

항공기 지상 이동 선입 선처리 스케줄링

First-Come First-Served Airport Surface Movement Scheduling.

강선영 · 박배선 · 이학태*
인하대학교 항공우주공학과

Seon-Young Kang · Bae-Seon Park · Hak-Tae Lee*

Department of Aerospace Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

[요 약]

공항 내에서의 효율적인 지상 교통 관리를 위하여 선입-선처리 (FCFS; first-come first-served) 알고리즘을 적용한 항공기 지상 이동 스케줄러를 개발하였다. 본 스케줄러는 이전에 개발한 공역 내 교통 흐름 관리 스케줄러를 기반으로 하며, 지상 이동에 있어 추가적으로 요구되는 제약 조건인 링크의 방향성과 교차로 처리 등을 추가하였다. 추가된 각각의 제약 조건을 만족하는지 검증하기 위해 단순한 시나리오를 제작하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과가 주어진 제약 조건을 만족하는 것을 확인하였다. 또한 제주 공항의 실제 항공기 출·도착 데이터인 FOIS (flight operation information system) 데이터를 기반으로 시나리오를 제작하여 시뮬레이션을 진행하였다. 개발한 스케줄러의 실효용성을 판단하기 위해, 실제 평균 지연시간과 스케줄러를 통해 산출한 평균 지연 시간을 비교하였다.

[Abstract]

An airport surface movement scheduler using first-come first-served (FCFS) algorithm is developed to efficiently manage surface traffic in an airport. It is based on the previously developed traffic flow management scheduler. Link directionality and intersection processing, which are additional constraints for ground movement, are added to the scheduler. To verify each of additional constraints, several simulations were performed by making simple scenarios, and the results show that all constraints were satisfied. Also, a simulation was performed by making a scenario based on flight operation information system (FOIS) data which is real departure and arrival flight data of Jeju airport. To determine the practicality of the developed scheduler, we compare the actual average delay time with the average delay time calculated by the scheduler.

Key word : First-come first-served, Scheduling, Surface operation, Airport surface, Node-link structure.

<https://doi.org/10.12673/jant.2017.21.1.36>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 10 January 2017; Revised 2 February 2017
Accepted (Publication) 26 February 2017 (28 February 2017)

*Corresponding Author; Hak-Tae Lee

Tel: +82-32-860-8929

E-mail: haktae.lee@inha.ac.kr

I. 서론

항공 수요는 해마다 증가하고 있으며, 동시에 공항에서의 항공기 지상 이동은 더욱 복잡해지고 있다. 공항 표면 (airport surface)에서의 항공기 지상 이동은 항공 교통 관제에 있어 스케줄 지연의 중요한 요인 중 하나이다. 항공기 지상 이동은 공항 게이트부터 활주로까지의 경로에서 발생하는 다양한 문제를 포함하고, 이를 해결하기 위한 다양한 연구들이 수행되어 왔다. 또한 미국의 ‘SARDA (spot and runway departure advisor)’를 비롯한 다양한 공항 표면에서의 의사 결정 도구들이 개발되고 있다[1]. 국내의 경우, 국토교통부의 ‘항공기 출발 도착 통합 관리 연구’를 통해 포화 상태에 다다른 국내 공항들의 교통 관리 기능의 향상을 기대하고 있다[2]. 본 논문은 기존 연구를 기반으로[3-5], 일반화된 노드-링크 (node-link) 모델에서의 선입-선처리 알고리즘 (FCFS; first-come first-served algorithm)을 이용한 항공기 지상 이동 스케줄링 기법에 대해 설명한다.

기존의 연구들은 최적화 기반의 알고리즘과 통계 기반의 예측을 이용하여 접근하였다. 활주로에 항공기를 적시에 배치하기 위한 활주로 스케줄링 (runway scheduling problem)의 최적해를 구하기 위해, 동적 계획 (dynamic programming) 기반의 기법이 제시된 바 있다[6]. 다른 연구는 혼합 정수 선형 계획법 (MILP; mixed integer linear programming)을 이용하여 활주로에서의 결정론적 출발 스케줄링의 해법을 제시하였다[7]. 또한, 지금까지 수집된 데이터를 기반으로, 항공기 출발 시간을 예측하여 공항 수요를 증가시킨 연구도 있다[8].

본 논문은 주어진 노드-링크 모델과 항공기 스케줄을 대상으로, 일반 유도도로와 교차 유도도로의 방향성을 고려한 선입-선처리 알고리즘 기반 스케줄링 기법을 설명한다. 공항 노드-링크 모델은 제주 공항을 기반으로 유사 모델을 구성하였으며, 약 하루 동안의 실제 데이터를 이용하여 항공기 약 412대의 지상 이동 스케줄링을 수행하였다.

II. 스케줄링 기법

2-1 선입-선처리 알고리즘

본 논문에서 지상 이동 스케줄링에 이용한 알고리즘은 선입-선처리 알고리즘을 기반으로 새롭게 착안한 것으로, 미국항공우주국 (NASA; National Aeronautics and Space Administration)의 에임스 연구 센터 (ARC; Ames Research Center)에서 개발된 공역 내 스케줄링에 이용한 기법이다[3]. 해당 기법은 크게 두 가지의 처리과정을 통해 스케줄링 결과를 도출하며, 스케줄링의 우선순위는 기존의 예정된 출발 또는 도착시간을 기준으로 매겨진다. 변경된 스케줄 시간은 기존의 예정 시간보다 빨리 출발 또는 도착할 수 없다는 제약조건을 기본으로 하며, 공역 내 수용 가능한 항공기의 수와 출발 및 도착공항의 AAR (aircraft

arrival rate)과 ADR (aircraft departure rate)의 제약조건을 만족하도록 스케줄링을 수행하며[3], 대한민국 공역을 이동하는 항공기 데이터를 기반으로 한 스케줄링을 수행한 바 있다[4]. 전체적인 스케줄링 과정은 그림 1과 같다.

2-2 노드-링크 구조

선입-선처리 알고리즘은 노드-링크 구조를 기초로 하여 수행된다. 공역에서의 항공기 스케줄링의 경우 출발 및 도착 공항과 공역의 경계를 노드로 대입하였으며, 각 공역 구간은 링크로 대입하였다[3],[4]. 해당 알고리즘을 지상 이동 스케줄링에 이용하기 위해선 공항 내에서 항공기가 이동하는 구간을 노드와 링크의 구조로 설정해줘야 한다. 게이트와 항공기가 이륙 및 착륙하는 활주로의 끝점, 그리고 계류장과 유도도로에서의 모든 교차점을 노드로 설정하고, 각 노드와 노드를 잇는 이동 구간을 링크로 설정하였다. 그림 2는 제주공항을 노드-링크 구조로 나타낸 것이다.

기존 선입-선처리 스케줄링은 공역 상에서의 스케줄링을 위해 개발한 것으로[3],[4], 지상 이동 스케줄링을 위해서는 해당 스케줄러에 추가적인 고려사항이 필요하다.

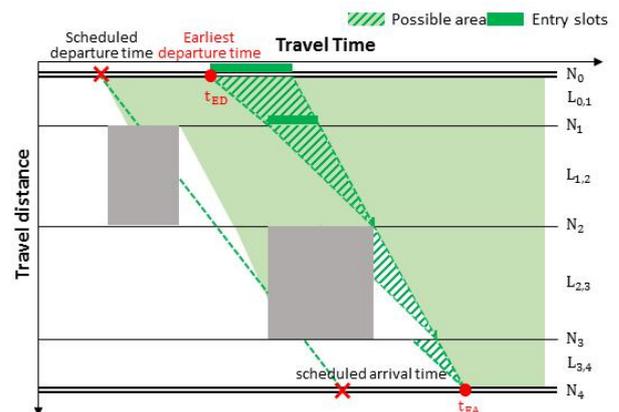


그림 1. 선입-선처리 스케줄링 알고리즘
Fig. 1. First-come first-served scheduling algorithm.



그림 2. 제주공항 노드-링크 모델
Fig. 2. Node-link model of Jeju airport.

III. 지상 이동 제약 사항

3-1 링크의 방향성

지상 이동 스케줄링은 게이트에서 활주로까지의 항공기의 이동 스케줄, 또는 그 반대의 이동 스케줄을 계획하는 것으로, 지상 이동 스케줄링 시에 고려되는 항공기의 이동로는 앞에서 언급한 바와 같이 크게 계류장, 유도로, 활주로가 있다. 이 세 가지 이동로는 일반적인 자동차 도로와는 달리 하나의 차선으로 되어있다. 그림 3은 한 대의 항공기(1)가 링크 내에서 이동 중이며, 두 대의 항공기가 해당 링크에 진입하려고 하는 상황이다. 이 상황에서 (2)번 항공기가 링크에 진입할 경우, 이동 경로가 막혀 두 항공기 모두 움직일 수 없게 된다. 따라서 지상에서는 항공기 이동 방향에 따른 링크의 방향성을 고려해야 한다. 그림 4는 방향성을 고려하여 링크 내의 항공기 수 변화를 보여주며 이에 따라 링크 진입 가능 여부를 나타낸 것이다. 공역 내 스케줄링에서는 공역 구간을 링크로 설정하였기 때문에 링크 방향성이라는 개념 자체가 존재하지 않는다 [3],[4].

링크의 방향성을 판단하기 위해서 모든 링크는 두 개의 노드로 이루어져 있다는 것과 하나의 링크는 연결된 다른 링크와 하나의 같은 노드를 공유한다는 것을 이용하였다. 방향성을 적용한 스케줄러의 검증용 위해 임의의 노드-링크 모델과 테스트 시나리오를 작성하여 시뮬레이션 하였으며, 시뮬레이션 결과, 주어진 제약조건을 만족하는 것을 확인하였다[5].

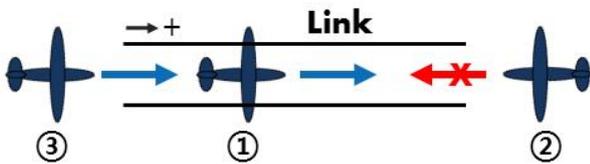


그림 3. 링크의 방향성
Fig. 3. Directionality of link.

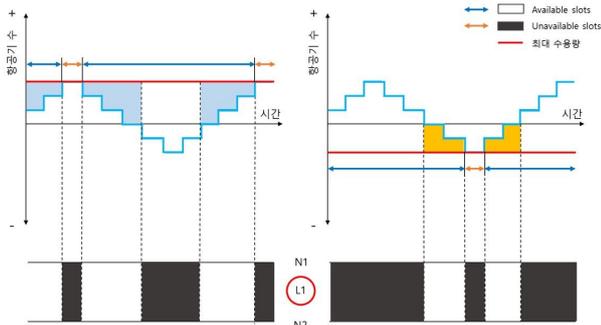


그림 4. 방향성을 고려한 링크 내 항공기 수 변화
Fig. 4. Change of aircraft number in a link considering directionality.

3-2 교차로

항공기가 이동하는 구간 중 교차로에도 제약 사항이 존재하며, 이는 교차로 내에 한 대의 항공기만 진입할 수 있다는 것이다. 이를 처리하기 위해 교차로를 최대 수용량이 1인 링크로 가정하려 하였으나, 링크로 적용 시에 방향성 고려의 어려움과 하나의 교차로가 여러 개의 링크로 구분될 오류가 있기 때문에 노드로 설정하였다.

공역 스케줄링에서는 출발 및 도착 공항 노드를 제외한 나머지 노드는 공역과 공역 사이의 경계로, 따로 제약사항이 존재하지 않아 스케줄링 시에 링크의 제약 조건만 고려해주면 되었다[3],[4]. 하지만 지상 이동 스케줄링에서는 교차로 노드의 제약 사항으로 인해 교차로에서의 제약 조건과 링크의 제약조건을 함께 고려해줘야 한다. 그림 5는 교차로 제약조건을 고려한 상태에서의 전체적인 스케줄링 프로세스를 나타낸 것이다. 앞의 그림 1과 다르게 링크와 링크 사이의 노드, 즉 교차로에 진입 불가능한 구간을 제외하고 스케줄링을 진행한다.

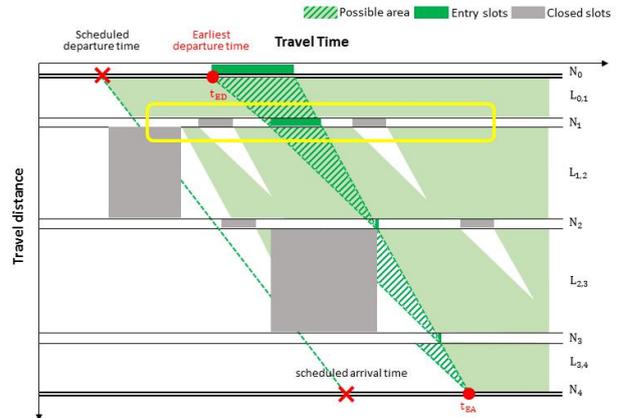


그림 5. 교차로 제약조건을 고려한 선입-선처리 스케줄링 알고리즘
Fig. 5. First-come first-served scheduling algorithm considering intersection constraints.

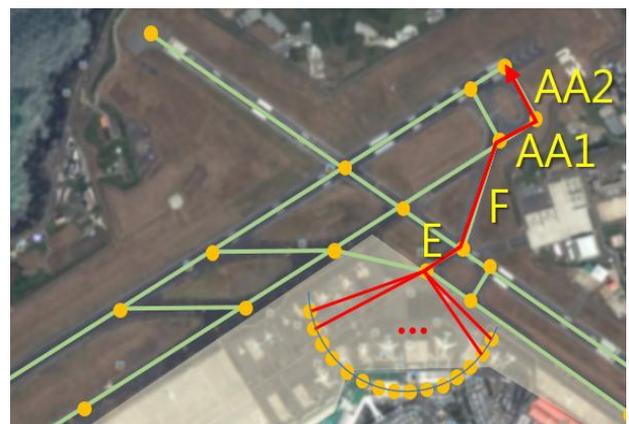


그림 6. 항공기 이동 경로
Fig. 6. Flight path in the airport.

IV. 스케줄링 수행 및 결과

개발한 스케줄러의 검증을 위해 시나리오를 작성하여 스케줄링을 수행하였다. 3-2에서 설명한 교차로 제약조건 검증을 위한 시나리오와 제주공항의 실제 데이터를 이용하여 시나리오를 작성하였다.

4-1 교차로 제약조건

교차로 제약조건을 적용한 스케줄러의 검증을 위해 제주공항 노드-링크 모델을 이용하여 간단한 시나리오를 작성하였다. 항공기 수는 225대로 같은 시간에 그림 6과 같이 모두 동일한 경로로 이륙 위치까지 이동하며, 게이트 수는 15개로 유도로 진입위치에서 모든 게이트까지의 거리가 동일하다고 가정하였다. 교차로 제약조건을 확인하기 위한 시나리오이기 때문에 다른 제약조건에 의한 간섭이 생기지 않도록 링크 수용량을 10으로 설정하였으며, 항공기의 이착륙간격은 1초, 게이트에서의 turnaround time은 30초로 설정하였다. 교차로 통과시간은 5, 10, 15, 20초로 변경해가며 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션을 통해 교차로 제약조건에 따라 스케줄링 결과가 달라지며, 교차로 제약조건을 만족하도록 첫 항공기를 제외한 이후의 항공기들이 통과시간에 따라 지연되는 것을 확인하였다.

4-2 실제 데이터 이용 시뮬레이션

본 시나리오에 이용한 데이터는 제주공항의 3월 31일자

FOIS (flight operation information system) 데이터로, FOIS 데이터가 포함하는 각 항공기의 출·도착 게이트와 활주로 정보, 출·도착 시간을 활용하여 시나리오를 제작하였다. 항공기 출·도착 시간은 ETA (estimated time of arrival)과 ETD (estimated time of departure)를 기준으로 선정하였다. 제주공항 노드-링크 모델은 게이트와 유도로, 활주로 정보는 그대로 사용하되, 계류장 내 항공기 이동로는 각 게이트와 유도로 진입점을 직선으로 연결한 링크로 간주하였다. 항공기 수는 총 412대이며, ADR (aircraft departure rate)과 AAR (aircraft arrival rate)은 30, 게이트 turnaround time은 15분으로 설정하였다. 링크 수용량은 링크 길이를 분리 간격으로 나눠 설정했으며, 여기서는 분리 간격을 150 m로 지정하였다. 항공기의 이동 속도는 5~20 knot로, 교차로 통과시간은 1~10초로 바뀌가며 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 7은 출발 항공기가 활주로 07을 이용할 때의 이동경로를 나타낸 것이며, 게이트를 크게 5 부분으로 나눠 각 부분에서 유도도로 진입하는 노드(N34~N37)를 지정해주었다.

스케줄러의 실효성 판단을 위해 실 데이터와 스케줄러를 통해 산출한 평균 지연 시간을 비교하였다. 실제 평균 지연시간은 FOIS 데이터의 ATA (actual time of arrival), ATD (actual time of departure)와 ETA, ETD의 차를 평균내어 지연시간을 구했으며, 그 수치는 약 739초이다. 표 1은 항공기의 이동 속도와 교차로 통과시간 변화에 따른 평균 지연시간을 정리한 것으로, 항공기 이동속도를 10~15 knot로 주었을 때의 결과가 실제와 유사한 것을 알 수 있다. 따라서 항공기 이동속도를 10~15 knot로 주었을 경우에 개발한 스케줄러가 실제와 유사한 결과를 도출할 수 있으며, 실 스케줄링에 사용 가능하다고 판단된다.

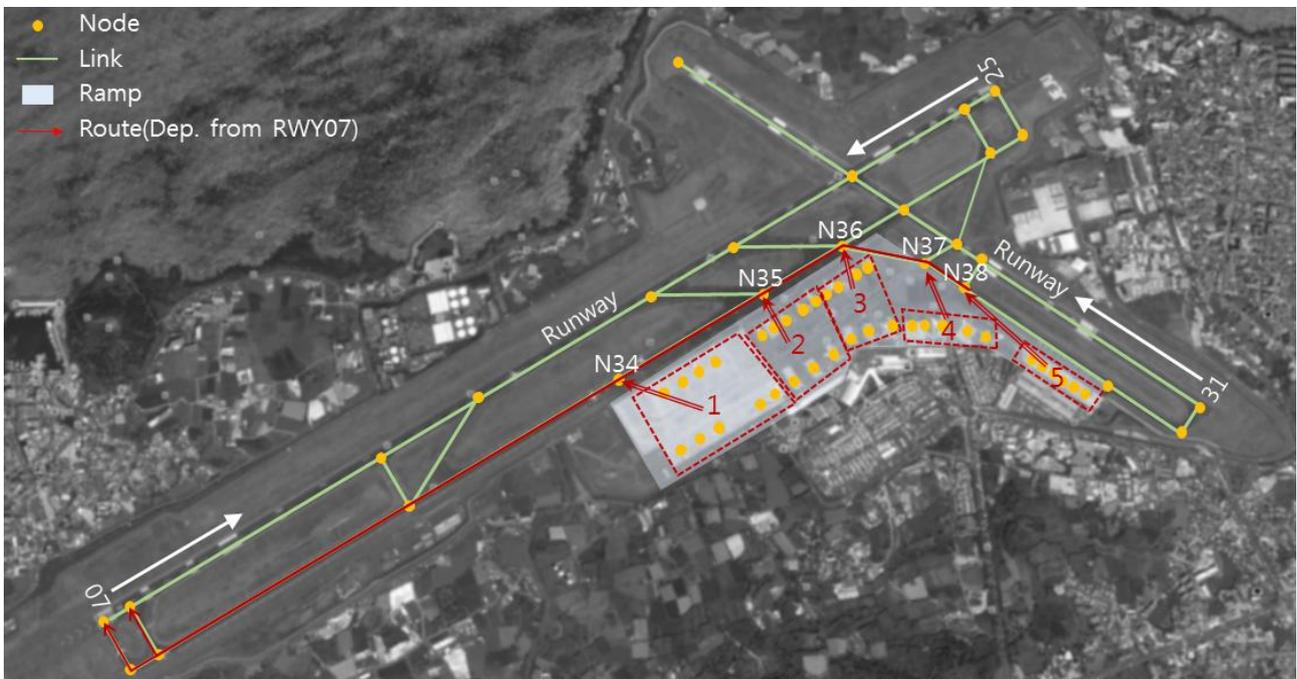


그림 7. 07번 활주로를 이용하는 경우의 출발 항공기 이동경로
Fig. 7. Paths of depart flight using runway 07.

표 1. 제약 조건에 따른 시뮬레이션 결과

Table 1. Simulation results by constraints change.

Transit time at a entry node of taxiway: 10 sec			
*Transit time	10 sec	5 sec	1 sec
Taxi speed			
5 knots	2533.518	2533.423	2529.114
10 knots	904.6934	902.6034	900.9392
15 knots	686.4599	686.2409	686.2384
20 knots	578.8443	578.4258	578.4039
Transit time at a entry node of taxiway: 5 sec			
*Transit time	10 sec	5 sec	1 sec
Taxi speed			
5 knots	2217.701	2251.246	2251.197
10 knots	894.5255	962.9927	961.3187
15 knots	684.2044	684.2044	684.2044
20 knots	537.2238	836.7956	536.7518
Transit time at a entry node of taxiway: 1 sec			
*Transit time	10 sec	5 sec	1 sec
Taxi speed			
5 knots	2173.978	2338.769	2335.63
10 knots	819.8005	838.3333	810.691
15 knots	646.9002	646.4745	646.455
20 knots	534.0657	533.6375	533.6058

*Transit time: Transit time at other intersection nodes

그림 8-11은 표 1의 여러 케이스 중 모든 교차로(유도로 진입 점 포함) 통과시간이 5초, 항공기 이동 속도가 10 knots일 때의 결과 중 일부 링크의 항공기 수를 시간에 따라 나타낸 것이다. 그래프의 x축은 시간, y축은 링크 내 항공기 수를 나타낸다. 항공기 수가 음수로 나타나는 부분은 3-1에서 언급한 링크의 방향성에 따른 것으로, 항공기가 해당 링크의 음의 방향으로 이동하는 경우이다. 그림 8-11에서 알 수 있듯이 주어진 제약조건인 링크의 최대 수용량을 넘지 않는 것을 알 수 있다. 그림 10-11은 활주로 진입 바로 전 링크의 항공기 수 변화 그래프이다. 시나리오 작성 시에 설정해준 ADR, AAR을 만족하기 위해서는 활주로에서 이착륙 하는 항공기 사이의 시간 간격이 최소 120 초 이어야 하며, 그림 10와 11에서 이를 만족함을 확인할 수 있다. 그림 12는 동일 케이스의 지연 시간을 히스토그램으로 나타낸 것으로, 주로 10-20분 사이의 지연이 발생하는 것을 확인했다.

표 2는 이동 속도 10 knots, 교차로 통과시간 5초일 때의 케이스를 항공기 이동 속도가 항상 일정한 경우와 이동 속도를 최대 5% 증가, 최소 10% 감소 가능한 경우의 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 속도 변화가 가능한 경우에 평균 지연시간이 보다 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 속도 변화에 따라 항공기가 링크를 이동할 수 있는 시간 구간이 속도가 일정한 경우보다 넓어지기 때문이며, 실제 상황에서도 항공기가 유도로 내에서 타 항공기가 지나가는 것을 기다리기 위해 멈추는 경우가 발생하기 때문에 이 경우가 실제와 더 유사하다고 판단된다.

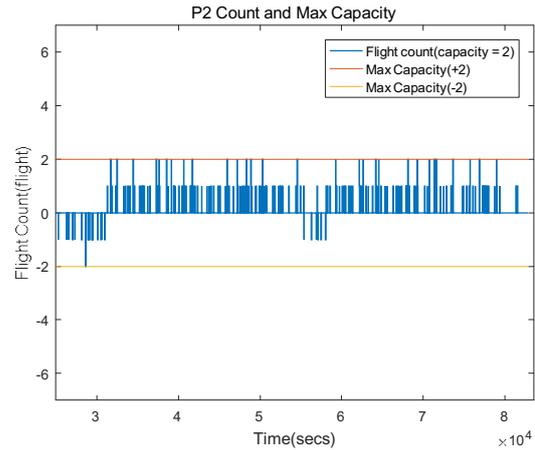


그림 8. 링크 P2의 항공기 수 변화
Fig. 8. Change of flight count in link P2.

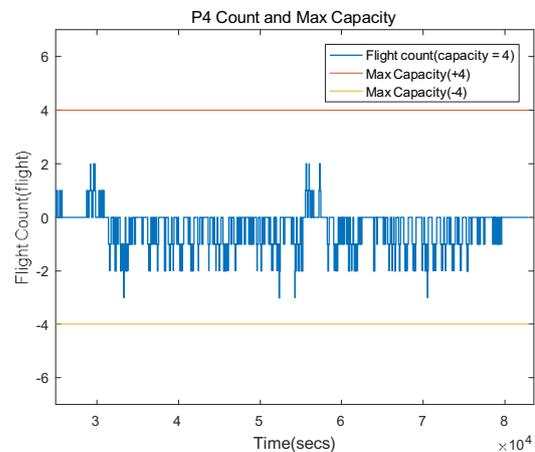


그림 9. 링크 P4의 항공기 수 변화
Fig. 9. Change of flight count in link P4.

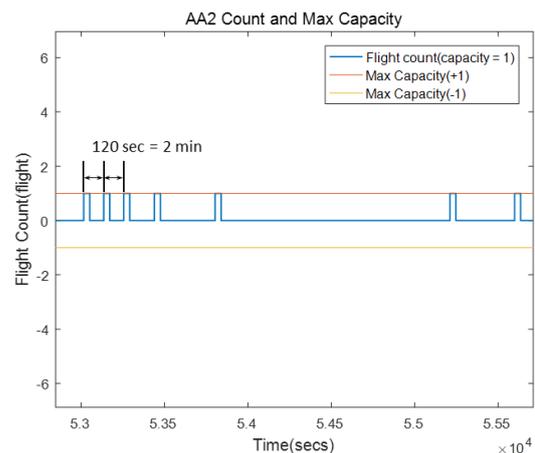


그림 10. 링크 AA2의 항공기 수 변화
Fig. 10. Change of flight count in link AA2.

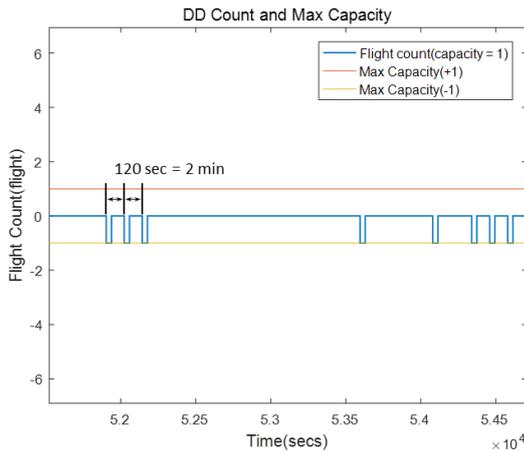


그림 11. 링크 DD의 항공기 수 변화
 Fig. 11. Change of flight count in link DD.

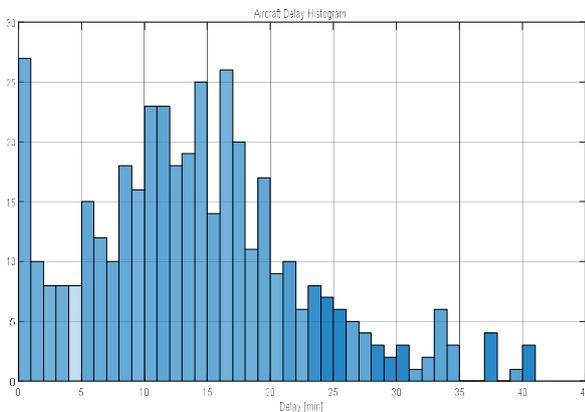


그림 12. 항공기 지연 시간 히스토그램
 Fig. 12. Aircraft delay histogram.

표 2. 속도 변화의 유무에 따른 시뮬레이션 결과
 Table 2. Simulation results with or without speed change.

Speed change	O	X
Taxi speed		
5 knots	1709.382	2251.246
10 knots	639.0827	962.9927
15 knots	613.2457	684.2044
20 knots	517.1971	536.7956

V. 결 론

본 논문에서는 선입-선처리 알고리즘을 항공기 지상 이동 스케줄링에 도입하여, 기존에 공역 상에서의 스케줄링을 위해 개발한 스케줄러의 이용 범위를 확대하였다. 지상 이동에 있어 추가적으로 고려해야할 제약 조건인 링크의 방향성과 교차로 처리 등을 스케줄링 알고리즘 내에서 어떻게 처리하였는지 설명하고, 테스트 시나리오를 작성하여 개발한 스케줄러가 해당 제

약조건들을 만족하는 것을 확인하였다. 최종적으로 제주 공항의 항공기 출·도착 실 데이터인 FOIS로부터 실제와 동일한 시나리오를 작성하여 스케줄링을 수행하였다. 스케줄링 결과, 항공기 이동 속도가 10~15 knots인 경우에 개발한 스케줄러를 통해 산출된 평균 지연시간과 실제 평균 지연시간의 차이가 미미한 것을 확인하였다. 또한 이동 속도 변화 유무에 따라 스케줄링 결과가 바뀌며, 속도 변화가 있는 경우에 보다 개선된 결과를 제공할 수 있음을 확인하였다.

향후 다양한 일자의 FOIS 데이터를 이용하여 여러 시나리오를 작성하여 반복적으로 시뮬레이션을 수행할 예정이며, 시뮬레이션을 통해 개발한 스케줄러의 보완을 반복할 예정이다. 또한 도착 항공기에 대한 우선순위 부여와 추가적으로 스케줄러에 추가될 기능 등에 대해 고려할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부의 ‘항공기 출발 및 도착 통합 관리 연구 (과제번호: 16ATRP-C088155-03)’에 의하여 이루어진 연구로써, 관계부처에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] M. Hayashi, T. Hoang, Y. Jung, W. Malik, H. Lee, and V. L. Dulchinos, “Evaluation of pushback decision-support tool concept for charlotte douglas international airport ramp operations,” in *10th USA/Europe ATM R&D Seminar (ATM2015)*, Lisbon: Portugal, June 23-26, 2015.
- [2] Y. Eun, D. Jeon, H. Lee, Z. Zhu, Y. C. Jung, M. Jeong, H. Kim, E. Oh, S. Hong, and J. Lee, “Operational characteristics identification and simulation model verification for Incheon international airport,” in *16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, Washington, D.C., 2016
- [3] C. Park, H. T. Lee, and L. A. Meyn, “Computing flight departure times using an advanced first-come first-served scheduler,” in *12th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference and 14th AIAA/ISSM*, Indianapolis: IN, pp. 1-8, 2012.
- [4] B. Park, and H. T. Lee, “Development of a first-come first-served departure scheduler,” in *7th Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT)*, Cairn: Australia, Nov. 25-27, 2015.
- [5] S. Kang, B. Park, and H. T. Lee, “First-come first-served airport surface movement scheduling considering link directionality,” in *2016 The Korea Navigation Institute*

Conference, Seoul: Korea, pp. 187-189, 21 Oct. 2016.

- [6] J. Montoya, Z. Wood, and S. Rathinam, "Runway scheduling using generalized dynamic programming," in *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Portland: OR, 2011.
- [7] G. Gupta, W. Malik, and Y. Jung, "A mixed integer linear program for airport departure scheduling," in *AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, Hilton Head: SC, Sep. 2009.
- [8] L. Cook, S. Atkins, and Y. Jung, "Improved prediction of gate departure times Using pre-departure events," in *AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, Anchorage: AK, pp. 14-19, Sep. 2008.



강 선 영 (Seon-Young Kang)

2015년 2월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학사)
2015년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 항공우주공학과 석사과정
※ 관심분야 : 항공교통



박 배 선 (Bae-Seon Park)

2014년 2월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학사)
2014년 2월 ~ 현재 : 인하대학교 항공우주공학과 통합과정
※ 관심분야 : 항공교통



이 학 태 (Hak-Tae Lee)

2000년 12월 : 미국 스탠포드대학교 항공우주공학과 (공학석사)
2006년 1월 : 미국 스탠포드대학교 항공우주공학과 (공학박사)
2013년 9월 ~ 현재 : 인하대학교 항공우주공학과 조교수
※ 관심분야 : 항공교통, 공탄성, 전산유체