



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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.

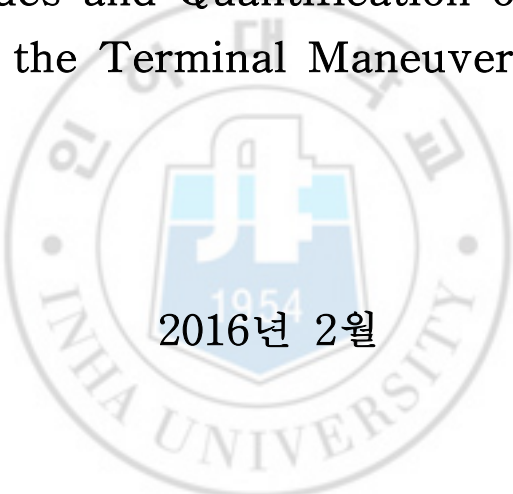
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위 논문

접근관제구역에서의 충돌 위험 정량화  
및 충돌탐지기법 비교 연구

Comparative Study of Conflict Detection  
Techniques and Quantification of Conflict  
Risk in the Terminal Maneuvering Area

The logo of Inha University is a circular seal. It features a central shield with a stylized 'I' and 'H' and the year '1954' below it. The shield is set against a blue background. The outer ring of the seal contains the text 'INHA UNIVERSITY' in English and Korean characters. The date '2016년 2월' is printed in the center of the seal.

2016년 2월

인하대학교 대학원

항공우주공학과

정 세 훈

공학석사학위 논문

접근관제구역에서의 충돌 위험 정량화  
및 충돌탐지기법 비교 연구

Comparative Study of Conflict Detection  
Techniques and Quantification of Conflict  
Risk in the Terminal Maneuvering Area

2016년 2월

지도교수 최 기 영

이 논문을 공학석사학위 논문으로 제출함

인하대학교 대학원

항공우주공학과

정 세 훈

이 논문을 정세훈의 석사학위 논문으로 인정함

2016년 2월



주심 이 학 태



부심 최 기 영



위원 유 창 경



## 초 록

지속적인 항공 교통 수요량의 증가와 함께 기존 공역 내에서의 무인항공기 통합운영은 공역 내 항공기 밀도 증가 및 다른 요인에 의한 항공기간 충돌위험을 증가시킨다. 이러한 위험도는 항공기간의 상대적 거리가 줄어드는 접근관제 공역에서 더욱 심각한 문제가 될 수 있고 이에 대한 상세한 분석 연구가 필요하다.

그러나 현재까지의 충돌 탐지와 관련된 연구는 충돌 회피 기동 알고리즘 구성을 위한 일부 과정으로 활용되거나, 충돌위험도 반복 시뮬레이션을 통해 수행되었으며, 무인항공기 또는 공역의 특성이 고려되지 않은 일반적인 분리기준을 적용하였다. 이는 접근관제공역 및 무인항공기의 특성과 실시간성을 고려하지 않기 때문에, 무인항공기의 충돌 위험 탐지에 따른 회피 기동 시점 결정에 제약 조건이 된다.

본 논문에서는 항공기의 충돌 위험을 실시간으로 측정할 수 있는 대표적 3가지 충돌 탐지기법 알고리즘인 Well Clear, Conflict Intrusion Parameter, Protected Airspace Zone에 대한 특징 분석을 수행하였다. 또한, 접근관제공역에서의 항공기간 충돌 위험에 대한 정량화 과정을 제시하고, 실제 항공기 ADS-B 데이터와 임의의 무인항공기로 구성된 시나리오에 대한 시뮬레이션을 통해 정량화 결과에 대한 결과와 유효성의 분석을 수행하였다.

핵심어 : 무인항공기, 접근관제공역, 충돌 탐지, Well Clear, Conflict Intrusion Parameter, Protected Airspace Zone, 충돌 회피, 항공기 분리, 충돌 위험도, 공역 통합

# ABSTRACT

Integration of remotely piloted aircraft(RPA) with ever increasing air traffic demand results in higher risk of aircraft conflict, with unseen factors in addition to the airspace density problem. This problem is particularly severe in the terminal maneuvering area (TMA) where the distances between aircraft decrease naturally. Detailed analysis is necessary to resolve the problem and maintain high level of safety. However, most researches on collision detection have limitations in the sense that either they were dealt as a part of collision avoidance algorithm, the collision possibility was estimated with iterative simulations, distinguished airspace was not considered, or the characteristics of RPA was not considered. Since the characteristics of TMA, RPA, and time-delay are not considered, the usefulness of the estimation evasion time was limited.

In this study, the three most well known conflict analysis algorithms, Well Clear, Conflict Intrusion Parameter, and Protected Airspace Zone are comparatively analyzed. This thesis suggests quantification algorithms for the measure of the conflict possibilities. The algorithm is evaluated and validated with simulation that consists of real ADS-B trajectory data and an artificial RPA flight.

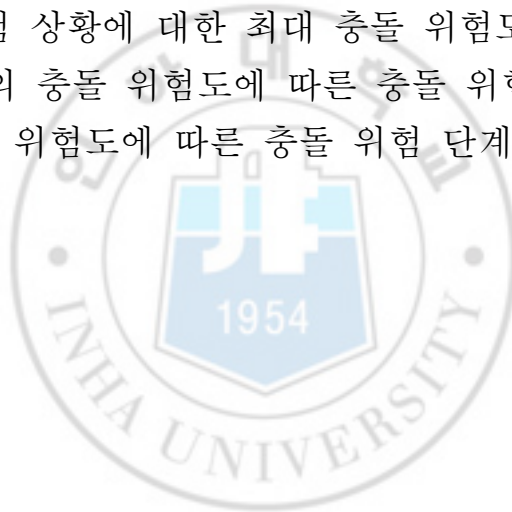
Key-words : Remotely Pilot Aircraft System, Air Traffic Management, Terminal Maneuvering Area, Conflict Detection, Well Clear, Conflict Intrusion Parameter, Protected Airspace Zone, Conflict Risk, Aircraft Separation, Airspace Integration, Conflict Resolution

# 목 차

초 록 .....	i
ABSTRACT .....	ii
목 차 .....	iii
표 목차 .....	v
그림 목차 .....	vi
1. 서론 .....	1
1.1 접근관제구역 .....	1
1.2 연구개요 .....	3
1.3 기술 현황 분석 .....	6
1.4 연구 진행 방향 소개 .....	8
2. 충돌 위험 탐지기법 .....	9
2.1 Conflict Intruder Parameter(CIP) .....	9
2.2 Well Clear .....	10
2.3 Protected Airspace Zone(PAZ) .....	12
3. 정량적 충돌 위험도 산출 .....	15
3.1 Well Clear 기반의 충돌 위험도 .....	16
3.2 PAZ 기반의 충돌 위험도 .....	18
4. 시나리오 구성 .....	20
4.1 연산시간 측정을 위한 시나리오 .....	20
4.2 충돌 위험도 정량화 검증을 위한 시나리오 .....	21
4.3 탐지기법 비교 및 정량화 결과 분석을 위한 시나리오 .....	22
4.4 충돌 위험도와 충돌 확률 간의 관계 분석을 위한 시나리오 .....	28
5. 탐지기법 및 시뮬레이션 결과 비교 .....	30
5.1 충돌 위험 탐지기법 비교 .....	30
5.2 충돌 위험도 정량화 수행 결과 .....	33
5.3 충돌 위험도 및 확률 분석을 통한 위험 단계 구분 .....	42
6. 결론 .....	47
7. 참고문헌 .....	49

## 표 목차

표 1. LOWC 조건	11
표 2. Well Clear 예측 정보 기준	11
표 3. PAZ 진출입 시간에 따른 방향별 Loss Separation 기준	13
표 4. PAZ의 Separation Violation 예측 기준	14
표 5. 수평방향 PAZ 기반 충돌 위험도 정의	18
표 6. 수직방향 PAZ 기반 충돌 위험도 정의	19
표 7. 유인항공기 정보(KAL770)	26
표 8. 유인항공기 정보(CCA125)	26
표 9. 유인항공기 정보(KAL982)	27
표 10. 무인항공기 정보(HL2213)	27
표 11. 충돌 탐지기법 비교 분석 결과	32
표 12. 각 충돌 위험 상황에 대한 최대 충돌 위험도(CIP)	35
표 13. Well Clear의 충돌 위험도에 따른 충돌 위험 단계 구분	44
표 14. PAZ의 충돌 위험도에 따른 충돌 위험 단계 구분	44





## 그림 목차

그림 1. 국내 공역 구분 현황.....	1
그림 2. 접근관제공역 개략도.....	2
그림 3. Miles in Trail.....	2
그림 4. 국내 연간 항공기 운항 편수(전국, 2010-2014).....	5
그림 5. Phase of Flight(ICAO, 2014).....	5
그림 6. 인천공항 활주로 구조.....	6
그림 7. 연구 진행방향.....	8
그림 8. Protected Airspace Zone.....	12
그림 9. 연산시간 측정을 위한 시나리오.....	20
그림 10. 충돌 탐지 기법 검증용 시나리오.....	21
그림 11. Douglass & Peucker Algorithm.....	22
그림 12. 임계치( $\epsilon$ )에 따른 DPA 적용 결과.....	23
그림 13. 접근관제공역 내 도착항공기 궤적(2015. 6. 20, 16:00-17:00).....	24
그림 14. 충돌 탐지 기법 비교 및 정량화 시나리오.....	25
그림 15. 충돌 위험도 유효성 검증 시나리오.....	29
그림 16. 무인항공기(HL2213)의 고도 운용 범위.....	29
그림 17. 항공기 운용 대수에 따른 기법 별 1회 연산시간.....	31
그림 18. 검증용 시나리오에 관한 Conflict Risk, Alert Level(Well Clear).....	34
그림 19. 검증용 시나리오에 관한 Conflict Risk, Alert Level(PAZ).....	34
그림 20. 항공기간 상대거리.....	35
그림 21. Conflict Route(CIP).....	36
그림 22. Conflict Risk(CIP).....	37
그림 23. Conflict Route(Well Clear).....	38
그림 24. LOWC, Conflict Risk(Well Clear).....	39
그림 25. Conflict Route(PAZ).....	40
그림 26. Conflict Risk, Alert Level(PAZ).....	41
그림 27. 충돌 위험도 - 충돌 확률 관계(1).....	43
그림 28. 충돌 위험도 - 충돌 확률 관계(2).....	43
그림 29. 회피 기동 시점 별 충돌 위험도 산출 결과.....	45

# 1. 서론

## 1.1 접근관제구역

국내의 접근관제구역(Terminal Maneuvering Area, TMA)은 그림 1과 같이 구역 구분 등급 중 Class B, C, D로 구성된 관제구의 일부에 속하는 구역으로, 항공기의 안전한 이륙 및 착륙 수행을 위해 필요한 구역이다. 국내 공항 및 비행장과 공항 주변 고도 20,000ft 이하의 영역이 해당되는 접근관제구역에서는 그림 2와 같이 항로의 분리 및 결합이 반복되는 양상을 보인다. 이륙 시에는 활주로로부터 항로가 분리되지만, 착륙 시에는 활주로에 접근할수록 항로가 결합되기 때문에 그림 3과 같이 활주로에 가까울수록 항공기의 밀도가 높아지는 특징을 가진다.

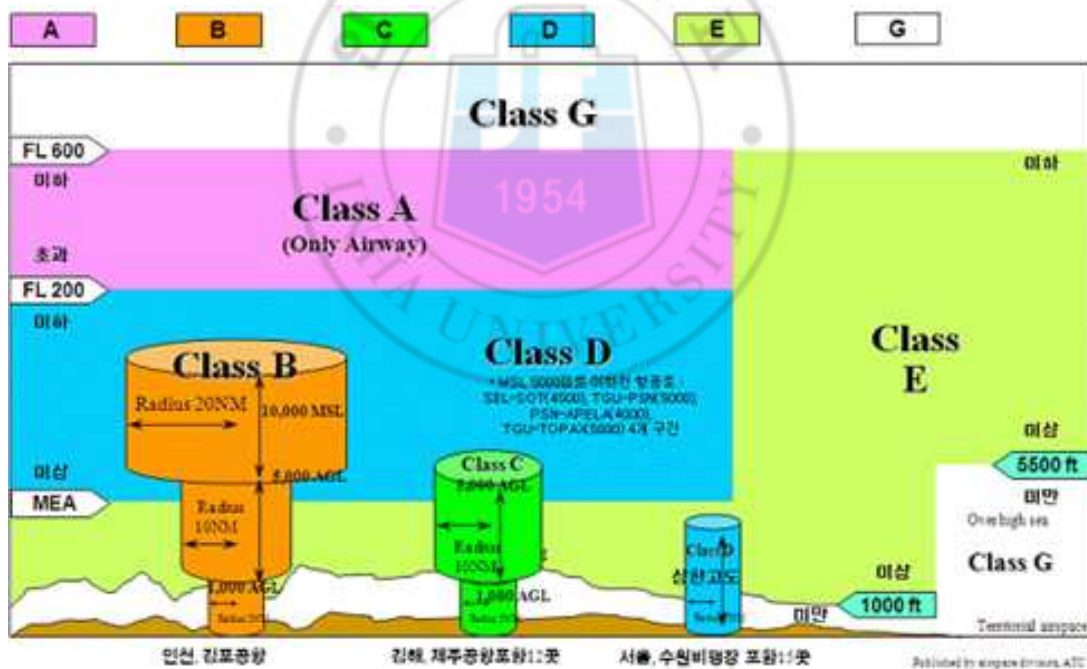


그림 1. 국내 구역 구분 현황[1]

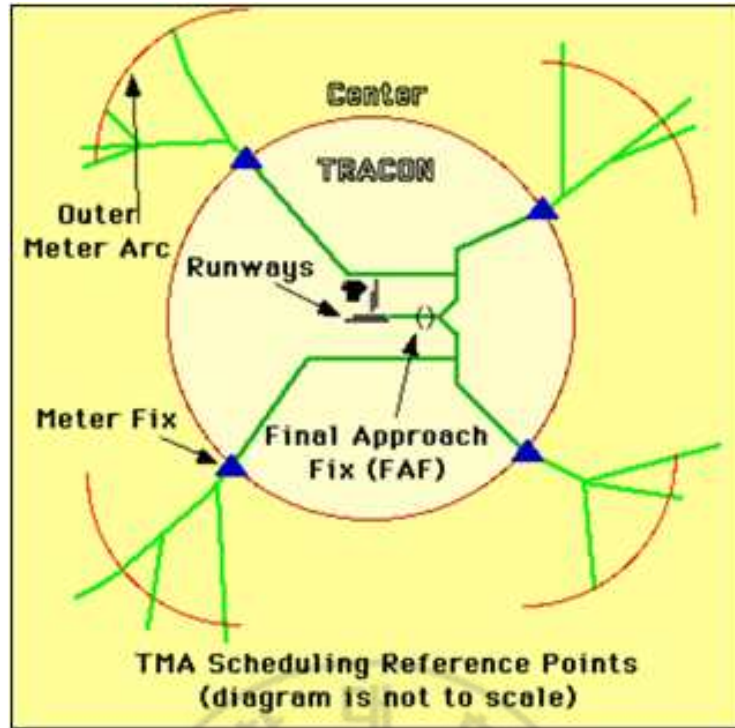


그림 2. 접근관제구역 개략도[2]

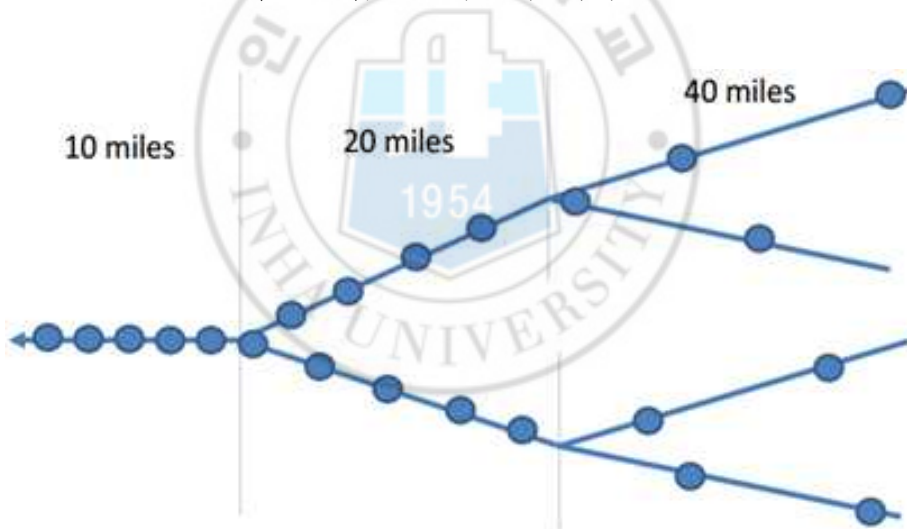


그림 3. Miles in Trail[2]

## 1.2 연구개요

무인항공기 기술의 발전과 수요 증가에 따라 전 세계적으로 기존의 유인항공기 공역 내 무인항공기의 통합 운용에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 따라, 항공법, 인증 및 운항기술기준 등의 제도적 기반과 공역 통합에 관한 중장기적 로드맵 수립 절차가 진행되고 있다. International Civil Aviation Organization (ICAO)의 경우 2007년부터 18개국 11개 기관이 참여한 Unmanned Aircraft System Study Group(UASSG)를 구성하고, 2023년 ~ 2028년에 유인항공기와 무인항공기의 공역 통합을 위한 규정을 제정 중에 있다. 유럽의 경우 ICAO의 공역 통합 시점에 맞춘 무인항공기 통합운용에 관한 로드맵을 발표하였다. 또한, 미국의 Federal Aviation Administration(FAA)는 무인항공기의 공역 통합을 목표로 하는 향후 10년간의 로드맵과 National Aeronautics and Space Administration(NASA), FAA, Department of Transport(DOT) 등으로 구성된 Joint Planning and Development Office(JPDO)를 구성하여 항공관제시물레이터의 개발 등과 함께 2025년을 목표로 한 프로젝트를 진행 중에 있다.[3]

국내의 경우에도 유인항공기에 의한 항공기 교통량은 그림 4와 같이 매년 6~7%의 성장률을 기록하며 지속적인 증가 추세를 보이고 있다. 또한, 무인항공기 운용에 대한 세계적 추세에 따라 항공법 및 운항기술기준에 등의 관련법 검토와 항공관제시물레이터를 통한 위험상황에 대한 시물레이션을 통해 유인항공기와 무인항공기의 통합 공역에 대한 논의 및 연구가 수행되고 있다.

그러나 무인항공기의 운용은 조종사가 지상에 위치해 있는 관계로 시계비행이 불가능한 특징이 있어 시계비행과 계기비행 모두를 수행할 수 있는 유인항공기와 비교할 때, 항공기 운용 측면에서 차이가 발생한다. 또한, 무인항공기의 운용은 공역 내 항공기 교통량 증가로 연결되어, 비행 공역을 통제하는 관제사 중 다수의 항공기가 밀집된 접근관제공역을 담당하는 관제사의 업무 부담과 혼란을 가중시킬 우려가 있다.[5] 이러한 관제사 임무 수행능력 감소는 항공기에 대한 관제능력 저하를 초래할 수 있고, 무인항공기 조종사의 운용 실수 및 무인

항공기 - 조종사 간 통신 두절에 따른 예상치 못한 기동으로 인해 공중 충돌 (Mid-Air Collision) 또는 니어 미스(Near Miss) 등의 항공기 사고로 이어질 수 있다. ICAO에서 발간한 2014년 Safety Report에 따르면, 공역 내 유인항공기만 운용되고 있는 현재에도 그림 5와 같이 전체 사고의 18%가 항공기의 접근 과정에서 발생하는 것으로 조사되었다. 이를 증명하듯, 미국 캘리포니아 세리토스(1986), 핀란드의 라펜란타(1999), 프랑스 디종(2004), 라트비아 리가(2008), 영국 런던(2009, 2014)에서 발생한 항공기 사고 및 준사고 사례와 같이 세계 곳곳에서 접근관제공역 내에서의 사고 또는 준사고가 지속적으로 발생하고 있다. 이러한 상황에서의 통합 공역 구성과 무인항공기의 운용은 접근관제공역에서의 항공기간 사고 확률을 증가시키고, 항공 안전을 위협하는 요인이 될 수 있다.

공중에서의 항공기 사고는 심각한 인적 및 물적 손실을 유발하게 된다. 특히 접근관제공역에서는 항공기 간 분리 기준이 명확하지 않고, 사람에 의해 항공기의 통제가 이루어지기 때문에 무인항공기 운용에 따른 항공기 간 충돌 위험상황의 발생 가능성이 증가할 우려가 있다. 따라서 통합 공역에서의 무인항공기 운용은 조종사 및 관제사의 실수나 통신 두절로 인한 다양한 위험상황에서도 항공기간 분리 및 자동 충돌 회피 등을 통해 안전한 비행을 보장 받을 수 있어야 한다. 현재 공식적으로 사용되고 있는 미국 FAA의 분리기준은 Class A공역 상에서 항로를 따라 비행하는 항공기에 적용되고 있으나, 접근관제공역의 경우 조종사의 시계비행 및 관제사의 지시에 따라 착륙과정이 진행되므로 규정된 분리기준이 존재하지 않는다. 그러나 무인항공기의 경우 시계비행이 불가능하므로, 항공기의 이착륙 과정이 진행되는 접근관제공역에서의 안전한 운항을 위한 분리기준 또는 시스템이 요구된다. 이러한 관점에서 볼 때, 무인항공기 주변의 항공기 정보를 활용하여 충돌 위험상황에서의 적절한 회피 기동과 기동 시점을 결정하는 알고리즘을 고려해 볼 수 있으나, 이러한 알고리즘은 충돌 위험의 정도와 충돌 위험의 탐지 시간에 따라 영향을 받는다. 따라서 알고리즘 개발에 앞서, 접근관제공역에 위치한 항공기의 현재 상태를 바탕으로 실시간 충돌 위험을 탐지할 수 있는 기법에 대한 조사 및 분석과 적시에 회피 명령을 수행하기 위한 정량적 충돌 위험에 대한 정의 및 검증이 선행적으로 요구된다.

연간 항공기 운항 편수(전국, 2010 - 2014)

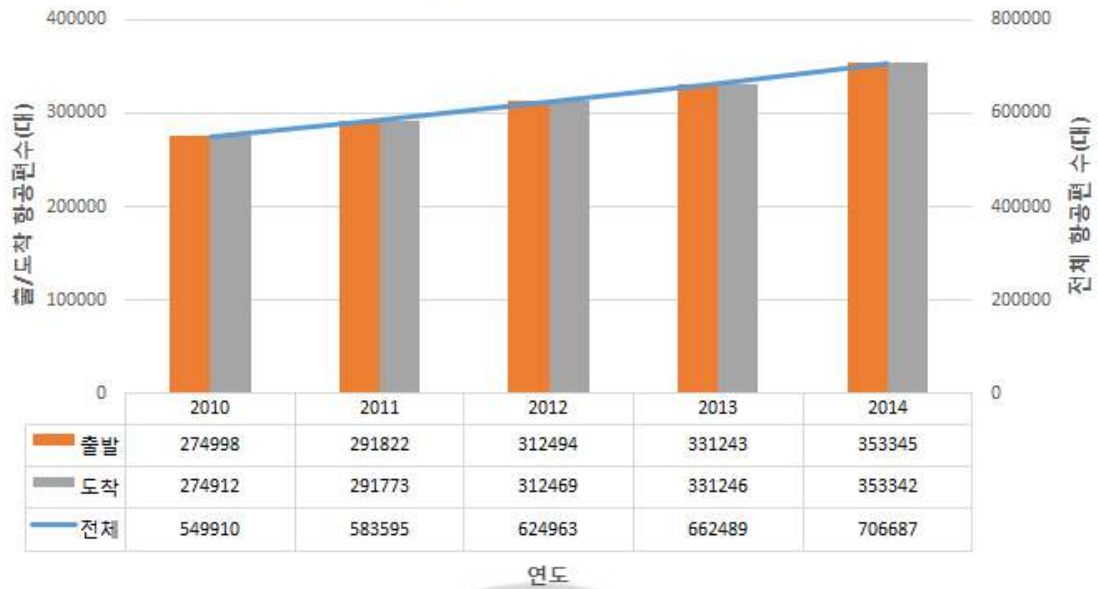


그림 4. 국내 연간 항공기 운항 편수(전국, 2010-2014)[4]



그림 5. Phase of Flight(ICAO, 2014)[6]

### 1.3 기술 현황 분석

항공기의 충돌 위험과 관련된 연구는 대부분 충돌에 대한 회피기동과 함께 수행되었다. 공역에 대한 구분 없이 수행된 충돌 회피 연구의 경우, 항공기의 충돌 위험에 대한 정의로 FAA의 항공기 분리 규정(수평 5nm, 수직 1,000ft)을 활용해왔다.[7] 그러나 FAA의 항공기 분리 규정은 Class A공역의 항로상에서 적용 가능한 규정으로, 이 규정을 공항 주변의 접근관제공역에 적용하는 것은 공항 운용의 효율성 측면 및 공역 특성을 고려할 때 적절하지 않다. 예를 들어, 인천공항 활주로로 경우 그림 6과 같이 활주로 간 거리가 FAA의 항공기 분리 규정(수평 5nm, 수직 1,000ft) 이내의 값을 가지기 때문에 FAA의 규정을 적용할 경우 항상 충돌 위험이 존재하는 모순이 발생한다.

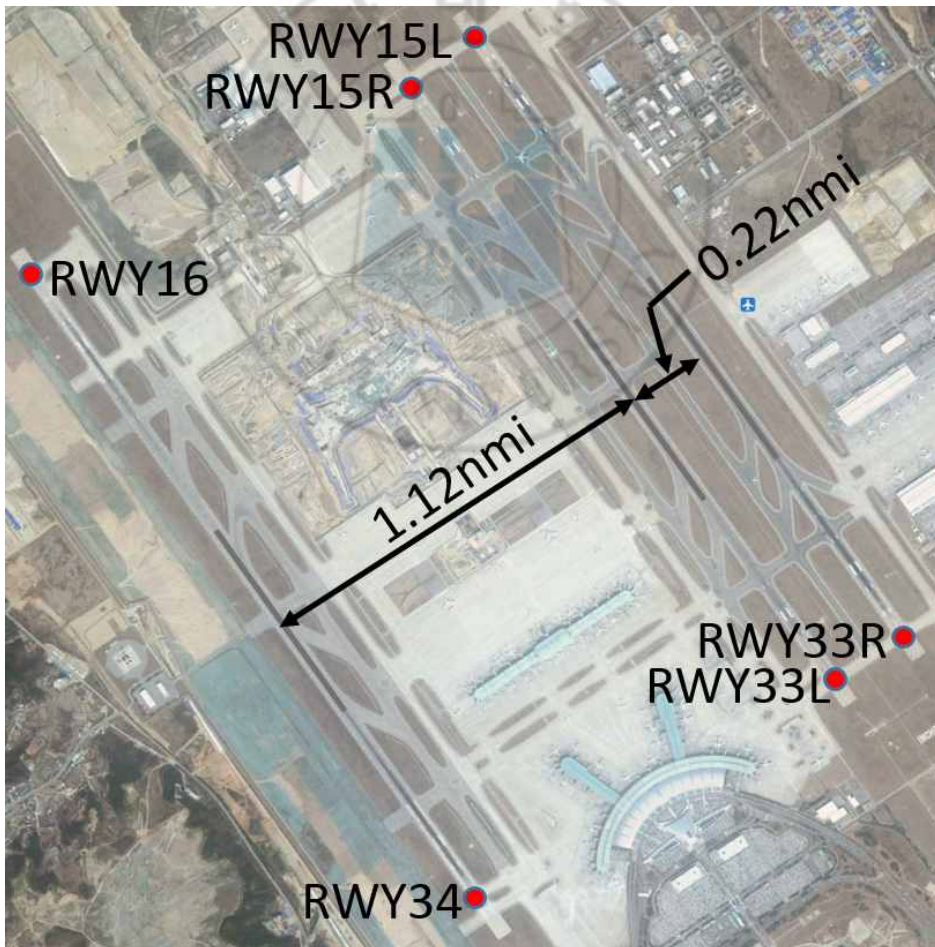


그림 6. 인천공항 활주로 구조

항공기의 충돌 위험을 판단하기 위해서는 항공기의 현재 위치 및 속도 정보로부터 현재의 상태를 판단하고, 미래의 상태를 예측하는 것이 요구된다. 충돌 탐지에 대한 접근 방법은 항공기의 현재 상태와 동역학 모델, 기상상태 등을 고려한 명목적 기법, 최악의 상황을 고려하는 기법, 불확실성을 고려한 확률적 기법으로 구분할 수 있다.[8]

충돌 위험의 탐지에 대한 명목적 기법으로는, 대상 항공기의 진행방향에 대한 위치 예측으로 항공기의 최소거리를 계산하는 Closest Point of Approach(CPA)를 이용한 방식과[9], 항공기의 상대 운동을 통해 충돌 위험을 탐지하는 방식이 있다[10]. 명목적 기법은 미래의 경로가 비교적 확실하기 때문에 충돌 회피 알고리즘을 구성하는데 용이한 장점이 있으나 항공기 운동의 불확실성에 대한 안전성 조건에의 여유와 오차에 대한 보상이 요구된다. 또한, 최악의 상황을 고려하는 기법으로는, 항공기의 안전 확보를 위한 최소 분리 거리를 결정하기 위해 정해진 시간 내에서의 최악의 오차거리를 산출하는 연구와 [11], 최악의 경우에도 항공기 안정성을 보장하고 불확실성에 대해 높은 강건성을 가지는 하이브리드 시스템의 설계 연구가 수행되었다[12]. 이러한 연구의 경우, 항공기 사이에 충돌 회피를 위한 사전 협의 없이 거리를 유지함으로써 충돌을 방지할 수 있다는 장점이 있으나 불필요한 충돌 감지를 유발할 수 있다는 단점이 있다. 마지막으로 확률적 기법으로는 항공기의 위치, 속도에 대한 측정 오차를 정규 확률분포로 가정하여 충돌 확률을 계산하는 방식[13-14], 몬테카를로 시뮬레이션을 통해 충돌 확률을 계산 및 검증하는 방식이 수행되었다 [15-16]. 이러한 확률적 모형을 통한 충돌 위험의 탐지 및 예측은 다양한 항공기 기동에 대한 예측으로 결과에 대한 신뢰성을 향상시킬 수 있으나, 연산시간의 측면에서 실시간성이 결여되는 단점이 있다.



## 1.4 연구 진행방향 소개

충돌 위험 탐지 기법의 성능 및 특징 비교와 충돌 위험도의 정량화를 위한 연구의 진행 방향은 그림 7과 같다. 항공기의 충돌 위험을 실시간으로 판단하는 Conflict Intrusion Parameter(CIP), Well Clear, Protected Airspace Zone(PAZ) 3개의 충돌 탐지기법에 대한 알고리즘 모사와 충돌 위험 정량화를 위한 과정을 제시하였다. 또한 ADS-B 데이터를 바탕으로 한 실제 유인항공기와 임의의 무인항공기를 통해 충돌 위험상황을 유도하는 시나리오를 구성하고, 항공관제시뮬레이터를 통해 구성된 시나리오에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 마지막으로 미리 설정한 탐지기법 비교 지표에 대한 각 탐지기법의 특징 및 성능 분석과 반복 시뮬레이션을 통한 정량화 결과의 검증을 수행하였다.



그림 7. 연구 진행방향

## 2. 충돌 위험 탐지기법

### 2.1 Conflict Intrusion Parameter[17]

Conflict Intrusion Parameter(CIP)는 항공기간 상대적 수평 및 수직거리를 이용하여 충돌 위험도를 계산한 것으로 식 (1)과 같다. 식 (1)에서  $t_{soc}$ ,  $t_{eoc}$ 는 충돌 위험의 발생 및 종료 시간,  $\Delta s$ ,  $\Delta h$ 는 항공기 간 상대 수평, 수직거리,  $S_{std}$ ,  $H_{std}$ 는 FAA의 항공기 분리기준에 따른 수평 및 수직 분리기준이다.

$$CIP(\Delta s, \Delta h) = 1 - 0.5 \times \left\{ \min_{t_{soc} \leq t \leq t_{eoc}} \left( \frac{\Delta s}{S_{std}} + \frac{\Delta h}{H_{std}} \right) \right\} \quad (1)$$

식 (1)로부터 나오는 충돌 위험도는 0과 1사이의 실수 값을 가진다. 그러나 식 (1)의 경우 충돌 위험이 발생하고 있는 상황에서 산출된 충돌 위험도 중 최소값을 산출한 것으로, 항공기 충돌 위험도의 실시간 산출에 어려움이 있다. 따라서 항공기가 운항하는 전 구간에서 실시간으로 충돌 위험도를 산출하기 위해 기존의 식 (1)을 식 (2)의 형태로 변형하였다.

$$\begin{cases} CIP(\Delta s, \Delta h) = 0 & (CIP < 0) \\ CIP(\Delta s, \Delta h) = 1 - 0.5 \times \left( \frac{\Delta s}{S_{std}} + \frac{\Delta h}{H_{std}} \right) & (0 \leq CIP \leq 1, t_{soc} \leq t \leq t_{eoc}) \\ CIP(\Delta s, \Delta h) = 1 & (CIP > 1) \end{cases} \quad (2)$$

식 (2)를 통해 항공기의 운항 구간에 대한 연속적인 CIP값을 산출할 수 있게 된다. 두 항공기간 거리가 수평 및 수직 방향에 대한 분리 기준보다 클 경우, CIP는 0이 되며 항공기간 충돌 위험이 없음을 의미한다. 반대로, 두 항공기간 수평 및 수직 방향의 거리가 각각 0인 경우 CIP는 1이 되며 두 항공기가 동일한 위치에 있는 충돌 상황임을 의미한다.

## 2.2 Well Clear[18]

Well Clear(WC)는 식 (3) - (5)를 이용하여 항공기간 상대 거리와 속도를 바탕으로 3개의 기준 충족 여부에 따라 항공기의 충돌 위험상태를 판정한다. 식 (3)은 Modified tau로 항공기의 고도가 동일할 때 현재의 상태에서부터 두 항공기의 거리가 Distance Modification of Modified Tau(DMOD)에 정의된 거리 (4,000ft) 보다 작은 값을 가질 때의 시간을 의미한다. 식 (3)에서  $\vec{r}$ ,  $\vec{v}$ 는 각각 항공기 간 상대 거리와 상대 속도를 의미한다.

$$\tau_{\text{mod}}(\vec{r}, \vec{v}) = \begin{cases} \frac{DMOD^2 - r^2}{\vec{r} \cdot \vec{v}} & (r > DMOD) \\ 0 & (r \leq DMOD) \end{cases} \quad (3)$$

식 (4)는 항공기의 현재 상태를 바탕으로 현재 상태를 유지하며 운동한다고 가정할 때, CPA에 도달하는 시간  $t_{cpa}$ 을 이용한 항공기의 최소거리이다. 식 (4)에서  $d_x, d_y$ 와  $v_{rx}, v_{ry}$ 는 각각 ECEF 좌표계에서의 항공기간  $x$  및  $y$ 방향의 상대 거리 및 상대 속도이다.

$$HMD(\vec{r}, \vec{v}, t_{cpa}) = \begin{cases} \sqrt{(d_x + v_{rx}t_{cpa})^2 + (d_y + v_{ry}t_{cpa})^2} & (t_{cpa} \geq 0) \\ -\infty & (t_{cpa} < 0) \end{cases} \quad (4)$$

$$\left( \text{where, } \vec{r} = \sqrt{d_x^2 + d_y^2}, \vec{v} = \sqrt{v_{rx}^2 + v_{ry}^2}, t_{cpa} = -\frac{d_x v_{rx} + d_y v_{ry}}{v_{rx}^2 + v_{ry}^2} \right)$$

마지막으로, 식 (5)는 항공기간 상대 수직거리를 의미한다.

$$dh = h_2 - h_1 \quad (5)$$

Well Clear를 통한 충돌 위험도 산출 결과 표 1의 조건을 만족할 경우 충돌 위험이 존재함을 의미하며, Loss of Well Clear(LOWC)라 정의한다.

또한, Well Clear의 경우 항공기의 현재 상태를 이용하여 미래 시점에서의 충돌 위험을 예측할 수 있다. 충돌 위험을 예측하는 과정은 식(3) - 식(5)와 동일하다. 그러나 현재 상태를 기준으로 외사법(Extrapolation)을 수행한 미래 시점에서의 항공기 정보를 이용하여, 위험상태를 LOWC가 아닌 4개의 경보 단계로 구분한다. 표 3은 Well Clear를 이용한 충돌 위험 예측결과에 대한 경보단계별 기준이다.

표 1. LOWC 조건

	LOWC 조건	기준값
$\tau_{mod}$	$0 \leq \tau_{mod} \leq \tau_{mod}^*$	$\tau_{mod}^* = 35sec$
$HMD$	$0 \leq HMD \leq HMD^*$	$HMD^* = 4,000ft$
$dh$	$dh \leq  dh^* $	$dh^* = 450ft$

표 2. Well Clear 예측 경보 기준

경보 단계		Advisory	Preventative Caution	Corrective Caution	Warning
Must Alert Threshold	Within Time	60sec	55sec	55sec	40sec
	$\tau_{mod}^*$	35sec	35sec	35sec	35sec
	$DMOD, HMD^*$	2.0nm	0.66nm	0.66nm	0.66nm
	$dh^*$	1,200ft	700ft	450ft	450ft
Must Not Alert Threshold	More than Time	85sec	75sec	75sec	55sec
	$HMD^*$	>5.0nm	>2.5nm	>1.5nm	>1.0nm
	$dh^*$	>1,300ft	>800ft	>450ft	>450ft

## 2.3 Protected Airspace Zone[9]

Protected Airspace Zone(PAZ)은 그림 8와 같이 Owner 항공기에 대한 Cylinder형태의 공역을 말한다. Cylinder의 크기는 항공기의 수평 분리기준의 2배에 해당되는 길이를 직경으로 하고 수직 분리기준의 2배를 높이로 한다.

PAZ를 이용한 항공기의 충돌 위험은 Intruder항공기의 Owner 항공기 PAZ의 수평 및 수직방향 진출입 시간( $[t_{h,in}, t_{h,out}]$ ,  $[t_{v,in}, t_{v,out}]$ )에 따라 결정된다. 수평방향에 대한 진출입 시간  $t_{h,in}, t_{h,out}$ 은 식 (6)과 같이 항공기 간 상대 수평거리로부터 구할 수 있다.

$$d_h(t) = \sqrt{(d_x + v_{rx}t)^2 + (d_y + v_{ry}t)^2}$$

$$[t_{h,in}, t_{h,out}] = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{A} \quad (t_{h,in} < t_{h,out}) \quad (6)$$

$$(A = v_{rx}^2 + v_{ry}^2, B = d_x v_{rx} + d_y v_{ry}, C = d_x^2 + d_y^2 - D_h)$$

또한, 수직방향에 대한 진출입 시간  $t_{v,in}, t_{v,out}$ 은 식 (7)과 같이 항공기 간 상대 수직거리로부터 구할 수 있다.

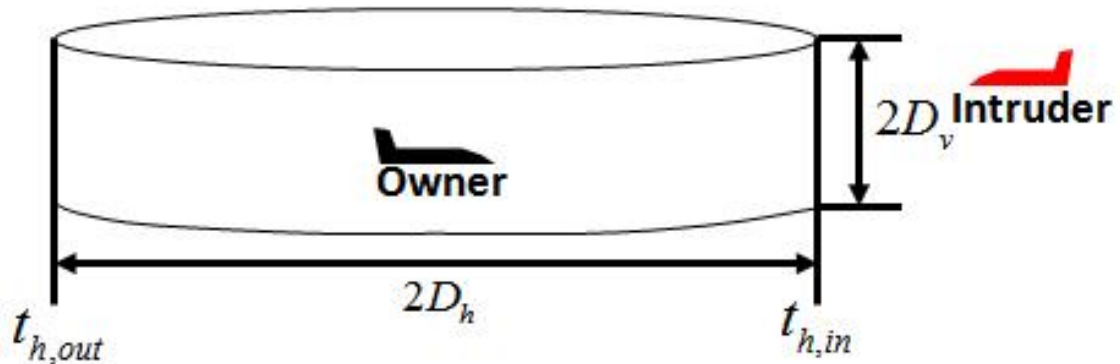


그림 8. Protected Airspace Zone

$$\begin{aligned}
d_v(t) &= |d_z - v_z t| \\
t_{v,in} &= \min\left(\frac{D_v - d_z}{v_z}, \frac{-D_v - d_z}{v_z}\right) \\
t_{v,out} &= \max\left(\frac{D_v - d_z}{v_z}, \frac{-D_v - d_z}{v_z}\right) \\
&\quad (t_{v,in} = 0 \text{ and } t_{v,out} = 0 \text{ when } z = 0)
\end{aligned} \tag{7}$$

식 (6)-(7)의 결과로 나오는 Intruder항공기의 Owner 항공기 PAZ 진출입 시간 ( $[t_{h,in}, t_{h,out}]$ ,  $[t_{v,in}, t_{v,out}]$ )을 Separation Violation Threshold( $T(\text{sec})$ )를 기준으로 하는 표 3의 내용과 비교하여 수평 및 수직 방향에 대한 항공기의 Loss Separation 여부를 확인할 수 있다.

표 3. PAZ 진출입 시간에 따른 방향별 Loss Separation 기준

Type	조건	설명
H1/V1	$0 < t_{h,in}, t_{v,in} \leq T$	기준 시간 내, $t_{h,in}$ 초 이후 수평 또는 수직 방향 충돌 위험 예측
H2/V2	$t_{h,in}, t_{v,in} > T$	기준 시간 밖, $t_{h,in}$ 초 이후 수평 또는 수직 방향 충돌 위험 예측
H3/V3	$t_{h,in}, t_{v,in} \leq 0$ and $t_{h,out}, t_{v,out} \geq 0$	현재 수평 또는 수직 방향 충돌 위험 발생
H4/V4	$t_{h,out}, t_{v,out} < 0$	과거 수평 또는 수직 방향 충돌 위험 발생
H5	$B^2 - 4AC < 0$	수평 방향으로의 충돌 위험 없음
H6/V6	$v_x = 0$ or $v_y = 0$ or $v_z = 0$	수평 또는 수직방향으로 평행 비행 중

표 3에 따른 각 방향별 충돌 위험 판정 중 H1/V1 - H3/V3은 충돌 위험이 존재함을 의미한다. 그 중, H1/V1의 경우 Intruder항공기의 PAZ 통과 시간이 기준 시간 이내이므로 충돌 위험을 통보가 요구되지만, H2/V2의 경우 기준 시간 이후에 PAZ 통과 시점이 존재하므로 충돌 위험의 통보가 필요하지 않다고 볼 수 있다. H3/V3는 현재 충돌 위험상황이 진행 중인 것으로 충돌 위험도가 높다고 볼 수 있다. 또한, H4/V4 - H6/V6의 경우 충돌 위험 상황이 과거에 있었거나 Intruder 항공기가 Owner 항공기와 평행하게 비행한 경우 또는 두 항공기가 완전히 분리되어 있어 충돌 위험이 없는 상태를 의미한다. 추가적으로 H1 또는 V1의 경우에 대해 표 4의 조건을 적용하여 C1, C2의 경우에 해당되는 최종적인 Separation Violation을 판정한다.

표 4. PAZ의 Separation Violation 예측 기준

Type	조건	설명
C1	H1 and $d_v(t_{h,in}) < D_v$	현재 상태로 부터 $t_{h,in}$ 초 이후 충돌 위험 발생
C2	V1 and $d_h(t_{v,in}) < D_h$	현재 상태로 부터 $t_{v,in}$ 초 이후 충돌 위험 발생

### 3. 정량적 충돌 위험도 산출

시계비행이 불가능한 무인항공기의 특성상, 사전에 충돌 위험을 예측하고 그에 따른 기동을 수행함으로써 무인항공기가 충돌 위험 상황으로 진입하지 않도록 이를 방지하는 것이 중요하다. 그러나 조사한 탐지기법 중, Well Clear와 PAZ는 항공기의 충돌 위험 판단 결과를 ‘위험하다’와 ‘위험하지 않다’의 구분으로 나누는 On / Off 개념의 충돌 위험으로, 항공기의 위험 수준에 대한 정량적인 정보는 제공하지 않는다. 이는 예측되는 충돌 위험에 대해 충돌 회피 기동을 수행해야 할 시점과 회피 기동의 종류를 결정하는데 제약조건이 되고, 항공기 운용과 공역관리의 측면에서 효율성의 감소로 이어질 수 있다. 본 장에서는, 두 가지 탐지기법인 Well Clear와 PAZ에서 사용되는 충돌 위험 판단 기준을 활용하여 충돌 위험을 정량적으로 수치화 할 수 있는 기법을 제시하였다.





### 3.1 Well Clear 기반의 충돌 위험도

Well Clear에서 LOWC는 항공기간 상대 거리와 상대 속도를 활용한 3개의 파라미터인 Modified Tau, Horizontal Minimum Distance, Vertical Distance를 각각 특정 기준 값과 비교한 결과를 통해 결정된다. 식 (8)은 3개의 파라미터를 활용하여 Well Clear 기반의 충돌 위험도를 정의한 식이다.

$$R_{WC}(P_1, P_2, P_3) = \sqrt[3]{P_1 P_2 P_3} \times 100 = \sqrt[3]{\frac{\tau_{ref}}{\tau} \times \frac{HMD_{ref}}{HMD} \times \frac{dh_{ref}}{|dh|}} \times 100$$

cf)  $R = 0$ , when  $R < 0.01$   
 $R = 100$ , when  $R > 1$   
 $P_n = 0$ , when  $P_n < 0$  or  $P_n = -\infty$   
 $P_n = 1$ , when  $P_n > 1$  or  $P_n = \infty$

(8)

식 (8)로부터 Well Clear 기반의 충돌 위험도는 LOWC를 결정하는 각 파라미터의 Normalization된 값을 활용한다. 그러나 Well Clear의 정의로부터 발생하는 특정 값(0, ∞, 음수)의 경우 식 (8)의 결과에서 Singular값을 도출하게 된다. 이 경우 충돌 위험도를 산출할 수 없으므로 이에 대한 예외처리로, Normalization 값이 양의 무한대인 경우 해당 파라미터의 값이 0인 경우로 충돌 위험 기준 이내에 위치한다고 판단하여 해당 파라미터의 Normalization 값을 1이 되도록 하였고, 반대로 파라미터 값이 음수 또는 음의 무한대인 경우 충돌 위험이 존재하지 않음으로 판단하여 해당 파라미터의 Normalization 값이 0이 되도록 하였다. 또한 특정 기준치 이내일 경우 각 파라미터의 Normalization 값이 1보다 크게 되어 전체 충돌 위험도가 100보다 큰 값이 도출될 수 있다. 이 경우 충돌 각 파라미터의 충돌 위험도가 1이 되도록 예외처리를 구성하였다. 이를 통해 Well Clear에 따른 충돌 위험도가 0과 100사이의 특정한 값을 가지도록 구성하였다. 그러나 각 파라미터의 Normalization 값을 바로 곱하여 충돌 위험도를 산출하는 것은 이론적 모순이 발생하게 된다. 예를

들어 각 파라미터에 대한 충돌 위험도가 모두 0.9일 때, 최종 충돌 위험도는 0.9가 도출되어야 하지만 Normalization 값을 바로 곱한 결과는 0.729가 되어 오히려 더 낮은 충돌 위험도를 보이게 된다. 따라서 이러한 모순을 해결하기 위해 각각의 Normalization 값의 곱에 기하평균을 적용하여 충돌 위험도를 산출하도록 하였다.



### 3.2 PAZ 기반의 충돌 위험도

PAZ의 경우 Well Clear에 비해 Conflict Type이 방향별로 존재한다. 따라서 각 방향의 Conflict Type에 대한 충돌 위험도의 정의가 요구된다. 표 5와 표 6은 각 방향에 대해 정의된 충돌 위험도를 정리한 내용이다.

수평 방향에 대한 PAZ 기반의 충돌 위험도는 총 6가지 Conflict Type에 대해 정의할 수 있다. Conflict Type 1-3의 경우 항공기간 수직거리와 Intruder 항공기가 Owner 항공기의 PAZ를 수평방향으로 진입하는 예상 시간을 이용하여 충돌 위험도를 산출한다. Conflict Type 1과 3의 경우 해당 Conflict Type이 발생할 때, PAZ의 수평방향 진입 예상 시간은 기준시간( $T$ )이내에 있으므로 해당 값을 1로 처리하였고, Conflict Type 2의 경우에는 반대의 경우이므로 시간과 수직거리를 함께 고려하게 된다. 또한 Conflict Type 4와 5의 경우 충돌 위험이 이미 지났거나 또는 없는 상태로 충돌 위험도는 0이 된다. 마지막으로 Conflict Type 6의 경우 항공기가 평행하게 비행하는 상태로 이에 대한 충돌 위험도는 현재 상태에서의 항공기간 수평거리를 통해 산출한다.

표 5. 수평방향 PAZ 기반 충돌 위험도 정의

Conflict Type	충돌 위험도	
H1	$P_h = \sqrt{\frac{D_v}{ z }}$	$P_h = 1$ (when, $ z  \leq D_v$ )
H2	$P_h = \sqrt{\frac{T}{t_{h,in}} \times \frac{D_v}{ z }}$	$P_h = \sqrt{\frac{T}{t_{h,in}}}$ (when, $ z  \leq D_v$ )
H3	$P_h = \sqrt{\frac{D_v}{ z }}$	$P_h = 1$ (when, $ z  \leq D_v$ )
H4	$P_h = 0$	
H5	$P_h = 0$	
H6	$P_h = \sqrt{\frac{D_h}{\sqrt{x^2 + y^2}}}$	

수직 방향에 대한 PAZ 기반의 충돌 위험도는 총 5가지 Conflict Type에 대해 정의할 수 있으며 산출 과정은 수평 방향의 충돌 위험도 정의와 동일하다.

표 5와 표 6의 정의를 바탕으로 최종적인 PAZ 기반의 충돌 위험도는 식 (9)와 같이 각 방향별 충돌 위험도의 곱으로 표현한다. Well Clear와 마찬가지로 위험도의 곱에 따른 모순을 방지하기 위해 기하평균을 적용하여 충돌 위험도를 산출한다.

$$R_{PAZ}(P_h, P_v) = \sqrt{P_h P_v} \times 100 \quad (9)$$

표 6. 수직방향 PAZ 기반 충돌 위험도 정의

Conflict Type	충돌 위험도	
V1	$P_v = \sqrt{\frac{D_h}{\sqrt{x^2 + y^2}}}$	$P_v = 1$ (when, $\sqrt{x^2 + y^2} \leq D_h$ )
V2	$P_v = \sqrt{\frac{T}{t_{v,in}} \times \frac{D_h}{\sqrt{x^2 + y^2}}}$	$P_v = \sqrt{\frac{T}{t_{v,in}}}$ (when, $\sqrt{x^2 + y^2} \leq D_h$ )
V3	$P_v = \sqrt{\frac{D_h}{\sqrt{x^2 + y^2}}}$	$P_v = 1$ (when, $\sqrt{x^2 + y^2} \leq D_h$ )
V4	$P_v = 0$	
V6	$P_v = \sqrt{\frac{D_v}{ z }}$	

## 4. 시나리오 구성

### 4.1 연산시간 측정을 위한 시나리오

앞서 조사한 3개의 충돌 탐지 기법은 충돌 위험을 판정하는 조건이 모두 다르기 때문에 동일한 조건하에서도 서로 다른 연산과정을 거치게 된다. 이 경우 연산시간의 차이가 필수적으로 발생하게 된다. 따라서 탐지 기법의 성능 분석을 위한 하나의 지표로써 탐지기법 별 연산시간을 측정하고, 항공기 대수 증가에 따른 연산시간의 민감도를 평가하기 위한 시나리오를 별도로 구성하였다.

연산시간 측정을 위한 시나리오는 그림 9와 같이 5, 10, 20대의 항공기를 활용하여 구성된다. 이 때, 최악의 상황을 유도하기 위해 시나리오 상의 모든 항공기는 동일 고도에 위치해 있고, 탐지기법 별 충돌 위험 판단 조건을 모두 만족하도록 하였다. 이 시나리오를 통해 산출되는 연산시간은 충돌 탐지 기법 알고리즘을 수행하는데 따른 1Cycle(1:1 충돌 위험 판단) 시간의 평균을 산출하도록 하였다.

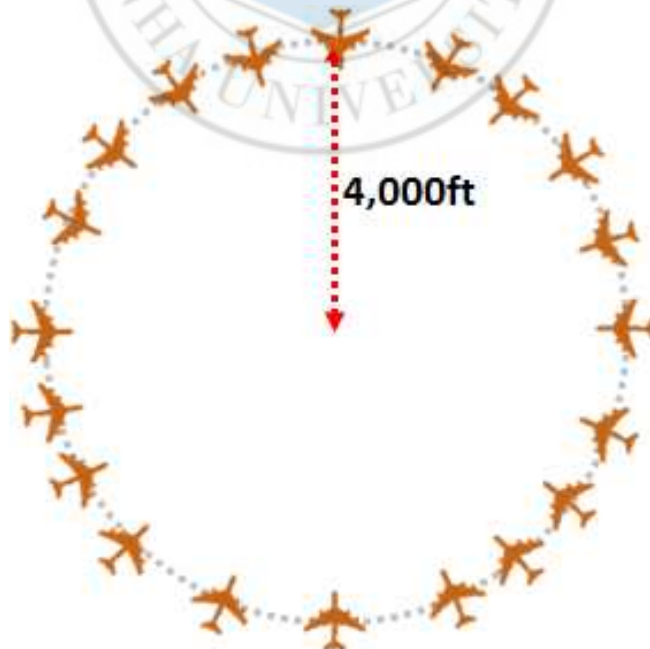


그림 9. 연산시간 측정을 위한 시나리오

## 4.2 충돌 위험도 정량화 검증을 위한 시나리오

충돌 탐지 기법에 대한 검증을 위해 그림 10과 같이 충돌 위험 상황의 발생이 확실한 시나리오를 구성하였다. 그림 10의 시나리오에서 각 항공기는 임의의 원에 대한 중심으로부터 동일한 거리에 위치해 있으며, 동일한 속도를 가진다. 따라서 시나리오 상의 모든 항공기는 동일한 시간에 원의 중심에 도달하게 되며, 마주보는 방향에서 비행하는 HL4241과 HL4243, HL4242와 HL4244의 경우 직접적인 충돌이 발생하고, 대각선으로 위치한 항공기의 경우 니어미스(Near Miss)가 발생한다. 구성된 시나리오는 자체 개발한 항공관제시뮬레이터를 통해 수행되었으며, 항공기의 모델은 항공관제시뮬레이터의 Cessna 172 모델을 이용하였다. 각 기법에 대한 기준 값은 정의에 따라 설정하였으며, PAZ의 충돌 위험 판단 기준은 Well Clear의 현재 상태에서의 충돌 위험 판단 기준인 수평 4,000ft, 수직 450ft, 기준 시간 35초를 적용하였다.

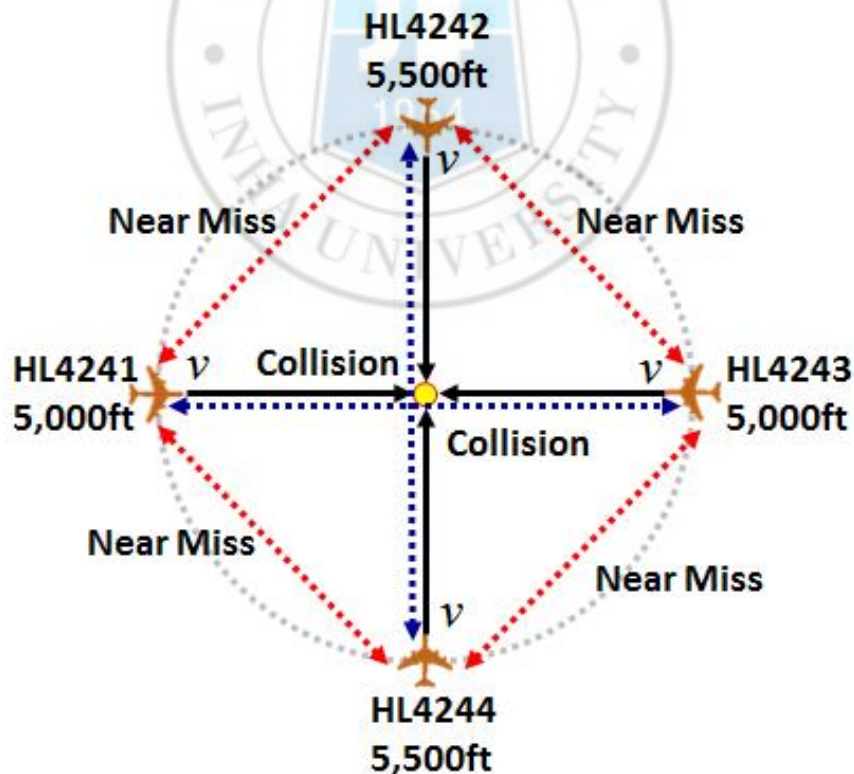


그림 10. 충돌 탐지 기법 검증용 시나리오

### 4.3 탐지기법 성능 및 정량화 결과 분석을 위한 시나리오

충돌 탐지 기법의 성능과 정량화 결과를 비교 및 분석하기 위한 데이터로 실제 항공기의 항적 데이터를 활용하였다. 항공기의 항적 데이터는 2015년 6월 20일 16:00 - 16:59 사이에 인천공항에 착륙한 항공기로 flightaware.com에서 자료를 획득하였다. 그러나 획득한 ADS-B 데이터는 데이터 기록 주기가 20 - 60초로 다양하기 때문에 항공기간 충돌 위험도의 판단에 있어 실시간성이 결여되는 문제가 발생하게 된다. 따라서 Interpolation 과정을 통해 수집된 데이터를 5초 단위로 나누고, 시나리오 구성을 위한 항공기의 경로점 구성을 위해 Douglass & Peucker Algorithm(DPA)을 적용하였다.[19]

DPA는 여러 꼭짓점으로 구성된 데이터에서 특정 임계치( $\epsilon$ )와의 비교를 통해 비 중요 꼭짓점을 제거함으로써 데이터 단순화를 수행하는 알고리즘이다. 그림 11과 같이 다수의 꼭짓점으로 구성된 선에 대해 DPA는 먼저 시작 위치와 끝 위치를 잇는 선분  $\overline{v_0v_5}$ 를 기준으로 선분  $\overline{v_0v_5}$ 와 나머지 점들에 대한 수직거리 ( $d$ )를 계산한다. 각 점에 대해 계산된 거리  $d$ 에 대해,  $d \geq \epsilon$ 인 경우 해당 점은 다음 계산에 활용하도록 존치하고, 반대인 경우 점을 삭제한다. 다음 단계부터는

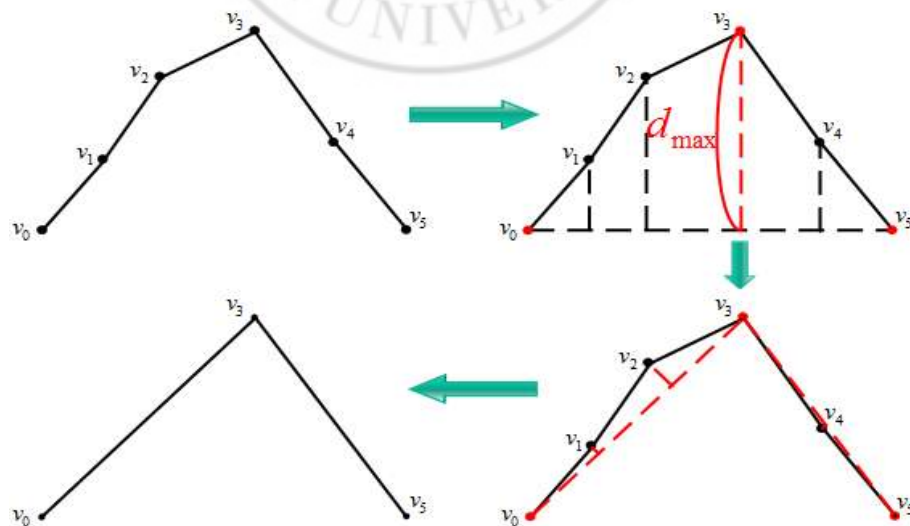


그림 11. Douglass & Peucker Algorithm[18]

시작위치와 계산된 거리  $d$ 의 최대값인  $d_{\max}$ 를 연결한 선분  $\overline{v_0v_n}$ 을 바탕으로 하여 동일한 과정을 더 이상 제거할 점이 없을 때 까지 반복적으로 수행한다. 그림 12는 수집한 항공기 중 임의의 항공기에 대해 임계치( $\epsilon$ )을 변경하며 DPA를 적용한 결과로,  $\epsilon$ 이 1인 경우에 비해  $\epsilon$ 이 0.5인 경우 대부분의 경로점이 표시됨을 알 수 있다. 그림 12의 결과로부터  $\epsilon$ 을 0.5로 설정하고 전체 항적 데이터에 대해 Interpolation과 DPA를 수행한 항공기의 도착 궤적은 그림 13과 같다.

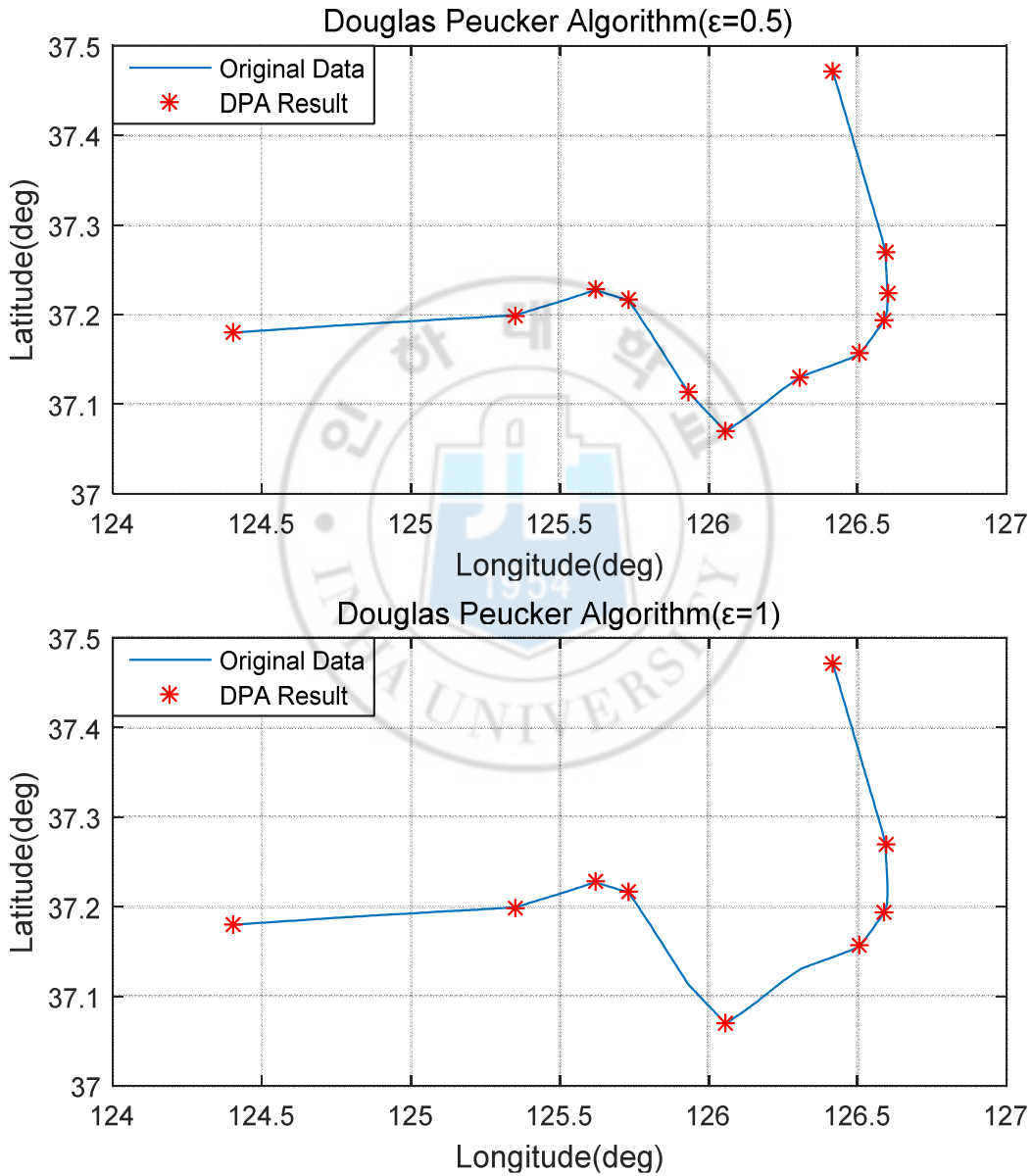


그림 12. 임계치( $\epsilon$ )에 따른 DPA 적용 결과



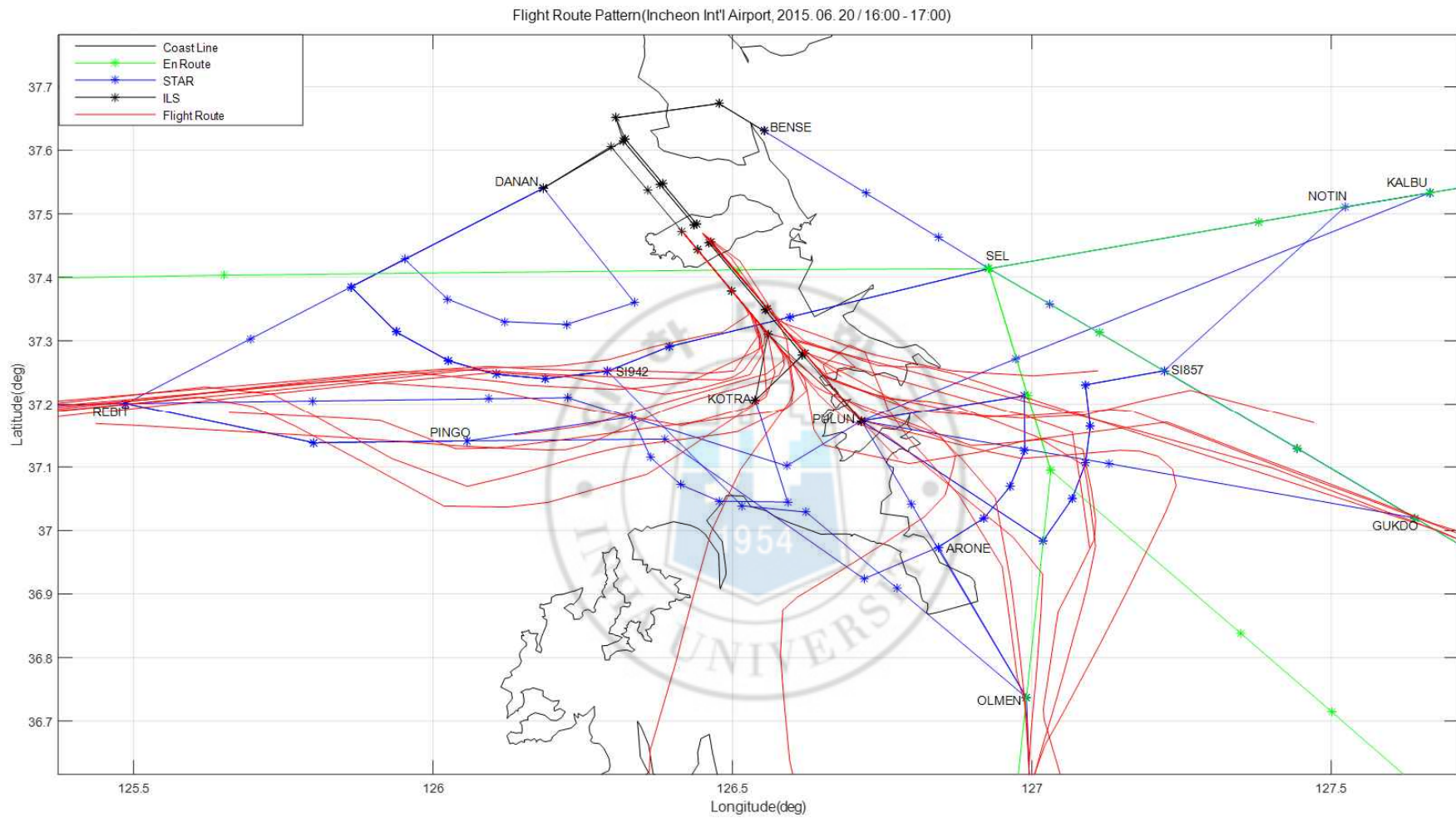


그림 13. 접근관제구역 내 도착항공기 궤적(2015. 6. 20, 16:00-17:00)

그림 13으로부터 접근관제 구역 내에서 운항중인 항공기의 경우 Aeronautical Information Publication(AIP) 문서상에 정의된 Standard Arrival Route (STAR) 항로를 통해 운항하지 않음을 알 수 있다. 이는 항공기 운항에 있어 공항의 수용능력 및 주변 환경 등의 영향으로 인해 조종사와 관제사간의 의사소통과 조종사의 시계 비행의 영향을 받은 것으로 추측된다. 또한 항공기간 충돌 위험이 발생하지 않도록 관제사의 적절한 지시를 통해 착륙했기 때문에, 실제 항공기 데이터만으로는 충돌 위험도를 측정할 수 없다. 따라서 실제 항공기의 항적에 무인항공기를 추가하여 충돌 위험을 유발하는 시나리오를 구성했다. 그림 14는 탐지기법별 성능 및 특징, 그리고 충돌 위험에 대한 정량화 결과를 비교하기 위해 구성한 시나리오 내의 항공기 항적 데이터이다.

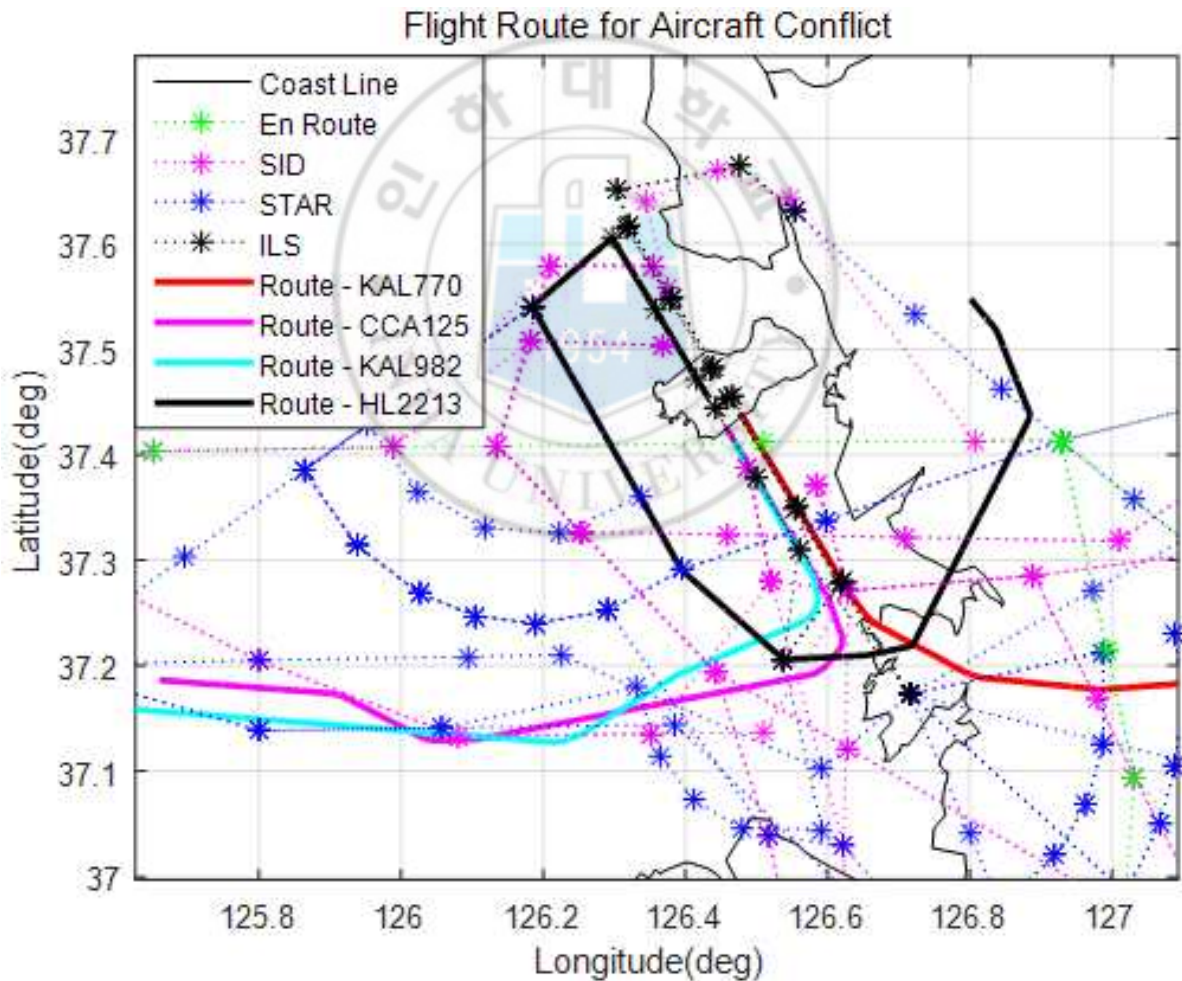


그림 14. 충돌 탐지 기법 비교 및 정량화 시나리오

그림 14의 시나리오 항적은 유사 시간대에 인천공항에 착륙하는 실제 항공기(KAL770, CCA125, KAL982) 데이터와 충돌 위험을 유발하기 위해 김포공항에서 이륙하여 인천공항에 착륙하는 무인항공기(HL2213)의 실시간 데이터이다. 김포공항에서 이륙한 무인항공기는 3대의 유인항공기와 항적이 교차하는 곳 부근에서 충돌 위험에 직면하게 된다. 따라서 총 3번의 충돌 위험 시나리오가 존재하게 된다. 유인항공기 간의 충돌 위험은 모든 유인항공기가 시계비행을 수행한다고 가정하여 측정하지 않았으며, 항공기가 공항에 착륙한 이후에는 충돌 위험도를 산출에 활용하지 않도록 하였다. 시나리오에서 활용되는 항공기에 대한 정보는 표 7 - 10과 같다. 시나리오에 사용된 항공기 모델은 실제 항공기에 대한 등급을 고려하여 유인항공기의 경우 Large 등급에 해당되는 B737 모델을 적용하였고, 무인항공기의 경우 Cessnar 172 모델을 적용하였다.

표 7. 유인항공기 정보(KAL770)

Callsign	KAL770	항공기등급	Large	공항도착시간	885초
항공기 초기 정보					
위도(deg)	경도(deg)	고도(ft)	속도(knot)	방위각(deg)	
37.1701	127.4715	15,000	319	314	

표 8. 유인항공기 정보(CCA125)

Callsign	CCA125	항공기등급	Large	공항도착시간	1,091초
항공기 초기 정보					
위도(deg)	경도(deg)	고도(ft)	속도(knot)	방위각(deg)	
37.1864	125.6596	13,000	356	94	

표 9. 유인항공기 정보(KAL982)

Callsign	KAL982	항공기등급	Large	공항도착시간	1,150초
항공기 초기 정보					
위도(deg)	경도(deg)	고도(ft)	속도(knot)	방위각(deg)	
37.1685	125.4367	16,300	365	93	

표 10. 무인항공기 정보(HL2213)

Callsign	HL2213	항공기등급	Small	공항도착시간	1,522초
항공기 초기 정보					
위도(deg)	경도(deg)	고도(ft)	속도(knot)	방위각(deg)	
37.548003	126.80103	70	90	143	



#### 4.4 충돌 위험도와 충돌 확률 간의 관계 분석을 위한 시나리오

4.3절의 항공기의 충돌 위험도 정량화 기법은 항공기간 상대 정보와 충돌 탐지기법의 위험 판정 기준을 활용하여 “얼마나 항공기가 위험한 상태에 있는가?”를 평가한다. 그러나 식 (8)과 표 5 - 6의 충돌 위험에 대한 정량화 기준을 볼 때, 충돌 위험도의 증가 및 감소는 비선형성의 특징을 가진다. 이러한 이유로 산출된 충돌 위험도를 항공기간 충돌 확률로 연결하는 것은 바람직하지 않다. 따라서 산출된 충돌 위험도와 실제 충돌 확률간의 관계를 파악하여 산출된 충돌 위험도에 대한 유효성의 판단이 요구된다.

충돌 위험도의 정량화를 위한 유효성 검증 시나리오는 그림 14의 충돌 위험 시나리오 중 첫 번째 충돌 위험 상황인 HL2321 - KAL770의 경우를 고려하였다. 시나리오 상에서 항공기간 충돌 위험이 발생할 때 무인항공기인 HL2321이 기동을 하는 것으로 정하였고, 충돌 시점은 충돌 탐지기법에 의해 산출된 충돌 위험도가 10, 20, ..., 100에 최초로 진입할 때로 설정하였다. 또한 회피기동의 수행을 위한 임의의 경로점을 두어 해당 지점에서의 회피기동에 따른 충돌 위험도를 시작위치별로 300, 500회씩 반복 측정하였다. 반복 시뮬레이션을 통한 회피기동에 따른 충돌 확률은 항공기의 기동 시작 위치에 따라 식 (10)과 같이 전체 시뮬레이션 횟수 대비 충돌 위험도 100의 발생 횟수로 나타낼 수 있다.

$$\text{Conflict Probability}(\%) = \frac{\text{Number of 100 Conflict Risk}}{\text{Number of simulation}(500)} \quad (10)$$

무인항공기의 회피 기동에 따른 임의의 경로점 범위는 그림 15와 같이 구속 조건으로 설정 하였다. 여기서 경로점의 위치 범위는 두 항공기가 교차하는 지점을 중심으로 하고 교차점과 충돌 위험도가 100이 되는 위치와의 거리를 반지름으로 하는 원으로 설정하였다. 이 경우, 충돌 위험 탐지에 의한 충돌 회피 시점이 충돌 위험도와 충돌 확률에 미치는 영향을 알 수 있다. 그림 15에서 무인항공기는 n% Conflict Risk가 시작되는 지점에서 회피기동을 수행하여 Temporary WP 내 임의의 한 점을 지나 Final WP로 이동한다.

한편, 고도의 경우 그림 27과 같이 유인항공기가 교차점을 통과 할 때의 고도인 5,464ft를 기준으로  $\pm 1,000$ ft를 범위로 설정하였다.

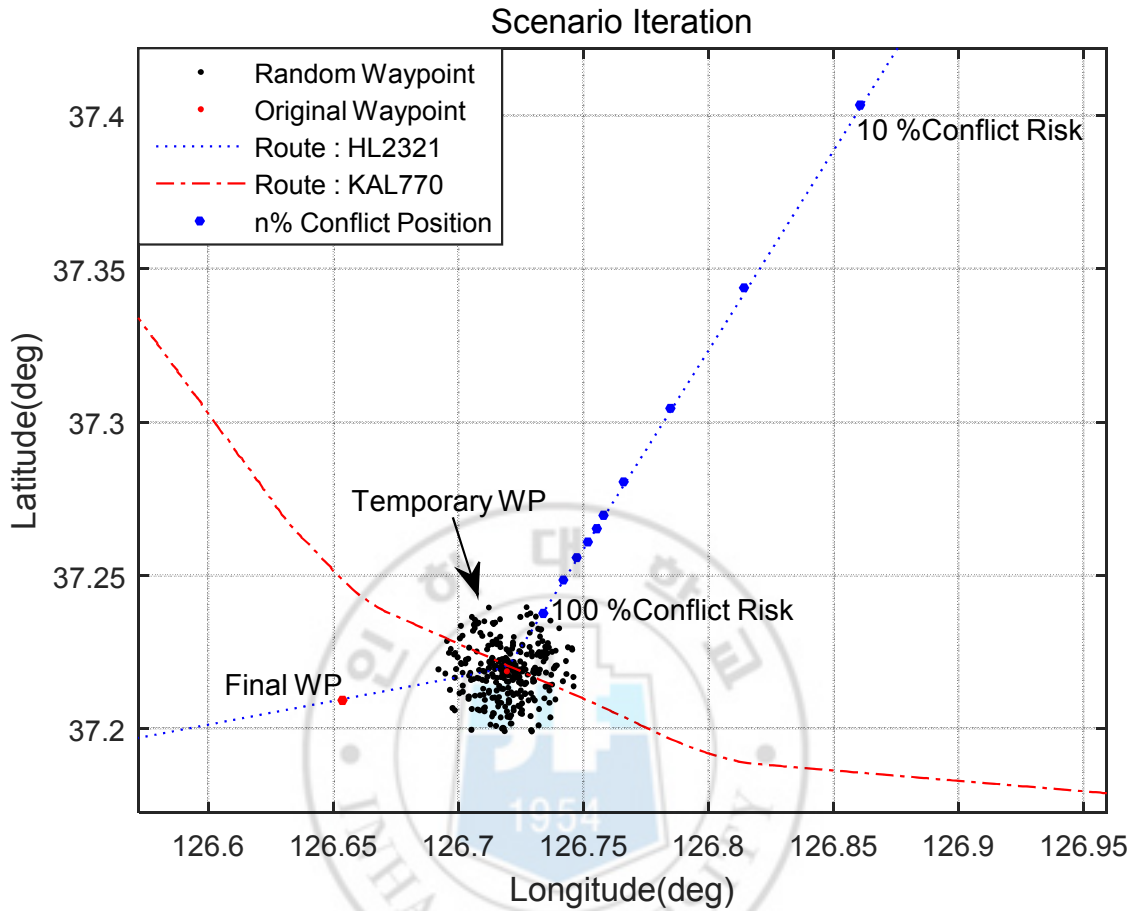


그림 15. 충돌 위험도 유효성 검증 시나리오

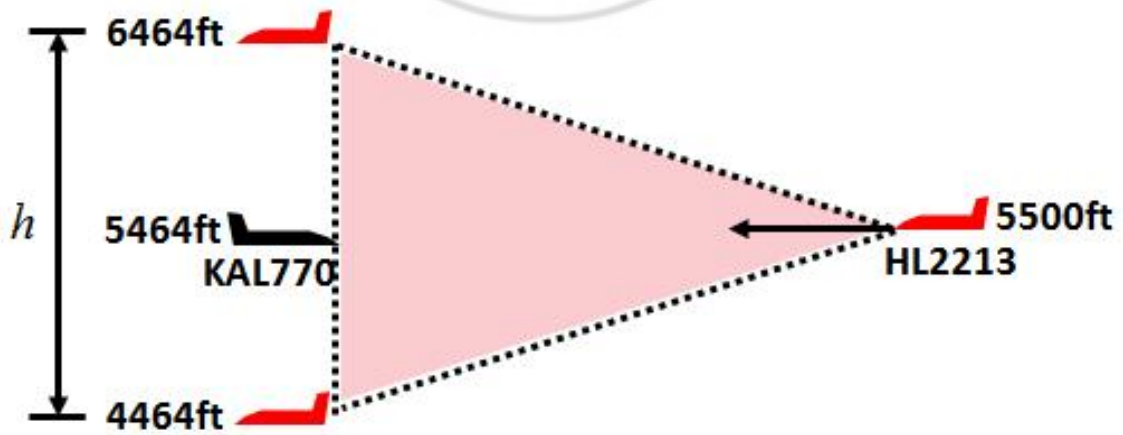


그림 16. 무인항공기(HL2213)의 고도 운용 범위

## 5. 탐지기법 및 시뮬레이션 결과 비교

### 5.1 충돌 위험 탐지기법 비교

각 기법에 대한 특징 및 성능 비교를 위한 지표로 기법에 대한 기본적 특징과 위험도 산출에 요구되는 입력 파라미터, 정량적 위험도 산출 여부와 공역 구분, 운용항공기 대수 증가에 따른 연산시간의 민감도를 설정하였다.

첫 번째 탐지기법인 CIP의 경우 수식을 통한 산출 결과가 0과 1사이의 특정 값을 산출한다. 이는 충돌 위험에 대해 정량적인 산출이 가능함을 의미한다. 또한 위험도 산출에 있어 항공기간 상대 운동에 따른 수평 및 수직거리를 활용하기 때문에 충돌 위험을 직관적으로 산출할 수 있는 장점이 있다. 그러나 CIP의 경우 충돌 위험도의 산출에 있어 Class A 공역의 항로상 항공기에 적용하는 FAA의 기준을 적용하기 때문에 항공기 간 간격이 조밀해지는 접근관제공역에서는 활용은 적합하지 않다. 또한 항공기간 상대거리를 활용하여 충돌 위험을 산출하기 때문에 진행방향을 고려하지 않는 문제가 있다. 이는 항공기간 상대거리가 점점 증가하거나 두 항공기가 서로 평행하게 비행하는 상황임에도 불구하고 상대거리가 기준값 이내일 경우, 충돌 위험이 존재하는 것으로 인식하여 과도한 충돌 위험 탐지가 발생할 수 있음을 의미한다. 따라서 접근관제공역에서 CIP를 이용한 충돌 탐지기법을 적용하기 위해서는 항공기의 진행방향을 고려하고 접근관제공역에서 활용하기 위한 별도의 항공기 분리 기준이 요구된다.

두 번째 탐지기법인 Well Clear의 경우 직관적으로 충돌 위험을 산출할 수 있는 CIP와는 달리 항공기간 상대 정보를 활용한 매개변수를 통해 충돌 위험을 판단한다. 특히 항공기간 상대 거리 정보를 활용하는 것과 함께, 항공기의 상대 속도를 함께 고려함으로써 항공기의 진행방향을 고려하고, 기준이 적용 되는 공역에 대한 제한이 없으며, 별도의 기준을 바탕으로 현재 상태를 기준으로 미래 시점에서의 충돌 위험 또한 판단할 수 있다는 점에서 CIP와는 다른 특징을 가진다. 그러나 충돌 위험 상황에 대해 정량적인 지표를 제공하지 않는 On / Off

개념의 충돌 위험 판단과 미래 시점에서의 충돌 위험 예측은 가능하지만 이를 위해 항공기의 위치를 예측해야 하는 Extrapolation 또는 별도의 위치 예측 알고리즘이 요구되어 CIP 보다 충돌 위험 판단 알고리즘이 상대적으로 복잡한 특징을 가진다.

마지막으로 PAZ의 경우 Well Clear와 마찬가지로 항공기간 상대 거리와 상대 속도를 모두 고려하고, On / Off 개념의 충돌 위험을 판단함으로써 정량적인 지표를 제시하지 못하는 점, 그리고 공역에 대한 제한조건 없이 현재 상태를 기반으로 미래 시점에서의 충돌 위험을 예측할 수 있다는 점에서 Well Clear와 동일한 특징을 가진다. 하지만 Well Clear와는 달리 가상으로 설정한 임의의 3차원 공간인 Owner 항공기의 PAZ를 Intruder 항공기가 통과하는 시간만으로 충돌 위험을 판단하고, 미래 시점에서의 충돌 위험을 예측하는 데 있어 별도의 기준 없이 직관적으로 판단이 가능하다는 점에서 Well Clear와 차이점을 가진다. 또 다른 탐지기법 별 특징 분석 지표로 각각의 충돌 탐지 기법에 대한 연산 시간 측정 결과는 그림 17과 같다.

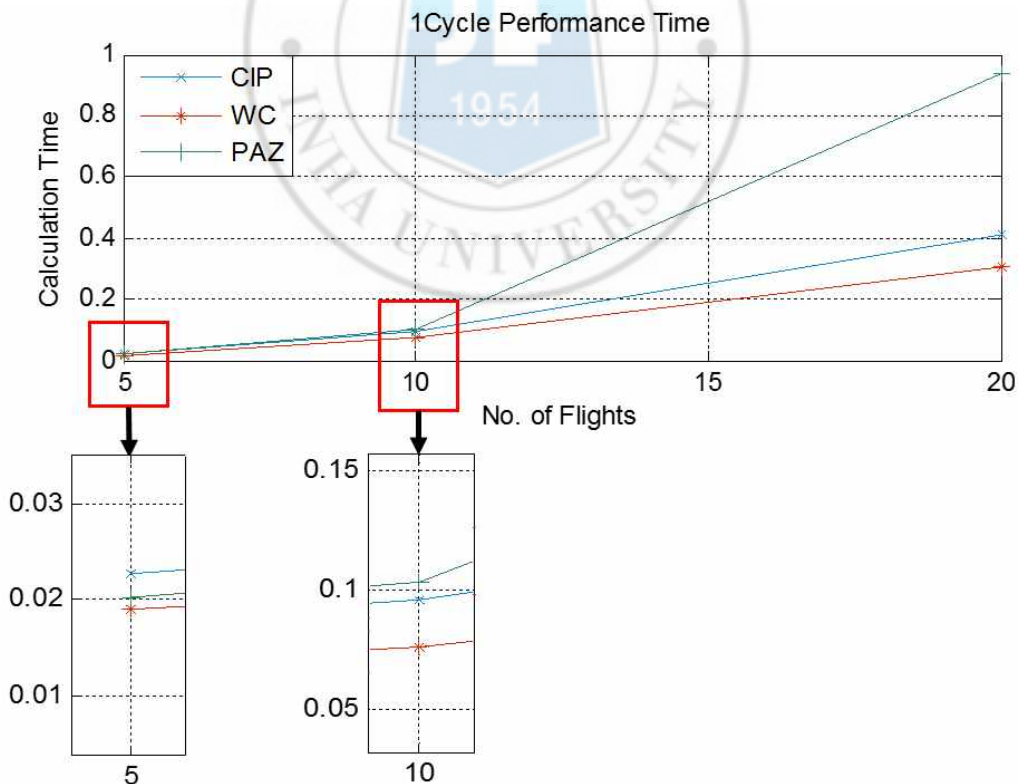


그림 17. 항공기 운용 대수에 따른 기법 별 1회 연산시간



그림 17은 항공기 운용 대수 증가에 따른 탐지기법의 특징을 명확히 보여주고 있다. 최초 5대를 이용한 충돌 탐지기법 연산시간 결과는 3개의 충돌 탐지기법에 대한 연산시간 편차가 크지 않고 Well Clear - PAZ - CIP 순으로 연산시간이 길어짐을 알 수 있다. 그러나 운용 항공기 대수가 증가함에 따라 탐지기법에 대한 연산시간 편차가 커지는데, 특히 PAZ의 경우 연산시간의 증가폭이 가장 크다. PAZ의 경우 항공기 운용 대수가 10대 일 때, CIP보다 더 많은 연산시간이 소요되고 있고, 20대를 운용할 경우 연산시간이 1초에 근접하게 된다. 이는 PAZ를 이용하여 20대 이상의 항공기를 대상으로 1초 간격의 실시간 충돌 탐지를 수행할 경우 실시간성에 제약이 발생할 수 있음을 의미한다. 즉, PAZ의 경우 항공기 운용 대수 증가에 따른 연산시간의 변화가 민감하며 민감도가 높다고 볼 수 있다. 반대로 CIP와 Well Clear의 경우 항공기 운용 대수 증가에 따른 연산시간의 변화가 둔감하기 때문에 민감도가 낮다고 볼 수 있다. 각각의 충돌 탐지 기법에 대한 특징을 비교한 결과를 표 11에 정리하였다.

표 11. 충돌 탐지기법 비교 분석 결과

	CIP	WC	PAZ
<b>충돌 위험 판정요소</b>	- 정량적 충돌 위험도	- 특정 수평거리 진입시간 - 항공기간 최소거리 - 항공기간 고도 차	- 수평 / 수직방향 PAZ 진출입 시간
<b>정량적 위험도 산출</b>	가능	불가능	불가능
<b>적용 가능 공역</b>	Class A	구분 없음	구분 없음
<b>연산시간 민감도</b>	낮음	낮음	높음
<b>기본 특징</b>	- 직관적 충돌위험 산출 - TMA 적용을 위한 별도 기준 요구	- 매개변수를 통한 충돌 위험 판단 - 항공기 진행방향 고려 - 미래 상태에서의 충돌 위험예측 시 Extrapolation 요구	- 매개변수를 통한 충돌 위험 판단 - 항공기 진행방향 고려 - 현재 상태에서 미래 상태의 충돌 위험 예측

## 5.2 충돌 위험도 정량화 수행 결과

충돌 위험에 대한 정량화 수행에 앞서 정량화 결과의 검증을 위한 시나리오를 적용한 Well Clear와 PAZ의 충돌 위험 판단 및 충돌 위험도 산출 결과는 그림 18 - 19와 같다. CIP의 경우 산출 결과가 수치적인 값으로 도출되기 때문에 검증용 시나리오는 적용하지 않았다.

Well Clear의 경우 정의에 따른 기준에 의해 Near Miss 항공기에 대한 LOWC가 발생하지 않았으며, 정면충돌하는 경우에 한해 LOWC가 발생한 것을 확인할 수 있다. Extrapolation을 통한 경보단계 예측의 경우, 경보단계가 단계적으로 상승하는 것을 알 수 있다. 그러나 Near Miss가 발생하는 항공기의 경우 LOWC가 발생하지 않기 때문에 최종 경보단계인 Warning Alert의 기준 값을 벗어나면서 항공기가 교차하기 전 까지 충돌 위험이 판정되지 않는 문제가 발생한다. 이에 반해 충돌 위험도의 정량화 결과의 경우 충돌이 발생하는 경우 100, Near Miss가 발생하는 경우 약 95의 충돌 위험도를 가지고, 항공기의 속도벡터를 활용하여 방향을 고려하기 때문에, 두 항공기가 교차한 이후 충돌 위험도가 0으로 감소하는 것을 볼 수 있다.

PAZ의 경우 Well Clear와 마찬가지로 정면충돌하는 항공기에 한해 충돌 위험의 예측과 Separation Violation이 계단 형식으로 발생하는 것을 알 수 있다. 충돌 위험도의 정량화 결과의 경우에도 Separation Violation이 발생하는 경우 100, Near Miss의 경우 약 92의 충돌 위험도를 가진다. 그러나 동일한 정면충돌의 경우보다 Near Miss에 해당하는 항공기의 PAZ 진입이 더 빠르기 때문에 전체 경우에 대해 동일한 값에서 충돌 위험도가 시작되는 Well Clear와는 달리, PAZ에서의 최초 충돌 위험도는 Near Miss 항공기가 더 높게 나오게 된다. 또한 Intruder 항공기가 Owner항공기의 PAZ에서 진출하는데 까지 시간이 고려되기 때문에 두 항공기의 교차 이후 일정 시간동안 높은 충돌 위험도가 지속되는 특징이 있다.

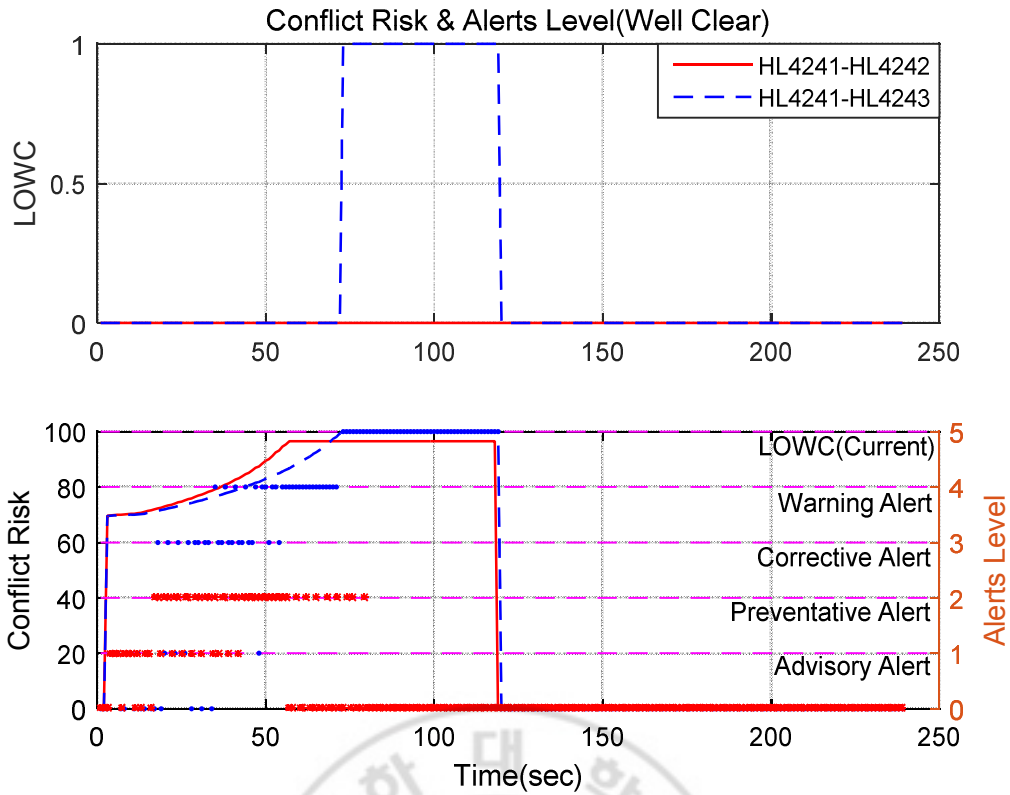


그림 18. 검증용 시나리오에 관한 Conflict Risk, Alert Level(Well Clear)

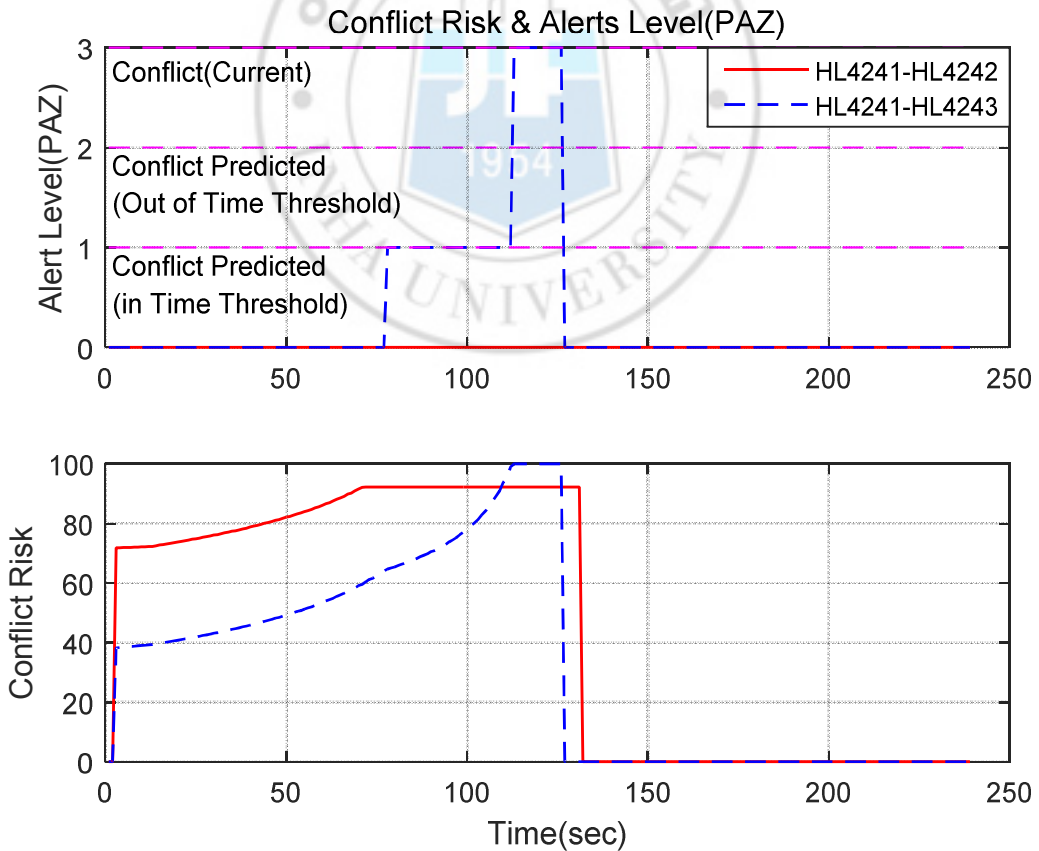


그림 19. 검증용 시나리오에 관한 Conflict Risk, Alert Level(PAZ)

충돌 위험에 대한 정량화 수행과 그에 따른 결과를 확인하기 위해 실제 항공기를 이용한 시나리오를 구성하고 항공관제시뮬레이터를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 한편, FAA에서 정의된 항공기의 Near Mid Air Collision(NMAC) 기준은 전 방향을 고려한 항공기간 상대거리가 500ft 이내가 되는 것으로[20], 규정에 따른 항공기간 충돌 여부는 항적 데이터 상의 항공기간 상대거리를 고려해야 한다. 그림 20은 유인항공기 - 무인항공기 간 상대 거리에 관한 정보로 항공기간 최소 상대거리는 각각 4,957ft, 4,634ft, 2,516ft로 시나리오 상에서의 항공기간 NMAC는 존재하지 않음을 알 수 있다.

그림 21은 첫 번째 충돌 탐지기법인 CIP를 이용하여 시뮬레이션 하였을 때, 전체 항로 중 유인항공기와 무인항공기간 충돌 위험이 발생하는 항로를 표시한 그림으로 굵은 실선은 두 항공기간 거리가 CIP의 기준인 수평 5nm과 수직 1,000ft를 모두 만족하는 구간을 의미한다. CIP를 이용한 충돌 탐지 기법은 총 3번의 충돌 위험 상황 중 모든 상황에서 충돌 위험이 발생한다. CIP를 이용한 충돌 탐지기법은 항공기의 진행 방향을 고려하지 않기 때문에 항공기의 항로가 교차한 이후 또는 두 항공기의 상대거리가 서로 발산하는 상황에 있음에도 불구하고 진행되는 항로상에 충돌 위험이 있는 것으로 판정된다.

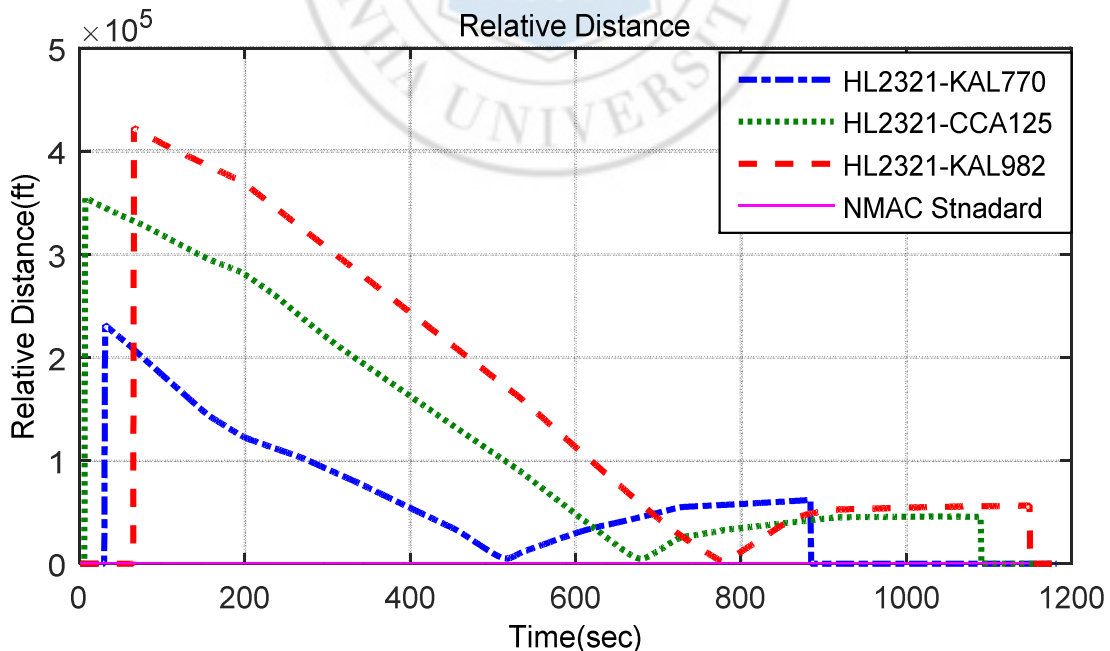


그림 20. 항공기간 상대거리

그림 22는 그림 21의 시뮬레이션에 대한 유인항공기 - 무인항공기의 실시간 충돌 위험도에 관한 그래프이고, 표 12는 각 충돌 위험상황에서 CIP기법을 통해 산출된 최대 충돌 위험도 이다. CIP를 통한 항공기간 충돌 위험도의 산출은 항공기간 거리가 CIP에 정의된 기준에 진입하는 시점부터 충돌 위험도가 발생하기 시작하여 수평 및 수직 방향을 모두 고려한 항공기간 상대거리가 최소가 될 때 최대값을 나타내게 된다. 항공기 간 최소거리 지점을 통과한 이후 항공기간 상대거리가 다시 증가함에 따라 충돌 위험도는 감소하게 된다. 이는 CIP의 충돌 위험도를 산출하는데 있어 항공기간 상대거리만 활용하기 때문으로, 교차 이후 충돌 위험도가 감소하는 구간은 조종사에 의한 임의 조종이 없는 경우 충돌 위험이 존재하지 않는다고 볼 수 있다.

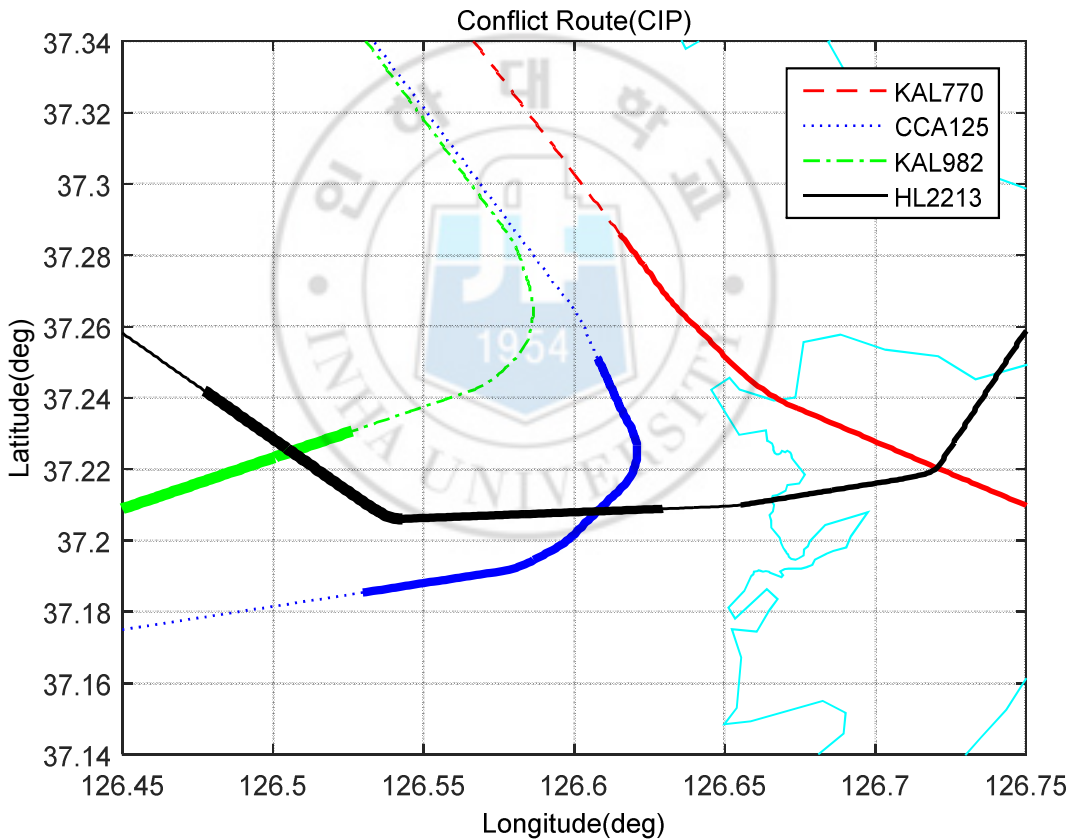


그림 21. Conflict Route(CIP)

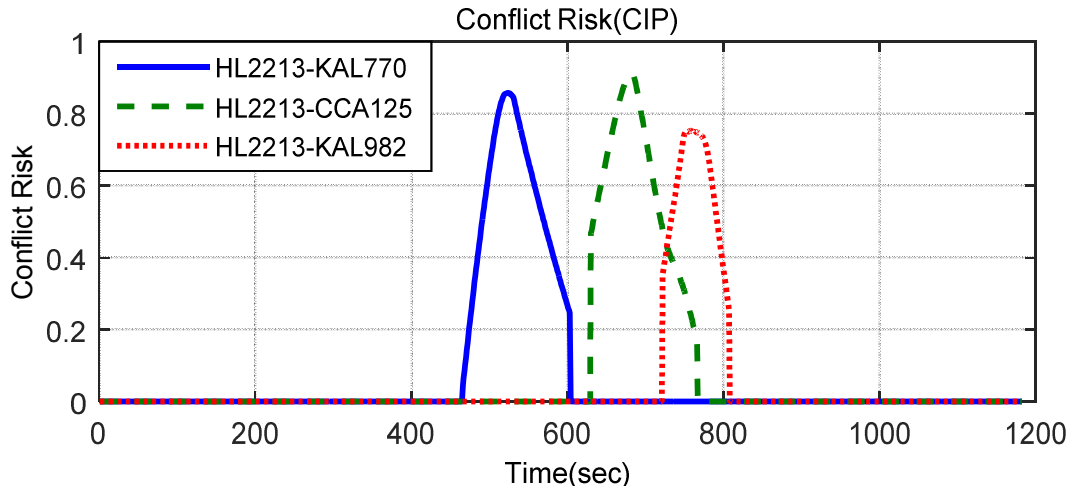


그림 22. Conflict Risk(CIP)

표 12. 각 충돌 위험 상황에 대한 최대 충돌 위험도(CIP)

	HL2213-KAL770	HL2213-CCA125	HL2213-KAL982
Max CIP	0.8577	0.9101	0.7527



두 번째 충돌 위험 탐지 기법인 Well Clear의 경우 CIP는 달리 항공기의 진행방향을 고려한다. 그림 23은 Well Clear 탐지기법을 사용했을 때, 전체 항로 중 유인항공기 - 무인항공기 간 실시간 충돌 위험이 발생하는 구간에 대한 그래프로 그림 21의 CIP에 의한 결과와 비교했을 때, Conflict이 발생하는 구간이 감소했음을 알 수 있다. 이는 항공기의 진행방향을 고려하여 충돌 위험을 판단하기 때문이다. 그림 24는 항공기의 운동에 따른 실시간 LOWC와 정량화 결과, 그리고 Extrapolation을 활용한 경보단계를 도시한 그래프다.

그림 24의 결과로부터 3개의 충돌 위험 상황 모두 충돌 위험이 발생하고, 정의에 따라 LOWC가 발생한다. LOWC가 발생한다는 것은 두 항공기간 거리가 35초 이내에 4,000ft, 특정 시점에서 최소거리가 4,000ft 이내가 될 것으로 예상되고, 현재 항공기간 상대 고도는 450ft 이내임을 의미한다. 또한 현재 항공기 상태로부터 Extrapolation을 통해 충돌 위험 경보단계를 나타낸 결과는 Well Clear에 정의된 표 2의 경보단계 정보 중 가장 높은 단계를 반영하였다.

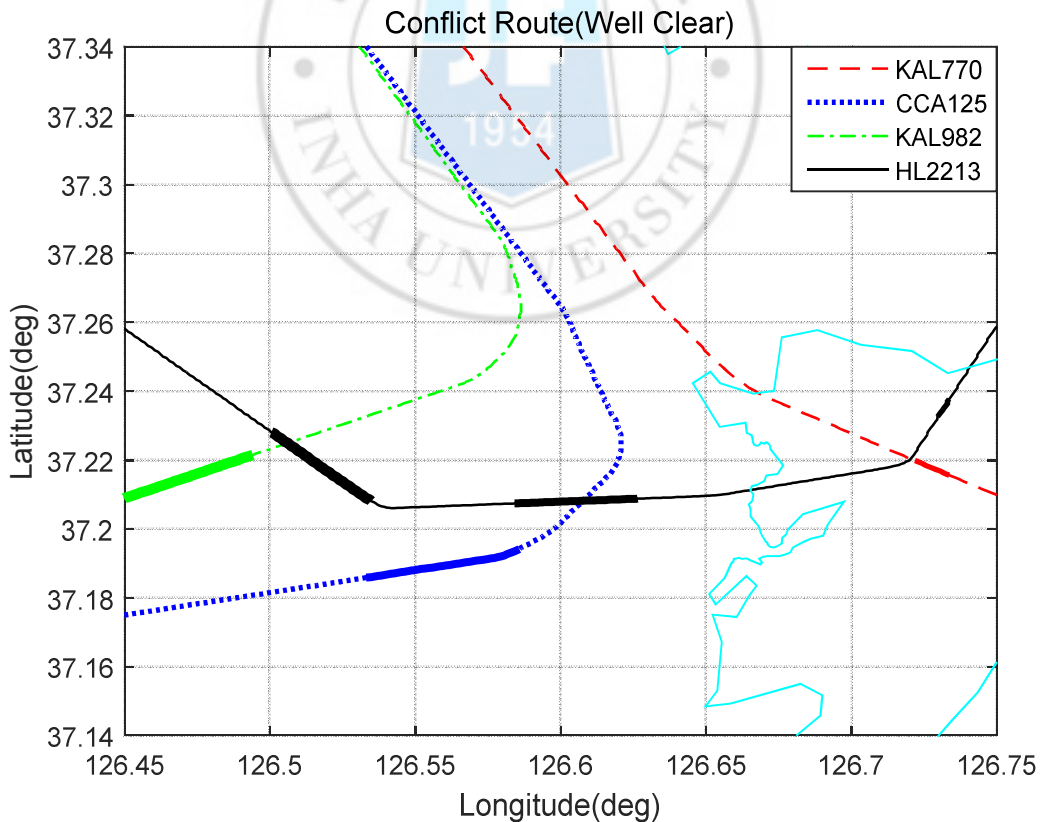


그림 23. Conflict Route(Well Clear)

그림 24에서 항공기 운동에 따른 실시간 충돌 위험 정보는 계단형의 정보단계 추이를 보이고, 최초 Advisory Alert 발령 이후 약 60 - 90초 이후에 LOWC가 발생하게 된다. 이러한 높은 편차의 시간 범위는 항공기의 진행 방향에 크게 영향을 받는다. 마지막으로 식 (8)의 정량화 결과를 반영하여 충돌 위험도를 산출한 결과 연속적인 충돌 위험도 데이터를 획득하였다.

그러나 각 매개변수에 대한 충돌 위험도가  $n_{ref}/n$  형태로 정의되어 있어 현재 상태의 값  $n$ 이 매우 크더라도 해당 값이 0에 무한히 근접하게 된다. 따라서 시뮬레이션 시작 직후부터 10 - 20의 충돌 위험도가 발생하게 된다. 그러나 그림 18의 항공기간 상대거리를 고려할 때, 해당 시점에서 항공기간 상대거리가 상당히 멀기 때문에 충돌이 발생하지 않는다고 볼 수 있고, 이는 20 미만의 충돌 위험도의 경우 충분히 무시할 수 있는 수준임을 의미한다. 또한 정보 단계를 산출할 때와 마찬가지로 항공기의 진행 방향에 따라 충돌 위험도의 변화율이 달라진다. 대표적인 구간으로 HL2321 - CCA125의 충돌 위험도에서 불연속적인

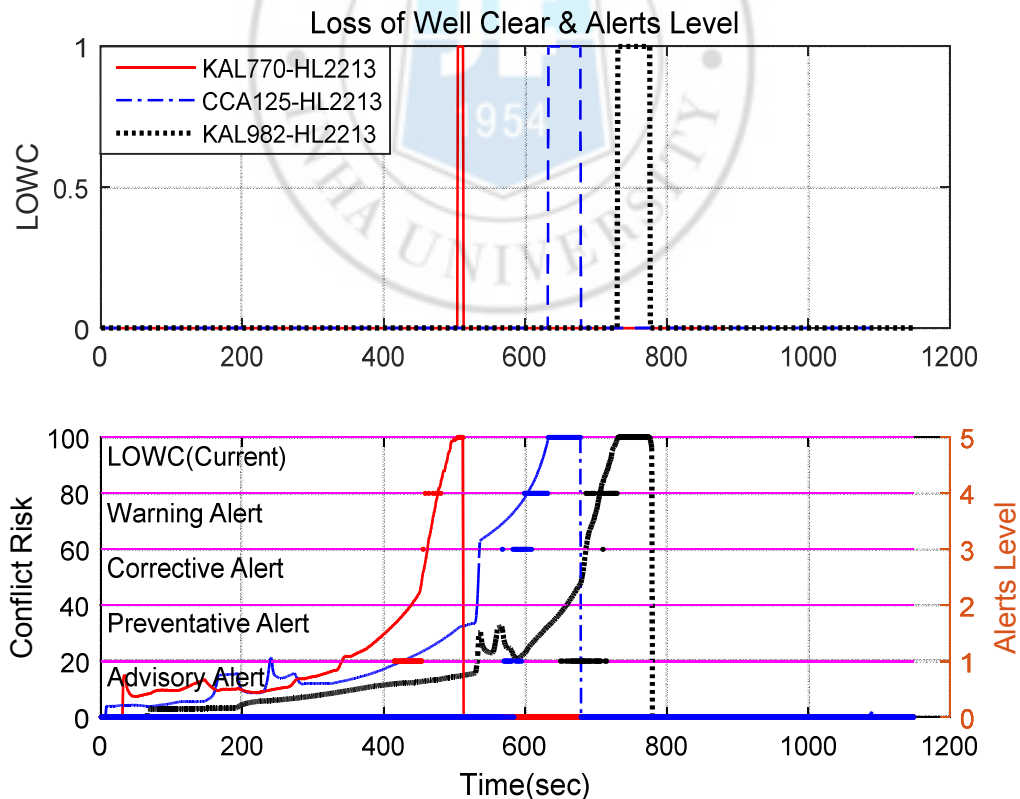


그림 24. LOWC, Conflict Risk(Well Clear)



구간처럼 보이는 부분이 해당되는데, 이 구간의 경우 무인항공기가 KAL770 유인항공기와 충돌 위험이 지난 직후 진행 방향을 변경함에 따른 영향에 의한 것이다. 해당 구간에서 KAL892 유인항공기와의 충돌 위험도 또한 급격히 변화하는 것을 확인할 수 있다. 마지막으로 검증 시나리오에서도 도출되었듯이, 항공기간 교차 및 방향 전환에 따른 충돌 위험 상황 종료 이후 충돌 위험도가 0이 된다.

마지막 충돌 탐지기법인 PAZ의 경우 현재 상태를 바탕으로 별도의 과정 없이 충돌 위험을 예측할 수 있기 때문에, 그림 25와 같이 전체 비행경로 중 충돌 위험 발생 및 예측이 존재하는 구간을 도시하였다. PAZ를 활용한 충돌 위험의 발생 및 예측 구간은 Well Clear와 유사하나 충돌 위험이 지속되는 Intruder 항공기가 Owner 항공기의 PAZ를 진출하는데 소요되는 시간을 고려하기 때문에 동일한 구간에서 충돌 위험이 발생할 경우 상대적으로 PAZ가 더 긴 시간동안 충돌 위험이 지속된다.

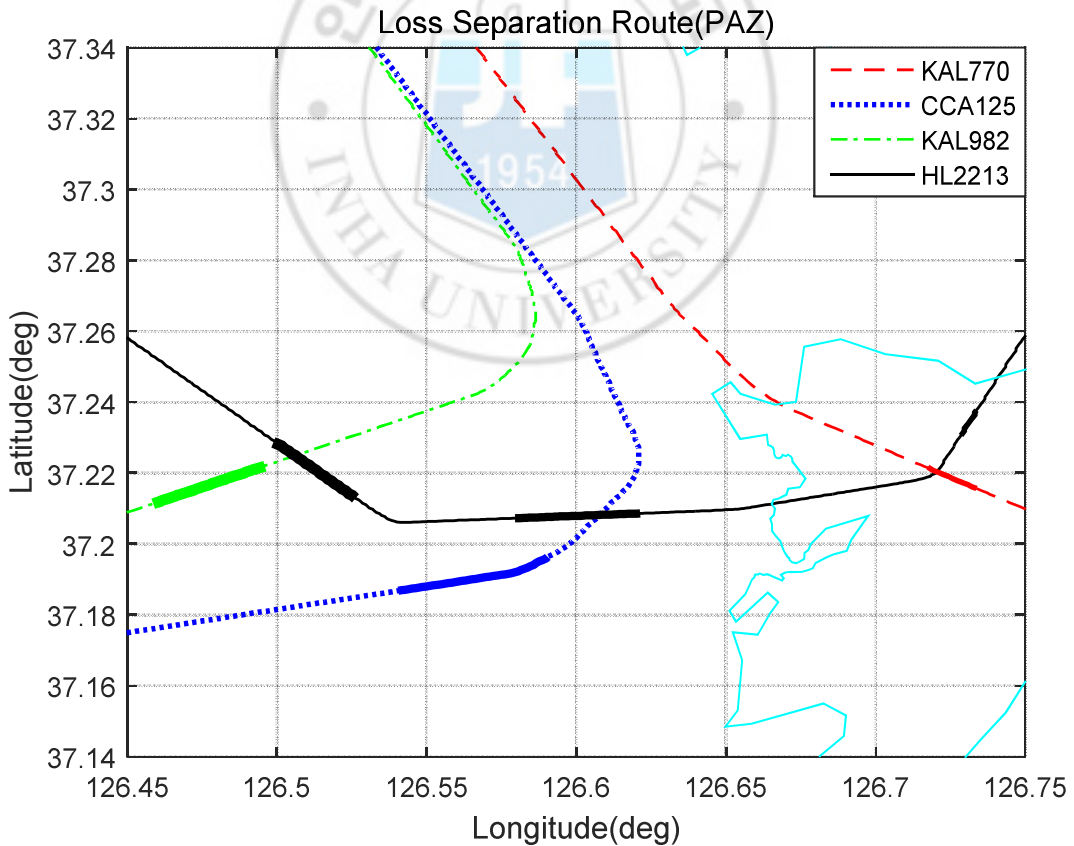


그림 25. Conflict Route(PAZ)

그림 26은 PAZ를 이용한 Separation Violation 및 충돌 위험 판정과, 표 5 - 6의 정의에 따른 충돌 위험도의 정량화 결과를 도시한 그래프이다. 그림 26의 Conflict Predicted(in Time Threshold)는 수평방향과 수직방향을 모두 고려하여 충돌 위험을 판정한 표 4의 C1, C2에 해당되며, Conflict(Current)의 경우 수평방향과 수직방향 각각 표 3의 H3과 V3을 모두 만족하는 경우이다. Well Clear에 대한 결과 그림 24와 비교해 볼 때, 실질적으로 충돌 위험이 발생하는 구간은 매우 짧음을 알 수 있다. 이는 동일 조건에서 최소거리를 예측하여 충돌 위험 판단에 반영하는 Well Clear와는 달리, Owner 항공기의 PAZ에 수평 및 수직방향으로 진입하는 시점을 충돌 위험으로 판단하는 PAZ의 충돌 위험 판단방식의 차이로부터 발생한다. 이에 대한 실시간 충돌 위험도 결과는 연속적인 결과를 도출한 Well Clear와는 달리 불연속적으로 산출되는 문제점이 발생한다. 분석 결과 이에 대한 원인은 항공기의 상태를 바탕으로 수평방향의 PAZ 진입시간을 분석할 때, 표 3의 H5에 해당되기 때문으로 파악되었다. H5의 의미는 “해가 없음”이고, 이는 Intruder 항공기가 Owner 항공기의 PAZ에 진입할 경우가 없음을 의미하기 때문에 물리적으로 타당하다고 볼 수 있다.

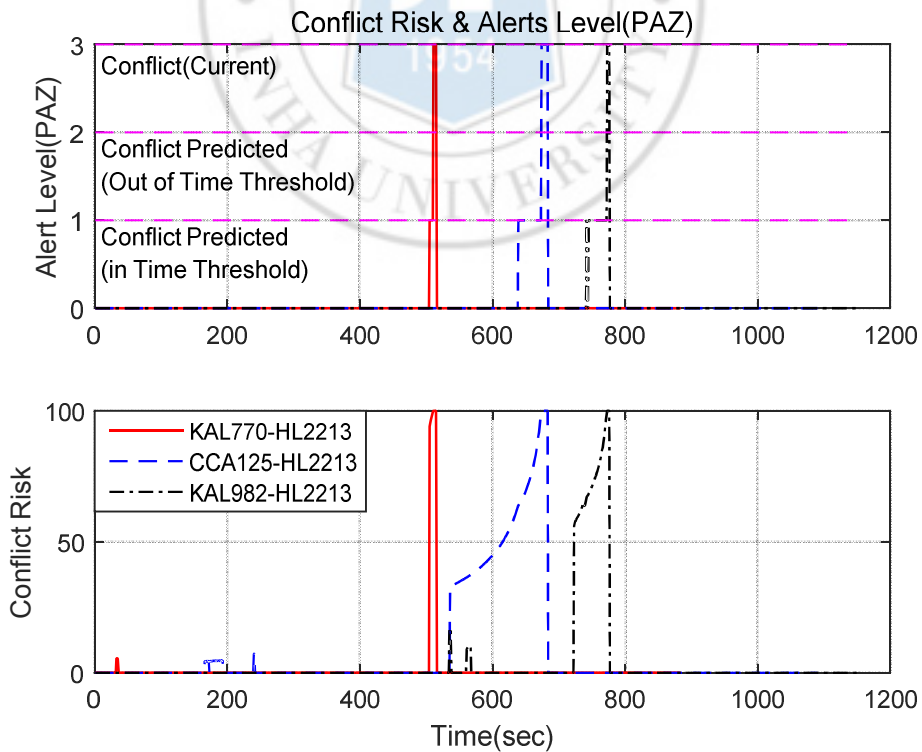


그림 26. Conflict Risk, Alert Level(PAZ)

### 5.3 충돌 위험도 및 확률 분석을 통한 위험단계 구분

산출한 충돌 위험도 정량화 결과와 항공기간 충돌 위험이 발생하는 영역에 대해 불확실성을 고려하여 임의의 경로점을 통과하도록 각 탐지기법 및 충돌 위험도 별 500회씩 반복 시뮬레이션 한 결과는 그림 27 - 28과 같다. 충돌 위험도와 충돌 확률간의 관계에 대해 그림 27 - 28에서의 결과 차이는 임의로 생성되는 경로점의 통과 위치 선정 결과에 근거한다.

Well Clear에 의한 충돌 위험도와 충돌 확률간의 관계는 충돌 위험도가 90이 되는 지점을 기준으로 그 이후의 지점에서 항공기가 기동할 경우 LOWC와 LOS의 발생 횟수 및 충돌 확률의 변화가 급격히 증가하고, 이전 지점에서 회피 기동을 수행할 경우 변동이 거의 없음을 보인다. 이는 실시간 충돌 위험도의 결과가 90 이전일 경우 항공기의 충돌 위험에 대해 주의를 기울여야 함을 의미하고 반대의 경우 충돌 회피를 수행해야 하는 기준점이 됨을 의미한다. 그러나 주의 단계의 경우, 충돌 확률이 약 40%대를 유지하고 있기 때문에 산출된 충돌 위험도가 50 이하인 지점에서는 실제 충돌 확률보다 낮게 충돌 위험도가 산출되는 Under Warning이, 50 초과인 지점에서는 과도한 충돌 위험인 Over Warning이 발생하는 것으로 추정해 볼 수 있다.

한편, PAZ에 의한 충돌 위험도와 충돌 확률 간 관계의 경우 Well Clear와 마찬가지로 충돌 위험도 90을 기준으로 변화가 발생한다. 따라서 PAZ의 경우에도 충돌 위험도가 90 이하일 경우 주의가 요구되고, 90을 초과하는 지점부터는 항공기의 기동이 요구된다고 볼 수 있다. 또한 충돌 위험도가 40이 되는 지점을 기준으로 이전 위치의 경우 산출된 충돌 위험도가 충돌 확률보다 낮은 Under Warning이 발생하고, 40 이후의 위치의 경우 산출된 충돌 위험도가 충돌 확률보다 높게 나오는 Over Warning이 발생하는 것으로 추정해 볼 수 있다.

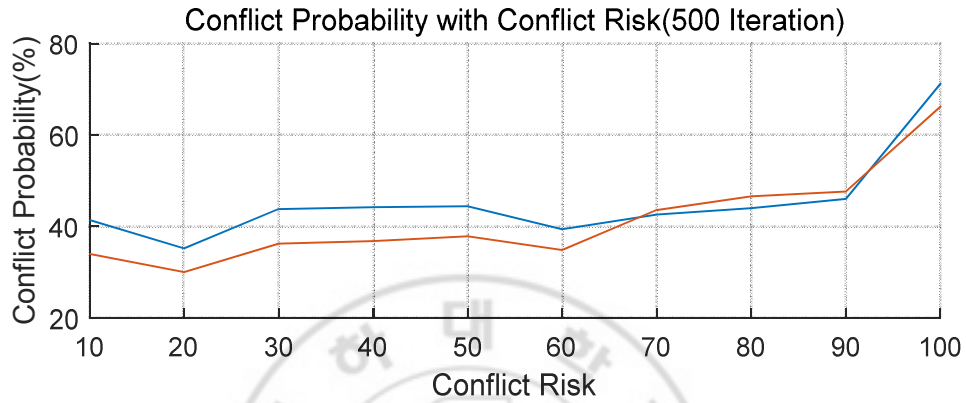
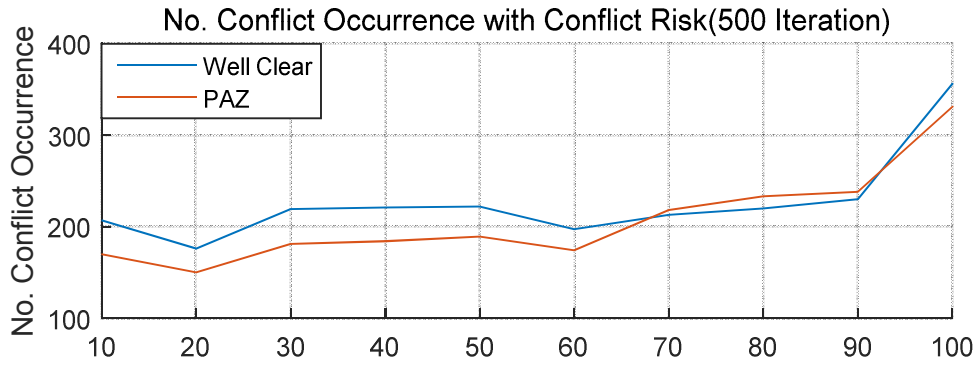


그림 27. 충돌 위험도 - 충돌 확률 관계(1)

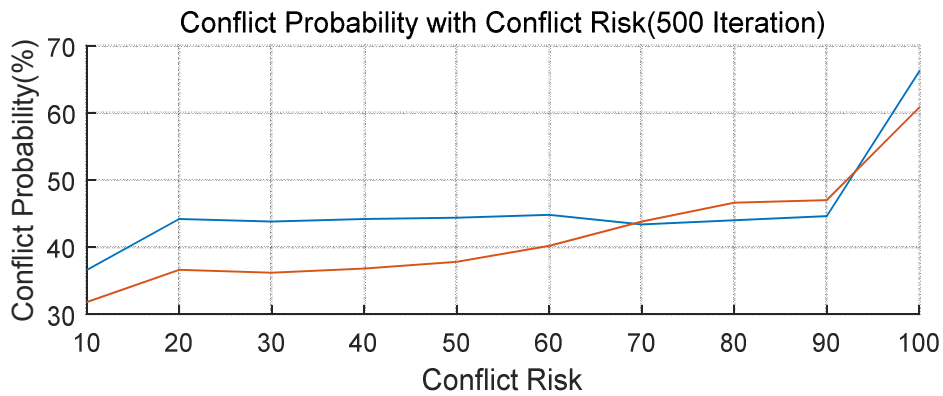
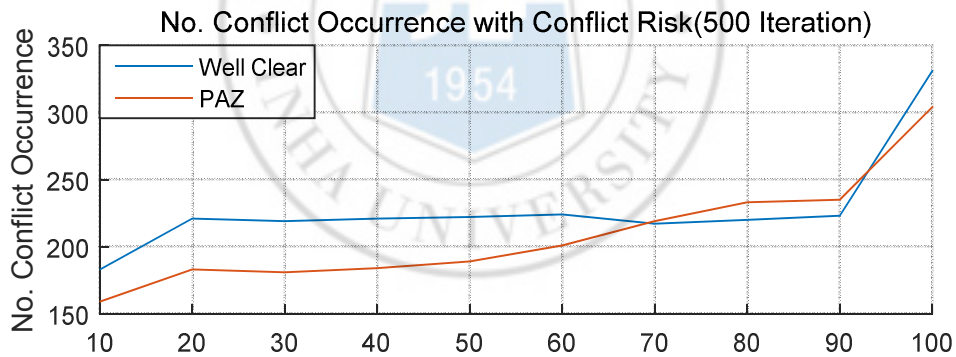


그림 28. 충돌 위험도 - 충돌 확률 관계(2)

이러한 충돌 위험단계의 구분은 기존 항로에서 회피기동을 수행하는 시점에 따른 충돌 위험도의 비율로부터 보다 명확하게 확인할 수 있다. 그림 29는 그림 27에 대한 구간별 충돌 위험도 산출 결과이다. 그림 29에서 Well Clear의 경우 10 - 40의 충돌 위험도를 나타내는 지점에서 회피 기동을 수행했을 경우 산출된 각 충돌 위험도의 결과에는 큰 차이가 없으나, 50의 충돌 위험도를 나타내는 지점 이후에서 회피 기동을 수행할 경우 높은 수준의 충돌 위험도에 대한 비율이 점진적으로 증가함을 확인할 수 있으며, 90의 충돌 위험도를 나타내는 지점에서 회피 기동을 수행할 경우 100의 충돌 위험도를 가지는 비율이 급격히 증가함을 알 수 있다.

PAZ의 경우, 10 - 40의 충돌 위험도를 나타내는 지점에서 회피 기동을 수행할 경우 각 충돌 위험도의 변화에는 큰 차이가 없다. 40의 충돌 위험도를 나타내는 지점 이후부터 각 충돌 위험도의 비율에 변화가 발생되기 시작하지만 높은 수준의 충돌 위험도의 비율에는 영향이 없다. 높은 수준의 충돌 위험도에 직접적인 변화가 발생하는 시점은 60 이후의 충돌 위험도를 나타내는 지점에서 회피 기동을 수행할 경우로, 앞서 설명한 40의 기준보다 높다. 따라서 PAZ의 경우 Well Clear와는 다르게 낮은 충돌 위험 단계를 나타내는 경우에도 Over Warning이 존재한다고 볼 수 있다. Well Clear와 PAZ로부터 산출되는 충돌 위험도에 대한 충돌 경고 단계는 표 13 - 14와 같이 정리할 수 있다.

표 13. Well Clear의 충돌 위험도에 따른 충돌 위험 단계 구분

충돌 위험도	Risk ≤ 50	50 < Risk ≤ 90	Risk > 90
충돌 위험 단계	낮음 (Under Warning)	주의 (Over Warning)	높음 (기동 수행 요구)

표 14. PAZ의 충돌 위험도에 따른 충돌 위험 단계 구분

충돌 위험도	Risk ≤ 40	40 < Risk ≤ 60	60 < Risk ≤ 90	Risk > 90
충돌 위험 단계	낮음		주의	높음 (기동수행 요구)
	(Under Warning)	(Over Warning)		

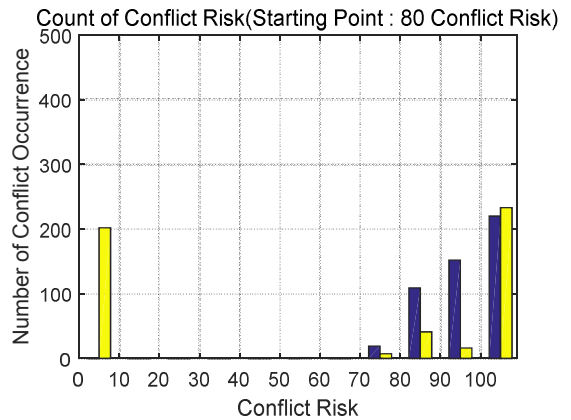
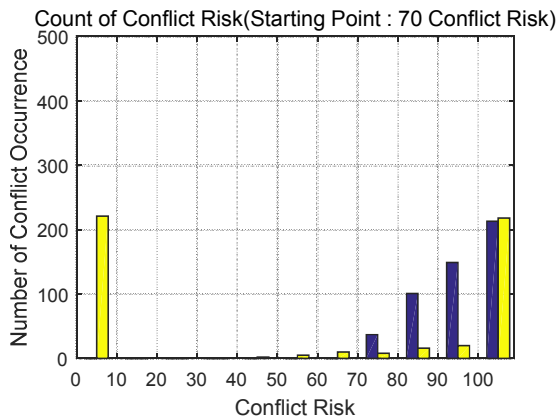
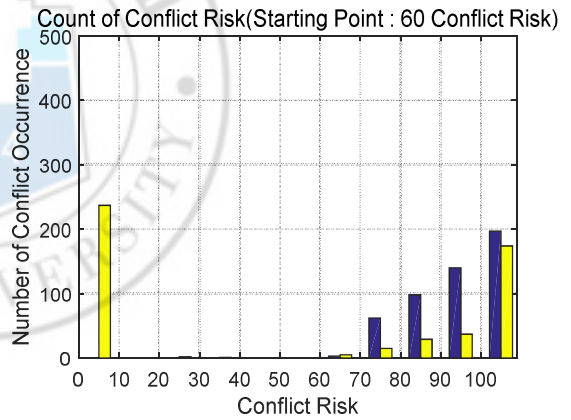
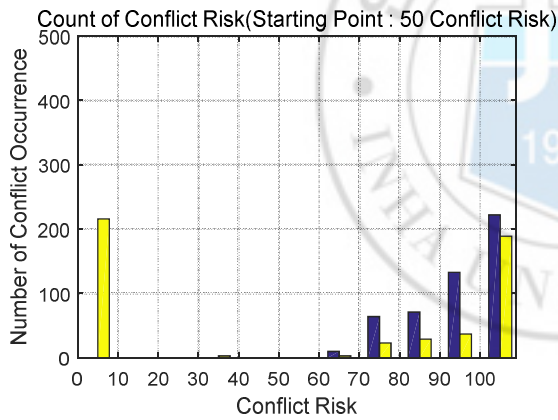
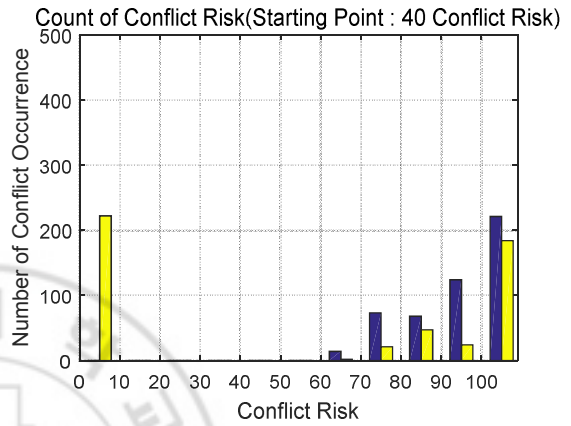
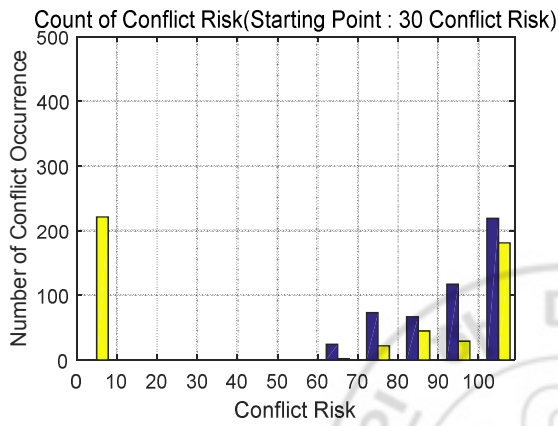
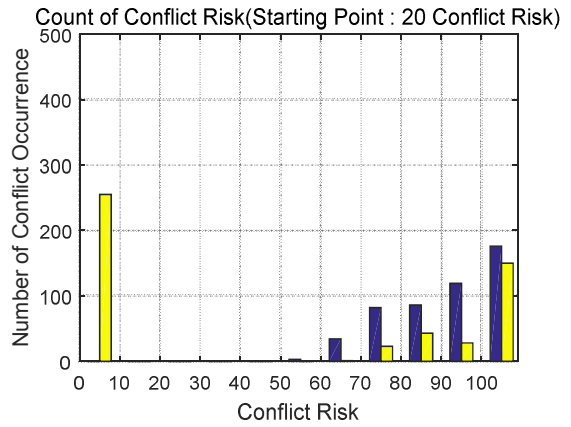
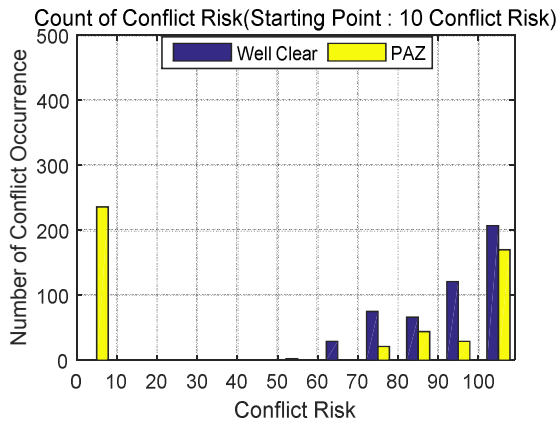


그림 29. 회피 기동 시점 별 충돌 위험도 산출 결과

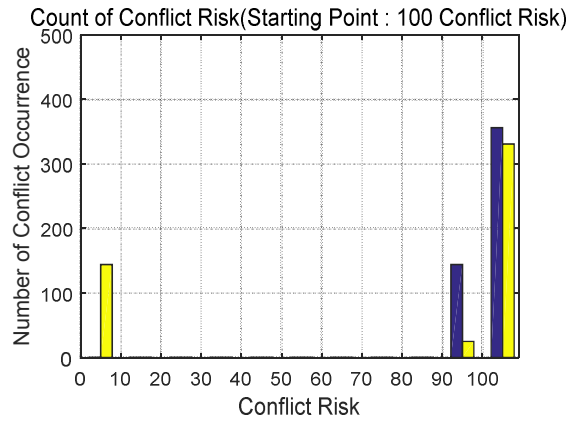
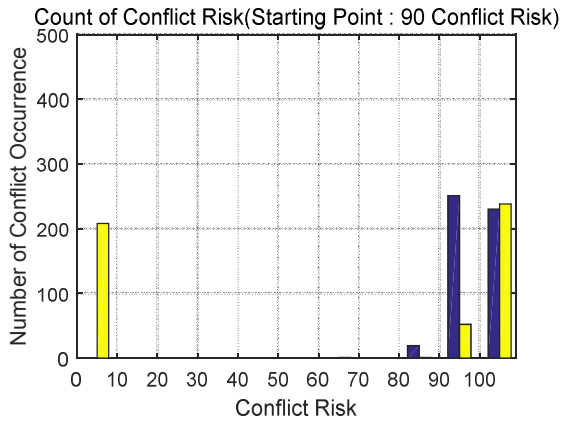


그림 29. 회피 기동 시점 별 충돌 위험도 산출 결과(계속)



## 6. 결론

향후 기존의 유인항공기 운용을 위한 공역에 무인항공기를 운용하기 위해서는 안전 및 운용의 측면에 대한 법률 및 기술적인 제반 연구가 필요하다. 특히 항공기간 공중 충돌은 상당한 인적, 물적 손실을 야기하기 때문에 항공기 간 충돌 위험상황이 발생했을 때, 충돌 위험으로부터 벗어나기 위한 회피명령을 수행하는 것이 중요하다. 그러나 충돌 위험에 대한 회피 기동 알고리즘은 항공기의 충돌 위험 예측 및 회피 기동 시점에 따라 영향을 받기 때문에 이에 대한 연구가 선행적으로 요구된다. 본 논문에서는 별도의 분리기준이 없는 접근관제공역에서 시계비행이 불가능한 무인항공기의 안전을 보장할 수 있는 제반 연구로, 조사된 3개의 기법인 CIP, Well Clear, PAZ에 대한 기본적 특성 비교와 임의의 항공기 및 실제 접근관제공역에서 운항한 항공기의 항적으로 구성된 시나리오를 바탕으로 탐지기법별 충돌 위험 판정에 대한 성능 비교를 수행과, 각 탐지기법 별로 정의된 충돌 위험을 판정하는 변수를 활용하여 항공기의 충돌 위험을 연속적인 수치로 나타낼 수 있는 정량화 방법을 제시하였다. 또한, 다양한 시나리오를 활용하여 정량화 결과에 대한 분석과 실제 충돌 확률과의 비교를 통해 유효성에 대한 분석을 수행하였다.

그 결과, 각 충돌 탐지기법에 대한 적용 가능 공역, 직관성, 연산 시간 등의 기본적인 특징을 우선적으로 비교할 수 있었다. CIP의 경우 충돌 위험의 판정에 대해 정량화된 값을 도출하는 직관적인 특징을 가지지만, 항공기의 진행 방향을 고려하지 않기 때문에 항공기간 최소거리 지점을 통과한 이후에도 충돌 위험이 발생하게 된다. Well Clear와 PAZ의 경우 On/Off 개념의 충돌 위험 탐지로 정량화된 값을 도출에 제약이 있고 다양한 변수를 바탕으로 충돌 위험도를 판정하기 때문에 CIP에 비해 직관성이 떨어지나, 항공기의 진행 방향을 고려하여 충돌 위험을 판정하고 미래 시점의 충돌 위험을 예측하는 특징이 있어 항공기의 밀집도가 높은 접근관제공역에서의 활용에 용이한 특징이 있다. 또한, 두 탐지기법에 대한 정량화를 수행한 결과 대상항공기의 상태에 따른 충돌 위험을 수치적으로 정량화 할 수 있었다. 그러나 PAZ의 경우 충돌 위험 판정 변



수로 부터 정의된 Conflict Type에 따라 충돌 위험도의 산출 결과에서 불연속점이 다수 발생하는데, 이는 Intruder 항공기가 Owner 항공기의 PAZ에 진출입하는 시점을 바탕으로 충돌 위험을 판단하는 PAZ 기법의 특성에 기인한다. 마지막으로, 충돌 위험도의 정량화 과정은 각 탐지기법 별로 충돌 위험을 판단하는 변수로 해당 변수의 기준 값을 나누기 때문에 비선형적 특징을 가지게 된다. 이러한 이유로 산출된 충돌 위험도는 실제 항공기의 충돌 확률이라 볼 수 없다. 반복 시뮬레이션을 통해 충돌 위험도와 충돌 확률을 비교한 결과, 탐지 기법에 대한 Over / Under Warning과 충돌 위험도에 따른 충돌 위험 단계 구분을 수행하여 산출된 충돌 위험도에 대한 유효성을 확인할 수 있었다.

충돌 위험의 탐지는 충돌 회피를 위한 첫 단계로, 항공기의 안전을 보장하는데 기초가 되는 요소로써, 적시에 수행하는 것이 무엇보다도 중요하다. 본 연구를 통해 충돌 위험도에 대한 정량화를 수행함으로써 통합 공역 내 접근관제공역에서의 충돌 회피 알고리즘 구성에 보조적 역할을 수행과 유/무인항공기의 운항 안정성을 확보할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 지속적으로 증가하는 항공기 수요와 교통량의 증가추세에서 접근관제공역을 관할하는 관제사의 업무부담 감소 및 항공기 도착 관리 효율성을 증대시킴으로써 효율적인 공항 시스템의 운영 또한 기대해 볼 수 있다.

## 7. 참고문헌

- [1] 항공교통센터, [http://acc.molit.go.kr/USR/WPGE0201/m\\_16182/LST.jsp](http://acc.molit.go.kr/USR/WPGE0201/m_16182/LST.jsp), 2015.11.24.
- [2] 차세대 항공 항행 시스템 특론 강의자료 Week 14, pp. 23-24, 2014.
- [3] 정세훈, 조환희, 오혜주, 최기영, 이학태, (2014), ‘차세대 항행 시스템을 고려한 항공관제시물레이터 서버 및 조종사 스테이션 구현’, *한국항공우주학회 2014년도 추계학술대회*, 한국항공우주학회, pp. 1715-1718.
- [4] 한국공항공사 공항별 통계, <http://www.airport.co.kr/user/www/396/stats/airportStats/jsp/LayOutPage.do>, 2015.11.24.
- [5] 정세훈, 오혜주, 최기영, 이학태, (2015), ‘항공관제시물레이터를 이용한 항공기간 회피 기동의 위험도 분석’, *한국항공우주학회지*, Vol. 43, No. 8, pp. 739-747.
- [6] 2014 Safety Report, ICAO, [http://www.icao.int/safety/documents/icao\\_2014%20safety%20report\\_final\\_02042014\\_web.pdf](http://www.icao.int/safety/documents/icao_2014%20safety%20report_final_02042014_web.pdf), 2015.11.26.
- [7] Valenzuela, A., Rivas, D., Vázquez, R., del Pozo, I., Vilaplana, M., (2012), ‘Conflict Resolution with Time Constraints in Trajectory Based Arrival Management’, *Second SESAR Innovation Days*, SESAR, Braunschweig.
- [8] 김유단, 이금진, (2003), ‘항공교통관리 기술의 개발동향’, *한국항공우주학회지*, Vol. 31, No. 10, pp. 120-133.
- [9] Kelly, W. E., Collins, R., Rapids, C., (1999), ‘Conflict Detection and Alerting for Separation Assurance Systems’, *Proceeding of the 18<sup>th</sup> Digital Avionics Systems Conference*, IEEE, St Louis, Vol. 2, pp.6.D.1-1 – 6.D.1-8.

- [10] Krozel, J., Mueller, T., Hunter, G., (1996), 'Free Flight Conflict Detection and Resolution Analysis', *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, San Diego, Paper No. AIAA-96-3763.
- [11] Shewchun, J. M., Oh, J. H., Feron, E., (1997), 'Linear Matrix Inequalities for Free Conflict Problems', *Proceeding of the 36<sup>th</sup> Conference on Decision & Control*, IEEE, San Diego, Vol. 3, pp. 2417-2422.
- [12] Tomlin, C., Mitchell, I., Ghosh, R., (2001), 'Safety Verification of Conflict Resolution Maneuvers', *Intelligent Transportation System, IEEE Transaction on*, Vol. 2, No. 2, pp.110-120.
- [13] Krozel, J., Peters, M., (1997), 'Strategic Conflict Detection and Resolution for Free Flight', *Proceeding of the 36<sup>th</sup> Conference on Decision & Control*, IEEE, San Diego, California, USA, pp. 1822-1828.
- [14] Kim, K. Y., Park, J. W., Thak, M. J., (2008), 'A Probabilistic Algorithm for Multi-aircraft Collision Detection and Resolution in 3-D', *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 9, No. 2, pp. 1-8.
- [15] Paielli, R. A., Erzberger, H., (1997), 'Conflict Probability Estimation for Free Flight', *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 20, No. 3, pp. 588-596.
- [16] Yang, L., Kuchar, J., (1997), 'Prototype Conflict Alerting System for Free Flight', *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 20, No. 4, pp. 768-773.

- [17] Bilimoria, K. D., Lee, H. Q., (1995), 'Properties of Air Traffic Conflicts for Free and Structured Routing', *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, Montreal, Canada, Vol. Pt.1, pp. 259-266.
- [18] Radio Technical Commission for Aeronautics(RTCA), (2015), 'RTCA SC-228 DDA Draft MOPS'.
- [19] 강지수, 오혜주, 최기영, 이학태, (2015), 'ADS-B 수신기가 결합된 항공 관제시뮬레이터 활용방안 연구', *한국항공우주학회 2015년도 추계학술대회*, 한국항공우주학회, pp. 2132-2135.
- [20] FAA Aviation Safety Information Analysis and Sharing (ASIAS), [http://www.asias.faa.gov/pls/apex/f?p=100:35:0::NO::P35\\_REGION\\_VAR:2](http://www.asias.faa.gov/pls/apex/f?p=100:35:0::NO::P35_REGION_VAR:2), 2015.11.26.

