

무인비행체 등을 위한 고도 150m 이하 초저고도 바람예측 모델링 기법 연구 최종보고서

2020 . 1 . 21 .

주관연구기관 / 한서대학교 산학협력단
협동연구기관 / 주식회사 포디솔루션

2020

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

초저고도 바람예측 모델링 기법 연구 최종보고서

국토교통과학기술진흥원

국토교통부

제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

‘무인비행체 등을 위한 고도 150m 이하 초저고도 바람예측 모델링 기법 연구’ (연구개발 기간 : 2018 . 4 . 17 ~ 2019 . 12 . 31) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2020 . 1 . 21 .

주관연구기관명 : 한서대학교 산학협력단 김 현 성 (인)

공동연구기관명 : 주식회사 포디솔루션 김 기 영 (인)

주관연구기관책임자: 구 성 관

공동연구기관책임자: 권 재 일

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	19CTAP-C143 284-02	해당 단계 연구 기간	' 18.04.17 ~' 19.12.31	단계구분	1/1
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	무인비행체 등을 위한 고도 150m 이하 초저고도 바람예측 모델링 기법 연구			
	세부과제명				
연구책임자	구성관	해당단계 참여연구원 수	총: 19 명 내부: 19 명 외부: 명	해당단계 연구비	정부:369,000 천원 민간:123,000 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:492,000 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 19 명 내부: 19 명 외부: 명	총 연구비	정부:369,000 천원 민간:123,000 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계:492,000 천원
연구기관명 및 소속 부서명	한서대학교 산학협력단 / 항공산업공학과			참여기업명 주식회사 포디솔루션	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반
-------------------------	----

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호	4	1				3					

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

보고서 면수

152

요 약 문

연구의 목적 및 내용	○ 무인비행체 등을 위한 초저고도 바람예측 모델링 기법 연구 ○ 기상역학모델(WRF), 정밀지형정보, 수치예보 모델 자료 등을 활용하여 기존 기상예보에서 제공하지 못하는 고도 150m 이하 초저고도 비행체의 안전한 운항을 위한 바람예측 모델링 기법을 연구하고, 이를 검증할 수 있는 기술 개발과 시험을 수행하여 TRL4 수준의 기술을 확보 ○ 초저고도 비행체 운영 환경 분석 및 모델 검증 기법 개발 - 초저고도 비행체 운영 개념 및 환경 분석 - 딥러닝을 이용한 데이터 고도화 방안 연구 - 개발된 예측 모델의 검증 방안 개발 - 모델링 결과 비교를 위한 바람 실험 측정용 드론 개발 ○ 현업 기상모델 분석 및 초저고도 바람예측 기초 모델링 개발 - 현업 기상정보 수치예보 모델 분석 - 고도 150m 이하의 고해상도 바람자료 생산을 위한 기상역학 모델 구성 ○ 바람예측 모델링 적절성 검토 및 고도화 기법 개발 - 딥러닝 기법 활용한 모델링 정밀도 향상 후처리 기법 연구 - 초저고도 비행계획 수립, 드론을 활용한 바람의 실험 측정 및 비교 ○ 모델링 고도화 및 운영자용 리포트 샘플 개발 - 초저고도 바람예측 모델링의 시범 지역 적용 - 중규모 기상역학모델 WRF 결과를 활용한 고해상도 모델 처리 기법 개발 - 모델결과를 사용자가 확인할 수 있는 리포트 샘플 개발
연구개발성과	○ 본 연구결과를 통하여 미래 항공운항 형태 중 하나인 초저고도 소형비행체의 운항을 위한 기반 기술 중 하나인 기상정보 제공을 위한 원천기술을 확보할 수 있으며, ○ 드론 등 초저고도 비행체 비행계획 수립 지원에 활용하여 비행체의 안전 운항의 통합 지원을 위한 새로운 서비스 분야의 창출이 가능할 것임 ○ 본 연구의 예상되는 기술수요처는 초저고도에서 운영되는 드론 등의 소형비행체를 운영하는 주체로 예상되지만, 현재 운영되고 있는 기타 항공 분야에도 적용하는 것이 가능할 것으로 판단됨 ○ 개발 결과를 활용하기 위한 활용 범위는 현재 항공기상 정보의 주요 운용 주체인 정부, 항공사, 관제 기관 등 항공기 운항 통제를 위한 기상 감시 시스템 개발의 원천기술로 활용이 가능할 것임
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 기술적 측면 - 비행체를 위한 고해상도 모델 설치 및 구성을 통해 항공정보에 기상모델을 적용한 사례가 될 수 있음 - 기상과 항공의 기술융합 확대를 기대할 수 있음 - 수치예보모델 자료와 현실적 시각정보를 활용한 융복합적 서비스 방안 제시 - 딥러닝을 기상모델에 적용함으로써 최신 기술에 대한 기술력을 확보할 수 있음 ○ 경제적·산업적 측면 - 비행체를 활용한 사업 확대 추진에 따라 초저고도 비행체의 수요가 증가할 것으로 예상됨 - 초저고도 바람자료는 각 업계에서 저고도 비행체의 운항계획을 세우는데 기초자료로 활용가능 - 기상으로 인한 비행제한 시에 발생할 수 있는 인적·물적·시간적 손실을 줄일 수 있음 - 바람으로 인한 무인비행체 추락을 방지함으로써, 비행체의 손실을 막을 수 있음

	○ 사회적 측면 - 기상정보를 고려하지 않은 무분별한 비행을 방지하여, 체계적인 비행계획 수립을 가능하게 함 - 바람으로 인한 무인비행체 추락 시에 발생할 수 있는 인명피해를 방지할 수 있음 - 기상정보를 효율적으로 사용하여 운항 안전이 확보되어 상용화되면 항공, 해상, 지상 등 여러 교통 분야로 서비스 확대가 가능할 것임 - 정확하고 항공기상정보를 대국민에게 쉽게 제공할 수 있는 기반을 마련하여, 항공 안전의 증진하고 추후 미래형 항공운송이 대중화 시점에 필요한 대국민 복지 서비스의 기틀을 마련				
국문핵심어 (5개 이내)	항공기상	항공기상예보	초저고도비행체	저고도기상서비스	기상정보
영문핵심어 (5개 이내)	Aviation Weather	Aviation Weather Forecast	Very Low Altitude Aircraft	Low Altitude Weather Service	Weather Information

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
가. 연구개발 개요	1
나. 연구개발의 목표	3
다. 연구개발의 내용 및 범위	3
라. 연구 추진 전략 및 방법	5
2. 연구 수행 내용 및 성과	9
가. 연구개발 목표 및 결과	9
나. 주요 연구 내용	10
(1) 초저고도 기상 모델 현황	10
(2) 역학모델 설치 및 운영	19
(3) 지형 데이터 입력 및 정밀화	28
(4) 초저고도 바람예측 모델 시범 지역 선정 및 실험 설계	42
(5) 모델링 대상 지역 적용	71
(6) 딥러닝 활용 고도화 기술 개발	80
(7) 실황 측정용 드론 개발	98
(8) 연구 결과 활용 기술 개발	134
다. 연구개발 성과	137
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	141
가. 성과 목표 및 달성도	141
나. 연구성과 목표 및 달성도	144
다. 관련 분야 기여도	145
4. 연구개발성과의 활용 계획 등	147
가. 기술 활용 계획 및 타 연구 응용	147
나. 추가 연구 필요성	148
다. 사업화 추진 계획	149
붙임. 참고문헌	151

1. 연구개발과제의 개요

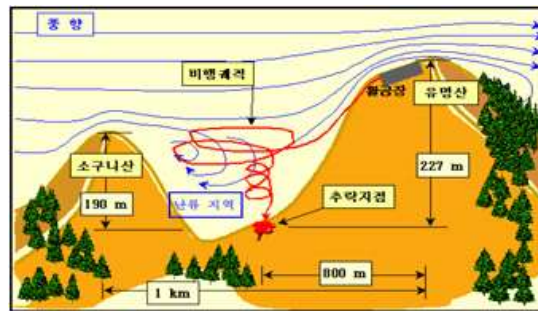
가. 연구개발 개요

- 본 연구에서 수행하고자 하는 연구 범위는 가시권/비가시권 무인비행체, 미래형 저고도 자율비행체 등 4차 산업혁명의 ICT 및 IoT 기반 기술의 결과물로 예상되는 미래형 항공서비스의 안전 운항과 비행을 위한 기상 모델과 이를 검증하기 위한 지원 기술을 개발하는데 있음
- 미래형 항공서비스는 운영자에 의하여 직접 운송을 목적으로 사람 또는 화물 운송이 이루어지는 기존의 개념과는 별개로 사람에 의해 직접 운송이 이루어지지 않더라도 본래 운송 목적을 달성하는 비행체의 개발과 서비스가 예상될 수 있음
- 무인비행체 형태의 운송 개념은 미국 아마존(amazon), UPS 등을 비롯한 소형/특송 화물 운송이 필요한 수요에 의하여 개발이 진행 중이며, 국내에서도 비가시권 무인비행체 운영 시범 사업 등을 통하여 택배 회사 및 통신사 등에서 개발이 진행 중에 있음



[그림 1] 무인비행체에 의한 초저고도 서비스 시범 연구

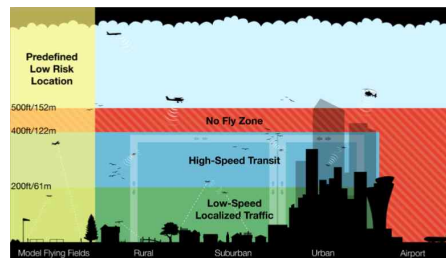
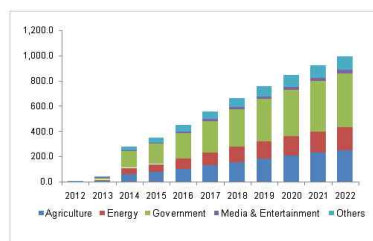
- 이러한 미래형 항공운송서비스도 기본적으로 공역을 비행하는 비행체로서 안전한 비행을 위해서는 이착륙 지역, 목적지 또는 이동 경로의 날씨, 기상 상태 등의 확인이 반드시 필요함
- 현재 공역의 기상 정보를 확인할 수 있는 항공기상 서비스는 대형운송용 항공기의 고고도 비행을 기반으로 제공하는 것으로, 일정 높이 이상 상공의 기상 상태와 공항의 이착륙 기상을 확인할 수 있음
- 고도 150m 이하의 초저고도는 지형의 영향에 의한 공기 유동 때문에 기존의 저해상도 기상예보로는 정확도가 낮은 정보를 제공하게 되어, 초저고도에서 비행하는 비행체 및 운영자는 유용한 정보를 획득하기가 어려운 실정임



[그림 2] 지형 영향에 의한 바람 영향 사고 사례

- 세계 드론시장은 2026년까지 820억 달러 규모로 연평균 29% 씩 성장할 것으로 전망되며, 이에 따라 초저고도 비행체의 안전한 통제의 중요성이 커지고 있어 효과적인 통제 체계를 위한 연구(UTM : Unmanned aircraft system traffic management 등)도 국내외에서 진행되고 있음

U.S. commercial UAV market by application, 2012-2022, (USD Million)



[그림 3] 드론시장전망 및 UTM 연구 범위

- 해외 공유형 운송 서비스를 제공하는 UBER 에서는 저고도 항공기를 활용한 서비스에 대한 연구를 시행하고 있으며, 2020년에는 Air-taxi 서비스 시행 목표를 공표 하였고, 운항의 형태는 지상의 자율주행 또는 저고도 무인비행체와 유사한 자율비행 형태를 제시하고 기존 항공기의 운항 기술 활용하는 것을 컨셉으로 함



[그림 4] 저고도 항공기 활용 운송서비스 컨셉

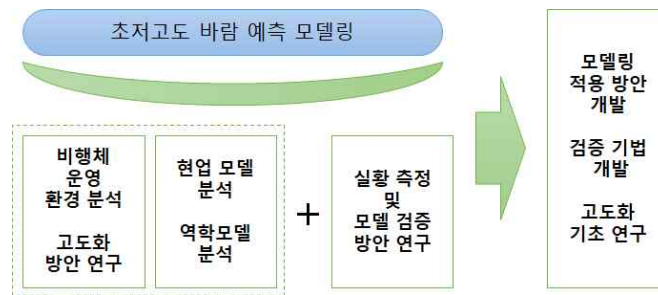
- 이처럼 초저고도 비행체의 운영에 관한 요구도가 증가하고 있으나, 실제로 비행체의 운항 안전에 직접적인 도움을 줄 수 있는 기상 및 초저고도 기상 예측의 중요성은 높으나 관련 연구가 수행되지 못하고 있는 실정임
- 본 연구에서는 초저고도 비행체의 안전한 운항을 위한 기상 정보 중 특히 중요도가 높으나 다양한 변수의 영향을 고려해야 하는 풍향 및 풍속 등의 바람정보에 대한 상세 모델링 방법에 대한 연구를 수행하고자 함
- 본 연구는 지형의 영향을 받는 초저고도의 바람 정보를 정밀하게 예측하여 비행체의 운항 안전에 직접적인 중요 정보를 제공하는 것을 목표로 하는 것으로써, 향후 무인항공기, 드론, 비가시권 무인비행체, 저고도 자율비행체 뿐만 아니라, 현재의 저고도 유인비행체의 조종사 등도 활용할 수 있는 정보를 제공할 수 있는 등 국내 항공 안전 증진에도 직접적인 도움이 될 것임

나. 연구개발의 목표

구분	내용
최종 목표	무인비행체를 위한 초저고도 바람예측 모델링 기법 연구
세부 목표	기상역학모델(WRF), 정밀지형정보, 수치예보 모델 자료 등을 활용하여 기존 기상예보에서 제공하지 못하는 고도 150m 이하 초저고도 비행체의 안전한 운항을 위한 바람예측 모델링 기법을 연구하고, 이를 검증할 수 있는 기술 개발과 시험을 수행하여 TRL4 수준의 기술을 확보

다. 연구개발의 내용 및 범위

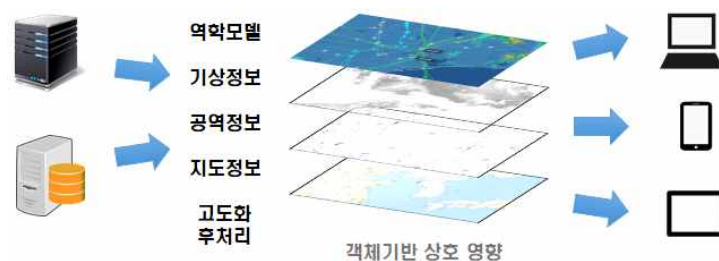
- 개발 목표 구분
 - 주관연구기관(한서대학교): 초저고도 비행체 운영 환경 분석 및 모델 검증 기법 개발, 바람예측 모델링 적절성 검토 및 고도화 기법 개발
 - 공동연구기관((주)미래기후): 현업 기상모델 분석 및 초저고도 바람예측 기초 모델링 개발, 모델링 고도화 및 운영자용 리포트 샘플 개발



[그림 5] 초저고도 바람예측 모델링 초기 단계

○ 주요 개발 내용 및 범위

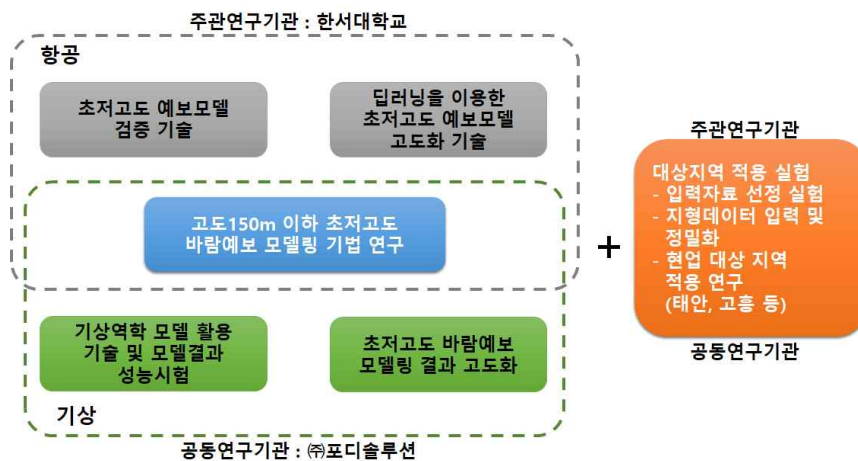
- 연구과제 통합관리 / 시스템 통합
- 초저고도 비행체 운영 개념 및 환경 분석
- 고도 150m 이하의 고해상도 바람자료 생산을 위한 기상역할 모델 구성
- 현업 기상정보 수치예보 모델 분석
- 중규모 기상역학모델 WRF 결과를 활용한 고해상도 모델 처리 기법 개발
- 국내 기상현업 모델의 UM 모델을 활용한 입력자료 선정 및 실험
- 개발된 예측 모델의 검증 방안 개발
- 모델링 결과 비교를 위한 바람 실황 측정용 드론 개발
- 수평해상도 1km의 바람자료 생산을 위해 수평해상도 100m 이하의 지형자료 처리
- 모델링 성능 향상을 위한 입력자료 선정 실험
- 모델의 최적화를 위한 물리과정 실험 및 성능 비교 시험 수행
- 머신러닝을 이용한 데이터 고도화 방안 연구
- 딥러닝을 활용한 모델링 정밀도 향상 후처리 기술 연구
- 심층신경망 DNN(deep neural network)을 이용한 시범 데이터 처리 적용



[그림 6] 모델링 검토, 고도화, 리포트 프로세스 형태

라. 연구 추진 전략 및 방법

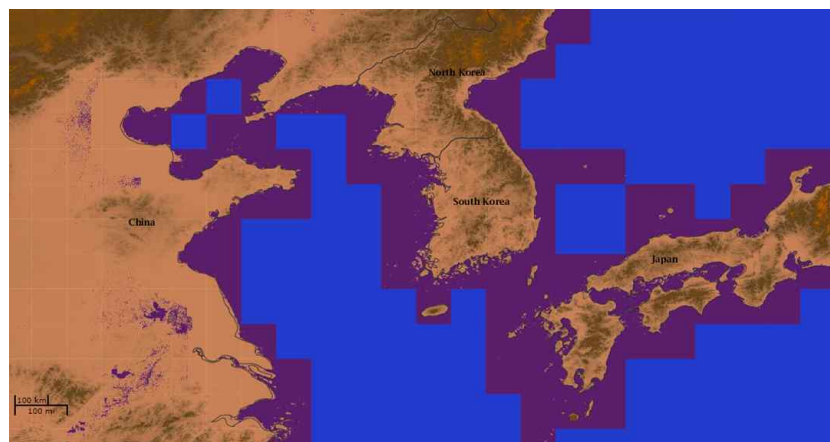
- 본 초저고도 소형비행체의 안전한 운항을 위한 바람예측 모델링 연구를 위하여 아래와 같은 추진 전략을 수립하고, 항공전문 주관기관(한서대학교)와 기상전문 공동기관((주)포디솔루션)의 협업 체계를 구축함
 - 지형학적 영향이 큰 고도 150m 이하 초저고도 비행체의 안전한 운항을 위한 바람예측을 위한 모델링 방법을 개발하여, 실제 저고도 소형비행체 운영자가 비행 단계에서 활용할 수 있도록 상세한 정보 제공
 - 최적 물리과정 및 입력자료 선정을 통해 초저고도에 대한 모델링 성능 최적화
 - 4차산업혁명의 최신 기술인 딥러닝을 사용한 모델 고도화를 통해 신뢰성 있는 모델링 결과 자료 생산
 - 모델링 결과의 검증 방안, 검증 적용을 위한 실황 측정용 드론 개발 및 이를 활용하여 연구 산출물 / 현업 예보모델 / 실황의 비교 실험을 시행하고 정밀도 향상과 정확도 확인 시행
 - 운영자 요구도를 고려한 연구개발을 목표하여 연구 결과에 대한 활용성 증대



[그림 7] 연구개발 추진 전략

- 현업 기상모델 분석 및 초저고도 바람예측 기초 모델링 개발
 - 고도 150m 이하의 초저고도에 대한 고해상도 바람자료 생산을 위한 기상역학 모델 개발 방안 기초 연구
 - 우리나라의 UM모델, 미국의 WRF 모델 등 현업 기상예보 모델의 처리 결과 검토

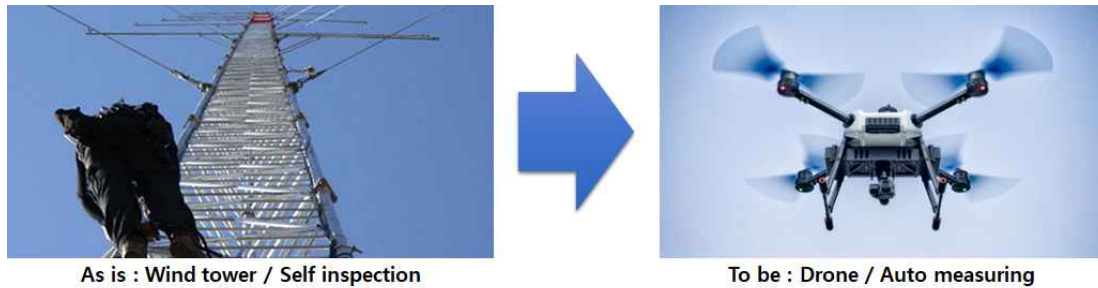
- 저해상도의 모델 결과에 대한 역학적 처리 결과의 가능성 여부의 확인과 25km×25km 격자 형태의 저해상도 결과를 활용한 1km×1km 격자 형태의 고해상도 바람자료 생산을 위한 기술 연구
- 최대 500m×500m 격자의 고해상도 바람자료 생산을 위한 기술 구현
- 지형학적 고려가 필요한 고도 150m 이하의 정밀한 바람자료 생성을 위한 100m 이하 해상도의 지형자료 처리 방법 연구
- 고해상도 지형자료는 미국 NASA(National Aeronautics and Space Administration)와 NGA(National Geospatial-Intelligence Agency)에서 개발한 SRTM(Shuttle Rader Topographic Mission) 1"(1 arc-second, 약 30m) DEM 자료 등을 적용할 수 있음
- SRTM 1" 지형자료는 1° x 1° 타일 자료로 제공하고 있으며, 한반도 주변의 제공 영역은 아래의 [그림 8]과 같음
- 모델링 입력자료의 적정성 확인과 성능 향상을 위한 입력자료 선정 실험



[그림 8] 한반도 주변 지형자료 영역 - 타일 격자 형태

○ 초저고도 기상예측 모델의 검증 기법 개발

- 모델링 결과 검증 및 비교를 위한 통계적 분석 방법 연구
- 모델링 결과 비교를 위한 바람 실험 측정용 드론 개발
- 바람 측정시 드론의 프로펠러 유동 문제를 고려하며, 개발 리스크 관리를 위하여 센서 장착 위치 확보를 위한 상용 드론 모델을 검토하여 개발에 활용
- 멀티콥터형 드론의 한계 극복
- 국외 기술 검토를 통한 현실적인 측정 방안을 적용한 드론을 활용하여 바람 실험 측정과 비교 실험 수행



[그림 9] 바람예모 모델 검증과정의 드론 적용 방안

- 개발될 연구 결과의 목표 달성 현실성을 위한 목표 명확화
 - 본 연구는 TRL4 수준의 개발이 완료되는 단계로 실질적으로 개발 시스템의 실용화 또는 상품화를 위한 초기 단계에 해당하며, 이를 전체 연구의 1단계로 정의함
 - 연구의 1단계에서는 초기 시스템 구현 및 확인을 목적으로 하며, 가능한 경우 이를 실제 운영 환경에 적용할 수 있는지 확인하는 것을 목표함
 - 추후, 실제 시스템의 활용과 적용을 위한 2단계 연구를 본 연구(1단계)가 종료된 이후 추진할 필요성이 있음
- 진행 중 타 항공 R&D와의 연계 방안 고려
 - 기 수행중인 항공분야 연구개발과의 협력 가능성을 확인하고, 연계성을 검토함
 - 가능한 경우, 본 연구개발의 중간결과물 또는 최종결과물을 제공하는 등의 적극적 협력 추진함

2. 연구 수행 내용 및 성과

가. 연구개발 목표 및 결과

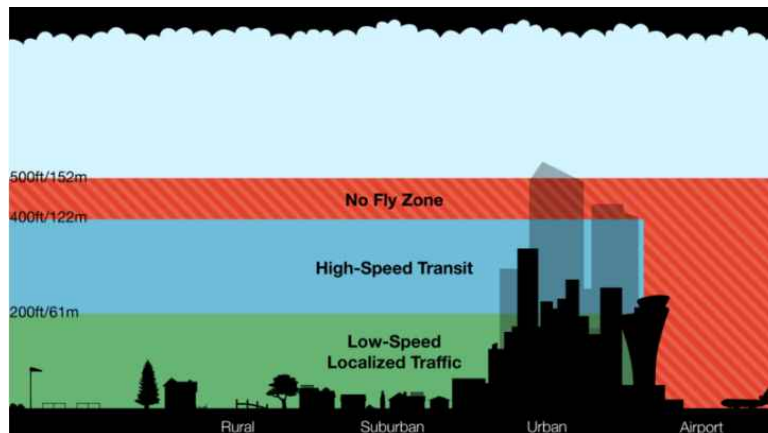
핵심성과	세부 연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
초저고도 바람예측 모델의 고도화 기술 및 검증 방법 개발	연구과제 통합관리	과제 통합 관리	- 기술문서 도출
	예측 모델 고도화 기술	초저고도 기상모델 현황 분석	- 문서 도출 - 전문가 검토
		딥러닝 활용 고도화 기술 개발	- KCI 논문 2편 게재 - 학술발표 1건
	예측 모델 검증 기술	실험 측정용 드론 개발	- KCI 논문 1편 게재 - 학술발표 1건 - 시스템 개발
		예측 모델 검증 실행	- 결과 도출
초저고도 바람예측 모델링 방법 개발 및 고도화	기상역학모델 활용 기술 개발	역할 모델 설치 및 운영	- S/W 등록 1건
		지형 데이터 입력 및 정밀화	- 결과 도출 - SW 등록 1건
	모델결과 성능 시험	입력자료 선정 및 실험	- 보고서 도출 - 전문가 검토
		현업모델 비교 성능 실험	- 결과 도출 - 학술발표 1건
	모델링 결과 고도화 연구	모델링 대상 지역 적용 실험	- 보고서 도출 - KCI 논문 1편 게재
		딥러닝 활용 성능 향상 기술 개발	- 결과 도출 - 특허 출원 1건 - 시제품 개발 - SW 등록 1건

나. 주요 연구 내용

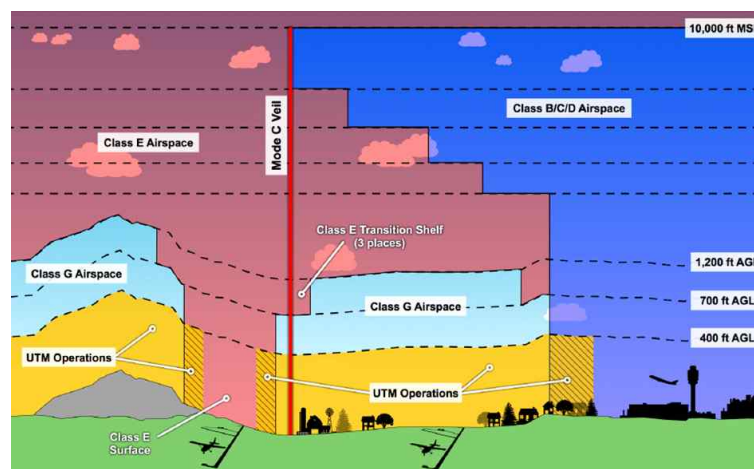
(1) 초저고도 기상 모델 현황

(가) 초저고도 비행체 운영을 위한 저고도 무인항공기 교통관리 체계

- 저고도 무인비행장치 교통관리체계(UTM)는 저속/저고도에서 주로 비행이 이루어지는 소형무인비행체를 효과적으로 통제하는 방법에 대한 연구로서, 유인항공기와의 분리 통제를 통하여 상호 안전한 비행환경을 구축 목적이 있음
- 무인비행체의 기술은 최근 드론(drone)이라 불리는 멀티콥터형 무인비행장치에 의하여 대중화되고 있으며, 취미용, 촬영용, 농약 살포용 등 일반인이 활용할 수 있는 다양한 기체의 형태와 목적으로 개체수가 급격히 증가하고 있음
- 현재에도 드론은 모형항공기와 같이 조종자 인근의 한정된 장소에서 비행하는 형태로는 비행금지 구역 및 통제 구역이 아니라면 특별한 제약사항 없이 운영이 가능하고, 이를 위한 일부 지원 체계가 구축되고 있는 초기 단계이며,
- 이런 형태는 조종사의 시야 거리를 벗어나지 못하는 최대 거리에서 비행하는 것이 가능한 조건으로 제한되어 있음
- IT 기술 등의 발전에 따라 비행체의 성능은 매우 좋아지고 있는 형태로 예전에는 대형 무인항공기와 유사한 형태의 경로점 비행 및 일부 제한적 자동 이착륙 기능도 제공되고 있음
- 이처럼 이용의 제약 조건이 완화되고 있는 소형무인비행체의 급격한 증가로 인하여 공역 통제 기관인 각국의 항공당국에서는 이러한 소형 무인비행체에 대한 적극적인 감시 및 통제가 필요하게 되었으며,
- 이에 따라 미국, 유럽, 일본, 싱가포르 등의 국가 및 우리나라에서도 이에 대한 연구를 수행하고 있음
- 미국에서는 2014년부터 NASA와 FAA가 저고도 무인항공기 교통관리 체계인 UTM(UAS Traffic Management)에 대한 기본 개념을 제안하고 상세한 UTM 운용개념 수립 및 필요기술에 대한 기초연구를 수행하고 있음
- 지난 25년 간 공역 내 비행교통 효율 증진, 비행 지연 감소, 연료소모 및 배출가스 감소 등의 연구를 수행해 온 NASA는 에임즈(Ames) 연구소를 중심으로 UTM 연구를 미연방항공청(FAA)과 협력하여 진행 중이며, NASA UTM 연구에는 아마존을 비롯한 24개의 기관이 참여하고 있음



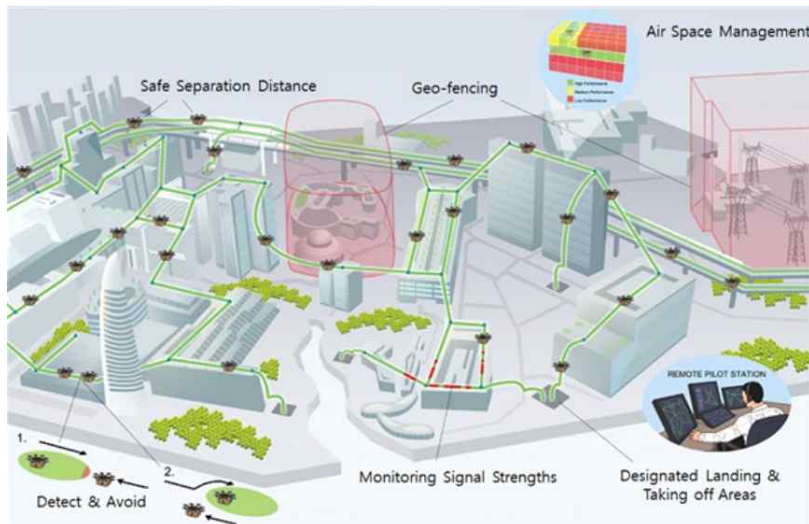
[그림 10] 아마존 제안 UTM 개념도



[그림 11] NextGen UTM 운영 개념, FAA

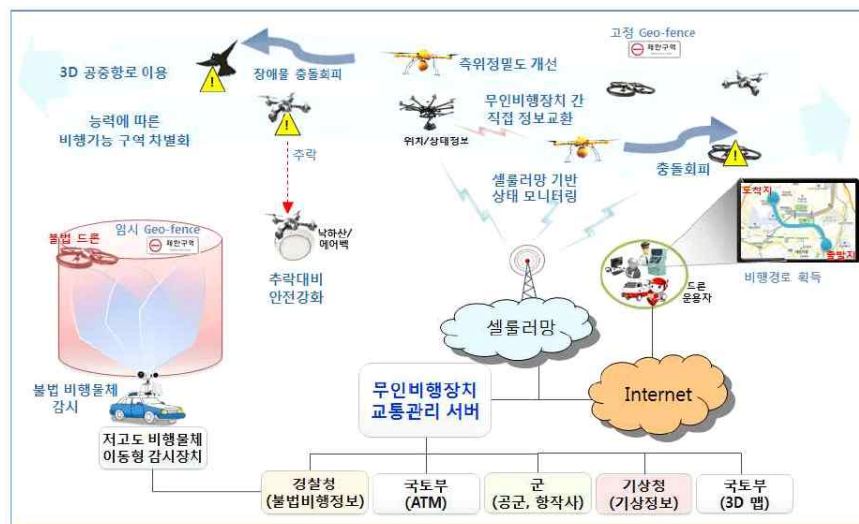
- UTM의 적용을 위한 세부적인 4단계의 기술능력수준(TCL : Technology Capability Level)으로 구분하여 적절한 수준인지 확인하는 기술 검증을 하고 있으며, 이런 기술개발과 검증 결과는 관련 표준기술안으로 만들어져서 2019년에 FAA에 제출될 예정임
- 각 기술의 세부 단계는 아래와 같음
 - UTM TCL 1 : 인구 저밀집 지역에서의 농업, 산불진화, 구조물 안전점검용 무인기 비행시험
 - UTM TCL 2: 인구 밀도 희박 지역에서의 비가시권 비행시험 및 관련 절차 평가
 - UTM TCL 3: 인구 중밀도 지역에서 유·무인기 통합 운영을 위한 협력적, 비협력적 무인기 추적능력 시험
 - UTM TCL 4: 인구 고밀도 지역에서 뉴스영상촬영, 물품배송, 우발사태 위험 저감안 등에 대한 비행시험

- 중국은 '15년 12월에 소형드론 운행규정을 제정을 통해 세계 최초로 UTM 관련 내용을 규정하여 '16년 2/4분기부터 이동통신망을 이용한 클라우드 기반의 시스템을 구축하여 운용 중임
- 중국의 드론교통관리 시스템(U-Cloud)의 관리를 중국 항공기 소유자 및 조종사 협회(AOPA)에서 관리하고 있는 점이 다른 나라와 상이하며, 제정된 운행규정에는 U-Cloud에 대한 구체적인 내용이 별도로 정의함
- U-Cloud 시스템에 접속하지 않은 무인기는 비행 전에 유효한 감시 방법과 관리를 당국에 신청하여야 하며, 민간 무인기를 교통관리 시스템에 접속시켜 교통관리를 받는 방식은 다음과 같음
 - 핵심지역과 공항에서 무인기 분류 2, 5의 무인기는 비행체 또는 지상관제장비(GCS)가 U-Cloud 시스템에 접속하여 최소 1회/분 비행정보를 보고함
 - 인구밀집지역에서 운용하는 무인기 분류 3, 4, 6, 7 무인기는 U-cloud 시스템에 접속하여 최소 1초에 한번, 비 밀집지역에서 운용하는 무인기는 최소 30초에 한번씩 보고함
- 일본에서는 JUTM(Japan Unmanned System Traffic & Radio Management Consortium, 일본 무인기 운행관리 컨소시엄) 단체가 2016년 7월에 설립되었으며, 동경대학교 교수가 대표를 맡고 ANA홀딩스, NTT도코모, 일본우편, 히타치 제작소 등의 기업 회원 이외에 성능평가방법을 맡은 AIST(산업기술종합연구소), 전파관리를 맡은 NICT(전보통신연구소), 공역관리를 맡은 JAXA(우주항공개발기구), 항공관제를 맡은 ENRI(전자항법연구소) 등의 연구기관, 그리고 시험지역을 제공하는 지자체로서 후쿠시마 현이 회원으로 참여하고 있음
- 2017년까지는 가시권 내의 비행을 하는 드론에 대하여 운행정보 공유 시스템을 정비해서 운용하고, 2018년부터는 가시권 밖으로 비행을 하는 다수의 드론 운행을 관리하는 것을 목표로 하고 있으며, 일본 JUTM의 특징은 무인기 비행에 필수항목인 전파 관리를 포함하고 있다는 것임
- 싱가포르의 국가 전체가 도심 환경인 특징으로 인하여, 도심운영 UTM을 개발하고 있으며, 싱가포르 우체국에서 Airbus 헬기팀과의 협업을 통해 2018년 중에 기술 시연을 예정하였음
- 싱가포르 UTM은 도심 전체를 대상으로 수평 및 고도별 수직으로 격자모델(AirMatrix)을 개발하여 도심 무인기 운용 및 공역관리에 적용하려고 하는데, 이용자가 UTM 비행계획에 이륙하는 지점과 착륙하는 지점을 입력하면 AirMatrix 기반의 위험도 분석을 통해 경로를 설정하는 형태로 그림과 같이 도심 하늘에 드론 도로망을 구성하여 하늘 위의 드론 고속도로 교통을 구현하려는 것으로 판단됨



[그림 12] 싱가포르 도심 UTM 개념도

- 우리나라에서도 국토교통부의 무인비행체 안전지원 기술개발 사업의 이름으로 무인 비행장치의 안전운용을 위한 저고도 교통관리체계 개발 및 실증시험 연구개발 사업이 2017년 4월부터 착수함

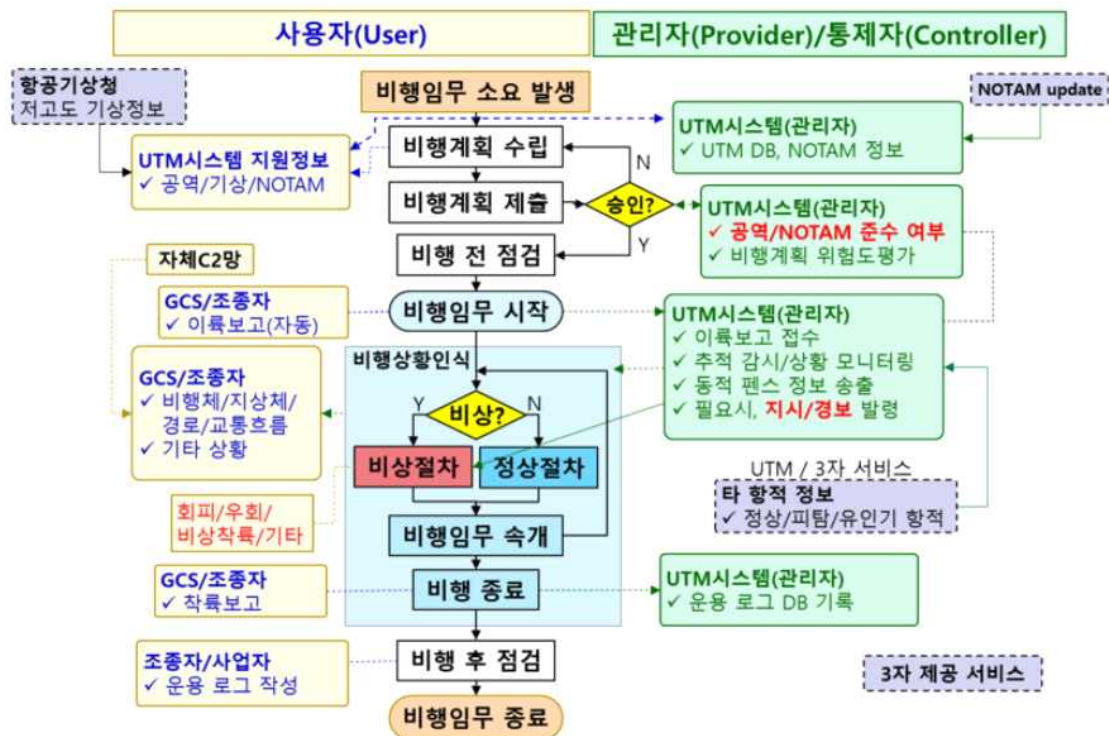


[그림 13] 저고도 무인비행장치 교통관리 개념도

- 우리나라는 전국토가 이동통신망으로 덮여 있어서 이를 이용하면 드론 교통을 감시하고 관리하는 좋은 해결책을 찾을 수 있을 것으로 기대하고 있음
- 이를 위하여 1단계인 2018년까지 5대 이상의 드론이 동시에 비행하는 것을 관리하는 기술 데모를 시연할 예정이고, 2단계인 2021년 말까지는 비가시권으로 범위를

확대한 다수의 드론 비행과 공역관리, 교통관리를 하는 클라우드 기반의 시스템 기술을 선보이는 것으로 계획하고 있음

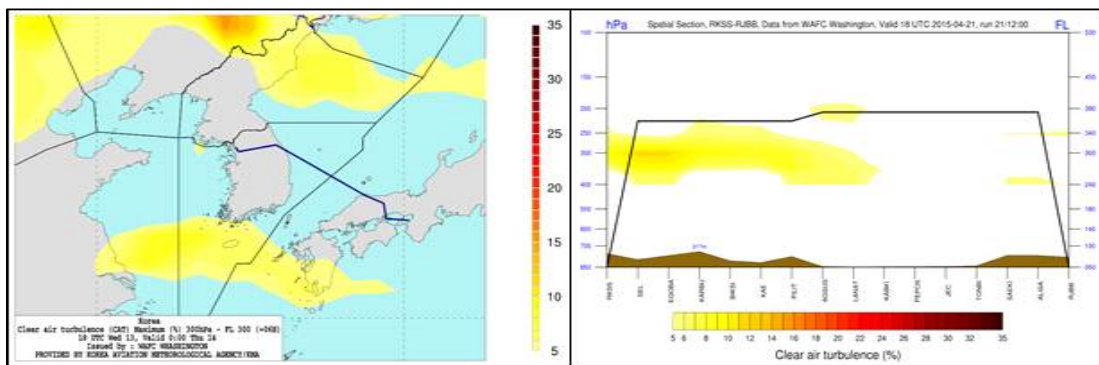
- 드론택배나 가시권 거리를 훨씬 넘어서는 거리의 긴급물자 수송, 재난감시 등의 좀 더 본격적인 드론의 활용이 현실화되기 위해서는 비가시권 장거리 비행이 요구되는데, 기존의 가시권 이내 드론 운용을 유인항공기의 시계비행방식(VFR)과 유사하다고 한다면, 비 가시권 장거리 드론의 운용은 계기비행방식(IFR)에 비유될 수 있음
- 아래 그림은 우리나라 UTM 체계의 절차적 업무 흐름 개념을 나타낸 그림으로, 소형 비행체의 저고도 운항을 위하여 항공기상청의 저고도 기상정보를 활용한 UTM 시스템 지원정보(기상)를 정의하고 있음



[그림 14] 우리나라 UTM 체계의 절차적 업무 흐름개념(안)

(나) 항공기 운항 지원용 기상정보

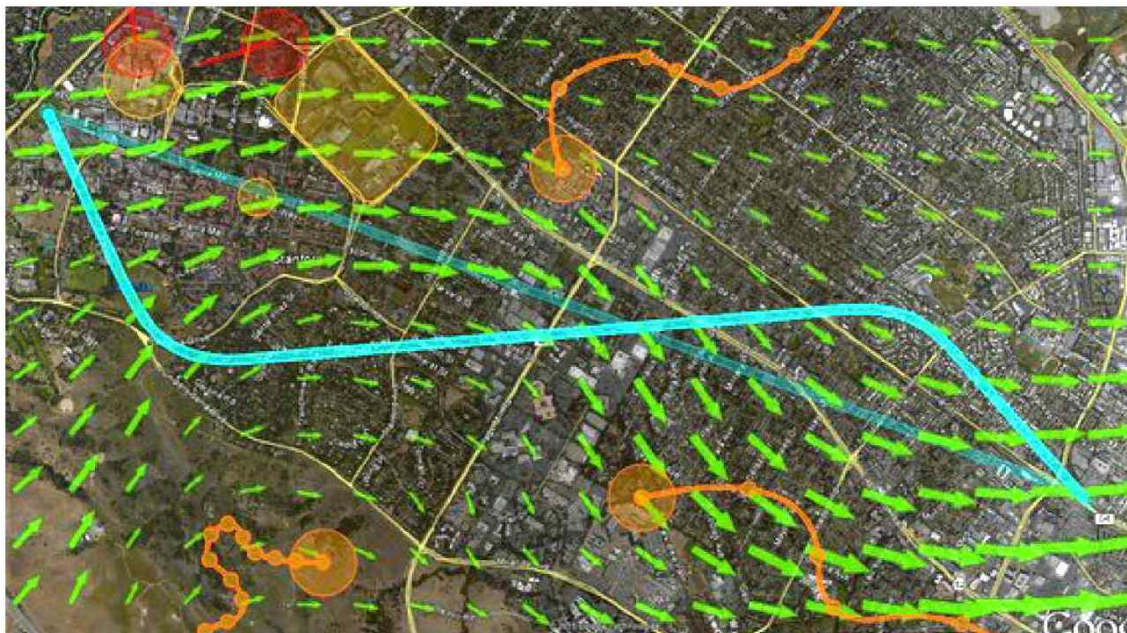
- 항공기가 운항하는 공간인 공역과 항공로의 기상현상은 비행고도가 매우 낮은 저고도가 아닌 이상 현장측정이 아닌 원격탐측으로 관측되어야하므로 공역 및 항공로상의 기상요소 종류 별로 필요로 하는 시스템이 필요함
- 대표적인 항공기 항행에 영향을 미치는 기상현상으로 강풍, 안개(구름), 비, 눈, 먼지(황사), 호우, 폭설, 우박, 뇌전, Ceiling, 적란운(Cb), 바람시어(Wind Shear), Microburst, 난류(Turbulence), 착빙(Icing), 산악파와 같이 16개의 항목이 있음
- 공역 및 항공로 기상감시를 위하여 필요로 하는 관측시스템은 저고도 항공운항 지원에 필수적인 운고계와 시정계, 광역적 기상현상 탐측에 걸맞은 기상위성, 도플러 기상레이더(TDWR), 낙뢰 관측 망, 연직 대기상태 탐측에 적합한 Radiometer, SODAR, LIDAR, Wind Profiler 총 9종으로 요약되며 최근의 LIDAR는 레이더와 같이 전 방향으로 스캐닝이 가능한 기능을 갖춘 것도 개발됨
- 상기 내용이 포함된 항공기 운영 지원을 위한 기상정보는 항공기상(Aviation weather)으로 정의하며 조종사를 포함한 항공종사자를 위한 별도의 정보 전달 체계를 구축하고 있음
- 이러한 정보는 세계공역예보센터(WAFC)에서 제공하는 난기류, 착빙, 적란운 등의 항공기상 수치 모델 자료를 기반하는 것으로, 주로 고고도에서 비행하는 운송용 항공기에 유용한 정보를 제공하는 것을 목적으로 하고 있음



[그림 15] 고고도 운송용 항공기 지원 기상정보 예

(다) 무인항공기 운영 관련 기상정보

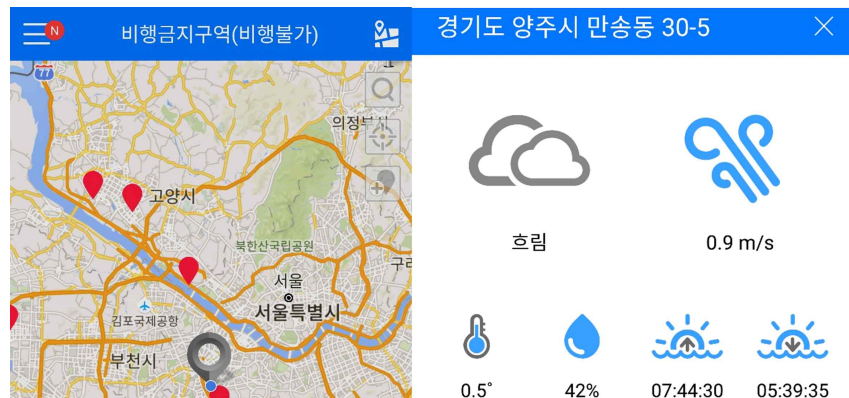
- 현재 무인항공기를 위한 별도의 기상정보 제공은 없는 상태이나,
- 미국 Google에서 인구 밀집 지역인 저고도 Class G 공역에서 신속한 운항이 가능한 UTM 연구로 수행중인 Project Wing에서 관련된 개념을 제안하였음
- Google에서 제안한 형태인 ASP(Airspace service provider)는 UAS 트래픽 구획/계획을 수행하는 것으로 모바일 네트워크(cellular network)를 활용하여 ADS-B를 활용한 무인항공기 대 유인항공기 교통 제어 및 충돌회피 및 근거리의 무인항공기간 충돌회피를 제공하며,
- 정보를 제공하는 형태는 아래 그림과 같이 날씨(바람정보 : 녹색 화살표), 장애물(노란색), 무인항공기 항적(오렌지), 유인항공기 항적(적색) 트래픽 정보 데이터를 무인항공기와 운영자에게 제공하고 이를 통하여 충돌 없는 경로(route)가 계획될 수 있도록 함



[그림 16] Google ASP UTM 데이터 표출 예

- 국내에서는 소형비행체로 대표되는 드론 비행을 지원하기 위한 스마트폰 어플리케이션이 개발되어 서비스 되고 있으며, 해당 어플리케이션은 드론을 비행하려는 현 위치가 드론 비행가능한 곳인지, 공항인근 또는 비행금지 구역으로 설정된 곳인지에 대한 위치 정보를 제공하려는 목적을 가지고 있음

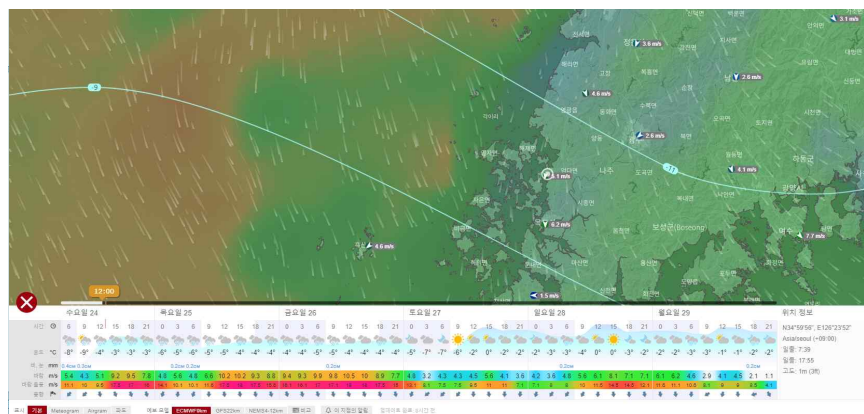
- 해당 어플리케이션은 비행하려는 위치 등 관심 지역의 현재 풍향/풍속, 기온, 기상 상태 등의 현황 정보를 제공하고 있으나, 이는 기상청의 동네예보 정보를 활용한 수준으로 무인항공기의 비행에 필요한 저고도의 상세 정보와 예보 정보는 제공하지 못함



[그림 17] 드론 어플리케이션(드론플라이) 화면 예

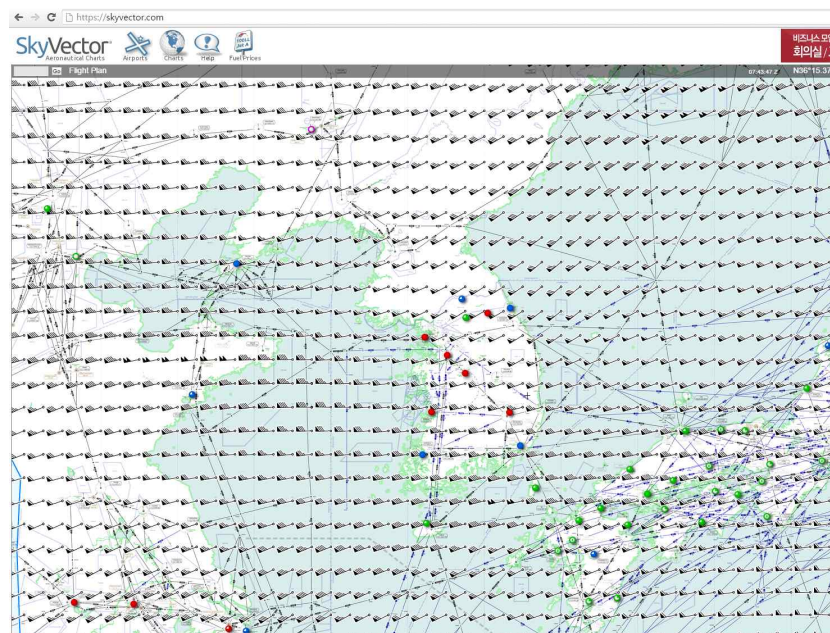
(라) 기타 항공관련 활용 가능 기상 정보

- 일본의 SunnySpot Inc.의 경우 항공 활동을 하는 사람들을 위한 고도별, 시간별 상세 기상 예보를 제공하고 있으며, Weathernews Inc.는 각 현(現)의 경찰항공대, 소방항공대, 민간헬기 운항회사 등에서 상세 예보 정보를 제공하고 있음
- 체코의 WindGURU는 주로 윈드서핑(Windsurfing), 카이트서핑(Kitesurfing)을 위한 날씨 예보를 제공하며, 영국의 전세계 기상 예보 결과인 GFS 27km×27km 격자자료를 이용한 전세계의 날씨 예보 정보를 제공함



[그림 18] Windy 서비스 예시 형태

- 스위스의 windy에서는 전세계의 기상 현상을 예측한 ECMWF 9km×9km 격자 정보와 GFS 27km×27km의 예보 자료를 이용하여 기압경계면(600m-950hPa, 900m-900hPa, 1500m-850hPa)을 기준한 고도별 풍향/풍속, 기온, 습도 등의 정보와 주요 공항의 과거 기상정보를 제공하며, 지면의 기상정보를 제공하기는 하지만 지형이 고려된 정보는 아님
- 항공항행 정보 및 기상관측, 예측 자료를 실시간으로 제공하는 서비스를 상용화시킨 Skyvector社は 공항, 항로 등의 NavData에 기상정보(Wind, Temperature, Satellite, Radar 등)이 중첩된 항공맵을 통하여 항로별 기상 감시가 용이한 서비스를 제공하고 있으나, 운송용 항공기의 고고도 운항에 필요한 정보만 제공함



[그림 19] skyvector 서비스 예시 형태

(2) 역학모델 설치 및 운영

(가) 모델 구축을 위한 자료 수집

① 초기 및 경계 조건 자료 수집

- 본 연구개발에서는 모델의 초기 및 경계조건으로 미국의 전구모델인 GFS(Global Forecast System) 모델의 자료와 우리나라 기상청에서 현업으로 운영하고 있는 국지모델인 UM(Unified Model) LDAPS(Local Data Assimilation and Prediction System) 자료를 수집하여 사용하고 GFS 및 LDAPS의 세부 정보는 표 3과 같음
 - GFS는 전구모델로 해상도가 약 28km이고, 전지구를 모델 영역으로 하고, LDAPS는 국지모델로 해상도가 1.5km이며, 한반도를 모델 영역으로 함
 - 격자수는 GFS와 LDAPS가 각각 1440(동서)×721(남북), 781(동서)×602(남북)이며, 연직층은 각각 31, 24개임
 - 모델의 예측시간은 GFS와 LDAPS가 각각 384, 36시간이고 자료형식은 두 가지 모델 모두 grib2임
 - GFS 자료는 2018년 1~12월의 00 및 12UTC 초기장 자료를 수집하였으며, LDAPS는 2018년 4월에 대해서 수집함
 - GFS 예측자료의 수집이 되지 않은 기간에 대해서는 GFS의 분석장(ANL) 자료를 대체자료로 사용함
- ※ GFS ANL 자료 사용 날짜: 2018031000~2018031912, 2018040900, 2018041000, 2018041300, 2018041312, 2018041400, 2018041412, 2018041512

[표 3] GFS 및 LDAPS 세부정보

구분	GFS	LDAPS
해상도	0.25° (약 28km)	1.5km
격자수	1440(동서)×721(남북)	781(동서)×602(남북)
연직층(기압면)	31	24
자료영역	전구	한반도
예측시간	384시간(약 16일)	36시간
자료간격	240시간까지 3시간 이후 12시간	1시간
자료형식	grib2	grib2
수집경로	ftp://ftp.ncep.noaa.gov/pub/dat a/nccf/com/gfs/prod	기상자료개방포털(https://data.km a.go.kr/cmmn/main.do)

② 지형 및 토지이용도 자료 수집

- 본 연구개발에서는 고해상도 모델 구축을 수행하며, 이를 위해 고해상도의 지형자료 및 토지이용도 자료가 필요함
- 지형자료로는 미국 NASA(National Aeronautics and Space Administration)에서 제공하는 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) 1arc-second(약 30m) 해상도의 자료를 사용하였고, 토지이용도는 환경부에서 제공하는 2013년 기준 1:25,000 토지이용도 자료를 사용함
- SRTM은 전세계의 수치표고모델(DEM, Digital Elevation Model)을 제공하는 프로젝트로서, 인디버 우주왕복선(Space Shuttle Endeavour)의 SRTM 탑재장비를 통해 전세계의 DEM 자료를 추출하였으며, 3arc-second(약 90m)와 1arc-second(약 30m)의 해상도 자료를 제공함
- SRTM 자료는 사이트에 따라 다양한 자료형식으로 다운로드가 가능함
- SRTM 자료를 제공하는 사이트와 제공자료 형식은 [표 4], 자료형식에 대한 설명은 [표 5]와 같음

[표 4] SRTM 자료 제공사이트 및 제공형식

SRTM 자료 제공 사이트	제공하는 자료형식
https://earthexplorer.usgs.gov/	BIL, DTED, GeoTIFF
http://opentopo.sdsc.edu/raster?jobId=rt1525918613458	ArcASCII, GeoTIFF, IMG
https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/	
http://dwtkns.com/srtm30m/	HGT

[표 5] 자료형식에 대한 설명

자료형식	설명
DTED(Digital Terrain Elevation Data)	NGA에서 개발한 포맷. 각 파일에는 수평 간격으로 간격을 둔 수직 고도 값의 행렬이 들어있음
BIL(Band interleaved by line)	파일의 레이아웃과 서식을 설명하는 헤더파일이 있는 바이너리 레스터 포맷
GeoTIFF(Georeferenced Tagged Image File Format)	지리적 정보가 포함된 TIFF. GIS 프로그램의 기본 이미지 포맷임
ArcASCII	지리적 정보가 포함된(헤더) ASCII 형식
HGT	16비트 정수로 서→동, 북→남으로 배열된 각 셀의 고도를 m 단위로 나타냄

- 본 연구개발에서는 표 4의 목록 중 <http://opentopo.sdsc.edu/>에서 제공하는 자료를 수집하였음
- 자료형식은 ArcASCII이며, 공간적인 범위는 동서로 124°E~132°E, 남북으로 32°N~40°N임
- 다운로드 된 자료는 36°N를 기준으로 나뉘어 2개의 파일로 존재하며, 세부적인 파일의 정보는 [표 6]와 같음

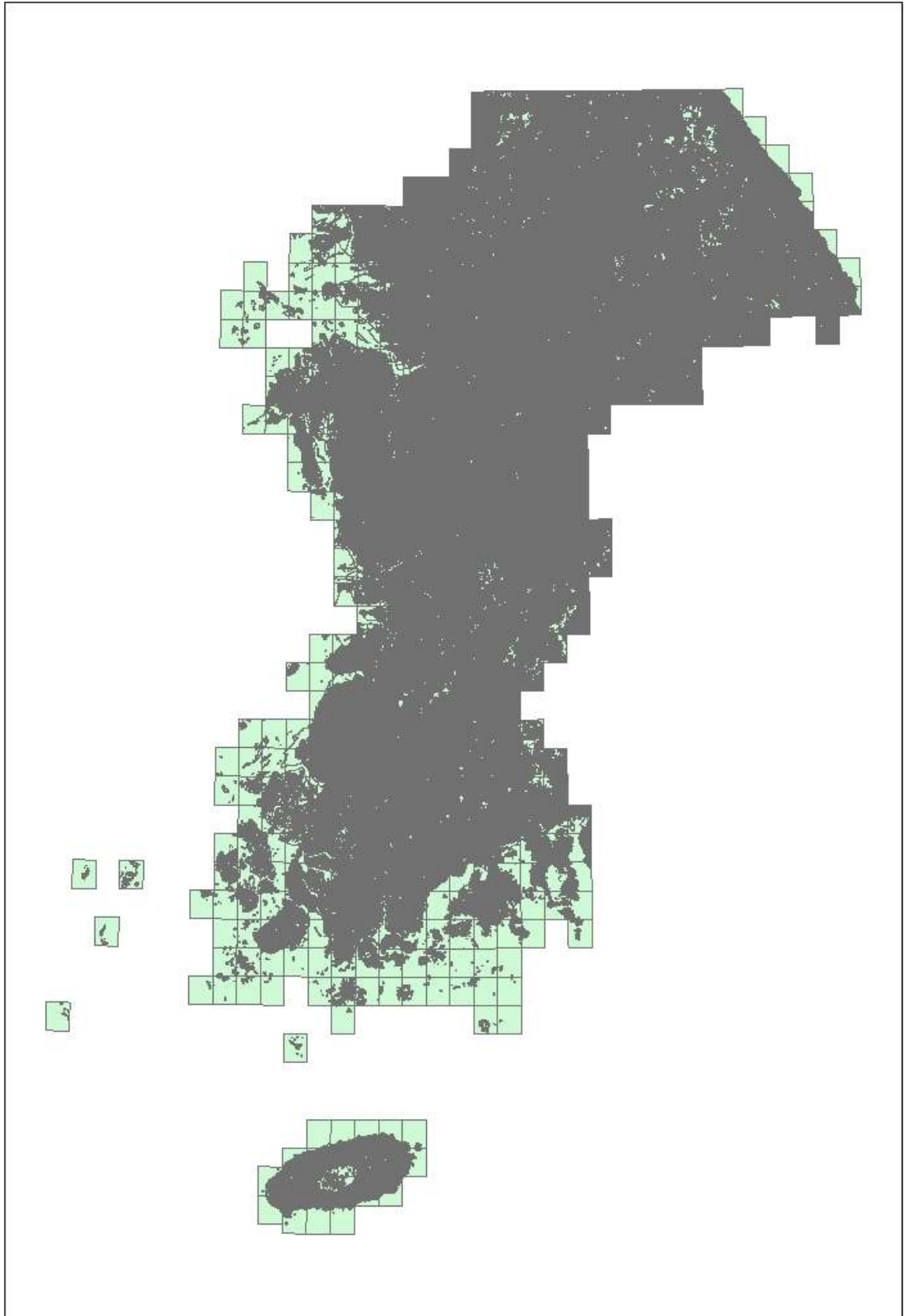
[표 6] 수집된 SRTM 파일 정보

구분	내용
파일 당 x 격자수	28800
파일 당 y 격자수	14400
셀 사이즈	0.000277777778 ° (약 30m)
x 좌하단 코너 위치	123.999861111151° E
y 좌하단 코너 위치	32.000138888885° N

- 환경부 토지이용도 자료는 환경공간정보서비스(<http://egis.me.go.kr/req/list.do>)에서 자료를 신청하여 다운로드 받을 수 있음
- 환경공간정보서비스에서는 shp형태의 토지이용도 파일을 1:25,000의 축적으로 제공하고 있음
- 입수한 자료는 2013년도의 경상도를 제외한 토지이용자료이며, 총 526개 도엽으로 구성되어 있음
- 해당 자료의 토지이용 중분류와 분류코드는 [표 7]과 같음

[표 7] 환경부 토지이용도 중분류

분류항목명	분류코드	분류항목명	분류코드
주거지역	110	활엽수림	310
공업지역	120	침엽수림	320
상업지역	130	혼효림	330
문화·체육·휴양지역	140	자연초지	410
교통지역	150	인공초지	420
공공시설지역	160	내륙습지(수변식생)	510
논	210	연안습지	520
밭	220	자연 나지	610
시설재배지	230	인공 나지	620
과수원	240	내륙수	710
기타재배지	250	해양수	720



[그림 20] 환경부 토지이용도 도엽 정보

(나) 기상 역학 모델 구성

① WRF 모델 소스코드 입수 및 설치

- 본 연구에서는 미국 NCAR(National Center for Atmospheric Research)에서 개발한 중규모 수치모델인 WRF(Weather Research and Forecasting)를 사용하였음
- WRF 모델은 완전 압축성 비정수계 모델이며, 수평격자는 Arakawa-C 격자를, 연직격자는 지형에 근거한 정역학 기압 연직 좌표를 사용하는 모델임
- 모델을 설치하기 위해서는 컴파일러, 병렬수행을 위한 라이브러리, NetCDF 라이브러리, grib2 해석을 위한 라이브러리 등이 필요하며 WRF는 http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_source.html에서 제공받을 수 있음
- 설치된 모델 버전
 - WRF-3.9.1.1 - 2017년 8월 28일 릴리즈
 - WPS-3.9.1 - 2017년 8월 17일 릴리즈
- 모델 설치에 사용된 라이브러리
 - gcc 4.8.5 (컴파일러)
 - mpich-3.2
 - netcdf-c-4.4.0
 - netcdf-fortran-4.4.3.
 - zlib-1.2.8, libpng-1.2.50, jasper-1.900.1
- 모델 환경설정 옵션
 - WRF: 34.(dmpar_ GNU (gfortran/gcc)
 - 1. basic nesting
 - 1. Linux x86_64, gfortran (serial)
- WRF 모델 설치 방법
 - WRF의 설치 순서는 [그림 21]과 같음
 - WRF를 먼저 설치하고, 그 이후에 WRF 전처리 프로그램인 WPS를 설치해야 함
 - 모델 소스 코드는 .tar.gz 파일 형태로 제공되며 설치를 원하는 서버에 해당 파일을 전송 후 압축을 풀어야 함
 - 이후 WRF를 설치하기 위해 압축을 해제한 WRFV3 디렉토리로 이동하여 명령어[`./configure`]를 입력하여 configure를 실행함
 - configure를 실행하면 다음과 같은 화면이 나타나는데 사용하고자 하는 컴파일러를 찾아 해당번호를 입력하고, nesting 옵션은 특별한 목적이 없는 경우 basic(1)을 선택함



[그림 21] WRF 설치절차

- 본 연구에서 선택한 옵션은 34번이지만, 모델 버전에 따라 달라질 수 있음

Please select from among the following supported platforms.

1. Linux x86_64 i486 i586 i686, PGI compiler with gcc (serial)
 2. Linux x86_64 i486 i586 i686, PGI compiler with gcc (smpar)
 3. Linux x86_64 i486 i586 i686, PGI compiler with gcc (dmpar)
 4. Linux x86_64 i486 i586 i686, PGI compiler with gcc (dm+sm)
 5. Linux x86_64 i486 i586 i686 PGI compiler with pgcc YELLOWSTONE (serial)
 6. Linux x86_64 i486 i586 i686 PGI compiler with pgcc YELLOWSTONE (smpar)
- (중략)

Enter selection [1-55] :

- configure가 정상적으로 실행되면 configure.wrf 파일이 생성됨
- 해당 파일의 컴파일 옵션 및 경로, 라이브러리 옵션 등을 확인하여 시스템에 맞게 설정해줘야 하는데, 특별한 경우를 제외하면 configure.wrf는 시스템에 맞게 정상적으로 생성됨
- 이후 다음의 명령어를 입력하여 컴파일을 수행됨
- 이 때 컴파일을 수행할 모델 종류를 입력해야 하며, em_real은 Real Data Case 모델을 의미함

```
# ./compile em_real >& log.compile
```

- 모델을 컴파일하며 생성한 log.compile 파일에 Error가 존재하지 않고, WRFV3/main 디렉토리 내에 ndown.exe, nup.exe, tc.exe, real.exe, wrf.exe 파일이 존재하면 정상적으로 설치되었다고 판단할 수 있음
- WRF 설치가 정상적으로 완료되면 WPS 설치를 수행해야 함
- grib2 파일을 사용하기 위해서는 환경변수를 설정해줘야 하며 다음과 같은 명령어를 입력하여 환경변수를 설정함

```
# export JASPERLIB= "grib2 lib 디렉토리 경로"
# export JASPERINC= "grib2 lib 디렉토리 경로"
```

- 이후 수행 방법은 WRF 설치와 같음
- WPS 디렉토리로 이동하여 configure를 실행시키면 다음과 같은 화면이 나타나고, WRF와 마찬가지로 사용하고자 하는 컴파일러를 찾아 해당번호를 입력함
- 본 연구에서 선택한 옵션은 1번이지만, 모델 버전에 따라 달라질 수 있음

Please select from among the following supported platforms.

1. Linux x86_64, gfortran (serial)
2. Linux x86_64, gfortran (serial_NO_GRIB2)
3. Linux x86_64, gfortran (dmpar)
4. Linux x86_64, gfortran (dmpar_NO_GRIB2)
5. Linux x86_64, PGI compiler (serial)
6. Linux x86_64, PGI compiler (serial_NO_GRIB2)
7. Linux x86_64, PGI compiler (dmpar)
8. Linux x86_64, PGI compiler (dmpar_NO_GRIB2)

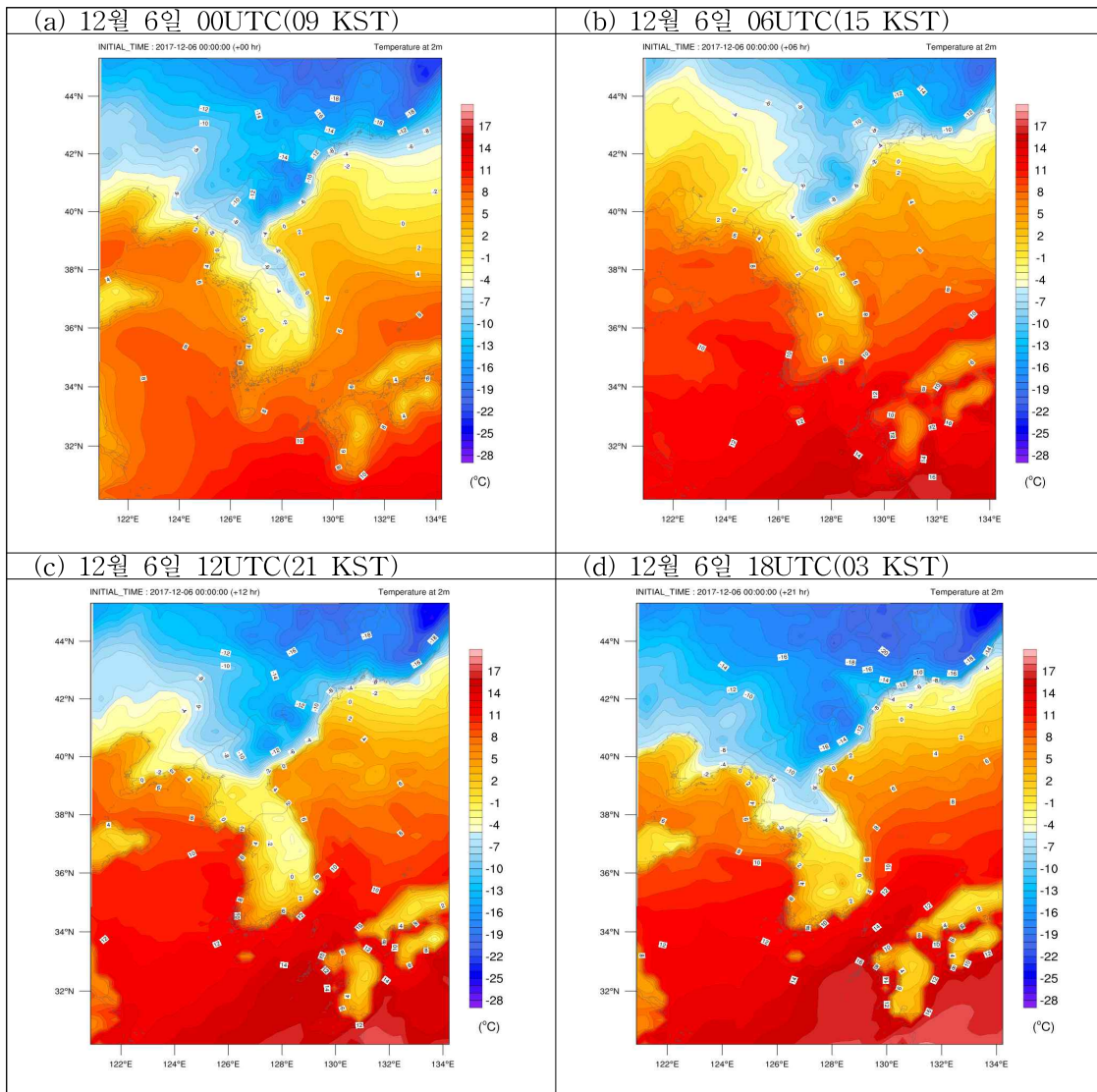
(중략)

Enter selection [1-36] :

- configure가 정상적으로 실행되면 configure.wps 파일이 생성되며 WRF와 마찬가지로 해당 파일의 컴파일 옵션 및 경로, 라이브러리 옵션 등을 확인하여 시스템에 맞게 설정함
- 이후 다음의 명령어를 입력하여 컴파일을 수행함

```
# ./compile >& log.compile
```

- 모델을 컴파일하며 생성한 log.compile 파일에 Error가 존재하지 않고, WPS/src 디렉토리 내에 geogrid.exe, ungrib.exe, metgrid.exe 파일이 존재하면 정상적으로 설치된 것임

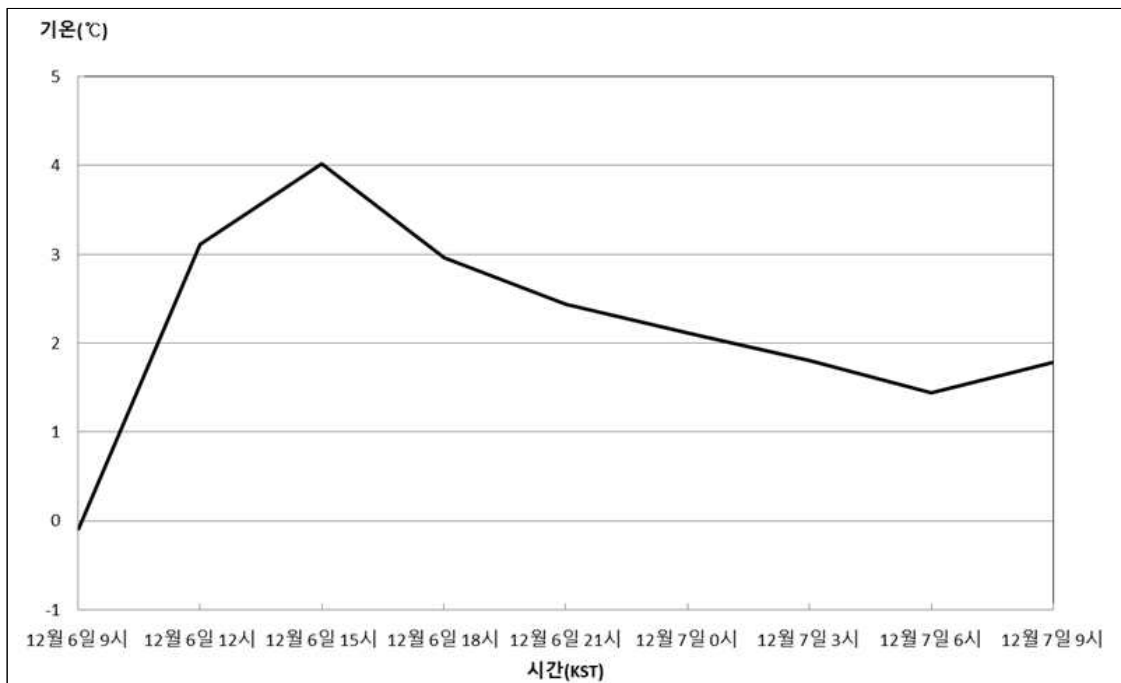


[그림 22] 정합성 테스트 결과 시간별 2m 기온 공간분포

② 정합성 테스트

- WRF가 정상적으로 설치되었는지 확인하기 위해 우리나라 영역을 대상으로 한 정합성 테스트를 진행함
- 도메인 정보
 - 해상도 및 격자수: 30km, 45(동서)×57(남북)
 - 연직층: 27층(토양 4층)

- 중심 위경도: 38°E, 127.6°N
- 지도 투영법: Lambert
- 실험구성
 - 입력자료: GFS 0.25°
 - 지형자료: WPS 10m(분) 해상도 자료
 - timestep: 180초
 - 사용된 코어: 4개
 - 모델수행기간: 2017년 12월 6일 00UTC ~ 2017년 12월 7일 00UTC
 - 물리과정: CONUS physics suite(WRF 초기 상태)
- 실험수행결과
 - 실험수행결과를 2m 기온에 대한 공간분포 및 시계열로 [그림 23]에 나타냄
 - 2m 기온의 일변화 및 수륙분포가 정상적으로 나타나는 것으로 보아 모델이 정상적으로 설치된 것으로 판단됨



[그림 23] 정합성 테스트 결과 시간별 2m 영역평균 시계열

(3) 지형 데이터 입력 및 정밀화

(가) SRTM 지형 자료

① SRTM 1arc-second 지형자료 적용

- 현재 다운로드된 SRTM 1arc-second 파일은 ArcASCII 형태이나, WRF의 geogrid에서 읽을 수 있는 지형 자료 형태는 바이너리 형태이므로, 다운로드된 파일을 바이너리 형태로 변환할 필요가 있음
- 그림 5와 같이 포트란 코드를 사용하여 바이너리 파일로 변환하였고, 수집된 ArcASCII 파일은 2개이므로, 각각을 바이너리 형태로 따로 변환함

```

PROGRAM read_asc
IMPLICIT NONE
INTEGER,DIMENSION(28800,14400) :: um
integer :: i,nxy
open(1, FILE='srtm_124_132_36.asc')
i=0
do
  i=i+1
  read(1, *, end=999) um(:,i)
enddo
999 continue

nxy=28800*14400

open(11, file='00001-28800,00001-14400.dat', form='unformatted', access='direct', recl=nxy*4)
write(11, rec=1) um
close(11)
end program
  
```

[그림 24] 자료 형식 변환 포트란 코드

- WRF에서는 다음의 지형자료 명명규칙에 따라 파일을 인식하며, 규칙에 어긋날 경우 파일을 인식하지 못함
 - x시작격자-x끝격자.y시작격자-y끝격자
 - ex) 00001-01201.00001-01201
- 좌하단 파일을 기준으로 1번이 시작되며, 이후 파일들은 좌하단 파일에 이어지는 번호를 부여하고 다운로드 및 변환된 SRTM 자료는 다음의 이름을 가짐
 - 00001-28800.00001-14400
 - 00001-28800.14401-28800
- 각 파일은 WRF의 GEOG 폴더 안에 새로운 폴더를 만들어서 함께 두어야 함
- 여기서는 폴더명을 'topo_srtm_1s'로 정의하고 해당 폴더에 파일을 넣음
- WRF에서 해당 파일을 인식하게 하기 위해서는 해당 지형자료에 대한 설명이 포함된 index 파일을 같은 폴더 내에 작성해야함

○ 작성된 index 파일은 [표 8]과 같음

[표 8] SRTM index 파일

type = continuous	(자료 형태, 연속자료/명목자료)
signed = yes	(정수인지 실수인지)
projection = regular_ll	(투영법)
missing_value=-32768	(missing value 값)
dx = 0.000277777778	(x 방향 격자크기)
dy = 0.000277777778	(y 방향 격자크기)
known_x = 1.0	(known_lon에 해당하는 x격자번호)
known_y = 1.0	(known_lat에 해당하는 y격자번호)
known_lat = 32.00013889	(known_y에 해당하는 위도)
known_lon = 123.999861111151	(known_x에 해당하는 경도)
wordsize = 4	(byte 수)
row_order=top_bottom	(자료 읽는 방향)
endian=little	(endian 방식)
tile_x = 28800	(x 격자수)
tile_y = 14400	(y 격자수)
tile_z = 1	(z 격자수)
units="meters"	(단위)
description="Topography"	(설명)

- WRF의 namelist에서 SRTM 자료를 적용할 수 있도록 GEOGRID.TBL을 수정해야함
- SRTM이 적용될 지형고도 변수명은 HGT_M으로, 이에 대한 테이블 추가가 필요함
- 변경된 GEOGRID.TBL의 HGT_M 부분은 [표 9]와 같으며, 굵은색 글씨가 추가된 부분임

[표 9] SRTM 적용을 위한 GEOGRID.TBL 일부

name = HGT_M
priority = 1
dest_type = continuous
smooth_option = smth-desmth_special; smooth_passes=1
fill_missing=0.
interp_option = srtm_1s:average_gcell(4.0)+four_pt+average_4pt
interp_option = gmted2010_30s:average_gcell(4.0)+four_pt+average_4pt
interp_option = gtopo_30s:average_gcell(4.0)+four_pt+average_4pt
interp_option = gtopo_2m:four_pt
interp_option = gtopo_5m:four_pt
interp_option = gtopo_10m:four_pt
interp_option = default:average_gcell(4.0)+four_pt+average_4pt
rel_path = srtm_1s:topo_srtm_1s/
rel_path = gmted2010_30s:topo_gmted2010_30s/
rel_path = gtopo_30s:topo_30s/
rel_path = gtopo_2m:topo_2m/
rel_path = gtopo_5m:topo_5m/
rel_path = gtopo_10m:topo_10m/
rel_path = default:topo_gmted2010_30s/

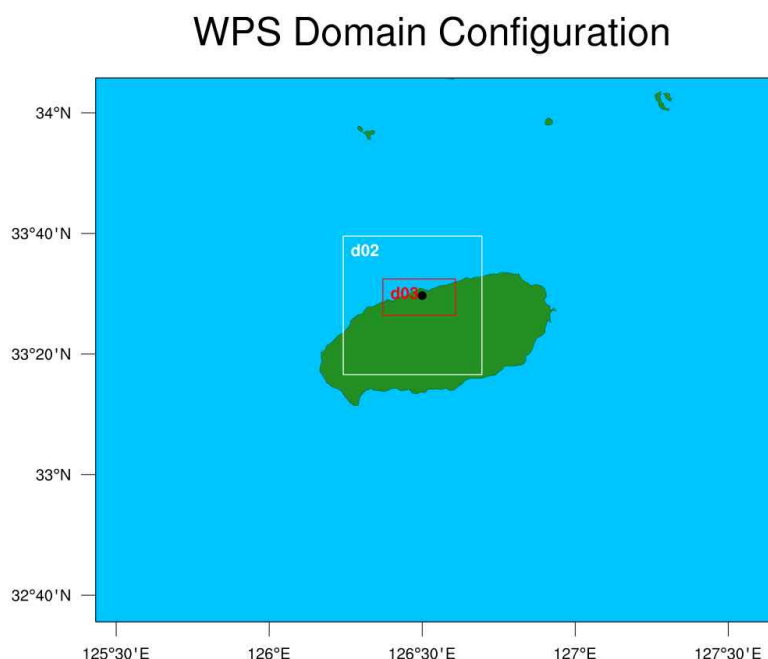
- srtm_1s로 namelist 옵션을 설정하였으며, interp_option은 고해상도 지형에 맞도록 average_gcell(4.0)+four_pt+average_4pt로 설정하였으며, rel_path는 GEOG 폴더 내의 해당 자료가 있는 폴더명을 의미함

② 지형자료 적용 실험

○ 도메인 설정

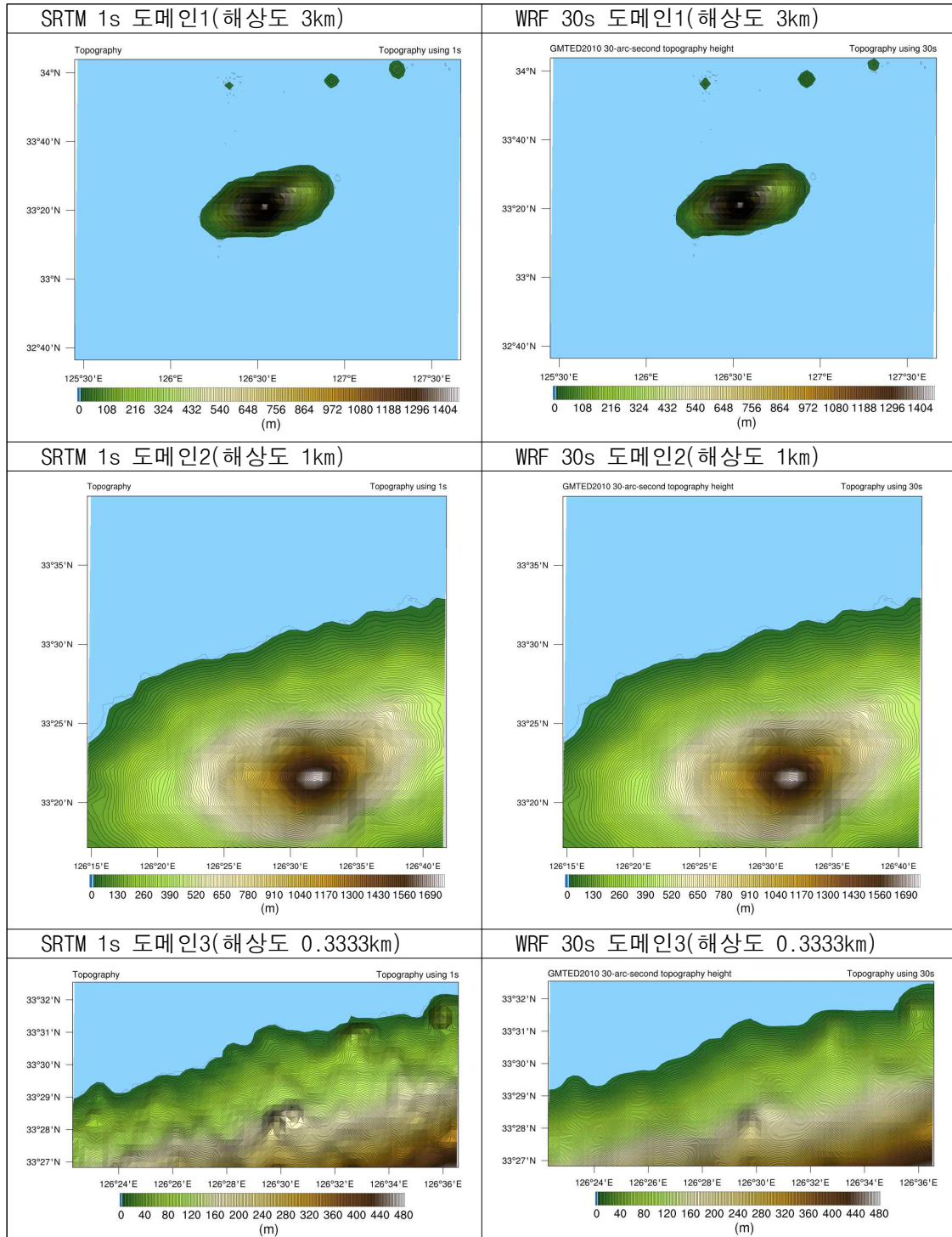
- 제주 국제공항을 중심으로 한 테스트 도메인을 설정함(W. WRF에서 제공하는 지형자료가 30s(약 900m)로 1km 이하이므로, 적용된 지형의 차이를 보다 명확히 파악하기 위해 최종 도메인을 0.3333km로 지정함
- 도메인 정보는 다음과 같음
 - 해상도(도메인1/2/3) 및 격자수: 3km/1km/0.3333km, 70×56/43×43/67×34
 - 연직층: 30층(토양 4층)
 - 중심 위경도(도메인1/2/3): 34.6°N, 127.3°E/ 33.47°N, 126.47°E/ 33.50°N, 126.49°E
 - 도메인2/3 시작 지점: 26번,26번/13번,19번
 - 지도 투영법: Lambert

도메인1은 전체 제주도와 바다가 포함되도록 잡았고, 도메인2는 제주국제공항(검은 점)을 중심에 두되, 한라산을 하단에 포함시켰으며, 도메인3은 한라산이 포함되지 않도록 함[그림 25]



[그림 25] 지형적용 실험 테스트 도메인

- SRTM 1s 지형자료와 WRF 제공의 30s 지형자료를 적용한 각 도메인의 고도는 [그림 26]과 같음
- 도메인1과 2는 명확한 차이가 드러나지 않으나, 도메인3은 세부적인 지형에서 차이를 보임



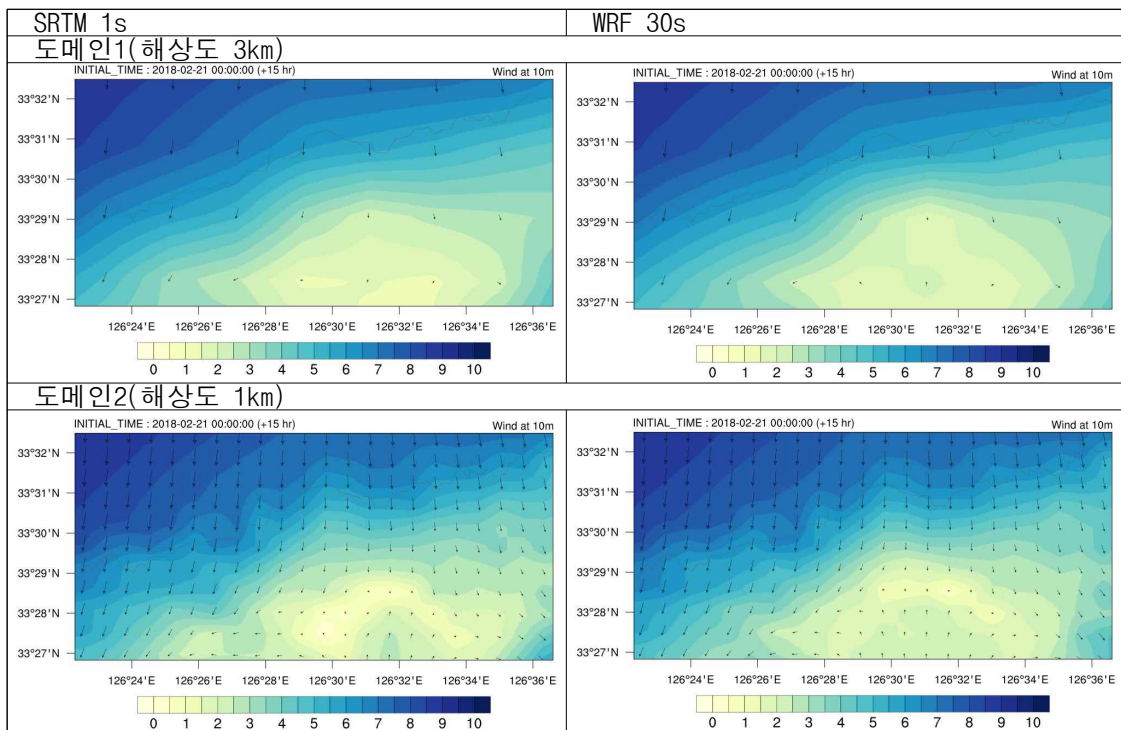
[그림 26] 각 도메인에 대한 지형자료별 고도

○ 실험구성

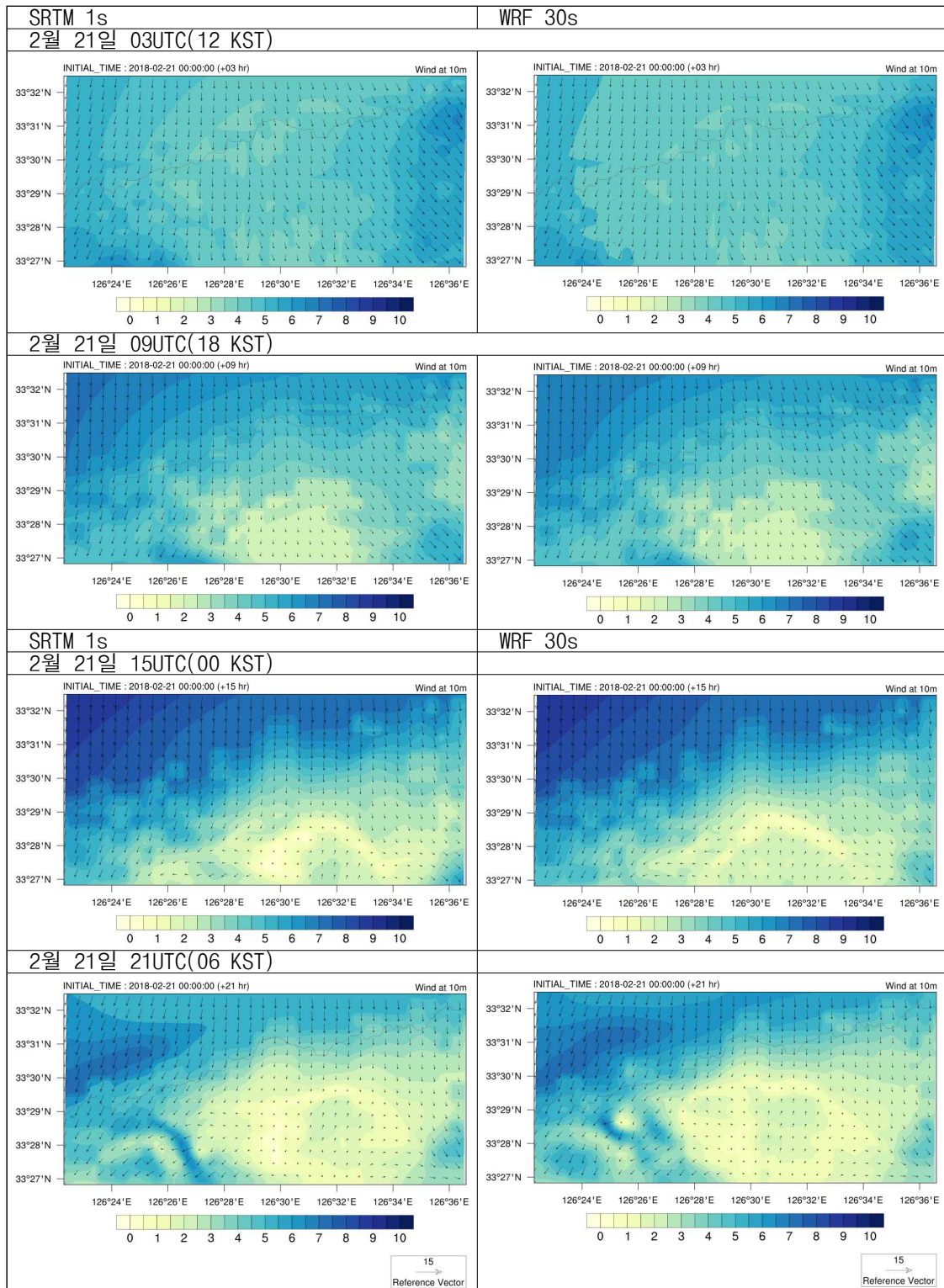
- 입력자료: GFS 0.25°
- 지형자료: SRTM 1s 지형자료, WPS 30s 해상도 자료
- timestep(도메인1/2/3): 18초/6초/2초
- 출력자료 간격(도메인1/2/3): 1시간/1시간/1시간
- 모델 top 고도: 50hPa
- 모델 연직층: 30층(+토양 4층)
- 물리과정: CONUS physics suite(WRF 초기 상태)
- 사용된 코어: 56개
- 모델수행기간: 2018년 2월 21일 00UTC ~ 2018년 2월 22일 00UTC

○ 실험 결과

- 도메인3 영역에 대한 도메인1~3의 10m 바람 분포를 입력된 지형자료에 따라 나타냈음
- 도메인1과 2는 거의 차이가 나타나지 않으나, 도메인3의 경우 예측시간이 지남에 따라 차이가 나타나기 시작함[그림 27,28]
- 그러나 도메인3에서도 아주 큰 차이를 나타내지는 않았으며, 실험지역의 지형이 비교적 단조로운 지역이라 이런 결과가 나타난 것으로 판단됨



[그림 27] 2월 21일 15UTC(00 KST) 10m 바람 벡터 및 공간분포(도메인1, 2)



[그림 28] 시간별 10m 바람 벡터 및 공간분포(도메인3, 해상도 0.3333km)

(나) 환경부 토지 이용도 자료

① 환경부 토지 이용도 적용

○ 환경부 토지이용도 자료 변환

- 환경부 토지이용도는 벡터형태의 shp 파일로 저장되어 있기 때문에 WRF에 입력하기 위해서는 변환작업이 필요함
- 변환작업은 벡터형태의 shp 파일을 래스터 형태로 변환하며, 이를 다시 ArcASCII 파일로 변환함
- 최종적으로 WRF에 입력할 수 있도록 바이너리로 변환하고, 토지이용분류를 USGS 24-카테고리로 재분류해야 함
- 먼저 shp 파일은 총 526개 도엽으로 구성되어, 이를 합치는 작업이 필요하며, 이는 ArcMap을 이용하여 진행하였으며, 다음의 메뉴를 사용하여 진행함
 - ArcToolbox - Data Management Tool - General - Merge
- 합쳐진 shp 파일은 TM 좌표체계로 되어있기 때문에 경위도 좌표체계로 변환을 진행해야하며, 다음의 메뉴를 사용함
 - ArcToolbox - Management Tool - Projections and Transformations - Feature - Project
 - Output Coordinate System에 WGS1984 입력
- 변환된 좌표체계의 벡터형태의 shp 파일을 래스터 형태로 변환해야하며, ArcGIS에서는 다음의 메뉴를 사용하여 변환할 수 있음
 - ArcToolbox - Conversion Tools - To Raster - Polygon to Raster
 - 변환될 격자의 크기를 지형자료의 사이즈에 맞게 적용하여 변환 (격자 크기 : 0.0002777777778)
- 래스터 형태로 변환된 shp 파일을 다시 ASCII 파일로 변환을 수행해야 하므로 다음의 메뉴를 사용하여 변환할 수 있음
 - ArcToolbox - Conversion Tools - from Raster - Raster to ASCII
 - 래스터 형태의 shp 파일을 입력에 넣고 ASCII로 변환
- 최종적으로 WRF에 입력할 수 있도록 ASCII 파일을 바이너리 파일로 변환해야 하고, 토지이용분류를 재분류해야함
- 이를 위해 [그림 29]와 같이 포트란 프로그램을 사용하여 변환을 진행하였으며, 환경부 토지이용분류와 USGS 24-카테고리의 분류 체계 비교는 [표 10]과 같음

```
PROGRAM read_asc_2013
IMPLICIT NONE
INTEGER, ALLOCATABLE, DIMENSION(1:1) :: grid
INTEGER, DIMENSION(15750) :: grid
INTEGER, DIMENSION(15750,18000) :: um, kom
integer :: i,my,j
open(1, FILE='korea_2013.txt')
i=0
do
  i=i+1
  read(1, *, end=999) grid
  do j = 1, 15750
    if ( grid(j) .eq. 5 .or. grid(j) .eq. 6 .or. grid(j) .eq. 7 .
    .or. grid(j) .eq. 8 .or. grid(j) .eq. 9 .or. grid(j) .eq. 10 ) then !urban and built-up land
      grid(j) = 1
    else if ( grid(j) .eq. 21 ) then ! Irrigated Cropland and Pasture
      grid(j) = 3
    else if ( grid(j) .eq. 11 ) then ! Dryland Cropland and Pasture
      grid(j) = 2
    else if ( grid(j) .eq. 18 ) then ! Cropland/Grassland Mosaic
      grid(j) = 5
    else if ( grid(j) .eq. 19 ) then ! Mixed Shrubland/Grassland
      grid(j) = 9
    else if ( grid(j) .eq. 20 ) then ! Mixed Dryland/Irrigated Cropland and Pasture
      grid(j) = 4
    else if ( grid(j) .eq. 12 ) then ! Deciduous Broadleaf Forest
      grid(j) = 11
    else if ( grid(j) .eq. 13 ) then ! Deciduous Needleleaf Forest
      grid(j) = 12
    else if ( grid(j) .eq. 14 ) then ! Mixed Forest
      grid(j) = 15
    else if ( grid(j) .eq. 15 .or. grid(j) .eq. 16 ) then ! Grassland
      grid(j) = 7
    else if ( grid(j) .eq. 17 .or. grid(j) .eq. 22 ) then ! Herbaceous Wetland
      grid(j) = 17
    else if ( grid(j) .eq. 1 .or. grid(j) .eq. 2 ) then ! Barren or Sparsely Vegetated
      grid(j) = 19
    else if ( grid(j) .eq. 3 .or. grid(j) .eq. 4 ) then ! Water bodies
      grid(j) = 16
    endif
  enddo
  um(i,18000:1)=grid
enddo
```

[그림 29] ASCII 파일을 binary로 변환하는 fortran code

[표 10] 환경부 토지이용분류와 USGS 24-카테고리 비교

환경부 토지 중분류		USGS 24-category	
110	주거지역	1	Urban and Built-Up Land
120	공업지역		
130	상업지역		
140	위락시설지역		
150	교통지역		
160	공공시설지역		
210	논	3	Irrigated Cropland and Pasture
220	밭	2	Dryland Cropland and Pasture
230	하우스재배지	5	Cropland/Grassland Mosaic
240	과수원	9	Mixed Shrubland/Grassland
250	기타재배지	4	Mixed Dryland/Irrigated Cropland and Pasture
310	활엽수림	11	Deciduous Broadleaf Forest
320	침엽수림	12	Deciduous Neddleleaf Forest
330	혼효림	15	Mixed Forest
410	자연초지	7	Grassland
420	골프장		
430	기타초지		
510	내륙습지	17	Herbaceous Wetland
520	연안습지		

610	채광지역	19	Barren or Sparsely Vegetated
620	기타나지		
710	내륙수	16	Water Bodies
720	해양수		
		6	Cropland/woodland Mosaic
		8	Shrubland
		10	Savanna
		13	Evergreen Broadleaf Forest
		14	Evergreen Needleleaf Forest
		18	Wooded Wetland
		20	Herbaceous Tundra
		21	Wooded Tundra
		22	Mixed Tundra
		23	Bare Ground Tundra
		24	Snow or Ice

*참고문헌: 대기질모델링 정보자료 제공을 위한 자료공개 시스템 구축2(2012), 국립환경과학원

○ 환경부 토지이용자료 적용

– 최종적으로 산출된 토지이용자료의 정보는 다음과 같음

- x 격자수: 15750
- y 격자수: 18000
- 셀 사이즈: 0.0002777777778(약 30m)
- x 좌하단 코너: 124.99999999°E
- y 좌하단 코너: 33.124999999°N

– 지형자료와 마찬가지로 좌하단 파일을 기준으로 1번이 시작되며, 이후 파일들은 좌하단 파일에 이어지는 번호를 부여하였으나, 토지이용도는 1개의 파일로 구성되며, 변환된 토지이용자료는 다음의 이름을 가짐

- 00001-15750.00001-18000

– 지형고도 파일과 마찬가지로 WRF의 지형자료가 존재하는 GEOG 폴더 안에 새로운 폴더를 만들어서 지형자료와 index 파일을 넣어야 함

– 여기서는 폴더명을 'landuse_korea'로 정의하고 파일을 넣었으며, index 파일 정보는 [표 11]과 같음

[표 11] 환경부 토지이용도 index 파일

type = categorical	(자료 형태, 연속자료 명목자료인지)
category_min=1	(카테고리 최소값)
category_max=24	(카테고리 최대값)
projection = regular_ll	(투영법)
missing_value=-9999	(missing value 값)
dx = 0.000277777778	(x 방향 격자크기)
dy = 0.000277777778	(y 방향 격자크기)
known_x = 1.0	(known_lon에 해당하는 x격자번호)
known_y = 1.0	(known_lat에 해당하는 y격자번호)
known_lat = 33.12499999	(known_y에 해당하는 위도)
known_lon = 124.99999999	(known_x에 해당하는 경도)
wordsize = 4	(byte 수)
row_order=top_bottom	(자료 읽는 방향)
endian=little	(endian 방식)
tile_x = 15750	(x 격자수)
tile_y = 18000	(y 격자수)
tile_z = 1	(z 격자수)
units="category"	(단위)
description="landuse_korea"	(설명)

- WRF의 namelist에서 SRTM 자료를 적용할 수 있도록 GEOGRID.TBL을 수정해야 함
- 토지피복 관련 변수명은 LANDUSEF로, 이에 대한 테이블 추가가 필요함
- 추가된 GEOGRID.TBL의 LANDUSEF 부분은 [표 12]와 같음

[표 12] 환경부 토지이용도 적용을 위한 GEOGRID.TBL 일부

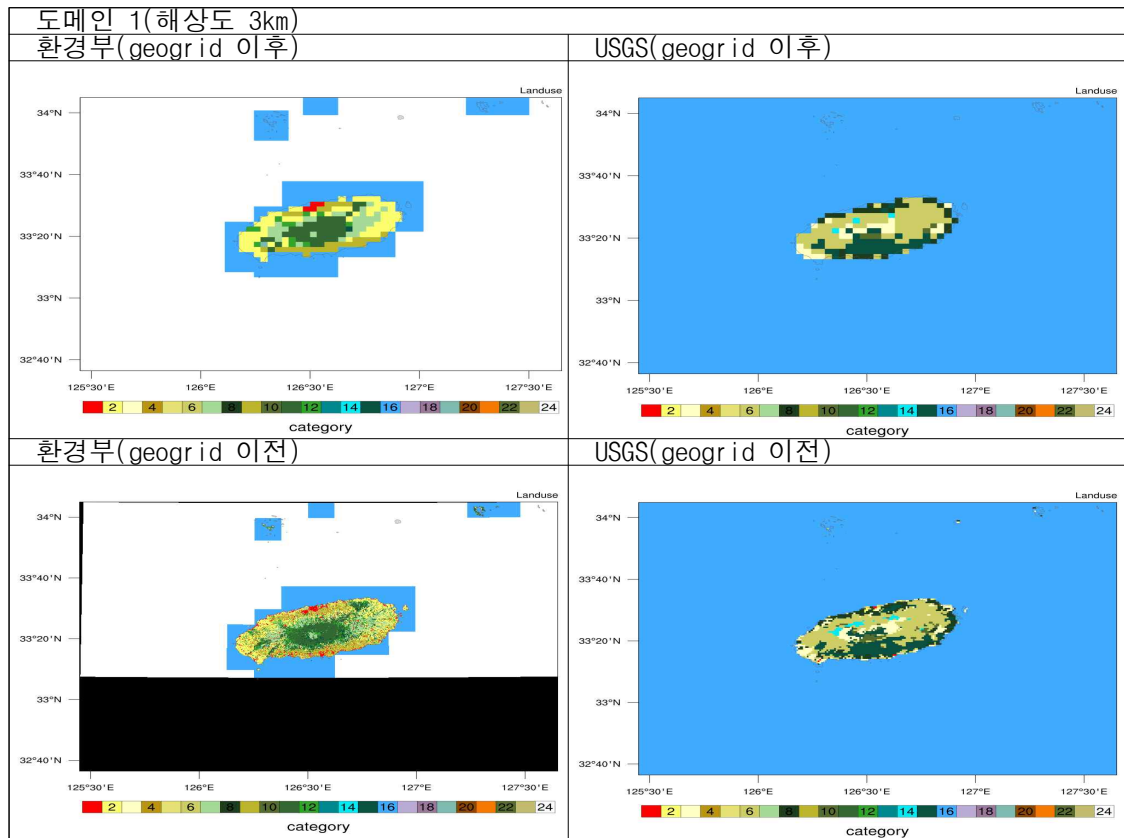
name=LANDUSEF
priority=2
dest_type=categorical
z_dim_name=land_cat
landmask_water = korea:16
interp_option = korea:nearest_neighbor
rel_path = korea:landuse_korea/

② 토지이용도 적용 실험

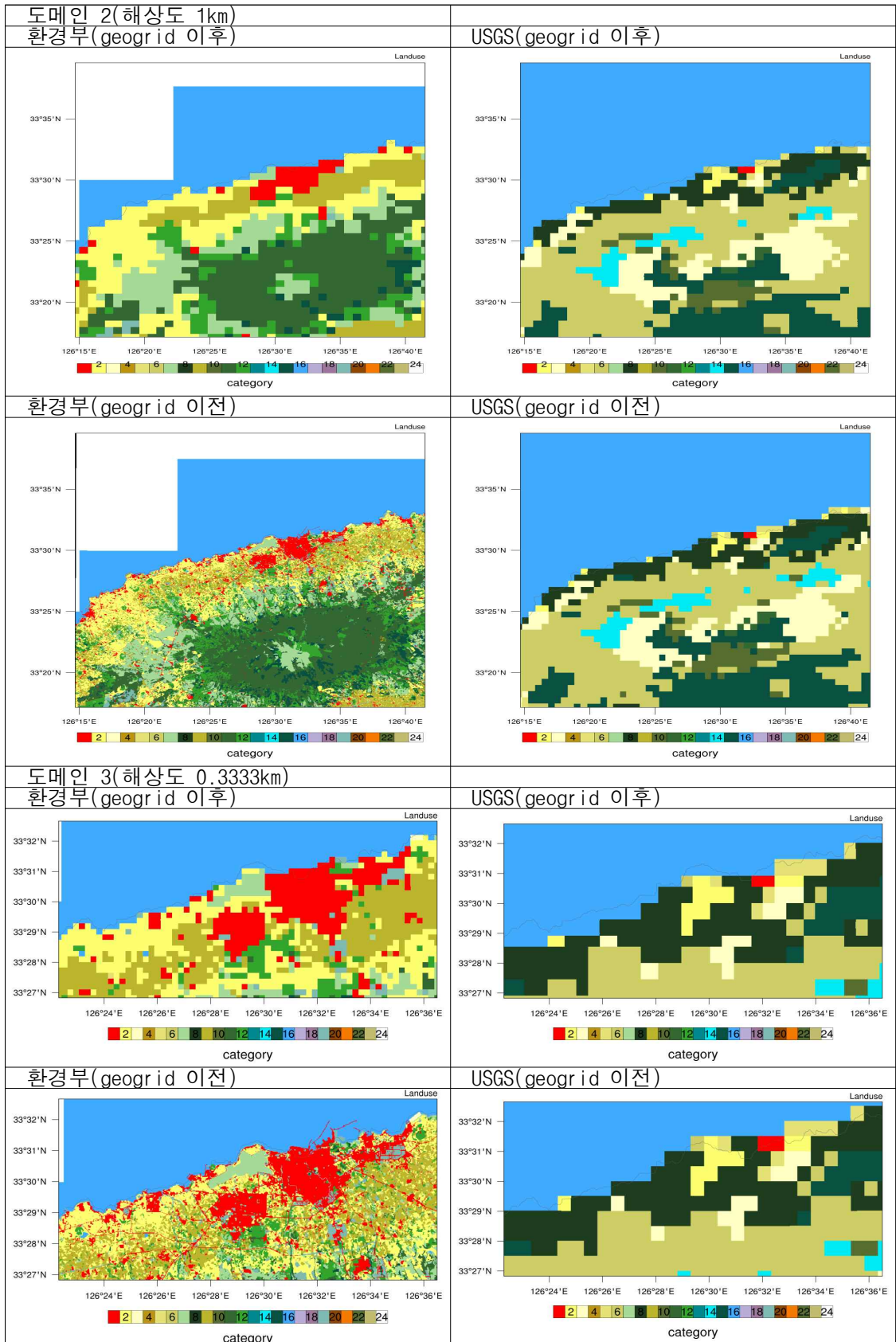
○ Landuse 비교

- 토지이용도 적용실험은 SRTM 적용실험과 같은 환경설정으로 진행하였으며, 우선적으로 적용된 Landuse를 WRF에서 제공하는 USGS 토지피복도와 비교를 진행함

- geogrid에서 생산된 지형자료의 LANDUSEF 변수는 각 카테고리 별로 1이하의 숫자를 배정하여 해당 격자의 각 카테고리가 해당하는 비율을 나타냄
- 따라서 그림을 그리기 위해 각 카테고리 중 가장 큰 것을 찾아 그림으로 나타냈음
- USGS에 비해 환경부 자료가 고해상도로 갈수록 더 제주도의 토지피복을 잘 반영 하였으며, 특히 제주도심 지역을 환경부 자료가 잘 나타내고 있음[그림 30,31]



[그림 30] 각 도메인별 환경부 및 USGS 카테고리 비교(도메인 1)



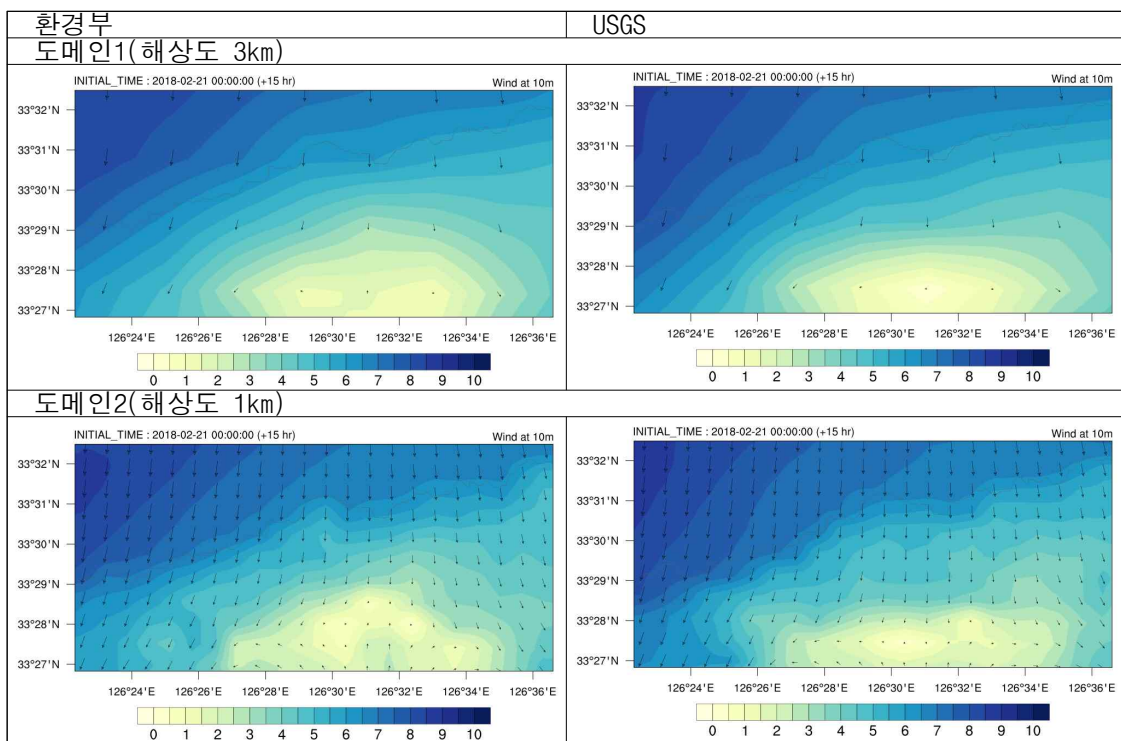
[그림 31] 각 도메인별 환경부 및 USGS 카테고리 비교(도메인 2,3)

○ 실험구성

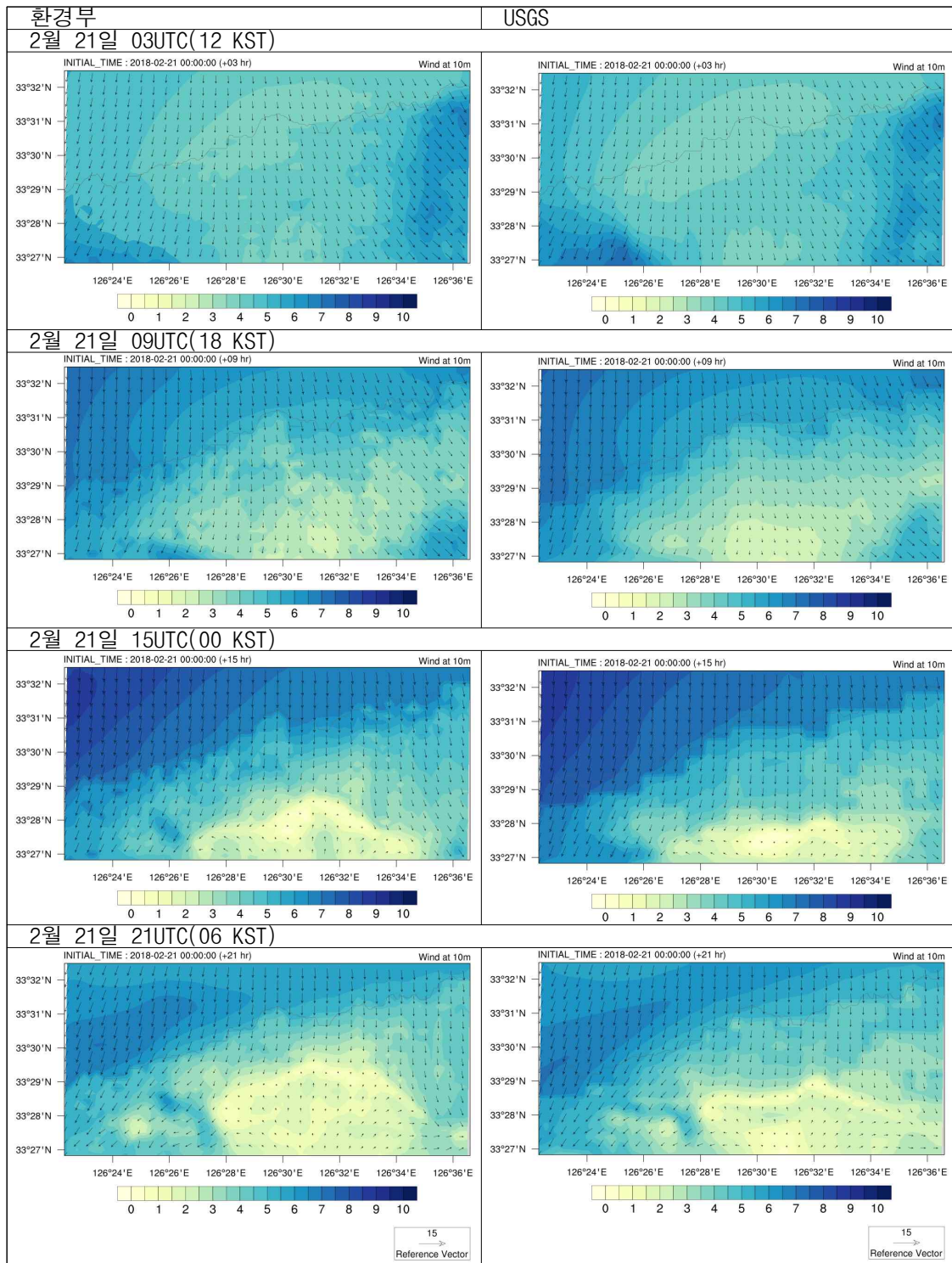
- 입력자료: GFS 0.25° / 지형자료: SRTM 1s 지형자료
- 토지이용도 자료: 환경부 30m 토지이용도, USGS 24-카테고리 30초 자료
- timestep(도메인1/2/3): 18초/6초/2초
- 출력자료 간격(도메인1/2/3): 1시간/1시간/1시간
- 모델 top 고도: 50hPa
- 모델 연직층: 30층(+토양 4층)
- 물리과정: CONUS physics suite(WRF 초기 상태)
- 사용된 코어: 56개
- 모델수행기간: 2018년 2월 21일 00UTC ~ 2018년 2월 22일 00UTC

○ 실험 결과

- SRTM+환경부(1s)와 SRTM+USGS(30s)을 비교하였으며, 도메인3 영역에 대한 도메인1~3의 10m 바람장을 작성하였음[그림 32,33]
- 도메인1과 2의 경우 크게 차이를 보이지 않는 것으로 나타남
- 도메인3의 경우 지형을 다르게 한 실험을 비교했을 때 보다 토지이용도를 변화시켰을 경우의 차이가 더 큰 것을 확인할 수 있음
- 환경부 토지이용자료를 사용했을 경우 USGS보다 국지적인 바람장의 차이가 더 크게 나타나는 것으로 보임



[그림 32] 2월 21일 15UTC(00 KST) 10m 바람 벡터 및 공간분포(도메인1, 2)



[그림 33] 시간별 10m 바람 벡터 및 공간분포(도메인3, 해상도 0.3333km)

(4) 초저고도 바람예측 모델 시범 지역 선정 및 실험 설계

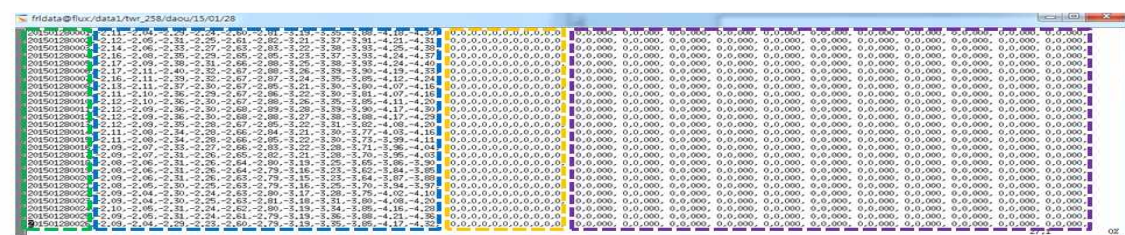
(가) 시범 지역 - 보성

① 보성 관측자료 정보

- 150m 이하 초저고도 바람예측 모델 성능 검증을 위한 고도별 관측자료가 존재하는 보성글로벌표준기상관측소를 시범지역으로 선정함
- 보성글로벌표준기상관측소는 중심위경도가 34.7637°N, 127.2124°E이고 이를 중심으로 한 도메인을 설정함
- 보성글로벌표준기상관측소는 종합기상타워를 운영하고 있음



[그림 34] 보성글로벌표준기상관측소 조감도(왼쪽) 및 관측탑(오른쪽), 기상청 제공



날짜 및 시간	11개 층의 자료	11개 층 별 flag	11개 층 별 detailed flag
		※ 각 Flag의 의미	
		0 : pass	※ Humidity
		1 : missing	Raw 24 : missing
		2 : erroneous	Raw 25 : limits check
		3 : suspect	Raw 26 : persistency check
			Raw 27 : spike check
			Raw 28 : profile check
			Raw 29 : range check
			※ Wind speed
			Raw 24 : missing
			Raw 25 : limits check
			Raw 26 : internal consistency check
			Raw 27 : persistency check
			Raw 28 : spike check
			Raw 29 : profile check
			Raw 30 : range check
			※ Wind direction
			Raw 24 : missing
			Raw 25 : limits check
			Raw 26 : internal consistency check
			Raw 27 : persistency check
			Raw 28 : spike check

[그림 35] 보성글로벌표준기상관측소 종합기상탑 자료 제공 형식

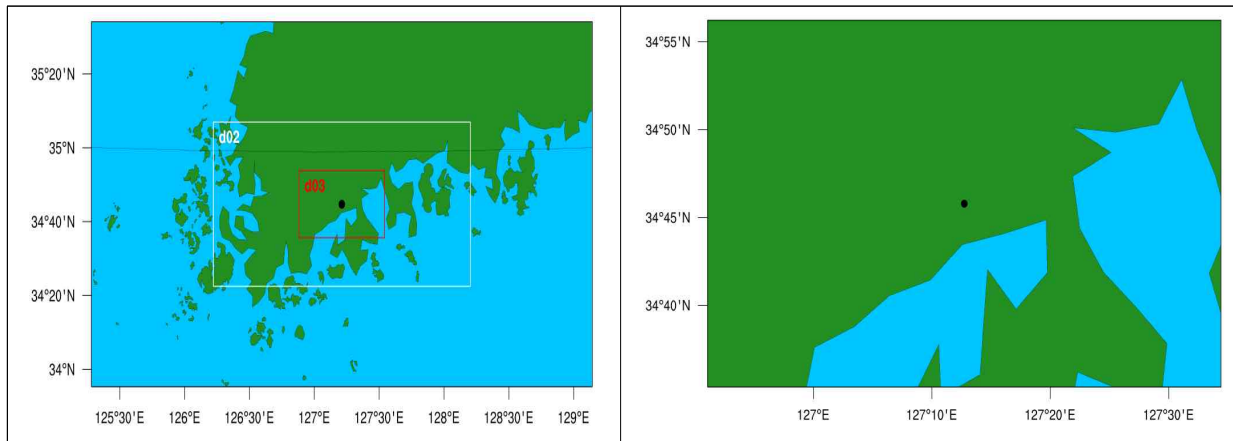
- 보성글로벌표준기상관측소에서 관측하는 자료의 정보는 다음과 같음
 - 관측요소: 온도, 습도, 풍향, 풍속
 - 관측주기: 1분
 - 관측고도(11개층): 10, 20, 40, 60, 80, 100, 140, 180, 220, 260, 300m
 - 자료형식
- (ex)20150701_T.txt: 2015.7.1. 평균온도자료[T:온도 H:습도 V:풍속 WD:풍향])

② GFS 및 LDAPS 도메인 설정

- GFS 및 LDAPS는 모두 보성관측타워를 중심으로 하여 도메인을 설정하고 GFS의 경우 도메인1은 서쪽의 바다가 많이 포함되고, 북쪽으로 지리산이 모두 포함되도록 함
- 도메인2는 서쪽으로 바다의 경계가 포함되고 북쪽으로는 지리산이 포함되지 않도록 하였으며, 도메인3은 동서로 도메인2의 약 33%, 남북으로 도메인2의 약 40%를 차지하도록 설정함
- LDAPS는 GFS의 도메인3과 유사한 영역을 가지게 하되, 모든 방향으로 5개씩 격자를 늘리도록 생성함
- 자세한 도메인 설정정보는 [표 13]과 같으며, 그림 17에 GFS 및 LDAPS 도메인을 각각 나타내었음

[표 13] GFS 및 LDAPS 도메인 설정

구분	GFS	LDAPS
해상도	도메인1: 4.5km 도메인2: 1.5km 도메인3: 0.5km	0.5km
격자수(동서×남북)	도메인1: 79×41 도메인2: 121×41 도메인3: 121×67	131×77
중심위경도	34.7637° N, 127.2124° E	34.7637° N, 127.2124° E
도메인2/3 시작지점(동서, 남북)	도메인2: 20번, 12번 도메인3: 41번, 17번	-
지도투영법	Lambert	Lambert
지형자료	SRTM 1s	SRTM 1s
토지이용자료	도메인1,2: USGS 24-카테고리 도메인3: 환경부 토지이용도	도메인3: 환경부 토지이용도



[그림 36] GFS(좌) 및 LDAPS(우) 입력자료 실험 보성도메인

(나) 초저고도 바람예측 모델 설계

① 150m 이하 초저고도 WRF 연직층 구성

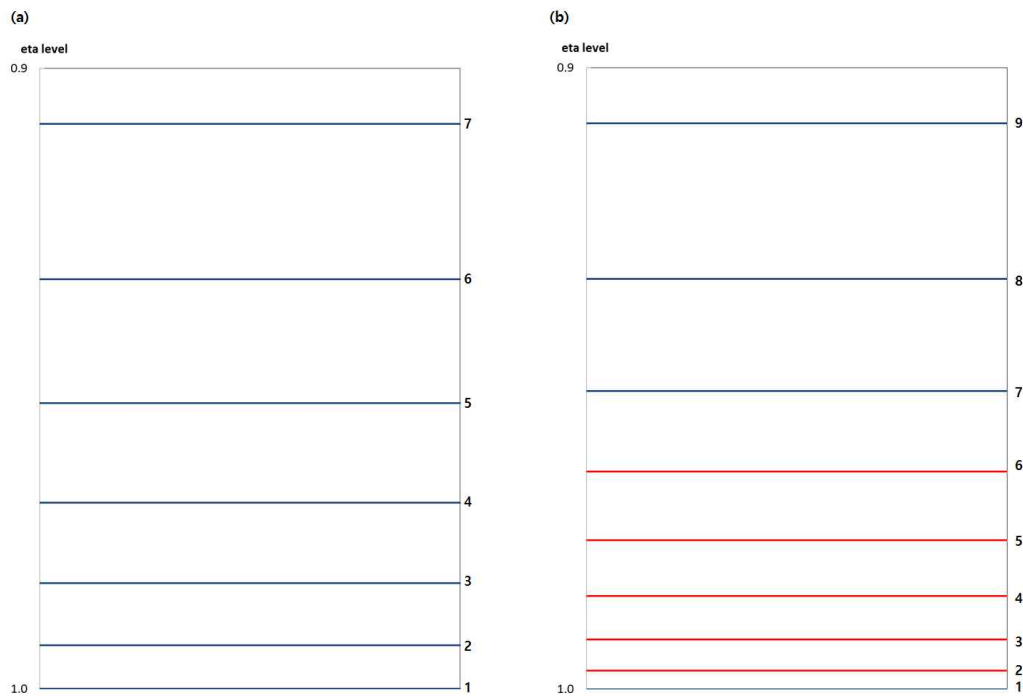
- 150m 이하 초저고도 바람예측을 위해 하층에 대한 모델면을 추가하여 바람예측 성능을 높이고자 함
- WRF에서 모델의 최상단 높이를 50hPa로, 연직층을 30층으로 할 경우 초기 상태 고도는 [표 14]와 같으며 150m 이하 층은 3개임
- 500m 이하 하층에 대해 eta level 차이를 0.003, 0.005, 0.007, 0.009, 0.011, 0.013으로 하여 연직층 수를 늘렸으며, 이에 대한 자세한 정보는 [표 15]와 같음
- 150m 이하에 해당하는 층은 기존 3개에서 4개로 늘어났으며, 8층부터는 WRF 초기 상태의 6층 이후와 같은 층을 사용함
- eta level 0.9 이하 하층에 대한 연직층 분포는 [그림 37]과 같음
 - (a)가 초기 상태이고, (b)가 변경된 연직층이며 서로 다른 부분을 빨간색으로 표시함
 - (b)가 좀 더 점진적으로 층 간격이 증가하는 것을 볼 수 있음

[표 14] WRF 30개 연직층 초기상태

층	eta level	eta level 차이	높이(m)	두께(m)
1	1.000000	-	0	-
2	0.993000	0.007000	56.6	56.6
3	0.983000	0.010000	137.9	81.4
4	0.970000	0.013000	244.7	106.8
5	0.954000	0.016000	377.6	132.9
6	0.934000	0.020000	546.3	168.7
7	0.909000	0.025000	761.1	214.8
8	0.880000	0.029000	1016.2	255
9	0.831800	0.048200	1455.3	439.1
10	0.783500	0.048300	1914.6	459.3
11	0.735300	0.048200	2396.2	481.6
12	0.687000	0.048300	2902.5	506.3
13	0.603600	0.083400	3845.1	942.6
14	0.527900	0.075700	4787.7	942.6
15	0.459500	0.068400	5730.3	942.6
16	0.397700	0.061800	6672.9	942.6
17	0.342000	0.055700	7615.5	942.6
18	0.291900	0.050100	8558.1	942.6
19	0.246900	0.045000	9500.7	942.6
20	0.206700	0.040200	10443.3	942.6
21	0.170700	0.036000	11385.9	942.6
22	0.138700	0.032000	12328.5	942.6
23	0.110300	0.028400	13271.1	942.6
24	0.086020	0.024280	14213.7	942.6
25	0.065350	0.020670	15156.3	942.6
26	0.047760	0.017590	16098.9	942.6
27	0.032790	0.014970	17041.5	942.6
28	0.020060	0.012730	17984.1	942.6
29	0.009221	0.010839	18926.7	942.6
30	0.000000	0.009221	19869.3	942.6

[표 15] 추가된 연직층 설정의 높이

층	eta level	eta level 차이	높이(m)	두께(m)
1	1.000000	-	0	-
2	0.997000	0.003000	약 24.0	약 24.0
3	0.992000	0.005000	약 64.0	약 40.0
4	0.985000	0.007000	약 121.0	약 57.0
5	0.976000	0.009000	약 194.0	약 73.0
6	0.965000	0.011000	약 284.5	약 90.5
7	0.952000	0.013000	약 392.0	약 107.5



[그림 37] eta level 0.9 이하에 대한 연직층, (a) 초기 상태, (b) 연직층 변경

② WRF 최적 물리과정 실험을 위한 PBL 적용관련 연구 조사

○ WRF Hub-Height Wind Forecast Sensitivity to PBL Scheme, Grid Length, and Initial Condition Choice in Complex Terrain(2017)

– 모델: WRF version 3.5.1

– 격자 정보(도메인1,2,3): 36km(100×76), 12km(136×103), 4km(103×103)

– 검증고도: 4개 지점의 풍력발전기 터빈 높이(약 80~95m)

– 터빈 높이와 가장 가까운 모델 level을 interpolation 함

– Planetary boundary layer: YSU, MRF, ACM2, MYJ, QNSE, MYNN, GBM, UW

– Surface layer: MM5(YSU, ACM2, MRF, MYNN, GBM, UW), Eta(MYJ), QNSE(QNSE)

– 결과

- 연구지역의 지점과 시간을 평균하면 ACM2가 높은 예보정확도를 보임
- 특정 위치, 특정 계절, 특정 시간대에서는 일부 다른 PBL scheme도 높은 정확도를 보임

○ Sensitivity of the WRF model to PBL parametrisations and nesting techniques evaluation of wind storms over complex terrain(2015)

- 모델: WRF version 3.5
- 격자 정보(도메인1,2,3,4): 54km, 18km, 6km, 2km
- 검증고도: 지표(surface wind)
- Planetary boundary layer: YSU, ACM2, MYJ, 수정된 YSU
- 결과
 - PBL scheme에 따라 WRF의 풍속예보 정확도가 크게 좌우됨
 - 수정된 YSU가 관측과의 차이가 가장 적었으며 풍향은 크게 차이가 나지 않음

○ WRF 모델을 이용한 지표층 바람장의 대기경계층 모수화와 지면모델 민감도 평가 (2010)

- 모델: WRF version 3.0.1
- 격자 정보(도메인1,2,3,4): 54km, 18km, 6km, 2km
- 검증고도: 10m(기상대-약 81개), 80m(고층 기상대-속초, 흑산도, 백령도, 포항, 고산)
- Planetary boundary layer: YSU, MYJ, Pleim(ACM2)
- Land surface model(LSM): Noah, RUC, Pleim(ACM2)
- 결과
 - 고도가 상승할수록 풍속은 LSM보다 PBL의 영향을 더 많이 받음
 - 10m 풍속결과는 Pleim-Pleim 실험에서 가장 오차가 작았음
 - 그러나 모델이 수치불안정으로 중지 되는 경우가 발생하여, 다양한 기상사례에 대한 지표 바람장 모의 연구에 사용이 불안정하다고 판단함
 - 80m 풍속결과는 MYJ-RUC 실험에서 가장 오차가 작았음
 - 전반적인 지표층 바람장 모의에 적합한 모델은 MYJ-RUC로 판단함
 - 풍향은 뚜렷한 차이는 나타나지 않음

○ Analysis of WRF model performance over subtropical region of Delhi, India(2011)

- 모델: WRF version 3.1.1
- 격자 정보(도메인1,2,3): 18km, 6km, 2km
- 검증고도: 지표
- Planetary boundary layer: MYJ, YSU, ACM2, QNSE
- 결과
 - ACM2-PX 가 전반적으로 기온과 상대습도를 가장 잘 모의함
 - YSU가 풍향 및 풍속을 가장 잘 모의함

○ 수도권 지역의 고해상도 WRF 모델 기반 연직 해상도 및 경계층 모수화 방안 민감도 실험(2015)

- 모델: WRF version 3.6.1
- 격자 정보(도메인1,2,3): 3km, 1km, 333m
- 검증고도: 지표 ~ 1km(라디오존데 관측자료)
- Planetary boundary layer: YSU, MYJ, Pleim(ACM2)
- Land surface model(LSM): Pleim
- 결과
 - 연직 고도별 수평 풍속 변화는 시간에 따라 모의 정확도가 달랐음
 - RDAPS의 경우 PBL이하 하층 연직해상도가 낮아 도심의 하층 고해상도 바람 변화를 추정하기에는 한계가 있음
 - PBL 모수화 방안에 대한 연직 기상변수의 변동은 기온보다 풍속 모의에 미치는 영향이 더 뚜렷하며 모든 실험이 연직 풍속 변화를 적절히 모의하지 못함
 - UM 분석장도 관측값에 비해 큰 차이가 나타나, 모델 초기장 및 경계장의 정확도가 영향을 미쳤다고 판단함
 - PBL 이하의 고도에서 풍속은 YSU, ACM2, MYJ 순으로 오차가 적음
 - YSU, ACM2 scheme은 1차 종결(first-order closure) 방안인데 반해, MYJ scheme은 난류운동에너지 종결(Turbulent kinetic energy closure) 방안으로 PBL 고도 내에서 대기를 차고 습하게 모사함

○ 선행연구에서 사용한 물리과정 요약

- 선행연구에서는 하층 바람에 대해 주로 PBL을 조정하였고(Surface Layer는 PBL과 짝을 이루는 경우가 대다수), 추가적으로 Land Surface를 조정하는 실험이 있었음
- 선행연구에서 주로 사용된 PBL scheme은 다음과 같음
 - YSU scheme(WRF 1번 옵션)
 - MYJ(Mellor-Yamada-Janjic or Eta) scheme(WRF 2번 옵션)
 - ACM2(Pleim) scheme(WRF 7번 옵션)
- Land Surface scheme은 다음과 같음
 - unified Noah land-surface model(WRF 2번 옵션)
 - RUC land-surface model(WRF 3번 옵션)
 - Pleim-Xiu scheme(WRF 7번 옵션)
- LSM도 함께 실험한 '다. WRF 모델을 이용한 지표층 바람장의 대기경계층 모수화와 지면모델 민감도 평가(서범근 등, 2010)' 에서 YSU, MYJ(PBL)를 사용했을 경우는 NOAA, RUC(LSM)을 사용했고, ACM2(Pleim)을 사용했을 경우에는 LSM도 Pleim만 사용함

- 나머지 실험들에서는 Land Surface를 Noah나 Pleim으로 고정하여 사용한 경우가 있었으며, RUC를 추가적으로 사용한 경우도 있음
- GFS와 LDAPS 입력자료에 대한 실험을 모두 진행해야 하므로, 우선적으로 LSM은 Noah를 고정하고, PBL scheme에 대해 YSU, MYJ를 적용한 실험을 우선적으로 진행하기로 결정하였으며, 2차년도에 추가적으로 LSM 변경 실험을 수행할 예정임

③ LES 및 WRF 적용

○ LES 정의 및 사용목적

- 지표면 근처의 바람장에는 지형과 지표이용도가 큰 영향을 미치며, 이에 따라 고해상도의 지형 및 지표이용도 자료와 고해상도 수치모델이 필요함
- 또한 고해상도의 수치모델은 모수화 방안을 이용하는 저해상도 수치실험과 달리 대기경계층 난류의 직접 계산이 가능함
- 모수화 방안은 말 그대로 실제 수치적으로 난류를 계산하는 것이 아니라 모수화를 시킨 것이고, LES의 경우 작은 크기의 난류는 모수화하고 큰 크기의 난류를 직접 수치로 모의하여 보다 정확한 난류를 계산할 수 있음
- 이러한 난류는 대기흐름과 확산에 중요한 요인으로 작용하며, 이로 인해 기온 및 바람 등이 영향을 받을 수 있으나 계산 소요시간이 증가할 수 있다는 단점이 있음
- 지표면 근처의 풍속은 LES를 적용하면 정확성이 향상될 수 있을 것으로 보이지만, 실제로 성능이 어떻게 나오는지 확인해보기 위해 실험을 수행함

○ WRF에 적용방법

- WRF에서 LES 방안을 적용하기 위해서는 추가적인 컴파일이 필요하진 않으며, namelist 옵션 중 몇 가지를 수정하면 적용할 수 있음
- 여기서 고려할 옵션은 PBL 물리과정(bl_pbl_physics), 지면으로부터의 열 및 수분플럭스(isfflx), 확산 옵션(diff_opt, km_opt)임
- WRF에서 LES를 적용하기 위해서는 bl_pbl_physics 옵션을 0번으로 하여 사용하지 않고, isfflx 옵션을 1번으로 하여 플럭스를 고려해야 하며, diff_opt는 2번, km_opt는 2 또는 3번을 적용해야 함
- 이에 대한 자세한 namelist 옵션 적용은 다음의 표와 같으며, 1km 이하의 도메인3에 대해서만 LES를 적용한 namelist 예시임

[표 16] LES를 적용한 namelist 예시

&physics				
sf_sfclay_physics	= 1,	1,	1,	주로 1번 사용
bl_pbl_physics	= 1,	1,	0,	LES 적용 도메인에 0번 부여
isfflx	= 1,			지면으로부터 열, 수분 플럭스 고려
&dynamics				
diff_opt	= 1,	1,	2,	turbulence and mixing option
km_opt	= 4,	4,	2,	eddy coefficient option
				위 둘다 LES 적용 도메인에 2번 부여

(다) 모델 성능 향상을 위한 시범 지역 적용 실험

① 실험구성

- 시범지역에 대한 최적 물리과정을 선정하고, GFS와 LDAPS 중 더 나은 입력자료를 선정하기 위한 실험을 진행함
- 실험은 2018년 4월의 1개월 동안 00UTC와 12UTC의 초기시간으로 진행하였으며, 지역모델 실험이므로 경계조건이 필요하여, 입력자료가 가용한 범위에 따라 GFS는 3일, LDAPS는 1.5일 예측을 수행함
- TEST1은 전체 물리과정을 CONUS(Continental US) physics suite으로 진행하며 이는 'NCAR Convection-Permitting Suite'에 해당하는 물리과정 세트로 미국 대륙의 대류성 일기(convective weather)에 초점을 맞춘 것임
- TEST2는 TEST1에서 국내에서 일반적으로 사용하는 세팅을 변경한 실험으로, Microphysics를 WSM6로, Cumulus Parameterization을 사용하지 않고 진행하였고 TEST3~7도 Microphysics, Cumulus Parameterization, Longwave Radiation, Shortwave Radiation을 모두 TEST2와 같은 셋팅으로 적용함
- TEST1~TEST5는 Land Surface를 모두 unified Noah land-surface model로 사용하였고, TEST6,7은 Pleim-Xiu, TEST8은 RUC를 사용함
- TEST1,2는 PBL scheme을 Mellor-Yamada-Janjic로 사용하였고, TEST3,7,8은 YSU, TEST5,6은 ACM2를 사용하였음
- TEST4는 1km 이하의 격자(도메인3)에 대해 PBL scheme을 사용하지 않고, 큰 에디모사(Large Eddy Simulation, LES)를 적용하여 직접 난류를 계산하는 방안을 사용하여 성능을 테스트하였음
- Surface Layer의 경우 PBL scheme과 연동되어, MYJ에는 Monin-Obukhov를, YSU와 LES에는 Revised MM5를, ACM2에는 Pleim-Xiu를 적용하였음

- TEST에 대한 자세한 사항은 표 17과 같음
- 실험결과 검증을 위한 관측자료로 보성글로벌표준기상관측소의 자료를 사용하였으며, 검증 변수는 10m, 100m의 풍속과 풍향을 대상으로 함
- 예측자료는 보성글로벌표준기상관측소가 포함되는 격자의 값을 추출하여 사용함
- 풍속 검증을 위한 지표로는 RMSE와 BIAS를 사용하였으며, 계산식은 다음과 같음

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (F_i - O_i)^2}, \quad BIAS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (F_i - O_i)}$$

F_i =예측값, O_i =관측값, N =관측 및 예측자료 개수

[표 17] 각 테스트별 물리과정 설정

물리과정	Test1	Test2	Test3	Test4	Test5	Test6	Test7	Test8
Microphysics (mp_physics)	Thompson graupel scheme (8번)	WSM 6-class graupel scheme(6번)						
Cumulus Parameterization (cu_physics)	Tiedtke scheme (6번)	off(0번)						
Longwave Radiation (ra_lw_physics)	RRTMG scheme(4번)							
Shortwave Radiation (ra_sw_physics)	RRTMG scheme(4번)							
Land Surface (sf_surface_physics)	unified Noah land-surface model(2번)					Pleim-Xiu scheme (7번)		RUC (4번)
Surface Layer (sf_sfclay_physics)	Monin-Obukhov (Janjic Eta) scheme(2번)		Revised MM5 Monin-Obukhov scheme(1번)		Pleim-Xiu(7번)		Revised MM5 Monin-Obukhov scheme(1번)	
Planetary Boundary layer (bl_pbl_physics)	Mellor-Yamada-Janjic (Eta) TKE scheme (2번)		YSU scheme (1번)	도메인1,2 YSU, 도메인3 LES 적용	ACM2 scheme(7번)		YSU scheme (1번)	

- 풍향 검증을 위한 지표로는 RMSE를 사용하였으나, 풍향의 경우, 각도로 계산되기 때문에, 내각이 풍향간의 차이로 판단되어 RMSE를 계산할 때 다음의 식을 적용함

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F'_i - O'_i)^2}$$

$$F'_i = F_i, \quad O'_i = O_i \quad \text{if } |F_i - O_i| \leq 180$$

$$F'_i = F_i + 360, \quad O'_i = O_i \quad \text{if } |F_i - O_i| > 180 \text{ and } F_i < O_i$$

$$F'_i = F_i, \quad O'_i = O_i + 360 \quad \text{if } |F_i - O_i| > 180 \text{ and } F_i > O_i$$

, F_i =예측값, O_i =관측값, N =관측 및 예측자료 개수

- RMSE와 BIAS 계산은 00UTC와 12UTC 초기시간을 분리하여, 1개월의 모델결과를 가지고 수행하였음
- GFS의 경우 입력자료 수집이 되지 않은 시간이 있어서, 해당 시간은 제외하고 예측모델을 수행함

② 실험 소요 시간 및 문제점

- 각 실험을 진행하는데 소요된 시간은 하나의 초기시간별로 다음의 표와 같으나, 각 초기시간별로 시간이 상이한 경우가 자주 있음
- TEST1이 가장 적은 시간이 필요했으며, 나머지는 유사한 소요시간을 나타냄
- LES를 적용한 TEST4는 다른 TEST에 비해 GFS와 LDAPS 모두에서 크게 시간이 증가되지 않는 것으로 보임

[표 18] 각 테스트별 소요시간

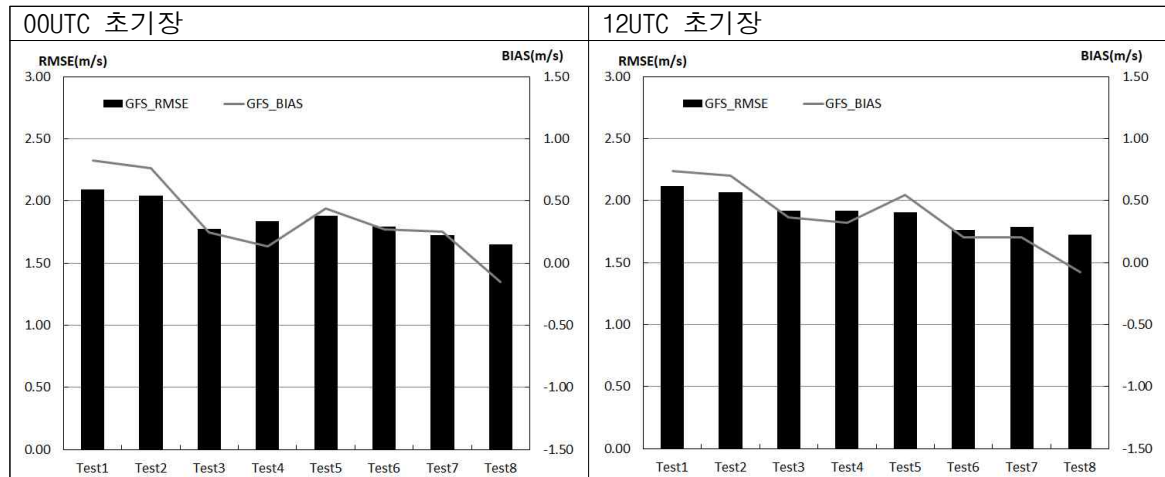
TEST	GFS	LDAPS
TEST1	약 4시간	약 50분
TEST2	약 5시간	약 75분
TEST3	약 5시간	약 75분
TEST4	약 5시간	약 80분
TEST5	약 5시간	약 75분
TEST6	약 5시간	약 75분
TEST7	약 5시간	약 75분
TEST8	약 5시간	약 75분

- WRF-LES를 수행할 경우, CFL(Courant-Friedrichs-Lewy) 조건에서 위배되어 수치적으로 불안정하여 모델이 수행되지 않는 경우가 생기며, 이는 주로 연직바람의 속도가 너무 빠른 경우 발생됨
- LES의 경우 PBL scheme을 사용하지 않고, 격자 내의 큰 난류를 수치적으로 계산하기 때문에 발생하기 쉬운 것으로 판단됨
- GFS 입력자료를 사용했을 경우, 총 53개의 실험 중 12개의 실험이 수치불안정으로 중단되었고(약 23%), LDAPS 입력자료를 사용했을 경우에는 총 60개의 실험 중 20개의 실험이 수치불안정으로 중단됨(33%)
- 이러한 문제점을 해결하기 위해서 실패한 실험에 대해 적분간격을 줄여가며 모델을 수행했으나 적분간격을 줄일 경우 소요시간이 적분간격이 줄어든 비율만큼 증가함

(라) 저고도 고해상도 모델 처리 기법 개발

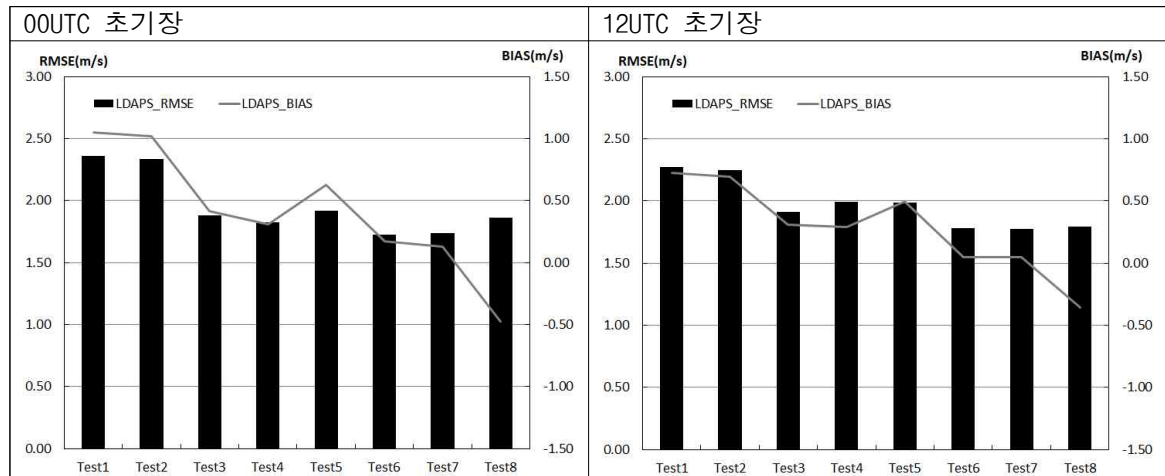
① 실험결과 - 10m 풍속

- GFS의 고도 10m 풍속 결과를 보면 전체적으로 RMSE는 1.65~2.12m/s, BIAS는 -0.15~0.83m/s의 분포를 보임
- 또한 전반적으로 00UTC의 모델결과가 12UTC에 비해 약간 우수하게 나타남
- 00UTC 초기장에서는 RMSE를 보았을 때, TEST8(1.65), TEST7(1.72), TEST3(1.78) 순으로 성능이 우수하게 나타났음
- 12UTC 초기장에서는 TEST8(1.72), TEST6(1.76), TEST7(1.79) 순으로 성능이 우수하게 나타나, 공통적으로 TEST8이 가장 우수한 성능을 보임
- 전체적으로 TEST1~7이 풍속을 과대모의하는데 비해 TEST8은 풍속을 약간 과소모의하는 경향을 보임
- 그러나 다른 TEST에 비해 BIAS도 0에 가장 가까운 모습을 나타냄
- 00UTC와 12UTC에서 모두 YSU 대기경계층 모수화 방안을 사용한 TEST3, TEST7, TEST8이 다른 대기경계층 모수화 방안을 사용한 TEST에 비해 성능이 비교적 우수한 것으로 나타남
- 또한 공통적으로 MYJ를 사용한 TEST1과 TEST2는 성능이 가장 떨어지는 것으로 나타남
- LES 방안을 적용한 TEST4는 00UTC와 12UTC에서 모두 중간정도의 성능을 나타내었음(그림 38)



[그림 38] 고도 10m 풍속의 GFS 실험 결과

- LDAPS의 고도 10m 풍속 결과를 보면 전체적으로 RMSE는 1.73~2.36m/s, BIAS는 -0.47~1.05m/s의 분포를 보임
- LDAPS에서는 00UTC의 모델결과가 12UTC에 비해 TEST1,2,8을 제외하고 약간 우수하게 나타남
- 00UTC 초기장에서는 RMSE를 보았을 때, TEST6(1.73), TEST7(1.74), TEST4(1.82) 순으로 성능이 우수하게 나타났음
- 12UTC 초기장에서는 TEST7(1.78), TEST6(1.78), TEST9(1.79) 순으로 성능이 우수하게 나타났음
- 가장 우수한 TEST는 달랐으나 공통적으로 TEST6,7이 우수한 성능을 보임
- LDAPS에서도 전체적으로 TEST1~7이 풍속을 과대모의하는데 비해 TEST8은 풍속을 과소모의하는 경향을 보임
- 그러나 GFS 달리 LDAPS에서는 풍속을 과소모의하는 경향이 커서 TEST 1,2,5를 제외한 나머지 TEST보다 0에서 멀어져있는 모습을 나타냄
- LDAPS에서는 GFS와 달리 YSU 대기경계층 모수화 방안을 사용한 TEST가 모두 우수한 성능을 나타내지는 않았으나 GFS와 마찬가지로 MYJ를 사용한 TEST1과 TEST2는 성능이 가장 떨어지는 것으로 나타남
- LES 방안을 적용한 TEST4는 00UTC에서는 세 번째로 우수했으나, 12UTC에서는 세 번째로 성능이 떨어지는 것으로 나타났음(그림 39)



[그림 39] 고도 10m 풍속의 LDAPS 실험 결과

[표 19] 00UTC 10m 풍속의 역학모델 RMSE 성능 차이

RMSE	Test1	Test2	Test3	Test4	Test5	Test6	Test7	Test8
GFS	2.09	2.04	1.78	1.75	1.88	1.79	1.72	1.65
LDAPS	2.36	2.34	1.88	1.82	1.92	1.73	1.74	1.86

[표 20] 12UTC 10m 풍속의 역학모델 RMSE 성능 차이

RMSE	Test1	Test2	Test3	Test4	Test5	Test6	Test7	Test8
GFS	2.12	2.07	1.92	1.79	1.91	1.76	1.79	1.72
LDAPS	2.27	2.25	1.91	1.82	1.98	1.78	1.78	1.79

[표 21] 00UTC 10m 풍속의 역학모델 BIAS 성능 차이

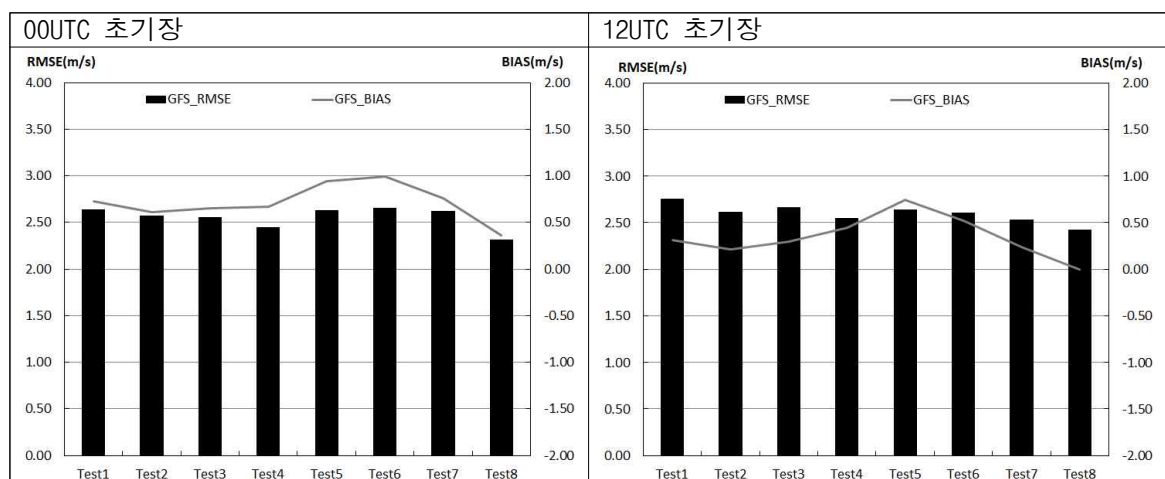
BIAS	Test1	Test2	Test3	Test4	Test5	Test6	Test7	Test8
GFS	0.83	0.76	0.25	0.11	0.44	0.27	0.25	-0.15
LDAPS	1.05	1.02	0.42	0.38	0.62	0.17	0.13	-0.47

[표 22] 12UTC 10m 풍속의 역학모델 BIAS 성능 차이

BIAS	Test1	Test2	Test3	Test4	Test5	Test6	Test7	Test8
GFS	0.74	0.70	0.36	0.26	0.55	0.20	0.20	-0.08
LDAPS	0.73	0.69	0.31	0.32	0.50	0.05	0.05	-0.36

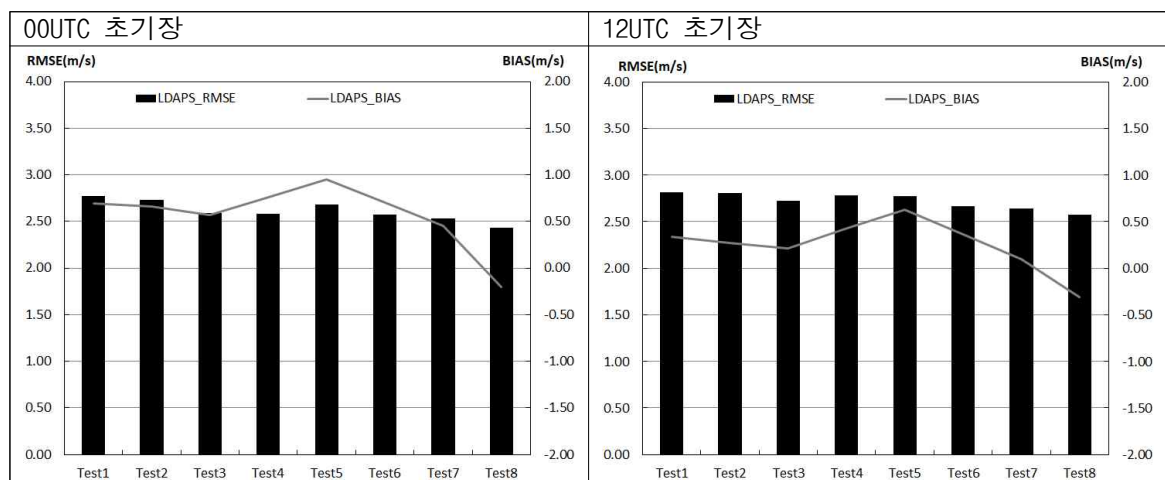
② 실험결과 - 100m 풍속

- GFS의 고도 100m 풍속 결과를 보면 전체적으로 RMSE는 2.31~2.75m/s, BIAS는 0.00~0.99m/s의 분포를 보임
- 10m의 RMSE 분포에 비해 약 0.5~7m/s 정도 높게 나타나며 10m의 GFS 결과와 마찬가지로 100에서도 전반적으로 00UTC의 모델결과가 12UTC에 비해 약간 우수하게 나타남
- 00UTC 초기장에서는 RMSE를 보았을 때, TEST8(2.31), TEST4(2.45), TEST3(2.55) 순으로 성능이 우수하게 나타났음
- 12UTC 초기장에서는 TEST8(2.42), TEST7(2.53), TEST4(2.55) 순으로 성능이 우수하게 나타나, 10m 풍속의 결과와 마찬가지로 TEST8이 00UTC와 12UTC에서 모두 가장 우수한 성능을 보임
- 00UTC에서는 전체적으로 모든 TEST가 풍속을 과대모의하고 있고, 12UTC에서는 TEST8(0.00)을 제외한 나머지 TEST가 모두 풍속을 과대모의 하고 있고 TEST8은 00UTC와 12UTC에서 모두 BIAS가 가장 0에 가깝게 나타나 편향하는 경향이 적음
- 00UTC와 12UTC에서 모두 YSU 대기경계층 모수화 방안을 사용한 TEST3, TEST7, TEST8이 같은 지면 모델과 다른 대기경계층 모수화 방안을 사용한 Test에 비해 성능이 비교적 우수한 것으로 나타났으나 GFS의 10m 풍속과 달리 MYJ를 사용한 TEST 중 TEST2는 중간 정도의 성능을 보여 MYJ의 성능이 가장 떨어진다고 할 수 없음
- LES 방안을 적용한 TEST4는 00UTC와 12UTC에서 각각 두 번째와 세 번째로 성능이 우수한 것으로 나타났음(그림 40)



[그림 40] 고도 100m 풍속의 GFS 실험 결과

- LDAPS의 고도 100m 풍속 결과에서는 전체적으로 RMSE는 2.43~2.81m/s, BIAS는 -0.31~0.95m/s의 분포를 보임. LDAPS에서는 10m 풍속과 달리 전반적으로 00UTC의 모델결과가 12UTC에 비해 약간 우수하게 나타남
- 00UTC 초기장에서는 RMSE를 보았을 때, TEST8(2.43), TEST7(2.53), TEST6(2.57) 순으로 성능이 우수하게 나타났음
- 12UTC 초기장에서는 TEST8(2.58), TEST7(2.64), TEST6(2.66) 순으로 성능이 우수하게 나타났음
- LDAPS의 100m 풍속 결과에서는 첫 번째에서 세 번째로 우수한 성능을 보인 TEST가 모두 같았으며, TEST8이 가장 우수하게 나타남
- LDAPS의 100m 풍속에서도 전체적으로 TEST1~7이 풍속을 과대 모의하는데 비해 TEST8은 풍속을 과소 모의하는 경향을 보이거나 LDAPS의 10m 풍속과 달리 100m에서는 풍속을 과소모의하는 경향이 비교적 작아서 00UTC에서는 BIAS가 가장 0에 가깝고, 12UTC에서는 네 번째로 0에 가까운 것으로 나타남
- LDAPS의 100m 풍속에서는 YSU 대기경계층 모수화 방안을 사용한 TEST3, TEST7, TEST8이 같은 지면모델과 다른 대기경계층 모수화 방안을 사용한 TEST보다 우수한 성능을 나타내며 MYJ를 사용한 TEST1과 TEST2는 성능이 가장 떨어지는 것으로 나타남
- LES 방안을 적용한 TEST4는 00UTC와 12UTC에서 모두 하위의 성능을 나타냈음 (그림 41)



[그림 41] 고도 100m 풍속의 LDAPS 실험 결과

[표 23] 00UTC 100m 풍속의 역학모델 RMSE 성능 차이

RMSE	Test1	Test2	Test3	Test4	Test5	Test6	Test7	Test8
GFS	2.64	2.57	2.55	2.25	2.63	2.66	2.63	2.31
LDAPS	2.77	2.74	2.59	2.54	2.68	2.57	2.53	2.43

[표 24] 12UTC 100m 풍속의 역학모델 RMSE 성능 차이

RMSE	Test1	Test2	Test3	Test4	Test5	Test6	Test7	Test8
GFS	2.75	2.61	2.67	2.26	2.64	2.61	2.53	2.42
LDAPS	2.81	2.81	2.73	2.49	2.77	2.66	2.64	2.58

[표 25] 00UTC 100m 풍속의 역학모델 BIAS 성능 차이

BIAS	Test1	Test2	Test3	Test4	Test5	Test6	Test7	Test8
GFS	0.73	0.61	0.65	0.55	0.95	0.99	0.76	0.36
LDAPS	0.69	0.66	0.57	0.89	0.95	0.70	0.45	-0.20

[표 26] 12UTC 100m 풍속의 역학모델 BIAS 성능 차이

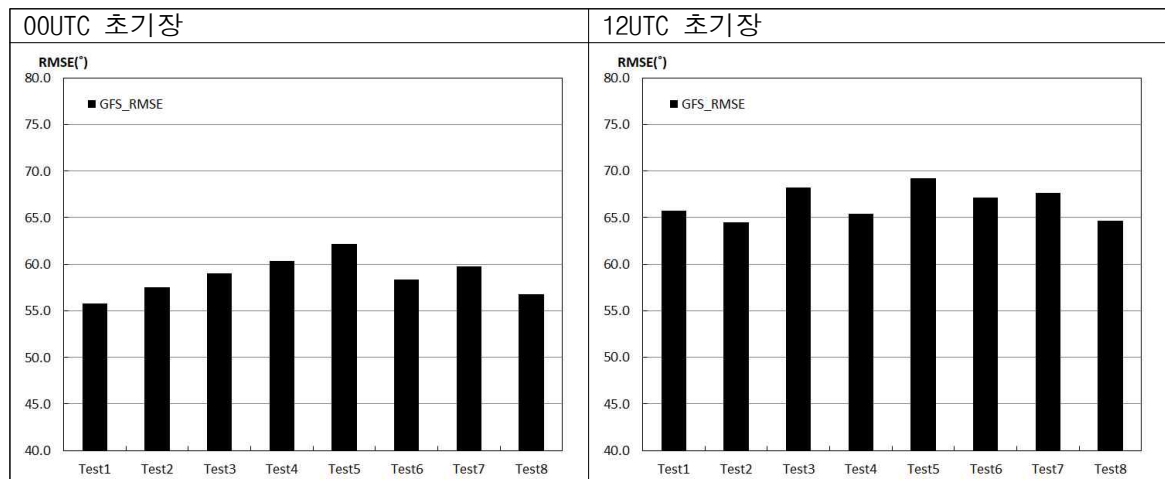
BIAS	Test1	Test2	Test3	Test4	Test5	Test6	Test7	Test8
GFS	0.31	0.21	0.30	0.07	0.74	0.52	0.24	0.00
LDAPS	0.34	0.27	0.22	0.53	0.63	0.36	0.09	-0.31

③ 실험결과 - 10m 풍향

- GFS의 고도 10m 풍향 결과를 보면 00UTC의 RMSE는 전체적으로 55.8~62.1°, 12UTC의 RMSE는 57.3~62.0°의 분포를 보임. 또한 전반적으로 00UTC의 모델결과가 12UTC에 비해 약 10° 정도 우수하게 나타남
- 00UTC 초기장에서는 RMSE를 보았을 때, TEST1(55.8), TEST8(56.8), TEST2(57.2) 순으로 성능이 우수하게 나타났음
- 12UTC 초기장에서는 TEST2(64.5), TEST8(64.7), TEST4(65.4) 순으로 성능이 우수하게 나타났음
- 00UTC와 12UTC에서 모두 풍속에서 가장 떨어지는 성능을 보인 MYJ 대기경계층 모수화 방안을 사용한 TEST1, TEST2가 비교적 우수한 성능을 나타내었으나 풍속

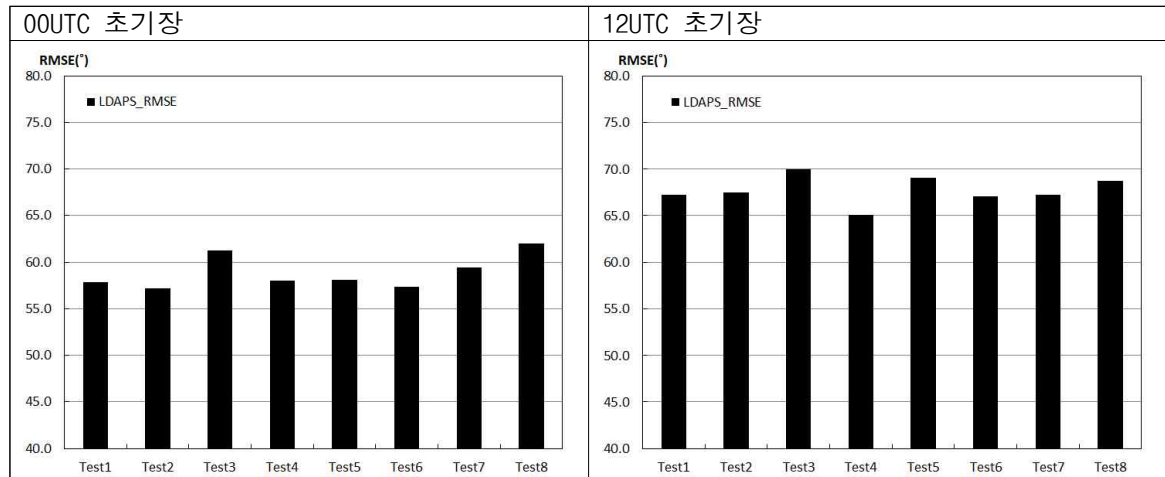
에서 우수한 성능을 보인 TEST8은 여기서도 00UTC와 12UTC에서 모두 두 번째로 우수한 성능을 나타냈음

- LES 방안을 적용한 TEST4는 00UTC에서 두 번째로 성능이 떨어졌고, 12UTC에서는 세 번째로 성능이 우수하게 나타났음(그림 42)



[그림 42] 고도 10m 풍향의 GFS 실험 결과

- LDAPS의 고도 10m 풍향 결과를 보면 00UTC의 RMSE는 전체적으로 57.2~62.0°, 12UTC의 RMSE는 65.1~70.0°의 분포를 보임. 또한 전반적으로 00UTC의 모델결과가 12UTC에 비해 약 8° 정도 우수하게 나타남
- 00UTC 초기장에서는 RMSE를 보았을 때, TEST2(57.2), TEST6(57.3), TEST1(57.8) 순으로 성능이 우수하게 나타났음
- 12UTC 초기장에서는 TEST4(65.1), TEST6(67.1), TEST1(67.2) 순으로 성능이 우수하게 나타났음
- LDAPS의 10m 풍향에서도 GFS와 마찬가지로 00UTC와 12UTC에서 모두 풍속에서 가장 떨어지는 성능을 보인 MYJ 대기경계층 모수화 방안을 사용한 TEST1, TEST2가 비교적 우수한 성능을 나타냈으나 GFS와 달리 풍속에서 우수한 성능을 보인 TEST8은 00UTC에서 가장 성능이 떨어졌고, 12UTC에서는 세 번째로 성능이 좋지 않게 나타났음
- LES 방안을 적용한 TEST4는 00UTC에서 네 번째로 성능이 우수했고, 12UTC에서는 가장 성능이 우수하게 나타났음(그림 43)



[그림 43] 고도 10m 풍향의 LDAPS 실험 결과

[표 27] 00UTC 10m 풍향의 역학모델 RMSE 성능 차이

RMSE	Test1	Test2	Test3	Test4	Test5	Test6	Test7	Test8
GFS	55.8	57.5	59.0	60.3	62.1	58.3	59.8	56.8
LDAPS	57.8	57.2	61.2	58.0	58.1	57.3	59.5	62.0

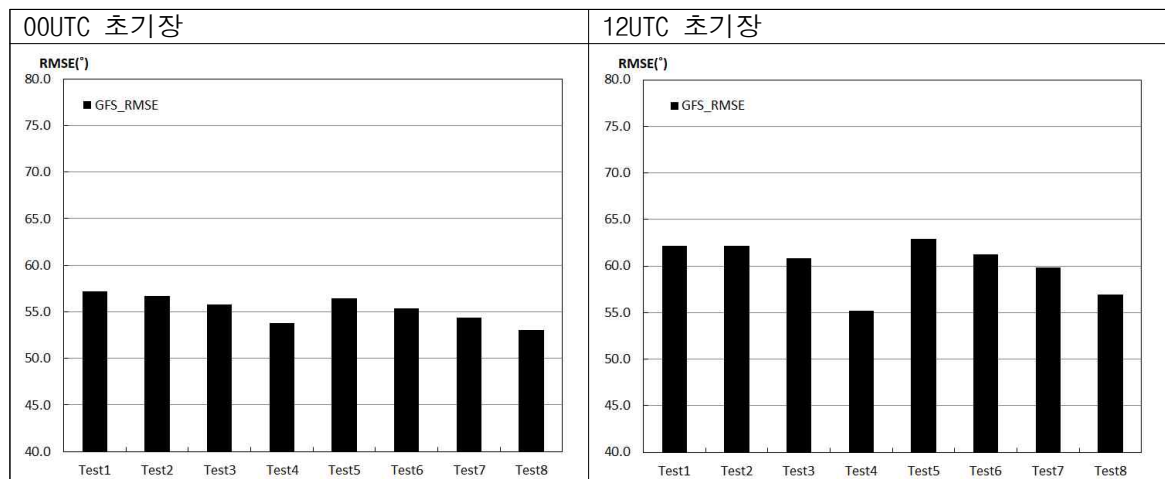
[표 28] 12UTC 10m 풍속의 역학모델 RMSE 성능 차이

RMSE	Test1	Test2	Test3	Test4	Test5	Test6	Test7	Test8
GFS	65.7	64.5	68.2	65.4	69.2	67.1	67.7	64.7
LDAPS	67.2	67.5	70.0	65.1	69.0	67.1	67.2	68.7

④ 실험결과 - 100m 풍향

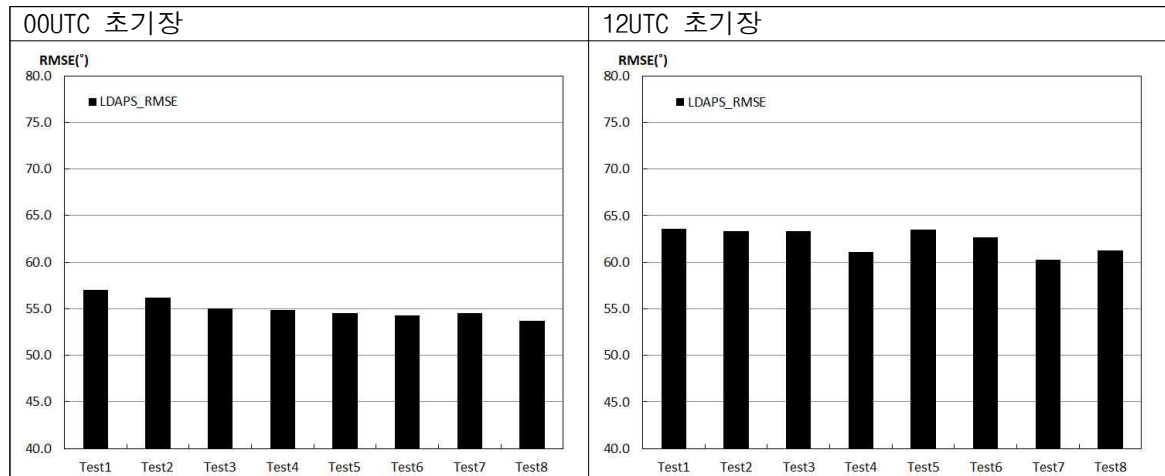
- GFS의 고도 100m 풍향 결과를 보면 00UTC의 RMSE는 전체적으로 53.0~57.2°, 12UTC의 RMSE는 55.2~62.9°의 분포를 보임. GFS의 고도 10m 풍향 결과에 비해 약간 RMSE가 낮게 나타나고 있으며, 00UTC의 결과가 12UTC에 비해 약 2~5° 정도 RMSE가 낮게 나타남
- 00UTC 초기장에서는 RMSE를 보았을 때, TEST8(53.0), TEST4(53.8), TEST7(54.4) 순으로 성능이 우수하게 나타났음

- 12UTC 초기장에서는 TEST4(55.2), TEST8(56.9), TEST7(59.9) 순으로 성능이 우수하게 나타났고 00UTC와 12UTC 모두 TEST4,7,8이 우수하게 나타남
- 10m 풍향에서는 성능이 비교적 우수했던 MYJ 대기경계층 모수화 방안을 사용한 TEST1, TEST2은 여기서 가장 성능이 떨어지는 것으로 나타남
- LES 방안을 적용한 TEST4는 00UTC와 12UTC에서 각각 두 번째, 첫 번째로 성능이 우수하게 나타났음(그림 44)



[그림 44] 고도 100m 풍향의 GFS 실험 결과

- LDAPS의 고도 100m 풍향 결과를 보면 00UTC의 RMSE는 전체적으로 53.7~57.0°, 12UTC의 RMSE는 60.3~63.6°의 분포를 보이며 전반적으로 00UTC의 모델결과가 12UTC에 비해 약 8° 정도 우수하게 나타남
- 00UTC 초기장에서는 RMSE를 보았을 때, TEST8(53.7), TEST6(54.3), TEST5(54.5) 순으로 성능이 우수하게 나타났음
- 12UTC 초기장에서는 TEST7(60.3), TEST4(61.1), TEST8(61.3) 순으로 성능이 우수하게 나타났으며 TEST8은 00UTC와 12UTC에서 모두 우수한 성능을 보임
- GFS 100m 풍향 결과와 마찬가지로 MYJ 대기경계층 모수화 방안을 사용한 TEST1, TEST2은 비교적 성능이 떨어지는 것으로 나타남
- LES 방안을 적용한 TEST4는 00UTC에서 네 번째로 성능이 떨어졌고, 12UTC에서는 두 번째로 성능이 우수하게 나타났음(그림 45)



[그림 45] 고도 100m 풍향의 LDAPS 실험 결과

[표 29] 00UTC 100m 풍향의 역학모델 RMSE 성능 차이

RMSE	Test1	Test2	Test3	Test4	Test5	Test6	Test7	Test8
GFS	57.2	56.7	55.8	53.8	56.5	55.4	54.4	53.0
LDAPS	57.0	56.2	55.1	54.9	54.5	54.3	54.6	53.7

[표 30] 12UTC 100m 풍속의 역학모델 RMSE 성능 차이

RMSE	Test1	Test2	Test3	Test4	Test5	Test6	Test7	Test8
GFS	62.1	62.2	60.8	55.2	62.9	61.3	59.9	56.9
LDAPS	63.6	63.3	63.4	61.1	63.5	62.6	60.3	61.3

⑤ 최적물리과정 선정

- 고도 10m의 풍속에서는 RMSE를 보았을 때, GFS의 경우 00UTC와 12UTC 모두 TEST8이 가장 우수하게 나타났고, LDAPS는 00UTC와 12UTC가 각각 TEST6, TEST7이 우수하게 나타났고 TEST8도 비교적 우수한 성능을 보임
- 고도 10m 풍속 의 BIAS를 보면 TEST1~7이 모두 과대모의하는 것으로 나타나는 것에 비해 TEST8은 약간 과소모의하는 모습을 나타내며 GFS의 경우 다른 TEST에 비해 BIAS가 0에 가까워 과소모의하는 경향이 적게 나타나지만, LDAPS의 경우는 과소모의하는 경향이 비교적 크게 나타남

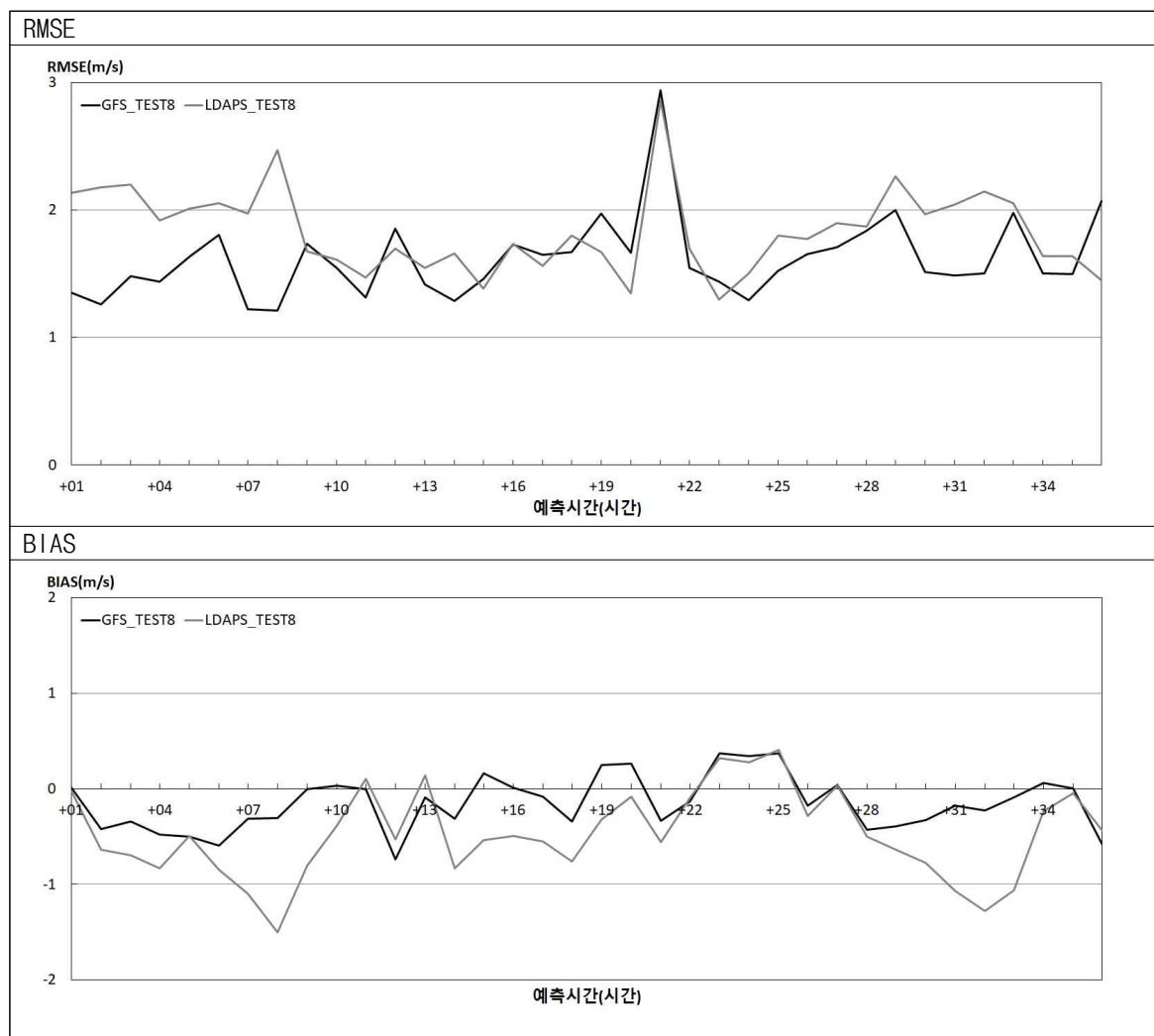
- 고도 100m의 풍속에서는 RMSE를 보았을 때, GFS와 LDAPS 모두 00UTC와 12UTC에서 TEST8이 가장 우수하게 나타남
- 고도 100m 풍속의 BIAS를 보면 GFS의 경우 모든 TEST가 풍속의 과대모의하는 것으로 나타났고, LDAPS는 TEST8을 제외한 나머지가 모두 과대모의하는 것으로 나타났으며 TEST8의 경우 LDAPS의 12UTC를 제외하면 BIAS가 가장 0에 가까워 편향되는 경향이 적음
- 고도 10m 풍향에서는 GFS의 경우 00UTC와 12UTC의 RMSE가 각각 TEST1, TEST2에서 가장 우수하게 나타났고, TEST8은 모두에서 두 번째로 우수하게 나타남
- LDAPS의 경우 00UTC와 12UTC에서 각각 TEST2, TEST4에서 가장 우수하게 나타났으며, TEST8은 비교적 성능이 떨어졌음
- 고도 100m 풍향에서는 00UTC의 경우 GFS와 LDAPS에서 모두 TEST8이 가장 우수한 성능을 나타냈고, 12UTC의 경우 GFS와 LDAPS에서 각각 TEST4, TEST7이 가장 우수한 성능을 보이고 TEST8은 12UTC에서도 우수한 성능을 나타냄
- LES를 사용한 TEST4의 경우 풍속과 풍향에서 일부 우수한 성능을 나타내었으나, 가장 우수한 성능을 나타내지는 않았고 수치불안정과 모델수행 소요시간을 고려해 볼 때 물리과정 모수화를 사용하는 것이 더 좋을 것으로 판단됨
- 전체적으로 YSU를 사용한 TEST가 동일조건의 다른 대기경계층 모수화 방안을 사용한 TEST에 비해 우수하게 나타났고, 그 중에서도 RUC와 조합한 TEST8이 가장 우수한 성능을 나타냈음
- 풍향에서는 우수한 초기장과 물리과정 모수화 방안이 일관적으로 나타나지는 않았으나, TEST8이 전반적으로 우수한 성능을 보였기에 보성지역에 대해서는 RUC-YSU 물리과정 모수화 방안 조합이 바람예측을 위한 최적의 모델링 방법이라고 판단할 수 있음

(마) 현업 모델(UM모델) 비교 성능 실험

- 최적 물리과정으로 선정된 TEST8에 대해 현업모델인 UM 모델의 LDAPS를 사용한 모델결과와 GFS를 사용한 모델 결과를 비교분석하여, 초기 및 경계조건 자료를 선정하고자 함

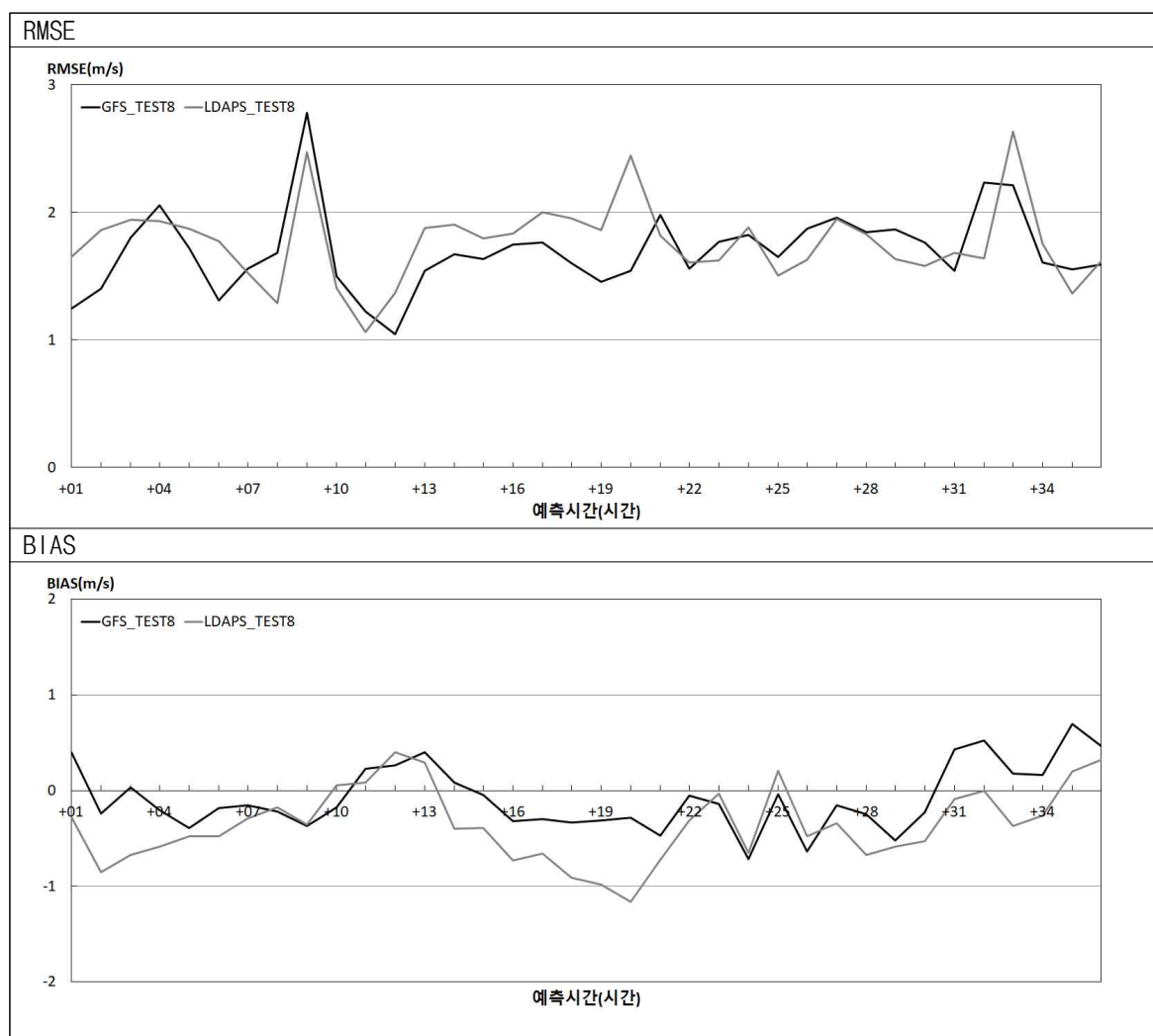
① 10m 풍속 결과 비교

- 10m 풍속의 00UTC 초기장에서는 +12~+20시간 중의 일부를 제외하면 전반적으로 GFS가 LDAPS에 비해 RMSE가 낮게 나타남. 또한 BIAS를 보았을 때도 GFS가 전반적으로 LDAPS에 비해 0에 가깝게 나타남
- 전체 RMSE의 경우 GFS는 1.65m/s, LDAPS는 1.86m/s로 나타났고, BIAS는 각각 -0.15m/s, -0.47m/s로 나타나 GFS의 성능이 더 우수함(그림 46)



[그림 46] 00UTC 고도 10m 풍속의 GFS 및 LDAPS TEST8 결과 비교

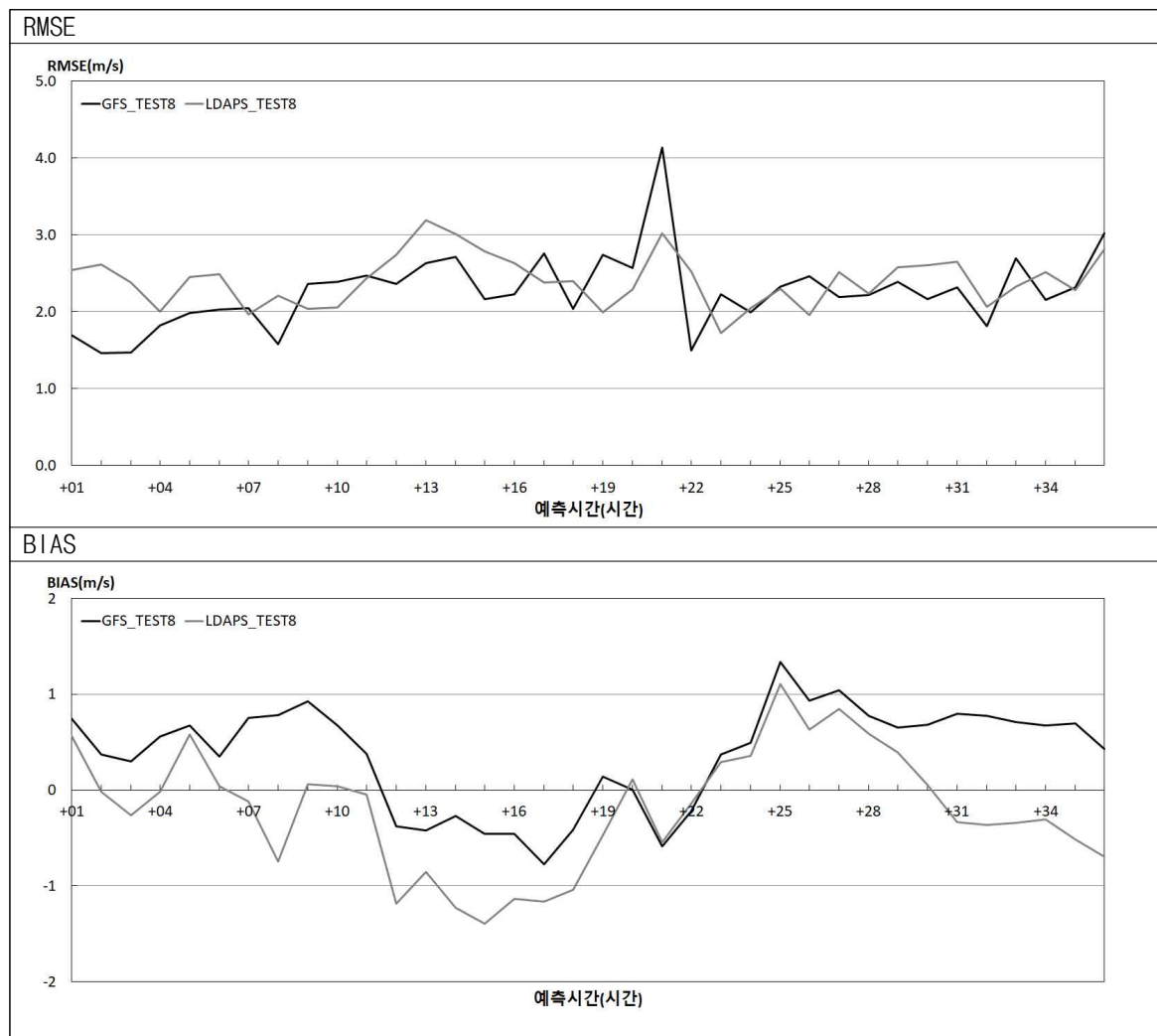
- 10m 풍속의 12UTC 초기장에서는 RMSE를 보았을 때 +20시간까지 전반적으로 GFS의 성능이 우수하게 나타났고, 이후 시간에는 GFS와 LDAPS가 유사한 성능을 보임
- BIAS를 보았을 때는 GFS가 전반적으로 LDAPS에 비해 0에 가깝게 나타났고 LDAPS의 경우 전반적으로 과소모의하는 경향이 크게 나타남
- 전체 RMSE의 경우 GFS는 1.72m/s, LDAPS는 1.79m/s로 나타났고, BIAS는 각각 -0.08m/s, -0.36m/s로 나타나 GFS의 성능이 더 우수함(그림 47)



[그림 47] 12UTC 고도 10m 풍속의 GFS 및 LDAPS TEST8 결과 비교

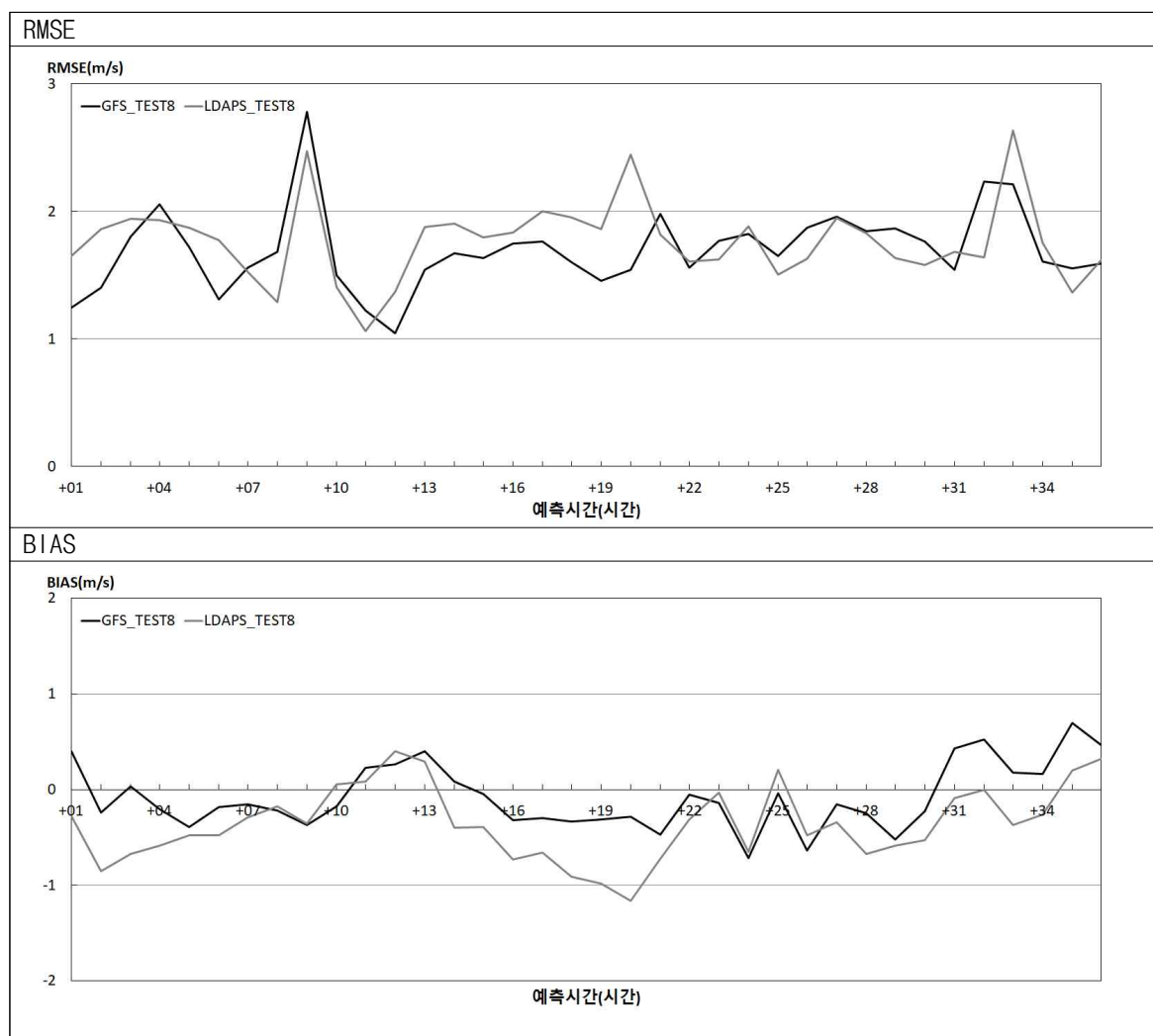
② 100m 풍속 결과 비교

- 100m 풍속의 00UTC 초기장에서는 +17~+21시간과 다른 예측시간의 일부를 제외하면 전반적으로 GFS가 LDAPS에 비해 RMSE가 낮게 나타났고 BIAS를 보았을 때는 GFS가 전반적으로 과대모의하는데 비해, LDAPS는 과소모의하는 경향이 크게 나타남
- 전체 RMSE의 경우 GFS는 2.31m/s, LDAPS는 2.43m/s으로 나타나 GFS의 성능이 우수하게 나타났으나 BIAS는 GFS와 LDAPS가 각각 0.36m/s, -0.20m/s로 나타났으므로 GFS는 과대모의하고 LDAPS는 과소모의하며, LDAPS의 BIAS가 약간 0에 가까움(그림 48)



[그림 48] 00UTC 고도 100m 풍속의 GFS 및 LDAPS TEST8 결과 비교

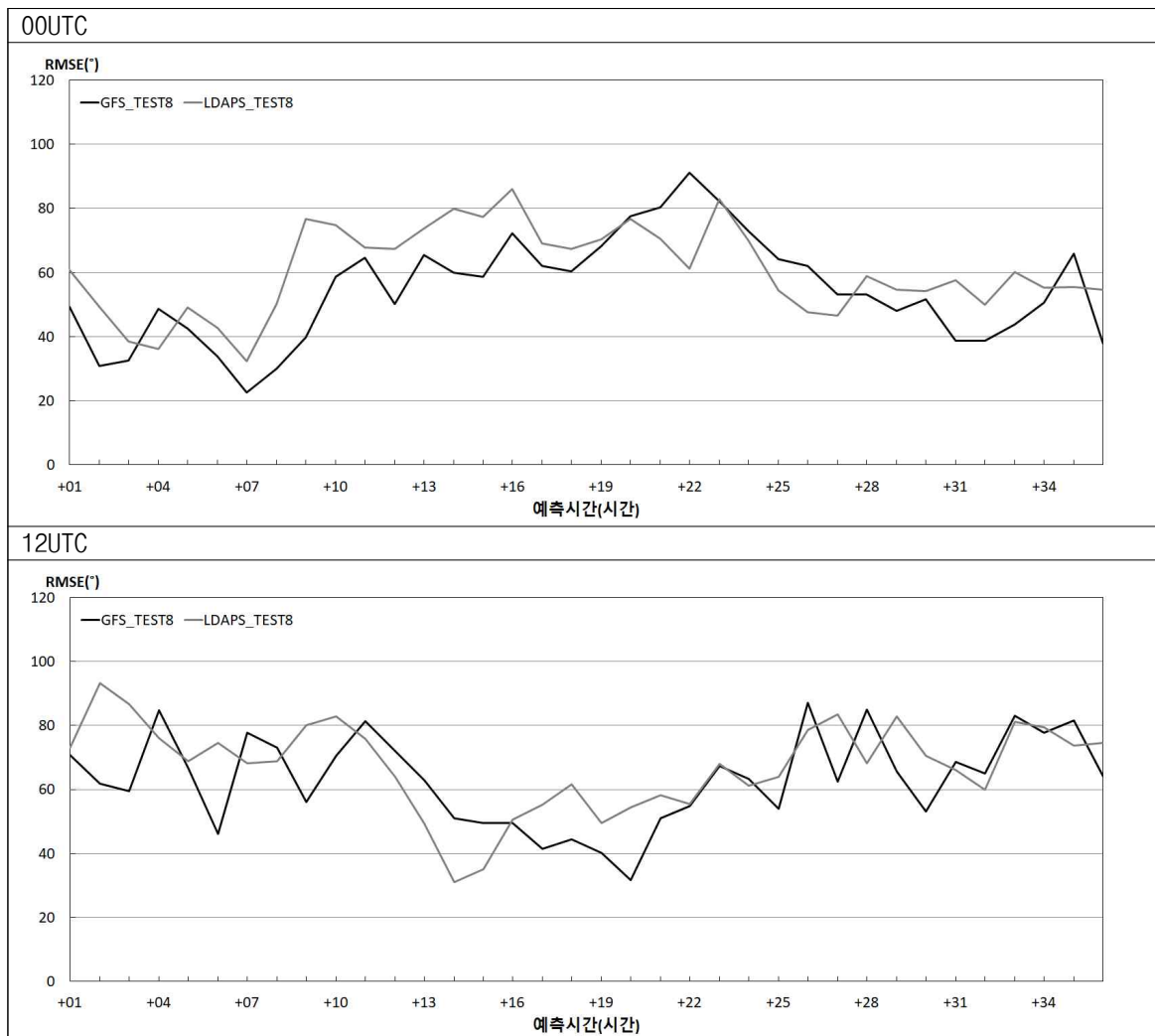
- 100m 풍속의 12UTC 초기장에서는 RMSE를 보았을 때 일부 시간을 제외하면 전반적으로 GFS의 성능이 우수하게 나타났음
- BIAS를 보았을 때는 GFS가 전반적으로 LDAPS에 비해 0에 가깝게 나타났으며 LDAPS의 경우 GFS에 비해 전반적으로 과소모의하는 경향이 크게 나타남
- 전체 RMSE의 경우 GFS는 2.42m/s, LDAPS는 2.58m/s로 나타났고, BIAS는 각각 0.00m/s, -0.31m/s로 나타나 GFS의 성능이 더 우수함(그림 49)



[그림 49] 12UTC 고도 100m 풍속의 GFS 및 LDAPS TEST8 결과 비교

③ 10m 풍향 결과 비교

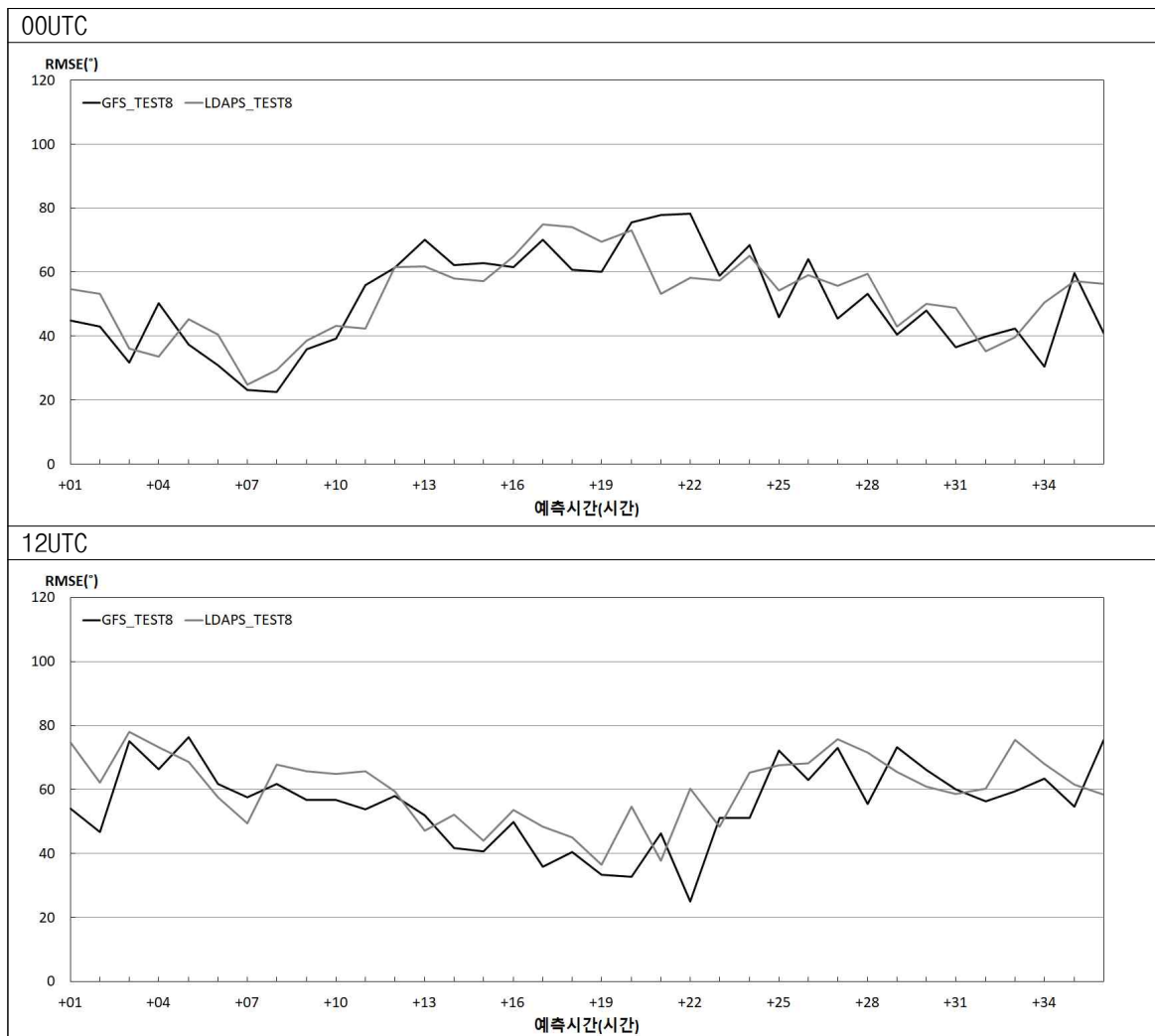
- 10m 풍향의 00UTC 초기장에서는 +20~+27시간과 나머지 예측시간 중 일부를 제외하면 전반적으로 GFS가 LDAPS에 비해 RMSE가 낮게 나타남
- 10m 풍향의 12UTC 초기장에서는 +11~+15시간과 나머지 예측시간 중 일부를 제외하면 전반적으로 GFS가 LDAPS에 비해 RMSE가 낮게 나타남
- 00UTC 초기장의 전체 RMSE의 경우 GFS는 56.8°, LDAPS는 62.0°로 나타났고, 12UTC 초기장의 경우 GFS와 LDAPS가 각각 64.7°, 68.7°로 나타나 00UTC와 12UTC 초기장 모두 GFS의 성능이 더 우수함(그림 50)



[그림 50] 고도 10m 풍향의 GFS 및 LDAPS TEST8 결과 비교

④ 100m 풍향 결과 비교

- 10m 풍향의 00UTC 초기장에서는 전반적으로 GFS와 LDAPS의 RMSE 유사하게 나타나지만 약간 GFS가 낮게 나타남
- 10m 풍향의 12UTC 초기장에서는 예측시간 중 일부를 제외하면 전반적으로 GFS가 LDAPS에 비해 RMSE가 낮게 나타남
- 00UTC 초기장의 전체 RMSE의 경우 GFS는 53.0°, LDAPS는 53.7°로 나타났고, 12UTC 초기장의 경우 GFS와 LDAPS가 각각 56.9°, 61.3°로 나타나 00UTC와 12UTC 초기장 모두 GFS의 성능이 더 우수함(그림 51)



[그림 51] 고도 100m 풍향의 GFS 및 LDAPS TEST8 결과 비교

⑤ 입력자료 선정

- 고도 10m의 풍속의 00UTC에서는 전체 RMSE의 경우 GFS는 1.65m/s, LDAPS는 1.86m/s로 나타났고, BIAS는 각각 -0.15m/s, -0.47m/s로 나타나 GFS의 성능이 더 우수함
- 고도 10m의 풍속의 12UTC에서는 전체 RMSE의 경우 GFS는 1.72m/s, LDAPS는 1.79m/s로 나타났고, BIAS는 각각 -0.08m/s, -0.36m/s로 나타나 GFS의 성능이 더 우수함
- 고도 100m 풍속의 00UTC에서는 전체 RMSE의 경우 GFS는 2.31m/s, LDAPS는 2.43m/s으로 나타나 GFS의 성능이 우수하게 나타났으나 BIAS는 GFS와 LDAPS가 각각 0.36m/s, -0.20m/s로 GFS는 과대모의하고 LDAPS는 과소모의하며, LDAPS의 BIAS가 약간 0에 가까움
- 고도 100m 풍속의 12UTC에서는 전체 RMSE의 경우 GFS는 2.42m/s, LDAPS는 2.58m/s로 나타났고, BIAS는 각각 0.00m/s, -0.31m/s로 나타나 GFS의 성능이 더 우수함
- 고도 10m 풍향의 경우 00UTC 초기장의 전체 RMSE가 GFS는 56.8°, LDAPS는 62.0°로 나타났고, 12UTC 초기장의 경우 GFS와 LDAPS가 각각 64.7°, 68.7°로 나타나 00UTC와 12UTC 초기장 모두 GFS의 성능이 더 우수함
- 고도 100m 풍향의 경우 00UTC 초기장의 전체 RMSE가 GFS는 53.0°, LDAPS는 53.7°로 나타났고, 12UTC 초기장의 경우 GFS와 LDAPS가 각각 56.9°, 61.3°로 나타나 00UTC와 12UTC 초기장 모두 GFS의 성능이 더 우수함
- 전체적으로 모든 고도 및 변수에서 GFS의 RMSE가 LDAPS보다 낮게 나타나 우수한 성능을 보였고, 풍속 BIAS는 고도 100m 00UTC를 제외하면 GFS가 더 0에 가까워 편향하는 경향이 적음
- 따라서 GFS를 사용한 모델 결과가 LDAPS를 사용한 모델 결과보다 우수한 성능을 나타냄

○ 태안비행장 AMOS에서 관측하는 자료의 정보는 다음과 같음

- 관측요소: 강수, 기온, 습도, 풍향, 풍속, 운량, 기압
- 관측주기: 10초
- 관측고도: 지면
- 자료형식

(ex)20150701_T.txt: 2015.7.1. 평균온도자료[T:온도 H:습도 V:풍속 WD:풍향])

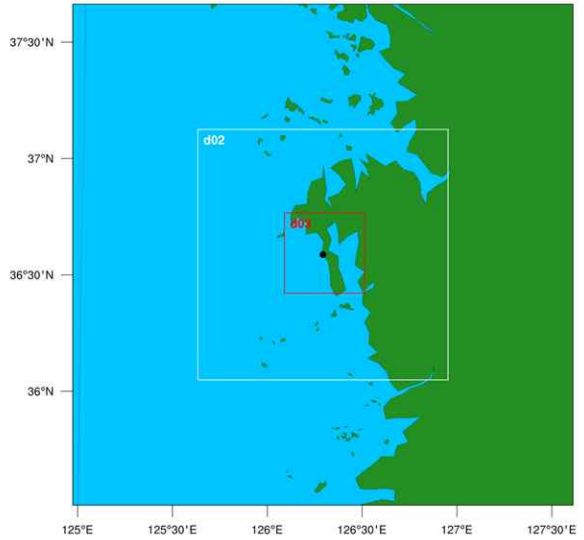
② 도메인 및 실험 구성

○ 도메인 설정정보와 그림은 표 24와 같으며, 태안비행장을 중심으로 한 동지격자를 구성하였음

○ 실험에 대한 세부 정보는 다음과 같음

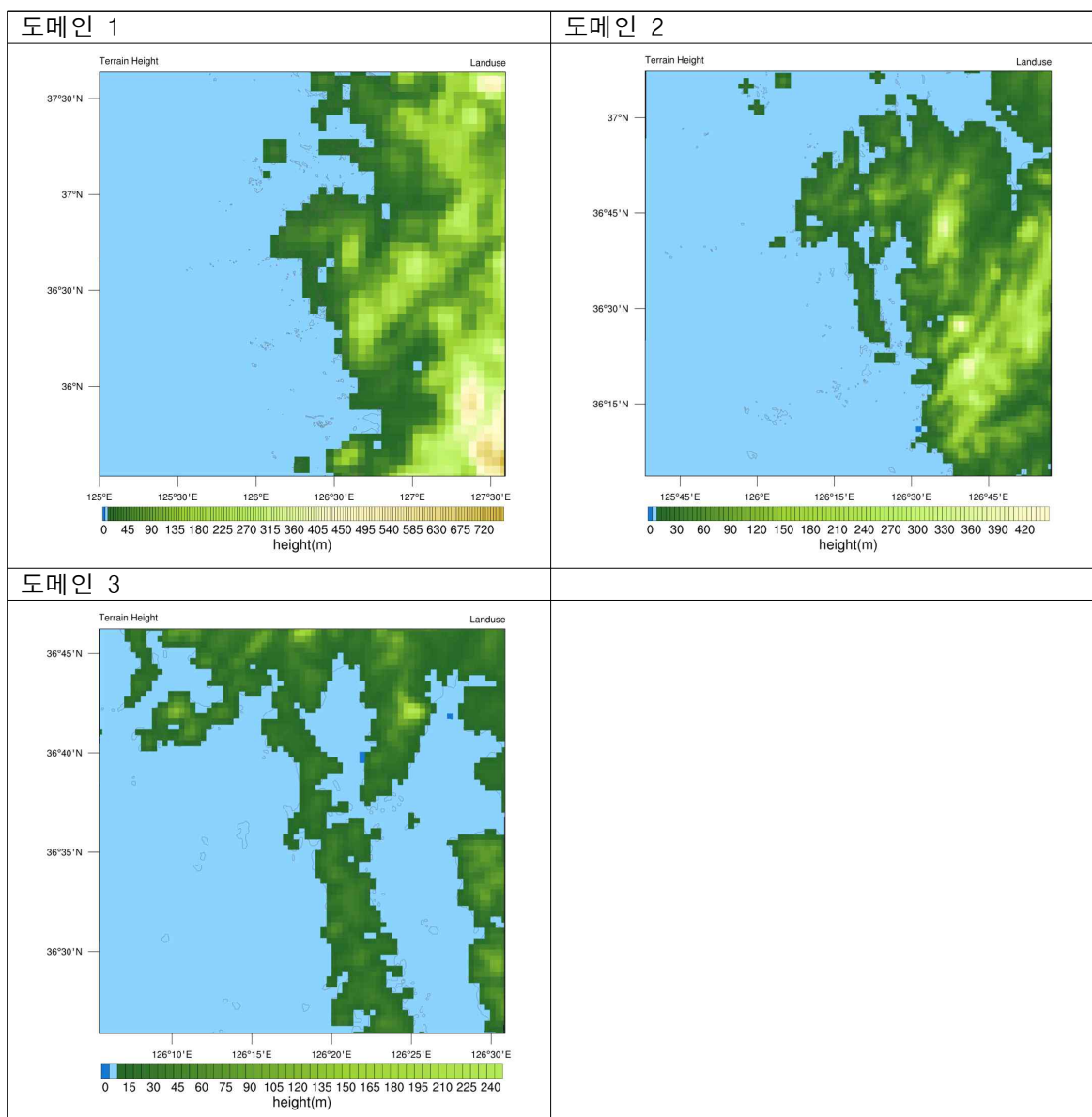
- 실험기간: 2018년 1월 1일 ~ 2018년 12월 31일, 00 및 12UTC 예측시작, 3일 예측
- 초기 및 경계자료: GFS
- 물리과정: 표 17의 TEST8
- 검증방법: RMSE, BIAS

[표 31] 태안비행장 도메인 설정

구분	내용	
해상도	도메인1: 4.5km 도메인2: 1.5km 도메인3: 0.5km	
격자수(동서 ×남북)	도메인1: 53×53 도메인2: 79×79 도메인3: 76×76	
중심위경도	36.5947° N, 126.2933° E	
도메인2/3 시작지점 (동서,남북)	도메인2: 14번, 28번 도메인3: 14번, 28번	
지도투영법	Lambert t	
지형자료	SRTM 1s	
토지이용자료	환경부 토지이용도	

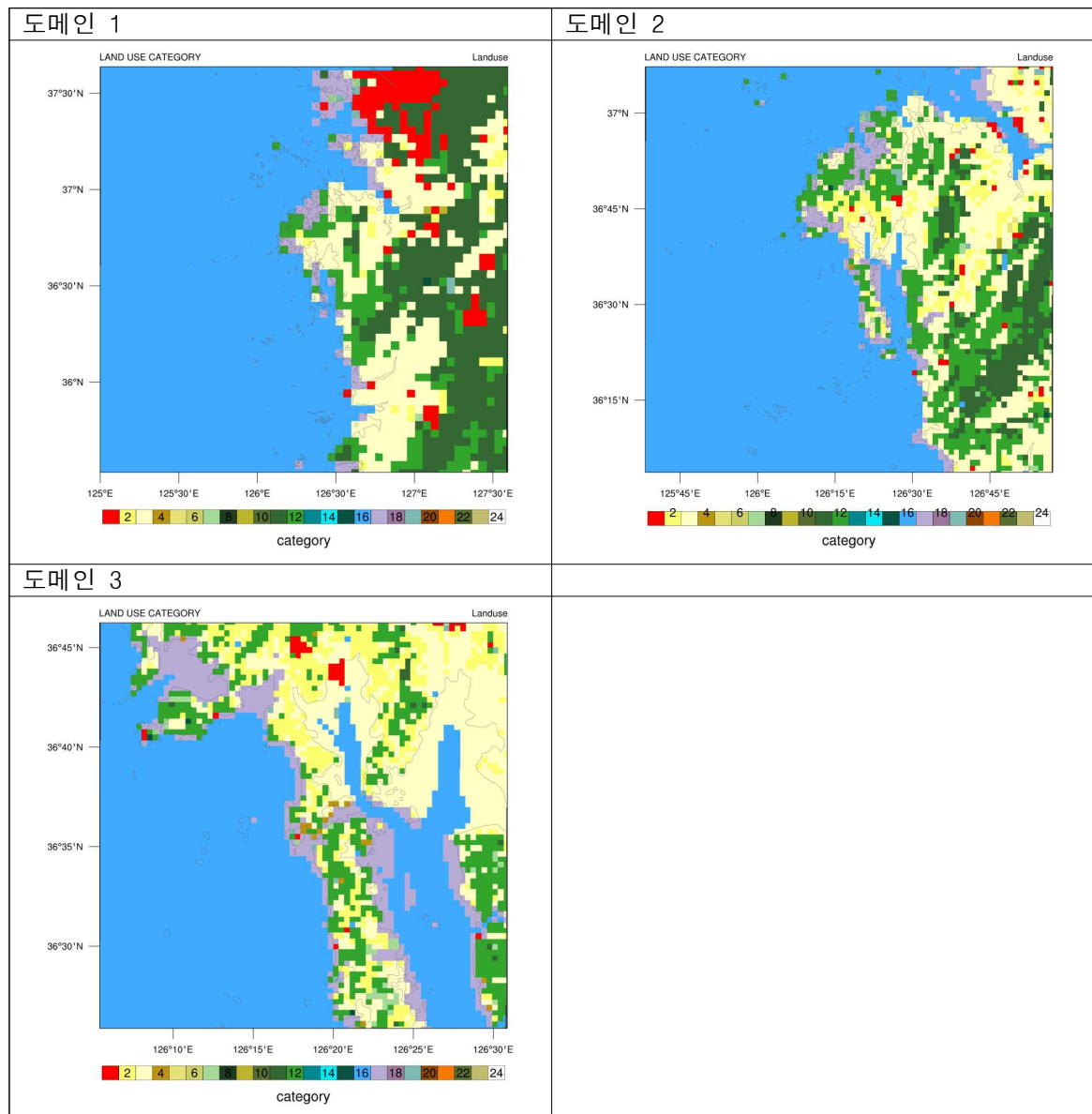
(나) 지형 및 토지이용자료

- 고해상도 모델링을 위해 지형자료로는 SRTM 1s 자료를, 토지이용자료로는 환경부 1:25,000 토지이용도 자료를 적용하였음
- SRTM 지형자료를 적용하여 산출된 모델 입력자료의 지형정보는 그림 55와 같으며 각 도메인의 지형을 고해상도로 상세하게 잘 나타내고 있음
- 본 연구의 대상인 도메인 3은 고도가 240m 이하이며, 특히 태안비행장 부근의 고도는 30m 이하로 매우 낮게 나타남



[그림 54] 태안비행장 도메인의 지형

- 환경부 토지이용자료를 적용하여 산출된 모델 입력자료의 토지이용정보는 그림 56과 같으며 여기서 각 카테고리는 표 10의 USGS 카테고리로 분류되어 있음
- 각 도메인의 토지이용정보를 고해상도로 상세하게 잘 나타내고 있음
- 도메인 3의 토지이용을 보면 대다수의 지역이 경작지(2,3)와 숲(12)로 구성되어 있으며, 중간에 도시지역(1)이 포함되어 있는 것을 확인할 수 있음

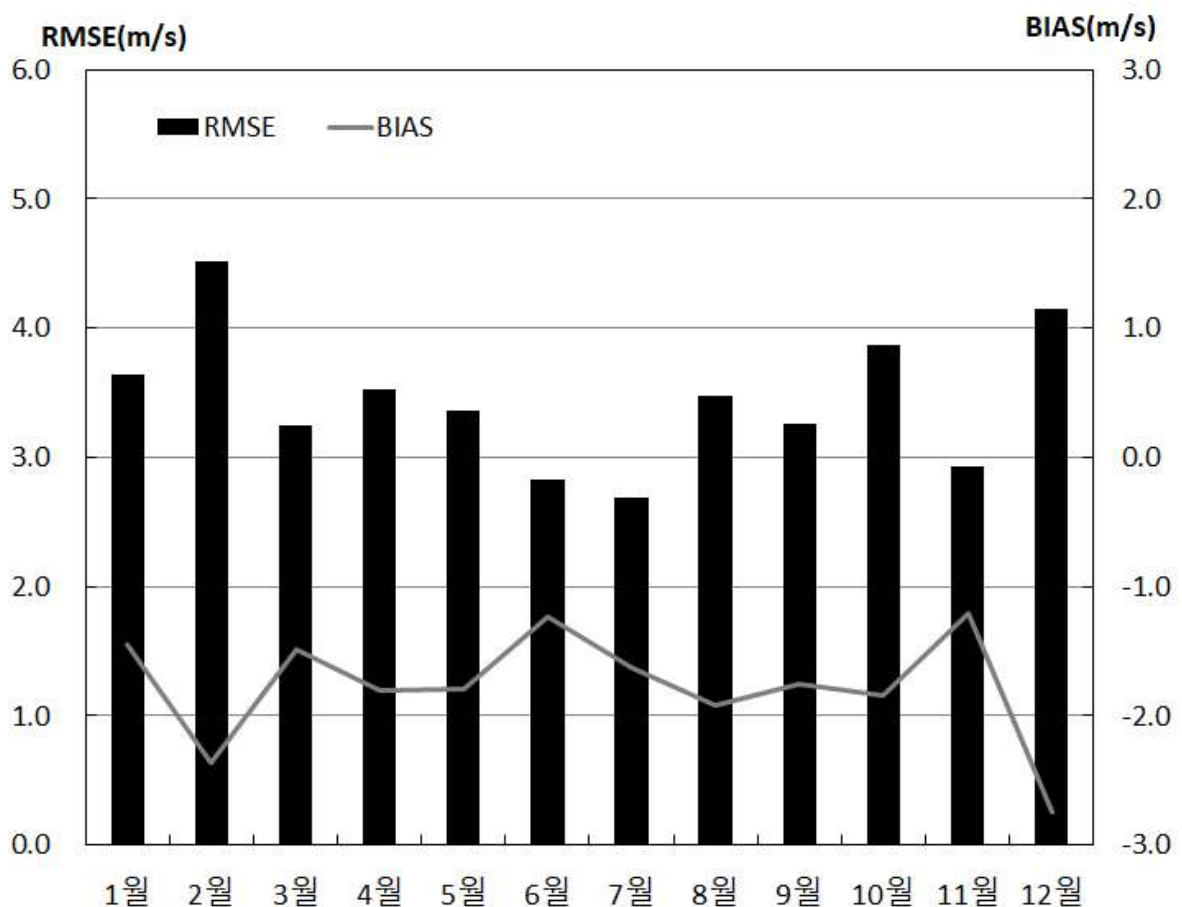


[그림 55] 태안비행장 도메인의 토지이용도

(다) 모델 결과 및 관측 데이터 비교

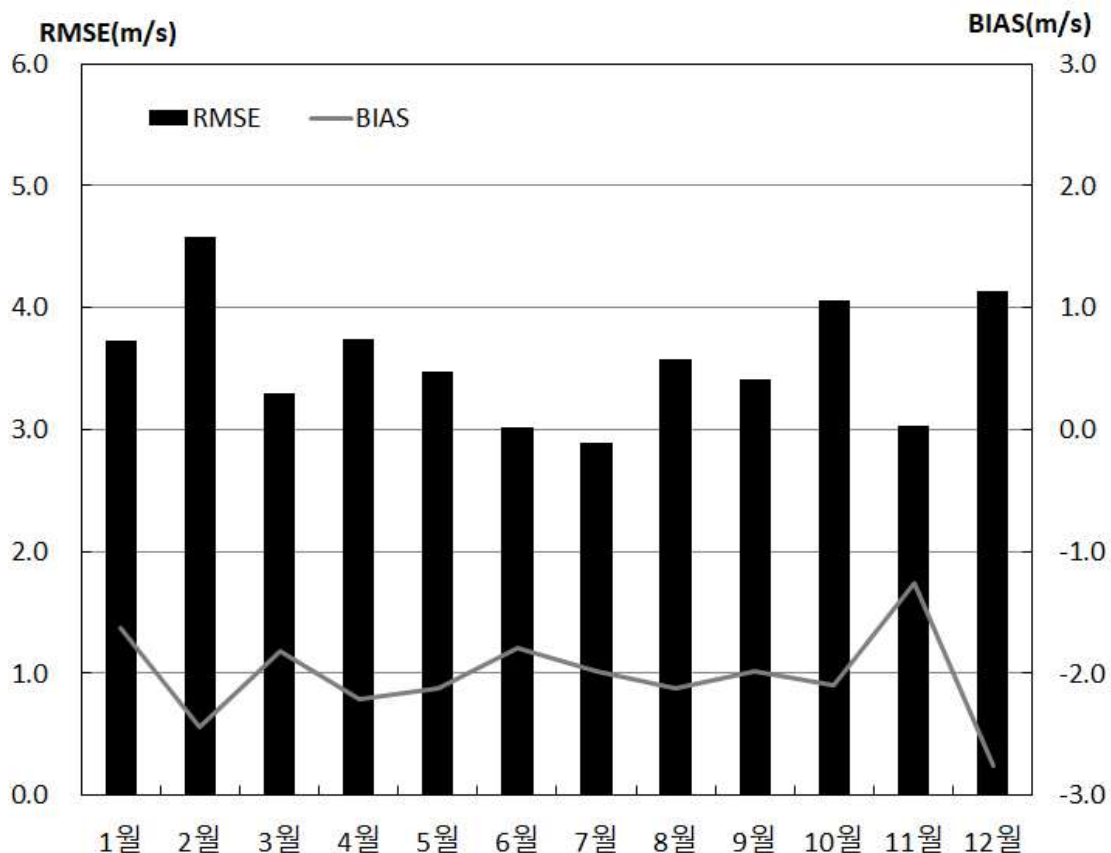
① 풍속 결과 비교

- 00UTC 실험의 풍속 결과는 그림 57에 나타나고 각 월별로 RMSE와 BIAS를 산출하여 그림에 나타냈음
- 00UTC 풍속의 RMSE 결과는 월별로 2.69~4.52m/s의 분포를 보이고 있으며, 7월이 가장 낮은 RMSE를 보였고, 2월이 가장 높은 RMSE를 보였음
- 계절별 RMSE는 여름(6~8월)에 평균 2.99m/s로 가장 낮게 나타났고, 겨울(12~2월)에 평균 4.10m/s로 가장 높게 나타났으며 봄(3~5월)과 가을(9~11월)은 각각 3.37, 3.35m/s로 유사한 성능을 보였음
- 월별 BIAS의 경우 전체적으로 -2.75~-1.23m/s의 분포를 보여 전반적으로 과소모의하는 경향을 나타냈고, 6월이 가장 0에 가까웠고 12월이 가장 0에서 멀게 나타났음
- 계절별 BIAS는 봄, 여름, 가을이 각각 -1.69, -1.59, -1.60m/s로 유사하게 나타났고, 겨울은 -2.18m/s로 과소모의하는 경향이 크게 나타났음



[그림 56] 태안비행장 실험의 00UTC 풍속 결과

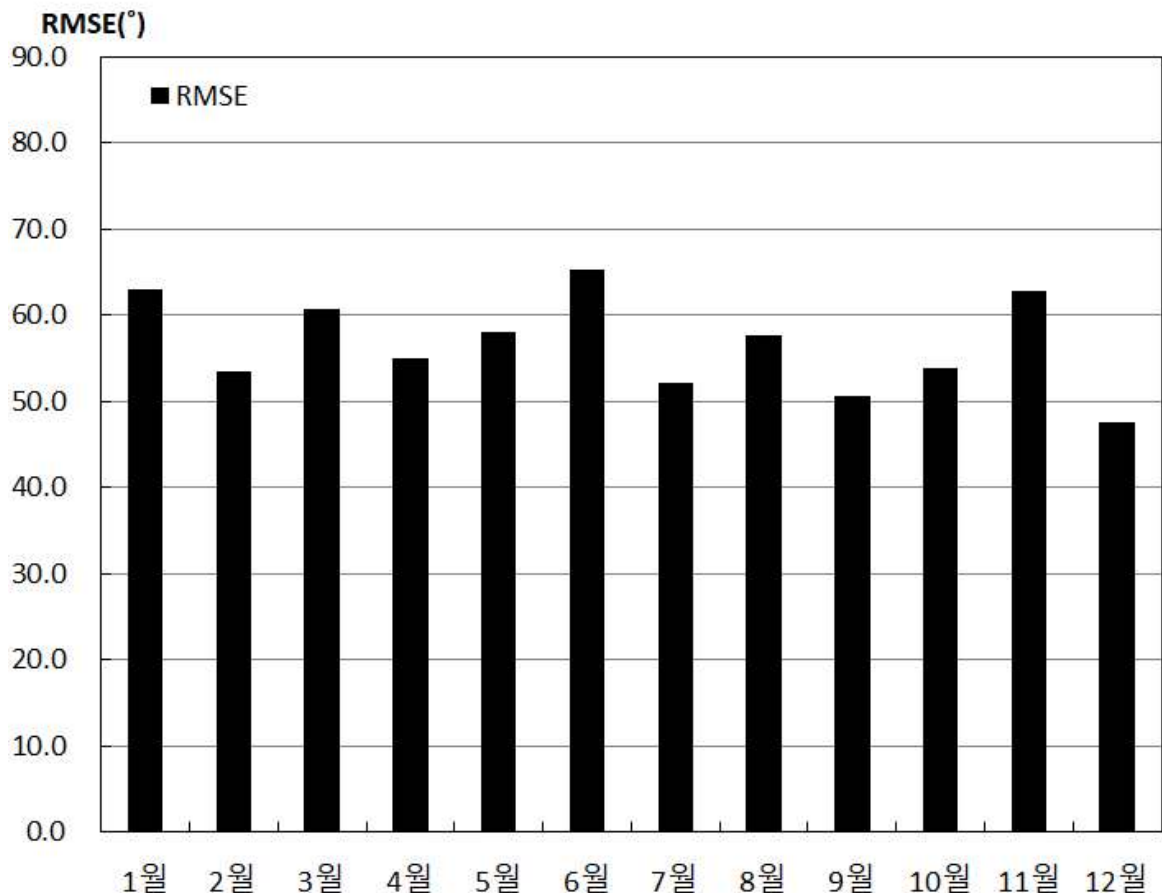
- 00UTC 실험의 풍속 결과는 그림 58에 나타냈고 여기서 마찬가지로 각 월별로 RMSE와 BIAS를 산출하여 그림에 나타냈음
- 12UTC 풍속의 RMSE 결과는 월별로 2.89~4.58m/s의 분포를 보이고 있으며, 00UTC와 마찬가지로 7월이 가장 낮은 RMSE를 보였고, 2월이 가장 높은 RMSE를 보이며 전반적으로 00UTC보다 약간 RMSE가 높게 나타났음
- 계절별 RMSE는 여름에 평균 3.16m/s로 가장 낮게 나타났고, 겨울에 평균 4.15m/s로 가장 높게 나타났고 봄과 가을은 각각 3.50, 3.50m/s로 유사한 성능을 보여 계절평균으로 보았을 때도 00UTC보다 RMSE가 높게 나타났음
- 월별 BIAS의 경우 전체적으로 -2.76~-1.79m/s의 분포를 보여 전반적으로 과소모의하는 경향을 나타냈고, 6월이 가장 0에 가까웠고 12월이 가장 0에서 멀게 나타났음
- 계절별 BIAS는 봄, 여름, 가을, 겨울이 각각 -2.05, -1.96, -1.78, -2.27m/s로 나타나, 가을이 가장 0에 가깝고, 겨울이 가장 0에서 멀었음
- 00UTC와 12UTC 결과를 보았을 때, 전반적으로 여름의 예측성능이 높게 나타나고 겨울의 예측성능이 낮게 나타났음. 또한 모든 월에서 풍속을 과소모의하는 것으로 나타남



[그림 57] 태안비행장 실험의 12UTC 풍속 결과

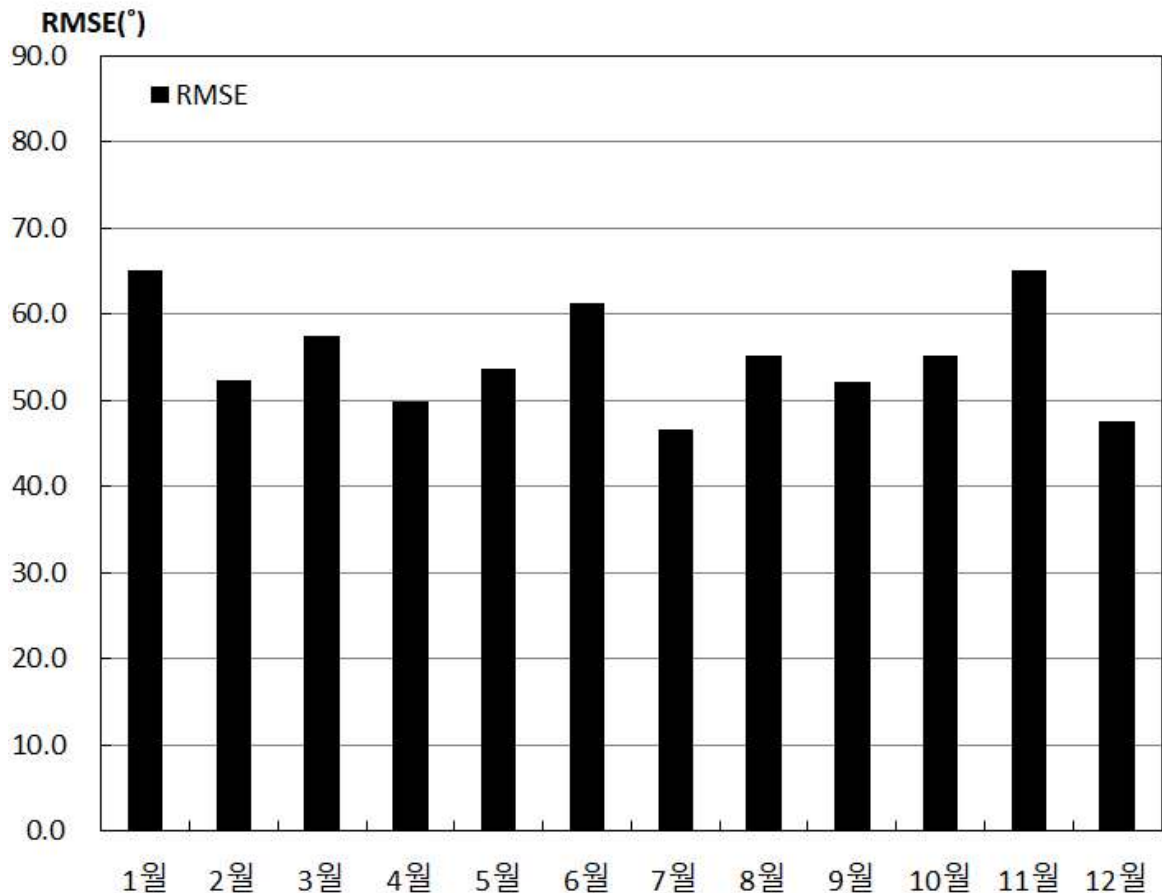
② 풍향 결과 비교

- 00UTC 실험의 풍향 결과는 그림 59에 나타나며 각 월별로 RMSE를 산출하여 그림에 나타냄
- 00UTC 풍향의 RMSE 결과는 월별로 47.52~65.30°의 분포를 보이고 있으며, 12월이 가장 낮은 RMSE를 보였고, 6월이 가장 높은 RMSE를 보였음
- 계절별 RMSE는 봄, 여름, 가을, 겨울이 각각 57.88, 58.34, 55.79, 54.65°로 나타났음. 겨울이 가장 낮고, 여름이 가장 높게 나타남
- 풍속과는 상반된 결과를 나타냈으나, 각 계절별로 보았을 때 크게 편차가 크지 않았고, 월별로 보았을 때도 특정 계절이 우수한 성능을 나타내지는 않았음



[그림 58] 태안비행장 실험의 00UTC 풍향 결과

- 12UTC 실험의 풍향 결과는 그림 60에 나타나고 00UTC와 마찬가지로 각 월별로 RMSE를 산출하여 그림에 나타냄
- 12UTC 풍향의 RMSE 결과는 월별로 46.69~65.12°의 분포를 보이고 있으며, 7월이 가장 낮은 RMSE를 보였고, 1월이 가장 높은 RMSE를 보였음
- 계절별 RMSE는 봄, 여름, 가을, 겨울이 각각 53.71, 54.38, 57.46, 54.95°로 나타났으며 봄이 가장 낮고, 가을이 가장 높게 나타남
- 계절적으로 보았을 때, 00UTC와는 일관적이지 않은 결과를 나타냈으나, 월별로 보면 비슷한 패턴으로 나타났으며 00UTC와 마찬가지로 각 계절별로 보았을 때 크게 편차가 크지 않았고, 월별로 보았을 때도 특정 계절이 우수한 성능을 나타내지는 않았음



[그림 59] 태안비행장 실험의 12UTC 풍향 결과

③ 태안비행장 결과 종합

- 00UTC 풍속의 RMSE 결과는 월별로 2.69~4.52m/s의 분포를 보였고, 12UTC 풍속의 RMSE 결과는 월별로 2.89~4.58m/s의 분포를 보였음
- 같은 물리과정과 입력자료를 사용한 보성 실험의 결과에서는 4월 00UTC와 12UTC의 RMSE가 각각 1.65, 1.72m/s로 나타났으며 태안비행장의 4월 00UTC와 12UTC의 RMSE는 각각 3.52, 3.74m/s로 나타나 보성보다 성능이 떨어졌음
- BIAS를 보았을 때도 보성은 4월 00UTC와 12UTC가 각각 -0.15, -0.08m/s로 나타나 같은 기간의 태안비행장(00UTC: -1.80m/s, 12UTC: -2.21m/s) 보다 0에 가까워 편향되는 경향이 적게 나타남
- 00UTC 풍향의 RMSE 결과는 월별로 47.52~65.30°의 분포를 보였고, 12UTC 풍향의 RMSE 결과는 월별로 46.69~65.12°의 분포를 나타냈음
- 같은 물리과정과 입력자료를 사용한 보성 실험의 결과에서는 4월 00UTC와 12UTC의 RMSE가 각각 56.82, 64.70°로 나타났으며 태안비행장의 4월 00UTC와 12UTC의 RMSE는 각각 54.97, 49.91°로 나타나 00UTC는 보성보다 성능이 우수한 것으로 나타났음
- 전반적으로 모든 월의 풍속 결과는 보성보다 RMSE가 높게 나타나서, 보성보다 과소모의하는 경향이 크게 나타났으며 풍향의 경우는 보성보다 RMSE가 낮게 나타나는 경우가 많았음
- 이러한 점을 볼 때, 한 지역에서 최적의 물리과정을 선정한 것이 다른 지역에서도 최적 물리과정이 아닐 수 있다는 점을 파악할 수 있고 보성의 결과에서 다른 물리과정이 과대모의하는데 반해 TEST8은 과소모의하는 경향이 있어 태안비행장에서 다른 물리과정을 적용한다면 과소모의하는 경향이 적어져 성능이 오히려 우수하게 나타날 가능성이 있음

(6) 딥러닝 활용 고도화 기술 개발

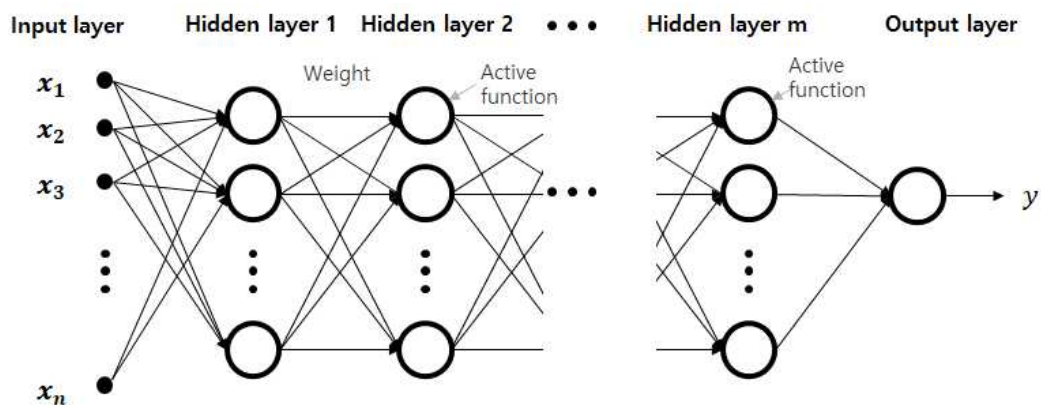
(가) 머신러닝

- 머신러닝은 데이터에서 모델을 찾아내는 기법을 의미하는 것으로, 어떠한 종류의 입력 데이터에 대한 특성을 반영한 모델을 도출하여 추후 입력되는 데이터에 대한 모델의 적용 결과를 산출하는 것임
- 이러한 전체 과정에서 데이터를 분석해 모델을 스스로 찾아가는 형태이므로, 학습(learning)이라는 의미를 부여하는 것으로, 기계가 데이터를 학습해 모델을 알아내는 것과 유사하여 머신러닝이라 칭함
- 모델은 어떠한 데이터를 처리한 결과를 생성할 수 있는 중간 과정에 해당하는 것으로, 연구의 결과물로 도출되는 결과물의 형태임
- 모델을 만드는 모델링 기법은 머신러닝만 있는 것은 아니며, 역학 분야의 운동 방정식 등과 같이 수치적 특성을 도출할 수 있는 것을 포함하거나 또는 통계적으로 유의한지 확인하는 과정과 같은 의미있는 결과를 만들어 낼 수 있는 다양한 것을 의미함
- 다만, 법칙이나 논리적으로만 모델링하기 어려운 분야가 있는데, 대표적으로 영상 인식, 음성 인식, 자연어 처리 등과 같이 결과 도출에 지능이 필요한 분야가 포함됨
- 머신러닝은 학습데이터를 통하여 모델을 개발하고, 개발된 모델에 새로운 데이터를 입력하여 결과를 도출하는 과정임
- 이 과정에서 학습데이터와 입력데이터는 동일한 데이터가 아니라는 점에 따라 발생되는 한계가 있음
- 즉, 학습데이터가 나쁘면 개발된 모델의 적정성이 낮아질 수 있으며, 이로 인하여 새로운 입력데이터로 산출된 결과의 정확도도 낮아질 수 있음
- 따라서, 머신러닝에서는 실제 데이터의 특성이 잘 반영되어 있고 편향되지 않은 학습 데이터의 확보와 이를 적용한 모델의 개발이 매우 중요함

(나) 심층신경망

- 인공신경망은 뇌의 뉴런들의 상호 작용과 경험을 통해 학습해 나가는 것을 모사해 만든 알고리즘으로, 1958년 Rosenblatt에 의해 제안된 퍼셉트론 학습 모델 또는 단층 신경망을 시작으로 다양한 형태로 개발되고 있음

- 초기 단층 인공신경망은 선형 분리 가능한 문제와 같은 제한적인 문제만 풀 수 있었으며, 신경망의 크기에 따라 요구되는 계산량이 증가하는 문제점을 가지고 있었음
- 이러한 문제점들을 극복하고자 단층에서 보다 복잡한 심층구조로 확장을 통해 단점을 보완함
- 하지만 심층구조에 따른 과잉 학습, 데이터의 특성을 나타내는 경사(gradient) 사라짐이나 폭발과 같은 문제점들이 나타나게 되었으며, 이를 위해 1975년 P. Werbos에 의해 제안된 오차역전파법과 비선형 활성화 함수를 이용한 방법과 2006년 G. Hinton에 의한 가중치의 적절한 초기화를 통해 심층 신경망의 문제점들이 개선됨



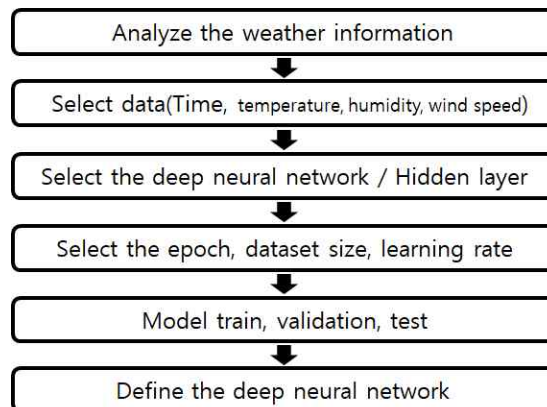
[그림 60] 심층신경망 구조

- 일반적으로 은닉 층이 2개 이상인 경우 심층 신경망이라고 칭하게 됨
- 본 연구에서는 그림과 같이 2개의 은닉층을 가진 심층신경망 구조를 구성해서 학습을 구현했으며, 그림에서 둥근 원은 노드를 의미하고, 각각의 노드는 sigmoid 함수나 ReLU(rectified linear unit) 함수와 같은 활성화함수(active function)를 포함하고 있음
- 각 층의 노드를 연결한 화살표는 신호의 흐름을 나타내고, 이전 노드의 데이터는 가중치(weight)를 곱하여 화살표로 연결된 다음 노드에 전달됨
- 전달된 가중치가 곱해진 입력 데이터들은 모두 더해져 즉, 가중합(weighted sum)되어 활성화 함수를 통해 출력 값이 생성되고, 이렇게 얻은 출력 값과 실제 측정값 사이의 오차를 최소화하기 위해 각 가중치는 학습을 통해 갱신되게 됨

(다) 심층신경망 적용 데이터 고도화

① 심층신경망 개발

- 본 연구에서 풍속 예측 개선을 위한 심층신경망 개발 및 적용을 위해서 그림과 같은 절차를 사용함



[그림 61] 심층 신경망 개발 절차

- 우선 저고도 바람정보 예측을 위한 수치 예보 모델 자료 생산을 위해 수치예보 모델에서 연구 대상지의 상세 예측 자료를 생성하고, 실제 고도별 관측 값과 함께 심층 신경망의 입력 데이터로 선정함
- 선정된 데이터를 바탕으로 예측 값을 실제 값으로 개선하는 학습 모델을 구성함
- 모델에서 예측된 풍속 자료가 관측된 풍속 정보를 적정하게 추정하는지 성능을 확인하고 학습 모델을 개선하며, 심층신경망에 대한 적절한 모델이 구성되면, 학습을 위한 데이터 크기, 학습 비율 등을 조절해가면서 적정한 학습 모델을 설정함

```

ford@localhost:DATA/WRF/WRF_GFS/LOGO/2018063012
Timing for main: time 2018-07-03_11:59:30 on domain 2: 0,44440 elapsed seconds
Timing for main: time 2018-07-03_11:59:30 on domain 1: 1,78261 elapsed seconds
Timing for main: time 2018-07-03_11:59:32 on domain 3: 0,20801 elapsed seconds
Timing for main: time 2018-07-03_11:59:34 on domain 3: 0,05666 elapsed seconds
Timing for main: time 2018-07-03_11:59:36 on domain 3: 0,05825 elapsed seconds
Timing for main: time 2018-07-03_11:59:38 on domain 3: 0,05657 elapsed seconds
Timing for main: time 2018-07-03_11:59:40 on domain 3: 0,05644 elapsed seconds
Timing for main: time 2018-07-03_11:59:42 on domain 2: 0,71135 elapsed seconds
Timing for main: time 2018-07-03_11:59:42 on domain 3: 0,06422 elapsed seconds
Timing for main: time 2018-07-03_11:59:44 on domain 3: 0,05667 elapsed seconds
Timing for main: time 2018-07-03_11:59:46 on domain 3: 0,05653 elapsed seconds
Timing for main: time 2018-07-03_11:59:48 on domain 3: 0,05675 elapsed seconds
Timing for main: time 2018-07-03_11:59:50 on domain 3: 0,05677 elapsed seconds
Timing for main: time 2018-07-03_11:59:50 on domain 2: 0,44562 elapsed seconds
Timing for main: time 2018-07-03_11:59:52 on domain 3: 0,06410 elapsed seconds
Timing for main: time 2018-07-03_11:59:54 on domain 3: 0,05657 elapsed seconds
Timing for main: time 2018-07-03_11:59:56 on domain 3: 0,05658 elapsed seconds
Timing for main: time 2018-07-03_11:59:58 on domain 3: 0,05663 elapsed seconds
Timing for main: time 2018-07-03_12:00:00 on domain 3: 0,05658 elapsed seconds
Timing for Writing wrfout_d03_2018-07-03_12:00:00 for domain 3: 0,32781 elapsed seconds
Timing for Writing wrfout_d02_2018-07-03_12:00:00 for domain 2: 0,77298 elapsed seconds
Timing for Writing wrfout_d01_2018-07-03_12:00:00 for domain 1: 2,42793 elapsed seconds
Timing for main: time 2018-07-03_12:00:00 on domain 1: 0,28422 elapsed seconds
2018-07-03_12:00:00 wrf: SUCCESS COMPLETE WRF
164511,1 Bot.
  
```

[그림 62] WRF 로그파일 캡처화면

② 기상 역학 모델 이용 저고도 풍속 예측

- 본 연구에서는 바람정보 예측을 위한 수치모델 자료 생산을 위해 NCAR (national center for atmospheric research)에서 개발한 중규모 기상 역학 모델인 WRF (weather research and forecasting model)을 사용하였음
- WRF는 완전 압축성 정수계 모델 (fully compressible non-hydrostatic)이며, 수평 격자는 Arakawa-C 격자, 연직 격자 지형에 근거한 정역학 기압연직 좌표를 사용하는 모델임
- WRF는 다양한 기상관련 연구에 많이 사용하는 모델로, 모델 구동 환경 설정으로 연구에 필요한 구역의 다양한 정보의 생성이 가능한 장점이 있음
- 특히, 일반적으로 기상 예보 정보에서 제공하지는 않지만, 본 연구에서 반드시 필요한 150 m 이하의 저층 기상 정보의 생성이 가능함
- 저고도의 바람을 정밀하게 예측하기 위해 모델의 최종 도메인을 500 m 설정하였고, 실제 저고도의 층별 관측이 가능한 대상지에 대한 정밀 예측을 실시하였음
- 또한, 높은 해상도의 정밀한 모델 수행을 위하여 고해상도 지형 자료 및 토지 이용도 자료를 입력 자료로 사용하였음
- 지형자료는 1 s (약 30 m) 해상도의 SRTM (shuttle radar topographic mission) 자료를, 토지이용도 자료로 2013년 환경부 1:25,000 축척 자료를 사용함
- 또한, 물리 모수화 방안 선정에 대한 실험을 진행한 사전 연구의 결과를 활용하여 저고도 바람 예측 모델의 결과 값을 본 연구의 입력 자료로 사용함

③ 풍속 측정 데이터

- 일반적으로 측정되어 제공되는 풍속 정보는 지면에 위치한 관측점의 데이터임
- 본 연구는 바람 예측 모델의 결과 값의 정밀도를 높이는 것이 필요하므로, 실제 관측 점의 데이터의 경우 적절한 품질이 보장된 데이터를 활용하는 것이 연구 결과의 정밀도 향상이 필요한 요소임
- 본 연구에서 사용한 실제 풍속 측정 데이터는 그림 64의 보성 종합기상 관측 탑에서 측정한 풍속 데이터를 사용함
- 그림의 시설은 고도 10 m 의 높이에서부터 고도300 m 까지 11개 층별 바람 데이터를 측정할 수 있는 시설로, 국내에서 저고도의 층별 데이터를 측정할 수 있는 몇 안 되는 시설중 하나임
- 측정된 주요 기상 데이터는 실제 기상 관련 연구에 사용하기 위한 품질화 과정을 거치는 등 데이터의 정밀도가 보장됨

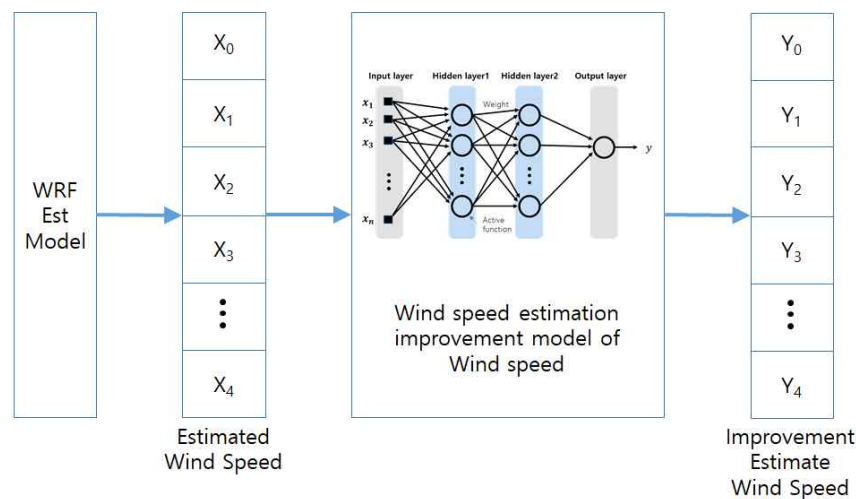


[그림 63] 보성종합기상관측탑

④ 풍속 예측 개선 고도화 모델 개발

- 본 연구 수행을 위하여 상위 과정에서 제시한 기상역학 모델의 2018년 1월부터 6월까지의 예보 값을 활용함
- 예보는 일자별로 한국시간 오전 9시 및 오후 9시, 1일 2회의 데이터를 활용하였으며, 각 1회 데이터에는 생성 시간부터 +72시간 까지 1시간 간격으로 예보 데이터가 발생함
- 그 중 실제 관측 값과 비교를 위해 3-3의 측정 데이터가 있는 보성 관측 탑 위치에 해당하는 예보 데이터를 추출함
- 예보 데이터는 데이터 생성 시간별로 예보 일자, 예측시간, 온도, 습도, 대기압, 강수량, 풍속, 대기상태변수 등 14개의 항목에 대한 데이터가 생성되며, 1회 데이터 산출시에는 기준 시각부터 +72시간 까지 73세트의 데이터가 생성되므로 총 1,022개의 데이터(14개 항목 × 73시간)가 산출됨
- 이렇게 산출된 각각의 데이터는 3-3에서 측정된 관측 값과 1:1 매칭이 가능함
- 만약, 관측 데이터의 오류 등으로 1:1 매칭이 불가능한 데이터가 포함된 경우 해당 예보 모델로 생성된 데이터 세트는 전부 학습에 사용할 수 없게 됨
- 사용이 불가한 데이터를 제외하고, 총 317개의 입력 데이터 세트(323,974개의 예측 데이터)가 생성됨
- 본 연구를 위하여 반복적 형태로 학습에 효과가 없거나 풍속에 영향이 적은 항목을 제외하고 예측 시간, 온도(℃), 기압(hPa), 습도(RH%), 대기상태변수, 풍속(m/s) 예측 데이터 등 7개 항목 학습에 사용함

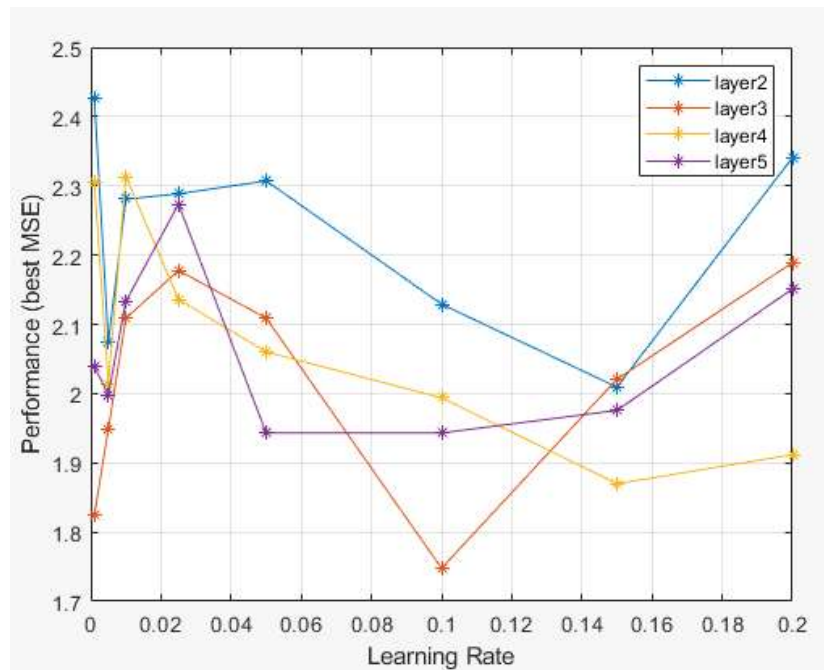
- 317개의 입력 데이터 세트 중 254개의 데이터 세트는 학습 및 검증에 사용하였고, 개발된 예측 모델의 적정성을 확인하기 위해서 나머지 63개의 데이터를 사용함
- 본 연구에서 예측 개선의 범위는 실제 기상 관측 데이터의 유효성 및 사용성 등을 고려하였을 때, 운영자는 2일치의 정밀한 데이터를 필요한 것으로 가정함
- 이는 드론 등과 같은 저고도 비행체 운영자는 내일 및 모레의 정밀한 기상 정보의 제공이 있는 경우 사전에 운영 여부를 판단하는데 도움이 될 수 있기 때문임
- 따라서 데이터의 생성 및 표출 시간, 전·후 처리 시간 등을 제외하고, 생성시간 기준 +6시간부터 +54시간까지의 48시간 데이터를 정밀하게 예측하기 위한 개선 모델을 개발함
- 그림 65는 본 연구에서 활용한 심층신경망을 이용한 풍속 예측 개선 모델의 개념 도입



[그림 64] 심층신경망 개념도

- 모델의 개발 과정에 MATLAB을 이용하여 데이터 전처리, 개선 모델 구성, 모델 성능 도출, 실험, 데이터 분석 등을 실시함
- 심층신경망의 적정한 은닉층의 수, 은닉층 노드와 학습률은 실험을 통하여 선정함
- 은닉층의 수는 2개부터 5개 까지 순차적으로 늘렸으며, 은닉 층 내 노드의 수는 이전 층(layer)의 1/2을 갖도록 함
- 각각의 은닉층과 노드의 구성이 완료된 후, 학습률 0.001, 0.005, 0.01, 0.025, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 으로 총 8단계로 실험을 실시하여, 총 32개 경우의 수(4개 은닉층 × 8개 학습률)에 대한 민감도 분석 실험을 완료 한 후 적정한 모델을 구성함

- 그림 65는 실험결과를 나타낸 그림으로 같은 은닉층에서 학습률에 따른 학습된 결과의 변화를 보여줌



[그림 65] 은닉층 및 학습률 실험 결과

- 은닉층이 3개의 경우 학습의 결과의 편차가 다른 은닉층의 개수에 비하여 큰 것을 확인할 수 있으나, 이는 가중치의 초기 값 설정의 영향 등에 따라 나타날 수 있는 현상임
- 은닉층 2개, 4개, 5개의 경우 학습률이 증가함에 따라 학습의 결과가 좋아지는 추세이나, 학습률이 0.2가 되었을 때 학습의 결과가 안 좋아지는 현상을 보임

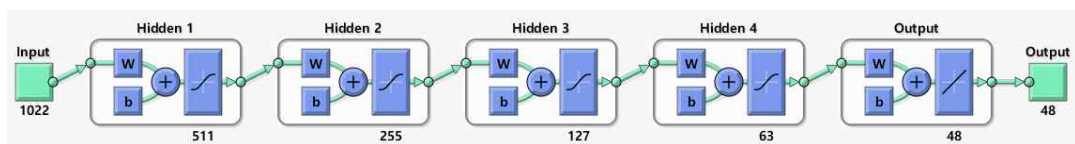
⑤ 풍속 예측 개선 모델 구현

- 그림66의 실험 결과를 바탕으로 심층신경망을 활용한 풍속 예측 모델을 구현함
- 모델은 은닉층 4개 및 학습률 0.15로 풍속 예측 개선 모델을 구성하고 해당 은닉층과 학습률은 그림6의 실험 결과를 확인하고 반영함
- 학습을 위한 모든 데이터는 정규화 하는 과정이 필요하며, 풍속의 최소값인 0의 경우 바람이 없는 상태를 의미하는 것으로 데이터의 특징을 학습에 반영이 필요함

- 이에 따라 정규화는 최소값을 -1, 최대값을 1로 갖는 식(1)과 같은 형태로 적용함
- 즉, 아래 식에서 x 는 데이터, $x_{\max}$ 는 데이터 최대값, $x_{\min}$ 은 데이터 최소 값, y 는 정규화 결과 값, $y_{\max}$ 는 1, $y_{\min}$ 은 -1을 나타냄

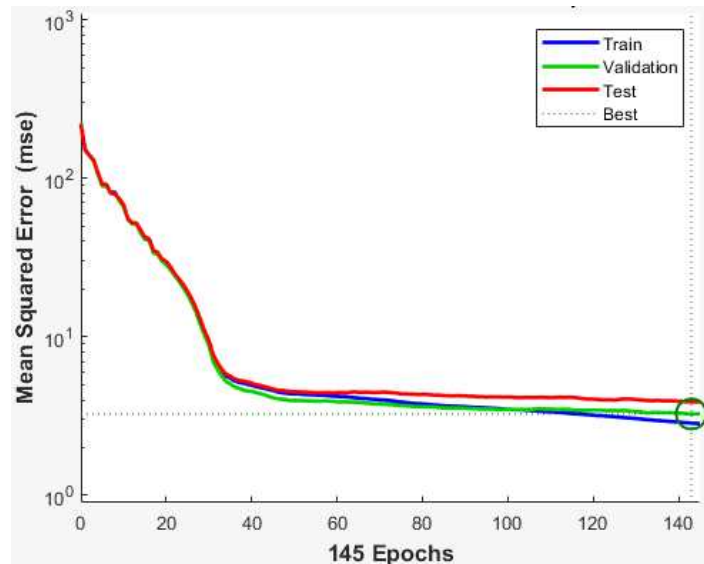
$$y = \frac{(y_{\max} - y_{\min}) \times (x - x_{\min})}{(x_{\max} - x_{\min}) + y_{\min}}$$

- MATLAB의 경우 학습을 위한 기본적 정규화에 위의 식과 같은 형태를 활용하므로 해당 함수를 사용함
- 모델의 활성화함수는 Hyperbolic tangent를 사용하였고, 모든 노드는 연결하였으나 입력 값에서 일부 노드를 활용하지 않는 Dropout을 기능을 사용하여 학습의 정확도를 향상시킴
- 모델의 가중치들은 확률적 경사하강법(SGD : stochastic gradient descent)을 이용한 오차역전파법으로 갱신함
- 그림 67은 구현된 심층신경망 모델을 나타낸 것임



[그림 66] 심층신경망 모델 구현

- 모델의 각 은닉층 별로 노드의 개수를 확인할 수 있으며, 적용된 활성화 함수의 형태를 확인할 수 있음
- 그림68은 구현된 모델의 학습결과에 예를 나타낸 것으로, 입력데이터 중 80%는 학습(train)에 사용하였고, 10%는 검증(validation), 10%는 시험(test)에 사용하였으며, 데이터의 분배 여부의 판단은 무작위(random)로 선택함
- 그림8에서 보는 것과 같이 오류가 증가되지 않는 수준에서 학습을 중단하였으며, 모델이 학습용 데이터에 과적합(overfitting)되지 않고 적절한 수준을 유지할 수 있도록 함
- 다만, 학습에 사용되는 초기 값을 무작위(random)로 적용하는 방법에 따라 학습의 결과 및 성능이 달라지는 특성이 나타냄
- 이에 따라 적절한 예측 결과를 확인할 수 있는 학습의 결과는 여러 번의 학습을 시도하여 선정함



[그림 67] 모델의 학습 결과

⑤ 풍속 예측 개선

- 그림68에서 나타낸 모델의 개선 정도를 확인할 수 있는 그림의 예로 학습 횟수별로 학습(train), 검증(validation), 시험(test)의 결과를 확인할 수 있음
- 그림과 같은 형태의 결과는 모델의 학습, 학습된 모델을 사용한 데이터 검증, 학습된 모델을 사용한 시험이 모두 비슷한 성능 수치를 나타내는 것을 의미하므로 학습된 데이터에 과적합(overfitting)되지 않은 적절한 모델이 구성되었다는 것을 의미함
- 학습된 모델을 사용하여 별도로 구분된 확인(check)용 데이터 세트를 사용하여 모델의 적정성을 다시 검증함
- 확인용 데이터는 모델을 구성할 때 사용한 학습/검증/시험용 데이터와는 구분된 별도의 데이터를 사용하여 객관성을 확보함
- 성능 확인은 역학모델의 예측 값, 심층신경망의 예측 개선 값, 실제 관측 값을 각각 비교함
- 성능은 비교를 위하여 산출된 값들에 대한 평균제곱근오차(RMSE : root mean square error)를 사용하며, RMSE의 산출식은 식(2)와 같음

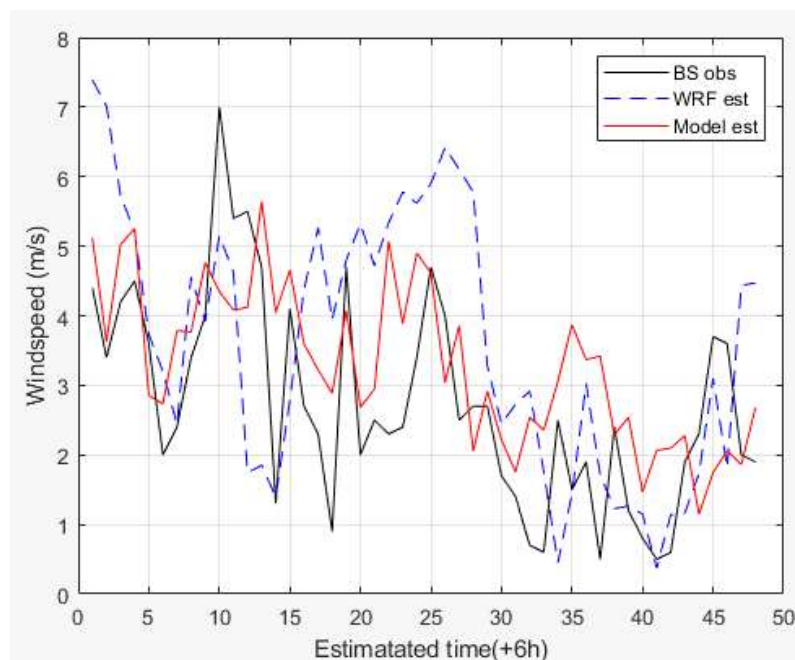
$$\begin{aligned}
 RMSE(x_1, y_1) &= \sqrt{MSE(x_1, y_1)} = \sqrt{E(x_1 - y_1)^2} \\
 &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}}
 \end{aligned}$$

○ 표25는 풍속 예측 개선 모델의 RMSE결과 임

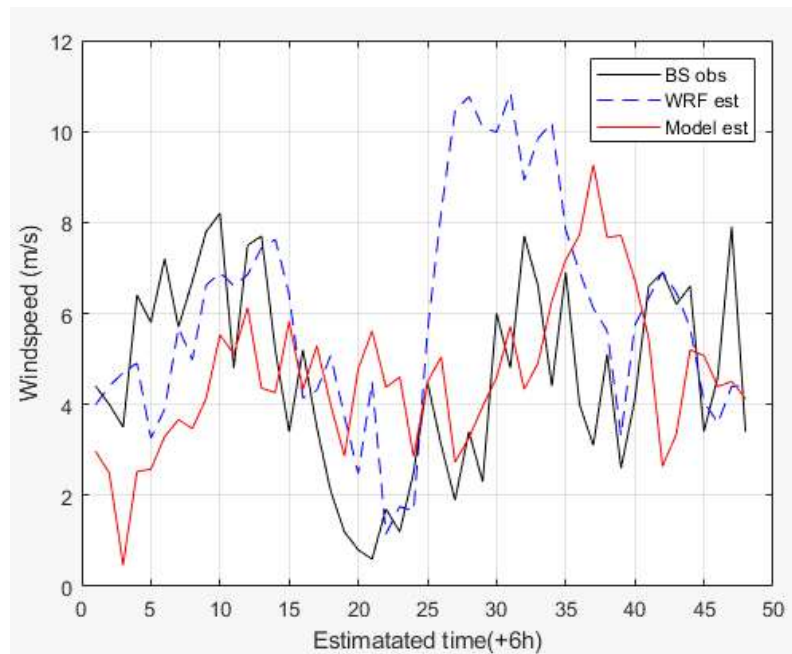
[표 32] 풍속 예측 개선 모델의 RMSE 결과

WRF model	DNN model	improvement value
1.9320	1.7976	0.1364

- 학습 모델의 초기 값에 의한 영향을 줄일 수 있도록 30회의 반복 학습을 시행한 후 가장 학습 성능이 좋은 모델을 사용하여 예측 개선을 실시함
- 역학모델의 예측 값과 실제 관측 값의 차이는 RMSE 1.932이고, 심층신경망을 이용한 풍속 예측 개선 모델과 실제 관측 값의 차이는 RMSE 1.7676로, 0.1364 개선됨
- 그림69와 그림70은 관측값(BS obs), 역학모델 예측 값(WRF est), DNN 개선 모델 예측 값(Model est)을 나타낸 예임
- 그림에서는 예측 시간 기준 +1 및 +25에서 역학 모델의 오차를 DNN 모델이 개선한 것을 확인할 수 있으며, 그림 10에서는 +25~+30에서 역학 모델의 오차를 DNN 모델이 개선한 것을 확인할 수 있음



[그림 68] 관측값, 역학모델, 예측 모델의 결과 예 I



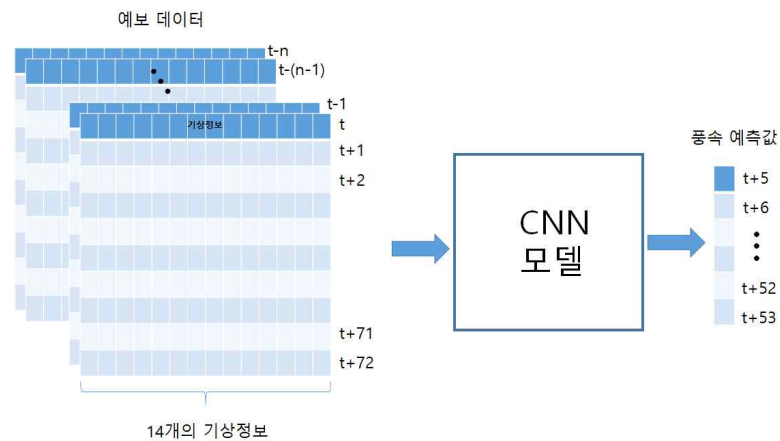
[그림 69] 관측값, 역학모델, 예측 모델의 결과 예Ⅱ

(라) CNN 적용데이터 고도화

① CNN 적용 모델 개발

- CNN(Convolutional Neural Network) 모델은 LeCun의 의해 1990년에 소개된 신경망으로, 뇌의 시각 피질이 이미지를 처리하고 인식하는 원리를 모방해 만든 인공신경망의 한 종류임
- 초기에는 복잡한 이미지를 처리에 부적절하여 사용되지 않다가 컴퓨팅 성능 향상과 딥러닝 기법의 개선으로 이미지 인식, 이미지 분석과 같은 컴퓨터 비전 분야 뿐만 아니라 다양한 분야에서 가장 널리 사용되는 신경망임
- CNN 모델은 합성곱층, 풀링층, 완전히 연결된 층으로 구성되며, 합성곱층은 합성곱층의 필터와 입력값의 합성곱으로 특징맵을 구성하게 되고, 풀링층은 표현 공간의 크기를 줄이는 역할을 하며, 완전히 연결된 층에서는 특징을 분류를 하게 됨.
- 본 연구에서는 예보 데이터에 생성된 기상 데이터 14개의 항목인 예보 일자, 예측 시간, 온도, 습도, 대기압, 강수량, 풍속, 대기상태변수 등에 대해 기준 시각부터 +72시간 까지 73세트의 데이터, 즉 총 1,022개의 데이터(14개 항목 × 73시간)를 2차원 데이터로 변환을 함

- 예보 데이터에 측정 기간에 해당하는 317개의 데이터 세트에 대해 아래 그림과 같은 3차원 데이터(14개 항목 $\times$ 73시간 $\times$ 317개 데이터 세트) 변환을 해 CNN 모델의 입력 값으로 사용하여 기준시간 + 5부터 기준시간+53의 풍속 예측값을 개선함

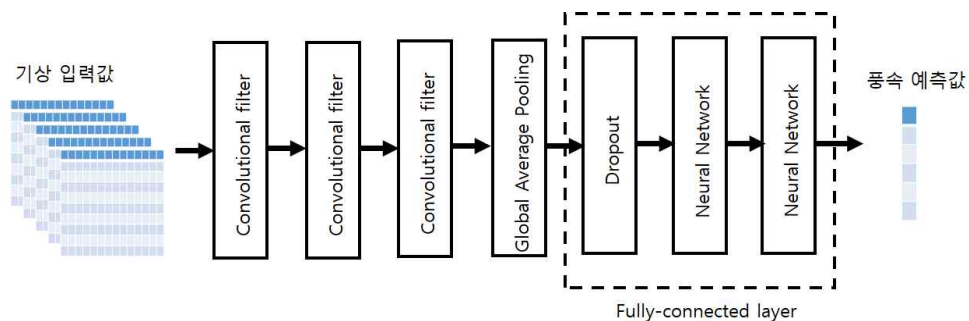


[그림 70] CNN 적용 모델의 입력과 출력

- 각 예보데이터의 값들은 값의 범위가 다양하기 때문에 각 입력값들의 영향을 비슷하게 만들기 위해 -1과 1사이의 값을 정규화를 실시함

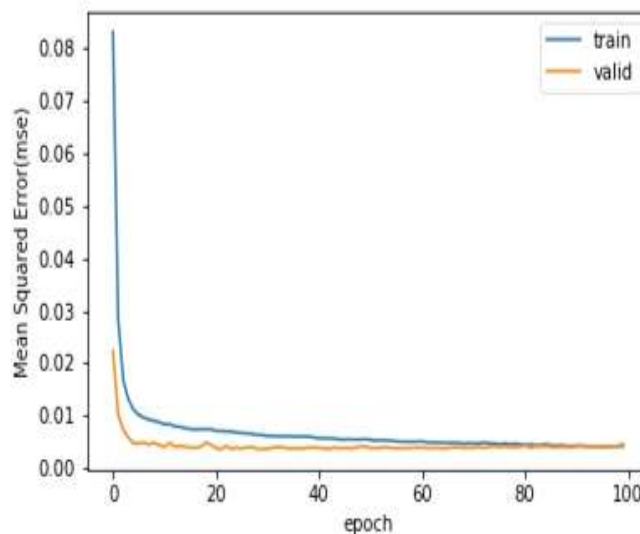
② CNN 적용 개선 모델 구현

- 본 연구에서 풍속 예측값 개선을 위해 다음 그림과 같이 CNN 적용 모델을 구성함
- 해당 CNN 적용 모델의 구성은 CNN 모델의 구성과 모델 파라미터값을 변경해서 경험적으로 구성을 함



[그림 71] 제안된 CNN 적용 모델

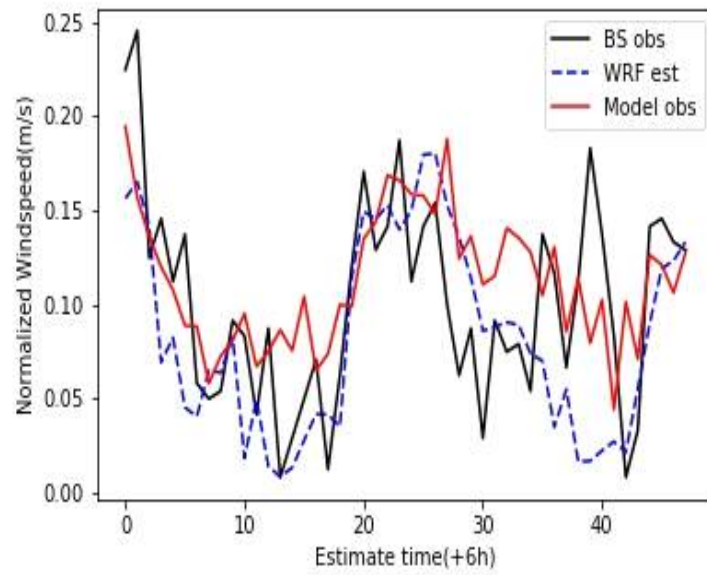
- 각 합성곱층의 필터는 120개, 100개, 80개를 사용하였으며, 커널의 크기는 14, 10, 6으로, 각 stride는 2로 설정해 학습을 진행했으며, 입력값이 -1과 1사이의 값으로 정규화되어 있어 활성화함수로는 tanh를 사용함
- 과적합을 방지하기 위해서 Dropout을 20%했으며, 은닉층은 각각 60개, 48개의 노드로 구성됨
- 학습을 위해 본 연구에서는 전체 317개의 데이터 세트를 train을 위해 222개 데이터세트(70%), validation을 위해서 48개 데이터세트(15%), test를 위해 48개 데이터세트(15%)로 나누어 사용했으며, 학습횟수(epoch)는 100번으로 설정함
- 제안된 CNN 적용 모델의 정규화된 입력값에 대해 다음 그림과 같이 0.004782의 RMSE값을 가짐



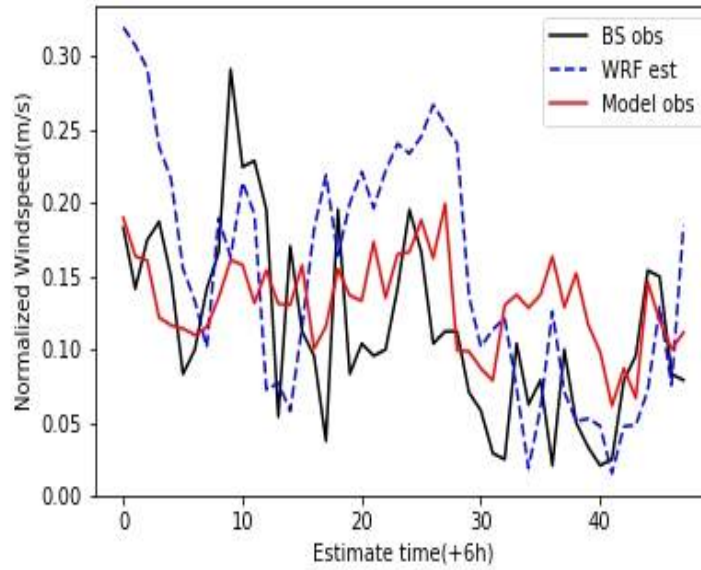
[그림 72] CNN 적용 모델의 학습 및 검증 결과

③ CNN 적용 예측 개선

- 제안된 CNN 모델의 유효한지를 확인하기 위해서 test 데이터 세트를 이용해 WRF와 제안된 CNN모델을 통해 풍속예측 값 개선을 확인함
- 다음 그림들의 결과는 관측값(BS obs), 역학모델 예측 값(WRF est), CNN 개선 모델 예측 값(Model est)을 나타낸 예임
- 전반적으로 CNN 개선 모델의 예측값이 역학모델 예측 값보다는 개선된 것을 확인할 수 있음



[그림 73] 관측값, 역학모델, 예측 모델의 결과 예 I

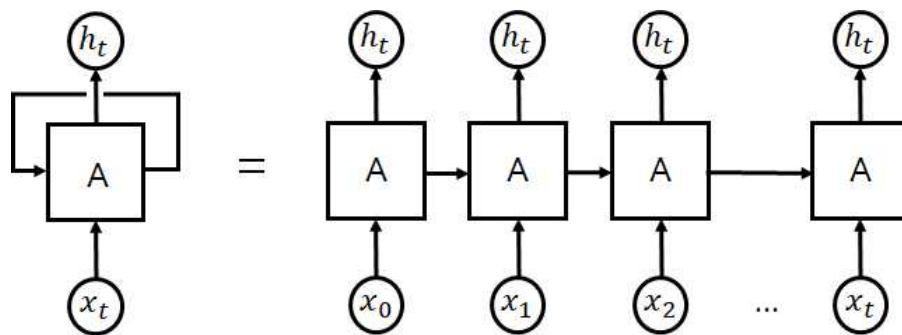


[그림 74] 관측값, 역학모델, 예측 모델의 결과 예 II

(마) LSTM 적용데이터 고도화

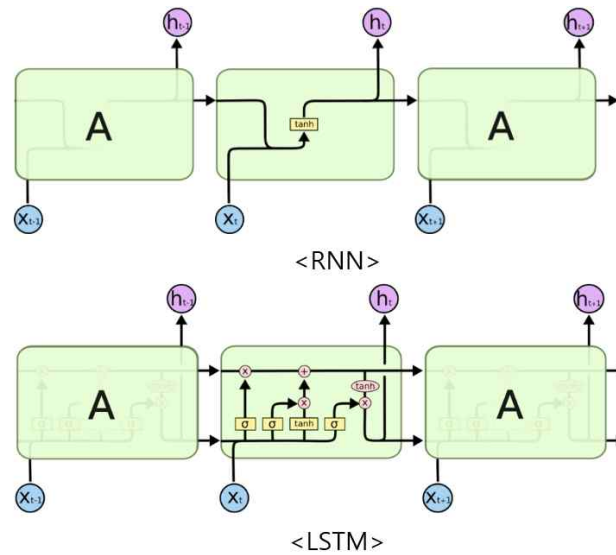
① LSTM 적용 모델 개발

- RNN(Recurrent Neural Network)은 자연어 처리나 음성 신호, 주가 예측같은 시계열 데이터의 예측 및 분석에 적합한 신경망임
- RNN에서는 순차적으로 입력이 되는 형태로 이전 데이터가 저장되고 처리되어 순차적인 데이터의 처리에 적합함.
- 아래 그림은 RNN의 구조를 펼친 형태로 나타낸 것으로, 출력 결과는 이전의 결과에 영향을 받는 구조임



[그림 75] RNN의 구조

- RNN을 이용한 학습은 기존 신경망의 학습과 유사하며 학습을 진행하며 가중치를 갱신 할 때 역전파(backpropagation) 알고리즘을 수행하게 되는데, 이를 통해 gradient가 사라지거나 폭발해 버리는 vanishing/exploding gradient 등이 발생할 수 있어 긴 시퀀스의 학습의 경우 학습이 잘 이루어지지 않는 문제점이 있음
- 이를 보완 개선한 방법 중 하나가 1990년대 중반에 소개된 LSTM(Long Short-Term Memory)은 순환신경망의 구조에 장/단기 기억을 가능하게 설계된 신경망 구조로, LSTM은 역전파 과정에서 오차의 gradient가 시간을 거슬러 잘 흘러갈 수 있게 도와줌
- LSTM은 기존 RNN과는 달리 셀 상태(cell state)를 가지고 있으며, 셀 상태에 저장된 정보는 다음 단계로 전달되고, 이렇게 전달된 이전 셀 상태와 현재 셀 상태를 활용해 선형 연산을 수행함

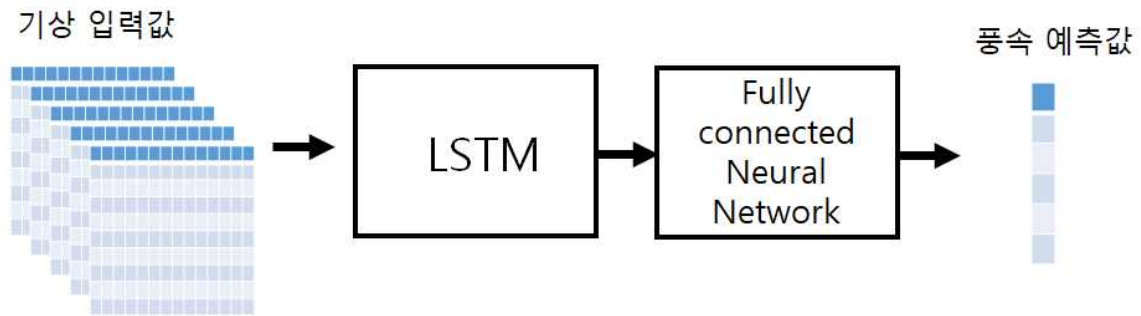


[그림 76] RNN과 LSTM의 구조 비교

- LSTM 구조는 여러 개의 게이트가 붙어 있는 셀로 이루어져 있으며, 이 셀의 정보를 저장/불러오기/유지하는 기능이 있음
- LSTM은 게이트라는 구조에 의해 정보를 더하거나 없애줌으로써 선택적으로 정보를 저장할 수 있어 긴 시퀀스의 데이터를 적절히 처리할 수 있음
- LSTM의 게이트는 입력 조절 벡터, 망각 벡터, 출력 조절 벡터로 구성되어 있어 신호의 양을 조정함
- LSTM의 게이트는 학습 수행을 통해 게이트의 가중치를 조정할 수 있어, LSTM이 기존 RNN보다 네트워크 용량이 크며, 긴 시퀀스의 데이터를 다룰 수 있음

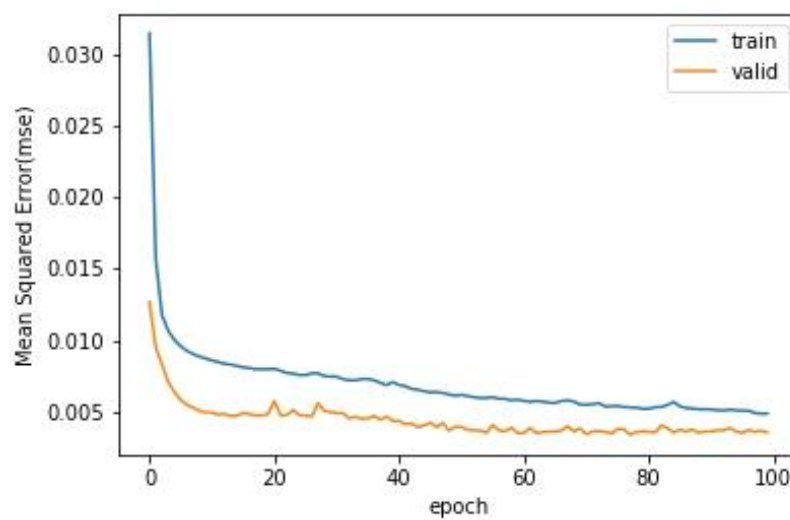
② LSTM 적용 개선 모델 구현

- 본 연구에서 예보 데이터들이 순차적으로 주어지는 데이터이므로 LSTM을 사용해 풍속 예측 개선을 수행함
- 풍속 예측 값이 +5h부터 +53h 풍속을 예측값이므로 출력단자를 48로 설정함. 활성화함수는 tanh를 사용함



[그림 77] 풍속 예측 개선을 위한 LSTM 구조

- 본 연구에서 제안된 LSTM의 학습을 위해 CNN 학습에서 사용된 정규화된 예보 데이터 세트를 사용해 train을 위해 222개 데이터세트(70%), validation을 위해서 48개 데이터세트(15%), test를 위해 48개 데이터세트(15%)로 나누어 사용함
- 학습횟수(epoch)는 100번으로 설정하였으며 손실함수는 mean squared error를 사용했으며, 최적함수는 adam을 사용함
- 아래 그림은 LSTM 적용 모델의 학습 및 검증 결과를 나타내며, 0.00394의 MSE값을 가짐

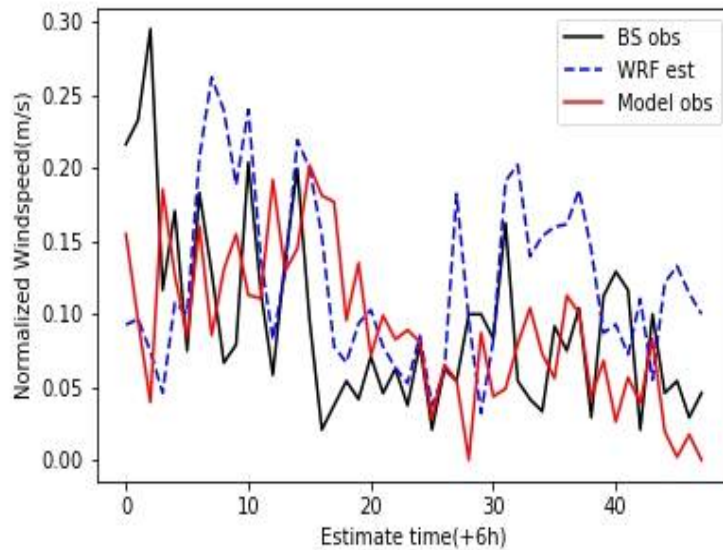


[그림 78] LSTM 적용 모델의 학습 및 검증 결과

③ LSTM 적용 예측 개선

- 이전 CNN 모델과 같이 유효성한지를 확인하기 위해서 test 데이터 세트를 이용해 WRF와 제안된 LSTM모델을 통해 풍속예측 값 개선을 확인함

- 다음 그림들의 결과는 관측값(BS obs), 역학모델 예측 값(WRF est), CNN 개선 모델 예측 값(Model est)을 나타낸 예임
- 전반적으로 LSTM 개선 모델의 예측값이 역학모델 예측 값보다는 개선된 것을 확인할 수 있음



[그림 79] 관측값, 역학모델, 예측 모델의 결과 예 I

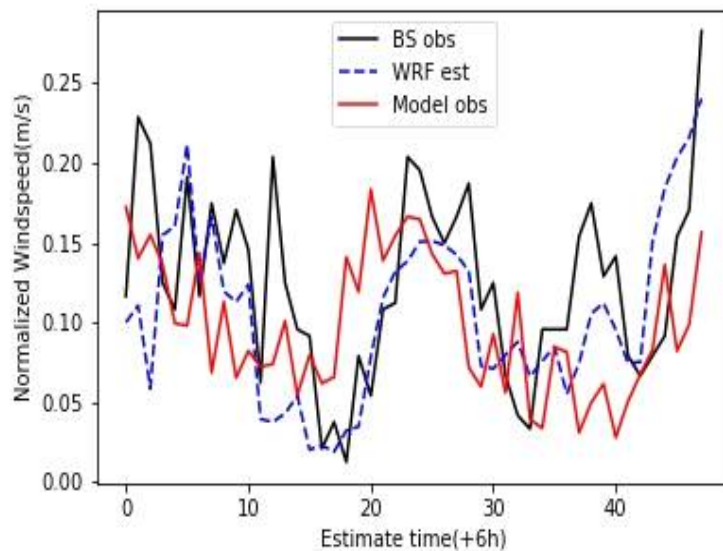
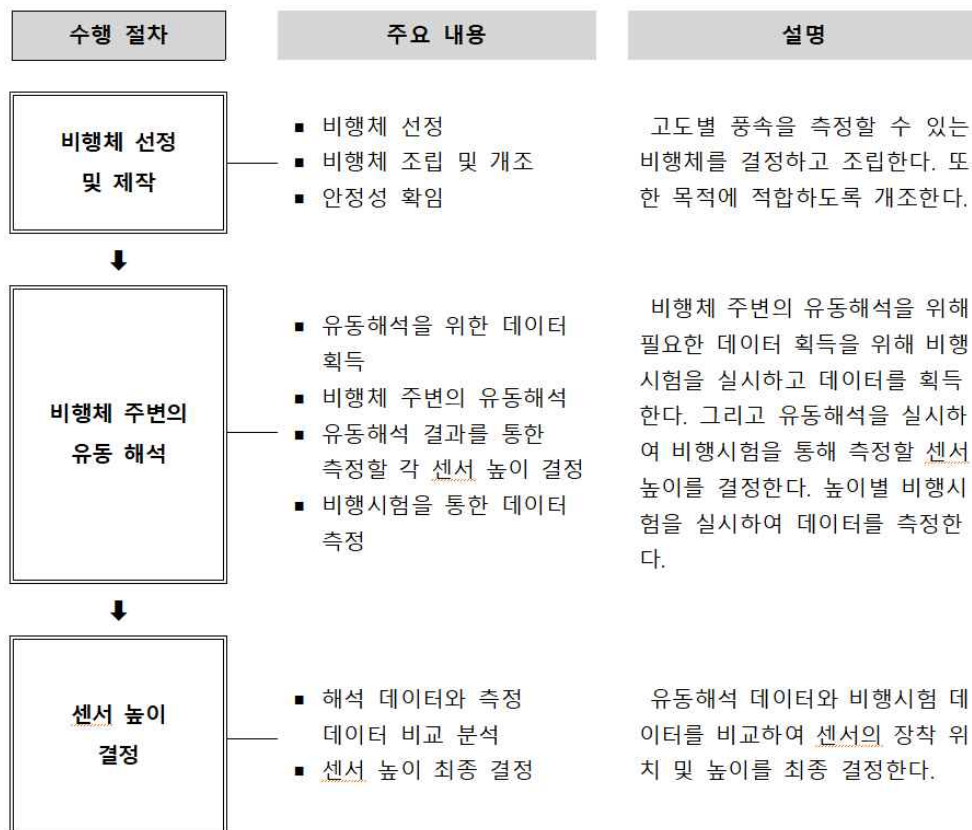


그림 80 관측값, 역학모델, 예측 모델의 결과 예 II

(7) 실황 측정용 드론 개발

(가) 개요

- 고도의 대기자료를 측정하기 위해서는 적정 비행체를 선정하고 목적에 적합하도록 개조하여야 하며, 또한 풍향/풍속 측정용 센서의 장착 위치 및 높이는 비행체의 프로펠러 바람이 영향이 미치지 않는 위치이어야 함
- 이를 위해서는 유동해석을 위한 입력 데이터를 측정하고 측정 데이터를 기반으로 비행체 주변의 유동을 해석하여 적정 위치 및 높이를 결정해야 하며, 비행시험을 통해 획득한 데이터와 비교하며 검증해야 함
- 본 연구 연구의 내용 및 흐름은 다음과 같음

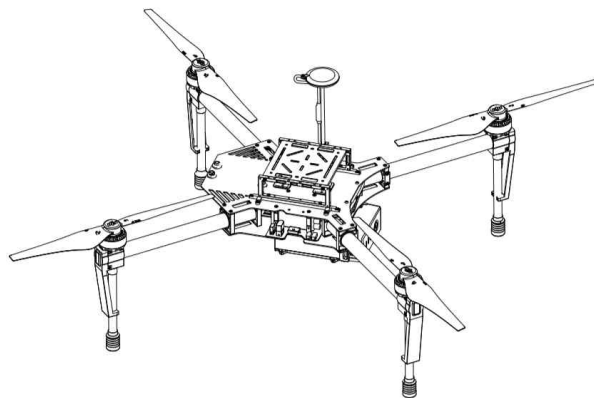


[그림 81] 대기자료 실황 측정용 비행체 개발 절차

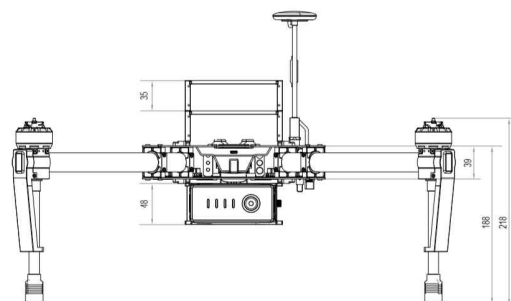
(나) 비행체 제작

① 기체 제작

- 비행체는 정지 비행하면서 대기자료를 측정해야 하므로 회전익 비행체이어야 하며, 비행의 용이성을 위하여 멀티콥터 형식의 비행체가 적당한 것으로 판단함
- 대기자료센서, 센서마운트, 기타 개조 부품 등을 장착할 수 있어야 하며, 비행시간 증가가 필요한 경우 예비 축전지를 장착할 수 있을 정도의 추력을 확보해야 함
- 또한, 본 연구에 맞는 임수 수행을 위해 개조가 가능할 수 있어야 함
- 본 연구는 연구에서는 드론 기체를 개발하는 것은 효율적인 접근방법은 아니므로, 상기 조건을 만족하는 상용 기체를 활용하였으며, 최종적으로 DJI사의 Matrice 100 기체를 선정하여 제작 및 개조 등을 작업을 수행하였음
- 해당 기체는 개발자용 API를 제공하는 기능이 있으므로, 차년도에 목적에 맞는 비행이 이루어질 수 있도록 하는 연구의 연속성도 가능할 것으로 판단함



[그림 82] DJI M100



[그림 83] M100 사이즈

- 선정된 기체는 대기자료 센서 장착 이전에 비행체의 조립 및 비행안정성에 대한 확인을 시행하였으며, 이후 센서 장착을 위한 부품 제작과 개조를 실행하였음



[그림 84] 드론 M100 조립



[그림 85] M100 초도비행(조립 후, 안정성 검사)

② 비행체 테스트벤치 제작

- 테스트벤치는 지상에서 비행체를 고정하고 작동시킬 수 있도록 제작하였으며, 이 테스트벤치는 비행체에 센서 장착 후 비행 이전에 비행체의 동작과 프로펠러 유동이 센서의 동작에 영향을 미치는지 확인하는데 활용하였음

- 이것은 비행체의 실 비행 이전에 지상시험을 실시하여, 연구 목적에 맞는 데이터의 획득이 가능한지 확인함으로써, 연구의 리스트 관리를 실행하는 목적이 있음
- 구조는 비행체의 추력 등을 고려하여 제작하였으며, 투명 플라스틱을 이용하여 실험중 관찰과 운영자의 안전성을 확보하였음
- 아래 그림을 지상시험과 기체, 센서 설정 등에 활용한 테스트벤치 임



[그림 86] 비행체 테스트벤치



[그림 87] 테스트벤치에 장착한 비행체

(다) 대기 자료 센서 장착 위치 설정

① 입력 데이터 측정을 위한 시험비행

- 모든 부품을 장착한 최대 이륙무게를 계산하여 비행체에 적재하였고 이는 비행체의 추력과 조종 안전성에 영향을 미치는 요소로 사전에 확인이 필요함
- 계산된 예상 무게는 아래와 같음

[표 33] 비행체 이륙 영향 무게 산출

부품명	무게(g)	장착 수량(EA)	합계(g)	비고
풍속 센서	350	1	350	원형 Type
Battery	592	2	1,184	
기체	2,034	1	2,034	
거치대	0	1	0	2단
카메라 볼트	4	1	4	
카본 파이프	119	1	119	1m
GPS 1 추가	100	1	100	2개
파이프 고정대	100	1	100	
기타	5	1	5	부속품
총 무게			3,896	

- 유동해석의 입력 데이터를 측정하기 위하여 풍속 센서를 장착하였으며, 이는 프로펠러 후류의 풍속을 측정하기 위한 것임
- 또한 위 표에서 계산된 무게를 장착하고 비행체의 비행특성이 변경되지 않도록 각 Landing gear에 분포하는 무게를 측정하여 비행체의 균형을 맞춤
- 아래 그림은 비행체에 프로펠러 후류 측정용 센서를 장착한 사진임



[그림 88] 프로펠러 후류 측정용 센서 장착한 M100

- 아래 그림은 비행체의 예상 총 무게를 장착하고 무게를 측정하는 것과 각 Landing gear에 분포하는 무게를 측정하는 사진임



[그림 89] 비행체의 총무게 측정



[그림 90] 비행체의 총무게(Battery 1개 제외)



[그림 91] 각 Landing gear의 하중 측정

- 비행체의 탑재 무게가 허용범위 내에 있는지 확인하고 각 Landing gear에 부과되는 무게 분포를 균일하게 설정한 다음, 시험비행을 실시하여 비행의 안정성을 확인하고 유동해석의 입력 데이터로 사용할 프로펠러 후류의 풍속을 직접 측정함
- 아래 그림은 후류 측정용 풍속센서를 장착하고 시험비행을 실시하는 것임



[그림 92] 프로펠러 후류의 풍속 측정 비행

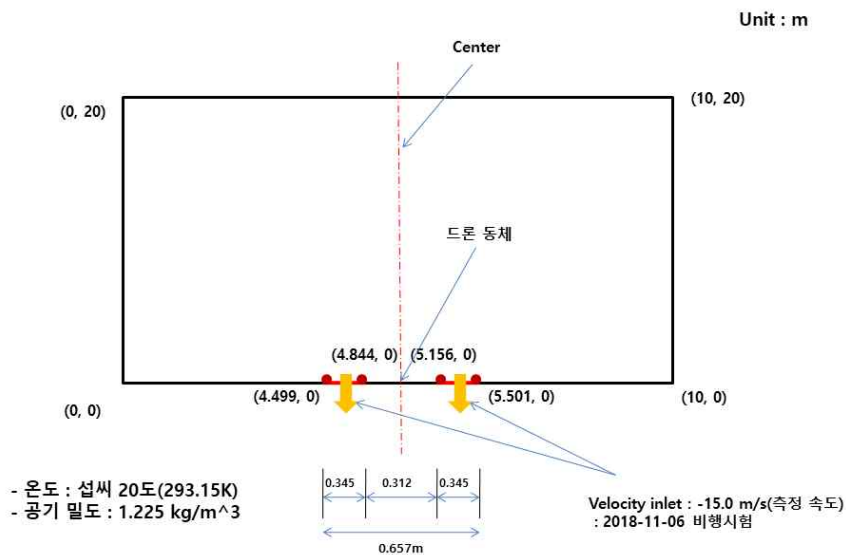
- 비행 결과, 총무게를 장착한 상태에서 안정성을 보였으며 후류의 풍속은 14.5 m/s ~ 15.0 m/s로 측정됨
- 배터리는 1개만 장착한 상태로, 비행시간은 10 분 ~ 15분 정도로 확인됨

② 비행체 상부의 유동해석

- 프로펠러의 영향을 미치지 않는 센서의 높이를 설정하기 위하여 유동해석을 실시하였으며 프로그램은 FLUENT를 이용하였음
- 프로펠러 후류의 풍속을 직접 측정하여 입력데이터로 사용하였고, 본 해석 데이터를 기준으로 각 센서의 높이를 결정하고 높이에 따라 비행시험을 실시하여 X-방향의 풍속을 직접 비행체로 측정함
- 해석 조건은 다음과 같음



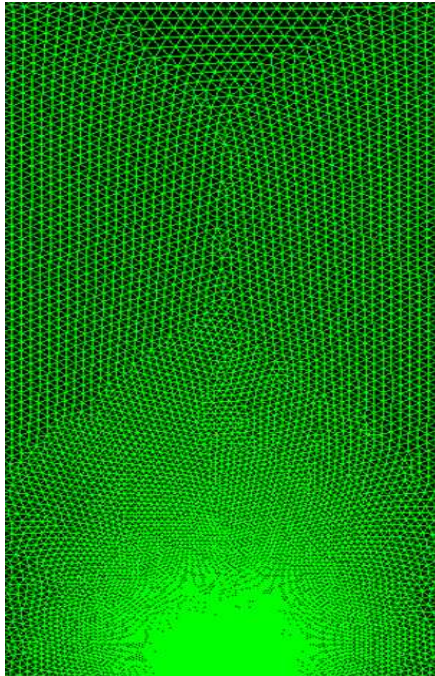
[그림 93] 비행체의 유동해석 부분



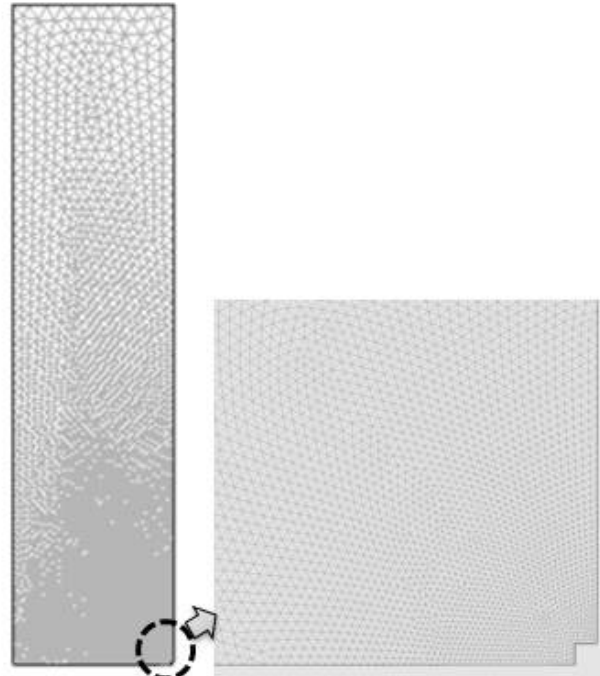
[그림 94] 유동 해석 조건

- 좌/우의 길이는 10m, 상부는 20m로 충분한 여유를 주었으며 각 프로펠러의 후류 속도는 아래 방향의 측정 데이터, 15 m/s를 입력함
- 프로펠러 중앙은 기체의 동체 부분이며, 격자(Mesh)는 삼각형 격자를 사용하였음

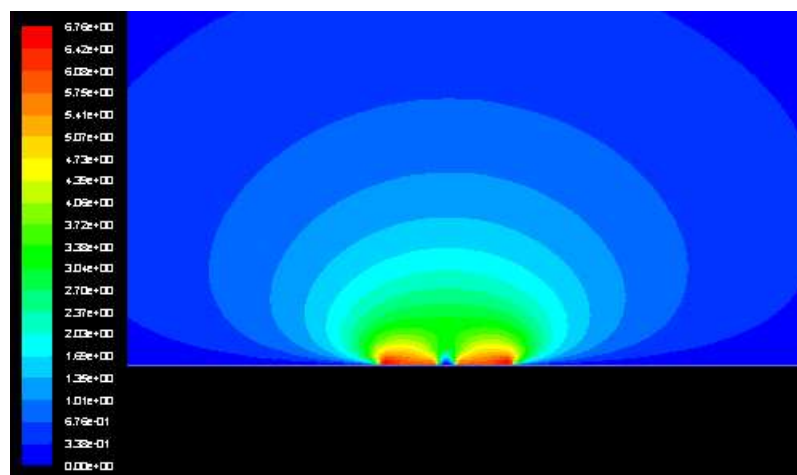
- 본 연구에서 관심 부분으로, 유동의 변화가 심한 프로펠러 부분은 조밀하게 격자를 배치하였고, 양쪽 측면과 윗면은 격자를 크게 배치함
- 다음은 해석을 위한 격자를 나타낸 것임



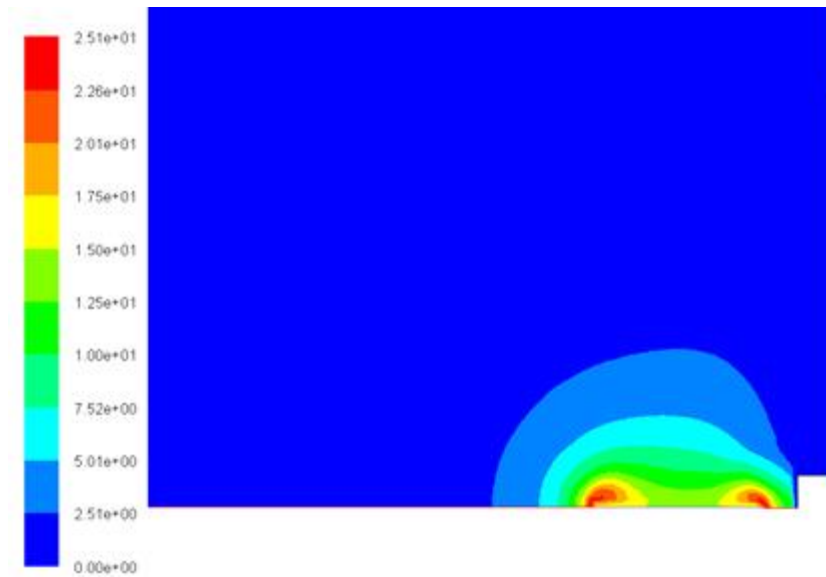
[그림 95] 해석한 삼각형 격자(Mesh)



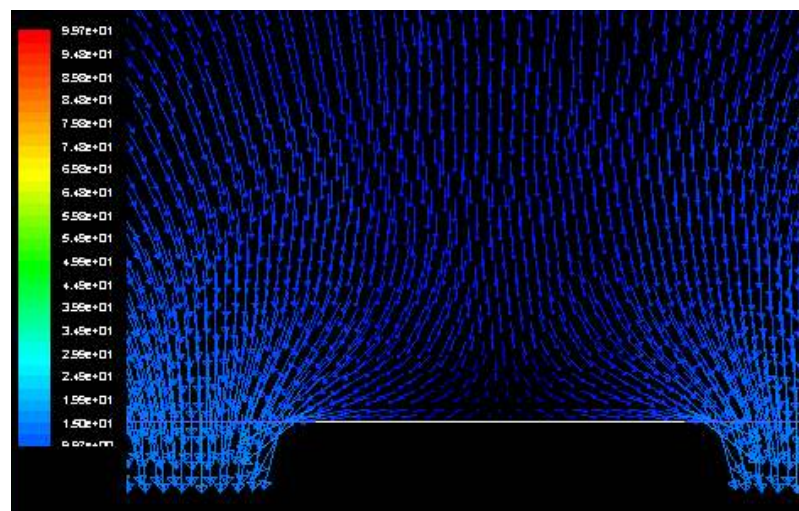
[그림 96] 격자(Mesh) 확대



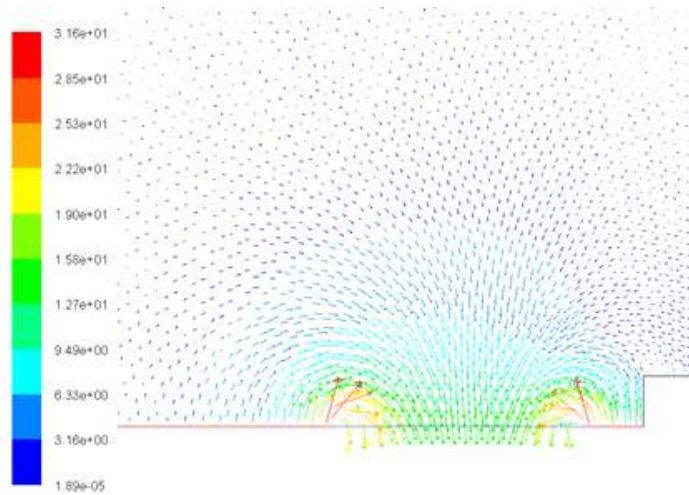
[그림 97] 속도 분포(단위 : m/s)



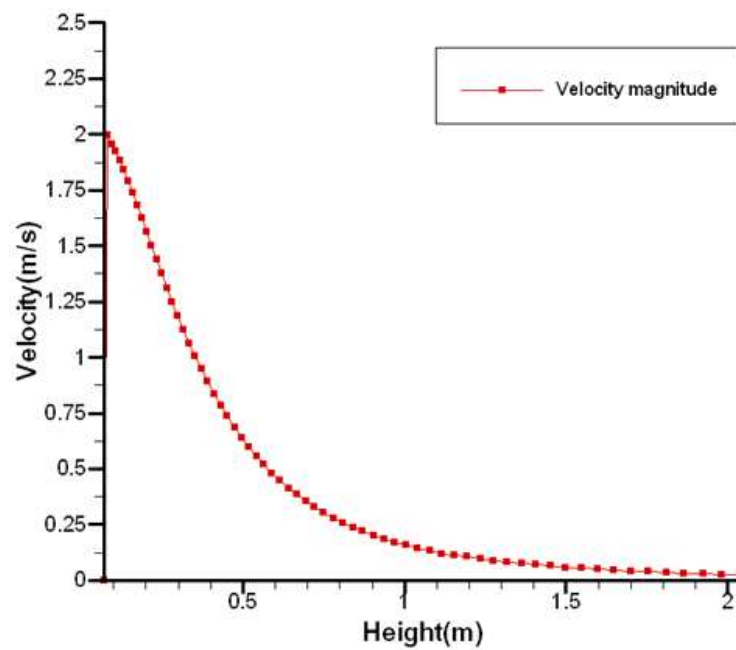
[그림 98] 프로펠러 근처 유동



[그림 99] 기체 중앙 부분의 유동(단위 : m/s)



[그림 100] 프로펠러 근처 유동(단위 : m/s)



[그림 101] 기체 중앙부분 속도 선도

- 드론의 중앙부분에서 높이별 속도를 나타낸 그래프로, 높이 2 m까지의 속도를 도식화 한 것임
- 그림에서 나타난 바와 같이 1 m까지는 급속히 감소하다가 그 이상의 높이에서는 완만한 감소를 나타내고 있음
- 따라서 이러한 드론 상부/중앙에서의 유동장 특성은 지수 또는 로그 곡선 형태로 감소하는 것으로 나타남

-

[illegible]

[그림 103] 마운트 제작용 2D 도면(autoCAD)



[그림 104] 제작한 마운트

○ 다음 그림은 각 타입의 비행체 탑재 사진임



[그림 105] 타입 1의 풍속센서



[그림 106] 타입 2의 풍속센서



[그림 107] 비행 안정성 시험

- 비행체는 센서의 높이가 높을수록 바람의 영향으로 센서의 회전 시, 기체가 많이 흔들려 안정성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상함
- 그림은 센서의 높이가 650mm를 시험 비행하는 사진으로, 비행 안정성 확인을 위한 시험을 실시하였으며, 이때 관측된 대기의 풍속은 1.1 m/s 임
- 이후, 센서의 높이 370mm, 450mm, 550mm, 650mm, 750mm에 대하여 시험비행을 실시함



[그림 108] 센서 장착 구조물

- 그림은 센서 높이를 위해 제작한 튜브 타입의 프레임이며, 그림에서 좌측 위에 있는 부품은 풍향 센서를 장착하기 위한 마운트임
- 시험결과, 비행 안정성에서는 0.34m ~ 650 m 높이까지는 안정성을 나타냈으나 0.75 m은 약간의 불안정성을 보였음
- 풍속 측정장치는 케스트럴사의 Kestrel 5500을 사용하였고, 정확도는 $\pm 3\%$ 이며 회전식으로 임펠러의 사이즈는 1 inch임



[그림 109] 속도 측정 실내 비행

- 센서의 높이가 높을수록 드론의 기동 및 측풍 시, 기체가 많이 흔들려 안정성이 떨어지는 것을 확인하였으며 센서 마운트 및 프레임의 재질에 따라 GPS 안테나의 전파 방해를 일으키므로 주의해야 함

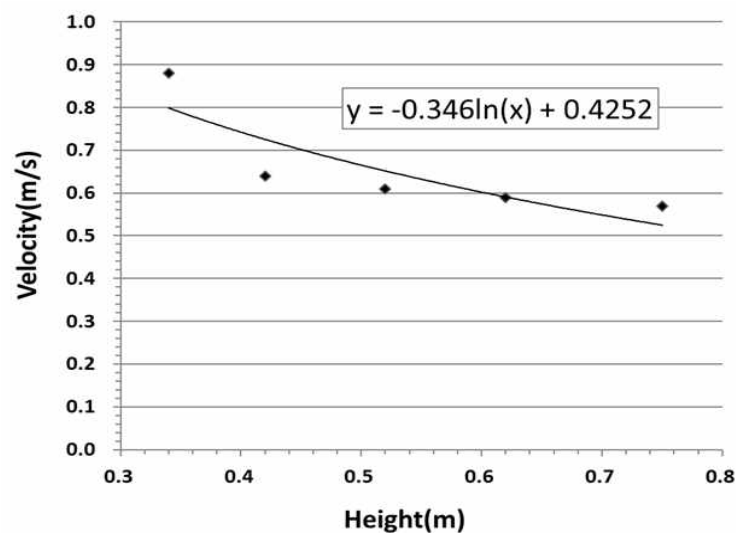
[표 34] 속도 측정 실내 비행

Sensor Height(m)	Velocity(m/s)
0.34	0.88
0.42	0.64
0.52	0.61
0.62	0.59
0.75	0.57

- 속도 측정 시험비행은 바람이 없는 실내에서 측정하였으며 높이별로 정비비행(Hovering)에서의 속도 데이터를 유효 값으로 선정함
- 표는 비행시험을 통해 획득한 드론 중앙에서의 속도 값으로, 측정한 속도 데이터를 기반으로 회귀분석법을 이용하여 실험식을 도출함

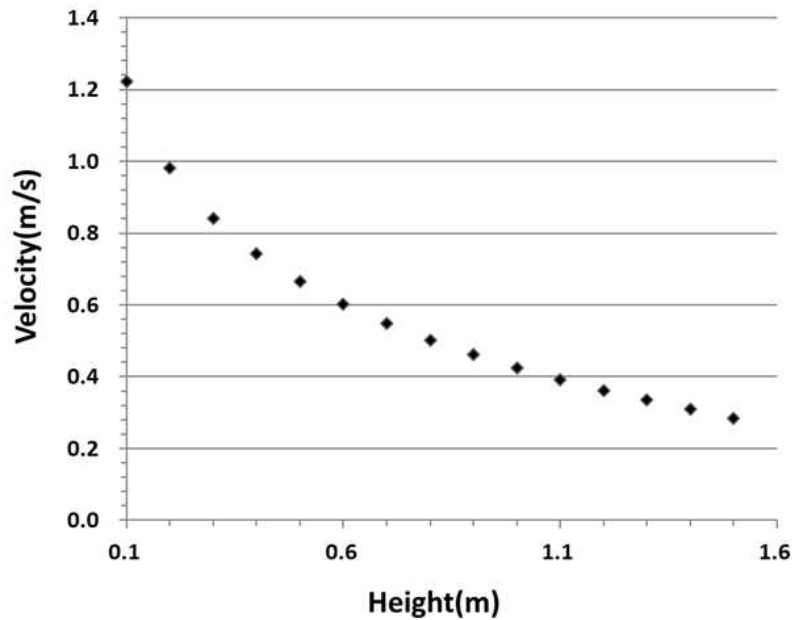
$$y = -0.346 \ln(x) + 0.4252$$

- 추세선은 위의 유동장 해석을 통해 나타난 속도 분포 형태를 기반으로 로그 식을 적용함
- 산출된 실험식은 다음과 같으며 높이별 측정된 속도와 산출된 추세선을 나타낸 것임



[그림 110] 산출된 속도 실험식

- 유동 특성의 결과를 적용하고 측정된 데이터를 기반으로 실험식을 산출하고, 산출된 실험식을 이용하여 높이별 속도 그래프를 나타내면 그림과 같음



[그림 111] 실험식을 적용한 속도 그래프

Height (m)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
Velocity (m/s)	1.22	0.98	0.84	0.74	0.67	0.60	0.55	0.50	0.46	0.43	0.39	0.36	0.33	0.31	0.28

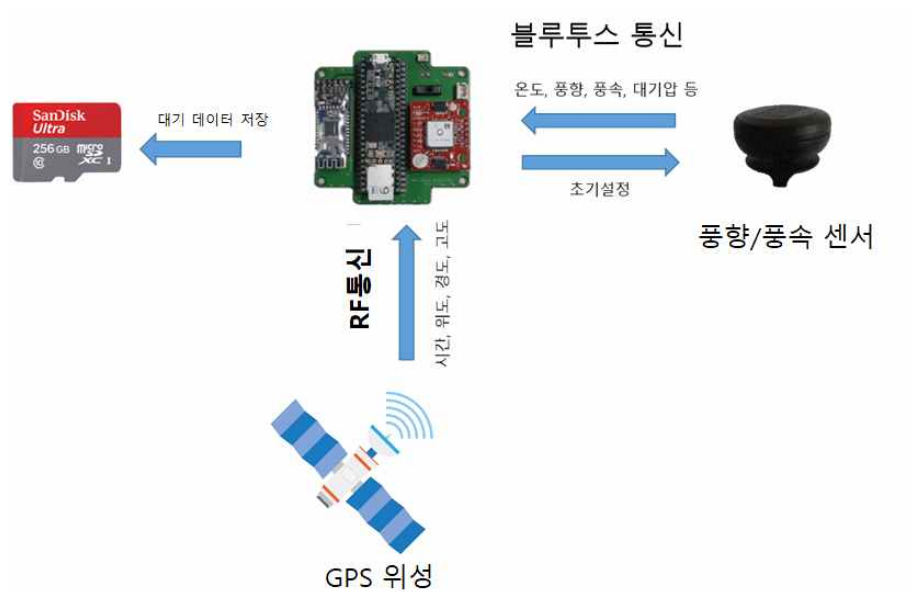
[표 35] 센서 높이별 예측된 속도 데이터

- 그림과 같은 속도 분포를 보이고 있으며, 이에 대한 상세 내역은 표와 같음
- 일반적으로 항공기상(aviation weather)에서는 1 knots를 풍속의 최소 측정 속도로 하고 있으며 1 m 이상의 높이에서는 비행 안정성성에 큰 영향이 예상되어 적정 센서 높이는 0.8 m로 나타남
- 센서 높이를 더 높게 선정하기 위해서는 사이즈가 더 큰 드론을 이용하거나 상부에 바람막이 장치(wind fence)를 설치하는 것도 대안이 될 수 있음

(라) 대기 자료 데이터 기록 장치 개발 및 실험

① 대기 자료 데이터 기록 장치 구성

- 본 과제에서는 풍속/풍향 센서와 GPS 위성으로부터 측정 위치에서는 풍속/풍향, 기온, 대기압 등의 대기 데이터와, 데이터 기록 시간, 위도/경도/고도 등의 위치 데이터의 저장을 위한 장치를 그림과 같이 개발함



[그림 112] 대기 데이터 기록 장치 구성

- 대기 상태 측정 센서는 그림과 같이 Calypso instruments사의 초음파 바람 센서를 사용하여 풍속, 풍향, 대기압, 온도 등의 현재 일기 상태 정보를 획득함



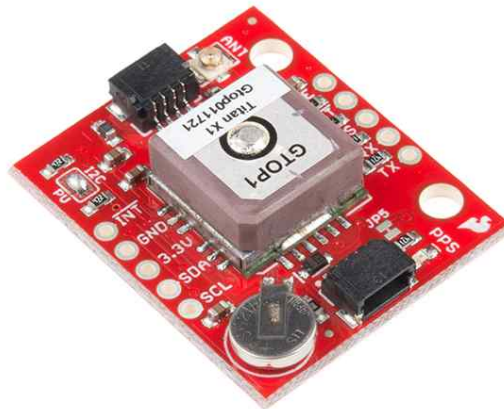
[그림 113] Calypso instruments사의 바람 센서

- 풍속/풍향 센서와 바람 정보 수신을 위해서는 블루투스 통신을 통하여 전달되며, 이를 위해 본 과제에서는 블루투스 통신을 위해서 블루투스 모듈(HM-10 Bluetooth 4 BLE Modules)을 사용함
- 풍속/풍향 센서의 초기 설정은 사용자가 초기에 블루투스 모듈을 통해 풍속/풍향 센서의 초기 파라미터 설정(바람센서 주소 설정, 샘플링 주기, 모드설정 등)을 하게 됨



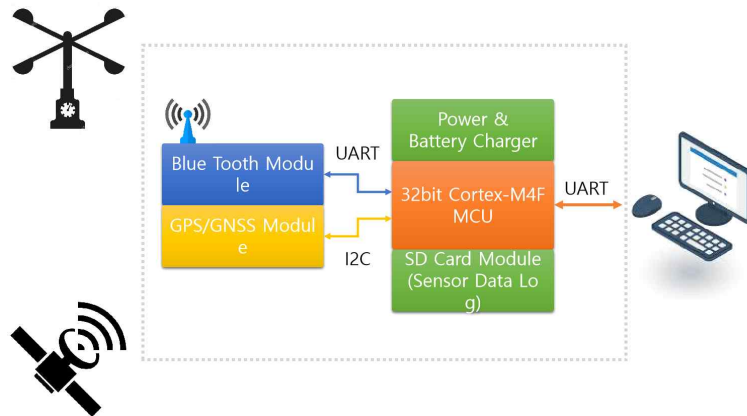
[그림 114] 블루투스 모듈(HM-10 Bluetooth 4 BLE Modules)

- GPS 및 GLONASS 위성으로부터 GPS 정보 수신을 위해서는 SparkFun의 XA1110 GPS 모듈을 사용해 측정 위치에서의 시간, 위도, 경도, 고도 정보를 획득함



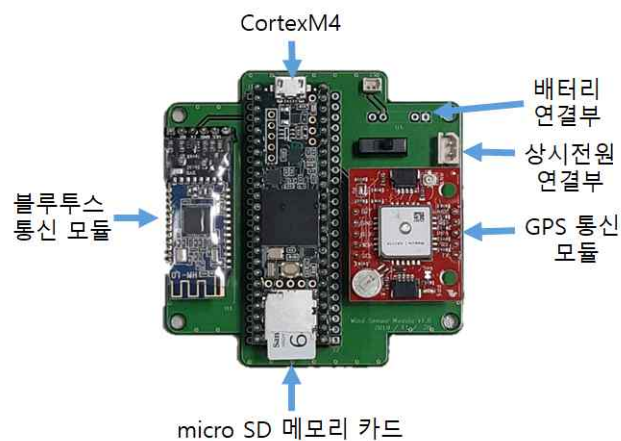
[그림 115] GPS 모듈(XA1110 GPS Module)

- 상기 기술한 블루투스 모듈과 GPS 모듈의 설정 및 데이터 처리를 위해 임베디드 시스템을 구성함
- 임베디드 시스템 구성을 위해 CortexM4 계열의 MCU를 사용하였으며, 아래 그림과 같이 MCU와 각 모듈은 시리얼 통신을 통해 대기 데이터를 획득함
- 각 모듈에서 수집된 대기 데이터는 CSV파일 형태로 micro SD 메모리카드에 설정된 주기마다 저장됨
- 바람에 대한 대기 데이터 분석 시 저장된 대기 데이터를 통해서 분석을 진행하게 됨



[그림 116] 대기 데이터 기록 장치 개념도

- 임베디드 시스템은 드론 탑재와 외부 전원 사용을 위해서 전원 연결부를 내부 장착용 배터리 연결부와 외부 상시 전원 연결부로 각각 구성함
- 또한 내부 장착된 리튬 폴리머 배터리 충전 시 과충전과 방전 보호를 위해서 충전 모듈(인가전압 4.5V-5.5V)을 장착해 micro USB선을 통해 내부 리튬 폴리머 배터리가 충전되도록 구성함
- 아래 그림은 개발된 대기 데이터 기록을 위한 실제 사진을 나타내고 있음



[그림 117] 대기 데이터 기록 장치 실물 사진

- 대기자료 데이터 기록장치가 드론 및 옥외에 설치되기 때문에 비와 눈에 대해 내부 회로를 보호하기 위해 아래그림과 같이 방수 가능한 케이스를 활용에 장착함



[그림 118] 대기 데이터 기록 장치 조립 완성 사진

② 풍향/풍속 데이터

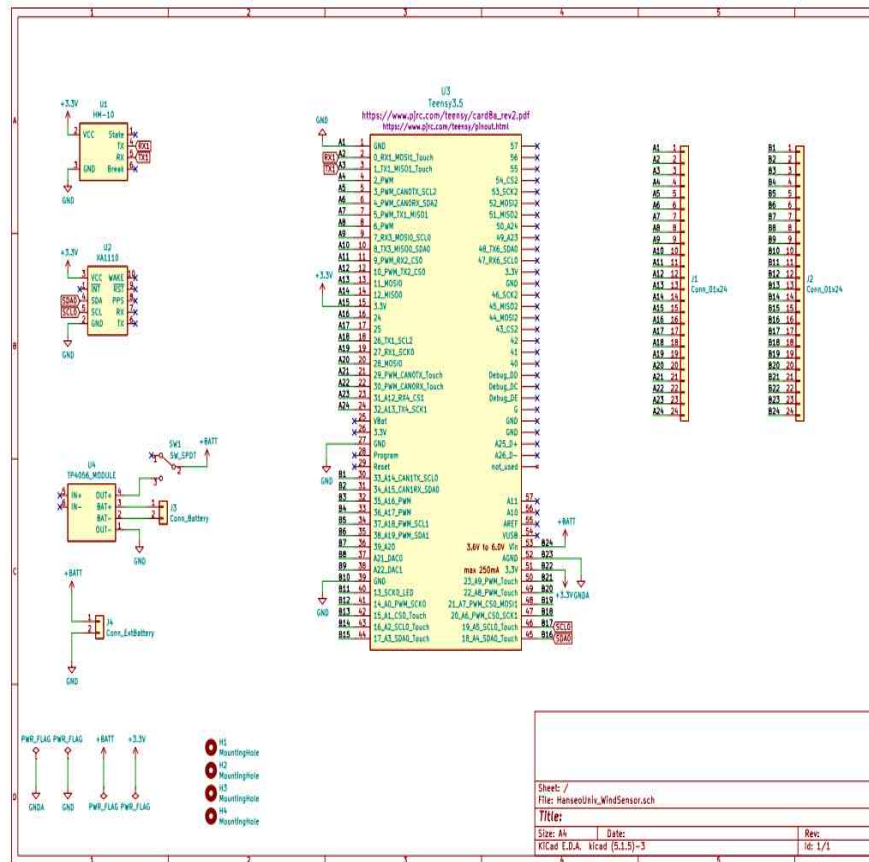
- 풍향 및 풍속 센서로부터 데이터 획득을 위해 기 개발된 시스템의 블루투스 모듈은 MCU와 UART 시리얼 통신으로 연결되어 있으며, Central Role로 구성함
- 풍향/풍속 센서 접속이후 블루투스 통신을 통해 설정된 주기마다 풍향, 풍속, 배터리, 온도, 센서의 자세 정보를 패킷으로 전송 받고, MCU단에서 패킷을 분해 조립하여 외부 저장장치(micro SD)에 저장

③ 위도/경도 데이터

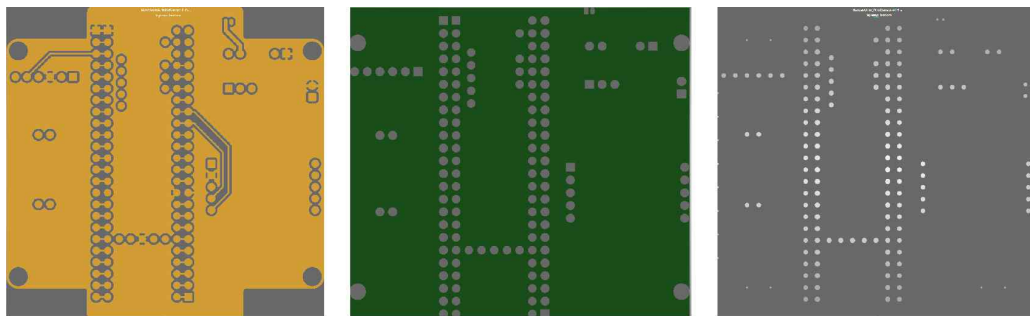
- 시스템의 위도 및 경도 데이터 등 획득을 위해, GPS 및 GLONASS 데이터 수신 가능한 모듈이 부착되었으며, 해당 모듈은 MCU와 I2C통신으로 연결됨
- 최대 10Hz마다 데이터 수신 가능하며 설정에 따라 주파수는 변경 가능함, UTC 날짜/시간, 위도/경도, 고도, 속도 등의 데이터를 NEMA 패킷 형태로 수신하여, GPS 원시 데이터를 TinyGPS라는 라이브러리를 통해 parsing해 외부 저장장치(micro SD)에 저장함

④ 대기자료 데이터 기록 장치 보드 개발

- 안정적이고 효율적으로 대기자료 데이터를 저장하기 위해서 PCB 보드를 개발함
- 아래 그림은 PCB 보드 설계자료와 PCB 보드 층별 구성도임



[그림 119] 대기 데이터 기록 장치 PCB 보드 설계도



[그림 120] 대기 데이터 기록 장치 PCB 보드 층별 구성도

⑤ 대기자료 데이터 기록 장치 초기화

- 저장 장치의 초기화는 외부 PC의 시리얼 통신 프로그램을 임베디드 시스템과 시리얼 통신을 통해서 설정할 수 있음
- 외부 PC의 시리얼 통신 프로그램을 다음과 같은 방법을 통해 설정함

○ 파라미터 정보 출력

- Param.GetInfo

○ 바람 센서 주소 설정

- Default: EC868905C8
- EC:86:89:05:C8로 설정 시 ⇒ Param.SetBleAddr:EC868905C8
- 현재 설정값 출력 ⇒ Param.GetBleAddr

○ 바람 센서 데이터 수신방법

- Default: 1
- 바람 센서 데이터 수신방법은 Notify 방식과 Read 방식 두 가지 존재
- Notify 방식으로 UDP 방식과 유사, Read 방식은 TCP와 유사
- Notify 방식 설정 시 데이터 획득 속도 설정에 따라 데이터 획득 가능
- Read 방식 설정 시 속도는 5Hz로 고정되나 신뢰성 있는 데이터 획득 가능
- Notify 방식 설정 ⇒ Param.SetNotify:1
- Read 방식 설정 ⇒ Param.SetNotify:0
- 현재 설정값 출력 ⇒ Param.GetNotify

○ 데이터 획득 속도 설정(Sampling Rate)

- Default: 8Hz
- 1, 4, 8Hz 설정 가능
- 바람센서상태 Low Power Mode 경우 1Hz설정되며, Clinometer는 동작하지 않음
- 4Hz 설정 ⇒ Param.SetDataRate:4
- 현재 설정값 출력 ⇒ Param.GetDataRate

○ 바람센서 Clinomter & eCompass 설정

- Default: 0
- Roll, Pitch, eCompass 전송
- 사용 시 배터리 소모량 상승(데이터 시트 참고)
- 바람 센서 상태 Low Power Mode인 경우 Disable됨
- 사용 ⇒ Param.SetClinometer:1
- 미사용 ⇒ Param.SetClinometer:0
- 현재 설정값 출력 ⇒ Param.GetClinometer

○ 바람센서 시리얼 데이터 출력 설정

- Default: 0
- 사용 ⇒ Param.SetPrintWind:1

- 미사용 ⇒ Param.SetPrintWind:0
- 현재 설정값 출력 ⇒ Param.GetPrintWind

○ GPS의 Navigation Mode 설정

- Default: 0
- 총 5가지 모드 사용 가능
- “0” = Normal mode: For general purpose
- “1” = Fitness mode: For running and walking purpose that the low-speed (< 5m/s) movement will have more effect on the position calculation
- “2” = Aviation mode: For high-dynamic purpose that the large-acceleration movement will have more effect on the position calculation.
- “3” = Balloon mode: For high-altitude balloon purpose that the vertical movement will have more effect on the position calculation.
- “4” = Stationary mode: For stationary applications that zero dynamics is assumed.
- 모드별 고도제한

Mode	Altitude Limitation
Normal	10000m
Fitness	10000m
Aviation	10000m
Stationary	10000m
Balloon	80000m

- Normal mode 설정 ⇒ Param.SetGpsNaviMode:0
- Fitness mode 설정 ⇒ Param.SetGpsNaviMode:1
- Aviation mode 설정 ⇒ Param.SetGpsNaviMode:2
- Stationary mode 설정 ⇒ Param.SetGpsNaviMode:3
- Balloon mode 설정 ⇒ Param.SetGpsNaviMode:4
- 현재 설정값 출력 ⇒ Param.GetGpsNaviMode

○ GPS의 시리얼 데이터 출력 설정

- Default: 0
- 사용 ⇒ Param.SetPrintGPS:1

- 미사용 ⇒ Param.SetPrintGPS:0
- 현재 설정값 출력 ⇒ Param.GetPrintGPS
- 전원 인가 이후 세부 초기화 과정 시리얼 데이터 출력 설정
 - Default: 0
 - 사용 ⇒ Param.SetPrintDebug:1
 - 미사용 ⇒ Param.SetPrintDebug:0
 - 현재 설정값 출력 ⇒ Param.GetPrintDebug
- 저장된 모든 파라미터 초기화, 전원 재인가 필요
 - Param.SetEraserAll

⑥ 대기자료 데이터 기록

- micro SD 카드에는 저장된 대기 자료가 저장됨
 - 저장된 파일은 “LOGxxxxx.CSV” 형태로 저장됨
- 각 CSV파일은 다음과 같이 저장됨
 - LOG 파일 1~7줄: 현재 파라미터 설정 값 및 바람 센서 상태
 - LOG 파일 데이터 저장 순서대로 가로로 저장됨
 - UTC Date[yy/mm/dd]
 - UTC Time[hh:mm:ss.ss]
 - Lat[deg], ⇒ Latitude
 - Long[deg], ⇒ Longitude
 - Altitude[m]
 - Speed[knots]
 - Course[deg]
 - Satellites[ea]
 - HDOP
 - Updated, ⇒ GPS Data Update 여부
 - Wind Speed[m/s]
 - Wind Direction[deg]
 - Wind Battery[%]
 - Temp Level[C]
 - Roll[deg]
 - Pitch[deg]

- eCompass[deg]
- Connection ⇒ 바람 센서 접속 여부

```

1 # EEPROM Param.
2 # BLE Addr,Notify:,Data Rate[Hz]:,Clinometer On:,Print Wind:,GPS Navi Mode:,Print GPS,Print De
3 # C7289BE8811A,1,8,0,0,0,0,0
4
5 # Wind Status:,2
6 # 0:Sleep, 1:Low(1Hz & Clinometer Disabled, 2:Normal
7
8 # UTC Date[yy/mm/dd],UTC Time[hh:mm:ss.ss],Lat[deg],Long[deg],Altitude[m],Speed[knots],Course|
9 2019/12/25,1:45:39.71,Invalid,Invalid,Invalid,Invalid,Invalid,0,0.00,0,0.830,109,20,16,0,0,0,1
10 2019/12/25,1:45:39.81,36.592121,126.294182,22.90,1.04,86.82,8,1.01,0,0.830,109,20,16,0,0,0,1
11 2019/12/25,1:45:39.81,36.592121,126.294182,22.90,1.04,86.82,8,1.01,0,0.830,109,20,16,0,0,0,1
12 2019/12/25,1:45:40.10,36.592129,126.294174,22.70,0.60,89.89,8,1.01,0,0.830,109,20,16,0,0,0,1
13 2019/12/25,1:45:40.20,36.592133,126.294174,22.21,0.49,89.89,8,1.01,0,0.830,109,20,16,0,0,0,1
14 2019/12/25,1:45:40.30,36.592133,126.294167,21.74,0.42,89.89,8,1.01,0,0.830,109,20,16,0,0,0,1
15 2019/12/25,1:45:40.40,36.592136,126.294167,21.39,0.34,89.89,8,1.01,0,0.810,109,20,16,0,0,0,1
16 2019/12/25,1:45:40.60,36.592136,126.294167,20.75,0.24,89.89,8,1.01,0,0.780,109,20,16,0,0,0,1
17 2019/12/25,1:45:40.70,36.592140,126.294167,20.37,0.19,89.89,8,1.01,0,0.780,109,20,16,0,0,0,1
18 2019/12/25,1:45:40.80,36.592140,126.294167,20.11,0.18,89.89,8,1.01,0,0.730,109,20,16,0,0,0,1
19 2019/12/25,1:45:40.90,36.592140,126.294167,19.81,0.15,89.89,8,1.01,0,0.690,109,20,16,0,0,0,1
20 2019/12/25,1:45:41.10,36.592144,126.294167,19.68,0.12,89.89,8,1.01,0,0.690,109,20,16,0,0,0,1
21 2019/12/25,1:45:41.20,36.592144,126.294159,19.59,0.10,89.89,8,1.01,0,0.690,109,20,16,0,0,0,1
22 2019/12/25,1:45:41.30,36.592144,126.294159,19.55,0.10,89.89,8,1.01,0,0.710,109,20,16,0,0,0,1
23 2019/12/25,1:45:41.40,36.592144,126.294159,19.41,0.13,89.89,8,1.01,0,0.700,109,20,16,0,0,0,1

```

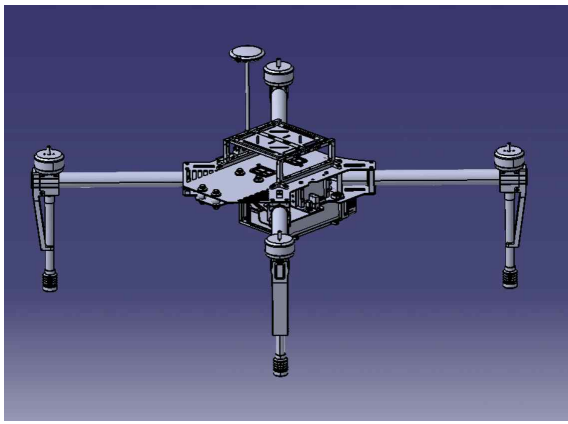
[그림 121] 대기 데이터를 기록한 CSV 파일

(마) 측정 데이터 정확도 향상 방안

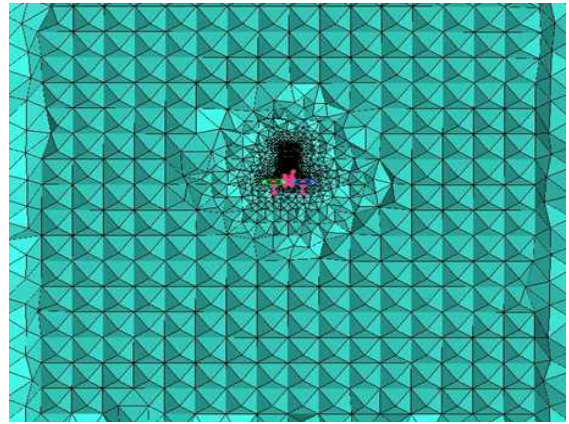
- 드론의 센서 높이는 최대한 높은 것이 프로펠러의 영향을 받지 않아 바람직하나, 센서의 위치가 어느 이상으로 높으면 비행 안정성에 영향을 미치며 외부 바람에 의한 영향도 받음
- 이에 대한 대안으로 센서 아래에 바람막이(Wind guard)를 설치하였음
- 이 방법은 센서의 높이를 낮추어 비행 안정성을 높이고 외부 바람과 프로펠러 흡입에 의한 영향을 낮출 수 있음
- 우선, 바람막이가 유동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 유동해석을 실시하고 바람막이가 있는 조건과 없는 조건에서의 속도를 해석하였고, 위에서 파악한 센서의 높이별 바람의 영향 결과를 반영하여 비행 안정성에 영향을 미치지 않고 외부 바람의 영향이 작은 바람막이 사이즈를 결정함
- 또한, 설계를 기반으로 실제 바람막이를 제작하고 정비비행의 안정성 및 기동 안정성에 대하여 비행시험을 실시함

① 유동해석 및 분석

- 유동해석은 바람막이(Wind guard)가 있는 조건과 바람막이가 없는 조건으로 공기의 유동속도를 3차원으로 해석함
- 센서의 높이는 바람막이의 영향을 확인하기 위하여 관심있는 높이인, 0.518m로 설정함



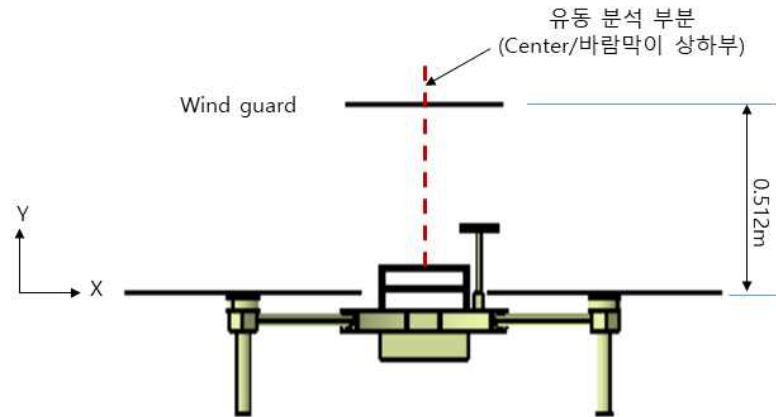
(a) 유동해석에 사용된 DJI M100 기체



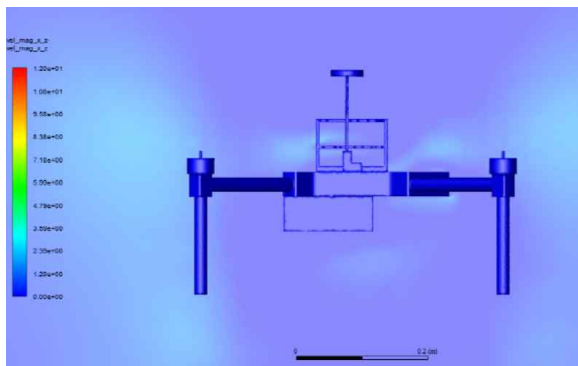
(b) 벽면 메시(Mesh)

[그림 122] 드론 기체(Drone airframe) 및 메시(Mesh)

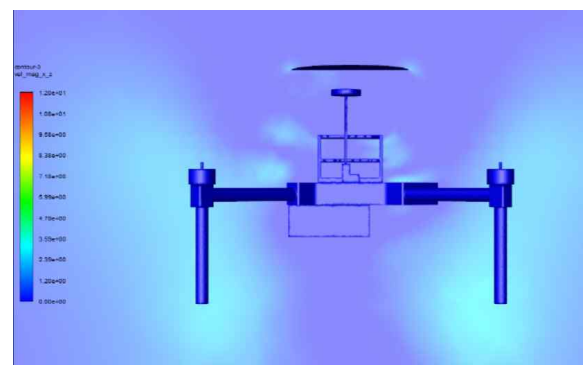
- Solver는 Fluent를 사용하였으며 모델은 Vorticity-based spalart-allmaras(1 equation), 온도 조건은 15 °C, 공기 밀도는 1.225 kg/m³으로 설정함
- 해석 그림에서 보는 바와 같이 프로펠러 주변의 공기 유동이 큼을 알 수 있으며 바람막이가 있는 조건에서는 바람막이 아래의 유동이, 없는 조건에 비해 공기의 유동이 큼을 알 수 있음
- 바람막이 끝단의 유동 변화도 주변 유동에 비해 큼을 확인할 수 있음



[그림 123] 유동 해석 부분



(a) 바람막이가 없는 드론의 유동해석



(b) 바람막이가 있는 드론의 유동해석

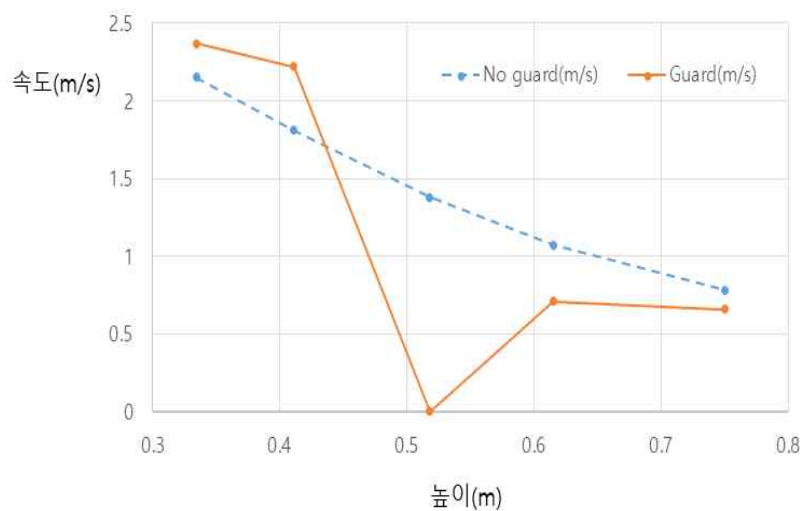
[그림 124] 드론 3차원 유동해석 결과

- 해석 결과를 속도 데이터로 비교하면 아래 표와 같음
- 바람막이 0.518m 위치에서 각 높이별 공기의 유동속도를 확인한 결과, 바람막이 아래의 유동은 바람막이가 있는 조건이 더 크게 나타남
- 그러나 바람막이 상부인, 0.61 m에서의 유동은 1.07 m/s와 0.71 m/s로 -0.36 m/s 유동이 작아짐을 알 수 있으며, 0.75 m에서의 유동은 0.78 m/s와 0.66 m/s로 -0.12 m/s 유동이 작아짐을 확인함

	센서 높이(m)	No guard(m/s)	Guard(m/s)	비고
Velocity	0.334	2.15	2.37	
	0.411	1.81	2.22	
	0.518	1.38	-	Guard 위치
	0.615	1.07	0.71	
	0.750	0.78	0.66	

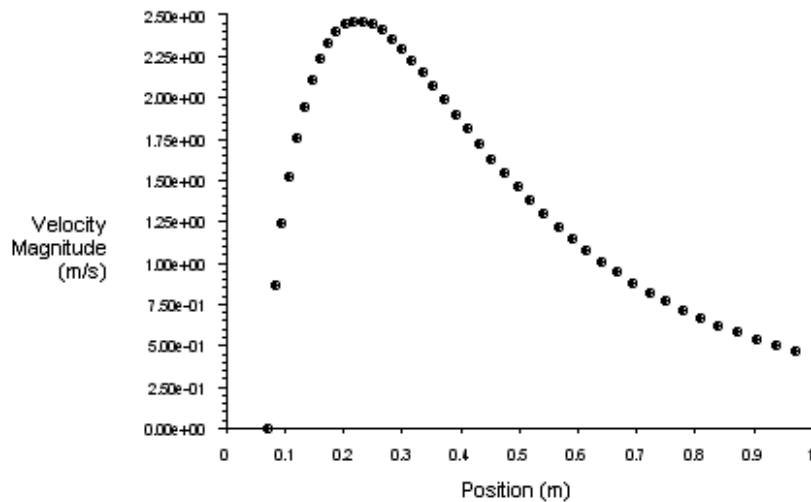
[표 37] 센서 높이별 공기의 유동속도

- 센서 높이별로 바람막이 있는 조건과 없는 조건에서의 속도 분포를 그래프로 나타내면, 아래 그림에서 보는 바와 같이 바람막이가 있는 조건(Guard)에서 프로펠러의 유동 영향이 작아짐을 확인할 수 있음
- 바람막이가 없는 조건에서는 센서의 높이가 높을수록 선형적으로 일정하게 공기의 유동이 작게 나타났으며 바람막이가 있는 조건에서는 낮은 센서 높이에서는 유동이 상대적으로 높게 나타났다가 바람막이를 지난 높이에서는 더 낮아짐을 확인함
- 그래프에서 유동 속도가 0 m/s인 부분은 바람막이가 존재하는 위치임



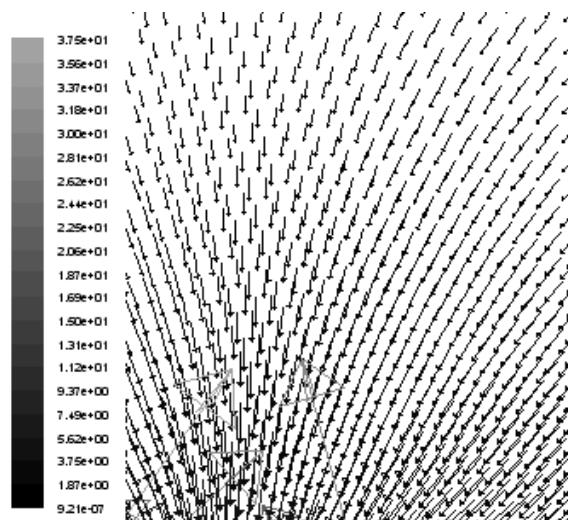
[그림 125] 바람막이에 따른 유동 속도

- 아래 그림은 바람막이가 없는 조건에서의 드론 중앙에서의 높이별 속도 분포임
- 그림에서 보는 바와 같이 0.25m까지는 속도가 증가함을 확인할 수 있으나, 센서 높이 0.25m를 지나면서 프로펠러의 영향은 현저히 낮아졌으며, 1m의 높이에서는 0.55m/s로 작아짐

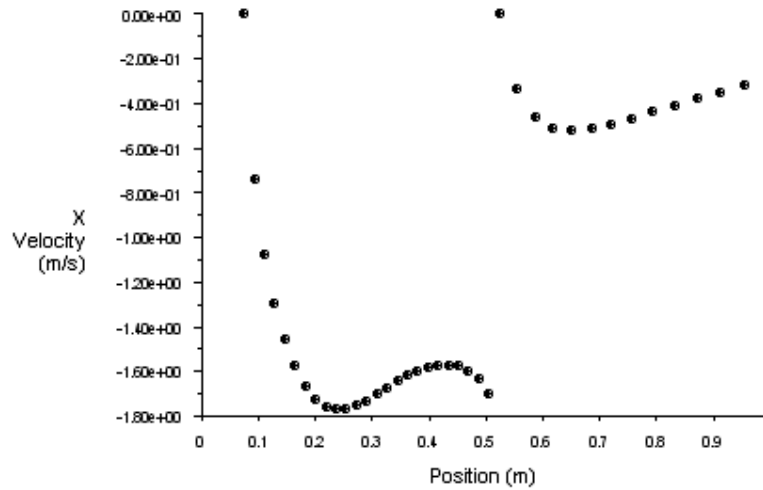


[그림 126] No wind guard velocity(center)-100회

- 아래 그림은 유동해석의 100회 Iteration 해석한 그림으로, 주변의 유동이 프로펠러로 집중되고 있음을 알 수 있음
- 속도는 프로펠러에 가까워짐에 따라 화살표의 크기가 점차 커져, 속도가 빨라짐

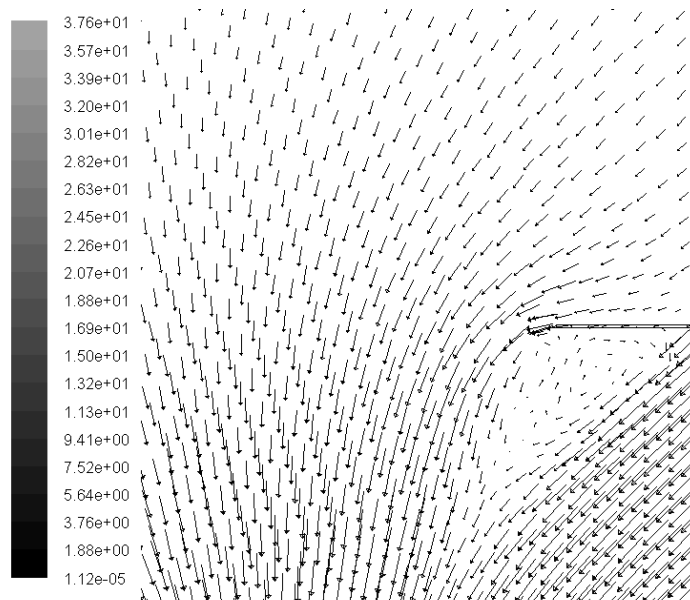


[그림 127] No wind guard flow(center)-100회



[그림 128] Wind guard velocity(center)-1,000회

- 위 그림은 바람막이가 있는 형태의 유동에서 1,000회 Iteration한 결과로, 드론 중앙에서의 X-방향 유동은 보는 바와 같이 0.518m의 바람막이가 있는 부분에서 그 영향이 크게 작용함을 확인할 수 있음
- 아래 그림은 바람막이가 있는 부분에서의 유동 형태를 나타낸 것으로, 바람막이 위 부분에서는 속도가 작아 프로펠러의 영향이 작음을 확인할 수 있음
- 그러나 바람막이 바로 아래의 유동은 상대적으로 큼을 알 수 있으며 위의 바람막이가 없는 조건에서의 유동과 차이와 미치는 영향을 확인할 수 있으며, 바람막이 끝단에서는 회전하는 유동도 나타남



[그림 129] Wind guard flow(center)-1,000회

- 따라서, 바람막이가 있는 것이 프로펠러에 의한 공기 유동의 영향을 최소화할 수 있으며 유동해석을 통해 그 영향을 확인함
- 또한, 바람막이 장치는 센서의 높이를 상대적으로 낮춰, 드론의 비행 안정성을 확보할 수 있으며 외부 바람의 영향도 낮출 수 있는 방법임

② 바람막이(Wind guard) 설계

- 위에서의 유동해석을 통해 확인한 바람막이의 영향을 기반으로 설계를 수행함
- 사용한 Tools은 autoCAD를 이용하였으며 설계에 사용된 드론의 형상데이터는 제작사 홈페이지에서 제공하는 데이터를 이용함
- 센서 높이 650mm은 드론의 랜딩기어 사이의 거리가 650mm로, 최대 높이인, 1:1을 기준으로 설정하였으며, 너무 높으면 비행 안정성에 나쁘고 너무 낮으면 바람막이(Wind guard)의 크기가 커져 외부 바람의 영향을 받으므로 지금까지 시험비행한 비행 데이터를 기준을 적용함
- 아래 그림은 센서의 위치와 바람막이의 사이즈에 대한 설계 도면으로, 드론의 프로펠러는 DJI 1345S(직경 345mm)를 적용하였으며 회전식 센서를 기준으로 적용하였으며, 드론의 중앙 부분을 기준으로 프로펠러의 끝단을 대각선으로 연결함
- 그 결과 드론에서 바람막이의 적정 높이는 525mm이며 직경은 196mm로 나타났으며, 비회전식 센서(더 낮은 높이의 센서)를 기준으로 설계하면 센서의 높이는 더 낮아질 수 있어 비행 안정성을 확보할 수 있으며 바람막이의 직경을 더 작게 설계할 수 있어 외부 바람의 영향도 낮출 수 있음
- 체결방식은 도면에서 보는 바와 같이 중앙에 직경 8.0mm 홀을 이용하여 단순 삽입방식을 이용하였으며 두께는 강도를 고려하여 2.0mm로 선정함

10-DM

196.0

8.0

t = 2.0mm

0

[주기]

1. 호단가 : 제작자 양의
2. 수량 : 1 EA

제출처		제출일		제출인		제출처	
제출처	제출일	제출인	제출처	제출일	제출인	제출처	제출일
제출처	제출일	제출인	제출처	제출일	제출인	제출처	제출일
제출처	제출일	제출인	제출처	제출일	제출인	제출처	제출일

제출처		제출일		제출인		제출처	
제출처	제출일	제출인	제출처	제출일	제출인	제출처	제출일
제출처	제출일	제출인	제출처	제출일	제출인	제출처	제출일
제출처	제출일	제출인	제출처	제출일	제출인	제출처	제출일

[그림 131] 바람막이 상세 설계도

③ 바람막이(Wind guard) 제작 및 장착

- 바람막이의 형상은 설계도에 따라 원형 판으로 제작하였으며 재질은 아크릴이며 투명한 것을 사용하여 아래 또는 위에서 드론 기체나 센서의 상태를 볼 수 있도록 하였으며, 두께는 2mm로 제작함



[그림 132] 바람막이(Wind guard) 제작 부품



[그림 133] 바람막이(Wind guard) 장착 사진(상세 보기)

- 아래 그림은 바람막이를 제작하여 드론에 장착한 사진으로 프로펠러 기준으로 높이 525mm 부분에 단순 끼움 방식으로 장착한 사진으로, 그림에서 보는 바와 같이 투명 아크릴를 사용하여 드론 기체나 센서의 상태를 확인할 수 있음



[그림 134] 바람막이(Wind guard) 장착 사진(정면도)

- 아래 그림은 바람막이를 장착한 드론의 위에서 본 ISO 사진으로, 센서는 CALYPSO사의 Ultrasonic Portable Wind Instrument를 장착하여 기존의 회전식 센서와 비교해 전체 높이를 낮춤



[그림 135] 바람막이(Wind guard) 장착 사진(ISO 보기)

④ 바람막이(Wind guard) 장착 비행시험

- 설계한 바람막이를 장착한 드론의 비행 안정성과 외부 바람의 영향을 파악하기 위하여 비행시험을 실시함
 - 시험 조건은 야외에서 15.0 °C, 평균 0.8 m/s의 외부 바람이 존재하는 조건에서 실시함
- 비행은 정지 비행에서의 안정성 및 돌풍 시, 기체의 안정성에 대하여 시험하였으며 드론의 기동 시, 비행 안정성에 대해서도 시험함
- 센서의 높이는 드론의 랜딩기어 사이 간격(기체 사이즈) 이내로 하는 것이 비행안정성을 확보하는 것으로 나타남



[그림 136] 바람막이 장착 드론의 비행시험 준비



[그림 137] 바람막이 장착 드론의 비행시험 이륙



[그림 138] 바람막이 장착 드론의 비행시험 기동



[그림 139] 바람막이 장착 드론의 비행시험 정지비행

- 지금까지 드론의 비행 안정성과 확보를 위한 방안으로 바람막이를 적용함
- 이를 위하여 우선, 유동특성과 그 효과를 파악하기 위하여 유동해석을 실시하였고, 조건은 바람막이가 있는 조건과 없는 조건에서의 속도를 비교함
- 그리고 해석을 통하여 효과를 확인하고 적정 센서 높이와 바람막이 사이즈를 설계하였으며 설계를 기반으로 실제 바람막이를 제작하여 장착함
- 바람막이 장착 비행시험을 실시한 결과, 드론은 정지비행과 기동성에 안정성을 보였으며 기존의 바람막이가 없는 비행 상태에 비해 외부 바람 및 돌풍의 영향에도 안정적으로 비행함

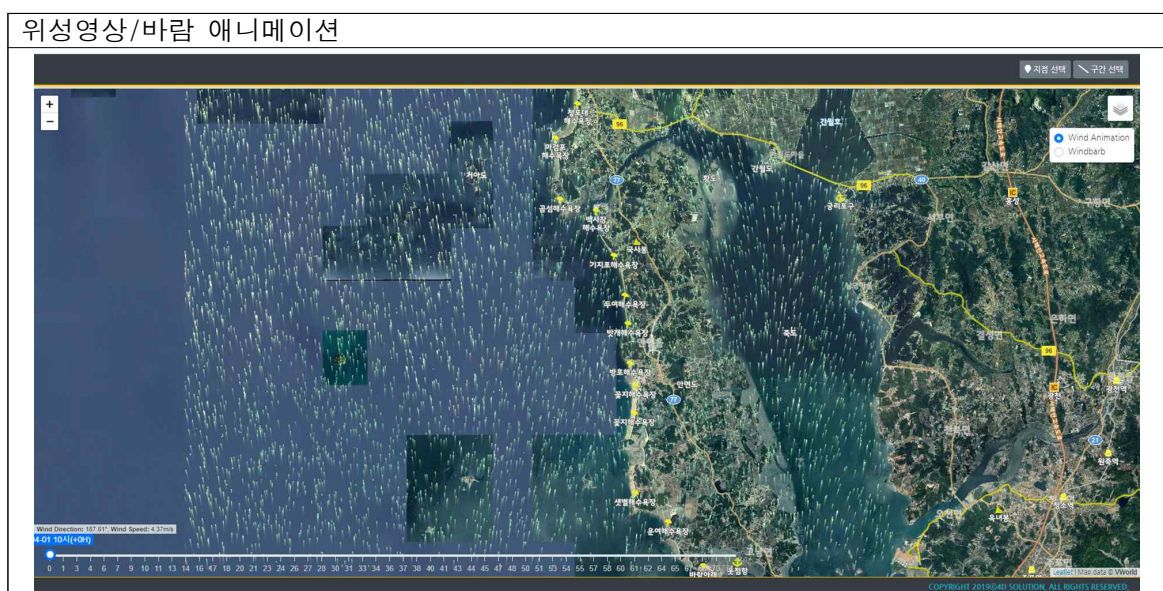
- 따라서 바람막이 장착 방식은 센서 높이를 낮추어 비행 안정성을 높일 수 있는 방법이며 프로펠러의 흡입 유동도 차단할 수 있는 방법임을 확인함
- 이러한 결과는 작은 드론이나 비행체에서 프로펠러의 영향을 줄일 수 있는 방법으로, 실제 풍속 측정 실험에는 바람막이를 장착한 드론을 이용하여 측정하는 것이 정확하게 데이터를 측정하는 방법이라고 할 수 있음

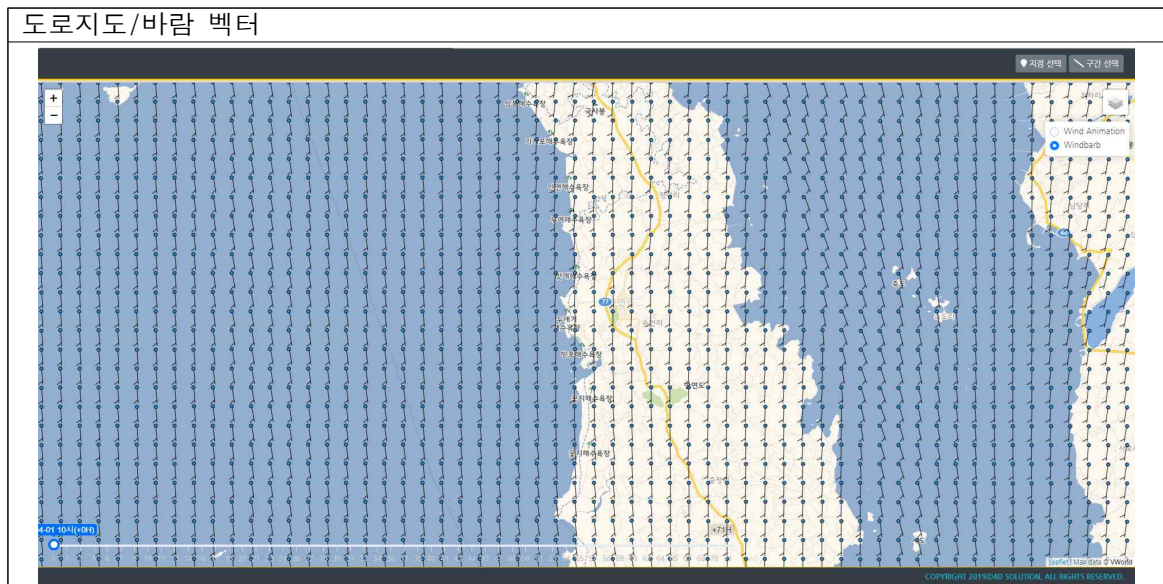
(8) 연구 결과 활용 기술 개발

(가) 모델링 결과 확인을 위한 리포트 샘플 개발

① 메인 페이지

- 사용자 인터페이스는 웹 UI 형태로 개발하였으며, 메인페이지는 그림 141과 같음
- 메인페이지에서는 지도에 바람의 흐름을 나타내었으며, 지도의 확대 및 축소에 따라 동적으로 변동됨
- 바람의 흐름은 애니메이션 형태와 바람벡터 형태의 두 가지 모드로 설정가능함
- 지도는 위성영상, 도로지도, 그레이 스케일 도로지도, 야간모드 도로지도 등으로 표출이 가능함
- 하단부에 시간바를 두어, 예측시간에 따른 바람의 변화를 나타낼 수 있도록 제작함

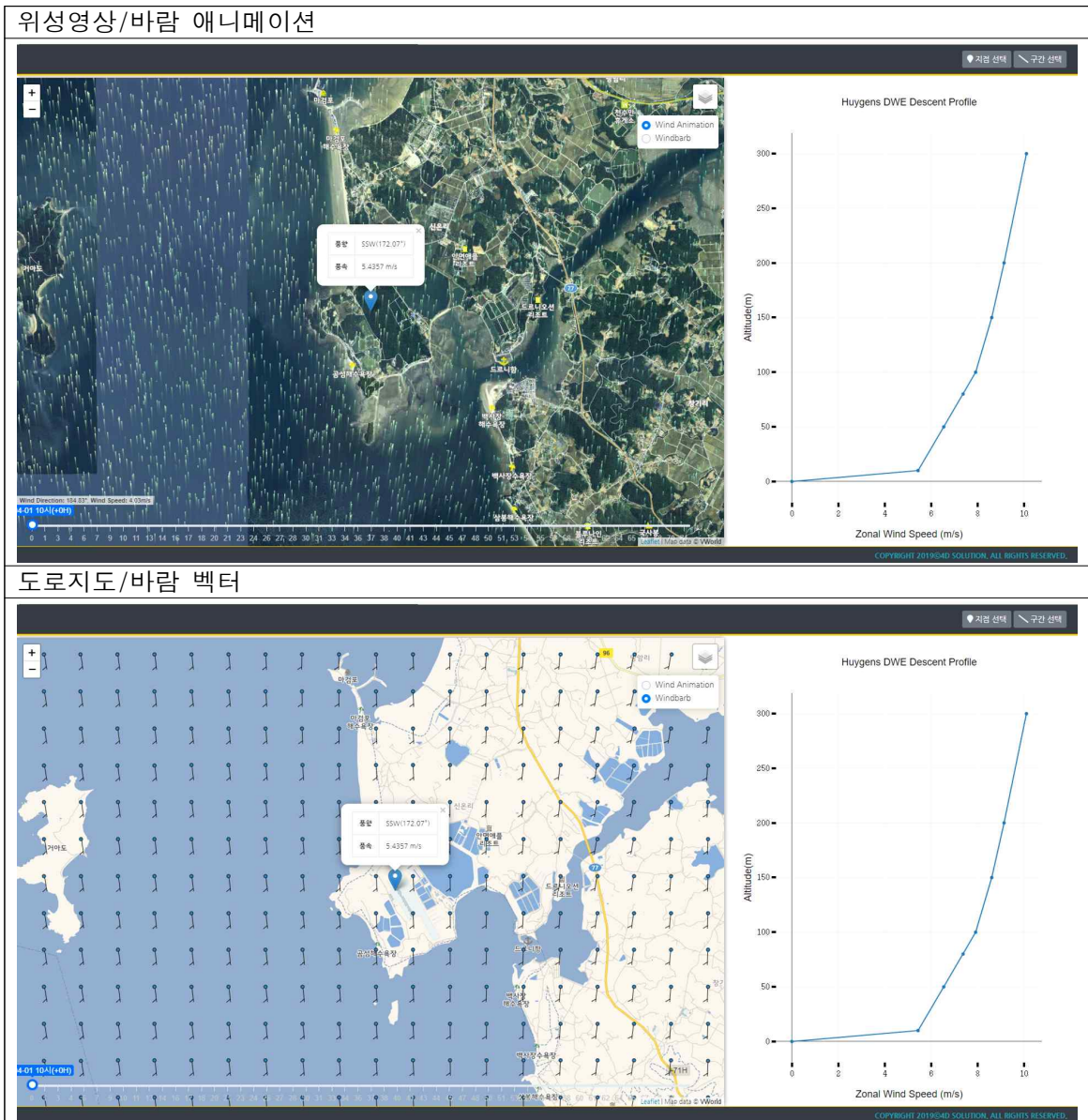




[그림 140] 웹 UI 메인 페이지

② 지점 선택 페이지

- 메인 페이지에서 지점 선택을 클릭한 후, 특정 지점을 선택하면 그림 42와 같은 화면이 호출됨
- 선택한 지점의 풍향 및 풍속이 텍스트로 호출되고, 우측에는 바람의 연직 프로파일 그림이 나타남
- 하단부의 시간 선택에 따라 텍스트와 그래프가 동적으로 변동함
- 메인 페이지와 마찬가지로 지도에는 바람의 흐름이 애니메이션 및 벡터로 호출되며, 지도 선택도 가능함



[그림 141] 지점 선택 페이지

다. 연구개발 성과

(1) 국내외 논문 게재

번호	논문명	학술지명	주저 자명	호	국명	발행 기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록 번호
1	기상데이터 센서의 최적 높이를 위한 유동해석 및 비행실험	한국항공학 회논문지	김영인	22(6)	대한 민국	한국항 행학회	비SCI	2018.12 .31	
2	초저고도 바람예측을 위한 WRF의 물리과정 및 초기조건 민감도 평가	한국항공학 회논문지	권재일	23(6)	대한 민국	한국항 행학회	비SCI	2019.12 .31	
3	Improving Wind Speed Forecasts Using Deep Neural network	Internation al Journal of Advanced Culture Technology	홍석민	7(4)	대한민 국	IJACT	비SCI	2019.12 .31.	
4	심층신경망을 활용한 풍속 예측 개선 모델 개발	한국항공학 회논문지	구성관	23(6)	대한 민국	한국항 행학회	비SCI	2019.12 .31	

(2) 국내 및 국제학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	한국항공운항학회 추계 학술대회	권재일	2018.12.07	항공보안교육센터	대한민국
2	한국항공운항학회 추계 학술대회	홍석민	2018.12.07	항공보안교육센터	대한민국
3	한국항공운항학회 추계 학술대회	김영인	2018.12.07	항공보안교육센터	대한민국

(3) 지식재산권

번호	지식재산권 등 명칭	국명	출원			등록			기여율
			출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호	
1	초저고도 바람 예측 정보 제공 방법	대한 민국	주식 회사 포디솔 루션	2019. 12.23.	10-2019- 0173141				100

(4) 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율
1	WRF 모델에 적용 가능한 고해상도 지형자료(SRTM) 변환 프로그램	2018.10.23.	주식회사 포디솔루션	2018.10.30.	C-2018-029417	주식회사 포디솔루션	100
2	WRF 모델에 적용 가능한 고해상도 토지이용자료 변환 프로그램	2018.10.23.	주식회사 포디솔루션	2018.10.30.	C-2018-029418	주식회사 포디솔루션	100
3	WRF 모델 결과를 이용한 심층신경망 입력자료 생산 프로그램	2019.11.30.	주식회사 포디솔루션	2019.12.16.	C-2019-040735	주식회사 포디솔루션	100

(5) 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황										
			학위별				성별			지역별			
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	인력양성	2019		1			1			1			
2	인력양성	2020			1		1			1			

(6) 산업 기술 인력 양성

번호	프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원
1						

(7) 고용창출

번호	이름	과학기술인번호	근무처	근무기간	비고
1	임 수 진	1156 4606	(주)포디솔루션	2018.12.10.~ 현재	2019년 신규채용

(8) 시스템 개발

연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호
2019	초저고도 바람 예측 모델링 시스템	초저고도 바람 정보를 생산하고 이를 표출하는 시스템	100%	-

(9) 보고서 산출

연도	보고서 구분	날짜	비고
2018	고도 150m 이하 초저고도 바람예측 모델 기법	2018. 11. 09	
2019	초저고도 바람예측 모델 기법 대상지역 적용	2019. 12. 10	

(10) 기타 홍보 및 협의

연도	구분	일자	장소
2018	저고도 항공기상정보 및 서비스 모델 개발 세미나	2018.10.17	한국항공우주연구원
2019	성과 확산을 위한 해외연구 기관 교류 협의	2019.01.16	Japan Weather Association

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

가. 성과 목표 및 달성도

○ 성과 목표 - 기초원천 분야

성과지표	성과 목표	최소 성과 목표	달성치
SCI(E)급 학술지 게재(2점)			
일반학술지게재(1점)	4건		4건
특허출원(1점)	1건		1건
특허등록(2점)			
소프트웨어(1점)	2건		3건
소계(점수)	7점	5점	8점

○ 연구 결과에 대하여 아래와 같은 평가 목표에 대한 평가 목표를 제시하고, 100% 이상 초과 달성을 완료함

구분	성과점검 기준	달성치 및 측정방법
양적성과지표	일반학술지 논문 게재 4편	KCI 등재 학술지 4건 / 게재 완료
	특허출원 1건	출원 1건 / 출원 완료
	소프트웨어 등록 2건	등록 3건 / 등록 완료
질적성과지표	연구과제 통합관리 문서 도출	시험문서/일정관리 문서 도출
	초저고도 기상모델 현황 분석	문서도출 / 전문가 검토
	실황 측정용 드론 개발	1건 / 시스템 개발 완료 (2차년도 시스템 추가 보완)
	저고도 기상관련 성과 확산 세미나	1건 / 세미나 실시
	입력자료 선정 실험	문서도출 / 전문가 검토
	모델링 대상지역 적용 실험	문서도출 / 전문가 검토
	모델결과 활용관련 시제품 기술문서 도출	문서 도출 / 전문가 검토

○ 연구개발 계획서에 제시된 성과 목표 이외에 초과로 달성한 연구 실적은 아래와 같음

구분	성과점검 기준	달성치 및 측정방법
양적성과지표	학술대회 논문 발표	3건 / 학술 발표
	기상모델링 관련 S/W 등록	최종 3건 / 1건 추가 달성
	인력양성	석사 1명 / 졸업
	국내외 장단기 연수 성과	단기 연수 3명 / 수료
	일자리 창출	1명 / 신규채용
질적성과지표	저고도 기상관련 성과 확산 세미나	1건 / 실시여부
	데이터 도출 및 연구 성과 활용 검토	데이터 도출 / 외부 전문가 검토

○ 연구기간 종료 후 추가로 달성예정인 연구 결과는 아래와 같음

구분	예상 실적	달성치 및 측정방법
양적성과지표	논문 / 1건	3월 투고 예정

○ 성과점검기준표 대비 목표 달성 여부는 아래와 같음

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법	
주관	1	초저고도 바람예측 모델의 고도화 기술 및 검증 방법 개발	1-1	연구과제 통합관리	①	시험평가종합계획 개발	1	1	문서개발	산출여부	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> </u> 건 제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건
					②	개발일정 추적관리	1	1	일정관리 문서	산출여부	
			1-2	예측모델 고도화 기술	①	초저고도 기상모델 현황 분석	1	1	결과문서	전문가 검토	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> </u> 1 건 제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건
					②	딥러닝 활용 고도화 기술 개발	1	1	결과문서	논문게재	
			1-3	예측모델 검증 기술	①	실험 측정용 드론 개발	1	1	시스템 개발	개발여부 논문게재	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건 논문: <u> </u> 2 건 제품: <u> </u> 건 SW: <u> </u> 건
					②	예측모델 검증 실행	1	1	결과문서	논문게재	

공동	2	초저고도 바람예측 모델링 방법 개발 및 고도화	2-1	기상역학모 델 활용 기술	①	역할모델 설치 및 운영	1	2	S/W개발	S/W등록	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건
					②	지형데이터 입력 및 정밀화	1	1	결과문서	산출여부	논문: <u> </u> 건 시제품: <u> </u> 건 S/W: <u> 2 </u> 건
			2-2	모델결과 성능시험	①	입력자료 선정 및 실험	1	1	보고서	전문가 검토	특허: 출원 <u> 1 </u> 건 등록 <u> </u> 건
					②	현업모델 비교 성능 실험	1	1	결과문서	특허출원	논문: <u> </u> 건 시제품: <u> </u> 건 S/W: <u> </u> 건
			2-3	모델링 결과 고도화 연구	①	모델링 대상지역 적용 실험	1	1	보고서	전문가 검토	특허: 출원 <u> </u> 건 등록 <u> </u> 건
					②	딥러닝 활용 성능 향상 기술 개발	1	1	결과문서	S/W등록	논문: <u> 1 </u> 건 시제품: <u> </u> 건 S/W: <u> 1 </u> 건
			계						12	13	-

나. 연구성과 목표 및 달성도

구분		목표	달성도(%)	비고	
국외 논문 게재	SCI				
	비SCI				
	계				
국내 논문 게재	SCI				
	비SCI	4	100%		
	계	4	100%		
특허 출원	국내	1	100%		
	국외				
	계	1	100%		
특허 등록	국내				
	국외				
	계				
인력 양성	석사	1		초과달성	
	박사				
	계				
기술 이전	계약 건수				
	계약액				
	징수액				
국제 표준화	기고서 제출				
	기고서 채택				
	표준안 채택				
국내 표준화	기고서 제출				
	기고서 채택				
	표준안 채택				
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문				
	연구시설·장비				
	기술요약정보				
	생명자원	생명정보			
		생물자원			
		신품종			
	소프트웨어		2	150%	초과달성
	화학물				
기타	시제품		1	초과달성	
	성과 홍보		2	초과달성	
	일자리 창출		1	초과달성	
	학술대회 발표		3	초과달성	

다. 관련 분야 기여도

- 본 연구를 통하여 드론운영, UTM 체계, PAV 등 미래형 항공서비스의 안전한 운항을 위하여 필요한 항공기상 정보 생성에 필요한 데이터를 제공하는 방법에 대한 기초 연구를 수행하여, 항공적 교육을 받지 않은 일반인도도 직관적으로 인식할 수 있는 데이터의 플랫폼 체계를 구축함
- 이 과정에서 미래형 항공서비스와 운영 조건이 유사한 실제 저고도 항공기 운영자에게 정보의 중요도 및 요구도 조사를 실시하여 적절한 연구 결과가 산출될 수 있도록 하여, 실제 연구 결과의 활용도를 높이기 위한 초기 단계부터의 활용성 증대에 대한 고려를 수행함
- 본 연구를 통하여 개발된 3차원 항공기상정보 제공 플랫폼은 저고도 운항하는 항공기뿐만 아니라 중고고도에서 운항하는 항공기에도 정보를 제공할 수 있는 플랫폼으로 확장성을 가지고 있으며,
- 실제 본 연구에 참여한 공동기관에서는 개발된 TRL 4 기반 기술을 바탕으로 데이터의 제공 범위를 확장한 사업 모델을 구축하여 연구 결과를 활용한 사업화 시도를 하고 있는 등 연구 결과와 후속 연구를 수행하는데 활용될 수 있는 기반을 마련함
- 또한, 본 연구에서 산출된 다양한 결과는 국내외 논문 게재, 특허 출원/등록, 소프트웨어 등록, 국내외 학술대회 발표 등을 다수 수행하여 연구 내용의 객관적 검증 및 공표를 시도하였으며,
- 인력 양성, 일자리 창출, 전문교육 이수, 본 연구 결과의 확산을 위한 국내외 세미나 참석과 후속 연구 협의 등을 수행하여 관련 분야의 기여도가 크다고 판단됨

4. 연구개발성과의 활용 계획 등

가. 기술 활용 계획 및 타 연구 응용

- 본 연구의 연구 결과인 초저고도 바람예측 모델링 기법은 저고도 무인비행체 운영을 위한 지원 분야에 국한되지 않고, 해상/지상 등 타 교통 분야 및 생활기상 전반에 기상정보 제공 및 위험관리 기술로 확대될 수 있음
- 특히 본 연구를 통해 개발된 초저고도 바람예측 모델링 기법은 고해상도의 정밀한 기상 예보 정보 산출이 가능한 것으로, 사용자 편의성, 정보의 가공 및 분석을 위한 뛰어난 성능의 데이터를 산출할 수 있음
- 공동연구기관인 주식회사 포디솔루션은 저고도의 정밀 기상데이터 예측을 위한 기반 기술을 개발하고, 주관기관과 협업을 통하여 데이터의 정확도를 증가시키는 기법 등을 공동으로 특허 등록 하는 등 향후 연구 결과물의 실용화를 위한 기반 기술을 확보하고 활용할 예정임
- 본 연구의 결과물은 현재 유인항공기의 저고도 정밀 기상 정보 처리를 위한 범위, 공항 운영의 협업을 위한 범위 등과 같이 항공기상 분야뿐만 아니라, 해양기상의 저층의 예보를 위한 기상 예측에도 기술 활용을 제안하였음
- 이를 위하여 본 연구에서 제시한 바람 예측 결과 데이터의 성능 향상 기술에 대하여 주요 사항으로 시도한 심층신경망 이외 방법에 관한 상세한 접근이 필요할 것으로 판단되며, 또한, 성능 향상 기술개발과 더불어 예측 정확도를 높이기 위한 초기 데이터 및 입력 데이터의 신뢰성 검토 및 확보가 필요함
- 특히, 저고도 바람정보 모델링을 위한 입력 데이터인 관측 데이터 및 상층 기상 데이터 등과 같은 관련 데이터의 경우 연구 목적의 데이터 공유가 가능한 분야로서, 정부에 구축된 공공데이터 요청 및 확보 등을 통하여 일정 수준의 이상의 신뢰성이 보장된 기상청 검증 데이터와 국외 기상 연구 기관 및 예보 기관에서 생성한 다양한 예측 모델 데이터를 활용하는 것이 필요함



[그림 142] 연구결과 활용을 위한 데이터 프로세스 도식

나. 추가 연구 필요성

- 본 연구는 기상 예보모델 결과와 기존 항공기상정보 등을 활용하여 미래항공서비스의 안전한 운항을 위한 맞춤형 정보 제공을 위한 데이터 처리 기술과 효과적인 정보 전달을 위한 예측 모델링의 원천 기술 개발을 수행하였으며,
- 일부 데이터를 활용한 초저고도에 특화된 예보/경보 기술과 데이터 후처리 등을 위한 관련 기술 연구 등을 수행하였음
- 다만, 기존 기상 예보 데이터의 한계로 인한 도심지의 빌딩, 장애물 등이 있는 경우의 낮은 예보 정확도 향상을 위한 관련 기술에 대해서는 추가적인 연구를 수행할 필요가 있음
- 최근 데이터 처리를 위하여 연구되고 있는 관련 기술 들을 활용하여 기존의 기상정보에 대한 후처리를 등을 통하여 예보 정확도가 향상된 기상정보의 제공으로 관련 항공안전에 긍정적인 효과가 있을 것임
- 본 연구에서 처리, 분석, 도출한 항공기상 데이터의 활용성 증대를 위하여, 저고도 항공기 운항 및 무인항공기교통관리 체계 등을 위한 저고도 기상 데이터 산출에 대한 연구가 지속적으로 필요할 것임
- 또한, 본 연구에서 수행하지 못한 항공기의 운항 범위에 가정된 저고도의 지형정보, 운항 속도 등의 영향을 고려한 연구 및 생성된 데이터의 정확도를 검증하기 위한 방법 등의 추가적인 연구가 수행되어야 할 필요가 있음
- 도심지 운영이 목표된 무인비행체 운용 환경에서 영향을 줄 수 있는 건물, 구조물, 지형 등과 같은 지상 장애물에 의한 바람의 3차원 변화와 국지적 또는 한정된 시간에 발생할 수 있는 도심지 열원에 의한 온도 변화에 따른 영향이 반영된 바람의 변화 등과 같이 인공적인 요인을 반영 적정성의 검토 및 검토 후 필요한 경우 이를 고려한 후속 연구가 필요할 것임
- 특히, 개발된 모델링 기법의 보편성 확보를 위하여 데이터 생성 후 적용이 가능한 다양한 지역에 대한 적용이 필요하며, 이를 위해 본 연구 결과인 저고도 바람 모델링 기법의 적용이 가능한 지역을 선정하여 장기간의 데이터 생성 및 검토를 통하여 계절의 변화, 시간대의 변화 특징의 반영된 모델링 기법으로의 발전이 필요함

다. 사업화 추진 계획

- 주관연구기관인 한서대학교와 공동연구기관인 주식회사 포디솔루션은 본 연구의 성과를 활용하여, 미래형 항공서비스로 제시되고 있는 PAV 운영 분야에 개발 결과를 응용할 수 있는 데이터 처리 및 시스템 구축 등에 활용할 계획임
- 성과활용 등을 위한 향후 계획에 본 연구에서 개발된 기반 기술을 이용할 뿐만 아니라, 항공기상 데이터를 처리하는 기반을 확보한 본 연구 결과를 활용하여 후속적인 핵심 기술을 도출하고 관련 개발을 추진할 것임
- 특히, 현재 국내에서 가시적인 계획이 제안되고 있는 기업 등에 본 연구의 결과물의 활용뿐만 아니라, 연구 수행 과정에서 확보된 데이터 처리 및 고도화 기술을 활용하여 항공안전을 확보하는 것으로 목표하여, 직접적 사업화 결과뿐만 아니라 대국민 등을 대상할 수 있는 공공적 결과도 고려할 계획임

붙임. 참고문헌

- ICAO, Annex 3 - Bangkok, Thailand, 6 - 9 June 2016
- 국립기상연구소, 기상정보 활용 및 가치 창출 지원 연구, 2013
- 기상청, 항공기상기술 선진화를 위한 발전 방안 연구, 2009
- 항공기상청 정보기술과, 항공기상정보 서비스 소개, 2015
- 한국기상산업진흥원 산업전략실, 중국 기상현대화 첨단기술 엑스포2017 참관 공무국외 출장 세부 결과보고, 2017
- 한국과학기술기획평가원, 기상관측·예보기술의 동향 및 시사점, 2011
- 한국기상산업진흥원 산업지원실, 2016년 핀란드 기상청 및 글로벌 기상기업 기술현황 조사 공무국외 출장 세부 결과보고, 2017
- 한국교통연구원, 항공분야 빅데이터의 정책적 활용방안 연구, 2014
- 한국기상산업기술원, 기상분야 선진국 R&D 연구방향 비교, 2017
- 한국기상전문인협회, 수요자 중심의 항공기상서비스구현 방안 연구, 2007
- 항공기상청 관측예보과, 항공기상 예보지침, 2017
- FAA, Aviation Weather Services, 2016
- 한국항공운항학회, F급 항공기 교체 공항 선정을 위한 기상분석, 2012
- 한국항행학회, PAV를 활용한 공유형 항공 이동수단의 해외 연구 동향 및 국내 적용 방안, 2017
- 한국항공운항학회, Radiosonde 자료를 이용한 항공기 난류 특성 분석, 2007
- 한국항공운항학회, 국내 항공운항에서 기상현상이 결빙 및 지연에 미치는 영향 분석, 2011
- 공군사관학교, 군 우주기상 지원 체계 구축 방안 연구, 2016
- 한국항공운항학회, 기상 전용 항공기 도입 및 운영방안 연구, 2009
- 한국항공운항학회, 기상청 현업 통합모델과 조종사기상보고 자료를 이용한 한국형 항공난류 예측시스템 개발, 2012
- 대한지리학회, 도로상 위험안개의 특징 분석 및 발생 지표의 개발, 2003
- 한국항공운항학회, 소형 항공기의 고밀도 운용방안, 2011
- 한국항공경영학회, 우리나라에서의 PAV 개발과 항공기산업의 발전, 2010
- 해양예보과, 인천의 해무 발생 특성, 2017
- 한국항행학회, 항공교통정보 제공을 위한 FIS-B 설계 및 구현에 관한 연구, 2011
- 국토교통부, 소형항공기(헬기) 안전개선 대책 수립을 위한 정책 연구용역 보고서, 2013
- 기상청, 안개분석기술과 예측방법, 2015
- 기상청, 항공기상업무지침_15년 1월 개정, 2015
- ICAO : MANUAL ON LOW-LEVEL WIND SHEAR AND TURBULENCE FIRST EDITION - 2005 (DOC 9817)
- 항공기상청 : Manual for Aerodrome Warnings and Wind shear Warnings - 2016.11.10. (ISO-I-06)

- NWS, 2004: Terminal Aerodrome Forecasts, NWS Instruction, 10-813
- Zhou, Binbin & Du, Jun & Mcqueen, Jeffery & Dimego, Geoff & Manikin, Geoffrey & Ferrier, Brad & Toth, Zoltan & Juang, Hann-Ming & Hart, Mary & Han, Jongil. (2004). An Introduction to NCEP SREF Aviation Project.
- 서범근, 변재영, 최영진, 2010, WRF 모델을 이용한 지표층 바람장의 대기경계층 모수화와 지면모델 민감도 평가, 대기, 20, 319-332.
- 임아영, 노준우, 지준범, 최영진, 2015, 수도권 지역의 고해상도 WRF 모델 기반 연직 해상도 및 경계층 모수화 방안 민감도 실험, 한국지구과학회지, 36, 553-566.
- Mohan, M., Bhati, S., 2011, Analysis of WRF model performance over subtropical region of Delhi, India, Advances in Meteorology, 2011, doi:10.1155/2011/621235
- Gómez-Navarro, J. J., Raible, C. C., Dierer, S., 2015, Sensitivity of the WRF model to PBL parametrisations and nesting techniques evaluation of wind storms over complex terrain, Geosci. Model Dev., 8, 3349-3363.
- Siuta, D., West, G., Stull, R., 2017, WRF Hub-Height Wind Forecast Sensitivity to PBL Scheme, Grid Length, and Initial Condition Choice in Complex Terrain, Wea. Forecasting, 32, 493-509.
- 국립환경과학원, 대기질모델링 정보자료 제공을 위한 자료공개 시스템 구축. 2012
- 국립환경과학원, 대기정책 모델링을 위한 고해상도 지형자료 작성 및 실행 매뉴얼. 2013
- 국립기상과학원 응용기상연구과, WRF-LES 구축 및 평가. 2014
- <https://www.windguru.cz/>
- <https://www.windfinder.com/>
- <https://www.usairnet.com/>
- <https://sunny-spot.net/>
- <https://www.windyty.com/>
- <https://www.weather.gov.hk/>
- <https://aviationweather.gov/>
- <https://www.aviationweather.gov/adds/>
- <https://www.faa.gov>
- <https://www.airportal.go.kr>
- <http://ais.casa.go.kr/>
- <http://atis.koca.go.kr/ATIS/index.jsp>
- <http://www.molit.go.kr/portal.do>
- <http://araib.molit.go.kr/intro.do>
- <http://www.airportal.go.kr/skyleisure/index.jsp>

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.