

발 간 등 록 번 호

11-1721137-100020-01

RRA-2025-RT-101

도심 항공교통(UAM) 전파자원 이용기술 동향 연구

2025. 12. 10



국립전파연구원

National Radio Research Agency

한국항공대학교 산학협력단



제 출 문

본 보고서를 「도심항공교통(UAM) 전과자원 이용기술 동향 연구」 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2025. 12. 10.

연구책임자 : 정영호 (한국항공대학교)

연구보조원 : 한승규 (한국항공대학교)

이승민 (한국항공대학교)

요 약 문

1. 과 제 명 : 도심항공교통(UAM) 전파자원 이용기술 동향 연구

2. 연구기간 : 2025. 3. 14 ~ 2025. 12. 10

3. 연구책임자 : 한국항공대학교 정영호 교수

4. 계획 대 진도

가. 월별 추진내용

세부내용	연구자	월별 추진일정										비 고
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
UAM CNSi 후보기술, 주파수 이용동향 조사 분석												
- UAM 상용화 관련 주요국 추진동향 조사 분석	한승규 이승민											
- 기존 항공용 CNSi 기술현황 및 주파수 이용동향 조사	이승민											
- 주요국 ConOps, 기술문서 분석을 통한 UAM 성숙도별 CNSi 후보기술 분석	정영호											
UAM CNSi 주파수 소요량 분석												
- 주요 UAM 신규 CNSi 기술별 기존 항공 CNSi 기술과의 간섭영향, 공유조건 등 조사분석	정영호 한승규											

-주요국 초기 UAM 상용화 시나리오에 따른 신규 주파수 소요량 분석	정영호										
- UAM 발전 단계별 주파수 수요량 변화 분석	정영호 한승규										
보고서 작성	정영호 한승규										
분기별 수행진도(%)		10	30		30		30				

나. 세부 과제별 추진사항

1) UAM CNSi 후보기술, 주파수 이용동향 조사 분석

- 기존 항공용 CNSi 기술현황 및 주파수 이용동향 분석 완료
- 주요국 UAM 운용개념서 (ConOps)에서 고려하고 있는 성숙 단계별 공역구조/ ATM-UTM과의 정보 교환 구조/ 활용하는 CNSi 수단 분석 완료
- K-UAM 운영개념서 v1.5 개정 내용 분석 완료

2) UAM CNSi 주파수 소요량 분석

- ITU-R의 주파수 소요량 산출 방법, LTE-R 등 UAM 교통관제와 유사성이 있는 시스템에 대한 주파수 소요량 분석 기법 등 자료 수집 및 분석 완료
- UAM 트래픽 특성, 셀 환경 등을 고려한 주파수 소요량 분석 방법 제시
- UAM 발전 단계별 통신 서비스의 종류, 요구사항, 전송률, 운항 빈도 등을 반영하여 주파수 소요량 분석 완료

5. 연구 결과

- 1) UAM 성숙도 레벨별 CNSi 후보기술, 주파수이용 관련 국내외 동향 조사 분석 결과
- 2) UAM 주파수 소요량 방법론
- 3) UAM 상용화 시나리오에 따른 발전 단계별 주파수 소요량 분석 결과

6. 기대효과

- 1) UAM 발전 시나리오별 요구되는 신규 주파수 수요 예측 자료를 확보하여 관련 정책 수립의 기초자료로 활용 가능
- 2) 안전한 UAM 서비스 제공을 위한 기술분석, 적정 주파수 및 소요량 산출, 기술기준 제정에 활용
- 3) 국내 UAM 관련 연구자, 산업계 종사자 등에게 UAM CNSi 기술 및 주파수 관련 이슈에 대한 정보 제공

7. 기자재 사용 내역

시설.장비명	규 격	수량	용도	보유 현황	확보 방안	비 고
개인용 컴퓨터	-	3	문서작성 등	보유		
모의실험 PC	-	4	주파수소요량 분석	보유		
MATLAB	-	4	주파수소요량 분석	보유		
전파감쇄 분석 시뮬레이터	TIREM	1	통신 커버리지 분석	보유		
전파감쇄 분석 시뮬레이터	Wireless Insight	1	통신 커버리지 분석	보유		
레이저프린터	컬러	2	자료출력	보유		

8. 기타사항

해당사항 없음

최종보고서 초록

국문 초록

본 연구는 미래 교통수단으로 부상하고 있는 도심항공교통(UAM)의 안전한 운항을 지원하기 위한 CNSi(통신, 항법, 감시, 정보) 기술 동향을 조사하고, 상용화 발전 단계에 따른 신규 주파수 소요량을 분석하였다. 미국(FAA), 유럽(EASA) 및 한국(K-UAM)의 운용개념(ConOps)을 비교 분석한 결과, 초기 단계에는 기존 유인 항공기의 CNS 체계를 활용하되 점진적으로 UAM 전용 기술로 발전할 것으로 전망된다. 특히 한국은 초기부터 5G/LTE 상공망을 통신 및 감시 보조 수단으로 적극 고려하고 있다는 점에서 차별성을 보인다.

기술별로 분석한 결과, 항법 및 감시 분야는 기존 항공용 주파수 대역을 활용하거나 비전/라이다 등 비전과 센서를 융합하는 방식으로 발전하여 신규 주파수 수요가 제한적인 것으로 나타났다. 반면, 통신 분야는 기체 제어 및 정보 교환을 위해 필수적인 자원으로, 운항 밀도와 원격 조종 도입 여부에 따라 주파수 수요가 크게 변동될 것으로 예측되었다. 본 연구에서는 철도통신(LTE-R) 및 ITU-R의 주파수 소요량 산출 방법론을 정해진 회랑을 비행하는 UAM 환경에 맞춰 수정 적용하여 통신 주파수 소요량을 산출하였다.

주파수 소요량 분석 결과, 제한된 기체 수와 조종사가 탑승하는 초기 상용화 단계에서는 상·하향링크를 합하여 약 8.71 MHz의 주파수가 소요될 것으로 예측되었다. 그러나 고밀도 운항이 이루어지고 원격 조종을 위한 고화질 영상 전송이 필수적인 성장기 및 성숙기 단계에서는 소요량이 약 57.61 MHz로 급격히 증가할 것으로 분석되었다. 이는 향후 UAM 산업의 확장과 안전한 무인 비행 지원을 위해 선제적인 주파수 확보 및 공급 정책 수립이 필수적임을 시사한다.

영문 초록

This study investigates the trends in CNSi (Communication, Navigation, Surveillance, and Information) technologies to support the safe operation of Urban Air Mobility (UAM), an emerging future mode of transportation, and analyzes the new frequency requirements according to the stages of commercialization. A comparative analysis of the Concepts of Operations (ConOps) from the US (FAA), Europe (EASA), and Korea (K-UAM) reveals that while existing aviation CNS systems will be utilized in the initial phase, there will be a gradual evolution toward dedicated UAM technologies. Notably, Korea distinguishes itself by actively considering the early adoption of 5G/LTE aerial networks as auxiliary means for communication and surveillance.

The analysis by technology sector indicates that new frequency demands for navigation and surveillance are limited, as these fields are expected to utilize existing aviation frequency bands or integrate non-radio sensors such as vision and LiDAR. Conversely, communication is identified as a critical resource for vehicle control and information exchange, with frequency demand expected to fluctuate significantly depending on flight density and the introduction of remote piloting. This study calculated communication frequency requirements by modifying and applying the methodologies of Railway Communication (LTE-R) and ITU-R to fit the UAM environment, where vehicles operate within fixed corridors.

The results predict that in the initial commercialization phase, characterized by a limited number of vehicles and

onboard pilots, approximately 8.71 MHz of frequency (combined uplink and downlink) will be required. However, in the growth and mature phases, which involve high-density operations and necessitate high-definition video transmission for remote control, the requirement is analyzed to surge to approximately 57.61 MHz. These findings suggest that establishing a proactive spectrum acquisition and supply policy is essential to support the future expansion of the UAM industry and ensure safe unmanned operations.

색 인 어	한글	도심항공교통, 통신·항법·감시·정보, 주파수 소요량, 상공통신망
	영문	Urban Air Mobility (UAM), CNSi (Communication, Navigation, Surveillance, information), Frequency Requirement, Aerial Network

SUMMARY

본 연구는 미래의 핵심 교통수단으로 주목받는 도심항공교통(UAM)의 안전한 운항을 보장하기 위해 필수적인 CNSi(통신, 항법, 감시, 정보) 기술의 국내외 동향을 면밀히 분석하고, 이를 바탕으로 상용화 발전 단계별로 요구되는 신규 주파수 소요량을 산출하였다. UAM 산업은 현재 초기 단계에 머물러 있어 대부분의 국가가 기존 유인 항공기의 CNS 체계와 시계비행(VFR) 절차를 준용하는 방식을 고려하고 있으나, 향후 고밀도 운항과 자율 비행을 위해서는 UAM 전용 CNSi 체계로의 전환과 이에 따른 신규 주파수 자원 확보가 필수적이다.

주요국의 운용개념(ConOps)을 비교 분석한 결과, 미국 FAA 는 기존 항공 규제를 바탕으로 점진적인 발전을 도모하는 전략을 취하고 있으며, 유럽 EASA 는 무인기 교통관리 체계인 ‘U-space’를 도입하여 통합적인 공역 관리를 추진하고 있다. 이에 반해 한국의 K-UAM 운용개념은 초기 실증 단계부터 5G 및 LTE 상용 이동통신망을 항공 통신과 감시의 보조 수단으로 적극 활용한다는 점에서 차별화된 전략을 제시하고 있으며, 세계 최초로 UAM 전용 5G 상공망 구축을 추진하는 등 선제적인 인프라 확보에 주력하고 있다.

기술별 주파수 분석에서 항법 및 감시 분야는 기존 항공용 주파수 대역을 활용하거나 비전(Vision), 라이다(LiDAR) 등 비전과 센서를 융합하는 기술이 주류를 이루고 있어 신규 주파수 수요는 제한적인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구는 기체 제어와 관제 정보 교환의 핵심인 ‘통신’ 기술에 집중하여 주파수 소요량을 분석하였다. 분석 방법론으로는 정해진 회랑(Corridor)을 따라 이동하며 관제 통제를 받는 UAM의 운용 특성이 철도와 유사하다는 점에 착안하여, ITU-R M.1390 권고안을 기반으로 한 철도통신(LTE-R) 주파수 산출 모델을 UAM 환경에 맞게 수정하여 적용하였다.

분석 결과, 조종사가 탑승하고 운항 빈도가 낮은 초기 상용화 단계에서는 필수적인 안전 운항 데이터(Vital)와 비필수 데이터(Non-vital)를 포함하여 상·하향링크 합계 약 8.71 MHz의 주파수 대역폭이 소요될 것으로 예측되었다. 그러나 서비스가 고도화되는 성숙기 단계에 이르면 상황은 급변할 것으로 전망된다. 이 시기에는 기체 밀집도가 증가하고 원격 조종 및 자율 비행이 도입됨에 따라, 안전 확보를 위한 고화질 영상(Full HD 급)의 실시간 전송이 필수화되기 때문이다. 이에 따라 주파수 효율이 초기 대비 2 배 향상된다고 가정하더라도, 요구되는 주파수 소요량은 약 57.61 MHz로 급격히 증가할 것으로 분석되었다.

결론적으로 본 연구는 UAM의 초기 상용화 단계에서는 현재 공급된 실험국 주파수 등으로 대응이 가능할 수 있으나,

향후 산업의 성장과 완전 자율 비행 시대를 대비하기 위해서는 50MHz 이상의 광대역 주파수 확보가 필수적임을 시사한다. 이는 정부가 기술 발전 속도와 서비스 확장 시나리오에 맞춰 선제적인 주파수 분배 정책과 간섭 보호 기준을 마련해야 함을 보여주는 중요한 근거 자료가 된다.

목 차

표 목 차.....	14
그림 목차.....	16
제 1 장 서 론.....	18
제 2 장 UAM CNSi 후보기술, 주파수 이용동향 조사 분석.....	20
제 1 절 UAM 운용 개념 및 시스템 특징	20
제 2 절 기존 항공용 CNSi 기술현황 및 주파수 이용동향.....	26
1. 개요	26
2. 통신(Communication) 기술	28
3. 감시(Surveillance) 기술	31
4. 항법(Navigation) 기술	33
5. 지역별 특징 비교.....	36
제 3 절 주요국 ConOps, 기술문서 분석을 통한 CNSi 후보기술	37
1. 미국 FAA	37
2. 유럽	42
3. 대한민국.....	47
제 4 절 UAM CNSi 관련 주요국 기술 개발 동향	54
1. 통신	54
2. 항법	57
3. 감시	59
제 3 장 UAM CNSi 주파수 소요량 분석.....	63
제 1 절 UAM 신규 CNSi 기술 별 주파수 소요량 분석 방법.....	63
1. 개요	63

2. ITU-R 주파수 소요량 분석 방법.....	64
3. LTE-R 주파수 소요량 분석 방법 [20]	68
4. UAM 통신 서비스를 위한 주파수 소요량 분석 방법.....	77
제 2 절 UAM 신규 CNSi 기술 별 기존 CNSi 기술과의 간섭조건/ 공유조건	79
1. 개요	79
2. 감시 기술.....	80
3. 통신 기술.....	84
제 3 절 초기 UAM 상용화 시나리오에 따른 신규 주파수 소요량 분석.....	88
제 4 절 UAM 발전 단계별 주파수 수요량 변화 분석	92
제 4 장 결 론.....	94
참고문헌.....	96

표 목 차

표 1. K-UAM ConOps v1.0에 따른 단계별 UAM 운용 특징 [9].....	23
표 2. K-UAM ConOps v1.5에 따른 단계별 UAM 운용 특징 [11].....	24
표 3. 기존항공용 CNS 기술	27
표 4. FAA UAM ConOps v1.0 주요내용	37
표 5. FAA UAM ConOps v2.0의 v1.0 대비 주요 변경내용	38
표 6. FAA UAM ConOps v2.0 [3]에 따른 발전단계별 특징 비교.....	41
표 7. 영국 CAA UAM ConOps 주요 내용	45
표 8. K-UAM 기술로드맵에 따른 발전단계별 주요 특징.....	48
표 9. K-UAM 운용개념서 v1.0에 따른 발전단계별 주요 특징	49
표 10. K-UAM ConOps v1.5에 따른 단계별 UAM 운용 특징 [11]	49
표 11. K-UAM ConOps v1.5의 주요 변경 내용	51
표 12. ADS-B OUT 추가 파라미터	61
표 13. ADS-B 추가 파라미터 최소 성능 규제사항	61
표 14. 주파수 소요량 산출을 위한 ‘환경’과 ‘서비스’ 조합 예시 [17].....	66
표 15. 철도통신 하향링크 서비스 종류 및 특성 [20].....	72
표 16. 철도통신 상향링크 서비스 종류 및 특성 [20].....	72
표 17. 철도통신 하향링크 데이터 트래픽 특성 및 파라미터 [20].....	73
표 18. 철도통신 상향링크 데이터 트래픽 특성 및 파라미터 [20].....	73
표 19. 철도통신 상/하향링크 음성서비스 트래픽 특성 및 파라미터 [20].....	74
표 20. 철도통신 하향링크 영상서비스 트래픽 특성 및 파라미터 [20]	74

표 21. 철도통신 상향링크 영상서비스 트래픽 특성 및 파라미터 [20]	74
표 22. 철도통신 상향링크 트래픽 계산 결과 예시 (2012) [20]	75
표 23. 철도통신 하향링크 트래픽 계산 결과 예시 (2012) [20]	76
표 24. 철도통신 하향링크 트래픽 계산 결과 [20]	76
표 25. 철도통신 상향링크 트래픽 계산 결과 [20]	76
표 26. 주파수 소요량 계산에 사용한 주파수 효율 값 [20]	77
표 27. 철도통합무선망 주파수 소요량 계산결과 [20]	77
표 28. UAM 통신 서비스 종류 및 특성 [21]	90
표 29. UAM 기체 당 상-하향링크 트래픽 [21]	91
표 30. UAM 상-하향링크 트래픽	91
표 31. 초기 UAM 서비스를 위한 주파수 소요량	92
표 32. 발전기 이후 UAM 상-하향링크 트래픽	93
표 33. 발전기 이후 UAM 서비스를 위한 주파수 소요량	93

그림 목차

그림 1. K-UAM ConOps에 따른 UAM 공역 구조 [9]	20
그림 2. FAA ConOps에 따른 UAM 공역 구조 [2].....	21
그림 3. AMU-LED ConOps에 따른 UAM 공역 구조 [4]	22
그림 4. 공항주변 영역에 대한 동적 회랑 구성 개념도 [4]	24
그림 5. UTM 운항 공역에 대한 동적회랑 구성 개념도 [4]	25
그림 6. UAM 수도권 실증 노선과 주요 버티포트 후보지[12]	26
그림 7. 유인항공기 운항단계별 CNS 기술.....	27
그림 8 ATM과 xTM 관계 개념도.....	40
그림 9. U-space 공역구조	43
그림 10. 도심지 실증 노선 변경 안	53
그림 11. UAM 운항을 위한 다양한 통신 수요 [12]	54
그림 12. 상공 통신망 아키텍처 및 인터페이스 예시	55
그림 13. 대한민국 스펙트럼 플랜에 반영된 UAM 전용 주파수 현황.....	56
그림 14. ILS 원리를 활용한 UAM 지상 대체 항법 기술 개념도 [13]	59
그림 15. VOR-DME 원리를 활용한 UAM 지상 대체 항법 기술 개념도 [14]	59
그림 16. ADS-B 기술 개념도.....	60
그림 17. UAM 감시 운용 시스템 전체 구성도 [16]	62
그림 18. 주파수 소요량 산출 과정.....	67
그림 19. 철도통합무선망 주파수 소요량 산출 과정	71
그림 20. K-UAM GC 1 CNSi 체계	80

그림 21. BSS 보호 간섭 시나리오.....	87
그림 22. IMT 보호 간섭 시나리오.....	87

제 1 장 서 론

도심항공모빌리티 (UAM: Urban Air Mobility)에 대한 개념은 UBER에서 2016년 Urban Air Transformation에 관한 기술문서 [1] 를 발표한 후 세계 각국의 기업과 정부의 관심이 증가하여, 최근 수 년간 세계의 다양한 기업, 연구기관과 정부에서 관련 투자와 연구 활동이 활발하게 이루어지고 있다. 미국 FAA, 유럽 등 여러 나라에서 운용개념(ConOps) 문서를 발간하고 있고 [2]-[7], 우리나라에서도 2020년 도심항공모빌리티 연구 로드맵 [8], 2021년 9월 K-UAM 운용개념서 1.0을 발간하고 [9], 2024년까지 2단계에 걸쳐서 K-UAM 그랜드챌린지 (GC) 라는 이름으로 UAM 서비스를 위한 여러 이해당사자가 요소 기술을 실증하는 민관 합동 실증사업을 진행 중이다 [10].

기체, 버티포트, 구역, 교통관제, CNSi (Communication, Navigation, Surveillance, information) 등 각 요소기술이 검증되지 않고, 제도가 확립되지 않은 상황이므로 우리나라를 포함한 대부분의 국가에서는 UAM 초기 단계에서는 기체에 조종사가 탑승하고, 기존 유인항공체계에 따른 통신·항법·감시 (CNS: Communication·Navigation·Surveillance) 수단을 기반으로 한 저밀도 시계비행 서비스를 고려 중이다. 이에 따라 UAM 초기 상용화를 위한 신규 주파수 수요는 많지 않다고 판단될 수 있으나, 미국, 유럽, 우리나라 등 각국의 서로 다른 UAM 서비스 시나리오에 따라 시기의 문제일 뿐 새로운 항공 교통체계인 UAM의 안전 운항을 보장하기 위해서는 기존 항공 CNSi 체계와 다른 UAM 전용 CNSi 체계 개발이 필요하며, 이를 위해서는 신규 주파수 자원 공급이 필요하다.

VHF, ADS-B 등 기존 항공 통신, 감시 자원은 기존 항공 산업에서 용량이 포화되고 있고, 향후 UAM 산업이 확장되어 많은 UAM기체를 수용하려면 UAM 전용 CNS 기술로의 전환이 필요하다. 국내의 경우 항공통신망과

상용이동통신망 인프라가 잘 갖춰져 있기에 대부분의 선도 국가들의 UAM 정책이 eVTOL 항공기 인증에 집중되어 있는 것과 비교하여 K-UAM ConOps에서는 5G 이동통신망을 주된 통신수단으로 고려하고 있으며, 실증 시험을 위한 UAM 전용 주파수를 30MHz 공급하여 세계 최초 UAM 전용 5G 상공망 구축 중에 있다.

UAM 발전 성숙도에 따른 CNS 세부 기술별 요구되는 주파수 소요량과 기존 공중 및 지상 CNS 체계와의 상호 간섭 문제 등에 대한 체계적인 국내외 연구 결과가 전무하므로 이에 대한 분석결과 도출을 통해 국가 주파수 정책 수립의 기초 자료를 확보하는 것이 필요하다. 특히 미국/유럽 주요국이 초기 UAM 상용화 단계에서는 기존 항공 CNS 기술 그대로 활용하는 것을 고려하고 있으나 우리나라는 초기 단계부터 5G 통신망을 활용한 통신/감시/항법 기술을 적용하는 것을 고려하고 있어, UAM 분야 선도를 위해 적기에 적절한 양의 주파수 자원 공급을 위한 근거 자료가 선제적으로 확보되어야 하는데, 본 연구를 통해 관련한 초기 연구 결과를 확보하고자 한다.

제 2 장 UAM CNSi 후보기술, 주파수 이용 동향 조사 분석

제1절 UAM 운용 개념 및 시스템 특징

그림 1 ~ 3은 각각 K-UAM 팀코리아 [9], 미국 FAA [2],[3], 유럽 AMU-LED 프로젝트 [4]의 ConOps에 따른 UAM 공역구조이다. 구체적인 공역 분리와 회랑 설정 방법에 있어서는 차이가 있으나 공통적으로 UTM이 사용하는 150m 이하 저고도와 유인기가 운용하는 고고도 공역 사이의 300m ~ 600m 정도의 영역에 무인기가 이동할 수 있는 영역을 회랑 형태로 설정해두고, 해당 영역만을 이용하여 운항하는 시나리오를 고려하고 있다. 이 경우도 이 착륙 과정에서 UTM이 관장하는 class G 공역중 일부를 이용할 수도 있고, 공항 근처의 이착륙장을 이용할 경우 유인기가 운항할 수 있는 class B/C/D 공역을 운항해야 할 경우도 있다.



그림 1. K-UAM ConOps에 따른 UAM 공역 구조 [9]

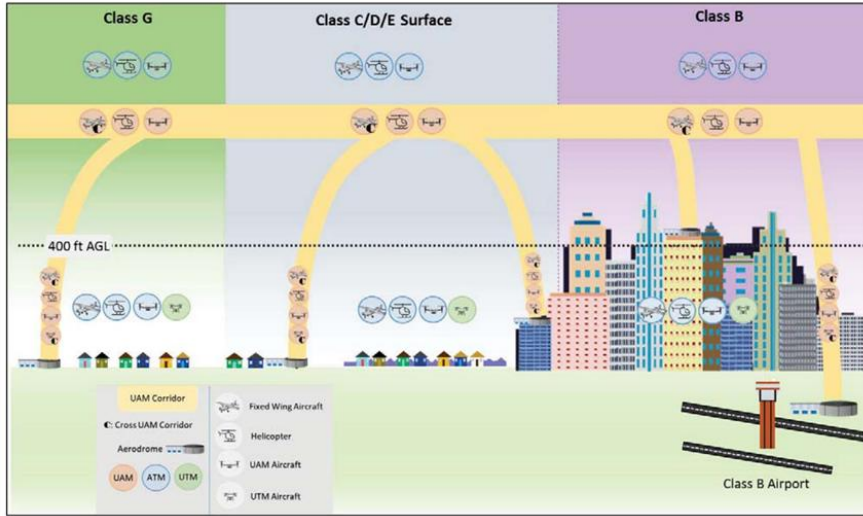


그림 2. FAA ConOps에 따른 UAM 공역 구조 [2]

무인기에 대한 자동 관제 체계인 UTM의 경우에는 유인기 운항 공역에는 원칙적으로 무인기가 진입하지 못하도록 하므로, 유인기 ATC와 실시간 통신이 필요하지 않으나, UAM의 경우에는 UTM과 유인기 관제 공역을 지나갈 필요가 있으므로, UAM 공역을 어떤 방식으로 설정하는지에 따라 UAM 관제 서비스를 제공하는 사업자 뿐만 아니라 UTM 관제 서비스 제공 사업자나 유인기 ATC와의 통신링크 확보가 필요할 수도 있다. 그림1의 K-UAM ConOps에서는 UTM 운항 고도 내에서 소형 UAM 기체는 전용 회랑을 설정하여 운항하는 것을 가정하고 있으므로, 해당 영역을 UTM 비행 금지 영역으로 설정하면 UAM 기체가 직접 UTM 관제 서비스 사업자와 실시간 통신을 할 필요는 없다. 반면 그림2, 3의 FAA와 AMU-LED ConOps에서는 UTM 운항 영역에서 UAM 기체가 운항 가능하므로 해당 영역에서는 UTM 서비스 사업자의 관제에 따르거나, UTM/UAM 사업자 간에 보다 긴밀한 정보 공유와 낮은 지연의 통신링크 확보가 필요하게 된다.

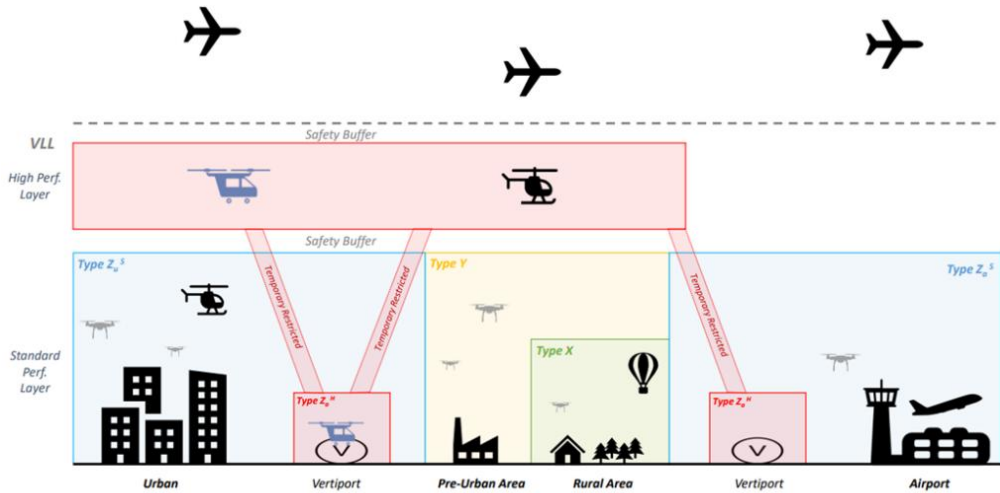


그림 3. AMU-LED ConOps에 따른 UAM 공역 구조 [4]

세 가지 시나리오에서 모두 유인기 관제를 수행하는 ATC와 UAM 기체 사이의 직접 통신링크 확보와 실시간 기체 위치 정보에 대한 감시는 필수적으로 필요하다. 공항 근처 이착륙장으로 이착륙하는 과정에서 관제 공역을 통과할 수도 있고, 이착륙 상황이 아니더라도 비상 상황에서는 회랑을 벗어나 유인기 관제 공역 내로 들어와야 하는 상황이 발생할 수 있다. 이 경우 UAM 기체에 탑승하거나 원격 조종을 수행하는 조종사와 ATC 타워 관제사 사이에서 음성관제 통신을 수행하기 위한 통신링크가 확보되어야 한다. K-UAM ConOps에서는 공항 근처 UAM 이착륙장 주변의 관제 공역 내의 UAM 회랑에 해당하는 공역은 유인기 운항 가능 공역에서 제외하는 것을 고려하고 있다. 이 경우에는 비상 상황이 아닌 정상 이착륙 과정에서는 UAM 기체와 유인기 ATC 타워간의 실시간 통신이 필요하지 않으므로 기존 항공교통관리 (ATM) 및 UAS 교통관리 (UTM) 운용에 미치는 영향 최소화 할 수 있다.

표1은 K-UAM ConOps v1.0에 따른 단계별 UAM 운용 특징을 정리한 것이고, 표2는 K-UAM ConOps v1.5에 따른 단계별 UAM 운용 특징을 정

리한 것이다. 초기에는 그림 2와 같은 고정형 회랑이나 지정구역을 활용하지만 최종적으로는 동적 회랑망을 활용하는 것을 목표로 하고 있다. 동적 회랑망의 개념은 유럽에서 추진중인 AMU-LED 프로젝트의 ConOps에 잘 설명되어 있다. 동적 회랑망이라고 하더라도 완전히 전체 공역을 자유롭게 활용하여 운항하는 것이 아니고 회랑이 점유하는 공역을 유/무인항공기 운항 상황에 따라 가변하여 변경하는 것을 의미한다. 그림 4, 5와 같이 공항 주변 이착륙장과 고고도 회랑 사이의 구간이나 UTM 운영 공역 상의 UAM 기체 이동을 위한 회랑 설정은 항공기 이착륙 방향이 변경되거나, UTM 기체 운영 상황에 따라 변경 가능하고, 이에 대한 정보는 UAM 관제 사업자와 UTM 관제 사업자, ATM 관제소 사이에서 이루어지면 되므로, UAM 기체 또는 조종사와 타 관제 사업자 사이의 직접 통신은 필요하지 않다.

표 1. K-UAM ConOps v1.0에 따른 단계별 UAM 운용 특징 [9]

항목	초기(2025년~)	성장기(2030년~)	성숙기(2035년~)
기장 운용	On Board	Remote 도입	Autonomous 도입
교통관리체계	UAM 교통관리서비스 제공자 역할 단계적 확대, 항공교통관제사 참여 단계적 축소		
교통관리 자동화 수준	자동화 도입	자동화 주도 및 인적 감시	완전자동화 주도
회랑운영방식	고정형 회랑 (Fixed Corridor)	고정형 회랑망 (Fixed Corridor Network)	동적 회랑망 (Dynamic Corridor Network)
항공통신망	상용이동통신(4G·5G), 항공음성통신	상용이동통신(5G·6G), 저궤도위성통신, C2 LINK 등	
항법시스템	정밀위성항법	정밀위성항법+ 영상기반 상대항법	복합상대항법
버티포트 입지 및 형태	수도권 중심 버티포트	수도권 및 광역권 중심 버티포트	전국 확대

표 2. K-UAM ConOps v1.5에 따른 단계별 UAM 운용 특징 [11]

항목	초기	성장기	성숙기
기장 운용	On Board	Remote 도입	Autonomous 도입
교통관리체계	UAM 교통관리서비스 제공자 역할 단계적 확대, 항공교통관제사 참여 단계적 축소		
항공교통체계 통합	UATM↔ATM 간 협조		안전당국 주도 공역 통합관리
교통관리 자동화 수준	자동화 도입	자동화 주도 및 인적 감시	완전자동화 주도
경로·회랑운영방식	지정 구역, 지정 경로 또는 고정형 회랑 (Fixed Corridor) ³⁾	고정형 회랑망 (Fixed Corridor Network)	동적 회랑망 (Dynamic Corridor Network)
항공통신망	필수항공음성통신 보조데이터통신(5G)	필수항공음성통신	보조항공음성통신
		데이터통신(5G·6G), 저궤도위성통신, C2 LINK 등	
항법시스템	관성항법장비 및 정밀위성항법	정밀위성항법+ 영상기반 상대항법	복합상대항법

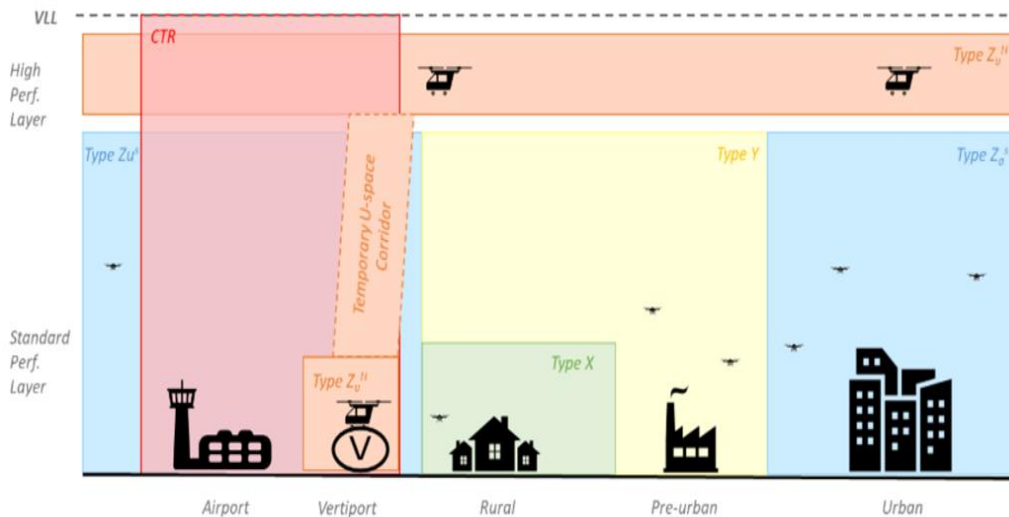


그림 4. 공항주변 영역에 대한 동적 회랑 구성 개념도 [4]

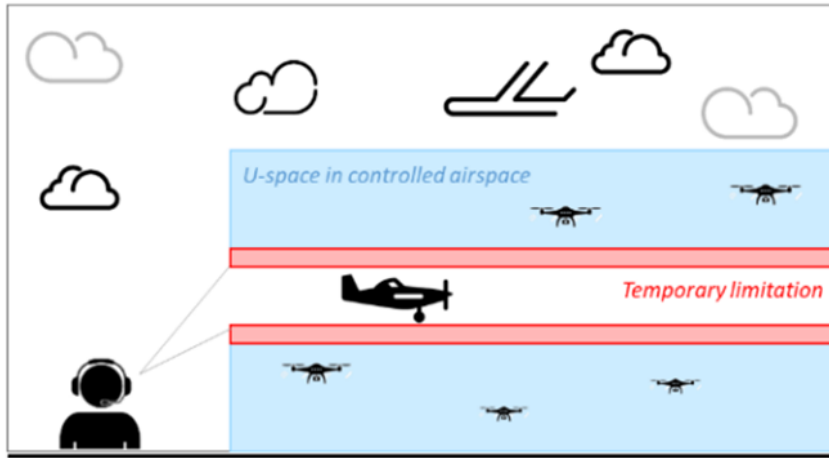


그림 5. UTM 운항 공역에 대한 동적회랑 구성 개념도 [4]

UAM 초기 운용과정에서는 UAM 기체만을 위한 운항 절차 및 법적 제도적 규정이 정해지지 않은 상황이므로 UAM 기체에 탑승한 조종사가 기존 유인항공기의 시계비행, 계기비행 절차에 준하여 기체를 운용해야 할 가능성이 크다. 이를 위해서는 UAM의 이륙-순항-착륙의 운항 전 구간에서 비상 관제를 위한 ATC 타워와의 항공음성통신 링크가 확보되어야 하고, UAM 운항자, 교통관리서비스제공자, 버티포트와 조종사 사이의 양방향 무선통신 수단이 확보되어야 한다. UAM이 운항하는 고도 300 - 600m 회랑 영역과 버티포트 진출입 영역, 버티포트 주변 영역은 기존 유인항공기에 대한 직접적인 교통 관제업무가 제공되는 공항 주위의 B 등급, C 등급 공역과 시계비행 항공기에 대해서는 비행정보만 제공되는 E등급, G등급 공역이 혼재하는 상황이다. 초기 UAM 운영 시나리오에서는 기존 유인 항공기에 대한 영향이 적고, 안전 규제가 덜한 제한된 영역을 활용한 관광, 물류 배송 등 공공서비스나, 제한적인 고정 회랑을 활용한 준 도심 공항 연계형 시범 서비스 등이 이루어질 것으로 예상된다.

우리나라에서도 한강과 아라뱃길 영역을 중심으로 그림 6과 같은 수도권 실증이 추진되고 있다. 해당 영역 주변에는 B등급 공역에 해당하는 김포공

항과 D 등급 공역에 해당하는 서울공항이 있다. 김포공항 주변 영역의 경우 그림에 원으로 표시한 것과 같이 1000ft 아래는 5NM, 5000ft 아래는 10NM 영역이 공항 ATC 타워의 항공교통관제를 받아야 하는 영역이고, 잠실과 수서 주변 영역도 서울공항의 관제권 내에 있다. 따라서 UAM기체에 탑승한 조종사와 ATC 타워 간 수시로 항공음성통신을 이용한 소통이 필요하고, 관제권역이 아닌 영역에서도 비상 통신을 위한 VHF 통신 링크가 전체 운항 구간에서 안정적으로 확보되어야 한다.

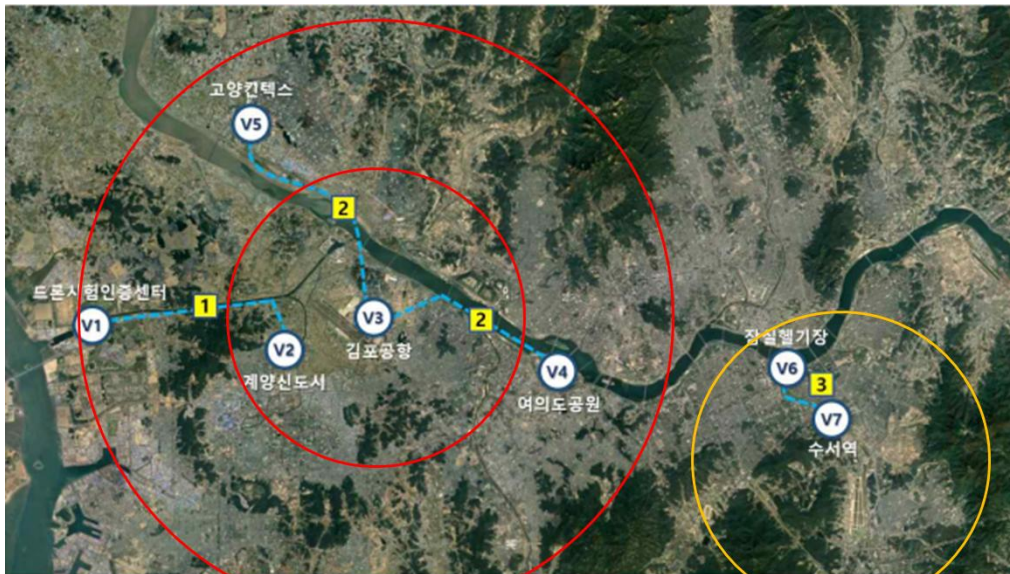


그림 6. UAM 수도권 실증 노선과 주요 버티포트 후보지[12]

제2절 기존 항공용 CNSi 기술현황 및 주파수 이용동향

1. 개요

출발지 공항 게이트를 출발한 항공기는 이륙-항로운항-접근-착륙 과정에서 다양한 통신, 항법, 감시 장비의 도움을 받아 안전한 운항을 할 수 있다. 그림7은 각 운항 과정에서 활용하는 CNS 기술들을 정리하고 있고, 표3

은 각 시스템의 특징을 정리한 것이다. 통신 기술은 관제소, 운항사와 조종사 간에 음성이나 데이터를 서로 주고받는 수단이고, 감시 기술은 지상에서 각 기체의 실시간 위치, 속도 상태 정보를 알아내기 위한 기술, 항법 기술은 기체에 탑승한 조종사가 기체의 위치, 속도, 상태 정보를 알아내기 위한 기술에 해당한다. 각각의 기술의 특징에 대해 정리하면 다음과 같다.



출처: 국토교통부 (<https://news.nate.com/view/20210420n21537> 에서 재인용)

그림 7. 유인항공기 운항단계별 CNS 기술

표 3. 기존항공용 CNS 기술

기술 분류	시스템명	주파수 대역
Communication - Voice	VHF Voice	118-137 MHz
Communication - Voice	UHF Voice	225-400 MHz
Communication - Voice	HF Voice	2-22 MHz

Communication - Data	ACARS	131.55/136.9 MHz VHF
Communication - Data	CPDLC	VHF/Satellite
Surveillance	Primary Radar	1.3-1.35 GHz
Surveillance	Secondary Radar SSR	1030/1090 MHz
Surveillance	ADS-B	1090 MHz/978MHz
Surveillance	TCAS/ACAS	1030/1090 MHz
Surveillance	Multilateration (MLAT)	1090 MHz
Navigation	VOR	108-118 MHz
Navigation	ILS Localizer	108-112 MHz
Navigation	ILS Glide Slope	329-335 MHz
Navigation	DME	960-1215 MHz
Navigation	GPS L1	1575.42 MHz
Navigation	GPS L2	1227.6 MHz

2. 통신(Communication) 기술

가. VHF 음성통신

- 주파수 및 대역폭: 118-137 MHz, 채널당 8.33kHz 또는 25 kHz
- 변조방식: AM(Amplitude Modulation)
- 원리: VHF 대역의 전파는 직선 전파 특성으로 가시선(line-of-sight) 범위 내에서 통신이 가능하며, 안테나 높이와 송신출력에 따라 통달거리가 결정됨
- 특징:

- 121.5MHz 는 국제 비상주파수(International Air Distress)로 지정
- 항공교통관제(ATC)의 주요 통신수단으로 사용
- 지형이나 건물에 의한 차폐 현상으로 통신 제한 발생 가능

나. UHF 음성통신

- 주파수 및 대역폭: 225-400MHz, 채널당 25kHz
- 원리: VHF 와 유사한 직선 전파이나 더 높은 주파수로 인해 더 짧은 통달거리
- 특징:
 - 243.0 MHz 는 군용 비상주파수(Military Air Distress)
 - 주로 군용 항공기에서 사용하며, 민간항공에서는 제한적으로 사용

다. HF 음성통신

- 주파수 및 대역폭: 2-22MHz(실제 사용은 18MHz 까지), SSB 방식으로 2.8kHz 대역폭
- 원리: 전리층 반사를 이용한 장거리 통신으로, 전리층의 전자밀도에 따라 skip distance 가 결정됨
- 특징:
 - 대양 횡단 및 원격지역 통신에 필수적
 - 시간대별(주간/야간) 최적 주파수가 상이하며 전리층 상태에 따라 품질 변동
 - 100W 송신출력으로 대서양 횡단 음성통신 가능

- 대기잡음과 태양활동의 영향을 받아 음성 품질이 VHF 보다 낮음

라. ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System) 데이터통신

- 주파수 및 대역폭: VHF 131.55MHz, 136.975MHz 등, 데이터 전송률 2.4kbps
- 원리: 디지털 데이터링크 시스템으로 항공기와 지상 간 구조화된 메시지 전송
- 전송매체: VHF(가시선 범위), SATCOM(위성통신), HF DL(HF 데이터링크)
- 특징:
 - 1978 년부터 운용 시작된 성숙한 기술
 - 자동 및 수동 메시지 전송 가능
 - 항공사 운항관리(AOC), 행정관리(AAC), 일부 항공교통관제(ATC) 메시지 처리
 - 기상정보, 비행계획 변경, 정비상태 보고 등 운항업무 지원

마. CPDLC (Controller Pilot Data Link Communications) 데이터통신

- 주파수 및 대역폭: VDL2 사용 시 VHF 대역 118-137MHz, 데이터 전송률 31.5kbps
- 원리: 관제사-조종사 간 텍스트 기반 디지털 메시지 교환 시스템
- 특징:

- 음성통신을 보완하는 비긴급 전략적 메시지 전송
- 항공교통관제 허가, 주파수 배정, 정보요청 등 처리
- 음성채널 혼잡도 감소 효과 약 84%
- 평문 전송으로 인한 보안 취약성 문제 존재
- 시간이 중요하지 않은 상황에서만 사용

바. 비상통신

- VHF Guard 121.5MHz: 민간 국제 비상주파수, 모든 관제탑과 항공기가 감시
- UHF Guard 243.0MHz: 군용 비상주파수, 121.5MHz 의 2 차 고조파
- ELT(Emergency Locator Transmitter): 406MHz 디지털 ELT 가 현재 표준이며, 구형 121.5MHz ELT 는 2009 년부터 위성 감시 중단

3. 감시(Surveillance) 기술

가. 1차 감시레이더(Primary Surveillance Radar, PSR)

- 주파수 및 대역폭: 1.3-1.35GHz, 수 MHz 대역폭
- 원리: 송신된 전파가 항공기 표면에서 반사되어 돌아오는 신호를 수신하여 거리와 방위각 측정
- 특징:
 - 트랜스폰더 비장착 항공기도 탐지 가능
 - 높은 송신출력 필요하며 소형 항공기 탐지 한계
 - 기상 조건과 지형에 의한 영향 큼

나. 2차 감시레이더(Secondary Surveillance Radar, SSR)

- 주파수: 질문 1030MHz, 응답 1090MHz
- 원리: 지상 질문기가 항공기 트랜스폰더에 질문신호를 송신하면, 트랜스폰더가 항공기 식별부호와 고도정보를 포함한 응답신호 송신
- 모드별 특징:
 - Mode A: 4 자리 8 진법 식별부호만 송신
 - Mode C: Mode A + 고도정보(100ft 단위)
 - Mode S: Mode C + 데이터링크 기능, 고도정보 25ft 단위
- 장점: PSR 대비 낮은 전력으로 높은 탐지성능, 항공기 식별 및 고도정보 자동 제공

다. ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast)

- 주파수: 1090MHz Extended Squitter
- 원리: GNSS 위치정보 기반으로 항공기가 자신의 위치, 속도, 고도 등을 자동으로 방송
- 특징:
 - 초당 2 회(0.5 초마다) 위치정보 송신
 - ADS-B OUT: 송신전용, ADS-B IN: 수신전용으로 구분
 - GNSS 의존성으로 인한 취약점 존재
 - 높은 정확도와 갱신률로 기존 레이더보다 우수한 감시성능

라. TCAS/ACAS (Traffic Collision Avoidance System/Airborne Collision Avoidance System)

- 주파수: 질문 1030MHz, 응답 1090MHz
- 원리: 항공기 탑재 레이더가 주변 항공기의 트랜스폰더를 질문하여 충돌 위험 판단
- 기능:
 - TA(Traffic Advisory): 교통정보 제공
 - RA(Resolution Advisory): 회피기동 지시
 - 자율적 충돌회피 시스템으로 관제사 개입 없이 작동

마. 다변측량(Multilateration, MLAT)

- 주파수: 1090MHz 수동수신
- 원리: 다수의 지상 수신소에서 항공기 신호 도달 시간차(TDOA)를 측정하여 위치 계산
- 특징:
 - 최소 3 개(2D) 또는 4 개(3D) 수신소 필요
 - 수동적 감시시스템으로 항공기 측 추가 장비 불필요
 - ADS-B 검증 수단으로 활용 가능

4. 항법(Navigation) 기술

가. VOR (VHF Omnidirectional Range)

- 주파수: 108-117.95MHz, 채널간격 50kHz
- 원리: 기준신호(9960Hz FM 부반송파)와 가변신호(30Hz AM 변조)의 위상차로 방위각 결정
- 특징:
 - 30Hz 변조신호로 자북 기준 방위각(Radial) 제공

- 정확도 ± 1 도 이내
- 점진적으로 GNSS 기반 PBN 으로 대체 중이나
MON(Minimum Operational Network) 유지

나. DME (Distance Measuring Equipment)

- 주파수: 항공기 질문 1025-1150MHz, 지상국 응답 960-1215MHz
- 원리: 항공기에서 송신한 펄스쌍이 지상국에서 돌아오는 시간을 측정하여 경사거리 산출
- 특징:
 - 펄스 간격과 주파수로 채널 구분
 - VOR 또는 ILS 와 쌍을 이루어 2 차원 항법 제공
 - HPDME(1000W): 항로용, LPDME(100W): 진입용
 - DME/DME 항법으로 GNSS 백업 역할

다. ILS (Instrument Landing System)

- 구성요소 및 주파수:
 - Localizer: 108.1-111.95MHz (홀수 첫째 자리)
 - Glide Slope: 329.15-335.4MHz
 - Marker Beacon: 75.0MHz
- 원리:
 - Localizer: 90Hz 와 150Hz 변조신호의 DDM(Depth of Difference in Modulation)로 활주로 중심선 유도
 - Glide Slope: 동일한 90Hz/150Hz 원리로 3 도 강하각 제공
- 특징:

- 정밀진입 가능한 유일한 지상기반 시설
- 활주로별 전용 주파수 사용으로 간섭 최소화
- 반사물체에 의한 신호 왜곡 취약성

라. GNSS (Global Navigation Satellite System)

- GPS 주파수:
 - L1: 1575.42MHz (C/A 코드 2.05MHz, P 코드 20.46MHz 대역폭)
 - L2: 1227.6MHz (P 코드 20.46MHz 대역폭)
- 원리: 4 개 이상 위성으로부터의 거리 측정값을 삼각측량 원리로 3 차원 위치 결정
- 특징:
 - CDMA 확산스펙트럼 방식으로 다중 위성신호 동시 수신
 - 전 지구적 커버리지와 높은 정확도
 - 전리층, 대류층 오차 및 위성 궤도/시각 오차 존재

마. SBAS (Satellite-Based Augmentation System)

- 원리: 지상 기준국 네트워크에서 GNSS 오차를 계산하여 정지궤도 위성으로 보정정보 방송
- 시스템별 특징:
 - WAAS: 북미 지역, FAA 운영
 - EGNOS: 유럽 지역, ESA 운영
 - MSAS: 일본 지역
 - KASS: 한국형 위성항법보강시스템, 2023 년 운용 시작
- 성능: 위치 오차 1 미터 이하(1σ), 무결성 감시 6 초 이내

5. 지역별 특징 비교

가. 주파수 할당 및 규제 관련 공통점

- ICAO Annex 10 및 ITU-R 규정에 따른 국제표준 주파수 사용
- VHF 항공교통관제, 1090MHz 감시, GNSS L1/L2 주파수 전 세계 공통
- 비상주파수 121.5MHz, 243MHz 국제표준 적용

나. 감시 기술 관련 주요국 특징

- 미국: ADS-B 의무화 완료, 차세대 감시시스템 운영
- 유럽: Mode S Enhanced Surveillance 의무화, ADS-B 확대
- 한국: ADS-B 표준 도입, 기존 레이더와 통합 운영

다. 항법 기술 관련 주요국 특징

- 미국: WAAS 기반 정밀진입 확대, VOR MON 유지
- 유럽: EGNOS 기반 항법서비스, 기존 ILS 점진적 감축
- 한국: KASS 기반 정밀항법 도입, 기존 항법시설과 병행 운영

라. 통신 기술 관련 주요국 특징

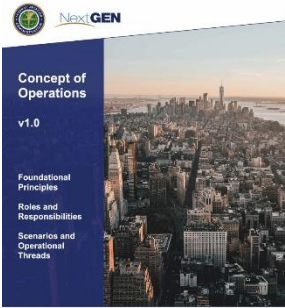
- 미국: NextGen 데이터링크 확대, 음성/데이터 통합
- 유럽: Link 2000+ 프로그램으로 CPDLC 의무화
- 한국: 단계적 데이터링크 도입, 기존 음성통신 유지

제3절 주요국 ConOps, 기술문서 분석을 통한 CNSi 후보 기술

1. 미국 FAA

미국 FAA는 ‘20년 UAM 초기 운용개념을 정의한 UAM ConOps v1.0 [2]을 발표하고, ‘23년 기존 UAM 운용개념을 발전시킨 성장기 및 고밀도 운용개념을 정의한 UAM ConOps v2.0 [3]을 발표하였다. ConOps v1.0의 주요 내용은 표4와 같이 UAM의 단계별 발전과 안전한 운용을 위한 종합적인 지침을 제공하고 있다.

표 4. FAA UAM ConOps v1.0 주요내용

구분	주요 내용	
UAM 운용개념	초기 운용 단계에서의 개념과 이를 지원하는 인프라 및 기술.	
주요 이해관계자	UAM 운용에 참여하는 다양한 이해 관계자의 역할과 책임.	
정보공유 아키텍처	UAM 운용을 위한 정보 공유 및 통신 구조	
운영 시나리오	정상 및 비정상 상황에서의 UAM 운용 시나리오	

UAM ConOps v2.0에서는 UAM ConOps v1.0의 내용에 대한 피드백과 이후 발전된 UAM 운항 개념을 반영하여, UAM 운용 환경의 발전과 주요 요소들을 제시하고 있다. 주요한 변경사항은 ATM, UTM, UATM을 포괄하는 운

용환경(xTM) 전반에서 일관된 용어와 정의를 유지하도록 수정하였고, 기존 ‘커뮤니티 비즈니스 규칙(CBRs: Community Business Rules)’을 확장한 ‘협력 운용 관행(COPs: Cooperative Operating Practices)’ 개념 등을 추가하였다. 이를 포함한 주요 변경사항을 표5에 정리하였다.

표 5. FAA UAM ConOps v2.0의 v1.0 대비 주요 변경내용

구분	주요 변경 사항
운용개념서 전반	• 협력적 운용 절차(COPs) 등의 개념 요소에 대한 세부사항 제공 • 항공교통서비스, 확장형 교통관리 등의 서비스 환경 내 UAM의 관계에 대한 세부 사항 제공 • 전반적인 용어 사용에 대한 조정
운용 환경 전망	• ATS 및 xTM을 포함하도록 서비스 환경 관련 설명에 대한 업데이트 및 확장
정의	• 협력환경에서 사용되는 다양한 용어(UTM, AAM 등)에 대한 정의 포함
UAM 운용의 진화	• 초기 UAM 운항을 지원하기 위해 현재의 규제 프레임워크 사용에 대한 세부 정보 제공 및 업데이트된 용어를 반영
협력적 운용절차	• 기존의 커뮤니티 비즈니스 규칙(CBR)을 대체하는 협력적 운용절차에 초점을 맞춘 내용추가
연방 서비스 네트워크	• UAM 운항을 지원하는 연방 서비스 네트워크에 대한 설명 업데이트
UAM 회랑	• 시간이 지남에 따라 발전하는 UAM 회랑에 대한 요소의 추가 및 세부사항 제공
개념적 아키텍처	• UAM/PSU와 관련된 데이터 교환, 버티포트 등의 아키텍처에 대한 추가적인 세부사항 제공
UAM 시나리오	• 운용개념의 주요 변화 내용을 반영하도록 시나리오 업데이트

FAA ConOps의 특징은 CNS관련된 특정 기술을 제시하지 않고, UAM 운용 개념의 발전, 협력적 운용 환경, CNSi 관련 향후 UAM의 발전 방향 및 목표 등을 추상적으로 제시하고 있다는 점이다. 특히 초기 UAM 운용은 유인항공기를 위한 기존 운항절차 및 CNS장비를 활용하는 것을 고려하고 있다는 점이 특징이다. 주요 특징을 요약하면 아래와 같다.

- **(UAM 운용 개념)** 무인항공시스템(UAS)교통 관리(UTM) 및 고고도 항공(Class E)교통 관리(ETM) 등과 유사한 요소를 포함하며, UAM 운용을 단계적으로 제시
 - (초기 UAM 운용) 신형 항공기 활용하여 현재의 규제 및 운항 환경(VFR, IFR 등)을 준수하여 운항
 - (운항 빈도 증가) 협력적 기술 및 기법을 활용한 UAM 회랑(Corridors)이 도입되고, 이에 맞춰 규제 프레임워크도 점진적으로 발전
 - (운항 규칙 및 인프라가 추가적으로 발전) 정의된 협력 운용 구역(CA: Cooperative Areas)에서 원격 조종 및 자율 항공기가 높은 운항 빈도로 안전하게 운용될 수 있도록 함
- **(협력적 운용환경)** AAM/UAM 운용환경의 배치와 미래 협력 운용 환경(xTM)과의 관계도를 제시
 - 국가항공시스템(NAS) 내에서 항공교통서비스(Air Traffic Services)와 xTM 은 미래의 수요 증가 문제를 해결하고, 기술 발전에 따라 변화하는 기회를 극대화하기 위한 확장성과 유연성 확보 방안으로 활용될 예정

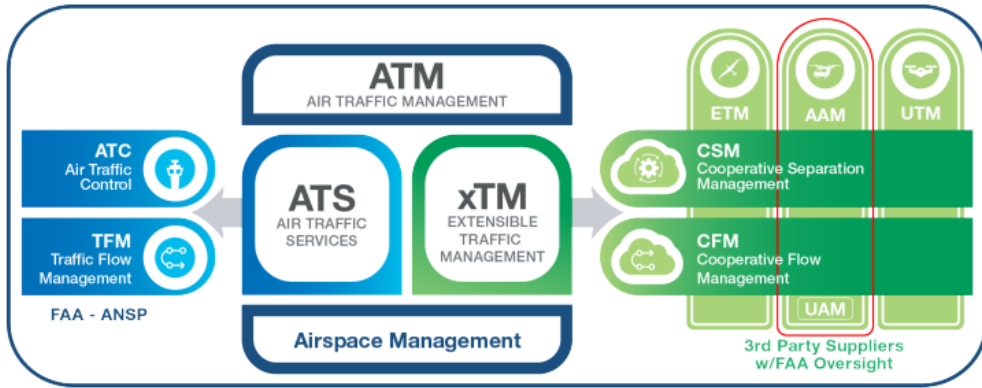


그림 8 ATM과 xTM 관계 개념도

- UAM 운용을 초기, 중기, 성숙기로 구분하여 단계별 주요 특징을 제시
 - (초기 운용) 초기 UAM 운용은 기존 항공교통서비스(ATS: Air Traffic Services) 규정 및 규칙(VFR, IFR 등)을 준수
 - (중기 운용) 운항 빈도가 증가함에 따라, UAM 운용은 규제 개정, 협력 운용 관행(COPs), 인프라 및 자동화 기술 발전을 통해 점진적으로 개발
 - (성숙기 운용) 운항 수요를 충족하기 위해 UAM 운용 방식이 더욱 발전

위와 같은 내용에 대해 UAM 발전 단계별 FAA ConOps의 특징은 표6에 정리되어 있다. 전반적으로 Crawl-Walk-Run 의 단계적 접근을 고려하고 있고, 초기에는 기존 항공 CNS 기술과 절차 만으로 운용하는 것을 고려하고 있어 초기 상용서비스를 위한 추가적인 CNS 주파수 자원 수요는 크지 않을 것으로 예상된다.

표 6. FAA UAM ConOps v2.0 [3]에 따른 발전단계별 특징 비교

구분	초기	중기	성숙기
운행빈도	낮음	낮은 수준이나, 기존 규제/절차변경이 필요할 정도로 증가	운행빈도의 급격한 증가
UAM 공역 및 운항절 차	전용 UAM 공역, 절차 존재하지 않음 (기존 ATS 공역 활 용)	UAM 회랑 (Corridors)에서 운항, 운항의도의 정의 필요	UAM 회랑 (Corridors) 에서 의 지속적인 운항
규제 변화	-	ATS 규제 개정 및 신규 UAM 규정 도입	원활한 운영을 위 한 UAM 전용규정 개발
협력운영 관행 (COPs)	COPs는 비존재 (필요시 협정서 등 으로 요구사항 조정)	FAA 가이드라인을 기반으로 산업 표준 화된 COPs 정의	COPs의 복잡성 증 가로, FAA의 가이 드라인 및 승인절 차 개발
항공기 자 동화 수준	기존 유인 고정익 항공기 및 헬리콥터 수준	조종사가 신규 자동 화 기능을 활용 가능	자동화 기능의 향 상으로 HOVTL ¹ 기능 지원
CNS 기술	현행 CNS 인프라 그대로 사용해 안전검증 및 초기 서비스 시작	UAMCorridor·PSU 네트워크 도입으로 디지털 정보 공유가 본격화되고, 성능 기 반 항법·감시 요구가 높아짐	AFR+ V2V를 활 용한 고자동화·고 밀도 운항을 목표 로, 초저지연·고신 뢰 통신과 고정밀 항법·감시 기술이 필수

미국 FAA는 ConOps와 별도로 2023년에 ‘28년까지 미국 내 통합 AAM 구현을 위한 단기적 목표 및 구체적 계획을 담은 AAM Implementation Plan을 발표하였다. 그 주요 내용을 정리하면 다음과 같다.

¹ 휴먼 오버더 루프(HOVTL): 사람이 수동적으로 모니터링함

- (목표) 도심 및 지역간 항공교통(AAM) 구축을 위한 규제, 인프라, 기술, 운영 등에 대한 실행 로드맵임
- (단계별 시나리오) 1 단계('25~'27 년) 시범운항 → 2 단계('28~'30 년) 도시 및 지역 간 상업 운항 → 3 단계('31 년~) 대규모 운항 및 완전자율화
- (향후 추진방향) 글로벌 표준 정립 및 국제협력 강화, 주요 도시에서 시범/실증 프로그램 운영, 장기적인 경제성과 지속 가능성 평가 등
- (규제 및 정책) eVTOL 등 AAM 비행체 인증 및 조종사·운용 기준 마련, 공역 통합(UTM, 기존 ATC 연계) 및 비행 경로 설정, 자율 운항 및 안전·보안 기준 수립 등

FAA는 AAM 통합을 위해 기존 항공 교통 관리(ATM) 시스템을 활용하고, 필요에 따라 절차를 개정하고자 하고 있다.

- (공역 경로 구조) 기존 VFR 경로 및 새로운 AAM 전용 경로 구축
- (교통량 증가 대응) 공역 내 교통량 증가를 고려한 ATC 절차 조정
- (안전 및 환경 고려) 소음 및 난기류 영향을 평가하여 공역 설계에 반영
- (버티포트) AAM 운영을 지원하기 위해 버티포트에 대한 정의 등을 위해 '25년도 버티포트 설계에 대한 지침 발표 예정

2. 유럽

유럽 각국은 정부 주도하에 UAM/AAM 도입을 위한 전반적인 산업 기반 조성에 집중하고 있으며, 이를 위해 R&D 및 실증 지원, 법·제도 정비, 인프라 구축 등 운용 전반에 걸친 정책을 추진 중이다. EASA에서는 향후 유럽 내 UAM의 교통관리 관련 핵심 개념을 담은 U-space ConOps를 2019년 10월

에 발행하였다. 무인기와 UAM을 포함한 전반적인 공역 관리에 대한 개념을 담고 있으며 주요 내용에 대한 특징을 정리하면 다음과 같다.

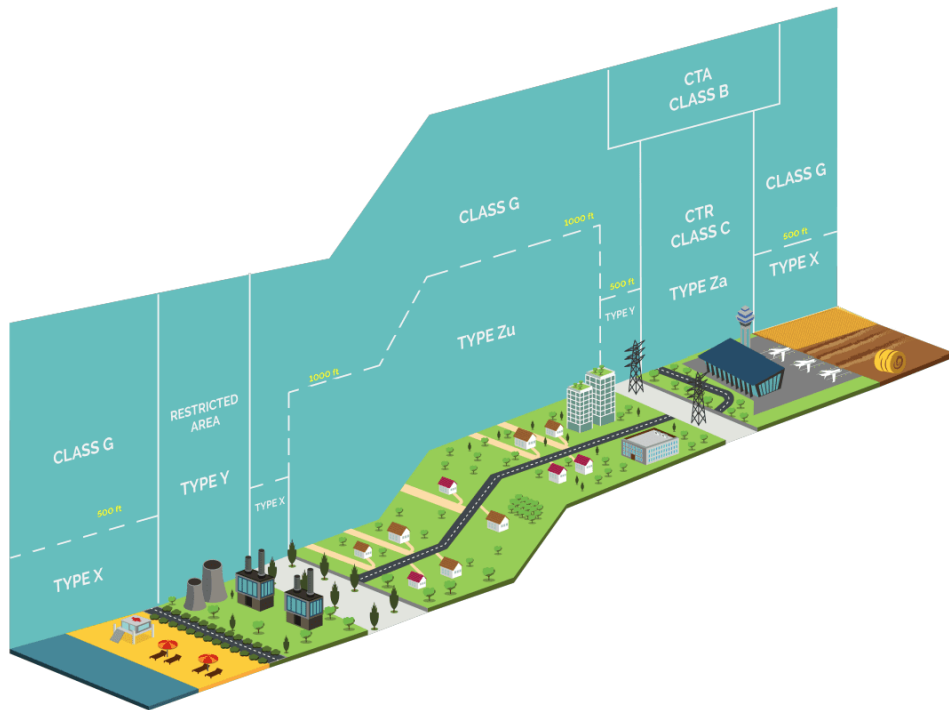


그림 9. U-space 공역구조

- SORA(Specific Operation Risk Assessment)와 연동하여 Air risk (유인기 조우 가능성)와 Ground risk (사람, 재산, 지상 구조물과의 충돌 위험)를 평가 통해 임무위험도 평가
- 모든 크기의 무인기, 승객을 수송하는 UAM, 다양한 자동화 수준을 수용
- 야간 비행, 모든 장애물(이동 장애물, 고정 장애물, 기상 장애물 등)의 위험을 분석
- 공항 관제사 통제 받는 이착륙 무인기, IFR 에 따라 비행하는 RPAS 는 제외
- GNSS 고도 기반 운용(필요시 고도변환 서비스 제공)

- 하나의 비행계획으로 무인기 여러 대가 군집 비행하는 것을 지원
- 무인기 운용 구분: 개방비행(Open Flight), 특별비행(Specified Flight), 인증비행 (Certified Flight)으로 구분
- 특별비행은 EASA 의 표준시나리오를 준수하고, 인증비행의 비행승인은 기존 유 인기 규정 준수
- 공역 구분: X, Y, Z 로 구분
 - X 구역: 충돌방지 서비스 제공 없음
 - Y 구역: 비행계획 검토를 통한 비행 전 충돌방지 서비스 제공 (Y 구역 비행을 위해서는 무인기는 위치보고 능력이 있어야 함. 무인기 GCS 가 U-space 에 접속되어야 하며 비행계획 승인 필요)
 - Z 구역: 비행 전 충돌방지 및 비행중 충돌방지 서비스 제공 (Z 구역에서는 보다 고밀도의 운용이 허용되며, 조종사가 지속적으로 U-space 에 접속되어 있어야 함.)
 - Zu 구역: 비행중 충돌방지 서비스가 U-space 에 의해 제공
 - Za 구역: 비행중 충돌방지 서비스가 관제사(ATC)에 의해 제공
- 원격 ID
 - DRID(Direct Remote Identification): 무인기가 자신의 ID 를 방송 (Open flight 에서는 의무사항)
 - NRID(Network Remote Identification): U-space 에 접속된 네트워크에 의해 추적됨

EASA는 ‘22년 UAM 운용개념서 [4]를 발간하여 교통관리체계의 구축 방향을 제시하고, UAM 및 무인비행체 운용을 위한 새로운 공역관리시스템인 ‘U-Space’를 도입하여 ‘23년부터 유럽 전역에서 시행 중에 있다. EASA에서 제안한 저고도 공역에서 UAM 및 무인비행체의 안전하고 효율적으로 운용하

기 위한 디지털 및 자동화 교통관리 시스템을 확보하기 위해 AMU-LED, SAFIR-Med 등 다양한 실증 프로젝트에 참여하여 UAM 교통관리체계의 실용성을 검토하고, 실제 운용환경에서의 데이터 수집·분석으로 규제 및 표준 수립에 활용 중에 있다.

영국 민간항공청(CAA, Civil Aviation Authority)에서는 브렉시트 이후 EU와 달리 독자적인 UAM 정책을 수립해왔으며, 정부 주도로 UAM 산업 기반 마련을 위해 제도 마련 및 R&D 지원을 추진중에 있다. 규제샌드박스 프로젝트의 일환으로 영국 CAA의 혁신허브 주도로 UAM/AAM 등 신항공 기술의 안전한 도입 및 규제 개선 등을 지원하고 기업-연구기관의 실증을 위한 기반을 마련하고 있다. 구체적으로 Future Flight Challenge를 통해 eVTOL, 드론 기술개발을 위한 125개 이상의 기업과 연구기관이 참여하는 정부 주도의 혁신 프로그램을 진행하였고, UAM 실증을 위한 공역 통합 테스트와 히드로공항과 런던 시 구간 등 공항과의 연계한 테스트 진행중이다.

영국의 CAA는 2022년 규제샌드박스 프로젝트를 통해 'UAM ConOps' [7]를 마련하였는데, 주요 내용은 표7에 정리하였다.

표 7. 영국 CAA UAM ConOps 주요 내용

구분	주요 내용
저고도 공역에서의 UAM 운용 소개	ConOps의 기초적인 맥락을 제공하기 위해 저고도 공역에서의 UAM 운용의 주요 요소 소개
현재 런던의 공역	미래의 UAM 운용이 통합해야 할 기존 헬리콥터 경로 구조에 중점을 두고 현재 런던 공역에 대한 개요 제공
UAM의 규제 관련 도전 과제	런던 환경 내에서 UAM 운영을 통합하고 확장하는 데 필요한 주요 규제 관련 도전 과제 소개

UAM 발전 단계	• 규제 관련 도전 과제가 언제 해결되어야 하는지에 대한 시점을 제시하면서, Horizons를 통해 절차 기반의 UAM 운영 진화 제안
개념 개요	• UAM 교통 관리 개념을 도입하며, UAM의 도입과 확장성을 지원할 기초적·운영적 서비스에 대한 개요 제공
운영개념 (Horizon)	• 초기 상업적 UAM 운영을 지원하기 위해 초기 ATM 절차와 기술을 어떻게 활용할 수 있는지에 대한 상세한 ConOps 제공 및 Horizon 1에 대한 주요 고려 사항 식별 • 기존 ATM 절차와 기술이 UAM 교통의 증가된 밀도와 복잡성을 지원하기에 불충분할 때 고려할 수 있는 여러 접근 방식 제안 및 Horizon 2에 대한 주요 고려 사항 식별 등

CAA ConOps에서는 UAM의 발전단계를 4개의 호라이즌(horizon)으로 구분하였는데, 각 호라이즌의 특징은 다음과 같다.

- (호라이즌 0) 기존 프레임워크를 사용하여 초기 운용의 안전사례를 지원하기 위한 도심항공교통(UAM) 실험단계
- (호라이즌 1) 기존 ATM 절차와 기술을 사용한 유인 도심항공교통(UAM) 비행체의 초기 운용단계
- (호라이즌 2) 현재 ATM 절차와 기술이 운영수요를 지원하기에 불충분한 상황에서의 UAM 운용단계
- (호라이즌 3) 새로운 ATM 서비스로 지원되는 유인 및 자율 기반 UAM 비행체의 운용단계

CNS 기술 측면에서는 미국 FAA ConOps와 유사하게 각 단계에서 개념적 기능 요구사항 만 언급하고, 구체적으로 어떠한 기술을 사용할 지는 명시하지 않고 있다. 각 호라이즌에 해당하는 CNS요구사항을 정리하면 다음과 같다.

- (호라이즌 1): 기존 민간항공 CNS 인프라와 규칙을 그대로 사용
- (호라이즌 2): 고밀도 운항을 위한 새로운 정보 교환 및 감시 수단 필요
- (호라이즌 3): 자율운항 및 고밀도 UAM 운항 지원을 위한 새로운 UAM 교통관리 체계 및 이의 지원을 위한 고신뢰 CNS 수단 필요

영국에서는 ConOps 제정과 함께 UAM 상용화를 위한 연구개발로 공역 분석을 통해 현재 런던의 헬리콥터 비행로 구조를 검토하여 UAM 통합을 위한 기존 공역의 개요를 제공하려는 시도를 하고 있고, 히드로공항에서 런던 시티 공항까지 승객을 수송하는 시나리오를 통해 UAM 운영의 실제 적용 가능성을 평가하고 있다. 추가로 안전하고 효율적이며 확장 가능한 UAM 운용을 위해 해결해야 할 주요 규제 문제를 정의하고, 시뮬레이션을 통해 데이터를 수집하고, 이를 바탕으로 이해관계자의 우려와 요구를 해소하기 위한 활동을 수행 중에 있다.

3. 대한민국

우리나라에서는 「한국형 도심항공교통(K-UAM) 로드맵('20.6)」과 「한국형 도심항공교통(K-UAM) 기술개발 로드맵('21.3)」을 제시하여 표 8과 같은 발전단계별 운용형태, 회랑용량, 구체적인 CNS 기술 등을 제시하였다. 이는 앞에서 살펴본 미국 및 유럽 등 주요국의 운용개념서의 내용과 차별화되는 부분이며, 초기 단계부터 새로운 CNS 기술 도입을 적극 고려하고 있다는 특징이 있다.

표 8. K-UAM 기술로드맵에 따른 발전단계별 주요 특징

항목	단계별 목표(년도)		
	초기(2025년~)	성장기(2030년~)	성숙기(2035년~)
자율비행 수준 (조종사 운용)	On Board (조종사 탑승)	Off Board (원격조정)	Autonomous (자율비행)
교통관리체계	PSU 주도(ATC 참여)	PSU 주도(ATC 제 한적 개입)	PSU 완전 운용(ATC 비상시 개입)
교통관리 자동화 수준	자동화 도입	자동화 주도 및 인 적 감시	완전자동화 주도
비행회랑 (corridor) 운영방식	Fixed Corridor	Mixed Corridor(회 랑 망)	Mixed Corridor(회 랑 망)
동시 운용 용량 (회랑, 30km 기준)	5대	8대	16대
항공통신망	이동통신, 항공음성통신	이동통신(5G/6G), 저궤도위성통신, C2	이동통신(5G/6G), 저궤도위성통신, C2
항법시스템	정밀위성항법	정밀위성항법 + 영상기반 상대항법	복합상대항법
감시체계	ADS-B 초기형 + UATM 보 고체계		광역 UATM 보고체계

출처: 관계부처합동(‘21), ‘K-UAM 기술로드맵’

2021년 9월에는 K-UAM 기술로드맵에 기반하여 K-UAM 운용개념서 v1.0 [9]을 발간하였다. K-UAM 운용형태를 단계별로 구분하였으며, 운용개념의 주요 내용은 초기(2025~2029) 시기를 중심으로 기술하였다. 이 시기의 기술성숙도, 사회적 수용성, 생태계 발전 정도, 운용여건 등을 고려하여 이해관계자의 역할·책임, 항로선정·관리 및 정상·비정상 운항 시나리오의 개념 등을 제시하였다. 표 9에서 확인할 수 있듯이 K-UAM 기술로드맵의 내용을 계승하여, 구체적인 운용형태와 CNS 기술을 명시하고 있다. 특히 통신 측면에서는 항공음성통신과 병행하여 상용이동통신망을 활용하는 것이 특징인데, 이

통신망을 활용하여 항법, 감시 정보를 실시간으로 전송하여 공역에서의 안전성을 확보하는 것을 목표로 하고 있다.

표 9. K-UAM 운용개념서 v1.0에 따른 발전단계별 주요 특징

항목	초기 (2025년~)	성장기 (2030년~)	성숙기 (2035년~)
기장 운용	On Board	Remote 도입	Autonomous 도입
교통관리체계	UAM 교통관리서비스 제공자 역할 단계적 확대, 항공교통관제사 참여 단계적 축소		
교통관리 자동화 수준	자동화 도입	자동화 주도 및 인적 감시	완전자동화 주도
회랑운영방식	고정형 회랑 (Fixed Corridor)	고정형 회랑망 (Fixed Corridor Network)	동적 회랑망 (Dynamic Corridor Network)
항공통신망	상용이동통신 (4G·5G), 항공음성통신	상용이동통신(5G·6G), 저궤도위성통신, C2 LINK 등	
항법시스템	정밀위성항법	정밀위성항법+ 영상기반 상대항법	복합상대항법
버티포트 입지 및 형태	수도권 중심 버티포트	수도권 및 광역권 중심 버티포트	전국 확대

2021년 9월 발간된 1.0 버전 이후 변화된 기술 및 시장 환경을 반영하고, 초기 상용화의 성공 가능성을 높이기 위해 2025년 8월 K-UAM 운용개념서 V1.5 [11]가 발간되었다. K-UAM 운용개념서 V1.5에 따른 발전 단계별 UAM 운용 특징을 정리하면 표 10과 같다.

표 10. K-UAM ConOps v1.5에 따른 단계별 UAM 운용 특징 [11]

항목	초기	성장기	성숙기
기장 운용	On Board	Remote 도입	Autonomous 도입
교통관리체계	UAM 교통관리서비스 제공자 역할 단계적 확대, 항공교통관제사 참여 단계적 축소		
항공교통체계 통합	UATM↔ATM 간 협조		안전당국 주도 공역 통합관리
교통관리 자동화 수준	자동화 도입	자동화 주도 및 인적 감시	완전자동화 주도
경로·회랑운영방식	지정 구역, 지정 경로 또는 고정형 회랑 (Fixed Corridor) ³⁾	고정형 회랑망 (Fixed Corridor Network)	동적 회랑망 (Dynamic Corridor Network)
항공통신망	필수항공음성통신 보조데이터통신(5G)	필수항공음성통신	보조항공음성통신
		데이터통신(5G·6G), 저궤도위성통신, C2 LINK 등	
항법시스템	관성항법장비 및 정밀위성항법	정밀위성항법+ 영상기반 상대항법	복합상대항법

운용 개념서의 개정 배경을 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

- **글로벌 상용화 지연 및 환경 변화:** 전 세계적으로 eVTOL (전기수직이착륙기) 기체 개발 및 안전 인증이 지연되고 시범사업 계획이 순연되는 등 시장의 불확실성이 증대됨
- **현실적 상용화 모델 필요:** 글로벌 시범사업 무산 원인인 기체개발 지연부터 안전한 UAM 정착을 위해 저난도 운용모델 우선 상용화 예상 등 국제적 여건 변화 반영 필요
 - 초기 시장 진입 장벽을 낮추기 위한 기술적·사업적 부담을 완화한 '다각화된 운용모델' 포함 필요
- **민간 부담 완화:** 초기 시장 활성화를 위해 사업자 구성, 통신망 사용 의무 등을 완화하여 민간 기업이 초기 시장에 원활히 진입할 수 있도록 유연한 기준 도입 필요

운용개념서 v1.5의 v1.0 대비 주요 변경 내용을 정리하면 표 11과 같다.

표 11. K-UAM ConOps v1.5의 주요 변경 내용

구분	ConOps 1.0	ConOps 1.5
발전단계별 구현 시기	초기 ('25~), 성장기 ('30~), 성숙기 ('35~) 명시	발전 단계별 구현 시기 삭제
사업자 구성	3개 사업자 필수 (운항, 교통관리, 버티포트)	유연한 구성운용 모델에 따라 통합 수행 가능 (예: 운항자가 교통관리 겸임 등)
공역 및 항로	고정형 회랑(Fixed Corridor) 의무, 엄격한 경로 이탈 관리	모델별 차등 적용지정 구역(Area), 지정 경 로, 또는 고정형 회랑 선택 적용. 회랑 준수 는 자율 규제 성격으로 완화
통신 체계	5G/LTE 상용망 중심 데이터 통신 강조	항공음성통신(VHF) 필수, 5G/LTE는 보조 수단으로 활용 (안전 최우선)
버티포트	도심 주요 거점 신규 구축전용 인프라 중심	기존 시설 활용 가능헬기장 또는 이착륙 적합 장소 활용 등 형태 다양화
정보 공유	PSU(교통관리자) 간 네트워크 중심	국가 주도 '도심항공교통정보시스템' 도입초기 단계 정보 공유의 중추 역할

정부는 대규모 실증사업인 K-UAM 그랜드챌린지(GC)를 통해 '24년 비도심지 및 '25년 도심 실증을 추진하였다. K-UAM 그랜드챌린지를 통해 국내 도시, 기상 여건 등에 맞는 한국형 운용 기준을 마련하기 위한 민간기업들이 참여하는 대규모 실증사업으로 운용데이터를 확보하여 UAM 초기 운용 기반(제도, 기준 등)을 마련할 수 있도록 추진하고 있다. 관련 내용을 요약하면 다음과 같다.

- K-UAM 그랜드챌린지(GC) 실증
 - 목적

- 버티포트 운영 및 UAM 교통관리 서비스의 H/W, S/W 안전성 통합점검
- 통신, 항법, 감시, 정보 공유·교환을 통한 이해관계자간 역할
- 악전후, 기기고장 등 상황별 비정상상황에 대비한 대응 계획 등



출처 : 국토부 보도자료(23.8.21) 'K-UAM 실증착수'

- 기체·운항, 교통관리, 버티포트 등 통합운영 7 개 컨소시엄(35 개사), 기체, 교통관리 등 단일 분야 5 개 컨소시엄·기업(11 개사)가 실질적 사업 참여 주체들로 실증사업에 참여 중
- 참여기업들은 국가종합비행성능시험장(전남 고흥)에서 1 단계 통합 실증을 완료하고, '25 년 수도권 실증에 참여
- 통합운용 분야 7 개팀 중 6 개 팀은 1 단계 비도심 실증을 통해 세계 최초로 UAM 항공기, UAM 운용시스템, 5G 항공통신망의 통합시스템 등에 대한 검증을 완료

최근 전 세계적으로 eVTOL 개발·인증이 지연되면서 국내 실증과 상용화 일정 조정이 불가피해짐에 따라 이를 반영하여 실증 계획을 변경하여 추진할 예정이다. 주요 변경 사항을 정리하면 다음과 같다.

- **대역기(헬기) 활용 실증:** eVTOL 도입 전까지 헬기를 대역기로 활용하여 교통관리, 버티포트 운영, 관제 절차 등 운용 요소를 우선 검증
- **사업모델 맞춤형 실증:** 모든 사업자가 동일한 항목을 실증하는 것

이 아니라, 관광형, 교통형 등 각자의 사업 모델에 필요한 항목만 선택하여 실증

- **도심 실증 노선 구체화:** 그림 10과 같이 수도권 실증 노선이 기존 아라뱃길(2-1단계), 한강(2-2단계), 탄천(2-3단계)에서 킨텍스-대덕/수색 비행장 노선을 중심으로 상시 실증 환경을 구축하는 것으로 변경하고, 기존 노선은 상용화 일정에 맞춰 지원할 예정



그림 10. 도심지 실증 노선 변경 안

우리나라에서는 UAM 통신과 관련해서는 ICAO에서의 국제표준 개발 및 주파수 대역, 상용망 활용여부 등 통신방식 관련 논의는 구체화되지 않은 상황이나, 국내에서는 기체운용(관제·제어), 항로관리(위치·항로 표시), 인포테인먼트(항공정보, 인터넷 등) 용도의 주파수가 필요할 것으로 전망하고, 그림 11과 같이 선제적인 주파수 공급정책을 고려 중이다.

특히 지상 사용자를 대상으로 하는 4G/5G 이동통신망의 경우 UAM이 운항하는 상공에서 통신품질 확보가 어렵고, 상공 단말을 위한 별도 주파수 할당이 필요하므로 신규 주파수 수요가 초기 단계부터 발생하게 된다. 이를 위해 실증 시험을 위한 UAM 전용 주파수를 30MHz 공급하여 세계 최초 UAM 전용 5G 상공망 구축 중에 있다.



그림 11. UAM 운항을 위한 다양한 통신 수요 [12]

제4절 UAM CNSi 관련 주요국 기술 개발 동향

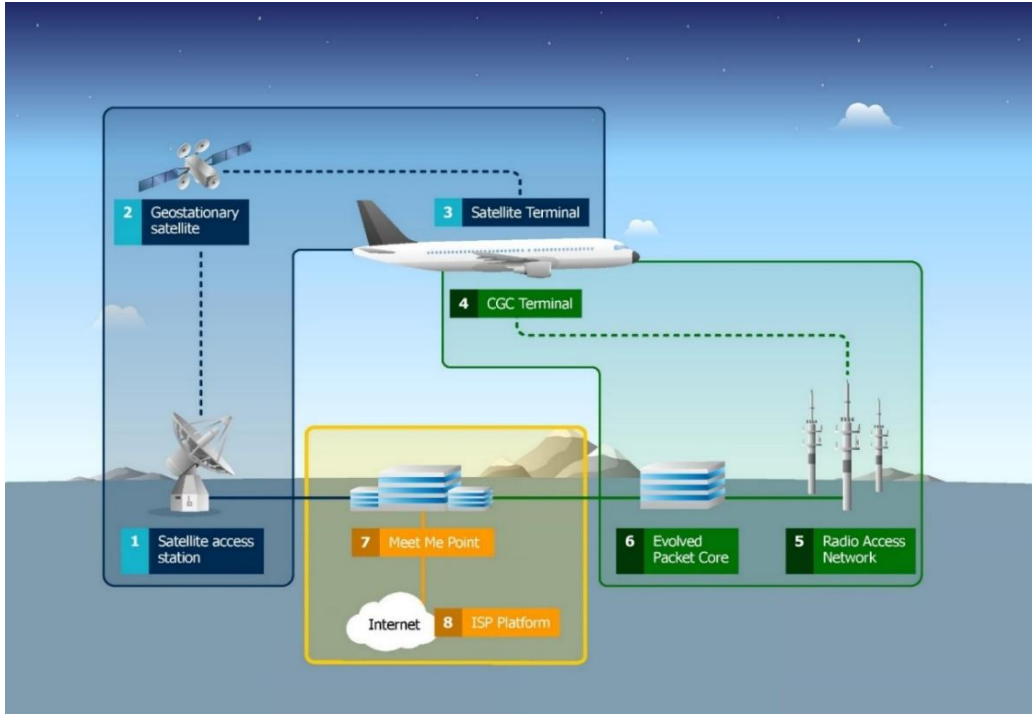
1. 통신

가. 6G

글로벌 선진 국가/기업들은 5G 인프라 구축과 병행하여 미래 6G 통신 산업 선점을 위해 관련 연구개발을 착수하였으며 최근 주요 비전을 제시하고 있다. 6G는 5G 성능 고도화, 인공지능 기반 네트워크 최적화, 해상·공중·우주 등 커버리지 확대를 통해 가상과 현실을 시공간 제약 없이 연결하는 지능형 통신 인프라로 발전할 전망이다.

- (5G 성능 고도화) 자율주행, 오감 홀로그램 통신, 원격 수술 등 5G 서비스의 본격 확산에 따른 초고속, 초저지연, 초연결의 고도화
- (네트워크 완전 지능화) 지능형 유무선 통신 인프라 기반의 인공지능 에이전트간 대규모 협업을 통한 다양한 융합 서비스가 일상에 보편화 될 전망

- (통신 커버리지 초월) 기존 육상 중심의 통신 서비스에서 해상, 공중, 우주 등 보편적 무선 통신 서비스 제공이 가능한 인프라 가시화 예상



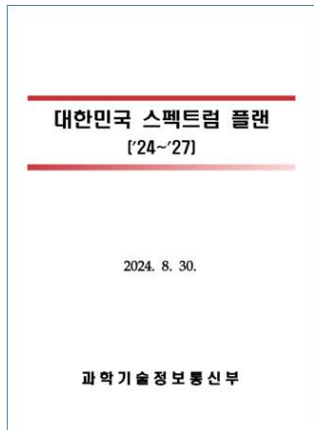
출처: ITU-R WP5D PROPOSAL ON THE WORKING DOCUMENT TOWARDS A PRELIMINARY DRAFT A NEW REPORT ITU-R M.[IMT.A2G], 독일, 2025.01.22.

그림 12. 항공 통신망 아키텍처 및 인터페이스 예시

성장기 이후에는 저궤도 통신위성(LEO) 기반 6G 통신 기술이 대안으로 고려될 수 있으며, 위성 통신이 본격 상용화 되는 경우 커버리지 제약을 극복하여 선박·자동차·드론 등의 통신 수단으로 활용할 수 있어 미래 모빌리티 등 초 연결 사회를 위한 차세대 필수 네트워크 시스템으로 주목받고 있다. 특히, 저궤도 위성에 탑재되어 위성 사이의 데이터를 ‘레이저’로 주고받으며 통신을 가능하게 하는 ‘위성 간 레이저 통신(ISL)’ 기술이 차세대 저궤도 위성 통신의 핵심기술로 관심을 받고 있다.

나. UAM 전용 상공망

국내에서는 항공통신용 6MHz와 5G 상공 전용망을 위한 30MHz 실험국 주파수를 공급하여 도심 UAM 실험/실증을 위해 활용 중이다. [12]



- **(공급 방향)** UAM 실험·실증을 위한 실험용 주파수를 공급하고, 향후 국제조화 등을 고려 추가 주파수 공급 검토 추진
- 실험·실증을 위해 기존 항공통신용(음성통신, 항로표지) 6MHz폭 및 5G용 20~30MHz폭 실험국 주파수(800MHz/1.4GHz/1.8GHz대역 등) 공급* 추진(24~)
- * 이용범위, 이용지역, 대역변경 가능성 대비 및 인접대역 서비스 보호 등의 조건을 부가
- 향후 필요시, UAM 국제 표준, 시장·기술 동향, 실험·실증 결과를 종합적으로 검토하여 국제조화를 이루는 주파수 공급을 추진

그림 13. 대한민국 스펙트럼 플랜에 반영된 UAM 전용 주파수 현황

다. C 대역 통신 (CNPC)

무인항공시스템(UAS)의 안전한 운용을 위해서는 고신뢰도의 제어 및 비탐재 통신(CNPC) 링크가 필수적으로 필요하며, 이를 위해 ITU-R WRC-12에서는 C 대역을 UAS 제어용 주파수로 신규 분배하였다. 국내에서는 다음과 같이 무인항공기 통신을 위해 C 대역 주파수를 분배하고 있다.

- 5030~5091MHz: 무인항공기 제어용 지상 주파수로 분배
- 5091~5150MHz: 무인항공기 임무용 주파수로 분배

미국의 RTCA는 2013년부터 특별위원회(SC-228)를 구성하여 L 대역 및 C 대역을 활용한 데이터 링크의 최소 운용 성능 표준(MOPS) 및 최소 시스템 성능 표준(MASPS)을 개발 중임. 특히 DO-377B 에서는 문서에서

Air-taxi의 원격 조종을 위한 CNS 성능 요구도에 대한 수치를 제시하고 있다.

- 최소 운용 성능 표준(MOPS) : DO-362 (2016), DO-362A (2020)
- 최소 시스템 성능 표준 (MASPS) : DO-377 (2019), DO-377A (2021), DO-377B(2023)

2. 항법

주요국들은 위성항법시스템(GNSS), 관성항법시스템(INS), 비전 및 LiDAR 기반 내비게이션, 통신기반 항법 등 다양한 기술을 결합하여 UAM 항법시스템의 정밀도를 높이는 연구를 진행중에 있다.

미국은 NASA의 UAM ConOps에서 UAM 항법시스템은 기존 항공 교통 관리 시스템(ATM) 및 UTM(Unmanned Traffic Management)과 연계하여 운영될 예정이라고 언급되어 있다. NASA의 National Campaign 등을 통해 자동화된 비행 시스템 개발을 통한 자율항법 기술 및 정밀 항법 기술 검증을 수행중이고, FAA는 Wide Area Augmentation System (WAAS) 및 Ground-Based Augmentation System (GBAS) 같은 GNSS 보정 시스템을 UAM에 적용하는 방안을 연구 중이다. NASA는 관성항법 (INS), LiDAR, 비전 기반 내비게이션을 GNSS와 결합하여 다중센서 융합을 통해 신뢰성을 강화하는 연구를 수행 중이다.

유럽은 Horizon Europe 프로그램을 통한 GNSS 보완 및 비GNSS 기반 항법 기술 연구와 UAM 항법과 U-Space 통합을 위한 실증 프로젝트(SESAR CORUS-XUAM)를 통해 기술 확보 중이다. 유럽연합(EU)은 Galileo 기반의 보정 시스템인 EGNOS를 활용하여 높은 정밀

도의 UAM 항법을 개발 중이고, GNSS 불능 상황에 대비하여, 전파 교란(GNSS jamming) 및 스푸핑(spoofing) 위험을 고려하여 비전(Vision), LiDAR, 레이더 기반 항법 시스템 개발 중이다. UAM을 위한 항법 기술과 관련해서는 SESAR(유럽 항공교통관리 현대화 프로젝트)에서 UAM을 위한 U-Space 개념을 개발하고, 이를 항법 시스템과 연계하는 방법을 연구 중이다.

중국은 저고도 경제 정책을 기반으로 GNSS, V2X, AI 기반 항법을 UAM 운용에 최적화 및 EHang216을 활용하여 BeiDou 기반 자동항법 기술 검증을 진행 중이다. 특히 자체 BeiDou(北斗) 위성항법 시스템을 활용하여 정밀 항법 구축하고 있으며, 5G 및 차량-사물통신(V2X)을 활용한 UAM 내비게이션 및 충돌 회피 기술을 연구 중에 있다.

우리나라에서는 ADD(국방과학연구소)/한화시스템의 자율비행 연구를 통한 INS/GNSS 융합 및 비전 기반 항법 개발 및 K-UAM GC의 항행교통관리 실증 등을 통해 핵심기술을 확보 중이고, 한국형 SBAS(Satellite-Based Augmentation System)인 KASS를 활용하여 UAM 정밀 항법 시스템 개발 중이다. UAM 관련해서는 항공기 INS/GNSS와 함께 LiDAR, 비전 기반 내비게이션 도입을 연구 중이고, K-UAM 그랜드 챌린지 실증사업을 통해 항법시스템 검증을 추진하고 있다.

국내에서는 유인항공기 항법 장비인 ILS나 DME-VOR의 원리를 활용하여 지상에서 전파를 활용하여 UAM이 정해진 항로를 유지하고 있는지 정보를 제공하는 기술에 대한 연구가 진행되고 있다.

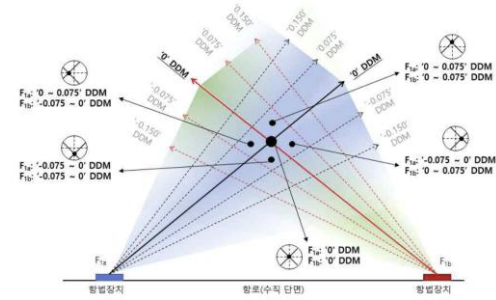


그림 14. ILS 원리를 활용한 UAM 지상 대체 항법 기술 개념도 [13]

기존 민항기용 주요 기술표준과 연구과제 기술방식 비교표

항 목	기존 민항기용 기술방식	드론/UAM용 기술방식
방위각 주파수	108~118MHz	5030~5150MHz
방위각 획득	AM30Hz/FM30Hz 위상차 판별	작동
거리측위 주파수	960~1250MHz	5030~5150MHz
거리측위 획득	3.5us 쌍펄스 질문/회신 시간차	작동

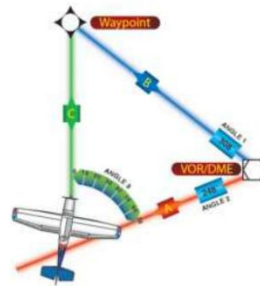


그림 15. VOR-DME 원리를 활용한 UAM 지상 대체 항법 기술 개념도 [14]

3. 감시

UAM 감시는 도심 공역에서 UAM 기체 및 비UAM 기체, 그리고 비행공기 물체를 효과적으로 탐지, 추적, 식별할 수 있도록 다층 감시 체계 및 통합 관제 기술을 고도화하는 방향으로 추진중이다. 이를 위한 수단으로는 민항기 감시와 유사한 체계를 갖출 것으로 예상된다.

민항기의 협력적 감시는 주로 ADS-B가 사용되고 있고, 비협력적 감시는 레이다(radar)가 주로 사용되고 있다. 추가로 버티포트 주변의 경우 카메라 등 영상 기반 감시도 고려되고 있다.

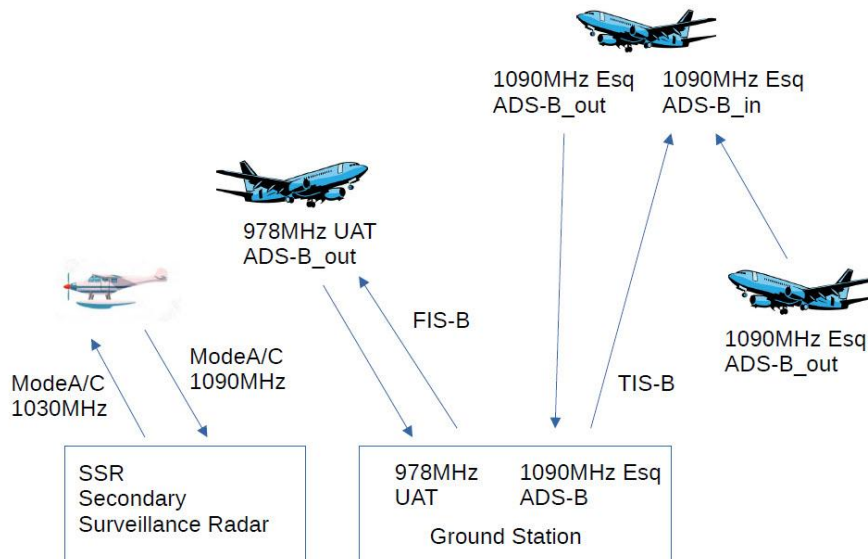


그림 16. ADS-B 기술 개념도

(<https://jeremyclark.ca/wp/telecom/ads-b-out-basics/>)

ADS-B는 민항기의 협력적 감시에 사용되고 있는 기술이며, broadcasting 방식으로 동작한다. 그중, ADS-B OUT은 그림 16과 같이 항공기 상태를 주기적으로 송출하는 기능을 수행한다. 참고문헌 [15]은 ADS-B OUT의 최소 성능 규제사항을 정의하였다. 구체적으로, ADS-B OUT은 항공기의 현재 식별 및 상태 정보 뿐만 아니라 공중충돌방지장치(TCAS:Traffic Collision Avoidance System) 설치 유무, ADS-B IN 가능 여부, 표12에 첨부한 추가 파라미터의 내용들을 방송한다. 표12의 추가 파라미터는 최소 성능 규제사항을 갖는데, 표 13은 이를 요약한 것이다. NAC, SDA, SIL의 값에 변화가 생길 시에는 10초, NIC의 값에 변화가 생길 시에는 12초 이내에 송신해야 하

며 항공기 이륙 후에는 최소 1초에 한 번은 위치 및 속도 정보를 송신하고 이륙 전 정적인 상태일 때는 최소 5초에 한 번은 위치 정보를 송신해야 한다는 최소 성능 규제사항도 포함되어 있다. UAM의 경우에도 ADS-B OUT을 기본적인 감시 수단으로 사용할 것으로 예상되나, ADS-B 기술이 GNSS에 기반한 기술이고, 그 용량이 충분하지 못하므로, GNSS 불능 상황을 대비한 감시 기술, ADS-B를 사용하지 않는 통신망을 활용한 감시 정보 송신 방식 등에 대한 연구도 진행 중이다.

표 12. ADS-B OUT 추가 파라미터

파라미터 명	설명
NAC (Navigation Accuracy Category)	항법 데이터의 정확도 수준
NIC (Navigation Integrity Category)	항법 데이터의 신뢰성 수준
SIL (Source Integrity Level)	항법 데이터 공급원의 신뢰성 수준
SDA (System Design Assurance)	시스템 강건성 척도
Latency	메시지 전송 지연시간 관련 정보

표 13. ADS-B 추가 파라미터 최소 성능 규제사항

분류	최소 성능 요구조건 (오차)
NAC_pos (위치)	0.05 (nautical miles) 이내
NAC_vel (속도)	10 (m/s) 이내
NIC	0.2 (nautical miles) 이내
SDA	2 이내
SIL	3 이내
Total Latency	2 (s) 이내

UAM은 저고도에서 운용되므로, 레이더를 활용한 감시가 제한적일 수 있으나 버티포트 주변 등에서는 라이다, 카메라와 함께 중요한 감시 수단이 될 수 있다.

그림 17에서 볼 수 있듯이 우리나라에서 추진중인 K-UAM 그랜드

챌린지 실증에서는 항로 구간에서는 ADS-B, 5G 상공망을 통한 정기적 기체 위치/상태 정보 송신 기반 협력적 감시와 지상에서의 감시 레이더를 활용한 비협력적 감시 수단을 모두 고려하고 있다. 추가로 버티포트 주변에서는 EO/IR 광학장비와 레이더를 활용한 감시를 고려하고 있다 [16].

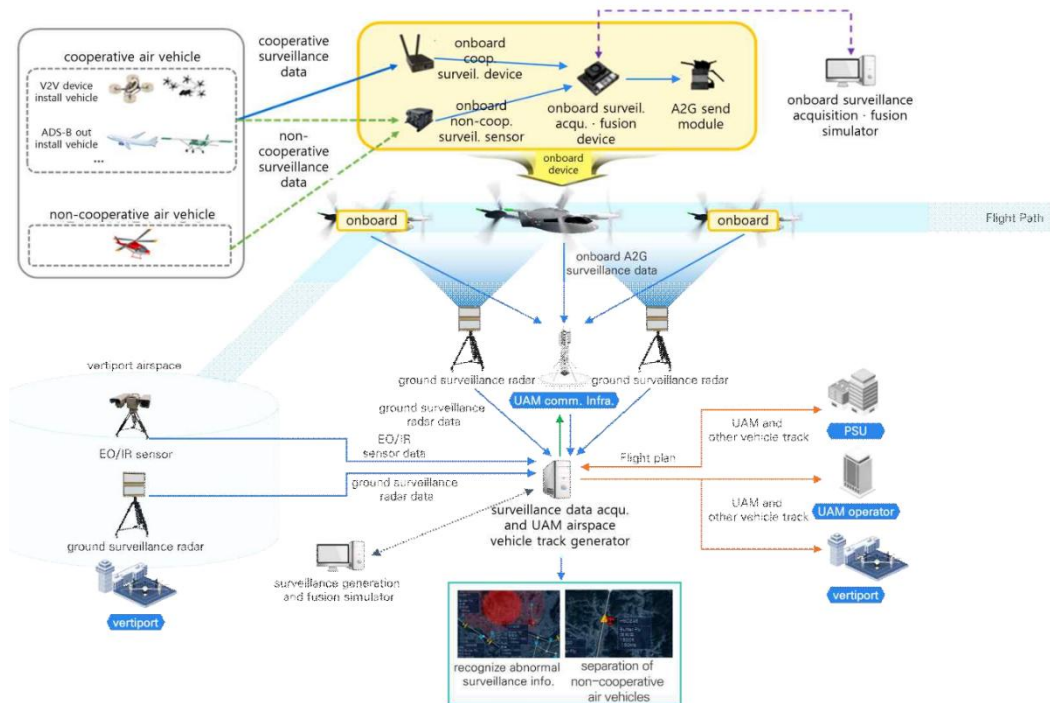


그림 17. UAM 감시 운용 시스템 전체 구성도 [16]

제 3 장 UAM CNSi 주파수 소요량 분석

제1절 UAM 신규 CNSi 기술 별 주파수 소요량 분석 방법

1. 개요

앞에서 살펴본 UAM을 위한 CNSi 기술들은 초기 단계에서는 신규 기술이 아닌 기존 유인항공기를 위한 CNSi 기술을 활용하고, 운항 빈도가 높지 않아 추가 주파수 소요가 크지 않을 것으로 판단된다.

성장기 이후를 고려하더라도 항법 기술의 경우는 GNSS/RTK 기술의 경우 추가 주파수 소요가 없고, 관성 항법, vision 기반 항법 기술, 복합 항법 기술 등도 추가 주파수 소요는 없다. 앞에서 언급한 바와 같이 지상에서 전파를 활용하여 GNSS 불능 상황에 대비한 대체 항법 수단을 제공하는 연구가 일부 진행중에 있으나, 기초 연구 단계이고, 해당 기술이 도입이 된다고 하더라도 주파수 수요가 제한적이므로 현 시점에서 주파수 소요량 분석의 필요성이 크지 않다고 판단된다.

감시 기술의 경우 ADS-B를 대체할 수 있는 통신네트워크를 활용한 기체 감시 정보 전송 기술의 경우 해당 기술 적용을 위해 통신기술을 활용하므로, 별도로 주파수 소요량을 산출하지 않고, 통신 기술을 위한 주파수 소요량 산출에 통합하여 산출 가능하다. 레이더를 이용한 비협력적 감시 시스템의 경우 도입 필요성이 국제적으로 검증되지 않고, 실증 시험 등을 통해 확인 중인 상황이고, 기존 공항 주변에서 사용중인 드론탐지 레이더, 조류감시 레이더 등을 활용할 가능성도 있어 현 시점에서 추가 주파수 소요량을 산출하는 것은 큰 의미가 없을 것으로 판단된다.

반면 통신 기술의 경우 UAM 성숙 단계별로 기체의 운항 빈도, 조종사의 유무와 관여 정도 등에 따른 통신 수요의 편차가 크고, 이에 따른 주파수 소요량이 크게 달라질 수 있다. 따라서 본 보고서에서는 UAM 신규 CNSi

기술별 주파수 소요량 분석은 통신 기술에 집중하여 실시하고자 한다.

2. ITU-R 주파수 소요량 분석 방법

ITU-R은 새로운 이동 통신 시스템의 주파수 소요량을 추정하기 위해 일련의 권고안을 개발했다. 주요 문서로는 Rec. ITU-R M.1390-1, Rec. ITU-R M.1391-1, Rec. ITU-R M.1768-1이 있으며, 이들은 적용 범위와 주요 특징에서 차이가 있는데 이를 정리하면 다음과 같다.

(가) Rec. ITU-R M.1390 [17]

- 적용범위: IMT-2000(3 세대 이동통신) 시스템에 필요한 지상 무선 스펙트럼의 양을 추정하는 방법론을 제공
- 특징
 - 주파수 소요량을 '필요한 트래픽 양'을 '네트워크의 효율'로 나누는 '기본적인 계산 공식'을 제시한 최초의 방법론
 - 서킷 기반의 음성 통화와 멀티미디어 서비스(영상, 인터넷 접속) 등 패킷 통신을 모두 고려
 - 음성 통신에 대해서는 Erlang B 모델(통화 중 막힘 확률 계산)을 사용할 것을 권고하고 있으나, 패킷 통신에 대해서는 특정 모형을 제시하고 있지는 않음

(나) Rec. ITU-R M.1391-1 [18]

- 적용범위: IMT-2000(3 세대 이동통신) 시스템에 필요한 위성 무선 스펙트럼의 양을 추정하는 방법론을 제공
- 특징

- 지상망(M.1390)과 상호 보완적으로 위성을 통해 제공되는 서비스에 필요한 주파수만 계산하는 데 초점을 맞춤
- 서킷 기반의 음성 통화와 멀티미디어 서비스(영상, 인터넷 접속) 등 패킷 통신을 모두 고려
- M.1390 문서와 동일하게 음성 통신에 대해서는 Erlang B 모델(통화 중 막힘 확률 계산)을 사용할 것을 권고하고 있으나, 패킷 통신에 대해서는 특정 모형을 제시하고 있지는 않음

(다) Rec. ITU-R M.1768-1 [19]

- 적용범위: 4 세대 및 그 이후의 이동통신 (IMT-Advanced)
지상망 무선 스펙트럼의 양을 추정하는 방법론을 제공
- 특징
 - '기술 중립적 접근법'을 도입하여, 무선접속기술그룹 (RATG: Radio Access Technique Group)을 4 가지로 분류하여 시스템 특성을 반영한 최종 소요 주파수 집계 방식을 적용
 - 사용자가 발생하는 통신 트래픽의 종류(고화질 영상 통화, 이메일 등)와 발생 환경(실내, 이동환경 등)을 세밀하게 분류하여 주파수 수요 예측에 반영
 - 음성 통화 (회선 교환 모방): 여전히 Erlang 이론을 사용하여 필요 용량 산출
 - 데이터 통신 (패킷 교환): 데이터 지연 시간(딜레이) 요구 사항을 충족하는 데 필요한 용량을 산출하기 위해 M/G/1 큐잉 모델 사용

전반적으로 주파수 소요량을 산출하는 기본적인 방법은 Rec. ITU-R M.1390 제시된 아래 식을 활용한다.

$$F_{\text{Terrestrial}} = \beta \sum \alpha_{es} F_{es} = \beta \sum \alpha_{es} T_{es}/S_{es}$$

여기서 ‘e’는 환경에 대한 인덱스, ‘s’는 서비스에 대한 인덱스이고, 각 파라미터는 다음과 같이 정의된다.

$F_{\text{Terrestrial}}$ (MHz) = Terrestrial Component Spectrum Requirement

T_{es} (Mbit/s/cell) = Traffic/Cell_{es}

S_{es} (Mbit/s/MHz/cell) = System capability

α_{es} = Weighting factor

β = Adjustment factor

이는 각 환경('e')과 서비스('s') 조합별로 요구되는 셀당 트래픽 용량(T_{es})을 시스템의 스펙트럼 효율(S_{es})로 나누어 산출한 개별 주파수 소요량(F_{es})을 가중치(α_{es})와 조정 팩터(β)를 적용하여 합산하는 원리를 이용한다. 환경과 서비스는 Rec. ITU-R M.1390에서는 표 와 같이 예시를 제시하였는데, 환경에 따라 통신시스템의 주파수 효율이 달라질 수 있고, 서비스의 종류에 따라 요구 전송률, 허용 가능 지연, 통신 패킷 발생 패턴 등 QoS 파라미터가 달라질 수 있으므로, 각 환경('e')과 서비스('s') 조합별로 요구되는 주파수 소요량을 합산하여 총 요구 주파수 소요량을 산출한다.

표 14. 주파수 소요량 산출을 위한 ‘환경’과 ‘서비스’ 조합 예시 [17]

Environments “e”	High density-in building (CBD)	Urban pedestrian	Urban vehicular
Services “s”			
Speech (S)	F_{es}	F_{es}	F_{es}
Simple Message (SM)	F_{es}	F_{es}	F_{es}
Switched Data (SD)	F_{es}	F_{es}	F_{es}
Medium Multimedia (MMM)	F_{es}	F_{es}	F_{es}
High Multimedia (HMM)	F_{es}	F_{es}	F_{es}
High Interactive Multimedia (HIMM)	F_{es}	F_{es}	F_{es}

이후 Rec. ITU-R M.1768-1에서는 다양화된 사용자의 서비스 특성 (SC: Service Category)에 따른 트래픽 특성과 이동성 등 사용환경 (SE: Service Environment), 무선통신 셀 구조 (RE: Radio Environment) 등을 기준으로 주파수 소요량 산출을 세분화하였다. Rec. ITU-R M.1768-1에 따른 소요 주파수 산출 과정은 그림 18과 같이 9개의 세부 과정으로 구성된다.

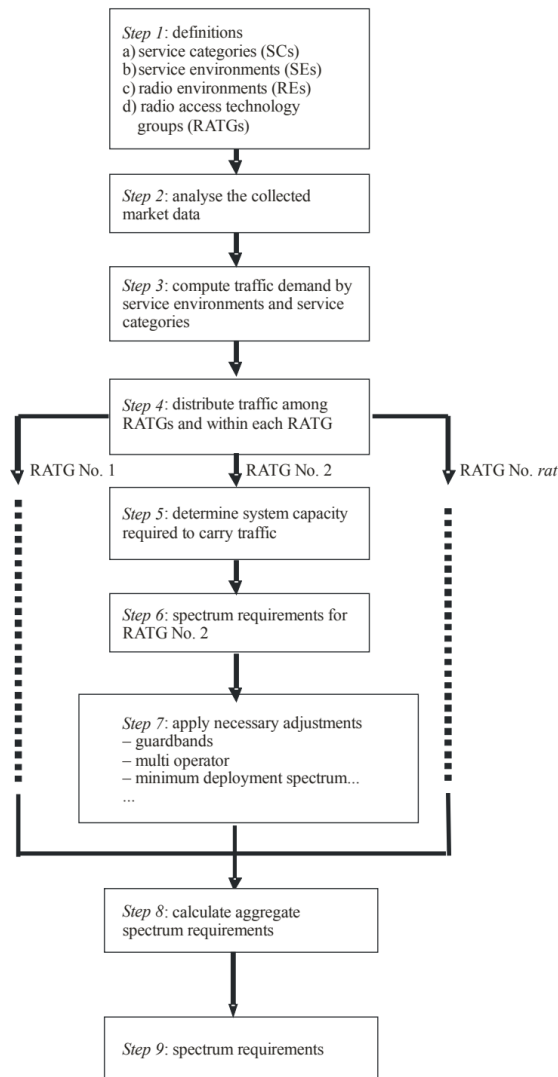


그림 18. 주파수 소요량 산출 과정

각 과정에서 수행하는 내용을 요약하면 다음과 같다.

- Step 1: 주파수 소요량 분석에 적용할 서비스 종류, 적용 환경 및 무선 접속 기술과 채널 환경의 정의
- Step 2: 주파수 소요량 분석을 위한 실제 상용 환경에 대한 여러 기술 및 트래픽 동향의 채집 분석
- Step 3: Step 1 및 2의 진행을 통한 서비스 적용 환경과 종류 별 요구 트래픽 산출
- Step 4: 산출된 요구 트래픽을 지원하기 위한 무선 접속 기술 그룹(RATG) 선정
- Step 5: 무선 접속 기술 그룹 별 트래픽을 수용하는 시스템 용량 산출
- Step 6: 지상 셀룰러 이동통신에 대한 주파수 소요량 1차 산출
- Step 7: 보호 대역 운용, 포설 조건, 사업자 분배 등을 고려한 주파수 소요량 조정
- Step 8: 종합적인 주파수 소요량 산출
- Step 9: 최종적인 주파수 소요량 결정

3. LTE-R 주파수 소요량 분석 방법 [20]

우리나라는 철도 운행의 안전성과 효율성을 극대화하기 위해 700MHz 공공통합망 주파수 대역을 활용하여 기존 VHF 및 TRS 기반 통신을 대체하는 LTE 기반의 철도 통합 무선망(LTE-R) 기술을 개발하여 도입하고 있다. 이는 기존의 음성 위주였던 노후화된 통신망(VHF, TRS)을 4세대 이동통신 기술로 대체하여 관제실, 기관사, 현장 작업자 간의 실시간 영상 공유와 고속 데이터 전송이 가능해져, 철도 사고 예방 및 긴급 대응 능력이

획기적으로 향상되었다.

주요 도입 과정은 다음과 같다.

- 기술 개발 및 검증: 2010년대 초반부터 국가 R&D 과제로 기술 확보
- 최초 상용화 (2017년): 원주~강릉 고속철도 구간에 구축
- 전국 망 확대 (진행 중): 정부의 '철도 통합 무선망 구축 계획'에 따라 2027년까지 전국 모든 철도 노선을 LTE-R로 전면 교체하는 사업을 추진 중

LTE-R의 주요 특징은 아래와 같다.

- **목적 및 서비스:** LTE-R의 목적은 일반 및 고속 철도의 운영과 제어에 필요한 열차 제어 데이터 서비스, 무선 통신을 위한 음성 서비스, 데이터 서비스와 영상 서비스를 제공
- **기술적 기반:** LTE-R 무선통신망은 3GPP LTE 기반의 코어망과 무선 액세스망으로 구성되며, 350km/h의 고속 이동 환경에서도 안정적인 서비스 성능 요구 사항을 만족해야 함
- **열차 제어 데이터 서비스:**
 - 열차의 안전 운행을 위해 관제 센터와 열차 간에 열차 상태를 모니터링하거나 열차를 제어
 - 통신의 신뢰성이 높고 다른 서비스에 비해 우선순위가 가장 높은 서비스
 - 열차 제어권 정보는 폐색 센터와 열차 이동국 간 무선 구간에서 300msec 이내에 전달되어야 함
- **음성 통화 서비스:**
 - 기관사, 승무원, 관제 센터 관리자 및 유지 보수 작업자에게 개별 통화, 그룹 통화, 긴급 통화 등을 제공

- 통화 전송 지연 시간이 300msec 이내로 시간 응답성이 높은 서비스
- 영상 서비스:
 - 그룹 영상 통화 (영상 PTT): 사전에 정해진 그룹의 모든 구성원에게 영상 통화 기능을 제공해야 함. 그룹 구성원 중 PTT(Push To Talk) 버튼을 누른 1 인만이 영상을 송출할 수 있으며, 나머지 그룹 구성원은 영상을 보기만 할 수 있음
 - 영상 정보 전송: 열차의 내부 상황, 승강장의 상황, 선로의 상황을 영상으로 전달하여 안전사고를 예방하고 사고 발생 시 신속하게 대응할 수 있도록 영상 정보를 제공해야 함

[20] 논문은 ITU-R M.1390 권고안을 기반으로 철도 환경에 맞게 수정 및 최적한 방법에 따라 철도통합무선망의 주파수 소요량 산출 과정 및 결과를 제시하고 있다. ITU-R M.1768-1의 경우 트래픽이 여러 무선접속 기술을 이용하여 처리되고, 다수 사용자의 다양한 종류의 통신 패킷의 랜덤한 발생 특성을 확률적으로 모델링하여 시스템 용량 분석이 필요한 경우에는 더 적합한 방법론이지만, 철도통합무선망의 경우에는 단일 무선접속기술로 구현이 가능하고, 서비스의 종류도 제한적이므로 M.1390이 적절한 주파수 소요량 산출 방식이다.

M.1390은 단순 계산을 기반으로 하지만, 철도통신 서비스의 특성이 일반적인 이동통신 서비스와 상이하기 때문에 이를 고려하여 수정된 트래픽 예측이 필수적이다. 이 연구에서는 M.1390의 기본적인 4단계 프로세스(지형 고려, 시장/트래픽 고려, 기술/시스템 고려, 주파수 결과 고려)는 유지하되, 철도 환경 및 서비스 특성을 반영하여 시장 및 트래픽 고려 단계를 수정하여 그림 19와 같은 과정을 거쳐 주파수 소요량을 분석하였다. 각 단계별 산출 과정을 간략하게 정리하면 다음과 같다.

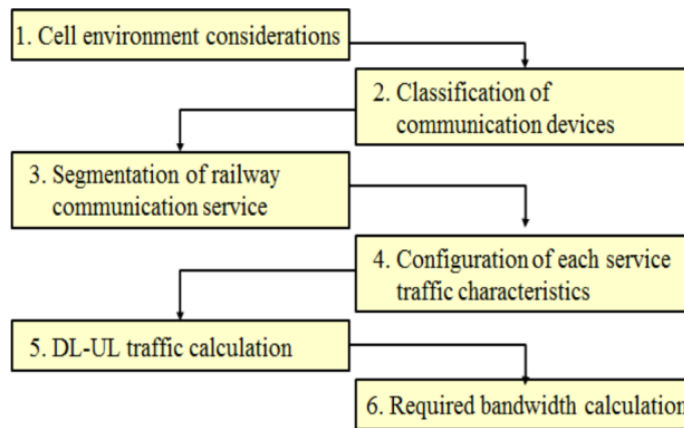


그림 19. 철도통합무선망 주파수 소요량 산출 과정

(가) 셀 환경 고려

- 단일 셀 내에서 발생하는 최대 트래픽의 양을 구하기 위해 국내에서 가장 열차가 밀 집한 장소인 서울역을 기준으로 하여 최고로 분비는 시점 기준으로 반경 2km 이내의 최대 열차 편성 수를 연도별 철도 계획과 열차간 최소 분리거리 기준 등을 반영하여 2012 년 22 대 ~ 2022 년 36 대로 산출
- 열차의 셀 진입시에만 발생하는 트래픽에 대한 피크값은 별도로 1 일 편성수와 1 일 운행시간 등을 활용하여 계산함

(나) 철도설비 (통신단말) 분류

- 통신 트래픽을 발생하는 철도설비 모니터링 장치와 철도 안전설비로 분류

(다) 철도통신 서비스 특성 분석

- 철도통신 상/하향링크 서비스의 종류와 요구사항 정리

표 15. 철도통신 하향링크 서비스 종류 및 특성 [20]

Services classification		Data rate (kbps)	Transmission period	Delay time	Priority
Service	Detail of service				
Train Control	Transmission of train speed control	12	Real-time	35~280ms	Vital
Video detection System	Safety support using platform video	500	Event of Train entering	0.5±0.1s	Vital
Operation & maintenance of train	Commander communication	45.6	Traffic generation basis	0.5±0.1s	Vital
	Station communication	45.6	Traffic generation basis	0.5±0.1s	Vital
	Portable communication	45.6	Traffic generation basis	0.5±0.1s	Vital
	Vehicle communication	45.6	Traffic generation basis	0.5±0.1s	Vital
Railway customer service	Vehicle passenger service	13.75	Real-time around the station	0.5±0.1s	Non-vital
Freight information on management	Tracking cargo movement path	14	Real-time around the station	0.5±0.1s	Non-Vital
	Real-time information confirmation in CY	14	CY-site limited	0.5±0.1s	Non-vital
Railroad crossings information system	Crossing control information system	14	Crossing adjacent region limited	0.5±0.1s	Vital
	Crossing observation system	2000	Crossing adjacent region limited	0.5±0.1s	Vital

표 16. 철도통신 상향링크 서비스 종류 및 특성 [20]

Services classification		Data rate (kbps)	Transmission period	Delay time	Priority
Service	Detail of service				
Train control	Transmission of train location	12	Real-time	35~280ms	Vital
Monitoring of running train status and railway device	Real-time train status monitoring	2000	Real-time	35~280ms	Vital
	Railway infra monitoring	14	Real-time	35~280ms	Vital
	Railway device monitoring	14	Real-time	35~280ms	Vital
	Railway safety device monitoring	14	Real-time	1s	Vital
Video detection system	Safety maintenance using video within the cab	2000	Event of response absence	0.5±0.1s	Vital
	Safety maintenance using video within the vehicle	0 (2012) 2000 (2017~)	Real-time	0.5±0.1s	Vital
	Propagation at the event of accident	2000	Event of accident	0.5±0.1s	Vital
Operation & maintenance of train	Commander communication	45.6	Traffic generation basis	0.5±0.1s	Vital
	Station communication	45.6	Traffic generation basis	0.5±0.1s	Vital
	Portable communication	45.6	Traffic generation basis	0.5±0.1s	Vital
	Vehicle communication	45.6	Traffic generation basis	0.5±0.1s	Vital
Railway customer service	Vehicle passenger service	13.75	Real-time around the station	0.5±0.1s	Non-vital
Freight information on management	Tracking cargo movement path	14	Real-time around the station	0.5±0.1s	Non-vital
	Real-time information confirmation in CY	14	CY-site limited	0.5±0.1s	Non-vital
Railroad crossings information system	Crossing control information system	14	Crossing adjacent region limited	0.5±0.1s	Vital

(라) 각 서비스 트래픽 특성 및 파라미터 산출

- 데이터 서비스의 특성을 Session Arrival Rate, Service Activity 와 Service Priority 로 구분하여 분류

- Session Arrival Rate: 초당 특정 서비스가 시작 되는 횟수
- Service Activity: 전체 시간 중 해당 서비스 가 제공되는 시간의 비율
- Service Priority: 해당 서비스의 제공여부가 승객들의 안전과 직접 연관되어 있는지 여부

표 17. 철도통신 하향링크 데이터 트래픽 특성 및 파라미터 [20]

Service name	Data rate (kbps)	Session arrival rate	Service activity	Service priority
Train speed control	12.0	1.0000	1.0000	Vital
Service for passenger	13.8	0.0458	0.1250	Non-vital
Tracking cargo movement path	14.0	0.0417	0.0366	Non-vital
Real-time cargo handling information	14.0	0.0417	0.0366	Non-vital
Crossing control information	14.0	0.0153	0.1944	Vital

표 18. 철도통신 상향링크 데이터 트래픽 특성 및 파라미터 [20]

Service name	Data rate (kbps)	Session arrival rate	Service activity	Service priority
Transmission of train location	12.0	1.0000	1.0000	Vital
Railway infra monitoring	14.0	1.0000	0.3333	Vital
Service for passenger	13.8	0.0458	0.1250	Non-vital
Tracking cargo movement path	14.0	0.0417	0.0366	Non-vital
Real-time cargo handling information	14.0	0.0417	0.0366	Non-vital
Crossing control information	14.0	0.0153	0.1944	Vital
Electronic monitoring	14.0	0.0153	0.0269	Vital
Signal flag	14.0	0.0458	0.0017	Vital
Relay device	14.0	0.0153	0.0017	Vital
Induction device	14.0	0.0153	0.0017	Vital
Shunting signal	14.0	0.0153	0.0023	Vital
Shunting indication	14.0	0.0153	0.0017	Vital
Course indication	14.0	0.0153	0.0011	Vital
Railway switcher	14.0	0.0153	0.0017	Vital
Axle temp. detection	9.6	5.0000	0.1067	Vital
Obstacle detection	56.0	5.0000	0.0183	Vital
Drag detection	64.0	5.0000	0.0160	Vital
Weather monitoring	64.0	5.0000	0.0160	Vital
Rail temp. detection	64.0	5.0000	0.0160	Vital
Tunnel alarm	64.0	5.0000	0.0160	Vital
Line crossing detection	14.0	5.0000	0.0731	Vital
Track divergence device heating	14.0	5.0000	0.0731	Vital
Machine room monitoring	14.0	5.0000	0.0731	Vital
Safety switch	14.0	5.0000	0.0731	Vital
Earthquake monitoring	14.0	5.0000	0.0731	Vital

표 19. 철도통신 상/하향링크 음성서비스 트래픽 특성 및 파라미터 [20]

Service Name	Data rate (kbps)	Voice activity (Omni-direction)	Erlang/ User	Call blocking rate	2012		2017		2022	
					Number of UE	Num of required channel	Number of UE	Num of required channel	Number of UE	Num of required channel
Commander communication	45.6	0.38	0.20	0.001	22	13	30	15	36	17
Station communication	45.6	0.38	0.20	0.001	78	29	89	32	100	35
Portable communication	45.6	0.38	0.10	0.001	35	11	35	11	35	11
Vehicle communication	45.6	0.38	0.10	0.001	66	13	90	17	108	19
Railway police device	45.6	0.38	0.10	0.001	5	5	5	5	5	5

표 20. 철도통신 하향링크 영상서비스 트래픽 특성 및 파라미터 [20]

Service name	Data rate (kbps)	Session arrival rate	Service activity	Service priority
Video in platform	500	1.0000	0.3333	Vital
Crossing observation	2,000	0.0153	0.1944	Vital

표 21. 철도통신 상향링크 영상서비스 트래픽 특성 및 파라미터 [20]

Service name	Data rate (kbps)	Session arrival rate	Service activity	Service priority
Real-time train status monitoring	2,000	0.2500	0.2000	Vital
Safety video within the cab	2,000	0.2500	0.1000	Vital
Video in platform	2,000	0	1.0000	Non-vital
Safety video within the vehicle	2,000	0.2500	0.5000	Vital/ Non-vital
Propagation at the event of accident	2,000	0	1.0000	Vital

(마) 상-하향링크 트래픽 산출

- 각 서비스별 트래픽 량을 아래 식을 이용하여 산출

$$\text{Data Traffic}_{\text{service}} = \text{Datarate}_{\text{service}} \times \text{단말기수}_{\text{service}} \times \text{Session Arrival Rate}_{\text{service}} \times \text{Service} \times \text{Activity}_{\text{service}}$$

표 22. 철도통신 상향링크 트래픽 계산 결과 예시 (2012) [20]

UE Classification		Data traffic (kbps)	Service	Priority
Train control		733.3	Data	Vital
Train driver voice communication		225.3	Voice	Vital
Platform video for train driver		1,200.0	Video	Vital
Train crew	Voice	225.3	Voice	Non-vital
	Video	5.2	Data	Non-vital
Station crew		502.5	Voice	Non-vital
Maintenance crew		190.6	Voice	Non-vital
Freight train		0.3	Data	Non-vital
Crossing device		0.04159	Data	Vital
Electronic monitoring		0.00574	Data	Vital
Signal flag		0.04950	Data	Vital
Relay device		0.00037	Data	Vital
Induction device		0.00183	Data	Vital
Shunting signal		0.00684	Data	Vital
Shunting indication		0.01467	Data	Vital
Course indication		0.02151	Data	Vital
Railway switcher		0.02823	Data	Vital
Earthquake monitoring		5.1	Data	Vital
Axle temp. detection		5.1	Data	Vital
Obstacle detection		5.1	Data	Vital
Drag detection		10.2	Data	Vital
Weather monitoring		5.1	Data	Vital
Rail temp. detection		5.1	Data	Vital
Tunnel alarm		30.7	Data	Vital
Line crossing detection		5.1	Data	Vital
Track divergence device heating		204.8	Data	Vital
Machine room monitoring		10.2	Data	Vital
Safety switch		81.9	Data	Vital
Railway police	Video	0.0	Video	Non-vital
	Voice	86.6	Voice	Non-vital
video within the vehicle		0.0	Video	Vital
CCTV around the station		0.0	Voice	Non-vital
Total		3537.9		

표 23. 철도통신 하향링크 트래픽 계산 결과 예시 (2012) [20]

UE Classification		Data traffic (kbps)	Service	Priority
Train control		531.5	Data	Vital
Train driver voice communication		225.3	Voice	Vital
Platform video for train driver		3,666.7	Video	Vital
Train crew	Voice	225.3	Voice	Non-vital
	Data	5.2	Data	Non-vital
Station crew		502.5	Voice	Non-vital
Maintenance crew		190.6	Voice	Non-vital
Freight train		0.3	Data	Non-vital
Crossing device		6.0	Data	Vital
Railway police	Voice	0	Video	Non-vital
	Data	86.6	Voice	Non-vital
Total		5439.9		

(바) 상-하향링크 주파수 소요량 산출

- 각 서비스별 트래픽량을 더하여 연도 별 상/하향링크 트래픽량을 계산하고, 예상되는 주파수 효율로 나누어 주파수 소요량 계산

표 24. 철도통신 하향링크 트래픽 계산 결과 [20]

Classification		Amount of traffic (kbps/cell)		
		2012	2017	2022
Service	Data	542.9	744.0	897.9
	Voice	1,230.3	1,386.2	1,507.5
	Video	3,666.7	5,000.0	6,000.0
Total		5,439.9	7130.2	8405.4

표 25. 철도통신 상향링크 트래픽 계산 결과 [20]

Classification		Amount of traffic (kbps/cell)		
		2012	2017	2022
Service	Data	1,107.6	1,457.1	1,740.5
	Voice	1,230.3	1,386.2	1,507.5
	Video	1,200.0	9,500.0	11,600.0
Total		3,537.9	12,343.4	14,848.0

표 26. 주파수 소요량 계산에 사용한 주파수 효율 값 [20]

Spectral efficiency (bps/Hz)			
System	2012	2017	2022
3G (WCDMA)	0.49	1.10	1.10
4G (LTE/WiMAX)	1.46	1.56	2.32

표 27. 철도통합무선망 주파수 소요량 계산결과 [20]

Bandwidth requirement (MHz)			
Direction	2012	2017	2022
Downlink	3.73	4.57	3.62
Uplink	2.42	7.91	6.40
total	6.15	12.48	10.02

이 논문의 주파수 소요량 산출 방법은 안전 필수 서비스인 철도에 특화된 트래픽 특성 분류부터 장비 정보(단말기 수)와 피크 값에 해당하는 운행 상황에 부합하는 트래픽 파라미터를 적용하여 철도망에 최적화된 주파수 예측을 가능하게 한 점에서 의미가 있다고 판단된다.

4. UAM 통신 서비스를 위한 주파수 소요량 분석 방법

본 연구에서는 앞서 설명한 철도통합무선망 주파수 소요량 산출 방식을 UAM 환경에 맞추어 수정하여 적용하고자 한다. 이러한 접근 방법이 타당하다고 판단되는 근거는 다음과 같다.

- **운용 환경의 구조적 유사성: 선형 회랑과 통제된 이동성**
 - 철도와 UAM 은 일반적인 이동통신 사용자와 달리, 정해진 경로를 따라 이동하며 중앙 관제 시스템의 통제를 받는다는 점에서 구조적으로 매우 유사

- 고정된 이동 경로 (Corridor vs Track): 철도가 궤도를 따라 1 차원적으로 이동하듯, 초기 UAM 역시 고정형 회랑(Fixed Corridor) 내에서 운항하는 것을 고려함. 철도 주파수 계산 시 셀 반경 내 진입 가능한 최대 열차 수를 계산하는 것과 유사하게, UAM 역시 회랑의 용량과 분리 거리(Separation)를 기반으로 단위 셀(공역) 내 최대 기체 수를 산출할 수 있고, 버티포트 주변 최대 기체 대수를 기준으로 하여 트래픽 총량을 예측할 수 있음
- 엄격한 안전 이격 거리: 철도가 제동거리를 고려하여 열차 간 간격을 유지하듯, UAM 역시 안전 운항을 위해 전략적·전술적 분리를 수행하며 항로 이탈을 엄격히 모니터링해야 하므로 무작위 분포 모델(Random Walk)이 아닌 결정론적 트래픽 모델 적용이 가능함
- 통신 서비스 분류 및 속성의 유사성
 - 철도통신망(LTE-R) 연구에서 정의한 서비스 분류 체계(음성, 영상, 제어 데이터)와 중요도(Vital/Non-Vital) 구분은 UAM 통신 서비스 분류 체계와 유사하게 매핑될 수 있음
 - 서비스 카테고리의 유사성:
 - 음성 (Voice): 철도의 관제사-승무원 간 통신은 UAM의 조종사-관제사 간 음성 통신과 유사한 특성을 가짐
 - 데이터 (Control/Data): 철도의 열차제어시스템(TCS) 신호 전송은 UAM의 위치 정보, 기체 상태 정보, 운항지원 정보 전송과 유사한 특성
 - 영상 (Video): 철도의 승강장/건널목 감시 영상, 열차 내부 감시 영상은 UAM의 기내/외부 모니터링 및 버티포트(Vertiport) 이착륙 감시 영상 서비스로 확장 해석할 수 있음

- Vital vs Non-Vital 구분: 철도 연구에서 통신 트래픽을 안전 필수(Vital)와 비 필수(Non-Vital)로 구분하여 가중치를 둔 것처럼, UAM 역시 안전 운항 정보(위치, 기체 상태 등)와 부가 정보(인포테인먼트, 일반 운항지원 정보) 간의 명확한 우선순위 구분이 존재
- 트래픽 파라미터 및 산출 수식의 적용성
 - 철도 주파수 소요량 계산 논문 [20]에서 제안한 ITU-R M.1390 수정 방법론은 UAM의 트래픽 특성을 반영하기에 적합함
 - 세션 도래율(Session Arrival Rate) 및 활성화율(Activity Factor): 철도 연구에서는 열차 운행 횟수와 이벤트 발생 주기를 통해 세션 도래율을 계산했는데, 이는 UAM 통신 성능 요구도 연구 [21]에서 제시된 UAM 통신 패킷 별 정보 생성 주기(Period)와 전송 지속 시간 비율을 이용하여 동일하게 계산할 수 있음

제2절 UAM 신규 CNSi 기술 별 기존 CNSi 기술과의 간접 조건/ 공유조건

1. 개요

UAM CNSi 목적으로 신규 주파수를 공급할 경우 발생할 수 있는 간접 시나리오와 해당 상황에서 준수해야 하는 공유조건에 대해 살펴본다. 앞에서 언급한 바와 같이 항법 기술 관련해서는 GNSS 대체 항법 기술과 관련한 신규 주파수 수요가 일부 있으나, 주파수 소요량이 크지 않고, 기술 성숙도가 높지 않아 레이다를 중심으로 한 감시 기술과 통신 기술과 관련된 사항을 중심으로 분석한다.

감시, 통신 기술과 관련해서도 어느 주파수 대역이 얼마만큼 필요한지에 대한 기초 연구도 국내외에서 이루어진 바가 없으므로, 잠재적으로 발생 가능한 간섭 이슈와 일반론 적인 공유 조건에 대해 다룰 수밖에 없는 한계 점이 있다.

2. 감시 기술

K-UAM 그랜드 챌린지에서도 그림 20과 같이 ADS-B와 함께 레이더를 주요 감시 수단으로 설정하여 고흥 항공시험장에 설치하여 실증에 활용하였다. 항로 전체에 대한 감시에 레이더를 이용할지 여부는 불확실하지만 앞에서 살펴본 바와 같이 버티포트 주변이나 공항 등 주요 시설물 주변에서는 레이더가 주요한 감시 수단으로 사용될 것으로 판단된다.

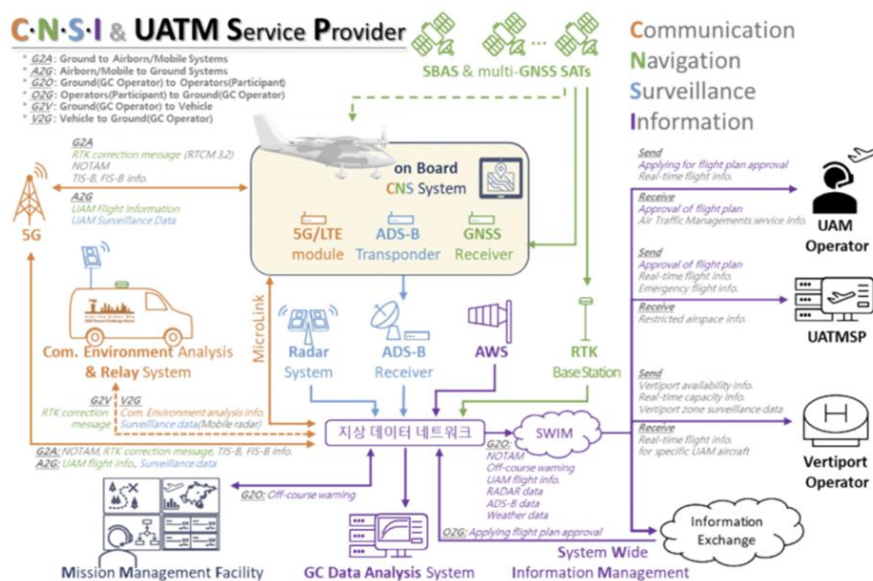


그림 20. K-UAM GC 1 CNSi 체계

UAM 감시용으로 레이더가 사용될 경우 어느 주파수 대역이 할당될지는 불분명하다. 현재 공항에서는 항공기를 위한 감시레이더에 더해 드론

감시레이다, 조류감시레이다 등이 운용되고 있으며, 일반적으로 새로운 레이다 시스템이 도입될 경우, 국내외의 간섭 허용 규정과 공유 조건에 맞추어 기존 시스템에 영향이 없다고 판단되는 주파수 대역이 할당된다. 이와 관련된 국내외 규정을 정리해 보자.

무선측정업무(radiodetermination service)에 속하는 레이다 시스템은 제한적인 주파수 스펙트럼 내에서 필수적인 기능을 제공하지만, 다른 서비스에 비해 넓은 대역폭을 필요로 한다. 따라서 주파수 효율성을 높이고 다른 시스템과의 호환성을 확보하는 것이 중요하며, ITU-R 권고는 레이다 시스템 설계 시 간섭 억제 기술을 활용하도록 권고하고 있다.

(가) 국제 호환성 분석 절차 및 간섭 보호 기준 (ITU-R M.1461 [22], M.1464 [23])

- 안전 업무(Safety Service)의 보호 원칙
 - 무선향행업무(Radionavigation service)는 안전 업무 (safety service)로 지정되어 있으며(RR No. 4.10), 이 서비스에 대한 유해한 간섭은 허용될 수 없음
 - 항공교통 감시와 같은 안전 목적의 레이다 시스템은 단기 및 장기 간섭 모두로부터 보호가 필요하며, 전파 모델은 허용 한계를 초과할 수 있는 모든 전파 증대 현상을 고려해야 함
- 일반적인 간섭 대 잡음비 (I/N) 보호 기준
 - CW, BPSK, QPSK 또는 노이즈와 같은 높은 듀티 사이클 간섭 신호의 경우, 일반적으로 레이다 사용자가 허용할 수 있는 I/N 비율은 -6 dB 이하. 이 기준은 레이다 수신기 잡음 전력을 약 1 dB 증가시키는 수준임

- 총합 간섭(Aggregate Interference): 다수의 간섭원이 존재하더라도 권고되는 I/N 보호 기준은 변동되지 않으며, 모든 간섭원의 기여를 누적하여 총 간섭 수준을 평가해야 함
- 특정 대역의 엄격한 보호 기준 사례 (2700-2900 MHz)
 - 항공 무선헤행 레이다가 운용되는 2700-2900 MHz 대역의 경우, 디지털 변조 방식의 통신 시스템 방출에 대한 총합 보호 임계값은 -10 dB 를 기준 설정
 - 이는 테스트 결과, -6 dB I/N 수준에서도 이미 레이다의 표적 탐지 성능에 영향이 발생했기 때문

(나) UAM 감시용 레이다의 주파수 및 대역폭 신규 공급 기준 (국내 규정 준용)

- 개요
 - UAM 감시용 레이다는 새로운 주파수 대역이 할당될 경우 국내 「간이무선국·우주국·지구국의 무선설비 및 전파탐지용 무선설비 등 그 밖의 업무용 무선설비의 기술기준」 [24] 고시에서 드론탐지 레이다에 적용되는 기술기준 (제 21 조)을 준용하여 유사한 방식으로 주파수 대역 및 대역폭 기준을 설정할 수 있을 것으로 판단됨
 - 드론탐지 레이다는 국가중요시설 보호를 위해 특정 주파수 대역에서 운용됨. UAM 용 감시레이다도 유사하게 전용 주파수 대역이 할당되어야 함
 - 드론과 UAM 기체는 크기, 운용고도, 공역 등 다른 점들이 많으므로 아래 값들은 설정 항목과 기준을 단순 참고 사항으로 고려할 수 있을 것으로 판단됨
- 공통 기술 기준

구분	조건	상세 내용
스푸리어스 발사	$43 + 10\log(P)$ [dB] 또는 60 dB 중 덜 엄격한 값 이하	P: 안테나공급전력 최대값(W).
점유주파수대역폭 (OBW) 정의	안테나공급전력 최대값보다 20 dB 낮은 지점 사이의 폭	「무선설비규칙」 제 6 조제 2 항의 필요 주파수대역폭을 적용.
다수 주파수 사용	하나의 송신장치에서 여러 주파수의 전파를 발사할 경우 개별 주파수 모두 기술 조건을 만족해야 함.	

- 주파수 대역별 세부 기준

• 8.5 ~ 8.6 GHz 주파수 대역

변조 방식	안테나 공급 전력 (최대)	최대 주파수 편이	점유주파수대역폭 (OBW)
주파수 변조 펄스파	첨두 전력 200 W 이하 (23 dBi 기준 조정)	33 MHz 이내	최대 주파수 편이의 300 % 이내
주파수 변조 연속파	평균 전력 40 W 이하 (26 dBi 기준 조정)	42 MHz 이내	최대 주파수 편이의 220 % 이내

• 15.7 ~ 17.2 GHz 주파수 대역

변조 방식	안테나 공급 전력 (최대)	최대 주파수 편이	점유주파수대역폭 (OBW)
주파수 변조 펄스파	평균 전력 40 W 이하 (29 dBi 기준 조정)	200 MHz 이내	최대 주파수 편이의 240 % 이내

- 간섭 발생 시 추가 조치 절차

- 상기 기술 기준을 모두 만족하더라도, 해당 레이더 설비가 다른 무선국의 통신에 전파 간섭을 주거나 그 우려가 있는 경우, 전파

간섭이 발생하지 않도록 송·수신 장치의 기준을 변경하거나 추가할 수 있음

- 이는 신규 레이더 도입 시 잠재적 간섭 문제에 대해 유연하게 대응할 수 있는 제도적 절차임

3. 통신 기술

통신 서비스를 위한 신규 주파수 할당 시에는 기존 서비스의 정상 동작을 보장할 수 있도록 엄격한 규정과 절차를 따라야 하며, 각 국의 주파수 사용 상황이 상이하므로 특정 대역의 사용 목적은 ITU-R에서 국제적으로 조율하고, 각 국에서는 이 자체적인 규정/지침에 따라 해당 서비스 목적에 맞는 세부 주파수 할당을 수행한다. 이와 관련된 국내외 규정과 절차를 정리하면 다음과 같다.

(가) 국제 규정 및 절차 (ITU-R 중심)

- 전파규칙 (Radio Regulations) [25]
 - ITU 전파규칙(Radio Regulations, RR)은 국제전기통신연합(ITU)에서 발행하는 국제 조약 성격의 문서로, WRC(세계전파통신회의)를 통해 3~4 년 주기로 개정됨
 - Article 5 (Frequency Allocations): 전 세계를 3 개 지역(Region)으로 나누어 주파수 대역별 용도를 정의. 신규 할당 시 1 순위(Primary) 업무와 2 순위(Secondary) 업무 간의 보호 의무 관계를 명시함
 - Article 9 (Procedure for effecting coordination): 인접 국가나 다른 위성망과의 주파수 조정(Coordination) 절차를 규정. 간섭 가능성이 있는 경우, 사전에 기술 정보를 교환하고 합의해야 하는 의무 조항

- Article 15 (Interferences): 유해 간섭(Harmful Interference)의 정의와 금지, 해결 절차를 다룸
- Appendix 7: 지구국 간의 조정 영역(Coordination Area)을 결정하는 방법론을 기술
- 주요 권고 (Recommendations) - 보호 기준 수립용
 - ITU-R M-Series (Mobile): 이동통신 서비스의 보호 기준(I/N 등) 정의. (예: ITU-R M.2101 [26] - 4G/5G 시스템과 위성 간 간섭 보호기준 제시)
 - ITU-R SM-Series (Spectrum Management): 스펙트럼 관리 및 감시 기술. (예: ITU-R SM.1541 은 대역 외 발사(Out-of-band emission) 한계치를 규정)
 - ITU-R P-Series (Radiowave Propagation): 간섭 모의 실험 등에 사용하는 전파 전파 모델 제시

(나) 미국 규정 및 절차 (FCC, NTIA)

- FCC CFR Title 47 (Telecommunication) [27]
 - Part 2: 주파수 할당 및 조약 관련 일반 사항.
 - Part 15 (Radio Frequency Devices): 비 면허 기기(Wi-Fi, IoT 등)의 간섭 방지 규정
 - Part 96 (CBRS): 3.5GHz 대역에서 기존 레이더(Incumbent)를 보호하고 공유하는 규칙을 상세히 기술
- NTIA Redbook [28]
 - 정부/군사용 주파수 관리 규정
 - 민간(FCC) 대역과 정부 대역이 겹칠 때의 조정 절차를 다룸

(다) 유럽 규정 (CEPT/ECC & ETSI)

- ECC Decisions: 주파수 사용에 대한 강제적 규정 (예: 5GHz 대역 WAS/RLAN 사용 시 기상 레이더 보호를 위한 DFS 기능 의무화 등)
- ECC Reports: 신규 주파수 도입 전 기술적 타당성과 간섭 시나리오를 검토한 문서(예: ECC Report 302, 6GHz 공유 연구)
- ETSI Harmonised Standards (EN): 유럽 시장에 장비를 출시하기 위해 준수해야 하는 표준으로, 스펙트럼 마스크(Spectrum Mask) 등 간섭 방지를 위한 장비 요구사항을 정의 (예: EN 301 893 - 5GHz RLAN)

(라) 대한민국 규정

- 법령 및 고시
 - 국내에서는 전파법을 최상위로 하여 과학기술정보통신부 고시 및 국립전파연구원(RRA) 공고를 통해 구체적인 간섭 기준을 관리함
 - 무선설비 규칙: 송신 설비가 지켜야 할 스푸리어스 (불요파) 발사 강도, 주파수 허용 편차 등을 규정하여 타 시스템 간섭을 원천적으로 제한함
 - 신고하지 아니하고 개설했을 수 있는 무선국용 무선설비의 기술기준: 비면허 대역(Wi-Fi, RFID/USN 등) 기기의 출력, 듀티 사이클(Duty Cycle), LBT(Listen Before Talk) 등의 간섭 회피 기술 탑재 의무를 규정
- 실무 절차 (주파수 할당 시)
 - 주파수 환경 분석: 신규 주파수 할당 시, 국립전파연구원 등에서 기존 무선국과의 간섭 가능성을 시뮬레이션 하여 확인
 - 공동사용 조건 부과: 간섭 분석 결과에 따라 이격거리 설정, 가드밴드(Guard Band) 확보, 필터 장착 의무화 등의 조건을 할당

(마) 예시: 1.4 GHz 대역 IMT와 방송위성업무(BSS) 공유 [29]

- BSS (위성) 보호를 위한 기준 (IMT 제한)
 - BSS 수신지구국 보호를 위해 BSS 통고 주관청 국경에서의 IMT 송신신호에 의한 전력속밀도($-154\text{dB(W/m}^2\cdot 4\text{ kHz)}$) 제한

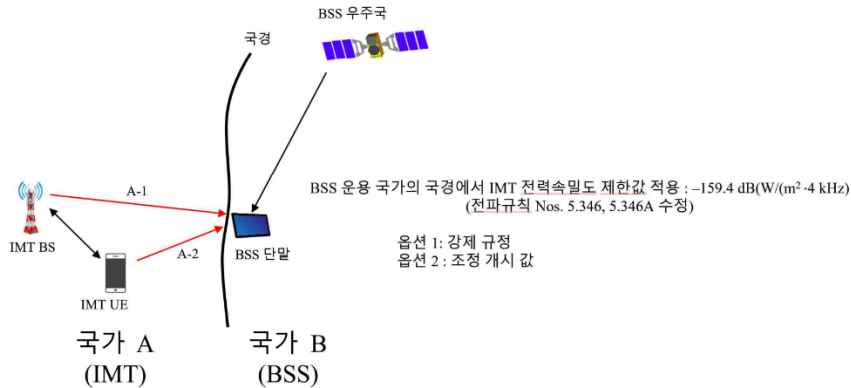


그림 21. BSS 보호 간섭 시나리오

- IMT (지상) 보호를 위한 기준 (BSS 제한)
 - IMT 보호를 위해 BSS 우주국 전력속밀도 제한값 계산
 - Alternative 1 (IMT 단말 보호): $-112\text{ dBW/m}^2\cdot 1\text{ MHz}$
 - Alternative 2 (IMT 기지국 & 단말 보호): $-131.3 \sim -115.3\text{ dBW/m}^2\cdot 1\text{ MHz}$
 - Alternative 3 (BSS 송신 특성 기준): $-91.5\text{ dBW/m}^2\cdot 4\text{ MHz}$

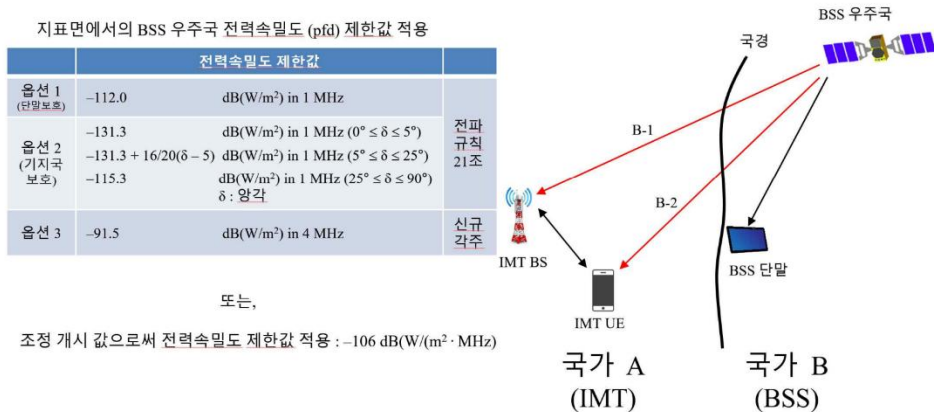


그림 22. IMT 보호 간섭 시나리오

- 우선권
 - WRC-19 시작일 이전에 조정 및 통고서를 제출하고 2024 년 1 월 1 일 이전에 운용을 개시한 BSS 시스템에는 이 제한값이 적용되지 않음
 - 위성망과 지상 IMT 시스템 간의 주파수 공유에서는 상호 운용성을 확보하기 위해 지상 시스템의 보호를 위한 위성망 출력 제한과 위성 시스템의 보호를 위한 지상 시스템 출력 제한이 모두 설정됨
 - 궁극적으로 새로운 시스템(예: ESIM 또는 신규 IMT 도입)이 기존 시스템에 유해한 간섭을 주지 않도록 기술적/규정적 제한(PFD, 이격거리 등) 을 적용하는 것이 핵심적인 공유 조건 및 우선순위임

제3절 초기 UAM 상용화 시나리오에 따른 신규 주파수 소요량 분석

1. 분석 방법

앞에서 언급한대로 제 3 장-제 1 절에서 분석한 다양한 주파수 소요량 분석 방법 중 LTE-R 주파수 소요량 분석 방법[20]은 LTE-R과 UAM 교통관리 통신망의 특성 간 유사성을 고려할 때 초기 UAM 상용화 시나리오에 따른 신규 통신 주파수 소요량 분석에 있어 유용한 방법이다. 기본적으로는 그림 19의 [20] 논문의 분석 과정을 따르되, 기체별로 필요한 하향링크, 상향링크 요구 전송률 분석 결과[21]가 이미 제시되어 있으므로 해당 결과를 활용하여 분석하고자 한다. 분석 과정에서 가정한 수치에 따라 분석 결과는 큰 편차를 갖게 되고, 아직 불분명한 것이 많으므로, 절대적인 값 보다는 산출 과정을 중심으로 참고하는 것이 적절하다고 판단된다.

2. 셀 환경 고려, 통신 단말 분류

통신 수요가 가장 많은 밀집한 상황을 회랑 구간과 버티포트 상황으로 나누어 분석한다. 단일 기지국의 커버리지는 2km를 가정하고, 지상 버티포트와 그 주변을 서비스하는 기지국과 상공 항로를 서비스하는 기지국은 서로 다르다고 가정한다. 통신 단말은 eVTOL 기체에 장착되는 단일 단말 형태이다.

(가) 항로구간

- 초기 운용단계에서는 대부분의 국가에서 기존 항공 교통 체계 내에서 제한적으로 운용되므로, 기존 유인 항공기의 시계비행(VFR) 및 계기비행(IFR) 분리 기준을 그대로 따르게 됨
- 안전거리: 수직분리 최소 1000ft (300m), 수평분리 최소 2500ft (약 750m)
- 최대 서비스 UAM 기체 수: 2km 커버리지 내에 수평으로 3 대 ($2000/750 = 2.67$), 300m 와 600m 에 서로 다른 방향으로 회랑 존재하는 경우 셀 당 최대 6 대 기체 서비스 가능

(나) 버티포트 구간

- K-UAM 운용개념서에 따르면 최대 밀집 시나리오는 다음과 같음
 - 접근/대기 (Approach): 1 대. 동시 접근은 허용되지 않으며, 선행 항공기가 착륙 후 이착륙장(TLOF)을 비울 때까지 후행 항공기는 공역 밖에서 대기해야 함
 - 이·착륙 (Active on TLOF): 1 대. 단일 TLOF 운용이 기본이며, 이착륙 절차가 완료될 때까지 다른 기체의 진입이 금지됨
 - 주기 중 (Parked): 1~2 대. 초기 버티포트는 소규모 거점 형태로, 비상 상황이나 승객 승하차를 위한 최소한의 주기 공간만 확보함
 - 시간당 처리량 (Throughput): 4~6 회/시간

- 최대 서비스 UAM 기체 수: 접근/대기 1 대 + 이·착륙 1 대 + 주기 중 2 대 = 4 대

3. UAM통신 서비스 특성 분석 및 각 서비스 트래픽 특성 및 파라미터 산출

국내외 UAM ConOps 분석을 바탕으로 [21]에서 도출한 UAM 통신 서비스 특성과 각 정보 전송에 있어 요구되는 QoS 관련 파라미터는 표28과 같다.

표 28. UAM 통신 서비스 종류 및 특성 [21]

ID	Information	Packet size (kbyte)	Latency (sec)	Period (sec)	Required data rate (kbps)	Ratio of information transmission time	Reliability
U01	Real-time aircraft position information	1	1	1	8	100%	0.999
U02	Real-time aircraft status information	1	1	10	8	100%	0.999
D01	Supplemental data (obstacles and terrain)	1	1	-	8	low (< 1%)	0.999
D02	Supplemental data (weather)	1	1	-	8	low (< 1%)	0.999
D03	Supplemental data (noise)	1	1	-	8	low (< 1%)	0.999
D04	NOTAM, information on restricted airspace	1	1	-	8	low (< 1%)	0.9999
D05	Vertiport information for take-off and landing support	1	1	10	8	10%	0.999
D06	Availability of vertiports, real-time capacity	10	1	600	80	100%	0.999
D08	Real-time surveillance information (including ADS-B information)	20	1	1	160	100%	0.99
D10	Flight restrictions	1	1	10	8	low (< 1%)	0.9999
V03	Communication for take-off and landing support or control (G2A)	-	0.1	0.02	31.2	10%	0.99
V04	Communication for take-off and landing support or control (A2G)	-	0.1	0.02	31.2	10%	0.99

4. 상-하향링크 트래픽 산출

상공 통신망의 경우 커버리지 확보가 지상에 비해 어려우며, 요구되는 Reliability 값이 철도 통신을 포함한 일반적인 통신 상황에 비해 높다. 이를 극복하기 위해 [21]에서는 적절한 재 전송을 고려한 각 기체 당 상-하향링크 트래픽을 표 29와 같이 계산하였다.

표 29에서는 UAM 교통관제 및 운항을 위한 필수 데이터만을 포함하며, 승객석과 조종석이 분리되어 있고, 승객석에는 승무원이 탑승하지 기체 승객 모니터링 등을 위한 영상 정보 송신을 고려하면 1080p 30pfs 기준 2~4Mbps가 필요하므로 이는 Non-Vital 서비스로 분류하여 산출한다. 앞에서 분석한 바와 같이 최대 밀집 환경은 버티포트가 아닌 항로 구간으로

판단되고, 6대를 기준으로 산출한 상-하향링크 트래픽은 표 30과 같다.

표 29. UAM 기체 당 상-하향링크 트래픽 [21]

ID	Information	Period (sec)	Required data rate (kbps)	Ratio of information transmission time	Reliability	Required number of transmission	Peak data rate (kbps)	Average data rate (kbps)
U01	Real-time aircraft position information	1	8	100%	0.999	2	16	16
U02	Real-time aircraft status information	10	8	100%	0.999	2	16	1.6
D01	Supplemental data (obstacles and terrain)	-	8	low (< 1%)	0.999	2	16	0.16
D02	Supplemental data (weather)	-	8	low (< 1%)	0.999	2	16	0.16
D03	Supplemental data (noise)	-	8	low (< 1%)	0.999	2	16	0.16
D04	NOTAM, information on restricted airspace	-	8	low (< 1%)	0.9999	3	24	0.24
D05	Vertiport information for take-off and landing support	10	8	10%	0.999	2	16	0.16
D06	Availability of vertiports, real-time capacity	600	80	100%	0.999	2	160	0.27
D08	Real-time surveillance information (including ADS-B information)	1	160	100%	0.99	2	320	320
D10	Flight restrictions	10	8	low (< 1%)	0.9999	3	24	0.024
V03	Communication for take-off and landing support or control (G2A)	0.02	31.2	10%	0.99	2	62.4	6.24
V04	Communication for take-off and landing support or control (A2G)	0.02	31.2	10%	0.99	2	62.4	6.24
Required uplink data rate (kbps)							94.4	23.8
Required downlink data rate (kbps)							654.4	327.4

표 30. UAM 상-하향링크 트래픽

	vital (Mbps)	non-vital (Mbps)	합 (Mbps)
하향링크	0.65	0	0.65
상향링크	0.57	12	12.57

5. 상-하향링크 주파수 소요량 산출

총 트래픽량을 시스템 오버헤드를 고려한 주파수 효율로 나누면 요구 주파수 소요량을 산출할 수 있다. UAM 상공통신망의 경우 기존 지상망과 특성이 여러모로 달라 적절한 주파수 효율 값을 산정하는 것이 현 시점에서 무리가 있다. 여러 문헌 중 3GPP에서 발간한 LTE 기반 드론/UAM 지원을 위해 수행한 3GPP TR 36.777 연구 보고서 [30]에는 하향(DL): 약 2.0 ~ 3.5 bps/Hz, 상향(UL): 약 1.5 ~ 2.0 bps/Hz 로 제시하고 있다. 이 값 중 낮은 값을 이용하여 산출한 상-하향링크 주파수 소요량은 표 31과 같다. Non-vital 서비스를 포함하여 보수적으로 산출하더라도 상-하향링크 합 8.71MHz 정도로 요구되는 주파수 소요량은 크지 않다.

표 31. 초기 UAM 서비스를 위한 주파수 소요량

	vital (MHz)	non-vital (MHz)	합 (MHz)
하향링크	0.33	0	0.33
상향링크	0.38	8.00	8.38
합	0.71	8.00	8.71

제4절 UAM 발전 단계별 주파수 수요량 변화 분석

UAM 발전단계가 발전기와 성숙기로 발전하게 되면 두 가지 측면에서 주파수 소요량 증가 요인이 있다.

첫째는 UAM 서비스의 수요 증가와 비행규칙 정립으로 UAM 밀집도가 증가하게 된다. 발전기 이후에는 수평분리도가 1200ft, 수직분리도 500ft로 감소하는 것을 고려할 수 있고 [31], 이 경우에는 셀 반경을 그대로 2km로 유지하게 되면 초기 단계에 비해 4배인 최대 24대가 1개 셀에 존재하는 것을 고려해야 한다. 다만 UAM 수요가 증가하게 되면 통신 인프라 역시 추가로 설치할 것으로 예상 가능하므로, 반경 1km 셀을 가정하여 셀 당 최대 12대의 기체를 서비스하는 것으로 가정하자.

두 번째 요인은 원격 조종이 일부 도입될 가능성이 있어, 기체 내부 및 주변에 대한 영상 정보 송신이 필수적이고, 고품질/ 저지연 전송이 요구되게 된다. 이를 고려하여 기체당 Full HD (1080p, 60fps) 6Mbps 영상 정보 2개가 상시로 전송되어야 한다고 가정한다. 추가로 하향링크에서는 원격조종을 위한 전송률을 데이터 양은 매우 적으나 초저지연(Low Latency)과 무결성이 요구되는 특성을 고려하여 기체당 300kbps로 산출하면 발전기 이후 UAM 통신 트래픽량을 산출하면 표 32와 같다. 조종을 위한 영상정보 외에 객실 모니터링을 위한 영상 트래픽도 non-vital로 포함하였다.

주파수 소요량 산출에 이용되는 주파수 효율값은 상공망 최적화 및 전용 주파수 공급이 적시에 이루어 지게 되면 대폭 상향될 수 있으며 하향링크

4.0bps/Hz, 상향링크 3bps/Hz로 주파수 효율이 초기에 비해 2배가 되었다는 가정하에 주파수 소요량을 산출하면 표 33과 같다. 원격 조종 도입을 위해서는 50MHz 이상의 상당한 주파수 할당이 필요함을 확인할 수 있다.

표 32. 발전기 이후 UAM 상-하향링크 트래픽

	vital (Mbps)	non-vital (Mbps)	합 (Mbps)
하향링크	4.92	0	4.92
상향링크	145.13	24	169.13

표 33. 발전기 이후 UAM 서비스를 위한 주파수 소요량

	vital (MHz)	non-vital (MHz)	합 (MHz)
하향링크	1.23	0	1.23
상향링크	48.38	8.00	56.38
합	49.61	8.00	57.61

제 4 장 결 론

본 연구는 미래 모빌리티의 핵심인 도심항공교통(UAM)의 성공적인 상용화와 안전한 운항을 지원하기 위해 필수적인 CNSi(통신·항법·감시·정보) 기술 동향을 분석하고, 서비스 발전 단계에 따른 신규 주파수 소요량을 과학적으로 산출하였다. 연구 결과, 미국과 유럽 등 주요 선진국은 초기 단계에서 기존 항공 규제를 준용하는 보수적 접근을 취하는 반면, 한국은 초기부터 5G 및 LTE 상용망을 적극적으로 활용하는 차별화된 전략을 보유하고 있음을 확인하였다. 또한, 기술별 분석을 통해 항법과 감시 분야는 기존 항공 자원이나 비전과 센서로 대체가 가능하여 신규 주파수 수요가 제한적이지만, 통신(Communication) 분야는 기체 제어와 관제 데이터 전송을 위해 필수적인 자원으로서 별도의 주파수 확보가 시급함을 규명하였다.

특히 본 연구는 회랑(Corridor)을 기반으로 운항하는 UAM의 특성이 철도와 유사하다는 점에 착안하여, 철도통신(LTE-R) 및 ITU-R의 방법론을 수정·적용한 독자적인 주파수 산출 모델을 제시하였다는 점에서 중요한 학술적 의의를 갖는다. 이를 통해 도출된 분석 결과에 따르면, 조종사가 탑승하는 초기 저밀도 운용 단계에서는 필수 및 비필수 데이터를 포함하여 약 8.71 MHz의 대역폭이 소요될 것으로 예측되었다. 그러나 원격 조종과 자율 비행이 본격화되는 성숙기 단계에서는 기체 밀집도의 증가와 더불어 원격 제어를 위한 고화질 영상 데이터 전송이 필수화됨에 따라, 주파수 효율 향상을 고려하더라도 약 57.61 MHz의 대역폭이 필요할

것으로 분석되었다. 이는 UAM 산업의 발전 단계에 따라 주파수 수요가 급격히 증가할 것임을 시사하는 구체적인 정량적 데이터이다.

이러한 연구 결과는 향후 국가 주파수 정책 수립에 있어 핵심적인 근거 자료로 활용될 것으로 기대된다. 구체적으로는 막연하게 논의되던 UAM 주파수 수요를 초기와 성숙기로 구분하여 제시함으로써, 정부가 중장기 스펙트럼 플랜을 수립할 때 50MHz 이상의 광대역 주파수를 선제적으로 확보해야 한다는 정책적 방향성을 제시하였다. 또한, 본 연구에서 정립한 트래픽 특성 분석과 주파수 산출 방법론은 향후 UAM 통신 시스템의 기술 기준 제정과 성능 요구사항 정의에 기여하여 안전한 UAM 서비스 환경을 조성하는 데 이바지할 것이다. 나아가 국내 연구자 및 산업계에 구체적인 주파수 데이터와 기술 이슈를 제공함으로써, 통신 장비 개발 및 관련 산업 생태계의 불확실성을 해소하고 기술 개발을 촉진하는 데에도 긍정적인 파급 효과를 미칠 것으로 전망된다.

참고문헌

- [1] UBER, “Fast-Forwarding to a Future of On-Demand Urban Air Transportation”, Oct. 2016.
- [2] Federal Aviation Administration, “Urban Air Mobility (UAM) Concept of Operations v1.0,” Jun. 2020.
- [3] Federal Aviation Administration, “Urban Air Mobility (UAM) Concept of Operations v2.0,” Apr. 2023.
- [4] AMU-LED, “D2.2.012a High Level ConOps – Initial,” 2021. 3.
- [5] Skyroads AG, “A Roadmap for Flight Automation in Advanced Air Mobility – Creating and Automated Airspace Management and Vehicle Guidance System.” Jan. 2022.
- [6] UK Air Mobility Consortium, “Urban Air Mobility Concept of Operations for the London Environment,” Mar. 2022.
- [7] Eve Urban Air Mobility, “Concept of Operations for Sustainable Urban Air Mobility in Rio de Janeiro,” May 2022.
- [8] 국토교통부, 한국형 도심항공교통(K-UAM) 로드맵, 2020. 5.
- [9] UAM Team Korea, “K-UAM Concept of Operations 1.0,” Sep. 2021.
- [10] MOLIT. UAM Team Korea, Establishment of 5 Working Groups including Policy, Aircraft and Operation, and Building the Framework [Internet]. Available: http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?lcmspage=3&id=95088307
- [11] UAM Team Korea, “K-UAM Concept of Operations 1.5,” Aug. 2025.
- [12] 대한민국 스펙트럼 플랜 (2024 ~ 2027) 과학기술정보통신부, 2024. 9
<https://www.msit.go.kr/bbs/view.do?sCode=user&mId=113&mPid=238&pageIndex=&bbsSeqNo=94&nttSeqNo=3184873&searchOpt=ALL&searchTxt=>
- [13] 홍진영, 양세훈, 김현철, 최승원, 이준섭. (2022-11-16). UAM 항로용 지상항법시스템 개념 및 설계. 한국항공우주학회 학술발표회 초록집
- [14] GPS 위성항법 불용 환경에서 UAM en-route 운항을 위한 대체항법을 제공하는 지상기반 C 밴드 전파항법 시스템 개발 : 최종보고서 : 국토교통 기술사업화를 위한 이어달리기 사업 제3차 연도 최종 보고서 / 우리항행기술 2025.2.
- [15] Solomon, Bruce Allen, “System analysis using automatic dependent surveillance broadcast (ABS-B) for closely spaced parallel approaches,” Thesis (S.M.)--

- Massachusetts Institute of Technology, System Design and Management Program, 1999.
- [16] C. Heo, K. Kang, and H. Yoon, "UAM Airspace Surveillance Environment Analysis and Surveillance System Implementation," *Journal of Advanced Navigation Technology*, vol. 28, no. 6, pp. 872–878, Dec. 2024.
 - [17] *Framework and overall objectives of the future development of IMT-2000 and related systems*, Rec. ITU-R M.1390-1, International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, 1998.
 - [18] *Methodology for the calculation of IMT-2000 terrestrial spectrum requirements*, Rec. ITU-R M.1391-1, International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, 2000.
 - [19] *Key characteristics of the IMT-Advanced systems*, Rec. ITU-R M.1768-1, International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, Apr. 2013.
 - [20] M. Jeong, H. Yoon, D.-K. Park, K.-H. Kim, and S. Lee, "Bandwidth Requirement Estimation Method for Future Wireless Railway Communication Systems," *Journal of the Korean society for railway*, vol. 16, no. 6. Korean Society for Railway, pp. 540–550, 31-Dec-2013.
 - [21] Y.-H. Jung and H. Jun, "Analysis of Communication Performance Requirements for Initial-Phase UAM Services," *Journal of Advanced Navigation Technology*, vol. 28, no. 1, pp. 109–115, Feb. 2024.
 - [22] Procedures for determining the potential for interference between radars operating in the radiolocation service and systems in other services, Recommendation ITU-R M.1461-2, International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, Feb. 2018.
 - [23] Characteristics of radiolocation radars, and characteristics and protection criteria for sharing studies for aeronautical radionavigation and meteorological radars in the radiolocation service operating in the frequency band 2 700–2 900 MHz, Recommendation ITU-R M.1464-2, International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, Feb. 2015.
 - [24] Technical Requirements for Radio Equipment of Simple Radio Stations, Space Stations, Earth Stations, and Radio Determination Services, etc. (간이무선국·우주국·지구국의 무선설비 및 전파탐지용 무선설비 등 그 밖의 업무용 무선설비의 기술 기준), National Radio Research Agency Notice No. 2023-18, South Korea, Oct.

2023.

- [25] Radio Regulations, Edition of 2024, International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, 2024.
- [26] *Modelling and simulation of IMT networks and systems for use in sharing and compatibility studies*, Recommendation ITU-R M.2101-0, International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, Feb. 2017.
- [27] *Telecommunication*, 47 C.F.R. (2023). [Online]. Available: <https://www.ecfr.gov/current/title-47>
- [28] *Manual of Regulations and Procedures for Federal Radio Frequency Management (Redbook)*, National Telecommunications and Information Administration, Washington, DC, USA, 2021. [Online]. Available: <https://www.ntia.doc.gov/publications/redbook-manual>
- [29] D.-S. Oh, "Standardization for spectrum resources based on the interference assessment between satellite system and 5G system (위성망과 5G 이동통신시스템 간 주파수 간섭분석기술 기반 주파수 자원 확보 및 보호 국제 표준화 연구)," Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI), Daejeon, South Korea, Final Rep. 2018-0-01470, Feb. 2021.
- [30] *Study on Enhanced LTE Support for Aerial Vehicles*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP) Technical Report TR 36.777 V15.0.0, Dec. 2017.
- [31] S. Verma *et al.*, "Design and Analysis of Corridors for UAM Operations," in *2022 IEEE/AIAA 41st Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, Portsmouth, VA, USA, 2022, pp. 1-10.

도심항공교통(UAM) 전파자원
이용기술 동향 연구



국립전파연구원

National Radio Research Agency

(58323) 전남 나주시 빛가람로 767

발 행 일 : 2025. 12.

발 행 인 : 정창립

발 행 처 : 국립전파연구원

전 화 : 061) 338-4567

인 쇄 : 카피콜

Tel. 02) 3158-4631

ISBN : 979-11-5820-276-7 < 비 매 품 >

주 의

1. 이 연구보고서는 국립전파연구원에서 수행한 연구결과입니다.
2. 이 보고서의 내용을 인용하거나 발표할 때에는 반드시 국립전파연구원 연구결과임을 밝혀야 합니다.

