J. Soc. Korea Ind. Syst. Eng Vol. 40, No. 2 : 13-21, June 2017
https://doi.org/10.11627/jkise.2017.40.2.013

ISSN : 2005-0461(print)
ISSN : 2287-7975(online)

Airline Disruption Management Using Ant Colony Optimization Algorithm with Re-timing Strategy

Gukhwa Kim · Junjae Chae†

School of Air Transport, Transportation, and Logistics, Korea Aerospace University

항공사 비정상 운항 복구를 위한 리-타이밍 전략과 개미군집최적화 알고리즘 적용

김국화 · 채준재†

한국항공대학교 항공교통물류학부

Airline schedules are highly dependent on various factors of uncertainties such as unfavorable weather conditions, mechanical problems, natural disaster, airport congestion, and strikes. If the schedules are not properly managed to cope with such disturbances, the operational cost and performance are severely affected by the delays, cancelations, and so forth. This is described as a disruption. When the disruption occurs, the airline requires the feasible recovery plan returning to the normal operations in a timely manner so as to minimize the cost and impact of disruptions. In this research, an Ant Colony Optimization (ACO) algorithm with re-timing strategy is developed to solve the recovery problem for both aircraft and passenger. The problem consists of creating new aircraft routes and passenger itineraries to produce a feasible schedule during a recovery period. The suggested algorithm is based on an existing ACO algorithm that aims to reflect all the downstream effects by considering the passenger recovery cost as a part of the objective function value. This algorithm is complemented by re-timing strategy to effectively manage the disrupted passengers by allowing delays even on some of undisrupted flights. The delays no more than 15 minutes are accepted, which does not influence on the on-time performance of the airlines. The suggested method is tested on the real data sets from 2009 ROADEF Challenge, and the computational results are compared with the existing ones on the same data sets. The method generates the solution for most of problem set in 10 minutes, and the result generated by re-timing strategy is discussed for its impact.

Keywords : Ant Colony Optimization Algorithm, Airline Disruption Management, Re-timing

1. 서 론

비정상 운항(disruption)이란 기상이변, 조종사 파업, 갑작스런 항공기 고장과 같이 예기치 못한 사건들로 인하여 운항 스케줄을 계획대로 운영할 수 없는 상태를 말한다[8]. 항공사는 네트워크 특성 상 발생한 문제가 네트워크를 통해 전파되는 파급효과(downstream effect)가 매우 크다[19]. 또한 하나의 운항 스케줄이 항공기, 승무원, 고객, 공항 등의 수많은 자원들을 포함한다. 따라서 비정상 운항이 발생했을 때에는 가능한 한 빠른 시간 내에 원래의 스케줄대로 운행할 수 있도록 앞서 언급한 것들을 고려한 스케줄 복구계획을 수립해야 한다. 그렇지 못할 경우 항공사의 수익에 막대한 손실을 가져올 수 있다[17].

스케줄 복구를 위해 항공사가 사용하는 방법은 항공편 취소, 항공기 경로 재설정 혹은 대체 항공기 사용, 조종사

Received 17 February 2017; Finally Revised 9 May 2017; Accepted 15 May 2017
† Corresponding Author : jchae@kau.ac.kr

재할당 및 대체 조종 인력(reserve crews) 사용, 그리고 승객 재할당 등이 있다. 이때 스케줄 복구의 목적은 발생한 비정상 운항 및 이로 인한 네트워크 파급효과를 최소화하는, 실행 가능한 복구 스케줄을 찾는 것이다.

해당 문제는 경영 과학(Operations Research)의 관점을 중심으로 많은 연구가 진행되었다[3]. 일반적으로 항공사 스케줄 복구 문제는 크게 항공기 복구(aircraft recovery), 조종사 및 승무원 복구(crew recovery), 그리고 승객 복구(passenger recovery)문제로 구분한다. 기존 대부분의 연구에서는 문제의 크기 및 시간 제약으로 인해 항공기 복구 문제를 해결한 뒤 각 개별 문제를 순차적으로 다뤘다. Yun et al.[22]은 항공기 운항 일정 계획 문제의 해법을 제약 만족 기법(constraint satisfaction Problem)과 발견적 기법을 사용하여 제시하였다. 이러한 순차적 해결방법으로 인해 대부분의 경우에 지역 최적화(local optimization)의 문제를 해결하는 것으로 제한이 되었다. 따라서 더 나은 해를 찾기 위한 일부 혹은 전체 문제에 대한 통합적인 접근 방법의 필요성이 증가했다.

완전한 스케줄 복구 통합 문제에 대한 모델은 Petersen et al.[16]이 처음으로 제안했고 benders' decomposition을 사용한 방법을 제시했다. Abdelghany et al.[1]은 항공기와 승무원을 통합한 문제를 풀기 위하여 시뮬레이션을 사용했다. Stojkovic et al.[17]는 동일한 문제를 정수선형계획법(integer linear program)으로 모델링하고 네트워크 흐름 기법을 적용하였다. Bratu and Barnhart[4]는 항공기와 고객에 대한 통합 모델을 제시하고 실제 미국 주요 항공사들의 운영에 미치는 영향을 측정하기 위하여 항공사 운영본부(Airline Operations Control Center) 시뮬레이터를 개발했다. Zegordi et al.[23]는 개미 군집 최적화(Ant Colony Optimization) 알고리즘을 사용해 고객에게 미치는 영향을 항공기 복구 문제의 목적함수에 포함함으로써 비정상 운항이 승객에게 미치는 파급효과를 명확하게 고려하고자 했다. Jafari et al.[10]은 항공기와 고객을 동시에 고려하는 스케줄 복구 문제의 모델을 혼합정수계획법(mixed integer program)으로 제안했다. 스케줄 복구 문제에 대한 더 자세한 논문은 [3, 7, 8, 12, 20, 21]를 참조할 수 있다.

본 연구에서는 Zegordi et al.[23]과 같이 항공기와 승객의 복구 문제에 ACO 알고리즘을 적용하고자 한다. 기존 연구와 다르게 본 연구는 ACO 알고리즘에 리-타이밍을 고려함으로써 총 비용 및 고객이 겪는 불편함을 최소화하고자 한다. 본 연구에서 리-타이밍은 비정상 운항의 영향을 받지 않은 항공편에 대해 일정 범위 내에서 지연을 허용하는 것을 의미한다. 이는 처음에 스케줄 계획 단계에서 보강 스케줄(robust schedule)을 구성하기 위하여 제안된 방법으로 고객 지연 시간은 물론이고 이로 인해 항공사가 지불하는 보상비용 또한 감소시킨 바 있다[13]. 개선된 알고리즘은 2009 ROADEF Challenge 데이터를 사용해 기존의 해와의 비교를 통해 성능을 테스트한다. 결과적으로 해당 알고리즘의 성능이 기존보다 개선되었음을 확인했다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 제 2장에서는 승객을 고려한 항공기 복구 문제 및 사용 가능한 전략들에 대하여 기술한다. 제 3장에서는 시간 재조정 전략을 제안하고 기존 ACO 알고리즘에 적용한 방법을 설명한다. 제 4장에서는 알고리즘의 성능 비교를 위해 사용한 데이터에 대한 설명과 실험에 사용한 파라미터들을 제시한다. 제 5장에서는 본 논문의 요약 및 결론을 제시한다.

2. 항공사 스케줄 복구 문제

2.1 항공사 스케줄 복구 문제 정의

본 연구에서의 스케줄 복구 문제는 각 항공기에 대하여 복구 기간 동안 운항이 가능한 항공기의 경로를 생성하고, 계획된 스케줄의 항공편에 탑승한 고객들을 재할당하는 것을 말한다. 스케줄 복구 문제는 ①기 계획된 운항 스케줄, ②비정상 운항의 발생원인, ③복구 기간의 정보를 바탕으로 정의할 수 있다.

본 연구에서는 항공사 복구 문제 발생 원인의 종류는 항공편 지연, 결항, 항공기 사용 제한, 공항 용량 감소의 경우를 포함한다. 항공편 지연 및 공항 용량 감소는 지상 조업 인원 파업, 기상변화 등 다양한 원인에 의해 발생할 수 있다. 항공기 사용 제한은 갑작스런 고장 등으로 인해 일정 시간 해당 항공기의 사용이 불가한 경우를 말한다. 이를 바탕으로 스케줄을 복구하기 위한 의사 결정을 내려야 한다.

스케줄 복구를 위한 전략은 항공편 취소, 새로운 항공편 생성, 항공기 교체, 고객 재할당, 고객 여정 취소를 포함한다. 항공기 교체는 서로 다른 두 항공기의 경로를 서로 바꾸는 것이다. Talluri[18]에 따르면 해당 방법은 총 항공편 지연 시간을 줄이는데 효과적이라고 알려져 있다. 고객 재할당은 가능한 최소 지연 시간 내에 그들의 목적지에 도달할 수 있도록 다른 항공편에 재할당하는 방법이다. 어떤 전략을 취하느냐에 따라서 총 비용이 크게 바뀔 수 있다.

항공사 스케줄 복구 문제의 목적 함수는 총 복구비용의 최소화로, 여기서 총 복구비용은 항공기 스케줄 복구비용과 고객 여정 복구비용의 합과 같다. 항공기 스케줄 복구비용은 특정 항공기로 노선을 운행하는데 드는 운항비용과 불일치 비용(non-compliant location cost)으로 구성된다. 불일치 비용은 복구 종료 시점에 원래의 스케줄대로 운행하기 위해 공항마다 필요한 항공기를 위치시킬 수 없는 경우 발생한다. 본 연구에서는 각 항공기마다 종료

지점을 사전에 정함으로써 이에 대한 비용은 포함하지 않았다. 고객 여정 복구비용은 항공편의 지연 및 결항으로 인해 고객이 겪었을 불만족을 계산하기 위해 일반적인 보상 금액과 함께 고객의 비효용(disutility)을 화폐단위로 환산한 금액을 포함한다. 크게 고객 지연 비용과 고객 취소 비용으로 구분한다.

2.2 수리모형

수리 모델을 위해 사용된 표기 및 모델은 다음과 같다.

표기

S	복구 기간
F_s	복구 기간에 포함하는 운항노선 집합
K_s	복구 기간에 포함된 항공기 집합
RO_k	항공기 k가 운항하는 노선 집합(경로)
C_{kf}	항공기 k가 노선 f를 운항했을 때의 비용
CD_f	노선 f를 1분 지연했을 때의 비용
CC_f	노선 f를 최소하는 비용
DT_f	노선 f 비행시간
NP_f	노선 f에 탑승한 고객 수
T_f	노선 f의 계획된 출발 시간
CAP_f	노선 f에 남아 있는 좌석 수
A_{kf}	항공기 k가 노선 f의 운항이 가능한 시간
V_k	항공기 k의 비행 가능 시간
P	복구 기간에 포함되는 고객 여정 집합
$R(p)$	고객 여정 p를 대신할 수 있는 다른 여정들 집합
U	고객의 최소 환승 시간(본 연구에서는 30분으로 설정)
S_p	재할당 되지 않은 고객들에 대한 비용
$IT(p)$	고객 여정 p의 운항 노선
$IT_L(p)$	고객 여정 p의 마지막 운항 노선
$IT(p, n)$	고객 여정 p의 n번째 운항 노선
δ_{rf}	만약 노선 f가 여정 r에 포함되면 1, 아니면 0의 값
x_{kf}	항공기 k가 노선 f에 할당되면 1 아니면 0의 값
z_f	노선 f가 취소되면 1 아니면 0의 값
td_f	노선 f의 실제 출발 시간
ta_f	노선 f의 실제 도착 시간
y_p	계획된 고객의 여정 p가 비정상 운항의 영향을 받으면 1 아니면 0의 값
it_p^p	고객 여정 p로 계획되었고 실제로도 p로 할당된 고객 수
it_p^r	고객 여정 p로 계획되었으나 실제로는 r로 할당된 고객 수

본 연구에서는 Jafari et al.[10]의 수리 모델을 바탕으로 한다.

$$\min f(\cdot) = \sum_{f\in F_s}\sum_{k\in K_s} C_{kf}\cdot x_{kf} + \sum_{k\in K_s} CD_f \cdot (1-z_f)\cdot [td_f - T_f]\cdot NP_f + \sum_{f\in F_s} CC_f \cdot z_f \cdot NP_f + \sum_{p\in P}\sum_r CD_f \cdot it_p^r \cdot (td_{it(r,l)} - td_{it(p,l)}) \quad (1)$$

s.t.

$$x_{kf} + \sum_{f'} x_{kf'} \le 1,\ \forall f\in F_s,\ k\in K_s,\ f'\in \{f'\in F_s | T_{f'} > T_f,\ T_f + DT_f \ge T_{f'} + \text{maximum delay allowed}\} \quad (2)$$

$$1 - z_f = \sum_{k\in K_s} x_{kf},\ \forall f\in F \quad (3)$$

$$x_{kfi+1} - x_{kfi} = 0,\ \forall k\in K_s,\ f_i\in ro\in RO_k \quad (4)$$

$$td_f \ge A_{kf}x_{kf},\ \ \forall f\in RO_k,\ \ k\in K_s \quad (5)$$

$$td_{f_{i+1}} \ge ta_{f_1} + U,\ \ \forall f\in RO_k,\ \ k\in K_s \quad (6)$$

$$td_{f_i} \ge T_f,\ \forall f\in F_s \quad (7)$$

$$td_f \le V_k x_{kf} + (1-x_{kf})\,UB(ta_f),\ \ \forall f\in F_s, k\in K_s \quad (8)$$

$$ta_f = td_f + DT_f(1-z_f),\ \ \forall f\in F_s \quad (9)$$

$$\left(\frac{td_{IT(p,2)}}{ta_{IT(p,1)}+u}\right) - 1 \ge -y_p\left(\frac{td_{IT(p,2)}}{ta_{IT(p,1)}+u}\right) - 1 \ge 1 - y_p,\ \forall p\in P \quad (10)$$

$$y_p \ge z_f,\ \ \forall p\in P, f\in IT(p) \quad (11)$$

$$N_p(1-y_p) = it_p^p,\ \ \forall p\in p \quad (12)$$

$$\sum_{p\in P} it_p^r \le \sum_{p\in P} N_p(1-y_r),\ \ \forall r\in R(P) \quad (13)$$

$$\sum_{r\in R(P)} it_p^r + trn_p = N_p y_p,\ \forall p\in P \quad (14)$$

$$\sum_{p\in P}\sum_{r\in R(P)}(1-\delta_f^p)\delta_f^r it_p^r \le CAP_f(1-z_f),\ \forall f\in R(P) \quad (15)$$

$$\sum_{f\in FA(a,s)}\sum_{k\in K_s} x_{kf} \le ARP_a^p,\ \ \forall s\in S, a\in A \quad (16)$$

$$\sum_{f\in FD(a,s)}\sum_{k\in K_s} x_{kf} \le DEP_a^p,\ \ \forall s\in S, a\in A \quad (17)$$

$$x_{rf}, z_f, y_p \in \{0,1\},\ td_f, ta_f \in \mathbb{R},\ it_p^p, it_p^r, trn_p \in \mathbb{Z} \quad (18)$$

식 (1)은 복구 문제의 목적함수로 제 2.1절에서 언급한 다음의 총 비용들을 최소화하도록 한다. 식 (2)는 제약조건을 나타낸다.

식 (2)는 각 항공기는 서로 시간이 겹치지 않는 운항노선에 할당되어야 함을 나타낸다. 식 (3)은 취소된 항공편($z_f = 1$)에는 항공기가 할당될 수 없음을 의미한다. 식 (4)는 하나의 경로에는 오직 한 대의 항공기만이 할당되어야 하는 제약 조건을 의미한다.

식 (5)~식 (7)은 각 항공편의 출발 시간 결정과 관련된 조건들이다. 식 (5)는 항공편의 출발 시간은 이를 운항하게 될 항공기의 출발 가능 시간보다 빠를 수 없음을 나타낸다. 식 (6)은 한 개의 경로에 포함된 연속된 두 항공편에 대하여 시간 상 뒤에 있는 항공편은 앞에 있는 항공편의 도착 시간에 최소 지상 선회 시간을 추가한 것보다 앞선 시간에 출발할 수 없도록 제한된다. 식 (7)은 모든 항공편은 기존 스케줄에서의 출발 시간보다 늦게 출발해야 한다는 것을 의미한다.

식 (8)은 만약 항공편이 지연되었을 경우에, 해당 항공편을 운항 중인 항공기의 최대 비행 가능 시간을 넘을 수 있음을 나타낸다. 식 (9)는 항공편의 출발 시간과 도착시간에 대한 제약 조건이다. 취소된 항공편의 출발 시간은 도착 시간과 같다는 것을 나타낸다.

식 (10)과 식 (11)은 스케줄대로 여행할 수 없었던 고객 여정을 구분하기 위한 것으로, 식 (10)의 경우 고객 여정에 포함된 연속된 항공편들 사이에 충분한 최소 환승 소요 시간이 주어졌는지 확인하기 위한 제약조건이다. 식 (11)은 고객 여정에 취소된 항공편이 포함되어 있는지를 확인하기 위해 사용된다.

식 (12)부터 식 (15)는 스케줄대로 여행할 수 없었던 고객들을 재할당 하는데 필요한 제약조건을 의미한다. 식 (12)에 있는 제약 조건은 고객 여정 p에 문제가 생겼을 때, 해당 여정에 포함된 모든 고객들을 반드시 동일한 항공편에 보낼 필요는 없다는 것을 나타낸다. 식 (13)은 문제가 발생한 항공편에는 어떠한 고객도 탑승하지 않는다는 것을 확인하기 위해 사용된다. 식 (14)는 모든 고객이 반드시 예정되었던 목적지에 도착하도록 해야 한다는 요구조건을 의미한다. 식 (15)는 취소된 항공편을 제외한 나머지 각 항공편에 탑승한 고객의 수는 해당 항공편에 할당된 항공기의 용량을 넘을 수 없다는 것을 의미한다.

식 (16)과 식 (17)은 공항 용량에 대한 제약 조건으로 복구 기간에 포함되는 매 시간 별로 출발하는 항공편 및 도착하는 항공편의 수가 용량을 초과하지 않도록 제한한다.

마지막으로 식 (18)은 의사 결정 변수 x, y, z는 이진 변수(binary variable), 항공편의 출발 및 도착시간(td_f, ta_f)은 실수(real number), 재 할당된 고객 수 it_p^p, it_p^r, trn_p는 자연수(natural number)의 제약조건을 나타낸다.

3. 리-타이밍을 적용한 ACO 알고리즘

3.1 기존 스케줄 복구 문제를 위한 ACO 알고리즘

개미 군집 최적화는 개미들이 먹이를 찾아 가는 메커니즘을 응용한 기법으로 개미들이 정보 교환 시에 사용하는 페로몬(Pheromone)을 이용하는 방법을 적용한 메타휴리스틱(Meta-heuristic) 알고리즘이다[9]. 개미는 무작위로 해를 구성하는 하나의 객체이다. 여기서 해는 개미가 각 방문한 노드(node)의 집합으로, 실제에서는 개미가 음식을 찾기 위해 이동한 경로를 의미한다. 다음은 Zegordi et al. [23]이 제안한 ACO 알고리즘에 대한 설명이다.

항공기 복구 문제에서의 노드는 항공기와 항공편들을 나타낸다. 각 항공기 노드는 해당 항공기가 복구시점 시작을 기준으로 마지막으로 운행한 항공편을 대신한다. 개미는 항공기를 대신해 경로를 선택하는데 이의 수도코드는 <Figure 1>과 같다.

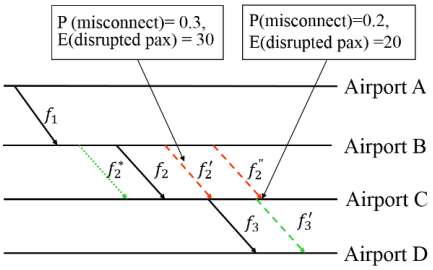
```
1  for each ant n ∈ N
2      while (not all k in K_s has visited by n)
3          i = p~U(0, card(K_s))
4          path(n) = {i}
5          while (more flights can be added to n)
6              j = state transition rule(i)
7              path(n) += {j}
8      calculate (cost)_n
```

<Figure 1> Pseudo Code for an Ant

개미는 항공기노드 중 하나를 무작위로 선택한다(3~4). 상태전이법칙(state transition rule)에 의해 다음 방문할 노드를 선택하는 과정을 해당 항공기에 대한 경로가 완성될 때까지 반복한다(5~7). 이 때 각 노드를 선택할 확률은 이미 해당 노드를 방문한 개미들에 의해 축적된 정보인 페로몬 값과 가시거리(visibility value)에 의해 결정된다. 만약 방문하지 않은 항공기 노드가 남아있다면 또다시 무작위로 하나를 선택해서 앞서 말한 것과 같은 방식으로 경로를 설정한다(2~7). 모든 항공기 노드를 방문하면 해당 개미의 해가 완성되고, 이를 바탕으로 총 비용을 계산한다(8). 모든 개미가 해를 완성하면 페로몬 업데이트 규칙에 의해 각 간선(edge)에 대한 페로몬 값을 갱신한다. 해당 알고리즘에 대한 자세한 설명은 Zegordi and Jafari[23]을 참조할 수 있다.

3.2 리-타이밍 전략

리-타이밍은 Lan et al.[13]이 보강 스케줄을 생성하기 위하여 인위적으로 항공편의 출발시간을 지연시키는 전략으로 주로 스케줄 계획 단계에서 사용되었다. <Figure 2>는 리-타이밍의 효과를 설명하기 위한 그림이다. 항공편 f_1, f_2, f_3(검정색)은 직선으로 표시되어 있고, 각 화살표의 머리는 도착 시간과 고객의 최소 환승 소요 시간을 합친 시간을 가리킨다. 항공편 f_2와 f_3의 환승 수요가 한 달에 100명이 있다고 한다. 과거 데이터를 보니 f_2항공편이 f_2'(빨간색 점선)로 지연될 확률이 30%, f_2''(빨간색 점선)로 지연될 확률은 20%라고 한다. 그렇다면 f_2에서 f_3으로 환승하는 고객 중 평균적으로 30명이 f_3항공편을 놓친다고 볼 수 있다. 반면에 항공편 f_3의 출발 시간을 f_3'로 늦추면(연두색 짧은 점선) 환승을 놓치는 고객이 20명으로 감소한다. 따라서 기존보다 10명의 고객이 불편함을 느끼지 않아도 된다.



<Figure 2> Example of Re-timing[13]

본 연구에서는 이러한 전략이 항공사 스케줄 복구 문제에도 유용할 것이라고 판단했다. 비정상 운항 시에 환승 항공편을 놓친 승객들은 이후 다른 항공편을 제공해서 목적지에 도달할 수 있도록 해야 한다. 평소에는 쉬울 수 있지만 비정상 운항 시에는 많은 항공편이 지연되거나 취소되면서 대체 항공편을 찾기 힘들 수 있다. 혹은 밤 비행기를 놓친 고객이 있다면, 항공사에서는 해당 고객에게 숙식 제공을 위한 지출과 함께 서비스 만족도가 크게 안 좋아질 수 있다. 이러한 경우 만약 특정 항공편을 몇 분 지연시킴으로써 해당 고객들을 탑승시킬 수 있다면 총 비용 및 서비스 만족도를 고려했을 때 지연시키는 것이 더 나은 방법이 될 수 있다.

특히 지연의 정도가 길지 않다면 서비스 만족도에 큰 영향을 미치지 않고서도 문제를 해결할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 허용 가능 지연 시간을 항공사의 정시성(On-Time Performance) 평가에 영향을 미치지 않는 15분으로 설정했다[14, 15]. 국내 공항의 경우에는 30분을 기준으로 하고 있으나, 보다 현실적이고 국제적인 기준을 사용하였다. 실제로도 10분에서 15분 정도의 지연은 실제로도 가능한 수준이라고 한다[2]. 리-타이밍 전략은 ACO 알고리즘의 매 시행이 끝난 뒤 다음과 같이 실행하도록 했다.

알고리즘에서 구한 스케줄에서 지연되는 운항 노선들의 집합을 $F_{delay} = \{f | f \in F_s,\ T_f \neq tdf\}$라고 하면, 각 $f \in F_{delay}$에 탑승한 고객 중 다른 노선으로 환승 하는 승객들의 집합 $affectedP_f$는 $\{p | p \in P,\ \delta_{pf} \equiv 1,\ IT_L(p) <> f\}$와 같이 정의할 수 있다. Φ이 아닌 고객 집합 $affectedP_f$에 대한 리-타이밍 과정은 <Figure 3>와 같다.

```
1  procedure Re-timing
2      for p in affectedP_f:
3          n = IT(p,n) == f
4          nextf = IT(p,n+1)
5          if td_nextf − ta_f < U:
6              reqTime = U − (td_nextf − ta_f)
7              paxSlack = paxSlack(nextf,r)
8              acSlack = acSlack(nextf)
9              slack = min(acSlack(nextf), paxSlack, 15minutes)
10             if reqTime ≤ slack:
11                 td_nextf += reqTime
12 end-procedure
```

<Figure 3> Re-timing Procedure

각 고객 $p \in affectedP_f$에 대하여 지연된 노선 f와 다음 항공편 $next\,f$사이에 시간 간격이 최소환승 소요시간(minimum transfer time)보다 짧은 경우(1~4)에만 리-타이밍을 실행하도록 했다(5). 리-타이밍 가능 여부를 확인하기 위해서 요구 시간($reqTime$)과 항공편 $next\,f$의 여유시간($slack$)을 산출해야 한다(6~10). 요구시간은 고객의 최소환승 소요시간을 확보하기 위해 추가적으로 필요한 시간을 의미한다. 여유시간은 항공기 여유시간($acSlack$), 고객 여유시간($paxSlack$), 그리고 허용 가능 지연 시간(15분)의 최소값과 같다. 항공기와 고객 여유 시간을 구하는 방법은 각각 <Figure 4>과 <Figure 5>과 같다.

```
function acSlack(f):
    slack = ∞
    k = x_kf == 1
    for i in (card(σ_k) − 1):
        if td_σk(i+1) − ta_σk(i) < slack:
            slack = td_σk(i+1) − ta_σk(i)
return slack
```

<Figure 4> Slack Time for Aircraft

function paxSlack(f, p):

$slack = \infty$

for r in $affectedP_f$:

$n = IT(p, n) == f$

$nextf = IT(p, n+1)$

if $td_{nextf} - ta_f < slack$:

$slack = td_{nextf} - ta_f$

return $slack$

<Figure 5> Slack Time for Passenger

이렇게 구한 값을 비교하여 요구시간이 해당 항공편에 할당된 여유시간보다 짧은 경우에만 출발시간을 지연하도록 한다(10~11). 결과적으로 리-타이밍 전략은 해당 항공편을 운행하는 항공기의 이후 경로 또는 탑승 승객들의 여정(itineraries)에 영향을 미치지 않을 때에만 가능하다.

4. 실 험

본 연구에서는 리-타이밍 전략을 적용한 개미 군집 최적화 알고리즘의 성능 평가를 위해 2009 Roadef challenge에서 사용했던 데이터로 실험을 진행했으며, Python을 통해 실험을 수행했다. 2009 Roadef Challenge의 결과값과의 비교를 위해 최대 연산 시간은 10분으로 대회와 동일하게 설정했다. 실험에서 사용한 알고리즘 파라미터는 <Table 1>와 같다[23].

<Table 1> Parameters

Parameters	values
α	3
β	1
$\tau_0(i, j)$	1
ρ	0.6
q_0	0.7

실험 데이터는 총 10가지 시나리오로 구성되며 각 시나리오에 대한 자세한 사항은 <Table 2>, <Table 3>과 같다. 표의 상단부터 차례대로 항공편 개수, 항공기 대수, 공항 개수, 고객 여정개수와 문제가 발생한 항공편, 항공기, 공항 개수, 그리고 스케줄 복구 기간에 대한 특성 값을 의미한다. 모든 시나리오에서 고려되는 항공편, 항공기, 공항의 수를 보면 각각 608개, 85대, 35개로 동일하지만, 고객 여정 개수와 비정상 운항의 원인 및 그 정도, 그리고 복구 기간에는 상호간 차이가 있다.

<Table 2> Data Description(A01~A05)

Scenarios	A01	A02	A03	A04	A05
No. of flights	608	608	608	608	608
No. of aircrafts	85	85	85	85	85
No. of airports	35	35	35	35	35
No. of itineraries	1,943	1,943	1,943	1,943	3,959
No. of disrupted flight	63	107	83	41	406
No. of disrupted aircraft	0	0	1	0	0
No. of disrupted airport	0	0	0	2	35
Recovery period	1	1	1	1	2

<Table 3> Data Description(A06~A10)

Scenarios	A06	A07	A08	A09	A10
No. of flights	608	608	608	608	608
No. of aircrafts	85	85	85	85	85
No. of airports	35	35	35	35	35
No. of itineraries	1,872	1,872	1,872	1,872	3,773
No. of disrupted flight	63	107	83	41	406
No. of disrupted aircraft	0	0	1	0	0
No. of disrupted airport	0	0	0	2	35
Recovery period	1	1	1	1	2

A01과 A06 시나리오는 모두 비정상 운항의 원인이 지연 혹은 취소로 총 63개의 항공편에 문제가 발생한 상황이다. A02와 A07 시나리오 역시 원인은 동일하지만 문제 발생 항공편의 수가 107개로 증가했다. A03과 A08시나리오 및 A04와 A09 시나리오의 경우 항공기 지연의 개수가 이전보다 감소했지만, 추가적으로 항공기 결함, 그리고 공항 용량 감소 등 비정상 운항 원인이 추가되었다. A05와 A10 시나리오 또한 비정상 운항의 원인이 항공편 지연 및 결항과 공항 용량 감소를 포함하는 경우이다. 하지만 전체의 약 30% 정도에 달하는 공항 용량이 감소하여 비정상 운항의 범위가 크게 증가했다. 이로 인해 문제 발생 항공편 및 공항 개수가 406개, 35개로 증가하고, 비정상 운항 복구 기간 또한 2일으로 늘었다.

각 시나리오 별 결과는 <Table 4>와 같으며 표의 왼쪽부터 시나리오, 기존 참가자들의 평균 목적함수 값, BK(best known), 본 연구에서 구한 값을 나타낸다. 먼저 평균값들을 보면 시나리오 별로 그 차이가 매우 큰데, 그 이유는 시나리오마다 비정상 운항이 미치는 영향의 범위가 다르기 때문이다. 특히 A05와 A10의 평균 스케줄 복구 비용이 다른 시나리오들과 최대 약 64배까지 차이가 발생했다.

또한 동일 시나리오에서도 BK값과 평균값의 차이가 최대 약 25배까지 발생했다. 이러한 결과는 항공사가 스

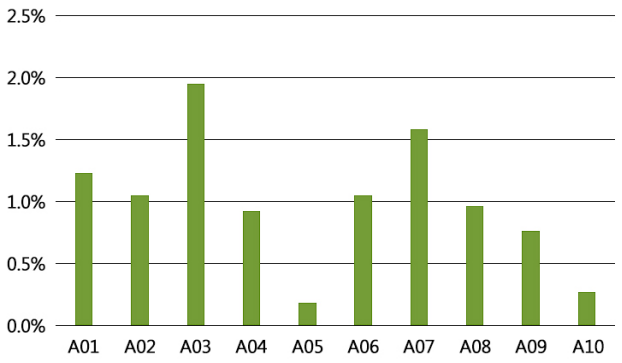
<Table 4> Comparisons of Results from Scenarios

Scenarios	Average	Best known	Ours
A01	614,020.8	23,789.1	23,435.0
A02	534,459.3	83,515.0	82,776.0
A03	909,793.7	131,694.6	127,563.0
A04	1,921,298.5	108,081.9	103,077.4
A05	23,520,568.4	3,717,376.4	20,761,434.2
A06	1,034,106.7	44,305.1	44,292.0
A07	739,179.1	202,247.8	202,227.0
A08	1,557,465.9	329,521.9	272,306.0
A09	3,212,825.1	187,144.4	187,016.0
A10	34,162.347.4	7,210,166.9	26,479,106.5

케줄 위해 사용하는 비용이 연간 수익의 2~3%를 차지하고 복구 방법에 따른 비용 차이가 확연하게 발생한다는 점을 감안했을 때 합당하게 보인다[6]. Castro and Oliveira [5]는 포르투갈의 한 항공사의 비정상 운항 데이터에 스케줄 복구를 위한 여러 알고리즘을 적용해본 결과, 실제 항공사에서 연간 사용한 복구비용과 비교했을 절감액이 약 4,280만 유로에서 28,990만 유로라고 밝혔다. Jarrah et al. [11] 또한 United Airline의 실제 운항 데이터를 바탕으로 한 연구에서 그의 방법론을 사용함에 따라 복구비용의 20%~90%까지 차이가 발생했다고 밝혔다. 이처럼 큰 비용 차이가 발생하는 이유는 항공사의 비싼 자원들로 인한 것으로, 예를 들어 2006년에는 183석의 B757 항공기를 운항하는데 시간당 4,300달러를 소비했다고 한다.

결과적으로 본 연구에서는 대부분의 시나리오에서 기존의 값들보다 좋은 해를 찾을 수 있었으나 비정상 운항의 정도가 매우 컸던 A05와 A10 시나리오에 대해서는 값이 개선되지 못했다. 다른 시나리오들과 달리 두 시나리오에 대해서 나은 해를 찾지 못한 이유는 리-타이밍 전략에 대한 유연성이 크게 감소했기 때문으로 판단된다. 두 가지 경우 모두 다른 시나리오들과 달리 공항의 용량 감소가 매우 크게 발생했고, 따라서 일정 시간 동안 특정 공항으로의 이착륙이 불가한 상황이었다. 이러한 경우에는 공항의 용량 제약 조건을 충족시키는 해를 찾는 것도 어렵다[11]. 그렇기 때문에 항공편의 시간을 재조정하는 데에 있어서 유연성이 크게 감소할 것이다. 따라서 리-타이밍 전략이 유효하지 않은 경우가 많아지고, 결과에 큰 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다.

추가적으로 리-타이밍 전략이 스케줄 복구비용에 미치는 영향을 확인하기 위하여 해당 전략을 포함 했을 때와 하지 않았을 때의 비용 변화를 확인해 보았다. <Figure 6>는 실험 결과 그래프로 각 시나리오 별로 목적함수의 개선율을 보여준다. 가로축은 각 시나리오를 나타내고 세로 축은 목적 함수 개선 정도를 의미한다.



<Figure 6> Impact of Re-Timing

리-타이밍 전략은 복구비용 감소에 긍정적인 영향을 미치고 있었다. 시나리오 별로 다르긴 하지만 최대 약 2%까지 목적 함수 값을 감소시킬 수 있었다. 전반적으로 발생한 문제의 범위가 크지 않을 때에 효과가 더 좋았으며, 예상대로 시나리오 A05와 A10에서는 다른 시나리오보다 그 정도가 덜 미치고 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 고객과 항공기를 고려한 항공사 복구 문제를 풀기 위해 항공편 리-타이밍을 적용한 개미 군집 최적화 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘을 2009 Roadef Challenge에서 사용되었던 문제들로 실험해 보았고, 대부분의 시나리오에서 더 좋은 값을 얻을 수 있었다. 특성이 서로 다른 10개의 문제에서 연산 시간을 10분으로 제한했고, 결과적으로 8개에 대해서는 기존 해보다 더 나은 값을 찾았으며 나머지 2개의 시나리오에서도 평균보다 좋은 값을 구할 수 있었다. 또한 리-타이밍 전략을 포함한 경우와 아닌 경우에 대한 추가 실험을 통해 리-타이밍 전략이 비용 감소에 영향을 미친다는 점을 알 수 있었다.

다른 시나리오들과 달리 두 시나리오(A05와 A10)에 대해서 나은 해를 찾지 못한 이유는 스케줄 리-타이밍에 대한 유연성이 크게 감소했기 때문으로 판단된다. 두 시나리오 모두 다른 시나리오들과 달리 공항의 용량 감소가 매우 크게 발생했고, 따라서 일정 시간 동안 특정 공항으로의 이착륙이 불가한 상황이었다. 이러한 경우에는 공항의 용량 제약 조건을 충족시키는 해를 찾는 것이 우선이기 때문에 리-타이밍을 실행하는 데에 있어서 유연성이 크게 감소할 것이다. 따라서 리-타이밍 전략이 유효하지 않은 경우가 많아지고, 결과에 큰 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다. 각 시나리오 별 리-타이밍의 효과 또한 이와 일치하는 결과를 보여준다. 비정상 운항의 영향을

미치는 범위가 다른 시나리오에 비해 컸던 두 시나리오에서 리-타이밍의 효과가 상대적으로 작은 것을 확인했다.

본 연구는 다양한 방면으로 추가 연구가 진행되어야 한다. 실험 결과에 따르면 복구 전략에 따라서 발생 비용에 차이가 크게 발생한 것을 확인했다. 복구 전략에 따른 비용 변화는 기존 연구를 통해서도 밝혀진 바 있다[5, 6, 11]. 특히 비정상 운항의 정도가 심한 시나리오에서는 방법론에 따라서 목적 함수 값의 차이가 최대 10배까지 발생했다. 따라서 어떠한 시나리오에서도 항상 안정적인 값을 도출할 수 있도록 추가적인 연구가 행해질 수 있을 것이다. 또한 본 연구에서는 승무원 스케줄을 고려하지 않았고, 결과적으로 동일 기종 간의 교체만 허용했다. 따라서 승무원 스케줄을 고려한다면 더욱 현실적인 연구가 될 것이다.

Acknowledgement

This research was supported by the MSIP(Ministry of Science, ICT and Future Planning), Korea, under the ITRC (Information Technology Research Center) support program (IITP-2017-2014-0-00678) supervised by the IITP(Institute for Information & communications Technology Promotion).

References

[1] Abdelghany, A., Ekollu, G., Narasimhan, R., and Abdelghany, K., A Proactive Crew Recovery Decision Support Tool for Commercial Airlines during Irregular Operations, *Ann. Oper. Res*., 2004, Vol. 127, No. 1-4, pp. 309-331.

[2] Aloulou, M.A., Haouari, M., and Mansour, F.Z., Robust aircraft routing and flight retiming, *Electron. Notes Discret. Math*., 2010, Vol. 36, No. C, pp. 367-374.

[3] Ball, M., Barnhart, C., Nemhauser, G., and Odoni, A., Chapter 1 Air Transportation : Irregular Operations and Control, *Handbooks in Operations Research and Management Science*, 2007, Vol. 14, No. C, pp. 1-67.

[4] Bratu, S. and Barnhart, C., Flight operations recovery : New approaches considering passenger recovery, *J. Sched.*, 2006, Vol. 9, No. 3, pp. 279-298.

[5] Castro, A. J. M. and Oliveira, E., Airline Operations Control : A New Concept for Operations Recovery, *Airline Industry : Operations and Safety*, 2011.

[6] Chen, X., Chen, X., and Zhang, X., Crew scheduling models in airline disruption management, in 2010 *IEEE 17th International conference*, 2010, pp. 1032-1037.

[7] Clarke, M.D.D., Irregular airline operations : a review of the state-of-the-practice in airline operations control centers, *J. Air Transp. Manag*., 1998, Vol. 4, No. 2, pp. 67-76.

[8] Clausen, J., Larsen, A., Larsen, J., and Rezanova, N.J., Disruption management in the airline industry-Concepts, models and methods, *Comput. Oper. Res*., 2010, Vol. 37, No. 5, pp. 809-821.

[9] Dorigo, M. and Di Caro, G., Ant colony optimization : a new meta-heuristic, *Proc. 1999 Congr. Evol. Comput.* (Cat. No. 99TH8406), 1999, Vol. 2, pp. 1470-1477.

[10] Jafari, N. and Zegordi, S.H., Simultaneous recovery model for aircraft and passengers, in *Journal of the Franklin Institute*, 2011, Vol. 348, No. 7, pp. 1638-1655.

[11] Jarrah, A.I., Yu, G., Krishnamurthy, N., and Rakshit, A., A Decision Support Framework for Airline Flight Cancellations and Delays, *Transp. Sci*., 1993, Vol. 27, No. 3, pp. 266-280.

[12] Kohl, N., Larsen, A., Larsen, J., Ross, A., and Tiourine, S., Airline disruption management-Perspectives, experiences and outlook, *J. Air Transp. Manag*., 2007, Vol. 13, No. 3, pp. 149-162.

[13] Lan, S., Clarke, J.P., and Barnhart, C., Planning for Robust Airline Operations : Optimizing Aircraft Routings and Flight Departure Times to Minimize Passenger Disruptions, *Transp. Sci*., 2006, Vol. 40, No. 1, pp. 15-28.

[14] Ministry of Land, Infrastructure, and Transport., Reduced inconveniences for airline passenger due to flight delays, 2016, [Online] : Available: https://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?id=95078299.

[15] Niehues, A., Berlin, S., Hansson, T., Hauser, R., Mostajo, M., and Richter, J., Punctuality : How Airlines Can Improve On-Time Performance, Booz Allen Hamilt., 2001.

[16] Petersen, J.D., Solveling, G., Clarke, J.P., Johnson, E.L., and Shebalov, S., An Optimization Approach to Airline Integrated Recovery, *Transp. Sci*., 2012, Vol. 46, No. 4, pp. 482-500.

[17] Stojkovic, G., Soumis, F., Desrosiers, J., and Solomon, M.M., An optimization model for a real-time flight scheduling problem, *Transp. Res. Part A Policy Pract*., 2002, Vol. 36, No. 9, pp. 779-788.

[18] Talluri, K.T., Swapping Applications in a Daily Airline Fleet Assignment, *Transp. Sci*., 1996, Vol. 30, No. 3, pp. 237-248.

[19] Teodorvic, D., Airline Operations Research, Gordon and Breach Science Publishers, 1988.

[20] Yan, S. and Lin, C.G., Airline Scheduling for the Temporary Closure of Airports, *Transp. Sci*., 1997, Vol. 31, No. 1, pp. 72-82.

[21] Yan, S. and Yang, D.H., A decision support framework for handling schedule perturbation, *Transp. Res. Part B Methodol*., 1996, Vol. 30, No. 6, pp. 405-419.

[22] Yun, H.K., Lee, J.J., and Lee, J.C., A Study on Development of the Aircraft Scheduling System Using ILOG, *J. Soc. Korea Ind. Syst. Eng*., 2001, Vol. 24, No. 62, pp. 89-102.

[23] Zegordi, S.H. and Jafari, N., Solving the Airline Recovery Problem By Using Ant Colony Optimization, *Int. J. Ind. Eng. Prod. Res*., 2010, Vol. 21, No. 3, pp. 121-128.

ORCID

Gukhwa Kim | http://orcid.org/0000-0001-6655-5832

Junjae Chae | http://orcid.org/0000-0002-2657-047X