밀리미터파 대역에서 Via Fence를 이용한 PCB 기판용 유전체 도파관 필터 설계

Dielectric Waveguide Filters Design Embedded in PCB Substrates using Via Fence at Millimeter-Wave

김봉수 · 이재욱 · 김광선 · 강민수 · 송명선

Bong-Su Kim · Jae-Wook Lee · Kwang-Seon Kim · Min-Soo Kang · Myung-Sun Song

요 약

본 논문에서는 기존의 도파관 필터, 즉 내부가 공기로 채워진 밀리미터파 도파관 필터를 기본적인 도파관 변수 계산치로부터 일반 PCB 기판상에 구현하는 방법을 소개한다. 이를 위해서는 기존 도파관 필터의 구조에서 수직으로 배치된 모든 도체구조를(접지용 도체벽, 신호제어용 도체판) via를 사용해 대체해야 한다. 이를 위해 side wall과 도파관 내부 폴들을 via의 연속적인 나열과 via 지름 크기의 조절을 통해 구현한다. 이를 통해 얻을 수 있는 장점은 사용될 기판 유전율의 제곱근에 비례하여 전체 크기가 x, y, z 축으로 축소되며 특히 z 축으로는 더 큰 축소가 가능하다. 또한 기존의 규모가 큰 금속성 도파관 필터를 제작할 필요없이 PCB상에 대량의 제작이 용이하기 때문에 훨씬 저렴하게 제작할 수 있다. 마지막으로 모듈의 소형화를 위해 요즘 한창 각광받는 LTCC 공정과 같은 다층기판 제작시 한 층을 사용해 제작될 수 있다는 점에서 유리하다. 이 새로운 도파관 필터를 평가하기 위해 40 GHz 대역에서 2.5 %의 대역폭을 가지는 3차 chebyshev 대역통과필터가 사용되었으며 이에 사용된 PCB 기판은 유전율이 2.2이고 두께가 10 mil인 RT/duroid 5880이다. 설계 후 측정 결과 전체 입/출력단에서 삽입손실이 2 dB 정도이며 반사손실이 −30 dB 이하의 우수한 특성을 얻을 수 있었다.

Abstract

In this paper, the implementation and embedding method of the existing air-filled waveguide-filters at millimeter-wave on general PCB substrate is introduced by systematically inserting the vias inside waveguide and mathematically manipulating the simple equations obtained from the classical circular-post waveguide filter design. All the metal structures placed vertically such as side wall for perfect ground plane and circular-post for signal control in the air-filled WR-22 waveguide are replaced with several types of via for constructing the bandpass-filter. Side wall and poles inside waveguide are realized by placing a series array of via and tuning the via diameter. The lengths of x, y, z axis are reduced in proportion to root square of employed substrate dielectric constant and especially the length of z axis can be more reduced due to the characteristics of the wave propagation. Because the mass production on PCB is possible without fabricating a large-scaled metal waveguide of WR-22 as input/output ports at millimeter-wave regime, the manufacturing cost is reduced considerably. Finally, when using multilayer process like LTCC for small-sized module, it is one of advantages to use only one layer for the filter fabrication. To evaluate the validity of this novel technique, order-3 Chebyshev BPF(Bandpass-Filter) centered at 40 GHz-band with a 2.5 % FBW (Fractional Bandwidth) were used. The employed substrate has relative dielectric constant of 2.2 and thickness of 10 mil of Rogers RT/Duroid 5880. Accroding to design and measurement results, a good performance of insertion loss of 2 dB and return loss of −30 dB is achieved at full input/output ports.

Key words : Millimeter-Wave, Waveguide-Filter, LTCC, BPF

한국전자통신연구원 디지털방송연구단 전파기술연구그룹 광대역RF연구팀(Wideband RF Research Team, Radio Technology Research Group, Digital Broadcasting Research Division, ETRI)

· 논 문 번 호 : 20031112-155

· 수정완료일자 : 2003년 12월 19일

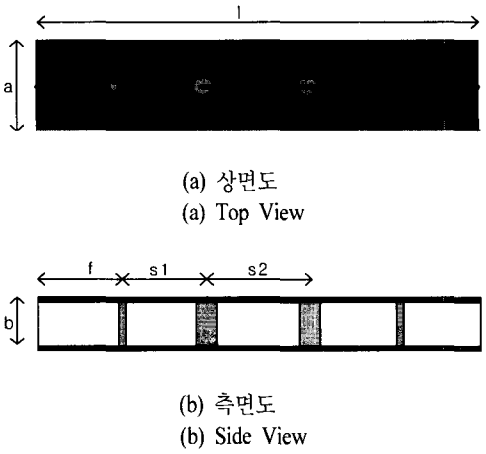
Ⅰ. 서 론

지식 정보화시대에 무선통신 시스템은 음성과 문자 위주의 2세대, 화상정보 전송 IMT2000의 3세대 이동통신에서 100 Mbps 이상의 전송속도를 갖는 4세대 시스템으로 발전할 것으로 예상된다. 이러한 광대역 4세대 시스템에서는 이미 포화상태의 기존 주파수 대역이 아닌 밀리미터파를 사용할 것으로 예상된다. 이를 위해 밀리미터파용 부품 및 소자 개발을 위해 많은 시간과 노력이 필요하며 그와 같은 시스템에서 밀리미터파 필터가 차지하는 비중은 매우 높다고 할 수 있다. 이를 위해 밀리미터파에서 소형화, 저렴화와 저손실의 소자 및 패키징 기술에 대한 많은 연구가 진행 중이며 요즘 한창 각광 받고 있는 HTCC(High Temperature Cofired Ceramic)와 LTCC (Low Temperature Cofired Ceramic) 기술이 이에 속한다. 이와 같이 단층 기판 또는 다층기판에 도파관 필터를 설계하고자 하는 연구는 "60 GHz 대역 필립-칩 모듈을 위한 유전체 도파관 필터[1]"와 "LTCC 광대역 Ridge 도파관 필터[2],[3]" 등의 다양한 형태로 연구되어 왔다. 이런 일련의 기술 흐름에서 기존의 도파관 필터 설계 방법을 그대로 사용함과 동시에 필터의 높이를 자유롭게 조절하여 입/출력단의 연결 및 제작상의 융통성을 증가하는 구조를 제안한다. 도파관에 수직적으로 위치하는 side wall 및 다양한 모양의 내부 폴들은 단일 PCB(Printed Circuit Board)나 LTCC 공정을 통해 제작할 수 없는 구조이므로 사용가능한 via 기술을 사용해 같은 효과를 주도록 설계했다. 본 논문에서는 우선 40 GHz 대역에서 공기로 채워진 도파관 필터를 설계한 후 이를 바탕으로 단일 PCB 공정에 맞게 유전율의 제곱근에 비례해 축소 후 via 기술을 이용해 side wall과 내부 폴을 via로 대체한 BPF 구조의 설계, 이를 바탕으로 제작 및 측정한 결과를 보인다.

Ⅱ. 원형 포스트 유전체 도파관 필터 설계

2-1 원형 포스트 도파관 필터 설계

유전체 기판을 이용한 도파관 필터 설계에서 가장 먼저 해야 할 일은 공기 환경에서 원하는 특성을 만족시키는 도파관 필터의 프로토타입을 설계하는 것이다. 그 다음에 PCB 공정상에 사용하고자 하는 기판의 유전율에 따라 프로토타입의 x, y, z 축을 같은 비율로 축소하면 된다[4],[5].



(a) 상면도
(a) Top View

(b) 측면도
(b) Side View

그림 1. 원형 포스트 도파관 필터(기본형)
Fig. 1. Circular-Post Waveguide Filters(Typical).

그림 1의 전형적인 원형 포스트를 이용한 도파관 필터로부터 중심주파수 f_c=41.5 GHz에서 대역폭 FBW=2.5 %를 가지는 3차 chebyshev 대역통과 여파기를 설계하였다. 사각형 도파관 내부에 원형 포스트가 있는 구조는 그림 2에 보이는 것과 같이 두개의 C와 하나의 L로 등가회로를 구성할 수 있다[6],[7]. 그리고 사용할 수 있는 via의 지름이 대부분의 공정상 정해져 있는 경우가 많기 때문에 이를 고려하여 설계해야 한다. 이에 따라 40 GHz 대역에서 동작하는 도파관 필터를 설계했으며 계산된 변수 값의 자세한 수치는 표 1에 나타나 있다.

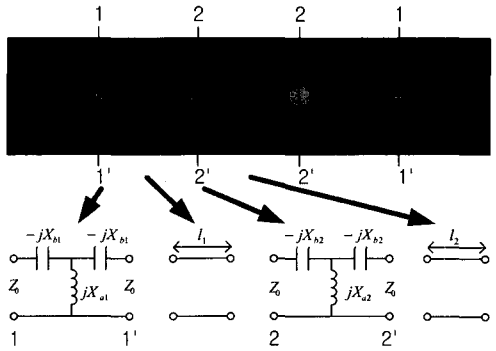


그림 2. 원형 포스트 도파관 필터의 등가회로
Fig. 2. Equivalent Circuit of Circular-Post Waveguide Filters.

표 1. 40 GHz 대역에서 동작하는 도파관 필터: Q대역에서 사용하는 WR-22(a×b=5.7×2.85 mm) 도파관이며 resonator 수는 3개, 가공오차는 1/100 mm이다(단위: mm).

Table 1. 40 GHz-Band Waveguide Filters: Q-band WR-22(a×b=5.7×2.85 mm) Rectangular Waveguide, 3 resonators, and 1/100 mm processing error(Unit: mm).

변수	X_{a1}	X_{b1}	X_{a2}	X_{b2}	l_1	l_2
값	19.2	2.4	4.6	14.2	0.48 λ_g	0.56 λ_g
변수	$r1$	$r2$	$s1$	$s2$	f	l
값	0.444	1.184	4.46	5.045	2.5175	19

-$r1$, $r2$ (원형 포스트의 지름), $s1$, $s2$ (원형 포스트 사이 거리), f (피딩 길이), l (전체 길이), λ_g (도파관 파장)

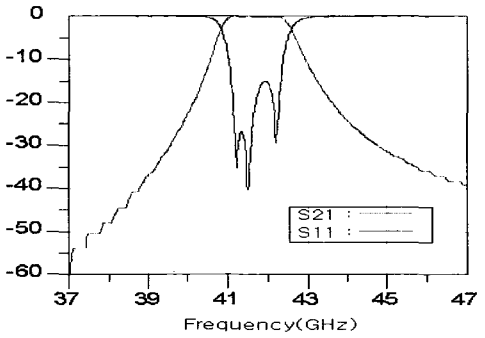


그림 3. 전형적인 원형 포스트 도파관 필터의 시뮬레이션 결과

Fig. 3. Simulation results of typical Circular-Post Waveguide Filters.

표 1의 설계치를 바탕으로 실행한 EM 시뮬레이션(CST사의 MW Studio Ver. 4.0) 결과가 그림 3에 있다.

2-2 PCB 기판을 이용한 도파관 필터 설계

2-2-1 유전체 도파관 필터 설계

위에서 설계한 도파관 필터의 기본형을 바탕으로 PCB 공정을 사용한 도파관 필터를 설계하기 위해서는 우선 다음의 공식에 보듯이 유전율이 변함에 따라 공기 중에서 설계된 도파관의 전체 크기를 x, y, z 축 모두에서 $1/\sqrt{\varepsilon_r}$의 비율로 일정하게 축소해야 한다[8].

$$\lambda_g = 2\pi/\beta = 2\pi/\sqrt{k^2 - k_c^2} \quad (1)$$

식 (1)에서 $k = w\sqrt{\mu\varepsilon}$, $k_c = \sqrt{(m\pi/a)^2 + (n\pi/b)^2}$ 이며 밀리미터파(30 GHz~300 GHz) 정도의 고주파에서는 $k \gg k_c$인 관계가 있으므로 간략화를 통해 λ_g는 $\sqrt{\varepsilon_r}$에 반비례함을 알 수 있다(여기서 λ_g는 도파관 파장, β는 전파상수, k는 물질의 파수, k_c는 차단파수이다).

본 논문에서는 공기환경에서의 도파관필터를 유전율이 2.2이고 두께가 10 mil인 RT/Duroid 5880 기판 내부에 embedding하는 경우에 대해서 언급한다. 위의 식 (1)에 따라 유전율이 2.2인 기판을 사용할 경우 기본형 도파관 필터를 x, y, z 축으로 1/1.48씩 축소하면 된다. 또한 도파관 필터가 보통은 TE_{10} 모드를 사용하는 특성상 z 축, 즉, 높이는 약간의 손실 증가이외에 필터의 특성에는 거의 영향이 없다[9]. 이는 패키징 면에서 장점을 가지고 있는 LTCC 공정을 사용하여 제작될 경우 입/출력단에 위치한 소자들과의 손쉬운 연결을 도울 수 있다. 이들 사실로부터 유전율이 큰 기판을 사용함으로써 약간의 손실을 감안하면 도파관 필터의 전체 크기를 크게 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림 4를 보면 도파관 필터는 크게 다음의 3가지 부분으로 나뉜다. 먼저 입/출력을 위한 50 ohm 마이크로스트립 선로부가 있으며 이 선로와 도파관 사이에 임피던스 매칭을 위한 마이크로스트립-to-도파관 전이부(transition) 그리고 필터의 특성을 나타내는 도파관 필터부이다.

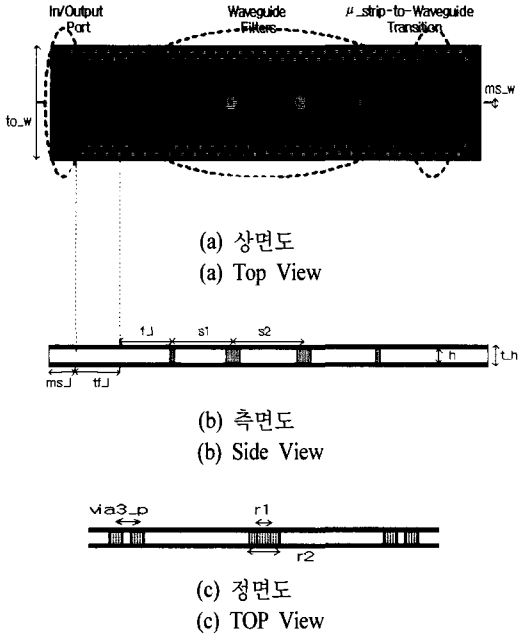
우선, 유전체 도파관을 설계하기 위해 식 (1)에 따라 표 1의 도파관 전체 크기를 줄이고 도파관의 높이는 기판의 높이인 10 mil에 맞춘다. 그리고 도파관 내부의 원형 포스트 지름과 그것들 사이의 간격 역시 같은 방법으로 줄인다. 마지막으로 도파관의 side wall을 via를 사용하여 대체해야 한다. 그림 4의 도파관 필터에 해당하는 부분에 대한 변수 값이 표 2에 나타나 있다.

그림 5(a)는 side wall이 완전도체로 완전히 둘러싸

표 2. 표 1의 도파관 필터를 PCB 상에 구현하기 위한 물리적 매개변수(단위: mm)
Table 2. Physical parameters to implement and embed waveguide filters on PCB(Unit: mm).

변수	to_w	wg_w	$r1$	$r2$	$s1$	$s2$
값	7.7	3.85	0.3	0.8	3.016	3.409
변수	via1_p	via2_p	via3_p	h	h_t	f_l
값	0.6	0.3	0.6	0.254	0.274	1.704

- to_w(도파관 필터 총 넓이), to_l(도파관 필터 총 길이), ms_w(마이크로스트립선로 넓이), ms_l(마이크로스트립 길이), tf_w(전이부 도파관쪽 넓이), tf_l(전이부 길이), h(기판의 두께), t_h(도파관 필터 총 두께), wg_w(도파관 넓이), via1_p(같은 줄 비아사이의 거리), via2_p(다른 줄 비아사이의 거리), via3_p(서로 다른 비아줄 사이의 거리)



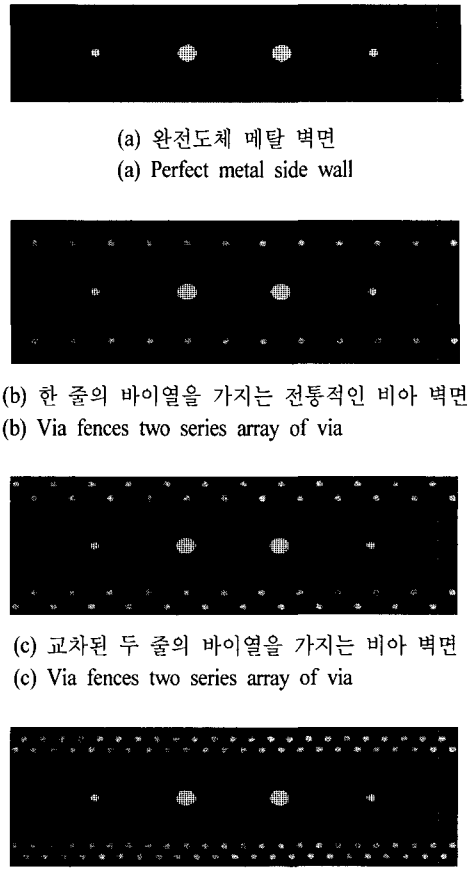
(a) 상면도
(a) Top View

(b) 측면도
(b) Side View

(c) 정면도
(c) TOP View

그림 4. PCB 기판을 이용한 유전체 도파관 필터
Fig. 4. Dielectric waveguide filters using PCB substrate.

여져 있는 기본적인 구조이며 이는 PCB나 LTCC 공정을 사용하여 제작될 수 없다. 그래서 기존의 방법으로는 도파관의 side wall을 대체하기 위해 그림 5(b)에 보이는 것과 같이 한 줄의 via를 도파관 벽면을 따라 일렬로 위치시켰다. 이는 간단하며 좋은 시도이나 밀리미터파대역에서는 제작 과정상 via 사이 거리의 한계로 인해 신호가 새어나가게 된다. 다시 말해 인접 소자와의 isolation이 나빠진다는 것이다. 이를 해결하기 위해 한 줄이 아닌 두 줄의 via 열을 교차 사용한 구조가 그림 5(c)에 나타나 있다. 그리고 마지막으로 그림 5(c)에서 제작 가능한 via 사이



(a) 완전도체 메탈 벽면
(a) Perfect metal side wall

(b) 한 줄의 바이열을 가지는 전통적인 비아 벽면
(b) Via fences two series array of via

(c) 교차된 두 줄의 바이열을 가지는 비아 벽면
(c) Via fences two series array of via

(d) 교차된 두 줄의 바이열을 가지는 비아 벽면
(d) Via fences two series array of via

그림 5. 다양한 Side Wall로 구성된 유전체 도파관 필터
Fig. 5. Dielectric waveguide filters having various side wall.

의 최소 거리를 사용한 구조가 그림 5(d)에 나타나 있다. 그림 6은 그림 5의 다양한 구조에 따른 시뮬레

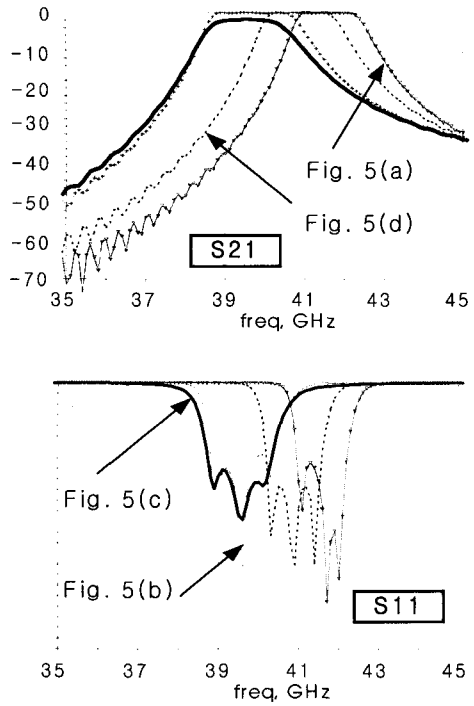


그림 6. 그림 5의 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Simulated results of Fig. 5.

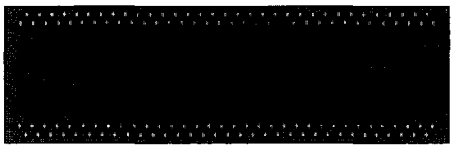
이션 결과를 나타낸다.

그림 6의 결과에서 보듯이 완전한 메탈 side wall을 via hole로 대체한 구조들의 삽입손실 및 주파수 이동은 도파관 벽면의 요철로 인한 임피던스의 변화와 공진기의 길이 증가가 한 요인으로 보이며 특히, 그림 6의 (b)와 (c)의 결과를 보면 한 줄로 side wall을 via hole로 대체하는 것보다 두 줄로 via hole array를 사용하는 것이 훨씬 적은 손실을 보이며 이들 손실의 대부분은 유전체를 통해 via사이의 틈으로 빠져나간 것으로 여겨진다. 그리고 같은 두 줄의 via hole array이지만 via사이의 간격이 좁을수록 훨씬 더 우수한 전달특성을 보이며 완전한 메탈 side wall인 경우의 주파수특성에 가깝게 접근한다.

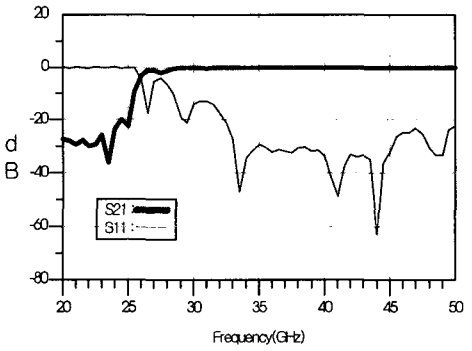
2-2-2 마이크로스트립-to-도파관 전이

도파관 형태의 필터를 다른 형태의 전송선로(마이크로스트립선로, 스트립선로, CPW 등)와 연결하기 위해서는 반드시 전이가 필요하다. 여기서는 50 ohm인 마이크로스트립에서 사각형 도파관으로의 전이를 보인다. 이 경우 사다리꼴의 형태를 하고 있으며 마이크로스트립과 도파관 사이의 거리(tf_l) 및 도파관과 연결되는 곳의 폭(tf_w)을 조절함으로써 원하는 주파수와 성능을 얻을 수 있다[10]. 40 GHz 대역을 사용하기 위해 마이크로스트립-to-도파관 전이의 길이와 폭을 조절하여 설계한 구조의 변수 값이 표 3에 나타나 있으며 설계된 구조와 시뮬레이션 결과가 그림 7에 보인다.

그림 7(a)에 보면 도파관의 side wall로 사용된 두 줄의 연속된 via 배열이 입/출력단의 끝까지 뻗어 나와 있는 것을 볼 수 있다. 이는 유전율을 가진 기판



(a) 마이크로스트립선로-to-사각도파관 전이
(a) Microstrip-to-rectangular waveguide transition



(b) 시뮬레이션 결과
(b) Simulated results

그림 7. 마이크로스트립-to-도파관 전이 최종구조 및 시뮬레이션 결과
Fig. 7. Final structure and simulated results of microstrip-to-waveguide transition.

표 3. 마이크로스트립-to-도파관 전이를 위한 물리적 매개변수(단위: mm)
Table 3. Physical parameters for microstrip-to-waveguide transition(Unit: mm).

변수	to_l	ms_l	tf_l	ms_w	tf_w
값	24	1.655	3.92	0.78	1.7

을 사용하는 경우, 전달되어야 할 신호가 유전체를 따라 외부로 누출됨에 따라 필터 자체의 성능은 물론 인접한 소자에도 나쁜 영향을 주므로 이러한 영향을 사전에 방지하기 위해서 사용됐다.

그림 7(b)의 시뮬레이션결과 40 GHz 대역에서 삽입손실이 0.2 dB 그리고 반사손실이 −25 dB 이하의 우수한 특성을 나타내었다.

Ⅲ. 시뮬레이션 및 측정 결과

앞에서 언급한 유전율이 2.2인 PCB 기판을 사용한 도파관 필터와 마이크로스트립-to-도파관 전이를 연결하여 완성된 최종 필터가 그림 8에 나타나 있다. 지름이 0.3과 0.8 mm인 2종류의 via만을 사용해 도파관 side wall과 내부 원형 포스트를 구현했으며 필터

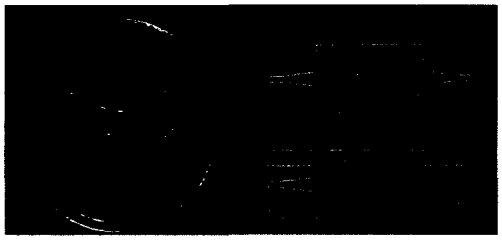


그림 8. PCB 상에 제작된 유전체 도파관 필터 실물 사진

Fig. 8. Dielectric waveguide filters realized on PCB substrate.

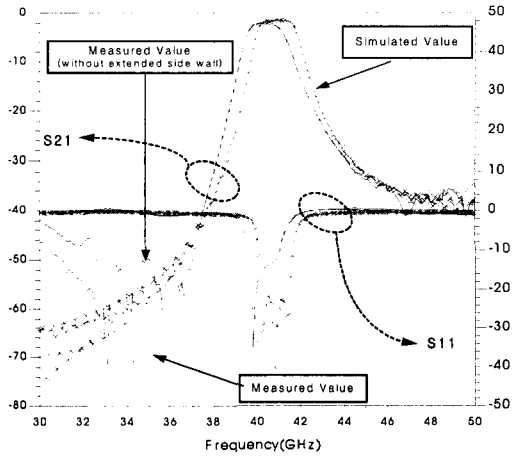


그림 9. 제작된 필터(그림 8)의 측정 결과 및 시뮬레이션 결과 비교

Fig. 9. Comparison of measured results(Fig. 8) and simulated results.

의 상면에 마이크로스트립 입/출력단과 전이부 그리고 도파관 필터가 보인다. 그리고 side wall의 효과를 검증하기 위해 두 가지 종류로 제작되었다.

그림 9의 측정결과는 Anritsu Network Analyzer (37397C)와 Test Fixture(3680V)를 사용해 측정되었다. 측정결과가 시뮬레이션 결과보다 삽입손실에서는 0.3 dB 정도, 주파수는 500 MHz 정도 낮아지는 차이를 보이며 전체적으로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 측정결과를 보면 40.5 GHz에서 −2 dB의 삽입손실과 −30 dB의 반사손실의 아주 우수한 특성을 나타내었다. 그리고 side wall이 더 길게 연장된 필터가 연장하지 않은 필터보다 삽입손실에서는 0.4 dB 그리고 반사손실에서는 10 dB 이상 우수한 특성을 보이는 것을 알 수 있다.

Ⅳ. 결 론

지금까지 공기환경에서 내부에 원형 포스트를 가지는 기존의 도파관 필터를 설계한 후 via fence를 이용해 PCB 기판상에 구현하는 방법을 제작을 통해 검증하였다. 특히 side wall과 도파관 내부 폴들을 via의 연속적인 나열과 via 지름 크기의 조절을 통해 쉽게 구현하였다. 이를 통해 얻을 수 있는 장점은 유전율이 높은 기판을 사용하여 전체 크기를 크게 줄일 수 있으며 특히 높이의 융통성으로 인해 집적화가 편리해졌다. 또한 기존의 도파관 필터를 위한 기구물 제작이 필요없이 PCB상에 대량의 제작이 용이하기 때문에 훨씬 저렴하게 제작할 수 있다. 마지막으로 모듈의 소형화를 위해 요즘 한창 각광받는 LTCC 공정과 같은 다층기판 제작시 한 층을 사용해 제작될 수 있다는 점에서 유리하다.

참 고 문 헌

[1] Masaharu Ito, Kenichi Maruhashi, Kazuhiro Ikuina, Takeya Hashiguchi, Shunichi Iwanaga and Deiichi Ohata, "A 60-GHz-Band Planar Dielectric Waveguide Filter for Flip-Chip Modules", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 49, no. 12, pp. 2431-2436, Dec. 2001.

[2] Yu Rong, Kawthar A. Zaki, Michael Hageman, Daniel Stevens and John Gipprich, "Low-Tempe-

rature Cofired Ceramic (LTCC) Ridge Waveguide Bandpass Chip Filters", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-47, no. 12, pp. 2317-2324, Dec. 1999.

[3] Yu Rong, Kawthar A. Zaki, John Gipprich, Michael Hageman and Daniel Stevens, "LTCC Wide-Band Ridge-Waveguide Bandpass Filters", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-47, no. 9, pp. 1836-1840, Sep. 1999.

[4] 김봉수, 이재욱, 송명선, "밀리미터파 도파관 E-평면 도체 삽입 필터의 변수변화에 따른 특성 조사", 2002년도 추계 마이크로파 및 전파학술대회 논문집, 25(2), pp. 111-114, 2002년 9월.

[5] 김봉수, 이재욱, 송명선, "밀리미터파 도파관 E-평명 Through-Hole 삽입 필터의 LTCC 설계", 2003년도 춘계 마이크로파 및 전파통신 학술대회 논문집, 26(1), pp. 133-136, 2003년 5월.

[6] N. Marcuvitz, ED., *Waveguide Handbook*, McGraw-Hill, pp. 257-262, 1951.

[7] George L. Matthaei, Leo Young and E. M. T. Jones, *Microwave filters, impedance-matching networks, and coupling structures*, Artech House, pp. 450-459, 1980.

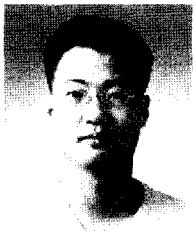
[8] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 2nd ed. Addison-Wesley, pp. 160-171, 1998.

[9] Simon Ramo, John R. Whinnery and Theodore Van Duzer, *Fields and waves in communication electronics*, 3rd ed. John Wiley & Sons, pp. 417-423, 1994.

[10] Dominic Deslandes, Ke Wu, "Integrated Microstrip and Rectangular Waveguide in Planar Form", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 11, no. 2, pp. 68-70, Feb. 2001.

[11] CST사의 MW Studio ver. 4.0

김 봉 수



1999년 2월: 충남대학교 정보통신공학과 (공학사)
2001년 2월: 충남대학교 정보통신공학과 (공학석사)
2000년 12월~현재: 한국전자통신연구원 디지털방송연구단 전파기술연구그룹 광대역RF연구팀 연구원
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 수동회로 해석 및 설계, 밀리미터파 RF/IF 시스템 분석

이 재 욱

1992년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1995년 10월~1996년 9월: 일본큐슈대학교 정보공학과 교환학생
1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
1998년 3월~현재: 한국전자통신연구원 디지털방송연구단 전파기술연구그룹 광대역RF연구팀 선임연구원
[주 관심분야] 고출력 증폭기 설계, 전자기수치해석, 저주파 및 광대역 안테나 설계, 마이크로파 및 밀리미터파 수동회로 해석 및 설계, EMI/EMC 해석

김 광 선

1998년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
2000년 2월: 경북대학교 전자공학과 대학원 (공학석사)
2000년 4월~현재: 한국전자통신연구원 디지털방송연구단 전파기술연구그룹 광대역RF연구팀 연구원
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 발진기, PLL 설계, 밀리미터파 RF/IF 시스템 분석

강 민 수

1996년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
1998년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학석사)
1998년 2월~2000년 3월: (주) 현대전자 통신사업본부 통신연구소
2000년 4월~현재: 한국전자통신연구원 디지털방송연구단 전파기술연구그룹 광대역RF연구팀 선임연구원
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 회로 설계, 이동통신 시스템

송 명 선

1984년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
1986년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
1986년 2월~현재: 한국전자통신연구원 디지털방송연구단 전파기술연구그룹 광대역RF연구팀장
[주 관심분야] 초고주파 및 밀리미터파 회로 설계, 응용시스템 개발