

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2023.31.4.007>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

접근관제구역 수용량 산정을 위한 수리적 모형

채종목*, 백호종**, 이장룡***, 박장훈****

A Mathematical Model for Calculating the Capacity in Terminal Control Areas

JongMok Chae*, Hojong Baik**, Jang Ryong Lee***, Janghoon Park****

ABSTRACT

The continuous increase in air traffic emphasizes the importance of capacity calculation. Research on the calculation method of Terminal Control Area (TMA) capacity has been treated as a partial aspect of the airspace sector capacity or has been limitedly studied. This study aims to propose a mathematical model for calculating TMA capacity, taking into account the Standard Terminal Arrival Route (STAR), separation standards, TMA entry speed, and runway threshold passing speed. The proposed model has the advantage of being able to calculate the instantaneous arrival capacity, which has not been noted in previous studies, along with the throughput. Additionally, it is meaningful as the model can easily calculate the arrival capacity of the TMA considering airport construction, runway expansion, or new procedures.

Key Words : Terminal Control Area(접근관제구역), Instantaneous Capacity(순간수용량), Throughput(처리량), STAR(표준계기도착절차), Instrument Approach Procedure(계기 접근 절차)

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

“항공 통계”에 따르면[1], 2023년 6월 국내 항공 교통량(국내선 및 국제선 운항 편수 기준)은 전년 동월 대비 56.7% 상승하여, 2019년 발생한 COVID-19의 영향으로 인한 항공교통 침체기로부터 점차 회복하고 있다. COVID-19 이전 10년(2010~2019년)간 국내

항공 교통량은 연평균 6.7%의 성장률을 보여왔으며, 보복 여행 심리로 4년 전(2019년 6월) 수요의 81.3%를 회복한 현재, 회복을 넘어 과거와 같은 지속적인 성장이 예측된다. 이러한 항공교통 수요 증가에 발맞춰 적절한 공급을 제공하기 위한 기반 시설 확충에는 많은 시간과 비용이 소요된다는 현실적인 어려움이 존재한다. 따라서 빠른 수요를 적절하게 소화할 수 있는 기반 시설이 제때 제공되지 못한다면 교통혼잡 및 항공기 지연이 가중되는 현상이 발생할 수 있다.

한편, 국제민간항공기구(ICAO, International Civil Aviation Organization)는 1998년 ICAO Doc. 9750에서 세계항행계획(GANP, Global Air Navigation Plan)을 수립하고, 2003년 차세대 항공시스템 전환계획(ASBU, Aviation System Block Upgrades)를 도입하여 인프라 및 시스템 확충이라는 장기적 대안 외에도 교통 흐름의 효율적 조절, 혼잡 시간대 수요의 탄

Received: 27. Sep. 2023, Revised: 13. Nov. 2023,
Accepted: 24. Nov. 2023

* 한국항공대학교 항공교통물류학과 박사과정

** 한국항공대학교 항공교통물류학과 교수

*** 한국항공대학교 항공운항학과 교수

**** 한국항공대학교 미래항공교통학과 연구교수

연락처 E-mail : ajgaqwsuvnh@gmail.com

연락처 주소 : 경기도 고양시 덕양구 항공대학교 76

력적 조절 등과 같은 방법을 통해 중, 단기적으로 교통 혼잡 및 지연을 완화하려는 노력을 기울이고 있다. ASBU는 4개의 성능개선 영역(PIA, Performance Improvement Area)과 세부개선영역(Threads) 등으로 구분되는데, 성능개선 영역 중 수용량 최적화 및 비행 유연성 확대(Optimum capacity and flexible flights)에 대응하는 국가 단위의 체계적인 계획 수립과 효율적인 이행을 위해서는 표준화된 수용량 모형과 정확한 예측이 요구된다. ICAO 지침에 따르면 수용량은 항공교통업무(ATS, Air Traffic Service)를 안전하게 제공할 수 있는 제한치를 초과해서는 안 되며, 항공교통업무를 담당하는 기관은 해당 관제구역의 용량을 평가하고 공시 수용량(Declared Capacity)을 선언해야 한다[2]. 따라서, 관제기관 수용량 산정 및 이를 위한 산정 기법 확립은 국가항행계획 차원에서 필요하다.

본 연구에서 중점을 두고자 하는 대상은 접근 관제소 담당의 접근관제구역(TMA, Terminal Control Area¹⁾)으로, 다른 관제구역 대비 수용량 관련 연구가 상대적으로 적게 수행된 구역이라고 할 수 있다. 접근관제구역은 활주로와 관제 섹터를 연결하는 공역으로, 활주로와 관제 섹터 양쪽의 특성을 공유한다. 처리량을 주로 활용하는 공항 수용량과 관제사의 업무부하로 인한 순간 수용량을 주로 활용하는 관제 섹터 수용량 사이에서 접근관제구역 수용량은 처리량과 순간 수용량의 양쪽 측면을 모두 고려할 필요가 있다. 또한, 접근관제구역 내 공항 활주로의 이용 방향(교통 흐름, flow)에 따라서도 표준계기도착절차(STAR, Standard Terminal Arrival Route) 및 공역 특성의 차이가 나타나고, 수용량 산정에 영향을 미치는 특성이 있다.

본 연구는 산술적인 방법을 활용하여, 지연을 고려하지 않은 절대용량 개념의 접근관제구역 수용량 산정 모형을 제시하고, 국내에서 가장 교통량이 많은 접근관제구역인 서울 접근관제구역 north flow²⁾의 도착 처리량 및 도착 순간 수용량을 산정 사례로서 제공하고 자 한다.

1.2 연구 범위

본 연구의 범위는 시간적 범위, 공간적 범위, 내용적 범위로 나눌 수 있다. 시간적 범위의 경우, 본 연구는 방법론 제시라는 점을 고려해 구체적인 시간대를 설정

하지 않았다. 다만 모형의 실제 활용 측면을 감안한다면, 항공교통흐름관리(ATFM, Air Traffic Flow Management) 상 장기간 계획에서 사용하는 전략 단계(strategic phase)³⁾에 해당하는 시간적 범위를 적용할 수 있으며, 수용량을 산정하는데 전략 단계에서 설정한 공역 구조, 운영 절차, 운항 특성을 반영할 수 있다.

공간적 범위는 접근관제구역으로서, 일반적으로 접근관제소가 담당하는 수직 범위 및 수평범위 내의 공역으로 정의되나, 본 연구에서는 도착 항공편의 경우, STAR의 진입지점에서부터 일반적으로 접근관제소에서 관제탑으로 항공기를 이양하는 활주로 시단에서 5NM 지점까지, 출발 항공편의 경우 관제탑에서 접근관제소로의 관제권 이양지점으로부터 표준계기출발절차(SID, Standard Instrument Departure)의 마지막 픽스까지를 공간적 범위로 한다. 수용량 산정 모형 적용 사례 연구의 경우 서울 접근관제구역을 대상으로 한다.

내용적 범위는 지연을 반영하지 않은 절대용량 개념의 접근관제구역 도착 순간 수용량, 접근관제구역 도착 처리량 산정 모형과 접근관제구역 출발 처리량, 접근관제구역 출·도착 혼합 처리량의 개념을 제시하고, 사례 연구로서 서울 접근관제구역 north flow의 도착 순간 수용량 및 도착 처리량을 제공한다.

1.3 문헌 고찰

수용량이란 용어는 항공교통 분야에서 빈번하게 활용되나, 실제로는 매우 포괄적인 개념으로 분류 기준 및 사용자에 따라 다양한 의미로 해석 및 정의된다. 분류 기준에 따른 대표적인 수용량들을 살펴본다면, 시간 요소에 따른 수용량, 지연 고려 여부에 의한 수용량, 관제시설별 수용량 등이 있으며, 관제기관은 수용량을 결정하는데 필요한 요소를 종합하고 산정 방법을 선별하여 공시 수용량을 제공한다.

시간 고려 여부에 따른 수용량의 분류로는 순간 수용량(Instantaneous Capacity)과 처리량(Throughput)이 있다. 순간 수용량은 관제구역 내에 특정 시점 동시에 존재하는 최대 항공기 수(대)로, 관제사가 담당 구역 내에서 동시에 통제할 수 있는 항공기 대수를 의미한다. 순간 수용량이 공간의 관점 혹은 관제사 업무 부하량의 관점이라면, 처리량은 단위시간(일반적으로 1 시간) 동안 특정 지점 혹은 구역을 통과하는 총 항공기

1) 실무적으로 TMA, TCA를 혼용하여 사용한다.

2) 인천국제공항 활주로 북서 방향(RWY 33, 34), 김포공항 활주로 북서 방향(RWY 32) 항공기 흐름.

3) 일반적으로, 실제 흐름관리 조치가 시행되는 당일을 기준으로 6개월 전부터 일주일 전까지의 기간을 의미한다.

대수(대/단위시간)를 의미한다.

자연 고려에 따른 수용량의 분류로는 절대용량(Absolute Capacity)과 실용용량(Practical Capacity)이 있는데, 일반적으로 처리량의 개념에 따라 산정한다. 절대용량은 충분한 수요가 지속된다는 가정하에, 관제규정, 분리 기준을 위반하지 않는, 관제시설이 처리할 수 있는 최대 항공기 수용량(처리량)이다. 실용용량은 절대용량이 고려한 사항에 더불어 자연 및 관제량을 고려한 실무적인 수용량으로, 항공기 대당 평균 지연시간이 일정 기준에 도달하는 수용량(처리량)을 관제시설의 수용량으로 한다.

관제시설에 따른 수용량의 분류는 관제시설이 담당하는 관제구역에 따른 분류이다. 항공교통업무를 제공하는 관제시설은 크게 관제탑, 접근관제소, 항로관제소의 세 시설로 구성되며, 각각의 시설은 공항, 접근관제구역, 관제 섹터를 담당 관제구역으로 두고 있다. 각 관제시설은 담당하는 관제구역의 특성 및 분리 기준, 관제규칙, 관제사의 업무부하량(Workload) 등을 활용하여 수용량을 산정한다.

수용량은 산정 대상이나 고려 요소별로 공항(활주로) 실용용량, 섹터 순간 수용량 등으로 다양하게 산정되는 편이며, 산정법으로는 크게 거시적 방법과 미시적 방법이 존재한다. 거시적 방법은 수용량에 영향을 미치는 여러 가지 요소를 변수(관제시설 특성, 분리 기준, 운항 특성 등)로 삼은 수식을 통해 수용량을 산정한다. 미시적 방법은 배속 시뮬레이션(Fast-time Simulation)을 활용하는 방법으로, 수용량에 영향을 미치는 여러 가지 요소를 반영한 현실을 모사하는 시뮬레이션 모형을 구축하고, 일정 조건에 도달했을 때의 수용량을 수용량으로 산정하는 방법이다.

접근관제구역의 수용량에 관한 연구는 공항 수용량 연구나 관제 섹터 수용량 연구 대비 제한적이며, 상당수의 연구에서 관제 섹터의 일부로 취급된다. 그러나 접근관제구역은 STAR 및 SID를 따르는 등 관제 섹터와 다른 특징이 있다. 또한 활주로 시단에서 공항과 연결되어 항공기 분리 기준을 공유하는 특징이 있다. 이처럼 접근관제구역의 수용량은 관제 섹터 수용량, 공항 수용량 모두와 연관되어 있어 타 관제구역 수용량 연구에 비해 희소하다.

Janić(2000)은 접근관제구역의 STAR 기하구조, 항공기 기종 등급 혼합률, 진입로별 사용비율, 접근관제구역 내 속도, 항공기별 분리간격 등을 고려하여 단위 시간 동안 적절한 항공교통업무 서비스가 제공될 최대

항공기 수로 접근관제구역 수용량을 정의하였다[3].

Yang과 Kim(1994)은 활주로 시단에서 두 항공기 간의 주어진 접근경로와 항공기 기종 등급 혼합률, 분리 기준에 의한 평균 도착시간차를 활용하여 접근관제구역 도착 수용량을 산정하였는데, 직선형 접근경로와 선회형 접근경로로 구분하여 분리 기준을 적용하고, 도착 처리량을 산정한 바 있다[4].

Harris(1972)는 활주로가 도착, 출발, 출·도착 혼합 상황에서 항공기 1대를 처리하는데 걸리는 평균 시간을 계산한 뒤, 도착 전용 용량, 출발 전용 용량, 출발·도착 결합 용량을 도출하여 공항(활주로) 수용량 그래프(Capacity Envelope)의 개념을 제시하였다. 이때 고려되는 요소는 출·도착 분리 기준, 공통 접근 거리, 등급별 도착 항공기간 종적 분리 기준, 출발 항공기간 분리 기준, 항공기 기종 등급 혼합률, 활주로 점유시간, 기종별 공통 접근 거리 접근속도 등이 있다[5].

MITRE, FAA(미국 연방항공청)과 미국 항공교통관제사협회는 1990년대 중반부터 Monitor Alert Parameter(MAP)의 개념을 수립하고, 관제 섹터 수용량을 산정하는데 활용한 바 있다. MAP의 개념을 활용한 관제 섹터 순간 수용량은 평균 관제 섹터 비행시간(분)을 대당 관제 소요시간(초/대)으로 나눠 산정된다. MAP에서 제공하는 섹터 수용량 기준은 관제사 업무부하를 고려하여 15분당 25대이며, 이로부터 대당 관제 소요시간 36초/대를 산출하였고, 최대 관제 섹터 순간 수용량을 18대를 넘을 수 없도록 규정하였다[6].

Juričić, Babić, Francetić(2011)은 Croatia Zagreb 접근관제구역을 대상으로 RAMS Plus라는 시뮬레이션 프로그램을 활용, 관제사의 업무 부하에 따른 휴식 시간을 고려하여 시간(60분)당 업무시간의 합이 48분(80%)이 되는 교통수요를 접근관제구역 수용량으로 산정하였다. 이때 관제사의 업무형태를 비행 정보 관리 업무, 충돌 탐색 업무, 일상 통신 업무, 조정 업무, 레이다 관련 업무로 구분하고, 구역의 구조와 관제절차를 반영한 실용 용량 관점의 처리량을 산정하였다[7].

Lee와 Kim(2020)은 미시적 항공교통 배속 시뮬레이션 모형 프로그램(Simmod)을 활용하여 대상 공항에 대한 시설 정보, 운항 스케줄 자료, 운항 특성을 반영한 시뮬레이션 모형을 구축하고, 이에 따른 공항 수용량을 산정하였는데, 이때 공항으로 진출입하는 항공기의 지연을 포함하고자 공간적 범위에서 접근관제구역 및 비행절차를 고려하였다[8].

1.4 시사점

기존 접근관제구역 수용량 산정 연구는 수리적 모형에 의한 방법이나 관제 섹터 시뮬레이션 프로그램을 이용한 방법으로 수용량을 산정하였다. 해당 방법들은 고려 요소 등에서는 차이가 있을 수 있으나, 접근관제구역의 도착 처리량(대/단위시간) 산정을 목표로 하는 것을 확인할 수 있었다.

접근관제구역 수용량 산정 관련 외의 연구 중 활주로 수용량 산정 연구의 경우, 활주로 시단에서의 분리 기준 준수를 위해, 항공기 기종 등급 혼합률, 기종별 접근속도, 선·후행 항공기별 분리 기준을 고려, 평균 시간 분리를 도출하고, 이를 이용해 활주로 용량(출발 용량, 도착 용량, 출·도착 혼합 용량)을 산정하였다. 관제 섹터 수용량 산정 연구에서는 관제사 업무부하에 따른 대당 관제 소요시간과 관제 섹터 비행시간을 통해 관제 섹터의 순간 수용량을 산정하는 방법을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 위와 같은 선행 연구를 바탕으로, 기존 접근관제구역, 활주로 수용량 산정 연구에서 활용한 고려 요소 및 평균 시간 분리 간격을 바탕으로 한 처리량을 산정하고자 하였다.

본 연구에서 사용한 방법과 Harris 모형은 분리 간격을 이용하여 처리량을 산정하는 부분에서는 공통된 방식을 차용한다. 다만 Harris 모형의 경우, 입력값으로 공통 접근 거리의 기종별 평균 비행속도를 활용하여 선·후행 항공기간 발산 수렴 여부를 고려하여 처리량을 산정하는데 반해, 본 연구에서 분리 기준은 활주로 시단에서 적용되며, 입력값으로 기종을 구분하지 않고 활주로 시단에서 수렴되는 공통 통과 속도를 이용하여 처리량을 산정한다는 점에서 Harris 모형과 차이점이 있다. 또한 새로운 순간 수용량 산정 방법은 관제 섹터 비행시간을 활용한 MAP에서 비행 거리를 비행시간으로 나눠 순간 수용량을 산정하는 방법에서 착안한 기법을 활용하고자 한다. 위와 같은 방법론에는 활주로와 관제 섹터를 연결하는 중간자적인 측면에서 접근관제구역 특성, 활주로 형태, 운영 특성 등을 접근관제구역 수용량 산정 모형에 반영되어 있다.

II. 본 론

2.1 연구 방법

2.1.1 개요

본 연구에서는 문헌 고찰 시사점에서 확인된 관제사 관별 수용량 산정 모형의 고려요소를 활용하여, 서론에

서 언급한 분류 기준 중 접근관제구역을 대상으로 절대용량 산정 모형을 개발하였다. 산정 모형의 내용을 보다 세분화하면, 접근관제구역 도착 순간 수용량, 접근관제구역 도착 처리량을 산정하는 모형을 개발하였으며, 추가로 접근관제구역 출발 처리량, 접근관제구역 출·도착 혼합 처리량의 개념을 제시하였다. STAR는 접근관제구역의 여러 진입지점(TMA Entry Point)에서 공항으로 착륙하는 항공기의 안전을 확보하고, 필요 시 포인트머지, 트럼본 절차 등을 적용하여 관제사의 업무부하를 최소화할 수 있도록 설계되어 있다. 접근관제구역 도착 수용량은 다수의 항공기가 접근관제구역 진입지점에서 활주로 시단으로 수렴하는 구조로 충돌 방지를 위한 접근관제구역 항공교통업무 서비스 제공을 위한 관제사의 업무부하가 가중되는 반면에, 출발 수용량의 경우 공항에서 이륙하여 각 접근관제구역 진출지점(TMA Exit Point)으로 발산하는 구조로, 접근관제구역의 관제사 업무부하가 상대적으로 낮은 부분을 반영하여 접근관제구역 출발 순간 수용량을 모형에서 제외하였다.

2.1.2 접근관제구역 수용량 산정 모형 고려요소

본 연구에서 활용된 접근관제구역 수용량 산정에 고려한 요소들은 다음 Table 1과 같다.

Table 1. TMA capacity calculation factor

Category	Element
TMA characteristics	The number of STARs
	STAR structures (length, pointmerge or trombone existence)
	Speed limitation of STARs
	Speed limitation of instrument approach
Runway characteristics	Runway configurations
Operational characteristics	Average arrival separation
	Average departure separation
	STAR usage ratio
	Average STAR entering speed
	Average runway touch down speed
Others (advancement)	Arrival separation standards
	Departure separation standards
	Arr-dep separation standards
	ROT(runway occupation time)
	Fleet mix
	Buffer time

2.1.3 접근관제구역 수용량 산정 모형

본 연구에서 도출하는 접근관제구역 수용량은 처리량과 순간 수용량으로 나누어져 있고, 접근관제구역 비행시간과 선·후행 항공기 평균 시간 분리 간격을 나누어 산정하기 때문에, 제안하는 수용량 산정 모형은 접근관제구역 비행시간 산정 부분과 선·후행 항공기 평균 시간 분리 간격 산정 부분, 크게 두 부분으로 구성되어 있다.

본 모형의 기본적인 가정 사항은 다음과 같다.

- ① 항공기는 입력된 평균 진입 속도로 접근관제구역에 진입하여 STAR 상의 가장 긴 경로를 비행하며, 활주로 시단의 입력된 평균 시간 속도까지 등감속함. 이때 레이더 벡터링과 홀딩 절차는 고려하지 않음.
- ② 속도 기준이 부여된 개별 픽스에서는 지정 속도를 준수함.
- ③ 속도 기준이 없는 경우 지정된 속도로부터 활주로 시단의 입력된 평균 시간 속도까지 등감속함.
- ④ 선·후행 항공기 시간 분리 기준은 활주로 시단에서 적용됨.

위 가정에 따르면 접근관제구역 처리량이 결정되는 지점은 활주로 시단으로, 활주로 용량이 결정되는 지점과 같다. 즉, 본 연구의 접근관제구역 도착 처리량, 접근관제구역 출발 처리량, 접근관제구역 출·도착 혼합 처리량은 각각 활주로 도착 처리량, 활주로 출발 처리량, 활주로 출·도착 혼합 처리량과 동일하다.

접근관제구역 비행시간은 STAR 경로 및 픽스에 지정된 속도, 계기접근절차 및 속도, 그리고 사전 정의된 가정들에 따라 결정된다. 이에 따라 개별 STAR 및 계기접근절차를 따른 접근관제구역 비행시간 계산식은 다음 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_N = \frac{\sum_{n=1}^{\alpha_1-1} d_n}{\frac{v_e + v_{l1}}{2}} + \frac{\sum_{n=\alpha_1}^{\alpha_2-1} d_n}{\frac{v_{l1} + v_{l2}}{2}} + \dots + \frac{\sum_{n=\alpha_{m-1}}^{\alpha_m-1} d_n}{\frac{v_{lm} + v_N}{2}} \quad (1)$$

여기서,

τ_N : 접근관제구역 진입지점부터 활주로 시단까지의 비행시간

n : 진입지점으로부터 STAR 및 계기접근절차를 구성하는 픽스의 번호

m : 속도가 지정된 픽스의 개수

$\alpha_1 \sim \alpha_m$: 1~ m 번째 지정 속도 픽스 번호

N : 활주로 시단(threshold)의 픽스 번호

d_n : n 번째 픽스와 $(n+1)$ 번째 픽스 사이의 거리 (NM)

v_e : 접근관제구역 진입 평균 속도(kt)

$v_{l1} \sim v_{lm}$: $\alpha_1 \sim \alpha_m$ 픽스의 지정 속도(kt)

v_N : 활주로 평균 시간 통과 속도(kt)

예시로서, STAR 내 특정 구간에 지정 속도가 존재하는 경우(일반적으로, 포인트머지나 트림본 절차를 활용하는 경우, 사례 1) 지정 속도 시작 픽스 번호를 α , 지정 속도 끝 픽스 번호를 β , 지정 속도를 v_l 라 할 때 비행시간에 따른 속도 변화를 시간(t)-속도(v) 평면에 표현하면 Fig. 1과 같다. 평균 속도(v_e)로 접근관제구역을 진입한 항공기는 속도가 지정된 픽스 α 의 v_l 까지 등감속한다. 픽스 α 에 도달한 항공기는 지정 속도 v_l 로 픽스 β 까지 비행한다. 이후, 항공기는 활주로 시단(N)의 평균 시간 통과 속도(v_N)까지 다시 등감속한다. 여기에서 시간-속도 그래프 하단의 면적은 STAR 비행시간과 같다.

활주로 시단을 지나치는 선행 항공기(i)로부터 후행 항공기(j)의 시간까지의 시간 분리 간격은 식 (2)와 같다.

$$\Delta\tau_{ij} = \tau_j - \tau_i \quad (2)$$

여기서,

i : 선행 항공기

접근관제구역 시간-속도 그래프 (사례 1)

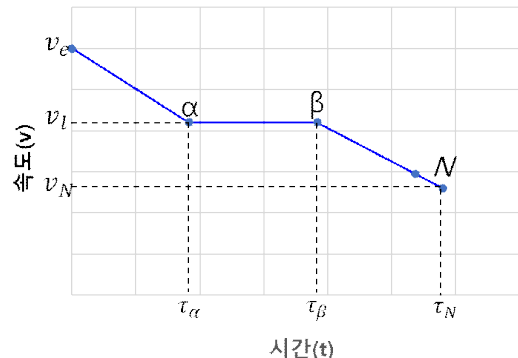


Fig. 1. TMA time-speed graph (case 1)

j : 후행 항공기

$\Delta\tau_{ij}$: 선·후행 항공기의 시단 도착 시간차

τ_i : 선행 항공기 시단 도착 시간

τ_j : 후행 항공기 시단 도착 시간

도착 항공기 분리 기준(δ)⁴⁾을 만족하는 최소의 선·후행 항공기의 시단 도착 시간차가 평균 시간 분리 간격($E(\Delta\tau)$)과 같을 때, 도착 처리량을 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$E(\Delta\tau) = \Delta\tau_{ij} \quad s.t. \quad f(\Delta\tau_{ij}) = \delta \quad (3)$$

여기서,

$E(\Delta\tau)$: 평균 시간 분리 간격

$f(\tau_{ij})$: 선·후행 항공기의 시단 도착 거리차

δ : 도착 항공기 분리 기준

평균 시간 분리 간격 개념을 사례1의 시간-속도 그래프에서 표현하면 Fig. 2와 같다. 선행 항공기가 τ_N 의 시간을 비행하여 시단에 도착한, 선·후행 항공기 분리 기준(δ)을 만족하는 후행 항공기의 진입지점으로부터 비행시간을 τ_x 라 할 때, 시간-속도 그래프 τ_N 과 τ_x 사이의 면적(Fig. 2의 노란색 면적)은 도착 항공기 분리 기준(δ)과 같다.

사례 1의 경우, 지정 속도 구간 끝 픽스(β)로부터 시단(N)까지 항공기는 지정 속도 구간(v_l)에서 평균 시단 통과 속도까지 등감속(v_N) 하며, 이를 시간-속도 관계

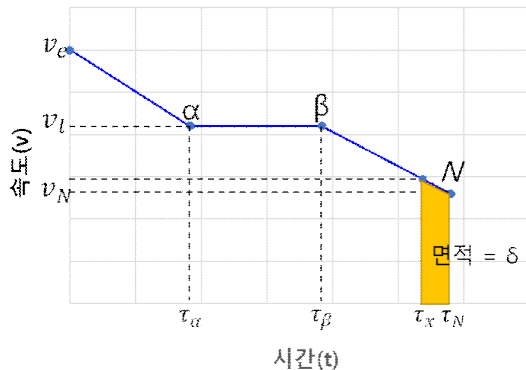


Fig. 2. Separation distance minima at runway threshold

접근관제구역 시간-속도 그래프

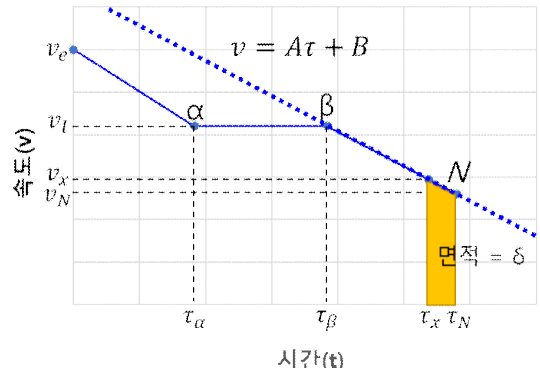


Fig. 3. Equation of a trajectory passing from fix β to threshold and its speed (case 1)

식으로 나타내면 Fig. 3, 식으로 표현할 경우 다음 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} v &= \frac{v_N - v_l}{(\tau_N - \tau_\beta)}(\tau - \tau_N) + v_N \\ &= A\tau + B \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,

τ_β : 지정 속도 구간 끝 픽스까지 비행시간

τ_N : 활주로 시단까지의 비행시간

v_l : 지정 속도(kt)

v_N : 활주로 평균 시단 통과 속도(kt)

$$A = \frac{v_N - v_l}{(\tau_N - \tau_\beta)}$$

$$B = -A\tau_N + v_N$$

분리 기준(δ)는 τ_N 과 τ_x 사이의 면적과 같으므로, 다음의 식 (5), (6)을 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta &= (\tau_N - \tau_x) \times \frac{(v_x + v_N)}{2} \\ &= \frac{(\tau_N - \tau_x) \times (A\tau_x + B + v_N)}{2} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} A\tau_x^2 + (-A\tau_N + B + v_N)\tau_x \\ - \tau_N(B + v_N) + 2\delta \\ = a\tau_x^2 + b\tau_x + c \\ = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

4) 예시에서는 제주국제공항 등에서 일반적으로 적용하는 단일 거리의 도착항공기 분리 기준을 사용함. 후류요란 분리 기준을 적용할 시 선·후행 항공기 기종별 분리 기준과 대상 공항의 기종 혼합률(Fleet Mix)을 곱하여 평균 분리 기준을 도출하여 이용할 수 있음.

여기서,

δ : 분리 기준

τ_β : 지정 속도 구간 끝 픽스까지의 비행시간

τ_N : 활주로 시단까지의 비행시간

v_l : 지정 속도(kt)

v_N : 활주로 평균 시단 통과 속도(kt)

$$A = \frac{v_N - v_l}{(\tau_N - \tau_\beta)}$$

$$B = -A\tau_N + v_N$$

$$a = A$$

$$b = -A\tau_N + B + v_N$$

$$c = -\tau_N(B + v_N) + 2\delta$$

식 (6)을 근의 공식에 적용해서 구한 τ_x 의 값은 다음 식 (7)과 같다.

$$\tau_x = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (\because \tau_x < \tau_N) \quad (7)$$

STAR 내 지정속도가 존재하지 않는 경우(사례 2), 사례 1의 방식으로 시간-속도 그래프를 표현하면 Fig. 4, 그래프의 식을 직선의 식으로 표현하면 식 (8)와 같다. 이로부터 도출된 τ_x 의 값은 식 (9)와 같다.

$$v = \frac{v_N - v_e}{(\tau_N - 0)}(\tau - \tau_N) + v_N \quad (8)$$

$$= A\tau + B$$

$$\tau_x = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (\because \tau_x < \tau_N) \quad (9)$$

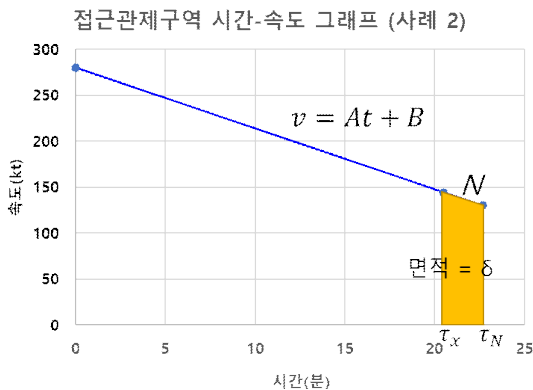


Fig. 4. Equation of a trajectory passing from fix β to threshold and its speed (case 2)

여기서,

τ_N : 활주로 시단까지의 비행시간

v_e : 접근관제구역 진입 평균 속도(kt)

v_N : 활주로 평균 시단 통과 속도(kt)

$$A = \frac{v_N - v_e}{\tau_N}$$

$$B = -A\tau_N + v_N$$

$$a = A$$

$$b = -A\tau_N + B + v_N$$

$$c = -\tau_N(B + v_N) + 2\delta$$

사례 1, 사례 2에서 τ_N 과 τ_x 의 시간 차이는 도착 항공기 평균 시간 분리 간격과 같으며, 식으로 나타낼 경우 식 (10)과 같다.

$$\tau_N - \tau_x = E(\Delta\tau) \quad (10)$$

단일 STAR의 도착 처리량(대/시간)은 도착 항공기 평균 시간 분리 간격(시간/대)에 역수를 취한 식 (11)로 표현할 수 있다.

$$\text{도착 처리량(대/시간)} = \frac{1}{E(\Delta\tau)(\text{시간/대})} \quad (11)$$

여기서,

$E(\Delta\tau)$: 평균 시간 분리 간격

접근관제구역 출발 처리량은 도착 처리량과 같은 방식을 적용하여 출발 평균 시간 분리간격의 역수인 식 (12)와 같다.

$$\text{출발 처리량(대/시간)} = \frac{1}{\text{출발 평균 시간 간격}} \quad (12)$$

항공교통관제절차상 출발 분리 기준은 시간 기준을 적용하므로 출발 평균 시간 간격은 선·후행 항공기의 출발 분리 기준과 기종 혼합률을 고려한 평균 출발 분리 기준과 같다.

혼합처리량을 도출하는 방법은 다음과 같다.출·도착 항공기 착륙-이륙-착륙-이륙을 반복한다고 가정했을 때,

- ① 선행 도착 항공기는 활주로 시단을 통과하여 착륙한 후 활주로를 개방함(도착 항공기 활주로 점유시간).

- ② 활주로가 개방되면, 이륙허가를 받은 선행 출발 항공기가 이륙주행을 시작하는데⁵⁾, 이때 후행 도착 항공기는 출·도착 분리 기준(일반적으로 거리 분리 기준)을 만족하는 위치에 비행하고 있어야 함.
- ③ 후행 도착 항공기가 활주로 시단을 통과했을 때 선행 도착 항공기와 후행 도착 항공기 사이의 시간차(도착 항공기 활주로 점유시간 + 출발 항공기 이륙허가부터 이륙주행까지의 시간 + 출·도착 분리 기준에 해당하는 거리를 후행 도착 항공기가 비행하는 시간)를 구한다.
- ④ ③의 도착-도착 시간차, 도착 평균 시간 분리간격, 출발 평균 시간 분리 간격 중 가장 큰 값을 혼합 평균 시간 분리 간격으로 하고, 혼합 처리량은 혼합 평균 시간 분리간격의 역수인 식 (13)과 같음.

$$\text{혼합 처리량(대/시간)} = \frac{1}{\text{혼합 평균 시간 간격}} \quad (13)$$

단일 활주로 또는 출·도착 전용 평행 활주로 형태에서 접근관제구역 처리량은 STAR의 개수 및 이용 비율에 따라 가중평균된 값과 같다. 종속 평행 진입이 필요한 활주로의 경우 분리 기준에 대각 분리(diagonal separation)를 추가 적용하여 개별 처리량을 구한 후, 이를 합하여 구한다. 독립 평행 활주로 등 복수의 활주로를 이용하는 경우의 처리량은 각각을 단일 활주로로 생각한 처리량의 총합과 같다.

접근관제구역 도착 순간 수용량은 다음의 몇 가지 가정을 따른다.

- ① 접근관제구역 도착 순간 수용량은 각 STAR 진입 지점으로부터 접근관제소에서 관제탑으로 업무를 이양하는 지점에 이르는 경로 상에서, 비행할 수 있는 최대 항공기 수로 정의함(단, 활주로 시단에서 분리 기준을 만족하여야 함).
- ② 위 정의에 따라 개별 STAR 경로 k의 순간 수용량($C_{k,ins}$)은 식 (14)와 같음.

$$C_{k,ins} = \frac{\tau_{loc}}{E_k(\Delta\tau)} \quad (14)$$

여기서,

$C_{k,ins}$: 개별 STAR 경로 k의 순간 수용량
 τ_{loc} : 관제권 이양지점까지의 비행시간
 $E_k(\Delta\tau)$: STAR k 항공기 평균 시간 분리 간격

- ③ 개별 STAR가 경로를 공유하는 구간(공통 경로) 및 계기 접근 절차의 경우, 해당 구간 개별 STAR의 평균 순간 수용량을 적용함.

위 가정에 따라 접근관제구역 도착 순간 수용량은 식 (15)와 같다.

$$C_{ins} = \sum_{k=1}^K \sum_{n_k=1}^{N_k} \left(\frac{\tau_{k,n_k+1} - \tau_{k,n_k}}{M_{k,n_k+1} \times E_k(\Delta\tau)} \right) \quad (15)$$

여기서,

C_{ins} : 접근관제구역 도착 순간 수용량
 k : STAR 번호
 K : 총 STAR 개수
 n_k : STAR k를 구성하는 진입지점으로부터의 픽스 번호
 N_k : STAR k의 활주로 시단에서 5NM까지 총 픽스 개수
 τ_{k,n_k} : STAR k의 진입지점부터 픽스 n_k 까지 비행시간
 M_{k,n_k+1} : STAR k의 $n_k \sim n_k+1$ 픽스 사이의 경로를 공유하는 STAR 개수
 $E_k(\Delta\tau)$: STAR k 항공기 평균 시간 분리 간격

2.2 사례 연구 - 서울 접근관제구역 North Flow 접근관제구역 도착 수용량 산정

서울 접근관제구역은 풍향에 따른 활주로 이용 방향에 따라 North Flow와 South Flow가 있는데, 일반적으로 North Flow의 이용 비율이 높다. 위와 같은 이유로 사례 연구에서는 서울 접근관제구역 North Flow의 도착 수용량을 산정하였다.

서울 접근관제소는 인천국제공항(RKSI)과 김포국제공항(RKSS) 두 주요 공항의 접근관제를 담당하는 곳으로, 관제사의 업무부하량이 높고, 이에 따른 수용량 산정의 필요성이 높게 대두되는 구간이다. 인천국제공항과 김포국제공항의 진입 픽스는 동일하나 절차가 서로

5) 공항별 관제운영규칙에 따라 도착 항공기 활주로 완전 개방 전 이륙허가를 받는 등 차이가 있음.

분리되어 있기 때문에 개별 절차로 취급된다. 따라서 서울 접근관제구역의 접근관제구역 도착 수용량은 인천국제공항 도착절차 수용량과 김포국제공항 도착절차 수용량의 합으로 판단할 수 있다.

인천국제공항 North Flow는 도착 활주로로 RWY 33R, RWY 34L을 사용하고 있으며, 도착 수용량 산정에 이용한 STAR⁶⁾ 경로는 다음과 같다.

OLMEN 2E
GUKDO 2E
KARBU 2E
REBIT 2A

모형에 입력한 STAR 진입 속도(v_e), 시단 속도(v_N), 도착 항공기 분리 기준(δ)는 각각 300kt(v_e), 130kt(v_N) 5NM(δ)이며, 각 STAR를 이용하는 운항 비율은 동일하다고 가정하였다.

가정 사항에 따라 서울 접근관제구역 인천국제공항 STAR에 대한 시간-속도 그래프(예시, 33R OLMEN 2E)를 작성하면 Fig. 5와 같다. 그림에서 적색 역삼각형은 절차상 해당 픽스에서 역삼각형 중심위치의 속도 이하로 비행하라는 지시이며, 적색 사각형은 절차상 해당 픽스에서 정사각형 중심위치의 지정 속도로 비행하라는 지시로, 시간-속도 그래프는 입력값과 모형, 해당 절차 지시를 모두 만족하는 경로의 선을 나타내고 있다.

평균 시간 분리 간격을 이용하여 개별 경로 및 공통 경로의 순간 수용량 및 처리량을 산정한 뒤 전체 수용량을 산정한다.

활주로 및 STAR별 시간 분리 간격 및 경로별 처리량은 Table 2와 같다. OLMEN, GUKDO, KARBU의 STAR 경로의 시간 분리 간격은 활주로와 상관없이

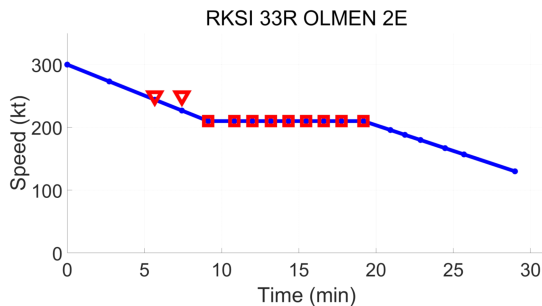


Fig. 5. RKS I 33R OLMEN 2E time-speed graph

Table 2. RKS I north flow TMA throughput

RWY 33R	시간분리간격(분)	경로별 처리량(대/시간)
OLMEN 2E	2.16	27.76
GUKDO 2E	2.16	27.76
KARBU 2E	2.16	27.76
REBIT 2A	2.21	27.10
RWY 34L	시간분리간격(분)	경로별 처리량(대/시간)
OLMEN 2E	2.16	27.74
GUKDO 2E	2.16	27.74
KARBU 2E	2.16	27.74
REBIT 2A	2.21	27.15

2.16분으로 동일한 경로별 처리량(27.76대/시간)을 도출할 수 있었고, 이는 세 경로가 공통된 트럼본 절차를 비행하기 때문이다. 진입지점 REBIT의 경우 개별 경로 및 다른 첫 접근 픽스(IAF)를 활용하여 시간 분리 간격(2.21분) 및 시간당 수용량(27.10대/시간, 27.14대/시간)의 차이가 나타났다. REBIT 경로 내에서 활주로 33R과 34L의 처리량이 다르게 나타나는 이유는 최종접근픽스까지 가는 계기접근절차의 차이로 비롯된 것으로, 첫 접근 픽스(PAMBI)의 위치가 다른 세 경로의 첫 접근픽스(ENPIL)의 위치보다 활주로 34L의 최종접근픽스 가까이 치우쳐져 있어서 33R과 34L간 경로의 거리 차이가 발생하기 때문이다.

구간별 순간 수용량은 Table 3과 같다. 개별 비행 구간은 개별 STAR가 단독으로 이용하는 비행 구간을 의미하며, 공통 비행 구간은 경로가 합쳐지는 픽스부터 함께 비행하는 구간을 의미한다.

인천국제공항 north flow 도착 순간 수용량과 도착 처리량은 Table 4와 같다. 도착 처리량의 경우 개별 활주소에 대하여 STAR 각각의 경로 이용 비율을 가중 평균한 처리량을 해당 활주로의 처리량으로 하여 독립

Table 3. RKS I north flow TMA interval instantaneous capacity

구간	순간 수용량(대)
개별 비행 구간	20.16
공통 비행 구간	12.66
합계	32.82

6) RKS I AD STAR Chart, Instrument Approach Chart, 2022.12.15.

Table 4. RKSI north flow TMA arrival capacity

RKSI north flow TMA 도착 순간 수용량(대)
32.8
RKSI north flow TMA 도착 처리량(대/시간)
55.2

평행활주로인 33R과 34L의 처리량을 합한 값을 도착 처리량으로 하였다.

김포국제공항 North Flow는 도착 활주로로 RWY 32L을 사용하고 있으며, 도착 수용량 산정에 이용한 STAR 절차는 다음과 같다.

OLMEN 2T
GUKDO 2T
KARBU 2T
REBIT 2T

모형에 입력한 STAR 진입 속도(v_e), 시단 속도(v_N), 도착 항공기 분리 기준(δ)는 인천국제공항 입력값과 같은 각각 300kt(v_e), 130kt(v_N) 5NM(δ)이며, 각 STAR를 이용하는 운항 비율 역시 동일하다고 가정하였다.

가정 사항에 따라 서울 접근관제구역 김포국제공항 STAR에 대한 시간-속도 그래프(예시, 32L OLMEN 2T)를 작성하면 Fig. 6과 같다.

활주로 및 STAR별 시간 분리 간격 및 경로별 처리량은 Table 5와 같다. 김포국제공항 STAR의 경우 Fig. 6 예시에서 보이다시피 인천국제공항 STAR와는 다르게 공통 경로의 지정 속도 지시가 없어 서로 다른 속도로 접근 절차를 이용함에 따라 시간 분리 간격의

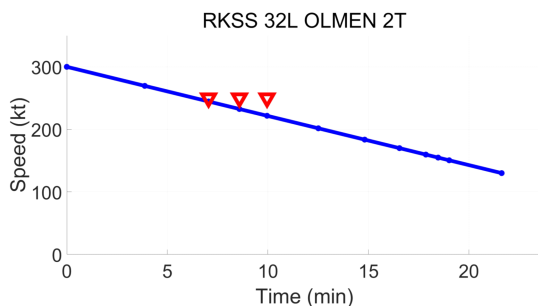


Fig. 6. RKSI 33R OLMEN 2E time-speed graph

Table 5. RKSS north flow TMA throughput

RWY 32L	시간분리간격(분)	경로별 처리량(대/시간)
OLMEN 2T	2.17	27.70
GUKDO 2T	2.16	27.80
KARBU 2T	2.15	27.91
REBIT 2T	2.21	27.18

Table 6. RKSS north flow TMA interval instantaneous capacity

구간	순간 수용량(대)
개별 비행 구간	19.19
공통 비행 구간	5.03
합계	24.22

Table 7. RKSS north flow TMA arrival capacity

RKSS north flow TMA 도착 순간 수용량(대)
24.2
RKSS north flow TMA 도착 처리량(대/시간)
27.6

Table 8. Seoul TMA north flow capacity

Seoul TMA 도착 순간 수용량(대)
57.0
Seoul TMA 도착 처리량(대/시간)
82.8

격차가 발생한다.

구간별 순간 수용량은 Table 6과 같다. 인천국제공항 대비 상대적으로 공통 비행 구간이 짧으며, 이는 인천국제공항 대비 김포국제공항의 수요가 적음을 반영한 절차 설계로 유추한다.

김포국제공항 north flow 도착 순간 수용량과 도착 처리량은 Table 7과 같다.

서울 접근관제구역의 총 도착 순간 수용량과 총 도착 처리량은 Table 8과 같다.

III. 결 론

본 연구는 항공교통량의 지속적인 증가로 인해 중요

성이 강조되는 수용량 산정, 특히, 연구가 제한적이고, 산정방법이 확립되지 않은 접근관제구역 수용량 산정 방법을 정립하고자 하였다. 기존의 접근관제구역 수용량 연구는 사례가 거의 없거나, 처리량 측면에 집중함으로써, 순간 수용량에 대한 연구가 희소한 실정이었다. 따라서 본 연구에서는 도착 처리량과 함께 도착 순간 수용량을 수리적으로 산정하는 방법을 제시하였다. 또한, 접근관제구역 출발 처리량 및 혼합 처리량 산정 방법을 활주로 수용량의 개념을 활용하여 제시하고자 하였다.

처리량은 특정한 지점의 시간당 항공기 처리 대수로, 제안된 접근관제구역 도착 처리량 산정 방법에는 공항과 접근관제구역이 활주로 시단에서 서로 공간적으로 연결되어 있는 특성과, 시단에서 항공기 간 분리 기준 적용이 접근관제구역과 활주로에서 동일하게 처리량을 결정하는 역할을 하는 특성이 반영되었다.

순간 수용량은 일정 공간에서 동시에 항공교통업무를 제공할 수 있는 최대 항공기 대수로, 제시된 접근관제구역 도착 순간 수용량 산정 방법은 전체 비행시간을 분리 기준을 만족하는 평균 시간 분리간격으로 나눠 해당 STAR가 포함할 수 있는 순간 최대 항공기 수를 구하는 방법을 사용하였다.

제안모형에 따라 절차 및 가정된 값을 활용하여 산정한 서울 접근관제구역의 수용량은 도착 순간 수용량 57.0대, 도착 처리량 82.8대/시간이다.

이렇게 산정된 수용량은 산술적으로 계산된 절대용량에 한정되어 있으며, 항공기의 속도조절, 선화나 관제사의 업무부하가 반영되어 있지 않다. 또한 지연을 고려한 실용 용량과는 거리가 있어 추후 연구에는 해당 요소를 포함한 모형의 확장 연구가 수행되어야 할 필요가 있다.

그럼에도 불구하고 본 연구는 공항 계획 등 전략적 측면에서 공항 건설(제주 제2공항 등), 활주로 증설(인천국제공항 제5활주로 등) 등의 시설 변동과 절차 변경, 분리 기준의 변동(후류요란 분리간격 조정 등)을 반영한 접근관제구역 수용량을 산정하고 그 영향력을 평가하는 새로운 모형을 제시했다는 점에서 이론적 기초 연구에 기여하는 동시에 공항개발증장기종합계획의 시설용량 산정 등에 활용할 수 있는 근거를 제시해 보았다는 점에서 정책적 시사점을 부여했다고 할 수 있다.

또한 국내 접근관제구역 중 가장 복잡한 서울 접근관제구역(인천국제공항과 김포국제공항을 포함하는 관

제구역)의 수용량을 실증적으로 산정해봄으로써, 향후 절차 설계 및 인력 배정 등에 활용할 수 있는 근거를 제공하였다는 점에서도 시사하는 바가 있다고 할 수 있다.

사 사

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 “데이터기반 항공교통관리 기술개발(과제번호 : RS-2021-KA1633-73)”의 연구지원으로 수행되었습니다.

후 기

본 논문은 한국항공운항학회 2023년 춘계학술대회에 발표한 논문 “접근관제구역 도착 수용량의 수리적 산정 모형에 관한 연구”를 수정 및 보완한 것입니다.

References

1. "Aviation Statistics - General", Airportal, retrieved March 2023. <https://www.airportal.go.kr/knowledge/statsnew/air/general.jsp>, Accessed 25 September, 2023.
2. ICAO, "ICAO Doc 9971. Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management (ATFM) 3rd Ed.", ICAO, 2018, pp.II-3-1.
3. Janić, M., "Air Transport System Analysis and Modelling", Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, 2000, pp.60-68.
4. Yang, H. M., and Kim, B. J., "Capacity model for terminal control area", Journal of Korean Society of Transportation, 12(3), Korean Society of Transportation, 1994, pp.15-27.
5. Harris, R., "Models for Runway Capacity Analysis", MITRE Corporation, 1972, pp.2-1~3-18.
6. FAA, "Facility Operation and Administration", FAA, 2015, pp.17-8-1~17-8-2.
7. Juričić, B., Babić, R., and Francetić, I., "Zagreb terminal airspace capacity analysis", Promet - Traffic & Transportation, 23(5), Fa-

- culty of Transport and Traffic Sciences, University of Zagreb, 2011, pp.367-375.
8. Lee, H., and Kim, D., "A comparative study on delay calculation method of airport capacity", Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics, 28(2), Korean Society for Aviation and Aeronautics, 2020, pp. 47-52.