

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2026.34.1.016>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

효율적인 공항 슬롯 배분을 위한 상세 모형 개발에 관한 연구

박보미*, 이대겸**, 김준혁***, 윤석재****

A Study on Developing a Detailed Model for Efficient Airport Slot Allocation

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

ABSTRACT

With the growing imbalance between airport capacity and increasing air traffic demand, the importance of efficient slot allocation has become more significant. This study aims to develop a sophisticated model that can be practically applied, based on the conceptual slot allocation model previously proposed by Park et al.(2024). Focusing on Gimpo International Airport, the proposed framework consists of three modular components that incorporate key constraints such as airport capacity, simultaneous origin & destination (O-D) management, and apron availability. Each module operates by adjusting flight schedules when demand exceeds capacity or rejecting Slot Clearance Requests (SCRs) that fall outside the allowable time window. This study provides a foundation for automating and simulating the slot allocation process, enhancing airport coordination efficiency, and supporting data-driven decision-making in strategic slot policy.

Key Words : Slot Allocation(항공기 운항시간 배분), Slot Allocation List(초기 슬롯 배분), Air Traffic Management(항공교통관리), Airport Operation(공항운영), Airport Planning(공항계획)

1. 서 론

1.1 연구의 배경

공항 슬롯(airport slot)은 계획된 항공편의 운항에 부여되는 허가로, 특정 날짜와 시간에 항공기가 공항에

출발하거나 도착하는데 필요한 모든 공항 자원을 사용할 수 있도록 허가하는 것이다(IATA, 2025). 슬롯 조정은 주로 IATA에서 구분하는 Level 3 공항에서 수행되는데, Level 3 공항은 수요가 공항의 수용 능력을 현저히 초과하거나, 공항 확장이 단기적으로 불가능하고, 자발적인 스케줄 조정으로 슬롯 조정이 어려운 공항을 의미한다.

Level 3 공항에서의 슬롯 조정은 항공사가 슬롯 신청서(SCR, slot clearance request)를 조정기구(coordinator)에 제출하는 것으로 시작된다. 조정기구는 공항의 수용 능력과 기득권 슬롯 등을 고려하여 1차적으로 슬롯을 배분하고 그 결과를 초기 슬롯 배분표(SAL, slot allocation list)로 제시한다. 이후 슬롯 협의회(slot conference)를 통하여 항공사 등 이해관

Received: 31. Oct. 2025, Revised: 2. Feb. 2026,
Accepted: 10. Mar. 2026

* 한국교통연구원 항공우주교통연구본부 부연구위원

** 한국교통연구원 항공우주교통연구본부 주임연구위원

*** 한국교통연구원 항공우주교통연구본부 선임연구위원

**** 한국교통연구원 항공우주교통연구본부 연구위원

연락처 E-mail : sjyun@koti.re.kr

연락처 주소 : 세종특별자치시 시청대로 370

세종국책연구단지 과학인프라동 440호

계자 간 협상이 이루어지는데, 이때 협상은 초기 슬롯 배분(SAL)을 기준으로 시행된다. 따라서 최종 슬롯 조정 결과는 항공사의 정책적 판단과 전략·전술적 협상 과정에 따라 확정된다고 할 수 있다.

초기 슬롯 배분(SAL)은 현재 주기장의 가용 여부 등 가장 기초적인 척도만을 활용하여 슬롯 신청서(SCR)의 제출 시점을 기반으로 first come first serve(FCFS) 형태로 배분하고 있다(단, 기득권 슬롯은 활용률에 따라 유지함). 때문에, 한정된 자원인 슬롯의 효율적이고 경제적인 배분을 위한 초기 슬롯 배분(SAL) 방법의 개선 필요성이 제기되고 있다(Katsigiannis and Zografos, 2021; Park et al., 2024).

1.2 연구의 목적 및 범위

본 연구는 Park et al.(2024)이 개발한 슬롯 배분 시뮬레이션 모형 기본 설계의 후속 연구로 기술성숙도(TRL, technology readiness level) 4 수준의 상세 모형 및 소프트웨어 개발을 목적으로 한다.

기본 설계에서 다루었던 단일 프로세스를 3개의 모듈로 구성하였으며, 각 모듈은 수용량(capacity) 관리, 동일시각 O-D 관리, 주기장 가용여부를 각각 판단하여 항공사가 제출한 슬롯 신청서(SCR)의 배분 가능성을 검토한다. 슬롯 배분이 불가능하면 운항 시각을 변경하거나 제출 슬롯을 거절하는 형태로 실제 초기 슬롯 배분 절차와 동일하게 작동할 수 있도록 하였다.

본 연구는 우리나라에 지정된 Level 3 공항 중 주기장의 복잡성, 정책적 결정 강도, 운항 수요의 적정성 등을 고려하여 김포국제공항을 대상으로 연구를 수행하였다.

주기장의 복잡성은 국제선 및 국내선 여객터미널의 구성(김포공항 각 1개), 접현 주기장 포함 시 추가로 사용 가능한 원격 주기장(remote apron)과 버스 사용 가능 여부, MARS(multi-aircraft ramping system)¹⁾의 복잡성²⁾ 등을 고려하였다.

정책적 결정 강도는 정부와 공항의 정책적인 결정 강도로 신규 노선 확보를 위하여 기득권 슬롯을 축소하는 등의 공항 운영 효율성보다 공항의 지속가능성이나 운항 확대 전략이 높은 공항을 회피하기 위한 척도로 사용하였다.

운항 수요의 적정성은 항공사가 제출한 슬롯 신청서(SCR)를 기반으로 초기 슬롯을 배분(SAL) 수행할 때 운항시각 조정의 필요성이다. 하루 전체의 운항 수요가 공항 수용 능력 한계에 도달한다면 슬롯 배분 알고리즘 수행은 의미가 없지므로, 이러한 사항을 고려하여 대상 공항 선정을 위한 척도로 활용하였다.

II. 본 론

2.1 이론적 배경

Katsigiannis & Zografos(2021)는 항공사의 슬롯 신청서(SCR)에 포함된 선호도를 반영하기 위해 가용한 운항 시각 변경 범위를 입력자료로 추가하고, 공항 수용 능력에 따라 슬롯을 동적으로 배분할 수 있도록 제약조건을 설정하였다. 이 연구는 변경 슬롯의 수와 요청 대비 변경된 시각 간 차이를 최소화하고, 항공사의 선호도를 극대화하는 목적함수를 고려하였으나, 수학적 최적해를 탐색하는 모델의 복잡성으로 인해 2,114건의 스케줄 조정 요청을 분석하는 데 200분 이상의 계산 시간이 소요되었다.

Katsigiannis & Zografos(2023)에서는 기존 연구를 보완하여 다중 이해관계자에 초점을 두고 이해관계자 및 전문가의 선호도를 반영한 통합 방법론을 다루고자 하였다. 특히, 스케줄 생성 모듈, 선호도 반영을 위한 클러스터링 모듈, 지연 추정 모듈, 분석 계층 프로세스(AHP)를 기반으로 한 우선순위 배정 등 개별 모듈을 복합적으로 구성한 복수 모형을 개발하였다.

Park et al.(2024)은 단일 공항을 기반으로 공항 슬롯 배분 개선을 위한 시뮬레이션 모형 기본 설계 연구를 수행하였다. 모형의 복잡성과 계산적 난해성 등을 최소화하기 위하여 단일 공항을 대상으로 구현하되 모형을 다단계로 구성하고, 목적함수도 복수로 설정하였다. 또한, 수용량을 세분화하고, 기득권, FCFS, 정책적(정성적) 결정으로 구분한 우선순위를 필요시 변경하여 적용할 수 있도록 입력자료를 설계하였다.

본 연구에서는 Park et al.(2024)이 제시한 기본 설계를 확장·보완하여 해당 연구에서 제시한 입출력자료를 기반으로 상세 모형 및 소프트웨어를 개발하고, 실제 스케줄을 기반으로 만들어진 시나리오를 사용하여 상세 모형을 테스트하고자 한다.

1) 주기장의 크기를 크게 설정하여, 작은 항공기는 2대, 큰 항공기는 1대를 주기할 수 있는 체계.
2) 복잡할 경우 계산적 난해성(computationally hardness)이 높아져 해를 찾을 수 없음.

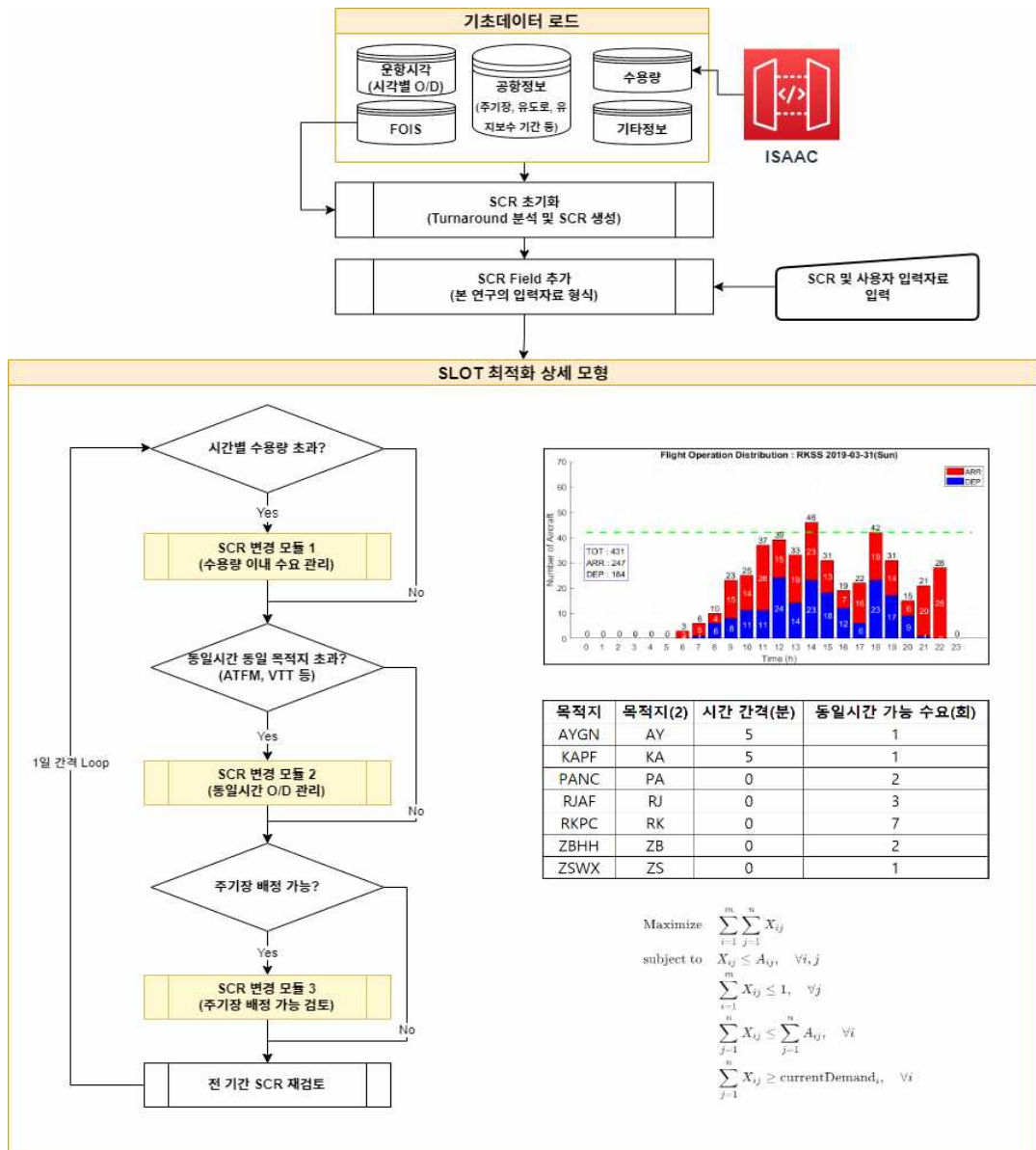


Fig. 1. Overall structure of slot optimization model

2.2 슬롯 배분 프로세스 개선

본 연구는 Park et al.(2024)이 개발한 기본 모형을 상세 모형으로 구성하기 위해 Fig. 1과 같이 3개의 모듈로 구성된 다중 모형(multi-model) 구조를 설계하였다.

먼저 수용량 예측 핵심기술로 개발되고 있는 ISAAC (integrated system for airport & airspace capacities) 시스템을 통하여 공항의 수용량 정보를 수집하고, 본 연구에서 별도로 개발한 기초 데이터 분석 프

시저로 만들어진 운항 실적과 공항 정보가 입력된다.

운항 실적을 기반으로 시각별 O-D 정보(5분 간격)와 사용 주기장, 기종, turnaround time 등의 정보가 분석되며, 이를 기반으로 가상의 슬롯 신청서(SCR)를 작성한다.

본 연구에서 개발한 상세 모형의 경우 테스트 시나리오인 김포국제공항의 2019년 하계 스케줄을 활용하여 초기 슬롯 배분(SAL)을 하였다.

향후 실제로 항공사가 제출한 슬롯 사용 신청서(SCR)를 사용자(공항)가 업로드하고, 사용자의 추가 입

력자료를 통하여 우선순위 등을 SCR에 반영할 수 있도록 개선할 예정이다.

초기 슬롯 배분(SAL)이 입력되면 슬롯 배정 최적화 상세 모형이 작동하여 1일 단위의 SCR로 슬롯을 배정한다. 만약 시간별 수용량 등 조건을 초과하는 경우 SCR 변경 모듈이 작동하며, 이때, 변경된 SCR은 다른 날짜의 SCR에도 동일하게 적용된다. 즉, 하나의 SCR은 여러 날에 중복되어 있으므로 동일한 SCR이다.

SCR 변경 모듈의 경우 앞서 언급한 바와 같이 3가지 모듈로 구성되며, 각 모듈에서 해를 찾지 못하는 경우 요청한 SCR을 거절한다. 또한, 각 모듈이 작동될 때마다, 변경 시각의 합 및 거절 건수가 계산된다. 우선순위는 정수로 입력되며, 1과 3은 유예, 2는 기득권, 4는 FCFS, 5부터는 정책적으로 사용할 수 있도록 사용자가 입력하는 우선순위이다(Park et al., 2024).

1) 모듈 1: 수용량 이내 수요 관리

시간당 수용량이 초과하지 않도록 우선순위가 낮은 항공기부터 허용 시각을 5분 간격으로 변경하며, 수용량을 초과하는 시간대의 운항 수요가 수용량보다 낮아지는 경우 정지하고 다른 항공기의 허용 시각을 다시

변경한다. 주변 시간대에 항공 수요가 공평하게 분배되므로 capacity utilization은 max로 계속 유지된다.

2) 모듈 2: 동일시간 O-D 관리

기존 연구(Park et al., 2024)에서 언급한 바와 같이 ATFM(air traffic flow management) 등의 상세 제약조건을 모형 내에서 반영하는 것은 해를 찾지 못할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 동일 시각 O-D 수요관리를 통해 이를 반영하고자 한다. 모듈 1과 마찬가지로 우선순위가 낮은 SCR부터 허용 시각을 변경한다.

3) 모듈 3: 주기장 배정 가능 검토

수학적 모형을 사용하여 주어진 SCR 수요에 따라 사용 가능 주기장의 해(solution)가 존재하는지를 탐색하고, 해가 없는 경우 우선순위가 낮은 SCR부터 허용 시각을 변경한다.

2.3 SCR 변경 모듈

2.3.1 모듈 1 - 수용량 관리

Fig. 2는 SCR 변경 모듈 1을 보여주고 있다. SCR

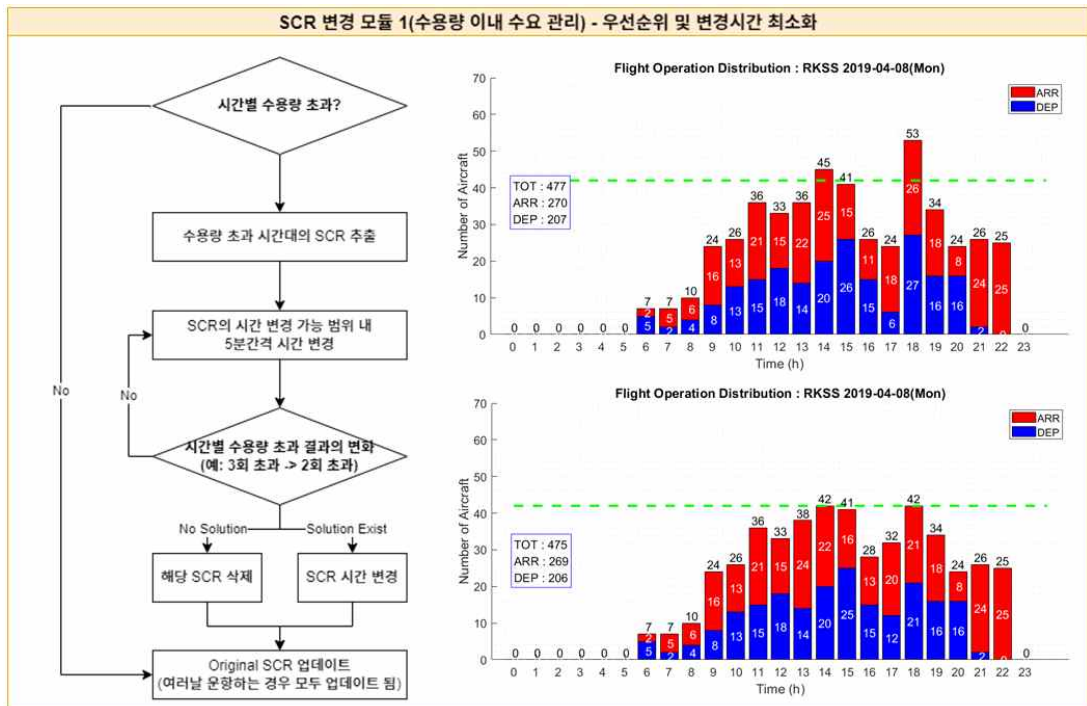


Fig. 2. SCR change module 1 - demand control

변경 모듈 1에서는 시간대별 공항 수용량을 초과하지 않도록 항공편의 운항 시각을 앞이나 뒤로 조정한다. 이때, 기득권 슬롯은 유지하고, 우선순위가 3 이상인 것 중에서 제일 우선순위가 낮은 항공편부터 변경한다.

일부 항공편은 시각이 앞당겨지거나 뒤로 미뤄질 수 있으며, 만약 조정된 운항 시각이 SCR에 주어진 time window(항공사가 제출한 변경 가능 범위)를 벗어나는 경우, 해당 항공편의 슬롯 변경은 거절된다.

수용량을 초과한 시간대의 운항 수요가 수용 한계 이하로 감소한 경우, 해당 SCR의 변경은 중단되며 다음 우선순위의 SCR에 대한 변경 또는 거절 절차가 수행된다.

이 과정은 모든 시간대의 운항 수요가 공항 수용량을 초과하지 않을 때까지 반복된다. 만약 모든 조정 시나리오에서도 유효한 해가 존재하지 않는 경우, 우선순위가 가장 낮은 항공편부터 순차적으로 삭제하여 수용량 범위를 만족하도록 한다. 이 방법을 적용하면 시간대별 수용량의 utilization을 자동적으로 최대화할 수 있다.

또한 운항 시각을 앞당기거나 미룰 때에는 항공편의 turnaround time을 유지함으로써 주기장 사용량 변경을 최소화하고 동시에 항공사의 운항 전략이 반영되도록 하였다. 이러한 절차를 통해 모듈 2와 모듈 3에서의 해 탐색 과정이 단순화되어 계산의 복잡성이 줄어들 수 있다.

2.3.2 모듈 2 - 동일시각 O-D 관리

모듈 2는 출발지-목적지(O-D)별로 단위 시간당 배정 가능한 최대 운항편수를 제한하기 위한 모듈로 Fig. 3과 같다.

예를 들어, 김포-제주 노선은 0분 간격으로 최대 8편까지 편성할 수 있으며, 김포-일본 노선은 0분 간격 및 최대 3편까지, 김포-광저우 방면(ZG로 시작) 노선은 30분 간격 최대 1편까지 편성이 가능한 조건이 있을 수 있다.

이러한 조건들은 과거 운항 통계나 운영적 판단에 기반하여 설정된 것으로, ATFM 및 VTT(variable taxing time) 등의 제약 요인이 이미 반영된 결과이다. 따라서, 슬롯 배분 모형에서 해당 정보를 반영함으로써, 별도의 모형 구성을 거치지 않고 ATFM과 VTT 등의 제약사항을 반영할 수 있다.

이 모듈에서는 단위 시간(5분)에 주어진 SCR 그룹이 해당 제한치를 초과할 경우, 모듈 1에서 앞으로 당겨진 항공편들은 추가로 앞당겨지고 뒤로 미뤄진 항공편은 추가로 미루는 방식으로 해를 탐색한다. 이는 모듈 1에서 이미 수용량 제약에 따라 조정된 방향을 반대로 변경할 수 없기 때문이다.

또한, 조정 과정에서 도착 시각이 변경될 경우(예:

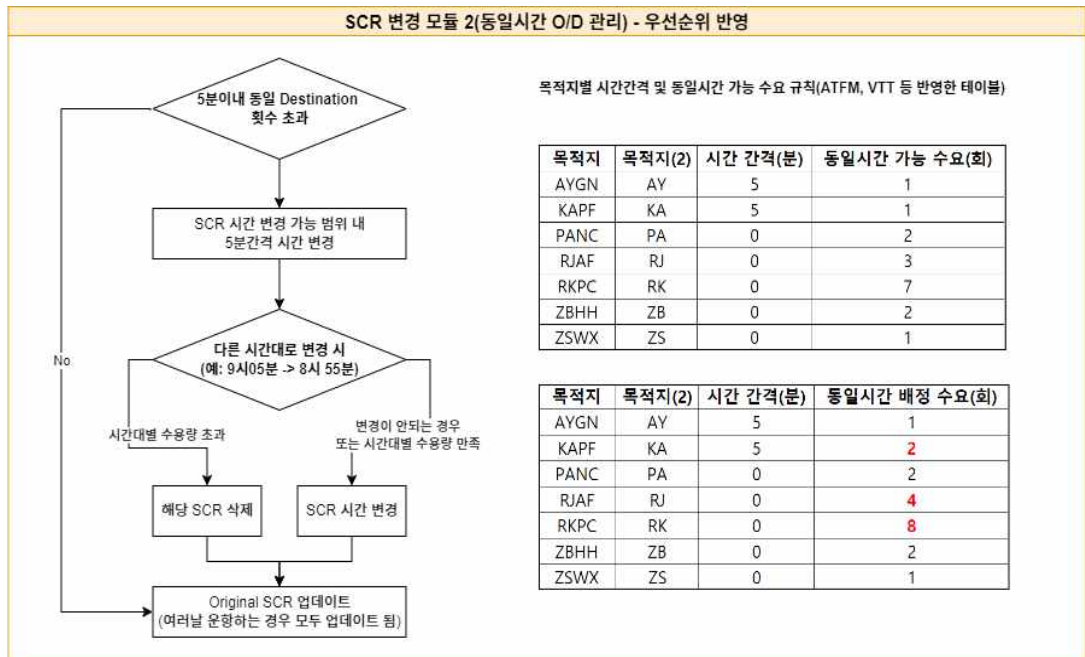


Fig. 3. SCR change module 2 - origin-destination control

07:05 → 06:55)에는 도착 슬롯의 수용량 초과 여부를 다시 검토하며, 출발 시각의 변경 시에도 동일한 검토를 수행한다.

이러한 조정은 모든 제약조건이 충족될 때까지 반복되며, 만약 SCR에 명시된 time window(항공사가 제출한 변경 가능 범위)를 벗어나는 조정이 필요한 경우, 해당 항공편의 슬롯 변경 요청은 거절된다.

2.3.3 모듈 3 - 주기장 가용 여부

SCR 변경 모듈 3은 주기장 가용 여부를 검사하는 모듈로 Fig. 4와 같다. Park et al.(2024)이 언급한 바와 같이 게이트 할당(gate allocation)을 수행하는 것은 슬롯 최적화 문제의 범위를 넘어 게이트 할당이라는 별도의 문제를 다루는 것이다. 따라서 본 연구에서는 각 항공편을 게이트에 직접 할당하는 대신, 주기장 가용성을 점검하는 접근법을 적용하였다.

먼저 기종×주기장으로 이루어진 매트릭스를 구성한다. 이 매트릭스의 각 원소는 해당 기종이 특정 주기장에서 주기가 가능한지를 나타내며, 이 값은 이진변수

(binary)로 표현된다.

이후 모듈 2까지 진행된 슬롯 배분 결과를 바탕으로, 5분 단위(슬롯 배정 시간 간격)로 주기 가능 여부를 검증한다.

검증 과정에서는 각 시간대의 항공기 기종별 수요(대수)를 주기할 수 있어야 하며, 동시에 가능한 한 많은 항공기를 주기장에 배치할 수 있도록 최적화 계산을 수행한다.

예를 들어, B737 기종은 SPOT 1~3, B747은 SPOT 3, 4, 6, B777은 SPOT 5, 6에서 주기가 가능한 것으로 가정한다. 모듈 1~2를 통해 재배정된 SCR 정보를 5분 단위로 세분화하여 기종별 운항 수요를 산출한다.

이때, 가능한 주기 조합을 탐색하여 B737 3대, B747 2대, B777 1대를 동시에 주기할 수 있는 경우, 이를 총 주기 항공기 수를 최대화(maximize)하는 해로 간주한다. 해당 조합에 대한 유효한 해가 존재한다면, 주어진 시간대의 기종별 운항 수요를 모두 충족할 수 있으며, 주기장은 가용상태(available)로 판단할 수 있다.

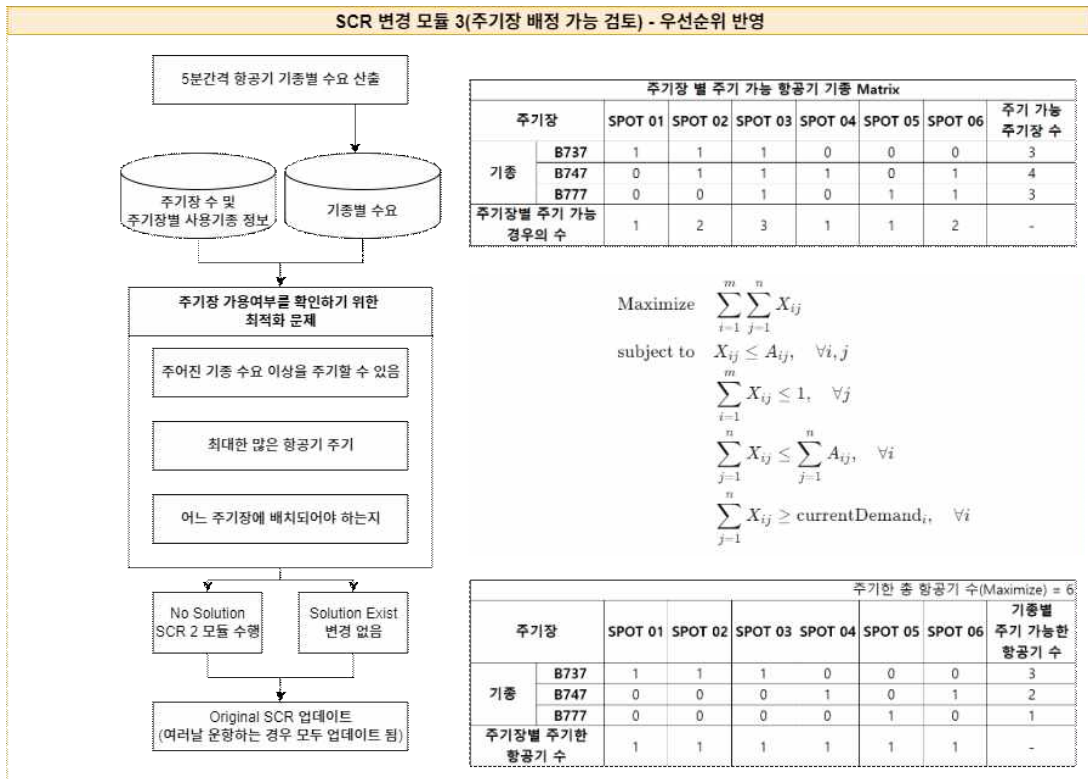


Fig. 4. SCR change module 3 – SPOT available

Table 1. Variable and parameter for module 3

A_{ij}	Binary, 항공기(기종) i 가 주기장 j 에 배정 가능 여부(날개폭 기반)
Demand $_i$	기종 i 의 총수요
X_{ij}	결정 변수, 기종 i 가 주기장 j 에 배정

물론 최적화 문제를 풀지 않고 주기장 배정의 가능한 조합(기종별 주기 가능한 항공기 수의 경우의 수)을 찾아가는 방법도 있다. 그러나 이러한 접근은 문제의 사이즈가 $2^{\text{주기장수} \times \text{기종종류}}$ 개로 급격히 커지며, 나아가 210일간의 하계 스케줄 전체 기간을 모두 탐색해야하기 때문에 일반적인 컴퓨터 환경에서는 계산이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 효율적인 계산을 위해 최적화 문제 접근법을 도입하였다.

Table 1과 수식 (1)~(5)는 SCR 변경 모듈 3에서 사용한 최적화 문제의 수식적 구조와 제약 조건을 각각 나타낸다.

$$\text{Maximize } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} \quad (1)$$

$$X_{ij} \leq A_{ij}, \forall i, j \quad (2)$$

$$\sum_i X_{ij} \leq 1, \forall j \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \leq \sum_{j=1}^n A_{ij}, \forall i \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \geq \text{Demand}_i, \forall i \quad (5)$$

식 (1)은 SCR 변경 모듈 3의 목적함수로 주기장 내에서 주기할 수 있는 항공기 수를 최대화하는 것을 목표로 한다.

식 (2)는 각 기종이 실제로 주기 가능한 주기장에만 배정되도록 하기 위한 기종-주기장 적합성 제약조건이다.

식 (3)은 하나의 주기장에 동시에 한 대의 항공기만 주기할 수 있도록 하는 주기장 점유 제약조건을 의미한다.

식 (4)는 주어진 주기장의 총 수를 초과하지 않도록 배정을 제한하는 주기장 수용량 제약조건이며, 식 (5)는 모듈 1~3의 수행 결과로 결정된 항공편 배정 수요를 충족할 수 있는 주기장 조합이 존재하는지를 확인

하기 위한 가용성 검증 제약조건이다.

본 최적화 모형은 주어진 주기장 수(기종별 주기 가능 여부 포함)를 초과하지 않도록 항공편 배정이 가능한 한지를 검토하는 것으로, 만약 이 모형에서 유효한 해가 도출되지 않는 경우, 우선순위가 가장 낮은 SCR을 순차적으로 거절하도록 설계하였다.

이 모형은 하루를 5분 간격으로 나눠 각 시점별 항공기 주기 가능 여부를 검토하는 모형으로, 이를 통해 주기장 배정 알고리즘을 직접 사용하지 않고도 주어진 조건 하에서 항공편의 주기 가능 여부를 검증할 수 있다.

특정 시점(5분 간격 기준)에서 기종별 항공기 수요를 처리할 수 있는 해가 존재한다면, 모듈 1~3에서 재배정된 운항 시각은 주기장 용량 측면에서 타당한 것으로 판단할 수 있다. 그러나 특정 기종의 수요를 처리할 수 없는 경우에는 해당 기종에 속하는 항공편 중 우선순위가 가장 낮은 항공편을 순차적으로 제거함으로써 해를 재조정한다.

시간 조정에 있어 이미 앞당겨진 항공편은 추가로 당길 수 없으며, 앞당겨진 시각을 다시 뒤로 미루는 것도 허용되지 않는다. 이는 시각을 앞당기는 경우 동일한 주기장 용량 부족 문제가 이전 시점에서도 발생하여 문제의 근본적 해결이 불가능하기 때문이다.

또한 수용량 모듈을 통해 슬롯이 확정된 상태이므로 항공편을 다른 시각(예: 17시 05분→16시 55분)으로 변경하는 것도 불가능하다.

마찬가지로 이미 미뤄진 항공편을 추가로 미루거나, 반대로 앞당기는 것도 불가하며, 이는 전체 모형의 목적함수가 시각 변경 최소화를 목표로 하기 때문이다. 이러한 제약조건 하에서는 SCR 거절 이외에는 유효한 해가 존재하지 않는다.

2.3 상세 모형 수행

본 연구는 2019년 하계시즌(3월 31일~10월 26일, 총 30주·210일)을 기준으로 김포국제공항의 운항 수요를 30% 증가시킨 가상의 SCR 데이터를 활용하여 상세 모형을 수행하였다³⁾.

2019년 기준으로 13,942개의 연결편과 동일 운항 패턴 조합이 존재하였으며, 증가된 수요를 반영한 SCR은 총 18,090개였다.

3) 다양한 항공기 기종 및 운항 스케줄을 반영하기 위하여 김포국제공항의 하계시즌의 역대 최대 출·도착 편 수를 기록한 2019년 자료를 활용하였다.

2019-03-31 - 2019-10-26
 No. Changed : 347
 Schedule Deviation(mins) : 8705
 No. Rejected : 116

Fig. 5. Result of slot allocation

Fig. 5는 상세 모형 수행 결과로 총 347개의 SCR의 시간이 변경되었으며, 변경된 시간의 총합은 8,705분, 거절된 SCR은 116개로 나타났다.

본 모형의 계산 시간은 약 15분으로, 기존의 주기장 배정 알고리즘을 사용하여 전체 배정을 수행할 경우 3일 이상 소요(해 미도출 상태로 중단)되었던 점을 고려할 때, 본 연구에서 제안한 모듈 3 기반 접근법의 효율성이 입증되었다.

Fig. 6은 Park et al.(2024)에서 제시한 모형의 출력 형식에 따라 본 연구의 상세 모형을 수행한 결과 도출된 초기 슬롯 배분(SAL) 결과이다. 출력 형식은 SCR과 동일한 구조이며, 각 항공편별로 시각 변경 여부, 거절 여부, 그리고 변경이 발생한 날짜 등의 정보가 기록되어 있다.

Fig. 7은 슬롯 배분 모형에서 도출되는 두 번째 출력자료인 NAC(notice of airport capacity chart)

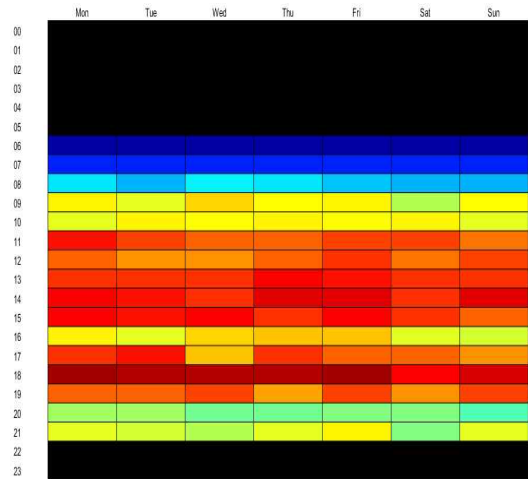


Fig. 7. Result of slot allocation - NAC

이다. 공항운영자는 항공사에게 슬롯 가용 여부를 공개할 때, 자유경쟁과 협상 유도를 위하여 상세 숫자를 공개하지 않고 NAC와 같이 가용 여부 수준만 공개한다.

Fig. 8과 Fig. 9는 상세 모형에서 별도로 생성된 출력자료로, Fig. 8은 항공사가 제출한 원시 SCR(본 연구에서는 가상의 SCR)이며, Fig. 9는 본 모형 수행 결

FLTarr	TWB734DUP	KAL1258DUP	TWB728DUP	AAR8924DUP	KAL708DUP	AAR1055DUP	KAL1244DUP	JAL93DUP	JAL93DUP
FLTdep	TWB701DUP	KAL1201DUP	TWB703DUP	AAR8957DUP	KAL711DUP	AAR8961DUP	KAL1203DUP	JAL94DUP	JAL94DUP
PeriodStart	20191023	20191021	20191025	20191020	20191023	20191023	20191023	20191023	20191023
PeriodEnd	20191025	20191025	20191025	20191025	20191023	20191025	20191023	20191023	20191023
Mon	0	1	0	1	0	0	0	0	0
Tue	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Wed	1	1	0	1	1	1	1	1	1
Thu	0	1	0	1	0	0	0	0	0
Fri	1	1	1	1	0	1	0	0	0
Sat	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sun	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Seat	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AC	B738	B737	B738	B763	B772	A333	B772	B788	B788
ORG	RKPC	RKPC	RKPC	RKPC	RJTT	RJTT	RKPC	RJTT	RJTT
STA	2135	2055	1755	1315	1355	1020	1755	1755	1755
STD	635	635	640	1355	1750	1355	705	1915	1915
L	TRUE	TRUE	TRUE	FALSE	FALSE	FALSE	TRUE	FALSE	FALSE
DEST	RKPC	RKPC	RKPC	RKPC	RJTT	RKPC	RKPC	RJTT	RJTT
SVCA	J	J	J	J	J	J	J	J	J
SVCD	J	J	J	J	J	J	J	J	J
SHL	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CHTA	1	1	1	1	1	1	1	1	1
CHTWS	100	100	100	100	100	100	100	100	100
CHTWE	100	100	100	100	100	100	100	100	100
CHDA	1	1	1	1	1	1	1	1	1
D1	10100	1111100	100	1011101	10000	10100	10000	10000	10000
D2	10100	1111100	100	1011101	10000	10100	10000	10000	10000
RQT	DOM	DOM	DOM	DOM	INT	INT	DOM	INT	INT
RQS	DOM	DOM	DOM	DOM	INT	INT	DOM	INT	INT
PRIOR	4	4	4	6	5	6	6	5	6
PeriodStartNum	737721	737719	737723	737718	737721	737721	737721	737721	737721
PeriodEndNum	737723	737723	737723	737723	737721	737723	737721	737721	737721
STAH	21	21	18	13	14	11	18	18	18
STAHd	21	21	18	13	14	11	18	18	18
STDH	6	6	7	14	18	14	7	19	19
STDHd	6	6	7	14	18	14	7	19	19
Key	15368	15861	17790	14288	14303	14667	15031	15651	15717
Delete	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Changed	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ChangedWhen	737723	737723	737723	737721	737721	737721	737721	737721	737721
DeleteWhen	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dest2Letter	RK	RK	RK	RK	RJ	RK	RK	RJ	RJ

Fig. 6. Result of slot allocation - SAL

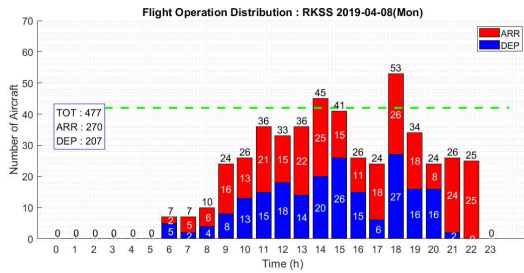


Fig. 8. Flight operations distribution - SCR

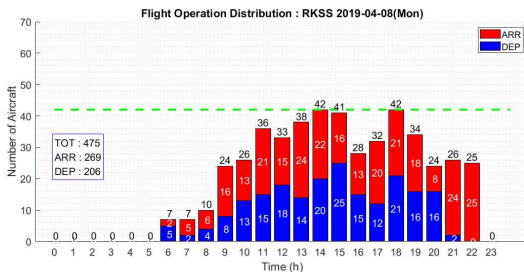


Fig. 9. Flight operations distribution - SAL

과 산출된 슬롯 배정결과(본 연구에서는 가상의 SCR을 배정한 결과)이다.

2019년 4월 8일 기준 총 477편/일의 슬롯 요청이 있었으나, 공항의 시간당 수용 한계인 42회/시를 초과하여 2편이 거절되고, 14편의 운항 시각이 변경되었다. 최종적으로 475회/일의 운항이 슬롯에 배정되었으며, 이를 통해 초기 슬롯 배분(SAL)을 도출하였다.

III. 결 론

3.1 연구의 결론

본 연구에서는 Park et al.(2024)에서 제시한 공항 슬롯 배분 개선을 위한 시뮬레이션 모형 기본 설계를 보완하고 실제 환경에 적용할 수 있는 상세 모형을 개발하였다.

슬롯 배분 절차는 일반적으로 기득권 슬롯 신청(SHL, slot historic list) → 항공사 슬롯 신청(SCR) → 초기 슬롯 배분(SAL) → 초기 슬롯 배분 통보 → 슬롯 컨퍼런스의 순으로 진행되는데, 본 연구는 이 중 항공사의 슬롯 신청(SCR) 단계부터 초기 슬롯 배분(SAL) 단계까지의 절차를 개선하기 위한 모형을 제시하였다.

연구의 배경에서 언급한 바와 같이, 현재 초기 슬롯 배분 과정은 단순한 지표를 활용한 수기(manual) 배분 방식에 의존하고 있다. 이에 본 연구에서는 이러한

한계를 보완하기 위하여 시뮬레이션 기반의 접근법을 도입하고, 자동화된 슬롯 배분을 위한 기초 기술을 개발하고자 하였다.

이를 위해 공항의 시간대별 수용 능력, 항공편의 시각 변경 가용범위, 우선순위, 주기장 가용 여부, O-D 시각 간격 등의 요소를 모형에 반영하였다.

3.2 연구의 한계 및 향후 과제

본 연구에서 도출한 결과는 초기 슬롯 배분(SAL)에 해당하며, 이를 최종 슬롯 배분의 결과로 직접 활용할 수는 없다. 다만, 본 결과를 바탕으로 슬롯 컨퍼런스 및 항공사 간 협상 과정을 거쳐 전략적인 최종 슬롯 배분이 이루어질 수 있다. 따라서, 본 연구의 결과는 협상 지원 자료로 활용 가능한 중간 산출물이라는 한계를 갖는다.

또한 본 연구에서 제시한 초기 슬롯 배분(SAL) 결과는 반드시 최적해를 도출하지는 않는다. 이는 항공편별 가용 시각 변경 범위, 하계 시즌 중 슬롯 요청 변경, 주기장 가용성 변화 등 다양한 현실적 제약 요인을 모형 내에 완전하게 반영하기 어렵기 때문이다.

실제로 이러한 복잡성을 수학적 최적화 모형으로 완전하게 구현하려는 연구들이 다수 수행되었으나, 탐색 시간이 과도하게 소요되거나 해를 도출하지 못하는 한계를 보였다.

이에 본 연구는 유사 연구들에서와 마찬가지로 모듈별 접근을 통해 부분 최적해를 탐색하는 방식을 채택하였다.

제안된 모형은 현재 TRL 4 수준에 해당하며, 향후 다른 공항 환경이나 복잡한 운영 시나리오에 대한 검증 및 보정이 필요할 것으로 판단된다. 이러한 후속 검증 및 보완 연구는 본 연구의 향후 과제로 남긴다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 “데이터기반 항공교통관리 기술개발(과제번호: RS-2021-KA163373)” 과제의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

References

1. IATA, "Worldwide Airport Slot Guidelines (WASG)" Edition 4, 2025, Available from: <https://www.iata.org/contentassets/4ede2aab>

- fcc14a55919e468054d714fe/wasg-edition-4-english-version.pdf
2. Katsigiannis, F. A., and Zografos, K. G., "Optimising airport slot allocation considering flight-scheduling flexibility and total airport capacity constraints", *Transportation Research Part B: Methodological*, 146, 2021, pp.50-87.
 3. Katsigiannis, F. A., and Zografos, K. G., "Multi-objective airport slot scheduling incorporating operational delays and multi-stakeholder preferences", *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, 152, p.104156.
 4. Korea Aerospace University, "Integrated System for Airport & Airspace Capacities (ISAAC) software design", *Data-Driven Air Traffic Management Technology Development Report*, Korea Aerospace University, Goyang, 2022.
 5. Park B. M., Lee D. K., Kim J. H., and Yun S. J., "A study on a conceptual design for a simulation model to enhance the airport SLOT allocation problem for a single airport", *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 32(1), 2024, pp.61-70.