

광각용 도파관 안테나 설계 방법 -중첩 빔 포밍 레이다용 배열 안테나-

Design of Waveguide Antenna for Wide-Angle Beam -Overlap Beamforming Array Antenna for Radar-

한 인 희 · 우 종 명

In-Hee Han · Jong-Myung Woo

요 약

본 논문에서는 중첩 빔 포밍을 이용한 레이다의 운용 방식을 제시하고, 이를 구현하기 위한 광각용 도파관 배열 안테나를 제시하였다. 먼저, 축소형 도파관 안테나를 설계하여 광각화 특성을 얻었고, 빔 조향각을 확대시키기 위해 릿지 도파관 안테나를 설계하였다. 설계 중심 주파수 9.375 GHz에서 릿지 도파관 안테나 방사 개구면의 크기는 14 mm×8 mm이고, WR-90 표준 도파관과 비교하여 48.2 %의 소형화율을 얻었다. 이를 이용하여, 1 × 8 배열 안테나를 설계 및 제작하였다. 그 결과, 각 안테나의 E-plane의 평균 빔폭은 120°, H-plane의 평균 89.7°를 얻었다. 빔 조향 검증을 위해 빔 조향 각도에 해당하는 위상 변이기를 다수 제작하고, 1×8 배열 안테나에 의한 빔 조향 측정으로부터 설계한 빔 조향 각도와 일치하는 것을 확인하였다. 이로써, 소형화된 릿지 도파관 배열 안테나는 6각 배열 구조의 광각 빔 조향에 적합한 특성을 갖는 것을 확인하였다.

Abstract

In this work, we suggest a radar operation using overlap beamforming and present a wide-angle waveguide array antenna for implementation. First, we design a reduced-waveguide antenna to obtain wide-angle properties, and then we design a ridge-waveguide antenna to enlarge the beam-steering angle. At the designed center frequency of 9.375 GHz, the size of the ridge-waveguide antenna radiation aperture is 14 mm×8 mm, and a miniaturization rate of 48.2 % is obtained compared to the WR-90 standard waveguide. Using this scheme, a 1×8 array antenna was designed and manufactured. Consequently, the average beamwidth of the E-plane of each antenna was 120°, and the average beamwidth of the H-plane was 89.7°. For the beam-steering verification, several phase shifters corresponding to the beam-steering angles were fabricated, and it was confirmed that the beam-steering angle was consistent with the designed value via beam-steering measurements using the 1×8 array antenna. Accordingly, we confirmed that the miniaturized ridge-waveguide array antenna had characteristics suitable for wide-angle beam steering for a hexagonal array structure.

Key words: Ridge Waveguide Antenna, Beamforming, Wide Angle Scanning, Anti-Jamming

I. 서 론

레이다는 전자파를 복사하여 목표 물체의 표면으로부터

「이 연구는 2018학년도 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음.」

충남대학교 전파정보통신공학과(Department of Radio Science & Communication Engineering, Chungnam National University)

· Manuscript received April 30, 2021 ; Revised May 18, 2021 ; Accepted June 7, 2021. (ID No. 20210430-047)

· Corresponding Author: Jong-Myung Woo (e-mail: jmwoo@cnu.ac.kr)

터 반사되는 전자파의 에코를 수신하고, 표적정보를 수집하는 장치이다. 최근 RF 소자 및 디지털 기술의 비약적인 발전으로 레이다는 더욱 첨단화되고, 고 정밀 고 기동 다기능의 임무 수행이 가능하게 되었다. 따라서 빔 운용 방법도 기계식 회전방식에서 위상배열 안테나를 이용한 전자식 빔 조향 방식으로 전환되고 있다^[1]. 이는 경제성 면에서 다소 불리하나, 표적의 탐지 속도, 정확도뿐만 아니라, 다중표적 탐지가 가능한 강력한 기능을 보유할 수 있게 되었다^[2]. 그러나 배열 복사 소자의 빔 조향각 허용범위 한계 때문에 레이다의 배치에 제한을 받고 있다.

예로, 함정 탑재 빔 조향 안테나는 보통 4개 세트로 이루어져 있다. 이 중에는 운행 중 적의 공격으로부터 1개 세트가 파손되면 수평면상 90°의 사각 영역이 생성된다. 양 측면에서 각각 일부 각도만큼 빔 조향 보안을 위해서는 개별 소자의 빔 광각화를 이루어야 한다.

따라서, 본 논문에서는 이러한 결점을 보완하기 위해 새로운 개념의 3차원 레이다 빔 운용 방식을 제시하고, 이에 수반되는 광각 빔 조향이 가능한 구형 도파관에 릿지 구조를 적용한 광각용 도파관 안테나를 설계하고, 이를 이용하여 1×8 배열 안테나의 수평면상에서 120°의 빔 조향 특성을 얻고자 하였다. 이에 대한 연구 과정에 대해 기술하고자 한다.

II. 본 론

2-1 새로운 3차원 레이다 운용개념

기존의 함정 탑재 3차원 레이다는 안테나를 90° 간격으로 4면에 배치하여 방위각 방향으로 360° 전 방향을 탐지할 수 있도록 운용하고 있다. 그러나 4면 중 1면이라도 동작 불능 상태가 되면 해당 90° 영역은 탐지가 불가능하다. 동작 불능을 야기하는 원인으로는 자체 기능 불량일 수 있고, 고출력 재밍 피폭에 의한 기구적 파손을 예로 들 수 있다^[3].

본 논문에서 제시하고자 하는 3차원 레이다 빔 운용 방식은 그림 1(a)와 같은 6각 배열 구조의 레이다로 1면당 120°의 조향 영역을 갖는다고 가정하면, 3면으로 360° 전 방향 탐지가 가능하고, 그림 1(b)와 같이, 최대 3면 동작 불능 시에도 다른 이웃 안테나로 대체 운용이 가능하다.

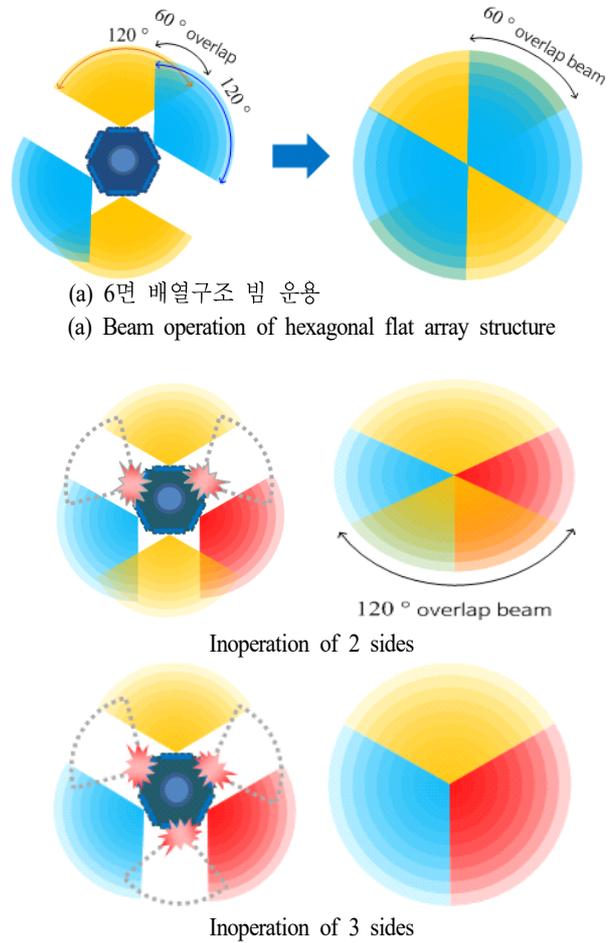


그림 1. 6면 배열구조 빔 운용 개념

Fig. 1. Beam operation concept of hexagonal flat array structure.

또한, 6면 모두 가동 시 6개의 중첩 빔을 형성(중첩 빔 360°)하여 어떤 한 방향으로의 이득을 극대화시킬 수 있다. 따라서, 이와 같이 중복 및 운용 방식을 채택한 레이다는 한쪽 면이 동작 불능 시 양 측면 안테나로부터 동작 불능에 의한 사각 지대를 커버할 수 있어 운용의 신뢰성을 높일 수 있다.

2-2 축소형 도파관 안테나 설계

먼저, 앞서 제시한 설계 목표인 빔 조향 폭 120°를 얻기

위해서는 배열 소자의 빔폭이 120° 가 되어야한다. 개별 소자 안테나를 도파관 안테나로 선정할 경우, 개구면 크기를 축소시켜 광각화를 이루고자 하였다. 표준 도파관 WR-90의 경우, X-band(설계 중심주파수 9.375 GHz, $\lambda = 3.2$ cm) 구형 도파관의 폭 a 는 22.86 mm, 높이 b 는 10.16 mm이다. 광각 빔을 얻기 위해 개구면을 축소시켰으며, 이때 TE_{10} 모드에서 높이 b 는 비교적 자유롭게 줄일 수 있는 반면에 폭 a 는 차단주파수를 포함한 감쇠 영역을 피해서 설계하여야 한다. 따라서 TE_{10} 모드인 경우, 그림 2에서 폭 a 가 18.8 mm 일 때 차단주파수는 $(f_c)_{10} = c/2a \approx 8$ GHz이다. 높이 b 는 8 mm로 설정하였다. 여기서 c 는 빛의 속도이다.

여러 개의 복사 소자를 배열할 경우, 커넥터 및 케이블에 의해 배열 간격에 제한을 주기 때문에 그림 3(a)와 같이 도파관 끝면 급전을 고려하여 설계하였다. 끝면 급전(end-launch)^{[4],[5]}에 있어서 임피던스 매칭을 위해 단락 부분을 테이퍼링시켰다. 그림 3에 끝면 급전구조에 대한 단면 구조, 전계 분포, 반사손실 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

설계 주파수 9.375 GHz에서 삽입손실은 0.1 dB 이하, S_{11} 은 -40 dB 이하로 정합되었다.

그림 4에는 축소형 도파관 안테나의 방사패턴 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 빔 폭은 E-plane 방향으로 128° , H-plane에 대하여 68° 를 얻었다.

2-3 릿지 도파관 안테나 설계

다음은, 더욱 향상된 빔 광각화 특성을 위해 개구면의

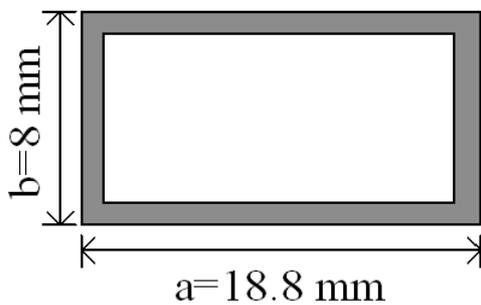
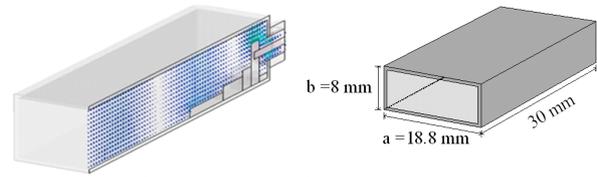
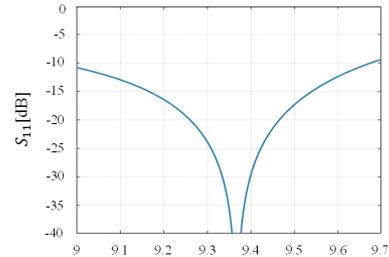


그림 2. 축소된 도파관 크기
Fig. 2. Reduced waveguide size.

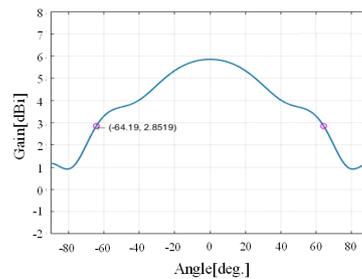


(a) 전계 분포 및 안테나 구조
(a) E-field distribution and antenna structure

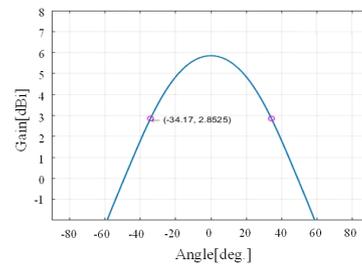


(b) S_{11}

그림 3. 축소형 도파관 안테나 끝면 급전 (시뮬레이션)
Fig. 3. End-launch feeding of reduced waveguide antenna (simulation).



(a) E-면
(a) E-plane



(b) H-면
(b) H-plane

그림 4. 축소형 도파관 안테나 방사패턴 (시뮬레이션)
Fig. 4. Radiation patterns of reduced waveguide antenna (simulation).

릿지를 이용하여 소형화하고자 하였다. 축소형 릿지 도파관 안테나는 섭동이론(perturbation theory)^{[6],[7]}에 의해 그림 5에 나타낸 바와 같이, 전계 에너지가 강한 부분에 릿지를 위치시키면 공진 주파수가 하향하여, 동일 설계 주파수에서 도파관 폭이 줄어들 수 있고, 릿지 간격이 좁을 수록 도파관 폭을 더욱 줄일 수 있다. 이로써, 높이와 폭의 크기를 훨씬 줄일 수 있다.

그림 6(a)에 나타낸 바와 같이, 도파관 내에 이중 릿지를 삽입시켰으며, 도파관의 높이 b 를 8 mm로, 폭 a 는 더 작은 14 mm로 줄였다. 여기서, 급전은 끝면 급전 방법을

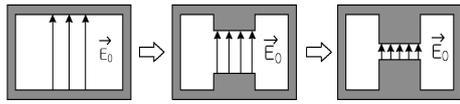
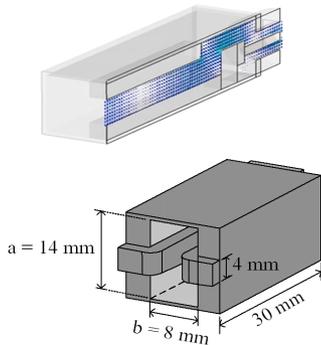


그림 5. 릿지 크기에 따른 전계 분포 변화
Fig. 5. Variation of electric field distribution by the ridge size.



(a) 전계 분포 및 안테나 구조
(a) E-field distribution and antenna structure

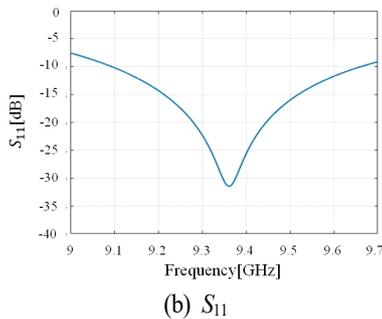
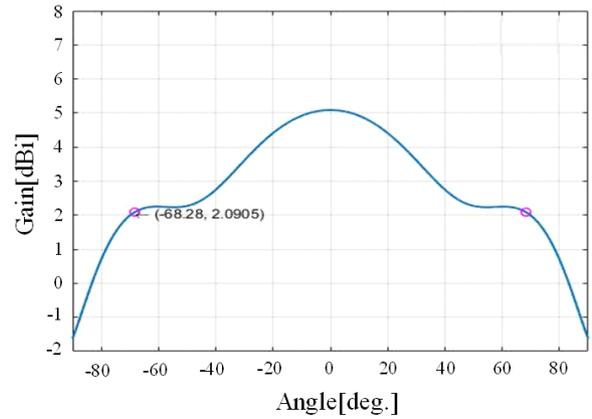


그림 6. 릿지 도파관 안테나 끝면 급전 (시뮬레이션)
Fig. 6. End-launch feeding ridge waveguide antenna (simulation).

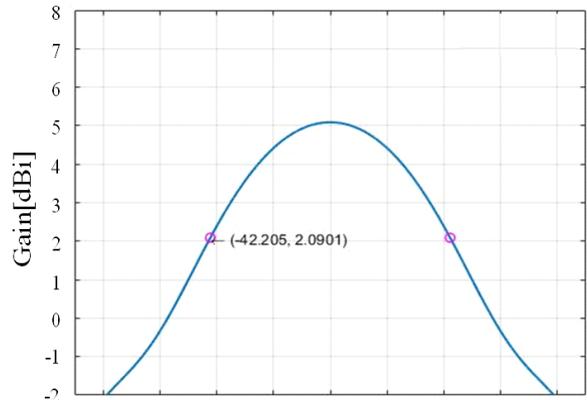
채택하였다. 릿지 삽입 도파관 안테나의 단면 구조 및 전계 분포, 치수, 반사손실의 시뮬레이션 결과를 그림 6에 나타내었다. 시뮬레이션 결과, 주파수 9.375 GHz에서 -30 dB의 S_{11} 을 확보하였다.

그림 7에는 릿지 삽입 도파관 안테나의 방사패턴 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 빔 폭은 E-plane 방향으로 136°, H-plane에 대하여 84.4°를 얻었다. 축소형 도파관 안테나 대비 광각의 빔 폭을 얻음을 확인하였다.

축소된 도파관 안테나와 비교하여 E-plane 8°, H-plane 16.4°의 광각화 특성을 얻었다.



(a) E-면
(a) E-plane



(b) H-면
(b) H-plane

그림 7. 릿지 도파관 안테나 방사 패턴(시뮬레이션)
Fig. 7. Radiation patterns of ridge waveguide antenna (simulation).

표 1. 도파관 안테나 특성

Table 1. Characteristic of waveguide antennas.

	Standard waveguide	Ref. [8]	Designed antenna
Aperture structure	Rectangular	Bow-tie	H-shape
Aperture size [mm]	22.86×10.16	16×10.5	14×8
Beamwidth (single element) [°]	E-plane: 97.4 H-plane: 60.6	-	E-plane: 136 H-plane: 84.4
Beam steering angle[°]	-	± 45	± 60

제안된 안테나 개구면은 ‘H’ 형태의 구조를 적용함으로써, 14 mm × 8 mm 크기로 축소시켜, 구형 표준 도파관 대비 52 %의 소형화를 얻었다. 또한, 일부 유사한 방법으로 설계한 참고문헌 [8]은 X-band에서의 광각 스캐닝을 위한 보우타이 슬롯 도파관 안테나로, 개구 형태는 광대역 특성을 위한 보우 타이 형태이며, 크기는 16 mm × 10.51 mm를 갖는다. 빔 조향 각도는 ±45° 특성을 갖는다. 제안한 안테나는 ±60°의 빔 조향각 특성을 보였다. 이에 대한 결과를 표 1에 나타내었다.

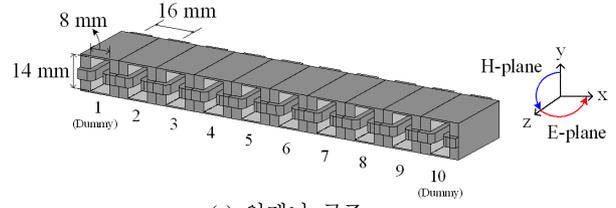
2.4 릿지 도파관 1×8 배열 안테나 설계

그림 8(a)에 나타낸 바와 같이, 그림 6의 릿지 삽입 도파관 안테나를 수평 방향으로 16 mm 간격으로 8개 배열하고 양 끝단에 빔의 왜곡을 막기 위해 더미 안테나를 추가 배치하였다. 안테나 배열 형상 및 예로, 5번째 안테나의 반사손실(return loss)의 시뮬레이션 결과를 그림 8에 나타내었다. 시뮬레이션 결과, -10 dB 대역폭은 9.3 GHz ~9.55 GHz(2.7%)를 얻었다.

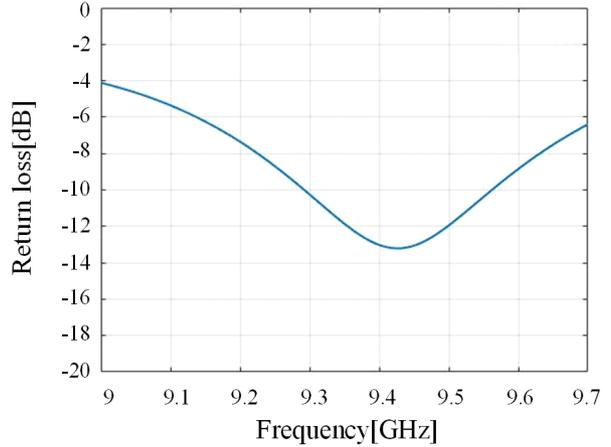
다음으로, 릿지 삽입 도파관 배열 안테나의 8배열 복사 소자에 각각 위상차를 주어 -72°에서 72°까지 조향한 결과를 그림 9에 나타내었다. 빔은 12° 간격으로 조향되었다. 여기서, 빔이 광각으로 조향될수록 이득이 감소하고, 빔 폭이 커지는 것을 확인할 수 있다.

2.5 제작 및 측정 결과

그림 10에 나타낸 바와 같이, 1×8 배열 축소형 릿지 도



(a) 안테나 구조
(a) Antenna structure



(b) 반사손실
(b) Return loss

그림 8. 릿지 도파관 1×8 배열 안테나 구조 및 반사손실 (시뮬레이션)

Fig. 8. Structure and return loss of ridge waveguide 1×8 array antenna (simulation).

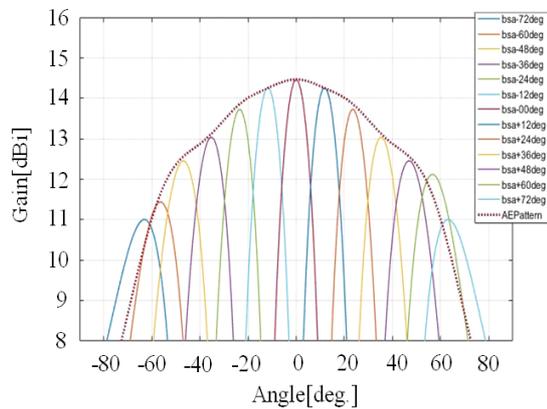


그림 9. 배열 시 릿지 도파관 방사 패턴 및 1×8 배열 안테나의 빔 조향 패턴 (시뮬레이션)

Fig. 9. Active element and beam steering radiation patterns of ridge waveguide 1×8 array antenna (simulation).

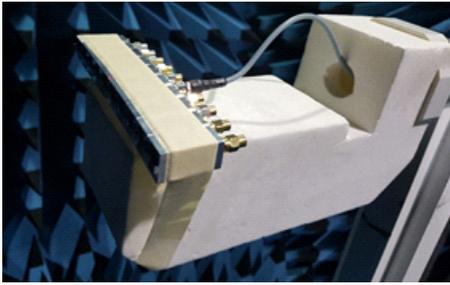


그림 10. 릿지 도파관 1×8 배열 안테나 패턴 측정 셋업
Fig. 10. Radiation pattern measurement set-up of ridge waveguide 1×8 array antenna.

파관 안테나를 제작하고, 이를 조립하여 제 특성을 측정하였다. 안테나의 좁은 면 벽의 두께는 4 mm, 넓은 면 벽의 두께는 0.5 mm의 알루미늄(aluminum)을 사용하여 제작하였다. 시험 장소는 (주)엠티지 패턴 측정 시설을 활용하였다. 그림 11에는 5번째 안테나의 반사손실(return loss)의 측정 결과를 나타내었다. 측정 결과, -10 dB 대역폭은 9.16 GHz~9.66 GHz(5.3%)를 얻었다.

그림 12에는 9.375 GHz에서의 시뮬레이션 방사패턴과 9.05 GHz에서 9.70 GHz까지 9개 주파수에 대해 중간 5번째 소자에 대한 방사 패턴 측정 결과를 나타내었다.

이득의 시뮬레이션 결과는 5.53 dBi, 측정 결과는 5.08 dBi를 얻었다. E-plane 빔 폭 시뮬레이션 결과는 118.4°이었고, 측정 결과는 120.9°로 나타났다. H-plane 빔 폭 시뮬

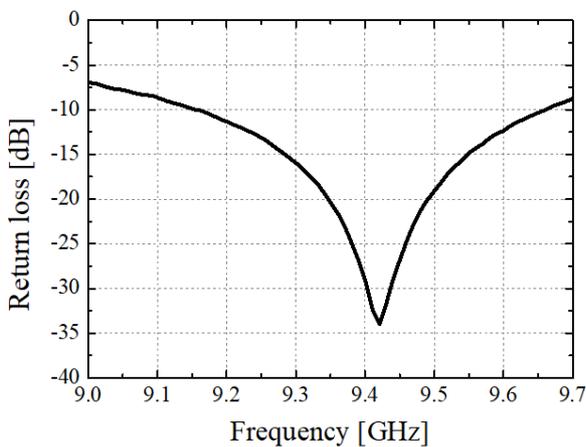
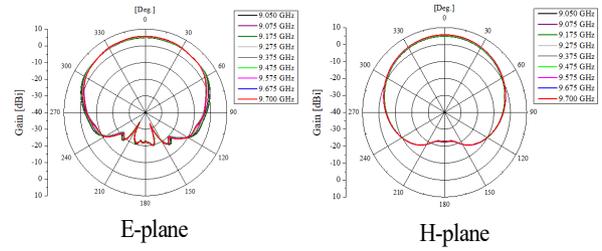
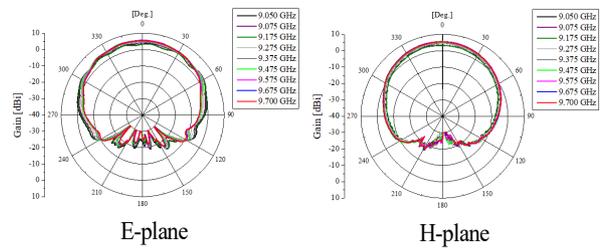


그림 11. 릿지 도파관 1×8 배열 안테나 반사손실 (측정)
Fig. 11. Return loss of ridge waveguide 1×8 array antenna (measurement).



(a) 시뮬레이션
(a) Simulation



(b) 측정
(b) Measurement

그림 12. 릿지 도파관 1×8 배열 안테나 방사 패턴
Fig. 12. Radiation patterns of ridge waveguide 1×8 array antenna.

레이션 결과는 93.2°이고, 측정 결과는 89.7°로 나타났다. 시뮬레이션에는 커넥터 손실을 고려하지 않았기 때문에 0.49 dB의 이득차가 나는 것을 확인하였다.

2-6 8-way 전력 분배 위상 조절기 제작 및 측정

빔 조향 실험을 위해 그림 13에 나타난 바와 같이, 빔 조향각 0°, 15°, 30°, 45°, 60°의 전력 분배 위상 변이기를 제작하였다. 기판은 Taconic사의 TLX-8 테플론 기판을 사용하였고, 두께는 $t=0.8$ mm, $\epsilon_r=2.55$ 이다. 마이크로스트립

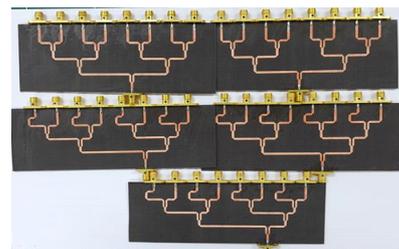


그림 13. 제작된 8-way 전력 분배 위상 변이기
Fig. 13. Fabricated 8-way power divided phase shifter.

라인의 패턴은 충남대학교 전파공학과 에칭 장비를 활용하였고, 커넥터는 중심 도체가 0.5 mm인 SMA를 사용하였다. 측정은 Agilent사의 5730A VNA를 활용하였다. 실제 5가지에 대해 모두 측정하였으나, 한 예로 빔 조향각 30°에 대한 위상 변이기 특성 결과를 그림 14(b)~그림 14(e)에 나타내었다. 반사손실은 1~8번을 정합시키고, 입력(input) 포트에서 측정하였으며, 진폭 밸런스는 주파수 9.375 GHz에서 해당되는 진폭을 재배열하였다. 전력 분배 위상 변이기는 빔 조향(30°)을 위해 각 포트에 할당된 계산한 위상값과 시뮬레이션 위상값 그리고 측정된 위상

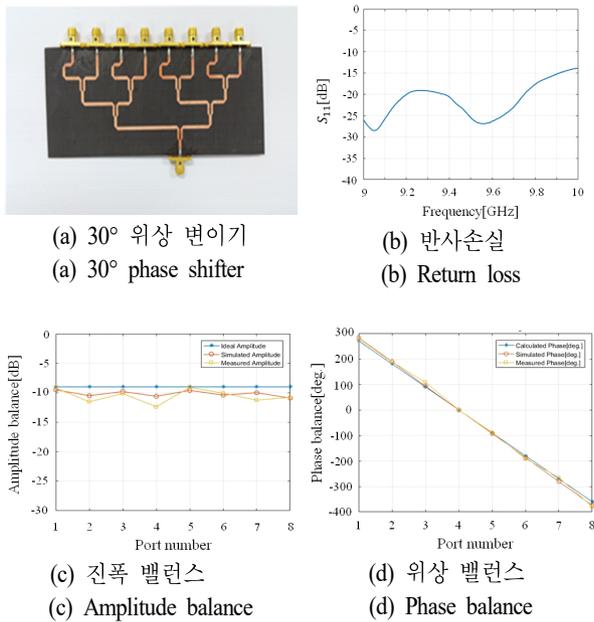


그림 14. 제작된 30° 8-way 위상 변이기 측정 결과
Fig. 14. Measurement results of fabricated 8-way phase shifter.

값을 동시에 나타내었다. 반사손실의 측정값은 -19 dB 이하의 특성을 얻었고, 진폭은 ±2 dB의 변화를 나타내었다. 위상은 ±10° 이내로 변화하였다. 빔 조향각에 따른 위상 밸런스는 ±13° 범위 내의 결과를 얻었다.

2-7 릿지 도파관 1×8 배열 안테나 빔 조향 패턴 측정

1×8 배열 복사 소자에 대한 빔 조향 특성을 확인하기 위해 그림 15와 같이, 전력 분배 위상 변이기를 적용하여 근접전계 측정을 수행하였다. 측정은 (주)엠티지 본사의 3 m×4 m 근접전계 시험시설을 활용하여 측정하였다.

빔 조향각 30°(BSA=30°)에 대한 근접전계 측정 결과를 그림 16에 나타낸 바와 같이, 3D far-field 복사패턴과 E-plane 패턴으로 나타내었다.

시뮬레이션 이득은 13.4 dBi이고, 측정이득은 11.3 dBi이다. 전력 분배 위상 조절기의 평균 삽입손실은 1.6 dB

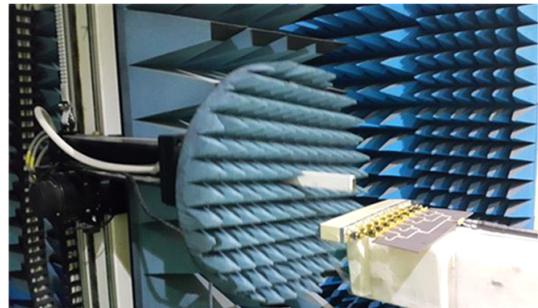


그림 15. 릿지 도파관 1×8 배열 안테나 빔 조향 패턴 측정 셋업

Fig. 15. Beam steering measurement set-up of ridge waveguide 1×8 array antenna.

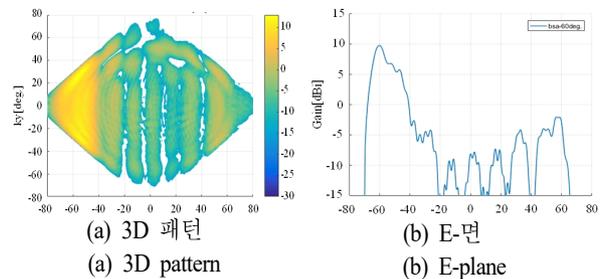


그림 16. 릿지 도파관 1×8 배열 안테나 방사 패턴 (측정)
Fig. 16. Radiation patterns of ridge waveguide 1×8 array antenna (measurement).

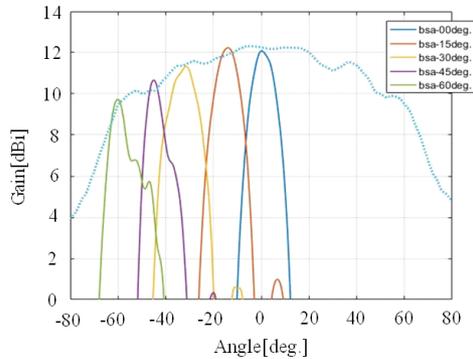


그림 17. 릿지 도파관 1×8 배열 안테나의 능동소자 및 빔 조향 방사패턴 (측정)

Fig. 17. Active element and beam steering radiation patterns of ridge waveguide 1×8 array antenna (measurement).

이다. 커넥터 손실 0.4 dB 및 진폭/위상 오차(error)를 감안하면 이득 차이 2.1 dB는 예측 가능한 범위이다.

빔 조향 패턴의 근접 전계 측정 결과를 그림 17에 나타내었다. 빔 조향 패턴은 0°, 15°, 30°에서 최대치를 나타내었으며, 양호한 조향 특성을 나타내었다. 여기서 점선으로 나타낸 패턴을 1×8 배열 상태에서의 5번째 안테나 방사패턴을 나타내었다.

III. 결 론

본 논문에서는 중첩 빔을 사용한 레이더의 향상된 새로운 운용 개념을 제시하였고, 이를 구현하기 위해 광각의 빔 조향이 가능한 축소형 릿지 혼 안테나를 설계 및 측정하였다.

릿지 도파관 복사소자의 크기는 광각 빔조향을 위해 개구면의 폭을 14 mm, 높이를 8 mm로 축소시켰으며, 다음으로 1×8 배열안테나를 설계하고 제작하였으며, E-plane 120°, H-plane 89.7°의 빔 폭을 얻었다.

또한, 전력 분배 위상 변이기를 이용한 빔 조향 특성 측정 결과, 조향각 0°, 15°, 30°, 45°, 60°에 대하여 잘 일치함을 확인하였다.

따라서, 이와 같은 배열 안테나를 6각 면에 배치하면, 1개 면이 동작 불능 시 양 측면에서 보완이 가능하며, 평상시는 이득 증가 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 이

는 레이더의 운용방안과 향후 경제성을 고려한 초 광각 빔 조향 레이더에 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] J. Joo, J. M. Lee, J. Park, H. S. Jin, Y. D. Kang, and I. T. Han, et al., "A study of dual channel side-lobe blanking beam pattern formation optimized for digital active phased array antennas of multi-function radar systems," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 1, pp. 62-71, 2020.
- [2] J. L. Armitage, "Electronic warfare solid-state phased arrays," *Microwave Journal*, vol. 29, p. 109, 110, 112, Feb. 1986.
- [3] T. Y. Yun, K. Chang, "A low-cost 8 to 26.5 phased array antenna using a piezoelectric transducer controlled phase shifter," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 49, no. 9, pp. 1290-1298, Sep. 2001.
- [4] A. Nadeem, A. R. Sebak, and A. A. Kishk, "End-launch horn antenna array for Ka-band 5G applications," in *2018 18th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics(ANTEM)*, IEEE, Waterloo, ON, Aug. 2018, pp. 1-2.
- [5] D. Y. Yang, "Design and fabrication of an end-launched rectangular waveguide adapter fed by a coaxial loop," *Journal of Information and Communication Convergence Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 103-107, Jun. 2012.
- [6] R. F. Harrington, *Time-Harmonic Electromagnetic Fields*, Piscataway, NJ, IEEE Press, pp. 317-322, 2001.
- [7] Y. S. Choi, B. C. Jung, and J. M. Woo, "Design of subminiature $\lambda/4$ microstrip antenna for GPS," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 7, pp. 607-613, Jul. 2021.
- [8] N. Wang, N. Ou, P. Wang, and R. Wang, "Ultra-wide band bowtie slot waveguide antenna array for SAR application," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 13, no. 3, pp. 391-397, Feb. 2019.

한 인 희 [충남대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-5716-1388>



1997년 2월: 충남대학교 물리학과 (학사)
2016년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
2018년 3월~현재: 충남대학교 전자공학과 박사과정
[주 관심분야] 안테나 설계

우 중 명 [충남대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-5796-5426>



1985년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학사)
1990년 2월: 건국대학교 전자공학과(공학석사)
1993년 3월: 일본, 니혼대학 전자공학과 (공학석사)
1996년 3월: 일본, 니혼대학 전자공학과 (공학박사)
1996년 3월~현재: 충남대학교 전자정보통신공학과 교수
[주 관심분야] 안테나 설계