

論文

모드-S 다변측정법을 이용한 항공감시기술 분석 및 전망

김장환*, 한재현**, 강자영***

Air Surveillance Using Mode-S Multilateration

Chang-hwan Kim* , Jae-hyun Han** and Ja-young Kang***

ABSTRACT

Surveillance is an enabler of safety with respect to aircraft separation and as a consequence capacity and efficiency with respect to aircraft operations. The new emerging technology among modern civil aviation surveillance is Multilateration (MLAT) which would affect on the surveillance capacity with both side of surveillance signal and operational properties. Multilateration system is needed to receive the signal which must reach at least 3 ground receivers simultaneously and has the effect that will have on with the ultimate accuracy. In this paper, the principle and the system configuration are reviewed. And its benefit of development is considered with use in situations where it is difficult to locate traditional radar. This MLAT requires no additional avionics equipment to supply service with more accurate and less expensive. And it is able to enhance performance that meets international standards and extend the investment of air navigation service providers with reducing environmental impact by utilizing a small footprint on existing structures. Finally, it can be added to meet a wide range of coverage requirements and future surveillance needs.

Key Words : MLAT(다변측정시스템), TDOA(도래시간차), SSR(2차감시레이더), ADS-B(자동 종속감시방송시스템), ASAS(공중분리보증시스템), MSPSR(다중정적1차감시레이더)

1. 서 론

세계적으로 항공운송은 매년 경이적인 성장 속도를 기록하고 있고, 이러한 추세는 당분간 계속 유지될 것으로 예상된다. 예를 들어, 한 보고서는 향후 20년 동안 항공성장 측정의 척도인 유상승객거리(RPKs)¹⁾가 연 4.9%, 유상탑재톤거리(RTKs)²⁾는 연 5.4%의 성장을 할 것이라고 예상하고 있다[1]. RPKs는 비행여정에 요금을 지불한 승객수와 각 여정의 거리를 곱하여 얻는다. 그러나 이러한 항공여행에 대한 수요증가는 항공운송산업

계에 커다란 도전을 요구한다. 승객 수가 증가하면서, 매주 적어도 하나의 큰 사고가 발생할 확률이 높아졌다. 만일 항공운송안전에 대한 대중의 신뢰도가 지속되려면 항공산업에서 안전이 가장 높은 순위에 있어야 한다. 활주로 준사고나 향후 일어날 사고를 예방하기 위한 가장 유익한 방법은 운용성능을 기록하고, 사고조사를 하는 동안 개선책을 정의하는 것이다. 조사를 통해서, 사고 또는 준사고의 원인이 식별되고 위험 요소들이 관리될 수 있다. 그러나, 통계에 의하면 항공 산업은 놀라울 정도로 안전기록을 유지해왔고, 오늘날 세계에서 가장 안전한 형태의 운송이 되게 하였다. 사고가 보다 적게 발생하면 자료수집이 힘들기 때문에 항공 안전의 실패 또는 성공에 관여하는 근본 요인들을 깊게 관찰하는 것이

2010년 08월 25일 접수~2010년 09월 20일 심사완료

* 한국교통연구원

** 한국교통연구원

*** 한국항공대학교 항공운항학과 교수

연락처, E-mail : jaykang@kau.ac.kr

경기도 고양시 덕양구 화전동 항공대길 100

1) Revenue Passenger Kilometers

2) Revenue Ton-Kilometers

유리할 수도 있다.

터미널 지역 및 활주로 안전 관리는 위험에 연관된 요인들을 이해하고, 위험을 감소시키기 위한 조치를 취해야 하는 등 동적인 과정으로 이루어진다. 터미널 지역 및 활주로 상에서 발생할 수 있는 사고를 줄이기 위해 최근 ADS-B³⁾를 포함하여 여러 가지 항공 감시기술들이 연구 개발되고 있는데 본 논문에서는 Mode-S를 이용한 다변측정법에 대해 알아보기로 한다. 다변측정기술은 경제성 및 기술 응용성의 측면에서 다른 어느 감시기술에 비해 높은 경쟁력과 보완성을 갖기 때문에 많은 국가에서 이 기술의 개발과 구축에 관심이 높아지고 있다.

2. 항공 감시시스템 개요

항공 감시는 항공기의 안전하고 효율적인 운항을 위해 이동체, 기상현상, 공역정보, 지형 및 장애물 정보 등에 대한 탐지, 추적, 식별 및 관측 업무로 정의될 수 있다. 감시의 첫 번째 목적은 항공기의 흐름을 제어하고, 항공기를 분리시키며, 조종사와 관제사에게 향상된 상황인지를 제공하는 것이다. 이러한 항공감시시스템의 기준으로 삼는 성능 파라미터는 통달범위(Coverage Volume), 정확도(Accuracy), 데이터 갱신주기(Update Rate), 무결성(Integrity), 신뢰도 (Reliability) 및 가용성(Availability) 등이다^[2].

감시의 방법은 음성보고, 시계포착, 1차 및 2차 감시 레이더, 기타 기술 (ADS-B, TIS-B⁴⁾, FIS-B⁵⁾, 상황인식유지 데이터 링크 및 데이터베이스, MLAT⁶⁾, WAM⁷⁾)을 포함한다.

데이터베이스는 조종석에 지형, 장애물 및 항공지도 정보를 제공한다. 반면 ADS-B는 데이터 링크를 통하여 기상데이터를 교환하기 위한 수단과 함께 근처 항공기에 위치 및 비행 의도 데이터를 제공하고, TIS-B는 항공기에 교통 데이터를 제공하며, FIS-B는 현재 및 현시점까지의 기상과 공역 상황 정보를 제공한다.

위치, 속도벡터, 비행의도, 기타 메시지를 포함한 교통감시정보는 지상국이나 항공기 조종실에서 사용될 수 있다. 또한 교통감시는 항공기 감시 및 관리, 교통흐름 관리, 수색구조 작업과 같은 다른 기능들을 지원하는 데에도 사용될 수 있다. 항공기 교통 감시의 품질은 목표물 정보의 갱신주기, 위치 및 속도 벡터의 정확도, 신뢰성, 가용도 등과 같은 지표를 이용하여 설명될 수 있다.

Fig 1은 항공기와 지상국 또는 항공기와 항공

기 간의 감시업무의 흐름 구조를 나타내고 있다^[3]. 흐름 구조에서 화살표는 감시의 행위가 일어나는 방향을 나타내는데, 점선으로 표시된 비협동 감시는 감시주체의 감시 행위에 대해서 감시대상(표적)의 반응이 필요 없음을 의미하고, 실선으로 표시된 협동 감시는 감시주체의 감시 행위에 대해서 감시대상이 반응하여 감시가 이루어짐을 의미한다. 이 Fig에서 양방향의 검은색 화살표로 나타난 항공기 간의 감시는 양 항공기 자체가 모두 감시 주체인 동시에 감시대상이 됨을 나타낸다. 이는 지상개입이 없이도 항공기 간의 자율적 분리가 가능함을 나타내는데 그 조건으로 공중분리를 보증할 수 있는 시스템(ASAS⁸⁾)이 항공기에 갖추어져 있어야 한다.

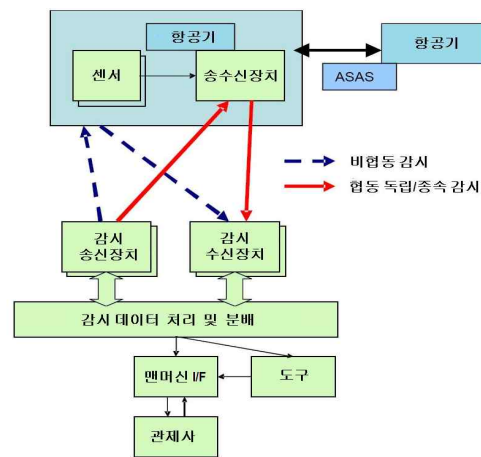


Fig 1. 항공 감시 업무의 흐름도

기본적으로 항공감시는 비협동 독립감시, 협동 독립감시, 협동 종속감시, 그리고 항공기 간의 감시 등으로 구분될 수 있다^[3]. 독립 감시는 지상 시스템 스스로 항공기의 위치식별을 통해서 항공기를 감시하는 능력을 말하고, 종속감시는 항공기가 자체의 위치식별 데이터를 데이터 링크를 통해서 지상국 및 주변 항공기에 제공하여 이루어지는 감시 능력을 의미한다. Fig 2는 항공 감시 시스템의 분류도로서 각각에 대한 설명은 아래와 같다^[4].

- 3) Automatic Dependent Surveillance–Broadcast
- 4) Traffic Information Service–Broadcast
- 5) Flight Information Services–Broadcast
- 6) Multilateration
- 7) Wide Area Multilateration
- 8) Airborne Separation Assurance System

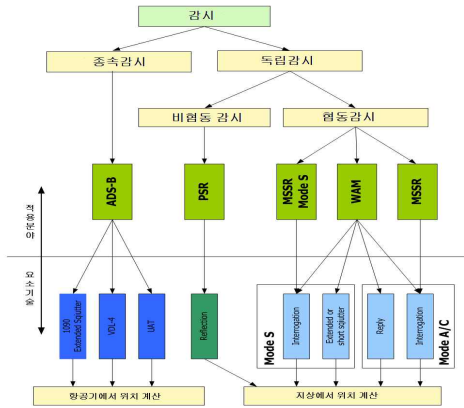


Fig 2. 항공 감시시스템의 분류

2.1. 비협동 독립 감시

비협동 독립 감시(Fig 3)는 어떠한 항공기 탑재 전자장비에도 의존하지 않는 감시로서, 중계기 고장이나 미확인 비행체를 탐지하기 위하여, 또는 안전 및 보안 목적상 필요할 경우에 계속 배치된다. 그러나 2020년까지는 다중의 정적(비회전) 기술을 이용하는 저렴한 1차 감시 레이더(MSPSR)⁹⁾가 가용할 것으로 예상된다.

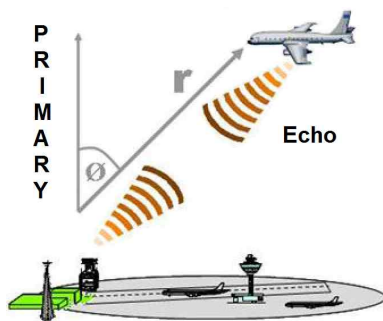


Fig 3. 비협동 독립 감시[5]

2.2. 협동 독립 감시

협동 독립 감시는 SSR¹⁰⁾ 모드 S(Fig 4) 또는 다변측정법(Fig 5)에 기초를 둔 감시방법으로서 2020년대에 주요 감시수단이 될 것으로 예상된다 [5]. 다변측정 감시시스템은 무거운 회전식 장비 보다는 지상기반 고정 안테나를 사용하기 때문에 비용 효과가 매우 크고, 항공기에도 영향을 미치지

않으므로 이 기술로의 전환은 아주 밝아 보인다. 다변측정법의 정밀도는 구성 방법에 따라 차이는 있겠지만 공항에서는 3~7m, 터미널 지역에서는 10~50m를 쉽게 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다.

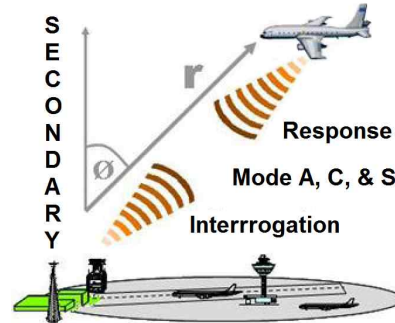


Fig 4. 협동 독립 감시[5]

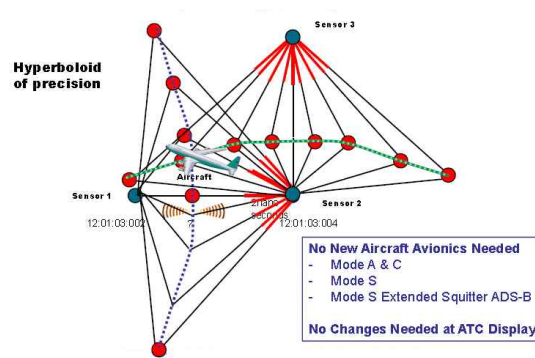


Fig 5. 다변측정개념도[5]

2.3. 협동 종속 감시

데이터 링크의 수단을 이용하여 항공기의 위치, 고도, 식별번호 및 기타 파라미터를 제공하는 항공기에 기초한 이 감시방법은 항공기 시스템에 완전히 종속적이다. 협동 종속 감시는 레이더가 없는 저밀도 공역에 대한 솔루션이나 중밀도 또는 고밀도 공역에서 독립감시에 대한 보완 장비로 개발되고 있다.

2.4. 공대공 감시

기본 ASAS ATSAW¹¹⁾, 간격유지, 초기 분리를

9) Multi-Static Primary Surveillance Radar

10) Secondary Surveillance Radar

지원하기 위해 필요한 능력을 갖춘 항공기를 제공하기 위해 ADS-B In/Out이 적용된다. Fig 6은 ADS-B의 개념도를 나타내고 있다[6].

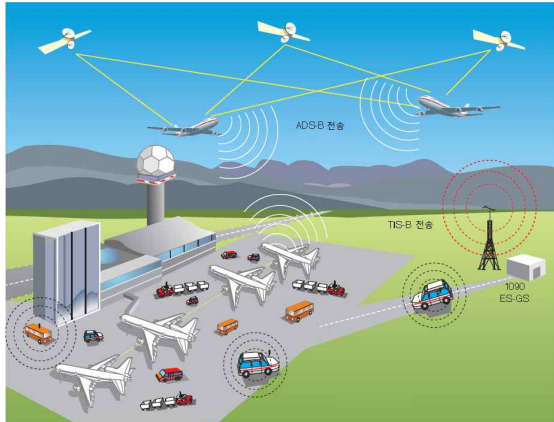


Fig 6. ADS-B 개념도[6]

2.5. 감시 데이터의 융합

감시기능은 항공관제사 뿐만 아니라 다른 지상 이동유도제어 기능에 필수정보를 제공한다. 최근에는 다중센서를 이용하여 다중 목표물을 추적하는 방법이 많이 연구되고 있는데 이 방법에서는 다양한 감시시스템의 센서들을 통하여 수집된 데이터를 관련 기능에 적합한 정보의 형태로 융합 처리하고 제공하는 일이 매우 중요하다. Fig 7은 이러한 다중센서 데이터 융합의 한 예를 보여주고 있다[7].

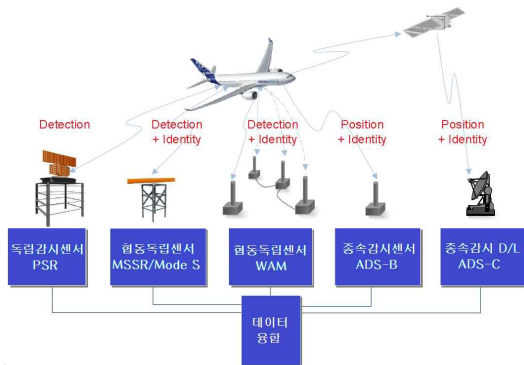


Fig 7. 통합 감시 데이터의 융합[7]

3. 다변측정 감시시스템

3.1. 기본원리

쌍곡선(hyperbola) 또는 쌍곡면(hyperboloid) 위치 측정법을 이용하는 다변측정법은 어떤 이동체로부터 3개 또는 그 이상의 수신기로 전송된 신호의 도래 시간차 (TDOA)¹²⁾를 정확하게 계산하여 물체의 위치를 측정하는 방법이다(Fig 8).

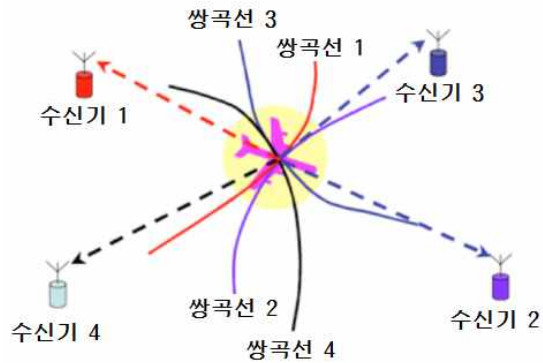


Fig 8. TDOA 쌍곡선 항법[8]

이는 역으로 3개 또는 그 이상의 동기화된 발신기로부터 발신된 신호의 TDOA를 측정함으로써 수신기의 위치를 계산하는 방법과 유사하다. 따라서 다변측정은 3개 또는 그 이상의 지점으로 부터의 거리나 또는 절대 비행시간을 측정하여 이용하는 삼변측정(Trilateration)이나 또는 하나의 기준선과 수신기 안테나 다이버시티 및 상 비교를 통하여 측정된 최소 2개의 각을 이용하는 3각측량(Triangulation)과도 구분된다. 다변측정은 운용중인 ATC 중계기를 장착한 항공기 또는 이동체들의 위치를 확인하고 식별하기 위해 다변측정 시스템 또는 다른 감시 소스들이 발신한 질문들(모드 A/C/S)에 대한 응답뿐만 아니라 임의의 Mode-S 스쿼터를 사용한다[8].

참고문헌 [9]에 주어진 수식들을 이용하여 다변측정법의 기본원리를 좀 더 설명하면 다음과 같다. Fig 9에서 미지의 위치 벡터 $E(x, y, z)$ 에 있는 임의의 발신기 E를 고려하기로 한다. 소스로부터 통달범위 내에 있는 $N+1$ 개의 수신기의 알려진 위치는 $P_0, P_1, \dots, P_m, \dots, P_N$ 이다. 첨자 m은

11) Airborne Traffic Situational Awareness
12) Time Difference of Arrival

수신기 중 하나를 의미하고, 그 위치는 $P_m(x_m, y_m, z_m)$, $0 \leq m \leq N$ 이다. 발신기에서 임의의 수신기까지의 거리(R)를 좌표로 나타내면 다음과 같다.

$$R_m = |\vec{P}_m - \vec{E}| = \sqrt{(x_m - x)^2 + (y_m - y)^2 + (z_m - z)^2} \quad (1)$$

수신기들 중의 하나를 원점(P_0)으로 잡으면 발신기로부터의 거리는 다음과 같이 된다.

$$R_0 = \sqrt{(x)^2 + (y)^2 + (z)^2} \quad (2)$$

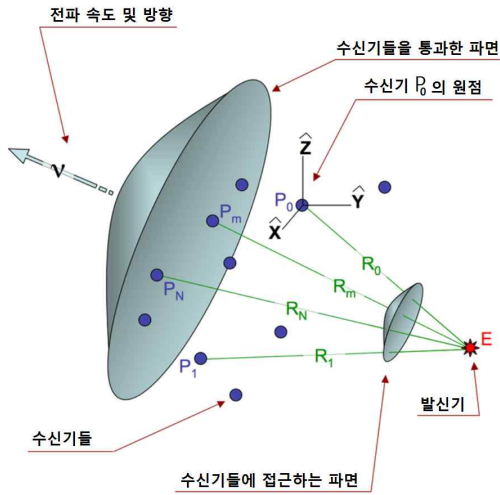


Fig 9. TDOA 기하학[9]

식 (1)에서 R_m 은 전파속도(v)에 이동시간(T_m)을 곱한 값과 같다. TDOA 다변측정시스템은 각 수신기에 도달하는 파면(wavefront)의 시간차이를 측정한다. 그러면 수신기 m 및 0에 대한 TDOA 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v\tau_m &= vT_m - vT_0 \\ &= R_m - R_0 \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)은 앞에서 설명한 쌍곡면 위치측정식으로서, 4개의 수신기($0 \leq m \leq 3$)로부터 3개의 미지수(x, y, z)를 갖는 3개의 비선형 방정식이 도출된다. 그런 다음에 시스템은 실시간으로 미지의 발신기 위치를 풀어야 한다. 민간항공교통관제에 쓰이는 다변측정시스템들은 고도(z)를 결정하기 위해 모드 C SSR 중계기 회답을 사용한다. 위치가 알려진 3개 또는 그 이상의 수신기가 다른 2

차원(x, y)을 찾는 데 사용된다. R. Bucher와 D. Misra는 3개의 발신기간의 TDOA로 1개의 수신기 위치를 결정하기 위한 상세한 대수식을 소개하였다[10]. 이들의 해는 (x, y)와 (z)에 대한 2차 방정식을 구하기 위한 한 세트의 선형방정식이다. 많은 수의 수신기를 가지고 정확성을 높이는 일은 비선형 방정식(1)~(3)을 동시에 푸는데 요구되는 시간 때문에 작은 임베디드 프로세서를 가진 장치에서는 문제가 될 수 있다. TDOA 문제는 5개 이상의 수신기가 있을 때 선형방정식의 체계로 전환될 수 있고, 이는 계산 시간을 줄일 수 있다. 식 (3)을 R_m 에 대해 풀고, 양변을 제곱한 다음 $v\tau_m$ 으로 모든 항들을 나누면 식 (4)와 같이 정리될 수 있다.

$$0 = (v\tau_m)^2 + 2R_0 + \frac{(R_0^2 - R_m^2)}{v\tau_m} \quad (4)$$

$2R_0$ 항을 제거하게 되면 모든 제곱근 항은 없어지게 된다. 이는 $m=1$ 인 수신기의 TDOA 식을 다른 각각의 수신기의 식($2 \leq m \leq N$)에서 뺄으로써 이루어진다.

$$0 = v\tau_m - v\tau_1 + \frac{(R_0^2 - R_m^2)}{v\tau_m} - \frac{(R_0^2 - R_1^2)}{v\tau_1} \quad (5)$$

식 (1)에서, R_m 항에 제곱을 취한 후 식 (2)의 R_0 에 해당하는 항들을 소거하면 다음과 같이 된다.

$$R_0^2 - R_m^2 = -x_m^2 - y_m^2 - z_m^2 + 2x_m x + 2y_m y + 2z_m z \quad (6)$$

식 (5)와 (6)을 결합하면 미지의 발신기 위치 (x, y, z)에 대한 선형방정식으로 표시할 수 있다. 즉,

$$0 = xA_m + yB_m + zC_m + D_m \quad (7)$$

여기에서

$$\begin{aligned} A_m &= \frac{2x_m}{v\tau_m} - \frac{2x_1}{v\tau_1} \\ B_m &= \frac{2y_m}{v\tau_m} - \frac{2y_1}{v\tau_1} \\ C_m &= \frac{2z_m}{v\tau_m} - \frac{2z_1}{v\tau_1} \\ D_m &= v\tau_m - v\tau_1 - \frac{x_m^2 + y_m^2 + z_m^2}{v\tau_m} + \frac{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}{v\tau_1} \end{aligned}$$

식 (7)을 이용하여 각 수신기 $2 \leq m \leq N$ 에 대한

측정된 거리와 시간으로부터 4개의 상수 A_m, B_m, C_m, D_m 을 계산할 수 있다. 이는 $N-2$ 개의 동차 선형방정식이다. (x, y, z) 의 값을 구하기 위한 특이값 분해법(Singular Value Decomposition) 또는 가우스 소거법과 같은 많은 강력한 선형대수법이 개발되어 있다. 참고문헌 [11]에는 선형방정식을 풀고 그 결과치의 불확정 값을 추정하는 몇 가지의 방법들이 제시되어 있다.

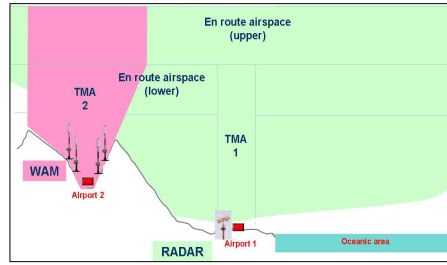


Fig 11. 하이브리드 감시시스템 구성예[7]

3.2. 시스템 구성

시스템 구축은 공항시설 근처에 정밀하게 측량된 위치에 임의의 수의 송수신국들을 설치하고, 하나의 신호가 여러 위치에 설치된 수신기에 도착한 시간차에 기초를 둔 소위 TDOA 원리를 통하여 목표물의 2차원/3차원적 위치를 측정하는 시설로 이루어진다. 다변측정은 항공기에 장착될 어떤 추가의 장비를 요구하지 않는다(휴대 가능하고 이동체에 장착이 용이한 중계기). 다변측정은 A-SMGCS¹³⁾ 또는 터미널지역/항로 감시 요구사항에 맞는 성능으로 항공기 또는 이동체를 확실하게 식별하고 추적하기 위한 충분한 정보를 제공할 수 있다. 즉, 다변측정시스템은 공항 지상 등 근거리에서 항공기 및 이동체들을 감시할 수 있는 시스템과 터미널 및 항로상의 항공기를 감시할 수 있는 광역 다변측정 시스템으로 분류하여 시스템을 구성할 수 있다(Fig 10)[5]. Fig 11은 프랑스령 Guiana Cayenne 지역에 설치된 레이더와 다변측정시스템의 혼용하여 구성한 예를 보여 주고 있다[7].

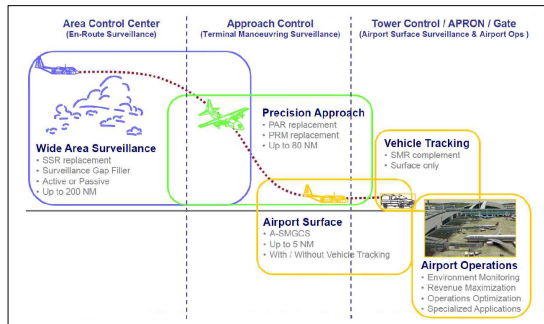


Fig 10. MLAT 항공분야 응용[5]

다변측정은 신호의 발신 위치를 정확하게 확인하고, 송신 신호의 일부인 어떠한 식별 데이터 (8진법 코드, 항공기 주소 또는 비행 식별)를 비교하고, ATM 시스템에 그것을 보내는 감시 어플리

케이션의 하나이다.

다변측정은 2차 감시레이더(SSR)처럼 식별 및 고도에 대한 목표물-유도 데이터상의 관련성을 지상기반 위치 계산과 결합하는 협동감시 기술로 고려된다. 전통적인 회전식 레이더에 비하여 다변측정은 항공기 발신 신호들 간의 간격으로 결정되는 높은 데이터 갱신 속도를 얻을 수 있다. 다변측정시스템을 구성하는 요소기술은 대략 Fig 12에 나타낸 바와 같다[12].

- 질문 메시지 생성 및 발신 기능을 포함하는 송신 서브시스템
- TCAS¹⁴⁾ 및 SSR 시스템들이 질문을 하는 지역에서 다변측정이 필요한지를 결정하는 선택적 지능형 질문 프로세스
- 목표물로부터 발신된 신호들과 각 안테나에서의 시간기록(time stamp)을 수신하는 수신 안테나 어레이 서브시스템
- 다변측정 경로를 계산하고 출력하는 중앙처리장치

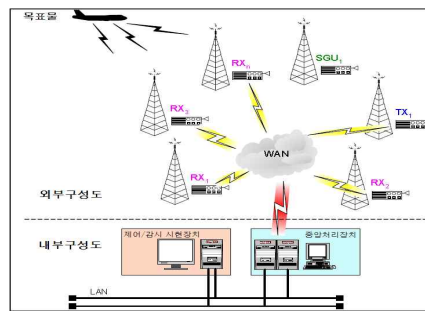


Fig 12. 다변측정 감시시스템 구성도[12]

13) Advanced Surface Movement Guidance and Control System
 14) Traffic collision avoidance system

TDOA를 계산하는 방법은 두 가지가 있다. 수신된 신호들을 상호 상관시켜서 신호의 도래시간의 차를 계산하거나 또는 도래시간(TOA)¹⁵⁾을 측정하여 이들의 시간차를 계산한다. TOA 시스템은 SSR 다변측정에서 광범위하게 이용되고 있다. Fig 13은 TOA 시스템에 대한 간략한 데이터 흐름을 보여주고 있다[13].

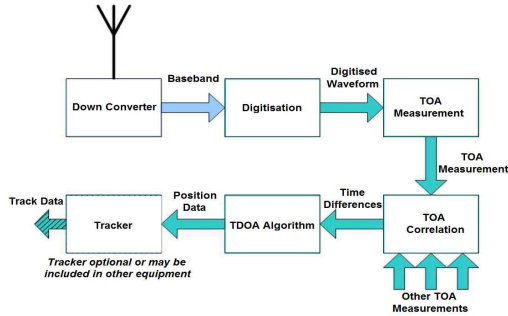


Fig 13 TOA 데이터 흐름도[13]

3.3. 시스템 동기화

시스템 동기화는 TOA 다변측정법에서 기본이다. 위치를 계산하기 위해서는 시스템 내의 한 안테나에 도착하는 신호와 다른 안테나에 도착하는 신호의 시간차를 아는 것이 필요하다. 이 때문에 TDOA라는 용어를 사용한다. 그러나 신호는 디지털화 과정에서 시간이 기록되는데, 이는 하향변환처리(downconversion process)의 군지연(group delay) 때문에 안테나에 도착한 시간에 대한 지연이 발생한다. 추가로, 각 수신기 체인에 대한 디지털화 과정은 공통시간 기준을 참조해야 한다. 그렇지 않으면 여러 사이트에서의 신호들은 서로 다른 시계들을 참조해야 하고, 직접 비교할 수가 없다. Fig 14는 군지연 및 동기화 컴포넌트들을 보여주고 있다[13].

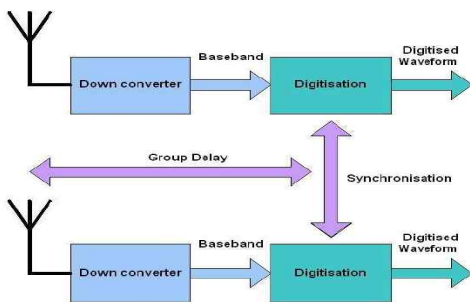


Fig 14. 군지연 및 동기화[13]

광역다변측정(WAM)에 사용되는 다양한 동기화 기술들을 분류하면 Fig 15와 같다[13].

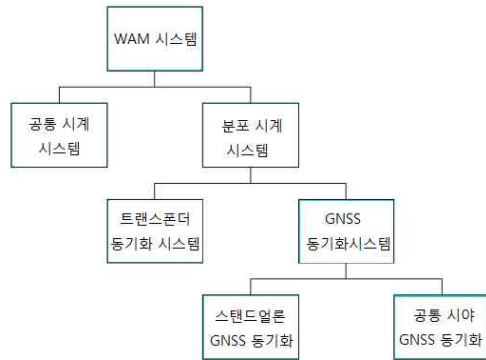


Fig 15. 다변측정시스템의 시각동기 분류[13]

동기화는 각 사이트에 대한 신호들의 디지털화 과정들이 함께 묶이는 방법으로 정의된다.

WAM에 적용되는 다양한 동기 방식들에 대한 특성이 Table 1에 주어져 있다. 이것은 긴 베이스라인에 대한 각 아키텍처의 기본을 요약하기 위한 것으로서 특정 전개를 언급하는 것이 아니다.

Table 1. 다변측정시스템의 동기화 방식[13]

방법	정확도	베이스라인	링크선택	Mast	LOS
공통시계	중	중	마이크로파 광케이블	고저	Yes/No
중계기 동기	중	중	Any	고	Yes
표준 GNSS	저	Any	Any	저	No
공통시야 GNSS	고	대	Any	저	No

정확도는 다음과 같이 정의될 수 있다.

- 저 - 약 10~20ns 이거나 더욱 안 좋음
- 중 - 2~5ns에서 10~20ns 사이
- 고 - 2~5ns 보다 나옴

3.4. 기술적 제약

다변측정시스템의 기술적 제약으로 많은 요인이 있지만, 그 중에서 주요한 부분을 살펴보면 수신기의 성능, 안테나의 선택, 신호 방해, 시스

15) Time of Arrival

템의 배치 및 GDOP¹⁶⁾ 등이 있다. 수신기는 시스템이 감지할 수 있는 최소한의 신호 강도로 표시되는 민감도를 가지고 있을 뿐 만 아니라, 동작 대역은 수신기에 동시에 감지될 수 있는 신호 전력의 범위를 나타낸다. 또한 수신기의 시간 비율이 높으면 높을수록 다변측정 시스템의 정확도가 높아진다. 신호 처리의 지연도 수신기의 기술적 제한 사항이 된다. 수신기의 선택은 시스템의 전체적인 성능에 큰 영향을 가져올 수 있는데, 2차 종속 레이더의 1090MHz 신호를 사용하거나 혹은 위성항법 수신 안테나를 사용하는 것도 성능에 지대한 영향을 미친다. 다중경로 혹은 비고의 적 신호 간섭 등의 신호 방해에 의한 신호 방해적 요소도 있다. 수신기의 개수나 배치에 따라 시스템의 영향을 줄 수 있다.

3.5. 다변측정시스템의 성능

Eurocontrol에서 다변측정시스템에 사용될 가능한 기술 연구를 한 자료를 살펴보면, 요구되는 수신기의 개수와 배치 거리에 따라 기존 레이더에서 요구하는 정확도를 비교하고 ADS-B 평가 요구조건을 구하였다. 넓은 간격을 가진 5개의 수신기로 구성된 다변측정시스템이 중심으로부터 약 170NM 거리에서는 레이더의 정확성보다 크게 앞서 있는 것을 보여 주고 있다(Fig 16). 터미널 지역에서는 항공기 가시성의 영향이 커서 안테나의 민감도나 선택이 상대적으로 적게 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 일반적으로 10~20NM의 간격이 적정한 것으로 연구되었다[13].

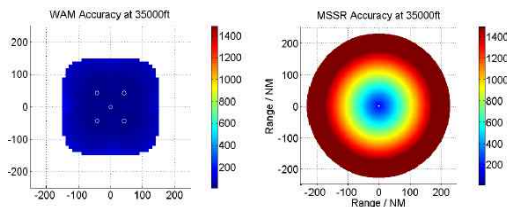


Fig 16. 항로용 WAM과 MSSR의 정확도(ft)

ADS-B의 성능은 수신된 신호에서 유도된 항공장비의 항법 정확도에 영향을 받는다. 현재 정밀 지역항법은 1NM이하의 정밀도를 요구하고 있는데 실제 위성항법시스템으로 도출된 위치는 대부분 이보다 더 정확한 것으로 나타났다. SSR은 거리와 방위각의 오차 문제가 있지만 다변측정시스템은 지상국과 항공기의 기하학적 위치와 연관되어 발생하는 정확성의 저하 문제가 있다. 일반 공항에서 위치 정확도는 10~23피트 정도이고,

공항으로부터 10마일 내에 있는 항공기의 정확도는 30~40피트 정도이다. Eurocontrol의 시험에 의하면 항로 분리에 적합하게 5개의 수신기를 설치하여 35,000피트의 고도에 있는 항공기를 측정하면 그 유효통달거리는 대략 170nm이 된다. 다변측정의 데이터 갱신 주기가 1초 또는 그 이하이기 때문에 4초 또는 그 이상의 갱신 주기를 갖는 SSR에 비해 큰 장점을 갖는다. 따라서 레이더를 사용할 때 존재하는 목표물 추적 오차를 상당히 감소시킬 수 있다. 이는 다변측정 감시시스템이 항로 및 터미널에서 운용되는 전자주사식의 PRM¹⁷⁾이나 SSR을 대체할 수 있음을 암시한다. 물론 다변측정에 비해 항로 분리 간격을 더 줄일 수 있는 ADS-B가 존재하지만 ADS-B는 항법위성에 종속되어 있는 감시시스템인 반면 다변측정은 감시대상인 항공기 자체에 의존하는 감시시스템이기 때문에 ADS-B에 대한 보완시스템으로서도 가치가 크다.

3.6. 항로 및 접근시 요구사항

다변측정시스템의 요구사항은 SSR/Mode-S 감시 레이더에 사용되는 유사한 방식에서 유도된다. 레이더 위치 오차의 주요 요인은 방위각 오차이다. 5nm의 분리를 위해 160nm에서 위치오차의 표준 편차는 344m보다 작아야 하고, 꼬리 부분의 평균 오차는 836m보다 작아야 한다. 레이더 감시의 표준 값은 약간 높다. 즉, 꼬리부에서 0.24°, 0.05%의 값을 갖고 꼬리부 값에 대한 요구된 평균값은 없다. 이러한 특성들은 WAM에 대한 요구위치성능으로 사용될 수 있다.

4. 기술 발전 전망 및 응용분야

4.1. 감시시스템의 구축 방향

향후 항공감시시스템을 여러 가지 방법으로 구성하여 운용할 수 있겠지만 예상 공역 교통량에 따라 기존시스템과 새로운 시스템을 균형있게 조화시켜 운용하는 것이 필요하다. Fig 17은 EU의 감시시스템 구축 계획에 따라 관련 기업에 의해 제시된 구축방안으로서[7], 2010년도 이후 항로, 터미널지역, 공항 등 모든 공역에서 다변측정의 활용이 포함되어 있고, 2015년도 이후에는 중/저밀도 항로에서 ADS-B와의 연계사업이 활발해질

16) Geometric Dilution of Precision

17) Precision Runway Monitor

것 같다. Fig 18은 기존시스템과 새로운 시스템이 통합 운용될 때의 개념도이다.

공역의 교통 밀도	2007	2010	2015	2020
EN ROUTE				
저밀도 내륙	Procedures / ADS-C	Multilateration (WAM)		→ ADS-B
중밀도 항로	MSSR	Multilateration (WAM)		→ ADS-B
고밀도 항로	MSSR	Multilateration (WAM) (double coverage ECAC area)		
전 체		PSR Long Range + MSSR (homeland security)		
APPROACH				
중밀도 접근	MSSR	Multilateration (WAM)		
고밀도 접근		ASR (PSR + MSSR) (ECOMGCA for military/civilian)		
AIRPORT		MSSR	Multilateration	

Fig 17. 감시시스템 구축 동향[7]

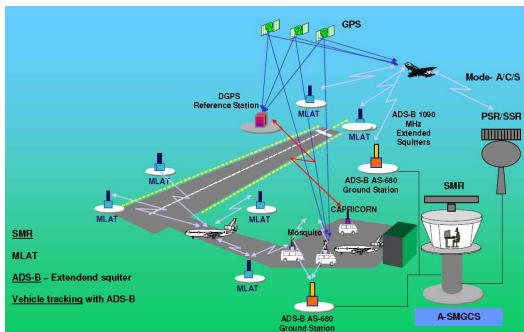


Fig 18. 통합 감시시스템 운용 개념도

4.2. 다변측정과 ADS-B

다변측정감시시스템과 ADS-B의 큰 차이점은 다변측정감시시스템이 새로운 항공전자 장비의 탑재를 필요로 하지 않는다는 점이다. 다변측정 감시시스템으로 인하여 ADS-B의 운용상의 장점은 소멸되는 것은 아니지만 다변측정 감시시스템은 ADS-B를 촉진시키는 운용상의 정책 및 절차가 만들어지는 시점까지 ADS-B의 개발을 더디게 할 수 있을 것이다. 그러나 GPS를 사용하는 ADS-B는 전 비행지역 및 지상에 걸쳐 광역다변측정 보다 정확도가 훨씬 높고, 조종석에서의 공통상황인지능력을 크게 개선한다. 이로 인하여 원격지 및 대양 공역에서 분리간격을 줄일 수 있다. 통과비행, 위치유지비행, 경로변경 도착을 하는 다른 항공기에 대해 자신의 항공기를 분리시키는 능력이 감시능력을 향상시키는 것보다 더 장점이 될 수도 있다. 향상된 감시에 의존하는 어떤 초기 적용이 없어도 요구사항들은 RNP¹⁸⁾와

다변측정으로 충족될 수 있을 것이다. 더구나 ADS-B는 다변측정 지상수신기들을 그대로 사용할 수도 있다. 이런 지상 수신기들로 구성된 네트워크는 ADS-B 정보 및 추적 데이터를 기존 항공교통 자동화 시스템이 사용할 수 있는 양식으로 전환시켜 준다. ADS-B가 일부만 구현된 혼용 환경에서 다변측정은 ADS-B Out 기능(항공기에 CDTI¹⁹⁾가 없는 위치방송 기능)에 견줄만한 서비스를 제공할 것이다. 항로상에 설치된 광역다변측정시스템은 ADS-B의 위치 보고를 검증해주는 독립장치가 될 수 있으며, GPS의 취약성으로 인하여 항공기가 항법해를 상실했을 때 2차 감시시스템의 기능을 제공해 줄 수 있을 것이다. 광역다변측정 시스템은 항공기의 RVSM²⁰⁾ 준수는 물론 모드 S ADS-B의 준수도 평가할 수 있다. 대부분의 항공전자와 달리 ADS-B 기술을 사용하기 위한 운용절차는 아직 완성되지 않았고, 안전성 증명을 테스트하고 있는 단계이다^[15]. 현재 다변측정 시스템을 통하여 향후 ADS-B가 운용될 때에 예상되는 중대한 방법의 변화와 관련된 잠재적인 안전 서비스 같은 것을 연구하는 것이 중요하다.

4.3. 개발 및 시험운용 사례

NASA는 멕시코 만 지역에서 헬리콥터의 저고도 운용과 고고도 항로비행에 대한 추적을 위한 광역 다변측정 성능시험을 실시하였다^[8]. 이 시험은 ADS-B에 대한 시험도 함께 실시되었는데, 이러한 시험들의 결과는 ATC²¹⁾ 비컨 질문기 모델 6 (ATCBI-6) 또는 SSR에 못지않은 성능을 보여주었다. 알래스카 Junea에서는 RNP와 결합하여 터미널 지역에서 운용할 목적으로 다변측정시스템을 설치하였고, St. Louis에서는 다변측정시스템이 전자주사방식의 PRM을 대체할 수 있는지를 확인하기 위한 기술시험을 실시하였다. 이 시험의 결과로 인하여 디트로이트와 클리블랜드도 다변측정시스템을 채택하게 되었고, 레이더에 비해 비용이 상당히 저렴하기 때문에 PRM 대체용으로 많이 사용될 경우 사업성도 좋을 것으로 알려졌다. 미국에서 다변측정기술은 대부분 공항 근처 감시에 적용이 되고 있지만 유럽과 아시아에서는 ATCBI²²⁾의 대안 또는 1차 레이더의 대체

18) Required navigation performance

19) Cockpit Display of Traffic Information

20) Reduced Vertical Separation Minimum

21) Air Traffic Control

22) Air Traffic Control Beacon Interrogator

기술로서 개발되기 시작했다.

첫 번째로 운용이 승인된 다변측정 감시시스템이 오스트리아의 Innsbruck Valley에 설치되었는데, 이 지역에서는 험한 지형 및 막대한 비용 때문에 전통적인 감시시스템을 운용할 수가 없었다[16]. 아홉 개의 원격 수신기 및 안테나를 사용함으로써 넓은 지역에 걸쳐서 10~50m의 정밀도를 얻고 있다. Innsbruck의 각 원격 유닛은 자체적으로 정밀한 시계를 갖고 있어서 기준 중계기에 시각 동기화된다. Austro Control은 전통적인 SSR시스템을 사용할 경우 1300만 유로가 들 것으로 추산하였지만 다변측정시스템은 연간 15만 유로의 운용비를 사용하는 것으로 알려졌다.

Eurocontrol은 항공감시시스템 구축 전략에 다변측정을 포함시켰고(Fig 19, 20 참조)[17], 체코와 독일은 그 기술이 터미널 및 항로 감시에 사용될 수 있음을 보여주었다. 또한 스위스의 Skyguide, 독일의 DFS, 오스트리아의 Austro Control은 WAM의 운용을 시도하였다. 유럽 중부지역의 WAM 사업은 Zurich, Nürnberg, Salzburg, Innsbruck를 커버한다. 유럽은 또한 RVSM 네트워크 내에 5기의 다변측정 수신시스템을 설치하여 25피트의 정확도로 비행고도를 확인하고 있다. 몽골, 티베트 및 중국 등도 다변측정 감시시스템에 투자하고 있는데, 우선 터미널 지역을 커버하고 그 다음에 항로를 연동시키는 방안을 갖고 있다.

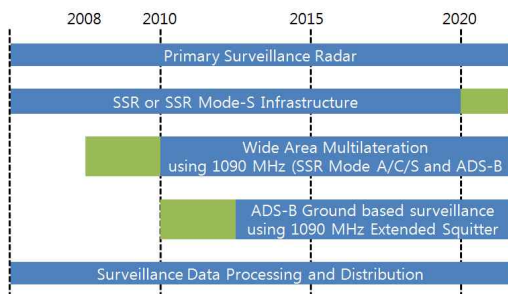


Fig 19. 유럽의 항로/TMA 구축 전략[17]

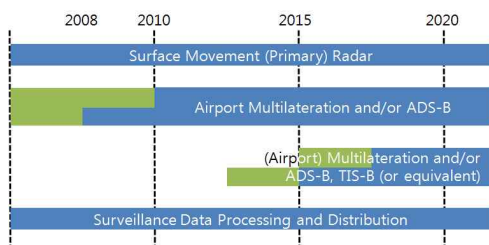


Fig 20. 유럽의 공항지역 구축 전략[17]

5. 기대효과 분석

다변측정감시시스템은 항행시설 서비스 운전자(ANSP)²³⁾들이 공역 감시의 범위를 확대하고 업그레이드할 수 있는 새로운 형태의 패러다임을 제공한다. 레이더 감시에서 야기되는 여러 가지의 공간적 제한사항들을 제거할 뿐만 아니라 구축 및 운용 측면에서도 다양하고 효율적인 안정성을 제공한다.

5.1. 비용효과

대략 유효한 범위에서 산업적으로 평균을 취하면, 다변측정감시시스템은 극적으로 적은 비용으로 감시 능력을 레이더를 대신하여 제공할 수 있는 것으로 증명되었다. Fig 21은 레이더와 다변측정시스템을 15년간 소유했을 때의 총비용(TCO)²⁴⁾을 보여주고 있는데 레이더의 비용이 약 3.3배나 된다[5].

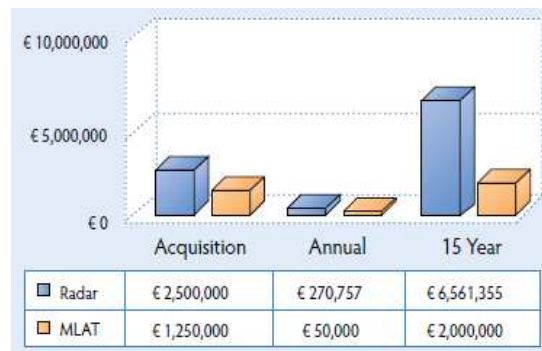


Fig 21. 레이더와 MLAT의 TCO 비교[5]

5.2. 성능효과

ICAO 워킹 그룹과 Eurocontrol 및 EUROCAE의 추가적 활동에 의해 개발되고 있는 성능기반의 철학과 일맥상통하게 다변측정 감시시스템의 성능은 2차 중속 레이더의 성능과 같은 것으로 고려된다. 지속적인 평가 및 운영 시험을 통해 다변측정 감시시스템은 정확도 측면에서 보다 더 나은 성능을 제공하는 것으로 증명되었다(Fig 16 참조)

23) Air Navigation Service Provider

24) Total cost of ownership

5.3. 운용 가용도

기존 레이더 시스템과 비교하면, 다변측정감시 시스템의 유지는 보다 쉽고 비용면에서도 훨씬 저렴한 것으로 밝혀졌다. 이는 다변측정시스템에는 움직이는 부분이 없고, 센서가 작아서 설치하기가 용이하기 때문이다. 또한, 네트워크 설계의 직접적 결과에 기인하는 예비율 수준을 제공한다. N-1 예비율로 지칭되는 이러한 기본 설계개념은 하나의 지상국의 작동이 중지되어도 나머지 지상국들이 요구된 지역에 대한 서비스를 훼손시키지 않고 계속적으로 서비스를 제공한다. 한 지상국의 작동중지가 해당 사이트에 대한 계획된 유지보수이거나 또는 계획된 정전이거나 아니면 예기치 않은 고장에 관계없이 다변측정시스템은 지속적으로 운용상의 가용성 및 구역 서비스를 제공할 수 있다.

5.4. 네트워크 확장성

다변측정 감시시스템은 기존 항공 교통 관리시스템이 제공하지 못했던 광범위한 감시 기능을 기본 장비의 변경 없이 수행 할 수 있다. 센서, 데이터 처리, 통신 링크 및 핵심 인프라가 어떤 기능을 수행하던 동일하다. 일례로 다변측정시스템이 정확도가 높은 A-SMGCS 공항 감시를 지원하기 위해서는 센서를 추가하면 된다. 추가적으로 동일한 센서를 더욱 먼 거리에 설치한 경우, 항로 지역으로 감시 기능을 확장할 수 있다. 이런 유연성은 상당한 경제적 이득을 가져다 줄 것이다. 또한 장비의 유사성으로 인해 유지보수 비용을 상당히 절감할 수 있다.

5.5. 접경지역 최적설계

다변측정시스템은 ANSP들이 각 국가의 경계 지역 내에 최적화된 감시범위를 설정하고 구축할 수 있다. SSR에서는 원치 않는 전파가 국경을 넘는 경우가 많았으나 다변측정시스템은 망구성이 유연하여 접경지역에 최적으로 설치할 수가 있다. 기존 시스템이 할 수 없었던 기존 시설에 대한 추가 확장 능력은 다변측정시스템의 고유한 능력이다. 세계적으로 추진되고 있는 최적화된 다변측정시스템의 구성으로 경제적 이득을 얻을 뿐만 아니라 전에는 불가능했던 비용분담 및 협력 모델 개발을 가능하게 한다. 이는 비용 절감 효과도 가져오면서, 이음매 없는 항공기 감시 업

무를 제공한다.

5.6. 친환경 시설

오늘날 세계에서는 기계와 기술이 환경에 미치는 영향을 세밀하게 감시하고 있다. 자원들은 유한하고, 공해를 내 뿜는 것들은 적정하게 조사되고 있다. ANSP들은 레이더의 족문(footprint) 및 전자파 배출 등으로 인해 레이더 설치 등에 대한 더욱 엄격한 제한을 받게 된다. 그러나 기존 핸드폰 기지국 같은 센서를 사용하는 다변측정시스템은 레이더가 발생시키는 전자파 문제를 야기시키지 않는다. 즉, 환경적인 측면에서 기존 레이더 시스템보다 더 나은 조건을 제공한다.

6. 결론

다변측정시스템 기술이 각국에 신속히 보급되는 이유는 우선 레이더 감시시스템과 같은 독립 감시시스템이면서도 구축비용이 저렴하고, 데이터 갱신주기가 짧으며 정확도가 높아 공항에서부터 항로에 이르기까지 유연성 있게 시스템을 구축할 수 있다는 장점이 있기 때문인 것으로 판단된다. 또한 기존의 감시시스템에 비해 비용대비 효과가 크고, 성능이 우수할 뿐만 아니라 망구성의 유연성 및 확장성도 뛰어나다. 향후 ADS-B가 구축 운용되면 일부 겹치는 부분이 있겠지만 다변측정시스템과 ADS-B는 양자택일의 관계가 아닌 상호 보완적인 시스템으로 활용될 수 있다. 단순 전환기적 기술이 아니고 항로, 터미널 지역, 공항지상의 이동체를 감시할 수 있는 시간적 공간적 갭필러 솔루션인 동시에 GNSS²⁵⁾ 의존도가 높은 ADS-B나 비용, 통달, 정확도 면에서 한계가 있는 레이더에 대한 주시스템 또는 예비시스템으로서 중요도가 높은 기술로 평가된다.

따라서 우리나라에서도 관련 기술의 조기 개발과 시스템 구축을 심도 있게 고려해 볼 필요가 있다. 우리나라는 이미 무선 통신망 기술이 세계 정상 수준에 있기 때문에 이러한 기술의 개발은 큰 어려움이 없을 것으로 생각된다. 개발된 기술은 대내적으로는 기존의 노후 레이더 시설들에 대한 교체, 저고도 임무 항공기들이 운용되는 음영지역에 대한 추가적인 감시 서비스 제공, 기존 관제 공역에 대한 감시 정밀도 향상 등에 활용하고, 대외적으로는 관련 장비 및 네트워크 설계

25) Global Navigation Satellite Systems

기술을 수출함으로써 항행안전시설에 대한 기술 자립 및 수출국으로 발돋움할 수 있는 기회를 마련할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Boeing, Current Market Outlook 2009-2028.
- [2] M. Paydar, Required Surveillance Performance (RSP), ICAO SPANS 2007.
- [3] SESAR Consortium, The ATM Target Concept, SESAR Definition Phase Deliverable 3, 2007
- [4] Ivan Markezic, Multilateration As Surveillance Choice, 2009.
- [5] Proven Multilateration and ADS-B Surveillance Solutions, ERA Company Overview
- [6] SELEX, MXC ADS-B 1090 ES GROUND STATION, System Description
- [7] Thales, Future Role of Radars in ATM Surveillance, 2007.
- [8] http://www.avmgt.com/AMA/AMA_Publications/AMA_Publications.html, Multilateration Low-cost Surveillance for the Transition to ADS-B, Wednesday, May 17, 2006,
- [9] <http://en.wikipedia.org/wiki/Multilateration>
- [10] Ralph Bucher and D. Misra, "A Synthesizable VHDL Model of the Exact Solution for Three-dimensional Hyperbolic Positioning System," VLSI Design, 2002 Vol. 15 (2), pp. 507-520
- [11] Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing, Third Edition, 2007.
- [12] Massimiliano De Angelis (Selex), Multilateration at Italian Airports, ICNS, May 5. 2008.
- [13] NLR, Wide Area Multilateration Report on EATMP TRS 131/04 Version 1.1, NLR-CR-2004-472
- [14] EUROCONTROL STANDARD DOCUMENT FOR RADAR SURVEILLANCE IN EN-ROUTE AIRSPACE AND MAJOR TERMINAL AREAS, SUR. ET1. ST01.1000-STD-01-01, Ed. 1, 1997.
- [15] Eurocontrol, Generic Safety Assessment for ATC Surveillance using Wide Area Multilateration, 2008.
- [16] Christian Scheiflinger(Austro Control), Wide Area Multilateration at Terminal Area Innsbruck, Brussels, June 2007.
- [17] Mel Rees, Surveillance Strategy for ECAE, ENRI International Workshop on ATM/CNS March 2009.