

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2025.33.2.099>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

인천국제공항 제5활주로 북측연결유도로 설계대안 비교 분석 연구

강동성*, 김민우**, 신중하***, 백호종****, 이현진*****

A Comparative Analysis of Design Alternatives for the Northern Connection Taxiway to Incheon International Airport's Fifth Runway

Dongsung Kang*, Minwoo Kim**, Joongha Shin***, Hojong Baik****, Hyeonjin Lee*****

ABSTRACT

Incheon International Airport plans to construct a fifth runway, planned as Runway 32-14, to accommodate increasing air traffic demand. The new runway will serve Terminals 1, 2, and the future Terminal 3, making efficient ground connectivity essential. This study examines the necessity of a northern connection taxiway and compares single and dual configurations through simulation. Using Total Airspace and Airport Modeler, traffic scenarios of 70 and 140 aircraft per hour were tested. Results show that the dual taxiway reduces delays and improves flow under high-demand conditions. The cumulative benefit of dualization from 2034 to 2050 is estimated at KRW 401.9 billion, exceeding the construction cost. These findings suggest that dualization is a cost-effective and operationally viable solution for integrating the new runway into the airport's ground system.

Key Words : Ground Traffic Flow(지상 이동 흐름), Airport Optimization(공항 최적화), Taxiway Design(유도로 설계), Airport Operation(공항 운영), Airport Planning(공항 계획)

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

연결유도로는 공항 내에서 이격된 활주로 또는 주요 공항시설(여객터미널, 계류장 등) 간의 직접적인 지상 이동 경로를 제공하는 유도로로서, 활주로 횡단을 최소

화하고 항공기 지상 이동의 효율성을 확보하는 데 중요한 역할을 한다. 특히, 공항 규모 확장 또는 신규 활주로 설치 시 연결유도로의 배치는 전체 공항 운영 흐름과 수용능력에 직접적인 영향을 미치므로, 구조적·운영적 관점에서의 면밀한 검토가 요구된다.

인천국제공항은 코로나19 이후 지속적으로 증가하는 항공 수요에 대응하기 위해 제5활주로(32-14 활주로) 건설을 계획하고 있다. 활주로의 신설은 공항의 수용 능력을 확대함으로써, 향후 증가하는 항공 교통량을 효과적으로 처리하는 데 기여할 것으로 기대된다.

계획 중인 32-14 활주로는 평면배치계획 상 기존 33R-15L 활주로로부터 동쪽으로 약 2km 이상 이격되어 있으며, 향후 신설 예정인 제3터미널뿐만 아니라 기존 제1·2터미널의 운항편 또한 공통적으로 활용될 예정이다(Fig. 1). 이에 따라, 32-14 활주로를 이용하는

Received: 27. May. 2025, Revised: 29. May. 2025,
Accepted: 05. Jun. 2025

* 한국항공대학교 미래항공교통학과 석사과정

** 인천국제공항공사 해외사업기술팀 팀장

*** 인천국제공항공사 공항계획팀 차장

**** 한국항공대학교 항공교통물류학부 교수

***** 한국항공대학교 미래항공교통학과 박사과정

연락처 E-mail : steve9412@naver.com

연락처 주소 : 경기도 고양시 덕양구 항공대학로 76

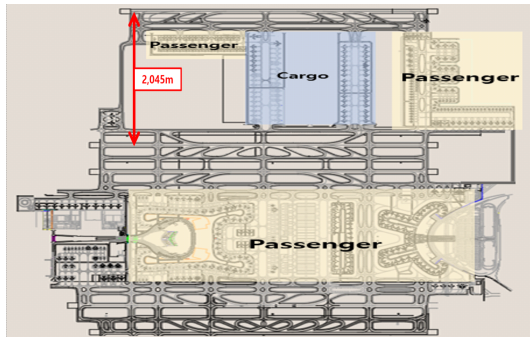


Fig 1. Taxiway and apron layout of Incheon International Airport

항공기의 지상 이동 효율성을 확보하기 위해 기존 여객터미널 및 공항 주요 시설과의 연계성 확보가 필수적인 과제로 부각되고 있다.

특히 제1·2터미널에서 32-14 활주로를 이용하는 항공기의 경우, 기존 33L-15R 및 33R-15L 활주로를 횡단해야 하며, 이 과정에서 운항 중인 항공기와 이동 동선이 교차하게 된다. 이러한 구조적 제약은 병목 현상을 유발하고 지상이동 흐름을 저해함으로써, 항공기 지연뿐만 아니라 불필요한 연료 소비 및 탄소 배출 증가를 초래하여 공항 운영의 효율성과 환경 측면 모두에 부정적인 영향을 미칠 수 있다.

이와 같은 운영상의 비효율을 해소하고 지상 이동의 원활한 흐름을 확보하기 위해서는, 32-14 활주로와 기존 활주로·유도로 간 효율적인 연결을 위한 신규 연결유도로의 설치가 필요하다. 연결유도로는 동선 분리를 통해 지연을 최소화하고, 항공기 이동 시간을 단축함으로써 연료 소모 및 배출량 저감 등 다양한 운영적·환경적 효과를 기대할 수 있다.

이에 본 연구에서는 Total Airspace and Airport Modeler(TAAM)를 활용한 시뮬레이션 분석을 통해 단선과 복선 두 설계 대안을 운용 성능 측면에서 정량적으로 비교·평가하고, 이를 바탕으로 북측연결유도로의 최적 구성 방안을 도출하는 것을 목적으로 한다.

1.2 연구 범위

본 연구의 공간적 범위는 인천국제공항의 32-14 활주로, 북측연결유도로, 제3터미널 계류장을 포함한 에어사이드 전 영역을 대상으로 한다.

시간적 범위는 인천국제공항 32-14 활주로 운영 개시가 예정된 2034년을 기준으로 설정하였다. 다만, 연

구에서 활용된 기초자료 및 운항 스케줄 데이터는 코로나19로 인한 항공 수요 변동성을 배제하기 위해 2019년을 기준으로 수집되었다.

내용적 범위는 시뮬레이션 모델 구축, 운영 시나리오 구성 및 비교, 운영 효율성 평가의 세 단계로 구성된다. 우선, 32-14 활주로와 북측연결유도로, 제3터미널 계류장을 포함하는 에어사이드 영역을 대상으로 시뮬레이션에 필요한 입력 데이터를 수집·분석하고, 이를 바탕으로 공항 운영 시뮬레이션 모형을 구축한다. 다음으로, 연결유도로 구성 방식에 따라 단선 및 복선 연결유도로 구성된 두 가지 운영 시나리오를 설정하고, 시간당 운항 수요가 각각 70대 및 140대인 두 가지 수요 조건 하에서 TAAM 시뮬레이션을 수행한다. 마지막으로, 시뮬레이션 결과를 비교·분석하여 운영 효율성을 평가하고, 복선 연결유도로의 도입이 공항 운영에 미치는 영향을 정량적으로 도출한다.

II. 분석 기법 고찰

시뮬레이션은 현실 세계의 시스템을 컴퓨터 기반 모델로 구축하고 이를 재현하여 다양한 상황을 분석하는 기법으로, 공항처럼 복잡한 환경에서 운영 시나리오를 실험하고 최적의 방안을 도출하는 데 널리 활용된다. 특히, 시뮬레이션은 가상의 시나리오를 기반으로 특정 조건 변화가 시스템에 미치는 영향을 예측하고, 이를 통해 운영 효율성을 높일 수 있는 전략을 도출하는 데 효과적이다. 일반적으로 항공교통 분야에서 사용되는 시뮬레이션 모형은 Real-time 시뮬레이션과 Fast-time 시뮬레이션으로 구분되며, 각 모형의 주요 특징은 다음과 같다.

Real-time 시뮬레이션은 현실 세계의 1초가 시뮬레이션 내에서도 동일한 1초로 진행되는 모형으로, 조종사나 관제사 등 실제 운영 인력이 직접 참여하는 모의 비행 또는 관제 훈련 시뮬레이션이 이에 해당한다. 이 모형의 주요 목적은 운영자의 훈련뿐 아니라, 설계 단계에서 파악하기 어려운 인적요인 및 잠재적 안전 문제를 사전에 식별하는 데 있다. 이를 통해 실제 환경에서 발생할 수 있는 위험 요소를 사전에 분석하고 대응 전략을 마련할 수 있다. 다만, 장비 구축에 많은 시간과 비용이 소요되며, 현실 시간과 동일하게 진행되기 때문에 분석 시간에도 제약이 있어, 다양한 시나리오 분석이 어렵다는 한계가 있다.

Fast-Time 시뮬레이션은 현실 시간보다 빠른 속도로 시뮬레이션을 실행하여 다양한 시나리오를 신속하게 분석할 수 있는 모형이다. 특히 공항의 계획 단계에서 다양한 시설 설계안의 수용 능력과 운영 효율성을 평가할 때 일반적으로 활용된다. 이러한 Fast-Time 시뮬레이션은 모형의 정밀도(level of detail)에 따라 거시적(macro), 중간 수준(meso-scopic), 미시적(micro) 모형으로 나뉘며, 각 모형은 시뮬레이션의 표현 범위와 분석 정확도 수준에 차이를 가진다. 거시적 시뮬레이션은 변수 간의 함수 관계를 기반으로 시스템의 전반적인 동작을 예측하며, 여러 가정을 통해 단순화된 분석을 수행한다. 이로 인해 실제 운영 환경과는 차이가 발생할 수 있으나, 모델 구축이 간단하고 비용이 적게 들어 공항 정책 수립이나 초기 계획 단계에서 유용하게 활용된다. 반면, 미시적 시뮬레이션은 항공기, 유도로, 활주로 등 개별 요소의 움직임을 상세히 모사하여, 공항 내 운영 흐름을 정밀하게 분석할 수 있다. 구축과 운용에 더 많은 시간과 비용이 소요되지만, 시설 설계 검토와 운영 최적화 측면에서는 높은 정확도를 제공한다.

또한, Fast-time 항공교통 시뮬레이션은 분석 대상의 공간적 범위에 따라 i) Apron and Taxiway, ii) Runway and Final Approach, iii) Terminal Airspace, iv) En-route Airspace, v) Gate-to-Gate 분석 모형으로 구분된다. 일반적으로 거시적 및 중간 수준 모형은 특정 구간 내의 국지적인 흐름 분석에 중점을 두는 반면, 미시적 모형은 Gate-to-Gate 전체 구간을 대상으로 하여 항공기의 전 이동 과정을 통합적으로 분석한다. 이 과정에는 출도착 공항의 지상 이동 시설, 절차, 항로 등(i~iv 범위)이 모두 포함되며, 운항 전 과정이 시뮬레이션에 반영된다. 대표적인 미시적 시뮬레이션 모형으로는 TAAM, SIMMOD, AirTOp 등이 있으며, Table 1에서는 이러한 Fasttime 항공교통 시뮬레이션 모형의 분류를 정리하고 있다.

본 연구는 Fast-Time 시뮬레이션을 활용하여 인천국제공항 북측연결유도로의 복선화가 단선 구조 대비 운영 효율성에 미치는 영향을 정량적으로 비교·평가하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 항공기 지상이동, 활주로 용량 등 공항 운영의 핵심 요소를 정밀하게 반영할 수 있는 Jeppesen(Boeing Company)사의 TAAM(total airspace and airport modeler)를 분석 도구로 활용하였다.

Table 1. Classification of fast-time simulation models by level of detail and spatial scope

구분	Macro- scopic	Meso- scopic	Micro- scopic
Apron and taxiway	-	-	SIMMOD, RAMS, TAAM, AirTOp
Runway and final approaches	LMI runway capacity model FAA airfield capacity model Delays, AND	NASPAC, TMAC, FLOWSIM, ASCENT	
Terminal airspace	-		
En-route airspace	ASIM SDAT(FAA) DORATASK		

TAAM은 Eurocontrol의 검증 결과, 항공기의 4차원 이동 경로를 실제값 대비 약 3~4% 오차 범위 내에서 재현할 수 있는 높은 정밀도를 갖춘 것으로 평가되었으며[1], 미국 FAA 또한 이를 시카고 오헤어 국제공항의 환경영향평가에 적용해 실무적 타당성을 입증한 바 있다[2]. 또한, 공항 혼잡도 분석이나 비정상 운항 상황의 시뮬레이션 등 다양한 분야의 연구에서도 널리 활용되고 있다[3],[4].

III. 분석 설계 및 입력자료 구성

3.1 분석 시나리오 설정

본 연구에서는 시뮬레이션 분석 시나리오를 연결유도로 설계 대안과 항공기 운항수요에 따라 구분하였다.

32-14 활주로 북측연결유도로의 설계 대안은 단선과 복선 두 가지 형태로 나뉘며, 이를 반영하여 두 가지 분석 시나리오 및 시나리오별 유도로 운영 방안을 설정하였다. 단선 연결유도로의 경우, 사용활주로 방향(North flow/South flow)에 따라 연결유도로를 이용하는 항공기 출·도착 유형이 달라진다. 예를 들어, North flow 운영 시 연결유도로는 도착 항공기 전용으로 사용되며, South flow 운영 시 출발 항공기 전용으로 활용된다. 반면, 복선 연결유도로는 활주로 운영 방향과 관계없이 출발·도착 항공기가 모두 이용할 수 있도록 설정하였다(Table 2).

Table 2. Scenarios of connection taxiway configuration

운항수요 (대/시간)	연결유도로 유형	운영 방향
70	단선	North flow
		South flow
	복선	North flow
		South flow
140	단선	North flow
		South flow
	복선	North flow
		South flow

또한, 수요 증가에 따른 연결유도로 대안별 지상 이동 시간 변화를 분석하기 위해, 항공기 운항수요를 시간당 70대와 140대로 구분하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 시간당 140대는 32-14 활주로를 포함한 인천국제공항 전체 활주로 수용능력을 반영하여 설정하였으며, 각 수요 조건에서 단선 및 복선 연결유도로의 운용 방식이 지상 이동 효율에 미치는 영향을 정량적으로 비교·분석하였다(Fig. 2).

3.2 기초자료 수집

3.2.1 공항 기본정보 및 시설 자료

TAAM 시뮬레이션에 입력되는 공항의 기본정보는 Jeppesen 데이터를 기반으로 인천국제공항의 ARP (airport reference point) 좌표, Field Elevation, Bearing 등을 입력하였다. 기존 4분 활주로는 AIP (aeronautical information publication)에 명시된

내용을 반영하였으며, 32-14 활주로는 시설 계획안에 따라 설정하였다.

인천국제공항은 공항 지상 운영의 효율성과 항공사 운영의 최적화를 위해 전체 주기장을 10개 구역으로 구분하여 운영하고 있으며, 각 구역은 Apron 1/2/3/4, Cargo Apron 1/2, Maintenance Apron, Deicing Apron, Isolated Security Parking Position, Run-up Area로 구성된다. 본 연구에서는 이러한 구역 구분을 기반으로 시뮬레이션 모델을 구축하였다.

3.2.2 항공기 운항 관련 자료

시뮬레이션에 적용된 항공기 운항 성능은 Euro-control의 BADA(base of aircraft data) 버전 3.10을 기반으로 설정하였으며, 기종 및 운항 거리(short-/medium/long haul)에 따라 이륙중량, 연료 소모량, 순항 고도, 속도, 이착륙 거리 등의 주요 성능 정보를 반영하였다.

항공기 지상활주 속도는 설계속도와 MLAT(다변측 정감시시스템) 자료 분석을 통해 설정하였다(Table 3). 도착 항공기의 Touchdown Distance는 MLAT 및 인천국제공항공사 제공 데이터를 기반으로 활주로 별 평균값을 적용하였고, 제5활주로에는 기존 최솟값인 550m를 반영하였다. 항공기 Push-back 특성은 항공기 등급에 따라 Pause 시간을 다르게 설정하였으며, ASDE(지상감시레이더) 자료를 분석하여 항공기 등급별 Pause 시간을 도출하였다. 중형급(C, D급) 및 대형급(E, F급) 항공기 모두 6분으로 적용하였으며, Push-back 속도는 TAAM 시뮬레이션 모형의 기본값인 3knots를 적용하였다.

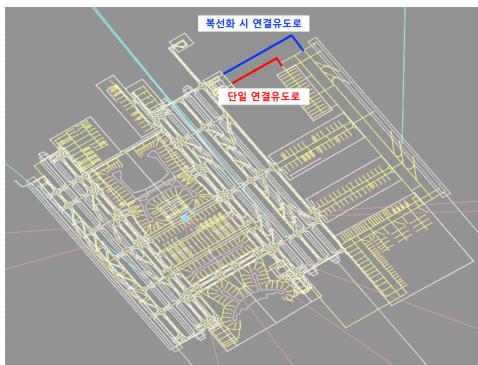


Fig. 2. Layout comparison of single and dual connection taxiways

Table 3. Taxiing speed settings by ground segment in TAAM simulation

구분	속도
고속탈출 유도로	45 knots
직각 유도로	25 knots (평균 23 knots + 2 knots (교차로 상 감속 보정))
계류장 내	7 knots (평균 7 knots = (출발 5 knots, 도착 9 knots))
기타	15 knots (TAAM 기본 지상활주 속도)

3.2.3 활주로 운영 방식

본 연구에서는 TAAM 시뮬레이션 내에서 인천국제공항의 5개 활주로 운영 방식을 33L-15R, 34R-16L 활주로는 출발 전용, 33R-15L, 34L-16R 활주로는 도착 전용, 32-14 활주로는 출·도착 공용으로 설정하였다.

활주로 종속성은 항공기의 이·착륙 시 활주로 간의 관계를 의미하며, 현재 인천국제공항에서는 활주로 간 독립 관계와 종속 관계가 혼합된 구조로 운영되고 있다. 33L-15R, 34R-16L 활주로는 서로 종속 관계에 있으며, 33R-15L, 34L-16R 활주로 또한 동일하게 종속 관계를 가진다. 이는 같은 그룹(쌍) 내에서 한 활주로에서 이루어지는 이·착륙이 다른 활주로의 운영에도 영향을 미친다는 것을 의미한다. 반면, 33L-15R, 34R-16L 활주로 그룹과 33R-15L, 34L-16R 활주로 그룹 간에는 독립적으로 운영되어, 한 그룹에서의 이·착륙이 다른 그룹의 활주로 운영에 영향을 미치지 않는다.

본 연구에서는 인천국제공항의 활주로 간 이·착륙 항공기 운영 방식과 그에 따른 종속 관계를 고려하여 분리

기준을 Table 4에 정리하였다. 또한, 활주로 간 종속성 및 선·후행 항공기의 출·도착 조합에 따라 5가지 형태의 분리 기준을 적용하였으며, 이에 대한 상세 내용은 Table 5에 정리하였다. 본 연구에서는 인천국제공항을 입·출항하는 항공기가 통과하는 주요 Fix 4개 그룹(KARBU/EGOBA, GUKDO/OSPOT, OLMEN/-BOPTA, REBIT/NOPIK)을 선정하고, 각 활주로의 입·출항 절차의 방향성에 따라 East Bound, South Bound, West Bound로 구분하였다(Fig. 3). 이를 바탕으로, 인천국제공항 주변 공역의 원활한 교통 흐름을 위해 입·출항 항공기의 방향성과 활주로 간 종속성을 고려하여 각 활주로 별 운영규칙과 운영 우선순위를 설정하였으며, 이에 대한 세부 기준은 Table 6에 정리하였다.

3.3 운항 스케줄 설정

운항 스케줄은 시뮬레이션 구동에 있어 중요한 입력값으로, 본 과업에서는 다음과 같은 절차를 따라 작성하였다.

Table 4. Application of aircraft separation criteria by runway pairings

선행 후행	33L-15R 활주로				33R-15L 활주로				34R-16L 활주로				34L-16R 활주로				32-14 활주로			
	A-D	A-A	D-D	D-A	A-D	A-A	D-D	D-A	A-D	A-A	D-D	D-A	A-D	A-A	D-D	D-A	A-D	A-A	D-D	D-A
33L-15R 활주로	-		S1	-	-			S2	독립 활주로				독립 활주로				독립 활주로			
33R-15L 활주로	S3		-		-	S4		-	독립 활주로				독립 활주로				독립 활주로(south flow인 경우, 최저 2nm의 사선 분리)			
34R-16L 활주로	독립 활주로				독립 활주로				-	S1		-	- S2				독립 활주로			
34L-16R 활주로	독립 활주로				독립 활주로				S3	- S4				-	S4		독립 활주로			
32-14 활주로	독립 활주로				독립 활주로 (south flow인 경우, 최저 2nm의 사선 분리)				독립 활주로				독립 활주로				S5	S4	S1	S2

Table 5. Operational definitions of runway separation scenarios (S1-S5)

구분	정의
S1	D-D (출발→출발) 항공기 간 분리 기준으로 RECAT-EU 분리 기준 가운데 시간 분리 적용
S2	D-A (출발→도착) 항공기 간 분리 기준으로 runway capture distance 적용
S3	A-D (도착→출발) 항공기 간 분리 기준으로 도착 항공기가 touchdown 후 이륙
S4	A-A (도착→도착) 항공기 간 분리 기준으로 RECAT-EU 분리 기준 가운데 거리 분리 적용
S5	단선 활주로에서의 A-D (도착→출발) 항공기 간 분리 기준으로 도착 항공기가 활주로 이탈 후 이륙

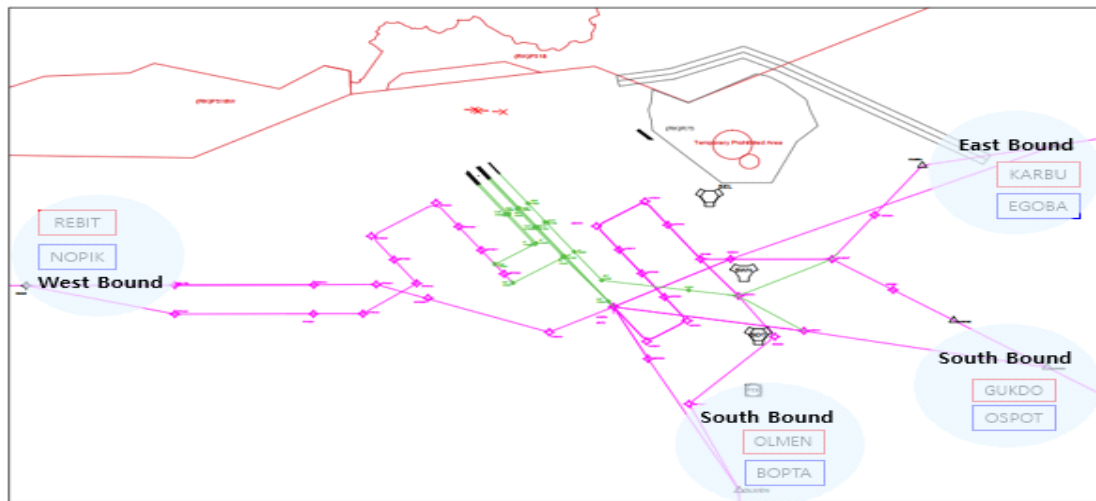


Fig. 3. Arrival and departure fix assignments at Incheon International Airport

Table 6. Runway operation rules and separation impacts by runway pairing

구분	운영 방식	주요 운항 방향	분리기준 영향
33L-15R 활주로	이륙 전용	South bound	33R-15L 활주로 착륙 시 출발 항공기 분리기준 영향
33R-15L 활주로	착륙 전용	South bound	33L-15R 활주로 이륙 시 도착 항공기 분리기준 영향
34R-16L 활주로	이륙 전용	West bound	34L-16R 활주로 착륙 시 출발 항공기 분리기준 영향
34L-16R 활주로	착륙 전용	West bound	34R-16L 활주로 이륙 시 도착 항공기 분리기준 영향
32-14 활주로	이·착륙 전용	East bound	단선활주로 출·도착 항공기 분리기준 및 33R-15L 활주로 착륙 시 도착 항공기 분리기준 영향 (south flow인 경우)

먼저, 인천국제공항의 IIS(integrated information system)에서 수집된 2019년의 운항 실적자료를 분석하여 첨두월(peak month, PM)을 선정하고, 해당 첨두월의 일평균(average day peak month, ADPM) 교통량을 산정하였다. 이어서, 첨두월 중에서 평일 여부, 기상 조건, 활주로 이용 방향 등 다양한 요소를 고려하여 첨두월의 일평균 교통량과 가장 유사한 교통량을 보인 하루를 대표일로 설정하였다. 이후, 선정된 대표일의 출발 및 도착 항공기 비율을 반영하여 대표 시간을 선정하고, 해당 시간의 IIS 데이터를 추출하였다. 마지막으로, 선정된 대표 시간의 Fix 이용률과 항공기 기종 분포를 고려하여 4시간 기준의 항공기 운항 스케줄을 작성하였다.

3.3.1 첨두월·대표일·대표시간대 선정

운항 스케줄 생성을 위해서는 기준연도의 ADPM 분

석이 필요하며, 본 연구에서는 코로나19로 인한 수요 변동을 배제하고자 2019년을 기준연도로 설정하였다. 또한, 운항수요가 가장 높은 2개월 동안의 총 운항 횟수를 해당 기간의 일수로 나눈 값을 ADPM 운항수요로 정의하였으며, 이를 기반으로 대표일을 선정하였다.¹⁾

2019년 인천국제공항의 IIS 자료를 활용하여 월별 운항수요를 분석한 결과, 운항 횟수가 가장 많았던 2개월은 8월(35,580회)과 7월(35,232회)로 확인되었으며, 첨두 2개월의 일평균 운항 횟수는 1,142회/일로 분석되었다(Fig. 4). 이후, 첨두월 중에서 이 일평균 운항 횟수와 유사한 운항 실적을 보이며 대표일 선정 기준을 충족하는 날짜를 대표일로 선정하였다. 대표일 선정 기준은 평일이어야 하며, 동일한 활주로 방향을 사용하

1) ICAO Doc 9184 Part 1 Airport Master Planning.

고, 특히 기상 상황이 없어야 한다. 또한, 출발, 도착 항공기의 비율이 50:50에 가까운 분포를 유지해야 한다. 이러한 조건을 모두 충족하는 날짜로 2019년 8월 22일(목요일, 1,154회/일)이 선정되었다(Fig. 5).

선정된 대표일의 시간별 출발 및 도착 항공기 비율을 분석한 결과, 출·도착 비율이 50:50에 가장 근접한 시간대인 20시를 대표 시간대로 결정하였다(Fig. 6).

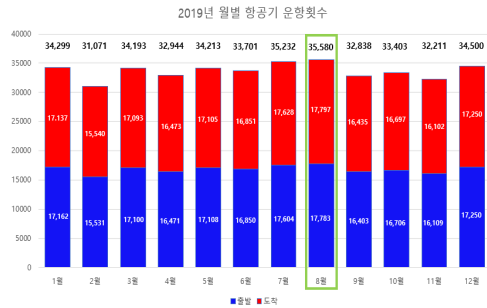


Fig. 4. Monthly flight distribution at Incheon International Airport (2019)

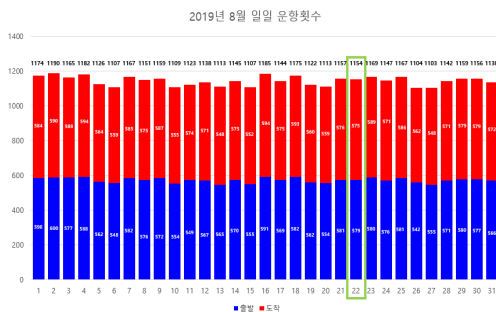


Fig. 5. Daily flight distribution at Incheon International Airport (August, 2019)

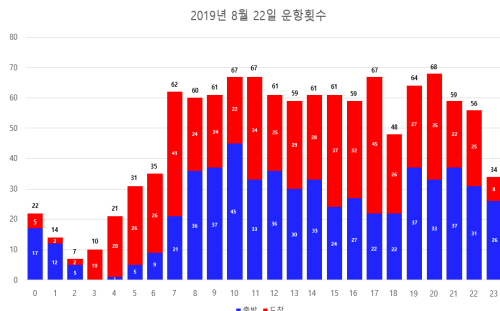


Fig. 6. Hourly flight distribution at Incheon International Airport (August 22, 2019)

3.3.2 시뮬레이션 입력 스케줄 작성

IIS 데이터 분석을 통해 대표 시간대(20시) 운항한 출발편(33대)과 도착편(35대)의 Fix별 운항 횟수, 비율 및 누적 비율을 산출하였으며, 입출항 Fix의 누적 확률을 활용하여 항공기 운항 스케줄의 각 항공편에 적절한 입출항 Fix를 배정하였다. 항공기 기종은 동일 시간대의 항공기 등급, 기종, 여객/화물 여부 분석을 통해 기종별 누적 확률분포를 도출한 후, 이를 활용하여 각 항공편에 무작위로 배정하였다. 운항노선은 Fix 비율에 따라 방향성을 분류하여 설정하였으며, East Bound는 32-14 활주로, West Bound는 33R-15L, 34L-16R 활주로, South Bound는 기존 활주로에 우선 배정하였다. 출·도착 시각은 균등 분포를 기반으로 운항수요에 맞게 무작위 생성하였다. 최종적으로, 침두시간이 2시간 지속된다는 가정 하에, 1시간 Warming-up, 2시간 분석 구간, 1시간 Cooling-down을 포함한 총 4시간의 운항 스케줄을 생성하였다.

IV. 시뮬레이션 모형 구축

본 연구에서는 인천국제공항의 CAD 도면을 Node와 Link로 구분하는 단순화 작업을 진행하여 좌표체계를 변경하였다. 이후, 진북 기준의 도면 정보를 자북 기준에 맞게 도면을 회전시키고, 전처리된 자료를 바탕으로 단선 연결유도로와 복선 연결유도로 각각의 시뮬레이션 모델을 구축하였다(Fig 7, 8).

TAAM 시뮬레이션 모형은 주기장, 유도로, 활주로, 접근관제구역 및 항로에서 항공기 이동과 관련된 관제 및 운영 규칙을 구현할 수 있는 기능을 제공한다. 이를 활용하면 실제 공항 운영과 유사한 시뮬레이션 모델

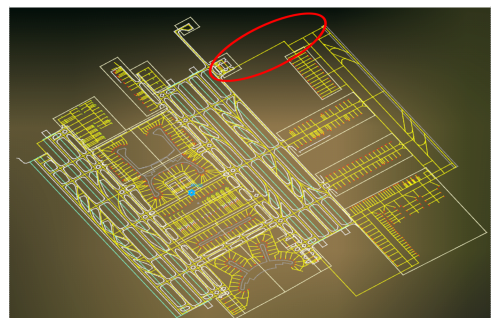


Fig. 7. Simulation layout with single connection taxiway

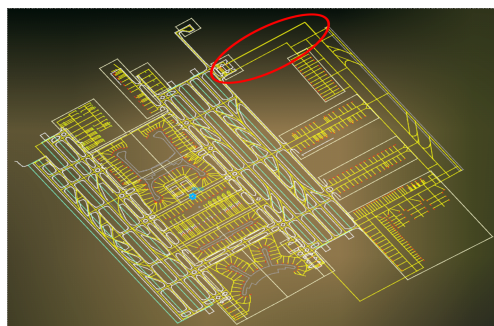


Fig. 8. Simulation layout with dual connection taxiway

구축이 가능하며, 활주로·유도로·게이트 사용 규칙, SID/STAR 선택 로직, Pushback 제한 등의 운항 규칙을 적용할 수 있다. 또한, Taxiing, Gate Usage, Flow Control, Sequencing 등 항공기 이동과 관련된 다양한 제약조건을 반영할 수 있다.

모델 구축 과정에서는 TAAM 사용자 가이드라인과 참조 매뉴얼을 참고하여 시뮬레이션 설정과 구조의 정합성을 확보하였다[5],[6].

V. 시뮬레이션 수행 및 결과 분석

5.1 시뮬레이션 수행 과정

구축된 모델을 활용하여 시뮬레이션을 수행하고 결과를 분석하는 과정은 다음과 같다.

시나리오 설정을 위해 32-14 활주로를 포함한 인천 국제공항의 활주로 수용량을 반영하여, 시간당 항공기 운항수요 기준으로 70대와 140대의 두 가지 운항 스케줄을 구성하였다. 이를 시뮬레이션 모델에 적용하여 단선 및 복선 연결유도로 시나리오별 분석을 수행하였으며, 확률적 요소로 인한 결과의 변동성을 최소화하기 위해 동일한 조건에서 각 5회 이상 반복 실행하였다. 마지막으로, 시뮬레이션 결과 분석을 통해 평균 지상 이동 시간과 평균 이동 거리를 산출하고, 이를 바탕으로 32-14 활주로 복측연결유도로 복선회에 따른 경제적 편익을 평가하였다.

5.2 시뮬레이션 수행 결과

5.2.1 대안별 지상 이동 경로

인천국제공항 제2터미널 게이트(혹은 탑승동)에서

출발하여 32-14 활주로 시단까지 이동하는 출발 항공기(파란색)와 32-14 활주로 고속탈출유도로를 통해 제2터미널 게이트(혹은 탑승동)으로 이동하는 도착 항공기(빨간색)의 지상 이동 경로를 연결유도로 설계 대안 별로 비교하면 Fig. 9, Fig. 10과 같다.

단선 연결유도로 운영 시, North Flow(RWY 32) 조건에서는 제2터미널 게이트(또는 탑승동)에서 출발하여 32-14 활주로에서 이륙하는 항공기가 제3터미널 계류장을 반드시 통과해야 한다. 반대로, South Flow(RWY 14) 운영 시에는 32-14 활주로에 착륙한 항공기가 제1·2터미널로 이동하는 과정에서 제3터미널 계류장을 지나게 된다. 이 과정에서 제3터미널을 이용하는 출·도착 항공기와 이동 경로가 중첩되며, 혼잡이 발생할 가능성이 높다. 이에 따라 제3터미널 계류장 구역 내 Hot Spot이 형성될 것으로 예상된다.

반면, 복선 연결유도로 운영 시 North Flow 조건에서는 제2터미널 게이트(또는 탑승동)에서 출발하여 32-14 활주로에서 이륙하는 항공기가 제3터미널 계류

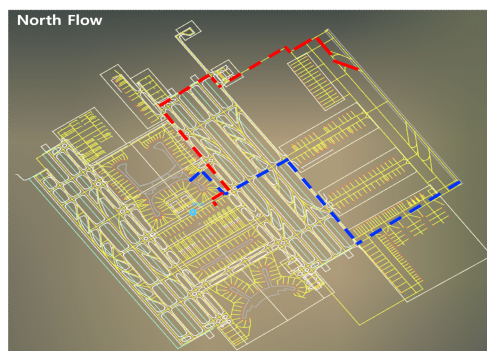


Fig. 9. Aircraft ground movement path (single connection taxiway, north flow)

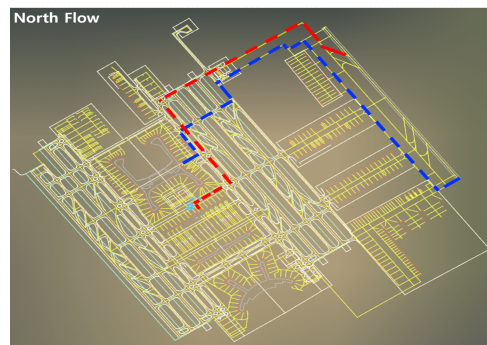


Fig. 10. Aircraft ground movement path (dual connection taxiway, north flow)

장을 통과하지 않아도 된다. 기존 단선 연결유도로는 주로 32-14 활주로에서 이륙하는 출발 항공기가 이용했으나, 복선 연결유도로를 도입하면 32-14 활주소에 착륙한 도착 항공기의 이동 경로로도 활용할 수 있다. 이를 통해 지상 이동 경로가 분산되고, 제3터미널 구역의 혼잡이 완화되며, 전반적인 공항 운영 효율성도 향상될 것으로 분석된다.

5.2.2 대안별 지상 이동 시간 및 거리

Table 7은 시뮬레이션 분석을 통해 시간당 수요 변화(70대/시간, 140대/시간)에 따른 북측연결유도로 설계 대안별 지상 이동 시간 및 지상 이동 거리를 정리한 것이다.

분석 결과, 시간당 70대 수요 발생 시 복선 연결유도로를 운영할 경우, 단선 연결유도로 대비 지상 이동 거리 및 시간이 증가하는 것으로 나타났다(North Flow: +0.3km, South Flow: +0.9km)(North Flow: +0.5분, South Flow: +1.4분). 즉, 시간당 70대의 수요가 발생하는 경우에는 단선 연결유도로 운영이 효율적인 공항 운영을 가능하게 할 것으로 판단된다.

반면, 시간당 140대 수요 발생 시 복선 연결유도로를 운영하면 단선 연결유도로 대비 지상 이동 거리는 증가하지만(North Flow: +0.6km, South Flow: +0.3km), 지상 이동 시간은 오히려 감소하는 것으로 분석되었다(North Flow: -11.1분, South Flow: -2.6분). 이는 복선 연결유도로 운영 시 항공기 지상 이동 흐름이 원활해지면서 거리 증가에도 불구하고, 이동 시간이 단축될 수 있음을 의미한다. 따라서, 시간당 140대의 높은 수요가 발생하는 경우에는 복선 연결유도로가 공항 운영 효율성 향상에 크게 기여할 것으로 분석된다. 또한, 본 연구에서는 북측연결유도로 설계 대안별 지상 이동 시간 및 이동 거리를 종합적으로 평가하기 위해 가중평균을 적용하였다. 인천국제공항의 2019년 실제 운항 데이터를 바탕으로 North Flow와 South Flow의 발생 비율을

7:3(N:S=7:3)으로 설정하고, 이를 반영하여 가중평균 지상 이동 시간 및 거리를 산출하였다.

분석 결과, 시간당 70대 운항수요에서는 복선 연결유도로 운영 시 지상 이동 거리가 증가함에 따라, 지상 이동 시간이 7.7분에서 8.5분으로 약 0.8분(9%) 증가하는 것으로 나타났다. 이는 복선 연결유도로 인한 구조적 거리 증가가 저수요 상황에서는 시간 효율을 오히려 저해할 수 있음을 의미한다. 반면, 시간당 140대 운항수요 조건에서는 복선 연결유도로 인한 개선 효과가 크게 나타났다. 단선 연결유도로 운영할 경우, 평균 지상 이동 시간은 21.6분이었으나, 복선 연결유도로 전환 시 13.0분으로 단축되어 약 8.6분(66%)의 시간 절감 효과를 보였다.

분석 결과를 바탕으로, 시간당 운항수요에 따른 단선 및 복선 연결유도로의 가중평균 지상 이동 시간을 비교한 결과, 약 76대/시간 시점에서 두 방식의 이동 시간이 약 9분으로 유사해지는 전환점이 확인되었다(Fig. 11). 따라서 해당 전환점은 복선 연결유도로의 도입이 실질적인 지상 이동 시간 절감 효과를 제공하는 수요 수준의 기준점으로 해석될 수 있으며, 시간당

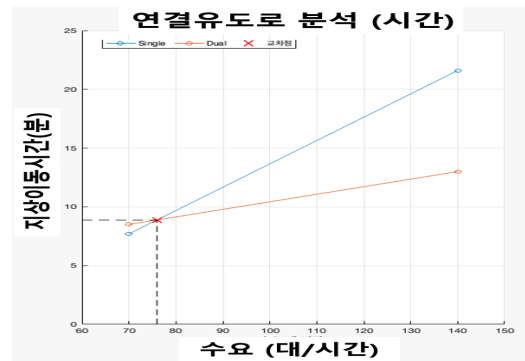


Fig. 11. Weighted average ground movement time under single and dual connection taxiway scenarios

Table 7. Ground movement time and distance by traffic demand and connection taxiway type

구분	연결유도로 유형	지상 이동 시간 및 지상 이동 거리		
		North flow	South flow	가중평균 (N:S=7:3 적용)
70 (대/시간)	단선	7.8분 (3.9km)	7.6분 (3.7km)	7.7분
	복선	8.3분 (4.2km)	9.0분 (4.6km)	8.5분
140 (대/시간)	단선	24.8분 (3.4km)	14.1분 (4.2km)	21.6분
	복선	13.7분 (4.0km)	11.5분 (4.5km)	13.0분

약 76대 이상의 운항수요가 발생하는 조건에서는 복선 연결유도로의 운용 효율성이 단선 대비 명확한 우위를 보인다. 따라서 연결유도로의 복선화는 향후 운항수요 증가에 대비한 운영 안정성과 지상이동 효율성 확보를 위한 타당한 설계 대안으로 평가되며, 이는 공항 내 항공기 흐름의 원활화와 지연 감소, 운항 정시성 향상 등에 기여할 수 있다.

5.3 경제적 편익 산정

본 절에서는 복측연결유도로 복선화 시 발생하는 지상 이동 시간 절감 효과를 정량화하고, 이에 따른 연도별 경제적 편익을 산정하였다. 분석 대상 기간은 32-14 활주로 개항이 예정된 2034년부터 2050년까지이며, 산정 절차는 1) 연도별 항공기 지상 이동 시간 감소량 산정, 2) 항공기 운항비용 절감 편익 및 여객 이동 시간 절감 편익 산출의 두 단계로 구분된다.

편익 산정에는 복선 연결유도로 전환 시 항공기당 지상 이동 시간의 감소분을 적용하고, 시간대별 운항 대수를 반영하여 연간 총 절감 시간을 도출하였다. 이후 이를 기반으로 연도별 편익을 산정하였으며, 2025년 기준 현재가치로 환산하여 평가하였다.

5.3.1 항공기 지상 이동 시간 감소분 산정

장래 연도별 항공기 지상 이동 시간 감소분은 장래 연간 운항수요를 일별 및 시간대별 수요로 환산하여 산정하였다. 이에 따라 2034년부터 2050년까지의 연간 운항수요를 예측한 후, 각 연도별 운항수요에 2019년 기준 일별·시간대별 운항수요 비율을 적용하여 장래 시간대별 수요를 도출하였다.

예를 들어, 2034년 1월 3일 9~10시의 운항수요는 해당 연도의 연간 운항수요(634,618회)에 2019년 동일 시간대의 비율(0.0156%)을 곱하여 산정하였고, 이 결과 약 99회로 나타났다($634,618 \times 0.0156\% = 98.94 \approx 99$ 회). 산정된 시간대별 수요를 바탕으로, 각 시간대에 대해 복선 연결유도로 운영 시 단선 연결유도 대비 항공기당 평균 지상 이동 시간 절감값을 적용하였다(Fig. 12). 예를 들어, 시간당 운항 수요가 99대인 경우 항공기당 평균 약 3분의 지상 이동 시간 절감이 발생하며, 전체 감소 시간은 $99 \text{대} \times 3 \text{분} = 297 \text{분}$ 으로 계산된다.

이와 같은 계산을 모든 시간대에 반복 적용한 후 합

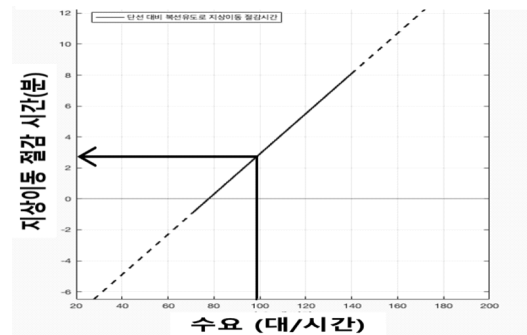


Fig. 12. Taxi time reduction by dual connection taxiway compared to single taxiway

산하여 연간 총 지상 이동 시간 감소분을 도출하였다. 이때 산정된 지상 이동 시간 감소분은 전체 운항편을 기준으로 한 값이며, 실제 편익 산정은 제1·2터미널과 32-14 활주로 사이를 운항하는 항공편만을 대상으로 하였다. 따라서 편익 산정을 위한 지상 이동 시간 감소분은 연도별 총 지상 이동 시간 감소분에 해당 연도의 대상 항공편 운항 횟수를 총 운항 횟수로 나눈 비율을 곱하여 산정하였다. 대상 항공편 운항 횟수는 인천국제공항의 터미널 용량 비율(제1·2터미널: 1.1억 명, 제3터미널: 0.2억 명)과 활주로 사용 비율(33L-15R, 33R-15L 활주로: 40%, 34R-16L, 34L-16R 활주로: 40%, 32-14 활주로: 20%)을 적용하여 연도별 총 운항 수로부터 추정하였다.

5.3.2 장래 연도별 편익 산정

항공기 지상 이동 시간 감소에 따른 편익은 항공기 운항비용 절감 편익과 여객 이동 시간 절감 편익으로 구분하여 평가하였다.

항공기 운항비용 절감 편익은 대상 항공편 기준으로 도출된 지상 이동 시간 감소분(분 단위)을 60으로 나누어 시간 단위로 변환한 후, 이에 항공기 시간당 운영 비용을 곱하여 연도별 미래가치 기준의 편익을 계산하였다. 이후 해당 값을 사회적 할인율 4.5%를 적용하여 기준연도인 2025년 기준의 현재가치로 조정하였다.

여객 이동 시간 절감 편익은 동일한 지상 이동 시간 감소값을 바탕으로, 항공편 당 평균 탑승객 수(180명)와 여객 1인당 시간 가치(18,928원/시간)를 곱하여 편익을 추정하였다. 이 경우에도 동일한 할인율을 적용하여 2025년 현재가치 기준으로 환산하였다.

두 항목을 합산하여 장래 연도별 총 경제적 편익을

Table 8. Annual economic benefits from reduced ground movement time

(단위 : 억 원)

연도	운항 횟수	대상 항공편 운항 횟수	지상 이동 시간 감소분 (분)	항공기 시간당 운영 비용 (천원)	① 항공기 운항비용 절감 편익 (현재가치)	② 여객 이 동 시간 절 감 편익 (현재가치)	총편익
2034	583,531	106,981	41,657	7,744	32	14	46
2035	601,882	110,345	78,569	7,727	57	25	82
2036	617,777	113,259	112,295	7,706	78	34	112
2037	633,546	116,150	147,363	7,688	98	43	141
2038	649,133	119,008	183,602	7,664	116	52	168
2039	664,804	121,881	221,615	7,641	134	60	193
2040	680,321	124,726	260,814	7,618	150	67	217
2041	695,479	127,504	300,606	7,596	165	74	239
2042	710,515	130,261	341,540	7,577	179	80	259
2043	725,196	132,953	382,914	7,558	191	86	278
2044	739,731	135,617	425,245	7,539	203	92	295
2045	753,857	138,207	467,691	7,521	213	96	310
2046	766,942	140,606	508,156	7,519	221	100	322
2047	779,324	142,876	547,463	7,518	228	103	332
2048	790,799	144,980	584,774	7,517	233	106	339
2049	800,860	146,824	618,185	7,516	236	107	343
2050	810,343	148,563	650,274	7,516	238	108	345
총합	-	-	5,872,762	-	2,771	1,248	4,019

도출하였으며, 주요 결과는 Table 8에 정리하였다. 사회적 할인율 및 여객 1인당 시간 가치는 「공항부분 예비타당성조사 수행을 위한 세부지침(KDI)」을 기준으로 설정하였다.

분석 결과, 북측연결유도로를 복선화할 경우 2034년부터 2050년까지의 누적 편익은 총 4,019억 원으로 나타났다. 복선 연결유도로의 공사비는 약 1,032억 원으로 추정되며, 연도별 편익을 고려할 때 2042년부터 누적 편익이 공사비를 초과하는 것으로 분석되었다. 또한, 2034년에는 약 46억 원, 2035년에는 82억 원의 편익이 발생하는 등 연도별 편익은 지속적으로 증가하는 추세를 보인다. 이에 따라, 북측연결유도로 복선화는 중장기적으로 투자비 회수가 가능하며, 운영 효율성 제고 측면에서도 경제성이 높은 설계 대안으로 판단된다.

VI. 결 론

본 연구는 시뮬레이션 분석을 통해 32-14 활주로

북측연결유도로의 두 가지 설계 대안(단선 및 복선 연결유도로)에 대해 항공기 지상이동 흐름과 이에 따른 경제적 편익을 비교·분석하였다.

분석 결과, 단선 연결유도로 운영 시 32-14 활주로를 이용하는 항공기가 제1·2터미널 및 탑승동으로 이동하는 과정에서 제3터미널 계류장 구역을 통과하게 되어, 해당 구역 내 혼잡 증가와 Hot Spot 발생 가능성이 높은 것으로 나타났다. 반면, 복선 연결유도로를 적용할 경우, 지상이동 경로가 분리되어 항공기 흐름이 원활해지며, 전체 이동 효율성이 크게 향상되는 것으로 분석되었다.

특히 시간당 운항 수요가 140대 수준에 이를 경우, 항공기당 평균 약 8.6분의 지상이동 시간 절감 효과가 나타나는 것이 시뮬레이션 결과를 통해 확인되었으며, 이는 고수요 시간대의 운영 안정성과 흐름 개선에 중요한 영향을 미칠 수 있다. 이러한 시간 절감 효과를 2034년부터 2050년까지의 기간 동안 경제적 편익으로 환산하면, 2025년 기준 현재가치로 약 4,019억 원에 달하는 비용 절감 효과가 기대된다.

따라서, 32-14 활주로 북측연결유도로의 복선화는 장래 항공기 운항수요 증가에 효과적으로 대응하고, 혼잡을 완화하며, 장기적으로 운영 효율성과 경제성을 동시에 확보할 수 있는 최적의 설계 대안으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2024년도 산업통상자원부 산업혁신인재성장지원사업(항공방산SW 전문인력양성)의 재원으로 지원을 받아 수행된 연구입니다. (RS-2024-00412499)

References

1. Sillard, L., F. Vergne, and B. Desart. TAAM Operational evaluation. eurocontrol experimental center report No. 351 - Project SIM-S-E8, Bretigny, France, Aug. 2000.
2. Federal Aviation Administration, "Chicago O'hare international airport final environmental assessment," Federal Aviation Administration, 2022, pp.4-1~4-11.
3. Zhu, Z., Hosagrahara, V. A., Lee, H., Jung, Y., and Bakowski, D. L., "Impact of general aviation operations on airport performance through fast-time simulations at charlotte douglas international airport", AIAA Aviation 2020 Forum, AIAA, Virtual Event, June 15 - 19, 2020, pp.1-12.
4. Zhu, Z., Lee, H., Hosagrahara, V. A., and Jung, Y. C., "Investigating effects of controlled flights through fast-time simulation," 2020 IEEE/AIAA 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC), IEEE, Virtual Event, Sept. 2020, pp.1-15.
5. Boesel, J., Gladstone, C., Hoffman, J., Massimini, P., Shiotsuki, C., and Simmons, B., TAAM Best Practices Guideline. MITRE Technical Report 01W0000092. McLean, Va., Sept. 2001.
6. Jeppesen, TAAM Reference Manual, 2023.