

論文

공공용 정보를 이용한 ADS-B 지상 항적 자료 분석

구성관*, 백호중**

Analysis of ADS-B ground trajectory data
using non-aviation approval public data

SungKwan Ku* and Hojong Baik**

ABSTRACT

In this study, we surveyed analysis of ADS-B ground trajectory data using non-aviation approval public data. For analysis used non-aviation public data and commercial ADS-B receiver. The study result is available using ADS-B ground trajectory data for airfield surveillance on limited range. Also, to confirmed of available using non-aviation public data for aviation research.

Key Words : ADS-B(Automatical dependent surveillance-broadcast), 공항 지상 감시(Airfield surveillance), 지상 항적 자료(Ground trajectory), 항적 분석(Trajectory analysis)

1. 서 론

IT기술을 발전은 일상생활에서 활용 가능한 다양한 정보를 다방면으로 제공하게 되었는데 항공분야도 주요 자료 및 정보를 항공기 제작사 또는 장비 제작사에 의하여 제공받던 과거와는 달리, 비교적 손쉽게 전문적인 정보에 접근하거나 제공받는 것이 가능해 졌다.

항공전자장비(avionics)의 경우 표준적인 기능, 성능의 보장과 이를 검증하는데 사용하기위한 규격(standard)이 고시되어 누구든지 확인할 수 있으며, 장비 제작사는 고시된 규격을 활용하여 시장의 요구조건을 만족하는 기능과 성능의 제품을 만들어 내고 있다.

과거에는 정보의 접근 자체가 불가능하였던 항공기 항적 정보도 인터넷 또는 스마트폰 상에서 확인이 가능하게 되었고, 이러한 기술을 활용

하여 관련 장비의 탑재가 필수적으로 요구되지 않는 항공기에서도 다른 항공기의 항적 정보를 실시간을 확인할 수 있는 기능의 장비가 비교적 저렴하게 공급되고 있어 일반항공기 및 경량항공기와 같은 소형시계비행항공기(이하 일반항공기 등)도 참고용으로 사용할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 일반인이 접근 가능한 비항공용 정보와 항공용으로 승인 또는 인증 받지 않았으나 일반항공기 등에 사용할 수 있도록 만들어진 항공 정보 수신용 상용수신기 장비를 사용하여 공항지상 이동 항적 자료를 분석하였다.

본 연구의 목적은 ADS-B 지상 항적이 공항지상감시에 사용될 수 있는지 검토하고, 또한 부가적으로 비교적 저렴한 비용으로 접근할 수 있는 비항공용 데이터를 항공분야 연구에 활용할 수 있는지 확인하는데 있다.

본 논문은 서론에서 연구의 배경을 설명하고, 이를 기초로 관련 기술과 선행연구 등을 확인하였다. 또한, 분석을 위한 자료 수집 방법에 대하여 설명하고 수집된 자료를 활용하여 공항 지상 항적에 대한 분석을 수행하였으며, 분석과 종합된 자료를 통하여 결론을 도출하였다.

2015년 9월 1일 접수 ~ 2015년 10월 14일 심사완료
게재 확정일(2015년 12월 10일)

* 한서대학교 항공학부 항공레저산업학과

** 한국항공대학교 항공교통물류우주법학부

연락처, E-mail : hbaik@kau.ac.kr

경기도 고양시 덕양구 항공대학로 76

2. 관련 기술 및 선행연구

2.1 ADS-B 개요

ADS-B(automatical dependent surveillance - broadcast)는 기존 항공 감시 기술인 레이더를 보완, 대체하기 위해 개발된 감시기술로 효율적인 공역 활용, 저시정 상태 제약 감소, 지상 감시 기능 강화, 혼잡시의 안전성 강화 등을 목표로 개발되었다[1]. 전용 무선데이터링크를 통하여 항공기가 자신의 정보(현재 위치, 고도, 속도, 항공기 등급, Call-sign 등)를 지속적으로 방송하는 시스템으로 일반적인 ADS-B 기능을 의미한다[2]. 초기 ADS-B는 항공교통관제기관에 의해 감시 및 상황인식 강화가 목적 이었고 특히 기존의 레이더에 비하여 저비용이면서 공역 및 지상이동 감시가 가능하며, 레이더 통달 범위 밖의 감시업무 불가지역(예, 대양지역 등)에서도 효과적으로 적용될 수 있으며, 호주의 경우 기존 레이더업무를 제공되지 않는 지역에서 ADS-B 감시업무를 제한적으로 적용하고 있다[3].

ADS-B의 핵심 기술은 위성항법시스템으로 GNSS(global navigation satellite system)를 이용하여 항공기 자신의 위치, 고도, 속도, 방향 등을 확인하고, GNSS 사용이 불가하거나 추가적인 정보가 필요한 경우 항공기에 탑재한 다른 항법시스템에 의하여 측정된 값을 ASTERIX¹⁾ 형식에 따르는 메시지로 생성하여, 이를 일정한 주기²⁾로 1090ES(extended squitter), UAT(universal access transceiver), VDL mode 4(very high frequency data link mode 4) 등 ADS-B 무선데이터링크 방식에 따라 방송한다[1]. ADS-B 메시지를 수신할 수 있는 지상시설(항공교통관리시스템)과 수신기 및 CDTI(cockpit display of traffic information)를 장착한 항공기는 수신된 신호를 바탕으로 송신한 항공기의 항적 위치, 고도, 상태 등의 정보를 실시간으로 확인할 수 있다.

2.2 ADS-B 지상감시 표준규격

항공전자장비는 표준적인 기능, 성능 등을 정

1) All purpose STructured Eurocontrol suRveillance Information eXchange의 약자로, ATM 감시정보에 관하여 감시 장비와 자동화 장비 사이 교환을 위하여 Eurocontrol에서 정의한 표준 프로토콜

2) 장비의 카테고리에 따라 방송되는 정보의 주기는 준용 표준에서 정하고 있음. 예) 1090ES 항공기 Call sign 5초 간격, 위경도위치 1초 간격

의하기 위하여 표준규격(standard)이 고시되어 있으며, 일반적으로 RTCA³⁾에서 고시한 기준(standard)이 국제표준으로 활용되고 있다.

항공교통관제(air traffic control) 시스템에서 ADS-B 운용과 관련된 RTCA 규격은 총 3가지이며, 이중 공항지상감시를 위한 기준은 DO-321 'Safety, Performance and Interoperability Requirements Document for ADS-B Airport Surface Surveillance Application(ADS-B-APT)'으로 정의되어 있다. Fig 1은 RTCA DO-321에서 제시한 공항 지상 감시 업무를 위한 감시 기능의 아키텍처를 보여주며, 감시 기능에서 가장 중요한 요소인 위치 정확도는 위성(GNSS) 신호를 수신하는 단계에서 along track tolerance 기준 22.5m 및 position source accuracy 기준 95% 오류(error) 반지름 10.8m와 실제 적용값 10m의 정확도로 요구되어 있다[4].

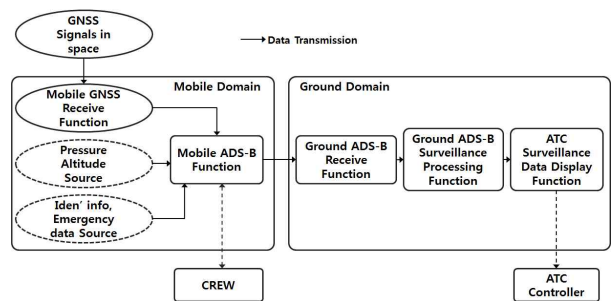


Fig 2. DO321 ADS-B 감시 기능의 개요도

2.3 선행연구

국내외에서 ADS-B의 개발 및 운영과 관련된 연구는 지속적으로 수행되고 있다. 해외에서는 ADS-B 초기 개발과 이를 표준화하기 위한 연구가 미국 Safety Flight 21 program 및 Capstone program, 호주 ADS-B program 등이 추진되었고, 최근에는 개발된 시스템을 운영하는 단계에서 위치 정확도와 이에 대한 효과성 확인을 위한 연구[5]~[9]가 일부 수행되고 있다. 특히, 최근 수행된 해외 연구는 항공기가 비행 상태일 때 데이터 정확도를 향상시키기 위한 연구가 주를 이루고 있으며, 다른 감시정보와의 통합 과정에 대한 연구 또는 항적 정확도를 향상시키기 위한 필터

3) Radio Technical Commission for Aeronautics. 미국의 비영리기관으로 항공기와 항공전자시스템과 관련하여 항공당국(FAA), 항공기 및 장비제작사, 학계 및 연구 자료 등을 토대로 관련 기준의 제정 및 발간을 하며, 이러한 기준은 개발자의 개발지침과 감항 당국의 검증지침 등으로 활용되고 있음.

처리와 이에 대한 정확도 향상 정도에 관한 것이 수행되었다.

국내에서는 주로 ADS-B 운용효율성 측정과 확인에 관한 연구[2],[10],[11]가 수행되었으며, 이를 위한 시스템 개발의 연구도 병행하여 진행되었다. 하지만 국내 연구는 대부분 항공기가 비행 중인 상태에 관한 것으로 항공기의 지상 이동 상황과 이에 대한 항적 정확도에 대한 연구는 상대적으로 미진하였다.

3. 분석 자료 수집

3.1 분석 자료 개요

본 연구의 수행을 위하여 필요한 주요 자료와 정보 출처는 Table 1과 같다.

Table 1. 분석 자료 및 출처

구분	출처
ADS-B 항공기 항적	상용수신기
공항 및 공역 정보	AIP(항공정보고시보)
주요 위치 위경도	G사 위성지도서비스

ADS-B 항적 정보의 수집을 위하여 상용으로 판매되고 있는 ADS-B 수신기 중 S사의 C모델을 사용하였으며, 해당 수신기는 태블릿PC, 스마트폰 등과 연동하여 일반항공기 등이 참고용으로 사용할 수 있는 항공정보, 주변항공기 교통정보(traffic information)가 제공되는 것이 가능한 제품이다. 수신된 정보의 저장을 위하여 Labview로 텍스트파일 출력이 가능하도록 프로그램을 별도로 구성하였다.

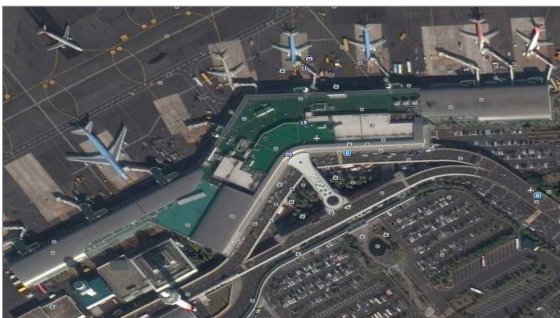


Fig 3. 위성지도서비스(예)-공항 여객터미널

분석에 필요한 범위의 공항과 공역의 주요 정보는 국토교통부 항공정보서비스(ais.casa.go.kr)의 항공정보고시보(AIP)에서 확인하여 사용하였

고, 유도로 중심선(taxi way center line) 등 상세한 위치의 좌표정보(위경도)는 G사의 위성지도서비스에서 확인하여 사용하였다.

항공정보고시보(AIP)를 제외한 ADS-B 항적 수신기와 위성지도서비스 정보는 항공용으로 사용하도록 승인되지 않은 정보로, 사용 목적에 의하여 참고용으로 사용하도록 누구나 접근할 수 있는 공공정보 성격이다.

3.2 ADS-B 항적 자료 수집

분석에 필요한 ADS-B 항적정보는 항공기 비행 중 송신한 정보를 지상에서 수신하여야 한다. 이를 위하여 2015년 6월 하루 동안 제주공항 인근에서 항공기에서 송신한 ADS-B 신호를 상용수신기로 수신하여 정보 수신 시간을 포함하여 수신된 메시지 전체를 텍스트 파일로 저장하고, 분석에 필요한 정보만 추출하기 위하여 Matlab 프로그램으로 가공하여 사용하였다. Fig3은 수신된 데이터의 일부분을 보여주고 있다.

파일(F)	콜릿(E)	서식(O)	보기(V)	도출할(H)
1080003	07:59:10	10852.389		
1080004	07:59:10	10852.400		
1080005	07:59:10	10852.411	7E30FF000042AFE013005F08BF7FC0000041FBACC17FC000004234AE1	
1080006	07:59:10	10852.420		
1080007	07:59:10	10852.430		
1080008	07:59:10	10852.440		
1080009	07:59:10	10852.450	7E140071C2321706829F66D03D977092FF3A90054574237303120200	
1080010	07:59:10	10852.459	7E140079A076170C1759E24E068800FF000000443455337313130200	
1080011	07:59:10	10852.469	7E140071BF4417E3895A10800A29680A0FF3A0041424C36303131200	
1080012	07:59:10	10852.479	7E1400750071781C35A89164D8651F2001A036941583531382000	
1080013	07:59:10	10852.489	7E3C770000370901DC3F7851EC0000000034500000073C4800070D6	
1080014	07:59:10	10852.499		
1080015	07:59:10	10852.509	7E30FF000042B070500CC05E0F67FC0000041FBACC17FC000004234AE1	
1080016	07:59:10	10852.519		
1080017	07:59:10	10852.529	7E008181434300000008C487E	
1080018	07:59:10	10852.539	7EDA000000017D59659F28DFFF9000008000000000000000000000	
1080019	07:59:10	10852.549	7E0B000F7FFF1705E7E	
1080020	07:59:10	10852.559		
1080021	07:59:10	10852.569		

Fig 4. 수신된 데이터(예)

4. 지상 항적 분석

4.1 분석 방법

수집된 자료의 분석은 Fig 4와 같은 절차를 사용하였다. 수신된 전체 자료에서 수신시간, Call sign, 위경도, 고도 등을 추출하고 지상항공기에 대한 정보만 선별하였다. 이후 평행유도로(P taxiway) 직선 이동한 모든 항적을 추출하고, 항공기 항적을 도식하여 분석 가능 여부를 확인한 후, 항공기가 이동 중 유도로 중심선과의 이격 거리를 측정하여 항공기 지상 항적 자료에 대한 분석을 수행하였다.

분석구역 범위 내 항공기의 모든 항적과 유도로 중심선과의 수직거리는 Fig 5와 같이 측정하였다.

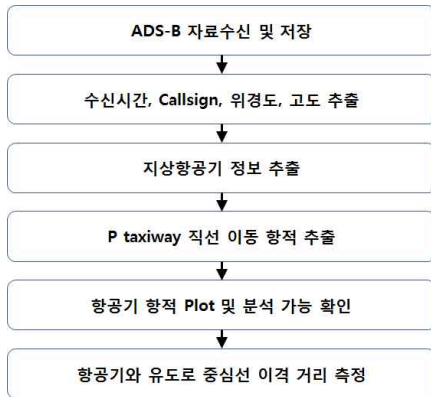


Fig 5. 분석 절차

이때 항공기 진행방향 기준으로 우측을 (+)값, 좌측은 (-)값으로 적용하였다. 거리를 m로 측정하기 위하여 수신된 항공기의 위치와 공항의 주요 지점의 위경도(WGS84)좌표는 UTM (universal transverse mercator)좌표로 변경하였다. 좌표의 변경에는 Matlab 프로그램을 사용하였다.

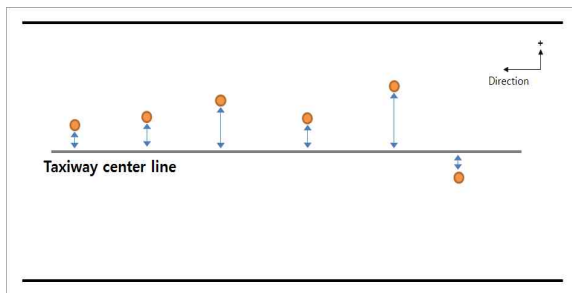


Fig 6. 활주로 중심선과 항적간의 거리측정방법

4.2 자료의 분석

분석을 위한 데이터 수집시간은 오전 5시30분부터 오후 11시까지이며, ADS-B의 특징상 특정 범위의 자료만 수신하는 것이 아닌, ADS-B out 상태로 항로(en-route)비행, 착륙접근(approach), 이륙출발(departure), 지상(airfield) 이동하는 모든 항공기의 항적자료가 수신 가능한 범위 내에서 수집된 것으로 Fig 6과 같다.

그림에서 비교적 명확히 표현된 선은 항공기가 특정 경로(항로, 착륙접근, 이륙출발)로 비행하는 항적이며, 나머지 얇은 선은 항로 비행 중 관제사 지시에 의한 비행(radar vector, direct 등) 또는 항공기 항법 장비의 오차에 의한 항적이다.

그 중 지상이동 항적 분석에 유효한 자료 추출, 이격거리 측정, 분석, 도식 등을 위하여 Matlab 프로그램을 사용하였으며, 사용한 프로그

램 코드(code)는 향후 다른 자료의 분석에도 활용할 수 있다.

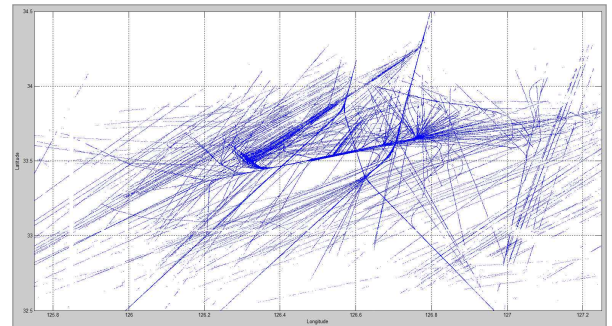


Fig 7. ADS-B 전체 수신 항적

분석에 사용한 주요 자료 중 일부는 앞서 명시한 것과 같이 인터넷으로 접근이 가능한 공공 정보를 활용하였으며, 일부는 항공용으로 승인받지 않은 것을 활용하였다.

```

%% Ground Aircraft Time stamp check
for i = 1:length(groundAircraftCallsign)
    groundAircraftCallsign(i,1);
    choiceAircraftIndex = strmatch(groundAircraftCallsign(i,1), groundAircraftData(:,5));
    choiceAircraftData = {};
    for j = 1:length(choiceAircraftIndex);
        choiceAircraftData(j, :) = groundAircraftData(choiceAircraftIndex(j), :);
        choiceAircraftSecondData(j,1) = choiceAircraftData(j,4);
    end
    %% Aircraft Ground Stop Check:
    % ADS-B signal transmitting 5S interval for Aircraft Full stop Sensing.
    % Check for Stop situation is more than (5S interval * B transmitting = ) 30S
    for k = 1:length(choiceAircraftSecondData)-1;
        choiceAircraftSecondInterval(k,1) = sqrt((choiceAircraftSecondData(k+1)-choiceAircraftSecondData(k))^2);
    end
end
    
```

Fig 8. 분석을 위한 Matlab 코드(예)

당일 제주공항 이착륙 항공기 스케줄(군용기 제외)은 총 459편이며, 이중 활주로를 포함한 지상에서의 ADS-B 수신 항적 수는 총 228편이다. 국내의 저비용항공사(LCC) 항공기 일부와 일반 항공기 등과 같이 ADS-B 송신기가 장착되지 않은 항공기로 인하여 모든 항공기가 ADS-B out 신호를 송신하지는 않으며, 일부는 수신환경(line of sight 등)의 영향으로 전체 항적에 대한 자료를 수집할 수는 없었다. 국내에서는 현재 주파수 문제 등으로 ADS-B UAT를 운용하지 않으므로, 수신된 모든 항적은 ADS-B 1090ES 항적으로 확인할 수 있다.

4.3 유도로 중심선 이격 거리 측정

제주공항에 이착륙한 항공기 중 Fig 8에 표시된 평행유도로에서 ADS-B out 상태로 이동한 항공기는 총 32편이다. 총 이착륙 비행편 및 수신

된 모든 ADS-B 항적에 비하여 평행유도로 이동 항적이 적은 이유는 일부 항공사에서 사용하는 항공기 운용매뉴얼에는 ADS-B out 신호를 발생 하거나 정지되는 시점을 이륙 직전 수행하는 점검 절차(before take-off procedure) 및 착륙/활주로 이탈 직후 수행하는 점검 절차(after landing procedure)에 명시하여 본 연구에서 필요한 평행 유도로 이동 지상 이동 항적을 수집할 수 없었기 때문이다.

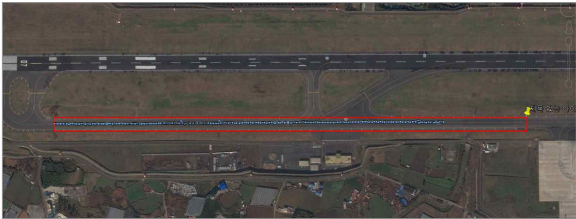


Fig 9. 평행유도로 항적 분석 구역

이들 유효한 항공편이 분석 구역에서 발생시킨 항적 점의 수는 총 4,791개로 위치정확도를 측정할 수 있는 항적수로 볼 수 있다.

Fig 9는 ADS-B out 상태로 지상에서 이동한 항공기 항적의 예이다. 그림에서 확인할 수 있는 것과 같이 ADS-B 신호를 송신한 항공기는 활주로, 유도로 및 계류장(apron)에서 이동한 상세 항적을 확인할 수 있다.

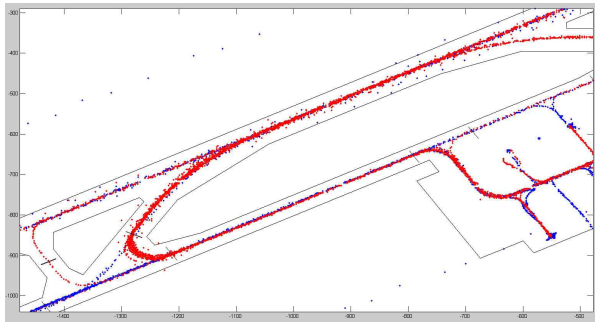


Fig 10. ADS-B 지상항적

Fig 10은 분석에 유효한 항적에 대한 평행유도로 중심선과 이격 거리에 따른 분포를 나타내는 히스토그램으로 대부분의 측정값이 평균에 위치하고 있으며, 꼬리값으로 갈수록 측정수가 극히 적어지는 것을 확인할 수 있다. Table 2는 평행 유도로 중심선으로부터 이격된 거리 측정값의 상세내역으로 평균값 2.72m, 표준편차 1.80m, 최대값 19.64m 및 최소값 -17.21m이다. Fig 10과 같이 중심을 기준으로 하여 분포의 꼬리로 갈수록 매우 적은 측정수를 보이므로, RTCA DO-321 요

구사항에 따라 전체 측정값 중 상위 95%의 범위를 도출한 결과 -0.5m에서 +6.0m로 확인되었다.

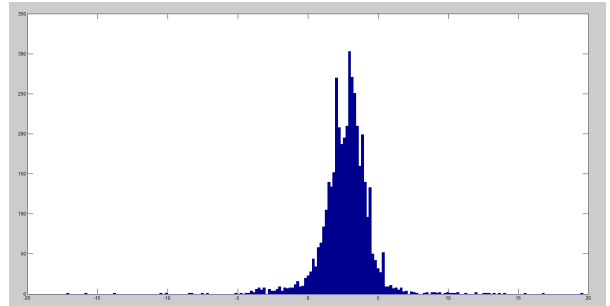


Fig 11. 평행유도로 중심선과 항적사이 거리 히스토그램

Table 2. 평행유도로 중심선과 항적사이 거리 측정 결과

구분	측정값
평균(m)	2.72
표준편차(m)	1.80
최대값(m)	19.64
최소값(m)	-17.21
95%포함범위(m)	-0.5 ~ +6.0

4.4 분석 및 제언

실제 ADS-B out 상태로 운용하는 운송용 항공기가 송신한 신호를 수신하여 지상에서 직선 이동할 때 유도로 중심선과의 수직 이격 거리를 측정한 결과 평균 이격거리는 2.72m이며, 전체 측정값 중 95%는 0.5m에서 6.0m 사이에 포함되어 있다. 이것은 GPS 위경도 위치의 공식적인 오차와 항공기 크기 및 30m의 유도로 폭을 감안하면 비교적 정확한 위치 값이라고 할 수 있다.

이는 현재 국내 제주공항에서 운용된 항공기가 송신하는 ADS-B out 신호에 대해서, 공항 지상이동 구역 중 분석 범위에 해당하는 평행 유도로 직선 구간에서는 지상 이동 감시에 활용 가능한 것으로 판단할 수 있다.

하지만, 국내 공항의 경우 일부 국외 공항에서와 같이 지상에서 이동하는 모든 항공기에 대하여 ADS-B 송신을 규정하지 않으며, 항공기에 대해서도 ADS-B의 탑재를 필수적으로 요구하지 않아 모든 항공기에 대하여 ADS-B를 통한 감시가 불가능하고, 분석에 사용한 정보는 항공용으로 승인받지 않은 공공용 정보를 기반한 것으로 기본 정보 자체의 신뢰성에 대하여 추가적인 검토가 필요하며, 또한 항공기가 직선 이동하는 구역

에서 측정된 것으로 정지 상태 또는 곡선 이동 상태에서 동일한 수준이라고 보장할 수 없으므로 이에 대하여 추가적인 연구가 필요하다.

5. 결 론

본 연구는 승인과 관계없이 접근이 가능한 비항공용 정보와 항공용으로 승인 및 인증을 받지 않았으나 일반항공기 등에 사용할 수 있도록 만들어진 항공 정보용 장비를 사용하여 공항지상 이동항적을 분석하였다.

분석결과 이러한 정조의 경우도 항공분야의 연구에 활용이 가능하였으며, 특정 범위 내의 ADS-B 지상직선 이동항적은 사례 공항의 유도로 폭인 30m 내를 유지하는 수준으로, 유도로중심 선과의 평균 이격거리 2.72m, 표준편차 1.80m, 이격거리 -0.5m에서 6.0m 사이에 전체 측정값의 95%가 포함되어 있는 것을 확인하였다.

ADS-B는 운용 방식의 특성상 GNSS 서비스 정확도 및 이를 보정하는 기술에 따라 위치정확도가 종속되는 특성이 있어, 항공기는 자신의 위치정확도에 대한 값을 ADS-B out 메시지에 포함하도록 규정되어 있다. 이를 포함하는 정보의 수집과 분석은 기존 RADAR 및 ASDE(airport surface detection equipment) 등에 비하여 낮은 장비 구축비용으로 유사한 기능을 높은 감시 정확도로 사용할 수 있는 방법으로, 현재 ASDE가 설치되어 있지 않아 공항 지상 감시 정보가 제공되지 않거나, 제공되는 감시 정보의 정확도가 낮아 감시 업무에 사용하기 어려운 상황이 발생하는 공항에서 대안으로 활용할 수 있을 것이다.

이를 위해서는 본 연구에서 분석한 범위에 해당하지 않은 항공기 정지 상태 또는 곡선 이동 상태 등에 대해서도 확인이 필요하며, 항공기에서 송신한 ADS-B 신호 자체의 손상, 손실 및 위경도 위치 값의 오류 등에 대해서 보정하여 정확도를 높이고 이에 대한 신뢰도를 보장할 수 있는 분야에 대한 연구가 지속적으로 필요하다.

참고문헌

- 1) 송인성, 장은미, 윤완오, 최상방, "항공 교통 상황 종합 현시 기능을 갖는 ADS-B 모니터링 시스템 설계 및 구현", 한국항공학회논문지, Vol 18(4):278~287, 2014년 8월
- 2) 김도현, 홍교영, 오경륜, "지상운영시험을 통한 ADS-B 효과에 관한 연구", 항공운항학회, 제15권 제2호 25~31, 2007년 6월
- 3) ICAO, ADS-B Study and implementation task force, Brisbane, Australia, 24-26, March 2003
- 4) RTCA, DO-321 'Safety, performance and interoperability requirements document for ADS-B airport surface surveillance applicaiton' p39, Dec 2010
- 5) Satish C. Mohleji and Ganghuai Wang, "Modeling ADS-B position and velocity errors for airborne merging and spacing in interval management application", MITRE.
- 6) Gonzalo de Miguel Vela, Josue Iglesias Alvarez, Juan Besada Portas and Jesus Garcia Herrero, "Integration of ADS-B surveillance data in operative multiradar tracking processors", Information fusion 2008 11th international conference. June 2008
- 7) Richard Barhydt, Nathan A. Boble, David Karr and Michael T. Palmer, "Handling trajectory uncertainties for airborne conflict management", Digital avionics systems conference 2005. Oct 2005
- 8) Taehwan Cho, Inseong Song, Eunmee Jang, Wanoh Yoon and Sangbang Choi, "The Improvement of aircraft position information with the unscented kalman filter", International journal of database theory and application, Vol. 5, No. 2, June 2012, pp.75~81
- 9) Russell A. Paielli, "Trajectory specification for high-capacity air traffic control", AIAA journal of aerospace computation, Vol.2, no.9, Sep 2005, pp.1~28
- 10) 홍교영, 김도현, 오경륜, "비행시험을 통한 ADS-B 운용상의 효과에 관한 연구", 한국항공학회논문지 제11권 제2호 137~145, 2007년 6월
- 11) 현정욱, 길현철, 안동만, 홍교영, "목적고도 정보를 제공하는 ADS-B 환경의 음성통신량 분석", 한국항공학회 논문지 제15권 제6호 946~952, 2011년 12월