

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2021.29.3.034>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

Wake Turbulence RE-CAT 적용과 효과성에 관한 연구

최상일*, 최지호*, 유수정*, 임민성*, 오민하*, 이수정*, 김현미**, 김휘양**

The Study on the Application of RE-CAT and Effectiveness

Sang Il Choi*, Ji Ho Choi*, Soo Jeong Yu*, Min Sung Lim*, Min Ha Oh*, Soo Jung Lee*,
Hyeon Mi Kim**, Hui Yang Kim**

ABSTRACT

Wake turbulence generated by the lead aircraft has a significant impact on the following aircraft and it has been considered a key factor to consider when determining the longitudinal separation between the aircraft. ICAO classifies aircraft into four wake turbulence categories based on the maximum takeoff weight and provides the longitudinal separation minima for each category. Due to richer measured data and better understanding of physical processes, it is raised that classifying aircraft with only four wake turbulence grades is imprecise and leads to over-separation in many instances. In this regards, much research on a new method of classifying Wake Turbulence Category(Re-CAT) has been done by EUROCONTROL, FAA, and ICAO. The main purpose of this study is to conduct a comparative analysis of the existing wake turbulence separation standards with Re-CAT in terms of departure capacity and the resulting benefits of Re-CAT using the data from the Incheon International Airport. The results show that EUROCONTROL and new ICAO standards have the greater effect on reducing wake turbulence separation, compared to the FAA RE-CAT standards. It is also concluded that Re-CAT presents different results of wake turbulence separation depending on the flight characteristics of each airport.

Key Words : Wake Turbulence(후류요란), RE-CAT(Re-categorization), Benefit Analysis(편익 분석), Separation(분리), Airport Efficiency(공항 효율성), Capacity(수용량)

1. 서 론

글로벌 항공 수요의 증가로 항공교통량이 지속해서 증가하는 가운데, 우리나라 항공 교통량은 세계 교통량 보다 높은 비율로 증가해 왔다[1]. 인천국제공항은 개

항 이후 연평균 7.3% 증가하였으며 최근 5년간 연평균 증가율은 약 6.0%로 개항 대비 항공기 운항 횟수가 4배 증가하였다. 이러한 항공교통량 증가로 인해 공항과 공역의 혼잡이 확대되고 운항의 지연이 점차 증가하였다[2]. 특히 인천국제공항의 경우, 2014년에는 총 10,657편의 항공기가 지연되었으나 2018년의 경우, 약 두 배인 21,942편의 항공기가 지연되었다(Table 1 참조).

국제선 항공기의 경우, 지연 원인으로 운항에 관련된 접속지연과 항공로 혼잡이 가장 큰 비중¹⁾을 차지하는 것으로 나타났으며, 항공로 혼잡은 수요 증가에 따른 항공 교통량의 증가로 추정된다. 운항 지연은 교통

Received: 24. Aug. 2021, Revised: 03. Sep. 2021,

Accepted: 28. Sep. 2021

* 한국항공대학교 항공교통전공 학사

** 한국항공대학교 항공교통물류학부 교수(공동 교신저자)

연락처 E-mail : igreenbee@kau.ac.kr

연락처 주소 : 경기도 고양시 덕양구 항공대학로 76

Table 1. 인천공항 항공기 지연 현황

구분	2014	2015	2016	2017	2018	2019
운항편수	290,043	305,446	339,673	360,295	387,497	404,104
지연편수	10,657	12,471	19,212	22,691	21,942	16,492
지연율(%)	3.7	4.1	5.7	6.3	5.7	4.1

자료: 인천공항공사, <https://www.airport.kr/co/ko/cpr/statisticCategoryOfDay.do>

이용자에 대한 서비스의 품질 저하뿐 아니라 항공사와 공항 당국 및 항공교통관제기관 등 참여자의 비효율성을 초래하고 항공교통시스템의 운영 효율성을 떨어뜨리는 등 사회경제적 비용을 발생시킨다.

국제민간항공기구(International Civil Aviation Organization, ICAO)와 회원국은 항공수요 증가에 대비하고 효율성 향상을 통한 항공교통시스템의 지속적 성장과 발전을 위해 글로벌 항행계획(global air navigation plan, GANP)을 제시하였다. 계획에는 수용량 증대 외에 “WAKE2)” 또는 “RE-CAT”로 불리는 항공기 간 분리 축소에 관한 새로운 기준과 개념이 포함되었다.³⁾

또한 유럽과 미국을 중심으로 후류요란에 관한 새로운 분류방식과 이를 적용한 항공기 간 분리 기준으로 “RE-CAT”에 관한 연구가 활발히 진행된 반면, 우리나라는 RE-CAT에 관한 연구가 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구는 RE-CAT의 개념과 해외 연구사례를 살펴보고, 인천공항을 대상으로 새로운 분리 기준에 대한 실증연구를 진행하였다. 이를 통해 첫째는 RE-CAT의 도입과 이행으로 예상되는 기대효과를 확인하고, 둘째는 RE-CAT이 활주로 처리능력 등 항공교통시스템의 효율성 향상에 관한 연구의 기초를 제공하고자 한다.

II. 이론적 고찰

2.1 후류요란과 항공기 간 분리

양력은 날개의 윗면과 아랫면의 기압 차에 의하여

발생하는데, 이 기압의 차이는 날개 양 끝에서 주위 공기를 안쪽으로 말려들게 하면서 후류요란(wake turbulence)을 발생시킨다. 후류요란은 선행 항공기와 같은 경로를 비행하는 후행 항공기의 비행안전에 영향을 미치기 때문에 항공기 간의 종적 분리를 위한 기준을 정하는 데 핵심적 요소로 작용한다.

2.1.1 ICAO의 분류와 기준

이전까지 ICAO는 항공기의 최대이륙중량을 기준으로 light, medium, heavy, super heavy, 4개 등급으로 구분하고, 이를 기초로 항공기 간 최소분리 기준을 정하였다(Table 2, 3 참조)[3].

그러나 1990년대에 마지막으로 검토된 후류요란 등급은 이후의 기술 발전과 다양한 항공기의 등장에 대해 효율적인 분리 기준을 제공하지 못하게 되었으며, 수용량과 항공수요의 격차를 적절히 반영하지 못하게 되었

Table 2. ICAO wake turbulence 등급(변경 전)

구분	최대이륙중량
Super (J)	A380-800 등 Doc. 8643에 기술된 항공기
Heavy (H)	136,000kg 이상(Super 항공기 제외)
Medium (M)	7,000kg 초과 136,000kg 미만
Light (L)	7,000kg 이하

자료: ICAO, PANS-ATM(Doc. 4444) 6th edition, 2020.

Table 3. ICAO wake turbulence 등급에 따른 최소 분리 기준(변경 전)

구분	Follower (후행 항공기)			
	J	H	M	L
Leader (선행 항공기)	J	5	7	8
	H	4	5	6
	M			5
	L			

자료: ICAO, PANS-ATM(Doc. 4444) 6th edition, 2020.

- 1) 2019년 국제선 지연의 원인은 접속(53.8%), 항공로 혼잡(15.6%), 기타(12.6%), 기상(9.2%)의 순으로 나타났다(국토교통부, 2019).
- 2) WAKE는 Wake Turbulence Separation의 약어로 글로벌 항행계획의 22개 스레드(threads) 중 하나이다. 기존 3등급의 후류요란 기준을 7개 등급으로 세분화한 분리 축소가 주요 내용이다.
- 3) Re-Categorization의 줄임말로 글로벌 항행계획에 포함된 “WAKE”를 다르게 표현한 용어이다.

다[4]. 이는 결과적으로 수용량 감소와 불필요한 지연을 증가시켜 항공교통시스템의 비효율성을 초래하였다.

이에 따라 ICAO와 유럽 및 미국은 항공기별 최대이륙중량과 날개폭을 기준으로 후류요란 등급을 재정의하고 최소분리 기준을 재설정하였다. 그러나 후류요란에 관한 연구를 주도하였던 미국과 유럽에서 정한 기준은 ICAO 기준과 차이가 있으며, 이후 추진계획에서도 차이가 있다.

당초, ICAO는 후류요란 등급을 6개 등급으로 분류하기로 하였으나, 최종적으로 7개 등급으로 정의하고 적합한 분리 기준을 제시하였다(Table 4, 5 참조).

Table 4. ICAO wake turbulence 등급(변경 후)

구분	최대이륙중량	날개폭
GROUP A	136,000kg 이상	74.68m 초과 80m 이하
GROUP B	136,000kg 이상	53.34m 초과 74.68m 이하
GROUP C	136,000kg 이상	38.1m 초과 53.34m 이하
GROUP D	18,600kg 초과 136,000kg 미만	32m 초과
GROUP E	18,600kg 초과 136,000kg 미만	27.43m 초과 32m 이하
GROUP F	18,600kg 초과 136,000kg 미만	27.43m 이하
GROUP G	18,600kg 이하	-

자료: ICAO, PANS-ATM(Doc. 4444) 6th edition, 2020.

Table 5. ICAO wake turbulence 등급에 따른 최소 분리 기준(변경 후)

구분	Follower						
	A	B	C	D	E	F	G
Leader(선행 항공기)	A	4	5	5	6	6	8
	B	3	4	4	5	5	7
	C			3	3.5	3.5	6
	D						4
	E						4
	F						
	G						

자료: ICAO, PANS-ATM(Doc. 4444) 6th edition, 2020.

ICAO의 새로운 후류요란 등급과 분리 기준은 2020년에 개정된 PANS-ATM(Doc. 4444) 개정판(16판, 9차 개정)에 반영되었으나, 체약국에게 신·구기준을 선택적으로 적용할 수 있도록 하였으며, 새로운 기준은 국가의 승인 하에 적용할 수 있게 되었다.

2.1.2 미국과 유럽의 분류와 기준

미국과 유럽은 ICAO가 후류요란에 관한 개정된 기준을 제시하기 이전부터 협력적인 연구를 통해 기준을 마련하고, 실제 자국 공항과 공역의 항공기 간 분리에 적용하였다.

미국(연방항공청, FAA)은 자국 내에서 비행하는 기종의 구성과 특성을 고려하여 항공기 등급 재분류를 단계적으로 진행하였다. 도입 1단계(Phase I)에서는 A~F까지 6개 등급으로, 2단계(Phase II)에서는 A~G까지 7개 등급으로 분류하였으며, 3단계(Phase III)에서는 ICAO와 유럽보다 더욱 세분화된 9개 등급으로 분류하였다(Table 6, 7 참조)[5]. 특히, 대형항공기(heavy)를 3개 등급으로 구분하고, 소형항공기(small)에 대해서도 upper와 lower로 구분하였다.

Table 6. FAA wake turbulence 등급

구분	항공기 분류
Category-A supper heavy	A388
Category-B upper heavy	A332, A359, B744, B773, B788 등
Category-C lower heavy	B762, B763, DC10, MD11 등
Category-D non-pairwise heavy	A339, A3ST, A342, A400, B741 B743, B74D, B74S, B78X 등
Category-E B757	B752, B753
Category-F upper large	A319, A320, A321, B737, B738 B739
Category-G lower large	AT43, AT72, DH8A, DH8C, E135 E145, E170
Category-H upper small	E120, B350, BE40, C560, C680 C750
Category-I lower small	BE10, BE20, BE58, BE99, C208 C210, C525

자료: FAA, JO 7110.126, Consolidated Wake Turbulence Radar Separation Standards, 2018.

Table 7. Eurocontrol wake turbulence 등급에 따른 최소분리 기준

구분		Follower (후행 항공기)					
		A	B	C	D	E	F
Leader (선행 항공기)	A	3	4	5	5	6	8
	B		3	4	4	5	7
	C			3	3	4	6
	D						5
	E						4
	F						3

Table 7을 포함하여 본 연구의 후류요란과 최소분리 기준에 관한 Table에서 빈칸들은 레이더 최소분리(minimum radar separation, MRS)을 의미하며, 3마일 분리를 적용한다.

유럽(Eurocontrol)은 후류요란 등급의 구분에 차이가 있으나 기본적으로는 ICAO와 같이 최대이륙중량과 날개폭을 기준으로 분류하면서 기존의 heavy와 medium을 각각 upper와 lower로 나누어 6개 등급으로 구분하고, 이에 따라 최소분리 기준을 제시하였다(Table 8, 9 참조)[6].

최소분리 기준은 거리를 단위로 하는 분리와 시간을 단위로 하는 분리로 구분되나, 여기에서는 거리 단위의 분리만 제시하였다.

ICAO와 유럽 및 미국의 항공기 후류요란 재분류(RE-CAT)는 후류요란의 등급을 최대이륙중량과 날개의 폭에 따라 구분하는 원칙적인 기준에서는 동일하지만, 결과적으로는 지역별 또는 국가별로 차이가 있는 분류 등급을 수립하여 적용하고 있다.

우리나라는 변경된 후류요란 등급과 그에 따른 분리를 적용하지 않고 있지만, ICAO의 체약국으로서 PANS-ATM(Doc. 4444)의 기준을 적용하는 것이 타당할 것이다. 다만, 항공교통관제절차(국토교통부 고시)는 미국 FAA 기준과 ICAO의 기준이 혼용되어 있으며, 후류요란에 관한 기준을 국가의 상황과 환경에 따라 달리 적용할 수 있다는 점에서 우리나라 환경에 적합하고 효과적인 기준을 적용할 필요가 있다.

2.2 편익의 산정

편익 산정 방법과 평가 항목은 문헌별로 연구내용과 목적에 따라 달리 적용하고 있다. 그러나 국내에서 진행된 항공산업과 관련한 편익 산정에 관한 연구는 주

Table 8. Eurocontrol wake turbulence 등급

구분	최대이륙중량	날개폭
CAT-A supper heavy	100,000kg 초과	72m 초과 80m 미만
CAT-B upper heavy		60m 초과 72m 미만
CAT-C lower heavy		52m 미만
CAT-D upper medium	100,000kg 미만	32m 초과
CAT-E lower medium		32m 미만
CAT-F light	15,000kg 미만	-

자료: Eurocontrol, RECAT-EU, European Wake Turbulence Categorization and Separation Minima on Approach and Departure, Edition 1.2, 2018.

Table 9. Eurocontrol wake turbulence 등급에 따른 최소분리 기준

구분		Follower (후행 항공기)					
		A	B	C	D	E	F
Leader (선행 항공기)	A	3	4	5	5	6	8
	B		3	4	4	5	7
	C			3	3	4	6
	D						5
	E						4
	F						3

자료: Eurocontrol, RECAT-EU, European Wake Turbulence Categorization and Separation Minima on Approach and Departure, Edition 1.2, 2018.

로 항공사의 서비스 편익 또는 공항개발 사업에 관한 편익에 집중되었다.

2.2.1 공항개발 사업에서의 편익

공항 사업에서 편익 산정을 위한 연구의 기초가 되는 공항부문 사업 예비타당성 조사 표준지침(KDI, 2014)은 타당성 조사에 비용추정, 항공교통 수요 추정, 경제성 분석, 정책성 분석과 지역 균형 발전분석을 포함하도록 하고, 공항부문 사업 추진과 관련하여 고려해야 할 편익 항목과 방법 및 기준 등을 제시하였다[7]. 이를 다시 세부 편익 항목을 4개 항목으로 구분하고, 이를 6개 분야의 사업 유형에 따라 필수적으로 고려되는

편의 항목을 제시하였다.⁴⁾

표준지침을 토대로 Kim and Park(2015)은 활주로 수용 능력 향상을 위한 사업에서 주요 편익은 지연 감소와 비행시간의 단축으로 인한 항공기 운항비용의 절감에서 발생한다고 하였다.

Ahn et al.(2013)은 항행시스템 개발에 따른 효과를 분석하면서 사업 추진에 따라 기대되는 편익과 비용을 현금흐름으로 추정하고, 이를 이용해 비용편익을 분석하는 것이 경제성 분석의 일반적인 방법이라고 하였다(Ahn, Hur, Ji, and Park, 2013). 그러나 여기에서는 기술 개발에 소요 비용과 활용에 대한 편익을 고려하였으나 항행시스템의 개발과 도입에 따른 항공기 운항 측면에서의 편익을 고려하지 않았다[8].

지연을 고려한 연구로서 Choi(2019)는 여객터미널 개발의 타당성에 관한 편익 분석 모형의 개발을 위해 지체 시간당 절감 비용을 계산하였다. 이 연구에서는 시설물이 신설, 증설 또는 개선된 경우, 연간 지체시간에서 현재의 지체시간을 뺀 나머지의 수량을 해당 연도의 지체시간으로 보고, 해당 연도의 총 지체시간에 현재가치를 곱하여 편익을 계산하였다[9]. 이 연구는 공항부문 사업 예비타당성 조사 표준지침에서 정한 편익 항목 중에서 터미널 내 여객의 흐름과 지체시간을 비용으로 환산하였으나, 항공기의 운항과 관련한 지연에 대해서는 고려하지 않았다.

2.2.2 항공기 운항에 관한 편익

항공기 운항에 관한 편익은 예비타당성 조사 표준지침에서 정한 운항비용 절감과 유사할 수 있으나, 운항에 관한 편익은 공항개발 사업뿐 아니라 활주로 점유 시간 감소 또는 항공기 간 분리 축소와 같은 공항의 운영 절차 또는 항공교통관제절차 개선으로도 가능하다.

이러한 개선 효과는 비행시간 감축 또는 지연과 회항의 감축과 같이 직접적으로 나타나며, 배출가스 저감과 같이 간접적으로도 나타난다.

운항 편익에 관한 연구로서 Park et al.(2007)은 시정악화로 인한 회항 또는 결항된 항공편을 분석하고, 이에 대한 경제적 손실을 추정하였다[10]. 여기에서 대체공항으로 회항하는 항공편의 여객에게 지급해야 하는 항목을 항공료 차액, 숙박비, 식비 및 버스요금 등으로 구분하였으며, 각각의 항목에 대해 좌석 수를 곱하여 손실액을 계산하였다. 이 연구는 회항과 결항으로 인한

경제적 비용을 산정하면서 기상악화로 인한 지연을 포함하지 않았다(Kim, Kweon, Park, and Baik, 2019).

Kim et al.(2019)은 정밀접근활주로 등급 상향에 관한 연구에서 운항에 대한 편익을 구체적으로 구분하였는데, 지연 등의 감소에 따라 발생하는 편익을 직접적 편익과 간접적 편익으로 구분하였다. 직접적 편익은 경제적 편익으로서 이를 운항과 여객 및 화물 부문으로 분류하였다[11].

$$BF = BF_0 + BF_p + BF_c \quad (\text{식 1})$$

여기서, $BF(BF_0, BF_p, BF_c)$: 경제(운항, 여객, 화물) 부문 편익.

특히 운항 부문의 지연감소에 따른 편익을 구체적으로 산정하였는데 지상과 공중지연으로 분류한 후, 대상 항공편을 등급(fleet)과 국제·국내 노선으로 구분하고 운항비용과 지연시간을 곱하여 계산하였다. 여기에서 운항비용은 예비타당성조사 표준지침에 따라 승무원 인건비와 유류비, 유지관리비, 임대료 등 6개 항목으로 구분하였으며, 물가상승률을 반영한 기준연도 소비자물가지수로 환산하였다.

III. 연구의 설계

본 연구는 RE-CAT의 적용과 그 효과를 확인하기 위한 실증적 연구로서 구체적인 효과분석은 다음과 같이 2가지로 구분하여 진행하였다.

- i) RE-CAT 적용에 따라 항공기 쌍(pair) 사이의 축소된 분리 간격과 시간당 감소한 거리
- ii) 항공기의 지상대기 감소를 통해 줄어든 분리 간격과 운항 편익

이를 위해 인천공항의 출발항공편을 대상으로 ICAO와 유럽(Eurocontrol), 미국(FAA)의 기준을 각각 달리 하여 먼저 항공기 쌍(pair)을 단위로 줄어든 분리 거리를 분석하였으며, 이를 단위 시간당 감소한 거리를 도출하기 위해 1시간 단위로 합산하여 감소한 거리를 분석하였다. 이 결과로 수용량 증대 가능성을 확인하였다.

다음으로 편익의 분석을 위해 앞선 분석에서 도출된

4) 표준지침에서는 편익의 항목을 ① 항공기 운항비용 절감 편익, ② 청사 내 여객과 화물 통행시간 절감 편익, ③ 전환 수요 통행시간 및 운항 비용 절감 편익, ④ 초과 수요 통행시간 및 운항 시간 절감 편익으로 구분하였다.

감소 거리를 운항비용으로 환산하였다.

3.1 자료의 수집

인천공항은 3개 활주로를 운영하면서 제1 활주로(33L/15R)는 출발항공편으로 사용하고, 제2 활주로(33R/15L)는 도착항공편에 대하여 사용하며, 제3 활주로(34/16)는 시간대에 따라 출발 또는 도착항공편에 대하여 사용하였다.⁵⁾ 본 연구는 출발 또는 도착 항공기 간 분리 간격과 분리 유지를 위한 관제 허가발부 시점이 중요하다는 점에 착안하여 기상 또는 항공기 성능 등 외부 영향이 적은 출발 항공기를 대상으로 RE-CAT에 관한 실증연구를 수행하였다.

2019년 최대 교통량을 기록한 9월 9일~9월 15일(7일간) 사이에 제1 활주로와 제3 활주로를 이용한 출발 항공편에 대하여 국토교통부 항공정보시스템(UBIKAIS)을 통해 자료를 수집하였다(Table 10, 11 참조).

조사 기간 동안 제1 활주로와 제3 활주로를 이용하

여 출발한 항공편의 비율은 각각 70.1%와 29.9%이었으며, 항공기 등급(J, H, M, L)별로 구분하면 다음과 같다.

3.2 연구 방법

3.2.1 분리 간격 분석

항공기 간의 분리 기준은 후류요란을 적용하는 경우라도 상황과 환경에 따라 다양하게 적용할 수 있다. 본 연구는 ATS 서비스가 제공되는 환경에서 거리 분리를 중심으로 진행하였다.

줄어든 분리 간격을 분석하기 위해 다음의 조건에 따라 항공기를 선별하고 선별된 항공기 등급을 ICAO와 유럽, 미국의 기준에 따라 재분류하였다.

- 조건1: 출발 대기열에서 2대 이상 항공기가 대기하는 경우, 최소분리(2분) 간격으로 이륙 허가를 발부한다.
- 조건2: RE-CAT 대상은 선행 항공기와 후행 항공기의 이륙시각(ATD)의 차이가 2분 이하인 경우로만 한정한다.⁶⁾

Table 10. 기초 자료(출발항공편 현황) (단위: 편수)

구분	9.9	9.10	9.11	9.12	9.13	9.14	9.15	계
33L/15R	372	347	408	401	405	402	418	2,753
34/16	159	184	174	187	162	152	155	1,173
합계	531	531	582	588	567	554	573	3,926

자료: UBIK AIS, <https://ubikais.fois.go.kr>

Table 11. 출발항공편 항공기 등급 (단위: 편수(%))

구분	9.9	9.10	9.11	9.12	9.13	9.14	9.15	계
Super heavy (J)	11 (2.1)	12 (2.3)	13 (2.2)	12 (2.0)	14 (2.5)	11 (2.0)	14 (2.4)	87 (2.2)
Heavy (H)	237 (44.6)	240 (45.2)	263 (45.2)	263 (44.7)	254 (44.8)	245 (44.2)	251 (43.8)	1,753 (44.7)
Medium (M)	283 (53.3)	279 (52.5)	306 (52.6)	313 (53.2)	299 (52.7)	298 (53.8)	308 (53.8)	2,086 (53.1)
합계	531	531	582	588	567	554	573	3,926

자료: UBIK AIS, <https://ubikais.fois.go.kr>

조건 1과 조건 2에 따라 분석 대상으로 선별된 항공기는 2,103대였으며, 이를 각각의 기준에 따라 Table 12와 같이 분류하였다.

분리 간격 변화는 재분류된 항공기의 이륙 순서를 그대로 하고, 선행 항공기와 후행 항공기를 쌍(pair)으로 하여 기존의 ICAO 기준에 따른 분리 간격과 ICAO와 유럽, 미국의 RE-CAT 기준을 적용한 분리 간격을

Table 12. 분석 대상 항공기 분류 (단위: 편수)

구분		J	H		M		L
현 ICAO		45	903		1,155		-
구분		A	B	C	D	E	F
RE-CAT	ICAO	45	852	52	1,151	3	-
	유럽	45	856	50	1,148	4	-
	미국	45	856	48	504	3	647

주: 미국 분류 기준에서 G, H, I는 해당 기종의 부재로 생략.

5) 현재 인천공항은 4개 활주로를 운영 중이다.

6) 관제시스템의 특성 및 ATD 산출방식에 따라 2분 간격으로 허가를 발부하는 경우라도 1분으로 표시되는 경우를 고려하였다.

계산하여 비교하였다.

3.2.2 편익 분석

RE-CAT의 적용에 따른 편익은 출발 대기열, 즉 지상 대기시간 감소에 따른 경제 편익과 환경 편익으로 구분할 수 있으며 경제 편익은 항공사 운항비용과 함께 여객과 화물의 시간가치를 포함한다. 그러나 본 연구는 RE-CAT 기준 간 비교 및 효용성의 확인에 중점을 두어 운항비용 감소에 대한 편익만을 추정하였다.

거리에 대한 시간 환산은 서울접근권제소와 인천권 제탑 간 협조 절차에 따른 시간 분리를 적용하여 5마 일당 1분으로 계산하였다(Ji, 2020)[12].

운항비용의 편익은 지상 운항 시간의 감소에 따른 편익으로서 RE-CAT의 대상인 편익 항공편 수와 분리 간격의 변화량 및 시간당 지상 운항비용을 이용하여 산출하였다(식 2 참조).

$$Bfo = \sum_i^n (NBchg \times ACF_i \times AVGC \times COgnd_i) \quad (\text{식 } 2)$$

여기서,

Bfo : 분리 간격 변화에 대한 운항 편익

i : 항공기 등급($i=1, 2, 3, 4$), 1: C급, 2: D급, 3: E급, 4: F급

$NBchg$: 편익 대상 항공편 수

ACF : 항공기 등급의 비율(%)

$AVGC$: 평균 분리 간격의 변화(Min/flight)

$COgnd$: 시간당 지상 운항비용(원/hour)

위의 식 2에서 평균 분리 간격의 변화는 기존 분리 기준에 의한 간격과 RE-CAT에 의한 분리 간격의 차이를 대상 항공편 수로 나누어 계산하였다(식 3 참조).

$$AVGC = \sum \left(CHGdep \times \frac{1}{NFdep} \right) \quad (\text{식 } 3)$$

여기서,

$CHGdep$: 기존 분리 간격과 새로운 분리 간격의 차

$NFdep$: 기존 분리 간격과 새로운 분리 간격이 다른 운항편 수

시간당 지상 운항비용($COgnd$)은 공항부문 예비타당성조사 표준지침에 정해진 항공기 등급별 운항비용을 지상 운항비용을 변환하고 물가상승률을 반영한 기준 연도 소비자 물가지수로 환산하였다(Table 13 참조).

여기에서 운항비용 산정을 위해 항공기 등급은 후류

Table 13. 시간당 운항비용($COgnd$) (단위: 원/시간)

구분	항공기 등급		
	C급	D급	E급
· 승무원 인건비	929,201	2,673,159	2,673,159
· 유류비	1,212,744	3,897,859	3,897,859
· 유지관리비	1,006,065	2,826,887	2,826,887
· 임대료	609,787	2,177,814	2,177,814
· 감가상각비	307,457	1,339,141	1,339,141
· 보험료	25,620	71,740	71,740
합계	4,065,254	12,914,862	11,647,460

자료: 한국개발연구원, 공항부문 사업의 예비타당성조사 표준지침(2019년 소비자 물가지수: 104.85만영).

요란에 의한 분류와 달리 국제항공운송협회(IATA)에 정한 항공기의 크기에 따라 구분하였다. 또한 항공기 등급은 C~F급만을 고려하였으며, F급 항공기에 대한 시간당 지상 운항비용이 별도로 명시되어 있지 않기 때문에 E급 항공기의 운항비용과 같다고 가정하였다.

IV. 분석 결과

4.1 RE-CAT 적용과 분리 간격

선행 항공기와 후행 항공기를 쌍(pair)으로 하여 각각의 기준별로 분석한 결과, RE-CAT에 의한 분리 간격이 항상 감소하는 것은 아니었으며, 항공기 쌍에 따라 변화하지 않거나 확대되는 경우도 발생하였다.

먼저, 분석 대상 항공기(2,103대)의 이륙 순서를 그대로 하여 등급 분류와 분리 기준을 적용하였을 때 분리 간격의 변화가 발생한 항공기를 분류한 후 그렇지 않은 항공기를 포함한 항공기 전체(2,103대)에 대한 분리 간격의 분석 결과는 다음과 같다(Table 14, Fig. 1 참조).

분석 대상 항공기 2,103대에 대한 간격을 분석한 결과, 유럽과 ICAO의 결과가 유사하나, 유럽의 RE-CAT 기준을 적용하는 것이 가장 효과적으로 나타났다. 반면, 미국 기준에 의한 경우, 등급을 다양하게 분류할 수 있으나, 실제 분리에 대한 효과는 미흡하다는 것을 확인하였다.

이는 인천공항을 비행하는 항공기 등급이 다양하지 않고, 미국보다는 유럽의 환경과 유사하기 때문으로 추정할 수 있다.

Table 14. 분석 결과 1: 분리 조정 항공편 및 감소한 거리
(단위: 편수, 마일)

구분	분리 조정 항공편	조정된 분리 간격	편당 감소 거리	필요한 거리 합계
현 ICAO	N/A	3.86	-	8,114
RE-CAT	ICAO	963	0.48	7,110
	유럽	983	0.50	7066.5
	미국	1,049	0.10	7,894

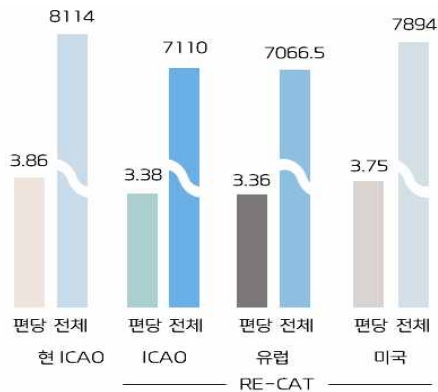


Fig. 1. 분석 결과 1: 분리 조정 항공편 및 감소한 거리

Table 15와 Fig. 2는 활주로 운영 효율성 측면에서 감소한 시간당 거리를 나타낸 결과로써 시간당 평균 출발항공편이 20대 이상(제1 활주로, 제3 활주로 포함)인 시간대로 한정하였다.

여기에서 감소한 거리는 기존 ICAO 기준으로 계산한 분리 간격과 RE-CAT을 적용했을 때 분리 간격의 차이를 평균하여 산출하였으며 계산식은 다음과 같다.

$$RSM = [\sum (SM_{old} - SM_{reCAT})] / N \quad (\text{식 4})$$

여기서,

RSM : 분리 간격 축소에 따라 감소한 시간당 평균 거리

SM_{old} : 기존 ICAO 기준 적용한 경우, 평균 분리 간격

SM_{reCAT} : RE-CAT 기준 적용한 경우, 평균 분리 간격

N : 분석 대상 항공기 편 수

Table 15의 결과에 대한 평균과 분산은 Table 16과 같다.

이상의 결과에서 RE-CAT 적용을 통해 분리 간격이 축소하고 시간당 분리를 위한 거리가 감소하였으며, RE-CAT 도입과 활용은 수용량 확대 및 지연의 감소

Table 15. 분석 결과 2: 시간당 평균 감소 거리
(단위: 마일)

구분	분리에 필요한 거리				감소 거리		
	현 ICAO	RE-CAT					
	ICAO	유럽	미국	ICAO	유럽	미국	
08~09	76.1	66.6	66.6	74.5	9.6	9.6	1.6
09~10	75.3	64.7	64.4	70.5	10.6	10.9	4.8
10~11	87.3	74.4	74.0	81.9	12.9	13.3	5.4
11~12	66.6	57.3	56.9	63.0	9.3	9.6	3.6
12~13	50.4	44.3	43.7	49.0	6.1	6.7	1.4
13~14	43.3	38.1	38.1	41.6	5.1	5.1	1.6
14~15	64.9	56.6	56.3	61.9	8.3	8.6	2.9
15~16	67.4	62.0	62.0	69.3	5.4	5.4	-1.9
16~17	56.9	51.3	51.4	58.1	5.6	5.4	-1.3
17~18	54.6	47.0	47.1	51.9	7.6	7.4	2.7
18~19	60.7	52.1	52.1	57.2	8.6	8.6	3.5
19~20	57.4	47.6	47.4	53.4	9.9	10.0	4.0
20~21	62.9	55.6	55.8	59.9	7.3	7.1	2.9
21~22	61.1	56.4	56.4	65.7	4.7	4.7	-4.6
22~23	71.7	64.0	63.6	72.6	7.7	8.1	-0.9
23~24	55.9	49.7	49.3	54.0	6.1	6.6	1.9

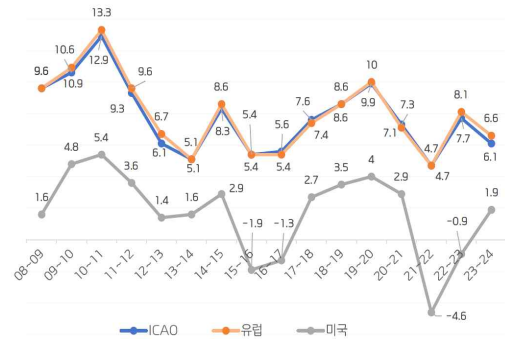


Fig. 2. 분석 결과 2: 시간당 평균 감소 거리

Table 16. 분석 결과 3: 시간당 평균 감소 거리(08~24시)
(단위: 마일)

구분	RE-CAT		
	ICAO	유럽	미국
평균	7.8	7.9	1.7
분산	4.9	5.2	6.7
표준편차	2.2	2.3	2.6

등 항공교통시스템의 성능 향상에 긍정적인 효과가 있다는 것을 확인하였다.

인천공항의 경우, 미국의 RE-CAT 기준에 비해 유럽과 ICAO의 기준을 적용하는 경우, 효과가 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. ICAO와 유럽 기준을 적용한 경우, 시간당 7.8마일과 7.9마일이 각각 감소하였으나, 미국 기준을 적용할 때는 1.7마일이 감소한 것으로 분석되었다.

유럽과 ICAO 기준 사이의 효과의 차이는 미미한 것으로 나타났는데, 이는 후류요란 등급 분류 차이로 인해 발생하는 것으로 분석된다. 향후 여러 공항에 대한 공항별 항공기 운항 특성과 등급에 따른 RE-CAT의 적용 효과에 관해 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4.2 RE-CAT 적용과 편익

축소된 분리 간격과 이에 따라 분리 거리의 감소량을 운항비용에 대한 절감 편익으로 환산하였다. 이를 위해 거리를 지상 운항 시간으로 계산하여야 하는데 서울접근관제소와 인천관제탑 간 협조 절차에 따라 5마일을 1분으로 환산하였으며, Table 13의 운항비용을 적용하였다.

그러나 Table 13을 적용하기 위해 항공기 등급을 후류요란에 의한 분류 대신 항공기의 크기에 따라 재분류하였으며, 편익은 RE-CAT의 적용 대상 항공기에 대한 전체 편익과 편당 편익으로 구분하였다.

식 1과 식 2에 따라 계산한 운항비용에 대한 편익은 다음과 같다(Table 17 및 Fig. 3 참조). 전체 편익은 RE-CAT 대상으로 선별된 2,103대에 대해 감소한 분리 거리를 비용으로 환산하였으며, 이를 다시 항공기 편 수로 나누어 편당 편익을 계산하였다.

ICAO와 유럽, 미국의 RE-CAT 기준을 각각 적용했을 때 분리 거리의 감소 효과와 마찬가지로 유럽, ICAO, 미국의 순서로 편익이 높은 것으로 확인하였다.

V. 결론 및 향후 연구

5.1 연구 결론

본 연구는 항공 수요와 항공교통량 증가로 인해 공항과 공역의 혼잡이 심화하고 지연이 가중되는 상황에서 국제적으로 연구와 도입이 진행되는 RE-CAT의 효과를 확인하기 위한 목적으로 진행되었다. 이를 위해 인천공항 출발항공편을 대상으로 실제 운항 데이터를 수집하여 RE-CAT 기준을 적용할 수 있는 조건을 설정하

Table 17. 분석 결과 4: 분리 거리 감소에 따른 운항비용 편익

(단위: 원)

구분	RE-CAT		
	ICAO	유럽	미국
C급	313,040,647	320,051,453	69,618,936
D급	30,917,603	31,610,029	6,875,946
E급	679,203,398	694,414,724	151,052,006
전체 편익	1,023,161,648	1,046,076,205	227,546,887
편당 편익	486,525	497,421	108,201

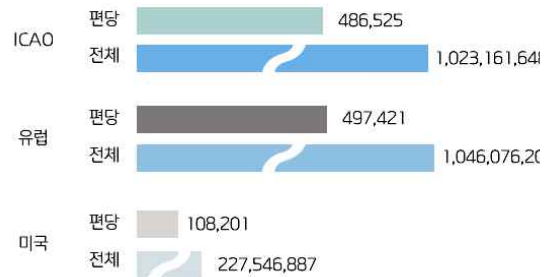


Fig. 3. 분석 결과 4: 운항비용 편익

고, ICAO와 유럽, 미국의 RE-CAT 기준을 적용하였다.

분류 등급과 분리 간격이 각각 다른 기준을 적용하여 분석한 결과, RE-CAT의 도입에 따라 분리 거리가 감소하고, 시간당 활주로 처리용량의 증대, 즉 수용량 향상에 효과가 있는 것으로 나타났다. 또한 ICAO와 유럽 기준의 적용 효과가 유사하나, 유럽의 기준을 적용하였을 때 효과가 가장 크다는 것을 확인하였다.

나아가, 축소된 분리 거리를 시간으로 환산하여 지상대기 시간 감소를 통한 편익을 추정하였으며 각각의 RE-CAT 기준에 따라 운항비용을 계산하여 유럽과 ICAO의 기준을 적용할 때 가장 많은 편익이 발생한다는 것을 알 수 있었다.

본 연구는 공항에서 출발하는 항공기 등급의 구성과 교통량에 따른 RE-CAT의 효용성 확인에 중점을 두고 진행하였으며, 국제적으로 인정되는 다른 기준을 적용함으로써 RE-CAT의 효과는 공항의 교통 특성, 특히 운항 항공기의 구성에 따라 달라질 수 있음을 확인하였다.

연구의 결과를 종합하여 본 연구는 RE-CAT의 적용을 통해 두 가지 측면, 즉 수용량 증대와 운항 효율성의 향상에 긍정적 효과를 도모할 수 있다는 점을 확인하고 국내에 RE-CAT의 적극적 도입과 함께 이를 적

용하는 경우, 운항 항공기의 특성과 구성 등 공항 환경을 고려할 것을 제안한다.

5.2 연구의 한계 및 향후 과제

본 연구는 RE-CAT의 도입 효과와 효용성을 확인하기 위해 인천공항을 대상으로 연중 가장 혼잡한 기간을 선택하여 연구를 진행하였고, 분석 결과 인천공항에 RE-CAT 도입은 활주로 처리능력의 향상과 편익 증대에 효과가 있다는 것을 확인하였다.

그러나 분석 결과에도 불구하고, 효과의 정확한 분석을 위해서는 여러 공항과 다양한 운항 분포를 고려하는 것이 필요하나, 대상 기간을 1주일로 한정하고 인천공항만을 대상으로 하는 한편, 출발항공편만을 대상으로 현재 데이터를 활용함으로써 실제 항공교통 환경에 정확한 반영이 어려웠다는 데 연구의 한계가 있다.

따라서, 향후 RE-CAT 효과의 정확한 검증을 위해 출발과 도착을 포함한 교통상황을 반영한 모델을 활용한 분석을 진행할 예정이며 공항별 효과를 비교·분석하고자 한다. 나아가, 활주로 처리능력의 향상을 위해 항공기의 이륙 순서의 최적화에 관한 연구를 진행하고자 한다.

본 연구는 일부 한계에도 불구하고, RE-CAT 도입을 위한 초기 연구를 진행하면서 해외의 여러 기준과 효과를 비교·분석함으로써 국내 분리 기준의 수립과 연구의 방향을 제시하였다는 데 의의가 있다.

References

1. International Civil Aviation Organization, Annual Report, <https://www.icao.int/annual-report-2018/Pages/the-world-of-air-transport-in-2018.aspx>
2. International Civil Aviation Organization, "Procedures for Air Navigation Services - Air Traffic Management", Doc. 4444, 6th edition, 2020.
3. Kim, H. Y., Yoon, J. S., Song, H. Y., and Baik, H. J., "A study on measuring airlines' on-time performance: Focusing on departure delays", The Korea Transport Institute, 2019, 26(3), pp.1-12.
4. International Civil Aviation Organization, "Global Air Navigation Plan", Doc. 9750, 5th edition, 2016.
5. Federal Aviation Administration, "JO 7110.126, Consolidated Wake Turbulence Radar Separation Standards", 2018, pp.3-16.
6. Eurocontrol, "RECAT-EU, European Wake Turbulence Categorization and Separation Minimum Approach and Departure", Edition 1.2, 2018, pp.15-17.
7. Kim, K. S., and Park, S. J., "A study on standard guidelines for pre-feasibility study on port projects", Korea Development Institute, 2014.
8. Ahn, J. M., Hur, H. Y., Ji, Y. S., and Park, W. G., "Cost-effectiveness analysis on development of aviation safety system - Focus on case of development of technology for MLAT(MULTILATERATION)", Journal of the Aviation Management Society of Korea, 11(2), 2013, pp.27-42.
9. Choi, K. J., Lee, H. S., and Choi, H. J., "A study on the development model of economical benefit cost analysis for the airport construction projects - Focusing on the airport passenger terminals," Architectural Institute of Korea, 2002, 39(2), pp.160-163.
10. Park, J. K., Jung, W. S., Lee, J. W., Choi, H. J., Kwon, T. S., and Back, J. H., "Analysis of the economic disaster scale for fog case occurred at the Incheon international airport", Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics, 15(2), 2007, The Korean Society for Aviation and Aeronautics, pp.40-47.
11. Kim, H. Y., Kweon, P. J., Park, J. H., and Baik, H. J., "A study for estimation of benefit from upgrading precision approach runway category", Journal of the Korean Society for Aeronautical Science and Flight operation, 2002, 27(3), pp.70-81.
12. Ji, M. J., "The study of setting an proper minimum departure interval for increased departure throughput", Korea Aerospace University, 2020.
13. Incheon International Airport Corporation, <https://www.airport.kr/co/ko/cpr/statistic/CategoryOfDay.do>