

Wake Turbulence RECAT을 적용한 활주로 절대 수용량 비교 분석

Comparative Analysis of Runway Ultimate Capacity using Wake Turbulence Re-Categorization

박정우¹ · 김휘양² · 구성관^{3*}

¹한서대학교 항공교통물류학과

²한국항공대학교 항공교통물류학부

³한서대학교 항공산업공학과

Jeongwoo Park¹ · Huiyang Kim² · Sungkwan Ku^{3*}

¹Department of Air Transportation and Logistics, Hanseo University, Chungcheongnam-do, 32158, Korea

²School of Air Transport and Logistics, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do 10540, Korea

³Department of Aviation Industrial & System Engineering, Hanseo University, Chungcheongnam-do, 32158, Korea

[요 약]

선행 항공기의 날개 끝단에서 발생하는 후류 요란으로 인해 후행 항공기는 정상적인 운항에 영향을 받을 수 있다. 현재는 항공기 최대이륙중량에 따라 4개의 카테고리 분류하여, 기준 거리별 항공기 수평 분리를 적용하고 있다. FAA 및 EUROCONTROL을 중심으로 항공기 후류 요란의 크기와 영향이 기존의 거리 분리치보다 더 작다는 것이 연구되었고, 이것을 바탕으로 분리 기준을 7개의 카테고리로 세분화한 규정(RECAT)이 제시되었다. 본 연구에서는 ICAO Doc. 10122의 초안을 이용하여 국내 공항의 RECAT 도입 필요 여부를 확인하고, 활주로 절대 수용량 계산 방법의 하나인 Harris 모델을 이용하여 인천국제공항의 절대 수용량을 산출하였다. 분석 결과 RECAT 도입에 따라 활주로 절대 수용량의 증가가 가능할 것으로 확인되었으며, 계산된 결과 및 계산에 활용한 방법은 국내 공항의 RECAT 도입 검토에 기본 자료로 활용될 수 있을 것이다.

[Abstract]

The wake turbulence at the wingtip of preceding aircraft may affect the normal operation of following aircraft. Aircraft are classified into four categories according to their maximum take-off weight, and horizontal separation is applied with this category matrix. The FAA and EUROCONTROL revealed that the magnitude and effect of preceding aircraft wake turbulence were smaller than the current distance separation minima suggest. This new information presents the opportunity for revising wake turbulence minima into seven categories (RECAT). This paper confirms the feasibility of implementing RECAT at major airports in South Korea using the draft of ICAO Doc. 10122. The paper also calculates the ultimate runway capacity of Incheon International Airport in South Korea using the Harris Model and comparatively analyzes the amount of runway capacity. As a result of the analysis, it was confirmed that the implementation of RECAT could increase the ultimate runway capacity of Incheon International Airport. This paper's calculation methods and results can be used as primary data for implementing RECAT in other airports.

Key word : Analytical Capacity Models, Aviation System Block Upgrade, RECAT, Runway Capacity, Wake Turbulence.

<https://doi.org/10.12673/jant.2021.25.6.498>



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 December 2021; Revised 5 December 2021

Accepted (Publication) 25 December 2021 (30 December 2021)

*Corresponding Author: Sungkwan Ku

Tel: +82-41-671-6246

E-mail: skku@hanseo.ac.kr

I. 서론

항공 교통량을 나타내는 지표는 RPKs (revenue passenger-kilometers), 여객 톤-킬로(passenger tonne-kilometers), 여객·화물 처리량, 운항 편수 등이 있다. 그중 RPKs란 유상 승객의 숫자와 이동 거리의 곱을 나타낸 것으로, 항공 교통량을 나타내는 주요 지표 중 하나이다. 글로벌 항공 수요가 계속해서 늘어남에 따라 2010년부터 2019년까지의 전 세계 PRKs 수치는 그림 1과 같이 매년 증가하고 있다[1].

국제민간항공기구(ICAO : international civil aviation organization)는 늘어나는 항공 교통량을 더욱 효율적으로 운영하기 위해서 각 계약국에 항공 시스템 전환(ASBU: aviation system block upgrade)의 시행을 권고하였다. ASBU는 ICAO 계약국들의 항공교통 효율성 증대를 위한 미래 항공 시스템 전환 계획으로 총 22개의 스레드(thread)로 이루어져 있다. 그중 항공기 후류 요란(WAKE) 스레드는 단계별로 항공기의 후류 요란 기준을 개선하는 계획으로, 먼저 후류 요란 등급을 4개에서 7개로 세분화하는 RECAT(re-categorization)을 실시한다. 이후 항공기 간의 분리를 정적인 형태의 항공기 기종별(pair-wise) 분리로 발전시킨 뒤, 최종적으로는 바람과 항공기 트랙픽을 고려하여 동적으로 항공기를 분리하는 개념이다.

본 연구는 RECAT 도입에 따른 활주로 수용량 변화량의 비교 분석을 목적으로 하여 국내 주요 공항의 RECAT 도입의 가능성 평가 및 인천국제공항의 활주로 용량을 비교 분석하였다. 도입 가능성의 평가는 ICAO의 Doc. 10122의 초안을 통해 수행하였으며, 활주로 절대 수용량은 Harris 모델을 사용하여 계산하고 비교하였다.

본 논문은 2장에서 ASBU를 중심으로 RECAT의 개념에 대해 살펴보고, 3장에서 국내외의 RECAT 적용 사례와 준용 규정을 확인한 후 국내 주요 공항의 RECAT 도입에 관한 평가를 하였다. 4장에서는 활주로의 절대 용량을 계산하는 Harris 모델을 이용하여 인천국제공항의 활주로 수용량 변화를 측정 한 후, 5장에서 결론을 도출하였다.

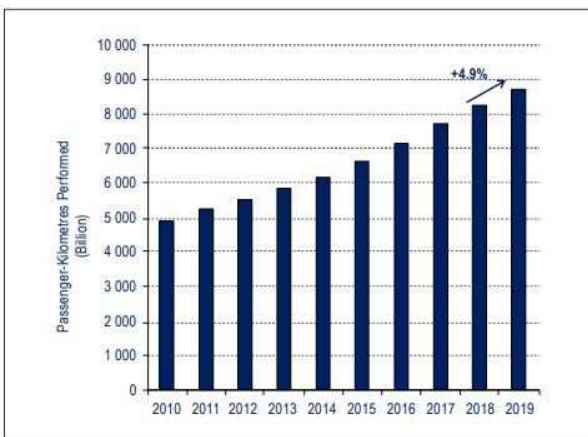


그림 1. 2010년부터 2019년까지 RPKs 수치 변화[1]

Fig. 1. RPKs form 2010 to 2019[1]

II. 이론적 배경 및 선행연구 고찰

2-1 후류 요란

후류 요란(WAKE : wake turbulence)이란 항공기 날개 끝단(wing tip)에서 발생하는 난류다. 항공기 날개의 윗면과 아랫면의 압력 차이로 인해 양력이 발생하게 되는데, 이때 날개의 끝단에서는 압력의 차이로 공기가 위로 말려들어 그림2와 같은 형태의 후류 요란이 발생한다. 선행 항공기에서 발생한 후류 요란으로 인해 후행 항공기는 항공기가 회전하는 현상(induced roll), 고도 상실, 상승률 제한, 기체 구조에 추가적 하중 부여 등의 영향을 받을 수 있다. 후류 요란으로 인해 발생할 수 있는 위험을 최소화하기 위해서 ICAO는 최대이륙중량(MTOW : maximum take off weight)에 따라 표1과 같이 항공기를 4개의 등급으로 구분하여 항공기의 수평 분리를 규정하고 있다.

2-2 ASBU(aviation system block upgrade)

ASBU는 ICAO의 모든 계약국의 항행 능력의 향상을 위해서 각 계약국이 이행해야 하는 사항들을 기술해둔 문서이다. 2012년에 개최된 제12차 세계 항행 회의(12th air navigation conference)에서 ASBU에 대한 개념이 처음 소개되었고, 2013년 ICAO 제38회 총회에서 최종적으로 의결되어 발표되었다. 이후 국제 항행 시스템의 발전을 위해 수립하고 있는 글로벌 항행 계획(GANP : global air navigation plan)의 부속서로 3년 주기마다 수정·발간되고 있다.

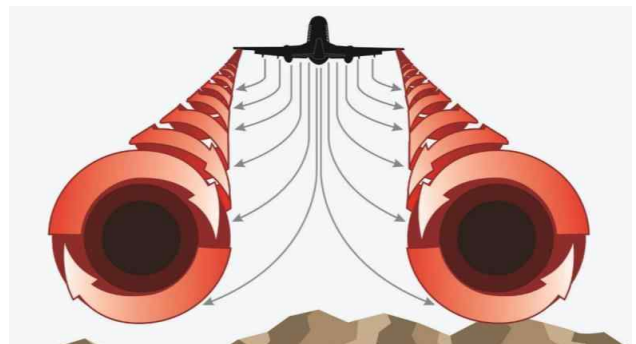


그림 2. 후류 요란의 형태[2]

Fig. 2. Form of Wake Turbulence[2]

표 1. 후류 요란 항공기 등급[3]

Table 1. Wake Turbulence Category[3]

Category	MTOW	Examples
Super (J)	Aircraft types specified as such in Doc 8643	A380
Heavy (H)	Aircraft types of 136,000 kg or more, with the exception of aircraft types listed in Doc 8643 in the Super (J)	A330, B747
Medium (M)	Aircraft types less than 136,000 kg but more than 7,000 kg	A320, B737
Light (L)	Aircraft types of 7,000 kg or less.	C172

2016년에 발간된 ASBU는 성능 개선 영역(PIA : performance improvement area)을 공항 운영(airport operation), 시스템 및 데이터의 글로벌 상호 운영(globally interoperable system and data), 최적 용량 및 유연한 비행(optimum capacity and flexible flights), 효율적인 비행경로(efficient flight paths)로 나누고, 하부에 세부적인 개념을 다루는 21개의 스레드를 설정하였다[4]. 이후 2019년 ASBU에서 4가지의 성능 개선 영역을 operational, information, technology의 세 가지의 카테고리로 변경하고, 스레드를 22개로 확장하였다. ASBU의 스레드에는 5년 단위의 Block 별로 세부적인 변화를 다루는 요소(elements)가 설정되어있다. 요소에는 해당 개념을 운영하기 위한 절차, 시스템, 장비, 선행 사례 등이 기술되어있다. ICAO는 체약국별로 ASBU를 적용하는 계획을 수립하여 적용할 수 있도록 권고하고 있다. 우리나라에서는 국가항행계획(NARAE: national ATM reformation and enhancement)을 수립하여 ASBU의 이행을 대비하고 있으며, 21년도에 NARAE 2.0으로 개정되었다.

1) ASBU WAKE Thread

2016년 GANP에 수록된 ASBU에서 WAKE 스레드는 Block 0부터 Block 2 (2013년~2023년)까지 단계적으로 이행하도록 되어있다. 세부적인 변화를 다루는 요소는 표2와 같이 분리 기준의 변화, 출발 절차의 수정, 도착 절차의 수정으로 구분하였다. 요소 1은 항공기 분리 기준의 세분화를 다루고, 요소 2는 그림3과 같이 활주로 중심선의 길이가 760m 미만의 평행활주로 (단일 활주로 취급)를 가진 공항에서 Diagonal paired approach 절차를 신설하였다. 요소 3은 그림4와 같이 출발 항공기의 절차를 수정하여 출발 항공기에 적용되는 2-3분의 대기 시간을 제거하도록 하였다. 이후 2019년 GANP에 수록된 ASBU WAKE 스레드는 표3과 같이 개정되었다.

WAKE 스레드를 적절하게 이행하기 위해서는 실시간 바람 관측장비를 통해서 바람을 관측하고, 예측할 수 있어야 한다. 측정 데이터를 바탕으로 관제사의 의사 결정을 보조하는 의사 결정 지원 도구를 개발하고, 항공 정보 종합 관리망(SWIM : system wide information management)을 통해 공유할 수 있도록 해야 한다. WAKE 스레드의 최종적인 목표는 항공기를 동적으로 분리하여 공항의 효율성을 증가시키는 것이다[4], [5].

2) Wake Turbulence Re-categorization (RECAT)의 개념

ICAO는 기존의 항공기의 등급을 최대이륙중량에 따라 Heavy(H), Medium(M), Light(L)로 구분하였다. 이후 Airbus 380 항공기에 Super(J) 등급이 부여되어 현재는 4개의 등급으로 항공기를 구분한다. 항공기 간의 수평 분리 최저치는 표 4와 표 5와 같으며 이때 MRS(minimum radar separation)는 공항의 상황에 따라 2.5NM이나 3NM 분리를 한다.

하지만 현재 사용되는 항공기 간 분리 기준은 1960년대에 제정되어 현재까지 사용되고 있다[6]. 이후 연구를 통해 Heavy 등급의 항공기에서 발생하는 난류의 이동 거리가 작다는 것이 밝혀졌고, 항공기 분리 기준 개정의 필요성이 제시되었다[4].

표 2. 2016년 ASBU Wake 스레드 요소

Table 2. 2016 ASBU Wake Thread Elements

	Element 1	Element 2	Element 3
Block 0	Revision of the current ICAO wake turbulence separation minima	Increasing aerodrome arrival operational capacity (Diagonal paired approach procedure)	Increasing aerodrome departure operational capacity (WTMD)
Block 1	Implement leader/follower pair-wise static matrix wake separation minima	Increasing airport arrival operational capacity at additional airports for parallel runways, with center lines spaced less than 760 m apart	Increasing airport departure operational capacity at additional airports
Block 2	Advanced wake turbulence separation (time-based)		

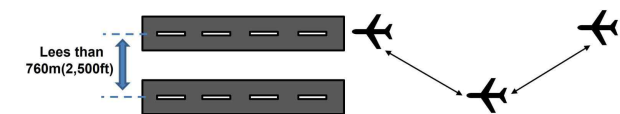


그림 3. Diagonal paired approach 절차
Fig. 3. Diagonal paired approach procedure

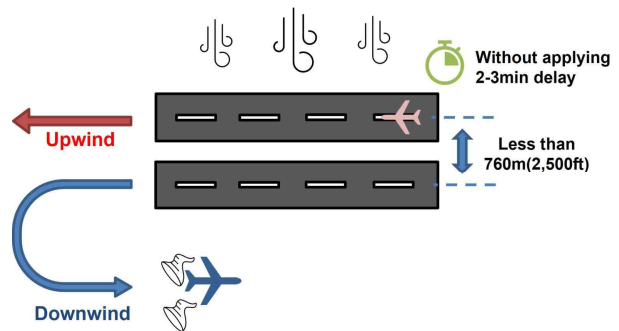


그림 4. 2016 ASBU Wake 요소 3
Fig. 4. 2016 ASBU Wake Element 3

표 3. 2016년과 2019년 WAKE thread 비교

Table 3. Comparison of WAKE thread in 2016 and 2019

	ASBU 2016	ASBU 2019
Block	Block 0~Block 2 (2013~2023)	Block 2~Block 4 (2023~2033)
Elements	6	12
Matrix	6 x 6	7 x 7
Applicable Airport	Parallel runways, with center lines spaced less than 760 m apart	Parallel runways, with center lines spaced less than 760m apart, threshold staggers, and/or glide path height difference
Approach Procedure	Dependent approach procedure	Dependent and Independent approach procedure
Block 4	-	En-route Wake Encounter

표 4. Wake Turbulence 도착 분리 최소값[3]

Table 4. Wake Turbulence Arrival Separation minima[3]

Category		Follower (NM)			
		J	H	M	L
Leader (NM)	J	MRS	5	7	8
	H	MRS	4	5	6
	M	MRS	MRS	MRS	5
	L	MRS	MRS	MRS	MRS

표 5. Wake Turbulence 출발 분리 최소값[3]

Table 5. Wake Turbulence Departure Separation Minima[3]

Category		Follower(Minutes)			
		J	H	M	L
Leader (Minutes)	J		2	3	3
	H			2	2
	M				2
	L				

그 결과, 2010년대 초반부터 미국 FAA, 유럽 EURO-CONTROL, ICAO를 주축으로 후류 요란 분리 기준을 재분류하는 RECAT에 대한 연구가 이루어졌다. 기관별로 RECAT 적용의 세부 기준은 다르지만, RECAT은 3가지의 단계(phase)로 진행된다.

- RECAT 1 (FAA는 RECAT 1.5): 6~7개의 등급으로 세분화된 후류 요란 분리 기준(RECAT)을 적용
- RECAT 2: 정적인 기종별 분리(static pair-wise separation) 적용
- RECAT 3 : 동적인 기종별 분리(dynamic pair-wise separation) 적용 (예: 시간 기반 분리)

ICAO는 국제 표준의 항공교통 절차를 기술한 PANS - ATM(procedures for air navigation Services - air traffic management, Doc. 4444)을 출판한다. 2020년 11월 ICAO는 RECAT 규정을 추가한 Doc. 4444 Amendment 9를 출판하였다. 개정된 Doc. 4444에는 표6과 같이 항공기의 후류 요란 등급을 7개로 세분화하였고, 표7, 표8과 같이 변경된 항공기의 분리 기준도 추가하였다. RECAT을 시행하게 된다면 현재와 비슷한 수준의 안전을 유지하면서 평균 7% ~ 10%의 활주로 수용량을 늘릴 수 있을 것으로 예상된다. 추가로 항공기의 대기시간이 감소하여 항공기의 연료 소모량과 배출 가스를 줄일 수 있다[4], [7], [8].

2-3 수용량(capacity)

1) 수용량(capacity)의 정의

공항 수용량(airport capacity)은 공항 또는 공항 구성 요소에서 한 시간 동안 수용할 수 있는 최대 항공기 운항 수를 측정하는 것이다. 이때 공항 구성 요소는 활주로, 유도로, 게이트를 의미한다[9].

표 6. RECAT 후류 요란 항공기 등급[3]

Table 6. Wake Turbulence Category of RECAT[3]

Category	MTOW	Wing Span	Examples
Group A	136,000 kg ~	74.68 m ~ 80 m	A380
Group B	136,000 kg ~	53.34 m ~ 74.68 m	A330, B747
Group C	136,000 kg ~	38.1 m ~ 53.34 m	A300, B767
Group D	18,600 kg ~ 136,000 kg	32m ~	A320, B737NG
Group E	18,600 kg ~ 136,000 kg	27.43 m ~ 32m	B737 Classic
Group F	18,600 kg ~ 136,000 kg	~ 27.43m	ATR72
Group G	~18,600 kg	-	C172

표 7. ICAO RECAT 도착 분리 최소값[3]

Table 7. RECAT Arrival Separation Minima of ICAO[3]

Category		Follower(NM)						
		A	B	C	D	E	F	G
Leader (NM)	A	MRS	4	5	5	6	6	8
	B	MRS	3	4	4	5	5	7
	C	MRS	MRS	MRS	3	3.5	3.5	6
	D	MRS	MRS	MRS	MRS	MRS	MRS	4
	E	MRS	MRS	MRS	MRS	MRS	MRS	4
	F	MRS	MRS	MRS	MRS	MRS	MRS	MRS
	G	MRS	MRS	MRS	MRS	MRS	MRS	MRS

표 8. ICAO RECAT 출발 분리 최소값[3]

Table 8. RECAT Departure Separation Minima of ICAO[3]

Category		Follower(Seconds)						
		A	B	C	D	E	F	G
Leader (Seconds)	A		100	120	140	160	160	180
	B				100	120	120	140
	C				80	100	100	120
	D							120
	E							100
	F							
	G							

공항 수용량은 지연시간 고려 여부에 따라 실용 수용량 (practical Capacity)과 절대 수용량(ultimate Capacity)으로 구분한다. 실용 수용량은 허용 가능한 항공기의 지연시간을 고려하여, 실제로 항공기가 이착륙 할 수 있는 용량이다. 절대 수용량은 산술적으로 도출할 수 있는 최대 수용량으로 항공기의 지연시간을 고려하지 않고, 항공기가 연속적으로 이착륙 할 수 있는 횟수를 의미한다. 실용 수용량과 절대 수용량을 비교해보면 그림5와 같이 표현할 수 있다.

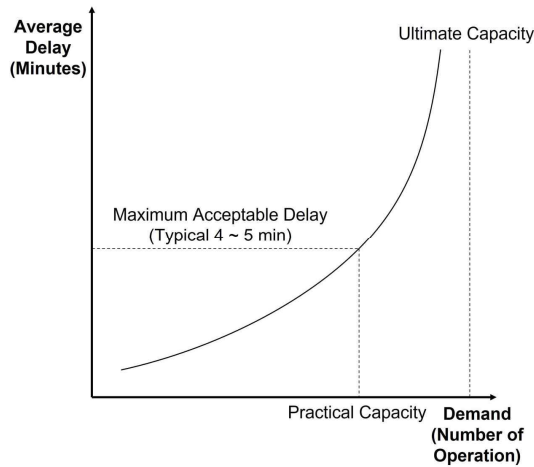


그림 5. 절대수용량과 실용수용량의 관계
Fig. 5. Relationship of Practical Capacity and Ultimate Capacity

따라서 공항의 수용량은 활주로 및 유도로의 처리량, 계류장의 처리량, 여객 터미널의 처리량, 항공교통관제업무의 처리량 중 가장 작은 값을 해당 공항의 공항 수용량으로 산정한다[10].

2) 수용량(Capacity) 산정 선행연구

이강석 외 2명(2013)은 Harris 모델을 이용해서 제주국제공항의 활주로 처리량을 산출하였다. 박지숙 외 3명(2015)은 지연 시간을 고려한 제주국제공항의 연간 활주로 처리량을 항공 교통 시뮬레이션 프로그램인 TAAM(total airspace and airport modeler)을 이용하여 제주국제공항의 활주로 처리량이 일간 463회임을 산출하였다. 김상현(2017)은 인천국제공항과 김포국제공항의 수용량 증대를 위해 동적으로 슬롯을 할당하는 방안을 제시하였다. 방준 외 1명(2019)은 각종 항공 교통 요소들을 고려하여 SIMMOD(simulation model)를 사용해 인천공항의 수용량을 산정하였다. 최동엽 외 2명(2019)은 인천국제공항 제4활주로 건설 타당성 연구를 통해 인천공항의 활주로 수용량을 산출하고 항공기의 5NM 분리와 6개 등급으로 나뉜 RECAT의 수용량을 비교 분석하였다. 이효주 외 1명(2020)은 SIMMOD를 이용하여 지연시간을 고려한 김해공항의 수용량의 산출하는 연구를 수행하였다.

3) 수용량 계산법

공항 수용량의 계산법은 정밀도와 필요 데이터에 따라 표9와 같이 구별할 수 있다. Level 5로 갈수록 더 많은 데이터를 요구하며, 더욱 정밀한 수용량을 도출할 수 있다[11]. 본 논문은 RECAT 도입의 타당성에 대한 기초 연구로써 Level 3에 해당하는 Harris 모델을 가지고 활주로 절대 수용량을 산출하였다.

4) Harris Model

본 연구에 사용된 Harris Model은 MITRE Corporation의 Dr. Richard M. Harris가 1972년에 만든 절대 수용량 산출 공식이다.

표 9. 수용량 모델링의 단계[11]

Table 9. Proposed levels of modeling sophistication[11]

Level	Description	Examples	Data Requirements
1	Table Lookup	FAA Table Lookup	Minimal, requiring only an overview of airport runway configuration and aircraft fleet mix
2	Charts, Nomographs, Spreadsheets	Spreadsheet model	Minor, requiring airport runway configuration, aircraft fleet mix, exit locations, and percentage of arrivals
3	Analytical Capacity Models	Airfield Capacity Model	More demanding, including aircraft fleet mix, aircraft final approach speeds, aircraft separations, and ATC rules
4	Airfield Capacity Simulation Models	FLAPS	More detailed input data than Level 3 models, including close-in arrival and departure flight track geometries and aircraft fleet mix by runway
5	Aircraft Delay Simulation Models	TAAM, SIMMOD, ADSIM	Greatest level of detail about aircraft flight schedule and airfield and airspace configurations, including taxiing routes and aircraft parking positions

Harris 모델은 수용량을 산출하는 방식 중 Level 3단계에 해당하며 항공기 혼합률, 항공기의 최종 접근 속도, 항공기 간의 분리 기준, 활주로 점유 시간(ROT : runway occupancy time) 등의 데이터를 통해 단일 활주로 절대 용량을 산출한다. 따라서 교차 활주로, 평행 활주로를 운영하는 공항의 수용량 계산을 위해선 해당 공항에 적용되는 규칙에 맞게 값을 조정하면서 산출해야 한다.

III. RECAT 적용 사례 및 준용 규정

3-1 국내외 적용 사례

1) 미국

미국은 2012년 11월부터 멤피스(MEM) 공항에 RECAT을 도입하였다. 그 결과로 멤피스 공항의 처리량은 56대에서 70대로 약 19% 증가하였다[12]. 이외에도 루이빌(SDF), 애틀랜타(ATL), 시카고(MDW, ORD) 공항에도 RECAT 1을 도입하였다. 이후 FAA는 RECAT 1의 경미한 수정을 통해 RECAT 1을 RECAT 1.5로 개정하였다. 2019년 기준 미국의 23개의 공항에 RECAT 1.5를 적용하여 운영하고 있다[13], [14]. RECAT 1.5은 기존의 최대이륙중량으로만 산정하던 항공기의 등급에서 착륙 속도, 날개 길이, 후행 항공기의 후류 요란 저항 능력 등의 요소를 추가로 고려하여 산정되었다[15].

2016년부터는 로스앤젤레스(LAX), 필라델피아(PHL)를 시작으로 RECAT 2에 해당하는 기종별 분리(pair-wise separation)를 시행하였으며, 2019년 기준으로 8개 공항에 RECAT2를 적용하여 수용량 증가 효과를 볼 수 있었다[13].

미국은 현재 RECAT 2를 대체하는 통합된 후류 요란 분리 (CWT : consolidated wake turbulence separation)를 실시하고 있다. CWT는 항공기를 9개의 등급으로 세분화하는 후류 요란 분리 기준으로 현재 미국 환경에 가장 적합한 항공기 분리 기준이다[15]. 미국은 그림 6과 같은 타임라인으로 RECAT의 도입을 시작하고 있으며 2022년에는 바람을 고려한 동적 기종별 후류 요란 분리 기준(total wind dynamic pair-wise wake separation)을 시범적 운영 할 계획이다[16].

2) 유럽

유럽은 항공교통 시스템의 현대화 프로젝트인 SESAR (single european sky air traffic management research) 프로젝트의 일환으로 RECAT-EU를 시행하고 있다. RECAT-EU의 항공기 등급도 선행 항공기의 후류 요란 세기와 후행 항공기의 저항 능력을 고려하여 산정되었으며 항공기의 분리 기준을 6개의 등급으로 세분화하였다. 2016년 3월 22일부터 프랑스 파리의 샤를 드 골 공항(CDG)과 르 부르제 공항(LBG)에서 RECAT-EU가 유럽 최초로 시행되었다[17]. 그 결과로 파리 샤를 드 골 공항은 첨두 시간(peak time)일 때 시간당 2~4대의 항공기를 더 수용할 수 있게 되었고, 1년간의 모니터링 결과 후류 요란으로 인한 준사고는 보이지 않았다[18]. 이후 독일 라이프치히 공항(LEJ), 오스트리아 빈 공항(VIE) 등에도 RECAT-EU가 도입되어 시행되고 있다. 영국 히스로 공항에서는 RECAT 3에 해당하는 시간 기반 분리(TBS : time-base separation)가 도입되어 운영되고 있다. 2021년 하반기에는 네덜란드 암스테르담 공항(AMS)에 RECAT-EU와 TBS가 도입될 계획이다[19], [20].

3) 아시아

대한민국은 2021년 2월부터 RECAT에 도입 계획을 수립하고 관련된 연구를 진행하고 있다. 2021년 하반기에는 시범 운영을 위한 안전성 평가를 진행하고, 2021년 12월부터 인천국제공항과 김포국제공항에서 RECAT 시범 적용할 계획이다[21]. 일본은 늘어나는 항공기 트래픽과 2020년 도쿄 올림픽을 대비하고 위해 그림7과 같이 2011년부터 RECAT에 대한 연구를 시작하였다. 이후 안전평가와 시험 적용 기간을 거쳐 2020년부터 도쿄 하네다 공항(HND)과 도쿄 나리타 공항(NRT) 공항에 RECAT을 적용하고 있다[22].

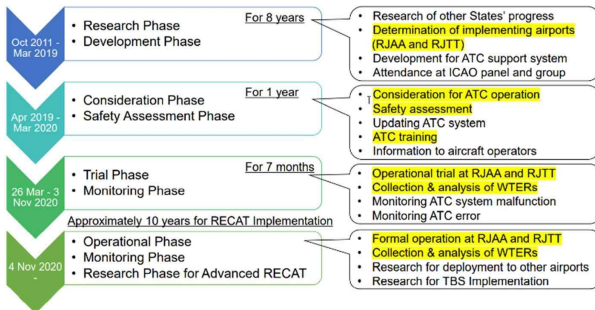


그림 7. 일본 RECAT Timeline[22]
Fig. 7. RECAT Timeline of Japan[22]

RECAT Timeline

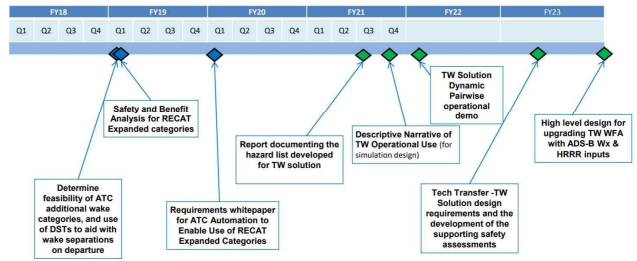


그림 6. 미국 RECAT Timeline[16]
Fig. 6. RECAT Timeline of United States[16]

3-2 후류 요란 분리 최소화 적용 매뉴얼

1) 개요

ICAO는 체약국의 RECAT 원활한 이행을 위해 후류 요란 분리 기준 최소화 적용 매뉴얼(manual on implementation of wake turbulence separation minima, Doc. 10122)을 2021년 4분기에 출판할 계획이다. Doc. 10122는 RECAT 도입을 위한 매뉴얼로, RECAT을 도입하고자 하는 공항이 RECAT을 적용하기에 적절한가 식별할 수 있는 평가 사항과 RECAT 도입을 위한 절차 등이 기술되어있다[7].

2) 평가 기준

Doc. 10122의 초안에 수록된 RECAT 도입 평가 요소는 다음과 같다[22].

- 활주로와 공역의 수용량 포화상태 여부
- 다수의 고속 탈출 유도로 설치 여부
- A380의 운항 여부
- E,F,G 등급 항공기 대비 A, B, C, D 등급 항공기의 높은 운항 비율

IV. RECAT 적용 활주로 용량 분석

4-1 국내 공항 RECAT 도입 가능성 평가

국내에서 RECAT을 시행하게 되면 일부 항공기 등급 간의 분리 기준이 감소하여 활주로 수용량에 변화가 있을 것으로 예상된다. 따라서 국내 주요 공항의 RECAT의 도입이 적절한지 알아보기 위해 Doc. 10122를 이용하여 적용 평가를 진행하였다. 단, Doc. 10122는 공식적으로 출판되지 않은 상태로 공개된 초안을 바탕으로 평가를 진행하였다.

Doc. 10122를 이용하여 대한민국에서 운항 편수가 가장 많은 3개 공항의 RECAT 도입 타당성을 분석한 결과, 표10과 같은 값을 얻을 수 있었다. 국내 주요 공항에서는 인천국제공항이 모든 조건을 충족하여 RECAT을 도입하기에 가장 적절하다고 판단할 수 있었다. 하지만 김포국제공항과 제주국제공항은 A380의 운항편이 없어 평가항목을 모두 충족하지 못하였으므로 본 논문에서는 인천공항의 수용량 변화만을 산출하였다.

표 10. 국내 주요 공항 도입 가능성 평가

Table 10. Determination of Implementing Airport in Korea

Airport	Runway and/or airspace capacity	Multiple high speed exit taxiway	Operating of A380	High rate of group A, B, C and D aircraft
ICN	Full	Yes	Yes	Yes
GMP	Full	Yes	No	Yes
CJU	Full	Yes	No	yes

4-2 활주로 용량 계산

1) 개요

Harris 모델을 이용한 활주로 절대 수용량 산출은 총 3단계로 이루어진다. 먼저 도착 수용량 계산하고, 출발 수용량 계산한 뒤 혼합 수용량을 산출한다 [23], [24].

2) 분석 수행 공항 기초 자료

표10에서 모든 조건을 만족하는 인천공항을 대상으로 분석을 시행하였다. 분석을 위한 조건은 출발-도착항공기 분리 기준 2NM, 최종접근구간(final course) 7.9NM, 오차(error) 지수 1.65(90%), Buffer 시간 9.6초(ASR 11 scanning time 4.8sec의 2 배)로 설정하였다. 인천공항의 Traffic Mix는 2019년 9월 8일 값을 사용하였으며 항공기 Traffic Mix와 그 확률은 각각 표 11과 표12와 같다. 항공기의 속도는 현직 조종사와 관제사의 인터뷰를 통해 카테고리별 평균 속도를 산출하였으며 그 값은 표 13과 같다. ROT는 REDIM(runway exit design interactive model)을 이용하여 인천공항의 기종별 평균 ROT 값을 산출하였으며, 그 결과는 표 14, 그림 8과 같다[25]. 다만 인천국제공항은 활주로는 활주로 중심선이 760m 미만인 평행활주로를 가지고 있고, 착륙과 이륙 활주로를 나누어서 운영한다. 일반적으로 착륙 항공기가 접근하는 동안 이륙 항공기는 활주로에서 대기한 뒤, 착륙 항공기가 활주로에 접지하는 순간 이륙 허가가 발부된다. 따라서 ROT는 착륙항공기가 활주로 말단을 넘어서 접지하는 시간을 고려하여 REDIM 산출 값이 아닌 10초를 대입하였다.

표 11. 인천공항 Traffic Mix

Table 11. Traffic Mix of Incheon International Airport

Aircraft Category	Number of Aircraft	Percentage of Aircraft
J	28	2.2%
H	568	45.6%
M	650	52.2%
L	0	0%
합계	1246	100%

표 12. 항공기 카테고리별 확률

Table 12. Probability of Aircraft Category

Leader	Follower		
	H	M	L
H	0.001	0.010	0.012
M	0.010	0.208	0.238
L	0.012	0.238	0.272

표 13. 항공기 카테고리별 항공기 속도

Table 13. Aircraft speed

Speed(Knots)		Speed (RECAT)	
Super (J)	150	A	150
Heavy (H)	150	B	150
		C	145
Medium (M)	140	D	140
		E	140

표 14. 항공기 카테고리별 항공기 평균 점유시간

Table 14. Average Runway Occupancy Time

ROT(Seconds)		ROT (RECAT)		Parallel RWY ROT
Super (J)	76.51	A	76.51	
Heavy (H)	64.84	B	65.35	
		C	57.83	
Medium (M)	58.7	D	58.73	
		E	53.81	

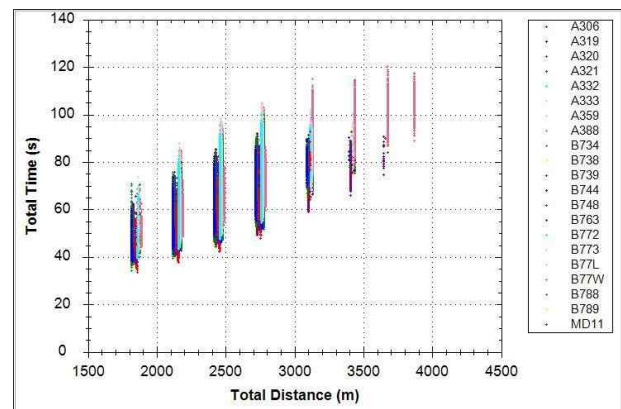


그림 8. 기종별 인천공항 활주로 점유시간

Fig. 8. Runway Occupancy Time by Aircraft

4-3 활주로 용량 분석 수행

1) 도착 수용량 계산

도착 수용량은 후행 항공기의 카테고리가 더 크거나 같을 때인 Closing Case와 후행 항공기의 카테고리가 더 작을 때인 Opening Case로 나누어서 구하며, 각각 수식1과 수식2로 표현할 수 있다. 해당 수식1과 수식2를 그림으로 표현하면 그림9와 그림10 같으며 Case 별 시간을 구하면 표 15와 같다.

Closing Case

$$\Delta T_{ij} = T_j - T_i = \frac{\delta_{ij}}{V_j} \tag{1}$$

Opening Case

$$\Delta T_{ij} = T_j - T_i = \frac{\delta_{ij}}{V_j} + \gamma \left(\frac{1}{V_j} - \frac{1}{V_i} \right) \quad (2)$$

이후 Buffer 값을 산출한다. Buffer 값을 산출하는 이유는 2 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 관제사의 레이더 모니터에 표시되는 항적과 실제 항공기의 위치 오차(position error)로 발생할 수 있는 위험을 고려하기 위해 추가한다. 두 번째는 안전을 위해 추가적인 분리 거리를 두고 싶은 관제사의 심리적인 요소를 반영하기 위해 적용한다. 위치 오차(position error)의 이해도는 그림 11과 같이 표현할 수 있다.

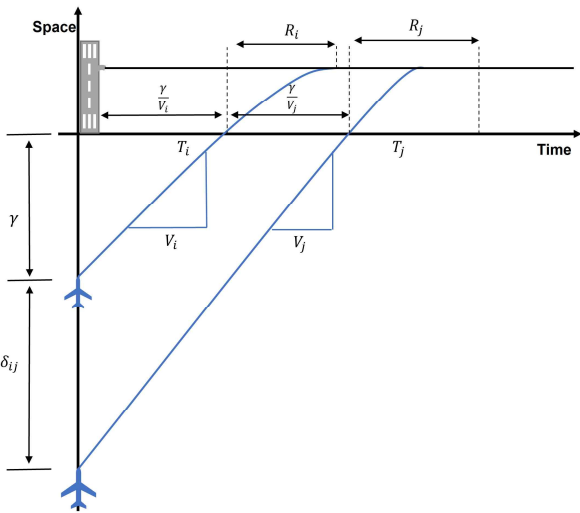


그림 9. Closing Case 시공간도
Fig. 9. Time-Space Diagram of Closing Case

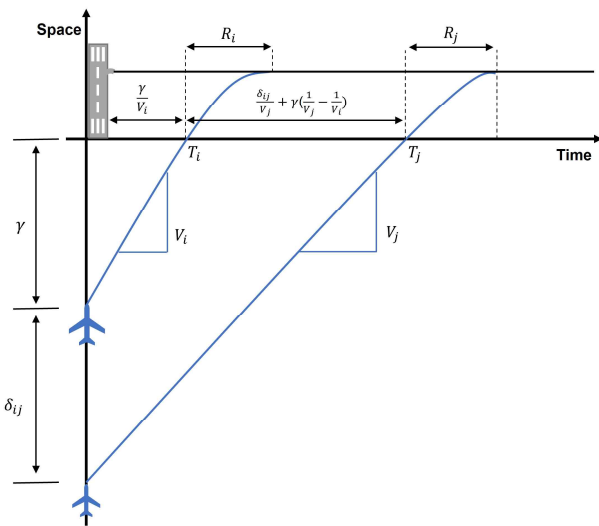


그림 10. Opening Case 시공간도
Fig. 10. Time-Space Diagram of Opening Case

표 15. Error-Free Case 별 산출 시간

Table 15. Error-Free Case Matrix

Leader (Seconds)	Follower(Seconds)		
	H	M	L
H	72.000	120.000	193.543
M	72.000	96.000	142.114
L	72.000	72.000	77.143

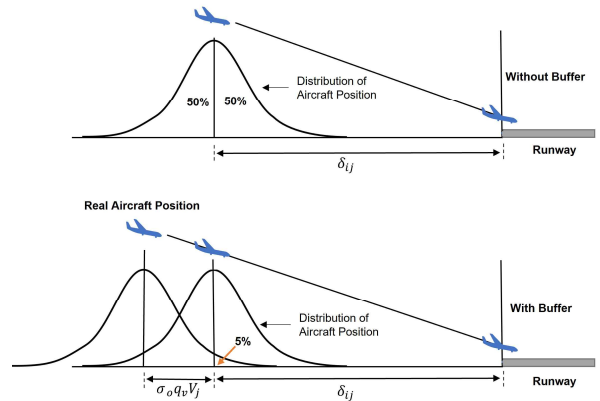


그림 11. Position Error의 이해
Fig. 11. Understanding of Position Error

항공기의 위치 오차(position error)에 의한 Buffer를 구하는 수식도 Case에 따라 Closing Case와 Opening Case로 나눠서 구한다. 이때 수식은 각각 수식 3과 수식 4를 사용하며 그 값은 표 16과 같다. 변수에 따라 Buffer 값이 음수로 나오게 되는 경우가 존재하는데, 실제로 항공기의 시간은 줄어들지 않기 때문에 해당 값은 0으로 변환하여 합산한다.

Closing Case Buffer

$$b_{ij} = q_v \sigma_o \quad (3)$$

Opening Case Buffer

$$b_{ij} = q_v \sigma_o - \delta_{ij} \left(\frac{1}{V_j} - \frac{1}{V_i} \right) \quad (4)$$

표 16. Buffer 시간

Table 16. Buffer Time Matrix

Leader (Seconds)	Follower(Seconds)		
	H	M	L
H	15.840	15.840	3.840
M	15.840	15.840	7.269
L	15.840	15.840	15.840

표 17. Buffer 합산 시간(ΔT_{ij})

Table 17. Sum of Error-Free and Buffer Matrix(ΔT_{ij})

Leader (Seconds)	Follower(Seconds)		
	H	M	L
H	87.840	135.840	197.383
M	87.840	111.840	149.383
L	87.840	87.840	92.983

표 18. 산출된 E(ΔT) 값

Table 18. Multiplication of Probability and ΔT_{ij}

Leader (Seconds)	Follower(Seconds)		
	H	M	L
H	0.044	1.392	2.314
M	0.900	23.241	35.524
L	1.030	20.889	25.304

아래의 수식 5를 바탕으로 Case 시간과 Buffer 시간을 합산하여 ΔT_{ij} 값을 산출하여야 한다. 그 값은 표 17과 같다.

$$\Delta T_{ij} = m_{ij} + b_{ij} \tag{5}$$

이후 수식 6을 이용하여 E(ΔT)을 산출해야 한다. 표 17의 ΔT_{ij} 값과 표 12의 확률값을 이용하여 산출할 수 있다. 해당 값을 곱하면 표 18과 같은 결과를 도출할 수 있으며, 산출된 값을 다 합산하게 되면 수식 7번과 같은 값을 도출할 수 있다.

$$E(\Delta T) = \sum [p_{ij}][M_{ij} + B_{ij}] \tag{6}$$

$$E(\Delta T) = 110.638 \tag{7}$$

수식 7번의 값을 수식 8번에 대입하여 수식 9번과 같이 1시간 동안의 도착 항공기의 수용량을 도출한다. 이때의 수식 9번 값은 1시간 동안 항공기가 연속해서 착륙할 수 있는 항공기의 대수를 의미한다.

$$Ca = \frac{3600}{E(\Delta T_{ij})} \tag{8}$$

$$Ca = 32.538 \tag{9}$$

2) 출발 수용량 계산

출발 수용량은 표 12의 항공기의 확률과 표 5의 출발 거리 분기 최솟값을 이용하여 산출한다. 표 5의 빈칸은 현재 인천공항에 적용되는 2분을 적용하였으며, 표 8의 빈칸은 80초를 적용하여 산출하였다. 이는 수식 10으로 표현할 수 있으며, 도출 값은 수식 11과 같다. 이후 수식 12번에 대입하여 나누게 되면 수

표 19. 도착 항공기 사이에 이륙할 수 있는 항공기의 조합

Table 19. Number of Departure per Runway Gap

Leader	Follower		
	H	M	L
H	1	1	2
M	1	1	1
L	1	1	1

식 13과 같은 출발 수용량을 구할 수 있다. 이때 수식 13번의 의미는 1시간 동안 항공기가 연속해서 이륙할 수 있는 횟수를 의미한다.

$$E(T_d) = \sum [p_{ij}][t_d] \tag{10}$$

$$E(T_d) = 120.703 \tag{11}$$

$$Cd = \frac{3600}{E(T_d)} \tag{12}$$

$$Cd = 29.825 \tag{13}$$

3) 혼합 수용량 계산

혼합 수용량을 계산하기 위해선 아래의 수식 14를 만족해야 한다. 인천국제공항의 자료를 입력하여 산출한 값은 수식 15와 같다. 해당 값의 의미는 착륙 항공기 사이에 출발 항공기를 1대를 이륙시키기 위해서는 착륙 항공기 사이에 최소 73.225초가 필요하다는 것이며, 이때 연속적으로 1대의 출발항공기를 더 출발시키기 위해선 120.70초의 시간이 추가로 필요하다는 의미이다. 따라서 해당 공식을 만족하는 항공기의 조합은 표 19과 같다. 선행 항공기가 H이고, 후행 항공기가 L일 경우에는 항공기가 2대 이륙 할 수 있고, 나머지 상황에서는 사이에는 항공기 1대가 이륙 가능하다는 뜻으로 해석이 가능하다.

$$E(\Delta T_{ij}) \geq E(R_i) + E(\frac{\delta_i}{V_j}) + E(B) + (n_d - 1)E(T_d) \tag{14}$$

$$E(\Delta T_{ij}) \geq 73.225 + 120.70(n_d - 1) \tag{15}$$

위의 수식을 바탕으로 혼합 수용량을 구하는 공식은 수식 16과 같으며 혼합 운영의 시공간도는 그림 12로 표현할 수 있다. 공식을 통해서 도출된 혼합 수용량의 값은 수식 17과 같다.

$$C_m = \frac{1}{E(\Delta T_{ij})} (1 + \sum n_d p_{nd}) \tag{16}$$

$$C_m = 65.458 \tag{17}$$

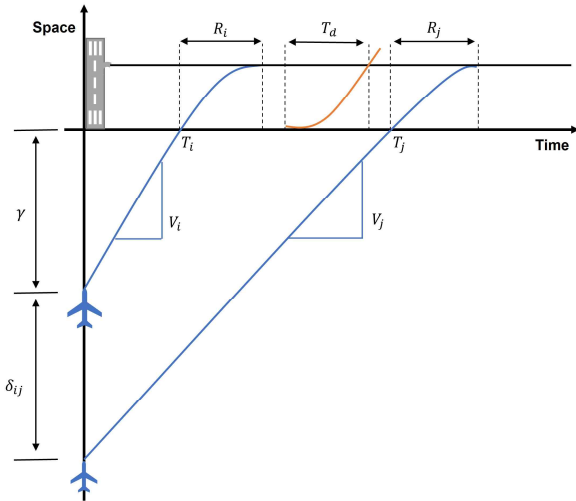


그림 12. 혼합 운영 시공간도
 Fig. 12. Mixed Operation Time-Space Diagram

산출된 수용량에서 소수점의 시간 동안에는 항공기가 뜨고 내릴 수 없으므로 소수점은 버림 한다. 활주로 중심선이 760m 미만인 평행 활주로 2본의 수용량을 계산한 결과, 1시간 동안 인천공항의 수용량은 도착 수용량 32대 출발 수용량 33대 혼합 수용량 65대로 계산되었다. 인천국제공항은 활주로 중심선이 760m 미만인 평행 활주로를 2세트(활주로 4본)를 갖추고 있으므로 해당 값에 2배를 해주어야 한다. 따라서 현재의 규정으로 산출된 수용량은 도착 수용량 64대, 출발 수용량 66대, 혼합 수용량 130대로 도출할 수 있다.

위와 동일한 방법으로 RECAT의 기준인 표6, 표7, 표8, 표14의 세부 조건을 적용하여 계산 한 결과, 도착 72대, 출발 72대, 혼합 수용량 144대로 산출되었다. 기존 분리치와 RECAT 적용의 수용량을 비교한 결과로 혼합 수용량이 14대가 증가하는 결과를 얻을 수 있었으며, 기존 분리치와 비교한 결과는 표 20과 같다.

4-4 자동 계산 스프레드시트 구축

상기 수식을 바탕으로 절대 수용량 비교 분석을 위한 계산을 위한 엑셀 스프레드시트를 그림13과 같이 구축하였다. 스프레드시트에는 위의 수식과 이착륙조건 등을 자동으로 선택하여 계산할 수 있게 구성하였으며, 이는 향후 세부적 조건의 변경에 따라 미치는 영향을 계산하거나, 다른 공항의 절대 수용량을 계산하는데 활용할 수 있다.

4-5 결과 검토 및 제언

본 연구에서는 Harris 모델을 이용하여 인천국제공항의 수용량을 산출하고, RECAT 적용에 따른 인천국제공항의 활주로 절대 수용량 변화를 측정하였다. 인천공항의 기존 절대 수용량은 130대였고, RECAT을 적용한 후에는 144대로 14대가 증가

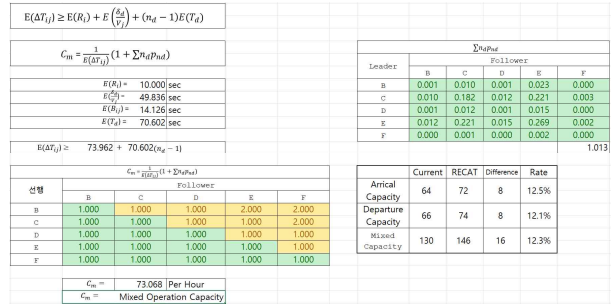


그림 13. 수용량 계산 엑셀 스프레드시트
 Fig. 13. Excel Spreadsheet for Capacity Calculation

표 20. 활주로 절대 수용량 변화치
 Table 20. Comparison of Current and RECAT Capacity

	Current	RECAT	Rate of Change
Arrival	64	72	12.5%
Departure	66	74	12.1%
Mixed	130	146	12.3%

하였다. 따라서 인천국제공항의 RECAT 도입은 실효성이 있다는 예측을 도출할 수 있었다. 하지만 Harris 모델은 활주로의 절대 수용량을 계산하는 공식으로 실제 공항의 실용 수용량과 차이가 있을 것으로 예상된다. 따라서 Level 5에 해당하는 SIMMOD, TAAM 등과 같은 지연산출을 기반하는 Fast Time Simulation을 이용하여 실용 수용량을 산출할 필요가 있다.

추가로 대한민국의 공항 중 운항 편수가 인천국제공항 다음으로 많은 제주국제공항과 김포국제공항의 수용량 변화를 분석하여, RECAT 도입 타당성 평가를 진행할 필요가 있다.

V. 결론

본 논문에서는 RECAT 도입에 따른 활주로 수용량을 변화를 알아보기 위해 국내에서 여객 처리량이 가장 많은 인천국제공항의 활주로 절대 용량을 산출하였다. 우선 ICAO Doc. 10122의 초안을 통해 국내 주요 공항의 RECAT 도입 평가를 진행하였다. 그 결과 국내 공항 중에서는 인천국제공항만이 모든 조건을 만족하였다. 국내에서 운항편이 2, 3번째로 많은 공항인 제주국제공항과 김포국제공항의 경우에는 A380이 운항하지 않는 공항으로, 모든 평가항목을 만족하지 않았다. 하지만 해당 공항들 역시 운항 편수가 많은 공항이기 때문에 추후 RECAT 적용에 따른 활주로 수용량 변화를 산출할 필요가 있다.

인천국제공항들의 활주로 절대 수용량을 비교 분석을 위해 사용한 활주로 수용량 산출 모형은 Harris 모델이다. Harris 모델은 Traffic mix, 항공기의 접근 속도, 항공기의 분리기준, 관제 규칙등의 데이터를 통해 수용량량을 산출한다. 비교 분석 결과로 인천국제공항의 수용량이 기존 130대에서 RECAT을 적용하였을 때 144대로 증가하여 14대가 증가함을 알 수 있었다.

현재 인천국제공항의 수용량은 활주로 4분 기준으로 107회로, 본 논문에서 산출된 값과 차이를 보인다. 이는 산출 값이 지연시간을 고려하지 않은 활주로 절대 용량이기 때문이다. 따라서 지연을 고려하여 수용량 산출할 수 있는 SIMMOD, TAAM과 같은 시뮬레이션을 이용하여 실용 수용량 측정하고, RECAT에 따른 변화량을 도출할 필요가 있다.

Acknowledgments

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호 21DATM-C163373-01 및 21RDPP-C164428-01)으로 수행되었음.

References

- [1] International Civil Aviation Organization. The World of Air Transport in 2019 [Internet]. Available: <https://www.icao.int/annual-report-2019/Pages/the-world-of-air-transport-in-2019.aspx>.
- [2] FAA AC90-23G, Aircraft Wake Turbulence, Federal Aviation Administration, Feb. 2014.
- [3] ICAO Doc. 4444 Amendment 9, Air Traffic Management, International Civil Aviation Organization, Nov. 2020.
- [4] ICAO Aviation System Blok Upgrade, International Civil Aviation Organization, Jul. 2016.
- [5] ICAO GANP 6th Edition, Global Air Navigation Plan, International Civil Aviation Organization, 2019.
- [6] J. Roa, A. Trani, J. Hu, and N.Mirmohammadsadeghi, "Simulation of Runway Operations with Application of Dynamic Wake Separations to Study Runway Limitations," *Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2674, Issue. 12, pp. 199-211, Oct. 2020.
- [7] International Civil Aviation Organization. WAKE TURBULENCE RE-CATEGORISATION (RECAT) [Internet]. Available: <https://www.icao.int/APAC/Meetings/Pages/2021-RECAT-Webinar.aspx>.
- [8] NextGen - SESAR State of Harmonisation Third Edition, SESAR Joint Undertaking, p17-18, 2018.
- [9] FAA AC150/5060-5, Airport Capacity and Delay, Federal Aviation Administration, 1983.
- [10] H. Lee, and D. Kim, "A Comparative Study on Delay Calculation Method of Airport Capacity," *Journal of the Korean Society for Aeronautical Science and Flight operation*, Vol. 28, No. 2, pp. 47-52, Jun. 2020.
- [11] Evaluating Airfield Capacity, Transportation Research Board, ACRP Report 79, 2012.
- [12] Volpe National Transportation Systems Center. Wake Turbulence Separation Standards for Aircraft [Internet]. Available: <https://www.volpe.dot.gov/infographic-wake-turbulence-separation-standards-aircraft>.
- [13] FAA JO 7110.659C, Wake Turbulence Recategorization, Federal Aviation Administration, 2016.
- [14] N. Coleman, D. Knorr, and A. Ramadani, "Statistical Model to Estimate the Benefit of Wake Turbulence Re-categorization," *Thirteenth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2019)*, Vienna, Austria, 2019.
- [15] FAA JO 7110.126A, Consolidated Wake Turbulence (CWT) Separation Standards, Federal Aviation Administration, 2019.
- [16] FAA REDAC/NAS Ops, Wake Turbulence Re-Categorization (RECAT) Review of FY 2021 - 2023 Proposed Portfolio, Federal Aviation Administration, Mar. 2021.
- [17] DSNA A FINE-TUNED WAKE VORTEX RE-CATEGORISATION AT PARIS-CDG & LE BOURGET AIRPORTS TO OPTIMISE SEQUENCING ON ARRIVAL, Direction des Services de la Navigation aérienne, 2018.
- [18] EUROCONTROL. Leading Optimised Runway Delivery [Internet]. Available: <https://www.sesarju.eu>.
- [19] EUROCONTROL Driving airport capacity, predictability and efficiency, European Organisation for the Safety of Air Navigation, 2019.
- [20] EUROCONTROL Network Operations Report 2020, European Organisation for the Safety of Air Navigation, pp.33, Nov. 2020.
- [22] S. Park (2021, September). RECAT Implementation Status in the Republic of Korea [Internet]. Available: <https://www.icao.int/APAC/Meetings/Pages/2021-RECAT-Webinar.aspx>.
- [22] Y. Marutsuka (2021, September). RECAT Implementation in Japan [Internet]. Available: <https://www.icao.int/APAC/Meetings/Pages/2021-RECAT-Webinar.aspx>.
- [23] R. M. Harris, Models for Runway Capacity Analysis, MITRE Corporation, Report No. FAA-EM-73-5, 1972
- [24] R. M. Horonjeff, F. X. McKelvey, W. J. Sproule, and S. B. Young, Planning and Design of Airports Fifth Edition, McGraw Hill, pp. 497-514, 2010
- [25] Air Transportation Systems Laboratory, Runway Exit

Design Interactive Model[Internet]. Available:
<https://atsl.cee.vt.edu/products/runway-exit-design-inte>

tive-model--redim-.html.



박 정 우 (Jeongwoo Park)

2016년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 항공교통물류학과 학사과정
※ 관심분야 : Air Transportation System, Simulation, Aviation Safety, Airport Operation



김 휘 양 (Huiyang Kim)

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



구 성 관 (Sungkwan Ku)

2017년 : 한국항공대학교 항공교통물류학과 이학박사
2009년 9월 ~ 2014년 2월 : 한국산업기술시험원 기계시스템본부 연구원
2015년 6월 ~ 2016년 8월 : Virginia Tech 방문 교수
2014년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 항공산업공학과 부교수
※ 관심분야: 항공교통, 시험평가인증, 시스템분석, 시뮬레이션, 안전성평가