60 Ω 으로 기존의 변조된 신호선 폭을 갖는 마이크로스트립에 비하여 정합특성이 현저하게 향상됨을 관찰하였다. 또한, 제안된 마이크로스트립은 기존의 변조된 마이크로스트립에 비해 전송 손실이 0.061 dB/cm 개선되었다. 특히, 천공된 마이크로스트립들의 slow-wave factor는 일반적인 마이크로스트립에 비하여 수 십 % 이상 개선되었음을 관찰하였다. 이상의 결과로부터 본 구조는 기존 slow-wave 구조들의 높은 유전체, 도체 손실과 높은 분산 및 비선형 특성을 개선할 수 있음을 확인하였다. 특히, 본 구조는 전류와 전하분포가 대부분 집중되는 신호선의 가장자리 구조를 일정하게 유지하므로써 주파수 변화에 따른 특성변화를 최소화하고 방사 및 고차 모드 발생등을 효과적으로 제거하며 그 제작의 용이성과 구조의 단순성으로 인하여 초고주파 수동소자의 소형화를 크게 향상시킬 것으로 기대된다. 향후 본 측정 및 해석결과를 바탕으로 대역통과 필터 그리고 위상 천이기등을 제작/측정하므로써 본 천공된 마이크로스트립의 실용화 가능성을 확인하고 그 구조의 최적화를 수행하고자 한다.

참고 문헌

- [1] H. Hasegawa, M. Furukawa, H. Yanai, "Properties of MIS line on Si-SiO₂ system," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. MTT-19, pp. 869-881, 1971.
- [2] Y. Fukuoka, M. Furukawa, and T. Itoh, "Analysis of Slow-wave Coplanar waveguide for Monolithic Integrated Circuits," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech*, vol. MTT-31, pp. 567-573, 1983.
- [3] JERARD A. WEISS, "Dispersion and Field Analysis of a Microstrip Meander-Line Slow-Wave Structure," *IEEE Trans. Microwave Theory tech*, vol. MTT-22, pp. 1194-1201, 1974.
- [4] J. S. Hong and M. J. Lancaster, "Capacitively loaded microstrip loop resonator," *Electronics Letter*, vol. 30, no. 18, pp. 1494-1495, 1st September, 1993.
- [5] J. S. Hong and M. J. Lancaster, "Edge-Coupled Microstrip Loop Resonators with Capacitive Loading," *IEEE Microwave*

- Guided Wave Lett.*, vol. 5, no. 3, pp. 87-89, March 1995.
- [6] S. Seki and H. Hasegawa, "Cross-tie Coplanar waveguide on Semi-insulating GaAs Substrate," *Electronic Letter*, vol. 17, no. 25, pp. 940-941, December 10, 1981.
- [7] R.E.Collin, *Field theory of guided waves*, Mcgraw-Hill Book Company, New York.
- [8] T. Itoh, *Numerical Techniques for Microwave and Millimeter-wave Passive Structures*, John Wiley & Sons Inc.
- [9] Kursad Kiziloglu, Nadir Dagli, George L. Matthaei and Stephen I. Long, "Experimental Analysis of Transmission Line Parameters in High-Speed GaAs Digital Circuit Interconnects," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 39, no. 8, August 1991.

 저 자 소 개



李 啓 安(正會員)

1997년 아주대학교 전파공학과 졸업 (공학사). 1997년 ~ 현재 아주대학교 대학원 전파공학과 석사과정 재학 중. 주관심분야는 초고주파 및 밀리미터 소자 패키지 해석 및 설계



尹 皓 聖(正會員)

1998년 아주대학교 전파공학과 졸업 (공학사). 1998년 ~ 현재 아주대학교 대학원 전파공학과 석사과정 재학 중. 주관심분야는 초고주파 및 밀리미터 소자 해석 및 설계

李 海 英(正會員) 第 34卷 D編 第 9號 參照

현재 아주대학교 전자공학부 부교수