

論文

접근관제구역에서 다변측정감시시스템을 이용한 대안항법 방안 연구

조상훈*, 강자영**

Alternative Positioning, Navigation and Timing Using Multilateration
in a Terminal Control Area

Sanghoon Jo* and Ja-young Kang**

ABSTRACT

Multilateration(MLAT) is commonly used in civil and military surveillance applications to accurately locate an aircraft, vehicle or stationary emitter. MLAT calculates the TDOA of signals by transmitted aircraft and determines the aircraft's location. With more than four receivers it is possible to estimate the 3D position of the aircraft by calculating the intersection of the resulting hyperbolas and the system integrity. In this study, our objectives are to apply MLAT technique to Jeju terminal control area and to propose a MLAT receiver network to properly estimate the positions of aircraft approaching this area. Based on computer simulations, we determine locations of ground receivers in Jeju terminal control area, calculate estimated position errors of the aircraft with respect to the selected receiver networks, and find the best receiver network with the least position error.

Key Words : Multilateration(다변측정감시시스템), APNT(대안항법시스템), TDOA(도달시간차이), Least Square Method(최소자승법)

1. 서 론

최근 국가 또는 지역별로 국제민간항공기구(ICAO)의 권고에 따라 위성항법과 디지털 통신기술을 활용한 CNS/ATM(Communication, Navigation and Surveillance/Air Traffic Management) 구축 기본계획을 수립하고 있다. 항공기의 Positioning, Navigation, and Timing(PNT)을 결정하기 위한 수단으로는 Global Navigation Satellite System(GNSS)을 주로 활용하고 있으며 이를 통해 공역시스템의 현대화를 추진하고 있다.

차세대 주요 항공감시 및 항법시스템으로 간

주되는 ADS-B(Automatic Dependent Surveillance - Broadcast)를 비롯하여 대부분의 차세대 항법시스템들도 GNSS로 부터 위치정보를 얻는다[1].

미국과 유럽의 NextGen(Next Generation Air Transportation System)이나 SESAR(Single European Sky ATM Research)와 같은 차세대 항공교통관리 시스템도 대부분 GNSS에 의존하고 있다. 그러나 GNSS는 지상 20,000km 상공의 위성에서 신호를 송출하므로 신호가 매우 약해 고의적 또는 비고의적 간섭에 쉽게 교란된다[2]. 따라서 GNSS 신호에 영향을 미치는 간섭이 발생할 경우에도 안전하게 운용될 수 있는 대안항법이 필요하다. 특히 항공 운송사업자들은 공항을 포함한 GNSS 간섭지역에서 위성신호를 가용할 수 없더라도 항공기는 항법정보를 지속적으로 운용할 수 있어야 한다. 또한, 일반항공 항공기도 계기비행기상상태(Instrument Meteorological Conditions, IMC)에서 GNSS 간섭이 발생하는 동안 안전하게

2015년 06월 23일 접수 ~ 2015년 09월 20일 심사완료
논문심사일 (2015.09.14, 1차)

* 한국항공대학교 일반대학원 항공운항관리학과

** 한국항공대학교 항공운항학과

연락처, E-mail : jykang@kau.ac.kr

경기도 고양시 덕양구 항공대학교로 76 본관420호

착륙할 수 있는 방안이 마련되어야 한다. 즉 국지적인 GNSS 간섭이 발생하는 동안 감시 및 항법을 대체할 수단은 모든 항공기의 안전한 착륙을 보장해야 한다는 것을 의미한다.

현재 항법시스템으로는 VOR과 거리측정장치(Distance Measuring Equipment, DME)를 사용하고 있다. 그러나 VOR/DME 기반의 대안항법(Alternative PNT, APNT) 시스템은 지역항법(Area Navigation, RNAV) 성능 요건을 충족할 수 없으며, 매우 오래된 시설로 교체에 많은 비용이 소요된다. 최근 FAA에서는 대안항법시스템으로 DME 성능개선, 광역다변측정감시시스템(Wide Area Multilateration, WAM), 그리고 지상기반의 의사위성을 이용한 방법을 고려하고 있다[3].

MLAT는 현재 항공기에 탑재한 장비의 추가적인 변경 없이도 기존 시스템과 호환성이 매우 뛰어나며 데이터 갱신 주기는 1초 이하이기 때문에 4초 이상의 갱신주기를 갖는 레이더에 비해 목표물 추적 오차를 상당히 감소시킬 수 있다. 또한 공항, 지상 등 근거리에서 항공기 및 이동체를 감시할 수 있는 시스템과 항로 및 접근관계구역에서 항공기를 감시할 수 있는 WAM으로 분류하여 항공감시 기능을 제공할 수 있다.

이러한 장점들로 MLAT 기술은 미국과 유럽, 일본 등 항공선진국과 더불어 대한민국 내에서도 공항 감시에 활용되는 등 안정적인 감시기능을 제공하고 있다. 최근 대한민국에서는 제주국제공항의 접근관계를 위해 운영중인 제주접근관계 레이더의 장애 시 비상용으로 활용이 가능한 차세대 항행감시시스템 보강방안 연구를 수행하여 MLAT를 활용하는 방안이 고려되었다. 따라서 본 논문에서는 대안항법으로 활용이 가능한 MLAT를 제주접근관계구역 내 설치할 경우 MLAT 수신기 설치 방안을 제안해 보았다. 수신기의 위치는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 이동중인 항공기의 3차원 위치 추정오차를 분석하였다.

2. 다변측정감시시스템 위치추정모델

MLAT는 물리적으로 제한된 공역과 지역에서 항공기의 정밀한 위치 측정을 가능하게 하는 상호 협력적이며 독립적인 지상기반의 항공감시시스템이다. MLAT는 항공기의 위치를 감시하기 위하여 적어도 3개 이상의 수신기와 수신된 신호를 처리하기 위한 중앙처리장치가 필요하다. 3개의 수신기만 사용한다면 3차원 위치를 바로 추정할 수 없지만 Mode A/C/S 트랜스폰더를 활용

할 수 있어 항공기의 고도정보를 알 수 있어 항공기의 위치를 추정할 수 있다. 하지만 무결성을 고려하여 적어도 4개의 수신기가 필요하다[4].

지상에 설치된 다수의 수신기들은 항공기 트랜스폰더 신호나 ADS-B 신호를 전송 받아 중앙처리장치로 정보를 보내 수신기간의 도달시간차(Time Difference of Arrival, TDOA)를 계산하고 결과를 추적하여 항공기의 위치를 추정하게 된다. 두 개 수신기 사이의 TDOA는 항공기가 위치한 쌍곡선과 일치하게 된다. 4개의 수신기를 통해 표적의 신호를 감지한 경우, 쌍곡선 또는 쌍곡면의 교점을 통해 항공기의 위치 추정이 가능해진다. 수신기의 개수를 추가할수록 항공기 위치에 대한 정확성과 가시거리에 대한 제한을 줄일 수 있으며, 전반적인 감시 용량을 증가시킬 수 있다[5].

2.1 TDOA 위치추정 모델

MLAT는 항공기에서 각각의 수신기에 신호를 보내 생기는 전파의 도달시간차를 이용하여 위치를 추정한다. TDOA 위치추정의 기본 이론은 항공기와 수신기의 도달시간차로부터 그려지는 쌍곡선을 이용하여 거리차를 알아낸다[6]. 두 지점 사이의 거리를 정의하는 방정식은 다음 식(1)과 같다.

$$R_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (1)$$

여기에서 x_i, y_i, z_i 는 수신기 위치좌표를 나타내고, N 개의 수신기는 $i = 1, 2, 3, \dots, N$ 로 표현하였다. x, y, z 는 항공기의 위치를 의미한다. 신호를 방출하는 항공기와 수신기 사이의 거리는 신호가 각 수신기에 도달하는 시간을 토대로 계산한다. 항공기와 두 수신기 간 관계식은 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$ct_{ij} = R_{ij} = c(t_i - t_j) = R_i - R_j \quad (2)$$

여기에서, t_i 는 i 번째 수신기에 전파가 도달한 시간을 의미하고, t_j 는 j 번째 수신기에 전파가 도달한 시간을 의미한다. c 는 전파속도로 빛의 속도 3×10^8 m/s로 구할 수 있다. 각 수신기와 의 관계식은 비선형 방정식으로 선형화를 통해 결과 값을 찾는 것이 가장 적절한 방법이다.

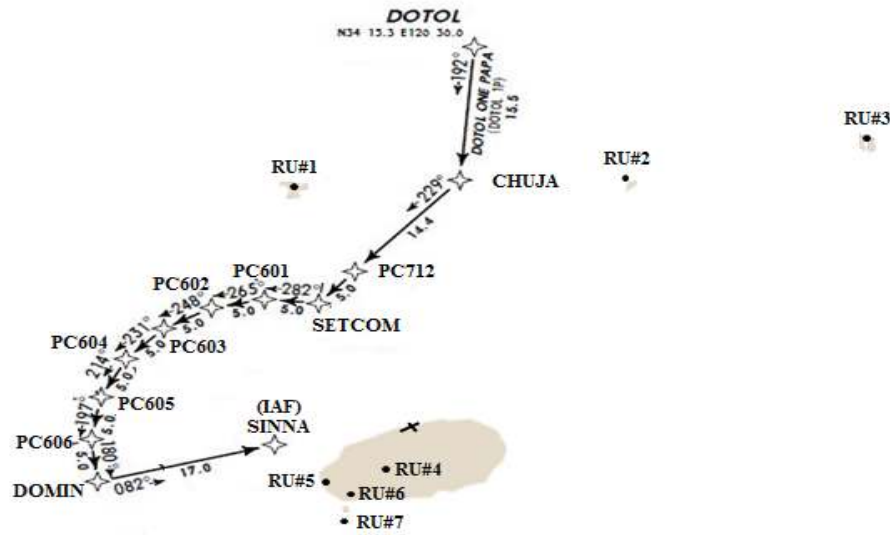


Fig 2. DOTOL One PAPA Arrival Procedure & Positions of Receivers

2.2 Recursive Least Square Method

TDOA 추정방법은 비선형 쌍곡선 관계식을 만든다. 본 논문에서는 TDOA에서 유도한 관계식을 Taylor series를 통해 선형화 하였다. Taylor series를 사용하는 방법은 복잡도가 크지 않아 알고리즘 구현이 용이하다. TDOA 방법을 통한 추정된 항공기의 위치와 두 수신기간의 거리는 다음 식(3)과 같이 정의할 때,

$$\hat{R}_{ij} = \frac{\sqrt{(x_i - \hat{x})^2 + (y_i - \hat{y})^2 + (z_i - \hat{z})^2} - \sqrt{(x_j - \hat{x})^2 + (y_j - \hat{y})^2 + (z_j - \hat{z})^2}}{2} \quad (3)$$

오차는 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta R_{ij} = R_{ij} - \hat{R}_{ij} \quad (4)$$

식(4)를 선형화된 Matrix 형태로 바꾸면, 다음 식(5)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta R_{ij} = H \Delta X \quad (5)$$

ΔX 는 $[\Delta x \ \Delta y \ \Delta z]^T$ 이고, 관측행렬 H는 (6)과 같다.

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta R_{12}}{\partial \hat{x}} & \frac{\partial \Delta R_{12}}{\partial \hat{y}} & \frac{\partial \Delta R_{12}}{\partial \hat{z}} \\ \frac{\partial \Delta R_{13}}{\partial \hat{x}} & \frac{\partial \Delta R_{13}}{\partial \hat{y}} & \frac{\partial \Delta R_{13}}{\partial \hat{z}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \Delta R_{ij}}{\partial \hat{x}} & \frac{\partial \Delta R_{ij}}{\partial \hat{y}} & \frac{\partial \Delta R_{ij}}{\partial \hat{z}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

위의 식으로부터 다음 식(7)을 반복적으로 수행함으로써 항공기의 위치를 찾는다.

$$Z = (H^T H)^{-1} H^T \Delta R_{ij} \quad (7)$$

3. 시뮬레이션 분석

3.1 시뮬레이션 고려사항

컴퓨터 시뮬레이션은 MATLAB 프로그램을 통해 수행하였다. Fig. 1과 같이 제주접근관제구역 내 DOTOL One PAPA 도착 절차를 적용하였다. 운항기준으로는 평균 220knot로 운항중인 B737를 기준으로 항적데이터는 1초 단위로 생성하였다. 운항고도는 DOTOL One PAPA Arrival procedure에 적용되고 있는 8,000ft, 5,000ft로 설정하였다. 시뮬레이션에서 항공기의 초기 근사값은 항공기가 운항하는 항로의 기본 위치를 토대로 실제 위치와 유사한 근사 위치로 설정하였다.

Table 1. Receiver Networks for Computer Simulations

Case	RU No.1 (추자도)	RU No.2 (여서도)	RU No.3 (거문도)	RU No.4 (동광레이더)	RU No.5 (고산기상대)	RU No.6 (모슬포)	RU No.7 (마라도)
Case 1	✓	✓		✓	✓		
Case 2	✓		✓	✓	✓		
Case 3	✓	✓		✓		✓	
Case 4	✓		✓	✓		✓	
Case 5	✓	✓		✓			✓
Case 6	✓		✓	✓			✓

수신기(Remote Unit, RU) 후보지는 제주접근관 제구역 내 DOTOL One PAPA Arrival procedure를 이용하는 항공기의 위치추정을 위해 제주도에 3개 지점(동광 레이더, 고산 기상대, 모슬포 레이더), 주변 섬 4개 지점(추자도 등대, 여서도 등대, 거문도 등대, 마라도 항로표지관리소) 총 7개의 지점을 선정하였다.

각 후보지점은 진입도로, 설치 공간 및 전원, 통신선로의 확보가 가능한 국유지를 후보지로 선정하여 오차가 가장 적은 최적 위치를 분석하였다. 수신기의 배열은 Table 1과 같이 4개 수신기로 구성하여 시뮬레이션 하였다.

수신기에 대한 시간 오차는 Mode-S 전파에 대한 오차 값을 계산하여 $6.2ns(6.2 \times 10^{-9}sec)$ 를 표준편차로 하는 Gaussian Random Number를 생성하였다[7]. 시간차에 대한 다양한 Random 변수를 고려하기 위하여 동일 루트를 따라 각각의 시뮬레이션을 1000번 수행하여 오차 값의 절대평균을 그래프로 나타내었다.

3.2 시뮬레이션 결과

모든 경우에 대한 시뮬레이션 결과는 Fig. 2 부터 Fig. 13과 같이 나타났다. Fig 에서 가로축은 DOTOL One PAPA Arrival procedures를 따라 비행하는 시간을 나타내고 세로축은 해당위치의 오차를 나타낸다.

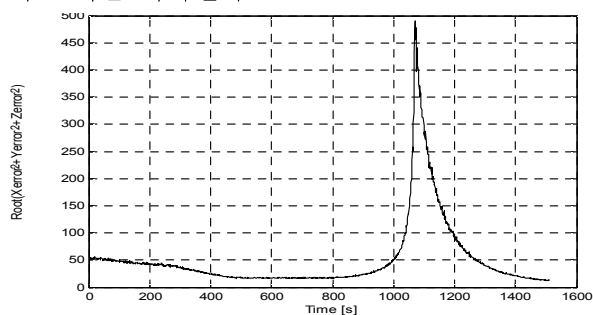


Fig 3. Case 1 of Position error(5,000ft)

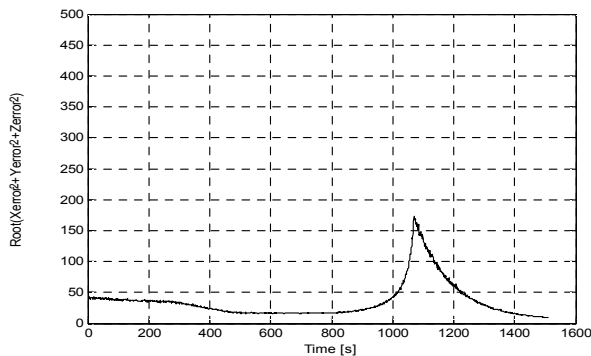


Fig 4. Case 2 of Position error(5,000ft)

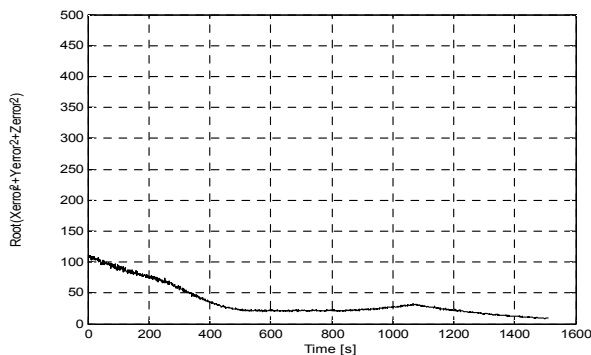


Fig 5. Case 3 of Position error(5,000ft)

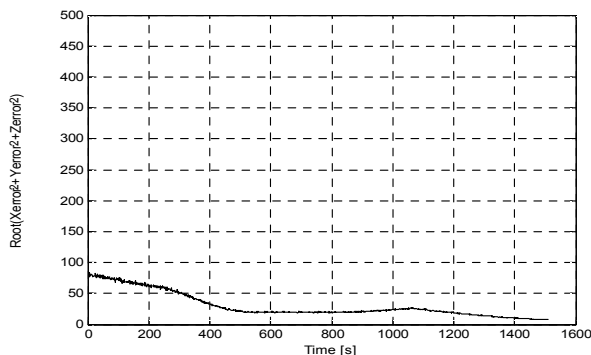


Fig 6. Case 4 of Position error(5,000ft)

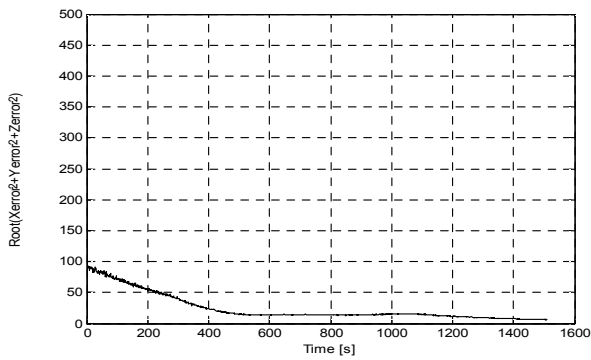


Fig 7. Case 5 of Position error(5,000ft)

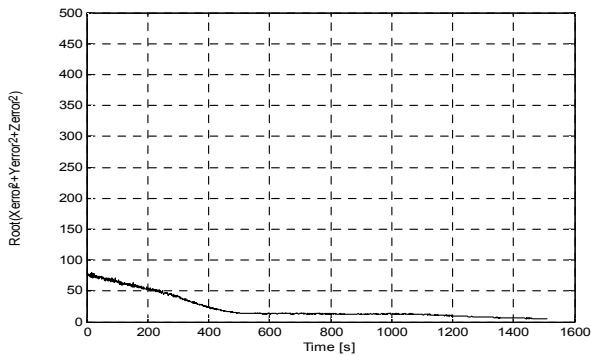


Fig 8. Case 6 of Position error(5,000ft)

Fig 2부터 Fig 7은 DOTOL One PAPA Arrival procedure를 5,000ft로 비행 시 수신기의 위치에 따른 위치 정확도를 보여주고 있다.

Case 1은 추자도(RU No.1), 여서도(RU No.2), 동광(RU No.4) 그리고 고산 기상대(RU No.5)를 포함하는 수신기 네트워크로 다른 Case들 보다 커브구간(SETOM fix에서 DOMIN fix 구간)에서 큰 오차를 보였다. 커브구간 중에서 오차 값이 가장 큰 위치는 PC604에서 605 구간이다.

Case 2는 추자도, 거문도(RU No.3), 동광 그리고 고산 기상대를 포함하는 수신기 네트워크를 구성하고 있다. Case 1과 비교하였을 때 초기 위치와 마지막 위치에서의 위치 오차는 큰 차이를 보이지 않았지만 커브 구간에서 차이가 나는 것을 볼 수 있었다.

추자도, 여서도, 동광 그리고 모슬포(RU No.6)를 포함하는 Case 3과 추자도, 여서도, 동광레이더 그리고 마라도(RU No.7)를 포함하는 Case 5 그리고 Case 4와 Case 6의 경우를 비교하였을 때 모슬포 지역에 수신기를 배치하는 것 보다 마라도 지역에 수신기를 배치하는 것이 커브구간에서의 위치 정확도가 높은 것을 볼 수 있었다. 각 Case의 Fix별 오차는 Table 2와 같다. Case별 오차의 변화가 가장 높은 구간은 PC604~606 Fix로

나타났다. 각 시뮬레이션 Case를 비교하였을 때 수신기의 배열을 가깝게 하는 것보다 일정 거리를 두고 배열하였을 때 더욱 효율적인 것으로 나타났다.

Table 2. Position error of each Case(5,000ft)

Case \ Fix	DOTOL	PC604~606	SINNA
Case 1	51m	492m	14m
Case 2	47m	173m	11m
Case 3	108m	32m	12m
Case 4	85m	25m	10m
Case 5	93m	18m	11m
Case 6	76m	17m	11m

다음 Fig 8부터 Fig 13은 DOTOL One PAPA Arrival procedure를 8,000ft로 비행 시 수신기의 위치에 따른 위치 정확도를 나타내었다. 5,000ft 시뮬레이션에서 고도만 변화를 주어 수신기의 위치에 따라 항공기의 위치 추정오차에 미치는 영향을 살펴보았다.

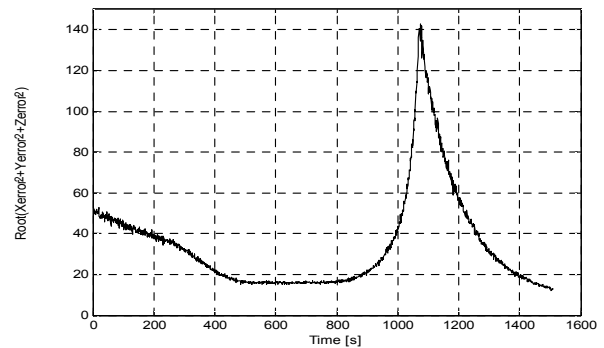


Fig 9. Case 1 of Position error(8,000ft)

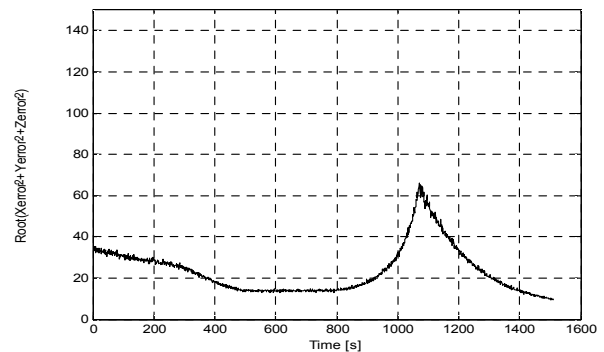


Fig 10. Case 2 of Position error(8,000ft)

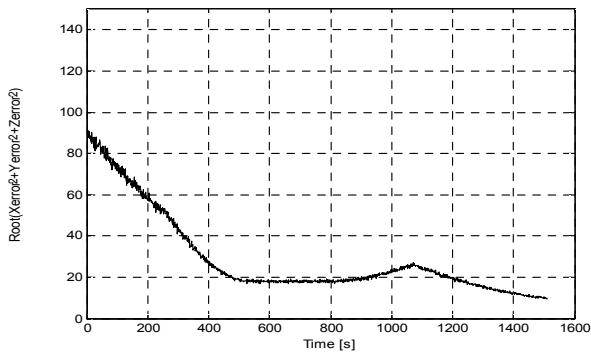


Fig 11. Case 3 of Position error(8,000ft)

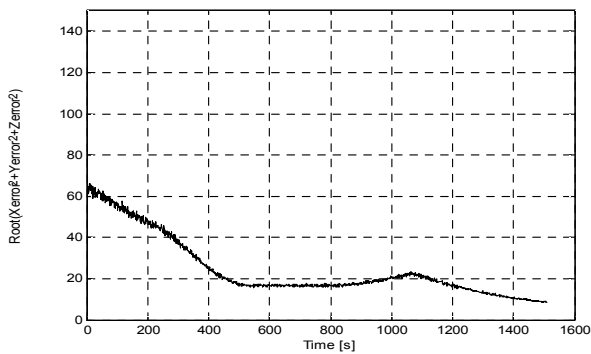


Fig 12. Case 4 of Position error(8,000ft)

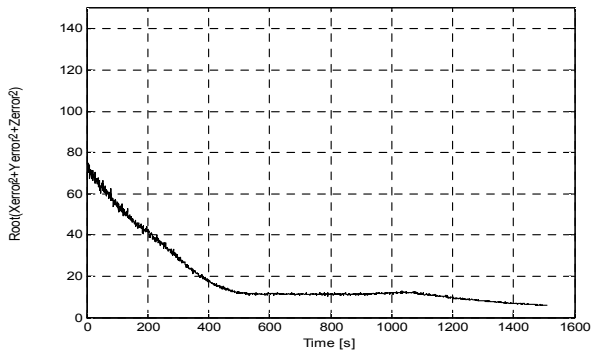


Fig 13. Case 5 of Position error(8,000ft)

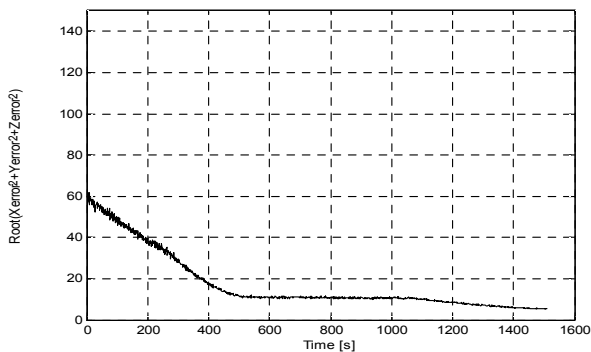


Fig 14. Case 6 of Position error(8,000ft)

Case 1과 Case 2에서는 고도가 더 높을수록 커브 구간에서 위치오차가 2배 이상 줄어드는 것을 보였지만 Case 3, 4, 5, 6의 경우에는 고도의 차이가 위치 오차에 크게 영향을 주지 않았다.

5,000ft의 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 추자도, 여서도, 동광 그리고 모슬포(RU No.6)를 포함하는 Case 3과 추자도, 여서도, 동광 그리고 마라도(RU No.7)를 포함하는 Case 5 그리고 Case 4와 Case 6의 경우를 비교하였을 때 모슬포 지역에 수신기를 배치하는 것 보다 마라도 지역에 수신기를 배치하는 것이 커브구간에서의 위치 정확도가 높은 것을 볼 수 있었다.

수신기의 위치를 여서도와 거문도에 배치하는 것을 비교한 Case 1과 Case 2, Case 3과 Case 4, Case 5와 Case 6의 시뮬레이션 결과에서 나타난 것과 같이 거문도에 수신기를 배치할 경우 초기 진입구간의 위치 정확도가 높은 것을 확인할 수 있었다.

Table 3. Position error of each Case(8,000ft)

Fix Case	DOTOL	PC604~606	SINNA
Case 1	52m	141m	14m
Case 2	38m	64m	12m
Case 3	91m	27m	11m
Case 4	62m	23m	11m
Case 5	76m	13m	7m
Case 6	60m	12m	7m

비행 고도를 8,000ft로 설정한 시뮬레이션 결과와 5,000ft로 설정한 결과를 비교하였을 때 오차 그래프가 유사하게 나타나는 것을 볼 수 있었으나 고도가 높을수록 전체적으로 위치 오차 범위가 줄어 높은 고도에서 더욱 정확한 위치추정이 가능한 것을 볼 수 있었다. 또한 5,000ft 고도에서 시뮬레이션 한 결과와 마찬가지로 각각의 수신기 배열을 가깝게 하는 것보다 일정 거리를 두고 배열하였을 때 더욱 효율적인 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 논문에서는 근래 항공교통관리 시스템 및 항법시스템에서 더욱 핵심적인 역할을 수행하고 있는 GPS가 간섭 등으로 사용이 불가능할 때, 이를 대신하여 PNT 기능을 제공할 수 있는 대안항법시스템 중 다변측정감시시스템(MLAT)에

초점을 맞추어 연구하였다.

컴퓨터 시뮬레이션으로는 제주 접근관제구역 내 MLAT 수신기를 배열하여 설치 위치에 따라 이동 중인 항공기의 3차원 위치 추정 오차를 분석하였다.

시뮬레이션은 제주접근관제구역 내 DOTOL One PAPA 도착 절차를 적용하고 B737을 운항 기종으로 설정하여 평균 220 knot로 8,000ft와 5,000ft로 비행하는 항적을 생성하였다.

분석 결과, 대부분의 경우에 대해 RNAV-1 요건을 만족하는 것을 볼 수 있었다. 그 중에서도 가장 적은 오차를 갖는 MLAT 수신기 네트워크 배열은 추자도(RU NO.1), 거문도(RU NO.3), 제주도 동광(RU NO.4), 마라도(RU NO.7)로 구성하는 것이었다.

하지만 본 연구에서는 4개의 제주 계기도착절차 중 1개의 경우만 고려하였다. 따라서 향후 연구에서는 제주 접근관제구역내 계기 출·도착절차를 모두 고려할 필요가 있다.

또한 항공기의 고도와 지형의 기하학적 요소, 지구 곡률 등 MLAT 수신기와 항공기간에 거리 벡터 변화에 따른 DOP(Dilution of precision)을 고려하여 수신기의 최적 위치를 찾는 방안[8]과 한정된 감시구역에서 항공기의 위치를 추정하는데 필요한 수신기의 수를 결정하는 방안에 대해서도 고려해 보아야 할 것이다.

후 기

본 논문은 한국항공대학교 교비학술지원연구(과제번호: 2014-01-011 연구기간: 2014.01.01.~2014.12.31.)의 일환으로 연구되었습니다.

참고문헌

- 1) Frederick A. Niles, Dr. Robert S. Conker, Dr. M. Bakry El-Arini, Daniel G. O'Laughlin, Dmitri V. Baraban, "Wide Area Multilateration for Alternate Position, Navigation, and Timing (APNT)", White Paper, August 2012.
- 2) 이상욱, 주인원, 신천식, 이정훈, 김재현, 손승호, "GPS 전파교란 감시기술 동향", 전파통신동향분석 제26권 제4호, 2011.
- 3) 조상훈, 강승은, 강자영, 고상호, "GNSS 대안항법시스템 요구사항 및 기술분석", 한국항공운항학회 제20권 제3호, 2012.
- 4) Marcela Ujcova, Intelligent Multilateration

System for Air Transport, European International Journal of Science and Technology Vol.2 No.6 July 2013.

5) Inna M. Konchenko, Felix J. Yanovsky, Influence of Multilateration Surveillance System Arrangement on The Target Localization, NAU Proceedings. pp.29 - 32, 2009.

6) 조상훈, 강자영, "평면 비행중인 항공기의 쌍곡선 위치 추정 연구", 한국항공운항학회, 21권 2호, pp.33~39, 2013.

7) Yekaterina Trofimova, Multilateration Error Investigation and Classification. Error Estimation, Transport and Telecommunication Vol.8 No.2, pp.28 - 37, 2007.

8) Ivan A. Mantilla Gaviria, New strategies to improve multilateration system in the air traffic control, 2013.