

이 기 형 박 종 국 홍 기 국
 광운대학교
 전자통신공학과

Analysis and Design of Dielectric Resonator Filter
 Using Coupling Parameter

G.H. Lee, J.K. Park, U.S. Hong
 Kwang Woon Univ. Elec-Com. Dept.

Abstract

In this paper a microwave band-pass filter using dielectric resonators at X-band is designed and constructed.

For the filter design and construction, the coupling coefficient k between one resonator and another one is numerically evaluated. The external quality factor Q_e is also calculated with a microstripline which is necessary for field excitation of dielectric resonators.

The k and Q_e data which are evaluated by numerical analysis are really applied the filter construction. Filter responses are given by Chebyshev approximation and they agree well with experimental results.

1. 서 론

마이크로웨이브 분야에서 마이크로웨이브 집적회로(MIC)는 눈부시게 발전하고있는 영역 중에 하나이며, 이것은 현대가 점점 더 작고 가벼운 장비를 요구하고 있는 까닭이다. 필터에 있어서도 마찬가지로 마이크로웨이브 집적회로와 결합시켜서 쓸 수 있는 소형, 경량의 집적회로용 마이크로웨이브 필터를 요구하고 있다.

최근 40년 동안, 마이크로웨이브 필터는 급속히 발전했으며 여러가지 형태를 가진 필터들이 실험, 제작되었으나 이들 Waveguide 필터나 Transmission line 필터 등 기존의 필터들은 부피와 무게가 크거나 손실이 크다는 단점을 가지고있다. 그러나 유전체공진기를 이용한 필터를 제작할 경우, 기존의 필터들이 가지는 단점을 보완할 수 있으며, 소형, 경량이며 싼 값으로 만들 수 있는 장점을 가지며, 마이크로웨이브 집적회로에서도 그 응용이 가능하다.

본 논문에서는 통신위성이나 레이더 시스템에 필요한 X-Band 용 필터를 유전체공진기와 Microstripline을 이용해서 설계, 제작하고자한다. 먼저 필터를 설계, 제작하는데 이론적으로 필요 본포를 가정하고 이 필터 본포를 이용해서 공진기와 공진기 간의 결합을 나타내는 Coupling Coefficient k 와 Port(Stripline)와 공진기 사이의 결합을 나타내는 External Quality Factor Q_e 를 계산하는데, 이전의 Magnetic-wall Method [1]를 이용하는 경우에는 유전체공진기와 유전체공진기의 위, 아래 영역에서의 Field만으로 Stored Energy와 Magnetic-dipole Moment를 구하여 Coupling Coefficient k 와 External Quality Factor Q_e 를 계산하였으나, 본 논문에서는 Magnetic-wall Method로는 고려할 수 없었던 유전체공진기의 옆 영역과 대각선 방향의 위, 아래 영역에서의 Field까지 포함시켜서 Stored Energy W_a 와 Magnetic-dipole

Moment M 를 구하여 Coupling Coefficient k 와 External Quality Factor Q_e 를 계산하였으며, 이 결과 이론이 이론으로 계산된 Coupling Coefficient k 가 실제보다 크게 나오는 것을 개선할 수 있었다. 이 Parameter를 실제 필터를 제작하는데 응용하였다.

필터의 응답은 Chebyshev Approximation으로 구하고 실험적 데이터와 비교, 검증한다.

II. 유전체공진기를 이용한 필터의 해석

이 장에서는 공진기 간의 결합계수와 External Quality Factor Q_e 에 대한 해석을 한다. Cylindrical 유전체공진기는 Microstrip Line의 Substrate 위에 놓이고, Microstripline에 의해서 여기된다. 유전체공진기의 모드는 해석 상의 편의를 위해서 TE₀₁₀ Mode로 가정한다.

II-1. Microstrip Line과 유전체공진기 사이의 결합

이러한 Port와 Microstripline의 기본 구조는 그림1과 같다.

Microstrip Line과 유전체공진기 사이의 결합을 나타내는 External Quality Factor Q_e 는 정의식으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다 [4].

$$Q_e = \frac{R_{ext}}{Z(\omega_0)} Q_0 \quad (1)$$

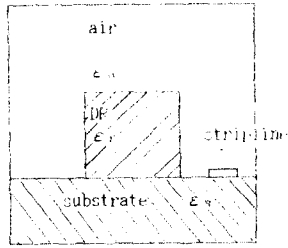


그림 1. 유전체공진기와 Stripline 간의 결합의 기본 구조

Fig. 1. Basic construction of coupling between a stripline and a dielectric resonator.

여기서, Q_0 는 (Unloaded Quality Factor)이다. 또한, R_{ext} 는 Generator의 내부저항(R_g)과 선로의 부하저항(R_L)을 나타내므로, $R_{ext}=R_g+R_L$ 이다. 이회로가 Matching network이라면 $R_g=R_L=R_0$ 이고, 여기서 Z_0 는 선로의 특성 임피던스이다. 고로, $R_{ext}=2R_0$ 로 놓을 수 있다. 그러므로,

$$Q_0 = \frac{Z_0 L_r}{\omega L_m} \quad (2)$$

유전체공진기에 흐르는 전류 I_r 에 의해 Microstrip 에 유기되는 전압 e 는

$$e = j\omega L_m I_r \quad (3)$$

이고, 이것은 Microstrip Line 밑에 있는 Substrate의 단면(S)을 통과하는 Magnetic Flux의 수로 부터 Magnetic Flux Method[5]를 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$e = j\omega \mu_0 \int_S H ds \quad (4)$$

또한, 유전체공진기에서의 Magnetic Stored Energy는 다음(5)식과 같다.

$$W_m = \frac{1}{2} L_r I_r^2 \quad (5)$$

(4)식과 (5)식으로부터 $L_r I_r^2$ 을 구해서 (2)식에 대입하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$Q_0 = \frac{Z_0}{\omega \mu_0 \omega^2} \int_S H ds^2 \quad (6)$$

II-2. 유전체공진기와 유전체공진기 간의 결합

유전체공진기 간의 결합은 Coupling Coefficient k 로 나타내는데 이러한 구조의 기본적인 형태는 그림 2와 같다.

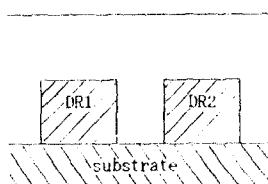


그림 2. 유전체공진기 간의 결합의 기본구조
Fig. 2. Basic construction of coupling between interresonators.

결합계수 k 는 아래와같이 상호인덕턴스와 자기인덕턴스로 정의된다.

$$k = \frac{L_{12}}{L} = \frac{V_2 I_2}{j 2 \omega W_{m1}} \quad (7)$$

여기서, I_2 와 V_2 는 각각 DR2에서의 전류와 전압이고, W_{m1} 은 DR1에서의 Stored Energy이다.

그림 2와같은 구조는 TE_{010} Mode에서 Magnetic-dipole로 나타낼 수 있으므로, waveguide 안의 유전체공진기가 동일하다면 결합계수는 waveguide 안의 동일한 Magnetic-dipole 사이의 결합으로 가정하여 그의 Coupling Coefficient 를 구하면된다.

$$k = \frac{\mu_0 H_2 M}{2 W_m} \quad (8)$$

여기서 H_2 는 다음과 같다.

$$H_2 = \frac{M}{S_{AB}} \left[\sum_{m,0} \alpha_{m0} \exp[-\alpha_{m0}s] + 2 \sum_{m,0} \frac{\alpha_{m0}^2}{\alpha_{mn}} \exp[-\alpha_{mn}s] \right]$$

또한,

M : DR에서의 Magnetic-dipole Moment

S_{AB} : waveguide의 단면적

$$\alpha_{mn} = \frac{2\pi}{\lambda_{cmn}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{cmn}}{\lambda}\right)^2}$$

$$\lambda_{cmn}^{-1} = \sqrt{\left(\frac{m}{2a}\right)^2 + \left(\frac{n}{2b}\right)^2}$$

s : DR사이의 거리이다.

고로, (8)식에 H_2 를 대입시켜서 얻은 Coupling Coefficient k 는 (9)식과 같다.

$$k = \frac{\mu_0 M^2}{2k_m S_{AB}} \left[\sum_{m,0} \alpha_{m0} \exp[-\alpha_{m0}s] + 2 \sum_{m,0} \frac{\alpha_{m0}^2}{\alpha_{mn}} \exp[-\alpha_{mn}s] \right] \quad (9)$$

III. 수치해석

External Quality Factor Q_0 나 Coupling Coefficient k 를 계산하기 위해서는 주어진 필드 분포를 이용하여 Magnetic Stored Energy W_m , Magnetic-dipole Moment M 와 Integral Value등을 구해야된다. 또한 이 양의 끝 부분에는 Chebyshev Approximation을 이용하여 필터의 응답을 구하였다.

그림4는 필드 분포를 위한 각 영역을 나타낸다.

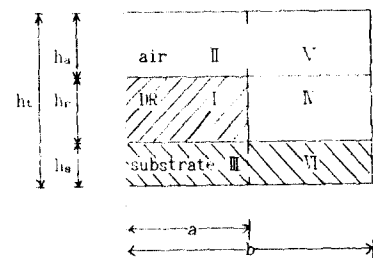


그림 4. 필드 분포를 위한 영역의 구분
Fig. 4. Divided regions for the field distribution.

각 영역에서의 필드 분포는 참고문헌[7]의 그림을 사용하였다.

주어진 필드로부터 Maxwell Eq.을 이용하여 E_0 와 H_0 를 구하며, E_0 는 Magnetic Stored Energy W_m 과 Magnetic-dipole Moment M 을 구하는데 쓰이고, H_0 는 Integral Value를 구하는 Magnetic Flux Method에 쓰인다. W_m 과 M 의 정의는 다음과 같으며

$$W_m = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \int_V E_0 \cdot E_0 dV$$

$$M = \frac{1}{2} j \omega \epsilon_0 \epsilon_r \int_V r \times E_0 dV$$

여기서,

- ϵ_r : 영역 i의 Relative Permittivity
- E_0 : 영역 i의 Electric Field Vector
- r : Distance Vector
- V_i : 영역 i의 체적이다.

필드 분포를 위의 정의식에 대입하여 얻은 Magnetic-dipole Moment M 과 Stored Energy W_m , 그리고 Integral Value를 얻을 수 있다.

앞에서 구한 Factor를 결과식 (6)과(9)에 대입하여 External Quality Factor Q_e 와 Coupling Coefficient k 값을 얻었는데 다음 그림 5와 6에 표시되었다.

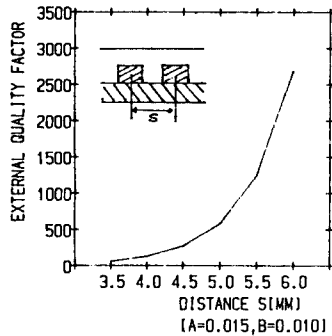


그림 5. 거리에 따른 External Quality Factor Q_e 의 값
Fig. 5. External quality factor Q_e as a function of the distance.

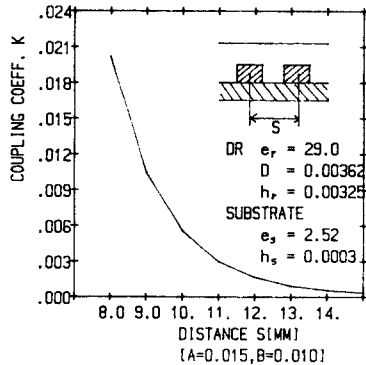


그림 6. 거리에 따른 Coupling Coefficient k 의 값
Fig. 6. Coupling coefficient k as a function of the distance.

Q_e 는 Microstrip Line과 유전체공진기 사이의 거리에 대한 함수이고, k 는 유전체공진기와 유전체공진기 사이의 거리에 대한 함수이다. 위에서 구한 Q_e 와 k 를 실제 필터를 제작하기 위한 설계에 참고한다.

그림 7은 Chebyshev Approximation을 이용하여 V-band에서의 대역 통과 필터의 응답을 구한 것이다. 다음 장에서의 실험 결과(그림 9)와 비교하게 된다.

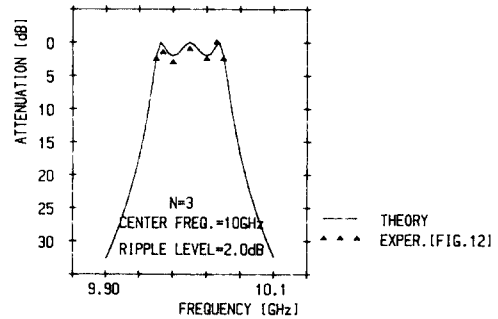


그림 7. Chebyshev Approximation을 이용한 대역 통과 필터의 응답과 실험치
Fig. 7. The bandpass filter response using Chebyshev approximation and experimental result.

그림 8은 본 논문에서 제안한 모든 영역의 필드를 고려해서 Stored Energy W_m 과 Magnetic-dipole Moment M 을 구해서 k 값을 계산한 것을 실험으로 나타내었고, Magnetic-wall Method[1,3]를 이용해서 구한 k 값은 점선으로 표시하여 비교하였다. 실험치와 Petterson의 데이터[11]를 비교한 것을 그림 8에서 참고문헌[7]의 것을 사용하였으며, 본 논문에서 제안한 방법으로 얻은 데이터의 정확도에 가장 접근하는 것을 알 수 있다.

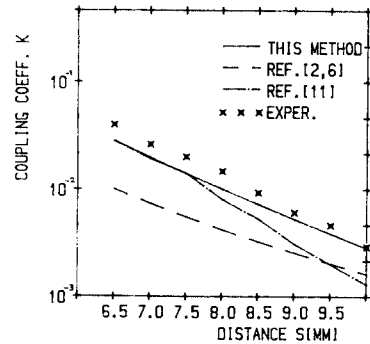


그림 8. Coupling Coefficient k 의 비교
Fig. 8. Comparison of the coupling coefficient k .

IV. 실험결과 및 결론

실험은 중심 주파수가 80GHz와 10GHz인 유전체공진기를 사용하였고, 필드를 여기시키기 위한 Port는 특성 임피던스가 50Ω인 Stripline을 이용하였으며, 이것이 Substrate는 Teflon($\epsilon_r=2.52$)을 사용하였고, Coaxial cable은 특성 임피던스가 50Ω으로 Matching 시킨 SMA Connector에 의해서 Microstrip Line과 연결된다. 실험을 측정하는데는 Network Analyzer HP 8410 Series를 이용하였다.

그림 9는 9.8-10.2GHz에서 Sweep시킨 필터의 응답을 사진으로 나타내었다. 실험에서 필터의 3dB 대역 폭은 80MHz(0.8%)이고 Passband의 Gain은 약 20dB이었으며, 또한 Passband에서의 Ripple Level은 2dB정도였다. 이 실험 Data(Filter Response-Fig.9)는 이론치인 Chebyshev Approximation인 그림 7과 매우 일치함을 알 수 있었다.

Chebyshev Approximation으로 구한 데이터(그림7)를 이용해서 참고문헌[6]의 이론으로 구한 Coupling Coefficient는 0.0053이었다. 그림9의 실험값은 유전체공진기와 유전체공진기 사이를 10.1mm의 간격으로 놓았을 때 얻은 데이터로써 본 논문에서의 방법으로 구한 Coupling Coefficient(그림6)가 10.1mm에서 0.0053을 갖는 것을 알 수 있다. 그러므로, 본 논문에서 구한 파라메타는 정확함을 알 수 있고, 이것을 이용하여 설계한 필터의 응답도 유용한 것이다.

필터의 제원은 다음 표 1에 나타내었다.

표 1. 유전체공진기 필터의 제원
Table 1. Specification of the dielectric resonator filter.

주파수 대역	X-Band
유전체공진기	공진주파수 10GHz 공진기의 수 3개 Dimension D=0.00362 h _r =0.00283
PORT	Stripline
Substrate	Teflon (ε _r =2.52) 높이 (h ₀ =0.3mm)
Connector	SMA Connector
BOX	재 질 Aluminum
	Dimension 15 · 10 · 50 [mm ³]

이 실험에서 더욱 보완하여야 할 부분은 첫째, Passband의 Ripple Level을 줄이는 것이다. 실험에서는 2dB의 Ripple Level이 생겼는데 이것은 Stripline을 제작할때 Port와 공진기 사이의 거리(External Quality Factor Q_e), Port와 Port 사이의 거리(Coupling Coefficient k)에대한 적절한 고려를함으로써 줄일 수 있으며, 또한 이 실험에서는 고려하지 않았던 Tuning Screw를 장착시킴으로써 Passband의 Ripple Level을 줄일 수 있을 것이다. 두 번째로는 유전체공진기의 수를 가변시켜서 공진기의 수에대한 영향인 Transition 영역의 Sharpness와 Passband의 안정성에대한 실험적 고찰 하는 것이다.

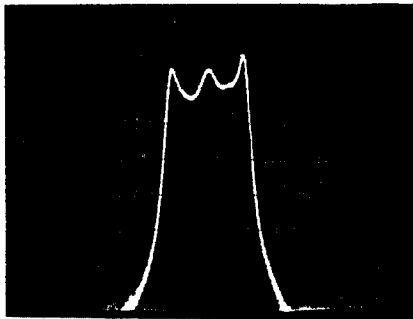


그림 9. 필터의 응답(9.8-10.2GHz)
Fig. 9. The filter response in sweeping region(9.8-10.2GHz)

Ⅶ. 결 론

본 논문에서는 유전체공진기 필터를 설계하는데 필요한 Coupling Coefficient k와 External Quality Factor Q_e의 계산에 필요한 Stored Energy W_m과 Magnetic-dipole Moment M을 구할 때, Magnetic-wall Method[2,6]에서는 고려하지 않았던 영역의 필드 분포까지 고려하여 Stored Energy W_m과 Magnetic-dipole Moment M을 구해서 Coupling Coefficient와 External Quality Factor Q_e의 계산에 이용함으로써, 종전의 방법으로는 실제보다 작았던 이들 Parameter들을 좀 더 개선할 수 있었다. 이 파라메타들을 유전체공진기 필터를 설계하는데 이용해서 필터의 응답을 구했다.

본 논문에서 연구한 유전체공진기를 이용한 필터는 기존의 필터들이 가지는 단점을 보완할 뿐만 아니라 소형, 경량이며 적은 비용으로 제작할 수 있는 장점을 가지고 있어서 현재의 인공위성에서는 대부분 유전체공진기 필터를 쓰고 있으며, 통신위성 뿐만 아니라 집적된 레이더 시스템 및 DRS에서도 쓰이게 될 것이다. 또한, 마이크로웨이브 집적회로에 응용시켜서 필터가 쓰이는 모든 시스템을 소형화 할 수 있으며 가격도 절감시켜줄 것이다.

< 참 고 문 헌 >

- [1] S.B. Cohn, "Microwave Bandpass Filters Containing High-Q Dielectric Resonators", IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., Vol. MTT-16 No.4 pp218-227, April, 1968
- [2] 이기형, 홍의석 "마이크로웨이브 필터를 위한 유전체공진기 간의 결합계수 k 에 관한 연구". 한국통신학회 춘계 학술발표 대회 논문집, 1990
- [3] D. Kajfez and P. Guillon, Dielectric Resonator, Dedham, Artec House, 1986
- [4] P. Guillon, S. Mekerta and Y. Garault, "Dielectric Resonator Bandstop Filter", 1989 Int. Microwave Symp. Dig. (Los Angeles), pp170- 173
- [5] P. Guillon, B. Byzery and M. haubet, "Coupling Parameters Between a Dielectric Resonator and a Microstripline", IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., Vol. MTT-33 No.3, pp 222- 226, March, 1985
- [6] G. Matthaei, L. Young and E.M.T. Jones, Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures, Dedham MA, Artec House, 1980
- [7] P. Skalicky, "Direct Coupling Between Two Dielectric Resonators", Electronic Letters, Vol.18 No.8 pp 332-334, April, 1982