

논문 2012-49TC-1-10

# KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)용 Reflectometry를 위한 메타전자파 구조 광대역 대역 통과 여파기 설계

(Design of Ultra Wide Bandpass Filter by Metamaterial for KSTAR Reflectometry)

이 중 민\*, 심 우 석\*, 서 철 현\*\*

(Chongmin Lee, Wooseok Sim, and Chulhun Seo)

## 요 약

본 논문에서는 차세대 초전도 핵융합 연구장치의 상태 진단 및 점검을 위한 마이크로파 진단 시스템에 적용하기 위한 광대역 대역 통과 여파기를 설계하였다. 광대역 특성 및 낮은 손실과 높은 스킷 특성을 위해 메타 전자파 구조를 적용하였다. 제안된 광대역 대역 통과 여파기는 한국형 핵융합 원자로의 마이크로파 진단 시스템 내에서 전압제어 발전기의 출력단에 적용되어 전압제어 발전기에서 발생하는 고조파 성분들을 제거하여 시스템의 선형성을 개선하는 역할을 한다. 광대역 대역 통과 여파기는 18-28 GHz의 대역을 통과 시키고 그 외 대역에서 -20 dB 이하의 저지 특성을 갖도록 설계하였다. 메타 전자파 구조 특성 확인을 위해 위상의 분산도를 확인하였으며 통과 대역의 하측 대역에서 LH 특성을 갖으며 그 외 대역에서는 RH 특성을 보이도록 설계하였다. 제안된 광대역 대역 통과 여파기의 군지연 (Group Delay)의 경우 0.5 nS 이하로 매우 우수한 특성을 보였다.

## Abstract

In this article, we designed a wide bandpass filter in order to apply microwave reflectometry for KSTAR. The proposed wide bandpass filter consists of a metamaterial structure which is to get a wide band, a lower insertion loss, and a high skirt. This is applied to VCO's output to enhance the linearity. A pass band is 18-28 GHz and the out of pass band is stopped over 20 dB. To confirm of the metamaterial, we suggest a dispersion diagram. The proposed filter in lower band and upper band of pass band is respectively a left handed and right handed characteristics. A group delay is below 0.5 ns.

**Keywords:** Ultra wide band, band pass filter, metamaterial, dispersion diagram, group delay

## I. 서 론

한국형 차세대 초전도 핵융합 연구장치는 최근 H-모

드 플라즈마 상태를 약 7초간 유지하는데 성공하였다. 핵융합로에서 이온의 결합에 의한 플라즈마 상태에서 이온들의 밀도 정보를 진단하기 위해 가시광선 진단 장치 및 마이크로파 진단 장치들이 사용된다.

\* 학생회원, \*\* 정회원, 숭실대학교 정보통신공학부 (Information and Telecommunication Engineering, Soongsil University)

※ 본 연구는 한국연구재단과 교육과학기술부의 지원에 의한 중견 연구자 지원 사업과 기초 연구자 지원 사업으로 이루어졌음 (No.20110018746, No.20110020262).

접수일자: 2011년12월8일, 수정완료일: 2012년1월17일

마이크로파 진단 장치의 경우 그림 1에서 보는 것과 같이 전압제어 발전기 및 주파수 혼합기, 안테나, 대역 통과 여파기, 주파수 분배기 등이 사용된다.

현재 한국형 차세대 초전도 핵융합로의 경우 마이크로파 진단 장치의 각 구성 요소 중 18-28 GHz를 전압제어 발전기를 통해 발전시킨 후 주파수 체배기를 통해

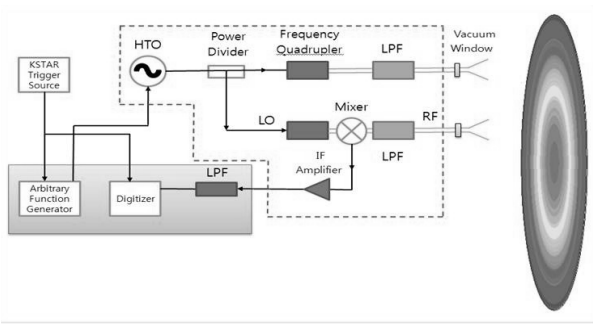


그림 1. KSTAR용 Microwave Reflectometry 블록도  
Fig. 1. Block diagram of microwave reflectometry for KSTAR.

최종 72-112 GHz의 출력을 발생시킨다. 이때 얻어진 출력 주파수의 신호는 핵융합로에 방사되고 플라즈마 상태의 이온들에 반사되어 안테나로 들어오는 신호를 검출하게 된다. 검출된 신호의 도플러 주파수를 측정하여 플라즈마 상태의 이온에 대한 정보를 얻을 수 있으며 이 정보를 통해 핵융합로의 각 상태에 대한 진단 및 제어를 수행하게 된다.

본 논문에서는 한국형 차세대 초전도 핵융합로에 적용하기 위한 마이크로파 진단 장치의 각 구성 요소 중 전압제어 발전기의 출력단에서 발전된 신호의 고조파 성분을 제거하기 위한 대역 통과 여파기를 연구하였다.

18-28 GHz의 발전 주파수는 통과 시키고 그 외에 고조파 성분을 제거하기 위해 광대역 대역 통과 여파기가 필요하며 이를 위해 메타 전자파 구조를 적용하여 광대역 및 우수한 스킨트 특성을 얻도록 하였다.

메타 전자파 구조는 파장보다 짧은 구성 소자로 구성되었으며 특정 주파수에서 음의 유효 유전율과 음의 유효 투자율을 갖는다.

30여년전에 러시아의 수학자 Veselago에 의해 이론적으로 증명되었다<sup>[1]</sup>. 유효 유전율과 투자율이 동시에 음의 값을 갖기 때문에 전파의 위상 속도와 군속도가 반대 방향으로 진행하게 된다. 이러한 특성으로 인해 기존의 전파의 진행이 오른손 법칙을 따랐다면 메타전자파 구조에서는 왼손 법칙을 따르게 된다.

이러한 이론적인 접근은 90년대에 미국의 Pendry에 의해 규명되었다<sup>[2]</sup>. 주기적으로 배열된 선형 다이폴에 나란히 입사된 전기장은 특정 대역에서 저지대역을 형성하게 되며 음의 유효 유전율을 갖게 된다. 또한 주기적인 구조로 배열된 분할링 구조에 수직하게 입사된 자기장에 의해 저지대역을 형성하게 되며 이때 음의 유효 투자율을 갖게 된다.

## II. 광대역 대역통과 여파기의 설계

제안된 광대역 대역통과 여파기의 설계를 위해 [3~4]의  $\lambda/4$  단락 회로 공진기의 최대 평탄도를 갖기 위한 이론에 기초하여 제작되었다. 사용된 툴은 Ansoft의 HFSS를 이용하여 모의실험을 진행하였다.

설계된 광대역 대역통과 여파기의 레이아웃 및 구조적 파라미터들은 그림 2에서 보여주고 있다.

광대역 대역통과 여파기의 통과 대역 중심 주파수인 23 GHz에서 초기  $\lambda/4$  선로와 마지막  $\lambda/4$  선로는 통과 대역을 형성하며 중앙의  $\lambda/2$  선로의 경우 상하측 대역의 통과 대역을 형성한다. 광대역 대역통과 여파기의 전체 길이는 통과대역의 중심 주파수인 23 GHz에서  $1\lambda$ 의 선로 길이를 갖도록 설계되었다. Shunt Bridge의 단락 선로는 23 GHz의  $\lambda/2$  선로로서 전체 저지대역을 형성하도록 설계되었다.

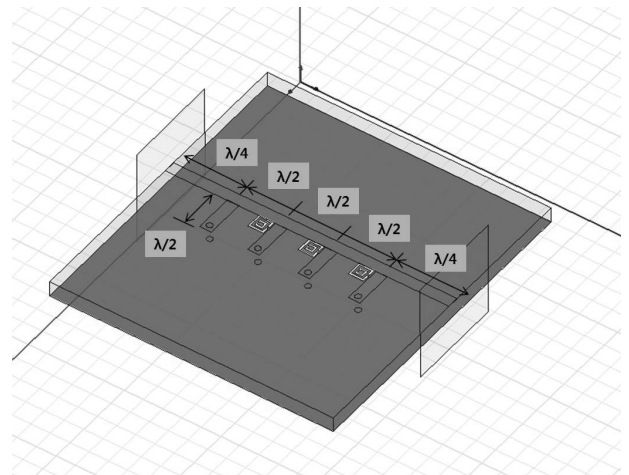


그림 2. 제안된 광대역 대역통과 여파기의 레이아웃  
Fig. 2. Layout of the proposed wide band pass filter.

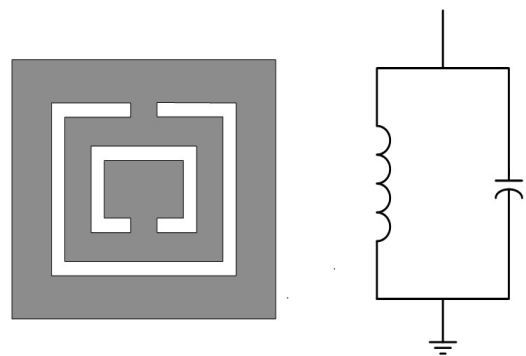
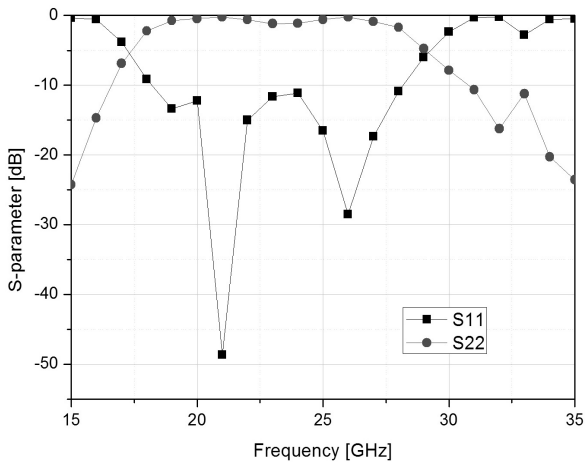
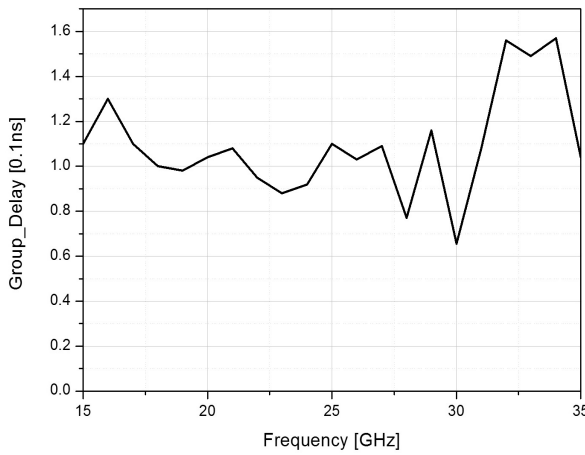


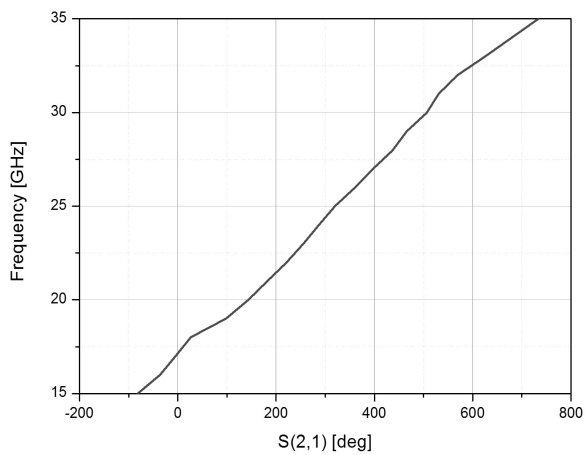
그림 3. 메타전자파 구조 셀 및 등가회로  
Fig. 3. Layout and equivalence circuit of metamaterial structure.



(a)



(b)



(c)

그림 4. 제안된 광대역 대역통과 여파기의 모의 실험 결과 (a)S-parameter (b)군 지연 (c)분산도

Fig. 4. Simulation result of the proposed wide band pass filter (a)S-parameter (b)Group delay (c)Dispersion diagram.

그 외에 Shunt 병렬 공진을 통해 저지대역의 광대역을 형성하기 위해 메타전자파 구조 셀을 적용하였으며 레이아웃과 등가회로는 그림 3에서 보여주고 있다.

그림 4 (a)는 제안된 광대역 대역통과 여파기의 모의 실험 결과를 보여주고 있다. 여기에 내용을 입력하세요. 3 dB 하측 차단 주파수와 상측 차단 주파수는 각각 18-28 GHz 이다. 삽입손실의 경우 통과대역 내에서 1 dB 이하의 값을 갖으며 반사손실의 경우 통과대역 내에서 10 dB 이상이 되도록 설계되었다.

그림 4 (b)는 제안된 광대역 대역통과 여파기의 통과대역 내에서 군 지연 특성을 보여주고 있으며 통과대역 내에서 0.5 ns 이하로 매우 우수한 특성을 나타내고 있다.

그림 4 (c)는 제안된 광대역 대역통과 여파기의 메타전자파 특성을 보여주기 위한 분산도를 보여주고 있다. 통과대역의 하측, 즉 고역 여파기 특성의 시작 주파수 이하에서는 Left Handed 특성을 갖는 것을 확인 할 수 있으며 그 이상의 주파수에서는 Right Handed 특성을 갖는 것을 확인 할 수 있다.

### III. 실험 및 측정

제안된 광대역 대역통과 여파기의 검증을 위해 유전율 3.2인 Taconic 사의 TLC-32 기판을 사용하여 제작하였다. 제작된 기판은 그림 5에서 보여주고 있다.

제작된 광대역 대역통과 여파기의 측정을 위해 Agilent 사의 8510C 네트워크 분석기를 사용하였다. 측정된 결과는 그림 6에 나타내었다.

그림 6(a)에 나타난 것과 같이 통과대역은 18.5 GHz에서 28.5 GHz로 10 GHz의 대역을 확보하였으며 삽입 손실의 경우 2 dB 이하이고 반사 손실은 10 dB 이

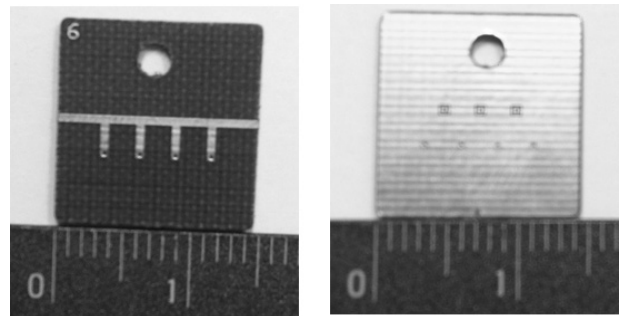
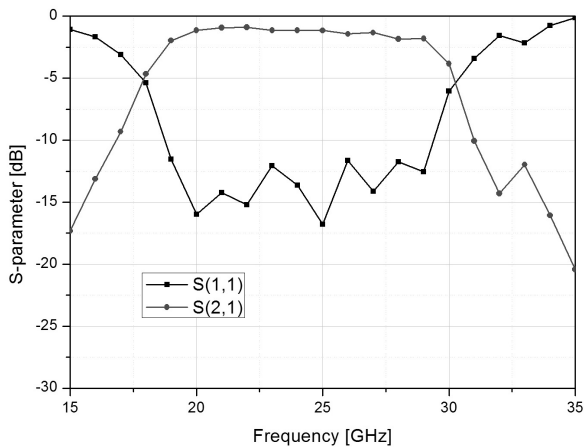
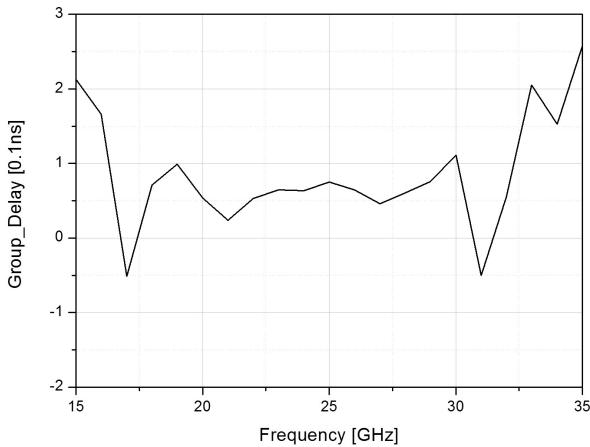


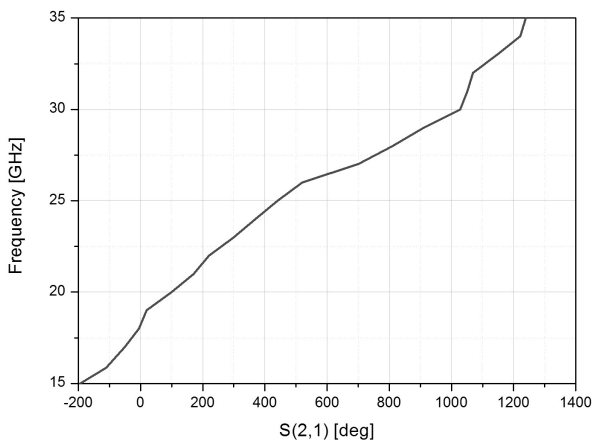
그림 5. 제안된 광대역 대역통과 여파기의 기판도  
Fig. 5. Substrate of the proposed wide band pass filter.



(a)



(b)



(c)

그림 6. 제안된 광대역 대역통과 여파기의 측정 결과  
(a)S-parameter (b)군 지연 (c)분산도

Fig. 6. Measurement of the proposed wide band pass filter (a)S-parameter (b)Group delay (c)Dispersion diagram.

상이 되는 것을 확인할 수 있다. 통과 대역 외의 대역에서는 20 dB 이하의 매우 우수한 저지 대역을 형성하고 있으며 통과 대역내의 맥율이 1 dB 이하로 매우 우수한 평탄도를 보이고 있다.

그림 6(b)는 군 지연 특성을 보여주고 있다. 통과 대역 내에서 모의실험과 같이 0.5 ns 이내의 군 지연 특성을 보여주고 있다.

또한 그림 6(c)는 측정된 결과에 대한 분산도를 보여주고 있으며 앞서 설명된 것과 같이 통과 대역의 하측 대역 이하 주파수에서 Left Handed 특성을 보이며 그 외 대역에서 Right Handed 특성을 보이는 것을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 한국형 차세대 초전도 핵융합 연구 장치의 고온 플라즈마 상태를 점검하고 진단하기 위한 마이크로파 진단기에 적용하기 위한 광대역 대역통과 여파기를 제안하였다.

기존의  $\lambda/4$  단락 회로 공진기의 최대 평탄도를 갖기 위한 기초 이론에 메타전자파 구조를 적용하여 통과 대역내의 반사 손실을 향상 시키고 군 지연 특성을 향상 시켰다.

통과 대역은 18-28 GHz로 10 GHz의 매우 넓은 주파수 대역을 통과 시키도록 제작되었으며 통과 대역 내에서 삽입 손실 및 반사 손실은 각각 1 dB 이하, 10 dB 이상이며 군 지연은 0.5 ns 이하로 매우 우수한 성능을 보였다. 통과 대역 외의 저지 특성은 20 dB 이하로 통과 대역 외에서 발생하는 잡음 신호들을 효과적으로 제거할 수 있도록 설계하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ," *Sov. Phys.-Usp.*, vol. 10, pp. 509-514, 1968.
- [2] J. B. Pendry, "Negative refraction makes perfect lens," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 85, pp. 3966-3969, 2000.
- [3] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 3rd ed. Wiley, 427, 2005.
- [4] A. Ali, and Z. Hu, "Metamaterial Resonator

Based Wave Propagation Notch for Ultrawideband Filter Applications," *IEEE ants. and wireless propagations. Lett.*, vol. 7, pp.210-212, 2007.

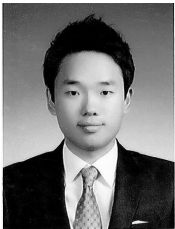
— 저 자 소 개 —



이 종 민(학생회원)  
2005년 숭실대학교 정보통신전자  
공학부 졸업 (공학사)  
2005년~2007년 숭실대학교 정보  
통신공학과 석사과정  
2007년 3월~현재 숭실대학교 정  
보통신공학과 박사과정

<주관심분야 : RF Front\_End System 및 소자>

서 철 현(정회원)  
대한전자공학회논문지  
제31권 TC편 6호 참조



심 우 석(학생회원)  
2011년 숭실대학교 정보통신전자  
공학부 졸업 (공학사)  
2011년~현재 숭실대학교 정보  
통신공학과 석사과정

<주관심분야 : RF Front\_End  
System 및 소자>