https://doi.org/10.7840/kics.2024.49.4.517

고도 및 안테나 기울기를 기반으로 한 지상 기지국과 무인항공기 간 통신품질 분석

윤 석[♦°], 김 태 홍[*], 안 준 오[*], 김 현 수[**]

Analysis of Base Station and Unmanned Aerial Vehicle Communication Quality Based on Altitude and Antenna Tilt

Seok Yoon[♦°], Tae-Hong Kim[*], Jun-Oh Ahn[*], Hyun-Su Kim[**]

요 약

본 논문은 무인항공기와 지상 기지국 간의 통신품질을 무인항공기의 고도와 기지국 안테나의 기울기를 기반으로 분석하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 3GPP 36.814 기지국 안테나 이득 패턴 모델과 ATDI사의 HTZ Communications 시뮬레이션 도구를 사용하여 무인항공기의 고도와 기지국 안테나의 기울기를 기반으로 통신품질을 나타내는 기준 신호 수신 전력을 분석하였다. 분석 결과 현재의 지상 기지국은 지상에 위치하고 있어 지상 환경에 대한 커버리지 및 통신 품질 요구사항은 충족하는 것으로 나타났다. 그러나 무인항공기가 공중에 위치할 때 커버리지 부족, 음영 지역 및 신호 강도 부족과 같은 문제가 발생하였다. 특히, 저고도 무인항공기의 최대 비행 고도가 6,000m인 점을 고려할 때, 기지국 안테나의 추가적인 하향 기울기가 무인항공기의 상공 커버리지 부족, 음영지역 및 통신품질 부족과 같은 문제를 더욱 악화시킬 것으로 판단되어 추후 상공 네트워크에 대한 연구가 필요하다.

키워드 : 기준 신호 수신 전력, 기지국 안테나, 무인항공기, 상공 네트워크, 안테나 기울기, 지대공 채널
Key Words : Reference Signal Received Power (RSRP), Base Station Antenna, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Aerial Network, Antenna Tilt, Ground-to-Air-Channel

ABSTRACT

In this paper aims to analyze the communication quality between unmanned aerial vehicles (UAVs) and ground base stations based on the altitude of the UAVs and the tilt of the base station antenna. To achieve this, we utilized the 3GPP 36.814 base station antenna gain pattern model and the HTZ Communications simulation tool from ATDI to analyze the reference signal received power, representing communication quality, based on the altitude of the UAV and the tilt of the base station antenna. The analysis results indicate that the current ground-based stations, located on the ground, meet the coverage and communication quality requirements for the terrestrial environment. However, issues such as coverage gaps, shadow areas, and signal strength inadequacies arise when UAVs are positioned in the airspace. Particularly noteworthy is the fact that

※ 본 연구는 2023년 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다.
♦° First and Corresponding Author : Institute for Future Radio Engineering, yseok1016@gmail.com, 정회원
* Institute for Future Radio Engineering, thkim@ifre.re.kr, 정회원; juno@ifre.re.kr, 정회원
** D-Air, lanshu@naver.com
논문번호 : 202312-165-B-RU, Received December 14, 2023; Revised January 2, 2024; Accepted January 8, 2024

considering the maximum flight altitude of low-altitude UAVs is 6,000 meters, additional downward tilt of the base station antennas could exacerbate issues such as insufficient aerial coverage, shadow areas, and poor communication quality. Therefore, further research on aerial networks is deemed necessary.

Ⅰ. 서 론

5세대(5G) 이상의 무선 네트워크 발전은 무인 항공기(UAV, Unmanned Aerial Vehicle)의 네트워크 용량과 효율성을 향상시킬 수 있는 중요성을 강조하고 있다.[1-4]

UAV는 초기에 군사용도로 개발되었지만, 이동성, 가시선(LoS, Line-of-Sight) 전송, 그리고 저렴한 생산 비용 등의 이점으로 인해 패킷 배달, 수색, 구조 등 다양한 민간 응용 분야에 널리 사용되고 있다.[5-8] 따라서 향후에는 UAV가 지대공(Ground-to-Air) 채널 네트워크에서 공중 기지국(BS, Base Station), 액세스 포인트 또는 중계기로 활용될 것으로 예상된다.

지대공 통신과 관련된 수많은 연구에는 지대공 통신 분석[9,10], 채널 모델링[11,12], 그리고 채널 성능 분석[13,14] 등이 있으며, 채널 모델은 측정 기반 모델[15,16], 광선 추적 기반 모델[17,18] 및 기하학 기반 확률론적 모델[19,20]으로 분류할 수 있다. 그러나 UAV의 사용 사례에서 지대공 채널 전송에는 UAV의 고도가 높아서 시각적이거나 LoS 범위로만 제한될 가능성이 높다[27]. 현재 기지국은 지상에 위치하고 있어 지상 커버리지 및 통신품질은 충족되지만, UAV 통신을 활용하기 위해서는 상공 커버리지가 필요하다. 그렇지 않으면, 복잡한 기지국 안테나 패턴과 하향 기울기를 가진 기지국 안테나의 지면 반사로 인해 상공에 있는 UAV에 대한 고르지 못한 커버리지 및 음영지역, 그리고 부족한 통신품질이 형성되어 통신 네트워크의 연결이 불안정해질 것이다.

이를 위해 기존 연구에서는 구릉지와 산악 지역 연구[15], 수중 지대공 채널 연구[12], 그리고 지대공 해상 수로에 대한 연구[21]를 통해 환경적 영향을 받는다는 것을 보여주었으나, 앞선 연구에서 UAV 고도에 따른 지대공 채널에 대한 2차원적 분석은 수행되지 않았으며, 기지국 안테나 기울기에 따른 영향성도 분석되지 않았다.

본 연구에서는 지상 기지국과 UAV 사이의 지대공 채널 통신을 분석하기 위해 복잡한 안테나 패턴 대신에 단순화된 3GPP(3rd Generation Partnership Project) 36.814[30] 기지국 안테나 이득 패턴 모델을 도입하였다. 이는 실제 기지국 안테나의 방사패턴이 제조사별로 다르며, 실제 설치된 안테나의 패턴을 요청하여 얻기 어렵기 때문에 3GPP 기지국 안테나 이득 패턴을 적용하였다. 또한, ATDI사의 HTZ Communications 시뮬레이션 툴[29]을 활용하여 UAV의 고도와 지상 기지국 안테나 기울기에 따른 통신품질 및 지대공 통신에 미치는 영향을 분석하였다. 2장에서는 기지국 및 UAV 시나리오 시뮬레이션을 위한 매개변수와 3GPP 기지국 안테나 이득 패턴 모델을 나타내었으며, 3장에서는 UAV 고도 및 안테나 기울기에 따른 통신품질을 나타내는 기준 수신 신호 전력(RSRP, Reference Signal Received Power)을 분석하였다.

Ⅱ. 지상 기지국 및 UAV 시나리오

2.1 시나리오

지상 기지국 및 UAV 시나리오에서 일반적으로 기지국과 UAV 사이의 채널은 UAV 끝의 커버리지 성능에 중요한 역할을 하며 일반적으로 거리 기반 경로 손실과 지면 반사를 모두 특징으로 하는 모델을 고려한다.[12,15,21,24]

본 연구에서는 30MHz ~ 6GHz 주파수 범위에서 지점간 서비스와 관련하여 사용하기에 적합한 신호 레벨을 자세히 평가하는데 권장되는 경로 별 전파 예측방법인 ITU-R(International Telecommunication Union Radiocommunication Sector) P.1812[26] 전파 모델을 적용하였다. 이 예측 방법은 원하는 신호 레벨에 대하여 서비스 영역 및 가용성, 그리고 원하지 않는 동일 및 인접 채널 신호(간섭 신호)로 인한 서비스 영역 및 가용성의 감소를 모두 예측하는데 이용된다. 지형적 특성의 경우, 구글 지도의 건물 및 지형적 특성을 적용하였으며, 이를 ATDI사 HTZ Communications 시뮬레이션 툴[29]에 적용하였다.

HTZ Communications 시뮬레이션 툴은 LTE 및 5G를 비롯한 다양한 통신 기술에 대응하여 무선 통신 시스템의 설계, 분석 및 최적화를 지원하는 고급 시뮬레이션 툴이다. 특히, 3D 지형 및 건물 모델링을 통해 LTE 및 5G 통신품질, RSRP 등의 무선 통신 환경에서의 성능을 정확하게 시뮬레이션할 수 있다. 이를 통해 사용자는 다양한 통신 시나리오에서의 커버리지와

성능을 상세하게 분석하고 최적의 설계를 수립할 수 있다.

그림 1은 기지국 및 UAV 채널을 위한 개념도를 나타내며, H_{BS}는 지상 기지국 높이, H_{UAV}는 UAV 고도, D는 기지국과 UAV사이의 직선 거리를 나타낸다. 추가적으로 지상 기지국 및 UAV 시나리오 시뮬레이션을 위한 시나리오 매개변수는 표 1과 같다. $HPBW_{el}$의 경우, 너무 넓은 이득 패턴을 갖는다면 목표로 하는 지역의 통신이 어려워질 수 있으며 주변 환경의 노이즈와 간섭을 더 많이 수용할 수 있기에 3GPP 36.814[30]의 매개변수를 적용하였다.

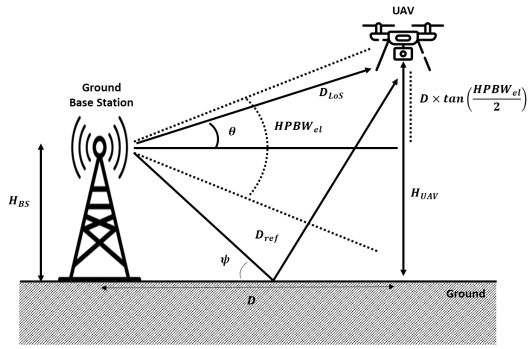


그림 1. 기지국 및 UAV 시나리오를 위한 개념도
Fig. 1. Conceptual Diagram for Base Station and UAV Scenario

표 1. 시뮬레이션을 위한 시나리오 매개변수
Table 1. Scenario Parameter for Simulation

Parameter	Value
Carrier Frequency	800-900MHz 대역 SKT - 879MHz / KT - 954.3MHz / LG U+ - 889MHz
Bandwidth	10 MHz
Resource Block	50
H_{BS}, Base Station Height	30 m
H_{UAV}, UAV Height	1 m / 30m / 100m / 300m / 500m
Base Station Power	46 dBm
Antenna Gain	20.15 dBi
$HPBW_{az}$ Azimuth Half Power Beam Width	65°
$HPBW_{el}$ Elevation Half Power Beam Width	10°
SLA Side Lobe Attenuation	-30 dB
Coverage threshold	-80 dBm
Analysis Radius	2 km

시나리오 1과 시나리오 2의 유일한 차이점은 지상 기지국 수이며, 표 1에 기재된 시나리오 매개변수는 두 시나리오에서 동일하게 적용되었다. 지상 기지국의 위치는 한국 방송 통신 전파진흥원(KCA, Korea Communications Agency)의 전자파 정보지도[22] 및 전파누리 지도[23]를 기반으로 하여 실제 기지국 위치를 반영하였다.

시나리오 1에서는 여수 세계 박람회장의 SKT 1개 기지국(위도: 34.751, 경도: 127.747)만이 위치하며, 다른 통신사의 기지국 영향은 배제되었다. 이는 건물 및 지형적 영향성만 고려한 시나리오로 구성되었다. 반면에 시나리오 2에서는 통신사별 위치가 겹치는 약 40여개의 기지국이 해당 지역에 분포하며, 다양한 통신사의 영향을 종합적으로 검토하기 위한 시나리오로 설계되었다.

그림 2. 시나리오1 - 기지국 위치
Fig. 2. Scenario1 - Base Station Location

그림 3. 시나리오2 - 기지국 위치
Fig. 3. Scenario2 - Base Station Location

2.2 3GPP 기지국 안테나 이득 패턴 모델

표 1의 시나리오 매개변수를 활용하고 단순화된 3GPP 36.814 기지국 안테나 이득 패턴 모델[30]을 사용하였다. 식(1), (2)와 같이 상대 이득 $G_{az}(\phi)$ 를 갖는 수평 이득 패턴(Azimuth Gain Pattern)과 $G_{el}(\theta)$를 갖는 수직 이득 패턴(Elevation Gain Pattern)으로 단순화하여 모델링된다.[25]

$$G_{az}(\phi) = \max\left(-12\left(\frac{\phi}{HPBW_{az}}\right)^2, SLA\right) \ [dB] \quad (1)$$

$$G_{el}(\theta) = \max\left(-12\left(\frac{\theta-\theta_{tilt}}{HPBW_{el}}\right)^2, SLA\right) \ [dB] \quad (2)$$

ϕ는 방위각(Azimuth Angle, $-\pi \leq \phi \leq \pi$), θ는 고도 각(Elevation Angle, $-\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$)을 나타내며, θ_{tilt}는 안테나 전기적 틸트(Antenna Electrical Tilt), *HPBW*는 반전력 빔 폭(Half-Power Beam Width), *SLA*는 사이드 로브 감쇠(Sidelobe Attenuation)를 나타낸다. 식 (1), (2)에 의하여 방위각 및 고도 각 패턴의 상대 이득에 의하여 임의의 방향에 대한 기지국 안테나 전체 이득은 식 (3)과 같이 모델링 되며, G_0는 안테나 최대 이득을 나타낸다.

$$G(\phi,\theta) = \max(G_{az}(\phi) + G_{el}(\theta), SLA) + G_0 \ [dB] \quad (3)$$

그림 4는 식 (1), (2)에 대하여 방위각 및 고도각에 따른 안테나 상대 수평 및 수직 이득을 나타낸다.

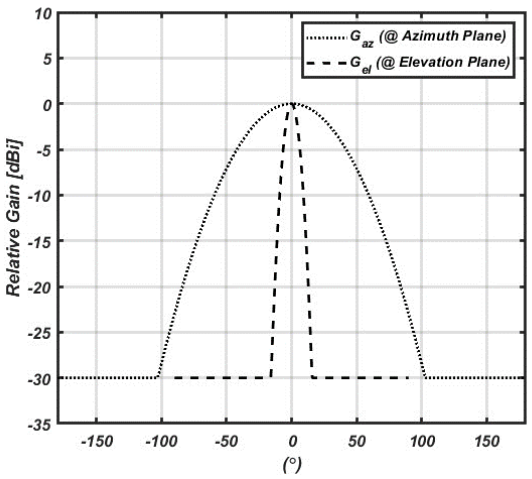


그림 4. 방위각 및 고도각에 따른 안테나 패턴
Fig. 4. Antenna Gain Variation depending on azimuth and elevation angle

Ⅲ. UAV 고도 및 안테나 기울기에 따른 영향성 분석

안테나 기울기 및 UAV 고도에 따른 영향성 분석을 위하여 전체 대역과 협대역에 걸쳐 확산된 LTE 기준 신호 수신 전력을 나타내는 통신품질 매개변수인 RSRP(Reference Signal Receiver Power)를 사용한다. 또한, 표 2는 4G(LTE) RSRP 신호강도 분류를 나타내며, RSRP는 -80dBm 이상은 우수한 신호강도, -90dBm 이하는 약한 신호강도를 가진다.

그림 5와 그림 8은 각각 시나리오 1과 시나리오 2의 안테나 기울기가 수평(0°)이며, 위도 34.751인 경우의 RSRP를 보여준다.

시나리오 1에서는 지상 기지국의 높이와 동일한 30m에서 최상의 통신품질을 나타내며, 지형적 환경에 의한 신호 강도 감소를 제외하고 UAV 고도 300m 이상이면 -80dBm 이하의 신호 강도를 가진다. 또한, 기지국으로부터 약 1km 이상에서는 지면 반사에 의한 신호 강도가 증가하는 경향성을 보인다. 표 3을 통해 확인할 수 있듯이 안테나 기울기가 수평인 경우, 300m 이상에서는 반경 2km 내에서 -90dBm 이하의 약한 신호 강도를 보인다.

그림 6과 그림 9은 각각 시나리오 1과 시나리오 2의 안테나가 하향 기울기(-10°)를 가지며, 위도 34.751인 경우 RSRP 분포를 보여준다. 시나리오 1에서는 기지국 안테나가 수평 기울기 경우와 비교하여 지형적 영향성을 더 많이 받아, UAV 상공에서 -80dBm 이하의 신호 강도가 더 자주 나타남을 확인할 수 있다. 표 3에서 확인할 수 있듯이 수평 기울기와 비교했을 때 100m 이상의 고도에서부터 -90dBm 이하의 약한 신호 강도가 나타난다.

표 2. 4G(LTE) RSRP 신호강도 분류[28]
Table 2. 4G(LTE) RSRP Signal Strength Classification[28]

RSRP	Signal Strength	Description
≥ -80*dBm*	우수한 신호세기	강력한 신호 및 최대 데이터 속도
-80*dBm to* -90*dBm*	좋은 신호세기	강력한 신호 및 좋은 데이터 속도
-90*dBm to* -100*dBm*	약한 신호세기	안정한 데이터 속도는 가능하지만, 특히 신호가 -100dBm에 근접할 때 가끔 중단 발생
≤-100*dBm*	신호세기 없음	연결 끊김

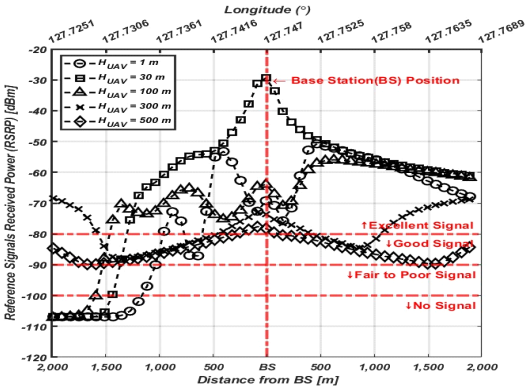


그림 5. 안테나 기울기가 0°인 경우, H_{UAV}에 따른 수신 강도 - 시나리오 1
Fig. 5. If The antenna tilt is 0°, Received Signal Strength According to H_{UAV} - Scenario 1

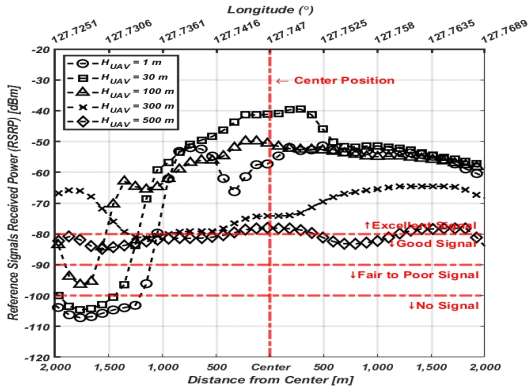


그림 8. 안테나 기울기가 0°인 경우, H_{UAV}에 따른 수신 강도 - 시나리오 2
Fig. 8. If The antenna tilt is 0°, Received Signal Strength According to H_{UAV} - Scenario 2

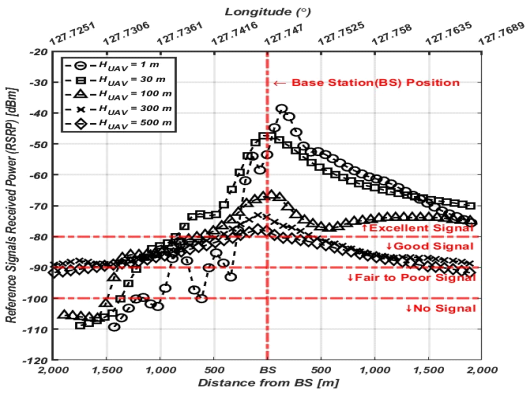


그림 6. 안테나 기울기가 -10°인 경우, H_{UAV}에따른 수신 강도 - 시나리오 1
Fig. 6. If The antenna tilt is -10°, Received Signal Strength According to H_{UAV} - Scenario 1

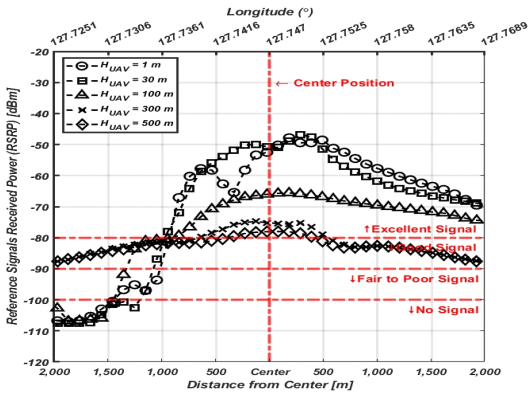


그림 9. 안테나 기울기가 -10°인 경우, H_{UAV}에 따른 수신 강도 - 시나리오 2
Fig. 9. If The antenna tilt is -10°, Received Signal Strength According to H_{UAV} - Scenario 2

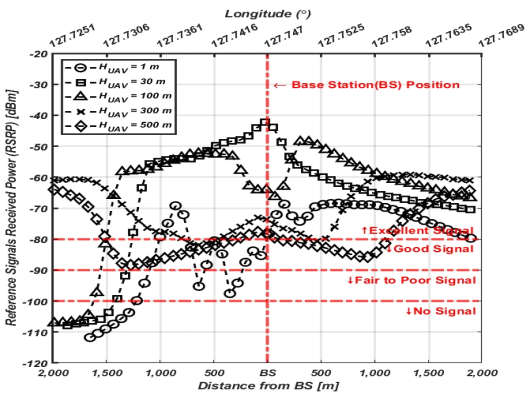


그림 7. 안테나 기울기가 10°인 경우, H_{UAV}에 따른 수신 강도 - 시나리오 1
Fig. 7. If The antenna tilt is 10°, Received Signal Strength According to H_{UAV} - Scenario 1

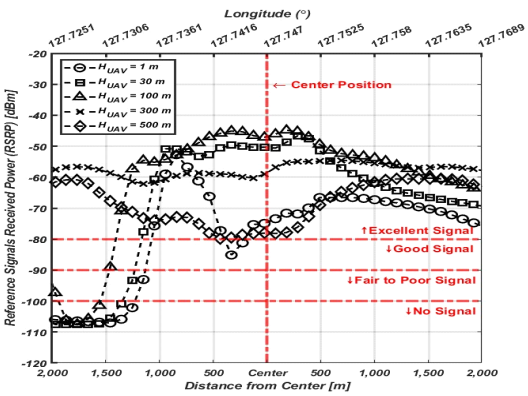


그림 10. 안테나 기울기가 10°인 경우, H_{UAV}에 따른 수신 강도 - 시나리오 2
Fig. 10.If The antenna tilt is 10°, Received Signal Strength According to H_{UAV} - Scenario 2

표 3. UAV 고도 및 기지국 안테나 기울기에 따른 RSRP 분포 - 시나리오1
Table 3. RSRP Distribution According to UAV Altitude and Base Station Antenna Tilt - Scenario1

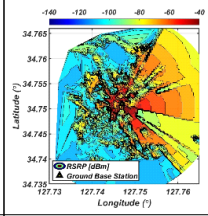
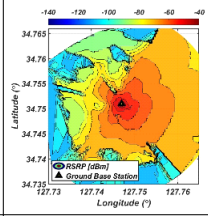
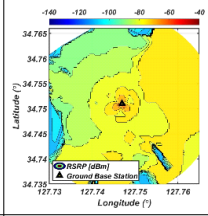
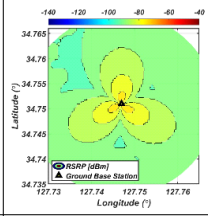
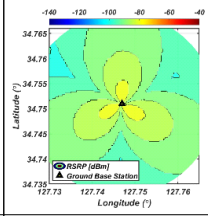
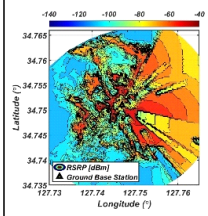
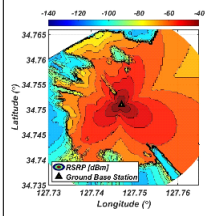
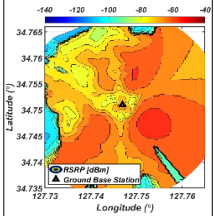
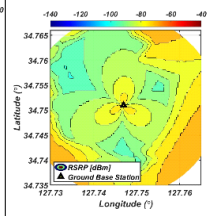
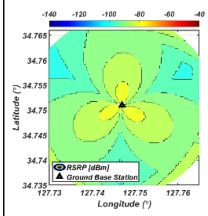
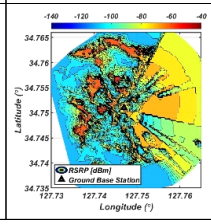
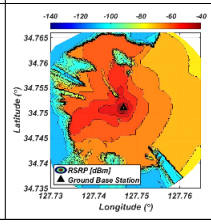
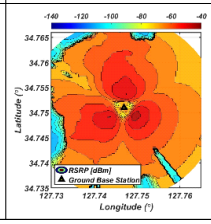
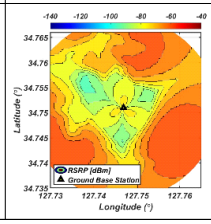
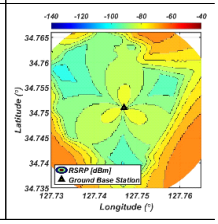
H_{UAV}	1m	30m	100m	300m	500m
Tilt = -10° (Down-Tilt)					
Tilt = 0°					
Tilt = 10° (Up-Tilt)					

표 4. UAV 고도 및 기지국 안테나 기울기에 따른 RSRP 분포 - 시나리오2
Table 4. RSRP Distribution According to UAV Altitude and Base Station Antenna Tilt - Scenario2

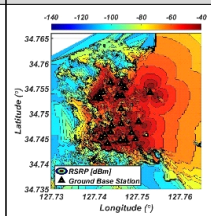
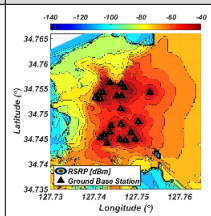
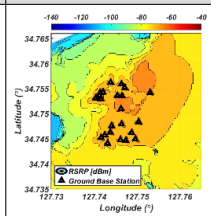
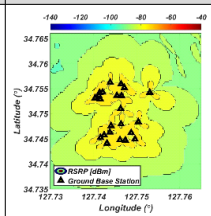
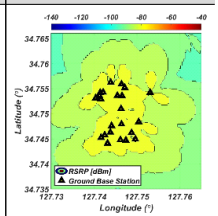
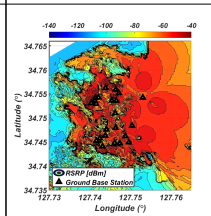
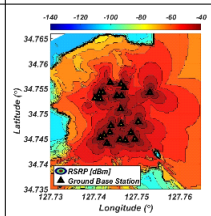
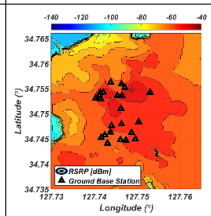
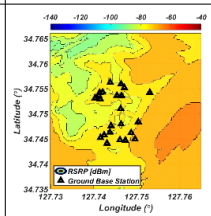
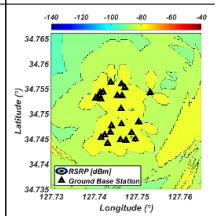
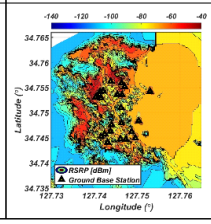
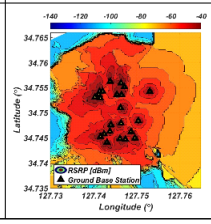
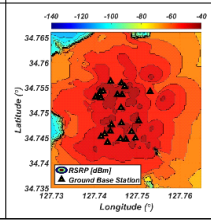
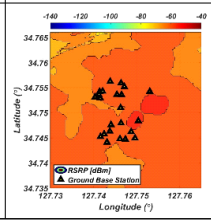
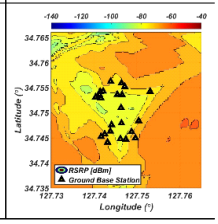
H_{UAV}	1m	30m	100m	300m	500m
Tilt = -10° (Down-Tilt)					
Tilt = 0°					
Tilt = 10° (Up-Tilt)					

그림 7과 그림 10은 각각 시나리오 1과 시나리오 2의 안테나가 상향 기울기(10°)를 가지며, 위도 34.751인 경우의 RSRP를 보여준다. 시나리오 1에서는 수평 및 하향 기울기와 달리 기지국 높이보다 높은 UAV 상공 고도에서 -80dBm 이상의 신호 강도를 나타낸다. 표 3에서 확인할 수 있듯이 300m의 UAV 고도에서는 수평 및 하향 기울기 경우와 비교하여 우수한 신호 강도를 보인다. 또한, 수평, 하향, 상향 기울기 경우의 시나리오 2는 시나리오 1과 유사한 통신품질 경향성을 보인다.

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 지상 기지국과 UAV 간의 지대공 채널 통신을 분석하기 위해 단순화된 3GPP 36.814 기지국 안테나 이득 패턴 모델을 도입하였으며, ATDI 시뮬레이션 도구를 활용하여 UAV의 고도와 안테나 기울기에 따른 통심 품질을 조사하였다.

UAV 고도 및 안테나 기울기의 변화에 따라 통신품질 신호강도 분포가 다르게 나타나며, 낮은 고도에서는 지형적 영향을 받을 수 있었지만 높은 고도에서는 안테나 기울기가 하향 및 수평일 때 상공에서 약한 통신 품질을 나타내었다. 이에 따라 현재 기지국이 지상에 위치하여 신호 레벨 및 통신품질을 충족시키지만, UAV 통신을 위한 상공 커버리지, 음영지역, 신호강도 부족 문제가 발생함을 확인하였다.

특히, 저고도 무인항공기의 최대 비행 고도가 약 6,000m까지이므로 추가적인 기지국 안테나의 하향 기울기가 적용될 경우, UAV 상공 통신에서 커버리지, 음영지역, 통신 품질 부족이 더욱 심화될 것으로 판단되어, 추후 상공 네트워크에 대한 연구가 필요하다.

References

[1] G. Geraci, A. Garcia-Rodriguez, L. Galati Giordano, D. Lopez-Perez, and E. Bjornson, “Understanding UAV cellular communications: From existing networks to massive MIMO,” in *IEEE Access*, pp. 67853-67865, Jun. 2018. (https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2876700)

[2] X. Lin, V. Yajnanarayana, S. D. Muruganathan, S. Gao, H. Asplund, H. Maattanen, M. Bergstrom, S. Euler, and Y.-E. Wang, “The sky is not the limit: LTE for unmanned aerial vehicles,” in *16 IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 4, pp. 204-210, Apr. 2018. (https://doi.org/10.1109/MCOM.2018.1700643)

[3] Q. Wu, Y. Zeng, and R. Zhang, “Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks,” in *IEEE Trans. Wireless Commun,* vol. 17, no. 3, pp. 2109-2121, Mar. 2018. (https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2789293)

[4] Y. Zeng and R. Zhang, “Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization,” in *IEEE Trans. Wireless Commun,* vol. 16, no. 6, pp. 3747-3760, 2017. (https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2688328)

[5] R. Amer, W. Saad, B. Galkin, and N. Marchetti, “Performance analysis of mobile cellular-connected drones under practical antenna configurations,” in *Proc. IEEE ICC*, Dublin, Ireland, Jun. 2020. (https://doi.org/10.1109/ICC40277.2020.9148841)

[6] M. M. U. Chowdhury, S. J. Maeng, E. Bulut, and I. Guvenc, “3-D trajectory optimization in UAV assisted cellular networks considering antenna radiation pattern and backhaul constraint,” in *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 56, no. 5, pp. 3735-3750, 2020. (https://doi.org/10.1109/TAES.2020.2981233)

[7] M. M. U. Chowdhury, F. Erden, and I. Guvenc, “RSS-Based q-learning for indoor UAV navigation,” in *Proc. IEEE Conf. MILCOM*, Norfolk, VA, Nov. 2019. (https://doi.org/10.1109/MILCOM47813.2019.9020894)

[8] A. Rahmati, X. He, I. Guvenc, and H. Dai, “Dynamic mobility-aware interference avoidance for aerial base stations in cognitive radio networks,” in *Proc. IEEE INFOCOM*, Paris, France, Mar. 2019. (https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2019.8737472)

[9] S. Kandeepan, K. Gomez, L. Reynaud, and T. Rasheed, “Aerial-terrestrial communications:

Terrestrial cooperation and energy-efficient transmissions to aerial base stations," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst*, vol. 50, no. 4, pp. 2715-2735, 2014. (https://doi.org/10.1109/TAES.2014.130012)

[10] M. Mozafari, W. Saad, M. Bennis, Y. Nam, and M. Debbah, "A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems," *IEEE Commun. Surv. Tuts.*, vol. 21, no. 3, pp. 2334-2360, 2019. (https://doi.org/ 10.1109/COMST.2019.2902862)

[11] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and A. Jamalipour, "Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments," in *IEEE Global Commun. Conf.*, pp. 2898-2904, 2014. (https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2014.7037248)

[12] D. W. Matolak and R. Sun, "Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems: The over-freshwater setting," *ICNS Conf.*, pp. K1-1-K1-9, 2014. (https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2530306)

[13] A. Al-Hourani, S. Chandrasekharan, G. Kaandorp, W. Glenn, A. Jamalipour, and S. Kandeepan, "Coverage and rate analysis of aerial base stations," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst*, vol. 52, no. 6, pp. 3077-3081, 2016. (https://doi.org/10.1109/TAES.2016.160356)

[14] K. Gomez, A. Hourani, L. Goratti, R. Riggio, S. Kandeepan, and I. Bucaille, "Capacity evaluation of aerial LTE base-stations for public safety communications," in *Eur. Conf. Netw. and Commun.*, pp. 133-138, 2015. (https://doi.org/ 10.1109/EuCNC.2015.7194055)

[15] R. Sun and D. W. Matolak, "Air to ground channel characterization for unmanned aircraft systems part II: Hilly and mountainous settings," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 3, pp. 1913-1925, 2017. (https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2585504)

[16] Z. Qiu, X. Chu, C. Calvo-Ramirez, C. Briso, and X. Yin, "Low altitude UAV air-to-ground channel measurement and modeling in semiurban environments," *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, pp. 1-11, 2017. (https://doi.org/10.1155/2017/1587412)

[17] M. Simunek, P. Pechac, and F. P. Fontan, "Excess loss model for low elevation links in urban areas for UAVs," *Radio Eng.*, vol. 20, no. 3, Sep. 2011.

[18] Q. Feng, J. McGeehan, E. K. Tameh, and A. R. Nix, "Path loss models for air-to-ground radio channels in urban environments," in *IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 6, 2006. (https://doi.org/10.1109/VETECS.2006.1683399)

[19] L. Zeng, X. Cheng, C. X. Wang, and X. Yin, "A 3D geometry-based stochastic channel model for UAV-MIMO channels," in *IEEE Wireless Commun. and Netw. Conf.*, pp. 1-5, 2017. (https://doi.org/10.1109/WCNC.2017.7925794)

[20] W. G. Newhall and J. H. Reed, "A geometric air-to-ground radio channel model," *MILCOM Proc.*, vol. 1, pp. 632-636, 2022. (https://doi.org/10.1109/MILCOM.2002.1180518)

[21] Y. S. Meng and Y. H. Lee, "Measurements and characterizations of air-to-ground channel over sea surface at c-band with low airborne altitudes," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 4, pp. 1943-1948, 2011. (https://doi.org/ 10.1109/TVT.2011.2136364)

[22] Korea Communication Agency(KCA) *Electromagnetic Wave Information Map*, https://emf.kca.kr/eh_medgm40_001.do

[23] Korea Communication Agency(KCA), *Frequency Comprehensive Information System*, https://spectrummap.kr/index.do

[24] A. Goldsmith. *Wireless Communications*, New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2005.

[25] 3GPP, Technical Specification (TS) 36.777. 2018.

[26] 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.

[27] N. Ha, J. An, and W. Shin, "New key features of UAV-enabled cellular networks: UAV channel modeling and trajectory optimization," *J. KICS*, pp. 1493-1507, Sep. 2020. (https://doi.org/ 10.7840/kics.2020.45.9.1493)

[28] *Tektronika, "RSRP and RSRQ,"* https://wiki.teltonika-networks.com/

[29] *ATDI's HTZ Communications Tool*, https://atdi.com/products-and-solutions/htz-communications/

[30] 3GPP 36.814 "*Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects.*"

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 홍 (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 : ㈜포스코이앤씨 대리
2001년 3월~2010년 2월 : 한국전파진흥협회 부장
2010년 3월~현재 : 미래전파공학연구소(IFRE) 소장

<관심분야> 전파공학, 스펙트럼엔지니어링, 전자파인체영향(EMF)

[ORCID:0000-0003-3640-9062]

김 현 수 (Hyun-Su Kim)

2000년 2월 : 동국대학교 인도철학과 졸업
2014년 8월 : 한국항공대학교 항공운항관리학과 석사
2018년 2월 : 한국항공대학교 항공운항관리과 박사수료

<관심분야> UAM, 항공통신, 항행시설