

위성통신용 저손실 도파관형 대역통과 여파기의 설계

임재봉 · 박준석 · 조홍구/국민대학교
RF/MMIC 연구소

□ 차 례 □

- | | |
|---------------------------------------|----------------------------|
| I. 서 론 | IV. 대역통과 여파기 설계 예 |
| II. 인덕티브 창 등가회로와 구조해석 | V. 위성통신용 대역통과 여파기의 설계 및 제작 |
| III. Direct-coupled cavity 여파기의 설계 방법 | VI. 결 론 |

I. 서 론

VSAT(Very Small Aperture Terminal)이나 SCPC(Single Carrier Per Channel) 시스템과 같은 위성통신용 마이크로파 통신장비에는 저손실 도파관형 대역통과 여파기가 필요하다.

국내에서 운용중인 VSAT(Very Small Aperture Terminals) 시스템에는 WR-75를 사용하여 Down-link에 12.25~12.75GHz의 통과대역을 갖고 Up-link에 14.0~14.5GHz의 통과대역을 갖는 대역통과 여파기가 사용된다.

본 연구에서는 저손실 특성을 갖는 도파관형 대역통과 여파기를 설계하여, 현재 국내에서 운용되고 있는 위성통신용 VSAT(Very Small Aperture Terminals)이나 SCPC(Single Carrier Per Channel) 시스템과 같은 마이크로파 통신장비의 주요 부품 중의 하나인 저손실 마이크로파 대역통과 여파기의 국산화에 목적이 있다.

본 연구에서는 불연속 구조로 인덕티브 창 구조를 사용하여 변분해석법에 의해 해석하고, 통과대역 보정에 의한 합성설계이론^(3,4,5)을 적용하여 저손실 도파관형 대역통과 여파기를 설계하는 CAD 프로그램을 개발하여 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 인덕티브 창 불연속 구조로 형성된 도파관형 대역통과 여파기를 설계하고, 제작 실험하였다.

II. 인덕티브 창 등가회로와 구조해석

본 연구에서, 해석방법으로서 모든 연산이 실수로 처리되고, 연산이 간단한 변분해석법을 적용하였다.⁽¹³⁾

Fig. 1의 인덕티브 창 구조는 폭이 a 와 t 로 구성된 2개의 도파관으로 구성된 것으로 생각할 수 있다. 폭이 a 인 영역에서만 주 모드인 TE_{10} 모드가 전파하고, 다른 고차 모드는 모두 감쇄한다고

가정하고 금속의 손실은 무시한다고 하면 $-1 \leq z \leq 1$ 사이의 인덕티브 창 구조를 Fig. 2에 나타낸 대칭형 T-등가회로로 나타낼 수 있다.⁽⁶⁾

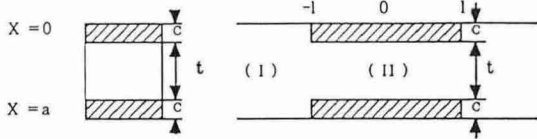


그림 1. 인덕티브 창 불연속 구조
Fig. 1 Inductive window discontinuity structures

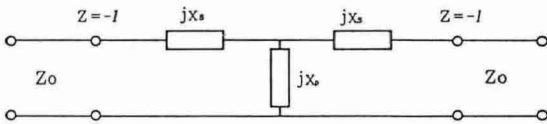
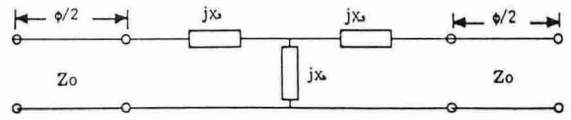


그림 2. 인덕티브 창 구조의 T-등가회로
Fig. 2 T-equivalent circuit of Inductive window structures

이 등가회로 소자값 X_s 와 X_p 는 대칭-비대칭 여 기법⁽⁶⁾을 이용해서 구할 수 있다. Fig. 3에 나타 낸 것과 같이 대칭형 T-회로에 일정길이의 전송 선로를 첨가하면 임피던스 K-인버터로 동작하며 이는 $\frac{\lambda}{4}$ 임피던스 트랜스포머와 같은 동작원리를 갖는다.⁽⁶⁾

도파관내에 삽입된 E-평면구조는 $z < -l$ 에서 TE_{10} 모드가 입사하면 불연속면이 Y-방향으로 균 일하므로 TE_{n0} 모드만이 고차모드로 발생하고 특 히 영역 (I)에서는 $x = \frac{a}{2}$ 에 대한 대칭성 때문에 $x = \frac{a}{2}$ 에 대칭인 모드만이 발생한다.

각 영역에서의 스칼라 포텐셜 함수와 전파상수 로서 각 구간에서의 전계와 자계의 단면성분을 정의하고, $z = -l$ 에서의 연속성과 스칼라 포텐셜 함수의 직교성을 이용하여 계수를 개구면 전계 $E(x)$ 로 나타내어, $x = \frac{a}{2}$ 에 대한 대칭성을 고려



$$K = Z_0 \left| \tan(\phi/2 + \tan^{-1}(X_s/Z_0)) \right| \quad \text{ohms}$$

$$\phi = -\tan^{-1}((2X_b/Z_0) + (X_a/Z_0)) - \tan^{-1}(X_a/Z_0) \quad \text{radians}$$

(a)

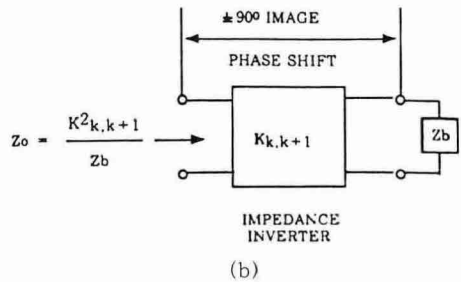


그림 3. (a) T-등가회로와 전송선로로 구성된 K-인버 터 (b) 임피던스 K-인버터의 정의
Fig. 3 (a) Impedance K-inverter composed of a T-circuit and a transmission line (b) Definition of a impedance K-inverter

하여 정규화 입력어드미턴스에 대한 변분표현식을 구한다. 개구면 $z = -l$ 에서의 전계를 알면 입력어드미턴스를 구할 수 있지만 정확한 개구면 전계를 알 수 없으므로 개구면 전계 시험함수(trial function)를 적절히 선택함으로써 입력어드미턴스를 상당히 정확하게 구할 수 있다. 본 연구에서는 다음과 같이 개구면에 접해있는 영역에서의 스칼라 포텐셜 함수를 이용하여 전개하는 Schwinger의 방법을 채택하여 다음과 같이 선택하였다.^(8,11)

$$E^*(X) = \sum_{s=1}^N M^*_s \left[\sqrt{\frac{t \cdot P}{2}} \varphi_s(x) \right] \quad (1)$$

여기서 $\varphi_s(x)$ 는 기저함수로서 좁은 도파관에서의 스칼라 포텐셜함수이고, P는 구간 (I)에

유입되는 전력이고 다음과 같이 정의된다.

$$P = \int_{(a-t)/2}^{(a+t)/2} \varphi_{11}(x)^2 dx \quad (2)$$

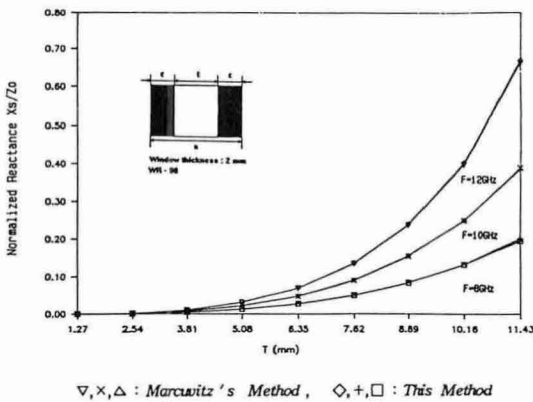
그리고 각 영역에서의 스칼라 포텐셜 함수는

$$\begin{aligned} \text{영역 I : } \varphi_n(x) &= \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{(2n-1)\pi x}{a} \\ &[u(x) - u(x-a)] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{영역 II : } \varphi_n(x) &= \sqrt{\frac{2}{t}} \sin \frac{(2n-1)\pi x}{t} \\ &[u(x) - u(x-t)] \end{aligned} \quad (4)$$

이러한 개구면 전개 시함수를 N항 근사치를 취한 다음 입력어드미턴스 변분표현식에 대입 정리하여 M_s 를 미지수로 하는 N개의 연립방정식을 구하여, 이 연립방정식이 해를 갖도록 연립방정식의 행렬식을 계산하여 정규화 입력어드미턴스를 구한다.

Fig. 4는 변분해석법으로 인덕티브 창 구조의 T-등가회로 파라미터 X_S 와 X_P 를 계산한 결과와 이것을 Marcuvitz가 유도한 공식의 결과와 비교한 것을 나타낸다.⁽¹⁾



(a)

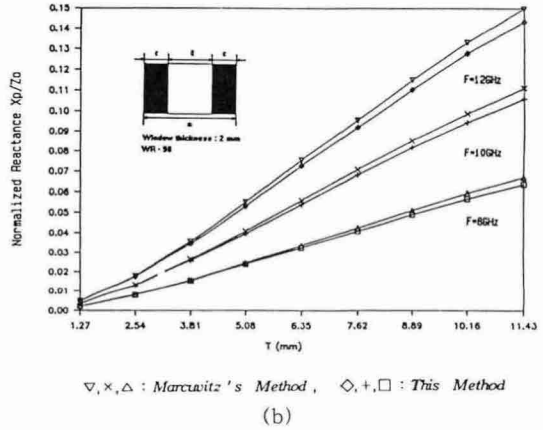


그림 4. 4 인덕티브 창 구조의 T-등가회로의 소자값
(a) 직렬 리액턴스 X_S , (b) 병렬 리액턴스 X_P
Fig. 4 T-equivalent circuit element's values of inductive window structures
(a) Series reactance X_S , (b) Shunt reactance X_P

III. Direct-coupled cavity 여파기의 설계 방법

인덕티브 창 대역통과 여파기⁽⁶⁾는 일종의 도파관형 직렬 공진기형 여파기(Direct-coupled cavity filter)이다. 비교적 광대역인 여파기 설계에 적합한 것으로는 Levy의 이론⁽⁸⁾이 알려져 있는데, Levy의 이론에서는 실제 마이크로 대역에서 주로 사용되는 전송선로로 구성된 분포정수 반파장 원형여파기(Distributed half-wave lowpass prototype filter)를 사용하기 때문에 본질적으로 대역통과 여파특성을 갖고, 임피던스 스태프로 표시된 불연속 구조에 대한 리액턴스 성분에 대하여 K-인버터의 주파수에 따른 특성변화를 고려하였기 때문에 광대역 여파기의 특성까지도 정확하게 추측할 수 있다.^(3,8,9,10,12)

그러나 이 방법은 여파기의 설계조건이 주어졌을 때 먼저 원형여파기의 소자값 즉 전송선로의 임피던스 값이 결정되어야 하는데 Levy는 이것을 수표형태로 제시하여 사용에 어려움이 많았으나, Rhodes는 K-인버터를 포함한 분포정수 반파장

저역통과 원형여파기를 제시하고, 이로부터 합성 이론을 전개하여 원형여파기의 소자값에 대한 간단한 공식을 유도하였다.^(3,6,10,12)

한편 이러한 합성이론에 의해 설계된 대역통과 여파기의 실제 특성을 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 구해보면, 통과대역이 당초의 설계조건보다 좁아지고 중심주파수가 약간 이동하는 통과대역 일탈 현상이 일어난다.⁽³⁾ 이것은 여파기의 임피던스 K-인버터의 특성임피던스가 여파기의 칫수에 의해 영향을 받기 때문이다. 본 연구에서는 이러한 통과대역 일탈현상을 보정하기 위해서 통과대역 보정법을 이용한 합성설계이론으로 대역통과 여파기를 설계하는 새로운 알고리즘인 통과대역보정에 의한 여파기의 합성설계이론을 적용하였다.^(3,12)

IV. 대역통과 여파기 설계 예

본 연구에서 개발된 CAD 프로그램으로 14.0~14.5GHz대 0.01dB 6단 Chebyshev형 대역통과 여파기를 설계하여 다음과 같은 설계결과를 얻었다.

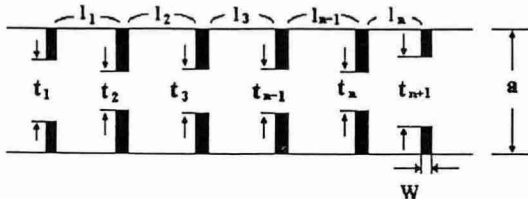


그림 5. 인덕티브 창 대역통과 여파기
Fig. 5 Inductive window type bandpass filter

V. 위성통신용 대역통과 여파기의 설계 및 제작

위성통신 시스템의 UP-link에 사용하기 위해 통과대역이 14.0~14.5GHz인 0.01dB 6단 Chebyshev 여파기를 본 연구에서 개발한 CAD 프로그램으로 설계하여, 제작 실험하였다. 이 여파기는 미세조정을 하지 않고 특성을 측정하였다.

Fig. 6은 설계된 여파기의 특성을 Field 해석에 의해 구한 결과이며, Fig. 7은 설계 제작된 대역통과 여파기를 VNA HP8510C 로 측정된 결과를 보여 주고 있다.

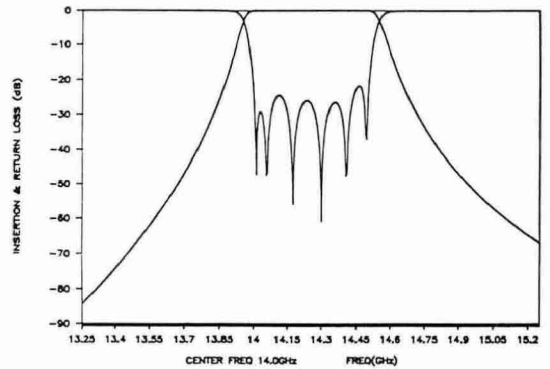


그림 6. 14.0-14.5 GHz, 0.01 dB 6단 대역통과 여파기의 이론적 특성
Fig. 6 Theoretical characteristics of 14.0-14.5GHz 0.01 dB 6-section bandpass filter

표 1. 0.01dB 6단 Chebyshev형 대역통과 여파기의 설계결과

Table 1. Design results of a 0.01dB 6-section Chebyshev type bandpass filter passband : 14.0-14.5 GHz, a = 750mil(WR-75), w = 0.2mm, 30term approximation, unit : mm

i	1	2	3	4	5	6	7	전체길이
l_i	10.99	12.05	12.17	12.17	12.05	10.99		
t_i	7.18	3.96	3.38	3.29	3.38	3.96	7.18	

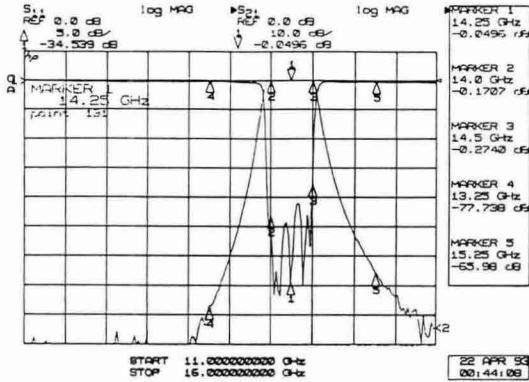


그림 7. 제작된 6단 여파기의 측정결과
Fig. 7 Measured results of the fabricated 6-stage band-pass filter

VI. 결 론

본 연구에는 위성통신용 VSAT(Very Small Aperture Terminal)이나 SCPC(Single Carrier Per Channel) 시스템과 같은 마이크로파 통신장비에 사용되는 대역통과 여파기를 설계하는 CAD 프로그램을 개발하였다.

여파기 구조로는 정확한 Field Analysis가 가능하며 저지대역특성이 우수하고, 저손실 도파관형 대역통과 여파기에 적합한 인덕티브 창 구조를 사용하였다.

개발된 프로그램으로 VSAT 시스템에 사용되는 대역통과 여파기의 설계사양인 14.25GHz에서 500MHz 대역폭을 갖는 6단 0.01dB 체비셰프형 대역통과 여파기를 설계하고, 정밀제작하여 실험, 측정하였다.

그 결과 중심주파수에서 0.1dB이하, 전체 통과대역에서는 0.3dB 이하의 삽입손실특성을, 중심주파수에서 1GHz떨어진 지점에서 약 65dB 이상의 감쇄특성을 나타내었으며, 반사손실은 전체 통과대역에 걸쳐 미세조정 없이 23dB 이상의 좋은 특성을 얻었다.

본 연구에서 개발된 프로그램으로 설계, 제작

된 여파기는 기존의 수입제품에 비교하여 그 특성이 손색이 없어 수입대체 효과가 클 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. N. Marcuvitz, "Waveguide Handbook," New York Dover Publication, INC. 1965.
2. 임재봉, 이충웅, "변분법에 의한 Bilateral Fin-line 구조의 해석에 관한 연구," 대한전자공학회 전파전파연구회 논문집, 제23권 제1호, pp. 36-41, 1986년 1월.
3. 임재봉, "통과대역 보정법에 의한 E-평면형 마이크로파 대역통과 여파기의 설계이론에 관한 연구," 서울대학교 박사학위 논문, 1987.
4. J-B. Lim, C-W. Lee and T. Itoh, "An accurate CAD Algorithm for E-Plane Type Bandpass Filters using a New Passband Correction Method combined with Synthesis Procedures," IEEE MIT-S International Microwave Symposium, Vol. 3, pp. 1179-1182, 1990.
5. 임재봉, 이충웅, "합성방법에 의한 E-평면형 대역통과 여파기의 정밀 설계에 관한 연구," 대한전자공학회지 전파전파연구회 논문집, 제23권 제5호, pp. 26-34, 1986년 9월.
6. G. Metthaei, L. Young, and E. M. T. Jones, "Microwave Filters, Impedance Matching Networks, and Coupling Structures," MGH, 1964.
7. S. B. Cohn, "Direct-Coupled Resonator Filters," Proc. IRE, Vol. 45, pp. 187-196, Feb. 1957.
8. R. Levy, "Theory of Direct-Coupled-Cavity Filters," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., Vol. MTT-15, No. 6, pp. 340-347, Jun. 1967.
9. R. Levy, "Tables of Element Values for the Distributed Low-pass Prototype Filters," IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., Vol. MTT-13, No. 5, pp. 514-536, Sep. 1965.

10. J. D. Rhodes, "Design Formulas for Stepped Impedance Distributed and Digital Wave Maximally Flat and Chebyshev Low-pass Prototype Filters," *IEEE Trans. Circuits and Systems*, Vol. CS-22, No. 11, pp. 866-874, Nov. 1975.
11. J. Schwinger and D. S. Saxon, "Notes on Lectures by Julian Schwinger, Discontinuities in Waveguides," pp. 27-34, GORDON and BREACH SCIENCE Pub., 1968.
12. 임재봉, "E-평면형 저손실 협대역 마이크로파 대역통과 여파기의 설계"에 대한 한국과학재단 보고서. 1994년 2월 28일.
13. 박준석, 임재봉, "변분해석법에 의한 협대역 도파관형 대역통과 여파기의 설계," 대한전자공학회지 전파전파연구회 논문집, 제15권 제1호, pp. 24-27. 1992년 5월.

筆者紹介

▲ 임재봉

- 국민대학교 전자공학과 교수

▲ 박준석

- 국민대학교 대학원 전자공학과 박사과정

▲ 조홍구

- 국민대학교 전자공학과 교수
- 국민대학교 부설 RF/MMIC 연구소장

※이 연구는 92년도 한국과학재단 연구비지원에 의한 결과임.