

2층 유전체기판을 이용한 고조파 억압 대역통과필터의 설계

정희원 문승찬*

Design of Harmonic Suppression BandPass Filter Using a Two-layer Dielectric Substrate

Seung-Chan Moon* *Regular Member*

요 약

초고주파 회로에서 광범위하게 이용되는 평행결합 마이크로스트립 대역통과필터는 2차 스퓨리어스 통과대역으로 필터의 응용을 제한한다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 2층 유전체기판을 사용하는 방법을 제시하였다. closed-form 해석방법을 이용하여 2층기판상에 결합 마이크로스트립 선로를 해석하고 중심주파수 9GHz에서 정규화 대역폭 20%을 갖는 필터를 제작하였다. 단층기판을 갖는 필터와 비교하면 2층기판을 이용한 필터는 스퓨리어스 통과대역이 개선됨을 보였다.

ABSTRACT

Parallel coupled microstrip bandpass filter is widely used in microwave circuits. But this filter limits the filter applications because of the spurious passband at twice the basic passband frequency. In order to solve this problems, a method of using a two-layer dielectric substrate is presented.

Closed form method is used to analyze coupled microstrip lines on a two-layer substrate.

An experimental filter is fabricated over 20 percent bandwidth centered at 9 GHz. Compared with the filter on a single-layer, this filter on a two-layer substrate shows improvements of the spurious passband.

1. 서 론

초고주파 수동소자로서 결합 마이크로스트립 선로는 MIC 와 MMIC 에서 필터,방향성 결합기 및 고속 디지털 VLSI등을 포함한 중요한 전송선로로 널리 이용되고 있다.

결합 마이크로스트립 선로를 이용한 저 전력용 필터는 소형경량이며 원하는 주파수 대역에서 전송 손실을 최소화 하여 소신호전송을 극대화하도록 설계하여야 한다. 또한 시스템의 잡음신호와 스퓨리어

스로부터 간섭을 방지하기 위해서 차단대역에서 손실을 극대화시킬 필요가 있다.

평행 결합 마이크로스트립 선로를 이용한 대역통과필터^[1,2]는 평면구조 및 소형이기 때문에 지금까지 가장 일반적으로 사용되는 필터중에 하나이다. 또한 이 필터는 저 가격으로 대량생산이 가능하며 다른 평면구조를 갖는 필터와 비교하면 상당히 좋은 성능을 보여주고 있다.

그러나 결합 마이크로스트립 선로는 두 모드(우모드와 기모드)의 장(field)분포가 다르기 때문에 두 모드의 위상속도가 서로 다르다. 이러한 두 모드 위

* 영동전문대학 정보통신과(scmoon@yeongdong.ac.kr)
논문번호 : 00007-0211, 접수일자 : 2000년 2월 11일

상속도의 차이가 증가할수록 결합 마이크로스트립 선로를 이용한 대역통과필터는 통과대역 상측차단 roll-off 특성을 저하시켜 중심 주파수의 약 2배에서 2차 스푸리어스 대역통과율을 갖는 단점이 있다.^[3]

2차 스푸리어스 통과대역을 억압하기 위해서 계단형 임피던스 공진기^[4], 캐패시터로 보상하는 방법^[5], 변형된 평행 결합선로^[6] 및 다층 기판구조를 이용한 방법^[7] 등이 발표되었다.

이들중 다층 기판구조를 이용하는 방법은 MIC 및 MMIC의 크기를 소형으로 제작할 수 있다는 장점 때문에 다층기판구조를 이용한 대역통과필터설계에 많은 관심을 갖는 추세이다.^[8]

본 논문에서는 서로 다른 유전체를 갖는 2층 유전체기판과 결합 마이크로스트립 선로를 이용하여 대역통과필터를 설계하였다.

2층 유전체기판은 하층기판의 높이와 유전율, 상층기판의 높이와 유전율을 적절히 조절하여 두 모드 위상속도의 차이를 줄이거나 같게 할 수 있다. 또한 2층 유전체기판상에 결합 마이크로스트립선로는 결합선로 사이에 밀결합으로 인하여 광대역특성을 갖는다는 장점이 있다.^[8,9]

closed-form 해석방법^[10]을 이용하여 2층 유전체기판상에 결합 마이크로스트립 선로의 모드 파라미터를 구하였다.

2층 유전체기판상에 결합 마이크로스트립 선로를 이용하여 Chebyshev 응답 X-band에서 첨예한 roll-off 특성을 갖는 대역통과 필터를 설계하였다.

2층 기판을 갖는 대역통과필터는 하층기판의 유전율 $\epsilon_{r1}=2.52$, 기판의 높이 $h_1=0.508\text{mm}$ 인 테프론 기판과 유전율 $\epsilon_{r2}=10$, 기판의 높이 $h_2=1.31\text{mm}$ 인 알루미나기판을 사용하여 제작하였다.

측정결과, 중심 주파수 9GHz에서 삽입손실 1.62dB, 대역폭 20% 및 반사손실은 약 10.8dB이며, 2차통과대역에서 약 19.7dB 이하의 감쇠특성을 얻었다. 또한 측정결과를 단층기판을 갖는 필터^[11]와 비교하면 2층기판을 갖는 필터의 2차 스푸리어스 통과대역이 개선됨을 보였다.

II. 2층 유전체기판상에 결합 마이크로스트립 선로

1. 모드 파라미터

그림 1은 선로의 폭(W) 및 간격(S)을 갖는 2층 유전체기판상에 결합 마이크로스트립 선로 부유용량

이며, 결합선로의 총 부유용량을 여러개의 부유용량 즉, 평행판 부유용량(C_p), 가장자리 부유용량(C_f, C'_f) 및 간격부유용량(C_{gd}, C_{ga}) 으로 나누어 나타내었다. 여기서 유전체기판은 무손실, 선로의 두께는 무시하였다.

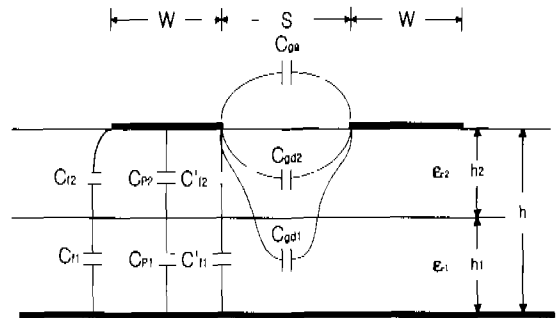


그림 1. 2층 유전체기판상에 결합 마이크로스트립 선로의 여러가지 부유용량

우모드 부유용량(C_u)과 기모드 부유용량(C_o)은 다음과 같다.

$$C_u = C_f + C_p + C'_f \tag{1a}$$

$$C_o = C_f + C_p + C'_f + C_{gd} + C_{ga} \tag{1b}$$

여기서 직렬로 연결된 평행판 부유용량 C_f 는

$$C_p = \frac{C_{p1} C_{p2}}{C_{p1} + C_{p2}} \tag{2}$$

이며, $C_{pi} (i=1, 2)$ 는 다음과 같다.

$$C_{pi} = \epsilon_o \epsilon_{ri} \frac{W}{h_i} \tag{3}$$

가장자리 부유용량 C_f 는 다음과 같다.

$$C_f = \frac{C_{f1} C_{f2}}{C_{f1} + C_{f2}} \tag{4}$$

$$C_{fi} = 0.5(C_{m_i} - C_{pi}) \quad (i=1, 2) \tag{5}$$

여기서, C_{pi} 는 식(3)으로 주어지며, C_{m_i} 는 마이크로스트립 선로의 총 부유용량으로 다음과 같다.

$$C_{m_i} = \frac{\epsilon_{rx(m)}(W, h_i, \epsilon_{ri})}{C_o Z_m(W, h_i, \epsilon_{ri} = 1)} \tag{6}$$

여기서 $Z_m(W, h_i, \epsilon_{ri} = 1)$ 과 $\epsilon_{rs(m)}(W, h_i, \epsilon_{ri})$ 은

$$Z_m(W, h_i, \epsilon_{ri} = 1) = \begin{cases} 60 \ln \left[\frac{8h_i}{W} + \frac{W}{4h_i} \right] & (W/h_i \leq 1) \\ 120 \pi / \left[\frac{W}{h_i} + 1.393 + 0.677 \ln \left(\frac{W}{h_i} + 1.444 \right) \right] & (W/h_i \geq 1) \end{cases} \quad (7)$$

$$\epsilon_{rs(m)}(W, h_i, \epsilon_{ri}) = 0.5 [(\epsilon_{ri} + 1) + (\epsilon_{ri} - 1) F(W/h_i)] \quad (8)$$

이며,

$$F(W/h_i) = \begin{cases} (1 + 12h_i/W)^{-1/2} + 0.04(1-W)^2 & (W/h_i \leq 1) \\ (1 + 12h_i/W)^{-1/2} & (W/h_i \geq 1) \end{cases}$$

이다.

C_{r2} 는 유전율 ϵ_{r2} 와 기판높이 h_2 를 갖는 가장자리 부유용량으로 구해진다. 또한 C_{r1} 은 유전율 ϵ_{r1} 과 기판높이 $h_1 + h_2$ 를 갖는 가장자리 부유용량(그림 2(a))과 유전율 ϵ_{r1} 과 기판높이 h_2 를 갖는 가장자리 부유용량(그림 2(b))을 각각 식(5)에 대입하고 그 결과값을 빼면 구할 수 있다.

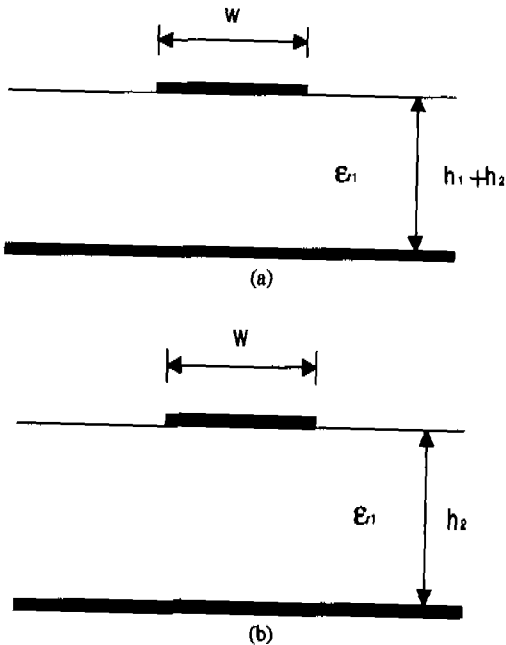


그림 2. (a) 유전율 ϵ_{r1} 과 기판높이 $h_1 + h_2$ 를 갖는 가장자리 부유용량
(b) 유전율 ϵ_{r1} 과 기판높이 h_2 를 갖는 가장자리 부유용량

가장자리 부유용량 C_r 는 가장자리 부유용량 C_{r1} 를 구하는 방법과 유사하게 구할 수 있다^[10].

$$C_r = \frac{C_{r1} C_{r2}}{C_{r1} + C_{r2}} \quad (9)$$

유전체 영역에서 간격 부유용량 C_{gd} 는 다음과 같다.

$$C_{gd} = C_{gd1} + C_{gd2} \quad (10)$$

$$C_{gd1} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{r1}}{\pi} \ln \left[\coth \left(\frac{\pi S}{4h} \right) \right] + 0.65 C_{r1} \left(\frac{0.02}{S/h} \sqrt{\epsilon_{r1} + 1 - \epsilon_{r1}^{-2}} \right) \quad (11)$$

공기영역에서 간격 부유용량 C_{ao} 는 비대칭 코플러 나 스트립선로구조^[10]를 이용하여 계산할 수 있다. 2층 유전체기판상에 결합 마이크로스트립 선로의 특성 임피던스 Z_{oe} 와 Z_{oo} 는 다음과 같다.

$$Z_{oe} = (C_r \sqrt{C^a_o C^o_o})^{-1} \quad (12a)$$

$$Z_{oo} = (C_r \sqrt{C^a_o C^o_o})^{-1} \quad (12b)$$

여기서 C^a_o 와 C^o_o 는 식(1)에서 유전율을 공기 ($\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = 1$)로 대체할때 두 모드의 부유용량이다.

2. 시뮬레이션

서로 다른 유전율을 갖는 2층 기판상에 결합 마이크로스트립 선로는 두 모드의 위상속도가 상층기판의 유전율과 높이, 하층기판의 유전율과 높이에 따라 변한다.

그림 3 은 2층 유전체기판상에 결합 마이크로스트립 선로의 모드 위상속도(V_p)를 나타내었다. 2층 유전체기판상에서 상층과 하층기판의 유전율이 각각 $\epsilon_{r2}, \epsilon_{r1}$ 인 경우, 기판의 전체높이 $h = h_1 + h_2$ 를 고정시키고 상층과 하층기판 높이를 변화시켜 나타내었다. 여기서 기판높이의 비가 $h_1/h = 0$ 인 경우는 유전율 ϵ_{r2} 인 단층기판을 갖는 결합 마이크로스트립 선로가 되고 기판높이의 비가 $h_1/h = 1$ 인 경우는 유전율 ϵ_{r1} 인 단층기판을 갖는 결합 마이크로스트립 선로가 되므로 그림 3 에 나타내지 않았다. 그림 3 에서 상층과 하층기판의 높이변화에 따라 두 모드의 위상속도 차이가 줄어들거나 증가하여 어떤 조건에서는 잡아짐을 알 수 있다.

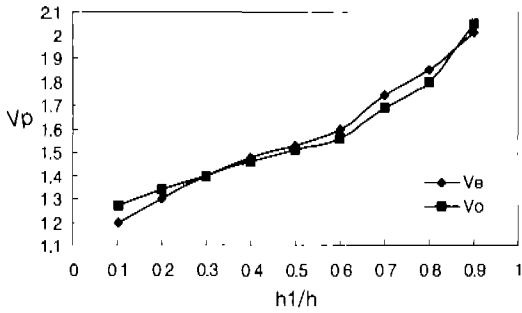
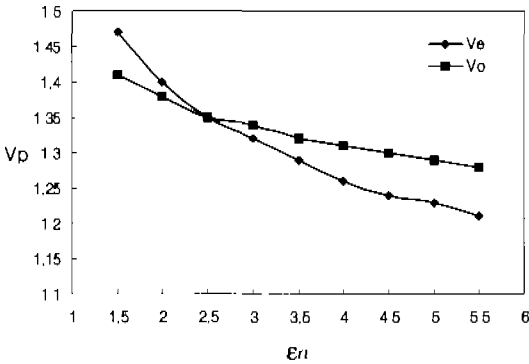
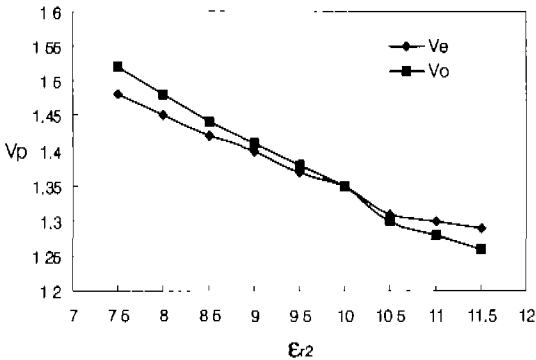


그림 3. 기판높이(h1/h)의 변화에 따른 모드 위상속도 ($\epsilon_{r1}=2.2, \epsilon_{r2}=9.7, W/h=S/h=0.33$)



(a)



(b)

그림 4. (a)유전율(ϵ_{r1})의 변화에 따른 모드 위상속도 ($\epsilon_{r2}=9.7, W/h=S/h=h1/h=0.33$)

(b)유전율(ϵ_{r2})의 변화에 따른 모드 위상속도 ($\epsilon_{r1}=2.5, W/h=S/h=h1/h=0.33$)

상층기판의 높이와 하층기판의 높이를 고정시키고 두 모드의 위상속도를 하층기판의 유전율과 상층기판의 유전율의 함수로 그림4에 나타내었다.

그림4에서 상층기판과 하층기판의 유전율의 변화에 따라 두 모드 위상속도를 같이 할 수 있다.

그림5는 2층기판상에 결합 마이크로스트립 선로의 모드 임피던스를 나타내었다.

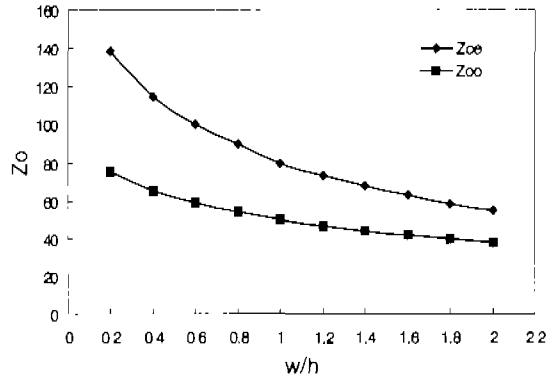


그림 5. 2층기판상에 결합 마이크로스트립 모드 임피던스 ($\epsilon_{r1}=2.2, \epsilon_{r2}=10, h1/h=S/h=0.4$)

III. 대역통과필터의 설계

그림 6(a)는 개방회로를 갖는 결합선로이며, 전기적 길이 θ 둘 갖는 우 모드과 기모드에서 특성 임피던스 Z_{oe}, Z_{oo} 와 같고, 전기적 길이, 선로의 특성 임피던스 Z_0 와 임피던스 변환기 K 를 이용하여 그림 6(b)와 같은 등가회로로 나타낼 수 있다.

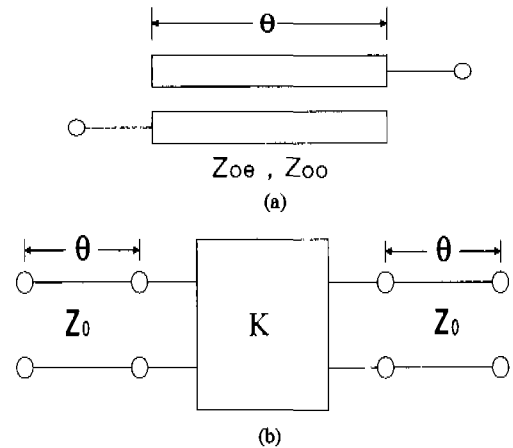


그림 6. (a) 결합 선로 (b) 등가회로

그림 6(a)에서 결합선로 ABCD 행렬식 F_a 는

$$[F_a] = \begin{bmatrix} \frac{Z_{oe} + Z_{oo} \cos \theta}{Z_{oe} - Z_{oo} \cos \theta} & j \frac{(Z_{oe} - Z_{oo})^2 + (Z_{oe} + Z_{oo})^2 \cos^2 \theta}{2(Z_{oe} - Z_{oo}) \sin \theta} \\ j \frac{2 \sin \theta}{Z_{oe} - Z_{oo}} & \frac{Z_{oe} + Z_{oo} \cos \theta}{Z_{oe} - Z_{oo}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

이다. 또한 그림 6(b)에서 ABCD 행렬식 F_θ 는

$$[F_\theta] = \begin{bmatrix} (\frac{Z_0}{K} + \frac{K}{Z_0}) \sin \theta \cos \theta & j(\frac{Z_0^2}{K} \sin^2 \theta - K \cos^2 \theta) \\ j(\frac{K}{Z_0^2} \sin^2 \theta - \frac{\cos^2 \theta}{K}) & (\frac{Z_0}{K} + \frac{K}{Z_0}) \sin \theta \cos \theta \end{bmatrix} \quad (14)$$

이다.

식(13)과 식(14)의 각 요소값은 결합선로(그림 6(a))와 그외 등가회로(그림 6(b))관계이므로 각각 일치하여야 한다.

$$\frac{Z_{oe} + Z_{oo}}{Z_{oe} - Z_{oo}} \cos \theta = (\frac{Z_0}{K} + \frac{K}{Z_0}) \sin \theta \cos \theta \quad (15a)$$

$$\frac{(Z_{oe} - Z_{oo})^2 + (Z_{oe} - Z_{oo})^2 \cos^2 \theta}{2(Z_{oe} - Z_{oo}) \sin \theta} = \frac{Z_0^2}{K} \sin^2 \theta - K \cos^2 \theta \quad (15b)$$

$$\frac{2 \sin \theta}{Z_{oe} - Z_{oo}} = \frac{K}{Z_0^2} \sin^2 \theta - \frac{\cos^2 \theta}{K} \quad (15c)$$

$\theta = \pi/2$ 인 경우, 식(15)로부터 결합선로에 대한 우모드와 기모드의 정규화 임피던스 Z_{oe}/Z_0 와 Z_{oo}/Z_0 에 관한 관계식은

$$Z_{oe}/Z_0 = 1 + \frac{Z_0}{K} + \frac{Z_0^2}{K^2} \quad (16a)$$

$$Z_{oo}/Z_0 = 1 - \frac{Z_0}{K} + \frac{Z_0^2}{K^2} \quad (16b)$$

이다.

그림 7은 결합 마이크로스트립 선로를 이용한 대역통과필터이다. 결합선로에서 전기적 길이, 우모드와 기모드의 특성 임피던스 및 간격을 각각 $\theta = \lambda_g/4$, $(Z_{oe})_{j-1,j}$, $(Z_{oo})_{j-1,j}$, $S_{j-1,j}$ 로 나타내었다.

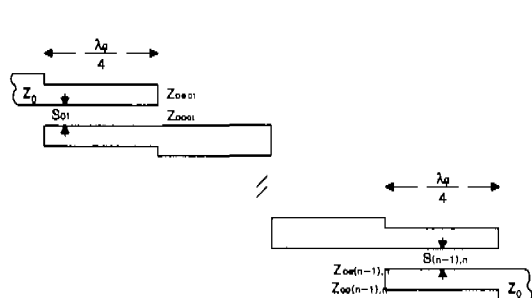


그림 7. 대역통과 필터 구조

$N+1$ 결합선로를 갖는 대역통과필터에서 소자값 g_j , 상대 대역폭 w_c 와 임피던스 변환기 $K_{j,j+1}$ 간의 관계는 대역통과필터에서 다음과 같다^[12].

1) 첫번째 결합선로

$$Z_0/K_{01} = \sqrt{\frac{\pi w_c}{2g_1 g_{j+1}}} \quad (17a)$$

2) 중간 결합선로

$$Z_0/K_{j,j+1} = \frac{\pi w_c}{2\sqrt{g_j g_{j+1}}} \quad (j=1, \dots, n) \quad (17b)$$

3) 끝부분의 결합선로

$$Z_0/K_{n,n+1} = \sqrt{\frac{\pi w_c}{2g_n g_{n+1}}} \quad (17c)$$

그림 7 에서 각 결합선로의 우모드와 기모드의 특성 임피던스와 임피던스 변환기간의 관계를

$$(Z_{oe})_{j,j+1} = Z_0(1 + aZ_0 + a^2 Z_0^2) \quad (18a)$$

$$(Z_{oo})_{j,j+1} = Z_0(1 - aZ_0 + a^2 Z_0^2) \quad (18b)$$

로 하면, $N+1$ 개 결합선로를 갖는 대역통과필터의 기능을 얻을 수 있다. 여기서 $a = 1/K_{j,j+1}$ 이고, Z_0 는 선로의 특성 임피던스이다.

IV. 실험 및 결과 검토

초고주파 대역중 X-band에서 첨예한 roll-off특성을 갖는 대역통과필터를 실현하기 위해서 2층 유전체기판상에 결합 마이크로스트립 선로를 이용하여 설계 제작하였다.

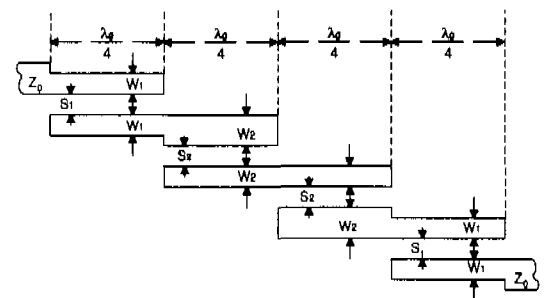


그림 8. 2층 기판상에 결합 마이크로스트립 대역통과 필터

표 1. 설계사양

항 목	필터 1
중심주파수(GHz)	9
정규화 대역폭	20%
W_1 (mm)	2.32
W_2 (mm)	2.54
l_1 (mm)	5.47
l_2 (mm)	5.45
S_1 (mm)	0.45
S_2 (mm)	0.53

실현하고자 하는 대역통과필터는 Chebyshev 응답 공진기수 $N=3$, 리플 0.2 dB, 중심주파수 9 GHz 및 정규화 대역폭 20%이며, 입출력 임피던스는 특성 임피던스 $Z_0=50 \Omega$ 으로 설계한 설계사양을 표1에 나타내었다.

그림 8은 결합 마이크로스트립 선로의 불연속특성과 분산특성^[13]을 고려하여 설계한 대역통과필터이다.

2층 기판을 갖는 대역통과필터는 하층기판의 유전율 $\epsilon_{r1}=2.52$, 기판의 높이 $h_1=0.508\text{mm}$ 인 테프론 기판과 유전율 $\epsilon_{r2}=10$, 기판의 높이 $h_2=1.31\text{mm}$ 인 알루미나기판을 사용하여 제작하였다.

대역통과필터의 주파수응답특성을 측정하기 위해서 HP 8722A Network Analyzer를 이용하였고 측정주파수범위는 0.5-20GHz 이다.

제작된 대역통과필터의 전달특성과 반사손실을 측정하여 그림9에 도시하였다. 중심 주파수 9GHz에서 삽입손실 1.62dB, 대역폭 20% 및 반사손실은

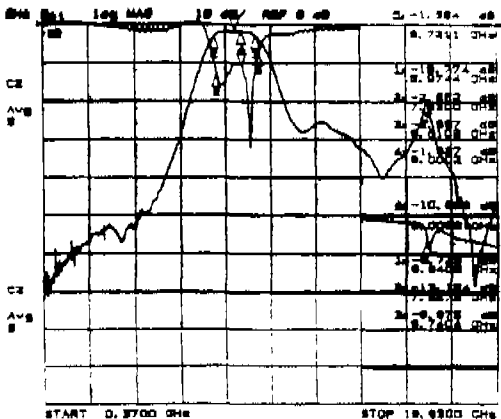


그림 9. 측정결과(2층 기판)

약 10.8dB이며, 2차통과대역에서 약 19.7dB 이하의 감쇠특성을 얻었다.

측정결과를 이미 발표된 연구결과(그림10)^[11]와 비교하면 2차 스퍼리어스가 약 15dB이하의 감쇠특성으로 개선되었고 동작주파수 범위내에서 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

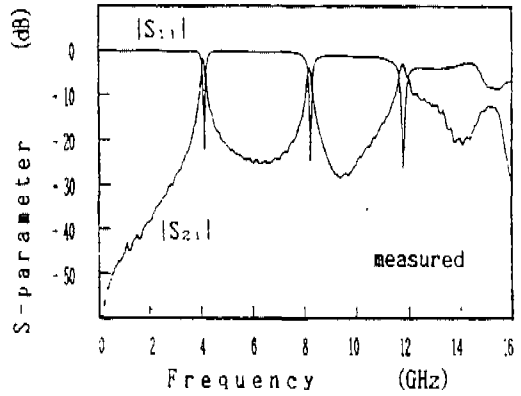


그림 10. 측정결과^[11](단일기판)

V. 결론

이동통신 및 초고주파 통신시스템에 이용되는 결합 마이크로스트립 대역통과필터는 두 모드의 위상 속도 차이로 인하여 2차 스퍼리어스 통과대역이 나타나 필터의 성능을 저하시킨다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 2층 유전체기판을 이용하는 방법을 제시하였다.

비유전율이 다른 2층기판은 상층기판의 높이와 유전율 및 하층기판의 높이와 유전율을 적절히 조절하여 결합 마이크로스트립 선로의 모드 위상속도 차이를 줄이거나 없게 할 수 있어 대역통과필터의 성능을 개선시킬 수 있다.

closed-form 해석방법을 이용하여 chebyshev 응답 공진기수 $N=3$, 리플 0.2dB, 중심주파수 9GHz에서 정규화대역폭 20%를 갖는 대역통과필터를 2층 기판상에 결합 마이크로스트립 선로를 이용하여 설계 제작하였다.

측정한 결과, 중심주파수 9GHz에서 1.62dB 정도의 삽입손실과 대역폭 20% 및 통과대역에서 약 10.8dB 이하의 반사손실을 얻었다. 또한 2차 통과대역에서 약 19.7dB이하의 감쇠특성을 얻었다.

2층기판구조를 갖는 대역통과필터의 성능이 일반

