

위성통신용 파라볼라 안테나의 풍압 성능 검증에 관한 연구

정치현*¹, 이덕우*², 이준경*³, 이성재**

A Study on Wind Load Performance Verification of a Parabolic Antenna for Satellite Communications

Chi-Hyun Cheong*¹, Deok-Woo Lee*², Jun-Kyeong Lee*³, and Sung-Jae Lee**

요 약

본 논문에서는 정지궤도(GEO) 위성통신을 위한 운반용 위성통신 단말의 풍압 성능을 검증하기 위하여 전산 유체해석(CFD), 유한요소해석(FEM) 및 전자기 해석과 정적·동적 풍압시험을 수행하였다. 정적시험에서 반사판의 최대 변위 및 페데스탈에 의한 최대 지향각 변화로 인한 이득 감소는 총 1.5 dB였으며, 동적시험에서는 14 m/s와 18 m/s에서 각각 최대 1.0 dB와 1.1 dB의 비콘 신호 감소가 측정되어 운용 요구조건을 만족하였다. 생존 조건인 25 m/s에서는 정면 풍향에서 최대 4.2 dB의 비콘 신호 감소가 발생하였으나, 변형, 전복 및 파손은 발생하지 않아 생존 요구조건을 만족함을 확인하였다. 본 연구는 풍하중과 위성통신 신호의 관계를 해석·시험으로 검증하여, 열악한 기상 환경에서의 단말 성능 검증에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract

This paper investigates the wind-load performance of a transportable satellite communication terminal for Geostationary Earth Orbit (GEO) satellite communications through Computational Fluid Dynamics (CFD), Finite Element Method (FEM), electromagnetic analysis, and static and dynamic wind-load tests. In the static tests, a maximum reflector displacement of 1.7 mm and a maximum pointing-angle variation of 0.7° due to pedestal deformation were measured. In the dynamic tests, maximum beacon signal reductions of 1.0 dB and 1.1 dB were measured at wind speeds of 14 m/s and 18 m/s, respectively, satisfying the operational requirements. Under the survival condition of 25 m/s, a maximum beacon signal reduction of 4.2 dB was observed under front-wind conditions; however, no deformation, overturning, or damage occurred, satisfying the survival requirement. The proposed approach correlates wind load with satellite communication signal performance through analysis and experimental verification and can be utilized for evaluating terminal performance under severe weather conditions.

Keywords

parabolic antenna, wind load, static test, dynamic test, pointing error, satellite communication terminal

* 한화시스템 통신연구소 연구원(*¹ 교신저자)

- ORCID¹: <https://orcid.org/0009-0005-9062-8006>

- ORCID²: <https://orcid.org/0000-0002-4897-6251>

- ORCID³: <https://orcid.org/0009-0007-7823-9117>

** 국방과학연구소 연구원

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3310-6170>

· Received: Jun. 23, 2026, Revised: Aug. 10, 2026, Accepted: Aug. 13, 2026

· Corresponding Author: Chi-Hyun Cheong

Communications Research Center, DE Division, Hanwha Systems Korea

Tel.: + 82-31-8091-7404, Email: chi Hyun.cheong@hanwha.com

1. 서 론

위성통신은 지상 통신망 구축이 어렵거나 상용 유무선 통신 서비스 제공이 제한되는 지역에서 안정적인 통신 서비스를 제공하기 위한 핵심 수단으로 활용되고 있다. 특히 최근 들어 저궤도(LEO, Low Earth Orbit) 통신 시스템은 낮은 전송 지연 시간과 높은 데이터 처리량을 강점으로 내세우며 글로벌 광대역 통신 서비스를 제공하는 차세대 위성 통신 기술로 주목받고 있다. 그러나 이러한 기술적 변화 속에서도 정지궤도(GEO, Geostationary Earth Orbit) 위성은 광역 커버리지 및 장기간 안정적인 통신 링크 유지가 필수적인 방송, 재난·재해 통신, 해상 및 항공 통신, 군 위성통신 등에서 지속적으로 활용되고 있다[1].

최근 저궤도 위성 통신 서비스를 위해서는 움직이는 위성을 추적하면서 위성간 핸드오버를 빠르게 수행할 수 있는 ESA(Electronically Steerable Antenna)를 포함한 단말에 관한 연구 및 수요가 증가하고 있다. 반면 정지궤도 단말의 경우, 높은 제조 비용과 소비전력, 빔조향 회로의 복잡성 등의 이유로 현재까지도 고이득의 전기적 성능을 비교적 쉽게 구현할 수 있는 파라볼라 형태의 안테나가 널리 사용되고 있다[2].

이러한 파라볼라 안테나는 구조적으로 온도, 고도, 강우, 염수, 진동, 충격, 바람 등의 환경적인 외란을 고려해야 한다. 특히, 강풍이나 돌풍과 같은 외부 풍하중(Wind load)은 안테나의 지향 오차(Pointing error)를 증가시키거나 구조적 변형을 유발하여 안테나 이득 감소로 인한 링크 마진 저하나 통신 단절을 유발할 수 있다. 따라서 실제 운용 환경에서의 구조적 안정성을 검증하기 위한 풍압 영향성 분석과 이를 검증하기 위한 시험 방법에 대한 다양한 고찰이 필요하다. 현재까지 파라볼라 안테나의 풍하중 특성에 관한 연구는 전산유체해석(CFD, Computational Fluid Dynamics), 유한요소해석(FEM, Finite Element Method), 풍동시험 등을 중심으로 수행되어 왔다[3]. 최근에는 통신탑·안테나 구조물에 대한 CFD 기반 풍하중 계수 산출 프로토콜이 제안되는 등 해석 기법의 일반화와 신뢰성 확보를 위한

연구가 지속되고 있으며[4], 접시형(Dish) 안테나가 통신탑 전체의 풍하중 분포에 미치는 영향을 풍동 시험을 통해 실험적으로 규명한 연구 및 지향 오차의 변화에 관한 연구도 보고된 바 있다[5][6]. 이러한 연구들은 풍하중에 의한 구조적 변형과 지향 오차의 관계를 규명하는 데 중요한 결과를 제시하고 있다.

그러나 기존 연구는 대형 안테나의 구조적 거동이나 지향 오차 분석에 중점을 둔 경우가 많으며, 실제 위성통신 단말을 대상으로 풍하중 해석 결과와 구조시험, 전자기 해석 및 실제 위성 비콘 신호 측정을 연계하여 풍압에 따른 통신 성능을 종합적으로 검증한 사례는 상대적으로 제한적이다. 특히 운반용 위성통신 단말은 구조적 경량화와 이동성을 동시에 요구하므로 반사판 자체의 변형뿐만 아니라 페데스탈의 지향 안정성과 실제 통신 링크 유지 여부를 함께 평가할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 파라볼라 안테나를 포함하는 위성단말의 풍압 성능을 분석하기 위해 두 가지 상호 보완적인 시험 방법을 사용하였다. 먼저 실험실 내에서 안테나에 하중을 인가하여 구조적 응답을 측정하는 정적 시험(Static test)을 수행하였다. 이러한 방법은 반복성과 시험 재현성이 우수하다는 장점이 있으나, 실 운용 환경에서 발생하는 시간에 따른 풍속 변화와 전체 단말 시스템의 동적하중 특성을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다. 따라서 실외 환경에서 단말이 위성 신호를 수신하고 있는 상태에서, 대형 송풍장치를 이용하여 인위적인 풍동 조건을 구현한 동적 시험(Dynamic test)을 수행하였으며 이러한 시험 결과를 비교·분석하였다.

본 논문에서 소개하는 단말은 이동 후 설치 운용하는 단말에 적용하는 운반용(Transportable) 위성단말로 운용 요구조건에 따라 18 m/s 이하에서는 위성 신호를 안정적으로 유지하고, 생존 풍속을 25m/s로 설정하여 안테나의 전기적/기구적 성능 유지 조건을 목표로 하였다. 2장에서는 풍압에 유리한 안테나 형태의 장단점을 고찰하여 설계 개요를 제시하고, CFD를 이용한 풍압 해석과 FEM을 이용한 구조 해석을 통해 설계된 안테나의 구조적 성능을 M&S 기반으로 검증한 결과를 기술한다. 3장에서는 안테

나 제작 후 정적 풍압시험과 동적 풍압시험의 구성 및 절차를 각각 기술하고, 시험 결과를 해석 결과와 비교·분석한다. 마지막으로 4장에서는 연구 결과를 종합하여 결론을 제시한다.

II. 안테나 설계 및 해석

2.1 개요

본 연구에서는 운용 요구조건에 따라 태풍의 강도 1 조건[7] 내에서 풍속 조건을 아래 표 1과 같이 설정하였다.

표 1. 운반단말 풍속 요구 조건

Table 1. Wind speed condition for transportable terminal

Condition	Wind speed	Spec
Operation	14m/s	Pointing loss of 2 dB or less [8]
Gust	18m/s	Operational requirements satisfied after gust exposure
Survival	25m/s	No structural deformation, overturning, or damage

이와 같은 풍속 조건을 만족하면서 동시에 운반성을 확보하기 위해, 본 연구의 위성단말은 소형·경량화 및 구성품 분리 기능을 중점으로 설계·제작하였다. 안테나의 경우, 양산성 및 구조적 안정성 확보를 위해 햇피드(Hat feed) 방식의 형상을 선택하였다[9]. 햇피드 구조는 반사판 중심부에서 급전부를 직접 지지하므로 오프셋(Offset) 구조에 비해 단순하고 풍하중에 대한 강성이 우수하여 운반용 단말에 적합하다.

또한, 햇피드 구조는 회전대칭 형상을 가지므로, 반사판을 동일한 형상의 패널 6개로 등분할한 분할 반사판(Segmented reflector) 구조로 설계하였다. 각 패널의 형상이 동일하여 양산이 용이하고, 현장에서의 조립·설치 편의성을 확보할 수 있다는 장점이 있다. 단말의 구조는 안테나 외에 위성을 지향하기 위해 2축(고각/방위각)으로 지향각 조절이 가능한 페데스탈(Pedestal) 장치와 2개의 지지대, 그리고 모뎀·전원·제어부가 포함된 본체로 구성된다. 본 안테

나는 X대역에서 동작하며, 반사판 지름은 1.1 m이다. 운반용 위성단말의 최종 형상은 그림 1과 같다.

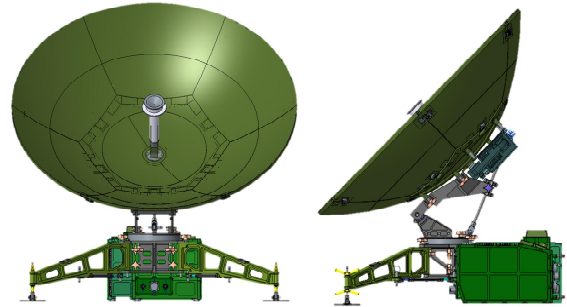


그림 1. 운반용 위성단말 및 파라볼라 안테나 형상

Fig. 1. Configuration of the transportable satellite terminal and parabolic antenna

2.2 유동(공력)해석(CFD)을 이용한 풍압 분석

풍압에 의한 위성단말의 구조해석을 위해 먼저 유동해석(CFD)을 이용하여 반사판에 작용하는 하중을 산출하였다. 그림 2와 같이 안테나의 고각(Elevation angle)은 한반도에서 정지궤도 위성 운용 시 일반적으로 적용되는 지향각을 고려하여 45°로 설정하였다. 또한 생존 풍속 조건에서의 풍압 특성을 분석하기 위하여 풍속은 25 m/s를 적용하였다. 바람의 방향에 따른 영향성을 고려하여 반사판의 정면(Front wind)과 후면(Rear wind)에서 지면과 수평으로 부는 경우를 가정하였으며, 풍하중 기여도가 상대적으로 작은 단말 본체와 주변 장치는 해석 대상에서 제외하였다.

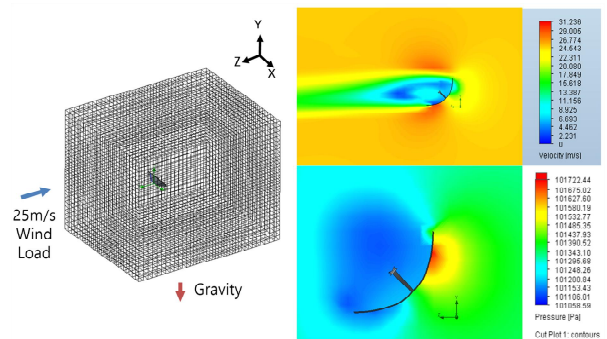


그림 2. 유동해석에 따른 경계조건, 속도 및 압력분포

Fig. 2. Boundary condition, velocity and pressure distribution obtained by CFD

CFD 해석 결과 풍속 14 m/s의 운용 환경에서 반사판에 작용하는 총 항력은 정면 169.8 N, 후면 54.3 N 으로 계산되었으며, 18 m/s는 정면 274.2 N, 후면 81.5 N 마지막으로 25 m/s는 정면 535.5 N, 후면 165.7 N 으로 계산되었다. 계산 결과의 타당성을 확인하기 위하여 식 (1)[10]을 이용하여 정면 방향에서의 생존 항력계수를 산출하였다.

$$F = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D A \quad (1)$$

반사판의 직경은 1.1 m로, 투영면적(A)은 0.95m²이며, 해수면 기준 공기밀도(ρ) 1.225 kg/m³를 적용하였다. 25 m/s 풍속(V)에서 계산 결과 항력계수(CD)는 약 1.47로 나타났으며, 이는 일반적인 파라볼라 반사판의 항력계수 범위(1.2 ~ 1.5)와 유사한 수준[11]으로 CFD 결과의 타당성을 확인할 수 있었다. 계산된 풍압 분포는 다음 절에서 수행하는 FEM을 통한 구조해석(Structural analysis)의 입력 하중으로 적용하였다. 또한 계산된 총 항력은 정적 풍압시험에서 등가 분포하중을 산정하기 위한 기준값으로 활용하였다. 구조 설계 및 시험 조건은 가장 보수적인 조건을 적용하기 위하여 정면 풍향에서 계산된 최대 항력을 기준으로 설정하였다.

2.3 유한요소해석(FEM)을 이용한 구조해석

2.2절에서 산출한 반사판 표면의 풍압 분포를 입력 하중으로 적용하여 유한요소해석(FEM)을 수행하였다. 구조해석은 반사판과 페데스탈에 대해 각각 수행하였으며, 풍하중에 따른 변위와 응력 분포를 분석하여 구조적 안전성을 검토하였다.

반사판은 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic) 분할 구조로 모델링하였으며, CFD에서 계산된 압력 분포를 반사판 표면에 직접 적용하였다. 이때 6개 분할 패널은 물리적으로 분리된 개별 부재로 모델링하되, 패널 간 체결부는 실제 조립 공차나 체결강성 손실을 배제하고 이상적으로 체결(Ideally fastened)된 것으로 가정하였다. 정적 구조해석을 통해 반사면의 변위와 응력을 계산하였다. 그림 3은 풍속 25 m/s에서의 M&S 결과이다.

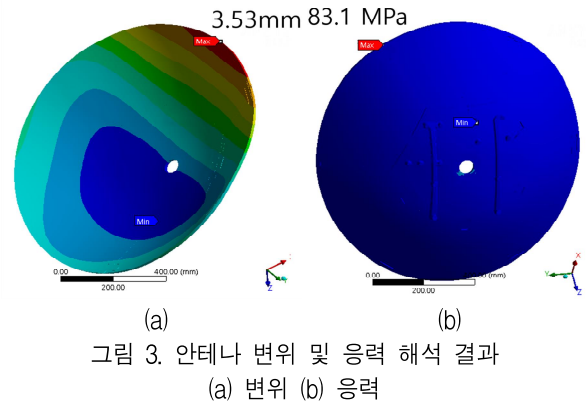


그림 3. 안테나 변위 및 응력 해석 결과
(a) 변위 (b) 응력

Fig. 3. Maximum displacement & stress of reflector antenna (a) Displacement (b) Stress

M&S 결과 반사판 표면의 최대 변위는 약 3.5 mm로 계산되었다. 이는 반사판 전체의 강체 변위가 아닌, 풍압에 의한 각 패널의 국부적 형상 변화로 이상적인 포물면 형상 대비 편차를 의미한다. 최대 응력은 반사판 후면의 페데스탈 체결부를 고정 경계조건으로 가정한 모델에서 83.1 MPa로 나타났다. 반사판에 적용된 CFRP의 기계적 물성은 별도의 시편 강도시험을 통해 확인하였다. 시험 결과 인장강도는 554 MPa, 압축강도는 364 MPa로 측정되었다. 설계 안전율 1.5를 적용한 허용응력은 약 242.7 MPa이다. 해석에서 산출된 최대 응력 83.1 MPa는 이 허용응력 대비 충분히 낮은 수준(안전율 약 2.9)으로, 구조적으로 안전한 것으로 판단된다.

계산된 반사면 변위 형상은 EM Tool(CST)의 전자기 해석 모델에 반영하여 안테나 성능 변화를 분석하였다. 그 결과 풍압에 의한 반사면 형상 변형으로 안테나 이득은 최대 약 1.4 dB 감소하는 것으로 나타났다. 상세 결과는 표 2와 같다.

표 2. 풍하중에 따른 반사판 변위 및 안테나 전기적 성능 해석 결과

Table 2. Reflector displacement and electrical performance analysis results under wind load

Wind speed	Reflector displacement	Reflector gain	Delta
None	-	38.1 dBi	-
14m/s	1.1 mm	37.9 dBi	0.2 dB
18m/s	1.8 mm	37.7 dBi	0.4 dB
25m/s	3.5 mm	36.7 dBi	1.4 dB

페데스탈은 실제 운용 상태를 고려하여 지지대의 하부를 고정 경계조건(Fixed boundary condition)으로 설정하였다. 반사판으로부터 전달되는 하중에 대한 정적 구조해석을 수행하여 최대 변위와 등가응력을 계산하였으며, 구조적 안전성을 검토하였다.

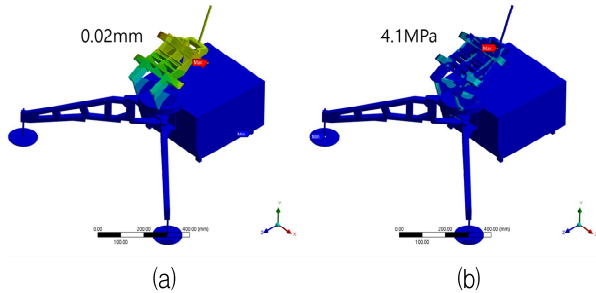


그림 4. 페데스탈 변위 및 응력 해석 결과
(a) 변위 (b) 응력

Fig. 4. Maximum displacement & stress of pedestal
(a) Displacement (b) Stress

그림 4의 M&S 결과, 페데스탈의 최대 변위는 고 각 지지대 부근에서 약 0.02 mm로 계산되었으며, 이에 따른 안테나의 지향 오차(Pointing error)는 0.001° 이하로 분석되어 풍하중에 의한 영향은 매우 미미한 것으로 판단하였다.

또한 페데스탈의 동적 특성을 분석하기 위하여 고유진동해석(Modal analysis)을 수행하였다. 그림 5와 같이 해석 결과 1차 고유진동수는 133.75 Hz로 계산되었다.

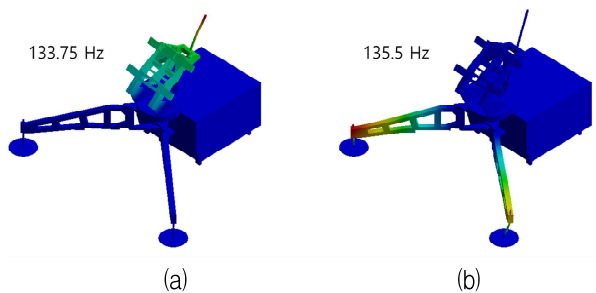


그림 5. 모달해석(고유진동수) 해석 결과
(a) 1차 모드 (b) 2차 모드

Fig. 5. Modal analysis results
(a) Mode 1st (b) Mode 2nd

풍압시험에 사용된 인공송풍장치는 정격 회전속도 2100 rpm으로 운전되며, 회전주파수는 35 Hz, 3엽 블레이드에 의한 BPF(Blade Passing Frequency)는 약 105 Hz이다. 따라서 구조물의 1차 고유진동수는 송

풍장치의 주요 가진 주파수와 충분히 이격되어 있어 풍압시험 중 공진이 발생할 가능성은 낮은 것으로 판단하였다. 본 고유진동해석은 풍압시험 결과가 구조물의 공진 현상에 의해 영향을 받지 않았음을 확인하기 위한 목적으로 수행하였다.

구조해석 결과는 이후 3장에서 수행한 정적 풍압 시험 및 실외 동적 풍압시험 결과와 비교하여 해석 모델의 신뢰성을 검증하였다.

III. 풍압 성능 시험 및 결과 분석

3.1 정적 풍압시험

CFD 해석에서는 풍압이 반사판 표면에 분포하중의 형태로 작용하는 것으로 계산되지만, 구조적으로는 반사판의 국부 변형과 함께 반사판-페데스탈 접합부를 통해 페데스탈로 전달되는 총 항력이 발생한다. 따라서 본 연구에서는 이러한 두 가지 하중 특성을 각각 검증하기 위하여 실험실 내에서 반사판 분포하중 시험과 페데스탈 수평 인장하중 시험의 두 가지 정적 풍압시험을 수행하였다.

반사판 시험은 풍압에 의한 분포하중을 모사하여 반사판의 구조 변형을 검증하기 위한 것이며, 페데스탈 시험은 반사판으로부터 전달되는 총 항력을 모사하여 지향 안정성과 구조적 건전성을 검증하기 위한 시험이다.

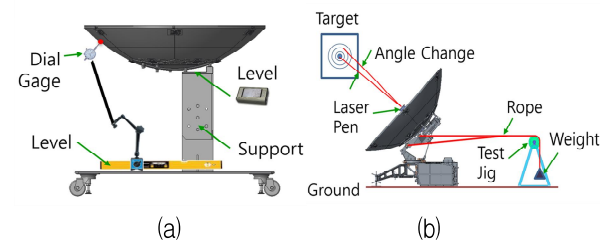


그림 6. 정적 풍압시험 구성
(a) 반사판 시험구성 (b) 페데스탈 시험구성

Fig. 6. Static load test setup
(a) Reflector test setup (b) Pedestal test setup

그림 6(a)에서의 반사판 시험에서는 실제 풍압에 의해 반사판 표면에 작용하는 분포압력을 모사하기 위하여, CFD 해석에서 산출된 정면 풍향 조건의 풍속별 항력에 설계 안전율 1.5를 적용하여 등가 중량

을 요구 풍속별로 각각 26, 42, 82 kgf를 산출하고, 이를 반사판 전체에 균일하게 분포시켰다. 이를 위해 동일한 질량의 모래주머니를 반사판 전면에 가능한 한 균일하게 배치하였으며, 이 방법은 반사판 표면에 작용하는 풍압을 비교적 간단하면서도 재현성 있게 구현할 수 있다는 장점이 있다. 다만 이는 CFD에서 산출된 반사판 표면의 불균일한 압력 분포를 등가 균일하중으로 단순화한 것으로, 국부적 압력 편차에 의한 영향은 시험에 반영되지 않는다는 한계가 있다.

하중 인가 후 반사판의 최대 변위는 다이얼 게이지를 이용하여 반사판 외곽 6개 지점과 중앙 피드부를 포함한 총 7개 지점에서 측정하였다. 측정된 변위는 FEM 구조해석 결과와 비교하여 해석 모델의 타당성을 검증하였으며, 측정된 변형 형상은 전자기 해석 결과와 연계하여 반사판 변형이 안테나의 전기적 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

그림 6(b)의 페데스탈 시험에서는 풍압에 의해 발생하는 총 항력이 반사판과 페데스탈의 접합부를 통해 전달되는 구조적 거동을 모사하였다. 이를 위해 반사판과 페데스탈의 접합부에 와이어를 연결하고 도르래(Pulley)를 통해 하중 방향을 수평으로 전환하여, 반사판 시험과 동일한 설계 안전율 1.5를 적용한 등가 하중(무게추)을 정면 풍향(Front Wind)을 모사한 수평 방향으로 인가하였다. 하중은 지면과 평행한 방향으로 작용하도록 구성하여 실제 운용 환경에서의 하중 전달 특성을 재현하였다.

시험에서는 하중 인가에 따른 페데스탈의 변위와 이로 인해 발생하는 안테나의 지향 변화를 측정하였으며, 측정 결과를 FEM 구조해석 결과와 비교하여 페데스탈의 구조적 건전성과 해석 모델의 신뢰성을 검증하였다.

반사판 시험은 풍압에 의한 반사판의 국부적인 구조 변형을 검증하기 위한 것이며, 페데스탈 시험은 풍하중이 전체 안테나 구조에 전달되는 하중 전달 특성과 지향 안정성을 검증하기 위한 것이다. 두 시험은 상호 보완적인 방법으로 수행되었으며, 실제 풍압 환경에서 발생하는 구조 응답을 정적 하중으로 효과적으로 모사하기 위해 적용하였다.

3.2 정적 풍압시험 결과

3.1절에서 수행한 반사판 분포하중 시험과 페데스탈 수평 인장하중 시험의 결과를 분석하고, FEM 구조해석 결과와 비교하여 해석 모델의 타당성을 검토하였다.

반사판 분포하중 시험에서는 CFD 해석에서 산출된 최대 항력 535.5 N을 등가 중량으로 환산하고 설계 안전율 1.5를 적용한 약 82 kgf의 하중을 반사판 전체에 균일하게 인가하였다. 하중 인가 후 다이얼 게이지를 이용하여 반사판 외곽 6개 지점과 중앙 피드부를 포함한 총 7개 지점의 변위를 측정하였다.

시험 결과 반사판의 최대 변위는 FEM 구조해석에서 예측한 동일한 위치에서 1.7 mm로 측정되었으며, 이는 해석 결과인 3.5 mm보다 약 51% 작은 값으로 나타났다. 이러한 차이는 FEM에서는 CFD로부터 산출된 반사판 표면의 불균일한 압력 분포를 그대로 적용한 반면, 실제 시험에서는 모래주머니를 이용한 등가 균일 분포하중을 적용함에 따라 국부적인 하중 집중 정도에 차이가 있었기 때문으로 판단된다.

측정된 반사판의 변형 형상을 EM Tool을 이용한 전자기 해석에 적용한 결과, 안테나 이득은 약 0.4 dB 감소하는 것으로 나타나 설계 요구조건(2 dB 이하)을 충분히 만족하는 수준으로 확인되었으며, 생존 풍속 조건에서도 반사판의 구조적 건전성은 유지되는 것으로 확인되었다.

페데스탈 시험에서는 반사판과 페데스탈의 접합부에 와이어를 연결하고 동일한 82 kgf의 수평 인장하중을 인가하여 풍압에 의해 전달되는 총 항력을 모사하였다.

시험 결과 페데스탈 장치의 변형으로 인한 안테나의 지향각은 약 0.7° 변화하여 안테나의 이득은 1.1 dB 감소되는 것으로 분석되었다. 반면 FEM 구조해석에서는 페데스탈의 최대 변위가 약 0.02 mm로 계산되었으며, 이에 따른 안테나의 지향 변화는 0.001° 이하로 예측되었다.

해석과 시험 결과의 차이는 제작 및 조립 공차에 기인한 것으로, 특히 체결부의 유연성, 회전축 및 베어링의 미세 유격 등은 해석 모델에서 고려되지 않은 요소로, 이러한 영향이 누적되어 시험 결과에

서 더 큰 지향 오차가 발생한 것으로 판단된다.

정적 시험 결과(표 3), 반사판의 최대 변위는 안테나가 적용된 보수적 하중 조건에서도 FEM 해석 결과보다 작게 나타나, 시험에서 구현한 균일 등가 하중 조건이 CFD 기반의 불균일 압력 분포보다 국부적으로 완화된 하중 특성을 가짐을 확인하였다. 반면, 페데스탈은 해석 결과보다 큰 지향 변화를 나타내었으며, 이는 페데스탈 구성품의 제작 및 조립 공차로 기인된 것으로 판단된다. 따라서 실제 운용 환경에서의 통신 성능은 반사판의 형상 변형뿐만 아니라 페데스탈의 구조 변형과 이에 따른 지향 오차의 영향을 함께 포함하여 시스템 수준의 구조 특성을 고려하여 평가할 필요가 있다. 이러한 영향을 검증하기 위하여 다음 절에서는 인공송풍장치를 이용하여 요구조건의 풍속에서 실제 위성을 지향한 상태로 수행한 동적 풍압시험 결과를 분석하였다.

표 3. 정적시험 결과

Table 3. Static wind load test results

Wind speed	Reflector displacement (Gain loss)	Pedestal angle change (Gain loss)	Total gain loss
14m/s	0.3 mm (0.08 dB)	0.09° (0.03 dB)	0.11 dB
18m/s	0.7 mm (0.15 dB)	0.19° (0.08 dB)	0.23 dB
25m/s	1.7 mm (0.4 dB)	0.7° (1.1 dB)	1.5 dB

3.3 동적 풍압시험

정적 풍압시험은 풍하중을 증가 정적 하중으로 모사하여 구조 응답을 평가하는 방법으로, 실제 운용 환경에서 발생하는 시간에 따른 풍속 변화와 난류의 영향을 충분히 반영하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 실제 운용 환경과 유사한 조건에서 위성단말의 풍압 성능을 검증하기 위하여 개방형 인공송풍장치를 이용한 동적 풍압시험을 수행하였다.

그림 7과 같이 시험은 안테나가 실제 정지궤도 위성을 지향한 상태에서 수행하였다. 송풍장치의 대형 블레이드에 의해 발생하는 풍속 분포의 영향을 최소화하기 위하여 위성단말은 지면으로부터 약 1.3 m 높이의 구조물 위에 설치하였으며, 원활한 위성 신호 수신을 위해 송풍장치와 단말 사이의 이격거리는 약 6 m로 설정하였다. 또한 송풍장치의 중심

축과 안테나 중심축을 일치시켜 정면(Front), 측면(Side) 및 후면(Rear) 풍향 조건에 대한 시험을 각각 수행하였다.

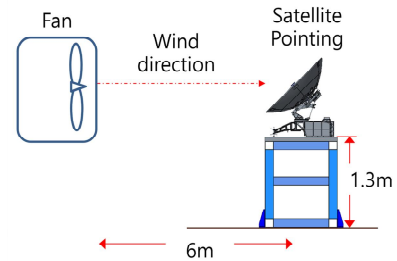


그림 7. 동적 풍속시험 구성

Fig. 7. Dynamic wind speed test setup

시험 풍속은 운반용 위성단말의 요구조건을 기준으로 설정하였다. 정상 운용 조건인 14 m/s에서는 평균 풍속을 600초간 인가하였으며, 돌풍 조건인 18 m/s에서는 평균 풍속을 20초간 인가한 후 정상 운용 여부를 확인하였다. 마지막으로 생존 조건인 25 m/s에서는 평균 풍속을 200초간 지속적으로 인가하여 구조적 안정성과 통신 성능 변화를 평가하였다.

풍압시험 동안 안테나는 실제 정지궤도 위성의 비콘(Beacon) 신호를 지속적으로 수신하도록 구성하였다. 통신 성능 평가는 안테나에 연결된 저잡음증폭기(LNA)의 출력 신호를 스펙트럼 분석기로 실시간 측정하여 수행하였으며, 풍속 및 풍향 변화에 따른 비콘 신호 레벨(Beacon signal level)의 변화를 성능 평가 지표로 사용하였다.

3.4 동적 풍압시험 결과 및 분석

동적 풍압시험은 정면(Front), 측면(Side), 후면(Rear)의 세 가지 풍향에 대하여 각각 수행하였으며, 풍속 변화에 따른 비콘 신호 레벨 감소량을 측정하였다. 시험 결과는 표 4 및 그림 8과 같다.

표 4. 풍향 및 풍속에 따른 비콘 신호 레벨 감소

Table 4. Dynamic wind load test result

Wind load	Front	Side	Rear
14m/s	0.9 dB	0.8 dB	1.0 dB
18m/s	1.1 dB	0.8 dB	1.1 dB
25m/s	4.2 dB	2.0 dB	2.0 dB

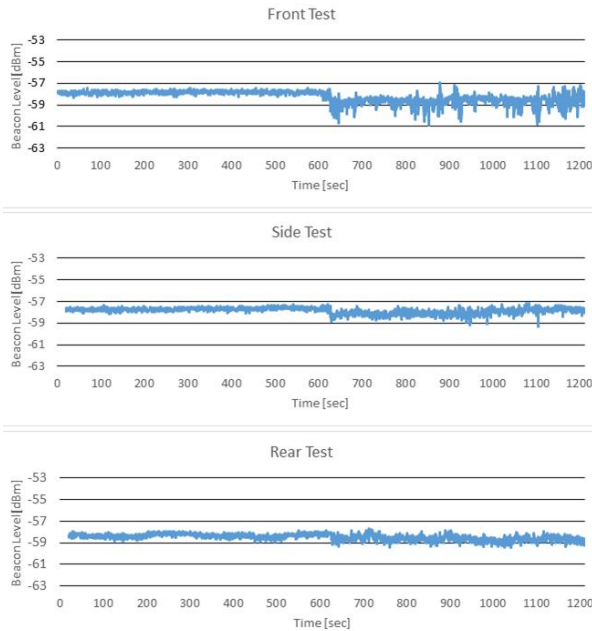


그림 8. 동적 풍속시험 결과
Fig. 8. Dynamic wind speed test result

정상 운용 풍속인 14 m/s에서는 모든 풍향에서 비콘 신호 레벨 감소가 약 1 dB 이내로 나타나 운용 성능 요구조건을 만족하였다. 또한 돌풍 조건인 18 m/s에서도 풍향에 따른 차이는 거의 발생하지 않았으며, 시험 종료 후 정상적인 위성 링크가 유지됨을 확인하였다.

생존 풍속인 25 m/s에서는 정면 풍향에서 평균 4.2 dB, 측면 및 후면에서는 각각 2.0 dB의 비콘 신호 감소가 측정되었다. 특히 정면 풍향에서 가장 큰 성능 저하가 발생하였으며, 이는 CFD 해석에서 정면 풍향의 항력이 후면 풍향보다 크게 계산된 결과와 동일한 경향을 나타낸다. 다만 표 1에 따르면 생존 풍속 조건의 요구사항은 통신 성능 유지가 아닌 구조적 생존성(변형·전복·파손 없음) 확보이다. 시험 중 단말의 전복이나 구조적 이상은 발생하지 않았으며, 시험 종료 후 육안 점검과 치수 측정을 통해 반사판 및 페데스탈의 변형·파손이 없음을 확인하였다. 또한 단말을 분해·재조립한 후 시험 전과 동일한 수준으로 비콘 신호를 정상 수신함을 확인하여, 표 1의 생존 요구조건을 만족함을 검증하였다.

2장에서 수행한 FEM 및 EM Tool 연계 해석에서는 반사판의 최대 변위 3.5 mm에 대해 약 1.4 dB의 안테나 이득 감소가 예측되었다. 그러나 실제 동적 풍압시험에서는 평균 풍속 25 m/s에서 최대 4.2 dB

의 비콘 신호 감소가 측정되었다. 이는 EM 해석에서 고려된 반사판 형상 변형에 따른 안테나 이득 감소 외에도, 실제 운용 환경에서는 페데스탈의 구조 변형에 따른 지향 오차, 체결부의 유연성, 그리고 시간에 따라 변화하는 풍하중이 복합적으로 작용하기 때문으로 판단된다.

또한 정적 풍압시험에서는 반사판의 최대 변위가 FEM 해석 결과보다 작게 측정되어 감소 경향은 해석 결과와 일치하였으나, 하중 인가 방식의 차이로 인해 정량적으로는 편차가 존재하였다. 이는 실제 운반용 위성단말의 풍압 성능이 반사판 자체의 구조 강성뿐 아니라 페데스탈을 포함한 시스템 수준의 구조 특성에 크게 영향을 받음을 의미한다.

따라서 운반용 위성단말의 풍압 성능을 정확하게 평가하기 위해서는 CFD를 이용한 풍하중 산출, FEM 및 전자기 해석을 통한 구조·전기적 성능 예측과 함께, 실제 위성을 이용한 동적 풍압시험을 병행하는 검증 절차가 필요함을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 운반용 정지궤도 위성통신 단말에 적용되는 분할형 파라볼라 안테나의 풍압 성능을 평가하기 위하여 CFD, FEM 및 전자기 해석을 수행하고, 이를 정적 풍압시험과 실제 위성을 이용한 동적 풍압시험 결과와 비교·분석하였다.

본 연구의 주요 기여점은 다음과 같다. 첫째, CFD 풍하중 해석·FEM 구조해석·전자기 해석과 정적·동적 시험을 연계한 위성단말 파라볼라 안테나의 풍압 성능 검증 절차를 제시하였다. 둘째, 해석 예측치와 시험 결과를 비교·분석하여 정적 하중 조건과 실제 풍동 환경에서 발생하는 구조적 거동 및 통신 성능의 차이를 실증적으로 확인함으로써 위성통신 단말의 구조적·전기적 성능을 종합적으로 평가한 것이다.

CFD 해석을 통해 풍속에 따른 반사판에 작용하는 풍압 분포와 최대 항력을 산출하였으며, 이를 FEM 구조해석의 입력 조건으로 적용하여 반사판과 페데스탈의 구조 변형을 예측하였다. 또한, 변형된 반사판 형상을 이용한 전자기 해석을 수행하여 풍압에 따른 안테나 성능 변화를 예측하였다.

정적 풍압시험에서는 CFD 결과를 기반으로 반사판에는 등가 분포하중을, 페데스탈에는 등가 수평 인장하중을 각각 인가하여 구조 응답을 측정하였다. 반사판의 최대 변위는 시험과 해석 모두에서 유사한 경향을 나타냈으나 정량적으로는 하중 인가 방식의 차이, 즉 균일 등가하중과 CFD 기반 불균일 압력분포의 차이에 따른 편차가 존재하였다. 반면 페데스탈은 해석 결과보다 큰 지향 변화를 나타내어 실제 구조물에서는 체결부와 구동계의 구조적 특성이 지향 성능에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

실제 위성 비콘 신호를 수신하는 상태에서 수행한 동적 풍압시험에서는 풍속 14 m/s, 18 m/s 및 25 m/s 조건에서 정면, 측면 및 후면 풍향에 대한 시험을 수행하였다. 운용 조건인 14 m/s와 돌풍 조건인 18 m/s에서는 모든 풍향에서 비콘 신호 레벨 감소가 1 dB 내외로 나타나 운용 요구조건을 만족하였다. 생존 조건인 25 m/s에서는 모든 방향의 풍향에서 구조적 생존성(변형·전복·파손 없음)에 대한 요구조건을 만족함을 확인하였다.

이상의 결과를 종합하면, 반사판의 구조 변형은 해석과 시험에서 동일한 경향을 나타내었으나 정량적인 차이가 존재하였으며, 실제 단말의 통신 성능에는 반사판 변형뿐만 아니라 페데스탈의 지향 오차와 실제 풍환경의 동적 영향이 함께 작용하는 것으로 확인되었다. 특히 운용 및 돌풍 조건에서 비콘 신호 감소가 요구범위 이내로 유지되고 생존 조건에서도 구조적 건전성이 확보됨을 확인함으로써, 풍하중에 대한 단말의 구조적 안정성과 위성통신 링크 성능을 연계하여 검증할 수 있음을 확인하였다.

본 연구의 해석 및 시험 연계 방법은 강풍·태풍과 같은 열악한 기상 환경에서 위성 데이터 통신 서비스의 안정성을 확보하기 위한 단말 하드웨어 성능 검증 방법으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후에는 다양한 안테나 크기와 형상에 대한 풍압 특성 분석 및 실제 자연풍 환경에서의 장시간 운용시험을 수행하여 적용 범위를 확대할 계획이다.

References

[1] J.-H. Lee, et al., "Current state and future prospect

of technology development in satellite application", Journal of the KSAS, Vol. 44, No. 8, pp. 728-740, Aug. 2016. <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.8.728>.

- [2] T. Joo, K. Kim, Y. Kim, C. Hwang, and J. Seo, "Design of a Conformal Rx Phased Array Antenna System for Ku-Band Satellite Communications", J. Korean Inst. Electromagn. Eng. Sci., Vol. 31, No. 6, pp. 495-509, Jun. 2020. <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2020.31.6.495>.
- [3] S.-H. Kim, B.-J. Kim, J. Lee, H.-S. Lee, and D.-S. Kang, "A Vibration Response Analysis of Large Offset Antenna in the Wind", Transactions of the KSNVE, Vol. 27, No. 3, pp. 318-326, 2017. <https://doi.org/10.5050/KSNVE.2017.27.3.318>.
- [4] M. Khazaali, L. Ma, K. Rokneddin, M. Mazzotti, and P. Bocchini, "A robust protocol to compute wind load coefficients of telecommunication towers and antennas using numerical simulation for risk and resilience assessment", Resilient Cities and Structures, Vol. 3, No. 1, pp. 66-83, Mar. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rcns.2024.02.001>.
- [5] P. Martín, V. B. Elena, A. M. Loredou-Souza, and E. B. Camaño, "Experimental study of the effects of dish antennas on the wind loading of telecommunication towers", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 149, pp. 40-47, Feb. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.11.010>.
- [6] Q. Xu, J. Zhang, Z.-Y. Wang, and H.-Z. Pan, "Analysis and compensation of the reflector antenna pointing error under wind disturbance", Research in Astronomy and Astrophysics, Vol. 21, No. 6, Art. no. 150, Jun. 2021. <https://doi.org/10.1088/1674-4527/21/6/150>.
- [7] Korea Meteorological Administration, <https://www.weather.go.kr/>. [accessed: Apr. 05, 2026]
- [8] US Department of Defense, 2012, Interface Standard, MIL-STD-188-164.
- [9] M. Yousefnia, A. Pirhadi, and M. Hakkak,

"Analysis and design of parabolic hat feed antenna", 2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Washington, DC, USA, pp. 651-653, Jul. 2005. <https://doi.org/10.1109/APS.2005.1552337>.

[10] J. D. Anderson, "Fundamentals of Aerodynamics", McGraw-Hill, pp. 75-80, Jul. 2016. <https://doi.org/10.1017/S0001924000023939>

[11] Y. E. Ibrahim, M. U. Qureshi, and Z. Mahmood, "Analysis of communication tower with different heights subjected to wind loads using TIA-222-G and TIA-222-H standards", Journal of Asian Architecture and Building Engineering, Vol. 22, No. 4, pp. 2175-2188, Nov 2022. <https://doi.org/10.1080/13467581.2022.2145203>.

저자소개

정 치 현 (Chi-Hyun Cheong)



1996년 2월 : 한밭대학교
전자공학과(공학사)
1999년 2월 : 충북대학교
전자공학과(공학석사)
2003년 12월 ~ 2008년 8월 :
(주)LG전자 MC연구소
2008년 9월 ~ 현재 : (주)한화

시스템 수석 연구원

관심분야 : 무선통신 시스템 설계, RF/안테나 Hardware 설계

이 덕 우 (Deok-Woo Lee)



2000년 2월 : 수원대학교
정보통신공학과(공학사)
2000년 8월 ~ 2003년 1월 :
(주)머큐리
2003년 2월 ~ 현재 : (주)한화
시스템 수석 연구원
관심분야 : 위성통신 시스템 설계,
기저대역 설계, 신호처리 Hardware 설계

이 준 경 (Jun-Kyeong Lee)



2016년 8월 : 성균관대학교
기계공학부(공학사)
2020년 3월 : (주)한화/방산 연구원
2020년 4월 ~ 현재 :
한화시스템(주) 전문연구원
관심분야 : 데이터링크 시스템
기구 개발

이 성 재 (Sung-Jae Lee)



1994년 2월 : 충남대학교
전자공학과(공학사)
1996년 2월 : 충남대학교
전자공학과(공학석사)
1996년 1월 ~ 현재 : 국방과학
연구소 책임연구원
관심분야 : 위성통신 시스템 설계,
RF 시스템 설계, 위성 시험장 시스템 설계