

고출력 방사를 위한 RF Window 두께 최적화 SF6 가스 주입형 Axially Displaced Cassegrain Dual Reflector 안테나 설계

Design of SF6 Gas-Filled Axially Displaced Cassegrain Dual Reflector Antenna with Optimized RF Window Profile for High Power Microwave System

이동훈 · 김원교 · 차민석 · 김준연* · 서동근* · 윤익재

Dong-Hoon Lee · Wonkyo Kim · Min-Seok Cha · Junyeon Kim* · Donggeun Seo* · Ick-Jae Yoon

요 약

본 논문에서는 적 소형 무인기(UAV) 공격 무력화를 위한 GW급 고출력 방사가 가능한 고이득 회전축 이동 ADC 이중 반사판(axially displaced Cassegrain dual reflector) 안테나를 제안한다. 원형 반사판 안테나 최적 개구 효율을 위해 급전 안테나는 E-/H-plane 대칭 방사 패턴 구현이 가능한 dual mode horn 안테나를 설계하였으며 급전 안테나 모드 변환부의 각 모드 별 관내 파장 길이에 각 모드 별 전력 비율을 고려한 최적 두께 RF window를 설계하여 목표 주파수에서 원활한 전력 전달을 구현하였다. 시뮬레이션 결과 최종 설계된 ADC 이중 반사판 안테나의 이득은 32.52 dBi로 최적 개구 효율 70.7 %를 달성하였으며 반사 계수 -30 dB 이하를 만족하였다. 또한 급전 안테나 - 부 반사판 간 중심부 전계 세기 확인을 통해 고출력 사용에 적합함을 시뮬레이션을 통해 증명하였다. 마지막으로, 설계한 안테나의 성능을 시제품 제작 및 측정을 통해 검증하였는데, 주 반사판 모서리 부분의 제작 오차로 인해 이득값이 다소 낮게 측정되었다. 그럼에도 불구하고, 반사 계수는 급전 안테나와 ADC 이중 반사판 안테나 모두에서 설계값과 근사한 결과를 통해 제안한 최적 두께 RF window 실장 상태에서의 전력 전달이 원활히 될 수 있음을 검증하였다.

Abstract

In this study, we propose a high-gain axially displaced Cassegrain (ADC) dual-reflector antenna capable of operating in a gigawatt-level high-power microwave system for neutralizing enemy small UAVs. To optimize the aperture efficiency of the circular reflector antenna, the feed antenna was designed as a dual-mode horn antenna capable of implementing E-/H-plane symmetric radiation patterns. Additionally, an RF window with an optimal thickness was designed by considering the power ratio of each mode to the wavelength in the mode converter of the feed antenna, to provide smooth power transfer at the target frequency. The simulated gain of the optimized ADC dual reflector antenna was 32.52 dBi, achieving an optimum aperture efficiency of 70.7 % and satisfying a reflection coefficient of -30 dB or less. Furthermore, simulation experiments confirmed that the proposed ADC dual-reflector antenna is suitable for use in high-power microwave systems based on the electric field strength between the feed antenna and sub reflector. The performance of the proposed design was experimentally verified, and the measured results generally agreed with the simulated results, except that the gain slightly decreased owing to the fabrication error at the edge of the main reflector. Although the measured gain was lower than the computed expectations, both the reflection coefficients of the feed horn antenna and ADC dual reflector showed good agreement with the simulation. Thus, we verified that the input power can be effectively transmitted through an RF window with an optimized thickness.

Key words: Axially Displaced Cassegrain Dual Reflector Antenna, SF6 Gas, RF Window, High Power Microwave System

「이 논문은 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(UJ220037SD).」

충남대학교 전기공학과(Department of Electrical Engineering, Chungnam National University)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received January 31, 2025; Revised February 26, 2025 ; Accepted April 9 2025. (ID No. 20250131-014S)

· Corresponding Author: Ick-Jae Yoon (e-mail: ijyoon@cnu.ac.kr)

I. 서 론

현대전은 무인기(UAV)를 이용하여 아군의 피해를 최소화하며 적군의 주요 시설을 감시, 타격하는 양상으로 진행된다. 또한 UAV의 소형화, 군집 운행과 같은 성능 및 전술의 고도화는 해당 공격에 대한 방어체계를 수립하는 것을 어렵게 만든다. 따라서 레이더, 적외선 탐지기, 광학 장비 등을 활용하여 대공 탐색 시스템을 가동하고, 전자기/광전/음향 간섭 수단에 기반한 제밍 시스템을 구축하려는 노력이 가속화되고 있다. 본 논문은 적군의 UAV 공격에 대비한 방어체계 구현 및 적군 전자통신기기의 무력화를 위해 고출력 방사에 적합한 반사판 안테나를 설계한다. 구체적으로, 절연파괴 방지를 위한 SF6 가스 주입 구간을 고려하고 부 반사판 회전축을 이동하여 소형화 설계를 진행한 ADC 이중 반사판(axially displaced Cassegrain dual reflector) 안테나를 제안한다. 설계 과정에서 진공 부분과 SF6 가스 영역의 분리와 동시에 목표 주파수에서 원활한 전력 전달을 위한 RF window 최적화 설계를 진행하였다. 설계한 반사판 안테나의 방사특성 및 급전 혼 안테나 내부 전계 세기에 따른 고출력 사용 가능성을 CST full-wave EM 시뮬레이션과 측정을 통해 검증하였다.

II. ADC 이중 반사판 안테나 설계

일반적인 Cassegrain dual reflector 안테나는 급전 안테나(horn antenna)로부터 부 반사판(sub reflector)에 인가된 일부 전자파가 반사되어 급전 안테나 내부로 다시 인가되는 문제점이 존재한다. 고출력 소스 인가 시 이는 안테나의 내부 전계 세기를 높여 PHC(power handling capacity)가 낮아지는 동시에 그림 1(a)에서와 같이 부 반사판의 blockage 효과로 인한 안테나 방사 효율 감소를 초래한다^{[1],[2]}. 해당 문제점을 보완하기 위해 그림 1(b)의 주 반사판(main reflector) 중심축(z축)과 부 반사판 쌍곡선의 두 초점(F_0 , F_1)을 잇는 축을 특정 각도(ϕ)로 배열하여 부 반사판에서 반사된 전자파가 급전 안테나로 다시 인가되는 것과 부 반사판 blockage를 개선하는 ADC 이중 반사판 안테나 구조를

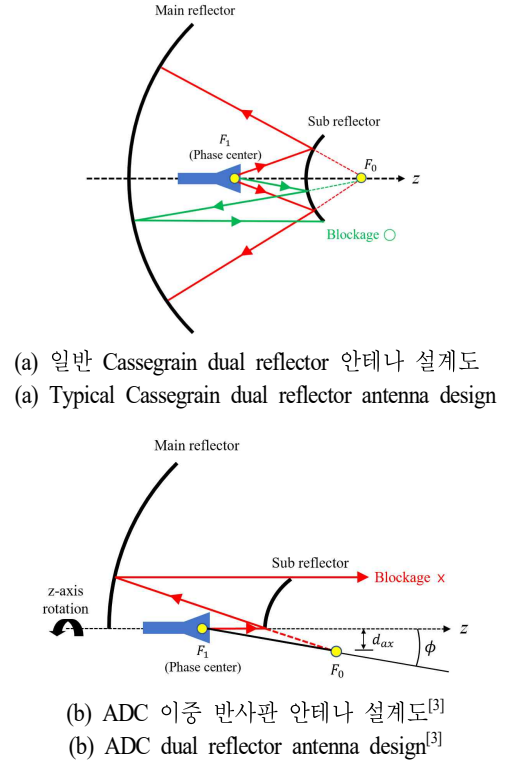


그림 1. 카세그레인 고이득 안테나

Fig. 1. High gain Cassegrain antenna.

설계할 수 있다^[3].

원활한 GW급 고출력 방사를 위한 도파관 내부 절연파괴 방지를 위해 고출력 사용에 안정적인 SF6 가스를 사용하였다. SF6 가스는 1기압(760 Torr) 상태에서 $\epsilon_r=1.002$, $\tan\delta=0$ 에 가까워 진공과 유사한 물질 특성을 가지며 참고문헌 [4]의 그림 3 및 그림 4를 통해 SF6 가스의 절연파괴전압 크기가 공기보다 약 3배 크다는 것을 확인할 수 있다. 그리고 참고문헌 [5]의 그림 4를 통해 주파수 변화에 따라 SF6 가스의 절연파괴전압 크기가 거의 변하지 않는 것을 알 수 있으며 이는 다양한 주파수 대역에서 안정적으로 고출력 사용이 가능함을 나타낸다.

2-1 Dual Mode Horn 급전 안테나 설계

급전 안테나는 원형 reflector 안테나 방사 효율을 높이기 위해 그림 2와 같이 E-/H-plane 대칭 방사 패턴

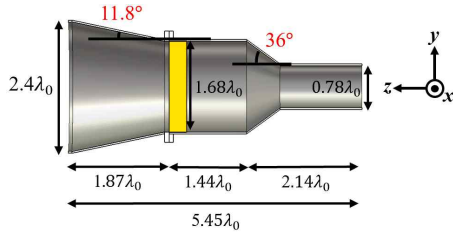
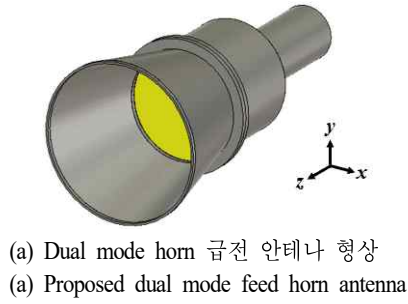
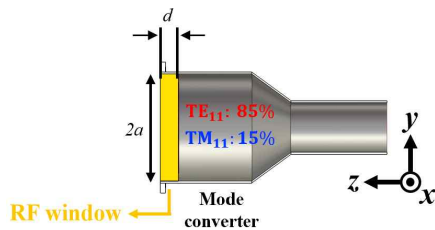


그림 2. 설계한 dual mode horn 급전 안테나
Fig. 2. Designed dual mode feed horn antenna.

을 구현할 수 있는 혼 안테나(dual mode horn antenna)를 설계하였다.

고출력 방사 및 안테나 PHC를 높이는데 유리한 SF6 가스를 진공 영역과 분리하기 위해 그림 3처럼 모드 변환부 종단에 RF window를 설치하였으며 모드 변환부 내 각 모드 별 전력 비율을 $TE_{11} : TM_{11} = 85 : 15$ 로 조절하여 E-H-plane 대칭 방사 패턴을 구현하였다^[6]. 그림 3의 a는 모드 변환부의 반지름이며 TM_{11} 발생과 내부 전계 세기를 최소화하기 위해 105 mm로 설정하였다^[7].



급전 혼 안테나의 모드 변환부에 의해 TE 모드가 dominant 하지 않기 때문에 목표 주파수에서 원활한 전력 전달을 위해서는 RF window의 두께 최적화가 필수적이다. RF window의 재질은 내열성이 강한 PEEK을 사용하였으며 $\epsilon_r=2.9$, $\tan\delta=0.003$ 의 물질 특성을 가진다. RF window의 두께는 주파수에 따른 관내 파장 길이에 영향을 받으며 원형 도파관 내부 각 모드 별 관내 파장 길이는 식 (1) 및 식 (2)를 통해 계산할 수 있다. 식 (1) 및 식 (2)의 p'_{11} , p_{11} 값은 TE_{11} , TM_{11} 모드에 따른 differentiated Bessel function의 해로써 각각 1.841, 3.832의 값을 가지며 $k = \omega\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ 이다. 식 (1) 및 식 (2)를 통해 RF window에 인가된 각 모드의 에너지 위상이 서로 다름을 확인할 수 있으며 RF window 기준으로 두 모드의 도파관에서 임피던스 매칭을 위한 두께는 각각 $\lambda_g^{TE_{11}}/(2\sqrt{\epsilon_r})$, $\lambda_g^{TM_{11}}/(2\sqrt{\epsilon_r})$ 이다. 도파관 내부 각 모드의 에너지의 방향과 위상은 서로 독립적이므로 식 (3)과 같이 각 모드의 전력 비율 85:15를 각 관내 파장 길이에 동일한 비율로 적용하여 최적 두께(d)를 41.3 mm로 계산하였다.

$$\lambda_g^{TE_{11}} = \frac{2\pi}{\sqrt{k^2 - k_c^2}} (k_c = \frac{p'_{11}}{a}) \quad (1)$$

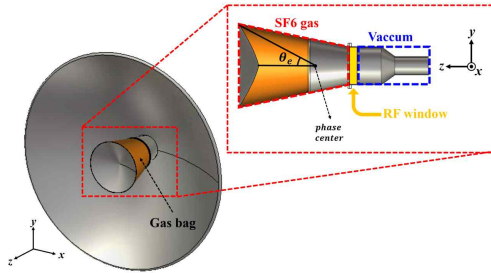
$$\lambda_g^{TM_{11}} = \frac{2\pi}{\sqrt{k^2 - k_c^2}} (k_c = \frac{p_{11}}{a}) \quad (2)$$

$$d = \frac{(\lambda_g^{TE_{11}} \times TE_{11} \text{ 전력 비율} + \lambda_g^{TM_{11}} \times TM_{11} \text{ 전력 비율})}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3)$$

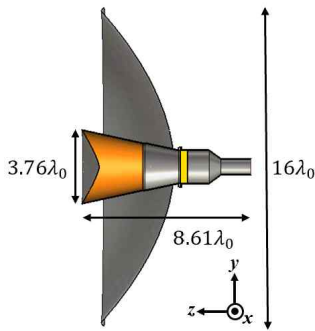
2-2 ADC 이중 반사판 안테나 설계

그림 4는 2-1의 급전 안테나를 부착하여 설계한 ADC 이중 반사판 안테나 형상과 규격을 나타낸다. 그림 4(a)를 통해 RF window 기준으로 진공과 SF6 가스 영역이 분리된 것을 확인할 수 있다. 반사판 안테나 최적 효율을 구현하기 위해 부 반사판 중심부와 가장 자리의 전력 세기 차이인 edge tapering은 -11 dB로 설정하였다^{[8],[9]}. 급전 안테나 방사 패턴에서 main lobe 이득

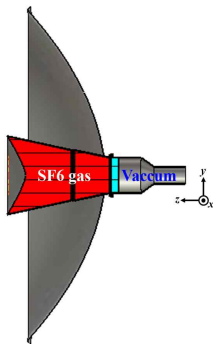
기준 -11 dB 지점은 $\theta=28^\circ$ 이며, 이에 따라 반향각(θ_e)은 그림 4(a)에 보이듯 동일한 28° 로 설정하였다. 부 반사판을 지지함과 동시에 SF6 가스를 가두기 위해 그림 4(a)에 보이듯 gas bag을 통해 부 반사판과 급전 안테나를 연결하였다. 시뮬레이션 모델은 그림 4(c)와 같이 RF window와 부 반사판 그리고 gas bag을 경계로 하는



(a) 급전 안테나 - 부 반사판 내부 구성도
(a) Feed horn - sub reflector configuration



(b) ADC 이중 반사판 안테나 규격
(b) Design parameters of the ADC dual reflector antenna



(c) SF6 가스 주입부
(c) SF6 gas injection area

그림 4. 제안 ADC 이중 반사판 안테나
Fig. 4. Proposed ADC dual reflector antenna.

공간을 SF6 가스로 채웠으며 물질 특성은 SF6 가스 1 기압 기준 $\epsilon_r=1.002$, $\tan\delta=0$ 로 설정하였다.

2-3 RF window 두께 별 시뮬레이션

본 연구에서 제안한 RF window 최적 두께 계산식의 유효성을 증명하기 위해 RF window 두께 별 안테나 방사특성 변화를 시뮬레이션을 통해 진행하였다. RF window 두께 39.3 mm에서 44.3 mm까지 1 mm 간격으로 시뮬레이션을 진행하였으며 두께 별 도파관 내부 모드 별 전력 비율 변화를 그림 5를 통해 나타내었다. 모드 변환부 반지름의 크기보다 급전 안테나 개구부의 크기가 더 크므로 이에 따른 고차 모드인 TE_{12} 모드 전력이 발생함을 알 수 있다. 또한 RF window 두께가 증가하면서 유전 손실이 증가함에 따라 급전부에서 개구면으로 가는 총 전력량이 감소함을 그림 5를 통해서 확인할 수 있다. 이는 두께에 따른 각 모드 별 $|S_{21}|^2$ 의 비율이 개구면의 모드 별 전력 비율이 아닌 것을 의미한다. 따라서 개구면의 각 모드 별 전력 비율 계산은 식 (4)를 통해 계산하였다. $|S_{21}^{mode}|^2$ 은 각 모드에 해당하는 $|S_{21}|^2$ 을 나타낸다. $|S_{21}^{Total}|^2$ 은 급전부에서 개구면으로 전달되는 각 모드의 $|S_{21}|^2$ 을 더한 값이며 급전 안테나 내부에는 TE_{12} 보다 높은 고차 모드는 존재하지 않으므로 이는 곧 급전부에서 개구면으로 전달되는 총 전력량을 나타낸다.

$$\text{모드별 전력비율} = \frac{|S_{21}^{mode}|^2}{|S_{21}^{TE_{11}}|^2 + |S_{21}^{TM_{11}}|^2 + |S_{21}^{TE_{12}}|^2} \times 100 = \frac{|S_{21}^{mode}|^2}{|S_{21}^{Total}|^2} \times 100 \quad (4)$$

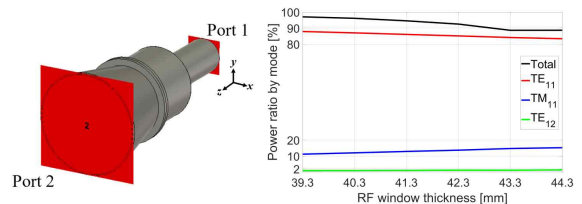
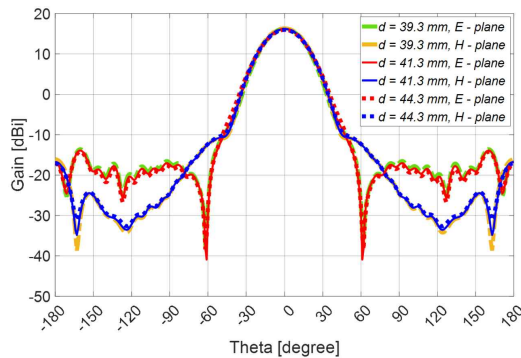
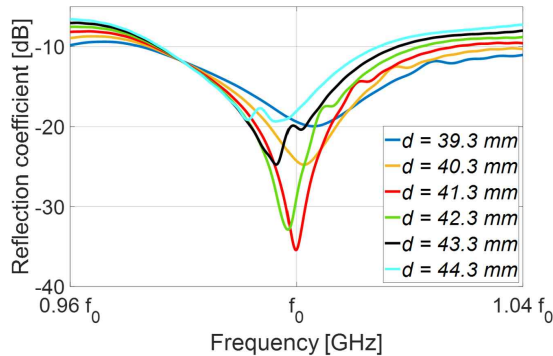


그림 5. RF window 두께별 각 모드 전력 비율 변화
Fig. 5. Power ratio of each mode according to the RF window thickness.

그림 5의 RF window 두께 변화에 따른 각 모드 별 전력 비율을 살펴보면 모두 E-/H-plane 대칭 방사 패턴 구현에 필요한 개구면 모드 전력 비율인 85:15 비율에 근접함을 알 수 있다. 따라서 그림 6(a)에서 보듯이 급전 안테나의 방사 패턴은 두께에 상관없이 E-/H-plane 대칭 방사 패턴이 나타남을 확인할 수 있으며 유의미한 패턴 차이는 없음을 확인할 수 있다. 그러나 그림 6(b)을 통해 ADC 이중 반사판 안테나의 반사 계수 측면에서 RF window의 두께 계산을 적용한 비율



(a) 급전 안테나 RF window 두께 별 E-/H-plane 방사 패턴 비교
(a) E-/H-plane radiation patterns of the feed horn antenna according to the RF window thickness



(b) RF window 두께별 ADC 이중 반사판 안테나 반사 계수 변화
(b) Reflection coefficients of the ADC dual reflector antenna according to the RF window thickness

그림 6. RF window 두께 별 방사특성 변화
Fig. 6. Radiation characteristics according to the RF window thickness.

이 모드 변환부 내 각 모드 별 전력 비율에 가까울수록 목표 주파수에 정합이 더 잘된 것을 확인할 수 있다. 이는 목표 주파수에서 각 모드 별 관내파장 길이와 전력 비율을 고려하여 설계한 결과 RF window 기준 급전부와 모드 변환부, 부 반사판 사이 공간 간의 임피던스 정합이 이루어졌기 때문이다.

III. 측정 결과

설계한 안테나의 성능을 확인하기 위해 그림 7과 같이 안테나를 제작하여 반사 계수 및 방사 패턴을 측정

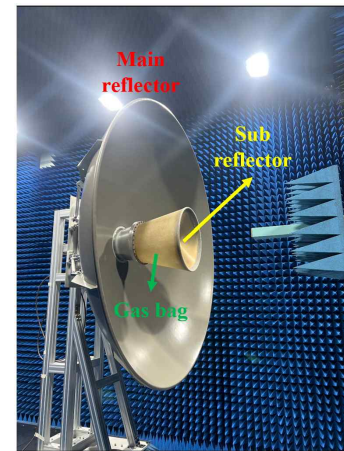


그림 7. 제작된 ADC 이중 반사판 안테나
Fig. 7. Photos of the built ADC dual reflector antenna.

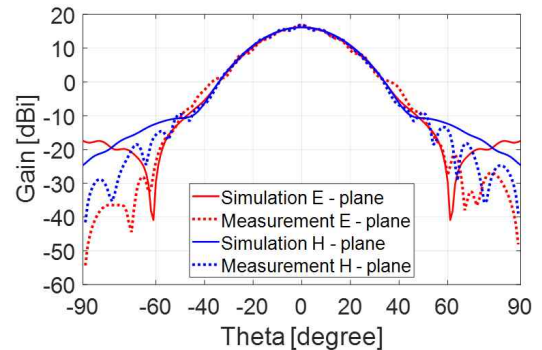


그림 8. 급전 안테나 방사 패턴 시뮬레이션 및 측정 결과
Fig. 8. Simulated and measured radiation patterns of the feed horn antenna.

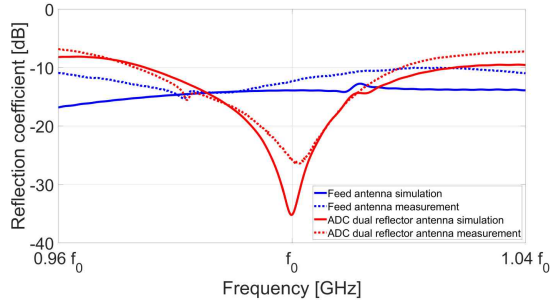


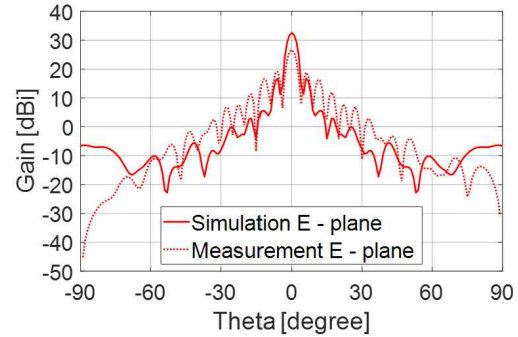
그림 9. 반사 계수 시뮬레이션 및 측정 결과
Fig. 9. Simulated and measured reflection coefficients.

하였다.

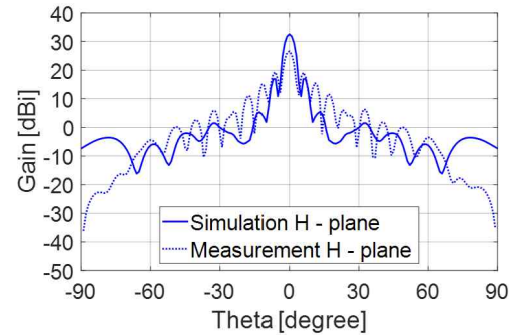
본 논문에서 설계된 급전 혼 안테나의 측정 결과를 그림 8 및 그림 9에 나타내었다. 그림 8을 통해 급전 혼 안테나의 방사 패턴이 시뮬레이션과 측정 결과 모두 $-40^\circ \leq \theta \leq 40^\circ$ 구간 E-/H-plane에서 대칭이며, 그림 9의 파란선을 통해 반사 계수가 시뮬레이션과 측정 결과 모두 -10 dB 이하로 정합되었음을 확인할 수 있다. Boresight 최대 이득은 시뮬레이션은 16.18 dBi, 측정 결과는 16.89 dBi 이다.

그림 9의 빨간선은 ADC 이중 반사판 안테나의 시뮬레이션 및 측정을 통한 반사 계수를 나타낸다. 시뮬레이션과 측정 결과 모두 ADC 이중 반사판 안테나의 목표 주파수에서 급전 안테나 대비 크게 감소하고 동작 주파수 대역에서 시뮬레이션과 측정 결과가 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이는 부 반사판에서 반사된 전자파가 급전 안테나 내부로 유입되지 않는 설계가 진행되었음을 의미하며, ray-tracing 시뮬레이션을 통해 그 특성을 확인하였다.

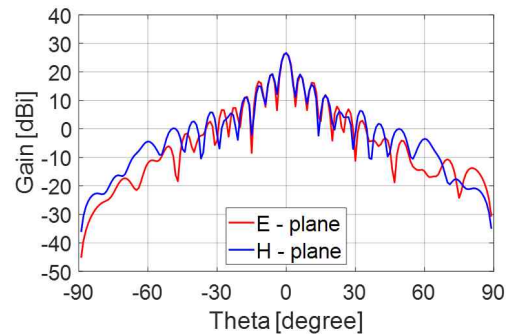
그림 10은 ADC 이중 반사판 안테나의 동작 주파수에서의 방사 패턴 시뮬레이션 및 측정 결과를 나타낸다. 시뮬레이션 이득은 32.52 dBi, 측정 이득은 26.61 dBi로써 약 6 dB 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 주 반사판 제작 과정에서 반사판 중심 기준 반경 방향으로 약 $6.4 \lambda_0 \sim 8 \lambda_0$ 부분에서 발생한 곡률 변형으로 인한 결과로 판단되며 이로 인해 side lobe level 또한 감소한 것을 확인할 수 있다. 다만 dual mode horn 안테나 사용을 통한 ADC 이중 반사판 안테나의



(a) E-plane 시뮬레이션 및 측정 방사 패턴
(a) Simulated and measured E-plane radiation pattern



(b) H-plane 시뮬레이션 및 측정 방사 패턴
(b) Simulated and measured H-plane radiation pattern



(c) E-/H-plane 측정 방사 패턴
(c) Measured E-/H-plane radiation pattern

그림 10. ADC 이중 반사판 안테나 방사 패턴 시뮬레이션 및 측정 결과
Fig. 10. Simulated and measured radiation patterns of the ADC dual reflector antenna.

E-/H-plane 방사 패턴 대칭성은 그림 10(c)에서 보이는 바와 같이 예상대로 구현되었음을 확인할 수 있다.

또한 시뮬레이션 결과를 통해서도 dual mode horn antenna의 사용으로 SLL(side lobe level)의 크기가 E-H-plane에서 각각 15.8 dB, 15.6 dB로 대칭적으로 나타남을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과 32.52 dBi 이득을 구현함으로써 반사판 안테나의 전체 크기로 실현 가능한 최대 이득의 70.7 % 개구 효율을 나타내며 모드 변환부의 RF window와 gas bag의 영향으로 인한 유전 손실 발생에도 불구하고 안테나 개구 면적에 따른 이론치에 가까운 안테나 최적 효율을 달성하였다^[10]. 추후 곡률 변형 오차 제거 후 재측정을 통해 시뮬레이션과 유사한 방사 패턴을 지닐 것으로 판단된다. 표 1의 참고 논문의 axially displaced dual reflector 안테나와 비교해보았을 때 목표 주파수 파장 대비 안테나 전체 크기 소형화를 진행함과 동시에 높은 효율을 달성하였음을 확인할 수 있다. 이는 적절한 주, 부 반사판 크기 선정과 axially displaced dual reflector 안테나의 최대 장점인 부 반사판 blockage 차단 효과가 적용된 결과로 볼 수 있다. 동시에 최적 설계를 위한 -11 dB 부 반사판 edge tapering이 적용된 결과 본 논문에서 제안하는 ADC 이중 반사판 안테나의 최적화 설계가 진행되었음을 확인할 수 있다. 이와 같이 본 논문에서 제안한 안테나의 소형화에도 불구하고, 최대 개구 효율을 달성하였음을 확인할 수 있다.

마지막으로, 본 ADC 이중 반사판 안테나가 고출력 방사에 사용 가능한지 확인하기 위해 급전 안테나와 부 반사판 간 중심부 전계 세기를 그림 11을 통하여 확인하였다. PHC가 1 GW일 경우, RF window 위치 기

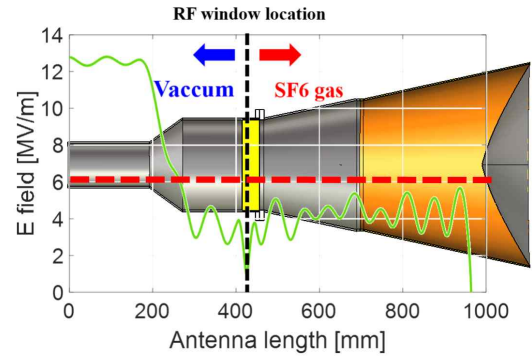


그림 11. 급전 안테나 - 부 반사판 간 중심부 전계 세기

Fig. 11. Center electric field strength between the feed horn antenna and sub-reflector.

준 SF6 가스 부분의 전계 세기를 확인해보면 절연과파 전압 9 MV/m 기준 안정도 1.5인 6 MV/m 이내로 형성됨을 확인할 수 있다. RF window 기준 급전부와 모드 변환부 내부는 SF6 가스의 절연과파전압 세기보다 큰 전계 세기가 발생하지만 해당 부분은 진공(vacuum)으로 설계되며 이는 공기와 SF6 가스와는 달리 이온화할 분자 및 원자가 존재하지 않아 플라즈마 현상의 원인인 자유전자가 발생하지 않는다. 이는 내부 전계 세기 크기를 고려하지 않아도 됨을 의미한다.

IV. 결 론

본 연구에서는 고출력 전자기파 방사와 개구 효율 향상을 위해 모드 별 전력 비율과 관내 파장을 고려하여 RF window 두께를 최적화한 급전 안테나 dual mode horn antenna와 이를 결합한 ADC 이중 반사판 안테나를 설계하였다. 급전 안테나는 시뮬레이션을 통해 E-H-plane 대칭 방사 패턴을 구현하였고 제작 후 측정 결과를 통해 확인하였다. 급전 안테나를 주, 부 반사판과 결합하여 ADC 이중 반사판 안테나를 설계하여, 목표 주파수에서 급전 안테나 대비 방사 계수가 크게 감소함을 측정을 통해 확인하였다. 주 반사판 제작 과정에서 발생한 곡률 변형으로 인해 이득이 감소하였지만 dual mode horn 안테나 사용으로 E-H-

표 1. Axially displaced dual-reflector 안테나 개구 효율 비교표

Table 1. Aperture efficiency comparison of axially displaced dual-reflector antennas.

Ref	Frequency (GHz)	Gain (dBi)	Diameter (m)	Aperture efficiency (%)
[2]	8.484	33.3	$19.8 \lambda_0$	55
[8]	93.3	40.1	$56.0 \lambda_0$	33.1
This work	f_0	32.52	$16 \lambda_0$	70.7

plane 대칭 방사 패턴이 구현되는 것을 확인하였다. 급전 안테나 - 부 반사판 간 중심부 전계 세기 확인을 통해 본 ADC 이중 반사판 안테나가 고출력 방사 사용에 적합함을 확인하였다.

References

- [1] A. Demirci, N. Sonmez, F. Tokan, and N. T. Tokan, "Phase error analysis of displaced-axis dual reflector antenna for satellite earth station," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 110, p. 152824, Oct. 2019.
- [2] C. Kumar, V. V. Srinivasan, V. K. Lakshmeesha, and S. Pal, "Performance of an electrically small aperture, axially displaced ellipse reflector antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, pp. 903-904, Jul. 2009.
- [3] C. Granet, "A simple procedure for the design of classical displaced-axis dual-reflector antennas using a set of geometric parameters," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 41, no. 6, pp. 64-72, Dec. 1999.
- [4] P. Shu, P. Zhao, "Global model for high power microwave pulse breakdown in air and SF₆," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 57, no. 9, p. 096101, Aug. 2018.
- [5] P. Zhao, C. Liao, and W. Lin, "Propagation of high-power microwave pulses in air-SF₆ mixtures at high pressure," *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, vol. 43, no. 3, pp. 257-269, Aug. 2013.
- [6] J. S. Kim, J. H. Yoon, Y. J., Yoon, and W. S. Lee, "Circular dual mode horn antenna(CDMHA) with modified aperture to improve E/H-plane radiation pattern symmetry," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 24, no. 5, 502-507, May 2013.
- [7] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, p. 121-130, 2011.
- [8] Y. Wang, W. Dou, and B. Bi, "W band axially displaced monopulse dual-reflector antenna for inter-satellite communications," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 10, no. 7, pp. 742-747, May 2016.
- [9] T. Milligan, C. Granet, J. S. Kot, and I. M. Davis, "Setting subreflector edge taper in a satcom dual-reflector antenna [antenna designer's notebook]," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 55, no. 6, pp. 128-136, Dec. 2013.
- [10] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed. Hoboken, NY, John Wiley & Sons, 2016.

이 동 훈 [충남대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0007-3853-0911>



2024년 2월: 충남대학교 전기공학과 (공학사)
2024년 3월~현재: 충남대학교 전기공학과 석사과정
[주 관심분야] 고출력 안테나 시스템, ray tracing

김 준 연 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0009-0007-9340-7182>



1997년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학사)
1999년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학석사)
2008년 8월: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 (공학박사)
1999년 3월~현재: 국방과학연구소 책임

연구원

[주 관심분야] 위상배열안테나, 전자파 수치해석

김 원 교 [충남대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-3748-9562>



2021년 2월: 충남대학교 전기공학과 (공학사)
2021년 3월~현재: 충남대학교 전기공학과 석박사통합과정
[주 관심분야] 고출력 안테나 시스템, 전자전, 안테나

서 동 근 [국방과학연구소/선임연구원]

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



2017년 2월: 경상국립대학교 전자공학과 (공학사)
2020년 2월: 경상국립대학교 전자공학과 (공학석사)
2021년 1월~2022년 5월: 국방기술진흥연구소 연구원
2022년 6월~현재: 국방과학연구소 연구

원

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

차 민 석 [충남대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0009-0007-7288-879X>



2019년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)
2022년 3월~현재: 충남대학교 전기공학과 석·박사통합과정
[주 관심분야] 안테나, 레이돔 해석

윤 익 재 [충남대학교/교수]

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



2003년 8월: 연세대학교 전기전자공학부 (공학사)
2005년 8월: 연세대학교 전기전자공학부 (공학석사)
2012년 8월: University of Texas at Austin 전기컴퓨터공학과 (공학박사)
2005년 7월~2008년 8월: 삼성종합기술원

연구원

2012년 9월~2014년 8월: Technical University of Denmark 전기공학과 박사후연구원/조교수

2014년 9월~현재: 충남대학교 전기공학과 교수

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

[주 관심분야] 안테나, 초고주파회로, 전자파이론, EMI/EMC