

이동통신 기반 UAV 상공망 구축을 위한 통신품질 및 음영지역 분석 연구

윤 석*, 김 태 홍°, 안 준 오*

Analysis of Communication Quality and Shadow Region for Building a Mobile Communication-Based UAV Aerial Network

Seok Yoon*, Tae-Hong Kim°, Jun-Oh An*

요 약

본 연구는 이동통신 기반 UAV 상공망 구축을 위한 통신 품질 및 음영 지역을 상세히 분석하였다. 단일 기지국을 중심으로 40m 및 80m 고도에서 통신품질 주요 매개변수인 RSRP를 실측하였으며, 이를 ATDI HTZ Communications 시뮬레이션 데이터와 비교하였다. 이후 단일 기지국 환경에서 5m 간격으로 5m에서 150m까지 고도별 시뮬레이션을 진행하여 고도별 RSRP와 음영 지역을 확장 분석하였다. 복수 기지국 환경에서도 동일한 방법으로 분석을 수행하여 복수 기지국 배치 시의 RSRP와 음영 지역을 평가하였다. 본 연구는 UAV 상공망의 효율적인 설계와 최적화에 중요한 기여를 할 수 있으며, 향후 도심 및 부도심 등의 통신 환경에서의 실측 데이터 수집 및 분석을 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

키워드 : 기지국, 무인 항공기, 상공망, 음영지역, 통신품질

Key Words : Base Station, Unmanned Aerial Vehicle, Aerial Network, Shadow Region, Communication Quality

ABSTRACT

This study conducts a detailed analysis of communication quality and shadow regions for building a UAV aerial network based on mobile communication. RSRP, a key communication quality parameter, was measured at 40m and 80m altitudes centered on a single base station and compared with ATDI HTZ Communications simulation data. Subsequently, simulations were performed at 5m intervals from 5m to 150m altitude in the single base station environment to expand the analysis of altitude-specific RSRP and shadow regions. A similar analysis was conducted in a multi-base station environment to evaluate RSRP and shadow regions when multiple base stations are deployed. This study significantly contributes to the efficient design and optimization of UAV aerial networks and can serve as foundational data for future measurement collection and analysis in urban and suburban communication environments.

※ 이 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00229541, 빅데이터·AI 기술 기반의 新 전파 모니터링 플랫폼 개발)

◆ First Author : Institute for Future Radio Engineering, yseok1016@gmail.com, 정희원

° Corresponding Author : Institute for Future Radio Engineering, thkim@ifre.re.kr, 정희원

* Institute for Future Radio Engineering, juno@ifre.re.kr, 정희원

논문번호 : 202407-150-B-RU, July 16, 2024; Revised August 7, 2024; Accepted August 23, 2024

I. 서론

현재 이동통신 사업자들은 무인항공기(UAV, Unmanned Aerial Vehicle)의 효율적인 관리와 안전한 운영을 지원할 수 있는 상공망의 필요성에 부응하기 위해 상공망 구축에 집중하고 있다. 이는 군사 작전, 상업적 배송, 공공 안전 모니터링 등에서 UAV의 사용이 급증하는 상황에서 매우 중요하다. 예를 들어, 상업적 배송 분야에서 UAV는 실시간 트래픽의 영향 없이 물품을 배달할 수 있는 능력을 제공하며, 공공 안전 분야에서는 재난 현장을 모니터링하여 중요한 역할을 수행한다¹⁻⁵.

이동통신 기반의 UAV 상공망 구축은 기존의 지상 기지국을 활용하는 것이 중요한 고려 사항이다. 하지만 대부분의 기지국은 지상 사용자를 대상으로 설계되어 있기 때문에, UAV가 고도를 높일수록 신호 강도가 약화되고 통신 품질이 저하되는 문제가 발생한다. 이러한 신호 약화는 UAV와의 안정적인 통신을 방해하며, 심각한 사고의 위험을 증가시켜 UAV의 활용 범위를 제한한다.

기존 연구들은 상용 LTE 네트워크를 활용하여 UAV의 통신 연결성을 평가해왔다. 이러한 연구들은 다양한 고도에서의 신호 강도와 네트워크 성능을 측정하며, 이를 기반으로 핸드오버 최적화, 3차원 경로 최적화 및 네트워크 성능 평가 방법 개발 등 다양한 기술적 해결책을 제시하였다. 이 연구들은 UAV가 네트워크에 효율적으로 연결되고 안정적인 데이터 전송을 할 수 있도록 지원하는 방법을 모색하였다⁶⁻⁸.

그러나 이러한 연구들은 몇 가지 중요한 한계를 가지고 있다. 대부분의 연구는 특정 고도에서의 신호 강도 평가에 집중하면서 UAV의 빠른 고도 변화에 따른 신호 강도 변화와 그 영향을 충분히 다루지 못하였다. 또한, 실험실 환경이나 제한된 필드 테스트에서 얻은 결과가 실제 복잡한 환경에서의 UAV 운용에 적용되기 어렵다는 문제가 있다.

본 연구는 이동통신 기반의 UAV 상공망 구축을 위해 통신품질 분포 분석 및 이에 따른 음영지역 파악을 목표로 하며, 기존 연구의 한계를 극복하고자 한다. 이를 위해, UAV 측정 시스템을 활용하여 단일 기지국 환경에서 수집된 실제 데이터와 시뮬레이션을 통한 데이터를 비교 분석한다. 이 비교를 통하여, 단일 기지국 환경에서의 통신 품질과 음영지역의 실제 분포를 파악하고, 이 결과를 바탕으로 복수기지국 환경에 적용하여 시뮬레이션에 적용한다. 이 과정을 통해 복합적인 기지국 환경에서의 통신품질 분포 및 운영 전략에 실질적인

기여를 할 수 있는 근거를 제공하고자 한다. 이러한 분석은 UAV 상공망의 효율성을 증대시키고, 실제 운영 환경에 최적화된 네트워크 설계를 가능하게 할 것이다.

본 논문의 2장에서는 UAV 기반의 측정 시스템과 실험 시나리오에 대해 상세히 설명한다. 3장에서는 단일 기지국 환경에서 수행된 통신품질 및 음영지역에 대한 분석 결과를 제시하며, 이러한 실제 데이터를 기반으로 수행된 복수 기지국 환경에서의 시뮬레이션 분석 결과를 다룬다. 마지막으로 4장에서는 본 연구의 주요 결론을 요약하고 향후 연구 방향을 논의한다.

II. UAV 기반 측정 시스템 및 시나리오

2.1 UAV 기반 측정 시스템

본 연구에서는 기지국 통신 품질을 측정하기 위해 UAV 기반 측정 시스템을 도입하였다¹⁷. 지상 기반 및 헬리콥터를 사용한 측정 방법¹⁹에 비해 이 시스템은 비용 효율적이고 유연한 솔루션을 제공한다. 시스템은 UAV, 지상 관제 시스템(GCS, Ground Control System), 스펙트럼 분석기(Spectrum Analyzer), 측정 안테나의 주요 구성 요소로 이루어져 있으며, 그림 1에 표시되어 있다.

본 연구에서 사용된 UAV는 D'Air 800 모델로, 최대 이륙 중량(MTOW, Max Take Off Weight)은 12kg인 쿼드콥터이다. 이 UAV는 추진 모터, 비행 제어기(FC, Flight Controller), GPS, 미니 PC, 배터리를 포함한다. 비행 제어 시스템은 Holybro의 Pixhawk 6X 보드를 기반으로 하며, Ardupilot을 사용하여 멀티콥터를 제어한다. 또한, 기압계, 관성 측정 장치(IMU, Inertial Measurement Unit), 그리고 GNSS(Global Navigation Satellite System) 시스템 수신기와 같은 통신 장치 및

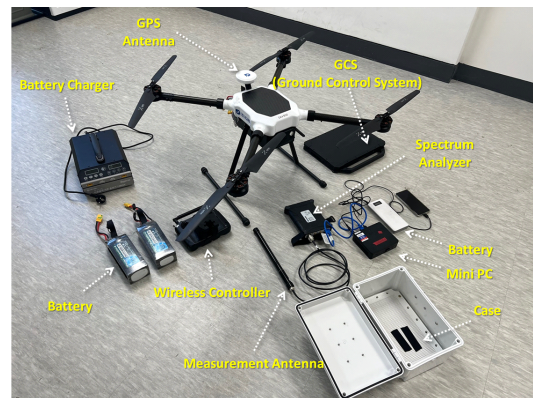


그림 1. UAV 기반 측정 시스템
Fig. 1. UAV-Based Measurement System.

센서를 갖추고 있어, 중소형 UAV에 일반적으로 사용되는 표준 장비를 완비하고 있다.

UAV에는 SIYI사의 MK15 Air 제어가 장착되어 있어, S.Bus 및 5채널 PWM 출력을 지원하며, MavLink 프로토콜을 통한 통신을 가능하게 한다.

위치 결정 하위 시스템은 GPS 안테나, 두 개의 기압계, 세 개의 IMU 센서를 포함하고 있으며, UAV의 위치, 고도, 자세 정보를 GCS에 실시간으로 전송한다. 이 데이터는 로그 파일을 생성하여 비행 후 분석에 활용된다.

스펙트럼 분석을 위해, 본 연구에서는 UAV에 탑재를 위하여 스펙트럼 분석기 Tektronix RSA 306B 모델^[11]을 선택하였다. 이 스펙트럼 분석기는 측정 주파수 대역이 9 kHz ~ 6.2 GHz 이며, 측정 수신 감도 범위는 +20 dBm ~ -160 dBm 이다. 특히, 5 MHz ~ 1GHz 사이의 최소 수신 감도는 -161 dBm/Hz이다. 사용된 측정 안테나는 600 MHz ~ 6 GHz 대역에서 3 ~ 6 dBi의 이득을 제공하는 무지향성 안테나이다^[11].

UAV의 전방부는 측정 과정 동안 항상 대상 기지국 안테나를 정확히 조준하도록 설계되어 있으며, 이를 통해 스펙트럼 분석기가 대상 안테나로부터 방출되는 신호를 측정할 수 있다.

그림 2는 UAV 기반 측정 시스템의 주요 구성 요소와 그 연결을 보여주는 아키텍처를 나타낸다.

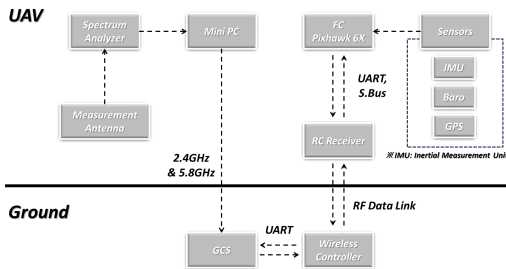


그림 2. UAV 기반 측정 시스템 아키텍처
Fig. 2. UAV-Based Measurement System Architecture.

2.2 시나리오

2.2.1 지역 선정

본 연구는 통신 3사 중 한 통신사 이동통신 기지국을 대상으로, UAV를 이용한 상공 통신망 구축에 필요한 통신 품질 및 음영 지역을 평가하고자 수행되었다. 이 과정에서 한국방송통신전파진흥원(KCA, Korea Communication Agency)의 전자파 정보지도^[12] 및 전파누리 지도^[13]에 나타난 위치 정보를 활용하여 기지국

의 위치를 정확하게 결정하였다.

본 연구에서는 단일 기지국 환경 분석을 위해 전라남도 나주시 삼도동에 위치한 이동통신 기지국을 선정하였다. 해당 기지국은 위도 35.0260684°, 경도 126.7337562°에 위치해 있으며, 인근의 다른 기지국으로부터 최소 1km 이상 떨어져 있어 통신 품질 분석을 위한 이상적인 조건을 제공한다. 그림 3에서 보여지듯, 이 기지국 주변의 반경 500m 내에서 측정을 수행하였다. 또한, 본 연구에서는 단일 기지국의 실측 데이터를 바탕으로 복수 기지국 환경에서의 음영지역을 분석 진행하였다. 그림 4에서 보여지듯, 이 지역은 단일 기지국에서 선택되었던 기지국을 중심으로 3km 반경 내에 위치한 15개의 이동통신 기지국을 포함한다.

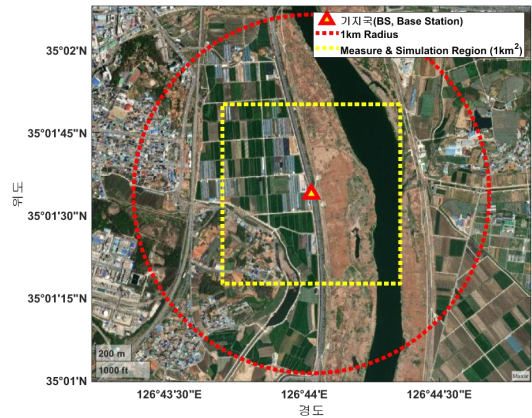


그림 3. 단일 기지국 측정 지역 - 실제 측정 및 시뮬레이션
Fig. 3. Single base station measurement area - Actual measurements and simulations.

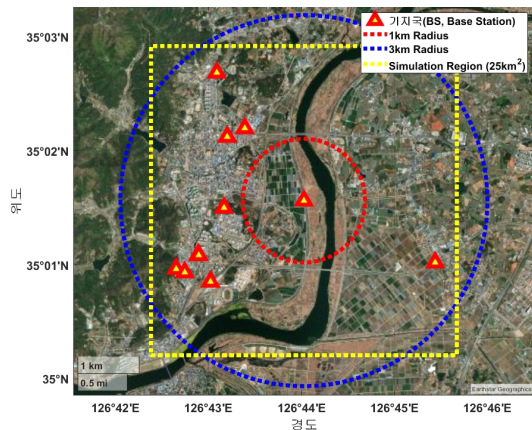


그림 4. 복수 기지국 측정 지역 - 시뮬레이션
Fig. 4. Multiple base station measurement area - simulations.

2.2.2 통신품질 측정 및 시뮬레이션 방법론

본 연구에서는 UAV를 활용하여 기지국의 통신품질을 측정한다. 일반적인 측정이 유인 항공기나 헬리콥터를 사용하는 측정 방법¹⁶⁾에 비해, UAV를 이용한 접근은 비용 효율성을 높이고, 접근성의 제한을 극복하며, 실험의 편의성을 개선한다.

UAV를 활용한 단일 기지국 안테나 패턴 측정¹⁷⁾ 이후, UAV 운용을 고려하여 그림 5와 같이 단일 기지국 측정 지역에서 100m 간격으로 배치된 측정 포인트 121개를 통해 기지국의 통신 품질을 평가한다. 이 측정 과정은 두 개의 다른 고도인 40m와 80m에서 수행되며, 이를 통해 고도에 따른 통신 품질 RSRP(Reference Signal Receiver Power)¹⁴⁾의 변화를 분석할 수 있다.

본 연구에서 시뮬레이션은 지점간 서비스의 적합한 신호 레벨을 상세히 평가하기 위해 ITU-R(International Telecommunication Union Radiocommunication Sector) 권고서 P.1812¹⁵⁾ 전파 예측 모델을 적용

하였다. 또한, 지형적 특성에 대한 데이터로는 구글 지도의 건물 및 지형 정보를 활용하였으며, 이 정보를 ATDI사 HTZ Communications 시뮬레이션 툴¹⁶⁾에 적용하였다.

HTZ Communications 시뮬레이션 툴은 LTE 및 5G를 비롯한 다양한 무선 통신 기술을 지원하며, 무선 통신 시스템의 설계, 분석 및 최적화를 위한 고급 기능을 제공한다. 이 툴은 3D 지형 및 건물 모델링을 통해 통신 환경에서 LTE 및 5G의 품질, RSRP 등의 성능을 정확하게 시뮬레이션할 수 있다. 이러한 기능을 통해 사용자는 다양한 통신 시나리오에서의 커버리지와 성능을 상세히 분석하고, 최적의 네트워크 설계를 수립할 수 있다.

복수 기지국의 경우, 각 기지국이 고유의 안테나 방사 패턴과 틸트 설정을 가지고 있어, 이를 모두 실제 비행을 통해 데이터를 수집하고 분석하는 데는 현실적으로 많은 시간이 소모된다. 또한, 시뮬레이션에서 안테나 패턴 및 틸트 설정을 각 기지국마다 다르게 설정하면 복잡성이 증가하며, 초기 연구 결과의 신뢰성과 재현성을 저해할 수 있다.

이러한 이유로, 본 연구에서는 단일 기지국 환경에서 측정된 안테나 패턴과 틸트 각도를 복수 기지국 환경에 동일하게 적용하였다¹⁷⁾. 이는 시간적 한계를 극복하고, UAV 상공망에서의 통신 품질과 음영지역의 특성을 보다 효과적으로 분석하는 데 유용하다. 이러한 접근 방식은 연구의 효율성을 높이고, 초기 연구 단계에서 실용적인 결과를 도출하는 데 큰 도움이 될 것이다.

III. 기지국 RSRP 및 음영지역 분석

3.1 단일 기지국 환경

3.1.1 통신품질 분석

본 절에서는 선행 연구¹⁷⁾의 단일 기지국의 안테나 패턴 측정 결과 즉, 수직 패턴(참조문헌 [17], 그림 11) 및 수평 패턴(참조문헌 [17], 그림 12)의 측정수치를 바탕으로, 고도별 RSRP 분포를 분석하였다. 이 과정에서 제조업체의 무반사실 또는 챔버에서 측정된 안테나 패턴, 실제 환경에서 측정된 안테나 패턴을 활용한 시뮬레이션 결과, 그리고 실제 고도에서 직접 측정된 RSRP 값들을 종합적으로 비교 및 검토하였다.

그림 6은 고도 40m에서의 RSRP 분포를 보여주며, 실측된 안테나 패턴을 기반으로 한 시뮬레이션 결과와 실제 측정된 RSRP 분포 간의 유사성을 확인할 수 있었다. 이는 실측된 안테나 패턴이 실제 환경을 더 정확하

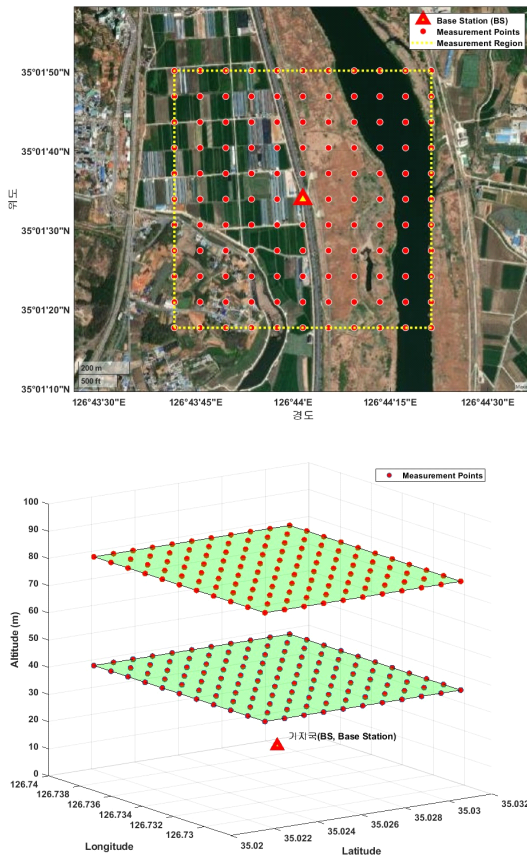


그림 5. 단일기지국에 대한 통신품질 측정 포인트
Fig. 5. Communication Quality Measurement Points for a single base station.

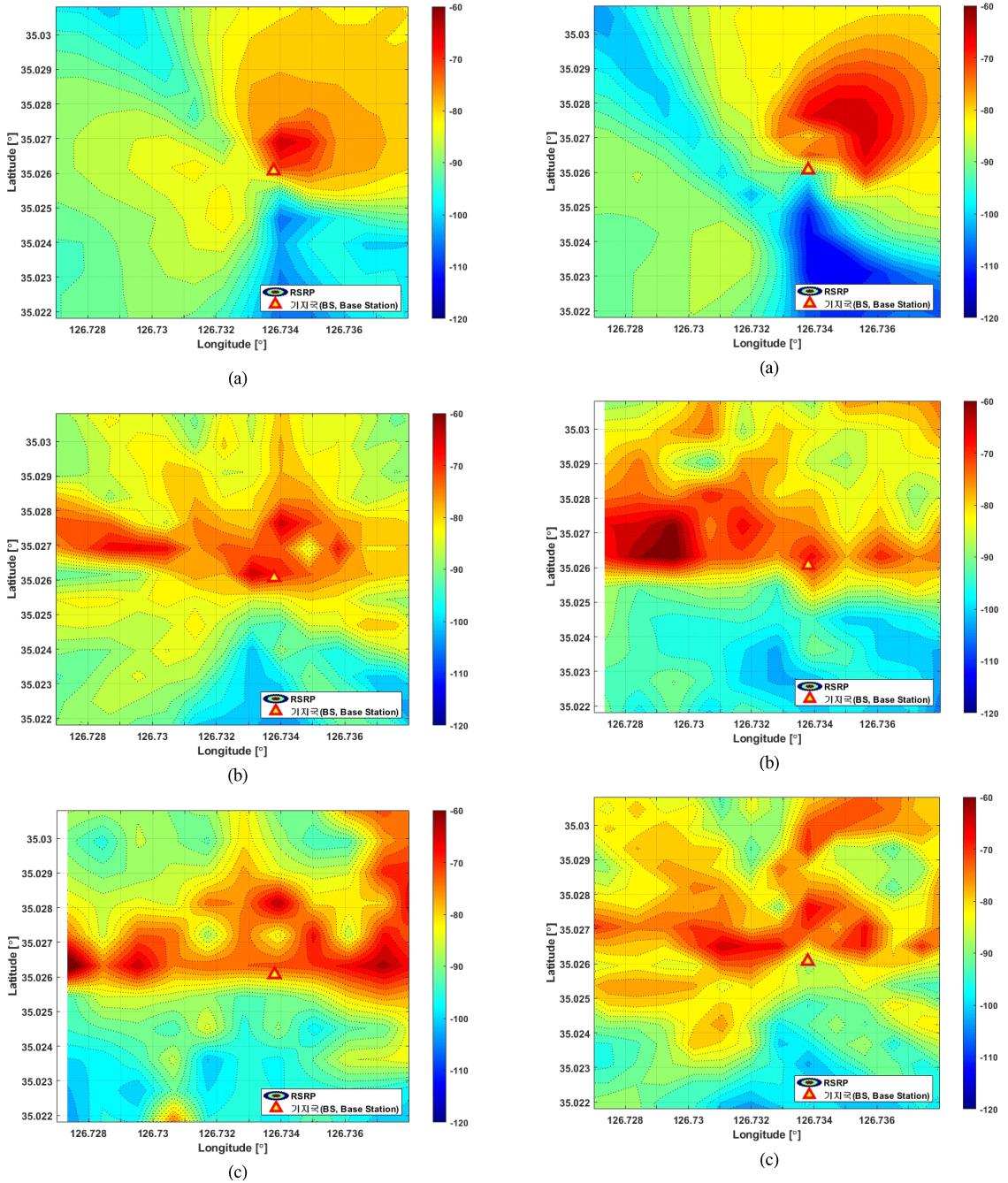


그림 6. 측정 영역에서의 RSRP 분포 비교 - 고도 40m

- (a) 제조사 안테나 패턴 적용 시뮬레이션 RSRP 분포
- (b) 실측 안테나 패턴 적용 시뮬레이션 RSRP 분포
- (c) 실제 측정된 RSRP 분포

Fig. 6. Comparison of RSRP Distribution in the Measurement Area - Altitude 40m.

- (a) Simulation RSRP Distribution Applying Manufacturer's Antenna Pattern
- (b) Simulation RSRP Distribution Applying Measured Antenna Pattern
- (c) Actual Measured RSRP Distribution

그림 7. 측정 영역에서의 RSRP 분포 비교 - 고도 80m

- (a) 제조사 안테나 패턴 적용 시뮬레이션 RSRP 분포
- (b) 실측 안테나 패턴 적용 시뮬레이션 RSRP 분포
- (c) 실제 측정된 RSRP 분포

Fig. 7. Comparison of RSRP Distribution in the Measurement Area - Altitude 80m.

- (a) Simulation RSRP Distribution with Manufacturer's Antenna Pattern
- (b) Simulation RSRP Distribution with Measured Antenna Pattern
- (c) Actual Measured RSRP Distribution

게 반영하고 있다는 점을 시사하며, 고도에 따른 통신 품질 예측에 있어 실측 데이터의 중요성을 강조한다.

그림 7은 고도 80m에서의 RSRP 분포를 보여주고 있다. 이 고도에서도 40m 고도와 유사하게, 실측된 안테나 패턴을 활용한 시뮬레이션 결과는 실제 RSRP 분포와 유사성이 높다. 이 결과는 제조업체가 제공하는 이론적 안테나 패턴의 한계를 드러내며, 실제 안테나 패턴을 활용하는 것이 기지국을 기반으로 한 UAV 상공망 구축의 최적화에 있어 결정적인 요소임을 시사한다.

이와 같이, 다양한 환경에서의 반복 측정, 고도별 세밀한 데이터 수집, 주변 환경 변수의 상세 분석 및 시뮬레이션 반영을 통해 실측 데이터와 시뮬레이션 결과 간의 차이를 줄일 수 있다. 이를 통해 UAV 상공망 구축 시 통신 품질 예측의 정확성을 높일 수 있으며, 최적화된 네트워크 설계를 가능하게 할 것이다.

그림 6 및 그림 7과 같은 결과를 얻기 위해서는 정밀한 기지국 안테나 패턴 측정이 필요하며^[7], 시뮬레이션에서는 지형, 건물 등의 다양한 요소들을 포함하여 이러한 변수들이 신호 전파에 미치는 영향을 정확히 반영하는 것이 중요하다.

3.1.2 고도에 따른 통신품질 및 음영지역 분석

앞 절에서는 실제 환경에서 측정된 안테나 패턴을 바탕으로 RSRP(Reference Signal Received Power) 시뮬레이션 분포와 실측된 RSRP 분포의 유사성을 분석하였다. 이에 본 절에서는 고도 5m에서 150m까지

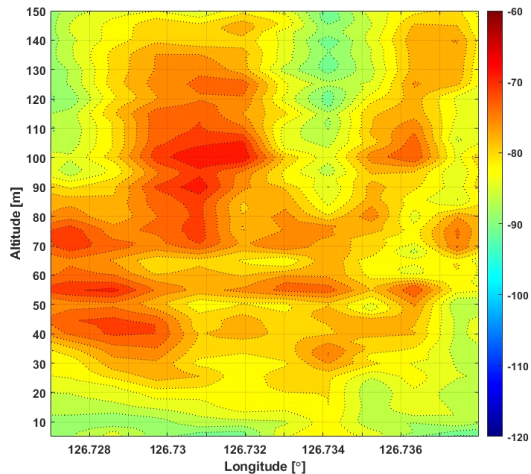


그림 8. 단일 기지국 위도 위치에서의 고도변화에 따른 기지국 상공망 통신품질 (위도: 35.0260684°)
Fig. 8. Single base station airspace network shadow region according to altitude change at a specific longitude (Latitude : 35.0260684°).

5m 간격으로 RSRP 분포를 시뮬레이션 진행하였으며, 단일 기지국 위도 및 경도에서의 경도-고도, 위도-고도의 단면을 보면 그림 8, 그림 9와 같이 예측할 수 있다.

그림 9의 위도 방향으로는 기지국 위치에서만 고도에 따라 통신품질이 보다 강한 것으로 드러나지만, 그림 8에서 볼 수 있듯이 다른 고도에 비하여 약 55m 높이에서 경도 방향으로 상공망을 일부 구축할 수 있을 것이라 판단된다. 이는 다른 고도에 비해 상대적으로 더 나은 통신 품질을 제공할 수 있는 위치임을 시사한다.

이 과정에서 -90dBm 이하의 RSRP 값^[4]에 대해 기지국에서 방출된 신호가 충분한 강도로 도달하지 못하

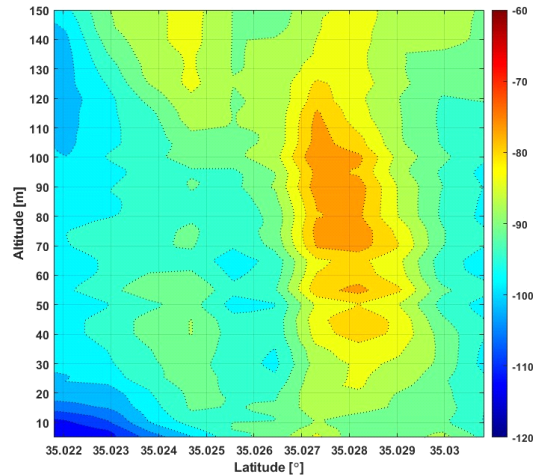


그림 9. 단일 기지국 경도 위치에서의 고도변화에 따른 기지국 상공망 통신품질 (경도: 126.7337562°)
Fig. 9. Single base station airspace network shadow region according to altitude change at a specific longitude (Longitude : 126.7337562°).

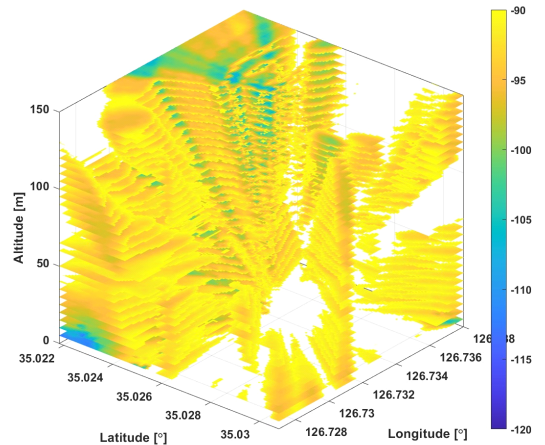


그림 10. 고도변화에 따른 단일 기지국 상공망 음영지역
Fig. 10. Shaded area over a single base station due to changes in altitude.

는 지역을 음영지역으로 정의하였으며, 고도 변화에 따른 단일 기지국 상공망 내 음영지역은 그림 10과 같이 예측할 수 있다. 시뮬레이션 결과는 실제 지형, 건물, 그리고 다른 장애물들이 신호 경로에 미치는 영향을 드러내며, 고도가 증가함에 따라 RSRP 및 음영지역의 분포가 어떻게 변화하는지를 보여준다. 이러한 분석을 통해 UAV-기지국간의 통신 효율성을 극대화하고, 신호 일관성을 보장하는 상공망 및 비행 경로 설계에 중요한 고려사항을 제공한다.

3.2 복수 기지국 환경

3.2.1 통신품질 분석

본 절에서는 복수 기지국 환경에서의 통신 품질을 분석하고, 단일 기지국 환경과의 차이점을 구체적으로 비교하였다. 고도 40m와 80m에서의 RSRP 분포를 분석함으로써, 복수 기지국 환경에서는 단일 기지국의 1km² 분석 영역에 비해 더 넓은 9km² 영역에서 RSRP 신호 강도를 관찰할 수 있었다.

그림 11은 고도 40m에서의 RSRP 분포를 보여주며, 기지국 근처에서 높은 RSRP 신호 강도를 확인할 수 있었다. 그림 12는 고도 80m에서의 RSRP 분포를 나타내는데, 이 높이에서도 기지국 근처에서의 높은 신호 강도가 유지되나, 40m 고도에 비해 지형적 영향이 덜 미치기 때문에 신호 강도 분포가 더 광범위하게 나타났다. 이는 더 높은 고도에서 신호가 지형적 장애물에 의한 감쇄가 적게 발생하고, 다수의 기지국들로부터 오버랩되는 신호 영역이 확장되기 때문에 가능하다. 더 높은 고도에서는 장애물로 인한 신호 차단이 줄어들고, 각 기지국 간의 신호 강도가 서로 보완되어 전반적인 커버

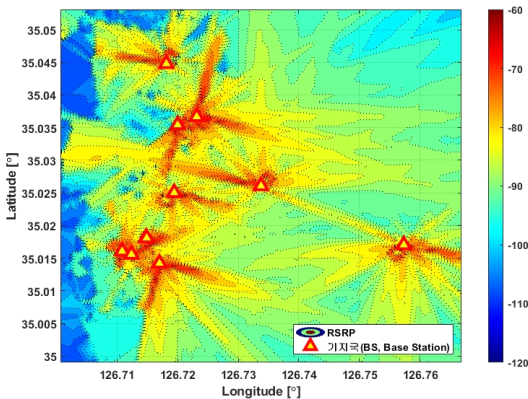


그림 11. 고도 40m에서의 통신품질 분포 시뮬레이션 결과 - 복수 기지국
Fig. 11. Communication quality distribution simulations results at 40altitude - multiple base stations.

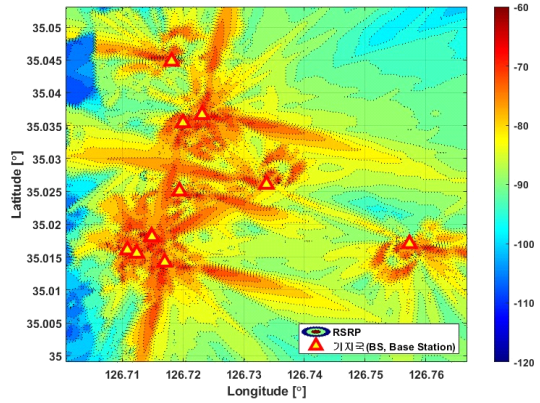


그림 12. 고도 80m에서의 통신품질 분포 시뮬레이션 결과 - 복수 기지국
Fig. 12. Communication quality distribution simulations results at 80altitude - multiple base stations.

리지가 증가한다.

이러한 분석은 복수 기지국 환경에서 네트워크 설계 및 최적화 전략을 수립할 때 중요한 고려 사항을 제공한다. 복수 기지국 환경에서 신호 중첩과 지형적 영향을 효과적으로 관리함으로써, 상공망의 성능을 최적화할 수 있다.

3.2.2 고도에 따른 통신품질 및 음영지역 분석

본 절에서는 복수 기지국 환경에서 고도 5m부터 150m까지 5m 간격으로 RSRP 분포를 시뮬레이션하여, 단일 기지국 환경과의 통신 품질 및 음영지역의 차이를 분석하였다. 이 시뮬레이션은 단일 기지국의 위치 좌표를 중심으로 한 경도-고도 및 위도-고도 단면과 비교되

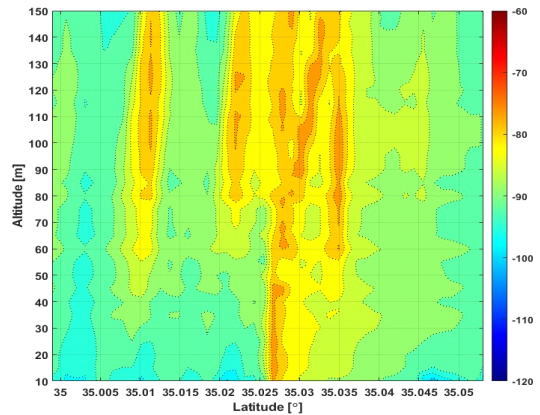


그림 13. 단일 기지국 위도 위치에서의 고도변화에 따른 복수 기지국 상공망 통신품질 (위도: 35.0260684°)
Fig. 13. Multiple Base Station Air Network Communication Quality According to altitude change at a single base station latitude location (Latitude : 35.0260684°).

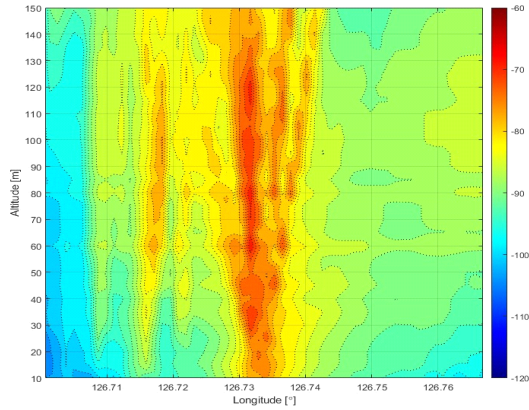


그림 14. 단일 기지국 경도 위치에서의 고도변화에 따른 복수 기지국 상공망 통신품질 (경도: 126.7337562°)
 Fig. 14. Multiple Base Station Air Network Communication Quality According to altitude change at a single base station longitude location (Longitude : 126.8337562°).

었으며, 이러한 비교는 그림 13 및 그림 14을 통해 확인할 수 있다.

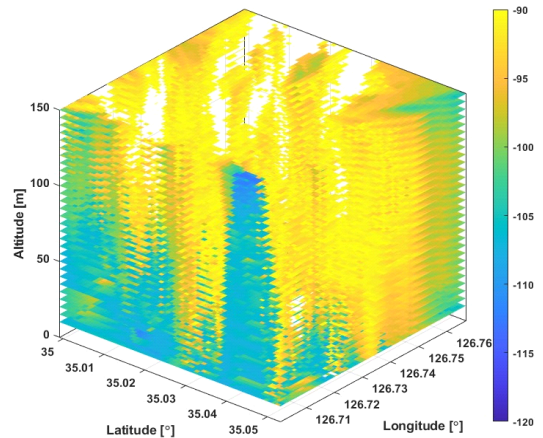
단일 기지국 환경에 비하여 복수 기지국 환경에서는 서로 다른 기지국들로부터 오버랩되는 신호 영역이 확장되어 각 기지국 간의 신호 강도가 서로 보완되었다. 이에 따라 경도 및 위도 방향 모두 약 80m 이상의 고도에서 일부 상공망 구축이 가능할 것이라 판단된다.

추가적으로 전반적인 커버리지가 증가하였으나, 그림 15(a)에 나타난 바와 같이 단일 기지국 환경에 비해 넓은 지역에서 -90dBm 이하의 RSRP 값^[14]을 가지는 음영지역이 훨씬 더 넓게 분포하는 것을 확인할 수 있다.

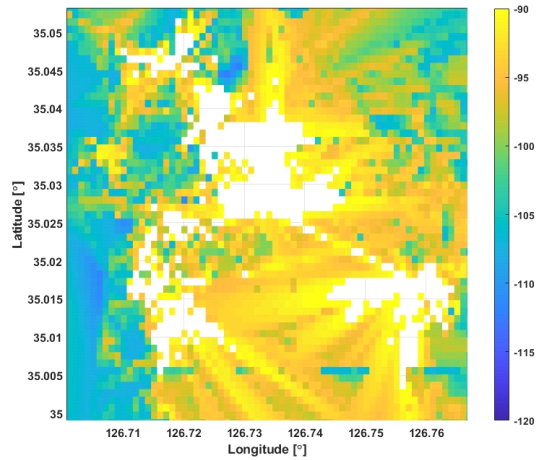
그림 15(b)와 같이 150m 고도에서 바라본 결과, 연속적으로 신호 강도가 강한 지역이 나타나지 않음을 확인할 수 있다.

이는 추가적인 기지국 설치의 필요성 및 안테나 틸트 조정의 중요성을 시사하며, 일부 음영지역을 커버할 수 있는 가능성을 보여준다. 이러한 결과는 상공망 설계에 있어 중요한 고려사항을 제시한다.

현재까지 각 기지국에 대한 안테나 패턴 및 틸트 각도의 구체적인 측정 데이터는 확보되지 않았지만, 동일한 안테나 조건^[7]에서 진행된 복수 기지국 시뮬레이션은 향후 실제 조건에서의 기지국에 대한 안테나 패턴 측정을 위한 기초를 제공하며, 이러한 시뮬레이션 데이터는 실제 측정을 통한 RSRP 분포를 확인하고, 음영지역을 최소화하는 방향 또는 음영지역을 피해가는 방향으로 UAV 상공망을 계획하는 데 중요한 역할을 할 것이다.



(a)



(b)

그림 15. 고도변화에 따른 복수 기지국 상공망 음영지역 (a) 전체 보기 (b) 상단 보기 - 고도 150m
 Fig. 15. Shaded area over a multiple base station due to changes in altitude. (a) Overall View (b) Top View - Altitude 150m

IV. 결 론

본 연구는 이동통신 기반의 UAV 상공망 구축의 타당성을 평가하기 위해 통신품질 및 음영지역에 대한 분석을 수행하였다. 고도 40m와 80m에서 단일 기지국의 RSRP 분포를 실측하였고, 시뮬레이션 결과와 비교 분석하였다. 이를 통해 고도별 통신 품질과 음영 지역을 시뮬레이션하여 UAV 상공망 설계에 필요한 데이터를 확보하였다. 복수 기지국 배치 시의 통신 품질과 음영 지역을 시뮬레이션하여 다중 기지국 상호작용의 영향을 평가하였다. 고도 5m에서 150m까지 5m 간격으로 시뮬레이션을 진행하여 고도 변화에 따른 통신 품질 변화를 분석하였다.

RSRP 값이 -90dBm 이하인 지역을 음영 지역으로 정의하고, 고도 변화에 따른 음영 지역 분포를 시뮬레이션하였다. 복수 기지국 환경에서의 신호 중첩과 지형적 영향을 고려하여 UAV 상공망의 최적화 전략을 제시하였다.

이러한 결과를 바탕으로, 본 연구는 UAV 상공망의 통신 품질과 음영 지역을 효과적으로 분석하였으며, 향후 도심 환경에서의 실측 데이터 수집 및 분석을 위한 기초 자료로 활용될 수 있다. 연구의 한계로는 단일 기지국 환경에서의 실측 데이터만을 바탕으로 복수 기지국 환경을 시뮬레이션한 점이 있으며, 이는 향후 도심 환경에서의 실측 데이터를 통한 보완이 필요하다.

References

- [1] K. Namuduri, U.-C. Fiebig, D. Matolak, I. Guvenc, K. Hari, and H.-L. Maattanen, "Advanced air mobility: Research directions for communications, navigation, and surveillance," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 17, no. 4, pp. 65-73, Dec. 2022. (<https://doi.org/10.1109/MVT.2022.3194277>)
- [2] "Why Amazon, "UPS and even Domino's is investing in drone delivery services," Insider Intelligence.com, 2023, [Online] Available: <https://www.insiderintelligence.com/insights/drone-delivery-services/>
- [3] W. J. Yun, S. Jung, J. Kim, and J.-H. Kim, "Distributed deep reinforcement learning for autonomous aerial eVTOL mobility in drone taxi applications," *ICT Express*, vol. 7, no. 1, pp. 1-4, Mar. 2021. (<https://doi.org/10.1016/j.icte.2021.01.005>)
- [4] D. Erdos, A. Erdos, and S. E. Watkins, "An experimental UAV system for search and rescue challenge," *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 28, no. 5, pp. 32-37, May 2013. (<https://doi.org/10.1109/MAES.2013.6516147>)
- [5] N. Ha, J. An, and W. Shin, "New key features of UAV-enabled cellular networks: UAV channel modeling and trajectory optimization," *J. Korean Inst. Commun. and Inf. sci.*, pp. 1493-1507, Sep. 2020. (<https://doi.org/10.7840/kics.2020.45.9.1493>)
- [6] B. Galkin and E. Fonseca, "Experimental evaluation of a UAV user QoS from a two-tier 3.6GHz spectrum network," *2021 IEE ICC Wkshps.*, Jul. 2021. (<https://doi.org/10.1109/ICCWorkshops50388.2021.9473826>)
- [7] I. Al Saadi and N. Tarhuni, "Ground level mobile signal prediction using higher altitude UAV measurements and ANN," *2022 32nd Conf. Open Innovations Assoc. (FRUCT)*, Nov. 2022. (<https://doi.org/10.23919/FRUCT56874.2022.9953813>)
- [8] A. Z. Hindi and I. Z. Kovacs, "Measurement reporting enhancement for 5G cellular-connected aerial vehicles," *IEEE Int. Symp.*, Sep. 2023. (<https://doi.org/10.1109/PIMRC56721.2023.10293978>)
- [9] Report, ITU-R SM. 2056-1, "Airbone verification of antenna patterns of broadcasting stations," 06, 2014.
- [10] Tektronix, *RSA 306B Spectrum Analyzer*, <https://www.tek.com/ko/products/spectrum-analyzers/rsa306>
- [11] 600MHz ~ 6GHz 광대역 안테나, https://www.antenna-pro.com/product/detail.html?product_no=2383&cate_no=120&display_group=1
- [12] Korea Communication Agency(KCA), *Electromagnetic Wave Information Map*, https://emf.kca.kr/eh_medgm40_001.do
- [13] Korea Communication Agency(KCA), *Frequency Comprehensive Information System*, <https://spec.trummap.kr/index.do>
- [14] Tektronika, "RSRP and RSRQ," https://wiki.teltonika-networks.com/view/RSRP_and_RSRQ
- [15] Recommendation ITU-R P. 1812-7, "A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the frequency range 30MHz to 6GHz," International Telecommunication Union, Oct. 2023.
- [16] ATDI's HTZ Communications Tool, <https://atdi.com/products-and-solutions/htz-communications/>

- [17] S. Yoon, T. Kim, and J.-O. Ahn, "Measuring base station antenna pattern using UAV," *J. Korean Inst. Commun. and Inf. sci.*, vol. 49, no. 7, pp. 927-934, Jul. 2024.
(<https://doi.org/10.7840/kics.2024.49.7.927>)

윤 석 (Seok Yoon)



2016년 2월 : 전남대학교 전자컴퓨터공학과 학사
2018년 2월 : 전남대학교 전자공학과 석사
2022년 8월 : 전남대학교 전자공학과 박사
2022년 7월~현재 : 미래전파공학연구소(IFRE) 선임연구원

<관심분야> 전자기학, 전파공학, 초고주파공학, 안테나공학

[ORCID:0000-0002-5319-1133]

김 태 흥 (Tae-Hong Kim)



1997년 2월 : 전남대학교 전자공학과 졸업
1999년 2월 : 전남대학교 전자공학과 석사
2005년 2월 : 전남대학교 전자공학과 박사
2016년~현재 : 미래전파공학연구소(IFRE) 책임연구원

<관심분야> 전자공학, 초고주파, 전파 전달

[ORCID:/0000-0002-9065-1645]

안 준 오 (Jun-Oh An)



1993년 2월 : 경희대학교 전자공학과 졸업
1995년 2월 : 경희대학교 전자공학과 석사
2007년 2월 : 경희대학교 전파공학과 박사
1995년 2월~1998년 12월 : (주)포

스카이앤씨 대리

2001년 3월~2010년 2월 : 한국전파진흥협회 부장

2010년 3월~현재 : 미래전파공학연구소(IFRE) 소장

<관심분야> 전파공학, 스펙트럼엔지니어링, 전자파인체영향(EMF)

[ORCID:/0000-0003-3640-9062]