

장보고 과학기지 주변 상세 지형/지물을
고려한 3차원 바람장 수치적 재현 연구

Numerical Simulation of 3-dimensional Wind
Distribution near the Jangbogo Antarctic Research
Station



2017. 04. 30

한 국 해 양 과 학 기 술 원
부 설 극 지 연 구 소



제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “ 장보고 과학기지 주변 상세 지형/지물을 고려한 3차원 바람장 수치적 재현 연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.



2017. 4. 30.

연구책임자 : 김 백 민

참여연구원 : 박 상 종

“ : 이 주 한

“ : 권 하 택

“ : 김 선 화

“ : 이 슬 지

“ : 이 민 희

“ : 홍 자 영

위탁연구기관명 : 부경대학교

위탁연구책임자 : 김 재 진



보고서 초록

과제관리번호	PE16250	해당단계 연구기간	2015.03.01.~ 2017.02.28.	단계 구분	1 / 1
연구사업명	중 사 업 명	기본연구사업(개인창의)			
	세부사업명				
연구과제명	중 과 제 명				
	세부(단위)과제명	장보고 과학기지 주변 상세 지형/지물을 고려한 3차원 바람장 수치적 재현 연구			
연구책임자	김백민	해당단계 참여연구원수	총 : 18 명 내부 : 8 명 외부 : 10 명	해당단계 연구비	정부: 480,000 천원 기업: 천원 계: 480,000 천원
연 구 기 관 명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 부설 극지연구소		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위 탁 연 구	연구기관명 : 부경대학교		연구책임자 : 김재진		
요약					보고서 면수 136 페이지
1. 남극 과학기지 주변의 활강류 수치적 재현 및 특성 분석 - 극지역 기상장의 최적 모의를 위한 중규모 수치모델(Polar-WRF)의 성공적 도입 및 구축 - 남극 과학기지 주변 기상장 최적 모의를 위한 모델 수행 격자 체계 및 시간적분, 물리모수화 방안 설계 - 장보고 과학기지 주변의 활강풍 수치 모의 및 특성 분석 - 남극 세종과학기지 주변의 강풍 사례 수치모의 및 발생원인, 특성 분석 - 고해상도 중규모 수치모델 결과와 관측의 비교를 통한 남극 과학기지 주변의 풍속자료에 대한 신뢰도의 정량적 검증 2. 남극대륙 중심 중규모 기상 모델링 데이터 3차원 가시화 도구 제작 및 가시화 - 남극대륙 연안의 복잡한 지형에 특화된 가시화 도구 제작 - 중규모 기상 수치모델의 모의 결과 표출에 적합한 좌표계 개발 - 중규모 기상모델 생산 3차원 기상장 상세 표출 도구 제작 - 가시화 도구의 사용자 인터페이스 제작 3. 장보고 과학기지 주변 상세 대기 환경 연구 - 장보고 과학기지 주변의 기상관측자료(AWS) 수집 및 상세 분석 - 중규모 기상수치 모델(Polar-WRF)-전산유체역학모델(CFD) 접합을 통한 장보고 과학기지 주변 바람장의 상세 흐름 분석 - 장보고 과학기지 건설에 의한 대기질 변화 분석 - 장보고 과학기지 건설에 의한 열환경 분석					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	남극, 활강류, 중규모 수치모델, 장보고과학기지, 전산유체역학모델, 가시화			
	영 어	Antartica, Katabatic wind, Polar-WRF, Jangbogo station, CFD model, Visualization			



요 약 문

I. 제 목

- 장보고 과학기지 주변 상세 지형/지물을 고려한 3차원 바람장 수치적 재현 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

○ 목적

- 장보고 과학기지 주변 남극 활강풍(Katabatic Wind)의 계절별 분포 특성 수치적 재현을 통한 지역 기상/기후 특성 이해
- 장보고 과학기지 주변 국지 지형/지물 배치에 따른 미터급 3차원 바람장 수치적 재현을 통한 합리적 과학장비 배치 및 기지 안전의 기초자료 제공

○ 필요성

- 장보고 기지가 위치한 테라노바 베이 지역은 육빙, 해빙 폴리니아, 남극 활강풍으로 대표되는 남극 빙권요소가 총체적으로 상호작용하고 있는 남극 기후변화 연구의 요충지로 남극 활강풍이 가장 강하게 부는 대표적 지역으로서 남극 활강풍 연구에 최적지임.
- 기상관측자료가 부족한 남극 대륙의 활강풍 연구를 위해서는 중규모 기상수치모델을 이용한 상세 바람장 모의가 필수적이라 할 수 있음.
- 이에, 남극 대륙 중심의 중규모 수치모델링을 통해 장보고 과학기지 인근 상세 바람장을 획득하고 수치모의 결과의 가시화를 통해 장보고 기지 과학장비 최적 배치에 필요한 설계 기초자료의 확보가 가능해 질 수 있음.
- 또한 장보고 과학기지 주변 지형/지물이 관측환경에 미치는 영향을 진단함으로써 양질의 관측 자료 생산을 위한 최적의 설치 장소 진단/제안하여 관측 기기 설치 장소 이전에 따른 비용 절감이

가능하며, 기지 안전확보에 필요한 순간 최대 풍속, 주풍의 방향, 계절 변동에 관한 기초 자료가 확보가 가능함.

- 그러나, 복잡한 기상 현상의 이해는 기존의 2차원 표출로는 쉽지 않을 뿐더러 특히 복잡한 지형 또는 여러 현상이 복합적으로 발생하는 지역에서는 효과적인 해석을 기대하기 더욱 어려움. 이에 따라 정확한 대기 현상의 이해는 3D 가시화 기술의 활용을 필요로 함.
- 장보고 기지 인근 상세 지형/지물에 따른 정밀한 바람장 획득 및 3차원 가시화를 통해 기지 내 신재생 에너지 (풍력, 태양열) 생산성 평가, 효율적 에너지 확보 방안 제시가 가능함.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

- 남극 과학기지 주변의 활강류 수치적 재현
 - 극지역 중심 기상수치 모델 수행을 위한 격자체계 및 영역구성
 - 모델 수행에 필요한 기초자료(경계조건, 초기조건, 분석자료) 확보
 - 남극 과학기지 주변의 활강류 모의 및 특성 분석
 - 전산유체역학모델 활용을 위한 상세 기상장 초기자료 생산 및 제공
- 남극대륙 중심 중규모 기상 모델링 데이터 3차원 가시화 도구 제작 및 가시화
 - 남극대륙 연안의 복잡한 지형에 특화된 가시화 도구 제작
 - 중규모 기상수치모델 모의결과 표출에 적합한 좌표계 개발
 - 중규모 기상수치모델이 생산한 3차원 기상장 상세 표출도구 제작
- 장보고 과학기지 주변 상세 대기 환경 연구
 - 장보고 과학기지 주변의 상세 바람장 특성분석
 - 장보고 과학기지가 주변 바람 관측 환경에 미치는 영향 조사
 - 중규모 기상수치모델과 전산유체역학 모델 접합
 - 장보고 과학기지가 주변 기온 및 대기오염물질 확산에 미치는 영향 조사

IV. 연구개발결과

- 남극 과학기지 주변의 활강류 수치적 재현 및 특성 분석
 - 극지역 기상장의 최적 모의를 위한 중규모 수치모델(Polar-WRF)의 성공적 도입 및 구축
 - 남극 과학기지 주변 기상장 최적 모의를 위한 모델 수행 격자 체계(27km, 9km, 3km 해상도를 갖는 3방향 등지격자) 및 시간적분, 물리모수화 방안 설계
 - 장보고 과학기지 주변의 활강풍 수치 모의 및 특성 분석
 - 남극 세종과학기지 주변의 강풍 사례 수치모의 및 발생원인, 특성 분석
 - 고해상도 중규모 수치모델 결과와 관측의 비교를 통한 남극 과학기지 주변의 풍속자료에 대한 신뢰도의 정량적 검증
- 남극대륙 중심 중규모 기상 모델링 데이터 3차원 가시화 도구 제작 및 가시화
 - 남극대륙 연안의 복잡한 지형에 특화된 가시화 도구 제작
 - 중규모 기상 수치모델의 모의 결과 표출에 적합한 좌표계 개발
 - 중규모 기상 수치모델이 생산한 3차원 기상장 상세 표출 도구 제작
 - 가시화 도구의 사용자 인터페이스 제작
- 장보고 과학기지 주변 상세 대기 환경 연구
 - 장보고 과학기지 주변의 기상관측자료(AWS) 수집 및 상세 분석
 - 중규모 기상수치 모델(Polar-WRF)-전산유체역학모델(CFD) 접합을 통한 장보고 과학기지 주변 바람장의 상세 흐름 분석
 - 장보고 과학기지 건설에 의한 대기질 변화 분석
 - 장보고 과학기지 건설에 의한 열환경 분석

V. 연구개발결과의 활용계획

- 장보고 과학기지 안전 운을 위한 기초자료로 활용
- 장보고 과학기지 주변 상세한 활강풍 3차원 맵 작성을 바탕으로 기지 주변 탐사활동에 필요한 정보제공
- 3차원 가시화된 기지주변 활강풍 정보와 장보고 기지 내 국지 바람장 정보 홍보실 전시 등을 통해 일반인 대상 극지과학 홍보
- 과제에서 개발된 극지역에서의 국지 상세 바람장 모의 기술은 국가적으로 최초로 시도되는 기술로서 타 산업 및 R&D 연계 가능성이 높음.
- 세종기지/장보고기지 독립적인 기상 예보 가능
- 예보에 기반한 응급후송 체계 구축 가능



S U M M A R Y

I. Title

- Numerical Simulation of 3-dimensional Wind Distribution near the Jang Bogo Antarctic Research Station

II. Purpose and Necessity of R&D

○ Purpose

- Understanding regional weather and climate characteristics through numerical simulation of seasonal distribution of Katabatic Wind around Jangbogo Station.
- Providing useful local wind informations around the Jangbogo station which can be useful for locating best place for science equipments and base safety through numerical simulation of 3D wind field considering local terrain and building arrangement of Jangbogo Station.

○ Necessity

- The Terra Nova Bay area where Jang Bogo station is located is the most important area for climate change studies in Antarctica. Combined cryospheric elements such as land ice, sea ice polynya and strong Katabatic winds make the place more compelling for scientists.
- Detailed wind field simulations using the mesoscale numerical model are essential for studying the arctic winds of Antarctica where weather observation data are very rare. With well designed numerical simulation techniques and visualization technique, it is possible to acquire necessary wind data for the optimal arrangement of Jang Bogo station.
- By diagnosing/suggesting the optimal installation site for science facilities, it is possible to reduce the cost due to the unnecessary trial and error for choosing installation location. Basic data about

maximum wind speed, direction of main wind direction, seasonal wind change can be easily accessed at necessary moment. However, understanding of complex weather phenomena is not easy to understand with conventional 2D representation of weather data, and it is more difficult to expect effective interpretation especially in areas where complex terrain or multiple phenomena occur. Therefore, understanding of accurate atmospheric phenomena requires the utilization of 3D visualization technology.

- With combined numerical techniques and proper visualization, It is possible to evaluate the productivity of new and renewable energy (wind, solar) in the base through the acquisition of precise wind field according to detailed geographical features / land near Jangbogo station and 3D visualization, and suggest ways to secure efficient energy.



III. Contents and Extent of R&D

- Numerical representation of streamlines around the Jangbogo station
 - Construct grid system and area configuration for numerical modeling in the polar region
 - Obtain basic data (boundary condition, initial condition, analysis data) necessary for model simulations
 - Simulation and characterization of streamline around Jangbogo station
 - Production of detailed initial catalog data for use of computational fluid dynamics model
- Creation and visualization of 3D visualization tools appropriate for Antarctic-centered medium-scale weather data
 - Creation of visualization tools specialized in complex terrain on Antarctica
 - Development of the coordinate system suitable for the simulation

result of the mesoscale meteorological model

- Production of 3-D ground-based detailed presentation tools produced by the mesoscale meteorological model
- Detailed air environment study near Jangbogo Science Base
- Analysis of detailed wind field characteristics around Jangbogo Science Base
- Analysis of influence of the Jang Bogo Station on the wind observation environment
- Cointegration of mesoscale meteorological model and computational fluid dynamics model
- Analysis of the effect of Jangbogo Station on the ambient temperature and air pollutant diffusion

IV. R&D Results

- Numerical representation and characterization of streamlines around the Antarctic Science Base
- Successful introduction and construction of a medium scale numerical model (Polar-WRF) for optimal simulation of polar weather stations
- Modeling grid system (27km, 9km, 3km 3-directional nesting grid) and time integration and physical parametrization plan for optimal simulation around the Jangbogo station
- Numerical simulation and characterization of bow breeze around Jangbogo station
- Numerical Simulation, Causes and Characteristic Analysis of strong wind Case around the Sejong Station
- Quantitative verification of the reliability of wind velocity data around the Antarctic Science Bases through comparison of high-resolution numerical model results and observations
- Creation and visualization of 3D visualization tools for

Antarctic-centered medium-scale weather data

- Creation of visualization tools specialized in complex terrain on Antarctica
- Development of coordinate system suitable for the simulation result of medium scale weather numerical model
- Production of 3-D ground-based detailed presentation tools produced by the mesoscale meteorological model
- User interface creation of visualization tool

- Detailed air environment study near Jangbogo Station
- Collection and detailed analysis of weather observation data (AWS) around Jangbogo Station
- Mesoscale meteorological model (Polar-WRF) - Computational fluid dynamics model (CFD) junction analysis of wind field around Jangbogo station
- Analysis of air quality change influenced by construction of Jangbogo Station
- Thermal environment analysis influenced by construction of Jangbogo Science base

V. Application Plans of R&D Results

- Use as basic environmental database for safe operation of Jangbogo Station
- Providing information necessary for exploration activities around the base based on detailed 3D wind map data around Jangbogo Station
- 3D visualization of the winds around the Jangbogo base accessible for the local wind field information public exhibition, etc.
- The detailed local wind field simulation technology developed in the project is the first attempt in the nation-wide and facilitate new R&D opportunities in Antarctic Science and industrial cooperation.

C O N T E N T S

Chapter 1 Introduction	1
Section 1. Objective of the study	3
Section 2. Necessity of the study	3
Chapter 2 Current R&D Status in Korea and Other Nations	5
Section 1. Domestic	7
Section 2. Abroad	8
Chapter 3 R&D Implementation Contents and Results	11
Section 1. Numerical model simulation of Katabatic wind around Antarctic Resesasrch Stations	13
Section 2. A study on the detailed atmospheric environment around the Jang-Bogo Research Station	53
Section 3. 3D visualization of numerical model simulation results	114
Section 4. Cause analysis of research results	121
Chapter 4 Degree of R&D Goal Achievement and Degree of Contribution to Outside Research Institute	123
Chapter 5 Application Plans of R&D Results	127
Chapter 6 References	131

목 차

제 1 장 서론	1
1.1 연구개발의 목적	3
1.2 연구개발의 필요성	3
제 2 장 국내외 기술개발 현황	5
2.1 국내 기술개발 현황	7
2.2 국외 기술개발 현황	8
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	11
3.1 남극 과학기지 주변의 활강풍 모의 및 특성분석	13
3.2 장보고 과학기지 주변의 상세 대기환경 연구	53
3.3 극지역 수치모델 자료의 3차원 가시화 도구 제작	114
3.4 연구결과에 대한 원인 분석	121
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	123
4.1 연차별 연구개발 목표 및 달성도	125
4.2 대외 기여도	126
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	127
제 6 장 참고문헌	131



제 1 장 서론



제 1 장 서론

1.1 연구개발의 목적

- 장보고 과학기지 주변 남극 활강풍(Katabatic Wind)의 계절별 분포 특성 수치적 재현을 통한 지역 기상/기후 특성 이해
- 장보고 과학기지 주변 국지 지형/지물 배치에 따른 미터급 3차원 바람장 수치적 재현을 통한 합리적 과학장비 배치 및 기지 안전의 기초자료 제공

1.2 연구개발의 필요성

가. 기술적 측면

- 장보고 기지가 위치한 테라노바 베이 지역은 육빙, 해빙 폴리니아, 남극 활강풍으로 대표되는 남극 빙권요소가 총체적으로 상호작용하고 있는 남극 기후변화 연구의 요충지로, 남극 활강풍이 가장 강하게 부는 대표적 지역으로서 남극 활강풍 연구에 최적지임.
- 장보고 기지 인근 상세 바람장 획득 및 3차원 가시화를 통해 장보고 기지 과학장비 최적 배치에 필요한 설계 기초자료 확보
- 관심이 증대되고 있는 건물 규모 상세 바람장 시뮬레이션 기법 발전
- 중규모 기상모델과 전산유체역학 모델 접합 기술 개선하고, 향후, 2방향 접합 기술에 대한 기반 기술 축적
- 2차원의 평면정보는 복잡한 대기 구조의 효과적 구현과 제공에는 한계를 가지고 있어 3차원 공간정보의 필요성이 요구됨
- 복잡한 기상 현상의 이해는 기존의 2차원 표출로는 쉽지 않을 뿐더러 특히 복잡한 지형 또는 여러 현상이 복합적으로 발생하는 지역에서는 효과적인 해석을 기대하기 더욱 어려움. 이에 따라 정확한 대기 현상의 이해는 3D 가시화 기술의 활용을 필요로 함.

나. 경제·산업적 측면

- 장보고 기지 인근 상세 지형/지물에 따른 정밀한 바람장 획득 및 3차원 가시화를

통해 기지 내 신재생 에너지 (풍력, 태양열) 생산성 평가, 효율적 에너지 확보 방안 제시 가능

- 장보고 과학기지 주변 지형/지물이 관측환경에 미치는 영향을 진단함으로써 양질의 관측 자료 생산을 위한 최적의 설치 장소 진단/제안하여 관측 기기 설치 장소 이전에 따른 비용 절감 가능
- 기지 안전확보에 필요한 순간 최대 풍속, 주풍의 방향, 계절 변동에 관한 기초 자료 확보
- 제2의 산업혁명이라 불리는 3D 프린팅과 함께 미래창조과학부에서는 실감형 콘텐츠 등을 미래 성장동력으로 정책을 추진하고 있을 정도로 3차원 분석, 제조, 응용 등의 기술은 전 산업계에서 활발히 연구되고 있는 분야임.
- 기상 분야에서도 수치예보데이터를 처리하는 기술과 현실감 있는 가상 공간을 구현하는 기술이 융합될 경우 새로운 산업을 창출할 수 있음.
- 기상의 3차원 가시화는 기상 연구 및 응용 분야에 새로운 분석 패러다임을 제공함으로써 경제적 부가가치를 창출할 것으로 기대됨.

다. 사회·문화적 측면

- 장보고 기지 주변 강한 블리자드 및 활강풍에 대한 3차원 시각화된 바람장 영상을 홍보함으로써, 국민들의 과학적 관심도 증가
- 향후, 중규모 기상모델과의 접합 모델링 시스템 구축으로부터 장보고 과학기지 주변의 바람장을 예측
 - 장보고 과학기지 구성원의 옥외 활동시 안전 확보 가능
- 최근 3D GIS, 컴퓨터 모델링 기술, 가상현실 기술 등의 발달로 현실에서 3차원 현상을 경험하는 것은 일상 생활이 됨.
- 스마트미디어의 발전에 따라 3D 영화, 3D 콘서트, 증강현실 등 실감형 콘텐츠에 대한 기대와 수요가 증가함.
- 이러한 가상과 현실의 탈경계화는 과학 분야에서도 그 기대치가 높아지고 있어 과학적 3차원 가시화 기술은 실감형, 참여형 콘텐츠의 연장선상에서 효과적으로 사용될 것으로 기대됨.

제 2 장 국내 외 기술개발소 현황



제 2 장 국내외 기술개발 현황

2.1 국내 기술개발 현황

- 기상청을 중심으로 중규모 모델링 기술 확보. 기상학계의 경우, 기후변화를 중심으로 한 연구가 주를 이루고 있어 지역규모의 기상장 수치모델링 및 분석에 필요한 연구 인력 배출 미흡
- 남극에 특화된 중규모 수치모델링 기술의 경우 극지연구소에서 2014년부터 ‘과거, 현재의 극지 기후 관측 및 재현을 통한 기후변화 메커니즘 규명’ 과제를 중심으로 진행중이나 전반적인 수준 미흡
- 극지연구소의 경우, 최근 장보고기지 안전확보를 위한 수치모델링을 위해 384코어 리눅스 클러스터 장비 도입, 남극 기지를 중심으로 한 중규모 모델링 연구 준비중이나 전반적인 수준 미흡
- 상세 바람장 산출 기술에 필요한 전산유체역학 기술의 경우, 부경대학교 연구팀을 중심으로 원천기술이 확보되어 있는 상태임.
- 서울대학교 백종진 교수팀과 본 연구팀은 중규모 기상모델과 전산유체역학 모델의 접합 모델링 시스템을 구축하여 운영 중
 - 본 연구팀은 서울대학교 박록진 교수팀과 공동으로 다중규모 기상-대기화학 모델링 시스템을 구축함.
- 연구 차원에서의 3차원 가시화 연구가 이뤄지고 있으며 현업에 활용하는 시도를 하고 있음.
- 2012년부터 기상청 선진예보 구축 사업으로 (주)미래기후 ‘KMet3D’를 기반으로 개발한 수치모델자료 3차원 가시화 프로그램 ‘Gloview’는 향상된 데이터 처리 속도와 편리성으로 현업 활용도를 높여 현재 기상청 예보 현업에 활용중임.
- 국내 주요 3D 가시화 프로그램

프로그램 명	개발 기관	주요 기능
산불확산예측모델 가시화 시스템	(주)한국해양기상기술 국립기상연구소	산불확산모델결과 데이터의 3차원 GIS 엔진기반 가시화
3차원 데이터 가시화 엔진 GvtX	(주)한국해양기상기술	모델 데이터의 GIS 엔진기반 3차원 가시화
KMet3D	(주)미래기후	기상 수치모델자료의 3차원 가시화

2.2 국외 기술개발 현황

- 기지 인근 독일 노이마이어, 러시아 보스토크, 미국 맥머도, 영국 할리, 일본 쇼와, 프랑스-이태리 콩코디아, 호주 모슨 등 8개국의 과학기지가 운영되고 있으며, 기지안전 및 과학활동 수행을 위한 연구가 진행중임. 특히 본 연구의 핵심 주제인 남극 환경풍 연구의 경우 미국 기지를 중심으로 활발히 연구되고 있음.
- 3차원 바람장 재현을 위한 고해상도 중규모 모델링 기술은 기상선진국을 중심으로 발전함. 그러나, 중규모 모델링의 핵심 기술인 모수화(parameterization) 방안은 주로 적도 및 중위도 지역에서 개발함. 2000년대 후반 미국에서 개발된 중규모 모델의 경우, 극지역 물리과정을 감안한 모수화 기술을 탑재하고 있으나 회소서 있는 남/북극 관측을 이용한 모수화 기술의 향상이 더욱 필요한 실정
- 중규모 기상모델과 전산유체역학 모델의 접합 모델을 구축하여 미터 단위 상세 규모(건물 규모)의 상세 바람장 시뮬레이션 수행
 - 기상장 현업 예측에 적용은 아직 이루어지지 않고, 연구적 측면에서 활용
 - 경험적 상세 규모 진단 모델(예, QUIC 모델 - 유타대학교 Pardyjak 교수 연구 그룹)을 개발하여 중규모 기상 모델인 WRF 모델과 2방향 접합 모델링 시스템 구축 중
- 복잡한 지형/지물에서의 미터급 상세 바람장 산출 기술은 도시설계의 선진화 및 환경영향 평가 등에 핵심기술로서 전세계적으로 수요가 큰 기술로 자리잡아가고 있으나, 핵심기술인 전산유체역학이 기상학에 접목이 느리게 진행되고 있어 전세계적으로도 기술수준이 높지 않은 수준임.
- 대기, 해양, 의학, 건설 등 각종 산업 분야에서 과학적 가시화(Scientific Visualization)라는 방법으로 폭넓게 활용되고 있음.
- 기상 분야에서의 3차원 가시화는 주로 미국 등 해외의 기상관련 연구소를 중심으로 기술 컨소시엄의 형태로 개발되어 주로 연구용으로 배포, 활용되고 있으나, 데이터의 복잡한 처리 과정 및 현업 접근성 저하로 활용도가 낮고 실용화에 한계를 가지고 있음.
- 해외 주요 3D 가시화 프로그램

제품명	제조업체(기관)
VAPOR	NCAR
IDV	Unidata
Vis5D	SSEC
VisAD	SSEC
OpenDX	IBM
vGEO	Mechdyne





제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과



제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

3.1 남극 과학기지 주변의 강풍 수치모의 및 특성분석

3.1.1 장보고기지 주변의 강풍사례 모의 연구

가. 서론

- 남극대륙은 남극의 태평양권을 중심으로 남반구 중위도 지역과 활발한 상호작용을 하며, 최근 30년간 전체 해빙면적이 10년당 1.2~1.8% 비율로 증가하였으나 지역별로는 감소와 증가지역이 공존하는 것으로 밝혀져 남극대륙의 지역별 세부적인 기후변화에 대한 이해의 필요성이 증대되고 있음(IPCC, 2014; Paolo et al., 2015).
- 극지연구소는 산 · 학 · 연 협동으로 구성된 전문가 그룹을 구성하여 2007년부터 2010년까지 남극대륙의 6개 예비 후보지에 대한 현장 답사 및 평가를 실시하고, 최종적으로 남극 로스해(Ross Sea) 연안 테라노바베이(Terra Nova Bay)의 해안 지역(74°37.4'S, 164°13.7'E)에 2014년 3월 장보고 과학기지를 완공하여 현재까지 운영해오고 있음(극지연구소, 2012a, Fig. 1).

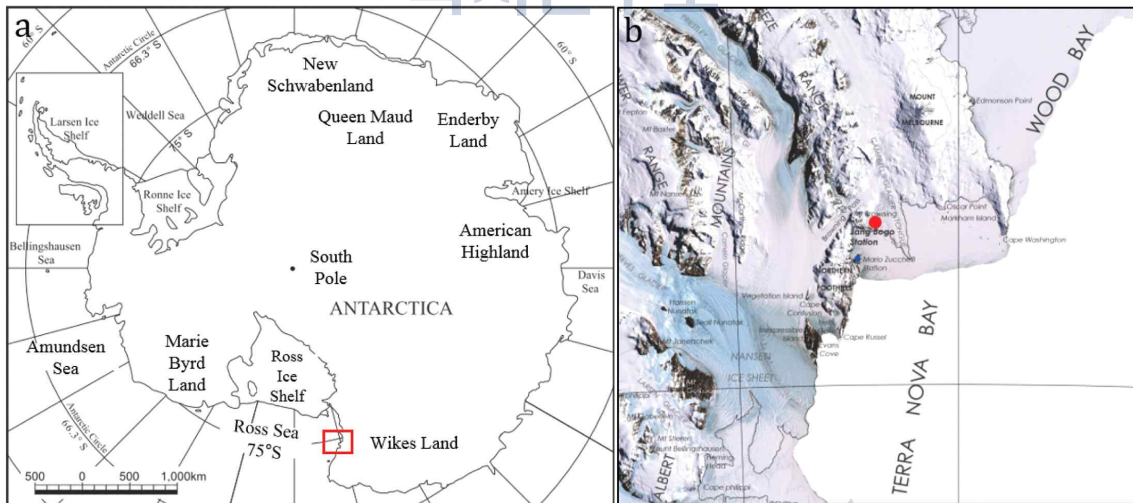


Fig. 1. Location of Jangbogo station (red dot) in Terra Nova Bay, Antarctica. The inner red box in (a) are enlarged in (b).

- 장보고 과학기지는 테라노바베이의 케이프피비우스에서 북쪽으로 약 1 km 떨어진 해안가에 위치하여 남극 중심부와 해안으로의 접근이 용이하여 남극대륙 중심의

기후변화, 고층대기, 지형 및 지질조사, 우주과학연구 등에 필요한 다양한 자료 확보를 통한 특성화된 연구 수행이 가능하다는 장점이 있음. 극지연구소는 장보고 과학기지를 중심으로 기상 및 대기화학 연구를 위한 WMO(World Meteorological Organization) / GAW (Global Atmosphere Watch) 지구급 관측소를 구축 및 운영하고 있으며, 로스해 지역의 고 기후, 극지 고층대기의 동역학적 특성, 육상-해양 생태계 생물의 다양성 및 장기모니터링, 남극운석탐사와 관련된 다양한 연구 활동을 진행해 오고 있음(극지연구소, 2012b).

- 장보고 과학기지가 위치한 로스해 연안은 남극대륙을 따라 분포한 해안가 지역에서 발생한 다양한 규모의 저기압 시스템의 이동과 소멸이 지속적으로 반복되는 대표적인 지역으로 알려져 있음(Simmonds et al., 2003; Hoskins and Hodges, 2005). 특히 장보고 과학기지가 위치한 로스해역의 테라노바베이 인근은 중규모 저기압의 주요 발생 지역 중 하나이며(Carrasco et al., 2003), 아델리 랜드(Adelie Land) 인근 해역에서 발생하여 서진하는 저기압의 영향을 지속적으로 받는 지역으로(Bromwich et al., 2011) 강풍과 같은 악기상이 자주 발생함. 또한 해안에서 대륙방향으로 급격한 고도변화를 보이는 복잡한 지형적 특성으로 강한 활강풍(katabatic wind)의 영향을 받는 대표적인 지역 중에 하나임. 로스해 지역의 악기상 관련 연구는 1955 년에 로스섬(Ross Island)에 건설되어 현재까지 상주기지로 운영되어 오고 있는 미국 맥머도 기지(McMurdo Station)를 중심으로 수행되어 오고 있음. 주로 인근 계곡에서 불어오는 높새 바람(Foehn wind) 및 강풍사례분석에 대한 연구들이 진행되어오고 있으나(Steinhoff et al., 2008, 2012; Speirs et al., 2012) 관련 연구가 매우 부족한 실정임. 이는 국지적인 악기상의 경우 상대적으로 낮은 해상도를 갖는 재분석 자료를 이용한 분석에 한계가 있으며, 관련 지역에서 제공되는 기상 관측자료가 부족하기 때문에 판단됨. 장보고 과학기지 인근에는 이탈리아에서 하계에만 운영하고 있는 마리오주 켈리(Mario Zucchelli) 기지가 위치해 있으나 테라노바베이 부근의 강풍사례에 대한 연구는 전무한 실정임. 앞으로 남극 지역의 다양한 관측과 연구를 위해 기지를 운영해 나가는데 있어 장보고 기지 주변 악기상에 대한 이해는 필수적이라 할 수 있음.
- 본 연구에서는 장보고 과학기지에 설치, 운영되어 오고 있는 자동기상관측장비(Automatic Weather Station: AWS)에서 관측된 풍속 자료를 분석하여 특징적인 강풍사례를 선정하고, 이를 극지역 모의를 위해 개발된 Polar

WRF (Weather and Research Forecasting) 수치모형을 이용하여 모의하였음. 이를 통해 장보고 과학기지 주변의 강풍 사례의 원인을 분석하고, 관측자료와의 비교를 통해 재분석 자료와 중규모 수치모형을 이용한 역학적 상세화(downscaling) 기법을 이용해 생산된 국지 바람장의 검증에 수행하였음.

나. 사례 및 종관장 분석

- 강풍사례의 선정과 모의를 위해 장보고 기지에서 운영되고 있는 AWS 관측자료를 분석하였음. 장보고 과학기지에서 운영되고 있는 AWS는 2010년 2월에 설치(74.623oS, 164.229oE)되어, 2012년 12월 29일 현위치(74.627oS, 164.237oE)로 이전하여 현재까지 운영되어 오고 있음. 자동기상관측 장비에는 5.5 m 높이에 풍향, 풍속계를 비롯하여, 약 2 m 높이에 온/습도계, 적설계, 복사계가, 지면에는 기압계가 설치되어 있으며, 관측주기는 30초로 10분 및 60분 평균자료가 생산됨.
- 사례 선정을 위해 2010년 2월부터 2015년 2월 기간에 관측된 풍속 시계 열을 분석하여 10분 최대 순간 풍속 값의 최고 값(41.17 m s⁻¹)을 기록한 사례(2010년 9월 9일, CASE1)와 일평균 풍속 값의 최고 값(23.92 m s⁻¹)을 기록한 사례(2010년 8월 20일, CASE2)를 선정하였음. Fig. 2와 3은 두 사례 기간의 장보고 기지 AWS에서 관측된 시간 평균 및 최대 풍속, 지면 기압의 시계 열을 나타냄. 10분 최대 순간 풍속 값을 보인 CASE1의 경우 9월 5, 6일 5 m s⁻¹ 이하로 유지되던 풍속이 9월 7일 0000 UTC 이후 증가하기 시작하여 9월 1100 UTC에 41 m s⁻¹의 10분 최대 순간 풍속값을 보이며, 강풍이 지속되는 동안 300도 방위의 북서풍이 일정하게 유지됨을 알 수 있음(Fig. 2). 지면기압은 8일 0000 UTC에 지속적으로 감소하기 시작하여 최대 풍속을 보인 9월 1100 UTC에 최저 관측 값(949 hPa)을 보임. 이는 동일한 시각에 증가하기 시작하여 최대 풍속을 보인 풍속의 변화 경향과 일치하며 사례기간에 발생한 강풍이 저기압의 영향을 받은 것임을 알 수 있음. 이러한 사실은 동일한 기간의 해면기압 분포(Fig. 4)에서 더욱 뚜렷이 볼 수 있음. 8일 마리비어드 랜드(Marie Byrd Land)의 동쪽 끝에 중심을 둔 저기압이 주변 지역에 넓게 자리 잡고 있으며, 10분 최대 순간 풍속을 보인 9일 저기압 중심이 남동쪽 남극대륙 안쪽으로 이동하며 장보고 기지가 위치한 로스해 지역의 대륙과 해양의 경계를 따라 조밀한 등선이 형성되어 있음을 볼 수 있음. 이후 10일 장보고 기지 주변의 조밀한 등압선 분포를 만들었던 저기압 세력이 약해지며 강풍 유발에 영향을 준 장보고 기지

주변 기압 경도가 약해졌음을 볼 수 있음.

- 일 평균 풍속의 최대값을 기록한 2010년 8월 20일의 사례를 살펴보면(Fig. 3) 1시간 평균 풍속은 8월19일 2000 UTC에 큰 폭으로 증가하여 약 20 m s^{-1} 이상의 풍속을 24시간 넘게 유지하다 21일 0600 UTC 이후 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있음. 24시간 넘게 지속된 강한 풍속이 해당 관측 기간 내의 일 평균 풍속의 최대 값을 유도하였음을 확인할 수 있음. CASE1과 유사하게 강풍이 지속되는 기간 동안 약 300도 방위의 내륙에서 해안 쪽으로 불어오는 북서풍 계열의 바람이 일정하게 유지되었으며, 지면기압의 경우 17일 1600 UTC에 최저 값을 보인 후 서서히 증가하여 일 평균 풍속의 최대값을 보인 20일에 약 972 hPa을 기록한 후 이후로도 지속적인 증가 경향을 보임. 이 사례는 CASE1과 달리 주변 저기압의 영향보다는 남극 해안가에서 내륙으로 갈수록 고도가 급격하게 높아지는 지형이 존재하는 곳에서 높은 지형을 따라 하강하는 찬 공기의 흐름에 의해 강한 지면 바람이 발생하는 활강풍 사례로 추정됨.
- 서론에서 언급되었듯이 장보고 기지가 위치한 해안가 주변은 내륙으로 갈수록 고도가 급격하게 높아지는 복잡한 지형으로 이루어져 있어 활강풍의 영향을 많이 지역으로 알려져 있으며 특히 겨울철에 큰 값을 보이는 것으로 알려져 있음(Parish, 1984). Figure 5는 8월 19, 20, 21일 1200 UTC의 해면기압과 500 hPa의 지위고도 아노말리 분포를 나타냄. 19일 장보고 기지 주변에 로스해부터 서남극 반도까지 해안을 따라 넓게 자리 잡고있는 저기압 시스템의 가장자리가 위치해 있으며, 최대 일평균 풍속을 보인 20일에는 저기압 중심이 장보고 기지가 위치한 테라노바베이에서 더욱 떨어진 마리비어드 랜드(Marie Byrd Land)의 동쪽 끝으로 이동한 것을 볼 수 있음. 또한 20일에 테라노바베이 해안을 따라 내륙 안쪽에서 남북방향으로 길게 고기압이 발달한 것을 확인할 수 있음. 이는 앞서 AWS 관측의 지면기압의 시계열에서 보여진 시간에 따라 증가하는 지면기압의 변화에 영향을 준 것으로 판단됨. 21일에는 저기압 중심이 보다 서쪽으로 이동하였음을 볼 수 있음.

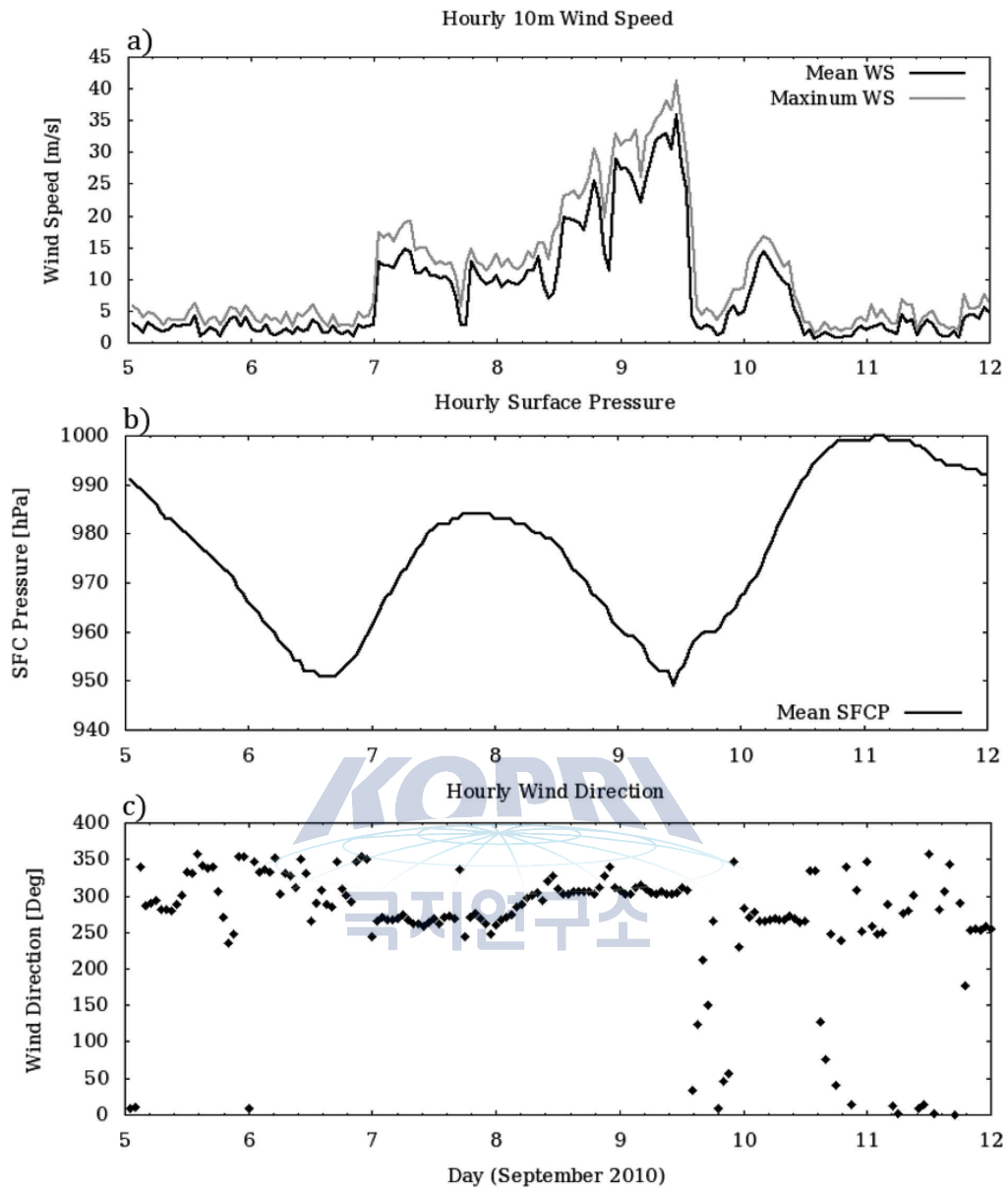


Fig. 2. Time series of (a) hourly averaged 10-m wind speed (m s^{-1}) (black line) and 10-m maximum instantaneous wind speed (gray line) and (b) hourly averaged surface pressure (hPa), and (c) wind direction (degree) at Jangbogo AWS station for 5~11 September 2010.

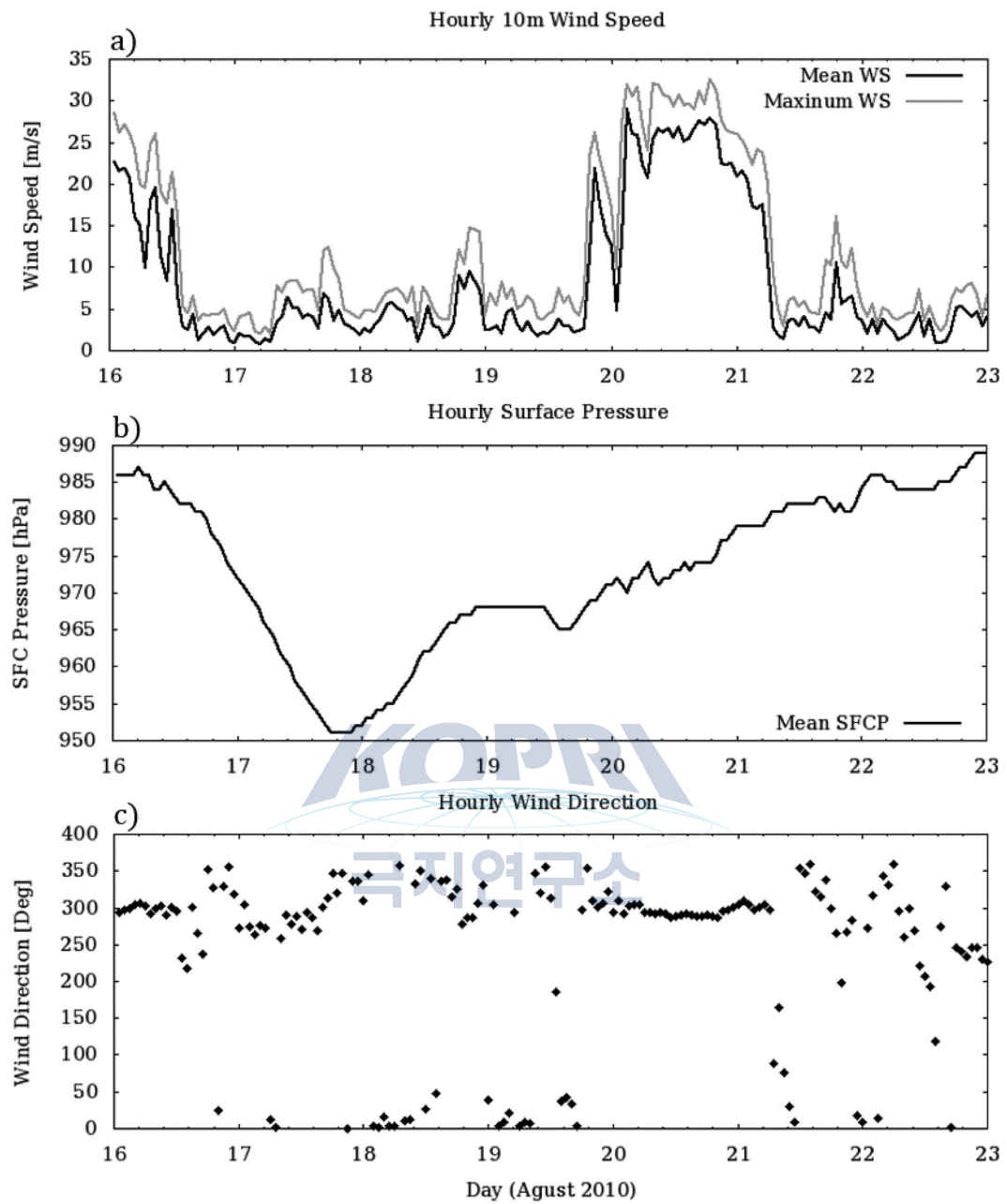


Fig. 3. Same as Fig. 2, except for the period of 16~22 August 2010.

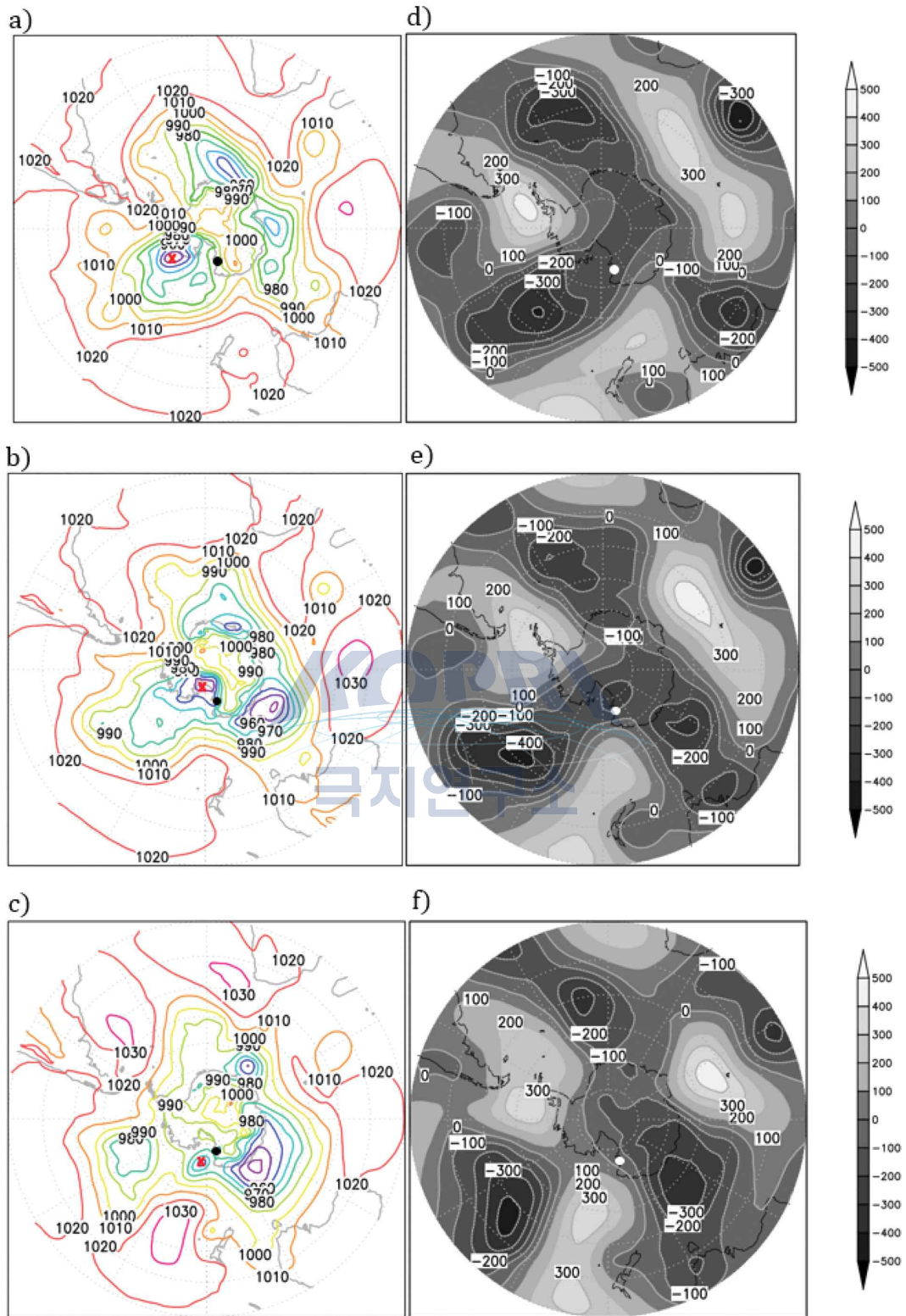


Fig. 4. (a)–(c) Sea-level pressure and (d)–(f) daily anomalies of 500 hPa geopotential height at 0600 UTC 8 (top), 9 (middle), and 10 (bottom) September 2010 from ERA–Interim reanalysis. Black and white closed circles in (a)–(c) and (d)–(f) indicate Jangbogo station, respectively. Red symbol x is center of low pressure system nearby Jangbogo station.

- 두 사례의 500 hPa 지위고도 아노말리 분포(Fig. 4와 5)를 살펴보면 두 사례 모두 공통적으로 남태평양 중앙(~40oS, 150oW)에 머물러 있던 양의 지위고도 아노말리가 강풍이 발생한 두 시기에 동남쪽 방향의 로스해 부근 남극대륙까지 길게 확장되며 장보고 기지 풍하층 방향에 정체된 기압능을 형성하고 있음을 알 수 있음. 또한 정체된 풍상층 저기압과 풍하층 저지 고기압 사이에 위치한 장보고 기지 상공에 정체된 기압골을 따라 강한 강풍대가 위치하고 있음을 볼 수 있음. 따라서, 두 강풍사례에서는 공통적으로 남태평양 중앙에 정체되어 있던 양의 지위고도 아노말리가 남극대륙 방향으로 확장하며 장보고 기지 상공에 기압골이 위치할 때 지상에 강한 강풍이 발생한 것으로 보여지며 이러한 상층 종관 패턴은 장보고 기지 주변의 강풍 유발과 밀접한 관련이 있을 것으로 판단됨. 본 연구에서는 이러한 과정을 일반화하기에는 사례가 충분하지 않아, 관련해서는 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각됨.



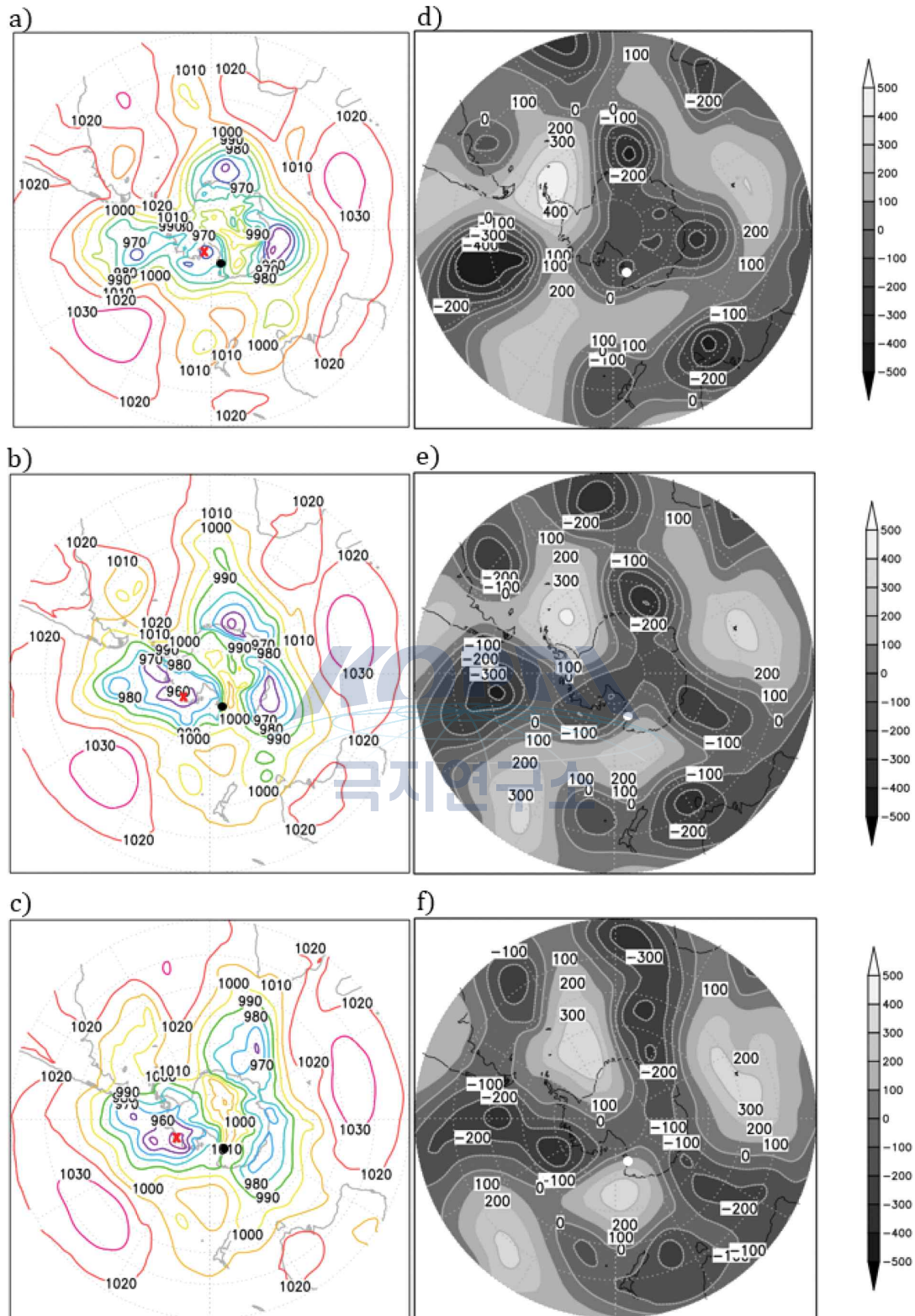


Fig. 5. Same as Fig. 4, except for at 1200 UTC 19 (top), 20 (middle), 21 (bottom) August 2010.

다. 실험 설계 및 모델 수행

- 본 연구를 위해 미국 오하이오 주립 대학(Ohio State University)의 Byrd Polar and Climate Research Center의 Polar Meteorology Group 에서 개발된 Polar WRF 모델(version 3.7)을 사용하였음. Polar WRF 모형은 중규모 대기현상을 고해상도로 연구하고 예측하기 위해 개발된 WRF 모형(Skamarock et al., 2005)을 기반으로 극지역 수치 모의 성능을 향상시키기 위해 개선된 수치모형임. 극지역의 많은 영역에 분포하고 있는 해빙과 영구 동토층 상에서 최적의 지표면 에너지 균형(Surface energy balance)과 열전달(Heat transfer) 모의를 위해 Noah Land-surface 모형(Noah LSM)이 개선되었으며, 해빙과 눈 두께 등의 지표 성질의 정확한 표현을 위해 눈과 해빙을 4개의 층으로 구성하고 농도를 수치화하여 격자마다 0에서 1까지의 비율로 선택적 적용이 가능하도록 세분화 되어 있음(Bromwich et al., 2009).
- 수치 모의를 위해 각각 27 km, 9 km, 3 km의 격자 간격을 갖는 3개의 실험 영역을 구성하였음(Fig. 6). 남극대륙과 그 주변 해역을 포함하여 남반구 중위도 일부까지 실험 영역 1(domain 1)을 설정하였으며, 장보고 과학기지를 중심으로 9 km, 3 km 격자 간격의 실험 영역 2와 3(domain 2, domain 3)을 구성하였음. 3개의 실험 영역은 측면 경계에서 기상변수 정보를 양 방향으로 전달하는 양방향 둥지체계(two-way nesting)로 구성하였으며, 각 실험영역의 연직 층 수는 44층이며 모형 상한은 10 hPa로 설정하였음. 모형의 초기 및 경계 자료로 유럽중기예보센터의 ERA Interim 자료(수평해상도~0.75o)를 사용하였음.

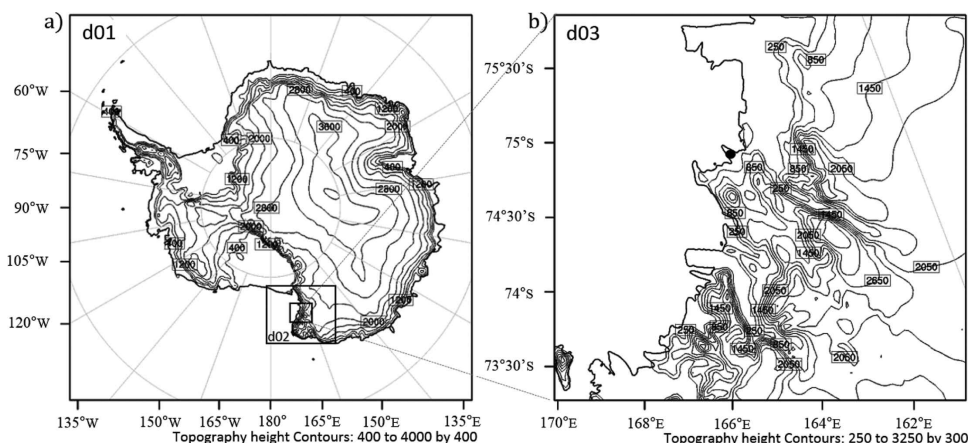


Fig. 6. Model domain with terrain height (solid line, Unit: meters) for (a) 27 km grid and (b) 3 km grid. The inner boxes in (a) represent 9 km (d02) and 3 km (d03) domains. The black circle in (b) indicates the location of Jangbogo station.

○ 본 연구에서는 Polar WRF를 이용하여 남극 지역에 대한 기상예보 및 성능 검증 수행 결과를 기술한 Bromwich et al. (2013)를 참조하여 시간적분 방안 및 물리과정을 설계하였음. 선정된 두 사례 기간에 대한 수치 모의 실험을 위해 매일 0000 UTC에 모형을 초기화하여 48시간의 적분을 수행하였으며, 스핀 업(spinup) 시간을 고려하여 초기 24시간은 제외하고 나머지 24시간 예측자료만을 분석에 활용하였음. 실험 수행에서 사용된 물리과정은 다음과 같음. 구름 물리과정은 WSM5 (WRF Single Moment 5-Class cloud microphysics scheme) (Hong et al., 2003) 방안을, 적운대류 모수화 과정은 Grell-Freitas ensemble (Grell and Freitas, 2014) 방안을 27 km 격자에만 적용하였으며, 9 km와 3 km 격자에는 적운대류 모화를 사용하지 않았음. 지표면 모형(Land surface model: LSM)은 극지역에 맞게 수정된 Noah LSM (Bromwich et al., 2009)을 사용하였으며, 복사 모수화 방안으로는 RRTMG 방안(Iacono et al., 2008)을 장파복사 및 단파복사에 동일하게 적용하였음. 행성경계층 모수화 방법은 Mellor-Yamada-Janjic TKE (Janjic, 1994) 방안을, 지표면 물리방안(surface layer scheme)으로는 Monin-Obukhov (Monin and Obukhov, 1954) 방안을 적용하였음. 실험구성 및 물리 모수화 방안에 대한 상세한 정보는 Table 1과 2에 각각 요약하여 기술하였음.

[Table. 3] Summary of model configuration

	Domain 1	Domain 2	Domain 3
Horizontal grid	240 × 230	124 × 103	100 × 109
Resoution	27km	9km	3km
Vertical layers	44 Layers (model top: 10 hPa)		
Geog data resolution	10 m'	30 s'	30 s'
Initial, lateral boundary condition	ERA-Interim (6-hour intervals with a spatial resolution of 0.75°× 0.75°)		
Time period	2010.09.05. 00 UTC~12 00 UTC (CASE1) 2010.08.16. 00 UTC~23 00 UTC (CASE2)		
Integration	48 h forecast from global analysis (first 24 h used for model spin up)		
Base state temperature	273.16 K		
Relaxation zone	4 grid point (Default)		

[Table. 4] Summary of used parameterization schemes used for the simulations.

	Domain 1	Domain 2	Domain 3
Microphysics	WRF Single-Moment 5-class		
Longwave rad.	RRTMG scheme		
Shortwave rad.	RRTMG Shortwave		
Land surface	Noah Land Surface Model		
Surface layer	Monin-Obukhov		
PBL	Mellor Yamada-Janjic TKE		
Cumulus param.	Grell-Freitas ensemble	×	×

라. 실험 결과

- 선택한 사례의 수치모의 성능을 살펴보기 위해 우선 각 사례별 바람, 기압의 공간 분포를 살펴보았음. Fig. 7은 사례1(CASE1) 기간 중 10분 최대 풍속 값을 기록한 2010년 9월 9일의 3 km 격자 실험결과로, 6시간 간격의 해면기압과 10 m 고도의 풍속, 풍향을 나타냄. 모의 영역에서 검은 점은 장보고 기지의 AWS 관측 지점을 나타냄. 장보고 기지는 해발 2,000 m 이상의 높은 고도를 지닌 내륙과 테라노바베이 사이에 위치하여 급격한 고도 변화와 함께 복잡한 주변 지형을 가지고 있음. 따라서 모의된 지상의 기압 분포는 지형의 영향을 받아 매우 복잡한 형태로 나타나고 있음을 알 수 있음. 바람의 경우 장보고 기지 주변에서 붉게 표시된 30 m s^{-1} 이상의 강풍 지역이 넓게 분포하고 있으며, 강풍 지역의 풍향은 서풍 계열이 지배적이며 위치에 따라 북서풍, 남서풍 등의 풍향을 보임. 그림에서 풍향은 Fig. 6의 영역 1의 그림에서 살펴보면 보다 쉽게 이해할 수 있다. Fig. 1에서 상측이 남쪽, 하측이 북쪽이며, 동, 서 방향의 경우 남극을 중심으로 그린 그림이므로, 우측에서 불어오는 바람이 서풍, 좌측에서 불어오는 바람이 동풍임. 장보고 기지 위치에서는 0000~1200 UTC 기간에 강한 바람이 모의되었으며, 1800 UTC에 실험 영역 전반에 걸쳐 풍속이 감소한 경향을 보임. 이러한 경향은 앞서 살펴본 AWS 관측자료에서 8일부터 서서히 증가한 풍속이 9일 1100 UTC 정점을 찍은 후 급격한 감소를 보인 변화 경향과 잘 일치함을 알 수 있음. 30 km 모델 모의 결과의 시간에 따른 지면기압의 공간분포(그림은

제시하지 않았음)의 변화를 살펴보면, 8일 마리비어드 랜드 동쪽 끝에 중심을 둔 저기압 시스템의 중심이 시간이 지날수록 로스 빙봉과 내륙의 경계를 따라 서쪽으로 이동하며 강풍이 발생한 9일 장보고 기지가 위치한 테라노바베이 주변에 위치하며 서풍, 북서풍 계열의 바람을 강화시킨 것을 확인할 수 있으며, 이러한 저기압에 의해 유도된 바람이 지형에 의해 발생한 지역 바람에 영향을 주어 북서풍 계열의 강한 바람을 모의한 것으로 판단됨.

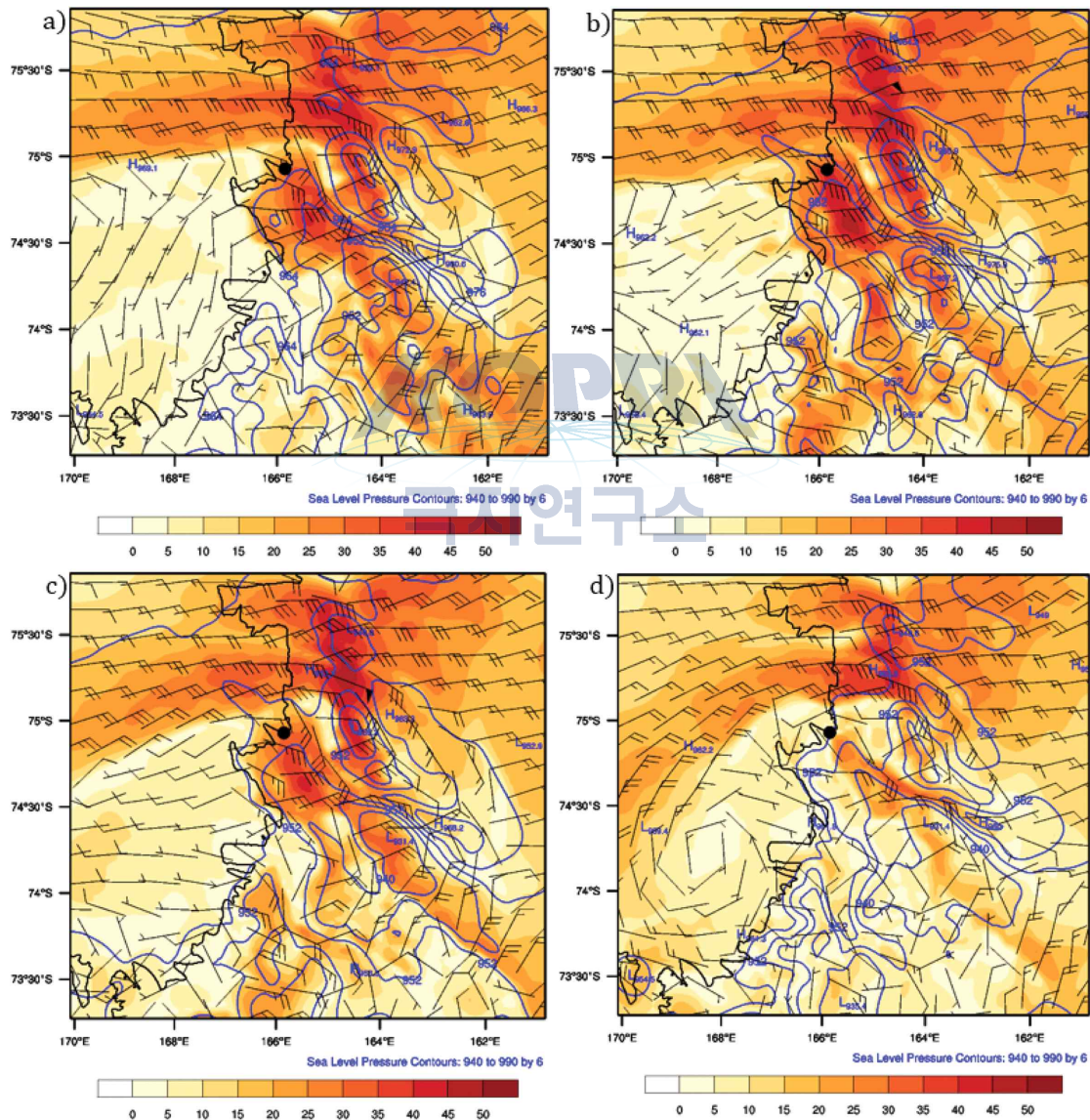


Fig. 7. Sea-level pressure (blue contour, hPa) and wind speed (shading, m s^{-1}) at (a) 0000, (b) 0600, (c) 1200, and (d) 1800 UTC 9 September 2010 from Polar WRF simulation with 3 km grid resolution. Contour interval is 6 hPa. Black circle indicates Jangbogo station.

○ Fig. 8은 CASE2 기간 중, 일 평균 최대 풍속 값을 기록한 2010년 8월 20일 장보고기지 부근의 6시간 간격의 해면 기압과 10 m 고도의 풍속, 풍향 모의 결과를 나타냄. 앞선 사례와 마찬가지로 검은 점으로 표시된 장보고기지 부근에 붉은 색으로 표현된 강풍 지역이 존재하고 있으며, 서풍 계열의 바람이 지배적인 것으로 보임. 다만 앞선 사례에서는 장보고기지의 위치가 직접적인 강풍 지역에 지속적으로 포함되어 있었던 반면, 두 번째 사례에서는 강풍 지역사이에 존재하는 좁은 약한 바람 영역에 장보고기지가 위치하면서 상대적으로 풍속이 약하게 모의된 것으로 보임. 이에 대한 보다 자세한 분석은 이후 풍향, 풍속의 시계열 결과와 함께 논의하였음. 장보고기지에서 강풍 모의 결과 검증 및 상세 분석을 위해 관측 자료와의 비교, 분석을 수행하였음.

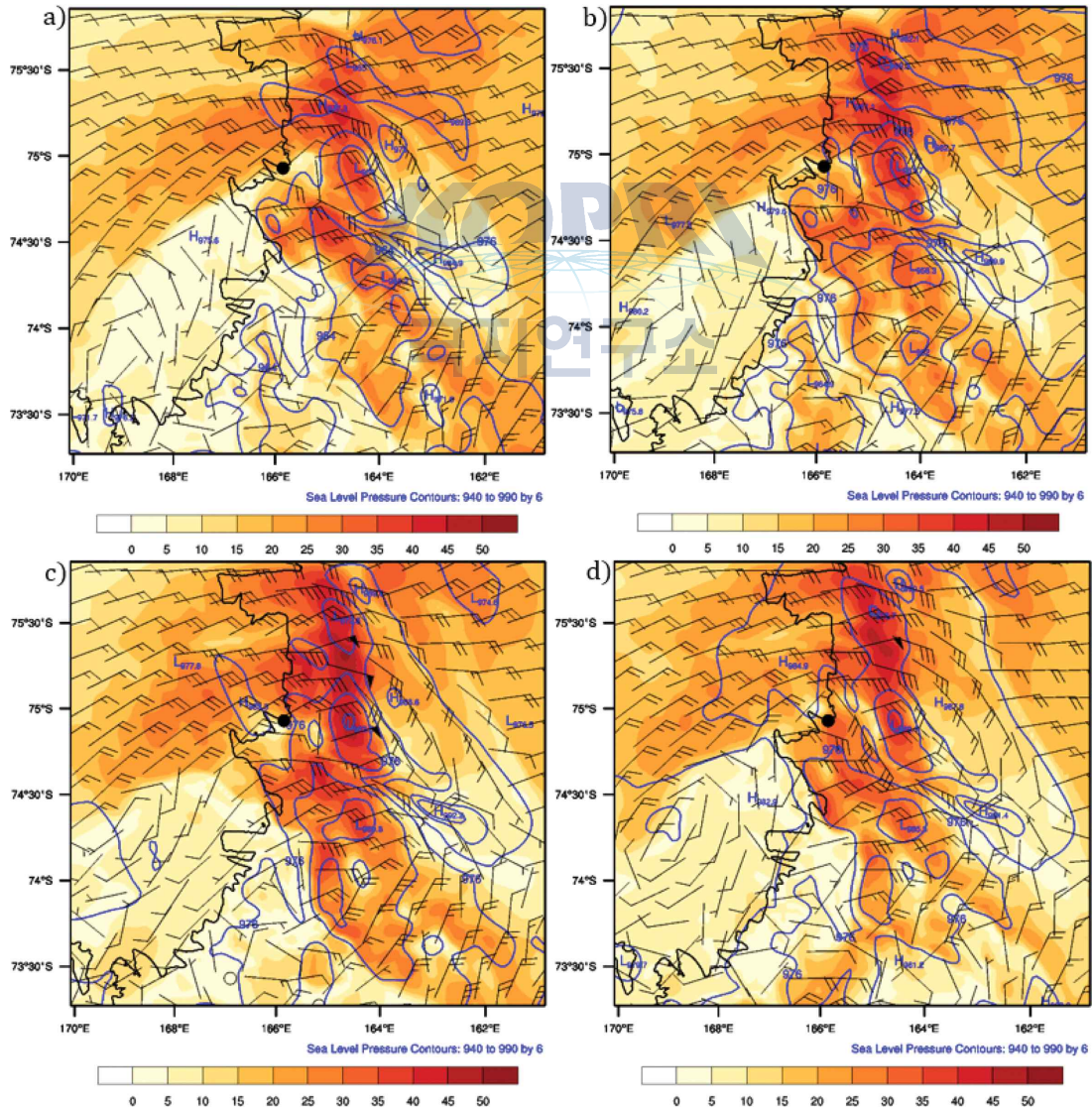


Fig. 8. Same as in Fig. 7, except for 20 August 2010.

- Fig. 9는 CASE1에 대한 장보고 기지의 AWS 관측, 3 km 해상도의 수치 모의 결과, ERA-interim 재분석장의 풍속, 지면 기압, 풍향의 시계열을 나타냄. 해당 사례에서 Polar WRF 수치 모형은 관측과 매우 유사한 풍속과 지면 기압을 모의하는 반면 ERA-interim 재분석장에서는 풍속의 변화폭이 적고 특히 강한 바람의 강도를 제대로 표현하지 못함을 알 수 있음.

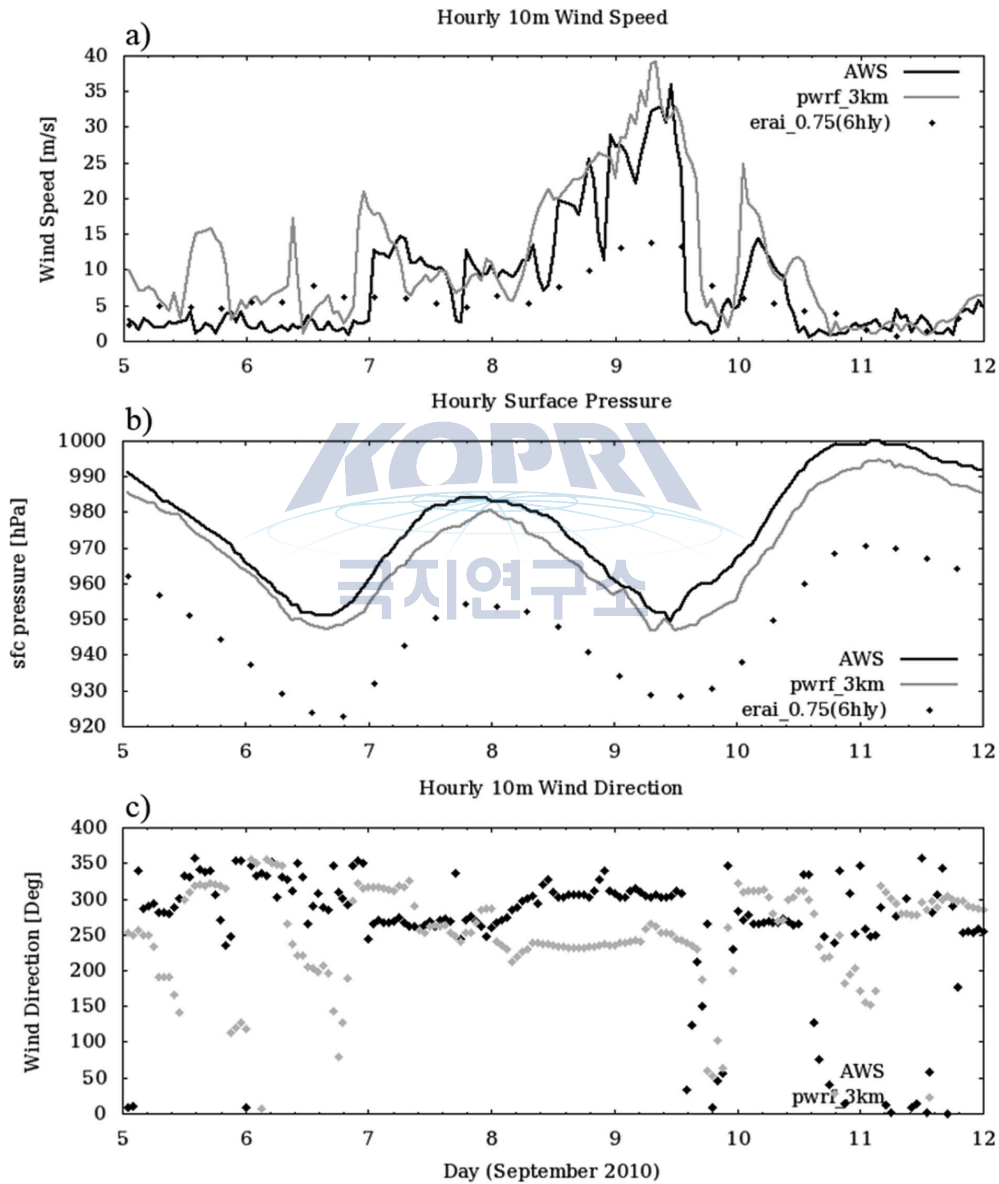


Fig. 9. Time-series of hourly (a) 10-m wind speed (m s^{-1}) and (b) surface pressure (hPa) from AWS (black line), Polar WRF (gray line), and ERA-Interim reanalysis (open diamond), and (c) wind direction from AWS (black closed diamond) and Polar WRF (gray closed diamond) for the 5~11 September 2010.

- 수치모의 결과에서는 풍속이 약한 기간에 일시적으로 과대 모의하는 경향을 보이며 전 기간에 대해 평균적으로 약 3.3 m s^{-1} 정도 관측에 비해 큰 값을 모의하였으나, 순간 최대 풍속을 기록한 9일을 전후하여 시간에 따른 풍속의 증감 경향, 최대 풍속 시점과 강도 등을 관측과 매우 유사하게 모의하였음. 하지만 재분석장에서는 41 m s^{-1} 의 10분 최대 풍속을 기록한 9일 1100 UTC 부근에서 15 m s^{-1} 전후의 풍속을 기록하며 관측과 큰 차이를 보였음. 지면 기압의 경우 수치모의 결과에서는 관측에 비해 약 5.8 hPa 정도의 음의 편차를 보였으나, 지면기압의 전반적인 증감 패턴을 잘 모의한 반면 재분석장은 AWS 관측 결과에 비해 약 30 hPa 정도 낮은 값을 보였음. 풍속, 지면기압에 대해 재분석장이 관측과 큰 차이를 보이는 원인은 상대적으로 낮은 재분석 자료의 수평해상도($\sim 80 \text{ km}$)의 영향으로 장보고 기지 주변의 복잡한 지형이 상세하게 표현되지 못하고, 이로 인해 지형에 영향을 많이 받는 지면기압 및 바람장 모의에 영향을 준 것으로 판단됨. 관측과의 비교에서 3 km 해상도의 수치모의 결과가 재분석 자료에 비해 크게 감소한 오차를 보였으며, 이를 통해 고해상도 수치모형을 이용한 역학적 다운스케일링이 성공적으로 수행되었으며, 남극기지 주변의 국지적 기상 현상을 모의 및 분석하는데 있어 고해상도 중규모 수치모델의 활용이 필수적임을 알 수 있음. 풍향의 비교에서는 관측 결과와 수치 모의 결과 모두 방위 $250\sim 350$ 도 사이의 서풍 계열이 지배적인 경향을 보였으나, 풍속이 가장 강했던 9일에 관측의 경우 북서풍 계열의 바람을 기록한 반면 수치모의에서는 250 도 안팎의 다소 남쪽으로 치우친 바람을 모의하며 차이를 보였음.
- Fig. 10은 CASE2 기간에 대해 Fig. 9와 동일한 자료를 나타낸 것임. 앞선 사례와 유사하게 재분석장은 풍속의 변화에서 관측에 비해 매우 평활화된 값을 보이며, 지면기압의 경우도 약 30 hPa 의 큰 음의 편차를 보였음. Polar WRF를 이용한 3 km 해상도 수치 모의 결과를 살펴보면 풍속은 평균 7 m s^{-1} 정도의 음의 편차를 보이며 CASE1에 비해 관측과 큰 차이를 보였으며, 기압은 전체적으로 3.8 hPa 의 음의 편차를 보였음. 관측에서 지속적으로 약한 바람을 보였던 8월 17 ~ 19일 기간에 수치모의 결과는 풍속을 과대 모의하였으며, 관측에서 일 평균 최대 풍속 값을 기록한 20일에는 최대 풍속의 모의 시점이 약 12시간 지연되어 나타났음. 또한 강풍이 지속되는 기간도 관측에 비해 상대적으로 짧게 나타나는 등 CASE1에 비해 전반적으로 낮은 모의 정확도를 보였음.

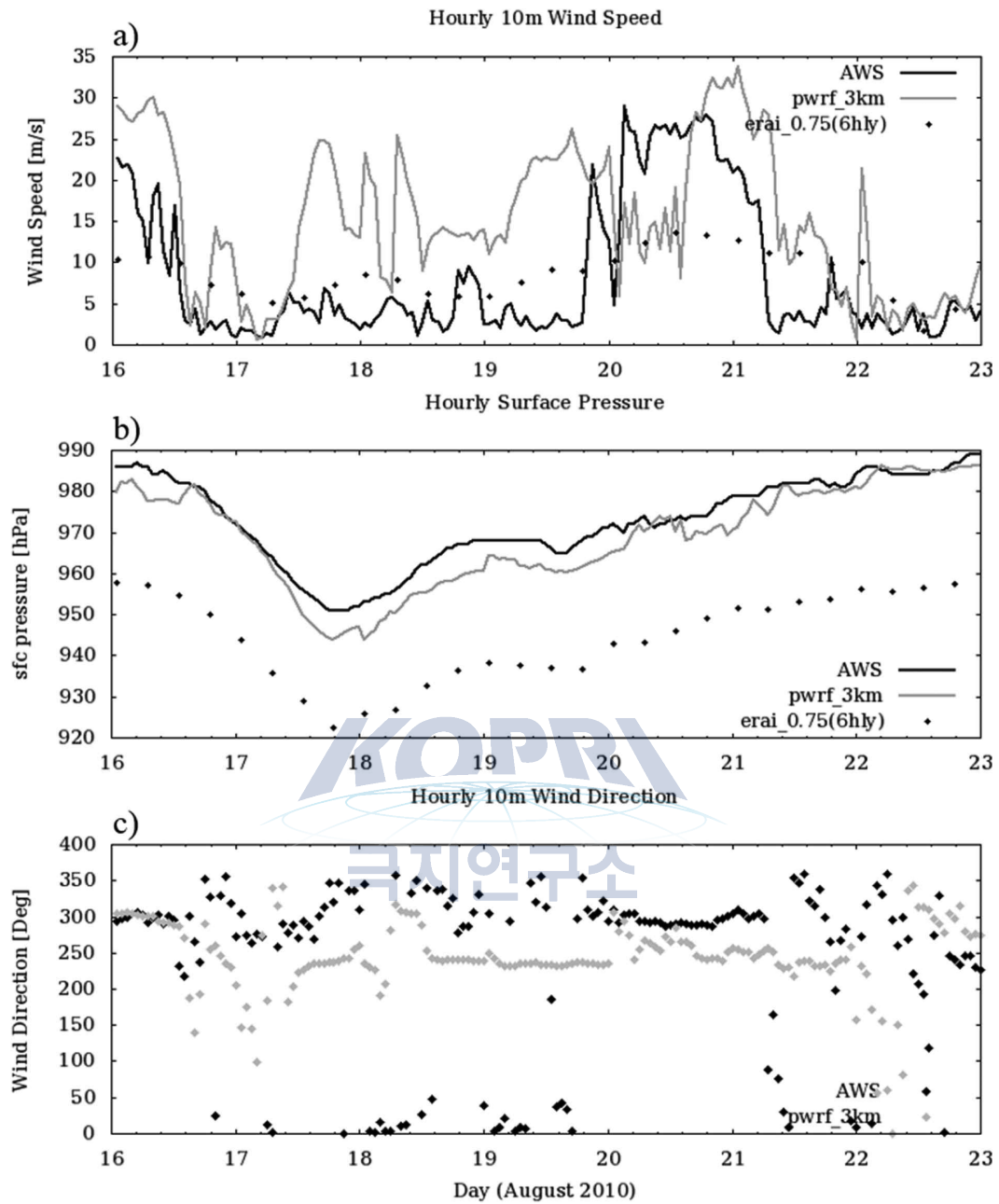


Fig. 10. Same as Fig. 9, except for the period of 16~22 August 2010.

- 풍향의 경우 CASE1과 마찬가지로 AWS 관측과 수치 모의 결과 모두 서풍 계열이 지배적이거나 관측은 방위 300도 안팎의 북 서풍 계열임에 비해 수치 모의 결과는 250도 부근의 서풍 또는 남서풍이 주로 나타났음. 지금까지의 결과 분석을 통해 CASE1의 경우 polar WRF를 이용한 역학적 다운스케일링을 통해 강풍사례를 관측과 유사하게 성공적으로 모의하였으나, CASE2의 경우 관측과 큰 차이를 보이며 낮은 강풍 모의 정확도를 보임을 알 수 있음. 앞서 살펴본 모의된 풍속의 수평 분포(Fig.

7과 8)에서 두 사례 모두 장보고 기지 주변의 강풍 대를 모의하였으나, CASE2의 경우 장보고 기지를 중심으로 남쪽으로 남서, 서풍의 강풍대가, 북쪽으로 북서, 남서풍의 강풍대가 모의되었으며, 장보고 기지는 이 두 강풍 대 사이의 상대적으로 약한 풍속을 보이는 지점에 위치하고 있음을 알 수 있음. CASE2의 풍향의 관측 시계열(Fig. 10)에서 8월 20일 강풍 기간에 북서풍의 바람이 지속된 점을 고려하면 모의된 풍속의 수평 분포에서 장보고 기지 북쪽에 위치한 높은 지형을 타고 하강하는 북서풍의 강풍대가 장보고 기지까지 확장되어 모의되지 못한 것으로 판단됨. CASE2의 경우 활강풍 사례로 주변 지형의 영향을 매우 많이 받으므로 이러한 사례의 경우 수치모델에서 사용된 지형의 정밀도에 따른 영향을 더욱 많이 받은 것으로 추정됨. 특히 장보고 기지가 위치한 해안가에서 내륙 방향으로 급격한 지형고도의 차이가 존재하며, 지형이 매우 복잡한 지역으로 실제와 모델 지형간에 큰 차이를 보임. 장보고 기지의 지형 고도 차이는 모델 격자 해상도에 따른 결과 논의에 보다 상세하게 기술되었음. 강풍모의에 성공적인 CASE1의 경우 동일한 해상도의 지형자료를 사용했으나 강풍의 원인이 활강풍과 같은 지형에 의한 영향 보다는 로스해의 해안을 따라 이동하던 저기압의 영향을 받아 발생한 사례로 수치 모의에 있어 CASE2에 비해 지형에 의한 영향을 적게 받은 것으로 판단됨. 이는 Kwon et al. (2016)에서 보였던 polar WRF를 이용하여 강한 극 저기압에 의한 영향으로 남극 세종기지에서 발생한 강풍 사례 모의에서 관측과 매우 유사한 성공적인 모의 결과와 일치함. 추가적인 오차의 원인으로는 강풍사례의 배경이 된 하층 저기압의 강도와 위치, 형태 등에 대한 수치 모의 오차를 들 수 있음.

- 수치모형의 다양한 크기의 수평격자 간격에 따른 강풍 사례 모의 결과의 차이를 살펴 보기 위해 27 km, 9 km, 3 km 해상도의 모의 결과를 분석하였음. Fig. 11과 12는 수치 모의의 수평 해상도 변화에 따른 모의 결과를 AWS 관측과 비교한 것으로 각각 CASE1, CASE2에 대하여 Fig. 9와 동일한 변수를 살펴보았음.
- CASE1의 경우, 풍속의 비교에서는 바람이 약한 시기에는 27 km 해상도 결과가 오차가 다소 적게 나타났으나 강풍이 기록된 기간에는 고해상도 결과가 관측에 가깝게 나타났으며 순간 최대 풍속은 3 km 결과에서 가장 강하게 모의되었음. 지면기압의 경우 27 km, 3 km 결과에서 각각 6.0 hPa, 5.8 hPa의 음의 편차를 보였으며 9 km 결과에서는 16.3 hPa의 큰 음의 편차를 보였음. 풍향의 경우 바람이 약한 기간에 대해 해상도에 따른 뚜렷한 차이를 보였으며, 바람이 강했던 8일과

9일에는 해상도의 변화에 따른 풍속의 큰 차이를 보이지 않았으며 모든 해상도에서 다소 남서풍 계열로 치우쳐 모의되는 경향을 보였음. Fig. 12는 CASE2에 해당되는 수치 모의 결과로 지면기압과 풍향은 CASE1의 결과와 유사한 경향을 보였음. 풍속의 경우 관측에서 일평균 최대풍속이 기록된 20일을 제외한 대부분의 구간에서 27 km 결과가 관측에 보다 가까운 값을 모의하였으며, 이로 인해 가장 성근 해상도인 27 km 모의 결과에서 평균 3 m s^{-1} 의 양의 편차를 보인 반면 9 km, 3 km 결과에서는 각각 7.3 m s^{-1} , 7.0 m s^{-1} 의 양의 편차를 보였음. 20일 기록된 강풍 모의에 있어서는 일부 구간을 제외하고 27 km 해상도 결과에 비해 고해상도인 9 km, 3 km 해상도 결과가 관측과 유사한 값을 보였음. 수치모형의 격자 간격에 따른 강풍 사례 모의 결과를 분석해 본 결과 지면기압 모의에 있어서 두 사례 모두 관측에 비해 과소 모의되는 경향을 보였으며, 특히 9 km 해상도 실험에서 가장 큰 음의 편차를 보였음. 모의된 지면기압이 관측에 비해 과소 모의된 특성을 보이는 원인을 살펴보기 위해 모델 실험에서 사용된 지형을 살펴보았음.

- 27 km, 9 km, 3 km 해상도 실험에서 각각 10분, 30초, 30초 해상도의 지형자료가 사용되었으며, 이러한 지형자료는 수치모형에 사용되기 위해 각 격자의 해상도에 맞게 내, 외삽되므로 각 해상도의 모델 격자마다 다른 지형 값을 보이며, 이러한 차이는 지형이 복잡한 지역일수록 큰 차이를 보임. 실제로 세 실험에서 사용된 장보고 기지의 AWS 관측 지점에 해당되는 격자의 고도 정보는 27 km, 9 km, 3 km 격자에서 128.2 m, 162.9 m, 62.7 m의 서로 다른 고도 값을 보임. 테라노바베이 해안가에 위치한 장보고 기지의 AWS 관측지점의 실제 고도는 10 m로 실제 모델의 고도 값과 큰 차이를 보임. 따라서 AWS 관측자료와 각 해상도의 모델 실험에서 모의된 지면기압을 동등하게 비교하기 위해 실제 지형과 모델 지형의 고도 차이에 대한 지면기압의 보정을 수행하였음. 정역학 방정식에서 밀도와 중력가속도를 상수로 가정하면 고도가 1 m 증가함에 따라 기압은 0.125 hPa 감소하게 됨. 이를 적용해 각 해상도에서 모의된 실험의 지형 고도와 관측 고도와의 차이에 대해 지면 기압의 고도 보정을 수행하였으며, Fig. 13은 CASE2에 대해 고도보정이 적용된 지면기압을 나타냄. 보정 전의 결과(Fig. 12b)에서 9 km 모의 결과가 관측과 가장 큰 차이를 보였으나, 고도 보정 후 3 km, 9 km, 27 km 순서로 관측과의 오차가 작게 나타나고 있음을 확인할 수 있음. 보정 후의 결과를 보다 상세히 살펴보면 강풍이 존재한 20일의 0000~1500 UTC의 수치모의 결과에서 지면기압이 다소 높게 모의되고 있는

것을 확인할 수 있음. 이처럼 국지적으로 기압이 높게 모의된 것은 해당 지점에서의 풍향 및 풍속의 오차와도 연관된 것으로 추정됨.

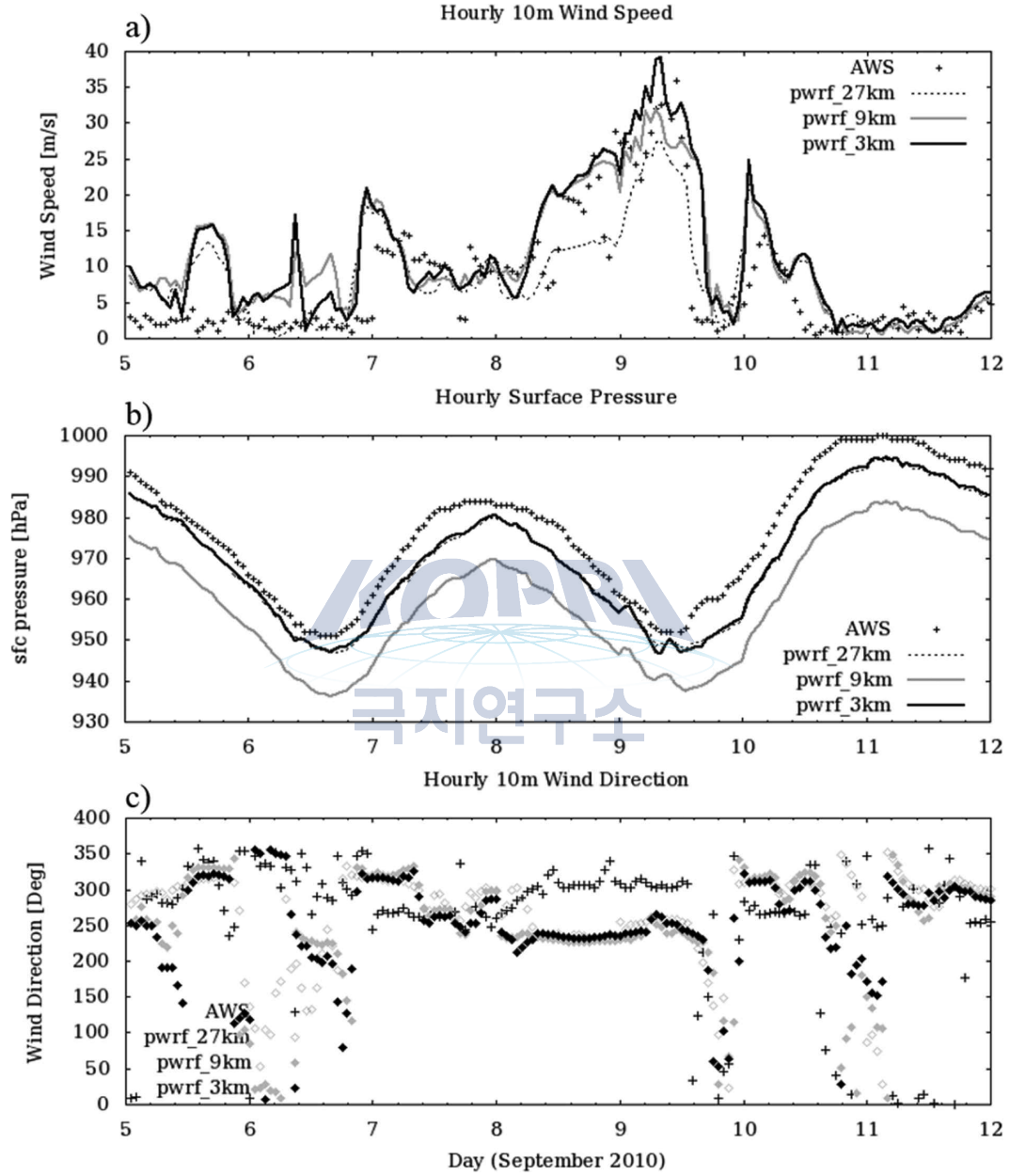


Fig. 11. Time-series of hourly (a) 10-m wind speed (m s^{-1}) and (b) surface pressure (hPa) from AWS (cross) and Polar WRF simulations with 27 km (gray dotted line), 9 km (gray solid line), and 3 km (black solid line) grids, and (c) wind direction from AWS (cross) and Polar WRF simulations with 27 km (open diamond), 9 km (gray closed diamond), 3 km (black closed diamond) grids for the period of 5~11 September 2010.

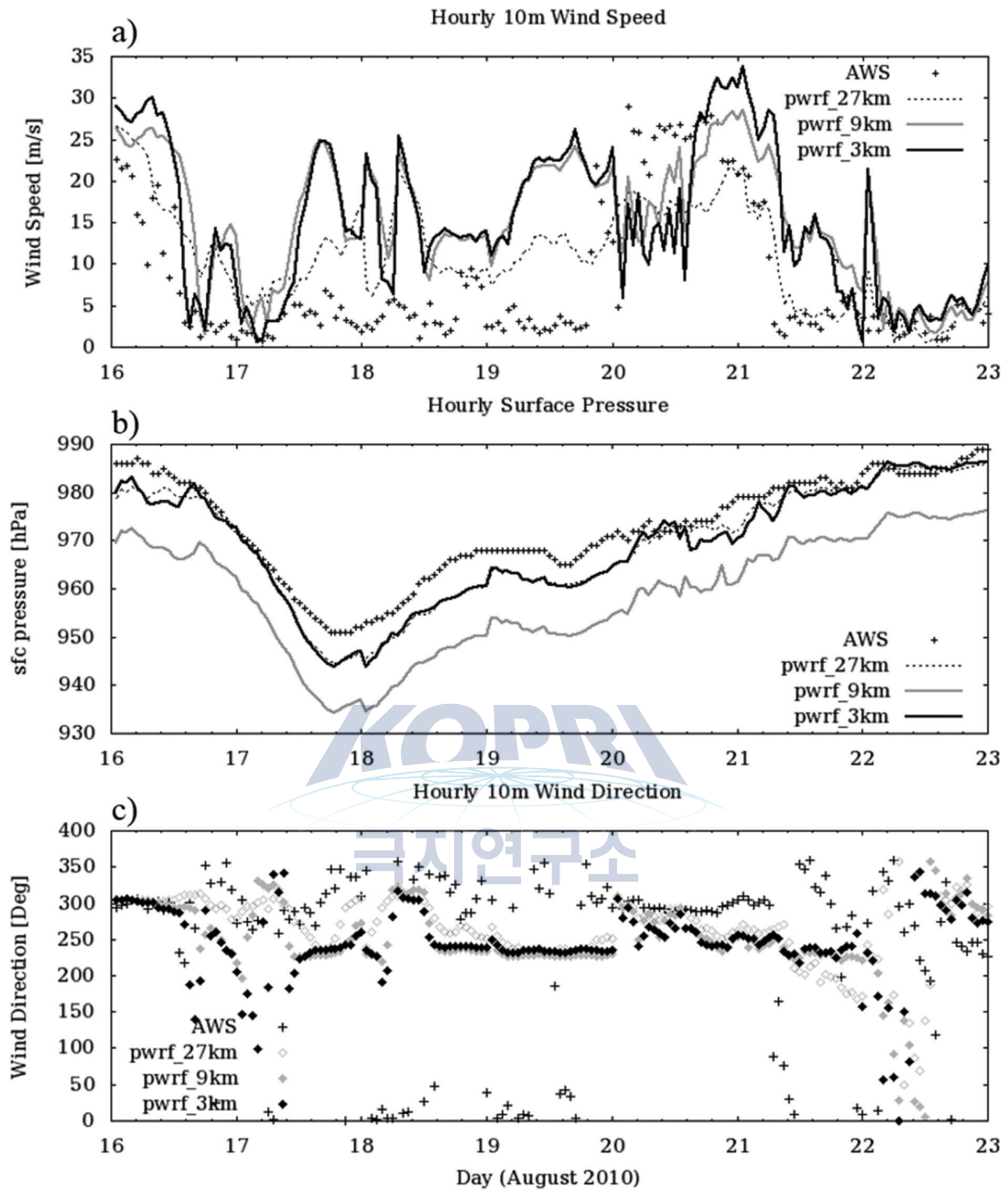


Fig. 12. Same as in Fig. 11, except for the period of 16~22 August 2010.

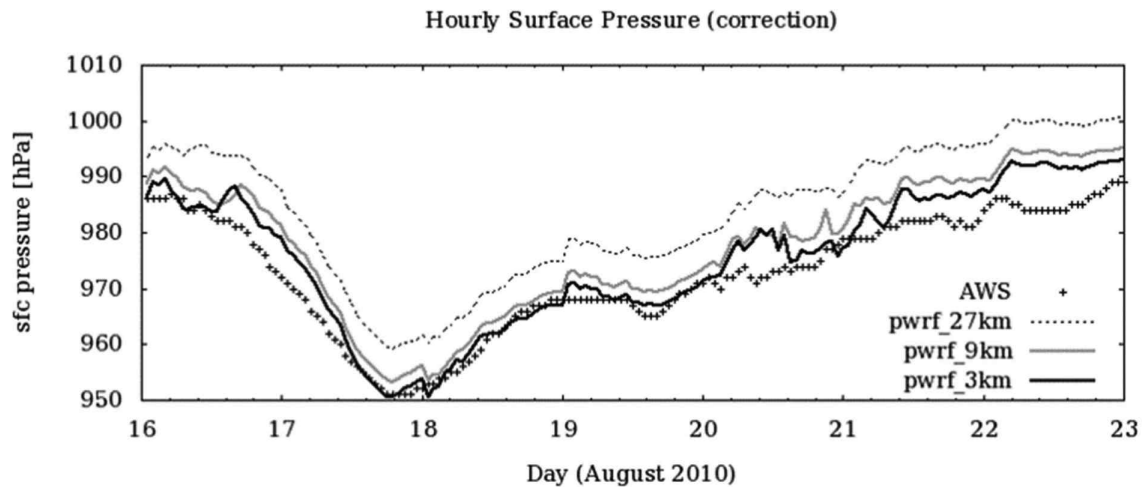


Fig. 13. Same as in Fig. 12b, except with height correction.

마. 요약 및 토의

- 본 연구에서는 장보고과학기지의 자동기상관측장비에서 관측된 풍속자료를 분석하여 관측이래 순간 최대 풍속의 최고값(41.17m/s)을 기록한 사례와 일평균 최대 풍속값(23.92 m/s)을 기록한 강풍사례를 선정하고, 이를 극지역 모의를 위해 개발된 Polar WRF 수치모형을 이용하여 모의하였음.
- 이를 통해 장보고과학기지 주변의 강풍사례의 원인을 분석하였으며, 관측자료와의 비교분석을 통해 중규모모델을 이용한 역학적 상세화기법으로 생산된 국지바람장의 검증 수행하였음.
- 관측자료와 수치모의자료 분석 결과 순간 최대 풍속의 최고 값을 보인 사례(CASE1)의 경우 로스해 부근에서 발생한 저기압의 영향으로, 일 평균 최대 풍속을 보인 사례(CASE2)의 경우 지형의 영향을 많이 받는 활강풍 사례임을 확인하였음.
- Polar WRF를 이용한 각 사례 별 3 km 해상도의 수치모의자료 분석 결과, 저기압의 영향을 많이 받은 강풍 사례(CASE1)의 경우 사례 기간에 대한 풍속, 지면 기압의 변화 경향 및 크기를 관측과 매우 유사하게 성공적으로 모의하였으나 활강풍 사례(CASE2)의 경우 풍속의 강도 및 강풍 모의 시점에 있어 CASE1에 비해 관측과 다소 큰 차이를 보이며 전반적으로 낮은 모의 정확도를 보임을 확인하였음.
- 이는 주변 지형의 영향을 많이 받는 활강풍 사례의 경우 수치모델에서 사용된 지형의 정밀도에 따라 강풍의 모의 강도 및 위치에 영향을 더 많이 받은 것으로 추정되며, 3 km 해상도의 수치모의에서 사용한 30초 지형 자료가 매우 급격한 변화와 복잡한 형

태를 가진 장보고 기지 부근의 실제 지형을 충분히 반영하지 못한 데서 기인한 것으로 판단됨.

- 이에 관해서는 향후 상세 지형을 이용한 추가적인 연구가 수반되어야 할 것으로 생각됨. 재분석자료의 경우 관측과의 비교에서 3 km 수치모의 결과에 비해 풍속의 증감 변화 폭이 매우 작고, 강한 바람의 강도를 제대로 모의하지 못하였으며, 지면기압에 모의에 있어서도 수치모의 결과에 비해 관측과 큰 차이를 보였음. 이는 재분석 자료의 상대적으로 낮은 수평해상도에 의한 영향인 것으로 판단되며, 이를 통해 강풍과 같은 지역규모 기상현상 모의에 있어 수치모형을 이용한 고해상도의 역학적 다운스케일링이 필수적임을 확인할 수 있음.
- 27 km, 9 km, 3 km 해상도의 수평격자 간격에 따른 강풍사례 모의 결과 분석을 통해 일부 구간을 제외하고 강풍 시기에 3 km 고해상도 모의 결과가 관측과 가장 유사한 값을 보이며, 실제와 모델 지형간의 고도 차에 대한 보정을 수행한 지면기압의 비교 결과에서도 고 해상도의 결과가 관측과 가장 작은 차이를 보임을 확인하였음.
- 이상의 분석결과를 통해 Polar WRF를 이용한 고해상도 중규모 수치모델링은 장보고 기지 주변의 강풍사례 모의 및 분석에 있어 관측자료와 함께 매우 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였으며, 이는 관측자료가 매우 부족한 남극대륙 주변의 극한 기상 사례연구에 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대됨. 다만, 다소 큰 오차를 보인 활강풍과 같은 주변 지형의 영향을 많이 받는 강풍 및 국지적 풍향 모의 오차를 줄이기 위해 실제지형에 가까운 고해상도 지형을 활용하고, 관측자료의 자료동화를 통한 초기장의 개선 등의 추가적인 노력이 필요할 것으로 판단됨.

3.1.2 세종기지 주변의 강풍사례 모의 연구

가. 서론

- 남극지역의 대기, 해양, 해빙, 생물 사이의 생지화학적 순환, 심해순환, 대기에 의한 에너지 수송 및 오염물질의 이송, 빙하의 증감과 같은 남극 특유의 변동성은 지구환경 변화에 있어 매우 중요한 역할을 담당함. 극지연구소는 1988년 2월 남극대륙 북쪽, 남 웨틀랜드 군도의 킹조지 섬 남쪽해안(62°13'S, 58°47'W)에 남극세종과학기지(이하 세종기지)를 개소하고, 이후 남극 주변의 해양과 대륙의 다양한 대기환경 및 생태계 변화 연구를 위한 관측과 실험을 추진해 오고 있으며, 주로 조디악(고무보트)을 활용한 주변 해역 관측과 펭귄 서식지에서 수행되는 연구 등 현장에서 활동하는 연구가 진행되고 있음. 따라서, 연구를 위한 야외 활동 시 연구원들의 안전을 위해 세종기지 주변의 정확한 기상 정보는 필수적이라 할 수 있음. 특히 세종기지의 경우 강풍(16 m s^{-1} 이상)과 눈 날림에 의한 시정 악화(400 m 이하)를 동반하는 블리자드(American Meteorological Society, 2016)가 자주 발생한다고 알려져 있음(Nam and Lee, 1991).
- 남극반도는 위치적으로 고위도 저압대에 해당하여 저기압의 이동에 따른 영향을 많이 받으며, 선행 연구에서는 세종기지에서 관측된 블리자드는 주로 그 부근을 통과하는 저기압의 영향으로 발생하고 있음을 언급하였음(Lee et al., 1990). 특히 규모가 작고 세력이 강한 극 저기압(polar low) 통과 시 강한 강풍 사례를 유발하는 것으로 알려져 있음. 극 저기압은 일반적으로 메조-베타(meso- β) 혹은 알파(α)규모(직경 $\sim 100\text{--}1000 \text{ km}$)로 중위도 지역의 종관 저기압에 비해 그 규모가 작으며, 인근 지면에 15 m s^{-1} 이상의 강한 바람을 동반하는 것으로 알려져 있음(Rasmussen and Turner, 2003; Kolstad, 2011; Zappa et al., 2014). 이러한 극 저기압은 다양한 원인에 의해 발생하는 것으로 알려져 있으며 특히, 바다와 육지(또는 빙하) 위 대기의 큰 온도 차에 의한 경압 불안정으로 인해 극지역의 해빙과 해양의 경계에서 자주 발생하는 것으로 알려져 있음(Reed and Duncan, 1987).
- 극 저기압은 세종기지가 위치한 서남극에서 자주 발생하며(Turner et al., 1993), 강력한 강풍을 동반한 블리자드 발생의 주요 원인으로 지목되고 있음. 하지만 세종기지 주변에 자주 발생하는 블리자드를 포함한 강풍 사례의 중규모 및 종관규모 특성에 극 저기압의 영향이 중요함에도 불구하고 이 지역의 극 저기압에 대한 기후학적 연구 및 수치 모델링 연구는 찾아보기 어려움(Deb et al., 2016).

- 이는 남극에 대한 기상/기후 연구가 대부분 두껍고 큰 빙하가 분포해 있는 동남극 지역에 집중되어 있으며, 세종기지가 위치한 서남극에는 아직 종합적인 연구 인프라와 연구 수행 인력이 부족한데 근본 원인이 있음. 또한 규모가 작은 극 저기압의 경우 지역규모 모델에 비해 상대적으로 낮은 해상도를 갖는 재분석 자료를 이용한 분석에는 한계가 있음.
- Zappa et al. (2014)는 유럽중기예보센터(European Center for Mediumrange Weather Forecast)의 ERA interim 재분석 자료(수평격자간격~80 km)와 현업예보자료(수평격자간격~16-25 km)를 이용하여 극 저기압을 탐지하고, 관측과 비교하여 해상도가 높은 현업예보자료를 사용한 탐지 결과가 관측과 더욱 유사함을 보였음.
- 본 연구에서는 극지역 모의를 위해 개발된 Polar WRF (Weather and Research Forecasting) 모델을 이용하여 남극 세종과학기지의 강풍 사례를 모의하였으며, 이를 통해 1) 극지역에 특화된 중규모 수치모델인 Polar WRF의 극 저기압 모의성능을 평가하고 2) 극저기압 통과 사례의 상세 분석을 통해 세종기지에서 관측된 강풍의 주요 원인이 극 저기압이 될 수 있음을 입증하고 3) 재분석 자료와 중규모 모델을 이용한 역학적 상세화(downscaling) 기법을 통해 생산된 국지 바람장과 기지의 자동기상관측 장비의 관측의 상호 검증(cross validation)을 수행하였음.
- 본 연구 사용된 Polar WRF 모형(version 3.7)은 중규모 고해상도 대기현상을 연구하고 예측하기 위해 개발된 WRF 모형을 기반으로 극지역 모의성능 향상을 위해 개선된 수치모형으로(Skamarock et al., 2005), 해빙과 영구 동토층 상에서 Noah Land-surface 모형(Noah LSM)이 최적의 지표면 에너지 균형과 열 전달이 모의될 수 있도록 개선되었음(Bromwich et al., 2009). 또한 다양한 해빙과 눈 두께의 지표 성질을 보다 정확하게 표현하기 위해 눈과 해빙을 4개의 층으로 구성하고 농도를 수치화하여 격자마다 0에서 1까지의 비율로 표준화시켜 선택적으로 적용 가능하며 두께도 세분화 되어 있음(Bromwich et al., 2009).

나. 세종기지 풍속자료의 기후학적 특성

- 다음 장에서 자세히 기술할 세종기지 강풍사례가 기후학적 관점에서 볼 때 극한 사례로 분류될 수 있는지를 확인하기 위하여 수치모의 실험에 앞서 세종기지에 설치, 운영되고 있는 자동기상장치에서 관측된 21년 기간(1994~2013년)의 풍속 자료를 분석하였음. 남극 세종과학기지에서의 기상관측은 지난 1988년 2월 17일부터 자동기상관측

시스템(Automatic Meteorological Observation System; AMOS)을 이용하여 수행되어 오고 있음. 기상관측시스템은 세종기지 근처(남위 62도 13분 23.68초, 서경 58도 47분 21.31초; Fig. 14 참조) 해변 가까이에 위치하고 있으며 지상 10 m 높이에 풍향/풍속계를 비롯하여 약 2 m 높이에 온/습도계, 이슬점온도계, 약 1.5 m 높이에 강수량계, 기압계와 수평면 전천일사량계 등이 설치되어 있음. 각 센서로부터 10초 또는 1초 간격으로 측정된 자료는 10분 평균되어 자료집록기에 저장됨.

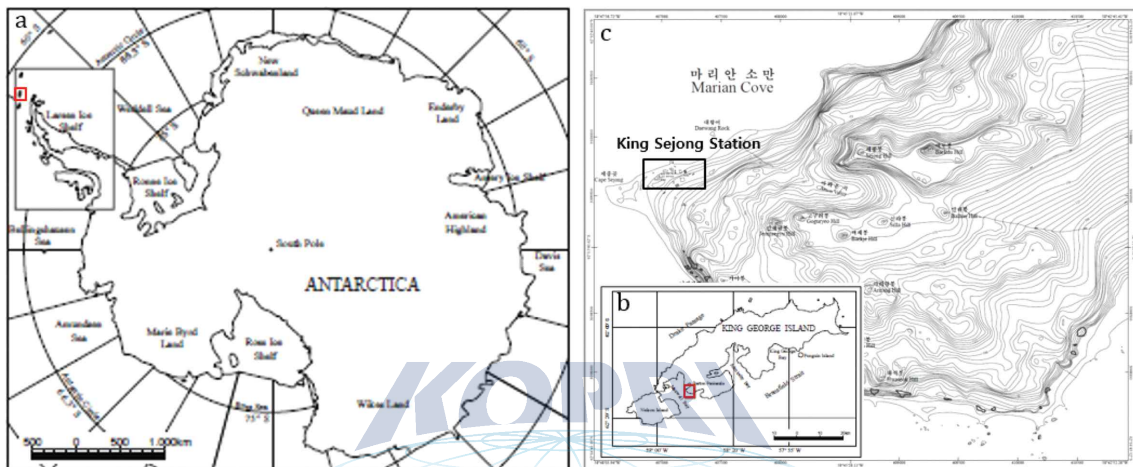


Fig. 14. Location of King Sejong station in King George Island. The inner red boxes in a) and b) indicate King George Island (further presented in b) and King Sejong station (further presented in c), respectively.

- 이후 2003년 12월부터 결측 방지를 위해 기존 기상관측시스템(AMOS-1이라 명함)과 약 5 m 거리에 백업용 관측시스템(AMOS-2)을 설치하여 운영하기 시작하였음. 또한 2008년에는 세종기지 본관동 증축에 따라 기상관측시스템에서 관측되는 풍속과 풍향에 영향을 줄수 있는 가능성을 고려하여 2010년 12월 기존의 자동기상관측 시스템에서 남서 방향으로 약 200 m 가량 떨어진 위치에 새로운 기상관측시스템(AMOS-3)이 설치되어 현재까지 병행 운영되고 있음. 분석을 위해 AMOS-1을 기준으로 결측된 기간은 AMOS-2로 보완하여 1994년부터 2013년까지의 10분 간격의 자료를 구성하고, 이를 바탕으로 일평균을 구한후 20년의 기후값을 계산하였음. AMOS-3는 관측 지점이 상이하고 관측 기간이 짧아 본 연구에서 사용하지 않았음.
- 1994~2013년 기간의 일 평균 풍속의 기후 평균값(Fig. 15)을 살펴보면 남반구 늦겨울과 봄철에 해당하는 8~10월에 10 m s⁻¹가 넘는 일 평균 풍속이 관측되며, 남반구 여름철에는 풍속이 다소 감소하여 6~8 m s⁻¹ 범위의 풍속이 분포하고 있음을 알 수

있음. 또한 계절에 따른 뚜렷한 변화가 나타나지 않는 특징을 보이는데, 이는 세종기지가 남극 최북단의 고위도 저압대에 위치한 킹 조지섬에 위치하여 4계절 내내 빈번한 폭우 및 구름의 영향을 많이 받고 있어 일 평균 풍속의 계절성이 약화된 것으로 판단됨.

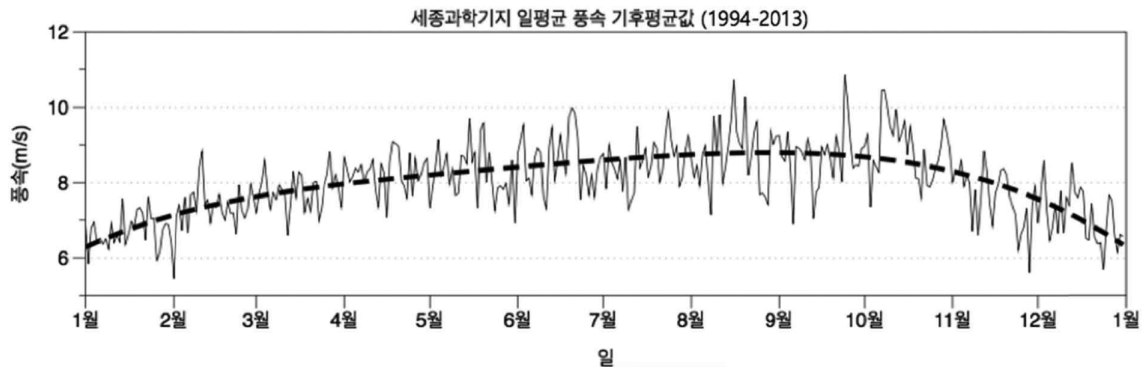


Fig. 15. Daily climatology of wind speed at King Sejong station for 1994~2013. Dashed line represents 5th degree polynomial fitting.

- 일 평균 풍속의 풍속 범위에 따른 관측빈도수를 살펴보면(Fig. 16), 일 평균 풍속의 기후 평균값에서 나타나지 않은 강한 풍속이 나타남을 확인 할 수 있음. 일 평균 풍속의 기후값이 약 11 m s^{-1} 를 넘지 못하는데 반해, Fig. 16에서 약 3%에 해당하는 구간에서 14 m s^{-1} 를 초과하는 강풍이 존재하며, 순간 최대풍속의 경우 전체의 4% 미만의 구간에서 30 m s^{-1} 를 넘는 강한 풍속이 실측되고 있음을 확인할 수 있음.
- 이러한 강풍의 발생빈도는 전체의 4% 미만으로, 남극대륙의 지형 및 기후학적 특성으로 인해 발생하는 활강류와 같은 상대적으로 긴 시간 규모의 현상이라기 보다는 세종과학기지의 지리적 특성에서 기인한 기상학적 요인에 의해 단기간에 발생하는 현상으로 판단됨. 본 연구에서 모델연구를 위해 선정한 사례는 시간 평균 풍속이 21 m s^{-1} , 순간 최대풍속이 41 m s^{-1} 가 기록된 사례로, 풍속 범위에 따른 관측빈도수 히스토그램에서 1% 미만에 해당하는 사례임.

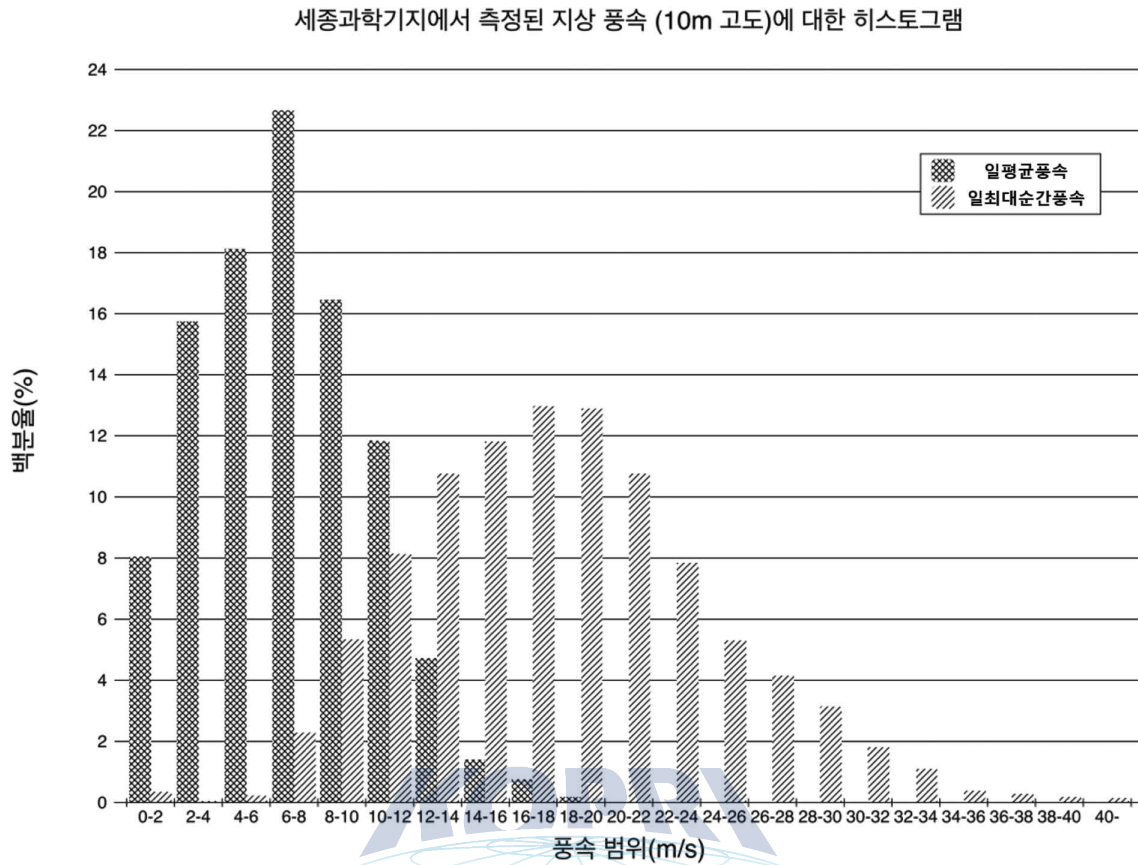


Fig. 16 Frequency distribution of daily averaged 10 m wind speed and daily maximum instantaneous 10 m wind speed for the period of 2005~2013.

다. 사례 및 종관적 분석

- 중규모 모델을 이용한 세종기지 주변 강풍 사례 수치모의를 위해 2013년 1월 7일 극저기압 통과에 의해 발생한 사례를 선정하였음. Fig. 4는 선정한 사례 기간(2013년 1월 5~10일)의 세종기지 AMOS 장비에서 관측된 시간 평균 풍속과 최대풍속(Fig. 17a), 지면 기압(Fig. 17b)의 시계열을 나타냄. 시간 평균 풍속값을 살펴보면 1월 5일에서 6일에 걸쳐 약 10 m s^{-1} 의 풍속을 보이다가 7일 오전 0800 UTC부터 20 m s^{-1} 부근 또는 이를 상회하는 강한 풍속 값을 보임을 알 수 있음. 이 강풍은 1월 7일 1800 UTC까지 유지되며 이 기간에 약 40 m s^{-1} 이 넘는 최대 순간 풍속 값을 보인 후 점차 감소하는 경향을 보임. 이 최대 순간 풍속 값은 Fig. 16의 9년(2005~2013년) 기간의 자료를 이용하여 최대 순간풍속 범위에 대한 발생 빈도수를 살펴본 분포도에서 약 1% 미만의 매우 강한 값을 확인할 수 있음. 동일한 기간에 지면 기압 시계열을 살펴보면 1월 5일 약 993 hPa의 값을 보이던 관측 값은 시간이 지남에 따라 감

소하여 세종기지에 강풍이 관측되었던 1월 7일 0600 UTC에 약 960 hPa의 최저 값을 보임. 지상 기압의 최저치가 관측된 시간 대가 약 40 m s^{-1} 이상의 시간 최대 풍속 값이 관측된 시간대와 일치함을 확인할 수 있으며, 이를 통해 세종기지에서 관측된 강풍이 주변을 통과하는 저기압의 영향을 받았음을 추측할 수 있음. 이 기간의 세종기지 주변을 통과한 저기압과 주변의 종관 기상장을 살펴보기 위해 유럽중기예보센터에서 제공하는 ERAInterim 재분석 자료(수평격자간격 $\sim 80 \text{ km}$)의 해면 기압(mean sea-level pressure)을 살펴보았음.

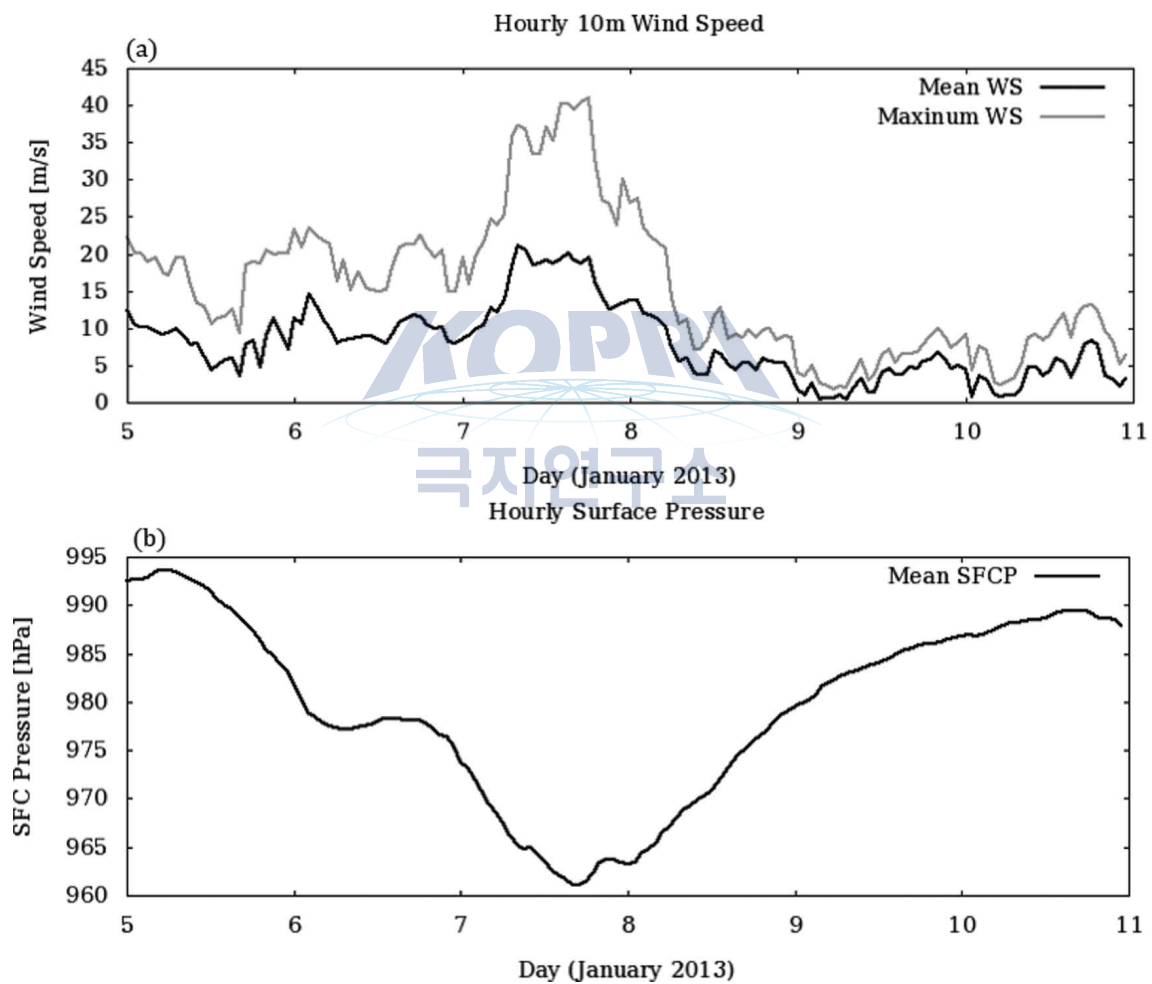


Fig. 17. Time series of a) hourly averaged 10m wind speed (m s^{-1} ; black line) and maximum wind speed (gray line), and b) hourly averaged surface pressure (hPa) at AMOS station during 5~10 January 2013.

- Fig. 18은 1월 5일부터 8일 기간 동안 1800 UTC의 해면 기압의 분포를 나타냄. 1월 5일 칠레 대륙 남단에서 발생한 극 저기압이 시간이 지남에 따라 세력이 강해지며 남동진하여 7일 세종기지 주변에 머물러 있는 것을 확인할 수 있으며, 이 시기 세종기지 주변의 등압선이 조밀하게 분포되어 있음을 볼 수 있음. 이로 인해 7일 세종기지 에서 관측된 강풍 유발에 영향을 준 것으로 추측됨. 극 저기압은 8일 에도 세종기지 주변에 위치해 있으나 7일에 비해 세력이 약해졌으며, 기압경도가 큰 지역 또한 동쪽으로 이동하여 풍속이 크게 줄어든 세종기지 AMOS 관측과 일치함을 알 수 있음. 8일 1800 UTC 이후에는 극저기압의 형태가 사라지며 동쪽으로 많이 이동한 것을 볼 수 있음.

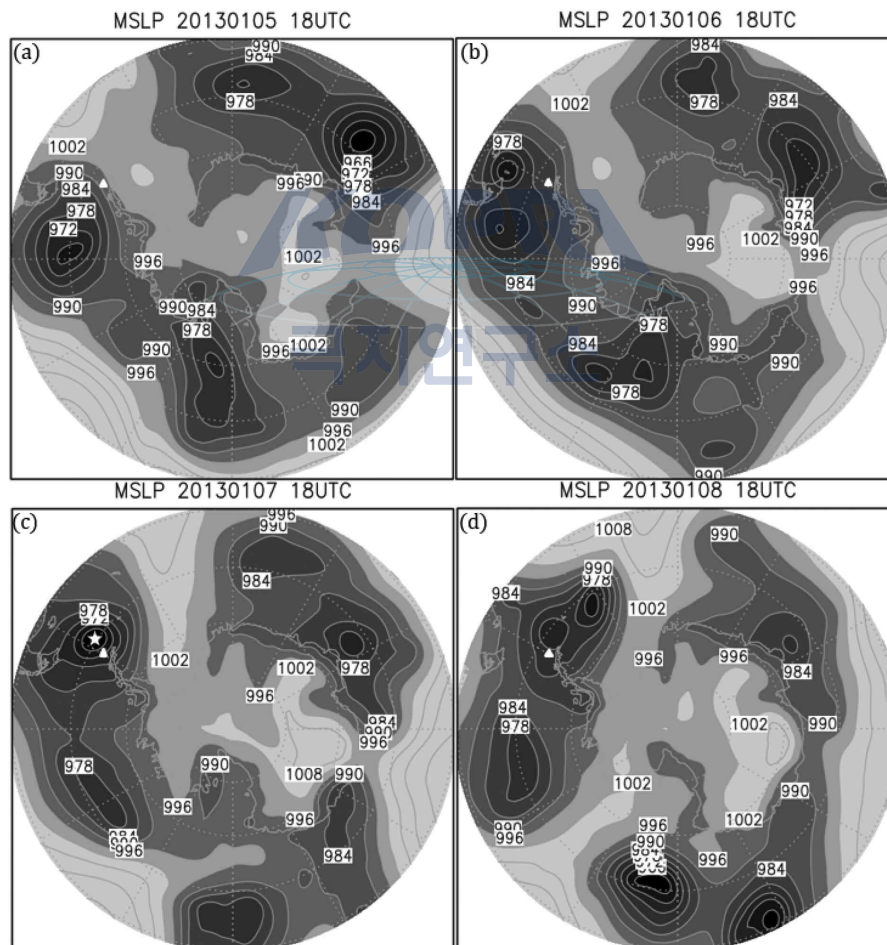


Fig. 18. Sea-level pressure at 1800 UTC a) 5, b) 6, c) 7, and d) 8 January 2013 from ERA-Interim reanalysis. Countour interval is 6 hPa. White star and triangle indicate center of the polar low and AMOS station at King Sejong station, respectively.

라. 실험 설계 및 모델 수행

- 모델 수행을 위해 남극세종기지가 위치한 남극 반도 북쪽의 킹조지 섬을 중심으로 각각 27, 9, 3 km의 격자 간격을 갖는 3개의 실험 영역을 구성하였음(Fig. 19). 3개의 모델 수행 영역은 측면경계에서 기상변수의 정보를 서로 전달하는 양방향 둥지체계(two-way nesting)로 구성하였으며, 각 실험영역의 연직 층 수는 44층으로, 모형 상한은 10 hPa로 설정하였음. 모델의 초기 및 경계 자료로 중기유럽예보센터의 ERA Interim (수평해상도~0.75o) 자료를 사용하였음.

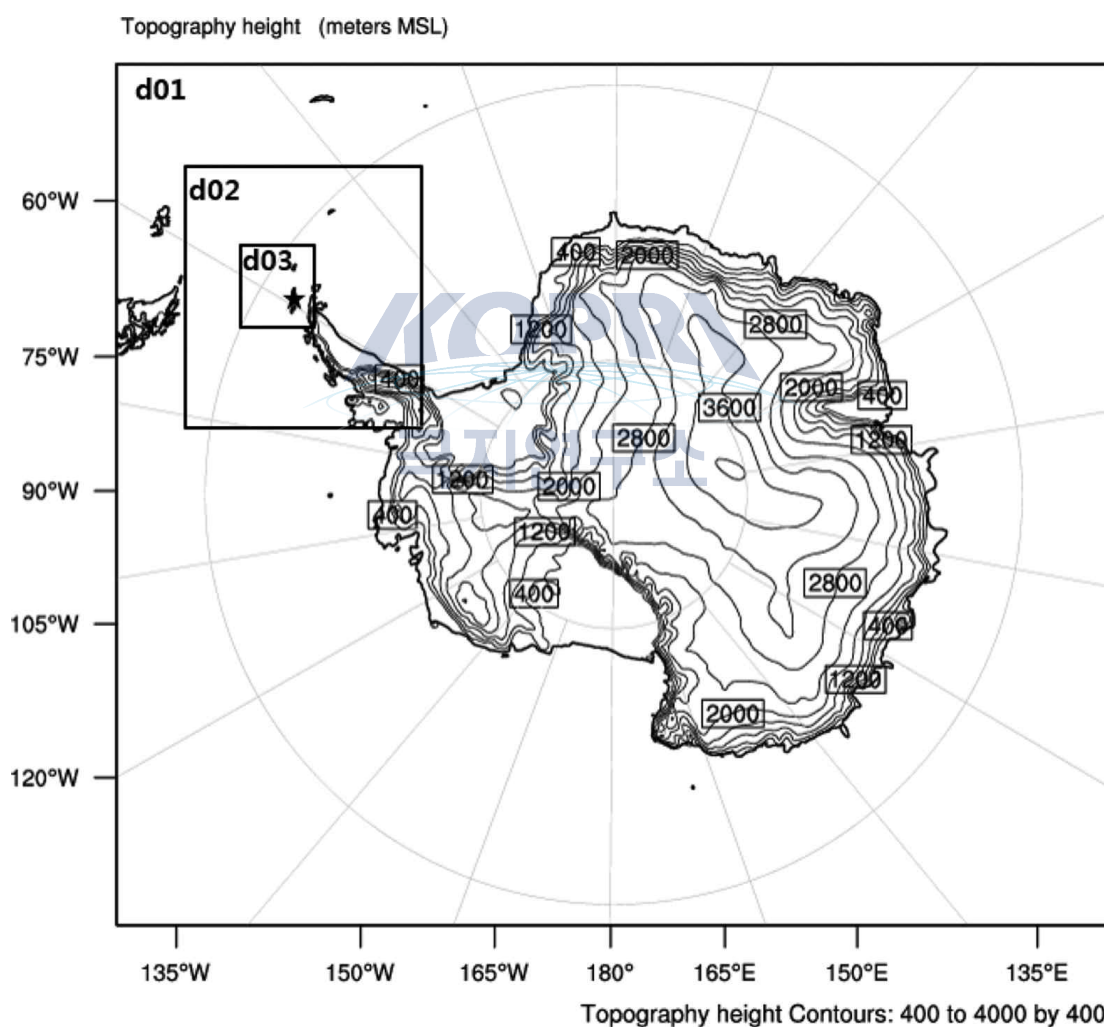


Fig. 19. Model domain with 27 km grid (d01) and terrain heights (contour). The inner boxes represent 9 km (d02) and 3 km (d03) domains, respectively.

○ 본 연구에 사용된 시간 적분 방안 및 물리과정은 Polar WRF를 이용하여 남극 지역에 대한 기상예보 및 성능검증 수행 연구를 기술한 Bromwich et al. (2013)을 참조하여 설계하였음. 선정된 사례 기간(2013년 1월 5일 0000 UTC~11일 0000 UTC)의 수치모의실험을 위해 매일 0000 UTC에 모델을 초기화하여 48시간 모델 적분을 수행하였으며, 스핀업(spin-up) 시간을 고려하여 초기 24시간은 제외하고 나머지 24시간 예측 자료만을 분석에 활용하였음. 실험에서 사용된 물리과정은 다음과 같음. 구름 물리과정은 WSM5 (WRF Single Moment 5-Class cloud microphysics scheme) (Hong et al., 2003) 방안을, 지표면 모형(Land surface model; LSM)은 극지역에 맞게 수정된 Noah LSM (Chen et al., 1996)을 사용하였으며, 복사 모수화 방안으로는 RRTMG 방안(Iacono et al., 2008)을 장파복사 및 단파복사에 동일하게 선택하였음. 행성경계층 모수화 방법은 Mellor-Yamada-Janjic TKE(Janjic, 1994) 방안을, 지표면 물리방안(Surface layer scheme)으로는 Monin-Obukhov (Monin and Obukhov, 1954) 방안을 적용하였음. 아격자 규모의 적운에 의한 강수 계산을 위한 적운대류 모수화 과정은 Grell-Devenyi ensemble (Grell and Devenyi, 2002) 방안을 27 km 격자에만 적용하였으며, 9 km와 3 km 격자에는 적운 대류 모수화 과정을 사용하지 않도록 설정하였음. 모델 구성 및 물리 모수화 방안에 대한 상세한 정보는 Table. 3과 4에 각각 요약하여 기술하였음.

[Table. 5] Summary of model configuration(2)

	Domain 1	Domain 2	Domain 3
Horizontal grid	281 × 242	202 × 220	187 × 205
Resoution	27km	9km	3km
Vertical layers	44 Layers (model top: 10 hPa)		
Geog data resolution	10 m'	30 s'	30 s'
Initial, lateral boundary condition	ERA-Interim (6-hour intervals with a spatial resolution of 0.75o× 0.75o)		
Time period	2013.01.05. 00 UTC~11 00 UTC		
Integration	48 h forecast form global analysis (first 24 h used for model spin up)		
Base state temperature	273.16 K		
Relaxation zone	4 grid point (Default)		

[Table. 6] Summary of parameterization schemes used for the simulation

	Domain 1	Domain 2	Domain 3
Microphysics	WRF Single-Moment 5-class		
Longwave rad.	RRTMG scheme		
Shortwave rad.	RRTMG Shortwave		
Land surface	Noah Land Surface Model		
Surface layer	Monin-Obukhov		
PBL	Mellor Yamada-Janjic TKE		
Cumulus param.	Grell-Devenyi ensemble	×	×

마. 실험결과

- 먼저 27 km 격자 실험의 모의결과를 살펴보았음. Fig. 20은 최대 풍속이 관측된 1월 7일의 6시간 간격의 해면 기압을 나타냄. 1월 7일 0000 UTC에 칠레 남단 동쪽 부근에 뚜렷하게 존재하는 저기압을 볼 수 있으며, 저기압 중심은 시간이 지남에 따라 세력이 강해지며 동남쪽으로 이동하는 모습을 볼 수 있음. 사례기간 중 20 m s⁻¹ 이상의 강한 시간 평균 풍속이 관측된 1월 7일 0600 UTC~1800 UTC 기간에는 저기압 중심 강도가 더욱 강해지며, 세종기지가 위치한 남극 반도 끝 킹 조지섬 부근과 더욱 근접하게 위치해 있음을 볼 수 있음. 이 시기 세종과학 기지가 위치한 킹 조지섬 주변에 더욱 조밀해진 등압선 분포를 볼 수 있으며, 이러한 강해진 주변의 기압경도에 의해 세종 기지 주변에 강풍이 유발된 것으로 보임. 이 시기 최저 중심 기압은 1200 UTC에 약 955 hPa을 보임. 27 km 격자 규모에서 모의한 세종기지 주변 저기압 이동 및 발달 경향은 앞서 살펴본 지상관측 풍속 및 지면기압 변화 경향의 종관적 특성을 잘 반영함을 알 수 있음.

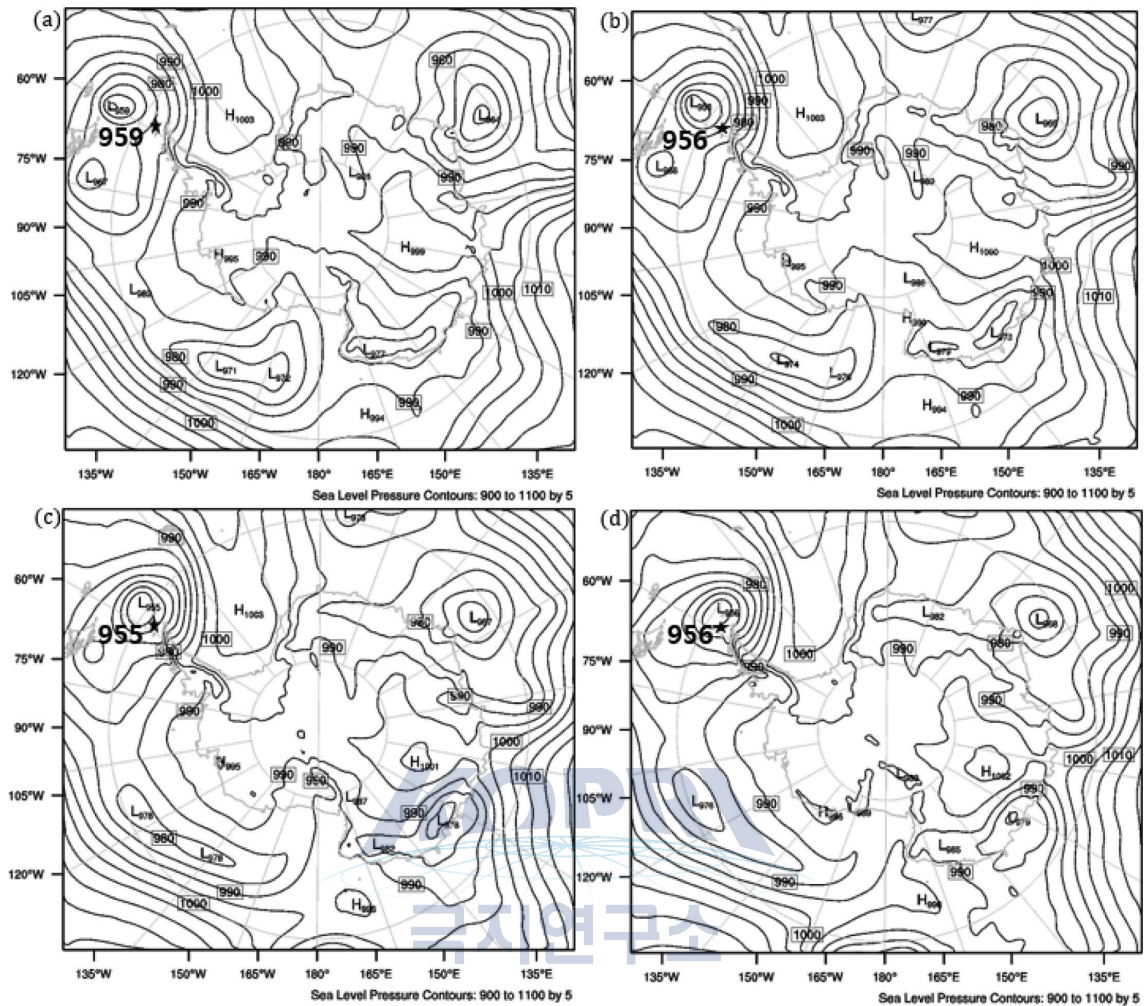


Fig. 20. Sea-level pressure at a) 0000, b) 0600, c) 1200, and d) 1800 UTC 07 January 2013 in domain 1 (27 km resolution) from Polar WRF simulation. Countour interval is 10 hPa.

○ 세종기지 주변의 상세 바람 장 및 기압계 변화 모의 성능을 살펴보기 위해 3 km 격자 규모 실험 결과를 살펴보았음. Fig. 21은 최대 강풍이 관측된 1월 7일 3 km 해상도의 모델에서 모의한 6시간 간격의 바람 장과 해면 기압을 나타냄. 1월 7일 0000 UTC에 극 저기압 가장자리가 세종기지가 위치한 킹 조지섬에 걸쳐 있는 것을 확인할 수 있으며, 세종기지 주변이 남동풍의 영향을 받고 있음을 알 수 있음. 시간이 지남에 따라 극 저기압이 발달하며 남동진하여 세종기지 주변의 기압이 낮아지고 주변의 풍속이 증가함을 볼 수 있음. 0600 UTC에는 세종기지 주변에 약 970 hPa의 등압선이 위치하며, 조밀해진 등압선 분포를 보이며, 남동풍보다 남풍의 영향이 강해졌음을 알 수 있음. 이러한 경향은 1200 UTC에 더욱 강해지며 관측에서 약 20 m s^{-1} 의

시간 평균 풍속 값을 보였던 1800 UTC까지 지속됨을 알 수 있음. 1200 UTC에는 세종기지가 위치한 킹 조지 섬 주변에 964 hPa의 등압선에 걸쳐 있으며, 약 20 m s^{-1} 의 강한 풍속 대를 보임. 관측에서 41 m s^{-1} 의 최대 풍속이 관측된 1800 UTC에는 세종기지 주변 기압이 1200 UTC 비해 조금 더 낮아지며, 약 20 m s^{-1} 의 강한 풍속을 보이던 영역이 감소했음을 알 수 있음. 이후 시간에 대한 27 km, 3 km 격자 규모 실험의 바람 장 및 지면 기압 모의 결과를 살펴보면(그림은 제시하지 않았음) 7일 1800 UTC 이후 저기압의 세력이 약해지며 남동쪽으로 이동하여 9일 0000 UTC에는 세종기지 주변에서 떨어진 것을 볼 수 있음. 이러한 27 km, 3 km 격자 규모의 모델 결과 분석을 통해 1월 6일 1200 UTC 칠레 남단에서 발생한 저기압이 극 저기압 형태로 빠르게 발달하며 세종기지가 위치한 킹 조지섬 부근으로 이동하여, 1월 7일 강한 세력을 유지하며 그 주변에 머물면서 사례기간에 관측된 강풍을 유발한 것임을 확인하였음.

- 1월 6일 칠레 남단에서 발생하여 극 저기압으로 발달한 저기압은 동진하던 중관규모의 저기압계가 칠레 남단을 통과 하던 중 칠레 반도의 서편에 남북으로 길게 자리잡은 안데스 산맥과 부딪치며 산맥 풍하측에 발생한 것으로 추정됨. 정확한 발생 원인은 향후 추가 연구가 필요할 것으로 판단됨.
- 관측자료를 이용한 모델 모의성능 검증을 위해 관측에서 제공된 10분 평균 풍속 값을 시간 평균 자료로 처리하였으며, 10분 평균 풍속 자료 중 최대 값을 시간 최대 풍속 값으로 처리하여 1시간 간격의 모델 결과와 비교, 분석하였음. 재분석 자료와의 차이를 살펴보기 위해 6시간 간격의 재분석 자료를 사용하였음.

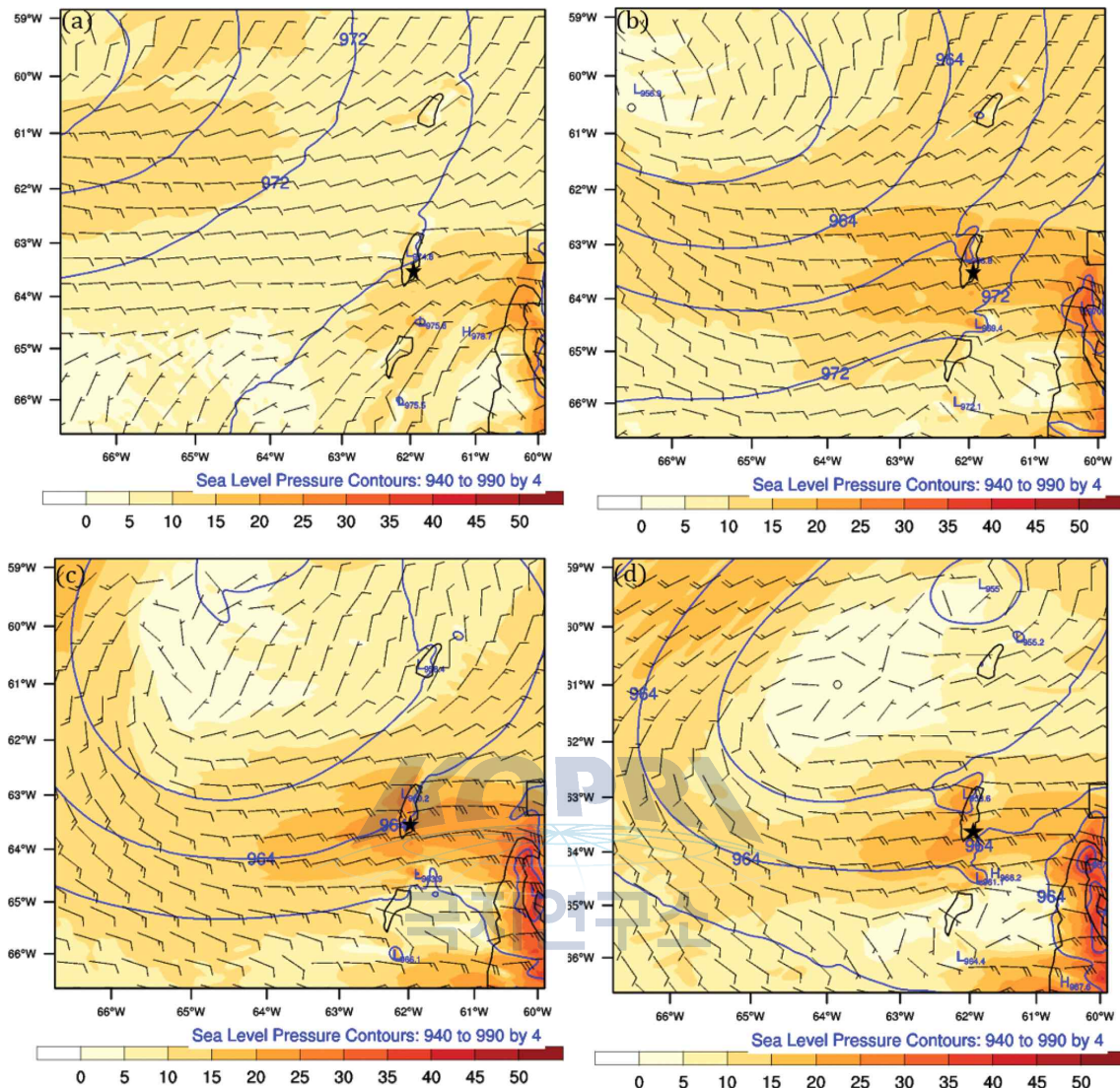


Fig. 21. Sea-level pressure (contour) and wind (bar) at a) 0000, b) 0600, c) 1200, and d) 1800 UTC 7 January 2013 from Polar WRF simulation with 3 km grid resolution. Countour interval is 4 hPa. Shading represents wind speed (m s^{-1}).

○ Fig. 22는 사례 기간 동안 세종과학기지에서 관측된 풍속(Fig. 22a)과 지면 기압(Fig. 22b), 이에 해당하는 3km 격자 실험의 모델 모의결과와 재분석 자료의 시계열을 나타냄. 사례기간 동안 세 자료의 시간에 따른 풍속의 변화를 살펴보면 대체로 유사한 풍속의 증감 경향을 보임. 하지만 모델의 모의 결과가 재분석자료에 비해 관측과 더 유사한 풍속 변동성을 나타냄. 특히 사례기간 중 핵심 모의 대상인 가장 강한 풍속이 관측된 1월 7일 0600 UTC~1800 UTC 기간의 시간 평균 풍속은 관측된 시간 평균 풍속의 약 91%를 모의함으로써 3 km 격자 규모의 Polar WRF 모델이 관측된 강풍을 성공적으로 모의했음을 확인할 수 있음. 동일한 기간 중 최대 순간 풍속(약 40 m s^{-1})

-1) 이 관측된 7일 1800 UTC에 관측된 최저 지면기압을 모델 모의결과와 비교해보면 관측 값(961.12 hPa)에 비해 약 2.2 hPa 높은 값을 보이며 관측과 매우 유사함을 알 수 있음. 그러나, 7일 1800 UTC~8일 0000 UTC 사이에 관측된 풍속 모의에 있어서는 시간에 따른 풍속변화 경향은 관측과 매우 유사하나, 8일 0000 UTC에 모델에서 모의된 풍속 증가가 관측에 비해 약 6 ms^{-1} 크게 모의되어 이후 1200 UTC까지 감소하는 풍속값이 관측에 비해 큰 값을 보임. 관측과 6시간 간격의 재분석 자료의 시계열을 비교해 보면 시간에 따른 풍속의 증감 경향은 유사하나 최대 강풍 크기에 있어서 관측 풍속의 약 45%를 보이며 모델 모의 결과에 비해 약한 값을 보임.

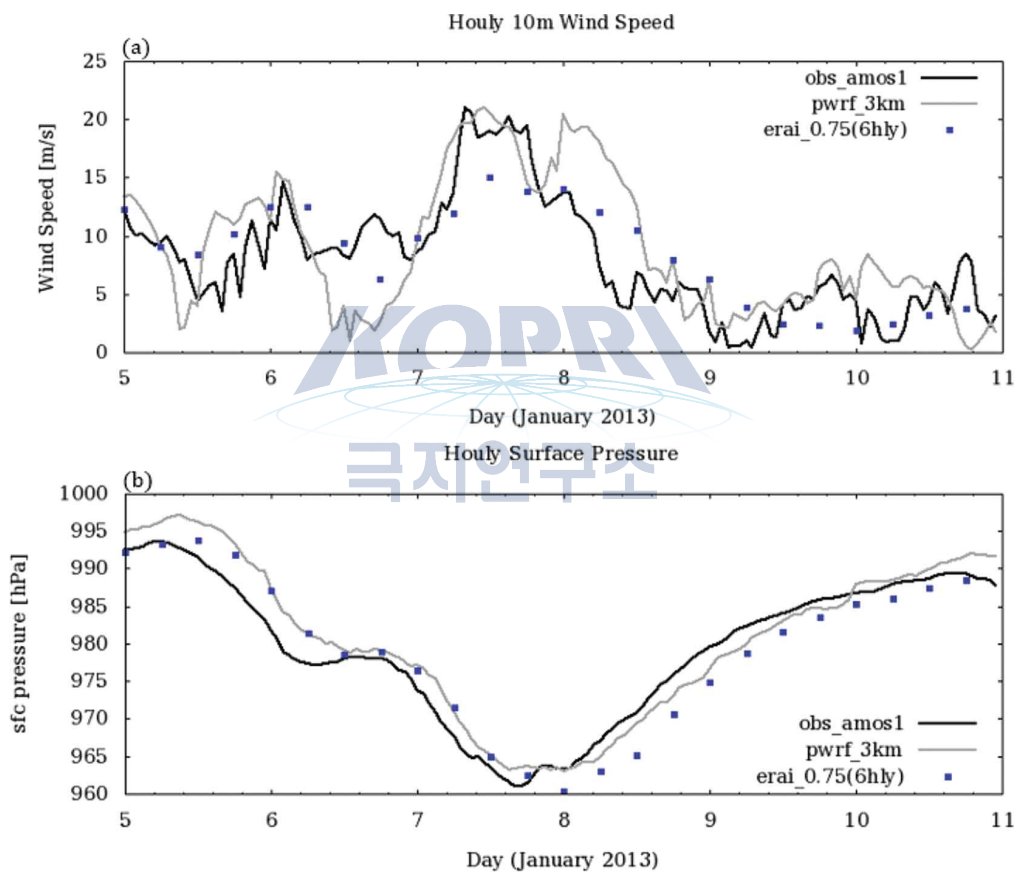


Fig. 22. Time-series of hourly a) 10 m wind speed (m s^{-1}) and b) surface pressure (hPa) from AMOS (black), polar WRF (gray), and ERA-Interim reanalysis (filled square) obtained from the nearest grid point during the 5~11 January 2013.

- 이 결과로부터, 3 km의 상세 격자를 이용한 중규모 모델 실험에서의 상세 지형, 물리 및 역화과정이 극저기압의 구조를 더욱 잘 모의하여 초기조건으로 사용된 재분석 자료의 바람장을 강화시켰음을 확인하였음. 또한, 모델이 재현해 낸 바람장이 관측 결과

와 대부분의 시간대에 있어 유사함으로 볼때, 초기화 이후 24시간을 스핀 업 기간으로 설정한 실험 방법이 적절하였다고 판단됨. 이 결과는 향후 극지역 지역규모 모델링 연구에 있어 참고할 만한 정보를 제공함.

- Fig. 23은 사례 기간에 대한 3개의 다른 격자 실험에서 모의된 세종기지 관측 지점의 풍속과 지상 기압의 시계열을 나타냄. 서로간에 큰 차이는 없으나 관측과 비교해 보면 다른 해상도에 비해 3 km 격자에서 모의된 풍속과 기압의 변화 경향 및 값이 관측 시계열과 가장 유사함을 알 수 있음. 특히 1월 7일 0600 UTC~1800 UTC 기간의 관측된 약 20 m s^{-1} 정도 또는 이상의 강한 시간 평균 풍속을 보인 구간에서 3 km 격자 규모에서 모의된 풍속이 관측에 가장 근접한 값을 보임을 확인할 수 있음. 모형 해상도에 따른 풍속 관측 값과의 편차(Fig. 23a)도 27, 9, 3 km 격자 실험에서 각각 -1.8 , -1.4 , -1.1 m s^{-1} 으로 작은 차이를 보임을 알 수 있음.

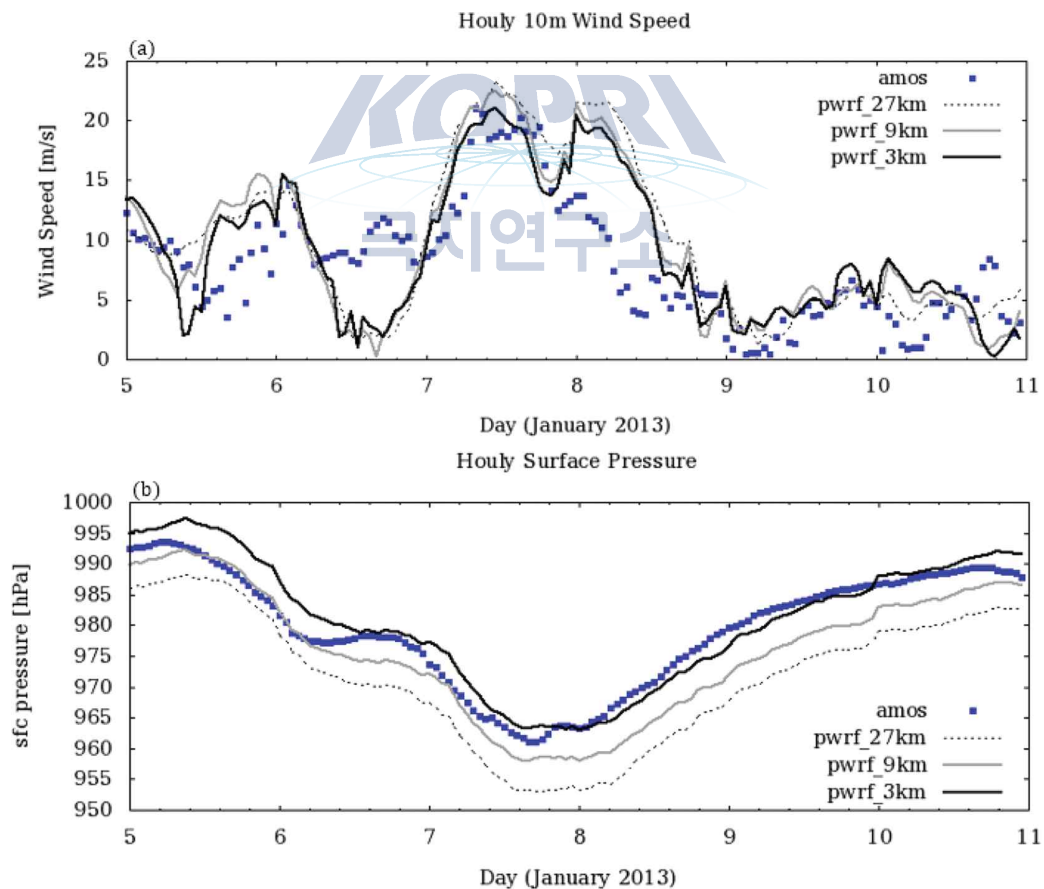


Fig. 23. Same as in Fig. 9, except for time series from AMOS (filled square) and polar WRF simulation with 27 (thin dotted line), 9 (thick gray line), 3 km (thick black line) grid resolutions.

- 지면기압 모의 결과에서도 풍속 결과와 비슷한 경향을 확인할 수 있음. 일부 구간을 제외한 대부분의 구간에 대해 3 km 격자 규모 모의 결과가 관측과 가장 유사한 값을 보이며, 격자 규모가 작아질수록 관측과의 편차가 작아짐을 알 수 있음. 사례 기간에 대한 지면 기압 관측 값과 각 격자 규모실험 결과의 편차는 각각 7 (27 km), 4 (9 km), -1.2 (3 km) hPa 의 값을 보이며, 고해상도 실험이 극 저기압의 강도를 정확하게 모의하는데 도움이 되는 것으로 보임.

바. 요약 및 토의

- 본 연구에서는 극지역 모의를 위해 개발된 Polar WRF 모델을 이용하여 남극 세종과학기지에서 관측된 강풍 사례를 모의하였으며, 이를 통해 Polar WRF의 극 저기압 모의 성능을 평가하고, 극 저기압 통과 사례 상세 분석을 통해 세종기지에서 관측된 강풍의 주요 원인을 분석하였음. 또한 모델 모의결과를 재분석 자료와 세종기지에서 관측된 기상관측자료와 비교함으로써 상호 검증을 수행하였음.
- Polar WRF를 이용한 중규모 모의실험에 앞서 선정된 강풍사례의 기후학적 특성을 살펴보기 위해 세종기지에서 관측된 21년(1994~2013년) 기간의 풍속 자료를 분석하였음. 1994~2013년의 일평균 풍속장의 기후 평균값 분석을 통해 세종기지의 기후학적 특성상 계절에 따른 풍속의 변화가 크지 않음을 확인하였음. 시간 평균 풍속의 기후학적 특성에서는 일평균 풍속 분석에서 나타나지 않은 강한 풍속 관측을 확인할 수 있었으며, 풍속 범위에 따른 관측빈도수 히스토그램에서 전체의 3% 미만에 해당하는 구간에 14 ms^{-1} 를 초과하는 강풍이 존재하였으며 순간 최대풍속의 경우, 전체의 4% 미만의 구간에서 30 m s^{-1} 를 풍속 관측 값을 보였음.
- 세종기지 인근지역을 통과한 극 저기압 모의 실험 분석을 통해 세종기지에서 1월 7일에 관측된 강풍은 1월 6일 1200 UTC 시경 칠레 최남단에서 생성된 극저기압이 세종기지가 위치한 킹 조지섬 부근으로 남동진하여 1월 7일 강한 세력을 유지한 채 그 주변에 머물면서 발생하였음을 확인하였음. 사례기간 동안 관측, 재분석 및 3 km 해상도 모델결과의 시간에 따른 10 m 풍속의 변화를 살펴보면 일부 구간을 제외하고 대체로 서로 유사한 풍속의 증감 경향을 보였음. 그러나, 그 크기에 있어 재분석 자료가 관측 풍속의 약 45%를 나타내는데 비해 모델의 경우 관측 시간 평균 풍속의 약 91%를 모의함으로써 강풍을 성공적으로 모의하였음을 확인하였음. 지면기압의 경우도 큰 차이는 없으나 관측과 비교해 3 km 격자에서 모의된 기압의 변화 경향 및 값이 관측

시계열과 더욱 유사하게 모의하였음을 확인할 수 있었음.

- 이상의 결과들을 종합해 볼 때, Polar WRF를 활용한 고해상도 중규모 모델 실험은 남극 세종과학기지에서의 극한 강풍 사례의 주원인인 극 저기압을 모델링하고 분석하는데 있어 매우 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였음. 그러나, 본 연구의 경우 한 사례만을 이용하여 수행된 모델 실험 결과만을 분석하였으므로 보다 일반적인 결론을 도출하기 위해서는 향후 추가적인 사례 실험 및 장기간의 모델 수행을 통한 기후학적 통계 분석이 수반되어야 할 것으로 판단됨.



3.2 장보고 과학기지 주변의 상세 대기환경 연구

3.2.1 장보고 과학기지 주변 관측자료 상세 분석

가. 장보고 과학기지 AWS_2와 ASOS 자료 비교 분석

○ Fig. 24는 남극 장보고 과학기지 주변에 설치된 ASOS와 AWS_2 관측기기의 위치정보를 나타낸 위성사진임. 남극 장보고 과학기지는 동남극 북빅토리아랜드(Northern Victoria Land) 테라노바만(Terra Nova Bay) 연안, 남위 74° 37.4', 동경 164° 13.7'에 위치하며 본관동이 위치한 지점의 해발고도는 25 m임. 장보고 과학기지의 북서 방향으로 산이 존재하며 남쪽과 동쪽 방향에는 바다가 존재함. 장보고 과학기지의 북서 방향에 존재하는 산의 최고 높이는 700 m임. 장보고 과학기지 AWS_2는 2017년 3월을 기준으로 위치를 이전(2회)하였음. AWS의 위경도 좌표는 각각 남위 74° 37' 23.16'', 동경 164° 13' 42.96''(AWS_1), 남위 74° 37' 26.79'', 동경 164° 13' 59.96''(AWS_2), 남위 74° 36' 58.52'', 동경 164° 15' 04.92''(AWS_3)이며, ASOS의 위경도 좌표는 남위 74° 37' 20.28'', 동경 164° 13' 41.83''임. 본 절에서는 동기간에 대하여 AWS_2와 ASOS의 관측자료를 분석하였음.

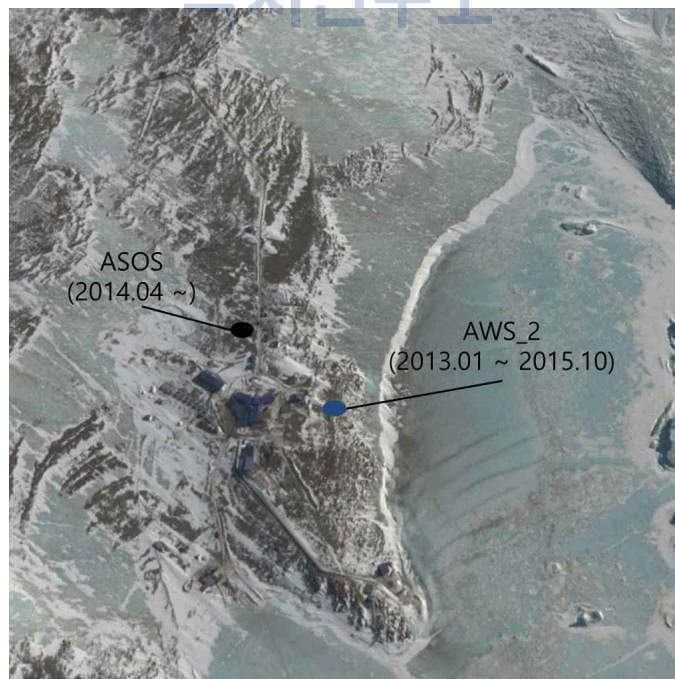


Fig. 24. 남극 장보고 과학기지 주변 관측지점에 대한 위성사진(1) (출처: Google Earth)

(1) 장보고 과학기지 관측 환경 특성 분석

- 장보고 과학기지 주변의 기상 특성(풍향, 풍속, 기온)을 분석하기 위하여, AWS_2과 ASOS 지점에 대하여 2014년 4월부터 2015년 10월까지의 관측자료를 분석하였음. Fig. 24는 장보고 과학기지, AWS_2, ASOS 지점의 위치를 나타냄. AWS_2는 기지의 동쪽에 위치하고 있고, ASOS는 기지의 북쪽에 위치한다. 장보고 과학기지 주변의 흐름 특성을 분석하기 위하여, 관측기간(1시간 평균 관측자료 이용)에 대하여 바람장미도와 풍향별 풍속구간 그래프를 분석하였음. 계절별 흐름 특성을 분석하기 위하여, 하계(12월부터 2월)와 동계(6월부터 8월)로 구분하여 분석하였음.
- Fig. 25는 AWS_2와 ASOS 지점에서 대상 기간(2014년 4월~2015년 10월)에 대한 바람장미도를 나타냄. AWS_2 지점에 대한 대상 기간(2014년 4월~2015년 10월)의 풍향 빈도는 서풍과 북동풍 계열의 바람이 우세하게 나타났으며, 서풍(16.07%), 북북동풍(15.59%), 서북서풍(12.02%) 순으로 높은 빈도가 나타났음. 이는 AWS_2 지점의 북쪽과 서쪽 산사면에서 불어오는 활강풍의 영향으로 판단됨(Fig. 25a). ASOS 지점에서 동기간에 대한 풍향 빈도는 서풍(19.21%), 서남서풍(11.74%), 서북서풍(11.38%), 북북동풍(11.03%) 순으로 AWS_2 지점과 유사한 경향을 나타냈으나, 상대적으로 풍속이 강하게 관측되었음(Fig. 25b). 이는 ASOS가 AWS에 비해 상대적으로 높은 고도에서 관측되기 때문으로 판단됨. 계절별 바람장미도를 분석한 결과, AWS_2 지점에 대하여 여름철에는 북동풍(17.49%), 북북동풍(15.77%), 서풍(15.06%) 순으로 빈도가 높게 나타났고, 겨울철에는 서풍(16.89%), 서북서풍(14.96%), 북북동풍(14.75%), 북풍(12.07%) 순으로 빈도가 높게 나타났음(Fig. 25c와 e). ASOS 지점에서는 여름철에 북북동풍(14.93%), 서풍(12.74%), 서남서풍(11.32%), 북동풍(11.28%) 순으로 빈도가 높게 나타났음(Fig. 25d와 f). AWS_2 지점에서 대상 기간(2014년 4월~2015년 10월)에 대한 풍향별 풍속 빈도는 $0.2 \sim 1.5 \text{ m s}^{-1}$ (35.76%), $1.6 \sim 3.3 \text{ m s}^{-1}$ (32.63%)의 풍속 순으로 빈도가 높게 나타났음(Fig. 26a). ASOS 지점에서는 $1.6 \sim 3.3 \text{ m s}^{-1}$ (35.7%)의 풍속에 대하여 빈도가 높게 나타났음(Fig. 26b). 계절별 바람장미도를 분석한 결과, 여름철에는 AWS_2와 ASOS 모두 $1.6 \sim 3.3 \text{ m s}^{-1}$ 의 풍속에서 가장 높은 빈도(각각 42.85%, 42.46%)가 나타났음(Fig. 26c와 d). 8.0 m s^{-1} 이상의 강풍은 여름철에 AWS_2와 ASOS 지점에서 각각 4.12%, 19.18%로 나타났고, 겨울철에 AWS_2와 ASOS 지점에서 각각 8.71%, 21.88%로 나타났음(Fig. 26c~f). 평균 기온을 분석한 결과, AWS_2 지점에서 전체 기간(2014년 4월~2015년 10월)에 대한 평균 기온은 -

17.56℃임. 여름철과 겨울철의 평균 기온은 각각 -2.89℃, -24.00℃로, 계절별 평균 기온차는 약 21.1℃임. ASOS 지점에서 전체 기간(2014년 4월~2015년 10월)에 대한 평균 기온은 -17.47℃이고, 여름철과 겨울철의 평균기온은 각각 -3.00℃와 -23.74℃로 AWS_2 지점의 관측값과 큰 차이가 나타나지 않았음(Table. 5).

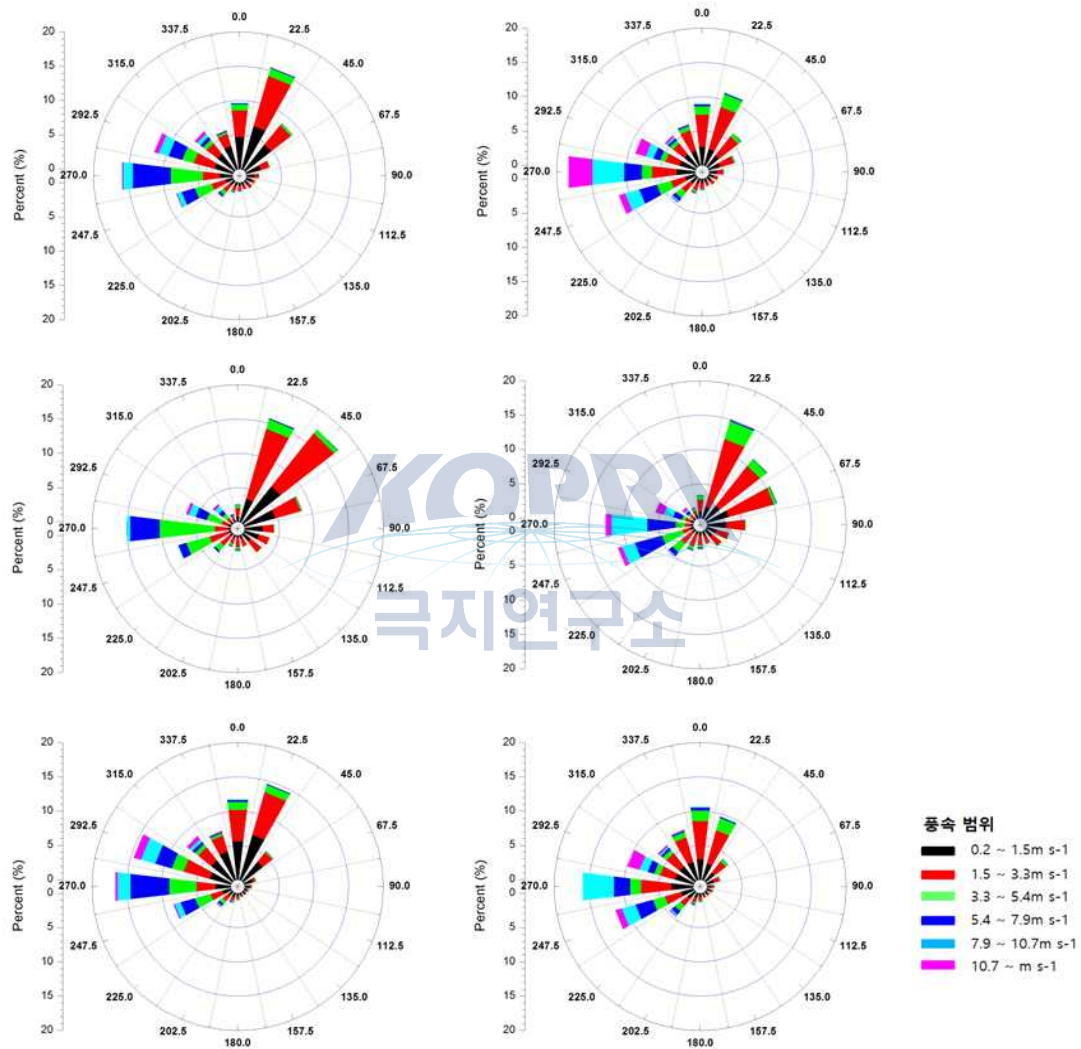


Fig. 25. 대상기간(2014년 4월~2015년 10월)에 대하여 (a) AWS_2와 (b) ASOS 전 기간, (c) AWS_2와 (d) ASOS 여름철, (e) AWS_2와 (f) ASOS 겨울철의 바람장미도

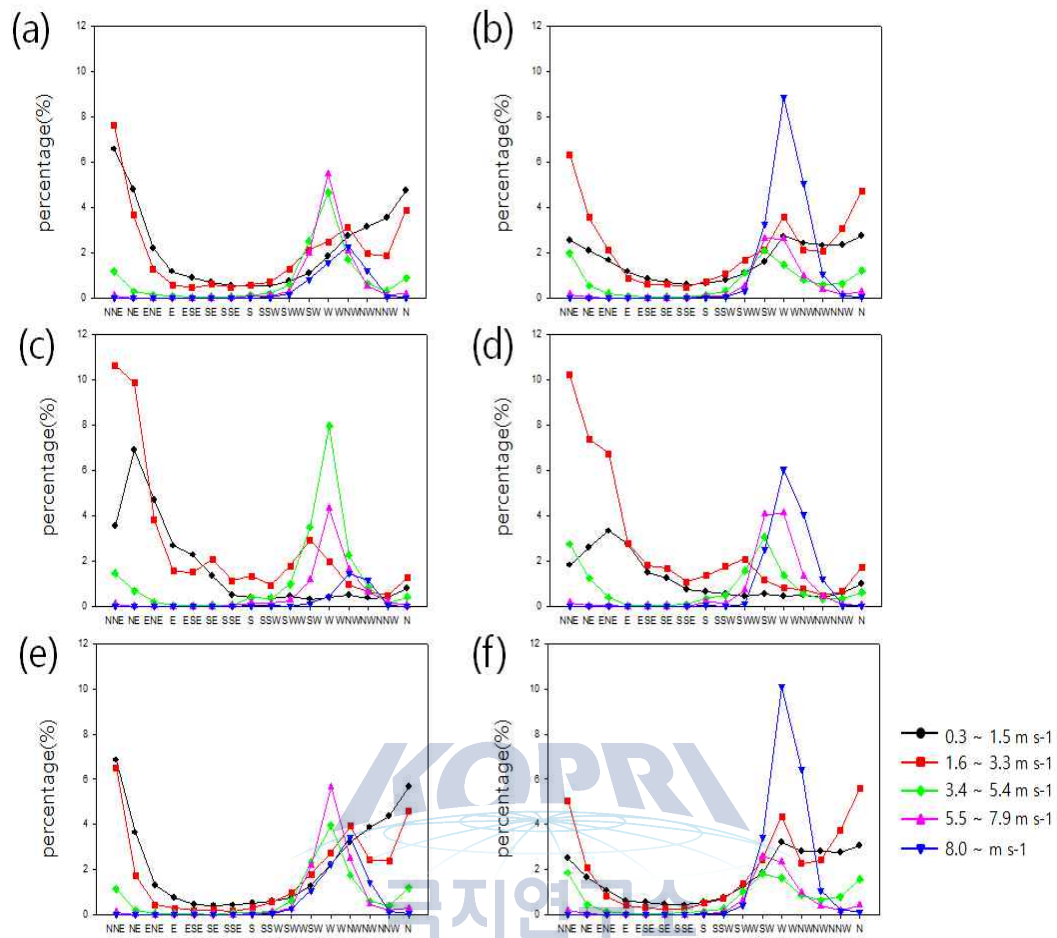


Fig. 26. 대상기간(2014년 4월~2015년 10월)에 대하여 (a) AWS_2와 (b) ASOS 전 기간, (c) AWS_2와 (d) ASOS 여름철, (e) AWS_2와 (f) ASOS 겨울철의 풍향별 풍속 빈도

[Table. 7] 대상 기간(2014년 4월~2015년 10월)에 대한 AWS_2와 ASOS 지점에서의 평균 기온(℃)

	전체 기간	여름 (12월, 1월, 2월)	겨울 (6월, 7월, 8월)
AWS_2	-17.56℃	-2.89℃	-24.00℃
ASOS	-17.47℃	-3.00℃	-23.74℃

나. 장보고 과학기지 AWS_3과 ASOS 자료 비교 분석

- 장보고 과학기지 주변의 기상 특성(풍향, 풍속, 기온)을 파악하기 위하여, AWS_3과 ASOS 지점에 대하여 2015년 12월부터 2016년 3월까지의 관측자료를 분석하였음. Fig. 27는 AWS_3(이전 후 지점)과 ASOS 지점에서 대상 기간(2015년 12월~2016년 3월)에 대한 바람장미도를 나타냄. AWS_3 지점에 대한 대상 기간(2015년 12월~2016년 3월)의 풍향 빈도는 북서풍(13.92%), 서북서풍(11.71%), 서풍(9.32%) 순으로 나타났음. ASOS 지점에서 동기간에 대한 풍향 빈도는 북북동풍(13.64%), 서남서풍(11.84%), 서풍(11.84%) 순으로 나타났고, 서풍 계열에서는 상대적으로 강한 바람이 주로 나타났고, 북동풍 계열에서는 상대적으로 약한 바람 주로 나타났음(Fig. 28a와 b).

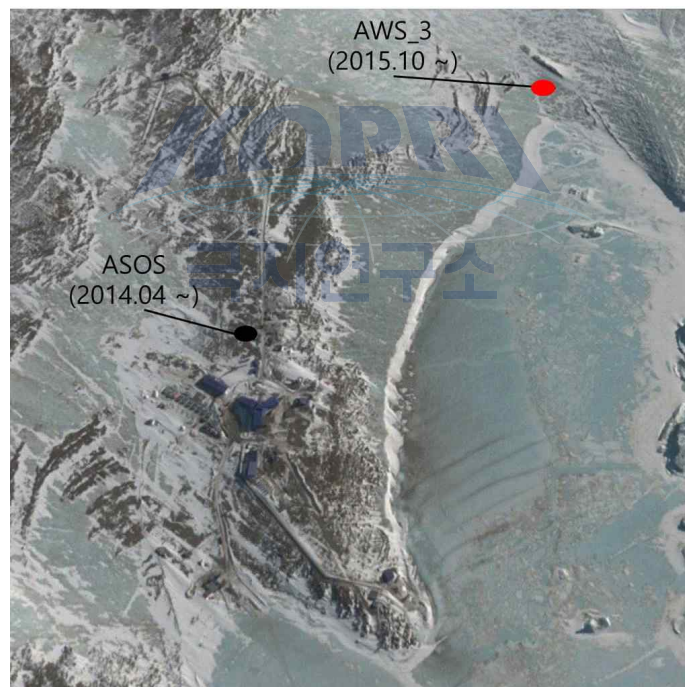


Fig. 27. 남극 장보고 과학기지 주변 관측지점에 대한 위성사진(2) (출처: Google Earth)

- AWS_3과 ASOS에서의 풍속을 분석한 결과, 대상 기간(2015년 12월~2016년 3월)에 대하여 $1.6 \sim 3.3 \text{ m s}^{-1}$ 의 풍속 빈도(AWS_3 : 33.52%, ASOS : 38.23%)가 가장 높게 나타났음(Fig. 28a와 b). AWS_3 지점에 대하여 동풍이 부는 경우에는 $0.2 \sim 1.5 \text{ m s}^{-1}$ 풍속이 5.66%로 가장 높은 빈도를 나타냈고, 서남서풍이 부는

경우에는 $5.5 \sim 7.9 \text{ m s}^{-1}$ 풍속이 4.12%의 빈도가 나타났음. ASOS 지점에 대하여 북북동풍이 부는 경우에는 $0.2 \sim 1.5 \text{ m s}^{-1}$ 풍속이 8.91%로 가장 높은 빈도를 나타냈고, 북동풍이 부는 경우에는 6.55%의 빈도가 나타났음. 8.0 m s^{-1} 이상의 강한 바람은 AWS_3과 ASOS 지점에서 각각 8%와 14.62% 빈도가 나타났음. 이는 AWS_3(지상 5 m)과 ASOS(지상 10 m) 지점의 관측 높이 차이에 따른 지표 마찰의 영향으로 판단됨. 대상 기간 동안의 평균 기온은 AWS_3과 ASOS 지점에서 각각 -4.23°C 와 -4.2°C 로, 두 지점의 평균 기온 차이는 거의 나타나지 않았음(Table. 6).

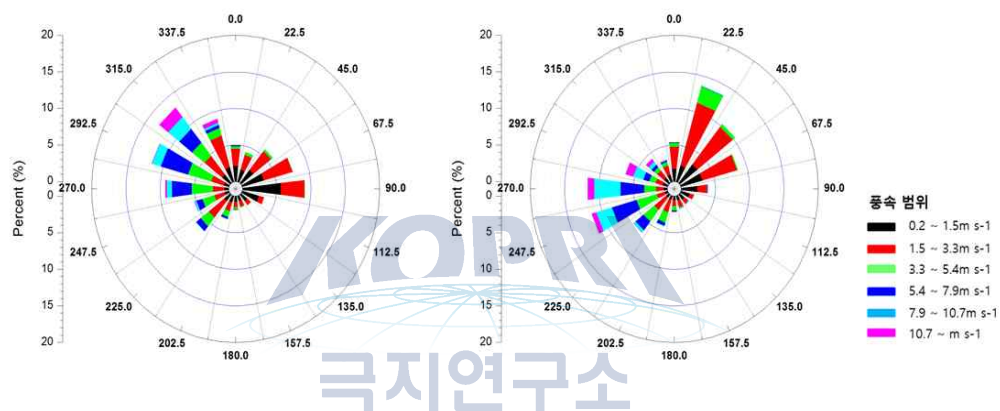


Fig. 28. 대상 기간(2015년 12월~2016년 3월)에 대하여 (a) AWS_3과 (b) ASOS 지점에서의 바람장미도

[Table. 8] 대상 기간(2015년 12월~2016년 3월)에 대한 AWS_3과 ASOS 지점에서의 관측한 평균 기온($^{\circ}\text{C}$)

	전체 기간
AWS_3	-4.22°C
ASOS	-4.20°C

3.2.2 Polar_WRF-CFD 모델 접합을 통한 상세흐름 분석

가. Polar_WRF-CFD 접합 시스템 구축 및 설계

- 중규모 기상 모델(예, WRF)은 넓은 영역의 직접적인 관측자료와 재분석자료를 이용한 수치 모의를 통해 국지적인 기상현상을 반영할 수 있다는 장점을 가짐. 그러나 중규모 기상 모델은 모델이 가지는 분해능과 좌표계의 한계로 인하여, 상세 규모의 흐름과 오염물질 확산에 큰 외력으로 작용하는 지형이나 건물의 직접적인 효과를 고려하는 것이 불가능하다는 단점을 가짐. 전산유체역학(CFD) 모델을 이용하여 장보고 과학기지 주변 지역의 흐름과 오염물질의 확산을 현실적으로 모의하기 위해 Polar_WRF를 통해 수치 모의한 초기 조건이 필요함. Polar_WRF와 CFD 모델의 접합 시스템 구축을 위하여, Polar_WRF가 모의하여 얻은 바람 성분(U, V, W)과 난류운동에너지(Turbulent Kinetic Energy)를 추출하여 사용함. Polar_WRF로부터 추출한 자료는 수평 해상도가 1 km와 3 km 이고, CFD 모델은 수평과 연직으로 각각 5 m, 2.5 m이기 때문에 자료의 격자 해상도에 차이가 있음. 이러한 문제를 해결하기 위해 Polar_WRF의 시그마 자료를 CFD 모델의 고도 자료로 연직 내삽 후, CFD 모델의 격자계에 맞추어 선형 내삽을 수행함. 이러한 과정을 통하여 생성된 자료를 CFD 모델의 초기/경계 자료로 사용하고, Fig. 29와 30과 같이 Polar_WRF-CFD 접합 시스템을 구축하였음. CFD 모델의 3차원 지형 입력 자료 생성을 위해 CAD(Computer Aided Design) 자료(1:50000 축척의 수치지도)를 이용하여, 지형과 건물에 대한 3차원 지표 경계 입력 자료를 구축하였음. CAD 자료로부터 대상 지역의 등고선, 해안선 자료를 추출하고, 등고선 자료에 대한 내삽을 수행하여 모든 수평 격자점에 대한 높이 자료를 구축함. 이후 생성된 등고선과 건물 높이 자료를 중첩하여 대상 지역의 3차원 지표 경계 입력 자료를 생성함(Fig. 31). 수치지도를 이용하여 10 km × 10 km 지표 경계 입력 자료를 생성하고, 장보고 과학기지 주변의 상세 흐름 모의를 위하여 기지 주변 1000 m × 1000 m 지표 경계 입력 자료를 구축하였음(Fig. 32). 장보고 과학기지 주변의 산악지형과 해안선을 잘 구현하였고, 3차원 지표 경계 입력 자료의 경우에도 산악 지형의 높이 및 경사를 잘 구현하였음을 알 수 있음.

○ 본 연구에서는 3차원, 비정수, 비회전, 비압축 대기 흐름계를 고려한 전산유체역학(Computational Fluids Dynamics, CFD) 모델을 사용하였음. 이 CFD 모델은 벽면 경계에서의 난류 경계층 효과를 잘 반영하도록 벽면 함수(Wall function)를 사용하였고(Versteeg and Malalasekera, 1995), 난류 모수화는 RNG $\kappa-\epsilon$ 난류 종결 방법을 사용하였음. 지배 방정식 계는 유한 체적법(Finite volume method), 엇갈림 격자계(Staggered grid system), Patankar (1980)가 제안한 SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 알고리즘을 이용하여 수치해를 구함. 초고해상도 미세규모 수치모의를 위하여, 모델 격자수($x \times y \times z$)는 $200 \times 200 \times 100$ 개이고, 격자 크기는 $x \times y \times z$ 방향에 대하여 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ 임. 전체 계산 영역 크기는 $x \times y \times z$ 방향으로 각각 $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ 임.

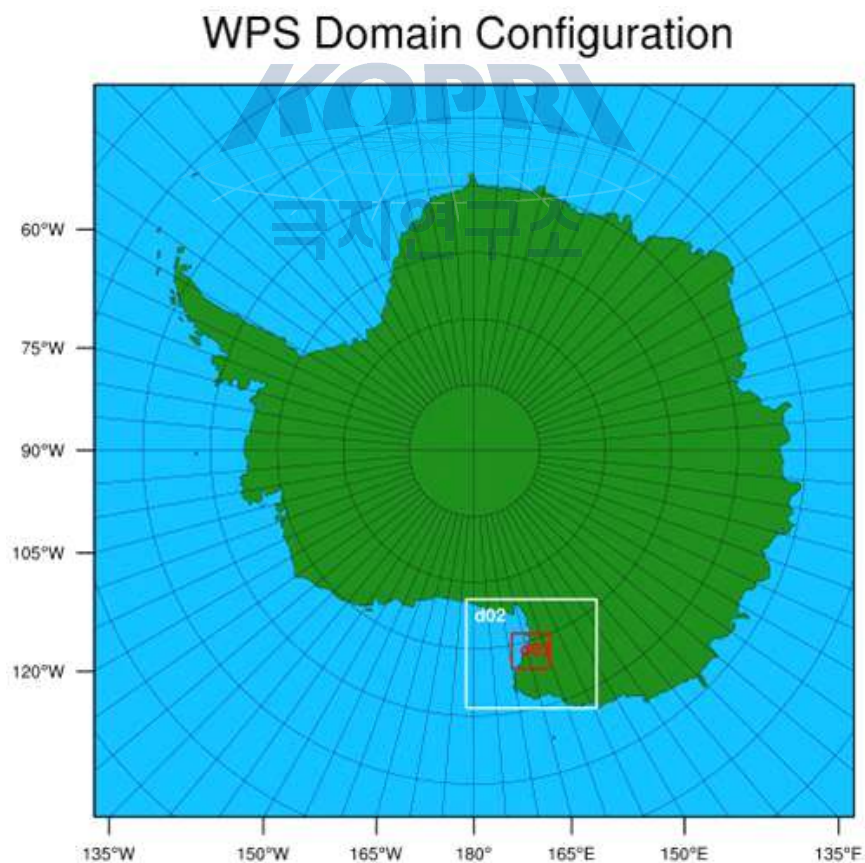


Fig. 29. Polar_WRF 수행 영역, domain1(27km), domain(9km), domain(3km) 해상도

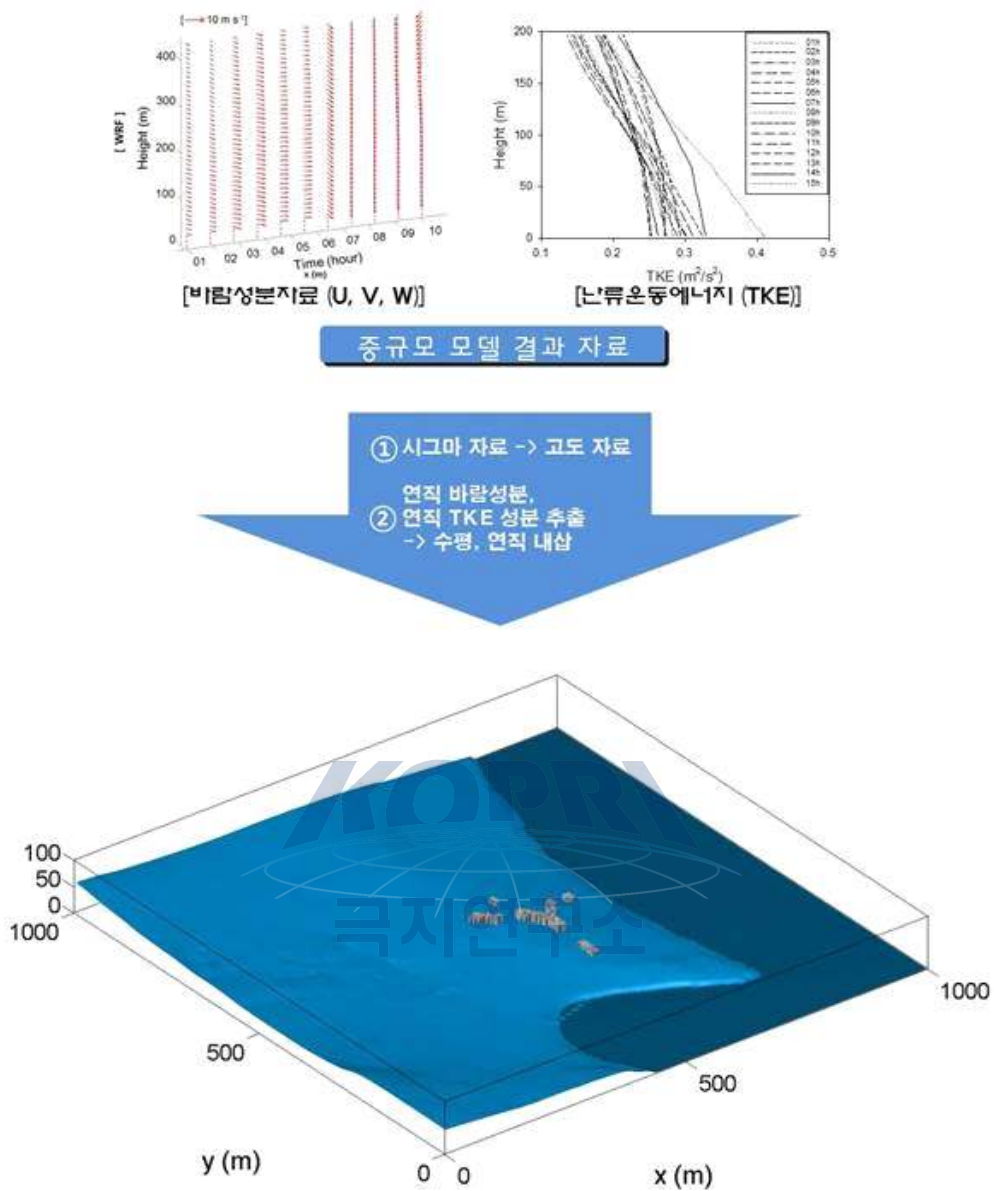


Fig. 30. Polar_WRF-CFD 모델의 초기 입력자료 추출 및 생성 과정

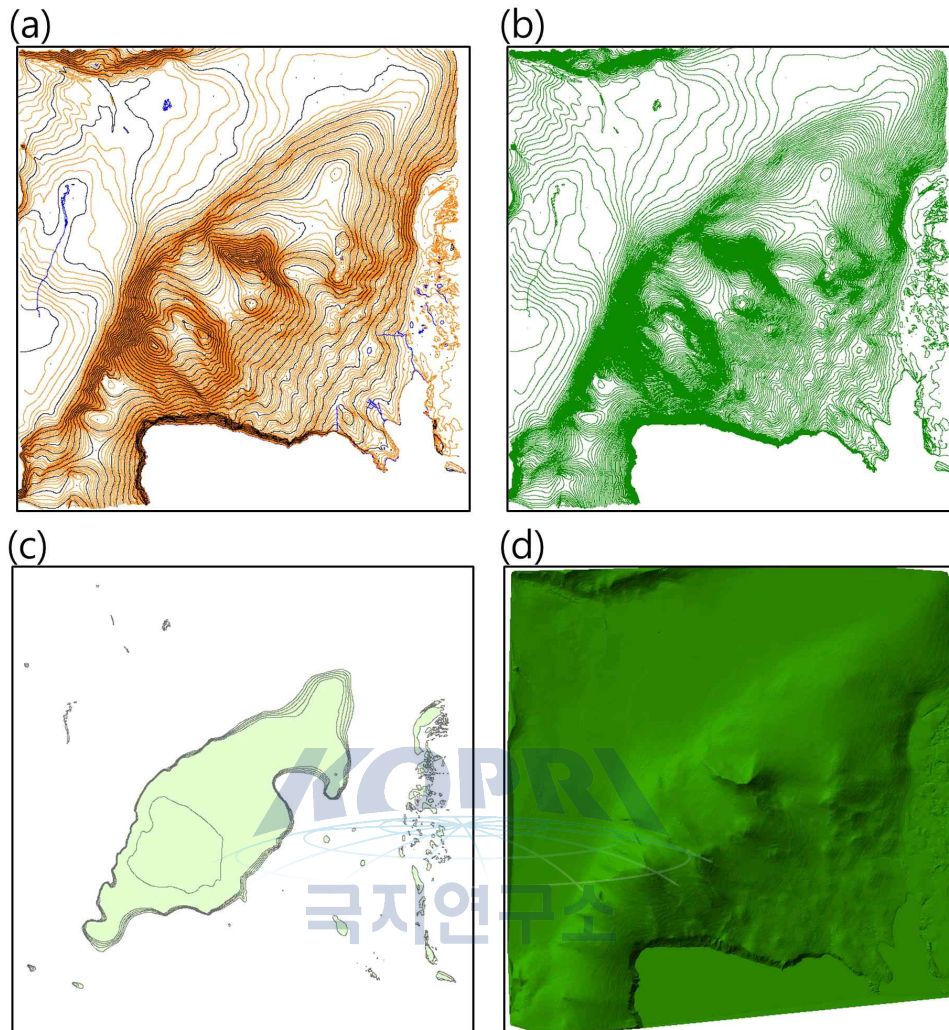
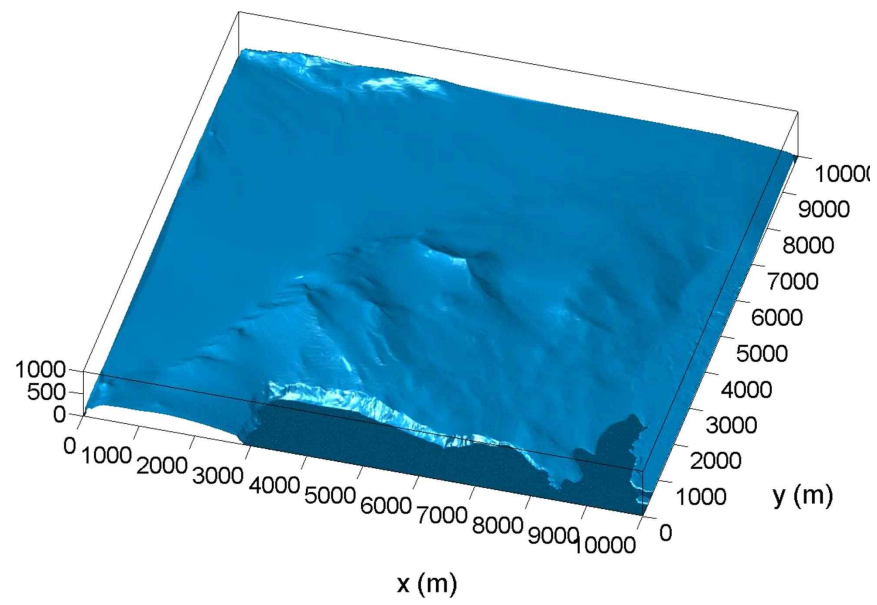


Fig. 31. 남극 장보고 과학기지의 (a) 수치지도, (b) Polyline 자료, (c) Polygon 자료, (d) 3차원 지표 경계 입력 자료

(a)



(b)

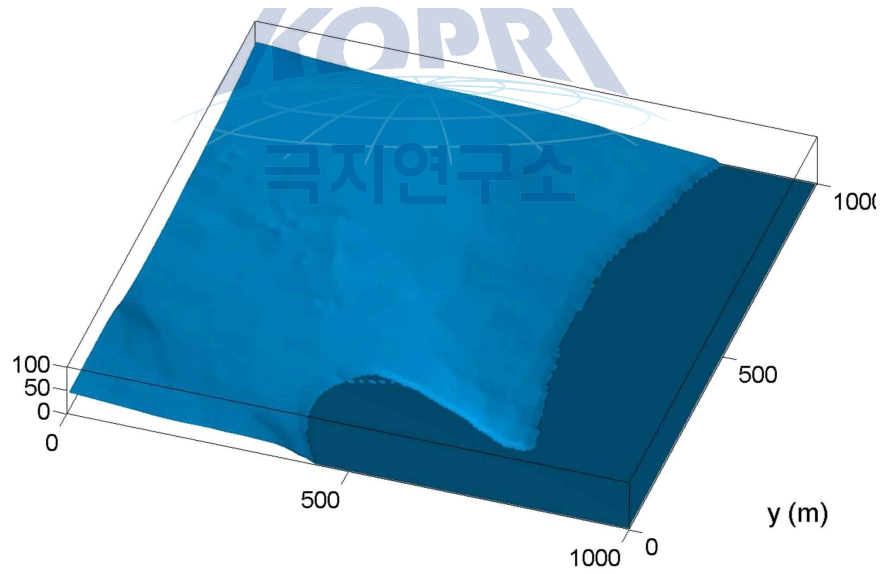


Fig. 32. 대상 지역에 대한 (a) 10 km × 10 km의 3차원 지표 경계 입력 자료와 (b) 1000 m × 1000 m의 3차원 지표 경계 입력 자료

나. Polar_WRF-CFD(Polar_WRF 해상도 : 3km) 모델 결과 분석

(1) 남극 장보고 과학기지 강풍사례 1(2010년 8월 18일~2010년 8월 22일)

- Polar_WRF로부터 현실적이고 연속적인 경계/초기 조건 자료를 획득하여 Polar_WRF-CFD 모델을 수행하였고 결과를 분석하였음. 강풍 사례(2010년 8월 18일~25일)에 대하여 Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델을 수행하였고, 이를 장보고 과학기지 AWS_1 지점의 관측 자료와 비교·분석하였음.
- Fig. 33은 풍속과 풍향에 대한 AWS_1 지점의 관측 결과, Polar_WRF 모의 결과, Polar_WRF-CFD 모의 결과를 나타냄. 풍속의 경우, Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델이 전체적으로 풍속을 과대 모의하였음. Polar_WRF의 결과를 초기값으로 사용하는 Polar_WRF-CFD 모델의 모의 풍속은 Polar_WRF와 유사한 패턴을 나타내지만, Polar_WRF와 비교하여 Polar_WRF-CFD 모델이 풍속을 비교적 관측과 가깝게 모의하였음. 장보고 과학기지 AWS_1의 관측 풍속에 대한 Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델(2010년 8월 18일~25일)의 RMSE는 각각 11.71 m s^{-1} , 8.16 m s^{-1} 로 Polar_WRF-CFD 모델이 Polar_WRF 모델보다 관측과 유사하게 모의하였음. 2010년 8월 18일~25일에 대한 일별 풍속 RMSE는 Polar_WRF의 경우에는 각각 12.71, 17.38, 8.96, 10.61, 5.44 m s^{-1} 이며, Polar_WRF-CFD 모델의 경우에는 각각 7.35, 10.99, 10.09, 6.79, 3.19 m s^{-1} 임(Table. 7). 풍향의 경우, Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델의 모의 풍향은 매우 유사하게 나타났음. Polar_WRF의 결과를 초기/경계 조건으로 사용하는 Polar_WRF-CFD 모델의 모의 풍향은 Polar_WRF와 유사한 경향이 나타남. 장보고 과학기지 AWS_1의 관측 풍향에 대한 Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델(2010년 8월 18일~25일)의 RMSE는 각각 65.10° , 67.12° 로 Polar_WRF 모델이 관측과 유사하게 모의하였음. 2010년 8월 18일~25일에 대한 일별 풍향 RMSE는 Polar_WRF의 경우에는 77.10, 60.08, 26.04, 63.46, 83.25° 이고, Polar_WRF-CFD 모델의 경우에는 79.28, 65.32, 28.79, 65.54, 82.77° 임(Table. 8). Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델의 모의 풍향은 큰 차이가 없었으나, 풍향에 대한 오차는 Polar_WRF가 전체적으로 작게 나타났음.

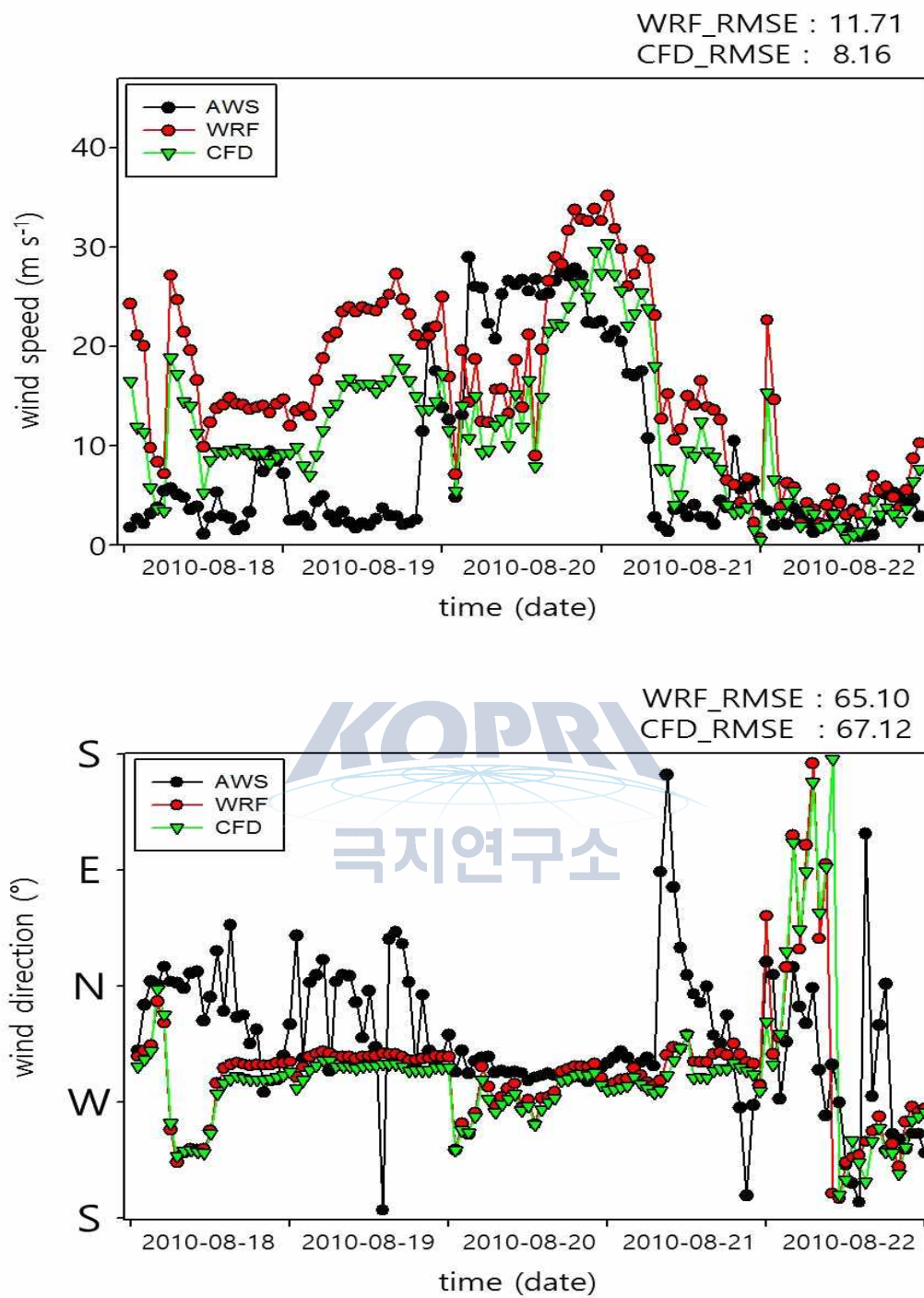


Fig. 33. 장보고 과학기지 강풍사례 1(2010년 8월 18일~2010년 8월 22일)에 대한 풍향, 풍속 시계열(AWS_1, Polar_WRF(3 km 해상도), Polar_WRF-CFD)

[Table. 9] 장보고 과학기지 강풍사례 1(2010년 8월 18일~2010년 8월 22일)에 AWS_1에 대한 Polar_WRF(3 km 해상도)와 Polar_WRF-CFD의 풍속 RMSE

Day	RMSE	
	Polar_WRF(m s ⁻¹)	Polar_WRF-CFD(m s ⁻¹)
8.18	12.71	7.35
8.19	17.38	10.99
8.20	8.96	10.09
8.21	10.61	6.79
8.22	5.44	3.19
All day	11.71	8.16

[Table. 10] 장보고 과학기지 강풍사례 1(2010년 8월 18일~2010년 8월 22일)에 AWS_1에 대한 Polar_WRF(3 km 해상도)와 Polar_WRF-CFD의 풍향 RMSE

Day	RMSE	
	Polar_WRF(°)	Polar_WRF-CFD(°)
8.18	77.10	79.28
8.19	60.08	65.32
8.20	26.04	28.79
8.21	63.46	65.54
8.22	83.25	82.77
All day	65.10	67.12

- Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델의 모의 결과(풍향과 풍속)를 종합적으로 분석한 결과, 풍속은 Polar_WRF-CFD 모델이 관측에 더 근사하게 모의하였고, 이는 지형과 같은 요소들의 마찰 효과를 잘 반영하는 것으로 판단됨. 풍향의 경우에는 Polar_WRF 모델이 전체적으로 관측과 유사하게 모의하였음.

(2) 남극 장보고 과학기지 강풍사례 2(2010년 9월 7일~2010년 9월 11일)

- 강풍 사례(2010년 9월 7일~11일)에 대하여 Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델을 수행하였고, 이를 장보고 과학기지 AWS_2 지점의 관측 자료와 비교·분석하였음.
- Fig. 34는 풍속과 풍향에 대한 AWS_2 지점의 관측 결과, Polar_WRF 모의 결과, Polar_WRF-CFD 모의 결과를 나타냄. 풍속의 경우, Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델은 전체적으로 풍속을 잘 모의하였음. Polar_WRF의 결과를 초기값으로 사용하는 Polar_WRF-CFD 모델은 Polar_WRF와 유사한 풍속 패턴을 나타내며, 전체적으로 AWS_2 관측에 더욱 근사한 결과를 모의하였음. 장보고 과학기지 AWS_2의 관측 풍

속에 대한 Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델(2010년 9월 7일~11일)의 RMSE는 각각 6.14 m s^{-1} , 4.45 m s^{-1} 로 Polar_WRF-CFD 모델이 Polar_WRF 모델보다 관측과 유사하게 모의하였음. 2010년 9월 7일~11일에 대한 일별 풍속 RMSE는 Polar_WRF의 경우에는 3.86, 7.49, 8.28, 6.82, 1.61 m s^{-1} 이고, Polar_WRF-CFD 모델의 경우에는 4.84, 5.54, 5.35, 3.81, 1.40 m s^{-1} 임(Table. 9).

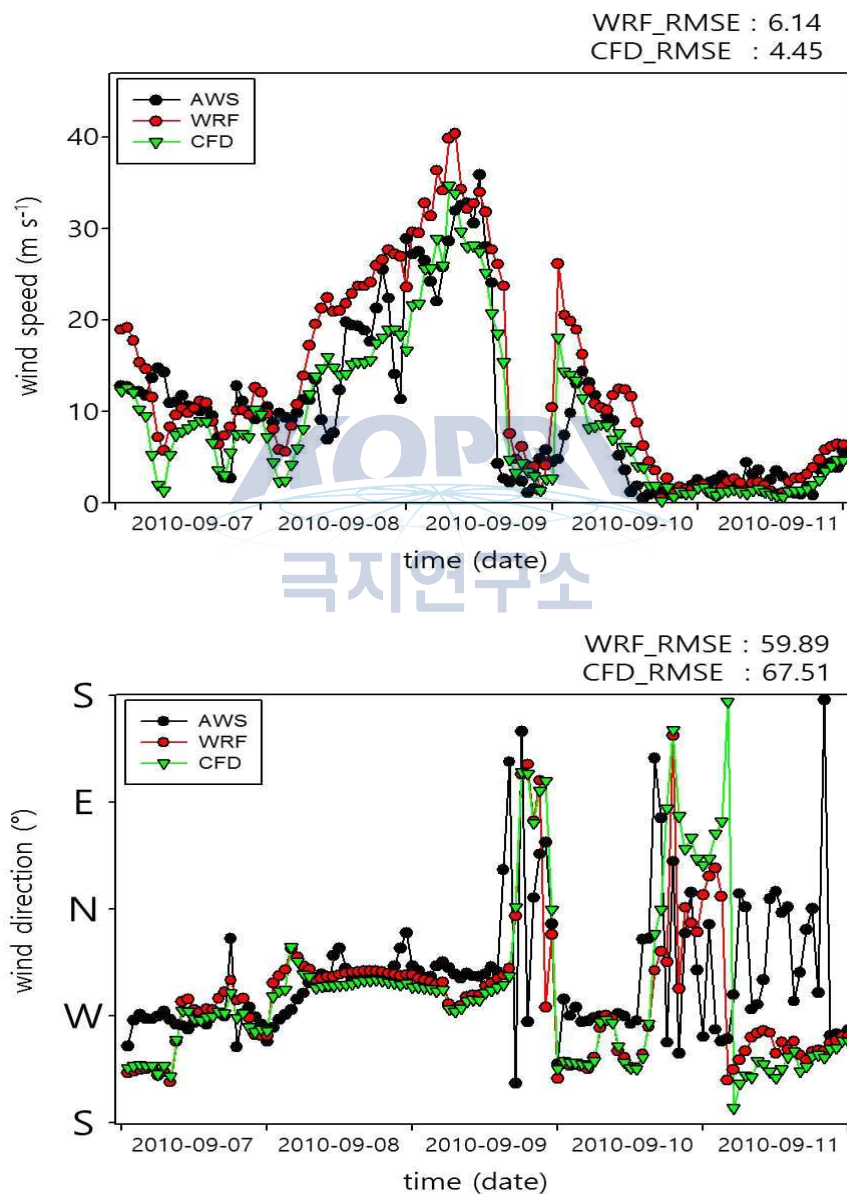


Fig. 34. 장보고 과학기지 강풍 분석 사례_2(2010년 9월 7일 ~ 2010년 9월 11일)에 대한 풍향, 풍속 시계열 분석 그래프(AWS_2, Polar_WRF(3 km 해상도), Polar_WRF-CFD)

- 풍향의 경우, Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델의 모의 풍향은 매우 유사하게 나타났음. Polar_WRF-CFD 모델의 풍향은 Polar_WRF의 영향을 받아 유사한 경향이 나타남. 장보고 과학기지 AWS_2의 관측 풍향에 대한 Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델(2010년 9월 7일~11일)의 RMSE는 각각 59.89°, 67.51°로, Polar_WRF의 모의 풍향이 관측에 더 가깝게 모의하였음. 2010년 9월 7일~11일에 대한 일별 풍향 RMSE는 Polar_WRF의 경우에는 29.87, 21.99, 68.25, 68.09, 85.24°이고, Polar_WRF-CFD 모델의 경우에는 26.92, 21.65, 65.69, 81.63, 103.05°임(Table. 10). Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델의 모의 풍향에 대한 관측값과의 오차는 Polar_WRF가 전체적으로 작게 나타났음.
- Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델의 모의 결과(풍향과 풍속)를 종합적으로 분석한 결과, 풍속은 Polar_WRF-CFD 모델이 관측에 더 근사하게 모의하였음. 이는 지형의 마찰 효과를 잘 반영하여 풍속이 감소하였기 때문으로 판단됨. 풍향의 경우, Polar_WRF 모델이 전체적으로 관측과 유사하게 모의하였음.

[Table. 11] 장보고 과학기지 강풍사례 2(2010년 9월 7일~2010년 9월 11일)에 AWS_2에 대한 Polar_WRF(3 km 해상도)와 Polar_WRF-CFD의 풍속 RMSE

Day	RMSE	
	Polar_WRF(m s^{-1})	Polar_WRF-CFD(m s^{-1})
9.7	3.86	4.84
9.8	7.49	5.54
9.9	8.28	5.35
9.10	6.82	3.81
9.11	1.61	1.40
All day	6.14	4.45

[Table. 12] 장보고 과학기지 강풍사례 2(2010년 9월 7일~2010년 9월 11일)에 AWS_2에 대한 Polar_WRF(3 km 해상도)와 Polar_WRF-CFD의 풍향 RMSE

Day	RMSE	
	Polar_WRF(°)	Polar_WRF-CFD(°)
9.7	29.87	26.92
9.8	21.99	21.65
9.9	68.25	65.69
9.10	68.09	81.63
9.11	85.24	103.05
All day	59.89	67.51

다. Polar_WRF-CFD(Polar_WRF 해상도 : 1km) 모델 결과 분석

- (1) 남극 장보고 과학기지 강풍사례 1(2010년 8월 18일~2010년 8월 22일)
- 앞에서 설명한 방법과 동일한 방법으로, Polar_WRF(1 km 해상도)의 모의 결과를 Polar_WRF-CFD 모델의 초기 및 경계 자료로 사용하였고, 그 결과를 분석하였음. 강풍사례(2010년 8월 18일~25일)에 대하여 Polar_WRF(1km 해상도)와 Polar_WRF-CFD 모델을 수행하였고, 이를 장보고 과학기지 AWS_1 지점의 관측 자료와 비교·분석하였음.
 - Fig. 35은 풍속과 풍향에 대한 AWS_1 지점의 관측 결과, Polar_WRF 모의 결과, Polar_WRF-CFD 모의 결과를 나타냄. 풍속의 경우, Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델이 전체적으로 과대 모의하였고, 3 km 해상도의 Polar_WRF 결과를 사용한 경우와 비교하여 2010년 08월 18일 12~23시를 제외하고 상대적으로 풍속이 높게 나타났음. 1 km와 3 km 해상도의 Polar_WRF를 사용한 경우, 지표 마찰에 의한 영향으로 Polar_WRF-CFD 모델이 모의한 모의 풍속보다 높게 모의함. 장보고 과학기지 AWS_1의 관측 풍속에 대한 Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델(2010년 8월 18일~25일)의 RMSE는 각각 14.47 m s^{-1} , 9.70 m s^{-1} 로 Polar_WRF-CFD 모델이 Polar_WRF 모델보다 관측과 유사하게 모의하였음. 그러나 1 km 해상도의 Polar_WRF와 비교하여 3 km 해상도의 Polar_WRF 모델이 관측과 유사하게 나타났음. 2010년 8월 18일~25일에 대한 일별 풍속 RMSE는 Polar_WRF의 경우에는 11.03, 24.23, 8.37, 15.05, 6.38 m s^{-1} 이고, Polar_WRF-CFD 모델의 경우에는 5.90, 16.32, 7.09, 10.31, 3.66 m s^{-1} 임(Table. 11).
 - 풍향의 경우, Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델의 모의 풍향은 매우 유사하게 나타났고, 1 km와 3 km 해상도의 Polar_WRF 모델 모의 풍향은 일부분을 제외하고 매우 유사하게 나타났음. Polar_WRF-CFD 모델의 모의 풍향은 건물이 존재하지 않기 때문에, Polar_WRF의 영향을 받아 유사한 경향이 나타남. 장보고 과학기지 AWS_1의 관측 풍향에 대한 Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델(2010년 8월 18일 ~ 25일)의 RMSE는 각각 54.22° , 61.26° 로 Polar_WRF의 모의 풍향이 관측과 유사하게 나타났음. 풍속과는 반대로 3 km 해상도의 Polar_WRF와 비교하여 1 km 해상도의 Polar_WRF 모델이 관측 풍속과 유사하게 나타났음. 2010년 8월 18일~25일에 대한

일별 풍향 RMSE는 Polar_WRF의 경우에는 35.32, 59.83, 19.78, 75.53, 63.32°이고, Polar_WRF-CFD 모델의 경우에는 39.47, 61.71, 20.69, 84.71, 76.12°임(Table 12). Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모의 풍향에는 큰 차이는 없었으나, 풍향에 대한 오차는 Polar_WRF가 대체적으로 작게 나타났음.

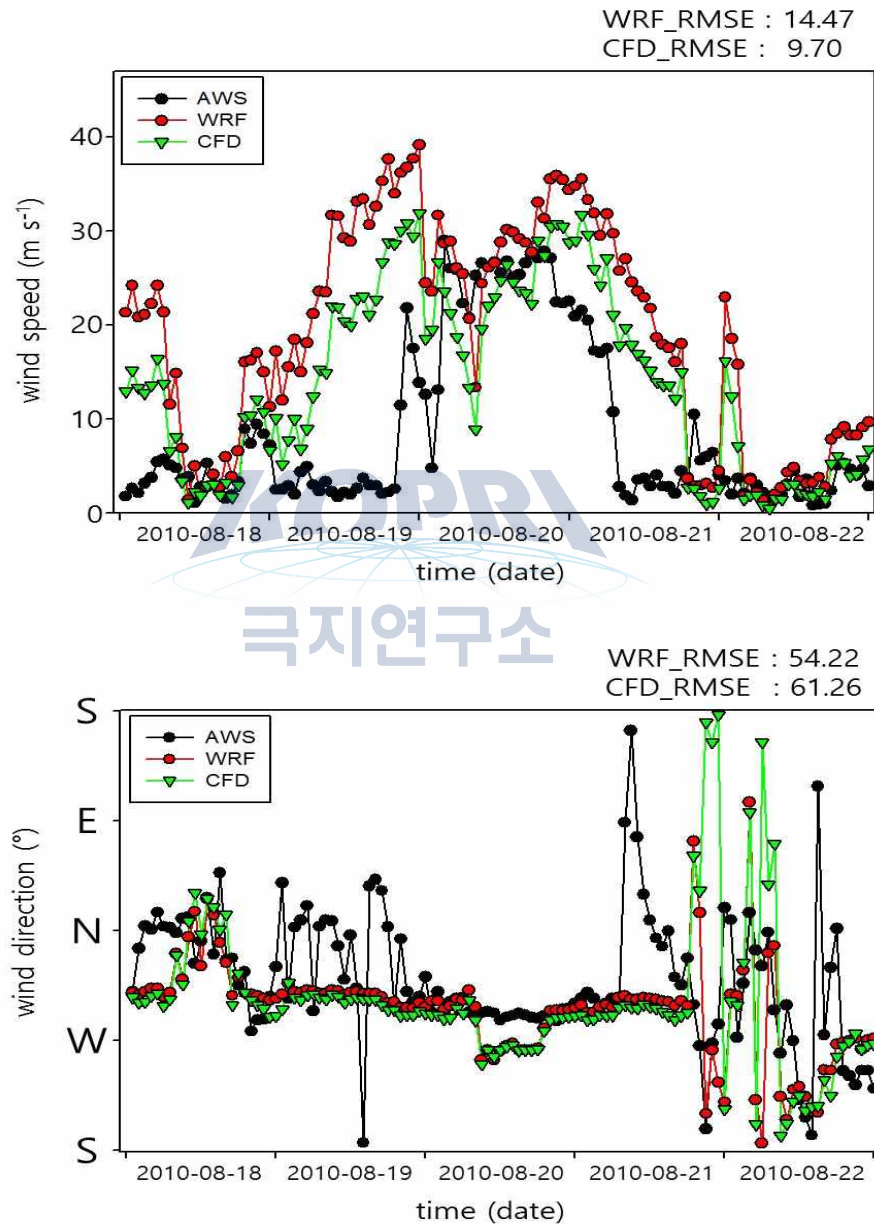


Fig. 35. 장보고 과학기지 강풍사례 1(2010년 8월 18일~2010년 8월 22일)에 대한 풍향, 풍속 시계열(AWS_1, Polar_WRF(1 km 해상도), Polar_WRF-CFD)

[Table. 13] 장보고 과학기지 강풍사례 1(2010년 8월 18일~2010년 8월 22일)에 AWS_1에 대한 Polar_WRF(1 km 해상도)와 Polar_WRF-CFD의 풍속 RMSE

Day	RMSE	
	Polar_WRF(m s^{-1})	Polar_WRF-CFD(m s^{-1})
8.18	11.03	5.90
8.19	24.23	16.32
8.20	8.37	7.09
8.21	15.05	10.31
8.22	6.38	3.66
All day	14.47	9.70

[Table. 14] 장보고 과학기지 강풍사례 1(2010년 8월 18일~2010년 8월 22일)에 AWS_1에 대한 Polar_WRF(1 km 해상도)와 Polar_WRF-CFD의 풍향 RMSE

Day	RMSE	
	Polar_WRF($^{\circ}$)	Polar_WRF-CFD($^{\circ}$)
8.18	35.32	39.47
8.19	57.83	61.71
8.20	19.78	20.69
8.21	75.53	84.71
8.22	63.32	76.12
All day	54.22	61.26

(2) 남극 장보고 과학기지 강풍사례 2(2010년 9월 7일~2010년 9월 11일)

- Fig. 36은 풍속과 풍향에 대한 AWS_2 지점의 관측 결과, Polar_WRF 모의 결과, Polar_WRF-CFD 모의 결과를 나타냄.
- 풍속의 경우, Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델은 전체적으로 관측값과 유사한 경향이 나타났음. 1 km 해상도의 Polar_WRF 모델을 사용한 경우에는 1 km 해상도의 Polar_WRF 모델을 사용한 경우보다 비교적 풍속을 과대모의 하였음. 그러나 Polar_WRF-CFD 모델은 1 km와 3 km 해상도의 Polar_WRF 모델을 사용한 경우에도, 거의 유사하게 풍속을 모의하였음. 장보고 과학기지 AWS_2의 관측 풍속에 대한 Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델(2010년 9월 7일~11일)의 RMSE는 각각 8.15 m s^{-1} , 4.92 m s^{-1} 임. 2010년 9월 7일~11일에 대한 일별 풍속 RMSE는 Polar_WRF

의 경우에는 2.94, 9.17, 14.33, 5.62, 1.47 m s^{-1} 이고, Polar_WRF-CFD 모델의 경우에는 2.76, 5.39, 8.54, 3.12, 1.31 m s^{-1} 임(Table. 13).

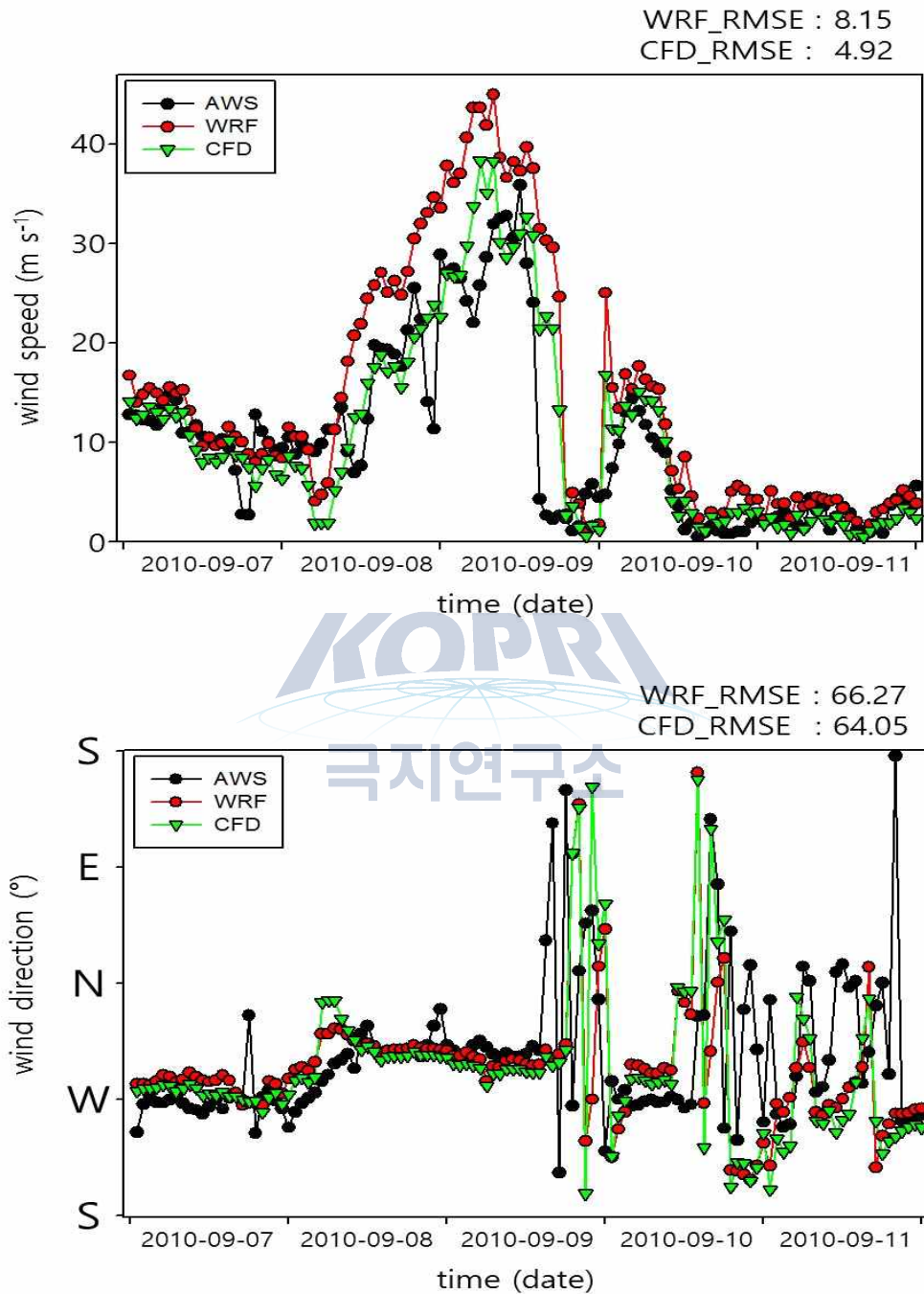


Fig. 36. 장보고 과학기지 강풍 사례 2(2010년 9월 7일~2010년 9월 11일)에 대한 풍향, 풍속 시계열(AWS_2, Polar_WRF(1 km 해상도), Polar_WRF-CFD)

- 풍향의 경우, Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델의 모의 풍향은 매우 유사하게 나타났고, 1 km와 3 km 해상도의 Polar_WRF 모델 모의 풍향은 일부분을 제외하고 매

우 유사하게 나타났음. 장보고 과학기지 AWS_2의 관측 풍향에 대한 Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델(2010년 9월 7일 ~ 11일)의 RMSE는 각각 66.27°, 64.05°로, Polar_WRF-CFD 모델이 관측 풍향에 더 가깝게 모의하였음. 3 km 해상도의 Polar_WRF 모델 결과를 사용한 경우와 비교한 결과, 3 km 해상도(59.89°)의 Polar_WRF 모델 결과가 1 km 해상도(66.27°)를 사용한 경우보다 더 나은 풍향 예측을 하였으나, Polar_WRF-CFD 모델은 3 km 해상도의 Polar_WRF 모델을 사용한 경우(67.51°)보다 1 km 해상도의 Polar_WRF 모델을 사용한 경우(64.05°)에 관측값에 더 가까운 풍향을 모의하였음. 2010년 9월 7일~11일에 대한 일별 풍향 RMSE는 Polar_WRF의 경우에는 24.03, 19.38, 91.21, 91.37, 65.85°이고, Polar_WRF-CFD 모델의 경우에는 19.23, 25.08, 86.26, 85.60, 68.89°임(Table. 14). 대상 기간동안의 강풍사례에 대해서는 Polar_WRF 모델보다 Polar_WRF-CFD 모델이 풍속과 풍향을 상대적으로 잘 모의하였음.

[Table. 15] 장보고 과학기지 강풍사례 2(2010년 9월 7일~2010년 9월 11일)에 AWS_2에 대한 Polar_WRF(1 km 해상도)와 Polar_WRF-CFD의 풍속 RMSE

Day	RMSE	
	Polar_WRF(m s^{-1})	Polar_WRF-CFD(m s^{-1})
9.7	2.94	2.76
9.8	9.17	5.39
9.9	14.33	8.54
9.10	5.62	3.12
9.11	1.47	1.31
All day	8.15	4.92

[Table. 16] 장보고 과학기지 강풍사례 2(2010년 9월 7일~2010년 9월 11일)에 AWS_2에 대한 Polar_WRF(1 km 해상도)와 Polar_WRF-CFD의 풍향 RMSE

Day	RMSE	
	Polar_WRF(°)	Polar_WRF-CFD(°)
9.7	24.03	19.23
9.8	19.38	25.08
9.9	91.21	86.26
9.10	91.37	85.60
9.11	65.85	68.89
All day	66.27	64.05

3.2.3 장보고 과학기지에 건설에 의한 대기질 환경 변화 분석

가. 장보고 과학기지 건설 전·후에 대한 배경물질(스칼라) 농도 변화

- 장보고 과학기지가 위치한 남극은 인간 활동에 의해 끊임없이 진행되는 환경변화의 영향을 가장 적게 받은 지역으로 과학적으로 연구가치가 매우 높은 곳임. 남극에서 감지되는 대기 환경 변화는 전 지구적 환경의 변화를 가늠할 수 있는 척도가 될 수 있으므로 과거로부터 현재까지 많은 연구가 진행되고 있음(Robinson et al., 1984; Tanaka et al., 1987; Khairy et al., 2016). Jung et al.(2002)은 남극 세종기지가 위치한 킹조지섬을 대상으로 VOCs, SO₂와 NO₂를 측정하여 남극지역의 오염 물질의 농도를 조사한 바 있으며, Choi et al.(2007)은 세종기지에서 전 세계적으로 규제되고 있는 물질인 PCBs(polychlorinated biphenyls)를 모니터링하여 남극에 영향을 미치는 대기 오염 물질에 대하여 연구를 수행하였음. 이러한 직접적 관측을 통한 연구 이외에도 수치모의 실험을 통하여 대기오염 물질의 확산을 간접적으로 추정할 수 있음. 본 내용에서는 수치 도메인의 경계에서 스칼라 물질을 방출시켜 장보고 과학기지 건설이 오염 물질 분포에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 함.

(1) 장보고 과학기지 기지 주변 농도 변화 분석(16방위)

- 장보고 과학기지 건설이 배경물질 농도 변화에 미치는 영향을 분석하기 위해 16방위(북, 북북동, 북동, 동북동, 동, 동남동, 남동, 남남동, 남, 남남서, 남서, 서남서, 서북서, 북서, 북북서)에 대하여 스칼라 물질 확산 실험을 수행하였음. 각 방향에 대한 유입 풍속은 장보고 과학기지 건설 후에 AWS 관측 지점에서의 평균 풍속($z=5.5$ m에서 3.16 m s^{-1})으로 설정하였음. 오염 물질의 확산을 위해, 수치 도메인의 경계에서 초당 50 ppb의 오염물질이 유입된다고 가정하였음(Fig. 37).
- Fig. 38는 장보고 과학기지 건설 전과 후에 대한 장보고 과학기지 주변 지표($z=1.25$ m)에서의 오염 물질의 평균 농도 변화율을 나타냄. 16방위에 대하여 수치모의 실험을 수행한 결과, 기지 건설 후의 지표 부근($z=1.25$ m) 오염 물질 농도 감소는 기지 건설 전과 비교하여 최대 3.31%에서 최소 0.88%로 나타났고, 16방위에 대하여 평균한 결과 2.42%의 농도 감소가 나타났음.

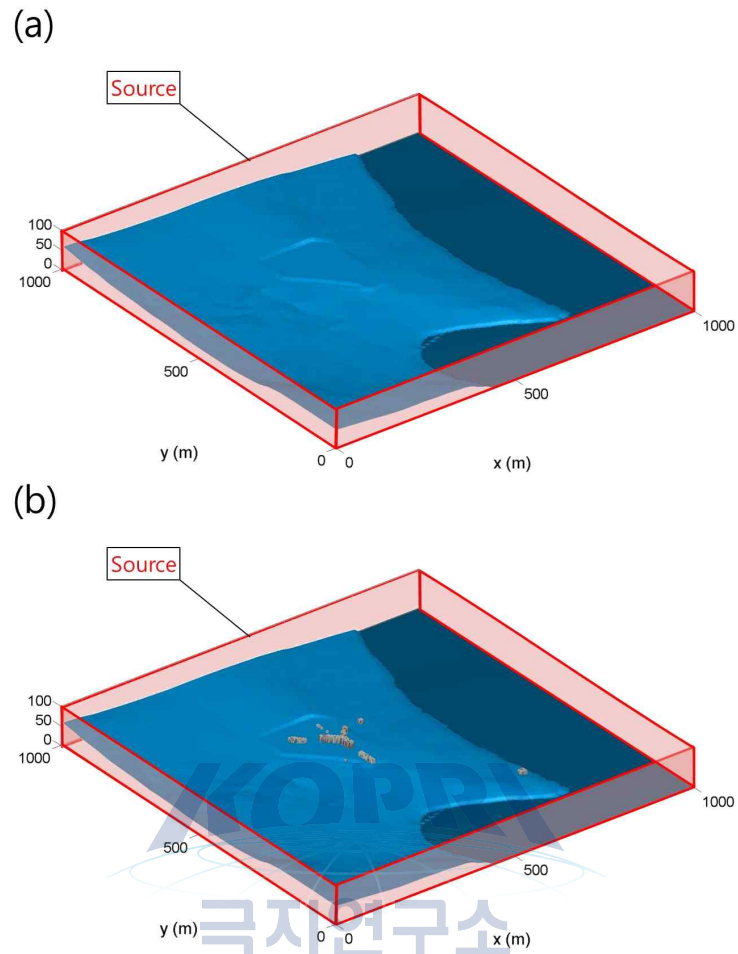


Fig. 37. 장보고 과학기지 건설 (a) 전과 건설 (b) 후의 오염 물질 확산 실험 도메인

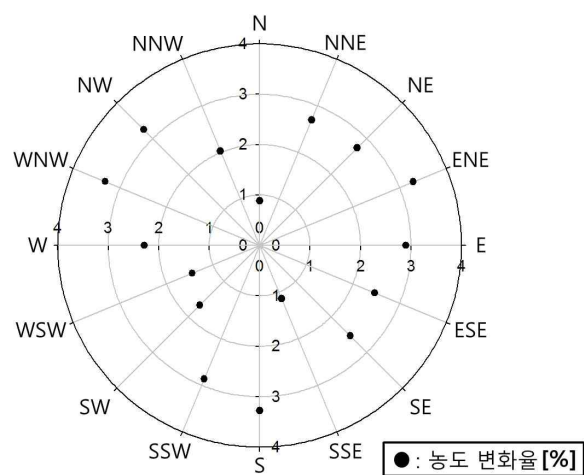


Fig. 38. 장보고 과학기지 건설 전·후에 대한 기지 주변 지표($z=1.25$ m)에서의 오염 물질 농도 변화율(16풍향)

(2) 장보고 과학기지 기지 주변 상세 농도장 분석(북, 북북동, 북동, 동북동풍)

- Fig. 39~42은 각각 북풍, 북북동풍, 북동풍과 동북동풍이 부는 경우의 배경물질의 농도장 및 농도 변화율을 나타냄. 북풍이 부는 경우, 기지 북쪽에 위치한 사면을 따라 기지를 향해 불어오는 흐름을 따라 오염물질이 수송됨. 기지 건설 전과 후, 기지 부근에서 약 30 ppb ~ 40 ppb의 농도 분포가 나타나고 기지의 동쪽에 위치한 해안에서는 50 ppb 이상의 높은 농도가 나타남.
- 기지 건설 전과 후의 농도 변화율은 0.9%로 거의 변화가 나타나지 않았고 본관동과 정비동 사이, 그리고 발전동의 남측에서 상대적으로 배경물질의 농도가 증가하는 영역이 나타났음(Fig. 39). 북북동풍이 부는 경우, 기지 주변에서 약 30 ppb ~ 40 ppb의 농도가 나타나고 기지의 동쪽과 남동쪽 해안에서 50 ppb 이상의 농도가 나타남. 기지 건설 전과 후의 배경물질의 농도 변화는 2.7% 감소가 나타났고 북동쪽에서 불어오는 흐름에 의해 본관동 주변에서 농도가 낮아지는 영역이 나타남.
- 반대로 정비동과 본관동의 남서쪽, 정비동의 남서쪽에서 농도가 다소 증가하는 영역이 나타남(Fig. 40). 북동풍이 부는 경우, 기지 부근에서 약 30ppb ~ 43 ppb의 농도가 나타남. 기지 건설 전에 대한 건설 후의 농도 변화는 2.7% 감소가 나타나며, 본관동 주변에서 농도가 감소하는 영역이 나타나고 기지의 남서쪽 부근에서 농도가 다소 증가하는 영역이 나타남(Fig. 41).
- 동북동풍이 부는 경우, 기지 건설 전과 후에 약 37 ppb ~ 43 ppb의 농도가 나타남. 기지 건설 전에 대한 건설 후의 배경물질 농도 변화율은 3.3% 감소가 나타났고 기지 주변에서 농도의 감소가 나타남. 그러나 기지의 서쪽 부근에서 농도가 다소 증가하는 영역이 나타남(Fig. 42).

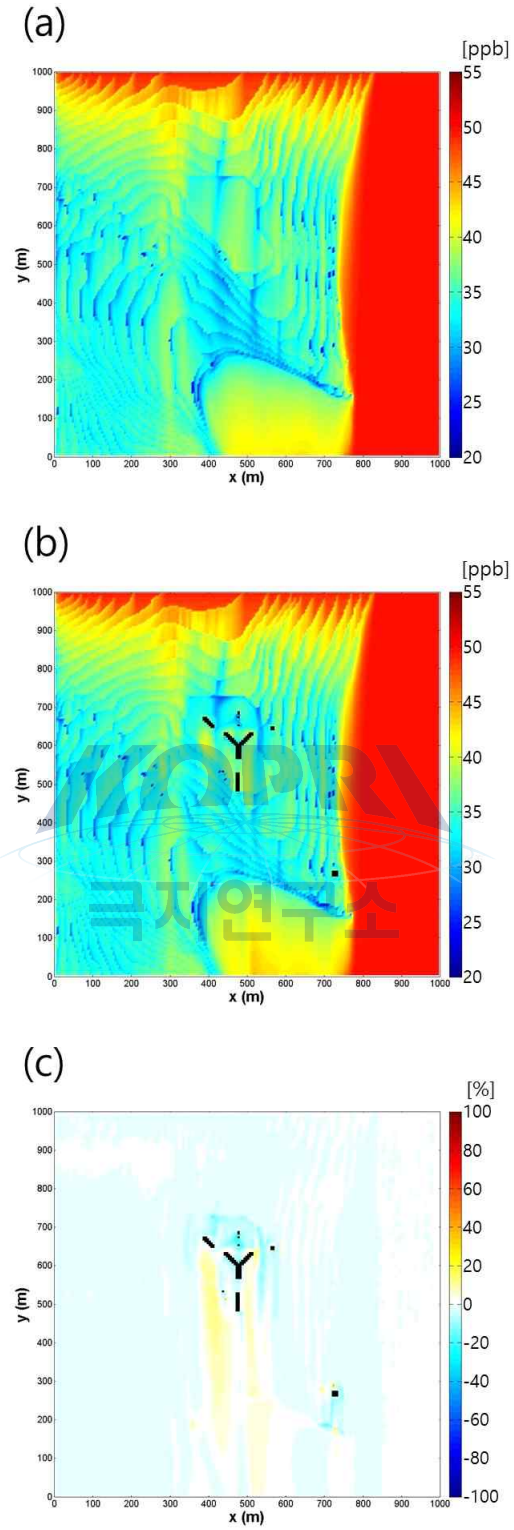


Fig. 39. 유입 풍향이 북풍(0°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표($z=1.25$ m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

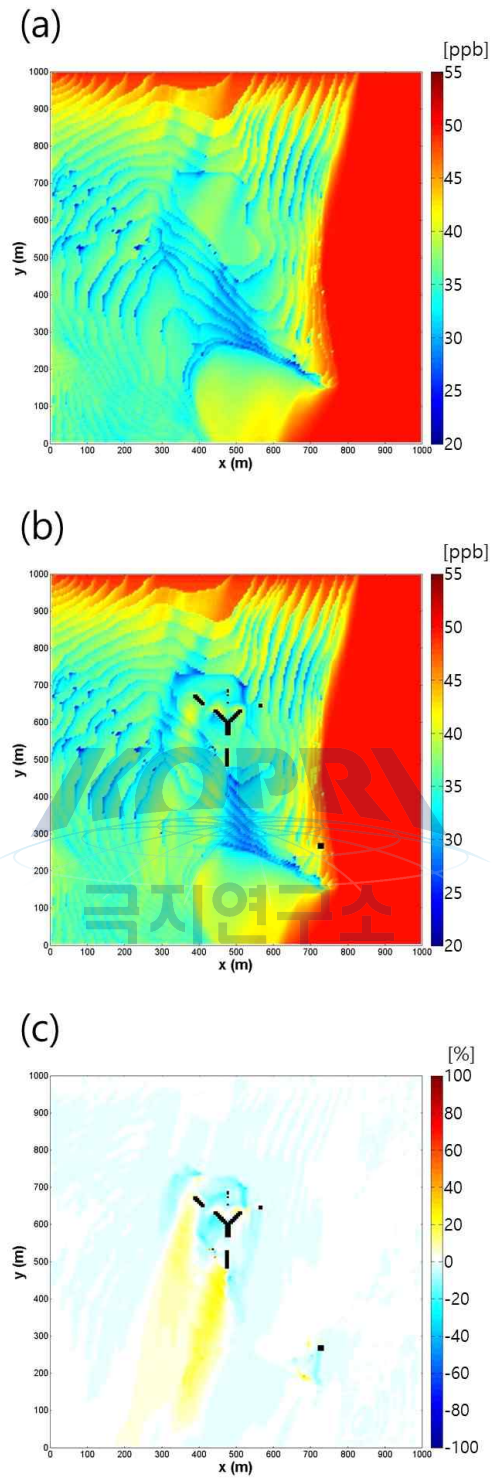


Fig. 40. 유입 풍향이 북북동풍(22.5°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표($z=1.25$ m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

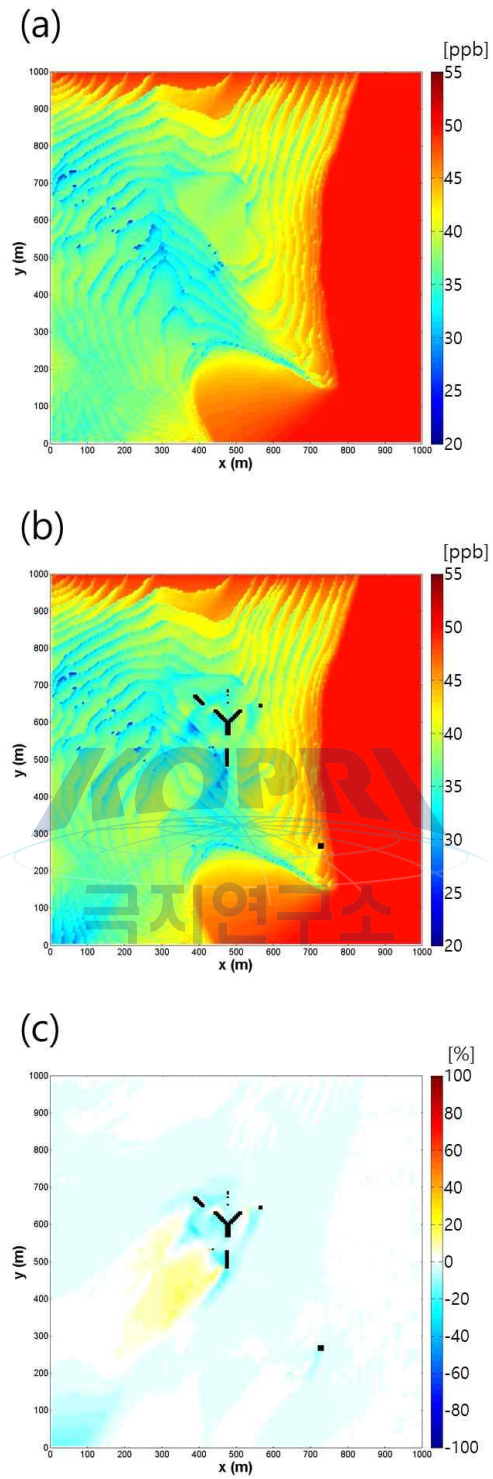


Fig. 41. 유입 풍향이 북동풍(45°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표($z=1.25$ m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

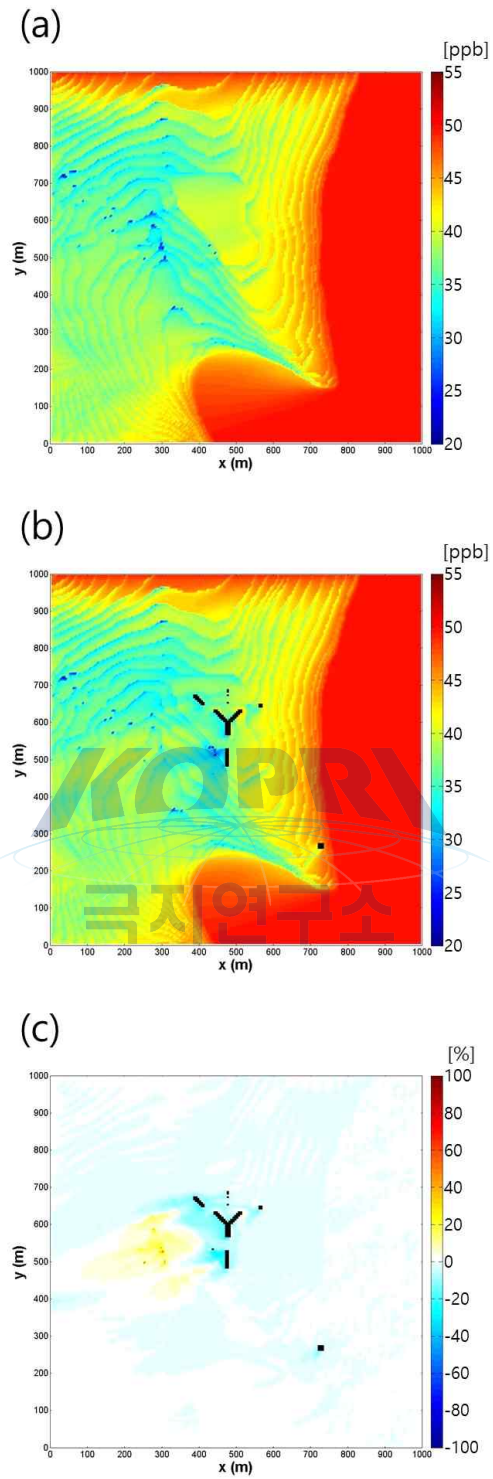


Fig. 42. 유입 풍향이 동북동풍(67.5°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표($z=1.25$ m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

(3) 장보고 과학기지 기지 주변 상세 농도장 분석(동, 동남동, 남동, 남남동풍)

- Fig. 43~46은 각각 동풍, 동남동풍, 남동풍과 남남동풍이 부는 경우의 배경물질 농도장 및 농도 변화율을 나타냄. 동풍이 부는 경우, 동쪽 해안으로부터 사면을 따라 기지를 향해 불어오는 흐름을 따라 오염물질의 수송이 나타나게 됨. 기지 건설 전과 후, 기지 부근에서는 약 30 ppb ~ 40 ppb의 농도가 나타나고 기지의 동쪽에 위치한 해안에서 50 ppb 이상의 높은 농도를 나타냄. 이에 비하여 육지에서는 상대적으로 낮은 농도가 나타남. 기지 건설 전에 대한 건설 후의 농도 변화율은 2.9% 감소가 나타났음. 건물의 바로 인접한 영역에서는 농도의 감소가 나타났으나, 본관동의 서쪽에서 반대로 배경물질의 농도가 증가하는 영역이 나타났음(Fig. 43).
- 동남동풍이 부는 경우, 기지 주변에서 약 35 ppb ~ 43 ppb의 농도분포가 나타나고 기지의 동쪽과 남쪽 해안에서 50 ppb 이상의 농도가 나타남. 기지 건설 전에 대한 건설 후의 농도 변화율은 2.5% 감소가 나타났음. 기지의 남동쪽 해안에서 불어오는 흐름에 의해 본관동 주변에서 농도가 감소하는 영역이 나타나고 본관동의 북서쪽에서 농도가 증가하는 영역이 부분적으로 나타남(Fig. 44).
- 남동풍이 부는 경우, 기지 부근에서 35 ppb ~ 43 ppb의 농도가 나타나고 기지 건설 전에 대한 건설 후의 농도 변화는 2.5% 감소하였음. 남동쪽에서 불어오는 흐름에 의해 기지의 풍하측 영역에서 농도가 낮아지는 영역이 나타남(Fig. 45). 남남동풍이 부는 경우, 기지 건설 전에 40 ppb의 농도가 나타나고 기지 건설 후에 농도가 다소 감소함. 기지 건설 전에 대한 건설 후의 농도 변화율은 1.1% 감소가 나타났고 남동풍의 경우와 유사하게 기지의 북서쪽 영역에서 농도의 감소가 나타남(Fig. 46).

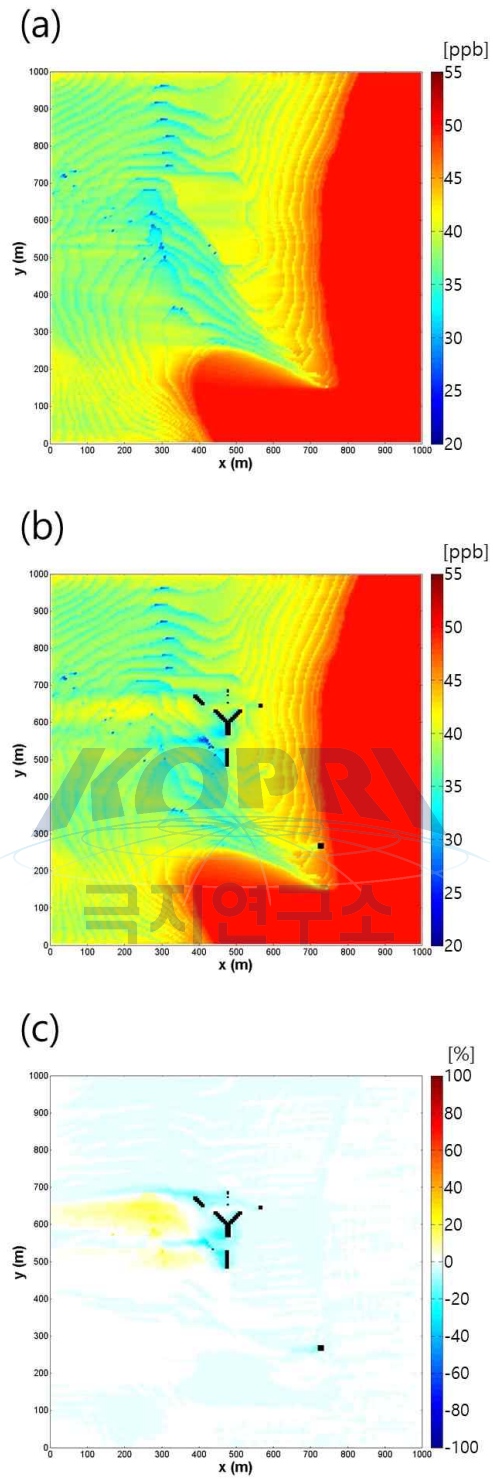


Fig. 43. 유입 풍향이 동풍(90°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표($z=1.25$ m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

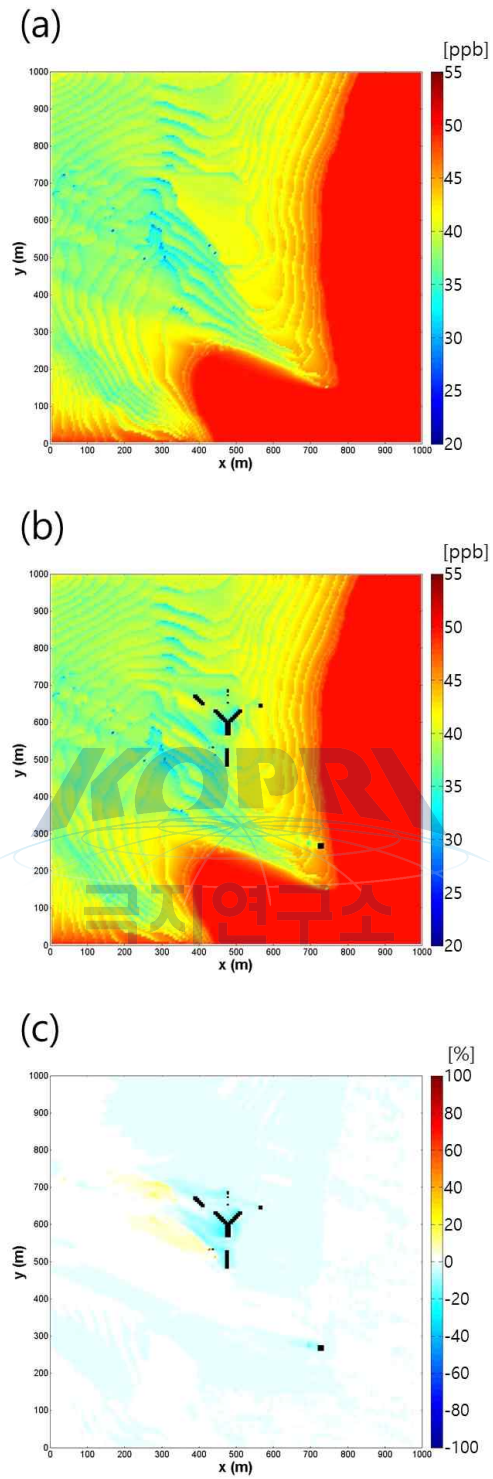


Fig. 44. 유입 풍향이 동남동풍(112.5°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표($z=1.25$ m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

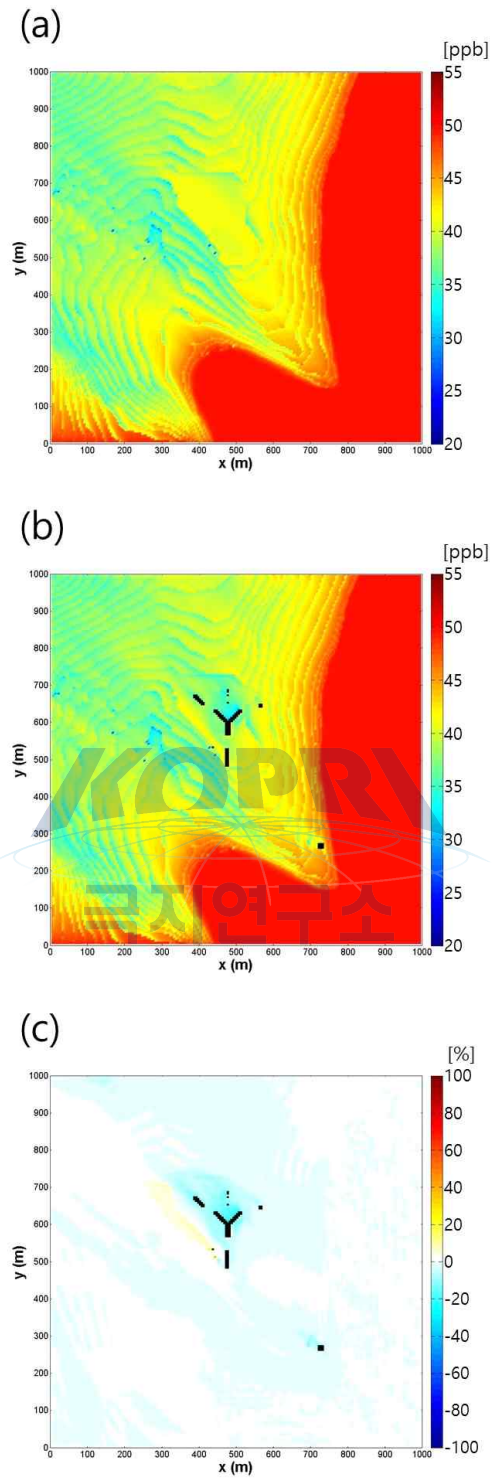


Fig. 45. 유입 풍향이 남동풍(135°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표($z=1.25$ m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

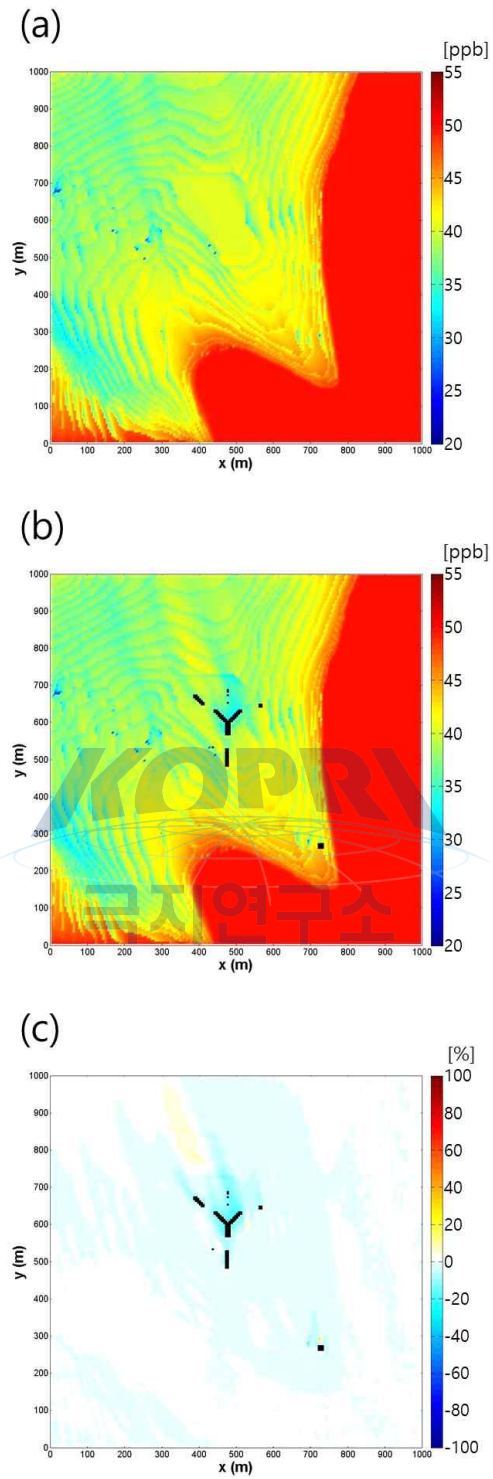


Fig. 46. 유입 풍향이 남남동풍(157.5°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표($z=1.25$ m) 오염물질 농도장과 (c)오염물질 농도 변화율

(4) 장보고 과학기지 기지 주변 상세 농도장 분석(남, 남남서, 남서, 서남서풍)

- Fig. 47~50은 각각 남풍, 남남서풍, 남서풍과 서남서풍이 부는 경우의 배경물질 농도 및 농도 변화율을 나타냄. 남풍이 부는 경우, 기지 남쪽해안으로부터 사면을 따라 기지를 향해 흐름이 나타나고 이를 따라 오염물질이 수송됨. 기지 건설 전과 후, 기지 부근에서 30 ppb ~ 40 ppb의 농도를 나타내고 기지의 남쪽과 동쪽에 위치한 해안에서 50 ppb 이상의 높은 농도를 나타냄. 기지 건설 전과 후의 농도 변화율은 3.3%로 나타났고 본관동의 북쪽에서 농도가 낮게 나타났음(Fig. 47).
- 남남서풍이 부는 경우, 기지 주변에서 25 ppb ~ 35 ppb의 농도를 나타내고 기지의 동쪽과 남쪽 해안에서 50 ppb 이상의 농도가 나타남. 기지 건설 전과 후의 농도 변화율 2.9% 감소하였고 남서쪽에 불어오는 흐름에 의해 본관동 주변에서 농도가 낮아지는 영역이 나타나며 특히 본관동 북측면에서 크게 약화됨(Fig. 48).
- 남서풍이 부는 경우, 기지 부근에서 25ppb ~ 35 ppb의 농도가 나타나고 기지 건설 전과 후의 농도 변화율은 1.7% 감소하였고 본관동 주변에서 낮아지고 기지의 북동쪽 부근에서 농도가 다소 증가하는 영역이 나타남(Fig. 49).
- 서남서풍이 부는 경우, 기지 건설 전 35 ppb ~ 40 ppb의 농도가 나타나고 기지 건설 후에 농도가 다소 감소함. 기지 건설 전과 후의 농도 변화율은 1.4% 감소하였고 본관동 주변에서 농도가 감소하는 영역이 나타나고 기지 북동쪽에서 농도가 다소 증가하는 영역이 나타남(Fig. 50).

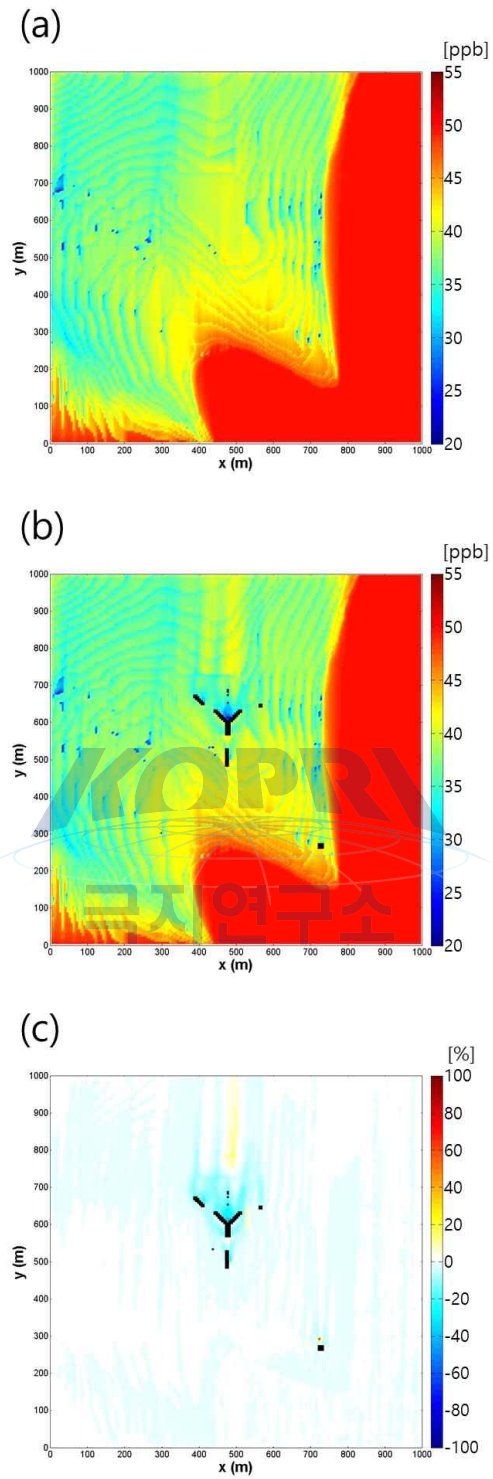


Fig. 47. 유입 풍향이 남풍(180°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표($z=1.25$ m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

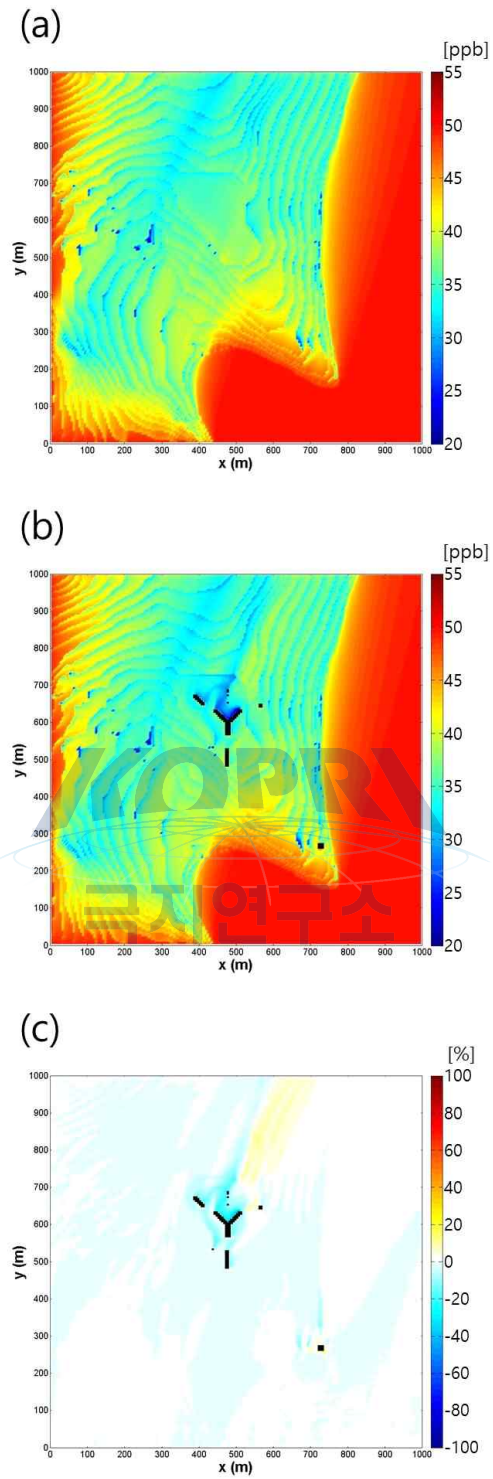


Fig. 48. 유입 풍향이 남남서풍(202.5°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표($z=1.25$ m) 오염물질 농도장과 (c)오염물질 농도 변화율

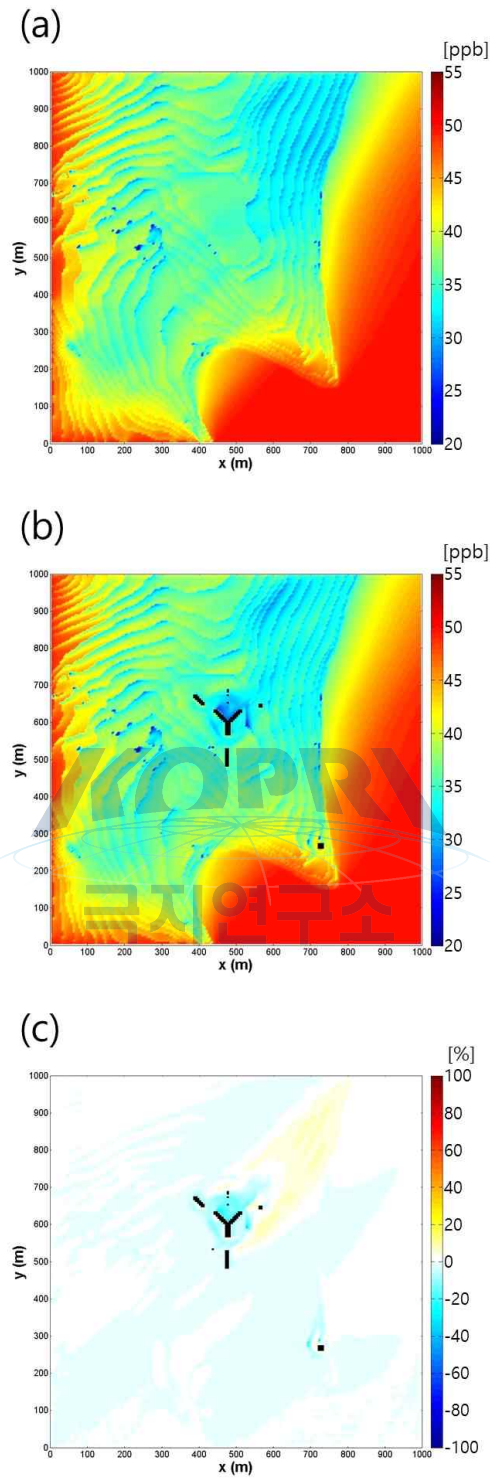


Fig. 49. 유입 풍향이 남서풍(225°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표($z=1.25$ m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

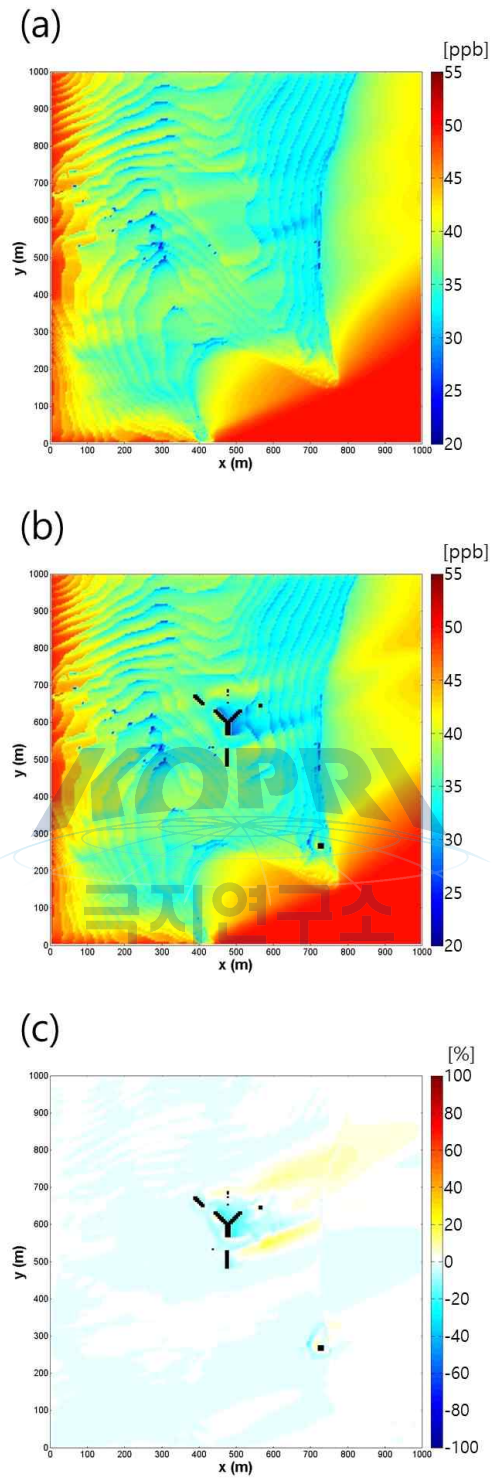


Fig. 50. 유입 풍향이 서남서풍(247.5°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표($z=1.25$ m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

(5) 장보고 과학기지 기지 주변 상세 농도장 분석(서, 서북서, 북서, 북북서풍)

- Fig. 51~54는 각각 서풍, 서북서풍, 북서풍과 북북서풍이 부는 경우의 배경물질 농도 및 농도 변화율을 나타냄. 서풍이 부는 경우, 기지 서쪽에 위치한 사면을 따라 기지를 향해 불어오는 흐름을 따라 오염물질이 수송됨. 기지 건설 전과 후, 기지 부근에서 약 30 ppb ~ 35 ppb의 농도를 나타내고 기지의 동쪽에 위치한 해안에서 약 43 ppb 이상의 농도가 나타남. 기지 건설 전과 후의 농도 변화율은 2.3%로 나타났고 본관동과 발전동 사이, 상층대기관측동의 동측에서 상대적으로 배경물질의 농도가 증가하는 영역이 나타났음(Fig. 51).
- 서북서풍이 부는 경우, 기지 주변에서 35 ppb ~ 40 ppb의 농도를 나타내고 기지의 북동쪽 해안에서 50 ppb 이상의 농도가 나타남. 기지 건설 전과 후의 농도 변화율 3.3% 감소하였고 북서쪽에 불어오는 흐름에 의해 본관동 주변에서 농도가 낮아지는 영역이 나타나고 본관동의 남동쪽에서 농도가 증가하는 영역이 나타남(Fig. 52). 북서풍이 부는 경우, 기지 부근에서 약 35ppb의 농도가 나타나고 기지 건설 전과 후의 농도 변화율은 3.2% 감소하였고 본관동 주변에서 낮아지고 기지의 남동쪽 부근에서 농도가 다소 증가하는 영역이 나타남(Fig. 53). 북북서풍이 부는 경우, 기지 건설 전에 약 40 ppb의 농도가 나타나고 기지 건설 후에 농도가 다소 감소함. 기지 건설 전과 후의 농도 변화율은 2.0% 감소하였고 본관동 주변에서 농도가 감소하는 영역이 나타나고 기지 남동쪽에서 농도가 다소 증가하는 영역이 나타남(Fig. 54).

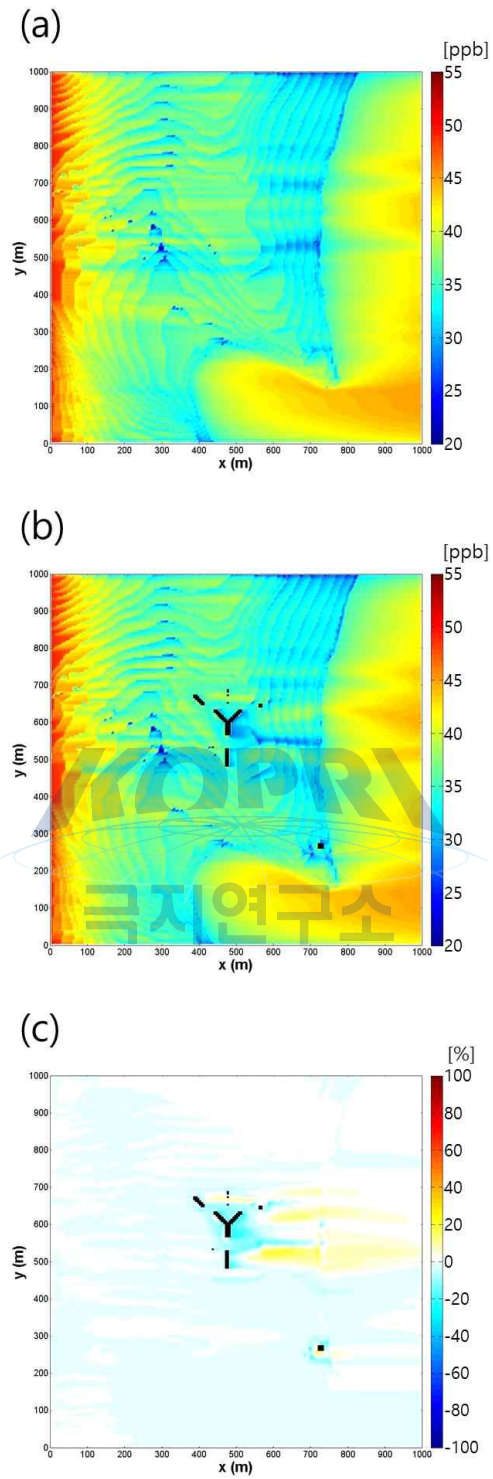


Fig. 51. 유입 풍향이 서풍(270°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표($z=1.25$ m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

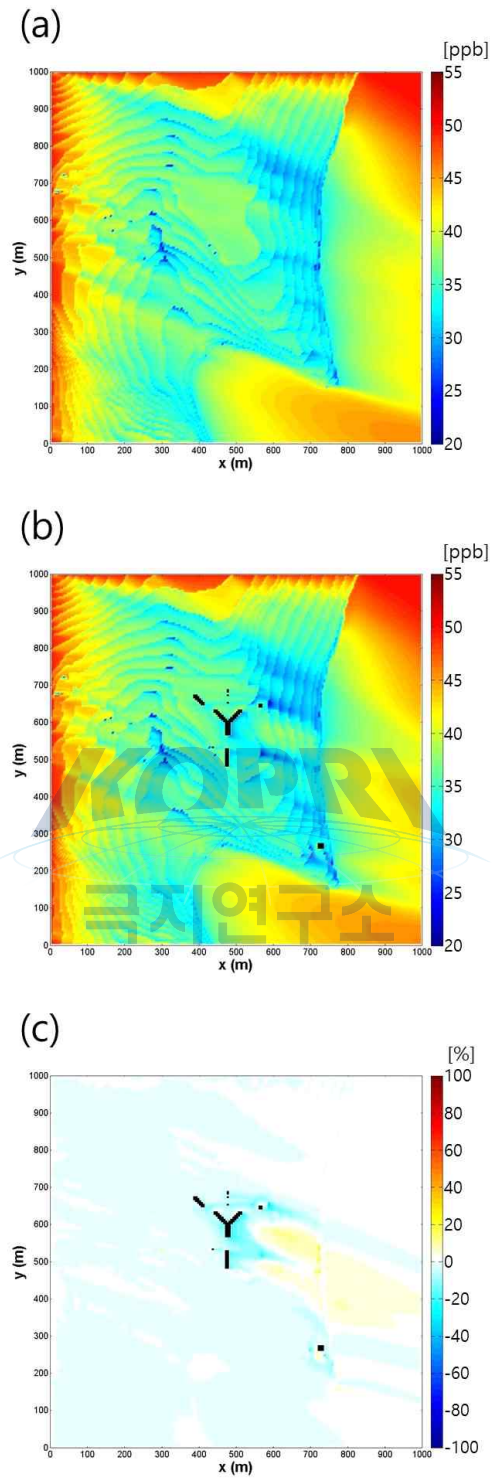


Fig. 52. 유입 풍향이 서북서풍(292.5°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표($z=1.25$ m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

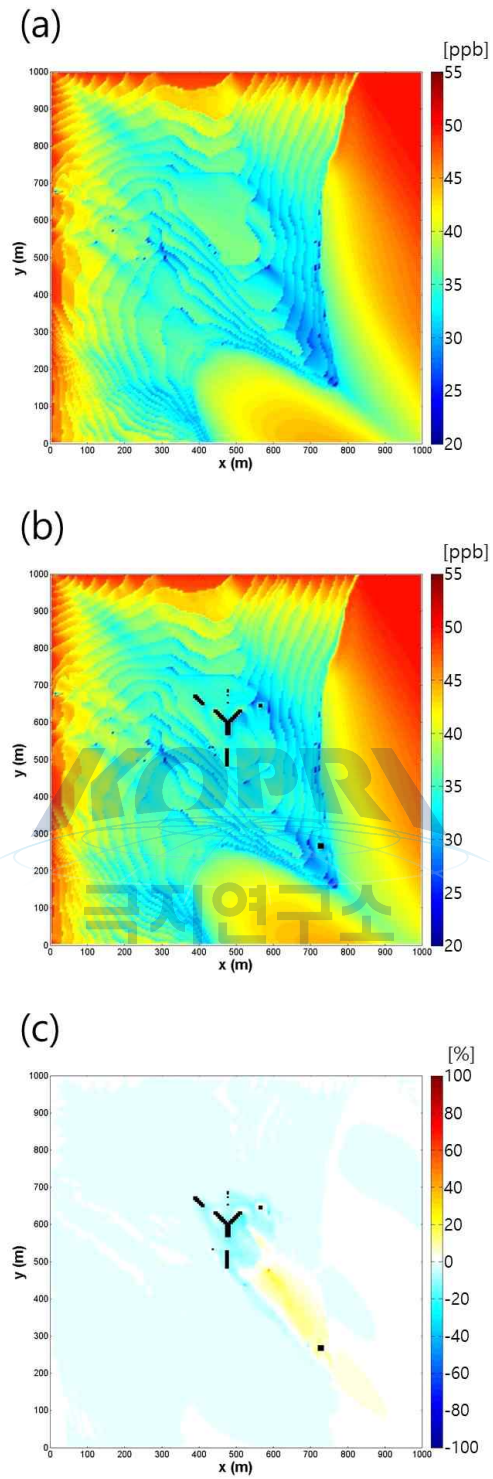


Fig. 53. 유입 풍향이 북서풍(315°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표($z=1.25$ m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

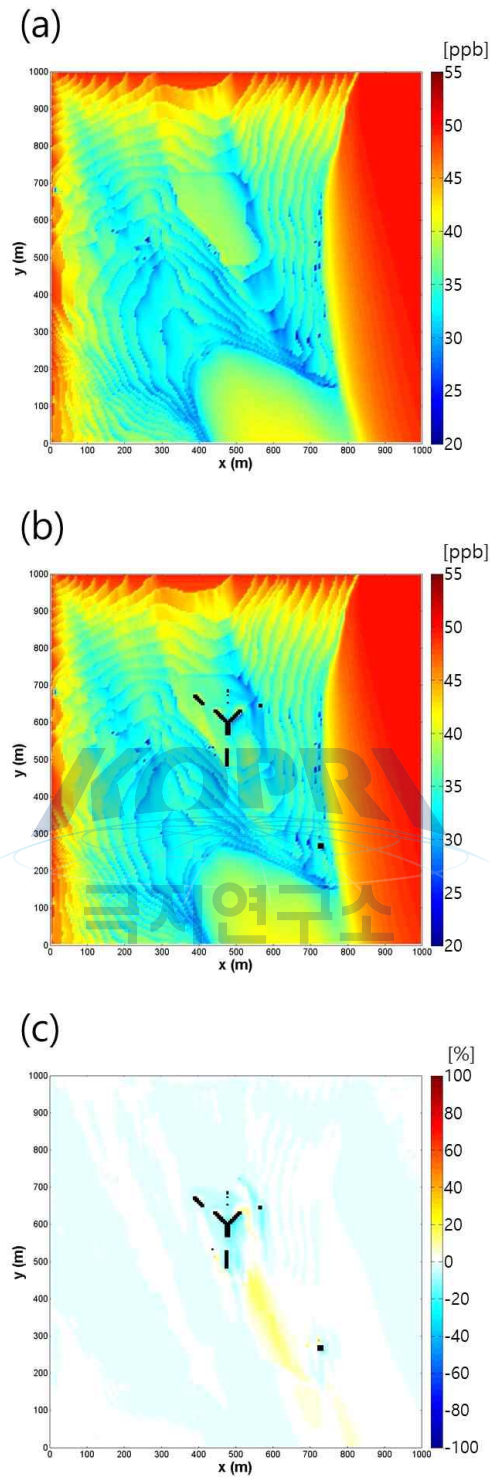


Fig. 54. 유입 풍향이 북북서풍(337.5°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표($z=1.25$ m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

3.2.4 장보고 과학기지의 건설에 의한 열환경 분석

가. 장보고 과학기지 건설 전·후에 대한 기지 주변 기온 분석

- 남극은 혹한의 기후대로 순간 최대 풍속이 80 m s^{-1} 에 이르며 기온이 영하 50°C 까지 떨어지는 극한 환경을 가지고 있음. 극한 환경에 설치된 장보고 과학기지는 관측 환경과 대기질에 영향을 미침. 컨테이너 등으로 이루어진 장보고 과학기지는 주변의 열 환경에도 영향을 미칠 것으로 예상됨. 그러나 남극과 같은 극한 기후에서 건물 벽면 온도에 대한 정보와 열적 효과에 대한 선행연구가 매우 부족한 실정임. 본 연구에서는 강설이 잦은 일본 북해도 지방에서 강설에 의한 건물 온도 변화 연구를 토대로 장보고 과학기지 건설에 의한 온도 변화 연구를 수행하였음.

(1) 장보고 과학기지 기지 주변 기온 변화 분석(16방위)

- 장보고 과학기지 건설이 주변 열환경에 미치는 영향을 분석하기 위해, 장보고 과학기지 건설 전과 후에 대하여 16방위(북, 북북동, 북동, 동북동, 동, 동남동, 남동, 남남동, 남, 남남서, 남서, 서남서, 서북서, 북서, 북북서)에 대하여 수치 실험을 수행하였음. 각 방향에 대한 유입 풍속은 장보고 과학기지 건설 후에 AWS 관측 지점에서의 평균 풍속 ($z=5.5 \text{ m}$ 에서 3.16 m s^{-1})으로 설정하였음. 지표면 온도 변화 실험(Mochida et al., 2002)을 위해 지표면에 눈이 있는 경우와 눈이 없는 경우를 고려하였음(Table. 15).

[Table. 17] 눈 적설 유·무에 따른 지표면 차등 가열 효과 분석을 위한 지표면 온도 설정

	기온(K)	지표온도(K)	건물벽면온도(K)
지표에 눈이 없는 경우	276	281	281
지표에 눈이 있는 경우	277	273	287

- Fig. 55은 지표면에 눈이 없는 경우, 장보고 과학기지 건설 전·후의 지표 부근($z=1.25 \text{ m}$) 기온 변화율을 나타냄. 16방위 유입 풍향에 대하여 장보고 과학기지 주변 기온장을 분석한 결과, 기온은 기지 건설 전과 건설 후(0.01% 증가)의 변화가 거의 나타나지 않았음. Fig. 56는 지표면에 눈이 있는 경우, 장보고 과학기지 건설 전·후의 지표 부근($z=1.25 \text{ m}$) 기온 변화율을 나타냄. 16방위 유입 풍향에 대하여 장보고 과학기지 주변 기온장을 분석한 결과, 지표면에 눈이 있는 경우에도 기온의 변화(0.07% 증가)가 거의 나타나지 않았음.

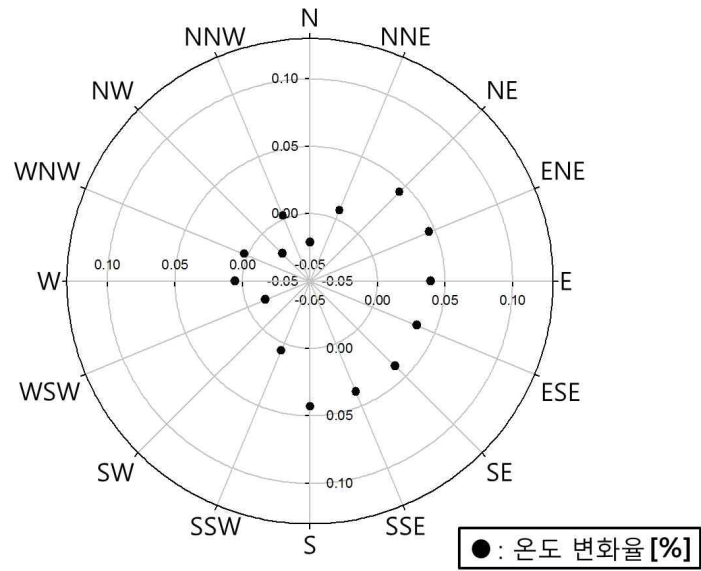


Fig. 55. 지표면에 눈이 없는 경우, 장보고 과학기지 건설 전·후에 대한 지표 부근($z=1.25$ m) 기온 변화율 (16풍향)

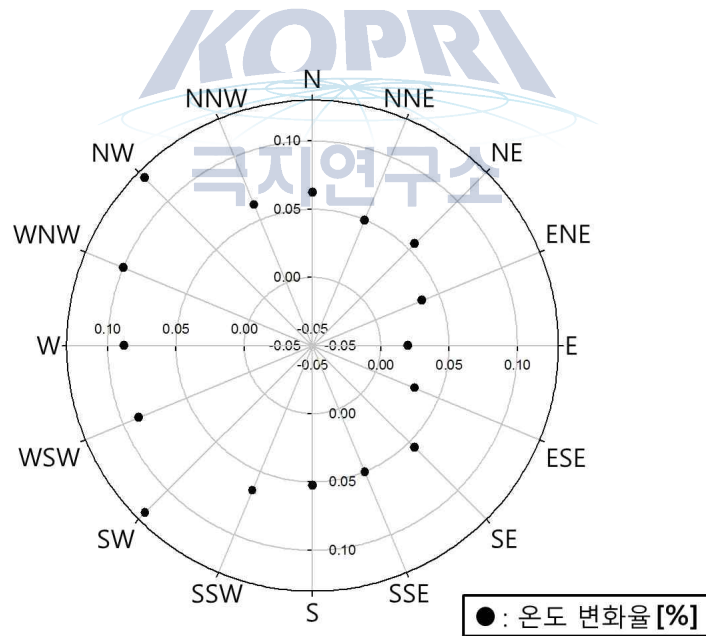


Fig. 56. 지표면에 눈이 있는 경우, 장보고 과학기지 건설 전·후에 대한 지표 부근($z=1.25$ m) 기온 변화율 (16풍향)

(2) 장보고 과학기지 기지 주변 상세 온도장 분석(북, 북북동, 북동, 동북동풍)

○ Fig. 57~60은 각각 북풍, 북북동풍, 북동풍, 동북동풍이 부는 경우의 지표($z=1.25$ m) 기온장 및 기온 변화율을 나타냄. 북풍이 부는 경우, 기지 북쪽의 산사면을 따라 기지 방향으로 흐름이 나타남. 지표에 눈이 없다고 가정한 경우, 기지 건설 전에는 기지 주변 지표($z=1.25$ m)에서 277~279 K의 온도 분포를 나타냄. 기지 건설 후에는 건물 표면의 인접한 영역에서 부분적으로 온도가 증가하였음. 지표에 눈이 있다고 가정한 경우, 기지 건설 전에는 기지 주변 지표($z=1.25$ m)에서 275 K~277 K의 온도 분포를 나타냄. 기지 건설 후에는 기지 건물의 주변과 기지의 남쪽 부근 지표에서 기온이 다소 상승하였음. 그러나 기지 주변에서의 지표 부근 기온 변화율은 0.06%로 매우 미비하게 나타났음(Fig. 57).

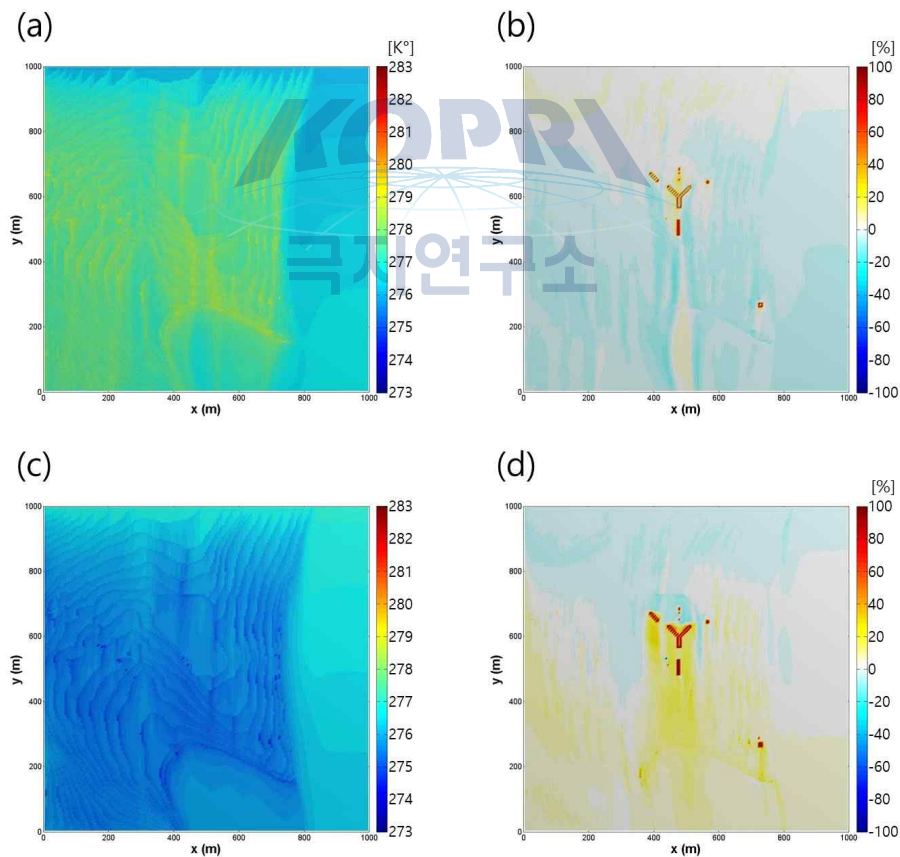


Fig. 57. 유입 풍향이 북풍(0°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

- 북북동풍, 북동풍, 동북동풍이 부는 경우에는 기지의 북동쪽 해안으로부터 기지를 향해 흐름이 나타남. 지표에 눈이 없다고 가정한 경우와 지표에 눈이 있다고 가정한 경우 모두 유입류가 북풍인 실험과 유사한 온도 분포가 나타났음. 기지 건설 후, 지표에 눈이 없다고 가정한 경우에는 건물 부근에서 온도 상승이 나타났고, 지표에 눈이 있다고 가정한 경우에는 기지의 풍하층 영역에서 온도가 상승하였음(Fig. 58, 59, 60).

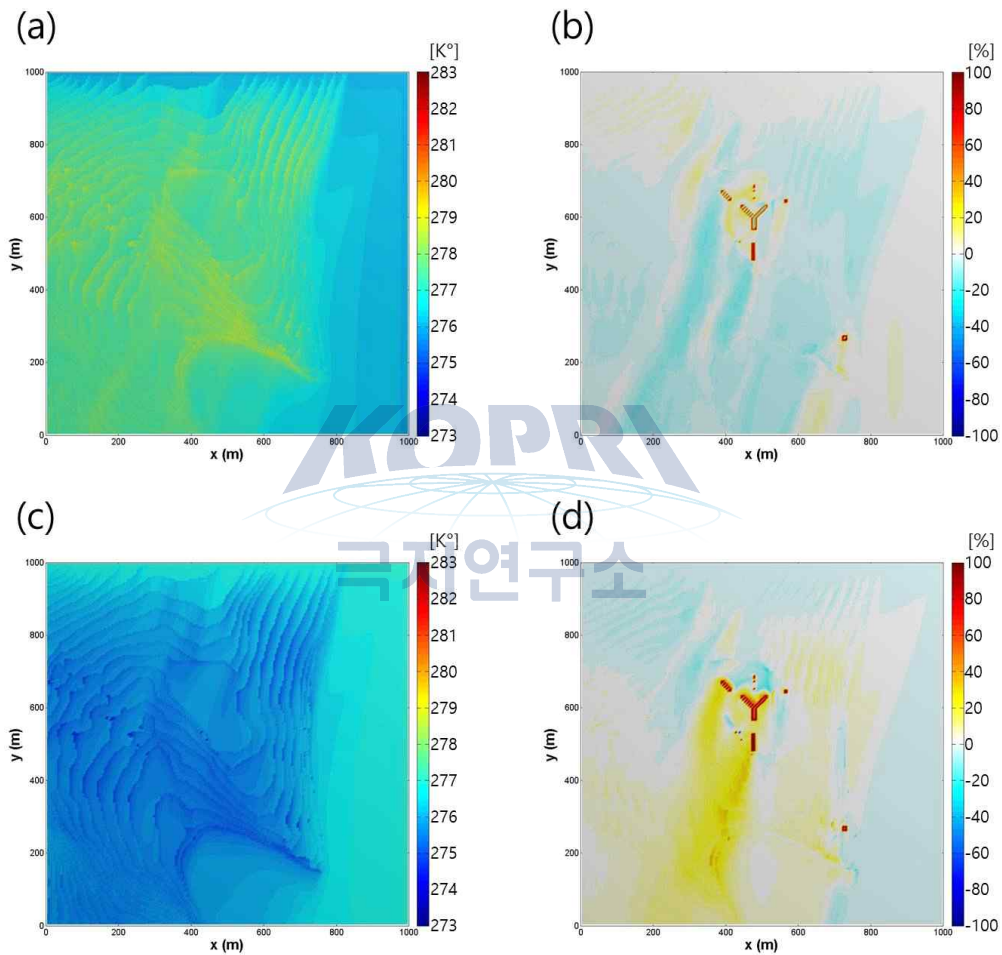


Fig. 58. 유입 풍향이 북북동풍(22.5°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

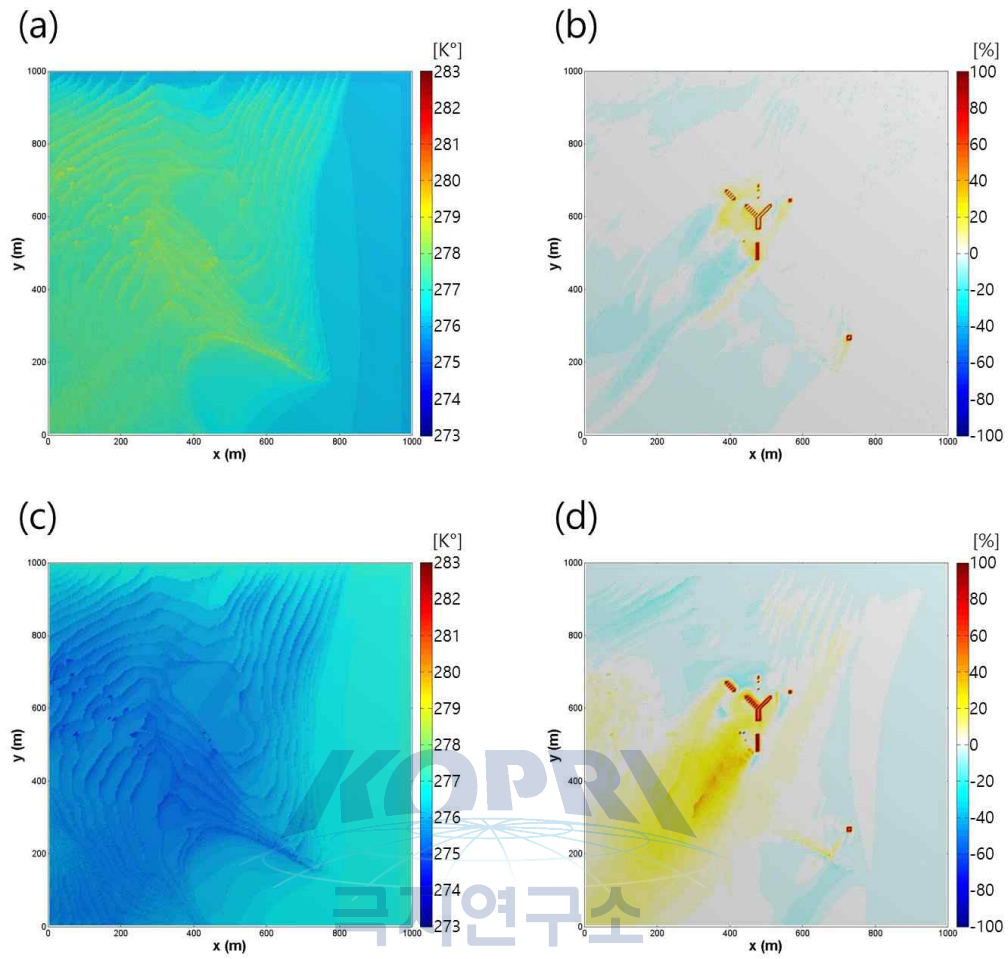


Fig. 59. 유입 풍향이 북동풍(45°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

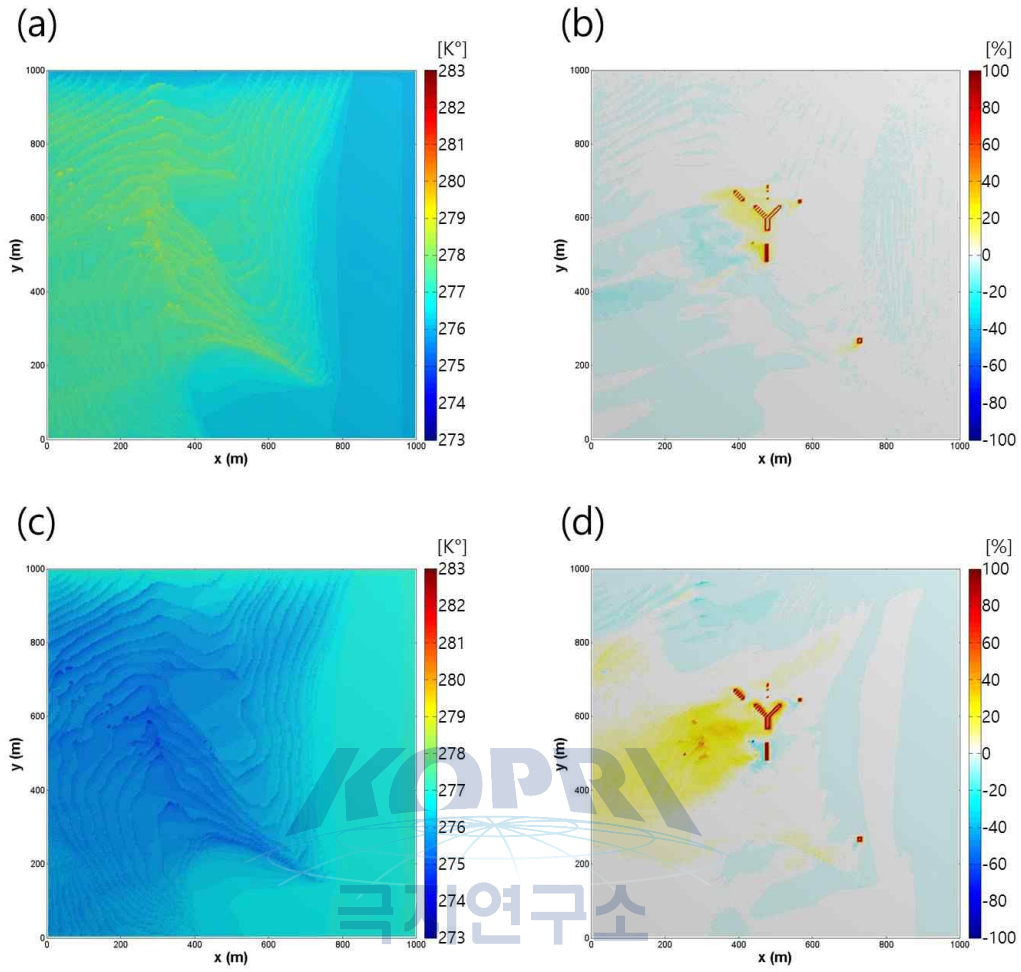


Fig. 60. 유입 풍향이 동북동풍(67.5°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

(3) 장보고 과학기지 기지 주변 상세 온도장 분석(동, 동남동, 남동, 남남동풍)

- Fig. 61~64은 각각 동풍, 동남동풍, 남동풍과 남남동풍이 부는 경우의 지표($z=1.25$ m) 기온장 및 기온변화율을 나타냄. 동풍이 부는 경우, 기지 동쪽의 해안에서 사면을 따라 기지 방향으로 흐름이 나타남. 지표에 눈이 없다고 가정한 경우, 기지 건설 전에는 기지 주변 지표($z=1.25$ m)에서 276~279 K의 온도 분포를 나타냄. 기지 건설 후에는 건물 표면의 인접한 영역에서 부분적으로 온도가 증가함. 지표에 눈이 있다고 가정한 경우, 기지 건설 전에는 기지 주변 지표($z=1.25$ m)에서 275~277 K의 온도 분포가 나타남. 기지 건설 후에는 기지 건물의 주변과 기지의 서쪽 사면 지표에서 기온이 상승하였음. 그러나 기지 주변에서의 지표 부근 기온 변화율은 0.06%로 매우 미비하게 나타났음(Fig. 61).

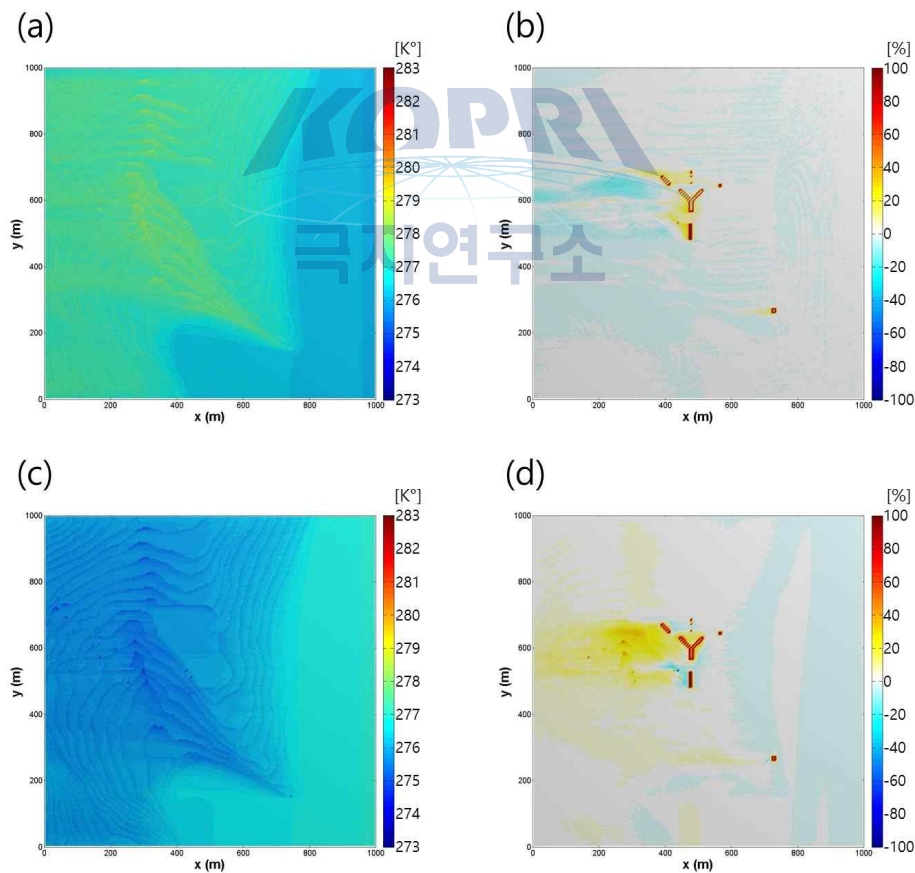


Fig. 61. 유입 풍향이 동풍(90°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

- 동남동풍, 남동풍, 남남동풍이 부는 경우에는 기지의 남동쪽 해안으로부터 기지로 향하는 흐름이 나타남. 지표에 눈이 없다고 가정한 경우와 지표에 눈이 있다고 가정한 경우 모두 유입류가 동풍인 실험과 유사한 온도 분포가 나타났음. 기지 건설 후, 지표에 눈이 없다고 가정한 경우에 건물의 바로 인접한 영역에서 온도의 상승이 나타나고, 지표에 눈이 있다고 가정한 경우에는 기지의 풍하층 영역에서 온도가 상승하였음 (Fig. 62, 63, 64).

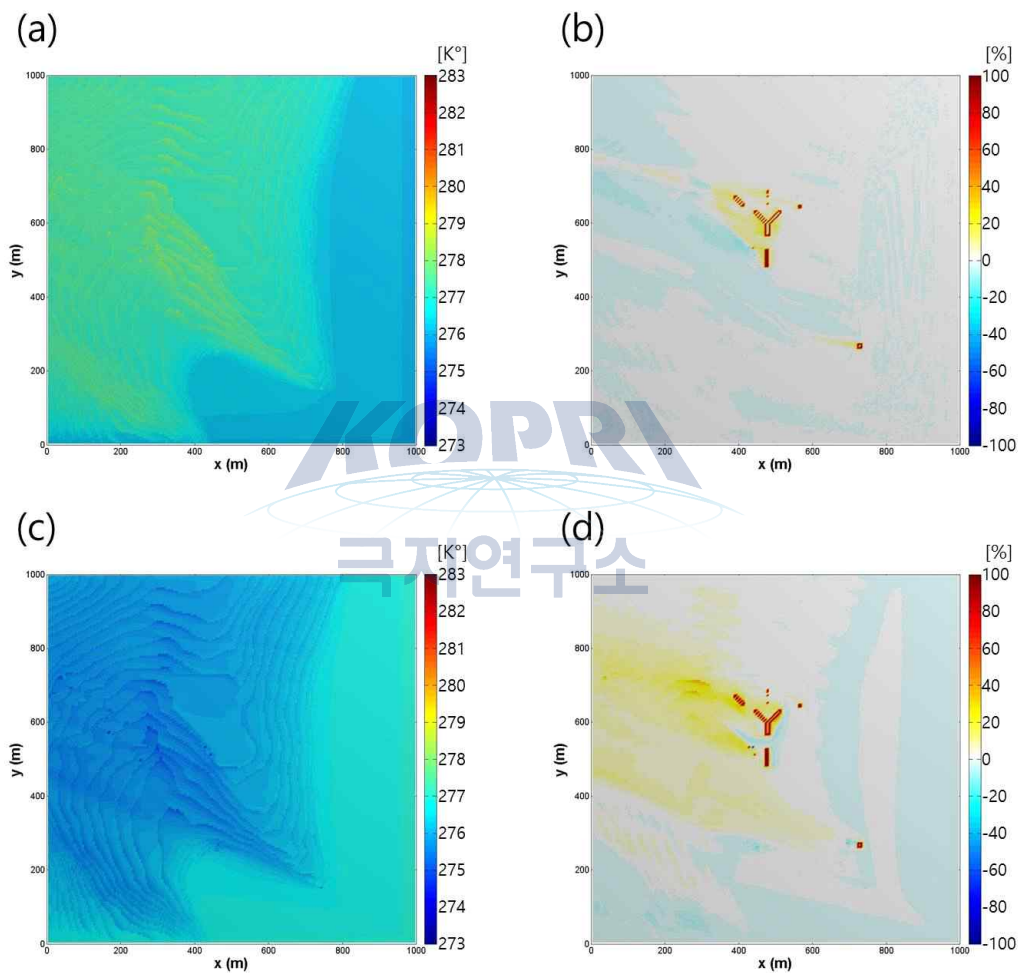


Fig. 62. 유입 풍향이 동남동풍(112.5°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

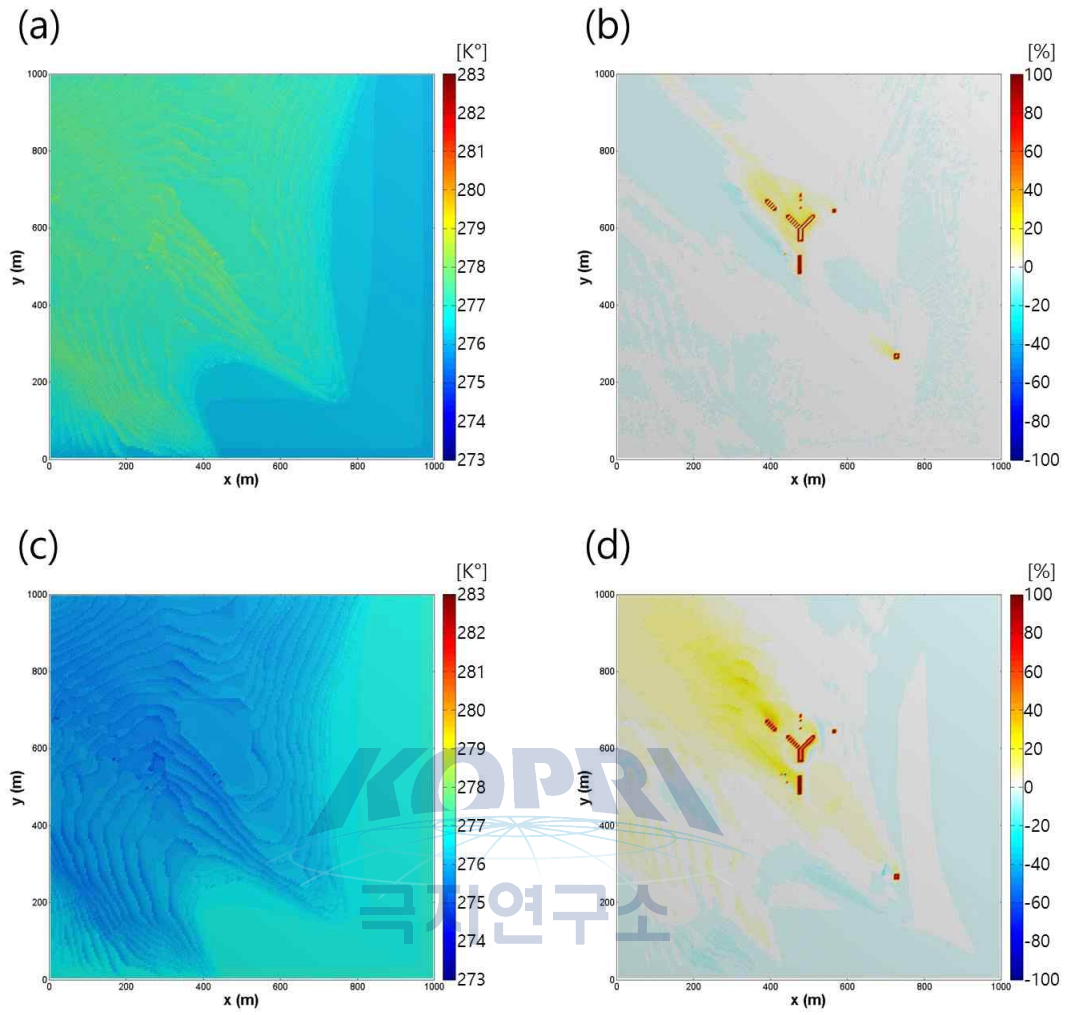


Fig. 63. 유입 풍향이 남동풍(135°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

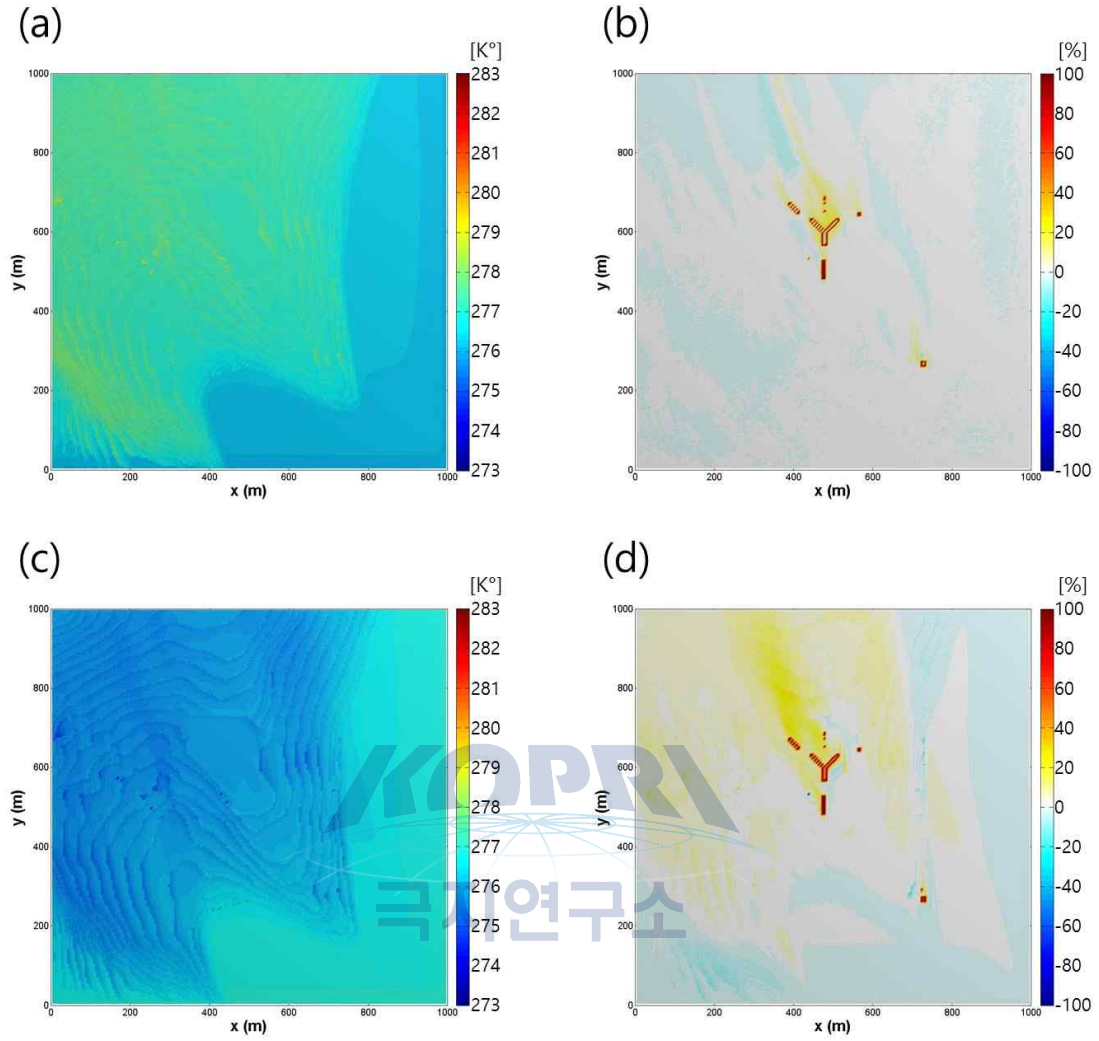


Fig. 64. 유입 풍향이 남남동풍(157.5°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

(4) 장보고 과학기지 기지 주변 상세 온도장 분석(남, 남남서, 남서, 서남서풍)

- Fig. 65~68은 각각 남풍, 남남서풍, 남서풍과 서남서풍이 부는 경우의 지표($z=1.25$ m) 기온장 및 기온변화율을 나타냄. 남풍이 부는 경우, 기지 남쪽의 해안에서 사면을 따라 기지 방향으로 흐름이 나타남. 지표에 눈이 없다고 가정한 경우, 기지 건설 전에는 기지 주변 지표($z=1.25$ m)에서 276~279 K의 온도 분포가 나타남. 기지 건설 후에는 건물 표면의 인접한 영역에서 부분적으로 온도가 증가함. 지표에 눈이 있다고 가정한 경우, 기지 건설 전에는 기지 주변 지표($z=1.25$ m)에서 275~277 K의 온도 분포가 나타남. 기지 건설 후에는 기지 건물의 주변과 기지의 북쪽 사면 지표에서 기온이 상승하는 영역이 나타남. 그러나 기지 주변에서의 지표 기온변화율은 0.05%로 매우 미비하였음(Fig. 65).

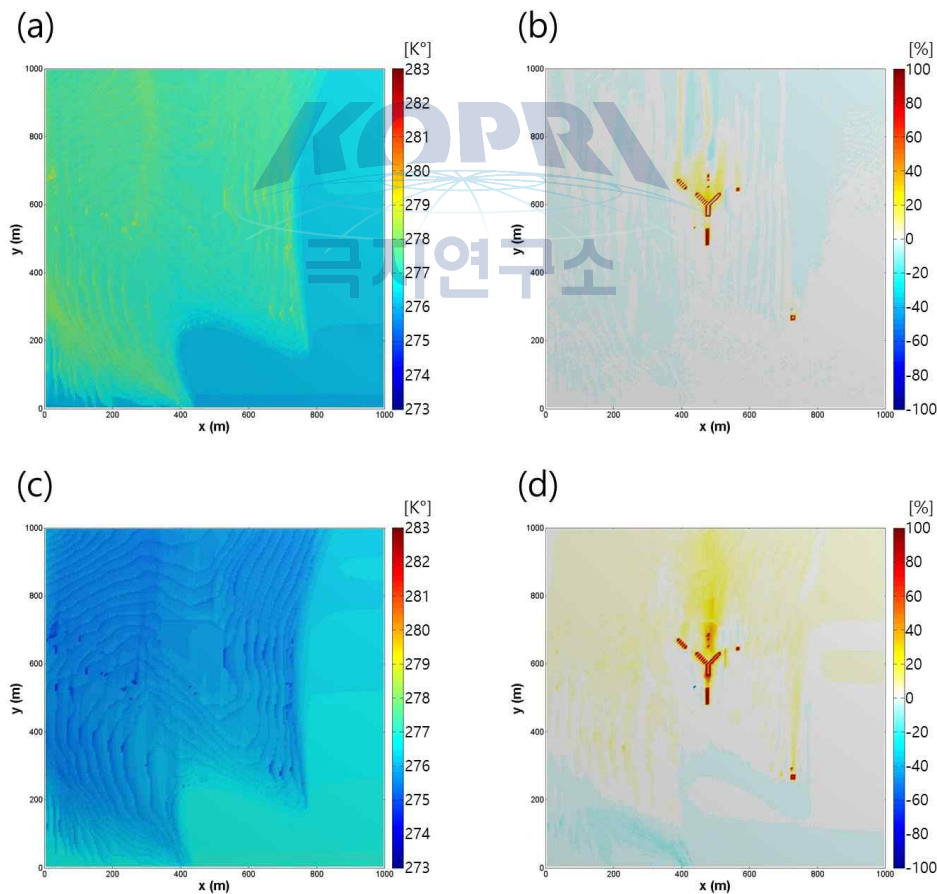


Fig. 65. 유입 풍향이 남풍(180°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표 ($z=1.25$ m) 기온 변화율

- 남남서풍, 남서풍, 서남서풍이 부는 경우에는 기지의 남서쪽 사면으로부터 기지를 향하는 흐름이 나타났음. 지표에 눈이 없다고 가정한 경우와 지표에 눈이 있다고 가정한 경우에서 유입류가 남풍인 경우와 유사한 온도 분포가 나타났음. 기지 건설 후, 지표에 눈이 없다고 가정한 경우에는 건물의 바로 인접한 영역에서 온도의 상승이 나타났고 지표에 눈이 있다고 가정한 경우에는 기지의 풍하층 영역에서 온도가 상승하는 영역이 나타났음(Fig. 66, 67, 68).

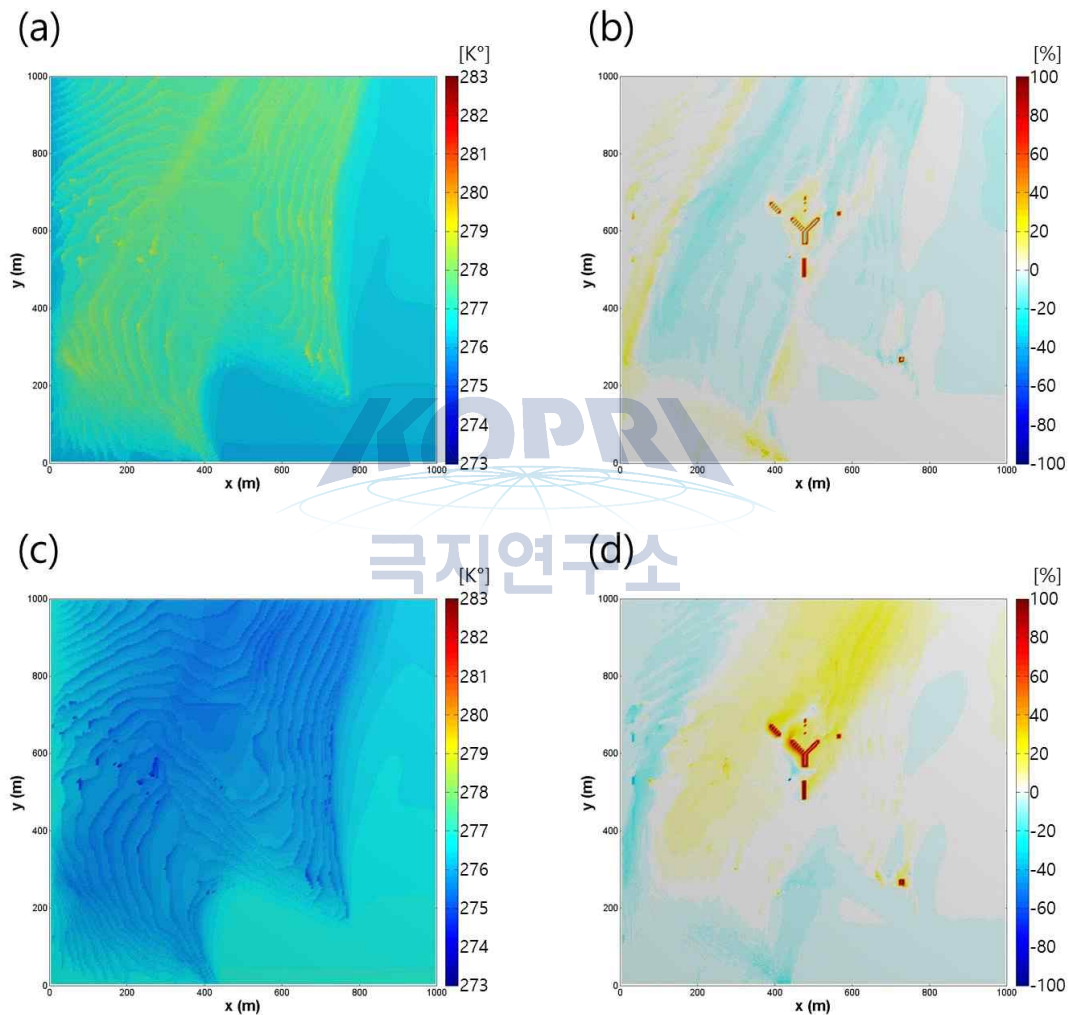


Fig. 66. 유입 풍향이 남남서풍(202.5°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

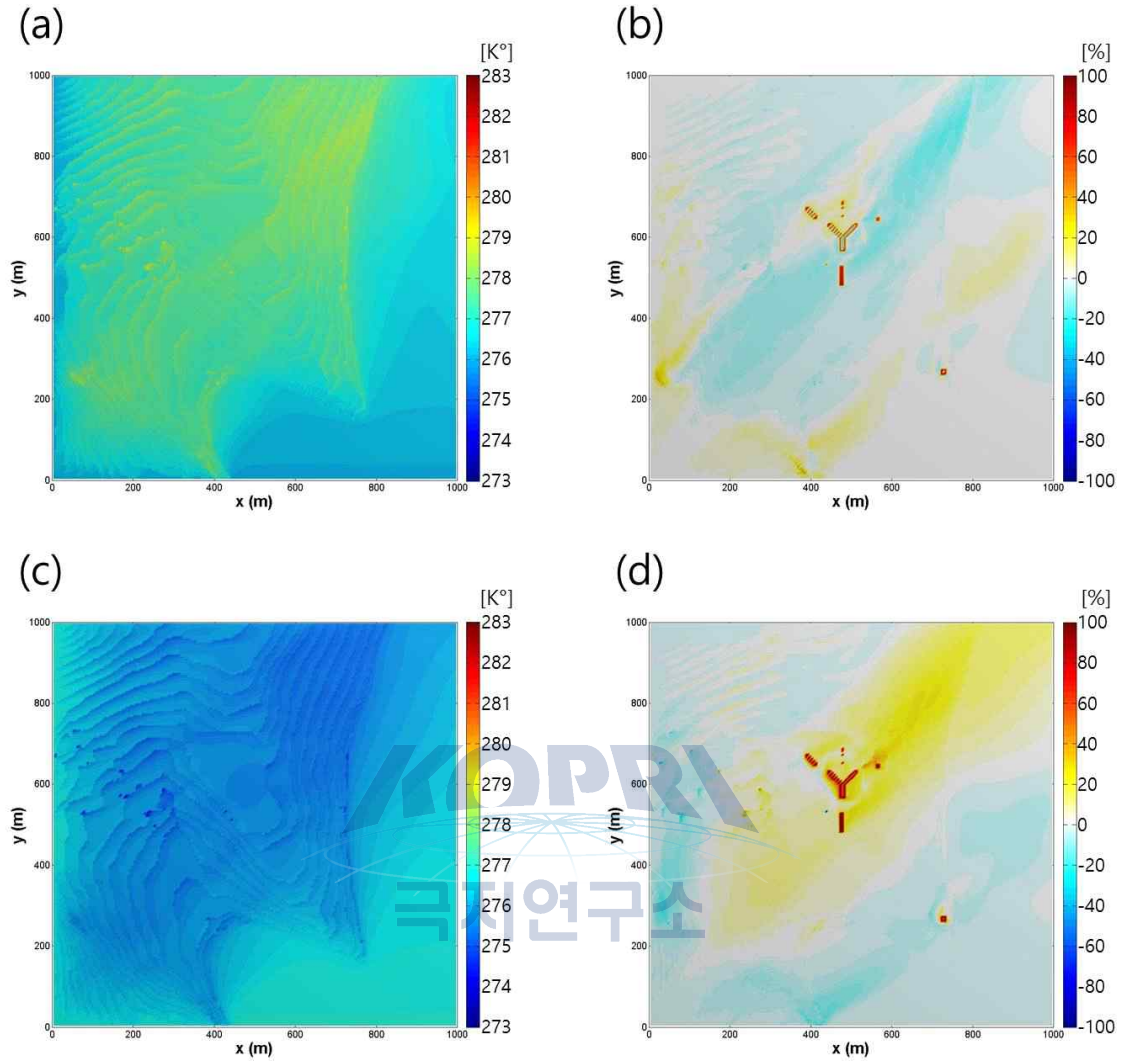


Fig. 67. 유입 풍향이 남서풍(225°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

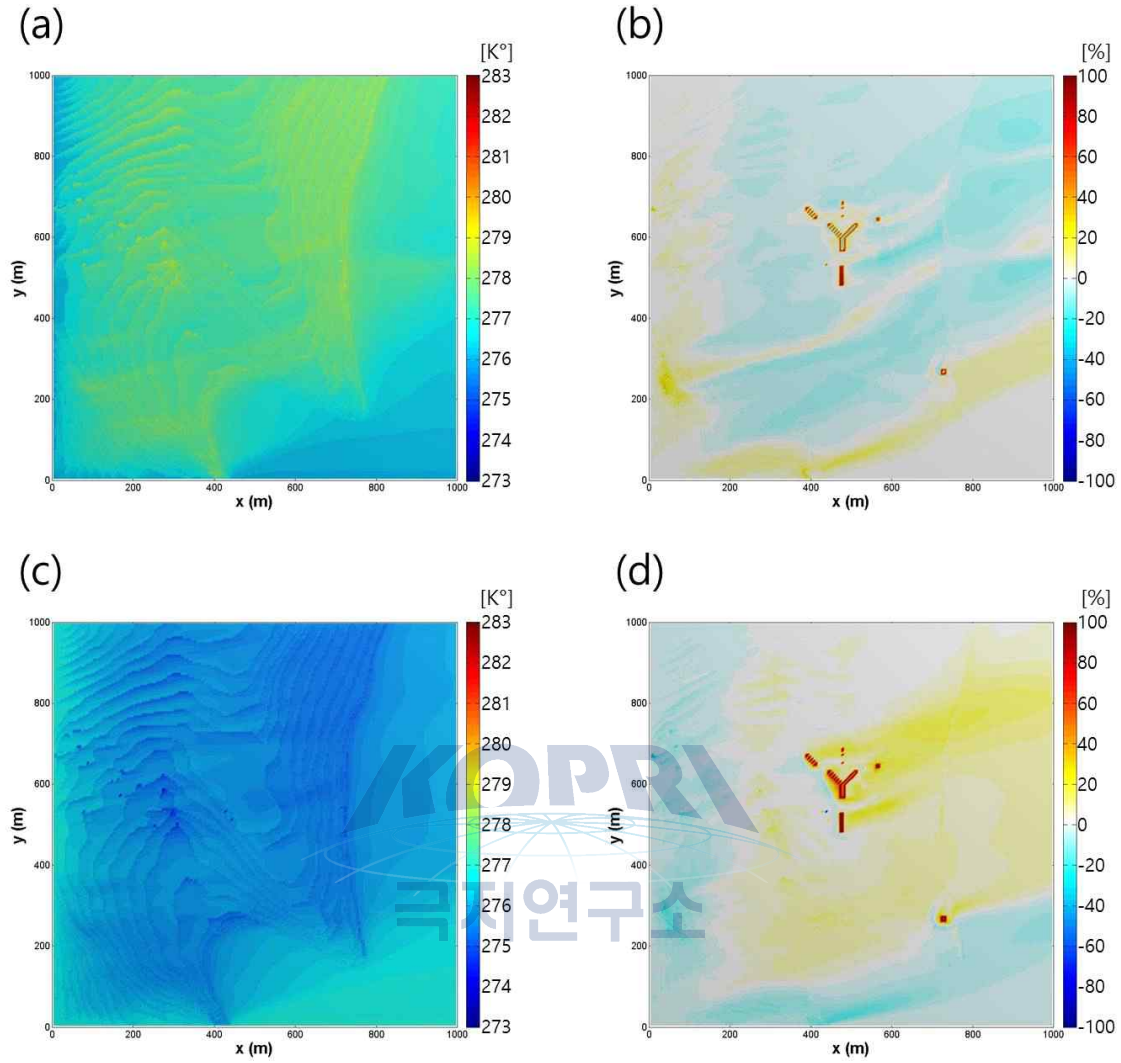


Fig. 68. 유입 풍향이 서남서풍(247.5°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

(5) 장보고 과학기지 기지 주변 상세 온도장 분석(서, 서북서, 북서, 북북서풍)

- Fig. 69~72은 각각 서풍, 서북서풍, 북서풍과 북북서풍이 부는 경우의 지표($z=1.25$ m) 기온장 및 기온변화율을 나타냄. 서풍이 부는 경우, 기지 서쪽의 사면을 따라 기지 방향으로 흐름이 나타남. 지표에 눈이 없다고 가정한 경우, 기지 건설 전에는 기지 주변 지표($z=1.25$ m)에서 276~279 K의 온도 분포가 나타남. 기지 건설 후에는 건물 표면의 인접한 영역에서 부분적으로 온도가 상승함. 지표에 눈이 있다고 가정한 경우, 기지 건설 전에는 기지 주변 지표($z=1.25$ m)에서 275 ~277 K의 온도 분포가 나타남. 기지 건설 후에는 기지 건물의 주변과 기지의 북쪽 사면 지표에서 기온이 상승하는 영역이 나타남. 그러나 기지 주변에서의 지표 기온변화율은 다른 풍향과 마찬가지로 매우 미비(0.09% 상승)하였음(Fig. 69).

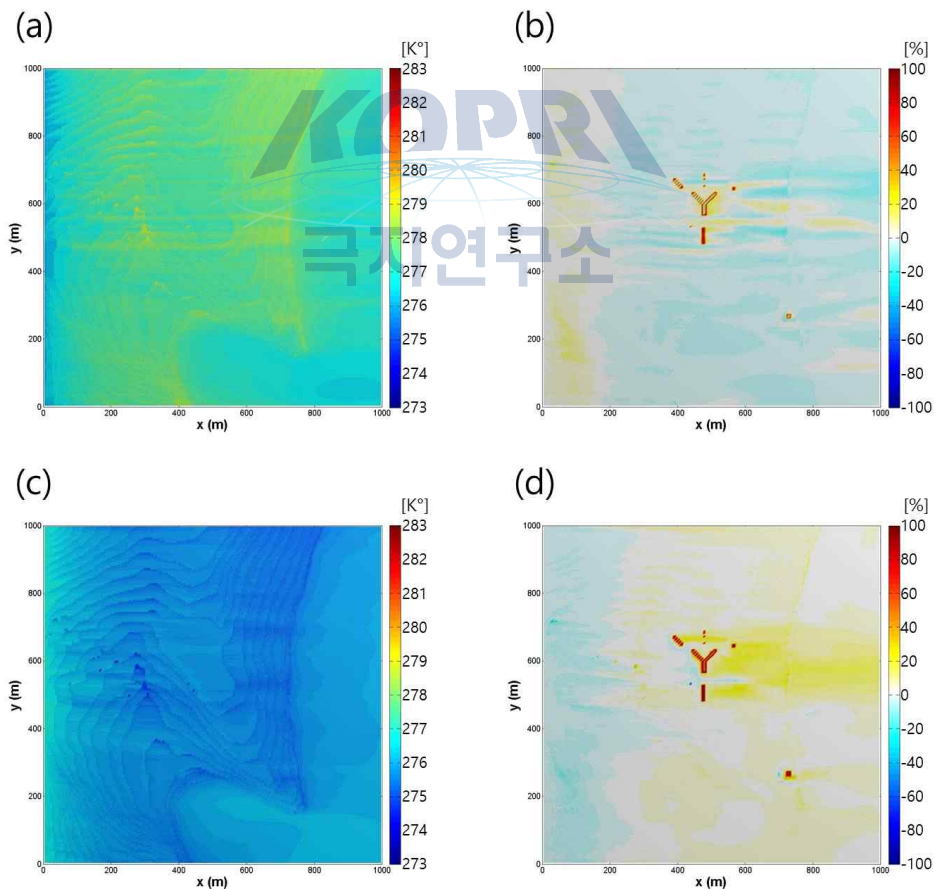


Fig. 69. 유입 풍향이 서풍(270°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표 ($z=1.25$ m) 기온 변화율

- 남남서풍, 남서풍, 서남서풍이 부는 경우, 기지의 북서쪽 사면으로부터 기지를 향하는 흐름이 나타남. 지표에 눈이 없다고 가정한 경우와 지표에 눈이 있다고 가정한 경우는 모두 유입류가 서풍인 경우와 유사한 온도 분포가 나타남. 기지 건설 후, 지표에 눈이 없다고 가정한 경우에는 건물의 바로 인접한 영역에서 온도가 상승하였고, 지표에 눈이 있다고 가정한 경우에는 기지의 풍하층 영역에서 온도가 상승하였음(Fig. 70, 71, 72).

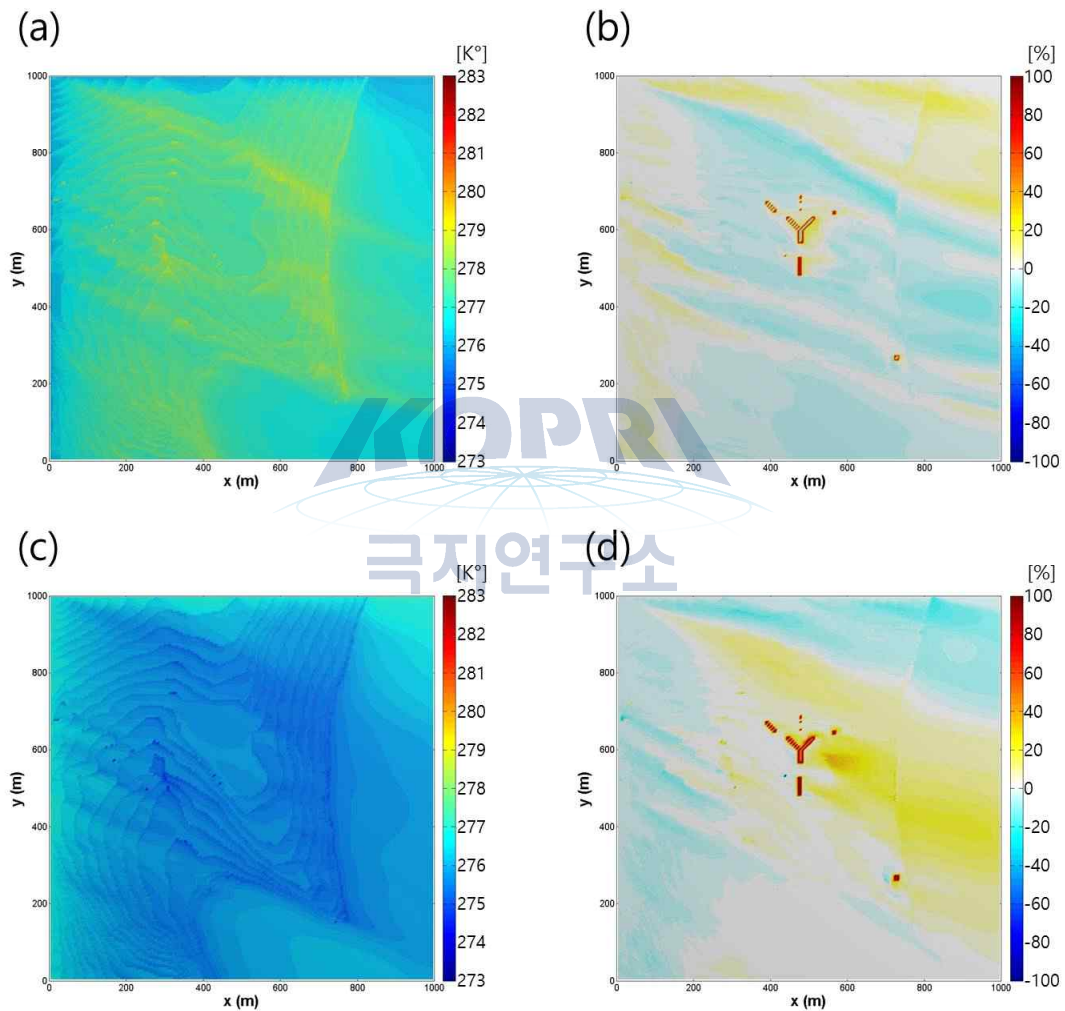


Fig. 70. 유입 풍향이 서북서풍(292.5°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

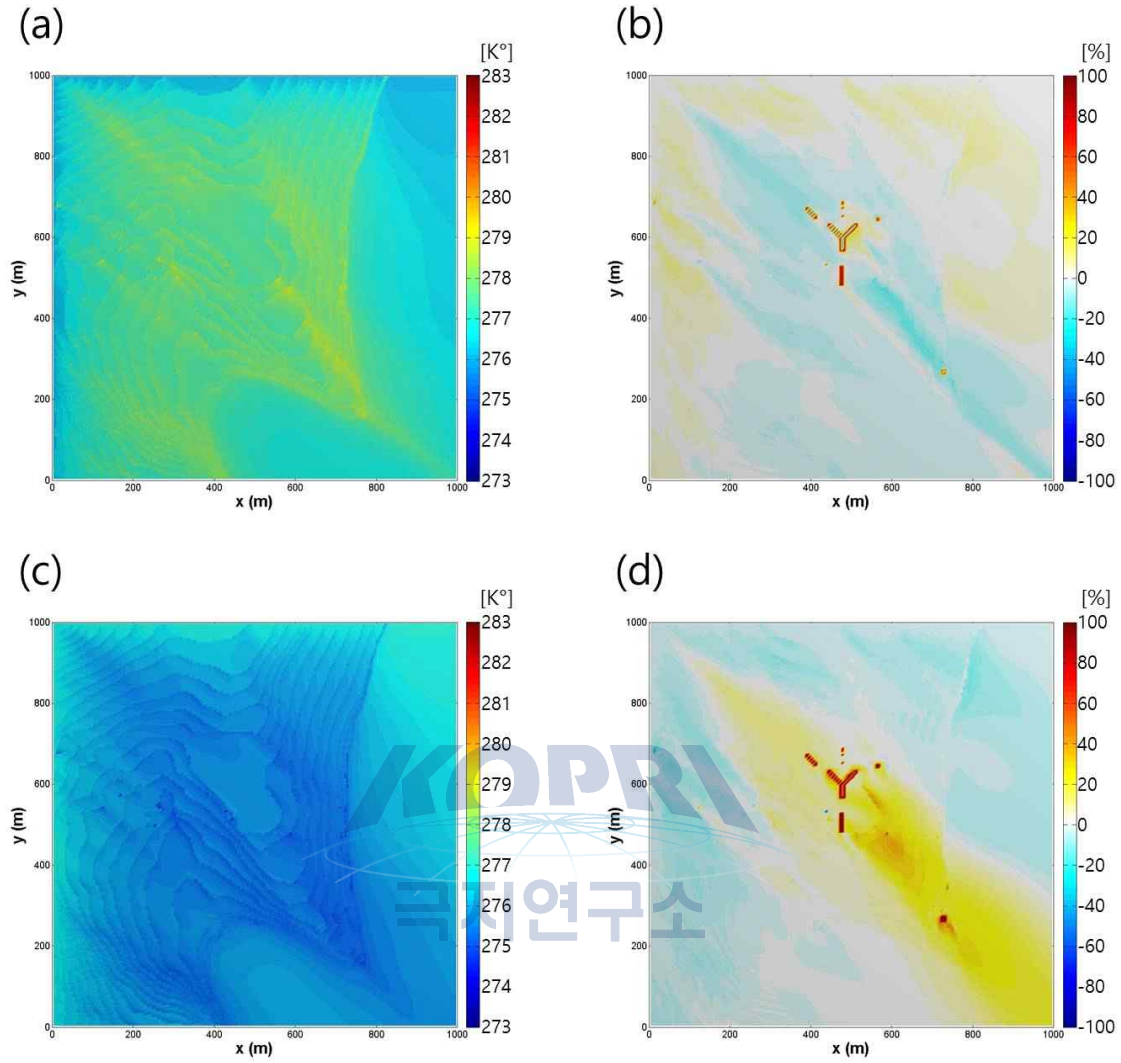


Fig. 71. 유입 풍향이 북서풍(315°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

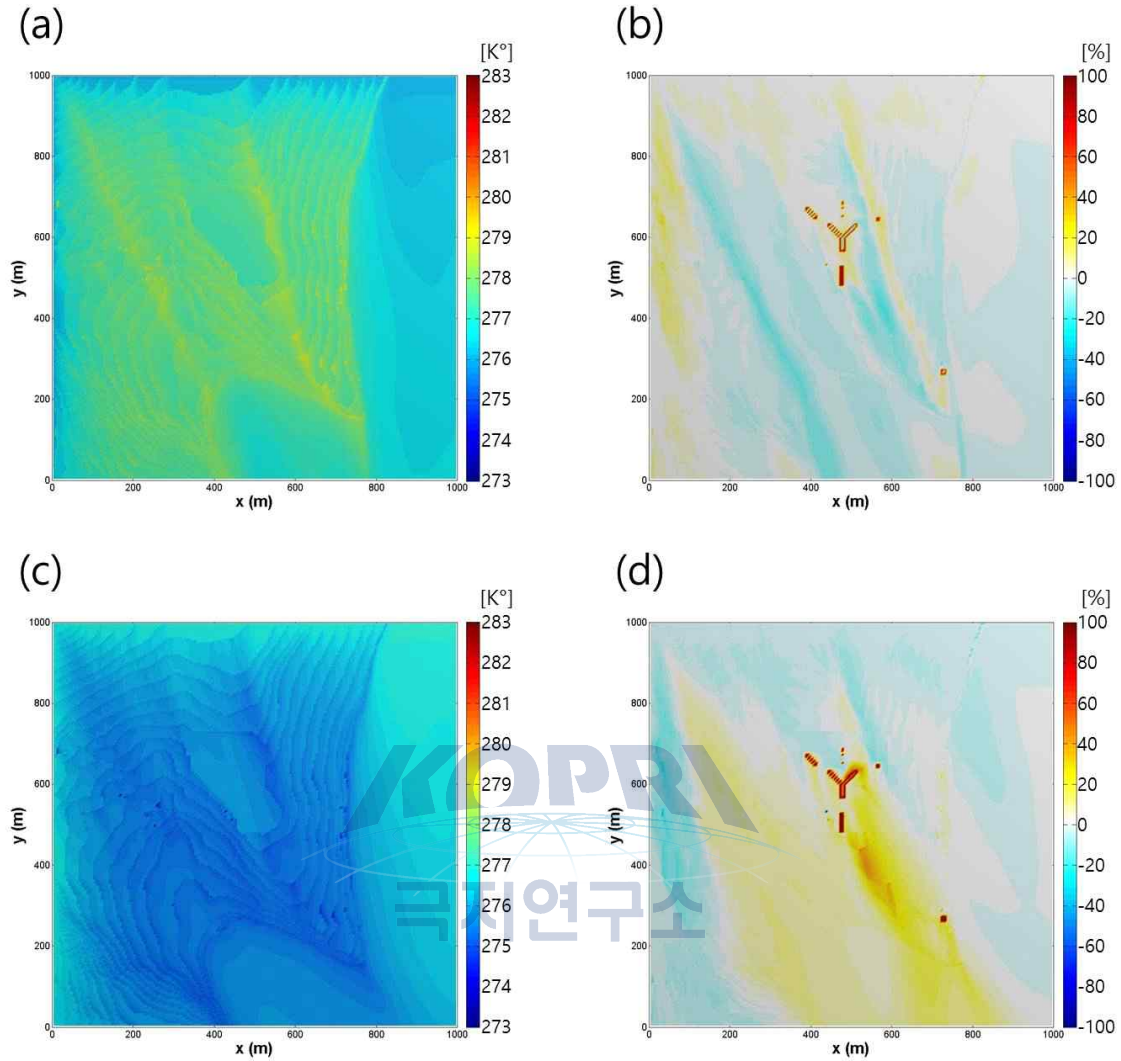


Fig. 72. 유입 풍향이 북북서풍(337.5°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

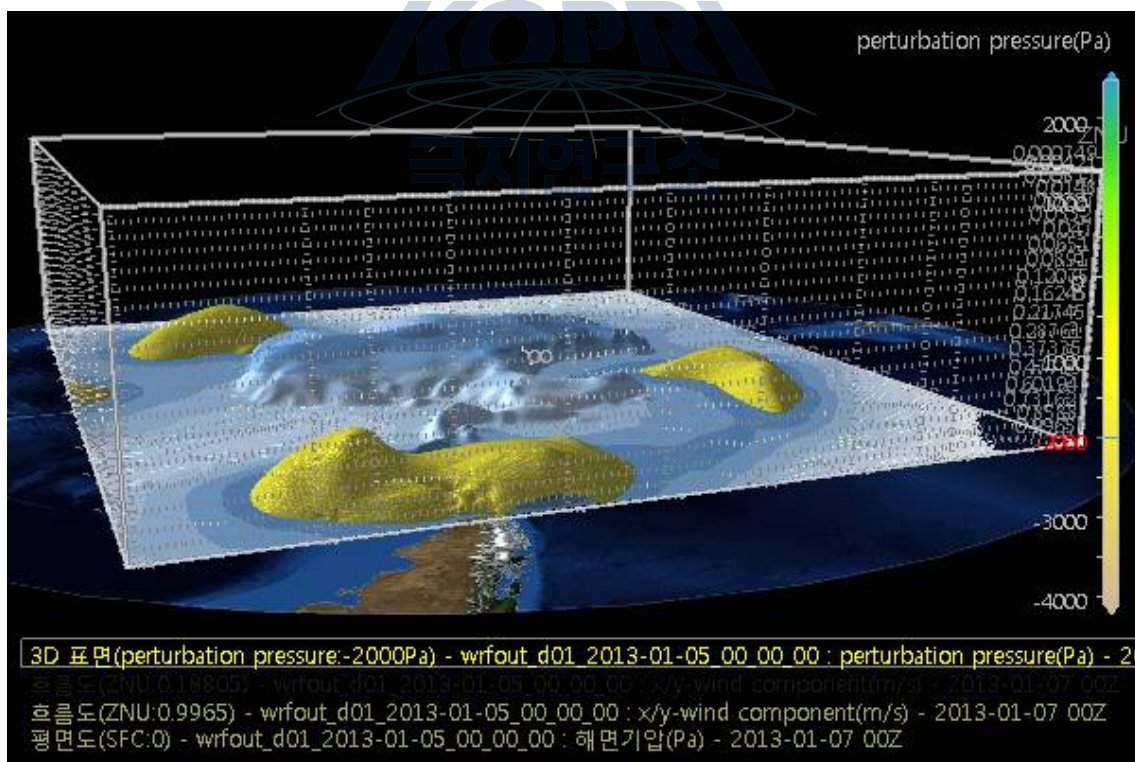
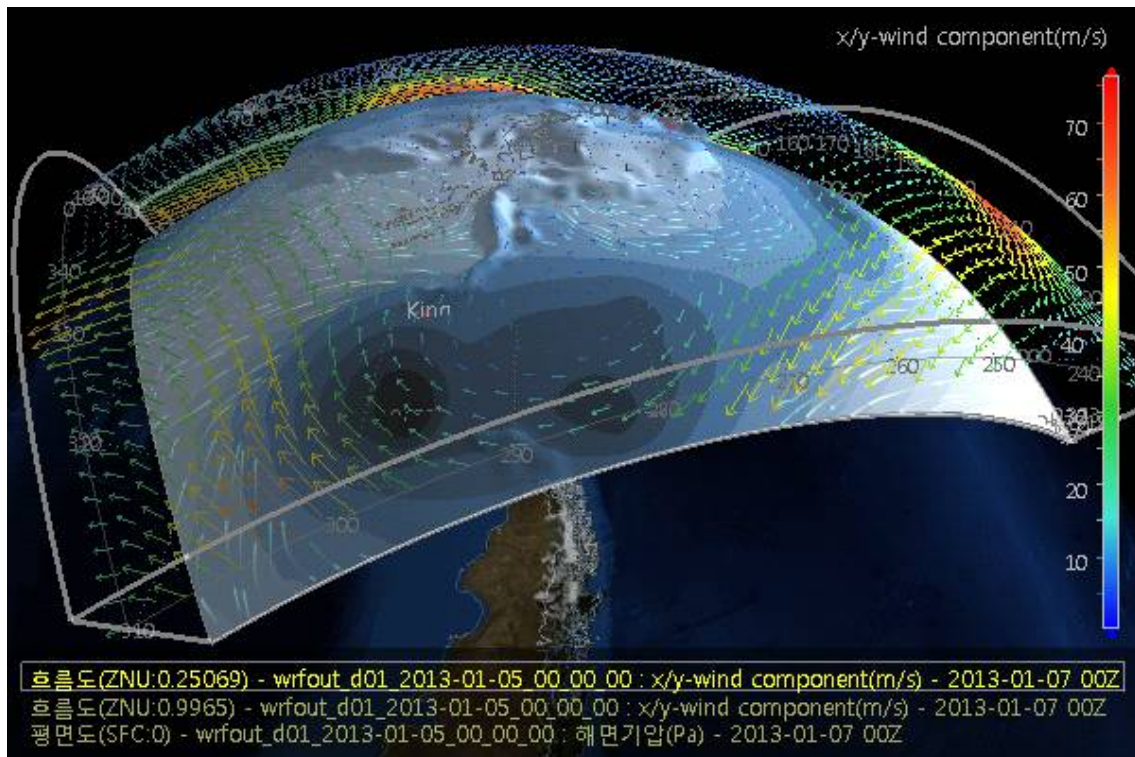
3.3 극지역 수치모의 자료의 3차원 가시화 도구 제작

가. 중규모 수치 모델 생산 결과 3차원 가시화 도구 제작 완료

- netcdf 형식의 Polar WRF 모델 결과자료 사용을 위한 입력루틴 개발 완료
- 모델생산 기상변수의 극지역 지형 및 지도 투영에 최적화된 이미지 표출을 위한 좌표 시스템 및 다양한 지도에 투영이 가능하도록 제작 완료
- 다양한 수평 해상도의 모델수행 결과의 경우 관심 지역만 설정하여 단독으로 또는 여러 지역이 동시에 표출 가능하도록 제작 완료
- 모델 결과의 기상변수 별 특성에 따른 2차원 평면, 연직 단면 등의 다양한 방식의 표출이 가능하도록 제작 완료
- 모델 결과의 시간정보를 참고해 기상변수의 기간 설정에 따른 연속적 가시화 가능하도록 제작 완료
- 장보고 및 세종기지 등 지도상 특정 지점의 위치 표시 가시화 장착 완료

나. 가시화 도구의 사용자 인터페이스 제작 완료

- 선그리기, 채우기, 래스터, 점그리기 등 수치모델 자료의 평면도 레이어 표출 기능 구현 완료
- 배경색상, 위경도선, 등치선 표출 이미지의 사용자의 목적에 맞는 자유로운 설정이 가능
- 지형고도 표출 기능, 연직 프로파일 기능 등 수치 모델자료의 연직 단면도 레이어 표출 기능 구현 완료
- 동시간대 원하는 다중 변수의 중첩 표출이 가능하며, 서로 다른 시간대의 경우 선택적인 중첩 표출이 가능
- 표출된 이미지의 이미지 저장 및 동영상 저장 기능 구현 완료



다. 가시화 도구를 이용한 남극 과학기지 주변 강풍모의 결과
가시화 완료

○ 장보고기지주변 강풍 모의 결과 가시화

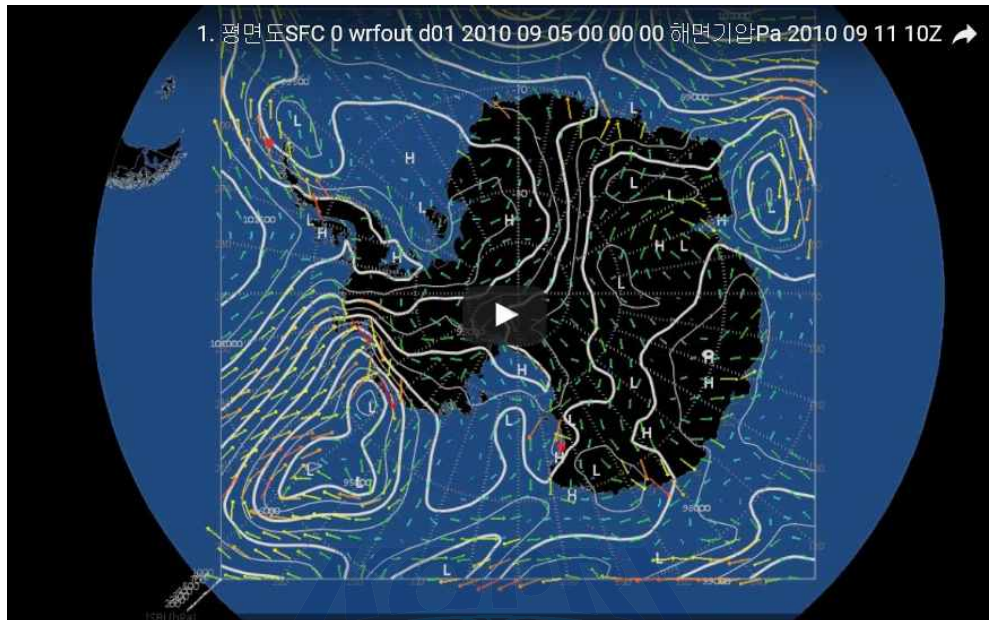


Fig. 73. Sea level pressure and surface wind component: 2010-09-05:00 ~ 2010-09-12:00, domain1

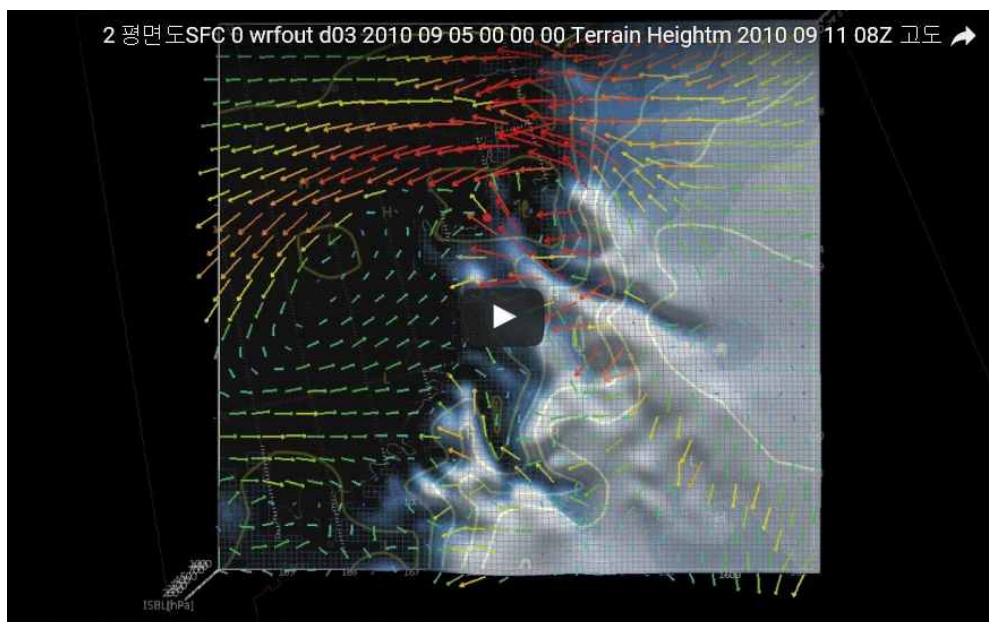


Fig. 74. Sea level pressure and surface wind component: 2010-09-05:00 ~ 2010-09-12:00, domain3

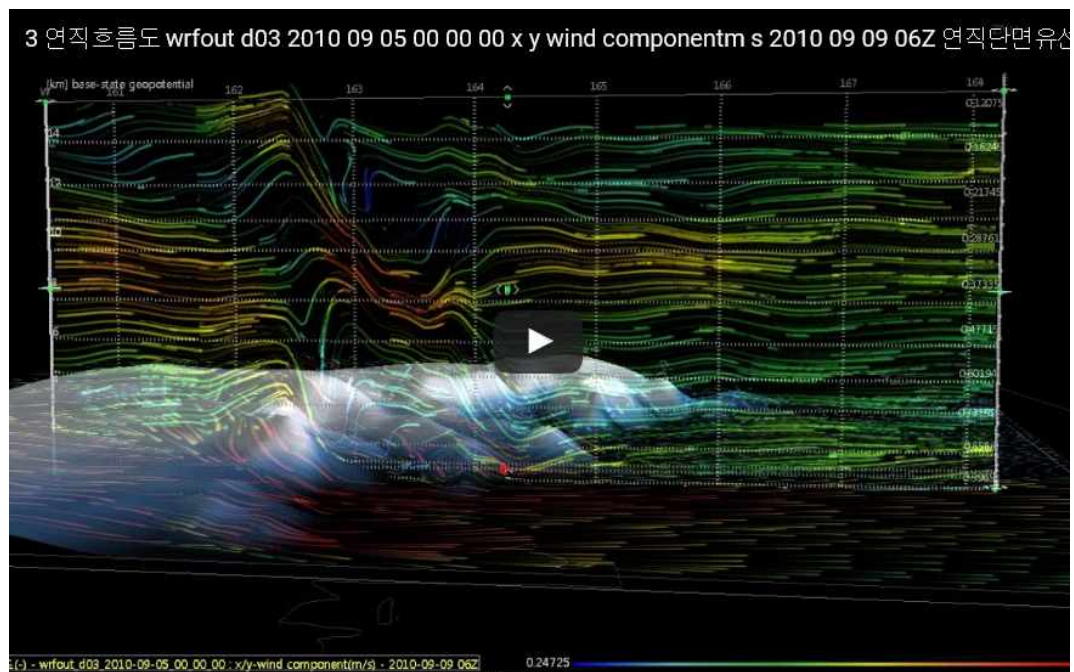


Fig. 75. Vertical wind component-model time: 2010-09-09:06, domain3

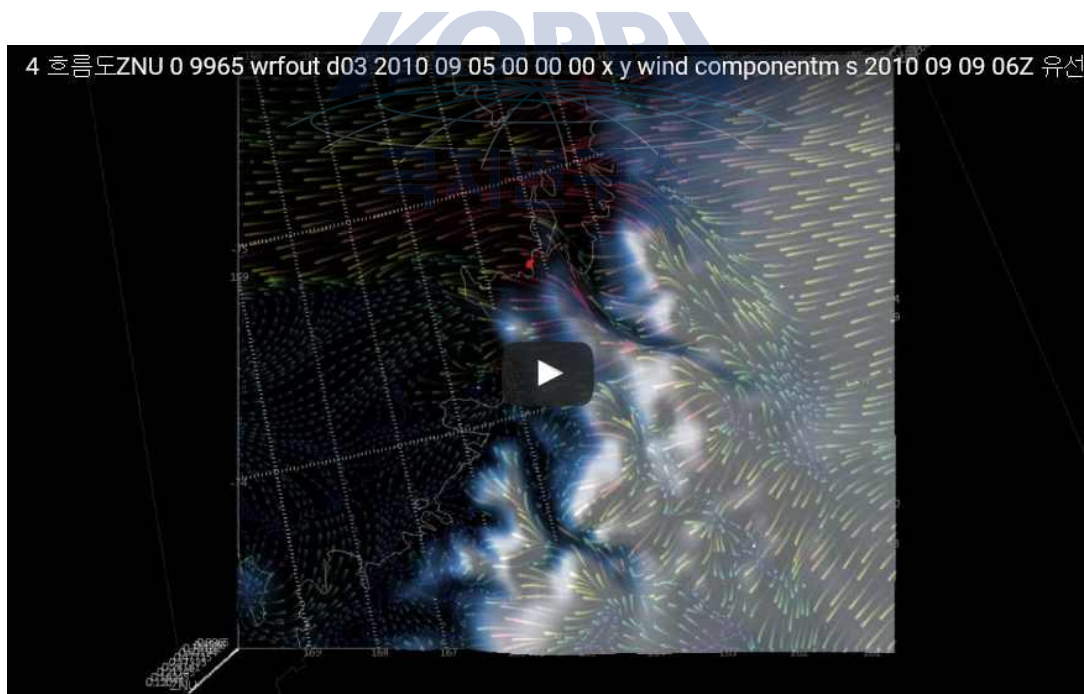


Fig. 76. Surface wind component(streamline) : 2010-09-09:06, domain3

○ 세종기지주변 강풍 모의 결과 가시화

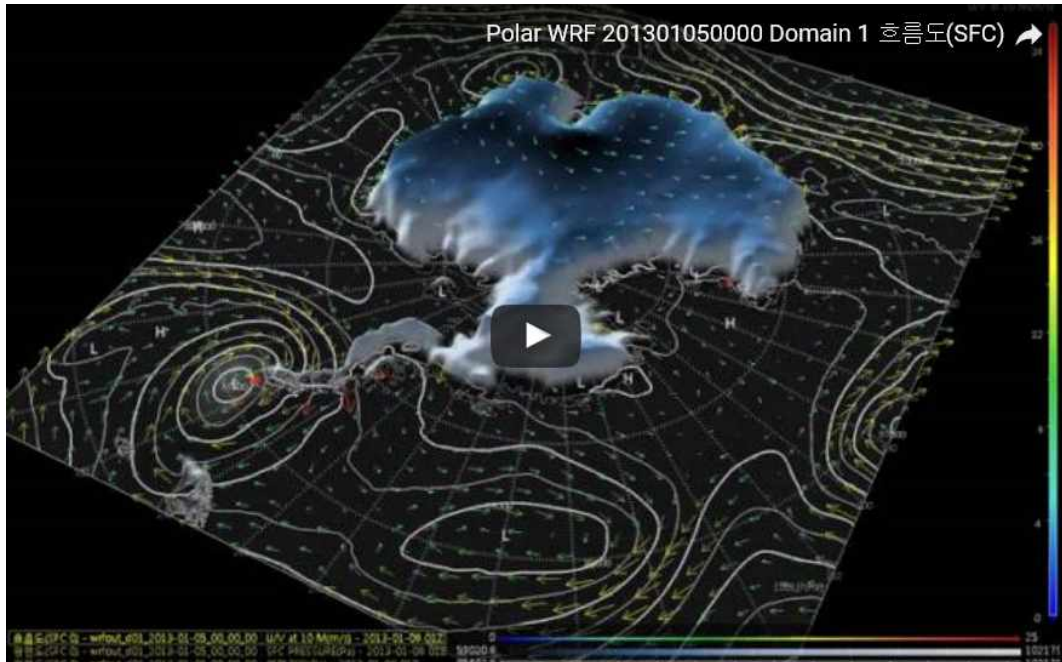


Fig. 77. Sea level pressure and surface wind component - model time : 2013-01-05 00:00, domain 1

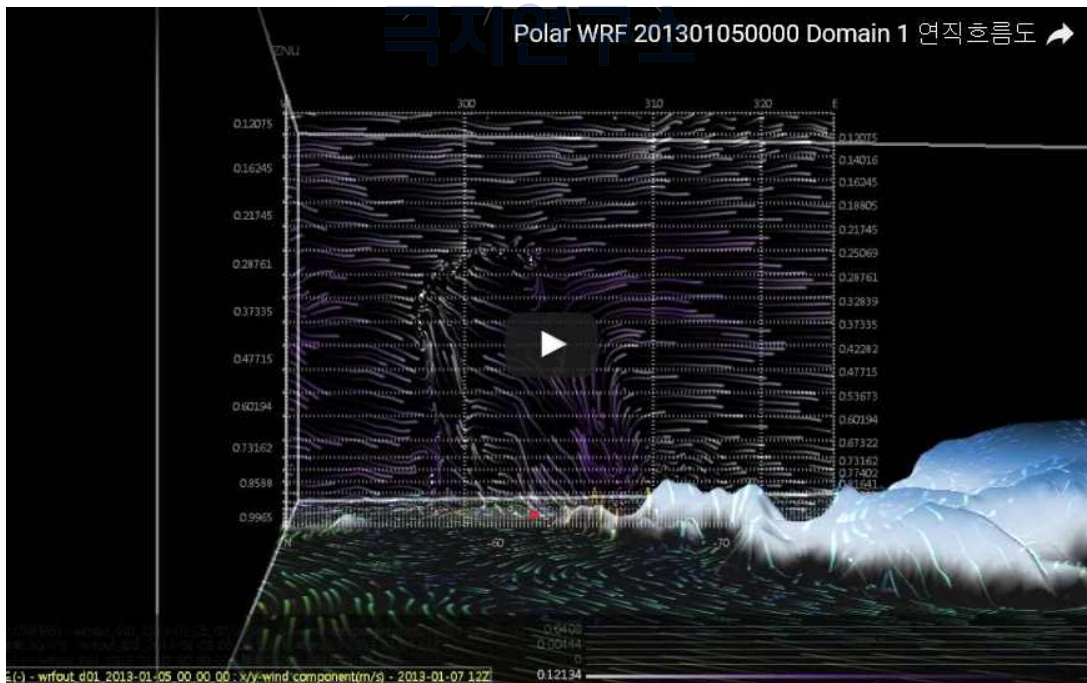


Fig. 78. Vertical wind component - model time : 2013-01-05 00:00, domain 1

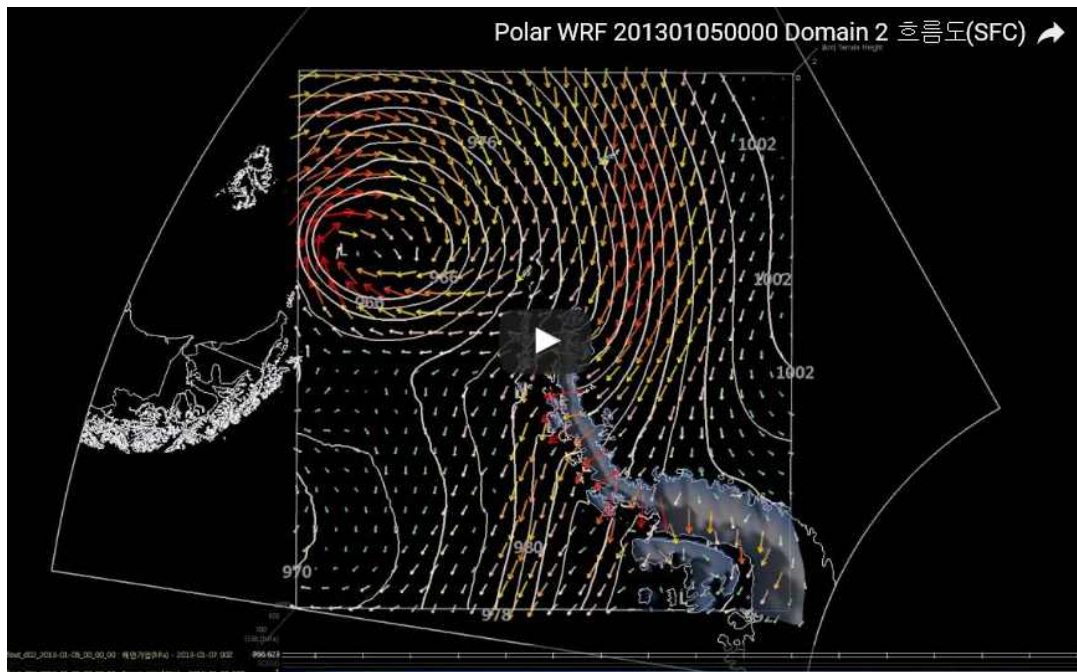


Fig. 79. Sea level pressure and surface wind component - model time : 2013-01-05 00:00, domain 2

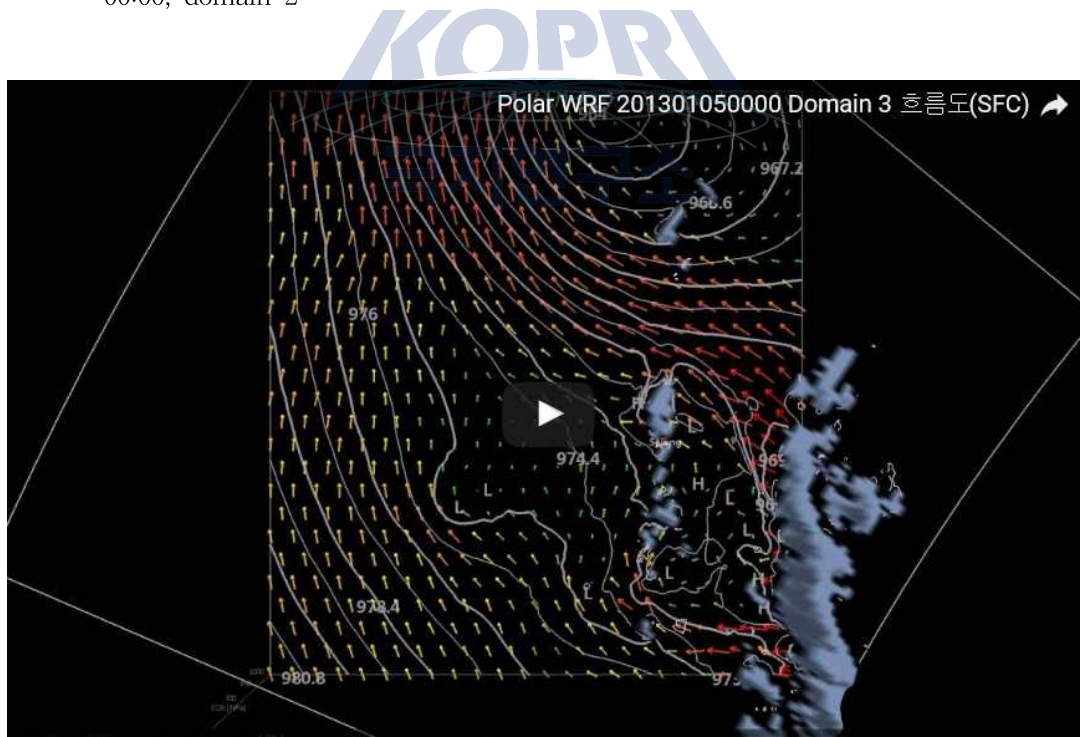


Fig. 80. Sea level pressure and surface wind component - model time : 2013-01-05 00:00, domain 3

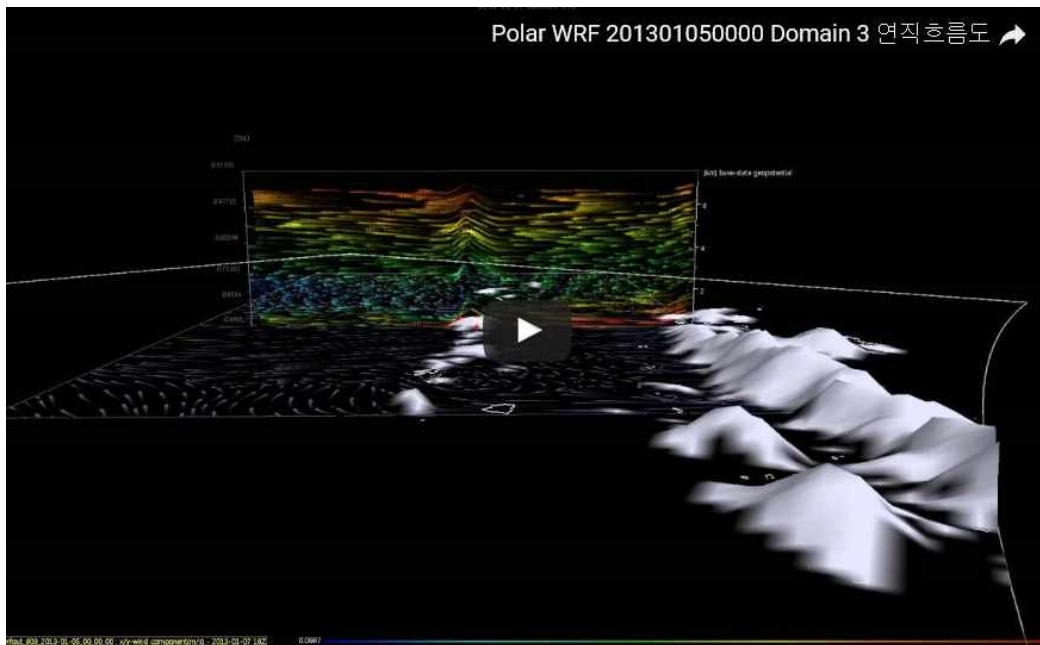


Fig. 81. Vertical wind component - model time : 2013-01-05 00:00, domain 3

3.4 연구결과에 대한 원인 분석

가. 좋은 결과의 원인 분석

- 남극 과학기지 주변의 상세 바람장의 성공적 수치 모의는 극지역 최적화 수치모의를 위해 개발된 중규모 수치모델(Polar WRF)의 도입과 성공적인 구축, 고품질의 유럽중기예보센터(ECMWF)의 초기입력자료(초기조건, 경계조건)의 사용 때문으로 판단됨.

나. 나쁜 결과의 원인 분석 및 보완 방안

- 극지역 모의 중심의 중규모 수치모델을 이용한 남극 과학기지 주변의 기상장 모의를 어느 정도 성공적으로 수행하였으나(주변의 기상관측 자료와 비교를 통해 검증 하였음) 보다 정밀한 기상모의 및 예보를 위해서는 다음과 같은 방안이 필요할 것으로 판단됨.
 - 남극 과학기지 주변의 기상 관측 자료 확대(관측 지점 확대)
 - 자료동화 기법을 활용한 남극 과학기지 주변의 기상관측자료의 수치모델 예보에 활용
 - 남극 과학기지 주변의 고해상도 지형 자료 활용
 - 다양한 테스트를 통한 남극 과학기지 주변의 최적의 기상 예보를 위한 물리모수화 방안 설계 및 적용



제 4 장 연구개발
목표 달성도 및
대외 기여도



제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도

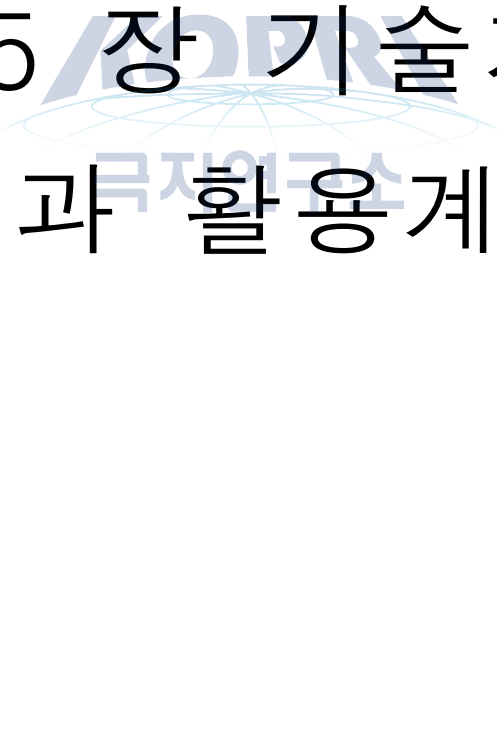
4.1 연차별 연구개발 목표 및 달성도

구분	연차별 달성내용		
	세부연구목표	달성내용	달성도
1년차 (2015)	1. 남극 활강류 수치적 재현	1-1. 중규모 모델 수행 격자체계 및 영역 구성	100%
		1-2. 모델 수행에 필요한 기초자료 (경계조건, 초기조건, 분석자료) 확보	
		1-3. 남극 장보고 기지 주변 활강류 재현	
	2. 남극대륙 중심 중규모 기상 모델링 데이터 3차원 가시화 도구 제작	2-1. 남극대륙 연안의 복잡한 지형에 특화된 가시화 도구 개발	100%
		2-2. 중규모 모델 표출에 적합한 좌표계 개발	
		2-3. 중규모 모델 생산 3차원 바람장 표출도구 개발	
	3. 장보고 과학기지 주변 상세 바람장 특성 연구	3-1. 장보고 과학기지 주변 상세 바람장 특성 분석	100%
		3-2. 장보고 과학기지가 주변 바람 관측 환경에 미치는 영향 조사	
2년차 (2016)	1. 남극 과학기지 주변의 강풍 모의 및 특성분석	1-1. 장보고 과학기지 주변의 활강풍 수치 모의 및 특성 분석	100%
		1-2. 남극 세종과학기지 주변의 강풍 수치 모의 및 발생 원인 분석	
		1-3. 관측과의 비교를 통한 수치모의 결과 검증	
	2. 장보고 과학기지 주변 상세 대기환경 연구	3-1. 장보고 과학기지 주변의 기상관측 자료 수집 및 상세 분석	100%
		3-2. 중규모 기상수치모델-전산유체역학모델 접합을 통한 장보고 기지 주변 바람장 상세흐름 분석	
		3-3. 장보고 과학기지 건설에 의한 대기질 변화 분석	
		3-4. 장보고 과학기지 건설에 의한 열환경 분석	

4.2 대외 기여도

- 남극 빙권요소가 총체적으로 집약된 테라노바 베이 지역에 대한 3차원 가시화를 통해 지역 기후에 대한 종합적 이해
- 건물규모 상세 바람장 시뮬레이션 기법을 남극에 최초로 적용함으로써 해당분야 과학 선도
- 중규모 기상모델, 전산유체역학 접합기술 축적
- 기상 3차원 가시화는 기상 연구 및 응용분야에 새로운 분석 패러다임 제공함으로써 경제적 부가가치 창출 기대
- 장보고 기지 인근 상세 바람장 획득 및 3차원 가시화를 통해 과학기지 장비 배치에 최적 설계 기초자료 확보
- 장보고 과학기지 주변 지형/지물이 관측환경에 미치는 영향 진단, 양질의 관측자료 생산을 위한 최적 설치 장소 진단/제안하여 관측 기기 설치 장소 이전에 따른 비용절감 가능





제 5 장 기술 개발 결과 활용 계획



제 5 장 기술개발 결과 활용계획

- 장보고 과학기지 안전 운용을 위한 기초자료로 활용
- 장보고 과학기지 주변 상세한 활강풍 3차원 맵 작성을 바탕으로 기지 주변 탐사활동에 필요한 정보제공
- 3차원 가시화된 기지주변 활강풍 정보와 장보고 기지 내 국지 바람장 정보 홍보실 전시 등을 통해 일반인 대상 극지과학 홍보
- 과제에서 개발된 극지역에서의 국지 상세 바람장 모의 기술은 국가적으로 최초로 시도되는 기술로서 타 산업 및 R&D 연계 가능성이 높음.
- 본 과제에서 구축된 시뮬레이션 기술들과 3차원 가시화 기술은 향후 남극과학기지에서 우리나라가 독자적으로 돌발기상 예보를 체계적으로 수행하는데 필요한 기반기술들에 해당됨. 그러나, 자체적인 상시 기상 예보의 경우, 관측장비 및 예측용 서버장비 확충/유지보수, 예보 분석에 관한 지속적인 인적 물적 자원이 선행되어야 함. 현재 연구소 수요에 대한 분석을 진행중에 있으며, 충분한 수요가 존재할 시 현업화에 관한 장기 플랜을 작성 후 추진 예정임.
- 예보 현업화 완성시 예보에 기반한 돌발사고시 응급후송 체계 구축에 필수적인 악기상 예보 정보 접근이 가능해져 기지 안전 사고 예방 및 대응에 큰 도움이 될 것으로 기대됨.



A faint, light blue watermark of the KOPRI logo is centered in the background. It features the acronym 'KOPRI' in a bold, sans-serif font, with the Korean text '극지연구소' (Geopji Research Institute) written below it. The logo is partially obscured by the main title text.

제 6 장 참고 문헌



제 6 장 참고문헌

- American Meteorological Society, 2016, Blizzard, Glossary of Meteorology.
[Available online at <http://glossary.ametsoc.org/wiki/Blizzard>].
- Bromwich, D. H., K. M. Hines, and L.-S. Bai, 2009, Development and testing of Polar Weather Research and Forecasting model: 2. Arctic Ocean. *J. Geophys. Res.*, 114, D08122, doi:10.1029/2008JD010300.
- _____, D. F. Steinhoff, I. Simmonds, K. Keay, and R. L. Fogt, 2011, Climatological aspects of cyclogenesis near Adélie Land Antarctica. *Tellus*, 63, 921–938.
- _____, F. O. Otieno, K. M. Hines, K. W. Manning, and E. Shilo, 2013, Comprehensive evaluation of polar weather research and forecasting performance in the Antarctic. *J. Geophys. Res.*, 118, 274–292, doi:10.1029/2012JD018139.
- Carrasco, J. F., D. H. Bromwich, and A. J. Monaghan, 2003, Distribution and characteristics of mesoscale cyclones in the Antarctic: Ross Sea eastward to the Weddell Sea. *Mon. Wea. Rev.*, 131, 289–301.
- Chen, F., K. E. Mitchell, J. Schaake, Y. Xue, H.-L. Pan, V. Koren, Q. Y. Duan, M. Ek, and A. Betts, 1996, Modeling of land-surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations. *J. Geophys. Res.*, 101, 7251–7268.
- Choi, S.-D., S.-Y. Baek, Y.-S. Chang, Y.-J. Yoon, B.-K. Park, and S. Hong, 2007, Year-round Monitoring of Atmospheric Polychlorinated Biphenyls (PCBs) at the King Sejong Station in the Antarctic. *Ocean and Polar Research* 29, 297–302.
- Deb, P., O. Andrew, H. Scott, P. Tony, T. John, B. Daniel, P. James, and C. Steve, 2016, An assessment of the Polar Weather Research and Forecast (WRF) model representation of near-surface meteorological variables over West Antarctica. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 1532–1548.
- Grell, G. A., and D. Devenyi, 2002, A generalized approach to parameterizing

- convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophys. Res. Lett.*, 29, doi:10.1029/2002GL015311.
- _____, and S. R. Freitas, 2014, A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 5233–5250, doi:10.5194/acp-14-5233-2014.
- Hong, S.-Y., J. Dudhia, and S.-H. Chen, 2003, A revised approach to ice-microphysical processes for the bulk parameterization of cloud and precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 103–120.
- Hoskins, B. J., and K. I. Hodges, 2005, A new perspective on Southern Hemisphere storm tracks. *J. Climate*, 18, 4108–4129.
- Iacono, M. J., J. S. Delamere, E. J. Mlawer, M. W. Shephard, S. A. Clough, and W. D. Collins, 2008, Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res.*, 113, D13103, doi:10.1029/2008JD009944.
- IPCC, 2014, *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 1535pp.
- Janjic, Z. I., 1994, The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927–945.
- Khairy, A. M., J. L. Luek, R. Dickhut, and R. Lohmann, 2016, Levels, sources and chemical fate of persistent organic pollutants in the atmosphere and snow along the western Antarctic Peninsula. *Environmental Pollution* 216, 304–313.
- Kolstad, E. W., 2011, A global climatology of favourable conditions for polar lows. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137, 1749–1761.
- Korea Polar Research Institute, 2012a, A planning for new operating program of the Jang Bogo Station, Antarctica, BSPE11260–222–7.
- _____, 2012b, A survey study on the registration Jang Bogo Station as a GAW global station and its operation, BSPE10300.

- Kwon, H., S. J. Park, S. Lee, S. J. Kim, and B. M. Kim, 2016, A numerical simulation of blizzard caused by polar low at King Sejong station, Antarctica. *Atmosphere*, 26, 277–288 (in Korean with English abstract).
- Lee, B. Y., D. H. Kim, and Y. Kim, 1990, A study on the climate characteristics over King Sejong Station. *Korean J. Polar Res.*, 1, 47–57.
- Mochida, A., Y. Tominaga, H. Yoshino, K. Sasaki, and M. Ohba, 2002, Numerical Study on Thermal Effects of Cold and High-albedo Surfaces Covered with Snow in Outdoor Environment. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* 1, 175–182.
- Monin, A. S., and A. M. Obukhov, 1954, Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Slovak Acad. Sci.*, 24, 163–187.
- Nam, J. C., and B. Y. Lee, 1991, A Case Study of Blizzard at King Sejong Station, Antarctica. *Korean J. Atmos. Sci.*, 27, 291–300.
- Paolo, F. S., H. A. Fricker, and L. Padman, 2015, Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating. *Science*, 348, 327–331.
- Patankar, S.-V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*.
- Parish, T. R., 1984, A numerical study of strong katabatic winds over Antarctica. *Mon. Wea. Rev.*, 112, 545–554.
- Rasmussen, E. A., and J. Turner, 2003, *Polar Lows: Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions*. Cambridge University Press, 624 pp.
- Reed, R. J., and C. N. Duncan, 1987, Baroclinic instability as a mechanism for the serial development of polar lows: a case study. *Tellus*, 39A, 376–385.
- Robinson, E., W. L. Bamesberger, F. A. Menzia, A. S. Waylett, and S. F. Waylett, 1984, Atmospheric Trace Gas Measurements at Palmer Station, Antarctica: 1982–83. *Journal of Atmosphere Chemistry* 2, 65–81.
- Simmonds, I., K. Keay, and E.-P. Lim, 2003, Synoptic activity in the seas around Antarctica. *Mon. Wea. Rev.*, 131, 272–288.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers, 2005, A Description of the Advanced Research WRF

- Version 2. NCAR Technical Note, NCAR/TN- 468+STR, 88pp.
- Speirs, J. C., H. A. McGowan, D. F. Steinhoff, and D. H. Bromwich, 2012, Regional climate variability driven by foehn winds in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica. *Int. J. Climatol.*, 33, 945-958, doi:10.1002/joc.3481.
- Steinhoff, D. F., D. H. Bromwich, M. Lambertson, S. L. Knuth, and M. A. Lazzara, 2008, A dynamical investigation of the May 2004 McMurdo, Antarctica, severe wind event using AMPS. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 7-26.
- _____, _____, and A. Monaghan, 2012, Dynamics of the foehn mechanism in the McMurdo Dry Valleys of Antarctica from Polar WRF. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 139, 1615-1631, doi:10.1002/qj.2038.
- Tanaka, M., T. Nakazawa, M. Shiobara, H. Ohshima, and S. Aoki, 1987, Variations of atmospheric carbon dioxide concentration at Syowa Station(69°00'S, 39°35'E), Antarctica. *Tellus* 39, 72-79.
- Turner, J., T. A. Lachlan-Cope, and J. P. Thomas, 1993, A Comparison of Arctic and Antarctic mesoscale vortices. *J. Geophys. Res.*, 98, 13019-13034.
- Versteeg, H. K., and W. Malalasekera, 1995, An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Longman, Malaysia, 257pp.
- Zappa, G., L. Shaffrey, and K. Hodges, 2014, Can polar lows be objectively identified and tracked in the ECMWF operational analysis and the ERA-Interim reanalysis. *Mon. Wea. Rev.*, 142, 2596-2608.
- 정의석, 김선태, 김선규, 홍성민, 정호성, 2002: 남극지역의 대기오염 측정체계 구축을 위한 기초조사. 대전대학교 환경문제연구소 논문집 6, 61-72.

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.