



저작자표시 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.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 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

공역 통과량 산출 및 관제사 지시명령을 이용한 공역
혼잡도 분석 연구

A Study on the Analysis of Airspace Congestion Using
Airspace Throughput and Radar Vectoring Instructions



2023년 2월

인하대학교 대학원

항공우주공학과(항공우주공학전공)

강진혁

공학석사학위 논문

공역 교통량 산출 및 관제사 지시명령을 이용한 공역
혼잡도 분석 연구

A Study on the Analysis of Airspace Congestion Using
Airspace Throughput and Radar Vectoring Instructions



2023년 2월

지도교수 이 학 태

이 논문을 석사학위 논문으로 제출함

이 논문을 강진혁의 석사학위논문으로 인정함.

2023년 2월



주심 김 종 한 (인)

부심 이 학 태 (인)

위원 목 성 훈 (인)

초록

COVID 19로 인해 전 세계 항공 교통량이 감소하였지만, 항공기 운용 대수 상승 및 드론, UAM과 같은 차세대 항공교통운송 수단이 상용화됨에 따라 미래 항공 교통량은 지속적으로 증가할 전망이다. 이에 따라 효율적이고 체계적인 차세대 항공교통관리에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) 항적 데이터를 활용하여 항공교통관리에 관한 다양한 연구를 수행하고 있다.

본 논문은 ADS-B 항적 데이터를 분석하여, 대한민국 관제구역인 인천 FIR에 속해있는 각 공역(Airspace)의 시간대별 항공 교통량을 분석하고자 한다. 이를 위해 Aeronautical Information Publication (AIP)에 기재된 지역관제구역(Sector)와 접근 관제구역(TMA)의 공역 좌표를 분석하여 좌표 투영법 차이 등으로 인해 발생한 공역 좌표 불일치 영역을 제거하는 공역 좌표 보정 알고리즘을 개발하였다. 그 후 2019년 1년간 인천 FIR 내를 비행한 약 100만대의 항공기 ADS-B 항적 데이터를 대상으로 좌표 보정이 완료된 공역을 통해 각 공역별 교통량을 산출하였다.

또한 본 논문은 ADS-B 항적 데이터를 분석하여 항공기가 운항했을 당시 수행된 관제사의 레이더 유도(Vectoring) 지시사항을 추정하기 위해 항적 좌표를 통한 관제사 지시 명령 추정 알고리즘을 개발하였다. 이를 위해 인하대학교에서 개발한 비행 계획 추정 알고리즘을 사용하였으며, 추정된 각 항적의 비행 계획을 통해 관제사 지시명령의 횟수와 종류를 추정하였다.

최종적으로 본 논문은 공역 교통량 산출 결과와 관제사 레이더 유도 지시사항 추정 결과를 통합하여 대한민국 공역 및 항로의 교통 혼잡도를 수치적으로 나타내고자 한다. 본 논문에서 제시하는 교통 혼잡도 분석 결과는 데이터 기반 항공교통관리 체계 구축 시 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

Abstract

Although the global air traffic volume has decreased due to COVID-19, the future air traffic volume is expected to increase as the number of aircraft operated increases and next-generation air transportation such as drones and UAM are commercialized. Accordingly, research on efficient and systematic next-generation air traffic management is being actively conducted. In particular, various studies on air traffic management are being conducted using Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) trajectories.

This paper analyzes the ADS-B trajectories to calculate the amount of aircraft passing by time in each airspace belonging to the Incheon FIR. To this end, the airspace coordinates of TMA and Sector described in the Aeronautical Information Publication (AIP) were analyzed in this paper, and an airspace coordinate correction algorithm was developed to remove the airspace coordinate discrepancy area. After that, the throughput for each airspace was calculated based on the ADS-B trajectories of about 1 million aircraft that flew within the Incheon FIR for one year in 2019.

In addition, this paper developed an algorithm for estimating the radar vectoring instructions of controllers through ADS-B trajectories analysis. For this end, the flight plan estimation algorithm developed by Inha University was used.

Finally, this paper analyzed the traffic congestion of airspaces and routes in Korea through result of airspace throughput and estimation of controller's radar vectoring instructions. The traffic congestion analysis results presented in this paper are expected to be useful when constructing a data-based air traffic management system.

Key-words : ATM(항공교통관리), Air Traffic Controller(항공 교통 관제사),
Airspace Capacity(공역 수용량), Aircraft Count(공역 내 항공기 수), Sector(지역관
제구역), TMA(접근관제구역), Dynamic Density(공역 혼잡도),



차례

제 1 장. 서론	1
1.1 연구 배경	1
1.1.1 공역 혼잡도 상승	1
1.1.2 항공 교통 관리 시스템	2
1.2 연구 목표	5
1.3 연구 방향	6
제 2 장. 공역 교통량	7
2.1 ADS-B 항적 데이터	7
2.2 대한민국 공역 좌표 보정	8
2.2.1 기존 공역 좌표 분석	8
2.2.2 공역 좌표 보정 알고리즘 개발 및 구현	11
2.3 공역 내 항적 진입 여부 판단	14
2.4 공역 교통량 산출	17
2.5 각 공역의 1일 교통량 비교분석	20
제 3 장. 관제사 지시명령 추정	23
3.1 비행 계획 추정	23
3.2 관제사 지시명령이 반영된 항적 좌표 추정	25
3.2.1 특징 좌표 판별	25
3.2.2 관제사 지시명령 추정 알고리즘	30
3.3 각 공역별 수행된 관제사 지시명령 종류 및 횟수 산출	32

제 4 장. 공역 혼잡도 분석	36
4.1 각 공역별 혼잡도 비교분석	36
4.2 Dynamic Density 공역 혼잡도 산출 기법 검증	37
4.2.1 Dynamic Density 공역 혼잡도 산출 기준	37
4.2.2 Human-in-The-Loop (HiTL) 시뮬레이션	38
4.2.3 HiTL 시뮬레이션 기반 Dynamic Density 공역 혼잡도 판별 기법 검증	41
4.3 대한민국 공역 Dynamic Density 산출	42
제 5 장. 결론	46
제 6 장. 참고문헌	48
제 7 장. 부록	50
7.1 미래 항공 교통량 예측 모델	50
7.1.1 가우시안 혼합 모델(GMM)을 활용한 공역 교통량 데이터 군집화	50
7.1.2 항공 교통량 예측 결과	52
7.2 대한민국 공역(Sector, TMA) Dynamic Density 산출 결과	54
7.3 방위각 변경 지시명령 추정 단계별 과정	56

그림 차례

그림 1.1 전 세계 항공 수요 성장률	2
그림 1.2 지역별 항공 수요 성장률	2
그림 1.3 공역의 세분화	3
그림 1.4 대한민국 지역관제구역(Sector) 구성	4
그림 1.5 공역에 따른 출·도착 항공기 항적 분류	5
그림 1.6 연구 방향 흐름도	6
그림 2.1 2019년 인천 FIR을 진입한 항공기의 ADS-B 항적 데이터	7
그림 2.2 대한민국 지역관제구역(Sector), 접근관제구역(TMA)	9
그림 2.3 공역 좌표 및 항적 데이터 좌표 투영 결과	10
그림 2.4 공역 좌표 불일치 유형	11
그림 2.5 좌표 보정 대상 선분 주위 설정 범위	13
그림 2.6 공역 좌표 보정 결과	13
그림 2.7 ADS-B 항적 데이터 선형 보간	14
그림 2.8 공역 내 항적 진입 여부 판별 과정	15
그림 2.9 고도 경계면 통과 경우에 따른 진입 공역 변동	16
그림 2.10 시간대별 공역의 항공 교통량 산출 과정	17
그림 2.11 인천 북부 Sector의 2019년 공역 교통량 산출 결과	18
그림 2.12 제주 TMA의 2019년 공역 교통량 산출 결과	19
그림 2.13 인천 북부 Sector의 2019년 하루 24시간 교통량 중첩 결과	20
그림 2.14 2019년 인천 북부 Sector의 상위 5%, 최빈값, 하위 5% 항공 교통량	21
그림 3.1 비행 계획 추정 알고리즘을 활용한 비행 계획 추정 결과	24
그림 3.2 RDP 알고리즘을 이용한 선분 단순화 과정	25
그림 3.3 ϵ - 특징 좌표 개수 N 그래프	26

그림 3.4 방위각 지시명령 추정을 위한 특징 좌표 판별 결과	27
그림 3.5 고도 데이터 Low Pass Filter 결과	28
그림 3.6 속도 데이터 Low Pass Filter 결과	29
그림 3.7 관제사 지시명령이 반영된 항적 좌표 추정 알고리즘 Decision Tree	31
그림 3.8 방위각 변경 지시명령이 반영된 항적 좌표 추정 Case 분류	32
그림 3.9 2019년 인천 남부 Sector의 관제사 지시 방위각 변경 명령 횟수	33
그림 3.10 2019년 인천 남부 Sector의 관제사 지시 고도 변경 명령 횟수	34
그림 3.11 2019년 인천 남부 Sector의 관제사 지시 속도 변경 명령 횟수	35
그림 4.1 항로 기반 항공 교통 흐름	36
그림 4.2 각 시뮬레이션에 따른 CWP 화면 범위	39
그림 4.3 HiTL 시뮬레이션의 Dynamic Density와 ISA Workload 평가 결과 비교	41
그림 4.4 제주 Sector의 Dynamic Density 산출 결과	43
그림 4.5 2019년 대한민국 Sector(지역관제구역) Dynamic Density 산출 결과	44
그림 4.6 2019년 대한민국 TMA(접근관제구역) Dynamic Density 산출 결과	45
그림 7.1 제주 Sector 항공 교통량 2번 군집	50
그림 7.2 제주 Sector 항공 교통량 5번 군집	51
그림 7.3 제주 Sector 항공 교통량 군집들의 중심값(Centroid)	51
그림 7.4 2019년 12월 15일 제주 Sector 항공 교통량 예측 결과	52
그림 7.5 2019년 12월 15일 제주 Sector 항공 교통량 데이터 예측 결과	53
그림 7.6 방위각 변경 지시명령 추정 대상 항적 좌표	56
그림 7.7 방위각 변경 지시명령 추정 단계 1: 비행 계획 추정	57
그림 7.8 방위각 변경 지시명령 추정 단계 2: 특징 좌표 판별	58
그림 7.9 방위각 변경 지시명령 추정 단계 3: 최종 항적 좌표 추정	59
그림 7.10 방위각 변경 지시명령이 반영된 항적 좌표 추정 결과	60

표 차례

표 1.1	공역의 구분	1
표 2.1	ADS-B 항적 데이터 정보	8
표 2.2	람베르트 정각원추도법 투영 기준 좌표 정보	8
표 2.3	2019년 1월 1일 AAR8141 공역 통과 여부 판별 결과	10
표 2.4	좌표 불일치 공역의 개수	11
표 2.5	공역 좌표 불일치 유형 분류	11
표 2.6	공역 좌표 보정 유형별 분류	12
표 2.7	대한민국 Sector의 상위 5% 공역 교통량 및 해당 시간대	22
표 2.8	대한민국 TMA의 상위 5% 공역 교통량 및 해당 시간대	22
표 3.1	추정 대상 비행 계획	23
표 4.1	Dynamic Density 각 항목별 가중치	38
표 4.2	대한민국 Sector의 상위 5% 공역 교통량 및 해당 시간대	39
표 4.3	ISA Workload 평가 척도	40
표 4.4	Controller ISA Workload 측정 예시	40
표 7.1	대한민국 Sector Dynamic Density 산출 결과	54
표 7.2	대한민국 TMA Dynamic Density 산출 결과	55

1. 서론

1.1 연구배경

항공 교통량의 지속적인 증가는 공역 내 교통 혼잡도 상승을 불러일으키고 있으며 따라서 이를 관리하는 관제사의 업무 강도 또한 높아지고 있다^[1]. 항공관제 시스템의 완전 자동화가 이뤄지지 않은 상태에서 관제사의 판단이 주요하게 작용하는 한, 관제사의 업무 강도 증가는 항행 안전을 저해하는 심각한 위험 요소가 될 것이다. 이에 따라 차세대 항공 항행 시스템 구축의 일환으로 관제사를 보조해 줄 관제 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[2]. 그러나 항공관제 시스템은 기본적으로 공역의 수용량을 기반으로 구축되기에, 수용량을 뛰어넘는 교통량이 발생하게 되면 시스템이 효율적으로 작동하지 않을 가능성이 크다. 따라서 항공 교통량 관리를 통해 공역의 수용량을 초과하지 않음과 동시에 공역 혼잡도 상황을 해소하여 관제사의 업무량을 감소시키기 위한 연구 또한 진행되고 있다.

1.1.1 공역 혼잡도 상승

COVID 19로 인해 전 세계 항공 교통량이 정체됐었지만, 운용 항공기 대수 증가 및 드론, UAM 등 차세대 항공교통운송 수단의 상용화에 따라 미래 항공 교통량은 꾸준히 증가할 것으로 전망된다. 그림 1.1과 1.2는 ACI World Airport Traffic Forecasts에서 제공한 전 세계 항공 수요의 성장 상황을 인천국제공항에서 정리한 그래프로, COVID 19가 발병했던 2020년부터 2022년까지는 항공 수요가 확연히 감소했지만, 2023년부터는 항공 수요 상승률이 회복되어 2040년에 총 항공 여객 수가 약 20억 명에 도달할 것으로 예상하고 있다. 또한 그림 1.2를 통해 향후 아시아-태평양 지역에서 항공 수요가 도드라지게 증가할 것이며 전 세계 항공 수요의 절반 이상을 차지할 것으로 예측하고 있음을 알 수 있다. 따라서 공역 내 교통 혼잡도 또한 항공 수요의 상승에 발맞춰 지속적으로 상승할 것으로 예상되며, 이에 대해 효과적으로 선 대응하기 위한 항공교통관리 체

계를 미리 구축하지 않으면 차후 항공 교통량의 폭증에 원활히 대응하지 못할 것이다.

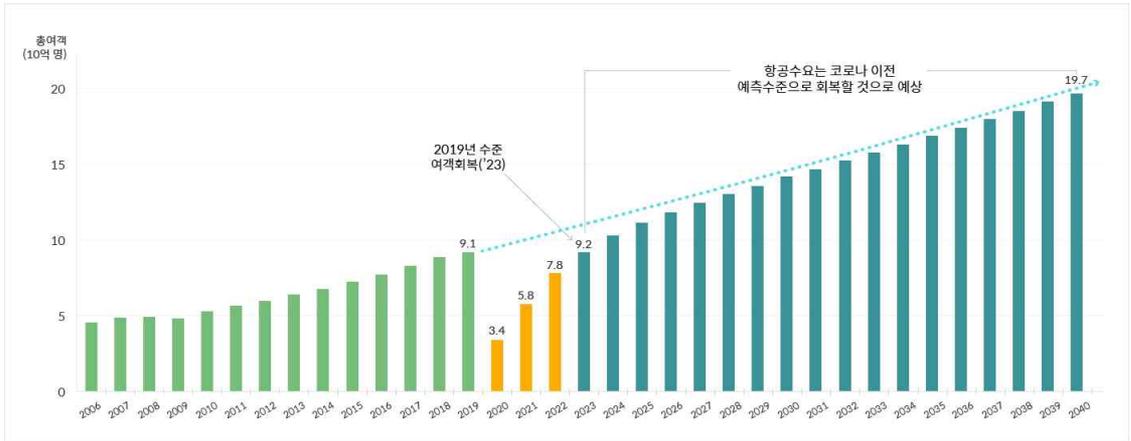


그림 1.1 전 세계 항공 수요 성장률^[3]

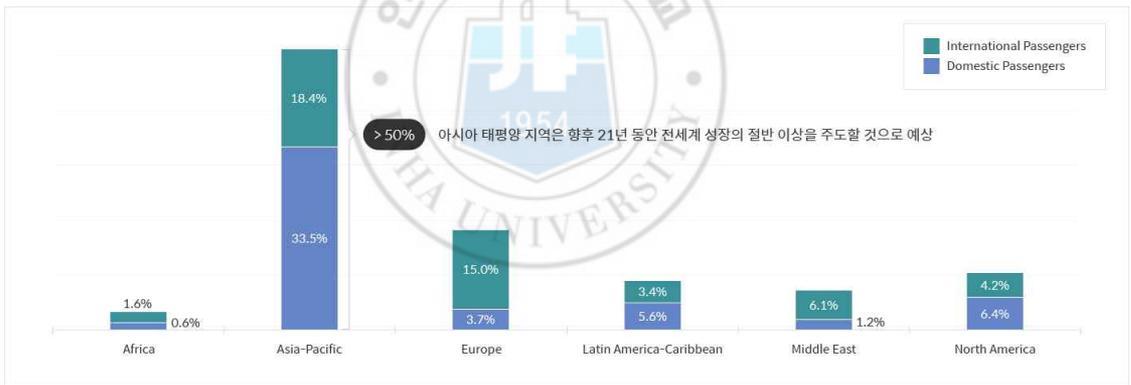


그림 1.2 지역별 항공 수요 성장률^[4]

1.1.2 항공 교통 관리 시스템

항공 교통관제 업무의 경우 지상과 공중 간의 상호작용을 통해 항공 교통 흐름을 원활히 하여 항공기가 안전한 항행을 할 수 있도록 하는 업무이다. 전 세계 대부분의 국가에서는 자국 공역의 항공 교통을 효율적으로 관리하기 위해 공역을 여러 하위 공역으로 세분화하여 관제공역을 관리하고 있다. 관제 공역이란, 비행정보구역(FIR)중 항공기의 안

전한 항행을 위해 교통관제업무가 제공되는 공역을 지칭하며 대한민국의 비행정보구역 명칭은 인천 FIR 이다. 관제 공역의 경우 그림 1.3과 표 1.1을 통해 알 수 있듯이, 사용 목적에 따라 관제권과 관제구, 비행장교통구역으로 나뉘게 된다. 그중 관제구의 경우 가장 광범위한 교통관제업무가 제공되는 공역이며 이를 관제 범위에 따라 지역관제구역 (Sector)와 접근관제구역(TMA)로 구분하여 운용하고 있다. Sector의 경우, 보다 광범위한 범위인 지역관제업무가 제공되는 공역이며, TMA의 경우 공항 또한 관제시설 인근 항공기의 입출항 관제 및 비행장교통구역과 Sector 사이의 관제권 인수인계를 담당한다 [5].

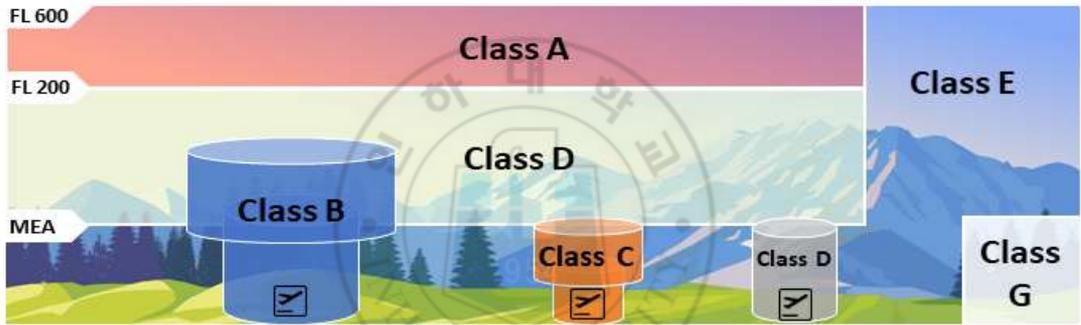


그림 1.3 공역의 세분화

표 1.1 공역의 구분

구분		등급	내용	
관제 공역	관제권	B, C, D	항공기가 이착륙하는 공항 주위에 설정되는 공역	
	관제구 (CTA)	지표면 ~ 650 ft 이상	지역관제구역(Sector)과 접근관제구역(TMA)로 나뉨	
			이름	목적
			지역관제구역(Sector)	지역관제업무 제공
비행장교통구역 (ATZ)	관제권 외 D등급	관제권 외 시계비행을 하는 항공기 간 교통정보 제공		

대한민국의 Sector과 TMA 좌표는 Aeronautical Information Publication (AIP)에 위경도 형태로 제공된다. 대한민국의 TMA는 총 14개로 구성되어 있으며, 각 TMA의 교통량 차이에 따라 한 명의 관제사가 다수의 TMA를 담당하여 관제 업무를 수행하는 경우도 존재한다. 그림 1.4와 같이 Sector의 경우 총 12개의 구역으로 이루어져 있으며, 인천 FIR을 동·서로 분할하여 대구 지역관제센터에서 동쪽에 위치한 5개의 구역을 담당하고, 인천 지역관제센터에서 서쪽에 위치한 7개 구역의 관제를 담당한다^[6].

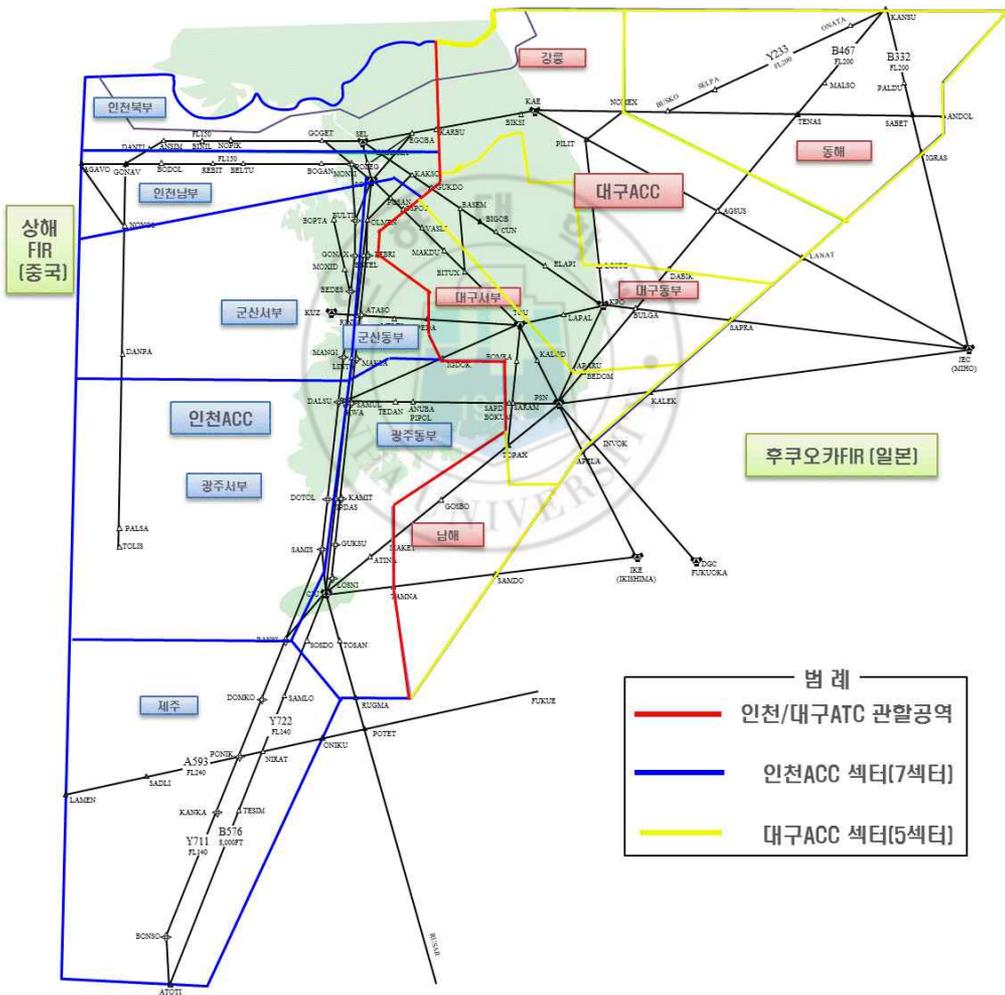


그림 1.4 대한민국 지역관제구역(Sector) 구성

1.2 연구 목표

늘어나는 항공 교통량 속에서 효율적인 항공 교통 관리를 통해 항공기의 항행 안전성을 보장하기 위해선 관제 업무가 제공되는 Sector과 TMA의 항공 교통량 데이터를 기반으로 공역의 혼잡도를 분석하고 이를 통해 관제사의 업무량 산정에 대한 연구가 선행되어야 한다. 본 연구는 ADS-B 항적 데이터 분석을 통해 대한민국 각 공역의 항공 교통량을 산출함과 동시에 항적 데이터를 통해 해당 항공기가 수행했던 관제사 지시명령의 횟수와 종류를 추정하여 공역과 비행절차 별 관제사의 업무량을 비교하고자 한다. 최종적으로 그림 1.5와 같이 대한민국 관할 관제 공역을 대상으로 항공 교통량과 관제사 업무량을 분석한 결과를 통해 공역의 혼잡도를 분석하고자 한다.

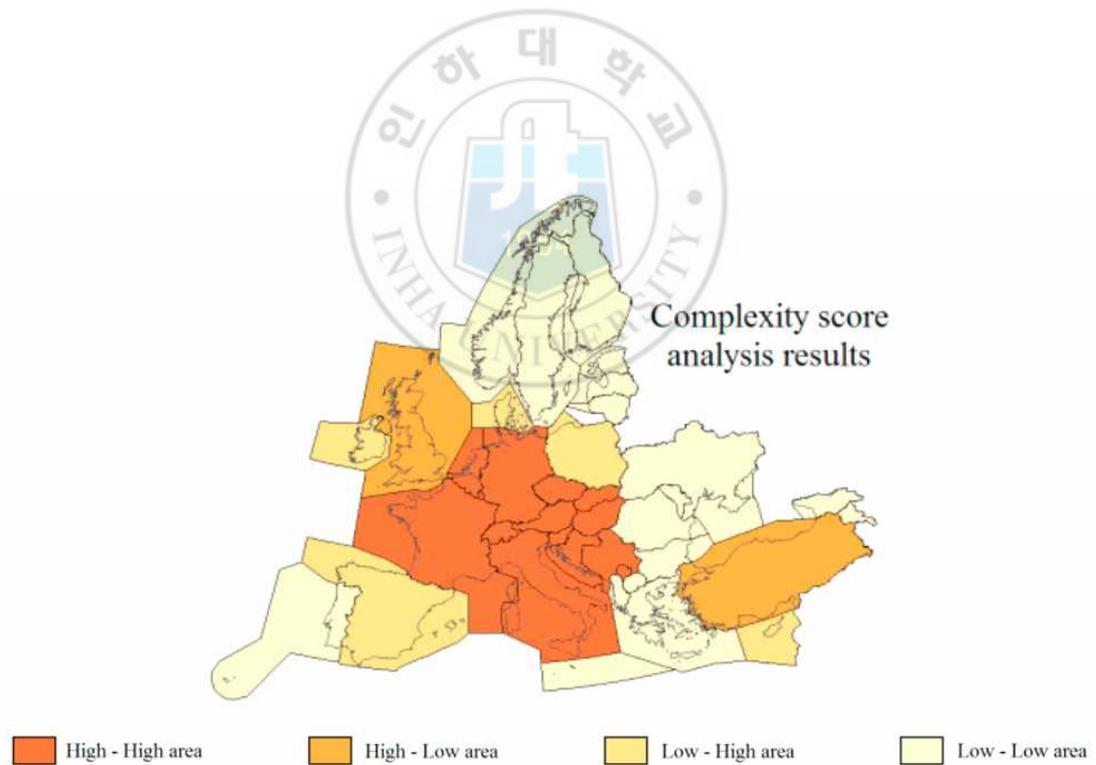


그림 1.5 유럽 공역의 항공 교통 혼잡도 산출 결과^[7]

1.3 연구 방향

본 연구의 진행 방향을 그림 1.6에 나타내었다. 공역의 혼잡도를 분석하기 위해 첫 번째로 대한민국 각 공역의 항공 교통량을 산출하였다. 이를 위해 2019년 1년간 인천 FIR 내를 비행한 이력이 있는 항공기 약 100만 대의 ADS-B 항적 데이터를 사용하였다. 또한 AIP 문서에 기재된 공역 좌표 분석을 통해 좌표 투영 시 오차가 발생할 수 있음을 확인하였고, 이를 보정할 수 있는 공역 좌표 보정 알고리즘을 개발하였다. 이를 통해 보정된 공역 좌표를 사용하여 공역 교통량을 산출하였다. 두 번째 단계인 관제사 지시명령 추정에서는 먼저 항적 좌표를 통해 해당 항공기가 수행했던 비행 절차를 추정하였다. 이때 인하대학교에서 개발한 비행 계획 추정 알고리즘^[8]을 사용하였다. 이와 동시에 각 항공기의 출발지부터 도착지까지 전체 항적 데이터 중 특징 좌표를 판별하는 과정을 진행하였다. 항적 좌표의 방위각, 고도, 속도 성분의 변화를 각각 비교 분석하여 조종사의 의지에 의해 각 비행 성분이 변화하였을 것으로 추정되는 좌표를 판별하였다. 그 후 앞서 추정하였던 비행계획과 특징 좌표를 비교 분석하여 최종적으로 관제사 지시명령이 반영되었을 것이라고 예상되는 항적 좌표를 추정하였다.



그림 1.6 연구 방향 흐름도

2. 공역 교통량

2.1 ADS-B 항적 데이터

본 연구에서 공역의 항공 교통량을 산출하기 위해 사용한 항적 데이터는 차세대 항공관제 시스템인 ‘방송형-자동 종속 감시 (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, ADS-B)’이다. ADS-B 항적 데이터를 통해 각 항공기의 고유 식별코드와 콜사인, 각 항적 좌표 정보가 수신된 시간, 위도, 경도, 고도로 이루어진 현재 위치 정보, 항공기의 비행 상태를 알 수 있다. 본 연구에서는 대한민국 공역의 항공 교통량을 산출하기 위해 그림 2.1과 같이 2019년 1년간 대한민국 관할 공역인 인천 FIR 내를 비행한 이력이 있는 항공기 약 100만 대의 ADS-B 항적 데이터를 FlightAware 사에서 구매하여 사용하였다. 해당 ADS-B 항적 데이터 중 단일 항공기에 대한 ADS-B 데이터 예시를 표 2.1에 나타내었다.

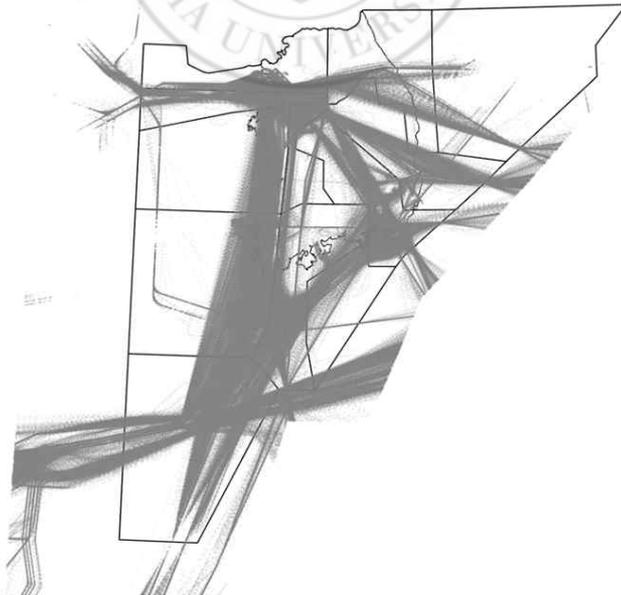


그림 2.1 2019년 인천 FIR을 진입한 항공기의 ADS-B 항적 데이터

표 2.1 ADS-B 항적 데이터 정보

Callsign	AAR108					
Type	A321					
Origin	RKSI					
Destination	RJAA					
Time	Lat (deg)	Lon (deg)	Alt (ft)	GSD (knot)	VRT (fpm)	Hdg (deg)
2019-06-02 7:03:22 PM	37.49192	126.42738	1500	177	-	327
2019-06-02 7:03:39 PM	37.50448	126.41735	2250	179	2338	328
2019-06-02 7:03:56 PM	37.51598	126.40833	2825	182	2091	328

2.2 대한민국 공역 좌표 보정

2.2.1 기존 공역 좌표 분석

본 연구에서 산출한 공역의 항공 교통량은 대한민국의 지역관제구역(Sector)와 접근관제구역(TMA)를 대상으로 하였다. AIP 문서에 수록된 각 공역의 위도, 경도, 최대·최소 고도 범위로 이루어진 3차원 좌표 데이터와 항적 데이터를 비교하여 공역의 항공 교통량을 산출하였다. 이를 위해 첫 번째로 공역 좌표와 항적 데이터 중 2차원 데이터를 동일 좌표계로 투영하는 과정을 진행하였다. 본 연구에서 사용한 좌표 투영법은 람베르트 정각원추도법이며^[9], 좌표 투영 과정에 필요한 기준 좌표값의 경우 인천 FIR 공역의 최대·최소 위경도 범위를 기준으로 하였으며 표 2.2에 나타내었다. 좌표 투영이 완료된 공역 좌표를 사용하여 나타낸 대한민국의 Sector과 TMA 3차원 형상을 그림 2.2에 나타내었다.

표 2.2 람베르트 정각원추도법 투영 기준 좌표 정보

Reference	Value	Unit	Reference	Value	Unit
ϕ_{min}	30.0	deg	λ_{max}	133.7	deg
ϕ_{max}	38.7		ϕ_0	30.0	
λ_{min}	124.0		λ_0	128.85	

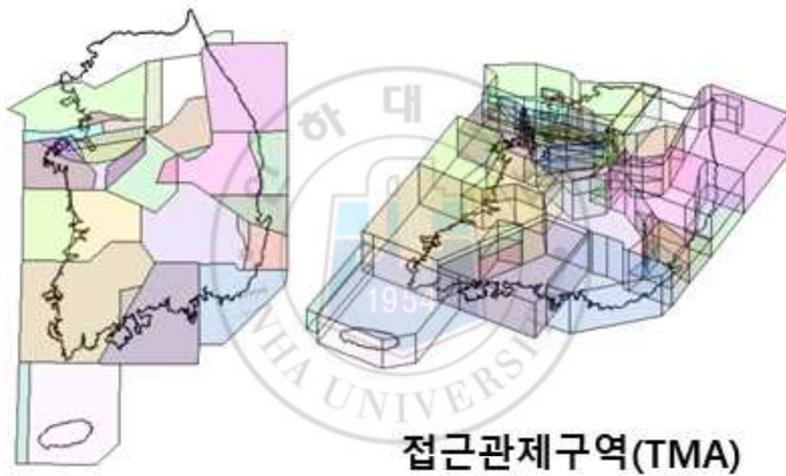
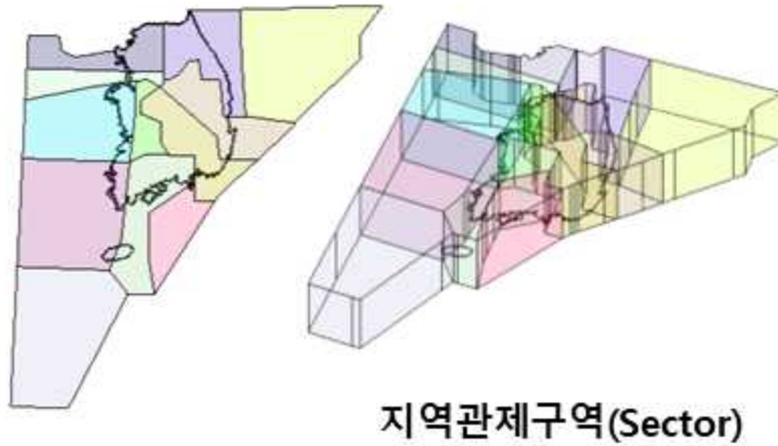


그림 2.2 대한민국 지역관제구역(Sector), 접근관제구역(TMA)

좌표 투영을 진행한 Sector과 TMA의 3차원 좌표 데이터를 기준으로 2019년 1월 1일 광주공항을 이륙해 제주공항으로 운항한 아시아나항공 8141편의 ADS-B 항적 데이터를 사용해 항공기의 공역 통과 여부를 판별하였으며 그 결과를 그림 2.3과 표 2.3에 나타내었다. 해당 결과를 통해 제주 TMA와 광주 TMA의 경계선에서 중첩되는 영역이 발생해 단일 항적 좌표가 동시에 2개의 TMA를 통과한다는 결과가 도출되었음을 알 수 있다.

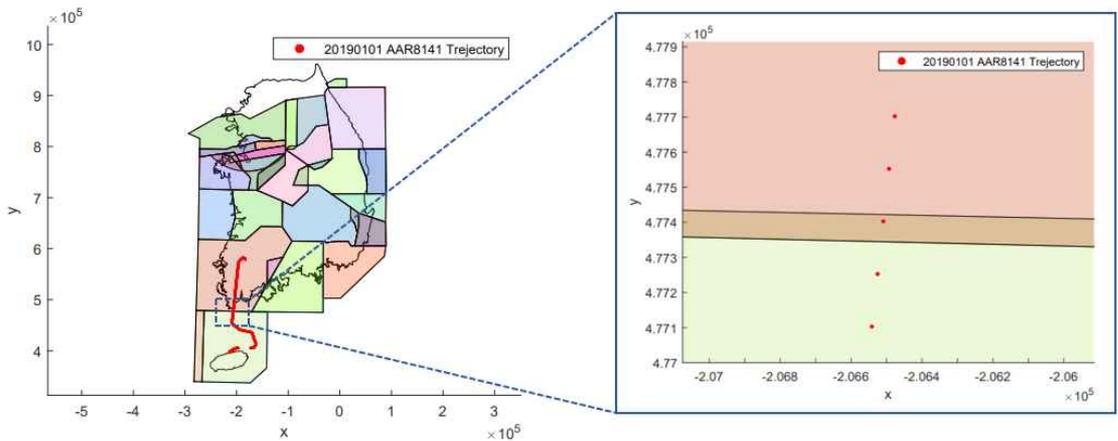


그림 2.3 공역 좌표 및 항적 데이터 좌표 투영 결과

표 2.3 2019년 1월 1일 AAR8141 공역 통과 여부 판별 결과

Flight Time	x (m)	y (m)	Altitude (ft)	Current TMA		Current Sector
2019-01-01 10:59	-206476.8	477702.4	13417	Gwangju		Gwangju West
2019-01-01 10:59	-206492.9	477552.5	13403	Gwangju		Gwangju West
2019-01-01 10:59	-206509.1	477402.5	13390	Gwangju	Jeju	Gwangju West
2019-01-01 10:59	-206525.3	477252.6	13377	Jeju		Gwangju West
2019-01-01 10:59	-206541.4	477102.7	13363.3	Jeju		Gwangju West

이와 같이 좌표 투영 시 공역 좌표 불일치로 인해 중첩되거나 빈 영역이 발생하는 이유는 초기 공역 설계 시와 비교하였을 때 본 연구에서 항적 데이터의 공역 통과 여부 판별 과정 시 사용한 좌표 투영법 및 기준 좌표가 다르기 때문이다.

따라서 항적 데이터를 통해 공역의 항공 교통량을 산출하기 전, 좌표 투영으로 발생하는 공역 좌표 불일치 영역을 제거하는 과정을 진행하였다. 이를 위해 먼저 좌표 전처리 가 필요한 영역의 개수를 공역의 종류, 불일치 유형별로 구분하여 표 2.4와 그림 2.4에 나타내었다.

표 2.4 좌표 불일치 공역의 개수

Airspace Type	Number	Number of Inconsistent Area	
		Overlap	Empty
TMA	55	15	6
Sector	12	0	0

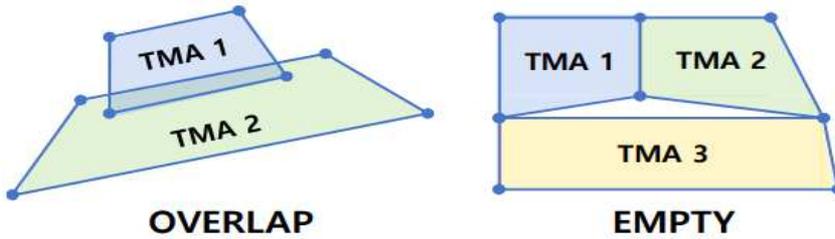


그림 2.4 공역 좌표 불일치 유형

2.2.2 공역 좌표 보정 알고리즘 개발 및 구현

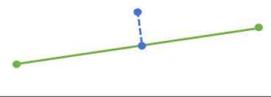
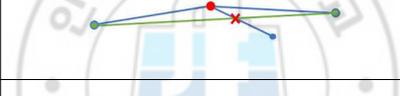
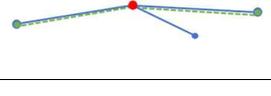
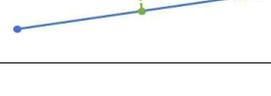
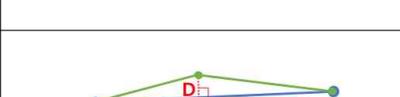
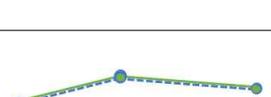
2차원 공역을 다각형이라고 가정한 후, 인접한 공역 간의 어긋난 유형을 다각형의 선분 간 교차 모습으로 나타내어 분석한 결과 표 2.5에 나타난 2가지 케이스 중 하나임을 확인할 수 있었다.

표 2.5 공역 좌표 불일치 유형 분류

Case 1	Case 2
	비교
	<ul style="list-style-type: none"> ✖ : Cross Point ● : Reference Point D : Distance

표 2.5의 1번 케이스와 같은 경우, 두 개의 선분이 교차하였을 때 교차하는 지점을 ‘교차점’, 각 선분의 끝점들 중 교차점과 거리가 가장 가까운 점을 ‘기준점’ 이라 명명하였다. 또한 다수의 공역을 순차적으로 보정하는 점, 각 공역 간의 불일치 특성이 제각각인 점 등을 고려하여, 표 2.6과 같이 케이스를 세분화 시킨 후 각 영역의 특성에 맞는 좌표 보정 과정을 진행토록 하였다.

표 2.6 공역 좌표 보정 유형별 분류

Case Name	Preprocessing	
	Before	After
1-(1)		
1-(2)		
1-(3)		
1-(4)		
2-(1)		
2-(2)		
비고		
 : 전처리 대상 다각형의 선분  : 전처리 완료 다각형의 선분		 : Cross Point  : Reference Point  : Distance

2-(1), 2-(2) 케이스와 같이 삼각형 형태로 빈 영역을 형성하고 있을 경우, 그림 2.5와 같이 좌표 보정 대상 선분의 주위에 특정 범위를 형성하여 설정한 범위 내에 다른 좌표가 존재하는지의 여부에 따라 좌표 보정을 진행하도록 하였다^[10].



그림 2.5 좌표 보정 대상 선분 주위 설정 범위

각 공역에 대한 좌표 보정을 진행한 결과, TMA에서는 총 46번의 보정 과정이 소요되었으며, 좌표 불일치 영역이 존재하지 않았던 Sector에서는 좌표 보정 과정이 소요되지 않았다. 대표적인 공역 좌표 불일치 영역 4곳의 좌표 보정 결과를 그림 2.6에 나타내었다.

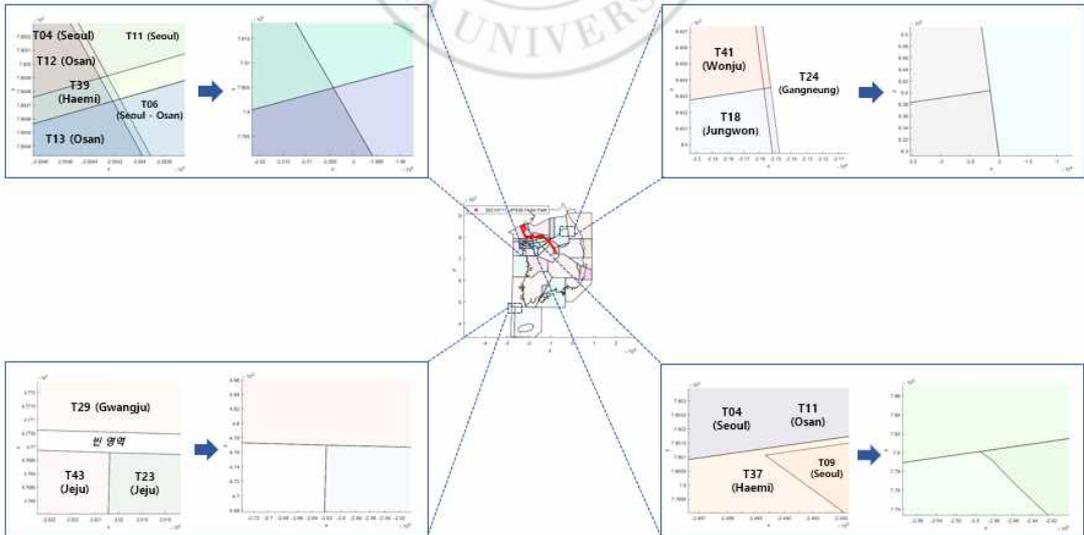


그림 2.6 공역 좌표 보정 결과

2.3 공역 내 항적 진입여부 판단

본 연구에서 공역 교통량 산출을 위해 사용하는 ADS-B 항적 데이터는 데이터의 기록 주기는 평균 3초, 최소 1초 간격으로 일정치 않다는 특징을 가지고 있다. 따라서 보다 정확히 공역 교통량을 산출하기 위해 그림 2.7과 같이 ADS-B 항적 데이터를 1초 단위로 선형 보간하였다.

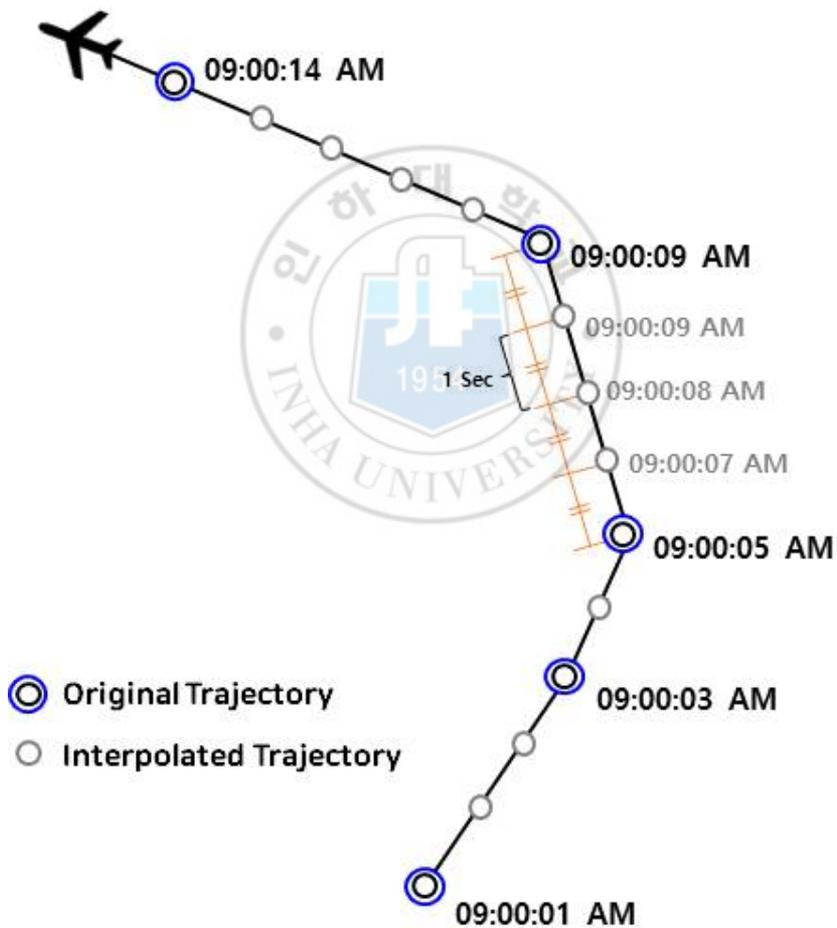


그림 2.7 ADS-B 항적 데이터 선형 보간

보간이 완료된 항적 데이터를 통해서 각각의 항적 좌표가 영역의 내외부에 속해 있는지를 판별하였다. 이를 위해 다각형 내부에 점이 위치하는지를 판별하는 Point in Polygon 알고리즘^[11]을 사용하였다. 이를 위해 먼저 항적과 영역 좌표를 x, y 좌표 평면상에 투영하였으며, 영역을 여러 개의 경계점으로 구성된 다각형이라고 가정하였다. 그 후 영역의 x 좌표값 중 가장 큰 값에 1000m를 더한 좌표값과 항적 좌표의 y 좌표값으로 만든 가상의 기준 좌표를 생성하여 항적 좌표와 이를 이은 가상의 선분을 생성하였다. 해당 가상 선분과 영역 경계선의 교차 형태를 비교하여 두 선분이 교차하는 지점이 1개만 존재한다고 판별될 경우 항적 좌표가 2차원 영역 내에 위치한다고 판별하였다. 해당 과정과 별개로 항적 좌표가 영역 경계선과 정확히 겹치는 상황에서도 해당 좌표가 영역 내부에 위치한다고 판별하였다. 본 연구에서 Point in Polygon 알고리즘을 활용하여 영역의 2차원 항적 진입 여부 판단 과정을 그림 2.8에 나타내었다.

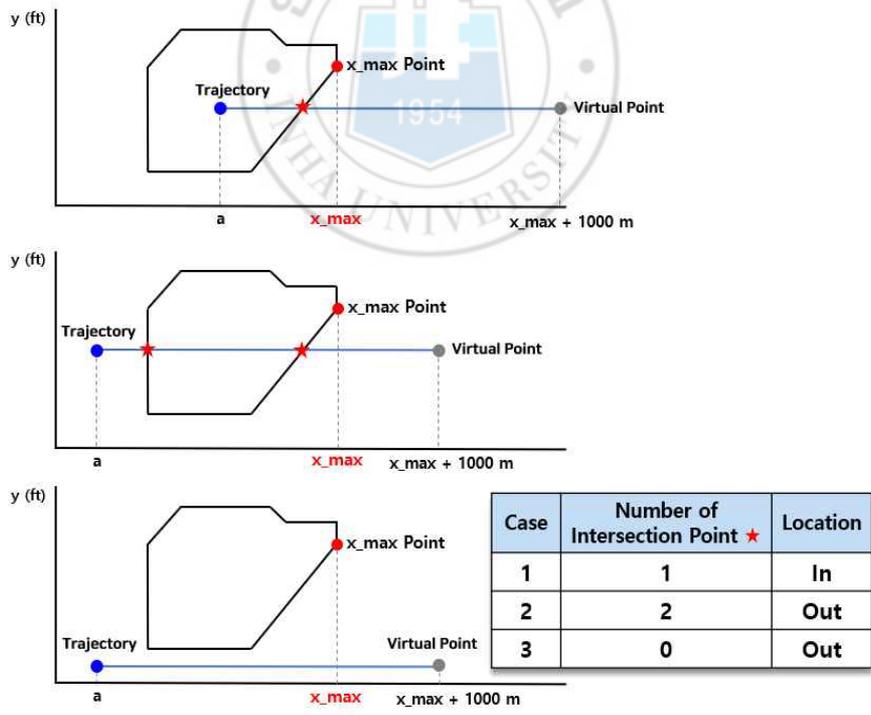


그림 2.8 영역 내 항적 진입 여부 판별 과정

또한 각 항공기는 수직평면 상에서 공역의 경계를 넘어 이동하는 경우도 있고 그림 2.9와 같이 항공기가 항로를 따라 비행하며 고도 변경을 통해 공역 간 수평 고도 경계면을 지나는 경우도 있음을 확인하여 최종적으로 항적 좌표의 고도 데이터와 공역의 최대·최소 고도 범위를 비교하여 항적 좌표가 공역의 3차원 공간 내부에 위치하고 있는지 판별하였다.

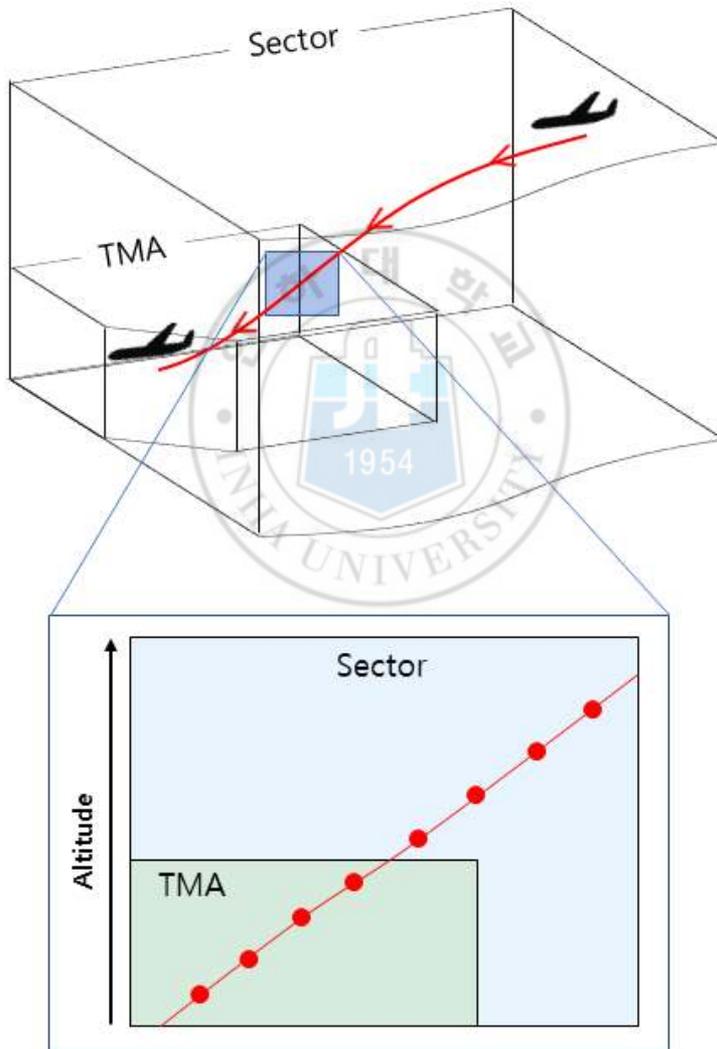


그림 2.9 고도 경계면 통과 경우에 따른 진입 공역 변동

2.4 공역 교통량 산출

1초 간격으로 선형 보간 된 모든 항적 좌표에 해당하는 공역을 계산한 후, 각 공역의 시간에 따른 항공기 대수의 증감을 산출하였다. 실제로 매 초마다 공역에 진입해 있는 항공기의 대수가 달라지기 때문에 시간에 따른 항공기 대수의 변화가 너무 잦고 데이터 표현에 한계가 있어 최종적으로 10분간 공역에 진입한 최대 항공기 대수를 그 시간대의 공역 교통량이라고 정의하였으며 해당 과정을 그림 2.10에 나타내었다.

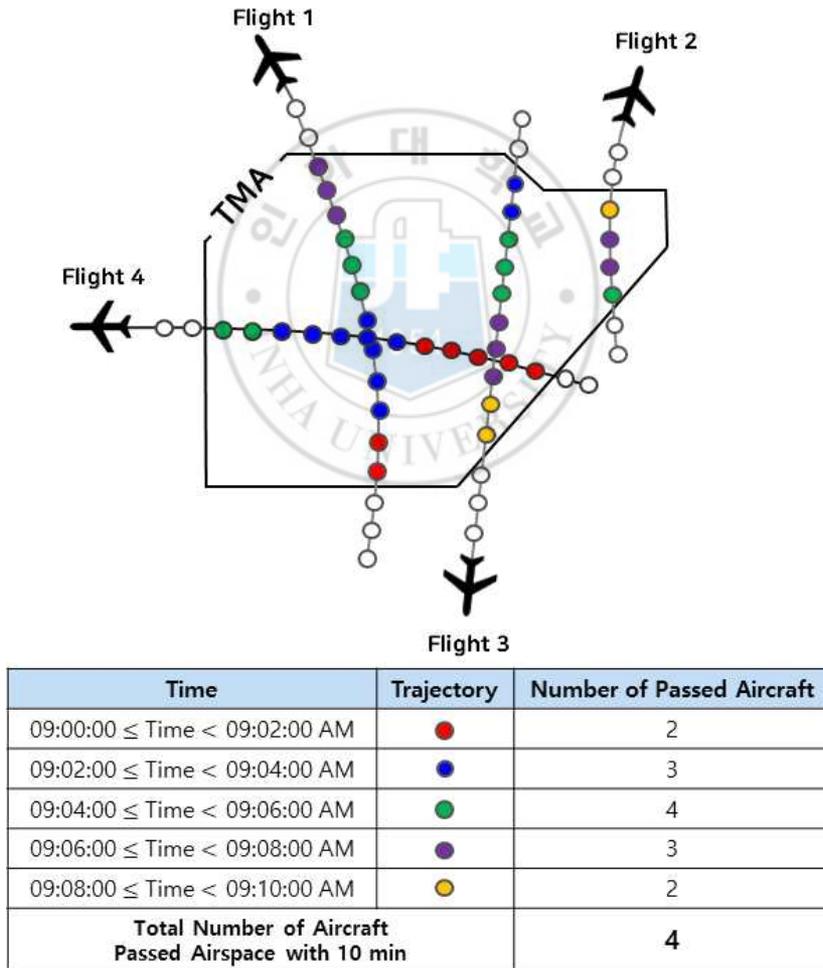


그림 2.10 시간대별 공역의 항공 교통량 산출 과정

산출된 각 공역의 항공 교통량 결과 중 인천 북부 Sector와 제주 TMA의 결과를 그림 2.11과 2.12에 나타내었다. 그림 2.11과 2.12의 상단 그림은 1년 전체에 대한 변화를 보여주고 있으며, 하단의 그림은 그중 특정 하루에 대하여 0시부터 24시까지의 공역 교통량 변화를 보여준다.

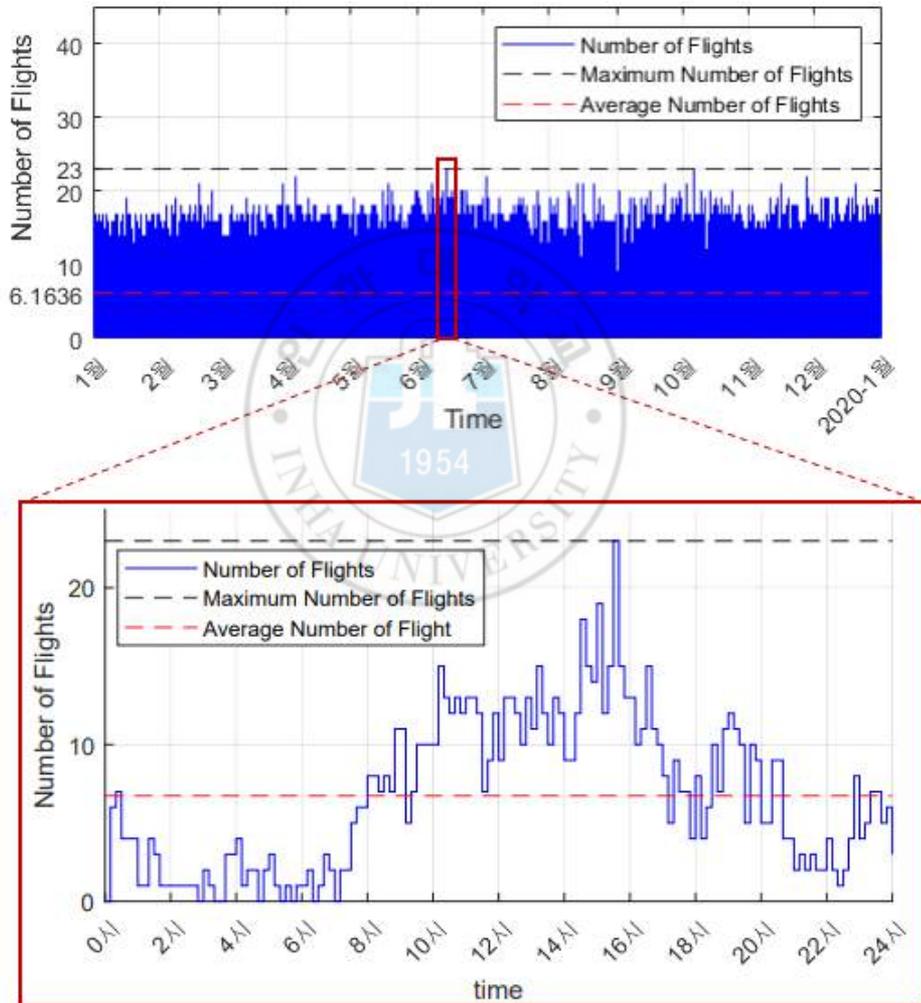


그림 2.11 인천 북부 Sector의 2019년 공역 교통량 산출 결과

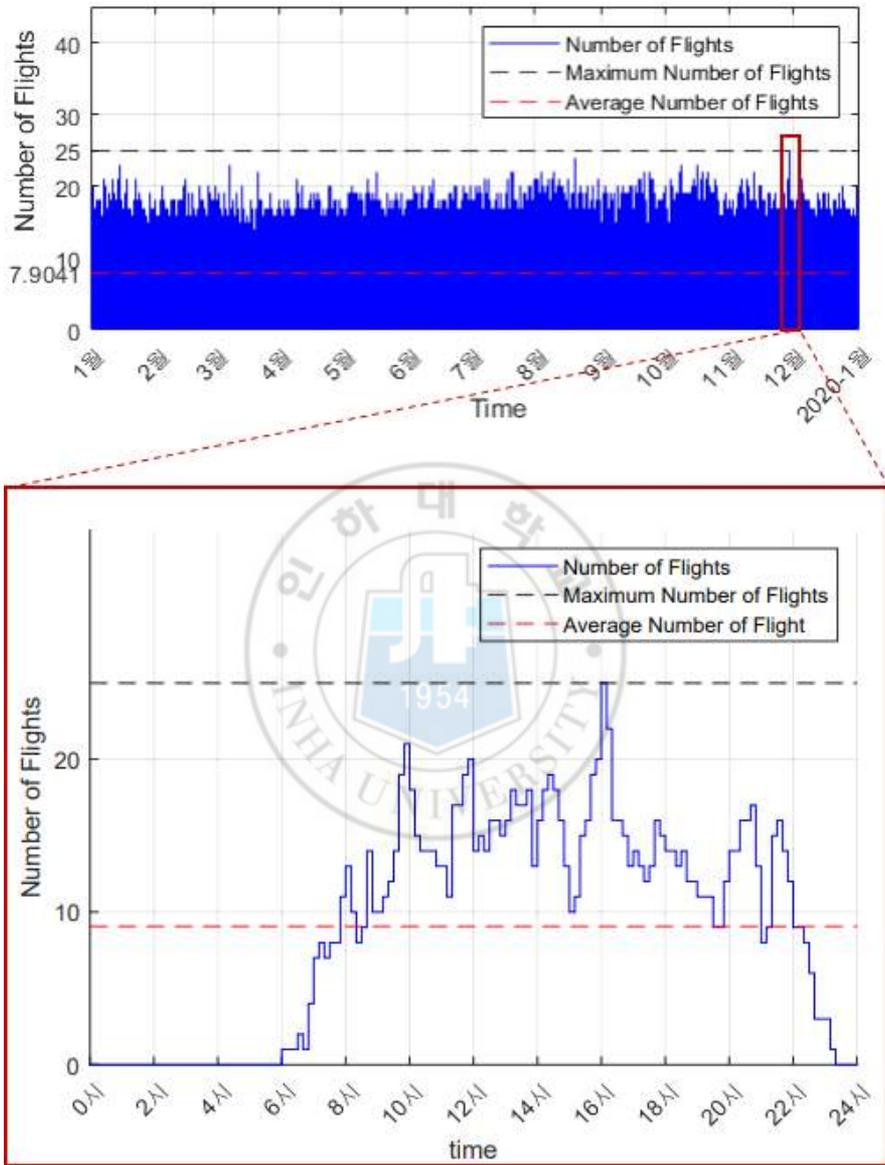


그림 2.12 제주 TMA의 2019년 공역 교통량 산출 결과

2.5 각 공역의 1일 교통량 비교분석

대부분의 항공편이 스케줄에 따라 정해진 항로를 따라서 정기 운항하기 때문에 하루 중 교통량의 변화 패턴은 크게 달라지지 않는다는 가정하에 각 공역별로 1년간의 교통량을 하루 24시간에 중첩하여 분포를 분석하였다. 그림 2.13은 인천 북부 Sector에 대한 하루 24시간 교통량 분포를 보여주며 열은 녹색으로 나타나는 부분이 가장 빈번한 교통량 변화 패턴임을 알 수 있다.

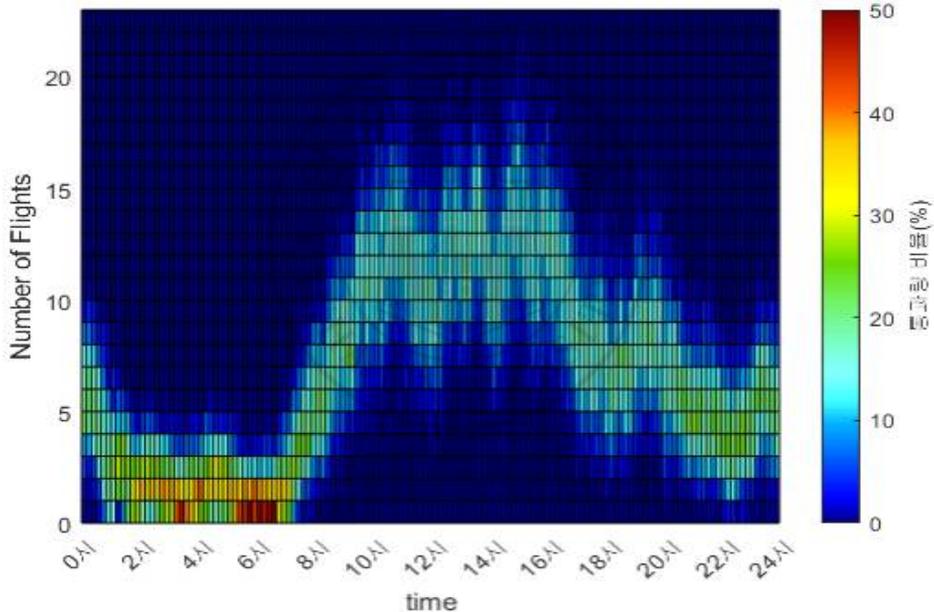


그림 2.13 인천 북부 Sector의 2019년 하루 24시간 교통량 중첩 결과

이와 같이 생성된 분포를 이용하여 최빈값, 하위 5%, 상위 5% 값을 산출하였다. 그림 2.13에 나타난 연속적인 분포에 대해 하위 5%, 최빈값, 상위 5% 선을 나타낸 것이 그림 2.14이다. 이러한 방식으로 교통량을 분석한 결과 대부분의 공역에서 새벽과 저녁 시

간대에 교통량이 급감하는 형태의 그래프 개형이 도출됨을 확인할 수 있었으며, 특히 높은 수준의 교통량이 유지되는 낮 동안에는 교통량의 상한이 유지되는 특성을 발견할 수 있었다. 실제 이러한 교통량 상한선이 항공 교통량의 수요가 한정되어 있기 때문에서 오는 것인지 관제사 업무 부하의 한계에 따른 교통량 조절에서 오는 것인지를 명확히 구분하기는 어렵지만, 실제 데이터를 통해 도출된 결과이기 때문에 상위 5% 공역 교통량 데이터를 해당 공역의 가장 기본적인 수용량이라 판단하였다.

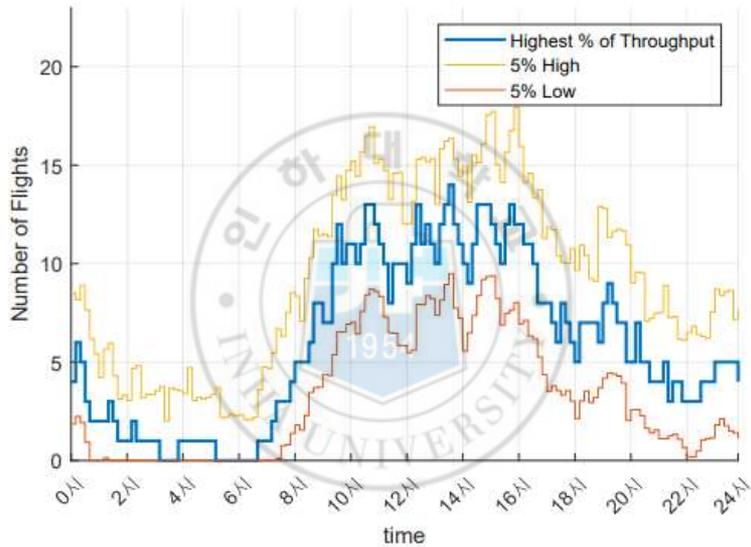


그림 2.14 2019년 인천 북부 Sector의 상위 5%, 최빈값, 하위 5% 항공 교통량

1일 기준 교통량 분포에서 상위 5% 비중을 가지는 교통량 중 최대 교통량과 이때의 시간대를 Sector와 TMA에 대하여 각각 표 2.7과 2.8에 나타내었다. 본 연구에서는 표 8과 9의 교통량 값이 각 공역별 수용량이라 산정한다. 또한 공역의 교통량만을 분석하여 각 공역의 혼잡도를 판단하는 가장 기본적인 공역 혼잡도 판별 기법에 의거하여 본 연구에서는 표 2.7과 2.8을 통해 제시한 시간대가 해당 공역의 혼잡도가 가장 높은 시간대라고 제시한다.

표 2.7 대한민국 Sector의 상위 5% 공역 교통량 및 해당 시간대

Sector	Max Number of Aircraft	Time
Gwangju East	26	05:50 ~ 06:00
Pohang Area	18	10:20 ~ 10:30
East-Sea	12	10:50 ~ 11:00
Gangneung	14	10:50 ~ 11:00
Incheon South	25	15:20 ~ 15:30
Incheon North	18	15:50 ~ 16:00
Jeju Area	35	15:50 ~ 16:00
Gunsan East	17	16:40 ~ 16:50
South Area	11	18:00 ~ 18:10
Gunsan West	17	19:30 ~ 19:40
Daegu Area	14	20:20 ~ 20:30
Gwangju West	20	20:50 ~ 21:00

표 2.8 대한민국 TMA의 상위 5% 공역 교통량 및 해당 시간대

TMA	Max Number of Aircraft	Time			
Sacheon	9	05:40 ~ 05:50			
Gimhae	15	09:10 ~ 09:20			
Seoul	43	10:50 ~ 11:00			
Jeju	20	14:20 ~ 14:30			
Gwangju	14	16:40 ~ 16:50			
Osan	9	18:10 ~ 18:20			
Daegu	11	20:10 ~ 20:20			
Haemi	Pohang	Gunsan	Yecheon	Wonju	Gangneung
Max Number of Aircraft Passed Airspace is 4 or less.					

3. 관제사 지시명령 추정

3.1 비행 계획 추정

앞서 산출한 각 공역별 항공 교통량과 함께 공역 혼잡도를 판단하는데 필요한 중요 지표인 관제사 지시명령 종류 및 횟수 산출을 위해 가장 먼저 항적 데이터를 통한 해당 항공기의 비행 계획 추정을 진행하였다. 본 연구에서 활용하고자 하는 비행 계획의 경우 대한민국 관할 관제 공역인 인천 FIR에 속해있는 대표 공항 4곳(RKSI, RKSS, RKPC, RPKK)의 출발·도착 비행 계획인 SID, STAR, ILS와 이들을 잇는 순항 비행 계획인 EN-Route를 대상으로 하였으며, Aeronautical Information Publication (AIP) 문서에 기재된 각 비행계획의 좌표 정보를 활용하였다. 본 연구에서 활용한 비행계획들을 정리하여 표 3.1에 나타내었다.

표 3.1 추정 대상 비행 계획

Flight Plan Type	Incheon FIR			
	RKSI	RKSS	RKPC	RPKK
SID	Flight plan from the Aeronautical Information Publication (AIP)			
STAR				
ILS				
EN-Route				

추정 대상 비행 계획의 좌표 정보와 항적 데이터를 활용하여 비행 계획을 추정하기 위해 인하대학교에서 개발한 비행 계획 추정 알고리즘^[12]을 사용하였다. 해당 알고리즘의 경우 항적 데이터와 비행 계획의 좌표 분석을 통해 최종적으로 항공기가 운항했던 비행 계획을 추정한다. 본 연구에서 활용한 비행 계획 추정 알고리즘을 사용하여 특정 항공기의 비행 계획을 추정한 결과를 그림 3.1에 나타내었다.

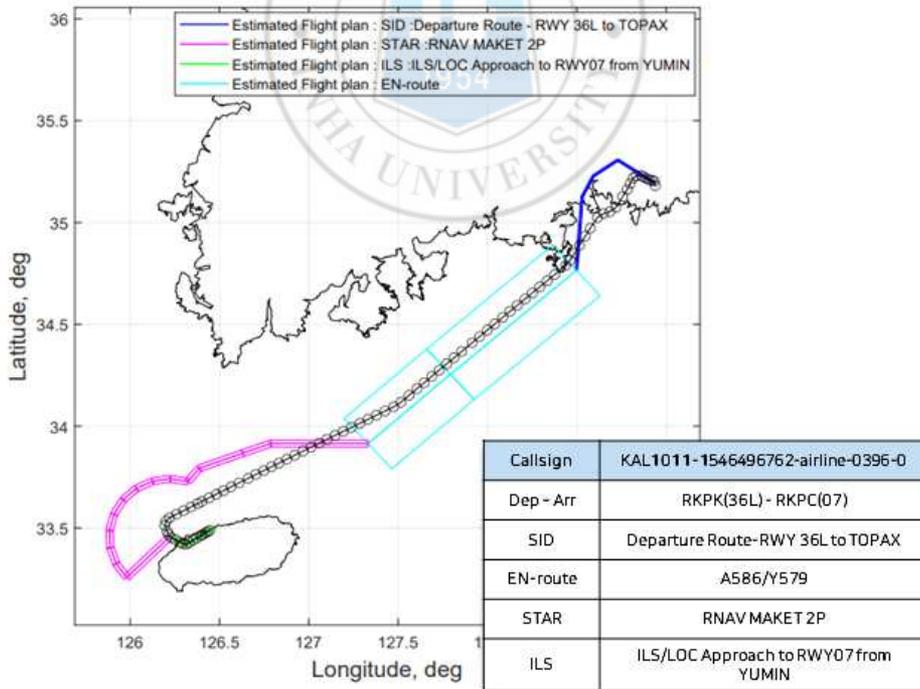
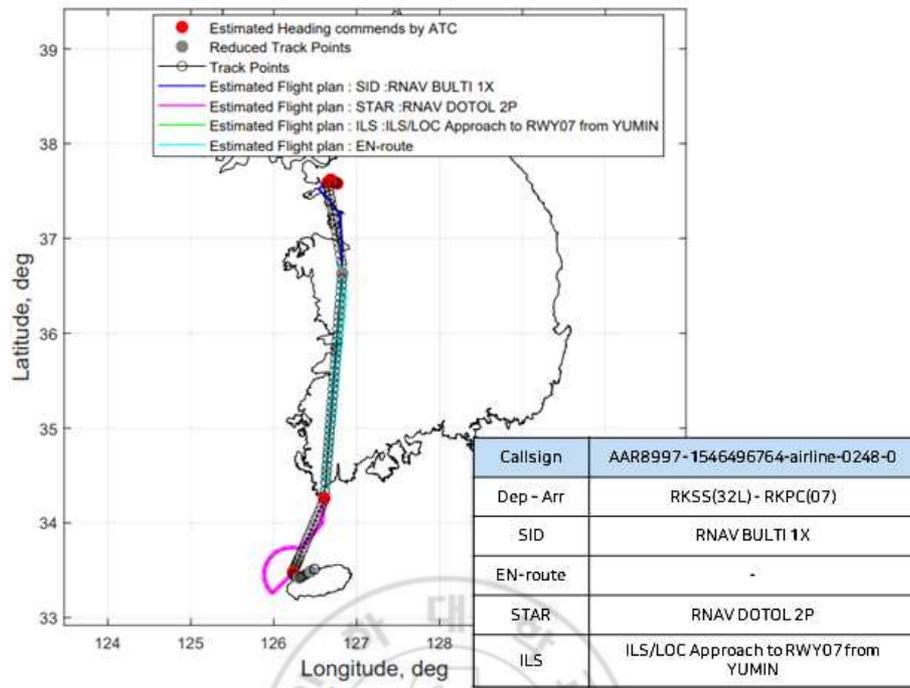


그림 3.1 비행 계획 추정 알고리즘을 활용한 비행 계획 추정 결과

3.2 관제사 지시명령이 반영된 항적 좌표 추정

3.2.1 특징 좌표 판별

앞서 추정된 항적별 비행계획을 활용해 최종적으로 관제사 지시명령이 반영된 항적 좌표를 추정하기 위해 ADS-B 항적 데이터에서 특징 좌표를 판별하였다. 특징 좌표 판별 시 관제사가 조종사에게 지시하는 여러 명령들 중 대표적으로 방위각, 속도, 고도 변경을 추정할 수 있도록 각 항목별 최적화된 특징 좌표 판별법을 설정하였다.

먼저 방위각 변경 지시명령 추정을 위한 특징 좌표 판별의 경우 위경도 2차원 항적 좌표를 대상으로 다각 선분 단순화 기법인 Ramer Douglas Peucker (RDP) 알고리즘^[13]을 활용하였다. RDP 알고리즘을 통해 선분 단순화를 수행하는 과정을 그림 3.2에 나타내었다.

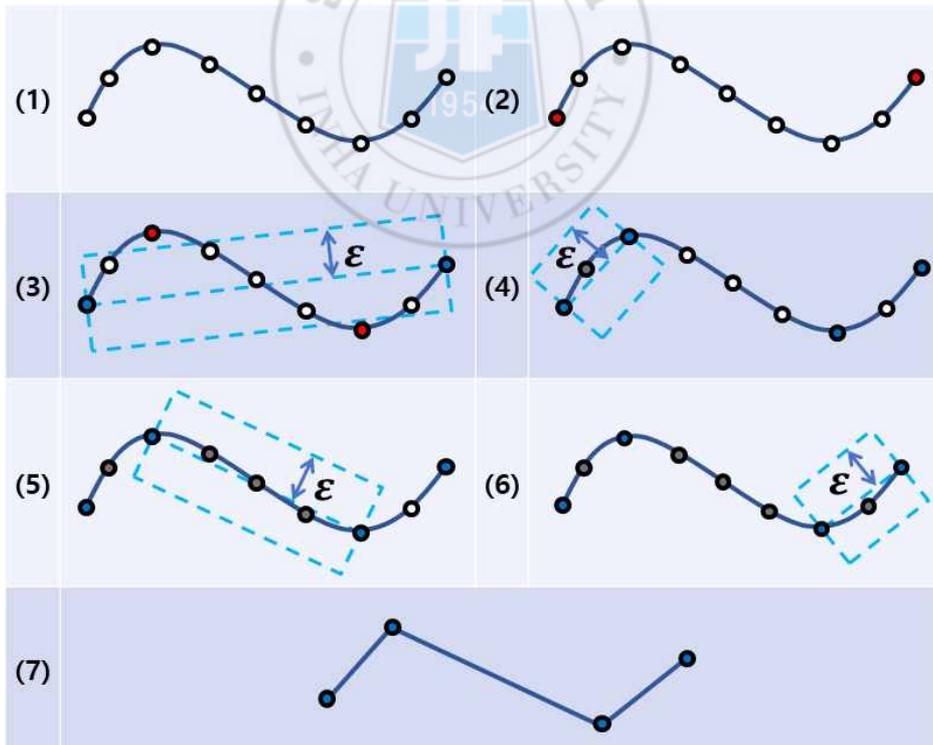


그림 3.2 RDP 알고리즘을 이용한 선분 단순화 과정

RDP 알고리즘의 경우 그 특성상 적절한 거리 공차 ϵ 을 구하는 것이 매우 중요하다.

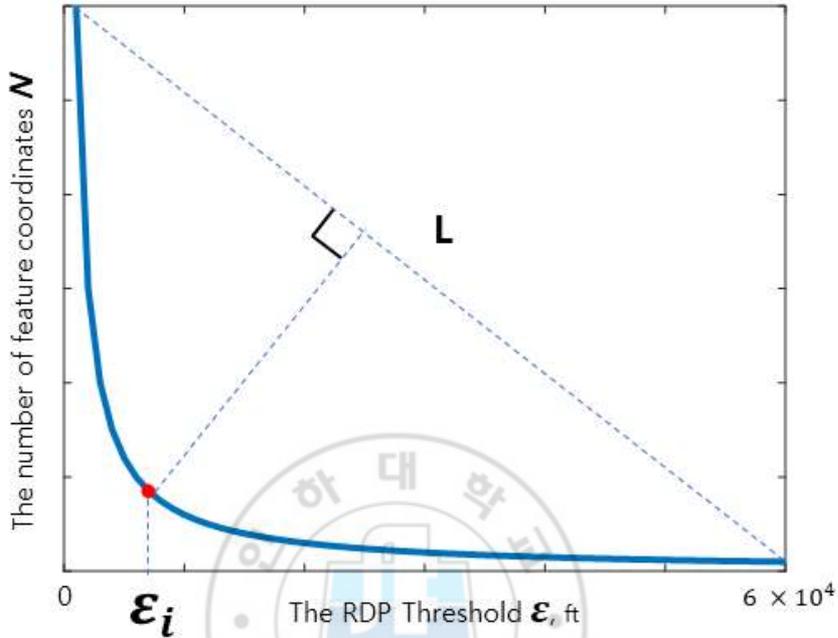


그림 3.3 $\epsilon -$ 특징 좌표 개수 N 그래프

RDP 알고리즘을 통해 특징 좌표를 판단할 시 사용한 ϵ 값은 그림 3.3의 그래프와 같이 크기가 작을수록 검출되는 특징 좌표의 개수가 많아지는 반비례 경향이 있다. 결과적으로 적절한 ϵ 값을 적용하는 것이 RDP 알고리즘의 정확도를 높이는 핵심이다. 따라서 본 연구에서는 RDP 알고리즘을 사용할 때, 단일 ϵ 값을 사용하지 않고 각 항적 별 최적의 ϵ 값을 찾는 과정을 수행하였다. 먼저 ϵ 값의 크기를 10ft에서 60000ft까지 100ft씩 증가하며 ϵ 후보군을 만들었고 각 ϵ 값을 사용하였을 때 검출되는 특징 좌표의 개수 N 을 각각 매칭하였다. 그 후 그림 3.3과 같이 $\epsilon - N$ 그래프를 생성하였다. 그래프 상에서 적절한 ϵ 값을 찾기 위해 선분 L 과 직선거리가 가장 먼 점 P 에 해당하는 ϵ 값 ϵ_i 를 판별하였다. 그 후 해당 ϵ 값에 n 배수를 취하며 최적의 ϵ 값을 도출하였다^[14].

해당 과정을 통해 2차원 항적 좌표를 대상으로 특징 좌표를 산출한 결과를 그림 3.4에 나타내었다.

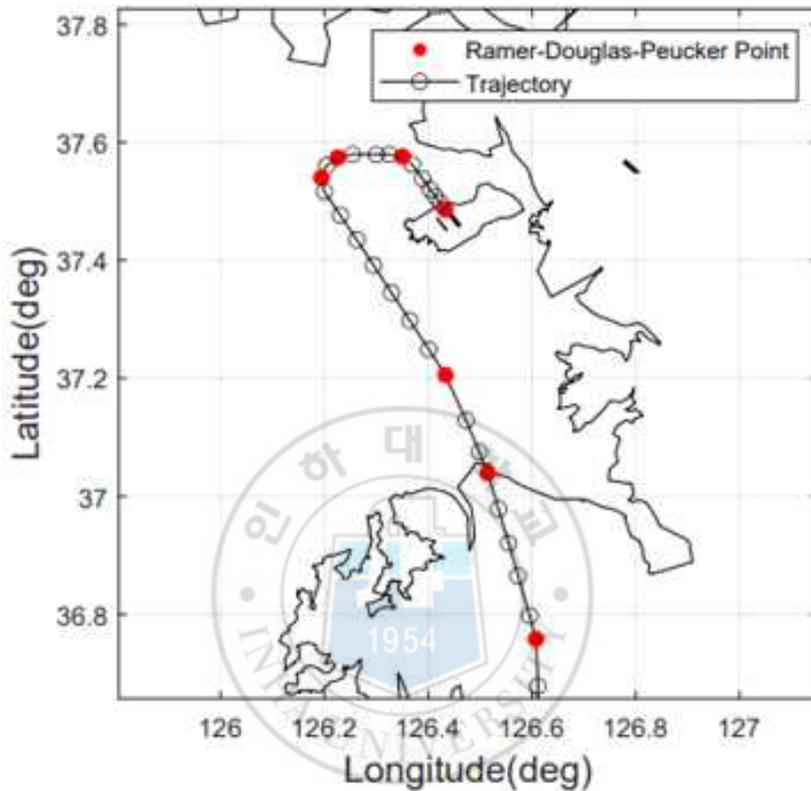


그림 3.4 방위각 지시명령 추정을 위한 특징 좌표 판별 결과

고도, 속도 변경 지시명령을 추정하기 위해 RDP 알고리즘을 사용하여 항적 데이터의 속도와 고도 성분을 대상으로 특징 좌표를 판별하였을 때 그림 3.5와 3.6의 최상단 그래프와 같이 불필요한 좌표들이 판별되는 경우가 다수 존재하였다. 특히 속도 데이터의 경우 지면 속도라는 특성상 외란에 의해 오차가 많이 발생하여 원본 데이터를 대상으로 RDP 알고리즘을 적용하였을 때 정확도가 현저히 떨어지는 문제점이 있었다. 따라서 고도, 속도 변경 지시명령 추정을 위해 항적 데이터의 고도, 속도 성분을 Low Pass Filter를 적용하여 데이터 전처리 과정을 진행하였다.

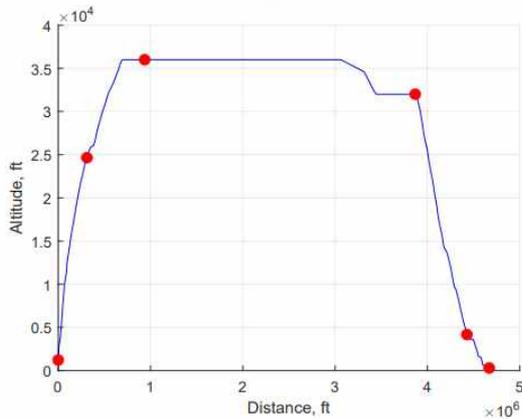
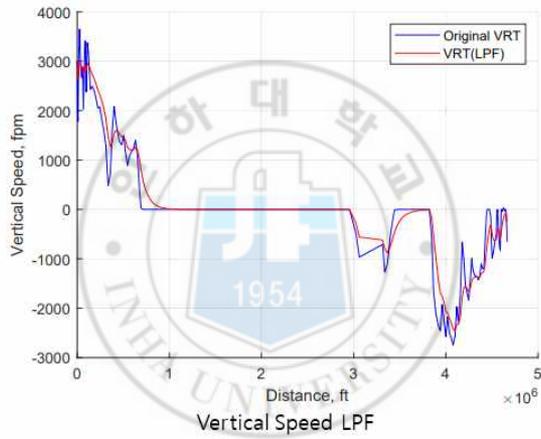
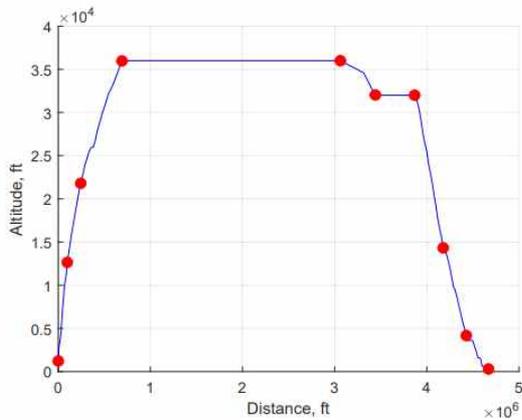


그림 3.5 고도 데이터 Low Pass Filter 결과

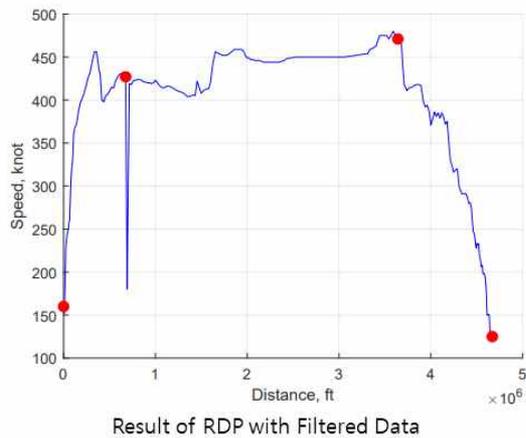
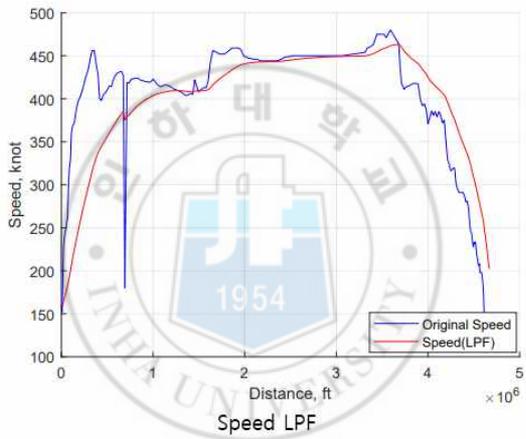
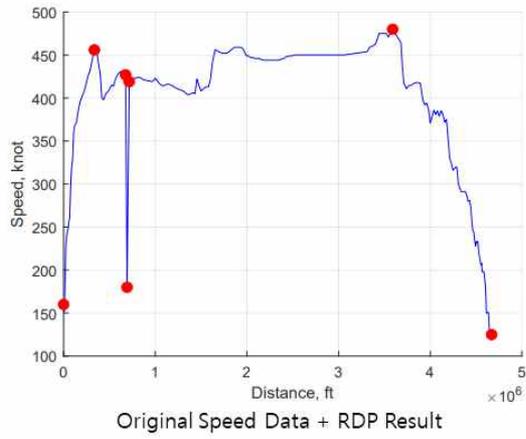


그림 3.6 속도 데이터 Low Pass Filter 결과

그중 고도 데이터의 경우 수직속도 성분을 Low Pass Filter를 통해 전처리 과정을 진행한 후, 전처리가 완료된 수직속도 성분을 통해 고도를 재산출 하였다. 그 후 재산출된 고도 데이터를 사용하여 RDP 알고리즘을 통해 특징 좌표를 판별하였으며, 속도 데이터의 경우 항적 데이터의 속도 성분을 Low Pass Filter를 통해 전처리를 진행하였다. 항적 데이터의 고도, 속도 성분을 Low Pass Filter를 통해 전처리를 진행한 결과를 그림 3.5와 3.6에 나타내었다.

3.2.2 관제사 지시명령 추정 알고리즘

앞서 추정된 비행계획과 항적 좌표들 중 판별한 특징 좌표를 활용하여 최종적으로 관제사 지시명령이 반영된 항적 좌표를 추정하기 위한 알고리즘을 개발하였으며, 해당 알고리즘을 Decision Tree로 그림 3.7에 나타내었다.

그림 3.7에 나타낸 알고리즘 Decision Tree에서 집중적으로 보아야 할 부분이 방위각 변경 지시명령 추정으로, 붉은색 점선으로 표시하였다. 해당 과정의 경우 세 가지의 Case로 분류할 수 있으며 각 Case 별 상황을 그림 3.8에 나타내었다. 먼저 앞서 추정한 특징 좌표가 항로의 3차원 범위 내에 속하지 않을 경우 Case 1과 같이 해당 좌표를 지시명령이 반영된 좌표로 최종 특정하였다. 특징 좌표가 항로의 3차원 범위에 포함되어 있을 경우에는 해당 특징 좌표 다음으로 2분간 비행한 항적 좌표들 중 항로의 3차원 범위를 벗어나는 좌표가 존재할 경우 Case 2와 같이 해당 특정 좌표를 지시명령이 반영된 좌표로 특정하였다. 마지막으로 Case 3과 같이 항로의 3차원 범위에 포함되어 있으면서 그다음 2분간 비행한 항적 좌표가 모두 Route의 3차원 범위에 포함되어 있는 경우에는 해당 특징 좌표를 지시명령이 반영되지 않은 좌표라고 특정하였다.

고도 변경 지시명령의 경우 상당수의 항공기가 항로의 3차원 범위 내에 위치하고 있는 상황에서 관제사의 지시명령을 받은 후 고도 변경을 통해 항로를 벗어나는 형태이기 때문에 항로의 3차원 범위 내에 항적 좌표가 속하는지에 상관없이 해당 항적이 고도 변경 특징 좌표일 경우 최종적으로 고도 변경 지시명령이 반영된 항적 좌표로 추정하였으며 속도 변경 지시명령의 경우에도 이와 마찬가지로 항공기가 항로 범위 내를 비행하는 상

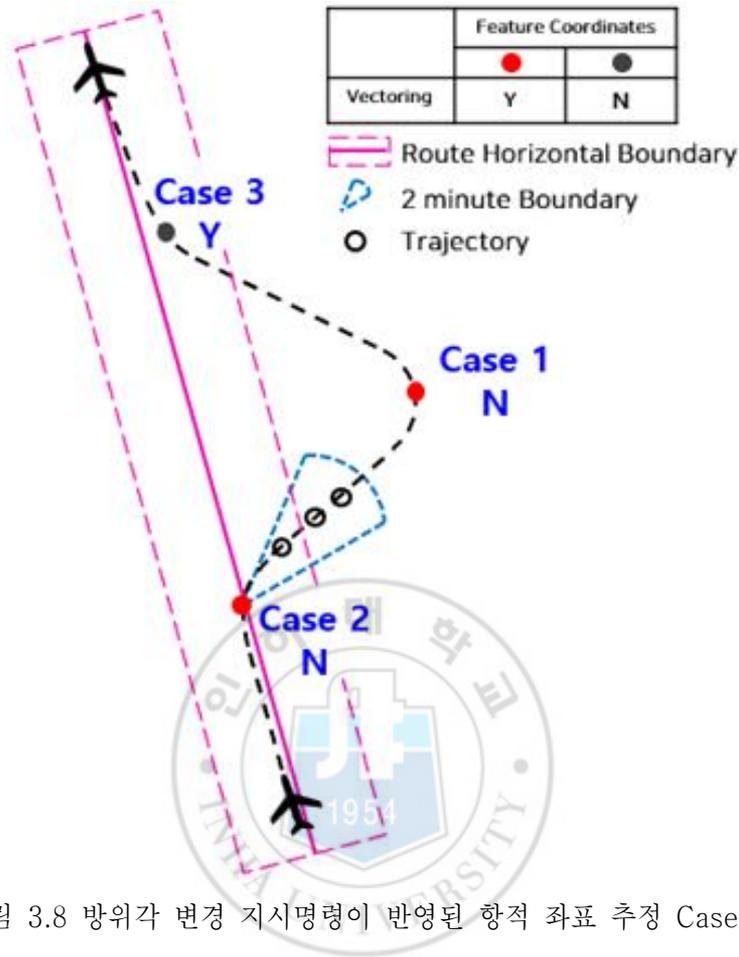


그림 3.8 방위각 변경 지시명령이 반영된 항적 좌표 추정 Case 분류

3.3 각 구역별 수행된 관제사 지시명령 종류 및 횟수 산출

앞서 최종적으로 추정된 관제사 지시명령이 반영된 항적 좌표를 토대로 해당 항적이 어떤 구역에 속해있었는지를 판별하여 각 구역별 관제사 명령이 지시된 종류와 횟수를 시간대별로 비교 분석하였다. 그림 3.9, 3.10, 3.11의 경우 인천 남부 Sector에서 2019년 1년 동안 지시된 관제사 지시명령의 종류와 횟수를 나타낸 것으로, 방위각 변경의 경우 10분당 최대 8번, 고도 변경의 경우 최대 7번, 속도 변경의 경우 최대 6번의 지시가 내려졌음을 확인할 수 있다.

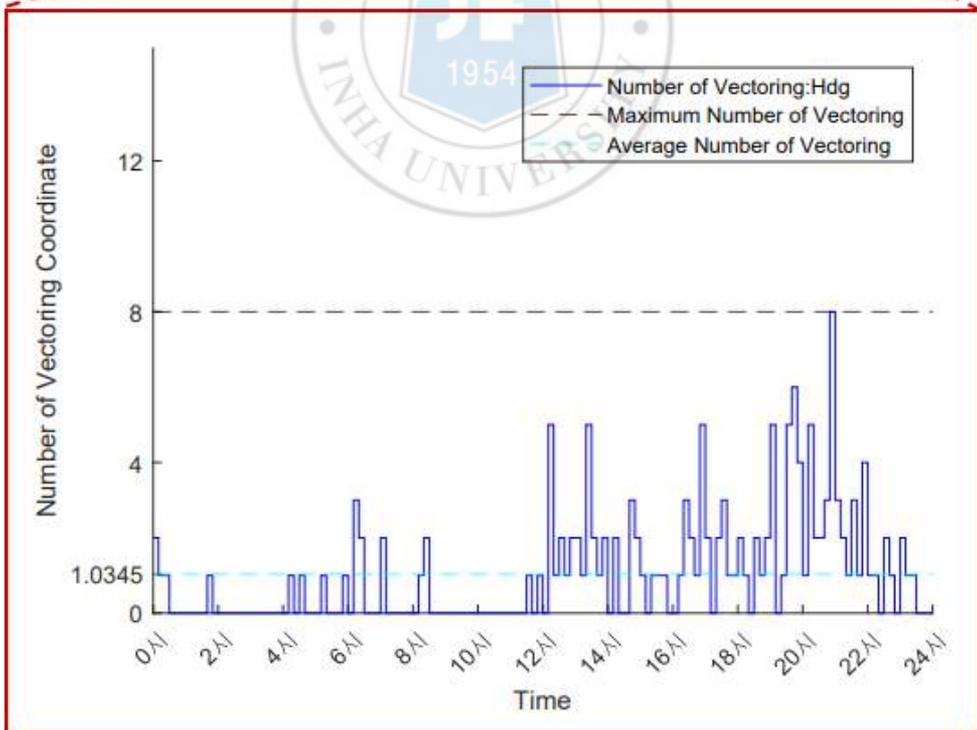
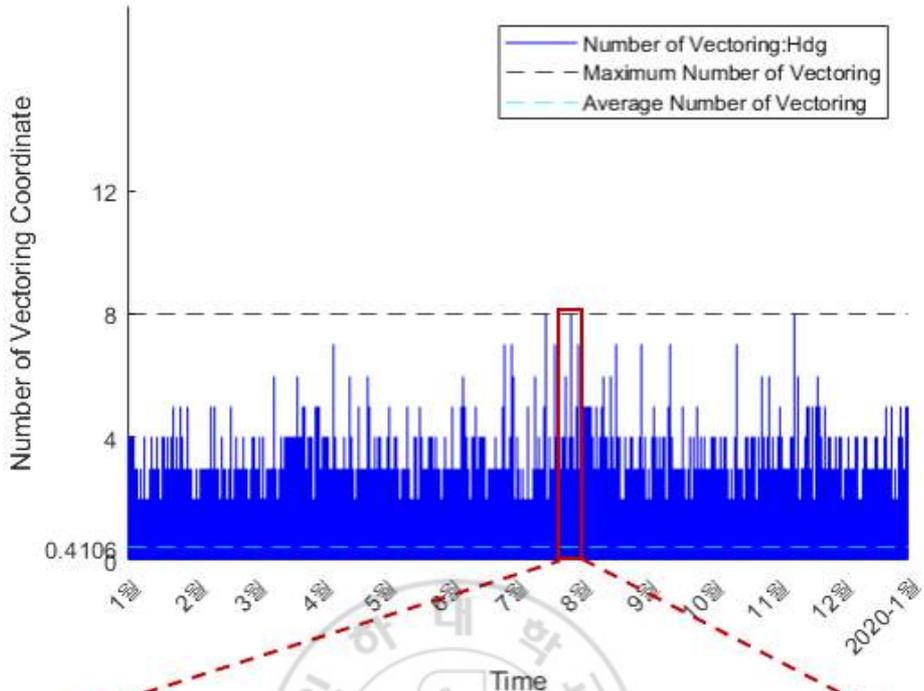


그림 3.9 2019년 인천 남부 Sector의 관제사 지시 방위각 변경 명령 횟수

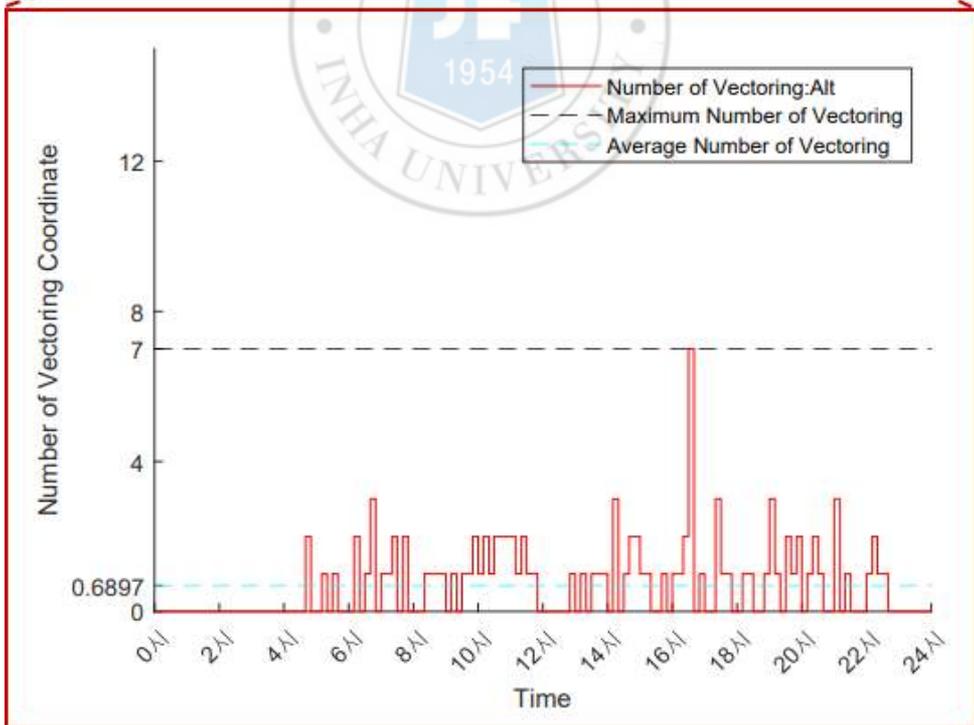
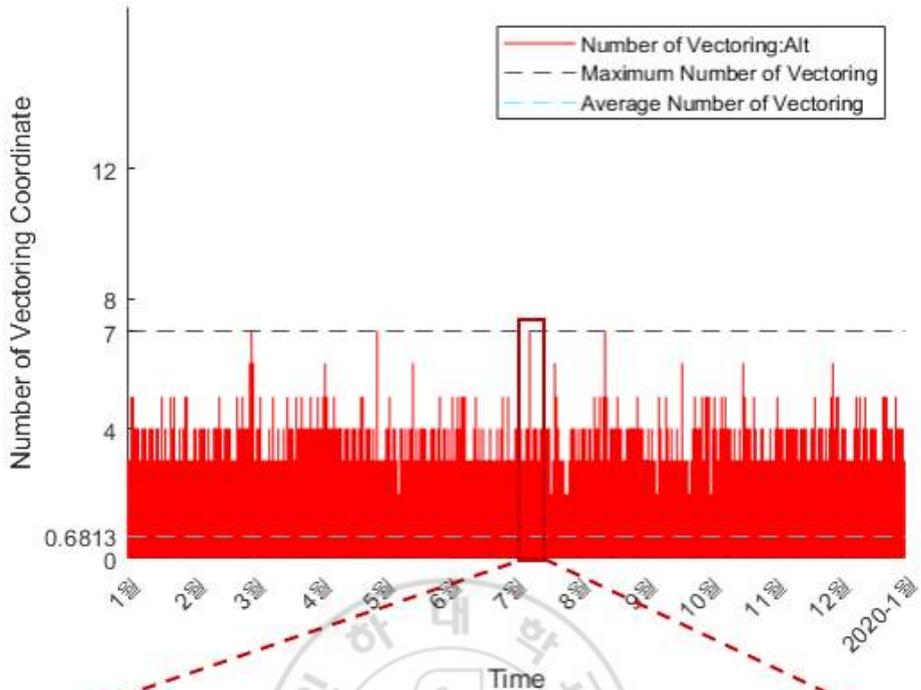


그림 3.10 2019년 인천 남부 Sector의 관제사 지시 고도 변경 명령 횟수

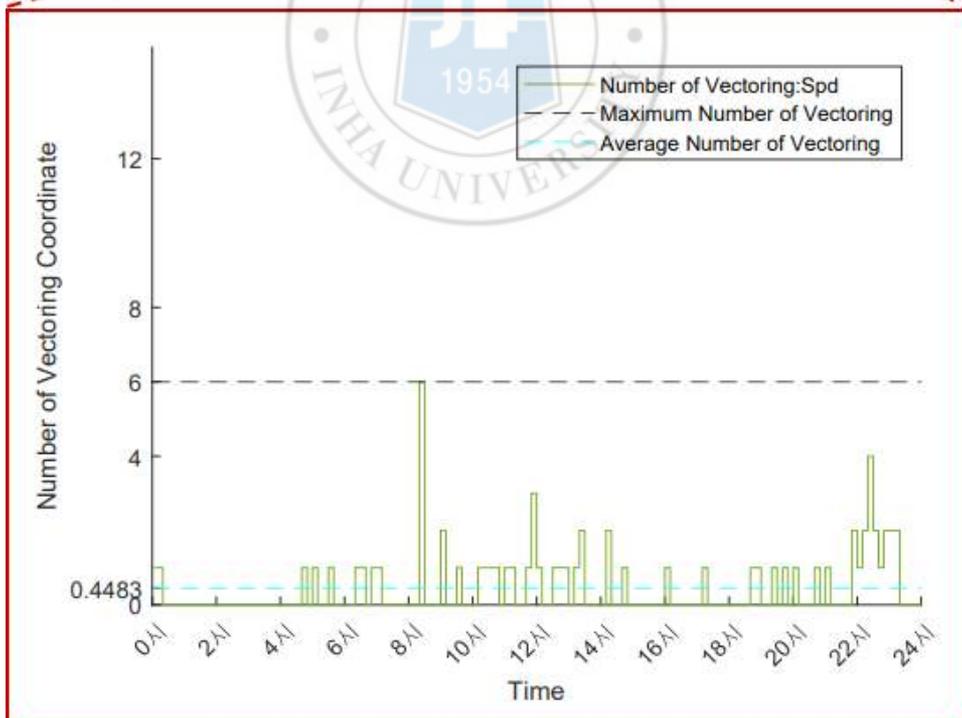
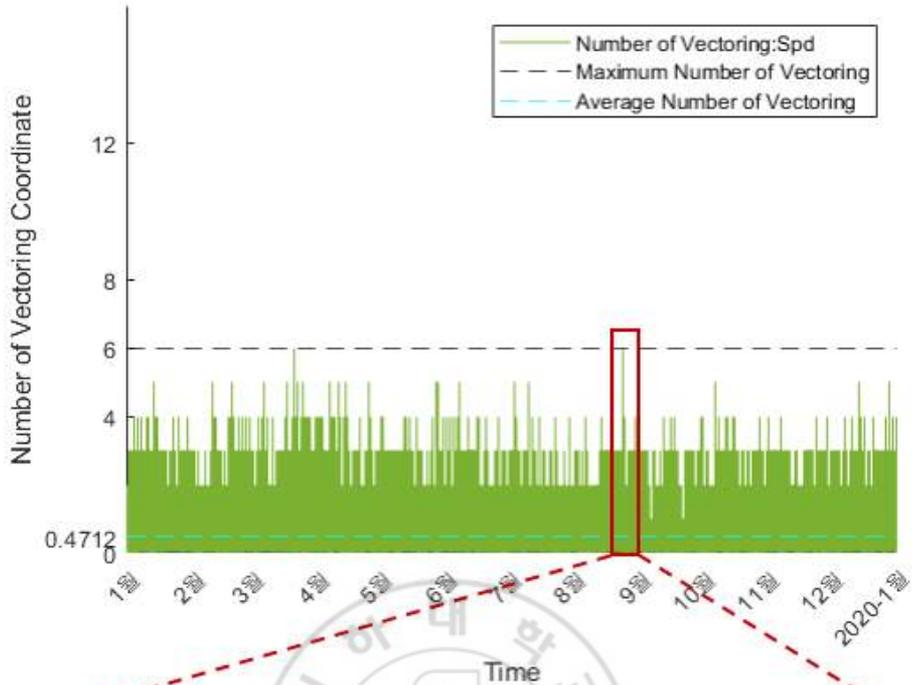


그림 3.11 2019년 인천 남부 Sector의 관제사 지시 속도 변경 명령 횟수

4. 공역 혼잡도 분석

4.1 공역 혼잡도 특성

대부분의 항공기들이 사전에 계획된 항로 및 비행계획에 따라 운항하는 항공운항의 가장 기본적인 특성상 공역별 혼잡도는 그 차이가 다소 존재한다. 구체적으로 항공 교통량이 많아 혼잡한 항로가 통과하는 공역 또는 항로의 혼잡도와는 무관하게 통과하는 항로의 개수가 많은 공역이 상대적으로 타 공역보다 교통량이 많으며 이는 그림 4.1에서 나타난 항로 기반 항공 교통 흐름을 통해 확인할 수 있다. 그림 4.1을 살펴보면 대한민국에서 가장 항공 교통량이 활발한 항로인 김포-제주 항로를 운항하는 항공기가 타 항로를 운항하는 항공기보다 상대적으로 많음을 확인할 수 있으며, 인천국제공항과 김포국제공항이 위치하고 있어 여러 항로의 시점과 종점에 위치하고 있는 서울 상공의 항공 교통량이 타 지역 상공보다 많다는 것 또한 확인할 수 있다. 그에 따라 이를 효율적으로 관리하기 위한 관제사의 개입이 많아져 공역 혼잡도가 높아질 수밖에 없다.



그림 4.1 항로 기반 항공 교통 흐름

따라서 본 연구에서는 이와 같이 각 공역별 특성에 기반한 공역 혼잡도를 산출하여 관제사의 업무부하를 간접적으로 파악하기 위해 NASA에서 제안한 Dynamic Density 공역 혼잡도 산출 기법^[15]을 사용하였다. 기존 공역 혼잡도 산출의 경우 항공 교통량 밀도에 따라 산출하는 것이 보편적이었다. 하지만 기존 항공 교통량 밀도에 따른 공역 혼잡도 판별의 경우 보다 다각도에서 공역의 혼잡도를 파악하지 못한다는 단점으로 인해 공역 혼잡도를 통해 관제사의 업무부하를 판단하기 위해서는 새로운 공역 혼잡도 판별 기법이 필요하게 되었고, 특히 항공관제 상황을 반영할 수 있는 여러 항목별 관제사의 업무 부하를 반영할 수 있는 공역 혼잡도 판별 기법의 필요성이 대두되었다. 이로 인해 Dynamic Density 공역 혼잡도 산출 기법에 대한 연구가 활발히 진행되었으며 해당 기법의 경우 교통량과 더불어 교통 혼잡 파악이 가능한 요소인 관제사 개입 비중을 추가하여 보다 다각도에서 공역 혼잡도 파악 및 관제사 업무부하 판별이 가능하다는 장점이 있다.

4.2 Dynamic Density 공역 혼잡도 산출 기법 검증

4.2.1 Dynamic Density 공역 혼잡도 산출 기준

Dynamic Density (DD)는 공역 혼잡도 파악이 가능한 각 요소들에 가중치를 곱해 이를 모두 선형으로 더한 최종 값이며, 해당 값을 산출하기 위한 식은 다음의 식 (1)과 같다.

$$DD = W_1 \times N + W_2 \times NH + W_3 \times NA + W_4 \times NS \quad \text{식 (1)}$$

W: Weight

식 (1)의 각 항목별 가중치의 경우 다음의 표 4.1과 같이 NASA에서 관제사 65명을 대상으로 공역 혼잡도 산정에 영향을 줄 수 있는 여러 항공관제 상황별 업무 부하 가중

치를 설문한 결과^[16]를 사용하였다.

표 4.1 Dynamic Density 각 항목별 가중치

Function Name	Definition	Weight (Subjective Ratings)
N	Traffic Density	1.00
NH	Number of aircraft with Heading Change	2.40
NA	Number of Aircraft with Altitude Change	2.94
NS	Number of Aircraft with Speed Change	2.45

4.2.2 Human-in-The-Loop (HiTL) 시뮬레이션

NASA에서 제안한 Dynamic Density의 각 항목별 가중치 값들의 경우 미국의 항공관제 특성을 반영한 결과이기에 해당 가중치를 통해 대한민국 공역의 혼잡도를 판별하기 위해서는 먼저 Dynamic Density의 각 항목에 따른 가중치 값에 대한 검증이 필요하였다. 따라서 본 연구에서는 인하대학교에서 수행한 Human-in-The-Loop (HiTL) 항공관제 시뮬레이션 수행을 통한 관제사 업무부하 산출 결과와 NASA에서 제안한 Dynamic Density의 각 항목별 가중치 값을 비교 검증하였다.

인하대학교에서 수행한 HiTL 항공관제 시뮬레이션의 경우 총 2회 진행하였으며, 관제사 2명에서 같은 시나리오를 통해 각각 1회씩 항공관제 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 시나리오의 경우 서울 TMA 진입 항공기 중 인천국제공항 도착 편 항공기를 관제하는 것으로서 시나리오 동작 시간은 50분이며 해당 시간 동안 총 128대의 항공기가 비행하게 된다. 관제사가 시뮬레이션을 수행하는 동안 지시한 명령을 표 4.2와 같이 수기로 기록하여 추후 관제사 지시명령의 종류 및 횟수를 파악하는데 활용하였다.

또한 각 시뮬레이션별 시나리오는 같은 반면 Controller Working Position (CWP) 화

면의 범위는 그림 4.2과 같이 다르기에 HiTL 시뮬레이션 상에서 시나리오의 항공 교통량을 산출할 때 공역의 범위를 CWP 화면의 범위로 대체하여 실제적으로 관제사가 화면에서 육안으로 확인할 수 있는 항공 교통량을 산출하였다.

표 4.2 대한민국 Sector의 상위 5% 공역 교통량 및 해당 시간대

시간	초	Callsign	Heading	Speed	Altitude	Direct To	Terminate
2021-08-19 11:08	30	AAR151		100	5000	DANAN	o
2021-08-19 11:08	50	JNA602	70		2600		
2021-08-19 11:09	75	UAS0203			5000	DANAN	
·	·	·	·	·	·	·	·

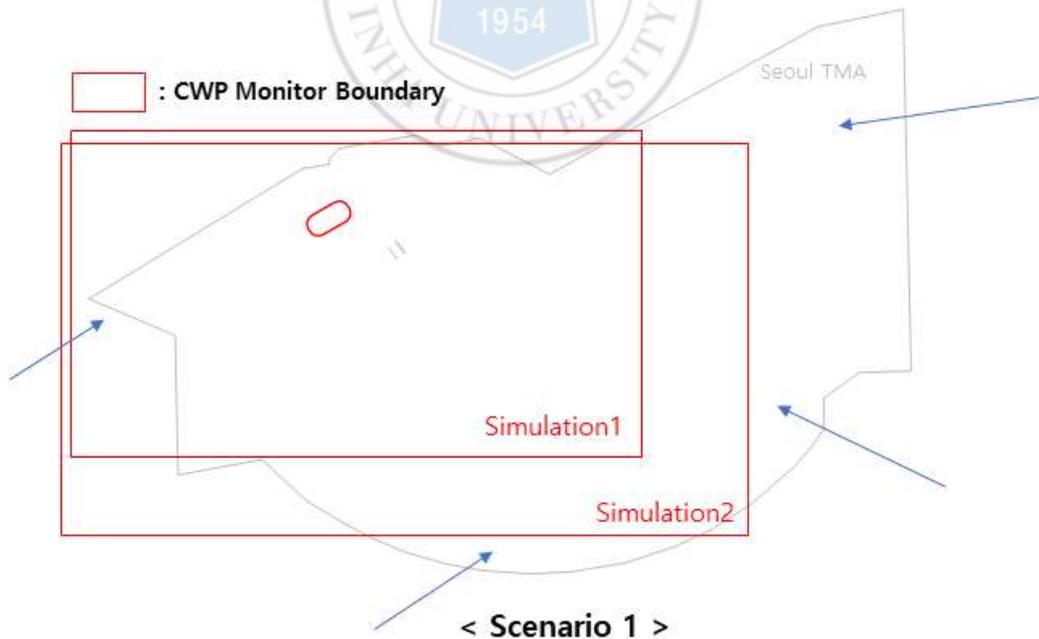


그림 4.2 각 시뮬레이션에 따른 CWP 화면 범위

HiTL 항공관제 시뮬레이션을 통해 관제사의 업무부하를 판단하기 위해 관제사 업무부하 측정 지표인 ISA 지표를 활용하였다. ISA 지표의 경우 참여자의 주관적 업무부하 평가 방식 중 하나로서 업무를 수행하는 동안 일정 시점(2분)마다 참여자 스스로 표 4.3의 평가 척도에 따라 표 4.4와 같이 1(낮음) ~ 5(높음)을 척도로 하여 자신의 업무부하 상태에 대해 평가하게 된다.

표 4.3 ISA Workload 평가 척도

Level	Workload Heading	Spare Capacity	Description
1	Underutilized	Very Much	Little or Nothing to do. Rather boring
2	Relaxed	Ample	More time than necessary to complete the tasks. Time passes slowly.
3	Comfortable	Some	The controller has enough work to keep him/her stimulated. All tasks are under control.
4	High	Very little	Certain non-essential tasks are postponed. Could not work at this level very long. Controller is working "at the limit" Time passes quickly.
5	Excessive	None	Some tasks not completed. The controller is overloaded and does not feel in control.

표 4.4 Controller ISA Workload 측정 예시

Time (min)	2'	4'	6'	8'	10'	12'	14'	...
Workload	1	1	3	3	4	3	5	...

4.2.3 HiTL 시뮬레이션 기반 Dynamic Density 공역 혼잡도 판별 기법 검증

HiTL 시뮬레이션 상의 시나리오를 기반으로 CWP 화면에서의 공역 교통량을 산출하였으며, 시뮬레이션 수행 시간 동안 관제사가 지시한 명령의 종류 및 횟수를 기록하였다. 최종적으로 공역 교통량과 관제사 지시명령 횟수 및 종류를 통합하여 NASA에서 제안한 Dynamic Density 가중치를 대입해 HiTL 시뮬레이션에서의 Dynamic Density를 산출하였다. 그 후 그림 4.3과 같이 HiTL 시뮬레이션을 수행하며 관제사가 직접 평가한 업무부하 지표인 ISA 결과와 비교하였다.

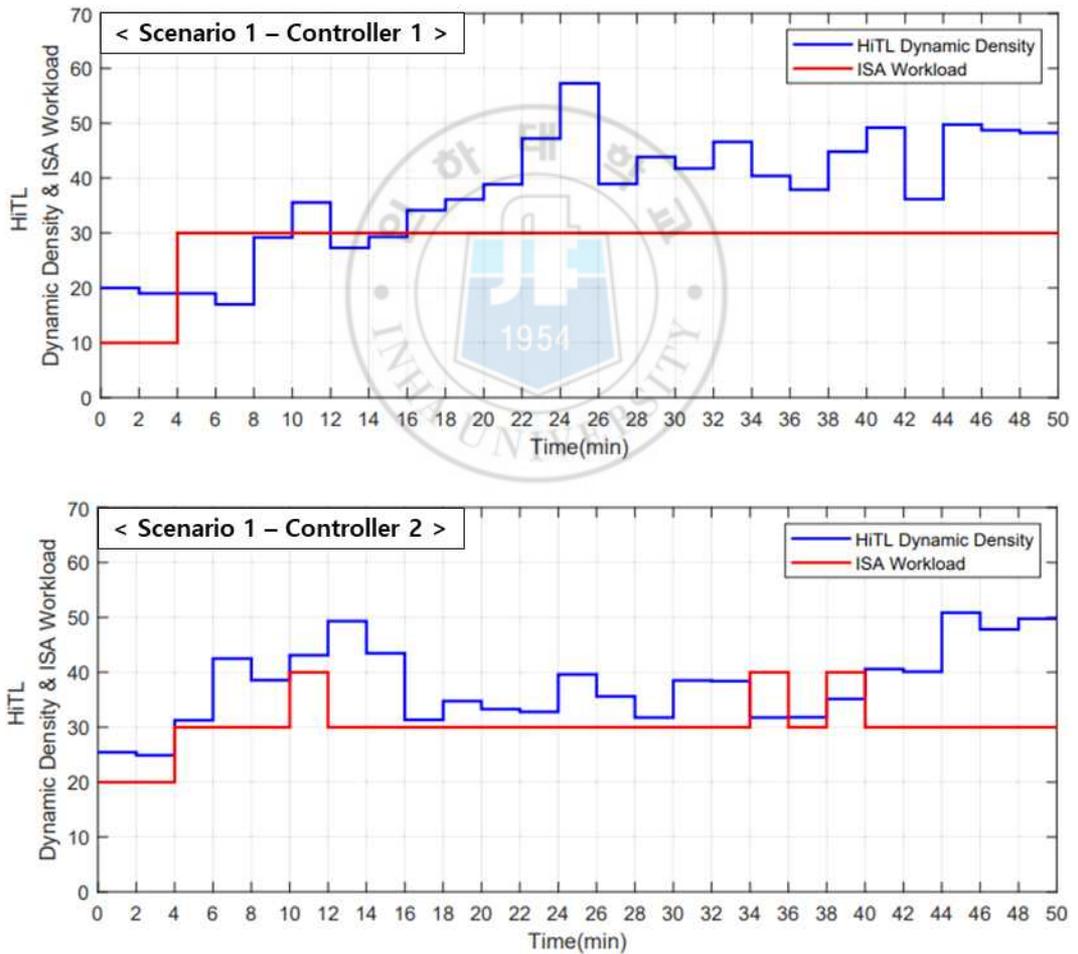


그림 4.3 HiTL 시뮬레이션의 Dynamic Density와 ISA Workload 평가 결과 비교

업무부하 수치 비교의 편의를 위해 ISA 업무부하 평가 결과에 10배의 가중치를 둔 후 Dynamic Density 공역 혼잡도 산출 결과와 비교하였으며, 비교 결과 ISA 업무부하 측정 지표가 Dynamic Density 공역 혼잡도 산출 결과와 비교해 세밀하지 않은 측면이 있어 결과에 다소 차이가 있지만 시간에 따른 업무 부하 증감의 경향이 같다는 것을 확인할 수 있어 최종적으로 NASA에서 제안한 Dynamic Density 공역 혼잡도 산출 기법과 해당 기법의 각 항목별 가중치를 활용해 대한민국 공역의 혼잡도를 산출할 수 있을 것이라 판단하였다.

4.3 대한민국 공역 Dynamic Density 산출

HiTL 항공관제 시뮬레이션을 통한 관제사 업무부하 지표 ISA 평가 결과를 활용하여 Dynamic Density 공역 혼잡도 산출 기법 및 각 항목의 가중치에 대한 검증을 수행한 후 최종적으로 대한민국 공역의 Dynamic Density를 산출하였다.

앞서 소개한 각 공역별 항공 교통량 산출 방식과 같이 2019년 1년간 특정 공역의 Dynamic Density를 산출하였고, 해당 결과를 1일 기준으로 누적하여 최대 빈도를 가지는 Dynamic Density 데이터를 산출하였다. 산출된 Dynamic Density 결과 중 제주 Sector에서의 2019년 각 시간대별 Dynamic Density 누적 결과와 최대 빈도를 가지는 Dynamic Density 산출 결과를 그림 4.4에 나타내었다. Dynamic Density 누적 산출 결과를 통해 각 시간대별 최대 빈도를 가지는 Dynamic Density 결과를 통해서 각 공역의 최대 및 평균 Dynamic Density 값을 산출하였으며 각 공역의 종류별로 가장 높은 평균 Dynamic Density 값을 가지는 공역들을 순차적으로 그림 4.5와 4.6에 나타내었다.

앞서 산출한 표 2.7과 2.8의 각 공역별 항공 교통량과 비교하여 Sector의 경우 인천 북부 Sector, TMA의 경우 광주 TMA가 각각 항공 교통량 상위 5위와 4위에서 공역 혼잡도 순위 2위로 상승하였음을 확인할 수 있다. 이러한 원인에 대한 분석으로 해당 공역을 통과하는 여러 항공기 항적들을 분석해 본 결과 인천 북부 Sector의 경우 중국, 유

럽, 미주 노선 운항 항공기들이 해당 공역에 진입하며 타 공역보다 상대적으로 관제사의 지시명령을 많이 하달 받는 것으로 나타났으며, 광주 TMA의 경우 김포-제주 항로에서 순항 항로인 EN-Route에서 제주국제공항 착륙을 위해 도착 항로인 STAR로의 항로 변경과 그 반대로 제주국제공항 출발 항로인 SID에서 EN-Route로의 변환 등이 이루어지는 길목이기 때문에 관제사 지시명령이 많이 발생한 것으로 추정되어 순위가 상승한 것으로 분석되었다.

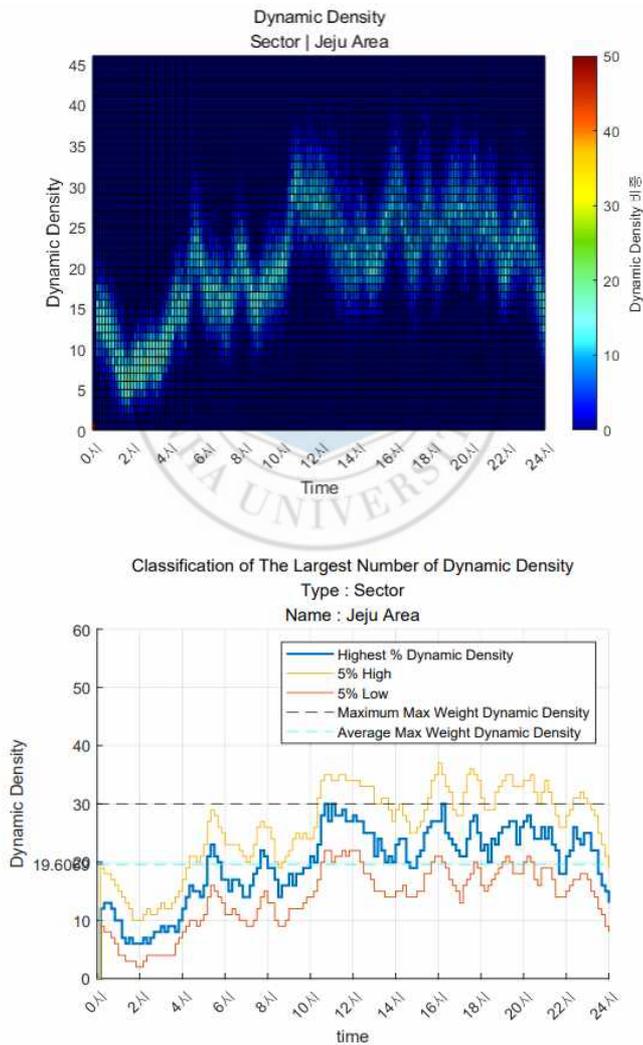


그림 4.4 제주 Sector의 Dynamic Density 산출 결과

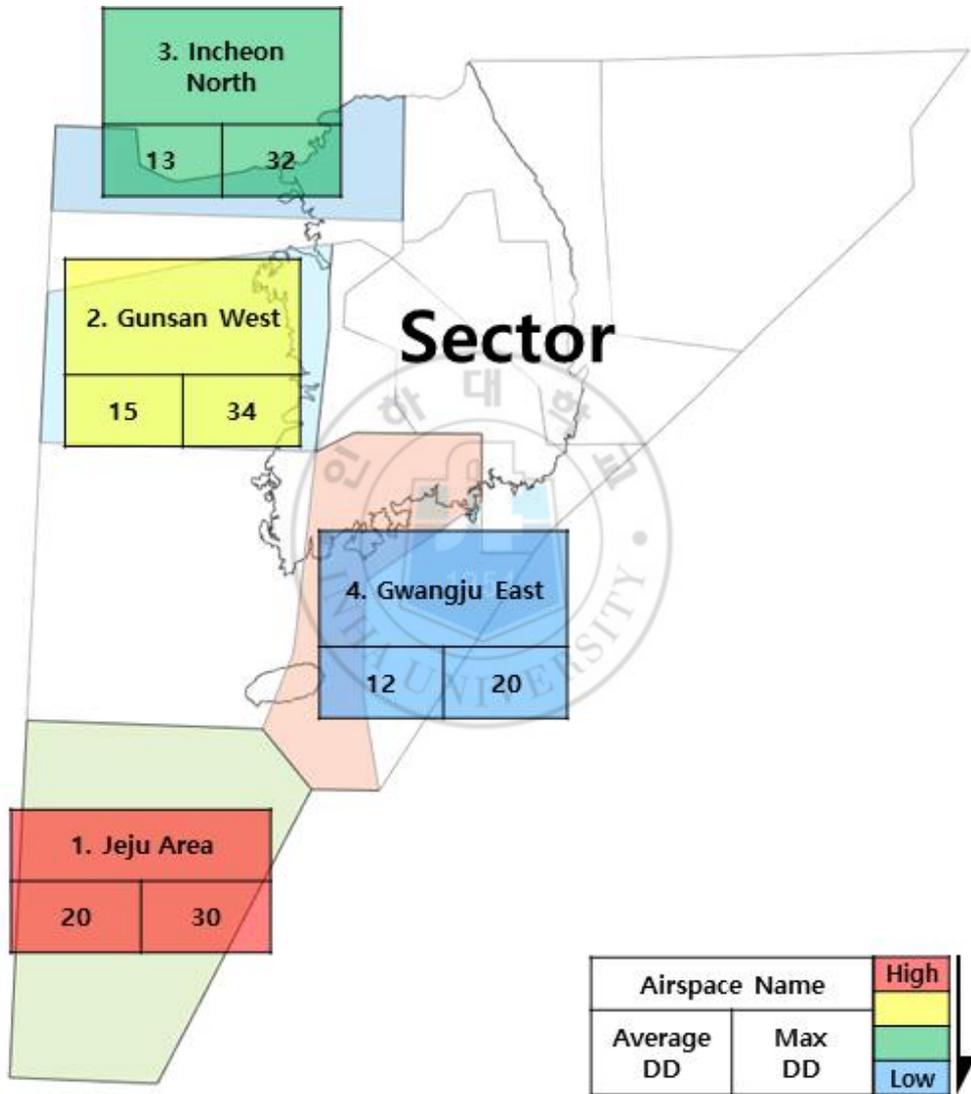


그림 4.5 2019년 대한민국 Sector(지역관제구역) Dynamic Density 산출 결과

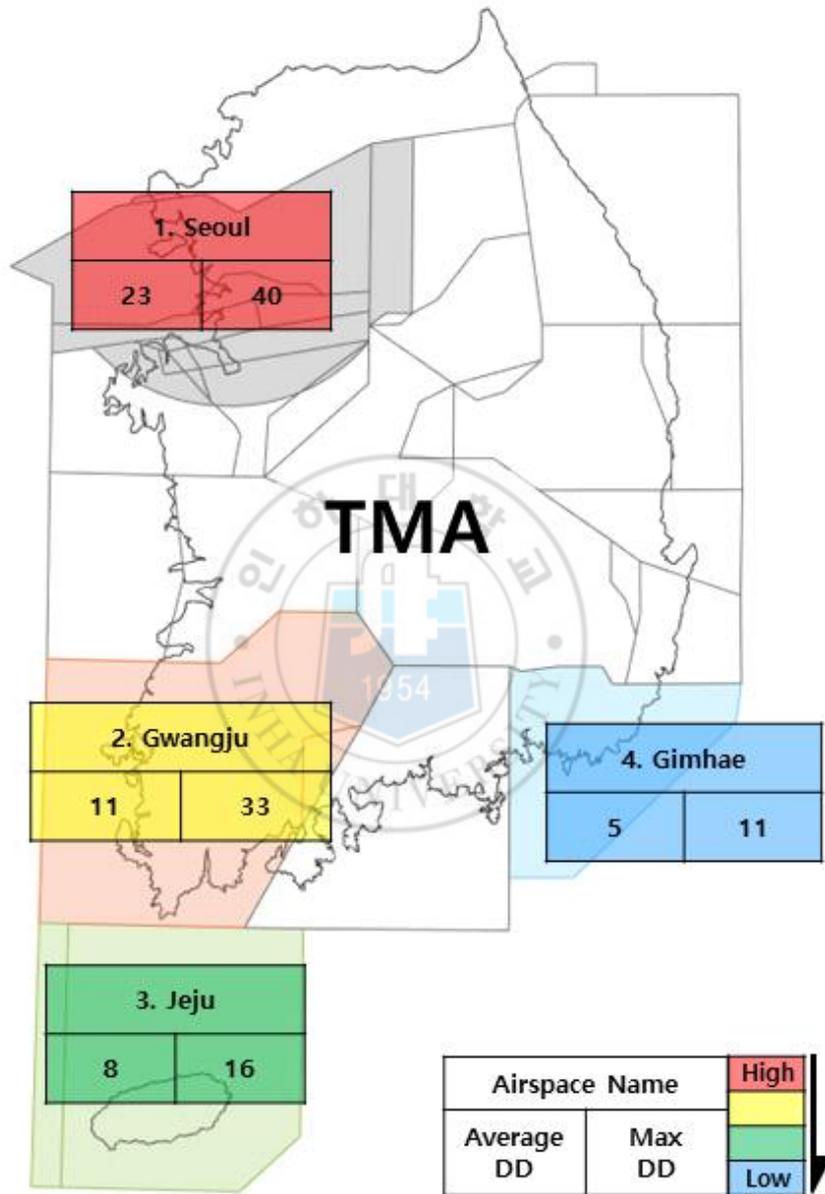


그림 4.6 2019년 대한민국 TMA(접근관제구역) Dynamic Density 산출 결과

5. 결론

본 연구에서는 대한민국 관할 관제 공역(Sector, TMA)의 항공 교통 혼잡도를 산출하고 이를 비교 분석하여 관제사의 업무부하도가 가장 높은 공역을 선제적으로 판별하는 연구를 수행하였다. 이를 위해 가장 먼저 각 공역별 항공 교통량을 산출하였다. 해당 과정에는 2019년 1년간 대한민국 관할 관제 공역인 인천 FIR 내를 비행한 이력이 있는 항공기 약 100만 대의 ADS-B 항적 데이터를 활용하였으며, 공역 교통량 산출을 위해 AIP에 기재된 각 공역의 좌표를 투영할 시 발생할 수 있는 좌표 불일치 영역을 제거하는 공역 좌표 보정 알고리즘을 개발하여 공역 교통량 산출의 정확도를 확보하였다. 또한 1년 동안 각 시간대별로 산출된 공역별 항공 교통량을 누적하여 각 시간대별로 최대 빈도 및 상하위 5% 비중을 가지는 항공 교통량을 산출하였고 이를 통해 1차적인 공역 수용량 판단 및 각 시간대별 공역의 항공 교통량을 비교 분석하여 항공 교통량을 기준으로 한 가장 기본적인 공역 혼잡도를 산출하였다.

각 공역별 항공 교통량과 더불어 보다 다각도에서 공역 혼잡도 판별을 위해 관제사의 지시명령이 반영된 항적 좌표를 추정할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 해당 알고리즘 개발을 위해 먼저 인하대학교에서 개발한 항적 좌표 기반 비행 계획 추정 알고리즘을 사용하여 특정 항공기가 비행했던 비행계획을 추정하는 과정을 수행하였다. 그 후 해당 항공기의 항적 데이터 중 관제사 지시명령(방위각, 속도, 고도 변경)이 반영된 항적 좌표를 추정할 수 있도록 각 지시명령 항목에 최적화된 특징 좌표를 판별하는 과정을 수행하였다. 이를 통해 앞서 추정한 항적 데이터 기반 비행 계획 추정 결과와 특징 좌표 추정 결과를 활용하여 최종적으로 항적 좌표들 중 관제사 지시명령이 반영된 좌표를 추정하였고 이를 해당 항적이 속한 공역별로 구분하여 각 공역별 관제사 지시명령의 종류별 발생 빈도를 분석하였다.

본 연구에서는 최종적으로 앞서 산출한 각 공역별 항공 교통량과 관제사 지시명령 발생 빈도를 활용해 NASA에서 제안한 공역 혼잡도 판별 기법인 Dynamic Density 산출 기법을 통해 대한민국의 공역 혼잡도를 판별하였으며, 해당 과정에서 Dynamic Density

공역 혼잡도 산출 기법 및 해당 기법의 항목별 가중치에 대한 검증은 수행하기 위해 인하대학교에서 수행한 Human-in-The-Loop (HiTL) 항공관제 시뮬레이션 상황에서 Dynamic Density를 산출한 후 해당 결과를 HiTL 시뮬레이션의 관제사 업무부하 평가 결과인 ISA Workload 지표와 비교 검증하여 Dynamic Density를 통해 대한민국 관제 공역의 혼잡도를 산출 시 유효한 결과를 도출할 수 있음을 확인하였다. Dynamic Density 공역 혼잡도 산출 기법에 대한 검증 과정을 거친 후 해당 기법을 활용하여 최종적으로 대한민국 공역의 교통 혼잡도를 산출하였으며 해당 과정에서 대한민국 공역 상황에 최적화된 Dynamic Density의 각 항목별 가중치가 존재할 경우 보다 정확한 공역 혼잡도를 판별할 수 있을 것이라 판단하였다.

본 연구를 통해 도출한 대한민국 공역 혼잡도 비교 분석 결과를 통해 향후에는 머신러닝 기반 데이터 클러스터링 기법인 가우시안 혼합 모델을 통해 각 공역별 대표적인 항공교통량 증감의 추이를 파악해 이것을 통해 미래 항공교통량을 예측할 수 있는 미래항공교통량 예측 모델을 개발하여 미래 각 공역의 혼잡도를 선제적으로 예측하는 연구를 수행할 계획을 가지고 있다.

6. 참고문헌

- [1] 손영우, “항공교통관제사 인적 요인의 안전영향 및 안전관리방안 연구-항공교통관제사의 피로 및 스트레스 중심”, 연세대학교 인간행동연구소, 2011-5
- [2] 김용균, 원인수, 윤준철, 박효달. (2010). “항공관제 시스템 자동화를 위한 자동 관제권 이양 알고리즘 연구”. 한국항공학회논문지, 14(4), 489-494.
- [3] 인천국제공항공사, https://www.airport.kr/ai_cnt/ko/business/background.do
- [4] 인천국제공항공사, https://www.airport.kr/ai_cnt/ko/business/background.do
- [5] 한국공항공사 항로시설본부, https://www.airport.co.kr/acc/cms/frCon/index.doMENU_ID=60
- [6] 인천항공교통관제소, https://www.molit.go.kr/iacro/USR/WPGE0201/m_16185/DTL.jsp
- [7] Rezo, Z., and Steiner, S. “South East Common Sky Initiative Free Route Airspace implementation aftermath”, Transportation Research Procedia, Vol. 45, 2020, PP. 676~683.
- [8] Lee, H., and Lee, H. “Extracting Flight Plans from Recorded ADS-B Trajectories”, International Journal of Aeronautical and Space Sciences, Undergoing revision.
- [9] Nagy, D. “The Lambert Conformal Conic Projection: A short Algorithm to Calculate the Direct and Inverse Transform”, CISM Journal, Vol. 44, No. 2, 1990, PP. 158~164.
- [10] Lee, H. T., and Romer, T. F. “Automating the Process of Airport Surface Node-Link Model Generation”, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 34, No. 4, 2011, pp. 1228~1238.
- [11] Kenneth, B. S., “An efficient point-in-polygon algorithm”, Computers & Geosciences, Vol. 4, No. 2, 1978, pp. 173-178.
- [12] Lee, H., and Lee, H. “Extracting Flight Plans from Recorded ADS-B Trajectories”, International Journal of Aeronautical and Space Sciences, 2022.
- [13] Saalfeld, A. “Topologically Consistent Line Simplification with the

Douglas–Peucker Algorithm” , Cartography and Geographic Information Science, 26(1), 7 18

- [14] Lee, H., Park, B., and Lee, H. “Waypoint Extraction from Recorded ADS–B Trajectory Data” , 2016 The Korean Navigation Institute Conference, KONI, Vol. 20, No. 1, 2016, pp. 194-196.
- [15] Laudeman, I. V., Shelden, S. G., Branstrom, R., and Brasil, C. L. “Dynamic Density: An Air Traffic Management Metric” , Report No. NASA/TM –1998–112226. MoffettField, CA: NASA
- [16] Sridhar, B., Chatterji, G., Sheth, K., and Edwards, T., “Airspace Complexity And its Application in Air Traffic Management” , Second USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar



7. 부록

7.1 미래 항공 교통량 예측 모델

7.1.1 가우시안 혼합 모델(GMM)을 활용한 공역 교통량 데이터 군집화

각 공역별 1일 교통량 그래프를 비교 분석한 결과, 대다수의 항공기가 일정 스케줄에 따라 정해진 항로로 비행하는 항공 운항 특성상 시간대별 공역 교통량 증감의 추이가 비교적 일정함을 확인하였다. 이에 착안해 세부적으로 교통량 증감 패턴이 유사한 일자별로 분류하는 기법이 필요하였고, 공역의 전체 항공 교통량 데이터를 특정 개수의 확률 분포로 나타낼 수 있다고 가정한 후 가우시안 혼합 모델(GMM)을 사용하여 항공 교통량 군집화(Clustering)을 진행하였다. 그림 7.1과 7.2는 제주 Sector의 항공 교통량 데이터 군집들 중 2번과 5번 군집의 모습을 나타낸 그래프이며 그림 7.3의 경우 2019년 1년간 제주 Sector의 항공 교통량 군집화 과정을 통해 도출한 군집들의 중심값(Centroid)을 모두 나타낸 그래프이다.

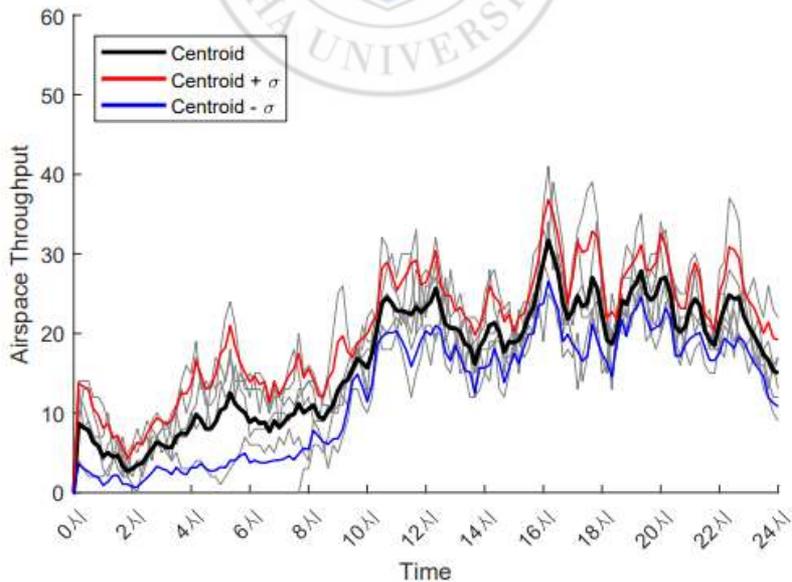


그림 7.1 제주 Sector 항공 교통량 2번 군집

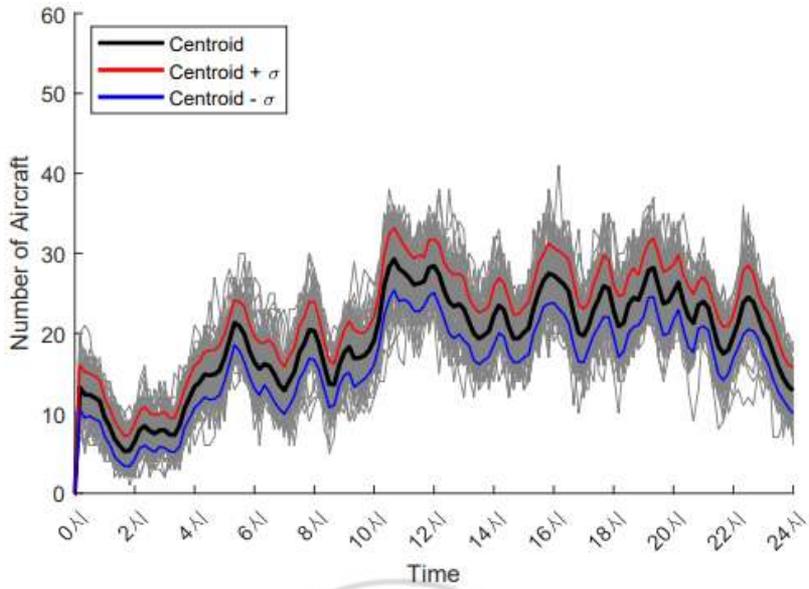


그림 7.2 제주 Sector 항공 교통량 5번 군집

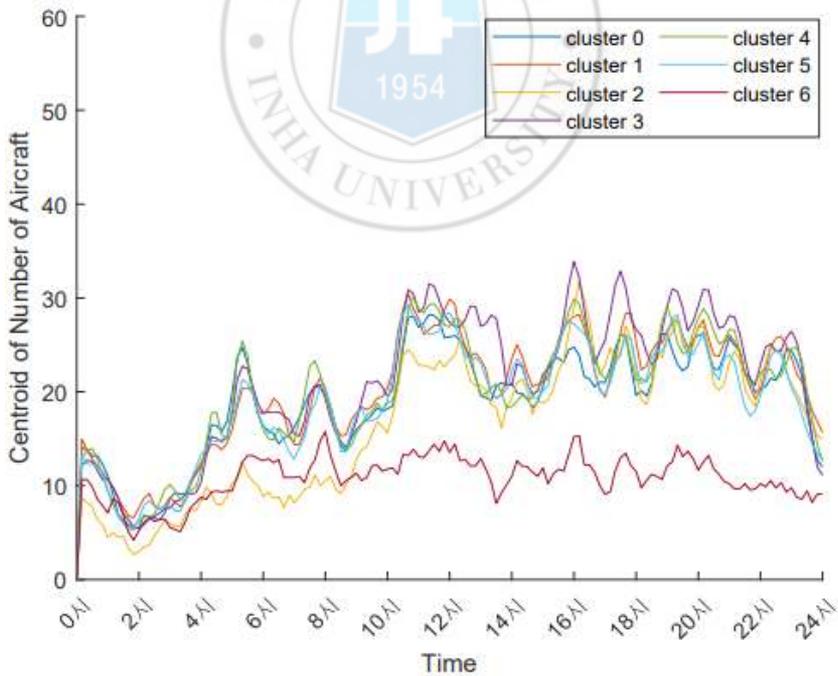


그림 7.3 제주 Sector 항공 교통량 군집들의 중심값(Centroid)

7.1.2 항공 교통량 예측 결과

이렇게 2019년 1월 ~ 11월 각 구역의 항공 교통량 데이터 군집화를 통해 각 구역별 특정 개수의 군집과 중심값 데이터를 얻게 되었으며, 이를 통해 2019년 12월 각 구역별 특정 일자의 항공 교통량을 예측하고 이를 2019년 12월 실제 항공 교통량 데이터와 비교하여 예측의 정확성을 검증하였다. 그림 7.4의 경우 2019년 12월 15일 제주 Sector의 항공 교통량 예측 과정을 나타낸 그래프이다. 해당 예측 과정의 경우 실제 2019년 12월 15일 제주 Sector의 항공 교통량과 각 군집의 중심값들을 비교하여 교통량의 차이가 가장 적은 군집을 선별하는 과정인데, 그래프를 보았을 때 대략 오전 10시 이후 0번 군집으로 결과가 수렴함을 확인할 수 있다. 이는 주로 오전 10시를 기점으로 본격적인 항공 교통량이 발생하는 대다수 구역의 특성이 반영된 것으로, 해당 시간대 이후의 항공 교통량을 항공 교통량 데이터 군집의 중심값으로 예측할 수 있음을 확인하였으며, 그림 7.5에 실제 2019년 12월 15일 제주 Sector의 항공 교통량과 예측 과정 결과 도출된 0번 군집의 모습을 그래프로 나타내었다.

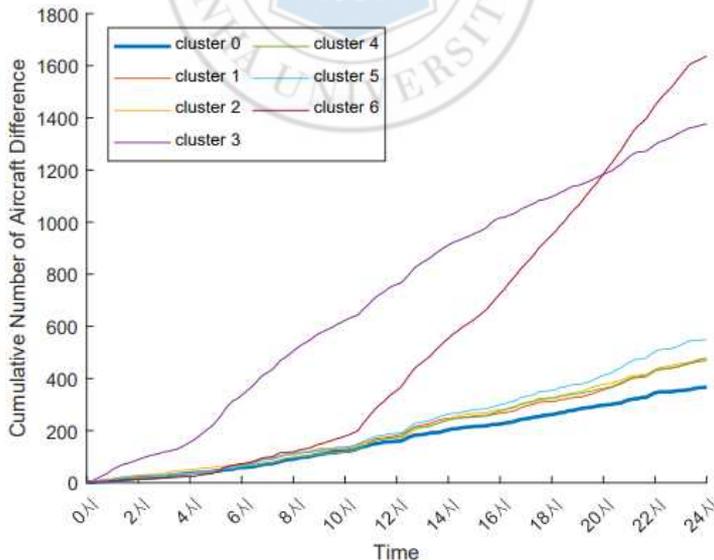


그림 7.4 2019년 12월 15일 제주 Sector 항공 교통량 예측 결과

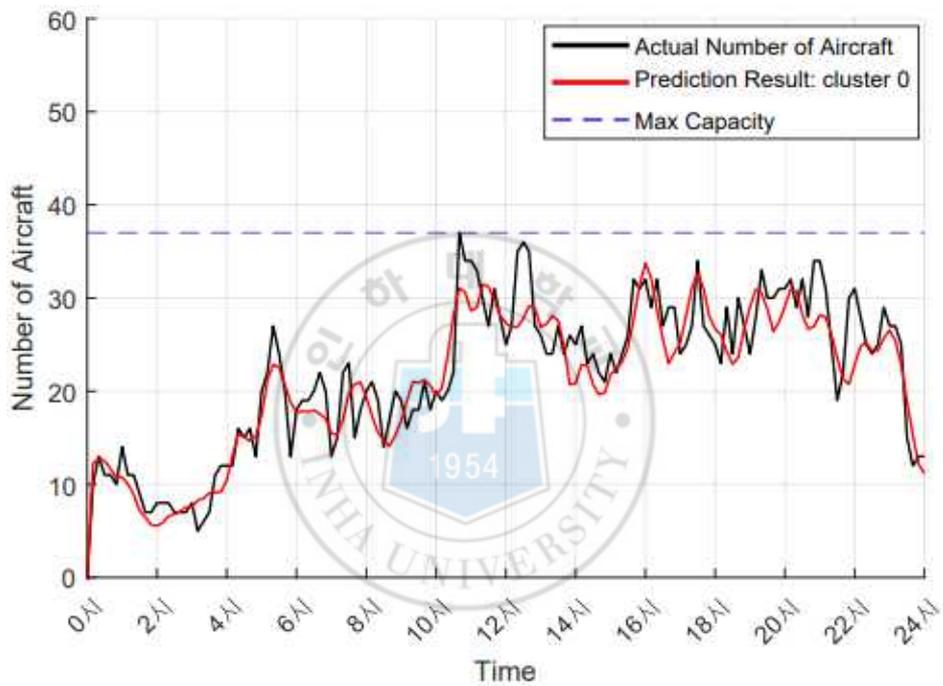


그림 7.5 2019년 12월 15일 제주 Sector 항공 교통량 데이터 예측 결과

7.2 대한민국 공역(Sector, TMA) Dynamic Density 산출 결과

표 7.1 대한민국 Sector Dynamic Density 산출 결과

Sector	Dynamic Density	
	Average	Max
Jeju Area	19.6069	30
Gunsan West	15.3103	34
Incheon North	13.8483	32
Gwangju East	11.9172	20
Incheon South	10.2207	24
Gwangju West	8.2759	16
Gunsan East	7.1034	14
Pohang Area	6.9862	15
Daegu Area	4.1724	9
South Area	3.7034	7
Gangneung Area	3.5931	12
East-sea	2.6	8

표 7.2 대한민국 TMA Dynamic Density 산출 결과

TMA	Dynamic Density	
	Average	Max
Seoul	23.1586	40
Gwangju	11.2621	33
Jeju	7.8483	16
Gimhae	4.9517	11
Daegu	3.7586	21
Sacheon	1.8552	6
Osan	1.069	4
Jungwon	0.3517	2
Yecheon	0.1655	5
Pohang	0.1241	2
Haemi	0.0552	1
Wonju	0.0138	1
Gunsan	0.0138	1
Gangneung	0	0

7.3 방위각 변경 지시명령 추정 단계별 과정

Trajectories



그림 7.6 방위각 변경 지시명령 추정 대상 항적 좌표

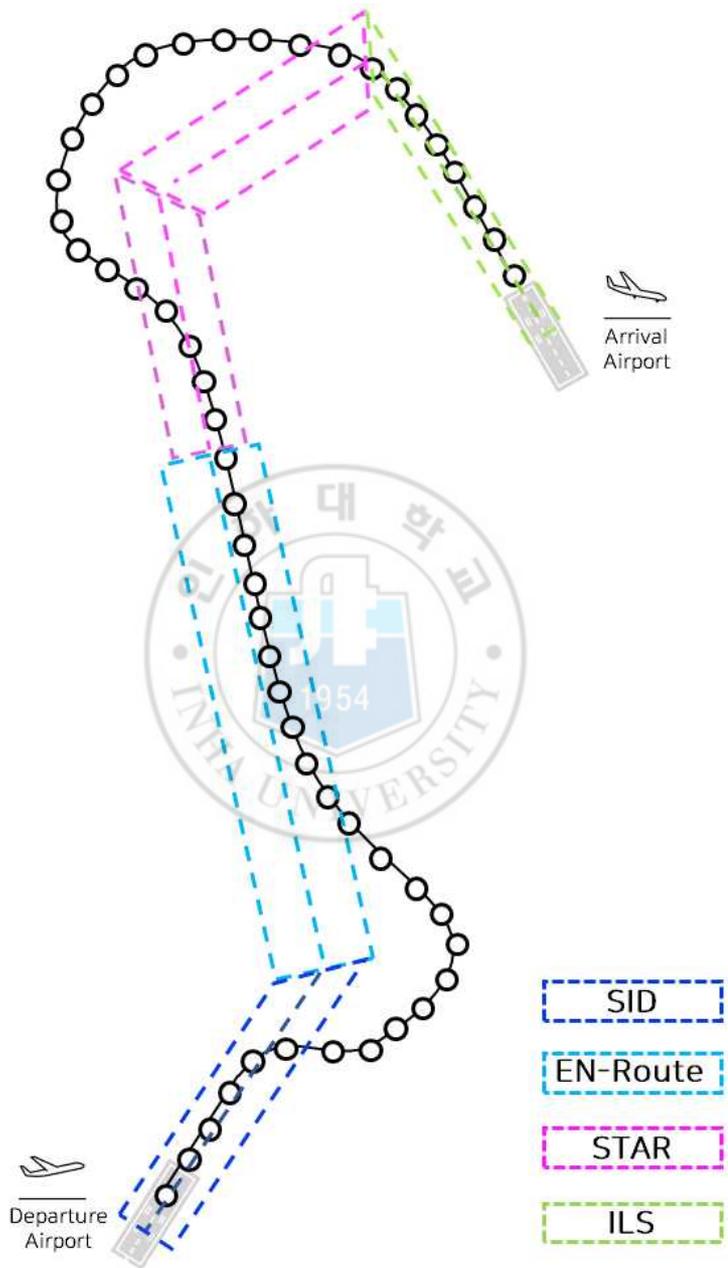


그림 7.7 방위각 변경 지시명령 추정 단계 1: 비행 계획 추정



그림 7.8 방위각 변경 지시명령 추정 단계 2: 특징 좌표 판별



그림 7.9 방위각 변경 지시명령 추정 단계 3: 최종 항적 좌표 추정



그림 7.10 방위각 변경 지시명령이 반영된 항적 좌표 추정 결과