

계기비행절차 설계 기술동향

글/김필수 pskim@kari.re.kr

한국항공우주연구원 항공우주안전·인증센터 항공인증그룹

Doc 8168 PANS-OPS Vol II 이며 ICAO에서는 절차설계와 관련해 다음과 같은 주요 지침서를 발행하고 있다.

- ICAO Annex 4, 6, 10, 11, 14
- ICAO Doc 8168 PANS-OPS Vol I, II
- ICAO Charting Manual 등

1. 서론

항공기라는 운송수단이 발명된 이래 3차원의 공간을 비행하는 항공기에 대한 방법은 조종사가 직접 지상의 지형지물을 참조하며 비행하는 시각비행과 지상의 항행안전시설로부터 신호를 받아 비행하는 계기비행으로 구분되어 발전하였다.

계기비행을 위한 항행 시설은 NDB(Non-directional Radio Beacon), VOR(VHF Omni-directional Range) 등의 지상기반 항행안전 무선시설을 거쳐 최근에는 GNSS(Global Navigation Satellite System)를 사용하는 위성기반 항행방법으로 발전하고 있다.

계기비행 절차설계(Procedure Design)는 계기비행을 하는 항공기에 Track guidance를 제공하고 지상 장애물에 대한 일정수준 이상의 거리를 보장함으로써 안전한 항공기 운항을 꾀하는데 그 목적이 있다.

현재 계기비행절차설계를 위한 설계기준은 크게 국제민간항공기구(ICAO)에서 발행하는 PANS-OPS 기준과 미국 연방항공국(FAA)에서 발행하는 TERPs 기준으로 구분되어 있다.

현재 우리나라에서는 이 두 가지 기준을 국내 각 공항별로 적용하고 있으며 본문에서는 ICAO PANS-OPS 기준에 따라 고찰해보도록 하겠다.

1.1 절차설계를 위한 ICAO 지침서

절차설계에 가장 기본이 되는 지침서는 ICAO의 OCP(Obstacle Clearance Panel)에서 발행되는 ICAO

2. 절차설계의 기본 요소

2.1 항행안전시설

현재 사용되고 있는 계기비행을 위한 항행안전시설에 대한 성능기준은 ICAO Annex 10에 정의되어 있으며 보통 VOR, NDB, ILS(Instrument Landing System), MLS(Microwave Landing System) 등이 사용된다.

최근에는 항공기 계기비행접근절차를 위한 접근절차 설계 기준에 GNSS를 보정하여 사용하는 Basic GNSS 절차, GBAS(Ground-based Augmentation System) 절차가 도입되었으며 앞으로는 SBAS(Satellite Based Augmentation System)절차가 도입될 예정이다.

2.2 항공기 성능관련 요소

절차설계에 있어 영향을 주는 항공기 성능관련 요소에는 항공기 속도, 항공기 선회 성능 등이 있다. 이때 항공기 속도는 진대기속도(TAS)를 사용하며 항공기 선회성능은 선회각(Bank angle : α)에 따른 선회율(Turn rate : R)과 선회반경(Turn radius : r)로 표현되어 진다.

계기비행에서는 25°까지의 선회각을 사용하고 있

으며 특히 절차설계에서는 각 비행 단계별로 표 1과 같이 선회각이 적용된다.

표 1. PANS-OPS에서의 선회각 적용기준

선회각 α	비행 단계
15°	Missed Approach, Departure
20°	Circling procedure, Visual
25°	All Phase of approach

2.3 바람의 영향

절차설계에 있어 바람의 영향을 고려해야 하는 요소는 여러 가지가 있지만 그중 대표적인 것이 Wind Spiral이다. Wind Spiral은 지정된 경로를 진행하는 항공기가 바람에 영향에 의해 드리프트(Drift)되어 설정된 보호구역(Containment Surface) 밖으로 벗어나는 것을 막기 위해 항공기가 바람에 의해 드리프트되는 거리를 계산하여 보호구역 너비에 적용하기 위한 것이며 그림 1은 바람에 따른 Wind Spiral의 적용을 나타낸 것이다.

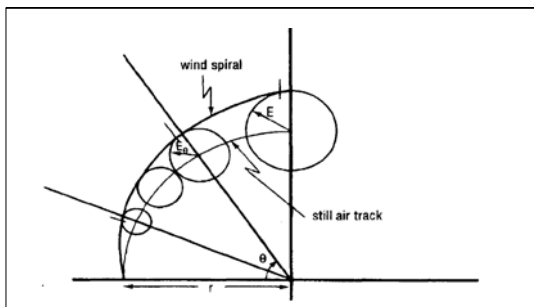


그림 1. Wind Spiral

3. 절차설계의 개요

3.1 계기접근 절차의 구간(Segments)

계기접근절차는 보통 그림 2와 같이 5가지 구간으로 구분되며 각 구간은 다음과 같은 특징을 가진다.

- Arrival Segment : Initial segment가 En-route Structure와 직접 연결될 수 없을 때 사용된다.
- Initial Segment : En-route 단계 비행에서 Terminal

단계 비행으로의 전환을 위한 구간이다.

- Intermediate Segment : Initial 구간과 Final구간을 연결하기위한 구간이다. 이 구간동안 항공기는 Final 구간을 위한 항공기 형상을 변경한다.
- Final Segment : 정상적인 착륙을 하기위한 항공기 위치 및 상태를 유지하는 구간이다.
- Missed approach Segment : 착륙을 수행할 수 없게 된 경우 항공기를 Holding이나 다시 En-route 구간으로 돌아갈 수 있게 해주는 구간이다.

각 구간은 다음과 같은 파라미터에 따라 기준이 적용된다.

- Alignment : 다음 Segment와의 각도(최대 회전각 포함)
- Length : 권고되는 최대, 최소 구간의 길이
- Descent Gradient : 최대, 최소, 최적의 경사도.
- Area : Obstacle clearance가 제공되는 지역 내 Track에 대해 규정된 너비
- Minimum Obstacle Clearance(MOC) : 지역 내 장애물과 해당 구간의 최저고도 사이의 수직적인 최소 장애물과의 거리

3.2 터미널 지역에서의 Fix/WPT

Fix/WPT(Waypoint)는 계기비행절차상의 정해진 한 지점이며 조종사가 항법시스템을 사용하여 확인할 수 있는 지점이다. Fix는 VOR, NDB, LLZ (Localizer) 등과 같은 항행안전무선시설을 이용하여 확인할 수 있는 지점이며 WPT는 GNSS 또는 RNAV(Area Navigation) 절차에서 사용되는 용어로서 기본개념은 Fix와 같다. 터미널 지역에서의 Fix /WPT는 다음과 같이 구분된다.

- IAF(Initial Approach Fix)/IAWP(Initial Approach Waypoint): Initial segment의 시작점
- IF(Intermediate Fix)/IWP(Intermediate Waypoint): Intermediate segment의 시작점
- FAF(Final Approach Fix)/FAWP(Final Approach Waypoint) : Final segment의 시작점
- MAP(Missed Approach Point)/MAWP(Missed Approach Waypoint) : Final segment의 종료지점이며 Missed approach segment의 시작점

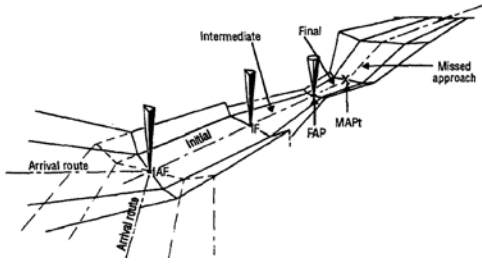


그림 2 일반적인 접근절차의 구성

4. 계기비행절차의 변화

4.1 개요

계기접근은 크게 Lateral Deviation 정보를 제공하는 비정밀접근(Non-Precision Approach)과 Lateral Deviation 정보와 Final segment에서 Vertical Deviation 정보를 제공하는 정밀접근(Precision approach)로 구분되어 진다. 비정밀접근에는 크게 NDB, VOR, LLZ 등이 사용되며 정밀접근 절차에는 ILS, MLS 등이 사용된다.

최근에는 GNSS의 사용이 현실화됨에 따라 GNSS를 사용하는 절차 중, Lateral Deviation 정보만 제공하는 Basic GNSS 절차의 경우 비정밀접근절차 군에, Lateral Deviation과 CAT-I 성능 이상의 Vertical Deviation 정보를 제공하는 GBAS 절차의 경우에는 정밀접근절차 군에 새롭게 속하게 되었으며 앞으로 도입될 SBAS 적용 절차 중 하나인 APV(Approach with Vertical Guidance) 절차는 아직 그 구분이 정해지지 않은 상태이다.

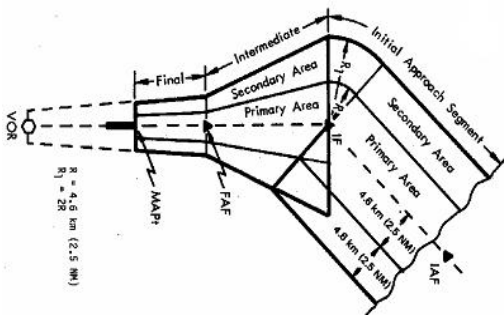


그림 3 일반적인 비정밀 접근 절차 구성

4.2 Basic GNSS 접근절차(RNAV_{GNSS})개요

RNAVGNSS 절차는 비정밀접근의 한가지로서 GNSS 위성에서 수신되는 신호를 항공기 GNSS 수신기로 수신해 자신의 위치를 확인하는 것으로서 절차설계 측면으로는 기존의 RNAVVOR/DME절차나 RNAVDME/DME절차와 기본개념은 동일하다.

보통 GNSS의 성능은 Accuracy, Integrity, Availability, Continuity의 4가지 파라미터로 나타내어지며 GNSS 수신기의 운용모드는 다음과 같이 En-route, Terminal, Approach모드로 구성된다.

- En-route mode : 비행계획상의 목적공항으로부터 30NM 외부의 범위에서 적용된다.
- Terminal mode : 목적공항으로부터 30NM이 내에서 적용되며 FAF(FAWP)이전에 종료된다.
- Approach mode : FAF(FAWP) 2NM 이전에 시작되며 MAPt(MAWP) 이후 다시 Terminal mode로 전환된다.

4.3 RNAV_{GNSS} 접근 절차의 구성

RNAVGNSS 접근절차는 통상적으로 그림 4와 같은 기준으로 “Basic T”또는 “Basic Y”형상으로 설계되며 기존의 비정밀 접근절차 설계 기준과 비슷하게 Initial, Intermediate, Final, Missed Approach Segment로 구분된다. 세부 기준은 대부분 기존 비정밀 접근과 같은 개념을 공유한다.

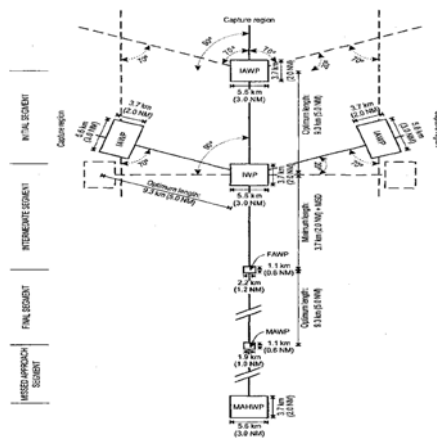


그림 4 통상적인 RNAVGNSS "T" 및 "Y" 형상

4.4 RNAV_{GNSS} 접근 절차의 특성

RNAVGNSS 절차는 항공기에 장착되는 GNSS 수신기의 기술적 특성으로 인해 하나의 WPT를 지나 다음 WPT까지의 거리가 항공기 선회거리 등으로 인해 짧을 경우 해당 WPT를 건너뛰어 다음 WPT로 진행하는 특성이 있다. 이런 경우를 방지하기 위해 그림 5와 같이 각 구간별로 항공기가 선회하여 안정되기까지의 거리를 계산하여 구간길이에 적용하게 되는데 이를 MSD(Minimum Stabilization Distance)라 한다.

총 구간거리는 항공기의 강하거리를 고려하여 MSD 및 DTA(Distance Turn Angle), WPT(Fly-By 또는 Fly-Over)를 지나는 거리를 고려한 유효구간거리(Effective Segment Length)를 기초로 계산되어진다.

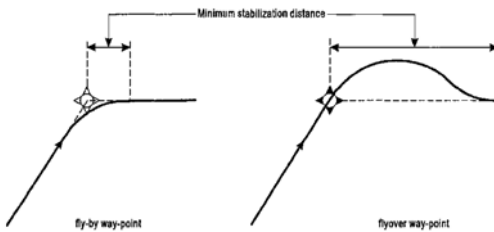


그림 5. Minimum Stabilization Distance

4.6 GBAS 접근 절차 개요

GBAS는 GNSS 보정 시스템의 한 종류이며 정밀 접근을 제공한다. 현재 GBAS는 CAT-I(Category I) 정밀접근의 정확도만을 지원할 수 있으나 앞으로 GPS 현대화 또는 GNSS 위성시스템의 추가 등으로 인한 GNSS 위성시스템의 시스템 정확도가 향상되면 현재의 ILS와 같이 CAT-II 및 CAT-III 정밀접근 서비스도 제공할 수 있을 것으로 전망된다.

지난 2004년 11월에 개정된 ICAO PANS-OPS Vol. II Amdt 12에는 CAT-I GBAS 정밀접근절차 설계 기준이 도입되었으며 새롭게 도입된 GBAS절차 설계 기준의 경우 전체적인 절차 구성, 세부기준, Precision Segment 에서의 Obstacle Protection을 위한 OAS (Obstacle Assesment Surface), CRM (Collision Risk Modeling) 등의 기본 골격은 기존의 ILS CAT-I 정

밀접근 절차의 구성과 거의 동일하며 Fix Tolerance Area의 구성 등의 세부적인 GNSS관련 특성은 기존의 RNAVGNSS절차의 그것을 수용하고 있다.

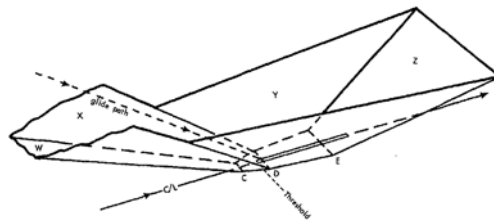


그림 6. ILS의 Obstacle Assesment Surface(OAS)

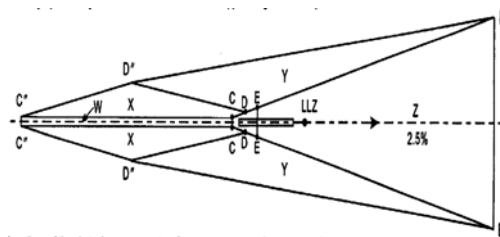


그림 7. ILS의 OAS Plan View

4.7 CRM의 개요

ILS, GBAS 등의 정밀접근절차 절차의 수립하기 위해 OAS내 장애물 평가를 위한 CRM(Collision Risk Model)을 수행하여야 한다. ILS CRM과 관련한 사항은 ICAO Doc 9274 Manual on the use of the Collision Risk Model(CRM) for ILS Operation을 참고하여 ICAO에서 사용하는 CRM 프로그램을 실행함으로써 분석을 수행한다.

GBAS CRM의 경우에는 현재까지 ICAO에서 발행된 관련 지침서가 없는 상황이지만 GBAS CRM의 모든 파라미터는 ILS CAT-I CRM의 파라미터와 동등하므로 ILS CAT-I CRM 분석방법을 사용해도 무리가 없을 것으로 판단된다.

ICAO에서 요구하는 CRM의 평가 기준은 Collision Risk Probability가 1.0×10^{-7} 이하여야 하며 만약 그 이상이면 해당 정밀접근절차의 DA/H(Decision Altitude/Height)를 높여 Collision Risk Probability가 1.0×10^{-7} 이하가 되도록 한다.

CRM 분석에서 주의할 점은 Precision Segment 내의 활주로 및 항공기 경로 주변 모든 장애물 정보를 입력하여 정확한 평가가 되도록 하는 것이다.

CRM에서는 그림 8과 같이 장애물의 각 지점으로 구분하여 모델링한 정보를 입력한다.(그림에서는 6개의 점으로 구분하였다.)

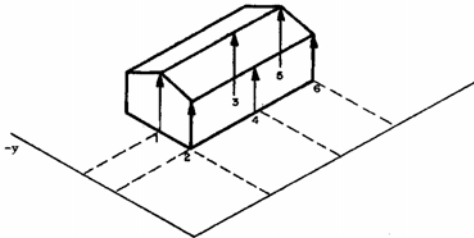


그림 8. CRM 모델링의 예시

5. RNP 개념의 도입

5.1 RNP 비정밀 접근 절차 개요

ICAO PANS-OPS Amdt 12에서의 RNP(Required Navigation Performance) 비정밀접근 절차 설계 기준은 기존의 RNP절차설계 기준에 비해 좀더 현실화된 기준이 제시되었다.

하지만 현재 ICAO PANS-OPS에 규정되어 있는 RNP 관련 접근절차는 비정밀 접근에 국한되어 있으며 RNP 비정밀접근절차는 RNP0.5(Initial Segment에만 해당) 또는 RNP0.3(Initial, Intermediate, Final Approach Segment에 해당)이 적용된다.

5.2 RNP 비정밀 접근 절차: 구간

RNP 비정밀접근절차는 기본적으로 일반 RNAV 절차 기준이 적용되며 구간 너비의 경우(Area semi-width) $2RNP + \text{buffer zone}$ 을 적용한다. 여기에서 buffer zone은 Initial/Intermediate Segment의 경우 1.0NM이 적용되며 Final/Missed approach Segment의 경우에는 0.5NM이 적용된다. 예를 들어 Initial Segment에서 RNP0.5를 적용한다면 구간 너비의 반은 $2 \times 0.5 + 1.0 = 2\text{NM}$ 이 적용된다.

5.3 RNP 비정밀 접근 절차 : 선회

RNP 비정밀접근에서의 항공기 선회를 위한 보호지역은 일반적으로 RNAV 기준이 적용된다. 그러나 RNP1.0 이하의 RNP 절차에서의 항공기 선회는 기존의 일정한 선회각(Bank Angle)만으로는 측풍의 영향으로 발생하는 항공기의 드리프트(Drift)를 보호구역(Containment Surface)내에서 막을 수 없기 때문에 Fixed radius turn(RF segment)을 사용한다. Fixed radius turn에서 항공기는 바람영향을 상쇄하기 위해 기존의 일정한 선회각이 아닌 다양한 선회각으로서 선회 할 수 있어야 하며 선회반경은 다음과 같이 결정되어진다.

$$r = (V + V_w)^2 / 68626 \times \tan \theta \quad (r: \text{NM}, V, V_w: \text{kt})$$

$$r = (V + V_w)^2 / 127094 \times \tan \theta \quad (r: \text{km}, V, V_w: \text{km/h})$$

V : 최대 진대기속도(TAS)

V_w : 최대바람속도

θ : 최대 Bank Angle

(각 비행단계에 규정된 bank angle + 5°)

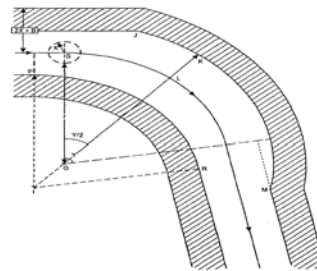


그림 9. Fixed radius turn

6. PATH TERMINATOR 개념의 도입

6.1 Path Terminator의 개요

Path Terminator는 항공기 항법 시스템 소프트웨어를 지원하기 위한 것으로 컴퓨터 기반의 항행시스템에 사용될 수 있도록 코드화 된 비행경로를 Arrival, Departure, Approach 절차에 적용하게 되었으며 주로 FMS 등의 항공기 경로 데이터베이스 코딩에 이용된다. Path terminator는 항공기가 항행하는 경로의 시작지점에서 특정지점 또는 경로가 종료되는 지점까지 그 경로의 성격을 규정한다.

6.2 Path Terminator의 구성

각각의 Path terminator는 두개의 알파벳 문자로 구성되며 각 Path terminator는 항공기 컴퓨터에 설계된 계기비행절차에 따른 항공기 기동 정보를 제공하며 Path terminator의 첫 번째 알파벳문자는 비행하게 될 비행경로를, 두 번째 알파벳 문자는 경로의 종료지점을 나타낸다.

예를 들어, "TF"라는 Path terminator로 코딩된 비행경로는 "Track to fix"라는 의미로서 T는 비행 경로로서 Track을 따라 비행한다는 것을 의미하고 F는 비행경로의 종료지점이 Fix 임을 나타낸다.

현재 ICAO에서 규정하고 있는 Path Terminator는 표2와 같이 총 23종이 있으며 각 Path terminator의 특성에 따라 기존 절차(Conventional procedure), RNAV 절차, RNP 절차에 각각 적용된다.

표 2 Path Terminator의 종류 및 적용

Leg 형태	Conv.	RNAV	RNP
IF: Initial fix	○	○	○
TF: Track to fix	○	○	○
RF: Radius to fix	×	×	○
DF: Direct to fix	○	○	○
FA: Fix to altitude	○	○	○
CF: Course to fix	○	○	○
HF: Hold to fix	○	○	○
HA: Hold to altitude	○	○	○
HM: Hold to manual termination	○	○	○
PI: Procedure turn to interception	○	×	×
CA: Course to altitude	○	×	×
CI: Course to next leg intercept	○	×	×
CD: Course to a DME distance	○	×	×
CR: Course to a radial intercept	○	×	×
FC: Fix to a distance on course	○	×	×
FD: Fix to a DME distance	○	×	×
FM: Fix to a manual termination	○	×	×
AF: Arc to a fix	○	×	×
VD: Heading to DME distance	○	×	×
VA: Heading to altitude	○	×	×
VM: Heading to manual termination	○	×	×
VI: Heading to next leg intercept	○	×	×
VR: Heading to radial termination	○	×	×

7. 계기비행절차설계를 위한 도구

7.1 PDTool Kit

ASD(Aeronautical Software Development)에서 개발한 CAD 기반 절차설계 도구로서 MOC(Minimum Obstacle Clearance)에 대해서 자동적으로 최소 고도를 계산하는 MAAE(Minimum Altitude Analysis Engine)와 장애물과의 적정거리 유지 여부를 평가하는 OIAE(Obstacle Inference Analysis Engine)을 탑재하고 있다. PDTool Kit은 ICAO PANS-OPS와 미 FAA TERPS의 절차 설계 기준을 모두 지원한다는 특징이 있으며 ICAO Annex 14의 기준에 따른 공항 표면 모델링에서부터 Baro VNAV 절차 설계까지 응용 범위가 광범위하다는 장점이 있다.

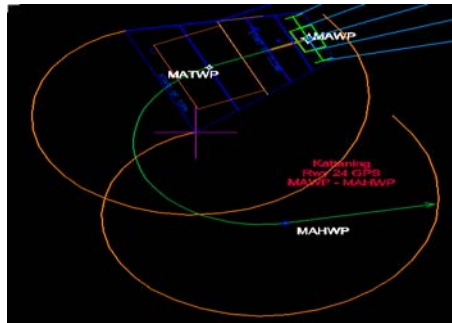


그림 10. PDTool Kit 시연화면

7.2 WX1

PDToolKit과 유사한 CAD 기반 절차 설계 도구로서 네덜란드의 NLR(National Aerospace Laboratory) 및 Eurocontrol S/W Tool Working Group의 시험을 통과하였으며 현재 35개의 민간/군 항공당국에서 이용하고 있다. 사전에 정의된 소음 메트릭을 통해 소음 모델링이 가능하다는 특징이 있다.



그림 11. WX1 시연화면

7.3 TARGETS

Services -Aircraft Operations Vol. I, II, 2004.

TARGETS(Terminal Area Route Generation, Evaluation and Traffic Simulation)는 RNAV 절차 설계의 효율을 기하고 절차의 적합성을 평가하기 위해 MITRE CAASD에서 개발한 터미널 지역 절차 설계 및 시뮬레이션 도구이며 TARGETS은 절차 설계 기능 이외에도 항로 평가, 비행 시험을 통한 설계 상세화, 관제사에게 새로 도입되는 절차 교육 등 여러 가지 기능을 하나의 소프트웨어에 통합적으로 구현했다는 특징이 있다.

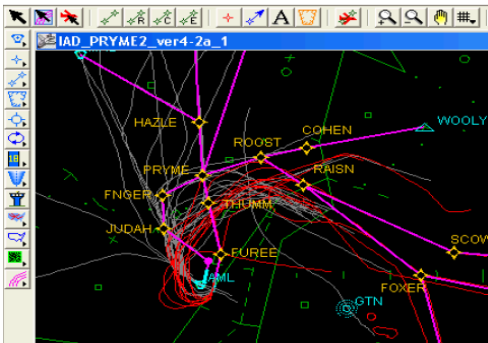


그림 12. TARGETS시연화면

8. 결론

현재 계기비행절차 설계기준의 발전방향은 기존절차에서 RNAV절차로, 기존의 지상기반 항행안전무선 시설을 사용하는 RNAV에서 GNSS를 이용한 RNAV 절차로 진화되고 있으며, 여기에 덧붙여 항공기 항행 항법장비 정확도의 향상 및 GNSS의 향상으로 공역 수용량을 증가시키고 공역의 최적화를 추구하기 위한 RNP절차 등이 도입되고 있다. 우리나라에서도 현재 일부 지역에서 VOR을 기반으로 하는 RNAV 절차가 사용되고 있으며 앞으로는 ICAO New CNS/ATM(Communication, Navigation, Surveillance /Air Traffic Management) 의 이행으로 GNSS를 이용한 RNAV 절차의 폭넓은 사용이 예상된다.

참고문헌

1. ICAO, ICAO Doc 8168-OPS, Procedure for Air Navigation