

# RVSM 안전성 평가에 대한 연구

## The Study on RVSM Safety Assessment

김성겸\*, 신대원(한국항공우주연구원)

### 1. 서론

RVSM(수직분리기준 축소, Reduced Vertical Separation Minima)은 비행고도 FL290~FL410 사이에서 항공기간 수직분리기준을 기존의 2000ft에서 1000ft로 축소운용하는 것으로서 추가적인 운항고도를 제공함으로써 공역수용량을 확충하기 위한 것이다.

대기압은 고도가 높아질수록 로그함수의 형태로 감소하기 때문에 기압고도계의 대기압 측정 오차가 동일하다 하더라도 이로 인한 고도 오차는 고도에 따라 지수적으로 증가하게 된다. 다시 말하면 고고도일수록 항공기의 압력고도계 정밀도가 저하된다는 의미이다. 이러한 배경에서 ICAO(International Civil Aviation Organization)는 고고도에서의 고도이탈에 의한 항공기 충돌을 방지하기 위해 1960년 FL290 이상의 수직분리기준을 2000ft로 설정하였다. 당시 적용고도를 FL290 이상으로 설정한 것은 정확한 분석에 근거한 것이 아닌 당시 항공기의 운항고도상의 한계에 따른 것이다. 그러나 이러한 고도체계는 현재 운용되고 있는 상당수 상업용 항공기의 최적 운항고도가 FL290 이상이라는 점에서 증가하는 교통량을 효율적으로 수용하는데 장애요인으로 작용하였고 특히 1970년 중반 석유파동으로 인한 유가상승 때문에 더욱 효율적인 공역사용에 대한 필요성이 제기되었다. 이러한 배경에서 1980년대 초반 ICAO의 지원하에 각 국가들은 수직분리기준 축소와 관련하여 광범위한 연구를 시작하였으며 1997년 NAT(North Atlantic) 지역을 필두로 RVSM의 적용이 점차 확대되기 시작하여 현재 일부 지역을 제외하고는 RVSM의 적용이 이루어지고 있다. 우리나라의 경우도 일본과 협력하여 2005년부터 RVSM을 시범적으로 운영 중에 있다.

수직분리기준이 축소되면 그만큼 항공기간 공중충돌 가능성이 높아지기 때문에 ICAO에서는 RVSM 적용시의 충돌가능성을 정량적으로

추정하는 안전성 평가를 수행하여 그 결과가 정해진 기준 이하 일 때에 한해서 RVSM 시행을 허용하고 있다.

본 논문에서는 RVSM 적용을 위해 선행되어야 하는 RVSM 안전성 평가의 기본 개념 및 방법을 소개하고 이를 적용하여 수행한 인천 FIR에 대한 안전성 평가 결과를 제시하도록 하겠다.

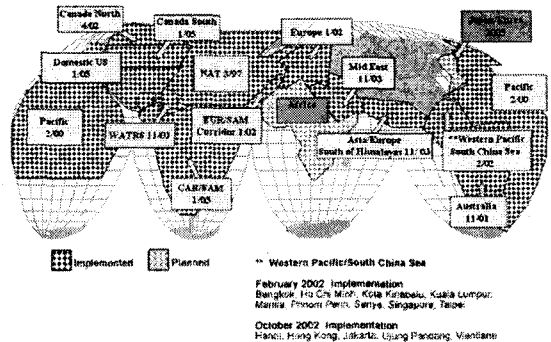


그림 1. RVSM 이행 현황

### 2. RVSM 안전성 평가의 기본 개념

RVSM 안전성 평가의 목표는 고도분리값을 축소할 경우 인접고도를 운항하는 항공기 사이에서 발생할 수 있는 공중충돌의 가능성을 확률적으로 추정하고 이 확률이 정해진 기준(TLS : Target Level of Safety)을 충족하는지를 확인하는데 있다. 현재 ICAO에서 제시하고 있는 RVSM 시행을 위한 TLS는 비행시간당 충돌사고 발생 가능성  $5.0 \times 10^{-9}$  미만이다. 이 기준은 조종 및 관제 실수, 난류 등 기상현상에 의한 고도 이탈 등과 같이 인적/환경적 관련된 요인들까지 고려한 것으로서 이를 제외한 항공기 탑재 기압고도 시스템 및 고도유지 시스템의 부정확성만을 고려한 TLS는  $2.5 \times 10^{-9}$  이며 기술적인 결함에 의한 충돌확률 기준(Technical

TLS)이라는 용어를 사용하여 전자의 기준과 구분하고 있다. 본 연구에서는 기술적인 결함에 의한 충돌확률에 대한 내용만을 다루도록 하겠다.

### 3. Reich 공중충돌모델

공중충돌확률은 다음과 같이 다양한 방법을 통해 추정할 수 있는데 RVSM 안전성 평가와 관련하여 ICAO에서 권고하고 있는 방식은 Reich 충돌모델을 이용한 방식이다.

확률적/해석적 방법	시뮬레이션
Reich Model Gas-Law Model Intersection Model	Real Time Fast Time

Reich가 제안한 단위 시간당 충돌회수의 기대값을 개념적으로 표현하면 다음과 같다. 별도로 언급하지 않는 한, 좌표체계는 트랙 방향을 x축, x축에 수직이고 지면에 평행한 방향을 y축, 나머지를 z축으로 하겠다.

$$C = \sum_{\text{all dimension}} \text{frequency with which separation between two aircraft is lost in one dimension} \times \text{probability that separation in the two dimensions has simultaneously been lost}$$

$$= N_x P_y P_z + N_y P_x P_z + N_z P_x P_y$$

C : 단위시간당 충돌회수  
 N<sub>r</sub> : r 차원에서의 분리실패 빈도  
 P<sub>r</sub> : r 차원에서의 분리실패 확률

여기에 항공기의 형상을 직육면체로 간주하고 모든 방향으로의 등속운동을 가정하면 위 식은 다음과 같이 표현할 수 있다. 항공기의 충돌은 두 항공기가 동시간대에 점유하는 공간이 중첩되는 것으로 정의하며 동일 트랙, 1000ft 고도분리 상태에서 인접 고도를 운항하는 항공기 간의 충돌만을 고려한다.

$$N_{az} = N_{az}(opp) + N_{az}(same)$$

$$N_{az} = P_z(1000)P_y(0) \frac{\lambda_x}{S_x} \{ E_z(same) \{ \frac{|\Delta V|}{2\lambda_x} + \frac{|\dot{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\dot{z}|}{2\lambda_z} \} + E_z(opp) \{ \frac{2|\Delta V|}{2\lambda_x} + \frac{|\dot{y}|}{2\lambda_y} + \frac{|\dot{z}|}{2\lambda_z} \} \}$$

$$N_{az} = P_z(1000)P_y(0) \{ N_x(same) \{ 1 + \frac{\lambda_x |\dot{y}|}{|\Delta V| \lambda_y} + \frac{\lambda_x |\dot{z}|}{|\Delta V| \lambda_z} \} + N_x(opp) \{ 1 + \frac{\lambda_x |\dot{y}|}{2\bar{V} \lambda_y} + \frac{\lambda_x |\dot{z}|}{2\bar{V} \lambda_z} \} \}$$

각 파라미터의 의미는 다음과 같다.

- P<sub>z</sub>(1000) : 1000 ft 수직분리기준하에서 XZ 평면에서(수직(고도)방향으로) 두 항공기가 중첩될 확률(vertical overlap probability)
- P<sub>y</sub>(0) : XY 평면에서 가로방향으로 두 항공기가 중첩될 확률(lateral overlap probability)
- |ΔV| : 인접고도에 있는 두 항공기가 동일한 방향으로 비행하는 경우 두 항공기간의 상대속도(double alternate track의 경우)
- $\bar{V}$  : 항공기의 평균속도
- $|\dot{y}|, |\dot{z}|$  : 한 두 항공기의 트레이탈 상대속도(relative deviation rate)
- E<sub>z</sub>(점유율) : 동일한 트랙에서 한 항공기를 기준으로 하였을 때 비행방향으로 전후 S<sub>z</sub>의 거리 내에 위치하는 인접고도 항공기 수의 평균
- λ<sub>x</sub>, λ<sub>y</sub>, λ<sub>z</sub> : 항공기의 평균 길이, 폭 및 높이
- N<sub>x</sub>(opp), N<sub>x</sub>(same) : 각각 반대방향과 동일방향으로 비행하는 경우에 대한 교차빈도(passing frequency)

상기 식에서 뒷부분을 N<sub>x</sub>(equivalent)로 축약하면 단위 비행시간 당 예상되는 충돌회수는 다음과 같이 세 개의 파라미터의 곱으로 표현할 수 있다.

$$N_{az} = P_z(1000)P_y(0)N_x(equivalent) < TLS$$

위 공식에 나타난 파라미터들은 각각 독립적인 방식으로 측정 또는 추정할 수 있기 때문에 매우 유용한 형태이다. TLS < 2.5×10<sup>-9</sup>와는 별개로 상기 파라미터 각각에도 상한선이 부여되는데 이는 다음과 같다.

- N<sub>x</sub>(equivalent) < 2.5회/1비행시간
- P<sub>y</sub>(0) < 0.058  
(또는 이탈오차의 표준편차 > 550m)
- P<sub>z</sub>(1000) < 1.7×10<sup>-8</sup>

위의 각 파라미터에 대해 설정된 상한값을 곱하면  $2.5 \times 10^9$  을 얻을 수 있다. 또한 제한된 범위에서 각 인자간의 trade-off도 허용된다.

**3.1 수직방향 중첩확률  $P_z(1000)$**

이론상으로는 고도 분리값이  $S_z$  인 공역에서 인접 고도를 비행하는 항공기 간의 고도차에 대한 확률밀도 함수를  $f^{zn}(z)$ 로 정의할 때 수직방향으로의 중첩확률은 다음과 같이 구할 수 있다.  $\lambda$ 는 항공기의 높이이고,  $f^z(z_1)$ 은 개별 항공기의 고도오차 확률밀도 함수이다.

$$P_z(S_z) = \int_{-\lambda}^{+\lambda} f^{zn}(z) dz$$

$$f^{zn}(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f^z(z_1) f^z(S_z + z_1 - z) dz_1$$

$$P_z(S_z) = \int_{-\lambda}^{+\lambda} \int_{-\infty}^{+\infty} f^z(z_1) f^z(S_z + z_1 - z) dz_1 dz$$

결국, 항공기의 고도 오차 확률밀도 함수  $f^z(z_1)$ 을 알 수 있다면 수직방향 중첩확률을 추정할 수 있으며 이는 일반적으로 레이더 또는 GPS(Global Positioning System) 등을 이용하여 항공기의 고도 이탈 분포 데이터를 수집하는 방식으로 이루어진다.

항공기의 고도 오차 확률 밀도 함수는 일반적으로 다음과 같은 Double Generalized Laplace 확률밀도함수로 근사 할 수 있는 것으로 알려져 있다.

$$f_{DGL}(x) = (1 - \alpha) \frac{1}{2a_1 b_1 \Gamma(b_1)} e^{-\left|\frac{x-\mu}{a_1}\right|^{b_1}} + \alpha \frac{1}{2a_2 b_2 \Gamma(b_2)} e^{-\left|\frac{x-\mu}{a_2}\right|^{b_2}}$$

**3.2 수평방향 중첩확률  $P_y(0)$**

수직방향중첩확률의 경우와 유사한 방식으로 추정이 가능하다. 지상 레이더를 이용하여 수평면상에서의 중첩 빈도인  $P_y(0)N_z$ 를 직접 카운트하는 방식도 있다.

**3.3 교차빈도  $N_x$  (equivalent)**

점유율( $E_z$ )을 통해 교차빈도를 구하는 방식과 직접 교차빈도를 추정하는 방식이 있으며 대표적인 방식은 아래와 같다.

첫 번째는 정상유동모델(Steady State Flow Model)을 적용하여 점유율을 계산하는 방식으로

서 항공교통이 통계적으로 일정한 흐름 상태를 유지하며 이루어지고 있는 것으로 가정하면 점유율을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_z = 2 \times \frac{\sum_{i=2} \sum_{j=1} m_{i-1,j} m_{i,j} (2S_z/V)}{\sum_{all\ i,j} m_{i,j}}$$

$m_{i,j}$ 는 단위시간당  $i$ 번째 고도,  $j$ 번째 비행경로로 진입하는 항공기 수이고,  $V$ 는 항공기 평균 비행속도를 의미한다.

동일한 트랙에서 인접고도를 비행하는 항공기에 대하여 위 식을 적용하면 다음과 같다.

$$E_z = \frac{4S_z}{V} \frac{m_i m_j}{m_i + m_j}$$

상기의 방식은 계산이 용이한 반면, 정상상태로 교통의 흐름이 이루어진다는 것이 확인되어야 한다는 점에서 제한사항이 있다.

두 번째는 비행진행정보를 사용하여 점유율을 계산하는 방법이다.

비행진행정보(flight progress information)를 사용하여 점유율을 직접 계산 방식으로서 항공기가 특정 지점을 통과하는 시간에 그 항공기에 대하여 일정 시간기준(통상적으로 15분 기준) 이하의 거리에 있는 항공기의 수를 카운트하여 점유율을 계산한다.

인접고도 간에 진행방향이 반대가 되도록 구성된 항로의 경우 교차빈도는 다음과 같이 점유율을 이용하여 구할 수 있다.

$$N_x(opp) = \frac{E_z(opp) | \bar{V} |}{S_z}$$

세 번째로 직접 교차빈도를 계산하는 방법이 있다. 인접고도 간에 진행방향이 반대가 되도록 구성된 항로를 고려하면, 항로상의 임의의 두 지점(A, B) 사이에서 반대방향으로 진행하는 항공기( $i, j$ )가 교차하기 위한 필요충분조건은  $T_{Ai}$ 를 항공기  $i$ 가 A 지점을 통과하는 시간이라고 할 때 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{Ai} < T_{Aj} \text{ and } T_{Bj} > T_{Bi}$$

따라서, A와 B지점사이에서의 항공기의 비행 기록을 고도별로 그룹화 한 다음 인접고도(아래 또는 위)에 대해서 상기조건을 만족하는 항공기의 쌍을 검색하여 교차횟수를 구할 수 있다. 이렇게 구한 교차횟수의 두 배를 총 비행시간으로 나누면 교차빈도  $N_x(opp)$ 를 계산할 수 있다.

마지막으로 XY 평면상에서 항공기가 중첩되는 빈도인  $P_y(0)N_x$ 를 측정하는 방법이 있다.

이 방식에서는 두 항공기가 수평방향으로 기준거리 R 미만으로 근접하여 교차하는 경우 중 두 항공기 사이의 거리가 항공기 평균 폭보다 작은 확률을 측정하게 된다. 이론적으로는 R 값을 항공기 평균폭과 같게 설정하는 것이 가장 정확한 값을 추정할 수 있는 방법이나 이러한 조건에서는 근접 교차 빈도가 매우 낮기 때문에 통계적으로 신뢰할 수 있는 데이터를 얻기 위해서는 장기간의 측정이 불가피하다.

또한 HMU(Height Monitoring Unit) 등과 같은 정밀 지상 Radar 설비를 갖추어야 한다. 유럽 지역의 RVSM 안전성 평가 및 모니터링에 이용되고 있으며 HMU가 설치되어 있지 않은 한국의 경우에는 적용하기 어려운 방식이다.

#### 4. 인천 FIR의 안전성 평가

RVSM 안전성 평가를 위해 본 연구원에서는 2004년 8월에서 9월까지 두 달 동안의 항공기의 비행자료를 토대로 FL290 이상 운항고도에서의 교차빈도를 추정하였다. 정확한 값을 얻기 위해서는 RVSM 시행에 따른 고도별 교통량의 재분포를 고려하여야 하나, RVSM 시행에 따라 예상되는 전체적인 교통량 증가를 감안하더라도 추가적인 고도 사용으로 인해 고도별 교통량은 오히려 감소하는 것이 일반적이므로 2000ft 분리기준하의 현재 비행자료를 사용하는 것이 더 보수적인 결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서 채택한 교차빈도 추정방식은 교차빈도의 직접계산 방식으로서 이 방식을 적용하기 위해 인천 FIR 내의 항로 구조와 운항 항공기의 비행경로 패턴을 분석하여 RVSM entry point/exit point를 지정한 후, 비행자료에 기록된 항공기의 속도 및 비행경로 데이터를 기반으로 각 Fix의 통과시간을 추정하였다.

인천 FIR 내의 항로는 인접고도 간에는 진행

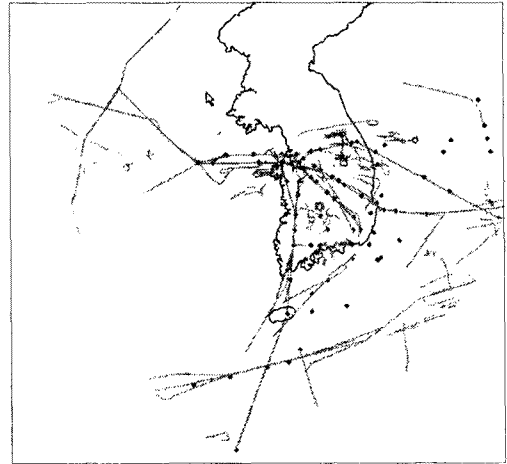


그림 2. 인천 FIR의 비행 패턴-FL290 이상 방향이 서로 반대인 single alternate 방식이므로 동일 방향으로의 교차빈도( $N_x(same)$ )은 고려하지 않고, 반대 방향으로 운항하는 항공기에 대한 교차빈도인  $N_x(opp)$ 을 계산하였다. track 상의 항공기 속도에 비해 다른 속도 성분이 상대적으로 매우 작은 크기를 갖기 때문에  $N_x(equivalent)$ 는 다음과 같이  $N_x(opp)$ 로 근사할 수 있다는 가정을 하였다.

$$N_x(equivalent) = N_x(opp) \left\{ 1 + \frac{\lambda_y \bar{y}}{2\bar{V}\lambda_x} + \frac{\lambda_z \bar{z}}{2\bar{V}\lambda_x} \right\} \approx N_x(opp)$$

그 결과 하루를 단위로 한 교차빈도는 약 0.4에서 0.7 사이에서 분포되는 것을 확인할 수 있었으며 평균값은 0.54로서 ICAO의 요구조건인 2.5보다 충분히 낮은 값을 나타냈다.

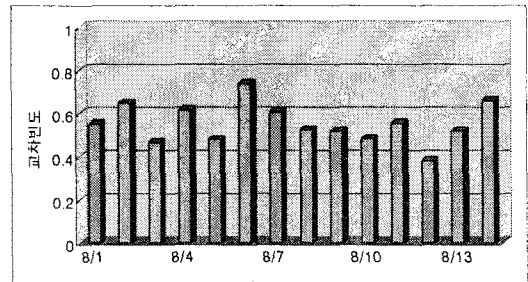


그림 3. 교차빈도(2004년 8월1일~14일)

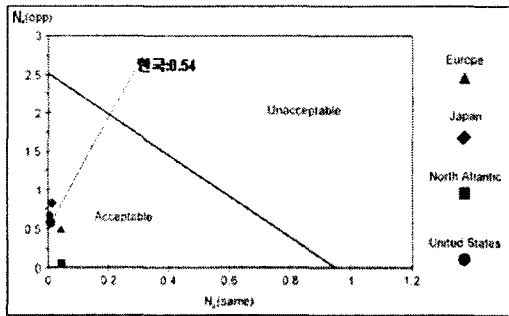


그림 4. 주요 지역과의 교차빈도 비교

수직방향 중첩확률의 경우, RVSM이 시행되면 기본적으로  $P_2(1000) < 1.7 \times 10^{-8}$ 을 충족하는 것이 입증된 항공기, 즉 RVSM 형식승인을 취득한 항공기들만이 RVSM 공역에 진입할 수 있으므로  $P_2(1000) = 1.7 \times 10^{-8}$ 으로 보수적인 가정을 할 수 있다.

또한 수평방향 중첩확률의 경우 ICAO의 요구조건이 실제 운항되는 항공기들의 데이터를 기반으로 최대한 여유를 두고 설정한 값이기 때문에 ICAO에서 제시하는 상한값인 0.058을 그대로 적용하였다.

위와 같이 가정 또는 추정된 값을 사용하여 RVSM 공역에서의 공중충돌확률을 계산하면 비행시간당  $0.53 \times 10^{-9}$  이하일 것으로 추정되며 ICAO의 TLS를 충분한 수준으로 만족하고 있는 것으로 평가할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 RVSM 공역안전성 평가와 관련하여 Reich 충돌위험모델에 기반한 RVSM 공중충돌확률 추정기법을 소개하고 이를 적용하여 정량적으로 예측한 인천 FIR 내의 RVSM 공중충돌가능성을 제시하였다.

안전성 평가 결과 현재(2004년 기준) 국내 공역의 공중충돌위험성은 RVSM 시행을 위한 요건을 일단 충족하고 있음이 확인되었다. 그러나 향후 있을 수 있는 항로 구조의 변경 및 이로 인한 교통 패턴의 변화 그리고 연평균 10% 내외의 교통량 증가추세를 감안하였을 때, 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 사료되며, 국가적 차원에서 이를 위한 체계적인 평가 시스템을 구축할 필요가 있다.

참고문헌

- FAA, Advisory Circular 91-RVSM, 1994
- ICAO, Document 9574 Manual on the im-

plementation of 300m Vertical Separation Minimum Between FL290-FL410 Inclusive, 1992

- Eurocontrol, RVSM Master Plan, 1999
- Eurocontrol, ATC Manual for a RVSM in Europe, 2001
- ICAO, Document 9536 Review of the General Concept of Separation Panel, 1988
- Eurocontrol, The RVSM Pre-Implementation Safety Case, 2001