

# CNS/ATM 환경에 있어서의 항법성능과 공역설계

Navigation Performance and Airspace Design in Era of CNS/ATM

김장환\*, 전동구, 강자영(한국항공대학교)

## 1. 서 론

신속하게 증가하고 있는 항공운항 혼잡도는 모든 가능한 방법을 이용하여 항공교통관리(ATM: Air Traffic Management) 시스템의 개선과 지난 40년간 산업계에서 활용해온 기술로부터 진일보할 것을 요구하고 있다. 이러한 변화는 개선된 항공교통관리를 위해 기존의 능력과 혼합된 새로운 기술의 이용을 권장하고 있다. 항공교통관리의 목표는 운항안전 수준의 유지 또는 증대, 사용자가 선호하는 3차원 또는 4차원 비행체도의 신속한 수용, 사용자에게 기상, 교통상황, 서비스 관련 정보 제공의 개선, 항공기-지상국간 컴퓨터 문답을 포함한 ATM 결정에 있어서 사용자 참여의 확대, ATM절차와 일치되는 공역 구성, 항공교통 요구사항을 충족시키는 시스템 수용량의 증대, 모든 형식의 항공기와 그 항공기가 갖고 있는 모든 능력의 수용, 진보된 접근 및 출발 절차를 지원하기 위한 항법 및 착륙 능력의 개선, 경계가 사용자에게 투명하고 최대한 이음매 없이 연속되는 공역의 설계 등이다. 따라서, 항공교통관련 당국, 항공사, 법제기관, 장비제조업체 등은 필요한 장비 및 절차를 개발하기 위한 미래항행시스템을 구성하고 공동작업을 하고 있다. 통신, 항법, 감시분야의 개선을 위해 관련된 분야가 바로 CNS인데, 이들 각 분야의 주요 특징을 요약하면 다음과 같다. 즉, 통신분야에서는 데이터 흐름을 증가시키고 복잡한 항공교통관제허가를 전달하기 위해 데이터 링크를 이용한다. 항법분야에서는 위성항법시스템을 도입하여 기존의 다른 항법수단과 연계하여 이용함으로써 항공기의 정밀도를 향상시키고 좀더 조밀한 운항간격을 허용할 수 있다. 감시분야에서도 데이터 링크를 이용하여 항공기들의 위치와 의도를 지상국 및 다른 사용자들에게 알릴 수 있다.

본 논문에서는 이러한 CNS/ATM 환경이 구축됨에 따른 새로운 항법성능과 공역설계의

특성 및 관계를 분석하고 요약한다.

## 2. 항법성능과 공역설계

일반적으로 항로 공역 설계의 기본 도구중의 하나는 충돌위험모델(CRM: Collision Risk Model)을 사용하여 안전의 목표 수준을 평가하는 방법이다. CRM은 교통 밀도, 항공기 집단의 항법성능의 측정수단으로 횡방향의 중첩 확률, 수직 방향의 중첩 확률, 항공기의 평균 크기 및 속도, 항로설정/항공제어성능/항공기시스템 결합 및 성능오차/경로이탈의 특성 등에 대한 수많은 다른 가정을 고려하여 적용되며, 운용상의 위험도는 항법성능, 공역, 교통특성, 감시, 통신, 항공교통제어의 함수이다.

### 2.1 RNP RNAV

RNP-x RNAV 항공기의 항법시스템들이 영향을 미치고 충돌 위험을 개선할 수 있는 한 분야는 횡방향 중첩 확률을 통해서이다. 항법성능은 CRM평가에서 고려된 어떤 오차 종류에 대한 관련된 설계 또는 절차적 완화와 함께 RNP-(x) RNAV의 개선된 항법성능 정확도 규격으로 횡방향 중첩 확률에 영향을 미친다.

성능분포에 적용된 특정한 오차의 종류는 다음과 같다.

- 공역에서 운용을 위해 인증되지 않은 항공기
- ATC시스템의 루프 오차
- 부주의한 웨이포인트 오차를 포함한 장비제어 오차
- 부정확한 위치를 정확히 입력함으로써 생기는 웨이포인트 입력 오차
- 조치를 위한 정확한 시간내에 ATC에 통보된 고장과 관련된 오차
- 조치를 취하기에 너무 늦게 ATC에 통보된 고장과 관련된 오차
- ATC에 의해 통보되지 않았거나 접수되지

많은 고장과 관련된 오차

충돌위험을 감소시키기 위해 RNP-x RNAV 은 다음과 같은 항법성능을 제공한다.

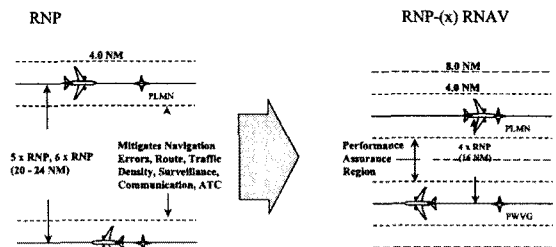
- 항공기 위치에 대한 95% 항법성능 정확도 및 성능보증이 비행시간 당  $10^{-5}$  컨테인먼트 한계(Containment limit)인 RTCA SC-181에 지정된 성능보증 한계는 2 x RNP와 같다.
- RNP 타입에 대해 비행시간당  $10^{-4}$  인 항법 성능의 연속성
- RNP가 기초로 하는 표준보다 더 좋은 실제 성능 수준

특정한 형태의 오차를 완화하기 위해 RNP-x RNAV에 포함되는 요구사항은 다음사항을 포함한다.

- 입력오류가 발생할 수 있는 수동 입력을 요구하는 대신에 항공기 항법시스템을 위한 데이터베이스 안에 정의된 구역, 공역 및 항로에 대한 RNP 요구사항의 획득; 이 RNP 요구사항은 사용 및 운용 신청을 위한 특정 자격을 가진 비행 계획 또는 비행항로에 첨부된다. 현재의 항법성능 수준과 함께 RNP 요구사항은 항공기의 적절한 디스플레이와 항공기 비행계기관 지시계를 통하여 운항 승무원에 알려진다.
- 진행방향 트랙 픽스의 자동입력 기능의 규정 및 미리 정의된 비행계획 절차의 자동입력에 의한 웨이포인트 선택 입력 오류의 원천 제거; 추가적으로 여러 개의 명명되지 않은 픽스에 대한 세트 이름 및 좌표를 설정하기 위한 조치들은 입력오류문제를 상당히 경감시켜준다.
- 시스템 감시, 실제 항법성능의 디스플레이, 요구되어진 항법성능의 디스플레이 및 RNP-x RNAV 요구사항 일치여부에 대한 정보가 요구되고 제공된다.
- 비행계획 변경 및 허가를 위한 데이터 링크 통신은 가능한 CNS 요구사항으로 확인되고, 항공기 운항 승무원에 의한 독립적인 점검뿐만 아니라 데이터 경로의 완전성 점검으로 기존의 ATC 시스템 오류의 발생을 감소시킨다. 이것은 RNP-x RNAV 시스템에 대한 최소 요구사항이 아니지만 FANS1/A능력을 가진 시스템으로 장착된 상업 운송용 범주의 항공기에서, 항공기/지상국 데이터링크 통신은 ATC시스템 루프에서 보다 큰 완

전성을 제공하도록 요구되어 왔다.

시스템 성능 및 보증을 위한 RNP-(x) RNAV 개념은 그들에 대한 절차와 공역을 개발하는데 하나의 도구로서 사용될 수도 있다. 특히, RNP와 2 x RNP 한계는 가용공역의 한계, 예비항법인프라의 한계, 감소된 적합성 감시 수준을 보상하기 위한 한계와 같은 인자들에 의한 필요로서 또는 장애 평가기준에 있어서의 인자로서 완충장치가 추가되어야 하는 근거를 형성한다.



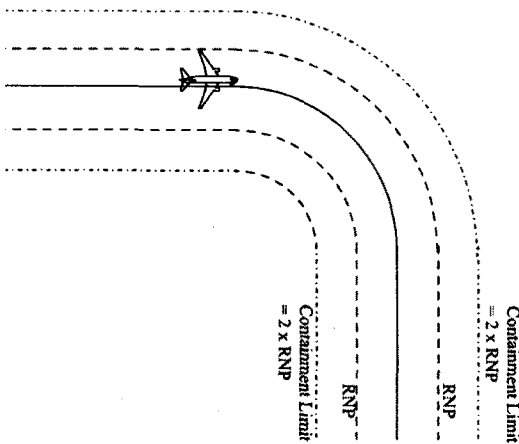
<그림 1> 시스템 성능/보증을 위한 RNP-x RNAV 개념

앞에서 언급된 바와 같이, 최소항공기시스템 성능기준(MASPS)은 2 x RNP와 동일한  $10^{-5}$ 의 컨테인먼트 한계 및 95%의 컨테인먼트 값(Containment value)을 규정한다. 항공기 시스템에 대한 요구사항은 보다 큰 보호구역이 선회시에 요구되지 않도록 선회 세그먼트뿐만 아니라 직진경로 세그먼트에 대한 공역의 규격을 지원한다.

그림 2는 다음의 가정과 요구사항을 반영하고 있다.

- 경로정의오차는 본질적으로 영이다; RNP 운용을 위해 동일한 측량 데이터와 참고기준들이 지상시스템 및 항공기시스템의 비행절차 DB에 반영된다. 경로는 지점에서 지점까지로 정의되고, 선회는 고정된 선회반경이다. 예상 경로의 변화량은 제거되거나 무시된다.
- 경로 조종 오차는 무시되거나 조종사 또는 자동비행시스템이 있으면 영이다. (주: 수동 비행이나 Flight Director의 유도를 이용함으로써 발생하는 이탈의 양은 다양하다). RNP가 실행되는 방법은 어떤 모드(즉, 수동, 플라이트 다이렉터, 또는 자동조종)가 특정 RNP값에 대해 승인될지를 결정함으로써 이루어진다.
- 위치추정의 불확실성은 작지만 '0'보다는 크

며, 항공기의 진위치와 예측위치간의 작은 편위를 만든다. 그림에 나타낸 편위는 효과를 설명하기 위해 실제보다 크게 도시되었다. 조종사의 상황 정보가 비행경로상의 트랙위에 있는 항공기를 도시하더라도 실제 상황은 물리적 편위를 갖게 될 것이다. 그 후 항공기는 직진 및 선회 경로에 유지되기 위해 필요한 트랙킹 성능을 제공할 것이다. 구역한계는 환경이 중저범위의 교통밀도, 적정 수준의 적합성 감시소, ATS와의 통신방법 등의 하나 또는 그 이상으로 특정지워지기 때문에 2 x RNP 한계와 일치하게 된다. 증가된 교통량으로 인하여 증대된 위험을 완화시키기 위하여, 감시와 통신의 능력을 다소 감소시키고 부가적인 구역의 완충지대를 둬으로써 받아들일만한 항공기 간격을 보장 할 수 있다.



<그림 2> RNP와 컨테인먼트 한계

그렇지 않으면, RTCA SC-181에 정의된 컨테인먼트한계 및 95%의 컨테인먼트 값을 넘는 여분의 구역이 상공통과 선회에 대한 유일한 경우는 항공기가 다음 행로로 비행하기 전에 픽스 상공을 통과 비행해야 하는 경우의 선회이다. 그렇지만 이것은 통제된 선회로 고려되지 않는다. 주의: RNP 기반 절차의 초기 개발 단계에서, 몇몇의 경우에서 부가적인 완충지대가 조기 또는 늦은 선회 및 바람을 고려하여 추가되었다. 완충의 폭은 RNP값에 의해 결정될 수 있는데, 예를 들어 RNP20에 대해서는 무시할 수 있고, 정의된 절차기준에 의해서는 고정될 수 있다.

## 2.2 선회 보호 구역

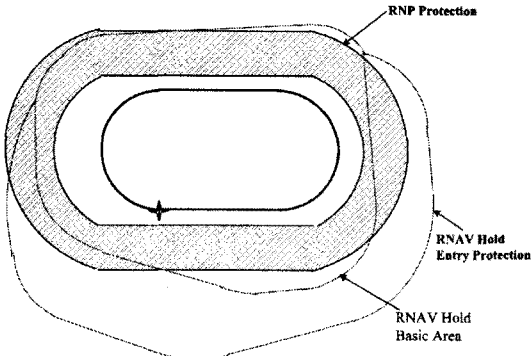
앞에서의 예는 고정된 반경으로 선회하기 전, 선회하는 동안, 선회한 후에 일정한 RNP 형태에 기초를 두고 있다. 선회에 대한 보호구역은 RNP와 2 x RNP 한계를 초과하는 항공기에 대한 관계 때문에 직진 세그먼트의 보호구역에 비해 달라야 한다는 것이다. 그러나 유럽에서 계획된 바와 같이, 항공기 항법시스템의 선회 및 물 기대 능력과 연계된, 15NM 또는 22.5 NM의 고정 선회반경의 선회정의는 선회 진입 및 선회종료시의 성능과 다르지 않은 트랙킹 성능을 유발함에 유의해야 한다. 이는 선회를 위한 보호구역구역의 정의시에는 주의할 것을 암시하고 있다. 어떠한 특별한 항공기 능력이 장애물 평가 및 보호구역의 결정에 반영되어야 하는지는 분명치 않다. 현재는 트랙킹 성능에 대한 일반화된 가정보과 함께 항법성능 정확도가 결과에 대한 기초를 형성해야 된다는 것을 적용하고 있다. RTCA SC181/EUROCAE WG 13 MASPS 및 EUROCONTROL RNAV Standard 모두로부터 특정 RNP-x RNAV 기준들은 평가에서 고려되지 않고 있다. 그러나 RNP 구역 운용을 목표로 한 항공기 항법시스템의 개발 및 능력의 지침이 될 문서들이 바로 이 문서들이다. RNP가 선회의 변수로서 너무 진전되어서는 아니 될 것이다.

## 2.3 체공(Holding)

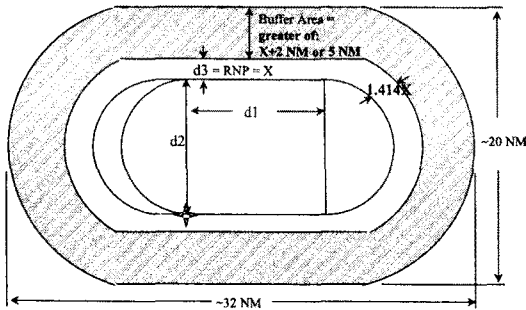
선회구역에 대한 설명이 체류 구역에 대한 완충에도 적용될 수 있다. 이때 RNP형태는 단순히 체공에 대해서 더 큰 경주형 트랙을 형성해야 한다. 항공기 시스템이 그 경로와 RNP의 한계 및 절차상 일관성의 필요성을 정의해야 될까에 대해 앞서 설명된 이유가 여기에 또한 적용된다.

1보다 큰 체공 RNP에 대해서 RTCA SC 181이 약간 기술되어 있다. 1보다 큰 RNP에서 항공기의 시스템 2 x RNP 컨테인먼트가 보호하는 구역의 크기는 기존의 체공 구역보다 더 크다. RNP 1과 합친 컨테인먼트한계 구역이 기존의 체공과 비교되는 반면에 체공위치에 요구되는 차이점들이 있다. RNP 1에서 비체공 쪽에 대한 구역의 양은 종래에 할당된 것보다 훨씬 작아서 픽스 위치가 바뀌어야 되거나 또는 구역의 편위(offset)가 구역 할당 시에 고려되어야 한다. RNP체공에 대한 처음의 ICAO 규격은 2x RNP 컨테인먼트에 2NM 완충지역을 더하여 확립되었다.

RNP에 대한 경험이 많을수록 완충지역은 최소화될 것으로 생각된다.



<그림 3> 종래의 ICAO RNAV 및 RNP 제공의 비교 예



<그림 4>

2.4 VNAV

VNAV의 중요한 관점은 경로 또는 구역에 비례하여 항공기를 경계시키는 구속조건을 적용하기 위한 경로 정의 요구사항이다. 이것은 절차를 위한 공역의 이용을 최적화하는 여러 가지의 수준을 제공한다. 최소의 수직 공역은 그것과 관련된 트래킹 성능을 가진 지점간의 기울기 경로로부터 유도된다. 최상의 수직경로를 결정하기 위해 항공기 시스템에 더 많은 폭이 허용되는 곳에서, 원도우 구속조건을 이용하면 그 지역을 경계짓기 위한 성능 한계를 갖는 보다 큰 수직구역을 허용하기 위한 수단이 제공된다.

VNAV 성능

현재 산업체에서 개발중인 VNAV의 요구사항은 수직경로 성능 한계, RVSM을 지원하는 성능, 경로 정의, 경로 트래킹, 사용자 인터페이스 등을 기술하고 있다. VNAV은 기하학적 수직경로의 절차 규격과 수직 경로 각이 신뢰할 수 있고, 예측가능하고, 반복 가능한 시스템 성능

에 의해 지원되어야 하는 강하 및 접근 운동을 지원하기 위한 것이다. 수직경로성능한계(VPPL)는 99.7%의 수직 TSE 정의된다. 이 한계는 공역의 구역을 정의하는 “가장자리(edges)” 뿐만 아니라 지점간 경로 세그먼트에 적용된다. VPPL은 기존의 VNAV시스템에 대한 성능요구사항과 같다. 그것이 어떻게 그리고 어디에 적용되는가는 다르다.

수직 성능은 다음 표와 같다.

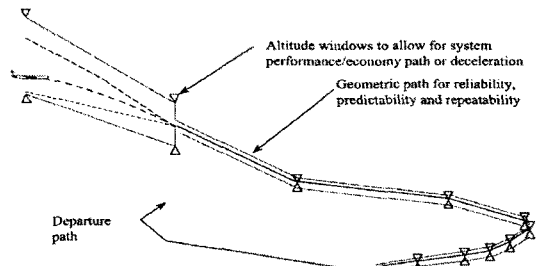
<표 1> VNAV의 TSE 요구사항

Altitude Region	Level Flight Segments and Descent Intercept of Clearance Altitudes	Approach Along Specified Vertical Profile
At or Below 5,000ft	150	160
5,000ft to 10,000ft	200	210
10,000ft to FL290	200	210
Above FL290	200	260

주: 이 요구사항은 RVSM 요구사항과 일치하는 성능을 제공하는 항공탑재고도계와 항공전자 시스템에 기초를 두고 있다. 더욱 중요한 것은 횡방향 성능에 적용되었을 때의 컨테인먼트 완전성 개념이나 컨테인먼트 연속성 개념이 수직성능에 적용되지 않는다.

경로정의 및 트래킹

VNAV에서 선택된 수직경로 전이는 통과비행 대신에 근접비행이 될 것이다. 이는 수직경로에서 변경(예: 수평비행에서 하강비행으로의 전이, 하강각도의 변경, 하강에서 수평세그먼트로의 전이)을 예측하기 위한 항공탑재시스템의 능력에 의한다. 근접비행 고도 하강도는 수직고도 구속조건과 절차시 수직근접비행을 허용하는 픽스의 위치를 확립하기 위한 기초가 될 것이다.



<그림 5> 구속조건에 의해 정의된 VNAV 경로

### 2.5 도착시간의 통제(TOAC)

도착시간의 통제는 향상된 교통 용량과 공역 운용 효율을 지원하는 도구이다.

TOAC가 도움이 될 것으로 기대하는 몇가지 적용 예는 항로교통교차, 세로방향의 교통 분리, 접근교통량측정, CTAS에 대한 지원 등이다.

시간 요구사항에 대한 현재 시스템의 허용공차는 항로에서는 30초이고, 터미널 기동 지역에서는 6초이다. 현재 RNP RNAV 운용에 이능역을 통합하는데 있어서 아주 적은 부분이 성취되었다. 감시, 컴퓨팅시스템, 공통적인 시간기준의 확립, ATC 등에 관련된 변경이 필요한 것으로 고려되고 있다.

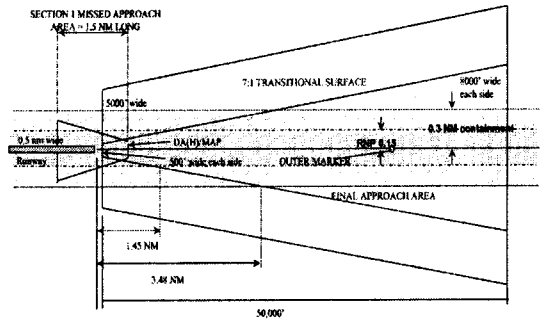
### 3. 적용

#### 접근(Approach)

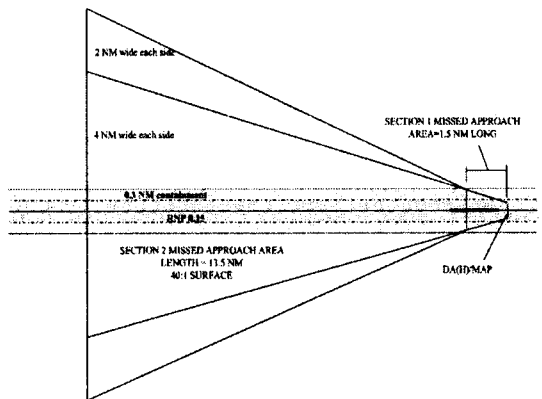
일반적으로 접근 절차는 TERPS와 PANS-OPS를 사용하여 개발된다. 이 기준들은 절차설계 및 장애물 평가에 대한 아주 특별한 기준을 적용한다는 점에서 유사하다. 그들은 전통적인 지상항법 지원시설의 특성, 항공기 성능, 최소의 항법능력과 성능을 지닌 항공기를 포함한 요소들에 기초를 두고 있다. 설계의 업무를 간단히 하기 위해, 기준들은 충족되어야 하는 좀더 단순한 요구사항으로 감소된다. 이는 일반화되고 큰 사다리꼴의 표면과 장애물이 배제되는 형상에 의한 절차설계 기준들을 만든다. 장애물이 존재할 경우에, 기준들은 운용 minima를 울림으로써 채택될 수 있다.

적용상 될 수록 간단화가 이루어지지만, TERPS/PANS-OPS 기준은 적용되는 큰 보호 표면 때문에 절차나 운용의 어떠한 최적화도 배제한다. RNP RNAV와 함께, 2 x RNP 컨테인먼트 한계가 성능 보증을 위해 제공된다. 항공기의 실제 성능이 운용중인 RNP를 초과할 때 시스템은 운항 승무원을 위한 감시기와 경고를 포함한다. 제공된 항법성능 보증을 일반화된 TERPS 표면에 반영된 것과 등가인 것으로 고려된다. 중요한 차이는 RNP RNAV가 선형적이고 더 작은 전체 표면을 가진다는 점이다. RNP RNAV 컨테인먼트 한계의 선형성은 종래의 기준을 가지고 성취할 수 있는 절차의 설계 및 위치와 더 낮은 minima의 개선을 가능하게 한다.

다음의 보기는 TERPS 표면과 RNP RNAV 컨테인먼트 표면을 비교한다.



<그림 6> TERPS와 RNP의 접근



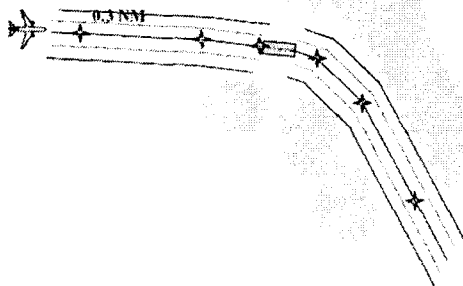
<그림 7> TERPS와 RNP의 실제 접근

#### 알래스카 Juneau 공항 적용 사례

다음은 1996년에 알래스카항공사가 개척한 737-300 항공기를 이용한 RNP RNAV 접근 및 출발 운용에 관한 사항이다. Juneau 국제공항 활주로 08의 운용은 저시정과 실링 때문에 자주 방해받거나 지연되었다. 바람이 변경될 때는 활주로 08의 운용이 어렵거나 불가능하게 되고, 반대쪽 활주로 26은 접근착륙시설 및 그와 관련된 절차가 수립되어 있지 않았기 때문에 사용될 수 없었다. 그때에는 특정한 이익을 달성하기 위해 RNP기술을 사용하기 위한 어떤 전례도 수립되지 않았다. Juneau 공항에서 알래스카 항공사에 신뢰성과 안전을 개선하기 위한 결정은 Boeing 항법 시스템과 그 운영 전문가의 도움을 가지고 RNP 기술의 지식, 비행기 성능 그리고 설계를 위한 비행운용과 활주로 08에 RNP 0.15 RNAV 접근을 운용할 수 있는 허가를 받아 사용하였다. minimum이 1,000-ft 실링과 2mi 시정으로부터 724-ft의 실링과 1마일의 시정으로 감소되었다.



<그림 8> 알래스카 Juneau 국제공항



<그림 9> RNP RNAV 적용 Juneau 공항

새로운 RNP 출발절차는 운항 승무원의 업무 부하를 줄였고, 더 낮은 상승 각도를 요하고 이것은 유효하중을 증가시켰다.

다음으로 활주로에 사용가능한 첫 번째 계기 접근을 제공하면서 활주로 26에 대한 RNP RNAV 접근 방법을 개발하였다. 접근은 산골짜기를 돌아 내려야 하기 때문에 지구기준 웨이 포인트 및 선형 컨테인먼트 표면에 기초를 둔 시스템의 유연성이 새로운 절차를 설계하는데 이상적인 것으로 증명되었다. RNP 0.3이 요구되었고, 1mi의 요구시정과 337-ft의 착륙 minimum을 갖게 되었다. 결과적으로 RNP RNAV 절차는 개발되어 Sitka, Ketchikan, Wrangell, Petersburg, Cordova 및 Kodiak에 대해 승인되었다.

### 3. 결 론

ICAO는 지속적으로 증가하는 21세기 항공교통 수요를 충족시키기 위해 위성기술을 기반으로 하는 CNS/ATM을 차세대 항행안전시스템으로 채택하고 표준화 작업을 진행시키고 있다. 본 논문에서는 이러한 환경이 구축됨에 따른 항법성능과 공역설계의 관계 및 특성을 분석하고 그 적용 예를 살펴보았다. 현재 위성항법시스템이 가용함에 따라 종래의 지상기반의 항행 지원시설을 이용하던 지역항법 기술에 획기적인 변화가 일어나고 있으며, 대양 항로에서부터 접근/착륙에 이르기까지 RNP RNAV를 적용함으로써 점점 복잡해지고 있는 공역의 효율적인 활용은 물론 항공기의 안전운항과 경제적 운용이 보장된다. 우리나라에서도 이러한 추세에 발맞추어 새로운 운항절차와 효율적 항로의 개발 및 공역 재설계를 위한 심층 연구가 필요하며, 이는 곧 선진항공기술을 발전시키는 큰 기여를 할 것으로 생각된다.

### 참고문헌

- [1] "Required Navigation Performance (RNP), Area Navigation (RNAV) Implementation", Mr. Hooper Harris, 19th Annual FAA/JAA International Conference, 2002
- [2] "RNAV Application in Terminal Airspace", European organization for the safety of Air Navigation, Euro control, 1999. 9.
- [3] "Guidance Material for the Design of Terminal Procedures for Area Navigation(DME/DME, B-GNSS, BARO-VNAV & ENP-RNAV)", European organization for the safety of Air Navigation, Euro control, 2003. 3.
- [4] "General Information on the Functional and Technical Aspects of Required Navigation Performance(RNP) Area Navigation(RNAV) and Applications", Dave Nakamura, Boeing, 2000. 2.