

## Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2024.32.1.061>  
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

## 공항 슬롯 배분 개선을 위한 시뮬레이션 모형 기본 설계에 관한 연구: 단일 공항을 중심으로

박보미\*, 이대겸\*\*, 김준혁\*\*\*, 윤석재\*\*\*\*

### A Study on a Conceptual Design for a Simulation Model to Enhance the Airport SLOT Allocation Problem for a Single Airport

Bomi Park\*, Daekyum Lee\*\*, Junhyuk Kim\*\*\*, Seokjae Yun\*\*\*\*

#### ABSTRACT

In response to the continuously increasing demand for air travel, various studies are being conducted. This research focuses on the design of a simulation model for improving airport slot allocation in the strategic phase. It addresses three aspects of model design, introducing considerations such as the objective function. Additionally, it explains the conceptual procedures for the overall simulation operation and detailed processes within the model including input and output data. Emphasizing the SAL, this study excludes policy and qualitative judgments from its scope. The target airport for application will be confirmed in future research. This study marks a crucial first step toward optimizing air traffic flow, with expectations of contributing to the enhancement of operational efficiency at airports.

**Key Words** : Airport Capacity(공항 수용능력), Air Traffic Management(항공교통관리), Airport Operation(공항운영), Airport Planning(공항계획), SLOT(항공기 운항시간 배분)

#### 1. 서 론

##### 1.1 연구의 배경

코로나19 팬데믹으로 인해 항공 수요가 급감하였으나, 질병확산 방지 및 항공산업 정상화를 위한 정부와 산·학·연의 노력을 통해 2019년 수준으로 회복하고

있으며, 앞으로도 항공 수요가 증가할 것으로 예상하고 있다(IATA, 2023).

지속적인 항공 수요 증가에 따른 공항 및 공역의 수용량 증대와 운영효율성 확보를 위해서는 운영방식 및 관련 기술의 개선이 필요하다는 주장은 꾸준히 제기되어 왔다. 수용량 증대를 위해서는 공항의 활주로 신설, 공역의 확장과 같이 물리적 범위를 확대하는 방법이 있다. 운영 효율성 확보를 위해서는 항공기의 출·도착 흐름관리 기법 도입, 항공기 간 분리 기준 최소화 와 같은 비행절차 개선, 또는, 주어진 공항의 수용량에서 슬롯(slot, 항공기 운항시간) 배분을 최적화하여 공항의 활용률(utilization)을 높이는 방법 등이 있다(IATA, 2023). Katsigiannis & Zografos(2021)도 공항의 수요-용량 불균형을 해결하기 위한 단기적인

Received: 29. Dec. 2023, Revised: 22. Feb. 2024,

Accepted: 26. Feb. 2024

\* 한국교통연구원 항공우주교통연구본부 부연구위원

\*\* 한국교통연구원 항공우주교통연구본부 연구원

\*\*\* 한국교통연구원 항공우주교통연구본부 연구위원

\*\*\*\* 한국교통연구원 항공우주교통연구본부 부연구위원

연락처 E-mail : sjyun@koti.re.kr

연락처 주소 : 세종특별자치시 시청대로 370

조치로 공항의 슬롯 배분(airport slot allocation, ASA) 방식이 사용되어야 한다고 언급하고 있으며, 김상현(2017) 또한 공항 수용능력에 따라 운항 수요를 동적으로 조정하면 한정된 공항 및 공역의 자원을 보다 효율적으로 활용할 수 있다고 언급하였다.

항공교통 흐름을 최적화하여 공항 및 공역의 활용률을 높이고, 항공기 지연을 최소화하는 항공교통 흐름관리 기법은 적용 시점에 따라 전략 단계(strategy, 운항 수개월 전), 사전전술단계(pre-tactical, 1일~2일 전), 전술단계(tactical, 1일 전~운영까지)로 구분할 수 있다(SESAR, 2007). 흐름관리 기법 중 가장 먼저 수행되는 전략단계에서는 공항 및 공역 운영의 계획을 수립하는 단계로, 전략적 수용량 산정과 1차적 운항스케줄 배분 등이 이루어진다. 1차적 운항스케줄 배분이란 특정 공항에서 특정 시각에 운항하는 항공편을 배정하는 공항의 슬롯 배분이라 볼 수 있다.

IATA(2023)는 Worldwide Airport Slot Guidelines (WASG)를 통해 혼잡수준에 따라 공항을 1수준부터 3수준까지로 구분하고, 혼잡수준별로 슬롯을 배분하는 기준을 제시하고 있다. 3수준에 해당하는 공항은 일정 시간 동안 수요가 공항이 공표한 수용량을 크게 초과하며, 단기적으로 수요를 충족하기 위한 공항 확장이 불가능하며, 자발적인 일정 조정을 통한 수요조절이 효과적이지 않아 공항을 이용하는 모든 항공사 또는 항공기에게 이착륙을 위한 슬롯 배분 프로세스가 필요한 공항으로 정의된다(IATA, 2023).

항공교통량의 증가로 우리나라에서도 인천, 김포, 제주국제공항의 3개 공항이 3수준에 해당되어 슬롯 배분이 이루어지고 있으나, 주기장의 가용 여부 등 기초적인 척도만을 기준으로 하여 항공편의 비행시간, 집중률, 활주로 수용량 등 운영효율성 향상을 위한 다양한 요인들이 충분히 고려되지 않고 있다.

따라서 보다 효율적인 공항 및 공역 운영을 위해서는 항공교통 흐름관리, 항공기 출·도착관리 기법과 같은 운영적인 해결 방법에 더하여, 실질적인 운항이 이루어지기 전에 항공기 운항스케줄을 적절하게 배분하는 최적화 기법도 검토할 필요가 있다.

## 1.2 연구의 목적 및 범위

본 연구는 항공교통 흐름관리의 전략적 단계에서 활용될 수 있는 공항 슬롯 배분을 최적화 하기 위한 첫 번째 단계로, 공항 슬롯 배분 개선을 위한 시뮬레이션

모형의 기본 설계를 수행하였다.

Table 1은 통상적인 슬롯 신청 및 운항스케줄 배분 절차이다. 순서 1~3은 슬롯의 신청 및 기계적인 배분 단계이며, 순서 4~9는 정성적 결정에 따라 수행되는 단계이다.

본 연구에서 제시하는 모형의 작동 시점은 순서 3에 해당하며, 정량적 방식의 1차적 최적화수행이 가능한 초기 슬롯 배분(slot allocation list, SAL) 단계를 연구의 범위로 설정하였다.

정부의 정책적 판단, 정부·군·공항·항공사의 협상에 따라 수행되는 순서 4~9단계는 연구 범위에서 제외하였다.

연구의 내용적 범위는 크게 세 가지로 모형 설계 시 고려사항, 입·출력 자료 설계, 프로세스의 기본 설계로 구분하였다.

설계 시 고려사항에서는 목적함수의 형태, 수용량의 종류, 시간 범위 등 모형 설계를 수행할 때 고려사항을 제시하고자 한다. 입·출력 자료 설계에서는 IATA가 제시하는 일반적인 슬롯 신청 형식에, 우선순위, 항공사

Table 1. Slot & flight schedule allocation process in Korea and research scope

순서	업무	세부 업무	업무 수행	비고
1	운항시각 신청	기득권 슬롯 산정 (SHL, slot historic list)	공항→항공사	6개월 전
2		슬롯 신청 (SCR, slot clearance request)	항공사→공항	5개월 전
3	운항시각 초기배분	초기 슬롯 배분 (SAL, slot allocation list)	공항	연구범위
4		SAL 통보	공항→항공사	5개월 전
5	운항시각 조정	슬롯 컨퍼런스 (협상 등을 통한 조정)	공항↔항공사	4개월 전
6	사업계획	국제선 사업계획 정기인가 신청	항공사→공항→국제항공과	
7		국내선 사업계획 정기인가 신청	항공사→공항→항공산업과	
8	운항인가	군공항 조정	국토부↔국방부	
9		사업계획 정기인가	국토부→공항 및 항공사	

요청 조건 등을 반영할 수 있는 입력자료와 초기 슬롯 배분 결과에 대한 출력자료의 형식을 제시하고자 한다.

마지막 프로세스 기본 설계에서는, 시뮬레이션의 전반적인 작동과 모형 내 상세 프로세스에 대한 개념적 절차를 제시하고자 한다. 공간적 범위 중 적용 대상 공항은 향후 연구인 상세모형 설계 및 개발 단계에서 확정을 짓고자 한다.

## II. 기존 문헌 연구

### 2.1 문헌 연구

공항 슬롯 배정을 최적화하기 위한 다양한 연구를 찾을 수 있다. 하지만, 슬롯 배분은 실제 운항이 시작되기 약 6개월 전부터 이루어지며, 시준별(하계 및 동계) 운항스케줄에 대한 배정을 수행하기 때문에, 시간적 범위와 변수 및 파라미터의 복잡성(complexity)으로 인하여 실험적 단계의 학술적인 연구만이 수행되고 있다.

Zografos et al.(2017)은 슬롯 최적화를 위한 연구 사례를 검토하였다. IATA 기반의 슬롯 배분은 크게 사전 슬롯 배분 단계, 슬롯 배분 단계, 후속 조치 활동으로 구분한다. 사전 슬롯 배분에서는 주로 공항 및 공역의 고시 수용량(전략적 또는 정책적으로 고시된) 설정에 중점을 둔다. 고밀도 수요를 억제하거나 과도한 지연을 방지하기 위해 특정 시간대의 수용량을 다르게 설정하여 슬롯 배분을 조정하는 방안이다.

슬롯 배분 단계에서는 시장주도형 또는 가격 책정 배분 방법을 사용하거나, 스케줄링 최적화를 통한 슬롯 배분을 사용하는 단계이다. 즉, 본 연구가 다루고자 하는 단계라 볼 수 있다.

후속 조치 활동에서는 슬롯 배분에 따른 이용률 준수 여부를 모니터링하면서 전술적으로 재배분하거나, 기상이나 운항패턴 등을 기반으로 고시된 수용량 또는 배정된 슬롯을 재배분하는 단계로 구분하였다. 이는 정책적 또는 정성적인 판단이 같이 이루어져야 하는 단계이다.

Zografos et al.(2012)은 단일 공항에 대한 슬롯 배분 모형을 선형(linear) 및 결정론적(deterministic) 모형으로 개발하였다. 목적함수는 항공사의 요청 시각과 실제 배정된 시각의 차이를 최소화하기 위해 설정하였으며, 특정 시간대의 활주로 수용량을 초과하지 않으면서, 도착-출발 항공편의 준비시간(turnaround time)을 고려했다. 하지만, 주기장의 크기에 따른 항공기 배정 가능 여부, 즉 주기장의 수용량을 다루

지 않은 기초적인 모형이다. 이 연구는 기득권 슬롯이 배분된 이후 초기 슬롯을 배분(SAL)하기 위한 목적으로 수행되었으며, 초기 슬롯 배분 이후의 절차는 정성적 판단에 따라 수행된다고 언급하고 있다.

또한, 연구의 한계에서 시간 종속성, 다중 목적함수, 기타 동적인 제약조건을 준다면, 이 문제는 NP-Hard로 분류될 수 있어 다항식 복잡성을 가진 알고리즘을 찾을 가능성이 매우 희박하다고 언급하고 있다(Garey & Johnson, 1979).

Jacquillant & Odoni(2015)도 유사한 형태의 선형 모형을 제시하였다. 전략적 단계에서 항공기 운항 스케줄을 배정하는 연구로 공항의 전술적 단계의 수용량 활용률을 최대화하기 위한 목적함수를 활용했으며, 지연시간을 감소시키기 위한 제약조건을 활용하였다.

Katsigiannis & Zografos(2021)는 항공사의 유연한 선호도와 공항 자원(수용량)의 동적 배분을 가능하게 하는 제약조건을 개발하여 다중 형태의 모형을 제시하였다. 기초적인 배분(allocation)을 위한 모형과 시간적 유연성을 고려한 추가 모형을 복합적으로 구성하여 시뮬레이션과 유사한 방법을 활용했다. 이때, 거부된 슬롯 총량, 요청 시각 대비 배정된 시각 간 차이, 변경된 슬롯의 수 등 다양한 목적함수를 고려하였으며, 주기장의 수용량, 항공기의 이동시간 등을 고려하였다. 하지만, 제약조건이 40개 이상이어서 샘플분석 시 200분 이상의 컴퓨팅 시간이 소요되었다.

### 2.2 모형 기본 설계 방향

본 연구에서는 슬롯 배분 절차에 관한 국내 사례와 슬롯 배정 최적화에 관한 연구사례를 살펴보았다. 이를 살펴봤을 때, 슬롯 배분 절차 중 최적화 기술이 필요한 시점은 초기 운항스케줄 작성(slot allocation list, SAL) 및 배포 단계임을 확인할 수 있다. 초기 운항시각 배정 결과가 배포된 이후부터는 정성적인 평가나 정책적인 결정에 따라 운항 시각이 조정되므로, 최적화 모형 등을 수행하는 데에 어려움이 있다.

수용량의 활용률 최대화, 슬롯 요청 거절 수 또는 변경된 시각의 최소화 등의 목적함수가 사용되고 있었으며, 본 연구에서도 유사한 목적함수를 다루고자 한다. 또한, 결정론적 모형의 경우, 다양한 제약조건(주기장, 지연시간 등)을 고려하기 어렵다는 한계를 확인하였으며, 본 연구는 이를 보완하기 위해 시뮬레이션 기법을 활용하고자 한다.

### III. 시뮬레이션 모형 기본 설계

#### 3.1 모형 설계 시 고려사항

슬롯 배분을 개선(또는 최적화)하기 위한 모형은 공간적 범위, 모형의 구성, 다루고자 하는 목적함수, 상세 조건 등에 따라 모형 구성의 난이도나 복잡성이 달라지며<sup>1)</sup>, 결과 도출 소요 시간 등에 영향을 미칠 수 있다.

즉, 모형 설계 시 고려사항을 설정하는 것이 가장 먼저 연구되어야 하며, 고려사항을 선언해야 한다. Fig. 1은 본 연구에서 제시하고자 하는 고려사항을 보여주고 있다.

##### 3.1.1 공간적 범위

모형의 공간적 범위는 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 단일 공항에 대한 슬롯 최적화이고, 두 번째는 복수 공항 네트워크에 대한 최적화다. 단일 공항의 경우 연결된 공항에 대한 상황을 고려하지 않는 대신, 복수 공항 네트워크보다 계산적 난해성(computationally hardness)이 작다. 또한 문제(problem)의 설정이 복수 공항보다 많지 않아 상세한 모델링이 가능해진다. 예를 들어, MARS(multi-aircraft ramping system)<sup>2)</sup>등을 활용한 동적인 수용량, 공항 구역별 별도의 수용량 설정 등이 가능해진다.

복수 공항을 고려할 경우, 슬롯 배분 시 항공기 기단(fleet) 운영 및 신규 항공기 도입에 대한 정보를 파악해야 하는데, 이는 항공사의 권한이며 운영적인 방법으로 해결해야 하는 사항이다. 연결편 지연 등을 고려한 출·도착 시각 최적화 등을 고려하는 것은 우리나라 전 공항 및 공역에 대한 ATFM(total air traffic flow management) 정도의 크기로 변질될 수 있다.

따라서 본 연구는 모형의 작동 범위, 모형 개발의 목적(SAL 도출) 등을 고려하여 모형의 공간적 범위를 단일 공항으로 한정하고자 한다.

##### 3.1.2 모형의 구성

슬롯 배분을 위한 모형은 할당문제(assignment problem)의 한 종류로 볼 수 있다. 일반적으로 할당문

제는 단일 모형으로 구성되지만, 우선권 등을 고려하는 경우 복수의 모형을 활용하여 단계별로 최적해를 탐색하는 사례가 있다. 기득권 슬롯에 우선권을 배분하기 위해 모형의 수행 단계를 분리하는 때도 있다(Katsigiannis & Zografos, 2021).

본 연구에서는 모형의 구성을 다단계 모형으로 구성하고자 한다. 1단계에서는 최초 운항스케줄을 배정하는 단계로 기득권 슬롯과 공항 수용량을 고려하여 요청 시각 대비 배정 시각의 차이를 최소화하는 방안으로 작동한다. 2단계에서는 거절 건수를 최소화하기 위한 단계로, 터미널 및 주기장 배정을 통해 주기장의 가용 여부를 검토하는 단계다. 3단계는 주어진 수용량의 활용률(utilization)을 최대화하는 단계로 설정하고자 한다.

##### 3.1.3 목적함수의 구성 및 종류

목적함수는 단일 목적함수 또는 다단계 모형을 활용한 다양한 목적함수를 사용할 수 있다. 본 연구는 다단계 모형을 사용하고자 하며, 이에 따라 다수의 목적함수를 사용하고자 한다.

이번 설계에서 선정한 목적함수는 크게 3가지로, 요청 슬롯 대비 배정 슬롯의 시각 차이, 슬롯 요청 거절 수, 수용량 활용률로 구성하고자 한다. 향후 상세모형 개발을 진행하면서 모형의 구성, 목적함수의 구성 등의 효율성에 대해 상세히 분석할 필요가 있으며, 계산시간(computing time) 기반의 평가를 수행할 예정이다.

##### 3.1.4 수용량의 종류

기본모형이 사용하는 수용량의 종류를 시간대별 복수 수용량으로 결정하고자 한다. 첫 번째는 시각별 수용량으로 주어진 단위 시간에 따른 용량을 의미하며, 두 번째는 세부 수용량으로 주기장, 활주로 등의 수용량을 의미한다.

##### 3.1.5 단위 시간 범위

본 연구의 슬롯 배분 모형은 할당문제(assignment problem)와 유사한 형태로 개발될 예정이며, 가상의 공간(bin)과 시간으로 구성된 산출물을 작성하게 된다. 이는 단위 시간의 정의가 필요함에 따라 Rolling Time Horizon을 기본으로 적용할 예정이나, 향후 상세모형 개발 시 모형의 복잡성으로 인해 단순 시간 범위로 적용될 수 있다.

1) 경우에 따라서 슬롯 배분이 아닌 국가적 항공교통 흐름 최적화가 될 수 있음.  
2) 주기장의 크기를 크게 설정하여, 작은 항공기는 2대, 큰 항공기는 1대를 주기할 수 있는 체계.



Fig. 1. Consideration for airport slot allocation model design

### 3.1.6 상세조건

본 연구의 1차적인 공간적 범위는 김포 또는 제주로 설정하고자 하며, 김포 및 제주 공항에는 국제선과 국내선 터미널이 별도로 운영되고 있으며, 원격 주기장을 포함한 복수의 주기장을 운영하고 있다. 단, 기본모형의 경우, 가상의 공항을 활용할 예정이며, 향후 연구에서 확장성을 고려한 절차를 개발할 예정이다.

다양한 준비시간(turnaround time)이란 기종별, 항공사별, 목적지별 등 세분화된 준비시간을 의미한다.

물론, 항공사가 제출한 슬롯 요청에 도착 항공편과 출발 항공편을 기입한 경우, 준비시간이 이미 주어진 매개변수라고 볼 수 있으나, 슬롯을 재배정해가며 운항 시각을 변경할 때 최대/최소 Time Window를 고려할 필요가 있으므로 주기장 배정자료에서 언급한 준비시간 분석 결과를 활용하고자 한다.

비행시간은 지연시간을 일부 반영하기 위해 활용되며, 출·도착 공항 간 비행시간을 의미한다. 예를 들어 김포-제주 노선의 경우, 특정 시간대의 수요 폭증으로 비행시간이 증가한다.

아무 항공기도 운항하지 않을 때 김포-제주 노선은 약 45분의 비행시간이 소요되는데, 침두 시간에는 제주 공항에서의 순서 배정 및 항공기 간 분리간격 조정 등으로 60분 이상이 소요되기도 한다.

본 연구에서는 이러한 사항을 반영하기 위해 향후 통계 처리된 비행시간을 반영하고자 한다.

### 3.1.7 우선순위 관련

본 연구에서는 우선순위 사항을 크게 3가지로 형태로 구성하고자 한다. 첫 번째는 기득권(grandfather right)으로 기득권 슬롯(SHL)을 가장 우선적으로 배정

하고자 한다. 두 번째는 First Come First Serve(FCFS)다. 항공사가 슬롯을 요청하기 위해 보내는 메시지인 SCR(Slot Clearance Request) 내에는 발송 일시가 포함되어 있다. 이 내용을 기반으로 동일 시각에 슬롯을 요청하였으나, 해당 시각의 수용량이 초과한 경우 먼저 제출한 SCR이 반영되도록 개발할 계획이다.

공항의 경영전략에 따라 사용자(공항공사의 Coordinators)의 정성적 판단이 필요할 경우가 있다. 이를 위해 세 번째 우선순위 사항으로 사용자의 추가 입력을 받고자 한다. 모형 개발 시 기득권은 2순위, FCFS는 4순위, 사용자 입력사항은 5순위(5순위부터 입력 가능)로 진행되도록 개발할 예정이다. 간혹 정책적 결정에 따라 기득권이나 FCFS 보다 우선적용이 되어야 할 경우가 발생할 수 있는데, 이를 반영할 수 있도록 앞서 언급한 우선순위를 1순위 및 3순위를 유예하여 우선순위 변경이 가능하도록 하고자 한다.

### 3.1.8 기타 사항

시간적 범위에 대한 사항을 고려할 필요가 있다. 매 주 단위로 슬롯 배정 문제를 세분화하여 적용할 것인지, 전체 시즌 단위로 고려할 것인지에 따라 문제의 크기와 입력자료의 크기가 달라진다. 실제로 운영되는 슬롯 배분 프로세스에서는 전체 시즌 단위로 진행되며, 이를 상세히 확인해 볼 때 매 주 반복되는 형태의 운항을 제출하고 적용받는다.

본 연구는 주 단위로 시간적 범위를 설정하고자 한다. 단, 향후 연구에서 다룰 상세모형에서 모형의 구성 단계 및 형태가 변경될 수 있다.

시간적 범위뿐만 아니라, 항공편의 조합도 고려사항이다. 항공편의 조합이란, 단일 항공편을 대상으로 할

지, 연결편을 모두 고려할지에 대한 의미인데, 본 연구는 SCR 기반으로 모형이 작동되도록 개발할 예정이므로, 단일 항공편에 대한 사항만 고려할 예정이다. 단, SCR에는 1차 연결편(동일 공항 내 도착-출발 연결)까지 제출되는 경우가 다수이므로 1차 연결편도 고려 대상이다. 모든 연결편을 고려하면 ATFM 문제와 같아지거나, 이에 따라 실질적인 슬롯 배분의 역할이 아닐 수 있으므로 범위를 축소하고자 한다.

### 3.2 입력 및 출력자료 설계

슬롯 배분은 항공사의 슬롯 신청으로부터 시작된다. 항공사는 슬롯 배분 담당기관(우리나라의 경우 공항공사)에 SCR을 제출하는데, 이 SCR은 IATA의 SSIM (Standard Scheduled Information Manual)에 따라 작성한다. 다음 표는 SCR의 형식을 보여주고 있다.

Table 2에서 확인할 수 있는 바와 같이 부가 및 일반정보 외의 자료는 정량적인 자료로 바로 활용 가능하다. 하지만, 부가 및 일반정보는 별도의 서식이 없어 평문으로 작성하며, SCR 작성자(항공사)에 따라 다양한 형태로 제출될 수 있다. 예를 들어, 부가 및 일반정보에 요청시각의 변경 가능 여부나, 변경 시 가용한 Time-window, 특정 주기장(spot)을 요청할 경우 해당 내용을 기입할 수 있다. 즉, 부가 및 일반정보를 입력받을 수 있는 설계가 필요하며, 슬롯 배분 담당자의 별도 입력이 필요하다.

Table 2. Example of SCR (SSIM format)

SCR	내용
SCR S21 07OCT GMP	헤더(슬롯 요청 시즌정보(21년 여름) SCR 발송일 대상공항
NJNL1234 JNL4321 01MAY31AUG 1234567 160 738 CJU0015 0130CJU JJ	신규슬롯, 도착·출발편명 슬롯 요청 기간 운항요일, 공급좌석, 기종 출발공항, 도착시각 출발시각, 목적공항, 정기여객
SI ALL TIMES UTC	부가정보(평문)
GI IF NOT AVBL PLS OFFER NEAREST POSSIBLE	일반정보(평문)

#### 3.2.1 입력자료 설계

본 연구에서는 Table 3 및 Table 4와 같이 입력자료를 SCR 기반 자동 입력자료와 사용자(슬롯 배분 업무 수행자)의 추가 입력자료로 구분하여 설계하였다.

Table 3과 Table 4에서 볼 수 있는 바와 같이, 총 30개의 파라미터를 입력받고자 한다. 단, Table 3은 항공사가 제출한 SCR 기반으로 자동 입력이 가능하며, Table 4는 SCR 내 부가 및 일반정보를 기반으로 사용자가 별도로 입력해야 하는 사항이다.

Table 3. Input data based on SCR

구분	명칭	의미	상세
1-2	ARR /DEP	도착·출발 항공편명	
3-4	Period	슬롯 시작일 슬롯 종료일	DDMM 형식
5-11	Day	운항 요일	운항하려는 요일 Binary (0: 미운항, 1: 운항)
12-13	Seat /AC	공급좌석 /항공기 기종	3자리 정수 IATA 코드
14-15	ORG /STA	출발공항 /도착시각	IATA 코드 HHMM 형식
16-18	STD/L/ DEST	출발시각 /날짜변경 /목적공항	HHMM 형식 Binary (0: 미변경, 1: 변경) IATA 코드
19-20	SVC	도착·출발 서비스 코드	정기, 부정기 등 IATA 서비스 코드

Table 4. Additional manual input data

구분	명칭	의미	상세
21	SHL	기득권 여부	기득권 여부 Binary (0: 없음, 1: 기득권)
22	CHTA	요청시각 변경 가능 여부	시각 변경 가능 Binary (0: 불가능, 1: 가능)
23-24	CHTWS /CHTWE	요청시각 변경시 Time-Window	도착 및 출발 변경 가능 범위 (예: 0100 → 1시간)
25	CHDA	요일 변경 가능 여부	요일 변경 가능 Binary (0: 불가능, 1: 가능)
26-27	D1 /D2	변경대안 1 및 2	요일 변경 대안 (예: 0100001, 화·일요일만 운항 가능)
28	RQT	터미널 요청	요청 터미널 정보
29	RQS	SPOT 요청	요청 SPOT 정보
30	PRIOR	우선순위	정수 형태의 순위 1: 유예, 2: 기득권 3: 유예, 4: FCFS 5-: 기타

### 3.2.2 출력자료 설계

일반적으로 슬롯 배분 업무를 수행하면 두 가지 형태의 결과가 도출된다. 첫 번째는 운항스케줄이며, 두 번째는 NAC(Notice of Airport Capacity Chart)이다. 운항스케줄의 경우, Table 3과 같은 형식으로 출력할 수 있으며, 슬롯의 여유 정도를 외부에 공개하기 위해 쓰이는 NAC의 경우 다음 그림3)과 같은 형식으로 출력할 수 있다. 시간 및 요일에 따른 슬롯 가용 여부(녹색: 추가 슬롯 요청 가능, 붉은색: 요청 불가)를 확인할 수 있다.

본 연구는 위 두 개의 출력자료 외에 추가로 주기장 배정 Gantt 차트를 다음 그림과 같이 출력자료로 설계하였다. X축은 시간대, Y축은 주기장을 의미하며, 동 시간대 및 동일 주기장에 중복배정 여부를 판단하기 위해 쓰일 수 있다.

### 3.3 프로세스 기본 설계

Fig 4는 본 연구에서 제시하고자 하는 슬롯 배분 개선(최적화)을 위한 시뮬레이션 프로세스 기본 설계를 보여주고 있다.

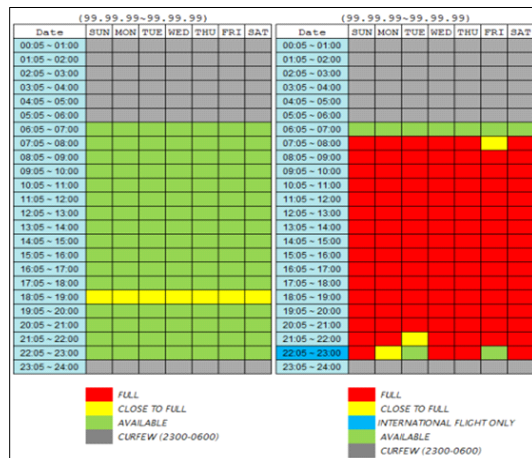


Fig. 2. Notice of airport capacity chart

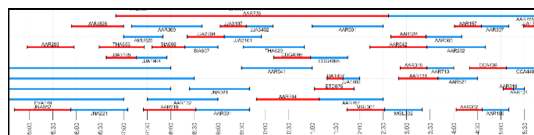


Fig. 3. Gantt chart for gate allocation

모형은 크게 두 부분으로 구성된다. 첫 번째는, 기초 데이터를 로드하고 데이터를 초기화한다. 이때 수용량 예측 시스템인 ISAAC<sup>4)</sup>과 연계하여 공항 및 공역의 수용량(한 시간 단위의 항공기 처리량)을 수집한다. 초기 슬롯 배분인 SAL을 작성하는 시점에 예측된 수용량 정보를 불러온다. 단, 6개월 이상의 시간 차이로 수용량 정보가 완벽할 수 없다는 한계가 있다.

두 번째 부분인 슬롯 최적화 기본모형 부분에서는 SAL을 만들기 위해 실제 슬롯을 배분한다. 이때 SCR 변경 모듈을 3개로 구성하였다.

가장 처음의 논리 검증은 공항의 일일 수용량을 초과하는지를 검토하는데, 공항 일일 수용량을 초과하는 경우 SCR 거절 외에는 해결 방법이 없으므로 SCR 변경 모듈 1의 경우 SCR 거절 기능만 탑재하고자 한다. 단, 기본모형에서는 거절 SCR을 랜덤으로 선정하며, 시뮬레이션 루프를 계속 진행하면서, 최종적으로 적합한 결과를 산정하게 된다. 나머지 SCR 변경 모듈은 다음 절차에서 설명하고자 한다.

위에서 업데이트된 SCR을 활용하여 가상으로 연결편을 배정한다. 제출된 SCR에 도착과 출발 항공편이 기록되어 있으면 동일 항공기로 설정하고, 단일 항공편은 각각 별도의 항공기로 구분한다. 가상의 데이터에서는 큰 문제가 발생하지 않았으나, 연결편에 대한 정보가 없어 공항 주기장에 시전 종료까지 주기하고 있는 항공기가 발생할 수 있으므로 향후 해당 사항을 개선할 필요가 있다.

가상으로 연결편이 배정되면, 주기장 배정 프로시저가 작동한다. 이때 주기장 배정에 관한 통계를 활용하는데, 시간대별, 항공사별, 기종별, 점유 시간별, 목적 공항별 통계를 활용한다. Cho(2020)는 시뮬레이션 기법을 활용한 항공기 주기장 배정에 관한 연구를 수행하였는데, 본 연구는 이를 활용하였다.

주기장 배정 프로시저가 수행될 때, SCR변경 모듈 2가 시간을 변경하며, 주기장 재배정을 수행한다. 이때 주기장 수용량 초과 여부를 지속 검토한다. 이때 항공사가 SCR에 기입한 변경 시작 가용범위를 초과하면 SCR을 삭제할 수 있다. 또한, 비행시간 통계 자료를 활용하여 예상 비행시간을 산정하여 기록한다.

주기장이 배정된 이후, 활주로 수용량에 대한 검토를 수행하고, 수용량 초과 시 SCR 변경 모듈 3이 작동하여 SCR 거절 및 시간 변경(1분 단위 및 최대 5분 이

3) 출처: 한국항공공사 내부 발표 자료.

4) Integrated System for Airport & Airspace Capacities

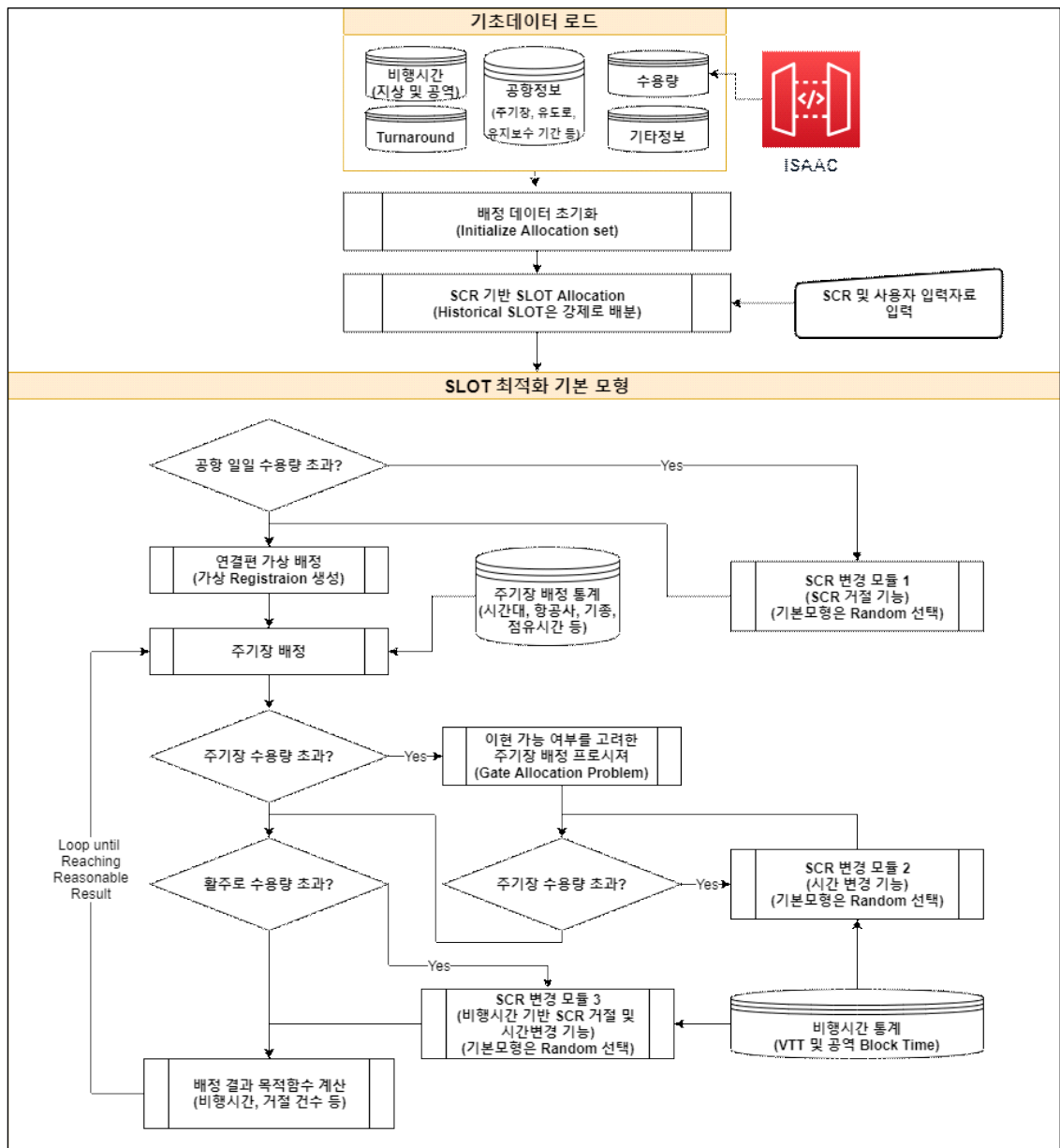


Fig. 4. Process design for airport slot allocation

내)을 수행한다. 위와 마찬가지로 비행시간 통계 자료를 활용하여 예상 비행시간을 산정하여 기록한다.

1차적으로 결정된 SAL을 기반으로 목적함수(비행시간, 거절건수, 활용률 등)를 계산하고, SAL 시나리오를 저장한 뒤, 다시 프로그램 초기(주기장 배정)로 돌아가 이 시뮬레이션을 재수행한다.

모든 SAL 시나리오를 저장한 뒤, 최종적으로 가장 적합한 목적함수 값을 나타낸 SAL을 선정한다. 이때,

시뮬레이션 수행 횟수, 적합성 판단, SCR 변경 모듈 내 적정 변경 방향 등에 관한 사항은 향후 상세모형 구축 시 개발할 예정으로, 기본모형에서는 단순히 정보를 기록하고자 한다.

다음 그림은 가상의 SLOT 요청(수용량 초과)을 활용한 기본 모형 수행 결과를 보여주고 있다. 가장 상단의 그림은 슬롯 배분 전의 상태로 시간대별(X축) SCR 요청 건수(Y축, 붉은색: 도착, 파란색: 출발)를 보여주고 있으

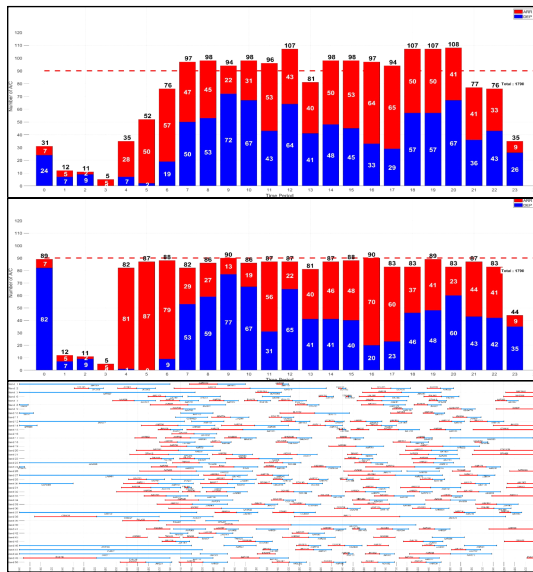


Fig. 5. Simulation result of test scenario  
(top: before allocation, middle: after allocation,  
bottom: gantt chart)

며, 점선은 공항의 수용량을 의미한다. 시뮬레이션 모형 수행 후 중앙 및 하단의 그림과 같이 수용량을 초과하지 않도록 슬롯이 배정되었다. 제일 하단의 Gantt Chart를 통해 동시시간에 잘못 배정된 슬롯 여부를 확인하였다.

단, 0시대(운항중지 시간에 포함)에 슬롯이 집중적으로 배분되었음을 볼 수 있는데, 이는 최적화에 대한 추가 모듈이 필요함을 의미하며, 향후 상세모형 설계에 반영하고자 한다.

## IV. 결 론

### 4.1 결론

지속적으로 증가할 것으로 예상되는 항공교통 수요와 한계에 다른 공항 및 구역 수용량의 균형과 효율적인 운항스케줄을 작성하기 위해, 본 연구는 슬롯 배분을 개선하기 위한 시뮬레이션 모형의 기본 설계에 관한 연구를 수행하였다.

여러 연구사례를 살펴봤을 때, 슬롯 배분이라는 문제의 크기와 복잡성으로 실험적 단계의 결정론적 방법론의 연구가 진행되고 있음을 확인하였으며, 본 연구는 다양한 조건을 부여할 수 있는 시뮬레이션 모형을 도입하고자 하였다.

Fig 6은 본 연구에서 개발한 슬롯 배분 모형의 전반적인 절차를 보여주고 있다. 항공사가 SCR을 제출하

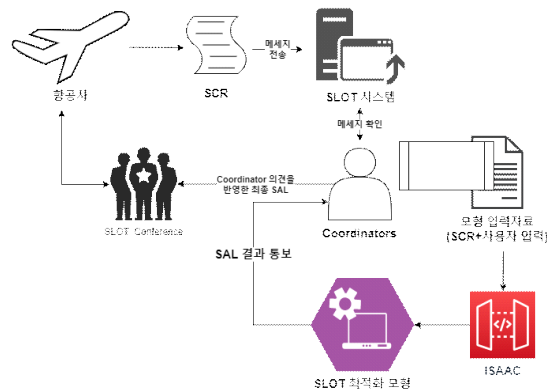


Fig. 6. The whole process of slot allocation model

면, 조정인(coordinator)이 모형의 입력자료를 슬롯 배분 모형에 입력하고, 산출된 SAL을 활용하여 슬롯 컨퍼런스에서 협상을 수행하는 방식으로 사용될 것으로 기대하고 있다.

기본 설계를 위해 모형 설계 시 고려사항에 대하여 상세하게 분석하였으며, 입·출력 자료의 설계와 세부 프로세스의 기본 설계를 수행하였다. 또한, 기본 설계의 적합성을 확인하기 위해 가상의 공항에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 기본 설계의 한계점 또한 확인하였다.

### 4.2 연구의 한계 및 향후 과제

일반적으로 시뮬레이션 기법(numerical approach)은 최적해(optimal solution)가 아닌 차선책(sub-optimal solution)을 도출하게 된다. 기본 설계로 구현된 이 시뮬레이션 모형은 현재 슬롯 배분에 활용하고 있는 시스템의 한계(단순히 제출한 SCR을 기반으로 주기장 가용 여부만 검토)를 개선하기 위해 제시한 것이며, 아직 최적 여부 및 커류시간 준수 여부에 대한 판단기준은 정립하지 않았다.

또한, 본 연구에서 제시한 모형은 모든 공항에 일반성을 가지고 적용하는 데에 한계가 있을 수 있다. 예를 들어, 하나의 주기장에 경우(작은 항공기)에 따라 두 대 이상 주기할 수 있는 MARS(multi-aircraft ramping system)가 있는 공항이나, 정적으로 SLOT 배분을 수행하는 공항에는 적용할 수 없다는 한계가 있다. 단, 본 연구의 공간적 범위를 김포 및 제주공항으로 한정하였으며, 제시된 모형은 두 공항에 동시에 적용 가능하다고 판단하였다.

본 연구가 제시한 기본 설계의 목적함수는 요청 시

각 차이, 요청 거절 수, 수용량 활용률로 설정했다. 단, 기본 모형에서는 난수 생성을 통해 SCR을 재배분해가며 적합한 값을 도출하고 있으며, 최적의 값을 도출하는 방법을 포함하고 있지 않다는 한계가 있다. 또한, 특정 시간대에 슬롯 배분이 집중되는 현상이 있었는데, 향후 상세 모형을 개발하면서 보완될 필요가 있다.

본 연구에서 제시한 기본 설계는 기술성숙도 4단계(실험단계) 수준으로 현실 가능성이 아직 검토되지 않았다. 향후 모형의 현실성을 확인할 수 있는 검증 및 검증 방법(verification & validation) 등 추가적인 연구를 통해 지속적으로 보완할 필요가 있다.

### Acknowledgement

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 “데이터기반 항공교통관리 기술개발(과제번호: 23DATM-C163373-03)” 과제의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

### References

1. Cho, S., "Aircraft stand allocation and stand operations assessment using simulation techniques", Master Degree, Korea Aero-space University, Goyang-si, 2020.
2. Garey, M. R., and Johnson, D. S., "Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness", W.H. Free-man, New York, 1979.
3. IATA, "Air Passenger Market Analysis: Passenger Traffic Growth Remains on Track in October", 2023, Available from: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/air-passenger-market-analysis---october-2023>
4. IATA, "Worldwide Airport Slot Guidelines (WASG)", 2023, Available from: <https://www.iata.org/contentassets/4ede2aabfcc14a55919e468054d714fe/wasg-edition-3-english-version.pdf>
5. Katsigiannis, F. A., and Zografos, K. G., "Optimising airport slot allocation considering flight-scheduling flexibility and total airport capacity constraints", Transportation Research Part B, 146, 2021, pp.50-87.
6. Kim, S. H., "Efficient management for the capacity of Incheon Airport and Gimpo Airport through dynamic slot allocation", Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics, 25(3), 2017, pp.101-107.
7. SESAR, "SESAR Definition Phase Deliverable 3-The ATM Target Concept", 2007, Available from: [https://www.ulc.gov.pl/\\_download/loz/jep/Deliverable%203.pdf](https://www.ulc.gov.pl/_download/loz/jep/Deliverable%203.pdf)
8. Jacquillat, A., and Odoni, A. R., "An integrated scheduling and operations approach to airport congestion mitigation", Operations Research, 63(6), 2015, pp.1390-1410.
9. Zografos, K. G., Madas, M. A., and Androutsopoulos, K. N., "Increasing airport capacity utilisation through optimum slot scheduling: review of current developments and identification of future needs", Journal of Scheduling, 20, 2017, pp.3-24.
10. Zografos, K. G., Salouras, Y., and Madas, M. A., "Dealing with the efficient allocation of scarce resources at congested airports", Transportation Research Part C, Emerging Technologies, 21(1), 2012, pp.244-256.