□ 論 文 □

고속탈출유도로 최소 갯수 및 위치 결정 모형

—A Model for Determining the Minimum Number of High Speed Exits and Their Locations for Airports—

김 병 종
(한국항공대학교 항공교통학과 전임강사)

목 차

Ⅰ. 서론
1.1 연구배경
1.2 연구목적 및 범위
Ⅱ. 문헌조사
Ⅲ. 모형개발
3.1 예비분석
3.2 모형의 구성 및 알고리즘
Ⅳ. 예제
Ⅴ. 요약 및 결론

ABSTRACT

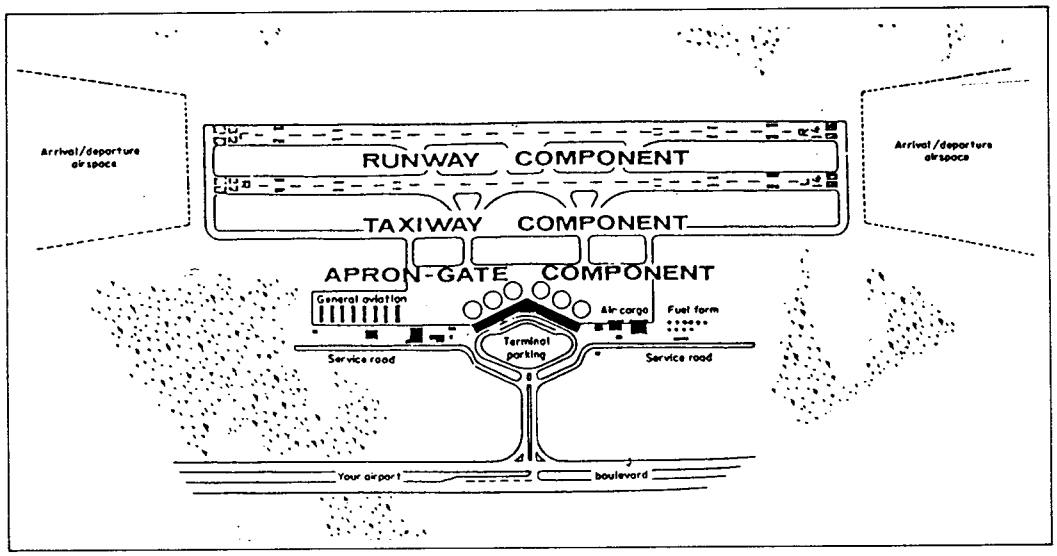
Proposed are a model and its solution algorithm for determining the minimum number of high speed exits and their locations. While the previous researches on exit location aimed to minimize the average runway occupancy time (ROT) of an aircraft mix, the proposed approach is to find the minimum number of exits required to meet the maximum allowable ROT. The rationale behind the approach is that the capacity of a runway increases as the ROT decreases down to some value, but not any more even though the ROT keep decreasing below the value. Hence, a maximum allowable ROT might be set up without declining the capacity. The problem is transformed into a shortest path problem on a specially constructed network and Dijkstra's labeling algorithm is employed to solve the problem. A hypothetical example is provided to illustrate how the algorithm solves the problem.

Ⅰ. 서론

1.1 연구배경

타 교통수단과 마찬가지로 항공교통에 있어서도 하부구조의 교통량 처리능력--'용량'이라고 표현됨--이 교통량에 비하여 부족할 때 혼잡과 지체가 일어나 안전에 위협이 될뿐만 아니라 막대한 경제적 손실을 초래한다. 미국의 경우 항공교통체계에서 일어나는 지체로 인하여 항공사들이 지불한 비용이 년간 29 억불에 달하는 것으로 추정되었다 [FAA, 1991]. 항공교통체계에서 용량부족현상은 주로 공항과 공항 주변의 공역--터미날 공역--에서 일어나는데, 이를 해결하기 위해서 세계 각 국은 공항의 신설, 기존공항에서의 활주로 증설, 항공보안시설의 현대화, 터미날 공역에서의 운항절차 개선등 많은 노력을 기울이고 있다.

논의의 촛점을 공항에 제한해보면, 공항은 다시 항공기 운항 공간인 airside와 승객 및 지상교통수단이 이동하는 landside로 구분되고, airside는 다시 활주로, 유도로, 계류장으로 세분된다. 유도로는 항공기가 공항 내의 다른 지점으로 이동하기 위하여 사용하는 일반 유도로와 착륙 항공기가 충분히 감속한 후에 활주로를 빠져나오기 위해 사용되는 탈출유도로로 구분하기도 한다. 이와 같은 공항의 구성시설은 그림 1에 개념적으로 표현되어 있다.



<그림 1> 공항의 구성

자료원 : Horonjeff and McKelvey, 1994, p. 302

과거의--'70년대 이전-- 탈출유도로의 형태로는 직각유도로가 일반적이었으나 Horonjeff et al. (1958, 1959, 1960) 의 고속탈출유도로에 관한 연구성과가 미 연방항공청 (FAA) 공항설

계지침 [FAA, 1970] 에 반영된 후로는 이를 활용하는 공항이 급속히 늘어 세계적으로 운영 중이거나 계획 중인 대부분의 대형공항에서 고속탈출유도로를 발견할 수 있다. 고속탈출유도로는 착륙시 항공기가 활주로에 머무르는 시간을--활주로점유시간 (Runway Occupancy Time, ROT) 이라고 함-- 줄여 연이어 착륙을 시도하는 항공기와의 도착 시간차이를 줄여 착륙용량을 늘이거나 연이어 착륙하는 두 항공기의 도착시차 사이에 이륙운항을 가능하게해 혼합용량을 늘이고자 제안된 탈출유도로의 일종이다.

활주로의 착륙용량은 항공기의 활주로 도착 시차의 역수로 표현되는데 시차를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\tau = T_j - T_i = MAX[ROT_i, \frac{S_{ij}}{V_j}] \quad (1)$$

τ = 두 항공기의 도착 시간차

T_j = 뒤따르는 항공기 (j)의 활주로 도착 시간

T_i = 앞선 항공기 (i)의 활주로 도착 시간

ROT_i = 앞선 항공기 (i)의 활주로점유시간

s_{ij} = 두 항공기간의 분리거리

v_j = 뒤따르는 항공기 (j)의 접근속도

식 (1)에 포함된 변수 중에서 s_{ij} 는 관제규정으로 정해져 있는데, 우리나라 상공에서 운항되는 대표적인 기종인 B747, MD-11 같은 초대형 항공기가 뒤따르는 경우 앞선 항공기의 기종에 따라 적어도 3해리에서 6해리의 분리거리를 확보하여야 한다. 또한 이들 항공기의 접근속도는 기상조건, 착륙중량에 따라 110 노트와 160 노트사이에서 결정된다. 따라서 식 (1)의 괄호 안의 두 번째 항은 최저 67초에서 최고 294초가 되고, 분리거리 3해리, 속도 140노트를 가정하면 대표값은 약 77초가 된다. 한편 현장조사에 의한 통계는 탈출유도로의 위치와 형태에 따라 초대형 항공기의 ROT 평균는 45초에서 62초임을, 표준편차는 약 10초임을 밝히고 있어 [Weiss and Barrer, 1984], 착륙용량만 고려할 경우에는 ROT의 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

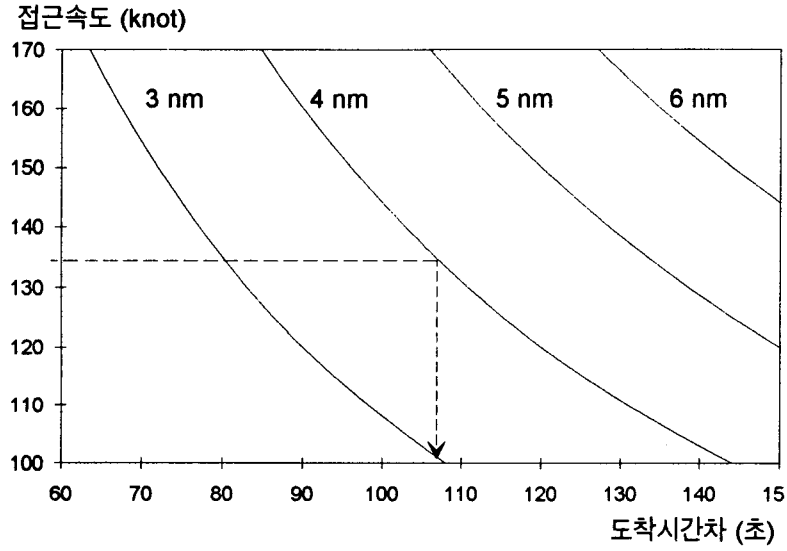
그러나 한 활주로에서 착륙과 이륙이 동시에 이루어지는 혼합운항의 용량을 고려할 때는 ROT의 역할이 중요해진다. 혼합운항의 가장 일반적인 형태는 접근 항공기의 착륙을 우선적으로 허용하면서 연속되는 착륙 시간 사이가 이륙을 끼어 넣을 정도로 충분할 경우에 이륙을 허용하는 착륙우선방식 (Arrival Priority Operation)인데, 한 번의 이륙을 허용하기 위해서는 앞서 내린 항공기가 활주로를 완전히 빠져 나가는 순간 뒤따르는 항공기가 활주로로 부터 적어도 2해리 떨어져 있어야 하므로 도착시간차 τ가 적어도 앞선 항공기의 ROT와 뒤따르는 항공기가 2해리 비행하는 시간 (50초 전후)의 합보다는 커야 가능하다.

혼합운항 시의 ROT의 역할을 체계적으로 살펴보기 위하여 항공기 운항 특성과 τ와의 관계를 그림으로 표시하면 다음과 같다.

예를 들어 135 노트로 접근하는 항공기가 앞 항공기와 4해리의 거리를 유지할 경우 약 107초의 도착 시차가 생기는데 두 항공기 착륙 사이의 이륙을 허용하기 위해서는 뒤 항공기가 최소한 2해리 떨어져 있어야 가능하므로 앞 항공기가 53초 이내에 활주로를 완전히 빠져나가야 한다. 따라서 앞 항공기의 ROT가 53초를 초과할 경우 이륙이 불가능 하여 혼합운항 용량이 감소된다. 다양한 조건 하에서 ROT 가 착륙용량 및 혼합용량에 미치는 영향을 계량적으로 평가한 결과는 Kim [1993]에서 찾을 수 있다.

지금까지 발표된 고속탈출유도로에 관한 연구의 주요 관심사는 항공기의 속도가 낮아지기 전에 안전하게 활주로를 벗어날 수 있는 유도로의

선형에 관한 연구와 아울러 해당 공항에 취항하는 여러 종류의 항공기의 ROT의 평균을 최소화하는 탈출유도로의 위치 결정이었다. 그러나 전술한 바와 같이 ROT의 감소가 활주로의 용량 증대에 단독으로, 직접적으로 기여하는 것이 아니라 항공기의 운항 특성과 함께 복합적으로 작용하는 것이다. 이런 배경에서 본 연구는 다음 절에 기술된 목적을 추구한다.



<그림 2> 분리거리 별 접근속도와 도착시간차 관계

1.2 연구목적 및 범위

본 논문은 고속탈출유도로의 위치 결정에 관한 연구이다. 지금까지의 유사 연구의 목적이 취항 항공기 집단의 ROT 의 최소화였던 반면, 본 연구는 기종별 ROT 의 최대 허용값이 정해졌을 때, 이를 만족시키기 위한 최소한의 유도로 갯수와 위치를 결정하는 모형을 개발하는 것이 목적이다. 전술한 바와 같이 어떤 범위내에서 ROT가 줄면 용량 증대 효과를 얻을 수 있으나 그 범위를 벗어나 계속 주는 것은 용량 증대와 직접적인 관계가 없으므로 무조건 ROT를 최소화 하는 것을 목적으로한 과거의 연구보다 본 연구의 목적이 개념적으로 타당하며 본 연구의 결과를 활용하면 탈출유도로에 대한 과다투자를 방지할 수 있다.

본 연구는 같은 활주로에서 이착륙이 이루어지는 단일활주로를 대상으로하며 이착륙을 각기 다른 활주로가 담당하는 근접평행활주로나 교차활주로등에서는 항공기 운항 형태가 단일활주로에서의 형태와 다르므로 본 연구의 결과가 용량 증대에 기여하지 못한다.

II. 문헌조사

고속탈출유도로를 활용하여 활주로의 용량을 증대시키고자 했던 시도는 Horonjeff et al.

(1958, 1959, 1960) 에 의하여 최초로 이루어 졌다. 이들은 앞 항공기가 활주로를 빠져 나가지 못해 뒤따르는 항공기의 착륙이 취소되는 경우 (Go-around Operation)를 최소화할 때 착륙용량이 최대화된다는 점에 착안하여 착륙용량을 유도로 위치의 함수로 표현하고 착륙용량을 최대화하는 유도로의 위치를 찾아내는 계산과정(Solution Algorithm) 을 개발하였다.

이들의 계산과정은 기종별 착륙운항 특성자료로 탈출속도까지 감속하는데 소요되는 거리와 시간의 결합확률밀도함수(Joint Probability Density Function)를 입력자료로 요구하며 수치계산법(Numerical Analysis)을 이용하여 해답을 찾는다. 이 모형은 항공기의 착륙순서가 미리 정해진 상황을 가정하였고 계산시간이 많이 걸린다는 단점이 있다.

Daellenbach [1974] 는 Horonjeff et al. 의 논리를 그대로 받아들이면서 착륙순서에 대한 가정을 완화하여 보다 일반적인 모형으로 발전시켰으며 동적계획법(Dynamic Programming)을 활용한 계산과정을 개발하여 계산시간을 획기적으로 단축하였다. Joline [1974]은 항공기 그룹별로 이상적인 유도로 위치의 분포가 있다는 가정에서 실제 위치와 이상적인 위치와의 차이를 최소화하여 결과적으로 평균 ROT를 최소화하는 모형을 개발하였으며, 계산과정으로 동적계획법을 활용하였다.

Sherali et al. [1992]는 취항하는 항공기 기종별로 이용하는 탈출유도로가 고정되어 있다는 가정 하에 평균 ROT 최소화가 목적함수인 혼합정수계획 (Mixed Integer Programming) 모형을 구성하였으며, 계산시간이 절약하기 위하여 수리계획 표준해법이 아닌 동적계획법 해법을 개발하였다. Kim[1993]은 Sherali et al. 이 설정한 유도로 이용에 대한 가정을 완화하여 한 기종이 여러 개의 유도로를 이용하는 상황에서 ROT 기대값을 최소화하는 모형을 구성하였고 해법으로는 역시 동적계획법을 활용하였다.

여러가지 ROT 최소화 모형으로 결정되는 유도로 위치의 정확성은 착륙시 항공기가 감속하는데 소요되는 거리 그리고 유도로의 위치가 바뀌 때의 ROT 변화량을 얼만큼 정확히 예측할 수 있는가에 달려있다. Kim에 의해 수행된 항공기 착륙운항 성능에 대한 실증연구 및 예측모형의 개발은 ROT 최소화 문제에 대한 또 하나의 기여라고 할 수 있다.

이상의 ROT 최소화를 위한 유도로 위치 결정 모형들은 해법으로 동적계획법을 활용하였는데, 모형 구조의 차이에도 불구하고 유도로 위치 결정 문제는 본질적으로 1차원 축 상에서의 위치결정문제이고, 동적계획법이 이런 부류의 문제를 가장 효율적으로 해결하는 기법이기 때문이다.

본 연구가 추구하는 기종별로 설정된 목표 ROT를 성취하고자할 때 필요한 최소한의 유도로 갯수 및 위치 결정에 관한 연구는 아직 발표된 바 없다.

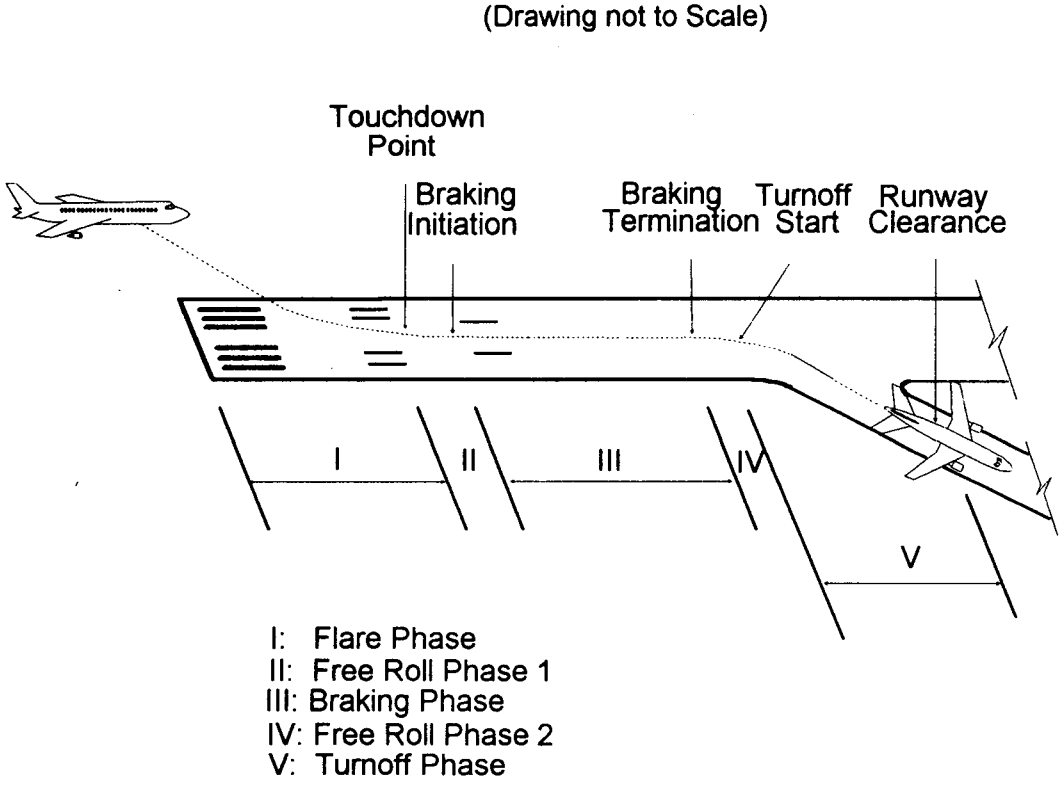
III. 모형개발

3.1 예비분석

항공기의 착륙 과정은 접근비행, 착지, 감속, 무감속 활주, 탈출로 구분할 수 있다(그림 3 참조). 착륙 과정 동안 탈출에 적합한 속도까지 감속하는데 같은기종, 같은 조종사라 할지라도 감속에 필요한 거리는 매번 변하므로 어떤 확률분포를 갖는 확률변수로 표현할 수 있다. 그림 4는 미국의 Charlotte 공항에서 관측한 B-727 기종의 활주로에서의 감속과정을 표시한 것이다. 고속탈출유도로에서의 탈출속도, v_{ex}, 가 정해졌다면 --일반적으로 26 m/s (60 MPH)-- 그림

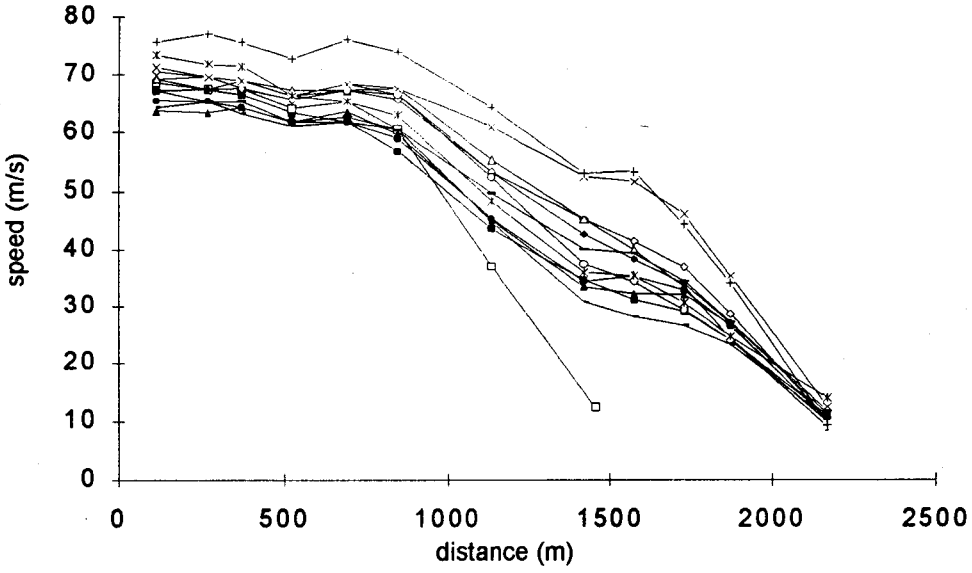
4에서 v_{ex} 까지의 감속거리 분포를 찾아낼 수 있다. 기종별 감속과정은 공항에서 관측한 실측치를 이용하거나, Kim [1993]에 의해 개발된 시뮬레이션 모형을 이용하면 된다.

모형개발을 위한 다음 과정은 기종별 유도로 위치의 적정범위의 산정이다. 적정범위는 최소한계 (Lower Bound)와 최대한계 (Upper Bound)에 의해 정의되는데 적정범위란 이 범위 내에 유도로가 설치되면 해당 기종의 항공기가 정해진 최대허용 ROT 를 초과하지 않으면서 활주로를 빠져나오는 구간을 의미한다. 이때, 항공기종 r 이 유도로 위치의 최소한계를 L_r, 최대한계를 U_r 이라 하면, 적정범위는 $[L_r, U_r]$ 이 된다. 최소한계는 감속거리 분포에서 매우 높은 percentile(예: 97 percentile) 값으로 정한다. 즉 유도로가 최소한계에 또는 멀리 설치되면 적어도 97% 착륙에서 해당 유도로를 이용할 수 있게 된다. 탈출속도까지 감속을 완료하는 거리에서 유도로가 멀리 떨어져 있으면 여분의 거리로 인하여 ROT가 늘어나게 되는데 최대허용 ROT를 초과하지 않는 지점이 최대한계가 된다. 그림 5는 기종별 적정범위을 개념적으로 표현한 것이고 취항 항공기가 여러 종류일때는 기종별로 적정범위가 산정되어야 한다.

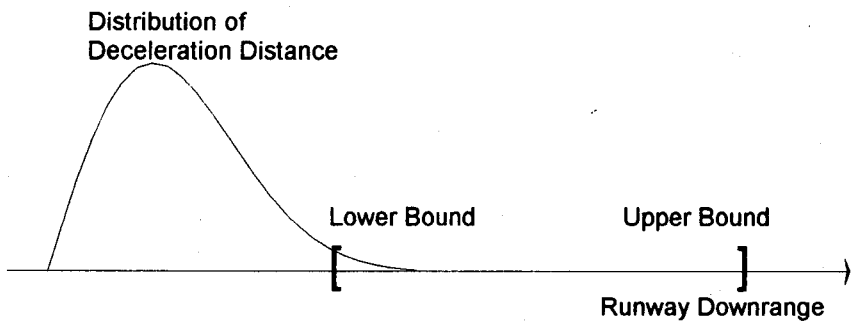


<그림 3> 항공기의 착륙 과정

자료원: Kim, 1993, p. 30



<그림 4> 항공기 감속 추이
자료원 : Kim, 1993, p. 34



<그림 5> 유도로의 적정범위

3.2 모형의 구성 및 알고리즘

항공기 r이 이용할 유도로 위치의 적정범위를 $[L_r, U_r]$ 이라 하자. 분석 대상 공항에 취항하는 항공기의 종류가 총 R 개라 하면 $r = 1, ..., R$이 되고 첨자는 U_r이 커지는 순서로 붙인다. 본 연구에서 풀고자 하는 문제는 모든 적정범위 $[L_r, U_r]$, $r = 1, ..., R$ 에 적어도 한 개의 유도로가 있게하기 위한 최소한의 유도로 갯수 및 그 위치를 밝히는 것이고 이 때 유도로와 유도로는적어도 D_{min} 만큼은 떨어져 있어야 한다 -- 너무 근접해 있으면 두 유도로 상의 항공

기 간에 접촉사고가 일어날 수 있으므로 일정거리 이상 떨어져 있어야 함. 유도로가 설치될 수 있는 K 개의 후보위치를 [0, U_r] 안에서 정하고 그 위치를 l(k), k = 1,..., K, 라 한다 -- 즉 유도로의 후보위치는 활주로의 시작점과 기종별 적정범위의 최대한계 중 가장 큰 값 사이에서 설정한다--.이상의 기본 자료가 준비되면 아래의 알고리즘에 의하여 문제가 해결된다.

<Solution Algorithm>

STEP 0: 초기값 부여

가상의 후보위치 k = 0 를 후보위치 집합에 추가하고 l(0) = l(1) − D_{min} 으로 놓는다 (총 후보위치의 갯수는 K+1 로 늘어남). 모든 유도로 후보위치 마다 (k = 0,..., K) 다음과 같이 정의되는 집합을 구한다.

F(k) = {k': l(k') ≥ l(k) + D_{min} and if Lr > l(k), then Ur ≥ l(k') for each r= 1,...,R} for k=0,...,K.

위에서 정의된 집합 F(k) 는 후보위치 k 에 유도로가 설치된다는 것을 가정했을 때 그 다음 유도로가 놓일 수 있는 후보위치들의 집합이다. 왜냐하면 후보위치 k 에 유도로가 설치될 경우 다음 유도로의 위치 k'는 최소한 D_{min}만큼은 떨어져 있어야 하고 또 k 에 설치된 유도로에 의하여 해결되지 않은 기종 -- L_r > l(k) -- 을 위해서는 유도로가 적어도 한개는 설치되어야 한다 -- U_r ≥ l(k').

변수 N* 와 집합 E 와 T의 초기값을 아래와 같이 부여한다.

N* = 1

E = {0}

T = {k ∈ {1,..., K}: Lr ≤ l(k), ∀ r= 1,...,R}

STEP 1:

집합 S 를 다음과 같이 구한다.

$$S = \bigcup_{k \in E} F(k)$$

STEP 2 :

case 1: 만일 S = ϕ 이면, 계산 종료. 주어진 문제는 해답이 없음.

case 2: 만일 S ∩ T ≠ ϕ 이면 계산 종료. 현재의 N* 가 찾고자 하는 최소 유도로 갯수임.

case 3: case 1 도 case 2 도 아니면, E = S, N* = N* + 1 으로 놓고 STEP 1, STEP 2 반복수행.

N* 는 찾고자 하는 유도로의 최소갯수로 초기치는 1이고 알고리즘이 진행됨에 따라 모든 항공기종의 적정범위에 적어도 하나의 유도로가 설치될 때까지 늘어난다. 집합 E 는 알고리즘이 진행됨에 따라 이미 선택할 것인가를 고려한 후보위치의 집합이다. 집합 T 는 R개의 최소한계 중에서 가장 큰 최소한계보다 멀리는 후보위치의 집합이다.

지금까지 정의된 여러 개념에서 주목해야 할 점들은:

1. 집합 T 에 속한 후보위치 중 하나도 선택되지 않으면 적정범위 [L_r, U_r] r = 1,..., R.중에서 유도로가 설치되지 않는 적정범위가 존재하므로 적어도 하나는 선택되어야 한다.
2. 집합 T 에 속한 후보위치 중 k_1, k_2 (k_1 < k_2) 두개가 선택되었을 경우, k_1 이 있으므로 해결되는 적정범위에 k_2도 속하게 되어 유도로

가 필요이상으로 많아 진다.

1+2. 따라서 유도로의 최소 갯수를 찾고자 할 때, 집합 T 에 속한 후보위치 중에서 정확히 한 개의 후보위치가 선택되어야 한다.

3. {0, ..., K}의 후보위치 중에서 k_i 와 k_j ($k_i < k_j$)가 선택된 인접한 유도로 위치라면 항상 $k_j < F(k_i)$ 의 관계가 있다. 왜냐하면 kj 는 정의에 의하여 F(ki)에서 선택되어야 하기 때문이다.

제시된 알고리즘이 최소 유도로 갯수를 성공적으로 찾는가를 증명하기 위해서는 0,..., K+1 로 명명되는 총 (K+2) 개의 노드로 구성되는 네트웍을 구성해야 한다. 이 때 노드 0,..., K 는 앞에서 설명한 (K+1) 개의 유도로 후보위치를 나타내고, 노드 K+1 는 가상의 종료노드이다. 노드를 연결하는 링크는 두가지 조건에 의하여 만들어진다. 첫째, 집합 T 에 속한 노드 ($k \in T$) 와 노드 K+1를 지향성 (Directed) 링크로 연결하되 길이는 0 이다. 둘째, 노드 집합 {0, ..., K} 에서 조합 가능한 모든 노드 짝 (k_1, k_2) 중 $k_2 \in F(k_1)$ 이면 길이가 1인 지향성 링크로 연결한다.

이 네트웍에서 노드 0 에서 출발하여 노드 K+1 까지 연결하는 경로를 찾는 것은 모든 기종의 적정범위에 적어도 한 개의 유도로를 설치하는 대안을 찾는 것이다. 왜냐하면 첫째, 노드 K+1은 집합 T 에 속한 노드 (후보위치를 의미)하고만 연결되어 있으므로 집합 T 에 속한 후보위치 중에서 반드시 한 개가 선택되어져야 한다는 조건이 만족되는 것이고, 둘째, 노드 짝 (k_1, k_2) 중 $k_2 \in F(k_1)$ 인 경우 만 지향성 링크로 연결되어 있으므로 가상 노드 0 에서 출발하여 노드 K+1 을 향하여 진행하는 것은 순차적으로 모든 기종에 대한 적정범위 내에 유도로를 설치하는 대안을 찾아가는 의미와 동일하다. 또 노드 K+1 으로 연결되는 링크의 길이는 0, 나머지 링크의 길이는 1 이므로 노드 0 에서 출발하여 노드 K+1 까지 연결하는 경로의 길이는 선택된 후보위치의 총 수가 된다. 따라서 본 논문에서 추구하는 유도로의 최소 갯수 결정 문제는 위 네트웍에서 노드 0 에서 출발하여 노드 K+1 까지 연결하는 최단거리경로문제와 동일하다.

실제로 제시한 알고리즘은 N^*를 목적함수인 경로의 길이로 하여 계산시간이 짧은 것으로 입증된 Dijkstra 의 최단거리경로 알고리즘을 정의된 네트웍에 적용한 것이고 [Bazaraa et al., 1990, 참조], 알고리즘에 종료조건인 $S \cap T \neq \phi$ 는 경로가 집합 T 에 속한 노드에 도착하였나를 판단하는 것이다. 끝으로 선택된 후보의 구체적인 위치는 노드번호 k 와 연결된 위치 라벨, l (k), 를 이용하여 밝힐 수 있다.

Ⅳ. 예제

제시된 모형과 알고리즘이 최소 유도로 갯수 결정 문제를 해결하는 과정을 구체적으로 살피기 위해 가상의 예제를 다루기로 한다. B-737, B-747, MD-11, MD-80, A-300 등 다섯 기종이 취항하는 공항에 활주로를 설계하고자 한다. 항공기의 감속능력은 활주로의 수분상태와 밀접한 관계가 있으므로 활주로가 마른 상태와 젖은 상태를 구분하여 별개의 기종으로 분류한 후, 활주로 용량분석에 따른 ROT 의 최대허용치와 감속성능을 고려하여 기종별 유도로 위치 적정범위가 표 1 과 같이 밝혀졌다고 가정하자.

또 인접한 유도로의 최소 간격 (D_{min}) 은 210m, 유도로의 후보위치는 1500m 에서 2400m 까지 100m 간격으로 총 10개가 고려되고 있다. 그림 6 은 표 1 에 나타난 유도로 위치의 적정범위와 유도로의 후보위치를 그림으로 표시한 것이다.

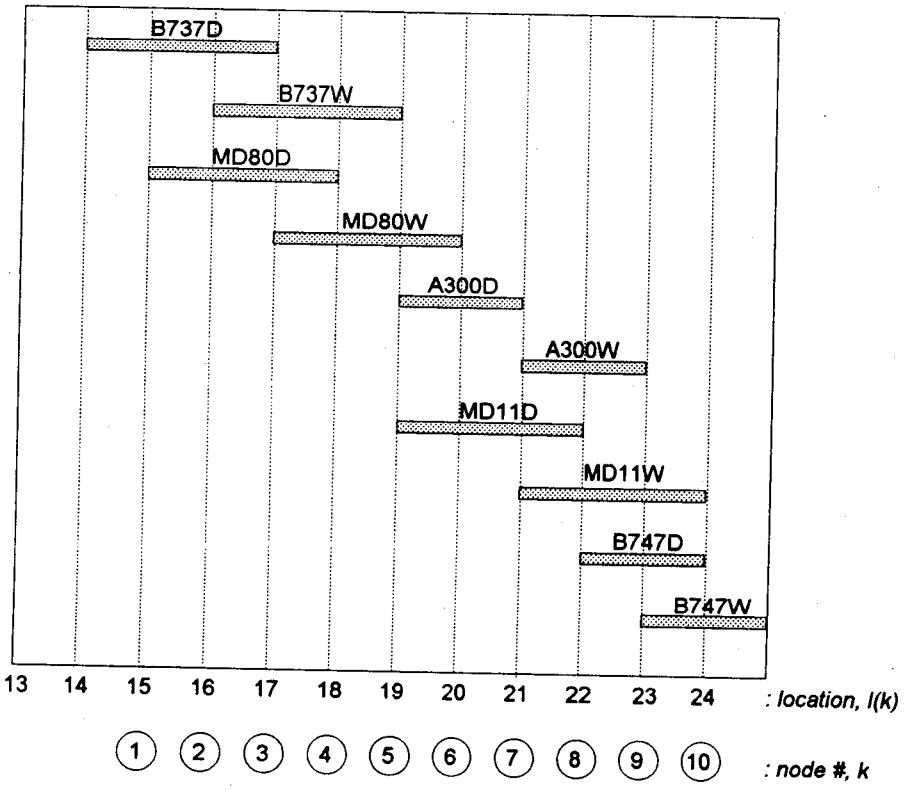
표 1: 기종별 유도로 위치 적정범위

<단위: m>

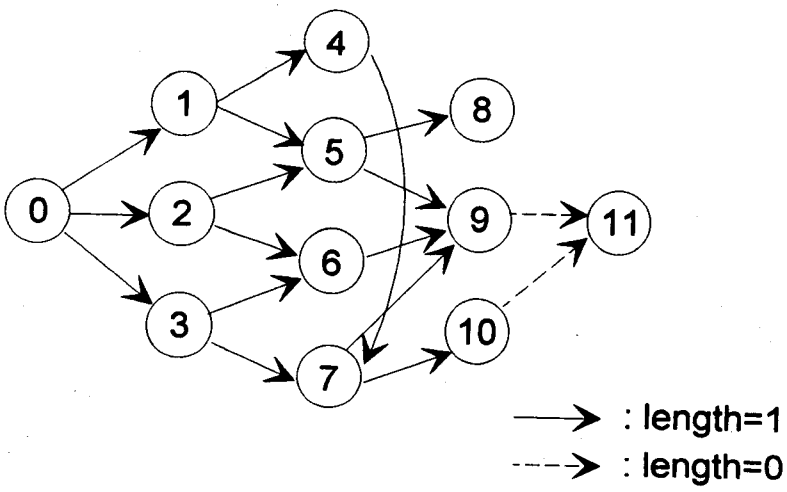
기 종	최소한계 (L_r)	최대한계 (U_r)	Index 'r'
B737-dry	1400	1700	1
B737-wet	1600	1900	2
MD80-dry	1500	1800	3
MD80-wet	1700	2000	4
A300-dry	1900	2100	5
A300-wet	2100	2300	6
MD11-dry	1900	2200	7
MD11-wet	2100	2400	8
B747-dry	2200	2400	9
B747-wet	2300	2500	10

문제 상황을 네트웍으로 변환하는데 필요한 정보인 집합 T 와 집합 F(k), k=1,...,10 는 T={9,10}, F(0)={1,2,3}, F{1}={4,5}, F{2}={5,6}, F{3}={6,7}, F{4}={7}, F(5)={8,9}, F(6)={9}, F(7)={9,10}, F(8)=F(9)=F(10)=(가 된다. 그림 7 은 주어진 문제 상황을 네트웍으로 변환한 것이다. 그림 7 에서 노드 0 과 노드 11 을 연결하는 최단 경로의 길이는 3 으로 본 예제의 경우 모든 유도로 위치 적정범위 내에 적어도 한 개의 유도로가 존재하기 위해서는 최소한 3 개의 유도로가 필요하다는 것을 의미한다. 또 최단 경로는 1-5-9, 2-5-9, 2-6-9, 3-6-9, 3-7-9, 3-7-10 을 중간 노드로 하는 총 6개가 되어 어느 것을 선택해도 소기의 목적을 달성할 수 있다는 것을 의미하고 유도로의 위치는 l(k)를 참조하여 결정한다. 경로 1-4-7-10 도 모든 적정범위에 최소한 한 개의 유도로를 설치하는 가능해는 되지만 4 개의 유도로가 필요하므로 최적해는 되지 않는다. 또 집합 T 에 속한 노드 9, 10 에 도달하는 않는 경로--예를 들면 1-5-8--는 모든 기종의 적정범위를 만족시키지 못하는 부적절한 대안을 의미한다.

그림 7 에 나타난 네트웍의 도움없이 그림 6 에서도 요구조건을 만족하는 최소한의 유도로의 위치와 갯수를 찾을 수 있겠으나, 해답이 여러 개일 경우 수작업으로 모두 찾아내는 일은 쉽지 않으며 항공기의 종류나 후보위치가 많아지면 더욱 그렇다. 공항 설계자에게는 요구 조건을 만족하는 해답이 여러개 있을 때 모두를 제시하는 것이 바람직한데 설계자는 여객청사나 화물청사로의 이동 경로, 항공보안시설의 위치 등 전반적인 공항 의 효과를 고려하여 유도로의 위치를 결정해야하기 때문이다. 또한 본 논문에서 제시한 알고리즘을 전산화하면 예제에서 설명한 계산과정을 자동화할 수 있다.



<그림 6> 기종별 유도로 위치 적정범위 및 유도로 후보위치



<그림 7> 최소 유도로 갯수 문제의 네트웍 모형

V. 요약 및 결론

활주로 용량은 공항 계획 시 검토되는 핵심적 사항이며 갯수와 배치형태에 따라 대략 결정되나 세부설계에 의해 적지 않은 영향을 받는다. 고속탈출유도로는 단일 활주로의 용량을 늘이기 위해 고안된 유도로의 한 형태이다.

고속탈출유도로에 관한 연구의 초점은 선형결정과 위치결정에 모아졌고 본 논문도 위치결정에 관한 연구이다. 기종별 ROT 의 총합 (또는 평균)의 최소화가 목적인 지금까지 발표된 유도로 위치 결정을 위한 연구와는 달리, 기종별 ROT 최대허용치가 주어졌을 때, 이를 만족하는 유도로 최소 갯수와 위치를 찾아내는 모형과 계산과정이 제시되었다. 일반적으로 ROT 가 줄을 때, 활주로 용량이 늘어나나 일정범위 이상 계속 주는 것은 용량증대에 도움이 되지 않는다는 사실에 비추어 볼 때 제시된 접근방법의 실용적 가치가 인정된다.

제시된 접근방법을 활용하기 위해서는 최소한계와 최대한계로 정의되는 기종별 유도로 위치의 적정범위가 먼저 밝혀져야 하는데, 이는 항공기의 착륙운항 특성을 정확히 알아야 가능하다. 항공기의 착륙운항 특성은 관심의 대상이 되는 공항에서 측정한 데이타를 이용하는 것이 바람직하나, 불가능 할 경우에는 Kim [1993]이 제시한 항공기 착륙 성능 예측을 위한 시뮬레이션 모형을 이용할 수도 있다.

공항 계획 및 설계과정에서 고려해야 할 점 중에 건설비와 혼잡에 의한 지체비용간의 절충이 있으나 본 연구의 대상인 단일활주로 인 경우, 공항은 한번 건설되면 장기간 사용하는 기간시설이므로 건설비가 다소 더 들더라도 활주로가 최대로 활용될 수 있도록 설계하는 것이 바람직하다고 판단된다. 다만 단일활주로의 용량은 ROT가 일정 수준까지 줄어드는 것은 용량 증대 효과가 있으나 그 수준을 지나 계속 주는 것은 더 이상의 용량 증대 효과가 없으므로 제시된 접근방법을 통하여 최소한의 유도로 갯수와 적정 위치를 밝힘으로서 요구되는 활주로 용량을 보장하면서 건설비를 절약하는 효과를 기대한다.

참고문헌

Bazarra, M. S., Jarvis, J. J. and Sherali, H. D., Linear Programming and Network Flows, John Wiley & Sons Inc., Second Edition, NY, 1990.

Daellenbach, H. G., "Dynamic Programming Model for Optimal Location of Runway Exits", *Transportation Research*, Vol. 8, pp. 225−232, 1974

Federal Aviation Administration, *1991−92 Aviation System Capacity Plan*, Report No. DOT/FAA/ASC−91−1, 1991.

Federal Aviation Administration, *Airport Design Standards: Transport Airports*, AC 150/5335−1A, 1970.

Horonjeff, R., Finch, D. M., Belmont, D. M. and Ahlborn, G., *Exit Taxiway Location and Design*, Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California, Berkeley, 1958.

Horonjeff, R., Grassi, R. C. and Read, R. R., *A Mathematical Model for Locating Exit Taxiways*, Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California, Berkeley, 1959.

Horonjeff, R., Read, R. R. and Ahlborn, G., *Exit Taxiway Locations*, Institute of Transpor-

tation and Traffic Engineering, University of California, Berkeley, 1960.

Horonjeff, R. and McKelvey, F. X., *Planning and Design of Airports*, Fourth Edition, McGraw-Hill Book Co., 1994.

Joline, E. S., "Optimization of Runway Exit Configuration", *Journal of Transportation Engineering, ASCE*, Vol. 100, pp. 85-102, 1974.

Kim, B. J., *Optimal Runway Exit Design and Capacity Enhancement*, Unpublished Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 1993.

Sherali, H. D., Hobeika, A. G., Trani, A. A. and Kim, B. J., "An Integrated Simulation and Dynamic Programming Approach for Determining Optimal Runway Exit Locations", *Management Science*, Vol. 38, No. 7, pp. 1049-1065, 1992

Weiss, W. E. and Barrer, J. N., *Analysis of Runway Occupancy Time and Separation Data Colleted at La Guardia, Boston, and Newark Airports*, Federal Aviation Administration Report No. FAA-DL5-84-2, 1984.