

An Optimal Solution Algorithm for Capacity Allocation Problem of Airport Arrival-Departure

Sang-Un Lee *

Abstract

This paper suggests heuristic algorithm to obtain optimal solution of minimum number of delay aircraft in airport arrivals/departures problem. This problem can be solved only mathematical optimization method. The proposed algorithm selects the minimum delays capacity in various airport capacities for number of arrivals/departures aircraft in i^{th} time interval (15 minutes). In details, we apply median selection method and left-right selection method. This algorithm can be get the optimal solution of minimum number of delay aircraft for sixes actual experimental data.

▶ Keywords : Arrival, Departure, Minimization of delays, Capacity, Median

• First Author: Sang-Un Lee, Corresponding Author: Sang-Un Lee

*Sang-Un Lee (sulee@gwnu.ac.kr), Dept. of Multimedia Engineering, Gangneung-Wonju National University

• Received: 2015. 05. 19, Revised: 2015. 06. 08, Accepted: 2015. 08. 12.

I. Introduction

주어진 공항에서, 항공기 도착/출발 처리 가용량이 증가하는 항공교통 요구량을 충족시키지 못할 경우 극심한 혼잡과 더불어 항공기의 출발과 도착 지연에 따른 막대한 비용이 수반되며, 이와 더불어 고객의 불만족도 증가한다. 따라서 관제사는 15분 간격으로 해당 공항 활주로의 이·착륙 가용능력을 최대한 활용하여 이·착륙 지연 대수를 최소화 시키는 것이 주요한 임무이다[1].

공항의 이·착륙 최소 지연 대수 z 값을 찾는 문제에 대해, Idrissi[2]는 분기한정법+지역탐색법+시간 초과 제약사항법의 수학적 최적화 방법을, Gilbo[1,3]는 출발/도착 교환 최적화 도구와 수학적 최적화 방법을 적용하였다. 이와 같이 수학적 방법 이외에 구체적인 알고리즘은 제시되지 못하고 있다[4].

본 논문은 공항의 출발/도착 항공기의 지연을 최소화시키는 최적 해를 찾을 수 있는 휴리스틱 알고리즘을 제안한다. 제안된 방법은 i 번째 시간간격에서 지연된 항공기 대수와 출발/도착 예정 항공기 대수를 합한 값에 대해 지연을 최소화시키는 가용 능력을 단순히 선택하는 방법을 적용하였다. 여기서 선택 방법은 최소 지연 가용 능력 들 중에서 중앙값 (median)을 선택하는 방법과 출발/도착 항공기의 대수를 비교하여 최 좌측과 최 우측을 선택하는 방법을 적용하였다.

2장에서는 공항의 가용능력을 최대화시켜 도착/출발 지연 항공기 대수를 최소화시키는 문제에 대한 개념을 고찰해 본다. 3장에서는 최소 지연 항공기 대수를 찾는 알고리즘을 제시한다. 4장에서는 다양한 문제들에 제안된 알고리즘을 적용하여 알고리즘의 적합성을 검증해 본다.

II. Related Works and Problems

항공교통의 목표는 15분 간격으로 주어진 공항의 출발과 도착 처리능력을 최대화시켜 지연 대수를 최소화시키는 것이다. 이때 공항의 활주로는 1개 이상이며, 도착과 출발하는 항공기는 다수의 접근/이탈 경로 (fixes)를 이용한다. Fix는 선회 트랙의 시작점으로 VOR (VHF omnidirectional range)과 같은 라디오 비콘 (radio beacon)을 기점으로 한다.

전형적인 공항의 출발-도착 스키마는 그림 1과 같다[1]. 만약, 도착하는 항공기 대수가 공항의 처리능력을 초과하는 경우, 다수의 항공기가 착륙을 위해 대기하는 큐 (queue)가 발생한다. 착륙대기 큐는 1,000ft 고도 차이를 가진 다수의 Fixes (4 NM의 선회 트랙)로 구성되어 있으며, 일반적으로 선입선출 (first-in first-out, FIFO) 개념으로 운영되며, 공항에 접근하는 항공기 순서대로 Top fix에 추가되며, 점차적으로 아래 fix로 이동되며, Bottom Fix 항공기부터 착륙이 허가된다. 이륙 (출발)도 동일한 방법을 적용한다[5].

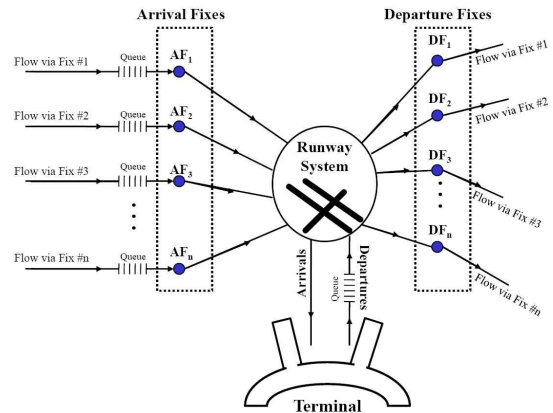


Fig. 1. Typical Arrival-Departure Scheme

공항은 활주로 수와 바람방향에 따른 제약조건으로 인해 이륙과 착륙 전용의 활주로는 없으며, 항상 혼용하여 운영하고 있으며, 착륙 중인 항공기를 피하여 출발 항공기가 활주로를 교차하기도 한다. 즉, 15분 동안의 공항의 처리능력은 이륙과 착륙 항공기의 대수를 교환하여 운영하고 있으며, 전형적인 교환은 그림 2에 제시되어 있다[1,2,6].

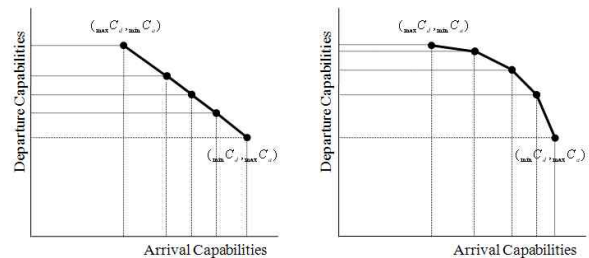


Fig. 2. Typical Arrival/Departure Trade-off Curve

여기서 제기되는 문제점은 대부분의 경우 출발/도착 항공기 대수가 공항의 운영 능력을 초과한다는 점이다. 이로 인해 특정한 15분 동안 지연된 항공기는 다음 15분 동안의 출발/도착 항공기에도 연쇄적으로 영향을 미친다. 따라서 그림 2의 도착/출발 교환 곡선을 적절히 배분하여 지연 항공기 대수를 최소화 시키는 것이 관제사에게 주어진 가장 큰 임무이다.

공항의 가용능력을 최대로 배분하여 도착/출발 항공기들의 지연 대수를 최소화시키는 문제에 대해, 다음의 용어들을 적용한다.

- $i = 1, 2, \dots, m$: 15분 간격
- $Q_{a(i-1)}$: $i-1$ 번째 시간 간격에서 선회비행으로 미착륙 중인 도착 지연 항공기 대수
- $Q_{d(i-1)}$: $i-1$ 번째 시간 간격에서 지상에서 대기 중인 출발 지연 항공기 대수
- $X_{a(i)}$: i 번째 시간 간격에서 도착 예정 항공기 대수, $X_{a(i)} = X_{a(i)} + Q_{a(i-1)}$
- $Y_{d(i)}$: i 번째 시간 간격에서 출발 예정 항공기 대수, $Y_{d(i)} = Y_{d(i)} + Q_{d(i-1)}$
- $C_j = (C_{a(j)}, C_{d(j)})$, $j = 1, 2, \dots, n$: 공항의 가용능력

- $X_{aa(i)}$: 공항의 착륙 수용능력 $C_{a(j)}$ 를 i 번째 시간 간격에서 할당할 값 (착륙 가능 항공기 대수)
- $Y_{ad(i)}$: 공항의 이륙 수용능력 $C_{d(j)}$ 를 i 번째 시간 간격에서 할당할 값 (이륙 가능 항공기 대수)
- $Q_{a(i)}$: i 번째 시간 간격에서 미 착륙 중인 도착 지연 항공기 대수, $Q_{a(i)} = X_{a(i)} - X_{aa(i)} > 0$
- $Q_{d(i)}$: i 번째 시간 간격에서 지상에서 대기 중인 이륙 지연 항공기 대수, $Q_{d(i)} = Y_{d(i)} - Y_{ad(i)} > 0$

표 1은 STL (St. Louis Lambert International Airport)의 17:45-19:00 주기 동안 예상되는 초기 항공교통량과 STL의 도착/출발 교환 곡선인 공항 처리 능력을 보여주고 있다[3]. 즉, $X_{a(i)}, Y_{d(i)}$, $i=1,2,\dots,m$ 가 주어졌을 때, $C_{a(j)}, C_{d(j)}$, $j=1,2,\dots,n$ 중에서 어떤 수용량을 배정하여 지연을 최소화 시키느냐가 수용량 할당 문제이다.

Table 1. Air Traffic and Airport Capacity of STL

Time	Predicted		Airport Capacity			
	Arrival X_a	Departure Y_d	j	Arrival C_a	Departure C_d	Sum
17:45-18:00 1	10	5	1	8	18	26
18:00-18:15 2	13	11	2	9	17	26
18:15-18:30 3	16	16	3	10	16	26
18:30-18:45 4	7	19	4	11	15	26
18:45-19:00 5	4	13	5	12	14	26
Total	50	64	6	13	13	26
			7	14	12	26
			8	15	11	26
			9	16	10	26
			10	17	9	26
			11	18	8	26

표 2는 STL에 대한 Gilbo의 TFM (traffic flow management) 전략 결과를 보여주고 있다[3]. 3가지 전략 모두 지연 항공기 대수는 12대로 최적 해는 $z=12$ 이다.

Table 2. TFM (traffic flow management) Strategies
(a) Gilbo's most favorable to Arrivals Strategy

i	Predicted		Capacity Operational Plan		Delayed		할당
	X_a	Y_d	X_{aa}	Y_{ad}	Q_a	Q_d	
1	10	5	13	13	0	0	C_6
2	13	11	13	13	0	0	C_6
3	16	16	14	12	2	4	C_7
4	7	19	8	18	1	5	C_1
5	4	13	8	18	0	0	C_1
Total	50	64			3	9	12

(b) Gilbo's Balance Strategy

i	Predicted		Capacity Operational Plan		Delayed		할당
	X_a	Y_d	X_{aa}	Y_{ad}	Q_a	Q_d	
1	10	5	13	13	0	0	C_6
2	13	11	13	13	0	0	C_6
3	16	16	13	13	3	3	C_6
4	7	19	8	18	2	4	C_1
5	4	13	9	17	0	0	C_2
Total	50	64			5	7	12

(c) Gilbo's most favorable to Departures Strategy

i	Predicted		Capacity Operational Plan		Delayed		할당
	X_a	Y_d	X_{aa}	Y_{ad}	Q_a	Q_d	
1	10	5	13	13	0	0	C_6
2	13	11	13	13	0	0	C_6
3	16	16	10	16	6	0	C_3
4	7	19	8	18	5	1	C_1
5	4	13	9	17	0	0	C_2
Total	50	64			11	1	12

Gilbo[3]는 출발 항공기 지연 최소화, 균형, 도착 항공기 지연 최소화의 3가지 전략을 제안하였다. 이 3가지 전략 중 어떤 방법이 최적인지에 대한 기준은 아직 설정되어 있지 않고 있다[3]. 기존 방법들은 이 전략을 $\alpha=[0,1]$ 을 고려하여 식 (1)을 찾고자 하였다. 여기서, $\alpha=1$ 이면 도착에 전적으로 우선순위를 부여하는 방법이며, $\alpha=0$ 이면 출발에 전적으로 우선순위를 부여하는 방법이며, $\alpha=0.5$ 이면 도착과 출발에 동일한 우선순위를 부여하여 우선순위가 없는 상태를 의미한다. 최적의 α 값은 아직 결정되어 있지 않다.

$$\min \sum_{i=1}^n [\alpha X_{i+1} + (1-\alpha) Y_{i+1}], 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (1)$$

기존의 방법 대부분은 z 값 여부에 상관없이 $\alpha=0.5$ 와 $\alpha=0.7$ 에 대해 수학적 방법들을 제안하고 있다. $\alpha=0.5$ 인 경우 대부분 z 값은 만족하지만 $\alpha=0.7$ 인 경우 z 값을 초과하는 경우가 대부분이다.

본 논문에서 제시하고자 하는 핵심은 α 값이 아닌 z 값이다. 즉, z 값을 찾은 후, z 값을 초과하지 않는 범위 내에서 출발지연 항공기 대수 최소화, 도착 지연 항공기 대수 최소화와 균형 지연 항공기 대수 최소화 값을 찾고자 함이다. Idrissi[2]와 Gilbo[1,3]는 수학적 방법으로 z 값을 찾았다. 그러나 z 를 찾을 수 있는 휴리스틱 알고리즘은 아직까지 제안되지 않고 있다. Gilbo의 전략 외에는 본 주제와 관련된 연구가 거의 없는 실정이다. 예로, Kim과 Lee[7]는 우리나라 공역환경에 부합하는 항공기 도착순서만을 관리하는 기법을 연구하였다. 즉, 공항의 출발과 도착 모두를 관리하는 항공관제 업무 중 특정 공항의 4개 접근영역의 효율적인 일정관리만을 다루어 도착/출발의 일반적인 모델로 적용이 불가능한 단점을 갖고 있다.

III. Minimum Delay Algorithm

본 장에서는 최소 지연 항공기 대수인 z 값을 찾는 휴리스틱 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 시간 간격 $i=1,2,\dots,m$ 에서 공항 수용능력 $C_j, j=1,2,\dots,n$ 에 대한 출발/도착 지연 항공기 대수 $Q_j, j=1,2,\dots,n$ 를 구하여 최소 지연 대수 $\min Q_j$ 를 가진 범위 $[C_{j=L}, C_{j=H}]$ 를 결정한다. Q_j 는 식 (2)와 같이 계산된다.

$$Q_j = Q_{a(j)} + Q_{d(j)}, j=1,2,\dots,n \quad (2)$$

$$\text{where } Q_{a(j)} = \begin{cases} 0 & , X_{a(i)} - C_{a(j)} \leq 0 \\ X_{a(i)} - C_{a(j)} & , X_{a(i)} - C_{a(j)} > 0 \end{cases}$$

$$Q_{d(j)} = \begin{cases} 0 & , Y_{d(i)} - C_{d(j)} \leq 0 \\ Y_{d(i)} - C_{d(j)} & , Y_{d(i)} - C_{d(j)} > 0 \end{cases}$$

다음으로, $\min Q_j = [C_{j=L}, C_{j=H}]$ 에 대해 $i=1,2,\dots,m$ 순서대로 중앙값 선택법 (Median Method, MM)과 좌우측 선택법 (L-R Method, LRM)으로 C_j 를 선택한다.

REFERENCES

- [1] E. P. Gilbo, "Optimizing Airport Capacity Utilization in Air Traffic Flow Management Subject to Constraints at Arrival and Departure Fixes," *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 5, No. 5, pp. 490-503, Sep. 1997.
- [2] A. Idrissi, "Some Methods to Treat Capacity Allocation Problems," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, Vol. 37, No. 2, pp. 141-158, Mar. 2012.
- [3] E. P. Gilbo, "Arrival/Departure Capacity Tradeoff Optimization: A Case Study at the St. Louis Lambert International Airport (STL)," *5th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar*, pp. 1-10, Budapest, 23-27, Jun. 2003.
- [4] A. Agustín, A. Alonso-Ayuso, L. F. Escudero, and C. Pizarro, "Mathematical Optimization Models for Air Traffic Flow Management: A Review," *Studia Informatica Universalis*, pp. 141-184, Feb. 2010.
- [5] Wikipedia, "Holding (Aviation)," *Wikipedia Foundation, Inc.*, 2013.
- [6] O. Gluchshenko, "Dynamic Usage of Capacity for Arrivals and Departures in Queue Minimization," *IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*, pp. 139-146, Denver, CO, USA, 2011.
- [7] M. J. Kim and G. J. Lee, "Time-Based Arrival Management Design for Incheon Int'l Airport," *Proceedings of Autumn Scientific Meeting of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, pp. 551-555, Nov. 2013.
- [8] A. Idrissi and C. M. Lim "Modeling and Optimization of the Capacity Allocation Problem with Constraints," *International Conference on Innovation and Vision for the Future*, pp. 107-116, 2006.
- [9] E. P. Gilbo and K. W. Howard, "Collaborative Optimization of Airport Arrival and Departure Traffic Flow Management Strategies for CDM," *3th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar*, pp. 1-11, Napoli, 13-16, Jun. 2000.
- [10] X. B. Hu, W. H. Chen, and E. D. Paolo, "Multi-airport Capacity Management: Genetic Algorithm with Receding Horizon," *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 8, No. 2, pp. 254-263, Jun. 2007.

Authors



Sang Un Lee received the B. Sc. degree in avionics from the Korea Aerospace University in 1997. He received the M. Sc. and Ph. D. degrees in Computer Science from Gyeongsang National University, Korea, in 1997 and 2001, respectively. He is currently Professor with the Department of Multimedia Science, Gangneung-Wonju National University, Korea. He is interested in software quality assurance and reliability modeling, software engineering, software project management, neural networks, and algorithm.