

Y형 구조물을 통해 구현된 접힌 Ridge 도파관 및 접힌 Ridge 도파관의 트랜지션

윤태순*

Realization of Folded Ridge Waveguide Using Y-type Structure and Transition of Folded Ridge Waveguide

Tae-Soon Yun*

요약

본 논문에서는 기존의 접힌 도파관의 내부 구조물을 Y형으로 대체하여 도파관의 차단주파수를 낮춘 접힌 Ridge 도파관(FRWG)을 제안하였다. 제안된 FRWG는 역 Ridge 도파관으로 등가될 수 있는데, 측면의 높이를 줄였을 때 측면의 길이가 증가하여 동일한 크기의 도파관에 비해 차단주파수를 절반 이하로 줄일 수 있다. 논문에서는 길이 40mm, 높이 20mm의 도파관에 폭 2mm의 Y형 구조물을 넣어 1.996GHz의 차단주파수를 갖는 FRWG를 설계하였다. 또한, 제안된 도파관을 활용하기 위한 SMA 커넥터와의 트랜지션이 설계되었다. 트랜지션은 커넥터의 신호선과의 커패시턴스를 최적화하여 2.064 ~ 3.050GHz 대역에서 VSWR 2:1 이하의 특성을 나타내었다. 제안된 FRWG는 도파관 구조를 이용한 다양한 소자의 소형화에 응용할 수 있다.

ABSTRACT

In this paper, in order to realize lower cut-off frequency of the waveguide, the folded Ridge waveguide (FRWG) is suggested by alternating T-shape structure in the conventional folded waveguide with Y-shape structure. Suggested FRWG can be equivalent by the reverse Ridge waveguide. As the height of side of the FRWG is lower, the width of side is increased. Therefore, the cut-off frequency of the FRWG can be decreased more than half compared with conventional waveguide. The FRWG is designed with the length, height, and width of Y-shape structure of 40mm, 20mm, and 2mm, respectively. Designed FRWG has the cut-off frequency of the 1.996GHz. Also, the transition between the FRWG and SMA connector is designed. The transition is optimized by the capacitance of the signal line of the connector. Its result shows the VSWR under 2:1 in the band of 2.064 ~ 3.050 GHz. Suggested FRWG can be applied with miniaturization of various waveguide devices.

키워드

Folded Waveguide, Ridge Waveguide, Cutoff Frequency, Transition, SMA Connector
접힌 도파관, Ridge 도파관, 차단 주파수, 트랜지션, SMA 커넥터

* 교신저자: 호남대학교 교수
• 접수일 : 2023. 11. 17
• 수정완료일 : 2023. 12. 30
• 게재확정일 : 2024. 02. 17

• Received : Nov. 17, 2023, Revised : Dec. 30, 2023, Accepted : Feb. 17, 2024
• Corresponding Author : Tae-Soon Yun
Dept. Electronic Eng., Honam University
Email : tsyun@honam.ac.kr

1. 서론

무선통신에서 각 부품을 연결하면서 회로를 구성하는 가장 기본적인 요소는 전송선로이다. 전송선로 중 하나인 도파관은 크기가 크고 무거우며 다른 소자들과 집적화가 어려운 단점이 있지만, 낮은 손실과 큰 전력 신호를 전송할 수 있다는 장점이 있어[1] 기지국, 중계기 등에 들어가는 필터, 안테나 등의 초고주파 부품 설계에 활용되고 있다[2-4].

도파관은 집적화가 어렵기 때문에 마이크로스트립, 동축케이블 등과 같은 다른 전송선로와 연결하기 위해서는 별도의 트랜지션(transition)이 있어야 한다[5-6]. 이러한 단점을 해결하기 위해 기판 집적형 도파관 (SIW: substrate integrated waveguide) 구조를 통해 전송선로를 구현하는 기판 자체를 도파관으로 활용하는 방법도 제시되어 다양한 초고주파 소자 개발에 활용되고 있다[7]. 또한, 큰 크기와 무게를 개선하기 위해 도파관 내부에 T형 구조물을 삽입하여 동일한 크기의 도파관으로부터 폭이 넓은 도파관을 구현함으로써 도파관의 차단주파수를 낮춘 접힌 도파관(FWG: folded waveguide)이 연구되어 왔다[8-9].

본 연구에서는 접힌 도파관의 구조를 변형하여 접힌 Ridge 도파관(FRWG: folded ridge waveguide)을 제안하여 도파관의 소형화를 구현하고, 제시한 FRWG을 활용하기 위해 SMA 커넥터와의 트랜지션 구조에 대해 제안하고자 한다.

II. FRWG의 구현 및 특성

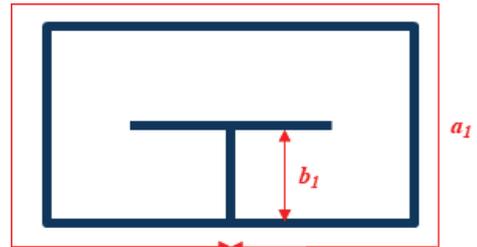
2.1 FRWG의 구조

그림 1은 기존에 연구되어 온 FWG와 본 논문에서 제안하는 FRWG 구조에 대해 나타내고 있다.

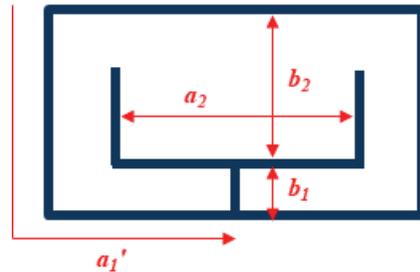
구형 도파관 (RWG: rectangular waveguide)은 일반적으로 폭(a)을 높이(b)의 2배($a = 2b$)로 제작되고, 기본모드는 TE₁₀모드이다. 그리고 TE₁₀모드의 차단주파수는 식 (1)과 같이 도파관의 높이에 무관하고 폭에 의해서 계산된다[1].

$$f_{c,mn} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \dots (1)$$

따라서, FWG는 그림 1(a)와 같이 도파관 내부에 T형 구조물을 넣어 도파관의 높이는 절반으로 낮추고 도파관의 폭을 길게 하여 차단주파수를 낮추는 것이다. 이때, 이상적으로 FWG의 폭을 두 배로 할 수 있으므로 식 (1)에 의해 차단주파수를 최대 절반으로 줄일 수 있게 된다. 본 논문에서 제안하는 접힌 Ridge 도파관 (FRWG)은 그림 1(b)와 같이 도파관 내부에 Y형 구조물을 삽입하여 도파관의 폭 향상을 최대화하고자 하였다.



(a) Folded waveguide (FWG)



(b) Folded Ridge waveguide (FRWG)

그림 1. FWG와 FRWG 구조
Fig. 1 Structure of the FWG and FRWG

그림 1(b)의 FRWG는 큰 높이(b_2)를 갖는 가운데 부분과 낮은 높이(b_1)를 갖는 측면 부분을 갖는 그림 2의 역 Ridge 도파관 구조로 증가할 수 있다.

2.2 FRWG의 등가 구조

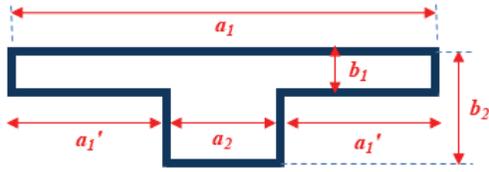


그림 2. FRWG의 등가 구조인 역 Ridge 도파관
Fig. 2 Reverse ridge waveguide

그림 2는 FRWG의 등가 구조로써 역 Ridge 도파관 구조를 나타내고 있는데, FRWG의 폭은 $2a_1' + a_2$ 로 주어지게 된다. 일정한 폭(a)과 높이(b)를 갖는 도파관을 통해 FRWG를 구현했을 때, 등가 구조의 측면 높이, b_1 를 낮게 할수록 측면 길이, a_1' 는 길어지게 된다. 한편, Ridge 도파관의 차단주파수는 식 (2)와 (3)을 통해 계산할 수 있다[10].

$$\frac{C_d}{\epsilon} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{x^2 + 1}{x} \operatorname{acosh} \left(\frac{1 + x^2}{1 - x^2} \right) - 2 \ln \left(\frac{4x}{1 - x^2} \right) \right] \quad \dots (2)$$

$$f_c' = \frac{1}{\pi \sqrt{\mu \epsilon}} / \sqrt{\left(\frac{a_2}{b_2} + \frac{2C_d}{\epsilon} \right) (a_1 - a_2) b_1} \quad \dots (3)$$

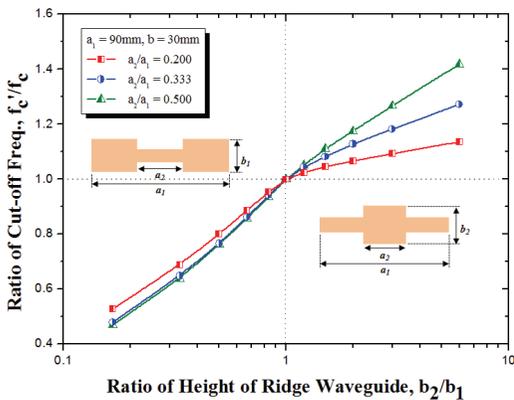


그림 3. Ridge 도파관의 높이 비율에 따른 차단주파수
Fig. 3 Cutoff frequency as the ratio of height of Ridge waveguide

식 (2)에서 변수 x 는 b_2/b_1 으로 주어지는 값이다. 이 식들을 바탕으로 EM 해석을 통해 Ridge 도파관과

역 Ridge 도파관의 차단주파수를 계산한 것을 그림 3에 나타내었다.

그림 3에서는 안쪽의 높이가 측면보다 낮은 Ridge 도파관과 안쪽의 높이가 더 큰 역 Ridge 도파관의 차단주파수 변화를 나타내고 있다. 각 도파관은 폭 90mm이고, Ridge 도파관의 측면 높이, b_1 과 역 Ridge 도파관의 안쪽 높이, b_2 를 30mm로 하여 조건을 동일하게 맞추었다.

폭 90mm, 높이 30mm인 도파관의 차단주파수 1.666GHz를 기준으로 Ridge 도파관의 차단주파수는 높이 비율에 따라 감소하고, 역 Ridge 도파관의 차단주파수는 증가하는 것을 알 수 있다. Ridge 도파관의 안쪽 길이, a_2 를 각각 18mm(사각형 심볼), 30mm(원형 심볼), 45mm(삼각형 심볼)로 하였을 때, 안쪽 영역의 길이가 길수록 차단주파수가 더 크게 변화하는 것으로 나타났다.

2.3 FRWG의 특성

본 논문에서는 길이 86.36mm를 갖는 WR340 내부에 Y형 구조물을 넣어 그림 1(b)의 FRWG를 구현하여 차단주파수를 계산한 후 그림 4에 나타내었다.

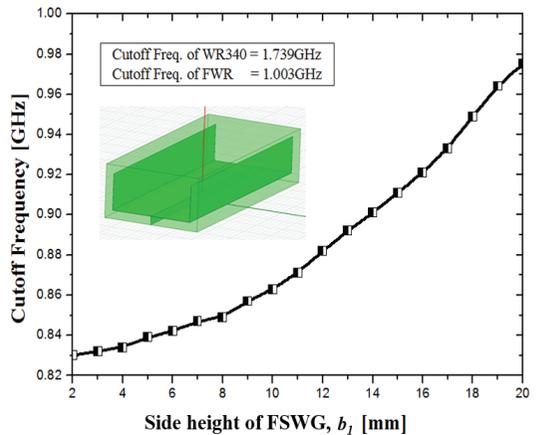


그림 4. 측면 높이에 따른 FSWG의 차단주파수
Fig. 4 Cutoff frequency of FSWG as the side's height

WR340으로 구현한 FRWG의 Y형 구조물 높이(b_1)는 최대 21mm까지 구현될 수 있는데 그림 4는 Y형 구조물 높이를 2mm에서 20mm까지 증가시키면서 차

단주파수를 확인한 것이다. WR340의 차단주파수는 1.739GHz로 계산되는데, 내부 구조물의 폭을 0.4mm로 하여 구현된 그림 1(a)의 FWG는 1.003GHz로 차단주파수가 낮아지는 결과를 나타내었다. 또한, Y형 구조물의 폭의 0.4mm로 하여 구현되는 FRWG의 차단주파수는 FWG보다 더 낮아지고 FRWG의 측면 높이, b_1 이 낮아질수록 차단주파수가 더 작아지는 결과를 보였다. 이것은 역 Ridge 도파관의 차단주파수가 높이에 비례에 따라 증가하지만, FRWG에서는 측면 높이, b_1 이 낮아질수록 증가된 역 Ridge 도파관의 총 길이, a_1 이 늘어나게 되어 증가를 상쇄시키고 감소시키는 결과를 보이게 되는 것이다.

III. FRWG 구현과 트랜지션

3.1 2.4GHz 대역에서의 FRWG 설계

본 논문에서는 2.4GHz ISM 대역에 응용할 수 있는 FRWG를 HFSS 시뮬레이션 툴을 이용하여 설계하였다. 상용화된 도파관을 2.4GHz 대역에 활용하기 위해서는 길이 86.36mm를 갖는 WR340을 사용해야 하지만 본 논문에서는 그림 5와 같은 길이 $a = 40\text{mm}$, 높이 $b = 20\text{mm}$ 를 갖는 FRWG 구조를 이용하였다.

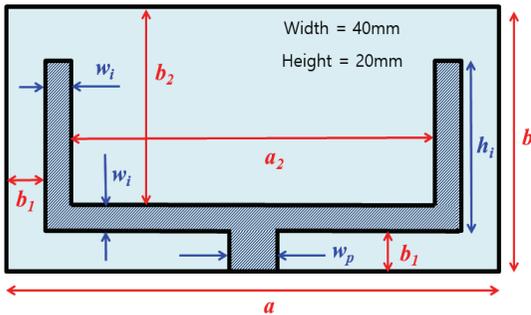


그림 5. 2.4GHz 응용을 위한 FRWG의 구조
Fig. 5 Schematic of FRWG for 2.4GHz application

그림 5에서 Y형 구조물의 안정성을 위해 Y형 구조물의 하단의 폭(w_p)은 8mm의 두께로 설계되었고 상단의 폭(w_i)과 높이(h_i)는 각각 2mm, 12mm로 설계되었다. 그림 5의 FRWG를 역 Ridge 도파관으로 증가하였을 때, 증가된 도파관의 안쪽 길이(a_2)와 높이

표 1. FRWG의 설계 변수 값
Table 1. Values of variables for FRWG

Content	Variable	Value [mm]
Waveguide	a	40.0
	b	20.0
FRWG	w_p	8.0
	w_i	2.0
	h_i	12.0
	b_1	3.0
	b_2	15.0
	a_2	30.0

(b_2)는 각각 30mm, 15mm로 계산되고 측면 길이(a_1)와 높이(b_1)는 35mm, 3mm로 계산되고, 셀변수 값은 표1과 같다.

공기로 채워지고 외곽 도체와 Y형 구조물은 알루미늄으로 구성되어 설계된 FRWG는 그림 6에 나타낸 바와 같이 1.996GHz의 차단주파수를 갖는다. 또한, 활용하고자 하는 2.4GHz에서 0.026dB의 삽입손실과 32.975dB의 반사손실 특성을 가졌다.

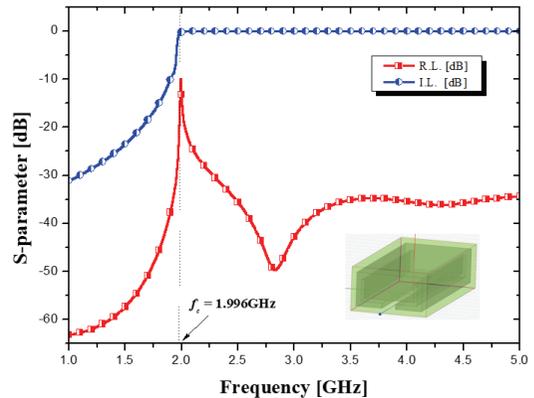


그림 6. FRWG의 주파수 특성
Fig. 6 Frequency characteristics of FRWG

3.2 FRWG의 트랜지션 설계

제한된 FRWG를 활용하기 위해서는 기본 도파관, 동축케이블, 마이크로스트립 전송선로와 같은 일반적으로 사용되는 전송선로로 연결될 수 있어야 한다. 본

논문에서는 SMA 커넥터와 연결하기 위해 동축케이블과의 트랜지션(transition)을 설계하였다.

일반적으로 도파관과 동축케이블의 트랜지션은 동축케이블의 신호선을 도파관 내부로 연장하여 구현하며, 신호선의 끝부분을 두껍게 하여 도파관의 전계 형성을 원활하게 하여 손실을 최소화하고 있다. 본 논문에서는 그림 7과 같이 FRWG의 Y형 구조물에 구멍을 형성하고 커넥터의 신호선을 구멍 내부까지 연장하여 손실을 최소화하도록 최적화하였다.

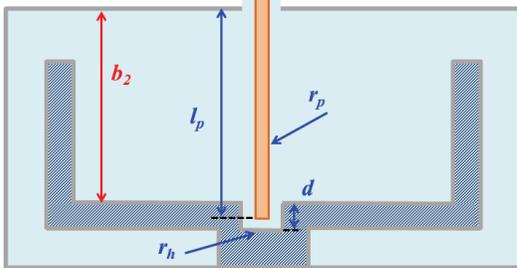


그림 7. FRWG 트랜지션의 구조
Fig. 7 Schematic of transition of FRWG

그림 7은 FRWG 내부로 연장되는 커넥터의 신호선을 나타낸 트랜지션의 구조를 보여주고 있다. 동축케이블 구조를 갖는 SMA 커넥터의 신호선의 반지름이 0.5mm이므로 신호선을 연장한 핀의 반지름도 0.5mm로 하고 핀의 길이, l_p 를 변수로 하여 설계하였다. 최적화된 설계 변수 값은 표 2에 나타내었다.

표 2. FRWG의 트랜지션 설계 변수 값
Table 2. Values of variables for transition

Content	Variable	Value [mm]
Transition between FRWG and SMA Connector	d_h	3.0
	r_h	1.0
	l_p	17.0
	r_p	0.5

그림 7의 FRWG 트랜지션 구조의 각 변수를 표 2의 값으로 최적화하여 EM 해석하였을 때, 그림 8과 같은 결과를 얻었다. 이 때, 도파관 구조는 도체는 알루미늄으로 정하였고 내부는 공기 유전체로 설정하였다. 또한, 커넥터의 신호선은 구리로 설정하였다.

설계된 트랜지션의 VSWR 2:1 이하인 대역폭은 986MHz로 39.3%의 대역폭을 가졌고, 설계 주파수인 2.4GHz에서의 VSWR은 1.24를 나타냈다. 또한, 2.4GHz에서의 삽입손실과 반사손실은 각각 0.06dB, 19.37dB를 나타냈다.

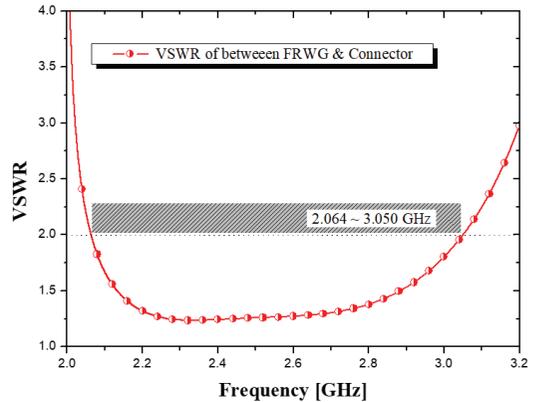


그림 8. FRWG 트랜지션의 시뮬레이션 결과
Fig. 8 Simulated results of transition of FRWG

IV. 결 론

본 논문에서는 구형 도파관의 크기 감소를 위해 T형 구조물을 통해 구현되는 FWG의 내부 구조물을 Y형으로 대체하여 FRWG 구조를 설계하였다.

제안되는 FRWG는 3.747GHz의 차단주파수를 갖는 길이 40mm의 도파관 구조로부터 1.996GHz의 차단주파수를 구현하여 46.7% 감소된 차단주파수 결과를 얻을 수 있었다. 이것은 2.4GHz 대역에 응용되는 일반적인 도파관 WR340의 크기 (86.36x43.18mm²)에 비해 21.5%의 크기를 갖는 FRWG로 대체할 수 있다는 것이다. 한편, 제안된 FRWG를 활용하기 위한 SMA 커넥터와의 트랜지션이 설계되었다. 트랜지션은 커넥터의 신호선을 FRWG의 Y형 구조물 안쪽까지 연장하여 최적화하였으며, 2.064 ~ 3.050GHz 대역에서 VSWR 2:1 이하의 특성을 보였다.

본 논문에서 제안한 FRWG는 저손실의 도파관 장점을 유지하면서 기존의 도파관보다 소형으로 구현되므로 다양한 초고주파 시스템에 응용될 수 있다.

감사의 글

본 논문은 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다. (과제관리번호: 2021RIS-002)

References

[1] N. Marcuvits, *Waveguide Handbook*, London: Peter Peregrinus Ltd., 1986.

[2] J. Hong, B. Kim, L. Yun, and S. Lee, "Evanescent-mode Waveguide Band-pass Filter Applied by Novel Metal Post Capacitor," *J. of the Korea Institute Electronic Communication Science*, vol. 17, no. 5, 2022, pp. 759-766.

[3] K. Chul, "Design of Slotted Waveguide Antenna with Slot Depth Variation," *J. of the Korea Institute Electronic Communication Science*, vol. 8, no. 4, 2013, pp. 535-540.

[4] Y. Kang, H. Ceong, and S. Rhee, "CPW-Fed π -Shaped Antenna for Wideband," *J. of the Korea Institute Electronic Communication Science*, vol. 13, no. 2, 2018, pp. 291-298.

[5] Y. Lee, "Wide Band Microstrip line-to-Rectangular Waveguide Transition Using a Radial Probe for Millimeter-wave Applications," *J. of Korea Industrial Information Systems Research*, vol. 20, no. 1, 2015, pp. 43-47.

[6] W. Yi, E. Li, G. Guo, and R. Nie, "An X-band Coaxial - to-Rectangular Waveguide Transition," *IEEE Int. Conf. on Microwave Technology and Computational Electromagnetics*, Beijing, China, 2011, pp. 22-25.

[7] T. Yun, "Bandpass Filter Using Folded Substrate Integrated Waveguide Structure," *J. of the Korea Institute Electronic Communication Science*, vol. 13, no. 5, 2018, pp. 965-970.

[8] N. Grigoropoulos and P. Young, "Compact Folded Waveguides," *34th European Microwave Conf.*, Amsterdam, Netherlands, 2004, pp.

973-976.

[9] J. Rao, K. Nai, P. Vaitukaitis, Y. Li, and J. Hong, "3-D Metal Printed Compact High-Q Folded Waveguide Filter with Folded Antenna," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 70, no. 1, 2022, pp. 112-121.

[10] T. Chen, "Calculation of the Parameters of Ridge Waveguides," *IRE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 5, no. 1, 1957, pp. 12-17.

저자 소개

윤태순(Tae-Soon Yun)



2000년 국민대학교 전자공학과 (공학사)

2002년 광운대학교 전파공학과 (공학석사)

2006년 광운대학교 전파공학과 (공학박사)

2007년 10월~2008년 09월: The SUNY at Buffalo Post Doc.

2008년 10월~2010년 02월: 광운대학교 연구교수

2010년 03월~현재: 호남대학교 로봇드론공학과 교수

※ 관심분야 : 마이크로파 소자, 무선전력전송, CRLH 전송 선로