

Recommendation of Navigation Performance for K-UAM Considering Multipath Error in Urban Environment Operation

Sangdo Park, Dongwon Jung[†], Hyang Sig Jun



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Recommendation of Navigation Performance for K-UAM Considering Multipath Error in Urban Environment Operation

Sangdo Park¹, Dongwon Jung^{1†}, Hyang Sig Jun²

¹Department of Smart Air Mobility Engineering, Korea Aerospace University, Goyang-si 10540, Korea

²SBAS Program Office, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, Korea

ABSTRACT

According to the Korea Urban Air Mobility (K-UAM) Concept of Operation (ConOps), the Global Navigation Satellite System (GNSS) is recommended as the primary navigation system and the performance specification will be implemented considering the standard of Performance Based Navigation (PBN). However, by taking into account the characteristics of an urban environment and the concurrent operations of multiple UAM aircraft, the current PBN standards for civil aviation seem difficult to be directly applied to an UAM aircraft. Therefore, by referring to technical documents published in the literature, this paper examines the feasibility of applying the proposed performance requirements to K-UAM, which follows the recommendation of navigation performance requirements for K-UAM. In accordance with the UAM ConOps, the UAM aircraft is anticipated to maintain low altitude during approach and landing phases. Subsequently, the navigation performance degradation could occur in the urban environment, and the primary degradation factor is identified as multipath error. For this reason, to ensure the safety and reliability of the K-UAM aircraft, it is necessary to analyze the degree of performance degradation related to the urban environment and then propose an alternative aid to enhance the navigation performance. To this end, the aim of this paper is to model the multipath effects of the GNSS in an urban environment and to carry out the simulation studies using the real GNSS datasets. Finally, the initial navigation performance requirement is proposed based on the results of the numerical simulation for the K-UAM.

Keywords: K-UAM, GNSS, multipath error, navigation requirement

1. INTRODUCTION

전 세계적으로 Urban Air Mobility (UAM)이 차세대 이동수단으로 고려되어 활발히 개발되고 있으며 우리나라에서도 그랜드 챌린지 사업을 기반으로 2025년 초기 운송을 목표로 한 국형 UAM (K-UAM) 개발을 진행하고 있다. 이에 국토교통부는 K-UAM 운용개념서 (K-UAM ConOps)를 통하여 단계별 운용에 필요한 개념, 각 주체에 대한 역할, 운영절차 등을 정의하여 제시한 바 있다 (Korea UAM Team 2021). K-UAM ConOps

의 제시된 운용계획을 고려하였을 때 민항기에 적용되고 있는 Communication, Navigation, Surveillance (CNS)에 대한 성능 규격은 UAM에 직접적으로 적용하기에 적합하지 않아 UAM에 대한 성능 요구도의 정립이 필요하다.

K-UAM ConOps에 따르면 K-UAM의 항법 시스템은 기본적으로 Global Navigation Satellite System (GNSS)을 기반으로 구축하며 성능기반항법(Performance Based Navigation; PBN)의 적용을 명시하고 있다. PBN은 International Civil Aviation Organization (ICAO)에서 제시한 개념으로 기존의 Area Navigation (RNAV)과 이에 On Board Performance Monitoring and Alerting System 기능이 탑재된 Required Navigation Performance (RNP)를 포함한다. PBN은 항법 사양 특정 구역에서의 운영에 대한 정확성, 무결성, 연속성, 신뢰성 측면의 성능 요구 사항으로 규정되는 항법 사양을 설정하고 이를 충족하기 위한 Navigational Aid를 결정한다 (ICAO 2023). K-UAM의 안전한 운용 및 PBN 이행을 위해서는 비행단계 별 특성을 분석하여 이를

Received Nov 13, 2023, Revised Nov 27, 2023 Accepted Dec 05, 2023

[†]Corresponding Author

E-mail: djung@kau.ac.kr

Tel: +82-2-300-0134 Fax: +82-2-3159-9257

Sangdo Park <https://orcid.org/0009-0003-1908-6545>

Dongwon Jung <https://orcid.org/0000-0002-2771-9408>

Hyang Sig Jun <https://orcid.org/0009-0005-4593-0310>

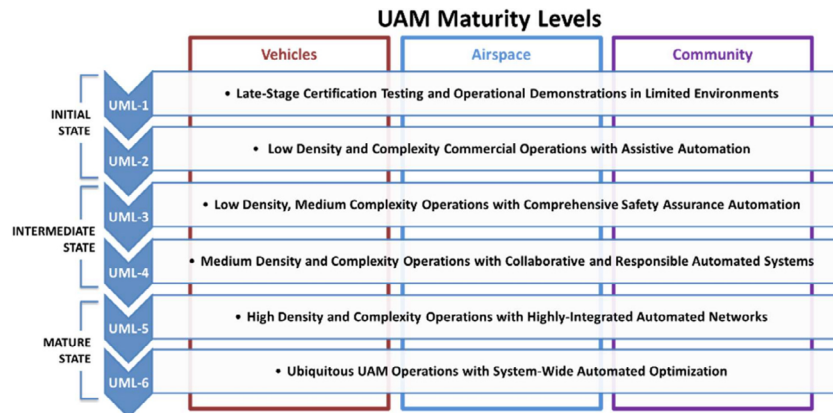


Fig. 1. UAM maturity levels scale (Goodrich & Theodore 2021).

바탕으로 항법 요구도를 도출해야 할 것이나 K-UAM ConOps에는 상세한 비행단계 별 운용 계획이 명시되어 있지 않다.

UAM 시스템 구축을 준비 중인 해외에서는 National Aeronautics and Space Administration (NASA), European Union Aviation Safety Agency (EASA) 그리고 Federal Aviation Administration (FAA) 등의 유관 기관을 주축으로 UAM 운용에 관련한 문서를 발간하였는데 (Single European Sky ATM Research 2019, FAA 2020, EUROCONTROL 2023), 본 논문에서는 이러한 해외 선행 연구 사례를 분석하고 K-UAM으로의 적용 가능성을 검토하여 K-UAM 항법 요구도에 필요한 항목 및 지표를 도출하고자 한다.

Uber 사의 경우 UAM의 각 비행단계 별 운항 속도, 고도를 설정하여 제시한 바 있다 (Uber 2020). 이에 따르면 UAM은 버티포트로 향하는 접근 및 착륙단계 진입 시 도심환경을 지나게 된다. GNSS 성능에 영향을 미치는 요소는 다양하게 존재하나 접근 및 착륙단계에서는 도심환경 내에서 저고도를 유지할 것으로 예상되며, 이때 수신기 주변에 존재하는 건물에 의한 다중경로 오차가 주된 오차요인이 될 것으로 판단된다 (Iwase et al. 2013). GNSS 오차 요소는 대부분 가우시안 분포로 근사화 할 수 있으나 다중경로의 경우 쉽게 예측이 어렵기 때문에 (Bijjahalli et al. 2019) 도심환경이 UAM의 항법 성능에 미치는 영향을 정확하게 분석하기 위해서는 모델링 수행을 통한 분석이 요구된다. 이를 위한 다중경로 모델링 접근법에는 확률적 방법 (Haker & Raquet 2011), 광선추적과 같은 수치적인 방법이 포함된다 (Breßler et al. 2016). 본 논문에서는 위성과 건물, UAM의 기하학적 관계에 기반하여 다중경로 오차와 Non Line-of-Sight (NLOS) 신호를 판별하는 다중경로 오차 모델링을 제안하고 이를 포함한 GNSS 오차 모델에 기반한 시뮬레이션을 통해 도심환경이 UAM 항법 성능에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 시뮬레이션 결과의 신뢰도를 제고하기 위해 실제 측정된 위성 항법 데이터를 바탕으로 도심 환경에서 UAM 기체가 운용되는 시나리오를 정의하고 이에 대한 분석을 진행하였다.

본 논문은 2장에서 PBN을 기초로 UAM 운용에 요구되는 항목과 지표를 도출하고, K-UAM 항법성능 요구도에 대해 제안한다. 3장에서 다중경로오차를 고려한 GNSS 오차 모델을 사용하여 도

심환경 운용을 가정한 시뮬레이션 환경에서 GNSS 항법성능 오차를 분석하고 마지막으로 4장에서 결론으로 마무리 짓는다.

2. UAM NAVIGATION REQUIREMENTS

2.1 Concept of Operation for UAM

UAM이 차세대 교통수단으로 주목받음에 따라 전 세계적으로 이에 대한 개발이 활발히 진행되고 있다. FAA는 UAM의 운용에 있어 최상위 개념을 담은 운용개념서 (ConOps)를 발행하였고 (FAA 2020) 이에 NASA는 ConOps에 제시된 UAM의 완전 운용을 위해 예상되는 기술 발전 단계의 지표인 UAM Maturity Level (UML)을 제안하였다 (Goodrich & Theodore 2021). UML은 1부터 6까지 총 6단계로 분류되어 있으며 UML-6은 UAM이 완전하게 운용될 수 있는 수준을 의미한다. Fig. 1에는 UML 각 단계의 특징을 나타내고 있다.

각 단계 중 UML-4는 K-UAM ConOps의 성장기에 해당하는 단계로 볼 수 있다. UML-4는 단일 대도시를 기준으로 회랑 내에 수백 대의 UAM이 동시에 운영되는 중밀도 (medium density) 운용 조건에서, 저시정 (low visibility) 환경, 회랑 내에서 UAM 기체가 상호 근접하는 환경, 그리고 버티포트에서의 다수 UAM 기체가 동시다발적인 이착륙을 수행하는 환경을 고려하는 중간단계의 운용복잡도 (medium complexity)와 이에 요구되는 자동화 시스템을 정의하고 있다. 이때 요구되는 자동화 시스템은 운항관련 일부 기능에서 탑승 조종사의 개입 없이 자동 운항을 유지할 수 있는 시스템을 의미한다. UAM 기술 관련 문서는 이를 고려하여 UML-4 수준 도달을 우선적으로 상정하고 있다. 이는 K-UAM ConOps의 성장기에 해당한다고 볼 수 있는데 K-UAM의 완전한 운용을 위해서는 우리나라 역시 이 단계에 우선적으로 도달해야 한다고 생각된다. UML-4 도달을 위해서는 항법에 있어 매우 높은 수준의 정확도가 요구될 것으로 판단되나 ICAO가 유인 항공기에 대해 정의한 현존 가장 높은 수준의 정확도를 지닌 RNP 0.3 및 RNP 0.1은 직접적으로 적용될 수 없다 (Nguyen 2020). Fédération Aéronautique Internationale은 Unmanned Aerial

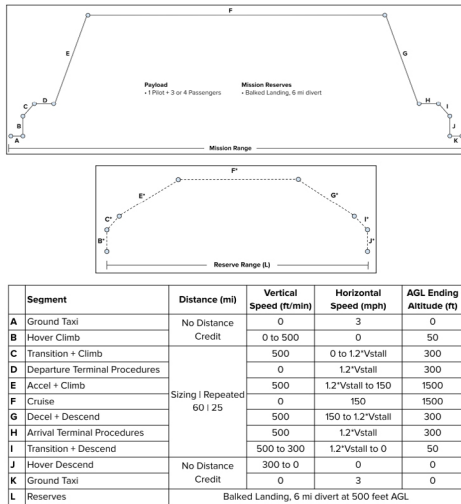


Fig. 2. Operational planning according to the flight phases of UAM (Uber 2020).

System (UAS)을 위한 항법 성능 요구도를 설정한 바 있다. 수평 방향에 대해 표준 정확도를 15 m, 정밀 정확도를 3 m로 설정하였으며 수직 방향에 대해서는 표준 정확도를 30 m, 정밀 정확도를 15 m로 설정하였으나 이 또한 UAM에 직접적인 적용은 불가능하다 (Bijjahalli et al. 2019).

UAM과 기존 민항기를 구분 짓는 가장 큰 차이점은 도심환경 내에서 운용된다는 점이다. UAM의 항법 요구도를 설정하기 위해서는 UAM의 각 비행단계의 특성을 파악하여 분석해야 하나 K-UAM ConOps에는 아직 이에 대해 정의하고 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 Fig. 2에 나타나 있는 Uber사에서 제안한 UAM의 비행단계 별 운용계획을 참고하였다 (Uber 2020).

Fig. 2에서 볼 수 있듯 예상되는 UAM의 비행단계는 크게 이륙 및 상승, 순항, 접근 및 착륙, 3단계로 분류할 수 있다. Uber사에서 제안한 UAM의 순항고도는 약 450 m로 $450 \text{ m} \pm 150 \text{ m}$ 로 설정된 K-UAM의 순항고도와는 차이가 있지만 그를 제외한 개념은 유사할 것으로 예상된다. 각 비행단계 중 순항단계에서는 예상되는 항법 성능 저해 요소가 없으므로 요구되는 항법 성능은 회랑의 크기와 기체 간의 수평 분리 거리에 근거하여 설정해야 할 것으로 보인다. Uber사에 따르면 순항 회랑 탈출 후 버티포트로 향하는 접근 및 착륙 단계에서 UAM은 도심 내에서 약 90 m의 고도를 유지하게 되는데 이때의 항법 시스템은 도심환경의 영향을 받을 것으로 판단되나 이에 대한 정량적인 분석은 아직 진행되지 않았다. UAM을 모든 도시에서 안전하게 운용하기 위해서는 이러한 도심환경에 의한 GNSS 성능 영향에 대한 분석이 선제적으로 이루어져야 한다 (Stouffer et al. 2020).

2.2 Related Work

항공 선진국의 유관기관은 UAM의 운용 환경을 고려하여 항법 성능 요구도를 제시하고 있는데 대표적으로 Uber, SAIC, EASA, NASA가 주도하고 있다. Uber는 UAM의 순항단계에 요구되는 항법 성능에 대해 RNP0.01 규격을 제안한 바 있으며 (Choi & Park 2022), SAIC는 UAM의 항법 성능 요구도에 대해 앞서 소

Table 1. UAM navigation requirements proposed by SAIC.

Autonomy		Lateral		Vertical	
		Autonomy	ILS	Autonomy	ILS
En-Route	Availability (%)	> 99	95~98	> 99	95~98
	Precision (m)	< 100	< 100	~38	~38
Approach	Availability (%)	> 99	95~98	> 99	95~98
	Precision (m)	4.5	4.5	5	5
Landing	Availability (%)	> 99	95~98	> 99	95~98
	Precision (m)	1.5	1.5	0.3	0.3

Table 2. Navigation specification of RUNP.

RUNP-5 m		RUNP-50 m
Accuracy	± 5 meters	± 50 meters
Integrity	Greater than $1-1 \times 10^{-7}$ with a Time-to-Alert of less than 1 second	
Availability	Better than 99%	
Continuity	At least $1-10^{-4}/h$	
Functionality	Managed: ATZ	Declared: Sub-urban region

개된 UML-4와 각 비행단계를 고려하여 제안한 바 있다. SAIC가 제안한 UAM의 항법 요구도를 Table 1에 정리하였다 (Stouffer et al. 2020).

EASA는 Single European Sky Air traffic management Research joint undertaking (SESAR) 프로그램을 통해 유럽 전 공역에 UAS를 안전하고 효율적으로 관리하기 위한 U-space 계획을 추진 중에 있다. EASA는 기존 RNP 규격의 UAS 적용 한계를 인지하고 U-space에 적용하기 위하여 운용개념서를 통하여 RNP와 유사한 개념의 Required U-space Navigation Performance (RUNP)를 제안하였다 (EUROCONTROL 2023). RUNP는 ICAO의 RNP와 RNAV의 원리에 기초하여 RNPx와 같이 거리를 나타내는 표기를 사용하며 SI 단위를 사용한다. UAM에 적용될 수 있을 것으로 판단되는 저고도의 UAS에 대한 요구 RUNP 규격은 Table 2와 같다.

2.3 Navigation Requirement Recommendation

현재 유인 항공기에 적용되고 있는 RNP 규격은 UAM 운용에 적합하지 않으므로 새로운 규격의 설정이 필요하다. 이번 절에서는 이를 위해 우리나라의 운용환경과 앞서 소개한 항법 성능 규격을 고려하여 K-UAM의 항법 요구도를 비행단계 별로 제시하고자 한다. 현 시점에서는 해외 선형 연구 사례 역시 검증된 바가 없어 이 연구에서도 다양한 가정을 통해 요구도를 도출하였다.

K-UAM의 회랑은 아직 그 규격에 대해 정해진 바가 없으므로 Fig. 3에 나타나 있는 것과 같이 K-UAM 로드맵 실증 노선 (MOLIT 2021)을 참고하여 한강 상공에 순항 회랑이 설치되었다고 가정하였다. 회랑 크기는 한강의 최소 강폭인 620 m를 고려하여 Fig. 4에 나타난 것과 같이 왕복 회랑의 폭을 600 m로 설정하였다. Uber Elevate (2020)에 따르면 회랑의 크기를 설정할 때에는 회랑 간의 분리거리 또한 염두에 두어야 하며 회랑 간 분리거리는 Fig. 4에 나타난 것처럼 RNP의 2배 수준이어야 한다. 이를 반영할 경우 단일 회랑의 폭은 약 200 m로 도출할 수 있고 이 때 요구되는 정확도 규격은 RNP0.03 수준임을 알 수 있다.

RNP0.03 규격은 아직 정의된 바가 없으므로 수직 분리 거리는 UML-4 단계의 기술 도달 수준을 고려하여 제안된 Barney &



Fig. 3. K-UAM demonstration route.

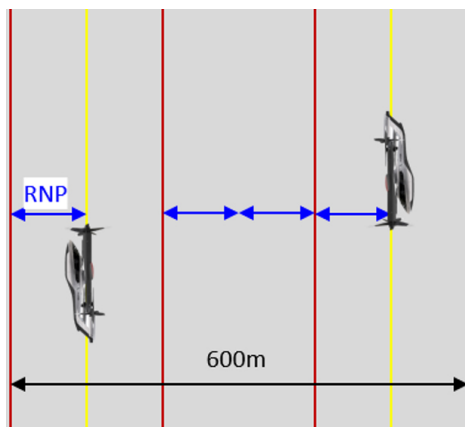


Fig. 4. Corridor separation standards according to RNP by Uber.

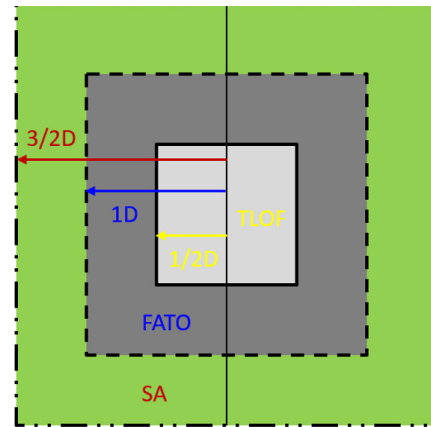


Fig. 6. Dimensions of TLOF, FATO and SA.

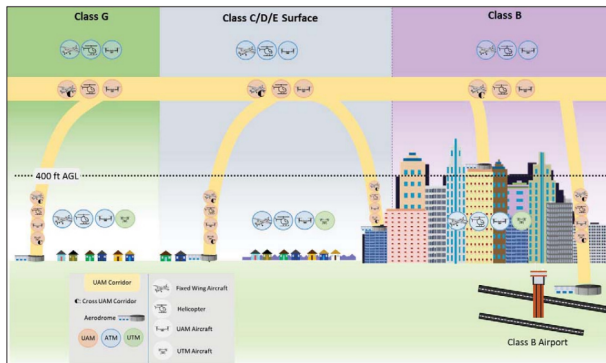


Fig. 5. UAM operating environments (FAA 2020).

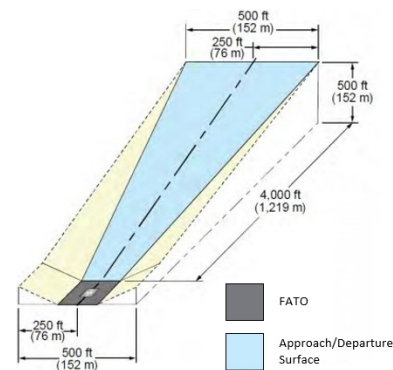


Fig. 7. Approach/departure surfaces.

Barrows (2022)를 참고하여 76 m로 설정한다. Global Positioning System (GPS)의 경우 표준 운영상태에서 17~34 m (95%) 수준의 정확도를 보이므로 (Hofmann-Wellenhof et al. 2007) RNP0.03의 요구도를 만족함을 알 수 있다.

FAA의 UAM ConOps에 따르면 UAM이 접근 및 착륙단계로 진입할 때는 Fig. 5와 같이 도착지 인근의 설정된 지점에서 순항 회랑을 벗어나 버티포트를 향하여 접근한 뒤 착륙하는 방식을 고려하고 있다. 접근단계에서의 항법 요구도를 도출하기 위해서 SAIC 문헌에서는 인간의 반응속도와 기체의 크기 그리고 미국 건물 간 폭을 근거로 삼았다. 그러나 이러한 요소는 한국과 상이

하기 때문에 K-UAM에 적용할 수 없다. 또한 착륙단계에서의 항법 요구도는 버티포트의 크기를 고려해야 하는데 현재 국내에는 버티포트에 관련된 규정이 없으므로 FAA에서 발간한 수직 이착륙기 버티포트 설계 관련 Engineering Brief (EB)를 참고하였다 (FAA 2022).

FAA는 Fig. 6과 같이 이착륙패드 설계 방안을 제시하였다. 이는 최종 착륙 지점인 Touchdown & Liftoff (TLOF)와 착륙을 위해 호버링을 실시하는 Final Approach and Take off Area (FATO) 그리고 기체의 FATO 이탈로 인한 위험을 방지하는 Safety Area (SA)로 구성되어 있으며 각각은 기체의 크기 (D)에 따라 정의된다.

Table 3. K-UAM navigation requirement recommendations.

Phase	Precision [m]		Continuity	Integrity	Availability
	Lateral	Vertical			
En-route	< 100	76			
Approach	7.5	1.5	1-8×10 ⁻⁶ per 15s	1-2×10 ⁻⁷ in any approach	> 0.99
Landing	1.5	0.3			

FAA (2022)에는 Fig. 7과 같이 FATO로 향하는 기체를 위한 진출입 회랑의 기준 또한 제시되어 있다. 이 기준은 Uber 사의 진출입 회랑에도 적용되었음을 알 수 있다. 진출입 회랑은 수평방향과 수직방향의 길이가 8:1의 비율로 구성되며 FATO의 양 끝단으로부터 이어져 가상의 진입표면을 정의하는데 이 크기는 앞서 설정한 단일 회랑의 크기 (200 m)와 연결 지을 수 있을 것으로 보인다.

UAM 기체의 크기를 15 m로 가정했을 때 FATO의 크기는 30 m로 결정된다. 착륙 단계 진입 전 호버링을 유지하는 기체가 FATO를 넘어서지 않아야 함을 고려하면 수평 정확도는 7.5 m로 설정할 수 있다. 이 때 수직 정확도는 SAIC의 제안 수치를 참고하여 1.5 m로 설정한다.

운용 초기의 UAM은 시계비행규칙으로 운용될 것으로 예상되나 (Korea UAM Team 2021) UML-4 혹은 K-UAM ConOps에 명시된 성장기에 명시된 중밀도 운용을 위해서는 계기비행규칙(IFR)에 해당하는 비행 능력을 갖추어야 할 것이다 (Goodrich & Theodore 2021). IFR로 비행하는 UAM의 착륙을 돕기 위해 버티포트에는 계기착륙시설(Instrument Landing System; ILS)과 같은 항법 보조 시스템이 설치될 수 있으며 ICAO의 ILS 성능등급 CAT I-CAT III에서 제시한 가시성(visibility)에 따른 착륙결심고도(decision height)를 참고하여 K-UAM 항법성능 요구도를 도출하고자 한다 (Eltahier & Hamid 2017). Uber의 비행단계 별 운용 고도에 따르면 UAM 착륙 결심고도는 버티포트 상공 약 15 m 부근이 되는데 이 때는 CAT III를 적용할 수 있다. ICAO에서 정의한 CAT III 정확도 요구사항은 약 3 m로 이에 기초하여 착륙 시 K-UAM의 수평방향 정확도는 1.5 m로 설정한다. 수직 정확도는 부드러운 착륙을 위하여 SAIC 제안 수치인 0.3 m를 차용하기로 한다. K-UAM ConOps에 정의된 K-UAM의 성장기에서는 UAM 기체의 부분적인 자율운용을 명시하고 있어 99% 이상의 가용성이 보장되어야 할 것이다. 또한, PBN에서 제안하는 항법성능 요구도 항목인 무결성(integrity)과 연속성(continuity)에 대해서는 ICAO Annex 10 (ICAO 2018)에 정의되어 있는 값 중 가장 높은 정확도에 요구되는 값을 차용하였다. 따라서 본 논문에서 도출한 K-UAM의 항법 요구도를 위한 항목 및 지표는 Table 3과 같이 요약될 수 있다.

3. VALIDATION OF THE PERFORMANCE REQUIREMENT

접근 및 착륙 단계에서 UAM의 항법 성능은 도심환경의 영향을 받게 될 것으로 예상된다. 따라서 이에 대한 분석을 위하여 GNSS 오차 모델링과 시뮬레이션을 진행한다. UAM 운용 시 항법 성능에 영향을 미치는 주된 요인은 도심환경에 의해 GNSS 신

호가 반사되어 수신기로 유입되는 다중경로 현상으로 판단된다 (Iwase et al. 2013). 이에 GNSS 오차 모델에는 ray-tracing과 기하학에 기반한 다중경로 오차 모델을 포함하였다. 다중경로 오차는 code와 phase에 의해 각각 발생하는데, phase에 의한 오차는 수 cm에 불과하므로 본 논문에서는 L1 C/A 신호의 code 오차를 중심으로 다중경로 오차를 구현하였다. 또한 도심환경에서는 위성의 신호가 건물에 의해 가려지는 NLOS 현상이 개활지에 비해 빈번하게 발생할 것으로 예상되어 기하학적 방법에 기반하여 이를 판별하였다.

3.1 GNSS Modeling

GNSS의 오차 모델은 Eq. (1)과 같이 표현될 수 있다 (Sabatini et al. 2017).

$$p^k = \rho^k + c \cdot dt_k + d_{iono} + d_{tropo} + \delta_{mp} + \epsilon \quad (1)$$

여기서 ρ^k 는 k번째로 관측된 위성과 수신기 간의 의사거리를 뜻하고, d_{iono} , d_{tropo} 는 각각 전리층, 대류권에 의한 지연으로 발생하는 오차를 뜻한다. δ_{mp} 은 다중경로 오차를, 나타낸다. ϵ 은 수신기 측정 잡음에 의한 오차를 의미하며 가우시안 분포를 따르는 잡음으로 나타내었다.

3.1.1 Atmosphere delay

위성 신호가 지구의 대기권을 통과할 때 전리층과 대류권에서 지연을 겪어 오차가 야기된다. 지표면에서 350 km 높이의 상층부에 위치한 전리층을 통과하는 위성신호는 두 가지 원인으로 지연된다. 첫째, 전리층이 완전한 진공 상태가 아니므로 자유전자와의 충돌로 인해 신호의 속도가 감소하고, 둘째, 신호가 전리층의 자유전자 분포에 따라 상호 작용하면서 굴절되어 신호의 전파 경로가 길어지기 때문이다. 이러한 신호의 지연은 위성 수신기 사이의 상대적 위치, 특히 고도각에 따라 변화한다. 전리층 지연은 Klobuchar 모델을 이용하여 Eq. (2)로 나타낼 수 있다 (Klobuchar 1987).

$$ID_{iono} = \left[1 + 16 \left(0.53 - \frac{elev}{\pi} \right)^3 \right] IDV \quad (2)$$

여기서, ID_{iono} 는 총 전리층 지연 시간을, $elev$ 는 수신기와 위성이 이루는 고도각을 의미한다. IDV 는 전리층에 의한 수직 지연시간을 뜻하며 Eq. (3)으로 나타낼 수 있다.

$$IDV = \begin{cases} DC + A \cos \left[\frac{2\pi(t - \Phi)}{P} \right], & \text{day} \\ DC, & \text{night} \end{cases} \quad (3)$$

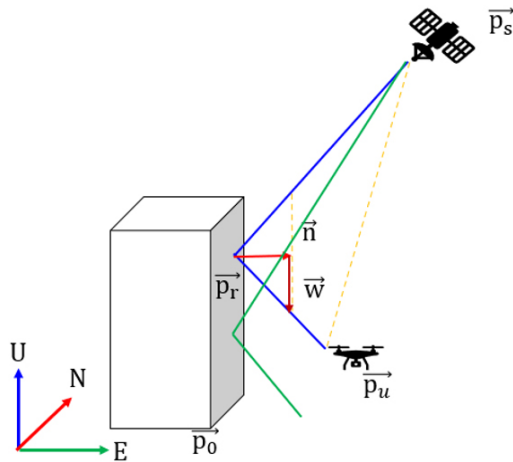


Fig. 8. Geometrically-based multipath error model.

여기서, A 는 진폭, Φ 는 위상 offset으로 상수이다. DC는 야간-주간 offset으로 상수로 표현 가능하며 5 nsec이다.

건조 지연은 대류권 내의 건조 가스 때문에 발생하며, 전체 대류권 신호 지연 오차의 약 90%를 차지한다. 건조 지연은 정밀하게 측정될 수 있는 특성이 있는 반면에 습윤 지연은 대류권 내의 수증기 때문에 발생하며 그 기여도는 상대적으로 적고 정확한 측정이 어렵다. 대류권에서 발생하는 신호 지연은 건조 지연량 (SHD)과 습윤 지연량 (SWD)의 합으로 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$d_{tropo} = SHD + SWD \quad (4)$$

대류권 오차를 추정하기 위해서 Hopfield 모델 (Hofmann-Wellenhof et al. 2007)을 사용하였으며 그에 필요한 파라미터는 UNB3/UNB4 모델을 사용하였다 (Collins & Langley 1997). Hopfield 모델을 이용한 SHD와 SWD 계산은 고도각에 대한 함수로써 Eqs. (5-6)으로 나타낼 수 있다.

$$SHD = \frac{10^{-6}}{5} \frac{77.64}{\sin \sqrt{E^2 + 6.25}} \frac{P}{T} [40136 + 148.72(T - 273.16)] \quad (5)$$

$$SWD = \frac{10^{-6}}{5} \frac{(-12.96T + 3.718 \times 10^5)}{\sin \sqrt{E^2 + 2.25}} \frac{e}{T^2} 11000 \quad (6)$$

3.1.2 Multipath error modeling

다중경로는 위성의 신호가 수신기 주변의 구조물에 반사되어 지연 수신되는 반사신호와 직접신호가 동시에 수신되는 현상을 뜻한다. 다중경로 오차 추정을 위한 모델링은 위성의 위치와 주변 건물 그리고 UAM의 위치의 기하학적인 관계에 기반하였으며 이를 Fig. 8에 나타내었다.

먼저, 건물면을 구성하고 있는 임의의 한 점 $\vec{p}_0$ 에 대해 이웃하고 있는 점을 이용하여 법선 벡터 $\vec{n}$ 를 정의한다. 정의된 법선 벡터는 반사 신호의 길이 α 와 입사 신호의 길이 β 를 구하는데 사용되며 반사점을 결정할 때 사용된다. Eq. (7)를 이용하여 구할 수 있다.

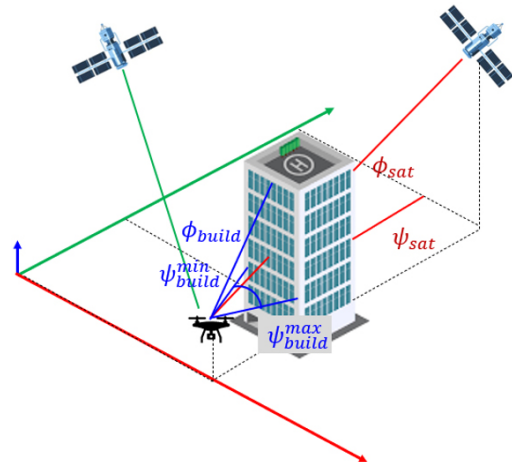


Fig. 9. NLOS detection.

$$\begin{aligned} \alpha &= \vec{n} \cdot (\vec{p}_u - \vec{p}_0) \\ \beta &= \vec{n} \cdot (\vec{p}_s - \vec{p}_0) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, $\vec{p}_u$ 와 $\vec{p}_s$ 는 각각 East-North-Up 좌표계에서의 UAM과 위성의 위치를 나타낸다. α 와 β 를 이용하여 법선 벡터와 반사 신호가 이루는 벡터 $\vec{w}$ 를 Eq. (8)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$\vec{w} = \frac{1}{(\alpha + \beta)} [(\vec{p}_u - \vec{p}_s) - (\alpha - \beta)\vec{n}] \quad (8)$$

최종적으로, 반사점은 Eq. (9)를 이용해 구해진다. 이렇게 구해진 반사점이 건물의 평면 내의 존재할 경우 다중경로가 발생 가능한 기하학적 조건이 충족된다.

$$\vec{p}_r = \vec{p}_u - \alpha(\vec{n} + \vec{w}) \quad (9)$$

다중경로가 발생하였을 때의 의사거리는 위 제시된 모델을 이용하여 구할 수 있으며 이 때의 의사거리 오차는 Eq. (10)로 구할 수 있다.

$$P_{error}^k = P^k - \rho^k \quad (10)$$

3.1.3 NLOS detection

GNSS 위성의 궤도는 시간과 위치에 관계없이 충분한 가용 위성 수를 보장하여 사용자가 위치해를 구할 수 있도록 설계 되어 있다. 하지만 도심 내에서는 주변의 구조물로 인해 신호가 가로 막혀 가용 신호의 수가 감소할 가능성이 있다. 이는 방위각, 고도 각과 같은 기하학적 관계에 기반하여 판별할 수 있으며 Eq. (11)로 표현할 수 있다.

$$\phi_{sat} < \phi_{build} \wedge (\psi_{sat} > \psi_{build}^{min} \wedge \psi_{sat} < \psi_{build}^{max}) \Rightarrow NLOS \quad (11)$$

여기서 ϕ_{sat} , ϕ_{build} 는 각각 UAM이 위성, 건물과 이루는 고도각의 미하고 ψ_{sat} 는 UAM과 위성이 이루는 방위각을 의미한다. ψ_{build} 는 UAM과 건물이 이루는 방위각이며 위첨자 min, max는 Fig. 9에 묘사된 것과 같이 UAM이 바라보고 있는 건물면의 양 끝단과 이루는 각을 의미한다. NLOS 현상이 발생하면 가용 위성의 수가 감소하여 기하학적인 배치의 변화가 생기고 이에 따라 Dilution of

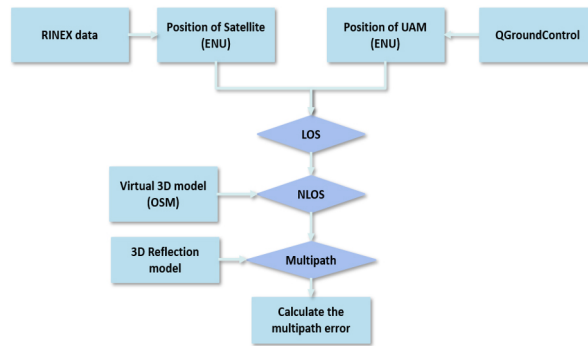


Fig. 10. Flow chart of the numerical simulation.

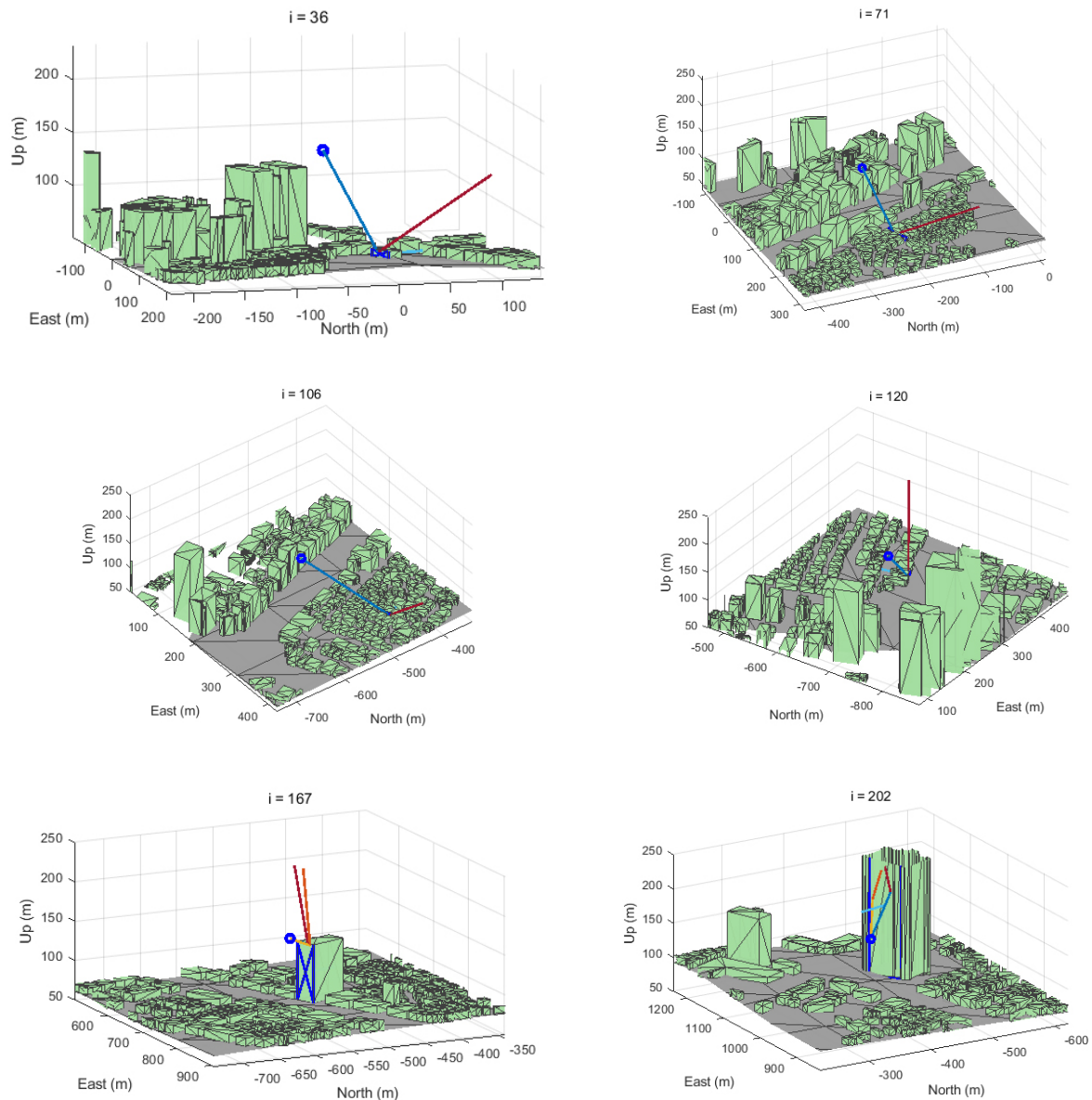


Fig. 11. Multipath in simulation.

Precision (DOP) 값 또한 변화한다. 가용 위성을 4개라고 가정하였을 때, 수신기의 추정 위치와 각 위성의 위치를 이용하여 단위 벡터를 Eq. (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{x_1 - x}{R_1} & \frac{y_1 - y}{R_1} & \frac{z_1 - z}{R_1} & 1 \\ \frac{x_2 - x}{R_2} & \frac{y_2 - y}{R_2} & \frac{z_2 - z}{R_2} & 1 \\ \frac{x_3 - x}{R_3} & \frac{y_3 - y}{R_3} & \frac{z_3 - z}{R_3} & 1 \\ \frac{x_4 - x}{R_4} & \frac{y_4 - y}{R_4} & \frac{z_4 - z}{R_4} & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서 $[x, y, z]$ 는 지구중심 고정 좌표계 (ECEF)에서 표현된 수신기의 위치를 의미하고, $[x_i, y_i, z_i]$ 는 관측된 i 번째 위성의 ECEF 좌표상 위치를 의미한다. R_i 는 i 번째 위성과의 수신기 간의 의사거리를 뜻한다. DOP 계수를 구하기 위한 공분산 행렬은 Eq. (13)으로 나타낼 수 있다.

$$C = (A^T A)^{-1} \quad (13)$$

DOP 계수에는 Geometric DOP (GDOP), Position DOP (PDOP), Horizontal DOP (HDOP), Vertical DOP (VDOP), Time DOP (TDOP)가 있으며 각각은 C 행렬의 대각성분의 조합으로 Eq. (14)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} GDOP &= \sqrt{C_{11} + C_{22} + C_{33} + C_{44}} \\ PDOP &= \sqrt{C_{11} + C_{22} + C_{33}} \\ HDOP &= \sqrt{C_{11} + C_{22}} \\ VDOP &= \sqrt{C_{33}} \\ TDOP &= \sqrt{C_{44}} \end{aligned} \quad (14)$$

3.2 Numerical Simulation

시뮬레이션의 현실성을 강화하기 위하여 실제적인 데이터 세트를 기반으로 시나리오를 구축하였다. 건물 정보 데이터를 공개적으로 얻을 수 있는 OpenStreetMaps의 데이터를 이용하여 가상 3D 환경을 구현하였다 (Haklay & Weber 2008). 시뮬레이션의 배경으로는 K-UAM의 실증 노선에 포함된 강남구 테헤란로 지역을 선택하였다. 위성군의 실시간 위치 시뮬레이션을 하기 위해 NASA에서 제공하는 Receiver Independent Exchange Format (RINEX) 데이터를 이용하였다. RINEX 데이터는 실측 데이터와 항법데이터, 기상데이터를 포함하고 있다. 비행경로는 오픈소스 지상국 소프트웨어인 QGroundControl을 사용하여 생성하였으며 이를 고려한 전체적인 시뮬레이션의 흐름도를 Fig. 10에 나타내었다.

시뮬레이션에서 UAM의 고도는 Uber에서 제시한 운용단계를 참고하여 90 m로 설정되었으며 다음의 가정들이 적용되었다.

- 1) 지연시간 600 ns 내의 신호는 세기가 크게 감소되지 않아 수신 가능하다.
- 2) UAM과 이루는 고도각이 10° 이하인 위성의 신호는 수신하지 않는다.

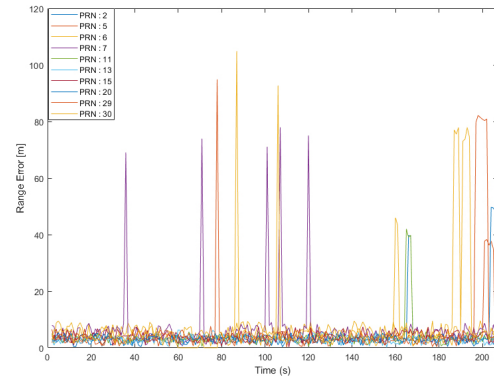


Fig. 12. UERE of each PRN in urban canyon.

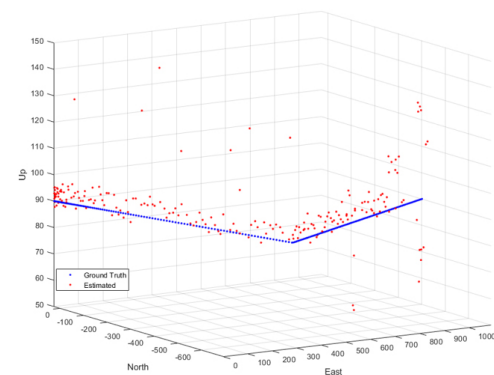


Fig. 13. Estimated position including multipath error compared to ground truth.

지 않는다.

3) NLOS 신호 발생 시 수신하지 않는다.

4) 다중경로 발생 시 반사 신호를 위치 추정에 사용한다.

가정 1을 적용하기 위하여 UAM의 일정 반경 내의 건물을 발생 가능한 건물로 지정하여 다중경로 모델을 적용하였다. 이때, 건물면의 법선 벡터를 계산하는 과정에서 부호의 모호성을 해결하기 위하여 건물에 부착된 로컬 좌표계를 정의하여 일관성을 갖게 하였다.

Fig. 11은 3장에서 논의한 GNSS 오차 모델을 기반으로 다중경로 현상이 발생하였을 때의 반사 신호에 대한 다양한 케이스를 나타내며 Fig. 12는 이 때의 각 Pseudo Random Number (PRN)에 대한 User Equivalent Range Error (UERE)를 나타낸다.

다중경로 현상이 발생하지 않았을 때의 UERE 값은 8.76 m로 통상적인 GNSS 오차를 보였으나 Fig. 11과 같이 다중경로 현상이 발생하였을 때 해당 PRN 위성의 신호는 건물에 반사되어 수신기에 유입되어 UERE가 증가하였다. 이에 따른 수신기의 추정 위치를 Fig.13에 나타내었다. 다중경로 오차를 반영한 수신기의 추정 위치에 대한 수평 방향 오차의 최대값은 43.15 m, 수직 방향 오차의 최대값은 53.27 m로 나타났다.

또한 Fig. 14 상단에 동일한 위성군의 위치, 시간 조건 하에서 개활지와 시나리오 지역에서의 가용 위성 신호의 수를 나타내었

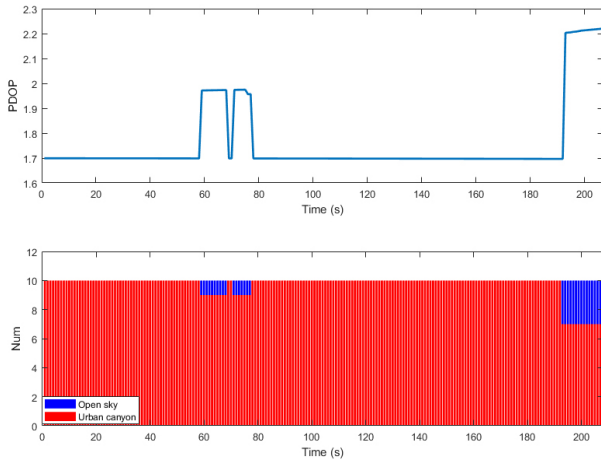


Fig. 14. Number of visible satellites and PDOP.

으며 Fig. 14 하단에 PDOP를 나타내었다. 앞서 정의한 시나리오에서는 NLOS 신호가 발생하여도 위치 추정에 충분한 수의 위성이 존재함을 알 수 있다. 따라서 NLOS 신호는 발생하여도 주변 건물에 반사되어 수신기로 유입될 수 있으나 본 논문에서는 가정 3에 따라 이는 고려하지 않았다. 따라서 위성 신호가 구조물에 완전히 가려졌을 시 DOP의 값이 증가하였다.

4. CONCLUSION

전 세계적으로 UAM의 개발이 활발히 진행됨에 따라 한국 역시 K-UAM 개발에 박차를 가하고 있다. UAM은 도심에서 운용된다는 점이 민항기와의 가장 큰 차이점이며, 기술의 성숙에 따라 동시에 수 백대가 운용될 계획이다. UAM의 항법 시스템은 GNSS를 기반으로 하며 PBN의 이행을 계획하고 있다. 이를 고려하였을 때 ICAO에서 정의한 기존의 RNP 규격은 UAM에 적용하기 어려워 UAM 시스템을 구축 중인 해외의 유관 기관은 UAM의 운용 특성을 반영하여 항법 성능 요구도를 제시하고 있다. 본 논문에서는 UAM의 비행단계 별 특성을 분석하고 해외 사례의 K-UAM 적용 가능성을 검토하여 K-UAM의 항법 요구도를 제시하였다.

UAM의 안전한 운용을 위해서는 각 비행단계에서 예상되는 GNSS의 성능 분석이 필수적이다. 특히 접근 및 착륙 단계에서 UAM은 도심환경에서 저고도를 유지한 상태로 비행하게 되는데 이 때는 UAM 주변 구조물에 의한 다중경로가 주된 성능 저하 요소일 것으로 판단된다. 따라서 본 논문에서는 기하학에 기반한 다중경로 오차를 모델링하고 이를 기반으로 시뮬레이션을 진행하여 도심환경에 의한 GNSS 성능 저하를 분석하였다. Uber의 비행단계 별 운용계획을 참고하여 시뮬레이션에서 UAM의 고도는 90 m로 설정하였다. 시뮬레이션 결과 NLOS 발생에 의한 DOP 값 변화로 항법오차 증가의 요인이 됨을 확인하였으며, 다중경로를 포함한 위치오차가 수평방향으로 최대 43.15 m, 수직방향으로 최대 53.27 m 발생하였다. 이러한 오차는 UAM 기체의 도심 환경에서 이착륙 단계에서 요구되는 정밀도에 부합하지 않으므로, 향후 K-UAM의 항법성능 요구도를 구체화하는 단계에서 위

성보강항법 (Satellite Based Augmented System) 또는 지상보강항법 (Ground Based Augmentation System), 또는 탑재센서로서 Lidar 또는 영상카메라 등을 사용하여 GNSS 항법해의 정밀도를 높이고 보완할 수 있는 보조 항법시스템 도입이 필수적이라 판단된다.

ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 산업통상자원부/한국산업기술평가관리원의 지원으로 수행중인 ‘eVTOL 비행안정성, 운용성 실증시험평가 및 충돌 회피처리 기술개발’ 과제 (과제번호: 20016489)의 연구 결과이며 지원에 감사드립니다.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, S.P. and D.J.; methodology, S.P.; software, S.P.; validation, S.P., D.J.; formal analysis, S.P.; investigation, S.P.; resources, S.P.; data curation, S.P.; writing—original draft preparation, S.P.; writing—review and editing, S.P. and D.J.; visualization, S.P.; supervision, D.J. and H.J.; project administration, D.J.; funding acquisition, D.J. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Barney, T. L. & Barrows, B. A. 2022, Initial Performance Evaluation of Flight Path Management Onboard Automation, 2022 IEEE/AIAA 41st Digital Avionics Systems Conference (DASC), Portsmouth, VA, 18-22 September 2022. <https://doi.org/10.1109/DASC55683.2022.9925825>
- Bijjahalli, S., Sabatini, R., & Gardi, A. 2019, GNSS performance modelling and augmentation for urban air mobility, *Sensors*, 19, 4209. <https://doi.org/10.3390/s19194209>
- Brefßler, J., Reisdorf, P., Obst, M., & Wanielik, G. 2016, GNSS positioning in non-line-of-sight context—A survey, In 2016 IEEE 19th international conference on intelligent transportation systems (ITSC), Rio de Janeiro, Brazil, 01-04 November 2016, pp.1147-1154. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2016.7795701>
- Choi, J. & Park, S. Y. 2022, Study on the Selection of UAM Pilots and Establishment of Training, *Journal of the*

- Korean Society for Aviation and Aeronautics, 30, 132-139. <https://doi.org/10.12985/ksaa.2022.30.3.132>
- Collins, J. P. & Langley, R. B. 1997, Estimating the residual tropospheric delay for airborne differential GPS positioning (A Summary), In *Advances in Positioning and Reference Frames: IAG Scientific Assembly*, Rio de Janeiro, Brazil, September 3-9, 1997, pp.331-336.
- Eltahier, M. M. A. & Hamid, K. 2017, Review of Instrument Landing System, *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering (IOSR-JECE)*, 12, 106-113. <https://doi.org/10.9790/2834-120203106113>
- EUROCONTROL 2023, U-space Concept of Operations [Internet], 4th edition, cited 2023 Sep. 7, available from: <https://www.sesarju.eu/node/4544>
- FAA 2020, Concept of Operations v1.0, Urban Air Mobility (UAM). https://nari.arc.nasa.gov/sites/default/files/attachments/UAM_ConOps_v1.0.pdf
- FAA 2022, Engineering Brief No.105, Vertiport Design. Memorandum, Airport Engineering Division, AAS100. <https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/eb-105-vertiports.pdf>
- Goodrich, K. H. & Theodore, C. R. 2021, Description of the NASA urban air mobility maturity level (UML) scale, In *AIAA SciTech 2021 forum*, p.1627. <https://doi.org/10.2514/6.2021-1627>
- Haker, M. E. & Raquet, J. F. 2011, Estimating Multipath in GNSS Signals Through a Novel Stochastic Search and Decomposition Algorithm, In *Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2011)*, Portland, Oregon, 20-23 September 2011, pp.1162-1172. <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=9673>
- Haklay, M. & Weber, P. 2008, Openstreetmap: User-Generated Street Maps, *IEEE Pervasive computing*, 7, 12-18. <https://doi.org/10.1109/MPRV.2008.80>
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. 2007, *GNSS-Global Navigation Satellite Systems* (Wien, New York: Springer-Verlag), p.128. <https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1>
- ICAO 2018, Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation: Aeronautical Telecommunications, Volume 1 (Radio Navigation Aids), 7th ed. (Montreal: International Civil Aviation Organization).
- ICAO 2023, Performance-Based Navigation (PBN) Manual (Doc 9613), 5th edition. (Montreal: International Civil Aviation Organization).
- Iwase, T., Suzuki, N., & Watanabe, Y. 2013, Estimation and exclusion of multipath range error for robust positioning, *GPS solutions*, 17, 53-62. <https://doi.org/10.1007/s10291-012-0260-1>
- Klobuchar, J. A. 1987, Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users, *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems*, ES-23, 325-331. <https://doi.org/10.1109/TAES.1987.310829>
- Korea UAM Team 2021, K-UAM Concept of Operations 1.0. Ministry of Land, Infrastructure and Transport: Sejong, Republic of Korea.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) 2021, Korean Urban Air Mobility (K-UAM) Technology Roadmap. http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?id=95083976
- Nguyen, T. V. 2020, Dynamic delegated corridors and 4d required navigation performance for urban air mobility (UAM) airspace integration, *Journal of Aviation/Aerospace Education & Research*, 29, 57-72. <https://doi.org/10.15394/jaaer.2020.1828>
- Sabatini, R., Moore, T., & Ramasamy, S. 2017, Global navigation satellite systems performance analysis and augmentation strategies in aviation, *Progress in aerospace sciences*, 95, 45-98. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.10.002>
- Single European Sky ATM Research 2019, SESAR U-space Concept of Operations, European Union, EUROCONTROL, pp.36-37. <https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/u-space/CORUS%20ConOps%20vol2.pdf>
- Stouffer, V. L., Cotton, W. B., DeAngelis, R. A., Devasirvatham, D. M., Irvine, T. B., et al. 2020, Reliable, secure, and scalable communications, navigation, and surveillance (CNS) options for urban air mobility (UAM). <https://ntrs.nasa.gov/citations/20205006661>
- Uber 2020, Uber Air Vehicle Requirements and Missions [Internet], cited 2023 Nov 27, available from: <https://s3.amazonaws.com/uber-static/elevate/Summary+Mission+and+Requirements.pdf>
- Uber Elevate 2020, Operations Inside Corridors [Internet], cited 2023 Nov 27, available from: https://nari.arc.nasa.gov/sites/default/files/attachments/Operations%20inside%20corridors_%20Tom%20Prevot_FINAL.pdf



Sangdo Park received the B.S. degree in the Aerospace engineering from Chosun University in 2023. He is currently working toward the M.S. degree at Korea Aerospace University.



Dongwon Jung received the B.S. and M.S. degrees in aerospace engineering from Seoul National University, Republic of Korea, in 1998 and 2000, respectively, and the Ph.D. degree in aerospace engineering from the Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, USA, in 2007. He is currently a

Professor with the Department of Smart Drone Convergence, Korea Aerospace University. From 2010 to 2014, he was worked at the Korea Aerospace Research Institute (KARI) as a Senior Researcher in the Division of Korea Space Launch Vehicle-2 Research and Development Program Office. His research interests include design and development of avionics systems for unmanned aerial vehicles, nonlinear guidance and trajectory optimization for autonomous vehicles, path/motion planning for multiple unmanned agents, hybrid estimation using vision, and inertial sensors.



Hyang Sig Jun received his B.S., M.S., and Ph.D. in Electrical & Electronics Engineering from Pusan National University, Pusan, Korea in 1988, 1992 and 2010, respectively. He worked in Daewoo Heavy Industry (DHI) and Korea Aerospace Industries (KAI) as an engineer and a senior

engineer from 1991 to 2003. He is currently a principal researcher in the Unmanned Aircraft System Research Division of Korea Aerospace Research Institute (KARI). His research interests include control, navigation and energy.

