

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2024.32.4.60>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

공항 수용량 산정 동향

이승준*, 이주환**, 백호종***

An Overview of Current Research and Developments in Airport Capacity Estimation

Seungjun Lee*, Juhwan Lee**, Hojong Baik***

ABSTRACT

The continuous increase in air traffic causes airport congestion and inconvenience to passengers using the airport. Saturation of capacity is one of the factors that lowers the level of service of the airport, and it affects not only inconvenience caused by flight delays but also economic losses such as increased fuel consumption due to waiting. Therefore, it cannot be overlooked to frequently estimate and evaluate the capacity of existing airport facilities in accordance with increasing demand. In this study, the overall trend of airport capacity estimation in the past was analyzed and how it was applied was studied. Prior to analyzing the trend of capacity estimation, it was possible to define it as aircraft throughput per unit time through a literature study on the definition of airport capacity. Airport capacity estimation methods can be divided into macroscopic and microscopic methods. Absolute capacity can be calculated in a macroscopic analysis, and practical capacity can be calculated in a microscopic analysis. The biggest factor that differentiates absolute capacity from practical capacity is whether or not delay is reflected. In the case of absolute capacity, the delay is not reflected, but in the case of practical capacity, the capacity is calculated considering the delay. In addition, the absolute capacity uses a calculation formula to calculate the capacity relatively intuitively and simply, that is, macroscopically, and the practical capacity can calculate the capacity microscopically as the model is relatively specific using a simulation model.

Key Words : Airport Capacity(공항 수용량), Formulation Model(산정식 모델), Simulation Model(시뮬레이션 모델), Absolute Capacity(절대용량), Practical Capacity(실용용량)

1. 서 론

글로벌 항공운송시장은 기술의 발전과 함께 성장해

왔다. 비록 최근 COVID-19으로 국가마다 하늘길을 봉쇄하거나 통제하는 등의 정책으로 항공수요가 줄어들었고 주춤하였지만, Post Corona를 맞이하는 시점에서 항공운송시장 수요는 정상적인 상승세 다시 보이기 시작하였다. 이미 국제민간항공기구(ICAO, International Civil Aviation Organization)는 현재의 공역, 공항 및 항행 서비스 수준과 운영 형태로는 지속적으로 증가하는 항공교통량 수요처리가 곤란할 것으로 예상하여 GANP(global air navigation plan, 글로벌 항행계획)와 ASBUs(aviation system block upgrades) 프로

Received: 30. Sep. 2024, Revised: 14. Oct. 2024,

Accepted: 06. Nov. 2024

* 한서대학교 항공교통물류학과 조교수

** 한국항공대학교 항공교통물류학부 박사과정

*** 한국항공대학교 항공교통물류학부 교수

연락처자 E-mail : hojongbaik@gmail.com

연락처자 주소 : 경기도 고양시 덕양구 항공대학로 76

그램을 수립하고, 제38차 ICAO 총회(2013. 10월)에서 승인하여 다가오는 항공시장의 성장을 대비하도록 계약국에 이행계획을 수립하여 대비하도록 촉구하고 있다. 우리나라도 항공교통량 증가에 따라 공항의 지연과 혼잡이 가중됨에 따라 2017년 항공교통본부를 대구에 신설하는 등 효율적인 항공교통관리를 위한 대책을 수립하는 등의 방안을 강구하고 있다.

항공교통량의 증가로 인해 지연과 혼잡이 자주 발생되게 때문에 증가하는 항공교통수요에 맞추어 적절하게 대비하기 위해서는 공항의 포화시점을 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 특히, 공항은 게이트, 터미널, 활주로, 계류장 등 다양한 시설이 함께 위치한 물리적 공간으로 이들은 네트워크 형태로 연결되어 운영된다. 따라서 특정 시설의 처리 용량이 증대되더라도 다른 시설에서 병목현상이 발생되기 때문에 공항의 수용량 증가가 이루어지지 않을 수 있다(Lee, 2020). 예를 들어, 공항의 터미널이 증가하는 항공 여객을 수용할 정도로 충분하지만, 1본의 활주로만 운영된다면 이착륙을 위해 대기하는 항공기의 수는 증가하고 상당한 지연이 발생할 것이다. 결국 공항의 수용량은 현재 해당 공항의 수용능력을 평가할 수 있을 뿐만 아니라, 증가하는 항공교통 수요에 따른 대기열과 지연을 파악하고, 향후 효율적인 운영을 위한 방안을 모색하기 위한 지표로서 활용이 가능하다.

공항의 수용량 산정방법은 크게 산정식 모형에 의한 거시적 방법(macroscopic method)과 시뮬레이션에 의한 미시적 방법(microscopic method)으로 구분할 수 있다. 산정식 모형에 의한 방법은 항공기 성능(속도, 이동시간 등), 물리적 구성요소(활주로, 출·도착 절차 등) 등의 변수가 반영된 수식을 통해 공항의 수용량을 계산하는 방법으로 단위시간 동안 최대한 수용할 수 있는 항공기 처리량으로 수용량 값이 설정된다. 이러한 방법은 입력변수를 단순화함으로써 수용량을 빠르게 산정할 수 있으나, 복잡한 항공교통 흐름의 특징을 구체적으로 수식화하기 어렵고, 불확실성(randomness)을 반영하기 어렵다. 시뮬레이션 방법에 의한 미시적 방법은 배속 시뮬레이션(fast-time simulation) 등을 활용하는 방법으로, 항공기 운항성능에 따른 개별 항공기 위치 및 속도 등이 매 순간 계산되어 모형에 반영되어 수용량을 산정하는 방법이다. 시뮬레이션 구축 및 검증에 많은 시간과 비용이 소요되지만, 현실에 유사한 모형 구축이 가능하여 비교적 신뢰성 있는 분석결과를 도출할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 과거 공항 수용량 산정 연구들을 검토하고, 분석 동향을 파악하였다. 가장 먼저, 2장에서는 공항 수용량의 정의와 용도에 대해 문헌 고찰을 수행하였고, 3장에서는 공항 수용량 산정 동향을 산정식 이용 공항 수용량 산정과 시뮬레이션 이용 공항 수용량 산정으로 구분하여 산정 동향을 분석하였다. 4장에서는 공항 수용량 산정 동향을 종합하였는데, 각 분석 방법의 입력변수, 장·단점 등을 함께 분석하였고, 5장에서 결론 및 추후연구를 제시하였다.

II. 공항 수용량 정의 및 용도

공항의 수용량은 해당 공항을 구성하는 시설(즉, 활주로, 유도로, 주기장, 여객 터미널 등)의 개별 수용량을 산정하고, 그 가운데 가장 작은 수용량을 공항 전체의 수용량으로 산정하는 것이 일반적이다. 하지만, 공항시설 가운데 활주로는 주요 병목현상이 발생하는 지점이기도 하고, 건설비용 및 시간이 가장 많이 요구되는 시설이라는 현실적 이유를 고려하여 활주로 수용량을 공항 수용량으로 간주하기도 한다.

U.S. Congress(1984)의 Airport System Development에서는 공항 수용량을 "처리량(throughput)"과 "실용용량(practical capacity)" 두 가지로 정의하였다. 처리량(throughput)은 항공기 처리 실적으로 정의하는데, 이는 항공기가 항상 이륙 또는 착륙이 연이어 발생한다고 가정하며, 주어진 시간 내에 달성할 수 있는 최대 운항횟수로 측정한다. 반면에 실용용량(practical capacity)은 적정수준의 지연을 고려하여 수용할 수 있는 항공기 수로 정의하였다. 처리량과 실용용량을 그래프로 표현하면 Fig. 1과 같다. 이 그래프에서 수요(X축)가 처리량(throughput)의 한계에 도달함에 따라 지연(Y축)은 급격히 증가하며, 이론적으로 수요가 처리량 용량에 가

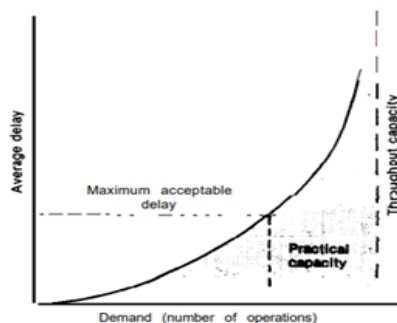


Fig. 1. Capacity graph example

까워지거나 같아질 경우 지연은 무한해진다. 아울러, U.S. Congress는 공항 수용량에 영향을 미치는 지연의 요소를 비행장 특성(활주로, 유도로, 계류장 배치 등), 공역 특성, 항공교통관제(절차, 관제규칙 등), 기상조건, 수요 특성 5가지로 구분하여 정의하고 있다.

Bell(1949)은 항공기 간 최소 분리 간격(시간 기준)을 고려한 일정 비율로 활주로 수용량을 정의하였고, Newell(1979)은 해당 시설이 비교적 장시간 동안 수용할 수 있는 최대 교통량의 평균 흐름으로, 원칙적으로 무한히 유지될 수 있는 수로 공항 수용량을 정의하였다. Hockey & Kanafani(1974)는 공항 수용량을 절대용량(ultimate capacity)과 실용용량(practical capacity)으로 정의하였는데, 절대용량은 지속적인 수요가 존재할 때 처리할 수 있는 최대 항공기 대수, 실용용량은 평균적으로 동일한 지연을 적용했을 때 항공기 운항 수로 정의하였다. De Neufville & Odoni(2003)는 공항 수용량을 (1) Maximum throughput capacity: 1시간 동안 ATM 규칙을 위반하지 않고 운항이 가능한 항공기 대수, (2) Practical hourly capacity: 항공기 당 4분의 지연을 가정했을 때 1시간 동안 운항이 가능한 항공기 대수, (3) Sustained capacity: 관제사의 업무량을 고려했을 때 합리적으로 운항을 유지할 수 있는 항공기 대수, (4) Declared capacity: 일정 수준의 서비스 수준(level of service)를 유지하면서 1시간 동안 운항이 가능한 항공기 대수, 이상 4가지로 분류하여 정의하면서, 취항 항공기 종류(fleet mix), 지연(delay), 기상조건(meteorological condition)을 고려하여야 한다고 강조하였다.

ICAO(2018)는 수용량을 DOC.9971 Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management에서 정의하고 있다. 수용량이라 함은 한 시간 동안 해당 시설이 수용할 수 있는 최대 항공기 대수로 항공교통 업무기관(air traffic services)에서 처리할 수 있는 교통량을 초과할 수 없다고 정의하고 있다. 아울러, Declared Capacity는 앞서 정의한 수용량을 관련 기관이 평가하여 선언한 수용량으로 정의하고 있고, 공항 수용량의 경우 사용 활주로, 활주로 운영방식, 항공기 간 분리 간격, 활주로 점유시간, 공항시설 등이 고려되어야 한다고 명시하고 있다.

국내의 경우, 국토교통부 훈령 제1188호 공항수용능력 설정지침(2019)에 따르면, 공항의 활주로, 계류장, 터미널 및 항공교통업무 등 주요 분야별 처리용량을 산출하여 가장 작은 처리용량을 전체 공항수용능력으로 설정하고 있으며, 시간당 항공기 처리 가능 대수

로 정의하고 있다[8].

종합해 보면, 공항 수용량은 절대용량(ultimate capacity)과 실용용량(practical capacity) 2가지로 분류할 수 있으며, 절대용량은 1시간 동안 처리할 수 있는 최대 처리용량으로, 활주로의 시간당 최대 항공기 처리량, 즉 모든 항공기가 정확하게 운항하여 완벽한 분리최저치가 적용된다는 가정하에 산정된 수용량으로 항공기 지연시간이 고려되지 않는 수용량이라 할 수 있겠다. 절대용량의 경우, 공항구조, 항공기 분리간격 등 최소한의 변수를 필요로 하며, 공항설계, 공항계획, 마스터플랜 수립 등의 단계에서 활용하거나, 활주로 등의 시설확장 또는 규모가 작은 소형 공항이나 혼잡이 비교적 덜한 공항의 수용량 산정에 적합하다.

실용용량은 수용 가능한 수준의 지연(delay)을 고려한 항공기 운항횟수로, 수요 증가에 따른 항공기당 평균 지연이 4분(또는 5분)일 때 활주로의 시간당 항공기 적정 처리량으로, 고려되는 변수로는 공항구조, 항공기 성능(분리 간격 등)뿐만 아니라, 추가로 기상 영향, 공역 혼잡 등으로 발생하는 지연 등이 추가되어 절대용량에 비해 더 많은 변수들이 고려된다. 실용용량은 교통량 또는 항공교통 수요가 비교적 높은 중·대형 공항의 수용량 산정 또는 특정 시점의 구체적인 수용량 산정이 요구되는 경우 적합한 방법이다.

III. 공항 수용량 산정 동향

본 장에서는 공항 수용량 산정 동향을 절대용량의 대표적인 방식인 산정식을 이용한 공항 수용량 산정과 실용용량의 방식인 시뮬레이션을 이용한 공항 수용량 산정으로 구분하여 수용량 산정 동향을 분석하였다.

3.1 산정식 이용 공항 수용량 산정

Poldy(1982)는 산식을 활용하여 활주로 수용량을 산출하였는데, 항공기 분리기준(separation standards), 항공기 특성(aircraft characteristic), 활주로 운영방식(runway configuration), 항공기 혼합률(fleet mix), 항공교통관제(air traffic control strategies) 등을 수용량 산정 모형의 입력변수로 정의하였다. 산정식에 의한 방법은 수요와 지연을 고려하지 않고, 단순히 활주로와 항공기 특성으로 수용량을 산출하는 방법으로, 활주로 확장 또는 공항계획이나 항공기간 분리기준을 변경하는 경우, 신기술을 도입하는 경우에 빠르게 수용량 산출

이 가능하다는 장점이 있지만, 지연이나 기상 등 부가적인 요소를 포함하지 않기 때문에, 현실적인 부분을 모두 반영하지 못한다는 단점이 있다고 시사하였다.

Gilbo(1993)는 항공교통의 전략적 관리를 위해 공항에서 정의한 수용량을 기준으로, 출·도착 항공기의 대기열을 최소화하는 최적화 산식을 활용하여 slot의 적정 수용량을 산출하였다. 최적화 모델의 참고자료로 활용되는 공항 수용량은 출·도착 항공기 수의 조합으로 Curve 또는 Envelope 형태로 Fig. 2와 같이 정의하였다.

최적화 산식을 적용한 수용량 산정방법은 출·도착 우선순위에 따라 다양한 결과를 산출하여 공항 운영자의 의사결정과정을 돕고 지연현황을 파악할 수 있어 항공교통 흐름관리에도 전략적 대응이 가능한 보조수단으로 적절하다.

LeighFisher(2012)는 기존 수용량 산정방법의 장·단점을 평가하고, 상황에 따른 산정방식을 5단계로 구분하여 Table 1과 같이 제시하였다.

공항 수용량 산정방법은 수학적 모델과 시뮬레이션 모델로 구분할 수 있는데, Table 1에서 Level 1, 2, 3은 수학적 모델로 산정 모형이 단순하고, 비교적 간단하게 수용량을 구할 수 있다. 그러나 다양한 확률 변수를 반영하지 못하는 한계가 있다. Level 4, 5는 시뮬레이션 모델로 확률 변수를 반영하여 현실에 가까운 결과를 얻을 수 있으나, 모형 구축과 검증에 비교적 많은 시간이 소요되고 시뮬레이션 tool을 활용할 수 있는 기술이 필요로 한다.

Ashford et al.(2011)은 활주로 수용량은 "지속적으로 처리 가능한 최대 항공기 운영 대수, 즉 특정 활주로 구성, 특정 기상 조건 및 허용 가능한 항공기 지연 수준에서 수행될 수 있는 도착과 출발 모두"로 정의

Table 1. Airport capacity estimation methods

레벨	방법론	방법론 예시	적용 예시
1	Table lookup	FAA lookup table	소형 공항 마스터 플랜.
2	Charts, spreadsheets	Spreadsheet model	공항 마스터 플랜
3	Analytical capacity model	Airfield capacity model	공항 수용량 연구
4	Airfield capacity simulation models	Runway simulator	지방공항 수용량 산정
5	Aircraft delay simulation models	TAAM, SIMMOD	중·대형 공항 수용량 산정

하고, 활주로 용량은 지속 가능한 처리량을 가정할 때, 평균 도착 간 비율의 역수로 정의하였다. 활주로 용량에 영향을 미치는 요인으로는 기상학적 조건, 항공기 도착 및 출발 비율, 혼잡 시간 동안의 ATM 절차, 관제사의 업무부하(workload)와 관련된 ATC 관련 사항 등을 제시하고 있으며, 수용량과 지연을 추정하기 위한 방법으로는 경험/실증적 접근법(empirical approach), 대기열 모형(queueing models), 분석적 접근법(analytical approach)으로 구분하여 제시하였다.

FAA(2010)는 분석적 방법(analytical method)을 이용하여 활주로, 유도로 및 계류장의 구조를 고려한 Archerfield 공항의 용량을 산정하고, 이를 바탕으로 연간 수용량을 산정하였다. 수용량(capacity)을 항공기의 도착 및 출발이 활주로, 유도로 또는 계류장 시스템에 표시되는 수로 정의하였으며, 실용용량(practical capacity)을 정상적인 안전기준(normal safety standards)에 따라 운영하면서 활주로는 침투시간대에 처리할 수 있는 최대 항공기 수로 정의하였다. 공항 특성상 혼련기 비중이 많은 점을 고려한 활주로 운영방식을 채택하여 수용량을 산정하였으며, 상업용 항공기 수요가 많지 않더라도 외부 요인(혼련기 등)에 따라 수용량이 차이가 있음을 시사하고 있다.

Jacquillat et al.(2017)은 전술적 수준(tactical level)에서 공항 수용량을 최적화하기 위해 뉴욕의 JFK 공항을 대상으로 하루 동안의 기상(IMC, VMC), 풍향, 지상과 공역의 혼잡 정도를 고려하여 활주로 운영 형태(방향, 출·도착활주로 지정)와 출·도착항공기 처리율

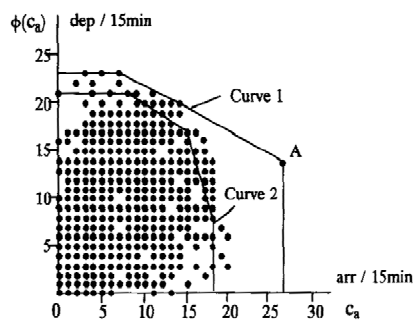


Fig. 2. Capacity envelope example

(service rates)을 정의한 후 혼잡비용을 최소화하는 방법론을 적용하여 실증분석을 수행하였다. Runway configurations (활주로 운영방식)과 arrival/ departure service rates(출·도착 항공기 처리율)를 Finite-horizon Dynamic Programming model로 수식화하였으며, 아침 6시부터 밤 12시까지 18시간을 매 15분 간격으로 72개의 구간을 설정하여 수용량을 산정하였다. 이러한 방법은 전술적 수용량 산정에 강점이 있긴 하나, Optimal policy(최적화 정책)가 어떻게 정의되는가에 따라서 그 결과가 크게 좌우한다. 그리고 과거 데이터를 활용하는 만큼, 발생 가능성이 있는 다양한 종류의 시나리오(policy)를 최대한 많이 구축하여 야만 다양한(dynamic) 상황에 적절히 대처가 가능하다는 한계가 있다.

Hesselink et al.(2014)은 기상 조건을 확률 변수로 고려해 전술적 측면에서 네덜란드 Schiphol 공항의 활주로 수용량을 산출하였다. 활주로 운영시간에 따라 도착 침두시, 출발 침두시, 비침두시, 야간으로 구분하여, 기상(시정: Good, Marginal, Low) 확률 변수를 시간대별 수용량(declared capacity)에 모두 반영하였다. 이렇게 산출된 수용량은 실측값 비교, MSE(mean square error), MAPE(mean absolute percent error) 검증을 통해 모형이 평가되었고, 기상 예보의 정확성과 Runway configuration이 수용량 산정에 중요한 변수로 작용함을 시사하였다.

Jones et al.(2017)은 뉴욕 EWR 공항의 터미널 및 공항 도착 항로 내의 환경 조건과 예상 도착 수요, 항공기 간 분리를 기반으로 공항 수용량 및 수용량 불확실성을 추정하는 방법론을 제시하고, 지상 지연 프로그램(GDP)의 계획에 수용량 불확실성의 적용 효과를 찾기 위한 모델을 제시하였다. 터미널 기상 예보, 교통 기록, 도착 경로 바람 예보 및 관측시간의 입력을 기반으로 공항 수용률(airport acceptance rate, AAR)을 예측하기 위해 Gradient Tree Boosting Regression 모델을 사용하였으며, Newark Liberty Airport(EWR)의 과거 데이터의 관측치를 이용하여 검증하였다. 기존 지상 지연만을 고려한 GDP 모델을 확장하고, 지상과 공중의 환경적 불확실성(기상 등)을 추정하여 이를 반영한 향후 8시간 이내 수용량 산정 모델을 제시하였다는 점에서 의의가 있다.

Tien et al.(2015)은 객관적인 Strategic ATFM(air traffic flow management) 수행을 위해 정량적 평가를 강조하였다. 우선, FAA의 ASPM 데이터베이스에서 자료를 취합하고, 발생 가능한 기상 상황을 기반으로

활주로 방향과 운영방식을 예측하여 상황에 맞는 대안을 마련하였다. 미국 내 35개 주요 공항을 대상으로 수용량을 산정하였고, 관측치와 실측치를 비교하기 위해 Bias, MAE(mean absolute error)를 확인하였다(Fig. 3 참조).

Choi and Kim(2021)은 공항의 출·도착 수용량을 예측하기 위해 Artificial Neural Network model인 Multi-Layer Perceptron(MLP), Recurrent Neural Networks(RNN), Long Short-Term Memory(LSTM) 모델을 적용하였다. 2013년부터 2017년까지 Hartsfield-Jackson Atlanta International Airport(ATL)의 수용량 및 기상 데이터를 사용하였고, 모델의 예측 성능은 2018년에 관측된 ATL 수용량을 기준으로 검증하였다. 트레이닝 모델을 통해 인공신경망(artificial neural network) 접근 방식이 공항 수용량 예측에 효과적임을 확인하였으며, 타 공항으로 모델의 이전 가능성(transferability)도 검토하였다. 개발된 모델을 보스턴 공항에 적용한 결과는 모형의 조정이 필요하며, 이는 공항별 특성이 수용량 산정 모델에 반영되어야 함을 시사하고 있다.

3.2 시뮬레이션 이용 공항 수용량 산정

FAA(2014)는 MITRE에서 개발한 runway-Simulator 시뮬레이션 모형을 활용하여, 미국 내 주요 공항(Atlanta, Washinton DC, LA, Chicago 등 30개)을 대상으로 현재 운영에 따른 수용량과 미래(2020년) 항공교통량 증가를 고려한 수용량 증대 방안을 제시하였다. 분석을 위해 기상(시정, 운고 등), 기상에 따른 활주로 운영방식, FAA Order 7110.65에서 정의하는 항공교통관제 기본 규정(항공기간 분리기준), 활주로 점유시간, 항공기 성능, 항공기 혼합률(fleet mix) 등을 고려하였으나, 지연은 고려되지 않았다.

Tee and Zhong(2018)은 저비용항공사(LCC)의 운항횟수 증가가 창이공항 활주로 수용량에 미치는 영향을 분석하기 위해 AirTOp 시뮬레이션 모델을 활용하

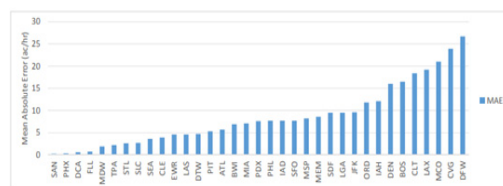


Fig. 3. MAE in model predictions

여 시뮬레이션 분석을 수행하였다. 2015년과 2020년의 교통 수요를 고려함과 동시에 복수 활주로에 대한 운영방식(독립운영, LCC 주력기종인 medium-size 항공기 전용운영, 혼합운영 등)에 따라 8개의 시나리오를 구성하여 시뮬레이션 분석결과에 따른 지연을 Fig. 4와 같이 비교함으로써 효율적인 운영방안을 도출하였다.

TransSolutions et al.(2014)은 미국의 FAA, 항공사, 대학 등 60여 개 이상의 실무기관과 연구기관을 대상으로 인터뷰를 진행하여 공항의 지연과 수용량을 정의하고, 공항 수용량을 산정하는데 적용 가능한 3가지 방법(Historical/Actual Observations, Basic Models, Simulation Models)을 제시하였다. Historical/Actual Observations 방법은 과거 활주로 처리량을 바탕으로 수용량을 산정하는 방법으로, 실제 수용량 값보다 낮게 측정되는 단점이 있다. Basic Models 방법은 산식을 활용하여 수용량을 산정하는 방법으로, 과거 데이터 없이 산출이 가능하지만, 새로운 운영 기준(신규 항공기 취항 등) 도입 시 즉각 반영이 불가하다는 단점이 있다. Simulation models 방법은 다양한 종류의 활주로 운영이나 새로운 절차, 기술, 항공기 도입 등의 변수를 반영할 수 있고, 지연(delay)을 수용량 산정에 반영할 수 있어 현실에 가장 가까운 결과 도출이 가능하다. 또한, 수용량 산정 기준을 시간/일일/연간에 따라 분류하였을 뿐만 아니라, 기상조건(VMC, IMC 등)에 따라 수용량을 세분화하여 제시할 수 있다는 장점이 있음을 강조하였다.

Kim and Hansen(2009)은 공항의 활주로 수용량 모델 중 ACM(airfield capacity model)과 rs(runway simulator) 모델을 활용한 시뮬레이션 결과 검증에 관한 연구를 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 실측치와 비교하고, Censored Regression Model을 통해

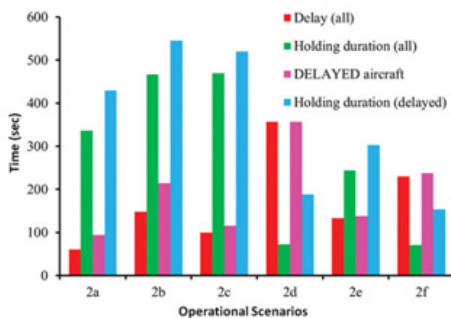


Fig. 4. Comparison of delay and average holding duration of scenarios

수용량 산정결과에 대한 정확도 검증을 분석하였다. 시뮬레이션 분석 대상 공항은 샌프란시스코(SFO) 공항과 로스앤젤레스(LAX) 공항이며, 각 공항에서 가장 활용도가 높은 활주로 방향에서 VMC/IMC 기상조건을 모두 고려하였고, 수요가 가장 많은 시간대(오전 9시, 오후 2시)를 분석하였다. 분석 결과, 수용량 산정에 대한 검증을 통해 현실에 가까운 모형 구축이 가능하다는 것을 제시하였다(Fig. 5 참조).

Kumar and Sherry(2009)는 미국 내 35개 주요 공항에 대해 2008년 수용량 변동을 고려하여, 수용량이 감소하는 경우 발생할 수 있는 평균 지연비용(delay cost)과 수용량 기준치보다 처리량이 낮은 경우 추가로 창출할 수 있는 평균비용(under utilization cost)을 산출하여 비교한 후, under utilization cost와 delay cost의 적정 교차점을 적정 수용량으로 하는 방법론을 Fig. 6과 같이 제시하였다. 이는 공항 수용량을 산정하는데 지연뿐만 아니라, 경제적인 부분(under utilization cost)을 고려하여 적정한 수용량을 산정하였으며, 미국 내 다수의 주요 공항을 대상으로 분석하여 전체 현황을 보여줌으로써 흐름 관리 또는 공항 간 출/도착 관리 등에 참고할 수 있음을 시사하고 있다.

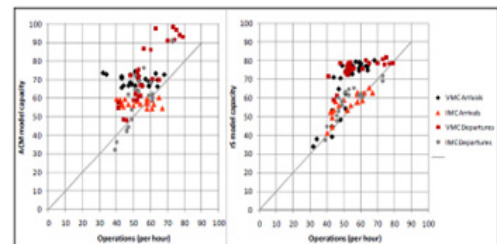


Fig. 5. Comparison of predicted and observation results example

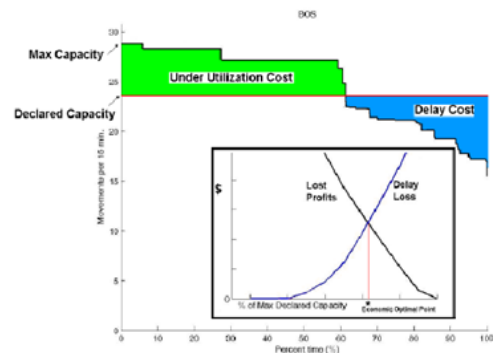


Fig. 6. Probability distribution of airport throughput capacity

FAA(2015)는 2002년에 미래의 공항 수요를 평가할 FACT(Future Airport Capacity Task) 팀을 소집하여 미국 내 가장 혼잡한 공항을 대상으로 정체 및 지연에 기인하는 요인과 추세를 거시적 관점에서 분석하고, 항공 시스템의 장기적 수용량이 미래의 수요에 적절히 부합할 수 있도록 보장하고자 수용량 평가 연구를 수행하였다. 중기, 장기로 구분하여 기존 공항시설 운영에 따라 수용량 개선이 필요한 공항을 식별하였으며, 분석 결과 2011년 기준 5개 공항(Newark, JFK, LaGuardia, Philadelphia, Atlanta 공항)이 이미 혼잡 공항으로 식별되었다. 이러한 한계점을 보완하기 위해 NextGen, ATC 시스템 개선계획, 활주로 확장 및 증설, 공역 재설계 등의 가이드라인을 제시하였다. Fig. 7은 FACT 1차, 2차, 3차 연구결과를 비교한 그림으로, 혼잡한 공항 현황을 보여주고 있다. 그림에서 ①는 해당연도에 공항 수용량에 제한사항이 있으나, 공항 개선에 따라 예측된 수용량을 처리할 수 있음을 의미하고, ②는 공항 개선을 이행하더라도 예측된 해당연도 수용량을 충족시키지 못함을 의미하고 있다.

Ramamoorthy and Hunter(2013)는 공항의 기상 조건, 활주로 구성 및 운영방식에 따른 공항 수용량을 추정하기 위한 시뮬레이션 기반 접근 방식을 연구하였다. 미국의 보스턴 공항을 대상으로 모형을 구축하였으며, 기상(시정)에 따른 항공기 간 분리 기준 등의 차이를 적용하여 수용량을 활주로 시스템이 처리할 수 있는 총 운항수/시간으로 정의하였다. 시뮬레이션 모델링은 충분한 제약조건의 적용과 미세한 조정이 필요하며, 다양한 정보가 포함된 데이터(ASDE-X 등)를 필요로 하지만, 다양한 운영 조건 및 기상 등을 반영할 수 있기 때문에 실시간 의사 결정에 유용한 방법임을 시사하고 있다.

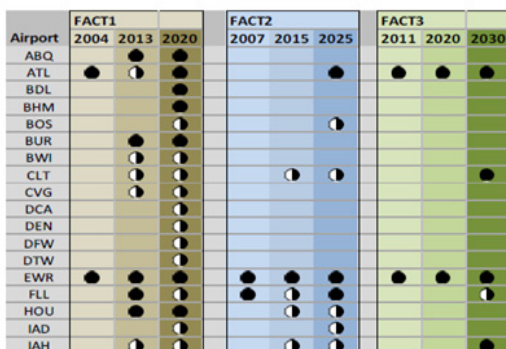


Fig. 7. Summary results of all FACT report

Ohama(2007)는 도쿄 국제공항 활주로 확장사업을 중심으로, 공항 master plan에 대한 문제점 및 유연한(flexibility) 공항 시스템 설계의 필요성을 제시하였다. Monte-Calro 시뮬레이션 분석을 통해 다양한 시나리오를 구성하여 공항 수용량 향상에 가장 효율적인 마스터 플랜 시나리오를 제시하였다. 분석결과, 초기에는 활주로를 확장하는 게 가장 효율적이고, 10년 후에는 증가하는 수요를 고려하여 평행 유도로 및 활주로 남단 구역을 추가 건설해야 예상된 수요를 처리할 수 있을 것으로 대안을 제시하였다.

Özdemir(2018)는 터키에 제3공항이 완공되기 전까지 단기적으로 혼잡과 지연을 해결하고, 수용 능력을 향상시킬 수 있는 대안으로 EAT(end-around taxiway)와 RET(rapid-exit taxiway)의 사용을 제안하였다. EAT, RET 도입 효과를 평가하기 위해 Fast-time Simulations(SIMMOD) 분석을 통해 시설 변경 및 추가에 따른 수용량 및 지연의 변화를 분석하였다. Fig. 8과 같이 EAT는 활주로 끝단에서 많은 공간을 차지할 수 있기 때문에 일부 공항에 대해서는 적용이 제한적이지만, 수용량 증가와 지연 감소에 효과적임을 증명하였다.

LeighFisher(2012)는 수요가 수용량을 초과하는 현상이 종종 발생하여 지연이 발생하는 London Luton 공항의 시설(활주로, 유도로, 계류장 등)에 대한 운영실태를 분석하고, 수용량 증대방안을 제시하였다. 공역, 활주로, 터미널, 육상 접근(surface access) 등으로 구분하여 공항 수용량을 분석하였으며, 이중 활주로 수용량 분석은 시뮬레이션 기법을 적용하였다. 시뮬레이션 기법을 통해 활주로와 유도로의 다양한 운영 시나리오를 분석하고, 공항의 기타 시설과 연계하여 비교 분석하였다.

Kellner(2009)는 공항의 수용량을 정의하기 위해 Fig. 9와 같이 출·도착 항공기 Density plots과 Capacity Envelope를 조합하여 유럽 내 4개 공항(Bru-

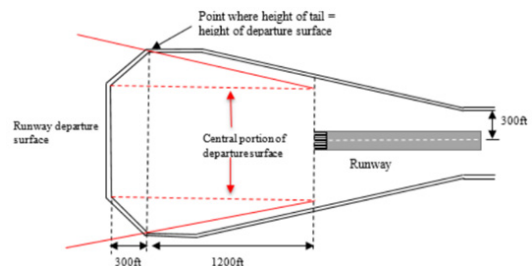


Fig. 8. Example of EAT structure

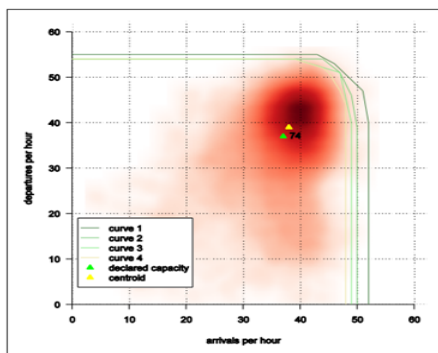


Fig. 9. Example density plot

ssels, London Heathrow, Helsinki Vantaa, Lisbon Portela)을 대상으로 수용량과 운항 밀도의 관계를 분석하였다.

Fig. 9와 같이 출·도착 항공기 운항 분포와 수용량(envelope, declared capacity)을 하나의 차트에 시각적으로 표현함으로써 공항 수용량 평가가 가능하고, 출·도착 항공기 운항 분포 대비 공항의 수용 능력을 비교 분석하여 수용량 선정의 타당성을 분석할 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 평일/주말, 기상 조건 등의 변수가 고려되지 않았다는 점을 보완한다면, 분석에 대한 신뢰도가 증가할 것이다.

Eurocontrol(2016)은 공항의 Airside Capacity에 초점을 맞추어 TMA, 활주로, 유도로, 주기장 등을 고려하여 수용량을 계산하는 방법을 연구하였다. 미 FAA에서 정의하는 수용량 및 지연 산정방법과 내용이 유사하나, 수용량 산정 시기에 따라 관련 기관(부서), 수용량 산정 방법(모델), 산정 기준(단위)을 구체적으로 제시하였고, 유럽의 공항을 대상으로 시뮬레이션 사례분석을 통해 구체적으로 어떻게 활용되는지를 제공하였다. 특히, 항공교통흐름 및 수용량 관리(ATFCM, Air Traffic Flow and Capacity Management)의 시간적 구분(전략적; Strategic, 전술술적; Pre-Tactical, 전술적; Tactical)에 따라 전략적 시기(D-7 이전)에는 구조적 수용량(structural capacity)과 계획 수용량(planned capacity)을 정의하였고, 전술적/전술술적(D-7~D-day) 시기에는 운영 수용량(operational capacity)으로 Fig. 10과 같이 정의하였다. 구조적 수용량은 공항 계획 단계에서 공항의 수용 능력을 식별하는데 필요한 거시적 수준의 수용량 산정을 의미하며, 계획 수용량은 시즌별 스케줄을 기준으로 고려된 수용량을, 전술적 수용량은 당일 수용량에 대해 기상 등 급변하는 상황을 반영한 수용량을 의미한다.

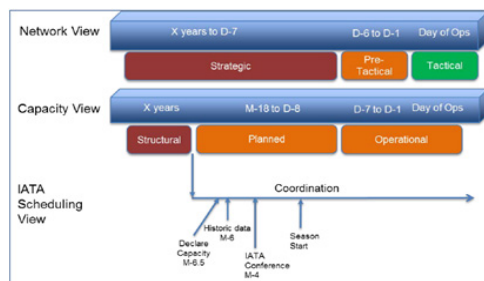


Fig. 10. Capacity definitions compared to ATFCM

Mota and Flores (2019)는 멕시코시티 공항을 대상으로 공항 수용량 제한요소를 식별하기 위해 Simulation 분석을 수행하였다. 2014년 중 정상적으로 운영된 하루를 대상으로 기본 모형 분석을 수행하고, 전체 교통량을 10%, 20%, 30%씩 증가하는 시나리오와 LCC 교통량을 10%, 20%, 30%씩 증가하는 시나리오에 대해 시뮬레이션 분석을 수행하였다. 분석 결과, 공항 내 모든 시스템(활주로, 유도로, 터미널 등)은 상호 연결되어 있으므로 한 가지 시설만 개선해서는 수용량과 관련된 문제를 해결할 수 없음을 시사하고 있으며, TMA 영역도 함께 고려가 되어야 함을 강조하고 있다.

Barrar et al.(2005)은 미 FAA에서 개발한 공항 수용량 모델인 EACM(Enhanced FAA Airfield Capacity Model)을 보완하기 위해 공항의 활주로 수용량 산정 모델인 ACATS(Airport Capacity Analysis Through Simulation)를 개발하였다. 기존의 EACM 방법은 분리기준, 운영 절차 및 활주로 수 등을 고려해 공항의 수용량을 평가하는 Analytical Model로 Simulation 기법에 비해 한계가 존재하는 방법론이다. 이에 반해, ACATS는 Fig. 11과 같이 사용자 기반 모형으로 수용량 산정 및 분석이 용이하도록 구축되어 있으며, 구조가 복잡한 공항에

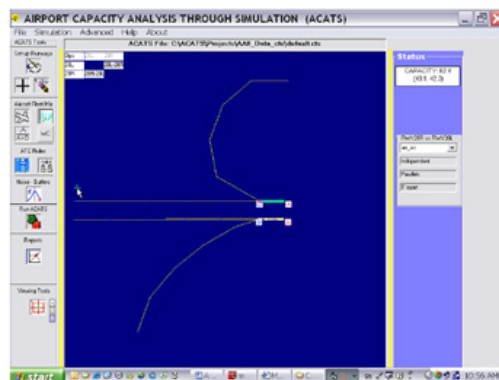


Fig. 11. ACATS user interface

대해서도 분석이 가능하고, 애니메이션을 통해 시각적 검증이 가능한 모델이다.

입력 데이터로 runway layout, wake vortex 분리 간격, fleet mix, 항공기 성능 parameters, 출·도착 항공기 비율, ATC 규칙, simulation control 특성 등이 필요하며, 시뮬레이션 분석 시간, 기종, 항공기간 분리 간격 등은 사용자가 조정이 가능하다. 이를 통해 Bottleneck 지점이나 Tactical pattern 등의 특정한 운영상의 현상을 분석하는데 활용하는 등 해당 공항의 교통 특성을 파악할 수 있으며, 각 항공기의 개별적 분석을 통해 활주로 system 부근의 지연을 예측, 분석이 가능하다.

Bubalo and Daduna(2011)는 Berlin Tegel 공항(TXL)과 Berlin-Schönefeld 공항(SXF)의 교통량을 분산하기 위한 목적으로 2020년 개항 예정인 Berlin-Brandenburg 국제공항에 대해 20년 이상의 예측 수요 및 수용량을 SIMMOD Simulation tool을 통해 검토하였다. 입력 데이터로 2008년 6월 26일에 TXL, SXF에서 운항한 총 635편을 기본으로 각 항공편의 Schedule 데이터를 활용하였으며, 항공기 혼합률(fleet mix)과 항공기의 접근 속도에 따른 수용량 변화를 시뮬레이션을 통해 제시하였다. 분석결과, 수요 증가에 따라 수용량 증대의 필요성을 시사하며, 그 방안으로 LOS(level of service: 항공기 한 대당 평균 지연 6분 이하)의 완화 및 활주로 운영방식에 대한 고려를 제시하였고, Re-Sequencing을 통해 단기적으로 수용량을 증대시킬 수 있음을 확인하였다.

Martin(2016)은 영국 히드로 공항 수용량 관리에 대한 연구를 수행하였다. 히드로 공항은 2015년 기준 수용량의 98%를 운영 중이며, 연간 교통량 470,000편, 승객 7천 5백만 명으로 유럽 내 가장 바쁜 공항으로 이를 효율적으로 관리하기 위해 Strategic Airport Capacity Management (Strategic ACM)를 적용하였다. Strategic Airport Capacity Management는 시뮬레이션과 데이터 분석을 통해 활주로 수용량 및 Scheduling, 시설 계획 등에 가장 효과적인 결정을 도출할 수 있으며, 기상 등에 대한 공항 수용량 탄력성을 높여 수용량을 최대화하고, 지연은 최소화할 수 있다. 전략적 수용량 관리를 위해 Fig. 12와 같이 웹 기반 Strategic ACM을 개발하여 공항, 항공사 등 이용자 요구에 맞춘 공항 수용량을 제시하여 다양한 상황(Slot 조정, 지연 분석 등)에 대하여 대처가 가능하다.

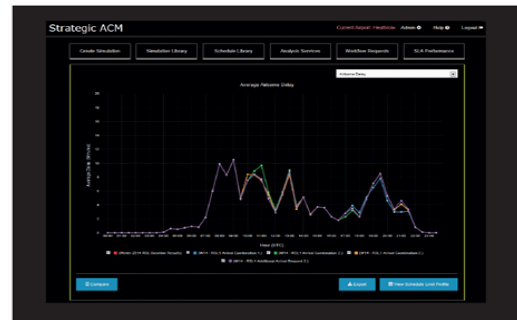


Fig. 12. Strategic ACM interface

Irvine et al.(2015)은 영국 런던의 주요 공항(Heathrow 등 3개 공항) 수용량 문제 해결을 위해 다양한 시나리오를 구성하여 Monte-Carlo Simulation 분석을 수행하였다. 분석 시나리오는 (1) Thames 강 근처 신공항 건축, (2) Heathrow 공항 활주로 연장 또는 추가 (현재 공항의 북쪽이나 서쪽), (3) Gatwick 공항에 제2 활주로 건축, (4) Stansted 공항에 제2 활주로 건축, (5) Heathrow 공항에 Mixed mode operation 채택 이상 5가지로 구성하였다. 시뮬레이션 분석결과, 첫 번째 대안인 Thames 강 부근 신공항 건축이 제일 효과적이기는 하나 비경제적이며, 경제적 측면에서는 4안인 Stansted 공항 활주로 추가가 적합하다는 결론이 도출되었다. 본 연구는 전략적 측면에서 공항 수용량을 평가하였고, 경제적 효과도 함께 분석함으로써 향후 가이드를 제시하였다는데 의의가 있다.

Lucic et al.(2010)은 1980년 미 연방항공청(FAA)에서 개발된 ADSIM(Airfield Delay Simulation Model)을 기존의 시뮬레이션 모델(SIMMOD, TAAM 등)의 약점을 보완하기 위해 ADSIM+로 업데이트하였다. 기존 ADSIM은 Graphical User Interface(GUI)가 없고, 데이터 입력 및 출력이 Text 파일의 형태로 지원되며, 애니메이션 기능과 오류 진단/Debugging 기능 등이 제한적이었다. 보완된 모델은 Discrete Event (Monte-Carlo) Simulation 방식으로 Link, Node 구조로 공항 레이아웃이 모델에 입력되고, 복잡한 활주로 관계를 정의할 수 있다. 또한, 새로운 활주로, 유도로, 고속 탈출 유도로, 새로운 게이트 구성, 활주로 폐쇄 분석 및 공항에 새로운 항공기 기종(예: A380) 도입 등에 대한 "What if" 분석을 지원할 수 있게 되었다. ADSIM+ 시뮬레이션 모델은 단순화된(예: rS) 모델과 정교한(예: TAAM) 모델의 중간 수준으로 개발되었고, TMA 영역도 함께 고려하여 Delay mode과 Capacity mode 운영이 가능하다. 그러

나 수용량을 산정하는 Capacity mode에는 공간적 범위를 활주로로 분석범위를 제한하고 있어 현실성이 떨어진다는 단점이 존재하고 있다.

Bazargan et al.(2002)은 공항계획 및 의사 결정 과정에 도움이 되도록 TAAM 시뮬레이션을 사용하여 활주로 레이아웃과 활주로 시스템 용량 활용 측면에서 공항의 레이아웃을 평가하기 위해 다양한 활주로 구성(단일 활주로, 평행활주로 운영 등)에 대한 시나리오를 분석하였다. 지상 및 공역 제약조건의 다양한 수준에서 지수(indexes)를 정의하고, 이를 비교함으로써, 공항계획 관점에서 설계 기능, 기술 및 절차 개선에 대한 민감도, 잠재적 용량의 전반적인 활용 측면에서 효율성에 대한 추정치를 제공하여 정보에 입각한 의사 결정을 내릴 수 있도록 하였다. 필라델피아 국제공항(PHL)을 대상으로 사례분석을 수행하였고, 수용량 증대를 위한 최적의 공항 레이아웃을 찾기 위해 5가지 대안을 설정하여 분석하였다.

Kicinger et al.(2016)은 공항 수용량 산정방법인 IACM(Integrated Airport Capacity Model)을 소개하고, 이 모델에 외적 변수인 기상을 고려하여 Atlanta 국제공항을 대상으로 모형을 검증하였다. 모형의 검증 기준으로는 실제 관측값(출·도착 항공기 처리량) 대비 IACM 모형에서 예측한 결과를 비교하였다. 외적 변수인 기상은 Deterministic forecasts인 METAR와 TAF, Deterministic forecasts with forecast error models, Ensemble forecasts 3가지 종류의 기상 입력값이 고려되었고, 공항의 활주로와 공항 주변 공역(TMA) 수용량을 동시에 고려하는 Monte Carlo 시뮬레이션 기법을 적용한 IACM 모형을 기반으로 공항의 수용량을 산정하여 그 결과를 검증하였다. IACM 외적 입력변수 중 하나인 기상을 3가지 방법(Deterministic forecasts, Deterministic forecasts with forecast error models, Ensemble forecasts)을 통해 얻어진 값을 적용하여 전술적 수용량 산출 결과를 비교 분석하였다는 점에서 의의가 있다.

Park et al.(2015)은 공항 수용량에 대한 실무적 한계를 개선하기 위해 미시적 항공교통 시뮬레이션 모형(TAAM)을 활용하여 활주로를 이용하는 항공기의 평균 지연시간을 측정하고 제주국제공항 활주로의 일일 용량을 분석하여 연간용량을 산정하는 방법을 소개하였다. 시뮬레이션 기법을 적용하여 지연을 고려한 공항의 수용량을 산정하였으나, 해당 공항의 다양한 비정상 상

황(기상의 경우 저시정, 측풍 등)을 고려하지 않았다는 한계가 있다.

Lee and Kim(2020)은 AIP, 운항 스케줄 자료(UBIKAIS) 등을 토대로 SIMMOD 시뮬레이션 분석을 통해 공항 운영시간과 지연시간을 고려하여 김해국제공항의 수용량 산정 연구를 수행하였다. 기본 수요를 기준으로 시간당 교통량을 단계적으로 증가시켜 지연시간을 분석하였고, 첨두시간 범위(1시간, 4시간)에 따라 5분 지연을 기준으로 수용량을 선정하였다. 공항 운영시간과 지연을 분석 기준으로 고려하였으나, 수용량 산정에 미치는 영향에 대한 분석 없이 단순 교통량 증가만 고려되었다는 한계가 존재하고 있다.

Bang and Kim(2019)은 SIMMOD를 활용하여 인천공항 활주로 수용량 분석연구를 수행하였다. 입력변수인 항적 자료는 FlightRadar24 항적 데이터를 활용하였으며, 항공기당 평균 지연시간이 5분인 실용용량을 분석하였다. 또한, 수용량 증대를 위한 대안으로 활주로 점유시간(ROT)을 최소화할 수 있는 고속탈출 유도로의 적정 위치를 산출하고, 이에 따른 수용량 변화를 비교 분석하였다.

IV. 공항 수용량 산정 동향 종합

공항의 수용량은 활주로, 유도로, 주기장, 터미널 등 해당 공항을 구성하는 시설의 개별 수용량을 산정하고, 그 가운데 가장 작은 수용량을 공항 수용량으로 산정하는 것이 일반적이다. 공항 시설 중 활주로에서 병목 현상이 주로 발생하기 때문에 공항 수용량 산정에 초점은 활주로를 중점으로 수행되어진다. 이러한 활주로 수용량은 항공기의 평균지연시간 고려 여부에 따라 크게 처리량(throughput), 절대용량(ultimate capacity), 실용용량(practical capacity)으로 구분되며 다음과 같이 정의할 수 있다. 처리량은 단위시간 동안 특정 지점(예, 활주로 시단)을 통과하는 총 항공기 수이자 관제시설이 주어진 시간 동안 운용할 수 있는 항공기의 수를 의미한다. 절대용량(ultimate capacity)은 지속적으로 충분한 수요가 존재한다는 가정하에, 분리기준을 위반하지 않는 조건하에서 특정 시설(또는 특정 지점)에서 단위시간 동안 처리할 수 있는 항공기 수. 즉, 최대처리용량을 말한다. 관계기준, 항로/절차/공역/활주로 구조, 항공교통 특성을 고려하지만, 지연, 관제량 등은 고려되지 않는다. 실용용량(Practical Capacity)

은 지연, 관제량 등을 고려한 실무적 수용량으로, 단위 시간당 교통량이 증가함에 따라 항공기 지연은 (일반적으로 비선형적으로) 증가하며, 이때 항공기 대당 평균 지연시간이 일정 기준(활주로로 경우 4분)이 되는 단위 시간당 교통량을 해당 시설의 실용용량으로 설정한다. 단위 시간당 교통량이 증가함에 따라 관제사의 관제량(workload)은 비선형적으로 증가하게 되며, 이때 단위 시간당 관제량이 일정 기준이 되는 교통량을 해당 시설의 실용관제용량으로 설정하기도 한다.

공항 수용량 산정 방법을 종합하면, 거시적 방법과 미시적 방법으로 구분할 수 있으며 다음과 같은 특징을 가지고 있다. 거시적 수용량 산정 방법은 산정식을 활용한 방법으로 항공기 종류 및 속도, 항공기 간 분리 기준, 활주로 길이 및 탈출 유도로 위치 등으로 구성된 수식으로 표현하는 방법으로 직관적이고, 수식화되어 있기 때문에 연산속도에 구애받지 않아 수용량을 빠르게 산출할 수 있다. 하지만, 복잡한 구조와 이에 따라 발생하는 다양한 항공기 운항패턴을 수식화 할 수 없다는 단점이 있다. 특히, 수식에 들어가는 매개변수(parameter)는 항적 자료 관측, 항공기 제원 등으로부터 수집되어야 하기 때문에, 신규 항공기 기종 도입이나 미래의 운항패턴에 대한 분석을 수행하는 데에 한계가 있다.

미시적 수용량 산정방법은 시뮬레이션을 활용한 방법으로 개별 항공기의 운항을 미시적 수준(항공기 성능, 비행절차, 관제절차 등)으로 구현하는 방법으로 현실에 가장 가까운 방법이고, 현재뿐만 아니라 미래 상황 그리고 새로운 절차/시스템에 대한 분석을 수행할 수 있다는 장점이 있다. 단, 시뮬레이션 모형 구축과 분석에 전문적 스킬과 기술을 필요로 하며, 결과도출과 모형 검증에 시간과 비용이 많이 소요된다는 단점이 있다.

V. 결론 및 추후연구

지속적인 항공교통량의 증가는 공항의 혼잡을 초래하고 해당 공항을 이용하는 이용객의 불편을 초래한다. 수용 능력의 포화는 해당 공항의 서비스 수준(level of service)을 저하시키는 요인 중 하나로 항공기 지연으로 인한 불편 등의 정성적 요인뿐만 아니라, 대기로 인한 연료 소모량 증가 등의 경제적인 손실, 즉 정량적인 부분에서도 영향을 미친다. 따라서, 증가하는 수요에

따라 현존하는 공항시설의 수용 능력을 수시로 산정하고 평가하는 것은 간과할 수 없는 부분이다.

본 연구에서는 과거 공항 수용량 산정 동향을 전반적으로 분석하고 어떻게 적용되었는지를 연구하였다. 수용량 산정 동향을 분석하기에 앞서, 공항 수용량의 정의에 대한 문헌 연구를 통해 단위 시간당 항공기 처리량으로 정의할 수 있었고, 공항 수용량 산정방법에 따라 절대용량과 실용용량으로 구분할 수 있었다. 절대용량과 실용용량을 구분하는 가장 큰 요소로는 지연(delay)의 반영 여부로 구분할 수 있었다. 절대용량의 경우 지연이 반영되지 않고, 실용용량의 경우 지연이 고려되어 수용량이 산정되어진다. 또한, 절대용량은 산정식을 활용하여 모형이 비교적 직관적이고 단순하게, 즉 거시적으로 수용량을 산출하며, 실용용량은 시뮬레이션 모형을 활용하여 모형이 비교적 구체화되어 미시적으로 수용량을 산출할 수 있다.

본 연구에서 제시된 거시적 방법과 미시적 방법에서 우위를 정할 수는 없다. 하지만 공항 수용량 산정 조건, 즉 상황에 따라서 거시적 방법과 미시적 방법에서 적절한 방법을 적용할 필요가 있다. 공항계획 및 설계와 같은 계획단계에서는 수집 데이터의 한계도 있을 뿐더러, 구체적인 결과를 요구하지 않기 때문에 거시적 방법이 적절한 것이고, 기존 공항시설의 확장, 서비스 수준 평가 등에서는 구체적인 대안이 적용되어야 하므로 미시적 방법을 적용하는 것이 적절할 것이다.

최근에는 항공종사자의 업무 부하와 같은 인적요소도 다방면의 연구에서 적용되고 있다. 향후 공항 수용량 산정에 있어서도 항공교통관제사의 업무 부하도 고려된 수용량 산정이 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 “데이터 기반 항공교통관리 기술개발(과제번호: RS-2021-KA163373)”의 연구지원으로 수행되었습니다.

References

1. Lee, H. J. A., "Study of airport capacity delay analysis", Hanseo University Master Thesis, 2020.
2. U.S. Congress, "Airport system development",

- U.S. Government, 1984.
3. Bell, G. E., "Operational research into air traffic control", *Journal of Royal Aeronautical Society*, 53, 1949, pp.965-976.
 4. Newell, G. F., "Airport capacity and delays", *Transportation Science*, 13(3), 1979, pp.201-241.
 5. Hockaday, S. L. M., and Kanafani, A. K., "Developments in airport capacity analysis", *Transportation Research*, 8, 1974, pp.171-180.
 6. De Neufville, R., and Odoni, A., "Airport Systems Planning, Design and Management", McGraw Hill Companies Inc., 2003.
 7. ICAO, "Doc.9971 Manual on collaborative air traffic flow management", 2018.
 8. MOLIT, R. O. K., "Order 1188, guidelines for airport capacity", 2019.
 9. Poldy, F., "Airport runway capacity and delay: Some models for planners and managers", Bureau of Transport Economics, 1982.
 10. Gilbo, E., "Airport capacity: Representation, estimation, optimization", *IEEE*, 1(3), 1993, pp.144-154.
 11. LeighFisher, "ACRP report 79: Evaluating airfield capacity", Transportation Research Board, 2012.
 12. Ashford, N. J., Mumayiz, S., and Wright, P. H., "Airport engineering: Planning, design, and development of 21 century airports", 2011.
 13. Archerfield Aiport Corporation, "Archerfield airport master plan", 2010.
 14. Jacquillat, A., Odoni A. R., and Webster M. D., "Dynamic control of runway configurations and of arrival and departure service rates at JFK airport under stochastic queue conditions", *Transportation Science*, 51(1), 2017, pp.155-176.
 15. Hesselink, H., Nibourg, J., Ludovic, E., and Lezard, P., "Airport capacity forecast: Short-term forecasting of runway capacity", 4th SESAR Innovation Days, 2014.
 16. Jones, J., Delaura, R., Pawlak, M., Troxel, S., and Underhill, N., "Predicting & quantifying risk in airport capacity profile selection for air traffic management", Twelfth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, 2017.
 17. Tien, S., Roy, S., Taylor, C., Wanke, C., and Dhal, R., "Evaluation of an airport capacity prediction model for strategizing air traffic management", American Meteorological Society, 2015.
 18. Choi, S., and Kim, Y. J., "Artificial neural network models for airport capacity prediction", *Journal of Air Transport Management*, 97, 2021.
 19. Gentry, J., Duffy, K., and Swedish, W. J., "Airport capacity profiles", FAA, 2014.
 20. Tee, Y. Y., and Zhong, Z. W., "Modelling and simulation studies of the runway capacity of Changi Airport", *The Aeronautical Journal*, 122, 2018, pp.1022-1037.
 21. Transportation Research Board, "ACRP report 104: Defining and measuring aircraft delay and airport capacity thresholds", 2014.
 22. Kim, A., and Hansen, M., "Validation of runway capacity models", 8th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, Vol.2 177(1), 2009, pp.69-77.
 23. Kumar, V., and Sherry, L., "Airport throughput capacity limits for demand management planning", Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference. IEEE, 2009.
 24. FAA, "FACT3: Airport capacity needs in the national airspace system", 2015.
 25. Ramamoorthy, K., and Hunter, G., "Simulation-based airport capacity estimation", AIAA Aviation Forum, 2013.
 26. Ohama, D., "Flexible design of airport system using real options analysis: Case study of new runway extension project of Tokyo International Airport", MIT, 2007.
 27. Özdemir, M., Usanmaz, O., "Airside capacity analysis and evaluation of Istanbul Ataturk Airport using fast-tiem simulations", *Anadolu University Journal of Science and Technology A: Applied Sciences and Engineer-*

- ing, 19(1), 2018, pp.153-164.
28. LeighFisher, "Capacity analysis of London Luton Airport with reference to coordinated designation", London Luton Airport Operations Limited, 2012.
 29. Kellner, S., "Airport capacity benchmarking by density plots", German Aviation Research Society, 2009.
 30. Eurocontrol, "Airport capacity assessment methodology", 2016.
 31. Mota, M., and Flores, I., "Model-based methodology for identifying capacity limitations in airports: Mexico city airport case", *Simulation Notes Europe*, 29(1), 2019, pp.13-25.
 32. Barrer, J., Peter, K., and Swedish, W., "Analyzing the runway capacity of complex airport", AIAA 5th Aviation, Technology, Integration, and Operations Conference, 2005.
 33. Bubalo, B., and Daduna, J. R., "Airport capacity and demand calculations by simulation: The case of Berlin Brandenburg International Airport", *Netnomics: Economic Research and Electronic Networking*, 12, 2011, pp.161-181.
 34. Martin, S., "Strategic airport capacity management at Heathrow", *Impact*, 2, 2016, pp.7-12.
 35. Irvine, D., Budd, L., and Pitfield, D., "A monte-carlo approach to estimating the effects of selected airport capacity options in London", *Journal of Air Transport Management*, 42, 2015, pp.1-9.
 36. Lucic, P., He, D., Adhami, L., and Post, J., "A new development of the airfield delay simulation model", 27th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2010.
 37. Bazargan, M., Fleming, K., and Subramanian, P., "A simulation study to investigate runway capacity using TAAM", *IEEE Winter Simulation Conference*, 2022.
 38. Kicing, R., and Chen, J., "Airport capacity prediction with explicit consideration of weather forecast uncertainty", *Journal of Air Transportation*, 24(1), 2016.
 39. Park, J. et al., "Estimation of annual runway capacity for Jeju International Airport considering aircraft delays", *Journal of Korean Society of Transportation*, 33(2), 2015 pp.214-222.
 40. Lee, H. J., and Kim, D. H., "A comparative study on delay calculation method of airport capacity", *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 28(2), 2020, pp.47-52.
 41. Bang, J., and Kim, D. H., "Estimation of Incheon International Airport capacity by using aircraft delay simulation model", *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 27(1), 2019, pp.20-25.