

공항 지상이동 경로 탐색을 위한 실용 알고리즘 개발

Development of a Practical Algorithm for Airport Ground Movement Routing

윤석재¹ · 구성관² · 백호중^{3*}

¹한국항공대학교 대학원 항공교통물류학과

²한서대학교 항공학부 항공레저산업학과

³한국항공대학교 항공교통우주물류법학부

Seokjae Yun¹ · SungKwan Ku² · Hojong Baik^{3*}

¹Department of Air Transport, Transportation and Logistics, Graduate School, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do 412-791, Korea

²Department of Aviation Leisure & Industry Management, School of Aeronautical Science, Hanseo University, Chungcheongnam-do 357-953, Korea

³School of Air Transport, Transportation, Logistics and Air & Space Law, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do 412-791, Korea

[요 약]

지속적으로 증가하고 있는 항공수요에 따라, 공항운영 측면에서 이동지역 내 항공기 이동에 대한 효율성을 증대할 수 있는 방안의 중요성이 대두되고 있다. 본 논문은 공항 이동지역을 운항하는 항공기에게 최단경로를 적시에 제공하여 공항운영의 효율성을 증대시키기 위한 경로 탐색 알고리즘을 제시하고자 한다. 기존 문헌들에서 여러 알고리즘이 개발되었는데, 대표적으로 Dijkstra 알고리즘 A* 알고리즘이 있다. Dijkstra 알고리즘은 상대적으로 느린 연산속도로 인해 공항구조가 복잡해질 경우 최단경로를 적시에 제공하기 어려울 수 있다는 단점이 있으며, A* 알고리즘은 최적성을 보장하지 못한다는 단점이 있다. 본 논문에서는 두 알고리즘을 병합하여, 각 알고리즘의 단점을 보완한 새로운 Hybrid A* 알고리즘을 제시하였다. 성능분석 결과, Hybrid A* 알고리즘은 경로 탐색에 있어 빠른 연산속도와 최적성이 개선됨을 확인하였다.

[Abstract]

Motivated by continuous increase in flight demand, awareness of the importance in developing ways to increase aircraft operational efficiency on the airport movement area has been raised. This paper proposes a new routing algorithm for providing the shortest path in a right time, enhancing the aircraft movement efficiency. Many researches on developing algorithms have been performed, for example, Dijkstra algorithm and A* algorithm. The Dijkstra algorithm provide optimal solution but could possibly provide it with a cost of relatively longer computation time. On the other hand, A* algorithm does not guarantee the optimality of a solution. In this paper, we suggest a Hybrid A* algorithm, incorporating both algorithms to eliminate the weaknesses. Rigorous test shows the proposed Hybrid A* algorithm may achieve shorter computing time and optimality in searching the shortest path.

Key word : Routing algorithm, Dijkstra algorithm, A* algorithm, Hybrid A* algorithm, Airport movement area.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2015.19.2.116>



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 7 April 2015; Revised 9 April 2015

Accepted (Publication) 27 April 2015 (30 April 2015)

*Corresponding Author; Hojong Baik

Tel: +82-2-300-0373

E-mail: hbaik@kau.ac.kr

I. 서론

지속적으로 증가하고 있는 항공수요에 따라 공항운영 측면에서 안전수준을 유지하면서 이동지역 내 항공기 이동시간에 대한 효율성을 증대할 수 있는 방안의 중요성이 대두되고 있다.

날씨, 교통밀도, 공항의 구조에 대응하여 공항 이동지역 내 최적의 효율적 관리를 통하여 안전성과 효율성을 증대시킬 수 있는 A-SMGCS (airport surface movement guidance and control System) 관련 연구가 국제민간항공기구(ICAO)와 유럽의 EMMA (european airport movement management by A-SMGCS) 프로젝트로 수행되고 있다[1]. 이와 별개로 공항 운영의 효율화를 위하여 항공기 출발 준비 단계부터 이륙까지의 관리를 위한 Airport CDM (collaborate decision making)의 연구를 수행하여 정확한 지상이동에 대한 지상이동시간 (taxi time) 및 이륙가능 시간을 출발 전에 산출하고 이를 고려하여 항공기를 출발시키는 것을 2009년부터 독일 뮌헨공항에서 적용 중이다[2]. 미국 NASA에서도 공항 지상이동의 효율성 증대를 위하여 SARDA (spot and runway departure advisory) 프로그램을 개발하였다.

지상이동의 효율적인관리를 위해서는 항공기가 실제 교통 환경에서 원활한 흐름을 가지며 이동할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 항공기가 이동 중에 실시간으로 다른 항공기의 상대적 위치 및 교통현황을 고려한 효율적인 지상이동 경로의 적용이 필요하다.

본 논문에서는 공항 이동지역에서 항공기의 효율적인 이동을 위하여 항공기 현위치(apron, spot, gate, 활주로 도착 후 지점 등)에서 목적 지점(이륙 활주로 시단, apron, spot, gate 등)까지 최적화된 유도로(taxiway) 경로를 산출하는 새로운 알고리즘을 제시하고, 기존 경로 탐색 알고리즘과의 비교를 통하여 새로운 알고리즘에 대한 효율성을 제시하였다.

본 논문의 구성은 제2, 3장에서 공항 이동 지역에 대한 개요(2장) 및 경로 탐색 알고리즘에 대한 개념(3장)을 설명하고, 제4장에서 새로운 알고리즘 개발에 대한 설명과 기존 알고리즘과의 비교를 통한 계산 효율성에 대하여 기술하였다.

II. 공항의 이동 지역

2-1 공항 지상 이동

공항의 지상에는 항공기, 지상 조업 장비와 같은 지상 이동체 등이 유도로(taxiway) 등을 따라서 복잡하게 움직이고 있다. 항공기는 승객 및 화물을 상·하기를 하기 위한 지점부터 다른 지점 또는 활주로 등으로 이동하기 위해서 항공기가 자력으로 또는 견인차량(towing car) 등의 지상 조업 장비에 의해서 이동되며, 지상 조업 장비 중 일부는 필요에 의해서 항공기 이동 지역에서 이동한다.

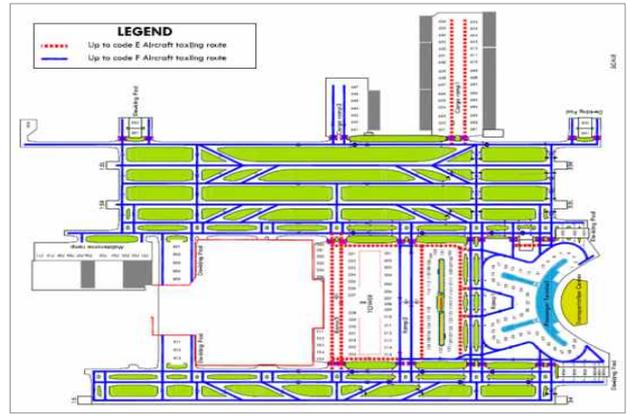


그림 1. 인천국제공항 이동지역
Fig. 1. Incheon International airport movement area.

2-2 이동 지역의 정의

공항 이동 지역이란 기동지역 (maneuvering area)과 이동지역 (movement area)으로 구분된다. 기동지역은 항공기 주기장 (apron)을 제외한 항공기의 이륙, 착륙 및 지상 이동에 사용되는 지역으로 활주로 및 유도로 지역을 말하며, 차량 및 인원의 출입에 대하여 엄격한 통제가 시행되는 비행장 내 구역이고, 이동지역은 기동지역과 항공기 주기장을 포함하는 것으로서 항공기 이륙, 착륙 및 지상이동에 이용되는 비행장의 내 구역이다 [3]. 즉, 이동지역은 기동지역을 포함하는 것으로 항공기가 지상에서 이동하는 모든 구역을 말한다. 이동지역의 모든 항공기는 이동을 위한 유도로(taxiway) 및 유도선(taxi lane)을 따라서 움직이며, 통상적으로 항공기 이동을 위하여 사용되는 모든 길은 유도도로로 통칭한다. 그림 1은 인천국제공항의 이동지역을 나타내는 것으로, 터미널을 제외한 공항의 모든 지상이 이동지역에 포함된다.

2-3 공항 이동 지역의 통제

공항 지상 이동의 통제는 일반적으로 관제탑의 지상관제사 (ground controller)가 담당하며, 이착륙 하는 항공기와 공항 주변 비행 항공기를 담당하는 국지관제사(local controller)와의 사전에 정의된 위치에서 항공기를 이양(hand off)시킨다.

지상 이동 항공기의 충돌방지는 조종사의 육안회피(sea and avoid)를 원칙으로 하지만, 항공기가 이동하는 유도로의 배정 업무와 저시정 상황 등에서는 관제사의 판단과 지시에 따른 충돌 방지를 위한 유도도로 안전을 보장하는 이동을 해야 한다. 특히, 유도도로가 복잡한 대형 공항에서는 주변 다른 항공기의 현황 및 예상 경로 상에 발생할 교통 상황의 예측 없이 운영되는 경우 교통상황에 따른 지상 이동 시간(taxi time)이 최소화되는 최적의 이동 경로가 필요하며, 따라서 이동지역의 효과적인 관리를 위해서는 항공기 출발 전 또는 항공기 이동 중에 지속적으로 가장 최적화된 경로 정보가 필요하다.

III. 경로 탐색 알고리즘

3-1 경로 탐색 알고리즘을 위한 자료구조

경로 탐색 알고리즘 구현은, 공항 이동지역에 대한 네트워크(또는 그래프)를 구축단계로부터 시작된다[4]-[6]. 네트워크는 노드와 링크(또는 아크)로 구성되고 $G(N,L)$ 또는 $G(N,A)$ 로 표현된다[4],[6]. 이를 그림으로 표현하면 그림 2와 같으며, 원은 노드를 화살표는 링크를 의미한다. 또한, 링크에 표시된 숫자는 각 노드간의 비용(또는 거리 등)을 의미한다.

각 노드 및 링크는 x, y 좌표로 구성되며, 본 논문에서는 사례 연구를 위해 인천국제공항의 이동지역 네트워크를 구축하여 사용하였다. x, y 좌표로 구성된 네트워크 정보만을 활용할 때, 한 노드로부터 다수의 링크가 연결되는 경우와 정방향/역방향 사용에 따른 통행비용이 다른 경우, 노드 정보의 중복성이 발생하게 된다. 알고리즘 수행 시 참조해야 하는 변수, 즉 노드 정보의 수는 알고리즘 성능에 영향을 미치기 때문에, 알고리즘이 효율적으로 수행되기 위해서는 네트워크 자료 구조를 알맞은 형태로 변형해야한다.

경로 탐색 알고리즘을 수행하기 위해서 일반적으로 사용되는 자료 구조로는 노드간의 연결 정보 및 비용(또는 거리)정보를 행렬 형태로 표현하는 인접행렬(adjacent matrix, A)이 일반적으로 활용되며[4],[6],[7], 이는 표 1과 같다.

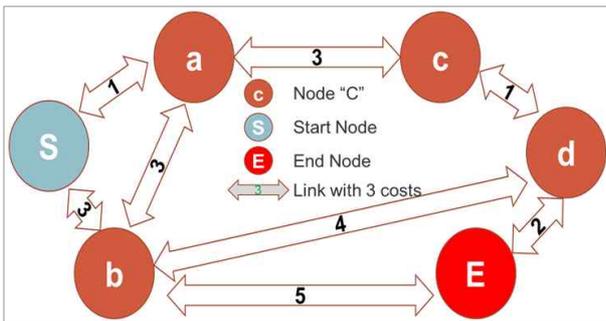


그림 2. 노드와 링크의 구성
Fig. 2. Node and link system.

표 1. 노드 비용 인접행렬
Table 1. Cost adjacent matrix of nodes.

From / To	S	a	b	c	d	E
S	inf	1	3	inf	inf	inf
a	1	inf	3	3	inf	inf
b	3	3	inf	inf	4	5
c	inf	3	inf	inf	1	inf
d	inf	inf	4	1	inf	2
E	inf	inf	5	inf	2	inf

표 1은 그림 2의 네트워크를 인접행렬로 표현한 것으로, 노드 S와 노드 a는 직접 연결되어 있어 링크가 존재하며, 이 링크를 사용할 경우 발생하는 비용이 1임을 알 수 있다. 또한, 노드 S와 노드 c는 연결되어있지 않은 것도 확인 할 수 있다.

본 논문에서는 인천국제공항의 네트워크 비용을 거리(m)로 표현하였으며, 고속탈출 유도도와 같이 일방통행 만 가능한 유도도 정보를 포함해야 되는 경우를 대비하여 $A_{ij} \neq A_{ji}(i \neq j)$ 인 비대칭 인접행렬을 구축하였다. 이때 사용된 링크의 개수는 총 537개 이다.

3-2 경로 탐색 알고리즘 종류 및 특징

1) Dijkstra 알고리즘

Dijkstra(1959)가 제시한 Dijkstra 알고리즘은 대표적인 경로 탐색 알고리즘 중 하나이다. 주어진 기점 노드부터 최종적인 종점 노드에 도달할 때까지 모든 노드에 대하여, 기점 노드부터 거리를 나타내는 비용 매트릭스의 정보를 통하여 최단경로를 탐색한다[8]. Dijkstra 알고리즘은 주어진 기점으로 부터 다른 노드간의 모든 경로를 탐색하는 소위 ‘One to All’ 알고리즘으로, 탐색결과로 항상 최단경로를 도출하며 $O(N^2)$ 의 계산 복잡성(computational complexity) 갖는다[4],[9].

그림 3은 Dijkstra 알고리즘을 수행한 결과를 보여주고 있다. 굵은 삼각형은 연산이 수행된 노드의 위치를 보여주고 있으며, 선택된 선은 최종적으로 도출된 최적 경로를 의미한다. 그림 3에서 볼 수 있는바와 같이 Dijkstra 알고리즘은 주어진 기-종점 노드의 최적 경로탐색을 수행하는 동안, 기-종점 노드 이외에 불필요한 노드 정보를 포함하여 연산되며, 또한 그 정보의 분포가 공항 전체에 위치하고 있는 것을 확인 할 수 있다.

2) A* 알고리즘

Hart, P. E. 외(1968)가 제시한 A* 알고리즘은 휴리스틱 경로 탐색 알고리즘으로 인접 노드로 경로탐색을 진행할 때, 이동시 발생하는 비용인 $g(n)$ 와 해당 인접 노드로부터 종점 노드까지의 예상비용인 $h(n)$ 의 합을 수식 1과같이 계산하여, 결과 F가 최소가 되는 인접 노드를 선택하여 목적 노드까지의 경로를 탐색한다[10],[11].

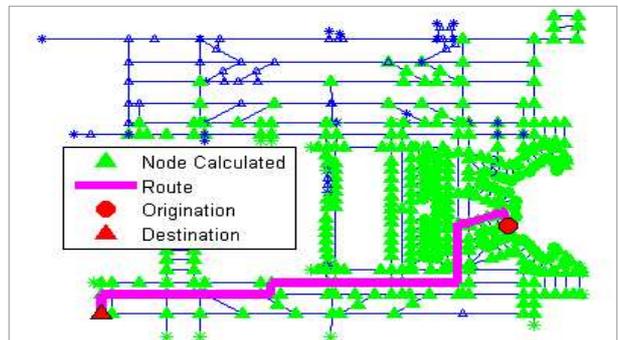


그림 3. Dijkstra 알고리즘 경로 탐색 결과
Fig. 3. Routing result of Dijkstra algorithm.

$$F(n) = g(n) + h(n) \quad (1)$$

수식 1의 $g(n)$ 은 Dijkstra 알고리즘과 동일한 값으로 기점으로부터 노드 n 까지의 비용을 의미한다. 또한 $h(n)$ 은 휴리스틱 비용 함수로 노드 n 부터 목적 노드까지의 예상 비용을 의미하며, 일반적으로 노드 n 부터 종점 노드까지의 기하학적 거리로 계산된다. 이를 통하여 기점 노드와 종점 노드를 연결하는 절대적인 직선상에 위치한 인접 노드를, 우선 탐색할 수 있도록 하여 연산시간을 단축하는 효과를 얻을 수 있다.

그림 4는 A* 알고리즘을 수행한 결과를 보여주고 있다. 굵은 삼각형은 연산이 수행된 노드를, 선택된 선은 최종적으로 도출된 최단 경로를 의미한다. 그림 4에서 볼 수 있는바와 같이, 연산이 수행된 노드들이 최종적으로 도출된 경로의 주변에 분포하는 것을 확인할 수 있다. 이는 목적노드가 위치한 방향으로 경로탐색을 수행하여 연산시간을 줄일 수 있다는 것이 A* 알고리즘의 큰 장점이나, 항상 최적성을 보장하지 않는다는 단점이 있다[10].

3) 기타 알고리즘

대표적인 경로 탐색 알고리즘인 Dijkstra와 A* 알고리즘 외에 많은 연구 분야에서 활용되는 알고리즘으로 TSP (traveling salesman problem)과 D* 알고리즘 등이 있다.

TSP 알고리즘은 모든 노드를 거쳐 기점으로 돌아와야 하는 물류 배송 경로 및 순서 배정 문제를 해결하는 알고리즘 중 하나로, MIP (mixed integer problem)의 대표적인 방법이다. 순환 경로, 즉 노드를 모두 경유하는 경로가 결과로 도출되기 때문에 지상이동 경로를 추출하기 위해서 순환 경로에서 목적지까지의 경로 결과를 추출해야 하는 재처리 과정이 필요하다. 또한 a, b, c, d, e라는 노드가 주어졌을 때, a-b-a 라는 경로와 c-d-e-c 라는 경로가 분리되어 결과로 도출되는 Sub-tour 현상을 해결하기 위해, 추가되어야 하는 제약조건의 경우의 수가 많아져 문제가 복잡해진다[12]. 이는 공항 이동 지역에서 이동하는 항공기 등에게는 적용하기 적합하지 않은 것으로 판단된다.

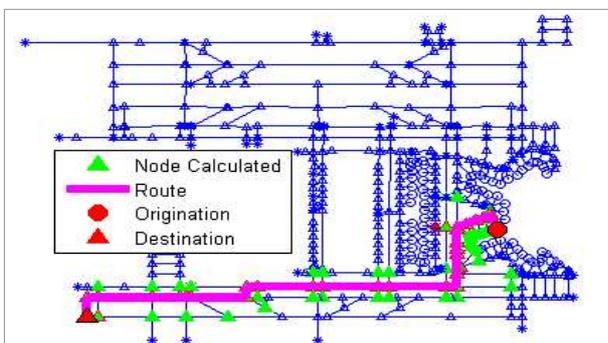


그림 4. A* 알고리즘 경로 탐색 결과
Fig. 4. Routing result of A* algorithm.

표 2. 경로 탐색 알고리즘 비교

Table 2. Comparison of routing algorithm characteristics.

구분	장점	단점
Dijkstra	최적성이 보장됨 One to All 경로 연산가능	연산속도가 느림
A*	경로탐색에 방향성 제공 연산속도가 빠름	최적성이 보장되지 않음
TSP	순환경로 도출	NP-완전문제 발생 Sub-tour 회피 제약조건 필요
D*	실시간 적용가능 객체에 탑재하여 수행	장애물 측정성능 및 A* 알고리즘성능에 영향 연산속도가 느림

D* 알고리즘은 A* 알고리즘을 동적(실시간)으로 활용하기 위해 A. Stentz(1995)가 제시한 알고리즘으로, 일반적으로 경로 탐색을 요하는 객체에 직접 탑재되어 사용된다. 주로 로봇에 탑재되어 장애물을 회피하며 목적지까지 최단경로를 실시간으로 탐색하기 위해 사용된다. A* 알고리즘 보다 연산속도가 느리며, 수시로 동적계획을 위한 연산을 수행하기 때문에, 비행 정보와 레이더 등 여러 시스템이 통합되어있는 비행장 관제 시설에 설치될 경우 시스템 전반의 성능이 저하될 수 있다. 이를 해결하기 위해 객체, 즉 항공기에 직접 탑재되어 사용되어야 하지만 이를 적용하기에는 어려움이 있다. 또한 A* 알고리즘을 기초로 하므로 최적성 보장에 관한 문제가 동일하게 발생하며, 장애물 탐색 범위 성능에 따라 최적성이 좌우 된다[13].

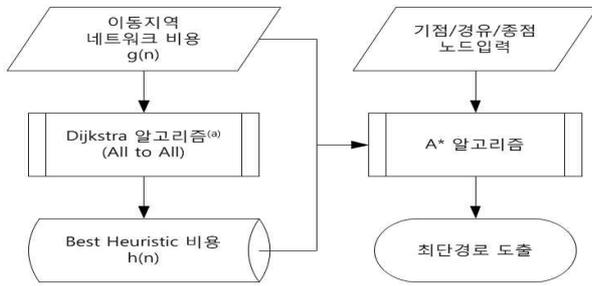
4) 알고리즘의 특징 비교

표 2는 본 논문에서 제시한 알고리즘에 대한 특징 및 단점을 비교한 것이다. 기존에 개발된 알고리즘은 각각의 특징이 있으며, 해당 알고리즘을 사용하는 환경에 따라 알고리즘을 선택해야 할 것으로 판단된다. 공항의 이동지역과 같이 다양한 요구사항이 고려되어야 하는 복잡한 교통 환경에서는 하나의 알고리즘만 사용하기에는 속도 및 최적성에 있어 한계가 있으며, 일부 알고리즘의 장점 들을 결합한 새로운 개념의 알고리즘이 필요하다.

IV. Hybrid A* 알고리즘 개발

4-1 Hybrid A* 알고리즘 개요

공항 이동지역 내 운항 효율성을 증진시키기 위해서, 항공기의 원활한 이동을 위한 최적화된 최단경로가 적시에 관제사 또는 조종사 등에게 전달되어야 한다. 이때에는 최적성이 보장되며 연산속도가 빠른 알고리즘의 적용이 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 1) 항상 최적값을 보장하고 시점부터 모든 중점까지의 경로를 제공하는 Dijkstra 알고리즘의 장점과 경로 탐색에 방향성을 제공하는 A* 알고리즘의 장점을 혼합한 Hybrid A* 알고리즘을 그림 5와 같이 제시한다.



(a) 유도로 폐쇄 등 이동지역의 변화가 발생한 경우에만 간헐적으로 수행

그림 5. Hybrid A* 알고리즘 구성도
Fig. 5. Block diagram of hybrid A* algorithm.

그림 5에서 확인할 수 있는바와 같이 Hybrid A* 알고리즘은 Dijkstra 알고리즘을 활용하여 최적화된 휴리스틱 비용 매트릭스를 사전에 구축한다. 이때, 휴리스틱 비용 매트릭스 구축은 사전에 구축되어 사용되는 것을 기본으로 하되, 유지보수로 인한 유도로 폐쇄와 같은 네트워크상의 변화가 발생한 경우 갱신되는 자료이다. Dijkstra 알고리즘은 항상 최단경로를 도출하기 때문에 휴리스틱 매트릭스는 최단 잔여비용으로 구성되며, 이를 활용하여 A*알고리즘의 최적성을 보장하고자 하였다. 완성된 Hybrid A* 알고리즘은 사용자가 지정하는 기점/경유점/중점을 요구사항으로 입력하고, 조건을 만족하는 최단경로탐색을 제시할 수 있도록 설계되었다.

4-2 Hybrid A* 알고리즘 개발 및 적용

본 논문에서 제시한 Hybrid A* 알고리즘의 성능평가를 위해 인천국제공항을 사례공항으로 선정하였으며, 그림 6은 인천국제공항의 이동지역과 Mathwork 사의 MATLAB 프로그램으로 구현된 GUI를 나타낸 것이다. GUI를 통해 사용자는 임의의 기-중점 및 경유점을 선택할 수 있도록 설계되었으며, Hybrid A* 알고리즘의 성능평가를 위해 선택된 기중점간의 최단 경로, 이동거리 및 연산시간 등 최단경로 산정결과를 자동적으로 표출할 수 있는 기능을 추가로 구현하였다.

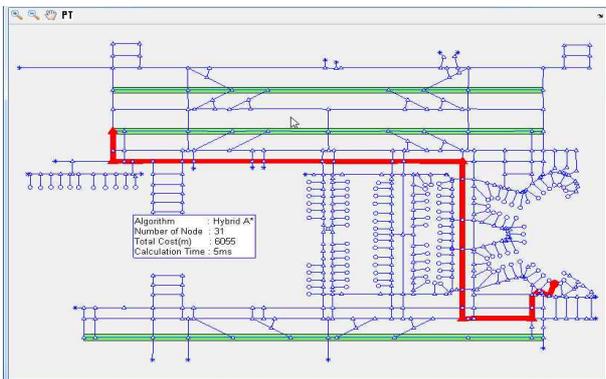


그림 6. Hybrid A* 알고리즘 구현
Fig. 6. Hybrid A* algorithm development.

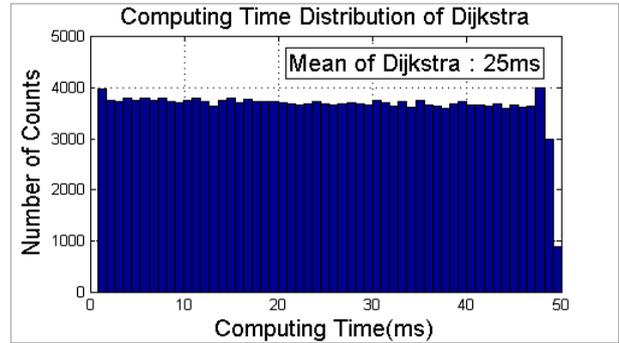


그림 7. Dijkstra 알고리즘 연산시간 분포
Fig. 7. Computing time distribution of Dijkstra algorithm.

4-3 Hybrid A* 알고리즘 성능 시험

1) Dijkstra 알고리즘에 대한 성능 비교

본 논문에서 제시하는 Hybrid A* 알고리즘과의 성능 비교를 위하여 우선 기존 알고리즘의 성능을 시험하였다. Dijkstra의 알고리즘의 성능 시험을 위해 Dijkstra의 알고리즘이 구현된 MATLAB 환경에서 537개의 노드를 각각 기-중점으로 설정하고 각 노드간의 경로탐색에 소요된 총 연산시간을 측정하였다. 모든 기-중점노드의 조합인 약 288,369회 연산을 수행하였으며, 그림 7은 연산시간에 도수분포표를 나타낸 것이다.

그림 7에서 보여주는 바와 같이 Dijkstra 알고리즘은 기-중점 노드간 평균 연산 시간이 25 ms이며, 1 ms부터 50 ms 사이에서 uniform 분포의 형태를 나타내고 있다.

Dijkstra 알고리즘은 경로 탐색 종료 후 연산이 수행된 모든 노드를 목적 노드로 하는 최단 경로를 얻을 수 있어 계산 시간에 비해 많은 정보를 얻을 수 있다는 장점이 있지만, 시작 노드와 목적 노드간의 상대적 위치와 효율적인 탐색 방향에 관계없이 시작 노드로부터 모든 인접 노드에 대하여 순차적으로 탐색하는 비효율성[14]이 있는 것도 사실이다.

2) A* 알고리즘에 대한 성능 비교

A* 알고리즘의 성능을 시험하기 위하여 Dijkstra 알고리즘 성능 측정 방법과 동일한 방법을 적용하였다. 그림 8에서 나타난 바와 같이 A* 알고리즘의 각 기-중점 노드간 최단경로 탐색 소요시간은 평균 2 ms (표준편차는 0.4 ms)인 정규분포 형태를 따르고 있는 것으로 나타났다. 이는 Dijkstra 알고리즘의 평균 연산시간인 25 ms와 비교했을 때, 현저한 차이를 보이는 결과라 할 수 있다.

하지만, 인천국제공항과 같이 비격자형 네트워크에서는 노드 n으로부터 중점 노드까지의 예상 거리와 기하학적 거리가 다르기 때문에, 기하학적 거리 기반의 A* 알고리즘은 그림 9와 같이 최적화된 경로를 항상 제시하지 못할 수도 있다[11].

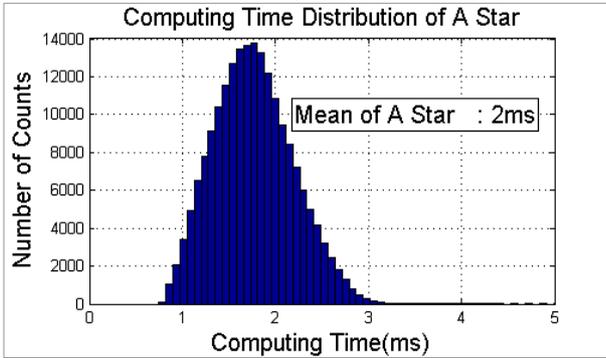


그림 8. A* 알고리즘 연산시간 분포
 Fig. 8. Computing Time Distribution of A* Algorithm

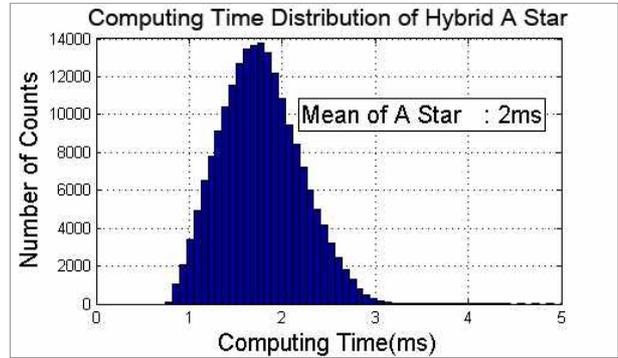


그림 10. Hybrid A* 알고리즘 연산시간 분포
 Fig. 10. Computing time distribution of hybrid A* algorithm.

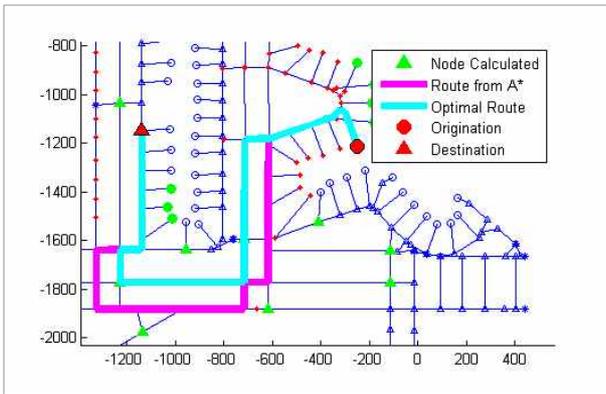


그림 9. A* 알고리즘의 sub-optimality
 Fig. 9. sub-optimality of A* algorithm.

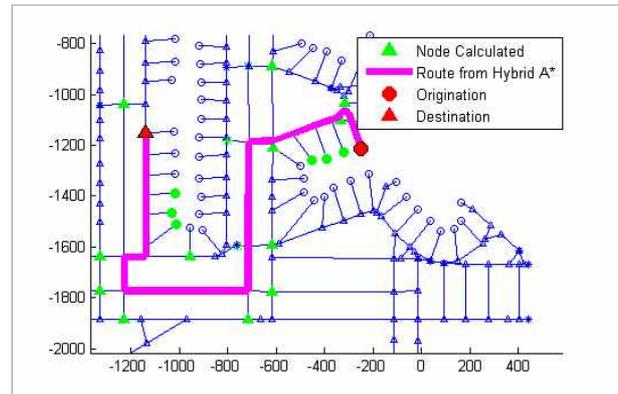


그림 11. Hybrid A* 알고리즘의 optimality
 Fig. 11. Optimality of hybrid A* algorithm.

3) Hybrid A* 알고리즘 성능 시험

본 논문에서 새로운 알고리즘으로 제시한 Hybrid A* 알고리즘에 대한 성능 시험을 위하여 앞서 제시한 알고리즘의 성능 시험 방법과 동일한 방법을 적용하였다. 그림 10에서 나타난 바와 같이 Hybrid A* 알고리즘의 탐색 소요 시간은 평균 2 ms (표준 편차는 0.4 ms)인 정규분포 형태를 따르고 있으며, A* 알고리즘과 성능차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

이는 본 논문에서 제시한 Hybrid A* 알고리즘이 A*의 장점인 연산 속도 성능을 유지하고 있음을 의미한다. 또한, 그림 11에서 보여주는 바와 같이 Dijkstra 알고리즘을 통하여 구축된 최적화된 휴리스틱 데이터베이스를 활용함으로써, Dijkstra 알고리즘의 장점인 경로 탐색의 최적성을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 공항 이동 지역에서 항공기의 효율적인 운항을 위하여, 기점 노드부터 종점 노드까지의 최단 경로를 제공하는 알고리즘에 관한 연구를 수행하였다.

경로탐색에 대표적으로 사용되는 알고리즘인 Dijkstra 알고리즘은 경로탐색의 최적성을 항상 보장할 수 있지만, 연산속도가 상대적으로 느리다는 단점이 있으며, A* 알고리즘은 속도는 빠르지만 최적성을 보장하지 않는다는 단점이 있다.

본 논문은 두 알고리즘 각각의 장점을 활용하고, 상호간의 단점을 보완하는 Hybrid A* 알고리즘을 새로운 알고리즘으로 제시하고, 인천국제공항을 대상으로 성능 시험을 수행하여 알고리즘의 연산속도와 최적성을 분석하였다.

성능 분석 결과 본 논문에서 제시한 Hybrid A* 알고리즘은 Dijkstra 알고리즘의 최적성과 A* 알고리즘의 빠른 연산속도 모두를 만족한다는 결론을 내릴 수 있었다. 이러한 Hybrid A* 알고리즘은, 빠른 연산속도로 복잡한 노드로 구성된 공항의 지상 환경에서 최단 경로를 적시에 활용할 수 있다는 점에서, 공항 이동지역 내 효율성 향상에 기여할 것으로 판단한다.

하지만, 본 논문에서 제시한 경로 탐색 알고리즘은 일방 또는 양방향통행 정보와 사용 제한 등의 정보를 가지는 유도로를 고려하여 거리(또는 비용) 기반 최단 경로를 제시할 수 있지만, 실제 항공기의 이동 시간을 고려하였을 때의 최단경로, 즉 실시간 최적 경로를 제시할 수 없다는 한계가 있다. 또한 유도로 등에서 이동 중인 다른 항공기 등에 의해 해당 시점에서 유도로의

사용 여부 및 노드 및 링크상의 교행을 예측하지 못하고, 알고리즘 연산 시점의 노드 점유 정보만을 고려한다는 점에서 한계가 있다.

이러한 한계점 등을 고려하여 실시간 경로 탐색을 위한 알고리즘 기법은 추후 연구가 필요하며, 이는 향후 연구과제로 남기고자 한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 항공안전기술개발사업 연구비지원 (14ATRP-C069188-02)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] S. K. Ku and H. J. Baik, "Case study on safety assessment standard for A-SMGCS", *The Journal of Korea Navigation Institute*, Vol. 18, No. 6, pp. 562-568, Dec. 2014.

[2] Airport CDM Team München, Airport collaborative decision making, Deutsche Flugsicherung, München, V5.0, Jul. 2009

[3] Incheon international airport coporation, SMGCS plan, IIAC, Incheon, Rev 26, Mar. 2015.

[4] H. Baik, Development of optimization and simulation models for the analysis of airfield operation, Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 2000.

[5] R. K. Ahuja, J. B. Orlin, P. Sharma, and P. T. Sokkalingam, "A network simplex algorithm with $O(n)$ consecutive degenerate pivots", *Operation Research Letters*, 30, pp. 141-148, Jan. 2002.

[6] A. F. Katsaros, Development and evaluation of novel algorithms for enhanced aircraft routing on ground, Master dissertation, University of Gothenburg, Gothenburg, Sweden, 2012.

[7] J. Y. Cai, G. Havas, B. Mans, A. Nerurkar, J. P. Seifert, and I. Shparlinski, "On routing in circulant graphs", in *Proceeding the 5th annual international Computing and Combinatorics conference*, Tokyo: Japan, pp. 360-369, Jul. 1999.

[8] E. W. Dijkstra, "A note on two problems in connexion with graphs", *Nemerische Mathematik*, Vol. 1, Issue. 1, pp. 269-271, Oct. 2010.

[9] F. S. Hussein, S. R. Douglas, V. Yannis, and S. R. Lee, "Evaluation of multicast routing algorithms for real-time communication on hight-speed networks", *IEEE Journal on Selected Area in Communication*, Vol. 15, No. 3, pp. 332-345, Apr. 1997.

[10] P. E. Hart, N. J. Nilsson, and B. Raphael, "A formal basis for the heuristic determination of minimum cost path", *IEEE Transactions of Systems Science and Cybernetics*, Vol. ssc-4, No. 2, pp. 100-107, Jul. 1968.

[11] S. H. Ok, J. H. Ahn, S. Kang, and B. Moon, "A combined heuristic algorithm for preference-based shortest path search", *The Institute of Electronics and Information Engineers*, Vol. 47, No. 8, pp. 74-87, Aug. 2010.

[12] S. Arora, "Polynomial time approximation schemes for euclidean traveling salesman and other geometric problems", *Journal of the ACM(association for computing machinery)*, Vol. 45, No. 5, pp. 753-782, Oct. 1998.

[13] A. Stentz, "The focussed D* algorithm for real-time replanning", in *Proceeding of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Montreal: Canada, pp. 1652-1659, 1995.

[14] S. Lee, K. Jung, B. Hwang, and W. Jung, "Modified bidirectional A* algorithm for optimal car route guidance search," in *Autumn Conference of Korean Society for Internet Information*, Seoul: Korea, pp. 44-45, 2002.



윤 석 재 (Seokjae Yun)

2014년 2월 : 한국항공대학교 항공교통물류학과 (이학석사)
2014년 3월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공교통물류학과 박사과정
※ 관심분야 : 항공교통관리, 항공교통시뮬레이션, 최적화, 공역설계, 공항설계



구 성 관 (Sungkwan Ku)

2014년 : 한국항공대학교 항공교통물류학과 박사수료
2009년 9월 ~ 2014년 2월 : 한국산업기술시험원 기계시스템본부 연구원
2014년 2월 ~ 현재 : 한서대학교 항공레저산업학과 조교수
※ 관심분야 : 항공교통, 시험평가인증, 시뮬레이션, 안전성평가



백 호 종 (Hojong Baik)

2000년 : Virginia Tech (공학박사)
2007년 8월 ~ 2010년 8월 : 미주리 주립대 조교수
2010년 8월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공교통우주물류법학부 부교수
※ 관심분야 : 항공교통, 시뮬레이션, 최적화(Optimization), ATM