THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2025 January; 36(1), 10～20.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2025.36.1.10
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

짧은 길이에서도 높은 개구 효율 및 전력 처리 용량을 갖는 저자세 그릴형 누설파 도파관 안테나

Low-Profile Grill-Type Leaky Waveguide Antenna with High Aperture Efficiency and Power Handling Capacity in Short Channel

김동현 · 박찬영* · 서동근** · 윤익재*** · 윤영중*

Donghyun Kim · Chan Yeong Park* · Donggen Seo** · Ick-Jae Yoon*** · Young Joong Yoon*

요 약

본 논문에서는 전기적으로 짧은 채널 길이에서도 높은 개구 효율과 전력 처리 용량을 갖는 그릴형 누설파 도파관 안테나가 제안된다. 제안된 안테나는 최대의 개구 효율을 위해 설계 파라미터들에 대한 안테나 방사 성능 변화의 관찰이 진행되며 설계된 그릴형 누설파 도파관 안테나의 측벽 보조 구조를 제안해 효율적으로 누출량을 늘려 8 λ의 전기적으로 짧은 안테나 길이에서도 단일 채널 122 %의 개구 효율을 구현하며, 4채널 섹터 도파관 분배기를 결합해 높은 안테나 이득을 구현한다. 또한, 높은 전력 처리 용량 확보를 위해 설계된 안테나의 도파관 내부는 RF 윈도우를 통해 진공 밀봉되며 안테나 주변을 포함한 2, 3중점에서 전계 분포 분석을 통해 1.46 GW의 이론적인 전력 처리 용량이 구현된다. 제안된 안테나는 실제 제작되어 근접 전계 측정을 통해 약 81 %의 높은 개구 효율이 실험적으로 검증된다.

Abstract

In this paper, a grill-type leaky waveguide antenna with a high aperture efficiency and power handling capacity, even with an electrically short channel length, is proposed. To obtain the maximum aperture efficiency of the proposed antenna, variations in the antenna radiation performance were observed for the design parameters. The sidewall auxiliary structure design of the designed grille-type leaky waveguide antenna effectively increased the leakage amount to realize an aperture efficiency of 122 % for a single channel, even with an electrically short antenna length of 8 λ, and the 4-channel sectorial waveguide divider was combined to realize high antenna aperture efficiency and gain. In addition, the inside of the waveguide of the antenna designed to secure high power handling capacity is vacuum-sealed through an RF window, and the proposed antenna, through the field distribution analysis at triple points, including around the antenna, has a theoretical power processing capacity of 1.46 GW. The proposed antenna was fabricated, and its high aperture efficiency was experimentally verified through a near-field test.

Key words: Grill-Type Leaky Waveguide Antenna, Power Handling Capacity, Short Channel

「이 연구는 국방과학연구소(Agency for Defense Development) 연구비의 지원으로 연구되었음.」

한화시스템 위성시스템 2팀(Satellite System Team 2, Hanwha Systems)
*연세대학교 전기전자공학과(Department of Electrical Electronic Engineering, Yonsei University)
**국방과학연구소(Agency for Defense Development)
***충남대학교 전기공학과(Department of Electrical Engineering, Chungnam National University)

· Manuscript received September 23, 2024 ; Revised October 10, 2024 ; Accepted December 22, 2024. (ID No. 20240923-099)

· Corresponding Author: Young Joong Yoon (e-mail: yjyoon@yonsei.ac.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Ⅰ. 서 론

고출력 전자기파를 방출시키기 위한 고출력 안테나는 목표하는 출력 전력, 주파수 대역, 그리고 하드웨어 플랫폼(platform)에 따라 다양한 형태로 연구되어왔다. 하지만, 특정한 주파수에서 임의의 목적을 갖는 고출력 안테나에 대한 국내외 연구는 공개가 어려우며, 특히 얇은 하드웨어 플랫폼 내 실장 가능한 저자세(low-profile) 고출력 안테나는 그 연구 수도 매우 적다. 따라서, 저자세 고출력 안테나에 대한 국내 연구 기술을 확보할 필요가 있다.

안테나의 타입 선정에 앞서 대표적인 고출력 안테나로는 Vlasov[1], EZ[2], mode-transducing[3] radial line helical array[4], 포물면 반사체(parabolic reflector)[5], 그리고 reflectarray[6] 안테나 등이 있다. Vlasov 및 EZ 안테나는 낮은 이득, mode-transducing 안테나는 낮은 전력 처리 용량(PHC, power handling capacity)으로 목표하는 안테나 선정으로 적합하지 않다. 또한, 높은 이득 및 PHC를 갖는 radial line helical array, papabolic, 그리고 reflectarray 안테나는 매우 큰 부피를 차지해 저자세 구조로는 적절하지 않다. 더 작은 부피로 높은 이득 및 PHC를 구현할 수 있는 안테나로는 slotted waveguide[7], radial line slot array[8], 그리고 series fed horn array 안테나[9] 등이 있다. 하지만, slotted waveguide 안테나는 높은 PHC를 위한 진공 밀봉 시 RF 윈도우(window) 설치에 어려움이 있고, radial line slot array 안테나는 급전 구조를 고려 시 부피가 매우 커지는 단점이 있다. 특히, series fed horn array 안테나는 구조적으로 이러한 문제들에 다소 자유롭지만 높은 이득을 구현하기 위해 높은 flare angle이 필요해 부피가 커지는 단점이 있다.

이러한 문제들에 자유로울 수 있는 구조로 누설파 도파관 안테나(LWA, leaky waveguide antenna)가 있다. LWA는 매우 작은 부피로 높은 이득과 높은 PHC를 가질 수 있으며 다양한 하드웨어 플랫폼에 실장 가능하다. 기 연구된 고출력 LWA의 종류는 그릴(grill)[10]과 슬롯(slot)[11] 타입으로 나뉜다. 그릴형 고출력 LWA는 매우 높은 개구 효율(aperture efficiency)을 갖지만 이를 위해 안테나의 전기적 길이가 중심 주파수를 기준으로 약 26 파장(wave length)으로 매우 길어 플랫폼 내 공간적 제한에서 자유롭지 못하다. 슬롯형 고출력 LWA는 더 낮은 높이를 갖고 안테나 전체 길이가 약 12 파장으로 개구효율은 앞선 타입에 비해 낮지만 공간적 제한에서 자유롭다. 하지만, 고출력 동작을 위한 RF 윈도우가 슬롯과 닿지 않아야 하기 때문에 추가적인 유전체 지지구조가 요구된다. 이러한 유전체 지지구조는 진공 압력에 의한 변형(deformation)과 외부 충격에 취약하고 안테나 전체 높이를 증가시킨다.

본 연구에서는 짧은 길이에서 높은 개구 효율을 갖는 그릴형 LWA에 대해 연구한다. 그릴형 LWA의 여러 가지 설계 파라미터들에 따른 방사 성능 및 에너지 누설량 변화에 대해 관찰하고 짧은 길이에서도 누설량을 증가시켜 개구 효율을 향상 시킬 수 있는 새로운 구조를 제안한다. 또한, 섹터 도파관 분배기를 통해 4채널 LWA로 결합되며 RF 윈도우를 통해 진공 밀봉 및 2, 3중점 분석을 통해 이론적으로 높은 PHC를 구현한다. 또한, 안테나 방사 성능 검증을 위해 실제 제작된 안테나의 근접 전계 측정이 진행된다.

Ⅱ. 단일 채널 그릴형 LWA

2-1 LWA 이론

그림 1의 LWA는 진행파(traveling wave) 안테나의 한 종류로 도파관 내에서 전달되는 파동이 임의의 개구면(aperture)에서 진행될 때 fast-wave 모드의 전자계 필드(electro- magnetic field)가 개구면 위로 누출되며 방사되는 원리를 갖는다. 도파관 개구면 내 진행파의 종축(longi-

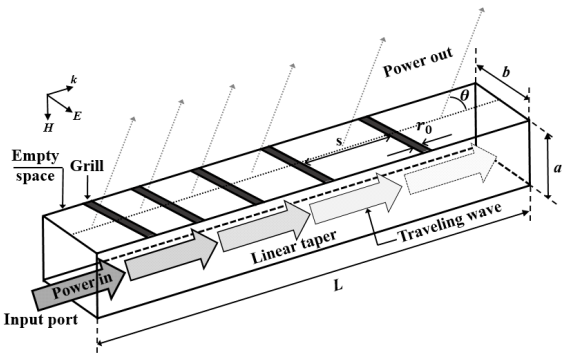


그림 1. 그릴형 누설파 도파관 안테나 구조
Fig. 1. Structure of leaky waveguide antenna.

tudinal) 복소수 파수 (complex wavenumber)는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다(시간-고조파 규칙 e^{jwt} 가정).

$$k_z = \beta - j\alpha \tag{1}$$

β, α는 각각 위상 상수(phase constant)와 감쇠 상수(attenuation constant)로 실수이며 각각 주 빔의 방향 및 빔폭(beam-width)를 결정한다. 또한, 도파관 개구면 위에서 필드는 Helmholtz 방정식을 통해 횡축(transverse) 파수로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$k_x = \pm\sqrt{k_0^2 - k_z^2} = \beta_x - j\alpha_x \tag{2}$$

도파관 위 필드가 방사되기 위해서는 식 (2)의 횡축 파수가 실수가 되어야 한다(fast-wave). 하지만, 순방향 진행파(β>0) 조건에서 fast-wave 모드가 존재한다면 α_x<0이 성립되어 방사 조건(radiation condition)에 부합하지 않지만 실제로는 순방향으로 방사한다. 이러한 비물리적인 현상 문제는 참고문헌 [12] 및 참고문헌 [13]에 의해 횡축 공진(transverse resonance)을 통한 섭동법(perturbation solution)으로 해결된다. LWA의 개구면은 균일(uniform) 및 주기(periodic)의 두 가지 구조로 설계할 수 있다. 두 구조의 가장 큰 특징은 원하는 빔을 형성하기 위한 α와 β 의 설계 자유도이다. 주기 구조의 LWA가 더 높은 자유도를 가지며 이것의 종축 파수는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_{z,n} = k_{z,0} + \frac{2\pi n}{p} \tag{3}$$

여기서 n은 모드의 수이고 p는 (위치에 대한) 주기를 의미한다. Fast-wave 모드는 n=−1에서 횡축 파수가 실수로 존재할 수 있어 발생한다. 또한, 주기 p는 개구면 위에서 임의의 도체 구조를 주기를 갖도록 설계해 조절할 수 있다. 여기서 RE[$k_{z,-1}$]은 식 (1)의 β이고 파수 벡터(wavenumber vector) 관계에 따라 주 빔 방향이 식 (4)와 같이 결정된다[14].

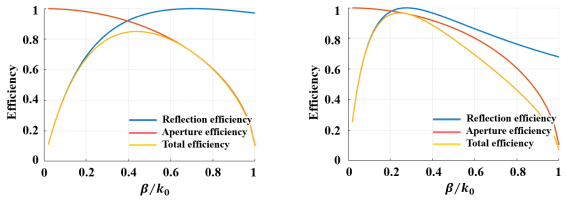
$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{\beta}{k_0}\right) \tag{4}$$

2-2 그릴형 LWA 원리 및 구조 매개변수

본 연구의 그릴형 LWA는 높은 전력 처리 용량이 확보되어야 하며 진행파 안테나이기 때문에 full-metal 구조인 직사각형 도파관을 기반으로 설계된다. 기본적으로 그릴형 LWA 구조는 방사를 위해 개구면이 시작되는 직사각형 도파관의 한 방향 옆면을 열어주고 일정하지 않은 주기를 갖는 그릴 구조를 배열하여 fast-wave가 발생돼 에너지가 누출되어 방사될 수 있는 구조가 된다(그림 1). 이러한 LWA의 총 효율(total efficiency)은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다[15].

$$\eta = e_r e_{ap} = \left(1 - \left|\frac{\sqrt{k_0^2 - (\pi/a)^2} - \beta}{\sqrt{k_0^2 - (\pi/a)^2} + \beta}\right|^2\right)\sqrt{1 - \left(\frac{\beta}{k_0}\right)^2} \tag{5}$$

여기서 e_r은 반사 효율, e_{ap}는 개구 효율, k_0는 자유공간 파수, a는 도파관의 너비, β는 누설파 위상 상수이다. 식 (5)에 의하면 임의의 도파관 너비 a를 갖는 LWA의 반사 및 개구 효율은 β의 변화에 서로 반대되는 관계를 가진다. 이러한 관계를 식 (4)와 함께 고려하면 도파관 너비 a에 따라 가장 높은 총 효율을 갖는 주 빔 방향이 결정됨을 알 수 있다. 해당 관계를 고려하여 본 연구에서는 표준 도파관 WR340A를 기반으로 서로 다른 도파관 너비의 두 비교군을 비교한다. 먼저, 표준 도파관의 너비는 88 mm로 비교군 1로 선정하였다. 또한, 직사각형 도파관 내 기본 모드인 TE10 mode가 감쇠 없이 진행하기 위해서는 도파관 너비 $a > \lambda_0/2$ 조건을 만족해야 하므로 해당 조건의 경계에 근접한 도파관 너비 65 mm를 비교군 2로 선정하여 그림 2에서 두 비교군의 총 효율을 비교한다. 비교군 1의 최대 효율은 $\beta/k_0 = 0.44$에서 약 84 %로 나타나며 해당 빔 각도 θ는 약 26.1도이다(그림 2(a)). 비교군 2에 대한 최대 효율은 $\beta/k_0 = 0.24$에서 약 95 %로 나타나며 해



(a) 비교군 1 (b) 비교군 2
(a) Group 1 (b) Group 2

그림 2. 도파관 너비에 따른 안테나 효율
Fig. 2. Antenna efficiency according to the waveguide width.

당 빔 각도 θ는 약 13.9도이다(그림 2(b)). 관찰된 결과를 기반으로 본 연구에서는 더 높은 효율을 얻을 수 있으며 안테나의 저자세 측면에서 장점을 갖는 도파관 너비 65 mm를 선택했다.

LWA는 진행파 안테나로서 여러 가지 손실 메커니즘을 통해 전파가 진행됨에 따라 총 전력은 감소한다. 높은 개구 효율을 구현하기 위해서는 LWA의 개구면 위에 누출되는 에너지가 균일하게 분포하여야 한다. 이를 위해서는 총 전력에 대한 방사 전력의 비율이 거리에 따라 증가해야 한다. 이러한 메커니즘으로 도파관 길이에 따른 필요 감쇠 상수는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다[15].

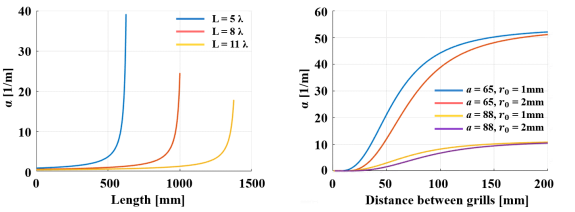
$$\alpha(z) = -\frac{P'(z)}{2P(z)} = \frac{1}{2L} \times \frac{1}{\frac{1}{1-r} - \frac{z}{L}} \tag{6}$$

여기서 $P(z)$와 $P'(z)$는 위치에 따른 진행파 전력과 그 도함수, L은 도파관 길이, r은 안테나 끝단에서 최종 전력 비율을 의미한다. 식 (6)의 감쇠 상수는 r이 0으로 갈수록 무한으로 접근함으로 끝단에서 전달되는 전력이 0임을 알 수 있다. 그림 3(a)에서는 본 연구에서 설계하는 도파관 길이를 선정하기 위해 식 (6)을 기반으로 여러 가지 도파관 길이에 대한 감쇠 상수 분포를 나타낸다(r= 0.02).

전체 도파관 길이는 중심 주파수를 기준으로 11 파장 내에서 관찰한다. 도파관 길이가 길수록 평균적으로 낮은 감쇠 상수값이 요구되며, 도파관 길이의 끝으로 갈수록 높은 감쇠 상수가 요구된다. 특히, 짧은 도파관 길이를 가질수록 급격한 감쇠 상수 값의 변화가 요구된다. 이러한 감쇠 상수를 그릴형 LWA의 설계 파라미터들을 통해 구현한다면 그 관계를 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다[15].

$$\alpha(s) = \frac{\lambda_{g0}}{2a^2} \frac{1}{1 + \left(\frac{2a}{s \ln \frac{s}{2\pi r_0}}\right)^2} \tag{7}$$

λ_{g0}는 관내 파장(guided wavelength), s는 그릴 간 거리, r_0는 그릴의 반지름을 의미한다. 그림 3(b)는 앞서 비교군으로 두었던 두 도파관 너비 a 및 그릴 반지름 r_0에 따른 감쇠 상수를 나타낸다. 이러한 도파관 너비가 작을수록 (a=65 mm) 더 작은 그릴 간 거리 s로 더 높은 감쇠 상수를 얻을 수 있어 공간 분해능 측면에서 유리하다. 해당 결과를 그림 3(a)와 함께 고려하면 도파관 길이 5 λ의 끝단에서 요구되는 감쇠 상수 약 39를 구현하려면 그릴 간 거리 약 80~100 mm가 요구된다. 전체 도파관 길이에 비해 이러한 큰 그릴 간 거리는 부정확한 도파관 길이에 따른 감쇠 상수 분포를 만들어 안테나 성능에 악영향을 미친다. 도파관 길이 8 λ과 11 λ 각각 끝단에서 요구되는 감쇠 상수(약 24 및 18)는 상대적으로 작은 차이를 보여 본 연구에서는 도파관 길이를 8 λ, 그릴의 반지름은 작을수록 더 높은 감쇠 상수를 얻을 수 있어 r_0=1 mm를 선택해 설계한다.



(a) 총 길이
(a) Total length

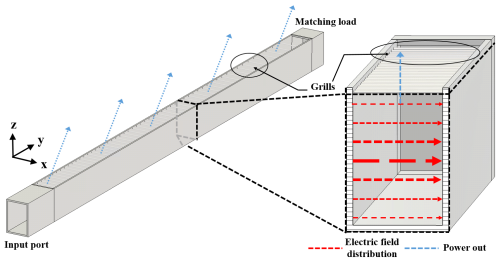
(b) 도파관 너비 및 그릴 반지름 별 그릴 간 간격
(b) Distance between grills by waveguide width and grill radius

그림 3. LWA 설계 파라미터에 따른 감쇠 상수
Fig. 3. Attenuation constants according to the LWA design parameters.

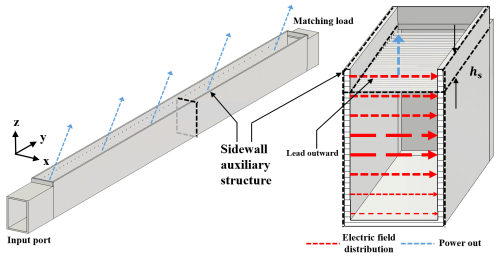
2-3 측벽 보조 구조가 적용된 그릴형 LWA 설계

일반적으로 그릴형 LWA의 방사는 개구면 내부를 진행하면서 에너지가 누출되어야 하며 에너지 누출이 충분히 이루어지지 않는다면 낮은 안테나 이득 및 끝단에서의 반사로 큰 부엽 문제 등을 겪게 되어 일반적으로 매우 긴 안테나 길이가 요구된다[10]. 특히, 이러한 문제는 복잡한 구조가 적용 가능한 다른 응용에서와 달리 고출력 동작을 위한 full-metal 구조의 그릴형 LWA에서는 해결이 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 짧은 안테나 길이에서 누출량 증대를 위한 측벽 보조 구조를 제안한다.

그림 4는 식 (6) 및 식 (7) 및 앞선 분석 결과를 통해



(a) 기본형
(a) Conventional



(b) 측벽 보조 구조
(b) Sidewall auxiliary structure

그림 4. 단일 채널 누설파 도파관 안테나 구조
Fig. 4. Single channel leaky wave waveguide antenna structures.

설계된 기본적인 그릴형 LWA 구조와 측벽 보조 구조를 나타낸다. 두 구조의 비교 설계 파라미터는 h_s이며 이것은 그릴로부터 확장된 도파관 너비를 의미한다. 설계된 구조들의 끝단에는 임의의 매칭 로드(matching load)가 적용된다. 그림 5 및 그림 6은 각각 h_s의 증가에 따른 산란 계수 및 방사 패턴 변화를 나타낸다. h_s가 12 mm인 경우에서 가장 높은 삽입 손실과 낮은 반사 계수를 나타내며, 최대 이득이 16.1 dBi에서 16.4 dBi로, 개구 효율이 114 %에서 122 %로 개선된다. 이러한 개구 효율 수치는 단일 널 기준 약 26 λ의 안테나 길이에서 116 %를 갖는 참고 문헌 [10]에 비해 매우 짧은 길이에서 더 높은 개구 효율을 갖는다. 또한, 100 % 이상의 개구 효율은 안테나의 fringing effect에 의한다[10]. 이러한 현상은 안테나가 배열 구조를 가지게 되면 물리적인 면적 대비 fringing effect가 약해지며 사라진다. 12 mm 이상의 h_s의 경우 산란 계수 및 방사 패턴 결과에서 추가적인 개선점을 얻을 수 없었으며 전체 안테나 높이를 증가시키므로 12 mm까지 분석을 진행하였다.

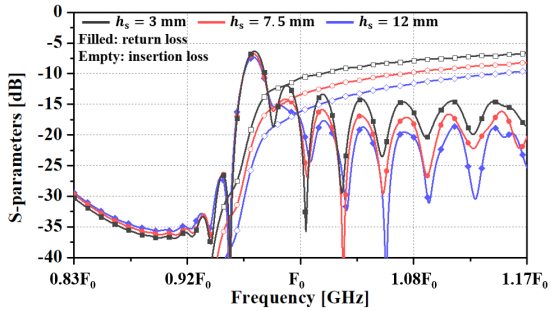


그림 5. 단일 채널 그릴형 LWA 산란 계수
Fig. 5. Scattering parameters of the single channel grill-type leaky waveguide antennas.

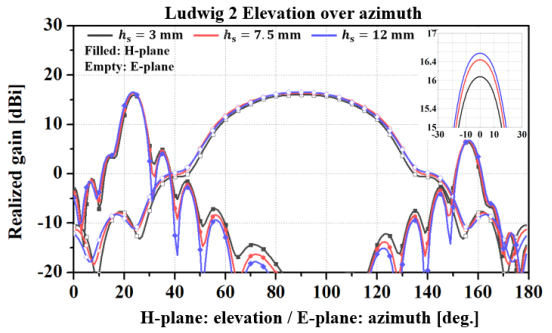


그림 6. 단일 채널 그릴형 LWA 방사 패턴
Fig. 6. Single channel grill-type leaky waveguide antenna radiation patterns.

이러한 안테나 성능 개선은 그릴형 LWA는 그 개구면에서 TE10 모드와 유사한 전계 분포 형상을 유지하며 에너지가 누출되는데, 제안된 측벽 보조 구조를 통해 해당 전계 분포를 개구면 위의 그릴 바깥까지 유도시켜 더 많은 에너지가 방사되었기 때문이다. 이것은 기본 구조와 측벽 보조 구조의 개구면 위 20 mm 지점에서 전계 분포를 확인해 더욱 명확히 확인할 수 있다(그림 7). 기본 구조는 안테나의 끝단에서 잉여 에너지들의 반사에 의해 균일하지 않은 전계 분포를 갖게되며 이것은 고출력 동작 관점에서 불리하고 개구 효율을 저감한다. 제안된 측벽 보조 구조의 경우 같은 안테나 길이에서 상대적으로 균일하며 더 높은 에너지 누출이 관찰된다. 또한, 두 구조의 전계 분포 단면도에서 안테나 내부의 전계 에너지가 끝단으로 갈수록 측벽 보조 구조에서 더 낮아지는 것으로 누출량이 증대됨을 확인할 수 있다(그림 8).

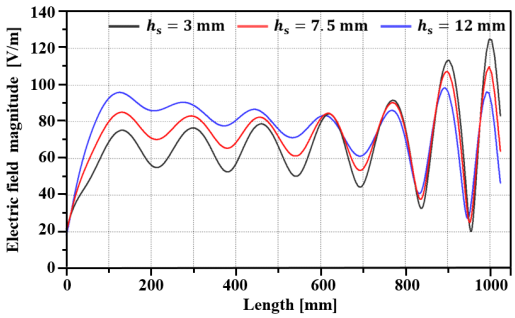
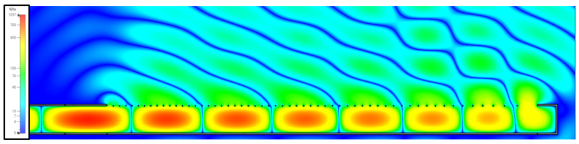
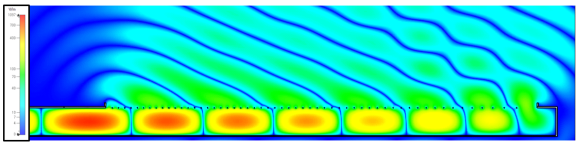


그림 7. 단일 채널 그릴형 LWA 위 20 mm 지점에서의 전계 분포(중심 주파수)
Fig. 7. Electric field distribution at 20 mm above single channel leaky waveguide antenna (center frequency).



(a) 기본형
(a) Conventional



(b) 측벽 보조 구조
(b) Sidewall auxiliary structure

그림 8. 단일 채널 그릴형 LWA의 단면 전계 분포도 (중심 주파수)
Fig. 8. Section view of electric field distribution of single-channel grill-type LWA (center frequency).

Ⅲ. 4 채널 누설파 안테나 설계

3-1 4방향 섹터 도파관 분배기 설계

특정 플랫폼 내 제한된 길이 내에서 높은 이득을 구현하기 위해서는 다채널 LWA 설계가 필요하다. 다채널 그릴형 LWA를 위한 급전 구조는 섹터 도파관 분배기 구조가 있다(그림 9). 본 연구에서는 4채널 구조의 도파관 분배기를 설계한다. 섹터형 도파관 분배기는 3 채널 이상 전력 분배가 필요한 경우 경로 간 위상 차이를 보상할 수 있는 위상 조정 설계가 필요하다. 도파관 너비에 따른 위

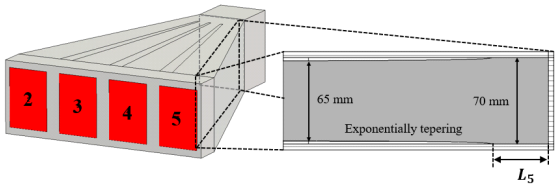


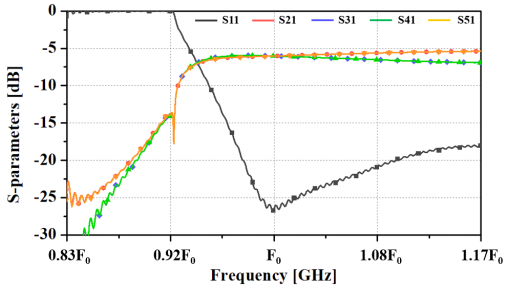
그림 9. 4방향 섹터 도파관 분배기 구조
Fig. 9. 4-way sectorial waveguide divider.

상 차이는 식 (8) 및 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

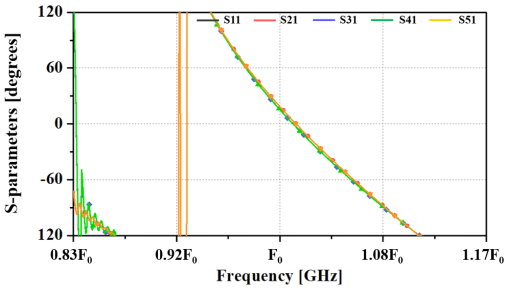
$$\beta = \sqrt{k_0^2 - (\pi/a)^2} \tag{8}$$

$$\Delta\phi = (\beta_1 - \beta_2)(L_2 - L_1) \tag{9}$$

L_n은 각 도파관 채널의 테이퍼링 되기 전 길이를 의미한다. 설계된 섹터 도파관 분배기의 산란 계수는 중심 주파수에서 −27 dB의 반사 계수 및 −6.02 dB에서 0.01 dB 이하의 채널 간 오차를 보인다(그림 10(a)). 위상의 경우



(a) 크기
(a) Amplitude



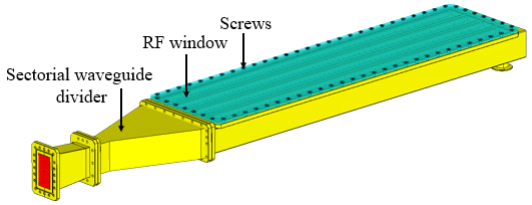
(b) 위상
(b) Phase

그림 10. 4방향 섹터 도파관 분배기 산란 계수
Fig. 10. Scattering parameters of the 4-way sectorial waveguide divider.

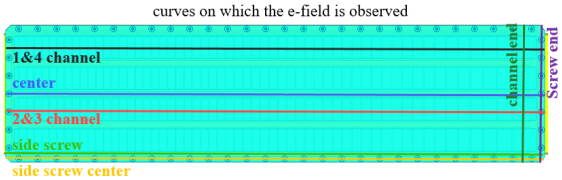
약 3.3도 이하의 오차를 보인다(그림 10(b)).

3-2 RF 윈도우 및 4채널 누설파 안테나 설계

4방향 섹터 도파관 분배기와 누설파 도파관 안테나를 결합한 안테나가 그림 11(a)에 나타난다. 높은 PHC를 얻기 위해 제안된 안테나 구조는 RF 윈도우로 진공 밀봉된다. RF 윈도우는 안테나 성능에 영향이 가지 않도록 하기 위해 얇은 두께로 진공 압력을 버틸 수 있도록 설계 되어야한다. 가장 중요한 설계 파라미터는 재질의 탄성 계수(eleastic modulus)와 진공 밀봉되는 면적이다. 본 연구에서 제안된 측벽 구조는 RF 윈도우가 그릴에 닿지 않고 단일 채널 내 좁은 면적으로 진공 밀봉될 수 있다. 설계된 안테나의 반사 계수는 중심 주파수에서 약 −22 dB, 최대 이득은 주 빔 방향 21도에서 22.6 dBi로 방사 효율 약 82 %로 나타난다(그림 12). RF 윈도우가 적용된 후 반사 계수와 최대 이득이 증가된 이유는 측벽 보조 구조의 에너지 누출량 증가와 비슷한 원리로 얇은 유전체가 개구면에 위치하면서 필드가 유전체 방향으로 더 몰리는 특성으로 인한다. 안테나의 전력 처리 용량은 안테나 내부, RF윈도우-공기 경계면에서 전계 세기, 그리고 안테나 도체 표면 처리 세 가지로 나눠서 고려된다. 본 연구에서 안

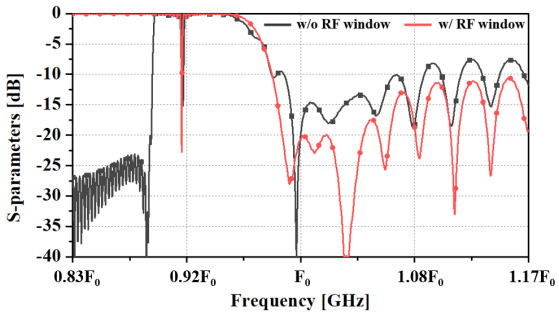


(a) 전체 구조
(a) Overall structure

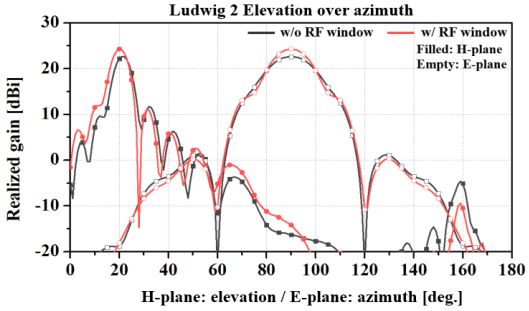


(b) RF 윈도우 전계 프로브
(b) Field probes on the RF window

그림 11. 4채널 그릴형 누설파 도파관 안테나
Fig. 11. 4-Channel grilled leaky waveguide antenna.



(a) 반사 계수
(a) Return loss



(b) 방사 패턴
(b) Radiation patterns

그림 12. 4채널 그릴형 도파관 누설파 안테나 성능
Fig. 12. Performance of the 4-channel grilled leaky waveguide antenna.

테나 내부는 진공 밀봉되었기 때문에 2, 3번째 문제가 고려되어야 한다. RF 윈도우-공기 경계면에서 전계 세기는 공기의 임계전압 3 MV/m를 기준으로 식 (10)으로 전력 처리 용량이 계산된다[16].

$$PHC = \left(\frac{E_{b,peak}}{E_0} \right)^2 P_0 \tag{10}$$

여기서 PHC는 전력 처리 용량(power handling capacity), $E_{b,peak}$는 최대 임계 전계, E_0는 최대 전계 세기, 그리고 P_0는 입력 전력을 의미한다. 3번째 고려 사항은 안테나 표면의 식 (11)과 같은 표면 처리 정도에 따른 정전파괴 예측 식으로 PHC가 계산된다.

$$E_s \exp(-4.25/E_s) \simeq 24.4\sqrt{f(GHz)}\ [MV/m] \tag{11}$$

여기서 E_s는 surface breakdown이 발생하는 전계값이다.

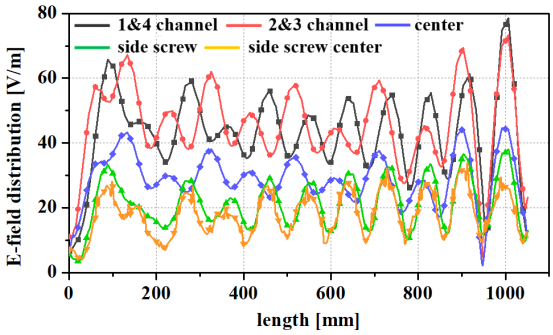
안테나 표면의 최대 임계 전압은 주파수에 비례한다. 또한, 그림 12(b)와 같이 설계된 안테나를 입력 전력 1 W에서 full-wave 시뮬레이션을 진행하고 가장 위험한 포인트인 RF 윈도우-공기-도체 경계면(삼중점)들에서 전계 프로브를 설정하였다. 채널 길이 및 너비 방향에서 최대 전계 세기는 1, 4 채널의 끝단에서 발생하며 약 78.6 V/m로 나타난다(그림 13(a)). 이러한 결과를 기준으로 PHC는 식 (10)에 의해 약 1.46 GW이다. 또한, 디바이더를 포함한 안테나 내부에서 최대 전계 세기는 약 1,026 V/m로 같은 방식의 전력 처리 용량 계산으로 식 (11)에 의해 임계 전압 42.3 MV/m, 식 (10)에 의해 PHC는 1.7 GW로 나타난다. 결론적으로 4 채널 누설파 안테나의 전력 처리 용량은 약 1.46 GW이다.

Ⅳ. 안테나 제작 및 측정

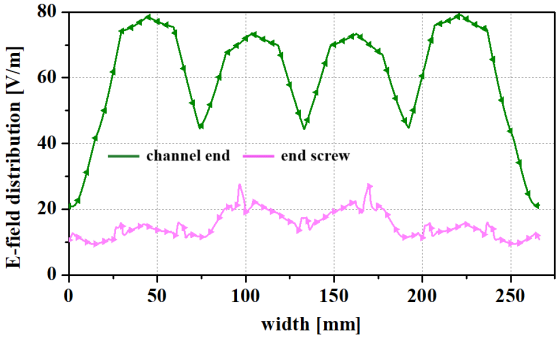
본 논문에서 설계된 고출력 그릴형 누설파 도파관 안테나의 방사 성능을 검증하기 위해 안테나 제작 및 성능 측정(cold test)을 진행하였다. 그림 14는 제작된 4 채널 안테나의 사진을 보여준다. RF 윈도우, 그릴형 방사체, 그리고 분배기로 구성된다(그림 14(a)). RF 윈도우와 방사체는 나사를 통해 체결되며 안테나 끝단에는 진공 펌프(vaccum pump)가 위치한다. 제작된 그릴형 누설파 도파관 안테나는 그림 14(b)에서와 같은 측정 환경에서 방사 성능 측정이 진행되었다. 그림 15(a)에 나타나는 측정된 반사 계수는 중심 주파수에서 약 −25 dB로 시뮬레이션 결과와 매우 유사하게 나타났다. 그림 15(b)은 측정된 방사 패턴이다. 제작된 안테나의 최대 이득은 주 빔 방향 20도에서 22.5 dBi, 개구 효율 81 %로 시뮬레이션 결과와 유사하게 나타났다. 본 논문에서 연구된 고출력 안테나는 추후 전력 처리 용량 성능을 검증하기 위해 고출력 테스트(hot test)를 진행할 계획이다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 전기적으로 짧은 길이에서도 높은 개구 효율 및 전력 처리 용량을 갖는 그릴형 누설파 도파관 안테나가 제안된다. 최대 안테나 효율을 얻을 수 있는 그릴형 누설파 도파관 구조를 구현하기 위해 안테나의 설계 파라미터들에 대한 분석이 진행되며 그에 따라 적합한 도파관 크기가 결정된다. 제안된 측벽 보조 구조는 효율

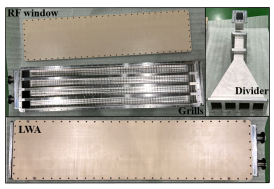


(a) 길이 방향
(a) Longitudinal direction

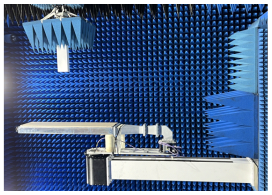


(b) 너비 방향
(b) Width direction

그림 13. 4채널 그릴형 도파관 누설파 안테나의 RF 윈도우-공기 경계면 전계 분포
Fig. 13. Electric field distribution of the 4-channel grilled leaky waveguide antenna in the RF window-air interface.

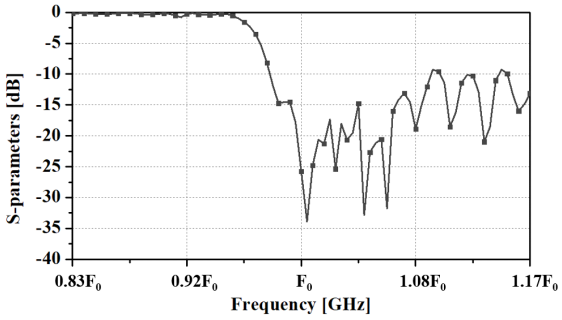


(a) 안테나 구성
(a) Configuration

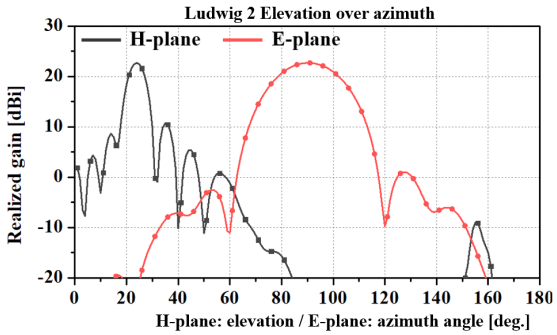


(b) 측정 환경
(b) Measurement envirment

그림 14. 제작된 4채널 그릴형 도파관 누설파 안테나
Fig. 14. Fabricated 4-channel grilled leaky waveguide antenna.



(a) 반사 계수
(a) Return loss



(b) 방사 패턴
(b) Radiation patterns

그림 15. 4채널 그릴형 도파관 누설파 안테나의 측정 결과
Fig. 15. Measured results of the 4-channel grilled leaky waveguide antenna.

적으로 누출량을 늘려 약 8 λ의 전기적으로 짧은 안테나 길이에서도 단일 채널 122 %의 높은 개구 효율을 나타내고 4채널 섹터 도파관 분배기가 결합되어 높은 이득을 구현한다. 또한, 높은 출력에서 동작을 위해 도파관 내부는 RF 윈도우를 통해 진공 밀봉되며 안테나 내외부를 포함한 2, 3중점에서 전계 분포 분석을 통해 1.46 GW의 높은 이론적인 전력 처리 용량이 구현된다. 설계된 안테나는 방사 성능 측정을 통해 약 81 %의 높은 개구 효율이 검증된다.

References

[1] S. N. Vlasov, I. M. Orlova, "Quasioptical transformer which transforms the waves in a waveguide having a circular cross section into a highly directional wave beam," *Radiophysics and Quantum Electronics*, vol. 17, no. 1, pp. 115-119, Jan. 1974.

[2] C. W. Yuan, Q. X. Liu, H. H. Zhong, and B. L. Qian, "A novel TEM-TE11 mode converter," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 15, no. 8, pp. 513-515, Aug. 2005.

[3] J. Ng, R. W. Ziolkowski, J. S. Tyo, M. C. Skipper, M. D. Abdalla, and J. Martin, "An efficient, electrically small, three-dimensional magnetic EZ antenna for HPM applications," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 40, no. 11, pp. 3037-3045, Nov. 2012.

[4] X. Q. Li, Q. X. Liu, X. J. Wu, L. Zhao, J. Q. Zhang, and Z. Q. Zhang, "A GW level high-power radial line helical array antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 9, pp. 2943-2948, Sep. 2008.

[5] C. C. Courtney, D. E. Voss, C. E. Baum, W. Prather, and R. Torres, "A description and the measured performance of three coaxial beam-rotating antenna prototypes," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 44, no. 3, pp. 30-47, Jun. 2002.

[6] L. Xu, J. Liu, Q. Zhang, C. Yuan, and Y. Sun, "A magnetic-enhanced reflectarray antenna for high-power microwave applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 10, pp. 8350-8355, Oct. 2023.

[7] X. Pan, C. G. Christodoulou, "A narrow-wall slotted waveguide antenna array for high power applications," in *Proceedings of the 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium(APSURSI)*, Memphis, TN, Jul. 2014, pp. 1493-1494.

[8] S. Peng, C. W. Yuan, T. Shu, J. Ju, and Q. Zhang, "Design of a concentric array radial line slot antenna for high-power microwave application," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 43, no. 10, pp. 3527-3529, Oct. 2015.

[9] Y. S. Choi, J. H. Hong, and J. M. Woo, "Array synthesis

horn antenna with an extended horn and a stepped corrugated structure for high-power microwave applications," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 20, no. 2, pp. 110-114, Apr. 2020.

[10] R. Meng, Y. Xia, Y. Guo, and Q. Zhu, "An X-band 48-way leaky waveguide antenna with high aperture efficiency and high power capacity," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 12, pp. 6799-6809, Dec. 2018.

[11] S. Bi, C. Yuan, Q. Zhang, and Y. Sun, "An L-band leaky-wave array antenna for high-power microwave applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 8, pp. 6918-6923, Aug. 2023.

[12] L. Goldstone, A. Oliner, "Leaky-wave antennas I: Rectangular waveguides," *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 7, no. 4, pp. 307-319, Oct. 1959.

[13] L. Goldstone, A. Oliner, "Leaky wave antennas II: Circular waveguides," *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 9, no. 3, pp. 280-290, May 1961.

[14] A. Hessel, "General characteristics of traveling-wave antennas," in *Antenna Theory*, New York, NY, McGraw-Hill, 1969.

[15] D. R. Jackson, A. A. Oliner, "Leaky-wave antennas," in *Modern Antenna Handbook*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, pp. 325-367, 2008.

[16] A. Larsson, B. Johansson, and S. E. Nyholm, "Radiated electric field strength from high-power microwave systems," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 50, no. 3, pp. 758-761, Aug. 2008.

김 동 현 [한화시스템/선임연구원]

https://orcid.org/0000-0002-9085-5509

2018년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)

2023년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)

2023년 2월～현재: 한화시스템 우주연구소 선임연구원

[주 관심분야] 광대역 안테나, 고출력 안테나, 반사판 안테나, 배열 안테나, 합성 개구 레이다

박 찬 영 [연세대학교/석・박사 통합 과정]

https://orcid.org/0000-0002-3056-884X

2019년 8월: 서경대학교 전자공학과(공학사)

2019년 9월～현재: 연세대학교 전기전자공학과 석・박사 통합 과정

[주 관심분야] 홀로그래픽 안테나 및 메타 표면

서 동 근 [국방과학연구소/연구원]

https://orcid.org/0000-0003-0736-3755

2017년 2월: 경상대학교 전자공학과(공학사)

2020년 2월: 경상대학교 전자공학과 (공학석사)

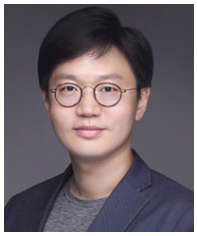
2021년 1월～2022년 5월: 국방기술진흥연구소 연구원

2022년 6월～현재: 국방과학연구소 연구원

[주 관심분야] 고출력 전자기파, 전자기파 효과분석 M&S, 고출력 안테나, 고이득 안테나

윤 익 재 [충남대학교/교수]

https://orcid.org/0000-0001-9623-2612



2003년 8월: 연세대학교 전기전자공학부 (공학사)

2005년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)

2012년 8월: University of Texas at Austin 전기컴퓨터공학과 (공학박사)

2005년 7월～2008년 8월: 삼성종합기술원 연구원

2012년 9월～2013년 12월: Technical University of Denmark 전기공학과 Postdoc 연구원

2014년 1월～2014년 8월: Technical University of Denmark 전기공학과 조교수

2014년 9월～현재: 충남대학교 전기공학과 교수

2024년 1월～현재: 한국전자파학회 안테나 및 전파전파 연구회 위원장

[주 관심분야] 안테나, 고출력 전자파 시스템, 전장부품 EMI/EMC

윤 영 중 [연세대학교/교수]

https://orcid.org/0000-0002-9585-9867

1981년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)

1986년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)

1991년 2월: Georgia Institute of Technology (공학박사)

1992년～1993년: 한국전자통신연구원 위성통신기술연구단 선임연구원

1993년～현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수

2011년: 한국전자파학회 학회장

[주 관심분야] 광대역 안테나, 고출력 안테나, 의료용 안테나, reflectarray 및 전파전파