

해양 사고 방지를 위한 레이더 시스템용 고이득 슬롯 배열 도파관 안테나 설계

Design of High-Gain Slotted Array Waveguide Antenna of Radar Systems to Prevent Maritime Accidents

여 유 석 · 민 경 식

You-Seok Yeoh · Kyeong-Sik Min

요 약

본 논문에서는 해양 사고 방지를 위한 레이더 시스템용 고이득 슬롯 배열 도파관 안테나를 제안한다. 제안된 안테나는 WR-51 표준 도파관의 광벽 길이와 협벽 길이를 2^{-3} 만큼 축소한 크기로 설계되었다. WR-51 표준 도파관 슬롯 배열 안테나와 비교하여 low profile이면서 고이득을 가지는 안테나 설계를 실현하기 위해 슬롯 길이, 폭, 오프셋 그리고 슬롯 사이의 거리와 같은 파라미터들의 최적화는 반복 모의실험으로 정밀하게 계산되었다. 제안된 안테나의 반사 계수와 방사 패턴은 WR-51 표준 도파관 안테나의 특성들과 잘 일치함을 보였다. 제작된 프로토타입 안테나의 측정된 반사 계수와 방사 패턴은 모의실험된 안테나의 특성들과 잘 일치하였다. 목표 주파수 대역에서 측정된 피크 이득은 모의실험된 이득보다 약 1 dBi보다 낮은 28 dBi로 관측되었다.

Abstract

This paper proposes a design of a high-gain slotted array waveguide antenna of a radar system to prevent accidents at sea. The proposed antenna has a reduced size, 2^{-3} , of the broad wall length and the narrow wall length of the WR-51 standard waveguide. To realize a low profile and high gain in comparison with the WR-51 standard waveguide slotted array antenna, the parameters, such as the slot length, width, offset, and distance between slots, were precisely calculated using the iterated simulations. The reflection coefficients and radiation patterns of the proposed antenna corresponded with the characteristics of the WR-51 standard waveguide antenna. The measured reflection coefficients and radiation patterns of the fabricated prototype antenna conformed with that of the simulated ones. The peak gains measured at the targeting frequency band were observed at 28 dBi, which were less than approximately 1 dBi of the simulated gains.

Key words: Slotted Array Waveguide Antenna, Wr-51 Standard Waveguide, Ku-Band, High Gain, Radar System

I. 서 론

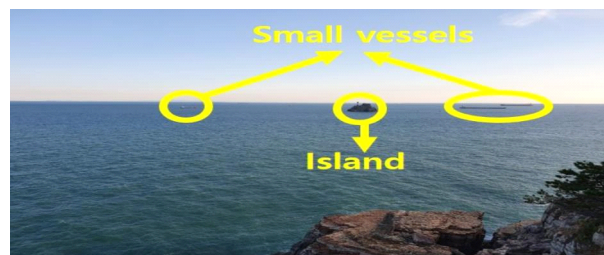
삼면이 바다인 한국의 복잡한 해안선으로 인하여 간첩 침투 시 인지능력 저하, 해안선 침식에 대한 감시의 어려

「본 과제(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 사회맞춤형 산학협력 선도대학(LINC+) 육성사업의 연구결과입니다.」
한국해양대학교 전파공학과(Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University)

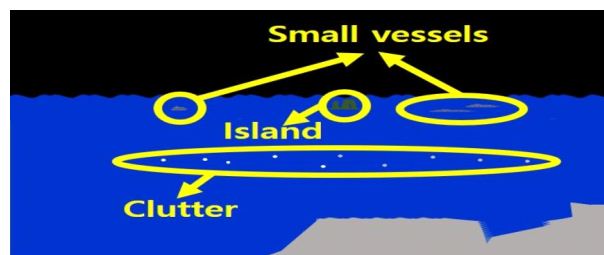
· Manuscript received November 16, 2020 ; Revised November 20, 2020 ; Accepted November 26, 2020. (ID No. 20201116-099)

· Corresponding Author: Kyeong-Sik Min (e-mail: ksmin@kmou.ac.kr)

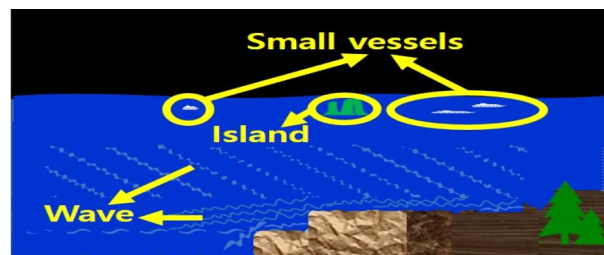
움, 근거리 물체 인식 부정확성 등이 문제 되고 있으며, 국내에서도 해상과 해수면 등을 감시하기 위해 다양한 레이더 시스템이 연구되고 있다^{[1],[2]}. 이러한 해상용 근거리 인식 레이더 시스템에는 일반 레이더로 탐지가 매우 어려운 소형 부유물들과 해수 표면의 미세한 움직임을 감지하기 위해 고성능·고이득의 안테나가 요구된다. 고성능·고이득의 안테나로 슬롯 배열 도파관 안테나가 가장 적합하며, 레이더용으로 사용되고 있다^[3]. 현재 해상용 레이더에 주로 사용되는 슬롯 배열 도파관 안테나의 주파수 대역은 X 밴드 또는 S 밴드이다. 하지만 X 밴드나 S 밴드 레이더의 경우, 정밀도가 낮아 근거리에서 소형 목표물과 부유물 탐지에 대하여 실시간으로 대용량 처리를 정밀하게 하지 못하는 한계를 가지고 있다. 그림 1(a)는 실제 부산 태종대에서 촬영한 사진이고, 그림 1(b)와 그림 1(c)는 각각 X 밴드 레이더 가상 화면과 Ku 밴드 레이더 가상 화면으로 근거리에서 포착된 소형 선박들과 파고 관측에 대한 가상적 차이를 나타낸다, 그림 1(a)에서는 실제 근거리에서 소형 선박들과 섬이 존재하지만 그림 1(b)인 X 밴드 레이더 가상 화면에서는 근거리에서 실제 존재하는 소형 선박들과 섬을 정밀하게 식별하지 못할 뿐만 아니라, 클러터가 발생하고 파고와 같은 정보는 관측이 어렵다. 반면, 그림 1(c)인 Ku 밴드 레이더 가상 화면에서는 근거리에서 실제 존재하는 소형 선박들과 섬을 실시간으로 정밀하게 식별하고, 파고 정보도 관측할 수 있다. 즉, 기존 레이더 시스템의 한계는 소형 선박과 부유물의 충돌 사고, 해안 침식과 이안류에 의한 피해, 해상 경계 실패 등 다양하게 발생하는 해양 사고를 사전에 막지 못한 많은 경험에 있다^[4]. 기존 레이더 시스템의 한계를 개선하기 위해 실시간 대용량 신호처리 가능한 레이더 시스템의 개발이 매우 시급한 실정이다. 위에서 언급한 문제를 해결할 수 있는 고성능 레이더 시스템을 구현하려면 고주파수 대역의 안테나가 필요하고 저전력으로 해수 표면의 클러터와 해상상태인 파고·파향·표층해류 등을 감지할 수 있는 고이득 안테나가 필요하다. 이러한 요구에 적합한 안테나는 전송손실이 적으면서 고이득을 가지며, 내구성이 강한 슬롯 배열 도파관 안테나가 훌륭한 후보 안테나로 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Ku 밴드 주파수 대역에 적합한 슬롯 배열 도파관 안테



(a) 실제 태종대 사진
(a) Taejongdae Park actual photo



(b) X 밴드 레이더 가상 화면
(b) X-band radar virtual screen



(c) Ku 밴드 레이더 가상 화면
(c) Ku-band radar virtual screen

그림 1. Ku 밴드 레이더의 장점 설명을 위한 가상 화면
Fig. 1. Virtual screen for advantage explanation of Ku-band radar system.

나의 최적 설계법을 제안한다.

슬롯의 크기나 개수, 모양, 배열 등을 조절하여 여러 특성을 만들 수 있고, 슬롯의 개수를 증가시켜 고이득 특성과 예리한 빔 패턴을 만들 수 있다. 본 연구에서는 X 밴드 대역의 해상용 레이더 안테나보다 고주파수 대역인 Ku 밴드 주파수 대역의 고이득 실현이 가능한 1×26 슬롯 배열 도파관 안테나를 설계하였다. 제안하는 안테나는 표준 도파관의 장변과 단변인 a 와 b 의 크기를 2^{-3} 으로 줄인 비표준 도파관 안테나로 최적 설계하였고, 파라미터 스티디와 설계 특성은 2장의 안테나 설계에서 다루었다.

II. 안테나 설계

2-1 슬롯 파라미터 설계

본 논문에서 제안하는 안테나의 설계는 FEM(finite element method) 기반의 3차원 시뮬레이션 프로그램인 HFSS를 사용하였다. 그림 2(a)와 같은 구조로 Ku 밴드 주파수 대역을 가지는 해양 사고 방지를 위한 레이더 시스템용 슬롯 배열 도파관 안테나를 설계하였고, 그림 2(b)는 그림 2(a)인 슬롯 배열 도파관 안테나의 파라미터 명칭과 구조를 나타내는 그림이다. WR-51 표준 도파관을 이용하여 설계하였고, 표준 도파관의 장변과 단변인 a와 b의 길이는 각각 12.95 mm, 6.48 mm이고, 연구에서 목표로 정한 대역폭은 17.35~17.75 GHz이며, 중심 주파수는 17.55 GHz로 하였다. 본 연구에서는 우선 1×26 슬롯 배열 도파관 안테나 설계를 고려하였으며, 이때 도파관의 총 길이는 관내 파장의 길이의 13배인 295.802 mm로 하였다. 그림 2(b)에서 슬롯과 슬롯 사이의 거리는 $\lambda_g/2$ 로 등간격으로 배열하였고, 입력 포트에서 첫 번째 슬롯까지의 거리는 $\lambda_g/4$ 로 하였다. 마찬가지로 쇼트에서 가장 가까운 슬

롯까지의 거리도 $\lambda_g/4$ 로 하여 모의실험하였다^{[5],[6]}. 슬롯의 폭은 슬롯의 길이에 비해 아주 작다고 가정하여 대략적인 슬롯의 폭은 약 $\lambda_g/15 \sim \lambda_g/8$ 로 정하였고, 슬롯의 폭을 고려한 슬롯의 길이는 $\lambda_g/3 \sim 3\lambda_g/8$ 의 범위에서 이론적인 설계를 시작하였다. 슬롯의 길이와 폭 그리고 오프셋은 0.01 mm 단위로 정밀하게 반복계산을 통해 구하였다^[7]. 반복계산으로부터 구해진 표준 도파관을 기준으로 했을 때, 최적 슬롯의 길이는 8.22 mm, 슬롯의 폭은 1.11 mm, 슬롯의 오프셋은 0.95 mm로 설계하였고, 슬롯 간격은 $\lambda_g/2$ 등간격으로 설계하여 서셉턴스 부분이 가능한 0으로 수렴하도록 배열 소자들의 위상이 같게 설계하였다.

동일한 설계 방법으로 도파관의 크기를 2^{-3} 으로 줄인 1×26 슬롯 배열 비표준 도파관 안테나를 설계하였다. 비표준 도파관으로 설계한 이유는, 시스템에 적합하게 low profile을 만족하면서 안테나의 최대 이득을 구현하고, 표준 도파관을 이용한 슬롯 배열 도파관 안테나에서 얻은 범 패턴은 유지하기 위해서이다. 중심 주파수는 1×26 슬롯 배열 표준 도파관과 동일하게 17.55 GHz로 하고, WR-51 표준 도파관의 차단 주파수에 영향을 미치지 않게 장변과 단변은 2^{-3} 만큼 줄인 11.33 mm, 5.67 mm로 설계하였다.

도파관 모드는 표준 도파관 안테나와 동일한 TE_{10} 이며, 차단 주파수는 13.24 GHz, 관내 파장은 26.04 mm이다. 소형화된 슬롯 배열 도파관 안테나의 설계 타당성을 입증하기 위해, 1차 설계로 슬롯의 길이와 폭, 오프셋은 표준 도파관의 제원을 그대로 사용하여 얻은 결과를 반사 계수로 비교하였다. 예상했던 대로 도파관의 크기가 2^{-3} 만큼 줄어들었기 때문에, 임피던스 정합이 되지 않음을 그림 3으로부터 확인하였다. 2차 설계로, 크기를 2^{-3} 으로 줄인 소형화된 도파관에 적절한 슬롯 파라미터를 구하기 위해 슬롯의 길이와 폭, 오프셋은 표준 도파관의 설계와 동일한 방법인 반복계산을 통해 최적화된 파라미터를 구하였다.

그림 3(a)는 슬롯 길이 변화에 따른 반사 계수이다. 최적 슬롯 길이를 구하기 위한 파라미터 계산에서는 슬롯 오프셋은 0.57 mm, 폭은 0.93 mm로 고정하여 반복계산을 통해 구하였다. 붉은색 실선이 표준 도파관 슬롯의 길이이고, 푸른색 파선이 최적의 도파관일 때의 제원이다. 초록색 일점쇄선과 푸른색 파선, 검은색 점선이 비표준 도

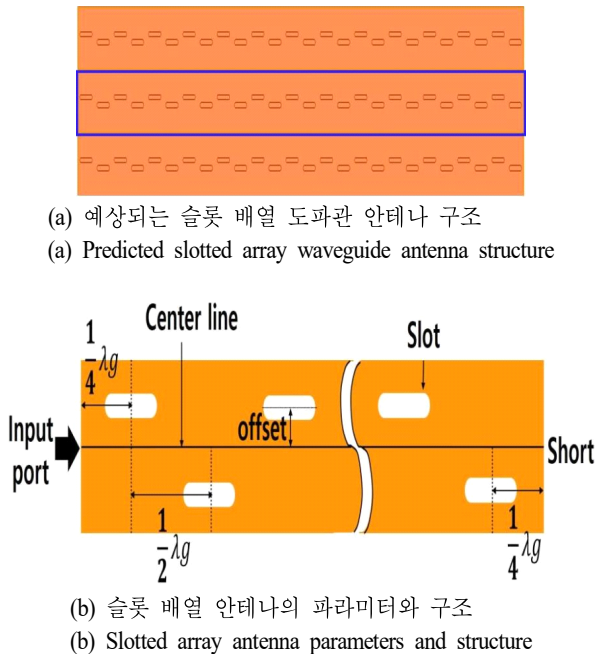
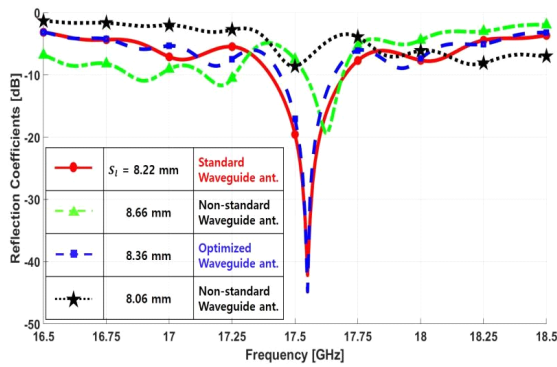
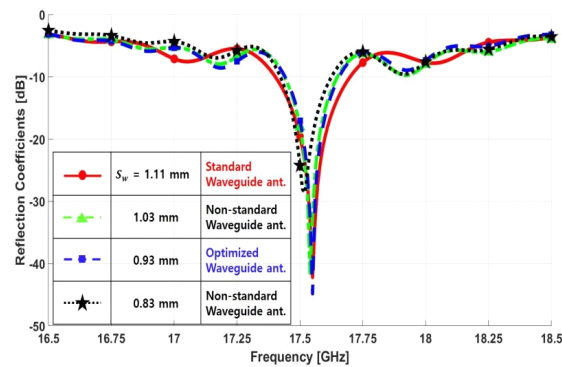


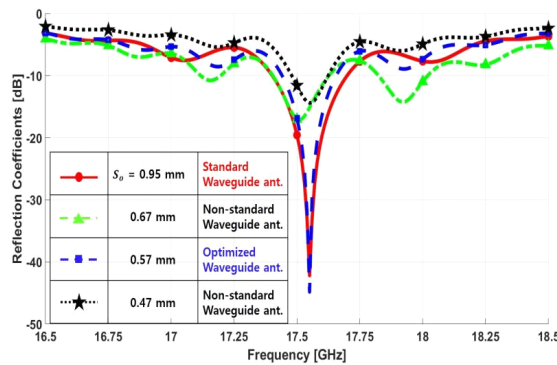
그림 2. 슬롯 배열 도파관 안테나 구조
Fig. 2. Slotted array waveguide antenna structure.



(a) 슬롯 길이(S_l) 변화에 따른 반사 계수(S_{11})
(a) Reflection coefficients with respect to the slot length variation



(b) 슬롯 폭(S_w) 변화에 따른 반사 계수(S_{11})
(b) Reflection coefficients with respect to the slot width variation



(c) 슬롯 오프셋(S_o) 변화에 따른 반사 계수(S_{11})
(c) Reflection coefficients with respect to the slot offset variation

그림 3. 시뮬레이션에 의한 슬롯 파라미터의 반사 계수
Fig. 3. Reflection coefficients of slot parameters by simulation.

파관 안테나의 슬롯 길이이다. 비표준 도파관으로 설계할 경우, 관내 파장이 증가하였기 때문에 슬롯의 길이는 표준 도파관의 최적 슬롯 길이보다 0.14 mm 더 길게 설계하였다. 초록색 일점쇄선인 8.66 mm에서는 16.8 GHz와 17.2 GHz에서 이중 공진하여 임피던스 매칭이 정확히 되지 않았고, 푸른색 파선인 8.36 mm에서는 중심 주파수인 17.55 GHz에서 공진하여 임피던스 매칭이 잘 된 결과를 얻었다, 푸른색 파선보다 작은 검은색 점선인 8.06 mm에서는 17.5 GHz와 17.8 GHz에서 이중 공진이 발생하여 임피던스 매칭이 정확히 되지 않은 결과를 얻어 푸른색 파선인 8.36 mm를 최적의 슬롯 길이로 선택하였다. 슬롯의 길이가 임피던스의 허수부에 영향을 주었기 때문에 주파수 이동 현상이 관측되었다. 그림 3(b)는 슬롯 폭 변화에 따른 반사 계수이다. 슬롯 길이는 8.36 mm, 오프셋은 0.57 mm로 고정하고, 슬롯 폭은 반복계산을 통해 구하였다. 초록색 일점쇄선인 1.03 mm의 경우, 17.53 GHz에서 공진하였다. 중심 주파수인 17.55 GHz에 맞추기 위해 슬롯 폭을 줄여 보았고, 푸른색 파선인 0.93 mm에서는 17.55 GHz에서 공진하여 임피던스 매칭이 잘 된 결과를 얻었다. 검은색 점선인 0.83 mm에서는 17.5 GHz에서 공진하였으나, 0.93 mm보다 특성이 다소 떨어져서 최적의 슬롯 폭은 푸른색 파선인 0.93 mm로 설계하였다. 슬롯 폭은 임피던스의 허수부에 영향을 주었기 때문에 미세한 주파수 변화는 관측되었지만, 슬롯 길이만큼의 주파수 이동에는 큰 영향을 주지 않는 결과를 얻었다. 그림 3(c)는 슬롯 오프셋 변화에 따른 반사 계수이다. 슬롯 길이는 8.36 mm, 폭은 0.93 mm로 고정하고, 슬롯 오프셋은 반복계산을 통해 구하였다. 비표준 도파관으로 설계할 경우, 관내 파장이 증가하기 때문에 슬롯 오프셋은 표준 도파관의 오프셋보다 더 작게 설계되었다. 초록색 일점쇄선인 0.67 mm에서는 -20 dB 이상의 반사 계수 결과를 얻어 임피던스 매칭이 잘 되지 않았고, 푸른색 파선인 0.57 mm에서는 17.55 GHz에서 -44.84 dB의 반사 계수 결과를 얻어 표준 도파관 위의 슬롯 오프셋에서 구한 0.95 mm와 잘 일치하였고, 임피던스 매칭이 잘 된 결과를 얻었다, 하지만 검은색 점선인 0.47 mm로 오프셋을 더 줄였을 경우, 임피던스의 부정합 매칭결과를 얻었기에 푸른색 파선인 0.57 mm를 최적의 슬롯 오프셋으로 설계하였다. 슬롯 오프셋은

임피던스의 실수부에 영향을 주므로 그림 3(c)의 결과값 같이 주파수 이동은 거의 없으며, 반사 계수 변화에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

2.2 최적 파라미터 도출

그림 4는 모의실험된 1×26 슬롯 배열 도파관 안테나의 반사 계수 비교 그래프이고, 붉은색 실선이 표준 도파관 안테나를 사용하여 최적화된 슬롯 파라미터를 구한 결과이고, 검은색 점선이 표준 도파관 안테나의 슬롯 제원을 그대로 사용한 비표준 도파관 안테나이고, 푸른색 파선이 최적화된 도파관 위에 배열된 슬롯 안테나의 반사 계수이다.

검은색 점선인 최적화하지 않은 비표준 도파관 안테나의 경우 임피던스 매칭이 되지 않은 당연한 결과를 얻었는데, 이는 비표준 도파관을 설계할 때 관내 파장이 증가하여 전기적 길이가 달라지므로 관내 파장에 따른 슬롯의 최적화가 되지 않아서 발생한 결과이다. 붉은색 실선의 반사 계수는 표준 도파관 안테나에 맞춘 최적화된 슬롯 파라미터를 가지고 계산된 것이고, 푸른색 파선인 최적화된 도파관의 반사 계수와 비교하면, 17.55 GHz에서 최적화된 표준 도파관 안테나의 경우 -42.19 dB이고, 최적화된 도파관 안테나의 반사 계수는 -44.84 dB로 계산되었다.

목표로 하는 대역폭 범위는 17.35~17.75 GHz이고, 모의실험에서 얻은 -10 dB 기준 임피던스 대역폭은 표준

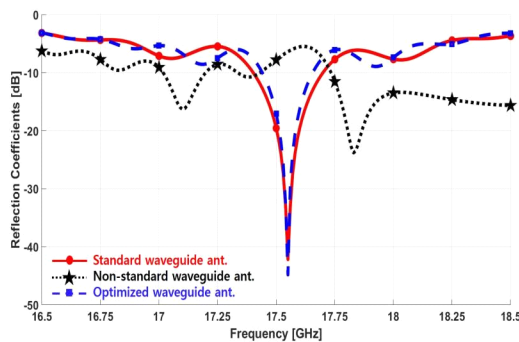


그림 4. 모의실험된 1×26 슬롯 배열 도파관 안테나의 반사 계수 비교

Fig. 4. Comparison of reflection coefficients for simulated 1×26 slotted array waveguide antennas.

표 1. 안테나 설계 파라미터

Table 1. Antenna design parameters.

	Standard waveguide ant.	Non-standard waveguide ant.	Optimized waveguide ant.
a	12.95 mm	11.33 mm	11.33 mm
b	6.48 mm	5.67 mm	5.67 mm
λ_g	22.75 mm	26.04 mm	26.04 mm
S_l	8.22 mm	8.22 mm	8.36 mm
S_w	1.11 mm	1.11 mm	0.93 mm
S_o	0.95 mm	0.95 mm	0.57 mm

도파관 안테나는 약 300 MHz이고, 최적화된 도파관 안테나는 약 220 MHz이다.

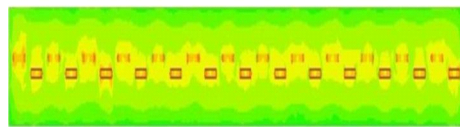
표 1은 그림 4의 모의실험된 1×26 슬롯 배열 도파관 안테나의 반사 계수 비교 그래프의 설계 구조 파라미터이다.

2.3 전류 분포 분석

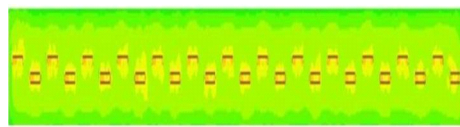
그림 5는 17.55 GHz에서 모의실험된 1×26 슬롯 배열 도파관 안테나의 전류 분포를 비교한 것이다. 표 1의 파라미터를 근거로 해서 얻은 모의실험 전류 분포이다. 그림 5(a)는 표준 도파관 안테나의 전류 분포이고, 그림 5(b)는 표준 도파관 안테나를 기준으로 구한 슬롯 파라미터 그대로를 비표준 도파관 안테나에 적용하여 구한 전류 분포이며, 그림 5(c)는 비표준 도파관 안테나의 크기에 맞게 구한 최적화된 파라미터를 이용하여 계산한 전류 분포이다. 그림 5(b)는 예상대로 임피던스 매칭이 원활히 되지 않아 그림 5(a)보다 각 슬롯에서의 전류 분포가 낮은 모습을 확인할 수 있다. 그림 5(c)는 최적화된 슬롯 파라미터를 가진 도파관 안테나로서 그림 5(a)보다 전류 분포가 더 집중되어 분포됨을 확인할 수 있다. 따라서 이 결과로부터, 17.55 GHz에서 그림 5 (c)의 안테나 이득이 더 클 것으로 예상하였다.

2.4 방사 패턴의 비교

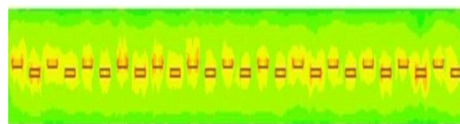
그림 6은 슬롯 배열 표준 도파관 안테나와 최적화된 슬롯 배열 도파관 안테나의 2-D 방사 패턴 비교 그림으로 17.35 GHz, 17.55 GHz, 17.75 GHz에서 방사 패턴을 모의 실험해 보았다. 붉은색 실선은 표준 도파관 안테나의 XZ



(a) 표준 도파관 안테나
(a) Standard waveguide antenna



(b) 비표준 도파관 안테나
(b) Non-standard waveguide antenna



(c) 최적화된 도파관 안테나
(c) Optimized waveguide antenna

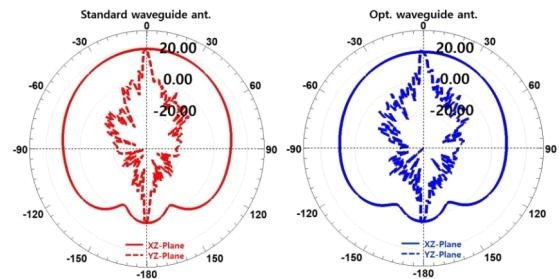
그림 5. 17.55 GHz에서 모의실험된 1×26 슬롯 배열 도파관 안테나의 전류 분포 비교

Fig. 5. Comparison of current distributions for simulated 1×26 slotted array waveguide antennas at 17.55 GHz.

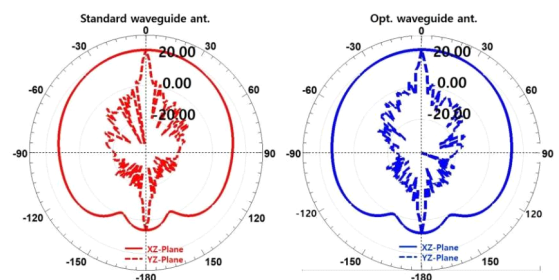
면의 전계이고, 붉은색 파선은 표준 도파관 안테나의 YZ 면의 전계, 푸른색 실선은 최적화된 도파관 안테나의 XZ 면의 전계이고, 푸른색 파선은 최적화된 도파관 안테나의 YZ 면의 전계를 나타낸다. 주파수별로 방사 패턴을 비교해 보았을 때, 두 안테나의 빔 형상이 유사하고 최대 이득은 최적화된 도파관 안테나가 다소 높음을 알 수 있다. 표 2는 그림 6의 XZ 면과 YZ 면 방사 패턴에 대한 전계의

표 2. 안테나의 피크 이득
Table 2. Peak gain of antenna.

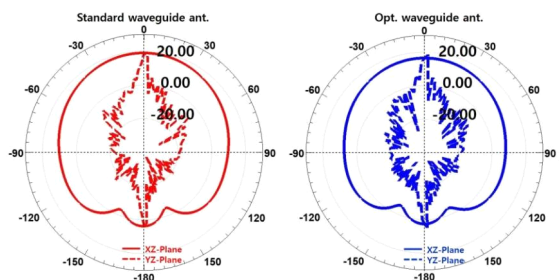
Frequency [GHz]	Plane	Standard waveguide ant. [dBi]	Optimized waveguide ant. [dBi]
17.35	XZ	19.1	17.24
	YZ	19.1	17.89
17.55	XZ	21.12	21.6
	YZ	21.12	21.6
17.75	XZ	18.9	16.49
	YZ	18.9	18.65



(a) 17.35 GHz



(b) 17.55 GHz



(c) 17.75 GHz

그림 6. 표준 도파관 안테나와 최적화된 도파관 안테나의 1×26 슬롯 배열 안테나에 대한 2-D 방사 패턴 비교

Fig. 6. Comparison of between standard waveguide antenna and optimized waveguide antenna 2-D radiation patterns of 1×26 slotted array antenna simulated.

피크 이득 값을 나타낸다. 목표 대역의 중간 주파수인 17.55 GHz에서는 표준 도파관 안테나보다 소형화된 최적화된 도파관 안테나의 피크 이득이 약 0.5 dBi 개선되어 고이득 특성을 잘 보이며 지향성 패턴도 유지되었다.

2.5 이득 비교

그림 7은 슬롯 배열 표준 도파관 안테나와 슬롯 배열

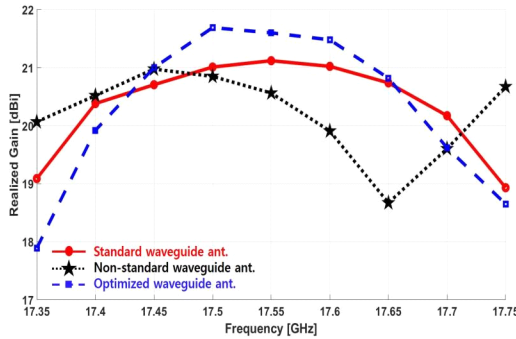


그림 7. 모의실험된 이득 비교
Fig. 7. Comparison of gains obtained by simulation.

비표준 도파관 안테나 그리고 최적화된 슬롯 배열 도파관 안테나의 YZ면 전계로부터 관찰된 17.35 GHz에서 17.75 GHz까지 주파수별 피크 이득을 비교한 것이다. 붉은색 실선이 표준 도파관 안테나이고, 검은색 점선이 비표준 도파관 안테나 그리고 푸른색 파선이 최적화된 도파관 안테나이다. 3종류 모두 목표 대역에서의 이득은 약 18 dBi 이상으로 나타났으며, 중심 주파수 대역인 17.55 GHz 대역 근방 주파수 대역에서는 최적화된 슬롯 배열 도파관 안테나의 이득이 가장 높은 21.6 dBi로 계산되었다.

III. 제작 및 측정

1×26 슬롯 배열 안테나 설계 기법을 사용하여 러프하게나마 6×26 슬롯 배열 안테나를 제작하였다. 그림 8은 실제 측정에 사용하기 위해 제작된 6×26 슬롯 배열 프로토타입 안테나의 모습이다. 공진 슬롯을 사용하였으며, 중심에서 양단으로 급전하는 중앙급전 방식을 사용하고 있다. 따라서 한 쪽 방향으로 13개의 슬롯이 놓여 있고,

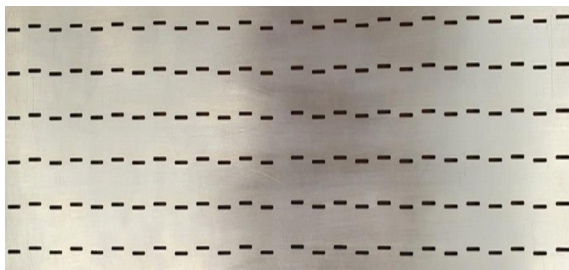


그림 8. 제작된 슬롯 배열 도파관 프로토타입 안테나
Fig. 8. Fabricated slotted array waveguide prototype antenna.

서로 대칭을 이루고 있다.

그림 9는 회로망 분석기를 사용하여 그림 8의 프로토타입 슬롯 배열 도파관 안테나를 측정한 반사 계수의 비교를 나타낸다. 측정된 반사 계수 결과는 붉은색 파선으로 표시하였고, 모의실험된 결과는 푸른색 실선으로 나타났다. 프로토타입 안테나는 슬롯의 길이와 폭, 오프셋, 간격 등이 최적화된 1×26 슬롯 배열 안테나의 모의실험에서 구한 슬롯 파라미터들을 사용하였고, 제작 과정에서 1/3~1/10 mm 정도의 파라미터들이 미세하게 차이가 생겼지만, 모의실험 반사 계수와 측정값이 대체로 잘 일치하는 결과를 얻었다, 목표 대역폭 17.35~17.75 GHz에서 프로토타입 안테나의 측정된 반사 계수는 -14.5 dB 이하로 우수한 특성을 보였으나, 모의실험한 것은 대역폭이 측정치보다 다소 좁게 나타났다, 그 이유로 급전 위치와 모의실험에서의 급전 방법 문제로 사료된다. 따라서 이 문제는 향후 급전부의 정밀 설계와 6×26 배열에 대한 구체적 설계를 통해 해결하고자 한다.

그림 10은 17.55 GHz에서 모의실험과 측정으로부터 구한 방사 패턴의 비교를 보여주고 있다. 그림 10의 (a)에서 푸른색 실선이 모의실험으로부터 구한 수직 편파 방사 패턴으로 빔 피크 이득은 -1°에서 29.52 dBi이고, 붉은색 파선인 프로토타입 안테나의 빔의 피크 이득은 -1°에서 28.43 dBi이다. 따라서 모의실험한 방사 패턴이 프로토타입 안테나의 방사 패턴들과 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 반사 계수는 RF 회로이므로 임피던스에 민감하므로 차이가 생길 수 있지만, 방사 패턴의 경우, 방사 저항의

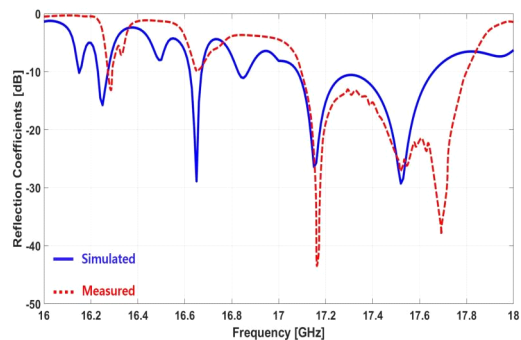
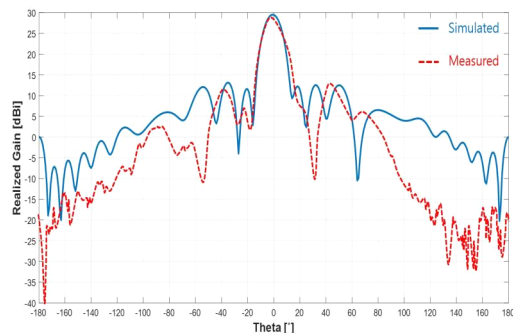
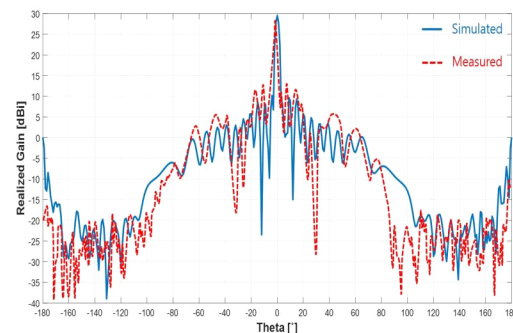


그림 9. 모의실험과 측정된 반사 계수 비교
Fig. 9. Comparison between the simulated reflection coefficients and the measured ones.



(a) 수직 편파
(a) Vertical polarization



(b) 수평 편파
(b) Horizontal polarization

그림 10. 17.55 GHz에서의 방사 패턴 비교
Fig. 10. Comparison of radiation patterns at 17.55 GHz.

크기에 더 크게 의존하므로 이들 패턴이 정면 방향에서 측정치와 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 10(b)는 수평 편파 비교 그림이며, 측정된 이득의 크기는 그림 10(a)와 마찬가지로 절대 이득으로 환산된 것이다. 그림 10(b)는 17.55 GHz에서 푸른색 실선인 모의실험으로부터 구한 수평 편파 방사 패턴으로 빔 피크 이득은 0°에서 29.47 dBi 이고, 붉은색 파선인 프로토타입 안테나의 빔의 피크 이득은 -1°에서 28.17 dBi이다. 따라서 그림 10의 측정값들을 분석하면 측정된 이득은 약 28 dBi 이상이고, 모의실험 결과와 제작된 안테나의 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

그림 11은 목표 대역폭인 17.35~17.75 GHz에서 50 MHz 간격으로 피크 이득을 비교한 그림이다. 푸른색 실선이 모의실험 결과이고, 붉은색 파선이 제작된 안테나의

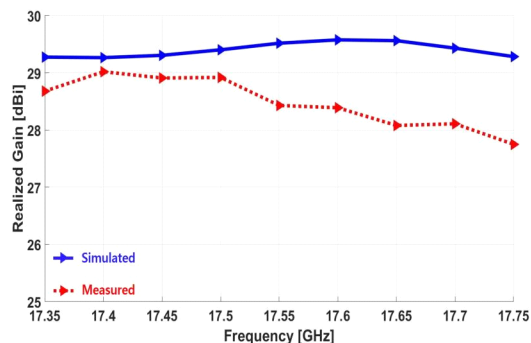


그림 11. 모의실험과 측정된 이득의 비교
Fig. 11. Comparison between the simulated gains and the measured ones.

결합값이다. 모의실험의 경우, 목표 대역폭에서 피크 이득이 29 dBi 이상의 결과값을 나타내고 있고, 제작된 안테나의 경우 모의실험보다 낮은 28 dBi 이상의 결과값을 나타내고 있다. 이득이 다소 차이가 나는 것은 앞서도 언급했듯이, 제작 과정에서 발생한 슬롯 파라미터들의 미세한 오차에 기여하는 것으로 사료된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 해양 사고 방지를 위한 Ku 밴드 레이다 시스템에 적용할 슬롯 배열 도파관 안테나 설계를 제안하였다. 설계 순서로 표준 도파관을 이용한 슬롯 배열의 최적 파라미터를 구하고, 이를 기반으로 하여 이득을 증가시킬 목적으로 2^{-3} 크기로 low profile 화 된 최적 슬롯 배열 도파관 안테나를 설계하였다. 설계된 슬롯은 등간격으로 배열하였으며, 공진 슬롯을 사용하였다. 모의실험을 통하여 크기를 2^{-3} 만큼 줄인 최적화된 슬롯 배열 도파관 안테나는 표준 도파관을 이용한 안테나의 빔 형상을 그대로 유지하였고, 중심 주파수인 17.55 GHz에서 약 0.5 dBi 더 개선된 이득을 가지는 결과를 얻었다. 제작된 6×26 슬롯 배열 프로토타입 도파관 안테나의 측정에서는 목표 대역폭에서 반사 계수가 -14.5 dB 이하로 우수한 특성을 보였고, 주파수별 피크 이득을 비교하였을 때 약 28 dBi 이상의 고이득을 가지는 결과를 얻었다. 향후 상용화를 위해 6×26 배열 안테나의 정밀한 설계를 할 필요가 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] T. H. Kim, J. Y. Park, J. H. An, J. H. Park, and Y. D. Kang, "Waveform operation and signal processing design for detecting naval and airborne targets in sea surveillance radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 5, pp. 456-467, May 2020.
- [2] T. Jin, Y. Oh, "A simple empirical model for the radar backscatters of skewed sea surfaces at X- and Ku-bands," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 19, no. 3, pp. 204-209, Jul. 2019.
- [3] J. Kim, S. C. Song, H. Shin, and Y. B. Park, "Radiation from a millimeter-wave rectangular waveguide slot array antenna enclosed by a Von Karman radome," *Journal of Electromagnetic Engineering And Science*, vol. 18, no. 3, pp. 154-159, Jul. 2018.
- [4] S. W. Han, "The army did not know even after 13 captures: the sea boundary was pierced by the entry boat," 2020. Available: <https://mbn.co.kr/news/politics/4175230>
- [5] L. Josefsson, "Analysis of longitudinal slots in rectangular waveguides," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 35, no. 12, pp. 1351-1357, Dec. 1987.
- [6] R. Elliott, "An improved design procedure for small arrays of shunt slots," *IEEE, Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 31, no. 1, pp. 48-53, Jan. 1983.
- [7] K. S. Min, "Study of single layer polarization converters for slotted waveguide array antennas," Ph.D. dissertation, Tokyo Institute of Technology, Jun. 1996.

여 유 석 [한국해양대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-6913-968X>



2020년 2월: 경운대학교 항공정보통신공학과 (공학사)
2020년 3월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 석사과정
[주 관심분야] 슬롯 배열 도파관 안테나

민 경 식 [한국해양대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-9827-0169>



1989년 2월: 한국해양대학교 전자통신공학과 (공학사)
1991년 2월: 한국해양대학교 전자통신공학과 (공학석사)
1996년 2월: 일본 동경공업대학교 전기전자공학과 (공학박사)
2001년 2월~2002년 1월: 일본 요코하마 국립대학교 방문교수
2017년 1월~2018년 1월: 미국 캘리포니아 주립대학교 (프레즈노) 방문 교수
2020년 1월~현재: 한국전자과학회 학회장
1997년 3월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 교수
[주 관심분야] 슬롯 배열 도파관 안테나 설계 및 측정, FDTD 해석법 및 프로그램 개발, 광대역 MDM(Magneto-Dielectric Material) 안테나, AI용 SDR 안테나, MIMO 안테나 설계 등