

단방향 복선 항공로 안전평가모델을 활용한 국내 Offset 절차 안전도 분석

Safety evaluation of the domestic Offset procedure using the unidirectional dual airway collision risk model

박세은¹ · 김휘양^{2*}

¹공군사관학교 항공우주정책학과

²한국항공대학교 항공교통물류학부

Se-eun Park¹ · Hui-yang Kim^{2*}

¹Department of Aerospace Policy studies, Republic of Korea Air Force Academy, Cheongju 281870, Korea

^{2*}Department of Air Transportation and Logistics, Korea Aerospace University, Goyang 10540, Korea

[요 약]

항행 정밀도 증가는 항공교통 수용량을 개선함으로써 효율적인 공역 환경을 조성하였으나, 항공안전 측면에서는 항공기 간 충돌확률을 증가시키는 요인으로 작용하였다. 항공기가 고도 분리에 실패하더라도 좌우 위치 오차를 갖는 경우 충돌로 이어지지 않지만, 좌우 위치 정밀도가 증가하면 위치 랜덤성이 줄어들어 항공기 충돌확률이 증가하게 된다. 이에 따라 국제민간항공기구는 항공기를 항공로 중심선으로부터 의도적으로 이탈시키는 SLOP (Strategic Lateral Offset Procedures) 절차를 도입하였으며, 우리나라 또한 이와 유사한 Offset 절차를 운영하고 있다. Y579 항공로는 22년 말 복선화되기 전까지 offset 절차로 운영되었으며, Y579 offset 항적 분석결과 SLOP 절차와 달리 단방향 복선 항공로와 유사함을 확인하였다. 본 논문은 단방향 복선 항공로 및 offset 절차에 적용 가능한 안전평가 방법론을 개발하고 이를 활용하여 Y579 Offset 절차에 대한 안전평가를 수행하였다.

[Abstract]

Sophisticated Air Navigation System has contributed to enhancing the capacity of airspace capacity, leading to an efficient airspace environment. However, it has acted as a factor increasing the probability of collision. When an aircraft fails to maintain vertical separation and instead exhibits lateral positional errors, it does not necessarily lead to a collision. However, as the lateral positional accuracy increases, the randomness of aircraft positions decrease, resulting in an elevated probability of collisions. Consequently, The International Civil Aviation Organization has introduced Strategic Lateral Offset Procedures(SLOP), intentionally deviating aircraft from the centerline of airways. Likewise, South Korea also operates Offset procedure. The Y579 was operated using the Offset before its conversion to a dual airway and the analysis of the Offset track revealed that it was being operated similarly to a unidirectional dual airway. This paper develops a safety assessment methodology applicable to unidirectional dual airways, and applies it to perform a safety assessment of the Y579 Offset procedure.

Key word : Collision Risk Model, Offset procedure, Parallel Airways, Safety Assessment, Unidirectional Dual airways.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2023.27.4.356>



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 31 July 2023; Revised 10 August 2023

Accepted (Publication) 27 August 2023 (30 August 2023)

*Corresponding Author ; Huiyang Kim

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

E-mail: igreenbee@kau.ac.kr

1. 서론

현재 대부분 민간항공기는 계획된 항공로 중심선을 정확하게 비행할 수 있는 정교한 항법 장비를 갖추고 있다[1]. 항법 장비의 발전은 항공교통 수용량 증대 등 공역 효율성 측면에서 여러 이점을 가져왔으나 항공안전 측면에서는 안전저해요소로 작용하였다. 같은 경로를 비행하는 항공기가 고도 분리에 실패하는 경우 횡적 위치 오차가 공중충돌을 방지하는 역할을 하게 되는데, 항공기의 항법 정밀도가 증가하면 횡적 위치 오차가 감소하여 충돌확률이 증가하게 된다. 이에 더하여 고도 분리를 1000 ft로 축소하는 RVSM(Reduced Vertical Separation Minimum)의 도입으로 항공기가 고도 분리를 상실할 확률이 증가하자 ICAO에서는 의도적으로 횡적 분리를 제공하는 Strategic Lateral Offset Procedure (SLOP) 절차를 도입함으로써 항공로 충돌 위험도를 허용수준까지 낮추고자 하였다.

SLOP이란 항공기가 항공로 중심선으로부터 진행 방향 기준 우측으로 이탈하여 비행하는 절차로[1], 우리나라 또한 G579/Y697/B467/Y437/L512 항공로와 Y579 항공로 일부 구간에서 SLOP과 유사한 Offset 절차를 도입/운영하였다. 국내 항공정보 간행물(AIP; Aeronautical Information Publication)에 따르면 Offset 절차는 항공 안전성을 도모하기 위하여 FMS(Flight Management System)를 장착한 민간항공기에 한하여 적용되며, Offset 절차로 비행하는 항공기는 항공로 중심선 기준 우측으로 3 nm 이탈하여 비행한다. Offset 적용구간에서 역방향 항공기 간에는 그림 1과 같이 1000 ft 고도 분리에 6 nm의 횡적 분리가 추가되어 고도중첩이 발생하더라도 충돌확률을 줄일 수 있다.

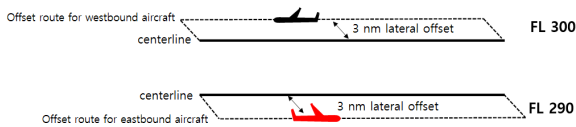


그림 1. 국내 Offset 운영방식
Fig. 1. Domestic Offset operational method

그림 1의 eastbound 경로와 westbound 경로로 비행하는 항공기를 대상으로 항적 데이터를 분석한 결과, 두 경로는 Y711/Y722와 같은 단방향 복선 항공로와 유사하다는 점을 확인하였다. 국내 대표적인 단방향 복선 항공로인 Y711(서울에서 동남아 방면), Y722(동남아에서 서울 방면)는 항공로 간 횡적으로 8 nm 분리되어있으며, Y644(중국에서 우리나라 방면)과 Y697(우리나라에서 중국방면) 단방향 복선 항공로 간에는 12 nm 분리되어있다. 현재 ICAO에서 단방향 복선 항공로에 대한 분리기준을 제시하지 않고 있으나 Y579 항공로의 Offset 구간에서 6 nm 횡적 분리는 국내 적용사례 대비 현저하게 낮은 수준으로 안전성 검토가 필요한 실정이다. 이에 따라 본 논문에서는 Offset 경로를 6 nm 분리된 단방향 복선 항공로로 가정하고 분리기준의 적절성을 검토하고자 한다.

본 연구에서는 Offset 절차 및 단방향 복선 항공로에 적용 가능한 안전평가 방법론을 개발하고, 개발된 모델을 활용하여 Y579 항공로의 Offset 구간에 대한 안전평가를 수행하였다. Y579 항공로의 MAKET-TOPAX 구간은 2022년 11월 부로 복선화되기 전까지 Offset 절차로 운영되었으므로 본 연구에서는 19년도 MAKET-TOPAX 구간 Offset 항적 데이터를 활용하여 실증분석을 수행하였다.

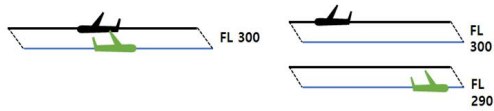
논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 단방향 복선 항공로 안전평가에 관한 선행연구를, III장에서는 국내외 Offset 절차 운영방식과 횡적 분리 및 안전평가에 대한 이론적 배경을 제시한다. IV장에서는 Offset 절차 및 단방향 복선 항공로에 활용 가능한 안전평가 방법론을 서술하고 있으며 V장에서는 Y579 항공로의 Offset 절차에 대한 안전평가 결과를 보여준다. 마지막으로 VI장에서는 본 논문의 결론 및 시사점을 정리한다.

II. 선행연구 검토

국내에서 횡적 안전평가에 관한 연구는 Y711/Y722, Y64/G597 등 항공로 복선화사업 전후로 활발히 수행되었다. 한재현 · 김장환 · 안미진(2011)은 Reich Collision Risk Model (Reich CRM)을 토대로 국내 공역안전평가 방법론을 개발하였고 평행으로 설계된 복선 항공로 간 횡적 충돌위험을 평가하였다[2]. 국토해양부(2012)는 Reich CRM을 활용하여 Y711/Y722 항공로에 대한 사후 안전평가를 수행하였고 충돌위험 수준이 ICAO에서 제시한 안전 목표수준(TLS; Target Level of Safety)을 충족함을 보여주었다 [3]. 해외 선행연구를 살펴보면 Mariken H.C. Everdij · Henk A P Blom(2007)은 Monte Carlo 시뮬레이션 기반의 Dynamically Coloured Petri net(DCPN)을 사용하여 안전평가 모델을 개발하였으며, 안전 평가 및 횡적 분리간격에 따른 위험 민감도 분석을 수행하였다. Xiaoyan Zhang · Jiangtao Ma(2013)는 RNAV 2로 운용되는 베이징-상하이 평행 항공로의 안전평가를 수행하기 위해 Reich CRM의 변형 모델을 사용하였다.

국내의 선행연구에서 활발히 사용되어 온 Reich CRM은 그림 2(a)와 같이 평행 항공로를 비행하는 항공기가 동일한 고도로 비행할 것을 가정한다. 반면 국내 Offset 절차 및 단방향 복선 항공로의 경우 001도~180도로 비행하는 항공기는 홀수 고도로, 181도~369도로 비행하는 항공기는 짝수 고도로 배정됨에 따라 그림 2(b)와 같이 역방향 항공기간 최소 1000 ft의 고도 분리가 적용된다.

따라서 국내 Reich CRM 기본모델을 사용하여 안전평가를 수행하게 되면 실제 운영형태를 반영할 수 없으므로 본 논문에서는 ICAO Reich CRM을 변형하여 단방향 복선 항공로 및 Offset 절차에 적용 가능한 새로운 안전평가 모델을 제안하고자 한다.



(a) Reich CRM's assumption (b) unidirectional dual airway

그림 2. Reich 모델과 단방향 복선 항공로 운영방식 차이

Fig. 2. The difference between the Reich model and the unidirectional dual airway

III. 이론적 배경

3-1 ICAO의 SLOP 절차와 국내 offset 절차

수직분리기준축소(RVSM) 도입과 항법 장비의 발달로 항공기 공중충돌확률이 증가함에 따라 ICAO는 동일한 항공로를 비행하는 항공기간 횡적 분리를 제공하는 SLOP 절차를 도입하였다[4]. SLOP이란 항공기가 진행 방향 기준 우측으로 이탈하여 항공로 중심선과 평행하게 비행하는 절차로 항공기 충돌확률 감소와 더불어 후류 요란 영향을 완화하는 효과가 있다[5]. 도입 초기에는 인접 항공로와 최소 50 nm 이상 분리되는 원거리 대양 및 대륙 공역에 한해 항공로 중심선으로부터 1 nm 이탈이 허용되었으나 이탈 정도가 작아 효과가 미미하였다[4]. 이에 따라 ICAO는 항공기에 3가지 경로(항공로 중심선, 1 nm 이탈 경로, 2 nm 이탈 경로) 중 하나를 선택하여 비행하도록 함으로써 위치 랜덤성을 추가로 부여하여 충돌확률을 감소시켰다. 2006년 남미에서 발생한 공중충돌 사건은 대양 및 원거리 대륙 상공으로 제한되어 있던 SLOP의 적용 범위를 국내 공역 환경으로 확장하였다[4]. 이후 ICAO가 “micro-offsets” 개념을 제시하면서 인접 항공로와 15 nm 이상 분리된 경우 0.1 nm 단위로 최대 2 nm까지, 인접 항공로와 6 nm 이상 분리된 경우 0.1 nm 단위로 최대 0.5 nm까지 SLOP이 허용되었다[5].

국내 Offset 절차는 일부 혼잡 항공로에 대하여 항공안전을 증진하기 위해 FMS를 장착한 민간항공기에 적용하는 절차이다[6]. 우리나라는 2022년 7월 기준 Y579 항공로 상 MAKET-TOPAX 구간과 G597(E)/Y697(E)/B467/Y437/L512 항공로 상 KARBU-KAE-ANDOL 구간에 대해 offset 절차를 운영하였다. 해당 구간을 비행하는 항공기는 그림 3과 같이 항공로 중심선으로부터 진행 방향 기준 우측 3 nm 이탈하여 비행하며 Offset 절차로 비행이 불가능한 항공기는 항공로 중심선을 따라 비행하게 된다. 본 논문의 연구대상인 Y579 항공로는 GNSS, DME/DME, DME/DME/IRU RNAV 2로 운영되는 양방향 단일항공로로 22년 복선화 전까지 매일 0700~2200 KST (2200~1300 UTC)에 Offset 절차를 운영하였다. 제주공항에 착륙하는 항공기는 MAKET으로부터 북동쪽 10 nm 지점에서 3 nm Offset 상태로 제주(CJU)까지 직선으로 비행하였으며, 김해공항에 착륙하는 항공기는 TOPAX 부근에서 접근관제소로 이양되었다. MAKET-TOPAX 구간에서는 제주 및 김해공항에 이착륙하는 항공기가 많아 고도 변경이 자

주 발생하였다.



그림 3. Y579 항공로 Offset 구간

Fig. 3. Offset segment of the Y579 airway

우리나라 항공교통관제소(Air Traffic Control Center, ACC)는 단일항공로에 대해 그림 4와 같이 1000 ft 수직 분리와 5 nm의 종적 분리(고도 변경 시 10 nm)를 적용하고 있다. 그림 4와 같이 X축(종적 방향) - Z축(수직 방향)으로 표현된 2차원 평면상에서 단일항공로를 비행하는 두 항공기가 중첩되는 것은 곧 충돌을 의미한다.

ICAO에서는 SLOP 절차 적용과 무관하게 기존의 항공로의 분리 기준을 그대로 적용하도록 권고[4]하고 있는바, SLOP 적용구간에서도 항공기의 안전한 분리를 위해서는 그림 4(a)와 같이 항공기가 중첩되지 않는 것이 바람직하다.

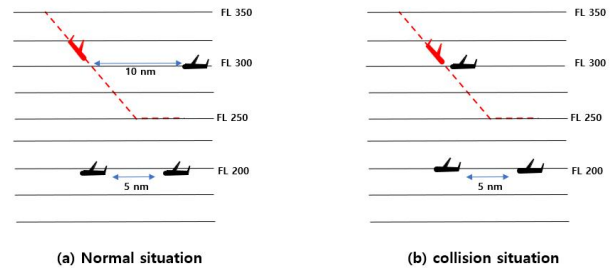


그림 4. 항공기 분리기준

Fig. 4. Aircraft separation

국내 Offset 구간에 대해 횡적 분석을 수행한 결과 ICAO의 권고와는 달리 X축 - Z축으로 표현되는 2차원 평면상에서 항공기간 중첩이 다수 발생하였다. 일반적으로 그림 5(b)의 KAL 1002편과 ABL 8201편은 2차원 평면상 중첩되어 충돌한 것으로 보이지만 그림 5(a)와 같이 횡적으로 분리되어있음을 확인할 수 있다. 즉, 국내에서는 ICAO 권고와 달리 Offset 구간에서 기존 단일항공로 분리기준을 적용하지 않고 있으며, Offset에 의한 횡적 분리가 항공로 안전을 보장하는 중요한 수단으로 사용되고 있음을 알 수 있다. 이는 단방향 복선 항공로의 분리방법과 유사하다고 볼 수 있으며, Offset 경로 간 횡적 분리간격이 안전성을 충분히 보장하는지 검토가 필요하다.

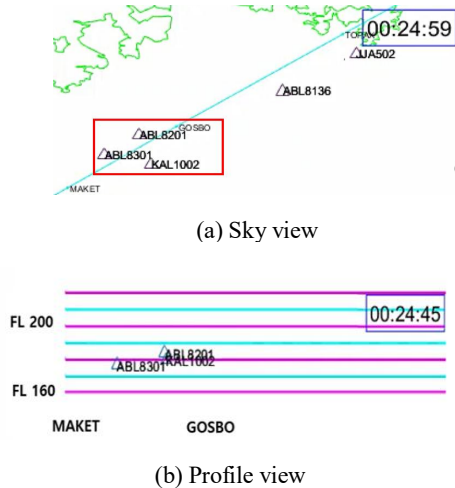


그림 5. 국내 Offset 운영방식

Fig. 5. Domestic Offset procedure

3-2 복선 항공로 분리기준

ICAO는 복선 항공로 및 PBN 항공로에 대한 명확한 분리 기준을 제시하지 않고 있으며 적용사례만 나열하고 있다. ICAO Doc 8168에서는 총 시스템 오차를 고려한 PBN 항공로 보호구역을 제시하고 있으나 별도 분리기준에 대한 안전도가 입증되는 경우 각국에 자율적인 적용을 허용하고 있다[7]. 항공로 분리기준은 항공안전과 직결되는 부분으로 별도 분리기준을 적용하기 전 국제 권고 및 적용사례를 충분히 검토하는 것이 바람직할 것이다.

PBN 항공로 폭에 대한 국제 권고를 살펴보면 항공로 반 폭은 「 $1.5 \times XTT + BV$ 」 식으로 결정된다. $1.5 \times XTT$ 란 총 시스템 오차(Total System Error)의 3σ 에 해당하는 값을 의미하며, BV(Buffer Value)란 버퍼 값을 의미한다. 식에 따르면 항공로 반 폭의 크기는 위치 오차의 99.7%를 수용하는 수준에 버퍼 값을 더하여 결정된다. XTT는 항법 성능이나 비행단계에 따라 달라지는 값으로[7] 여러 항법 성능이 허용되는 항공로의 경우 가장 보수적인 값을 선택하여야 한다. DME/DME, GNSS, DME/DME/IRU RNAV 2로 운영되는 Y579 항공로의 경우, 정확도가 떨어지는 GNSS를 기준으로 항공로 폭을 계산하면 표 1과 같이 최소 10 nm의 항공로 폭이 요구된다.

표 1. RNAV 2, RNAV 5 항공로 반폭(순항 단계)
Table 1. Area semi-width for RNAV 2, RNAV 5 in the en-route phase of flight

GNSS	RNAV 5	RNAV 2
XTT	2.51 nm	2.00 nm
1.5*XTT	3.77 nm	3.00 nm
BV	2.00 nm	2.00 nm
Area semi-width	5.77 nm	5.00 nm

국내 대표적인 단방향 복선 항공로인 Y711/Y722 또한 항공로 간 분리기준이 국제 권고보다 작은 8 nm로 설계되어 사전·사후 안전평가를 통해 안전도를 점검해왔다. 따라서 6 nm 분리된 Offset 경로는 국제 권고 및 국내 보호구역 적용사례 대비 작은 분리기준을 적용하고 있으므로 횡적 안전평가가 수행되어야 한다.

3-3 횡적안전평가

ICAO에서는 새로운 항공 시스템을 도입하거나 국제 기준과 안전평가 방법은 정성평가와 정량평가로 구분된다. 정성평가는 전문가의 지식, 경험을 활용하여 위험요인을 발견하고 허용 여부를 판단하는 방법이며, 정량평가는 위험 발생 정도를 확률적으로 평가하는 방법이다. 위험도를 정량적으로 평가하기 위해 Reich model, hue model 등 분석적 방법을 활용할 수 있으며 Real time simulation, Fast-time simulation 등 시뮬레이션을 활용하기도 한다. 위 방법에 따라 도출된 위험도의 안전성을 판단할 때 기준시스템(reference system) 접근법과 안전수준목표(TLS; Target Level of Safety) 접근법을 활용할 수 있다[8]. 기준시스템 접근법은 두 시스템의 안전성을 상대적으로 평가하는 반면 안전수준목표(TLS) 접근법은 새로운 시스템으로부터 추정된 충돌위험을 사전에 정해진 최대 충돌위험(Maximum tolerable collision risk)과 비교하는 방법이다. 기준시스템 접근법은 적절한 기준시스템을 찾기 어려워 다수의 선행연구에서 안전수준목표(TLS) 접근법을 사용해왔다. 아태 지역에서는 횡적·수직·종적 분리 상실에 대한 안전수준목표(TLS)를 5×10^{-9} 로 정의하고 있다[9]. 논문에서도 Y579 항공로 상 Offset 절차의 위험도를 정량적으로 분석하고 이를 사전에 주어진 안전수준과 비교하는 안전수준 목표(TLS) 접근법을 활용하여 안전성을 검증하고자 한다.

IV. 안전평가 방법론 개발

단방향 복선 항공로 안전평가 모델의 토대가 되는 Reich CRM은 수직분리기준축소(RVSM) 적용에 따른 수직 안전성 평가뿐 아니라 평행 항공로 간 횡적 안전평가에 사용 가능한 충돌 위험모델이다. Reich CRM은 현행 분리간격의 적절성을 판단하거나 현재 항법 수준에 적합한 새로운 분리간격을 제시하기 위한 목적으로 활용할 수 있다.

Reich CRM의 가정사항은 다음과 같다.

1. 인접 항공로를 비행하는 항공기의 횡적 이탈 정도는 독립적이다.
2. 모든 항공로는 평행하다.
3. 모든 항공기는 수평비행 중이며, 고도 변경을 위해

상승/하강하는 경우 해당 모델을 사용할 수 없다.

4. 충돌이 발생하는 상황에서 조종사/관제사의 개입이 없다.
5. 횡적 충돌위험은 불규칙하게 발생한다.
6. 항공기 기체는 평균 길이(λ_x), 너비(λ_y), 높이(λ_z)로 구성된 직육면체로 가정한다.

Reich CRM은 비행시간당 충돌횟수를 계산함으로써 안전도를 정량적으로 도출하는 모델이다. 예를 들어 수직(z 방향)충돌은 두 항공기가 수직(z 방향)으로 중첩된 횡수에 항공기가 횡적(y 방향), 종적(x 방향)으로 동시에 중첩될 확률을 곱하여 구할 수 있으며, 항공기는 x, y, z 모든 방향으로 충돌할 수 있으므로 식 1과 같이 표현할 수 있다.

$$\text{시간당 충돌횟수} = N_x P_y P_z + N_y P_x P_z + N_z P_x P_y \quad (1)$$

$$\begin{aligned} N_r &: r \text{ 방향 중첩 횟수 } (r : x, y, z \text{ 방향}) \\ P_r &: r \text{ 방향으로 중첩될 확률 } (r : x, y, z \text{ 방향}) \end{aligned}$$

단위시간을 1로 가정할 때 P_r 은 두 항공기가 r 방향으로 중첩되는 시간으로 계산할 수 있으며, 이를 항공기 크기(λ_r)와 r 방향 상대속도($|\dot{r}|$)로 표현하면 식 2와 같다.

$$P_r = \frac{N_r \times \frac{2\lambda_r}{|\dot{r}|}}{1} \quad (2)$$

식 1과 식 2를 정리하면 단위 시간당 충돌횟수는 식 3으로 나타낼 수 있다.

$$C = P_x P_y P_z \left[\frac{|\dot{x}|}{2\lambda_x} + \frac{|\dot{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\dot{z}|}{2\lambda_z} \right] \quad (3)$$

y 방향에 대한 중첩확률(P_y)은 S_y 만큼 분리된 두 항공로 간 횡적 중첩확률로 $P_y(S_y)$ 로 표현된다. z 방향 중첩확률(P_z)은 평행한 고도(고도 차이: 0)를 비행하는 항공기간 수직 중첩확률로 $P_z(0)$ 으로 표현된다. $E \times (\lambda_x/S_x)$ 변수는 x 방향 중첩확률(P_x)에 관한 식으로 항공기의 교통량과 관련되며 항공기 진행 방향에 따라 $E_{y(SAME)}$ 과 $E_{y(OPP)}$ 로 구분된다. 즉, 항공기 충돌 횟수는 횡적, 수직, 종적 중첩이 동시에 발생할 확률로 추정할 수 있으며 이에 따라 Reich CRM은 식 4와 같다.

$$N_{ay} = P_y(S_y)P_z(0) \frac{\lambda_x}{S_x} \left[E(same) \left\{ \frac{|\Delta V|}{2\lambda_x} + \frac{|\dot{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\dot{z}|}{2\lambda_z} \right\} + E(opp) \left\{ \frac{2|\dot{V}|}{2\lambda_x} + \frac{|\dot{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\dot{z}|}{2\lambda_z} \right\} \right] \quad (4)$$

표 2. 변수 정의

Table 2. Parameters for Reich Collision Risk Model

Parameter	Definition
S_y	lateral separation minimum
$P_y(S_y)$	Probability of lateral overlap for aircraft on the parallel track
$P_z(0)$	Probability of vertical overlap for aircraft at the same level
λ_x	Average aircraft length
λ_y	Average aircraft wing span
λ_z	Average aircraft height
S_x	Length of longitudinal window
$E_{y(OPP)}$	opposite-direction lateral occupancy
$E_{y(SAME)}$	same-direction lateral occupancy
\bar{V}	Average absolute aircraft ground speed
$ \Delta \bar{V} $	Average relative along-track speed between aircraft on same-direction routes
$\left \frac{\dot{y}}{\bar{V}} \right $	Average lateral relative velocity of a pair of aircraft
$\left \frac{\dot{z}}{\bar{V}} \right $	Average vertical relative velocity of a pair of aircraft
N_{ay}	Collision risk due to loss of lateral separation per flight hour

본 논문에서는 단방향 복선 항공로에 Reich CRM을 적용하기 위하여 발생 가능한 위험을 순항단계와 고도변경단계 두 가지로 구분하였다. 먼저 순항단계에서는 항공기간 고도 분리와 횡적 분리가 동시에 적용되므로 일반적인 단일항공로에 비해 횡적 충돌 가능성이 훨씬 낮아진다. 따라서 순항단계에서는 각 항공로에서 발생 가능한 수직 충돌위험만 고려하였다. 항공로 내 수직 충돌 위험은 Pacific Approvals Registry and Monitoring Organization(PARMO)에서 수행한 수직 안전평가 결과를 사용하였으며, 2019년 데이터 기준 인천 비행정보구역(AKARA-FUKUE Corridor 제외)의 수직 충돌위험은 1.07×10^{-9} 이다[10]. 단방향 복선 항공로에서는 동일한 항공로를 비행하는 항공기간 2000 ft 분리가 적용되므로 RVSM 환경(1000 ft 분리)에 대해 안전평가를 수행한 PARMO 결과보다 더 적은 위험도가 예상되나 보수적으로 접근했다는 점에서 의미가 있을 것이다. 다음으로 고도 변경 단계에서는 항공기가 상승/하강 과정에서 순간적으로 타 고도 항공기와 같은 고도로 비행하게 되는데 이때 발생 가능한 횡적충돌위험을 Reich CRM을 활용하여 계산하였다. 즉, 순항단계에서의 항공로 수직충돌 위험도와 고도 변경과정에서의 횡적 충돌 위험을 더하여 단방향 복선항공로 안전도를 계산할 수 있다.

- ① 순항단계 : 항공로별 수직 충돌위험 = 1.07×10^{-9}
- ② 고도변경단계: 단방향 복선 항공로를 비행하는 항공기 간 횡적 충돌위험(동 고도로 조우하는 경우)

③ 안전평가 결과 = ①+②

단방향 복선 항공로에서 횡적 충돌위험은 역방향 항공기간에 존재하므로 식5와 같이 역방향 횡적 점유율($E_{y(opp)}$)에 대해서 정리하였으며, 전체 비행시간 중 고도 변경에 따른 동 고도 발생비율(P_i)을 곱하여 횡적 충돌위험을 계산하였다.

$$N_{ay} = P_i P_y(S_y) P_z(0) \frac{\lambda_x}{S_x} \left[E_{y(opp)} \left(\frac{2|\bar{V}|}{2\lambda_x} + \frac{|\bar{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\bar{z}|}{2\lambda_z} \right) \right] \quad (5)$$

고도중첩 발생비율(P_i)은 식 6과 같이 전체 비행시간(T_n) 중 같은 고도로 중첩되는 시간(T_i)으로 계산할 수 있으나, 보수적으로 안전도를 도출하기 위하여 전체 비행시간 중 항공기가 고도를 변경한 총 시간으로 계산하였다.

$$P_i = \frac{T_i}{T_n} \quad (6)$$

V. 안전평가 방법론 적용

5-1 기초분석

본 논문에서는 앞서 개발된 안전평가 방법론을 활용하여 제주와 김해를 잇는 Y579 항공로 상 Offset 경로의 안전도를 평가하였다. Y579 항공로는 22년 12월 1일부로 복선화되기 전까지 Offset 절차로 운영되었으므로, 본 연구에서는 19년도 Y579 Offset 항적 데이터를 바탕으로 안전평가를 수행하고자 한다.

본 연구는 항공교통본부로부터 제공받은 항적 자료를 바탕으로 Y579 항공로 offset 절차에 대해 실증분석을 수행하였다. 사용된 데이터는 2019년 5월 1일부터 31일까지 총 31일 치 자료이며, 이 자료는 인천 비행정보구역 내 모든 민항기의 기종, 출발·도착지 정보, 시간에 따른 속도, 위도, 경도, 고도 정보를 포함하고 있다. 연구 범위에 따라 0700~2200KST에 Y579의 MAKET-TOPAX 구간을 비행한 항공기를 추출하였으며, 정확한 분석을 위하여 레이더 벡터, 직선비행(Direct) 지시를 받은 항적 및 FL140 미만으로 비행한 항적은 제거한 후 항적 분석을 실시하였다.

그림 6은 Y579 항공로 중심선을 기준으로 항공기가 벗어난 정도를 나타내는 것으로 실제 Offset 운영형태를 보여준다. Y579 항공로 중심선 기준 상단에 표시된 항적은 westbound 항공기, 하단의 항적은 eastbound 항공기를 나타내며, 항공로 중심선을 따라 비행하는 Offset 미적용 항적도 다수 발견되었다. 주목할 만한 점은 eastbound 항공기의 경우 항공정보간행물(AIP)에 명시된 바와 달리 3 nm뿐 아니라 6 nm 이탈하여 비행하는 항적이 존재한다는 것이다. 표 3에 따르면 eastbound 항공기는 대다수

가 6 nm offset 경로로 비행하였으며, westbound 항공기의 경우 약 79%가 3 nm offset 경로를, 21%는 항공로 중심선을 따라 비행하는 것으로 나타났다. westbound 항공기와 eastbound 항공기는 최소 0 nm (westbound 0nm-eastbound 0nm)부터 최대 9 nm (westbound 3 nm-eastbound 6 nm)까지 다양한 형태로 운영되므로, 본 논문에서는 실제 Offset 형태와 교통량을 반영하여 몇 가지 시나리오를 개발한 후 안전평가를 수행하고자 한다.

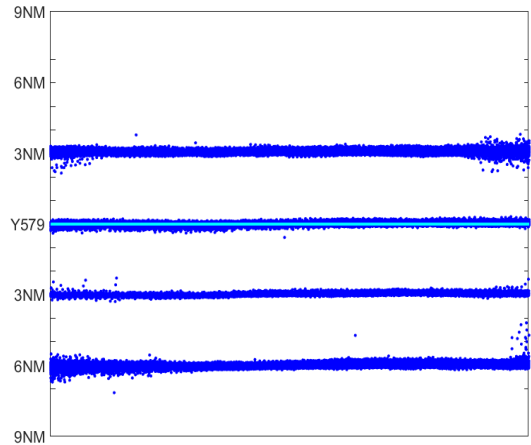


그림 6. Offset 항적 자료

Fig. 6. Trajectory data of Offset route

표 3. Offset 경로별 교통량

Table 3. Traffic volume on Y579 Offset route

Category		Count
westbound	centerline	275 (21.1%)
	3 nm offset	1029 (78.9%)
eastbound	centerline	22 (1.4%)
	3 nm offset	39 (5.7%)
	6 nm offset	1460 (92.9%)
total		2875

5-2 안전평가 시나리오 개발

표 3에서 나타나듯 westbound 항공기는 2개 경로 중 하나를, eastbound 항공기는 3개 경로 중 하나를 선택하여 비행할 수 있다. 그중 이용률이 적은 eastbound 0 nm(centerline) 경로와 eastbound 3 nm 경로를 제외하면 아래와 같이 2개의 경우의 수를 갖는다. Offset 운영방식에 따라 Offset 경로를 단방향 복선 항공로로 가정하고 시나리오별로 정량적 안전평가를 수행하였다.

시나리오 1. 6 nm 분리된 단방향 복선 항공로
westbound 0 nm offset & eastbound 6 nm offset

시나리오 2. 9 nm 분리된 단방향 복선 항공로
westbound 3 nm offset & eastbound 6 nm offset

5-3 정량적 안전평가 결과

1) 횡적중첩확률($P_y(S_y)$)

횡적중첩확률($P_y(S_y)$)이란 S_y 만큼 분리된 평행 항공로를 비행하는 두 항공기가 횡적으로 중첩될 확률로 식 7과 같이 정의된다. f^{h12} 는 항공기 간 횡적 거리가 y_{12} 인 두 항공기에 대한 확률밀도함수로[8], 최소 항공기너비(λ_y)보다 분리가 작아지면 횡적 중첩이 발생한다.

$$P_y(S_y) = \int_{-\lambda_y}^{\lambda_y} f^{h12}(y) dy \tag{7}$$

y_1, y_2 는 각 항공기의 횡적 편차로 두 항공기 간 횡적 거리 (y_{12})는 식 8과 같다. 또한, 각 항공기의 횡적 이탈에 대한 확률 밀도 함수가 $f^y(y_1)$ 와 $f^y(y_2)$ 로 독립적일 때 f^{h12} 는 식 9로 정의 된다.

$$y_{12} = S_y + y_1 - y_2 \tag{8}$$

$$f^{h12}(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f^y(y_1) f^y(S_y + y_1 - y) dy_1 \tag{9}$$

결과적으로 식 9를 식 7에 대입하면 식 10이 도출되며, 확률밀도함수인 f^{h12} 가 선형으로 변한다고 가정하면 식 11과 같이 근사화할 수 있다.

$$P_y(S_y) = \int_{-\lambda_y}^{\lambda_y} \int_{-\infty}^{\infty} f^y(y_1) f^y(S_y + y_1 - y) dy_1 dy \tag{10}$$

$$P_y(S_y) \approx 2\lambda_y \int_{-\infty}^{\infty} f^y(y_1) f^y(S_y + y_1) dy_1 \tag{11}$$

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

확률밀도함수는 항공기의 횡적 이탈자료를 활용하여 추정할 수 있다. 본 연구는 최대우도 추정법을 통해 확률밀도함수 모델의 변수를 추정하고, 관찰 데이터와 확률밀도함수 모델을 그래프로 나타내어 적합도를 비교하였다. 그림 7에 따르면 이중지수분포(DE), 가우스분포(N), 혼합 가우스분포(NN), 가우스-이중지수 혼합분포(NDE), 혼합 이중지수분포(DDE) 가운데

횡적 데이터를 가장 잘 설명하는 것은 혼합 이중지수분포 (DDE)로 나타났다.

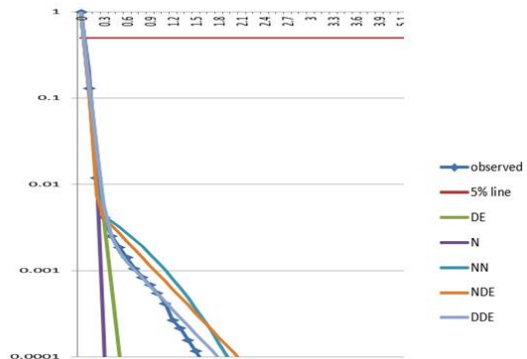


그림 7. 적합성 그래프
Fig. 7. Fitting Graph

표 4는 혼합 이중지수분포(DDE)를 사용하여 횡적 중첩확률을 계산한 결과를 보여준다. 시나리오 1의 경우 횡적 중첩확률은 1.09×10^{-9} 로, 시나리오 2의 횡적 중첩확률은 1.86×10^{-12} 로 계산된다.

표 4. 횡적중첩확률

Table 4. Probability of lateral overlap

Parameter	Scenario 1	Scenario 2
$P_y(S_y)$	1.09×10^{-9}	1.86×10^{-12}

2) 수직중첩확률($P_z(0)$)

수직 중첩확률($P_z(0)$)이란 인접 항공로를 동일고도로 비행하는 두 항공기가 수직적으로 중첩될 확률을 의미한다. 횡적 중첩확률과 유사한 방식으로 계산할 수 있으나, 수직 이탈자료의 불충분으로 인해 Asia/Pacific EMA Handbook 등 다수의 선행 연구에서 사용한 0.538 값을 적용하였다[11].

3) 반대 방향 횡적 점유율($E_y(O_{PP})$)

횡적 점유율이란 항공기가 기준 항공기의 종적 반경에 들어오는 평균 횡수로 계산되며 종적 중첩확률에 관한 변수이다. 식 12와 같이 전체 항공기 수(n)에 대한 근접 항공기 쌍(n_y)으로 계산되며, 근접 항공기 쌍(proximate pair)이란 두 항공기가 특정 지점을 통과한 시간이 ± 10 이내인 경우를 의미한다.

$$E_y = \frac{2n_y}{n} \tag{12}$$

동일한 고도로 비행하는 항공기를 대상으로 횡적 점유율을 계산하는 일반적인 Reich CRM과 달리, 본 논문에서는 고도를 변경하는 모든 항공기가 횡적 충돌 대상이 되므로 전체 고도에

대한 횡적 점유율을 계산하였다. 표 5는 시나리오 1과 2에 대한 횡적 점유율을 나타낸다.

표 5. 반대방향 횡적 점유율
Table 5. Opposite direction lateral occupancy

	Total number	Proximate pair	$E_{y(OPP)}$
scenario 1	1735	356	0.2951
scenario 2	2489	1130	0.908

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

항공기 평균 제원은 Y579의 MAKET-TOPAX 구간을 비행한 항공기 기종을 분석하고, 기종별 제원을 교통량에 따라 가중 평균하여 도출하였다. 표 6과 같이 항공기의 평균 길이(λ_x)는 0.022151, 너비(λ_y)는 0.019492, 높이(λ_z)는 0.006767로 계산된다.

표 6. 평균 항공기 제원
Table 6. Average aircraft specification

	Length(nm)	Width(nm)	Height(nm)
Specifications	0.022151	0.019492	0.006767

5) 종적 분리간격의 1/2(S_x)

항공기의 종적 분리간격은 480 knots 속도로 20분 비행하는 거리(160 nm)로 정의되며, 종적 분리간격의 반인 S_x 는 80 nm다 [12].

6) 기타 변수

이 외 평균 항공기 대지속도($|\bar{V}|$)와 고도중첩 발생비율(P_i)은 항적 자료로부터 계산하였으며, 배정된 횡적 분리를 상실한 항공기간 평균 상대 횡적 속도($|\bar{y}|$), 동일고도로 비행하는 두 항공기간 평균 상대 수직 속도($|\bar{z}|$)는 EMA Handbook을 비롯한 선행연구에서 사용한 값을 검토하여 적용하였다.

표 7. 기타변수
Table 7. Other parameters

	$ \bar{V} $	P_i	$ \bar{y} $	$ \bar{z} $
Value	428.38	0.5884	75	1.5

앞서 추정된 변수를 안전평가 모델에 적용한 결과, 시나리오 1의 고도 변경에 따른 횡적 충돌위험은 6.0261×10^{-10} 이며, 시나리오 2의 위험도는 3.0619×10^{-12} 로 나타났다. 각 위험도에 경로별로 존재하는 수직 충돌위험(1.07×10^{-9})을 더하면 최종 안전평가 결과가 도출된다. 표 8과 같이 시나리오 1의 최종 충돌위험은 1.06726×10^{-9} , 시나리오 2의 최종 충돌위험은 1.0731×10^{-9} 로, 두 경우 모두 ICAO 안전수준목표(TLS)인

5×10^{-9} 를 충족하는 것으로 나타났다.

표 8. 안전평가 결과
Table 8. Results of safety assessment

Parameters	Scenario 1	Scenario 2	Remarks
S_y	6	9	scenario
$P_y(S_y)$	1.09×10^{-9}	1.86×10^{-12}	measured value
$P_z(0)$	0.538	0.538	EMA Handbook
$E_{y(OPP)}$	0.2951	0.908	measured value
λ_x	0.022151	0.022151	measured value
λ_y	0.019492	0.019492	measured value
λ_z	0.006767	0.006767	measured value
S_x	80	80	EUR/SAM
\bar{V}	428.38	428.38	measured value
$ \Delta \bar{V} $	0.5884	0.5884	measured value
$ \bar{y} $	75	75	EMA Handbook
$ \bar{z} $	1.5	1.5	EMA Handbook
P_i	0.5884	0.5884	measured value
N_{ay}	6.0261×10^{-10}	3.0619×10^{-12}	measured value
results	1.6726×10^{-9}	1.0731×10^{-9}	measured value

VI. 결 론

본 연구는 Reich CRM을 토대로 국내 Offset 절차 및 단방향 복선 항공로에 적합한 안전평가 모델을 개발하고, Offset 절차로 운영된 Y579 항공로 MAKET-TOPAX 구간에 대하여 실증분석을 수행하였다.

항적 분석결과 국내 Offset 절차는 국제 기준과 달리 단방향 복선 항공로와 유사하게 운영되고 있었다. 또한, 진행 방향을 기준으로 우측 3 nm 벗어나서 비행할 것을 명시하는 항공정보간행물(AIP)과 달리 실제로는 6 nm 벗어나 비행하는 eastbound 항적이 다수 발견되었다. 이에 따라 본 논문은 실제 Offset 형태와 각 경로에 대한 교통량을 반영하여 2가지 시나리오를 개발하고, 각 시나리오에 안전평가를 수행하였다. 시나리오 1에서는 항공로 중심선을 따라 비행하는 westbound 항공기와 6 nm 이탈하여 비행하는 eastbound 항공기를 6 nm 분리된 단방향 복선 항공로로 가정하였다. 시나리오 2에서는 3 nm 이탈하여 비행하는 westbound 항공기와 6 nm 이탈하여 비행하는 eastbound 항공기를 9 nm 분리된 단방향 복선 항공로로 가정하였다.

본 연구에서는 단방향 복선 항공로 안전평가를 위해 Reich CRM을 변형한 새로운 안전평가모델을 개발하였다. 단방향 복선 항공로에 발생 가능한 위험을 순항단계와 고도변경단계로 구분하였으며 순항 단계의 경우 PARMO의 수직안전평가 결과를, 고도변

경단계의 경우 개발된 안전평가모델을 적용하였다. 그 결과 시나리오 1(6 nm 분리된 Offset 경로) 및 시나리오 2(9 nm 분리된 Offset 경로) 모두 안전성이 입증되었다.

현재 Y711/Y722 간 분리기준은 8 nm로 국내 단방향 복선 항공로 중 가장 작은 기준을 적용하고 있다. 교통량 등 변수에 따라 안전도가 달라질 수 있으나 Y579의 Offset 안전평가 결과는 단방향 복선 항공로 간 6 nm 분리(시나리오 1)도 국내 공역에 적용 가능하다는 점을 보여준다. 추후 공역의 효율적 사용을 위해 단방향 복선 항공로별 최적의 분리기준에 관한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보이며 본 논문에서 제시한 충돌위험 모델이 추후 연구에 활용 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] S. Alam, Md. M. Hossain, F. Al-Alawi, and F. Al-Thawadi, "Optimizing lateral airway offset for collision risk mitigation using differential evolution", *Air Traffic Control Quarterly*, Vol. 23, No. 4, pp. 1-24, Nov. 2015.
- [2] Han, J. H., Kim, C. H., and Ahn, M. J., "A basic study for development of safety technologies in aviation : focusing on development of airspace safety assessment model", Korea transport institute, Sejong, Research Report 2011-14, 2011.
- [3] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 3rd performance-based navigation(PBN) implementation affair[Internet]. Available: <https://www.codil.or.kr/viewDtlConRpt.do?gubun=rpt&pMetaCode=OTKCRK130027>
- [4] ICAO, Implementation of strategic lateral offset procedure, International Civil Aviation Organization, Montreal, Circular 331-AN/192, pp. 1-2, 2014.
- [5] ICAO, Air traffic management, International Civil Aviation Organization, Montreal, Doc 4444-ATM Amendment No. 9, pp. 110-111, 2016.
- [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[Internet]. Available: <http://ais.casa.go.kr/AIP.ASP?GUBUNCODE=2&GubunName=ENR>
- [7] ICAO, Aircraft operations, International Civil Aviation Organization, Montreal, Doc 8168, 2018.
- [8] Kim, C. H., Han, J. H., Ahn, M. J., "Preliminary analysis on safety assessment of ATS route B576 before the implementation of PBN road map", *Journal of Transport Research*, Vol. 19, No. 2, pp. 93-113, May. 2012.
- [9] ICAO, Manual on monitoring the application of performance-based horizontal separation minima, International Civil Aviation Organization, Montreal, Doc 10063, 2017.
- [10] ICAO, Report of the twenty-fifth meeting of the regional airspace safety monitoring advisory group, International Civil Aviation Organization Asia and Pacific office, Bangkok, RASMAG/25-WP13, p. 16, 2020.
- [11] ICAO, Asia/pacific region en-route monitoring agency (EMA) handbook version 2[Internet]. Available: <https://www.icao.int/Search/pages/results.aspx?k=EMA>
- [12] SATMA, Unidirectional routes postimplementation safety assessment[Internet]. Available: <https://www.satmasat.com/>



박 세 은 (Se-Eun Park)

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



김 휘 양 (Se-Eun Park)

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