

링 공진기를 사용한 대역통과 필터의 설계에 관한 연구

김동일* · 김보영** · Li Rui**

*한국해양대학교 전자공학과 교수, **한국해양대학교 전자공학과 대학원

A Study on Design of Band Pass Filter Using Ring Resonators

Dong Il Kim* · Bo Young Kim** · Li Rui**

*Division of Radio sciences, National Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

**Graduate school of National Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

요약 : 본 논문에서는 이동통신 시스템에 사용할 수 있는 대역 통과 필터를 얻기 위해서, 스텐브를 부가한 링 공진기로 2 GHz 대역 통과 필터를 설계하였다. 3단 광대역 대역 통과 필터는 스텐브를 부가한 링 공진기를 이용하여 설계되었으며, 연속적인 3단 링 공진기를 사용함으로써 원하는 기본 통과 대역의 특성을 향상시켰다. 그리고 회로 구성요소의 특성 임피던스 값은 Powell의 미분을 필요로 하지 않는 최소자승법에 의해 구하여 계산하였으며, 실험결과는 계산 결과와 거의 일치하였다.

핵심용어 : 링 공진기, 필터, Powell의 최소자승법

ABSTRACT : In this work, in order to realize a band pass filter with wide-band characteristics for mobile communications, 2 GHz band pass filter was designed using ring resonator with stub. The three stage wide-band BPF was designed and fabricated. For broadband design, the ring circumference was divided by 4 sections with $1/8$ wavelength and 2 sections with $1/4$ wavelength which have different line impedances. The characteristics of the proposed BPF were highly improved by using three stage ring resonator. The characteristic impedance values of each sections were obtained by Powell's least square algorithm where differentiations are not needed. The measured results showed a good agreement with the theoretical results as well as ADS simulation.

KEY WORDS : Ring resonator, filter, Powell's Least square method

1. 서 론

필터는 특정 대역의 주파수 성분만을 골라내기 위한 회로 또는 구조물로서 회로적으로는 L과 C의 조합으로 구성이 가능하며, 대역 혹은 통과대역 파형 혹은 구현방법 등의 분류기준에 따라 다양한 종류의 필터가 존재한다. 본 논문에서는 대역분류에 따라 특정 대역의 주파수 성분만을 골라내는 BPF(Band Pass Filter)에 관하여 연구하였으며, 이동 통신 시스템에 사용할 수 있는 대역 통과 필터를 얻기 위해서, 스텐브를 부가한 링 공진

설계법에서 탈피하여 $\lambda/8$ 선로를 기본으로 설계하였다. 3단 광대역 BPF는 스텐브를 부가한 링 공진기를 이용하여 설계되었으며, 연속적인 3단 링 공진기를 사용함으로써 원하는 기본 통과 대역의 특성을 향상시켰다. 또한 각각의 $\lambda/8$ 선로의 특성 임피던스 값을 다르게 함으로써 특성을 개선시켰으며, 회로 구성요소의 특성 임피던스 값은 보다 정확하고 좋은 특성을 얻을 수 있는 특성 임피던스 값을 얻기 위하여 Powell의 미분을 필요로 하지 않는 최소자승법에 의해 구함으로써 최적 설계하였다. Powell의 최소자승법을 사용한 계산결과의 정확도를 보기

가 다른 각각의 선로들을 이용하여 제작 설계하고, 최적 설계를 제시한 링 공진기용 필터에 관한 최초의 논문이다[1][2][3].

2. 종래 Ring Filter의 주파수 특성

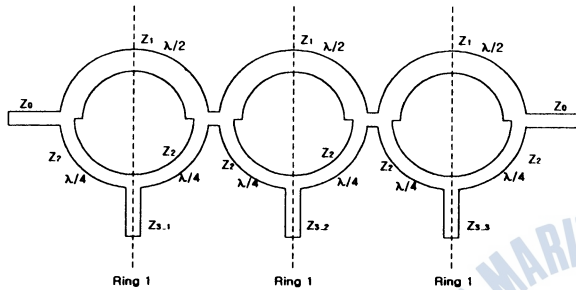


Fig. 1 Conventional 3-stage ring filter

그림 1은 1단 링 필터를 기본으로 한 종래의 3단 링 필터의 회로도이다. 본 논문에서 제작한 3단 링 필터와 종래의 것을 비교해 보기 위하여 계산 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 2는 종래의 논문에서 사용한 특성임피던스 $Z_1 = 50 \Omega$, $Z_2 = 131.8 \Omega$, $Z_{3,1} = 50 \Omega$, $Z_{3,2} = 40 \Omega$, $Z_{3,3} = 24.6 \Omega$ 로 하여 계산 한 결과이다. 그림 2에서 나타낸 계산 결과 S_{11} 이 1.75 GHz대역과 2.25 GHz 대역 부분에서 -15 dB정도의 반사계수 값을 가지며, S_{21} 은 전 대역에 걸쳐 비교적 양호한 특성임을 볼 수 있다[4].

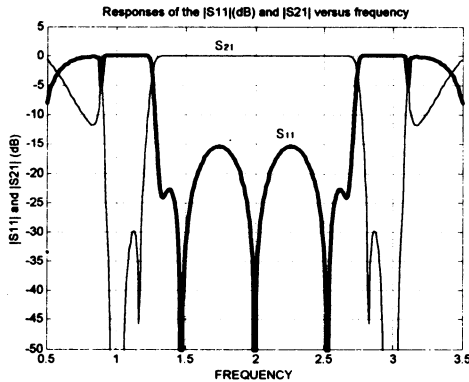


Fig. 2 Calculated results of S_{21} and S_{11} for conventional Ring Filter

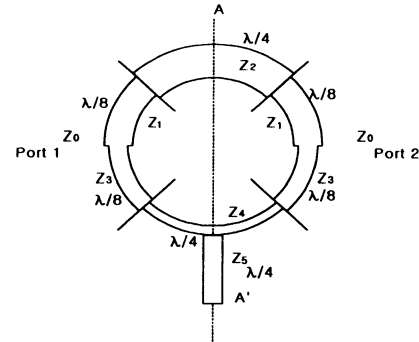


Fig. 3 Ring filter

그림 3은 링 형의 필터의 구조로 AA'축을 중심으로 구조적으로 1축 대칭이며, 가역적인 소자이다. Port 1이 입력(Input), Port 2는 출력(Output)포트이다. 그림 4와 그림 5에서는 even, odd-mode의 등가회로를 나타내고 있으며 even, odd-mode법을 이용하여 회로의 1/2만 해석하여 중첩의 원리를 이용하면 전체 회로에 대해 해석을 할 수 있다[5].

여기서, Z_{in}^e 는 even-mode 입력임피던스, Z_{in}^o 는 odd-mode 입력임피던스를 나타내고 있다.

(1) Even-mode 해석

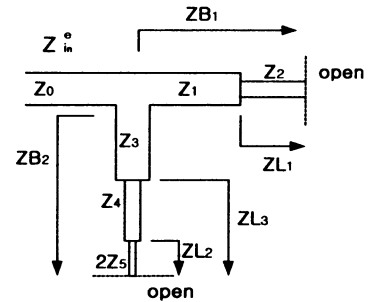


Fig. 4 Even-mode equivalent circuit

그림 4는 링 필터의 Even 모드 등가회로를 나타내고 있다.

$$f_n = \frac{f}{f_0} \quad (1)$$

식 (1)에서 f_n 은 정규화 된 주파수(normalized frequency)이며 f_0 는 중심 주파수(center frequency)이다.

먼저 even-mode인 경우로, 입력임피던스 Z_{in}^e 에서는 개방회로(open circuit)이며, even-mode의 입력임피던스 Z_{in}^e 를 구하기 위해 ZL_1 을 먼저 구하고 차례대로 ZB_1 , ZL_2 , ZL_3 , ZB_2 를

$$ZB_1 = Z_1 \frac{ZL_1 + jZ_1 \tan(\frac{\pi}{4} f)}{Z_1 + jZL_1 \tan(\frac{\pi}{4} f)} \quad (3)$$

$$Zb_1 = Z_1 \frac{Zl_1 + jZ_1 \tan(\frac{\pi}{4} f_n)}{Z_1 + jZl_1 \tan(\frac{\pi}{4} f_n)} \quad (11)$$

$$ZL_2 = 2Z_3 / j \tan(\frac{\pi}{4} f) \quad (4)$$

$$Zl_2 = jZ_4 \tan(\frac{\pi}{4} f_n) \quad (12)$$

$$ZL_3 = Z_4 \frac{ZL_2 + jZ_4 \tan(\frac{\pi}{4} f)}{Z_4 + jZL_2 \tan(\frac{\pi}{4} f)} \quad (5)$$

$$Zb_2 = Z_3 \frac{Zl_2 + jZ_3 \tan(\frac{\pi}{4} f_n)}{Z_3 + jZl_2 \tan(\frac{\pi}{4} f_n)} \quad (13)$$

$$ZB_2 = Z_3 \frac{ZL_3 + jZ_3 \tan(\frac{\pi}{4} f)}{Z_3 + jZL_3 \tan(\frac{\pi}{4} f)} \quad (6)$$

$$Z_{in}^o = \frac{Zb_1 \cdot Zb_2}{Zb_1 + Zb_2} \quad (14)$$

$$Z_{in}^e = \frac{ZB_1 \cdot ZB_2}{ZB_1 + ZB_2} \quad (7)$$

$$\Gamma_o = \frac{Z_{in}^o - Z_0}{Z_{in}^o + Z_0} \quad (15)$$

위의 식 (7)에 의해 even-mode의 입력임피던스를 이용하여 다음 식 (8)과 같이 even-mode의 반사계수를 구할 수 있다.

위의 식 (14)에 의해 odd-mode의 입력임피던스를 이용하여 다음 식 (15)과 같이 odd-mode의 반사계수를 구할 수 있다. 식 (8)과 식 (15)의 반사계수를 사용하여 다음과 같이 S-parameter를 구할 수 있다.

$$\Gamma_e = \frac{Z_{in}^e - Z_0}{Z_{in}^e + Z_0} \quad (8)$$

(3) S-parameter 계산

(2) Odd-mode

$$S_{11} = \frac{\Gamma_e + \Gamma_o}{2} \quad (16)$$

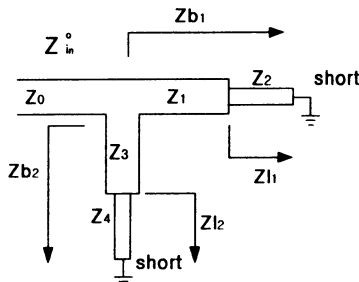


Fig. 5 Odd-mode equivalent circuit

$$S_{21} = \frac{\Gamma_e - \Gamma_o}{2} \quad (17)$$

$$S_{11} = S_{22}(\text{대칭성}) \quad (18)$$

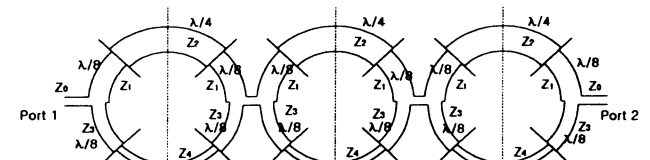
$$S_{21} = S_{12}(\text{가역성}) \quad (19)$$

식 (16)과 식 (17)에서와 같이 S-parameter를 구할 수 있으며 식 (18)과 식 (19)는 링 필터의 대칭성과 가역성을 가지는 회로임을 나타내고 있다[6].

$$f_n = \frac{f}{f_0} \quad (9)$$

위의 even-mode에서와 마찬가지로 f_n 은 정규화 된 주파수(normalized frequency)이며 f_0 는 중심 주파수(center frequency)이다.

3.2 3단 Ring Filter의 회로 해석



odd-mode에서 입력임피던스 Z_{in}^o 에서는 단락회로(short

위의 그림 6는 3절에서 설명한 1단 링 필터 3개를 연결한 3단 링 필터이다. 3단 링 필터 역시 3절에서 해석한 바와 같이 even, odd-mode 해석을 하여 회로의 1/2만 해석한 것을 중첩의 원리를 이용하면 전체회로에 대해 해석을 할 수 있다. Ring1, Ring2, Ring3의 순서로 등가회로를 이용하여 수식을 해석한 후 전체 회로를 전달 파라미터들을 이용하여 해석할 수 있다. 다음의 Transfer Parameter들을 이용하여 식 (24)와 같이 Transfer matrix를 구할 수 있으며, Transfer matrix를 이용하여 3단 링 필터의 전체 S_{11} 과 S_{21} 을 구할 수 있다.

다음의 식 (20)부터 식 (23)까지의 식은 Transfer Parameter들을 나타내고 있다.

$$T_{11} = S_{12} - \frac{S_{11} \cdot S_{22}}{S_{21}} \quad (20)$$

$$T_{12} = \frac{S_{11}}{S_{21}} \quad (21)$$

$$T_{21} = -\frac{S_{22}}{S_{21}} \quad (22)$$

$$T_{22} = \frac{1}{S_{21}} \quad (23)$$

$$T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \quad (24)$$

3단 링 필터의 전체 S_{11} 과 S_{21} 을 구하기 위해 Cascade Transfer Matrix로 전체 전달함수를 구할 수 있다. 다음의 식 (25)는 전체 전달함수를 구하기 위한 식으로 식 (24)를 이용하여 전체 전달함수를 구할 수 있다. 각각의 T_1 , T_2 , T_3 은 각각의 ring1, ring2, ring3의 전달함수 이다.

$$T = T_1 \times T_2 \times T_3 \quad (25)$$

$$T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \quad (26)$$

식 (26)과 같이 전체 전달함수를 4개의 파라미터의 matrix로 표현할 수 있으며 각각의 전달 파라미터들을 이용하여 식 (27)부터 (30)까지의 수식과 같이 S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22} 를 구할 수 있다.

$$S_{21} = \frac{1}{T_{22}} \quad (29)$$

$$S_{22} = -\frac{T_{21}}{T_{22}} \quad (30)$$

4. 최적 설계 및 계산 결과

4.1 Powell's Least Square Method를 이용한 최적 설계

Powell's Least Square Method는 미분을 하지 않고 극치를 찾을 수 있는 최소자승법으로서, 주어진 평가함수(parity function)를 최소로 하는 파라미터를 수치 계산적으로 구하여 이를 최적 파라미터로 하는 방법이다[7]. 링 필터에 요구되는 최적파라미터는 식 (31)과 식 (32)의 같은 평가함수를 써서 계산하였다.

즉 $f = 1.15 \sim 2.85 \text{ GHz}$ 의 pass band ($f_{56} \sim f_{226}$)에서는

$$F_2(Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, f_i) = \sum_{i=56}^{226} \{ (|S_{11}|^2 + (|S_{21}| - 1)^2) \}_i \quad (31)$$

$f = 0.6 \sim 1.15 \text{ GHz}$ ($f_1 \sim f_{55}$), $f = 2.85 \sim 3.4 \text{ GHz}$ ($f_{227} \sim f_{281}$)의 stop band에서는

$$F_1(Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, f_i) = \sum_{i=1}^{55} \{ (|S_{11}| - 1)^2 + |S_{21}|^2 \}_i \quad (32)$$

$$F_3(Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, f_i) = \sum_{i=227}^{281} \{ (|S_{11}| - 1)^2 + |S_{21}|^2 \}_i \quad (33)$$

로 하여 $F = F_1 + F_2 + F_3$ 라 놓고 $F(Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, f_i)$ 를 Minimum으로 하는 $Z_1 \sim Z_5$ 를 Powell's Least Square Method를 써서 구하였으며 f_i 의 값은 표 1과 같다.

Table 1 Sampling point using in Powell's Square Method

f_n	sampling point										
$f_1 \sim f_{55}$	0.60	0.61	0.62	0.63	0.64	-	1.10	1.11	1.12	1.13	1.14
$f_{56} \sim f_{226}$	1.15	1.16	1.17	1.18	1.19	-	2.81	2.82	2.83	2.84	2.85
$f_{227} \sim f_{281}$	2.86	2.87	2.88	2.89	2.90	-	56	57	58	59	60

4.2 최적 파라미터를 이용한 계산 결과

Table 2 Parameters obtained by Powell's Least Square Method

	특성임피던스	두께	l
Z_1	55.0685 Ω	1.329 mm	11.468 mm($\lambda_g/8$)
Z_2	54.8630 Ω	1.383 mm	22.901 mm($\lambda_g/4$)
Z_3	132.2052 Ω	0.185 mm	12.138 mm($\lambda_g/8$)
Z_4	132.2731 Ω	0.179 mm	24.291 mm($\lambda_g/4$)
Z_{5-1}	24.2429 Ω	1.695 mm	22.732 mm($\lambda_g/4$)
Z_{5-2}	39.6429 Ω	2.332 mm	22.403 mm($\lambda_g/4$)
Z_{5-3}	49.6429 Ω	4.664 mm	21.731 mm($\lambda_g/4$)

그림 7은 표 2의 파라미터들을 사용하여 S_{21} 과 S_{11} 의 주파수 특성을 계산한 결과이다. $\lambda/4$ 의 선로를 기본으로 하고 Powell's Least Square Method의 수식을 사용하여 계산한 회로 파라미터들을 사용하여 계산한 결과이며 계산 결과 S_{21} 이 1.17 GHz ~ 2.8 GHz 대역에 걸쳐 좋은 특성을 보이고 있으며, S_{11} 역시 1.3 GHz ~ 2.7 GHz 대역에 걸쳐 -20 dB 이상의 좋은 특성을 보이고 있다.

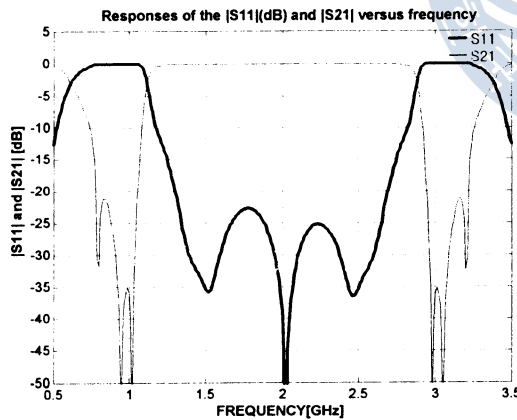


Fig. 7 Calculated results of S_{21} and S_{11} by using optimized parameter

본 논문에서 제안한 방법에 의해 계산한 결과와 위의 2절에서 보인 종래의 링 필터 결과인 그림 2와 비교하였다. 그림 7은 3단 링 필터의 선로의 폭을 달리 하지 않은, 종래의 $\lambda/4$ 의 선로를 기본으로 하여 특성 임피던스를 $Z_1=Z_2=50$, $Z_3=Z_4=131.8$, $Z_{5,1}=50$, $Z_{5,2}=40$, $Z_{5,3}=24.6$ 으로 계산한 결과이다. 즉, $Z_1=Z_2$, $Z_3=Z_4$ 로 하였을 때의 S_{21} 과 S_{11} 주파수 특성을 나타내었다. 1.3 GHz ~ 2.7 GHz 대역에 걸쳐 위의 Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5 의 값을 다르게 하여 선로의 폭

이 개선됨을 알 수 있다.

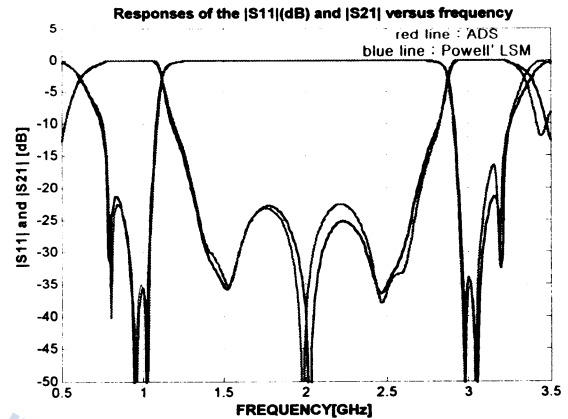


Fig. 8 Calculated results by using optimized parameter and simulation results by using ADS

그림 8은 본 논문에서 제안한 Powell's Least Square Method의 수식을 사용하여 계산한 결과와 ADS 시뮬레이션 결과이다. 비교한 결과 그림에서와 같이 거의 일치하는 것을 볼 수 있다.

4.3 제작 및 측정 결과

다음의 그림 .9은 본 논문에서 직접 제작한 3단 링 필터를 보이고 있다.

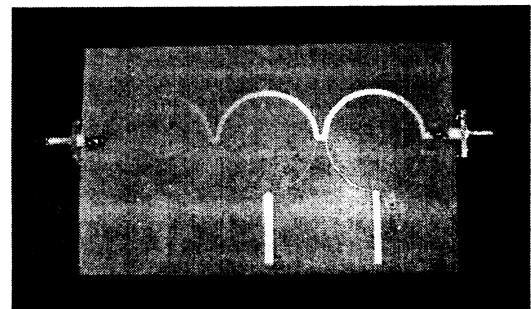


Fig. 9 Simulation results of S_{21} and S_{11}

직접 제작한 3단 링 필터를 네트워크 아날라이저로 측정된 결과를 그림 10와 11에 보이고 있다. 그림 10는 S_{21} 을 나타내고 있으며 그림 11는 S_{11} 의 측정 결과를 나타내고 있다. 위의 계산 결과와 비교하였을 때 S_{21} 은 1.21 GHz ~ 2.658 GHz 대역에 걸쳐 매우 흡사한 특성임을 알 수 있으며 S_{11} 역시 계산 결과와 흡사한 특성임을 보이고 있다.

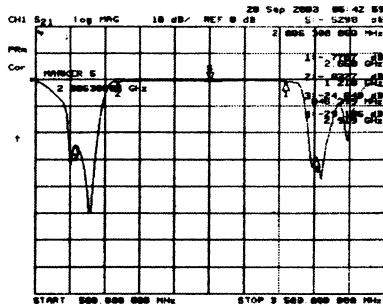


Fig. 10 Measured result of S_{21}

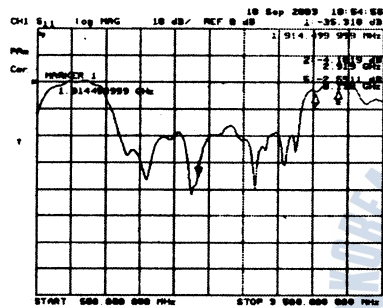


Fig. 11 Measured result of S_{11}

5. 결 론

본 논문에서는 필터의 소형화를 위해서 링 공진기를 사용하였으며 링 공진기와 외부 스타브를 조밀하게 결합해서 고조파를 없애기 위한 필터를 개발하였다. Powell의 미분을 필요로 하지 않는 최소자승법으로 구한 수치로 최적화하여 3단 링 필터를 설계하였으며, 파라미터 Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5 의 선로의 폭을 다르게 하여 제작, 측정하였다. 종래의 논문에서는 $\lambda/4$ 선로를 기본으로 사용하여 링 공진기 대역통과 필터의 가능성을 증명하였으나 이동통신시스템에서 사용되기 위해서는 특성의 개선이 필요로 하였다. 본 논문에서는 위의 문제점을 해결하기 위하여 종래의 $\lambda/4$ 선로를 기본으로 하는 설계법에서 탈피하여 $\lambda/8$ 선로를 기본으로 하는 2 GHz 대역필터를 설계하였고 그 특성이 개선됨을 증명하였다. 계산 결과 파라미터 Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5 의 선로 폭을 다르게 하지 않고 $Z_1 = Z_2, Z_3 = Z_4$ 로 하였을 때 S_{21} 은 1.45 GHz 정도의 대역에서와 2.45 GHz 대역에서의 S_{11} 주파수 특성이 -15 dB 에 못 미치는 좋지 않은 결과를 볼 수 있었다. 파라미터 Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5 의 두께를 다르게 하여 계산한 결과 S_{21} 이 1.17 GHz ~ 2.8 GHz 대역에 걸쳐 좋은 특성을 보이고 있었

르게 하여 3단 링 필터를 제작하여 측정한 결과 1 GHz ~ 3.1 GHz 대역에 걸쳐 계산 결과와 측정치가 잘 일치하였다. Powell의 최소자승법을 사용한 계산결과의 정확도를 보기 위하여 시뮬레이션 툴인 ADS(Advanced Design System)를 사용하여 비교하였으며, 비교한 결과 거의 흡사한 특성을 가짐을 확인하였다.

본 논문에서는 $\lambda/8$ 선로를 기본으로 하여 각각의 $\lambda/8$ 선로의 특성임피던스 값을 다르게 하여 링 공진기 필터의 특성을 개선시켰다. 본 논문은 폭이 서로 다른 $\lambda/8$ 선로를 이용하여 3단 링 필터를 제작 설계하고, 최적 설계법을 제시한 링 공진기용 필터에 관한 최초의 논문이다.

- 사 사 -

이 논문은 2003년도 Brain Busan 21 사업에 의하여 지원되었음

참 고 문 헌

- [1] 김동일, 한경수, 이연혜, "2단 결합선로형 광대역 방향성 결합기의 설계" '98 한국전자과학회 영남지부 학술대회 논문집 pp. 101-105, 1998. 7. 4.
- [2] Dong Il Kim, Yoshiyuki Naito, "Broad-Band Design of Improved Hybrid-Ring 3-dB Directional Couplers," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques vol.30, No.11, Nov. 1982.
- [3] David M. Pozar, 초고주파공학, 대영사, Mar. 1994.
- [4] Hitoshi Ishida, Takao Nakagawa and Kiyomichi Araki, "Design and analysis of Band Pass Filter with Ring Resonator," TECHNICAL REPORT OF IEICE, MW 2003-32, pp.59-63, May 2003.
- [5] J. A. G. Malherbe, Microwave Transmission Line Couplers, Artech House, INC., 1988.
- [6] J. Heiszajn, Passive and Active Microwave Circuits, Department of Electrical and Electronic Engineering Heriot-Watt University Edinburgh, United Kingdom, pp.18, 19, 47-50. 1979.
- [7] M. J. D. Powell, "A method for minimizing a sum of squares of non-linear functions without calculating derivatives," Computer J., vol. 7, pp.303-307. 1965