

Magic-T 멀티 포트 급전을 이용한 Ku-Band 파도 탐지 레이더용 4×4 빔 분할 패치 안테나의 설계

Design of a 4×4 Beam-Splitting Patch Antenna for Ku-Band Wave Detection Radar Utilizing Magic-T Multi-Port Feeding

이 승 우 · 민 경 식 · 여 유 석

Seung-Woo Yi · Kyeong-Sik Min · You-Seok Yeoh

요 약

본 논문은 파도 탐지 레이더 시스템용 magic-T 급전 구조를 이용한 빔 분할 안테나의 설계에 관한 연구이다. 제안된 안테나는 단층 기판을 이용하여 3개의 급전 포트로 3가지의 빔을 형성하는 기법을 보여주고 있다. 단층 기판에서 발생하는 3개 포트 사이의 강한 결합도를 해결하기 위해서 접지면에 위치한 슬롯 선로의 최적 배치 설계에 의해 -20 dB 이하의 우수한 격리도를 구현할 수 있었다. 측정된 반사계수와 격리도 계수는 모의실험 결과와 잘 일치하였으며 각각 -20 dB와 -23 dB 이하의 양호한 결과를 얻었다. 예상했던 3가지 종류의 빔 패턴이 구현되었으며, 측정에서도 모의실험 패턴들과 잘 일치하는 빔 특성을 확인하였다. 측정된 안테나의 피크 이득은 측정값과 잘 일치하였다. port 1 급전에 의한 2개의 빔의 이득은 10.90 dBi, port 2 급전에 의한 4개 빔의 이득은 각각 약 6 dBi, port 3 급전에 의한 단일 빔의 이득은 11.04 dBi의 특성을 보였다.

Abstract

This study presents the design of a beam-splitting antenna using a magic-T feeding structure for wave detection radar systems. The proposed antenna demonstrates a technique for forming three different beams feeding at the three ports using a single-layer substrate. The strong coupling that occurs between the three ports is owing to the use of a single-layer substrate. An optimal arrangement of the slot lines located on the ground plane was designed to address this issue, achieving excellent isolation with values below -20 dB. The measured reflection and isolation coefficients agreed well with the simulation results, achieving reasonable results below -20 dB. The three expected beam pattern types were implemented, and the measured beam characteristics matched well with the simulated patterns. The two beams fed by port 1 exhibited a peak gain of 10.90 dBi, whereas the four beams fed by port 2 exhibited approximately 6.11 dBi. The single beam fed by port 3 exhibited a peak gain of 11.04 dBi.

Key words: Magic-T, Wave Detection Radar Systems, Ku-Band, Beam Splitting, Beam Focusing

「본 과제(결과물)는 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 연구결과입니다.」

「이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2023-00253131).」

국립한국해양대학교 전파공학과(Department of Radio Communication Engineering, National Korea Maritime & Ocean University)

· Manuscript received July 11, 2024 ; Revised July 29, 2024 ; Accepted July 30, 2024. (ID No. 20240711-065)

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

I. 서 론

대한민국의 지형 특성상 동해안에는 해안 침식과 이안류가 빈번하게 발생하고 있다. 이에 따라 해안가의 도로 붕괴로 인한 인명 안전 문제와 교통 장애 등 연안 재해가 심각한 상황이다. 일례로 동해안 근해연안에서의 연안 침식과 이안류에 의한 인명 피해가 증가하여 피해 복구 비용은 연간 200억 원 이상으로 집계되었으며, 국민의 안전과 국가적인 경제 손실이 매우 심각하다^[1]. 국내에서는 연안 재해를 방지하고 복원하기 위해 파도 탐지 레이더의 기술이 연구되고 있다^{[2],[3]}. 이러한 기술들은 파도의 움직임을 미세하게 감지하여 파도의 높이(파고), 방향(파향), 주기(파주기) 등을 정확하게 탐지하는 데 활용된다. 파도의 움직임을 파악하여 연안 재해의 원인을 분석하고, 그 데이터를 바탕으로 취약 지역에 방어체계를 구축함으로써 연안 침식과 이안류를 방지할 수 있다. 그림 1(a)를 보면 기존의 Ku-밴드 파도 탐지 레이더에서 사용되는 고정식 안테나는 높이가 고정되어 파도를 탐지하기 때문에 파도 타겟의 거리가 바뀌면 안테나의 높이를 수동적으로 조절해야 하는 단점이 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 그림 1(b)의 빔 분할 배열 안테나 기술을 제안한다. 이 기술은 급전 포트에 따라 빔을 집중시켜 원거리의 파도 데이터를 얻거나 빔을 분할하여 근거리의 넓은 영역의 파도 데이터를 얻을 수 있는 기술이다. 참고문헌 [4] 및 참고문헌 [5]의 논문은 마이크로스트립 선로와 슬롯 선로를 이용하여 magic-T 급전 회로 구조를 구현하였다^{[4],[5]}. 이 참고문헌 [4] 및 참고문헌 [5]에 따르면, 인쇄회로기판이 단층 구조로써 2-port 2×2 패치 안테나를 설계하였다. 빔의 분할 개수는 포트에 따라 1개에서 최대 2개의 빔을 방사하는 패턴을 보였다. 하지만 다중 포트에서 발생할 수 있는 높은 격리도의 문제와 이득의 특성에 관한 내용은 언급되고 있지 않다^{[4],[5]}. 본 저자의 발표 논문인 참고문헌 [7]에서는 빔을 4개로 분할하는 기법을 구현하였고, 동시에 적층을 통한 포트 간의 높은 격리도 특성을 확보하여 이득을 높이는 설계를 진행하였다^[7]. 하지만, 참고문헌 [7]의 논문에서는 다층 기판 구조를 이용해서 양호한 격리도 확보를 하였으나, 단층 기판 구조로 하면 포트 간의 강한 결합이 발생하여 단층 구조를 기피하고 있다. 이

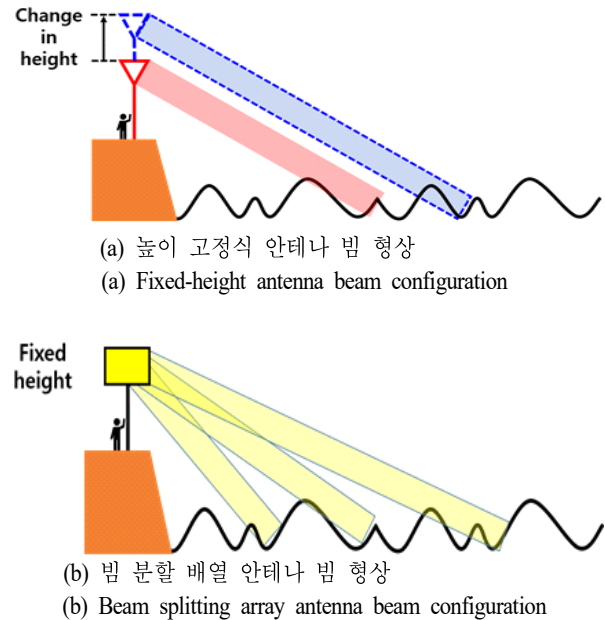


그림 1. 높이 고정식 안테나와 빔 분할 배열 안테나의 비교

Fig. 1. A comparison between fixed-height antenna and beam-splitting array antenna.

를 해결하기 위해 본 논문에서는 단층 구조에서도 높은 격리도 특성을 구현할 수 있는 4×4 빔 분할 안테나를 설계하여 이득 증가와 단층 기판 구조에서도 높은 격리도 특성을 구현하는 설계를 진행하였다.

II. 제안된 안테나의 빔 형성

2-1 제안된 안테나의 빔 특성 기법

3-port 4×4 빔 분할 배열 안테나에 의해 그림 2와 같이 빔 분할과 빔 집중 특성을 구현하였다. 그림 2(a)의 분할형 빔 특성은 배열 안테나의 소자 그룹을 4개로 나누어서 각각의 안테나 소자 그룹의 위상을 다르게 하면 빔이 분할된다. 이는 근거리의 넓은 파도 영역을 탐지하여 얻은 빅데이터를 통해 여러 파도 정보를 비교 분석할 수 있다. 그리고 그림 2(b)의 집중형 빔 특성은 4개의 안테나 소자 그룹을 동위상으로 하면 빔이 집중되어 원거리 파도 탐지의 이점을 가져서 고이득과 고분해능의 파도 정보를 취득할 수 있다. 이 기법을 통해 같은 안테나 소자를 사용

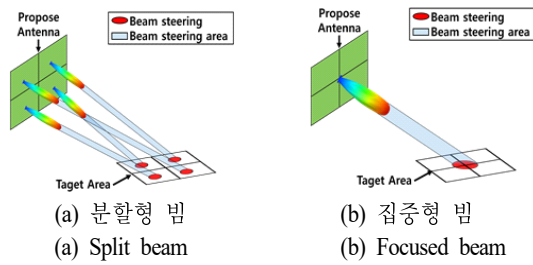


그림 2. 제안된 파도 탐지 레이더 안테나의 원리
Fig. 2. The technique of the proposed wave detection radar antenna.

하면서 빔 분할 특성과 빔 집중 특성을 구현하기 위한 설계를 진행하였다.

제안된 안테나는 3개의 급전 포트에 magic-T 회로 구조를 이용하여 패치 안테나 소자 그룹으로 인가되는 위상을 다르게 하였다. 참고문헌 [8]의 논문은 그림 3처럼 4개의 포트를 이용하여 빔을 분할하거나 집중하였다. 이렇게 빔을 4가지 위상으로 만들기 위해서는 4개의 포트가 필요하고, 4개 포트의 격리 특성을 높이기 위해서는 적층 구조를 가져야 하는 단점이 있다^[8]. 적층 구조는 안테나 전체 크기가 커지고 제작 과정에서의 비용 증가가 발생한다. 따라서 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 단층으로 진행하였고, 그림 3의 port B와 port C는 2개의 빔을 만드는 것이므로 port C를 생략하고 단층 3-port 급전 안테나로 제안하였다. 그림 4를 보면 port 1에서 급전하게 되면 2개의 안테나 소자가 역위상이 되어 빔을 동시에 방사한다. 따라서 2개의 빔이 방사된다. port 2에서 급전하게 되면 4개의 안테나 소자가 각각 대각선으로 동위상과 역위상이 되어 4개의 빔이 형성된다. 마지막으로 port 3에서 급전하게 되면 4개의 안테나 소자가 모두 동위상이 되어 1개의 빔이 형성된다. 이와 같은 원리로 급전 포트를

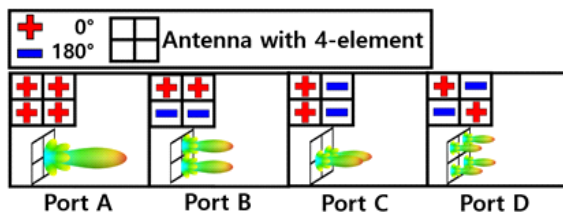


그림 3. 4-port를 이용한 빔 패턴 형성 원리
Fig. 3. Principle of beam pattern formation using a 4-port.

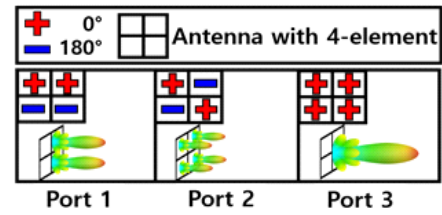
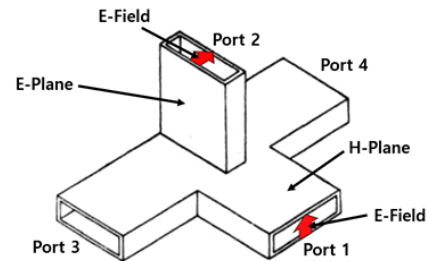


그림 4. 3-port를 이용한 빔 패턴 형성 원리
Fig. 4. Principle of beam pattern formation using a 3-port.

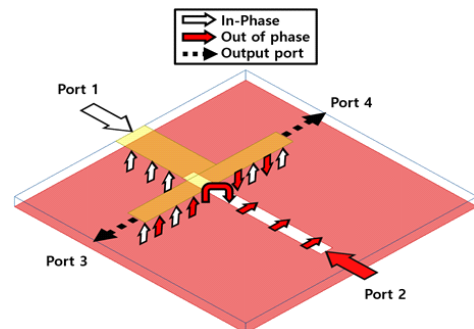
다르게하여 빔의 분할과 집중 특성을 구현하였다.

2-2 Magic-T 회로 구조의 원리

제안된 3-port 4×4 빔 분할 배열 안테나는 단층 기판 위에 마이크로스트립 선로의 슬롯 선로를 결합한 magic-T 기법을 적용하여 동위상과 역위상으로 빔을 구현하였다. 그림 5(a)는 도파관의 magic-T 회로의 구조를 보여준다. Magic-T 구조는 도파관 E-plane과 도파관 H-plane이



(a) 도파관에 적용
(a) Applied to a waveguide



(b) 마이크로스트립 선로에 적용
(b) Applied to a microstrip line

그림 5. Magic-T 구조
Fig. 5. Magic-T structure.

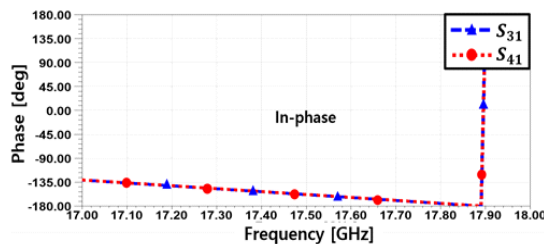
결합된 구조이다. H-plane이 있는 port 1에서 급전하였을 때는 도파관의 동일한 분배 특성 원리에 따라 동위상의 전계가 전파되어 port 3과 port 4에 급전된다. 반대로, E-plane이 있는 port 2에 급전하였을 때는 port 3과 port 4에 동일한 신호가 전달되지만, 180° 위상 차이가 발생하여 역위상 전계가 전파한다. 그리고 전파 모드 방향은 넓은 벽과 수직으로 서는 방향으로 전파되기 때문에 E-plane과 H-plane이 직교 형태의 전파 모드 방향으로 인해 포트 간의 우수한 격리 특성을 가진다. 이러한 도파관 magic-T 구조의 원리를 마이크로스트립에 적용하면 그림 5(b)처럼 port 1에서 급전할 때, 마이크로스트립 선로 분배 특성에 의해 port 3과 port 4에 동위상의 전계가 전파되고, port 2에서 급전하면 port 3과 port 4는 180° 위상 차이가 발생하는 역위상의 전계가 전파된다. 그림 6은 magic-T 원리를 증명하기 위해 단층 인쇄회로기판 위에 마이크로스트립 선로와 슬롯 선로를 설계하여 magic-T 회로 구조를 적용하여 모의실험한 주파수별 위상 결과이다. 그림 6(a)를 보면, port 1에서 급전하면 위상 S_{31} 은 중심 주파수에서 -151.16°이고, S_{41} 은 -157.94°로 약 0.22°의 차이가 있지

만 동위상으로 동작하는 것을 알 수 있다. 반면에 그림 6(b)를 보면, port 2에서 급전하면 S_{32} 는 중심 주파수에서 -124.74°이고, S_{42} 는 54.24°로 약 1.02°의 차이가 있지만, 178.98°의 위상 차이가 발생하여 역위상으로 동작하는 것을 알 수 있다. 이러한 magic-T 회로 구조를 마이크로스트립에 적용하여 급전 포트에 따른 위상차 발생 원리를 통해 빔을 분할하거나 빔을 집중시킬 수 있는 안테나를 설계하였다.

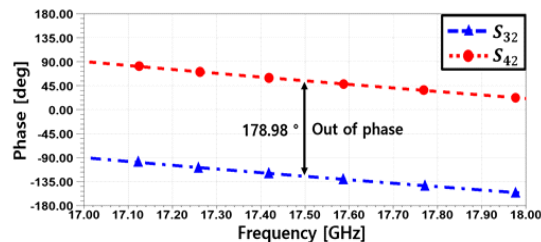
III. 제안된 안테나의 구조 및 측정

3-1 구조 및 급전 원리

그림 7은 3-port로 구성된 빔 분할을 위한 4×4 패치 배열 안테나의 구조이다. 비유전율 4.7을 가지는 FR-4 기판을 사용하였다. 제안된 안테나는 단층 기판으로 설계하였으며, 중심 주파수는 17.50 GHz에서 설계하였다. EM 시뮬레이션 도구인 HFSS를 사용하여 안테나 설계 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 7(a)의 ①, ② 그리고 ③은 설계에 사용된 magic-T 회로 구조의 위치를 나타내었다. 그림 7(b)의 ④~⑥는 접지면에 설계된 슬롯 선로의 위치를 보여준다. 각 포트에서 급전되는 구조를 설명해 보면, port 1에서 급전하면 마이크로스트립 선로를 통해 급전되고 각 ④, ⑤, ⑥ 그리고 ⑦의 슬롯 선로와 1회 결합하여 패치 안테나 소자에 급전되는 구조이다. Port 2에서 급전하면 마이크로스트립 선로를 통해 급전되고 ④의 슬롯 선로와 1회 결합하여 ①에 위치한 magic-T 회로 구조에 급전된다. 그 후에 ④, ⑤, ⑥ 그리고 ⑦에 위치한 슬롯과 결합하여 총 2회의 결합 급전이 이루어져서 급전된다. 마지막으로 port 3에서 급전하면 마이크로스트립 선로를 따라 급전된 다음, ⑧의 슬롯 선로와 1회 결합하고 ②, ③의 위치에 있는 magic-T 회로 구조에 급전된 다음, ④, ⑤, ⑥ 그리고 ⑦에 위치한 슬롯 선로와 결합하여 총 2회의 결합 급전이 이루어지는 구조이다. 그림 7(c)는 제안된 안테나의 사시도이다. #1, #2, #3 그리고 #4는 각각의 패치 안테나 그룹을 나타내고 하나의 그룹 당 4개의 패치 소자가 하나의 그룹을 이루어지며 이 4개의 소자는 동위상으로 동작된다. 그림 7의 설계된 안테나의 상세 파라미터 수치는 표 1에 정리되어있으며, 설계된 안테나에 사용된 모든

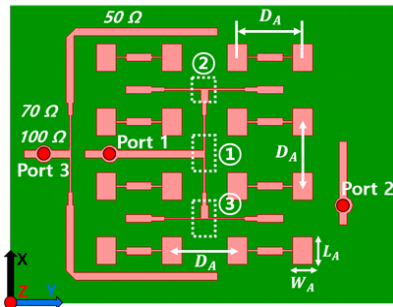


(a) Port 1 급전
(a) Port 1 feeding

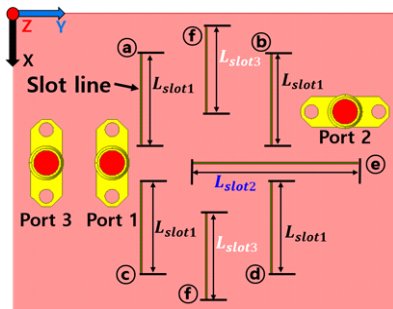


(b) Port 2 급전
(b) Port 2 feeding

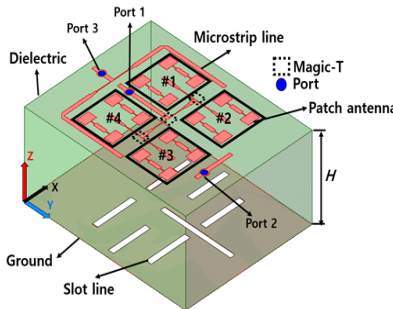
그림 6. 각각의 주파수에서 계산된 위상 결과
Fig. 6. Calculated phase results for each frequency.



(a) 상면도
(a) Top view



(b) 하면도
(b) Bottom view



(c) 사시도
(c) Oblique view

그림 7. 3-port 4×4 빔 분할 배열 안테나 구조
Fig. 7. 3-port 4×4 beam-split array antenna structure.

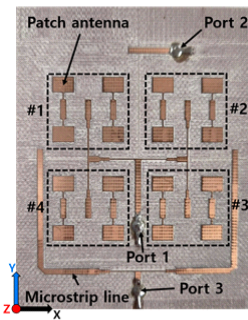
스터브의 길이는 $\lambda_g/4$ 로써 2.3 mm로 설계하였다. 또한 모든 슬롯의 넓이 W_{slot} 은 0.3 mm이다.

그림 8은 제작된 안테나의 실물 사진이다. 제작된 안테나의 전체 크기는 70 mm×55 mm이다. 각 포트를 이용하여 안테나 소자에 급전하기 위해 RF SMA 2-Hole 커넥터를 사용하였다. 급전 방식은 접지에서 수직으로 가장 상

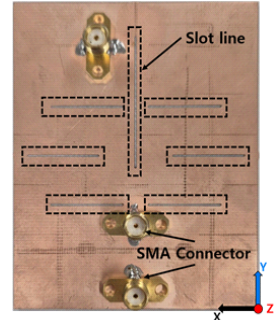
표 1. 제안하는 안테나의 설계 변수 (단위: mm)

Table 1. Proposed antenna design parameters in mm.

50 Ω	1.4	λ_g	9.2
70 Ω	0.8	$\lambda_g/4$	2.3
100 Ω	0.3	H	0.8
L_A	3.6	W_{slot}	0.3
W_A	5	L_{slot1}	16.8
D_A	11.8	L_{slot2}	30
λ	17.1	L_{slot3}	15.6



(a) 상면도
(a) Top view



(b) 하면도
(b) Bottom view

그림 8. 단층 인쇄회로기판을 이용하여 제작된 안테나 사진
Fig. 8. A photo of an antenna fabricated using a single-layer printed circuit board.

층에 있는 마이크로스트립 선로에 직접 급전하기 위한 구조이다.

3-2 반사계수 및 격리도 비교

그림 9는 3-port 4×4 빔 분할 배열 안테나의 각 포트별 반사계수에 대한 모의실험값과 측정값의 비교 결과이다. 표 2는 중심 주파수인 17.5 GHz에서의 모의실험과 측정된 반사계수 비교 표이다. 그림 9 및 표 2를 보면 제작된 안테나의 측정된 반사계수는 모의실험보다 약 50 MHz 저주파수에서 공진하였으나, 17.50 GHz에서 -20 dB 이상의 성능을 보여 유의미한 측정 결과를 확인하였다. 이러한 측정에서 관측된 주파수 공진이 발생한 이유는 Ku-밴드 대역과 같은 높은 주파수의 대역에서는 기판의 비유전율에 매우 민감한 반응을 보인다. 일반적으로 낮은 주파수 대역에서 사용되는 FR-4 기판을 상대적으로

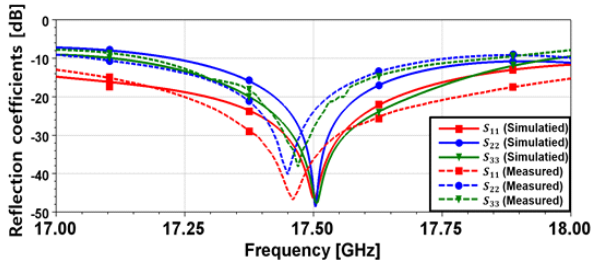


그림 9. 모의실험과 측정의 반사계수 비교 결과
Fig. 9. Comparison results of reflection coefficients of simulation and measurement.

표 2. 17.5 GHz의 모의실험과 측정된 반사계수 비교
Table 2. Comparison of reflection coefficients between simulation and measured.

Port number (S-parameter)	Simulated (dB)	Measured (dB)
Port 1 (S_{11})	-45.44	-33.14
Port 2 (S_{22})	-44.21	-23.84
Port 3 (S_{33})	-45.11	-28.11

높은 주파수 대역인 Ku-밴드 대역에서 밀링머신으로 제작하였기 때문에 안테나 표면이 매끄럽지 못하다. 그로 인해 비유전율에 의한 저항성이 커지게 되어 3개의 포트에서 공통적으로 약 50 MHz 낮은 주파수에서 공진이 발생하는 현상이 나타났다.

그림 10은 제안된 안테나의 모의실험과 측정의 격리도 비교 결과 그래프이다. 3개의 포트 모두가 넓은 대역에 걸쳐서 -23 dB 이하의 우수한 격리도 특성을 얻었다. 그 이유는 magic-T 급전 회로 구조로 인해 마이크로스트립 선로로 전달되는 전계와 슬롯 선로로 전달되는 전계의 방향이 서로 겹치지 않는 직교 형태이기 때문에 높은 격

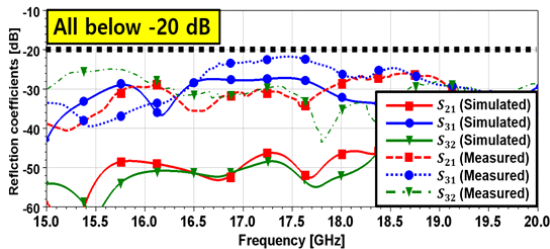


그림 10. 모의실험과 측정의 격리도 비교 결과
Fig. 10. Comparison of the simulated and measured isolation.

리도의 특성을 보였다. 또한 S_{31} 이 S_{21} 과 S_{32} 보다 격리도가 다소 나쁜 이유는 port 1과 port 3이 상대적으로 가깝고, port 2와 port 1, 그리고 port 2와 port 3은 상대적으로 멀리 위치하기 때문이다. 그러나 모두 -23 dB 이하의 특성을 보이고 있으며, -23 dB와 -30 dB의 차이는 1/200로 매우 미세한 차이로서 모두 우수한 특성이라 할 수 있다. 그리고 모의실험값과 측정값이 커넥터의 손실과 제작에 대한 오차로 인해 S_{21} 과 S_{32} 가 약 -20 dB의 차이를 보였으나, 측정치 모두 -30 dB 이하의 성능을 보였다.

3.3 방사 패턴 비교

제안된 안테나는 전자파기술원의 중대형 전파암실에서 측정하였다. 그림 11은 각 포트에서 급전할 때 모의실험

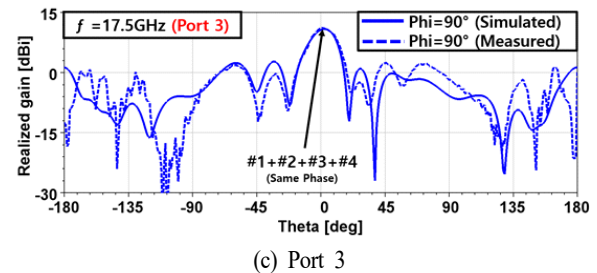
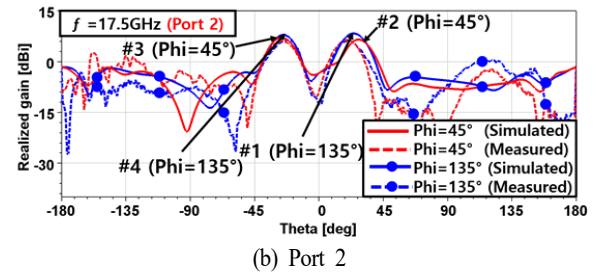
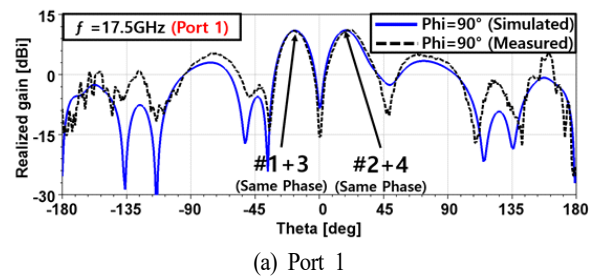


그림 11. 모의실험값과 측정값의 2-D 방사 패턴 비교
Fig. 11. Comparison of simulated and measured 2-D radiation patterns.

표 3. 모의실험과 측정의 빔 이득 비교

Table 3. Comparison of beam gain between simulation and measured.

Port number	Beam number	Simulated (dBi)	Measured (dBi)
Port 1	#1+#3	10.94	10.90
	#2+#4	11.02	10.86
Port 2	#1	6.85	6.25
	#2	6.12	6.40
	#3	6.28	6.11
	#4	7.75	6.39
Port 3	#1+#2+#3+#4	11.10	11.04

험과 측정된 2-D 방사 패턴 비교 결과 그래프이다. 그림 11(a)를 보면 port 1에서 급전하였을 때는 $\phi=90^\circ$ 에서 빔의 형상이 패치 안테나 그룹 #1, #3와 #2, #4가 안테나 회로 구조를 통해 서로 다른 전계 방향을 가지게 되어 2개의 빔이 분할되는 결과를 얻었다. 그림 11(b)는 port 2에서 급전하였을 때의 결과이다. $\phi=45^\circ$ 와 $\phi=135^\circ$ 에서 보면 각각 2개의 빔이 형성되어 총 4개의 빔이 형성되었다. 따라서 빔 분할 특성이 제작된 안테나에서도 잘 나타나는 결과를 얻었다. 마지막으로 그림 11(c)를 보면 port 3에서 급전하였을 때는 $\phi=90^\circ$ 에서 빔의 형상을 보았을 때, 1개의 주 빔이 형성되는 결과를 얻어서 하나의 빔이 방사되는 빔 집중 특성을 구현하였다.

표 3는 중심 주파수에서 측정한 각 port의 모의실험과 측정된 빔의 이득 값을 비교한 표이다. 커넥터의 손실과 안테나 제작 과정에서 슬롯 표면이 매끄럽지 않아 미세한 오차가 발생하기는 하였으나, 전체적으로 보면 모의실험값과 측정값은 모두 잘 일치하였다.

3.4 피크 이득 비교

그림 12는 목표 주파수 대역 17.2 GHz에서 17.8 GHz까지 100 MHz 간격으로 피크 이득을 모의실험한 것과 측정된 이득 값을 비교한 그래프이다. Port 1과 port 3는 모의실험 값과 측정치가 잘 일치하는 결과를 얻었지만, port 2의 경우, 3-1 구조 및 급전 원리에서 언급했듯이, magic-T 급전 슬롯과 마이크로스트립 선로의 2회에 걸친 결합으로 인해 약전력이 안테나 소자에 전달되기 때문에 이

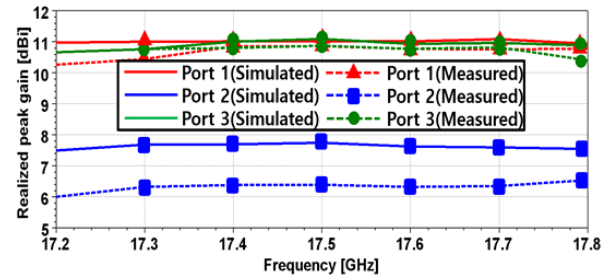


그림 12. 3-port 4×4 빔 분할 배열 안테나의 각 포트의 반사계수에 대한 모의실험값과 측정값의 비교 결과

Fig. 12. Comparison results between simulated and measured peak gains for each port of the 3-port 4×4 beam splitting array antenna.

득이 낮으며, 안테나를 제작할 때 슬롯의 급전 경계 부분이 매끄럽지 못한 것 등으로 인해서, 모의실험값과 측정값에 약 1 dBi 정도의 오차가 발생하였다. 중심 주파수에서 각 포트의 이득이 차이가 나는 이유는 port 1에서 급전하였을 때 패치 안테나 소자 그룹 #1, #3과 #2, #3이 서로 다른 전계방향으로 인해 각각 8개의 패치 안테나 소자가 동작하고, port 2에서 급전하였을 때, 패치 안테나 소자 그룹 #1, #2, #3 그리고 #4가 각각 4개의 그룹으로 동작한다. 마지막으로 port 3에서 급전하면, 패치 안테나 소자 그룹 #1, #2, #3 그리고 #4가 서로 동위상으로 16개의 패치 안테나 소자가 동작되어 가장 높은 이득을 보였다. 따라서 급전 포트에 따라 패치의 수가 달라서 port 1, 3과 port 2는 다른 포트들과 비교하여 약 3 dBi 이상의 차이를 보였다. 또한 port 1과 port 3을 보면, 측정된 이득 차이의 값이 약 0.14 dBi로 매우 작다. 그 이유는 port 1의 경우, 3-1에서 급전 구조를 설명했듯이, 슬롯 선로와 마이크로스트립 선로가 1회 결합되는 구조이다. 반면에, port 3은 슬롯 선로와 마이크로스트립 선로의 결합이 2회에 걸친 약결합으로 인해 급전 신호의 세기가 약하게 패치에 전달되기 때문에 이득의 차이가 작은 것이다.

IV. 결 론

본 논문은 기존 Ku-밴드 파도 탐지 레이더의 안테나 높이 조정 문제를 해결하기 위해 4×4 빔 분할 안테나 설

계를 통하여 안테나 높이의 인위적 조정 없이 빔의 조향을 제어하기 위해 연구를 수행하였다. 특히, magic-T 회로의 높은 격리도 특성 원리를 이용하여, 급전 포트에 따라 안테나 소자의 빔 패턴을 조절하는 새로운 빔 분할 조향 기술을 개발하였다. 제안된 3-port 4×4 빔 분할 배열 안테나는 반사계수의 경우 -20 dB 이하이고, 각 포트 간의 격리도는 -23 dB 이하로 우수한 것으로 나타났다. 또한 빔 분할과 빔 집중형의 타당성을 검증하였다. 또한, 방사 패턴 측정 결과, 1개에서 4개까지 빔을 방사하는 우수한 특성을 확인하였다. 최종적으로 집중형 빔과 분산형 빔을 생성할 수 있는 안테나의 설계법을 제안하였으며, 이러한 결과는 원항운행을 하는 대형 선박의 자율 운항 및 경제 운항용 레이더 안테나 및 군용 레이더 안테나로 활용될 것으로 기대된다. 향후 연구 과제로는 빔을 자유롭게 움직이기 위해 위상변위기를 적용하여 각 포트별로 빔을 집중시켜 원거리에 있는 고이득과 고해상도를 가지는 파도 데이터를 획득하거나, 빔을 분할하여 최대 4개의 빔을 자유롭게 조정해서 넓은 영역에서 파도 데이터 정보 수집이 가능하도록 연구를 계획하고 있다.

References

- [1] Ohmynews, "The East Coast landscape, a natural resource, is collapsing," 2023. Available: https://www.ohmynews.com/NWS_Web/View/at_pg.aspx?CNTN_CD=A0002909232
- [2] Y. S. Yeoh, K. S. Min, "Characteristics of 6×26 slotted waveguide array antenna for wave monitoring radar system," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 21, no. 5, pp. 439-447, Nov. 2021.
- [3] K. Do, J. Kim, "A study on the predictability of eastern winter storm waves using operational wind forecasts of KMA," *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, vol. 30, no. 5, pp. 223-233, Oct. 2018.
- [4] T. P. Phyo, E. Nishiyama, and I. Toyoda, "A 5.8-GHz dual-axis monopulse microstrip array antenna using dual-feed network," in *2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, Kyoto, 2018, pp. 1549-1551.
- [5] H. Sakai, E. Nishiyama, and I. Toyoda, "Direction of arrival estimating array antenna," in *2012 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, Nagoya, Oct.-Nov. 2012, pp. 1124-1127.
- [6] S. W. Yi, K. S. Min, and Y. S. Yeoh, "Design of a four-port phase control antenna for ku-band wave detection radar system using Magic-T circuit structure," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science (JKIEES)*, vol. 35, no. 1, pp. 1-6, Jan. 2024.
- [7] T. Tomura, J. Hirokawa, M. Ali, and G. Carpintero, "Millimeter-wave multiplexed wideband wireless link using rectangular-coordinate orthogonal multiplexing(ROM) antennas," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 24, pp. 7821-7830, Dec. 2021.

이 승 우 [한국해양대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-5621-9376>



2020년 2월: 경운대학교 항공정보통신공학과 (공학사)
2022년 9월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 석사과정
[주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계

여 유 석 [한국해양대학교/박사과정]

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



2020년 2월: 경운대학교 항공정보통신공학과 (공학사)
2020년 3월~2022년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학석사)
2022년 3월~2024년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 박사 수료
2024년 3월~현재: 한국해양대학교 전파

공학과 박사과정
[주 관심분야] 슬롯 배열 도파관 안테나 설계

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 방문 교수

2017년 1월~2018년 1월: 미국 캘리포니아 주립대학교 (프레즈노) 방문 교수

2020년 1월~2020년 12월: 한국전자파학회 학회장

2021년 1월~현재: 한국전자파학회 명예회장

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, 고이득 레이더 안테나, MIMO 안테나 설계 등