

UTM 통신을 위한 3차원 상공 LTE 품질 측정 및 분석

강 군 석*, 김 희 옥°, 문 권 한*, 김 대 호*

3D Aerial LTE Quality Measurement and Analysis for UTM Communication

Kunseok Kang*, Hee Wook Kim°, Gwon-han Mun*, Daeho Kim*

요 약

다양한 분야에서 드론의 용도와 활용성이 증가하면서 저고도 무인비행장치 교통관리체계 (UTM) 구축의 필요성이 제기되고 있다. UTM 통신으로 기존 LTE 상용망을 이용하는 경우 지상 사용자 대비 차이점은 드론이 비행하는 고도가 상대적으로 높다는 점으로, LTE 통신시스템은 지상에서 최적의 성능을 제공하기 위한 셀 구성이기 때문에 높은 고도에서의 성능은 보장하지 않는다. 따라서 기존 LTE 인프라를 활용하는 경우에는 무인 비행체의 경로에 따라 모든 구역에서 통신 서비스가 가능한지 판단할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 영월 드론전용비행시험장에서 LTE 망의 상공 통신 품질 측정을 수행한 결과를 제시하고 UTM 통신으로 활용성에 대해 분석하였다.

Key Words : UTM communication, Drone communication, LTE signal quality, Aerial Map, Quality Measurement

ABSTRACT

As the use and utility of drones increases in various fields, the need to establish a Unmanned Aircraft System Traffic Management (UTM) in low altitude is being raised. In the case of UTM communication using LTE network, the difference compared to ground users is that the altitude at which the drone flies is relatively high. Because the LTE communication system has a cell configuration to provide optimal performance on the ground, performance at high altitude is not guaranteed. Therefore, when using the existing LTE infrastructure, it should be possible to determine whether communication services are possible in all areas according to the path of the unmanned aerial vehicle. In this paper, we present the results of measuring the airspace communication quality of the LTE network at the Yeongwol drone flight test site and analyze the usability for UTM communication.

I. 서 론

드론을 포함한 무인이동체의 활용성이 증가함에 따

라 저고도 (150m 이하) G공역에서 임의의 시간에 안전한 비행이 가능하도록 저고도 교통관리체계 구축의 필요성이 제기되고 있다. 한국전자통신연구원에서는

※ 본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 무인비행체 안전지원기술개발사업 (21USTR-B127901-05)의 일부로 수행되었습니다.

• First Author : Electronics and Telecommunications Research Institute, kangks@etri.re.kr, 정희원

° Corresponding Author : Electronics and Telecommunications Research Institute, prince304@etri.re.kr, 정희원

* Electronics and Telecommunications Research Institute, gh.mun@etri.re.kr; daeho@etri.re.kr, 정희원

논문번호 : 202109-223-B-RN, Received September 2, 2021; Revised October 12, 2021; Accepted October 19, 2021

국토부의 지원으로 2020년부터 “저고도 무인비행장치 교통관리 (Unmanned Aircraft System Traffic Management, UTM) 인프라 설계 및 구축” 과제를 통해 UTM 통신 인프라 구축에 대한 연구를 진행하고 있다.

LTE 통신은 서비스 영역, 전송 속도, 지연시간 측면에서 UTM의 비가시권 (beyond line of sight) 통신 요구사항을 충족시킬 수 있어 UTM 통신을 위한 수단으로 주목 받고 있으며^{[1][2]}, 상용 LTE망의 비가시권 영역에서 통신 지원 가능성을 분석하기 위해 Qualcomm에서 측정을 수행하였으며, 다운링크 신호 품질 분석 결과 현재의 LTE망을 수정 없이 무인이동체 통신 지원이 가능하다는 결론을 내린 바 있다³⁾. 또한 참고문헌 [4][5]에서는 시뮬레이션 및 측정을 통해 LTE 통신을 사용하는 드론 통신에서 업링크와 다운링크 모두 간섭으로 인한 제약이 가장 큰 것으로 결론 내고 있다.

본 논문에서는 영월 드론전용비행시험장에서 드론을 이용하여 지상 고도 30m 부터 240m까지 LTE 망의 상공 통신 품질 측정을 수행한 결과를 제시하고 UTM 통신으로 활용성에 대한 분석을 수행하였다.

II. 본 론

2.1 LTE 품질 측정 개요

2.1.1 LTE 품질 측정 모듈

LTE 품질 측정 모듈 (LTE Quality Measurement Module, LQMM)은 드론에 장착하여 실시간 LTE 통신 품질을 측정 할 수 있는 모듈로, LTE 신호 품질 측정 값과 위도, 경도, 고도 등의 위치 정보 등을 1초 간격으로 모듈에 장착된 메모리에 저장하거나 지정된 서버로 전달한다. 그림 1에 측정용 드론에 장착된



그림 1. LQMM 장착 측정용 드론
Fig. 1. LQMM mounted on measurement drone

LQMM을 나타내었다.

LQMM은 MNC (Mobile Network Code) 06 통신사와 MNC 08 통신사 측정이 가능하며, 측정 수집 데이터로는 LTE 품질 관련하여 RSRP (Reference Signal Received Power), RSSI (Received Signal Strength Indicator), RSRQ (Reference Signal Received Quality), SINR (Signal to Interference Noise Ratio)이 있고, 기지국 정보인 PCI (Physical Cell ID) 그리고 위도, 경도, 고도의 위치 정보가 있다.

2.1.2 신호 품질 측정

영월 드론전용비행시험장에서 LTE 신호 품질 측정을 수행한 절차 및 내용은 아래 내용 및 그림 2와 같다.

- 측정 지표 고도 : 30m~240m (30m 고도 단위)
- 측정면 길이 : 1,000m×1,000m

측정에 사용된 드론의 제공 및 비행 측정은 유콘시스템(주)에서 수행하였으며, 드론의 비행시간을 고려하여 전체 측정면을 500m×500m의 4개면으로 나누어 측정하였으며, 각각의 면에서 지형 및 주변 환경 (주거지 등)을 고려하여 측정면 형태를 일부 변경하여 진행하였다.

측정 지역의 LTE 기지국 배치 정보는 전파누리 사이트 (www.sepectrummap.kr)에서 해당지역 반경 2km 이내의 기지국을 검색하여 그림 3과 그림 4에 나타내었으며, MNC 06의 경우 해당 영역에서 60개의 기지국이 MNC 08의 경우 총 58개의 기지국이 검색되었다.

그림 3과 그림 4에서 드론의 이동 경로는 그림 2에 나타내었듯이 가로 세로 1km 영역을 4개 영역으로 분할하여 측정을 수행한 결과이며, 그림에서는 고도 240m 측정에서 이동 경로를 나타내었다.

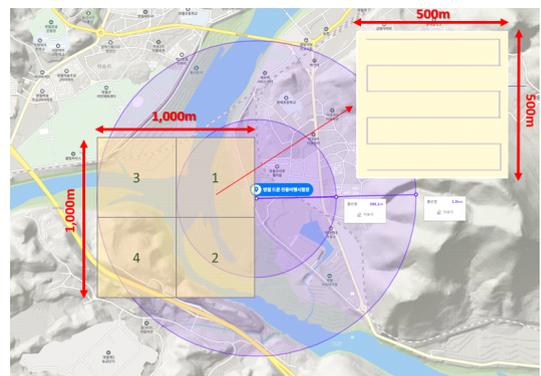


그림 2. LTE 품질 측정 지역
Fig. 2. LTE quality measurement area

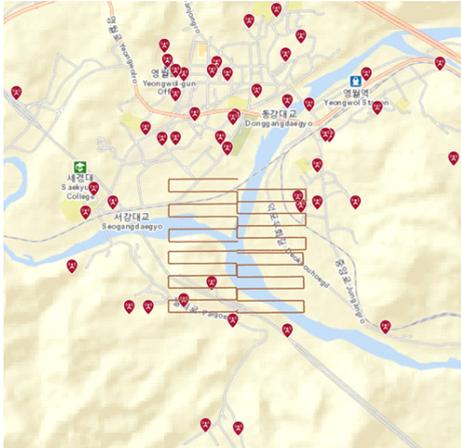


그림 3. LTE 기지국 배치 및 드론 경로 (MNC 06)
Fig. 3. LTE base station deployment and drone route (MNC 06)

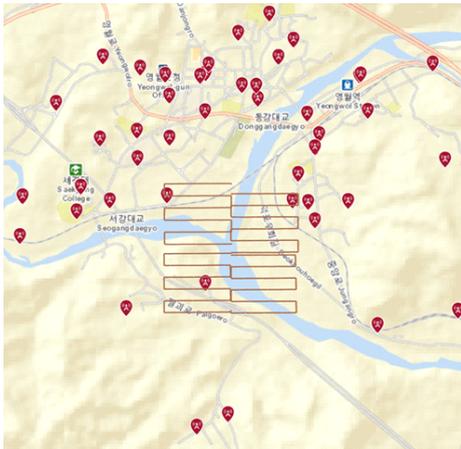


그림 4. LTE 기지국 배치 및 드론 경로 (MNC 08)
Fig. 4. LTE base station deployment and drone route (MNC 08)

2.2 LQMM 측정 결과

2.2.1 측정 결과 요약

06의 측정 결과 요약은 아래와 같다.

- 전체 측정 수 : 18,431
- 측정 기지국 PCI 수 : 29
- 핸드오버 횟수 : 886회
- 다수 접속 기지국 PCI (측정 수): 501 (7,909회), 480 (2,990회), 145 (1,161회)

MNC 08의 측정 결과 요약은 아래와 같다.

- 전체 측정 수 : 18,438
- 측정 기지국 PCI 수 : 17

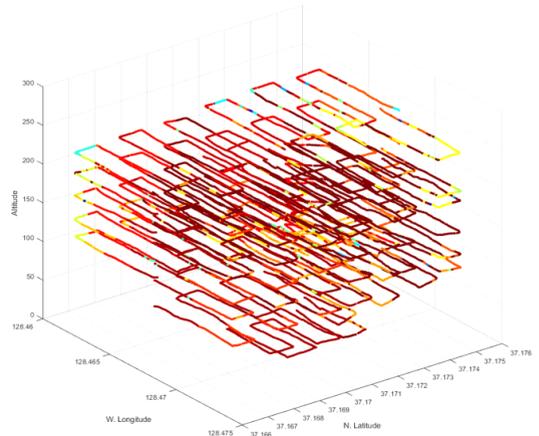


그림 5. 기지국의 PCI 정보 (MNC 06)
Fig. 5. Base Station PCI Information (MNC 06)

- 핸드오버 횟수 : 454회
- 다수 접속 기지국 PCI (측정 수): 501 (4,594회), 308 (4,572회), 306 (3,955회)

동일한 영역과 시간에 측정한 결과 MNC 06의 접속 기지국 수가 MNC 08의 접속 기지국 수에 비해 많이 측정되었고 이에 따라 핸드오버의 횟수 또한 더 많이 발생하였음을 알 수 있다.

각각의 MNC에 따른 접속 기지국 정보는 그림 5와 그림 7에 측정된 PCI 정보를 색깔별로 나타내었다. 그리고 그림 6과 그림 8에는 각각의 MNC별로 고도별 분당 핸드오버율을 나타내었다.

측정 SINR의 전체 평균 값은 -0.78dB 이고 표준 편차는 3.4dB 로 측정되었다. 측정 고도별 SINR의 평균 값과 하위 5분위 값을 그림 10에 나타내었고, 그림 11에는 고도별 측정 값의 누적분포함수(CDF, cumulative distribution function)를 나타내었다.

핸드오버율에서 30m 고도 결과는 측정 면적이 작

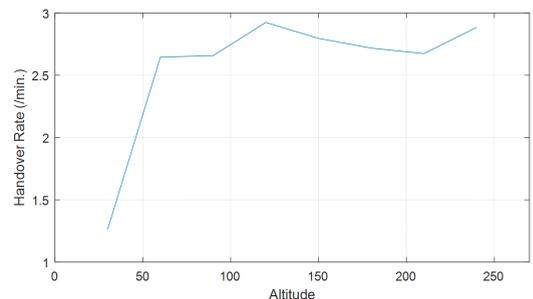


그림 6. 고도에 따른 핸드오버율 (MNC 06)
Fig. 6. Handover rate by altitude (MNC 06)

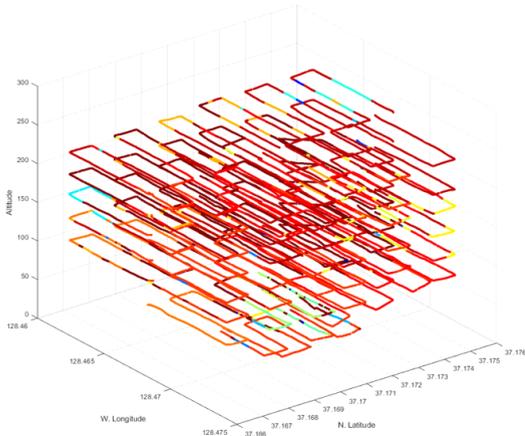


그림 7. 기지국의 PCI 정보 (MNC 08)
Fig. 7. Base Station PCI Information (MNC 08)

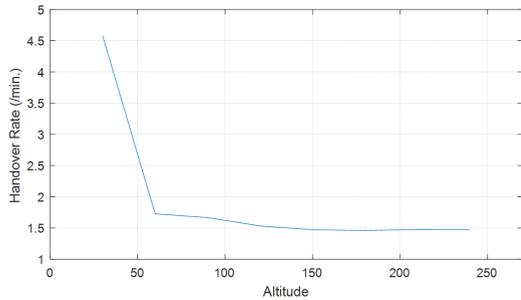


그림 8. 고도에 따른 핸드오버율 (MNC 08)
Fig. 8. Handover rate by altitude (MNC 08)

아 샘플이 작고 MNC 06의 경우 측정 장소 바로 인근에 기지국이 위치해 핸드오버율이 낮게 나타난 것으로 분석되며, MNC 08의 경우 측정 장소 인근 기지국들의 신호레벨이 큰 차이가 없어 잦은 핸드오버가 발생한 것으로 보인다. 60m 이상의 고도에서는 MNC 08의 핸드오버율이 조금 더 낮게 나타남을 확인할 수 있다. 고도별 핸드오버율의 경우 측정 장소 인근의 기지국 배치 및 기지국의 서비스 영역 등에 의해 영향을 받는 것으로 보인다.

상공의 드론의 경우 다수의 기지국으로부터 가지거리 (LOS, line-of-sight)가 존재하고 각 기지국의 섹터 구성, 기지국 안테나의 패턴에서 측엽 (Side lobe)의 영향 등으로 드론이 멀리 위치한 기지국에서 서비스 되기도 하는 등 멀리 위치한 기지국에 의한 간섭 또한 무시할 수 없다⁶⁾. 따라서 그림 5와 그림 7에서 드론에서 가까운 기지국에서 다른 기지국으로 핸드오버되는 경우가 빈번히 발생하고 있음을 알 수 있다.

마지막으로 기지국 배치와 이동 경로에 따른 본 논

문의 측정 결과에 대한 분석 또한 의미가 있을 것으로 보이나, 관련 분석은 이동통신사의 기지국 세부정보 (섹터 구성, 안테나 패턴, 송신 전력 등) 제공 등의 협조 없이는 어려우므로 본 논문에서는 고려하지 않았다.

2.2.2 SINR 측정 결과

SINR의 경우 3GPP 스펙에 정의된 항목은 아니며 단말 제조사마다 자기 구현되기 때문에 MNC 06 모델에서만 제공된다.

그림 9에 MNC 06 통신사의 SINR 측정 결과를 나타내었다.

측정된 SINR의 전체 평균 값은 -0.78dB이고 표준편차는 3.4dB로 측정되었다. 측정 고도별 SINR의 평균 값과 하위 5분위 값을 그림 10에 나타내었고, 그림 11에는 고도별 측정 값의 CDF를 나타내었다. 그림 10의 결과에서 고도가 높아지면서 SINR 측정 값이 점차 낮아짐을 확인할 수 있다. 이는 LTE 망이 지

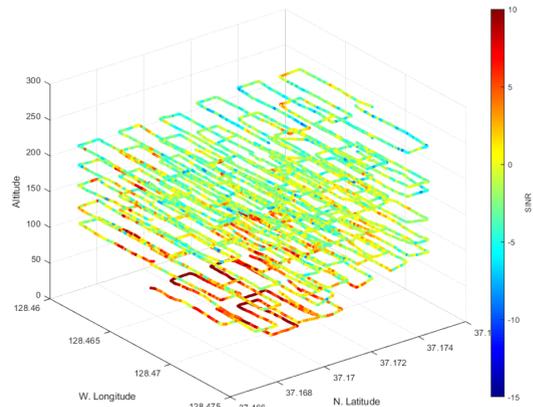


그림 9. SINR 측정 결과 (MNC 06)
Fig. 9. SINR measurement result (MNC 06)

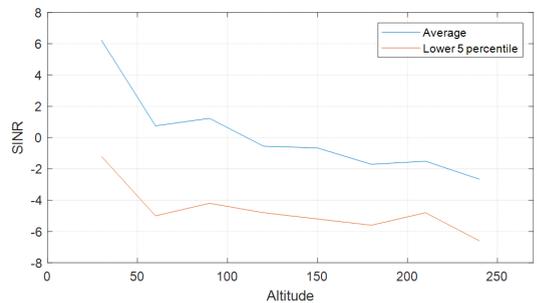


그림 10. 고도에 따른 SINR 평균 및 하위 5분위 값 (MNC 06)
Fig. 10. Average and lower 5 percentile SINR values by altitude (MNC 06)

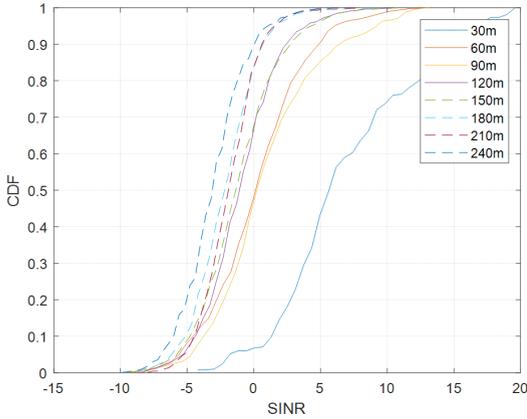


그림 11. 측정 SINR 값의 CDF (MNC 06)
Fig. 11. CDF of the measured SINR value (MNC 06)

상에서 최적의 성능을 제공하기 위한 셀 구성이기 때문에 나타난 현상으로 보이며, 측정 값이 고도에 따라서 단조 감소하지 않는 이유는 LTE 기지국의 섹터 구성 및 안테나 틸팅 각도와 패턴 등의 영향으로 보인다. 기지국의 섹터 구성에 따라 간섭의 영향이 달라지고 특히 안테나의 틸팅 각도와 안테나 패턴에 의해 고도별 신호 세기에 영향을 끼치는 안테나의 주엽(Main lobe)과 측엽 영역이 서로 다르게 중첩되므로 측엽의 고점에 해당하는 고도에서 증가하는 등 고도별로 단조 감소하지 않고 변화가 발생하는 것으로 보인다.

그림 10에서 하위 5분위 값은 240m 고도에서 약 -6.3dB 값을 보이며, LTE의 요구 SINR 값을 고려한다면⁷⁾ UTM 통신 지원에 문제가 없을 것으로 판단된다. 이러한 점은 그림 11의 측정 SINR의 CDF 분포에서도 확인 할 수 있다.

2.2.3 RSRP 측정 결과

RSRP는 단말에 수신되는 Reference Signal의 Power로 핸드오버와 Cell Reselection의 기준 값 등으로 활용된다. 그림 12에 MNC 06 통신사의 RSRP 측정 결과를 나타내었다.

측정된 RSRP의 전체 평균 값은 -78.41dB이고 표준편차는 4.48dB로 측정되었다. 측정 고도별 RSRP의 평균 값과 하위 5분위 값을 그림 13에 나타내었고, 그림 14에는 고도별 측정 값의 CDF를 나타내었다.

그림 15에는 MNC 08 통신사의 RSRP 측정 결과를 나타내었다.

측정 RSRP의 전체 평균 값은 -84.43dB이고 표준편차는 3.33dB로 측정되었으며, MNC 06 통신사에

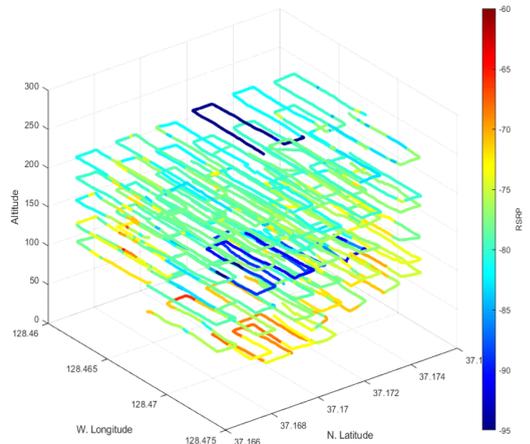


그림 12. RSRP 측정 결과 (MNC 06)
Fig. 12. RSRP measurement result (MNC 06)

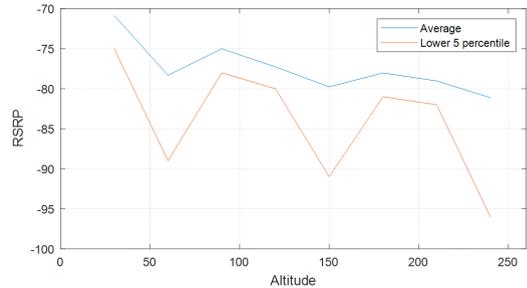


그림 13. 고도에 따른 RSRP 평균 및 하위 5분위 값 (MNC 06)
Fig. 13. Average and lower 5 percentile RSRP values by altitude (MNC 06)

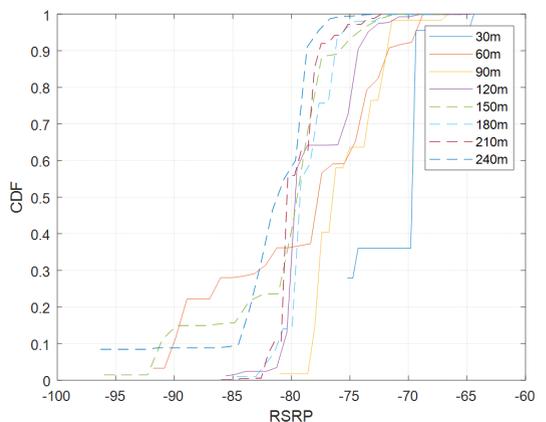


그림 14. 측정 RSRP 값의 CDF (MNC 06)
Fig. 14. CDF of the measured RSRP value (MNC 06)

비해 평균 값은 낮고 표준편차는 작게 나타났다. 측정 고도별 RSRP의 평균 값과 하위 5분위 값을 그림 16

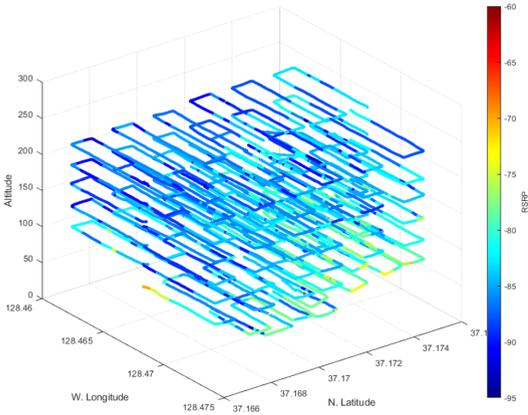


그림 15. RSRP 측정 결과 (MNC 08)
Fig. 15. RSRP measurement result (MNC 08)

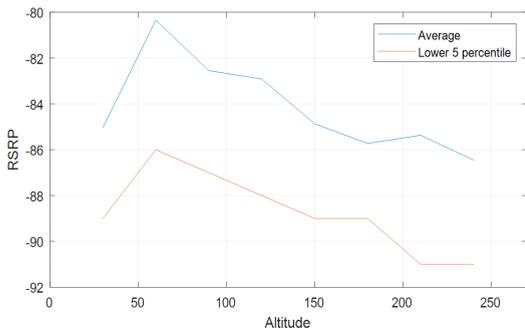


그림 16. 고도에 따른 RSRP 평균 및 하위 5분위 값 (MNC 08)
Fig. 16. Average and lower 5 percentile RSRP values by altitude (MNC 08)

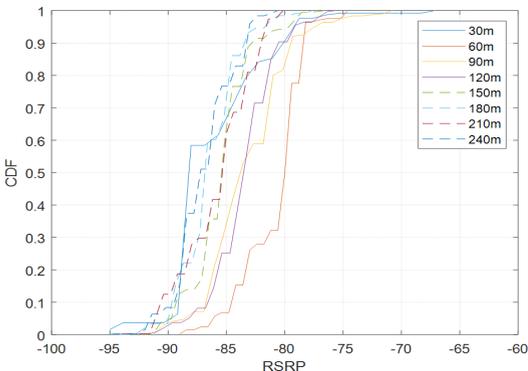


그림 17. 측정 RSRP 값의 CDF (MNC 08)
Fig. 17. CDF of the measured RSRP value (MNC 08)

에 나타내었고, 그림 17에는 고도별 측정 값의 CDF를 나타내었다.

평균 값은 MNC 06이 더 높게 나타나지만 고도별 RSRP 측정 값에서 240m 고도의 하위 5분위 값에서

는 MNC 08의 측정 값이 더 높게 나타난다.

전체적으로 고도가 높아지면서 RSRP 측정 값이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 하위 5분위 값은 240m 고도에서 MNC 06의 경우 약 -96dB, MNC 08의 경우 약 -91dB의 측정 값을 보이며, LTE의 성능지표 표준⁸⁾의 신호 품질 Fair 상태의 범위 (-90 ~ -100dB)를 고려한다면 두 통신사 모두 240m 고도까지 UTM 통신 지원에 문제가 없을 것으로 판단된다.

2.2.4 RSRQ 측정 결과

RSRQ는 단말에 수신되는 Power 대비 Reference Signal Power의 비로 신호 세기와 함께 간섭 등을 측정기에 포함시키기 때문에, RSRP와 더불어 핸드오버 결정 지표 등으로 활용된다. 그림 18에 MNC 06 통신사의 RSRQ 측정 결과를 나타내었다.

측정 RSRQ의 전체 평균 값은 -13.46dB이고 표준편차는 2.22dB로 측정되었다. 측정 고도별 RSRQ

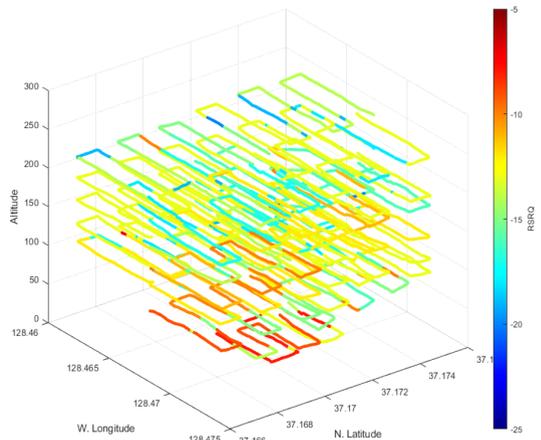


그림 18. RSRQ 측정 결과 (MNC 06)
Fig. 18. RSRQ measurement result (MNC 06)

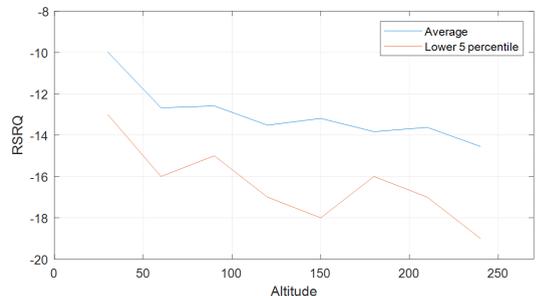


그림 19. 고도에 따른 RSRQ 평균 및 하위 5분위 값 (MNC 06)
Fig. 19. Average and lower 5 percentile RSRQ values by altitude (MNC 06)

의 평균 값과 하위 5분위 값을 그림 19에 나타내었고, 그림 20에는 고도별 측정 값의 CDF를 나타내었다.

그림 21에는 MNC 08 통신사의 RSRQ 측정 결과를 나타내었다.

측정 RSRQ의 전체 평균 값은 -13.0dB로 표준편차는 2.31dB로 측정되었으며, MNC 06 통신사와 비교에서 큰 차이가 나타나지 않았다. 측정 고도별 RSRQ의 평균 값과 하위 5분위 값을 그림 22에 나타내었고, 그림 23에는 고도별 측정 값의 CDF를 나타내었다.

평균 값은 MNC 08이 약간 더 높게 나타나고 고도별 RSRQ 측정 값에서도 240m 고도의 하위 5분위 값에서는 MNC 08이 더 높게 나타난다. 고도가 높아지면서 RSRQ 측정 값이 낮아지는 경향을 확인 할 수 있다. 하위 5분위 값은 240m 고도에서 MNC 06의 경우 약 -18.8dB, MNC 08의 경우 약 -17.0dB의 측

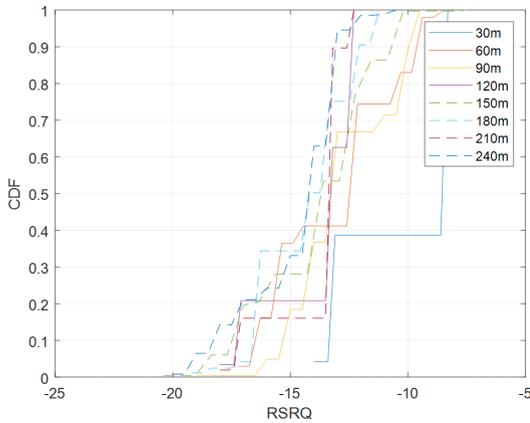


그림 20. 측정 RSRQ 값의 CDF (MNC 06)
Fig. 20. CDF of the measured RSRQ value (MNC 06)

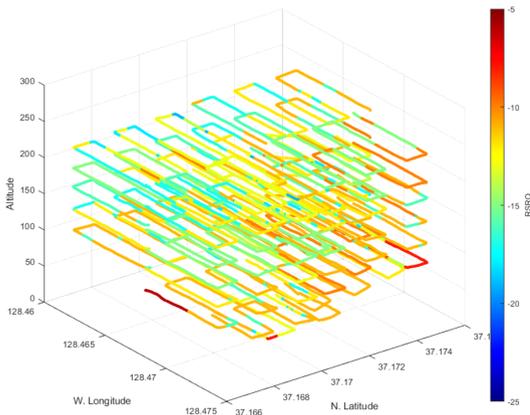


그림 21. RSRQ 측정 결과 (MNC 08)
Fig. 21. RSRQ measurement result (MNC 08)

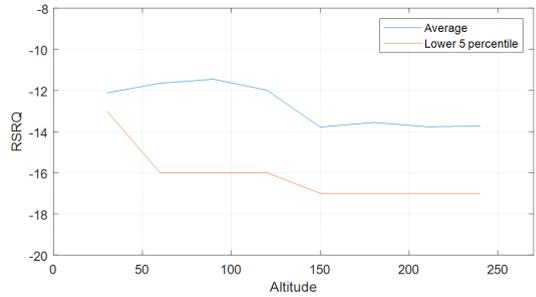


그림 22. 고도에 따른 RSRQ 평균 및 하위 5분위 값 (MNC 08)
Fig. 22. Average and lower 5 percentile RSRQ values by altitude (MNC 08)

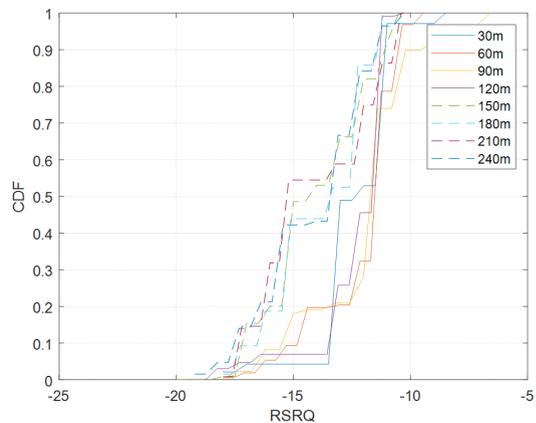


그림 23. 측정 RSRQ 값의 CDF (MNC 08)
Fig. 23. CDF of the measured RSRQ value (MNC 08)

정 값을 보이며, LTE의 성능지표 표준¹⁾의 RSRQ 신호 품질 Fair and Poor 상태의 범위 (-12~-17dB)를 고려한다면 MNC 06의 경우 UTM 통신 지역에서 일부 Outage가 발생할 수도 있을 것으로 보이나, 두 통신사의 CDF 분포를 보면 그 빈도는 매우 낮아 지속적인지 않을 것으로 보인다.

2.2.5 RSSI 측정 결과

RSSI는 단말에 수신되는 모든 Power의 총 크기로 신호 세기에 인접한 채널의 간섭, 열 잡음을 포함한 값으로 수신된 신호 강도의 지표라고 해석할 수 있다. 그림 24에 MNC 06 통신사의 RSSI 측정 결과를 나타내었다.

측정 RSSI의 전체 평균 값은 -46.99dB로 표준편차는 3.35dB로 측정되었다. 측정 고도별 RSSI의 평균 값과 하위 5분위 값을 그림 25에 나타내었고, 그림 26에는 고도별 측정 값의 CDF를 나타내었다.

그림 27에는 MNC 08 통신사의 RSSI 측정 결과를

나타내었다.

측정 RSSI의 전체 평균 값은 -51.44dB이고 표준편

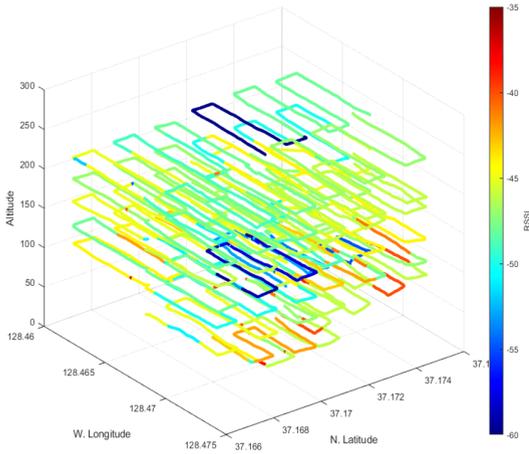


그림 24. RSSI 측정 결과 (MNC 06)
Fig. 24. RSSI measurement result (MNC 06)

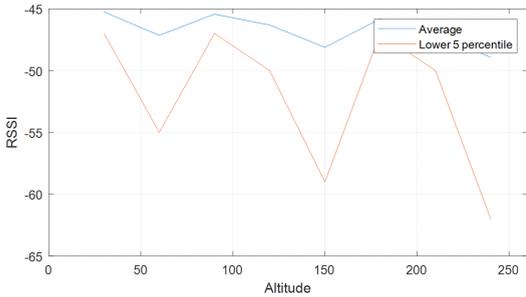


그림 25. 고도에 따른 RSSI 평균 및 하위 5분위 값 (MNC 06)
Fig. 25. Average and lower 5 percentile RSSI values by altitude (MNC 06)

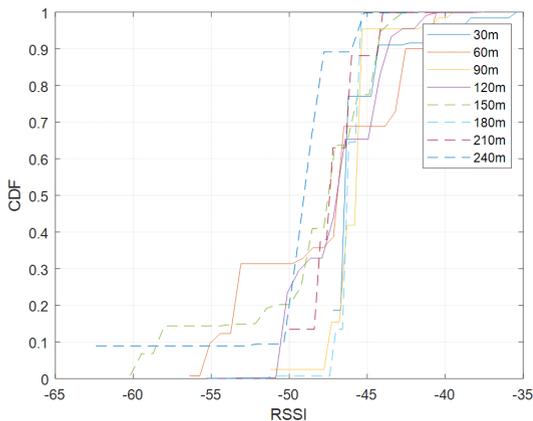


그림 26. 측정 RSSI 값의 CDF (MNC 06)
Fig. 26. CDF of the measured RSSI value (MNC 06)

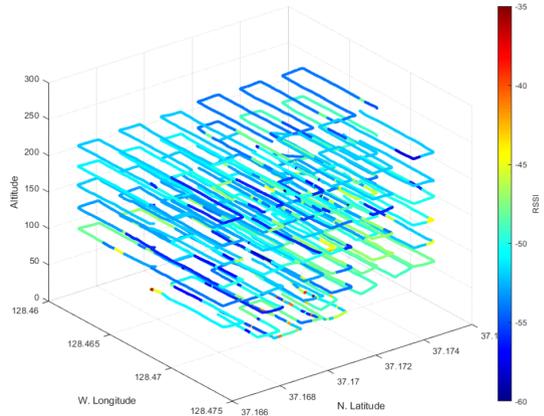


그림 27. RSSI 측정 결과 (MNC 08)
Fig. 27. RSSI measurement result (MNC 08)

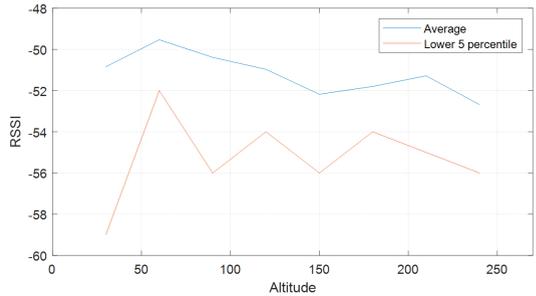


그림 28. 고도에 따른 RSSI 평균 및 하위 5분위 값 (MNC 08)
Fig. 28. Average and lower 5 percentile RSSI values by altitude (MNC 08)

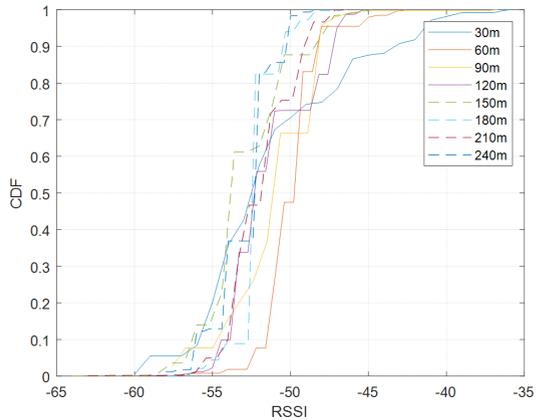


그림 29. 측정 RSSI 값의 CDF (MNC 08)
Fig. 29. CDF of the measured RSSI value (MNC 08)

차는 2.46dB로 측정되었으며, MNC 06 통신사에 비해 평균 값은 낮고 표준편차는 작게 나타났다. 측정 고도별 RSRP의 평균 값과 하위 5분위 값을 그림 28에 나타내었고, 그림 29에는 고도별 측정 값의 CDF

를 나타내었다.

전체적으로 고도가 높아지면서 RSSI 측정 값이 낮아지는 경향을 확인 할 수 있다. 하위 5분위 값은 240m 고도에서 MNC 06의 경우 약 -62dB, MNC 08의 경우 약 -56dB의 측정 값을 보이며, MNC 08의 경우 저고도인 30m에서 가장 낮은 값을 보인다. RSSI 측정 값으로 판단할 때 두 통신사 모두 240m 고도까지 UTM 통신 지원에 문제가 없을 것으로 보인다.

2.2.6 LTE망의 UTM 통신 지원

UTM 지원을 위해 LTE망을 통해 교환되는 데이터에는 공역 접근, 날씨 경고, 운용 불륨과 같은 시간 민감형 데이터와 Remote ID, Geofencing, 비행 승인과 같은 시간 민감형 데이터로 구성될 수 있으며, 이러한 정보를 전송하기 위해 요구되는 전송속도는 최대 35kbps를 초과하지 않는다⁹⁾. 상기 요구 전송 속도는 20MHz LTE Release 8기반의 LTE망에서도 가장 낮은 MCS 모드에서 동작이 가능하다¹⁰⁾. 이에 따라 앞서 분석된 SINR, RSRP, RSRQ, RSSI 신호 품질을 고려했을 때 상기 전송속도를 현재 구축되어 있는 LTE망을 통해 상공에서 지원 가능할 것으로 예상되며, 전송 속도 관점에서 LTE망을 통해 UTM 통신 서비스를 지원하는데 문제가 없을 것으로 보인다. 그러나 시간 민감형 UTM 서비스 지원을 위해서는 전송 속도 뿐만 아니라 전송 지연 또한 고려되어야 할 것이다.

작은 핸드오버는 서비스 지연 시간에 좋지 않은 영향을 줄 수 있기 때문에, 상공 지원을 위한 기지국 안테나 설치, 드론 단말을 위한 빔포밍 기술 등 상공 드론에 최적화된 셀 구성을 위한 방안이 필요할 것이다. 이러한 전송 지연 관점에서 LTE망의 UTM 통신 지원 가능성에 대한 분석과 함께, 상공에서의 신호세기 품질과 핸드오버 등 LTE망 성능을 향상시키기 위한 방안에 대한 연구는 본 연구에 이어 향후 진행 예정이다.

III. 결 론

본 논문에서는 영월 드론전용비행시험장 인근에서 30m부터 240m 고도까지 UTM 통신을 위한 LTE 신호 품질 측정 결과를 분석하고, LTE 망을 사용 시 각 품질 측정 지표별로 UTM 통신 지원에 문제가 없음을 제시하였다. 일부 측정 고도 및 측정 값에서 역전 현상이 나타나지만, 이는 LTE 기지국의 섹터 구성 및 안테나 틸팅 각도와 패턴 등의 영향으로 고도 별 신호 세기에 영향을 미치는 안테나 특성이 다르게 중첩되어 나타나는 현상으로 보인다. 전반적으로 고고도 영

역으로 갈수록 신호 품질이 떨어지는 현상이 나타남을 확인하였다. LTE 신호 품질의 경우 간섭량 등 신호 품질에 영향을 미치는 요소들이 항상 변화하고, 인근 기지국 배치, 도심, 부도심 등 환경에 따라 달라지므로 전체적인 통계적 특성 분석 내용이 중요할 것으로 판단된다. 따라서 논문에서는 제시한 영역 이외의 도심 환경 등 추가적인 측정 시험을 통해 LTE 망을 이용하는 UTM 통신 지원 가능성을 분석할 예정이다.

References

- [1] X. Lin, et al., "The sky is not the limit: LTE for unmanned aerial vehicles," in *IEEE Commun. Mag.*, Available online at <https://arxiv.org/abs/1707.07534>.
- [2] S. Zhang, Y. Zeng, and R. Zhang, "Cellular-enabled UAV communication: Trajectory optimization under connectivity constraint," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, May 2018, Available online at <https://arxiv.org/abs/1710.11619>.
- [3] LTE Unmanned Aircraft Systems; Trial Report, *Qualcomm Technologies, Inc.*: SanDiego, CA, USA, 2017.
- [4] K. Kang, T. Hong, H. W. Kim, and D. Kim, "UTM communication signal quality and coverage analysis in LTE network," *The Korean Soc. Aeronautical & Space Sci. Conf.*, pp. 859-860, Nov. 2020.
- [5] H. C. Nguyen, R. Amorim, J. Wigard, I. Z. Kovcs, T. B. Srensen, and P. Mogensen, "How to ensure reliable connectivity for aerial vehicles over cellular networks," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 12304-12317, Feb. 2018.
- [6] A. Colpaert, E. Vinogradov, and S. Pollin, "Aerial coverage analysis of cellular systems at LTE and mmwave frequencies using 3D city models," *Sensors*, vol. 18, no. 12, p. 4311, Dec. 2018.
- [7] L. Ding, F. Tong, Z. Chen, and Z. Liu, "A novel MCS selection criterion for VOIP in LTE," *7th Int. Conf. Wireless Commun., Netw. and Mob. Comput.*, Wuhan, China, Sep. 2011.
- [8] G. Putra, E. Budiman, Y. Malewa, D. Cahyadi, M. Taruk, and U. Hairah, "4G LTE

Experience: Reference signal received power, noise ratio and quality,” *3rd EIconCIT*, Apr. 2021.

- [9] GSMA, “*LTE Aerial Profile v1.00*,” Nov. 2020.
- [10] Abdulaziz M. Ghaleb, et al., “Throughput performance insights of LTE Release 8: Malaysia’s perspective,” *IWCMC*, Sardinia, Italy, Jul. 2013.

문 권 한 (Gwon-han Mun)



2013년 2월 : KAIST 전기및전자공학과 졸업
 2015년 2월 : KAIST 전기및전자공학과 석사
 2015년 2월~현재 : 한국전자통신연구원 연구원

<관심분야> 신호처리, 통신공학, 머신러닝
 [ORCID:0000-0001-8879-1908]

강 군 석 (Kunseok Kang)



1997년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업
 1999년 2월 : 경북대학교 전자공학과 석사
 1999년 3월~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> 이동통신, 무인기통신, 위성통신
 [ORCID:0000-0002-3021-7951]

김 대 호 (Daeho Kim)



1989년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업
 1991년 2월 : 경북대학교 전자공학과 석사
 2006년 2월 : 충남대학교 정보통신공학과 박사
 1991년 3월~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> 이동통신, 무인이동체 제어용/임무용통신
 [ORCID:0000-0001-7159-2881]

김 희 욱 (Hee Wook Kim)



2001년 8월 : 고려대학교 전기전자전파공학과 졸업
 2004년 2월 : KAIST 전기및전자공학과 석사
 2004년 3월~현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> 이동통신, 무인기통신, 위성통신
 [ORCID:0000-0002-6705-3444]