

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2025.33.4.193>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

고속탈출유도로가 활주로 점유시간에 미치는 영향 연구

김민우*, 백호종**, 최동엽***, 신중하****

Impact Analysis of Rapid Exit Taxiways on Runway Occupancy Time

Minwoo Kim*, Hojong Baik**, Dongyeob Choi***, Joongha Shin****

ABSTRACT

Runway occupancy time (ROT) is a critical factor determining runway operational efficiency and ensuring safe aircraft landing and expeditious runway vacation. This study analyzes the impact of rapid exit taxiways (RETs) on runway occupancy time (ROT) using operational data from Incheon International Airport's Runway 2 and Runway 4. Analysis of 17,181 landings reveals that Runway 4, equipped with four optimally positioned RETs, achieved an average ROT of 59.7 seconds—a 19% reduction compared to Runway 2. Notably, Class C aircraft showed a 23.7% reduction, primarily driven by the high utilization of RETs positioned at 1,600m and 1,900m. These findings empirically support the installation of additional RETs on Runway 2 and the planned Runway 5, demonstrating that optimizing RET placement is essential for enhancing overall runway capacity and operational efficiency.

Key Words : Runway Occupancy Time(활주로 점유 시간), Rapid Exit Taxiway(고속탈출 유도로), Fleet Mix(항공기 기종 구성), Wide-Body Aircraft(광동체 항공기), Narrow-Body Aircraft(협동체 항공기)

1. 서 론

1.1 연구 배경

공항은 현대 항공교통 인프라의 핵심 시설로서 막대한 투자가 요구되는 사회기반시설이며, 특히 활주로는 공항의 처리 용량을 결정하는 가장 중요한 구성요소이다. 따라서 항공 수요에 대한 적합한 효율적인 설계가 공항 활용도를 극대화하고 운영 효율성을 향상시키는

데 필수적이다. 활주로 용량을 증대시키는 가장 효과적인 방법은 활주로 점유 시간(runway occupancy time, ROT)을 단축하는 것이다.

활주로 점유시간은 항공기가 활주로 진입단(runway threshold)을 통과한 시점부터 항공기가 활주로를 완전히 이탈하는 시점까지의 경과 시간으로 정의되며, 이는 활주로 용량을 결정하는 핵심 지표이다 (Meijers and Hansman, 2019).

활주로에서는 동시에 두 대 이상의 항공기가 점유할 수 없으므로, 선행 항공기가 활주로를 완전히 이탈해야만 후속 항공기의 착륙이 가능하다. 따라서 활주로로부터의 신속한 이탈은 활주로 점유시간 단축을 위해 필수적이며, 이는 안전성 향상과 활주로 용량 증대로 직결된다.

활주로 점유시간에는 항공기 기종 구성(fleet mix), 항공기 속도, 탈출 유도도 각도 및 위치 등 다양한 요

Received: 29. Nov. 2025, Revised: 5. Dec. 2025,

Accepted: 15. Dec. 2025

* 인천국제공항공사 해외사업기술팀장

** 한국항공대학교 항공교통물류학과 교수

*** 인천국제공항공사 공항계획처장

**** 인천국제공항공사 공항계획팀 차장

연락처자 E-mail : air5709@gmail.com

연락처자 주소 : 인천시 중구 공항로 424 번길 47, 인천

국제공항공사 해외사업기술팀

인에 의해 결정된다. 활주로 점유시간에 영향을 미치는 요인을 규명하기 위한 많은 연구가 수행되어 왔으며, 활주로 설계와 시스템은 공항 용량을 극대화하기 위해 지속적으로 개선되어 왔다. 고속탈출유도로(rapid exit taxiway, RET)는 항공기의 신속한 활주로 이탈을 가능하게 하는 핵심 시설 중 하나이다.

1990년대 이전, 허브공항의 활주로 및 탈출 유도로 시스템은 주로 광동체(wide-body) 항공기를 중심으로 설계되었다.

따라서 고속탈출유도로는 광동체 항공기의 요구거리를 충족하도록 위치가 결정되었다. 그러나 1990년부터 2020년 사이 저비용 항공사의 급성장으로 허브공항의 항공기 기종 구성에서 협동체(narrow-body) 항공기가 약 50%를 차지하게 되었다. 기존의 탈출 유도로 시스템은 협동체 항공기에 적합하지 않아 높은 활주로 점유시간을 유발하였고, 이에 따라 많은 공항들이 활주로 점유시간 단축과 전체 공항 용량 증대를 위해 추가 고속탈출유도로 건설 등 활주로 탈출 시스템을 개선하고 있다.

이와 같은 현상은 2001년 개항한 인천국제공항에서도 발견된다. 인천국제공항은 동아시아의 허브공항으로 계획되었으며, 당초 항공기 기종 구성에서 광동체 항공기가 약 50%를 차지할 것으로 예상되었다. 터미널 게이트와 기타 시설은 이러한 항공기 기종 구성을 수용하도록 설계되었으며, 활주로의 탈출구 위치 역시 광동체 항공기 운영에 초점을 맞추어 활주로 말단으로부터 2,000m 이상 지점에 계획·건설되었다. 고속탈출유도로 역시 광동체 항공기의 요구사항을 충족하도록 설계되고 배치되었다.

그러나 저비용 항공사의 성장으로 인천국제공항의 항공기 기종 구성이 변화하여 협동체 항공기 비중이 50%를 초과하였다. 이에 따라 많은 협동체 항공기가 광동체 주기장을 사용하고, 필요 거리보다 긴 지점에서 활주로를 이탈함으로써 비효율이 발생하였다.

이러한 운영은 비효율적인 계류장 활용과 높은 활주로 점유시간을 초래하였다. 이에 인천국제공항은 신규 터미널에 협동체 게이트를 추가로 건설하고, 협동체 항공기 운영을 수용하기 위한 추가 고속탈출유도로를 설계하였다.

1.2 연구목적 및 연구문제

본 연구의 목적은 인천국제공항의 제2, 4활주로 운영

데이터를 분석하여 고속탈출유도로 설계가 활주로 점유시간에 미치는 영향을 정량적으로 검증하는 것이다.

구체적으로, 본 연구는 다음과 같은 세부 목표를 설정한다:

1. 제2활주로(RWY 15L/33R)와 제4활주로(RWY 16R/34L)의 고속탈출유도로 위치에 따른 활주로 점유시간을 비교 분석하여 고속탈출유도로 증설의 효과를 실증
2. 항공기 기종별 활주로 점유시간 차이를 분석하여 항공기 기종 구성이 활주로 점유시간에 미치는 영향 분석
3. 고속탈출유도로 활용률 분석을 통한 최적 배치 위치 도출
4. 제2활주로(RWY 15L/33R) 및 제5활주로(RWY 14/32) 개선을 위한 실무적 제언 도출

인천국제공항은 광동체 항공기를 주로 수용하도록 설계되었으며, 제1·2활주로에는 2,250m와 2,556m 지점에 2개의 고속탈출유도로가 설치되어 있다. 그러나 협동체 항공기의 비중이 증가함에 따라 현재의 고속탈출유도로 위치는 협동체 항공기의 요구 거리보다 길어 활주로 용량의 제약을 초래하고 있다. 이에 제4활주로(RWY 16R/34L)는 현재의 항공기 기종 구성을 수용하기 위해 4개의 고속탈출유도로를 갖추도록 설계되었다.

본 연구는 제4활주로(RWY 16R/34L)의 오픈이후 수집된 운영 데이터를 분석하여 고속탈출유도로의 설계(즉, 개소수와 위치)와 활주로 점유시간 간의 관계를 규명하고자 한다. 나아가 현재 제2활주로(RWY 15L/33R)와 제4활주로(RWY 16R/34L) 간의 활주로 점유시간 비교를 통해 고속탈출유도로 추가설치(증설)에 따른 효과를 검증한다. 본 연구는 고속탈출유도 추가설치에 따른 효과를 입증함으로써 향후 제5활주로(RWY 14/32) 고속탈출유도로 설계를 위한 지침을 제공하고자 한다. 이러한 활주로의 고속탈출유도로 최적 설계는 해당 활주로의 활주로 점유시간을 최소화함으로써 궁극적으로 공항 용량 증대에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구의 핵심 연구 문제는 다음과 같다.

주 연구 문제: 인천국제공항에서 고속탈출유도로 추가를 통한 최적화된 활주로 탈출 시스템이 활주로 점유시간을 감소시키는가?

부 연구 문제 : 항공기 기종에 따라 활주로 점유시간 감소에 유의미한 차이가 있는가?

1.3 연구의 범위 및 제한사항

본 연구는 인천국제공항에서 고속탈출유도로가 활주로 점유시간에 미치는 영향을 분석하는 데 초점을 두고 있다. 또한 각 요인과 활주로 점유시간 간의 관계를 규명하고자 한다. 모든 공항은 고유한 항공 운영 환경을 가지고 있으므로, 인천국제공항과 다른 허브공항 간의 비교는 활주로 점유시간에 영향을 미치는 요인의 영향을 파악하고 효과적이고 효율적인 활주로 시스템을 구축하는데 유익할 것이다. 그러나 다른 허브공항의 상세한 착륙 데이터는 취득이 어렵고 인천국제공항과 상이한 정보를 포함하고 있다. 따라서 본 연구는 주로 인천국제공항 데이터 분석에 집중하며, 이는 향후 제5활주로(RWY 14/32)에 효과적인 고속탈출유도로 설치를 적용하는 데 도움이 될 것이다.

총 17,181건의 착륙 데이터는 2021년에 수집되었으며, 착륙 항공기의 항공기 기종 구성은 팬데믹 이전 및 이후와 다르다. 데이터의 E등급 항공기는 76.45%를 차지하는 반면, 팬데믹 이전과 목표 연도의 E등급 비중은 약 30%이다. 항공기 기종 구성은 활주로 점유시간에 영향을 미치는 가장 중요한 요인 중 하나이며, 항공기 기종 구성의 차이는 연구 결과에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 분석은 인천국제공항의 실제 예측 운영을 정확히 반영하지 못한다는 제한점이 있다.

본 연구는 이러한 제한사항에도 불구하고, 인천국제공항 제4활주로(RWY 16R/34L)의 4개 고속탈출유도로 시스템의 영향을 규명하는 것을 목표로 한다. 또한 COVID-19 팬데믹 기간의 항공기 기종 구성으로 인해 활주로 점유시간이 크게 달라지지 않을 것으로 예상된다. 따라서 본 연구 결과는 인천국제공항의 활주로 점유시간에 영향을 주는 요소에 대한 분석 및 탈출 시스템 영향을 판단하는데 적절할 것이며, 향후 제5활주로(RWY 14/32)에 추가 탈출구 설치 계획 수립에 도움이 될 것이다.

II. 이론적 배경

2.1 활주로 점유시간

활주로 점유 시간은 항공기가 활주로를 점유하는 시

간으로, 공항 운영의 핵심 요소 중 하나이다. 활주로 점유시간은 일반적으로 항공기가 활주로 말단을 통과한 시점부터 항공기의 꼬리 부분이 활주로를 완전히 이탈하는 시점까지의 지속 시간으로 측정된다. 또한 선행 항공기가 활주로를 이탈하기 전에는 후속 항공기의 착륙이 허용되지 않는다. 활주로 점유시간은 단위 시간당 항공기 운항 대수(즉, 수용량 또는 슬롯) 제한에 직접적인 영향을 미친다. 활주로 점유시간 감소는 활주로 활용도를 높여 활주로 용량을 증대시킬 수 있다.

활주로 점유시간은 활주로 처리 능력을 제한하는 핵심 요소이다. 따라서 많은 연구들이 활주로 점유시간에 영향을 미치는 요인을 규명하고 활주로 점유시간을 최소화하는 방법을 모색하는 데 집중해왔다. 미국의 FAA는 2004년부터 미국 내 36개 공항에 설치한 공항표면 탐지장비(ASDE)를 활용하여 항공기 지상이동 데이터를 수집해오고 있다. Meijers & Hansman(2019)는 지상이동 데이터 분석을 통해 활주로 점유시간과 항공기 크기, 활주로 탈출구, IMC/VMC 기상조건 간의 종속성에 대한 분석을 수행하였으며, 항공기 크기가 클수록 활주로 점유시간이 증가하며, 고속탈출유도로 설치하는 활주로 점유시간 감소에 기여하며 기상 조건은 활주로 점유시간에 유의미한 영향을 미치지 않는다고 발표하였다.

활주로 점유시간 최소화를 위한 탈출 유도로 최적 설계 모델이 개발되었다. 대표적으로 1993년에 개발된 활주로 탈출 설계 상호작용 모델(REDIM)은 활주로 점유시간을 최소화하는 최적의 탈출구 세트를 설계하는데 사용되어 왔다. REDIM은 지속적으로 개선되어 왔으며, 현재 REDIM-V4가 활주로의 탈출 시스템 설계에 활용되고 있다.

2.2 활주로 점유시간에 영향을 미치는 요인

미국내 36개 공항의 착륙 데이터가 분석되었으며, 활주로 점유시간의 누적 분포가 제시되었다. 활주로 점유시간의 95%는 34초에서 74초 사이에 분포하며, 평균 활주로 점유시간은 49초였다(Meijers and Hansman, 2019)(Fig. 1).

아울러, 각 공항의 활주로 점유시간이 제시되고, 활주로 점유시간의 가변성이 관찰되었다. 예를 들어, Ronald Reagan Washington National Airport (KDCA)는 40초로 낮은 활주로 점유시간을 보인 반면, Honolulu International Airport (PHNL)는 57초로 다른 공항보다 긴 활주로 점유시간을 나타냈다(Mei-

gers and Hansman, 2019)(Fig. 2).

활주로 배치와 공항 운영 등 다양한 요인이 각 공항의 활주로 점유시간에 영향을 미친다. 따라서 활주로 점유시간에 영향을 미치는 요인을 규명하는 것이 활주로 점유시간 감소를 위해 매우 중요하다.

활주로 점유시간에 영향을 미치는 요인은 다양하다. Fig. 3은 활주로 점유시간에 영향을 미치는 요인별 영향을 분석한 결과이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 탈출구 위치의 기여도가 전체의 56.1% (=49.3% +6.8%)를 차지하고 있어, 탈출 시스템의 설계적 요인이 활주로 점유시간에 중요한 변수로 작용하고 있음을 알 수 있다.

항공기 기종은 활주로 점유시간에 두 번째로 중요한 영향(기여도=11.1%)을 미치며, 다음으로 항공사(기여도=10.7%)가 중요한 요소이다. 영향도의 87.4%를 설명하는 6가지 주요 요인은 활주로 탈출구 위치, 항공기 기종, 항공사, 탈출각도, 최종 접근 속도 및 후속 항공기 기종이다(Meijers and Hansman, 2019).

항공사 및 후속 항공기 기종 등 일부 요인은 공항 운영자가 조정할 수 없다. 따라서 공항 계획자와 운영자는 공항 당국이 계획하고 수정할 수 있는 활주로 탈출 시스템 등의 요인에 더 집중해야 한다. 즉, 탈출구 위치와 각도 등 탈출 시스템은 활주로 점유시간의 가

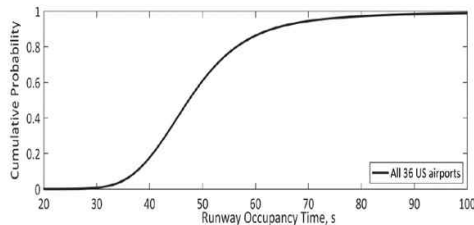


Fig. 1. The cumulative distribution of the ROT at the system level (36 US airports)

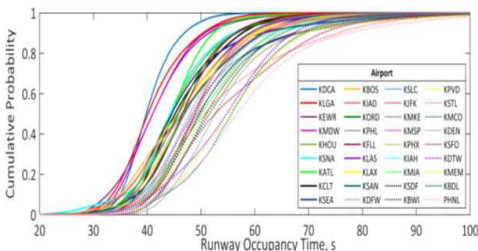


Fig. 2. The cumulative distributions of the ROT for 36 US airports

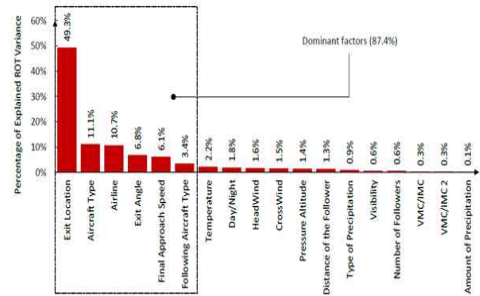


Fig. 3. The importance of the factors for the ROT

장 중요한 요소이며, 활주로 점유시간을 감소시키기 위해 분석되고 계획되어야 하며, 이는 궁극적으로 활주로 용량을 증대시킬 것이다

2.3 고속탈출 유도로

활주로의 일반적인 탈출 각도는 90도 직각 탈출과 30도 고속 탈출이다. 고속탈출유도로는 일반적으로 활주로 중심선과 30° 각도를 형성하여 활주로 점유시간을 감소시킴으로써 직각탈출유도로에 비해 상대적으로 활주로 용량을 증대시키는 역할을 한다(Federal Aviation Administration, 2022). 또한 고속탈출유도로는 평행유도로나 계류장로의 직접 접근을 제공하여 활주로 침범을 방지한다. 따라서 적절한 고속탈출유도로는 활주로 용량을 증대시키고 안전성을 향상시킬 수 있다.

혼잡한 허브공항에서 특히 운영 피크시간대의 고속 탈출유도로의 중요성은 더욱 부각된다. 착륙 항공기가 90° 탈출구를 이탈하기 위해서는 적절한 지상 이동 속도로 감속하는 데 더 많은 시간과 거리가 필요하다.

반면, 최적화된 고속 탈출 시스템은 항공기가 더 짧은 거리에서 보다 빠른 속도로 활주로를 이탈할 수 있게 함으로써 활주로 점유시간을 줄이는데 기여하게 된다. 감소된 활주로 점유시간은 항공기 착륙을 증가시키고 활주로 용량을 늘릴 수 있다. 또한 도착시 활주로 점유시간 감소는 출발 항공기가 활주로를 더 빠르게 사용할 수 있게 한다 (Federal Aviation Administration, 2023).

고속탈출유도로의 위치는 활주로 데이터, 항공기 기종 구성 및 항공기 성능 특성 분석을 통해 결정되어야 한다. 활주로 탈출 설계 상호작용 모델(REDIM)은 탈출구 위치를 분석하고 최적화하는 FAA의 선호 방법이다. REDIM은 가능한 탈출구 위치에 대한 활주로 점유시간을 예측하는 기능을 제공하고 있다.

미국 내 4개 공항에 대한 REDIM 시뮬레이션 결과, 새로운 활주로 탈출구 건설 또는 활주로의 저속 탈출구 사용 회피가 활주로 점유시간을 개선하는 것으로 나타났다(Mirmohammadsadeghi, 2020). 또한 여러 허브공항이 활주로 점유시간을 감소시키고 공항 용량을 증대시키기 위해 현재 활주로에 추가 고속탈출유도로를 건설하는 프로젝트를 시행하고 있다. 일반적으로 최근의 항공기 기종 구성을 효과적으로 수용하기 위해서는 활주로 방향당 4개의 고속탈출유도로를 설치하는 것이 효과적인 것으로 알려져 있다.

2.4 인천국제공항 활주로 시스템

인천국제공항은 급격히 증가하는 항공교통 수요를 충족하기 위해 제4단계 건설을 시행하였다. 제4 활주로(RWY 16R/34L)는 제4단계 건설의 주요 과업 가운데 하나로 공항의 전체 용량을 증대시키기 위해 계획되었고, 건설이 완료될 경우 시간당 107회를 처리할 수 있다고 분석되었다(Choi, Sin, Chang, and Park, 2019).

인천국제공항의 경우 제1활주로(RWY 15R/33L)는 주로 출발에 사용되며, 제2활주로(RWY 15L/33R)는 착륙에 사용된다. 제3활주로(RWY 16L/34R)는 제4활주로(RWY 16R/34L)로 개항 전에 출발과 착륙에 사용되었다. 현재 제3활주로(RWY 16L/34R)와 제4활주로(RWY 16R/34L)는 각각 출발과 착륙에 사용된다(Fig. 4).

2017년 자료에 의하면, 제2활주로(RWY 15L/33R)와 제3활주로(RWY 16L/34R)의 착륙 항공기 처리비율은 각각 72%와 28%이다. 참고로 인천국제공항의 제4활주로(RWY 16R/34L)는 2021년 완공되었으나, 곧이어 시작된 제3활주로(RWY 16L/34R) 재포장 공사로 제3활주로(RWY 16L/34R)를 사용할 수 없는 상황이 발생하였으며, 이에 따라 기존의 제3활주로(RWY 16L/34R)의 기능을 대신하여 활용되었다.

인천국제공항은 활주로 점유시간을 최소화하기 위해 제4활주로(RWY 16R/34L) 계획시 추가 고속탈출유도도로와 그 위치를 고려하였다. 또한 연료 소비를 줄이기 위해 활주로에서 계류장으로의 효율적인 경로가 함께 고려되어 설계되었다.

제1, 2, 3활주로의 고속탈출유도로는 광동체 항공기의 높은 비중을 수용하도록 설계되었으며, 그 결과 각 활주로의 첫 고속탈출유도도가 활주로 시단으로부터 2,000m 이상 지점에 설치되었다. 그러나 2025년 현재 저비용 항공사의 항공기 운항회수는 전체의 약 60%를 차지하고 있다.

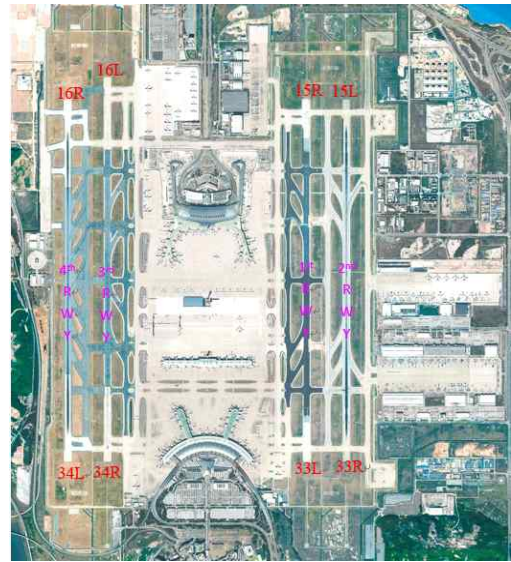


Fig. 4. Incheon Airport runway layout

2021년 완공된 제4활주로(RWY 16R/34L)는 이와 같은 협동체 항공기의 높은 비중을 효과적으로 수용할 수 있도록 설계되었다. 설계시 REDIM이 적절하고 효율적인 고속탈출유도도 위치를 분석하는 데 사용되었다. 게이트 간(gate-to-gate) 시뮬레이션 도구인 total airspace and airport modeler (TAAM)도 시나리오의 효과를 예측하고 분석하여 비교하는 데 사용되었다. 최종 고속탈출 유도로 위치는 REDIM과 TAAM의 결과를 바탕으로 4개 위치가 가장 효율적이라고 결론되었으며, 탈출구의 갯수와 위치는 REDIM 및 TAAM의 결과를 토대로 설계되고 건설되었다.

III. 연구방법

3.1 연구설계

협동체 항공기의 폭발적 증가와 함께, 추가 고속탈출유도도가 활주로 점유시간과 터미널 게이트까지의 거리를 최소화하기 위해 고려되고 설계되었다. 제4활주로(RWY 16R/34L)는 2021년 6월에 완료되었다. 따라서 제4활주로(RWY 16R/34L)의 4개 고속탈출유도로에 대한 운영 데이터가 수집되어 제2활주로(RWY 15L/33R)의 현재 운영과 비교하였다.

착륙데이터는 다변측정(multilateration, MLAT)시스템으로부터 수집되었다. 제4활주로(RWY 16R/34L) 개항 후 2021년 6월부터 9월까지 총 17,181건의 착륙

데이터가 수집되어 활주로 점유시간에 영향을 미치는 변수를 규명하고 활주로 점유시간에 유의미한 영향을 미치는 요인 간의 관계를 파악하기 위해 분석되었다.

다변측정시스템은 항공기 위치를 감시하기 위한 최신기술 중 하나로 여러 개의 지상 수신국이 항공기에서 송출되는 신호 도착시간을 비교하여 항공기의 정확한 위치를 계산하는 시스템으로 활주로 도착 및 이탈 시간에 대한 정확한 데이터를 공급한다.

본 연구의 주요 연구 주제는 "인천국제공항에서 고속탈출유도로 추가를 통한 최적화된 활주로 탈출 시스템이 활주로 점유 시간을 감소시키는가?"이다.

본 연구에서는 다변측정(multilateration, MLAT) 시스템을 통해 수집된 실제 운영 데이터를 기술통계분석(descriptive statistics) 및 추론통계 분석(inferential statistics) 기법을 활용하여 연구주제에 대한 해답을 도출하였다. 분석에 활용된 주요 독립 변수는 고속탈출유도로의 수와 위치이며, 주요 종속 변수는 활주로 점유시간이다. 항공기 항공기 기종 구성, 항공기 기종, 기상 및 활주로 가지거리(RVR)도 가능한 변수이다. 본 연구는 기술 통계 분석을 사용하여 운영 데이터를 분석하고 변수간의 관계를 제시하였다.

3.2 기술 통계 분석

기술 통계 분석은 데이터를 기술하거나 요약하는 데 사용되는 통계적 방법으로, 통계 데이터 분석을 수행하는 첫 번째 단계이다. 기술 통계는 데이터 분포를 제공하고 연구자들이 변수의 특성과 연관성을 파악할 수 있게 한다. 중심 경향, 변산성 및 빈도 분포의 측정 세 가지 기본 측정 범주이다(HWYES, 2022).

중심 경향은 데이터의 평균 또는 중간값을 정의하는 단일 값을 식별하는 통계적 방법이다. 중심 경향은 데이터를 가장 잘 대표하는 단일 값을 찾는 것을 목표로 한다(Gravetter and Wallnau, 2016). 변산성의 측정은 점수 간의 차이에 대한 정량적 측정을 제공하고 점수가 어떻게 분산되어 있는지를 보여준다. 빈도 분포는 특정 사건 또는 응답이 발생하는 빈도를 파악하는 데 필수적이며, 개수나 백분율 등의 측정을 제공한다. 기술 통계 분석은 예측 분석 전에 수행되는 과거 데이터를 기술하고 요약하는 표본데이터 분석 방법이다.

기술 통계 분석은 각 활주소에 대한 정보를 제공한다. 활주로 점유시간은 고속탈출유도로의 수와 항공기 기종에 따라 달랐다. 결과는 고속탈출유도로의 영향을 파악하고

평가하는 데 도움이 되며, 이는 제2활주로(RWY 15L/33R) 탈출 시스템을 개선하는데 지침을 제공한다. 또한 항공기 기종에 따른 각 고속탈출유도로의 활용률은 활주로 탈출 시스템과 운영에 대한 이해를 높이는데 활용된다.

3.3 추론 통계

추론 통계는 표본데이터를 이용하여 모집단의 특성을 추정하고, 집단 간의 차이를 검증하기 위한 통계적 방법이다. 본 연구에서는 인천국제공항 제2활주로(RWY 15L/33R)와 제4활주로(RWY 16R/34L)의 평균 활주로 점유시간 차이를 검증하기 위해 독립표본 t-검정을 수행하였다. 이를 통해 고속탈출유도로 수의 차이가 활주로 점유시간에 미치는 통계적 유의성을 확인하였다.

또한 항공기 등급(C, D, E, F Class)에 따른 활주로 점유시간의 차이를 검증하기 위해 일원분산분석(One-Way ANOVA)을 수행하였다. 이를 통해 항공기 기종별 활주로 점유시간 평균의 유의한 차이가 존재하는지 분석하였다.

본 연구에서는 별도의 상관관계분석은 수행하지 않았으며, 활주로 점유시간에 영향을 미치는 요인 간의 관계는 t-검정과 분산분석 결과를 중심으로 해석하였다. 이러한 추론 통계 기법들은 4장에서 제시된 분석 결과에 직접 적용되어 고속탈출유도로 확충이 활주로 점유시간 단축에 미치는 영향을 실증적으로 검증하는데 활용되었다.

IV. 분석 결과

4.1 분석자료

제4활주로(RWY 16R/34L)에 설치된 4개의 고속탈출유도로 시스템과 제2활주로(RWY 15L/33R)의 고속탈출유도로 시스템의 차이를 분석하기 위해 제4활주로(RWY 16R/34L) 개항 후 3개월(2021년 6월~9월)간의 착륙 데이터가 수집, 분석되었다.

3개월(2021년 6월~9월)동안 수집된 자료는 총 17,181건의 착륙 항공기 정보이며, 이 기간동안 착륙 항공기의 항공기 기종 구성은 팬데믹 이전과 크게 달랐다. COVID-19 팬데믹 이전, 인천국제공항의 항공기 기종 구성은 C등급이 약 55%, E등급이 35%를 차지하였다. 그러나 COVID-19 기간중인 2021년의 경우 항공 수요가 크게 감소하여 인천국제공항의 항공기

기종 구성에 영향을 미쳤다.

Table 1에서 보는 바와 같이 자료수집기간 3개월 동안의 인천국제공항 운항 항공기의 항공기 기종 구성에서 E등급의 비중은 76.45%였다. 따라서 본 연구는 인천국제공항의 실제 예측 운영을 반영하지 못한다는 제약이 있다. 이러한 제약사항은 고속탈출유도도가 활주로 점유시간에 미치는 영향을 결정하는 데 고려되어야 한다.

4.2 제2활주로(RWY 15L/33R)와 제4활주로(RWY 16R/34L)의 활주로 점유시간

Table 2는 수집된 자료를 활용하여 제2활주로(RWY 15L/33R)와 제4활주로(RWY 16R/34L)의 평균 활주로 점유시간과 개별 고속탈출유도도에서 항공기 기종별 활주로 점유시간을 정리, 비교한 것이다. 본 연구에서의 활주로 점유시간은 MLAT 자료를 기반으로 활주로 고속탈출유도도의 정지선을 완전히 이탈한 값을 사용하였다. 표에서 보는 바와 같이 제4활주로(RWY 16R/34L)의 평균 활주로 점유시간은 59.7초로 제2활주로(RWY 15L/33R)의 평균 활주로 점유시간 73.7초에 비해 크게 감소하였음을 알 수 있다.

Fig. 5, 6은 제2활주로(RWY 15L/33R)와 제4활주로(RWY 16R/34L)의 항공기 등급별 활주로 점유시간 분포를 보여주고 있다. 제2활주로(RWY 15L/33R) 활주로 점유시간의 경우 최소 50초에서 최대 96초까지 분포하며 (N=13,701, M=73.7초, SD=8.3초, Mdn=73초), 제4활주로(RWY 16R/34L)의 활주로 점유시간은 40초~96초까지 분포한다(N=3,213, M=59.7초, SD=7.1초, Mdn=59초).

독립표본 t-검정 결과, 두 활주로 간 활주로 점유시간 차이는 $t(16,912)=21.6$, $p<0.001$ 로 통계적으로 유

Table 1. The fleet mix by runway

	1 st RWY (15R/33L)	2 nd RWY (15L/33R)	4 th RWY (16R/34L)	Total
C class	0.05%	7.51%	2.28%	9.83%
D class	0.03%	5.31%	0.14%	5.48%
E class	1.50%	61.82%	13.13%	76.45%
F class	0.05%	8.03%	0.16%	8.24%
Total	1.63%	82.67%	15.70%	100.00%

Table 2. The Runway occupancy time in 2nd and 4th runways

	RET	C class	D class	E class	F class	Total
2 nd RWY (15L/ 33R)	2,250m	72.1s	68.9s	70.1s	66.2s	70.3s
	2,556m	79.2s	74.8s	76.6s	73.9s	76.1s
	3,005m	-	75.5s	83.2s	83.4s	82.9s
	3,600m	-	-	92.3s	91.0s	92.0s
	Total	75.9s	74.7s	73.2s	74.2s	73.7s
4 th RWY (16R/ 34L)	1,600m	53.5s	51.7s	51.4s	-	52.2s
	1,900m	57.6s	56.6s	57.0s	54.5s	57.1s
	2,200m	64.7s	62.0s	64.0s	60.6s	64.1s
	2,500m	72.0s	66.8s	70.5s	67.1s	70.3s
	3,030m	-	-	83.6s	84.0s	83.6s
	Total	57.9s	58.0s	60.0s	63.8s	59.7s

의한 차이를 보이는 것으로 분석되었다. 이는 제4활주로(RWY 16R/34L)에 설치된 4개의 고속탈출유도도가 항공기의 활주로 점유시간을 유의미하게 단축시켰음을 의미하며, 이는 고속탈출유도도 확충이 활주로 용량 증대에 효과적임을 실증적으로 보여준다고 할 수 있다.

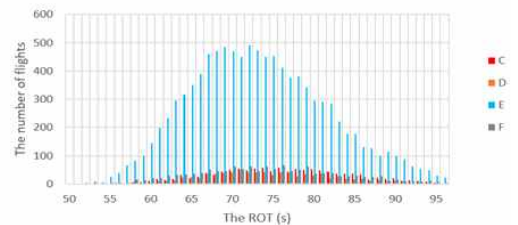


Fig. 5. The distribution of the ROT at the 2nd runway

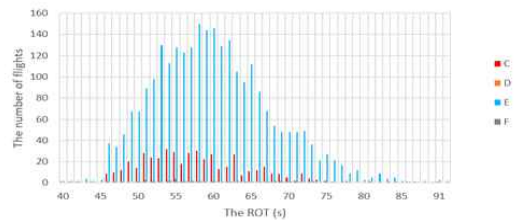


Fig. 6. The distribution of the ROT at the 4th runway

4.3 고속탈출 유도로 활용률

활주로 점유시간에 영향을 미치는 주요 요인은 활주로 탈출구 위치이다. Table 3은 고속탈출유도로 위치에 따른 항공기 기종별 활용 비율을 정리한 것이다.

제2활주로(RWY 15L/33R)의 경우 대부분의 C등급과 E등급 착륙 항공기가 2,250m 탈출구를 사용한 반면, 제4활주로(RWY 16R/34L)의 활용률은 C등급과 E등급 항공기의 33.8%와 10.2%가 1,600m 탈출구를 활용하였다. 특히, C등급 항공기의 45.6%가 1,900m 탈출구를 사용하였으며 결과적으로 C등급 항공기의 약 80%가 1,600m와 1,900m에 위치한 고속탈출유도로를 사용하였다. 이러한 탈출거리 단축은 제2활주로(RWY 15L/33R) 대비 제4활주로(RWY 16R/34L)의 활주로 점유시간 감소에 결정적 작용했음을 알 수 있다.

E등급 항공기의 1,900m 탈출구 활용률은 49.4%인 것으로 분석되었으며, 결과적으로 E등급 항공기의 약 60%가 2,000m 이하의 탈출 유도로를 사용한 것으로 나타났다. 이러한 분석 결과는 F등급을 제외한 대부분의 항공기가 2,000m 이하에 위치한 탈출 유도로를 사용할 수 있음을 보여주고 있다. 이러한 분석결과는 제5활주로

Table 3. The utilization of RET by aircraft class in 2nd and 4th runway

	RET	C class	D class	E class	F class	Total
2 nd RWY (15L/33R)	2,250 m	98.4%	100%	94.1%	92.0%	94.5%
	2,556 m	1.6%	0.0%	5.8%	8.0%	5.4%
	3,005 m	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.1%
	3,600 m	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	Total	8.9%	0.2%	90.5%	0.4%	100%
4 th RWY (16R/34L)	1,600 m	33.8%	31.6%	10.2%	0.0%	13.8%
	1,900 m	45.6%	57.9%	49.4%	8.3%	48.6%
	2,200 m	18.2%	5.3%	31.4%	54.2%	29.4%
	2,500 m	2.4%	5.3%	8.9%	37.5%	8.1%
	3,030 m	0.0%	0.0%	0.2%	0.0%	0.2%
	Total	14.8%	0.6%	83.8%	0.8%	100%

(RWY 14/32) 고속탈출 유도로 설계에 고려되어야 할 것이다.

4.4 항공기 기종의 영향

제4활주로(RWY 16R/34L)의 C, E, F등급 활주로 점유시간은 57.91초, 59.97초, 63.80초로 제2활주로(RWY 15L/33R)의 75.93초, 73.25초, 74.21초에 비해 각각 23.73%, 18.13%, 14.02% 감소한 것으로 분석되었다(Table 4).

제2활주로(RWY 15L/33R)의 경우 항공기 등급별 활주로 점유시간이 유사한 이유는 대부분의 항공기가 2,250m 탈출 유도로를 사용하는 현상에서 기인한 것으로 판단된다. 이와는 달리, 제4활주로(RWY 16R/34L)의 활주로 점유시간은 각 항공기 기종마다 다른 패턴을 보여주고 있다.

1,600m와 1,900m 탈출 유도로의 활용 비율은 활주로 점유시간 감소의 중요한 요인이다. 협동체 항공기의 2,250m 이하 탈출 유도로의 활용 비율은 약 80%이다. 반면, E등급과 F등급의 2,250m 이하 탈출 유도로의 활용 비율은 각각 59.6%와 8.3%로 협동체 항공기보다 상당히 낮은 것으로 분석되었다(Fig. 7).

제4활주로(RWY 16R/34L)의 항공기 등급(C, D, E, F Class)별 활주로 점유시간의 차이를 검증하기 위해 일원 분산분석을 실시한 결과, $F(3,3209)=12.64$, $p<0.001$ 로 등급 간 활주로 점유시간 평균에 유의한 차이가 존재하였다. 사후분석 결과, C, D급 항공기의 평균 활주로 점유시간이 E, F급 항공기보다 유의하게 짧은 것으로 분석되었다. 이는 항공기의 착륙중량과 이에 따른 감속거리 특성이 활주로 점유시간에 직접적인 영향을 미친다는 기존 연구 결과와 일치하며, 향후 활주로 설계 시 등급별 항공기

Table 4. Comparison of ROT of 2nd and 4th RWYs by aircraft type

	2 nd RWY (15L/33R)	4 th RWY (16R/34L)	Reduction ratio
C class	75.93	57.91	23.73%
D class	74.69	58.03	22.30%
E class	73.25	59.97	18.13%
F class	74.21	63.80	14.02%
Total	73.67	59.68	18.99%

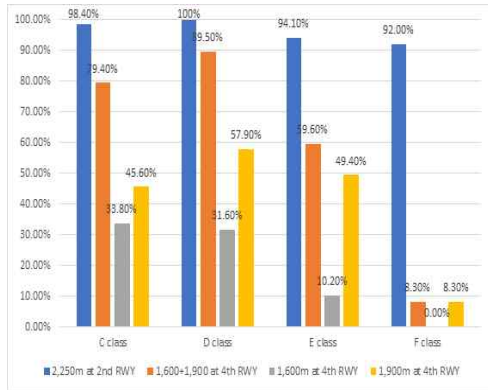


Fig. 7. The utilization of RET by RWY and aircraft class

비율(기종 믹스)에 따라 최적의 고속탈출유도도 위치를 설정하는 것이 중요함을 시사한다.

V. 결론 및 제언

5.1 연구결과 요약

본 연구에서는 2개 고속탈출유도도를 설치한 제2활주로(RWY 15L/33R)의 활주로 점유시간과 4개 고속탈출유도도를 설치한 제4활주로(RWY 16R/34L)의 활주로 점유시간을 비교 분석하였다. 이를 위해 제4활주로(RWY 16R/34L) 개항 후 2021년 6월부터 9월까지 수집된 총 17,181건의 착륙 데이터가 활용되었다. 분석 결과, 제2활주로(RWY 15L/33R)의 평균 활주로 점유시간은 73.67초, 제4활주로(RWY 16R/34L)의 평균 활주로 점유시간은 59.68초로 나타나, 약 14.0초의 활주로 점유시간 단축 효과를 보였다. 두 활주로 간 활주로 점유시간 차이에 대한 독립표본 t-검정 결과, $t(16,912)=21.6$, $p<0.001$ 로 통계적으로 매우 유의하였으며, 이는 제4활주로(RWY 16R/34L)의 추가 고속탈출유도도 설치가 실질적인 활주로 점유시간 감소와 활주로 용량 증대에 기여함을 의미한다. 또한 제4활주로(RWY 16R/34L)에서 항공기 등급(C/D/E/F)에 따른 활주로 점유시간 차이를 검증하기 위해 일원분산분석(one-way ANOVA)을 실시한 결과, 등급 간 평균 활주로 점유시간은 통계적으로 유의한 차이를 보였다 ($F(3,3209)=12.64$, $p<0.001$).

이러한 분석결과는 고속탈출유도도 위치가 활주로 점유시간 감소의 가장 중요한 요인임을 실증적으로 보여준 것이라 할 수 있다.

5.2 제언

고속탈출유도도 위치는 활주로의 활주로 점유시간에 영향을 미치는 주요 요인이다. 제4활주로(RWY 16R/34L)의 4개 고속탈출유도도는 제2활주로(RWY 15L/33R)의 2개 고속 탈출구와 비교하여 통계적으로 유의한 활주로 점유시간 감소가 발생하였음을 확인하였다. 따라서 인천국제공항의 전체 활주로 점유시간을 감소시키기 위해 제2활주로(RWY 15L/33R) 및 제5활주로(RWY 14/32)에 2,000m 이하의 추가 고속탈출유도도 설치 및 운영이 필요하다.

항공기 기종 구성 역시 활주로 점유시간에 영향을 미치는 중요한 요인 중 하나이다. 그러나 본 연구에서 분석한 2021년 6월부터 9월까지 착륙데이터의 항공기 기종 구성은 COVID-19 팬데믹으로 인해 목표 연도의 항공기 기종 구성과 약간 차이가 있었다. 따라서 항공 수요가 완전히 회복된 현시점에 제2활주로(RWY 15L/33R)의 오픈이후 인천국제공항의 모든 착륙활주로는 운영되게 되면 착륙 데이터를 분석하는 향후 연구가 필요할 것이다. 하지만, 향후 연구의 결과는 본 연구와 크게 다르지 않을 것으로 예상된다. 그러나 향후 연구는 제4활주로(RWY 16R/34L)와 제2활주로(RWY 15L/33R)의 활주로 점유시간 차이 분석 및 기상, 시정 등 활주로 점유시간에 영향을 미치는 다른 요인의 관계와 영향을 분석하면 활주로 점유시간에 영향을 미치는 요인에 대한 추가적인 분석에 크게 도움이 될 것이다.

본 연구는 실제 공항운영 데이터를 기반으로 고속탈출유도도의 추가 설치에 따른 활주로 점유시간 변화를 분석함으로써 고속탈출유도도가 활주로 점유시간에 미치는 영향에 대해 심도 깊은 분석을 시행하였다. 이 연구는 향후 활주로 신규 건설 및 운영중인 활주로의 개선공사를 계획할 때 중요자료로 활용이 될 것으로 판단된다.

향후 연구는 제2활주로(RWY 15L/33R) 운영 개시 이후 보다 많은 실제 착륙데이터를 확보하여 고속탈출유도도로 활주로 점유시간의 상관관계를 분석하여 더 상세한 원인과 요인의 관계를 발견할 수 있다. 또한 빅데이터를 기반으로 한국형 활주로 점유시간 예측모형을 개발함으로써 한국 공항환경에 최적화된 모델을 활용하여 공항 활주로 용량 최적화 방안을 제시할 수 있을 것으로 생각한다. 이러한 한국형 예측모형의 개발은

기존 미국 공항착륙데이터를 기반으로 개발된 FAA의 REDIM 모형보다 국내공항에 최적화된 결과를 도출할 수 있을 것이다. 이는 인천국제공항 제5활주로(RWY 14/32)의 가장 효과적인 고속탈출유도로 시스템을 계획하는 데 도움이 될 것이며, 국내 공항의 활주로 개선 및 계획에 활용될 수 있을 것이다.

5.3 결론

활주로 점유시간은 활주로 운영과 안전에 영향을 미치는 가장 중요한 요소 중 하나이다. 또한 활주로 점유시간 감소는 활주로 용량을 극대화하고 공항 용량을 증대시키는 가장 효과적인 방법이다. 따라서 많은 허브 공항이 추가 탈출 유도로 설치를 통해 활주로 점유시간을 감소시키는 개선 계획을 시행하고 있다. 인천국제공항도 활주로 점유시간을 감소시키기 위해 제4활주로(RWY 16R/34L)에 4개 고속탈출유도로 시스템을 설계하였다. 본 연구는 제4활주로(RWY 16R/34L) 개항 후 2021년 6월부터 9월까지의 착륙 데이터가 4개 고속탈출유도로 시스템이 활주로 점유시간에 미치는 영향을 결정하기 위해 수집되고 분석되었다. 평균 활주로 점유시간은 제2활주로(RWY 15L/33R)에서 73.7초, 제4활주로(RWY 16R/34L)에서 59.7초이다. 제4활주로(RWY 16R/34L)의 4개 고속탈출유도로는 제2활주로(RWY 15L/33R)의 2개 탈출구와 비교하여 활주로 점유시간의 상당한 감소를 제공하였다. 1,600m와 1,900m 고속탈출유도로의 이용 비율은 활주로 점유시간 감소에 상당한 영향을 미치며, C등급 항공기의 79.4%와 E등급 항공기의 59.6%가 2,000m이하 고속탈출유도로를 이용하였다. 연구 결과는 향후 5활주로(RWY 14/32)에 효과적이고 효율적인 탈출유도로 시스템을 설치하는 데 도움이 될 것이다.

활주로 점유시간에 영향을 미치는 여러 요인은 탈출유도로 위치, 항공기 기종, 기상 등이다. 고속탈출유도로의 위치는 활주로 점유시간 최소화의 가장 중요한 요인이다. 활주로 점유시간은 항공기 기종과도 관련이 있다. 협동체 항공기는 광동체 항공기보다 활주로 점유시간이 짧다.

본 연구는 탈출구 위치와 탈출 유도로의 수가 활주로 점유시간에 영향을 미치는 가장 중요한 요인임을 보여준다. 4개의 고속탈출유도로는 활주로 점유시간의 상당한 감소를 제공하였다. 따라서 제2활주로(RWY 15L/33R)에 추가 고속탈출유도로 설치하는 인천국제공

항의 전체 활주로 점유시간을 감소시킬 것이다.

활주로 점유시간은 활주로 운영과 용량에 영향을 미치는 가장 중요한 요인으로, 탈출유도로 개수, 위치, 항공기 기종 구성 등 많은 변수와 관련이 있다. 제4활주로(RWY 16R/34L)의 새로운 4개 탈출구 시스템은 4개 고속탈출유도로가 인천국제공항의 활주로 점유시간을 상당히 감소시킴을 보여준다. 따라서 제2활주로(RWY 15L/33R)에 2개의 추가 탈출 유도로 설치 및 운영은 인천국제공항의 전체 활주로 점유시간을 감소시킬 것이다. 제2활주로(RWY 15L/33R)가 운영개시된 이후 인천국제공항의 전체 착륙 활주로는 4개의 고속탈출유도로로 완성된 이후 많은 데이터를 분석할 향후 연구는 공항 용량을 증대시키는 더 효과적인 방법을 제공할 것이다. 아울러, 더 많이 확보된 빅데이터를 기반으로 한국형 활주로 점유시간 예측모형을 개발할 경우 활주로 점유시간 최적화를 통한 활주로 용량 극대화 방안을 연구할 수 있다. 이는 인천국제공항 및 국내공항의 향후 활주로 계획 및 개선시 효율성을 개선하고 활주로 용량을 극대화 하는데 많은 도움이 될 것이다.

References

1. Federal Aviation Administration, "Air traffic organization policy", Federal Aviation Administration, 2011.
2. Federal Aviation Administration, "FAA advisory circular 150/5300-13B", Federal Aviation Administration, 2022.
3. George Mason University, "Runway throughput", George Mason University, 2023.
4. Gravetter, F. J. and Wallnau, L. B., "Statistics for the behavioral sciences", Cengage Learning, 2016.
5. Hwyses, A., "Descriptive statistics: definition, overview, types, example", Investopedia, 2022.
6. Incheon International Airport Corporation, "Aircraft landing data at Incheon Airport", Incheon International Airport Corporation, 2021.
7. Incheon International Airport Corporation, "Incheon airport 4th airside detailed design

- report - 4th runway", Incheon International Airport Corporation, 2018.
8. International Civil Aviation Organization, "ICAO doc 9157 aerodrome design manual", International Civil Aviation Organization, 2020.
 9. Meijers, N. P. and Hansman, R. J., "Data-driven predictive analytics of runway occupancy time for improved capacity at airports", MIT International Center for Air Transportation, 2019.
 10. Mirmohammadsadeghi, N., "Development of an aircraft landing database and models to estimate aircraft runway occupancy times", Virginia Polytechnic Institute and State University, 2020.
 11. Choi, D., Sin, J., Chang, C. and Park, S., "A study on feasibility for runway development: IIAC 4th runway construction case study", Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics, 27(2), 2019, pp.37-45.