

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(9), 681-688(2013)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.9.681>

## 최적화 기법 기반의 항공기 스케줄러 개발 및 실제 공항의 수치적 모사

유민석\*, 송재훈\*\*, 최성임\*

A development of an Optimization-Based Flight Scheduler  
and Its Simulation-Based Application to Real Airports

MinSeok Ryu\*, Jae-Hoon Song\*\* and Seongim Choi\*

Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology\*  
Aviation Safety R&D Center, Korea Aerospace Research Institute\*\*

## ABSTRACT

Several problems caused by inevitable increment of airplane have been issued. The most effective solution to solve the issues is considered as establishing appropriate Air Traffic Management (ATM) that reduces aircraft's delay at an airport and intensify the airport's capacity. The purpose of this paper is to produce the optimum aircraft schedules that maximize the aircraft throughput by smooth air traffic flow near terminal area of an airport. In this paper, mathematical formulations of the scheduling problem are firstly specified. Based on the mathematical modelling, an Optimization-Based Flight Scheduler that provides the optimum flight schedules for arriving aircraft is developed by introducing the Mixed Integer Linear Programming(MILP) and the Genetic Algorithms(GA). With this scheduler, we calculated the optimum schedules to compare to real schedule data from an Incheon Airport. As a result, it is validated that aircraft throughput produced by the optimum schedule is much better than that of the schedule from the Incheon airport. The optimization-based flight scheduler is expected to deal with problems due to the aircraft saturation in near future.

## 초 록

불가피하게 급증하는 항공기 수요량에 따른 여러 가지 문제들을 해결하는 방안으로 항공기의 지연시간을 줄여, 공항의 수용력을 극대화하는 항공교통관리가 주목받고 있다. 본 논문은 공항주변 항공교통흐름을 원활히 하여 항공기 처리량을 최대화하는 항공기 스케줄링의 최적화를 목적으로 한다. 본 연구에서 개발한 스케줄링 기법은 스케줄링 문제를 수학적으로 모델링한 후, 혼합정수선형계획법과 유전자 알고리즘을 도입하여 항공기 지연시간을 최소화 하는 최적의 스케줄링을 제공한다. 최적화된 스케줄링과 실제 인천 공항에서의 항공기 스케줄링과 비교해 보았고, 그 결과 최적화된 스케줄링이 제공하는 항공기 처리량이 현재 인천 공항에서 처리하는 항공기보다 현저히 높다는 결과를 확인할 수 있었다. 본 연구에서 개발한 스케줄러는 향후 항공기의 포화 상태를 적절하게 대처하는데 큰 도움을 줄 것이라 예상되어진다.

† Received: June 11, 2013 Accepted: August 19, 2013

\* Corresponding author, E-mail : [schoi1@kaist.ac.kr](mailto:schoi1@kaist.ac.kr)<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

**Key Words** : Aircraft Scheduling(항공기 스케줄링), Optimization-Based Flight Scheduler(최적화 기법 기반의 항공기 스케줄러), Mixed Integer Linear Programming(혼합정수선형계획법), Genetic Algorithms(유전자 알고리즘), Incheon Airport(인천 공항)

## I. 서 론

미국 연방항공청 (FAA, Federal Aviation Administration)은 2030년까지 항공기의 수가 약 50%이상 증가할 것이라는 통계학적 자료를 발표하였다[1]. 이처럼 급격히 증가하는 항공기에 따라 환경오염, 연료고갈, 항공기 지연 등 여러 가지 문제점이 제기되고 있는 실정이다.

이러한 문제점을 해결하는 방안으로 국제 민간 항공 기구(ICAO, International Civil Aviation Organization)에서 효율적인 항공교통흐름(ATM, Air Traffic Management)의 방향을 제시하였다. 특히, 공항에 도착하는 항공기의 지연시간을 줄여 원활한 항공교통흐름에 이바지할 뿐만 아니라 앞서 언급한 여러 가지 문제들을 해결하기 위한 방안들이 대두되고 있다.

예를 들어, 항공기의 지연시간을 줄이기 위한 개념 연구[2], 실제 공항 상황을 기반을 둔 도착 비행의 최적 스케줄을 제공하는 컴퓨터 알고리즘의 개발[3], 더 나아가 실제 항공기 조종사들을 고용하여 human simulation을 수행하는 실험[4] 등 활발한 연구가 진행되고 있다.

이러한 연구는 세계적인 인천 국제공항을 보유하고 있는 국내에서도 활발히 이루어져야 한다. 인천 공항은 동북아시아의 허브공항으로 많은 량의 여객기와 화물 수송기를 처리해야 할 뿐만 아니라, 북한 공역에 의해 공역의 자유로운 사용이 제한되어 있는 실정이므로, 많은 항공기를 처리하기 위해 보다 효율적인 공역 활용이 필요하다. 이러한 특수성을 가지고 있는 인천 공항의 원활한 항공교통흐름을 보장하는 최적의 스케줄링 기법에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

본 연구에서는 항공기 지연시간을 최소화하는 최적의 항공기 스케줄링 기법에 대한 소개와 인천 국제공항 주변의 공역 및 실제 항공기 도착 비행에 대한 정보를 바탕으로 최적의 스케줄링을 제공하여, 현재 사용하는 스케줄링과 비교해보았다. 먼저, 최적화 기법 기반의 항공기 스케줄링 기법에는 스케줄링 문제에 대한 수학적 모델링과 알고리즘의 계산 효율성을 증가시키기 위해 유전자 알고리즘을 도입하는 방법론에 대해 설명을 하였다. 또한, 인천 공항에서 40해리 안에 있는 모든 waypoints, 운영 항로, 항공기가 인천 공항

에 도착하는 예정 시간 및 실제 도착 시간에 대한 정보를 조사하여 스케줄러에 적용하였다.

## II. 본 론

### 2.1 스케줄링 문제의 수학적 모델링

본 연구에서는 도착 비행에 대한 최적 스케줄링에 초점을 두지만, 출발 비행까지 고려할 수 있는 포괄적인 스케줄링 문제에 대한 수학적 모델링이 필요하다.

항공기 스케줄링 문제의 세 가지 구성 요소로는 항공기, 스케줄링 포인트, 운영 항로가 있으며, 다음 식 (1)과 같이 정식화 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F &= [f_i | 1 \leq i \leq N_F] = [f_1, f_2, \dots, f_{N_F}] & (1) \\
 P &= [p_i | 1 \leq i \leq N_P] = [p_1, p_2, \dots, p_{N_P}] \\
 R &= [r_i | 1 \leq i \leq N_R] = [r_1, r_2, \dots, r_{N_R}]
 \end{aligned}$$

여기서,

$f_i$  : 임의의 항공기 한 대

$p_i$  : 임의의 스케줄링 포인트 한 점 (입구 점 (Fix point), 교차 점 (Merging point), 또는 활주로 (Runway threshold))

$r_i$  : 임의의 운영 항로 (입구 점과 활주로를 연결한 항로)

$F$  : 운영 항공기들의 집합

$P$  : 모든 스케줄링 포인트들의 집합으로 입구 점, 교차 점, 활주로를 포함함

$R$  : 이용 가능한 모든 운영 항로들의 집합

$N_F$  : 전체 운영 항공기 댓 수

$N_P$  : 전체 스케줄링 포인트 개수

$N_R$  : 전체 운영 항로 개수

위의 세 가지 구성 요소들은 서로 독립적이므로, 다음과 같이 정의해 주어 종속적으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 R^f &= [r_k | \text{항공기 } f \text{가 항행할 수 있는 모든 항로,} \\
 & \quad k \in 1, 2, \dots, N_R(f) ] \\
 \text{이때, } N_R(f) & \text{는 항공기 } f \text{가 운행할 수 있는 모든} \\
 & \text{항로들의 개수이다.} \\
 P^r &= [p_k | \text{운영항로 } r \text{에 놓인 모든 스케줄링 포} \\
 & \quad \text{인트들의 집합, } k \in 1, 2, \dots, N_P(r) ] \\
 \text{이때, } N_P(r) & \text{는 항로 } r \text{에 놓인 모든 스케줄링 포} \\
 & \text{인트들의 개수이다.}
 \end{aligned}$$

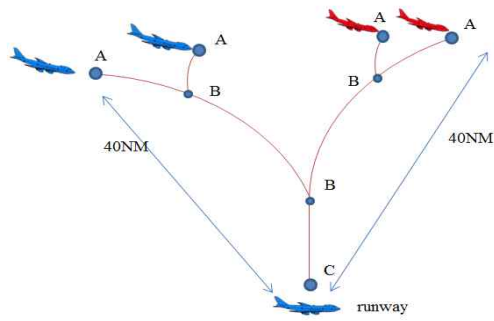


Fig. 1. Three components for a Scheduler

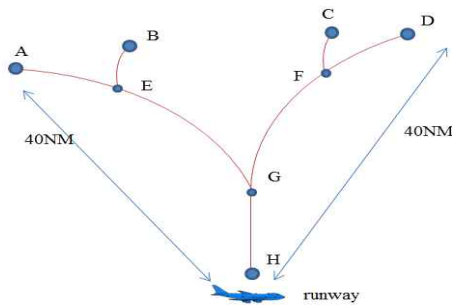


Fig. 2. Scheduling points and Routes

2.1.1 세 가지 구성 요소들의 특성

다음은 세 가지 구성 요소들을 도식화한 그림이다.

첫 번째 요소인 항공기는 이륙 무게에 따라 Small, Large, Heavy로 분류할 수 있다. 이륙 무게가 큰 항공기는 후와류(wake vortex)의 세기가 크기 때문에, 그 뒤를 따라가는 항공기는 분리 간격 (Separation)을 넉넉히 유지해야 한다. 본 스케줄링 기법에서는 각 항공기의 종류를 고려한 분리 간격을 적용하였다.

두 번째 요소인 스케줄링 포인트는 입구 점 (A), 교차 점(B), 활주로(C)로 분류할 수 있다.

마지막 요소인 운영 항로는 여러 스케줄링 포인트의 집합으로 다음과 같이 정식화 할 수 있다.

$$P^{r1} = \{ A, E, G, H \} \quad P^{r3} = \{ C, F, G, H \}$$

$$P^{r2} = \{ B, E, G, H \} \quad P^{r4} = \{ D, F, G, H \}$$

풀고자 하는 스케줄링 문제에 대한 세 가지 구성 요소를 설정한 후, 최적화 기법의 입력 값으로 설정한다.

2.2 혼합정수선형계획법 기반의 스케줄링

스케줄링 문제는 설계 변수가 이진변수와 연속 변수로 혼합된 형태이며, 이에 따라 목적 함수와

제약 조건 역시 혼합된 형태로, 혼합정수선형계획(Mixed Integer Linear Programming, MILP) 문제로 취급한다. MILP 기반의 스케줄링 문제는 ‘Branch and Bound’ 기법을 이용하여 풀이 가능하며, 목적 함수 및 제약 조건은 보조 변수 (Auxiliary variables)를 도입하여 선형화 할 수 있다[5][6].

본 절에서는 앞서 정의한 세 가지 요소들을 기반으로 정의된 스케줄링 문제에 최적화 기법을 적용하였고, 최적화 기법의 중요 요소인 설계 변수, 목적 함수, 제약 조건에 대한 연구가 수행되었다.

2.2.1 설계 변수 (Design Variables)

본 스케줄링 문제에서 정의한 설계 변수로는 항공기가 위치하는 항로를 나타내는 항로 부여 변수 ( $A_{f,r}$ ), 항공기의 순서를 나타내는 항공기 순서 변수 ( $S_{f,f',r,r',p}$ ), 항공기가 임의의 스케줄링 포인트를 지날 때의 시간 ( $T_{f,r,p}$ )으로 설정하였다. 이는 위 세 변수에 따라 항공기가 공항에 도착하는 시간이 달라지기 때문이다. 이때, 설계 변수는 이진 변수와 연속 변수로 분류할 수 있다.

먼저,  $A_{f,r}$ 은 이진변수로 항공기  $f$ 가 항로  $r$ 에 위치해 있다면  $A_{f,r}=1$  이고, 위치해 있지 않다면  $A_{f,r}=0$ 이다.

$$A_{f,r} \in \{0, 1\}$$

또 다른 이진 변수로  $S_{f,f',r,r',p}$ 이 있다. 이는 항로  $r$ 에 위치한 항공기  $f$ 가 항로  $r'$ 에 위치한 항공기  $f'$ 보다 교차점  $p$ 에 먼저 도달하면  $S_{f,f',r,r',p}=1$  이고, 그렇지 않으면  $S_{f,f',r,r',p}=0$  이다.

$$\forall f \in F, \forall r \in R^f, \forall r' \in R^{f'}, \forall p \in P^r \cap P^{r'} \neq \emptyset$$

$$S_{f,f',r,r',p} \in \{0, 1\}$$

마지막 설계 변수  $T_{f,r,p}$ 는 항로  $r$ 에 위치한 항공기  $f$ 가 항로  $r$ 에 위치한 스케줄링 포인트  $p$ 를 지날 때의 시간으로 연속변수이다.

$$\forall f \in F, \forall r \in R^f, \forall p \in P^r$$

$$T_{f,r,p} \in R$$

2.2.2 목적 함수 (Objective Functions)

본 스케줄링 문제에서는 항공기가 활주로에 도착하는 시간의 전체 합을 최소화하는 목적을 가지고 있으며, 다음과 같이 도식화 할 수 있다.

$$J = \sum_{f \in F} \sum_{r \in R^f} A_{f,r} T_{f,r,p}$$

위 목적 함수는 이산변수  $A_{f,r}$ 와 연속변수  $T_{f,r,p}$ 의 조합으로 이루어진 비선형함수이므로, 다음 보조 변수를 도입하여 선형화하였다.

$$\delta_{f,r,p}^T \cong A_{f,r} T_{f,r,p}$$

$$J = \sum_{f \in F_r} \sum_{p \in R^f} \delta_{f,r,p}^T$$

where,  $\delta_{f,r,p}^T \leq MA_{f,r}$   
 $\delta_{f,r,p}^T \geq mA_{f,r}$   
 $\delta_{f,r,p}^T \leq T_{f,r,p} - m(1 - A_{f,r})$   
 $\delta_{f,r,p}^T \geq T_{f,r,p} - M(1 - A_{f,r})$

여기서, M과 m은 각각 임의의 크고 작은 상수로 스케줄링 문제에서 주어진 최대값보다 크고, 최소값보다 작게 설정한다.

**2.2.3 제약 조건 (Constraints)**

제약 조건은 최적 점을 찾는데 불필요한 설계 변수들을 미리 제거해 주거나 비 물리적 현상에 대한 불필요한 고려를 기피하여 최적 설계에 기여한다. 본 스케줄링 문제에서는 다섯 가지의 제약조건을 설정하였다[5].

1. 단일 항로 부여에 대한 제약:  $\sum_{r \in R^f} A_{f,r} = 1$
2. 첫 스케줄링 포인트에서의 통과시간에 대한 제약:  
 $A_{f,r}(T_{f,r,p_i} - T_{f,r}^E) \geq 0$
3. 교차점에서의 항공기 순서에 대한 제약:  
 $S_{f,f',r,r',p} + S_{f',f,r,r',p} = A_{f,r}A_{f',r}$
4. 항공기 분리 간격에 대한 제약:  
 $S_{f,f',r,r',p}(A_{f',r}T_{f',r',p} - A_{f,r}T_{f,r,p}) \geq S_{f,f',r,r',p}(SEP_{f,f',p})$   
 (여기서,  $SEP_{f,f',p}$  : 지정된 분리 간격)
5. 임의의 두 스케줄링 포인트 사이의 이동 시간에 대한 제약  
 $A_{f,r}[T_{f,r,p'} - T_{f,r,p} - (\Delta T_{f,r,p,p'})_{\min}] \geq 0$   
 $A_{f,r}[T_{f,r,p'} - T_{f,r,p} - (\Delta T_{f,r,p,p'})_{\max}] \leq 0$   
 (여기서,  $\Delta T_{f,r,p,p'}$  : p부터 p'까지 이동 시간)

**2.3 유전자 알고리즘 기반의 스케줄링**

앞서 정의한 MILP 기반 스케줄링 문제는 설계 변수에 대한 모든 경우의 수를 고려하는 Branch & Bound 기법을 이용하여 풀 수 있지만, 이는 정확하지만, 계산 시간이 오래 걸린다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해, 유전자 알고리즘을 도입하여 최적화를 진행하였다.

본 스케줄링 문제에서 이진변수인 항로 부여 변수와 항공기 순서 변수( $A_{f,r}, S_{f,f',r,r',p}$ )를 유전자 알고리즘에서의 설계 변수로 설정하여 최적 해를 찾은 후, 선형계획법을 이용하여 항공기 도착 시

간( $T_{f,r,p}$ )을 구하는 방법으로, 기존 스케줄링 기법보다 계산소요 시간을 현저히 줄일 수 있다. 본 절에서는 스케줄링 문제에 유전자 알고리즘을 접목시키는 방법을 다루기로 한다[7].

**2.3.1 초기 모집단**

유전자 알고리즘 기반의 스케줄링 기법에서의 초기 모집단은 항로 부여 벡터( $\vec{A}_{f,r}$ )와 항공기 순서 벡터( $\vec{S}_{f,f',r,r',p}$ )로 설정한다. 각 벡터의 크기는 요구 집합에서 정의한 항공기의 댓 수( $N_F$ )와 같다. 항로 부여 벡터의 요소는 임의의 항로에 위치하는 각 항공기에 대한 모집단을 의미한다. 항공기 순서 벡터의 요소는 어느 한 스케줄링 포인트를 통과하는 항공기들의 순서에 대한 모집단을 의미한다. 이 두 벡터들의 수치 값은 유전자 알고리즘에서 임의로 생성된 값을 사용한다.

**2.3.2 적응도 평가 및 선택**

스케줄링 문제에서 정의한 목적 함수를 적응도 평가 함수로 설정하여, 두 벡터( $\vec{A}_{f,r}, \vec{S}_{f,f',r,r',p}$ )에 대한 적응도를 평가한다. 두 벡터의 적응도가 평가된 후, 다음 세대의 개체를 선택하는 과정에서 단순한 토너먼트 선택 기법을 사용한다. 이때, 전체 모집단의 개체 P개 중 성능이 좋은 P/2개를 선택하고, 선택된 P/2개를 변형시킨 개체를 다음 세대의 개체로 선택한다.

**2.3.3 유전 연산자 - 돌연변이**

유전자 알고리즘에서 세대가 거듭할수록 두 벡터의 요소들은 돌연변이에 의해 변형된다. 두 벡터는 연성이 매우 강한 특징을 가지고 있다. 즉, 항로 부여 벡터( $\vec{A}_{f,r}$ )에서 항로 r을 이루고 있는 waypoint p에서 항공기 순서( $\vec{S}_{f,f',r,r',p}$ )가 결정되기 때문이다. 그렇기 때문에, 항로 부여 벡터( $\vec{A}_{f,r}$ )에서 먼저 돌연변이가 일어난 후, 곧 이어 항공기 순서 벡터( $\vec{S}_{f,f',r,r',p}$ )에 돌연변이가 일어난다.

**2.3.4 절차 흐름도**

본 절에서는 유전자 알고리즘을 기반으로 하는 항공기 스케줄링 기법에 대한 전체적인 흐름을 설명하도록 한다.

먼저, 풀고자 하는 스케줄링 문제를 2.1절에서 설명한 세 가지 구성요소에 맞추어 구성한다. 본 연구에서는 인천 공항 주변의 공역을 조사한 후, 항공기의 댓 수 및 종류, 스케줄링 포인트들의 위치와 개수, 운영 항로를 기반으로 도착 비행에 대한 스케줄링 문제를 구성하였다.

위의 스케줄링 문제를 입력 값으로 하여, 유전

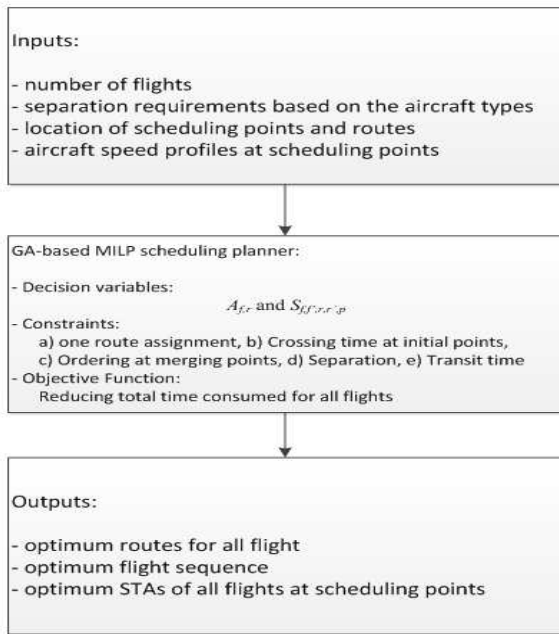


Fig. 3. Genetic Algorithm-based Scheduler

자 알고리즘 기반의 항공기 스케줄링 알고리즘에 입력하면, 스케줄링 알고리즘은 최적의 항로 부여 변수 값 ( $A_{f,r}$ )과 항공기 순서 변수 값( $S_{f,f',r,r',p}$ )을 제공하며, 그때의 항공기 도착 예정 시간 (Scheduled Times of Arrivals, STA)을 계산해준다.

유전자 알고리즘 기반의 스케줄링 기법은 기존 MILP 기반의 스케줄링 기법보다 현저히 빠른 계산 속도를 보이는 동시에 정확도 역시 보장한다. 다음은 유전자 알고리즘 기반의 스케줄링 기법에 대한 전체적인 절차 흐름도이다.

2.3.5 유전자 알고리즘의 효율성 및 정확성

본 절에서는 스케줄링 문제를 푸는 방법으로 Branch & Bound 기법보다 유전자 알고리즘이 갖는 효율성 및 정확성에 대한 내용을 이룬다.

다음은 4개의 항로와 8개의 waypoints로 이루어진 공역에 대하여 도착하는 항공기의 수를 증가시키기에 따라, 각 알고리즘의 계산소요 시간을 나타낸다.

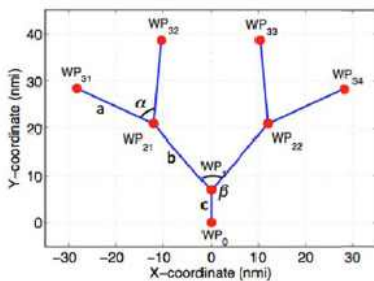


Fig. 4. Four-Routes Topology

Table 1. Computational Time for each Algorithm

|                   |      |      |        |      |     |
|-------------------|------|------|--------|------|-----|
| Number of Flights | 6    | 7    | 8      | 40   | 100 |
| Branch & Bound    | 6.7  | 98.3 | 1258.4 | N/A  | N/A |
| Genetic Algorithm | <1.0 | 1    | 2.2    | 23.4 | 50  |

Unit: [s]

Table 2. Average Delay Time for each Algorithm

|                   |                                  |
|-------------------|----------------------------------|
| Number of Flights | Average Delay Time for 8 Flights |
| Branch & Bound    | 8.23s                            |
| Genetic Algorithm | 8.58s                            |

위 결과를 보면, 항공기의 수가 증가할수록 계산소요 시간이 증가하는 것을 볼 수 있다. 하지만, Genetic Algorithm을 이용하는 경우, Branch & Bound 기법보다 현저히 적은 량의 계산 시간이 소요되는 것을 확인할 수 있다.

더 나아가, Genetic Algorithm이 Branch & Bound와 유사한 결과 값을 창출하는지 비교하기 위해, 위 그림과 같은 공역에 총 8대의 항공기에 대한 도착 비행 스케줄링을 실시한 후, 각 알고리즘에서 계산한 총 8대 항공기의 평균 지연시간 (Average Delay Time)을 비교하였다. 그 결과, Genetic Algorithm의 정확성이 증명되었다.

2.4 인천 공항 주변 공역

본 절에서는 AIP (Aeronautical Information Publication)에 등재된 운영 항로 및 Waypoint의 정보를 이용하여, 인천 공항 주변 공역을 조사하였다.

다음은 도착 비행에 대한 정보를 담고 있는 Standard Arrival Chart(STAR) 최신 버전(2013)을 기반으로 하여 인천 공항 주변 공역을 모델링

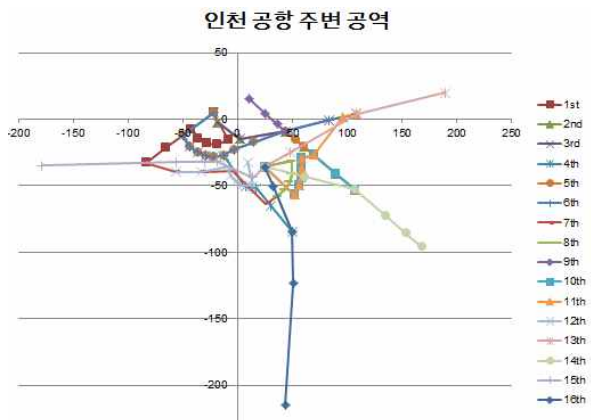


Fig. 5. Airspace near Incheon Airport

Table 3. Waypoints in each route

| Routes    |       |       |       |       |       |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>1</b>  | REBIT | ALTON | SI931 | SI932 | SI933 |
| SI934     | SI935 | DANAN |       |       |       |
| <b>2</b>  | BULLS | KAKSO | KALMA | SEL   | WINDY |
| COPUS     |       |       |       |       |       |
| <b>3</b>  | KARBU | ENKAS | SEL   | WINDY | COPUS |
| <b>4</b>  | OLMEN | TOSCA | BONSA | SI852 | SI942 |
| SI943     | SI944 | SI945 | SI946 | SI947 | DANAN |
| <b>5</b>  | BULLS | KAKSO | KALMA | HODOL | SEL   |
| SI853     | SI941 | SI942 | SI943 | SI944 | SI945 |
| SI946     | SI947 | DANAN |       |       |       |
| <b>6</b>  | KARBU | ENKAS | SEL   | SI853 | SI941 |
| SI942     | SI943 | SI944 | SI945 | SI946 | SI947 |
| DANAN     |       |       |       |       |       |
| <b>7</b>  | REBIT | COWAY | PINGO | SI854 | SI855 |
| ARONE     | SI912 | SI913 | SI914 | SI915 | PULUN |
| <b>8</b>  | OLMEN | ARONE | SI912 | SI913 | SI914 |
| SI915     | PULUN |       |       |       |       |
| <b>9</b>  | SEL   | QUZLE | LITON | BENSE |       |
| <b>10</b> | BULLS | KAKSO | SI857 | SI921 | SI922 |
| SI923     | SI924 | SI925 | PULUN |       |       |
| <b>11</b> | KARBU | NOTIN | SI857 | SI921 | SI922 |
| SI923     | SI924 | SI925 | PULUN |       |       |
| <b>12</b> | COWAY | PINGO | SI901 | SI902 | SI903 |
| SI904     | SI905 | KOTRA |       |       |       |
| <b>13</b> | KARBU | SI361 | PULUN |       |       |
| <b>14</b> | BULLS | SI362 | PULUN |       |       |
| <b>15</b> | ARIVA | SANHO | DANIL | BIANY | PULUN |
| <b>16</b> | OLMEN | SI363 | PULUN |       |       |

한 그림이다. 총 16개의 항로와 약 150개의 waypoints들을 포함한다. 인천 공항은 좌표 (0, 0)에 위치해 있고, 각 waypoints는 점으로 표시되어 있으며, 단위는 해리이다.

다음은 16개의 항로에 대한 정보로, 각 항로에 속한 waypoints를 공항에서부터 먼 순서대로 나열한 것이다.

위 Table처럼, 16개의 항로는 동일한 waypoint를 지나는 경우가 많다. 본 연구에서 인천 공항으로부터 40해리 안에 위치한 waypoints들만 고려하기로 하고, 이들을 Fixes라고 한다.

모든 항공기가 자신에게 할당된 Fix에 진입하는 시간을 '0[s]'으로 설정함으로써, 혼잡한 항공 교통 흐름을 모사하였다.

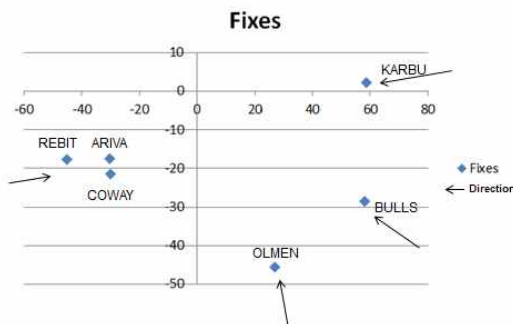


Fig. 6. Fix points and Flight Direction

Table 4. Number of Airplane (2013.05.05.)

| 시간    | 항공기 수 | 시간    | 항공기 수 |
|-------|-------|-------|-------|
| 0-1   | 1     | 12-13 | 17    |
| 1-2   | 2     | 13-14 | 18    |
| 2-3   | 0     | 14-15 | 19    |
| 3-4   | 1     | 15-16 | 28    |
| 4-5   | 12    | 16-17 | 33    |
| 5-6   | 26    | 17-18 | 32    |
| 6-7   | 26    | 18-19 | 22    |
| 7-8   | 21    | 19-20 | 16    |
| 8-9   | 18    | 20-21 | 22    |
| 9-10  | 10    | 21-22 | 9     |
| 10-11 | 8     | 22-23 | 11    |
| 11-12 | 28    | 23-24 | 3     |

Table 5. Data for arriving aircraft (16-17)

| 항공사 | 출발지    | 계획 (STA)       | 도착 (ATA) | 항공사   | 출발지 | 계획 (STA) | 도착 (ATA)  |       |       |
|-----|--------|----------------|----------|-------|-----|----------|-----------|-------|-------|
| 1   | 아일랜드항공 | HKG(홍콩)        | 16:00    | 15:43 | 18  | 버브항공     | HAN(하노이)  | 16:35 | 16:31 |
| 2   | 아시아나항공 | NRT(나리타)       | 16:00    | 15:36 | 19  | 대한항공     | PVG(푸둥)   | 16:35 | 16:46 |
| 3   | 아시아나항공 | SD(선다이)        | 16:00    | 15:45 | 20  | 에미레이트항공  | DXB(두바이)  | 16:40 | 17:00 |
| 4   | 중국남방항공 | YNZ(영향)        | 16:00    | 16:36 | 21  | 대한항공     | HKG(홍콩)   | 16:40 | 16:27 |
| 5   | 아시아나항공 | JFK(뉴욕)        | 16:10    | 16:12 | 22  | 아시아나항공   | YG(요나고)   | 16:40 | 16:06 |
| 6   | 중국남방항공 | DLC(대련)        | 16:10    | 16:13 | 23  | 카타르항공    | DOH(도하)   | 16:40 | 16:46 |
| 7   | 진에어    | OKA(오кина와)    | 16:10    | 15:58 | 24  | 아시아나항공   | HNL(호놀룰루) | 16:45 | 16:38 |
| 8   | 하이항공   | BKK(방콕(수안 나롬)) | 16:15    | 16:08 | 25  | 아시아나항공   | CAN(광저우)  | 16:45 | 16:35 |
| 9   | 일본항공   | NRT(나리타)       | 16:20    | 16:14 | 26  | 싱가포르항공   | SIN(싱가포르) | 16:45 | 16:22 |
| 10  | 대한항공   | NRT(나리타)       | 16:20    | 15:56 | 27  | 중국국제항공   | PEK(베이징)  | 16:50 | 16:20 |
| 11  | 대한항공   | PEK(베이징)       | 16:25    | 16:29 | 28  | 대한항공     | DLC(대련)   | 16:50 | 16:56 |
| 12  | 대한항공   | ORD(시카고)       | 16:25    | 16:42 | 29  | 대한항공     | ATL(애틀랜타) | 16:55 | 17:26 |
| 13  | 대한항공   | VVO(볼라디보 스토크)  | 16:30    | 16:03 | 30  | 타이항공     | IST(이스탄불) | 16:55 | 16:51 |
| 14  | 하와이안항공 | HNL(호놀룰루)      | 16:30    | 16:18 | 31  | 대한항공     | TPE(타이베이) | 16:55 | 16:41 |
| 15  | 대한항공   | PEN(페사)        | 16:30    | 15:48 | 32  | 에어아시아자판  | NRT(나리타)  | 16:55 | 16:44 |
| 16  | 대한항공   | CSX(항사)        | 16:30    | 16:10 | 33  | 대한항공     | JAD(약성동)  | 16:55 | 16:47 |
| 17  | 대한항공   | DFW(달라스)       | 16:30    | 16:30 |     |          |           |       |       |

2.5 실제 항공기 도착 시간 데이터

스케줄링 알고리즘이 제공하는 도착 시간 정보와 실제 항공기 도착 시간 정보를 비교하기 위해, 항공정보포털시스템에서 제공하는 항공기 도착 시간 정보를 조사하였다. 다음은 2013년 5월 5일 인천 공항에 도착한 항공기 수를 시간 별로 나타낸 표이다.

하루에 382대의 항공기가 인천 공항에 도착한다는 정보이며, 이 중 가장 교통량이 많은 시간인 16시-17시, 1시간에 대해 조사하였고, 항공기의 출발지 및 인천 공항 도착 예정 시간에 대한 정보는 다음과 같다.

2.6 결과

본 절에서는 2.4절에서 조사한 인천 공항 주변 공역에 대한 정보와 2.5절에서 조사한 도착 항공기 정보를 스케줄링 알고리즘의 입력 값으로 처리한 후, 스케줄링 알고리즘이 제공하는 최적의 항공기 순서 및 항로에 대한 결과를 포함하고 있

Table 6. Data for Fix points assumed

| 항공사 | 출발지     | 방향          | FIX | 항공사   | 출발지 | 방향      | FIX       |    |       |
|-----|---------|-------------|-----|-------|-----|---------|-----------|----|-------|
| 1   | 아름호스탈항공 | HG(홍콩)      | SW  | COWAY | 18  | 비프탈항공   | HAN(하노이)  | SW | COWAY |
| 2   | 아시아항공   | NRT(나리타)    | NE  | KARBU | 19  | 대한항공    | PVG(푸둥)   | SW | REBIT |
| 3   | 아시아항공   | GD(델리)      | SE  | BULLS | 20  | 에미레이트항공 | DXB(두바이)  | SW | COWAY |
| 4   | 중국남방항공  | YN(광저우)     | SW  | COWAY | 21  | 대한항공    | HKG(홍콩)   | SW | REBIT |
| 5   | 아시아항공   | JFK(뉴욕)     | NE  | KARBU | 22  | 아시아항공   | YSD(요코하)  | SE | BULLS |
| 6   | 중국남방항공  | DLC(대련)     | NW  | ARVA  | 23  | 카타르항공   | DOH(도하)   | SW | REBIT |
| 7   | 진에어     | OKA(오카와)    | SE  | OLMEN | 24  | 아시아항공   | HNL(호놀룰루) | SE | BULLS |
| 8   | 타이항공    | BKK(방콕수만나롬) | SW  | REBIT | 25  | 아시아항공   | CAN(광저우)  | NW | ARVA  |
| 9   | 일본전국항공  | NRT(나리타)    | NE  | KARBU | 26  | 항가울항공   | SPN(싱가포르) | SW | REBIT |
| 10  | 대한항공    | NRT(나리타)    | NE  | KARBU | 27  | 중국국제항공  | PEK(베이징)  | NW | ARVA  |
| 11  | 대한항공    | PEK(베이징)    | NW  | ARVA  | 28  | 대한항공    | DLC(대련)   | NW | REBIT |
| 12  | 대한항공    | ORD(시카고)    | NE  | KARBU | 29  | 대한항공    | ATL(애틀랜타) | NE | KARBU |
| 13  | 대한항공    | VVO(블라디보스톡) | NW  | ARVA  | 30  | 타이항공    | BT(이스탄불)  | SW | REBIT |
| 14  | 한화인양항공  | HNL(호놀룰루)   | SE  | BULLS | 31  | 대한항공    | TPE(타이베이) | SW | REBIT |
| 15  | 대한항공    | PEN(페낭)     | SW  | COWAY | 32  | 에어아시아자판 | NRT(나리타)  | NE | KARBU |
| 16  | 대한항공    | CSX(항샤)     | SW  | REBIT | 33  | 대한항공    | IAO(익산분)  | NE | KARBU |
| 17  | 대한항공    | DFW(달라스)    | NE  | KARBU |     |         |           |    |       |

으며, 이 결과를 기반으로 1시간 동안 얼마나 많은 항공기를 처리할 수 있는지에 대한 결과를 제공한다.

먼저, 2.5절의 도착 항공기 정보를 바탕으로 항공기의 출발지를 고려하여, 각 항공기의 Fix point를 설정하였다.

위와 같이 16시부터 17시까지 1시간 동안 실제 인천 공항에 도착하는 항공기 총 33대의 순서를 숫자 1부터 33이라고 설정하였고, 이들 항공기들이 인천공항에 접근하는 방향을 고려하여 스케줄링 알고리즘의 입력 값으로 지정하였다.

또한, 스케줄러 내부의 입력 값에 인천 공항 주변 공역에 대한 정보를 입력함으로 실제 인천 공항에 도착하는 항공기에 대한 가상 환경을 구축한 후, 다음과 같이 항공기 스케줄의 최적 값을 계산할 수 있었다.

위 Table에서 제시한 항공기의 순서는 33대의 항공기를 가장 효율적으로 처리하는 최적의 항공기 순서를 제시한 것이고, 그때의 운영 항로는 Route항목에 표시되어 있다.

STA(Scheduled Time of Arrivals)는 항공기가 인천 공항에 도착해야 하는 예정된 시간이다.

항공기가 다른 항공기의 영향을 받지 않아 어느 한 스케줄링 포인트에 제일 빨리 도착하는 시간을 ETA (Estimated Time of Arrivals)라 한다.

Delay = STA - ETA 로 다른 항공기에 영향을 받아 인천 공항에 도착하는 시간이 지연되는 경우를 표현한 것이다.

Seprn (Separation) 은 후행 항공기와의 분리 간격으로 짝을 이루는 두 항공기의 STA 차이로 나타내었다.

위의 Table에서 제시하는 최적의 스케줄링 결과와 실제 도착 비행 스케줄링을 비교해보았다.

먼저, 항공기 처리량을 비교해 보면, 실제 도착 비행 스케줄링을 보면 첫 항공기의 도착 예정 시

Table 7. Data for the Optimum Schedule

| 항공기 | STA    | Delay    | Seprn    | Route |
|-----|--------|----------|----------|-------|
| F8  | 1094.9 | 0        | 83.09998 | 1st   |
| F7  | 1178   | 70       | 83.09998 | 8th   |
| F3  | 1261.1 | 112.2    | 83       | 14th  |
| F14 | 1344.1 | 195.2    | 83.09998 | 14th  |
| F22 | 1427.2 | 278.2999 | 83.1001  | 14th  |
| F24 | 1510.3 | 361.4    | 83       | 14th  |
| F6  | 1593.3 | 424.6001 | 83.09998 | 15th  |
| F11 | 1676.4 | 507.7001 | 88.5     | 15th  |
| F13 | 1764.9 | 596.2001 | 90       | 15th  |
| F25 | 1854.9 | 686.2001 | 90       | 15th  |
| F27 | 1944.9 | 776.2001 | 83       | 15th  |
| F1  | 2027.9 | 842.8001 | 83.09998 | 12th  |
| F4  | 2111   | 925.9    | 83.1001  | 12th  |
| F15 | 2194.1 | 1009     | 83       | 12th  |
| F18 | 2277.1 | 1092     | 83.09985 | 12th  |
| F20 | 2360.2 | 1175.1   | 83.1001  | 12th  |
| F21 | 2443.3 | 1258.2   | 83       | 12th  |
| F2  | 2526.3 | 1131.3   | 83.09985 | 11th  |
| F5  | 2609.4 | 1214.4   | 83.1001  | 11th  |
| F9  | 2692.5 | 1297.5   | 83.1001  | 11th  |
| F10 | 2775.6 | 1380.6   | 83       | 11th  |
| F12 | 2858.6 | 1463.6   | 83.09985 | 11th  |
| F17 | 2941.7 | 1546.7   | 83.1001  | 11th  |
| F29 | 3024.8 | 1629.8   | 83       | 11th  |
| F33 | 3107.8 | 1712.8   | 83.09985 | 11th  |
| F32 | 3190.9 | 1795.9   | 83.1001  | 11th  |
| F16 | 3274   | 1425.9   | 83       | 7th   |
| F19 | 3357   | 1508.9   | 83.1001  | 7th   |
| F23 | 3440.1 | 1592     | 83.09985 | 7th   |
| F26 | 3523.2 | 1675.1   | 83.1001  | 7th   |
| F28 | 3606.3 | 1758.2   | 83       | 7th   |
| F30 | 3689.3 | 1841.2   | 88.69995 | 7th   |
| F31 | 3778   | 1929.9   | 0        | 7th   |

간은 16:00 이며, 마지막 항공기의 도착 예정 시간은 16:55 이다. 즉, 총 33대의 항공기를 처리하는데 소요된 시간이 약 1시간이다. 반면에, 스케줄러가 제시하는 최적의 스케줄링은 총 33대의 항공기를 처리하는데 소요된 시간이 약 45분이다. 이 결과는 스케줄러가 제시한 항로를 따라 운항하면, 항공기 처리량 (Throughput)이 약 45대이다. 이는 약 37%의 증가율을 보인다.

### III. 결 론

본 논문에서는 최적화 기법 기반의 항공기 스케줄러를 이용하여 항공기 스케줄링을 최적화하였고, 실질적인 비교를 위해 인천 공항 주변의 공역과 실제 도착 비행에 대한 정보를 이용하였다. 그 결과, 현재의 시스템이 처리하는 항공기보

다 약 37%의 항공기 처리량 증가율을 보였다. 이러한 항공기 스케줄링 기법은 향후 기하급수적으로 급증하는 항공기 량에 대처할 수 있는 강력한 도구로 자리매김할 수 있는 가능성이 다분하다.

본 연구에서 제시한 항공기 스케줄러는 정적인 정보인 STA, 항공기의 도착 예정 시간을 제공한다. 하지만, 항공기의 지연시간을 측정하기 위해 실제 도착 시간인 ATA (Actual Time of Arrivals)를 계산할 수 있어야 한다. 향후, Dynamic Programming을 이용하여 동적인 비행까지 고려한 스케줄러를 개발할 것이다.

## 후 기

본 연구는 국토교통부가 출연하고, 국토교통과학기술진흥원에서 위탁 시행한 항공안전기술개발사업(07항공-안전02)의 지원과 미래창조과학부 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업(과제 No. NRF-2011-0020565) 지원으로 수행되었습니다.

## References

- 1) FAA, "FAA Aerospace Forecast Fiscal Years 2010-2030", US Department of Transportation Federal Aviation Administration Aviation Policy and Plans. 2010.
- 2) Prevot, T., Callantin, T., "Cooperative air traffic management: a technology enabled concept for the next generation air transportation

transportation system", 5<sup>th</sup> USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, Baltimore, MD, 2005.

- 3) Arik-Quang V. Dao, Joel Lachter, "Automated Spacing Support Tools for Interval Management Operation during Continuous Descent Approaches", PROCEEDINGS of the Human FACTORS and ERGONOMICS SOCIETY 54<sup>th</sup> Annual Meeting, 2010.

- 4) Penhallegon, W. J., Mendolia, A. S., Bone, R. S., "Flight Deck-Based Interval Management - Spacing During Departures: Flight Crew Human-In-The-Loop Simulation", 9<sup>th</sup> USA/Europe ATM Research and Development Seminar, 2011.

- 5) Capozzi, B., Atkins, S., and Seongim Choi, "Towards Optimal Routing and Scheduling of Metroplex Operations", 9<sup>th</sup> AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO), Sep. 2009.

- 6) Atkins, S., and Capozzi, B., "Hybrid Optimization Approach To Traffic Management", 10<sup>th</sup> AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO), Sep. 2010, Fort Worth, Texas.

- 7) Seongim Choi, Robinson, J., Mulfinger, D., and Capozzi, B., "Design of an Optimal Route Structure Using Heuristics-Based Stochastic Schedulers", 29<sup>th</sup> Digital Avionics Systems Conference (DASC), Salt Lake City, UT, 3-7 Oct. 2010.