



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

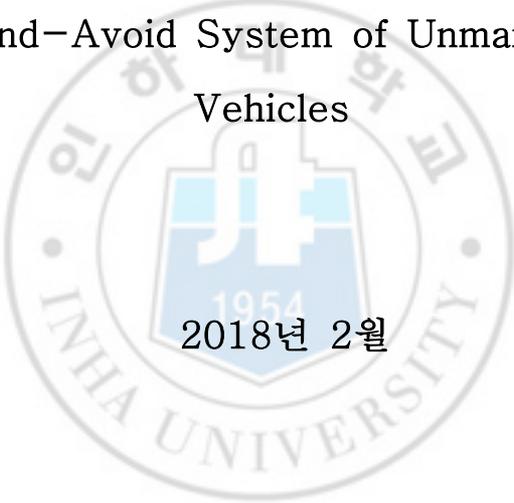
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위 논문

무인기의 Detect-And-Avoid 시스템을 위한  
항적데이터 기반의 위험도 분석 연구

Risk Analysis Based on ADS-B Data for the  
Detect-And-Avoid System of Unmanned Aerial  
Vehicles

The seal of Inha University is a circular emblem. It features a central shield with a stylized 'I' and 'H' and the year '1954' below it. The shield is set against a background of a building. The outer ring of the seal contains the text '인하대학교' at the top and 'INHA UNIVERSITY' at the bottom, separated by two dots on each side.

2018년 2월

인하대학교 대학원

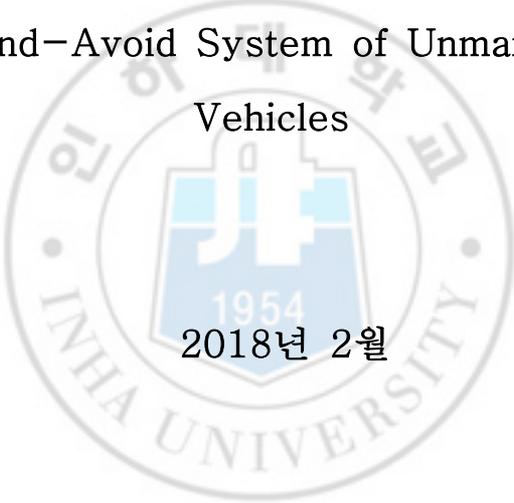
항공우주공학과

이 현 응

공학석사학위 논문

무인기의 Detect-And-Avoid 시스템을 위한  
항적데이터 기반의 위험도 분석 연구

Risk Analysis Based on ADS-B Data for the  
Detect-And-Avoid System of Unmanned Aerial  
Vehicles

The seal of Inha University is a circular emblem. It features a central shield with a stylized 'I' and 'H' and the year '1954'. The text 'INHA UNIVERSITY' is written around the bottom inner edge of the circle, and '인하대학교' is written around the top inner edge.

2018년 2월

지도교수 이 학 태

이 논문을 석사학위 논문으로 제출함

이 논문을 이현웅의 석사학위논문으로 인정함.

2018년 2월



주심 최 기 영 (인)

부심 이 학 태 (인)

위원 유 창 경 (인)

## 초 록

전 세계적으로 지속적인 항공수요와 항공 교통량의 증가는 공역 내 항공기 밀도증가로 이어지며, 이는 공역 내 항공기들 사이에 사고가 일어날 수 있는 위험성이 증가한다는 것을 의미한다. 이에 추가하여, 머지않아 지금껏 유인항공기만 사용하던 공역을 유인항공기와 무인항공기가 함께 사용하게 될 것이고, 이는 위험도를 더욱 증가 시키게 된다. 무인항공기의 기술개발에 발맞춰 이미 전부터 유·무인 관제 통합 운용에 대한 연구와 노력이 지속되고 있다. 기존 관제 시스템의 개선과 함께 무인항공기의 충돌 탐지 및 회피에 대한 충분한 연구와 지속적인 모의실험이 필요하다.

본 연구에서는 대한민국에서 가장 교통량이 많은 인천국제공항과 김포국제공항 주변의 유인항공기 항적데이터베이스를 이용하여 위험도를 분석하였으며, 이를 통해 얻은 결과를 바탕으로 무인항공기의 Detect-And-Avoid(DAA) 시스템을 위해 필요한 감지기의 성능 범위 도출의 기반이 되는 연구를 수행하였다.

Automatic Dependent Surveillance-Broadcast(ADS-B) 수신기를 설치하고, 데이터를 처리 수집할 수 있는 환경을 구축하였다. 신뢰성을 높이기 위하여 ADS-B 데이터를 그대로 사용하지 않고, 데이터에서 추출된 비행계획을 이용하여 궤적 생성 모델로부터 도출된 항적을 위험도 분석에 사용하였다.

위험도 분석에 사용된 지표로는 Conflict Intrusion Parameter(CIP)와 DAA Well Clear(DWC)이다. 이를 통하여 공역내의 위험 상황을 파악하고, 탐지 거리와 탐지 범위, 상대 위치 등에 대한 위험도를 분석하여, DAA 시스템의 요구 성능에 대한 가이드 라인을 제시하였다.

핵심어 : 관제 (Air Traffic Management, ATM), 충돌탐지 및 회피 (Detect-And-Avoid, DAA), 방송형-자동 종속 감시 (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast), CIP (Conflict Intrusion Parameter), DWC (DAA Well Clear), 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)

# ABSTRACT

With the continuously increasing demand for air travel, the number of flights is constantly increasing causing various unpredictable and complicated situations in the airspace. Moreover, the airspace will become even more congested once the Unmanned Aerial Vehicles (UAV) are allowed to enter the airspace. Along with the advancement of UAV technologies, research on the integrated Air Traffic Management (ATM) of manned aircraft and UAVs are actively being conducted. In addition to improving the existing ATM system, it is necessary to research and develop systems to ensure safety such as Detect-And-Avoid (DAA) system and conduct various simulations.

In this study, risk analyses are conducted using the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) data collected around Incheon International Airport and Gimpo International Airport, the busiest airspace in the Republic of Korea. Based on the analyses, an effort was made to find the proper detection range of the DAA system.

For this research, an ADS-B system was installed and data collection system was constructed. To increase the integrity of the risk analyses, instead of using the raw ADS-B data, tracks were regenerated using a trajectory generator and flight plans extracted from the ADS-B data.

The risk metrics utilized in the study are Conflict Intrusion Parameter (CIP) and DAA Well Clear (DWC). Potential risk areas inside the airspace were identified. By examining the effect of detection range, the field of regards, and relative positions, a guideline for the DAA system performance requirement is proposed.

Key-words : Air Traffic Management(ATM), Detect-And-Avoid(DAA), Automatic Dependent Surveillance-Broadcast(ADS-B), Conflict Intrusion Parameter(CIP), DAA Well Clear(DWC), Unmanned Aerial Vehicle(UAV)



# <목 차>

<b>1. 서론</b>	<b>1</b>
1.1. 연구배경	1
1.1.1. 항공수요의 증가	1
1.1.2. 무인항공기 비행 안전	2
1.2. 연구방향	3
1.2.1. 연구목표	3
1.2.2. 연구 진행방향	3
<b>2. ADS-B를 이용한 항적데이터 추출</b>	<b>5</b>
2.1. ADS-B 수신환경 구축	5
2.1.1. ADS-B 데이터 수신	5
2.1.2. 데이터베이스 구축	7
2.1.3. 데이터 추출	8
2.2. 궤적 생성 모델 적용	10
2.2.1. 항적데이터 단순화	10
2.2.2. 궤적 생성 모델 적용	11
2.2.3. 사용된 항적데이터베이스 목록	13
<b>3. 위험도 분석</b>	<b>14</b>
3.1. 위험도 측정에 사용된 지표	14
3.1.1. Conflict Intrusion Parameter (CIP)	14
3.1.2. DAA Well Clear (DWC)	15
3.2. CIP를 이용한 위험도 분석 결과	19
3.2.1. 위험도 발생 지역 위치	19
3.2.2. 위험도 발생 경향	22

3.3. DWC를 이용한 위험도 분석 결과 .....	23
3.3.1. 위험도 발생 지역 위치 .....	23
3.3.2. 대표적 위험 발생 상황 .....	26
3.3.3. 위험 상황 발생 경향 .....	28
<b>4. DAA 감지기 적용을 통한 위험도 분석 .....</b>	<b>30</b>
4.1. 분석 범위 선정 .....	30
4.2. 상대항공기 분석 .....	31
4.2.1. 거리에 따른 상대항공기 분석 .....	31
4.2.2. 방위각에 대한 상대항공기 분석 .....	33
4.2.3. 고각에 대한 상대항공기 분석 .....	41
<b>5. 결론 .....</b>	<b>46</b>
<b>6. 참고문헌 .....</b>	<b>47</b>
<b>7. 부록 .....</b>	<b>49</b>

## <표 목차>

[표 2-1] ADS-B 데이터 정보 .....	8
[표 2-2] 선정된 날짜 별 데이터베이스 정보 .....	13
[표 3-1] Well Clear Score .....	17
[표 4-1] 상대거리와 WCS에 따른 위험도 발생횟수 .....	32
[표 4-2] WCS=1에서의 범위에 따른 감지 횟수 .....	40
[표 4-3] WCS별 감지를 위한 최소 요구 방위각 .....	40
[표 4-4] 고각에 대한 WCS=1에서의 범위에 따른 감지 횟수 .....	45
[표 4-5] WCS별 감지를 위한 최소 요구 고각 .....	45
[표 A-1] WCS=2에서의 범위에 따른 감지 횟수 (방위각) .....	49
[표 A-2] WCS=3에서의 범위에 따른 감지 횟수 (방위각) .....	50
[표 A-3] $WCS \geq 4$ 에서의 범위에 따른 감지 횟수 (방위각) .....	51
[표 A-4] WCS=2에서의 범위에 따른 감지 횟수 (고각) .....	52
[표 A-5] WCS=3에서의 범위에 따른 감지 횟수 (고각) .....	53
[표 A-6] $WCS \geq 4$ 에서의 범위에 따른 감지 횟수 (고각) .....	54

## <그림 목차>

[그림 1-1] 대한민국 연도별 항공수요 .....	1
[그림 1-2] DAA 감지기 적용의 예[5] .....	2
[그림 1-3] DAA 감지 범위 요소 .....	3
[그림 1-4] 연구 진행방향 계략도 .....	4
[그림 2-1] ADS-B 수신기 성능 .....	5
[그림 2-2] ADS-B 데이터의 수신범위 및 항공기 위치 .....	6
[그림 2-3] 데이터베이스 저장 순서 .....	7
[그림 2-4] 메시지 종류별 분류 .....	8
[그림 2-5] 메시지 종류 별 수신에 따른 시간차의 보정 .....	9
[그림 2-6] 항공기별 Track Point로 구성된 항적데이터 .....	9
[그림 2-7] RDP 알고리즘 .....	10
[그림 2-8] 임계값에 따른 단순화 .....	10
[그림 2-9] RDP 임계값 선정 방법 .....	11
[그림 2-10] 항공기 가로 및 세로 운동에 대한 궤적 생성 모델 구성[8] .....	11
[그림 2-11] 궤적 생성 모델 상승/하강 검증 케이스 .....	12
[그림 3-1] CIP 계산 검증 결과 .....	15
[그림 3-2] WCS 계산 검증 결과 .....	18
[그림 3-3] CIP-위험도 발생 위치 (2017년 8월 5일) .....	19
[그림 3-4] 시간에 따른 Max. CIP 값 (above FL 180) .....	19
[그림 3-5] CIP 위험도가 가장 높게 나타난 두 항공기의 궤적 .....	20
[그림 3-6] CIP 위험도가 세 번째로 높게 나타난 두 항공기의 궤적 .....	21
[그림 3-7] 날짜 별 위험도 발생 위치 .....	22
[그림 3-8] WCS-위험도 발생 위치 (2017년 7월 16일) .....	23
[그림 3-9] 시간에 따른 Max. WCS .....	24
[그림 3-10] WCS가 가장 높게 나타난 두 항공기의 궤적 .....	24

[그림 3-11] WCS가 높게 나타난 두 항공기의 궤적 .....	25
[그림 3-12] 위험 발생 상황-1 .....	26
[그림 3-13] 위험 발생 상황-2 .....	26
[그림 3-14] 위험 발생 상황-3 .....	26
[그림 3-15] 위험 발생 상황-4 .....	26
[그림 3-16] 위험 발생 상황-5 .....	27
[그림 3-17] 위험 발생 상황-6 .....	27
[그림 3-18] 위험 발생 상황-7 .....	27
[그림 3-19] 위험 발생 상황-8 .....	27
[그림 3-20] 고도별 위험 상황 발생 횟수 .....	28
[그림 3-21] 상태별 위험 발생 수 .....	28
[그림 3-22] WCS별 위험 발생 수 .....	28
[그림 4-1] 최대 요구 거리 .....	30
[그림 4-2] 상대항공기의 위치 .....	31
[그림 4-3] 상대거리에 따른 Track Point 수 .....	31
[그림 4-4] 방위각에 따른 상대항공기 위치와 분포 .....	33
[그림 4-5] 방위각에 따른 상대항공기와 첫 위험 인식 위치와 분포 .....	34
[그림 4-6] 첫 위험 발생 시 WCS=1 .....	35
[그림 4-7] 첫 위험 발생 시 WCS=2 .....	35
[그림 4-8] 첫 위험 발생 시 WCS=3 .....	35
[그림 4-9] 첫 위험 발생 시 $WCS \geq 4$ .....	35
[그림 4-10] 감지범위 $\pm 30^\circ$ 에서의 WCS=1인 상대항공기 감지 결과 .....	36
[그림 4-11] 감지범위 $\pm 60^\circ$ 에서의 WCS=1인 상대항공기 감지 결과 .....	37
[그림 4-12] 감지범위 $\pm 90^\circ$ 에서의 WCS=1인 상대항공기 감지 결과 .....	38
[그림 4-13] 감지범위 $\pm 120^\circ$ 에서의 WCS=1인 상대항공기 감지 결과 .....	39

[그림 4-14] 고각에 따른 상대항공기 위치와 분포 .....	41
[그림 4-15] 방위각에 따른 상대항공기와 첫 위험 인식 위치와 분포 .....	42
[그림 4-16] 고각에 대한 첫 위험 발생 시 WCS=1 .....	43
[그림 4-17] 고각에 대한 첫 위험 발생 시 WCS=2 .....	43
[그림 4-18] 고각에 대한 첫 위험 발생 시 WCS=3 .....	43
[그림 4-19] 고각에 대한 첫 위험 발생 시 $WCS \geq 4$ .....	43
[그림 4-20] 고각 감지범위에 따른 WCS=1인 상대항공기 감지 결과 .....	44



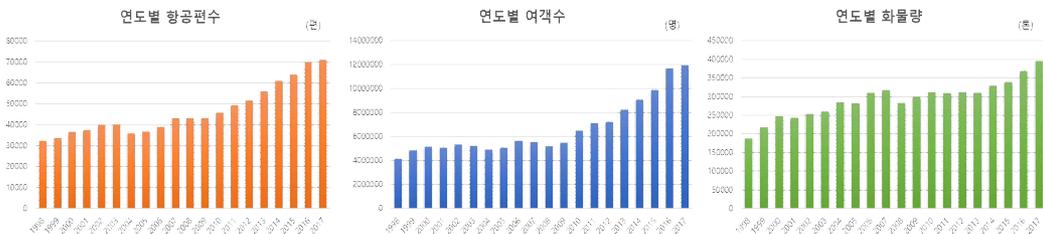
# 1. 서론

## 1.1. 연구배경

무인항공기의 기술개발이 가속화되면서, 지금까지 유인항공기만으로 사용되었던 공역에서 유인항공기와 무인항공기가 동시에 공존하는 공역 통합에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 따라, 항공관제 영역으로 유입되는 무인항공기로 인해 발생하는 문제에 대한 충분한 예측과 준비가 필요하다. 하지만 지속적으로 증가하는 항공수요와 무인항공기 공역 통합운용으로 인해 나타날 공역의 항공기 고밀도화는 예측할 수 없는 다양한 상황을 야기한다. 이는 크고 작은 항공사고뿐만 아니라 두 항공기간 충돌이라는 최고수준의 위험요소가 잠재되어 있음을 의미한다. 이러한 이유로 현재, 효과적인 관제 운용에 대한 연구와 항공감시 시스템 개발 및 항공운항기술기준 수립에 대한 노력이 이어지고 있다.

### 1.1.1. 항공수요의 증가

항공기술 및 항공운항의 발전으로 항공수요는 전 세계적으로 지속적인 증가추세가 이어지고 있다. [그림1-1]을 보면, 우리나라 역시 통계가 시작된 지난 20년간 항공수요는 꾸준히 지속됨을 확인할 수 있다. 이는 한국항공공사 웹사이트에서 제공되는 항공통계자료<sup>[1]</sup>를 그래프로 나타낸 것으로, 항공편은 20년 전에 비해 두 배가 넘게 증가하였으며, 항공이용 여객 수는 3배 가까이 증가했다. 이와 같은 증가 추세로 한국항공진흥협회에서는 2029년까지 전 세계적으로 연평균 4.1%, 국내 연평균 4.0%씩 증가할 것이라 예측하고 있다<sup>[2]</sup>.

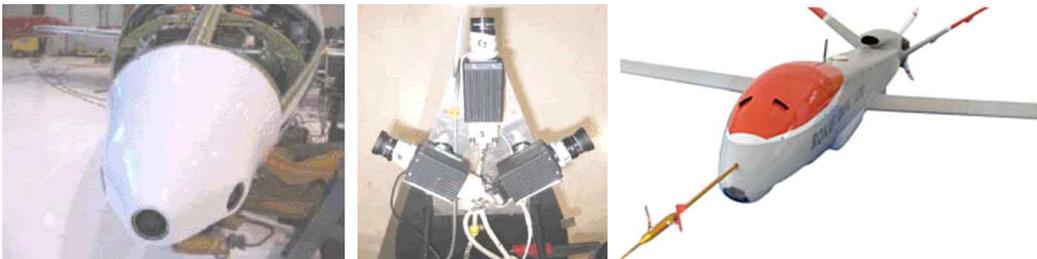


[그림 1-1] 대한민국 연도별 항공수요

### 1.1.2. 무인항공기 비행 안전

무인항공기는 조종사가 탑승하지 않고 지상 원격 또는 비행계획을 가진 상태로 자동 비행하는 항공기를 말한다. 무인항공기는 지휘통제소 (Ground Control System, GCS)와의 통신을 통해 비행을 하며, 비행 목적 및 임무에 맞도록 다양하게 개발되고 있다. 최초 개발 당시 대부분은 군용을 위해 연구되었으며, 20세기 초까지만 해도 주로 정찰 및 감시를 목적으로 두었으나, 최근 민간 활용을 위해 많은 기업과 연구소에서 개발에 참여하고 있다. 민간 활용의 목적은 촬영, 취미, 농업, 화물수송까지 다양하며, 전 분야에 걸쳐 무인항공기 시장이 확대 되고 있다<sup>[3]</sup>.

무인항공기가 다양한 목적과 임무에 따라 개발됨에 따라 안전관리 규정 및 운항기준 수립에 대한 관심 역시 높아지고 있다. 무인항공기는 원격으로 제어되기 때문에 지상 조종사는 비행 주변 상황을 감지기 또는 카메라에 의존하며, 직접 육안으로 상황을 인지하고 반응하는 유인항공기에 비해 안전에 상대적으로 취약하다고 할 수 있다. 현재 무인항공기는 안전상의 이유로 매우 한정된 공역에서만 운용이 가능하다. 유인항공기와 통합 운용을 위해서는 5가지의 기본 요건(감지 및 회피 / 감항성 / 운용기준 및 절차 / 장비 / 조종사 자격요건)을 충족해야 한다<sup>[4]</sup>. 이들 중 첫 번째 요소인 감지 및 회피(무인항공기 자체적으로 위험을 인지하고, 상대 항공기간 충돌을 회피하는 방법)를 위한 기술 개발이 이미 수년 전부터 연구가 진행 중이다. [그림 1-2] 는 충돌감지를 위한 장치의 예이다. 감지기는 무인항공기를 중심으로 침입항공기 또는 주변장애물을 감지하는 장치로, 이를 통해 무인기의 적절한 기동 또는 분리 기준에 따른 단계별 충돌회피상태에 진입한다.

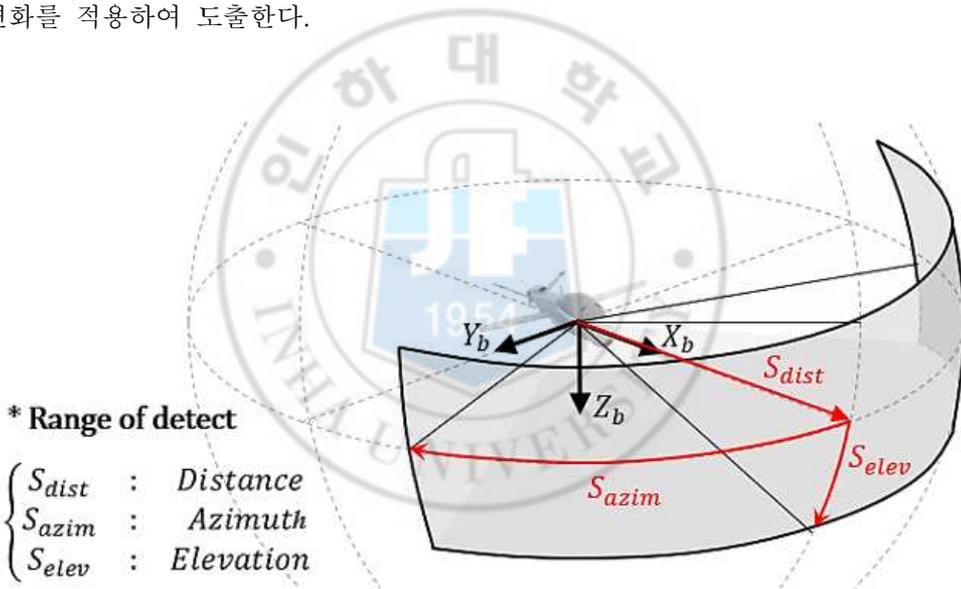


[그림 1-2] DAA 감지기 적용의 예<sup>[5]</sup>

## 1.2. 연구방향

### 1.2.1. 연구목표

본 연구는 차세대 항행시스템이라 불리는 ‘방송형-자동 종속 감시 (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, ADS-B)’ 기반의 항적데이터를 이용하여 위험도 분석을 수행한다. 또한 무인항공기의 ‘충돌탐지회피 (Detect-And-Avoid, DAA)’ 장비의 감지 범위를 적용하여, 범위에 따른 위험도 분석과 최적 성능 범위에 근거가 될 지표를 도출하는데 목표를 두었다. 감지기의 성능 지표는 [그림 1-3]과 같이 감지를 위한 최소 요소인 감지거리(Distance), 방위각(Azimuth), 고각(Elevation)의 변화를 적용하여 도출한다.

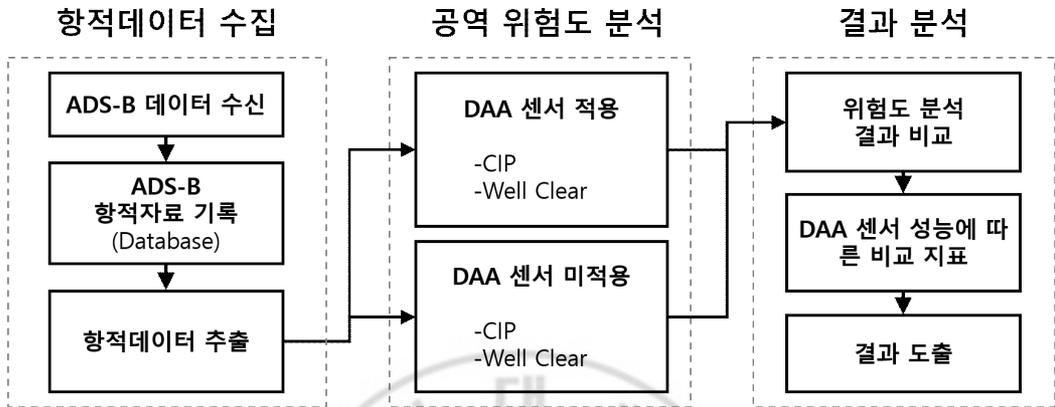


[그림 1-3] DAA 감지 범위 요소

### 1.2.2. 연구 진행방향

연구 진행방향은 [그림1-4]와 같다. 크게 3단계로 나뉘며, 첫 번째 단계인 항적데이터 수집에서는 ADS-B 데이터 수신 환경 구성 및 항적데이터 추출을 수행한다. 두 번째 단계인 위험도 분석에서는 추출된 항적데이터를 이용하여 DAA 감지기의 적용과 미적용으로 분류하여 분석을 수행한다. 위험도 분석에 사용된 측정 기준에는 CIP와 Well

Clear를 이용한다. 마지막 세 번째 단계에서는 분석된 내용을 바탕으로 결과를 비교하며, 최종적으로 DAA 센서 성능에 따른 비교 지표를 도출한다.



[그림 1-4] 연구 진행방향 계략도



## 2. ADS-B를 이용한 항적데이터 추출

### 2.1. ADS-B 수신환경 구축

ADS-B는 송신기가 장착된 항공기에서 자신의 비행정보를 송출하고 지상 관제소에서 수신함으로써, 공역 내 항공기들의 비행정보를 관제소에서 공유하는 시스템이다. 세계 각국에서는 자국의 공역에서 비행하는 항공기에 대해 ADS-B transponder 장착을 의무화 하고 있다<sup>[6]</sup>. 송출하는 비행정보는 항공기 식별부호, 위치, 속도, 방향과 기타정보(위험, 응급, 상태 등)가 포함되어 있다. 따라서 ADS-B데이터의 수신을 통해 항공기들의 비행정보 즉, 항적데이터를 기록하고 관리함으로써, 공역 내 교통상황과 위험도를 분석할 수 있다.

#### 2.1.1. ADS-B 데이터 수신

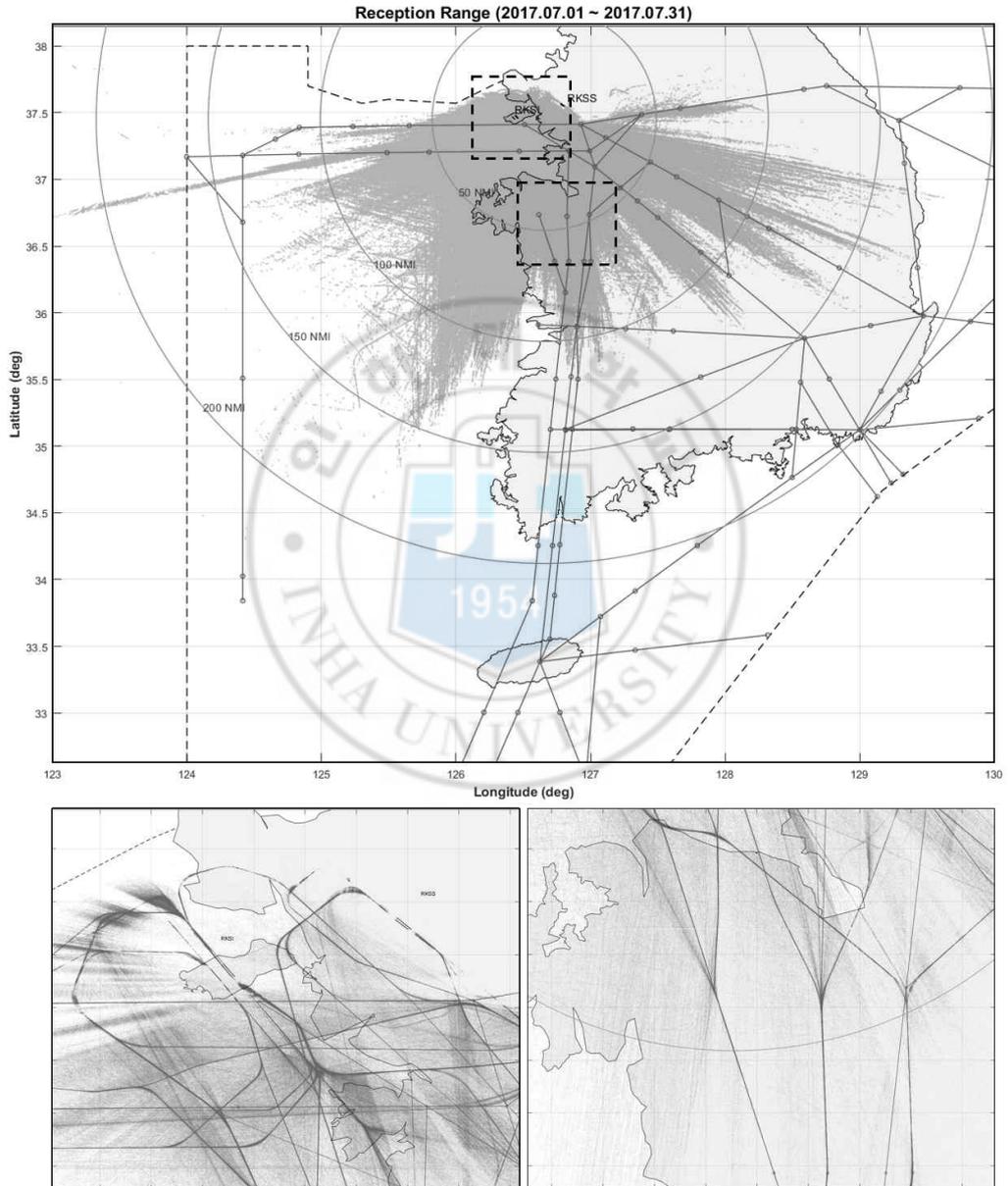
ADS-B 데이터의 수신율은 안테나의 위치와 주변 환경에 영향을 받는다. 따라서 높은 수신율과 수신 과정에서 나타나는 불필요한 잡음을 최소화하기 위해 다양한 장소에서 수신테스트와 운용 타당성 검토를 수행하였다. 이 과정을 통해 최종적으로 안테나와 수신기를 설치(인하대학교, 용현동)하여 2016년 말부터 현재까지 ADS-B 데이터를 상시 수신하여 기록 중에 있다. [그림 2-1]은 본 연구에서 사용된 ADS-B 수신기의 사양으로, 동 시간 최대 400대의 항공기에서 송출되는 ADS-B 데이터를 수신할 수 있으며, 최대 수신 반경으로는 200 nmi이다.



PlaneTRack-19" Professional ADS-B Receiver			
<b>Hardware platform</b>	Linux SBC Beagle bone Black Rev. C	<b>Output</b>	- HTTP, UDP, TCP interface - Raw and Decoded data (ASCII or JSON)
<b>CPU / Memory</b>	32bit Cortex A8-1GHz / 4GB	<b>Range</b>	200NMI
<b>ADS-B messages</b>	DF17, 18, 19	<b>Bit rate</b>	1Mbit/s
<b>Mode-S message</b>	DF4, 5, 20, 21	<b>Targets</b>	400
<b>ACAS/TCAS messages</b>	DF0, 16	<b>Option</b>	Warranty, Antenna Cable, Multiliterate, Extended data output

[그림 2-1] ADS-B 수신기 성능

[그림 2-2]는 지난 2017년 7월 한 달간 항공기로부터 송출된 위치데이터를 이용하여 지도상에 점들로 나타낸 것이다. 이를 통해 수신범위를 확인과 동시에 주로 사용되는 항로들을 파악할 수 있다.



[그림 2-2] ADS-B 데이터의 수신범위 및 항공기 위치

수신 안테나가 설치된 인하대학교는 인천국제공항과 김포국제공항 사이에 위치하고 있다. 이에 공항주변 항공기의 항적 데이터 수신에 용이한 지리적 이점을 지니고 있으며, 그림 2-3에서와 같이, 서울 접근관제구역(Terminal Maneuvering Area, TMA)과 그 주변까지 뒤덮는 수신 범위를 지닌다.

### 2.1.2. 데이터베이스 구축

ADS-B 수신기 설치 후 운용하는 현재까지 데이터의 양은 일평균 약 170만 개로, 여기서 한 개의 의미는 항공기에서 송출한 하나의 데이터를 의미한다. 이는 초당 약 20 번의 데이터를 수신하는 것과 같다. 데이터를 항공기 별로 분류하면 일평균 약 730 대에서 수신되며, 항공기마다 연결 편을 분리하여 항적(Trajectory)으로 분류하면, 약 1450 편의 항적데이터가 수신된다. 따라서 방대한 데이터를 실시간으로 처리하고 저장하기 위해 별개의 도구가 필요하다.

ADS-B 항적데이터를 데이터베이스로 구축하기 위해 [그림 2-3]과 같은 순서로 진행된다. 첫 단계로 ADS-B 수신기를 통해 들어온 데이터는 TCP/IP를 통해 데이터처리 전용 PC로 전달된다. 데이터처리 단계에서는 자체 개발한 데이터 처리도구를 이용하여 날짜와 시간을 확인한 후 데이터베이스화하기 위한 쿼리(Query)를 생성한다. 데이터를 저장하기 위한 데이터베이스는 오픈소스의 관계형-데이터베이스 관리시스템인 MySQL을 사용하였다. 본 연구에서는 서버 내 구축된 MySQL에 생성된 쿼리를 실행 시킴으로써 저장되는 방식을 사용하였다.



[그림 2-3] 데이터베이스 저장 순서

### 2.1.3. 데이터 추출

ADS-B 데이터는 암호화된 상태로 항공기에서 송출하며, 데이터 수신 시 디코딩(Decoding)을 거친 후 사람이 알아볼 수 있는 내용으로 확인이 가능하다. 본 연구에서 사용된 수신기는 내부에서 디코딩을 제공하므로, 수신 직후 [표 2-1]과 같이 항공기의 식별부호, 현재 위치, 상태, 시간정보를 확인 할 수 있다. 하지만 하나의 항공기에 대해 한 번의 수신으로 [표 2-1]의 모든 내용을 확인 할 수 있는 것은 아니다. ADS-B 데이터는 메시지의 종류에 따라 나뉘어 송출되며, 서로 다른 시간에 수신된다. 수신기 매뉴얼에 따르면, 메시지의 종류는 [그림 2-4]와 같이 총 8종류로 나뉘어 수신된다<sup>[7]</sup>.

[표 2-1] ADS-B 데이터 정보

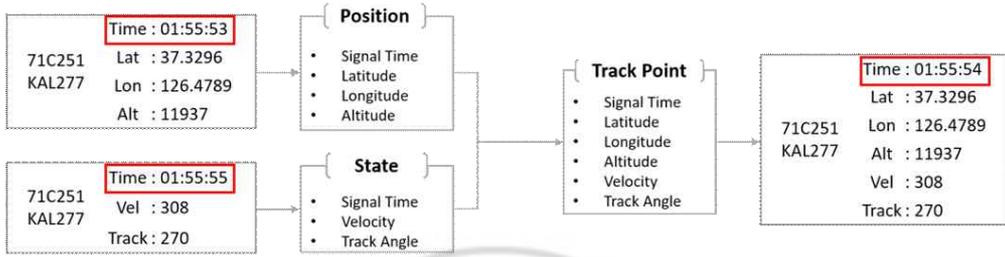
분류	종류	설명	수신 예
식별코드	ICAO address	항공기 고유 식별부호	7404F2
	CallSign	항공편명 Call-Sign	KAL2812
위치정보	Latitude	위도	36.154337 [deg]
	Longitude	경도	126.354981 [deg]
	Altitude	고도	27,260 [ft]
상태정보	Velocity	수평속도	380 [knots]
	Vertical Rate	수직속도	288.6 [ft/min]
	Alert (Squawk)	상태 및 비상알람	-
시간정보	Generated Time	항공기에서 송출한 시간	[UTC] 10:23:04.064
	Logged Time	안테나로부터 수신된 시간	[UTC] 10:23:04.082

MT	ID	GT	LT	CS	Alt	GS	Trk	Lat	Lon	VR	SQ	Alrt	Emer	GND
MSG1	○	○	○	○										
MSG2	○	○	○		○	○	○	○	○					○
MSG3	○	○	○		○			○	○			○	○	○
MSG4	○	○	○			○	○			○				
MSG5	○	○	○		○							○		○
MSG6	○	○	○		○						○	○	○	○
MSG7	○	○	○		○									○
MSG8	○	○	○											○

Classification - MT : Message Type  
 Identification - ID : ICAO24 address / CS : CallSign  
 Time - GT : Generated Time / LT : Logged Time  
 Location - Lat : Latitude / Lon : Longitude / Alt : Altitude  
 Speed : GS : Ground Speed / VR : Vertical Rate / Trk : Track Angle  
 State - SQ : Squawk / Alrt : Alert / Emer : Emergency / GND : IsOnGround

[그림 2-4] 메시지 종류별 분류

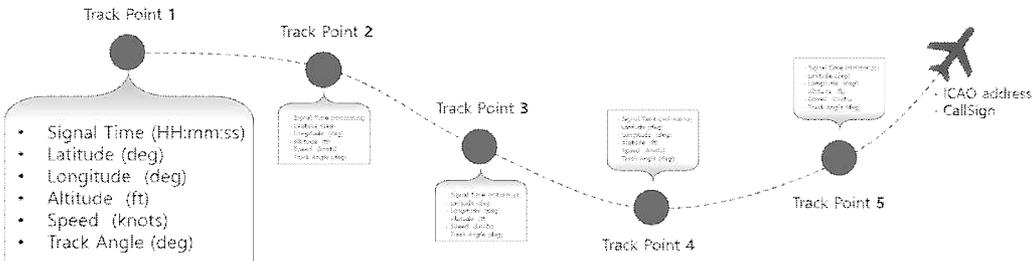
각 데이터에 포함된 내용으로 분류할 경우 3가지로 분류할 수 있으며, 이는 항공기 식별데이터, 항공기 위치데이터, 항공기 상태데이터를 말한다. 따라서 항공기 별 하나의 Track Point를 이루기 위해 필요한 데이터 즉, 위치데이터와 상태데이터는 [그림 2-5]와 같이 시간차가 존재하게 된다.



[그림 2-5] 메시지 종류 별 수신에 따른 시간차의 보정

각 메시지 종류 별 데이터는 수신 시 불규칙적인 주기를 가지고 있기 때문에 시간 보정을 통해 하나로 합쳐진 Track Point로 처리를 해야 한다. 이를 통해 [그림 2-6]과 같이 항공기 별로 Track Point를 분류 하여 항적데이터로 추출하게 된다.

추출 된 항적데이터는 대체적으로 완성도 있는 항적으로 추출되지만, 일부 항공기에 서 신뢰도가 낮은 항적이 추출되기도 한다. 그 중에서는 두 Track Point사이의 위치가 많이 떨어져있는 데이터 미 수신 구간이 존재하기도 하며, ADS-B 수신기가 설치된 주변 환경으로 인해 일정고도(약 2,500 ft) 이하에서 데이터 수신율이 급격히 감소하여 신뢰할 수 없는 데이터가 존재하기도 한다. 이후 진행될 공역 위험도 분석 결과의 신뢰도를 향상시키기 위하여, 신뢰도가 낮은 항적데이터들의 보완처리가 필요하다.



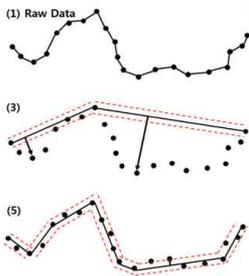
[그림 2-6] 항공기별 Track Point로 구성된 항적데이터

## 2.2. 궤적 생성 모델 적용

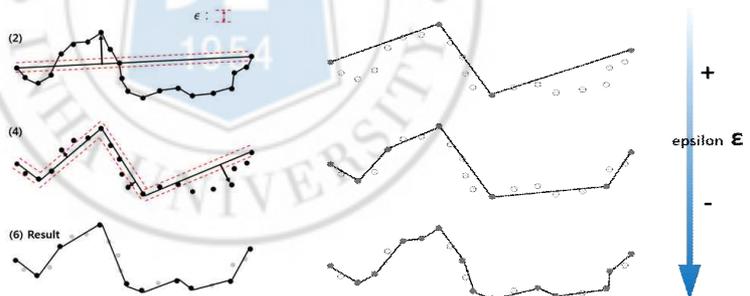
앞서 언급한 바와 같이, 신뢰도가 낮은 항적데이터들을 보완하기 위하여 모든 항적데이터에 대해 일괄적으로 EUROCONTROL에서 제공하는 BADA를 활용한 궤적 생성 모델<sup>[8]</sup>을 적용하였다. 궤적 생성 모델은 주어진 경로점을 추종하는 비교적 단순하며 처리속도가 빠른 것이 특징으로, ADS-B로부터 추출된 방대한 항적데이터를 적용하는데 큰 장점이 있다.

### 2.2.1. 항적데이터 단순화

궤적 생성 모델을 적용하기 위해서는 항적데이터로부터 경로점을 추출해야한다. 경로점을 추출하기 위하여 항적데이터의 특징점을 추출하여 단순화 시키는 방법인 Ramer-Douglas-Peucker (RDP) 알고리즘을 사용하였다<sup>[9]</sup>. 이 알고리즘은 설정된 임계값(epsilon,  $\epsilon$ )를 각 Track Point와 비교하여 추출하는 방법으로 [그림 2-7]과 같다.



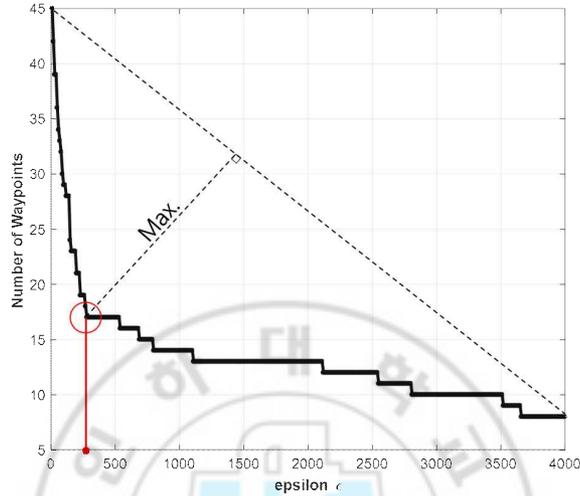
[그림 2-7] RDP 알고리즘



[그림 2-8] 임계값에 따른 단순화

RDP 알고리즘은 [그림 2-8]과 같이 임계값에 따라 항적데이터의 단순화 정도가 결정된다. 따라서 항적형태를 훼손하지 않는 범위에서 최적의 임계값을 선정하는 것이 중요하다. 최적의 임계값 선정을 위해 임계값에 따른 추출된 경로점의 수를 비교하여 선정하는 방법을 사용하였다. 이는 임계값의 증가에 따라 추출된 경로점 수의 변화가 상대적으로 줄어들 때로 선정하는 방법으로, 모든 항적데이터에 대해 자동적으로 선정할 수 있도록 [그림 2-9]의 방법을 사용하였다.

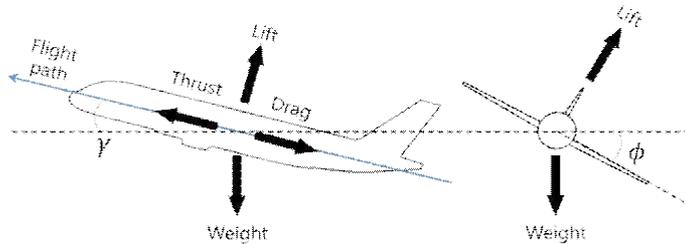
또한, 이차원 데이터에 적용 가능한 RDP 알고리즘을 세 가지(위도/경도, 거리/고도, 거리/속도)로 분리 적용하여 추출된 경로점의 합집합을 통해 최종 경로점을 추출하였다.



[그림 2-9] RDP 임계값 선정 방법

### 2.2.2. 궤적 생성 모델 적용

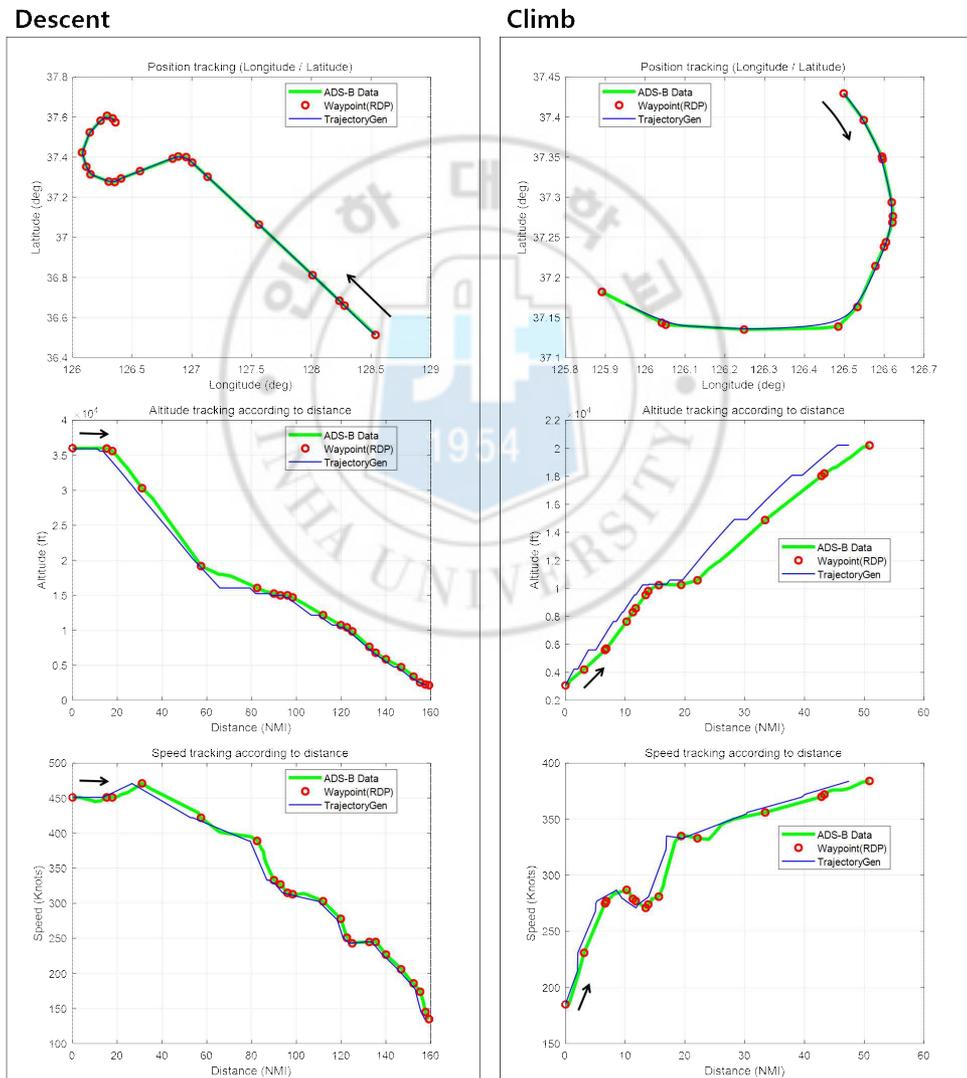
추출된 각 경로점들은 Track Point와 마찬가지로 항공기 식별부호, 모델, 위치(위도, 경도, 고도), 속도, 방향의 정보를 담고 있다. 이를 바탕으로 궤적 생성모델은 BADA의 항공기 모델별로 제공되는 성능에 따라 주어진 경로점을 추종하도록 되어있다.



$$\dot{h} = V \sin(\gamma) \quad \dot{d} = V \cos(\gamma) \quad \gamma = \tan^{-1} \left\{ \frac{\mathcal{T} - D}{L \cos(\phi)} \right\} \quad \dot{\psi} = \frac{g \tan(\phi)}{V}$$

[그림 2-10] 항공기 가로 및 세로 운동에 대한 궤적 생성 모델 구성<sup>[8]</sup>

[그림 2-10]은 궤적 생성 모델의 항공기 가로 및 세로 운동 적용에 대해 간단히 나타낸 것이다. 경로점의 수립은 항공기의 해당 경로점의 속도명령( $V_{cmd}$ )과 뱅크 각( $\phi$ )에 의해 계산된 회전반경 안에 들어올 경우로 하며, 만일 항공기가 해당 경로점 반경에 도달하기 전에 먼저 고도에 도달할 경우 반경에 도달할 때 까지 순항하도록 되어있다. 이를 바탕으로 [그림 2-11]은 여러 항적데이터 중 임의로 선정된 상승궤적과 하강궤적에 대한 경로점 추종 결과를 보여준다.



[그림 2-11] 궤적 생성 모델 상승/하강 검증 케이스

### 2.2.3. 사용된 항적데이터베이스 목록

본 연구에서 사용한 항적데이터는 데이터베이스 내 수신된 데이터가 많은 날을 기준으로 하여 30일치로 선정했다. 이는 총 47,601편의 항적데이터이며, [표 2-2]를 통해 날짜 별 데이터베이스 정보를 확인할 수 있다.

이 중 몇몇의 항적데이터에는 BADA로부터 모델 정보를 확인 할 수 없는 데이터들이 존재한다. 즉, 항공기 식별부호 중 하나인 ICAO address(24-bit)로부터 확인할 수 없는 항공기 모델 또는 BADA에서 제공되지 않는 항공기 모델이 존재한다는 뜻으로, 궤적 생성 모델 적용이 불가능하다. 이러한 경우 추출된 항적데이터를 그대로 사용하되, 항적데이터 내부에 미수신 구간이 존재하는 경우는 보간법(Interpolation)을 사용하여 보완하였다. 보간법으로 완성된 항적의 경우 다소 비현실적 항적데이터가 생성될 가능성이 존재하지만, 사용된 전체 항적데이터 중 약 4%에 불과하다.

[표 2-2] 선정된 날짜 별 데이터베이스 정보

No.	Date	Data Size	Trajectories	No.	Date	Data Size	Trajectories
1	2017/08/05	1,934,460	1,627	16	2017/08/06	1,850,217	1,642
2	2017/08/26	1,927,458	1,648	17	2017/08/30	1,847,879	1,592
3	2017/08/25	1,925,720	1,608	18	2017/07/16	1,832,236	1,637
4	2017/09/02	1,920,711	1,603	19	2017/06/07	1,823,531	1,546
5	2017/07/15	1,901,201	1,604	20	2017/06/09	1,809,875	1,551
6	2017/06/08	1,903,243	1,564	21	2017/09/03	1,797,916	1,598
7	2017/06/10	1,898,490	1,539	22	2017/08/17	1,798,148	1,627
8	2017/08/03	1,895,005	1,655	23	2017/07/04	1,782,096	1,490
9	2017/08/04	1,882,033	1,637	24	2017/08/28	1,773,776	1,558
10	2017/09/01	1,878,041	1,587	25	2017/08/29	1,767,783	1,546
11	2017/08/31	1,875,694	1,599	26	2017/11/04	1,730,898	1,539
12	2017/08/24	1,868,515	1,614	27	2017/11/02	1,732,319	1,560
13	2017/08/07	1,866,953	1,519	28	2017/07/05	1,729,563	1,572
14	2017/08/23	1,861,426	1,595	29	2017/11/01	1,729,151	1,570
15	2017/08/27	1,858,875	1,637	30	2017/08/22	1,726,146	1,537
<b>Total</b>					<b>30 days</b>	<b>55,129,359</b>	<b>47,601</b>

### 3. 위험도 분석

#### 3.1. 위험도 측정에 사용된 지표

위험도 측정에 사용된 항적데이터의 모든 Track Point는 갱신 주기를 1초로 설정하여 추출했다. 이를 일정 시간에 존재하는 모든 항공기의 Track Point들 서로 비교하여 위험도를 계산하게 된다. 이때 항공기의 위치(위도/경도)를 X-Y 좌표계로 변환하기 위해 Lambert conformal conic projection을 이용하였으며, 위험도를 측정하는 지표로 Conflict Intrusion Parameter (CIP)와 DAA Well Clear (DWC)를 사용하였다.

##### 3.1.1. Conflict Intrusion Parameter (CIP)

CIP는 두 항공기간 현재 상대 수평/수직 거리를 분리 기준과 비교하여 위험도를 수치적으로 나타내는 것을 말한다<sup>[10]</sup>. 일반적으로 공항 주변 공역이 아닌 공역 A (Class A)에서 적용되며, 참고적으로 사용되는 측정 지표이다. CIP를 계산하는 방법은 아래 식(1)과 같다.

$$CIP(t) = \max \left\{ 1 - 0.5 \times \left( \frac{r_{xy}(t)}{S_{std}} + \frac{d_h(t)}{h_{std}} \right), 0 \right\} \quad \text{식(1)}$$

where,

$$r_{xy}(t) = \sqrt{d_x^2(t) + d_y^2(t)} \quad \text{식(1-1)}$$

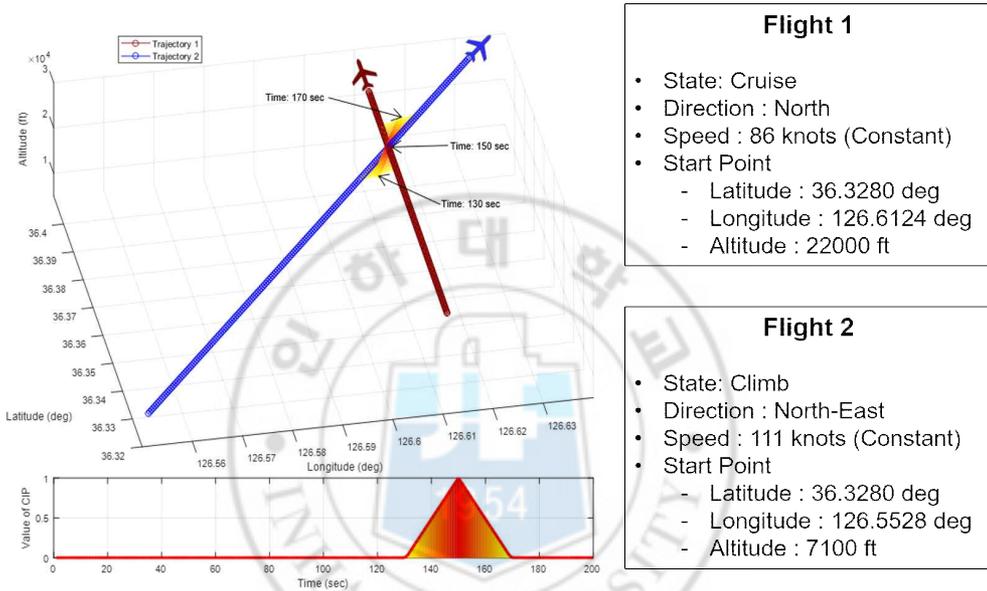
$$d_x(t) = x_2(t) - x_1(t) \quad \text{식(1-2)}$$

$$d_y(t) = y_2(t) - y_1(t) \quad \text{식(1-3)}$$

$$d_h(t) = |h_2(t) - h_1(t)| \quad \text{식(1-4)}$$

여기서 두 항공기에 대해  $d_x$ 는 X-축 방향으로 상대 수평거리,  $d_y$ 는 Y-축 방향으로 상대 수평거리,  $d_h$ 는 고도차를 의미하며,  $S_{std}$ 는 수평분리 기준이며,  $H_{std}$ 는 수직분리 기준이다. 따라서 두 항공기간 상대 수평거리와 수직거리가 분리 기준보다 클 경우

CIP 값은 0으로 계산되며, 이는 분리기준에 만족함을 나타낸다. 하지만 CIP 값이 0이상일 경우 위험도가 존재함을 나타내며, 값이 최대인 1일 경우 두 항공기의 충돌을 의미한다. 이를 검증하기 위해 두 항공기에 대한 간단한 항적을 생성하여 계산을 수행하였다. [그림 3-1]과 같이, 두 항공기는 서로 다른 위치에서 출발하여 같은 시간에 동일한 위치를 지나도록 생성한 항적으로, 서로 충돌하는 경우로 생성하여 검증하였다.



[그림 3-1] CIP 계산 검증 결과

### 3.1.2. DAA Well Clear (DWC)

DWC는 무인항공기의 DAA를 위한 위험도 판별 지표로서, 주변 항공기 사이에 충돌 회피를 위한 시간과 공간의 경계기준을 의미한다<sup>[11]</sup>. 최근 RTCA DO-3650(May 31, 2017)에서 DWC에 대한 기준을 새로 개편하였으며<sup>[12]</sup>, 본 연구에서도 이를 적용하여 위험도 분석을 수행하였다. 이에 따라 DWC를 판별하기 위한 계산식은 식(2)~(4)와 같다.

$$S_i = \max\left(DMOD, \frac{1}{2}\left(\sqrt{(\dot{r}_i \tau_{mod}^*)^2 + 4DMOD^2} - \dot{r}_i \tau_{mod}^*\right)\right) \quad \text{식(2)}$$

$$HMD_p \Big|_i = \sqrt{(d_{x,i} + v_{rx,i} t_{CPA,i})^2 + (d_{y,i} + v_{ry,i} t_{CPA,i})^2} \Big|_i \quad \text{식 (3)}$$

$$d_{h,i} = |h_{1,i} - h_{2,i}| \quad \text{식 (4)}$$

where,

$$i = [t_1, t_2, t_3, \dots, t_{end-1}, t_{end}] \quad \text{식 (1-1)}$$

$$\dot{r}_i = \frac{d_{x,i} \cdot v_{rx,i} + d_{y,i} \cdot v_{ry,i}}{r_i} \Big|_i \quad \text{식 (2-1)}$$

$$r_i = \sqrt{d_{x,i}^2 + d_{y,i}^2} \quad \text{식 (2-2)}$$

$$d_{x,i} = x_{2,i} + x_{1,i} \quad \text{식 (2-3)}$$

$$d_{y,i} = y_{2,i} + y_{1,i} \quad \text{식 (2-4)}$$

$$v_{rx,i} = \dot{x}_{2,i} + \dot{x}_{1,i} \quad \text{식 (3-1)}$$

$$v_{ry,i} = \dot{y}_{2,i} + \dot{y}_{1,i} \quad \text{식 (3-2)}$$

$$t_{CPA,i} = \max\left(0, -\frac{d_{x,i} v_{rx,i} + d_{y,i} v_{ry,i}}{v_{rx,i}^2 + v_{ry,i}^2}\right) \Big|_i \quad \text{식 (3-3)}$$

위 식으로부터 아래 식 (5)의 기준을 만족할 경우 DWC의 분리기준을 위반 했다고 하며, 이를 Loss of DAA Well Clear (LoWC)라 나타낸다.

$$[r_i \leq S_i] \text{ AND } [HMD_{p,i} \leq HMD^*] \text{ AND } [d_{h,i} \leq h^*] \quad \text{식 (5)}$$

$$\text{at } \tau_{mod}^* = 35 \text{ sec, } HMD^* = 4,000 \text{ ft, } d_h^* = 450 \text{ ft} \quad \text{식 (5-1)}$$

DWC는 분리기준이 위반된 LoWC단계 이전에 항공기의 위치, 속도, 방향을 고려하여 위험을 미리 예측하고 위험예상 정도에 따라 경고 알람을 나타낸다. 본 연구에서는 예측된 각각의 위험 단계를 수치화한 Well Clear Score (WCS)<sup>[13]</sup>을 이용하여 분석에 적용하였다. 각 위험단계에 대한 조건은 [표 3-1]과 같다.

[표 3-1] Well Clear Score

Alert Type	Preventive Alert	Corrective Alert	Warning Alert	LoWC	SLoWC(%)
Score	1	2	3	4	4+SLoWC/100
$\tau_{mod}^*$ (sec)	35	35	35	35	35
$HMD^*$ (ft)	4,000	4,000	4,000	4,000	4,000
$d_h^*$ (ft)	700	450	450	450	45
Average Time of Alert (sec)	55	55	25	-	-
Late Threshold (sec)	20	20	15	-	-
Early Threshold (sec)	75	75	55	-	-

여기서 Severity of LoWC (SLoWC)는 LoWC 단계가 된 시점(0%)으로부터 충돌(100%)까지 수치화한 것으로 위험단계를 더 세분화한 것을 의미한다. SLoWC는 아래 식( )을 이용하여 계산한다.

$$SLoWC_i = (1 - RangePen_i \oplus HMDPen_i \oplus VertPen) \times 100\% \quad \text{식(6)}$$

where,

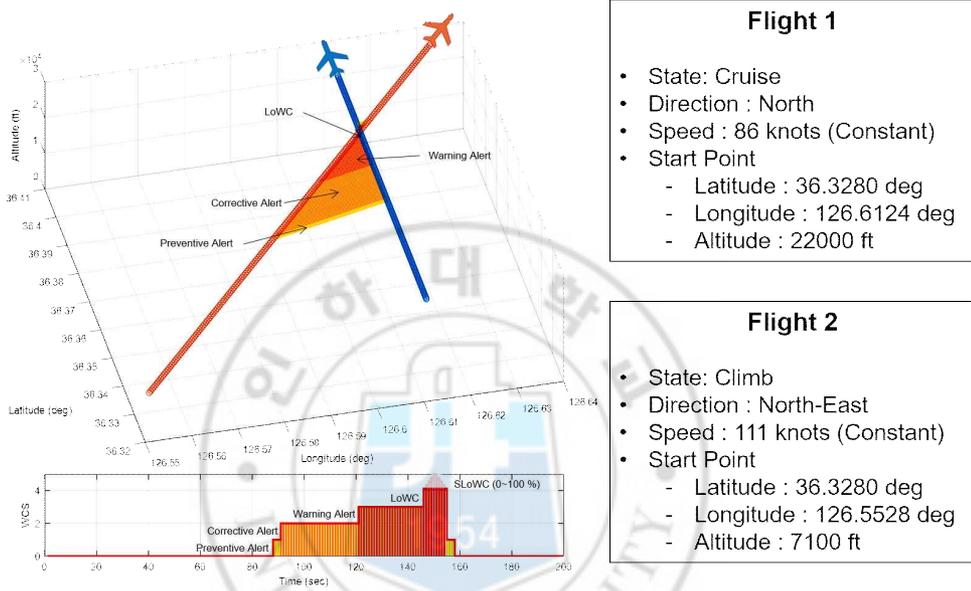
$$x \oplus y \equiv \sqrt{x^2 + (1+x^2) \cdot y^2} \quad \text{식(6-1)}$$

$$RangePen_i = \min\left(\frac{r_i}{S_i}, 1\right) \quad \text{식(6-2)}$$

$$HMDPen_i = \min\left(\frac{HMD_i}{DMOD}, 1\right), DMOD = 4,000ft \quad \text{식(6-3)}$$

$$VertPen_i = \min\left(\frac{d_{h,i}}{d_{h,i}^*}, 1\right) \quad \text{식(6-4)}$$

[그림 3-2]는 이를 검증하기 위해 두 항공기에 대한 간단한 항적을 생성하여 계산을 수행한 것이다. 와 같이, CIP와 마찬가지로 두 항공기는 서로 다른 위치에서 출발하여 같은 시간에 동일한 위치를 지나도록 생성한 항적으로, 서로 충돌하는 경우로 생성하여 검증하였다.



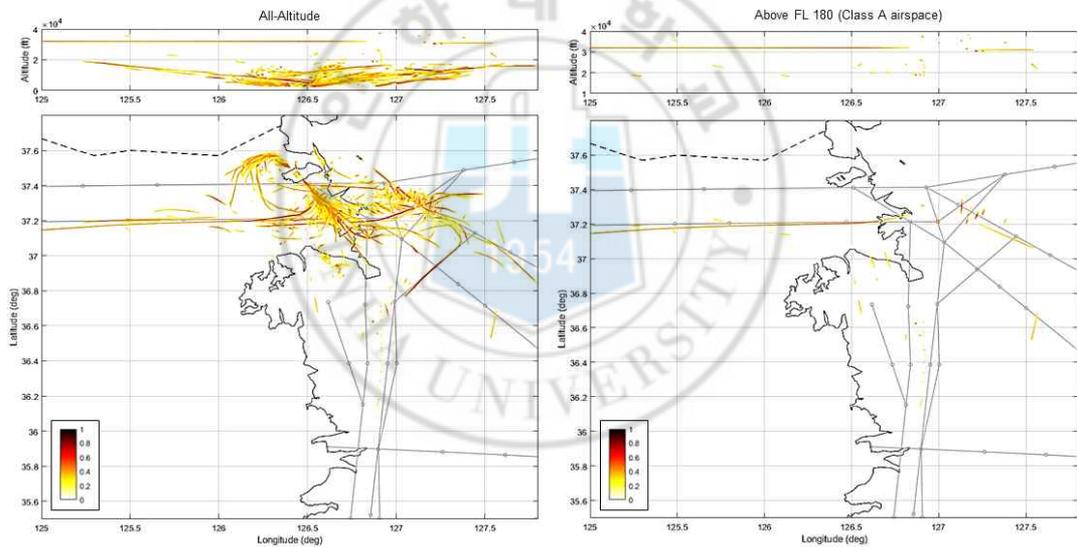
[그림 3-2] WCS 계산 검증 결과

## 3.2. CIP를 이용한 위험도 분석 결과

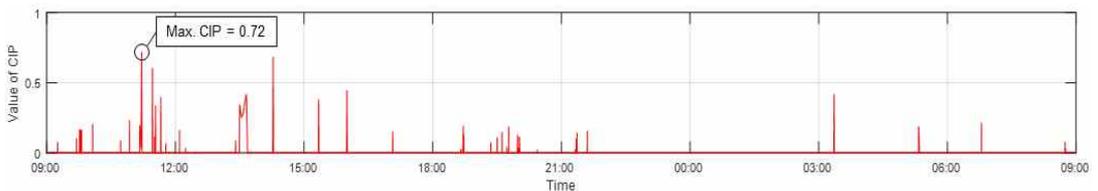
두 항공기간의 CIP를 계산할 경우 수평분리 기준( $S_{std}$ )과 수직분리 기준( $H_{std}$ )를 각각 5 nmi와 1,000 ft로 설정하였으며, 두 항공기의 고도가 FL 290 이상일 경우  $H_{std}$ 는 2,000 ft로 설정하였다<sup>[14]</sup>.

### 3.2.1. 위험도 발생 지역 위치

[그림 3-3]은 위험도 분석에 적용된 데이터 중 수신된 데이터가 가장 많았던 날(2017년 8월 5일)의 위험도 발생 위치이다. 이는 위험도가 나타난 경우( $0 < CIP \leq 1$ )를 지도상에 표현한 것으로, 위험도 표현 위치는 두 항공기 사이의 중심위치이다.



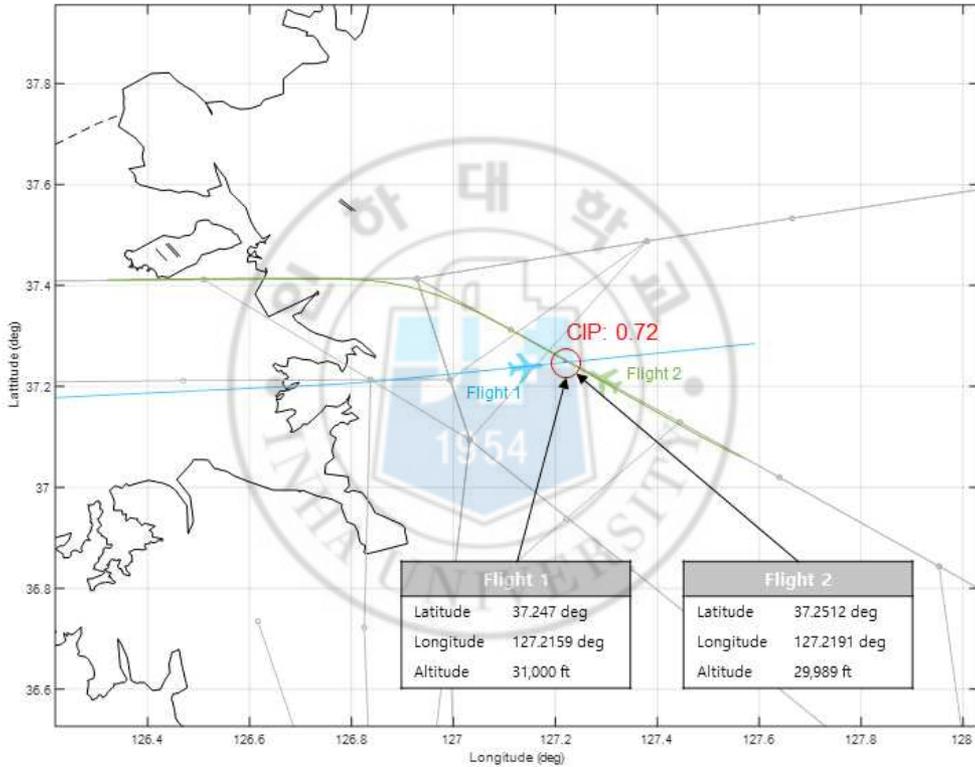
[그림 3-3] CIP-위험도 발생 위치 (2017년 8월 5일)



[그림 3-4] 시간에 따른 Max. CIP 값 (above FL 180)

[그림 3-3]의 왼쪽 그래프는 모든 고도범위에 대해 계산된 결과이며, 오른쪽 그래프는 공역 A에 해당하는 고도(FL 180)에서 계산한 CIP 위험도 발생 위치 결과이다.

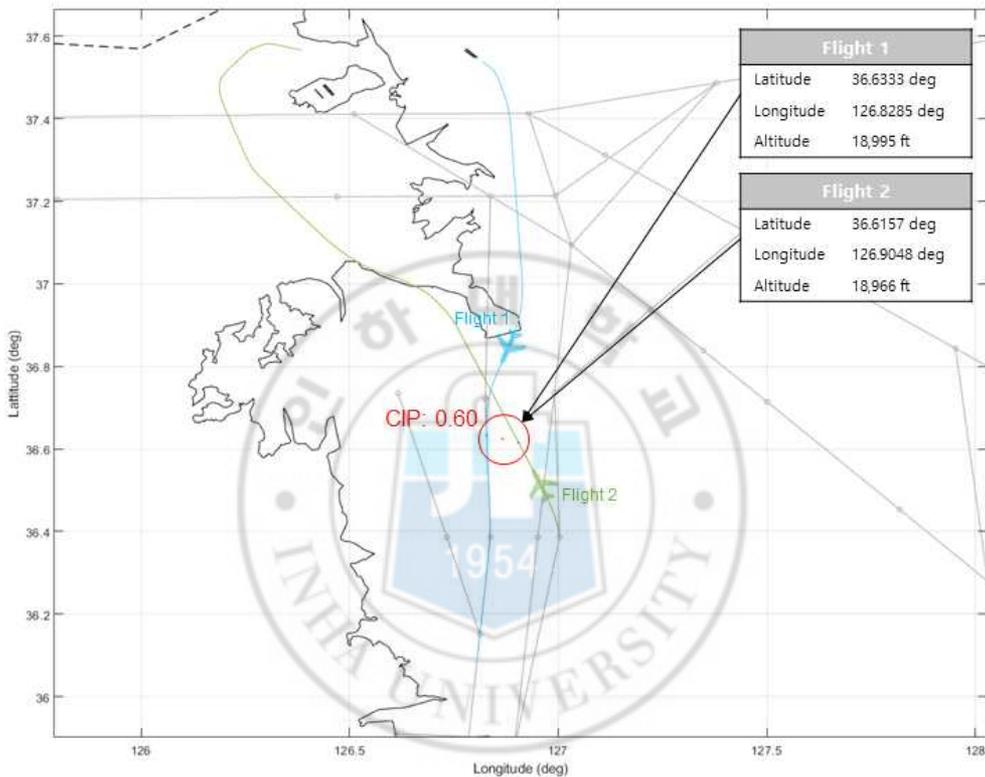
[그림 3-4]는 공역 A에서 나타난 위험도에 대해 시간에 따른 CIP의 최댓값을 나타낸 것이다. 위 그래프에서 CIP값이 0.5이상 즉, 위험도가 상대적으로 높은 경우가 총 3번이 나타나며, [그림 3-5]는 가장 높은 위험도를 보인 CIP=0.72가 나타난 경우에 대해 두 항공기 궤적과 상황을 보여준다.



[그림 3-5] CIP 위험도가 가장 높게 나타난 두 항공기의 궤적

[그림 3-5]에 나타난 항공기 궤적을 살펴보면, 모두 고도 30,000 ft 근방에서 순항 비행하는 항공기로 두 항공기가 가장 가까워졌을 경우 수평거리 1,794 ft이며, 고도차는 1,011 ft 이다. 일반적인 기준에서 고도 1,000ft 이상 차이는 수직분리 기준을 만족한 경우지만, 앞서 언급한바와 같이 두 항공기 모두 FL 290이상일 경우 수직분리기준은 2,000ft이므로 수평/수직 분리기준 모두 위반한 경우로 나타난다.

두 번째로 높은 위험도를 보인 경우 역시 가장 높은 위험도를 보인 경우와 위치와 상황이 비슷한 경우로 두 항공기가 순항하는 중에 항로가 교차되는 지점에서 나타났다. [그림 3-6]은 CIP값이 0.5이상으로 나타난 상황 중 마지막인 세 번째로 높은 위험도를 보인 CIP=0.60의 경우를 나타낸 것이다.

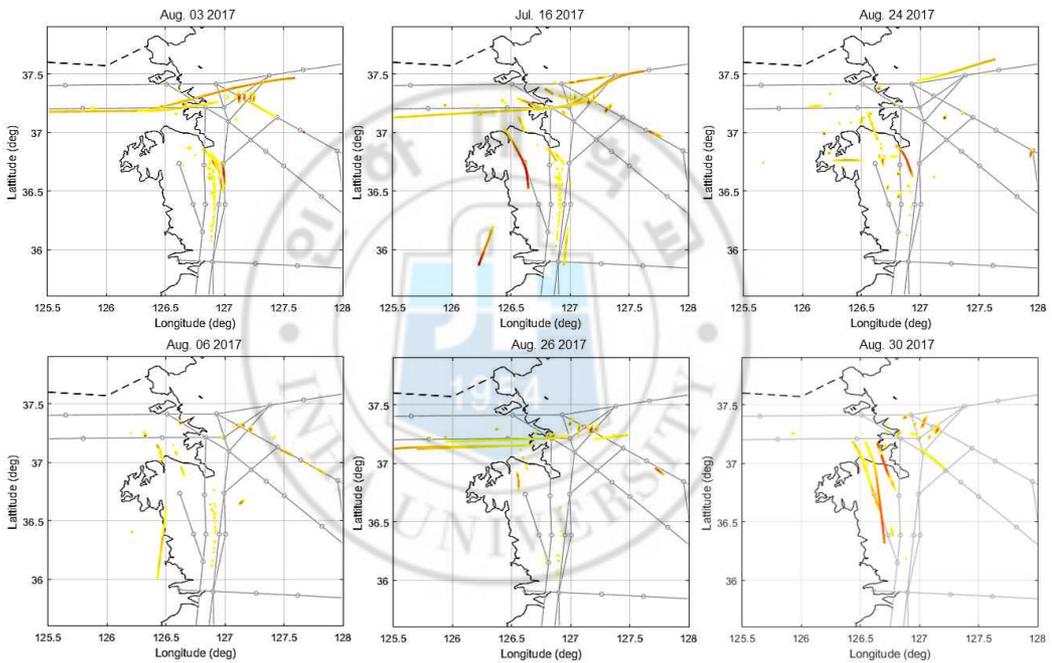


[그림 3-6] CIP 위험도가 세 번째로 높게 나타난 두 항공기의 궤적

[그림 3-6]을 살펴보면, 인천국제공항으로 접근하는 하강 항공기와 김포국제공항에서 출발한 상승 항공기의 항로가 교차하는 지점에서 위험도가 나타남을 알 수 있다. 항공기 1은 김포공항을 출발하여 Y711항로에 진입하는 순간이며, 항공기 2는 Y722항로에서 빠져나와 인천국제공항으로 접근절차에 들어가기 위한 비행을 하는 순간이다. 두 항공기가 가장 가까워진 순간에는 수평거리가 23,269ft (3.83 nmi), 수직거리가 29 ft로 나타났다.

### 3.2.2. 위험도 발생 경향

CIP 분석 결과는 모두 대체적으로 공항 주변 상승/하강 항공기간 높은 위험도를 지니고 있으며, 충돌사고에 대한 잠재적 위험이 존재함을 보인다. 또한 서로 다른 항로로 비행하던 두 항공기가 항로가 교차 또는 만나는 지점에서 위험도가 자주 발생하였다. 하지만 그 외에도 항공기가 지나는 모든 위치에서 간헐적으로 위험도가 발생하기도 한다. [그림 3-7]은 분석한 날짜 중 위험 발생 횟수가 가장 많은 날짜의 데이터 순으로 위험 발생 위치를 보여 주며, FL 180이상의 경우로만 나타낸 것이다.



[그림 3-7] 날짜 별 위험도 발생 위치

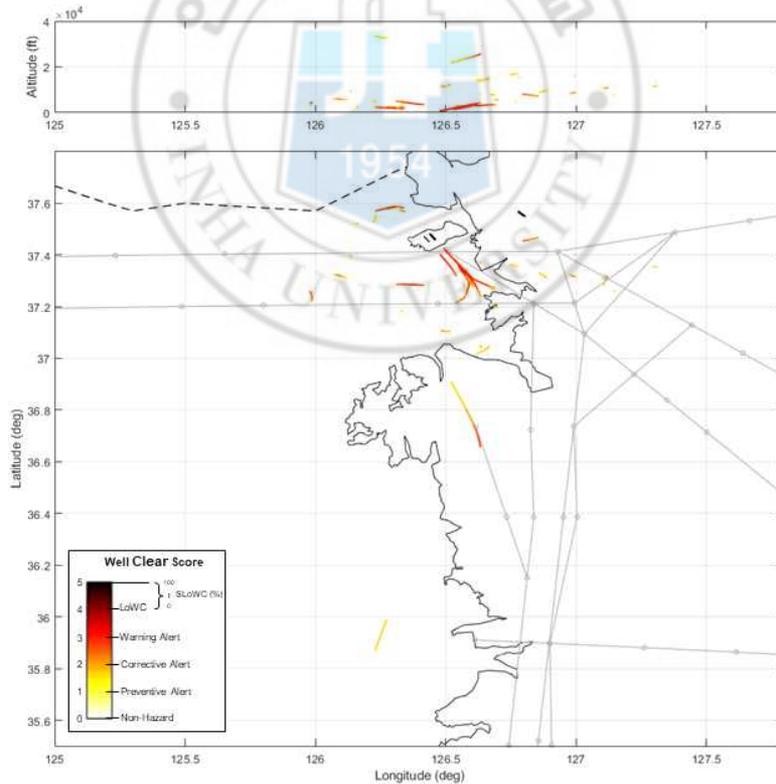
위험도는 고도 FL290 이상에서 대부분 Y644항로에서 G597항로로 순항하는 항공기에서 나타나며, 그 이하의 고도에서는 공항으로 출/도착하기 위해 비행하는 항공기들에서 나타난다.

### 3.3. DWC를 이용한 위험도 분석 결과

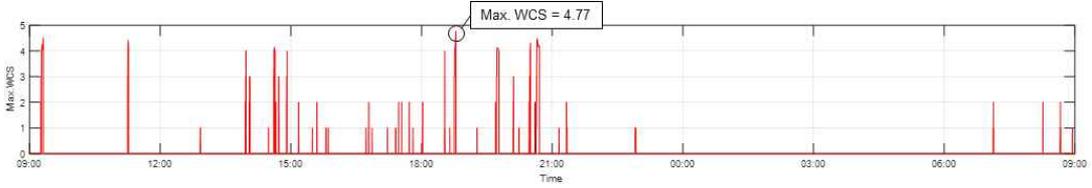
DWC 무인기의 DAA시스템을 위해 적용되는 위험도 판별 지표이다. 본 연구에서는 이 DWC를 ADS-B데이터 기반의 항적데이터에 적용하여 위험도를 분석하였다. [표 3-1]에 나타난 WCS를 적용하기 위해 Track Point로 확인할 수 있는 현재 항공기 속도와 방향으로부터 ‘Average Time of Alert’ 시간 내의 항공기 위치를 계산함으로써 분석을 수행하였다.

#### 3.3.1. 위험도 발생 지역 위치

[그림 3-8]은 분석한 날짜 중 위험도 발생(WCS > 0) 횟수가 가장 많았던 날(2017년 7월 16일)의 위험도 발생 위치를 지도상에 표현한 것으로, 위험도 표현 위치는 두 항공기 사이의 중심위치이다.



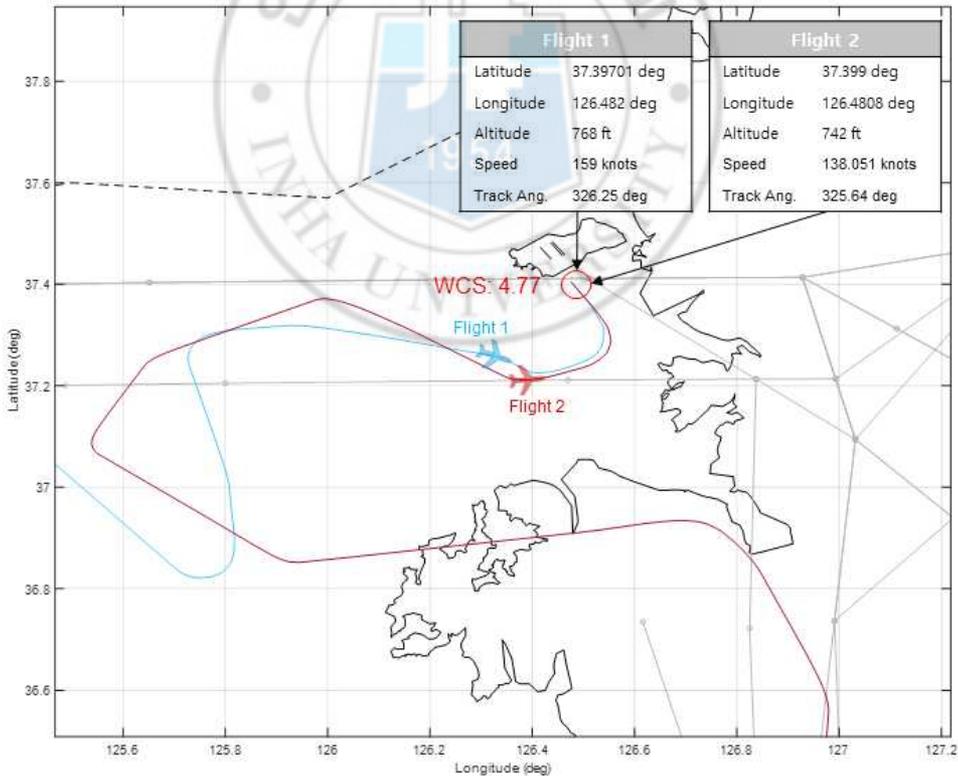
[그림 3-8] WCS-위험도 발생 위치 (2017년 7월 16일)



[그림 3-9] 시간에 따른 Max. WCS

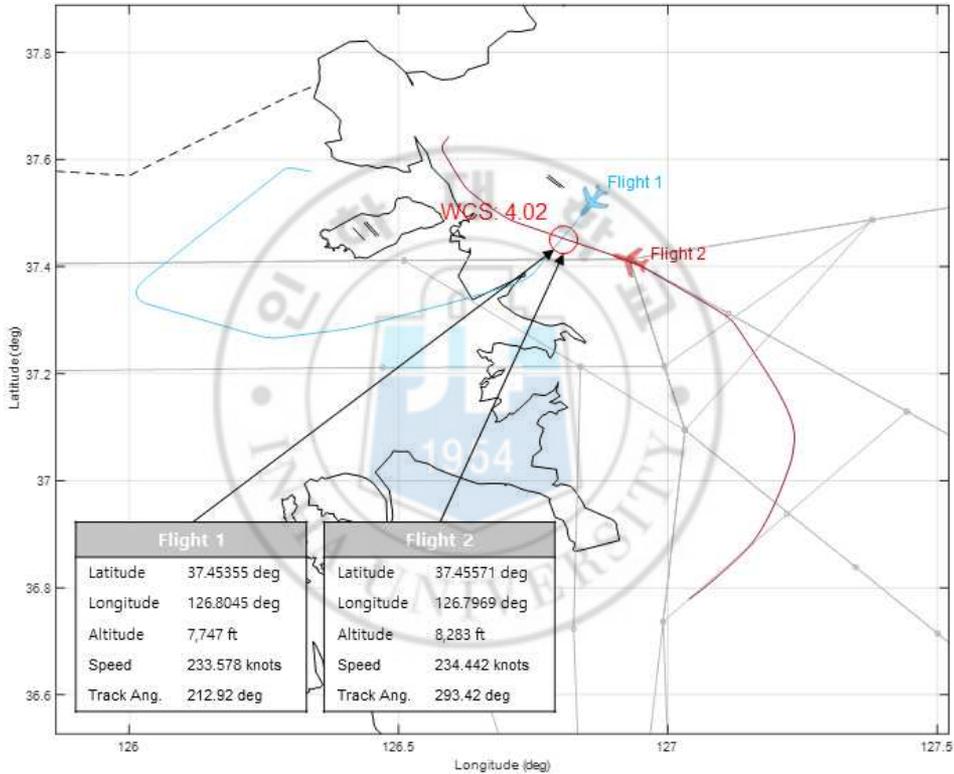
[그림 3-8]을 살펴보면, 위험도 발생 위치는 인천국제공항 근처의 저고도에서 집중적으로 나타남을 확인할 수 있다. [그림 3-3]의 왼쪽 그래프와 같이 CIP를 고도 전체 영역에서 계산했을 경우와 마찬가지로, WCS의 계산을 통해 나타난 위험도는 공항 근처에 집중되는 경향을 보인다.

[그림 3-9]는 시간에 따라 나타난 WCS의 최댓값을 보여준다. 이 그래프에서는 DWC가 위반된 경우 즉, WCS가 4 이상인 경우가 상당 수 나타난다.



[그림 3-10] WCS가 가장 높게 나타난 두 항공기의 궤적

[그림 3-10]은 이 날의 WCS가 가장 높게 나타난 상황의 항공기 궤적이다. 두 항공기 모두 인천국제공항의 16/34 활주로로 도착하는 경로이며 상대거리가 가장 최소가 될 때는 수평거리 811 ft, 수직거리 26 ft 로 나타났다. [그림 3-8]의 그래프에서 나타난 WCS가 4이상(LoWC 단계)의 위험 상황은 하나의 경우를 제외하고는 모두 인천국제공항으로 접근하는 항공기간 비슷한 상황에서 발생하였다. 제외된 하나의 경우는 [그림 3-11]의 상황이다.



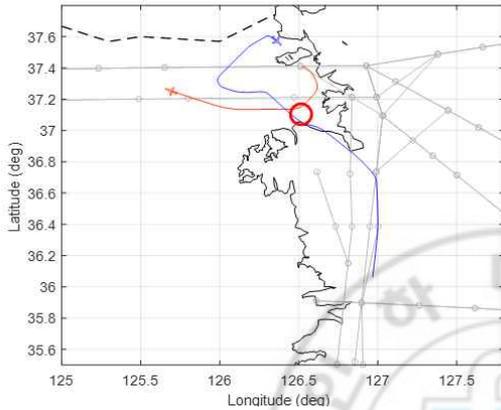
[그림 3-11] WCS가 높게 나타난 두 항공기의 궤적

[그림 3-11]의 상황은 인천국제공항으로 접근하는 항공기와 김포국제공항으로 접근하는 항공기 사이에 위험도가 나타난 경우이다. 두 항공기가 가장 가까워 질 때의 수평거리는 2,340 ft이며 수직거리는 536 ft 이다.

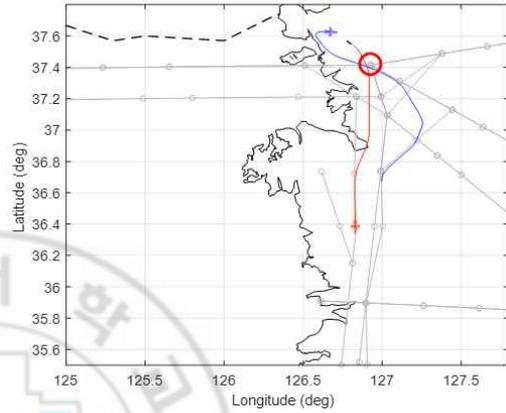
WCS가 0이상인 모든 위험도 역시 대체적으로 두 공항 근처에서 발생한다. 즉, CIP와 마찬가지로 공항 주변에 항공기들에게 잠재적 충돌 위험도가 있음을 나타낸다.

### 3.3.2. 대표적 위험 발생 상황

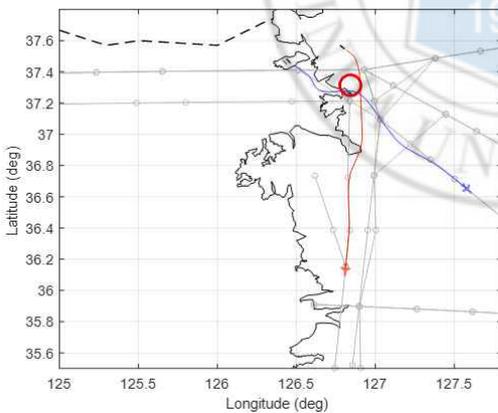
적용된 모든 날짜에 대해 WCS가 2이상인 경우를 확인한 결과 위험 발생 상황은 총 8가지의 비슷한 형태로 나타났다. [그림 3-11 ~ 18]은 이 8가지에 대한 대표적인 위험 발생 상황을 보여준다.



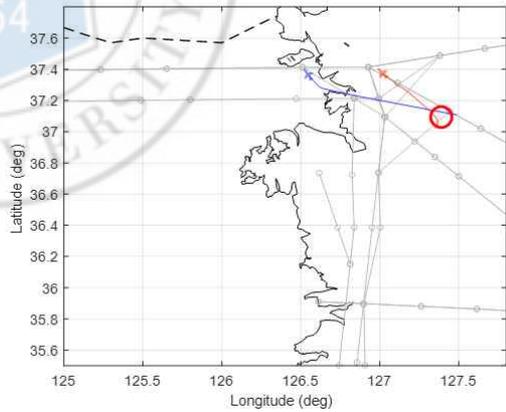
[그림 3-12] 위험 발생 상황-1



[그림 3-13] 위험 발생 상황-2



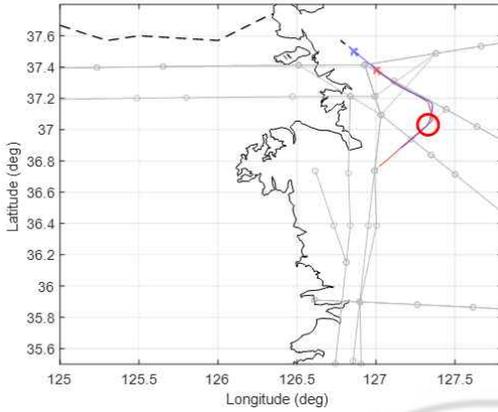
[그림 3-14] 위험 발생 상황-3



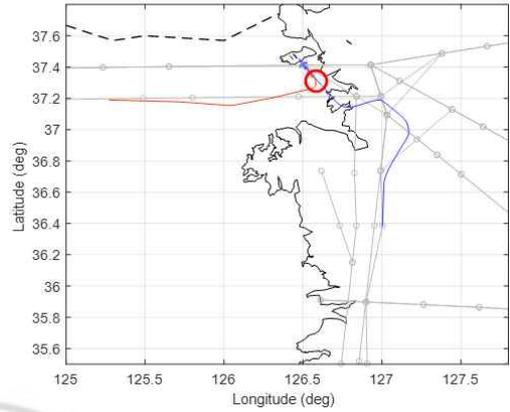
[그림 3-15] 위험 발생 상황-4

[그림 3-12]와 [그림 3-13]은 동일한 공항에서 출발하는 항공기와 도착하는 항공기 간 경로가 교차되는 지점에서 위험도가 나타난 상황이다. [그림 3-14]와 [그림 3-15]는 서로 다른 공항에 두 항공기가 도착 또는 출발하는 경우로 항로가 교차되는

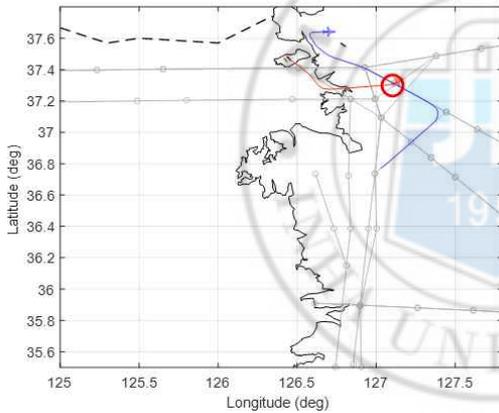
지점에서 위험도가 나타난 상황이다.



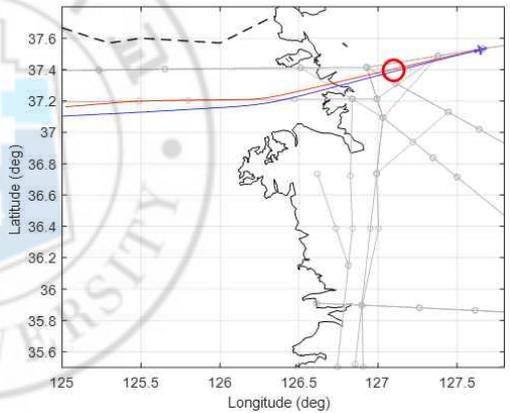
[그림 3-16] 위험 발생 상황-5



[그림 3-17] 위험 발생 상황-6



[그림 3-18] 위험 발생 상황-7

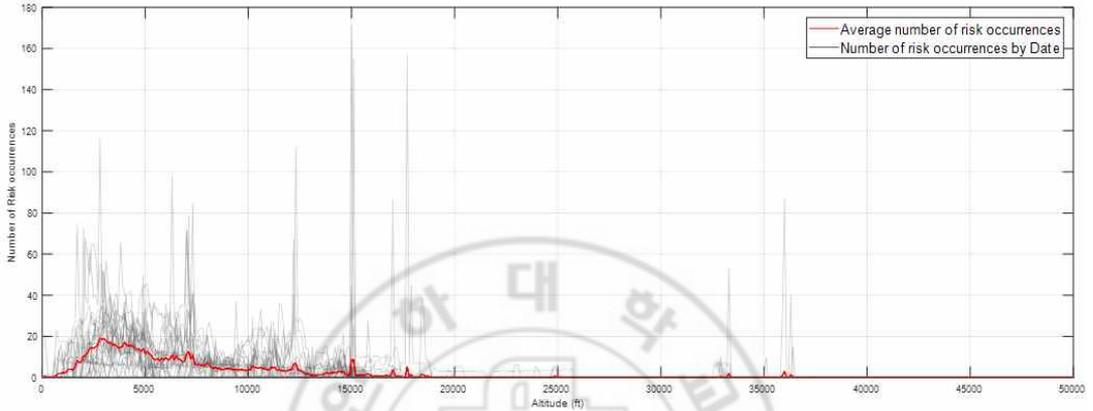


[그림 3-19] 위험 발생 상황-8

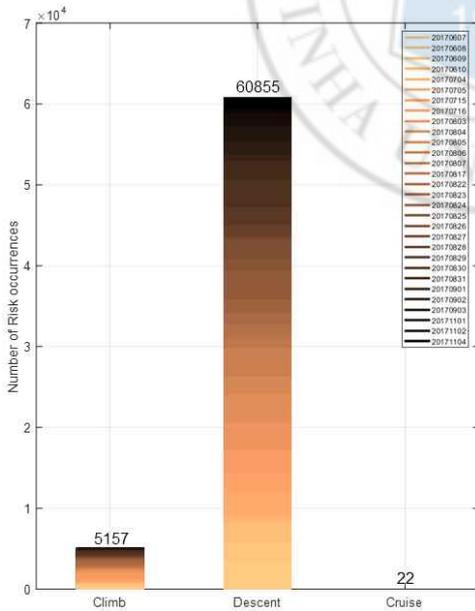
[그림 3-16]과 [그림 3-17]은 두 항공기가 동일한 공항으로 도착하는 상황에서 나타난 위험도가 나타난 상황을 보여준다. [그림 3-18]은 서로 다른 공항에서 출발하는 항공기와 도착하는 항공기 사이에 나타난 위험도가 나타난 상황을 보여준다. [그림 3-19]는 상대적으로 많은 경우는 아니지만 간헐적으로 나타나는 상황으로 고고도에서 순항하는 두 항공기간 위험도가 나타난 상황이다. 위 8가지의 대표적인 상황 이 외에도 규정된 항로 주변으로 일정한 경향 없이 순간적으로 위험도가 나타나는 경우도 존재하지만, 그 횟수는 비교적 낮게 나타났다.

### 3.3.3. 위험 상황 발생 경향

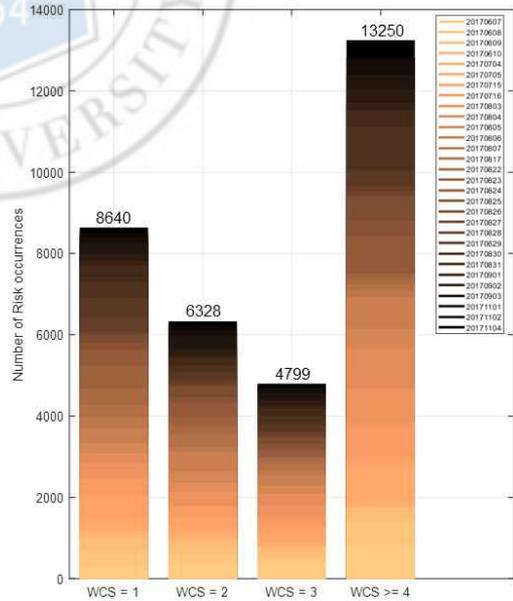
[그림 3-20~22]은 분석한 모든 날짜에 대해 고도별, 비행 상태별, WCS별 위험 발생 횟수를 나타낸다. 여기서 횟수는 위험 발생 상황에 대한 횟수를 나타내는 것이 아닌, 초단위로 분석된 Track Point의 수를 나타낸 것이다.



[그림 3-20] 고도별 위험 상황 발생 횟수



[그림 3-21] 상태별 위험 발생 수



[그림 3-22] WCS별 위험 발생 수

[그림 3-20]을 살펴보면, DWC를 이용해 계산된 위험 상황은 공역 A에 해당하는 고도 FL190 이하에서 주로 발생하였음을 알 수 있다. 평균적으로 약 3,000 ft 근방에서 위험도가 가장 많이 나타났으며, 이는 공항으로 출/도착 하는 항공기들에 대해서 나타난 위험도라 할 수 있다. [그림 3-21]과 같이 비행 상태별 비교는 이를 뒷받침해주는 데이터로, 순항하는 항공기에 비해 상승/하강하는 항공기들 사이에서 위험도가 높음을 확인할 수 있다. 그 중에서도 상승하는 항공기에 비해 공항으로 도착하려는 하강항공기들 사이에서 위험도가 많이 나타났음을 알 수 있다.

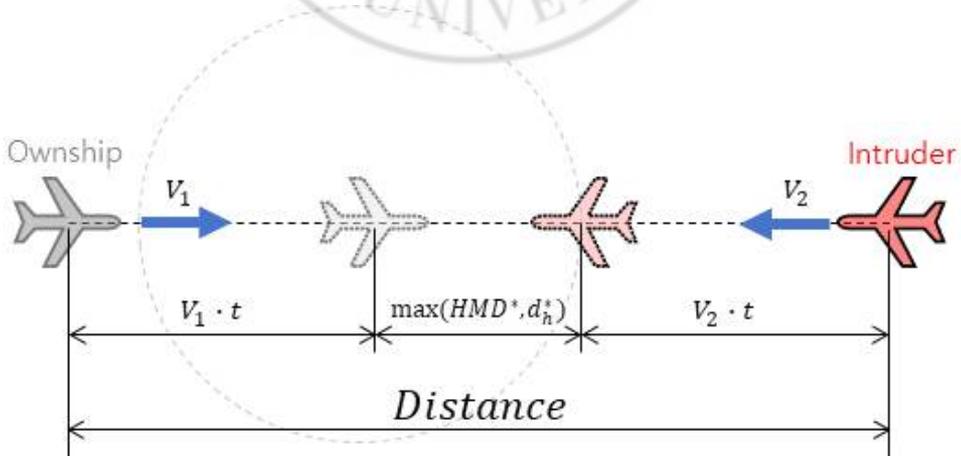


## 4. DAA 감지기 적용을 통한 위험도 분석

### 4.1. 분석 범위 선정

분석에 사용한 데이터는 총 30일의 데이터에서 DWC를 적용해 나타난 위험도(WCS >0)의 경우로만 선정하였다. 이는 모든 데이터를 이용하여 분석할 경우 경향성을 판단하기 어렵기 때문이다. 또한 CIP분석을 통해 나타난 위험도 결과는 오직 위치기반으로 계산되기에 감지기 최소성능 범위를 도출하는데 부적합하다.

주변 항공기를 안전하게 피하기 위해서는 감지 및 계산(‘상대항공기를 감지’, ‘위험도를 계산’, ‘회피경로 계획’), 기동을 할 충분한 시간과 거리가 있어야 한다<sup>[15]</sup>. 이를 고려하여 [그림 1-3]의 범위요소(방위각, 고각, 감지거리)에 대해 분석범위를 설정해야 한다. 초기 분석을 위하여 조건을 최대한으로 하는 방위각( $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ ), 고각( $-180^{\circ} \sim 180^{\circ}$ )로 하였으며, 감지거리는 [그림 4-1]을 통해 설정하였다. 이때 속도는 일반 여객 항공기의 최고속도 범위에 해당하는 520 knots로 하며,  $HMD^* = 4000$  ft, 시간은 [표 3-1]의 위험 알람 중 가장 낮은 단계의 Early threshold인 75 sec로 하여 계산된 최대 감지거리 22 nmi로 설정하였다.

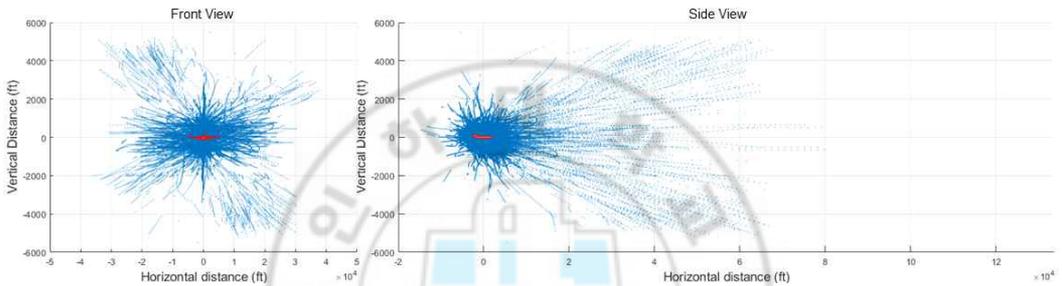


[그림 4-1] 최대 요구 거리

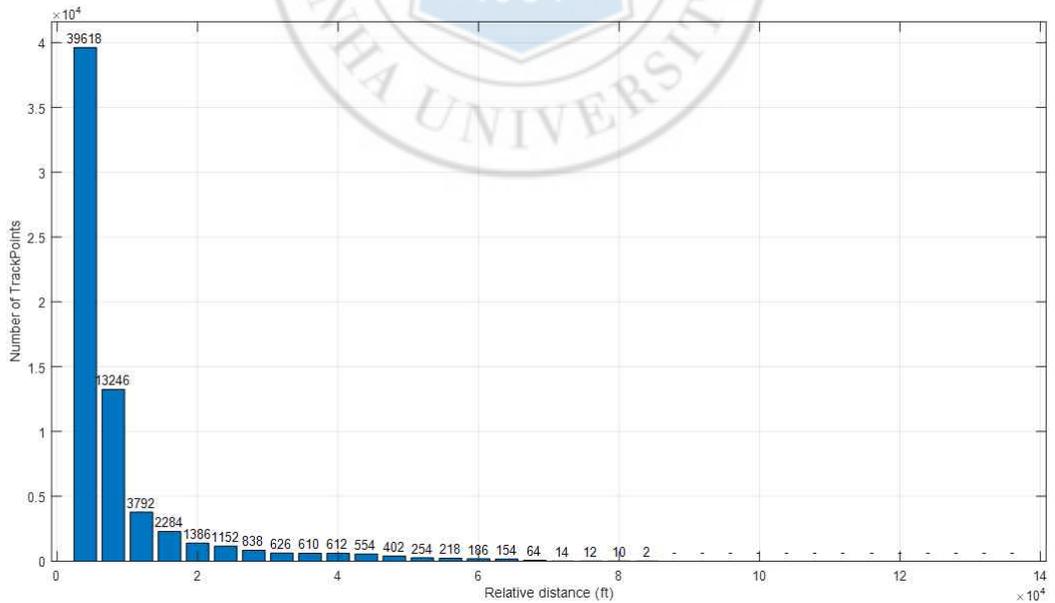
## 4.2. 상대항공기 분석

### 4.2.1. 거리에 따른 상대항공기 분석

상대항공기의 위치는 모든 Track Point에 대해 위치와 Track Angle을 이용한 동체 중심좌표계로 변환하여 계산되었다. [그림 4-2]는 앞서 언급한 바와 같이 위험도가 나타난 항공기 위치를 상대거리로 나타낸 것이다. 총 30일치 데이터에서 해당하는 모든 항공기에 대해 겹쳐 나타낸 것이다.



[그림 4-2] 상대항공기의 위치



[그림 4-3] 상대거리에 따른 Track Point 수

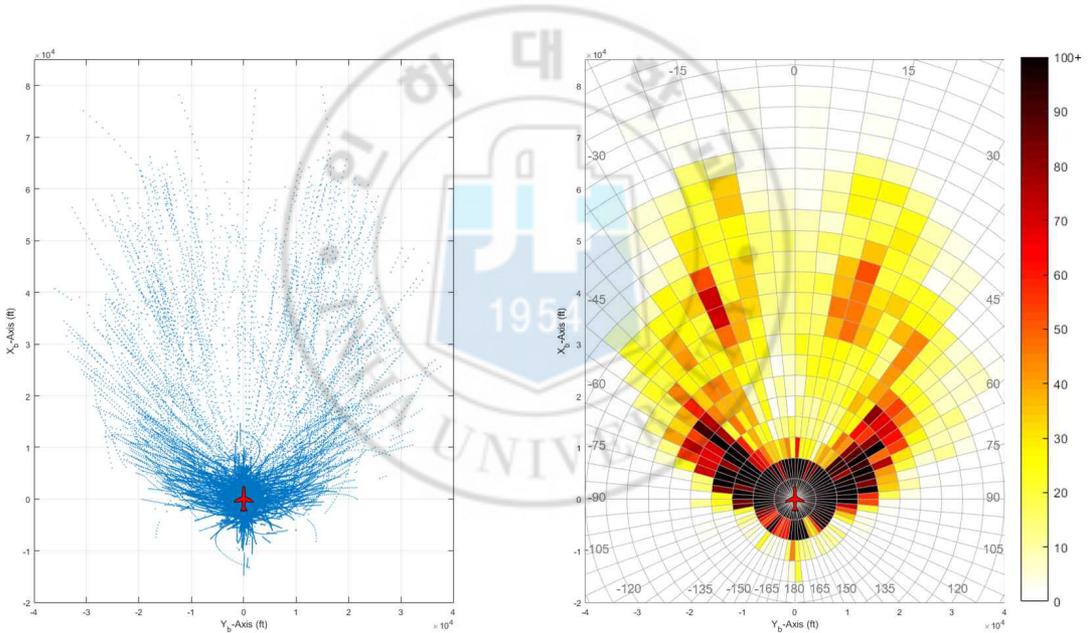
[그림4-2]는 4,000 ft씩 나누어진 거리간격에 대한 Track Point의 수를 나타낸다. 이것으로부터 분석된 모든 데이터에서 나타난 위험발생 상황(WCS >0)은 상대거리가 수평 79,740 ft, 수직 5,493 ft 내에서 발생했음을 알 수 있다. 또한 위험 발생 상황 중 두 항공기가 가장 멀었던 경우는 직선거리로 81,114 ft(약 13.35 nmi)였다. 아래 [표 4-1]은 상대항공기와의 상대거리에 따른 WCS의 분류와 발생 횟수를 보여준다. 이와 같은 방법으로 위험단계별 요구되는 거리감지범위를 참고적으로 확인 할 수 있다.

[표 4-1] 상대거리와 WCS에 따른 위험도 발생횟수

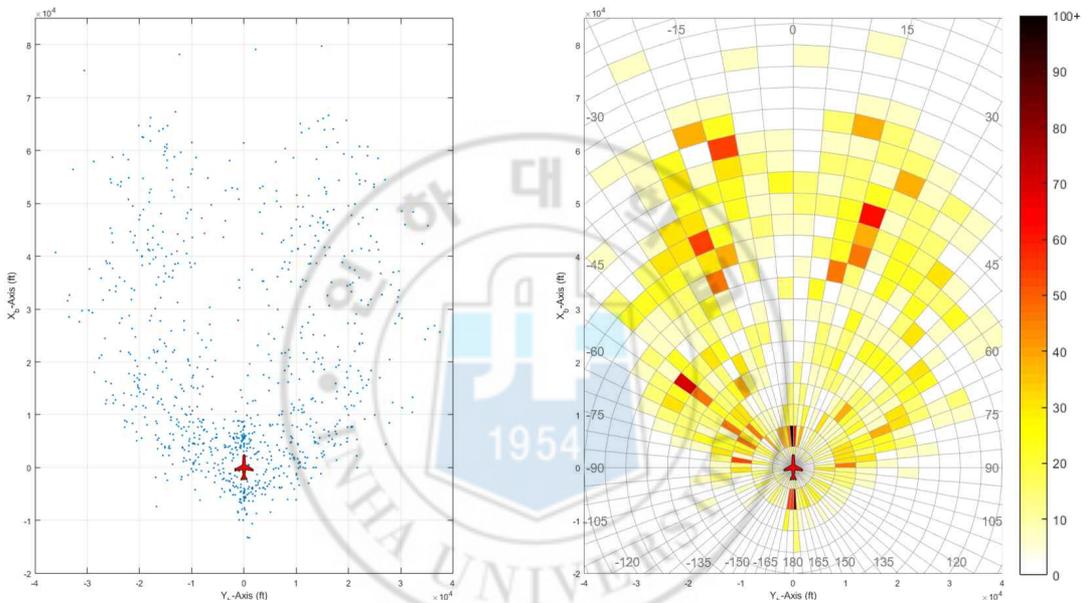
범위(직선거리)		Well Clear Score			
		WCS = 1	WCS = 2	WCS = 3	WCS 4 이상
(ft) ~ (ft)					
0	4,000	8,462	2,044	2,884	26228
4,000	8,000	3,396	3,934	5,644	272
8,000	12,000	1,450	1,800	542	-
12,000	16,000	862	1,214	208	-
16,000	20,000	492	750	144	-
20,000	24,000	442	600	110	-
24,000	28,000	380	422	36	-
28,000	32,000	314	284	28	-
32,000	36,000	286	322	2	-
36,000	40,000	298	314	-	-
40,000	44,000	248	306	-	-
44,000	48,000	172	230	-	-
48,000	52,000	144	110	-	-
52,000	56,000	104	114	-	-
56,000	60,000	78	108	-	-
60,000	64,000	80	74	-	-
64,000	68,000	38	26	-	-
68,000	72,000	10	4	-	-
72,000	76,000	12	-	-	-
76,000	80,000	10	-	-	-
80,000	84,000	2	-	-	-

### 4.2.2. 방위각에 대한 상대항공기 분석

거리와 방위각에 따라 설정한 영역에 상대항공기가 위치한 횟수를 통해 분석하였다. 하나의 영역은 거리 4,000ft, 방위각 5° 씩 나누어 설정하였으며, [그림 4-4]의 오른쪽 그래프에 보여 지는 하나의 영역과 같다. [그림 4-4]는 모든 항공기에 대해 위험이 발생했던 Track Point를 기준으로 표현한 것이다. 오른쪽 그래프는 상대항공기의 위치를 점들로 나타낸 것이며, 오른쪽 그래프는 설정 영역에 따른 상대항공기의 분포 정도를 나타낸다.

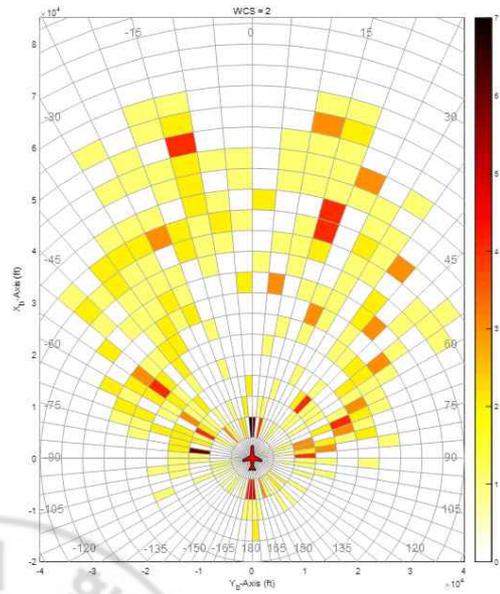
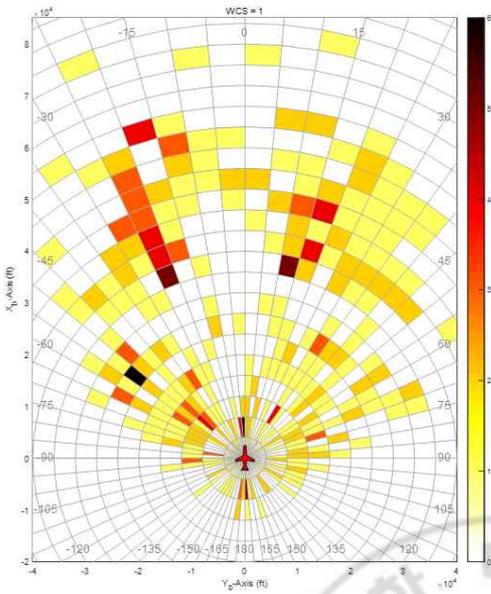


[그림 4-4] 방위각에 따른 상대항공기 위치와 분포

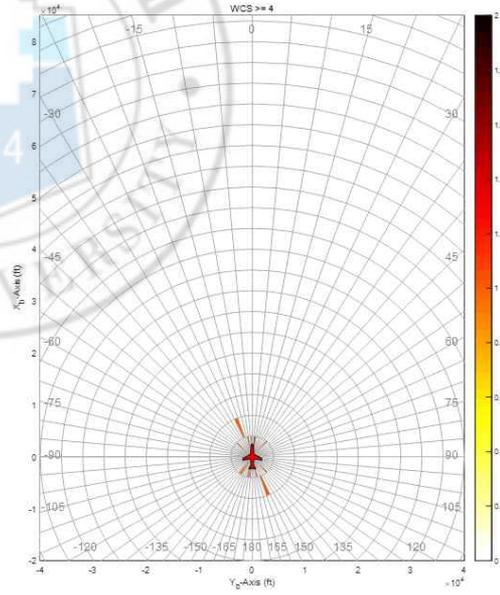
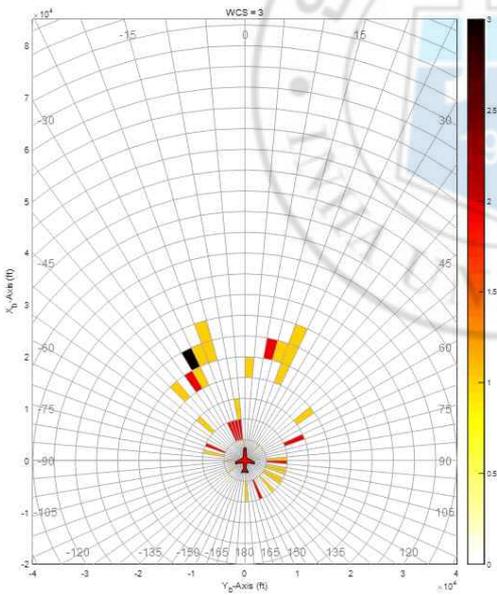


[그림 4-5] 방위각에 따른 상대항공기와 첫 위협 인식 위치와 분포

[그림 4-5]의 왼쪽 그래프는 위협도가 나타난 상대항공기와 처음 위협을 인식 했을 때 상대위치를 표현한 것이다. 오른쪽 그래프는 이때 설정 영역 방위각에 따른 항공기의 수를 나타낸다.

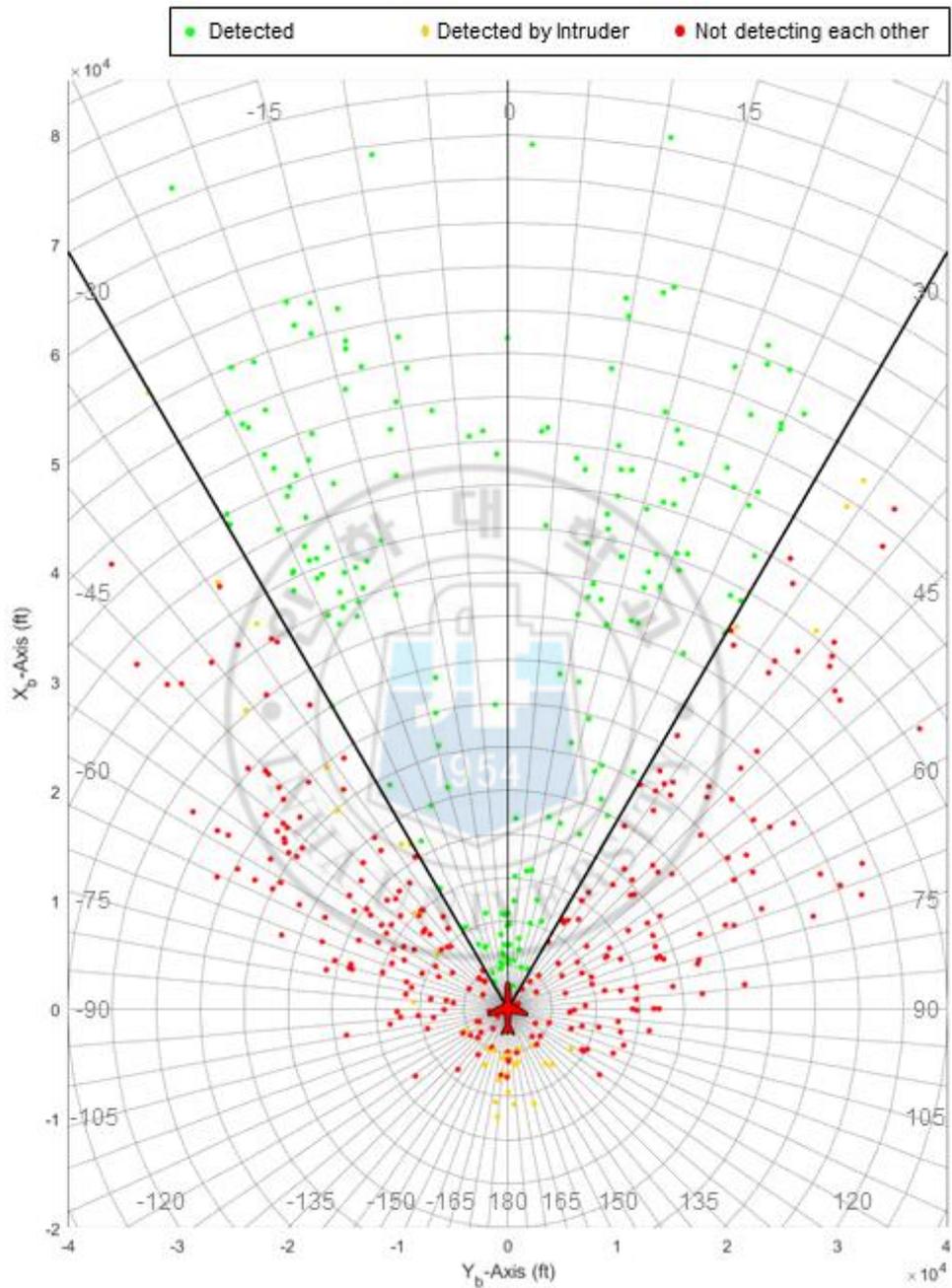


[그림 4-6] 첫 위험 발생 시 WCS=1      [그림 4-7] 첫 위험 발생 시 WCS=2

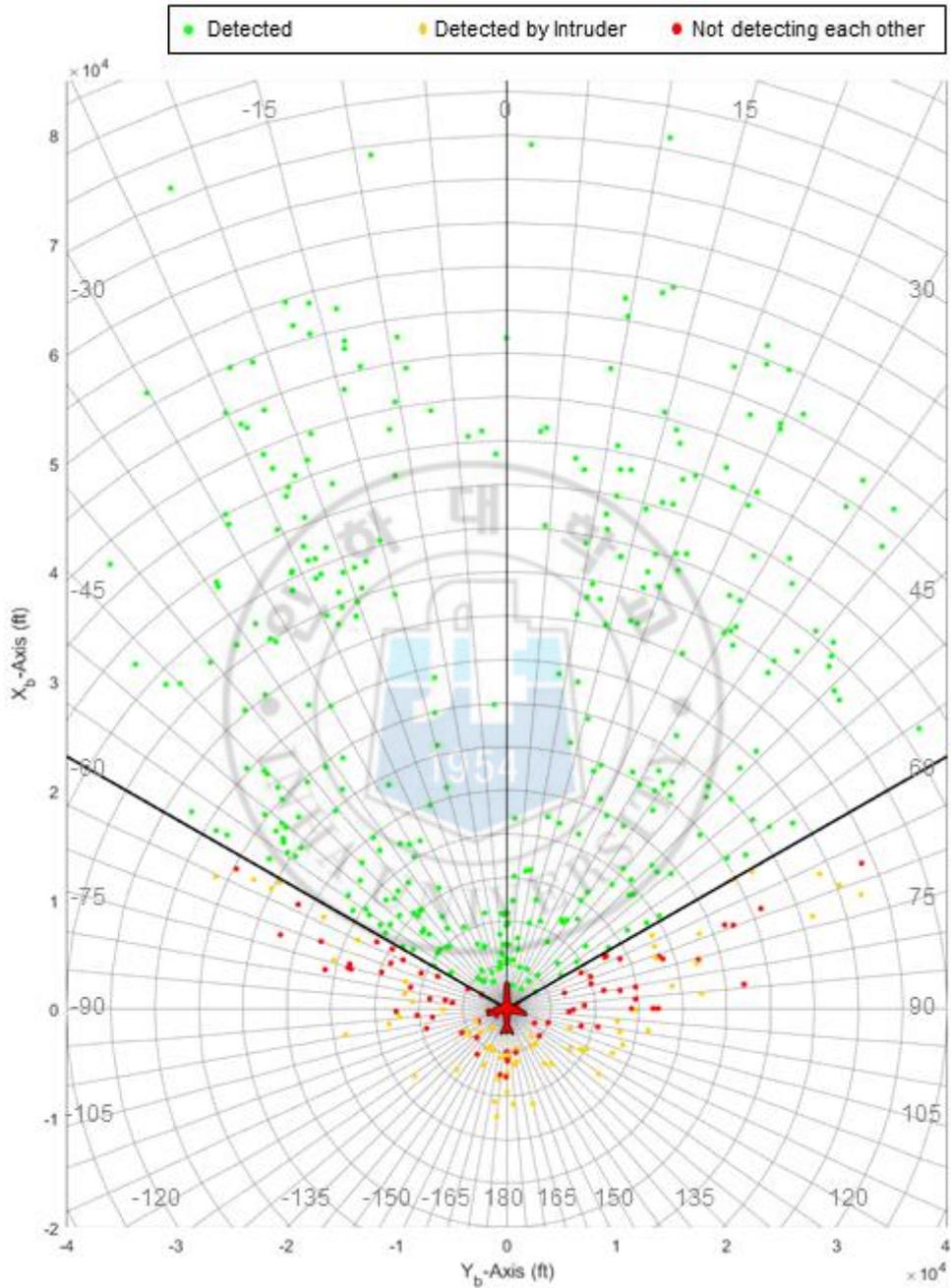


[그림 4-8] 첫 위험 발생 시 WCS=3      [그림 4-9] 첫 위험 발생 시 WCS ≥ 4

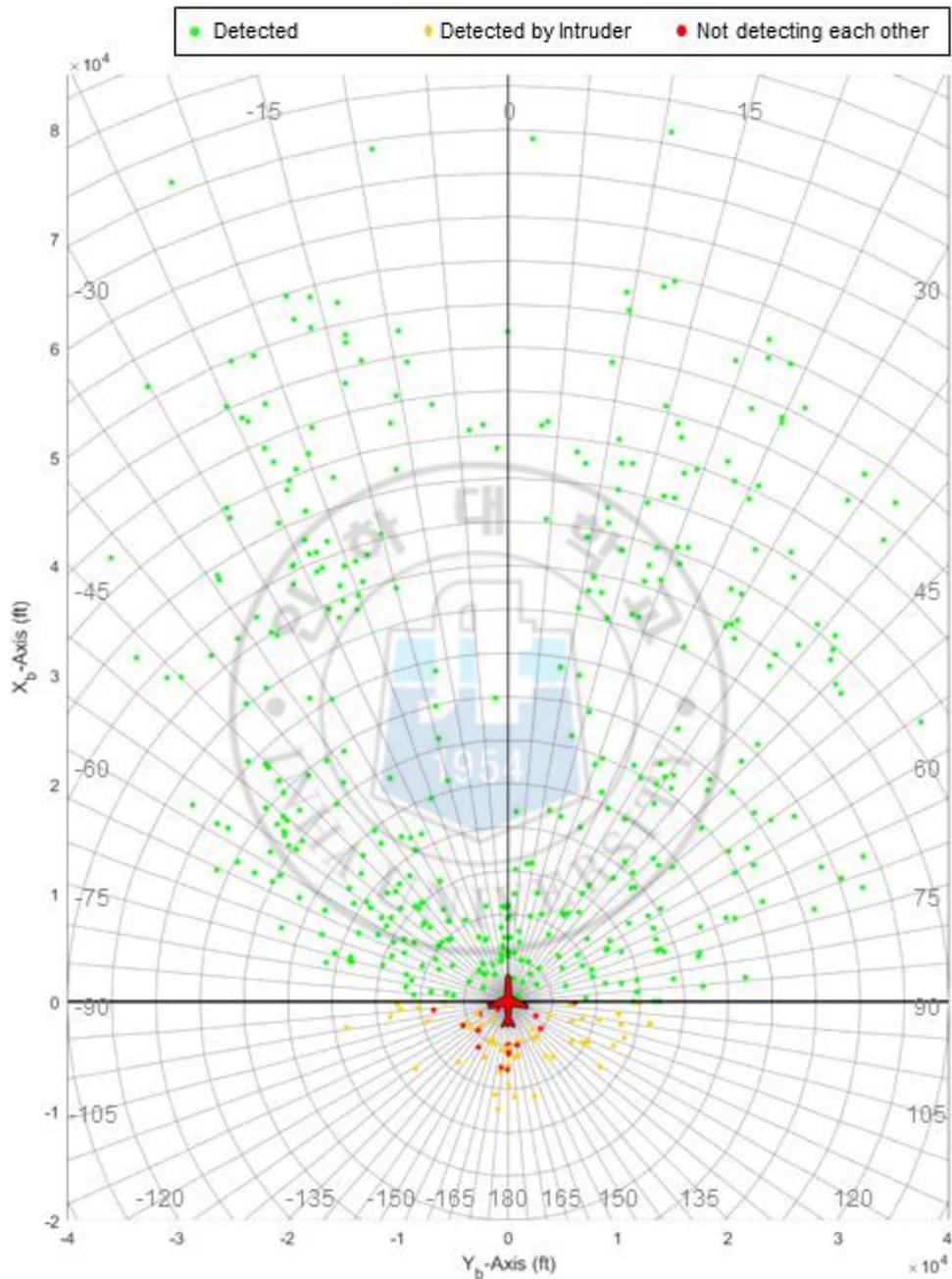
[그림 4-6~9]는 위험도가 나타난 상대항공기간 처음 위험을 인식 했을 때 WCS값에 따라 표현한 그림이다.



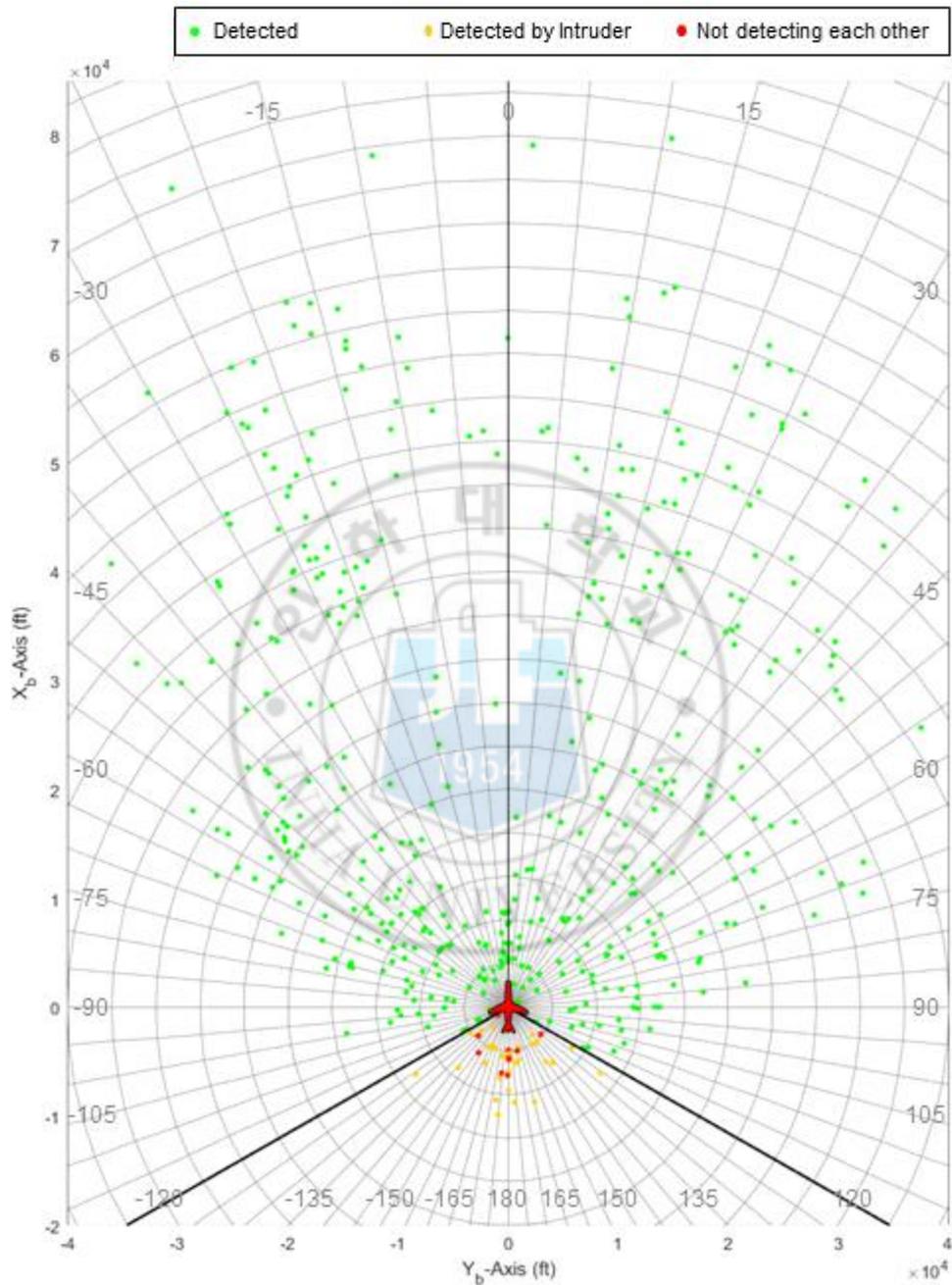
[그림 4-10] 감지범위  $\pm 30^\circ$  에서의 WCS=1인 상대항공기 감지 결과



[그림 4-11] 감지범위  $\pm 60^\circ$  에서의 WCS=1인 상대항공기 감지 결과



[그림 4-12] 감지범위  $\pm 90^\circ$  에서의 WCS=1인 상대항공기 감지 결과



[그림 4-13] 감지범위  $\pm 120^\circ$  에서의 WCS=1인 상대항공기 감지 결과

[그림 4-10~13]은 감지범위(30, 60, 90, 120° ) 조건에 따라 위험도가 나타난 상대항공기와 처음 위험을 인식 했을 때 WCS가 1인 경우에 대해 감지여부를 보여준다. 예를 들어 [그림 4-13]의 경우는 기준 항공기가 상대항공기를 감지한 경우가 426회, 기준 항공기는 감지하지 못하고 침입항공기가 감지한 경우가 31회, 두 항공기 모두 서로를 감지하지 못한 경우가 10회로 나타났다. 이와 같은 방법으로 감지범위에 따라 반복 수행 결과는 [표 4-2]와 같다. WCS가 2이상의 세부내용은 부록을 통해 확인 할 수 있다. [표 4-3]은 WCS에 따른 최소 요구 방위각을 보여준다.

[표 4-2] WCS=1에서의 범위에 따른 감지 횟수

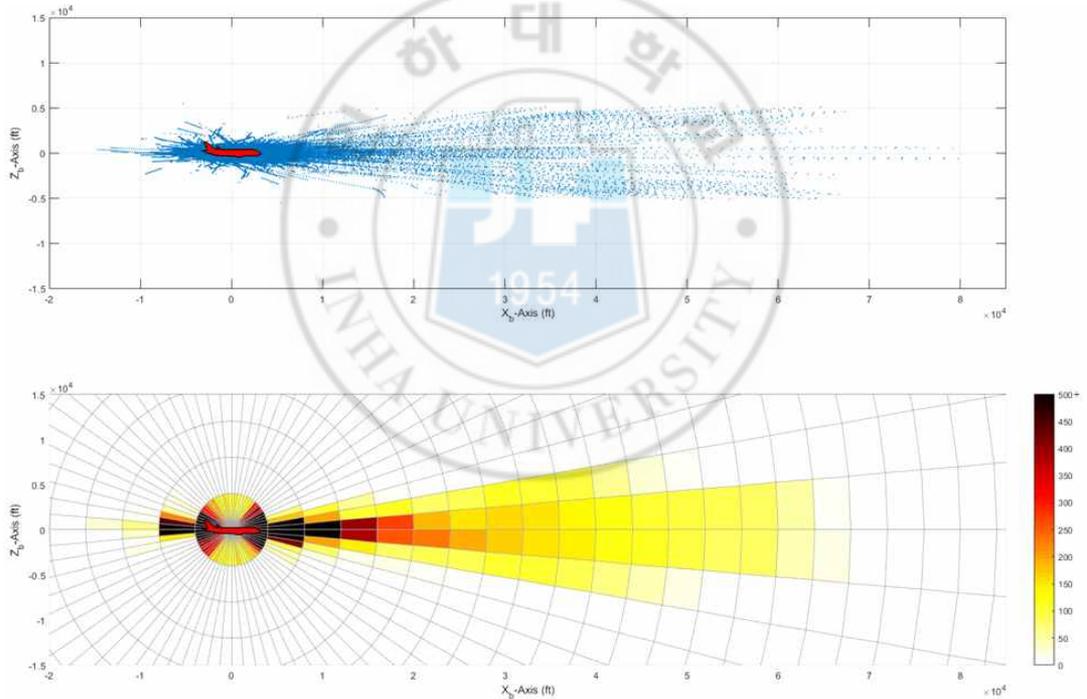
범위 (±°)	감지	상대가 감지	서로 감지불가	범위 (±°)	감지	상대가 감지	서로 감지불가
5	25	17	425	95	404	48	15
10	44	28	395	100	410	44	13
15	82	41	344	105	414	40	13
20	113	44	310	110	417	37	13
25	156	43	268	115	420	36	11
30	181	38	248	120	426	31	10
35	213	45	209	125	427	30	10
40	236	53	178	130	432	27	8
45	262	58	147	135	434	26	7
50	287	62	118	140	435	25	7
55	303	59	105	145	439	21	7
60	328	71	68	150	442	19	6
65	347	72	48	155	443	18	6
70	362	69	36	160	445	16	6
75	374	68	25	165	447	14	6
80	381	64	22	170	450	12	5
85	389	61	17	175	456	7	4
90	396	55	16	180	467	0	0

[표 4-3] WCS별 감지를 위한 최소 요구 방위각

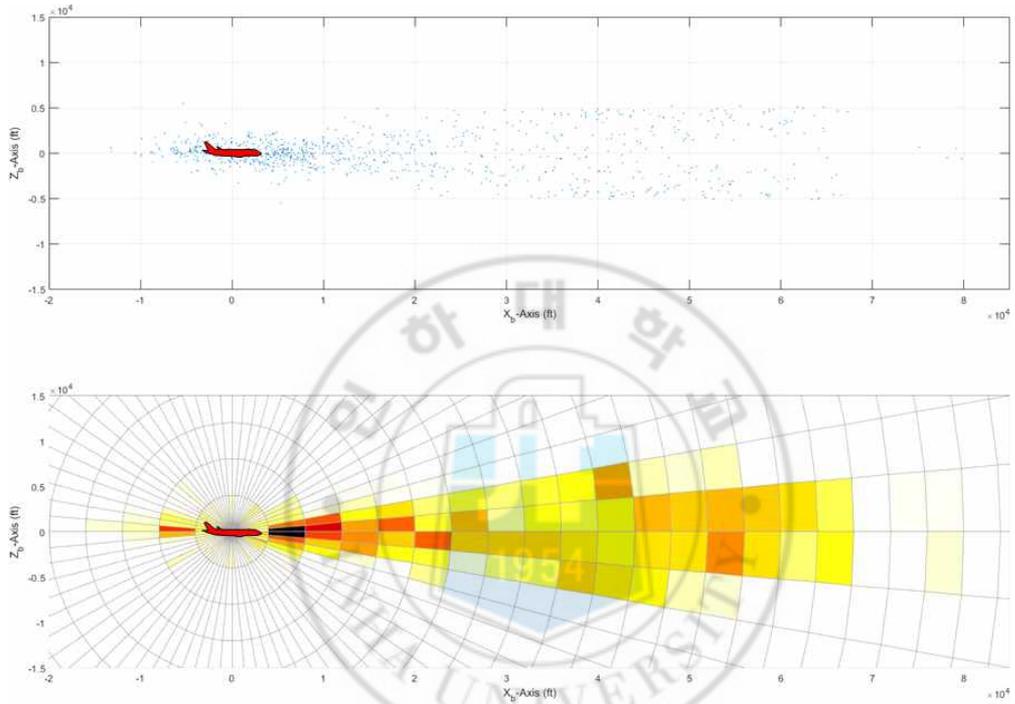
	WCS=1	WCS=2	WCS=3	WCS 4이상
요구 방위각 범위	±180°	±180°	±160°	±50°

### 4.2.3. 고각에 대한 상대항공기 분석

방위각과 마찬가지로 고각 또한 분석 간격을  $5^\circ$  로 설정하였으며, 거리간격은 4,000 ft로 설정하였다. 이를 아래 그림을 통해 분석결과를 확인 할 수 있다. [그림 4-14]는 방위각과 마찬가지로 고각에 대해 모든 항공기에 대해 위험이 발생했던 Track Point를 기준으로 표현한 것이다. 위쪽 그래프는 상대항공기의 위치를 점들로 나타낸 것이며, 아래쪽 그래프는 설정 영역에 따른 상대항공기의 분포 정도를 나타낸다.

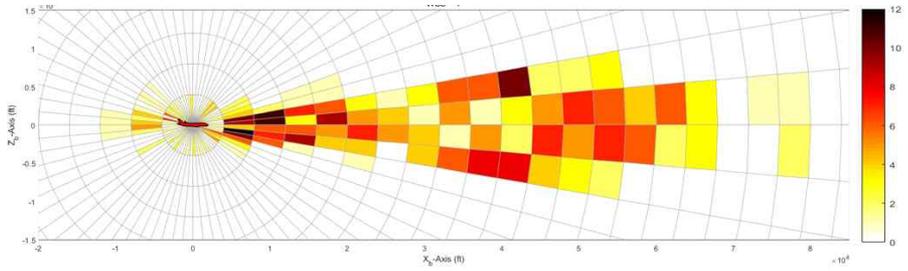


[그림 4-14] 고각에 따른 상대항공기 위치와 분포

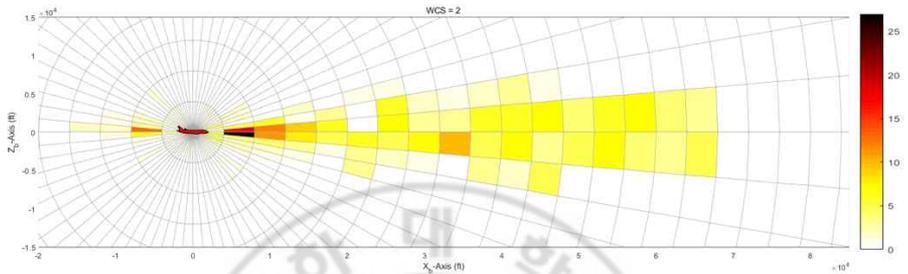


[그림 4-15] 방위각에 따른 상대항공기와 첫 위험 인식 위치와 분포

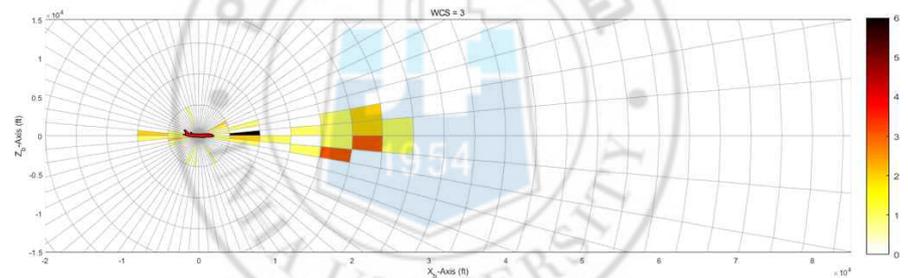
[그림 4-15]의 위쪽 그래프는 위험도가 나타난 상대항공기와 처음 위험을 인식 했을 때 상대위치를 고각에 대해서 표현한 것이다. 아래쪽 그래프는 이때 설정 영역 방위각에 따른 항공기의 수를 나타낸다.



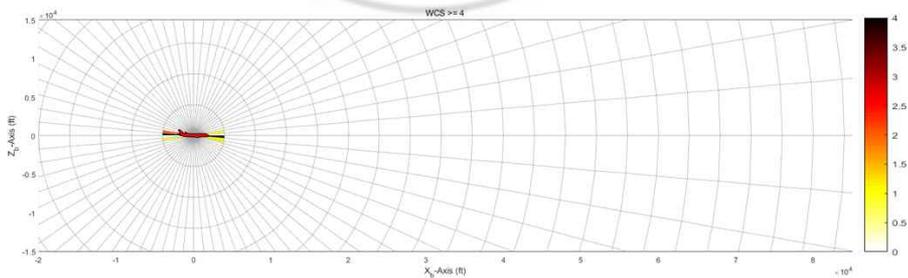
[그림 4-16] 고각에 대한 첫 위험 발생 시 WCS=1



[그림 4-17] 고각에 대한 첫 위험 발생 시 WCS=2

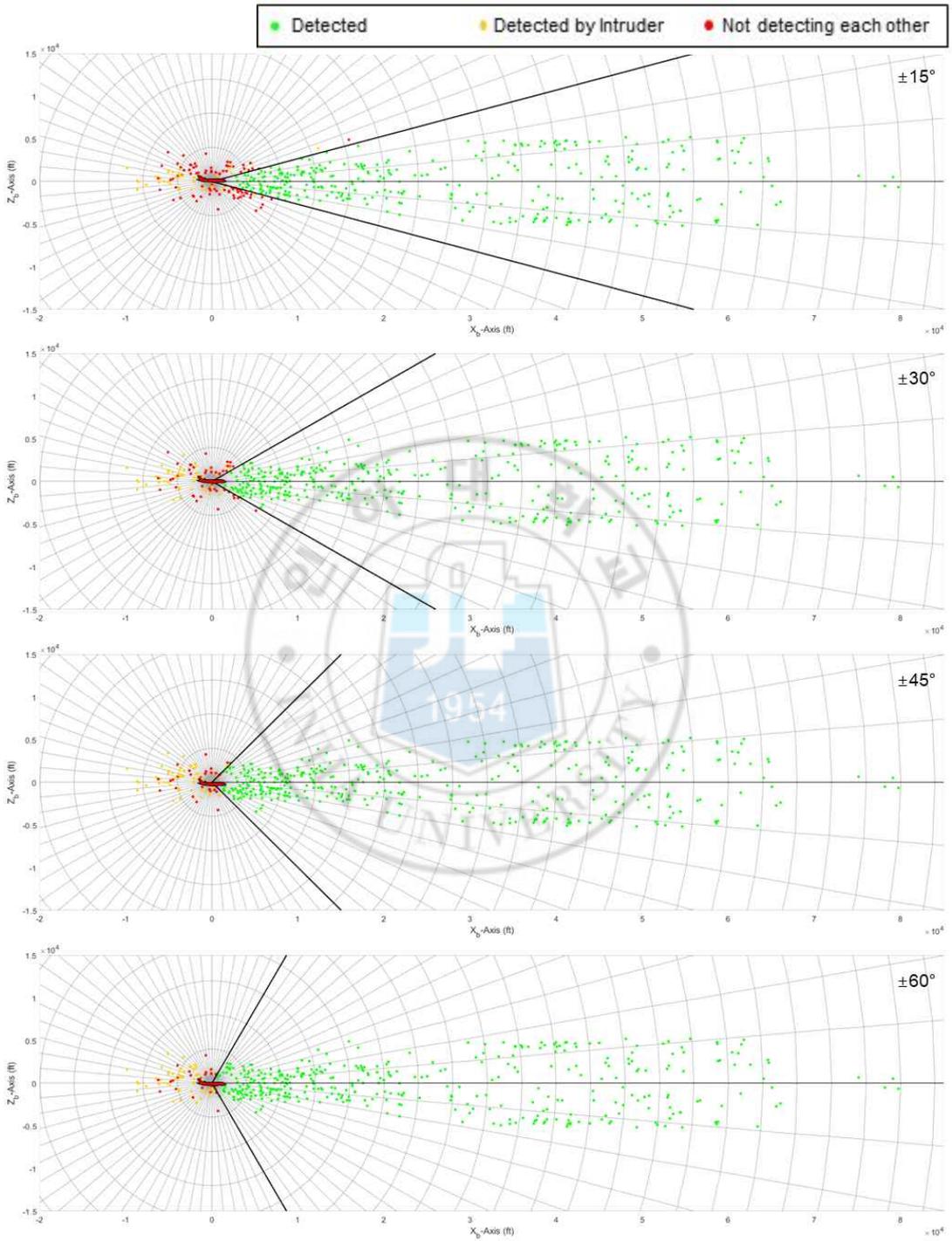


[그림 4-18] 고각에 대한 첫 위험 발생 시 WCS=3



[그림 4-19] 고각에 대한 첫 위험 발생 시 WCS ≥ 4

[그림 4-16~19]는 고각에 대해서 위험도가 나타난 상대항공기간 처음 위험을 인식했을 때 WCS값에 따라 표현한 그림이다.



[그림 4-20] 고각 감지범위에 따른 WCS=1인 상대항공기 감지 결과

[그림 4-20]은 고각의 감지범위(15, 30, 45, 60°) 조건에 따라 상대항공기로부터 처음 위협을 인식 했을 때 WCS값이 1인 경우, 이때의 감지여부를 보여준다. 방위각과 마찬가지로 WCS와 감지범위에 따라 수행한 결과는 [표 4-4]와 같다. 또한, [표 4-5]는 고각에 따른 WCS별 최소 요구 방위각을 보여준다.

[표 4-4] 고각에 대한 WCS=1에서의 범위에 따른 감지 횟수

범위 (±°)	감지	상대가 감지	서로 감지불가	범위 (±°)	감지	상대가 감지	서로 감지불가
5	163	17	287	95	399	53	15
10	305	43	119	100	402	51	14
15	334	42	91	105	403	50	14
20	352	50	65	110	404	49	14
25	362	50	55	115	404	49	14
30	368	52	47	120	405	49	13
35	374	55	38	125	405	49	13
40	379	55	33	130	409	46	12
45	381	56	30	135	410	45	12
50	385	57	25	140	412	43	12
55	387	57	23	145	418	38	11
60	388	56	23	150	420	36	11
65	390	57	20	155	426	34	7
70	391	57	19	160	433	28	6
75	392	56	19	165	434	27	6
80	393	57	17	170	447	14	6
85	393	57	17	175	454	10	3
90	396	55	16	180	467	0	0

[표 4-5] WCS별 감지를 위한 최소 요구 고각

	WCS=1	WCS=2	WCS=3	WCS 4이상
요구 방위각 범위	±180°	±180°	±180°	±15°

## 5. 결론

본 연구에서는 첫 번째 단계로 ADS-B데이터를 수신하고 기록하기 위한 환경을 구성하였으며, 두 번째 단계에서는 ADS-B 데이터 기반의 항적데이터를 추출하고 비실시간 궤적 생성 모델을 이용하여 현실적인 비행궤적을 생성하였다. 이는 일부 수신불량 구간과 미수신 구간을 보완하기 위한 방법으로, 경로점 생성 시 실제 항적의 형태를 훼손하지 않고 추출하도록 하는 RDP 알고리즘의 임계값 선정 방법을 고안하였다.

CIP를 이용한 위험도 분석에서는 공항에서 출발하는 항공기들이 항로에 진입하는 과정에서 위험도가 높게 나타났으며, 공항으로 도착하기 위해 항로를 빠져나와 하강하는 항공기들에게서 높은 위험도를 보임을 확인하였다. DWC를 이용한 분석에서는 8개의 대표적인 위험 상황이 발견되었다. 이는 모두 공항근처와 그 주변에서 출/도착 하는 항공기들의 조합으로 나타난 경우이다. CIP와 DWC의 두 가지 분석지표로부터 도출된 결과는 공통적으로 공항 주변을 비행하는 항공기들 사이에 높은 위험도가 존재함을 보여준다.

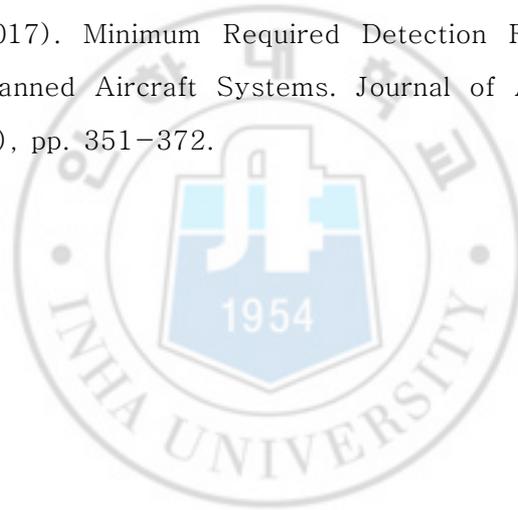
무인항공기의 DAA 감지기 성능 범위 도출은 위험도 분석에서 나타난 모든 결과를 적용하여 수행하였다. 성능범위 도출은 공간을 감지하기 위한 최소 범위 요소인 거리와 방위각, 고각으로 나누어 수행하였으며, 각 요소의 범위 설정을 통한 상대항공기 감지 여부에 따라 그 정도를 지표로 나타내었다. 그 결과 감지거리는 위험도가 나타나기 시작한 항공기들을 모두 감지하기 위해서는 80,000~84,000 ft 이상이 되어야하며, 적어도 LoWC단계의 위험상황을 피하기 위해서는 최소 8,000 ft 이상의 감지거리와 방위각  $\pm 50^\circ$  이상, 고각  $\pm 15^\circ$  의 감지능력이 있어야한다. 하지만 이는 LoWC 단계를 회피하기 위한 최소한의 감지범위로, 실제 무인항공기의 감지성능은 이 감지범위 이상의 상당한 성능이 요구되어야 할 것이다.

## 6. 참고문헌

- [1] 한국공항공사, <https://www.airport.co.kr/www/extra/stats/airportYearStats/layOut.do?cid=2015102917503242332&menuId=398>, (2017.10.26)
- [2] 한국항공진흥협회(2011), 항공운송 동향분석 국제공항협회 수요예측(2010~2029년), 한국항공진흥협회 기술정보실, 1-15.
- [3] 안오성, 오경륜, 홍승범, 윤원근, 주진. (2015). 무인기 기술 및 활용의 다양한 확장/발전 가능성 탐색/시장전망. 한국항공우주학회 학술발표회 논문집, 985-993.
- [4] 김종욱, 김도현. (2010). 국가공역체계에서 무인항공기 통합운영에 대한 동향. 항공우주산업기술동향, 8(2), 136-144.
- [5] USAF AFOSR, [http://www.barnardmicrosystems.com/UAV/features/sense\\_and\\_avoid.html](http://www.barnardmicrosystems.com/UAV/features/sense_and_avoid.html), (2017.10.23.)
- [6] 유창선. (2015). ADS-B 기반의 무인항공기 충돌회피 기술동향. 항공우주산업기술동향, 13(2), 63-71.
- [7] Planevision Systems - PlaneTrack Operating Manual V2. (수신기 매뉴얼)
- [8] 박배선, 이학태. (2016). BADA를 활용한 단순 항공기 궤적 생성 모델. 한국항공학회 종합학술대회 논문집, 20(1), 190-193.
- [9] 강지수, 오혜주, 최기영, 이학태. (2015). ADS-B 수신기가 결합된 항공관제시물레이터 활용방안 연구. 한국항공우주학회 학술발표회 논문집, 2132-2135.
- [10] 정세훈. (2016). 접근관제공역에서의 충돌 위험 정량화 및 충돌탐지기법 비교 연구. 공학석사학위논문, 인하대학교.
- [11] Andrew C. Cone, David P. Thippavong, Seung Man Lee, and Confesor Santiago. (2017). UAS Well Clear Recovery against Non-Cooperative Intruders using Vertical Maneuvers. 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, AIAA AVIATION Forum, (AIAA 2017-4382)
- [12] RTCA, Inc. (2017). Minimum Operational Performance Standards(MOPS) for Detect And Avoid(DAA) Systems. Radio Technical Commission for

Aeronautics (RTCA), Standard Document no. DO-365

- [13] Jisoo Kang, Seonyoung Kang, Hyeju Oh, Keeyoung Choi, Hak-Tae Lee, Hyuntae Jung, and Woo-Choon Moon. (2017). Human-in-the-Loop Simulation of Trajectory Based Operation Concept for Remotely Piloted Aircraft System Integration. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference, AIAA SciTech Forum, (AIAA 2017-0806)
- [14] Bilimoria, K. D., and Lee, H. Q. (2001). Properties of Air Trac Conflicts for Free and Structured Routing. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Montreal, pp. 259-266.
- [15] Jared K. Wikle, Timothy W. McLain, Randal W. Beard, and Laith R. Sahawneh. (2017). Minimum Required Detection Range for Detect and Avoid of Unmanned Aircraft Systems. Journal of Aerospace Information Systems, 14(7), pp. 351-372.



## 7. 부록

[표 A-1] WCS=2에서의 범위에 따른 감지 횟수 (방위각)

범위 ( $\pm^\circ$ )	감지	상대가 감지	서로 감지불가	범위 ( $\pm^\circ$ )	감지	상대가 감지	서로 감지불가
5	23	17	358	95	345	39	14
10	39	19	340	100	350	38	10
15	73	29	296	105	354	34	10
20	104	33	261	110	356	33	9
25	124	34	240	115	358	31	9
30	143	30	225	120	359	30	9
35	159	33	206	125	360	29	9
40	185	41	172	130	362	27	9
45	203	50	145	135	364	26	8
50	219	55	124	140	367	23	8
55	243	62	93	145	369	22	7
60	260	62	76	150	371	20	7
65	275	64	59	155	372	19	7
70	292	60	46	160	373	18	7
75	308	59	31	165	377	14	7
80	319	57	22	170	377	14	7
85	334	49	15	175	384	9	5
90	340	44	14	180	398	0	0

[표 A-2] WCS=3에서의 범위에 따른 감지 횟수 (방위각)

범위 ( $\pm^\circ$ )	감지	상대가 감지	서로 감지불가	범위 ( $\pm^\circ$ )	감지	상대가 감지	서로 감지불가
5	2	1	45	95	39	8	1
10	5	4	39	100	39	8	1
15	9	8	31	105	40	7	1
20	14	11	23	110	41	6	1
25	20	13	15	115	41	6	1
30	24	9	15	120	42	5	1
35	26	8	14	125	43	4	1
40	26	8	14	130	44	3	1
45	28	9	11	135	44	3	1
50	29	10	9	140	45	2	1
55	30	10	8	145	45	2	1
60	30	10	8	150	45	2	1
65	30	10	8	155	45	2	1
70	34	10	4	160	47	1	0
75	34	10	4	165	47	1	0
80	35	11	2	170	47	1	0
85	35	11	2	175	47	1	0
90	36	10	2	180	48	0	0

[표 A-3] WCS≥4에서의 범위에 따른 감지 횟수 (방위각)

범위 (±°)	감지	상대가 감지	서로 감지불가	범위 (±°)	감지	상대가 감지	서로 감지불가
5	1	1	12	95	7	7	0
10	3	3	8	100	7	7	0
15	4	4	6	105	7	7	0
20	4	4	6	110	7	7	0
25	5	5	4	115	7	7	0
30	5	5	4	120	7	7	0
35	5	5	4	125	7	7	0
40	5	5	4	130	7	7	0
45	6	6	2	135	7	7	0
50	7	7	0	140	8	6	0
55	7	7	0	145	9	5	0
60	7	7	0	150	10	4	0
65	7	7	0	155	10	4	0
70	7	7	0	160	11	3	0
75	7	7	0	165	11	3	0
80	7	7	0	170	13	1	0
85	7	7	0	175	14	0	0
90	7	7	0	180	14	0	0

[표 A-4] WCS=2에서의 범위에 따른 감지 횟수 (고각)

범위 ( $\pm^\circ$ )	감지	상대가 감지	서로 감지불가	범위 ( $\pm^\circ$ )	감지	상대가 감지	서로 감지불가
5	226	43	129	95	340	44	14
10	291	46	61	100	341	43	14
15	309	49	40	105	342	42	14
20	323	46	29	110	342	42	14
25	327	45	26	115	342	42	14
30	332	45	21	120	343	41	14
35	333	44	21	125	345	41	12
40	335	44	19	130	346	40	12
45	336	44	18	135	348	39	11
50	339	45	14	140	350	37	11
55	339	45	14	145	350	37	11
60	340	44	14	150	352	35	11
65	340	44	14	155	354	33	11
70	340	44	14	160	355	33	10
75	340	44	14	165	359	30	9
80	340	44	14	170	364	27	7
85	340	44	14	175	370	22	6
90	340	44	14	180	398	0	0

[표 A-5] WCS=3에서의 범위에 따른 감지 횟수 (고각)

범위 ( $\pm^\circ$ )	감지	상대가 감지	서로 감지불가	범위 ( $\pm^\circ$ )	감지	상대가 감지	서로 감지불가
5	20	8	20	95	36	10	2
10	30	9	9	100	37	9	2
15	31	8	9	105	37	9	2
20	32	9	7	110	37	9	2
25	33	10	5	115	39	8	1
30	35	11	2	120	39	8	1
35	35	11	2	125	39	8	1
40	35	11	2	130	39	8	1
45	35	11	2	135	39	8	1
50	35	11	2	140	39	8	1
55	35	11	2	145	39	8	1
60	36	10	2	150	39	8	1
65	36	10	2	155	39	8	1
70	36	10	2	160	39	8	1
75	36	10	2	165	40	7	1
80	36	10	2	170	40	7	1
85	36	10	2	175	43	4	1
90	36	10	2	180	48	0	0

[표 A-6] WCS ≥ 4에서의 범위에 따른 감지 횟수 (고각)

범위 (±°)	감지	상대가 감지	서로 감지불가	범위 (±°)	감지	상대가 감지	서로 감지불가
5	4	4	6	95	7	7	0
10	6	6	2	100	7	7	0
15	7	7	0	105	7	7	0
20	7	7	0	110	7	7	0
25	7	7	0	115	7	7	0
30	7	7	0	120	7	7	0
35	7	7	0	125	7	7	0
40	7	7	0	130	7	7	0
45	7	7	0	135	7	7	0
50	7	7	0	140	7	7	0
55	7	7	0	145	7	7	0
60	7	7	0	150	7	7	0
65	7	7	0	155	7	7	0
70	7	7	0	160	7	7	0
75	7	7	0	165	7	7	0
80	7	7	0	170	7	7	0
85	7	7	0	175	10	4	0
90	7	7	0	180	14	0	0