

고출력 환경에 적용 가능한 광대역 다층 구조 레이돔

Broadband Multi-Layered Radome for High-Power Applications

이기욱 · 이경원 · 문병귀 · 최삼열 · 이왕용 · 윤영중*

Ki Wook Lee · Kyung Won Lee · Bang Kwi Moon · Samyeul Choi · Wangyong Lee · Young Joong Yoon*

요 약

고출력 응용환경에 적용 가능한 광대역 다층 구조 레이돔을 개발하였다. 이를 위해 다층 레이돔의 전파전파특성을 ABCD 행렬로 표현하였고, Particle swarm 최적화 알고리즘을 상용 수치 모델링 툴로 구현하여 레이돔의 최적화된 층별 두께와 물질상수를 구하였다. 바람, 눈, 얼음 등 외부 기상 환경을 고려한 기계적 특성을 감안하여 레이돔을 재설계하였다. 대형구조물의 제작 제한조건을 고려한 두께를 재산출하여 전력 전달특성을 재분석하였다. 대기 정전과피 때보다 10 dB 높은 침투 전기장의 세기 조건에서 상용 해석 툴을 이용하여, 설계된 레이돔의 RF에 대한 대기 정전과피 특성을 분석하였다. 설계된 다층 레이돔을 제작하여 소신호 및 대신호 시험을 수행하였고, 상용 도구들을 사용한 계산값과 비교하여 목표 성능을 획득하였다.

Abstract

In this paper, we developed a broadband multi-layered radome applicable for high-power applications. In this regard, we presented the wave propagation characteristics of the broadband multi-layered radome with the ABCD matrix and obtained the optimal thickness and the material constant for each layer by an optimization algorithm called “particle swarm optimization,” implemented by a commercial numerical modeling tool. Further, we redesigned it in view of mechanical properties to reflect environmental conditions such as wind, snow, and ice. The power transmission property was reanalyzed based on the recalculated data of each layer’s thickness to consider the limitations of the fabrication of a large structure. Under the condition of a peak electric field strength that is 10 dB above the critical electric field strength in air breakdown, we analyzed the air breakdown by radio frequency(RF) in the designed radome using the commercial full-wave electromagnetic tool. The radome was manufactured and tested by continuous wave(CW) RF small signal and large signal in an anechoic chamber. The test results showed good agreement with those attained by simulation.

Key words: Broadband, High-Power, Breakdown, Multi-Layered, Radome

I. 서 론

레이돔은 주위 환경으로부터 내부 구성품을 안전하게 보호하는 역할뿐만 아니라, 내부 구성품의 전기적 특성

왜곡을 최소화하도록 설계하는 것이 중요하다. 기존 레이돔들은 설계와 제작이 간단한 단일층 레이돔을 주요하게 적용하였지만, 이는 협대역^{[1],[2]}의 단점을 가진다. 또한, 주기구조 적층형 FSS(Frequency Selective Surface)^{[3],[4]}를 적

LIG넥스원(주) (LIG Nex1 Co., Ltd.)

*연세대학교 전기전자공학과(Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

· Manuscript received August, 14, 2017 ; Revised October, 30, 2017 ; Accepted December, 23, 2017. (ID No. 20170814-079)

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

용한 레이돔은 다중주파수 운용이 가능하지만, 여전히 운용대역폭은 협대역의 단점을 가진다. 전자전 시스템^[5]과 같이 E 대역에서 J 대역 (2~18 GHz)까지 다양하게 분포된 광대역 시스템의 대응 위협에 효과적인 대응을 위하여 광대역 RF단 설계가 필수적이다. 특히, 전자전 시스템의 대표적인 위협 무기체계인 레이더들이 X 대역^[5]에 많이 분포되어 있기 때문에 이 대역 내에서의 전자전 시스템 성능 구현이 중요하다. 고출력 방사능력은 전자전 시스템의 높은 효과도^{[5]~[7]} 확보를 위하여 필수적이지만, 이는 광대역 운용대역폭과 함께 고출력 증폭기와 송신 안테나 등의 내부 구성품과 레이돔에 높은 설계 부하를 야기한다. 즉, 고출력 송신을 기반으로 하는 시스템은 RF 대기 정전파괴 없이 최대 전력 전송을 가능하게 하는 레이돔의 성능 확보를 중요 설계 요소 중의 하나로 가진다. 그러나, 기존 연구들^{[1]~[4]} 중에는 이에 대한 유사연구가 부족한 상황으로 이에 대한 연구의 필요성이 대두된다.

본 논문에서는 위협 무기체계인 레이더들이 주로 분포되어 있는 18 GHz 이하의 운용 주파수 범위 (E~J 대역) 내에서 전력 전달률은 평균 80 % 이상을 가지며, 최대 53 dBm 이상의 연속 입사파를 운용 가능한 광대역 고출력 레이돔을 제안하였다. 레이돔의 성능 분석에 대한 시물레이션과 측정에 사용된 시험용 송신 안테나는 급전용 혼 안테나를 갖는 광대역 반사판 안테나를 적용하였다^[8]. 또한, 다층 경계면에서의 경계조건^[9]에 의한 전력 전달특성을 적용하여 MATLAB과 FEKO를 기반으로 2D와 3D 측면에서 레이돔 시물레이션을 각각 수행하였다. 이러한 분석과 설계를 바탕으로 제안된 레이돔은 무반사 챔버에서 소신호 인가 시험 및 대신호 인가 시험을 수행하였고, 광대역 고출력 시스템에 적합한 성능 만족 특성을 확인하였다.

II. 레이돔 설계

제안한 광대역 고출력 운용환경에 적용 가능한 다층 구조 레이돔을 설계하기 위하여 먼저 선정된 코어와 스킨의 재질 특성 인자인 유전율과 손실탄젠트를 기반으로 하여 전기적 및 기계적으로 최적 성능을 가질 수 있도록 레이돔 형상 구조 및 그 구성요소들의 두께를 결정하였다. 최적의 전기적 및 기계적 성능을 만족하는 레이돔의

최적화 다층 구조는 5층 구조로 적용하였다. 레이돔을 구성하는 구성요소들의 각 층 두께는 다층 구조해석을 최적화한 알고리즘을 적용하여 산출하였다. 이후 레이돔 구성요소인 스킨과 코어의 두께를 구하고, 풍속과 빙부하에 대한 구조해석을 수행하였다.

2-1 전기적 특성

다층 구조 레이돔은 각 층을 행렬로 구현하여 전파 특성을 계산할 수 있다. 한 층이 늘어날수록 행렬만 추가하면 되기 때문에 다층 구조에 대한 전파 특성을 쉽게 계산할 수 있다. 식 (1)은 간단하게 표현된 다층 구조 행렬이며, 이 행렬의 원소들을 이용하여 반사계수와 투과계수를 구할 수 있다. 식 (2a)는 다층 구조의 반사계수 (R)를, 식 (2b)는 다층 구조의 투과계수 (T)를 나타낸 것이다.

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ B_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{N+2} \\ B_{N+2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R = \frac{B_1}{C_1} \quad (B_{N+2} = 0) = \frac{A_{21}}{A_{11}} \quad (2a)$$

$$T = \frac{C_{N+2}}{C_1} \quad (B_{N+2} = 0) = \frac{1}{A_{11}} \quad (2b)$$

여기서, C_1 은 자유공간에서 첫 번째 층의 경계면으로 입사하는 Fresnel 투과파(forward wave)를 나타내고, B_1 은 자유공간에서 첫 번째 층으로 입사시, 첫 번째 층의 경계면에서 반사되는 Fresnel 반사파(reverse wave)를 의미한다. C_{N+2} 는 N 번째 층에서 자유공간 상으로 투과되는 Fresnel forward wave를 나타내고, B_{N+2} 는 자유공간 상으로 투과된 후, Fresnel reverse wave를 의미한다.

A_{ij} ($i=1,2$)는 연속적인 2 포트 투과 네트워크를 ABCD 해렬 곱을 포함하는 1개의 2 포트 투과 네트워크로서 복소수 값을 갖는 계수를 의미한다. 즉, A_{11} 은 무차원의 전체 투과계수의 역수를 나타내고, A_{12} 는 투과/반사 비를 나타내며, A_{21} 은 반사/투과 비를 나타내고, A_{22} 는 무차원의 반사계수의 비를 의미한다.

식 (1)을 바탕으로 PSO (Particle Swarm Optimization) 알고리즘^{[10][11]}을 적용하여 다층 구조 레이돔 두께를 최적화하였다. PSO는 확률론적 최적화 기법이며, 집단을 이루는

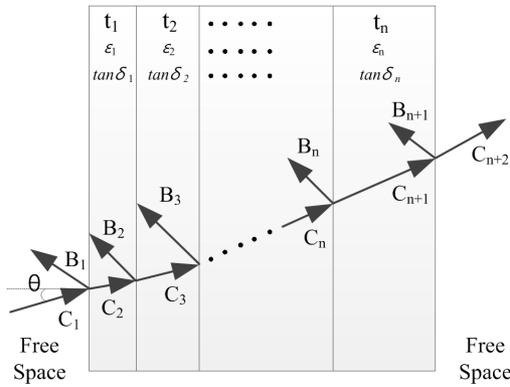


그림 1. 다층 구조 매질에서의 반사와 투과
Fig. 1. Reflection and transmission in a multi-layered medium.

구성요소들의 사회성 기반으로 최적화를 수행한다. 개체들(particles)은 탐색 공간 내에서 최적의 장소로 이동하며, 각각의 개체(particle)의 위치는 두 개의 최적의 값을 통하여 업데이트되어 새로운 위치 값을 갖게 된다. 최적화로 얻어진 두께는 위의 행렬을 기반으로 하여 수치해석으로 계산하여 전기적 성능을 고려한 두께이기 때문에 실제 제작에는 한계가 있다. 따라서 이 두께를 바탕으로 전기적 성능이 비슷하며, 실제 제작 가능한 두께를 도출하였다.

그림 1에서 t 는 매질 각 층의 두께(thickness), ϵ 은 매질 각 층의 유전율(permittivity), $\tan \delta$ 는 매질 각 층의 손실 탄젠트(loss tangent)를 의미한다.

최적화 및 제작 공정을 고려한 레이돔 두께는 표 1과 같다. 표 1에서 기술된 두께들을 가지고 평면파가 입사했을 때의 레이돔 전기적 특성을 비교한 것이 그림 2와 같다. 최적화 총 두께는 9.78 mm이고, 제작공정을 고려한

표 1. 레이돔 설계인자
Table 1. Design parameters of the radome.

Item	Skin	Core	Skin	Core	Skin
Optimized thickness (mm)	0.59	3.68	0.48	4.46	0.57
Fabricated thickness (mm)	0.6	3.5	0.4	3.5	0.6
ϵ_r	4.51	1.14	4.51	1.14	4.51
$\tan \delta$	0.0017	0.0055	0.0017	0.0055	0.0017

총 두께는 8.60 mm이다. 그림 2에서 알 수 있듯이, 고주파 일부분에서 차이가 나지만 전체적으로 전기적 특성이 유사함을 알 수 있다. MATLAB을 이용한 최적화 분석 두께와 제작 공정을 고려한 두께 적용 조건에 대한 레이돔 전력 전달특성 분석은 그림 2와 같다.

전파 투과특성 분석을 위한 시뮬레이션 주파수 범위는 E 대역에서 J 대역까지로 설정하였다. 최적화 전파투과손실은 0.7 dB 이하이지만 제작공정을 반영한 전파투과손실은 0.9 dB 이하임을 알 수 있다. 시작주파수는 E 대역의 시작주파수를 의미하고, 이를 f_0 으로 표기하였다.

2-2 기계적 특성

제안한 레이돔은 그림 3과 같은 형상을 갖는다. 상층부(레이돔)는 전파가 투과하게 되는 부분이며, 하층부(레이돔지지 구조물)는 상층부를 지지하기 위해 설계된 부분이다. 하층부는 단일구조 복합재로 전기적 특성과는 무관한 구조이며, 상층부는 앞서 얻어진 스킨, 코어의 각 두께로 구성된 구조이다.

표 2는 구조물의 상층부 (레이돔)와 하층부 (지지 구조물)를 제작하기 위한 복합재 및 코어의 제품의 종류를 나타낸 것이며, 이를 이용하여 그림 3과 같은 레이돔을 제작한다. 제작된 레이돔이 전기적이 성능을 만족할지라도 실제 운용환경 조건에서 레이돔이 정상적으로 운용될 수

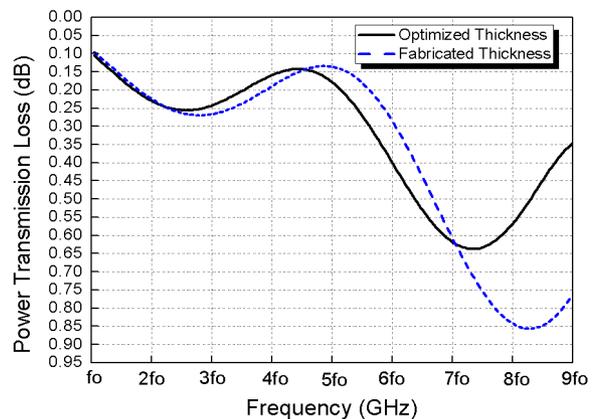


그림 2. 최적화 분석 두께와 제작 적용 두께에 대한 전파투과손실 비교
Fig. 2. Comparison of power transmission loss between optimized thickness and fabricated thickness.

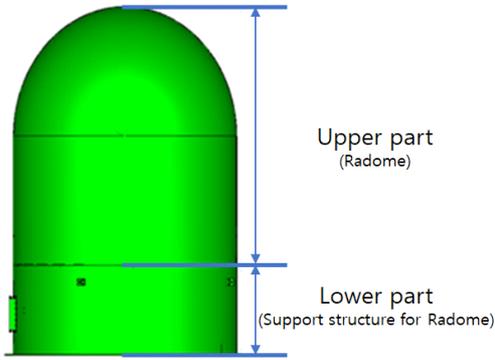


그림 3. 레이돔 설계 형상
Fig. 3. Designed configuration of the radome.

있는지 여부는 판단하기 어렵다. 따라서, 레이돔 제작 전에 시편을 통해 얻은 데이터를 이용하여 레이돔 형상에 대한 구조해석을 수행하고, 실제 운용환경 조건에 대한 적합 여부를 분석하게 된다. 본 논문에서도 시편의 인장, 압축, 굽힘 등 기본적인 시험을 통해 구조해석에 필요한 데이터를 획득하였다.

레이돔에 적용된 스킨은 Glass fiber polypropylene HG120/RS3232 (면밀도: 106 g/m²)를 적용하였고, 코어는 허니콤 (밀도: 72 kg/m³)를 적용하였다. 레이돔이 실제 환경에서 사용되는 환경조건은 풍속 및 빙부하이며, 이에 대한 요구 조건은 표 3과 같다. 빙부하는 눈이나 얼음이 쌓여 발생하는 수직 하중을 의미하며, 풍속은 순간 풍속과 지속 풍속을 포함한다. 이러한 하중에 문제없는지를 확인하기 위해 앞서 시편 시험을 통해 얻은 데이터를 이용하여 그림 3과 같은 형상의 레이돔 구조해석을 수행하였다.

레이돔의 구조해석 경우 수별로 정리한 것이 표 4와 같다. Case 1과 Case 2는 정면 하중, Case 3과 Case 4는 옆면 하중을 나타내는 조건이며 Case 5는 수직하중의 조건으

표 2. 레이돔 구조를 이루는 복합재
Table 2. Composites of the radome.

Composites	
Upper part (Radome)	HG120/RS3232
	ECA 4.8-7.2
Lower part (Support structure)	HG1581/RS3232

표 3. 레이돔 풍속 및 빙부하

Table 3. Wind speed and snow or ice load of the radome.

Design factor	
Wind speed	Instantaneous speed : 52 m/s
	Sustained speed : 39 m/s
Snow or ice load	20 kg/m ²

표 4. 레이돔 구조해석 경우 수

Table 4. Cases for the structural analysis of the radome.

Analysis case number	Direction of load	Type of load
Case 1	Front	Wind speed (39 m/s)
Case 2	Front	Wind speed (52 m/s)
Case 3	Side	Wind speed (39 m/s)
Case 4	Side	Wind speed (52 m/s)
Case 5	Normal	Snow or ice load (20 kg/m ²)

로 해석하였다. 부하에 대한 레이돔 기준에서의 적용 방향은 정면, 측면, 수직으로 구분하였다.

표 5는 설계된 레이돔 형상에 대한 구조해석 결과를 나타낸 것이다. 표 5에서 레이돔을 구성하는 물질 종류들의 안전 계수 (Safety factor)를 확인하면 요구 성능인 수직하중 조건에 대해 모두 만족함을 알 수 있다. 안전 계수란 기계나 구조물을 설계할 때 실제 사용하는 재료의 허용 응력을 결정하기 위한 계수이며 0보다는 큰 양수 값을 가지면 안전한 것으로 판단할 수 있다. 안전 계수는 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\text{Safety factor} = \text{Allowable stress} / \text{Equivalent stress} \quad (3)$$

III. RF 대기 정전파괴 분석

RF 대기 정전파괴에 대한 정량적인 해석은 어렵지만, 운용주파수, 운용 주위 환경 압력, 주위 온도 등을 기반으로 이를 수식화하여 분석하였다.

대기압 운용 환경에서의 레이돔에서 발생할 수 있는 RF 대기 정전파괴 중 이온화로 발생할 수 있는 임계치 (critical value) 범위는 표준 대기압이 750~760 Torr 조건에서 식 (4)^{[12],[13]}에 의거하여 그림 4와 같이 나타낼 수 있

다. 식 (4)는 만약 동일 온도와 압력조건에서는 운용 RF 주파수가 높아질수록 RF 대기 정전파괴가 일어날 수 있는 임계치는 올라간다는 것을 의미한다.

표 5. 레이돔 구조해석

Table 5. Results of the structural analysis of the radome.

Case	Material	Maximum displacement (mm)	Equivalent stress (MPa)	Allowable stress (MPa)	Safety factor	Result
1	HG120	0.129	1.720	331	192	OK
	ECA 4.8-72	0.129	0.008	5	625	OK
	HG1581	0.018	1.370	390	283	OK
2	HG120	0.229	3.060	331	108	OK
	ECA 4.8-72	0.229	0.014	5	340	OK
	HG1581	0.033	2.440	390	159	OK
3	HG120	0.178	3.190	331	103	OK
	ECA 4.8-72	0.178	0.017	5	290	OK
	HG1581	0.040	6.740	390	57	OK
4	HG120	0.230	3.020	331	109	OK
	ECA 4.8-72	0.230	0.014	5	338	OK
	HG1581	0.032	6.030	390	64	OK
5	HG120	0.028	0.210	331	1576	OK
	ECA 4.8-72	0.028	0.001	5	5000	OK
	HG1581	0.001	0.284	390	1373	OK

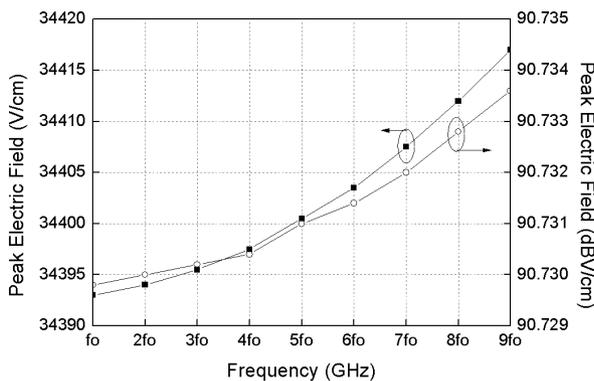


그림 4. 표준 대기압에서의 RF 대기 정전파괴

Fig. 4. RF breakdown in air on the condition of the standard ambient temperature and pressure.

$$E/f = 32 \times \sqrt{2} \times \sqrt{(p/f)^2 + 2} \quad (4)$$

여기서, E 는 첨두 전기장 세기 [V/cm], f 는 사용 주파수 [GHz], 그리고 p 는 압력 [Torr]을 나타낸다.

일반적으로 RF 대기 정전파괴를 3 MV/m(= 30 kV/cm) 이상으로 설정하는데 참고문헌 [12]에서의 설정된 임계치를 적용하면 약 34 kV/cm 이상으로도 분석할 수 있다. 3D 상용 툴인 FEKO를 이용하여, 그림 4에서의 RF 대기 정전파괴보다 10 dB 높은 첨두 전기장 세기 조건을 시험용 안테나 급전부에 모의 인가 후, 레이돔 전체에 미치는 전기장 세기를 분석하였다. 시뮬레이션 결과 레이돔에 미치는 첨두 전기장 세기는 대기 정전파괴를 발생시킬 수 있는 임계치보다 낮은 것으로 분석되었다.

레이돔 표면을 따라 관찰한 근접 전계 표면(near field surface)의 경우 그림 5에서 확인할 수 있듯이 상층부는 레이돔의 돔형태와 영역이 겹치게 된다. 따라서, 원통형 좌표(cylindrical coordinate)의 ρ 방향 이격거리는 0.08 m로 설정하였다. 레이돔 내 RF 대기 정전파괴를 분석하기 위해서 full wave 해석 코드인 FEKO를 이용하였다.

그림 6~그림 8의 수직단면의 경우, 레이돔 영역을 통과하면서 큰 감쇠가 없음을 확인할 수 있다. 수평단면의 경우, 레이돔 영역으로의 입사각이 달라지기 때문에 전기장의 분포가 대칭적이지 않는 것을 확인할 수 있으나 전기장의 감쇠가 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다.

전력 전달 손실을 분석하기 위해서 원통형 좌표의 ρ

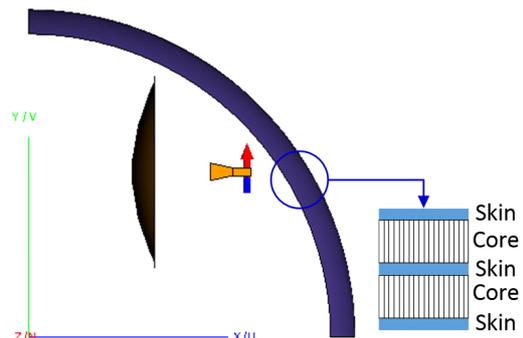
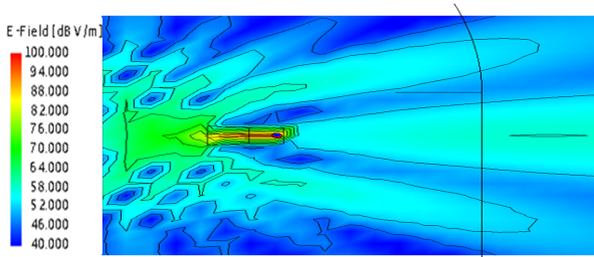
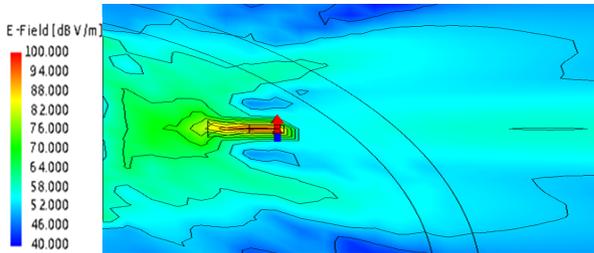


그림 5. 레이돔 형상 내 시험 송신 안테나 배치 단면도 및 레이돔 다층 구조

Fig. 5. Cross-section of a test transmit antenna in the radome and multi-layered wall structure.

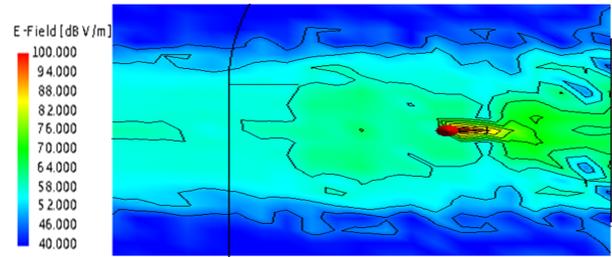


(a) E분포 수직단면
(a) Vertical cut of the electric field intensity

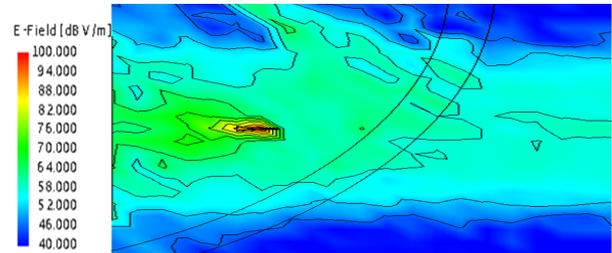


(b) E분포 수평단면
(b) Horizontal cut of the electric field intensity

그림 6. 레이돔 전기장세기(f_0 GHz)
Fig. 6. Electric field intensity at the frequency of f_0 GHz.

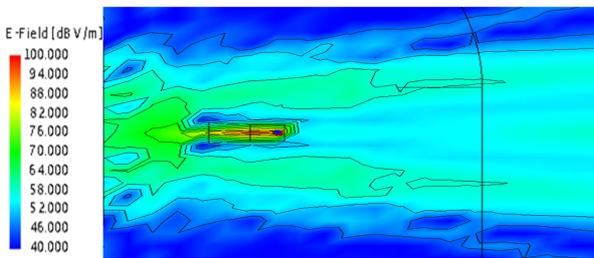


(a) E분포 수직단면
(a) Vertical cut of the electric field intensity

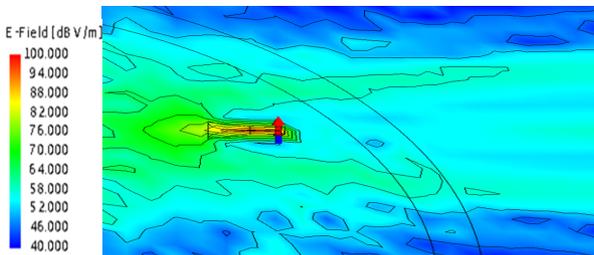


(b) E분포 수평단면
(b) Horizontal cut of the electric field intensity

그림 8. 레이돔 전기장세기($6f_0$ GHz)
Fig. 8. Electric field intensity at the frequency of $6f_0$ GHz.



(a) E분포 수직단면
(a) Vertical cut of the electric field intensity



(b) E분포 수평단면
(b) Horizontal cut of the electric field intensity

그림 7. 레이돔 전기장세기($3f_0$ GHz)
Fig. 7. Electric field intensity at the frequency of $3f_0$ GHz.

방향 이격거리 1.19 m와 1.27 m에 근접 전계를 모니터링 해서 근접 전계 표면전력을 분석하였다.

IV. 측정 및 결과

앞서 제시된 결과를 바탕으로 레이돔을 제작하여 기본적인 환경시험을 수행하고 전기적 성능 시험을 수행하여 레이돔이 실제 환경에서 사용가능함을 확인하였다.

제안된 레이돔은 제작공정 설계인자들을 토대로 금형을 제작하여 재단 및 lay-out을 5층 적층구조에 맞게 작업하였다. 이때, 제작 오차를 최소화하기 위해 제작 시 각 층의 두께 형성에 주의하였다. 이후, 성형 사이클에 맞추어 각 층 사이에 레진을 넣어 접착 되도록 온도와 압력을 가하여 성형로에서 굽고 나서 금형과 제품을 분리하여 후가공 처리를 하였다. 레이돔 크기는 2.8 m×3.5 m ($\varphi \times H$)이다. 하지만 이 크기를 한 번에 제작하기 힘들기 때문에 크게 두 조각으로 나눠 제작하여 조립하는 형태로 제작되었다.

제작된 레이돔의 실제 운용환경에 대한 적합성을 판단

하기 위해 전기적 성능 요구 조건뿐만 아니라 환경요건 요구 조건에 대한 성능 시험을 통해 실제 운용 가능 여부를 판단하였다. 제안된 레이돔에 적용된 환경시험 항목들은 온도, 습도, 진동, 염수분무, 강우이며 이 항목들에 대한 시험이 수행되었다. 각 항목에 대한 시험절차 및 시험결과 판단은 MIL-STD-810^[14]의 규정에 따라 정상적으로 수행되었으며, 관련 환경시험 항목들이 만족되었다.

4.1 레이돔 소신호 시험

전기적 성능 시험을 수행하기 위해 시험용 송수신 안테나로 표준 혼 안테나를 적용하였다. 무반사 챔버 제어실의 송신 안테나와 레이돔 내의 수신안테나가 전자적으로 정렬이 되도록 설정하였다.

시험용 제어기를 이용해서 레이돔을 2도 단위로 360도 회전하여 전력 전달률을 측정하였다. 전기적 성능 목표는 레이돔을 360도 회전해서 얻은 전력 전달률의 평균 80% 이상으로 규정하였다. 시뮬레이션 결과의 타당성을 검증하기 위해 다층 구조 레이돔을 제작하여 운용 주파수 대역에서 전력 전달률에 대한 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교해 그림 9에 제시하였다. MATLAB 시뮬레이션 전력 전달률과 FEKO 시뮬레이션 전력 전달률은 각 91.7%, 92.0%이다. 측정 전력 전달률은 평균 85.2%임을 확인할

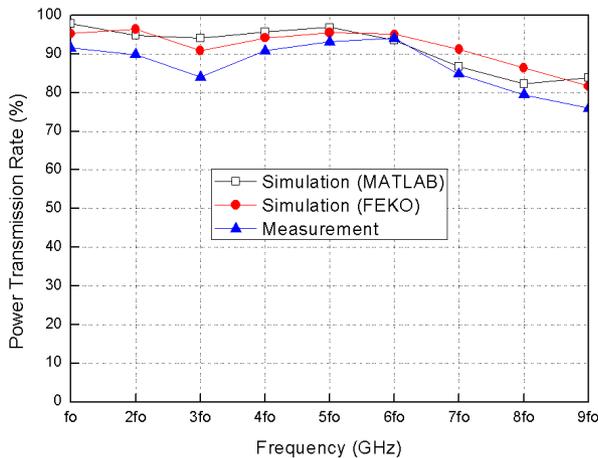


그림 9. 레이돔의 시뮬레이션과 측정 전력 전달률 비교
 Fig. 9. Comparison of power transmission rate of the simulated and fabricated radomes with respect to frequencies.

수 있다.

MATLAB을 이용한 최적화 알고리즘은 입사면을 완전 평면을 가정하여 최적화 값을 도출해내는데, 실제 측정 및 제작은 약간의 곡률 반경을 가지고 있기 때문에 이것의 영향으로 인해 MATLAB 시뮬레이션 결과와 측정 및 FEKO 시뮬레이션 결과가 차이가 발생했다고 판단됩니다.

시뮬레이션 결과와 측정 결과가 유사함을 확인하였다. 그렇지만, 측정 전력 전달률이 평균 80% 이상이지만 중심 대역을 제외한 나머지 대역에서 전력 전달률이 일부 낮아지는 현상을 보였다. 이러한 전력 전달률의 차이는 레이돔이 두 조각이 조립되는 부분의 손실과 레이돔 제작 시 적층 공정에서 각 층별로 발생하는 미세한 두께 차이의 영향으로 판단된다.

4.2 레이돔 대신호 시험

제안된 레이돔의 고출력 환경에서의 성능을 검증하기 위한 시험 구성은 그림 10과 같다. 고출력 송신을 위해 시험용 고출력증폭기로서 미국 ETM사의^[15] 고출력증폭기를 사용하였다. 6 GHz 이하 주파수 범위는 시험용 고출력증폭기(LB)는 ETM사의 300SC-XM을 사용하고, 6 GHz 이상 주파수 범위는 시험용 고출력증폭기(HB)는 ETM사의 300IJ-XM을 사용하였다.

그림 10에서 ㉑는 신호발생기에서 출력되어 시험용 고출력증폭기들로 입력되는 RF 신호, ㉒는 시험용 고출력증폭기들의 출력 RF 신호, ㉓는 시험용 수신안테나에서 커플링된 RF 신호, ㉔는 시험용 고출력증폭기들의 커플링된 진행 방향(Forward) 출력 RF 신호, ㉕는 시험용 고출력증폭기들의 커플링된 반사 방향(reflected) 출력 RF 신호, 그리고 ㉖는 대신호시험용 제어기와 각 계측기 및 시험용 고출력증폭기들 간의 제어, 상태 그리고 측정 데이터를 의미한다. 고출력 송신 시험 전 각 전송선로에 사용되는 RF 케이블 조립체의 삽입손실 및 시험용 송신 안테나의 VSWR을 측정한다.

그리고 고출력 송신 시험 후 각 전송선로에 사용되는 RF 케이블 조립체의 삽입 손실 및 시험용 송신 안테나의 VSWR을 재측정한다. 고출력 송신 시험 전/후의 결과 값을 비교하여 그 차이가 유효한 범위 내에 존재하는 확인해야 한다. 또한, 시험용 송신 안테나의 VSWR 특성이 시험용 고출

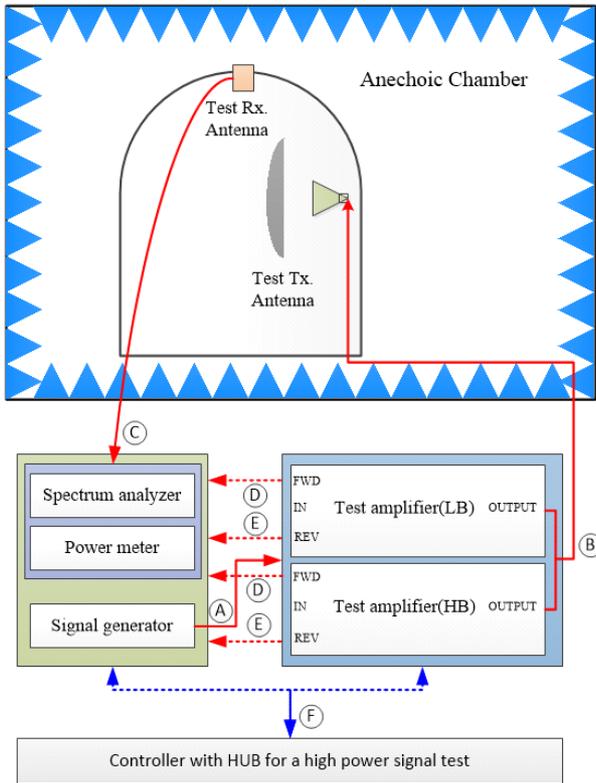


그림 10. 고출력증폭기를 이용한 대전력 방사 시험 구성 블록도
 Fig. 10. Block diagram of test configuration for a high-power radiation using high-power amplifiers.

력증폭기 출력단에서 전달된 RF 신호가 자유공간 상으로 방사된다는 의미를 포함하는 것은 아니므로, 자유공간 상으로 방사되는 RF 신호세기를 지속적으로 감시해야 하는 과정이 필요하다.

본 논문에서는 레이돔 상부에 시험용 기준 수신 안테나를 두어 이를 통해서 자유공간 상에서 커플링된 RF 신호세기를 기준으로 주파수별 보정을 한 후, 시험용 고출력증폭기로부터 시험용 송신 안테나로 전달된 RF 신호가 정상적으로 레이돔 표면으로 입사되어 레이돔을 투과하는지 여부를 지속적으로 스펙트럼분석기와 전력측정기를 통해 획득한 RF 신호세기를 감시하였다. 그리고 측정결과 값과 보정결과 값을 주파수별 상호 비교하여 시험용 송신 안테나의 성능 열화 여부를 확인하였다. 또한, 시험용 송신 안테나에 전달되는 RF 신호세기가 유효한지를 검증

하기 위해서 실시간적으로 시험용 고출력증폭기(LB)와 시험용 고출력증폭기(HB)의 출력단의 dual directional coupler를 통해 각 시험용 고출력증폭기의 forward power와 reflected power를 감시하였다.

대신호 시험을 수행하기 전에 시험용 고출력증폭기들의 운용모드를 CW로 설정하고, 운용 주파수 범위 내에서 최소 55 dBm에서 최대 58 dBm까지 출력됨을 확인하고 시험을 진행하였다. 고출력 송신시험은 먼저 레이돔이 있는 조건에서 시험용 고출력증폭기의 P1 dB 지점에서 20 dB 감쇠한 저출력으로 수행한 후, P1 dB 고출력 신호세기로 송신한 것을 수행하였다. 시험의 정상 유무는 공간상의 커플링된 수신 전력을 보정한 후, 이를 토대로 판단하였다. 즉, 레이돔이 있는 조건에서 각 시험 주파수별로 저출력으로 송신하면서 시험용 수신안테나에서 커플링 보정값을 측정하고 나서, 레이돔이 있는 조건에서 P1 dB 세기로 고출력송신을 했을 경우, 측정된 커플링된 값에 저출력 송신시 산출한 보정 값을 적용하여 최종 대신호 출력 신호세기를 분석하였다.

시험용 송신 안테나 자체의 특성변화를 분석하기 위해서 실시간으로 시험용 고출력증폭기에서 시험용 송신 안테나로부터 반사되는 전력과 시험용 송신 안테나로 전송되는 전력을 지속적으로 측정 및 감시하여 레이돔 이외의 주변 환경변수의 영향성에 대한 검증을 하였다.

고출력 운용환경 조건의 시험 주파수 범위 내에서 최대 투과전력 손실의 차가 0.35 dB이하임을 그림 11에서 확인할 수 있다. 시험용 송신 안테나의 경우, 고출력 송신 전과 고출력 송신 후의 VSWR 변화가 $-0.02 \sim 0.02$ 이내로 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 이는 고출력 송신 시, 시험용 고출력증폭기에서 증폭된 RF 신호가 정상적으로 시험용 송신 안테나를 통해 레이돔으로 방사되었음을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서 제안한 광대역 고출력 응용환경에 적용 가능한 다층 구조 레이돔은 광대역 운용주파수 대역에서 고출력 송신이 요구되는 구성품을 보호하고 운용하기에 적합함을 검증하였다.

레이돔의 광대역화에 대한 설계하기 위해 PSO 최적화

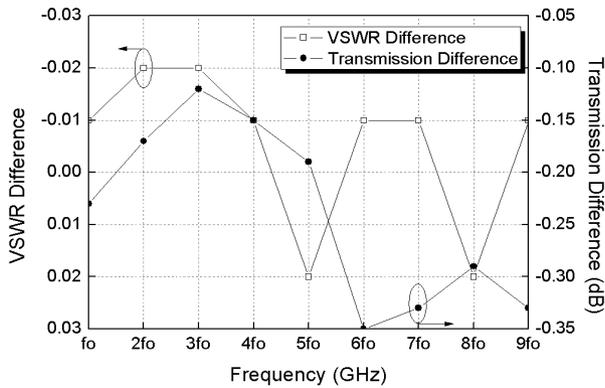


그림 11. 시험용 송신 안테나 VSWR 변화 및 소신호 대비 대신호 전력 전달손실 변화

Fig. 11. Variations of VSWR of the test transmit antenna and power transmission loss with the high-power signal compared with that of the low-power signal.

알고리즘을 MATLAB으로 구현하여 레이돔 다층 구조에 대한 각 층의 설계인자들을 산출하였다. 최적화로 예측된 다층 구조에 대한 전력 전달 특성을 분석한 후, 대형 구조물 제작공정의 제한 조건을 고려하여 제작공정에 적합한 다층 구조 두께를 재산출하여 이에 대한 전력 전달 특성을 재분석하였다. 또한, 실제 환경에 적합한 레이돔을 구현하기 위해 운용 환경 조건에 필요한 구조해석을 수행하였다. 또한, 대전력 신호방사 조건을 FEKO로 모사하여 레이돔 안쪽과 바깥쪽의 전기장세기 변화 분석을 통해 레이돔 표면에서 정전 파괴가 발생하지 않음을 확인하였다.

시뮬레이션 결과를 토대로 광대역 고출력 레이돔을 제작한 후, 무반사 챔버 내에서 소신호와 대신호 인가 시험을 수행하였다. E대역에서 J대역까지의 광대역 운용 주파수 범위에서 레이돔의 전력 전달률이 평균 80 % 이상이고, 정전파괴 없이 연속 입사파가 안정적으로 투과됨을 확인하였다.

향후, 본 논문의 레이돔 설계, 구조해석 및 시험검증 방법이 고출력 응용분야 연구뿐만 아니라, 광대역 응용분야 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 다층 구조를 갖는 유사 레이돔 개발에 본 논문에서 적용한 개발 절차를 응용한다면 개발 절차를 최적화할 수 있어 비용 절감에도 기여를 할 것으로 판단된다.

References

- [1] R. U. Nair, R. M. Jha, "Electromagnetic performance analysis of a novel monolithic radome for airborne applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 11, pp. 3664-3668, Nov. 2009.
- [2] K. Chang, "Antenna angle error correction to radome curvature," in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 1995 Digest*, Newport Beach, CA, 1995, vol. 3, pp. 1426-1429.
- [3] Y. E. Erdemli, K. Sertel, R. A. Gilbert, D. E. Wright, and J. L. Volakis, "Frequency-selective surfaces to enhance performance of broad-band reconfigurable arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 50, no. 12, pp. 1716-1724, Dec. 2002.
- [4] A. K. Rashid, B. Li, and Z. Shen, "An overview of three-dimensional frequency-selective structures," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 56, no. 3, pp. 43-67, Jun. 2014.
- [5] D. L. Adamy, *EW 104: Electronic Warfare against a New Generation of Threats*, Artech House, pp. 5-119, 2015.
- [6] K. V. Ravi, R. F. Ormondroyd, "Effect of CW and pulse jamming on direct-sequence spread-spectrum code acquisition using a sequential detector," in *MILCOM 92 Conference Record*, CA, Oct. 1992, vol. 2, pp. 638-643.
- [7] A. Purwar, D. Joshi, and V. K. Chaubey, "GPS signal jamming and anti-jamming strategy - A theoretical analysis," in *2016 IEEE Annual India Conference(INDICON)*, Bangalore, 2016, pp. 1-6.
- [8] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design Second Edition*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 785-838, 1997.
- [9] D. J. Kozakoff, *Analysis of Radome-Enclosed Antennas*, Artech House Microwave Library, pp. 69-95, 1997.
- [10] J. Robinson, Y. Rahmat-Samii, "Particle swarm optimization in electromagnetics," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 52, no. 2, pp. 397-407, Feb. 2004.

[11] 이경원, 홍익표, 박범준, 정영철, 육종관, "Particle swarm optimization을 이용한 다층구조 레이돔 설계," 한국전자과학회논문지, 21(7), pp. 744-751, 2010년 7월.
 [12] W. Woo, J. S. DeGroot, "Microwave absorption and plasma heating due to microwave breakdown in the atmosphere," *Physics of Fluids*, vol. 27, no. 2, pp. 475-487, 1984.
 [13] P. T. Partridge, J. Farrell, and J. Tate, *Standard/ Hand-*

book for RF Ionization Breakdown Prevention in Spacecraft Components, Antenna Systems Department, The Aerospace Corporation El Segundo, Jun. 2015.
 [14] MIL-STD-810F, "Department of defense test method standard for environmental engineering considerations and laboratory tests," Department of Defense, USA, 2000.
 [15] ETM. Available: <http://www.etm-inc.com>.

이 기 육



2000년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)
 2002년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학석사)
 2001년~2004년: LG이노텍 주임연구원
 2005년 11월~현재: LIG 넥스원 수석연구원
 2009년 9월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정

[주 관심분야] 고출력 마이크로파 회로설계, HPEM, 전자전 시스템 설계

문 병 귀



2011년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)
 2017년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학박사)
 2017년 1월~현재: LIG넥스원(주) 전자전연구소 선임연구원
 [주 관심분야] 안테나 시스템, 마이크로파 회로설계, 전자전 시스템 설계

이 경 원



2003년 2월: 대전대학교 전자공학과 (공학사)
 2005년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 2012년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
 2012년 7월~현재: LIG 넥스원 선임연구원

[주 관심분야] 마이크로파 해석, 안테나/레이돔, 전자전 시스템 설계

최 삼 열



2008년 2월: 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부 (공학사)
 2010년 2월: 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부 (공학석사)
 2009년 12월~2013년 4월: 에이스 안테나부설연구소 선임연구원
 2013년 4월~현재: LIG 넥스원 선임연구원

[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 능동 위상 배열 시스템

이 왕 용



1995년 2월: 경북산업대학교 전자공학과 (공학사)
2008년 2월: 아주대학교 정보전자공학과 (공학석사)
1995년 8월~현재: LIG넥스원 수석연구원
[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 전자전 시스템 설계

윤 영 중



1981년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
1986년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
1991년 2월: Georgia Institute of Technology (공학박사)
1992년~1993년: 한국전자통신연구원 위성통신기술연구단 교수
1993년~현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수
2011년: 한국전자파학회 학회장
[주 관심분야] 안테나 및 전파전파 등