

□ 論 文 □

터미널 공역의 수용능력 계산 모형*

—Capacity Model for Terminal Control Area—

梁 漢 模

(韓國航空大學校 航空交通學科 助教授)

金 炳 鍾

(韓國航空大學校 航空交通學科 專任講師)

목 차

I. 서론

1.1 연구의 목적과 범위

II. 문헌조사

III. 터미널 공역의 수용능력

3.1 터미널 공역의 구성

3.2 모형의 구성

IV. 예제

4.1 직선형 접근경로

4.2 선회형 접근경로

4.3 수용능력 차이의 원인분석

4.4 민감도분석

V. 결론

ABSTRACT

A mathematical model and its solution algorithm are proposed for computing the capacity of terminal control area. The model is built based on dynamics of aircraft flying on a pre-established approach path and its solution algorithm employs a numerical method. The model computes the minimum separation of two aircraft at the entry fix of the terminal control area, which assures that air traffic separation rules are not violated during the approach phase, thereby computes the capacity. The model might be applied for designing approach paths for a new airport, for rearranging paths of an existing airport or establishing approach control procedures.

* 본 논문은 1994년 4월 9일 한국항공대학교가 주최한 제3차 국제항공학술세미나에서 발표되었던 논문을 수정, 보완한 것임.

I. 서론

교통체계를 구성하는 요소로는 교통수단, 교통로 네트워크, 터미날이 있으며(이태원, 1991, p. 185), 교통로 또는 터미날의 교통량 처리능력 또는 수용능력은 움직임의 주체인 교통수단을 단위 시간에 얼마나 많이 처리할 수 있는 가로 나타낼 수 있다. 교통로 네트워크의 일부나 터미날에서 이동하려는 교통수요가 수용능력을 넘어서면 해당 교통로 또는 터미날이 혼잡하게 되고 이로 인하여 사고의 위험성이 증대될과 함께 지체현상으로 인한 불편함과 경제적인 손실이 발생하며, 일부분에서 일어나는 수요의 수용능력 초과가 장시간 지속되면 혼잡이 교통체계의 전부분으로 확산되어 교통체계의 전반적인 기능이 저하된다.

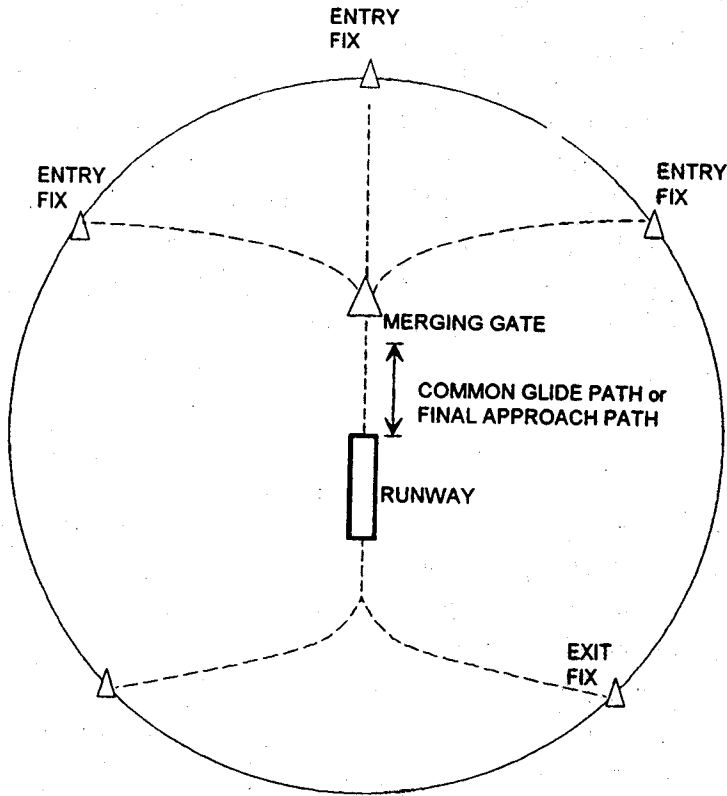
항공교통체계도 같은 관점에서 분석을 할 수 있다. 즉, 교통수단인 항공기, 교통로에 해당하는 비행로, 터미날에 해당하는 공항이 항공교통체계를 이루는 기본요소이다. 항공기가 터미날인 공항을 출발하여 비행로를 따라 목적지에 접근한 후 또 하나의 터미날인 공항에 도착함으로써 한번의 통행을 마치게 되며 운항 중에 비행로와 공항을 다른 항공기와 공유한다. 항공기의 운항 요구 빈도가 항공교통체계 각 부분의 수용능력을 초과하면 다른형태의 교통체계와 마찬가지로 여러가지 부정적인 현상이 나타난다.

비행로 네트워크나 공항의 어느 부분에서나 혼잡은 일어날 수 있으나 일반적으로 교통량이 집중되는 공항이 문제가 된다. 따라서 항공교통체계의 수용능력 부족을 경험하고 있는 나라들은 공항의 수용력 증대를 위하여 심혈을 기울이고 있으며 이런 노력은 신공항의 건설 또는 활주로의 증설로 나타난다. 활주로의 수용능력이 전체 항공교통체계의 수용능력을 결정하는데 매우 중요한 요인이기는 하나 경우에 따라서 공항 주변 구역

-터미날 구역-의 수용능력 부족이 혼잡의 원인이 되기도 한다. 즉, 시간당 운항횟수로 표현되는 활주로의 교통량 수용능력 만큼 터미날 구역에서 교통량을 처리하지 못하면 활주로의 수용능력을 충분히 활용하지 못하게 되어 항공교통체계의 전반적인 수용능력은 터미날 구역에서의 수용능력에 의하여 결정되는 경우가 있다. 이런 현상은 구역에 비행제한구역이 많거나 공항들이 인접해 있어 출발 또는 도착 공항이 서로 다른 항공기들이 같은 공역을 이용해야 할 때 경험할 수 있다. 예로 싱가포르의 창이공항의 경우 활주로의 수용능력이 시간당 62~68회 운항인데 반하여 북동쪽의 비행위험지역의 존재로 인하여 실제 운항 가능 횟수는 51~65회로 제한된다고 보고된 바 있다(Fan, 1992).

터미날 구역의 구성은 그림 1에 개념적으로 표현되어 있다¹⁾. 그림에서 볼 수 있듯이 접근항공기는 진입점(Entry Fix)을 통과하여 터미날 구역에 들어와 접근경로를 따라 비행하면서 감속과 강하하여 접근문(Merging Gate)에 도달하게 된다. 한 활주로를 향한 다수의 접근경로가 설정될 수 있으나 모든 접근경로는 접근문으로 모아진다. 접근문을 통과한 항공기는 항공보안시설을 이용하여 착륙에 적합한 강하율과 방향을 유지하며 비행해 활주로에 착지한다.

1) 각 지점과 경로의 명칭은 저자에 따라 차이가 있음.



(그림 1) 터미널 구역의 구성(Bianco, L. and Bielli, M., 1992에서 인용)

1.1 연구의 목적과 범위

본 연구는 비행로 네트워크 중에서 혼잡이 일어나기 쉬운 터미널 구역에서의 수용능력 계산을 위한 모형을 제시하고 예제를 통하여 접근경로의 형태, 분리거리기준, 항공기의 혼합률 등 여러 영향요인이 터미널 구역의 수용능력에 미치는 영향을 평가하는 것을 목적으로 한다.

공항과 비행로 네트워크를 더 세분하면 공항시설은 계류장, 유도로, 활주로로 나누어지며 - 항공기의 움직임을 위한 시설인 airside만 고려했음-, 비행로는 출발경로, 순항항로, 접근경로로 나눌 수 있다. 비행로는 항공기의 운항 통로이며 여러가지 보안시설에 의하여 방향, 고도등의 특성치

가 정해진다. 구역은 크게 관제구역과 비관제구역으로 나뉘며, 관제구역은 다시 공항주변의 터미널 구역, 항로, 특수 구역 등으로 구분된다(양한모, 1993).

비행로 네트워크는 주요 공항을 중심으로 구성되어 있다. 터미널 구역은 공항을 둘러싸고 있는 구역을 지칭하는 용어로 활주로에서 시작하여 가속 및 상승한 후 허락된 순항항로에 도달하는 출발경로와, 순항항로를 따라 비행한 후 감속 및 하강하면서 활주로로 수렴하는 접근경로가 터미널 구역안에서 설정된다. 이륙운항의 경우 활주로에서 출발하여 여러 순항항로로 분산되는 과정이므로 일반적으로 구역에서의 혼잡이 문제가 되지 않으며, 구역의 특성상 단일 출발경로만 이용할

수 밖에 없어 혼잡이 야기되는 경우라도 항공기들은 지상에서 운항허락을 기다리게 되므로 안전이나 경제적 손실면에서 부작용이 비교적 적다. 그러나 접근운항의 경우 교통 흐름이 수렴하는 과정이므로 혼잡이 일어나기 쉬우며 혼잡이 일어났을때 항공기들이 착륙허가가 날 때까지 체공해야 하므로 안전면에서와 경제적 손실 면에서 부작용이 크다. 따라서 본 연구는 접근운항에 대한 터미널 공역의 용량을 평가하는 것으로 그 범위를 제한한다.

II. 문헌조사

본 논문은 항공교통체계의 한 부분의 교통량 처리능력 - capacity, 용량이라 지칭되기도 함 - 에 관한 것으로 먼저 용량에 대한 개념을 살펴봄으로써 이해를 돕고자 한다. 용량은 최대용량 - ultimate capacity - 과 실용용량 - practical capacity - 으로 구분된다(Horonijeff and McKelvey, 1983, Ashford and Wright, 1992), 최대용량이란 항공기 운항요구가 항상 존재하여 여러가지 안전기준상 운항이 가능할 때 항공기 운항이 즉시 이루어지는 것을 가정하여 계산되는 최대운항횟수를 의미한다. 그러나 실제 운항에서는 운항요구 빈도가 시간에 따라 변하며 빈도가 낮아 운항이 가능한 시점에 운항을 기다리는 항공기가 없어 즉시 운항이 이루어지지 않는 현상과 운항요구 빈도가 높아 항공기가 운항이 가능해지는 시점까지 기다려야하는 현상이 발생하게 된다. 여기서 운항요구 빈도를 수요라, 운항이 가능해질 때까지 기다리는 시간을 지체시간이라 지칭한다. 실용용량이란 운항하는 항공기들의 평균 지체시간을 참을만한 수준으로 억제하면서 교통체계의 기능이 계속 수행될 수 있는 운항횟수를 의미한다. 지체시간과 수요에는 수요가 늘어남에 따라 지체시간이 늘어나고, 수요가 실용용량을 넘어 최대용량에 접근하면서 지체시간이 급격히 증

가하는 관계가 있어, 최대용량에 가까운 수요가 계속되면 교통체계의 기능이 마비되는 현상이 일어난다. 근래에 들어 최대용량의 개념이 더 선호되고 있으며(Horonijeff and McKelvey, 1983, Ashford and Wright, 1992), 단순히 용량이라 표기할 때는 최대용량을 의미한다(FAA AC 150/5060-5, 1983).

항공교통체계의 용량을 계산하기 위한 노력은 주로 공항의 각 부분의 용량 계산에 집중되었고, 특히 활주로의 용량 계산을 위한 모형이 많이 개발되었다. 활주로 용량을 해석적 모형을 이용하여 계산하고자한 노력의 효시로 Blumstein (1960), Airborne Instrument Laboratories (1963)의 보고서를 들 수 있으며 (Newell, 1979), Harris (1972)가 발전시킨 논리와 해석적 모형이 활주로 용량계산의 표준으로 받아들여지고 있다(Horonijeff and McKelvey, 1983, Ashford and Wright, 1992). Harris는 활주로의 연장선 상에 위치한 최종접근점(final approach fix)을 통과하는 시점에서 부터 항공기가 착륙 후 활주로를 완전히 벗어나는 시점까지의 항공기의 움직임을 모형화하여 이 기간동안 첫째, 다른 항공기와의 거리가 정해진 분리거리기준보다 좁아지지 않으며, 둘째, 활주로를 두 항공기가 동시에 점유할 수 없다는 원칙 하에 성취할 수 있는 최대운항횟수를 계산하는 해석적 해답(계산식)을 후행 항공기가 선행 항공기보다 빠른 closing case와 그 반대인 opening case로 구분하여 제시하였다. 이 모형의 한계는 첫째, 하나의 직선 상에서의 항공기의 움직임만 고려하였고, 둘째, 주어진 직선 구간에서의 속도가 일정한 경우만 고려하였기 때문에 경우에 따라서 선회비행과 감속하면서 공항으로 접근해야하는 터미널 공역의 전반적인 용량계산은 할 수 없다는 것이다.

Janic and Tosic(1982)은 Harris의 활주로 용량모형을 확장하여 운항속도가 각각 다른 세 개의 직선구간으로 이루어진 접근경로의 용량 계산

을 위한 모형을 개발하였다. 이 모형은 시간이 흐름에 따라 변하는 접근경로 상에서의 두 항공기의 위치를 추적하여 Harris의 모형에서 적용된 분리거리기준을 범하지 않으면서 성취할 수 있는 최대운항횟수를 계산한다. 이 모형은 Harris 모형의 경우보다 복잡한 접근경로들과 각 단계별 운항속도가 변하는 것을 고려하였기 때문에 해석적 해답은 구할 수 없으며, 계산방법으로 수치계산방법(numerical method)을 제시하였다. Janic and Tomic의 모형은 Harris의 모형을 보다 일반화 시켰다는데에 의의를 찾을 수 있으나, 다음과 같은 이유로 활용성이 제한된다.

1. 접근경로를 세 단계의 직선으로만 이루어진 경우만 고려하였고,
2. 제시한 수학적 모형은 구성이 필요 이상으로 복잡하고 선행 항공기와 후행 항공기의 위치에 따라 다른 수식을 적용해야하는 번거로움이 있다.

본 고에서는 Janic and Tomic이 전개한 가정과 논리를 기본으로 하여 접근경로를 세 단계이상의 다단계로 구분하여야 할 경우 -접근경로가 원주 형태로 이루어진 경우-를 포함하면서 두 항공기의 위치에 관계없이 적용할 수 있는 보다 일반적이면서 새로운 수학적 모형과 계산방법을 제시하고자 한다. 특히 극좌표계에서 운동체의 위치와 운동을 나타내는 벡터를 도입함으로써 수식의 간소화가 가능해졌다.

Ⅲ. 터미널 공역의 수용능력

3.1 터미널 공역의 구성

터미널 공역에서의 항공기 운항은 일반적으로 정해진 경로를 따라 이루어지므로 공역에서의 수용능력은 주어진 경로를 따라 항공기들이 접근할

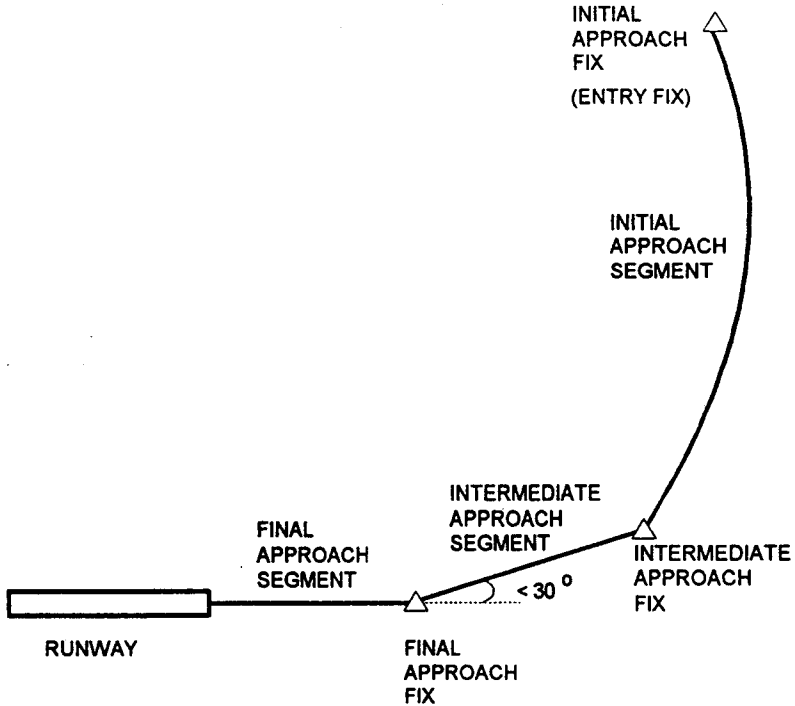
때, 안전을 확보하기 위하여 부과되는 항공기간의 분리기준을 범하지 않으면서 성취할 수 있는 최대의 운항횟수라 정의할 수 있다.

접근경로는 첫접근부분(Initial Approach Segment), 중간접근부분(Intermediate Approach Segment), 최종접근부분(Final Approach Segment)등 세 부분으로 나누어지며, 각 부분의 구체적인 설계는 적정 강하율, 회전반경 등 항공기의 성능을 고려하여 만들어진 미연방항공국(FAA)이나 국제미간항공기구(ICAO)의 지침서를 따라야 한다(FAA, 1976 & ICAO 1986). 세 부분으로 나누어진 접근경로는 직선과 원주를 사용하여 설정될 수 있다. 실제적인 접근경로는 3차원공간에서 설정되나 접근 항공기간의 분리는 레이다 수평분리 기준에 의하여 유지되므로 3차원적인 접근경로를 2차원 평면에 투시한 상태에서 접근경로의 수용력 평가가 가능하다. 또 원주 같이 곡선형 접근경로로 여러개의 작은 직선으로 구성되어 있다고 볼 수 있으므로 모든 접근경로는 직선으로 이루어졌다고 단순화 시킬 수 있다. 그림 2는 원주의 직선으로 이루어진 접근경로의 한 예를 2차원 평면상에 표시한 것이다. 접근경로의 기하학적 구조는 공역의 수용력에 중요한 영향을 미치며 이와 함께 항공기간 분리기준, 항공기 혼합비율, 접근경로 부분별 운항속도 등도 터미널 공역의 수용능력을 결정하는 요인이 된다.

3.2 모형의 구성

터미널 공역의 수용력은 접근경로를 비행하여 활주로에 먼저 도달하는 항공기와 뒤이어 도달하는 항공기간 도착시간차의 역수이다. 즉, 연속적으로 접근하는 항공기간 도착시간차의 평균을 τ 라 하면 공역의 수용력, λ 은

$$\lambda = \frac{1}{\tau} \quad (1)$$



〈그림 2〉 접근경로의 구성

로 표현되며, 도착시간차의 평균, τ 는

$$\tau = \sum_{(i, j)} t_{ij} p_{ij} \quad (2)$$

이 되며, 이때

i = 먼저 도착하는 항공기

j = 나중에 도착하는 항공기

t_{ij} = 항공기 i 와 j 의 활주로 도착시간차

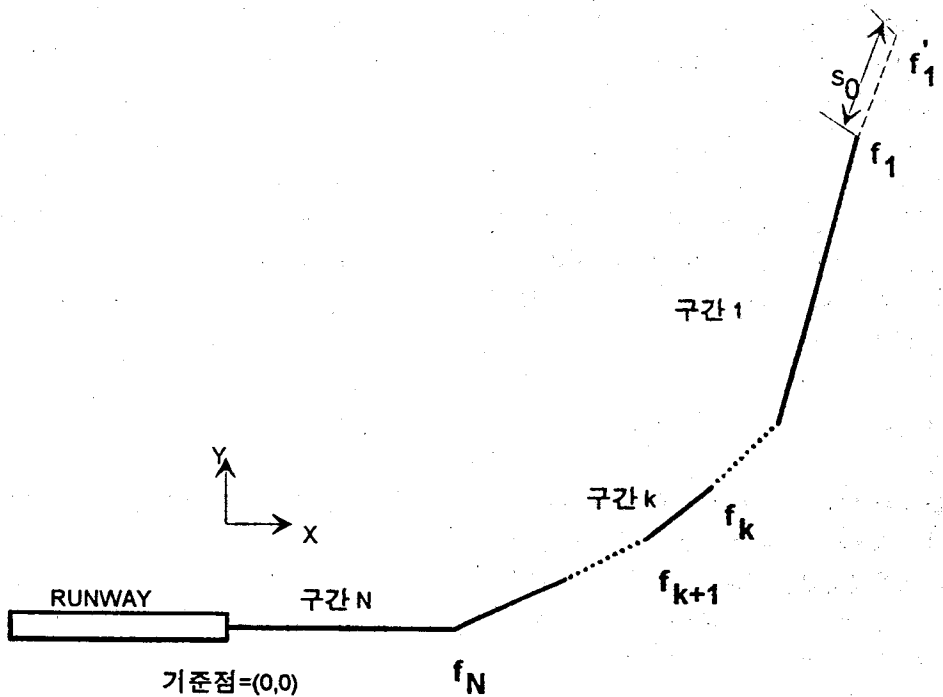
p_{ij} = 항공기 i 와 j 가 짝을 이루는 확률

로 정의된다.

선행항공기가 공역 진입점을 통과하는 순간 뒤따르는 항공기는 진입점을 향하여 비행중이며, 이때 뒤따르는 항공기는 진입점으로부터 s_0 만큼 떨어져 있다고 하자. 접근경로가 N 개의 구간으로 나누어져 있다고 가정할 때, 각 구간을 구분하기 위하여 N 개의 경계점이 필요하다. 활주로의 시작점을 원점으로 간주하여 접근경로상의 구간을 구분하는 기준이 되는 각 경계점의 2차원 평면에서

의 좌표값을 항공기가 통과하는 순서대로 f_1, \dots, f_N , 구분된 각 구간을 구간 1, ..., 구간 N 이라 하고, 선행항공기가 진입점을 통과하는 순간 뒤따르는 항공기 위치의 좌표를 f'_i 이라 하면 그림 2에 표현된 접근경로는 그림 3과 같이 된다. 항공기들의 속도와 비행방향을 벡터로 표시할 수 있고, 항공기 i 가 구간 k 를 통과할 때의 속도와 방향을 $v_{i,k}$ 라 하면, 항공기 i 와 j 간의 활주로 도착시간차 t_{ij} 는 항공기 j 가 f'_i 부터 활주루에 도착하는데 걸리는 시간에서 항공기 i 가 f_1 부터 활주루에 도착하는데 걸리는 시간을 뺀 값이 되며, 벡터의 크기를 나타내는 $\| \cdot \|$ 부호를 사용하여 수식으로 표현하면 다음과 같이 된다.

$$t_{ij} = \left(\frac{\|f_2 - f'_1\|}{\|v_{j,1}\|} + \sum_{k=2}^{N-1} \frac{\|f_k - f_{k-1}\|}{\|v_{j,k}\|} + \frac{\|f_N\|}{\|v_{j,N}\|} \right) - \left(\frac{\|f_2 - f_1\|}{\|v_{i,1}\|} + \sum_{k=2}^{N-1} \frac{\|f_k - f_{k-1}\|}{\|v_{i,k}\|} + \frac{\|f_N\|}{\|v_{i,N}\|} \right) \quad (3)$$



〈그림 2〉 2차원 평면에 표시된 접근경로

t_{ij} 가 최소화 될 때 공역의 수용능력은 최대화 되므로 수용능력을 계산하기 위하여는 t_{ij} 의 최소 값을 구하여야 한다. 식(3)에서 $\|f_2 - f_1\|$ 를 제외한 나머지 변수들은 고정된 값을 가지고 있고, $\|f_2 - f_1\|$ 만 s_0 가 증가할 때 같이 증가한다. 따라서 t_{ij} 의 최소치를 구하기 위해서는 s_0 를 최소화해야 하고 이때 유일한 제약조건으로 항공기 i 가 진입점을 지나 활주로에 도착하는 과정 중에 어느 순간에도 항공기 i, j 간의 간격이 분리기준, δ 보다 적어서는 안된다. 항공기는 항상 움직이므로 항공기의 위치는 시간에 따라 변하며 두 항공기간의 간격 또한 그렇다. t 시점에 항공기 i 의 평면상에서의 위치의 좌표를 $p_i(t)$ 라 하고 두 항공기간의 거리, $d_{i,j}(t)$ 를

$$d_{i,j}(t) = \|p_i(t) - p_j(t)\| \quad (4)$$

과 같이 나타낼 수 있다. 위에서 설명한 최소화 문제를 수리계획법 형태로 표현하면,

$$\begin{aligned} & \text{MINIMIZE } s_0 \\ & \text{Subject to } d_{i,j}(t) \geq \delta, \text{ for } t \in [0, T] \quad (5) \end{aligned}$$

로 되며 $t=0$ 는 선행 항공기가 진입점을 통과한 시점, $t=T$ 는 활주로에 도달한 시점을 의미한다.

식 (5)로 표현된 최적화 문제는 해석적으로 또는 수리계획 모형의 표준해법으로 최적해를 구할 수 없고 수치계산해법으로 풀 수 있다. 즉, 문제를 구성하는 입력자료로 접근항로의 기하학적 구조-항로의 방향이 바뀌는 지점의 좌표값-, 접근항로를 이용하는 항공기의 혼합비율, 항공기종별 경로 구간별 운항속도가 주어졌을 때, 일어날 수 있는 선행 항공기씩별로 항공기간 분리기준을 범하지 않으면서 초기분리거리, s_0 가 가질 수 있는 최소값을 구하기 위하여는 먼저 임의로 s_0 값을 정한 후, 시간이 경과함에 따라 변하는 항공기 i 와 j 의 경로상의 위치와 분리거리를 계산한다. 시간이 경과함에 따라 분리거리는 점차 줄어들다

어는 순간부터 늘기 시작하여 이 순간에서의 분리거리가 주어진 초기분리거리에 따라 결정되는 두 항공기간의 최소근접거리이다. 이 최소근접거리는 초기분리거리의 증가함수이므로 최소근접거리가 분리기준 δ 보다 작을 경우는 초기분리거리를 조금 키워서, 클 경우에는 조금 줄여서 전술한 과정을 반복하여 최소분리거리가 분리기준과 같아졌을 때 계산과정을 멈춘다. 이 때의 초기분리거리가 분리기준을 범하지 않으면서 얻을 수 있는 최소 초기분리거리이고 이 최소 초기분리거리를 적용하면 두 항공기의 활주로 도착시간차 t_{δ} 의 최소값을 얻을 수 있고 따라서 공역의 최대 수용력을 성취할 수 있다. 항공기 구성이 이질적인 경우에는 항공기 기종별로 짝을 이를 확률을 계산하여 t_{δ} 의 평균값을 구하므로써 공역의 수용력을 계산할 수 있다. 이러한 계산방식은 선후 항공기의 속도차에 관계없이 적용되므로 Harris의 해석적 모형과 같이 opening case와 closing case를 구분할 필요가 없다.

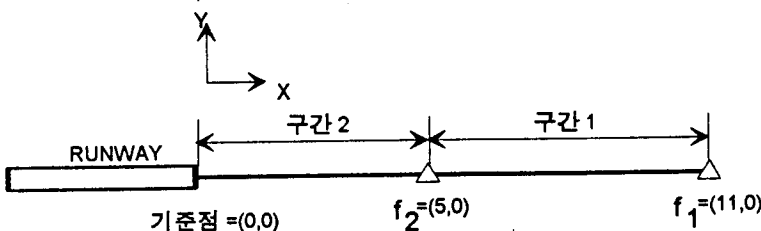
IV. 예제

전술한 터미널 공역의 수용력 계산 모형을 실제 상황에 가까운 문제에 적용하여 모형의 '효용성'과 공역설계의 중요성을 검증하고자 한다. 공역의 활용상황을 설명하는 항공기 혼합비율로는 초

대형(heavy) 항공기 80%, 중형(medium) 항공기 20%로 설정하였다. 접근경로의 기하학적 구조는 직선형과 선회형 두가지를 고려하였다. ICAO(1985)은 분리기준 δ 의 값으로 레이더 수평분리의 경우는 5해리를 -정밀 레이더가 운용될 때는 3해리-, 접근단계에서의 와류회피를 위한 분리기준으로는 선후항공기의 기종에 따라 3/4/5/6해리를 추천하고 있으며, 지역이나 국가에 따라서 더 엄격한 분리기준을 적용하기도 한다. 본 연구에서는 레이더 관제 수평분리기준인 5해리를 적용하였다.

4.1 직선형 접근경로(Strait-in Approach)

터미널 공역의 진입점이 활주로 중심선의 연장선에 위치하는 경우이며 예제를 위한 접근경로의 기하학적 구조는 그림 4에 나타나 있다. 즉, 터미널 공역의 진입점 f_1 이 활주로로부터 11해리 떨어져 있는 접근경로가 매우 짧은 경우로 접근경로는 두개의 구간으로 나눌 수 있다. 진입점부터 활주로까지의 거리가 5해리인 점까지는 (구간 1) 초대형, 중형 항공기 모두 170노트로 비행하다 최종접근부에서는 (구간 2) 각각 150, 140노트로 감속한다고 가정하였다. 항공기종별 짝을 이루는 경우 네 가지이며 각 경우별 수용력 계산과정은 표 1에 요약되어있다.



〈그림 4〉 직선형 접근경로(예제 1)

표 1에서 보는 바와 같이 5해리 분리기준을 만족하기 위해서는 공역의 진입점에서의 초기분리거리는 5.7 또는 6.1해리가 되어야 하고, 주어진

접근경로와 항공기 혼합비율에 의한 터미널 공역에서의 평균 도착시간차는 $(0.64 \times 2.004 + 0.16 \times 2.148 + 0.16 \times 2.148 + 0.04 \times 2.148) = 2.033$ 분

이며, 따라서 공역의 수용능력은 시간당 29.5회 운항이 된다.

직선형 접근구간인 경우 전 구간에 걸친 운항 속도가 기종별로 일정하다면, Harris의 해석적

모형을 이용하여 보다 쉽게 용량을 구할 수 있고, 계산 결과는 본 논문에서 제시한 수치계산방법의 결과와 동일하게 된다.

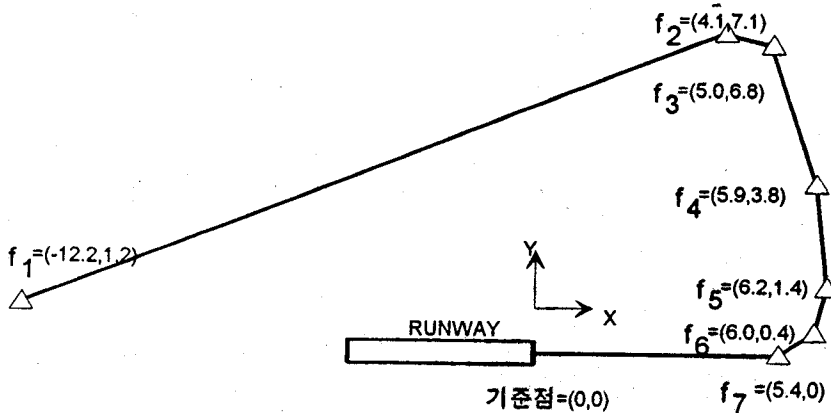
〈표 1〉 직선형 접근경로 수용력 계산(예제 1)

항공기 짝(j=i)	화물(D_{ij})	최소 초기분리(해리)	최소 도착시간차(분)
초대형 → 초대형	0.64	5.689	2.044
중형 → 초대형	0.16	5.689	2.148
초대형 → 중형	0.16	6.074	2.004
중형 → 중형	0.04	6.074	2.148

4.2 선회형 접근경로

접근하는 항공기가 터미널 공역에서 선회하면서 활주로 방향과 운항 방향을 일치시키는 경우이며 예제를 위한 접근경로의 기하학적 구조는 그림 5에 나타나 있다. 즉, 터미널 공역의 진입점 f_1 의 좌표값은 $(-10.2, 1.0)$ 이고 실질적인 접근단계는 f_2 에서 시작되는 경우로(f_1, f_2)구간은 전이 단계(transition phase)라 한다. f_2 부터 f_7 까지 여

러 구간으로 세분한 것은 직선을 이용하여 곡선으로 구성된 접근경로를 좀 더 정확하게 표현하고자 함이다. 초대형, 중형 모두 전이단계 및 선회부에서는 170노트로 비행하다 최종접근부($f_7 \rightarrow$ 활주로)에서는 각각 150, 140노트로 감속한다고 가정하였다. 항공기종별 짝을 이루는 경우는 네 가지이며 각 경우별 수용력 계산과정은 표 2에 요약되어 있다.



〈그림 5〉 선회형 접근경로 (예제 2)

〈표 2〉 선회형 접근경로 수용력 계산(예제 2)

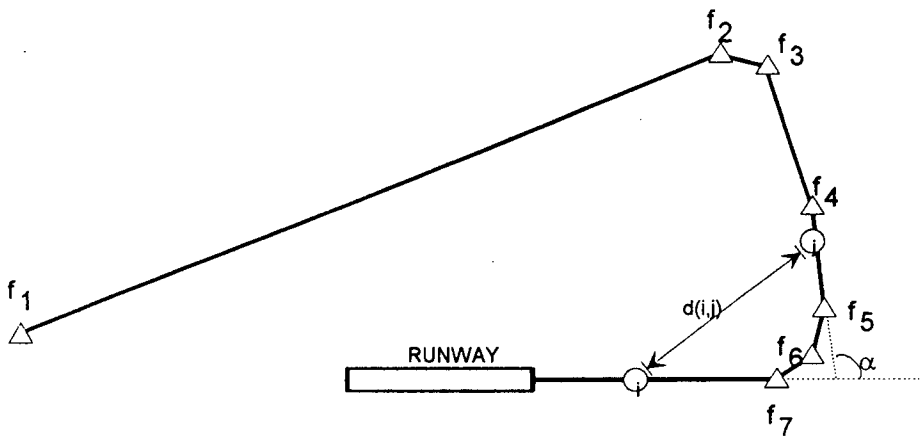
항공기 짝(j=i)	확률(p_{ij})	최소 초기분리(해리)	최소 도착시간차(분)
초대형 → 초대형	0.64	7.278	2.568
중형 → 초대형	0.16	7.278	2.724
초대형 → 중형	0.16	7.532	2.496
중형 → 중형	0.04	7.532	2.652

표 2에서 보는 바와 같이 5해리 분리기준을 만족하기 위해서는 공역의 진입점에서의 초기분리 거리는 7.3 또는 7.5해리가 되어야 하고, 주어진 접근경로와 항공기 혼합율에 의한 터미널 공역에서의 평균 도착시간차는 $(0.64 \times 2.568 + 0.16 \times 2.274 + 0.16 \times 2.496 + 0.04 \times 2.652) = 2.585$ 분이며, 따라서 공역의 수용력을 시간당 23.2회 운항으로 예제 1의 시간당 29.5회운항에 비하여 수용능력이 현저히 떨어진다.

4.3 수용력 차이의 원인 분석

예제 1과 예제 2를 비교하여 보면 항공기 혼합비율, 운항속도는 같으나 접근경로의 기하학적

구조의 차이에 의하여 수용력에 차이가 발생함을 알 수 있다. 예제 2의 경우 앞선 항공기가 f_7 을 지나 활주로를 향하여 비행하고 뒤따르는 항공기가 f_4 를 지나 f_5 를 향해 비행할 때 두 항공기간 간격이 가장 짧아지게 되며 이 때에도 5해리의 거리는 유지하여야 한다. 초기 분리거리가 7해리 이상 필요한 것은 이 정도의 초기 분리거리를 확보해야 두 항공기간 간격이 접근하는 전 과정 중에 5해리 이내로 줄어드는 것을 방지하기 때문이다. 이 상황을 그림으로 표현하면 그림 6과 같이 되며 두 항공기간의 실제 비행거리 차이는 5해리보다 커지므로 활주로 도착시간차가 직선형 접근경로보다 커져 수용력의 감소를 초래한다.



〈그림 6〉 두 항공기간의 최소 간격

4.4 민감도 분석

전술한 예제를 통하여 접근경로의 형태가 수용 능력에 적지 않은 영향을 미친다는 것을 보았다. 본 절에서는 앞의 예제에서 사용된 두가지 형태의 접근경로에서 항공기의 혼합비율이 변할 때와 분리거리기준이 변할 때의 공역에서의 수용능력을 계산하여 이러한 영향요인이 수용능력에 미치는 효과를 살펴보았다. 예제 1과 2에서 초대형 항공기의 혼합비율을 50%에서 100%로 조정해 본 결과 수용능력의 범위는 각각 [28.9회~29.9회], [23.0회~23.4회]이 되었다.

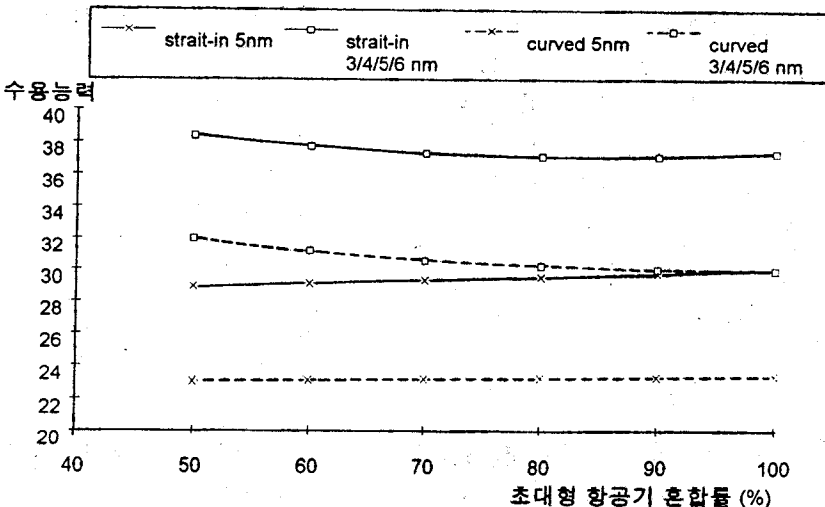
공역에서 운항하는 모든 항공기에 적용되는 분리 기준거리 기준은 항공기 혼합물과 더불어 수용능력에 영향을 미친다. 접근단계에서는 선후 항공기의 기종에 관계없이 일정한 분리거리를 유지하기도 하지만 기종에 따라 서로 다른 분리거리기준을 적용하기도 한다. 표 3은 ICAO(ICA0, 1985)가 추천한 접근단계에서의 분리거리의 최소치로 이런 분리거리 기준을 적용하면 직선형 접근경로의 경우 시간당 7~10회, 선회형 접근경로의 경우 시간당 6~9회의

수용능력 증가가 있음을 알 수 있었다(그림 7 참조). 환언하면, 공역에서의 용량은 접근경로의 형태와 적용되는 분리기준에 의해 좌우되며, 항공기의 혼합비율은 초대형 항공기의 혼합물이 50%에서 100%사이에서 머무를 경우에는 부수적인 영향 - 시간당 2회 증감 - 만 미친다.

이상의 민감도 분석 결과는 현재 우리나라 국제공항에서 운항되지 않는 소형항공기를 고려하지 않을 때만 유효하며, Janic and Tosic(1982)은 소형 항공기가 중형 또는 초대형 항공기와 같은 공역에서 운항할 때는 소형 항공기의 혼합물이 수용능력에 적지 않은 영향 - 시간당 10회 증감 - 을 미치는 것으로 평가하였다.

<표 3> 접근단계에서의 ICAO 분리거리기준(단위: 해리)

		후행 항공기		
		초대형	중형	소형
선행항공기	초대형	4	5	6
	중형	3	3	5
	소형	3	3	3



<그림 7> 영향요인의 변화에 따른 수용능력의 변화

V. 결론

본 고에서는 터미널 구역에서의 교통량 처리능력을 산출하는 모형과 계산 방법을 제안하였다. 이 모형을 이용하면 접근경로의 기하학적 구조, 항공기 혼합비율, 항공기별 운항속도 등의 정해진 상황에서 해당 터미널 구역의 수용력을 계산할 수 있었다. 전술한 예에서 보았듯이 접근경로의 구성에 따라 구역의 교통량 처리능력은 차이가 나며, 따라서 구역을 계획하거나 설계할 때, 설계 지침서와 함께 모형을 활용함으로써, 구역 수용능력에 영향을 미치는 구역의 기하학적 구조, 항공기 혼합비율, 항공기별 운항속도, 분리거리기준 등의 변수에 대한 민간도 분석을 통하여 구역계획의 합리화를 도모할 수 있다. 터미널 구역에서의 수용능력은 여러가지 불확실성을 고려한 시뮬레이션 모형으로 운항요구횟수의 증감에 따르는 지체시간의 변화까지도 분석이 가능하지만, 본 모형은 이론적 최대 수용능력을 계산할 수 있다는 장점과 여러가지 다른 경로설정 대안에 대한 평가가 시뮬레이션 모형보다 빨리 이루어질 수 있다는 장점이 있다. 따라서 신 공항을 계획할 때 또는 기존 공항의 접근경로를 변경하고자 할 때, 시뮬레이션 모형과 함께 활용되므로써 보다 효과적이고 효율적인 구역설계에 기여할 수 있을 것이다. 이 외에도 항공기가 구역에 진입한 후 활주로에 착지할 때까지의 접근단계에서 분리기준을 만족하는데 필요한 초기분리거리를 계산하여 주는 기능을 활용하면 주어진 경로에서 분리기준을 수정하고자 할 때나 접근경로를 새로이 개설할 때, 항공기의 분리를 확보하기 위한 관계절차를 수립하는데 도움을 줄 수 있다.

현 수준의 모형은 단일 접근경로만 고려하였으나 복수 접근경로의 경우에도 모형을 수정하여 적용할 수 있다. 이를 위해서는 먼저 식 (3)에 항공기가 이용하는 복수의 경로를 표시하기 위한 첨자가 포함되어야 하며, 알고리즘의 입력자료에

복수의 경로를 포함시켜야 한다. 이 모형에는 두 항공기가 활주로를 동시에 점유할 수 없다는 원칙은 고려하지 않았으므로, 선행 항공기의 활주로 점유시간을 고려하여 접근경로와 활주로를 함께 고려하는 모형의 개발이 향후 연구과제이다.

감사의 글

본 논문의 구성을 향상시키는데 도움이 되는 조언을 주신 세 분의 무기명 심사위원께 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 양한모, 영종도 신국제공항건설에 따른 수도권공역의 활용성 증진에 관한 연구, 한국항공대학논문집 제31집, pp.465-474, 1993년
2. 이태원, 현대항공수송론, 서울컴퓨터프레스, 1991년.
3. Airborne Instrument Laboratories, Inc., *Airport Capacity; A Handbook for Analyzing Airport Design and to Determine Practical Movement Rates and Aircraft Operating Costs*, 1963.
4. Ashford, N. and Wright, P.H., *Airport Engineering*, Third Edition, John Wiley and Sons, Inc., 1992.
5. Bianco, L. and Bielli, M., 'Air Traffic Management and Algorithms', *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 36, No.2, pp.131-167, 1992.
6. Blumstein, A., *An Analytical Investigation of Airport Capacity*, Cornell Aeronautical Laboratory, Report TA-1358-6-1, 1960.
7. Fan, H. S. L., 'Effect of Local Operational onstraints on Runway Capacity-A Case Study', *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 26, No.2, pp.169-184, 1992.

8. Federal Aviation Administration, *Airport Capacity and Delay*, AC 150/5060-5, 1983.
9. Federal Aviation Administration, *United States Standard for Terminal Instrument Procedures*, 1976.
10. Harris, R. M., *Models for Runway Capacity Analysis*, MITRE Technica Report No. 4102, The MITER Corporation, 1972.
11. Horonjeff, R. and McKelvey, F.X., *Planning and Design of Airports*, Third Edition, McGraw-Hill Book Co., 1983.
12. International Civil Aviation Organization, *Procedures for Air Navigation Services: Rules of the Air and Air Traffic Services*, Twelfth Edition, 1985.
13. International Civil Aviation Organization, *Aircraft Operations, Volume II: Construction of Visual and Instrument Flight Procedures*, Third Edition, 1986.
14. Janic, M. and Tomic, V., 'Terminal Airspace Capacity Model', *Transportation Research*, Vol. 16A, No.4, pp.253-260, 1982.
15. Newell, C.F., 'Airport Capacity and Delays', *Transportation Science*, Vol. 13, No.3, pp.201-241, 1979.