

## 복선 항공로에 대한 정량적 안전평가 및 효과에 관한 분석

# Quantitative Safety Assessment and Effectiveness Analysis for Duplication of ATS Routes

박세은<sup>1</sup> · 박선민<sup>2</sup> · 김휘양<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>공군사관학교 항공우주정책학과

<sup>2</sup>한국항공대학교 항공교통물류학부

Se-eun Park<sup>1</sup> · Sun-min Park<sup>2</sup> · Hui-yang Kim<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Aerospace Policy studies, Republic of Korea Air Force Academy, Cheongju 281870, Korea

<sup>2\*</sup>Department of Air Transportation and Logistics, Korea Aerospace University, Goyang 10540, Korea

### [요약]

국토교통부는 2022년 항공안전 및 운항 효율성 향상을 목적으로 제주와 부산을 잇는 항공로, Y579의 일부 구간을 복선화하였다. 복선화 이전에는 의도적으로 항공기를 진행 방향의 우측으로 이탈시키는 offset 절차를 적용하여 반대 방향으로 비행하는 항공기들을 횡적으로 분리하였으나 '22.12.1. Offset 절차를 폐지하는 대신, 두 개의 평행 항공로 Y571(부산방향)과 Y572(제주방향)를 신설함으로써 안전성과 효율성을 도모하였다. Y571, Y572 항공로의 복선화에는 여러 가지 측면에서 의의가 있다. 본 연구는 신설 항공로에 대해 안전도를 분석하는 한편, 이전에 적용하던 Offset 절차와의 안전도를 비교하여 복선화의 효과를 분석하였으며 공역 운용의 관점에서 의의를 제시하였다. 정량적 안전평가는 Reich CRM (collision risk model)의 변형된 모델을 활용하였다. 분석 결과 복선화 이후 안전수준이 향상되었으며 공역의 활용에서도 효과가 있음을 확인하였다.

### [Abstract]

The Ministry of Land, Infrastructure and Transport duplicated a section of ATS Route Y579 connecting Jeju and Busan in 2022 to enhance aviation safety and operational efficiency. Before duplication, an offset procedure was applied to separate aircraft flying in opposite direction by deviating them to the right of their intended flight paths. However, on December 1, 2022, this offset procedure was abolished and replaced with two parallel route, Y571(towards Busan) and Y572(towards Jeju), to improve safety and efficiency. The duplication of ATS Routes has significant implications in various aspects. This study analyzes the safety of the newly established ATS Routes and compares their safety with the previously applied offset procedure to evaluate the effectiveness of the duplication. Additionally, it presents the significance from the perspective of airspace operation. A safety assessment has conducted using a modified version of the Reich CRM (collision risk model). The analysis results confirms that the level of safety improves after the duplication and that there were benefits in terms of airspace utilization.

**Key word** : Lateral collision risk, Separation, Parallel route, Safety assessment, Aviation safety.

<https://doi.org/10.12673/jant.2024.28.4.480>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 4 July 2024; Revised 26 August 2024

Accepted (Publication) 29 August 2024 (30 August 2024)

\*Corresponding Author; Huiyang Kim

Tel: \*\*\* - \*\*\*\* - \*\*\*\*

E-mail: igreenbee@kau.ac.kr

## I. 서론

항공교통 부문의 수요와 교통량 증가뿐 아니라 최근 무인항공기(UAS; unmanned aircraft system)와 도심항공교통(UAM; urban air mobility) 등 새로운 비행체의 도입, 교통체계 변화의 기대로 국가 공역에 대한 구조적 개선이 계속 요구되는 한편, 한정된 공역을 효율적으로 사용하기 위한 공역 설계 및 공역관리 중요성이 대두되고 있다. 공역 구조는 환경변화에 따라 항공교통 수요에 대한 수용 능력이 극대화되고 교통이용자의 편의가 증대될 수 있도록 개선되는 것이 바람직하다. 다만 그 바탕에는 항공 안전의 확보가 전제되어야 한다. 공역 구조를 변경할 때는 최소한 변경 이전의 수용 가능한 안전수준을 유지해야 하며 이를 확인하기 위해서는 정량적 방법을 이용한 위험 평가(또는 안전 평가)가 필수적으로 수행되어야 한다 [1].

과거 Y579 항공로는 반대 방향으로 비행하는 항공기에 다른 고도를 배정하여 분리하는 단일 항공로로 운영되었으며, 김해와 제주공항에 입출항하는 항공기 사이에 빈번한 고도 변경으로 항공기 간 근접 조우 가능성이 높아 안전 이슈가 수시로 제기되었다[2]. 이에 따라 국토교통부는 안전 문제 해결을 위한 임시방안으로 항공로 일부 구간(MAKET-TOPAX)에 Offset 절차를 도입함으로써 반대방향으로 비행하는 항공기 간 근접 가능성을 완화하였다. Offset 절차는 실질적으로 단일 방향의 복선 항공로와 유사하게 운영되기는 하나 복선 항공로와 달리 항공기의 비행안전을 보장하는 보호구역이 설정되지 않고 항법 성능에 의존해서 비행해야 하는 어려움이 있었다 [2]. 이에 따라 '22. 12. 국토교통부는 Y579 항공로에서 Offset 절차의 운용을 폐지하는 대신 RNAV 2 성능을 만족하는 복선 항공로, Y571 및 Y572 항공로를 신설하고 부산 방향 항공기(Y571)와 제주 방향 항공기(Y572)를 8nm 분리하여 운용하기 시작하였다.

본 연구에서는 신설된 두 항공로의 중심선 사이 간격에 주목하였다. ICAO(2020)는 GNSS 기반의 RNAV 2 성능을 따르는 항공로 폭(여기에서는 절반 폭을 의미함)을 5nm로 요구함에 따라 Y571과 Y572 항공로 사이에는 10nm의 이격이 요구된다 [3]. 따라서 본 논문에서는 현재 ICAO 기준과 달리 8nm 분리되어있는 Y571, Y572 복선 항공로의 안전수준이 항공학적으로 수용 가능한지 분석하였다. 또한 본래의 연구 목적에 추가하여 항공로 복선화에 따른 효과를 분석하기 위해 이전 Offset 절차와 Y571/Y572 복선 항공로에 대한 안전수준을 비교·평가하였다. 연구의 수행을 위해 복선화 이전의 경우 MAKET-TOPAX 구간의 Offset 평행 경로를 단일방향의 복선 항공로로 가정하여 충돌 위험성을 계산하였으며 복선화 이후에는 MAKET-TOPAX와 대응되는 지점인 UPGOS-ENGOT와 AKPON-ANROD 사이의 평행 항공로 간 충돌위험을 계산하여 안전도를 비교하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. II장은 항공로 안전평가에 관한 선행연구를 검토하였으며 III장은 안전평가 방법론을 설명하고 IV장은 안전평가 수행과정 및 결과를 제시한다. 마지막으로 V장은 본 연구의 결론 및 시사점을 정리하였다.

## II. 이론적 고찰

### 2-1 Offset 운용 절차 및 항공로 설계기준

ICAO(2016)에서 정의하는 Offset 절차는 단일의 항공로에서 서로 반대 방향으로 비행하는 항공기 간 충돌 방지를 목적으로 운용되는 절차로서 항공교통관제기관은 인접하는 항공로와의 거리를 고려하여 항공기가 항공로 중심으로부터 비행 방향의 우측으로 0.5 nm에서 최대 2 nm까지 이탈하여 비행하도록 정할 수 있다 [4]. ICAO(2005)는 원칙적으로는 항공기에 대해 항공로의 중심을 따라 비행하도록 규정하면서도 안전을 위한 의도적인 이탈을 허용하는 것이다 [5]. ICAO(2016)는 Offset 절차를 ‘전략적 횡적 이탈 절차’의 의미로써 ‘SLOP (strategic lateral offset procedures)’으로 명명한다.

우리나라에서 적용했거나 적용 중인 Offset 절차는 SLOP의 의도와 운용방식 등에서 차이가 있다. 넓은 의미에서 항공 안전을 목적으로 한다는 점은 SLOP과 유사하다. 그러나 SLOP은 항공로 중심에서 최대 2nm까지 이탈을 허용하되 횡적 이탈은 항공기 간의 분리에 영향을 미치지 아니하고 단일항공로 분리 기준과 같은 기준을 적용하는 반면, 우리나라의 경우 이탈을 3nm로 정하고 분리는 단일항공로가 아닌 두 개의 평행한 항공로 분리 기준을 적용한다는 점에서 차이가 있다 [2],[4].

우리나라는 그림 1과 같이 Y579 항공로 일부 구간(MAKET-TOPAX)에 Offset 절차를 적용하였으며, 제주 또는 부산으로 입출항하는 항공기는 각각 비행 방향의 우측으로 3nm를 이탈하여 두 개의 비행경로는 6nm 간격으로 분리되었다 [6]. 그러나 실제 항적을 분석한 결과 김해 방향(Eastbound)의 항공기는 3nm보다 6nm 이탈하는 비율이 월등히 높은 것으로 확인되었다. 박세은·김휘양(2023)은 이를 반영하여 Offset 절차에 따른 제주 방향과 김해 방향 비행경로 간격을 6nm, 9nm로 구분하여 안전성을 평가하였다 [2].

복선화 이후에는 Y571 및 Y572 항공로 간 8nm 분리·운영되어 Offset 비행경로 6nm 보다는 넓지만 9nm보다는 감소하였다. 이러한 변화는 공역 운영 측면에서는 효과적일 수 있으나 그에 대한 안전이 충분히 보장될 수 있는지는 평가가 필요하다. 특히, ICAO(2020) 「PANS-OPS(Doc. 8168) vol.2」에 따르면 표 1과 같이 RNAV 2 성능(GNSS 조건)으로 설계되는 항공로의 경우 중심선 좌우로 ±5nm의 보호구역(또는 폭)이 설정되어야 하나 Y571과 Y572 항공로의 경우 일부 미치지 못하였다 [3].

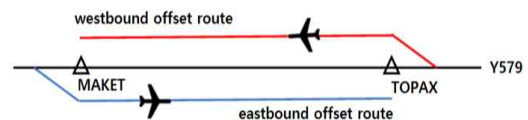


그림 1. Y579 항공로 Offset 절차  
Fig. 1. Offset operating procedures for the ATS route, Y579.

**표 1.** RNAV 2와 RNAV 5 항공로 절반 폭(semi-width)  
**Table 1.** Area semi-width for RNAV 2, RNAV 5 routes.

	RNAV 5	RNAV 2
Equation	1/2 AW = 1.5×XTT + BV	
XTT	2.51 nm	2.00 nm
BV	2.00 nm	2.00 nm
semi-width(1/2 AW)	5.77 nm	5.00 nm

그러나 우리나라는 '12.6. 이후 서울과 제주를 잇는 Y711과 Y722 항공로의 간격을 8nm로 운용하고 있으며 ICAO(2023)는 「PBN (performance based navigation) 매뉴얼」에서 8 nm 간격의 RNAV 2 항공로를 인정하고 있다 [7],[8]. 다만 이 경우는 모두 충돌위험평가를 통한 안전수준을 확인한 사례로써 Y571/Y572 항공로에 대해서도 동등한 평가가 필요하다. 따라서 본 연구는 충돌위험모델(CRM)을 활용하여 두 개의 평행 항공로에 대한 평가를 진행하고 그 결과가 이전 Offset의 안전수준보다 향상되었는지를 비교하였다.

**2-2 선행연구**

공역 구조, 절차 등에 대한 안전도를 정량적으로 평가하기 위해서는 충돌 위험성을 측정할 수 있어야 하며 계산된 수치가 안전한 수준인지 판단할 수 있어야 한다. ICAO에서는 안전성을 판단할 수 있는 목표 수치를 제시하고 있는데 종적 · 횡적 · 수직분리 상실에 대한 안전수준목표 (TLS; target level of safety)는 비행시간당  $5 \times 10^{-9}$ 이다 [9]. 즉, 평가 결과에 대한 수용 여부는 안전수준목표(TLS)와 비교함으로써 판단할 수 있으며 만약 평가된 위험 정도가 받아들일 수 없는 수준이라면 위험을 낮추기 위한 대책을 마련하여 재평가를 수행해야 한다 [10].

평행 항공로의 횡적 충돌위험을 계산하는 대표적인 모델은 ‘Reich Lateral Collision Risk Model(이하 Reich 모델)’로 ICAO를 포함하여 국내외에서 활발하게 사용되고 있다. 이 모델은 동일한 고도를 평행하게 비행하는 항공기가 독립적인 위치 오차를 가질 때 횡적 분리 상실로 충돌할 확률을 계산하는 모델이다. Davis & Sharpe (1993)은 60nm 분리된 North Atlantic의 평행 항공로 충돌위험 평가 연구에 Reich 모델을 사용논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 항공로 안전평가에 관한 선행연구를 검토하였으며 III장에서는 연구에서 사용한 안전평가 방법론을 설명하고 IV장에서는 정량적 안전평가 수행과정 및 결과를 제시한다. 마지막으로 V장에서는 본 연구의 결론 및 시사점을 정리하였다. 하였으며 FAA는 NOPAC (north pacific) 평행 항공로의 횡적 분리 기준 축소를 위한 안전평가에 이 모델을 활용하였다 [11],[12]. 국내에서는 성능기반항행(PBN) 이행 단계에서 B576 항공로의 복선화를 위한 사전 안전평가 및 Y71, Y72(현 Y711, Y722) 평행 항공로 간 안전평가에 사용된 사례가 있다 [13]. Reich 모델을 기초로 한 변형 모델도 개발되었는데 Brooker(2003)는 Reich 모델의 한계를 보완한 ‘Post-Reich

Model’을 제시하였으며 Zhang & Ma(2013)는 베이징-상하이 간 RNAV 2 평행 항공로의 충돌위험을 정확하게 평가하기 위해 항공기를 직육면체가 아닌 원기둥 형태로 가정하는 ‘Improved Reich model’을 활용하였다 [11],[14]. 박세은 · 김휘양(2023)은 Reich 모델을 토대로 단일방향의 복선 항공로와 국내 Offset 경로에 적합한 안전평가 모델을 제안하고 이를 활용하여 Y579 항공로 Offset의 안전수준을 평가하였다 [2].

본 연구에서는 선행연구에 사용한 Reich 모델 기반의 단일방향 복선 항공로 및 Offset 안전평가 모델을 활용하여 평행 항공로에 대한 충돌위험을 평가하였다.

**III. 정량적 안전평가 방법**

Reich 모델은 현재 항공로 분리 간격의 적절성이나 새롭게 제시된 항공로 분리 간격의 수용 여부를 판단하기 위해 사용되며 식 1과(표 1 참조) 같이 단위 시간당 충돌 횟수로 나타난다 [2]. 일반적인 Reich 모델은 모든 항공기가 평행한 항공로 상에서 수평비행을 하며 항공기 충돌위험을 수학적으로 계산하기 위해 항공기를 직육면체로 가정한다 [15].

$$N_{ay} = P_y(S_y)P_z(0) \frac{\lambda_x}{S_x} \left[ E(same) \left\{ \frac{|\Delta V|}{2\lambda_x} + \frac{|\bar{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\bar{z}|}{2\lambda_z} \right\} + E(opp) \left\{ \frac{2|\bar{V}|}{2\lambda_x} + \frac{|\bar{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\bar{z}|}{2\lambda_z} \right\} \right] \quad (1)$$

**표 2.** Reich CRM 변수 정의  
**Table 2.** Parameters for Reich CRM.

Parameter	Definition
$S_y$	Lateral separation minimum
$P_y(S_y)$	Probability of lateral overlap for aircraft on the parallel routes due to loss of lateral separation
$P_z(0)$	Probability of vertical overlap for two aircraft operating on the same level
$\lambda_x$	Average length of aircraft
$\lambda_y$	Average wing span of aircraft
$\lambda_z$	Average height of aircraft
$S_x$	Length of longitudinal window
$E_y(OPP)$	opposite direction lateral occupancy value
$E_y(SAME)$	Same direction lateral occupancy value
$\bar{V}$	Average ground speed of sample aircraft
$ \Delta \bar{V} $	Relative average speed in same-direction as the aircraft sample
$ \bar{y} $	Average absolute relative cross-track speed for an aircraft pair assigned to adjacent routes
$ \bar{z} $	Average absolute relative vertical speed of an aircraft pair assigned to the same flight level
$N_{ay}$	Expected collision risk per flight hour

한편 우리나라 비행정보구역에서 비행하는 항공기는 single alternate FLOS (flight level orientation scheme)에 따라 000도에 서 179도로 비행하는 항공기는 홀수 고도, 180도에서 359도로 비행하는 항공기는 짝수 고도로 비행한다 [6]. 즉, 반대 방향으로 비행하는 항공기 간에는 순항 시 최소 1,000ft의 고도 분리가 적용되기 때문에 Reich 모델의 기본 가정을 충족하지 않음을 알 수 있다. 따라서 본 연구는 선행연구에서 개발한 Reich 변형 모 델을 설명하고 이를 활용하여 정량적 안전 평가를 수행하고자 한다.

선행연구에서는 단일방향 복선 항공로 및 Offset 경로의 충돌 위험을 계산하기 위하여 발생 가능한 위험을 순항단계와 고도 변경 단계로 구분하고 두 위험을 합하여 최종 충돌위험을 도출 하는 방법을 제시하였다 [2]. 순항단계에서는 역방향 항공기 간 횡적 분리와 고도 분리가 동시에 실패하는 경우에 충돌이 발생 하므로 비교적 충돌확률이 낮아지게 된다. 따라서 순항 시에는 역방향 항공기 간 충돌위험은 배제하고 동일 방향 항공기 간 수 직 충돌위험만 고려하였다. 동일 방향의 항공기 간 수직 충돌위험은 태평양지역모니터링기구 (PARMO; pacific approvals registry and monitoring organization)에서 수행한 수직 안전평 가 결과인  $1.07 \times 10^{-9}$ 을 사용하였다 [16]. 고도 변경 단계에서 는 순간적으로 역방향 항공기가 같은 고도로 비행하는 상황이 발생할 수 있는데 이때 발생 가능한 횡적 충돌위험 계산에 Reich 변형 모델을 사용하였다. 변형 모델은 식 2와 같이 Reich 기본 모델에서 역방향 횡적 점유율에 관한 식으로 정리한 후 고 도 중첩 발생비율을 의미하는  $P_i$ 를 곱한 형태로 표현된다. 고도 중첩 발생비율( $P_i$ )은 안전도를 보수적으로 계산하기 위해 전체 비행시간 중 항공기가 고도를 변경한 총시간으로 정의한다 [2].

$$N_{avg} = P_i P_y (S_y) P_z (0) \frac{\lambda_x}{S_x} \left[ E_y (opp) \left( \frac{2|\bar{V}|}{2\lambda_x} + \frac{|\bar{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\bar{z}|}{2\lambda_z} \right) \right] \quad (2)$$

이에 따라 본 연구는 고도 변경 단계에 초점을 맞춰 Reich 변형 모델인 식 2의 주요 변수를 추정 후 위험도를 도출하였으며 최종적으로 순항단계 위험도인  $1.07 \times 10^{-9}$ 을 더하여 ICAO 안 전수준목표(TLS)인  $5 \times 10^{-9}$ 을 충족하는지 평가한다.

## VI. 정량적 안전평가

### 4-1. 기초 데이터 분석

정량적 안전 평가에 앞서 복선화 전후 항공로 운영형태를 살 펴보기 위해 기초분석을 수행하였다. 분석을 위해 Flight Radar 24에서 제공하는 ADS-B (automatic dependent surveillance-broadcast) 자료를 수집하였으며 2019년 5월(복선화 전)과 2023 년 5월(복선화 후) 각 한 달 동안의 데이터를 비교· 분석하였다.

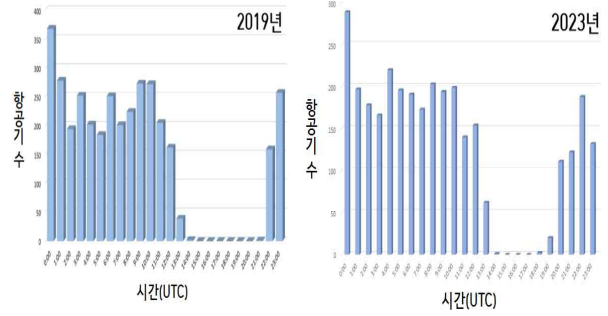


그림 2. 시간대별 교통량

Fig. 2. Traffic volume by time period.

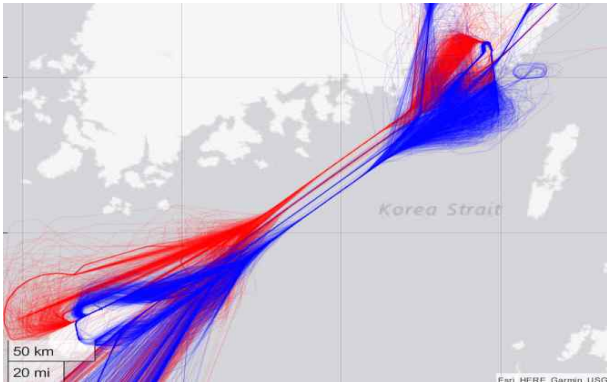
먼저 복선화 이전 Y579 항공로의 ‘MAKET-TOPAX’ 구간을 비행한 항적과 복선화 이후의 Y571 ‘AKPON-ANROD’ 및 Y572 ‘UPGOS-ENGOT’ 구간을 비행한 항적 자료를 추출하였다. 그 결과 2019년 5월(복선화 전)에는 총 2,875대의 항공기가 Y579 항공로를 Offset 절차에 따라 비행하였고 2023년 5월(복선화 후)에는 Y572 항공로는 1,580대, Y571 항공로는 1,366대의 항공기 가 이용하였다. 시간대별 교통량에서는 그림 2과 같이 복선화 전후 모두 비슷하게 국제 표준시(UTC; universal time coordinated) 기준 0000시(대한민국 표준시 0900)에 교통량이 가 장 많았으며 UTC 1400(대한민국 표준시 2300) 이후 교통량은 급격히 감소하였다.

표 3은 해당 항공로를 비행한 항공기의 기종별 점유율을 보 여주는 자료로써 B738과 A321과 같이 중·단거리용 항공기가 높은 비중을 차지하고 있음을 알 수 있다. 이는 김해공항과 제주 공항을 비행하는 국내선 항공기의 비율이 높아서 나타난 결과 로 분석되었다.

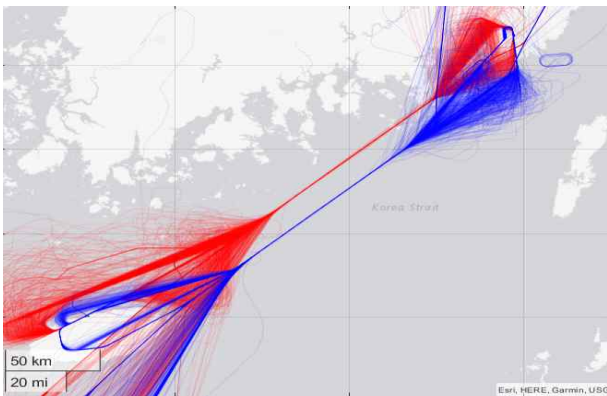
표 3. 기종별 점유율

Table 3. Occupancy by aircraft type.

2019(Before duplication)		2023(After duplication)	
Aircraft type	Number(Ratio)	Aircraft type	Number(Ratio)
B738	839(29.2%)	B738	1178(40.0%)
A321	790(27.5%)	A321	606(20.6%)
B737	453(15.8%)	B739	368(12.5%)
A320	394(13.7%)	A21N	287(9.7%)
BCS3	118(4.1%)	A320	213(7.2%)
A330	113(3.9%)	A333	120(4.1%)
A333	62(2.1%)	BCS3	119(4.0%)
B739	36(1.2%)	A20N	35(1.2%)
A20N	34(1.2%)	Others	20(0.7%)
Others	36(1.3%)	-	
Total number	2875	Total number	2946



(a) Trajectory Data(2019 before duplication)



(b) Trajectory Data(2023 after duplication)

그림 3. 항적 자료  
Fig. 3. Trajectory Data.

그림 3은 복선화 전과 후의 실제 항적 데이터 중 Westbound 항적(김해→제주 방향)은 빨간색으로 표시하고 Eastbound 항적(제주→김해 방향)은 파란색으로 표시한 것이다. 그림 3(a)를 통해 알 수 있듯이 복선화 이전 Offset 절차를 운용하였을 때 총 4개의 항적 경로가 식별되었다. 우리나라 항공정보간행물(AIP; aeronautical information publication)에서 설명에 따라 3nm 이탈로 생성된 항적 경로 외에도 항공로 중심선을 따라서 비행하는 Eastbound 및 Westbound 항적 경로(0nm Offset)와 함께 6nm을 이탈하여 비행하는 Eastbound 항적 경로(Eastbound 6nm Offset)가 추가로 확인되었다. 복선화 이후에는 그림 3(b)와 같이 Eastbound 항적은 Y571 항공로를 따라 생성되었고 Westbound 항적은 Y572 항공로를 따라 이루어졌다. 두 항공로 중심선 간 간격은 8nm인 것으로 확인되었다.

경로별 교통량을 분석한 결과, 표 4와 같이 복선화 이전에는 대다수 Eastbound 항공기는 6nm Offset 경로로 비행하였으며 전체 Westbound 항공기 중 약 79%는 3nm Offset 경로로 비행하고 그 외 항공기는 항공로 중심선(0nm Offset)을 따라 비행하는 것으로 확인되었다. 복선화 이후 Westbound(Y572)로 비행한 항공기는 Eastbound(Y571)보다 많았으나 충돌위험 분석에 유의미한 영향을 주지 않는 것으로 분석되었다.

표 4. 항적 발생 경로별 교통량  
Table 4. Traffic volume by routes of trajectories.

(a) 2019(Before duplication)		
Category		Estimate
West bound (to Jeju)	Centerline (0nm Offset)	275
	3nm Offset	1,029
	total	1,304
East bound (to Gimhae)	Centerline (0nm Offset)	22
	3nm Offset	89
	6nm Offset	1,460
	total	1,571

(b) 2023(After duplication)		
Category		Estimate
Y572 West bound (to Jeju)		1,580
Y571 East bound (to Gimhae)		1,366

4-2. 안전평가 시나리오 개발

충돌위험 분석을 위한 시나리오는 기초자료 분석 결과를 반영하여 표 5와 같이 개발하였다. 복선화 이전 자료에서는 상대적으로 교통량이 적은 Eastbound의 중심선(0nm Offset) 경로와 Eastbound 3nm Offset 경로를 제외한 나머지 경로를 조합하여 각각 경로의 간격이 6nm과 9nm 떨어진 2개 시나리오를 생성하였다. 복선화 이후에 대해서는 8nm 이격된 Y571과 Y572 평행한 복선 항공로를 1개의 시나리오로 하였다. 본 연구에서는 3개의 시나리오에 대한 횡적 충돌위험 결과를 도출하고 복선화 이전 대비 복선화 이후 안전수준의 변화를 비교한다.

표 5. 안전평가 시나리오  
Table 5. Safety assessment scenario.

2019	Scenario 1	Lateral collision risk between Westbound 0nm route and Eastbound 6nm route
	Scenario 2	Lateral collision risk between Westbound 3nm route and Eastbound 6nm route
2023	Scenario 3	Lateral collision risk between unidirectional Parallel routes separated by 8nm

4-3. 주요 변수값의 추정

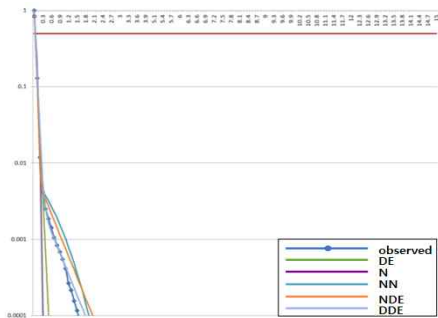
1) 횡적중첩확률( $P_y(S_y)$ )

‘횡적중첩확률’은  $S_y$ 만큼 분리된 경로를 비행하는 항공기가 위치 오차로 인해 횡적 방향으로 중첩될 확률로 식 3으로 표현된다. 여기에서  $y_1$ 과  $y_2$ 는 평행 항공로를 비행하는 두 항공기의 횡적 편차를 의미하고  $\lambda_y$ 는 항공기 너비를 말한다.

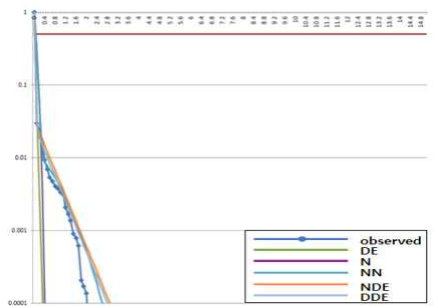
$$P_y(S_y) \approx 2\lambda_y \int_{-\infty}^{\infty} f^{y_1}(y_1) f^{y_2}(S_y + y_1) dy_1 \quad (3)$$

또는  $P_y(S_y) \approx 2\lambda_y f^{12}(0)$

횡적중첩확률의 계산에서는 횡적 이탈에 대한 확률밀도 함수  $f^{12}$ 의 추정이 중요하다. 확률밀도함수의 도출은 횡적 이탈자료 확보 여부에 따라 구분되는데 자료가 충분하지 않을 때는 확률밀도함수 모델을 가정하고 간단한 수치를 활용하는 반면, 자료가 충분한 경우에는 관찰 자료로부터 확률밀도함수의 추정이 가능하다 [17]. 여러 선행연구에서는 항공기 횡적 편차를 모델링할 때 ‘이중지수 분포 (DE; double exponential distribution)’, ‘가우스분포 (GN; gaussian distribution)’ 또는 두 분포를 혼합한 모형을 사용했는데 정확한 분석을 위해서는 여러 분포 중 관찰 자료를 가장 잘 설명하는 분포를 선택하는 것이 중요하다 [18].



(a) 2019



(b) 2023

그림 4. 적합성 그래프

Fig. 4. Fitting graph.

표 6. 횡적중첩확률

Table 6. Probability of lateral overlap.

Parameter	2019		2023
	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
$P_y(S_y)$	$1.09 \times 10^{-9}$	$1.86 \times 10^{-12}$	$1.08 \times 10^{-13}$

본 연구에서는 이중지수분포(DE), 가우스분포(N), 혼합가우스분포(NN), 가우스-이중지수혼합분포(NDE) 및 혼합 이중지수분포(DDE)의 매개 변수를 최대우도추정법(Maximum likelihood)로 추정된 후 관찰 자료와 가장 적합한 확률밀도함수 모델을 선정하였다. 그림 4는 관찰 데이터와 확률밀도함수 간 적합도 그래프를 나타낸다. 여기에서 x축 방향은 항공기가 횡적으로 이탈한 정도를 의미하며 y축은 1-CDF (one-minus the cumulative distribution function)를 의미한다. 그림 4(a)에서는 혼합 이중지수분포(DDE)가, 그림 4(b)는 혼합 가우스분포(NN)가 가장 적합한 것으로 나타났다.

위에서 선정한 모델을 통해 도출한 횡적중첩확률( $P_y(S_y)$ ) 결과는 표 6과 같다. 시나리오 1, 2, 3의 횡적중첩확률은  $1.09 \times 10^{-9}$ ,  $1.86 \times 10^{-12}$ ,  $1.08 \times 10^{-13}$ 인 것으로 나타났다.

2) 수직중첩확률( $P_z(0)$ )

항공기는 항법 성능 등으로 인해 배정 고도와 실제 고도 사이에 편차가 발생하게 된다. ‘수직중첩확률’은 동일한 고도를 배정받은 항공기가 수직으로 중첩될 확률을 의미한다. 수직중첩확률은 횡적 중첩확률과 유사한 방법으로 계산할 수 있으나 본 연구에서는 수직 이탈자료가 충분하지 않아 선행연구에서 적용한 값을 검토하였다. 인도 지역감시기구 BOBASMA, 일본의 JASMA 및 Asia/Pacific EMA Handbook 등 선행연구에서는 수직 중첩확률값으로 0.538을 사용하였다.

3) 반대 방향 횡적 점유율( $E_{y(opp)}$ )

‘횡적 점유율’은 종적 중첩확률과 관련된 변수로써 동일 고도로 비행하는 항공기가 특정 항공기의 종적 범위로 들어가는 횡수로 정의된다. 인접 항공로를 비행하는 항공기가 동일 방향으로 비행하는 때에는 E(same), 항공기가 반대 방향으로 비행하는 경우는 E(opp)로 표현된다. 다만 단일방향으로 운용되는 복선 항공로 및 Offset 절차에서는 E(same)에 해당하는 경우가 존재하지 않는다.

표 7. 반대 방향 횡적 점유율

Table 7. Opposite direction lateral occupancy.

Parameter	2019		2023
	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Proximate pair	256	1130	1350
Total number	1735	2489	2946
$E_{y(opp)}$	0.2951	0.908	0.9164

본 연구에서 횡적 점유율은 분석 기간에 특정 웨이포인트를 통과하는 항공기의 시간을 추적하여 근접하는 항공기 쌍의 수를 계산하는 ‘Direct estimation from the at waypoint crossing’ 방법을 사용하였다. 즉  $E(opp)$ 는 식 4와 같이 모든 항공기 대수  $n$  중에 근접 항공기 쌍  $n_y$ 로 계산할 수 있다. 다만 동일 고도를 비행하는 항공기를 대상으로 근접 항공기 쌍을 계산하는 일반적인 Reich 모델과 달리 본 연구에서는 고도를 변경하는 항공기가 모두 횡적 충돌 가능성을 가지고 있으므로 전체 고도에 대한 근접 항공기 쌍을 계산하였다 [2]. 시나리오별 반대 방향 횡적 점유율은 표 7과 같다.

$$E_y = \frac{2n_y}{n} \tag{4}$$

4) 항공기 평균 제원 값( $\lambda_x/\lambda_y/\lambda_z$ )

항공기 평균 길이, 너비 및 높이 등 제원에 관한 변수는 복선화 이전에 Y579 항공로를 비행한 항공기와 복선화 이후의 Y571과 Y572 항공로를 비행한 항공기 기종을 추출하여 분석에 활용하였다. 기종별 제원은 EUROCONTROL에서 제공하는 Aircraft Performance Database의 정보를 해리(NM; nautical mile)로 변환하였다. 표 8은 항적 데이터에서 추출한 기종별 점유율에 따라 가중평균한 결과이다.

5) 종적 분리간격의 1/2( $S_x$ )

항공기 간의 종적 분리간격은 EUR/SAM 보고서에서 정의한 바와 같이 480knots 속도로 20분 비행하는 거리로 계산하였다. 이에 따라 종적 분리 간격은 160nm로 하고  $S_x$ 는 종적 분리의 절반인 80nm로 정하였다 [13],[19].

표 8. 평균 항공기 제원

Table 8. Average aircraft specification.

Parameter	2019		2023
	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
length( $\lambda_x$ )	0.023145	0.02274	0.022742
width( $\lambda_y$ )	0.020295	0.019588	0.019621
height( $\lambda_z$ )	0.006813	0.006722	0.006699

표 9. 기타 변수

Table 9. Other parameters.

Parameter	2019		2023
	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
$ \bar{V} $	435.7561	425.5933	393.9491
$P_i$	0.6686	0.5850	0.6068
$ \bar{y} $	75	75	75
$ \bar{z} $	1.5	1.5	1.5

6) 기타 변수

표 9는 항적 데이터로부터 산출한 평균 비행속도( $|\bar{V}|$ ), 고도중첩 발생비율( $P_i$ ) 등 기타 변수의 값을 보여준다. 고도중첩 발생비율( $P_i$ )은 식 5에 따라 전체 비행시간( $T_n$ )과 동일 고도로 중첩되는 시간( $T_i$ )의 비율로 계산할 수 있다. 다만 안전수준을 보수적으로 결정하기 위하여 동일 고도로 중첩되는 시간 대신, 항공기가 고도를 변경한 시간으로 수정하여 계산하였다 [2].

$$P_i = \frac{T_i}{T_n} \tag{5}$$

$|\bar{y}|$ 는 횡적 분리를 상실한 두 항공기 간 평균 상대 횡적 속도로 Asia/Pacific EMA Handbook에서는 75kts를, ARINC는 42kts를 사용하였다. 본 연구에서는 안전도를 보수적으로 계산하기 위하여 75kts를 적용하였다.  $|\bar{z}|$ 는 동일 고도를 비행하는 두 항공기 간 평균 상대 수직 속도로 Asia/Pacific EMA Handbook과 ARINC 모두 1.5kts를 적용함에 따라 본 연구에서도 1.5kts로 가정하였다.

4.4. 정량적 안전 평가 결과

앞에서 추정한 변수값을 Reich 변형 모델(식 2)에 대입하여 도출한 고도 변경 단계에서의 충돌위험 분석 결과는 시나리오 1:  $6.9577 \times 10^{-10}$ , 시나리오 2:  $3.1339 \times 10^{-12}$  그리고 시나리오 3:  $1.7769 \times 10^{-13}$ 으로 도출되었다(표 10 참조).

표 10. 안전평가 결과  
Table 10. Results of safety assessment.

Parameters	2019		2023
	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
$S_y$	6	9	8
$P_y(S_y)$	$1.09 \times 10^{-9}$	$1.86 \times 10^{-12}$	$1.08 \times 10^{-13}$
$P_z(0)$	0.538	0.538	0.538
$E_{y(OPP)}$	0.2951	0.908	0.9164
$\lambda_x$	0.023145	0.02274	0.022742
$\lambda_y$	0.020295	0.019588	0.019621
$\lambda_z$	0.006813	0.006722	0.006699
$S_x$	80	80	80
$\bar{V}$	435.7561	425.5933	393.9491
$ \Delta \bar{V} $	0.5884	0.5884	0.5884
$ \bar{y} $	75	75	75
$ \bar{z} $	1.5	1.5	1.5
$P_i$	0.6686	0.5850	0.6068
$N_{ay}$	$6.9577 \times 10^{-10}$	$3.1339 \times 10^{-12}$	$1.7769 \times 10^{-13}$
results	$1.7658 \times 10^{-9}$	$1.0731 \times 10^{-9}$	$1.0702 \times 10^{-9}$

최종 충돌위험 결과는 각 시나리오별 위험도와 순항단계에서의 수직 충돌위험 값인  $1.07 \times 10^{-9}$ 을 더하여 도출된다. 그 결과 시나리오 1:  $1.7658 \times 10^{-9}$ , 시나리오 2:  $1.7658 \times 10^{-9}$ , 시나리오 3:  $1.7658 \times 10^{-9}$ 으로 계산되었으며 평가 결과를 ICAO의 안전수준목표(TLS)인  $5 \times 10^{-9}$ 와 비교할 때 3개의 시나리오 모두 목표 수준을 만족하였다. 더욱이 복선화 후의 안전도는 복선화 전에 비해 향상되었음을 확인하였다.

### V. 결론

본 연구는 Y571, Y572 복선 항공로 신설에 따른 공역 환경변화에 대해 안전수준을 확인하는 한편 복선화의 효과를 분석하기 위해 복선화 전후의 안전수준을 정량적으로 분석하였다. 복선화 전, Y579 항공로 일부 구간은 Offset 절차가 적용되었으며 항적 데이터를 확인한 결과, AIP에서 설명하는 3nm 이탈경로 이외에 항공로 중심선을 따라 비행하는 항적과 6nm까지 이탈하여 비행한 항적 경로가 추가로 확인되었다. 본 연구에서는 실제 항적 분석 결과를 토대로 2가지 시나리오(시나리오 1, 2)를 개발하였으며 복선화 이후(시나리오 3)의 안전평가 결과와 비교 분석하였다. 사용된 안전평가 방법은 국내 Offset 절차 및 단일방향 복선 항공로에 적용 가능한 Reich 변형 모델이며 충돌위험을 분석한 결과, Offset 절차가 적용된 시나리오 1과 시나리오 2는 각각  $1.7658 \times 10^{-9}$ 과  $1.0731 \times 10^{-9}$ 로, 신설 항공로인 시나리오 3은  $1.0702 \times 10^{-9}$ 로써 모두 ICAO의 목표 수준을 충족하고 있음을 확인하였다. 또한 복선화 전후 안전도 비교 결

과, 복선화 이후 안전도가 향상된 것으로 분석되었다.

본 연구의 결과는 다음과 같은 점에서 의의가 있다. 첫째, 계기비행절차 설계기준에서 정하는 보호구역(또는 폭)의 범위에 일부 부족하나 수용할 만한 안전수준이 확보될 수 있음을 재차 확인하였다. 둘째, 시나리오 3의 경우 두 평행 항공로의 간격은 8nm로써 시나리오 2의 항적 사이의 횡적 간격 9nm보다 적음에도 불구하고 안전은 더욱 향상된 것으로 확인되었다. 이와 같은 결과는 항법 성능에 의존하는 Offset 절차보다 공식 항공로 운용이 항공안전에 더 유리하다는 사실을 확인한 사례이다. 셋째, 본 연구는 안전평가를 통해 복선 항공로의 보호구역에을 줄일 수 있음을 확인하였다. 이는 협소한 우리나라 공역 환경에서 안전수준을 유지 또는 향상되도록 하면서 공역을 효과적으로 활용할 수 있다는 근거를 제시하였다는 데 의의가 있다.

본 연구는 정량적 안전평가를 위해 변형된 Reich 모델을 활용하였다. 원형의 Reich 모델은 공역(또는 항공로)의 환경에 따라 계속 발전되고 변화되어야 한다. 본 연구는 우리나라 공역 및 항공교통 환경에 더욱 적합한 충돌위험모델을 개발할 예정이다. 또한 ICAO의 권고에 따라 우리나라의 다른 항공로에 대해서도 정량적 안전평가를 꾸준히 진행함으로써 항공안전을 유지하는 데 기여하고자 한다.

### Acknowledgments

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 사업 [(RS-2022-00143625), 저밀도 도심항공모빌리티(UAM) 교통관리용 CNSI 획득·활용체계 신뢰성 검증 기술 개발]과 경기도 경기도지역협력연구센터(GRRC) 사업[(GRRC항공2023-B03), 첨단모빌리티 융합기술 연구센터]의 일환으로 수행하였음.

### References

- [1] D. H. Kim and W. Y. Kim, "A study on risk assessment procedure for the structural changes of navigable airspaces," *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, Vol. 20, No. 1, pp. 13-18, Mar. 2012. DOI: <https://doi.org/10.12985/ksaa.2012.20.1.012>.
- [2] S. E. Park and H. Y. Kim, "Safety evaluation of the domestic offset procedure using the unidirectional dual airway collision risk model," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 27, No. 4, pp. 356-364, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.12673/jant/2023.27.4.3.56>.
- [3] International Civil Aviation Organization, Construction of visual and instrument flight procedures(Doc. 8168-AN/611 vol II 6<sup>th</sup>ed), Montreal, ICAO, 2020. Retrieved from <https://store.icao.int/en/procedures-for-air-navigation-services-pans-aircraft-operations-volume-ii-construction-of-visual-instr>



- ument-flight-procedures-doc-8168.
- [4] International Civil Aviation Organization, Air traffic management (Doc. 4444, 16<sup>th</sup>ed), Montreal, ICAO, 2016. Retrieved from <https://store.icao.int/en/procedures-for-air-navigation-services-air-traffic-management-doc-4444>.
- [5] International Civil Aviation Organization, Rules of the Air( Annex 2 10<sup>th</sup>ed), Montreal, ICAO, 2005. Retrieved from [https://www.icao.int/Meetings/anconf12/Document%20Archive%20an02\\_cons%5B1%5D.pdf](https://www.icao.int/Meetings/anconf12/Document%20Archive%20an02_cons%5B1%5D.pdf)
- [6] Office of Civil Aviation Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Aeronautical information publication(AIP) ENR 1.9 Air traffic flow management and airspace management, Daegu, Republic of Korea, 2024. Retrieved from <https://aim.koca.go.kr/eaipPub/Package/history-en-GB.html?ver=10>
- [7] International Civil Aviation Organization, Performance-based navigation(PBN) manual(Doc. 9613, 5<sup>th</sup>ed), Montreal, ICAO, 2023. Retrieved from <https://store.icao.int/en/performance-based-navigation-pbn-manual-doc-9613>.
- [8] International Civil Aviation Organization, Safety assessment of RNAV ATS Routes Y71 and Y72(RASMAG/17-WP19), Bangkok, ICAO APAC, 2012. Retrieved from [https://www.icao.int/APAC/Meetings/2012\\_FIT\\_ASIA\\_RASMAG17/WP19%20ROK-Safety%20Assessment%20of%20RNAV%20ATS%20Routes%20Y71%20and%20Y72.pdf](https://www.icao.int/APAC/Meetings/2012_FIT_ASIA_RASMAG17/WP19%20ROK-Safety%20Assessment%20of%20RNAV%20ATS%20Routes%20Y71%20and%20Y72.pdf)
- [9] International Civil Aviation Organization, Manual on monitoring the application of performance-based horizontal separation minima(Doc. 10063, 1<sup>st</sup>ed), Montreal, ICAO, 2017. Retrieved from <https://store.icao.int/en/manual-on-monitoring-the-application-of-performance-based-horizontal-separation-minima-doc-10063>.
- [10] H. S. Lee and S. H. Jo, "Hazard assessment methodology based on target level of safety for CNS/ATM system," *Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol 20, No. 4, pp. 285-291, Aug. 2016. DOI: <https://doi.org/10.12673/jant.2016.20.4.285>.
- [11] X. Zhang and J. Ma, "Analysis for lateral collision risk assessment of RNAV parallel routes," *Journal of Applied Sciences*, Vol. 13, No. 20, pp. 4231-4235, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3923/jas.2013.4231.4235>.
- [12] ICAO, Manual on airspace planning methodology for the determination of separation minima(Doc. 9689-AN/953 1<sup>st</sup> ed), Montreal, ICAO, 1998. Retrieved from [https://www.icao.int/Meetings/anconf12/Document%20Archive/9689\\_con s\\_en.pdf](https://www.icao.int/Meetings/anconf12/Document%20Archive/9689_con s_en.pdf).
- [13] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 3rd performance-based navigation(PBN) implementation affair, Sejong, Republic of Korea, 2012. Retrieved from <https://www.codil.or.kr/viewDtlConRpt.do?gubun=rpt&pMeta Code=OTKCRK130027>.
- [14] P. Brooker, "Lateral collision risk in air traffic track systems: A 'post-reich' event model," *The Journal of Navigation*, Vol 56, Issue 3, pp. 399-409, Sep. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1017/s0373463303002455>.
- [15] M. Fujita, Collision risk model for independently operated homogeneous air traffic flows in terminal area, Tokyo, Japan, 2013. Retrieved from [https://www.jstage.jst.go.jp/article/enrihoukoku/2013/130/2013\\_1/\\_article/-char/en](https://www.jstage.jst.go.jp/article/enrihoukoku/2013/130/2013_1/_article/-char/en).
- [16] International Civil Aviation Organization, Report of the twenty-fifth meeting of the regional airspace safety monitoring advisory group(RASMAG/25-WP13), Bangkok, ICAO APAC, 2020. Retrieved from <https://www.icao.int/APAC/Meetings/Pages/2020-RASMAG25.aspx>.
- [17] S. E. Park, Safety evaluation for domestic offset operation procedure – focusing on Y579 ATS Route-, MS dissertation, Korea Aerospace University, Republic of Korea, 2021. Retrieved from [https://m.riss.kr/search/detail/DetailView.do?p\\_mat\\_type=be54d9b8bc7cdb09&control\\_no=fb757261ca03d26bffe0bdc3ef48d419&keyword=offset%20%EC%A0%88%EC%B0%A8](https://m.riss.kr/search/detail/DetailView.do?p_mat_type=be54d9b8bc7cdb09&control_no=fb757261ca03d26bffe0bdc3ef48d419&keyword=offset%20%EC%A0%88%EC%B0%A8).
- [18] J. H. Han, C. H. Kim, and M. J. Ahn, *A basic study for development of safety technologies in aviation: focusing on development of airspace safety assessment model(Research report 2011-14)*, Sejong, Republic of Korea, 2011. Retrieved from <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO201300014645>.
- [19] ENAIRE, *EUR/SAM Corridor: 2021 collision risk assessment (NYVI-IDS-062-22-1.0)*, Madrid, Spain, 2022. Retrieved from [http://www.satmasat.com/files/rvsm\\_rmp\\_10/EUR\\_SAM\\_Collision\\_Risk\\_Assessment\\_2021.pdf](http://www.satmasat.com/files/rvsm_rmp_10/EUR_SAM_Collision_Risk_Assessment_2021.pdf).



**박 세 은 (Se-Eun Park)**

2018년 2월 : 공군사관학교 국방경영학과(문학사)  
2021년 2월 : 한국항공대학교 항공교통물류학과(이학석사)  
2022년 4월 ~ : 공군사관학교 항공우주정책학과 조교수  
※ 관심분야 : 항공교통, 공역관리



**박 선 민 (Sun-Min Park)**

2021년 3월 ~ : 한국항공대학교 항공교통물류과  
※ 관심분야 : 항공교통



**김 휘 양 (Hui-Yang Kim)**

2011년 : 한국항공대학교(경영학 석사)  
2000년 2월 ~ 2018년 2월 : 국토교통부  
2018년 3월 ~ : 한국항공대학교 항공교통물류학부 조교수  
※ 관심분야 : 항공교통, 공역 및 비행절차, 수용량 항행계획