

항공기 지연시간을 고려한 제주국제공항 활주로 연간용량 산정

박지숙 · 윤석재 · 이영종 · 백호종*
한국항공대학교 항공교통물류학과

Estimation of Annual Runway Capacity for Jeju International Airport Considering Aircraft Delays

PARK, Jisuk · YUN, Seokjae · LEE, Youngjong · BAIK, Hojong*

School of Air Transport and Logistics, Korea Aerospace University, Gyeonggi 412-792, Korea

Abstract

Jeju International Airport has become the most delayed airport in Korea, due to increased demand in air passengers and unexpected local weather condition. Observing the demands continuously grow for a decade, the airport is expected to be saturated in the near future. As a part of effort to prepare effective and timely measure for this expected situation, airport planners seeks the annual runway capacity, i.e., the appropriate number of flight operations in a given year with tolerable delay. In practice, the FAA formula is frequently adopted for the capacity estimation. The method, however, has intrinsic issues: 1) the hourly capacity imbedded in the formula is not clearly defined and thus the estimated value is vulnerable to be subjective judgement, and 2) the formula doesn't consider aircraft delay resulted from runway congestion. In this paper, we explain a novel method for estimating the daily runway capacity and then converting to the annual capacity taking into account the aircraft delay. In this paper, average delay of aircraft was measured using microscopic air traffic simulation model. Daily capacity of the runways were analyzed based on the simulation outputs and the method to assess the yearly capacity is introduced. Using a microscopic simulation model named TAAM, we measure the average aircraft delay at various levels of flight demand, and then estimate the practical daily runway capacity. The estimated daily and annual runway capacities of Jeju airport are about 460 operations a day which is equal to 169,000 operations year. The paper discusses how to verify the simulation model, and also suggests potential enhancement of the method.

계속되는 항공수요 증가와 국지적인 기상요인으로 제주국제공항은 우리나라 공항 가운데 가장 높은 항공기 지연율을 보이고 있다. 현재의 항공수요 증가추세를 감안할 때 이러한 제주국제공항의 항공기 지연현상은 앞으로 더욱 악화되어 공항의 처리능력 한계에 다다를 것으로 예상된다. 공항의 처리능력을 가늠할 수 있는 활주로의 연간용량 산정은 장래 공항계획 수립을 위한 필수적인 작업이다. 하지만 현재 실무에서는 FAA에서 제시한 산정식을 적용하여 연간용량을 산정하고 있으나, 변수에 대한 명확한 정의가 이루어지고 있지 않아 사용자의 해석에 따라 상이한 결과값이 도출될 가능성이 있으며, 항공기의 지연이 고려되지 않는다는 점에서 실무적 제약이 내재되어 있다. 이러한 실무적 한계를 개선하기 위한 방법으로, 본 논문에서는 미시적 항공교통 시뮬레이션 모형을 활용하여 활주로를 이용하는 항공기의 평균 지연시간을 측정하고, 이를 기준으로 제주국제공항 활주로의 일일용량을 분석, 최종적으로 연간용량을 산정하는 방법을 소개하였다. 또한, 시뮬레이션 모형 구축 및 검증에 위한 자료수집, 분석과정과 검증결과를 설명하였다. 제주국제공항의 일일용량 및 연간용량 분석 결과, 각각 약 460회, 약 169,000회로 산정되었다.

Keywords

aircraft delay, Jeju international airport, runway capacity, simulation, TAAM
항공기 지연, 제주국제공항, 활주로 용량, 시뮬레이션, TAAM

* : Corresponding Author
hbaik@kau.ac.kr, Phone: +82-2-300-0373, Fax: +82-3-300-5151

Received 3 December 2014, Accepted 23 February 2015

서론

1. 연구의 배경 및 목적

지속적으로 증가하고 있는 제주 노선의 저비용 항공사의 점유율과 2012년 중국인 무비자입국 허용 등의 이유로, 제주국제공항의 여객수요는 꾸준히 증가하고 있으며 2013년에는 한 해 관광객이 천만 명을 넘어서는 위업을 달성하였다.

이러한 여객객 증가에 비례하여, 제주국제공항의 운항횟수 또한 지난 5년간 평균 6.5%의 증가세를 보이고 있다. 특히, 2013년은 전년대비 8.5% 증가한 약 131,000회를 기록하였다¹⁾(Table 1 참조). 이는 MOLIT(2011)에서 예측한 (고성장 가정하에서의) 2015년 전망 수요 예측치인 127,000회를 뛰어 넘는 수치로 제주국제공항의 항공수요가 예상보다 빠르게 증가하고 있음을 보여주고 있다.

이와 같은 항공기 운항 수요의 급증은 제주지역 특유의 국지적 기상여건과 맞물려 빈번한 항공기 지연의 원인이 되고 있으며, 그 결과 제주공항(2012년 기준)은 항공기 운항 지연율 5.6%로 우리나라 공항 중 가장 높은 수치를 기록하고 있다¹⁾. 특히 제주국제공항의 경우 교차활주로 2본을 운영 중이나, 31활주로의 경우 짧은 길이와 지형장애물로 인해 이륙전용으로만 사용할 수 있어 활주로 사용의 제약이 발생하고 있다. 항공수요 증가추세와 현재의 공항 시설을 고려할 때 제주국제공항은 가까운 장래에 처리능력이 한계에 다다를 것으로 예상되고 있어, 처리능력에 대한 재평가가 시급한 상황이다.

Table 1. Growth rates of Jeju Airport in last 5 years

Year	Departure	Arrival	Total	Growth Rate
2009	50,100	50,061	100,161	4.6%
2010	52,131	52,101	104,232	4.1%
2011	56,811	56,780	113,591	9.0%
2012	60,444	60,385	120,829	6.4%
2013	65,570	65,549	131,119	8.5%

1) Airportal System Homepage

2) 공항의 용량은 계류장/게이트 처리용량, 활주로/유도로 처리용량, 여객 터미널 처리용량, 항공교통관제업무 처리용량 중 가장 작은 값으로 결정되지만 (MOLIT(2012)), 일반적으로 건설기간 및 비용이 상대적으로 많이 소요되는 활주로의 용량을 공항전체의 용량으로 결정하는 것이 관례이다.

3) Neufville R. D.(2013)

4) Total Airspace and Airport Modeller, Jeppesen사의 항공교통시뮬레이션 모형

공항의 처리능력을 가늠할 수 있는 활주로의 용량 산정은 장래 공항계획 수립 뿐 아니라 현 공항시설의 효율적인 활용이라는 측면에서 반드시 수행되어야 하는 필수적인 작업이다²⁾. 현재 실무에서 주로 사용되는 FAA의 연간용량 산정방식(FAA(1983))은 수식에 포함된 각항에 대한 명확한 정의가 이루지고 있지 않아, 사용자의 해석에 따라 상이한 결과 값이 도출될 가능성을 내재하고 있다. 또한, 실제 현장에서 느끼는 공항의 서비스 수준(Level-Of-Service, LOS)을 평가하는 지표인 항공기 지연시간³⁾이 고려되지 않은 단순수식에 기반하고 있어, 공항 운영상황을 반영하고 있지 않다는 실무적인 제약을 가지고 있다.

이러한 실무적 한계를 개선하기 위한 방법으로, 본 논문에서는 미시적 항공교통 시뮬레이션 모형을 활용하여 항공기의 평균 지연시간을 측정하고, 이를 기준으로 제주국제공항 활주로의 연간 용량을 산정하는 방법을 소개하고자 한다.

2. 연구의 내용 및 방법

본 연구는 다음의 4단계를 거쳐 수행되었다. 1) 우선, 미시적 항공교통 시뮬레이션 모델인 TAAM⁴⁾을 활용하여 제주국제공항의 시뮬레이션 모형을 구축하고, 2) 시뮬레이션 분석결과와 신뢰성 확보를 위한 시뮬레이션 모형의 검증을 수행하였으며, 3) 검증된 시뮬레이션 모형을 활용하여 시나리오 분석을 수행하고, 4) 분석결과 도출된 항공기 지연시간을 고려하여 활주로 용량을 산정하였다.

각 단계별 세부적인 수행과정은 다음과 같다. 먼저, 공항시설물 도면, 분석대상일의 운항스케줄 자료 및 항공기 관제규정 등 기초자료를 입력하여 기본 시뮬레이션 모형을 구축하였다. (기본값으로 설정된) 기본 시뮬레이션 모형의 내재변수(Parameter)의 조절을 통해 모형의 정확성을 향상시키는 모형의 정산(Calibration)과정과 최종 시뮬레이션 모형의 정확성을 검토하는 검증(Validation)작업을 수행하였다. 본 연구에서 모형 검증은 관련기관으로부터 제공받은 지상 및 공역에서의 항

공기 항적자료에서 추출된 실제 항공기 운항자료의 관측 값과 시뮬레이션 모형으로부터 도출된 모형값의 비교⁵⁾를 통해 이루어 졌다.

활주로 용량 산정을 위한 시뮬레이션 분석은 i) 기본 가정 및 분석 시나리오 설정, ii) 시뮬레이션 분석, iii) 각 시나리오별 항공기 지연시간 산출의 과정을 통해 수행되었다. 이 때, 항공기당 평균 지연시간이 5분⁶⁾이 되는 하루 전체 수요를 실용 일일용량⁷⁾으로 산정 및 제시하였다.

본 논문의 주요 구성은 다음과 같다. 활주로 용량의 정의와 용량 분석과 관련된 문헌 및 기존연구를 고찰하고 (2장), 시뮬레이션 모형의 구축 및 검증과정을 설명하며 (3장), 검증된 시뮬레이션 모형을 활용하여 제주국 제공항의 활주로 일일용량 분석 및 연간용량을 산출한다 (4장).

기존 문헌 고찰

식(1)은 FAA(1983)에서 발행한 AC 150/5060-5 Airport Capacity and Delay에 제시된 활주로의 연간 용량 산정 방식으로, 실무적으로 가장 널리 사용되는 방법이다.

$$ASV = C_w \times D \times H \quad (1)$$

식(1)에서 ASV(Annual Service Volume)는 연간 용량, C_w 는 가중 평균된 시간당 용량, D는 Daily Factor로 연간수요 대비 첨두월 일평균 운항수요의 비율을 의미하고, H는 Hourly Factor로 일평균 수요대비 첨두월 평균 첨두시 수요의 비율을 의미한다. D와 H Factor는 공항의 실질적인 운영시간을 반영하기 위한 Factor로써, FAA에서 제공하는 참조표(Table 2)에 의해 산정되고 있다. Table 2에서보는 바와 같이, D와 H Factor

Table 2. Typical demand ratios

Mix Index	Daily (D)	Hourly (H)
0-20	280-310	7-11
21-50	300-320	10-13
51-180	310-350	11-15

는 범위로 주어지며, 분석가의 주관적 판단에 의해 결정되어 산정된 연간용량의 불확실성을 높이는 원인이 되고 있다.

한편, C_w 는 활주로 구성, 혼합지수(Mix Index), 도착비율, 활주로 사용 형태 등을 고려하여 계산된 시간당 용량이지만, 우리나라의 경우 항공기의 지연시간이 고려되지 않은 시간당 절대용량⁸⁾이 적용되고 있다(MOLIT (2011), Lee K. S.(2013)).

여기서 중요한 점은 C_w 값에 (항공기당 평균 지연시간이 고려된) 실용용량이 적용되어야 하는지, (지연시간을 고려하지 않은 최대 처리량인) 절대용량이 사용되어야 하는지에 대한 분명한 정의가 없는 실정이다.

예를 들어, Lee K. S.(2013)은 Harris 모형에 의해 산정된 시간당 용량(C_w)을 식(1)에 적용하여 산정하였으며, 최종적으로 활주로의 시간당 용량 및 연간 용량을 각각 43회, 약 180,000회⁹⁾로 제시하였다.

미국 TRB¹⁰⁾(2012)에서 발행한 ACRP¹¹⁾ Report 79에서는 활주로 용량산정 방법을 분석의 정밀도에 따라 Table 3과 같이 레벨 1부터 5까지로 구분하고, 각 단계별 특성을 정의하고 있다. 여기서, 시뮬레이션 모형을 활용하는 레벨 5 수준의 분석방법을 제외한 레벨 1-4는 항공기의 지연시간이 고려되지 않은 수식기반 산정방법이다. 실무에서 가장 많이 적용되고 있는 Harris 모형은 레벨 3에 해당하는 방법으로, 지연시간을 고려하지 않고 기중 혼합률, 활주로점유시간 및 항공기간 분리간격에 따라 활주로 용량을 산정하는 방법이다. 반면, 레벨 5에 해당하는 시뮬레이션 분석 방법은 항공기 운항특성, 공항 및 공역 구축 등 다양한 항공교통요소들을 통해 정밀

5) 관측값과 모형값의 비교를 위해 사용된 지표(즉 검증지표)는 다음과 같다. i) 탈출유도로 이용현황, ii) 활주로 점유시간, iii) 도착 항공기 간 분리시간
 6) 시간당 항공기 수요가 증가하게 되면 항공기당 평균지연시간 역시 증가하게 된다. 이때 각 항공기당 평균 지연시간이 수용가능한 적정한 수준(보통 3-5분으로 정의)이 발생할 때의 시간당 항공기 운항횟수를 실용용량으로 정의한다(FAA(2002)). 본 연구에서는 제주국제공항의 특성을 고려하여 항공기당 평균 5분 지연기준을 적용하여 실용용량을 산정하였다.
 7) 수용가능한 수준의 지연(5분)이 발생할 때의 항공기 운항횟수. 즉, 항공기당 평균 지연시간이 5분일 때의 항공기 처리량
 8) 항공기의 지연을 고려하지 않고, 주어진 활주로가 1시간 동안 최대로 처리할 수 있는 항공기 운항횟수. 즉, 항공기의 지연이 고려되지 않은 물리적인 최대 가능 처리량
 9) $180,000 (=ASV) \approx 43 (=C_w) \times 350 (=D) \times 12 (=H)$
 10) TRB(Transportation Research Board)
 11) ACRP(Airport Cooperative Research Program)

Table 3. Modeling sophistication for analyzing airfield capacity

Level	Description	Examples	Data Requirements
1	Table Lookup	FAA Lookup Table	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

한 용량 분석이 가능한 방법이다. 하지만 레벨 5는 레벨 1-4에 비해, 시뮬레이션 모형 구축 및 검증에 소요되는 시간으로 인하여 분석 기간이 오래 걸리며, 시뮬레이션 사용료로 인해 비용도 증가하게 된다.

세계적으로 활주로 용량분석에 활용되는 시뮬레이션 모형에는 SIMMOD, TAAM, RAMS가 있다(Norman J. A.(2011)). 이 가운데 TAAM 모형을 활용하여 활주로 용량을 산정한 해외 사례의 경우, Polak F. R. (1997)은 스키폴국제공항의 용량을 산정하기 위해 TAAM 모형을 활용하였으며, Simmons B. (2000)이 로건국제공항의 활주로 용량과 항공기 지연을 분석하였고, Subramanian P.(2002)이 필라델피아국제공항의 활주로 배치형태에 따른 용량산정에 관한 연구를 수행한 사례가 있다.

국내에서 TAAM 모형을 활용하여 활주로 용량을 산정한 경우, Posco Engineering Consortium(2013)에서 시뮬레이션 모형인 TAAM을 활용하여 항공기당 평균 지연시간을 고려한 인천국제공항 활주로의 시간당 실용용량을 산정하였다. 이는 레벨 5 수준에 해당하는 방법으로, 항공기 지연시간을 고려한 용량산정 방법으로 가장 정밀도가 높은 분석 방법이다. 최종적으로, 연간용량은 시뮬레이션 분석을 통해 산정된 실용용량을 식(1)의 C_w 값으로 적용하여 산출하였다.

활주로의 시간당 용량 기반의 방법과는 달리 Branko B.(2011)은 시뮬레이션 모형가운데 하나인 SIMMOD를 활용하여 항공기 지연시간을 산정하고, 이를 토대로 활주로의 일일용량을 산정하였다. 또한, 산정된 공항의

일일용량을 토대로 베를린국제공항의 포화시점을 예측¹²⁾하는 방법을 제시하였다.

본 연구에서는 검증을 거친 시뮬레이션 모형, TAAM을 활용한 레벨 5 수준의 분석방법을 통해 지연시간을 고려한 제주국제공항의 실용용량을 산정하고자 한다¹³⁾. 이 때, Branko B.(2011)이 제시한 방법에 따라 항공기당 평균 지연시간이 5분이 되는 일일수요를 실용용량으로 산정하고, (기존 FAA의 C_w , H, D로 구성된 수식적 산정이 아닌) 일일용량 기반의 연간용량을 산정한다.

제주국제공항의 활주로 연간용량 산정

1. 시뮬레이션 모형 구축

시뮬레이션모형 구축을 위해 제주국제공항의 2013년도 ADPM (Average Day Peak Month), 즉 침두월의 일평균 수요와 근접한 수요를 기록한 2013년 8월 13일을 시뮬레이션모형 구축 및 검증 대상으로 선정하였으며, 다음의 단계별 과정을 통해 기본 시뮬레이션모형이 구축되었다.

i) 우선, 공항의 시설물도면(Figure 1), 운항스케줄 자료 및 관제 규칙을 입력하여 기본적인 모형을 구축하였으며, ii) 활주로 접지위치, 유도도 상에서 항공기 이동속도, 탈출유도로 이용 현황을 입력하여 항공기 지상 이동규칙을 설정하고, iii) 제주국제공항의 ARTS¹⁴⁾ 자료 분석 및 제주국제공항의 항공교통관제사와의 면담을

12) 산출된 용량을 기반으로, 3-5%의 연평균 증가율에 따른 예측수요에 대한 각각의 포화시점을 예측함으로써 향후 수요예측치가 나올 경우 유연하게 포화시점을 예측할 수 있도록 하였다.

13) TAAM 시뮬레이션을 활용하여 공항의 용량 산정 시, 지연시간을 고려한 실용용량 뿐만 아니라 공항이 최대로 처리할 수 있는 절대용량의 산정도 가능하다.

14) Automated Radar Terminal System. 항공교통 관제를 위한 터미널 레이더 정보 처리 시스템

Table 4. Separation between arrival aircraft

Leading-Following Aircraft	Aircraft Category ¹⁵⁾ (Leading-Following)	Separation (nm)
Arrival-Arrival	H-H	5
	H-M	5
	M-H	5
	M-M	5
Arrival-Departure-Arrival	H-dep-H	8
	H-dep-M	8
	M-dep-H	8
	M-dep-M	8

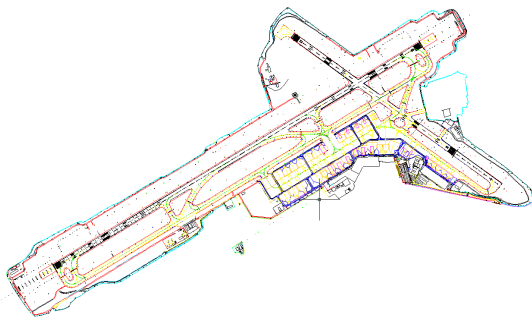


Figure 1. Jeju international airport aerodrome chart

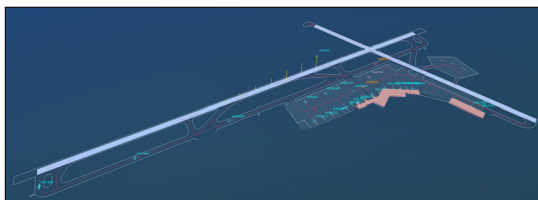


Figure 2. Jeju international airport simulation model

통해 도착 항공기 간 분리거리를 분석 후, Table 4와 같이 입력하였다. 최종적으로 Figure 2와 같이 제주국제공항의 시뮬레이션 기본모형을 구축하였다.

2. 시뮬레이션 모형 검증

시뮬레이션 모형 구축 과정에 도면, 항공기 운항특성 자료, 관제 자료 등의 수집, 분석 및 입력 시 오류가 발생할 수 있으며, 시뮬레이션 모형 내재변수(parameter)가 조정되지 않은 상태에서는 실제 관측값¹⁶⁾과 시뮬레이션 모형의 모형값에 차이가 생길 수 있다. 따라서 구축

된 시뮬레이션의 기초모형은 1차 검증(Verification)과 2차 검증(Validation)의 두 단계 과정을 거쳐 수정 및 보완되어야 한다.

1) 1차 검증(Verification)

1차 검증은 모형이 오류 없이 정상적으로 수행되는지를 확인하는 과정으로 이 과정을 통해 비정상적인 항공기 이동동선이 발생한 경우 오류의 원인을 제거하였다. Table 5는 제주국제공항의 대표 활주로 사용방향인 활주로 07이 사용되는 경우 (시뮬레이션 결과 나타난) 모든 출·도착 항공기의 유도도 이동경로를 나타낸 것으로, 그림에서 보는 바와 같이 출발 및 도착 항공기의 이동이 정상적으로 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

2) 2차 검증(Validation)

2차 검증은 1차 검증을 마친 모형이 실제 현상을 제대로 반영하고 있는지를 검토하는 과정으로, 선정된 검증지표에 대한 실제 관측값과 시뮬레이션의 모형값의 차이, 즉 모형의 정확성을 검토하였다. 본 연구에서 사용된 검증지표는 탈출유도도 이용비율, 활주로 점유시간, 도착 항공기 간 분리시간간격이다.

Table 6은 실제 관측된 탈출유도도(P4, P5, 활주로 31)별 도착 항공기의 이용비율과 시뮬레이션 분석 결과 나타난 탈출유도도별 이용비율을 비교한 것으로, 관측값

Table 5. Verification of aircraft track on the ground

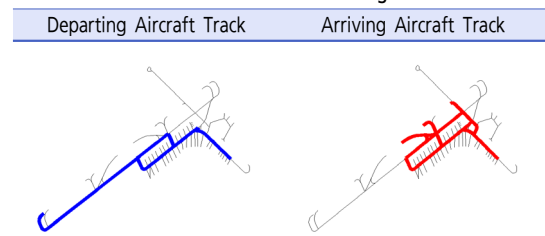


Table 6. Validation of percentage using exit taxiway

Exit Taxiway	Observed Data	Simulation Result
Runway 31	6%	5%
P4	27%	29%
P5	67%	66%
Total	100%	100%

15) 항공기 등급은 ICAO 기준에 의해 Light, Medium, Heavy로 나뉘며, 제주국제공항의 경우 Light 항공기는 운항하지 않기 때문에, 본 연구에서는 H-H, H-M, M-H, M-M 상황의 분리거리만을 입력하였다.

16) 한국공항공사와 제주항공관리사무소에서 제공한 실제 항공기의 운항자료를 분석한 값

과 모형값의 차이가 1-2% 이내로 매우 근사한 결과를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

Table 7은 관측값과 시뮬레이션 모형값의 활주로 점유시간을 비교하고 있다. 예를 들어, 활주로 31을 탈출 유도도로 사용하는 항공기의 활주로 점유시간은 75초로 관측된 반면, 시뮬레이션 모형값은 80초로 산출되었다. P4를 사용하는 항공기의 관측값과 시뮬레이션 모형값은 각각 63초, 66초이며, P5를 사용하는 항공기는 각각 60초, 58초로 분석되어, 전체적으로 실제 관측값과 시뮬레이션 모형값의 차이가 10% 이내인 것을 확인하였다.

Figure 3은 도착 항공기간 분리시간에 대한 검증 결과로, 막대그래프는 ARTS시스템을 통해 수집된 항적자료 분석을 통해 산출된 도착 항공기간 실제 분리시간 분포를, 꺾은선 그래프는 시뮬레이션에서 도출된 분리시간 분포를 나타낸다. 실제 관측값은 2013년 8월 한 달 동안의 모든 항공기 중 도착-도착 항공기간 분리시간을 추출한 것이며, 시뮬레이션 모형값은 검증 대상일인 2013년 8월 13일 하루 동안의 모든 항공기 중 도착-도착 항공기간 분리시간으로 구성하였다. 그림에서 왼쪽 상단은 관측값, 오른쪽 상단은 시뮬레이션 모형값의 총 항공기 대수(N), 평균(Mean), 표준편차(STD)를 의미한다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 관측된 평균 분리시간은 207초인 반면, 시뮬레이션 분석으로 산정된 도착 항공

기의 평균 분리시간은 218초로 나타나 약 5%의 모형오차가 발생하는 것으로 나타났다.

시뮬레이션 분석에서 발생하는 모형오차는 모형 자체의 구조적, 기능적 한계, 입력 및 검증 자료의 한계 등 다양한 원인에서 기인하며, 한계 오차범위의 설정은 연구의 목적에 따라 달라진다. 본 연구에서는 탈출유도도 이용비율, 활주로점유시간, 항공기간 분리시간 검증 결과, 나타난 최대 10%의 오차범위를 타당한 범위이내인 것으로 간주하고, 해당 모형을 활용하여 활주로 용량 분석을 진행하였다.

3. 활주로 용량 분석

1) 시뮬레이션 분석 시나리오 설정

제주국제공항의 일일용량을 산정하기 위해 분석대상일인 2013년 8월 13일 항공기 운항스케줄(출·도착 항공기 총 398대)을 기본수요(0%)로 설정하고, 10%씩 수요를 증가시켜 50% 증가된 수요까지 생성하여, 총 6개의 시뮬레이션 분석 시나리오를 설정하였다. Figure 4는 설정된 각 분석 시나리오의 시간대별 운항횟수를 나타내고 있다. 제주국제공항은 24시간 운영 공항이지만, 소음 등의 문제로 실질적인 운영시간은 5시부터 23시까지이다. 따라서 실질적인 운영시간 내에서 10%씩 수요를 증가시켜 수요 시나리오를 설정하였다.

제주국제공항은 교차활주로(07-25, 13-31)로 구성된 2본의 활주로를 운영하고 있지만, 기초자료 분석결과 전체 운항항공기 95% 이상이 07-25 활주로를 이용하여 이·착륙하고 있으며, 특히 전체 항공기의 72%가 활주로 07을 이용하는 것으로 나타났다. 이러한 기초 분석을 토대로, 본 연구에서는 제주국제공항의 대표 활주로 사용방향인 활주로 07만을 분석대상으로 설정하였으

Table 7. Validation of runway occupancy time

Exit Taxiway	Observed Data	Simulation Result
Runway 31	75sec	80sec
P4	63sec	66sec
P5	60sec	58sec
Total	62sec	62sec

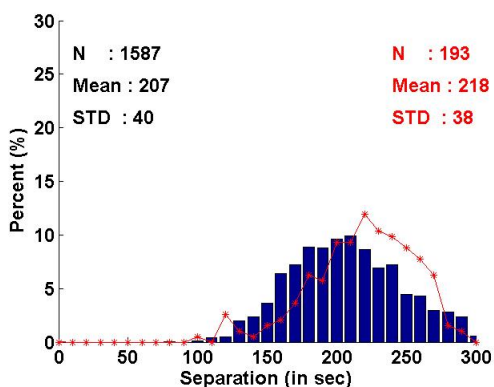


Figure 3. Time separation of arrival-arrival

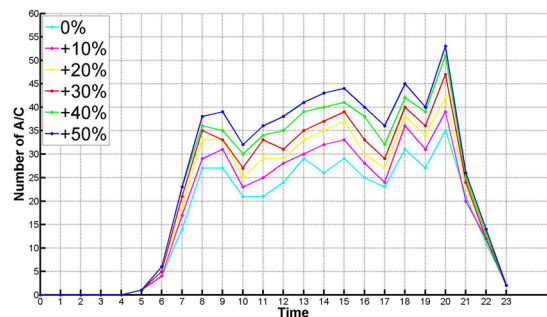


Figure 4. Operations per time by scenarios

며, 정상적인 기상여건¹⁷⁾ 하에서의 활주로 운영을 가정 하였다.

2) 항공기 지연시간을 고려한 활주로 용량산정

일반적으로 활주로 용량에 따른 항공기 지연은 출·도착항공기를 구분하여 정의된다. 도착 항공기 지연시간은 도착 항공기간 분리거리 확보를 위해 후행 항공기를 체공 또는 레이더 유도 등의 방법으로 지연시킨 시간을 의미하며, 출발 항공기 지연시간은 출발항공기가 활주로의 출발 대기열(Departure Queue)에 진입한 시점부터 이륙허가를 받을 때까지의 시간을 의미한다. 활주로의 실용용량은 출·도착 항공기의 평균 지연시간이 5분이 될 때의 항공기 수으로 정의하고 이를 기준으로 제주국제공항의 용량을 분석하였다.

Figure 5는 증가수요 시나리오별로 각각 5회씩 시뮬레이션을 수행하여 산정된 각 시나리오별 항공기 평균 지연시간 분석결과를 나타낸 것이다. 선형보간법(Linear Interpolation)을 이용하여 항공기당 평균 지연시간이 5분이 되는 일일수요를 산정한 결과 현재 일일수요(398회)보다 16% 증가된 463회가 제주국제공항의 서비스 수준을 고려한 활주로 일일 실용용량인 것으로 분석되었다.

Figure 5의 각 포인트에서 수직으로 그려진 선은 각 시나리오마다 5회의 시뮬레이션 수행 결과 분석된 각 시뮬레이션 수행별 항공기의 평균 지연시간으로, 수요가 증가할수록 지연시간의 폭이 넓어짐을 확인할 수 있다. 각 시나리오에 따른 항공기 지연시간을 더욱 자세히 살

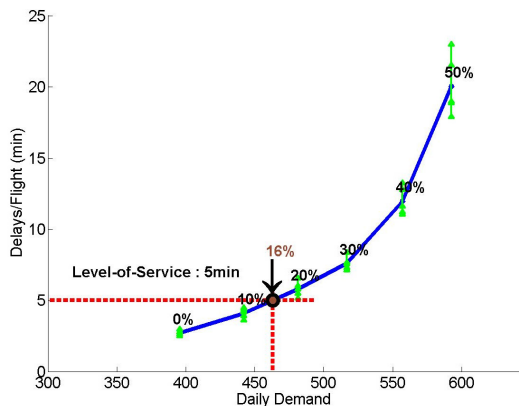


Figure 5. Delay per flight by increasing daily demand

펴보기 위해, Figure 6과 같이 각 시나리오별(0-50%)로 5회씩 수행한 시뮬레이션의 모든 항공기 지연시간을 분석하였다. 이는 모든 항공기 지연시간의 히스토그램으로, 시나리오 0%(현재)의 경우 항공기당 지연시간이 평균 3분, 최대 17분, 표준편차는 3분으로 나타났다. 제주국제공항의 수요가 현재 보다 20% 증가할 경우, 항공기 평균 지연시간은 6분으로 증가하며, 최대지연 시간은 25분까지 증가할 것으로 분석되었다. Figure 5와 6은 이러한 수요 증가에 따른 항공기 운항지연시간의 변화를 나타낸 것으로, 수요가 증가할수록 공항의 서비스 수준은 급격히 저하되는 현상을 보여주고 있다.

앞서 산정한 제주국제공항의 활주로 실용용량은 일일 용량이므로, 이 값에 365일을 곱한 값을 제주국제공항의 활주로 연간용량으로 산정한다. 즉, 제주국제공항의 연간용량은 169,000회(=463(회/일)x365(일/년))로 산정되었다. 이러한 연간용량은 항공기 지연시간이 고려된 실용용량 기반의 연간용량으로, 기존의 항공기 지연시간이 고려되지 않은 FAA 산정방식에 의한 연간용량 비해 실무적으로 보다 더 유의미한 결과인 것으로 사료 된다.

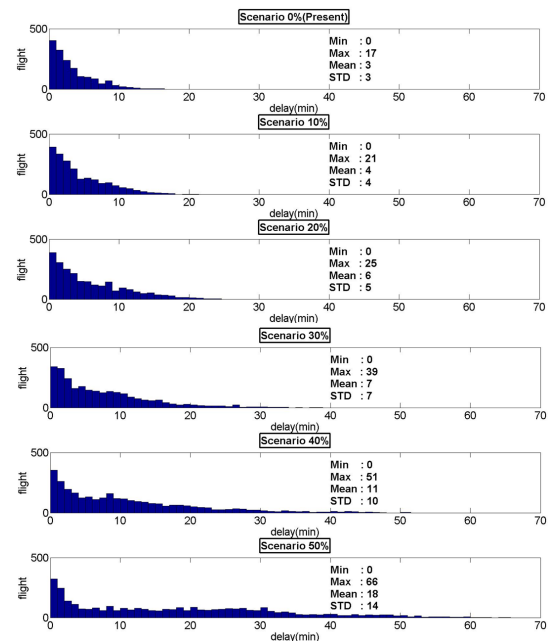


Figure 6. Delays of all flights per scenario

17) 실제로 제주국제공항의 경우 갑작스런 기상변화로 활주로 방향이 변환되는 상황이 적잖이 발생하고 있으며, 이러한 기상조건은 항공기 지연을 가중시키며 결과적으로 공항의 용량을 저하시키는 요인으로 작용하고 있다. 이러한 비정상적인 기상여건에 따른 활주로 용량분석은 본 연구의 범위에서 제외하였다.

결론 및 향후연구

본 연구에서는 항공기당 평균 지연시간을 고려하여 제주국제공항의 활주로 일일 및 연간용량을 산정하였다. 항공기당 평균 지연시간은 ACRP Report 79(2012)에서 제시한 레벨 5 수준의 분석이 가능한 TAAM 시뮬레이션 모형을 활용하여 분석하였다.

시뮬레이션 분석을 위해 2013년 8월 13일의 하루 스케줄을 기본(0%)으로 하여 50%까지 10%씩 수요를 증가시킨 분석 시나리오를 설정하였으며, 각 시나리오별 시뮬레이션 분석을 통해 항공기당 평균 지연시간을 산출하였다. 항공기 운항수요가 증가함에 따라 항공기 평균 지연시간은 기하급수적으로 증가하게 되며, 이 때 항공기 평균 지연시간이 5분이 되는 일일수요를 활주로 실용용량으로 산정하였다.

분석결과 2013년 일일수요(398회)에서 16% 증가한 463회를 제주국제공항의 활주로 실용 일일용량으로 산정하였으며, 이를 기반으로 169,000회를 연간용량으로 산정하였다.

본 연구의 경우, 기존의 연간용량 산정방법인 시간당 용량을 활용하여 수식에 의해 연간용량을 산정한 방법이 아닌, 시뮬레이션을 활용하여 항공기의 지연시간을 고려한 일일용량을 산정하여 이를 기반으로 연간용량을 산정하였다. 또한, 항공기 운항과 관련된 실제 관측값을 수집하여 시뮬레이션 모형값과의 비교를 통해 시뮬레이션 모형 검증은 거쳐 보다 고도화된 분석을 수행하였기에 기존 연구와 차별성을 두었다고 판단된다. 단, 분석을 위한 시뮬레이션 모형의 구축 및 검증에 상당한 시간과 비용이 투자된다는 것이 단점으로 지적될 수 있다. 하지만, 본 논문에서는 항공기 지연을 출도착 항공기별 지연을 명확하게 구분 및 정의함으로써 기존 연구에서 미흡했던 부분을 보완하였다는 점에서 실무적인 의미가 있다고 할 수 있다.

현재 제주국제공항은 지형 특성상 활주로 방향이 수시로 바뀌고 있어 활주로 변경에 따른 부가적인 지연시간도 발생할 것으로 예상되지만 본 연구에서는 활주로 07 방향만을 분석하였다. 또한 항공기당 평균 지연시간 산출 시, 게이트에서 발생한 지연시간은 포함하지 않은 순수 활주로 용량만으로 공항의 용량을 산정하였다. 또한, 공항 용량 산정 시 매우 중요한 요소인 관제사(특히, 접근관제소의 관제사)의 업무부하도 고려해야하지만, 본 연구에서는 고려되지 않았다. 따라서 활주로 07 및 25, 양방향에 대한 분석과 게이트 및 활주로에서 발생하는

총 지연시간을 포함하고, 관제사의 업무부하를 고려한 용량산정 연구를 향후 연구과제로 남기고자 한다.

REFERENCES

- Branko B., Joachim R. D. (2011), Airport Capacity and Demand Calculations by Simulation - The Case of Berlin-Brandenburg International Airport, NETNOMICS, 12(3), 161-181.
- FAA (1983), Airport Capacity and Delay, AC 150/5060-5, 16-17.
- FAA (2002), National Plan of Integrated Airport System (2001-2005), Chapter 2: Condition and Performance.
- Lee K. S., Ko S. H. (2013), A Study on the Jeju International Airport Capacity Limit Point, Journal of Aviation Management Society of Korea, 11(5), 41-63.
- MOLIT (2011), The 4th Airport Master Plan (2011-2015), 22-64.
- MOLIT (2012), Guideline for the establishment of Airport Capacity, 2-7.
- Neufville R. D., Odoni A. (2013), Airport Systems: Planning, Design and Management, 2nd Edition, McGraw-Hill, Chapter 10: Airfield Capacity.
- Norman J. A., Saleh M., Paul H. W. (2011), Airport Engineering: Planning, Design and Development of 21st Century Airports, 4th Edition, John Wiley & Sons, Chapter 15: Airport Modeling and Simulation.
- Polak F. R. (1997), Airport Modelling: Capacity Analysis of Schiphol Airport in 2015, 1st Air Traffic Management R&D Seminar, France.
- Posco Engineering Consortium, Korea Aerospace University (2013), Enforcement Design of Airside Facility in the Incheon International Airport (3rd Phase) - Airfield Simulation (인천국제공항 3단계 Airside시설 실시설계 용역 - Airfield 시뮬레이션 분석), 75-92.
- Simmons B., Boan L., Massimini P. (2000), Simulation Analysis of Dual CRDA Arrival Streams to Runways 27 and 33L at Boston Logan International Airport, Report MTR 00W0000128.
- Subramanian P. (2002), A Simulation Study to Investigate Runway Capacity Using TAAM, Proceedings of The 2002 Winter Simulation Conference, 2, IEEE,

1235-1243.

Transportation Research Board (2012), Evaluating Airfield Capacity, ACRP Report 79, Chapter 3: Existing Airfield Capacity Evaluation Tools.

Airportal System Homepage, <http://www.airportal.go.kr>, Aviation Statistics, 2014.05.22.

✎ 주 작성자 : 박지숙

✎ 교신저자 : 백호중

✎ 논문투고일 : 2014. 12. 3

✎ 논문심사일 : 2015. 1. 29 (1차)

2015. 2. 23 (2차)

✎ 심사판정일 : 2015. 2. 23

✎ 반론접수기한 : 2015. 8. 31

✎ 3인 익명 심사필

✎ 1인 abstract 교정필