

항공교통 관제절차 예측모형 개발 최종보고서

2014 . 09 . 30

Infrastructure
R&D Report

주관연구기관 / 한국항공대학교

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부 장관 귀하

이 보고서를 "항공교통 관제절차 예측모형 개발"의 최종보고서로 제출합니다.

2014. 09. 30

주관연구기관명 : 한국항공대학교

주관연구책임자 : 이 금 진

연구원 : 홍 성 권

" : 정 완 기

" : 김 민 지

보고서 요약서

과제고유번호	13CTAP-C0 66369-01	해 당 단 계 연 구 기 간	2013.04.01~ 2014.09.30	단 계 구 분	최종
연 구 사 업 명	건설교통기술촉진연구사업				
연 구 과 제 명	최 상 위 과 제 명	항공교통 관제절차 예측모형 개발			
	단위과제명				
연 구 책 임 자	이 금 진	총연구기간 참 여 연구원수	총 : 4명 내부 : 4명 외부 : 0명	총연구비	정부 : 50,000천원 기업 : 천원 계 : 50,000천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	한국항공대학교		참여기업명		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서면수	76
○ 항공기 궤적예측 관련 국내외 연구 동향 분석 ○ 항공교통 관제절차 패턴 분류기법 개발 ○ 항공교통 관제절차 패턴 예측기법 개발 ○ 항공기 공항 도착시간 예측기법 개발 ○ 실제 항적 데이터를 통한 예측기법 성능 검증					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	항공교통관리, 궤적 예측, 궤적 패턴 식별, 궤적 패턴 예측, 도착시간 예측, 항공교통 복잡도			
	영 어	Air Traffic Management, Trajectory Prediction, Trajectory Pattern Identification, Trajectory Pattern Prediction, Arrival Time Prediction, Air Traffic Complexity			

요 약 문

I. 제 목

- 항공교통 관제절차 예측모형 개발

II. 연구개발과제 목적 및 필요성

- 항공교통량이 지속적으로 증가함으로 인해 공역 혼잡, 항공기 결항 및 지연, 비효율적 운항에 따른 배출가스 증가 등의 문제가 전 세계적으로 심각해지고 있음
- 이러한 문제점을 해결하기 위하여 세계 각국은 차세대 항공교통관리(ATM, Air Traffic Management) 도입을 위한 연구개발을 활발히 진행하고 있으며 이는 항공기 4차원 궤적정보(위도, 경도, 고도, 시간)에 기반을 둔 궤적기반 관리(TBO, Trajectory Based Operation)를 핵심적인 개념으로 함
- 궤적기반 관리에 핵심적인 항공기 4차원 궤적에 대한 정보 중, 특히 항공기의 중장기 미래 궤적에 관한 정보를 예측하는 기술은 전략적이고 정밀한 항공교통관리를 위해 핵심적으로 필요한 기술로서 그 중요성이 대두되고 있음
- 하지만 종래의 기술들은 항공기의 3차원 이동경로, 즉 비행절차가 주어진 상황에서 항공기 성능데이터를 기반으로 항공기 한 대의 궤적을 예측하는 기법이 주를 이루고 있으며, 중장기 항공기 궤적을 예측하기 위해서는 관제사에 의해 항공기의 경로가 임의로 변화되는 상황에 대한 궤적예측 기술의 연구가 필요함
- 따라서 본 연구는 항공기 중장기 궤적예측을 위해 항공교통 관제절차 예측모형을 개발하는 것을 그 목적으로 함
- 또한 국제적인 수준의 선도적 연구를 수행함으로써 해당 분야에 대한 국가 연구위상을 강화함과 동시에 ATM 분야에 대한 국내 연구를 활성화하고 관련 전문인력을 양성하는 것을 목적으로 함

III. 연구개발 수행내용 및 범위

- 항공기 궤적예측 및 관제절차 예측모형에 대한 해외 연구사례 및 문헌조사를 통해 기존 연구동향 및 기술을 파악하고 현존하는 문제점을 분석함
- 관제절차 예측모형의 첫 번째 단계로써 관제절차 주요 패턴 분류기법을 개발함. 관제절차 주요 패턴 분류기법 개발 단계에서는 항공기 궤적의 수학적 모델링 방법과 항공기 궤적을 유한개의 관제절차 패턴으로 분류하기 위한 클러스터링 방법을 활용한 분류기법을 개발함
- 관제절차 예측모형은 다양한 기계학습 기법을 적용하여 개발함. 먼저 관제절차 주요 패턴 분류기법 단계에서 분류된 관제절차 패턴과 항공 교통 복잡도간의 상관관계를 통한 예측기법을 개발함
- 관제절차 예측의 또 다른 방법으로써 연속된 항공기의 관제절차 패턴이 유사한 점을 활용하여 항공기의 관제절차를 예측하는 기법을 개발함
- 관제절차 예측모형을 적용하는 단계로써 항공기의 공항 도착시간 예측모형을 개발함. 공항 도착시간 예측모형 개발단계에서는 먼저 항공 교통 복잡도를 통해 항공기가 각 궤적 패턴 별로 공항까지 비행하는데 걸리는 시간을 예측하는 비행시간 예측모형을 개발한 후, 비행시간 예측모형과 관제절차 예측모형을 통해 항공기의 목적지 도착시간을 보다 정밀하게 예측하는 방법을 개발함
- 관제절차 예측모형에 대한 연구의 각 단계별로 실제 항공기 데이터를 활용하여 검증을 수행함. 본 연구에서는 서울접근관제공역을 대상으로 인천국제공항으로 착륙하는 항공기에 대해 예측모형을 적용해 봄으로써 그 성능을 평가함. 또한 성능의 평가에는 각 예측모형 별로 검증을 위한 성능지표를 개발하고 적절한 비교모형을 구축하여 비교검증을 수행함

IV. 연구개발결과

- 항적데이터 분류 정확도 약 46% 개선
- 관제절차 패턴 예측오차 30% 미만 달성
- 항공기 공항 도착시간 예측오차 20.5% 개선
- 해외 및 국내 학술대회 총 7회 발표
- 국내 등재지 3편 게재
- 국제 학술지(SCI) 1편 제출 후 심사중
- 특허 출원 1건

V. 연구성과 활용계획

- 현재 국토교통부에서 추진 중인 제주 국제공항 대상 도착관리기법에 본 연구 결과의 활용 방안 검토
- 공항 출발관리 연구개발을 비롯해 향후 진행 예정인 국가 연구개발 사업에 본 연구를 통해 개발된 결과물 활용 가능
- 본 연구결과를 통해 궤적예측기술에 대한 지속적인 연구 진행

SUMMARY

I. Title

- Development of Air Traffic Control Procedure Prediction Model

II. Objective and Necessity

- With increasing air traffic demand, the problems such as air traffic congestion, delay and inefficient flight have become more serious.
- To address these problems, many countries of the world carrying out research on future air traffic management systems and the Trajectory Based Operation (TBO) is one of the most important part of the research.
- Among various technologies, mid to long term trajectory prediction has become more important in order to manage air traffic more strategically and accurately.
- However, traditional trajectory prediction schemes are mainly based on the fixed air route procedures, which cannot consider air traffic controller's tactical instructions.
- As an effort to predict mid to long term trajectory more accurately, this study aim at development of air traffic control procedure prediction model.
- In addition, this study aim at improving the nation's research status by conducting leading study of air traffic management as well as training concerned experts.

III. Scope and Contents

- A wide range of research and technical reports about trajectory prediction were extensively reviewed.
- As the first step of the prediction model development, the air traffic pattern identification method was developed. At this step, the aircraft trajectory was modeled by mathematical techniques and clustering technique was applied to modeled trajectories for trajectory pattern identification.
- Various air traffic control procedure prediction models were developed. One of the model is based on the air traffic complexity factors and the classification method. Another is based on the relationship between subsequent aircraft trajectory pattern.
- The aircraft arrival time prediction model was developed using air traffic pattern identification method and air traffic pattern prediction model.
- Each developed model was verified using real operational aircraft data. This study focused on the Seoul terminal airspace. Especially, the models were applied to arrival traffic into Incheon International airport.

IV. Results

- Aircraft trajectory classification accuracy improved about 46%
- Air traffic pattern prediction error less than about 30%
- Aircraft arrival time prediction error reduced about 20.5%
- Presented 7 papers on domestic and international conferences
- Published 3 papers on domestic journal
- Submitted 1 paper on international journal (SCI)
- Filed 1 patent

V. Utilization

- The application of the developed prediction model for arrival management system is being considered.
- The developed prediction model is applicable for future departure management system.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	1
Section 1. Background and Necessity of Study	1
Section 2. Objective of Study	7
Chapter 2. Contents and Results of Study	13
Section 1. Methodology of Study	13
Section 2. Contents and Verification of Study	15
Chapter 3. Outcome and Application of Study	47
Section 1. Trajectory Prediction via Modeling Vectored Area Navigation Arrivals	47
Section 2. Aircraft Arrival Time Prediction via Modeling Vectored Area Navigation Arrivals	50
Section 3. Apparatus and Method for Aircraft Arrival Time Prediction Using Trajectory Pattern	53
Section 4. Probabilistic Model for Air Traffic Controller Sequencing Strategy	60
Chapter 4. Effect of Study	63
Section 1. Effect of Study	63
Chapter 5. Future Application and Work of Study	65
Section 1. Future Application of Study	65

Section 2. Future Work of Study	67
References.	69

목 차

1장. 서론	1
1절. 연구의 배경 및 필요성	1
1. 미래 항공교통관리 시스템에 관한 국내외 현황	1
2. 항공기 궤적예측 관련 연구 동향	4
3. 연구의 목적	5
2절. 연구개발 목표	7
1. 연구개발 개요	7
2. 연구개발 최종목표	9
2장. 연구개발 수행 내용 및 결과	13
1절. 연구수행 전략 및 방법론	13
2절. 연구수행 내용 및 결과의 검증	15
1. 항공기의 궤적 수학적 모델링 및 관제절차 패턴별 분류기법 개발	16
2. 관제패턴 예측모형 개발	25
3. 공항 도착시간 예측모형 개발	37
3장. 최종 연구성과 및 적용실적	47
1절. 관제패턴 모델링을 통한 궤적예측기법 연구 (Trajectory Prediction via Modeling Vectored Area Navigation Arrivals)	47
1. 연구 설명	47
2. 핵심요소기술	48
3. 주요 연구성과	49

2절. 관제패턴 모델링을 통한 도착예정시간 예측기법 연구 (Aircraft Arrival Time Prediction via Modeling Vectored Area Navigation Arrivals)	50
1. 연구 설명	50
2. 핵심요소기술	51
3. 주요 연구성과	52
3절. 궤적 패턴을 이용한 항공기 도착시간 예측 장치 및 방법 (Apparatus and method for aircraft arrival time prediction using trajectory pattern)	53
1. 연구 설명	53
2. 핵심요소기술	55
3. 주요 연구성과	59
4절. 항공교통관제사의 항공기 합류순서결정에 대한 확률적 예측모형 개발 (Probabilistic Model for Air Traffic Controller Sequencing Strategy)	60
1. 연구 설명	60
2. 핵심요소기술	61
3. 주요 연구성과	61
4장. 연구개발 효과	63
1절. 연구개발 성과의 효과분석	63
1. 기술적 효과	63
2. 경제적 효과	64
3. 정책적 효과	64
5장. 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성	65
1절. 연구성과 향후 활용방안	65

2절. 추가연구 필요성	67
참고문헌	69

표 목차

[표 1-1] 국내 항공교통량 증가 추이	1
[표 2-1] 궤적패턴 별 항적비율 및 비행시간 표준편차	25
[표 2-2] 요인 1과 궤적패턴에 대한 분할표	27
[표 2-3] 요인 2와 궤적패턴에 대한 분할표	27
[표 2-4] 요인 3과 궤적패턴에 대한 분할표	28
[표 2-5] 요인 4와 궤적패턴에 대한 분할표	28
[표 2-6] 교통 혼잡요인 별 카이제곱 통계량 및 p-value	29
[표 2-7] 선행항공기와 후행항공기의 궤적패턴에 대한 분할표	35
[표 2-8] 각 궤적패턴별 비행시간 예측모형	42
[표 2-9] 궤적패턴 별 예측오차 RMS 비교	46

그림 목차

[그림 1-1] 국내 항공교통량 증가에 따른 항공기 편당 지연시간	2
[그림 1-2] ASBU 주요 성능개선 영역 및 단계별 도입 계획	3
[그림 1-3] 궤적예측 기술과 타 ATM 구성요소와의 연관성	4
[그림 1-4] 일본 전자항법연구소(ENRI) 연구개발 로드맵	5
[그림 1-5] 연구의 목적	6
[그림 1-6] 서울접근관제구역 주요 진입지점별 소요비행시간 분포(1일분)	7
[그림 1-7] 관제절차 예측모형 개요	8
[그림 1-8] 연구개발 단계	9
[그림 1-9] 관제절차 패턴 예시	10
[그림 1-10] 기계학습법을 활용한 관제절차 예측모형	10
[그림 2-1] 연구개발 주요 방법	14
[그림 2-2] 서울접근관제공역 - 인천국제공항 활주로 15 및 16 도착절차	15
[그림 2-3] OLMEN 픽스를 통해 도착하는 항공기 궤적	16
[그림 2-4] PCA를 통해 변환된 항공기 궤적	18
[그림 2-5] PCA 및 DBSCAN을 이용한 궤적패턴 분류기법에 따른 궤적패턴 분 류 결과 - 1	19
[그림 2-6] PCA 및 DBSCAN을 이용한 궤적패턴 분류기법에 따른 궤적패턴 분 류 결과 - 2	20
[그림 2-7] 항공기 궤적 쌍 간의 대응 - 1	20
[그림 2-8] 항공기 궤적 쌍 간의 대응 - 2	21

[그림 2-9] Dendrogram	22
[그림 2-10] DTW 및 계층적 클러스터링 방법에 따른 궤적패턴 분류 결과	24
[그림 2-11] 궤적패턴 별 항적 비율	24
[그림 2-12] 교통 복잡도와 통계적 분류 모형을 이용한 관제절차 예측모형의 개념도	26
[그림 2-13] 구역 개념도	31
[그림 2-14] 각 궤적패턴에 대한 확률밀도함수	34
[그림 2-15] 항공기 진행에 따른 예측확률	37
[그림 2-16] 기계학습방법을 이용한 공항 도착시간 예측모형 개념도	39
[그림 2-17] 비행시간에 대한 선형회귀모형	40
[그림 2-18] 기계학습방법과 궤적패턴 예측모형을 사용한 공항 도착시간 예측모형 개념도	41
[그림 2-19] 제안된 모형에 따른 예측오차	45
[그림 2-20] 비교 모형에 따른 예측오차	45
[그림 3-1] 궤적예측 흐름도	47
[그림 3-2] 도착시간 예측 흐름도	50
[그림 3-3] 도착시간 예측장지 도면	53
[그림 3-4] 도착시간 예측방법 순서도	54
[그림 3-5] 순서결정 예측모형 적용 대상 구역	60
[그림 4-1] 도착관리기법 운영개념 및 궤적예측 필요성	63
[그림 5-1] 개발된 기법의 도착관리기법에의 활용방안	65
[그림 5-2] 개발된 기법의 출발관리기법에의 활용방안	66
[그림 5-3] 출발항공기의 direct-to 지시에 의한 경로변경	67

1장 서론

1절 연구의 배경 및 필요성

2절 연구개발 목표

1장. 서론

1절. 연구의 배경 및 필요성

1. 미래 항공교통관리 시스템에 관한 국내외 현황

- 항공교통량이 지속적으로 증가하고 있으며 이로 인한 공역 혼잡, 항공기 결항 및 지연, 비효율적 운항에 따른 배출가스 증가 등의 문제가 전 세계적으로 심각해지고 있음
 - 국제민간항공기구(ICAO)는 전 세계 항공교통량이 2030년까지 지금의 두 배로 증가할 것으로 예상하고 있음
- 우리나라의 경우에도 경제발전 및 국민소득 증가 등과 맞물려, 항공교통량이 지난 10년간 연평균 4.6% 정도로 지속적으로 증가하고 있음

(단위: 대)

구분	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
교통량	371,308	368,130	390,815	452,177	459,936	455,287	485,288	513,922	551,744	585,016
민 ¹⁾ 계	345,204	346,604	371,259	427,556	432,918	421,667	450,703	480,334	519,149	551,393
민 ¹⁾ 우 ²⁾	317,955	317,700	341,039	390,133	394,798	386,721	413,742	443,153	480,716	514,377
민 ¹⁾ 통 ³⁾	27,249	28,904	30,220	37,306	38,077	34,912	36,962	37,056	38,433	37,016
군 ⁴⁾	26,104	21,526	19,556	24,621	27,018	33,620	34,585	33,588	32,595	33,623
일평균	1,017	1,009	1,071	1,239	1,260	1,247	1,330	1,408	1,507	1,603
증감률 (%)	2.83	-0.86	6.16	15.69	1.72	-1.01	6.59	5.90	7.36	6.03

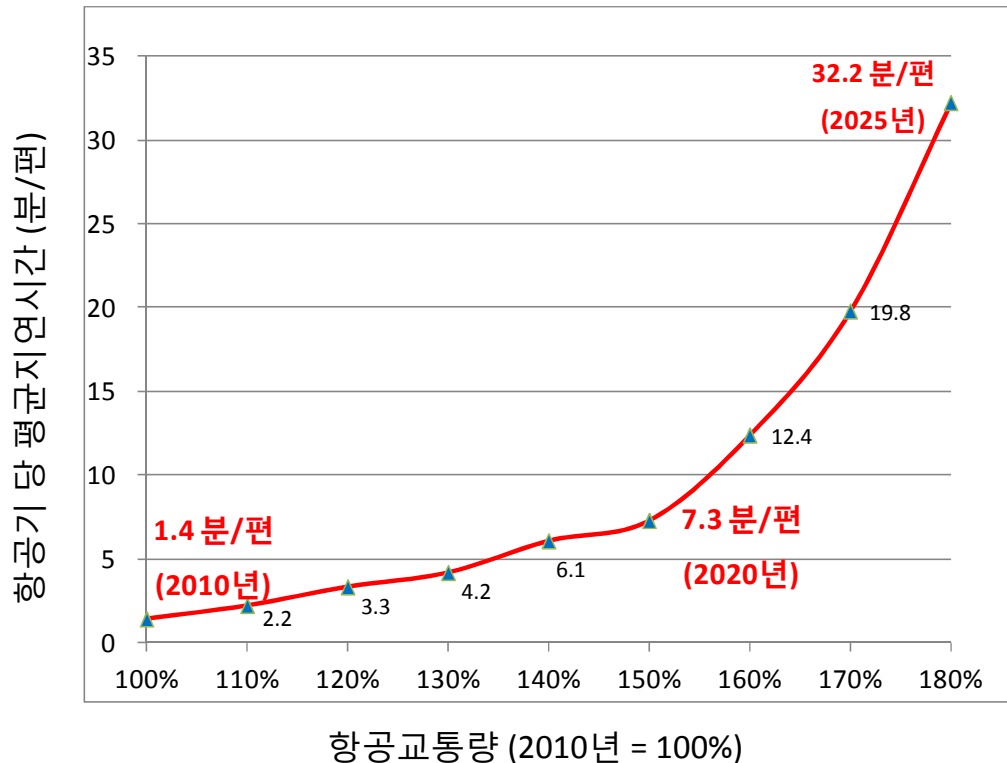
자료 : 국토교통통계누리(<http://stat.molit.go.kr>)

[표 1-1] 국내 항공교통량 증가 추이

- [그림 1-1]에 나타난 바와 같이, 항공교통량이 증가함에 따라 항공기 편당 지연시간이 기하급수적으로 늘어남을 알 수 있으며, 항공교통량이 2010년 대비 150% 증가 시 이로 인한 추가적 연료 소모량은 연간 1억 500백만 갤런(3천 5백억원)

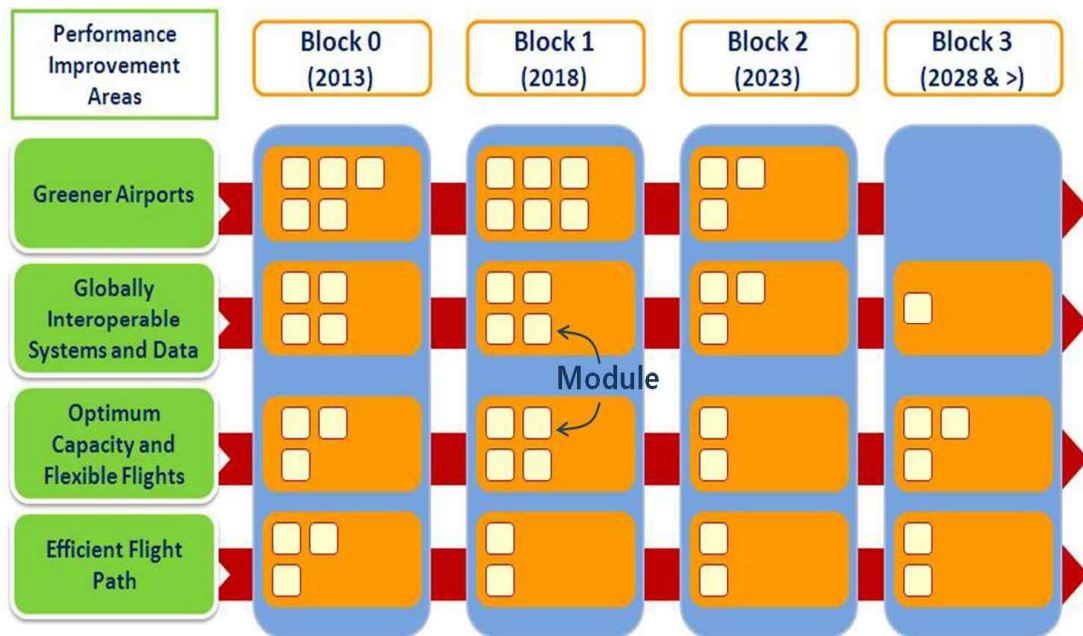
1) 민간 항공기
 2) 우리나라에 이·착륙 하는 항공기
 3) 영공통과 항공기
 4) 군용 항공기

그리고 추가적 탄소가스 배출량은 연간 99.5만톤에 이를 것으로 시뮬레이션 분석을 통해 예상되었음



[그림 1-1] 국내 항공교통량 증가에 따른 항공기 편당 지연시간

- 증가하는 항공교통량에 대응하기 위해 세계 각국은 차세대 항공교통관리(ATM, Air Traffic Management) 도입을 위한 연구개발을 활발히 진행 중에 있음
- 미국의 NextGen (Next Generation Air Transportation System), 유럽의 SESAR (Single European Sky ATM Research), 일본의 CARATS (Collaborative Actions for Renovation of Air Traffic Systems) 등이 현재 진행 중인 각국의 대표적 ATM 연구개발 프로그램 임
- 또한 ICAO는 차세대 ATM 시스템에 대한 전 세계적인 가이드라인을 제시하기 위해 Aviation System Block Upgrades (ASBU)을 최근 발표하였으며, 각 체약국들의 이행을 권고하고 있음
 - ASBU는 2012년 제12차 세계항행회의를 통해 기본 안이 확정되었으며, 제38차 총회를 거쳐 세계항행계획(GNAP, Global Air Navigation Plan)에 반영될 예정
- ASBU는 2028년까지의 ATM 시스템의 발전방향에 대한 보다 구체적인 모습을 제시하고 있는데, 특히 항공기 4차원 궤적정보(위도, 경도, 고도, 시간)에 기반한 궤적기반 관리(TBO, Trajectory Based Operation)를 핵심적인 개념으로 함

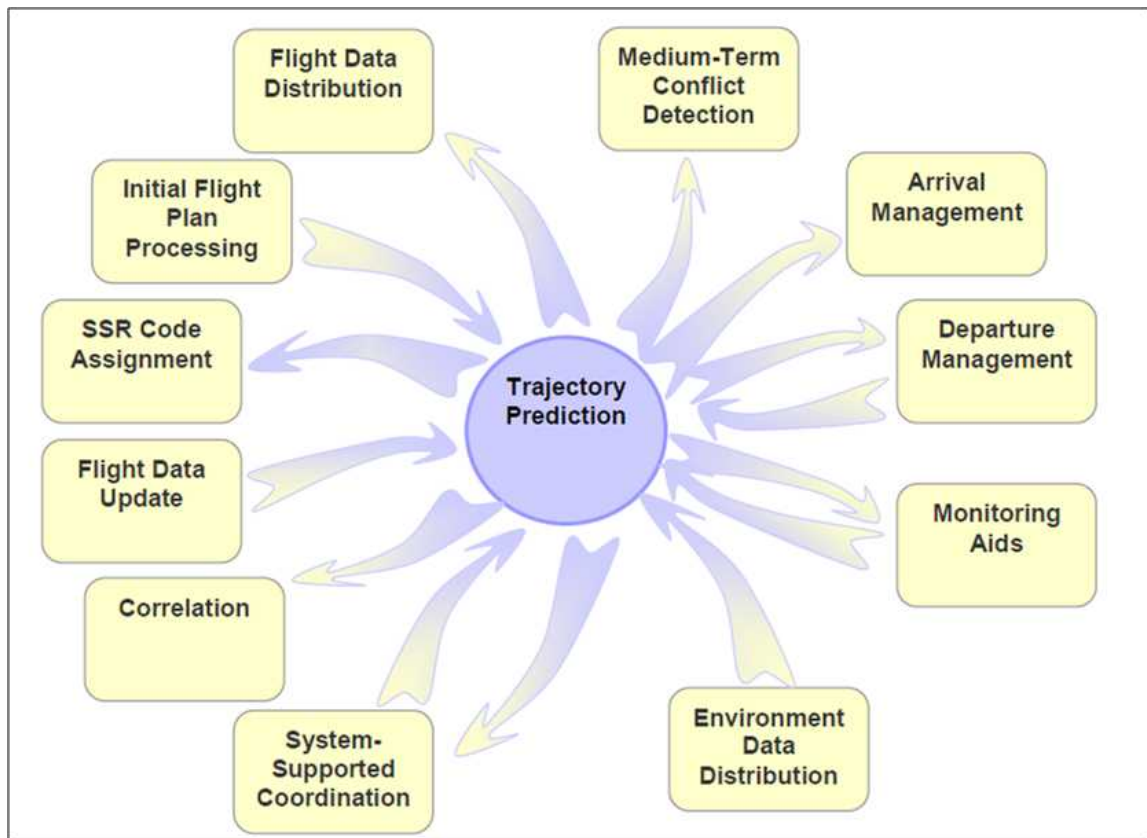


[그림 1-2] ASBU 주요 성능개선 영역 및 단계별 도입 계획 [77]

- 우리나라도 이와 같은 국제적인 노력에 부응하고 세계 6위 규모의 국내 항공운송산업의 지속적 성장을 도모코자, 2012년 NARAE(National ATM Reformation and Enhancement)라는 미래 ATM 체계에 대한 청사진을 제시함
- 또한 성능기반항행(PBN, Performance Based Navigation)의 도입을 위한 사업을 2010년부터 지속적으로 진행해 오고 있으며, 올해에는 제주국제공항을 대상으로 한 도착관리시스템(AMAN, Arrival Management)을 개발 중에 있음
- 이와 같이, 공역 및 ATM 분야의 중요성에 대한 국내 인식이 최근 들어 높아지고 있는 것은 사실이나, 여전히 관련된 국내 연구기반이 매우 취약한 상태임
- 실제로 항공교통분야에서 기 수행 또는 수행 예정인 국내 연구개발 과제의 경우 항행시설(CNS, Communication, Navigation, Surveillance) 위주의 것이 대부분이며, ATM 측면에 중심을 둔 국외의 연구동향과는 많은 차이가 있음
- 국가 고유의 영토자원인 공역을 안전하고 효율적으로 사용할 수 있고, 이를 통해 항공운송산업의 지속적 성장을 가능케 하는 ATM 기술의 자주적 확보는 중요성이 매우 높다고 할 수 있음
- 특히 ATM 분야의 기초 원천기술에 대한 연구는 기술적 파급효과, 국가 연구역량 및 인적 인프라 개선 효과 등을 고려할 때 중요성이 매우 높다고 할 수 있는데, 관련된 국내연구가 매우 미약 하다고 할 수 있음

2. 항공기 궤적예측 관련 연구 동향

- 항공기들의 4차원 궤적에 대한 정보는 미래 ATM 시스템의 작동에 있어서 매우 핵심적인 정보에 해당하며, 따라서 관련된 기술규격(예: FF-ICE(Flight and Flow Information for the Collaboration Environment))에 대한 논의가 ICAO를 통해 활발히 진행 중에 있음
- 항공기 4차원 궤적에 대한 정보 중, 항공기의 미래 궤적에 관한 정보가 특히 중요하며, 따라서 이와 같은 정보를 생산해 내는 궤적예측기술은 ATM 분야의 모든 부분과 관련된 매우 핵심적인 기술에 해당함



[그림 1-3] 궤적예측 기술과 타 ATM 구성요소와의 연관성 [22]

- 지금까지의 궤적예측기술은 매우 짧은 시간범위(2분 이내)를 대상으로 하며, 이를 통해 항공기간 당면한 충돌(short-term conflict)을 예측하는 데에 활용하고 있음
- 하지만 최근 들어서는 전략적이고 정밀한 항공교통관리를 위해, 보다 긴 시간범위에서의 궤적 예측, 또는 관제사를 통한 경로 변경이 잦은 구역(예: 공항근처 터미널 공역)에서의 궤적 예측에 대한 관심이 높아지고 있음
- 미국, 유럽, 일본 등은 항공기 궤적예측 기술을 미래 ATM 실현을 위한 핵심원천

기술로 여기고 관련 연구를 수 십년간 지속적으로 진행하고 있음

- 예를 들어, 일본 전자항법연구소(ENRI)의 항공교통관리 연구개발 로드맵을 보면, 궤적예측기술 개발 및 응용은 가장 핵심적이고 우선적인 연구과제에 해당함

Table 1 Research and Development Roadmap of ENRI

	Short Term				Middle Term				Long Term			
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
ATM Performance Analysis for Bottleneck Identification and Efficiency Improvement	ATM Performance Evaluation & Analysis								Performance Analysis of Trajectory Management (TM)			
Functional Airspace Configuration & Trajectory Management	Air Traffic Controller Workload Analysis				Techniques for Reducing Human Errors				Safety Assurance taking into account HF			
	Evaluation Method for Terminal Airspace				Functional Terminal Airspace Design				Strategic & Integrated Airspace Design & Operations			
	Oceanic Airspace Operational Procedures				Promoting Dynamic Routes Operation							
	RNAV Route Safety Assessment				Development of Safety Analysis Tools				Assessment & Improvement of Safety for Total Flight Phase			
Information and communications infrastructure for collaborative decision making	Development of Trajectory Model				Use of Trajectory Prediction Model				Operational Efficiency Improvement by TM in High Density Airspace			
	Traffic Information (Info.) Exchange by Airborne Surveillance				Spacing Applications of Airborne Surveillance							
	Dev. of Surveillance Data Link for ATCo				Flight Info. Interchange				Supplement of Trajectory Management (TM) by Airborne Surveillance			
	Aeronautical Tele-communications Network				Development of VIM							
	Evaluation of Air-ground High-speed Data Link Medium				Development of VIM				Ins Techniques			
					Methods of Surveillance Information Processing (Sensor fusion, Integration of associated Info. and TM)							
Advanced operations of Airport/ Airport surface	Impl. of Multilateration for ATC Applications				Advanced Airport Operation by TM				Use of CAT-IIIc GBAS			
	Impl. of ASMG				Dev. of Airport Surface Navigation							
Highly accurate, reliable, and flexible navigation technology	Actual Use of CAT-I GBAS				Use of CAT-II/III GBAS				GBAS Dynamic Approach Paths Provision for TM			
	Requirement Review for GNSS Curved Approach				Performance Improvement of MSAS & Its Use for Precision Approach							
					Advanced ABAS				Use of CAT-I ABAS			

항공기 궤적예측기술
개발 및 응용

ATCo: Air Traffic Controller ASMG: Advanced Surface Movement Guidance and Control system GBAS: Ground Based Augmentation System
 ABAS: Aircraft Based Augmentation System TM: Trajectory Management MSAS: MTSAT based Augmentation System
 RNAV: Area Navigation ATN: Aeronautical Tele-communications Network

[그림 1-4] 일본 전자항법연구소(ENRI) 연구개발 로드맵

- 우리나라의 경우 항공관제용 통합 정보처리 시스템 개발 사업과 항공기 비행절차 및 공역 설계 프로그램 개발 사업 등을 통해 항공기 궤적예측에 관한 연구가 일부 수행되었음
- 하지만 기 수행된 연구의 경우 항공기의 3차원 이동경로, 즉 비행절차가 주어진 상황에서 항공기 성능데이터에 기반으로 항공기 한 대의 궤적을 예측하는 기법에 대한 것으로서, 항공기의 이동경로가 관제사에 의해 임의로 변화되는 상황에 대한 궤적예측에 대한 연구는 수행된 적이 없음

3. 연구의 목적

- 본 연구의 주된 목적은 아래와 같음
- 본 연구의 목적은 첫째, 항공기 궤적예측과 관련된 연구를 수행하고 결과물을 ATM 분야 타 연구개발에 활용하는 것임
 - 연구 개발된 예측모형의 활용도 제고를 위해, 결과물을 실제 우리나라 환경에

적용(adaptation)하고 검증하는 과정을 중점적으로 수행함

- 또한 본 연구는 궤적예측과 관련된 가장 어려운 문제인 관제분리 절차에 대한 모형개발을 목표로 하며, 국제적인 수준의 선도적 연구수행을 통해 해당 분야 국가 연구위상 강화를 두 번째 목적으로 함
- 마지막으로, ATM 분야에 대한 국내 연구를 활성화하고 이를 통해 관련 전문인력의 지속적 양성을 본 연구의 주된 목적으로 함

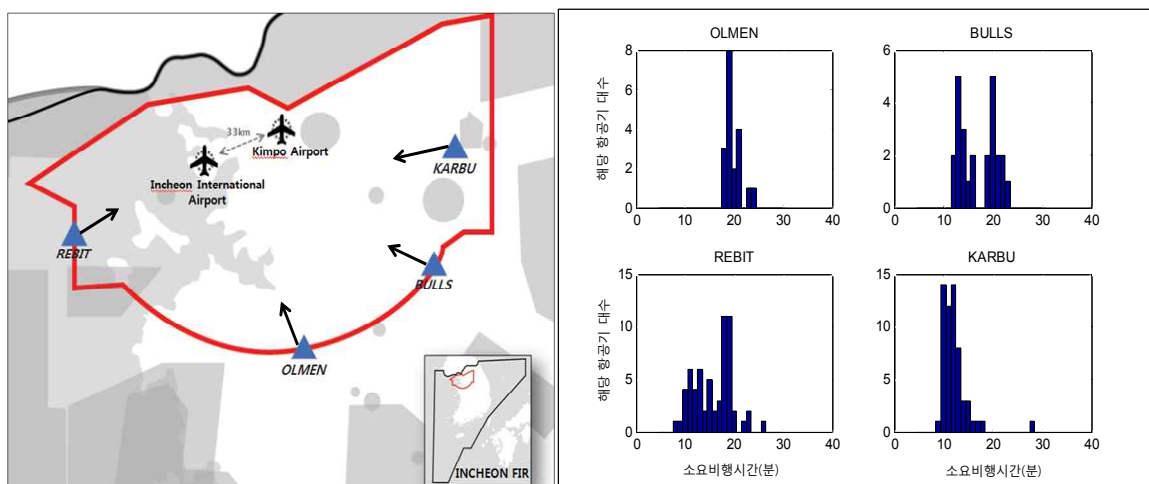


[그림 1-5] 연구의 목적

2절. 연구개발 목표

1. 연구개발 개요

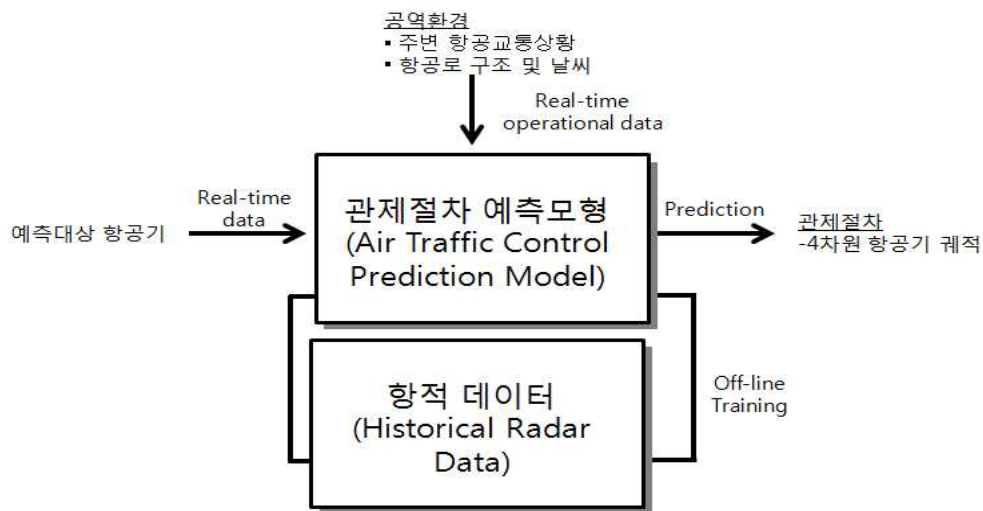
- 본 연구개발은 주어진 교통 환경 아래에서 항공기간 충돌을 방지하기 위해 관제사가 적용하는 관제분리절차에 관한 수학적 예측모형의 개발을 최종목표로 함
- 효과적인 항공교통관리를 위해서는 항공기 4차원 궤적을 사전에 예측하는 것이 필요한데, 이를 위해서는 항공기에 적용되는 관제분리절차에 대한 수학적 모형이 필수적임
- 예를 들어 인천국제공항에 대한 효과적인 활주로 및 지상이동관리(surface management)를 위해서는 서울 접근관제구역으로 진입예정 항공기의 활주로 도착시간에 대한 예측이 필요하며,
- 항공기의 공항활주로 도착시간을 정확히 예측하기 위해서는 항공기가 접근관제구역을 통과하는 데 얼마만큼의 시간이 소요될지를 알아야 함
- 접근 관제구역에서의 항공기 별 비행소요시간은 관제사가 해당 항공기에 어떠한 형태/정도의 관제분리절차를 적용하는 지에 따라 달라짐



[그림 1-6] 서울접근관제구역 주요 진입지점별 소요비행시간 분포(1일분)

- [그림 1-6]에 나타난 바와 같이 서울 접근관제구역 주요 진입지점에서 공항활주로까지의 소요비행시간에는 상당 수준의 편차가 나타나는데, 편차의 주된 이유는 비행 중 타 항공기와의 충돌회피를 위해 관제사에 의해 적용되는 관제분리에 있음

- 관제분리에 대한 예측모형은 항공기 궤적예측, 더 나아가 다양한 종류의 항공교통관리 운용기법 개발에 활용될 수 있는 기초원천기술에 속하는 것으로 미국, 유럽, 일본 등 항공교통기술 선진국에서도 지속적인 연구를 진행 중에 있음
- 관제분리에 대한 예측모형의 중요성 및 다양한 기술적 시도가 관련분야 최신 연구를 통해 계속해서 제시되고 있으나, 관제분리절차의 복잡성으로 인해 아직까지는 만족할 만한 예측모형이 도출되지 못하고 있음
- 특정 항공교통상황에 대해 관제사가 적용하는 분리절차는 공역 및 항로구조, 주변 타 항공기의 상태 등에 따라 다르게 나타나며,
- 또한 모든 조건이 같은 경우에 대해서도 여러 가지 형태의 관제절차가 일정한 확률을 가지고 발생하는 확률변수의 성격을 가지고 있음
- 본 연구개발은 그림 1-7에 나타난 바와 같은 관제분리절차에 대한 확률적 예측모형을 개발하는 것을 목표로 함
- 관제분리절차 예측모형은 과거 데이터를 기반으로 기계학습(machine learning) 기법을 통해 구축되며, 구축된 모형은 실시간 항적 및 공역 정보를 입력자료로 하여 대상 항공기의 궤적에 대한 예측을 수행함

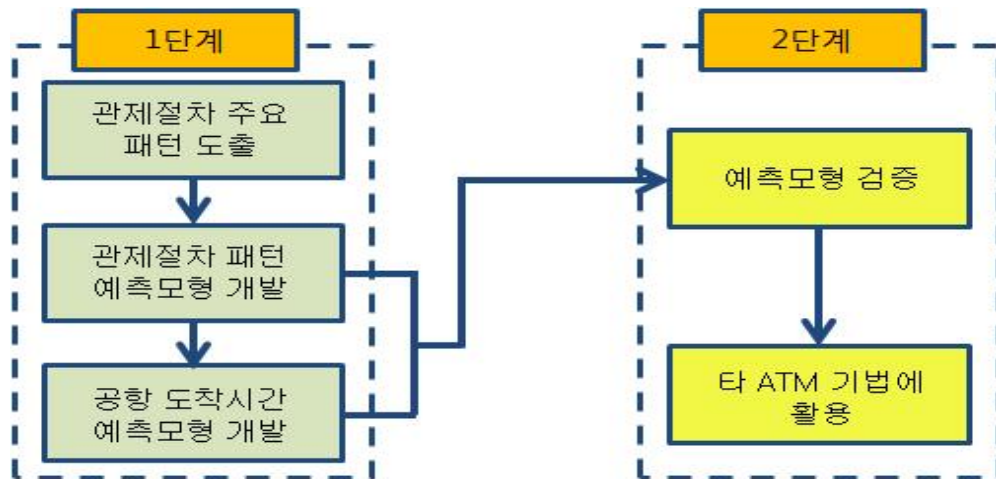


[그림 1-7] 관제절차 예측모형 개요

- 관제분리절차에 관한 기존 연구에서는 항적자료에 담긴 관제분리절차 경향성에 대한 충분한 통계적분석이 미비했던 것으로 판단되며, 따라서 본 과제에서는 이와 같은 점에 대한 개선에 중점을 두어 연구를 수행함
- 본 연구개발은 관제절차 패턴 도출→관제절차 패턴 예측모형 개발→공항 도착예정시간 예측모형 개발의 순서로 이루어지며, 개발된 모형을 국내 서울접근관제구

역의 실제 항적자료를 기반으로 시험/검증하도록 함

- 또한 본 연구개발을 통해 습득된 기술을 현재 국토교통부에서 개발 중인 도착관리기법에 적용하는 방안에 대한 연구를 수행토록 함



[그림 1-8] 연구개발 단계

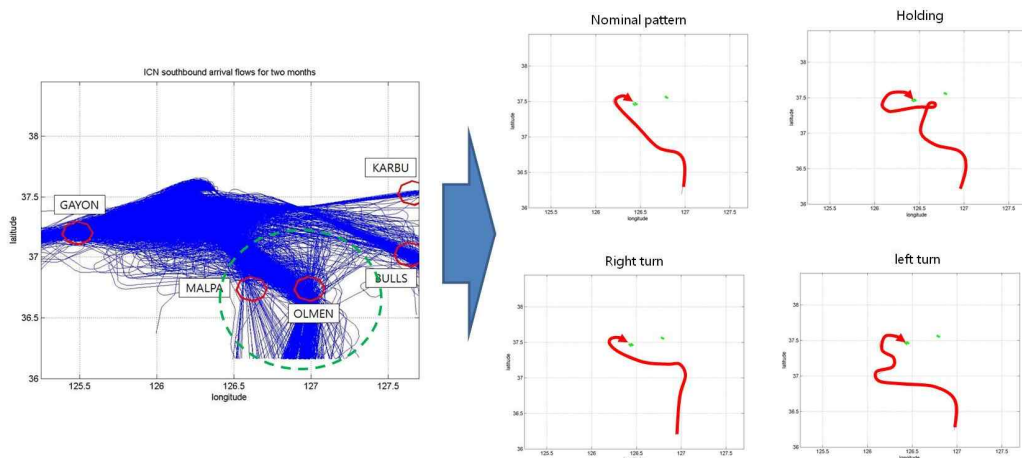
2. 연구개발 최종목표

● 관제분리절차에 대한 확률적 예측모형을 실제 항공교통 데이터를 활용해 개발하고 검증한다.

- 관제절차 주요 패턴 분류기법 개발
- 관제절차 패턴 예측모형 개발
- 공항 도착시간 예측모형 개발

가. 관제절차 주요 패턴 분류기법 개발

- 본 연구개발에서 개발하는 관제절차 예측모형의 경우 관제분리절차의 주요 패턴을 그림 1-9와 같이 도출한 후, 도출된 패턴 별 발생확률을 주어진 교통상황을 바탕으로 추정하는 형태를 가짐

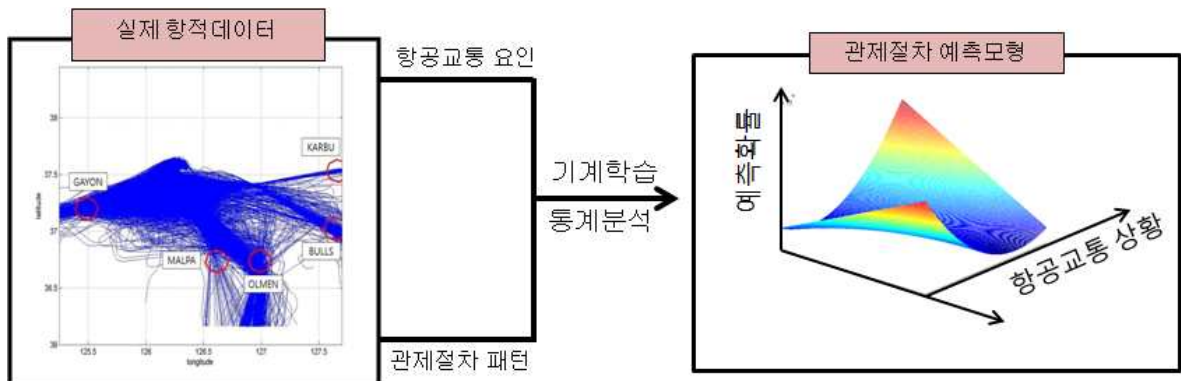


[그림 1-9] 관제절차 패턴 예시

- 따라서 이와 같은 예측모형을 개발하기 위해서는 관제절차 주요 패턴을 도출하는 것이 필요하며, 본 연구개발에서는 항공기 궤적을 기반으로 실제 항적데이터를 분류하는 클러스터링 기법을 사용해 관제절차 분류기법을 개발함

나. 관제절차 예측모형 개발

- 관제절차 예측모형의 경우 특정 항공기에 적용될 관제분리의 유형 및 정도를 현재 주어진 교통상황(또는 기타 공역상황)을 바탕으로 예측하는 형태를 가짐
- 도출된 관제절차 주요 패턴과 교통상황 간의 상관관계에 대한 통계 분석을 수행하며, 다양한 기계학습 기법을 적용해 관제절차 예측모형을 개발함



[그림 1-10] 기계학습법을 활용한 관제절차 예측모형

다. 공항 도착시간 예측모형 개발

- 관제절차 예측모형을 사용해 항공기의 공항 도착시간을 예측하는 모형을 개발함
- 항공기에 적용되는 관제절차를 예측함으로서 해당항공기가 공항에 도착하는 시간을 보다 정확히 예측할 수 있음
- 개발한 공항 도착시간 예측모형을 서울접근관제구역을 통해 인천공항으로 도착하는 항공기에 적용하여 성능을 평가함

2장 연구개발 수행 내용 및 결과

1절 연구수행 전략 및 방법론

2절 연구수행 내용 및 결과의 검증

2장. 연구개발 수행 내용 및 결과

1절. 연구수행 전략 및 방법론

- 본 연구개발은 궤적예측 및 분류관련 주요 연구문헌 조사, 궤적예측모형 개발 및 계량적 수치 분석, 자료 수집을 통해 개발된 예측모형 검증을 주된 방법으로 함

가. 연구문헌 조사

- 본 연구개발은 해당 분야의 기존 연구동향을 파악하고 관련 기술을 습득하기 위하여 연구문헌 조사를 수행함
- 연구문헌 조사 단계에서는 해외 및 국내 학술대회 또는 학술지에 게재된 논문들과 특허 기술 등을 중심으로 조사함
- 연구문헌 조사 단계에서는 단순히 문헌을 조사하는데 그치지 않고 기존에 존재하는 방법을 직접 구축하여 봄으로써, 관련 기술을 습득하였음
- 또한 기존의 방법에 대한 계량적 수치분석을 통해서 현존하는 방법의 문제점을 파악함

나. 관제절차 예측모형 개발

- 관제절차 예측모형 개발 단계에서는 연구문헌 조사 단계에서 파악한 기존 방법들을 토대로 관제절차를 예측하는 새로운 단계를 개발함
- 이 단계에서 하나의 모형을 개발하는데 그치지 않고 개발된 모형의 검증을 통해 문제점을 파악하고, 기존 방법의 문제점을 개선하기 위한 모형을 지속적으로 개발함

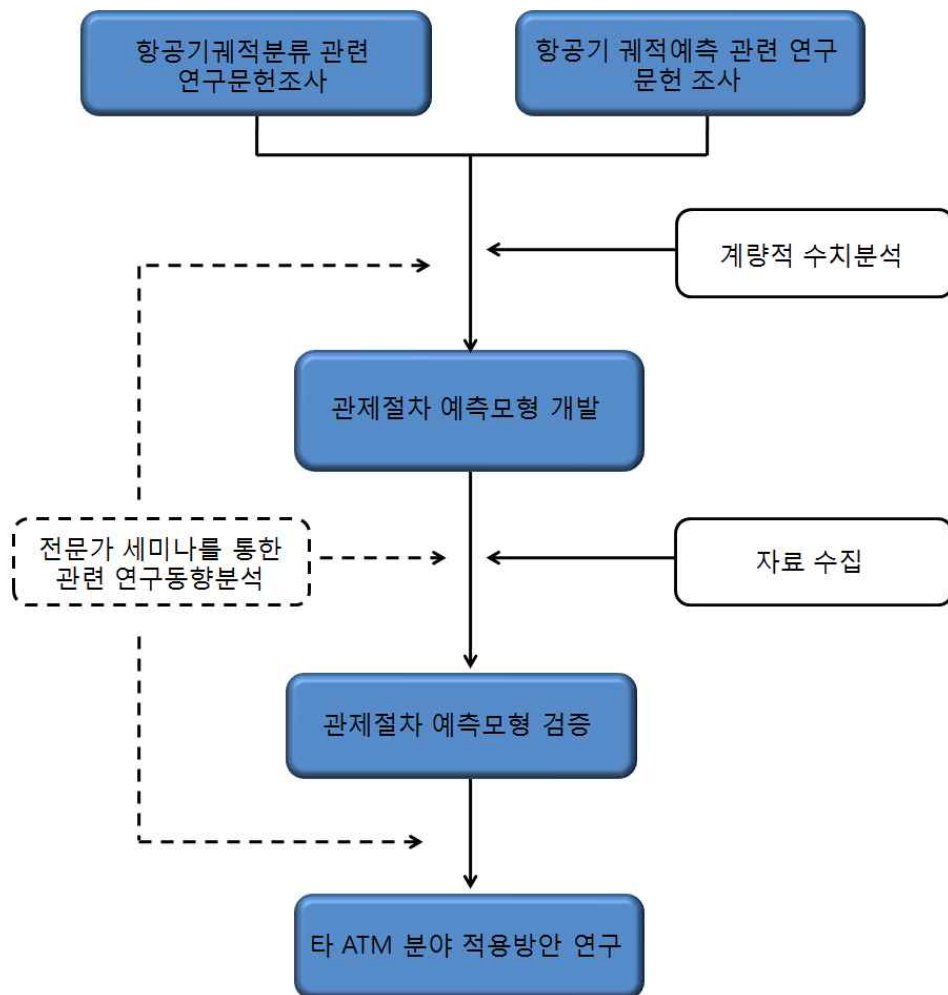
다. 관제절차 예측모형 검증

- 관제절차 예측모형 검증 단계에서는 관제절차 예측모형 개발 단계에서 개발된 예측모형을 실제 운영 데이터를 통해 검증함
- 예측모형의 신뢰성 있는 검증을 위하여 계량적인 정량지표를 개발하고 적

절한 비교모형을 구축하여 비교분석을 수행함

라. 세미나 및 회의 진행

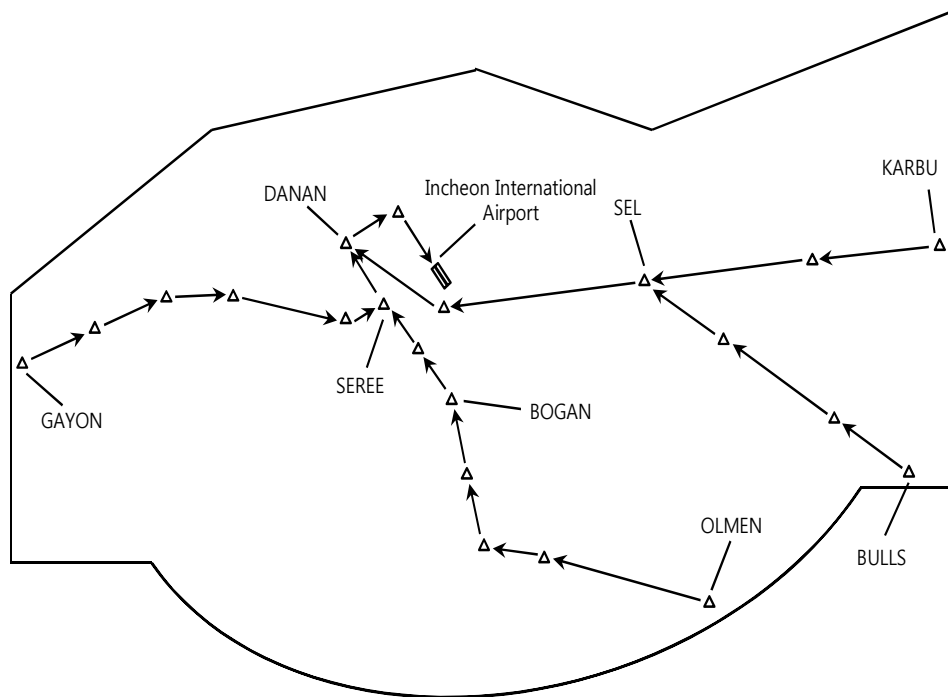
- 향후 추가 연구의 필요성 도출, 관련분야 최신 연구동향 분석, 개발 된 기술의 타 ATM 분야 활용방안 도출 등을 위해 전문가 세미나 및 회의를 진행함



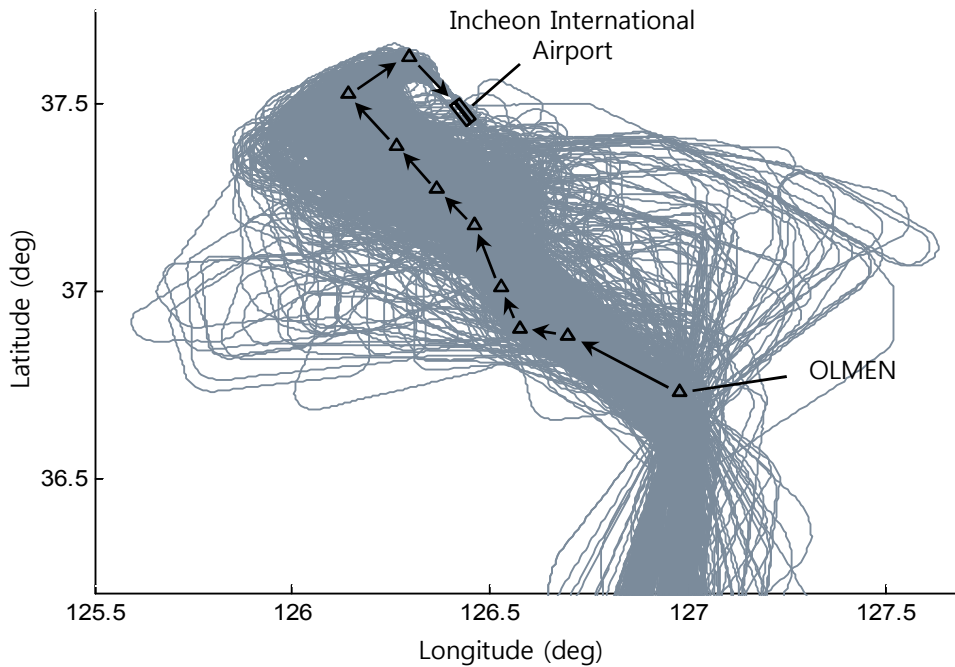
[그림 2-1] 연구개발 주요 방법

2절. 연구수행 내용 및 결과의 검증

- 본 연구개발은 다음과 같이 세 단계로 나뉘어 수행됨
 - 항공기의 궤적 수학적 모델링 및 관제절차 패턴별 분류기법 개발
 - 관제패턴 예측모형 개발
 - 공항 도착시간 예측모형 개발
- 본 절에서 개발된 예측기법에 대한 실험 및 검증은 [그림 2-2]에 나타나 있는 서울접근관제구역을 대상으로 수행되었음. 특히 [그림 2-3]에 나타나 있는 바와 같이 OLMEN 픽스를 통해 인천공항의 남쪽방향 활주로로 도착하는 경우에 예측이 매우 어려우므로, 이를 대상으로 검증을 수행하였음



[그림 2-2] 서울접근관제구역 - 인천국제공항 활주로 15 및 16 도착절차



[그림 2-3] OLMEN 픽스를 통해 도착하는 항공기 궤적

1. 항공기의 궤적 수학적 모델링 및 관제절차 패턴별 분류기법 개발

- 본 연구개발에서 제안하는 관제절차 예측모형을 구축하기 위해서는 가장 먼저 과거 항적으로부터 유한개의 항공기 궤적 패턴을 분류해야 함
- 이를 위해서는 ① 항공기 궤적을 수학적 모델링 방법을 통해 효율적인 방법으로 나타내야 하며 ② 클러스터링 등의 방법을 통해 수학적으로 모델링된 항공기의 궤적을 유한개의 패턴으로 분류할 수 있어야 함
- 따라서, 항공기 궤적의 수학적 모델링 방법과 궤적 패턴을 분류하는 방법에 따라 다양한 궤적패턴 분류기법이 존재할 수 있음
- 본 연구개발에서는 먼저 기존 문헌에서 소개된 방법을 통하여 궤적패턴 분류를 수행하여 보았으며, 기존의 방법에 존재하는 한계점을 파악한 후 이를 해결하기 위한 방법을 개발하였음

가. 연구수행 내용

1) Principal Component Analysis(PCA) 및 Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise(DBSCAN)을 이용한 궤적패턴 분류기법

- 궤적패턴 분류기법의 첫 번째 방법으로써 PCA 및 DBSCAN을 이용한 방법을 수행해 보았음
- 이 방법은 ① 궤적 샘플링(Trajectory sampling), ② 궤적 정보 강화(Trajectory information augmentation), ③ 차원 축소(Dimension reduction), ④ 클러스터링(Clustering)의 순서로 수행되며, 각각은 다음에서 설명됨

가) 궤적 샘플링(Trajectory sampling)

- 본 방법에서 모든 항공기의 궤적은 동일한 개수(p)의 n차원 데이터 포인트들로 나타내어짐. 항공기 궤적은 각각 서로 다른 개수의 레이더 데이터 개수로 이루어져 있으므로, 이를 위해 보간법(interpolation)을 통해 궤적을 샘플링 하였음
- 항공기 궤적을 구성하는 데이터 포인트의 차원 n은 궤적이 가지고 있는 정보의 개수에 따라 좌우되며, 기본적으로 레이더 데이터는 위도, 경도, 고도 정보를 포함하고 있으므로 3차원 정보로 간주함

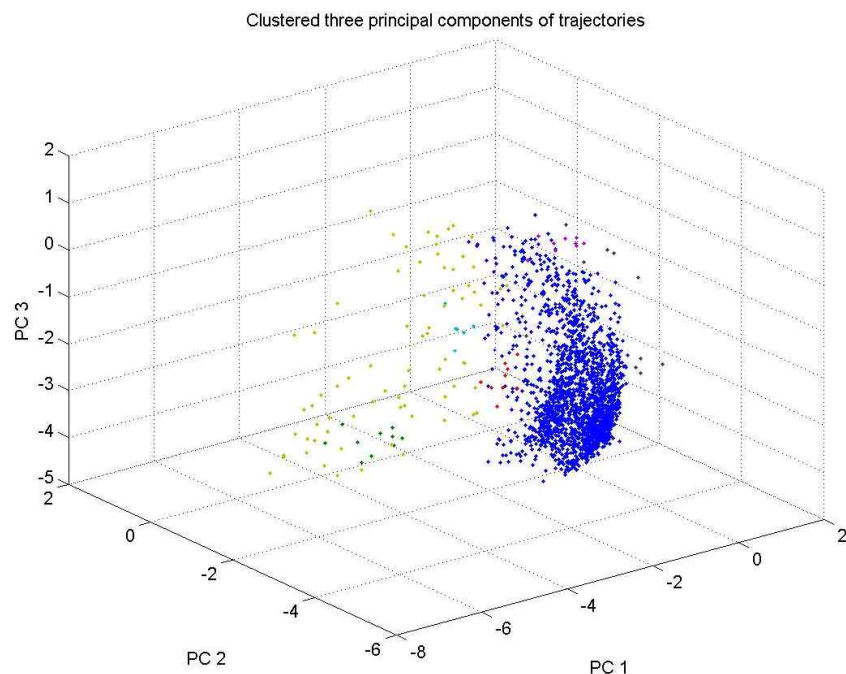
나) 궤적 정보 강화(Trajectory information augmentation)

- 궤적패턴이 효율적으로 분류되기 위해서는 각 궤적이 다른 궤적과 구분될 수 있는 정보가 많이 포함되어 있어야 함. 따라서 궤적 정보 강화 단계에서는 궤적을 구성하는 데이터 포인트에 추가적인 정보를 포함하여 차원을 증가시킴
- 각 궤적의 데이터 포인트에는 기존의 3차원 정보 (위도, 경도, 고도) 이외에 다음과 같은 정보들이 추가됨
 - 항공기 방위정보의 사인(sine) 값
 - 항공기 방위정보의 코사인(cosine) 값
 - 공역 중심으로 부터의 거리
 - 공역 왼쪽 상단의 코너지점으로 부터의 거리
 - 항공기 각위치(angular position)의 사인(sine) 값
 - 항공기 각위치(angular position)의 코사인(cosine) 값

- 위와 같은 정보들이 추가되면 하나의 데이터 포인트는 총 9개의 정보를 가지게 되며, 하나의 궤적은 $p \times 9$ 개의 정보로 나타내어 짐

다) 차원 축소(Dimension reduction)

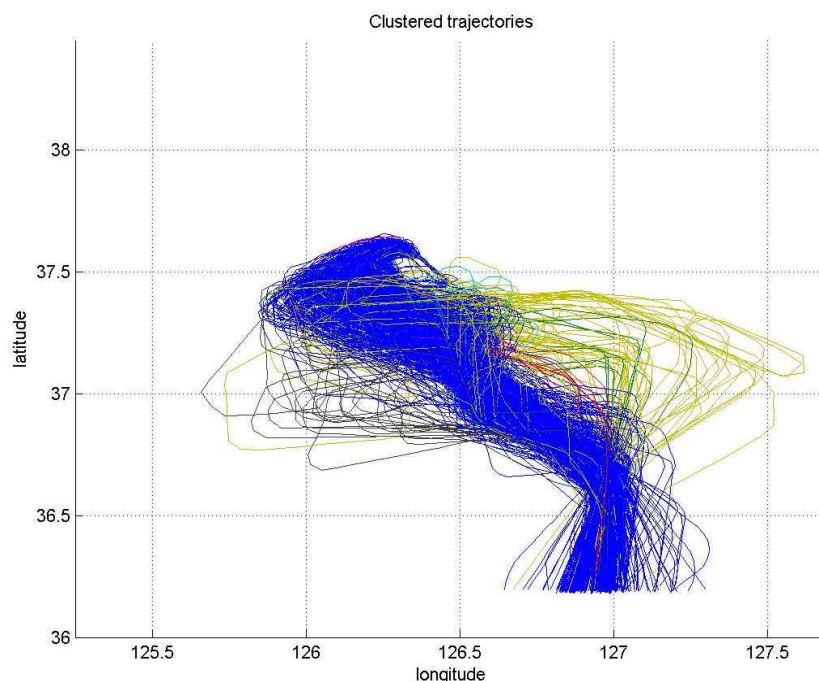
- 궤적 정보 강화를 통해 하나의 궤적은 $p \times 9$ 개의 정보로 구성됨. 항공기 궤적의 일반적인 길이를 고려할 때, 이는 매우 큰 개수임.
- 데이터의 차원이 높으면 컴퓨터 계산의 정확도 문제와 계산 시간 등 여러 가지 문제점이 존재하므로 $p \times 9$ 차원의 데이터를 소수개 차원의 데이터로 축소하는 과정이 필요하며, 이는 PCA 방법을 통해 수행됨
- PCA는 기존의 고차원 데이터의 선형결합을 통해 기존의 정보를 최대한 보존하며 낮은 차원의 데이터로 변환시키는 방법으로써 데이터의 차원을 축소시키는데 자주 사용되는 방법임
- $p \times 9$ 차원의 항공기 궤적에 PCA를 적용하여 각 항공기 궤적을 소수 개 차원의 데이터로 나타낼 수 있음. 본 연구에서는 3차원의 데이터로 항공기 궤적을 나타내었으며 이는 [그림 2-4]에 나타나 있음



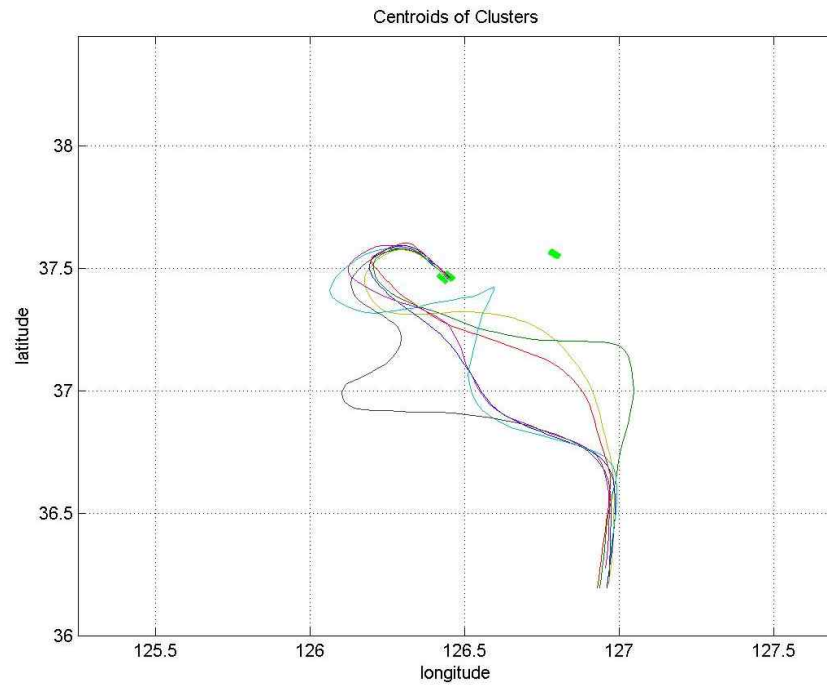
[그림 2-4] PCA를 통해 변환된 항공기 궤적

라) 클러스터링(Clustering)

- 각 항공기 궤적을 3차원 데이터로 나타낸 후, DBSCAN 클러스터링 알고리즘을 사용하여 궤적패턴을 구분하였음
 - DBSCAN 알고리즘은 Density 기반 클러스터링 기법 중 하나로써, clustering과 더불어 이상치(outlier)를 구별해 낼 수 있는 장점이 있음. DBSCAN은 특정 반경 ϵ 이내에 특정 개수(m) 이상의 점이 존재하면 cluster를 만들기 시작하며 해당 cluster 내의 각 점으로부터 ϵ 이내에 특 m 개 이상의 점이 존재하지 않을 때까지 이를 확장하는 방식으로 cluster를 생성함
- 위 방법을 통해 [그림 2-3]에 나타나 있는 과거 항적에 대하여 클러스터링을 수행한 결과는 [그림 2-5] 및 [그림 2-6]에 나타나 있음.
- [그림 2-5]는 동일한 클러스터에 속한 항공기 궤적을 같은 색깔로 나타내고 있으며 [그림 2-6]은 각 클러스터의 중심선(centroid)를 나타내고 있음. 그림을 통해 볼 수 있듯이 관제패턴의 구분이 모호하며 궤적패턴의 예측을 위해서는 더욱 명확한 구분이 필요한 것으로 보임

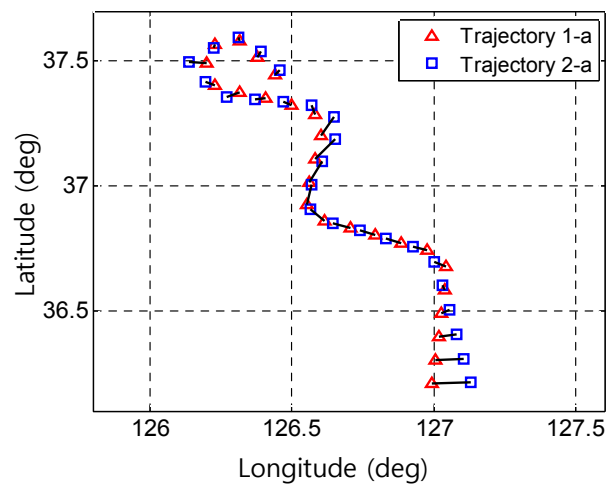


[그림 2-5] PCA 및 DBSCAN을 이용한 궤적패턴 분류기법에 따른 궤적패턴 분류 결과 - 1

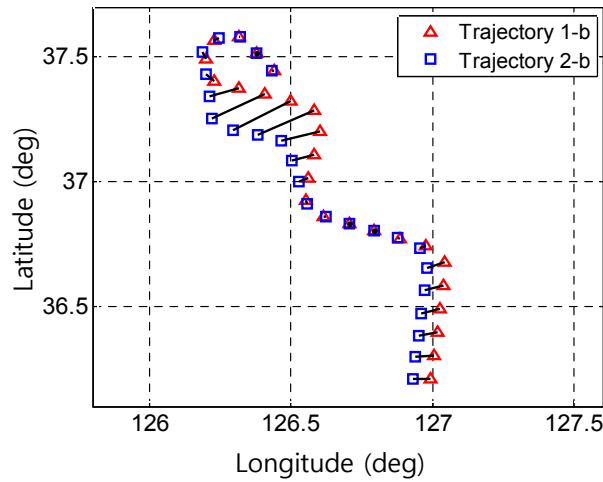


[그림 2-6] PCA 및 DBSCAN을 이용한 궤적패턴 분류기법에 따른 궤적패턴 분류 결과 - 2

- 실제로, 본 방법을 적용할 경우 각 궤적 간에 대응되는 점들의 정렬이 올바르게 되지 못해 궤적 간의 비교가 왜곡될 수 있음. 이는 [그림 2-7] 및 [그림 2-8]을 통해 설명될 수 있음



[그림 2-7] 항공기 궤적 쌍 간의 대응 - 1



[그림 2-8] 항공기 궤적 쌍 간의 대응 - 2

- [그림 2-7]은 [그림 2-8]의 궤적 쌍에 비하여 그 모양이 비슷하나, 궤적의 정렬이 올바르지 못하여 두 궤적 사이의 거리를 계산하였을 경우 왼쪽 궤적 쌍의 거리가 더 크게 계산됨. 이러한 상황은 궤적 간의 정렬이 클러스터링의 결과를 왜곡시킬 수 있음을 보여줌

2) Dynamic Time Warping(DTW) 및 계층적 클러스터링 방법을 이용한 궤적패턴 분류기법

- PCA 및 DBSCAN을 이용하나 궤적패턴 분류기법은 앞서 설명한 바와 같이 궤적 간의 정렬로 인한 문제점이 있으므로, 이러한 문제점을 해결하기 위한 분류기법을 개발함
- 본 방법은 DTW 및 계층적 클러스터링 기법을 이용하여 궤적패턴을 구분하며, ① 궤적 샘플링(Trajectory sampling), ② 궤적 간 거리계산(Trajectory distance computation), ③ 클러스터링(Clustering)의 순서로 수행되며, 각각은 다음에서 설명됨

가) 궤적 샘플링(Trajectory sampling)

- 본 방법에서 모든 항공기의 궤적은 동일한 개수(p)의 항공기 위치 데이터로 나타내어짐. 항공기 궤적은 각각 서로 다른 개수의 레이다 데이터 개수로 이루어져 있으므로, 이를 위해 보간법(interpolation)을 통해 궤적을 샘플링 하였음

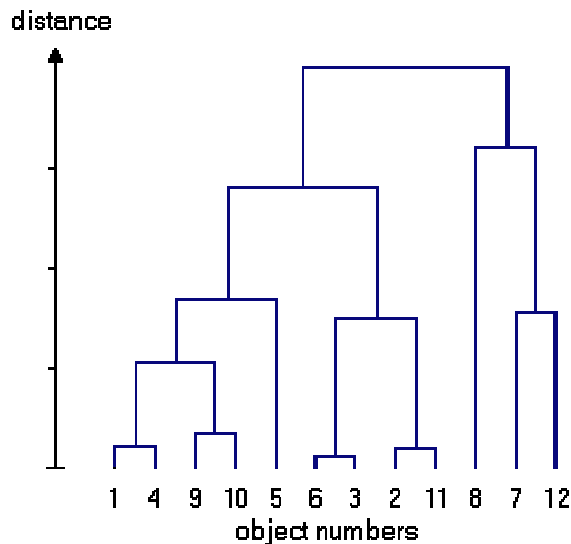
- 기본적으로 항공기의 위치 데이터는 위도, 경도, 고도 정보를 포함하나, 본 연구에서는 고도보다 항공기의 횡적 위치가 중요하므로 위도와 경도만을 사용하였음

나) 궤적 간 거리계산(Trajectory distance computation)

- 본 방법에서 사용한 클러스터링 방법을 위해서는 모든 궤적 쌍 간의 거리가 계산되어야 함. 각 궤적 쌍 간의 거리는 유클리디안 거리를 통하여 계산되었으며, 거리 계산 시에는 앞서 문제점으로 언급된 궤적 데이터 간 정렬 문제를 해결하기 위하여 DTW 알고리즘이 적용되었음
- DTW 알고리즘은 두 궤적 간의 최적의 대응 정렬을 찾아주는 알고리즘임

다) 클러스터링(Clustering)

- 각 항공기 궤적 쌍 간의 거리가 계산되면 계층적 클러스터링 기법을 통하여 궤적패턴을 구분하였음
- 계층적 클러스터링 기법은 특정 기준 (예를 들어, 동일 클러스터 내의 분산 최소화)을 통해 순차적으로 각 궤적을 그룹화 해나가는 방법으로써 이 과정은 [그림 2-9]에 나타나 있는 dendrogram을 통해 볼 수 있음



[그림 2-9] Dendrogram

- 계층적 클러스터링 기법은 최종적으로 그룹화 하고자하는 클러스터의 개수를 입력값으로 주어야 하며, 순차적인 그룹화 과정 중 해당 개수의 그

룹이 결정된 시점에서 클러스터링이 종료됨

- 본 연구에서는 계층적 클러스터링의 기준으로써 Ward's Minimum Variance 기준을 사용하였음

나. 결과의 검증

- 본 절에서는 항공기 궤적패턴 분류기법에 대한 결과의 검증방법을 소개하고 앞서 설명한 분류기법 중 DTW 및 계층적 클러스터링 기법을 이용한 방법에 대한 검증을 수행하였음

1) 결과의 검증방법

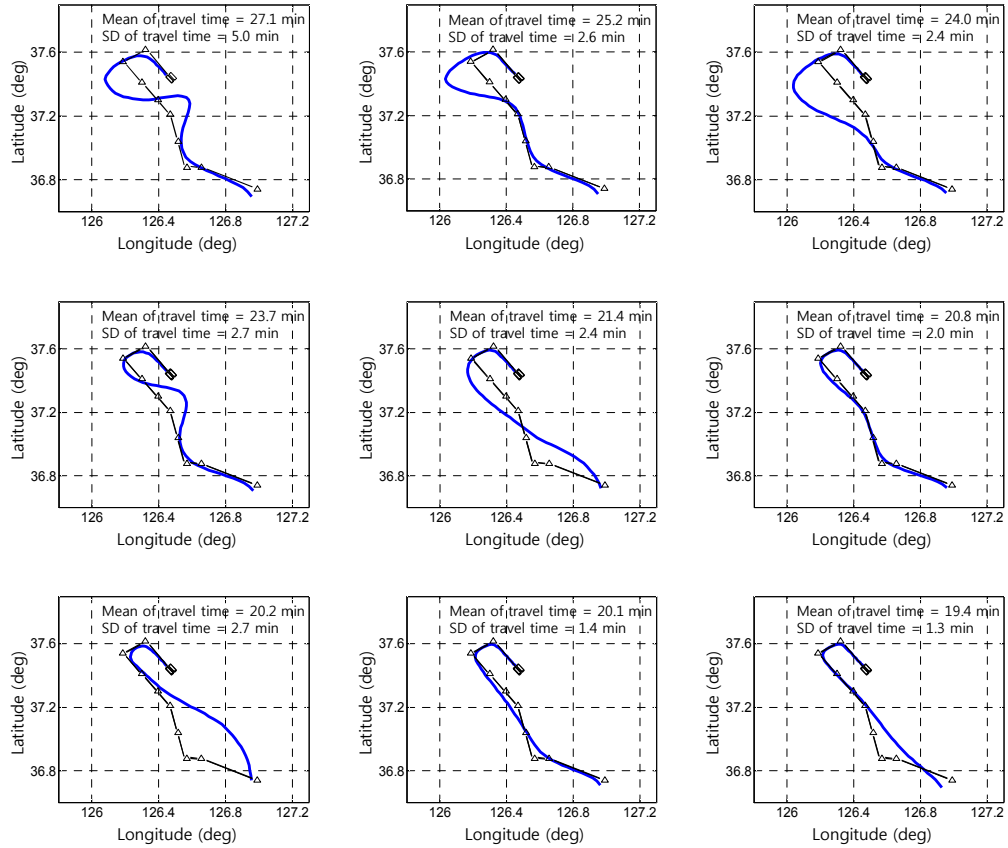
- 클러스터링의 결과에 대한 검증은 다양한 기준을 통하여 수행될 수 있음
- 하지만 본 연구에서 클러스터링은 다양하게 나타날 수 있는 항공기의 궤적 중 주요 궤적패턴을 찾아내는데 있으므로 궤적패턴의 분류정확도는 동일한 패턴 내에 속해있는 항공기 궤적의 총 비행거리의 표준편차로 정의하였음
- 또한 항공기 궤적패턴은 여러 개가 존재하므로, 총 분류 정확도는 각 패턴에 속한 항공기 궤적의 비율에 따른 각 패턴의 분류 정확도의 가중평균으로 계산하였음
- 즉, n 개의 궤적 패턴이 있을 때, 각 궤적 패턴에 속한 궤적의 비율을 $p(i)$ 라 하고, 각 패턴에 속한 항공기 궤적의 비행거리의 표준편차가 $\sigma(i)$ 라 할 때, 궤적패턴 분류 정확도는 다음과 같음

$$\text{분류정확도} = \sum_{i=1}^n p(i) \times \sigma(i) \quad (1)$$

- 또한, 본 방법에 따른 분류 정확도의 비교 검증을 위해서 기존의 항적데이터 분류 정확도가 정의되어야 함. 기존에는 궤적패턴에 따라 궤적을 분류하지 않았으므로 모든 궤적이 동일한 패턴에 속하는 것과 동일하며, 따라서 기존의 항적데이터 분류 정확도는 모든 항공기 궤적의 비행거리 표준편차로 정의됨

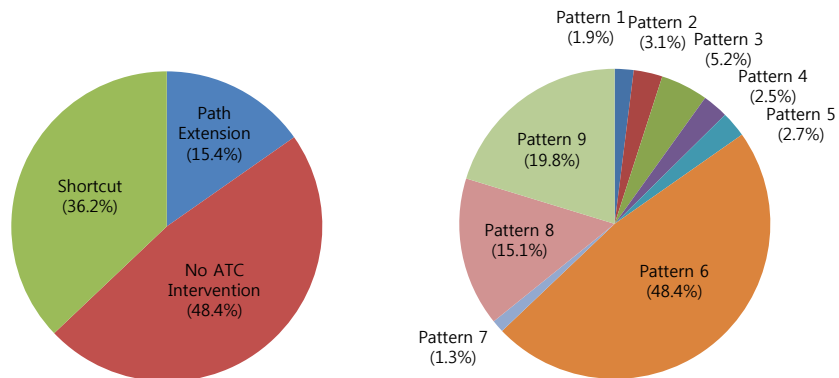
2) 결과의 검증

- [그림 2-10]은 DTW 및 계층적 클러스터링 방법에 따른 [그림 2-3]의 궤적패턴 분류결과임. 각 그림의 우측 상단에는 해당 궤적패턴에 포함된 항공기 궤적의 비행시간에 대한 평균과 표준편차가 나타나있음



[그림 2-10] DTW 및 계층적 클러스터링 방법에 따른 궤적패턴 분류 결과

- 그림에서 볼 수 있듯이, 1부터 5번까지의 궤적패턴은 관제사에 의하여 비행거리가 증가된 경우에 해당되는 것으로 보이며, 6번 패턴은 거의 비행절차를 따라 비행한 경우에 해당됨. 또한 7부터 9번까지의 궤적패턴은 비행거리를 감소시키기 위한 관제절차 패턴으로 보임
- [그림 2-11]은 각 궤적패턴 별 항공기의 비율을 나타내고 있음



[그림 2-11] 궤적패턴 별 항적 비율

- 식 (1)에 따른 분류 정확도를 계산하기 위한 각 궤적 패턴 별 항적 비율과 표준편차는 [표 2-1]에 나타나 있으며, 계산된 분류 정확도는 1.9분임

궤적 패턴	항적 비율 (%)	비행시간 표준편차 (min)
1	1.9	5.0
2	3.1	2.6
3	5.2	2.4
4	2.5	2.7
5	2.7	2.4
6	48.4	2.0
7	1.3	2.7
8	15.1	1.4
9	19.8	1.3

[표 2-1] 궤적패턴 별 항적비율 및 비행시간 표준편차

- 기존의 항적데이터 분류정확도, 즉 모든 항적의 비행시간 표준편차는 3.5 분으로써, 항적데이터 분류 정확도는 기존에 비하여 약 46% (3.5 분에서 1.9 분으로) 개선되었음

2. 관제패턴 예측모형 개발

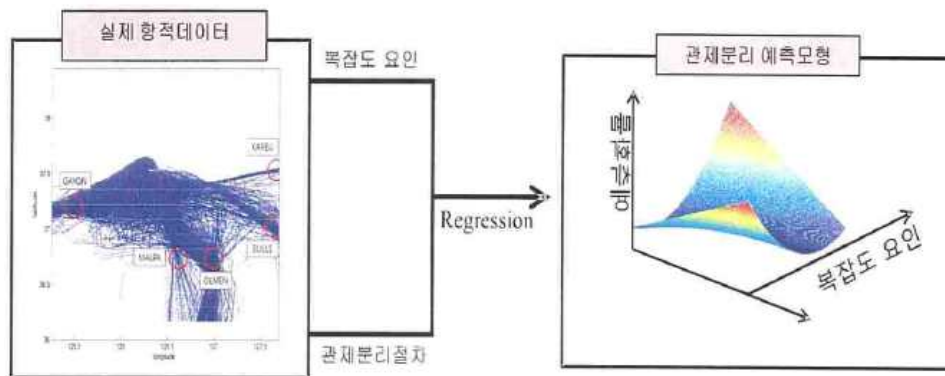
- 분류된 항공기 주요 궤적패턴 중 특정 항공기가 어떠한 궤적패턴을 따를 지를 확률적으로 예측하는 모형을 개발하였음
- 본 연구개발에서는 ① 항공 교통 복잡도(traffic complexity)를 이용한 궤적 패턴을 예측하는 방법과 ② 연속된 항공기의 궤적패턴 유사성을 이용하여 궤적패턴을 예측하는 방법을 개발하였음

가. 연구수행 내용

1) 교통 복잡도(traffic complexity)와 통계적 분류 모형(probabilistic classifier)을 이용한 예측모형

- 본 예측모형은 현재 주어진 교통상황의 복잡도를 관측하여 이를 바탕으로 항공기가 어떠한 궤적 패턴을 따라 비행할 지를 확률적으로 예측하는 모형

으로써, 이는 [그림 2-12]에 개략적인 흐름이 나타나 있음



[그림 2-12] 교통 복잡도와 통계적 분류 모형을 이용한 관제절차 예측모형의 개념도

- 본 예측모형은 궤적패턴을 예측하기 위하여 적절한 항공 교통 복잡도와 분류 모형을 사용하는 것이 중요하며, 이에 대한 연구는 다음에서 설명되었음

가) 교통 복잡도(traffic complexitiy)

- 교통 복잡도란 주어진 공역의 상황이 얼마나 복잡한지를 나타내는 지표로써, 이는 어떠한 목적으로 교통 복잡도를 사용하는지에 따라 다양한 요인에 의하여 결정될 수 있음
- 본 예측모형에서는 항공기가 어떤 궤적패턴을 따라 비행할지를 예측하기 위한 변수로써, 다음과 같은 요인들을 교통 복잡 요인으로 선택하여 사용하였음
 - 예측 시점에 접근관제공역 내에 존재하는 항공기 대수 (요인 1)
 - 예측 시점으로부터 5분 이내에 GAYON 픽스를 통해 진입한 항공기 대수 (요인 2)
 - 예측 시점으로부터 5분 이내에 OLMEN 픽스를 통해 진입한 항공기의 대수 (요인 3)
 - 예측 시점으로부터 5분 이내에 BULLS 픽스를 통해 진입한 항공기의 대수 (요인 4)
- ※ GAYON, OLMEN, BULLS는 본 연구의 실험에 사용된 공역의 특정 지점을 의미하며 이는 [그림 2-2]에 나타나 있음
- 앞서 선택된 네 개의 교통 복잡 요인이 궤적 패턴을 예측하는데 있어 유

의한지를 검증하기 위하여 Pearson 카이제곱 독립성검정을 수행하였음

- Pearson 카이제곱 독립성검정을 수행하기 위하여 각 변수에 대하여 앞서 분류된 아홉 개의 궤적패턴과의 분할표를 계산하였으며, 이는 [표 2-2]부터 [표 2-5]에 나타나 있음

Level Pattern(#)	Low	Low-Medium	Medium-High	High	Sum
1	10.0%	80.0%	6.7%	3.3%	1.4%
2	30.9%	63.2%	5.9%	0.0%	3.2%
3	41.0%	49.6%	6.8%	2.6%	5.5%
4	30.8%	55.4%	13.8%	0.0%	3.1%
5	50.0%	32.0%	16.0%	2.0%	2.4%
6	63.1%	28.2%	8.0%	0.8%	48.7%
7	80.0%	20.0%	0.0%	0.0%	1.2%
8	63.7%	28.1%	8.2%	0.0%	14.5%
9	75.1%	19.4%	5.5%	0.0%	20.0%
Sum	61.5%	30.3%	7.6%	0.6%	100.0%

[표 2-2] 요인 1과 궤적패턴에 대한 분할표

Level Pattern(#)	Low	Low-Medium	Medium-High	High	Sum
1	63.3%	26.7%	6.7%	3.3%	1.4%
2	95.6%	4.4%	0.0%	0.0%	3.2%
3	88.0%	9.4%	0.9%	1.7%	5.5%
4	81.5%	15.4%	3.1%	0.0%	3.1%
5	94.0%	6.0%	0.0%	0.0%	2.4%
6	91.2%	6.9%	1.3%	0.7%	48.7%
7	100.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.2%
8	97.1%	2.3%	0.7%	0.0%	14.5%
9	99.1%	0.7%	0.2%	0.0%	20.0%
Sum	93.0%	5.5%	1.0%	0.5%	100.0%

[표 2-3] 요인 2와 궤적패턴에 대한 분할표

Level Pattern(#)	Low	Low-Medium	Medium-High	High	Sum
1	63.3%	23.3%	13.3%	0.0%	1.4%
2	60.3%	30.9%	5.9%	2.9%	3.2%
3	76.9%	21.4%	0.9%	0.9%	5.5%
4	80.0%	16.9%	1.5%	1.5%	3.1%
5	52.0%	26.0%	14.0%	8.0%	2.4%
6	80.0%	14.4%	3.0%	2.6%	48.7%
7	64.0%	16.0%	16.0%	4.0%	1.2%
8	68.0%	16.3%	10.5%	5.2%	14.5%
9	75.4%	14.5%	6.4%	3.8%	20.0%
Sum	75.4%	16.1%	5.3%	3.2%	100.0%

[표 2-4] 요인 3과 궤적패턴에 대한 분할표

Level Pattern(#)	Low	Low-Medium	Medium-High	High	Sum
1	80.0%	16.7%	3.3%	0.0%	1.4%
2	94.1%	2.9%	1.5%	1.5%	3.2%
3	91.5%	6.8%	1.7%	0.0%	5.5%
4	73.8%	16.9%	7.7%	1.5%	3.1%
5	96.0%	2.0%	0.0%	2.0%	2.4%
6	90.2%	7.5%	1.8%	0.5%	48.7%
7	92.0%	4.0%	4.0%	0.0%	1.2%
8	95.1%	3.6%	1.3%	0.0%	14.5%
9	97.6%	1.7%	0.7%	0.0%	20.0%
Sum	92.1%	5.8%	1.7%	0.4%	100.0%

[표 2-5] 요인 4와 궤적패턴에 대한 분할표

- [표 2-2]부터 [표 2-5]까지의 분할표를 통하여 궤적패턴과 각 교통 혼잡 요인이 독립적이라는 귀무가설 하에서 Pearson 카이제곱 독립성검정을 수행하였음
- [표 2-6]에는 각 교통 혼잡 요인에 대한 카이제곱 통계량과 p-value가 나타나 있으며, p-value를 통해 볼 수 있듯이 모든 요인은 궤적패턴과 통계적으로 종속적임을 확인할 수 있음

교통 혼잡 요인	카이제곱 통계량	p-value
1	184.6	<0.001
2	106.5	<0.001
3	91.8	<0.001
4	77.7	<0.001

[표 2-6] 교통 혼잡요인 별 카이제곱 통계량 및 p-value

나) 통계적 분류 모형(Probabilistic classifier)

- 통계적 분류 모형은 독립변수(교통 혼잡 요인)가 주어졌을 때 대상(항공기)이 어떠한 범주(궤적패턴)에 속하는 지를 확률적으로 추정 또는 예측하는 모형으로써, 본 연구에서는 ① 다중 로지스틱 회귀모형과 ② Bayesian 분류기법을 적용해보았음

① 다중 로지스틱 회귀모형 (Multinomial logistic regression)

- 다중 로지스틱 회귀모형에서 교통 혼잡 요인이 관측되었을 때 j 번째 항공기가 j 번째 궤적패턴을 따를 확률을 다음과 같은 식에 의해 계산됨

$$P_j^i = \frac{e^{\sum_{k=0}^K x_{ik}\beta_{kj}}}{1 + \sum_{j=1}^{J-1} e^{\sum_{k=0}^K x_{ik}\beta_{kj}}} \quad \text{for } j = 1, 2, \dots, J-1 \quad (2)$$

- 여기서 x_{ik} 는 i 번째 항공기의 k 번째 교통 혼잡 요인; β_{kj} 는 j 번째 궤적패턴의 k 번째 교통 혼잡 요인에 대한 계수; J 는 총 궤적패턴의 개수; K 는 총 교통 혼잡 요인의 개수; β_{0j} 는 바이어스 계수이며 j 번째 궤적 패턴을 따를 확률은 $1 - \sum_{q=1}^{J-1} P_q^i$ 를 통해 계산됨
- 다중 로지스틱 회귀모형의 계수들은 다양한 방법을 통해 추정될 수 있는데, 본 연구에서는 Newton-Raphson 방법을 통해 추정되었음
- 식 (2)의 다중 로지스틱 회귀모형을 통해서 [그림 2-3]의 항공기가 OLMEN 픽스에 도착하였을 때 궤적패턴을 예측해 보았음. 여기에는 [그림 2-10]의 궤적패턴과 앞서 설명된 네 개의 교통 혼잡 요인이 사용되었으며, 가장 높은 확률을 나타내는 궤적패턴을 예측 패턴으로 결정하였음

- 예측 결과 약 46%의 예측율을 보였으며 이는 기존에 계획된 목표치 70%에 미치지 못함

② Bayesian 분류기법 (Bayesian classification)

- i 번째 궤적패턴을 θ_i 라 하고 관측된 m 개의 교통 혼잡 요인이 $Z=[z_1, z_2, \dots, z_m]$ 일 때, Bayesian 분류기법에 따라 예측 대상 항공기가 i 번째 궤적 패턴을 따라 비행할 확률은 다음과 같이 계산됨

$$P(\theta_i|Z) = \frac{P(Z|\theta_i)}{P(Z)} P(\theta_i) \text{ for } i=1,2,\dots,N \quad (3)$$

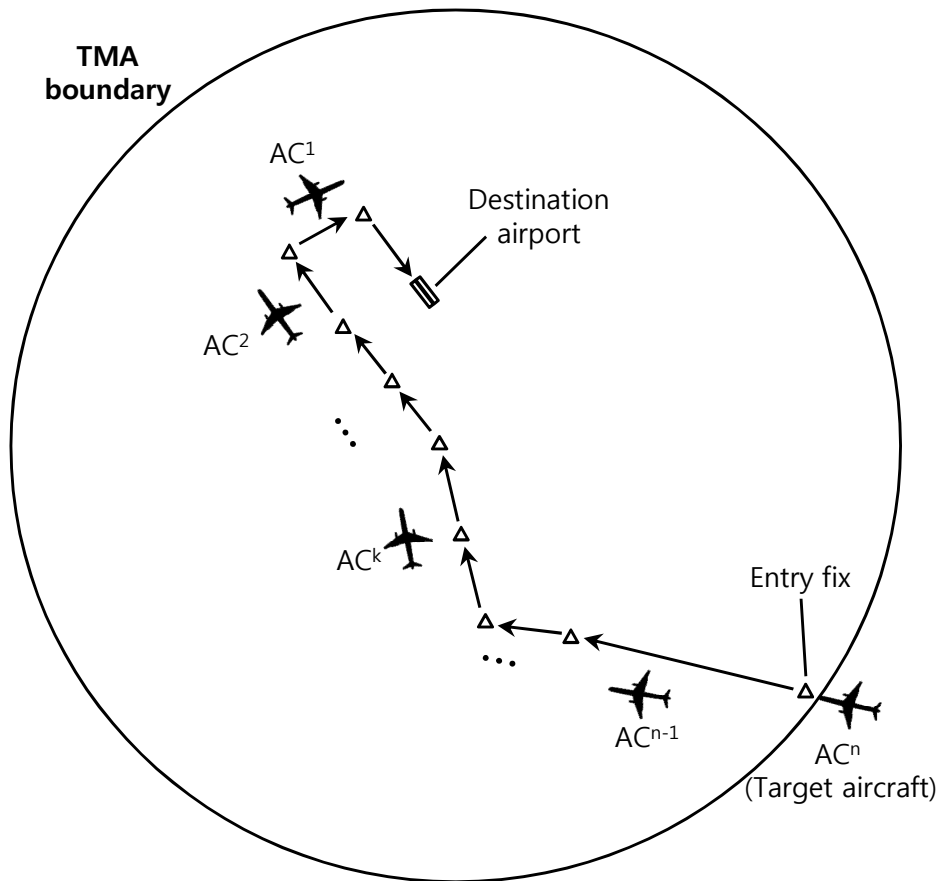
- 여기서 $P(Z) = \sum_{i=1}^N P(Z|\theta_i)P(\theta_i)$ 이며, $P(\theta_i)$ 는 θ_i 에 대한 사전확률임. 사전확률 $P(\theta_i)$ 날씨정보나 관제사에 대한 정보 등 다양한 정보가 포함될 수 있으나 본 연구에서는 단일분포를 사용하였음
 - 조건부 확률분포 $P(Z|\theta_i)$ 는 과거 항적자료를 통하여 추정할 수 있음
 - 마찬가지로 식 (3)의 Bayesian 분류기법을 통해서 [그림 2-3]의 항공기가 OLMEN 픽스에 도착하였을 때 궤적패턴을 예측해 보았음. 교통 혼잡 요인 Z 에는 다중 로지스틱 회귀모형과 동일하게 앞서 설명된 네 개의 교통 혼잡 요인이 사용되었으며, 가장 높은 확률을 나타내는 궤적패턴을 예측 패턴으로 결정하였음
 - 예측 결과는 다중 로지스틱 회귀모형과 유사한 예측율(약 47%)을 보였으며 마찬가지로 이는 기존에 계획된 목표치 70%에 미치지 못함
- 교통 복잡도와 통계적 분류모형을 이용한 궤적패턴 예측모형은, 궤적패턴에 영향을 미치는 교통 복잡 요인을 더욱 탐색하고 다양한 분류모형을 적용해 봄으로써 성능을 향상시킬 여지가 남아있으나, 현재 연구 단계에서는 만족할만한 성능을 나타내지 못함

2) 연속된 항공기의 궤적패턴 유사성을 이용한 궤적패턴 예측모형

- 교통 복잡도와 통계적 분류모형을 이용한 궤적패턴 예측모형은 낮은 궤적패턴 예측율을 보여 다른 접근방법을 통한 궤적패턴 예측모형을 개발함
- 본 예측모형은 예측 대상 항공기에 앞서서 비행하고 있는 항공기의 궤적패턴을 이용하여 대상 항공기의 궤적패턴을 예측하는 모형임
- 이 모형은 연속된 항공기가 유사한 궤적패턴을 통해 비행할 것이라는 가정과, 항공기의 궤적이 진행될수록 궤적패턴을 예측하기가 쉬워진다는 점을

이용하였음

- [그림 2-13]에는 n 대의 연속된 항공기(AC^1 - AC^2 -...- AC^n)가 목적지 공항으로 비행하고 있는 상황이 나타나 있음. 여기서 바깥 테두리는 접근관제구역 경계를 나타내며 항공기는 가장 앞서가는 항공기부터 순서대로 번호가 붙여짐



[그림 2-13] 공역 개념도

- 이 때 본 예측모형에 따라 항공기가 각 궤적패턴을 따를 확률은 다음과 같이 계산됨

가) Step 1

- 모든 i 에 대해 ($i=1,2,...,N$) $P^0(\theta_i)=1/N$ 로 정의함. 여기서 θ_i 는 i 번째 궤적패턴을 나타내며 N 은 총 궤적패턴의 개수임

나) Step 2

- AC^1 이 θ_i 를 따를 확률은 Bayes 법칙에 따라 다음과 같이 계산됨

$$P^1(\theta_i) = \frac{L(\theta_i|w^1)}{\sum_{j=1}^N L(\theta_j|w^1)P^0(\theta_j)} P^0(\theta_i) \quad \text{for } i=1,2,\dots,N \quad (4)$$

- 여기서 $w^1 = \{w_1^1, w_2^1, w_3^1, \dots\}$ 는 AC^1 의 관측된 궤적 데이터; $w_j^1 = [x_j^1 \ y_j^1]^T$ 는 AC^1 의 j 번째 궤적의 횡적 위치; $L(\theta_i|w^1)$ 는 w^1 에 따른 AC^1 이 θ_i 를 따를 우도임

다) Step 3

- AC^k 가 θ_i 를 따를 확률은 AC^k 에 앞서서 비행하는 항공기인 AC^{k-1} 이 θ_i 를 따를 확률을 사전확률로 사용하여 다음과 같이 계산됨

$$P^k(\theta_i) = \frac{L(\theta_i|w^k)}{\sum_{j=1}^N L(\theta_j|w^k)P^{k-1}(\theta_j)} P^{k-1}(\theta_i) \quad \text{for } i=1,2,\dots,N \quad (5)$$

- 여기서 $w^k = \{w_1^k, w_2^k, w_3^k, \dots\}$ 는 AC^k 의 관측된 궤적 데이터; $w_j^k = [x_j^k \ y_j^k]^T$ 는 AC^k 의 j 번째 궤적의 횡적 위치; $L(\theta_i|w^k)$ 는 w^k 에 따른 AC^k 가 θ_i 를 따를 우도임

라) Step 4

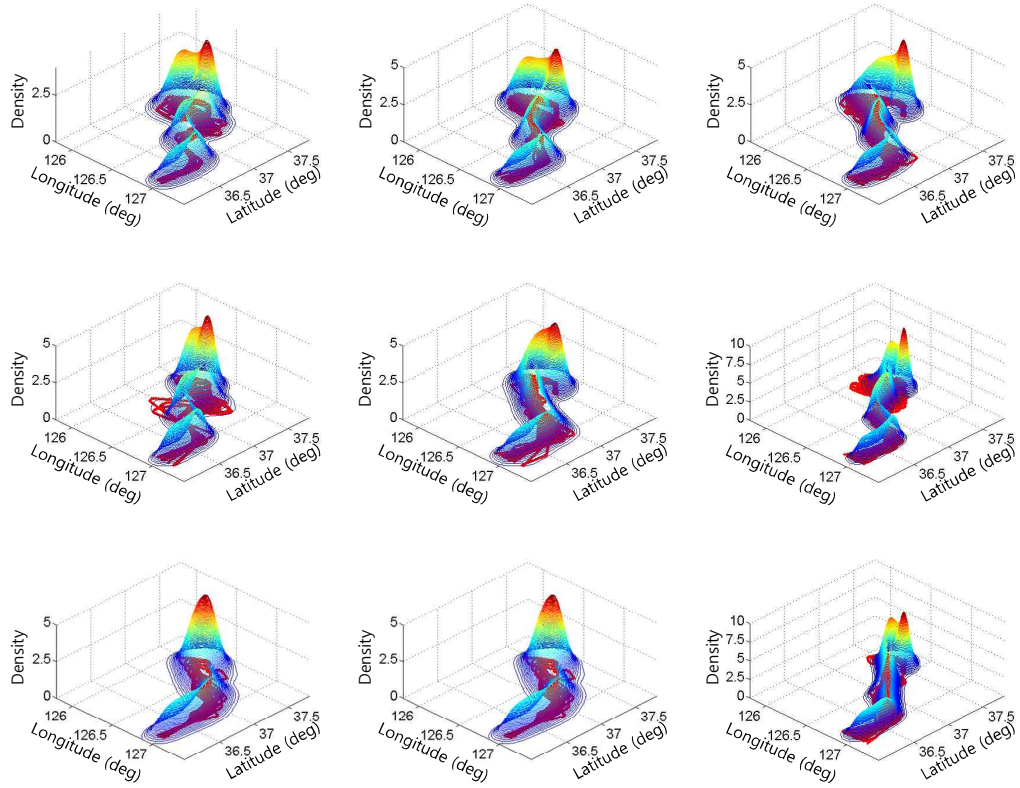
- AC^n , 즉 해당 공역에 진입한 시점에 있는 항공기의 경우 아직 항공기 궤적이 존재하지 않으므로 우도 $L(\theta_i|\bullet)$ 가 계산될 수 없음. 따라서 AC^n 이 θ_i 를 따를 확률은 AC^n 에 앞서서 비행하는 항공기인 AC^{n-1} 이 θ_i 를 따를 확률을 이용하여 다음과 같이 계산됨

$$P^n(\theta_i) = P^{n-1}(\theta_i) \quad \text{for } i=1,2,\dots,N \quad (6)$$

- 위 과정을 통해 궤적패턴을 예측하기 위해서는 항공기의 궤적 $w = \{w_1, w_2, w_3, \dots\}$ 가 주어졌을 때 우도 $L(\theta_i|w)$ 를 계산할 수 있는 확률밀도 함수가 정의되어야 함
- 확률밀도함수를 추정하는 데에는 다양한 방법이 사용될 수 있으나 본 예측 모형에서는 kernel density estimation 방법을 사용하였음
- Kernel density estimation은 확률밀도함수의 모형을 특정 통계모형으로 가정하지 않고 추정하는 비모수 추정 방법으로서, 본 연구에서와 같이 추정하려는 확률밀도함수의 모양(즉, 관제절차 패턴의 모양)이 정규분포 등의 특정한 통계적 모형으로 근사되기 어려운 경우에 적합한 방법임
- $W(\theta_i) = \{W_1(\theta_i), W_2(\theta_i), W_3(\theta_i), \dots\}$ 이 궤적패턴 θ_i 에 속한 궤적들이고 $W_j(\theta_i) = [X_j(\theta_i) \ Y_j(\theta_i)]$ 를 $W(\theta_i)$ 에 속한 j 번째 궤적의 횡적위치라고 할 때, Kernel density estimation 방법에 따른 확률밀도함수는 다음과 같이 정의됨

$$\hat{f}(w_k|\theta_i) = \frac{1}{M_i H} \sum_{j=1}^{M_i} K(H^{-1}(w_k - W_j(\theta_i))) \quad (7)$$

- 여기서 M_i 는 궤적패턴 θ_i 에 속한 궤적의 개수; H 는 확률밀도함수의 평탄성을 좌우하는 bandwidth 행렬; $k(\cdot)$ 는 kernel 함수임. 본 예측모형에서 H 는 Scott rule에 따라 계산하였으며 kernel 함수는 다변량 정규분포함수를 사용하였음
- 식 (7)의 정의에 따른 확률밀도함수를 [그림 2-10]의 궤적패턴에 대하여 구한 결과는 [그림 2-14]와 같음



[그림 2-14] 각 궤적패턴에 대한 확률밀도함수

- 위 식 (7)에서 정의된 확률밀도함수에 따라서, 항공기의 궤적 $w = \{w_1, w_2, w_3, \dots\}$ 가 주어졌을 때 우도 $L(\theta_i|w)$ 는 다음과 같이 계산됨

$$L(\theta_i|w) = \prod_k \hat{f}(w_k|\theta_i) \quad (7)$$

- 또한, 본 예측모형은 연속된 항공기의 궤적패턴이 유사할 것이라는 가정 하에 개발되었으므로, 과거 항적자료를 통해 이에 대한 검정이 이루어짐
- 이를 위해서는 선행항공기와 후행항공기의 궤적패턴에 대해 Pearson 카이제곱 독립성검정이 수행되었음.
- [표 2-7]은 선행항공기와 후행항공기의 궤적패턴에 대한 Pearson 카이제곱 독립성검정을 위한 분할표임

Pattern of AC	Pattern of preceding AC									Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	37.5% (13.7)	0.0% (-0.9)	12.5% (1.7)	12.5% (2.6)	0.0% (-0.7)	33.3% (-1.6)	0.0% (-0.6)	0.0% (-2.1)	4.2% (-1.9)	1.9%
2	2.7% (0.5)	40.5% (13.8)	13.5% (2.4)	2.7% (-0.2)	2.7% (0.3)	29.7% (-2.4)	0.0% (-0.8)	0.0% (-2.6)	8.1% (-1.7)	3.0%
3	4.9% (2.0)	11.5% (4.1)	31.1% (9.6)	6.6% (1.5)	3.3% (0.7)	27.9% (-3.4)	0.0% (-1.0)	11.5% (-0.9)	3.3% (-3.2)	4.9%
4	12.1% (4.7)	0.0% (-1.0)	6.1% (0.3)	18.2% (4.9)	0.0% (-0.8)	48.5% (-0.1)	0.0% (-0.7)	15.2% (0.0)	0.0% (-2.8)	2.7%
5	0.0% (-0.8)	3.0% (0.0)	3.0% (-0.5)	0.0% (-1.1)	21.2% (7.9)	27.3% (-2.6)	0.0% (-0.7)	15.2% (0.0)	30.3% (1.7)	2.7%
6	0.7% (-2.6)	1.4% (-3.1)	3.6% (-2.2)	3.2% (0.0)	0.3% (-4.0)	69.7% (13.8)	0.5% (-2.7)	11.7% (-3.3)	8.8% (-8.8)	47.6%
7	0.0% (-0.5)	6.3% (0.8)	0.0% (-0.9)	0.0% (-0.7)	0.0% (-0.6)	12.5% (-3.0)	37.5% (12.1)	18.8% (0.4)	25.0% (0.6)	1.3%
8	0.0% (-2.0)	0.5% (-2.1)	3.6% (-1.0)	2.1% (-1.0)	2.6% (0.6)	33.9% (-4.6)	2.1% (0.8)	34.9% (8.2)	20.3% (0.5)	15.6%
9	0.0% (-2.3)	1.2% (-1.8)	1.6% (-2.8)	1.2% (-2.0)	3.2% (1.5)	27.6% (-7.6)	2.0% (0.8)	13.2% (-1.0)	50.0% (13.9)	20.3%
Total	1.7%	2.9%	5.0%	3.2%	2.0%	49.2%	1.5%	15.3%	19.1%	100.0 %

【표 2-7】 선행항공기와 후행항공기의 궤적패턴에 대한 분할표

- [표 2-7]의 분할표를 통한 독립성검정 수행 결과, 선행항공기와 후행항공기의 궤적패턴이 독립적이라는 가설은 유의수준 0.01 하에서 기각되었으며, 이는 연속된 항공기의 궤적패턴이 종속적이라는 통계적인 근거를 보여줌

나. 결과의 검증

- 본 절에서는 관제패턴 예측모형에 대한 결과의 검증방법을 소개하고 앞서 설명한 예측모형 중 연속된 항공기의 궤적패턴 유사성을 이용한 궤적패턴 예측모형에 대한 검증을 수행하였음

1) 결과의 검증방법

- 궤적패턴 예측모형에 대한 검증은 다양한 기준을 통하여 수행될 수 있음
- 본 연구에서 궤적패턴 예측모형은 항공기가 공역에 진입 시 또는 비행 도중에, 향후 비행하게 될 궤적이 어떤 궤적패턴에 속할 지 잘 예측하는 것이 중요함
- 따라서 궤적패턴 예측모형의 성능은 다음과 같은 방법을 통해 측정되었음

- ① 검증에 사용되는 항공기의 전체 궤적을 통해 해당 항공기의 궤적이 띤 궤적패턴에 속하는지 추정함. 이는 최대우도 추정법(Maximum Likelihood Estimation)을 통해 수행되었으며, 식으로 표현하면 다음과 같음

$$\hat{\theta} = \underset{\theta}{\operatorname{argmax}} L(\theta_i | \tilde{w}) \quad (8)$$

여기서 $\hat{\theta}$ 는 검증에 사용되는 항공기의 추정된 궤적패턴이며 $\tilde{w}$ 는 검증에 사용된 항공기의 전체 궤적임

- 검증에 사용된 항공기는 궤적패턴 분류에 사용되지 않았으므로 해당 궤적이 어떤 궤적패턴에 속하는지를 추정하는 단계가 필요함

- ② 항공기의 공역 진입시점부터 도착 시점까지 궤적패턴 예측모형을 통해 계산된 $\hat{\theta}$ 의 예측확률을 계산함

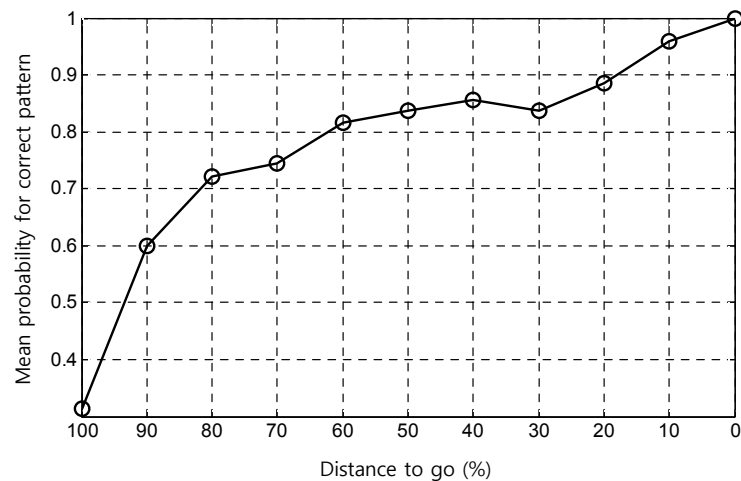
- 위 방법을 통해 [그림 2-3]의 항공기 중 총 100대의 항공기에 대한 예측을 수행하였음
- 또한, 예측결과에 대한 단일 지표로써 총 비행시간 동안 궤적패턴 예측모형을 통해 계산된 $\hat{\theta}$ 의 평균예측확률이 사용되었으며, 이는 다음 식과 같이 계산될 수 있음

$$\text{평균예측확률} = \sum_{t=1}^T P_t(\hat{\theta}) \times S \quad (9)$$

- 여기서 t 는 항공기의 새로운 궤적정보 업데이트에 따른 time step; T 는 항공기의 총 궤적 개수; $P_t(\hat{\theta})$ 는 t 번째 time step에서 예측된 $\hat{\theta}$ 의 예측확률이고 S 는 항공기 궤적정보 업데이트 사이의 시간 간격임

2) 결과의 검증

- [그림 2-15]는 앞서 설명된 검증방법을 통해 계산된 결과로써, 가로축은 공역 진입시점부터 목적지까지 남은 비행거리를 비율로 나타내며, 세로축은 100대 항공기에 대한 각각의 $\hat{\theta}$ 의 예측확률의 평균값을 나타냄



[그림 2-15] 항공기 진행에 따른 예측확률

- 그림에서 볼 수 있듯이, 총 비행거리의 약 20%를 비행한 시점에 계획된 궤적패턴 예측률 목표치인 70%를 넘어서는 것을 볼 수 있음
- [식 2-9]를 통해 계산된 평균예측확률은 77.7%로 마찬가지로 계획된 목표치인 70%를 상회하는 것을 확인할 수 있음

3. 공항 도착시간 예측모형 개발

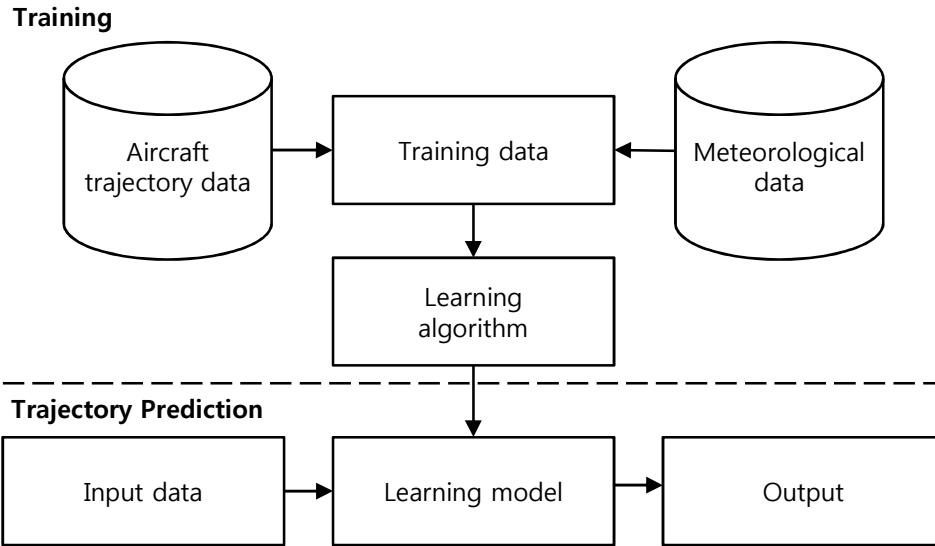
- 본 연구개발의 공항 도착시간 예측모형을 개발하였음
- 공항 도착시간을 예측하는 모형은 다양한 방법을 통해 연구 개발되어왔으며 이는 크게 ① 항공기의 역학적 모형을 이용한 방법과 ② 기계학습(Machine Learning)을 통한 방법으로 나뉠 수 있음
- 항공기의 역학적 모형을 이용한 방법은 항공기의 성능 정보와 비행 역학 방정식을 활용하여 항공기의 궤적을 예측하고, 예측된 궤적을 통해 항공기의 공항 도착시간을 예측하는 방법임
 - 이러한 방법은 항공기가 비행할 경로가 정확하게 정의되어 있는 경우에만 적용이 가능하여 본 연구개발의 대상과 같이 관제사의 관제지시가 자주 발생하는 지역에서는 그 효율성이 매우 낮을 것으로 예상될 수 있음

- 기계학습을 통한 방법은 항공기의 궤적을 정확하게 예측하는 대신, 과거 수집된 데이터를 통해 특정 기계학습모형을 학습한 후 이를 통해 공항 도착시간을 예측함
- 본 연구개발에서는 [그림 2-3]과 같이 관제지시가 자주 발생하는 지역을 예측대상으로 설정하였으므로 기계학습을 통한 방법을 주 대상으로 선정하였음
- 본 연구개발에서는 공항 도착시간 예측모형으로써 기존 문헌에서 개발된 선형회귀모형을 사용한 일반적인 형태의 예측모형을 먼저 적용해 본 후, 이에 추가적으로 앞서 개발된 궤적패턴 예측모형을 활용한 예측모형을 개발하였음

가. 연구수행 내용

1) 기계학습(Machine Learning)방법을 사용한 공항 도착시간 예측모형

- 기계학습방법을 이용한 일반적인 공항 도착시간 예측모형은 [그림 2-16]과 같은 개념도로 나타낼 수 있음
- 먼저 항공기 궤적 데이터와 기상자료 등 다양한 정보가 수집되며 이들은 기계학습모형을 학습하는데 사용됨
 - 수집되는 자료는 그 목적에 따라 상이할 수 있으나 공항 도착시간 예측모형의 경우 비행시간이 예측되어야 하므로 항공기 궤적 데이터와 기상자료 등이 필수적임. 이 외에도 추가적인 정보가 사용될 수 있음
 - 기계학습모형으로는 선형 회귀모형, 일반화 회귀모형(Generalized linear model), 인공 신경망 분석(Artificial neural network)등 다양한 모형이 존재하며 적절한 모형이 선택되어야 함
- 수집된 데이터를 통해 학습된 모형은 입력 데이터(Input data)를 통해 출력값(Output), 즉 공항 도착시간을 예측할 수 있음



[그림 2-16] 기계학습방법을 이용한 공항 도착시간 예측모형 개념도

- 입력 데이터로써 사용될 정보는 예측 성능에 직접적인 영향을 미치므로 매우 신중하게 결정되어야 함. 본 연구에서는 입력 데이터로써 항공기의 예측시점(공역 진입시점)에서의 속도 및 고도, 그리고 공역 내의 항공기 대수로 설정하였음
- 본 연구에서는 수집 가능한 자료의 한계로 인하여 제한된 정보만을 사용하였으나 향후 연구에서는 기상정보 등 더욱 다양한 정보를 모형에 포함시킬 수 있음
- 또한 본 연구에서는 기계학습모형으로써 선형회귀모형을 사용하였음
- 항공기 비행시간을 예측하기 위한 선형회귀모형은 다음과 같음

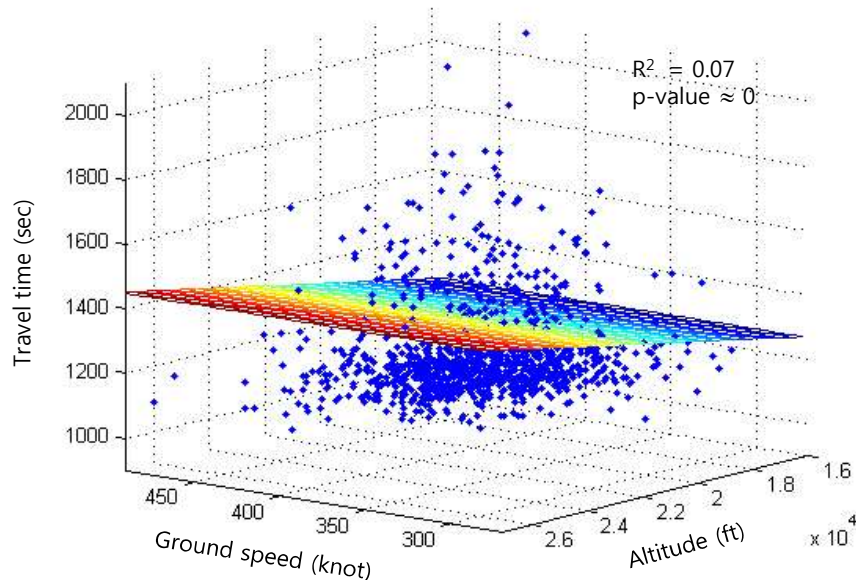
$$T(Z) = \beta_0 + \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \beta_3 z_3 \quad (10)$$

- 여기서 $T(Z)$ 는 $Z = [z_1, z_2, z_3]$ 을 통해 계산된 비행시간이며, $B = [\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3]$ 는 수집된 과거 자료로부터 추정되어야 할 계수 행렬임. 또한 z_1, z_2, z_3 는 각각 진입시점에 관측된 항공기의 속도, 고도 및 공역 내의 항공기 대수임
- 식 (10)을 통해 항공기의 비행시간이 예측되면 공항 도착시간은 다음과 같이 예측됨

$$ETA(Z) = T_e + T(Z) \quad (11)$$

- 여기서 $ETA(Z)$ 는 Z 가 관측되었을 때 예측된 도착예정시간(Estimated Time of Arrival)이며, T_e 는 진입시점의 시간임

- [그림 2-17]은 식 (10)의 모형을 [그림 2-3]에 나타나있는 항공기 항적자료를 통해 학습한 결과임.
- 그림에 나타나있는 평면은 학습된 모형을 나타내며 ◆ 표시는 각 항공기 항적자료를 나타냄

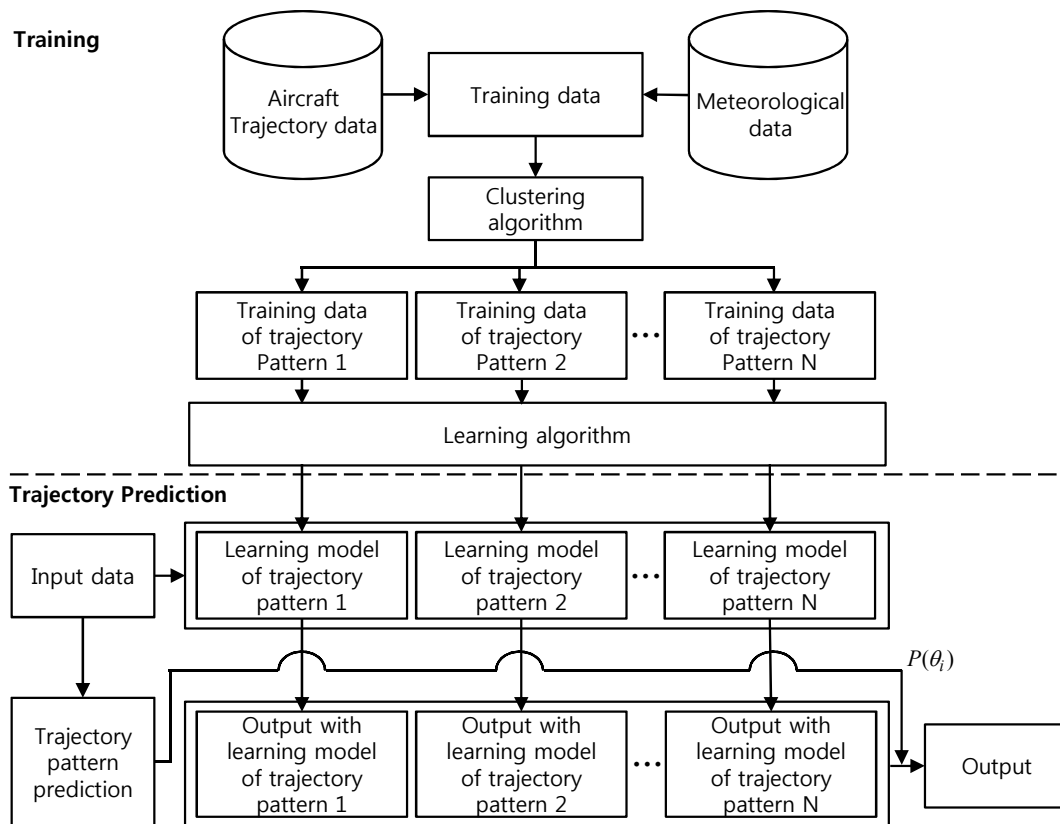


[그림 2-17] 비행시간에 대한 선형회귀모형

- 그림에 나타나있는 모형은 95% 신뢰구간에서 유의하며, 약 0.07의 R^2 값을 가짐. 즉, [그림 2-17]의 모형은 전체 항공기의 비행시간의 분산을 약 7% 가량밖에 설명하지 못함
- 위 결과에서 볼 수 있듯이 단일 선형회귀모형으로는 [그림 2-3]과 같이 관제사의 지시에 따라 다양한 궤적을 통해 비행하는 공역에서의 비행시간을 예측하기가 매우 어려움

2) 기계학습(Machine Learning)방법과 궤적패턴 예측모형을 사용한 공항 도착시간 예측모형

- 앞서 살펴본 바와 같이, [그림 2-16]에 나타나 있는 일반적인 형태의 예측모형으로는 [그림 2-3]과 같은 공역에서의 공항 도착시간을 정밀하게 예측할 수 없음
- 따라서 본 연구에서는 공항 도착시간 예측모형으로써, 기존의 일반적인 형태의 예측모형에 궤적패턴 예측모형을 추가한 형태의 예측모형을 개발하였으며, 이에 대한 개념도는 [그림 2-18]과 같음



[그림 2-18] 기계학습방법과 궤적패턴 예측모형을 사용한 공항 도착시간 예측모형 개념도

- 그림에서 볼 수 있듯이, 본 예측모형은 크게 ① 학습단계(Training stage)와 ② 예측단계(Prediction stage)로 나뉨

가) 학습단계(Training stage)

- 본 모형에서 또한 학습단계는 ① 관제절차의 패턴 구분, ② 각 관제절차 패턴별 공항까지 비행시간의 학습모형 구축, ③ 관제절차 패턴별 확률밀도함수 추정으로 구성되며 각각은 다음에서 설명됨

① 관제절차의 패턴 구분

- 이 단계는 과거 항적자료로부터 주요 관제절차 패턴을 구분하는 단계로써 1장 2-1절에 설명된 방법 등을 통해 수행될 수 있음
- 본 연구에서는 1장 2-1절에 설명된 방법 중 DTW 및 계층적 클러스터링 방법을 이용한 궤적패턴 분류기법을 사용하였으며, [그림 2-3]에 대한 패턴 구분 결과는 [그림 2-10]에 나타나 있음

② 각 관제절차 패턴별 공항까지 비행시간 학습모형 구축

- 이 단계는 기계학습방법을 이용한 일반적인 형태의 예측모형의 경우와 같이 입력 데이터에 따라 항공기의 공항까지의 비행시간을 예측하는 학습모형을 추정하는 단계임
- 다만, 기존의 일반적인 방법과는 다르게, 비행시간 예측 모형을 가) 단계에서 구분된 관제절차 패턴별로 구축함
- 본 연구에서는 학습모형으로써 선형회귀모형을 사용하였음. 즉, 궤적패턴 θ_i 를 따라 비행했을 때 공항까지의 비행시간은 다음과 같이 예측됨

$$T^i(Z) = \beta_0^i + \beta_1^i z_1 + \beta_2^i z_2 + \beta_3^i z_3 \quad (12)$$

- 여기서 $T^i(Z)$ 는 $Z = [z_1, z_2, z_3]$ 을 통해 계산된 θ_i 를 따라 비행했을 때 공항까지의 비행시간이며, $B^i = [\beta_0^i, \beta_1^i, \beta_2^i, \beta_3^i]$ 는 θ_i 에 속한 과거 항적자료로부터 추정되어야 할 계수 행렬임. 또한 z_1, z_2, z_3 는 각각 진입시점에 관측된 항공기의 속도, 고도 및 공역 내의 항공기 대수임
- 마찬가지로, 본 연구에서는 수집 가능한 자료의 한계로 인하여 제한된 정보만을 사용하였으나 향후 연구에서는 기상정보 등 더욱 다양한 정보를 모형에 포함시킬 수 있음
- [표 2-8]은 각 궤적패턴별로 구축된 비행시간 예측모형의 R^2 값과 모형의 통계적 유의성 검정에 대한 p-value가 나타나 있음. 유의성 검정의 귀무가설은 모형의 모든 계수가 0이라는 것으로써, 대부분의 패턴에 대한 모형이 유의함을 볼 수 있음
- 궤적패턴 4,5 및 7에 대한 모형은 통계적으로 유의하지 않으나, 샘플의 수가 충분하지 못한 것으로 볼 때, 향후 데이터를 더욱 수집함으로써 해결할 수 있을 것으로 보임
- 또한 모든 패턴의 R^2 가 [그림 2-17]의 모형의 $R^2(0.07)$ 에 비하여 크게 향상되었음을 볼 수 있음

Pattern (#)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Number of trajectories	21	35	59	29	31	549	14	171	225
R^2	0.32	0.25	0.08	0.06	0.07	0.08	0.24	0.19	0.23
p-val	0.03	0.01	0.09	0.43	0.38	<0.01	0.22	<0.01	<0.01

[표 2-8] 각 궤적패턴별 비행시간 예측모형

③ 관계절차 패턴별 확률밀도함수 추정

- 이 단계는 궤적패턴 예측방법으로써 1장 2-2절에 설명된 연속된 항공기의 궤적패턴 유사성을 이용한 궤적패턴 예측모형을 사용하기 위한 단계로써, 각 궤적패턴 별 확률밀도함수를 식 (7)에 따라 추정함
- [그림 2-10]의 궤적패턴에 대해 추정된 확률밀도함수는 [그림 2-14]에 나타나 있음

나) 예측단계(Prediction stage)

- 본 모형에서 또한 예측단계는 ① 궤적패턴 예측, ② 궤적패턴별 비행시간 예측, ③ 공항 도착시간 예측으로 구성되며 각각은 다음에서 설명됨

① 궤적패턴 예측

- 이 단계는 예측 대상 항공기가 공역에 진입했을 때 어떠한 궤적패턴을 따라 비행할 지를 예측하는 단계로써, 1장 2-2절에 설명된 궤적패턴 예측방법들을 통해 수행될 수 있음
- 본 모형에서는 1장 2-2절에 설명된 예측방법 중 연속된 항공기의 궤적패턴 유사성을 이용한 궤적패턴 예측모형을 사용하였음

② 궤적패턴별 비행시간 예측

- 이 단계는 예측 대상 항공기가 공역에 진입했을 때 어떠한 궤적패턴을 따라 비행할 지를 예측하는 단계로써, 이는 각 궤적패턴별로 추정된 식 (12)의 비행시간 예측모형을 통해 수행됨

③ 공항 도착시간 예측

- 궤적패턴 예측 및 궤적패턴별 비행시간 예측이 수행되면, 공항 도착시간은 다음과 같이 예측됨

$$ETA(Z) = T_e + \sum_{i=1}^N T^i(Z) \times P(\theta_i) \quad (13)$$

- 여기서 $ETA(Z)$ 는 Z 가 관측되었을 때 예측된 공항 도착예정시간; T_e 는 진입시점의 시간; $T^i(Z)$ 는 궤적패턴별 비행시간 예측단계에서 예측된 i 번째 궤적패턴을 따라 비행했을 경우에 대한 비행시간; $P(\theta_i)$ 는 궤적패턴 예측단계에서 예측된 예측대상 항공기가 i 번째 궤적패턴을 따라 비행할 확률이고 N 은 총 궤적패턴의 개수임

나. 결과의 검증

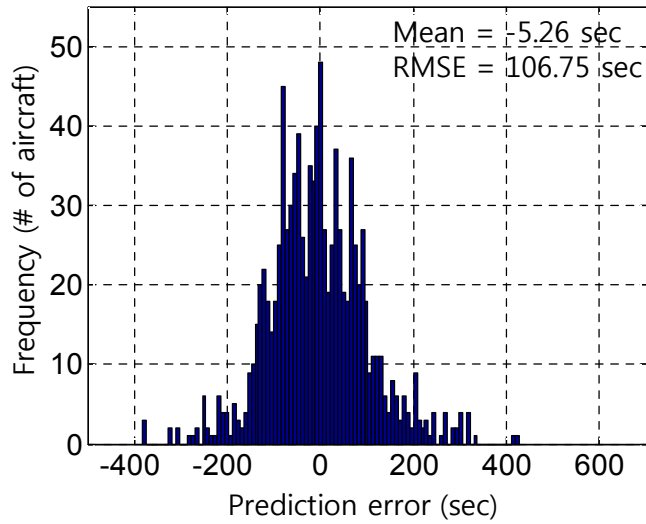
- 본 절에서는 공항 도착시간 예측모형에 대한 결과의 검증방법을 소개하고 앞서 설명한 예측모형 중 기계학습방법과 궤적패턴 예측모형을 사용한 공항 도착시간 예측모형에 대한 검증을 수행하였음

1) 결과의 검증방법

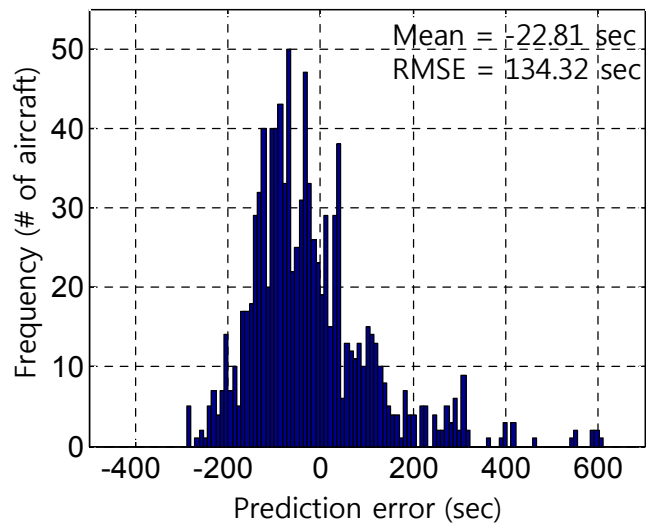
- 공항 도착시간 예측모형은 검증용 항공기에 대하여 이를 적용하여, 실제 도착시간과 예측된 도착시간을 비교해봄으로써 결과를 검증할 수 있음
- 또한 본 연구에서 개발한 예측모형의 성능을 비교검증하기 위하여 기존의 일반적인 예측모형의 예측 결과와 비교 검증을 수행하였음
- 검증을 위한 궤적 데이터가 충분치 않았으므로(약 1200대) 총 100대의 항공기를 무작위로 선별하여 예측하는 방법을 10회 독립적으로 수행한 후, 결과를 평균하여 검증을 수행하였음
 - 검증에 사용된 항공기는 학습단계에 포함되지 않음
- 검증의 지표는 RMSE(Root-Mean-Square Error)를 사용하였음
- 또한 이에 추가적으로, 검증용 항공기를 각 궤적패턴 별로 구분하여 두 모형을 통한 공항 도착시간 RMSE를 비교 분석함
 - 검증에 사용된 항공기는 궤적패턴 분류에 사용되지 않았으므로 이를 위해서는 검증에 사용되는 항공기의 전체 궤적을 통해 해당 항공기의 궤적이 어떤 궤적패턴에 속하는지 추정하는 단계가 필요하며, 이는 식 (8)을 통해 수행됨

2) 결과의 검증

- [그림 2-19]는 본 연구에서 개발한 예측모형을 통해 예측된 검증용 항공기의 공항 도착시간에 대한 예측 오차의 히스토그램이며, [그림 2-20]은 기존 일반적인 예측모형에 대한 예측 오차의 히스토그램임
- 그림에서 볼 수 있듯이, 기존의 예측모형에 비해서 본 연구에서 개발한 예측모형을 사용한 경우 공항 도착시간 예측에 대한 RMSE가 약 20.5% (134.3초에서 106.8초로) 감소하였으며, 이는 기존의 목표치인 15%를 상회함



[그림 2-19] 제안된 모형에 따른 예측오차



[그림 2-20] 비교 모형에 따른 예측오차

- [표 2-9]는 식 (8)을 통해 궤적패턴 별로 구분된 검증용 항공기의 RMSE를 비교 분석한 표임
- 표를 통해 볼 수 있듯이, 본 연구에서 개발한 예측모형은 특히 비행거리를 증가시킨 관제절차 패턴의 경우에 더욱 큰 효과가 나타남을 볼 수 있음

Pattern (#)	RMSE of proposed method (sec)	RMSE of comparative method (sec)	Reduced RMS (%)
ATC intervention (path extenstion)	124.9	179.7	30.5%
1	224.2	254.0	11.7%
2	147.5	171.5	14.0%
3	82.2	119.2	31.0%
4	123.1	217.2	43.3%
5	68.0	71.3	4.7%
Standard Procedure	107.0	131.3	18.5%
6	107.0	131.3	18.5%
ATC intervention (shortcut)	94.7	114.1	17.0%
7	129.3	149.5	13.5%
8	73.1	86.2	15.2%
9	98.4	119.0	17.3%
Total	106.8	134.3	20.5%

[표 2-9] 궤적패턴 별 예측오차 RMS 비교

3장 최종 연구성과 및 적용실적

1절 관제패턴 모델링을 통한 궤적예측기법 연구
(Trajectory Prediction via Modeling Vectored Area
Navigation Arrivals)

2절 관제패턴 모델링을 통한 도착예정시간 예측기법 연
구 (Aircraft Arrival Time Prediction via Modeling
Vectored Area Navigation Arrivals)

3절 궤적 패턴을 이용한 항공기 도착시간 예측 장치 및
방법 (Apparatus and Method for Aircraft Arrival
Time Prediction Using Trajectory Pattern)

4절 항공교통관제사의 항공기 합류순서결정에 대한 확률
적 예측모형 개발 (Probabilistic Model for Air Traffic
Controller Sequencing Strategy)

3장. 최종 연구성과 및 적용실적

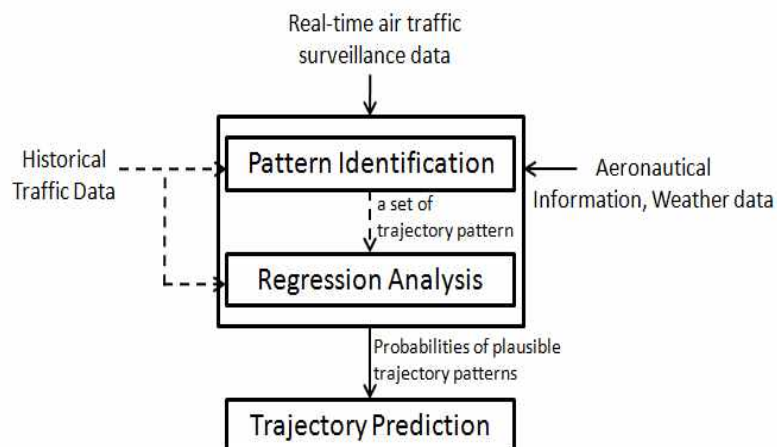
- 본 장에서는 본 연구개발을 통해 수행된 개별 연구에 대한 설명과 핵심요 소기술 및 주요 연구 성과가 설명됨

1절. 관제패턴 모델링을 통한 궤적예측기법 연구

(Trajectory Prediction via Modeling Vektored Area Navigation Arrivals)

1. 연구 설명

- 본 연구에서는 항공교통관제사가 항공기에게 어떠한 패턴의 궤적을 따르게 할지에 대한 확률적 정보를 기반으로 항공기의 궤적을 예측하는 방법론을 제안하였음
- 제안된 방법은 항공기 궤적의 주요 패턴을 식별하는 부분과 식별된 패턴들과 여러 교통 혼잡 요인 사이의 통계적 관계를 찾는 것에 기반을 둠
- 또한 제안된 방법은 실제 항공기 궤적 데이터를 통해 그 유용성을 검증해 보았음
- [그림 3-1]은 본 연구에서 제안한 방법의 전체적인 흐름도임



[그림 3-1] 궤적예측 흐름도

2. 핵심요소기술

- 본 연구에서 제안한 방법의 핵심요소기술은 크게 ① 궤적 패턴 식별방법, ② 궤적 패턴 예측방법, ③ 항공기 공항 도착시간 예측방법으로 구성되며, 각각은 다음에서 설명됨

1) 궤적 패턴 식별방법

- 궤적 패턴 식별방법으로써 Dynamic Time Warping(DTW) 알고리즘과 Ward's Minimum Variance 기준을 활용한 계층적 클러스터링 기법을 개발하였음

2) 궤적 패턴 예측방법

- 궤적 패턴 예측방법으로 다항 로지스틱 회귀모형과 항공 교통 혼잡요인을 사용한 방법을 개발하였음
- 예측에 사용되는 항공 교통 혼잡요인으로써 다음과 같은 요인들을 고려함.
 - 예측 시점에 접근관제구역 내에 존재하는 항공기 대수 (요인 1)
 - 예측 시점으로부터 5분 이내에 GAYON 픽스를 통해 진입한 항공기 대수 (요인 2)
 - 예측 시점으로부터 5분 이내에 OLMEN 픽스를 통해 진입한 항공기의 대수 (요인 3)
 - 예측 시점으로부터 5분 이내에 BULLS 픽스를 통해 진입한 항공기의 대수 (요인 4)
- ※ GAYON, OLMEN, BULLS는 본 연구의 실험에 사용된 공역의 특정 지점을 의미하며 이는 [그림 2-2]에 나타나 있음

3) 항공기 공항 도착시간 예측방법

- 항공기 공항 도착시간 예측방법으로써 각 궤적 패턴 별 평균 비행시간과 궤적 패턴 예측방법을 통해 계산된 각 궤적 패턴을 따를 확률의 가중평균을 통해 예측하는 방법을 개발하였음
- 본 연구에서 제안한 방법에 따른 항공기 공항 도착시간 예측방법은 다음과 같이 계산됨

$$ETA = T_e + \sum_{i=1}^N \overline{T_i} \times P_i \quad (14)$$

- 여기서 P_i 는 예측 대상 항공기가 i 번째 궤적 패턴을 따를 확률; $\overline{T_i}$ 는 i 번째 궤적패턴을 따라 진입 픽스로부터 활주로 시단까지 과거 항적자료의 평균 비행시간임

3. 주요 연구성과

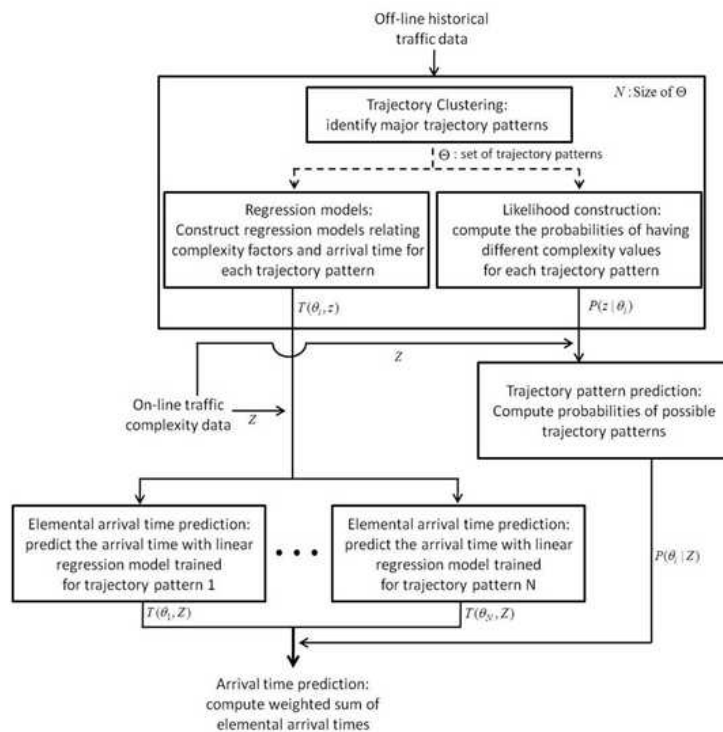
- 본 연구는 다음과 같이 국제 및 국내 학술대회에서 두 차례 발표되었음
 - Hong, S., and Lee, K., "Trajectory Prediction via Modeling Vectored Area Navigation Arrivals," AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, AIAA 2013-4237, Los Angeles, CA, 2013.
 - 홍성권, 이금진, "관제패턴 모델링을 통한 궤적예측기법 연구," 한국항공우주학회 추계학술대회, 2013.

2절. 관제패턴 모델링을 통한 도착예정시간 예측기법 연구

(Aircraft Arrival Time Prediction via Modeling Vectored Area Navigation Arrivals)

1. 연구 설명

- 본 연구에서는 항공교통관제사가 항공기에게 어떠한 패턴의 궤적을 따르게 할지에 대한 확률적 정보를 기반으로 항공기의 도착시간을 예측하는 방법론을 제안하였음
- 제안된 방법은 항공기 궤적의 주요 패턴을 식별하는 부분과 식별된 패턴들과 여러 교통 혼잡 요인 사이의 통계적 관계를 찾는 것에 기반을 둠
- 또한 제안된 방법은 실제 항공기 궤적 데이터를 통해 그 유용성을 검증해보았음
- [그림 3-2]는 본 연구에서 제안한 방법의 전체적인 흐름도임



[그림 3-2] 도착시간 예측 흐름도

2. 핵심요소기술

- 본 연구에서 제안한 방법의 핵심요소기술은 크게 ① 궤적 패턴 식별방법, ② 궤적 패턴 예측방법, ③ 궤적패턴 별 비행시간 예측방법, ④ 항공기 공항 도착시간 예측방법으로 구성되며, 각각은 다음에서 설명됨

1) 궤적 패턴 식별방법

- 궤적 패턴 식별방법으로써 Dynamic Time Warping(DTW) 알고리즘과 Ward's Minimum Variance 기준을 활용한 계층적 클러스터링 기법을 개발하였음

2) 궤적패턴 예측방법

- 궤적 패턴 예측방법으로 Bayesian 분류기법과 항공 교통 혼잡요인을 사용한 방법을 개발하였음
- 예측에 사용되는 항공 교통 혼잡요인으로써 다음과 같은 요인들을 고려함
 - 예측 시점에 접근관제구역 내에 존재하는 항공기 대수 (요인 1)
 - 예측 시점으로부터 5분 이내에 GAYON 픽스를 통해 진입한 항공기 대수 (요인 2)
 - 예측 시점으로부터 5분 이내에 OLMEN 픽스를 통해 진입한 항공기의 대수 (요인 3)
 - 예측 시점으로부터 5분 이내에 BULLS 픽스를 통해 진입한 항공기의 대수 (요인 4)
- ※ GAYON, OLMEN, BULLS는 본 연구의 실험에 사용된 공역의 특정 지점을 의미하며 이는 [그림 2-2]에 나타나 있음

3) 궤적패턴 별 비행시간 예측방법

- 궤적패턴 별 비행시간 예측방법으로써 선형회귀모형과 여러 가지 항공 교통 혼잡 요인들을 통해 진입시점부터 공항까지의 비행시간을 예측하는 방법을 개발하였음
- 예측에 사용되는 항공 교통 혼잡 요인으로써 다음과 같은 요인들을 고려함
 - 진입속도
 - 진입고도
 - 진입 시점에 공역 내에 존재하는 항공기 대수

4) 항공기 공항 도착시간 예측방법

- 항공기 공항 도착시간 예측방법으로써 궤적패턴 별 비행시간 예측방법을 통해 예측된 각 궤적 패턴 별 비행시간과 궤적 패턴 예측방법을 통해 계산된 각 궤적 패턴을 따를 확률의 가중평균을 통해 도착시간을 예측하는 방법을 개발하였음
- 본 연구에서 제안한 방법에 따른 항공기 공항 도착시간 예측방법은 다음과 같이 계산됨

$$ETA(Z) = T_{entry} + \sum_{i=1}^N T(\theta_i, Z) \times P(\theta_i|Z) \quad (15)$$

- 여기서 $ETA(Z)$ 는 관측된 교통 혼잡도가 Z 일 때 예측된 도착예정시간, $P(\theta_i|Z)$ 는 궤적패턴 예측방법을 통해 계산된 항공기가 i 번째 궤적 패턴을 따를 확률이며, $T(\theta_i, Z)$ 는 궤적패턴 별 비행시간 예측방법을 통해 계산된 목적지까지의 항공기의 비행시간임

3. 주요 연구성과

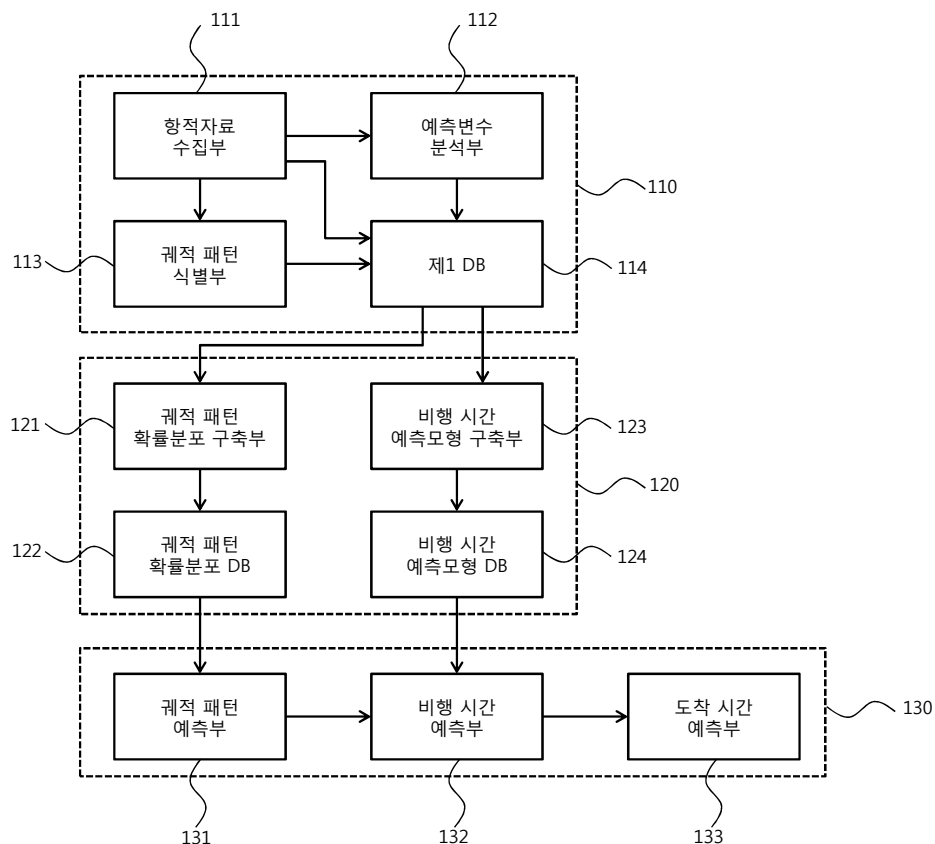
- 본 연구는 다음과 같이 국제 학술대회에서 발표되었음
 - Hong, S., and Lee, K., "Aircraft Arrival Time Prediction via Modeling Vectored Area Navigation Arrivals," The 2013 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Takamatsu, Japan, 2013.
- 또한 본 연구는 다음과 같이 국내 등재지에 게재되었음
 - 홍성권, 이금진, "관제패턴 모델링을 통한 도착예정시간 예측기법 연구," 한국항공운항학회지, 제22권, 2호, 2014, pp. 1-8.

3절. 궤적 패턴을 이용한 항공기 도착시간 예측 장치 및 방법

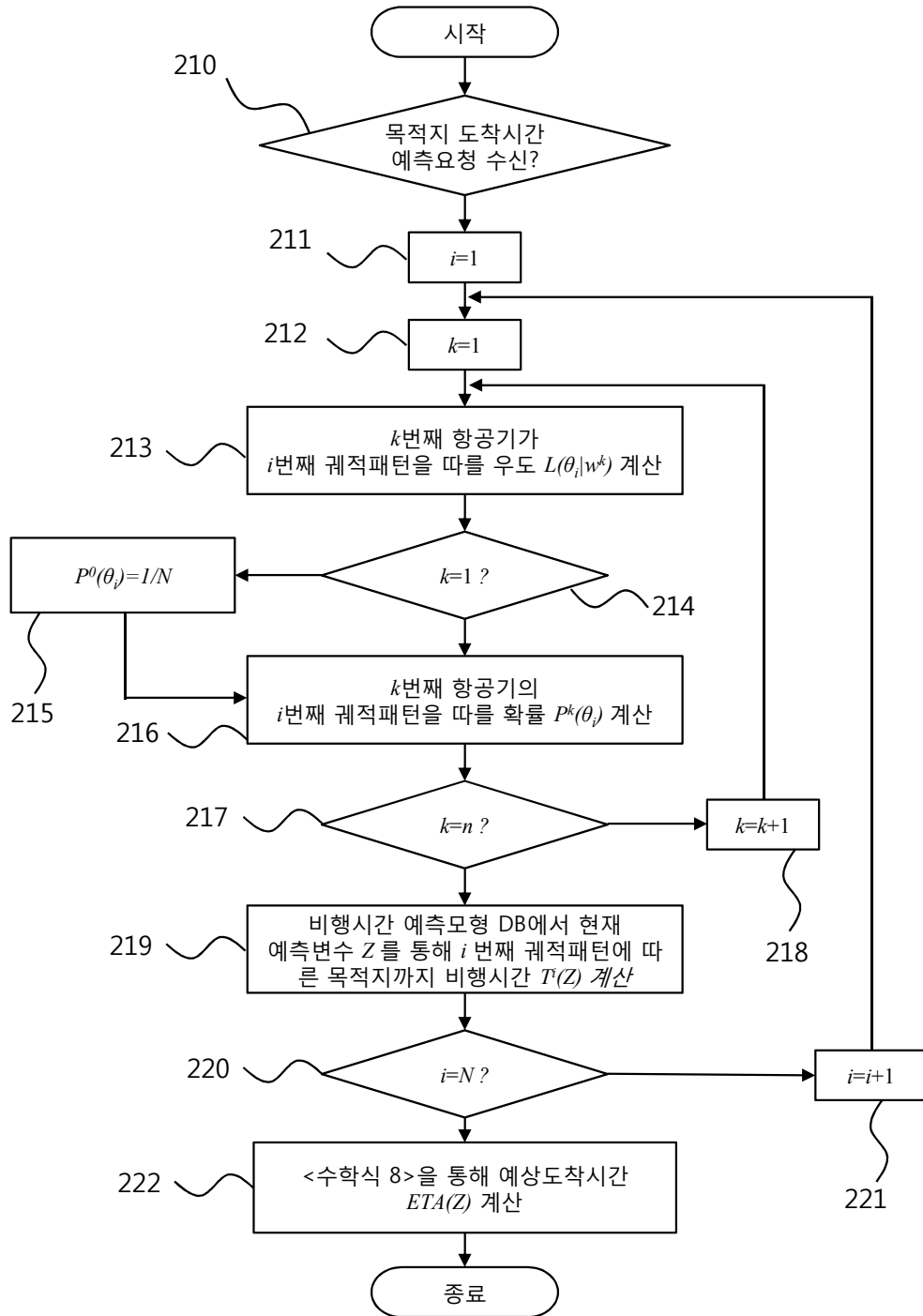
(Apparatus and method for aircraft arrival time prediction using trajectory pattern)

1. 연구 설명

- 본 연구에서는 과거 항적자료를 통하여 식별된 궤적 패턴과 연속된 항공기의 궤적 패턴 유사성을 이용하여 항공기 목적지 도착시간을 예측하는 장치 및 방법을 개발하였음
- [그림 3-3]은 본 연구에서 제안한 예측 장치를 나타내며 [그림 3-4]는 본 연구에서 제안한 예측 방법의 흐름도임



[그림 3-3] 도착시간 예측장치 도면



[그림 3-4] 도착시간 예측방법 순서도

2. 핵심요소기술

- 본 연구에서 제안한 [그림 3-3]에 나타나있는 예측 장치의 핵심요소는 크게 ① 데이터 수집 및 가공수단(110), ② 예측모형 구축수단(120), ③ 도착시간 예측수단(130)으로 구성되며, 각각은 다음에서 설명됨

1) 데이터 수집 및 가공수단

- 데이터 수집 및 가공수단(110)은 해당 공역의 과거 항적자료를 수집하고, 수집된 과거 항적자료로부터 비행시간 예측변수를 분석하고 주요 궤적패턴을 식별하는 역할을 함
- 이러한 데이터 수집 및 가공수단(110)은 해당 공역의 과거 항적자료를 수집하는 항적자료 수집부(111); 항적자료 수집부(111)에서 수집된 과거항적자료를 통해 예측변수를 분석하는 예측변수 분석부(112); 항적자료 수집부(111)에서 수집된 과거 항적자료를 통해 항공기의 궤적 패턴을 식별하는 궤적패턴 식별부(113); 항적자료 수집부(111)에서 수집된 항적 자료, 예측변수 분석부(112)에서 분석한 예측변수 및 궤적패턴 식별부(113)에서 식별한 궤적 패턴을 도착시간 예측을 위한 정보로 저장하는 정보 데이터베이스(DB)(114)를 포함함
- 항적자료 수집부(111)는 해당 공역의 레이더 항적자료를 항공기 별로 수집해서 예측변수 분석부(112) 및 궤적 패턴 식별부(113)에 제공하고, 정보 데이터베이스(114)에 저장함
- 예측변수 분석부(112)는 수집된 과거 항적자료를 이용하여 항공기 비행시간 예측변수를 분석하고, 그 결과 정보를 정보 데이터베이스(114)에 저장함. 여기서 예측변수는 항공기의 진입속도, 항공기의 진입 고도, 해당 공역 내 항공기 대수 등이 될 수 있음
- 궤적패턴 식별부(113)는 수집된 과거 항적자료를 이용하여 주요 궤적 패턴을 식별하여 정보 데이터베이스(114)에 저장함. 궤적패턴 식별부(113)는 각 궤적 쌍 간의 거리를 계산한 후, 기설정된 개수의 그룹으로 분류될 때까지 상대적 거리가 가까운 궤적을 계층적으로 그룹화하는 방법으로 궤적패턴을 식별할 수 있음
- 정보 데이터베이스(114)는 항적자료 수집부(111)에서 수집된 항적자료와 예측변수 분석부(112)에서 분석된 예측변수 및 궤적패턴 식별부(112)에서 식별된 궤적 패턴을 저장함

2) 예측모형 구축수단

- 예측모형 구축수단(120)은 데이터 수집 및 가공수단(110)에서 분석된 예측변수, 식별된 궤적 패턴 및 수집된 데이터를 이용해서 궤적 패턴 확률분포 및 비행시간 예측모형을 구축하는 역할을 함
- 이러한 예측모형 구축수단(120)은 데이터 수집 및 가공수단(110)에서 획득한 식별된 궤적 패턴을 통해 궤적 패턴 확률분포를 구축하는 궤적패턴 확률분포 구축부(121); 궤적패턴 확률분포 구축부(121)에서 획득한 궤적패턴 확률분포를 데이터베이스화하는 궤적패턴 확률분포 데이터베이스(122); 데이터 수집 및 가공수단(110)에서 수집된 과거 항적자료와 분석된 예측변수를 통해 식별된 궤적 패턴별로 비행시간 예측 회귀모형을 구축하는 비행시간 예측모형 구축부(123); 비행시간 예측모형 구축부(123)에서 구축한 예측 회귀모형을 저장하는 비행시간 예측모형 데이터베이스(124)를 포함함
- 예측모형 구축수단(120)의 궤적패턴 확률분포 구축부(121)는 정보 데이터베이스(114)를 이용해서 항공기가 특정 위치(위도 및 경도)에 있을 때 항공기가 각 궤적패턴을 따를 우도(Likelihood)를 계산할 수 있는 확률분포를 구축하고, 그 구축된 궤적 패턴별 확률분포를 궤적패턴 확률분포 데이터베이스(123)에 저장함
- 궤적패턴 확률분포 구축부(121)에서 궤적 패턴별 확률분포를 구축하는 방법으로, 비모수 확률분포 추정방법의 하나인 kernel density estimation 방법을 사용할 수 있음
- 궤적패턴 확률분포 데이터베이스(122)는 항공기의 특정 위치가 주어졌을 때, 항공기가 각 궤적 패턴을 따를 우도(Likelihood)를 계산할 수 있는 확률분포를 저장함. 궤적패턴 확률분포 구축부(121)에서 궤적패턴 확률분포를 구축하는 방법으로 kernel density estimation 방법을 사용한 경우, 궤적패턴 확률분포 데이터베이스(122)에 궤적패턴 확률분포 구축부(121)에서 구축한 궤적 패턴별 확률분포를 저장하는 방법으로 항공기가 위치할 수 있는 한정된 영역의 유한개의 위치에 대한 확률밀도 값을 저장하는 방법을 사용할 수 있음
- 비행시간 예측모형 구축부(123)는 정보 데이터베이스(114)를 이용해서 항공기가 각 궤적 패턴을 따라 목적지까지 비행하는 데 걸리는 시간을 예측하는 회귀모형을 각 패턴별로 구축하고, 그 구축된 궤적 패턴별 비행시간 예측모형의 계수들을 비행시간 예측모형 데이터베이스(124)에 저장함

- 여기서 비행시간 예측모형 구축부(123)에서 비행시간을 예측하는 회귀모형으로는 선형 회귀모형을 사용할 수 있음
- 비행시간 예측모형 데이터베이스(124)는 예측변수가 관측되었을 때 항공기가 각 궤적 패턴을 따라 목적지까지 비행하는 데 걸리는 시간을 예측하는 회귀모형의 계수를 저장함. 즉, 비행시간 예측모형 데이터베이스(124)는 각 궤적 패턴별 회귀모형의 계수를 저장하는 데이터베이스임

3) 항공기 공항 도착시간 예측방법

- 도착시간 예측수단(130)은 예측모형 구축수단(120)에서 구축된 궤적 패턴 확률분포 및 비행시간 예측모형을 이용하여 각 궤적 패턴을 따를 확률과 각 궤적 패턴별 비행시간을 예측하고 항공기의 목적지 도착시간을 예측하는 역할을 함
- 도착시간 예측수단(130)은 예측모형 구축수단(120)에서 구축된 궤적 패턴 확률분포와 앞서가는 항공기를 통해 각 궤적 패턴을 따를 확률을 계산하는 궤적 패턴 예측부(131); 실시간 예측변수 정보를 통해 예측모형 구축수단(120)에서 구축한 비행시간 예측 회귀모형으로부터 각 궤적 패턴별 비행시간을 예측하는 비행시간 예측부(132); 비행시간 예측부(132)에서 예측된 궤적패턴별 비행시간과 궤적패턴 예측부(131)에서 예측된 궤적 패턴별 확률 및 실시간 항공기의 상태정보를 통해 목적지 도착시간을 예측하는 도착시간 예측부(133)를 포함함
- 도착시간 예측수단(130) 내의 궤적패턴 예측부(131)는 궤적 패턴 확률분포 데이터베이스(122)와 앞서가는 항공기의 위치정보를 통해서 예측대상 항공기가 i 번째 궤적 패턴을 비행할 확률 $P(\theta_i)$ 를 모든 궤적 패턴에 대하여 계산함. 궤적패턴 예측부(131)에서 $P(\theta_i)$ 는 다음의 방법을 통해 계산함
 - n 대의 연속된 항공기가 있을 때, 첫 번째, 즉 가장 선두에 있는 항공기가 i 번째 궤적 패턴을 따를 확률 $P^1(\theta_i)$ 는 다음 식을 통해 계산됨

$$P^1(\theta_i) = \frac{L(\theta_i|w^1)}{\sum_{j=1}^N L(\theta_j|w^1)P^0(\theta_j)} P^0(\theta_i) \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, N \quad (16)$$

- 여기서, w^1 은 첫 번째 항공기의 현재 위치이고, $L(\theta_i|w^1)$ 는 궤적패턴 확률 분포 데이터베이스(122)를 통해 계산된 첫 번째 항공기가 i 번째 궤적 패턴

을 따를 우도(Likelihood)이고, N 은 식별된 궤적 패턴의 총 개수이고, $P^0(\theta_i)$ 는 첫 번째 항공기가 i 번째 궤적 패턴을 따를 사전 확률임. 첫 번째 항공기의 경우 사전 확률 $P^0(\theta_i)$ 를 균일분포, 즉 $1/N$ 로 계산함

- 그리고 k 번째 항공기가 i 번째 궤적 패턴을 따를 확률 $P^k(\theta_i)$ 는 다음 식을 통해 계산됨

$$P^k(\theta_i) = \frac{L(\theta_i|w^k)}{\sum_{j=1}^N L(\theta_j|w^k)} P^{k-1}(\theta_i) \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

- 여기서, w^k 는 k 번째 항공기의 현재 위치이고, $L(\theta_i|w^k)$ 는 궤적 패턴 확률분포 데이터베이스(122)를 통해 계산된 k 번째 항공기가 i 번째 궤적 패턴을 따를 우도(Likelihood)이고, N 은 식별된 궤적 패턴의 총 개수이고, $P^{k-1}(\theta_i)$ 는 k 번째 항공기가 i 번째 궤적 패턴을 따를 사전 확률로서, 바로 앞서 비행하는 항공기가 i 번째 궤적 패턴을 따를 확률로 계산됨
- 마지막, 즉 n 번째 항공기가 i 번째 궤적 패턴을 따를 확률 $P^n(\theta_i)$ 는 다음의 식을 통해 계산됨

$$P^n(\theta_i) = \frac{L(\theta_i|w^n)}{\sum_{j=1}^N L(\theta_j|w^n)} P^{n-1}(\theta_i) \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, N \quad (18)$$

- 여기서, w^n 은 n 번째 항공기의 현재 위치이고, $L(\theta_i|w^n)$ 는 궤적 패턴 확률분포 데이터베이스(122)를 통해 계산된 예측대상 항공기가 i 번째 궤적 패턴을 따를 우도(Likelihood)이고, N 은 식별된 궤적 패턴의 총 개수이고, $P^{n-1}(\theta_i)$ 은 예측대상 항공기가 i 번째 궤적 패턴을 따를 사전 확률로서, 앞서 비행하는 항공기 중 $n-1$ 번째 항공기, 즉 바로 앞서 비행하는 항공기가 i 번째 궤적 패턴을 따를 확률로 계산됨
- 다만, n 번째 항공기의 비행 궤적이 아직 존재하지 않는 경우, 다시 말해 w^n 이 존재하지 않는 경우, $L(\theta_i|w^n)$ 을 계산할 수 없으므로, 이 경우에는 n 번째 항공기가 i 번째 궤적 패턴을 따를 확률 $P^n(\theta_i)$ 는 다음의 식을 통해 계산됨

$$P^n(\theta_i) = P^{n-1}(\theta_i) \text{ for } i = 1, 2, \dots, N \quad (19)$$

- 비행시간 예측부(132)는 현재 예측변수 Z 가 관측되면, 비행시간 예측모형 데이터베이스(124)로부터 예측변수 Z 하에서 예측대상 항공기가 i 번째 궤적 패턴을 따라 목적지까지 비행하는 데 걸리는 시간 $T^i(Z)$ 를 모든 궤적 패턴에 대하여 계산함
- 도착시간 예측부(133)는 궤적 패턴 예측부(131)에서 계산된 궤적 패턴별 확률과 비행시간 예측부(132)에서 계산된 궤적 패턴별 비행시간을 이용하여 다음과 같은 식을 통해 목적지 도착시간을 예측함

$$ETA(Z) = T_{current} + \sum_{i=1}^N T^i(Z) \times P(\theta_i) \quad (20)$$

- 여기서 $ETA(Z)$ 는 예측변수 Z 가 관측되었을 때 예측된 항공기의 목적지 도착시간이고, $T_{current}$ 는 현재의 시간이고, $P(\theta_i)$ 는 궤적 패턴 예측부(131)에서 계산된 i 번째 궤적 패턴을 따라 비행할 확률이고, $T^i(Z)$ 는 비행시간 예측부(132)에서 계산된 i 번째 궤적 패턴을 따라 목적지까지 비행하는 데 걸리는 시간임

3. 주요 연구성과

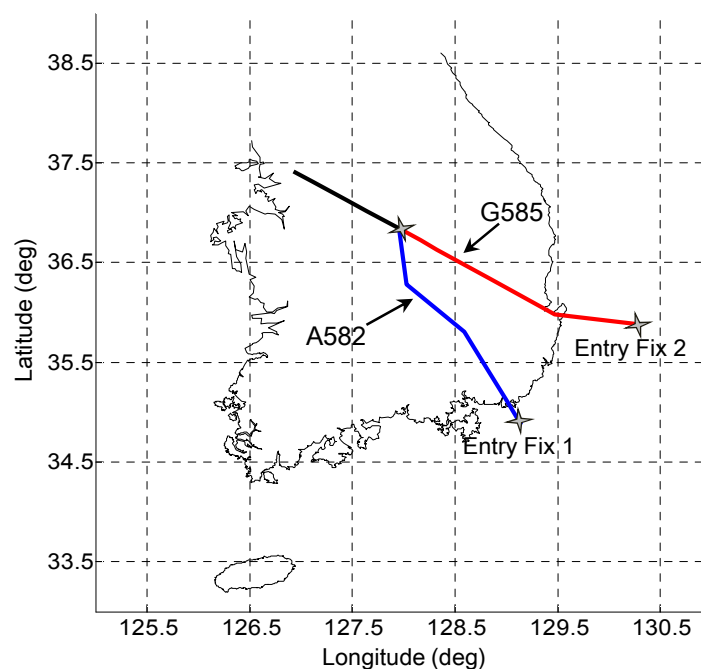
- 본 연구는 다음과 같이 국내 특허로 출원되었음
 - 궤적 패턴을 이용한 항공기 도착시간 예측 장치 및 방법 (출원번호 : 10-2014-0128367)
- 또한 본 연구는 다음과 같이 국제 학술지(SCIE)에 제출되어 심사 중에 있음
 - Hong, S., and Lee, K., "Trajectory Prediction for Vectored Area Navigation Arrivals," Journal of Aerospace Information Systems. (Submitted)

4절. 항공교통관제사의 항공기 합류순서결정에 대한 확률적

예측모형 개발 (Probabilistic Model for Air Traffic Controller Sequencing Strategy)

1. 연구 설명

- 본 연구에서는 합류지점으로 접근하는 두 항공기에 대한 항공교통관제사의 순서결정을 예측하는 모형을 개발함
- 제안된 방법은 항공교통관제사의 순서결정과 여러 교통 혼잡 요인 사이의 통계적 관계를 찾는 것에 기반을 둠
- 또한 제안된 방법은 [그림 3-5]에 나타나있는 공역의 실제 항공기 궤적 데이터를 통해 그 유용성을 검증해 보았음



[그림 3-5] 순서결정 예측모형 적용 대상 공역

2. 핵심요소기술

- 본 연구에서 제안한 방법의 핵심요소기술은 항공기의 순서결정을 확률적으로 예측하는 방법임
 - 항공교통관제사의 순서결정 예측방법으로 다항 로지스틱 회귀모형과 항공교통 혼잡요인을 사용한 방법을 개발하였음
 - 예측에 사용되는 항공 교통 혼잡요인으로써 다음과 같은 요인들을 고려함
 - 접근하는 두 항공기의 Entry Fix에서의 속도 차이
 - 합류하는 두 항공기의 Entry Fix 진입시간 차이
- ※ Entry Fix는 항공기가 공역에 진입하는 지점으로써 [그림 3-5]에 나타나 있음

3. 주요 연구성과

- 본 연구는 다음과 같이 국내 등재지에 게재되었음
 - 김민지, 홍성권, 이금진, “항공교통관제사의 항공기 합류순서결정에 대한 확률적 예측모형 개발,” 한국항공운항학회지, 제22권, 3호, 2014, pp. 8-14.

4장 연구개발 효과

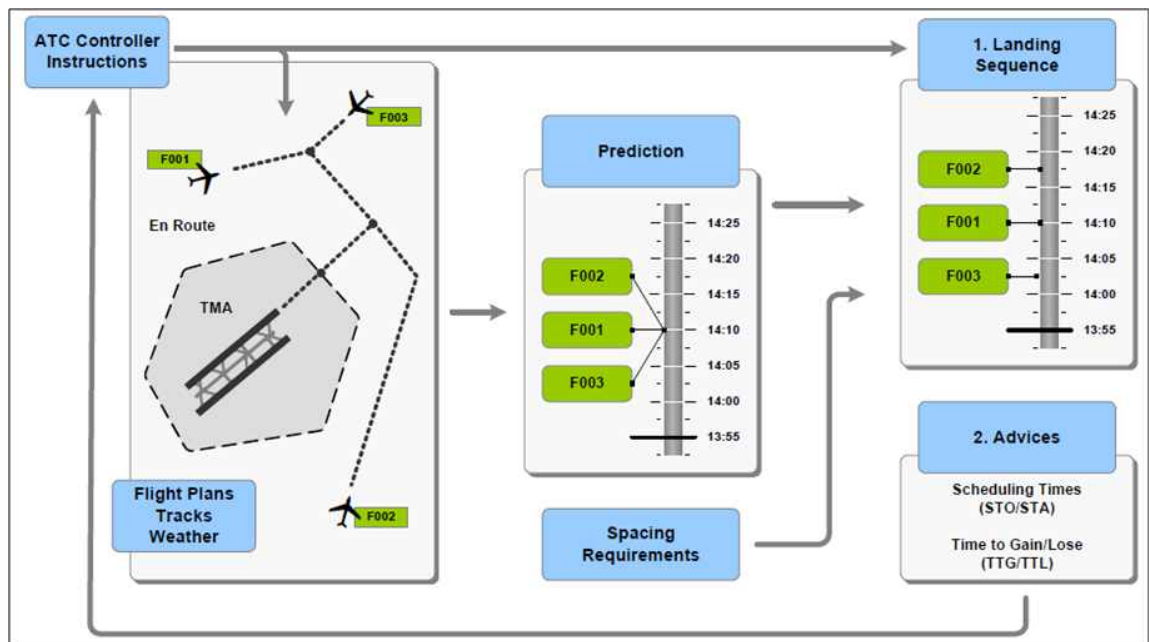
1절 연구개발 성과의 효과분석

4장. 연구개발 효과

1절. 연구개발 성과의 효과분석

1. 기술적 효과

- 본 연구과제를 통해 개발된 궤적예측 기술은 ATM 분야 타 연구과제에 기술적으로 응용되어 적용할 수 있음
- 예를 들어, 현재 국토교통부가 제주 국제공항을 대상으로 개발 중인 도착관리시스템에 본 연구를 통해 개발된 궤적예측기법을 적용할 수 있음



[그림 4-1] 도착관리기법 운영개념 및 궤적예측 필요성 [73]

- ATM 분야, 특히 항공기 궤적예측분야의 연구활성화에 본 연구과제가 기여할 수 있을 것이며 현재 국토교통부를 중심으로 추진 중인 4차원 궤적기반 관리에 본 연구결과를 활용할 수 있음
- 공항 도착시간을 정확히 예측하는 기술은, 향후 인천국제공항의 활주로 확장 등과 맞물려 보다 효과적인 활주로 배정 및 운영기술 개발과 연계 활용될 수 있음
- 항공교통분야 이외의 타 교통분야에 본 연구결과 및 아이디어가 활용될 수 있음

2. 경제적 효과

- 본 연구개발을 통해 ATM 분야의 연구 활성화에 기여할 수 있으며, 이는 관련 산업의 육성 및 고용창출 효과로 이어질 수 있음
- 선진 ATM 기술의 축적, 관련 전문 인력의 양성을 통하여 항공교통분야 기술도약의 기회를 제공하고 해외시장 진출기회를 확대함
- 공항 도착시간을 정확히 예측하는 기술은 현재 연구개발이 진행 중이거나 진행예정인 공항 지상이동유도 기술 및 출발관리 기술과 연계될 수 있으며,
- 항공기 출발시간의 정확한 예측을 통한 활주로 대기시간의 감소가 가능하며 이를 통한 탄소배출량 감소 및 연료소모량 감소 효과가 클 것으로 예상됨

3. 정책적 효과

- ICAO는 ASBU를 통해 차세대 ATM 시스템 도입을 우리나라를 비롯해 각 체약국의 적극적으로 권고하고 있으며, 본 연구개발을 통한 ATM 연구인프라 개선 및 전문인력 양성은 이와 같은 국제적 흐름에 부합함
- 우리나라는 효율적인 항공교통시스템 발전을 위해 항공정책기본계획, 공항개발 중장기 종합계획, 중장기 항공안전종합계획 등을 수립하고 추진하고 있으며, 본 연구과제를 통해 ATM 분야 기술개발 중요성을 알리고 관련된 국가정책의 결정에 도움을 줄 수 있음
- 기존의 항행안전시설에만 치우친 국내 연구개발 방향을 개선하고, ATM분야의 연구투자를 활성화 시키는 데 도움을 줌
- 본 연구개발 결과를 국외 학술대회를 통해 발표함으로써, ATM 분야 국내 기술발전을 외국에 알리고 이를 통해 항공교통분야 국가 위상 강화에 도움을 줌

5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

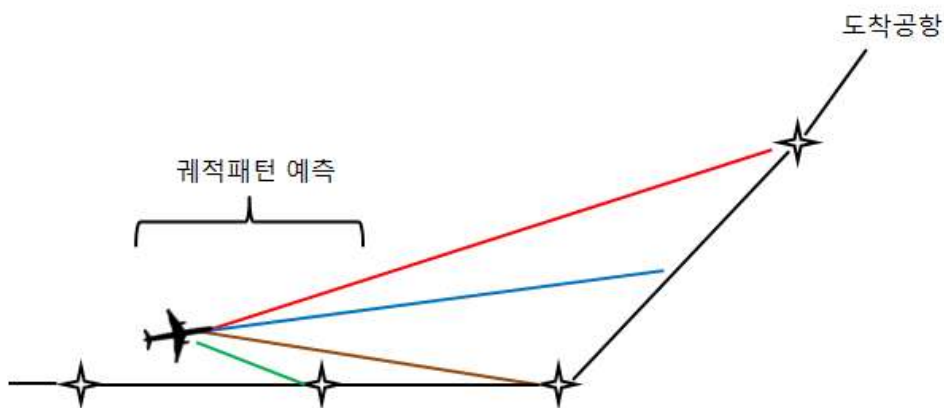
1절 연구성과 향후 활용방안

2절 추가연구 필요성

5장. 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

1절. 연구성과 향후 활용방안

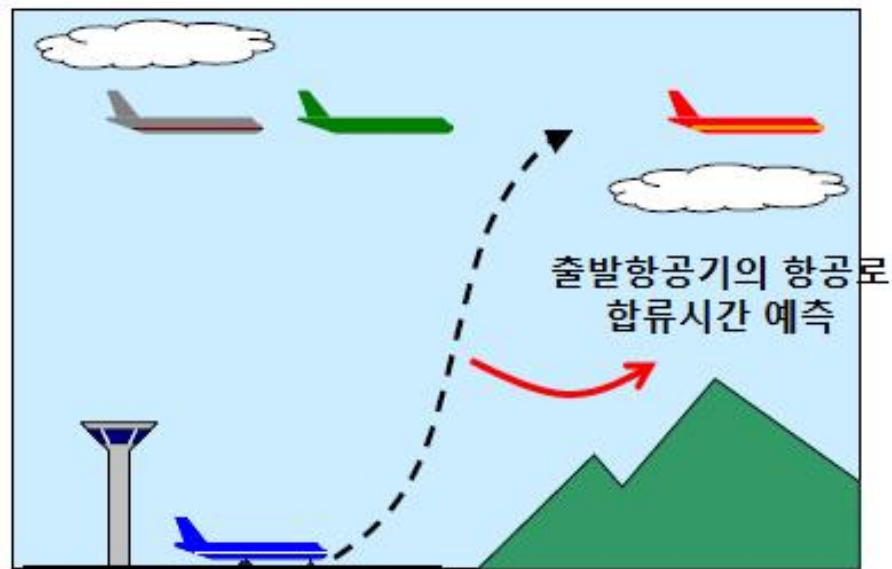
- 본 연구는 관제사에 의한 항공기의 경로변경이 빈번하게 발생하는 공역에서 항공기의 도착시간을 예측하는 새로운 기법을 개발함
- 개발된 기법을 도착항공기의 활주로 도착시간에 대한 예측에 적용 시, 기존 방법에 비해 20%이상 높은 도착시간 예측 정확도를 보임
- 따라서 본 연구결과를 공항 활주로 및 지상이동 관리에 활용할 수 있음
 - [그림 2-19] 및 [그림 2-20]에 나타난 바와 같이 제안된 방법을 통해 항공기의 활주로 도착 시간에 대한 오차 최대치가 기존의 609.7초에서 426.9초로 감소하였으며, 이는 활주로에서의 도착 항공기간 분리기준이 2분임을 감안할 때, 매우 큰 실용적 효과를 개발된 기법을 통해 얻을 수 있음을 의미함
- 또한 궤적패턴을 도착시간 예측에 활용하는 기법은 도착관리기법에 활용될 수 있음
 - [그림 5-1]에 나타난 바와 같이 정해진 항로를 벗어나 비행하는 항공기가 목적 공항에 도착하는 시간을 보다 정확하게 예측할 수 있음



[그림 5-1] 개발된 기법의 도착관리기법에의 활용방안

- 개발된 기법은 도착항공기 뿐만이 아니라, 출발항공기의 궤적예측에도 적용할 수 있으며,
- 따라서 본 연구결과를 향후 진행예정인 출발 및 도착 통합관리 연구에 활용할 수 있음

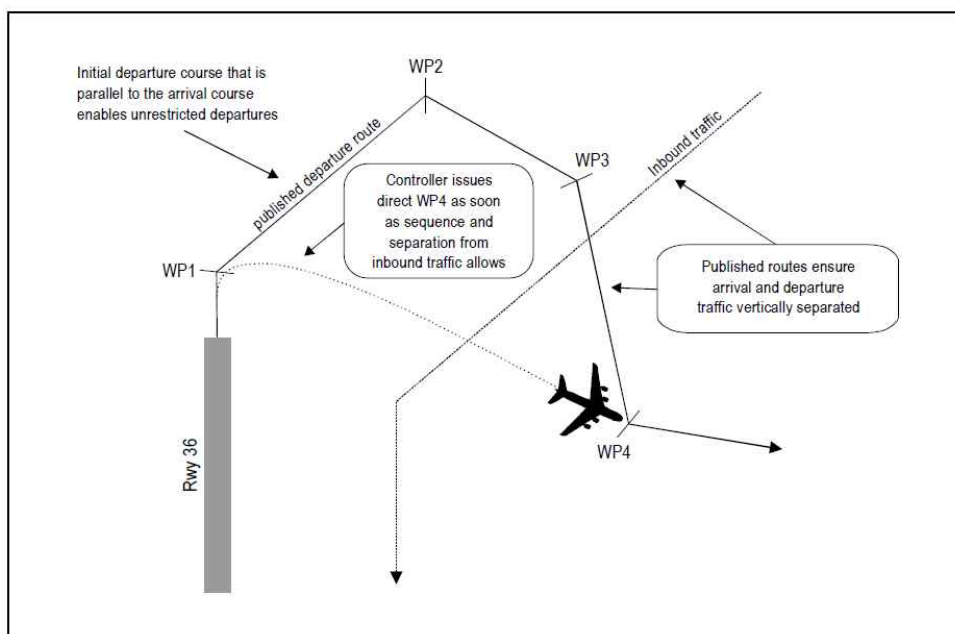
- [그림 5-2]에 나타난 바와 같이, 효과적인 출발관리를 위해서는 출발항공기가 항공로에 합류하는 시간을 정확히 예측하여야 함
- 표준출발절차(SID)가 존재하나 많은 항공기가 관제사로부터 direct-to 지시를 받아서 비행하며, 따라서 이와 같은 항공기의 항공로 합류시간 예측에 본 연구개발 결과를 활용할 수 있음
- 특히 [그림 5-3]에 나타난 바와 같이 출발항공기의 경로는 도착항공기의 경로와 밀접하게 연관되어 있으며, 따라서 도착항공기의 궤적을 보다 정확하게 예측할 수 있는 본 연구개발 결과를 활용할 수 있음



[그림 5-2] 개발된 기법의 출발관리기법에의 활용방안 [79]

2절. 추가연구 필요성

- 본 연구개발 결과는 항공기 궤적예측에 관한 새로운 프레임을 제시한 데 있으며, 제안된 궤적예측 프레임은 궤적패턴 분류, 패턴예측, 도착시간 예측 등 다양한 부분들로 구성되어 있음
- 각 부분들의 성능을 최대화함으로서 제안된 방법의 궤적예측 성능을 극대화할 필요가 있으며 이를 통해 연구결과의 활용방안을 높일 수 있음
 - 추가연구가 필요한 주된 분야로서, 궤적패턴 분류기법에 보다 다양한 클러스터링 알고리즘을 적용할 필요가 있으며 특히 알고리즘 내 파라미터들에 대한 최적화가 필요함
 - 또한 패턴예측 시 필요한 항공기 궤적에 대한 우도함수를 구성하는 기법에 대한 연구가 필요하며, 역시 해당 알고리즘 내 파라미터들에 대한 최적화가 필요함
 - 그밖에 패턴별 도착시간 예측 시 적용한 회기 모형을 개량할 필요가 있으며, 바람 등 보다 다양한 독립변수에 대한 고려가 필요함
- 본 연구개발 결과의 활용방안에 대한 추가적인 연구도 필요함
- 도착관리기법 뿐만이 아니라 출발관리기법, 출도착 통합관리기법 등 다양한 활용분야가 있을 것으로 생각되며 이에 대한 추가적인 연구가 필요함
- 또한 궤적패턴 분류 기법은 절차 설계 및 분석 등에 활용될 수 있음



[그림 5-3] 출발항공기의 direct-to 지시에 의한 경로변경 [78]

참고문헌

참고문헌

1. 국내 문헌

- [1] 국토교통부, 「공역관리 규정」, 국토교통부고시 제2013-117호, 2013a.
- [2] 국토교통부, 「항공교통흐름관리 업무 운영기준」, 국토교통부고시 제2013-98호, 2013b.
- [3] 국토통계누리, <http://stat.molit.go.kr>
- [4] 국토해양부 항공교통센터, 「항공교통흐름관리 세부운영 지침」, 센터훈령 제123호, 2010.
- [5] 국토해양부 항공정책실, 『신 공역체계 마스터플랜 수립용역』 최종보고서, 국토교통부, 2009.
- [6] 국토해양부, 『제2항공교통센터 구축 타당성 조사 용역』 최종보고서, 2011.
- [7] 김준혁 · 안미진 · 김연명, 『항공교통흐름관리 기반의 효율적 공역활용 방안』, 한국교통연구원, 2013.
- [8] 항공안전본부 항공교통센터, 「인천ACC 표준운영절차」, 항공교통센터훈령 제82호, 2008.

2. 국외 문헌

- [9] Erzberger, H., and Nedell, W., “Design of Automated System for Management of Arrival Traffic,” NASA TM-102201, 1989.
- [10] Saraf, A. P., and Slater, G. L., “Optimal Dynamic Scheduling of Aircraft Arrivals at Congested Airport,” AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 31, No. 1, 2008, pp. 53-65.
- [11] Gilbo, E. P., “Optimizing Airport Capacity Utilization in Air Traffic Flow Management Subject to Constraints at Arrival and Departure Fixes,” IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 5, No. 5, 1997, pp. 490-503.
- [12] Hu, X. B., and Chen, W. H., “Receding Horizon Control for Aircraft Arrival Sequencing and Scheduling,” IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 6, No. 2, 2005, pp. 189-197.

- [13] Delgado, L., and Prats, X., "En Route Speed Reduction Concept for Absorbing Air Traffic Flow Management Delays," *AIAA Journal of Aircraft*, Vol. 49, No. 1, 2012, pp. 214-224.
- [14] Berge, M. E., Haraldsdottir, A., and Scharl, J., "The Multiple Runway Planner (MRP): Modeling and Analysis for Arrival Planning," 25th Digital Avionics Systems Conference, IEEE/AIAA, Portland, OR, 2006, pp. 1-11.
- [15] Kim, S. H., Feron, E., and Clarke, J. P., "Gate Assignment to Minimize Passenger Transit Time and Aircraft Taxi Time," *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 36, No. 2, 2013, pp. 467-475.
- [16] Zelenka, R. E., Feldman, G., Williams, P., and Beatty, R., "Improving Airline Schedule Management Through Accurate Flight Arrival Prediction," *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, AIAA 2001-4113, Montreal, Canada, 2001.
- [17] Atkins, S., Brinton, C., and Walton, D., "Functionalities, Display, and Concept of Use for the Surface Management System," *IEEE Digital Avionics Systems Conference*, 2002.
- [18] Jung, Y. C., and Monroe, G. A., "Development of Surface Management System Integrated with CTAS Arrival Tool," *AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, AIAA 2005-7334, Arlington, VA, 2005.
- [19] Vivona, R. A., Cate, K. T., and Green, S. M., "Comparison of Aircraft Trajectory Predictor Capabilities and Impacts on Automation Interoperability," *AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, AIAA 2011-6856, Virginia Beach, VA, 2011.
- [20] Slattery, R., and Zhao, Y., "Trajectory Synthesis for Air Traffic Automation," *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 20, No. 2, 1997, pp. 232-238.
- [21] Musialek, B., Munafo, C. F., Ryan, H., and Paglione, M., "Literature Survey of Trajectory Predictor Technology," *DOT/FAA/TC-TN11/1*, 2010.
- [22] EUROCONTROL, "EUROCONTROL Specification for Trajectory Prediction," *EUROCONTROL-SPEC-0143*, 2010.

- [23] EUROCONTROL Experimental Center, "User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.8," EEC Technical/Scientific Report No. 2010/003, 2010.
- [24] Chan, W., Bach, R., and Walton, J., "Improving and Validating CTAS Performance Models," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, AIAA 2000-4476, Denver, CO, 2000.
- [25] Roy, K., Levy, B., and Tomlin, C. J., "Target Tracking and Estimated Time of Arrival (ETA) Prediction for Arrival Aircraft," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, AIAA 2006-6324, Keystone, CO, 2006.
- [26] Konyak, M. A., Doucett, S., Safa-Bakhsh, R., Gallo, E., and Parks, P. C., "Improving Ground-Based Trajectory Prediction through Communication of Aircraft Intent," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, AIAA 2009-6080, Chicago, IL, 2009.
- [27] Yepes, J. L., Hwang, I., and Rotea, M., "New Algorithms for Aircraft Intent Inference and Trajectory Prediction," AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 30, No. 2, 2007, pp. 370-382
- [28] Thipphavong, D. P., Schultz, C. A., Lee, A. G., and Chan, S. H., "Adaptive Algorithm to Improve Trajectory Prediction Accuracy of Climbing Aircraft," AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 36, No. 1, 2013, pp. 15-24
- [29] Le Fablec, Y., and Alliot, J. M., "Using Neural Networks to Predict Aircraft Trajectory," Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence, IC-AI '99, Vol. 2, Las Vegas, CA, 1999, pp. 524-529.
- [30] Hamed, M. G., Gianazza, D., Serrurier, M., and Durand, N., "Statistical Prediction of Aircraft Trajectory: Regression Methods vs Point-mass Model," 10th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, Chicago, IL, 2013.
- [31] De Leege, A. M. P., Van Paassen, M. M., and Mulder, M., "A Machine Learning Approach to Trajectory Prediction," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, AIAA 2013-4782, Boston, MA, 2013.
- [32] Tastambekov, K., Puechmorel, S., Delahaye, D., and Rabut, C., "Aircraft

- Trajectory Forecasting Using Local Functional Regression in Sobolev Space," *Journal of Transportation Research Part C*, Vol. 39, No. 1, 2014, pp 1-22.
- [33] Swierstra, S., and Green, S. M., "Common Trajectory Prediction Capability for Decision Support Tools," 5th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, Budapest, Hungary, 2003.
- [34] Meyn, L. A., Erzberger, H., and Huynh, P. V., "Estimating Controller Intervention Probabilities for Optimized Profile Descent Arrivals," AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, AIAA 2011-6802, Virginia Beach, VA, 2011.
- [35] Borchers, P. F., Diallo, O., and Day, K., "Challenges to Modeling Vectored Area Navigation Departures at Dallas/Fort Worth International Airport," AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, AIAA 2011-6836, Virginia Beach, VA, 2011.
- [36] Huang, H., Roy, K., and Tomlin, C. J., "Probabilistic Estimation of State-Dependent Hybrid Mode Transitions for Aircraft Arrival Time Prediction," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, AIAA 2007-6695, Hilton Head, SC, 2007.
- [37] Ravizza, S., Atkin, J., Maathuis, M. H., and Burke, E. K., "A Combined Statistical Approach and Ground Movement Model for Improving Taxi Time Estimations at Airports," *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 64, 2013, pp 1347-1360.
- [38] Xu, Q.-S., and Liang, Y.-Z., "Monte Carlo Cross Validation," *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, Vol.56, Issue 1, 2001, pp. 1-11.
- [39] Gariel, M., Srivastava, A. N., and Feron, E., "Trajectory Clustering and an Application to Airspace Monitoring," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 12, No. 4, 2011, pp. 1511-1524.
- [40] Salaün, E., Gariel, M., Vela, A. E., and Feron, E., "Aircraft Proximity Maps Based on Data-Driven Flow Modeling," *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 35, No. 2, 2012, pp. 563-577.
- [41] Annoni, R., and Forster, C. H. Q., "Analysis of Aircraft Trajectories Using Fourier Descriptors and Kernel Density Estimation," 15th International IEEE

- Conference on Intelligent Transportation Systems, Anchorage, AK, 2012.
- [42] Suyundikov, R., Puechmorel, S., and Ferre, L., "Multivariate Functional Data Clusterization by PCA in Sobolev Space Using Wavelets," 42èmes Journées de Statistique, Marseille, France, 2010.
- [43] Rehm, F., "Clustering of Flight Tracks," AIAA Infotech@Aerospace 2010, Atlanta, GA, 2010.
- [44] Easter, M., Kriegel, H., Sander, J., and Xu, X., "A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise," Proceedings of 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Portland, OR, 1996, pp. 226-231.
- [45] Muller, M., Information Retrieval for Music and Motion, Springer-Verlag, Berlin, 1999, Chaps. 4.
- [46] Ward, J. H., "Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function," Journal of the American Statistical Association, Vol. 58, No. 301, 1963, pp. 236-244.
- [47] Anderson, T. W., and Goodman, L. A., "Statistical Inference about Markov Chains," The annals of Mathematical Statistics, Vol. 28, No. 1, 1957, pp. 89-110.
- [48] Scott, D. W., Multivariate Density Estimation: Theory, Practice and Visualization, Wiley, New York-Chichester-Brisbane-Toronto-Singapore, 1992, Chaps. 6.
- [49] Yang, C., Duraiswami, R., Gumerov, N. A., and Davis, L., "Improved Fast Gauss Transform and Efficient Kernel Density Estimation," 9th International IEEE Conference on Computer Vision, Nice, France, 2003.
- [50] Elgammal, A., Duraiswami, R., and Davis, L. S., "Efficient Kernel Density Estimation Using the Fast Gauss Transform with Applications to Color Modeling and Tracking," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 25, No. 11, 2003, pp. 1499-1504.
- [51] Agresti, A., Categorical Data Analysis, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2002, Chaps. 3.
- [52] Arad, B. A., "The Control Load and Sector Design", *Journal of Air Traffic*

Control, 5, May 1964, pp. 13-31.

- [53] Cho, J., Welch, J. and Underhill, N. K., "Analytical Workload Model for Estimating En Route Sector Capacity", 9th USA/Europe ATM R&D Seminar, Berlin, Germany, 2011.
- [54] Falker, J. M. and Kuchar, J., "Analytical and Empirical Analysis of the Impacts of Restricting Airspace", 4th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Santa Fe, December, 2001.
- [55] Haraldsdottir, A., Schwab, R. W. and Alcabin, M. S., "Air Traffic Management Capacity-Driven Operational Concept Through 2015", 2nd USA/Europe ATM Seminar, 1998
- [56] Hilburn, B., "Cognitive Complexity in Air Traffic Control: A Literature Review", EUROCONTROL Experimental Centre, Rept. 04/04, Bretigny/Orge, France, 2004.
- [57] International Civil Aviation Organization (ICAO), Air Traffic Services Planning Manual, ICAO Doc 9426, FIRST (Provisional) EDITION, 1984.
- [58] Laudeman, I. V., Shelden, S. G., Branstrom, R. and Brasil, C. L., "Dynamic Density: An Air Traffic Management Metric", NASA/TM-1998-112226, 1998.
- [59] Majumdar, A., Ochieng, W. and Polak, J., "Estimation of European Airspace Capacity from a Model of Controller Workload", *Journal of Navigation*, 55(3), 2002, pp. 381-403.
- [60] Mogford, R. H., Guttman, J. A., Morrow, S. L., and Kopardekar, P. K., "The Complexity Construct in Air Traffic Control: A Review and Synthesis of the Literature", Department of Transportation and Federal Aviation Administration Technical Center, DOT/FAA/CT-TN92/22, Atlantic City, NJ, 1995.
- [61] Odoni, A. R., Bowman, J., Delahaye, D., Deyst, J. J., Feron, E., Hansman, R. J., Khan, K., Kuchar, J. K., Pujet, N. and Simpson, R. W., "Existing and Required Modeling Capabilities for Evaluating ATM Systems and Concepts", Final Report NASA/AATT No. NAG2-997, 1997.
- [62] Schmidt, D. K., "On Modeling ATC Work Load and Sector Capacity", *Journal of Aircraft*, 13(7), 1976, pp. 531-537.

- [63] Siddiquee, W., "Air Route Capacity Models", *Navigation*, 20(4), Winter 1973-1974, pp. 296-300.
- [64] Sridhar, B., Sheth, K. S. and Grabbe, S., "Airspace Complexity and its Application in Air Traffic Management", 2nd USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Orlando, December, 1998.
- [65] Welch, J. D., Andrews, J. W., Martin, B. D. and Sridhar, B., "Macroscopic Workload Model for Estimating En Route Sector Capacity", 7th USA/Europe ATM R&D Seminar, 2007.
- [66] Erzberger, H., 1995, "Design Principles and Algorithms for Automated Air Traffic Management", Mission Systems Panel of AGARD and the Consultant and Exchange Program of AGARD.
- [67] Swieringa, K., Murdoch, J. L., Baxley, B. and Hubbs, C., 2011, "Evaluation of an Airborne Spacing Concept, On-board Spacing Tool, and Pilot Interface", AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference.
- [68] Klooster, J. K., Amo A. D. and Manzi, P., 2009, "Controlled Time-of-Arrival Flight Trials", Eighth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar.
- [69] Erzberger, H. and Tobias, L., 1986, "A Time-Based Concept for Terminal-Area Traffic Management", NASA Technical Memorandum.
- [70] Davis, T. J., Krzeczowski, K. J. and Bergh, C., 1994, "The Final Approach Spacing Tool," 13th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace.
- [71] Hu, X. B. and Chen, W. H., 2005, "Genetic algorithm based on receding horizon control for arrival sequencing and scheduling", Engineering Applications of Artificial Intelligence.
- [72] Eun, Y. J., Hwang, I. S. and Bang, H. C., 2010, "Optimal Arrival Flight Sequencing and Scheduling Using Discrete Airborne Delays", IEEE Transactions on intelligent Transportation systems, Vol.11, No.2.
- [73] Eurocontrol, 2010, "AMAN Status Review 2010", 2010.
- [74] Mercer, J., Bienert, N., Gomez, A., Hunt, S., Kraut, J., Martin, L., Morey, S., Green, S. M., Prevôt, T. and Wu, M. G., 2013, "The Impact of Trajectory

Prediction Uncertainty on Air Traffic Controller Performance and Acceptability”,
AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference.

[75] Train. K. E., Discrete Choice Methods with Simulation, 2003, Cambridge, New York.

[76] Hosmer. D. W., Lemeshow, S., Applied Logistic Regression, 2000, John Wiley & Sons, Inc, New York

[77] International Civil Aviation Organization, "Aviation System Block Upgrades," 2011.

[78] International Civil Aviation Organization, "Continuous Climb Operations (CCO) Manual," ICAO Doc. 9993 AN/495, 2013.

[79] Doble, N. A., Timmerman, J., Carniol, T., Klopfenstein, M., Tanino, M., and Sud, V., "Linking Traffic Management to the Airport Surface: Departure Flow Management and Beyond," 8th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, Presentation Material.