

지상지연 상황에서 항공사 측면의 항공기 일정계획을

재수립하는 시나리오 기반 추계계획법

A stochastic programming framework for revising flight operations of an airline under ground delay programs

Young-Bin Woo¹ and Ilkyeong Moon^{1,2}

¹ Department of Industrial Engineering, Seoul National University,
Seoul, Korea

² Institute for Industrial Systems Innovation, Seoul National University,
Seoul, Korea

ABSTRACT. 항공산업에서 여객물류는 기상악화, 기체정비, 또는 인접공항의 장애 등으로 인한 불확실성에 의해 실시간으로 영향을 받는다. 이 때 항공교통관제센터는 항공기 운영 시스템의 안전성 확보를 이유로 여객물류의 실시간 처리율을 제약하기 위한 지상지연 프로그램(Ground Delay Program, GDP)을 발동할 수 있다. GDP 는 특정 시간대에 도착 예정인 항공기를 출발공항의 지상에서 지연시키도록 하여 목적공항에서의 최종 도착시간을 늦춘다. 하지만 GDP 발동은 항공기 운영 시스템 측면에서 수립되기 때문에 개별 항공사의 경영손실 (또는 페널티) 최소화와는 무관하다. GDP 에 의해 수정된 항공기 일정계획은 항공기의 결항, 지연, 또는 환승편 미연결을 포함할 수 있으며, 이는 항공사의 페널티로 야기된다. 이 연구에서는 GDP 가 발동했을 때, 항공사의 내부 페널티 비용함수를 최소화하기 위해 항공기 일정계획을 재수립하는 추계계획법을 개발한다. 추계계획법은 향후 GDP 의 변동을 시나리오로 고려하며, 최근 GDP 발동 시점에 실시간으로 항공기 일정계획을 재수립한다. 실제 항공기 운영데이터와 가상의 시나리오를 활용하여 현장 적용 가능성을 확인한다.

Keywords: Ground Delay Program, Stochastic Program, Flight Scheduling, Simulation

1. 서론

항공기 운영은 기상악화, 기체정비, 승객탑승 지연, 또는 인접공항의 장애 발생 등 다양한 종류의 불확실성에 의해 영향을 받는다. 일반적으로 기체정비, 승객탑승 지연 등 사건의 지속시간이 상대적으로 짧은 경우에는 항공편에 사전 할당된 여유시간 (즉, buffer time)을 소모함으로써 불확실성에 의한 지연을 상쇄한다. 하지만 기상악화 또는 인접공항의 장애 등 사건의 경우에는 안정성 확보를 위해 대상 공항에서 아직 출발하지 않은 항공기들을 대기시킨다. 항공교통관제센터(Air Traffic Control Centre, ATCC)는 기상악화 상황 발생시 항공기 운영

시스템의 안전성 확보를 위해 여객물류의 실시간 처리율(즉, acceptance rate)을 제약하기 위한 지상지연 프로그램(Ground Delay Program, GDP)을 발동할 수 있다 (*Incheon International Airport: Airport Collaborative Decision Making Operations Manual*, 2017). 여객물류의 실시간 처리율은 대상 공항으로 시간 당 착륙하는 여객 항공편의 수를 의미한다. 실시간 처리율이 특정 시간대에 하향 조정되면, 해당하는 모든 항공기의 관련 항공편은 조정된 처리율을 맞추어 계획 지연되거나 취소된다. 이 때, 항공편의 출발공항에서의 이륙시간을 조정시켜 그 항공기를 공항 지상에서 지연되게 하는 것을 GDP 라고 한다 (Brunner, 2014). 항공기는 공항에서 제공하는 발착시간(즉, slot time)에 관제탑으로부터 활주로 인근에서 통제되어야 하는데, 수정된 발착시간을 맞추기 위해 상공에서 대기하는 것은 비용측면에서 비효율적이기 때문에 GDP 는 비용 효율적인 지연 대안으로 평가된다 (Liu et al., 2008).

GDP 가 발동되면 항공편은 수정된 발착시간에 할당되거나 혹은 결항된다. 이 때 GDP 는 항공기 운영 시스템의 안정성 확보를 중점으로 발부된다. 그런데 수정된 일정계획은 해당 항공기를 소유한 항공사의 내부 운영목표 개선에 만족되지 않을 수 있다. 예를 들어 어떤 항공사는 항공편의 정시성과 일정 이행 보장에 더 관심이 있으므로, 이착륙 시간의 지연과 항공편의 결항으로 발생하는 경영손실(또는 페널티)을 최소화하는 일정계획을 원할 수 있다 (Bard and Mohan, 2008; Luo and Yu, 1997). 한편 항공사의 항공기 재일정계획 수립은 장애 요소로 인한 ATCC 의 조정된 이륙시간 발부 후, 20 분 이내로 허용된다 (*AIM 항공정보간행물*, 2018).

이 연구에서는 GDP 가 발동했을 때, 항공사의 내부 페널티 비용함수를 최소화하기 위해 항공기 일정계획을 재수립하는 추계적 방법론을 개발하고자 한다. 개발될 추계적 방법론은 향후 GDP 의 변동 가능성을 시나리오로 고려하며, 최근 GDP 발동 시점에서 실시간으로 항공기 일정계획을 재수립하는 알고리즘으로 제안된다. 제안된 알고리즘의 해성능 평가에 실제 항공기 운영데이터와 가상의 시나리오가 사용된다. 평가 실험은 알고리즘의 현장 적용 가능성을 제시한다.

2. 항공사 측면의 항공기 일정계획 수정 문제

항공사는 일일 단위로 편성된 항공기들을 운영한다. 항공기 일정계획은 이미 정립되어 있으며 장애 요소가 없는 경우 계획된 내용으로 항공편이 실행된다. 대상 공항에서 각 항공기는 일정계획에 따라 고유의 편제시간을 할당 받는다. 항공기는 편제시간에 맞추어 대상 공항으로 착륙해야 한다. 착륙 이후에는 다음 승객, 승무원 적하/재적재 시간을 거치고 다음 항공편 일정을 수행한다. 이 때, 다음 항공편의 이륙시간이 계획된 일정보다 지연되는 경우에는 적하/재적재 시간을 거치고 가장 빠른 시간에 비행일정을 실행한다. 기상악화 등의 장애요소가 발생되었을 때, ATCC 는 (1) 발동시간, (2) 대상항공기, (3) 조정이륙시간 정보를 포함하여 GDP 를 발동시킨다. 이 연구에서는 단일 공항에 한정하여 항공사 측면의 항공기 일정계획 수정을 수립하는 문제를 해결하고자 한다. 이에 따라, 항공기가 대상 공항으로 들어오는 항공편에 대해 GDP 에 의한 조정이륙시간과 비행시간을 고려하여 수정된 발착시간을 산출한다. 그림 1 은 항공편의 당초 계획된 도착/출발시간, GDP 에 의해 수정된 발착시간, 그리고 시나리오에서 산출되는 수정된

발착시간을 나타낸다. GDP 발동 시점에서 수정된 발착시간이 하달되며 각 시나리오는 발착시간이 향후 상향 조정되는 경우를 나타낸다. 그림 1의 예제에서 $t = 0$ 에 최근 GDP가 발동되었으며, 시나리오 s 는 GDP가 수정되어 τ_s 시간 이후의 발착시간이 상향 조정되는 경우를 표현한다.

발착시간이 조정되는 경우 항공사는 항공기 간 고유 발착시간을 교환하여 항공기 일정계획을 수정할 수 있다. 수정 대안은 20분 이내 결정이 되어야 한다. 항공사는 항공기 일정계획을 수정하여, 항공기가 대상 항공편으로 들어가는 항공편과 대상 항공편을 떠나는 항공편의 지연시간을 달리할 수 있다. 또는, 특정 항공편을 결항하는 결정도 가능하다. 항공사는 이미 정립된 항공기 일정계획과 변동이 적도록 항공편을 실행하고자 한다. 일정계획의 변동은 지연시간에 대한 페널티 비용과 결항에 대한 페널티 비용으로 산출된다. 항공사는 일일단위 총 페널티 비용을 최소화하는 항공기 일정계획 수정을 수립하고자 한다.

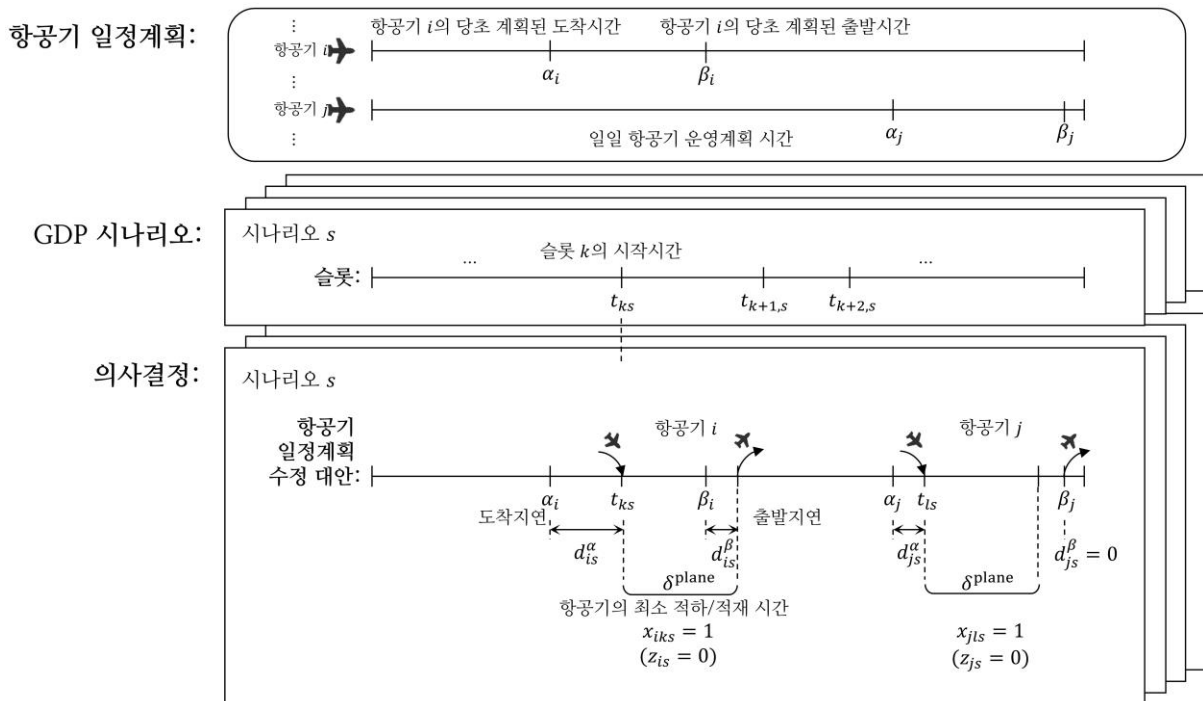


그림 1. 시나리오를 고려한 항공사 측면의 항공기 일정계획 수립 예시

3. 의사결정 프레임워크

GDP가 발동된 이후 항공사는 일일단위 항공기 일정계획 중 아직 실행되지 않는 항공편들의 발착시간을 서로 교환할 수 있다. 일반적인 방법으로는 GDP 정보가 항공사에 하달되는 시점에 남은 항공편들의 일정계획을 수정하는 것이다. 하지만 GDP는 발동된 이후 가까운 미래에 격상될 수 있으므로, 현 시점의 단편적 GDP 정보만 이용하여 일정계획을 수립하는 것은 향후에 상당한 페널티 비용을 초래할 수 있다. 이 절에서는 GDP가 발동되거나 업데이트되는 시점에 향후 GDP 격상 가능한 시나리오를 이용하여 남은 항공편들의 일정계획을 수정하는 의사결정 프레임워크를 제시한다.

항공사는 향후 GDP가 어떻게 업데이트되는지 정확하게 알 수 없더라도 장애 요인의 전개될 수 있는 몇 가지 시나리오를 추정할 수 있다. 시나리오의 추정은 과거 공항의 실시간 처리율의 변동과 GDP 기록을 이용하여 수행된다. 이 연구에서 시나리오의 추정은 연구범위를 벗어나므로 일련의 시나리오 정보가 이미 주어져 있다고 가정한다. 다음은 수학적 모형을 작성하는 데 필요한 집합, 매개변수 그리고 의사결정변수 표기를 나타낸다.

(집합)

I	항공기들의 집합
K	현재 GDP의 영향을 받는 항공기들의 집합
L	지연비용 설정에 대한 구간들의 집합
S	시나리오들의 집합 ($S = \{0, 1, 2, \dots\}$)
M	항공편에 대한 출발공항들의 집합
I_s^{GDP}	시나리오 s 상에서 GDP에 영향을 받는 항공기들의 집합
$I_s^{GDP}(m)$	시나리오 s 상에서 GDP에 영향을 받으며 공항 m 에서 출발하는 항공기들의 집합

(매개변수)

α_i	대상 공항에서 당초 계획된 항공기 i 의 도착시간
β_i	대상 공항에서 당초 계획된 항공기 i 의 출발시간
δ^{plane}	항공기의 최소 적하/적재 시간
\bar{d}_i^α	항공기 i 의 도착에 대한 최대 허용 지연시간
\bar{d}_i^β	항공기 i 의 출발에 대한 최대 허용 지연시간
τ_s	시나리오 s 상에서 다음 GDP가 발부되는 시간
t_{ks}	시나리오 s 상에서 대상 공항의 슬롯 k 에 관한 시간
t_l	증분비용 함수 정의를 위한 구간 l 의 중단점
r_l	증분비용 함수에서 구간 l 에 대한 절편값
c_l^{delay}	증분비용 함수에서 구간 l 에 대한 단위비용값
c^{can}	항공편의 결항 페널티 비용
M	임의의 큰 수

(의사결정변수)

x_{iks}	시나리오 s 상에서 항공기 $i \in I_s^{GDP}$ 가 슬롯 k 에 할당되면 1, 아니면 0.
z_{is}	시나리오 s 상에서 항공기 i 가 결항되면 1, 아니면 0
d_{is}^α	시나리오 s 상에서 항공기 i 의 도착지연시간
d_{is}^β	시나리오 s 상에서 항공기 i 의 출발지연시간
w_{is}^α	시나리오 s 상에서 항공기 i 의 출발지연비용
w_{is}^β	시나리오 s 상에서 항공기 i 의 출발지연비용

지상지연 상황에서 항공사 측면의 항공기 일정계획을 재수립하는 시나리오 기반 추계계획법은 다음과 같이 제시될 수 있다.

$$\min \mathbb{E}_{s \in S} \left\{ \sum_{i \in I_s^{GDP}} (w_{is}^\alpha + w_{is}^\beta) + \sum_{i \in I_s^{GDP}} c^{\text{can}} z_{is} \right\} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } c_l^{\text{delay}} d_{is}^\alpha + r_l \leq w_{is}^\alpha \quad \forall s \in S, i \in I_s^{GDP}, l \in L \quad (2)$$

$$c_l^{\text{delay}} d_{is}^\beta + r_l \leq w_{is}^\beta \quad \forall s \in S, i \in I_s^{GDP}, l \in L \quad (3)$$

$$\sum_{i \in I_s^{GDP}: \alpha_i \leq t_{ks}} x_{iks} \leq 1, \quad \forall s \in S, k \in K_s \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K_s: \alpha_i \leq t_{ks}} x_{iks} + z_{is} = 1, \quad \forall s \in S, i \in I_s^{GDP} \quad (5)$$

$$x_{ik0} = x_{iks}, \quad \forall s \in S \setminus \{0\}, i \in I_s^{GDP}, k \in K: t_{ks} < \tau_s \quad (6)$$

$$d_{is}^\alpha = \sum_{k \in K_s: \alpha_i \leq t_{ks}} (t_{ks} - \alpha_i) x_{iks}, \quad \forall s \in S, i \in I_s^{GDP} \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K_s} t_{ks} x_{iks} + \delta^{\text{plane}} - \beta_i \leq d_{is}^\beta, \quad \forall s \in S, i \in I_s^{GDP} \quad (8)$$

$$\alpha_i + d_{is}^\alpha \leq \alpha_j + d_{js}^\alpha + \bar{d}_j^\alpha z_{js} \quad \forall s \in S, m \in M, i, j \in I_s^{GDP}(m): \alpha_i < \alpha_j \quad (9)$$

$$x_{iks}, z_{is} \in \mathbb{B}, \quad \forall s \in S, i, j \in I_s^{GDP}, k \in K \quad (10)$$

$$0 \leq d_{is}^\alpha \leq \bar{d}_i^\alpha, \quad \forall s \in S, i \in I_s^{GDP} \quad (11)$$

$$0 \leq d_{is}^\beta \leq \bar{d}_i^\beta, \quad \forall s \in S, i \in I_s^{GDP} \quad (12)$$

목적식 (1)은 주어진 시나리오에 대한 총 기대 페널티 비용을 최소화하는 것을 나타낸다. 첫번째 항은 항공편의 단위 시간 지연으로 발생하는 비용을 나타내고 두번째 항은 결항으로 발생하는 비용을 계산한다. 여기서 시나리오 0 은 최근 GDP 가 발동된 현재 일정계획을 나타낸다. 만약 GDP 가 변동되지 않고 유지되는 경우, 시나리오 0 이 실현된다. 반면 GDP 가 변동되는 경우, GDP 정보는 업데이트되고 변동된 시점 이후의 일정계획만 재수정이 가능하다. 제약식 (2)와 (3)은 도착지연과 출발지연에 대한 페널티 비용을 계산한다. 페널티 비용은 증분비용 함수에 의해 지연시간이 속한 구간에 따라 달리 계산된다. 이는 항공기 운영에 대한 페널티 산정에서 15 분 이내의 지연보다 15 분을 초과하는 지연이 운영성과에 더 큰 영향을 미치는 것을 반영한다. 제약식 (4)는 슬롯은 최대 하나의 항공기와 연관될 수 있으며, 제약식 (5)는 항공기는 하나의 슬롯에 할당되거나 결항될 수 있음을 제약한다. 제약식 (6)은 이후 실현될 시나리오에서 다음 GDP 가 발부된 시간 이전의 항공기의 슬롯 할당을 수정될 수 없음을 나타낸다. 제약식 (7)과 (8)은 각 시나리오에서 실현되는 항공기의 도착지연과 출발지연을 계산한다. 제약식 (9)는 항공기가 대상 공항에 도착 후 다음 출발 항공편 준비를 위한 시간이 최소 적하/적재 시간보다 길어야 함을 나타낸다. 제약식 (10)부터 (12)는 의사결정변수를 정의한다.

4. 계산 실험

이 절에서는 알고리즘의 현장 적용 가능성을 확인하기 위해, GDP 발동에 대해 항공사 측면의

항공기 일정계획을 실시간으로 수정하는 시뮬레이션 실험을 진행하였다. 시뮬레이션 환경 구축을 위해 실제 항공기 운영 스케줄 데이터를 사용하였다. 발생 가능한 GDP 시나리오는 기존 문헌에서 사용된 방식을 참조하여 구성하였다.

4.1. 사례연구 데이터

항공사의 항공기 일정계획은 (Luo and Yu, 1997)와 (Brunner, 2014)의 실험 데이터를 참조하였다. 참조된 실험 데이터는 Dallas/Fort Worth 공항에서 American Airlines 의 하루 항공기 일정계획에 관한 것이다. 데이터는 GDP 에 의해 통제받는 71 대의 항공기에 대한 일정계획을 포함한다. 가상의 GDP 시나리오는 공항의 흐름율을 설정하고 GDP 를 계산하는 선행연구를 참고하여 ration-by-schedule (RBS) 규칙을 기반으로 만들어졌다 (Liu et al., 2017; Liu et al., 2019). RBS 규칙은 먼저 계획된 항공편 먼저 일정이 시작될 수 있도록 순서대로 지연시키는 방법이다. 가상의 시나리오는 새로운 GDP 의 발동 시점 τ_s 와 흐름률의 감소율 r_s 을 파라미터로 설정하여 다음과 같이 만들어졌다: 첫째, GDP 발동 시점 이후의 항공편이 할당된 모든 슬롯을 선별한다. 둘째, 항공편들의 슬롯 시간에 흐름률의 역수값을 슬롯의 순서만큼 더해 업데이트한다 (수식 12 참고). 현재 GDP 가 계속 유지되는 경우를 기본 시나리오 $s = 0$ 이라 정의한다. 기본 시나리오가 실현될 확률 θ_0 을 ϵ 으로 정의하며 나머지 시나리오 $s \neq 0$ 의 실현 확률은 $\theta_s = (1 - \epsilon)/|S|$ 로 설정하였다. 자세한 시나리오 데이터와 파라미터는 Mendely 온라인 데이터 저장소에서 확인할 수 있다 (Woo and Moon, 2021).

$$t_{ks} \leftarrow t_{ks} + \sum_{a=1}^{[k]} r_s^{-1}, \forall k \in K_s: \tau_s \leq t_{ks} \quad (13)$$

여기서 $[k]$ 는 슬롯 k 의 순서이다.

항공사의 항공기 일정계획 수정은 하루 동안의 남은 항공기 일정을 수행하면서 GDP 가 발동되거나 수정될 때 재계획을 수립하는 방식으로 시뮬레이션되었다. 재계획의 수립은 시나리오 기반 추계계획모형을 해결하여 진행하였다. 시나리오 기반 추계계획모형으로 도출한 항공기 일정계획이 효과적인지 확인하기 위해, GDP 에 대한 완전한 정보가 제공되었을 때 도출된 일정계획을 비교군으로 설정하였다. 완전한 정보 하에서의 일정계획은 GDP 에 대한 불확실성이 없을 때, 즉 최근 발동된 GDP 시점에서 근미래에 발생될 GDP 시나리오의 정보가 확실하게 알려진 경우 추계계획모형을 해결하여 얻어냈다. 또한, 시나리오 기반 추계계획법의 상대적 비교를 위하여, GDP 가 발동되거나 수정되었을 때 그 시점에 주어진 정보만을 이용하여 수립한 항공기 일정계획 수정 대안을 탐색하는 탐욕기법을 비교 대상으로 두었다.

일정계획 대조군과의 평가기준으로 완전한 정보에서의 기댓값(Expected value of perfect information, EVPI)과 시나리오 정보의 가치(Value of scenario information, VSI)를 계산하였다. EVPI 는 완전한 정보 가정 하에서 각 시나리오에 대해 얻은 일정계획들의 목적함수 기댓값과 가능한 시나리오 정보를 가지고 얻은 일정계획들의 목적함수 기댓값의 차이로 계산된다. EVPI 는 확률적 방법론이 완전한 정보없이 도출한 대안이 얼마나 효과적인지를 표현한다. VSI 는 시나리오 정보를 이용하여 얻은 일정계획들의 목적함수 기댓값과 시나리오 정보없이 얻은 일정계획들의 목적함수 기댓값의 차이로 계산된다. VSI 는 확률적 방법론의 사용에서 시나리오 정보 유무가

가치는 가치를 나타낸다.

방법론의 대안 탐색 시간은 항공사에게 허용된 일정계획 변경가능 시간인 20 분으로 설정되었고, 그 시간을 초과하는 경우 현재까지 탐색한 최선해를 도출하도록 하였다. 모든 계산 실험은 3.6 GHz 프로세서와 16 GB 램 환경에서 실시되었다. 방법론은 C# 언어를 이용하여 구현되었으며, 수리모형은 최적화 상용 소프트웨어 CPLEX 12.8 의 계산 엔진을 이용하여 해결되었다. 모든 소프트웨어 설정은 기본값으로 하였다.

4.1. 실험 결과

표 1 은 시나리오 기반 추계계획법과 탐욕기법을 이용하여 얻은 항공기 일정계획 수정 대안과 완벽한 GDP 정보를 가정하여 얻은 전역 최적해이다. 시나리오 기반 추계계획법과 탐욕기법으로 얻은 항공기 일정계획 수정 대안은 항공사에게 허용된 일정계획 변경가능 시간인 20 분 이내에 탐색되었다. 이는 실용적인 측면에서 두 방법론이 항공기 일정계획 수정 대안 탐색에 사용 가능성을 의미한다. 시나리오 기반 추계계획법 대안탐색에서 계산한 목적함수 값은 최적 목적함수 값과 근접하였다. 반면 탐욕기법이 탐색한 대안은 기본 시나리오 $s = 0$ 에 대한 최적 목적함수 값과 동일하였지만 나머지 시나리오에서 목적함수 값은 그 격차가 매우 컸다. 시나리오 6 의 경우, 탐욕기법의 목적함수 값은 최적해 값의 두배였다. EVPI 는 \$96, 그리고 VSI 는 \$3237 로 계산되었다. 이는 시나리오 기반 추계계획법이 완전한 GDP 정보가 주어지지 않더라도 전역 최적값과 근사한 대안을 탐색할 수 있음을 나타낸다. 그리고 높은 수치의 VSI 는 항공사가 일정계획 수정 대안을 탐색할 때 실현된 GDP 정보만을 이용하는 것보다 시나리오 정보를 함께 활용하는 것이 더 효과적임을 보여준다.

표 1. 항공사 관점의 항공기 일정계획 수정의 시뮬레이션 실험 결과

시나리오	전역 최적해		시나리오 기반 추계계획법			탐욕기법		
	목적함수 (\$)	결항수	목적함수 (\$)	격차	결항수	목적함수 (\$)	격차	결항수
0	7,524	2	7,676	152	5	7,524	-	5
1	7,846	5	7,846	-	5	14,368	6,522	5
2	10,099	6	10,178	79	6	12,094	1,995	6
3	7,959	5	7,960	1	5	13,460	5,501	5
4	7,670	4	7,714	44	5	14,980	7,310	5
5	9,004	6	9,115	112	5	11,225	2,221	5
6	7,583	2	7,703	120	5	16,517	8,934	5
7	9,342	6	9,461	119	5	11,265	1,923	5
8	8,246	6	8,331	84	5	11,615	3,369	5
9	9,263	6	9,379	116	5	11,164	1,901	5
10	9,905	6	10,042	137	5	11,897	1,992	5
기댓값	8,458		8,554			11,791		

5. 결론

이 연구에서는 항공사 측면의 항공기 일정계획 수정 문제를 다루었다. 항공사의 일정계획 수정은 ATCC가 공항의 항공기 흐름을 통제하기 위해 항공기를 의도적으로 지연시키는 GDP 발동 시 수립 가능하다. 항공사는 GDP에 의한 일정계획 변경으로 발생하는 페널티를 최소화하기 위해 아직 일정을 시작하지 않은 항공기들의 슬롯을 교환하여 일정계획을 수정 가능하다. 일정계획 수정 방법론으로 시나리오 기반 추계계획법과 탐욕기법을 제시하였다. 두 방법론은 GDP 발동 또는 업데이트 시 남아있는 항공기들의 일정계획을 수정한다. 시나리오 기반 추계계획법은 시나리오 정보를 사용하여 대안을 탐색하고, 탐욕기법은 GDP 발동 또는 업데이트 시 현재 정보만을 이용하여 대안을 제시한다. 제시한 일정계획 수정 방법론의 현실적용 가능성을 확인하기 위해 특정 대상 공항에서의 실제 항공사에 대한 사례연구를 수행하였다. 사례연구는 실제 GDP가 적용된 하루의 항공기 일정계획 데이터와 연속적으로 발생하는 가상의 GDP에 대한 시나리오를 사용하여 일정계획 수정을 시뮬레이션하였다. 계산 실험 결과, 제시한 방법론은 실제 상황에서 항공사에게 허용되는 일정계획 수정 가능 시간 이내에 대안을 도출하였다. 시나리오 기반 추계계획모형은 한정적인 시나리오 정보만 이용하여 대안을 도출하였지만, 전역 최적해와 근접한 해성능을 보였다. 반면, 시나리오 정보없이 탐색한 탐욕기법의 해성능은 좋지 못했다. 낮은 수치의 EVPI는 시나리오 기반 추계계획모형은 완전한 GDP 정보가 없더라도 좋은 대안을 탐색 가능하다는 것을 나타내었다. 높은 수치의 VSI는 항공사가 유추가능한 시나리오 정보를 이용하여 항공기 일정계획 수정을 수립할 때 효과적인 대안이 탐색될 수 있음을 보였다.

향후 연구에서는 비용 파라미터를 달리하여 민감도 분석을 실시하고자 한다. 항공사의 지연, 결항 등의 비용 페널티는 항공사마다 그 가중치가 상이할 수 있다. 다음 실험에서는 비용 페널티 가중치 변화에도 시나리오 기반 추계계획법이 일정계획 수정 대안을 탐색하는 것에 여전히 효과적이지를 분석하고자 한다. 또한, 다음 연구에서는 환승편의 미연결 페널티 비용과 승무원의 미연결 페널티 비용을 함께 고려하고, 단일 공항이 아닌 다수 공항에 대한 GDP로 문제상황을 확장하고자 한다.

REMARK

이 연구의 확장연구는 Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review에 제출되어 게재될 예정입니다. (Woo and Moon, 2021)

REFERENCES

- 국토교통부 AIM 항공정보관리체계. *AIM 항공정보간행물*. (2018).
- Bard, J. F., and Mohan, D. N. (2008). Reallocation arrival slots during a ground delay program. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(2), 113 – 134.
<https://doi.org/10.1016/j.trb.2007.07.005>

- Brunner, J. O. (2014). Rescheduling of flights during ground delay programs with consideration of passenger and crew connections. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 72, 236 – 252. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.10.004>
- Incheon International Airport. *Incheon International Airport: Airport Collaborative Decision Making Operations Manual (Korean)*. (2017).
- Liu, J., Li, K., Yin, M., Zhu, X., and Han, K. (2017). Optimizing key parameters of ground delay program with uncertain airport capacity. *Journal of Advanced Transportation*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/7494213>
- Liu, P. chen B., Hansen, M., and Mukherjee, A. (2008). Scenario-based air traffic flow management: From theory to practice. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42(7 – 8), 685 – 702. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2008.01.002>
- Liu, Y., Liu, Y., Hansen, M., Pozdnukhov, A., and Zhang, D. (2019). Using machine learning to analyze air traffic management actions: Ground delay program case study. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 131, 80 – 95. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.09.012>
- Luo, S., and Yu, G. (1997). On the Airline schedule perturbation problem caused by the ground delay program. *Transportation Science*, 31(4), 298 – 311. <https://doi.org/10.1287/trsc.31.4.298>
- Woo Y.-B., and Moon, I. (2021) Dataset of an airline-driven flight rescheduling problem. *Mendeley Data*, v1. <https://doi.org/10.17632/2h9cxkzj8j.1>
- Woo, Y.-B., and Moon, I. (2021). Scenario-based stochastic programming for an airline-driven flight rescheduling problem under ground delay programs. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Accepted.