

UTM 공역에서의 소형무인기 순항로 모델 연구

배 중 원[°], 이 상 정^{*}

A Study on a En-route Model of UTM Airspace for Small Unmanned Aerial Vehicles

Joong-Won Bae[°], Sang-Jeong Lee^{*}

요 약

일반적으로 드론으로 불리는 대부분의 민간용 소형무인기는 우리나라 항공법상 최대이륙중량 150kg 이하의 초경량비행장치 중 무인비행장치에 속하며 고도 150m 이하의 G 공역에서 주로 운용된다. 소형무인기의 활용성 증대와 안전성 확보를 위해서는 기술적으로 체공시간 개선, 충돌탐지 및 회피 기술 고도화, 항법 성능과 신뢰도 향상 등이 필요하다. 또한 무인기 안전 운항을 보장하고 사고를 예방하기 위해 무인항공기 교통관리(UTM)에 대한 개념을 도출하고 핵심 기능에 대한 연구가 필요한 상황이다. 본 논문에서는 UTM에서 다루는 무인기 공역으로 예상되는 고도 150m 이하의 공역에서 활용할 수 있는 순항로 모델을 제시하고, 유인항공기의 성능기반항법(PBN) 개념을 활용하여 무인기 항법시스템의 전체시스템오차(TSE)를 추정하여 순항로에서의 무인기 간 안전 분리(safe separation) 거리를 결정하는 방법론에 대해 고찰한다.

Key Words : UAV, UAS, Airspace, En-route model, UTM, Total System Error, TSE, Safe Separation

ABSTRACT

Most of a small civil unmanned aerial vehicle (UAV) or unmanned aircraft system (UAS), generally called a drone, belongs to the unmanned aerial vehicle among ultra light aircrafts with a maximum takeoff weight of 150kg or less and should be operated in the G-grade airspace below altitude of 150 meter according to the Korean Aviation Act. In order to increase the usability of small UAVs and to ensure safety, it is necessary to technically improve flight time, collision detection and avoidance technology, and reliability as well as accuracy of navigation technology. In order to guarantee unmanned safety operations and to prevent accidents, it is necessary to elucidate the concept of UAS traffic management (UTM) and to study the core functions. In this paper, we propose a en-route model that can be used in UAV airspace handling by UTM which is expected to be airspace below altitude of 150 meter. And estimating the total system error (TSE) of UAV by utilizing performance based navigation (PBN) concept and technology for civil manned aircraft, a methodology for determining the safe separation distance among UAVs will be discussed.

※ 본 연구는 국토교통부 무인비행체안전지원기술개발 사업의 연구과제(과제고유번호: 1615009399)와 과학기술정보통신부 ICT융합산업원천기술개발사업의 연구과제(과제고유번호: 1711058793)의 지원으로 수행되었음.

•° First and Corresponding Author : Avionics Research Team, Korea Aerospace Research Institute, jwbae@kari.re.kr, 정희원

* Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, eesjl@cnu.ac.kr, 정희원

논문번호 : KICS2017-10-306, Received October 13, 2017; Revised January 4, 2018; Accepted January 8, 2018

I. 서론

무인기는 우리나라 항공법 상 150kg 초과 무인 항공기와 150kg 이하의 무인비행장치로 분류하며, 25kg 이하의 무인비행장치에 대해서는 안전성 인증 및 비행승인 절차를 생략하는 등 규제를 완화하고 있다. 하지만 현재 항공법상 무인비행장치는 주간에 육안으로 식별 가능한 범위에서 비행해야 하며 고도 150m 이상, 비행장 반경 9.3km 이나, 비행금지구역 등에서는 운항할 수 없다^[1]. 소형무인기는 취미·오락, 사진·영상 촬영, 지도 제작, 농업, 감시·정찰 분야 뿐 아니라 운송, 재난 대응, 기상 모니터링, 공공 안전 분야 등 다양한 영역에서 활용도가 커지고 있다. 미국, 중국 및 유럽 연합 등은 국가 주도의 공역 관리 및 저고도 무인비행장치 운용에 관한 연구를 활발히 진행 중이며 이를 통해 안전하고 효율적인 공역관리와 무인기를 이용한 신산업 창출과 육성에 많은 투자를 하고 있다.

UTM(UAS Traffic Management) 공역에서 소형무인기의 활용성을 높이기 위해서는 현재 가시권 영역에 한정된 운용 범위 제한을 극복하는 기술적 개선이 필요하며, 연관하여 채공시간 개선, 비가시권 통신 지원, 충돌 탐지 및 회피 기술 고도화, 항법시스템의 정확성과 신뢰도 향상 등이 요구된다. 특히, 유인기 공역에 비해 작고 복잡한 UTM 공역에서 항법 성능 측면의 안전성 결여는 타 항공기 또는 장애물과의 충돌 가능성을 높이고 공역 안전성을 저해하는 요소가 된다.

본 논문에서는 150m 이하의 저고도에서 운영되는 무인비행장치를 위한 공역과 UTM 관련 기술 동향을 조사한 결과를 제시한다. 또한 UTM 공역에서 서비스되는 무인비행장치를 소형무인기로 정의하여 UTM 공역 일부에서 활용될 수 있는 순항로(en-route) 모델을 제안하고 유인항공기의 성능기반항법(PBN) 개념을 활용하여, 정의된 항로를 비행하는 소형무인기 항법 시스템의 전체시스템오차(TSE)를 추정하는 방법과 순항로에서의 무인기 안전 분리(safe separation) 거리를 결정하는 방법론에 대해 고찰한다.

II. 저고도 무인기 공역 및 UTM 관련 기술 동향

2.1 공역의 종류와 구성

공역의 종류와 구성은 국가마다 조금씩 다른 면이 있지만 대개 그림 1과 유사한 등급으로 구성되어 있다. 그림 2는 우리나라 공역의 종류와 등급을 나타낸다. 비행안전을 확보하기 위해서 인천 비행정보구역을

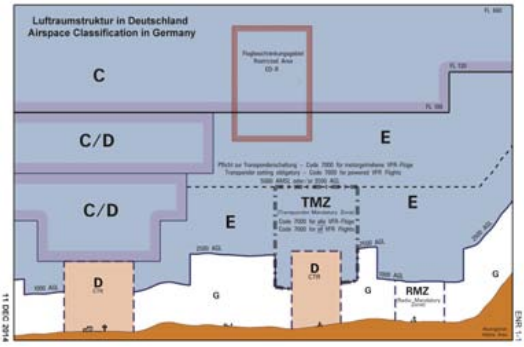


그림 1. 공역의 종류와 구성(독일의 사례)
Fig. 1. Classes of Airspace in Germany (Source: DFS Deutsche Flugsicherung GmbH)

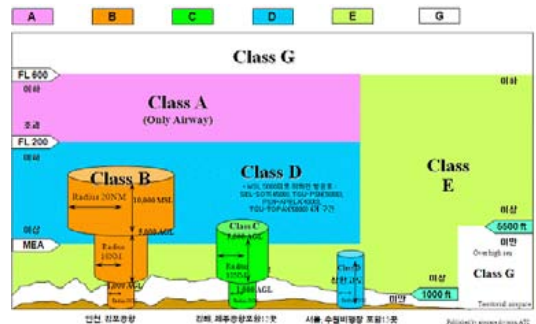


그림 2. 우리나라 공역의 종류와 등급 (출처: 인천항공교통관리소)
Fig. 2. Classification of Airspaces of Korea^[2]

A, B, C, D, E 및 G 등급 공역으로 세분화하여 각 공역 등급별로 비행방식과 항공교통업무 제공 범위 등을 지정·고시하여 시행하고 있다. 소형무인기가 운용되는 공역은 비관제 공역인 G 등급 공역으로 현재 유인항공기에게 비행정보업무만 제공되는 공역으로 정의되어 있다^[2].

G 등급 공역은 지형에 따라 상한 고도가 다르지만 전 세계적으로 지상기준 고도 500 ft 이하의 공역이 소형무인기를 위한 공역으로 활용될 것으로 전망된다.

2.2 미국의 UTM 기술 연구

미국은 무인기 기술의 발전과 시장 확대를 위해 저고도 공역에서의 안전 운항을 지원하는 UTM의 필요성을 인식하고 NASA를 중심으로 산학연관이 참여하는 연구개발을 추진 중이다. UTM 대상 공역의 제한된 영역과 기상 조건을 고려하여 안전 비행에 필요한 공간 확보와 타 비행체와의 분리를 유지하기 위한 정보와 수단을 운용자에게 제공할 것으로 예상된다. 이를 위해 무인기의 지역별 필요성, 애플리케이션, 성능 기준을 고려한 공역관리가 이루어 질 필요가 있다. 또

한 동적, 정적 geo-fence¹⁾ 설정, 기상/바람 정보 제공, 운용 인증 및 비행 허가 등과 관련된 기능이 구현될 것이다.

2.3 아마존사의 무인기 운용 공역 제안

세계 최대의 온라인 쇼핑몰을 운영하고 있는 미국 아마존사는 Prime Air라는 드론 택배 서비스를 시작하고 500ft 이하의 G 공역을 분할하여 이용하는 방안을 그림 3과 같이 제안한 바 있다³⁾.

특히 고도 200에서 400 ft 내의 영역을 고속 수송(Hight-speed transit)을 위한 전용 순항로로 활용할 수 있도록 고안된 것이 특징이며, 이 항로에는 상대적으로 성능이 좋은 항법/임무 장비를 탑재한(well-equipped) 무인기가 관련 규정에 따라 운용될 수 있도록 제안하였다.

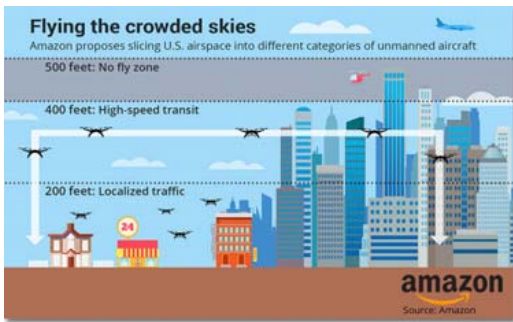


그림 3. 아마존 제안 무인기 택배용 공역의 구성³⁾
Fig. 3. Proposed airspace by Amazon for drone delivery service (source: Amazon, [3])

III. 성능기반항법의 개념 및 오차

3.1 성능기반항법과 오차 요소

성능기반항법(Performance Based Navigation)은 민간용 유인항공기를 대상으로 특정 항로(routes) 혹은 영역 내에서의 항법 애플리케이션의 요구사항을 항법 성능 측면에서 정의한 개념이다. PBN은 해당 공역에서 운용하는데 필요한 요구항법성능(RNP)을 지원하는 항공기의 지향항법(RNAV) 시스템의 성능 요건을 정확성(accuracy), 무결성(integrity), 가용성(availability), 연속성(continuity), 기능성(functionality)의 관점에서 정의한 것이다⁴⁾.

그림 4와 같이 VOR, DME와 같은 지상항행시설(NAVAIDS)을 따라 정의되는 과거 항로의 제한을 극복하는 성능기반항법 기술을 도입하게 되면 연속적

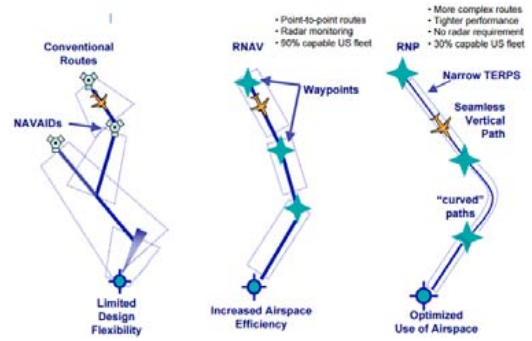


그림 4. 성능기반항법(PBN)으로의 발전
Fig. 4. Evolution to Performance-Based Navigation (Source: FAA)

(seamless)이며 경제적인 항로를 구성할 수 있게 되어 공역 수용량을 높이고 안전성을 보장하는 효율적인 공역 이용을 기대할 수 있다.

성능기반항법에서 정의된 RNP 항로를 비행하는 항공기는 자체 항법 성능 모니터링과 경보(alert) 기능을 포함해야 한다. 성능기반항법 개념에서 항공기 항법시스템의 요구성능은 요구항법성능(Required Navigation Performance, RNP)으로 표현되며 항법성능은 그림 5와 표 1과 같은 오차 성분으로 구성된다⁴⁾. 일반적으로 비행기술오차(FTE), 항법시스템오차(NSE), 경로정의오차(PDE)는 서로 독립이고, 0의 평균을 갖는 정규분포로 가정된다.

RNP 항로에서 통합시스템오차(TSE)와 연관된 주요 항법 성능 요건은 다음과 같다⁵⁾.

- 1) 정확성(accuracy): 95%의 비행 시간 동안, 실제 통합시스템오차(true TSE)가 RNP-x 임계값보다 작거나 같아야 함.
- 2) 무결성(integrity): true TSE가 (2×RNP-x) 임계값을 경보 없이 초과할 확률이 10^{-5} 보다 작아야 함.

RNP-x에서 x는 NM 단위의 임계값으로 예를 들어

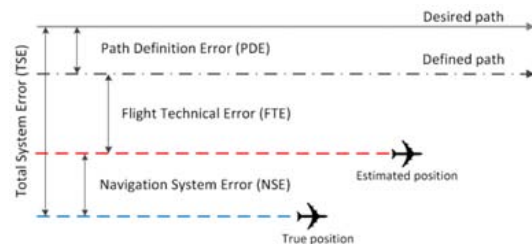


그림 5. RNP 항법 오차 요소 (95% 정확도)⁴⁾
Fig. 5. Error Elements of RNP Navigation (95% accuracy)

1) 지리상의 위치나 특정 지역에 대한 가상의 경계

표 1. RNP 항법 오차 요소^[4]
Table 1. Error Elements of RNP Navigation^[4]

Error Elements	Description
Path Definition Error (PDE)	PDE occurs when the path defined in the RNAV system does not correspond to the desired path, i.e. the path expected to be flown over the ground.
Flight Technical Error (FTE)	FTE relates to the air crew or autopilot's ability to follow the defined path or track, including any display error (e.g. course deviation indicator (CDI) centring error). FTE can be monitored by the autopilot or air crew procedures. FTE is sometimes referred to as path steering error (PSE).
Navigation System Error (NSE)	NSE refers to the difference between the aircraft's estimated position and actual position. NSE is sometimes referred to as positioning estimation error (PEE).
Total System Error (TSE)	TSE is the integrated error of FTE, NSE, and PDE. (Generally, PDE can be negligible).

RNP-1 항로에서 규정되는 정확성은 통합시스템오차가 95% 비행 시간 동안 1NM 이하가 되어야 하며, 무결성 조건은 2NM(2×1NM)의 임계값을 경보 없이 초과할 확률이 10⁻⁵ 이하가 되어야 한다는 것을 의미한다.

일반적으로 경로정의오차(PDE) 값은 무시할만한 수준이므로 통합시스템오차(TSE)의 계산에는 비행기술오차(FTE)와 항법시스템오차(NSE)만을 고려한다. FTE는 비행관리시스템에서 계획 경로 대비 편차(bias error)를 계산하여 구할 수 있다. NSE는 GNSS 기반 항법시스템인 경우 N(0, Σ)를 따르는 정규분포로 가정하는데 공분산(Σ)은 의사거리 오차의 표준편차와 가지 항법위성의 배치에 따라 결정된다.

GNSS 기반 항법시스템의 NSE는 식 (1)과 같이 동일 분포의 확률 타원체로 모델링할 수 있으며 식 (1)에서 x_{EN} 은 East-North 좌표계에서의 실제 위치, μ_{EN} 은 GNSS로 추정된 위치, Σ_{EN} 은 NSE 분포의 공분산 행렬값이며 K값은 RNP 성능에서 요구되는 성능지표 확률값에 따른 정규분포 신뢰구간에 의거 결정되는 인자이다.

$$(x_{EN} - \mu_{EN})^T \Sigma_{EN}^{-1} (x_{EN} - \mu_{EN}) = K^2 \quad (1)$$

정규분포의 신뢰구간(confidence interval)에 따라 RNP-x 항로의 정확성 요건(95% 확률)에서 K 값은 1.96이 되며 무결성 측면(99.999%)에서 K 값은 4.41이 된다.

3.2 통합시스템오차(TSE)의 추정

소형무인기의 항법시스템의 성능, 특히 신뢰성은 상업용 민간항공기와 비교하여 매우 열악하다. 그러므로 무인기 활용이 증가할수록 주변 다른 비행체나 지상 장애물과의 충돌 발생의 우려가 커진다. 무인기의 충돌을 방지하기 위해서는 소형무인기의 항법 성능과 불확실성을 고려하여 무인기 간 혹은 장애물로부터의 안전한 분리를 보장해야 한다.

이를 위해서는 소형무인기의 항법시스템에서 TSE를 실시간으로 추정하고 항법 오차를 모니터링하여 조종사에게 경보할 수 있는, 즉 RNP 지원 유인기와 유사한 항법 오차 모니터링 기능이 구현되어야 한다.

TSE를 산출하는 방법은 유인기 성능기반항법 개념에서 적용 중인 방식을 고려할 수 있는데 FTE, NSE의 표준편차 제곱 합의 제곱근(Root Sum Square) 연산 방식이나 스칼라량의 합(Scalar Quantity Summation)으로 계산하는 방식이 일반적이다. 하지만 스칼라량의 합을 구하는 경우 실제 오차보다 과도하게 보수적(conservative)인 경우가 있어 이를 개선하기 위해 Fu Li^[5] 등이 CTEM(Circular Tangent Ellipse Method)와 LTEM(Linear Tangent Ellipse Method) 방법을 제시한 바 있다.

그림 6과 같이 $y = kx$ 를 계획 경로, NSE는 원점이 (x_0, y_0) 인 동일 확률의 타원으로 분포됨을 가정하면 기존의 스칼라량 합 방식으로 계산되는 통합시스템오차는 식 (2)와 같다^[5].

$$\begin{aligned} \tau_{SQSM} &= FTE + NSE \\ &= \eta + \max(a, b) \\ &= \frac{|y_0 - kx_0|}{\sqrt{1+k^2}} + \max(a, b) \end{aligned} \quad (2)$$

스칼라량 합 방식에서는 FTE와 NSE의 스칼라 값을 단순히 더하는 방식으로 TSE를 추정하는데, 연산량이 적어 구현이 손쉬운 장점이 있으나 과도하게 TSE를 추정하여 거짓 경보를 발생시킬 문제가 있다. 이를 개선하여 CTEM에서는 그림 6 (b)와 같이 타원에 접하는 원을 생각하여 TSE를 구하거나, (c)와 같이

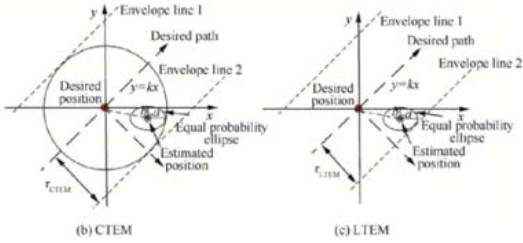


그림 6. 통합시스템오차 추정방법: CTEM과 LTEM [5]
Fig. 6. TSE estimation approaches: CTEM and LTEM [5]

타원에 접하는 직선을 구하여 TSE를 추정(LTEM 방식) 하게 되면 스칼라량 합 방식보다 근사하게 TSE를 추정할 수 있으며 실시간 연산량의 부담도 크지 않다. 비행기술오차(FTE)는 소형무인기에서도 유인기와 마찬가지로 0.3m 이하의 적은 값으로 추산된 연구결과⁶⁾가 제시된 바 있으며 항법시스템오차(NSE)는 GNSS 기반 항법 모드가 지배적으로 사용되므로 전술한 확률적인 방법으로 결정된다.

이러한 방식을 소형무인기에 적용하기 위해서는 무인기 탑재시스템의 성능을 고려한 효율적인 알고리즘을 적용해야 하며 기존의 비행조종시스템(FCS)의 소프트웨어를 변경하거나 별도의 임무컴퓨터(MC)를 추가하여 추정된 통합시스템오차(TSE)가 운용 항로상에 설정된 임계치를 초과하지 않는지를 모니터링하여 초과시 조종사나 운용자에게 즉각 경보할 수 있는 수단을 갖추어야 한다.

IV. 무인기간 안전분리 거리 결정 방법론

4.1 안전분리거리(Safe Separation Distance) 결정 방법

UTM 대상 공역에서 소형무인기간의 안전 분리 거리는 식 (3)과 같이 TSE가 공역 내에서 설정된 최소 분리거리 기준을 초과할 확률, $\Pr(TSE > \text{Separation Distance})$ 이 분리거리 침해(Separation Violation, SV) 확률, $\Pr(SV)$ 보다 작거나 같음을 만족할 수 있는 조건에서 식 (4)와 그림 (7)의 통계적인 임계값으로 결정될 수 있다^{7,8)}.

$$\Pr(TSE > \text{Separation Distance}) \leq \Pr(SV) \quad (3)$$

$$\text{Min. Separation Distance} = K\sigma_{TSE} \quad (4)$$

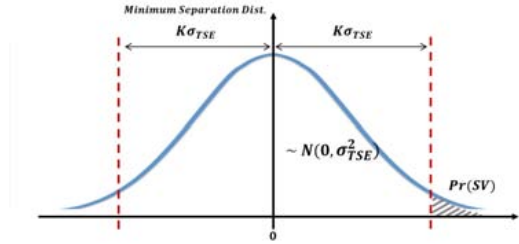


그림 7. 무인기 최소 분리 기준의 산출
Fig. 7. Determination of Minimum Separation Distance

4.2 안전성 검토를 위한 기능위험도분석(FHA)

소형무인기간 안전분리거리 결정을 위해서는 소형 무인기와 항법시스템의 안전성 분석(safety analysis)을 통해 위험(risk)과 위험의 발생 확률을 식별하고 위험으로 인한 사고 발생에 따른 영향을 검토하여야 한다. 이를 위해서는 최소한 기능위험도분석(Functional Hazard Analysis, FHA)이 필요하며 안전성 분석의 결과로 식 (3)의 연산에 필요한 $\Pr(SV)$ 가 확률값으로 결정될 수 있다.

기능위험도분석을 위한 주요 절차는 다음과 같다.

- 1) 다양한 기능의 식별
- 2) 고장 조건(Failure condition)에 대한 조사
- 3) 발생된 결과에 따른 각 고장 조건과 관련된 심각도(criticality) 정의
- 4) 각 고장 조건(최대 위험)을 방지하기 위한 요건 찾기 또는 발생 결과를 허용가능한 수준으로 유지
- 5) 분석이 완료되었고 및 결과가 안전성 규격에 부합함을 입증(모든 고장조건 확률이 목표 확률보다 작거나 같음을 보임)

안전성 분석을 위해서는 SAE ARP 4754⁹⁾와 ARP 4761¹⁰⁾과 같은 항공 안전성 관련 표준 규격을 참고한다. 표 2는 안전성 위배의 영향에 따른 심각도 따라 안전 심각도를 분류한 것이며, 표 3은 발생 확률과 횟수에 따라 심각도로 구분한 것이다.

참고 문헌 [6, 7, 8]에서는 안전분리 기준을 위배하여(Separation Violation, SV), 충돌(Collinsion)이 발생할 때 사람에게 피해를 주는(Harm to Human) 확률을 식 (5), (6)을 통해 계산하고 관련 확률을 표 4와 같이 산정하였을 때 $\Pr(SV)$ 이 10^{-4} 이하가 될 수 있음을 제시하였다.

$$\Pr(HH) = \Pr(HH/SV) \times \Pr(SV) \leq 10^{-9} \quad (5)$$

표 2. 안전 심각도 분류^[11]
Table 2. Safety criticality classification^[11]

Criticality classification	Results in one or more of the following effects
Catastrophic	- The loss of the aircraft - Multiple fatalities
Hazardous	- A large reduction in safety margins - Physical distress or a workload such that the flight crew cannot be relied on to perform their tasks accurately or completely - Serious injury or death of a relatively small proportion of the occupants
Major	- A significant reduction in safety margins - A reduction in the ability of the flight crew to cope with adverse operating conditions as a result of increase in a workload or as a result of conditions impairing to emergency - Injury to occupants
Minor	- Nuisance - Operating limitations: emergency procedures

표 3. 위험 내성도 표^[11]
Table 3. Risk tolerability matrix^[11]

Quantitative probability of occurrence	Qualitative probability of occurrence	Classification of effect
1 ~ 10 ⁻³	Frequent	Minor
10 ⁻³ ~ 10 ⁻⁵	Reasonably probable	
10 ⁻⁵ ~ 10 ⁻⁷	Remote	Major
10 ⁻⁷ ~ 10 ⁻⁹	Extremely remote	Hazardous
< 10 ⁻⁹	Extremely improbable	Catastrophic

표 4. 안전분리 위배시 충돌 및 위해 확률 산출^[6]
Table 4. Collision and Hazard Probabilities Given Probability of Separation Violations^[6]

Pr(CO SV) (mean)	Pr(HH CO) (mean)	Pr(HH SV) (mean)	Pr(HH SV) (worst case)
10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁹	10 ⁻⁵

$$Pr(HH|SV) = Pr(HH|CO) \times Pr(CO|SV) \quad (6)$$

안전분리거리 위배시 무인기 충돌 확률 (Pr(CO|SV)), 충돌 발생시 인명피해 확률 (Pr(HH|CO)) 값은 유인기와 상황이 다르므로 무인기 사고 사례와 비행체 특성에 따른 사항을 향후 연구에 반영하여 산출하고 보완할 필요가 있다.

4.3 시뮬레이션을 통한 안전분리 거리 도출

전술한 방법론과 가정을 통해 참고 문헌 [6]에서는 RTCA 24 GPS 위성군을 사용한 시뮬레이션을 수행하여 수평과 수직방향의 안전분리 거리를 추산한 결과를 제시하였다. 이 결과에 따르면 지상기반의 위성항법보강 기술을 적용시 수평방향의 안전분리 거리는 3m~6m, 수직방향은 2m~3m 수준이 가능함을 보인다.

V. 소형무인기 순항로 모델 제안

소형무인기의 운영 공역은 물리적으로 작은 공간의 한계로 확실적인 항로 지정이 사실상 불가능하다. 따라서 무인기 서비스의 종류에 따라 동적으로 또는 임시적으로 항로를 설정해야 할 수 있고 태백나 임무지역 고속 이동을 위해 특정 영역에 항구적인 순항로를 개설할 필요도 있을 것으로 예상된다. 그러나 어느 경우건 간에 무인기의 충돌을 방지하기 위해서는 무인기 간의 고도 분리가 관건이며 이를 위해서는 무인기의 항법 성능과 특성을 고려하여 동적 또는 정적 항로에서의 최소 분리 고도를 설정하는 것이 중요하다고 판단된다.

고도 150미터 이하를 비행하는 소형무인기의 고속(전용) 이동을 위한 순항로(en-route)를 그림 8과 같이 제안한다. 해당 공역의 수직 방향의 크기는 200ft(61m)로 설정하고, 소형무인기 지상통제시스템이나 UTM을 통해 또는 SBAS나 지상기반의 위성항법 보강시스템을 통해 위성항법 차분보정 정보와 무결성 정보를 제공받는 환경을 생각한다. 상부에는 충분한 버퍼 영역을 두어 고도 500 ft 이상의 유인기 공역과의 안전한 분리를 고려하고, 25m 수직 크기를 갖는 상부/하부 이동 항로 공역 간에는 5m의 물리적 버퍼를 두어 분리가 되도록 순항로 모델을 구성한다.

상하부 2개의 항로는 서로 반대방향(inbound/outbound 또는 east/west)으로 이동하는 순항로로 설정하고 상하 순항로 중심축 간의 물리적 거리는 50m가 되도록 설계하였다^[12].

제안한 순항로 공역에서 위성항법 보강기술을 통해 2~3m 이하 수준의 정확성(95%)이 보장된다고 가정

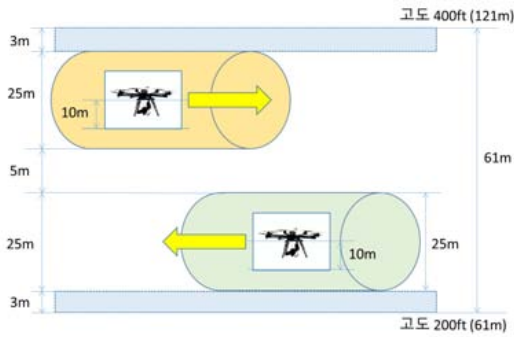


그림 8. UTM 공역에서의 순항로 모델 제안
 Fig. 8. Proposed en-route model for small UAVs in UTM airspace

한다. 수직 방향으로 10m의 경보한계값(alarm limit, threshold)를 설정하고, 소형무인기가 안전 분리 거리를 위배하여 무인기 충돌 발생으로 인해 사람이 피해를 입을 확률은 10^{-9} 이하가 되도록 한다. 제안된 모델을 기반으로 소형무인기가 TSE 추정을 통해 계산된 보호수준(Protection Level)이 수직방향의 무결성 경보한계(Alarm Limit, Threshold)를 초과하지 않는지를 모니터링하는 소형무인기 항법시스템을 구성하면 정상 상태에서 상·하부 항로를 비행하는 무인기 20m 수준의 안전한 수직 분리가 보장되는 무인비행장치를 위한 순항로 모델이 구성될 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 유인항공기의 성능기반항법의 개념과 오차 요소를 활용하여 통합시스템오차를 추산하여 안전분리거리를 구하는 방법론을 조사하여 소개하고 UTM 대상 공역에서 운용되는 소형무인기를 위한 순항로 모델의 한 방식을 제안하였다.

소형무인기에 통합시스템오차를 실시간으로 추정하는 성능기반항법 기능을 탑재하고 95% 비행 시간 동안 항법정확도가 2~3m 수준으로 유지되고 10^{-4} 이하의 항법 무결성이 보장되면 정상 상태에서 무인기 간 고도 분리 간격이 20m 수준으로 보장되는 순항로 모델이 구현 가능함을 알 수 있다.

이를 위해서는 RKT, GBAS, SBAS 등의 위성항법 보강(DGNSS) 기반 기술이 구현되어 소형무인기에 지원되어야 하며 통합시스템오차 추정과 항법 모니터링 기능이 기존의 시스템에 추가되어야 한다.

향후에는 통합시스템오차를 소형무인기에서 실제와 근사하게 실시간으로 추정하는 효율적인 방법에

대한 연구와 무인비행체의 실제 특성을 반영한 보다 구체적인 안전성 평가 및 분석 작업을 수행할 예정이다.

References

- [1] S. H. Kim and J. C. Kim, *Analysis of civilian UAV system and institution, and implications*, Issue paper, Korea Transport Institute, Sept. 2015.
- [2] Incheon Air Traffic Control Center, *Jurisdiction Airspace*, Retrieved Sept., 30, 2013, from http://acc.molit.go.kr/USR/WPGE0201/m_16182/LST.jsp.
- [3] Suppychain247, *Amazon's Top Prime Air Executive Outlines Plans for Delivery Drones to Navigate Skies*, Retrieved Sept., 30, 2013, from http://www.supplychain247.com/article/amazon_outlines_plans_for_delivery_drones_to_navigate_skies
- [4] ICAO Doc 9613, *Performance-Based Navigation (PBN) Manual*, ISBN 978-92-9231-198-8, 2008.
- [5] Fu Li, Zhang Jun, and Li Rui, "Real-time total system error estimation: Modeling and application in required navigation performance," *Chin. J. Aeronautics*, vol. 27, no. 6, pp. 1544-1553, 2014.
- [6] M. Kim, K. Kim, J. Lee, and S. Pullen, "High-Integrity GNSS navigation and safe separation distance to support local-area UAV networks," in *Proc. 27th Int. Technical Meeting of The Satellite Division of the ION GNSS+ 2014*, pp. 869-878, Tampa, Florida, Sept. 2014.
- [7] S. Pullen, P. Enge, and J. Lee, "High-integrity local area differential GNSS architectures optimized to support unmanned aerial vehicles (UAVs)," in *Proc. ION ITM 2013*, San Diego, CA, Jan. 2013.
- [8] S. Pullen, "Managing separation of unmanned aerial vehicles using high-integrity GNSS navigation," in *Proc. EIWAC 2013*, Tokyo, Japan, Feb. 2013.
- [9] SAE - ARP 4754 - *Certification considerations for highly integrated or complex aircraft*

systems - ED 79.

- [10] SAE - ARP 4761 - *Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment* - ED 135.
- [11] ICAO, *Manual on advanced surface movement guidance and control systems (A-SMGCS)*, Doc 9830 AN/452, First Edition 2004.
- [12] J. W. Bae and S. J. Lee, "A study on the safe separation of en-route airway under altimeter of 500 ft for the flight safety of small UAVs," in *Proc. KSAA Conf. Spring 2016*, pp. 39-47, Goyang, Korea, May 2016.

이 상 정 (Sang-Jeong Lee)



1979년 2월 : 서울대학교 전자공학과 졸업
1981년 2월 : 서울대학교 전자공학과 석사
1987년 3월 : 서울대학교 전자공학과 박사
1988년 3월~현재 : 충남대학교 전자공학과 교수

<관심분야> 위성항법시스템(GNSS), 강인제어

배 중 원 (Joong-Won Bae)



1995년 2월 : 한양대학교 제어계측공학과 졸업
1997년 2월 : 한양대학교 제어계측공학과 석사
2004년 3월~현재 : 한국항공우주연구원 선임연구원
2013년 3월~현재 : 충남대학교 전자공학과 박사과정

<관심분야> 항공전자기술, 위성항법시스템(GNSS), 항행시스템(CNS/ATM)