

발사체 주변환경에 의한 전파산란특성 예측 연구

Predicting Radio Wave Scattering Characteristics by the Environment around the Projectile

장도영 · 왕성식* · 김춘원** · 박용배*** · 추호성

Doyoung Jang · Sungsik Wang* · Chun Won Kim** · Yong Bae Park*** · Hosung Choo

요 약

본 논문에서는 발사체와 제어동 간의 텔레메트리 통신이 이루어질 때, 발사체 주변환경에 의한 전파특성을 예측하는 방법을 제안한다. 발사체 주변 전파환경 분석을 위해 지형 및 건물을 실제와 유사하게 모델링하고, 이를 전파해석 도구에 반영해 통합 시뮬레이션 모델을 구축한다. 통합 시뮬레이션 모델을 사용하여, 발사체(송신)와 제어동(수신) 사이의 전파 경로를 직접경로와 간접경로로 구분하여 분석하였을때, 지형지물에 의해 간접경로로 입사되는 신호는 직접경로로 입사되는 신호 대비 7.6~8 dB 낮은 것으로 확인되며, 구조물에 의한 영향이 지형 대비 더 큰 것으로 관측되었다. 분석 결과를 검증하기 위해, 한국나로우주센터에서 송·수신기 사이의 전파손실을 측정하고, 이를 시뮬레이션과 비교분석하였다. 송신전력이 20 dBm일 때, 주파수 대역과 송신 위치에 따라서 수신전력은 최소 -77.3 dBm, 최대 -70.5 dBm으로 잘 일치하는 것을 확인하였다.

Abstract

In this study, we propose a method for predicting the characteristics of radio wave scattering based on the environment around the projectile transmitting information through a telemetry communication channel. Terrain and buildings are included in the integrated simulation model to analyze the wave propagation characteristics around the projectile. The propagation path between the projectile and control tower is investigated by observing both the direct and indirect paths. The simulation results show that the received power of the indirect path is 7.6–8 dB lower than that of the direct path, which indicates that the structures around the projectile have a greater effect on the received power than the terrain. To verify these results, the measurement equipment is placed at the Naro Space Center and the consequent path loss between the transmitter and receiver is measured. The received powers measured in reference to the transmitter position are between -77.3 dBm and -70.5 dBm (transmitted power of 20 dBm), which is in good agreement with the simulation data.

Key words: Electromagnetic Environment, Radio Propagation, Telemetry System, Wireless Communications

「이 연구는 한국항공우주연구원과 2022년 한양사이버대학교 연구비, 2015년도 및 2017년도 정부(교육부, 과학 기술정보통신부와 이공분야 기초연구사업)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017R1A5A1015596, 2015R1A6A1A03031833).」

홍익대학교 전자전기공학과(Department of Electronic & Electrical Engineering, Hongik University)

*한양사이버대학교 전기전자공학과(Department of Electrical, Electronic, & Communication Engineering, Hanyang Cyber University)

**한국항공우주연구원 나로우주센터 비행안전기술부(Flight Safety Technology Division, Naro Space Center, Korea Aerospace Research Institute)

***아주대학교 전자공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University)

· Manuscript received March 7, 2022 ; Revised March 23, 2022 ; Accepted April 28, 2022. (ID No. 20220307-023)

· Corresponding Author: Sungsik Wang (e-mail: kingwss@hycu.ac.kr)

I. 서 론

최근, 국내 발사체 발사기술 수준이 향상됨에 따라, 발사체를 효과적으로 운용하기 위한 안정적인 무선통신시스템 기술이 지속적으로 요구되고 있다^{[1]~[3]}. 발사체 제어에 사용되는 무선통신 시스템으로는 발사체의 정보를 수집하는 텔레메트리 시스템^{[4]~[6]}, 발사체의 궤적을 추적하는 추적레이다 시스템^[7], 발사체의 비행을 중단시키는 비행종단 시스템^[8] 등이 있으며, 그중에서도 텔레메트리 시스템의 통신 연결이 불안정할 경우 발사체의 상태를 정확히 모니터링할 수 없어 발사체의 오동작 발생 시에 즉각적인 대처를 어렵게 한다. 따라서, 텔레메트리 시스템은 통신 연결성을 항상 유지해야 하지만, 발사체 주변에는 지형과 구조물 등 다양한 지형지물이 존재하기 때문에 발사체에서 송신된 전파가 굴절 및 회절하여 수신부에 전달되므로, 실제 수신되는 전력을 예측하기가 어렵다^{[9]~[12]}. 또한, 간접경로로 들어오는 강한 신호는 텔레메트리 시스템상에서 치명적인 잡음신호로 동작하는 문제점도 있다. 특히, 발사체가 지상 및 저고도에 있을 경우, 지형지물에 의한 영향을 더 강하게 받기 때문에, 텔레메트리 시스템의 안정적인 운용을 위해서는 직·간접경로로 들어오는 신호의 특성을 정확히 예측하는 것이 필요하다. 다양한 주파수 대역에서 통신 전파특성을 예측하기 위해서 P.452-17 모델, P.530-18 모델, P.1546-6 모델^{[13]~[15]}과 같은 여러 가지 ITU-R 전파모델이 보편적으로 활용되고 있다. 하지만 이러한 모델은 실제 발사체 주변의 세부적인 지형 및 지물을 정확하게 묘사하지 않고 통계적으로 접근하여 예측하기 때문에 높은 신뢰도의 결과값을 얻기에는 한계가 있다. 일부 선행연구에서는 구조물 및 지형 등을 모델링하고, 광선추적법 기반의 전파 해석도구를 활용하여 전파특성을 분석한 사례가 있으나, 대부분 이동통신 응용분야에 대한 연구로 한정되어 있다^{[16],[17]}. 한편, 국내 발사체 주변에서 시험 측정을 통해 전파 특성을 확인하려는 연구^{[18],[19]}가 수행되었으나 정밀한 M&S(modeling and simulation)가 동시에 수행되지 않아 측정결과와 검증이 어려울 뿐더러, 측정이 용이하지 않은 상황에서는 결과를 예측하기 어려운 한계가 있다. 최근에는, 국내 발사체 주변환경을 모델링하고, 발사체 고도에 따른 텔레메트리

시스템의 수신전력을 연구한 사례도 보고되었으나^[20], 측정 시스템을 구성하여 측정과 시뮬레이션의 비교검증을 수행하지 않은 한계점이 있다. 따라서, 발사체 주변환경을 정확히 모델링하고, 이를 측정결과와 비교검증하는 연구가 필요하다.

본 논문에서는 발사체와 제어동 간의 텔레메트리 통신이 이루어질 때, 발사체 주변환경에 의한 전파특성을 예측하는 방법을 제안한다. 발사체 주변 전파환경 분석을 위해 지형 및 건물을 실제와 유사하게 모델링하고, 이를 전파해석도구에 반영해 통합 시뮬레이션 모델을 구축한다. 통합 시뮬레이션 모델을 사용하여 발사체로부터 제어동까지 전달되는 전파를 직접경로와 건물 또는 지형에 의해 산란되어 전달되는 간접경로로 구분하였으며, 각각의 전파세기를 비교하여 지형지물에 의한 영향을 관측한다. 관측된 결과를 검증하기 위해 실제 국내 발사체 주변 환경에서 측정 시스템을 구축해 송신 위치에 따른 수신 전력을 측정하고, 이를 시뮬레이션과 비교분석하였다.

II. 발사체 주변환경 모델링 및 시뮬레이션

그림 1은 발사체의 정보를 수집하는 텔레메트리 시스템의 운용 환경을 보여준다. 발사체는 발사대(launching pad) 위에 배치되어 있으며, 발사체의 기립을 포함한 발사관련 작업을 지원하기 위한 서비스타워가 발사체의 옆에 위치한다. 발사체에 부착된 텔레메트리 안테나는 발사체의 정보가 담겨 있는 신호를 송신하는 역할을 하며, 송신된 신호는 제어동(control tower)으로 전달된다. 이때, 제

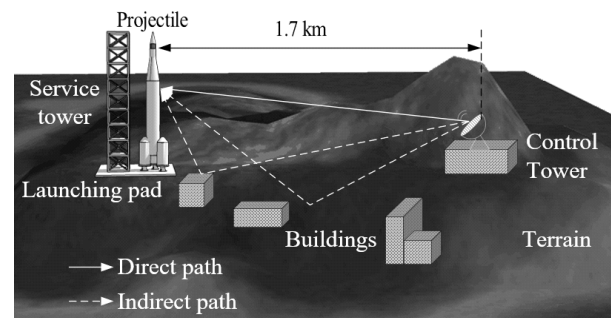


그림 1. 텔레메트리 시스템의 전파 전송
Fig. 1. Radio wave propagation of the telemetry system.

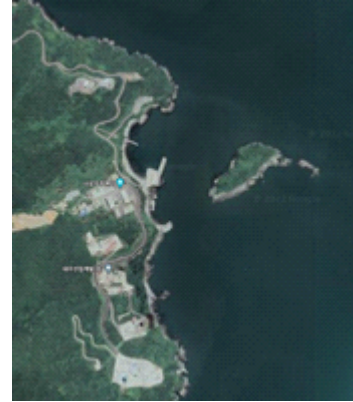
어동과 발사체 간의 거리는 약 1.7 km이고, 이 사이에는 지형과 건물 등의 구조물들이 다수 존재하며, 이에 의해 송신된 전파가 굴절 및 회절하기 때문에 실제 제어동에서 수신하는 전력은 자유공간으로 가정된 상황에서 예측되는 수신전력과는 다를 수 있다. 실제 환경에서 수신되는 신호는 발사체와 제어동 사이에 가시선(line-of-sight: LoS)을 따라 전달되는 직접 경로(direct path)와 지형이나 건물들에 의해서 한 번 이상 굴절이나 회절이 발생한 뒤 전달되는 간접경로(indirect path)로 구분된다. 여기서, 총 수신전력은 식 (1)과 같이 직접경로로 전달되는 신호와 간접경로로 전달되는 신호의 합으로서 나타낼 수 있다 [20],[21].

$$P_t = |P_d|e^{-j\beta\phi_d} + |P_i|e^{-j\beta\phi_i} \\ = |P_d|e^{-j\beta\phi_d} \left(1 + \frac{|P_i|}{|P_d|}e^{-j\beta(\phi_i - \phi_d)} \right) \quad (1)$$

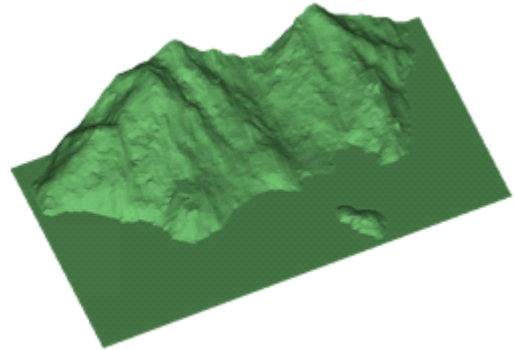
P_d 와 P_i 는 각각 직접경로로 전달되는 신호의 크기와 간접경로로 전달되는 신호를 의미하며, 각 신호가 갖고 있는 위상은 각각 ϕ_d , ϕ_i 로 나타내었다. 이때, 직접경로와 간접경로로 전달되는 신호의 위상 차이에 의해 신호 간의 보강간섭 또는 상쇄간섭이 발생하여 전체 신호 크기를 변동시킨다. 여기서, 간섭 크기는 P_d 와 P_i 의 비율에 의해 결정되기 때문에 간접경로로 전달되는 신호의 세기가 클수록 간섭이 더욱 강해진다.

그림 2는 통합전파환경 분석용 시뮬레이션 모델을 만들기 위한 발사체 주변 지형의 모델링을 보여준다. 본 연구의 분석 영역은 그림 2(a)에 나타난 것처럼 한국 ‘나로 우주센터’ 주변 영역에 대해서 수행되었으며, 해당 영역의 지형을 사실적으로 모델링하기 위해서 NASA에서 제공하는 지형데이터를 활용하였다[22]. 획득된 지형데이터는 파일 변환 프로세스를 통해 Remcom사의 전파 해석 시뮬레이터 도구인 Wireless InSite[23]에 반영할 수 있는 형태로 가공되며, 제작된 지형 모델은 20~30 m의 고해상도로 지형을 표현할 수 있다.

그림 3은 통합전파환경 분석용 시뮬레이션 모델에 반영되는 건물구조물의 실제 형상과 모델링 결과를 보여준다. 건물 구조물에 의한 굴절, 회절 등의 전파 산란특성을 정확히 반영하면서도 시뮬레이션 간 과도한 시간 및 자

(a) 실제 지형^[22]

(a) Real terrain



(b) 모델링된 지형

(b) Modeled terrain

그림 2. 발사체 주변 지형 모델링

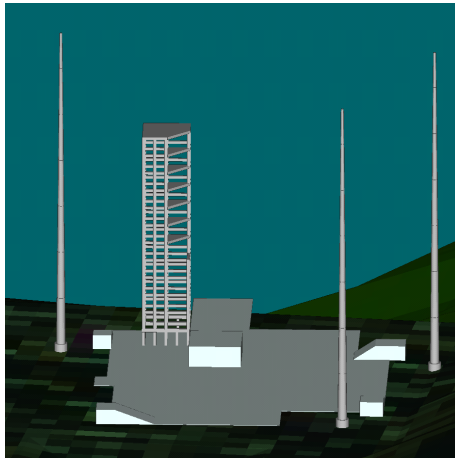
Fig. 2. Modeling of the terrain around the projectile.

원이 요구되지 않도록 실제 건물의 외곽면은 세부적으로 표현하였으며, 기타 부속물들은 최적화된 형태로 간소화되었다. 건물 구조물에 반영된 물성정보는 구조적 특징을 고려하여 완전도체(perfect electric conductor: PEC) 또는 콘크리트($\epsilon_r=15$, $\sigma=0.015$)로 적용되었다.

그림 4는 건물 및 지형 모델이 모두 반영된 통합 시뮬레이션 모델의 형상을 나타낸다. 통합된 해석 모델에는 분석영역 내에 있는 주요 건물들 및 발사체 주변의 소형 구조물을 포함하여 총 35개의 구조물들이 반영되었다. 또한, 해당 지역이 섬의 해안지역임을 고려하여 해수면이 추가적으로 고려되었다. 지형지물에 의한 영향을 명확히 파악하기 위해, 발사체에서 사용하는 송신 안테나와 제어동에서 사용하는 수신안테나는 반파장 다이폴 안테나로



(a) 실제 건물 구조
(a) Real structure



(b) 모델링된 건물
(b) Modeled structure

그림 3. 발사체 주변 구조물 모델링
Fig. 3. Modeling of the structure around the projectile.

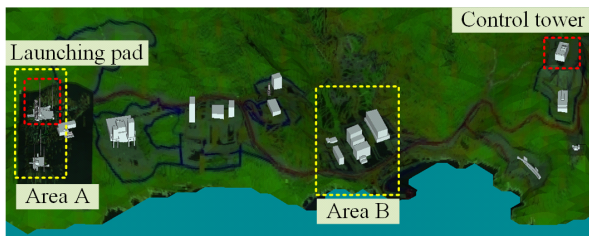
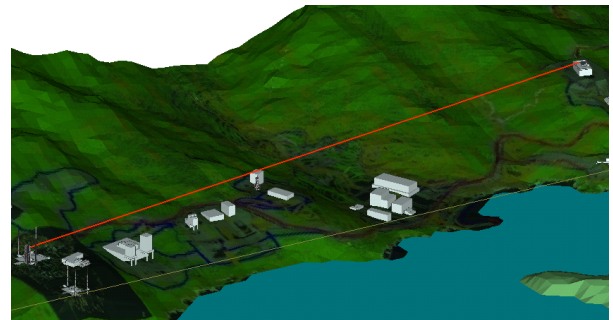


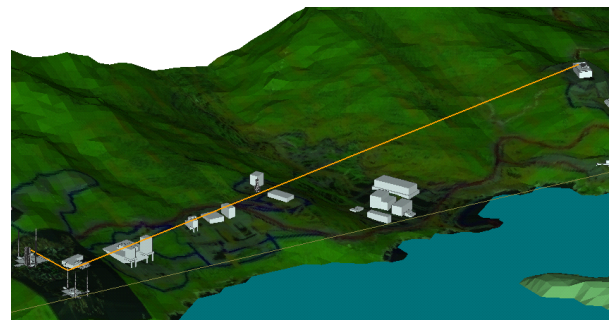
그림 4. 신호전파 특성 분석용 통합 시뮬레이션 모델
Fig. 4. Integrated simulation model for the radio wave propagation analysis.

가정되었다. 송신 안테나는 3개 단으로 분리된 발사체의 각 단계에 텔레메트리 안테나가 장착되는 것을 고려하여 로켓 하단으로부터 서로 다른 높이의 총 3곳의 위치에 배치되었으며, 송신전력은 20 dBm으로 가정되었다. 마찬가지로, 수신안테나는 실제 수신용 안테나가 배치된 위치를 고려하여 제어동의 옥상에 배치되었다.

그림 5는 통합 시뮬레이션 모델을 사용하여 발사체와 제어동 간의 주요 전파경로를 분석한 모습을 보여준다. 전파 경로는 크게 직접 경로로 전달되는 전파와, 건물에 의해 굴절되어 간접경로로 전달되는 전파, 지형에 의해 굴절되어 간접경로로 전달되는 전파로 분류할 수 있다. 각 전파 경로 분류 내에서 가장 강한 신호세기를 갖는 경로를 표 1에 정리하였으며, 발사체 각 단계에 대해 동일한 분석이 수행되었다. 정리된 결과에 따르면, 직접경로로 전



(a) 직접경로
(a) Direct path



(b) 간접경로
(b) Indirect path

그림 5. 발사체와 제어동 간의 전파경로
Fig. 5. Propagation path between the projectile and control tower.

표 1. 송신위치에 따른 수신전력

Table 1. Received power according to the transmitter position.

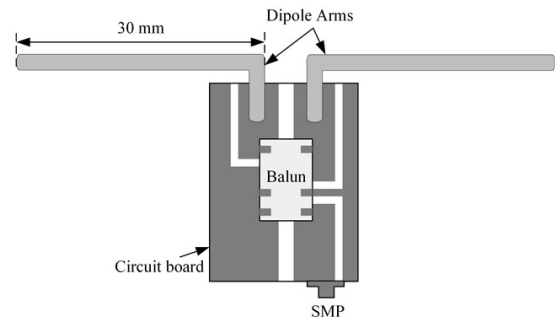
TX. positions	Path	Scatter	Received power	Phase difference $ \phi_s - \phi_d $
First stage	Direct path	-	-79.9 dBm	-
	Indirect path	Building	-87.5 dBm	27.3°
		Terrain	-88.1 dBm	42°
Second stage	Direct path	-	-80 dBm	-
	Indirect path	Building	-87.9 dBm	47.7°
		Terrain	-118.9 dBm	28.8°
Third stage	Direct path	-	-80.1 dBm	-
	Indirect path	Building	-88.1 dBm	35.7°
		Terrain	-111 dBm	30.8°

달되는 수신전력은 송신안테나 위치에 따라 $-80.1 \sim -79.9$ dBm으로 확인되며, 이보다 7.6~8 dB 낮은 전파세기가 건물에 의해 굴절되어 전달되는 간접경로로 전달된다. 또한, 직접경로로 입사되는 신호의 위상과 간접경로로 입사되는 신호의 위상 간의 위상 차이는 $27.3^\circ \sim 47.7^\circ$ 의 범위로 보강 간섭의 영향을 받는 것으로 확인된다. 여기서 수신전력에 영향을 많이 주는 주요 구조물은 발사체가 배치되는 발사대 및 그와 인접한 발사대(그림 4의 A 영역)에 있는 낙뢰타위가 가장 많은 영향을 주는 것으로 확인된다. 분지에 있는 건물들(그림 4의 B 영역)에 의한 간접경로도 존재하지만, 신호세기가 직접경로 대비 20 dB 이상 낮아 상대적으로 영향이 적게 나타나며, 그 외의 다른 구조물들에 의한 유의미한 간접경로는 관측되지 않았다. 한편, 지형에 의한 영향은 안테나 위치마다 큰 차이를 보여, 가장 낮은 높이인 발사체 1단에 위치한 안테나의 경우 지형에 의해 굴절되어 전파되는 신호의 세기가 -88.1 dBm으로 나타났다. 이는 건물에 의해 형성되는 간접경로의 신호세기인 -87.5 dBm과 0.6 dB 차이에 불과하여, 건물에 의한 영향과 지형에 의한 영향이 유사한 것으로 확인된다. 그러나 발사체 2단 및 3단에 안테나가 배치되는 경우, 지형에 의한 간접경로로 형성되는 신호세기가

각각 -118.9 dBm, -111 dBm으로, 건물에 의한 간접경로의 전파세기인 -87.9 dBm과 -88.1 dBm 대비 20 dB 이상의 큰 차이가 발생하는 것으로 확인되었다.

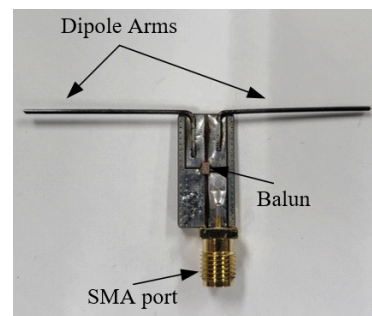
III. 발사체 주변 전파환경 측정 및 검증

그림 6은 앞서 분석된 결과들을 측정을 통해 검증을 위한 송·수신용 다이폴 안테나의 구조 및 제작 사진을 보여준다. 급전부로부터 불균일하게 흐르는 전류에 의한 패턴 왜곡을 최소화하기 위해, S 대역에서 동작하는 정합밸런을 장착한 회로보드 위에 다이폴 안테나를 연결하였다. 장착된 밸런은 Johanson Technology사의 2450BL15B100E 모델로^[24], 동작 대역 내에서 1 dB의 삽입손실을 갖는다. 회로 보드 위에는 급전을 위한 SMA(SubMiniature A) 포트가 연결되어 있으며, 다이폴 안테나의 각 도선의 길이



(a) 안테나 형상

(a) Geometry of the antenna

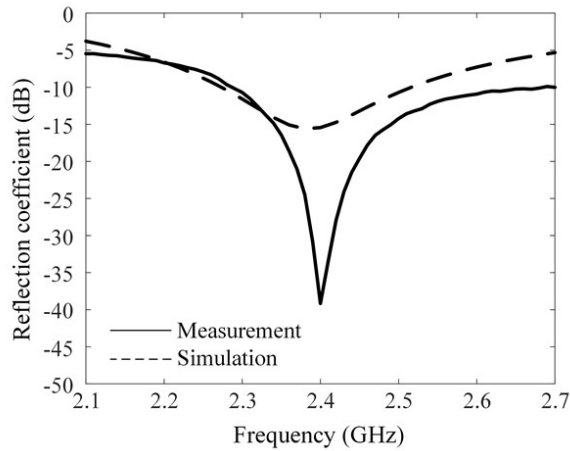


(b) 안테나 제작 사진

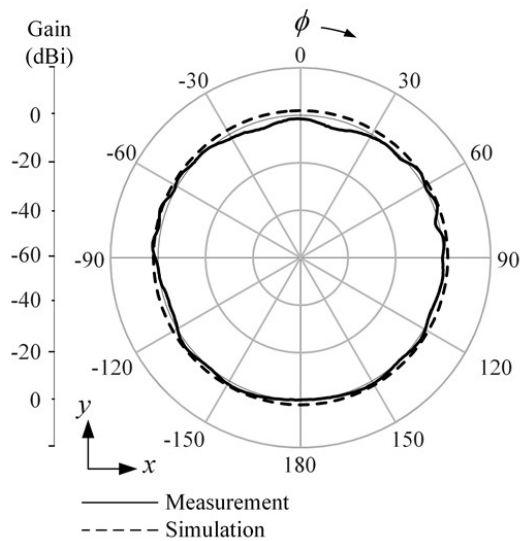
(b) Photograph of the fabricated antenna

그림 6. 송수신용 다이폴 안테나

Fig. 6. Dipole antenna for the transmitter and receiver.



(a) 반사계수
(a) Reflection coefficient



(b) 방사패턴
(b) Radiation pattern

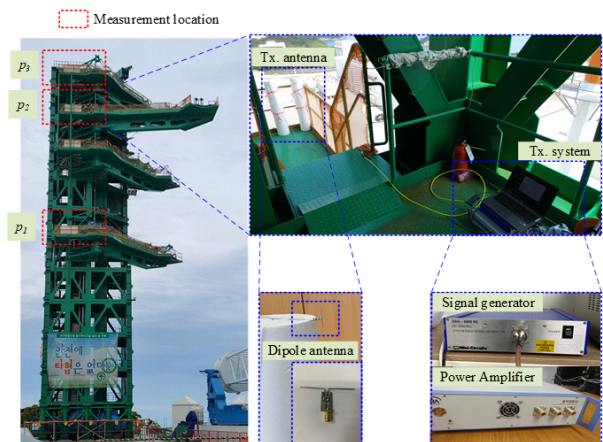
그림 7. 다이폴 안테나의 반사계수 및 방사패턴
Fig. 7. Reflection coefficient and radiation pattern of the dipole antenna.

는 30 mm의 길이를 갖는다.

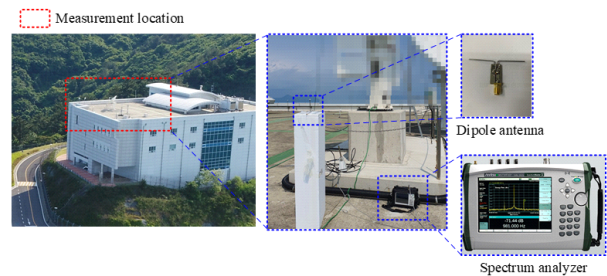
그림 7은 제작된 송·수신용 다이폴 안테나의 반사계수 및 방사패턴을 나타낸다. 측정 및 시뮬레이션 결과는 각각 실선과 점선으로 표현되었다. 그림 7(a)에 나타난 반사계수를 살펴보면, 안테나 동작 주파수인 2.4 GHz에서 반사계수의 측정 및 시뮬레이션 결과가 각각 -39.1 dB, $-$

15.4 dB로서, 설계 목표인 -10 dB 이하의 값을 갖는다. 그림 7(b)는 방위각 방향에 대한 다이폴 안테나의 H-plane 방사패턴을 보여주며, 측정 결과 평균 0 dBi의 무지향성 패턴이 나타나며, 시뮬레이션 결과와 경향성이 매우 유사함을 확인하였다.

그림 8은 통합 시뮬레이션 모델의 검증을 위해 실제 나로우주센터에서 측정 시스템을 구성한 모습을 나타낸다. 먼저 그림 8(a)의 사진은 서비스타워에 설치된 측정시스템의 송신부이다. 송신 안테나는 실제 발사체의 각 단계 장착될 안테나 높이를 고려하여, 발사체의 발사 관련 작업을 지원하기 위한 서비스타워의 서로 다른 3개 층에 설치하였으며, 높이가 낮은 순으로 p_1 , p_2 , p_3 으로 각 위치를 나타내었다. 송신신호는 신호발생기를 통해 생성된 0



(a) 측정 시스템의 송신부
(a) Transmitter of the measurement system



(b) 측정 시스템의 수신부
(b) Receiver of the measurement system

그림 8. 전파환경 분석을 위한 측정 시스템
Fig. 8. Measurement system for the radio wave propagation analysis.

dBm의 S 대역 주파수 신호를 전력 증폭기를 통해 20 dB 증폭시켜 20 dBm의 신호를 앞서 제작된 다이폴 안테나를 통해 서로 다른 3개의 S 대역 채널에서 송신하였다. 측정 시스템의 수신부는 그림 8(b)에서 보듯이 제어동의 옥상에 송신안테나와 동일한 다이폴 안테나를 수신안테나를 설치하였으며, 수신된 신호의 세기를 스펙트럼 분석기를 사용해 측정하였다. 송신 안테나의 각 위치에서 측정된 결과와 동일한 조건의 시뮬레이션 결과의 비교는 표 2에 나타내었다. 측정위치에 따라 다소의 차이는 있지만 전체적으로 측정값은 $-77.3 \sim -70.5$ dBm의 분포를 갖는다. 이는 시뮬레이션으로 관찰된 $-77.9 \sim -75.1$ dBm의 분포와 유사한 범위로 확인된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 발사체와 제어동 간의 텔레메트리 통신이 이루어질 때, 발사체 주변환경에 의한 전파특성을 예측하는 방법을 제안하였다. 발사체 주변 전파환경 분석을 위해, 주변 지형 및 건물이 실제와 유사하게 모델링된 통합 전파환경 분석용 시뮬레이션 모델을 구축하였으며, 이를 활용해 발사체와 제어동 간의 직접경로로 전달되는 전파세기와 간접경로로 전달되는 전파세기를 비교하였다. 발사체에 탑재된 3개의 송신안테나 중에서 중앙에 위치한 2단 송신기를 기준으로, 간접경로로 전달되는 전파세기는 직접경로로 입사되는 전파세기 대비 7.9 dB 낮은 신호가 확인되었으며, 주로 지형지물보다 건물에 의해서 강한 굴절 및 회절이 발생하는 것으로 나타났다. 하지만 낮은 위치에 있는 1단의 송신기에 대해서는 건물과 지형에 대한 영향이 서로 유사한 것으로 확인되었다. 도출된 결과를 검증하기 위해, 실제 국내 발사체 주변환경에서

측정 시스템을 구축해 송신 위치에 따른 수신 전력을 측정하고 이를 시뮬레이션과 비교분석하였다. 20 dBm의 송신전력으로 신호를 송신하였을 때, 주파수 대역과 송신 위치에 따라서 수신전력은 최소 -77.3 dBm, 최대 -70.5 dBm으로 나타났다.

References

- [1] M. Rice, C. Hogstrom, M. S. Afran, and M. Saquib, "On sparse channel estimation in aeronautical telemetry," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 55, no. 5, pp. 2612-2618, Oct. 2019.
- [2] X. Shi, Y. Shen, Y. Wang, and L. Bai, "Differential-clustering compression algorithm for real-time aerospace telemetry data," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 57425-57433, Oct. 2018.
- [3] M. S. Afran, M. Saquib, and M. Rice, "On the effects of channel sparsity on joint estimators in aeronautical telemetry," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 56, no. 3, pp. 2507-2514, Jun. 2020.
- [4] T. C. R. S. Fowler, "A six-channel high-frequency telemetry system," *IRE Transactions on Space Electronics and Telemetry*, vol. 6, no. 2, pp. 69-81, Jun. 1960.
- [5] A. E. Dent, W. M. Rae, and J. H. White, "Some telemetry systems for space research," *Journal of the British Institution of Radio Engineers*, vol. 22, no. 6, pp. 465-476, Dec. 1961.
- [6] S. W. Kim, S. S. Hwang, and J. D. Lee, "A study on link analysis of telemetry rocket-borne antenna," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and*

표 2. 측정 및 시뮬레이션 결과 종합

Table 2. Summary of the measurement and simulation.

TX. positions	S-band 1		S-band 2		S-band 3	
	Measurement	Simulation	Measurement	Simulation	Measurement	Simulation
p_1	-77.3 dBm	-76.8 dBm	-75.2 dBm	-76.7 dBm	-75.1 dBm	-76.7 dBm
p_2	-72.5 dBm	-77.2 dBm	-74.0 dBm	-77.4 dBm	-77.2 dBm	-77.4 dBm
p_3	-70.5 dBm	-77.8 dBm	-71.0 dBm	-77.9 dBm	-75.6 dBm	-77.9 dBm

- Science*, vol. 15, no. 3, pp. 311-318, Mar. 2004.
- [7] Y. T. Choi, S. W. Ra, "Implementation of slaving data processing function for mission control system in space center," *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, vol. 19, no. 3, pp. 31-39, Jun. 2014.
- [8] J. Ko, K. S. Choi, H. S. Sim, W. R. Roh, J. J. Park, and G. R. Cho, "Flight safety operation for the 1st flight test of Naro(KSLV-I)," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, vol. 38, no. 3, pp. 280-287, Mar. 2010.
- [9] N. Blaunstein, N. Yarkoni, and D. Katz, "Spatial and temporal distribution of the VHF/UHF radio waves in built-up land communication links," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 8, pp. 2345-2356, Aug. 2006.
- [10] W. M. O'Brien, E. M. Kenny, and P. J. Cullen, "An efficient implementation of a three-dimensional microcell propagation tool for indoor and outdoor urban environments," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, no. 2, pp. 622-630, Mar. 2000.
- [11] L. C. Fernandes, A. J. M. Soares, "Simplified characterization of the urban propagation environment for path loss calculation," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 9, pp. 24-27, Jan. 2010.
- [12] J. W. You, T. J. Cui, "Efficient approach to accurately analyze wireless propagation and fading in time domain," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 1767-1770, Feb. 2016.
- [13] Prediction Procedure for the Evaluation of Interference between Stations on the Surface of the Earth at Frequencies above about 0.1 GHz, *ITU-R P.452-17*, Sep. 2021.
- [14] Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Terrestrial Line-of-Sight Systems, *ITU-R P.530-18*, Sep. 2021.
- [15] Method for Point-to-Area Predictions for Terrestrial Services in the Frequency Range 30 MHz to 4,000 MHz, *ITU-R P.1546-6*, Aug. 2019.
- [16] Y. S. Lee, H. S. Lee, and H. D. Choi, "A study on the convenient EMF compliance assessment for base station installations at a millimeter wave frequency," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 18, no. 4, pp. 242-247, Oct. 2018.
- [17] P. Xu, K. W. Lam, L. Tsang, and K. L. Lai, "Statistical distributions of fields in urban environment based on Monte Carlo simulations of Maxwell equations," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 3, pp. 34-37, 2004.
- [18] S. I. Lee, K. W. Yeom, "Gyrocompass correction and pointing accuracy improvement of the ship-borne mobile down range antenna for launcher telemetry," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 5, pp. 532-541, May 2014.
- [19] B. M. Kwon, Y. S. Shin, K. S. Ma, J. G. Ju, and K. M. Ji, "Radio frequency interference on the GNSS receiver due to S-band signals," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, vol. 47, no. 5, pp. 388-396, May 2019.
- [20] D. Jang, S. Wang, C. W. Kim, Y. B. Park, and H. Choo, "Method for estimating optimal position of S-band relay station through path loss analysis in an outdoor environment," *Applied Science*, vol. 10, no. 17, p. 6089, Sep. 2020.
- [21] D. Jang, S. Youn, J. E. Park, J. Choo, and H. Choo, "Electromagnetic field propagation and indoor exclusion zone analysis in a nuclear power plant," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 62, no. 6, pp. 2386-2393, Dec. 2020.
- [22] NASA, "NASA earthdata," 2021. Available: <https://search.earthdata.nasa.gov/search>
- [23] Remcom, "Wireless InSite," 2021. Available: <http://www.remcom.com/wireless-insite>
- [24] Johanson Technology, "Johanson part number information," 2022. Available: https://www.johansontechnology.com/index.php?option=com_jtipproducts&name=2450BL15B0100001E

장 도 영 [홍익대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-5629-8294>



2015년~2018년: 모아소프트 RF/EMC 사업부 연구원
2018년 2월: 동양미래대학교 정보통신학과 (공학사)
2020년 2월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학석사)
2020년~현재: 홍익대학교 전자전기공학

부 박사과정

[주 관심분야] 방향 탐지용 안테나 설계 및 배열 최적화, 전파 환경 분석

박 용 배 [아주대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-7095-4614>



1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
2000년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2003년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
2003년 2월~2006년 8월: KT 인프라연구

소 선임연구원

2006년 9월~현재: 아주대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] 전자장 해석, EMI/EMC

왕 성 식 [한양사이버대학교/조교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1184-3807>



1997년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학사)
1999년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학석사)
2021년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학박사)
2021년 3월~8월: 홍익대학교 메타물질전

자소자연구센터 연구교수

2021년 9월~현재: 한양사이버대학교 전기전자공학부 조교수

[주 관심분야] 레이더 배열안테나, 배열 안테나 설계 최적화, 전자파 Propagation, 전파환경 분석

추 호 성 [홍익대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-8409-6964>



1998년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학사)
2000년 8월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학석사)
2003년 5월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학박사)
2003년 6월~현재: 홍익대학교 전자전기

공학부 교수

[주 관심분야] 초소형 안테나, 최적화 알고리즘을 이용한 안테나 설계, 차량 및 항공기 안테나

김 춘 원 [한국항공우주연구원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-6746-836X>



2007년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학사)
2009년 2월: 충북대학교 전파공학과 (공학석사)
2009년~2010년: 국방과학연구소 제7기술연구본부 3부 전문계약직 연구원
2011년~2015년: 삼성탈레스 통신시스템

그룹 선임연구원

2016년~현재: 한국항공우주연구원 나로우주센터 비행안전기술부 선임연구원

[주 관심분야] 텔레메트리, 신호추적안테나, 위성통신시스템