

Hairpin Line 여파기의 간단화된 등가회로

정회원 꺾우영*, 박진우**

Simplified Equivalent Circuit of Hairpin Line Filters

Woo Young Kwak*, Jinwoo Park** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 Hairpin Line 여파기의 정확한 해석 및 설계를 위한 등가회로를 제시하였으며 제시된 등가회로의 유효성을 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통해 입증하였다. Hairpin Line 여파기에 대한 설계식은 다양하게 제시되었으나, 인접하지 않는 소자간의 상호 연결성을 포함한 실제적으로 간단화된 등가회로는 아직 명시되고 있지 못하다. 본 논문에서는 회로 duality를 이용하여 Hairpin Line 여파기 회로의 모든 개방단자를 단락단자로 변환하고, 변환된 회로를 그래프 모델로 표시하였다. 또한 각 단자에서의 경계조건으로부터 보다 간략화된 회로모델을 구하고 역 dual구조로 변환하여 Hairpin Line 여파기에 대한 간단화된 등가회로를 유도하였다.

ABSTRACT

This paper presents an equivalent circuit of the hairpin line filter for accurate analysis and design. Its validity was verified by computer simulations and filter design experiments. Though the various design equations for a hairpin line filter have been proposed, there has not been a practically simplified equivalent circuit because it is hard to effectively represent interconnection effects between non-adjacent elements. In this paper, all the open ports of the hairpin line filter circuit are changed to the short ports using circuit duality, and the resulting circuits are transformed to graph model. The further simplified circuit model is obtained from boundary conditions, and then the final equivalent circuit of the hairpin line filter is derived in a dual structure of the filter.

I. 서론

마이크로파 기술은 위성통신, 레이더 장비, 미사일 시스템, 데이터 통신 시스템 등과 같은 여러 전자 장비들에 많이 이용되고 있으며, 특히 이와 같은 마이크로파 시스템에서 필요한 주파수를 선택하거나 분리하는 기능을 수행하는 마이크로파 여파기는 핵심적인 수동 소자라 할 수 있다. 이러한 마이크로파 여파기는 최근 마이크로 스트립 선로나 스트립 선로를 이용하거나 유전체를 매체로 한 공동 공진기를 이용하여 소형, 경량, 저가격화의 추세로 발전하고 있다^{[1][2]}.

마이크로파 여파기는 1948년 Richard에 의해 제안된 Richard 변환을 기초로 하고 있으며 1962년

Getsinger에 의해 결합선로에 대한 해석방법^[3]이 발표된 이후 Wenzel, Gupta 등에 의해 TEM모드 마이크로파 여파기설계 및 결합선로에 대한 많은 연구가 진행되었다^{[4][5]}. 특히 마이크로파 대역통과 여파기 중에서 공진소자의 접지가 필요없는 구조를 갖는 여파기는 반파장 병렬 결합 선로 여파기와 Hairpin Line 여파기인데, Hairpin Line 여파기가 적은 치수로 구현 가능한 장점을 갖고 있다. 이러한 Hairpin Line 여파기에 대한 이론이 1971년 Cristal과 Frankel에 의해 제시되었으나,^{[6][7]} Hairpin Line 여파기의 구조상 인접하지 않는 공진 소자간의 연계는 정확한 분석이 복잡하여 2단자 회로망 구조로 표현되는 등가 회로에 대한 일반식이 현재까지 제시되지 않고 있다^[8].

* (주)LG정보통신(kwakwy@lgic.co.kr).

논문번호 : 98041-0130, 접수일자 : 1998년 1월 30일

** 고려대학교 전자공학과(jwpark@kucenx.korea.ac.kr)

본 논문에서는 공진 소자의 접지가 필요없으며 소형으로 실현가능한 Hairpin Line 여파기에 대한 등가회로를 그래프 변환방법^[9]과 Dual Property를 이용하여 유도하고, 일반식을 제시하였다. 그리고 제시된 일반식으로 표현된 등가회로에 대해서 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하여 그 결과가 Hairpin Line 여파기 특성을 정확히 나타내고 있음을 확인하였다. 또한 Hairpin Line 여파기와 Hybrid Hairpin Line 여파기에 대한 실험적 고찰을 위하여 중심주파수가 2 GHz이고 통과대역폭이 5 %인 대역통과 여파기를 설계, 제작하여 특성 분석 실험을 하였다.

II. Hairpin Line 여파기

1. 2선 결합 전송선로의 Dual 구조 유도

결합 전송선로 회로망은 여파기, 방향성 결합기, 정합회로망, 등화기와 같은 많은 마이크로파 부품에 사용되고 있는데 다음과 같은 2선 결합 전송선로를 고려해 보면^[9],

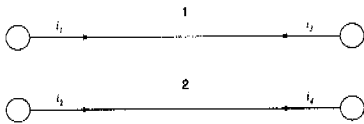


그림 1. 2선 결합 전송 선로

그림 1의 각 단자의 전압을 v_1, v_2, v_3, v_4 라 하면 어드미턴스 행렬식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{bmatrix} = \frac{v}{S} \begin{bmatrix} [C] & -t[C] \\ -t[C] & [C] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} \quad (1)$$

상기 식에서 v = 매질 내에서의 전파 속도

$$S = j \tan \beta l \quad (\beta : \text{전파상수,}$$

$$l : \text{전송선로의 전기적 길이)}$$

$$t = \sqrt{1 - S^2}$$

행렬 $[C]$ 는 2선 결합 선로 회로망에 대한 Maxwell 정전용량 분포를 나타내는데 다음과 같이 표현 된다.

$$[C] = \begin{bmatrix} -C_{11} & -C_{12} \\ -C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기에서 $C_{12} = C_{21}$ 이고 $C_{12}, C_{21} \geq 0$ 인 특성을 가지며 C_{ij} 의 단위는 farads/단위길이 이다. 이러한 행렬식의 의미를 그림 2와 같이 그래프로 나타낼 수 있다.

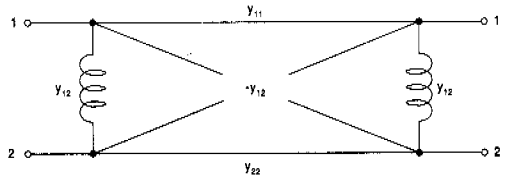


그림 2. 2선 결합 전송 선로의 그래프 표현

그림 2에서 인덕터 기호는 전기적 길이 1을 갖는 단락 스테브를 의미하며 직선기호는 전기적 길이 1인 단위요소를 의미한다. y_{ij} 값은 각 선로의 비정규화된 어드미턴스인데, $y_{ij} = vC_{ij}$ 에서 구한다. 이러한 그래프 표현방법에서는 모든 선로들은 비결합되어 있고, 모든 노드 점들은 실제의 회로망과 1:1로 일치하고 있다. 이러한 방법을 사용하여 마이크로파 Hairpin Line 여파기에 사용되는 2선 결합 전송 선로의 Dual 구조에 대해 고려해본다.

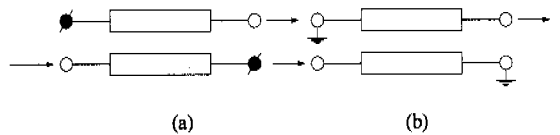


그림 3. 2선 결합 전송 선로의 Dual 구조

그림 3의 (a), (b)에 대해서 그래프 변환방법으로 등가회로를 구하는 과정을 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 그림 3의 (a), (b)는 서로 Dual인 관계이므로 각 회로의 등가회로간에도 서로 Dual인 특성이 유지되게 된다.

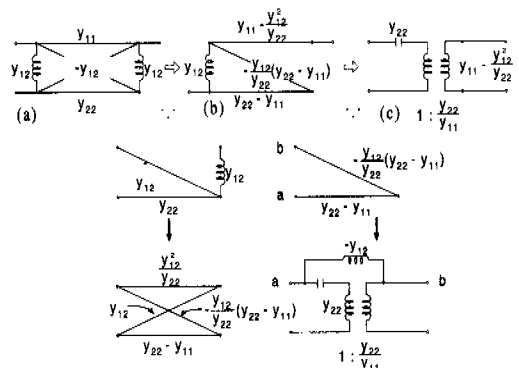


그림 4. 그림 3의 (a)에 대한 등가회로의 유도

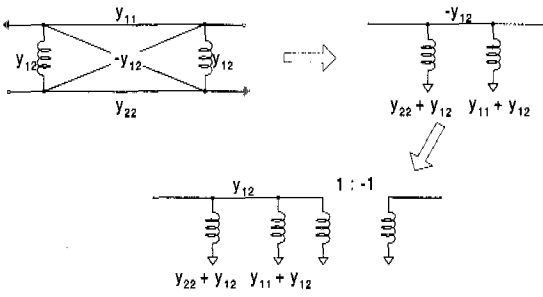


그림 5. 그림 3의 (b)에 대한 등가회로의 유도

2. Hairpin Line 여파기의 등가회로 유도

Hairpin Line 여파기는 여파기를 구성하는 공진기를 접지 시킬 필요가 없기 때문에 마이크로 스트립이나 스트립선로를 이용하여 실현하기가 매우 용이하며, 협대역에서 약25%의 대역폭까지 실현이 가능하고 Hybrid 구조를 갖도록 할 경우에는 여파기 구조의 변경이 용이하여 MIC 설계에 많이 이용될 수 있다. 이 여파기의 설계식은 1972년 Cristal과 Frankel에 의해 제시되었으나, 인접하지 않는 소자간의 연결 및 모든 공진기가 개방되어 있음으로 인하여 등가의 회로망이 매우 복잡하게 되며 다른 여파기들과 같이 회로망 소자들의 종속접속으로 간략화 되지 못하였다⁷⁾.

그림 6 (a)의 Hairpin Line 여파기의 모든 개방된 단자를 단락 시켜서 Dual 구조를 갖는 여파기를 (b)와 같이 만든다. (여파기의 차수 : N) 그림 6 (b)의 여파기를 그래프 변환 방법에 의해 표현하면, 그림 7과 같이 된다.

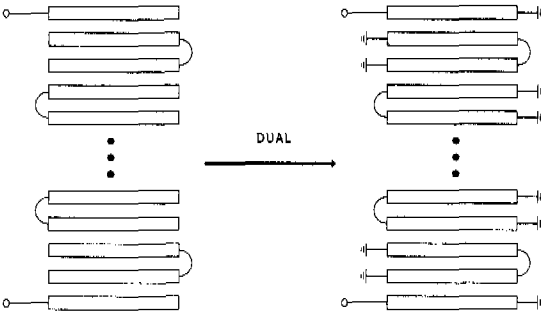


그림 6. Hairpin Line 여파기의 Dual 구조 생성

그림 7에 나타난 회로망에 대한 각 단자에서의 경계 조건을 고려하여 이 회로망을 그림 8과 같이 간략화 할 수 있다.

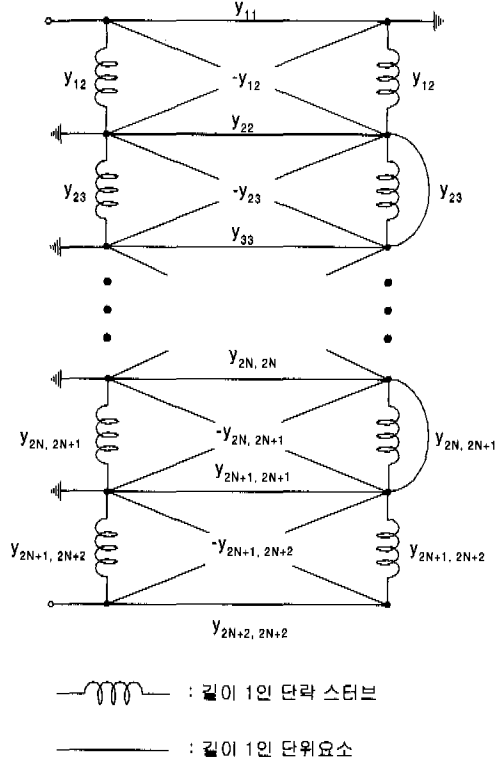


그림 7. Hairpin Line 여파기의 Dual 구조에 대한 그래프 표현

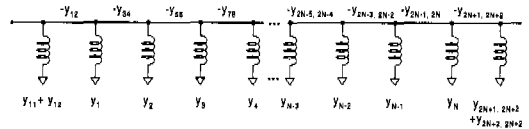


그림 8. 그림 7의 회로망을 간략화한 회로

그림 8의 $y_1, y_2 \dots y_N$ 의 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 y_1 &= y_{12} + y_{22} - 2y_{23} + y_{33} + y_{34} \\
 y_2 &= y_{34} + y_{44} - 2y_{45} + y_{55} + y_{56} \\
 y_3 &= y_{56} + y_{66} - 2y_{67} + y_{77} + y_{78} \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 y_{N-2} &= y_{2N-5, 2N-4} + y_{2N-4, 2N-4} - 2 y_{2N-4, 2N-3} \\
 &\quad + y_{2N-3, 2N-3} + y_{2N-3, 2N-2} \\
 y_{N-1} &= y_{2N-3, 2N-2} + y_{2N-2, 2N-2} - 2 y_{2N-2, 2N-1} \\
 &\quad + y_{2N-1, 2N-1} + y_{2N-1, 2N} \\
 y_N &= y_{2N-1, 2N} + y_{2N, 2N} - 2 y_{2N, 2N+1} + y_{2N+1, 2N+1} \\
 &\quad + y_{2N+1, 2N+2} \tag{3}
 \end{aligned}$$

y_1, y_2, \dots, y_N 의 값을 다음과 같이 2개의 부분으로 나누어 그림 8의 간략화된 회로가 그림 9와 같이 π 형 구조의 종속접속으로 구성되도록 한다.

$$\begin{aligned}
 y_1 &= [(y_{22}-y_{23})+y_{12}] + [(y_{33}-y_{23})+y_{34}] = y_{1A}+y_{1B} \\
 y_2 &= [(y_{44}-y_{45})+y_{34}] + [(y_{55}-y_{45})+y_{56}] = y_{2A}+y_{2B} \\
 y_3 &= [(y_{66}-y_{67})+y_{56}] + [(y_{77}-y_{67})+y_{78}] = y_{3A}+y_{3B} \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 y_{N-2} &= [(y_{2N-4,2N-4}-y_{2N-4,2N-3})+y_{2N-5,2N-4}] \\
 &\quad + [(y_{2N-3,2N-3}-y_{2N-4,2N-3})+y_{2N-3,2N-2}] = y_{N-2,A} \\
 &\quad + y_{N-2,B} \\
 y_{N-1} &= [y_{2N-2,2N-2}-y_{2N-2,2N-1})+y_{2N-3,2N-2}] \\
 &\quad + [(y_{2N-1,2N-1}-y_{2N-2,2N-1})+y_{2N-1,2N}] = y_{N-1,A} \\
 &\quad + y_{N-1,B} \\
 y_N &= [y_{2N,2N}-y_{2N,2N+1})+y_{2N-1,2N}] \\
 &\quad + [(y_{2N+1,2N+1}-y_{2N,2N+1})+y_{2N+1,2N+2}] \\
 &= y_{N,A} + y_{N,B} \tag{4}
 \end{aligned}$$

1절에서 유도한 2선 결합 선로에 대한 Dual 특성으로부터 그림 9의 단일 π 구조에 대한 Dual인 등가회로는 그림 4의 (c)회로와 같은 구조를 갖게 된다. 이러한 관계를 이용하여 그림 9에 대해 Dual인 등가회로는 그림 10과 같이 구할 수 있음을 알 수 있다.

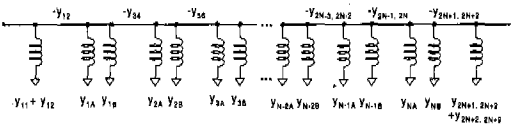


그림 9. π 형 구조의 종속접속으로 변형한 회로

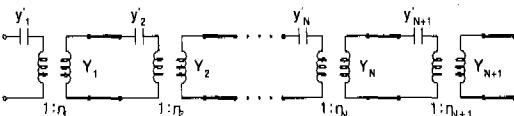


그림 10. 그림 9의 회로망에 대한 Dual 회로

그림10의 각 소자의 값은 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned}
 y'_1 &= y_{11}, \quad n_1 = \frac{y_{11}}{y_{12}}, \quad Y_1 = (y_{22} - y_{23}) - \frac{y_{12}^2}{y_{11}} \\
 y'_2 &= y_{33} - y_{23}, \quad n_2 = \frac{y_{33} - y_{23}}{y_{34}},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Y_2 &= (y_{44} - y_{45}) - \frac{y_{34}^2}{y_{33} - y_{23}} \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 y'_N &= y_{2N-1,2N-1} - y_{2N-2,2N-1}, \\
 n_N &= \frac{y_{2N-1,2N-1} - y_{2N-2,2N-1}}{y_{2N-1,2N}}, \\
 Y_N &= (y_{2N,2N} - y_{2N,2N+1}) \\
 &\quad - \frac{y_{2N-1,2N}^2}{y_{2N-1,2N-1} - y_{2N-2,2N-1}} \\
 y'_{N+1} &= y_{2N+1,2N+1} - y_{2N,2N+1}, \\
 n_{N+1} &= \frac{y_{2N+1,2N+1} - y_{2N,2N+1}}{y_{2N+1,2N+2}}, \\
 Y_{N+1} &= (y_{2N+2,2N+2} - y_{2N+2,2N+3}) \\
 &\quad - \frac{y_{2N+1,2N+2}^2}{y_{2N+1,2N+1} - y_{2N,2N+1}} \tag{5}
 \end{aligned}$$

그림10의 회로망에 사용된 변성기를 1개로 통합시켜서 식 (5)를 정리한다. 그림 6의 (a)와 같은 Hairpin Line 여파기의 등가회로는 이 여파기의 Maxwell 정전용량 분포값으로 표현되는 어드미턴스 값들이 그림 7과 같이 표현되는 경우 그림 11과 같이 된다.

그림 11은 단위요소를 사용한 최종 등가회로를 나타내고 있으며 N은 여파기의 차수를 의미하고 각 소자값에 대한 일반식은 식 (6)과 같다.

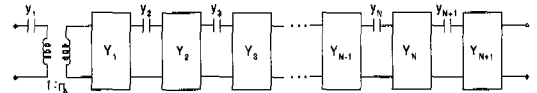


그림 11. Hairpin Line 여파기의 최종 등가회로

$$\begin{aligned}
 n_1 &= \frac{y_{11}}{y_{12}}, \quad n_A = \prod_{i=1}^{N+1} (n_i) \\
 n_k &= \frac{y_{2k-1,2k-1} - y_{2k-2,2k-1}}{y_{2k-2,2k}}, \quad k = 2 \sim N+1 \\
 y_1 &= y_{11} \\
 y_k &= (y_{2k-1,2k-1} - y_{2k-2,2k-1}) \prod_{i=k}^{N+1} \left(\frac{1}{n_i}\right)^2, \\
 &\quad k = 2 \sim N+1 \\
 Y_1 &= \left[(y_{22} - y_{23}) - \frac{y_{12}^2}{y_{11}} \right] \prod_{i=2}^{N+1} \left(\frac{1}{n_i}\right)^2 \\
 Y_{N+1} &= y_{2N+2,2N+2} - \frac{(y_{2N+1,2N+2})^2}{y_{2N+1,2N+1} - y_{2N,2N+1}}
 \end{aligned}$$

$$Y_k = (y_{2k,2k} - y_{2k,2k+1}) - \frac{(y_{2k-1,2k})^2}{y_{2k-1,2k-1} - y_{2k-2,2k-1}} \prod_{i=k+1}^{N+1} \left(\frac{1}{n_i}\right)^2, \quad (6)$$

$k = 2 \sim N$

$$y_{ij} = \frac{(\epsilon_r)^{1/2}}{120\pi} C_{ij}/\epsilon \quad (7)$$

III. Hairpin Line 여파기의 등가회로에 대한 컴퓨터 시뮬레이션

표 1과 같은 규격을 만족하는 Hairpin Line 여파기에 대한 용량 분포 (C/ε)를 Cristal과 Frankel이 제시한 설계식에 의해 구하면 표 2와 같다^[7]. 설계 시 여파기 내부의 임피던스/어드미턴스 제어 파라미터인 h는 0.1로 C_p는 12 dB로 선정하였으며, 대역폭 오차를 보정하기 위하여 Cristal과 Frankel이 제시한 대역폭 보정식을 사용하여 설계대역폭을 5.6%로 수정하여 설계에 적용하였다^[7].

표 1의 규격을 만족하기 위한 여파기의 차수는 5단이 되고, 다음의 표 2에 나타난 용량분포(C/ε)는 스트립 선로의 비유전율 ε_r은 2.5인 경우이며, 이 용량분포값으로부터 등가회로상의 비정규화된 어드미턴스는 식 (7)과 같이 구할 수 있으며 표 2에서

표 1. Hairpin Line 여파기 설계 규격의 예

1. 여파기의 기본구조	chebyshev
2. 중심주파수	2 GHz
3. 통과대역폭	5 %
4. 통과대역 리플	0.1dB
5. 차단대역폭	12.5 %
6. 차단대역폭 감쇄량	40 dB 이상
7. 공칭 임피던스	50Ω

표 2. 표 1의 설계규격에 대한 Hairpin Line 여파기 C/ε 값

C(1,1) = 5.1249	C(1,2) = -1.20675
C(2,2) = 4.08649	C(2,3) = -0.25894
C(3,3) = 3.81945	C(3,4) = -0.25198
C(4,4) = 3.96489	C(4,5) = -0.25084
C(5,5) = 3.95831	C(5,6) = -0.199
C(6,6) = 3.95826	C(6,7) = -0.25041
C(7,7) = 3.95826	C(7,8) = -0.199
C(8,8) = 3.95831	C(8,9) = -0.25084
C(9,9) = 3.96489	C(9,10) = -0.25198
C(10,10) = 3.81945	C(10,11) = -0.25894
C(11,11) = 4.08649	C(11,12) = -1.20675
C(12,12) = 5.1249	

C(i,i)는 C_{ii}/ε 을 C(i,j)는 C_{ij}/ε 을 나타내고 있다.

그림 11로부터 N=5인 경우의 Hairpin Line 여파기의 등가회로를 구할 수 있다. 이 등가 회로의 각 소자의 값은 식 (6)에서 구하며, 이 회로망에 대한 주파수 응답특성 및 입, 출력 반사 손실을 구하기 위한 컴퓨터 시뮬레이션을 하기 위하여 각 소자들에 대한 ABCD 파라미터를 구한 다음에 이 ABCD 파라미터들의 종속 접속으로 전체 회로망을 해석하였다. 회로망 전체에 대한 ABCD 파라미터를 이용하여 1.5~2.5 GHz의 주파수 대역에서의 시뮬레이션 결과는 그림 12와 같다.

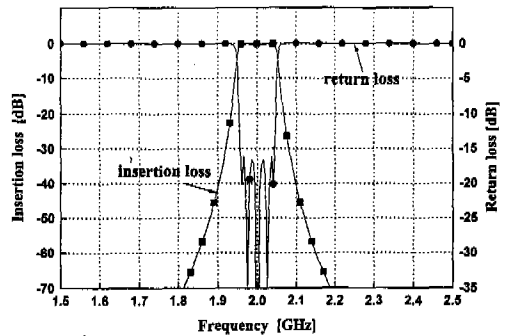


그림 12. 1.5~2.5 GHz 대역에서의 시뮬레이션 결과

그림 12에서 알 수 있듯이 중심 주파수가 2 GHz 인 대역 통과 여파기의 형태를 보이고 있으며, 대역폭도 약 100 MHz이고 250 MHz의 차단 대역폭에서의 감쇄도 약 46 dB로 요구 규격을 잘 만족하는 여파기의 형태가 시뮬레이션 결과로 나타났다. 통과대역 부근의 특성을 정밀하게 점검하기 위한 1.94~2.06 GHz의 주파수 대역에서의 시뮬레이션 결과는 그림 13과 같다.

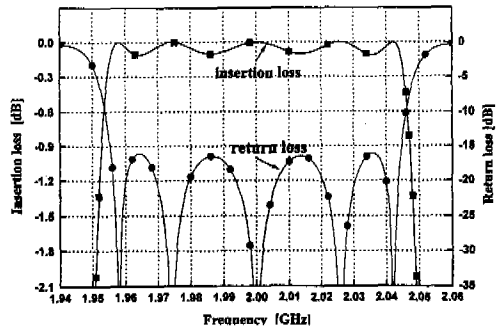


그림 13. 1.94~2.06 GHz 대역에서의 시뮬레이션 결과

그림 13에서 알 수 있듯이 통과대역 리플이 0.11 dB로 초기설계 규격인 0.1 dB에 매우 근사하며 0.143 dB의 통과대역 리플 대역폭이 100 MHz로 설계 규격인 0.1dB 리플 대역폭 (100 MHz)에 역시 매우 근사하고 있으며, 반사손실도 설계식이 제시하고 있는 16 dB에 매우 근사한 시뮬레이션 값을 얻으므로 본 등가회로의 유효성을 입증할 수 있다.

IV. Hairpin Line과 Hybrid Hairpin Line 여파기의 제작 및 실험

표 1의 설계 규격을 만족하는 Hairpin Line 여파기와 이 여파기의 2·3번, 6·7번, 10·11번 전송 선로간의 결합계수를 0으로 한 Hybrid Hairpin Line 여파기를 설계하여 기판두께가 1.5875 mm, 비유전율이 2.5, 도체두께가 2온스인 테프론 기판을 사용하여 스트립 선로 구조를 제작하였다. 그림 14와 그림 15는 제작된 Hairpin Line 여파기와 Hybrid Hairpin Line 여파기를 각각 나타내고 있다.

Hairpin Line 여파기에 대한 1.6~2.4 GHz대역에서의 감쇄특성을 그림 16에 반사손실 특성을 그림 17에 각각 나타내었다.

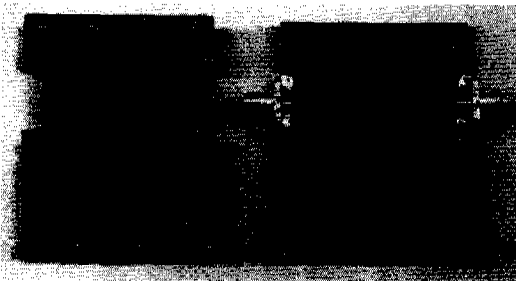


그림 14. 설계, 제작된 Hairpin Line 여파기

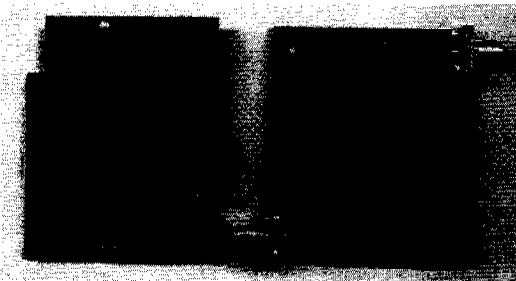


그림 15. 설계, 제작된 Hybrid Hairpin Line 여파기

측정결과 중심주파수가 1.9835 GHz로 설계값 대

비 0.825 % 낮게 나타났는데 이는 스트립 라인으로 구성된 Hairpin 공진기 종단의 개방효과에 기인한 것으로 사료되며 중심주파수로부터 ± 125 MHz 이격된 주파수에서의 차단대역 감쇄는 약 40 dB로 설계 규격을 만족하고 있음을 알 수 있다.

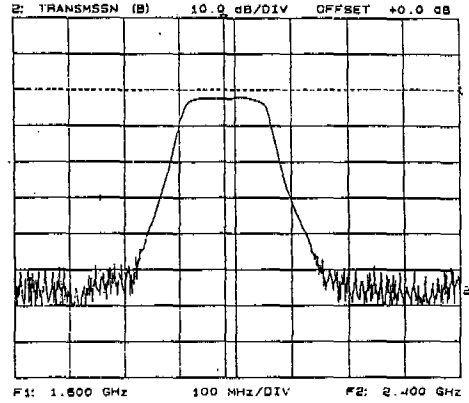


그림 16. Hairpin Line 여파기의 감쇄 특성

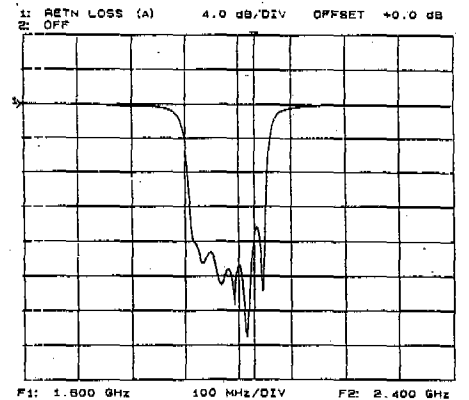


그림 17. Hairpin Line 여파기의 반사 손실 특성

차단 대역에서의 표면파 모드 전송에 의한 스프리드 특성을 조사하기 위하여 Hairpin Line 여파기와 Hybrid Hairpin Line 여파기에 대한 1~10 GHz 대역에서의 감쇄 특성을 그림 18과 그림 19에 각각 나타내었다.

Hairpin Line 여파기의 경우 그림 18에 나타난 것처럼 중심주파수 2 GHz에서의 대역통과 특성이 Richard 변환에 기인한 주기성에 의해 6 GHz 근처에서 반복되고 있음을 알 수 있으나 4 GHz, 8 GHz 근처에서도 큰 세력의 스프리어스 특성이 나타나고 있다. 이는 스트립라인 구조를 갖는 여파기

의 경우 $2f_0$, $4f_0$ 근처에서 발생하는 표면파 모드 전송에 기인한 것이다. Hybrid 구조에서는 이러한 표면파 모드 전송에 기인한 불요 스프리어스 특성이 억압되고 있음을 그림 19의 측정결과로부터 알 수 있으며 본 실험결과로부터 $2f_0$ 근처에서 약 23 dB, $4f_0$ 근처 약 20 dB의 스프리어스 특성 개선을 얻을 수 있었다.

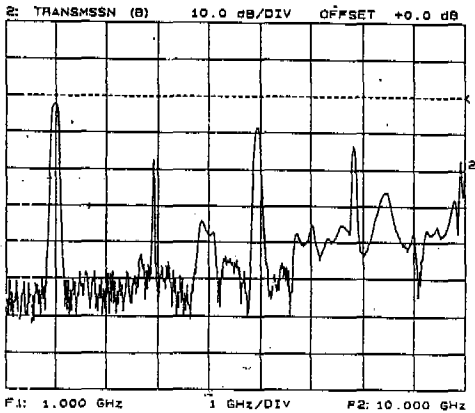


그림 18. Hairpin Line 여파기의 1~10 GHz 대역에서의 감쇄 특성

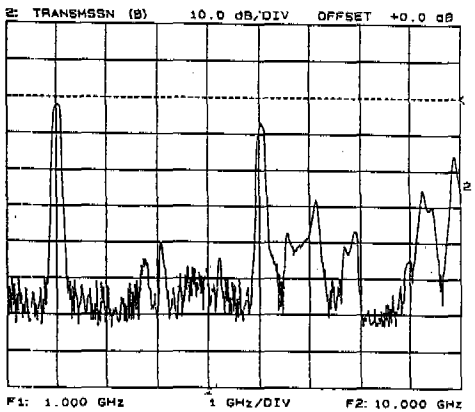


그림 19. Hybrid Hairpin Line 여파기의 1~10 GHz 대역에서의 감쇄 특성

V. 결론

본 연구에서는 여파기를 구성하는 공진기를 접지시킬 필요가 없기 때문에 마이크로 스트립 또는 스트립 선로를 이용하여 구현하기가 용이한 Hairpin Line 여파기에 대한 등가회로 및 그 구성소자에 대한 일반식을 제안하였고 Hairpin Line 여파기에서의

표면파 모드 전송에 의한 차단 대역에서의 불요 스프리어스 특성 개선 방안을 제시하였다. 중심주파수 2 GHz, 통과 대역폭 5 %인 5단 대역통과 Hairpin Line 여파기에 대해 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하여 제안된 등가회로의 유효성을 입증하였으며 실험적 분석을 위해 기본 구조와 Hybrid 구조를 갖는 2종류의 Hairpin Line 여파기를 제작하였다. 실험결과 제안 특성이 실제 규격에 매우 근사함을 얻을 수 있었고 Hybrid Hairpin Line 구조를 적용하므로써 Hairpin 구조보다 4 GHz에서 약 23 dB, 8 GHz 부근에서 약 20 dB의 불요 스프리어스 레벨 감쇄를 얻을 수 있었다.

본 연구에서 제안된 Hairpin Line 여파기의 간략화된 등가회로는 Hairpin Line 여파기의 근사 설계식에 대한 평가 및 특성 개선과 이 여파기를 포함하는 MIC 또는 MMIC 설계에 유용하게 응용될 수 있을 것으로 예측된다.

참고 문헌

- [1] L.Young, "Microwave Filters - 1965," *IEEE Trans. MTT*, VOL. MTT-13, pp 489-513, Sep. 1965.
- [2] G.L. Matthaei, "Comblin Band-Pass Filters of Narrow or Moderate Band-width," *Microwave J.*, pp 82-91, Aug. 1963.
- [3] R.J. Wenzel, "Exact Theory of Interdigital Band-pass Filters and Related Coupled Structures," *IEEE Trans. MTT*, VOL. MTT-13, pp 559-575, Sep. 1965.
- [4] R.J. Wenzel, "Exact Design of TEM Microwave Networks Using Quarter-Wave Lines," *IEEE Trans. MTT*, VOL. MTT-12, pp 94-111, Jan. 1964.
- [5] C.Gupta, "Design of Parallel Coupled Line Filters," *Microwave J.*, pp 39-57, Dec. 1979.
- [6] E.G. Cristal, "New Design Equations for a Class of Microwave Filters," *IEEE Trans. MTT*, VOL. MTT-19, pp 486-490, May 1971.
- [7] E.G. Cristal and S. Frankel, "Hairpin-Line and Hybrid Hairpin-Line / Half-Wave Parallel-Coupled-Line Filters," *IEEE Trans. MTT*, VOL.MTT-20, pp 719-728, Nov.1972.
- [8] J.A.G. Malherbe, *Microwave Transmission Line Filters*, Artech House, Inc., 1979.

- [9] R.Sato and E.G. Cristal, "Simplified Analysis of Coupled Transmission-Line Networks," *IEEE Trans. MTT*, VOL. MTT-18, pp 122-131, March 1970.

곽 우 영(Woo Young Kwak) 정회원



1978년 2월 : 고려대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1992년 8월 : 고려대학교 산업대학원 전자통신 공학과 졸업(공학석사)

1998년 2월 : 고려대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)

1981년~1991년 : 금성전기 기술연구소 선임연구원

1992년~1993년 : 금성통신 연구소 책임연구원

1994년~1998년 6월 : LG전자 미디어통신 연구소 책임연구원

1998년 7월~현재 : LG정보통신(주) 단말연구소 책임연구원

<주관심 분야> 초고주파회로, 이동통신, 전파 전파

박 진 우(Jin Woo Park) 정회원

1979년 2월 : 고려대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1983년 8월 : 클렘슨대학교 전기공학과 졸업(공학석사)

1987년 11월 : 버지니아 주립대학교 전기공학과 졸업(공학박사)

1988년 3월~1989년 2월 : 명지대학교 전자공학과

1989년 3월~현재 : 고려대학교 전자공학과 교수

<주관심 분야> 광전송시스템, 광통신망, 이동통신