

남극 장보고기지 주변 강풍사례 모의 연구

권하택¹⁾ · 김신우^{2),3)} · 이솔지²⁾ · 박상종¹⁾ · 최태진¹⁾ · 정지훈⁴⁾ · 김성중¹⁾ · 김백민^{2)*}

¹⁾극지연구소 극지기후과학연구부, ²⁾극지연구소 북극해빙예측사업단,
³⁾서울대학교 지구환경과학부, ⁴⁾전남대학교 해양학과

(접수일: 2016년 7월 29일, 수정일: 2016년 10월 4일, 게재확정일: 2016년 10월 13일)

A Numerical Simulation Study of Strong Wind Events at Jangbogo Station, Antarctica

Hataek Kwon¹⁾, Shin-Woo Kim^{2),3)}, Solji Lee²⁾, Sang-Jong Park¹⁾, Taejin Choi¹⁾,
Jee-Hoon Jeong⁴⁾, Seong-Joong Kim¹⁾, and Baek-Min Kim^{2)*}

¹⁾Division of Polar Climate Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon, Korea

²⁾Unit of Arctic Sea-Ice Prediction, Korea Polar Research Institute, Incheon, Korea

³⁾School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

⁴⁾Department of Oceanography, Chonnam National University, Gwangju, Korea

(Manuscript received 29 July 2016; revised 4 October 2016; accepted 13 October 2016)

Abstract Jangbogo station is located in Terra Nova Bay over the East Antarctica, which is often affected by individual storms moving along nearby storm tracks and a katabatic flow from the continental interior towards the coast. A numerical simulation for two strong wind events of maximum instantaneous wind speed (41.17 m s^{-1}) and daily mean wind speed (23.92 m s^{-1}) at Jangbogo station are conducted using the polar-optimized version of Weather Research and Forecasting model (Polar WRF). Verifying model results from 3 km grid resolution simulation against AWS observation at Jangbogo station, the case of maximum instantaneous wind speed is relatively simulated well with high skill in wind with a bias of -3.3 m s^{-1} and standard deviation of 5.4 m s^{-1} . The case of maximum daily mean wind speed showed comparatively lower accuracy for the simulation of wind speed with a bias of -7.0 m/s and standard deviation of 8.6 m s^{-1} . From the analysis, it is revealed that the each case has different origins for strong wind. The highest maximum instantaneous wind case is caused by the approach of the strong synoptic low pressure system moving toward Terra Nova Bay from North and the other daily wind maximum speed case is mainly caused by the katabatic flow from the interiors of Terra Nova Bay towards the coast. Our evaluation suggests that the Polar WRF can be used as a useful dynamic downscaling tool for the simulation and investigation of high wind events at Jangbogo station. However, additional efforts in utilizing the high resolution terrain is required to reduce the simulation error of high wind mainly caused by katabatic flow, which is received a lot of influence of the surrounding terrain.

Key words: Polar WRF, high wind events at Jangbogo station, East Antarctica

*Corresponding Author: Baek-Min Kim, Korea Polar Research Institute, 26 Songdomirae-ro, Yeosu-gu, Incheon 21990, Korea.
Phone: +82-32-760-5308, Fax: +82-32-760-5399
E-mail: bmkim@kopri.re.kr

1. 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 있다(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 있다(Korea Polar Research Institute, 2012a, Fig. 1). 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 있다. 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 있다(Korea Polar Research Institute, 2012b).

장보고 과학기지가 위치한 로스해 연안은 남극대륙을 따라 분포한 해안가 지역에서 발생한 다양한 규모의 저기압 시스템의 이동과 소멸이 지속적으로 반복되는 대표적인 지역으로 알려져 있다(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 발생한다. 또한 해안에서 대륙방향으로 급격한 고도변화를 보이는 복잡한 지형적 특성으로 강한 활강풍(katabatic wind)의 영향을 받는 대표적인 지역 중 하나이다. 로스해 지역의 악기상 관련 연구는 1955년에 로스섬(Ross Island)에 건설되어 현재까지 상주기지로 운영되어 오고 있는 미국 맥머도 기지(McMurdo Station)를 중심으로 수행되어 오고 있다. 주로 인근 계곡에서 불어오는 높새 바람(Foehn wind) 및 강풍사례 분석에 대한 연구들이 진행되어 오고 있으나(Steinhoff et al., 2008, 2012; Speirs et al., 2012) 관련 연구가 매우 부족한 실정이다. 이는 극지적인 악기상의 경우 상대적으로 낮은 해상도를 갖는 재분석 자료를 이용한 분석에 한계가 있으며, 관련 지역에서 제공되는 기상 관측자료가 부족하기 때문에 판단된다. 장보고 과학기지 인근에는 이탈리아에서 하계에만 운영하고 있는 마리오주첼리(Mario Zucchelli) 기지가 위치해 있으나 테라노바베이 부근의 강풍사례에 대한 연구는 전무한 실정이다. 앞으로 남극 지역의 다양한 관측과 연구를 위해 기지를 운영해 나가는데 있어 장보고 기지 주변 악기상에 대한 이해는 필수적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 장보고 과학기지에 설치, 운영되어

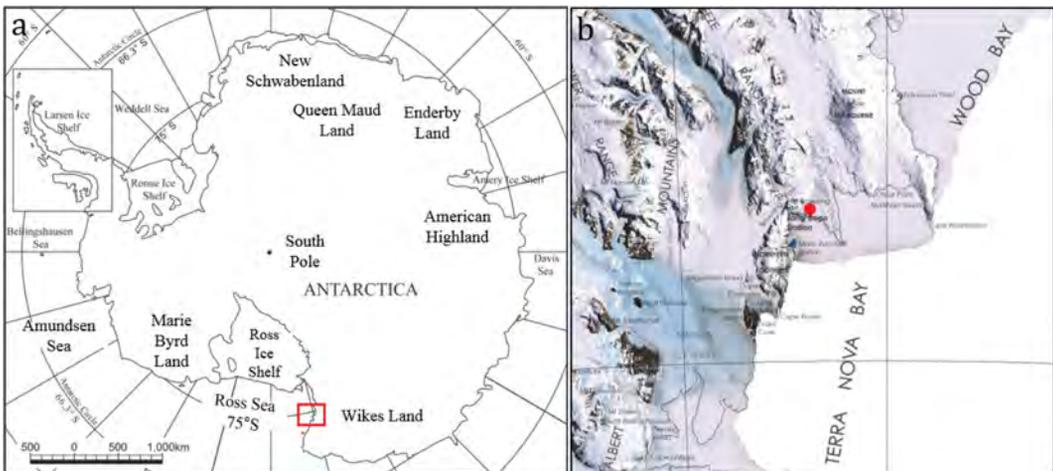


Fig. 1. Location of Jangbogo station (red dot) in Terra Nova Bay, Antarctica. The inner red box in (a) are enlarged in (b).

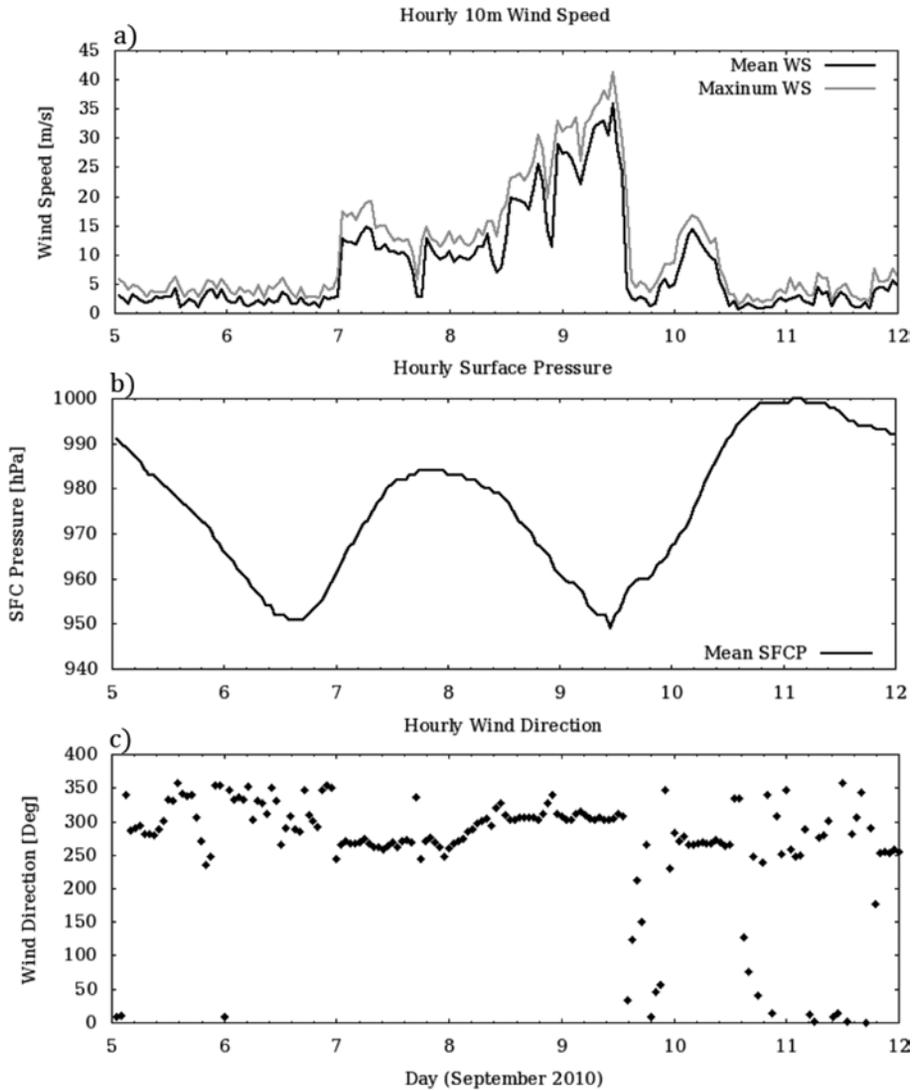


Fig. 2. Time series of (a) hourly averaged 10-m wind speed (m s^{-1}) (black line) and 10-m maximum instantaneous wind speed (gray line) and (b) hourly averaged surface pressure (hPa), and (c) wind direction (degree) at Jangbogo AWS station for 5~11 September 2010.

오고 있는 자동기상관측장비(Automatic Weather Station: AWS)에서 관측된 풍속 자료를 분석하여 특징적인 강풍 사례를 선정하고, 이를 극지역 모의를 위해 개발된 Polar WRF (Weather and Research Forecasting) 수치모형을 이용하여 모의하였다. 이를 통해 장보고 과학기지 주변의 강풍 사례의 원인을 분석하고, 관측자료와의 비교를 통해 재분석 자료와 중규모 수치모형을 이용한 역학적 상세화(downscaling) 기법을 이용해 생산된 극지 바람장의 검증에 수행하였다.

2장에서는 장보고 과학기지에서 관측된 기상관측자

료 및 재분석자료를 분석하여 선정된 사례의 극지역, 종관적 기상장의 특징을 기술하였다. 3장에서는 사례 모의에 이용한 Polar WRF 모형의 물리과정 설정 및 격자체계에 대해 기술하였으며, 4장에서는 수치모형 모의결과와 관측자료와의 비교검증 결과를 기술하였다. 5장에서는 요약 및 토의를 기술하였다.

2. 사례 및 종관장 분석

강풍사례의 선정과 모의를 위해 장보고 기지에서

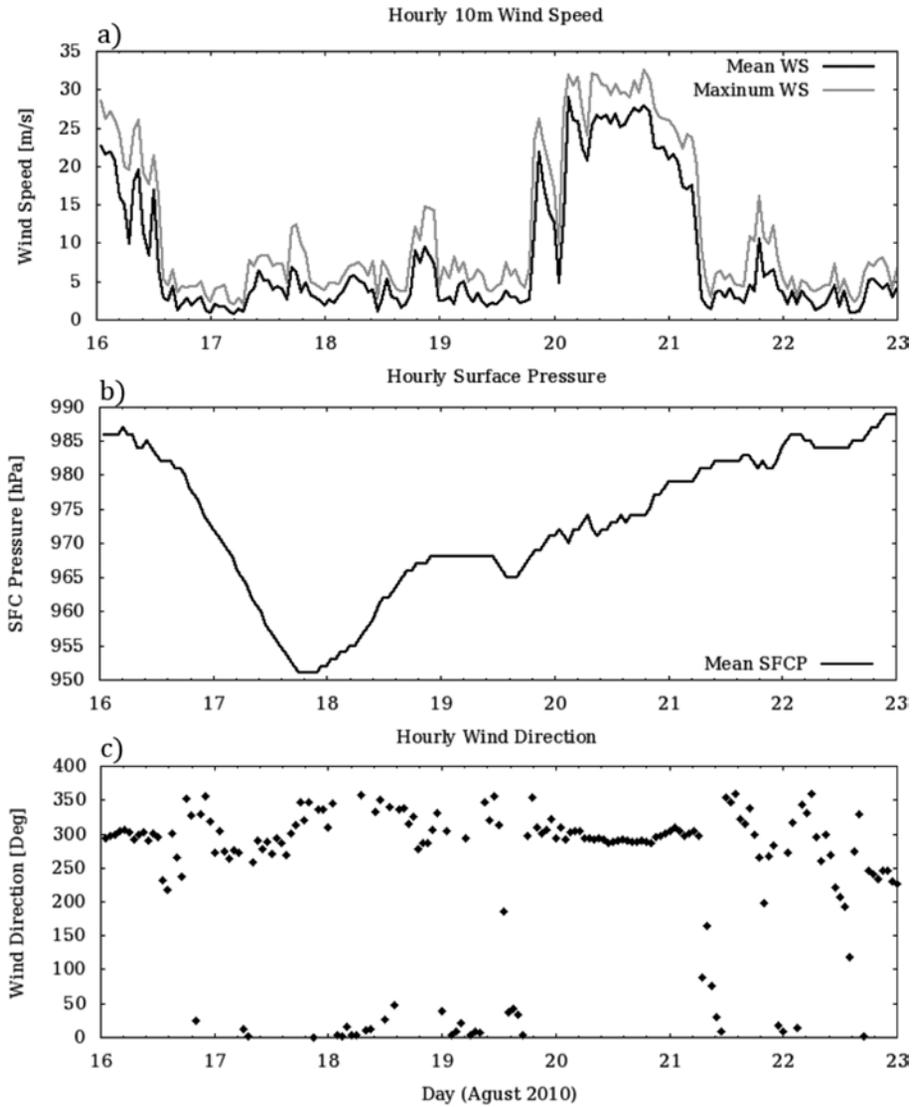


Fig. 3. Same as Fig. 2, except for the period of 16~22 August 2010.

운영되고 있는 AWS 관측자료를 분석하였다. 장보고 과학기지에서 운영되고 있는 AWS는 2010년 2월에 설치(74.623°S, 164.229°E)되어, 2012년 12월 29일 현 위치(74.627°S, 164.237°E)로 이전하여 현재까지 운영되어 오고 있다. 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 생산된다.

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 선정하였다. Figures 2와 3은 두 사례 기간의 장보고 기지 AWS에서 관측된 시간 평균 및 최대 풍속, 지면 기압의 시계 열을 나타낸다. 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 풍속 값을 보이며, 강풍이 지속되는 동안 300도 방위의 북서풍이 일정하게 유지됨을 알 수 있다(Fig. 2). 지면기압은 8일 0000 UTC에 지속적으로 감소하기 시작하여 최대 풍속을 보인 9일 1100 UTC에 최저 관측 값

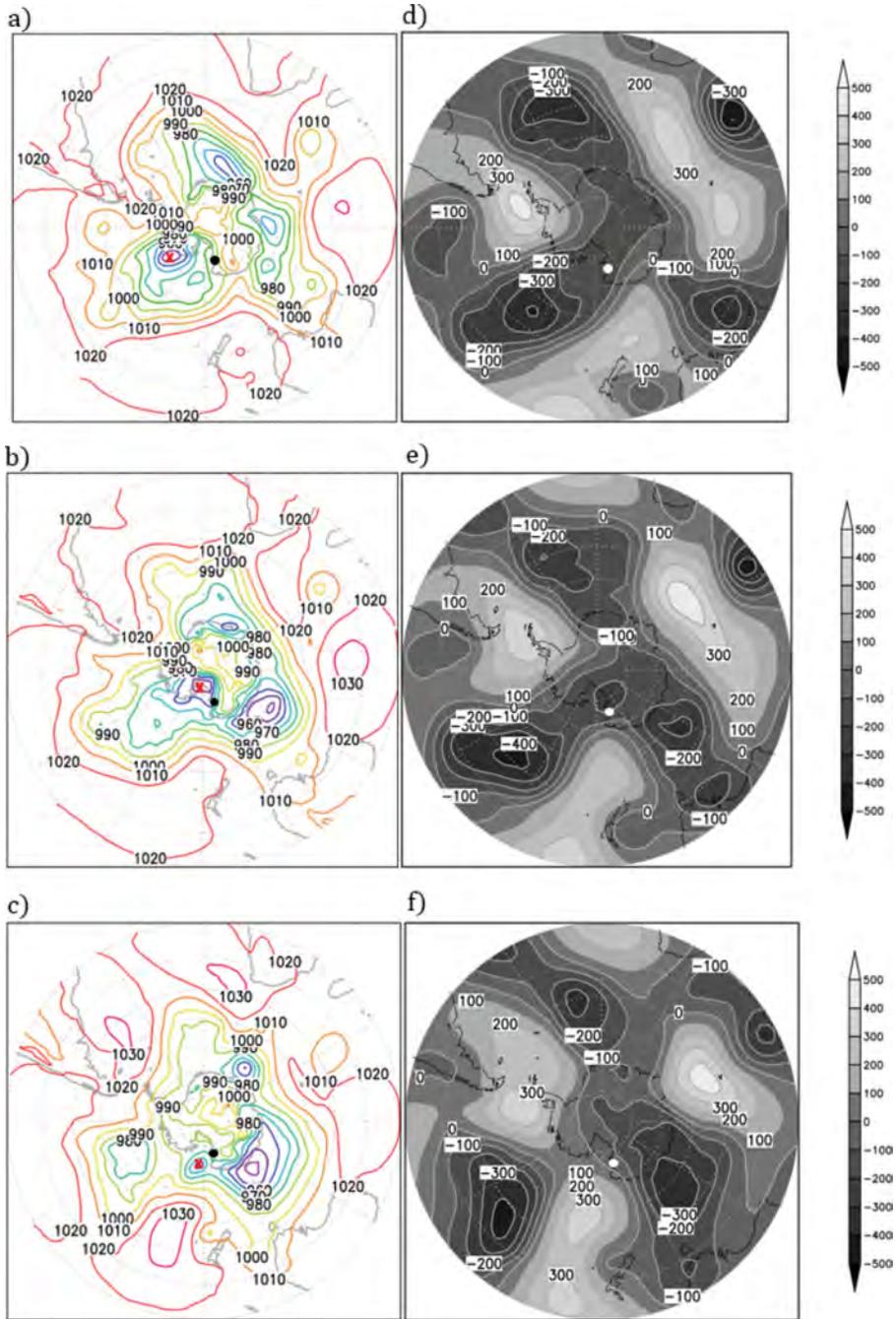


Fig. 4. (a)-(c) Sea-level pressure and (d)-(f) daily anomalies of 500 hPa geopotential height at 0600 UTC 8 (top), 9 (middle), and 10 (bottom) September 2010 from ERA-Interim reanalysis. Black and white closed circles in (a)-(c) and (d)-(f) indicate Jangbogo station, respectively. Red symbol x is center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

(949 hPa)을 보인다. 이는 동일한 시각에 증가하기 시작하여 최대 풍속을 보인 풍속의 변화 경향과 일치하며 사례기간에 발생한 강풍이 저기압의 영향을 받은

것임을 알 수 있다. 이러한 사실은 동일한 기간의 해면기압 분포(Fig. 4)에서 더욱 뚜렷이 볼 수 있다. 8일 마리비어드 랜드(Marie Byrd Land)의 동쪽 끝에 중심

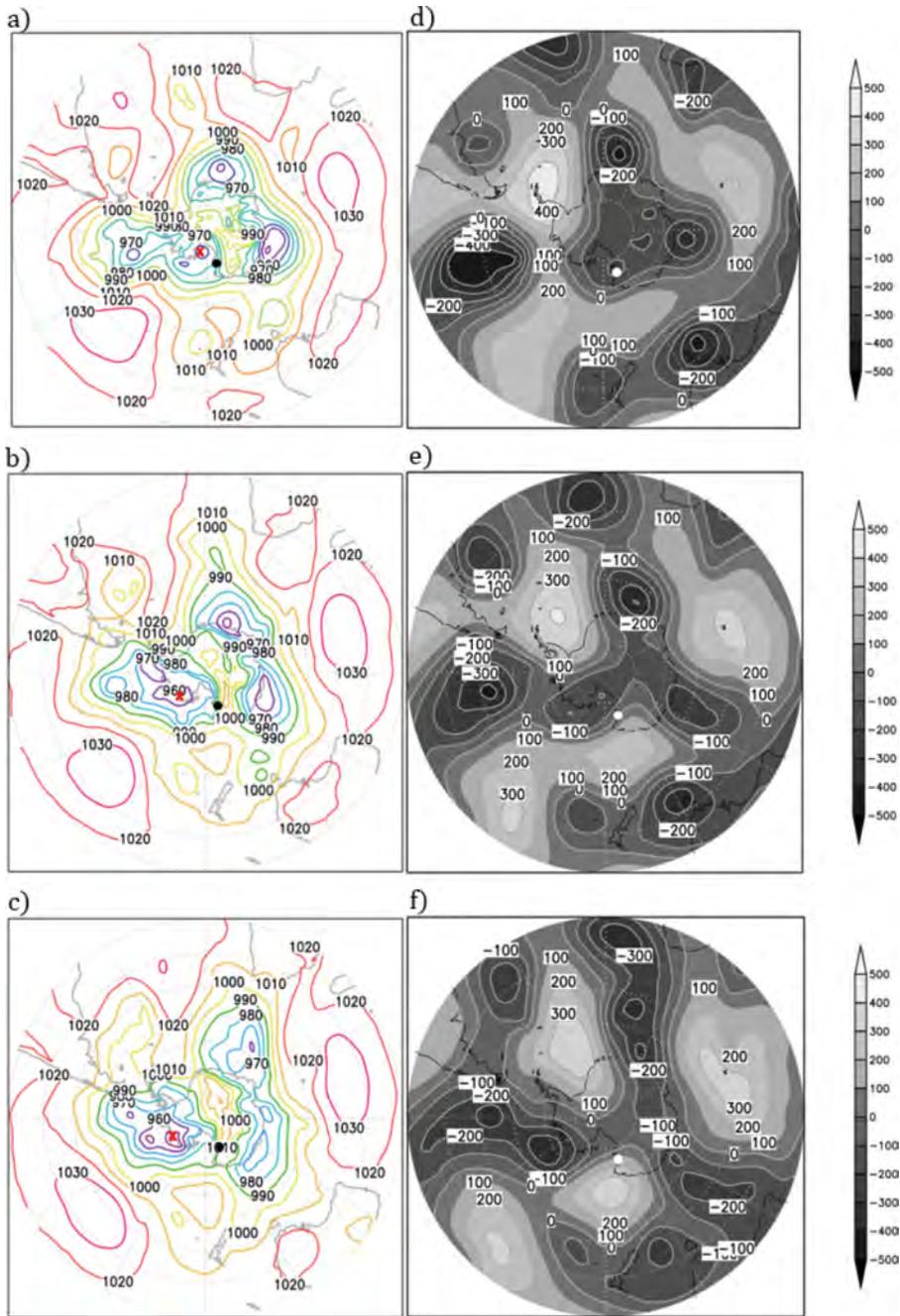


Fig. 5. Same as Fig. 4, except for at 1200 UTC 19 (top), 20 (middle), 21 (bottom) August 2010.

을 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 등압선이 형성되어 있음을 볼 수 있다. 이후 10일 장

보고 기지 주변의 조밀한 등압선 분포를 만들었던 저기압 세력이 약해지며 강풍 유발에 영향을 준 장보고 기지 주변 기압 경도가 약해졌음을 볼 수 있다.

일 평균 풍속의 최대값을 기록한 2010년 8월 20일의 사례를 살펴보면(Fig. 3) 1시간 평균 풍속은 8월

19일 2000 UTC에 큰 폭으로 증가하여 약 20 m s^{-1} 이상의 풍속을 24시간 넘게 유지하다 21일 0600 UTC 이후 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 24시간 넘게 지속된 강한 풍속이 해당 관측 기간 내의 일 평균 풍속의 최대 값을 유도하였음을 확인할 수 있다. 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 hPa를 기록한 후 이후로도 지속적인 증가 경향을 보인다. 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 추정된다. 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 있다(Parish, 1984). Figure 5는 8월 19, 20, 21일 1200 UTC의 해면기압과 500 hPa의 지위고도 아노말리 분포를 나타낸다. 19일 장보고 기지 주변에 로스해부터 서남극 반도까지 해안을 따라 넓게 자리 잡고 있는 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 있다. 또한 20일에 테라노바베이 해안을 따라 내륙 안쪽에서 남북방향으로 길게 고기압이 발달한 것을 확인할 수 있다. 이는 앞서 AWS 관측의 지면기압의 시계열에서 보여진 시간에 따라 증가하는 지면기압의 변화에 영향을 준 것으로 판단된다. 21일에는 저기압 중심이 보다 서쪽으로 이동하였음을 볼 수 있다.

두 사례의 500 hPa 지위고도 아노말리 분포(Figs. 4와 5)를 살펴보면 두 사례 모두 공통적으로 남태평양 중앙(-40°S , 150°W)에 머물러 있던 양의 지위고도 아노말리가 강풍이 발생한 두 시기에 동남쪽 방향의 로스해 부근 남극대륙까지 길게 확장되며 장보고 기지 풍하측 방향에 정체된 기압능을 형성하고 있음을 알 수 있다. 또한 정체된 풍상층 저기압과 풍하측 저지 고기압 사이에 위치한 장보고 기지 상공에 정체된 기압골을 따라 강한 강풍대가 위치하고 있음을 볼 수 있다. 따라서, 두 강풍사례에서는 공통적으로 남태평양 중앙에 정체되어 있던 양의 지위고도 아노말리가 남극대륙 방면으로 확장하며 장보고 기지 상공에 기압골이 위치할 때 지상에 강한 강풍이 발생한 것으로

보여지며 이러한 상층 중관 패턴은 장보고 기지 주변의 강풍 유발과 밀접한 관련이 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 이러한 과정을 일반화하기에는 사례가 충분하지 않아, 관련해서는 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

3. 실험 설계 및 모델 수행

본 연구를 위해 미국 오하이오 주립 대학(Ohio State University)의 Byrd Polar and Climate Research Center의 Polar Meteorology Group에서 개발된 Polar WRF 모델(version 3.7)을 사용하였다. Polar WRF 모형은 중규모 대기현상을 고해상도로 연구하고 예측하기 위해 개발된 WRF 모형(Skamrock et al., 2005)을 기반으로 극지역 수치 모의 성능을 향상시키기 위해 개선된 수치모형이다. 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 되어있다(Bromwich et al., 2009).

수치 모의를 위해 각각 27 km, 9 km, 3 km의 격자 간격을 갖는 3개의 실험 영역을 구성하였다(Fig. 6). 남극대륙과 그 주변 해안을 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 구성하였다. 3개의 실험 영역은 측면 경계에서 기상변수 정보를 양 방향으로 전달하는 양방향 등지체계(two-way nesting)로 구성하였으며, 각 실험영역의 연직 층 수는 44층이며 모형 상한은 10 hPa로 설정하였다. 모델의 초기 및 경계 자료로 유럽중기예보센터의 ERA Interim 자료(수평해상도 $\sim 0.75^{\circ}$)를 사용하였다.

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 설계하였다. 선정된 두 사례 기간에 대한 수치 모의 실험을 위해 매일 0000 UTC에 모형을 초기화하여 48시간의 적분을 수행하였으며, 스핀 업(spun-up) 시간을 고려하여 초기 24시간은 제외하고 나머지 24시간 예측자료만을 분석에 활용하였다. 실험 수행에서 사용된 물리과정은 다음과 같다. 구름 물리과정은 WSM5 (WRF Single Moment 5-Class cloud microphysics scheme) (Hong et al., 2003) 방안을, 적운대류 모수화 과정은 Grell-Freitas ensemble (Grell

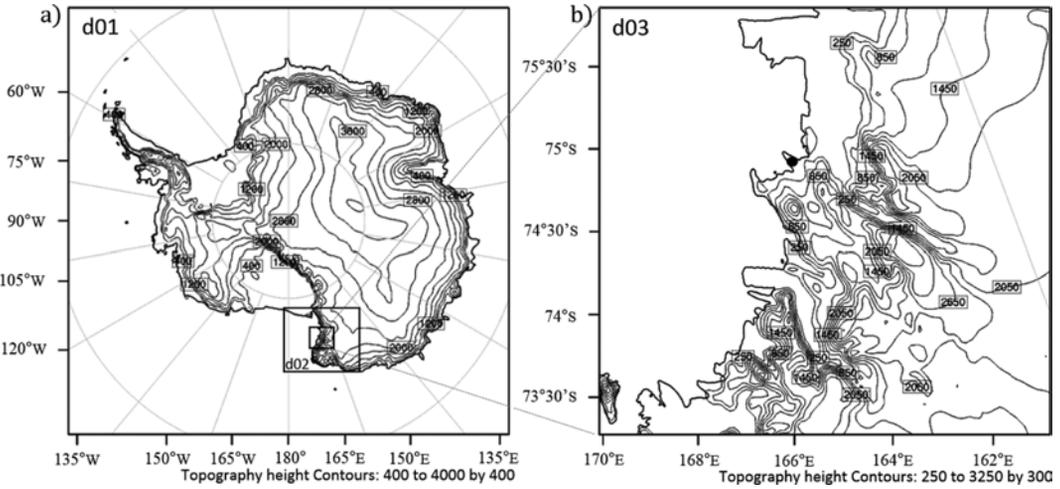


Fig. 6. Model domain with terrain height (solid line, Unit: meters) for (a) 27 km grid and (b) 3 km grid. The inner boxes in (a) represent 9 km (d02) and 3 km (d03) domains. The black circle in (b) indicates the location of Jangbogo station.

Table 1. Summary of model configuration.

	Domain 1	Domain 2	Domain 3
Horizontal grid	240 × 230	124 × 103	100 × 109
Resolution	27 km	9 km	3 km
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 2. 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	×	×

and Freitas, 2014) 방안을 27 km 격자에만 적용하였으며, 9 km와 3 km 격자에는 적운대류 모화를 사용하

지 않았다. 지표면 모형(Land surface model: LSM)은 극지역에 맞게 수정된 Noah LSM (Bromwich et al.,

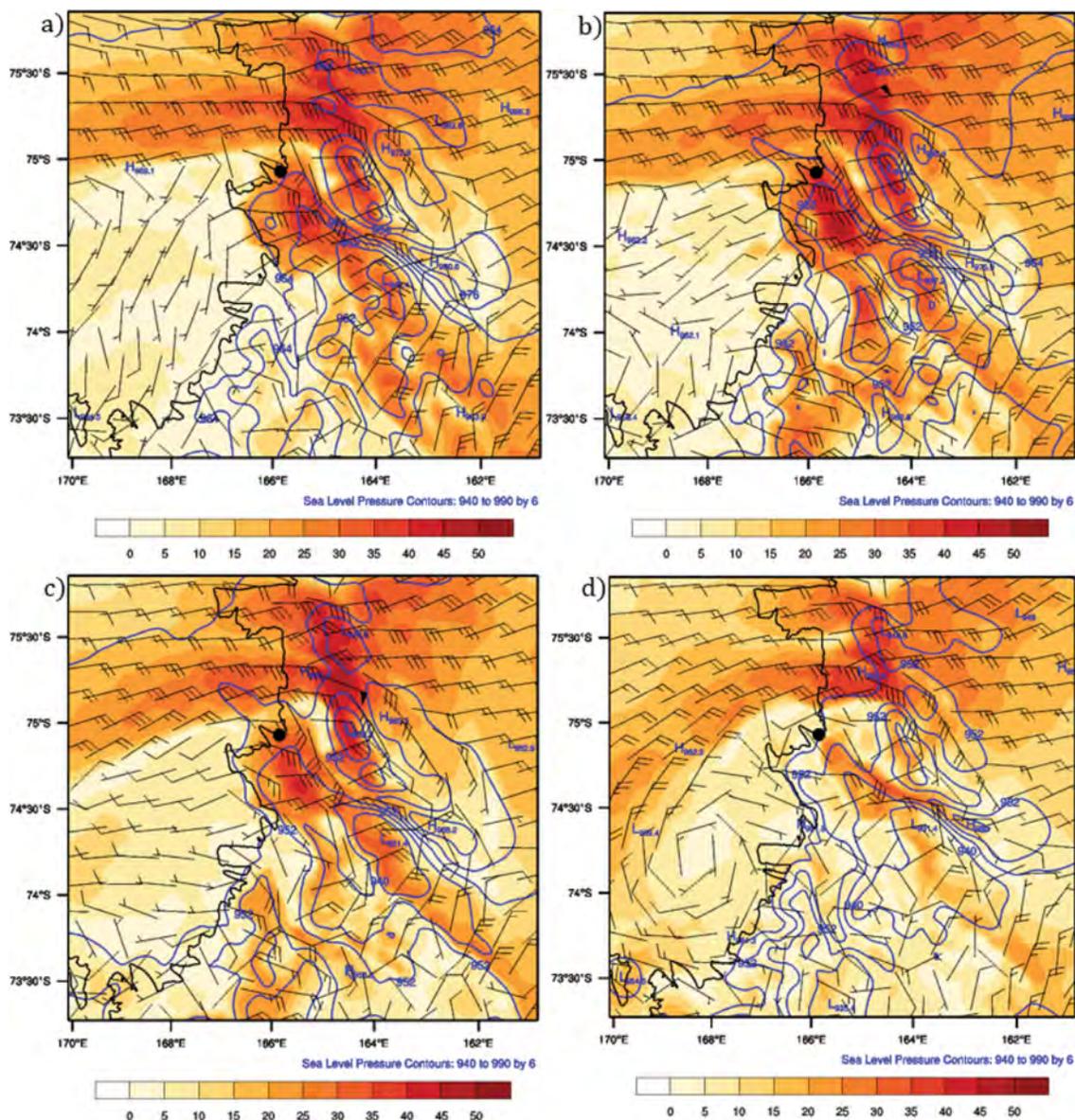


Fig. 7. Sea-level pressure (blue contour, hPa) and wind speed (shading, $m s^{-1}$) at (a) 0000, (b) 0600, (c) 1200, and (d) 1800 UTC 9 September 2010 from Polar WRF simulation with 3 km grid resolution. Contour interval is 6 hPa. Black circle indicates Jangbogo station.

2009)을 사용하였으며, 복사 모수화 방안으로는 RRTMG 방안(Iacono et al., 2008)을 장파복사 및 단파복사에 동일하게 적용하였다. 행성경계층 모수화 방법은 Mellor-Yamada-Janjic TKE (Janjic, 1994) 방안을, 지표면 물리방안(surface layer scheme)으로는 Monin-Obukhov (Monin and Obukhov, 1954) 방안을 적용하였다. 실험 구성 및 물리 모수화 방안에 대한 상세한 정보는 Table 1과 2에 각각 요약하여 기술하였다.

4. 실험결과

선택한 사례의 수치모의 성능을 살펴보기 위해 우선 각 사례별 바람, 기압의 공간 분포를 살펴보았다. Figure 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 나타낸다. 모의 영역에서 검은 점은 장보고 기지의

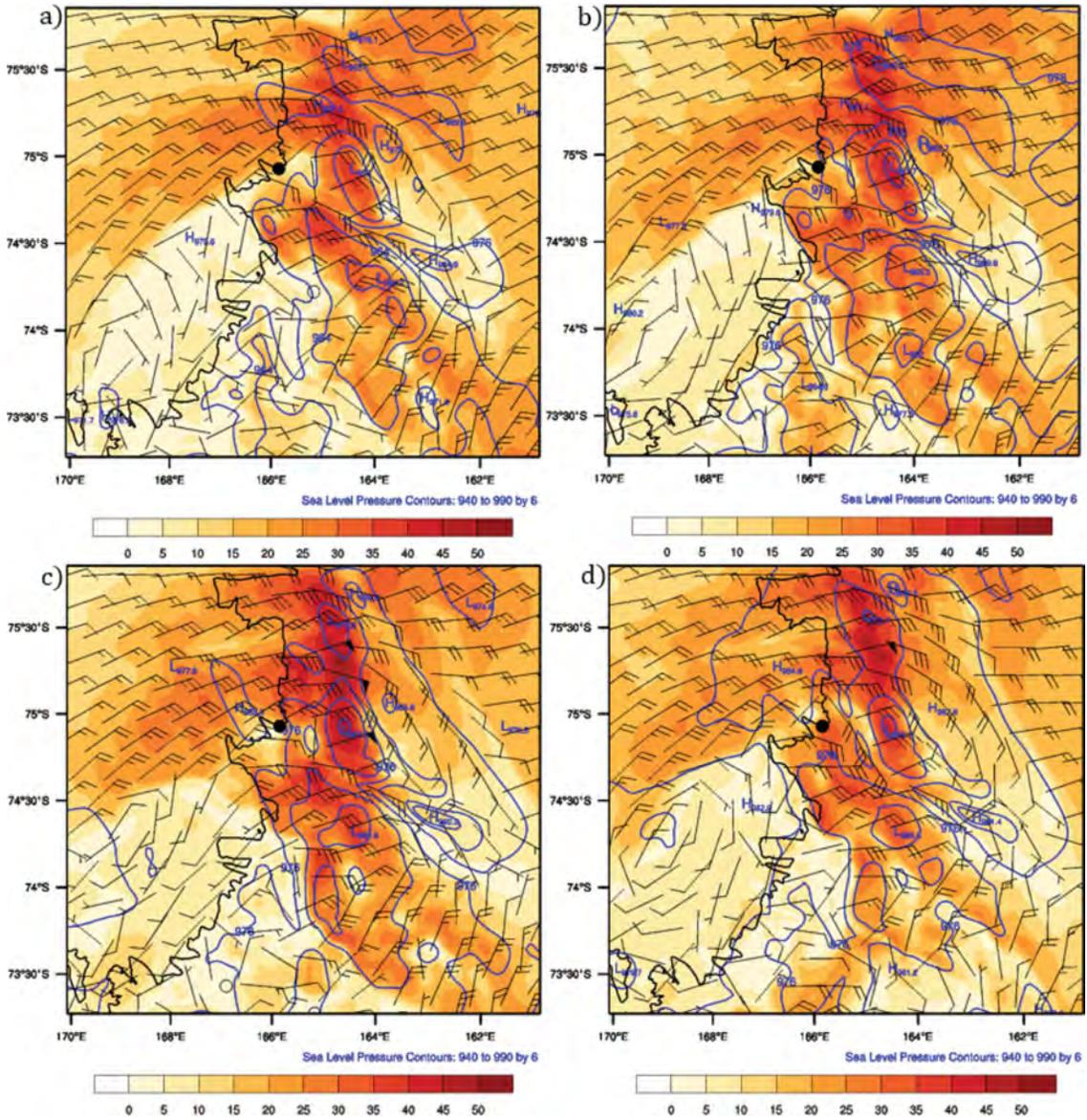


Fig. 8. Same as in Fig. 7, except for 20 August 2010.

AWS 관측 지점을 나타낸다. 장보고 기지는 해발 2,000 m 이상의 높은 고도를 지닌 내륙과 테라노바베이 사이에 위치하여 급격한 고도 변화와 함께 복잡한 주변 지형을 가지고 있다. 따라서 모의된 지상의 기압 분포는 지형의 영향을 받아 매우 복잡한 형태로 나타나고 있음을 알 수 있다. 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 보인다. 그림에서 풍향은 Fig. 6의 영역 1의 그

림에서 살펴보면 보다 쉽게 이해할 수 있다. Figure 1에서 상측이 남쪽, 하측이 북쪽이며, 동, 서 방향의 경우 남극을 중심으로 그린 그림이므로, 우측에서 불어오는 바람이 서풍, 좌측에서 불어오는 바람이 동풍이다. 장보고 기지 위치에서는 0000~1200 UTC 기간에 강한 바람이 모의되었으며, 1800 UTC에 실험 영역 전반에 걸쳐 풍속이 감소한 경향을 보인다. 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 있

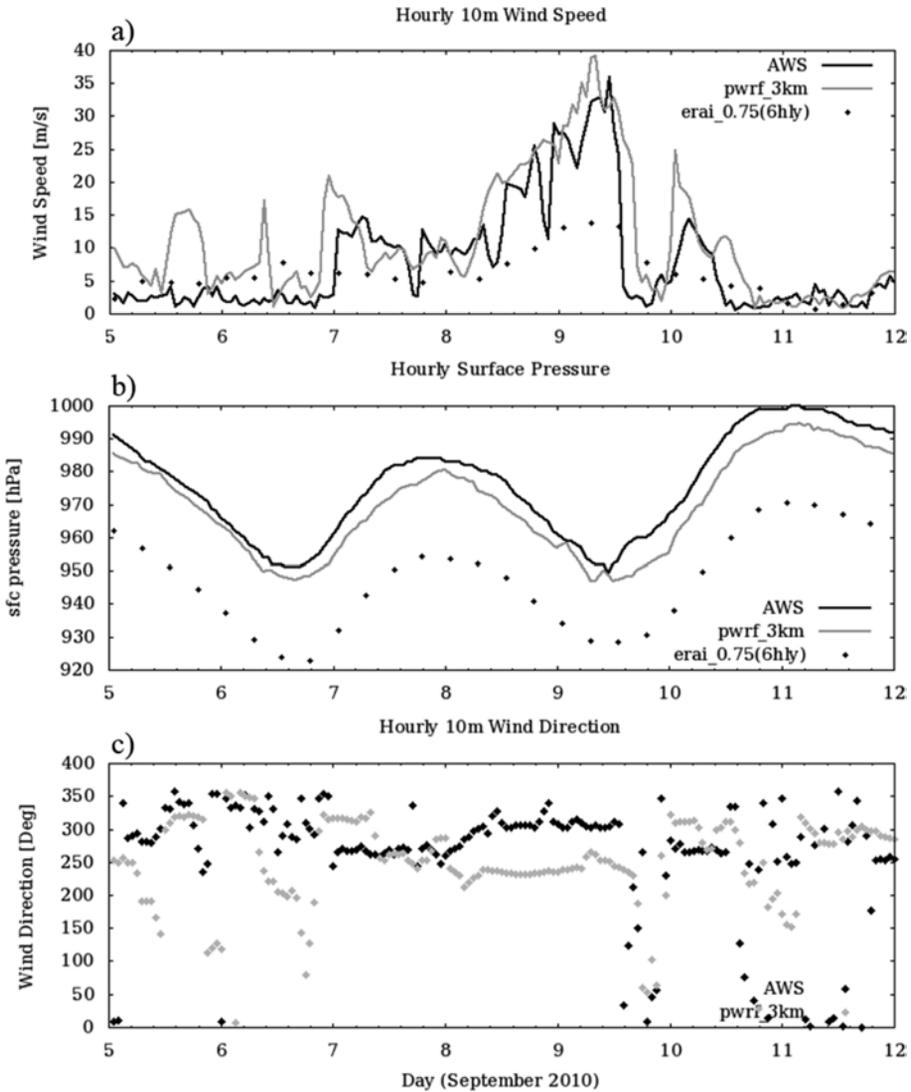


Fig. 9. Time-series of hourly (a) 10-m wind speed ($m s^{-1}$) and (b) surface pressure (hPa) from AWS (black line), Polar WRF (gray line), and ERA-Interim reanalysis (open diamond), and (c) wind direction from AWS (black closed diamond) and Polar WRF (gray closed diamond) for the 5~11 September 2010.

다. 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 판단된다.

Figure 8은 CASE2 기간 중, 일 평균 최대 풍속 값을 기록한 2010년 8월 20일 장보고 기지 부근의 6시간 간격의 해면 기압과 10 m 고도의 풍속, 풍향 모의 결과를 나타낸다. 앞선 사례와 마찬가지로 검은 점으로 표시된 장보고 기지 부근에 붉은 색으로 표현된 강풍 지역이 존재하고 있으며, 서풍 계열의 바람이 지배적인 것으로 보인다. 다만 앞선 사례에서는 장보고 기지의 위치가 직접적인 강풍 지역에 지속적으로 포함되어 있었던 반면, 두 번째 사례에서는 강풍 지역 사이에 존재하는 좁은 약한 바람 영역에 장보고 기지

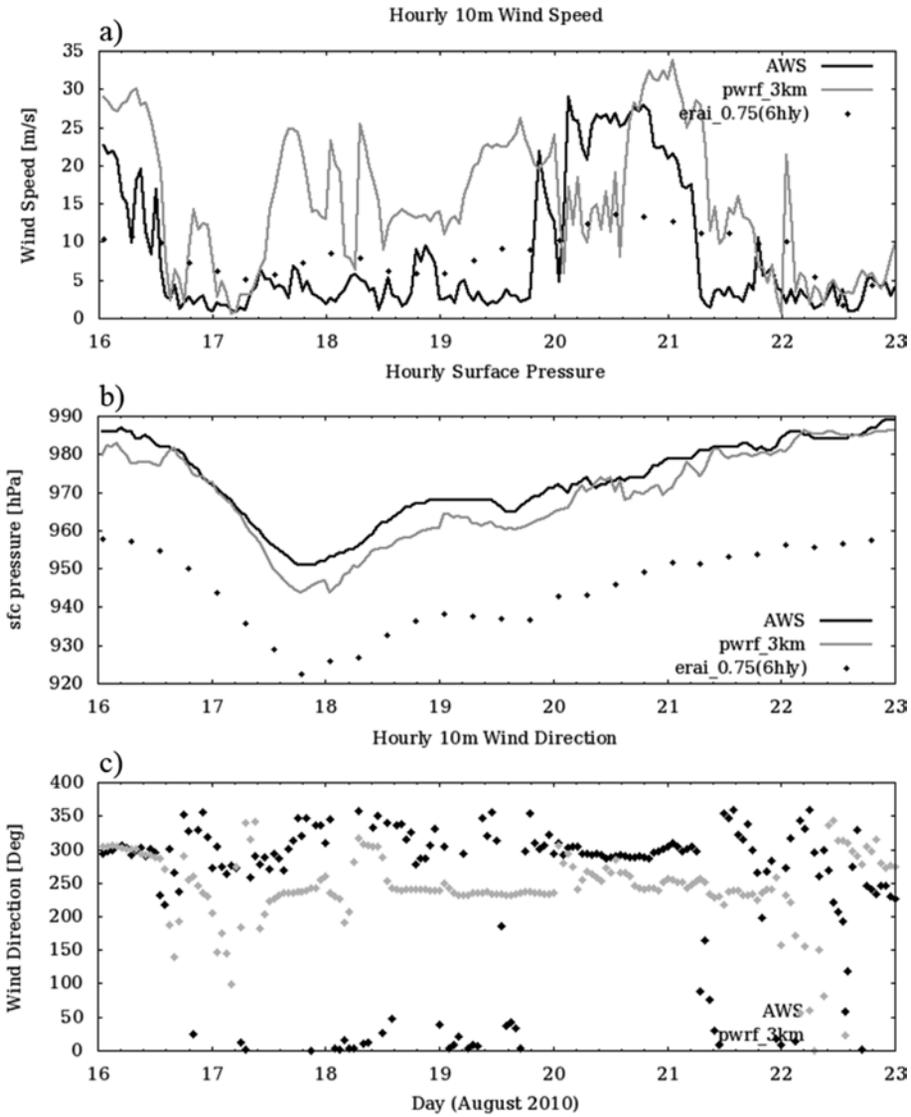


Fig. 10. Same as Fig. 9, except for the period of 16~22 August 2010.

가 위치하면서 상대적으로 풍속이 약하게 모의된 것으로 보인다. 이에 대한 보다 자세한 분석은 이후 풍향, 풍속의 시계열 결과와 함께 논의하였다.

장보고 기지에서 강풍 모의 결과 검증 및 상세 분석을 위해 관측 자료와의 비교, 분석을 수행하였다. Figure 9는 CASE1에 대한 장보고 기지의 AWS 관측, 3 km 해상도의 수치 모의 결과, ERA-interim 재분석장의 풍속, 지면 기압, 풍향의 시계열을 나타낸다. 해당 사례에서 Polar WRF 수치 모형은 관측과 매우 유사한 풍속과 지면 기압을 모의하는 반면 ERA-interim 재분석장에서는 풍속의 변화폭이 적고 특히 강한 바

람의 강도를 제대로 표현하지 못함을 알 수 있다. 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 모의하였다. 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 보였다. 지면 기압의 경우 수치모의 결과에서는 관측에 비해 약 5.8 hPa 정도의 음

의 편차를 보였으나, 지면기압의 전반적인 증감 패턴을 잘 모의한 반면 재분석장은 AWS 관측 결과에 비해 약 30 hPa 정도 낮은 값을 보였다. 풍속, 지면기압에 대해 재분석장이 관측과 큰 차이를 보이는 원인은 상대적으로 낮은 재분석 자료의 수평해상도(~80 km)의 영향으로 장보고 기지 주변의 복잡한 지형이 상세하게 표현되지 못하고, 이로 인해 지형에 영향을 많이 받는 지면기압 및 바람장 모의에 영향을 준 것으로 판단된다. 관측과의 비교에서 3 km 해상도의 수치 모의 결과가 재분석 자료에 비해 크게 감소한 오차를 보였으며, 이를 통해 고해상도 수치 모형을 이용한 역학적 다운스케일링이 성공적으로 수행되었으며, 남극 기지 주변의 극지역 기상 현상을 모의 및 분석하는데 있어 고해상도 중규모 수치모델의 활용이 필수적임을 알 수 있다. 풍향의 비교에서는 관측 결과와 수치 모의 결과 모두 방위 250~350도 사이의 서풍 계열이 지배적인 경향을 보였으나, 풍속이 가장 강했던 9일에 관측의 경우 북서풍 계열의 바람을 기록한 반면 수치 모의에서는 250도 안팎의 다소 남쪽으로 치우친 바람을 모의하며 차이를 보였다.

Figure 10은 CASE2 기간에 대해 Fig. 9와 동일한 자료를 나타낸 것이다. 앞선 사례와 유사하게 재분석장은 풍속의 변화에서 관측에 비해 매우 평활화된 값을 보이며, 지면기압의 경우도 약 30 hPa의 큰 음의 편차를 보였다. 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 hPa의 음의 편차를 보였다. 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 나타났다. 또한 강풍이 지속되는 기간도 관측에 비해 상대적으로 짧게 나타나는 등 CASE1에 비해 전반적으로 낮은 모의 정확도를 보였다. 풍향의 경우 CASE1과 마찬가지로 AWS 관측과 수치 모의 결과 모두 서풍 계열이 지배적이나 관측은 방위 300도 안팎의 북서풍 계열임에 비해 수치 모의 결과는 250도 부근의 서풍 또는 남서풍이 주로 나타났다. 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 있다. 앞서 살펴본 모의된 풍속의 수평 분포(Figs. 7과 8)에서 두 사례 모두 장보고 기지 주변의 강풍대를 모의하였으나, CASE2의 경우 장보고 기지를 중심으로 남쪽으로 남서, 서풍의 강풍대가, 북쪽으로 북서, 남서풍의 강풍대가 모의되었으며, 장보고 기지는

이 두 강풍대 사이의 상대적으로 약한 풍속을 보이는 지점에 위치하고 있음을 알 수 있다. 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 판단된다. CASE2의 경우 활강풍 사례로 주변 지형의 영향을 매우 많이 받으므로 이러한 사례의 경우 수치모델에서 사용된 지형의 정밀도에 따른 영향을 더욱 많이 받은 것으로 추정된다. 특히 장보고 기지가 위치한 해안가에서 내륙 방향으로 급격한 지형고도의 차이가 존재하며, 지형이 매우 복잡한 지역으로 실제와 모델 지형간에 큰 차이를 보인다. 장보고 기지의 지형 고도 차이는 모델 격자 해상도에 따른 결과 논의에 보다 상세하게 기술되었다. 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 판단된다. 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 일치한다. 추가적인 오차의 원인으로는 강풍사례의 배경이 된 하층 저기압의 강도와 위치, 형태 등에 대한 수치 모의 오차를 들 수 있다.

수치모형의 다양한 크기의 수평격자 간격에 따른 강풍 사례 모의 결과의 차이를 살펴 보기 위해 27 km, 9 km, 3 km 해상도의 모의 결과를 분석하였다. Figures 11과 12는 수치 모의의 수평 해상도 변화에 따른 모의 결과를 AWS 관측과 비교한 것으로 각각 CASE1, CASE2에 대하여 Fig. 9와 동일한 변수를 살펴보았다. 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 모의되었다. 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 보였다. 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 보였다. Figure 12는 CASE2에 해당되는 수치 모의 결과로 지면기압과 풍향은 CASE1의 결과와 유사한 경향을 보였다. 풍속의 경우 관측에서 일평균 최대풍속이 기록된 20일을 제

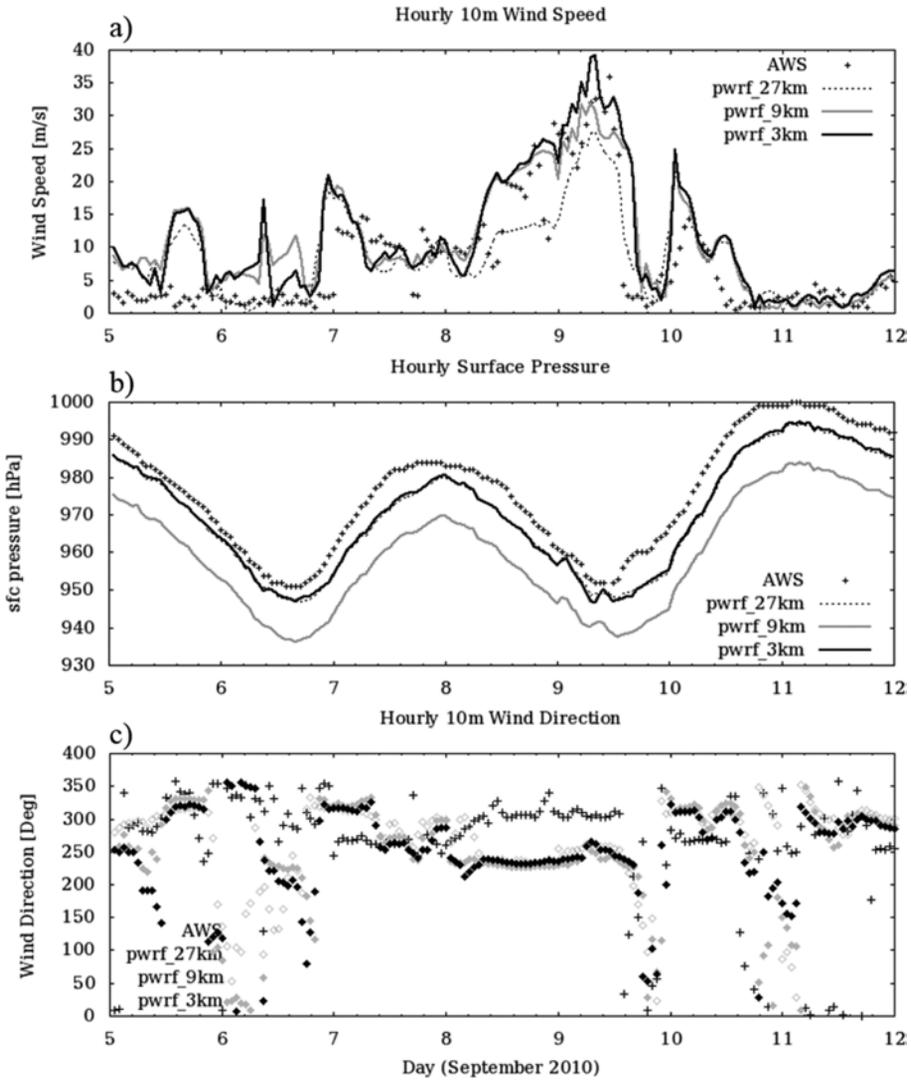


Fig. 11. Time-series of hourly (a) 10-m wind speed ($m s^{-1}$) and (b) surface pressure (hPa) from AWS (cross) and Polar WRF simulations with 27 km (gray dotted line), 9 km (gray solid line), and 3 km (black solid line) grids, and (c) wind direction from AWS (cross) and Polar WRF simulations with 27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

외한 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 보였다. 20일 기록된 강풍 모의에 있어서는 일부 구간을 제외하고 27 km 해상도 결과에 비해 고해상도인 9 km, 3 km 해상도 결과가 관측과 유사한 값을 보였다. 수치모형의 격자 간격에 따른 강풍 사례 모의 결과를 분석해 본 결과 지면기압 모의에 있어서 두 사례 모두 관측에 비해 과소 모

의되는 경향을 보였으며, 특히 9 km 해상도 실험에서 가장 큰 음의 편차를 보였다. 모의된 지면기압이 관측에 비해 과소 모의된 특성을 보이는 원인을 살펴보기 위해 모델 실험에서 사용된 지형을 살펴보았다. 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 보인다. 실제로 세 실험

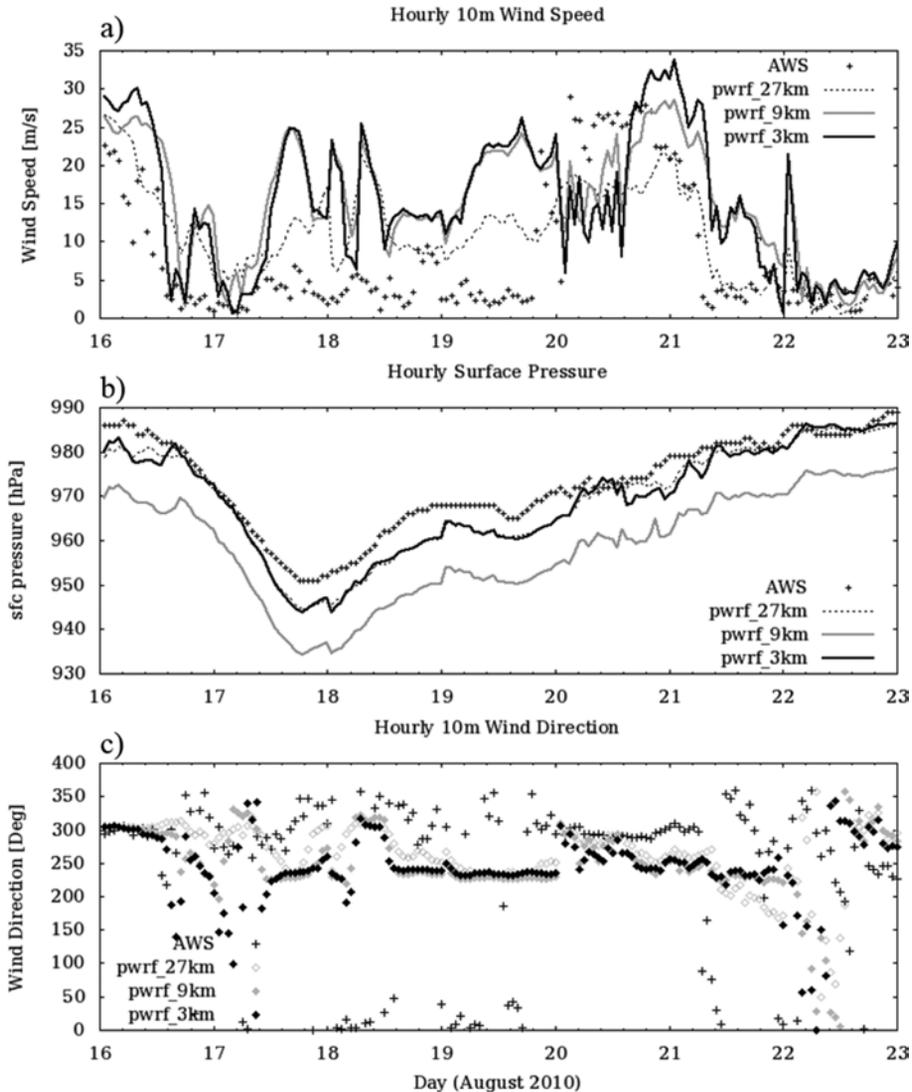


Fig. 12. Same as in Fig. 11, except for the period of 16~22 August 2010.

에서 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 보인다. 테라노바베이 해안가에 위치한 장보고 기지의 AWS 관측지점의 실제 고도는 10 m로 실제 모델의 고도 값과 큰 차이를 보인다. 따라서 AWS 관측자료와 각 해상도의 모델 실험에서 모의된 지면기압을 동등하게 비교하기 위해 실제 지형과 모델 지형의 고도 차이에 대한 지면기압의 보정을 수행하였다. 정역학 방정식에서 밀도와 중력가속도를 상수로 가정하면 고도가 1 m 증가함에 따라 기압은 0.125 hPa 감소하게 된다. 이를 적용해 각 해상도에서 모의된 실험의

지형 고도와 관측 고도와의 차이에 대해 지면 기압의 고도 보정을 수행하였으며, Fig. 13은 CASE2에 대해 고도보정이 적용된 지면기압을 나타낸다. 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 있다. 보정 후의 결과를 보다 상세히 살펴보면 강풍이 존재한 20일의 0000~1500 UTC의 수치모의 결과에서 지면기압이 다소 높게 모의되고 있는 것을 확인할 수 있다. 이처럼 국지적으로 기압이 높게 모의된 것은 해당 지점에서의 풍향 및 풍속의 오차와도 연관된 것으로 추정된다.

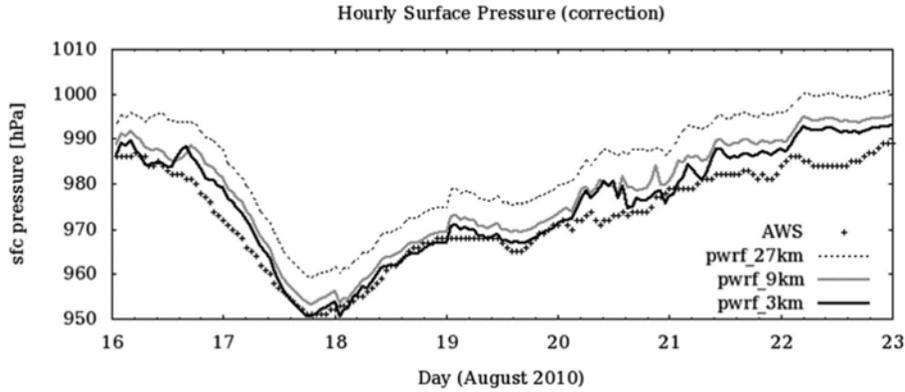


Fig. 13. Same as in Fig. 12b, except with height correction.

5. 요약 및 토의

본 연구에서는 장보고 과학기지의 자동기상관측장비에서 관측된 풍속 자료를 분석하여 관측이래 순간 최대 풍속의 최고 값(41.17 m s^{-1})을 기록한 사례와 일 평균 최대 풍속 값(23.92 m s^{-1})을 기록한 강풍 사례를 선정하고, 이를 극 지역 모의를 위해 개발된 Polar WRF 수치모형을 이용하여 모의하였다. 이를 통해 장보고 과학기지 주변의 강풍 사례의 원인을 분석하였으며, 관측 자료와의 비교 분석을 통해 중규모 모델을 이용한 역학적 상세화 기법으로 생산된 극지 바람장의 검증에 수행하였다.

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 확인하였다. 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 확인하였다. 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 형태를 가진 장보고 기지 부근의 실제 지형을 충분히 반영하지 못한 데서 기인한 것으로 판단된다. 이에 관해서는 향후 상세 지형을 이용한 추가적인 연구가 수반되어야 할 것으로 생각된다. 재분석

자료의 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 보였다. 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 있다.

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 확인하였다.

이상의 분석결과를 통해 Polar WRF를 이용한 고해상도 중규모 수치모델링은 장보고 기지 주변의 강풍 사례 모의 및 분석에 있어 관측자료와 함께 매우 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였으며, 이는 관측자료가 매우 부족한 남극대륙 주변의 극한 기상 사례 연구에 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 다소 큰 오차를 보인 활강풍과 같은 주변 지형의 영향을 많이 받는 강풍 및 극지적 풍향 모의 오차를 줄이기 위해 실제지형에 가까운 고해상도 지형을 활용하고, 관측자료의 자료동화를 통한 초기장의 개선 등의 추가적인 노력이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 극지연구소 “장보고 과학기지 주변 상세 지형/지물을 고려한 3차원 바람장 수치적 재현 연구 (PE16250)”, “기후변화/기상재해 예측을 위한 극지

예측 시스템(KPOPS)의 개발 및 활용 연구(PE16100)와 한국연구재단 국가간협력기반조성사업(NRF-2014K1A3A1A47067498) 지원으로 수행하였습니다. 논문에서 사용된 수치모델 결과 및 가시화 자료는 한국극지데이터센터(Korea Polar Data Center, <http://kpsc.kopri.re.kr/highwindJBG/>)에서 확인할 수 있습니다.

REFERENCES

- 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.
- Grell, G. A., 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.
- 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, 1535 pp.
- 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.
- 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).
- Monin, A. S., and A. M. Obukhov, 1954: Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci.*, **24**, 163-187.
- Paolo, F. S., H. A. Fricker, and L. Padman, 2015: Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating. *Science*, **348**, 327-331.
- Parish, T. R., 1984: A numerical study of strong katabatic winds over Antarctica. *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 545-554.
- 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, 88 pp.
- 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.