

유전체 장하 이중 스텝-리지 도파관 방사기 설계

김선각*¹, 김기홍*², 허지원**¹, 박민기***¹, 방재훈***², 안병철****¹

Design of a Dielectric-Loaded Double-Ridged Waveguide Radiator

Sun Kak Kim*¹, Ki-Hong Kim*², Jiwon Heo**¹, Minki Park***¹, Jae-Hoon Bang***², and
Bierng-Chearl Ahn****¹

논문은 2023학년도 충북대학교 학술연구영역 사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

요약

이중 리지 도파관은 낮은 차단 주파수와 넓은 주파수 대역폭 특성으로 인해 군사 및 항공 분야의 정밀한 고주파 신호 전송 및 방사 용도로 사용되고 있다. 본 논문에서는 이중 리지 도파관의 광대역 및 저차단 주파수 장점을 유지하면서 차단 주파수를 더욱 감소시키기 위해 유전상수가 5인 유전체가 장하된 이중 리지 도파관 방사기의 설계를 제시하였다. 제안된 방사기는 개구 부근의 4계단 리지 변환기와 개구에서 돌출된 최적 길이의 유전체로 구성된다. 자유공간과의 임피던스 정합을 위해 유전체 돌출부에 2계단 변환기를 적용하였다. 상용 시뮬레이션 툴을 사용한 패러미터 분석을 통해 광대역에 걸쳐 임피던스가 정합된 방사기를 설계하였다. 설계된 방사기는 5.3-22.1GHz의 주파수에서 -10dB 이하의 반사계수 특성을 보였다.

Abstract

Due to its low cutoff frequency and wide bandwidth, double-ridged waveguides are used for precise high-frequency signal transmission and radiation in the military and aviation sectors. This paper presents a design of a double-ridge waveguide radiator loaded with a material of dielectric constant of 5 in order to further reduce the cutoff frequency while keeping the wide bandwidth and low cutoff frequency advantages of the double-ridged waveguide. The proposed radiator consists of a 4-step ridge transformer near the aperture and a dielectric of optimum length protruding out of the aperture. A 2-step transformer is employed in the protruding dielectric for impedance matching with the free space. A wideband impedance-matched radiator is designed through parametric analysis using a commercial simulator tool. The designed radiator shows reflection coefficient of less than -10dB at 5.3-22.1GHz.

Keywords

antenna miniaturization, double-ridged waveguide, waveguide radiator, aperture matching, simulation-based

* 충북대학교 대학원 전파통신공학전공
- ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0003-0385-4039>
- ORCID²: <http://orcid.org/0000-0002-1100-8644>

** 충북대학교 산업인공지능연구센터
- ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1100-8644>

*** ㈜에이팜스페이스
- ORCID¹: <http://orcid.org/0009-0008-6276-1645>
- ORCID²: <http://orcid.org/0000-0003-3900-0019>

**** 충북대학교 정보통신공학부 교수(교신저자)
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7977-8760>

• Received: Dec. 31, 2024, Revised: Jan. 23, 2025, Accepted: Jan. 26, 2025

• Corresponding Author: Bierng-Chearl Ahn
Dept. of Information and Communication Engineering, Chungbuk National University

Tel.: +82-43-261-3194, Email: bician@cbnu.ac.kr

1. 서 론

일반 도파관은 구조의 단순성으로 제한된 대역폭 내에서의 안정성을 요구하는 시스템에 사용되어 왔다. 일반 도파관의 경우 특정 임피던스를 가지며, 특정 주파수 대역에서만 효율적인 설계가 되는 단점을 가진다[1]. 반면에 넓은 주파수 대역폭을 지원하고 다양한 주파수 대역에서 낮은 반사 계수를 제공하기 위하여 도파관에 리지를 사용하는 아이디어가 제안되었다. 또한 이중 리지 도파관은 사각형 도파관이나 원형 도파관에 비해 작은 크기로 높은 성능을 발휘하므로 소형화된 시스템에 적합하다[2][3].

이중 리지 도파관을 이용한 방사기로 주로 광대역 혼 안테나가 많이 사용되고 있다[4][5]. 이중 리지 혼 안테나 높은 이득을 제공하지만 부피가 크므로 프로브 안테나 또는 배열 안테나 방사 소자로는 적합하지 않다. 이중 리지 도파관 개구 방사기는 광대역 배열 안테나 구현에 사용되며[6]-[10], 의료용 밀리미터파 이미징 시스템용[11], HF 대역 가열용[12], 밀리미터파 통신용[13], 안테나 근접 전계 측정용[14] 등으로 개발되었다.

이중 리지 도파관 개구 방사기 구현에 있어서 개구의 임피던스 정합을 위해 개구 입구 전에서 이중 리지를 서서히 줄인 Taper-ridged 구조가 사용된다[13][14]. 이중 리지를 도파관 밖에서 확장하여 임피던스 정합을 향상시킨 구조는 부피가 증가한다는 단점을 가진다[4][15]. 도파관 방사기의 동작 주파수를 감소시키기 위해, 즉 주어진 주파수에서 방사기의 단면적을 감소시키기 위해 도파관 내부를 유전체를 채운 구조가 사용된다[16][17]. 이 경우 방사기의 단면이 더욱 감소하여 개구의 임피던스 정합이 더욱 악화되어 임피던스 정합 설계가 요구된다. 유전체가 장하된 사각형 도파관 또는 원형 도파관 방사기의 개구 임피던스 정합을 연구되었으나 유전체가 장하된 이중 리지 도파관 방사기의 임피던스 정합은 현재까지 발표된 연구결과가 없는 상태이다.

본 논문에서는 유전체 장하 이중 리지 도파관 방사기의 설계를 제안하였다. Step-ridged 방식으로 리지 높이와 폭을 단계적으로 조정한 구조와 유전체를 두 단계 스텝으로 제거하여 공기로 채운 구조를

적용하여 개구의 임피던스가 정합된 유전체 장하 이중 리지 도파관 방사기를 설계하였다. 설계에는 Dassault Systems Simulia 사의 CST Studio Suite™을 사용하였다. 다음 장에서는 제안된 이중 스텝-리지 도파관과 방사기의 설계 과정과 특성을 제시한다.

II. 이중 스텝-리지 도파관 방사기 설계

그림 1은 본 논문에서 설계한 이중 스텝-리지 도파관 방사기의 기본 구조이다. 이 어댑터는 직사각형 도파관 W , 4단계 스텝-리지 S , 방사기 R 로 구성된다.

도파관 포트는 4단계 스텝-리지를 통해 도파관 끝에서 TE_{10} 모드를 여기시킨다. 포트와 도파관 끝 사이의 임피던스 정합은 주로 스텝-리지 S 에 의해서 촉진된다. 4단계 스텝-리지 S 는 반사 계수의 수준과 고차 모드 생성 정도를 결정하는데 중요한 역할을 수행한다. 스텝 형태의 리지는 제어 파라미터가 많기 때문에 연속 테이퍼형 리지보다 넓은 대역폭에서 낮은 반사 계수를 달성하는데 효과적이다. 반사 계수는 스텝-리지 뿐만 아니라 방사기의 길이 및 매칭 캐비티의 치수를 조정하여 넓은 주파수 범위에서 낮은 반사 계수를 달성하는데 중요한 역할을 한다. 문헌 연구에 따르면 광대역 직사각형 도파관 변환 설계에 스텝형 리지를 가지는 도파관이 선호되는 것으로 나타났다.

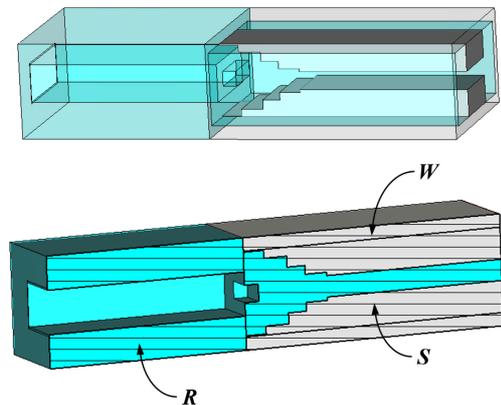


그림 1. 제안된 이중 리지 도파관 방사기의 구조
Fig. 1. Structure of the proposed double-ridged waveguide radiator

2.1 이중 리지 도파관 설계

이중 리지 도파관은 직사각형 도파관과 유사하며, 주된 모드는 TE_{10} 이며, 차단 주파수는 다음과 같은 식 (1)에 의해서 발생한다[18].

$$f_{c,TE_{10}} = \frac{c}{\pi\sqrt{\epsilon_r} \sqrt{b_1(a_1 - a_2) \left(\frac{a_2 + 2C_d}{b_2} + \frac{2C_d}{\epsilon} \right)}} \equiv \frac{c}{\lambda_{c,TE_{10}}} \quad (1)$$

여기서 c 는 진공에서의 광속, ϵ_r 은 유전상수, a_1 와 b_1 는 리지를 제외한 사각형 도파관의 폭과 높이, a_2 와 b_2 는 리지의 폭과 리지 간 간격이며, C_d 는 다음 식으로 주어지는 리지 간의 커패시턴스이다.

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

식 (1)과 식 (2)에서 ϵ 은 진공 중에서의 유전율이며 x 는 b_2/b_1 이다.

고차 모드인 TE_{m0} 모드의 차단 파장 $\lambda_{c,TE_{m0}}$ 은 다음 방정식의 해로 주어진다.

$$\frac{b_1}{b_2} = \frac{\cot \left[\left(1 - \frac{a_2}{a_1} \right) \frac{\lambda_{c0}}{\lambda_{c,TE_{m0}}} \right] - \frac{2C_d b_1}{\epsilon a_1} \frac{\lambda_{c0}}{\lambda_{c,TE_{m0}}} \frac{\pi}{2}}{\tan \left(\frac{a_2}{a_1} \frac{\lambda_{c0}}{\lambda_{c,TE_{m0}}} \frac{\pi}{2} \right)} \quad (3)$$

여기서 λ_{c0} 는 $2a_1/\sqrt{1/\epsilon_r}$ 로 주어지는 리지가 제거된 사각형 도파관의 차단 파장이다[19]. 리지 간격 b_2 를 일정하게 하고 리지 폭 a_2 대 도파관 폭 a_1 의 비가 0.45일 때 TE_{10} 의 차단 주파수가 가장 작게 되어 이중 리지 도파관의 대역폭이 최대가 된다.

그림 2는 $a_1=17.55$, $b_1=7.96$, $a_2=7.90$, $b_2=2.04$ mm인 이중 리지 도파관의 TE_{10} , TE_{20} , TE_{30} 모드의 전기장 분포를 도시한 것으로 이들 모드의 차단 주파수는 각각 4.73, 15.84, 27.25GHz이다. 차단 주파수가 TE_{10} 모드 다음으로 낮은 모드는 TE_{20} 모드이다. 이 모드의 전자기장은 좌우 기함수 대칭이므로 우함수 대

칭인 TE_{10} 모드와 동시에 여기되지 않는다. TE_{10} 모드와 동시에 잘 여기되는 다음 모든 TE_{30} 모드이다. 리지 폭을 일정하게 두고 리지의 간격을 감소시킬 경우 TE_{10} 모드의 차단 주파수는 빠르게 감소하는 반면 TE_{30} 모드의 차단 주파수는 서서히 높아져서 대역폭이 증가하게 된다. 리지 간격을 조정하여 TE_{30} 모드 차단 주파수와 TE_{10} 모드 차단 주파수 비가 3에서부터 10이상까지 되도록 설계할 수 있다 [20]. 본 논문에서는 앞에서 제시한 치수의 이중 리지 도파관을 적용하여 이론적 최대 주파수 대역폭이 $f_{c,TE_{30}}/f_{c,TE_{10}} = 5.76$ 이 되도록 설계하였다.

이중 리지 도파관을 저손실 유전체로 채워서 차단 주파수를 $\sqrt{1/\epsilon_r}$ 배로 낮출 수 있다. 본 논문에서는 유전율 5인 물질을 사용하여 차단 주파수를 0.45배(2.11GHz)로 감소시켰다.

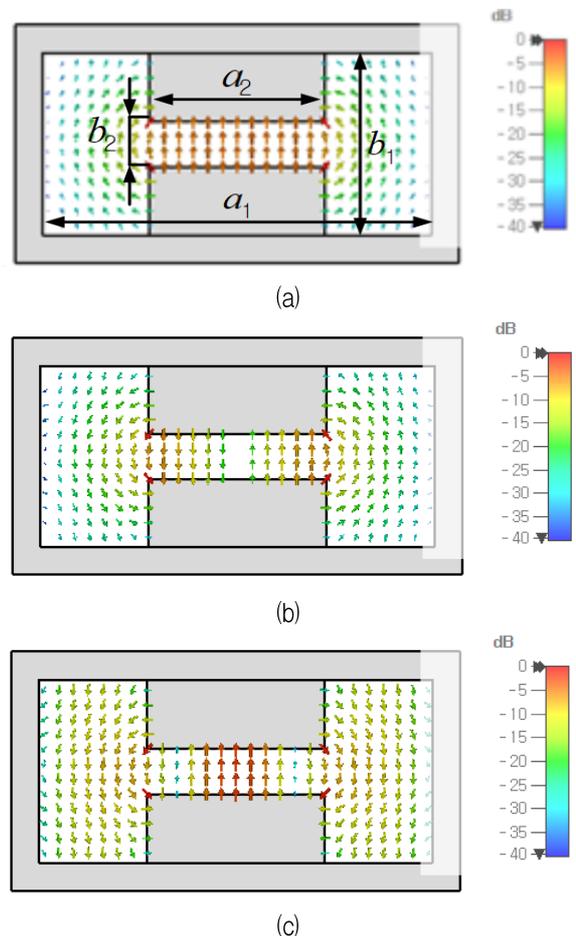


그림 2. 이중 리지 도파관의 전기장
 (a) TE_{10} 모드, (b) TE_{20} 모드, (c) TE_{30} 모드
 Fig. 2. Electric field in the double-ridged waveguide.
 (a) TE_{10} mode, (b) TE_{20} mode, (c) TE_{30} mode

이 경우 방사기의 치수를 0.45배로 축소하는 효과를 얻는다. 유전상수가 너무 작으면 방사기 소형화율이 작고 너무 크면 임피던스 정합 대역폭이 감소한다. 유전상수는 크기 소형화와 임피던스 정합을 고려하여 최적값인 5를 적용하였다.

그림 3은 이중 리지 도파관 개구 방사기의 반사계수를 보인 것이다. 차단 주파수 이하의 주파수에서는 CST Studio Suite™의 해석 방법 특성상 0보다 작은 값이 제시되며 이는 의미 없는 수치이다. 도파관이 공기로 채워진 경우 5-25GHz에서 반사계수가 -1dB에서 -6dB의 값을 보인다. 도파관이 유전상수 5인 물질로 채워진 경우 반사계수가 0dB에서 -3dB까지 변한다. 이러한 값은 개구의 임피던스 정합없이는 방사기로 사용할 수 없음을 의미한다.

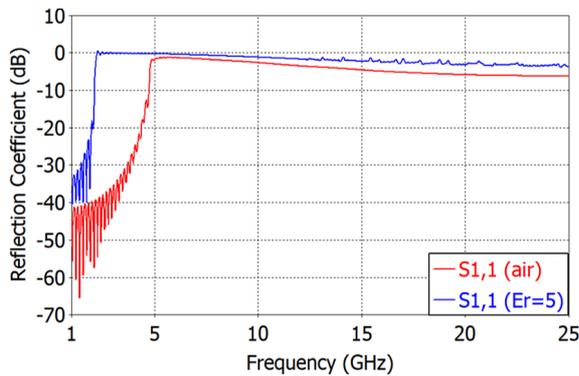


그림 3. 이중 리지 도파관 개구 방사기의 반사계수
Fig. 3. Reflection coefficient of the double-ridged waveguide aperture radiator

2.2 방사기 임피던스 정합구조 설계

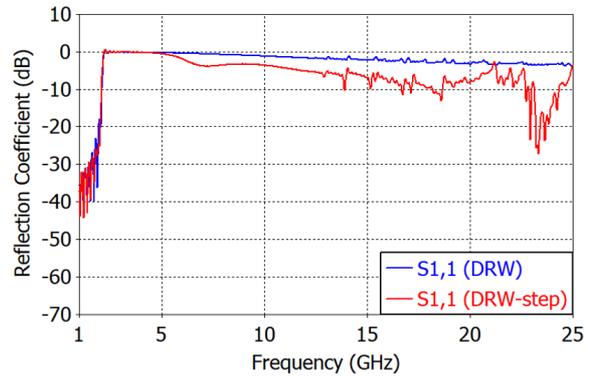
시뮬레이션을 통해 유전상수 5인 물질로 채워진 이중 리지 도파관 방사기의 임피던스 정합을 위해 개구 부분에서 리지를 서서히 제거하여 개구면에서 리지가 완전히 없어지게 할 필요가 있다는 것을 확인하였다. 본 논문에서는 길이를 최소로 할 수 있는 계단 구조를 적용하였다. 시행착오를 통해 그림 4와 같이 4개의 계단형 변환기를 적용할 경우 가장 양호한 임피던스 정합 특성을 얻을 수 있었다.

그림 4는 도파관 매질의 유전율을 5로 적용하고 도파관 내의 이중 리지 형태를 4단계 적용 여부에 대한 결과를 비교한 것이다. 차단 주파수는 2.11

GHz를 유지하고 있으며, 계단형 변환기 적용 시 5.3GHz에서부터 반사계수가 감소하며 최대 -27.05 dB까지 낮아짐을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

그림 4. 계단형 변환기를 가지는 이중 리지 도파관 (a) 방사기의 구조 (b) 반사계수

Fig. 4. Double-ridged waveguide radiator with a stepped transformer

(a) Structure (b) Reflection coefficient

설계의 최종 단계로서 유전체를 도파관 밖으로 돌출 시킨 후 계단형 변환기를 적용하여 도파관 개구와 자유공간의 임피던스를 정합하였다. 그림 5는 설계된 방사기의 구조를 보인 것이다. 2개의 계단형 변환기를 적용하였으며 유전체 돌출부의 길이를 충분히 크게 하여 낮은 주파수에서도 양호한 임피던스 정합이 이루어지도록 하였다.

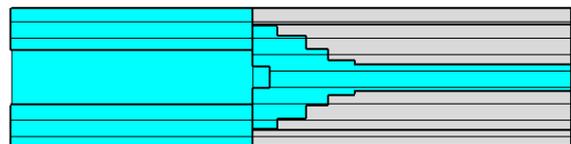


그림 5. 설계된 이중 리지 도파관 방사기의 구조

Fig. 5. Structure of the designed double-ridged waveguide radiator

Parameter sweep을 이용하여 전체 구조를 개선하였다. Parameter sweep의 한 예로서 그림 6에 유전체 돌출부 길이에 따른 반사계수 변화를 도시하였다. 돌출부 길이를 조정하여 방사기의 반사계수가 5.3GHz에서부터 22.1GHz까지 -10dB 이하가 되게 할 수 있었다.

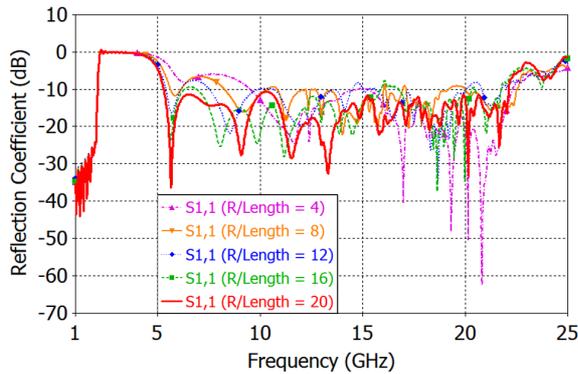


그림 6. 유전체 돌출부 길이에 따른 방사기의 반사계수
Fig. 6. Reflection coefficient vs the length of the protruding dielectric

그림 7에 본 논문에서 제안한 방사기의 치수 변수를 제시하였다. 그림 7(b)에서 W_3 는 유전체 제 1 계단의 폭을 의미하며 리지와는 상관이 없다.

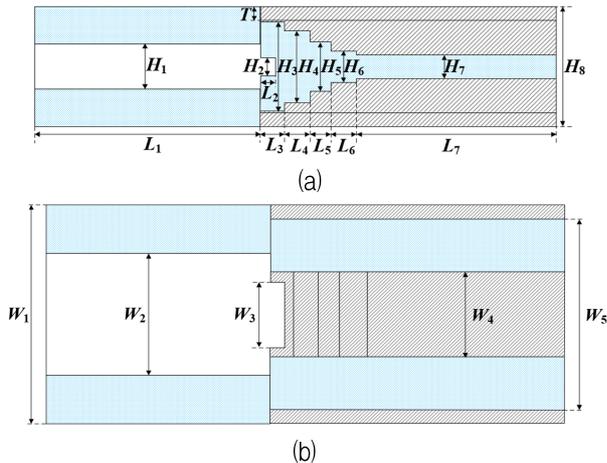


그림 7. 설계된 방사기의 치수 변수 (a) 측면, (b) 평면
Fig. 7. Dimensional parameters of the designed radiator (a) Side cross section and (b) Planar cross section

계단형 리지 변환기는 반사계수의 수준과 고차 모드 생성 정도를 결정하고 광대역 동작에 중요한 역할을 수행한다. 출력 도파관 W 의 치수 a 와 b 가

주어지면 계단형 변환기의 길이 $L_3 - L_6$ 및 높이 $H_3 - H_6$ 은 개선해야 할 파라미터 중 하나이며, CST Studio Suite™을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

계단형 리지 변환기가 적용된 유전체 장하 개구의 반사계수를 낮추기 위하여 도파관의 특성 임피던스와 자유공간 임피던스를 정합시키는 용도의 방사기 설계를 진행하였다. 계단형 리지 변환기와 유전체 돌출부는 개별적으로 설계한 후 결합된다.

도파관에서 외부 매질(자유공간의 진공)로 신호가 전달될 때 매질 간의 임피던스의 불연속성이 반사를 유발하게 된다. 따라서 외부 매질과 도파관 내부 물질의 유전율이 서서히 변하는 구조를 적용하면 도파관에서 외부 매질로의 임피던스 변환이 완만하게 되어 반사가 줄어들게 된다. 자유 공간의 특성 임피던스가 377Ω 일 때, 유전율이 5인 매질의 임피던스는 $377/\sqrt{5} \approx 168.6\Omega$ 으로 줄어들게 된다.

이를 위해 유전체 돌출부에 계단형 변환 구조를 적용하였다. 유전체 돌출부의 길이는 20mm, 높이는 10.69mm, 폭은 20.10mm이다. 표 1에 최종 설계된 방사기의 치수를 제시하였다.

표 1. 설계된 방사기의 치수 (단위: mm)

Table 1. Dimensions of the designed radiator (Unit: mm)

Parameters	Dimension	Parameters	Dimension	Parameters	Dimension
H1	4.40	H8	10.69	L7	17.90
H2	1.67	L1	20.00	W1	20.10
H3	7.96	L2	1.41	W2	11.00
H4	6.45	L3	2.05	W3	6.00
H5	4.35	L4	2.34	W4	7.90
H6	2.68	L5	1.84	W5	17.55
H7	2.04	L6	2.19	t	1.27

그림 8은 최종 설계된 방사기의 반사계수를 보여준다. 효율적으로 설계된 방사기는 5.3-22.1GHz의 범위에서 -10dB 이하의 반사계수 특성을 보인다. 유전체 돌출부의 길이를 증가시키고 3개 이상의 계단형 정합 구조를 적용할 경우 차단 주파수인 2.11에 더욱 근접하게 할 수 있겠지만 이 경우 방사기의 길이가 증가하여 소형화의 장점을 잃게 될 것이다.

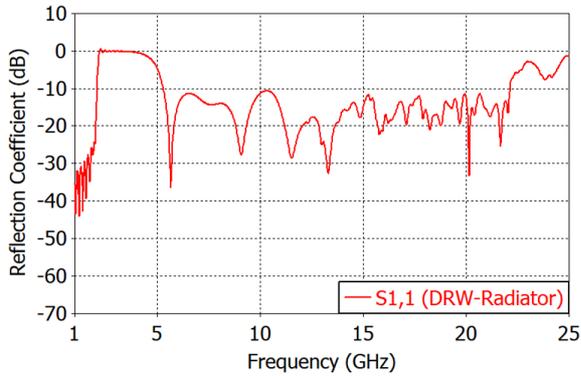


그림 8. 설계된 방사기의 반사계수

Fig. 8. Reflection coefficient of the designed radiator

III. 결 론

광대역, 레이더 및 통신 시스템의 범용성을 고려한 광대역 안테나의 수요가 증가하고 있다. 본 논문에서는 이러한 수요에 부응하여 5.3-22.1GHz에서 동작하는 이중 리지 도파관 방사기를 설계하였다. 광대역 동작을 위해 이중 리지 도파관을 사용하였으며 동작 주파수를 감소시키기 위해 도파관 내부를 유전상수 5인 물질로 채웠다. 유전체 장하 이중 리지 도파관 개구의 임피던스 정합을 위해 개구 부근에서 4계단 변환기를 적용하여 개구 밖으로 돌출되는 유전체의 길이를 개선하였다. 유전체 돌출부에 2계단 변환기를 적용하여 상기 주파수 범위에서 반사계수가 -10dB 이하인 광대역(비율 대역폭 $22.1/5.3=4.17$) 방사기를 설계하였다. 본 연구의 결과는 4 대 1 이상의 광대역 특성이 요구되는 배열 안테나 소자, 통신용 안테나 소자, 근접전계 안테나 측정용 프로브로서 유용하게 사용될 수 있으리라 판단된다.

References

- [1] H.-S. Lee, K.-H. Kim, J.-Y. Min, S.-K. Kim, J.-W. Oh, J.-H. Kim, and B.-C. Ahn, "Design of a broadband choke ring feed for prime focus reflectors", *J. KIIT*, Vol. 22, No. 12, pp. 103-109, Dec. 2024. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2024.22.12.103>.
- [2] J. Moreira, S. Churkin, and J. Hesselbarth, "A double-ridged waveguide design for 5G mmWave applications", *Proc. Asia-Pac. Microw. Conf. (APMC)*, Yokohama, Japan, pp. 824-826, Nov.-Dec. 2022. <https://doi.org/10.23919/APMC55665.2022.9999934>.
- [3] S. Manafi, M. Al-Tarifi, and D. S. Filipovic, "Millimeter-wave double-ridge waveguide and components", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, Vol. 66, No. 11, pp. 4726-4738, Nov. 2018. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2018.2864671>.
- [4] S. Lee, Y. Yang, K.-Y. Lee, K.-Y. Jung, and K. C. Hwang, "Robust design of 3D-printed 6-18 GHz double-ridged TEM horn antenna", *Appl. Sci.*, Vol. 8, No. 9, pp. 1582, Sep. 2018. <https://doi.org/10.3390/app8091582>.
- [5] A. Mehrdadian, H. Fallahi, M. Kaboli, and S. A. Mirtaheeri, "Design and implementation of 0.7 to 7 GHz broadband double-ridged horn antenna", *Proc. 7th Int. Symp. Telecom.*, Tehran, Iran, pp. 250-253, Sep. 2014. <https://doi.org/10.1109/ISTEL.2014.7000707>.
- [6] F. Filice, et al., "3-D printed high-efficiency wideband 2x2 and 4x4 double-ridged waveguide antenna arrays for Ku-band satcom-on-the-move applications", *Proc. 14th Euro. Conf. Antennas Propag. (EuCAP)*, Copenhagen, Denmark, Mar. 2020. <https://doi.org/10.23919/EuCAP48036.2020.9135680>.
- [7] S. Wang and A. Hessel, "Aperture performance of a double-ridge rectangular waveguide in a phased array", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 26, No. 2, pp. 204-211, Mar. 1978. <https://doi.org/10.1109/TAP.1978.1141817>.
- [8] C. C. Chen, "Octave band waveguide radiators for wide-angle scan phased arrays", *Proc. IEEE AP-S Int. Symp.*, Boulder, CO, USA, pp. 376-378, Apr. 1973. <https://doi.org/10.1109/APS.1973.1147147>.
- [9] J. P. Montgomery, "Ridged waveguide phased array elements", *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 24, No. 1, pp. 46-51, Jan. 1976.

- <https://doi.org/10.1109/TAP.1976.1141297>.
- [10] Z. Fang and X. Ma, "The design of Ku-band wide bandwidth and wide angle scanning double-ridged waveguide antenna", Proc. IEEE 11th Asia-Pacific Conf. Antennas Propag. (APCAP), Guangzhou, China, pp. 100-105, Nov. 2023. <https://doi.org/10.1109/APCAP59480.2023.10470019>.
- [11] M. Mirzaee, A. Mirbeik-Sabzevari, and N. Tavassolian, "15-40 GHz and 40-110 GHz double-ridge open-ended waveguide antennas for ultra-wideband medical imaging applications", IEEE Open J. Antennas Propag., Vol. 2, pp. 599-611, May 2021. <https://doi.org/10.1109/OJAP.2021.3078886>.
- [12] C. Marchal and P. Bey, "Development of large ridged-waveguide operating at 27 MHz for deep heating", Proc. Annual Int. Conf. IEEE Eng. in Med. and Biolog. Soc., New Orleans, LA, USA, pp. 10-15, Nov. 1988. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.1988.95159>.
- [13] M. Mirzaee and Y. Kim, "Analysis of ultra-wideband double-ridge open-ended waveguide antennas for millimeter-wave communications", Proc. IEEE AP-S Int. Symp., Denver, CO, USA, pp. 540-541, Jul. 2022. <https://doi.org/10.1109/AP-S/USNC-URSI47032.2022.9886358>.
- [14] J.-I. Moon and J.-H. Yun, "The design of broadband probe for efficient near field measurements", IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., Vol. 6, pp. 440-443, Sep. 2007. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2007.904713>.
- [15] D. Baker and C. V. D. Neut, "A compact broadband balanced transmission line antenna derived from double-ridged waveguide", Proc. IEEE AP-S Int. Symp., Albuquerque, NM, USA, pp. 568-571, May 1982. <https://doi.org/10.1109/APS.1982.1148767>.
- [16] M. Q. E. Maula, L. Shafai, and Z. A. Pour, "Dielectric loaded circular waveguide feeds", Proc. Int. Symp. Antenna Tech. Appl. Electromag., Victoria, BC, Canada, pp. 534-537, Jul. 2014. <https://doi.org/10.1109/ANTEM.2014.6887675>.
- [17] S. Xu, J. Heo, B.-K. Ahn, C.-S. Lee, and B.-C. Ahn, "Simulation-based approach to the matching of a dielectric-filled circular waveguide aperture", Sensors, Vol. 24, No. 3, pp. 841, Jan. 2024. <https://doi.org/10.3390/s24030841>.
- [18] T.-S. Chen, "Calculation of the parameters of ridge waveguides", IEEE Trans. Microw. Theory Tech., Vol. 4, No. 1, pp. 12-14, Jan. 1956. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1957.1125084>.
- [19] W. J. R. Hoefler and M. N. Burton, "Closed-form expressions for the parameters of finned and ridged waveguides", IEEE Trans. Microw. Theory Tech., Vol. 30, No. 12, pp. 2190-2196, Dec. 1982. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1982.1131406>.
- [20] M. A. Morgan and T. A. Boyd, "A 10-100 GHz coax to double-ridged waveguide launcher and horn antenna", IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. 69, No. 2, pp. 324-331, Feb. 2023. <https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2439697>.

저자소개

김 선 각 (Sun Kak Kim)



1995년 8월 : 충북대학교
경영학과(학사)
2016년 2월 : 충북대학교
나노반도체공학(석사)
2019년 3월 ~ 현재 : 충북대학교
전파통신공학과 박사과정
2015년 5월 ~ 현재 :

(주)네오세미텍 대표이사

관심분야 : 전자회로, 유무선통신, 반도체

김 기 흥 (Ki-Hong Kim)



2002년 2월 : 동국대학교
컴퓨터공학전공(학사)
2016년 8월 : 충북대학교
전파통신공학전공(석사)
2023년 2월 ~ 현재 : 충북대학교
전파통신공학전공 박사과정
2004년 2월 ~ 현재 : KG모빌리티

기술연구소 책임연구원

관심분야 : 안테나, 전자파 응용

허 지 원 (Jiwon Heo)



2020년 2월 : 충북대학교
전파통신공학전공(석사)
2024년 8월 : 충북대학교
전파통신공학전공(공학박사)
2024년 10월 ~ 현재 : 충북대학교
산업인공지능연구센터 연구원
관심분야 : 안테나, RF, 전자파 응용

박 민 기 (Minki Park)



2022년 3월 : 한밭대학교
정보통신공학과(학사)
2021년 9월 ~ 2023년 12월 :
(주)두타기술 연구원
2024년 1월 ~ 현재 :
(주)에이팜스페이스 주임연구원
관심분야 : 안테나

방 재 훈 (Jea-Hoon Bang)



1997년 2월 : 충북대학교
전파공학과(공학사)
1999년 2월 : 충북대학교
전파공학과(공학석사)
2003년 8월 : 충북대학교
정보통신공학과(공학박사)
2003년 9월 ~ 2007년 12월 :

(주)극동통신 선임연구원

2008년 1월 ~ 2009년 12월 : 한국과학기술원 연구교수

2010년 1월 ~ 2015년 12월 : 충북대학교 전파통신공학과
초빙교수

2016년 1월 ~ 2023년 9월 : (주)두타기술 수석연구원

2024년 10월 ~ 현재 : (주)에이팜스페이스 대표

관심분야 : 전자장 계산 이론, 무선통신기기, 안테나 설계

안 병 철 (Bierng-Chearl Ahn)



1992년 12월 : University of
Mississippi 전기전자공학과(박사)

1992년 12월 ~ 1995년 2월 :
국방과학연구소 선임연구원

1995년 3월 ~ 현재 : 충북대학교
전파통신공학과 교수

관심분야 : 안테나, 전자파 응용