

TSPE16250-066-12

장보고 과학기지 주변 상세 대기환경 연구



부경대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

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

2017. 03. 31

총괄연구책임자	: 김 백 민
위탁연구기관명	: 부 경 대 학 교
위탁연구책임자	: 김 재 진
위탁참여연구원	: 최 원 식
“	: 박 수 진
“	: 강 건
“	: 왕 장 운
“	: 강 정 은
“	: 김 동 주
“	: 김 미 현
“	: 문 다 슝
“	: 배 경 량

요 약 문

I. 제 목

장보고 과학기지 주변 상세 대기환경 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

장보고 기지 인근 테라노바 베이 지역은 남극 활강풍이 가장 강하게 부는 대표적 지역으로서 남극 활강풍 연구에 최적지이다. 장보고 기지 인근 상세 바람 장 획득 및 3차원 가시화를 통해 장보고 기지 과학장비 최적 배치에 필요한 설계 기초자료를 확보하고, 기지 안전의 기초자료를 제공하고자 한다. 본 연구에서는 국지적인 기상현상을 반영하는 중규모 기상 모델과 상세 규모 흐름 분석이 가능한 전산유체역학 모델의 접합 시스템을 이용하여 장보고 과학기지 주변의 3차원 흐름 특성을 분석하였다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

장보고 과학기지 주변에 대한 상세 흐름을 분석하기 위하여, 장보고 과학기지 주변 관측 자료를 분석하고, 전산유체역학(computational fluids dynamics, CFD) 모델을 이용한 수치 실험을 수행하였다. 관측 지점에 대한 장보고 기지의 영향을 분석하기 위하여, AWS 이전 전 기간(2014년 4월~ 2015년 10월)과 AWS 이전 후 기간(2015년 12월 ~ 2016년 3월)의 AWS 및 ASOS 관측 자료를 분석하여 장보고 과학기지 주변의 바람 환경을 조사하였다. 중규모 기상 모델(Polar_WRF)과 CFD 모델의 접합 시스템 구축하여, 강풍사례에 대하여 수치 실험을 수행하고 관측자료와 비교·분석하였다. 장보고 과학기지가 오염물질 농도 분포에 미치는 영향을 분석하고, 인위적 배출에 의한 대기확산 실험을 수행/분석하였다. 또한, 장보고 과학기지가 주변에 기온 변화에 미치는 영향을 분석하였다.

IV. 연구결과

AWS 이전 전과 후에 관측 풍향의 변화가 나타났고, ASOS의 관측 풍속이 AWS 관측 풍속에 비해 높게 나타났다. 중규모-전산유체역학(Polar_WRF-CFD) 접합 모델을 이용하여 강풍사례를 분석한 결과, WRF와 Polar_WRF-CFD 접합 모델은 풍향에 대하여 관측과 유사하게 모의하였다. 그러나 WRF 모델과 비교하여 Polar_WRF-CFD 접합 모델이 풍속을 관측값과 더 유사하게 모의하였다. 장보고 과학기지 건설에 따른 대기오염물질의 확산과 온도 변화를 분석한 결과, 장보고 과학기지 건설 전·후에 따른 변화가 거의 나타나지 않았다.

V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구를 통하여 남극 장보고 과학기지 주변의 기상 조건을 고려한 Polar_WRF-CFD 접합 모델을 이용하여 대기 환경(풍속, 풍향, 기온, 대기오염 물질의 농도)을 평가할 수 있는 적절한 평가 방법을 개발하였다.



S U M M A R Y

I. Title

A study on the detailed atmospheric environment around the Jang-Bogo Antarctic Research Station

II. Purpose and Necessity of R&D

Terra Nova Bay, near the Jang Bogo Antarctic Research Station is one of the best place for a study on a katabatic wind, because strong katabatic winds often appear around the bay. From this study, we expect to provide the basic design data for optimal placements of observational equipments through the simulations and visualizations of the detailed wind fields and, also, to provide basic guide lines for safety. In this study, we analyzed the three-dimensional flow characteristics around the Jang Bogo station, using a computational fluid dynamics (CFD) model which is capable of detailed flow analysis by directly resolving terrain and buildings and by reflecting realistic meteorological fields reproduced by the WRF model.

III. Contents and Extent of R&D

To analyze the detailed flow characteristics around the Jang Bogo Antarctic Research Station, we analyzed the AWS and ASOS observation data and performed numerical simulations. To analyze the effects of the construction of the Jang Bogo Antarctic Research Station on the AWS and ASOS observation data, we investigated the wind environments around the station for two separated periods, that is, before-the-construction (2014.04 ~ 2015.10) and after-the-construction (2015.12 ~ 2016.03) periods. We coupled the CFD model to the Polar_WRF model and performed numerical simulations for the selected periods (strong katabatic wind cases). Simulated data were compared with the observed data. The effects of the Jang Bogo Antarctic Research Station on the dispersion of the potentially emitted air pollutants as well as the distribution of air temperature were analyzed around the station.

IV. R&D Results

The wind-rose analysis showed that there appeared the meaningful change in the wind directions caused by the construction of the Jang Bogo Antarctic Research Station (the wind speeds observed at the ASOS were larger

than those at the AWS). The numerical results simulated by the Polar_WRF-CFD coupled model showed that the wind directions simulated by the coupled model were similar to those by the Polar_WRF model. However, compared with the wind speeds simulated the Polar_WRF model, the coupled model well reproduced the observed wind speeds. On the other hand, there was no significant change in the distributions of the air pollutants and air temperature after the construction of the Jang Bogo Antarctic Research Station.

V. Application Plans of R&D Results

Through this study, we developed a proper assessment method for evaluating atmospheric environments (changes in wind speed/direction, air temperature, and air pollutant concentrations) around the Jang Bogo Antarctic Research Station using a Polar_WRF-CFD coupled model which considered realistic meteorological conditions.



목 차

제 1 장 장보고 과학기지 주변 관측자료 상세 분석

제 2 장 Polar_WRF-CFD 모델 접합을 통한 상세흐름 분석

제 3 장 장보고 과학기지 건설에 의한 대기질 변화 분석

제 4 장 장보고 과학기지의 건설에 의한 열환경 분석

제 5 장 참고문헌



제 1 장. 장보고 과학기지 주변 관측자료 상세 분석

제 1 절 장보고 과학기지 AWS_2와 ASOS 자료 비교 분석

그림 1.1 은 남극 장보고 과학기지 주변에 설치된 ASOS와 AWS_2 관측기기의 위치정보를 나타낸 위성사진이다. 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 m이다. 장보고 과학기지의 북서 방향으로는 산이 존재하며 남쪽과 동쪽 방향에는 바다가 존재한다. 장보고 과학기지의 북서 방향에 존재하는 산의 최고 높이는 700 m이다. 장보고 과학기지 AWS_2는 2017년 3월을 기준으로 위치를 이전(2회)하였다. 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''이다. 본 절에서는 동기간에 대하여 AWS_2와 ASOS의 관측자료를 분석하였다.

1. 장보고 과학기지 관측 환경 특성 분석

장보고 과학기지 주변의 기상 특성(풍향, 풍속, 기온)을 분석하기 위하여, AWS_2와 ASOS 지점에 대하여 2014년 4월부터 2015년 10월까지의 관측자료를 분석하였다. 그림 1.1은 장보고 과학기지, AWS_2, ASOS 지점의 위치를 나타낸다. 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 분석하였다. 계절별 흐름 특성을 분석하기 위하여, 하계(12월부터 2월)와 동계(6월부터 8월)로 구분하여 분석하였다. 그림 1.2는 AWS_2와 ASOS 지점에서 대상 기간(2014년 4월~2015년 10월)에 대한 바람장미도를 나타낸다. 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 나타났다. 이는 AWS_2 지점의 북쪽과 서쪽 산사면에서 불어오는 활강풍의 영향으로 판단된다(그림 1.2a). 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 관측되었다(그림 1.2b). 이는 ASOS가 AWS에 비해 상대적으로 높은 고도에서 관측되기 때문으로 판단된다. 계절별 바람장미도를 분석한 결과, AWS_2 지점에 대하여 여름철에는 북동풍(17.49%), 북북동

풍(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 나타났다(그림 1.2 c와 e). ASOS 지점에서는 여름철에 북북동풍(14.93%), 서풍(12.74%), 서남서풍(11.32%), 북동풍(11.28%) 순으로 빈도가 높게 나타났다(그림 1.2 d와 f). AWS_2 지점에서 대상 기간(2014년 4월~2015년 10월)에 대한 풍향별 풍속 빈도는 0.2~1.5 m s⁻¹(35.76%), 1.6~3.3 m s⁻¹(32.63%)의 풍속 순으로 빈도가 높게 나타났다(그림 1.3a). ASOS 지점에서는 1.6~3.3 m s⁻¹(35.7%)의 풍속에 대하여 빈도가 높게 나타났다(그림 1.3b). 계절별 바람장미도를 분석한 결과, 여름철에는 AWS_2와 ASOS 모두 1.6~3.3 m s⁻¹의 풍속에서 가장 높은 빈도(각각 42.85%, 42.46%)가 나타났다(그림 1.3 c와 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 나타났다(그림 1.3 c~f). 평균 기온을 분석한 결과, AWS_2 지점에서 전체 기간(2014년 4월~2015년 10월)에 대한 평균 기온은 -17.56°C이다. 여름철과 겨울철의 평균 기온은 각각 -2.89°C, -24.00°C로, 계절별 평균 기온차는 약 21.1°C이다. ASOS 지점에서 전체 기간(2014년 4월~2015년 10월)에 대한 평균 기온은 -17.47°C이고, 여름철과 겨울철의 평균기온은 각각 -3.00°C와 -23.74°C로 AWS_2 지점의 관측값과 큰 차이가 나타나지 않았다(표 1.1).



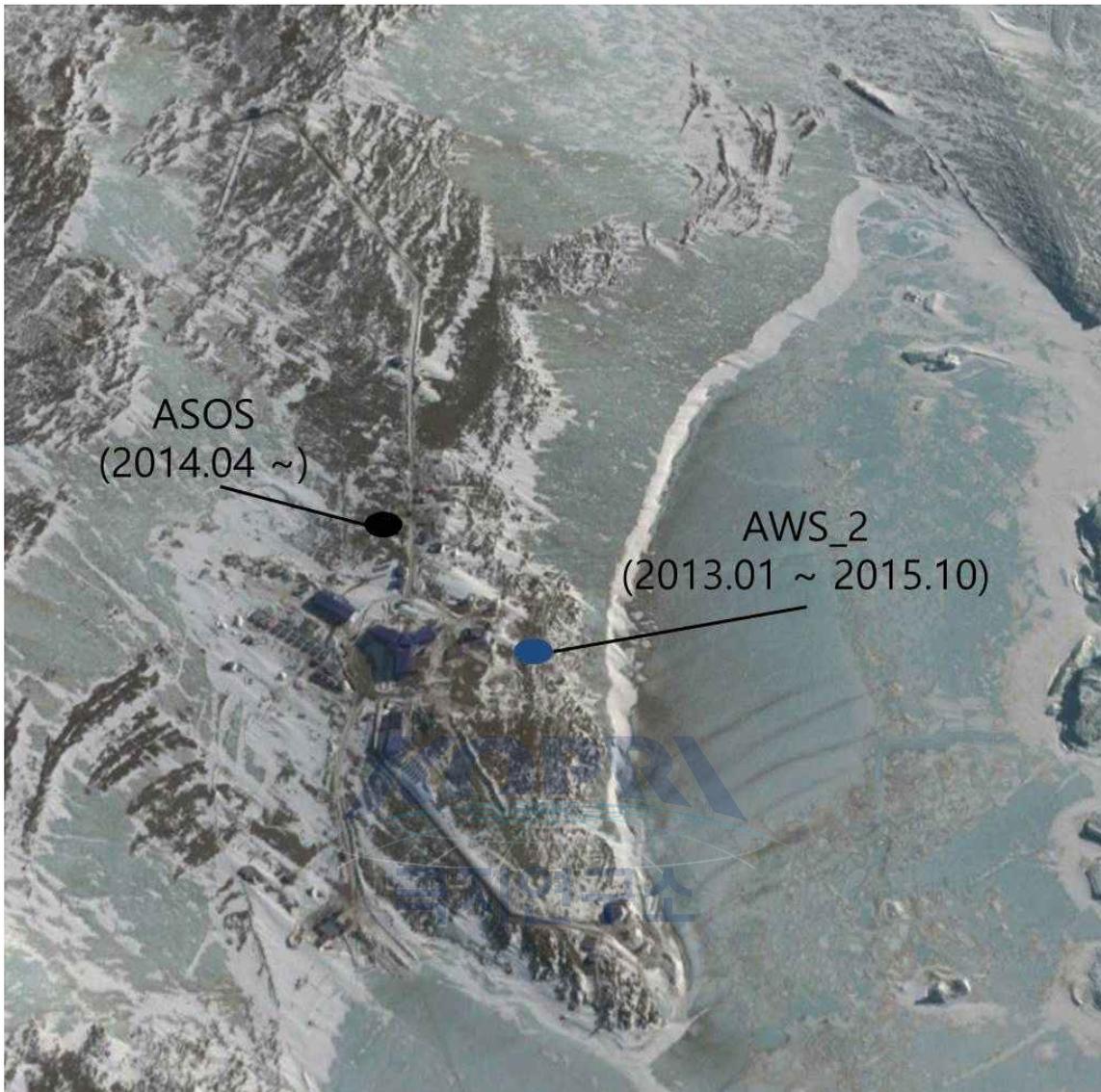


그림 1.1. 남극 장보고 과학기지 주변 관측지점에 대한 위성사진 (출처: Google Earth)

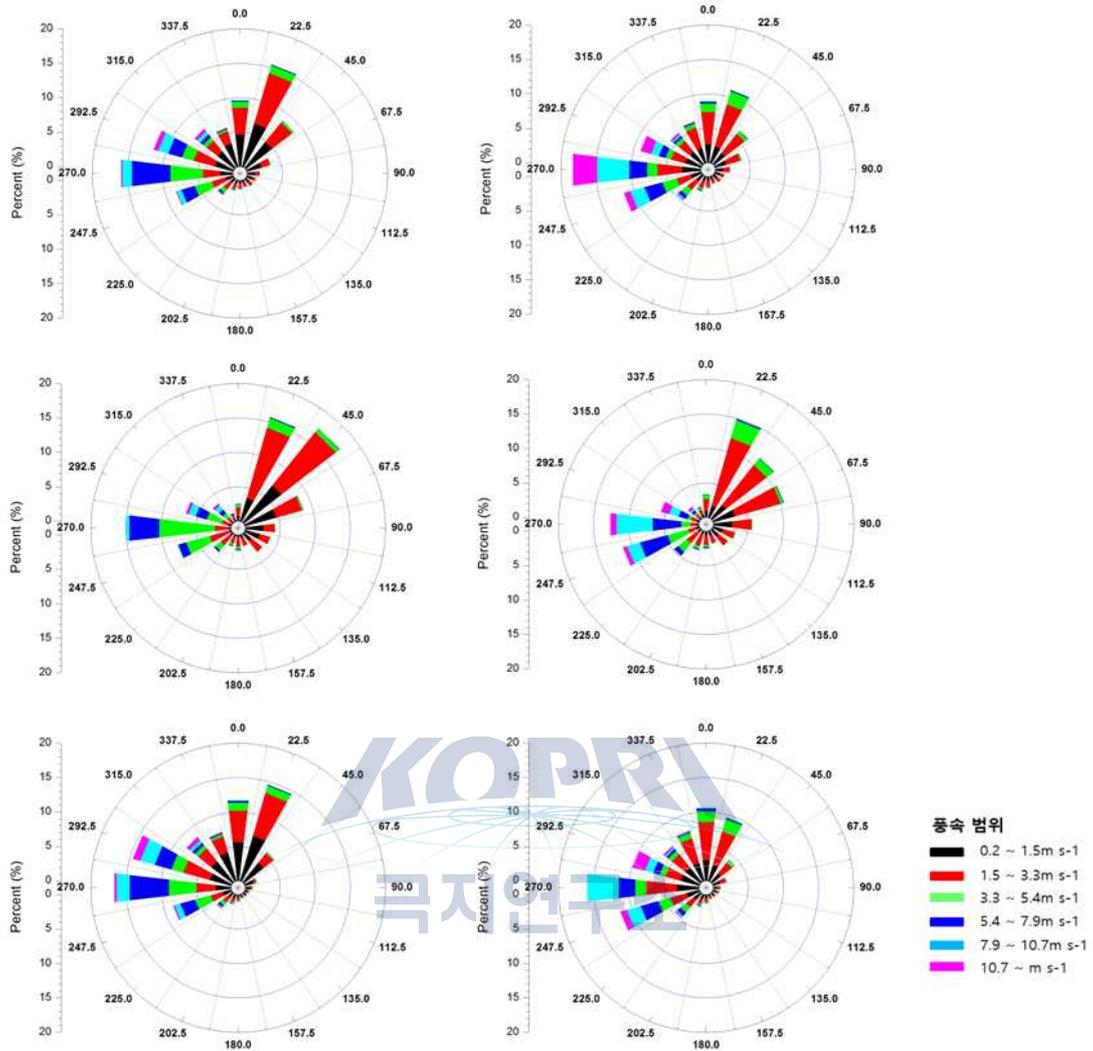


그림 1.2. 대상기간(2014년 4월~2015년 10월)에 대하여 (a) AWS_2와 (b) ASOS 전 기간, (c) AWS_2와 (d) ASOS 여름철, (e) AWS_2와 (f) ASOS 겨울철의 바람장미도

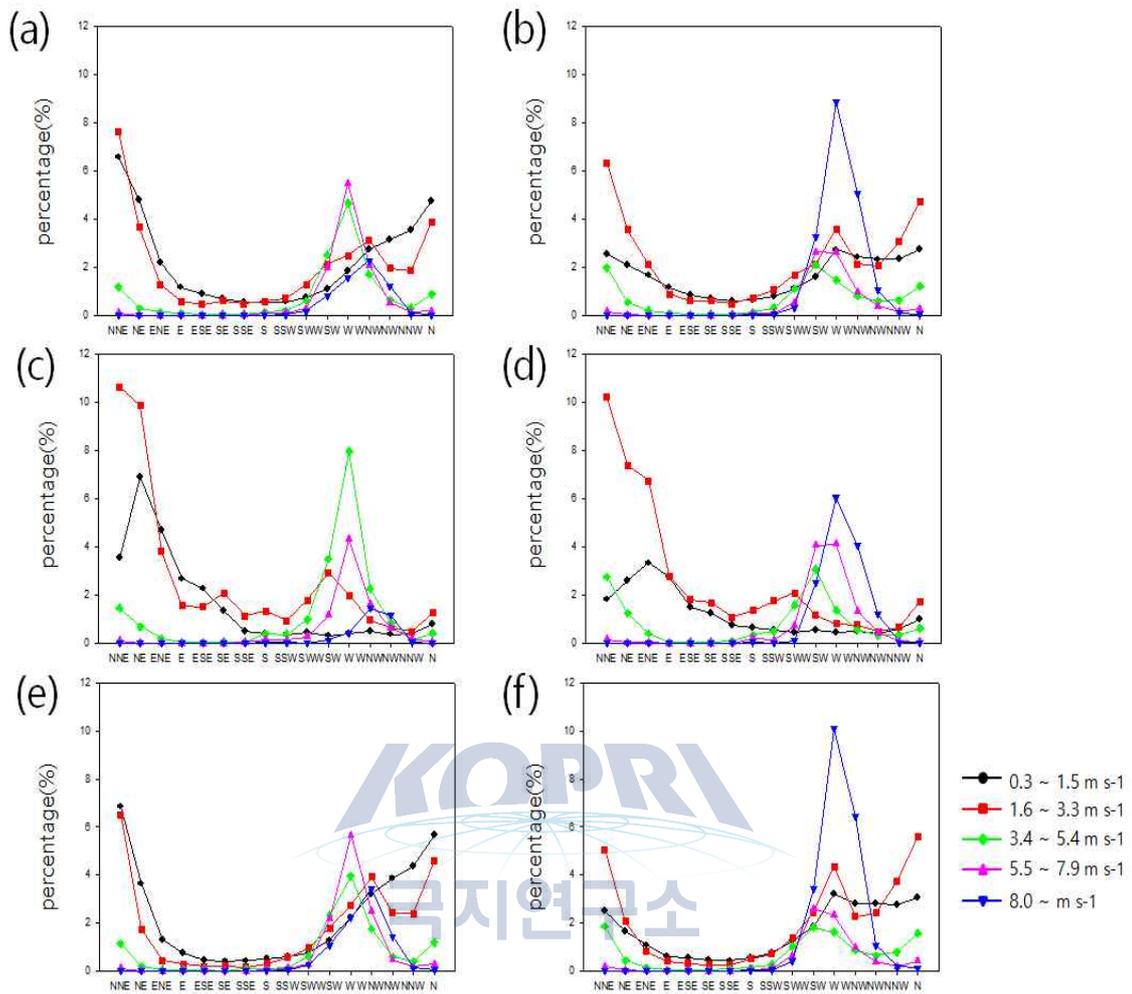


그림 1.3. 대상기간(2014년 4월 ~ 2015년 10월)에 대하여 (a) AWS_2와 (b) ASOS 전 기간, (c) AWS_2와 (d) ASOS 여름철, (e) AWS_2와 (f) ASOS 겨울철의 풍향별 풍속 빈도

표 1.1. 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℃



제 2 절 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 분석하였다. 그림 1.5는 AWS_3(이전 후 지점)과 ASOS 지점에서 대상 기간(2015년 12월~2016년 3월)에 대한 바람장미도를 나타낸다. AWS_3 지점에 대한 대상 기간(2015년 12월~2016년 3월)의 풍향 빈도는 북서풍(13.92%), 서북서풍(11.71%), 서풍(9.32%) 순으로 나타났다. 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 나타났다(그림 1.5 a와 b). AWS_3과 ASOS에서의 풍속을 분석한 결과, 대상 기간(2015년 12월~2016년 3월)에 대하여 1.6~3.3 m s⁻¹의 풍속 빈도(AWS_3 : 33.52%, ASOS : 38.23%)가 가장 높게 나타났다(그림 1.6 a와 b). AWS_3 지점에 대하여 동풍이 부는 경우에는 0.2~1.5 m s⁻¹ 풍속이 5.66%로 가장 높은 빈도를 나타냈고, 서남서풍이 부는 경우에는 5.5~7.9 m s⁻¹ 풍속이 4.12%의 빈도가 나타났다. ASOS 지점에 대하여 북북동풍이 부는 경우에는 0.2~1.5 m s⁻¹ 풍속이 8.91%로 가장 높은 빈도를 나타냈고, 북동풍이 부는 경우에는 6.55%의 빈도가 나타났다. 8.0 m s⁻¹ 이상의 강한 바람은 AWS_3과 ASOS 지점에서 각각 8%와 14.62% 빈도가 나타났다. 이는 AWS_3(지상 5 m)과 ASOS(지상 10 m) 지점의 관측 높이 차이에 따른 지표 마찰의 영향으로 판단된다. 대상 기간 동안의 평균 기온은 AWS_3과 ASOS 지점에서 각각 -4.23°C와 -4.2°C로, 두 지점의 평균 기온 차이는 거의 나타나지 않았다(표 1.2).

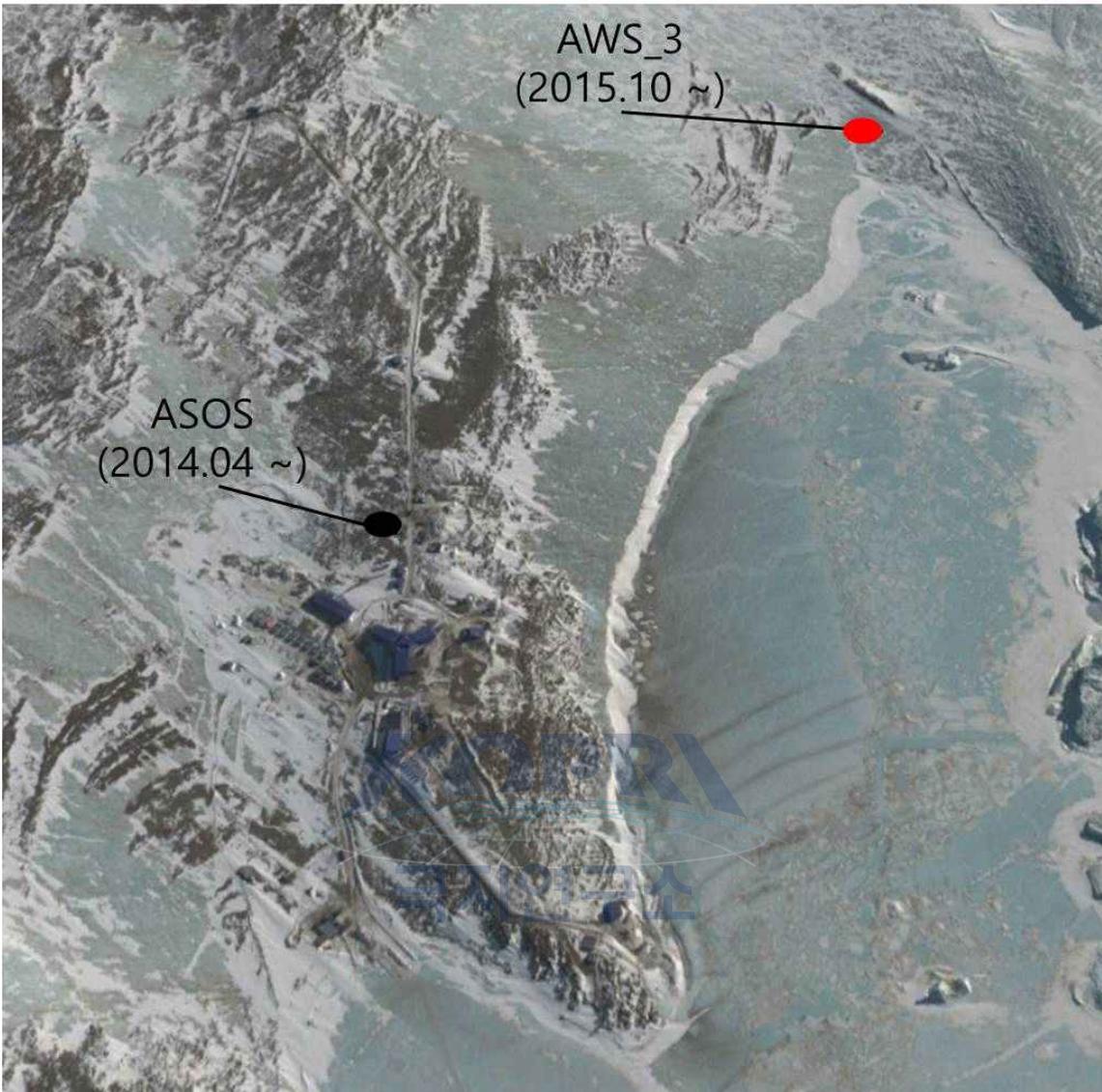


그림 1.4. 남극 장보고 과학기지 주변 관측지점에 대한 위성사진 (출처: Google Earth)

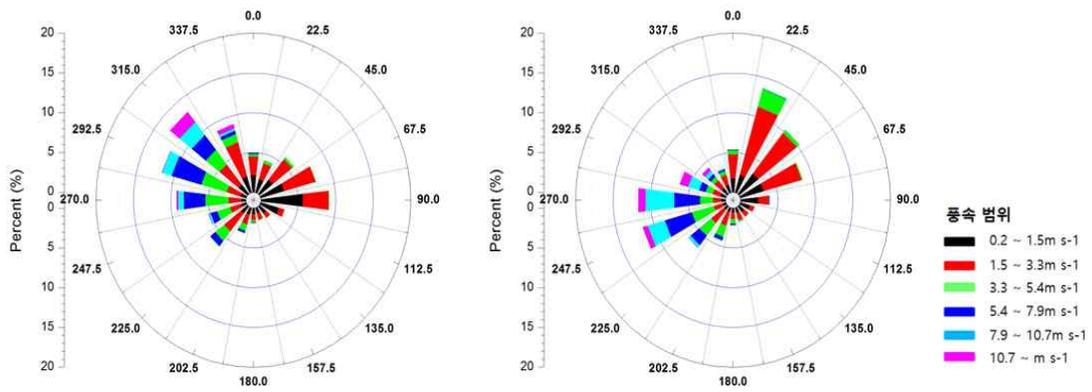


그림 1.5. 대상 기간(2015년 12월~2016년 3월)에 대하여 (a) AWS_3과 (b) ASOS 지점에서
의 바람장미도



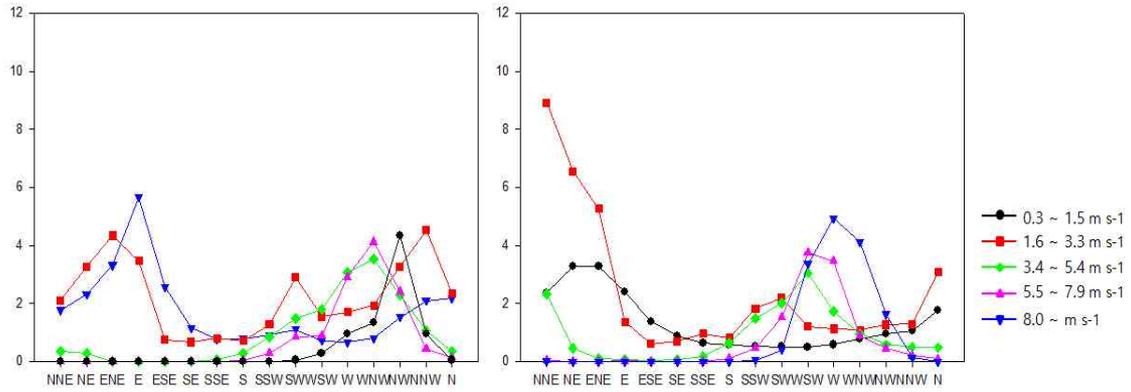


그림 1.6. 대상 기간(2015년 12월~2016년 3월)에 대하여 (a) AWS_3과 (b) ASOS 지점에서
의 풍향별 풍속 빈도



표 1.2. 대상 기간(2015년 12월~2016년 3월)에 대한 AWS_3과 ASOS 지점에서의 관측한 평균 기온(℃)

	전체 기간
AWS_3	-4.22℃
ASOS	-4.20℃



제 2 장. Polar_WRF-CFD 모델 접합을 통한 상세흐름 분석

제 1 절 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 가진다. 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 가진다. 전산유체역학(CFD) 모델을 이용하여 장보고 과학기지 주변 지역의 흐름과 오염물질의 확산을 현실적으로 모의하기 위해 Polar_WRF를 통해 수치 모의한 초기 조건이 필요하다. Polar_WRF와 CFD 모델의 접합 시스템 구축을 위하여, Polar_WRF가 모의하여 얻은 바람 성분(U, V, W)과 난류운동에너지(Turbulent Kinetic Energy)를 추출하여 사용한다. 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 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Polar_WRF의 시그마 자료를 CFD 모델의 고도 자료로 연직 내삽 후, CFD 모델의 격자계에 맞추어 선형 내삽을 수행한다. 이러한 과정을 통하여 생성된 자료를 CFD 모델의 초기/경계 자료로 사용하고, 그림 2.1과 2.2와 같이 Polar_WRF-CFD 접합 시스템을 구축하였다. 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 구축하였다. CAD 자료로부터 대상 지역의 등고선, 해안선 자료를 추출하고, 등고선 자료에 대한 내삽을 수행하여 모든 수평 격자점에 대한 높이 자료를 구축한다. 이후 생성된 등고선과 건물 높이 자료를 중첩하여 대상 지역의 3차원 지표 경계 입력 자료를 생성한다(그림 2.3). 극지연구소로 제공 받은 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 구축하였다(그림 2.4). 장보고 과학기지 주변의 산악지형과 해안선을 잘 구현하였고, 3차원 지표 경계 입력 자료의 경우에도 산악 지형의 높이 및 경사를 잘 구현하였음을 알 수 있다.

본 연구에서는 3차원, 비정수, 비회전, 비압축 대기 흐름계를 고려한 전산유체역학(Computational Fluids Dynamics, CFD) 모델을 사용하였다. 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 사용하였다. 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 구한다. 초

고해상도 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 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 2.5 \text{ m}$ 이다. 전체 계산 영역 크기는 $x \times y \times z$ 방향으로 각각 $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m} \times 250 \text{ m}$ 이다.



WPS Domain Configuration

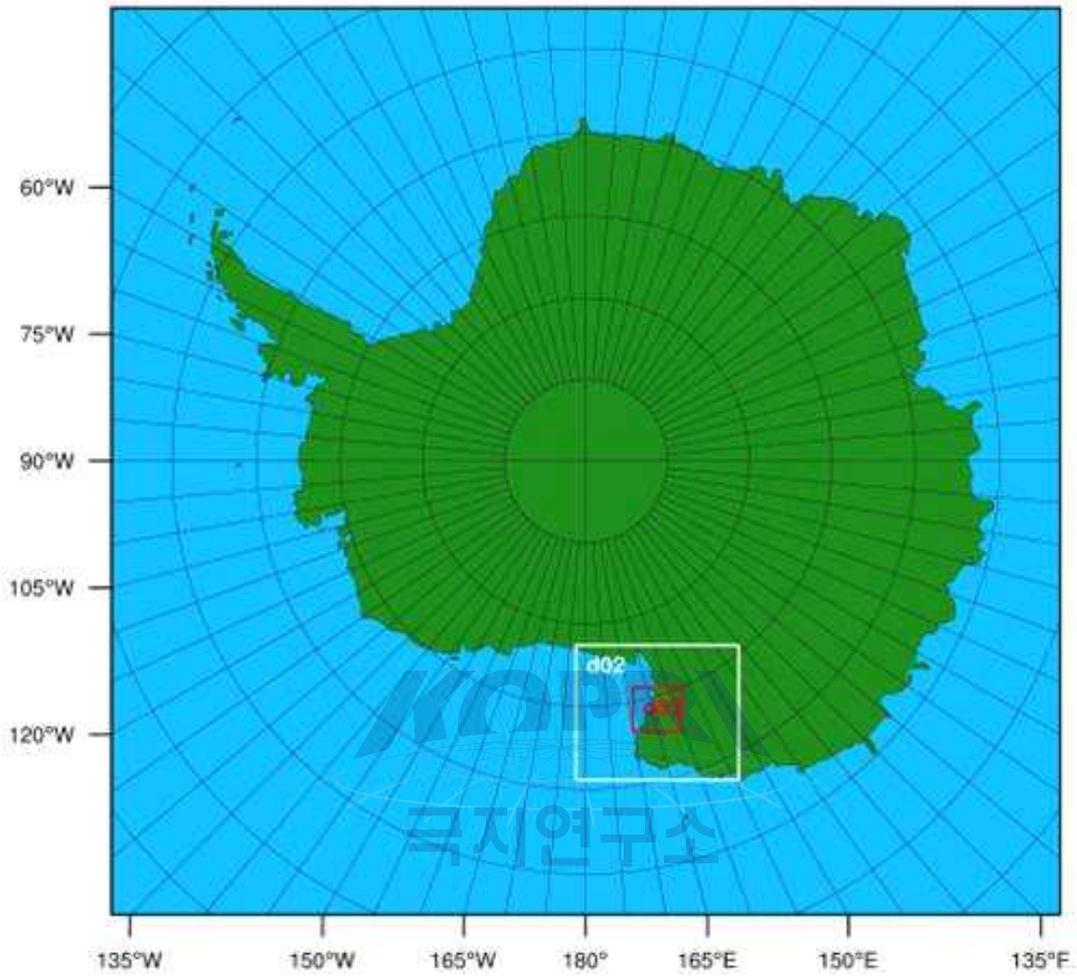
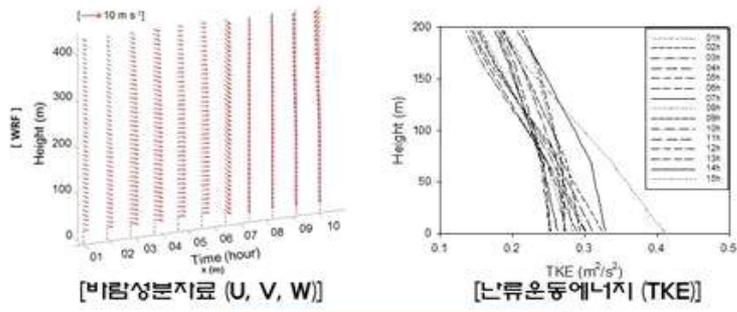


그림 2.1. Polar_WRF 수행 영역, domain1(27km), domain(9km), domain(3km) 해상도



중규모 모델 결과 자료

① 시그마 자료 → 고도 자료

연직 바람성분,
② 연직 TKE 성분 추출
→ 수평, 연직 내삽

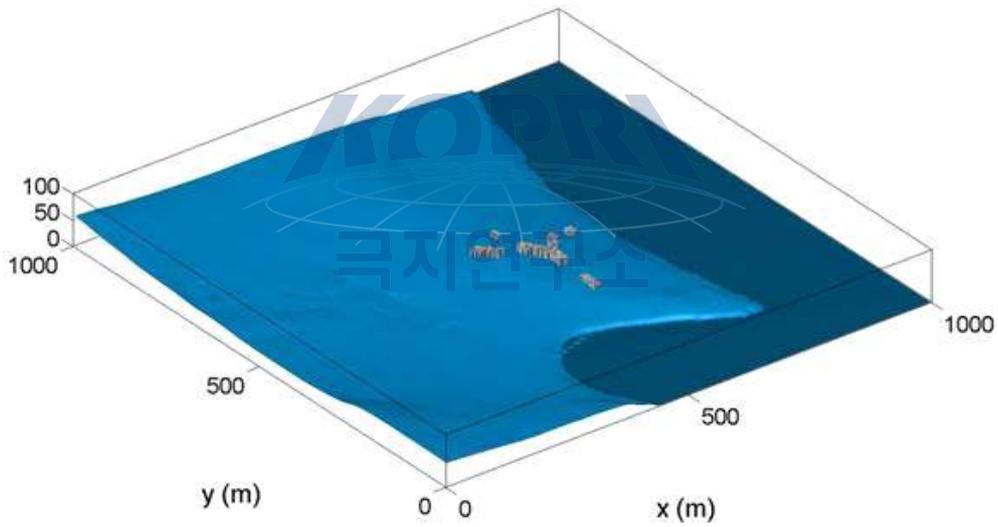


그림 2.2. Polar_WRF-CFD 모델의 초기 입력자료 추출 및 생성 과정

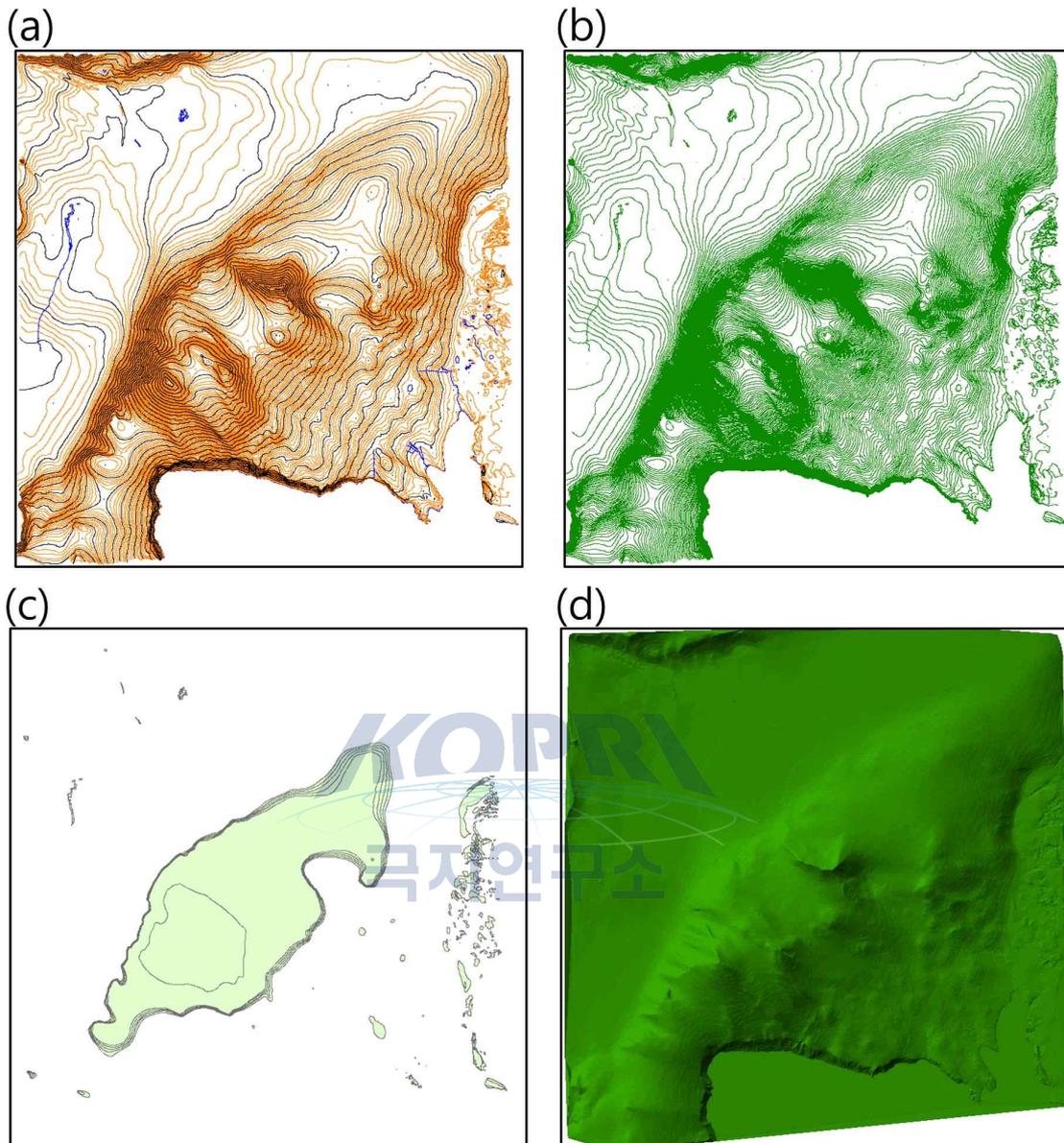
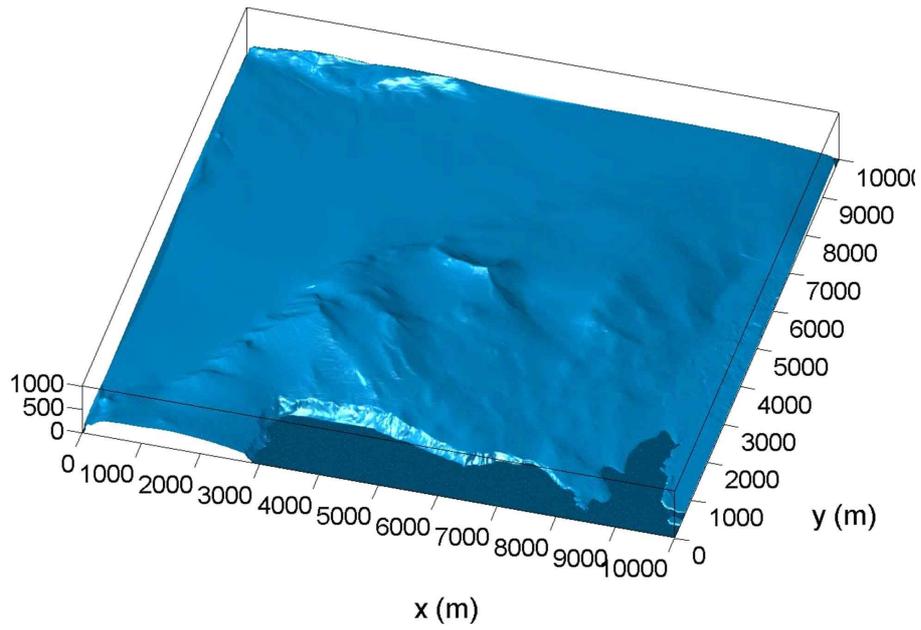


그림 2.3. 남극 장보고 과학기지의 (a) 수치지도, (b) Polyline 자료, (c) Polygon 자료, (d) 3차원 지표 경계 입력 자료

(a)



(b)

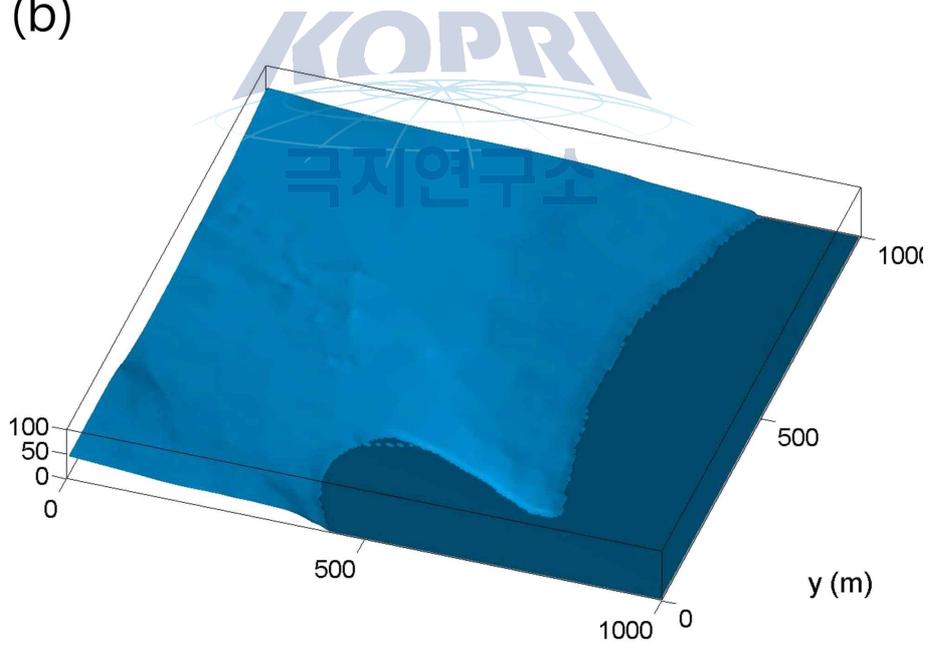


그림 2.4. 대상 지역에 대한 (a) 10 km × 10 km의 3차원 지표 경계 입력 자료와 (b) 1000 m × 1000 m의 3차원 지표 경계 입력 자료

제 2 절 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 분석하였다. 강풍 사례(2010년 8월 18일~25일)에 대하여 Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델을 수행하였고, 이를 장보고 과학기지 AWS_1 지점의 관측 자료와 비교·분석하였다.

그림 2.5는 풍속과 풍향에 대한 AWS_1 지점의 관측 결과, Polar_WRF 모의 결과, Polar_WRF-CFD 모의 결과를 나타낸다. 풍속의 경우, Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델이 전체적으로 풍속을 과대 모의하였다. 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 모의하였다. 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 모의하였다. 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} 이다(표 2.1). 풍향의 경우, Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델의 모의 풍향은 매우 유사하게 나타났다. Polar_WRF의 결과를 초기/경계 조건으로 사용하는 Polar_WRF-CFD 모델의 모의 풍향은 Polar_WRF와 유사한 경향이 나타난다. 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 모의하였다. 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° 이다(표 2.2). Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델의 모의 풍향은 큰 차이가 없었으나, 풍향에 대한 오차는 Polar_WRF가 전체적으로 작게 나타났다.

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 판단된다. 풍향의 경우에는 Polar_WRF 모델이 전체적으로 관측과 유사하게 모의하였다.

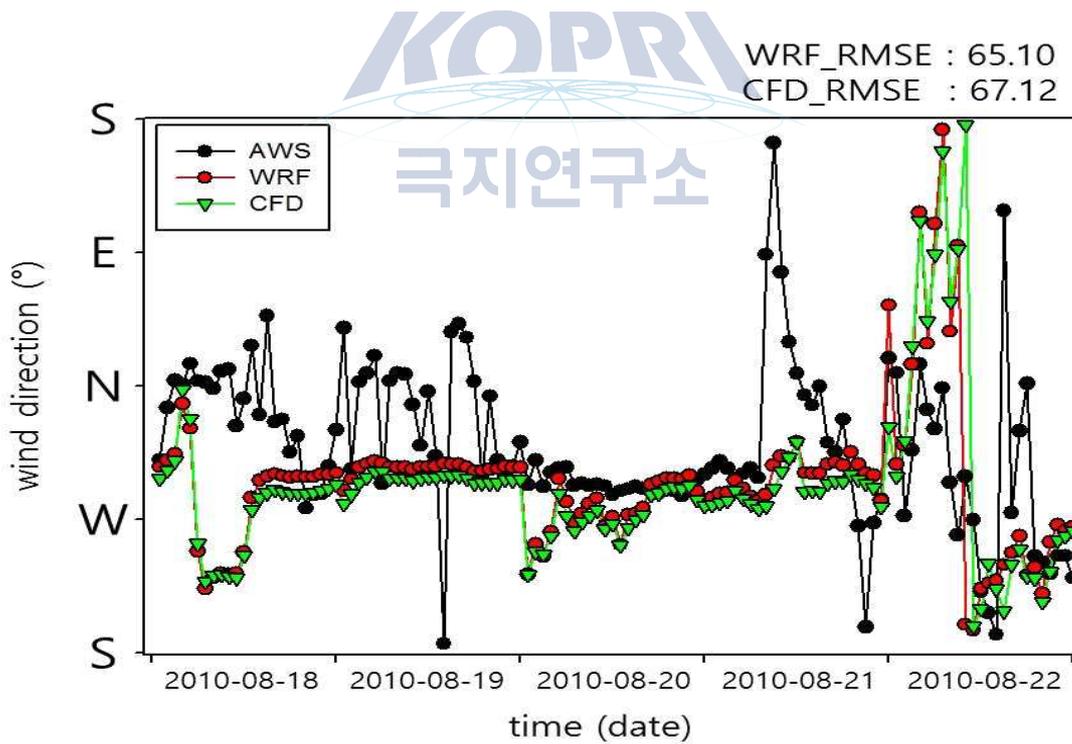
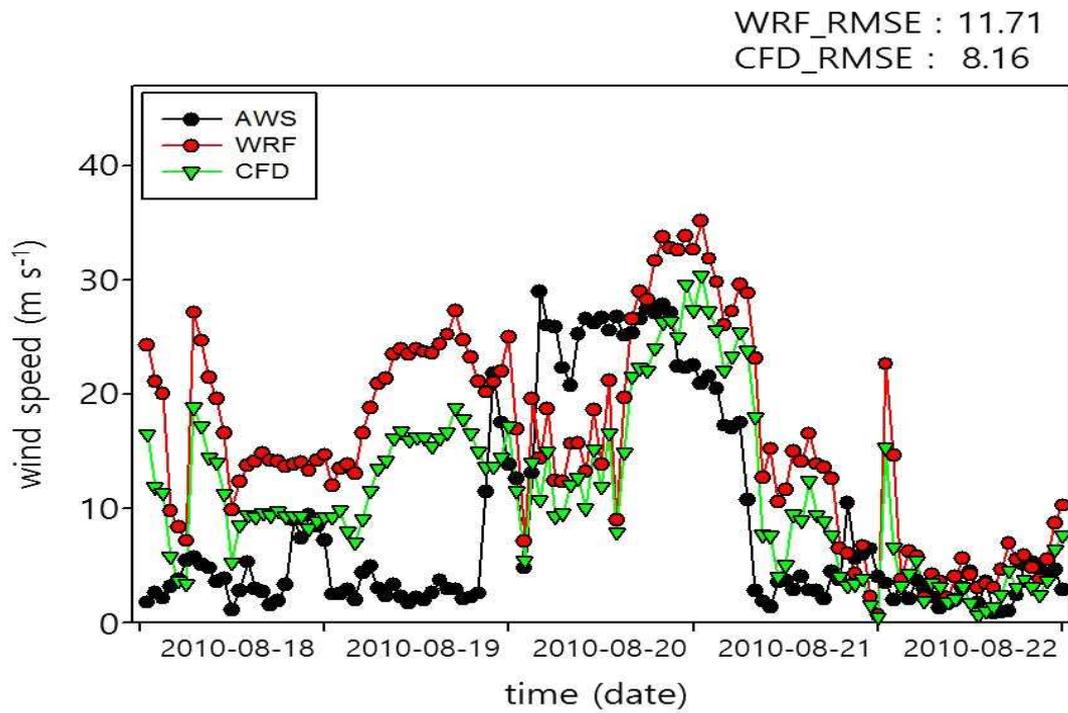


그림 2.5. 장보고 과학기지 강풍사례 1(2010년 8월 18일~2010년 8월 22일)에 대한 풍향, 풍속 시계열(AWS_1, Polar_WRF(3 km 해상도), Polar_WRF-CFD)

표 2.1. 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

표 2.2. 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($^{\circ}$)	Polar_WRF-CFD($^{\circ}$)
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

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·분석하였다.

그림 2.6은 풍속과 풍향에 대한 AWS_2 지점의 관측 결과, Polar_WRF 모의 결과, Polar_WRF-CFD 모의 결과를 나타낸다. 풍속의 경우, Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델은 전체적으로 풍속을 잘 모의하였다. Polar_WRF의 결과를 초기값으로 사용하는 Polar_WRF-CFD 모델은 Polar_WRF와 유사한 풍속 패턴을 나타내며, 전체적으로 AWS_2 관측에 더욱 근사한 결과를 모의하였다. 장보고 과학기지 AWS_2의 관측 풍속에 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 모의하였다. 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} 이다(표 2.3).

풍향의 경우, Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델의 모의 풍향은 매우 유사하게 나타났다. Polar_WRF-CFD 모델의 풍향은 Polar_WRF의 영향을 받아 유사한 경향이 나타난다. 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 모의하였다. 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° 이다(표 2.4). Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델의 모의 풍향에 대한 관측값과의 오차는 Polar_WRF가 전체적으로 작게 나타났다.

Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델의 모의 결과(풍향과 풍속)를 종합적으로 분석한 결과, 풍속은 Polar_WRF-CFD 모델이 관측에 더 근사하게 모의하였다. 이는 지형의 마찰 효과를 잘 반영하여 풍속이 감소하였기 때문으로 판단된다. 풍향의 경우, Polar_WRF 모델이 전체적으로 관측과 유사하게 모의하였다.

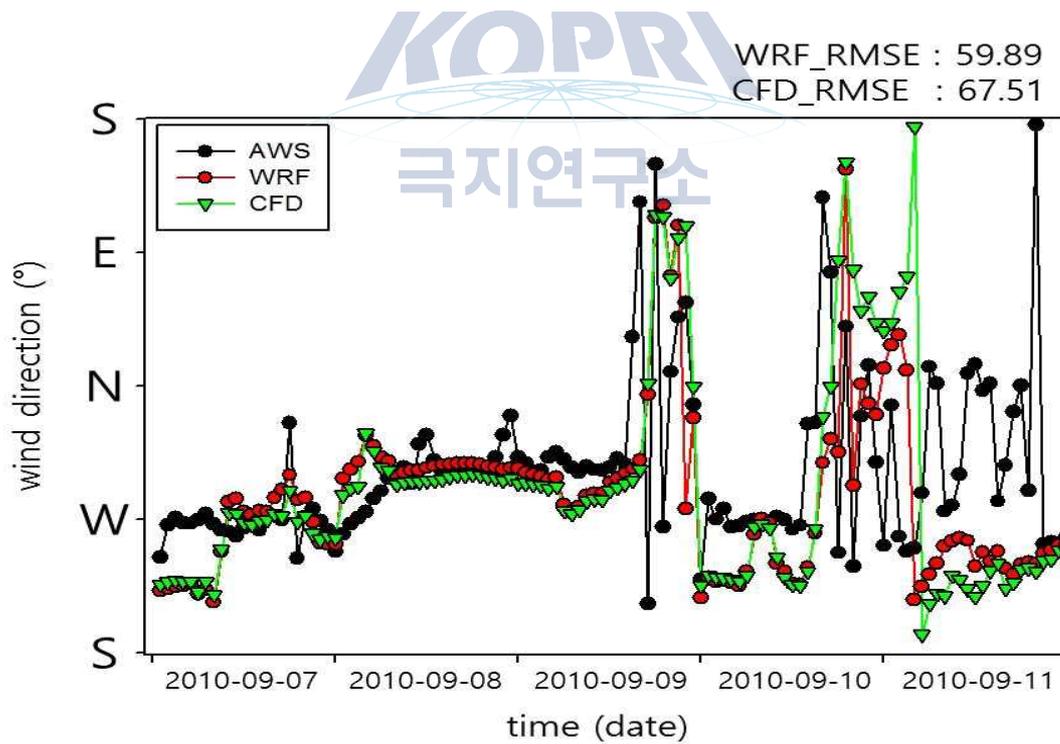
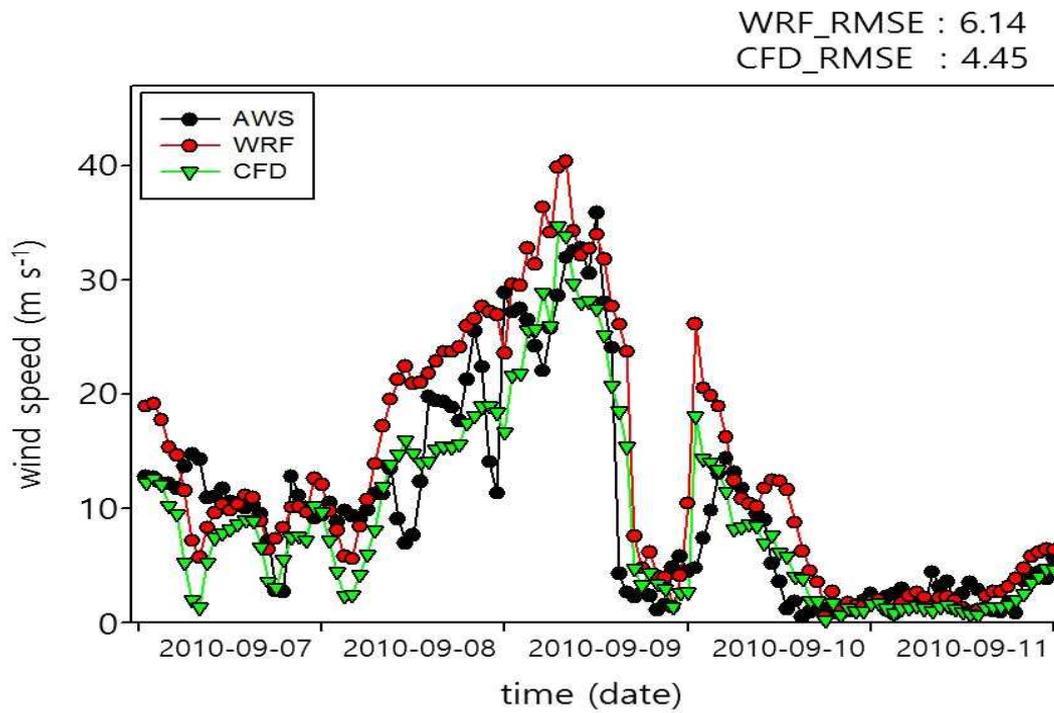


그림 2.6. 장보고 과학기지 강풍 분석 사례_2(2010년 9월 7일 ~ 2010년 9월 11일)에 대한 풍향, 풍속 시계열 분석 그래프(AWS_2, Polar_WRF(3 km 해상도), Polar_WRF-CFD)

표 2.3. 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

표 2.4. 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($^{\circ}$)	Polar_WRF-CFD($^{\circ}$)
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

제 3 절 Polar_WRF-CFD(Polar_WRF 해상도 : 1km) 모델 결과 분석

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

제 2 절에서 설명한 방법과 동일한 방법으로, Polar_WRF(1 km 해상도)의 모의 결과를 Polar_WRF-CFD 모델의 초기 및 경계 자료로 사용하였고, 그 결과를 분석하였다. 강풍사례(2010년 8월 18일~25일)에 대하여 Polar_WRF(1 km 해상도)와 Polar_WRF-CFD 모델을 수행하였고, 이를 장보고 과학기지 AWS_1 지점의 관측 자료와 비교·분석하였다.

그림 2.7은 풍속과 풍향에 대한 AWS_1 지점의 관측 결과, Polar_WRF 모의 결과, Polar_WRF-CFD 모의 결과를 나타낸다. 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 나타났다. 1 km와 3 km 해상도의 Polar_WRF를 사용한 경우, 지표 마찰에 의한 영향으로 Polar_WRF-CFD 모델이 모의한 모의 풍속보다 높게 모의한다. 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 모의하였다. 그러나 1 km 해상도의 Polar_WRF와 비교하여 3 km 해상도의 Polar_WRF 모델이 관측과 유사하게 나타났다. 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} 이다(표 2.5).

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 나타났다. Polar_WRF-CFD 모델의 모의 풍향은 건물이 존재하지 않기 때문에, Polar_WRF의 영향을 받아 유사한 경향이 나타난다. 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 나타났다. 풍속과는 반대로 3 km 해상도의 Polar_WRF와 비교하여 1 km 해상도의 Polar_WRF 모델이 관측 풍속과 유사하게 나타났다. 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° 이다(표 2.6). Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모의 풍향에는 큰 차이는 없었으나, 풍향에 대한 오차는 Polar_WRF가 대체적으로 작게 나타났다.

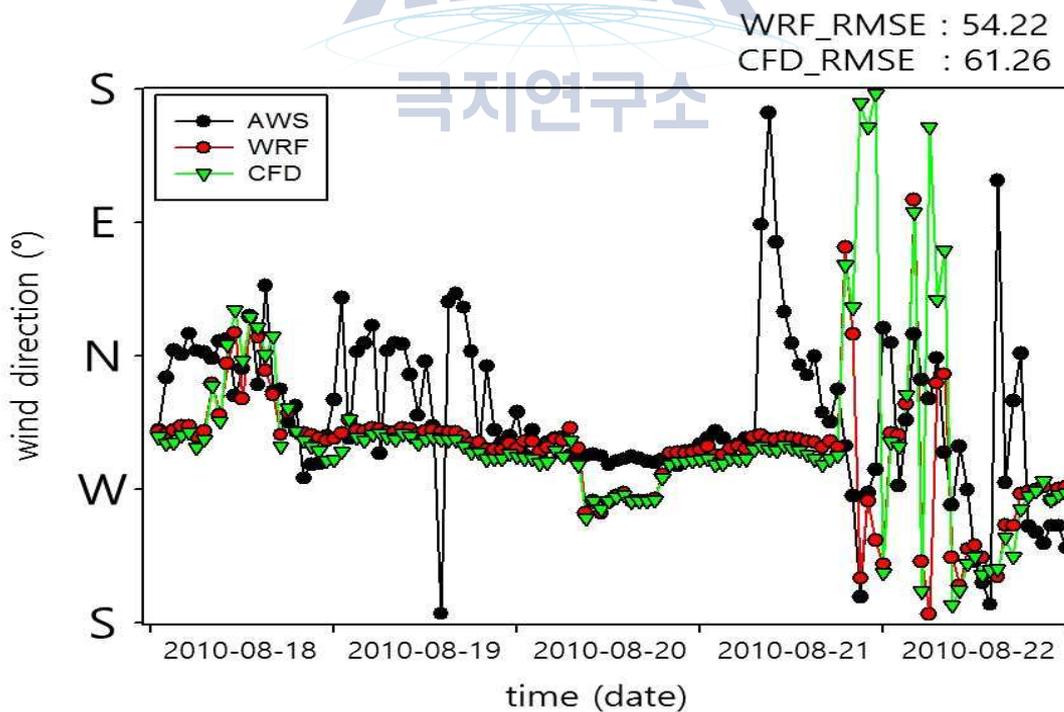
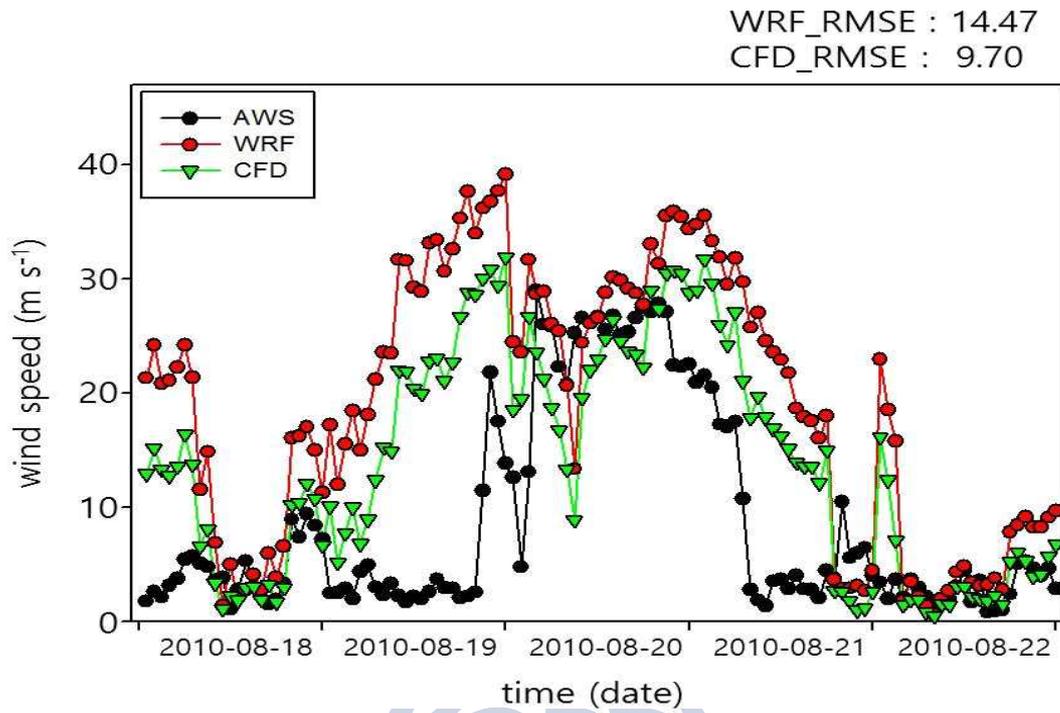


그림 2.7. 장보고 과학기지 강풍사례 1(2010년 8월 18일~2010년 8월 22일)에 대한 풍향, 풍속 시계열(AWS_1, Polar_WRF(1 km 해상도), Polar_WRF-CFD)

표 2.5. 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

표 2.6. 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)

그림 2.8은 풍속과 풍향에 대한 AWS_2 지점의 관측 결과, Polar_WRF 모의 결과, Polar_WRF-CFD 모의 결과를 나타낸다.

풍속의 경우, Polar_WRF와 Polar_WRF-CFD 모델은 전체적으로 관측값과 유사한 경향이 나타났다. 1 km 해상도의 Polar_WRF 모델을 사용한 경우에는 1 km 해상도의 Polar_WRF 모델을 사용한 경우보다 비교적 풍속을 과대모의 하였다. 그러나 Polar_WRF-CFD 모델은 1 km와 3 km 해상도의 Polar_WRF 모델을 사용한 경우에도, 거의 유사하게 풍속을 모의하였다. 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} 이다. 2010년 9월 7일~11일에 대한 일별 풍속 RMSE는 Polar_WRF의 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} 이다(표 2.7).

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 나타났다. 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 모의하였다. 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 모의하였다. 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° 이다(표 2.8). 대상 기간동안의 강풍사례에 대해서는 Polar_WRF 모델보다 Polar_WRF-CFD 모델이 풍속과 풍향을 상대적으로 잘 모의하였다.

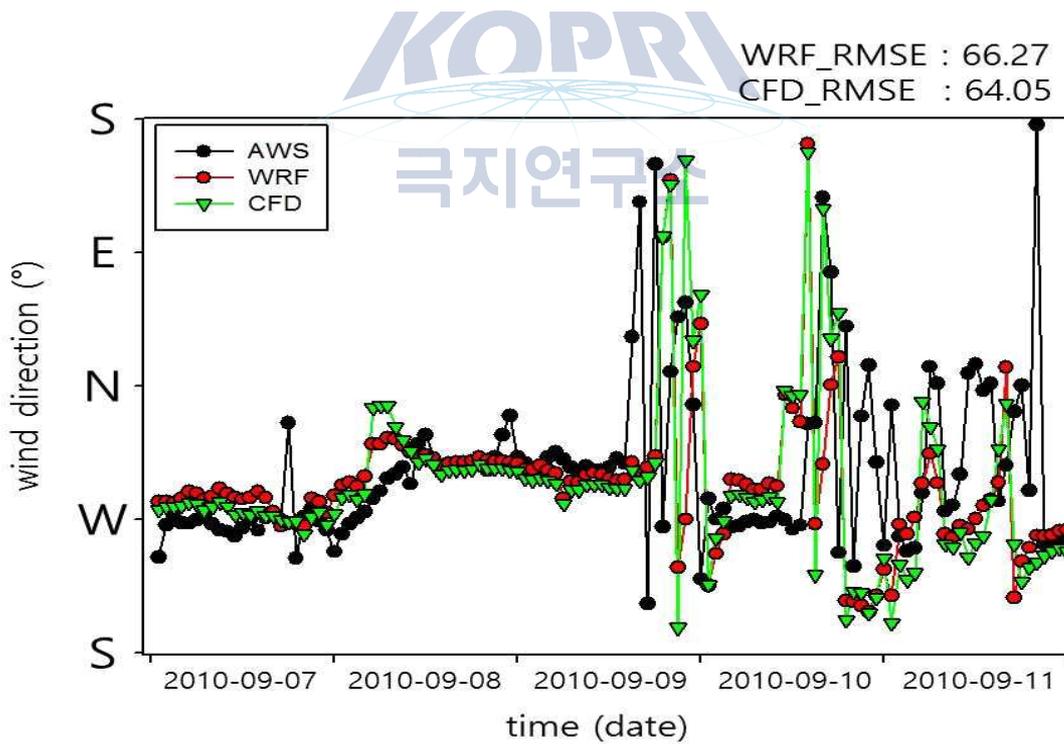
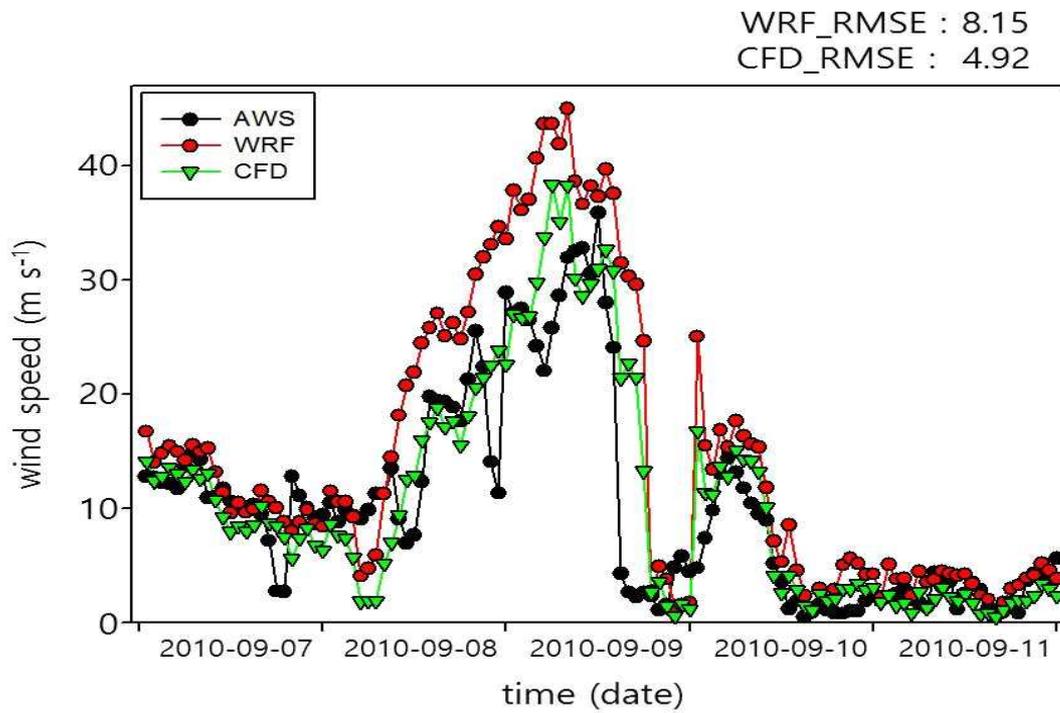


그림 2.8. 장보고 과학기지 강풍 사례 2(2010년 9월 7일~2010년 9월 11일)에 대한 풍향, 풍속 시계열(AWS_2, Polar_WRF(1 km 해상도), Polar_WRF-CFD)

표 2.7. 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

표 2.8. 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($^{\circ}$)	Polar_WRF-CFD($^{\circ}$)
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

제 3 장. 장보고 과학기지에 건설에 의한 대기질 환경 변화 분석

제 1 절 장보고 과학기지 건설 전·후에 대한 배경물질(스칼라) 농도 변화

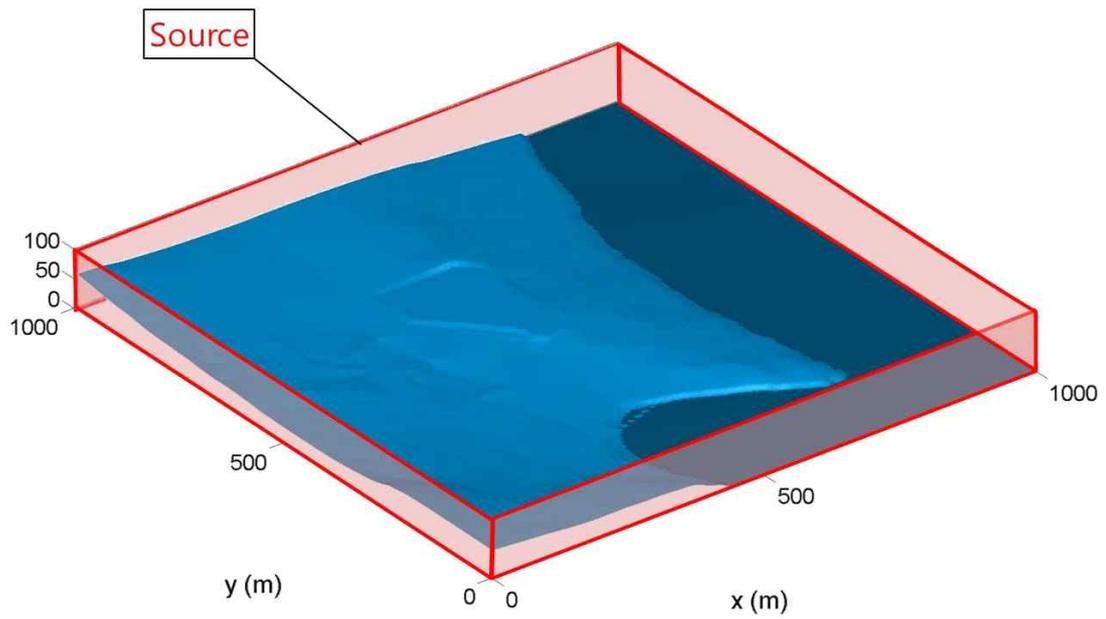
장보고 과학기지가 위치한 남극은 인간 활동에 의해 끊임없이 진행되는 환경변화의 영향을 가장 적게 받은 지역으로 과학적으로 연구가치가 매우 높은 곳이다. 남극에서 감지되는 대기 환경 변화는 전 지구적 환경의 변화를 가늠할 수 있는 척도가 될 수 있으므로 과거로부터 현재까지 많은 연구가 진행되고 있다(Robinson et al., 1984; Tanaka et al., 1987; Khairy et al., 2016). Jung et al.(2002)은 남극 세종기지가 위치한 킹조지섬을 대상으로 VOCs, SO₂와 NO₂를 측정하여 남극지역의 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 수행하였다. 이러한 직접적 관측을 통한 연구 이외에도 수치모의 실험을 통하여 대기오염 물질의 확산을 간접적으로 추정할 수 있다. 본 절에서는 수치 도메인의 경계에서 스칼라 물질을 방출시켜 장보고 과학기지 건설이 오염 물질 분포에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 한다.

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 수행하였다. 각 방향에 대한 유입 풍속은 장보고 과학기지 건설 후에 AWS 관측 지점에서의 평균 풍속($z=5.5$ m에서 3.16 m s^{-1})으로 설정하였다. 오염 물질의 확산을 위해, 수치 도메인의 경계에서 초당 50 ppb의 오염물질이 유입된다고 가정하였다(그림 3.1).

그림 3.2는 장보고 과학기지 건설 전과 후에 대한 장보고 과학기지 주변 지표($z=1.25$ m)에서의 오염 물질의 평균 농도 변화율을 나타낸다. 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 나타났다.

(a)



(b)

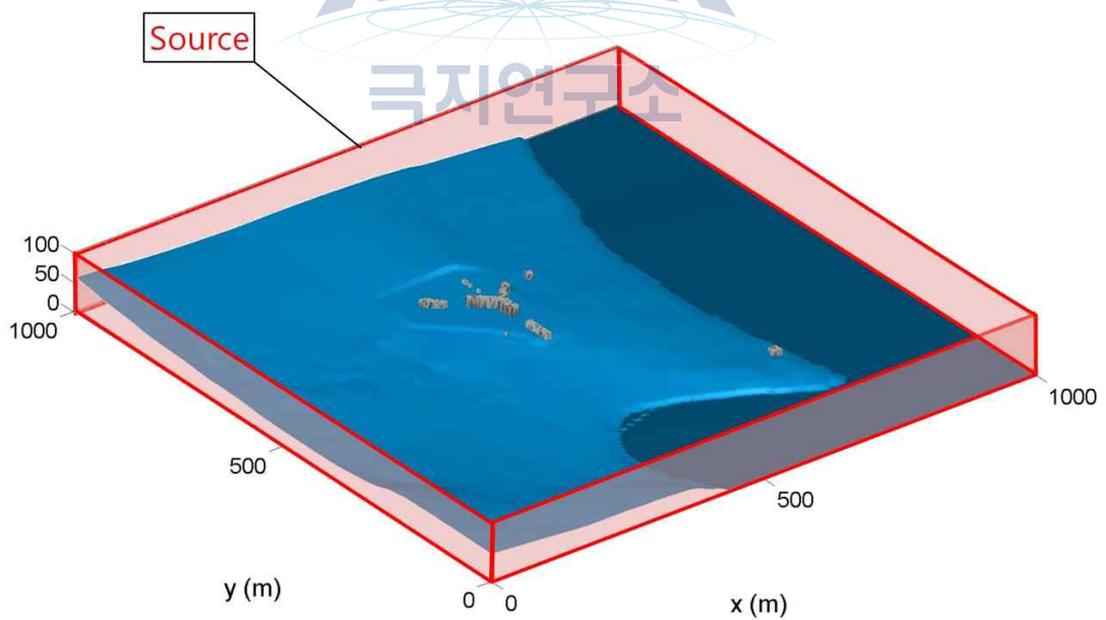


그림 3.1. 장보고 과학기지 건설 (a) 전과 건설 (b) 후의 오염 물질 확산 실험 도메인

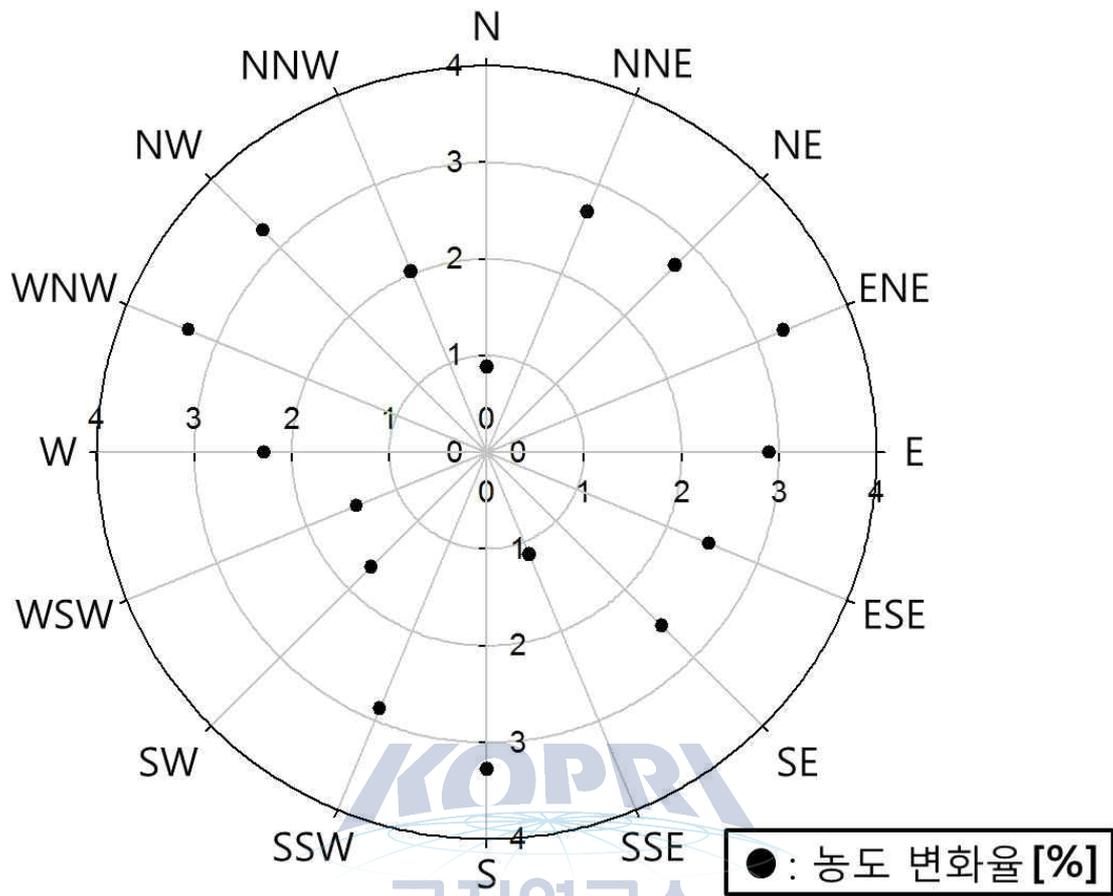


그림 3.2. 장보고 과학기지 건설 전·후에 대한 기지 주변 지표($z=1.25$ m)에서의 오염 물질 농도 변화율(16풍향)

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

그림 3.3~6은 각각 북풍, 북북동풍, 북동풍과 동북동풍이 부는 경우의 배경물질의 농도장 및 농도 변화율을 나타낸다. 북풍이 부는 경우, 기지 북쪽에 위치한 사면을 따라 기지를 향해 불어오는 흐름을 따라 오염물질이 수송된다. 기지 건설 전과 후, 기지 부근에서 약 30 ppb ~ 40 ppb의 농도 분포가 나타나고 기지의 동쪽에 위치한 해안에서는 50 ppb 이상의 높은 농도가 나타난다. 기지 건설 전과 후의 농도 변화율은 0.9%로 거의 변화가 나타나지 않았고 본관동과 정비동 사이, 그리고 발전동의 남측에서 상대적으로 배경물질의 농도가 증가하는 영역이 나타났다(그림 3.3). 북북동풍이 부는 경우, 기지 주변에서 약 30 ppb ~ 40 ppb의 농도가 나타나고 기지의 동쪽과 남동쪽 해안에서 50 ppb 이상의 농도가 나타난다. 기지 건설 전과 후의 배경물질의 농도 변화는 2.7% 감소가 나타났고 북동쪽에서 불어오는 흐름에 의해 본관동 주변에서 농도가 낮아지는 영역이 나타난다. 반대로 정비동과 본관동의 남서쪽, 정비동의 남서쪽에서 농도가 다소 증가하는 영역이 나타난다(그림 3.4). 북동풍이 부는 경우, 기지 부근에서 약 30ppb ~ 43 ppb의 농도가 나타난다. 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 나타난다(그림 3.5). 동북동풍이 부는 경우, 기지 건설 전과 후에 약 37 ppb ~ 43 ppb의 농도가 나타난다. 기지 건설 전에 대한 건설 후의 배경물질 농도 변화율은 3.3% 감소가 나타났고 기지 주변에서 농도의 감소가 나타난다. 그러나 기지의 서쪽 부근에서 농도가 다소 증가하는 영역이 나타난다(그림 3.6).

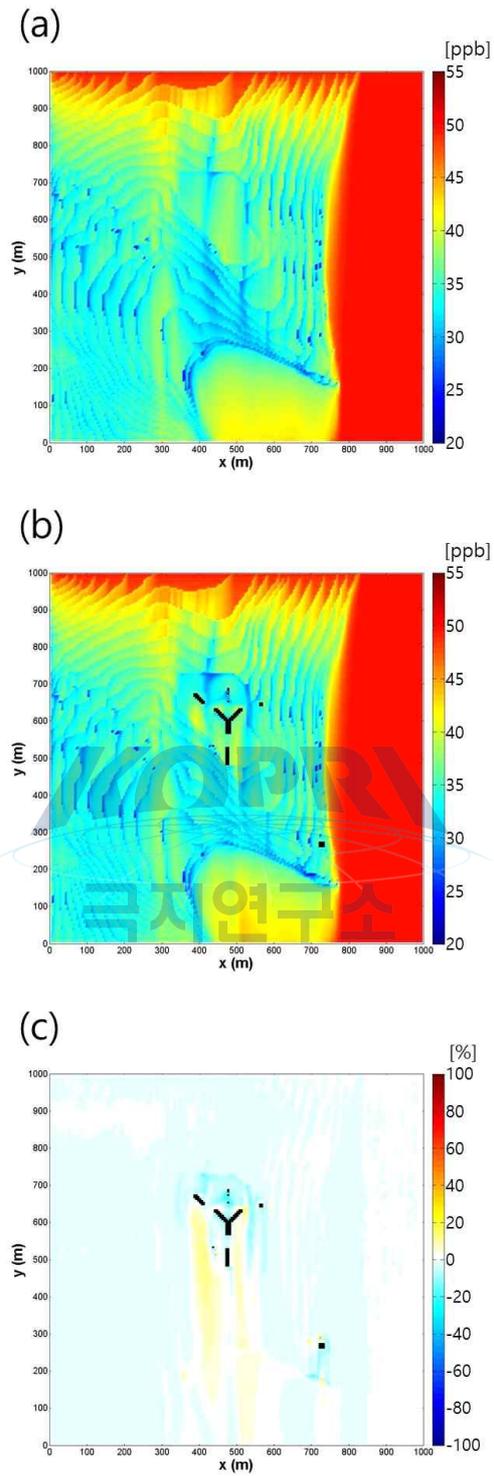


그림 3.3. 유입 풍향이 북풍(0°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표 ($z=1.25$ m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

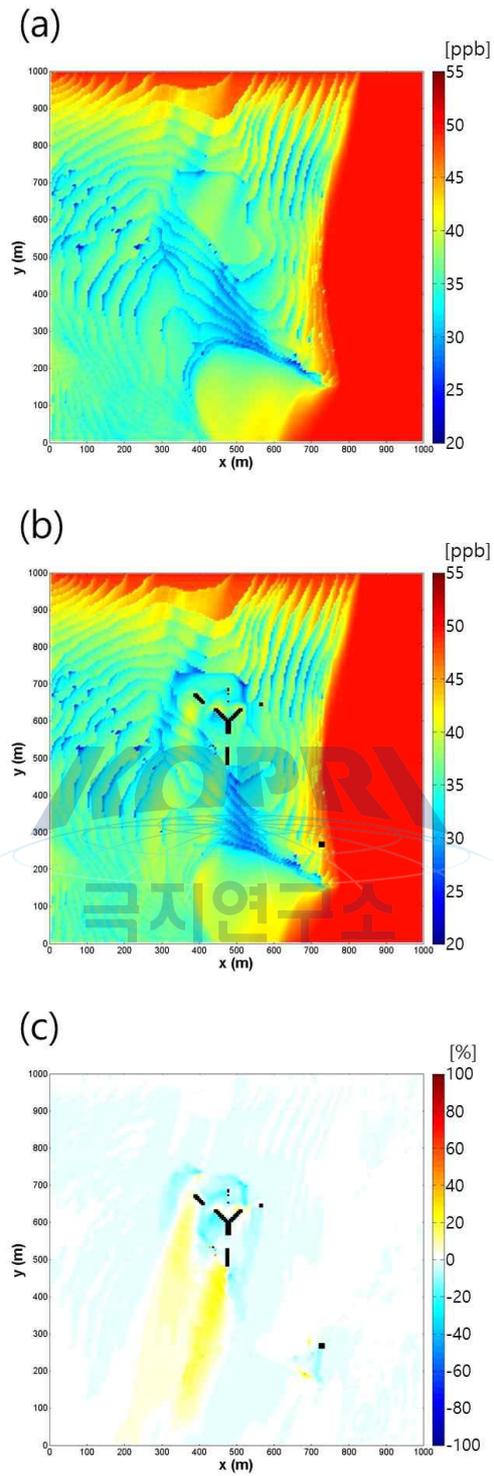


그림 3.4. 유입 풍향이 북북동풍(22.5°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표(z=1.25 m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

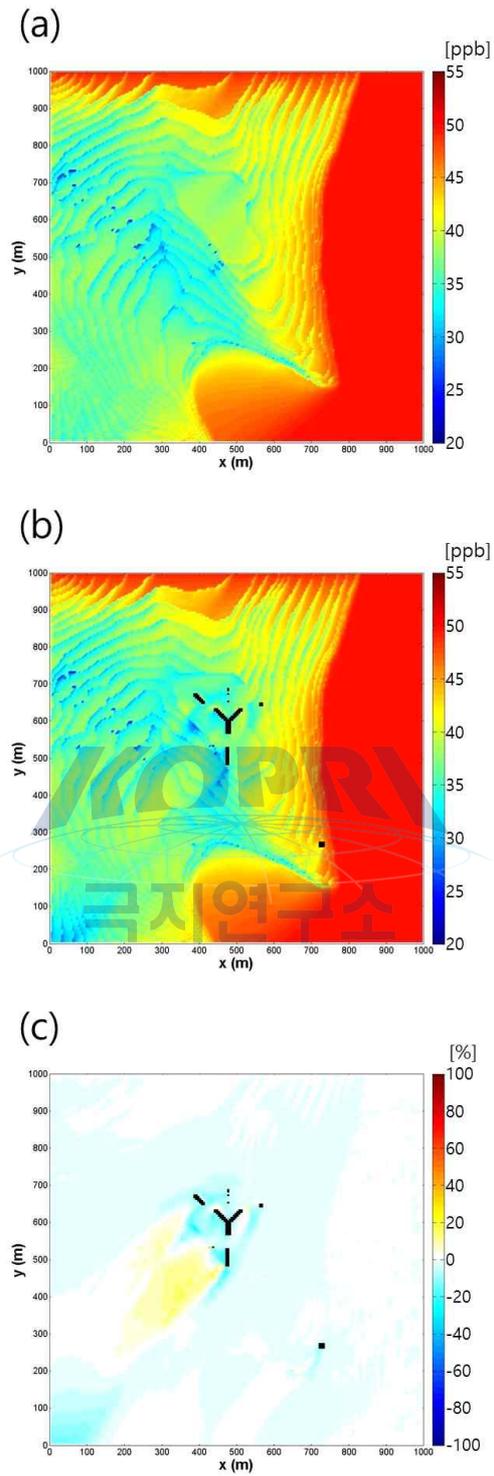


그림 3.5. 유입 풍향이 북동풍(45°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표(z=1.25 m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

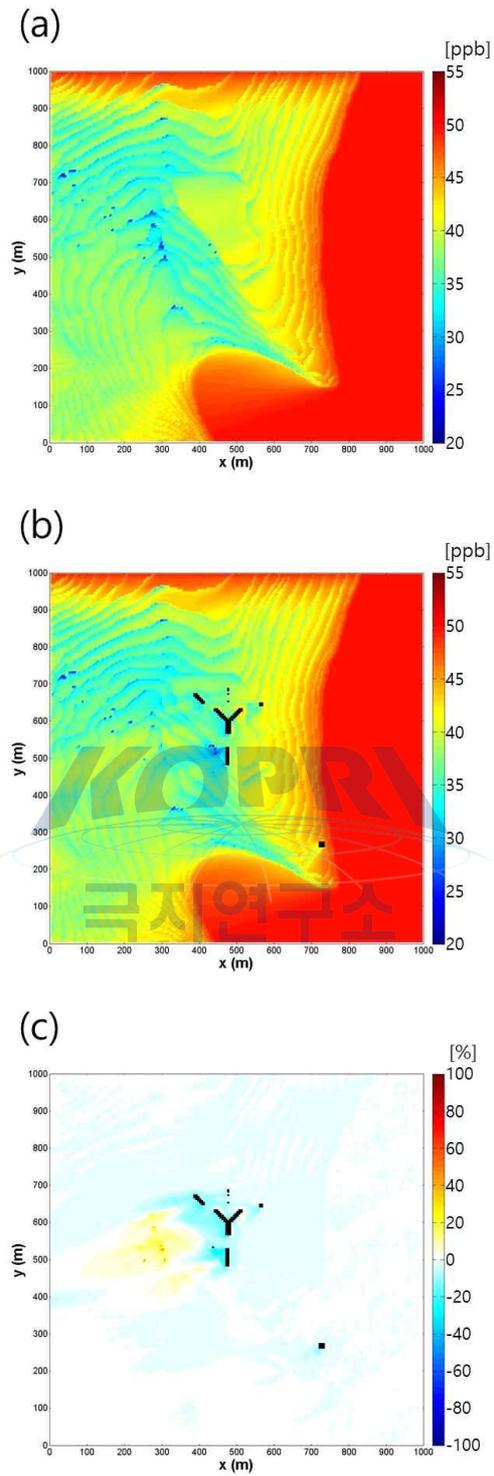


그림 3.6. 유입 풍향이 동북동풍(67.5°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표(z=1.25 m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

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

그림 3.7~10은 각각 동풍, 동남동풍, 남동풍과 남남동풍이 부는 경우의 배경물질 농도장 및 농도 변화율을 나타낸다. 동풍이 부는 경우, 동쪽 해안으로부터 사면을 따라 기지를 향해 불어오는 흐름을 따라 오염물질의 수송이 나타나게 된다. 기지 건설 전과 후, 기지 부근에서는 약 30 ppb ~ 40 ppb의 농도가 나타나고 기지의 동쪽에 위치한 해안에서 50 ppb 이상의 높은 농도를 나타낸다. 이에 비하여 육지에서는 상대적으로 낮은 농도가 나타난다. 기지 건설 전에 대한 건설 후의 농도 변화율은 2.9% 감소가 나타났다. 건물의 바로 인접한 영역에서는 농도의 감소가 나타났다으나, 본관동의 서쪽에서 반대로 배경물질의 농도가 증가하는 영역이 나타났다(그림 3.7). 동남동풍이 부는 경우, 기지 주변에서 약 35 ppb ~ 43 ppb의 농도분포가 나타나고 기지의 동쪽과 남쪽 해안에서 50 ppb 이상의 농도가 나타난다. 기지 건설 전에 대한 건설 후의 농도 변화율은 2.5% 감소가 나타났다. 기지의 남동쪽 해안에서 불어오는 흐름에 의해 본관동 주변에서 농도가 감소하는 영역이 나타나고 본관동의 북서쪽에서 농도가 증가하는 영역이 부분적으로 나타난다(그림 3.8). 남동풍이 부는 경우, 기지 부근에서 35 ppb ~ 43 ppb의 농도가 나타나고 기지 건설 전에 대한 건설 후의 농도 변화는 2.5% 감소하였다. 남동쪽에서 불어오는 흐름에 의해 기지의 풍하측 영역에서 농도가 낮아지는 영역이 나타난다(그림 3.9). 남남동풍이 부는 경우, 기지 건설 전에 40 ppb의 농도가 나타나고 기지 건설 후에 농도가 다소 감소한다. 기지 건설 전에 대한 건설 후의 농도 변화율은 1.1% 감소가 나타났고 남동풍의 경우와 유사하게 기지의 북서쪽 영역에서 농도의 감소가 나타난다(그림 3.10).

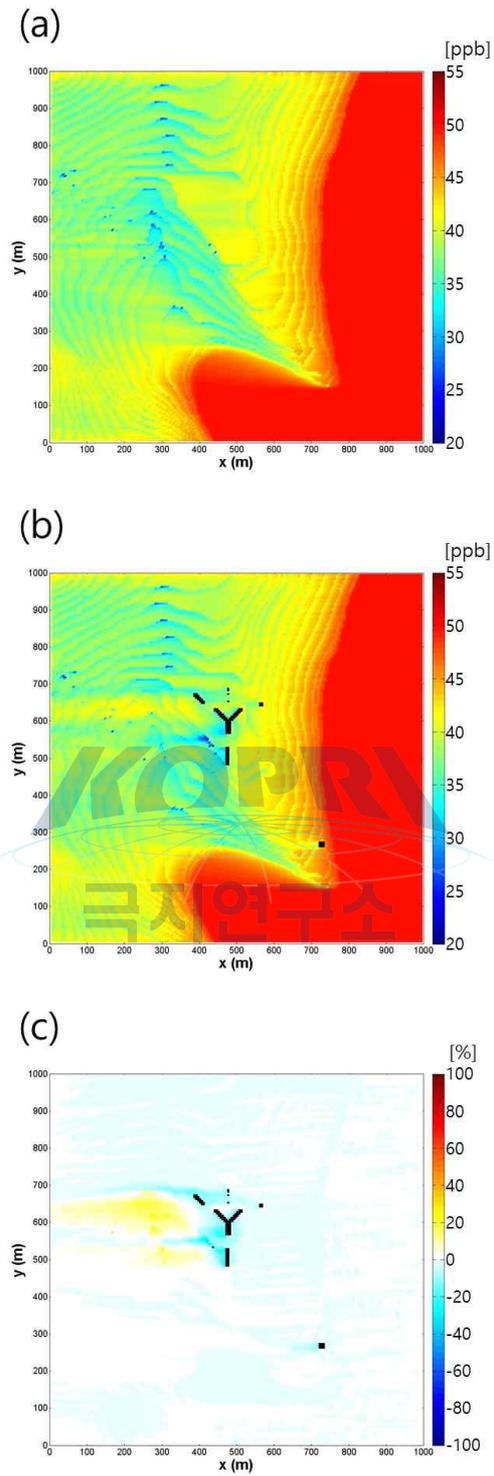


그림 3.7. 유입 풍향이 동풍(90°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표($z=1.25$ m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

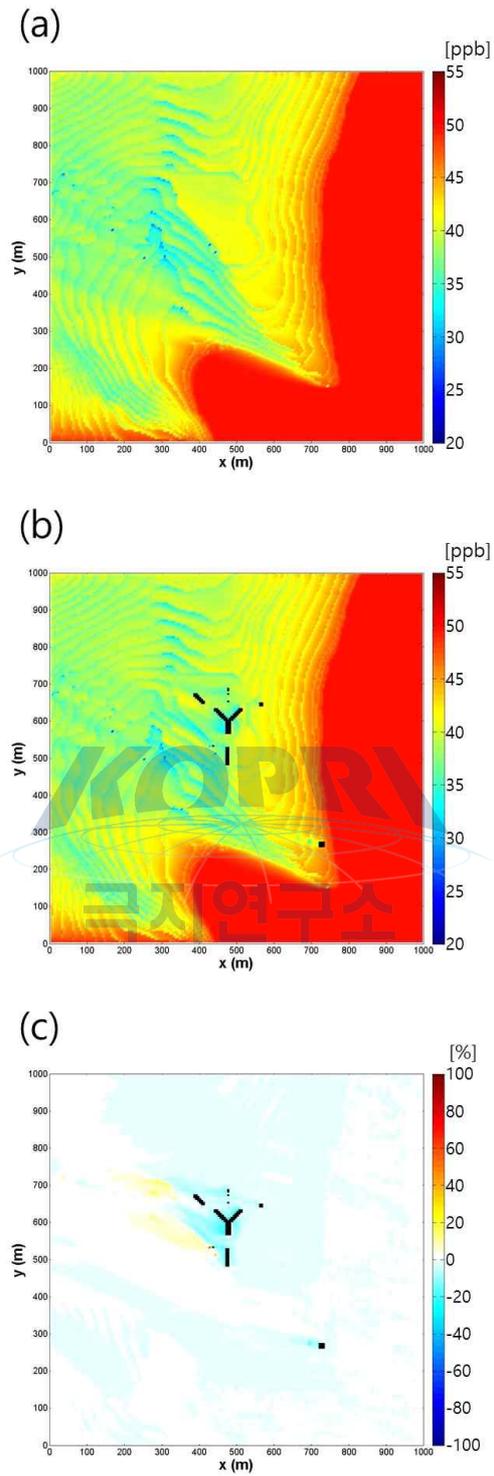


그림 3.8. 유입 풍향이 동남동풍(112.5°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표(z=1.25 m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

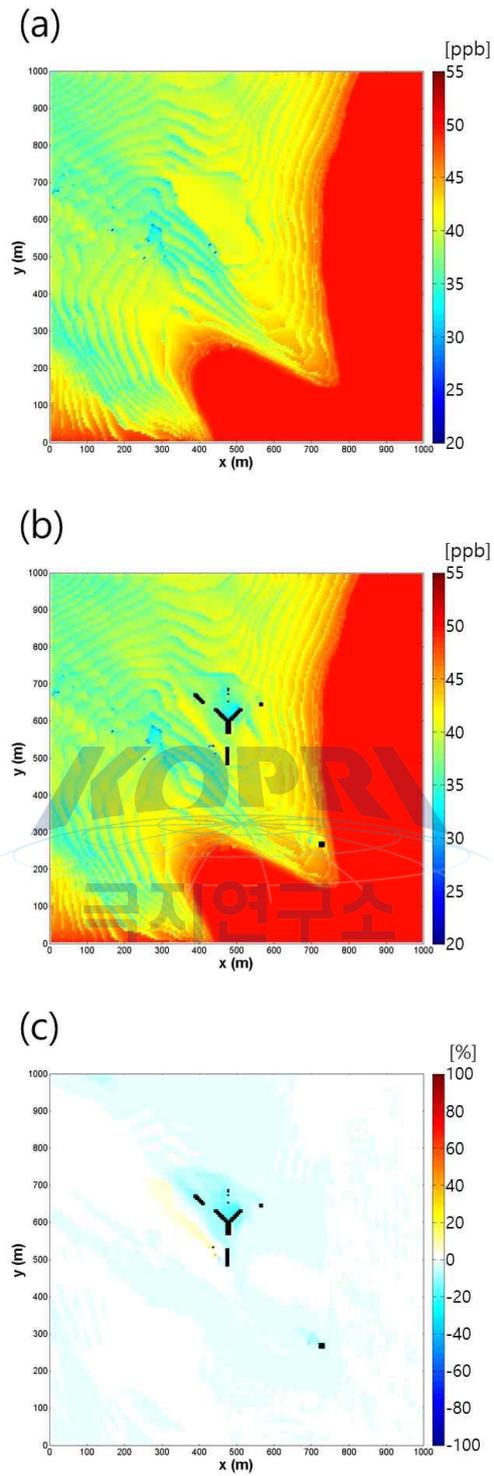


그림 3.9. 유입 풍향이 남동풍(135°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표($z=1.25$ m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

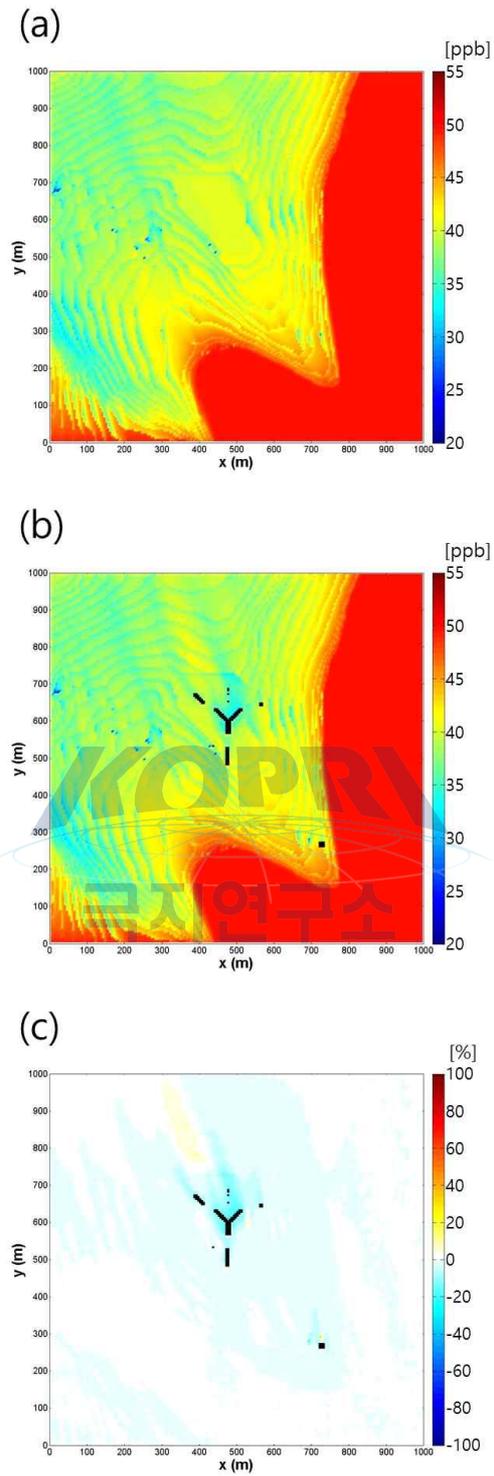


그림 3.10. 유입 풍향이 남남동풍(157.5°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표(z=1.25 m) 오염물질 농도장과 (c)오염물질 농도 변화율

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

그림 3.11~14는 각각 남풍, 남남서풍, 남서풍과 서남서풍이 부는 경우의 배경물질 농도 및 농도 변화율을 나타낸다. 남풍이 부는 경우, 기지 남쪽해안으로부터 사면을 따라 기지를 향해 흐름이 나타나고 이를 따라 오염물질이 수송된다. 기지 건설 전과 후, 기지 부근에서 30 ppb ~ 40 ppb의 농도를 나타내고 기지의 남쪽과 동쪽에 위치한 해안에서 50 ppb 이상의 높은 농도를 나타낸다. 기지 건설 전과 후의 농도 변화율은 3.3%로 나타났고 본관동의 북쪽에서 농도가 낮게 나타났다(그림 3.11). 남남서풍이 부는 경우, 기지 주변에서 25 ppb ~ 35 ppb의 농도를 나타내고 기지의 동쪽과 남쪽 해안에서 50 ppb 이상의 농도가 나타난다. 기지 건설 전과 후의 농도 변화율 2.9% 감소하였고 남서쪽에 불어오는 흐름에 의해 본관동 주변에서 농도가 낮아지는 영역이 나타나며 특히 본관동 북측면에서 크게 약화된다. (그림 3.12). 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 나타난다(그림 3.13). 서남서풍이 부는 경우, 기지 건설 전 35 ppb ~ 40 ppb의 농도가 나타나고 기지 건설 후에 농도가 다소 감소한다. 기지 건설 전과 후의 농도 변화율은 1.4% 감소하였고 본관동 주변에서 농도가 감소하는 영역이 나타나고 기지 북동쪽에서 농도가 다소 증가하는 영역이 나타난다(그림 3.14).

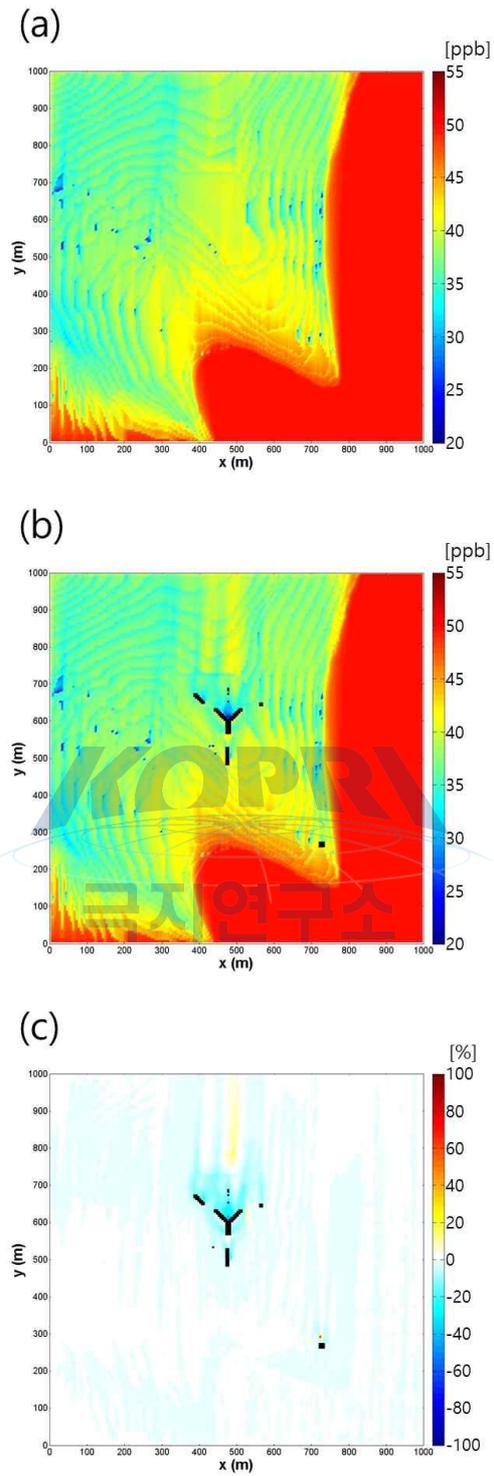


그림 3.11. 유입 풍향이 남풍(180°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표(z=1.25 m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

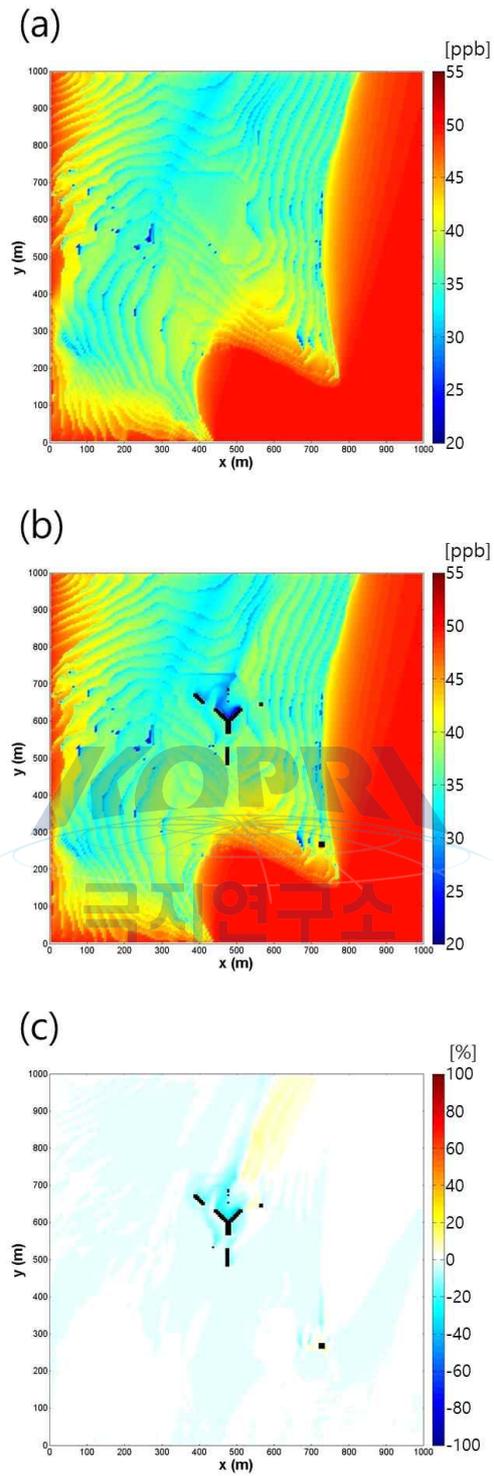


그림 3.12. 유입 풍향이 남남서풍(202.5°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표(z=1.25 m) 오염물질 농도장과 (c)오염물질 농도 변화율

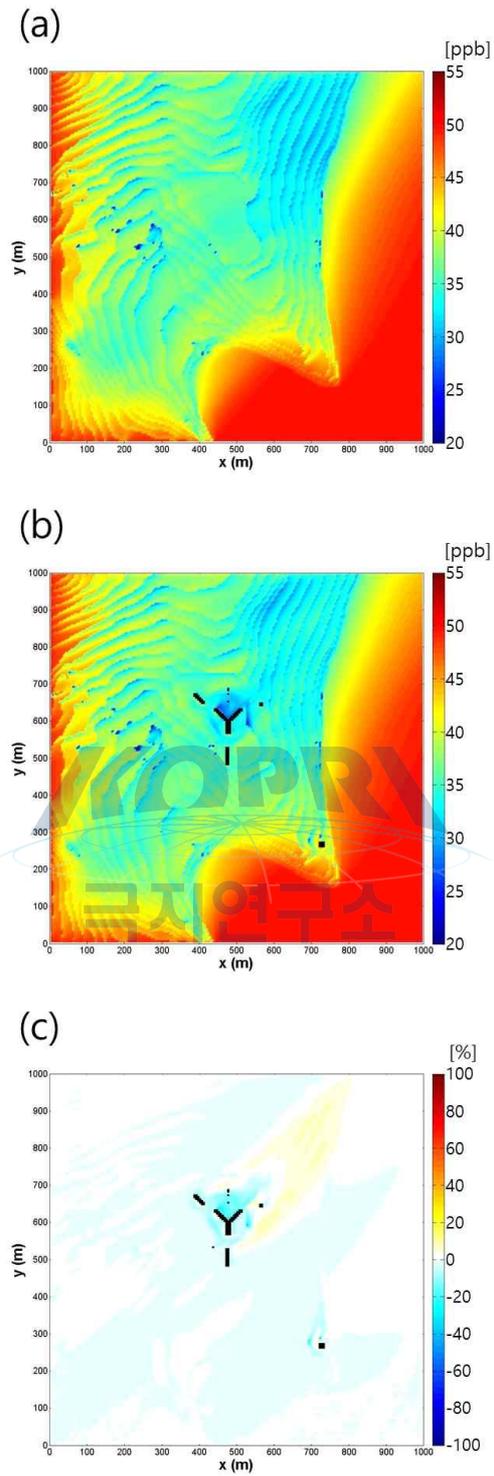


그림 3.13. 유입 풍향이 남서풍(225°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표($z=1.25$ m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

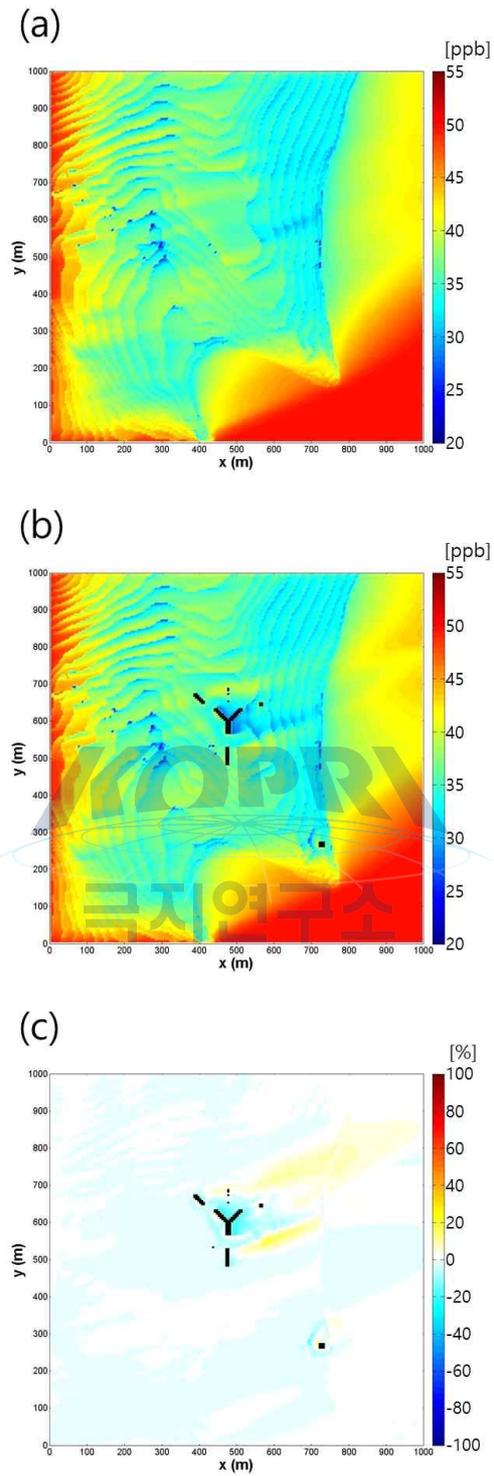


그림 3.14. 유입 풍향이 서남서풍(247.5°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표(z=1.25 m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

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

그림 3.15~18은 각각 서풍, 서북서풍, 북서풍과 북북서풍이 부는 경우의 배경물질 농도 및 농도 변화율을 나타낸다. 서풍이 부는 경우, 기지 서쪽에 위치한 사면을 따라 기지를 향해 불어오는 흐름을 따라 오염물질이 수송된다. 기지 건설 전과 후, 기지 부근에서 약 30 ppb ~ 35 ppb의 농도를 나타내고 기지의 동쪽에 위치한 해안에서 약 43 ppb 이상의 농도가 나타난다. 기지 건설 전과 후의 농도 변화율은 2.3%로 나타났고 본관동과 발전동 사이, 상층대기관측동의 동측에서 상대적으로 배경물질의 농도가 증가하는 영역이 나타났다(그림 3.15). 서북서풍이 부는 경우, 기지 주변에서 35 ppb ~ 40 ppb의 농도를 나타내고 기지의 북동쪽 해안에서 50 ppb 이상의 농도가 나타난다. 기지 건설 전과 후의 농도 변화율 3.3% 감소하였고 북서쪽에 불어오는 흐름에 의해 본관동 주변에서 농도가 낮아지는 영역이 나타나고 본관동의 남동쪽에서 농도가 증가하는 영역이 나타난다(그림 3.16). 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 나타난다(그림 3.17). 북북서풍이 부는 경우, 기지 건설 전에 약 40 ppb의 농도가 나타나고 기지 건설 후에 농도가 다소 감소한다. 기지 건설 전과 후의 농도 변화율은 2.0% 감소하였고 본관동 주변에서 농도가 감소하는 영역이 나타나고 기지 남동쪽에서 농도가 다소 증가하는 영역이 나타난다(그림 3.18).

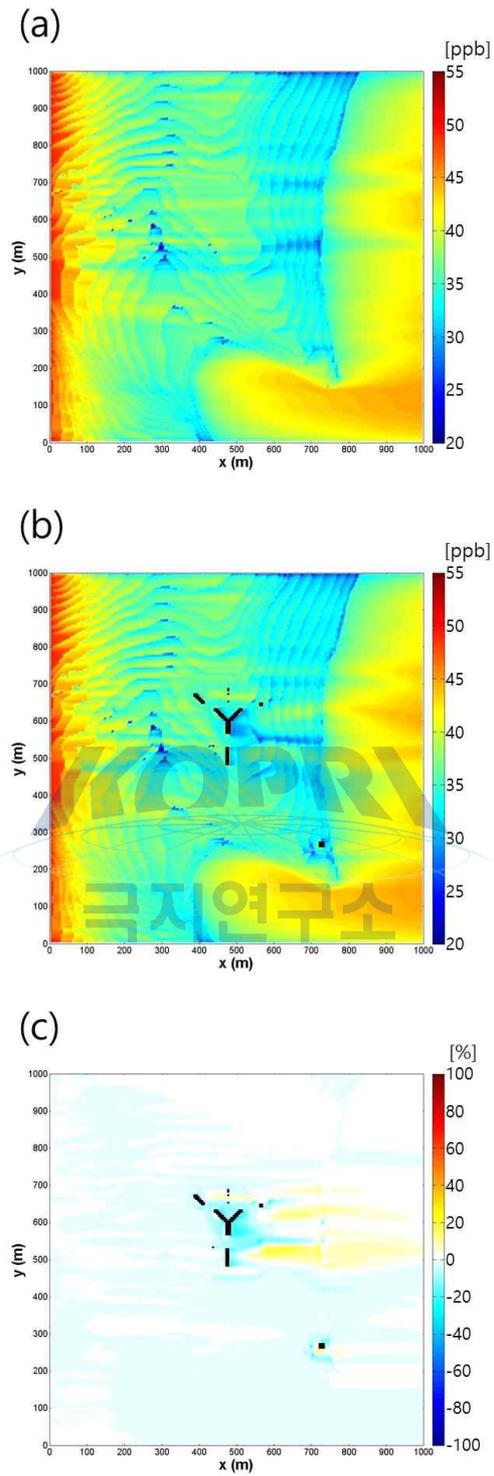


그림 3.15. 유입 풍향이 서풍(270°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표(z=1.25 m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

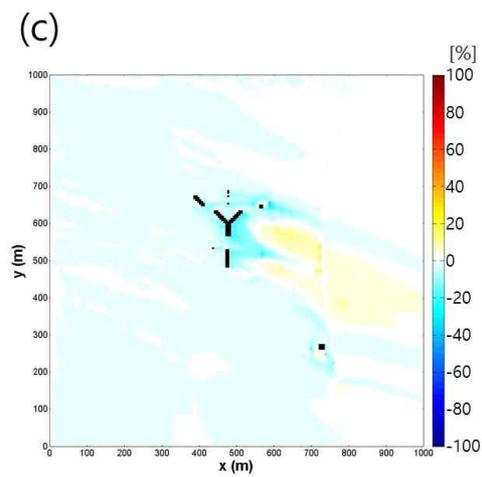
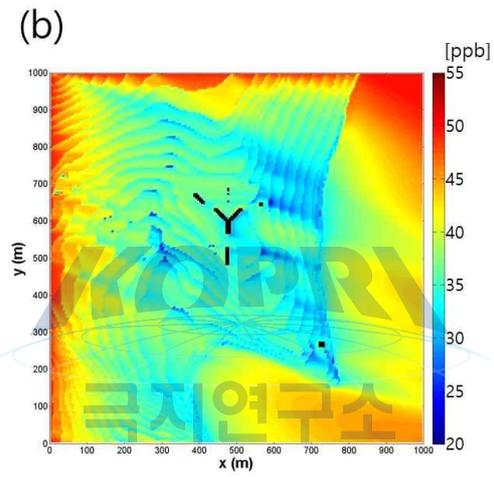
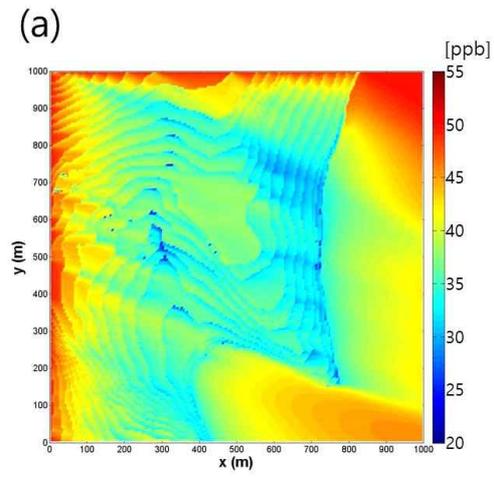


그림 3.16. 유입 풍향이 서북서풍(292.5°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표($z=1.25$ m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

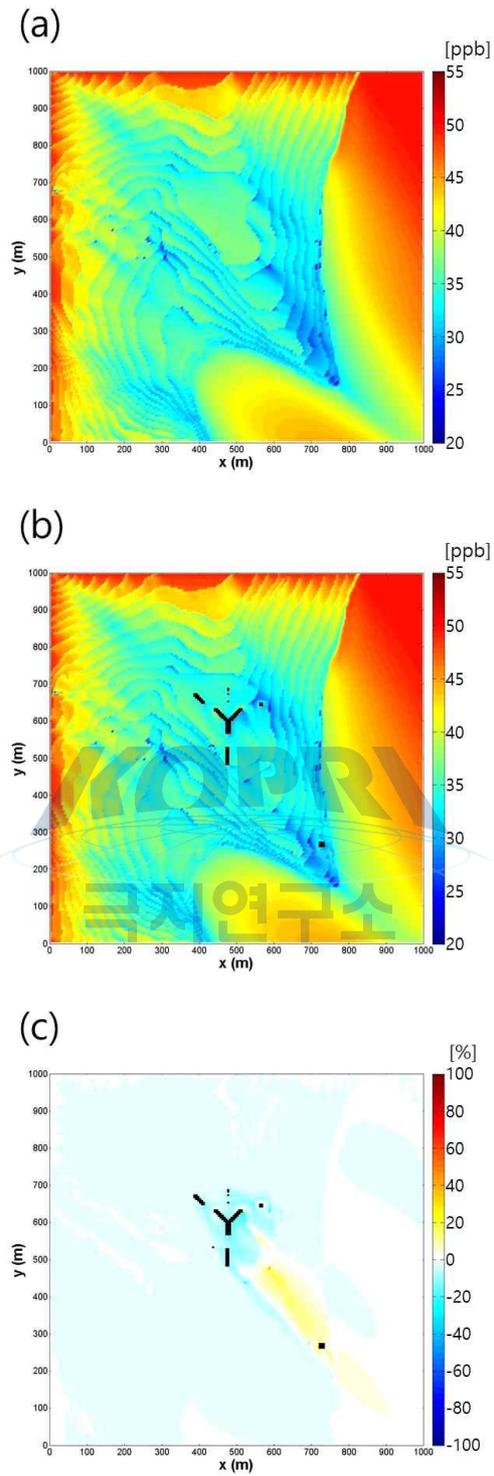


그림 3.17. 유입 풍향이 북서풍(315°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표(z=1.25 m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

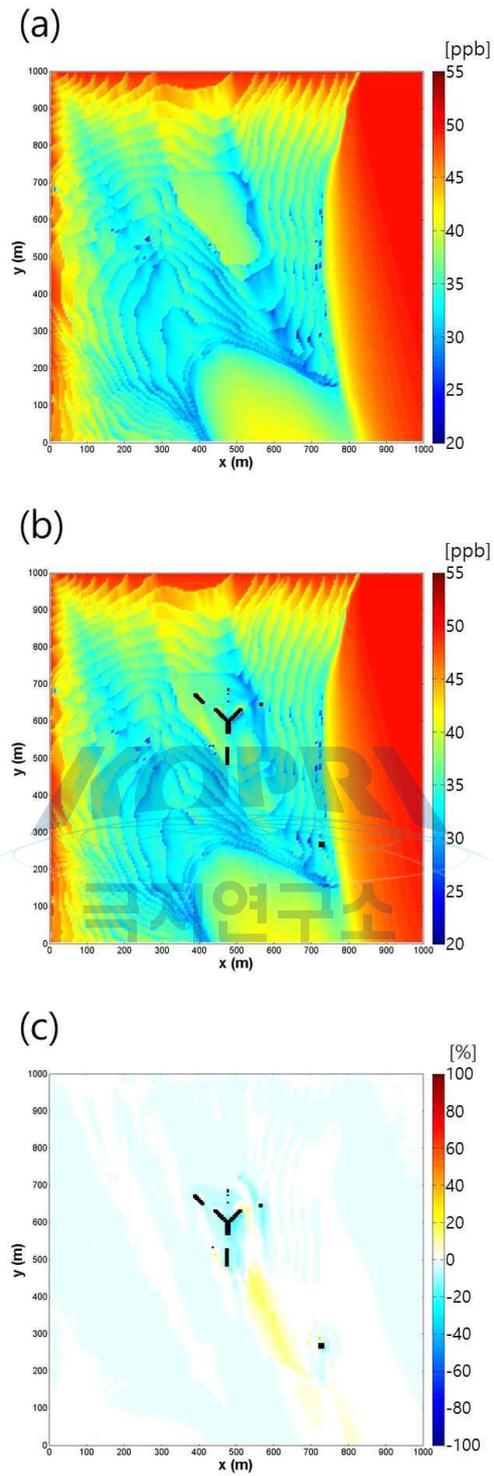


그림 3.18. 유입 풍향이 북북서풍(337.5°)인 경우, 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (b) 건설 후의 지표($z=1.25$ m) 오염물질 농도장과 (c) 오염물질 농도 변화율

제 4 장. 장보고 과학기지의 건설에 의한 열환경 분석

제 1 절 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 있다. 제 2장과 제 3장에서 보였듯이, 극한 환경에 설치된 장보고 과학기지는 관측 환경과 대기질에 영향을 미친다. 컨테이너 등으로 이루어진 장보고 과학기지는 주변의 열환경에도 영향도 미칠 것으로 예상된다. 그러나 남극과 같은 극한 기후에서 건물 벽면 온도에 대한 정보와 열적 효과에 대한 선행연구가 매우 부족한 실정이다. 본 연구에서는 강설이 잦은 일본 북해도 지방에서 강설에 의한 건물 온도 변화 연구를 토대로 장보고 과학기지 건설에 의한 온도 변화 연구를 수행하였다.

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 수행하였다. 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 설정하였다. 지표면 온도 변화 실험(Mochida et al., 2002)을 위해 지표면에 눈이 있는 경우와 눈이 없는 경우를 고려하였다(표 4.1).

그림 4.1은 지표면에 눈이 없는 경우, 장보고 과학기지 건설 전·후의 지표 부근($z=1.25 \text{ m}$) 기온 변화율을 나타낸다. 16방위 유입 풍향에 대하여 장보고 과학기지 주변 기온장을 분석한 결과, 기온은 기지 건설 전과 건설 후(0.01% 증가)의 변화가 거의 나타나지 않았다. 그림 4.2는 지표면에 눈이 있는 경우, 장보고 과학기지 건설 전·후의 지표 부근($z=1.25 \text{ m}$) 기온 변화율을 나타낸다. 16방위 유입 풍향에 대하여 장보고 과학기지 주변 기온장을 분석한 결과, 지표면에 눈이 있는 경우에도 기온의 변화(0.07% 증가)가 거의 나타나지 않았다.

표 4.1. 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

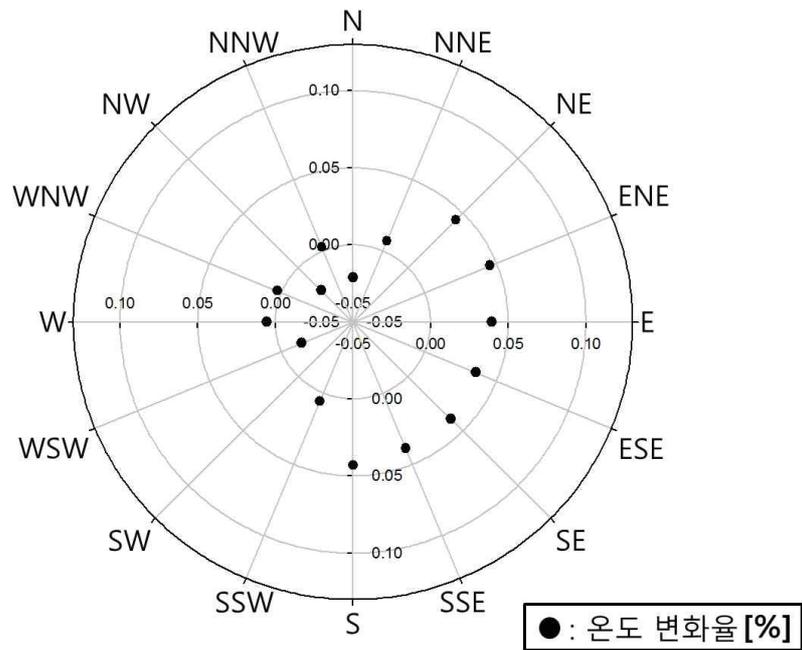


그림 4.1. 지표면에 눈이 없는 경우, 장보고 과학기지 건설 전·후에 대한 지표 부근($z=1.25$ m) 기온 변화율(16풍향)



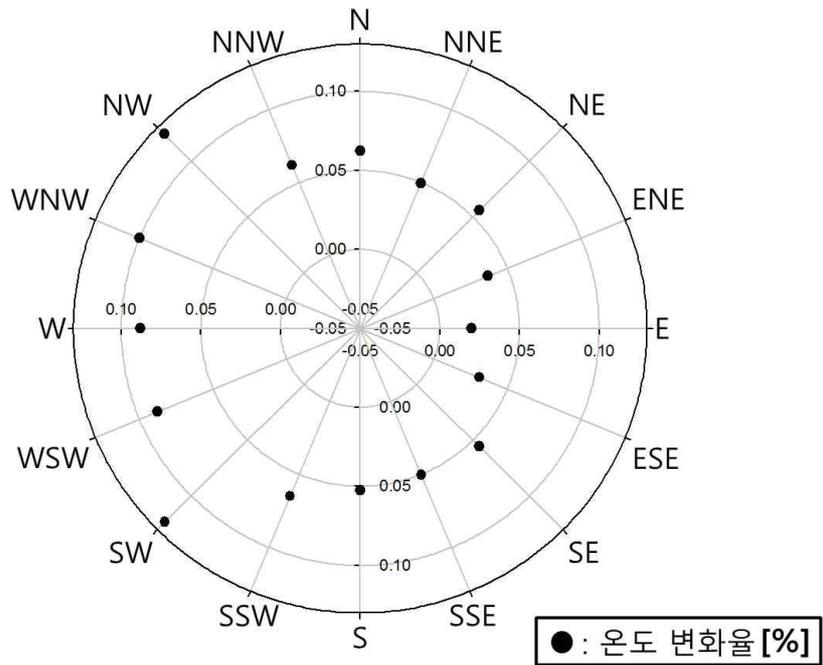


그림 4.2. 지표면에 눈이 있는 경우, 장보고 과학기지 건설 전·후에 대한 지표 부근(z=1.25 m) 기온 변화율(16풍향)



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

그림 4.3~6은 각각 북풍, 북북동풍, 북동풍, 동북동풍이 부는 경우의 지표($z=1.25$ m) 기온장 및 기온 변화율을 나타낸다. 북풍이 부는 경우, 기지 북쪽의 산사면을 따라 기지 방향으로 흐름이 나타난다. 지표에 눈이 없다고 가정한 경우, 기지 건설 전에는 기지 주변 지표($z=1.25$ m)에서 277~279 K의 온도 분포를 나타낸다. 기지 건설 후에는 건물 표면의 인접한 영역에서 부분적으로 온도가 증가하였다. 지표에 눈이 있다고 가정한 경우, 기지 건설 전에는 기지 주변 지표($z=1.25$ m)에서 275 K~277 K의 온도 분포를 나타낸다. 기지 건설 후에는 기지 건물의 주변과 기지의 남쪽 부근 지표에서 기온이 다소 상승하였다. 그러나 기지 주변에서의 지표 부근 기온 변화율은 0.06%로 매우 미비하게 나타났다(그림 4.3).

북북동풍, 북동풍, 동북동풍이 부는 경우에는 기지의 북동쪽 해안으로부터 기지를 향해 흐름이 나타난다. 지표에 눈이 없다고 가정한 경우와 지표에 눈이 있다고 가정한 경우 모두 유입류가 북풍인 실험과 유사한 온도 분포가 나타났다. 기지 건설 후, 지표에 눈이 없다고 가정한 경우에는 건물 부근에서 온도 상승이 나타났다. 지표에 눈이 있다고 가정한 경우에는 기지의 풍하층 영역에서 온도가 상승하였다(그림 4.4, 4.5, 4.6).



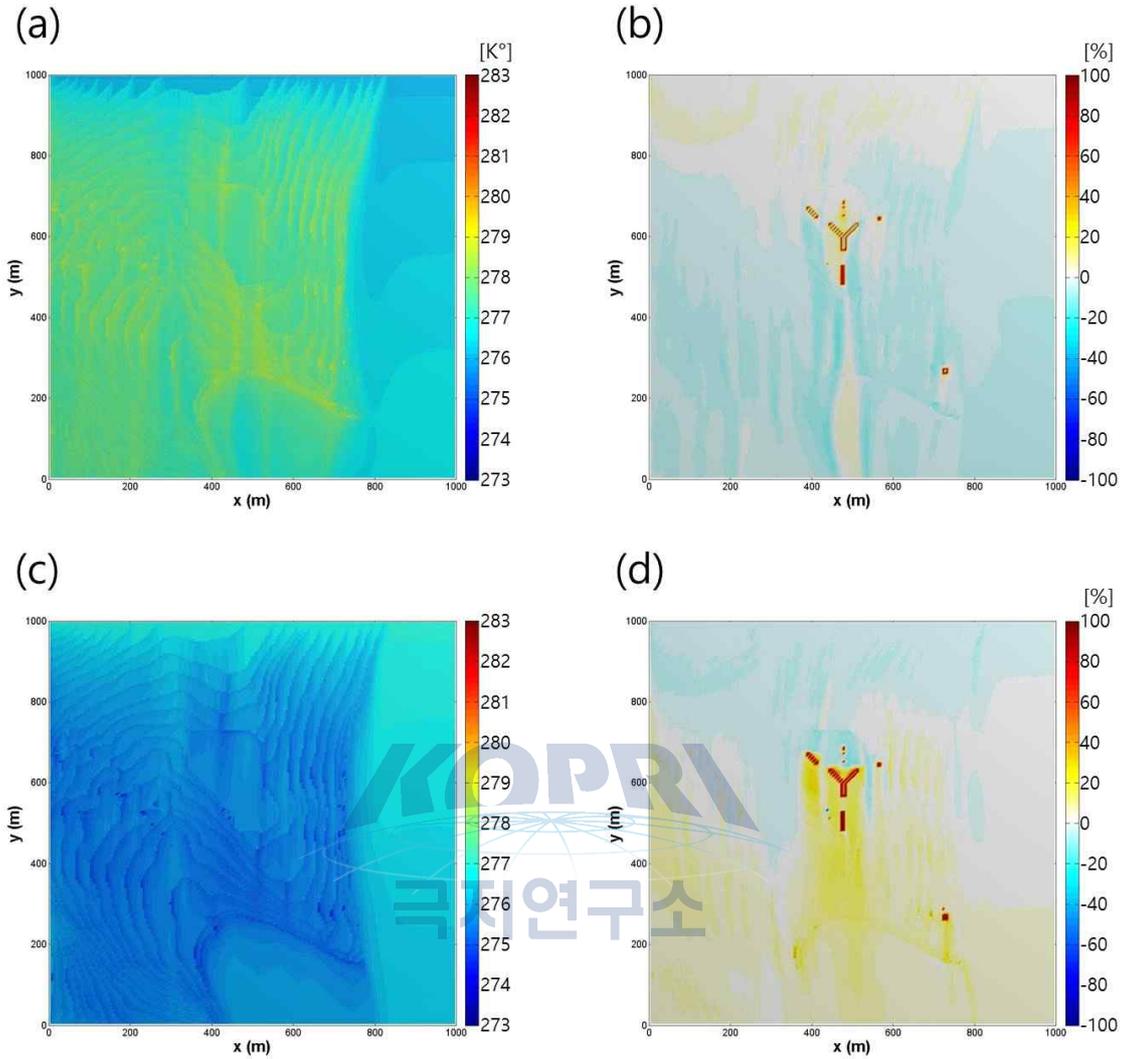


그림 4.3. 유입 풍향이 북풍(0°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

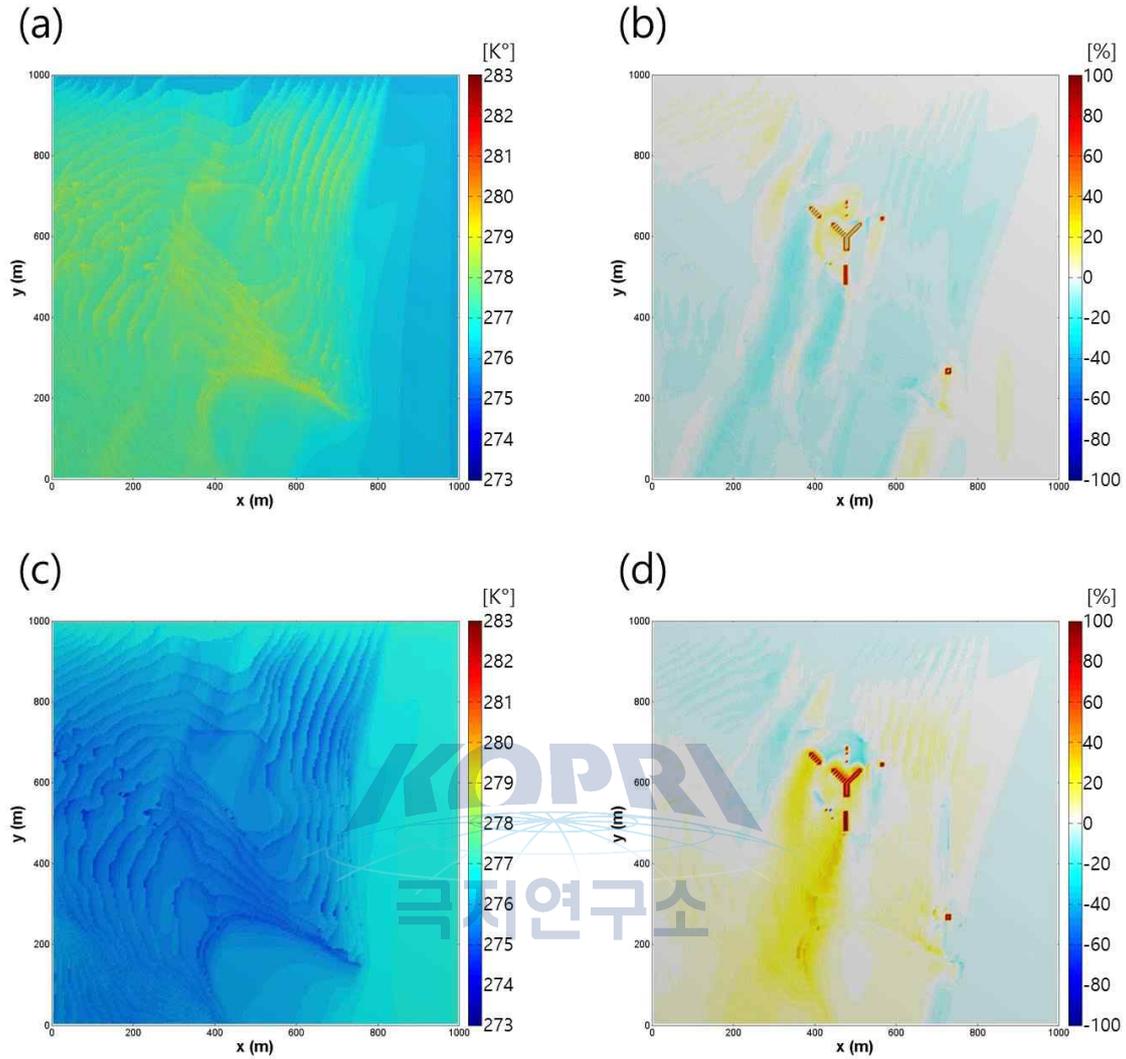


그림 4.4. 유입 풍향이 북북동풍(22.5°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

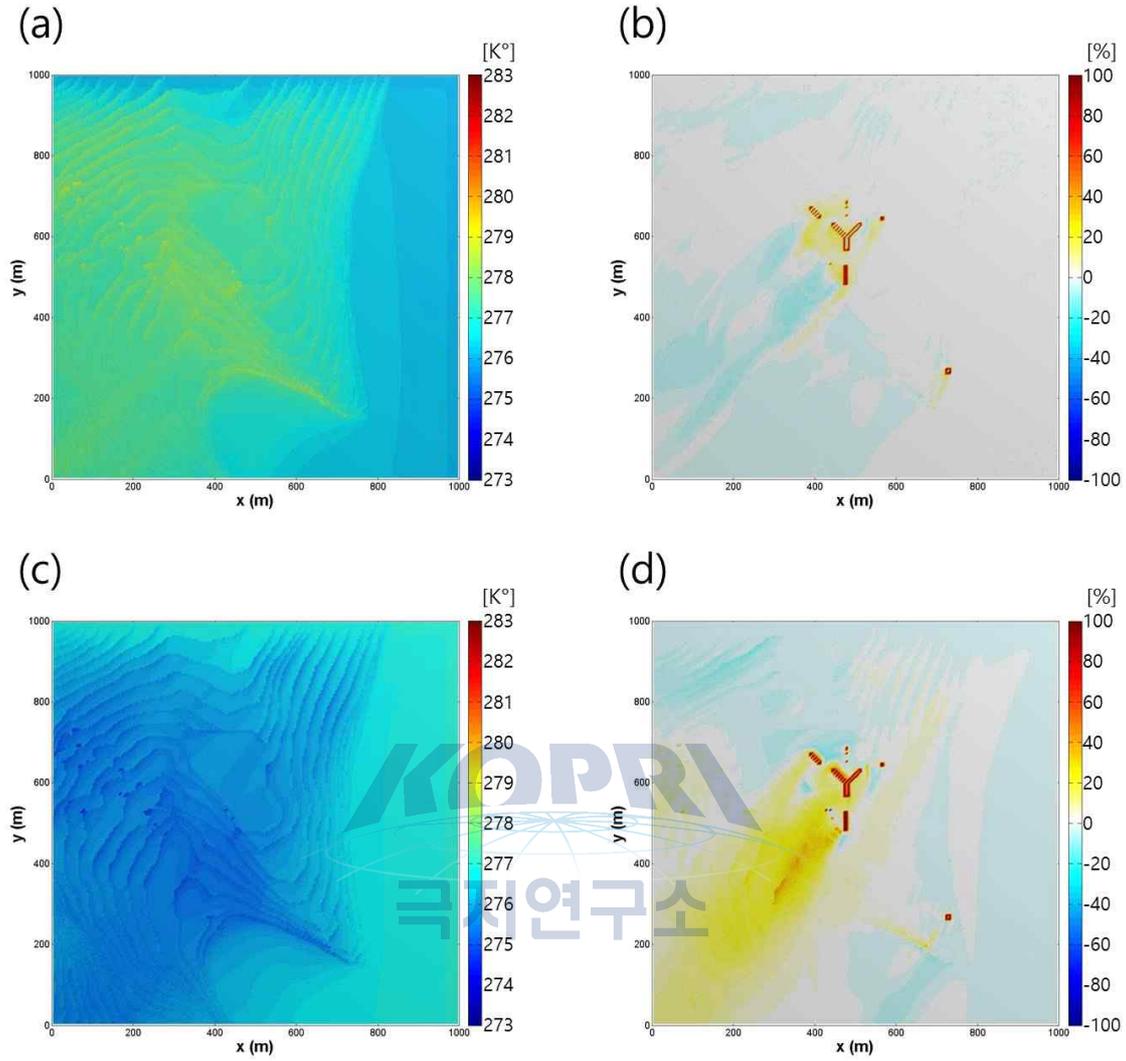


그림 4.5. 유입 풍향이 북동풍(45°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

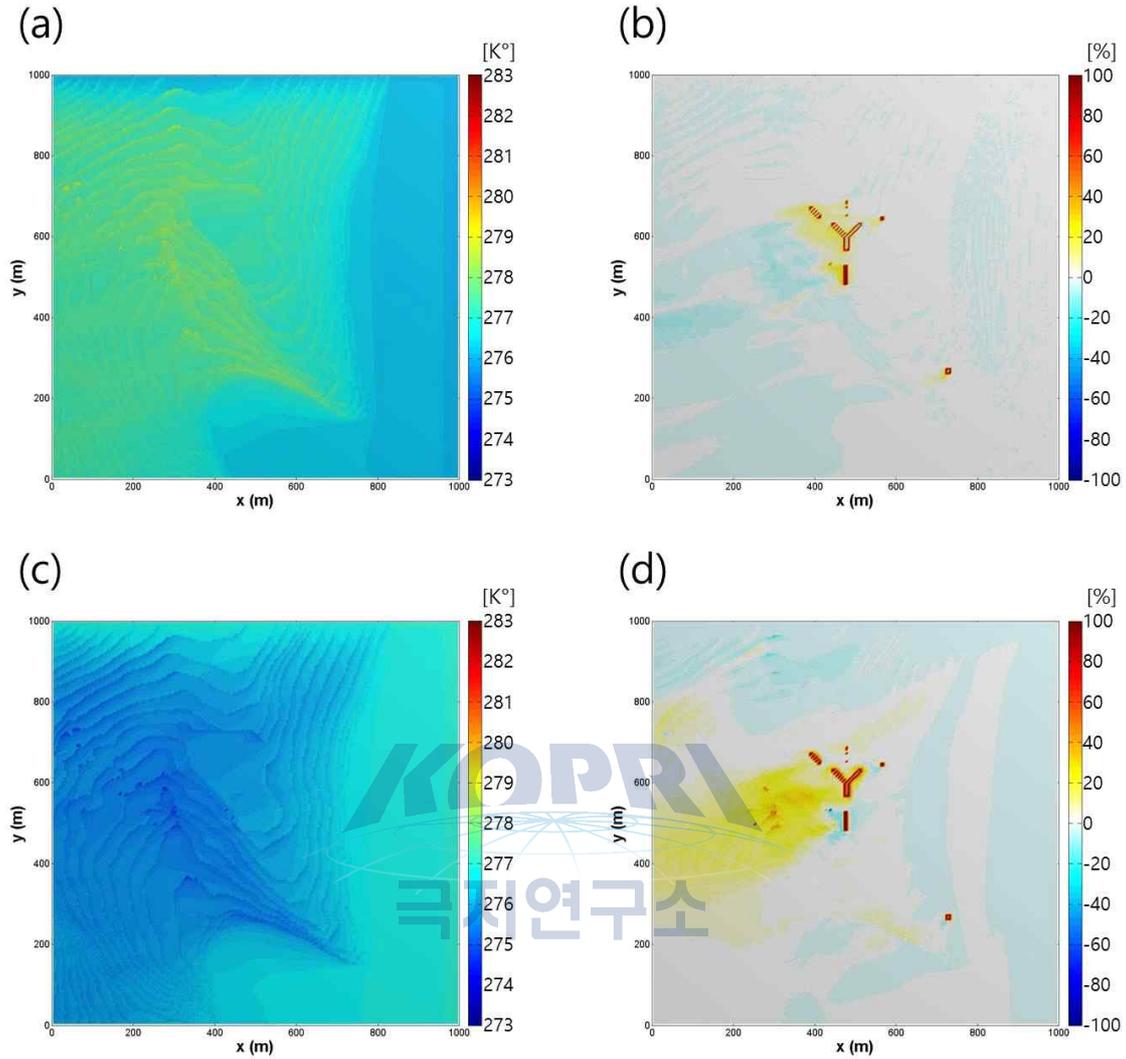
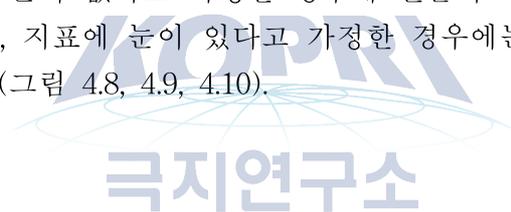


그림 4.6. 유입 풍향이 동북동풍(67.5°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

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

그림 4.7~10은 각각 동풍, 동남동풍, 남동풍과 남남동풍이 부는 경우의 지표($z=1.25$ m) 기온장 및 기온변화율을 나타낸다. 동풍이 부는 경우, 기지 동쪽의 해안에서 사면을 따라 기지 방향으로 흐름이 나타난다. 지표에 눈이 없다고 가정한 경우, 기지 건설 전에는 기지 주변 지표($z=1.25$ m)에서 276~279 K의 온도 분포를 나타낸다. 기지 건설 후에는 건물 표면의 인접한 영역에서 부분적으로 온도가 증가한다. 지표에 눈이 있다고 가정한 경우, 기지 건설 전에는 기지 주변 지표($z=1.25$ m)에서 275~277 K의 온도 분포가 나타난다. 기지 건설 후에는 기지 건물의 주변과 기지의 서쪽 사면 지표에서 기온이 상승하였다. 그러나 기지 주변에서의 지표 부근 기온 변화율은 0.06%로 매우 미비하게 나타났다(그림 4.7).

동남동풍, 남동풍, 남남동풍이 부는 경우에는 기지의 남동쪽 해안으로부터 기지로 향하는 흐름이 나타난다. 지표에 눈이 없다고 가정한 경우와 지표에 눈이 있다고 가정한 경우 모두 유입류가 동풍인 실험과 유사한 온도 분포가 나타났다. 기지 건설 후, 지표에 눈이 없다고 가정한 경우에 건물의 바로 인접한 영역에서 온도의 상승이 나타나고, 지표에 눈이 있다고 가정한 경우에는 기지의 풍하층 영역에서 온도가 상승하였다(그림 4.8, 4.9, 4.10).



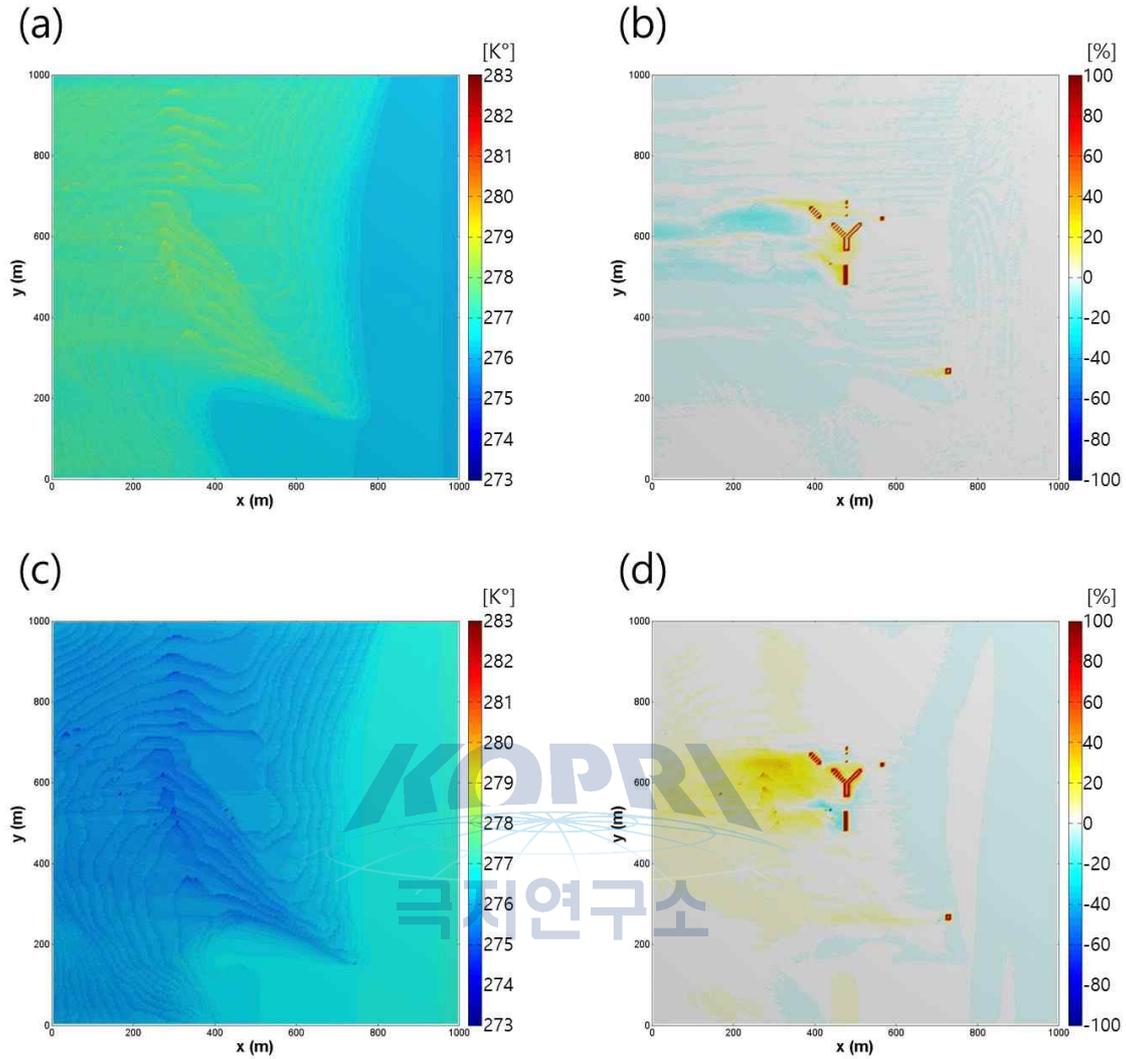


그림 4.7. 유입 풍향이 동풍(90°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

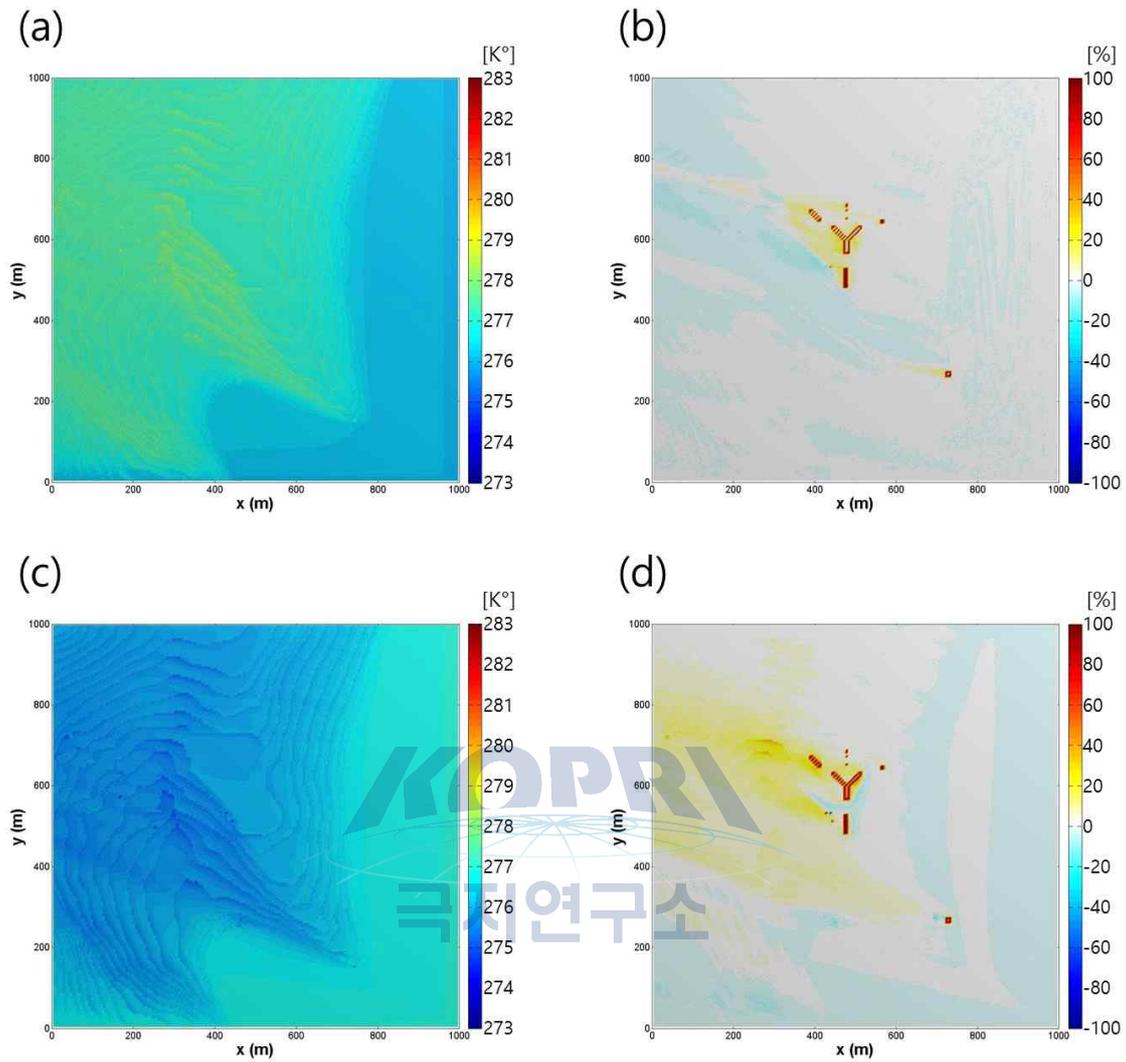


그림 4.8. 유입 풍향이 동남동풍(112.5°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근(z=1.25 m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표(z=1.25 m) 기온 변화율

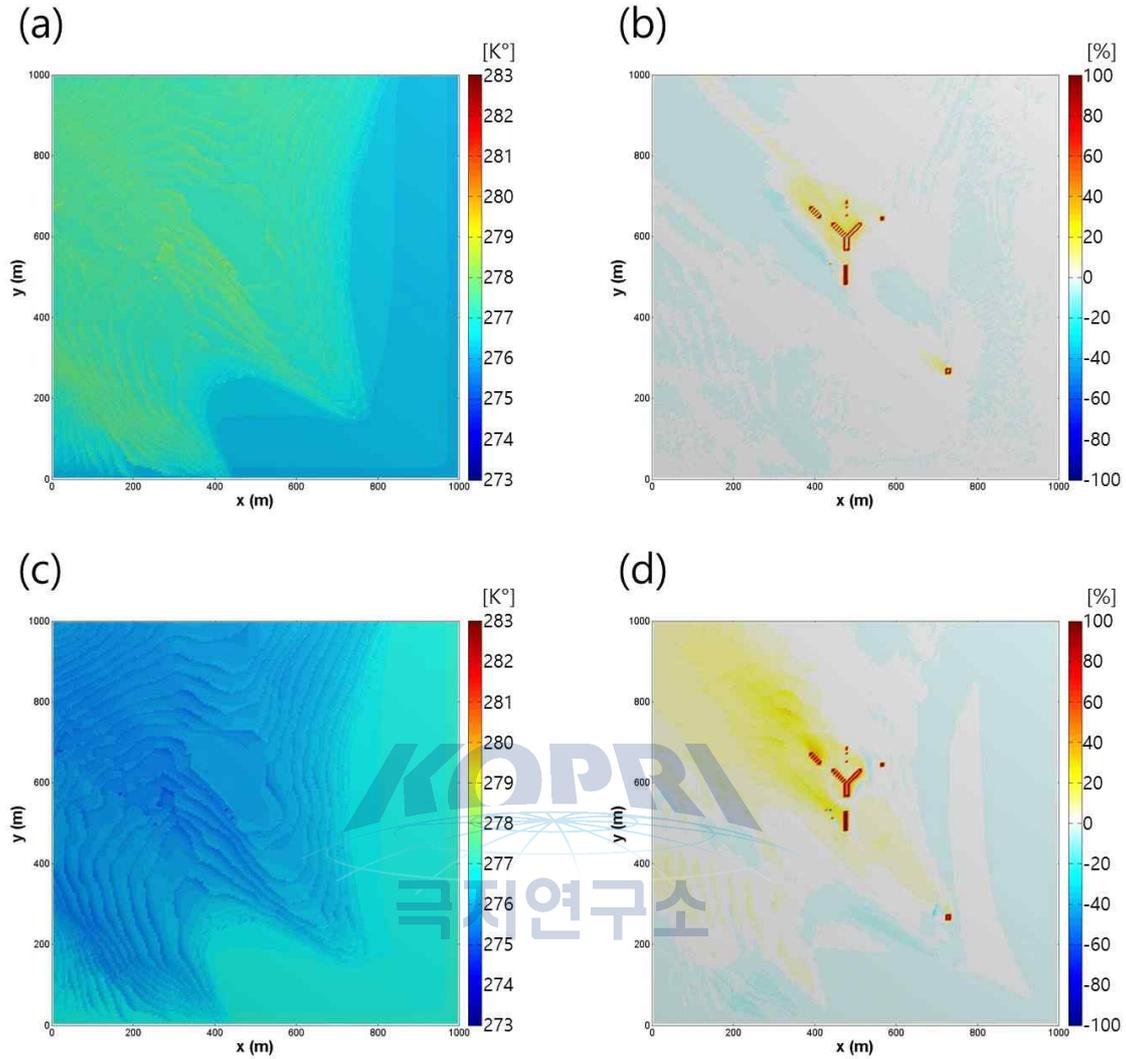


그림 4.9. 유입 풍향이 남동풍(135°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

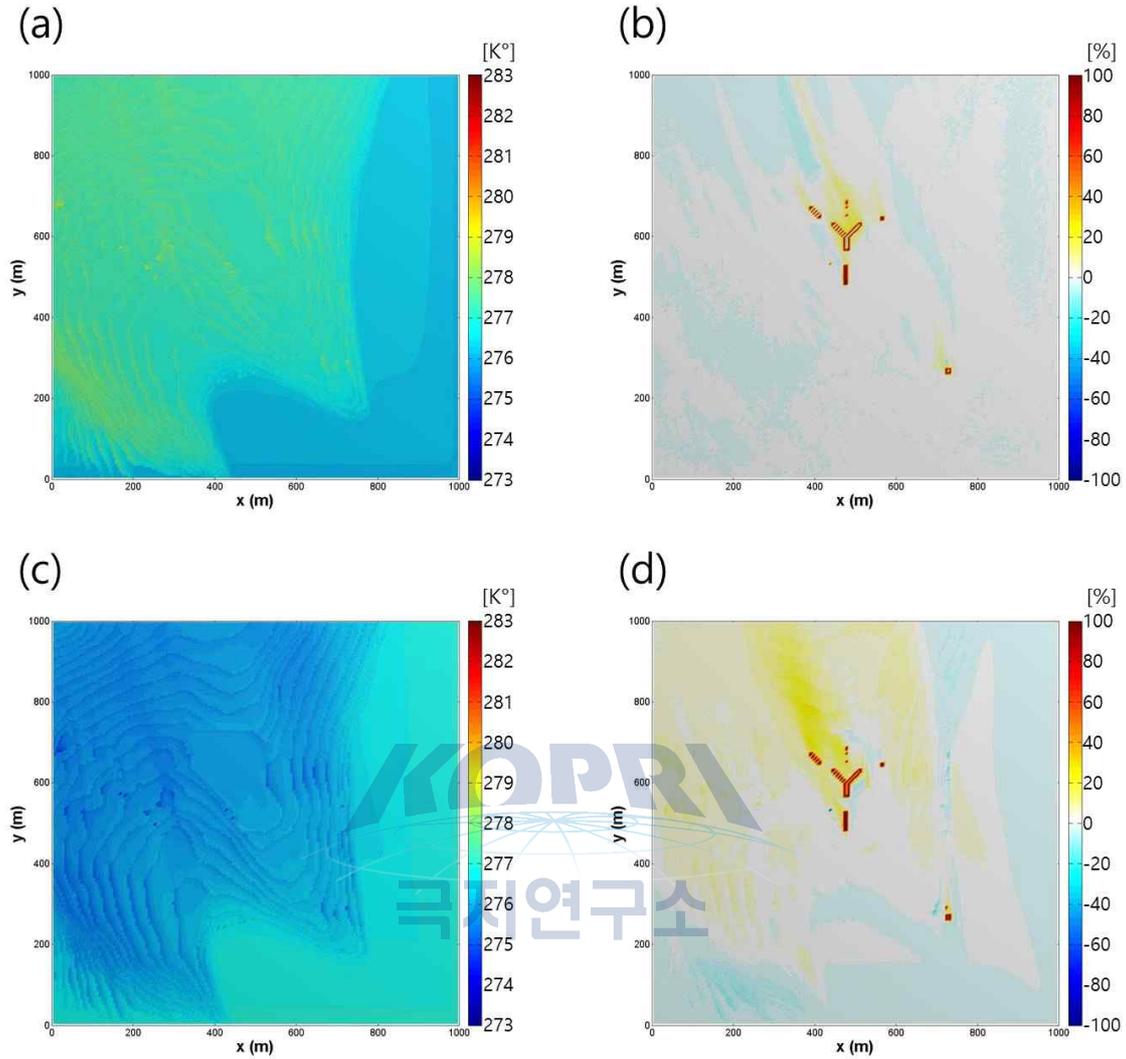


그림 4.10. 유입 풍향이 남남동풍(157.5°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

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

그림 4.11~14는 각각 남풍, 남남서풍, 남서풍과 서남서풍이 부는 경우의 지표($z=1.25$ m) 기온장 및 기온변화율을 나타낸다. 남풍이 부는 경우, 기지 남쪽의 해안에서 사면을 따라 기지 방향으로 흐름이 나타난다. 지표에 눈이 없다고 가정한 경우, 기지 건설 전에는 기지 주변 지표($z=1.25$ m)에서 276~279 K의 온도 분포가 나타난다. 기지 건설 후에는 건물 표면의 인접한 영역에서 부분적으로 온도가 증가한다. 지표에 눈이 있다고 가정한 경우, 기지 건설 전에는 기지 주변 지표($z=1.25$ m)에서 275~277 K의 온도 분포가 나타난다. 기지 건설 후에는 기지 건물의 주변과 기지의 북쪽 사면 지표에서 기온이 상승하는 영역이 나타난다. 그러나 기지 주변에서의 지표 기온변화율은 0.05%로 매우 미비하였다(그림 4.11).

남남서풍, 남서풍, 서남서풍이 부는 경우에는 기지의 남서쪽 사면으로부터 기지를 향하는 흐름이 나타났다. 지표에 눈이 없다고 가정한 경우와 지표에 눈이 있다고 가정한 경우에서 유입류가 남풍인 경우와 유사한 온도 분포가 나타났다. 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 나타났다(그림 4.12, 4.13, 4.14).

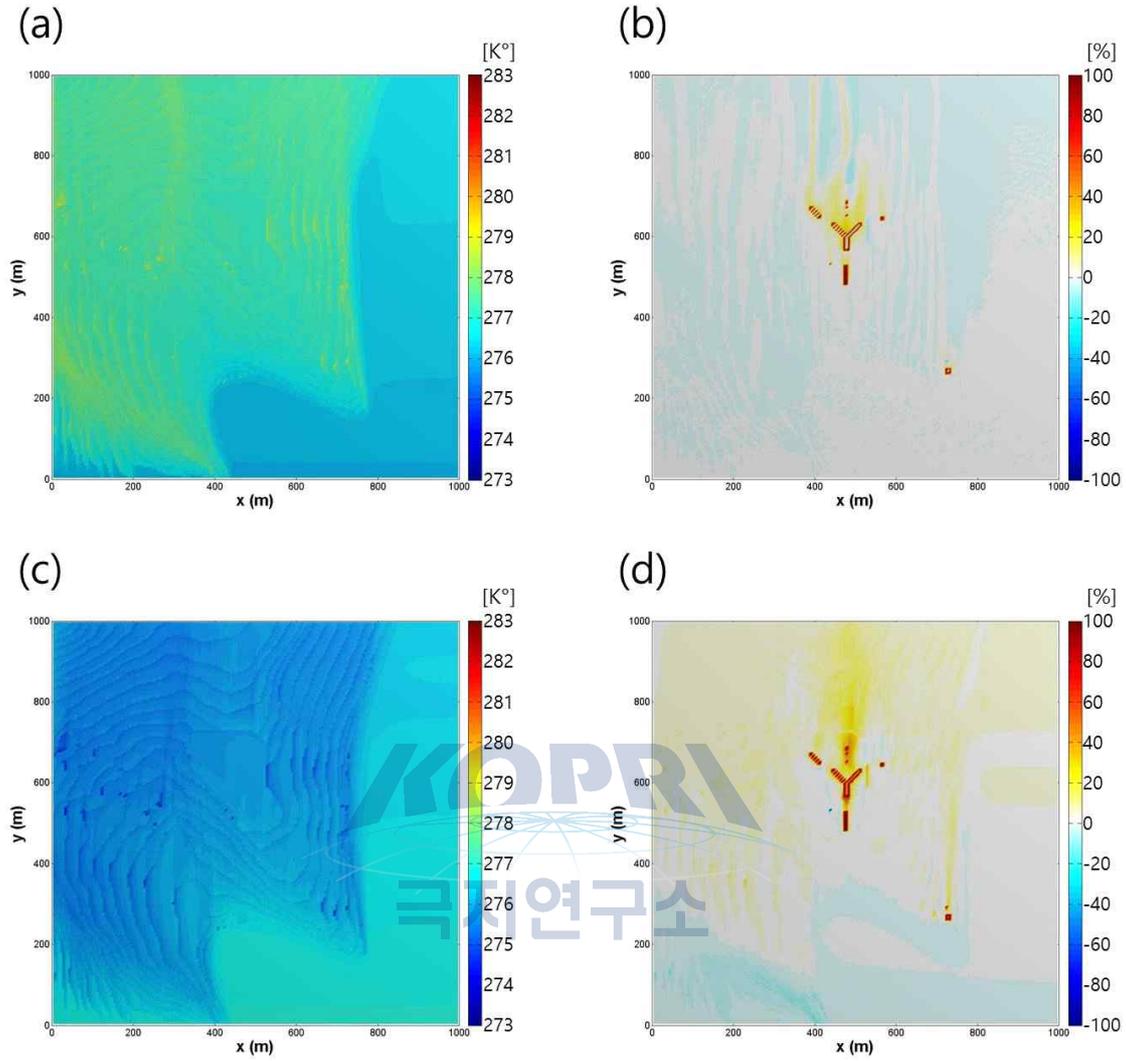


그림 4.11. 유입 풍향이 남풍(180°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

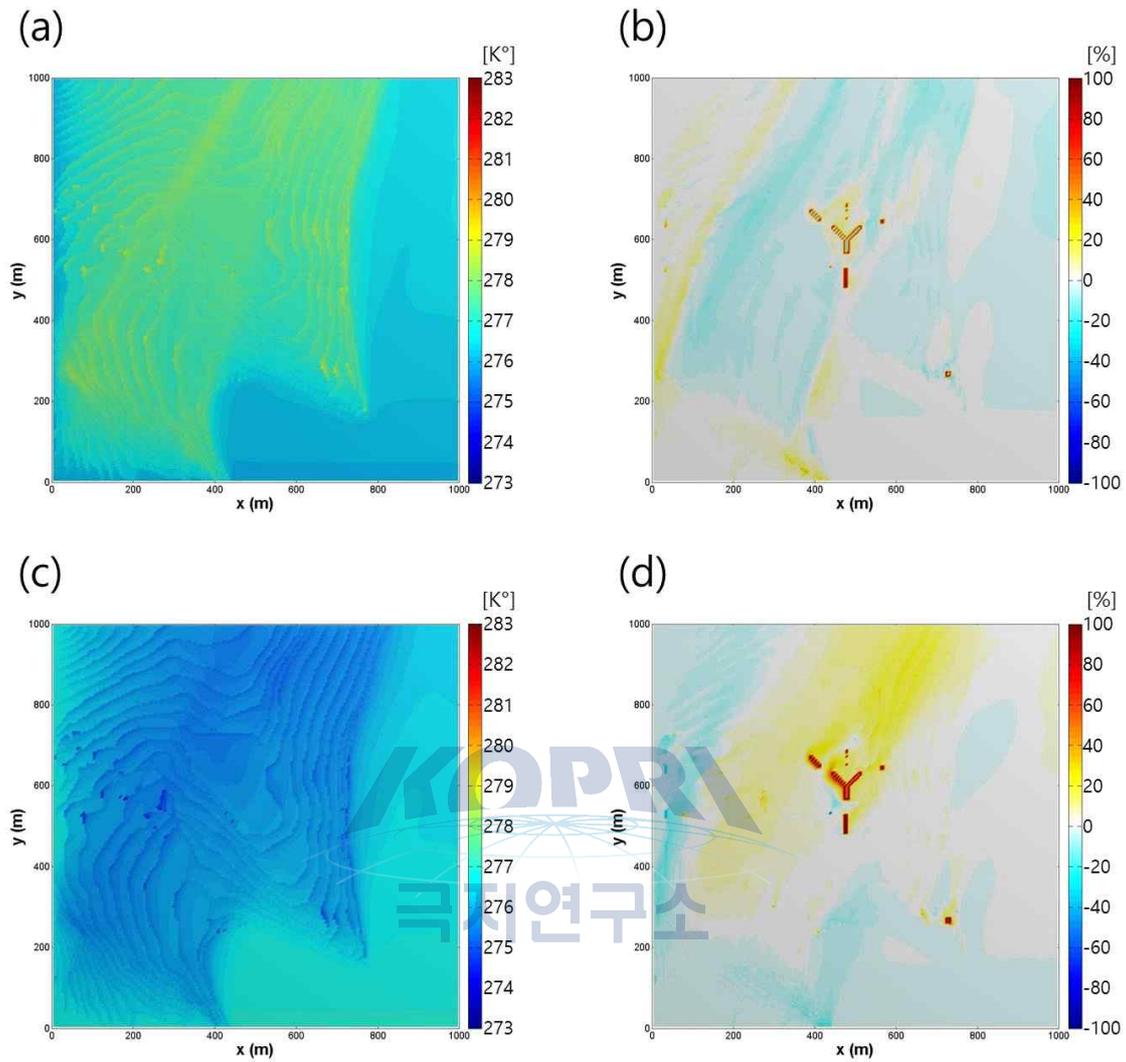


그림 4.12. 유입 풍향이 남남서풍(202.5°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

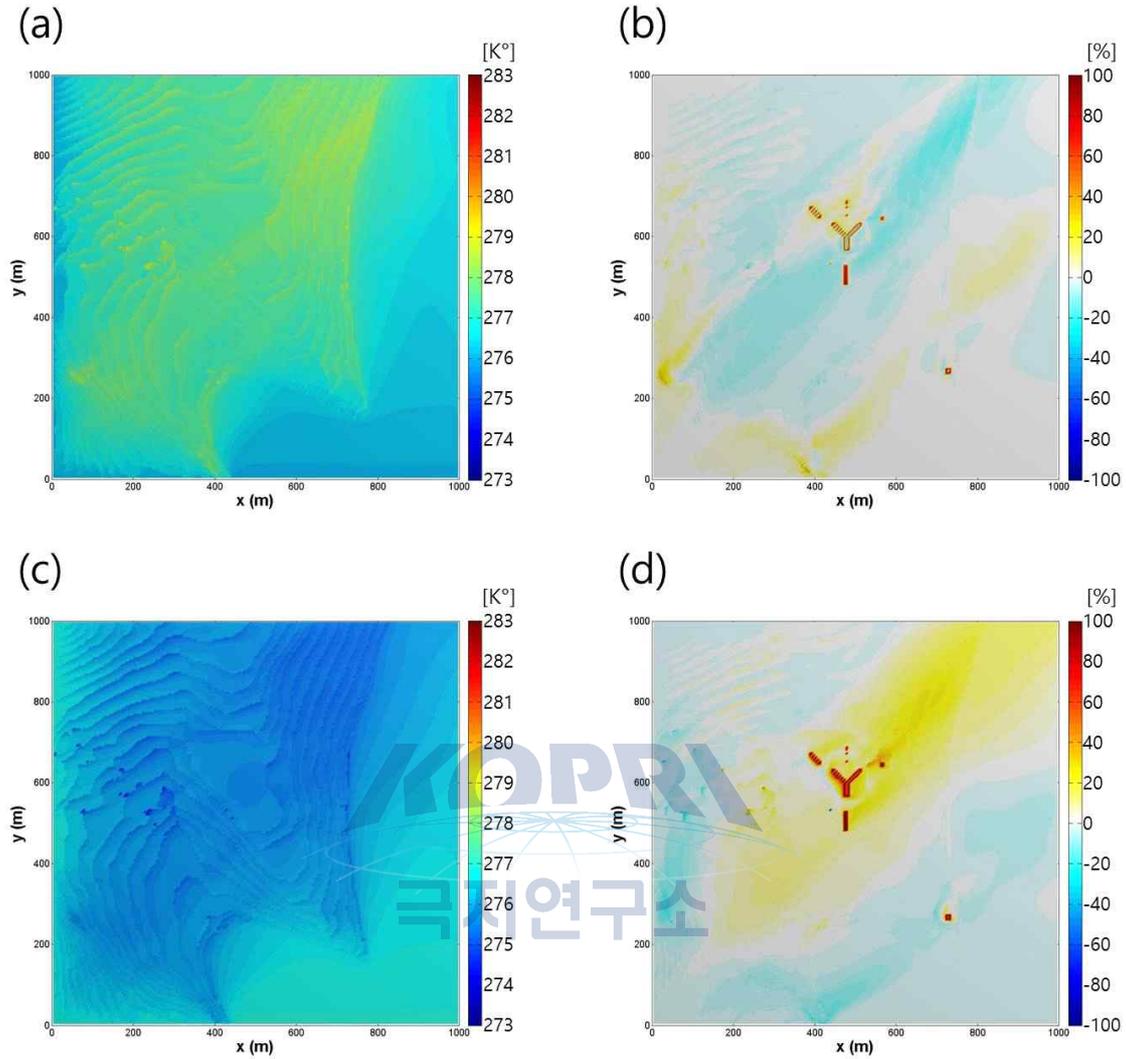


그림 4.13. 유입 풍향이 남서풍(225°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

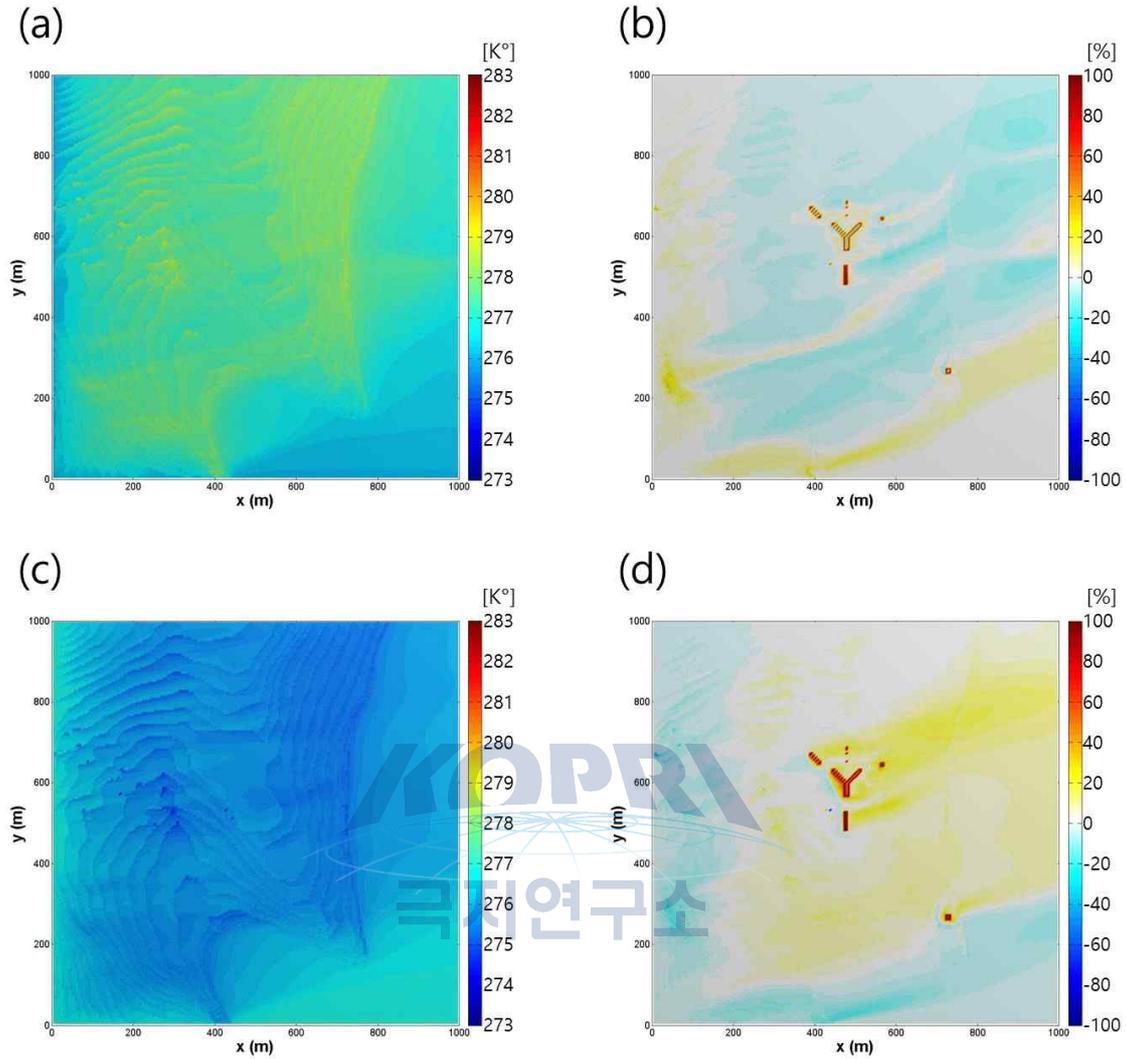


그림 4.14. 유입 풍향이 서남서풍(247.5°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

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

그림 4.15~18은 각각 서풍, 서북서풍, 북서풍과 북북서풍이 부는 경우의 지표($z=1.25$ m) 기온장 및 기온변화율을 나타낸다. 서풍이 부는 경우, 기지 서쪽의 사면을 따라 기지 방향으로 흐름이 나타난다. 지표에 눈이 없다고 가정한 경우, 기지 건설 전에는 기지 주변 지표($z=1.25$ m)에서 276~279 K의 온도 분포가 나타난다. 기지 건설 후에는 건물 표면의 인접한 영역에서 부분적으로 온도가 상승한다. 지표에 눈이 있다고 가정한 경우, 기지 건설 전에는 기지 주변 지표($z=1.25$ m)에서 275~277 K의 온도 분포가 나타난다. 기지 건설 후에는 기지 건물의 주변과 기지의 북쪽 사면 지표에서 기온이 상승하는 영역이 나타난다. 그러나 기지 주변에서의 지표 기온변화율은 다른 풍향과 마찬가지로 매우 미비(0.09% 상승)하였다(그림 4.15).

남남서풍, 남서풍, 서남서풍이 부는 경우, 기지의 북서쪽 사면으로부터 기지를 향하는 흐름이 나타난다. 지표에 눈이 없다고 가정한 경우와 지표에 눈이 있다고 가정한 경우는 모두 유입류가 서풍인 경우와 유사한 온도 분포가 나타난다. 기지 건설 후, 지표에 눈이 없다고 가정한 경우에는 건물의 바로 인접한 영역에서 온도가 상승하였고, 지표에 눈이 있다고 가정한 경우에는 기지의 풍하층 영역에서 온도가 상승하였다(그림 4.16, 4.17, 4.18).



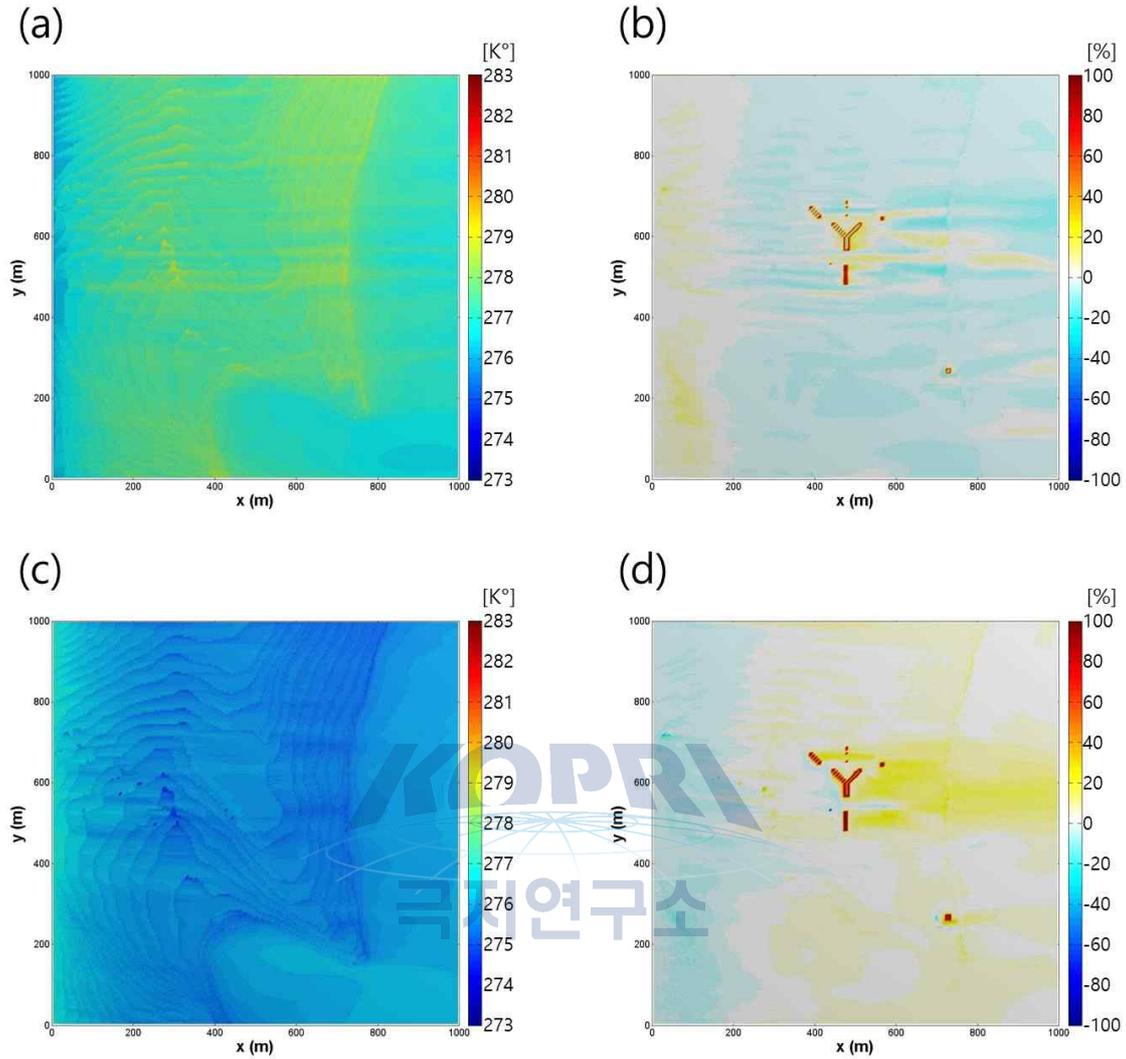


그림 4.15. 유입 풍향이 서풍(270°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

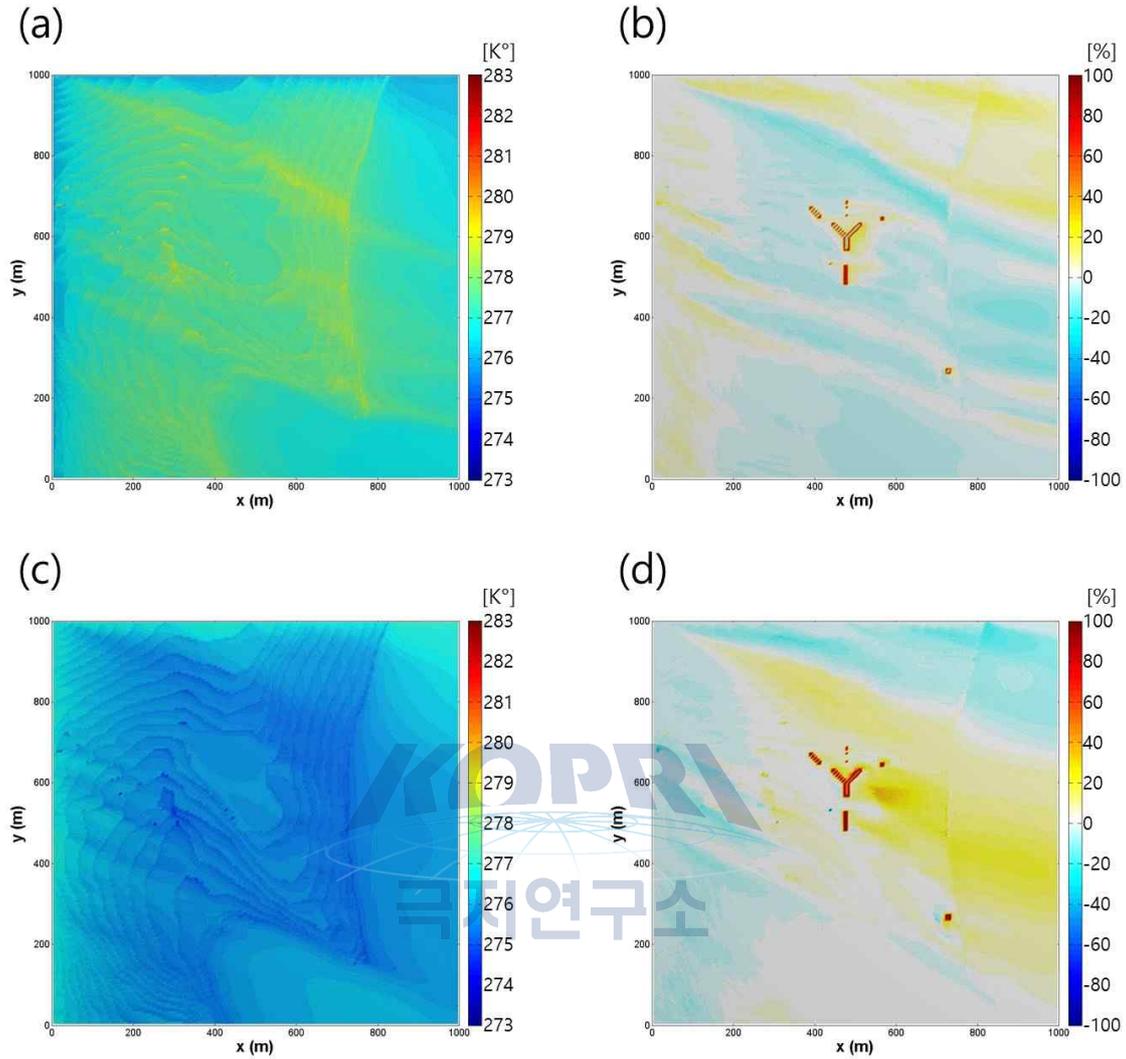


그림 4.16. 유입 풍향이 서북서풍(292.5°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

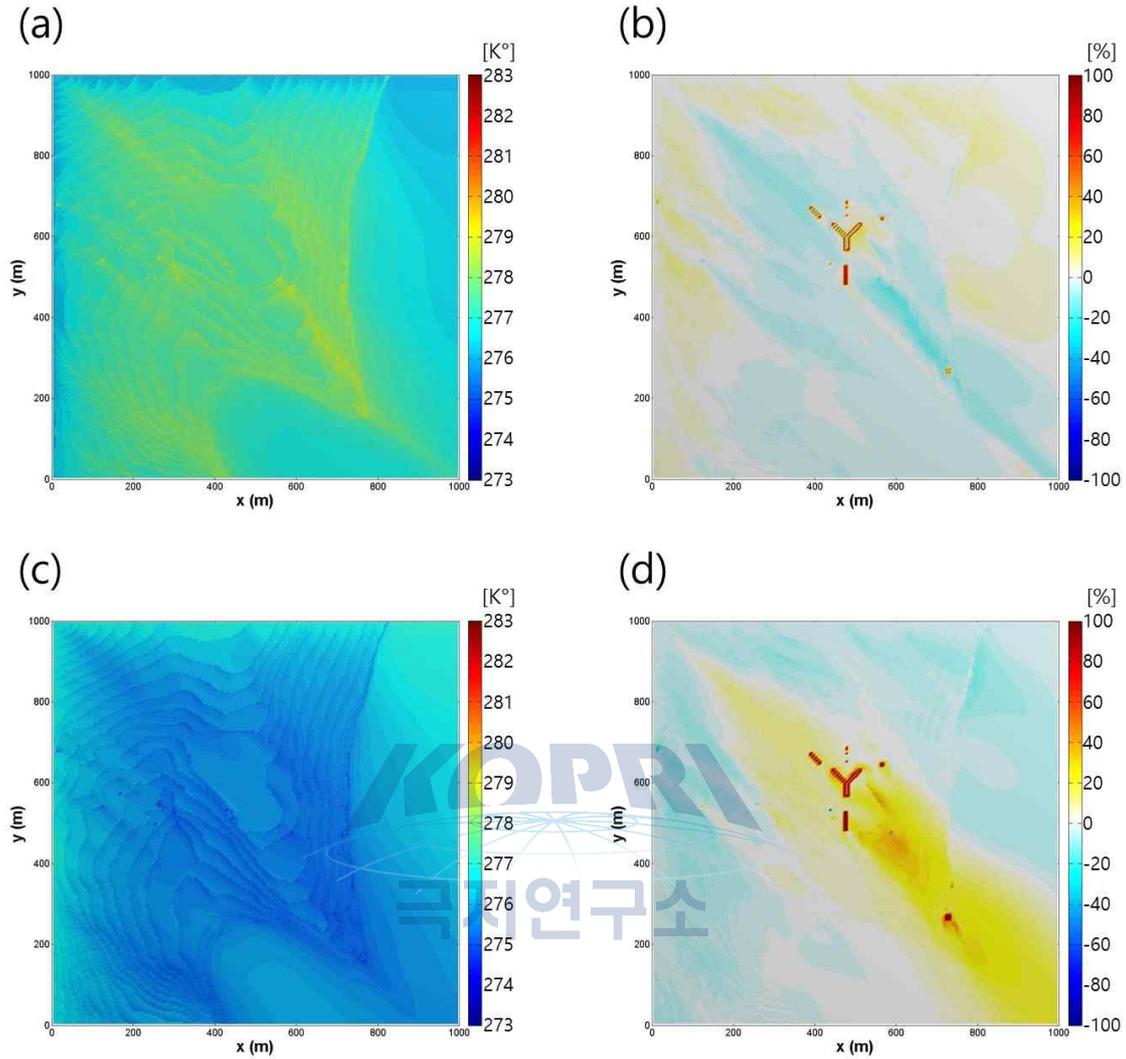


그림 4.17. 유입 풍향이 북서풍(315°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

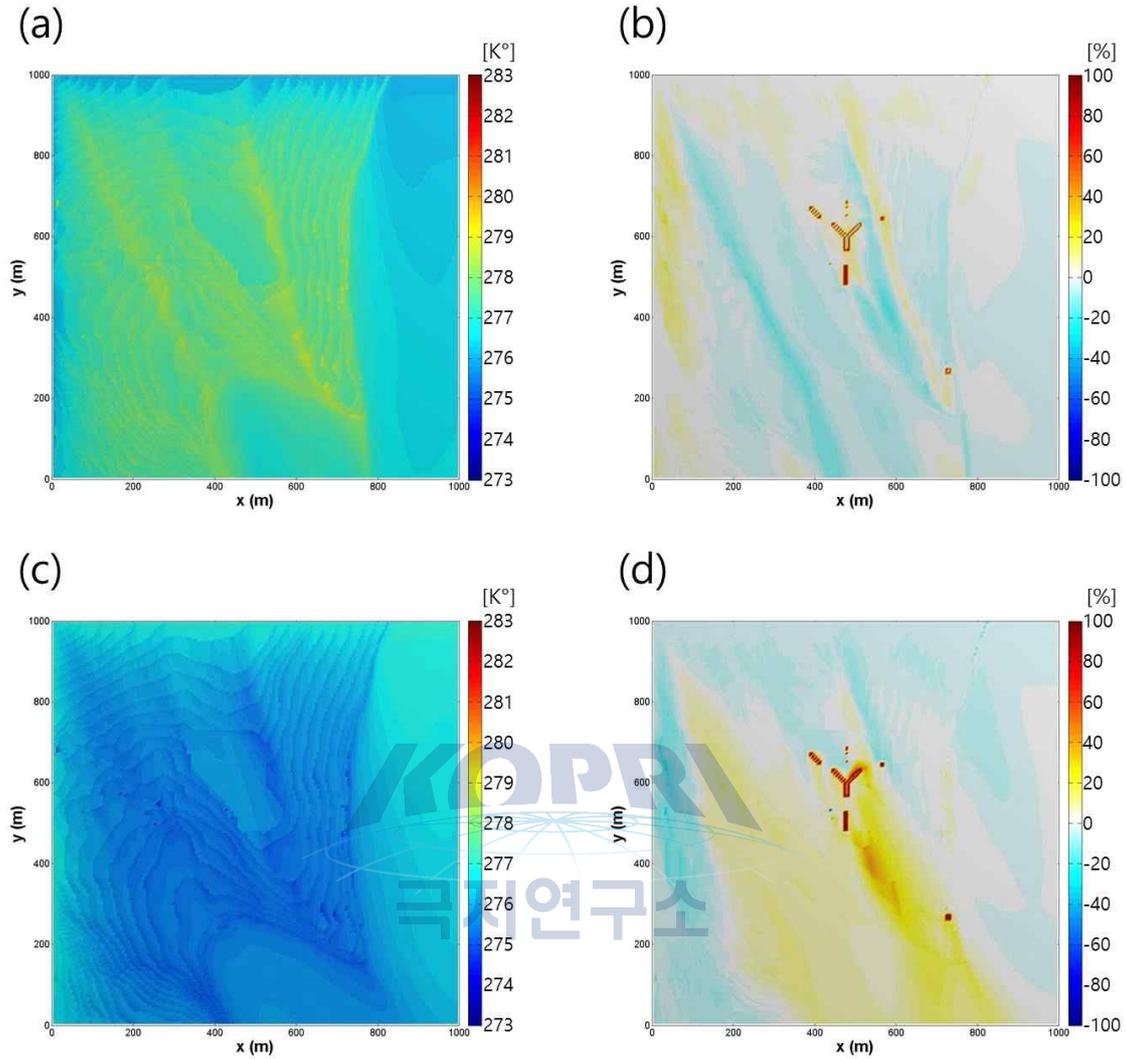


그림 4.18. 유입 풍향이 북북서풍(337.5°)인 경우, 지표면에 눈이 없는 경우에 장보고 과학기지 (a) 건설 전과 (c) 건설 후 지표 부근($z=1.25$ m) 기온장. (b) 눈이 있는 경우와 (d) 없는 경우에 대한 기지 건설 전·후의 지표($z=1.25$ m) 기온 변화율

제 5 장. 참고문헌

- 정의석, 김선태, 김선규, 홍성민, 정호성, 2002: 남극지역의 대기오염 측정체계 구축을 위한 기초조사. 대전대학교 환경문제연구소 논문집 **6**, 61-72.
- 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.
- 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.
- 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.
- Patankar, S.-V., 1980: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow.
- Robinson, E., W. L. Bamesberger, F. A. Menzia, A. S. Waylett, and S. F. Waylett, 1984: Atmospheric Trase Gas Measurements at Palmer Station, Antarctica: 1982-83. *Journal of Atmosphere Chemistry* **2**, 65-81.
- 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.
- Versteeg, H. K., and W. Malalasekera, 1995: *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Longman, Malaysia, 257pp.



1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.