

극 저기압(Polar Low) 통과에 의해 발생한 남극 세종기지 강풍 사례 모의 연구

권하택 · 박상종* · 이솔지 · 김성중 · 김백민

극지연구소 극지기후변화연구부

(접수일: 2016년 2월 17일, 수정일: 2016년 3월 15일, 게재확정일: 2016년 3월 28일)

A Numerical Simulation of Blizzard Caused by Polar Low at King Sejong Station, Antarctica

Hataek Kwon, Sang-Jong Park*, Solji Lee, Seong-Joong Kim, and Baek-Min Kim

Division of Polar Climate Change, Korea Polar Research Institute, Incheon, Korea

(Manuscript received 17 February 2016; revised 15 March 2016; accepted 28 March 2016)

Abstract Polar lows are intense mesoscale cyclones that mainly occur over the sea in polar regions. Owing to their small spatial scale of a diameter less than 1000 km, simulating polar lows is a challenging task. At King Sejong station in West Antarctica, polar lows are often observed. Despite the recent significant climatic changes observed over West Antarctica, adequate validation of regional simulations of extreme weather events such as polar lows are rare for this region. To address this gap, simulation results from a recent version of the Polar Weather Research and Forecasting model (Polar WRF) covering Antarctic Peninsula at a high horizontal resolution of 3 km are validated against near-surface meteorological observations. We selected a case of high wind speed event on 7 January 2013 recorded at Automatic Meteorological Observation Station (AMOS) in King Sejong station, Antarctica. It is revealed by in situ observations, numerical weather prediction, and reanalysis fields that the synoptic and mesoscale environment of the strong wind event was due to the passage of a strong mesoscale polar low of center pressure 950 hPa. Verifying model results from 3 km grid resolution simulation against AMOS observation showed that high skill in simulating wind speed and surface pressure with a bias of -1.1 m s^{-1} and -1.2 hPa , respectively. Our evaluation suggests that the Polar WRF can be used as a useful dynamic downscaling tool for the simulation of Antarctic weather systems and the near-surface meteorological instruments installed in King Sejong station can provide invaluable data for polar low studies over West Antarctica.

Key words: Polar WRF, West Antarctica, King Sejong station, polar low

1. 서 론

남극지역의 대기, 해양, 해빙, 생물 사이의 생지화학적 순환, 심해순환, 대기에 의한 에너지 수송 및 오염물질의 이송, 빙하의 증감과 같은 남극 특유의 변

동성은 지구환경 변화에 있어 매우 중요한 역할을 담당한다. 극지연구소는 1988년 2월 남극대륙 북쪽, 남 웨틀랜드 군도의 킹조지 섬 남쪽해안($62^{\circ}13'S$, $58^{\circ}47'W$)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 있다. 따라서, 연구를 위한

*Corresponding Author: Sang-Jong Park, Korea Polar Research Institute, 26 Songdomirae-ro, Yeosu-gu, Incheon 21990, Korea.
Phone: +82-32-760-5309, Fax: +82-32-760-5399
E-mail: sangjong@kopri.re.kr

의 활동 시 연구원들의 안전을 위해 세종기지 주변의 정확한 기상 정보는 필수적이라 할 수 있다. 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 있다(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 언급하였다(Lee et al., 1990). 특히 규모가 작고 세력이 강한 극 저기압(polar low) 통과 시 강한 강풍 사례를 유발하는 것으로 알려져 있다. 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 있다(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 온도차에 의한 경압 불안정으로 인해 극지역의 해빙과 해양의 경계에서 자주 발생하는 것으로 알려져 있다(Reed and Duncan, 1987). 극 저기압은 세종기지가 위치한 서남극에서 자주 발생하며(Turner et al., 1993), 강력한 강풍을 동반한 블리자드 발생의 주요 원인으로 지목되고 있다. 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 어렵다(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 있다. 또한 규모가 작은 극 저기압의 경우 지역규모 모델에 비해 상대적으로 낮은 해상도를 갖는 재분석 자료를 이용한 분석에는 한계가 있다. Zappa et al. (2014)는 유럽중기예보센터(European Center for Medium-range Weather Forecast)의 ERA interim 재분석 자료(수평격자간격 $\sim 80 \text{ km}$)와 현업예보자료(수평격자간격 $\sim 16\text{-}25 \text{ km}$)를 이용하여 극 저기압을 탐지하고, 관측과 비교하여 해상도가 높은 현업예보자료를 사용한 탐지 결과가 관측과 더욱 유사함을 보였다.

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) 극

저기압 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 극지 바람장과 기지의 자동기상관측 장비의 관측의 상호 검증(cross validation)을 수행하였다.

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 개선되었다(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 있다(Bromwich et al., 2009).

2장에서는 사례 모의에 앞서 남극 세종과학기지에서 장기간(1994~2013) 관측된 바람장의 기후학적 특성을 분석하고, 결과를 기술하였으며, 3장에서는 동일 자료를 이용하여 선정된 사례 및 종관 기상장에 대해 기술하였다. 4장에서는 사례 모의에 사용된 Polar WRF 모형의 물리과정 및 격자 체계를 포함한 실험구성에 대해 기술하였으며, 5장에서는 사례 모의결과와 관측 자료와의 비교 검증 결과를 기술하였다.

2. 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 분석하였다. 남극 세종과학기지에서의 기상관측은 지난 1988년 2월 17일부터 자동기상관측시스템(Automatic Meteorological Observation System; AMOS)을 이용하여 수행되어 오고 있다. 기상관측시스템은 세종기지 근처(남위 62도 13분 23.68초, 서경 58도 47분 21.31초; Fig. 1 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 있다. 각 센서로부터 10초 또는 1초 간격으로 측정된 자료는 10분 평균되어 자료집복기에 저장된다. 이후 2003년 12월부터 결측 방지를 위해 기존 기상관측시스템(AMOS-1이라 명함)과 약 5 m 거리에 백업용 관측시스템(AMOS-2)을 설치하여 운영하기 시작하였다. 또한

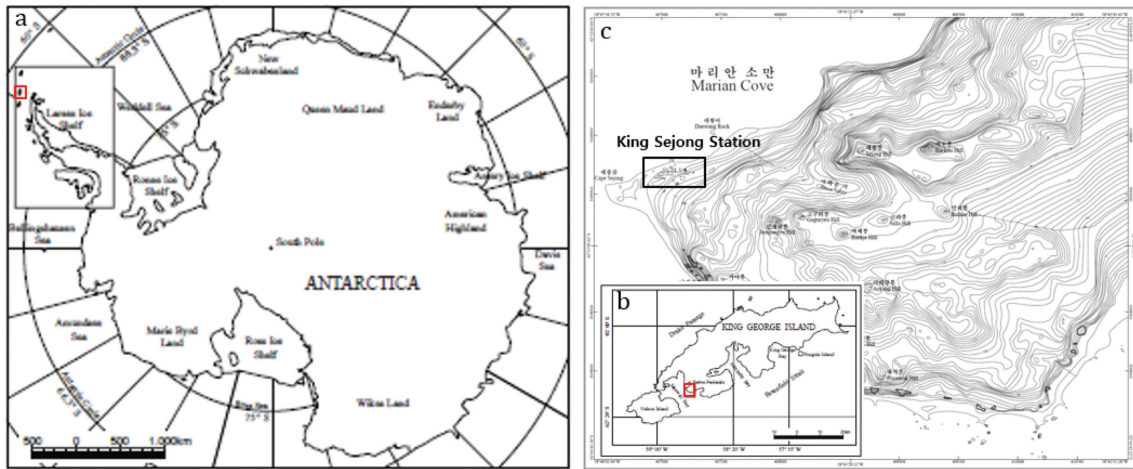


Fig. 1. Location of King Sejong station in King George Island. The inner red boxes in a) and b) indicate King George Island (further presented in b) and King Sejong station (further presented in c), respectively.

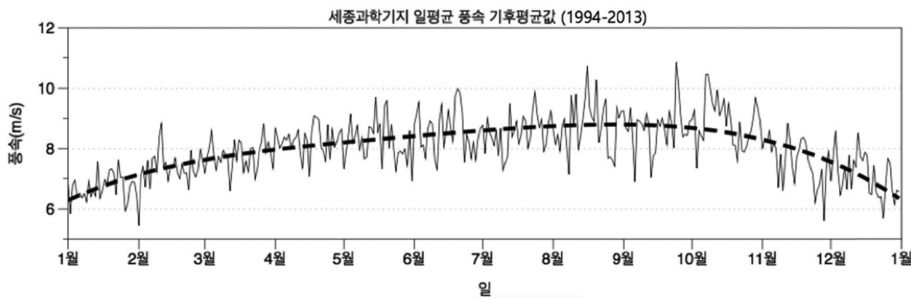


Fig. 2. Daily climatology of wind speed at King Sejong station for 1994-2013. Dashed line represents 5th degree polynomial fitting.

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 있다. 분석을 위해 AMOS-1을 기준으로 결측된 기간은 AMOS-2로 보완하여 1994년부터 2013년까지의 10분 간격의 자료를 구성하고, 이를 바탕으로 일평균을 구한후 20년의 기후값을 계산하였다. AMOS-3는 관측 지점이 상이하고 관측 기간이 짧아 본 연구에서 사용하지 않았다.

1994-2013년 기간의 일 평균 풍속의 기후 평균값(Fig. 2)을 살펴보면 남반구 늦겨울과 봄철에 해당하는 8-10월에 10 m s^{-1} 가 넘는 일 평균 풍속이 관측되며, 남반구 여름철에는 풍속이 다소 감소하여 $6\sim 8 \text{ m s}^{-1}$ 범위의 풍속이 분포하고 있음을 알 수 있다. 또한 계절에 따른 뚜렷한 변화가 나타나지 않는 특징을 보

이는데, 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 판단된다. 일 평균 풍속의 풍속 범위에 따른 관측빈도수를 살펴보면(Fig. 3), 일 평균 풍속의 기후 평균값에서 나타나지 않은 강한 풍속이 나타남을 확인할 수 있다. 일 평균 풍속의 기후값이 약 11 m s^{-1} 를 넘지 못하는데 반해, Fig. 3에서 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 있다. 이러한 강풍의 발생 빈도는 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 판단된다. 본 연구에

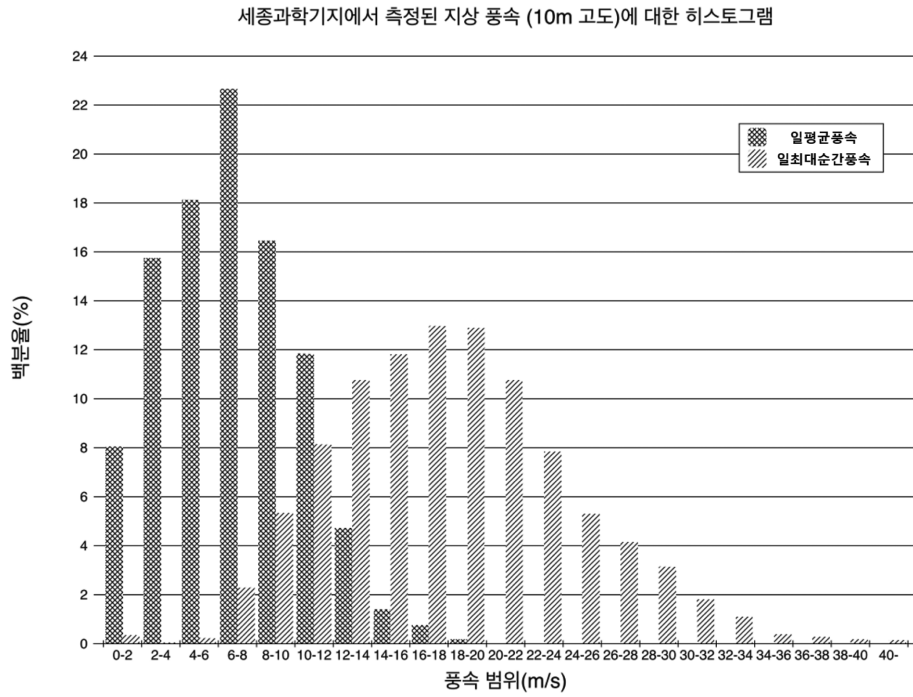


Fig. 3. Frequency distribution of daily averaged 10 m wind speed and daily maximum instantaneous 10 m wind speed for the period of 2005~2013.

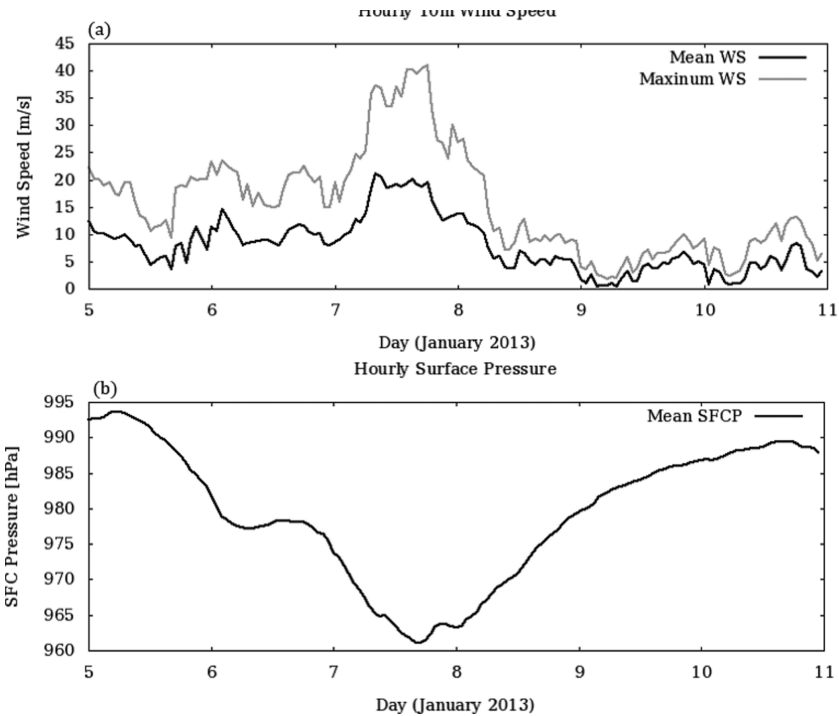


Fig. 4. Time series of a) hourly averaged 10m wind speed ($m s^{-1}$; black line) and maximum wind speed (gray line), and b) hourly averaged surface pressure (hPa) at AMOS station during 5~10 January 2013.

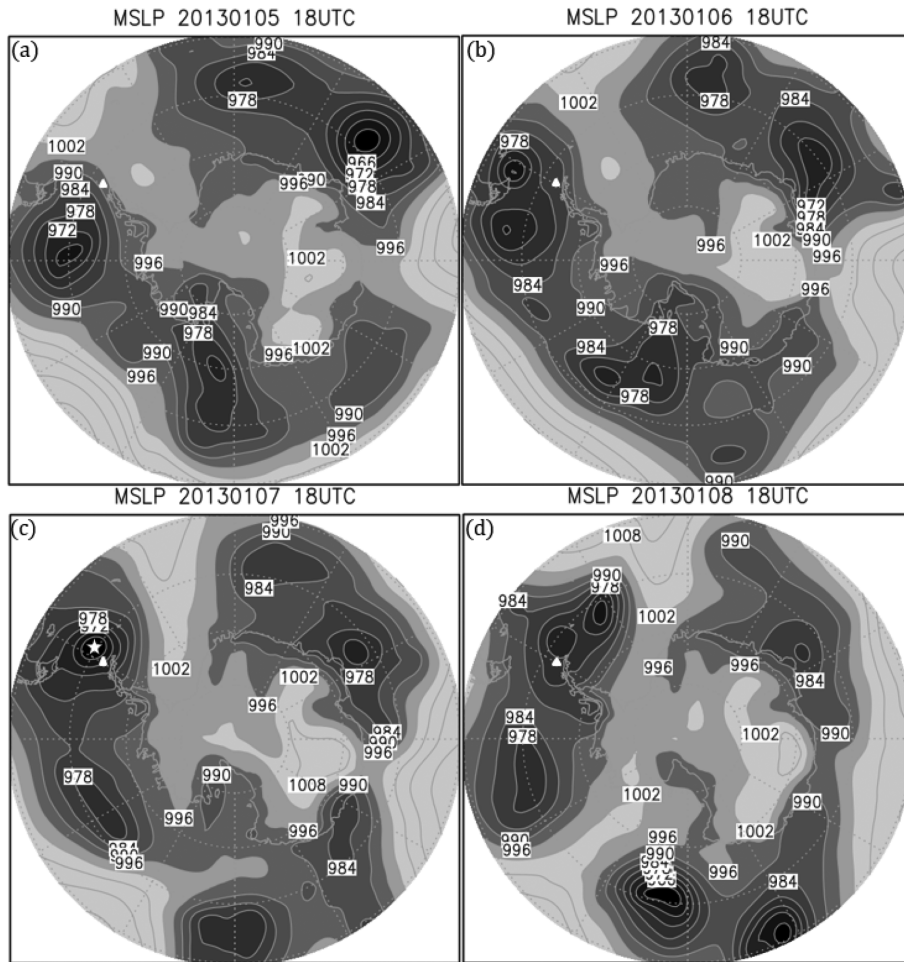


Fig. 5. Sea-level pressure at 1800 UTC a) 5, b) 6, c) 7, and d) 8 January 2013 from ERA-Interim reanalysis. Countour interval is 6 hPa. White star and triangle indicate center of the polar low and AMOS station at King Sejong station, respectively.

서 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 사례이다.

3. 사례 및 종관장 분석

중규모 모델을 이용한 세종기지 주변 강풍 사례 수치모의를 위해 2013년 1월 7일 극 저기압 통과에 의해 발생한 사례를 선정하였다. Figure 4는 선정한 사례 기간(2013년 1월 5~10일)의 세종기지 AMOS 장비에서 관측된 시간 평균 풍속과 최대풍속(Fig. 4a), 지면 기압(Fig. 4b)의 시계열을 나타낸다. 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 있다. 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 보인다. 이 최대 순간 풍속 값은 Fig. 3의 9년(2005~2013년)기간의 자료를 이용하여 최대 순간풍속 범위에 대한 발생 빈도수를 살펴본 분포도에서 약 1% 미만의 매우 강한 값을 확인할 수 있다. 동일한 기간에 지면 기압 시계열을 살펴보면 1월 5일 약 993 hPa의 값을 보이던 관측 값은 시간이 지남에 따라 감소하여 세종기지에 강풍이 관측되었던 1월 7일 0600 UTC에 약 960 hPa의 최저 값을 보인다. 지상 기압의 최저치가 관측된 시간대가 약 40 m s^{-1} 이상의 시간 최대 풍속 값이 관측된 시간대와 일치함을 확인할 수 있으며, 이를 통해 세종기지에서 관측된 강풍이 주변을 통과하는 저기압의

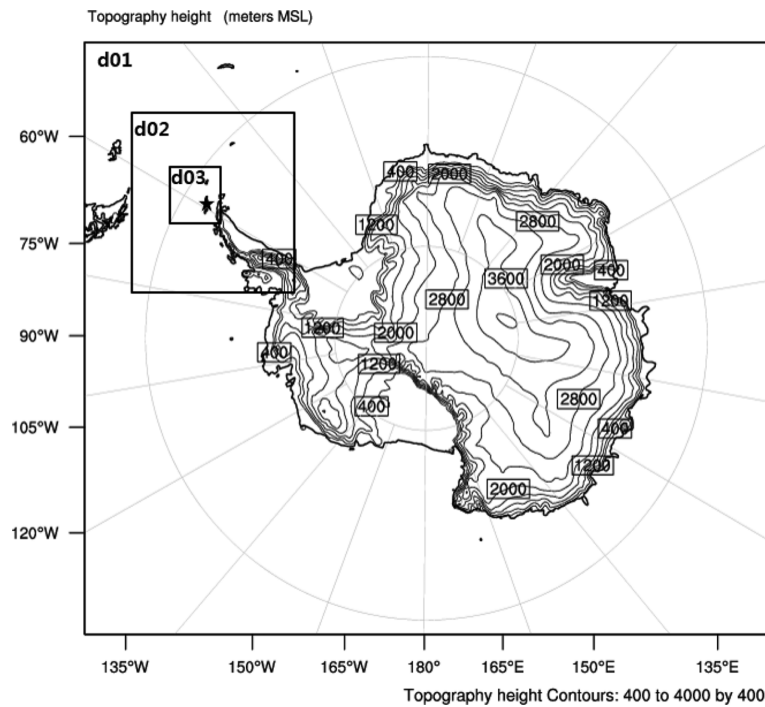


Fig. 6. Model domain with 27 km grid (d01) and terrain heights (contour). The inner boxes represent 9 km (d02) and 3 km (d03) domains, respectively.

영향을 받았음을 추측할 수 있다. 이 기간의 세종기지 주변을 통과한 저기압과 주변의 종관 기상장을 살펴보기 위해 유럽중기예보센터에서 제공하는 ERA-Interim 재분석 자료(수평격자간격~80 km)의 해면 기압(mean sea-level pressure)을 살펴보았다. Figure 5는 1월 5일부터 8일 기간 동안 1800 UTC의 해면 기압의 분포를 나타낸다. 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 있다. 이로 인해 7일 세종기지에서 관측된 강풍 유발에 영향을 준 것으로 추측된다. 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 있다. 8일 1800 UTC 이후에는 극저기압의 형태가 사라지며 동쪽으로 많이 이동한 것을 볼 수 있다.

4. 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 구성하였다(Fig. 6). 3개의 모델 수행 영역은 측면경계에서 기상변수의 정보를 서로 전달하는 양방향 등지체계(two-way nesting)로 구성하였으며, 각 실험영역의 연직 층 수는 44층으로, 모형 상한은 10 hPa로 설정하였다. 모델의 초기 및 경계 자료로 중기유럽예보센터의 ERA Interim(수평해상도~0.75°) 자료를 사용하였다.

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 설계 하였다. 선정된 사례 기간(2013년 1월 5일 0000 UTC~11일 0000 UTC)의 수치 모의실험을 위해 매일 0000 UTC에 모델을 초기화하여 48시간 모델 적분을 수행하였으며, 스피업(spun-up) 시간을 고려하여 초기 24시간은 제외하고 나머지 24시간 예측 자료만을 분석에 활용하였다. 실험에서 사용된 물리과정은 다음과 같다. 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 선택하였다. 행정

Table 1. Summary of model configuration.

	Domain 1	Domain 2	Domain 3
Horizontal grid	281 × 242	202 × 220	187 × 205
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	2013.01.05. 00 UTC~11 00 UTC		
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 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	×	×

경계층 모수화 방법은 Mellor-Yamada-Janjic TKE (Janjic, 1994) 방안을, 지표면 물리방안(Surface layer scheme)으로는 Monin-Obukhov (Monin and Obukhov, 1954) 방안을 적용하였다. 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 설정하였다. 모델 구성 및 물리 모수화 방안에 대한 상세한 정보는 Table 1과 2에 각각 요약하여 기술하였다.

5. 실험결과

선택한 극 저기압 사례의 모의 성능을 살펴보기 위해 먼저 27 km 격자 실험의 모의결과를 살펴보았다. Figure 7은 최대 풍속이 관측된 1월 7일의 6시간 간격의 해면 기압을 나타낸다. 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 있다. 사례

기간 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 있다. 이 시기 세종과학 기지가 위치한 킹 조지섬 주변에 더욱 조밀해진 등압선 분포를 볼 수 있으며, 이러한 강해진 주변의 기압경도에 의해 세종기지 주변에 강풍이 유발된 것으로 보인다. 이 시기 최저 중심 기압은 1200 UTC에 약 955 hPa을 보인다. 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 있다.

세종기지 주변의 상세 바람 장 및 기압계 변화 모의 성능을 살펴보기 위해 3 km 격자 규모 실험 결과를 살펴보았다. Figure 8은 최대 강풍이 관측된 1월 7일 3 km 해상도의 모델에서 모의한 6시간 간격의 바람 장과 해면 기압을 나타낸다. 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 있다. 시간이

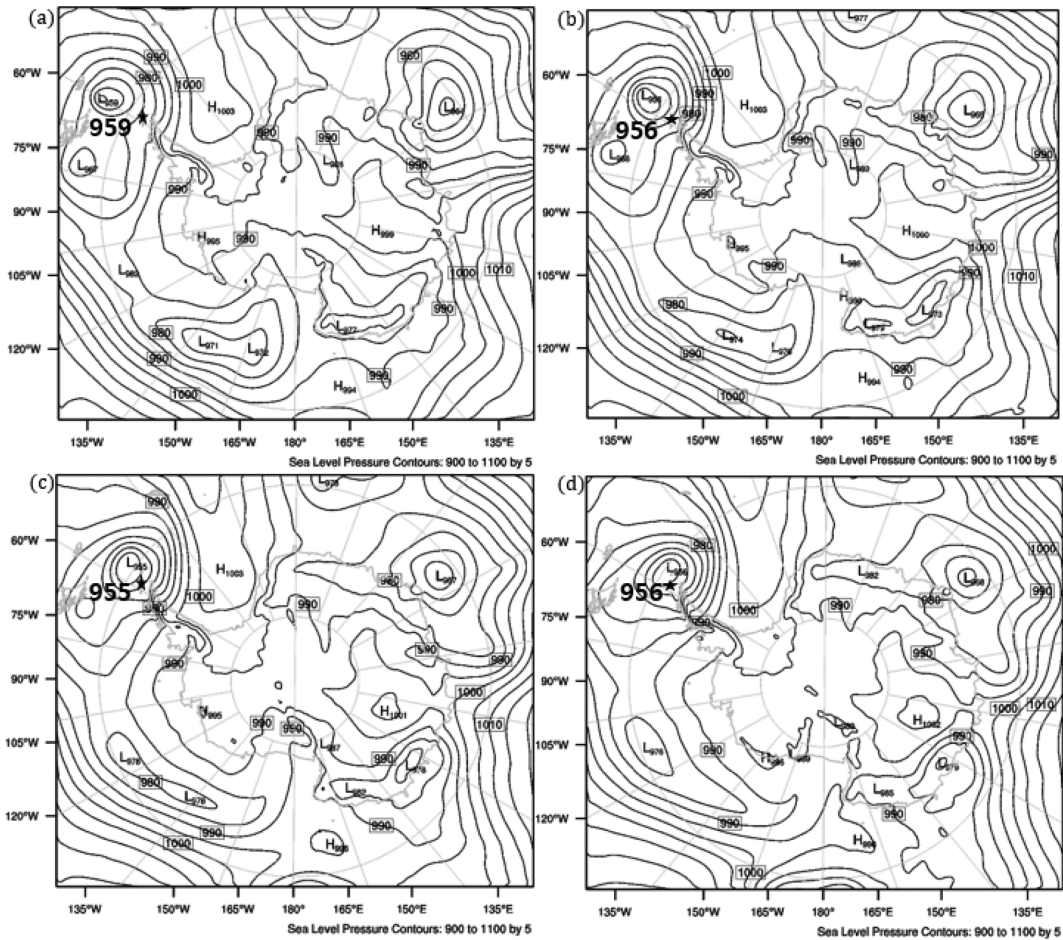


Fig. 7. Sea-level pressure at a) 0000, b) 0600, c) 1200, and d) 1800 UTC 07 January 2013 in domain 1 (27 km resolution) from Polar WRF simulation. Countour interval is 10 hPa.

지남에 따라 극 저기압이 발달하며 남동진하여 세종기지 주변의 기압이 낮아지고 주변의 풍속이 증가함을 볼 수 있다. 0600 UTC에는 세종기지 주변에 약 970 hPa의 등압선이 위치하며, 조밀해진 등압선 분포를 보이며, 남동풍보다 남풍의 영향이 강해졌음을 알 수 있다. 이러한 경향은 1200 UTC에 더욱 강해지며 관측에서 약 20 m s^{-1} 의 시간 평균 풍속 값을 보였던 1800 UTC까지 지속됨을 알 수 있다. 1200 UTC에는 세종기지가 위치한 킹 조지 섬 주변에 964 hPa의 등압선에 걸쳐 있으며, 약 20 m s^{-1} 의 강한 풍속 대를 보인다. 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 있다. 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 멀어진 것을 볼 수 있다. 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 조지 섬 부근으로 이동하여, 1월 7일 강한 세력을 유지하며 그 주변에 머물면서 사례기간에 관측된 강풍을 유발한 것임을 확인하였다. 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 풍하층에 발생한 것으로 추정된다. 정확한 발생 원인은 향후 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

관측자료를 이용한 모델 모의성능 검증에 위해 관측에서 제공된 10분 평균 풍속 값을 시간 평균 자료

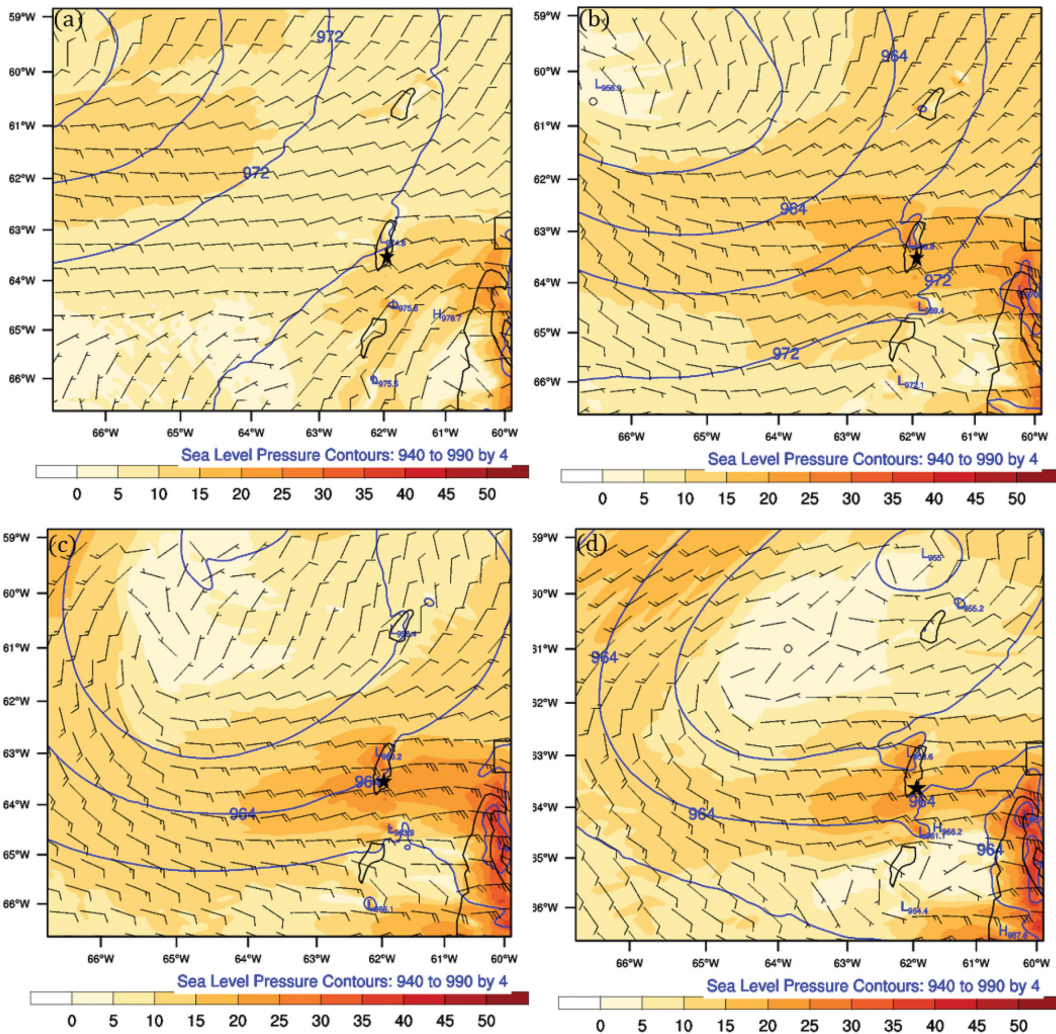


Fig. 8. Sea-level pressure (contour) and wind (bar) at a) 0000, b) 0600, c) 1200, and d) 1800 UTC 7 January 2013 from Polar WRF simulation with 3 km grid resolution. Countour interval is 4 hPa. Shading represents wind speed ($m s^{-1}$).

로 처리하였으며, 10분 평균 풍속 자료 중 최대 값을 시간 최대 풍속 값으로 처리하여 1시간 간격의 모델 결과와 비교, 분석하였다. 재분석 자료와의 차이를 살펴보기 위해 6시간 간격의 재분석 자료를 사용하였다. Figure 9는 사례 기간 동안 세종과학기지에서 관측된 풍속(Fig. 9a)과 지면 기압(Fig. 9b), 이에 해당하는 3 km 격자 실험의 모델 모의결과와 재분석 자료의 시계열을 나타낸다. 사례기간 동안 세 자료의 시간에 따른 풍속의 변화를 살펴보면 대체로 유사한 풍속의 증감 경향을 보인다. 하지만 모델의 모의 결과가 재분석자료에 비해 관측과 더 유사한 풍속 변동성을 나타낸다. 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 있다. 동일한 기간 중 최대 순간 풍속(약 $40 m s^{-1}$)이 관측된 7일 1800 UTC에 관측된 최저 지면기압을 모델 모의결과와 비교해 보면 관측 값(961.12 hPa)에 비해 약 2.2 hPa 높은 값을 보이며 관측과 매우 유사함을 알 수 있다. 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 $6 m s^{-1}$ 크게 모의되어 이후 1200 UTC까지 감소하는 풍속 값이 관측에 비해 큰 값을 보인다. 관측과 6시간 간

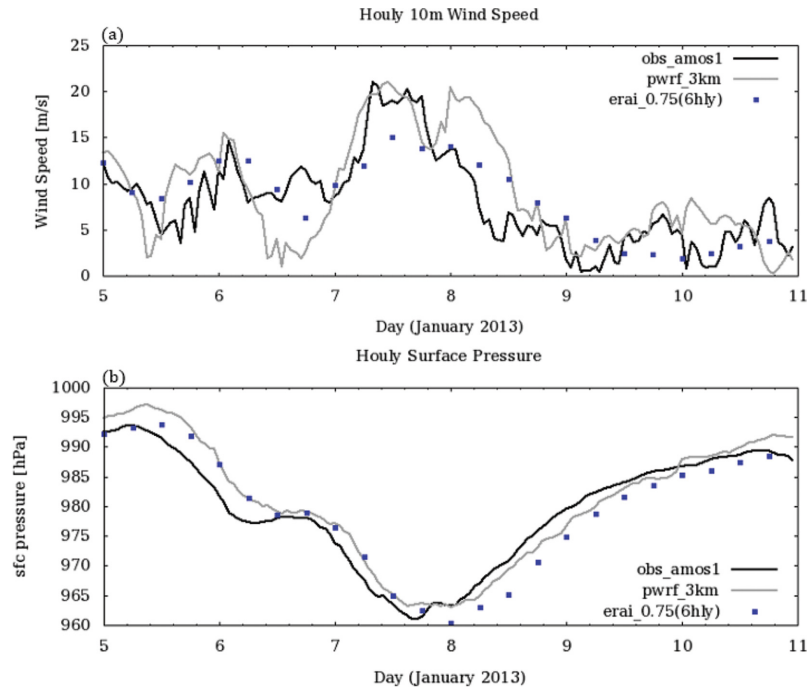


Fig. 9. Time-series of hourly a) 10 m wind speed ($m s^{-1}$) and b) surface pressure (hPa) from AMOS (black), polar WRF (gray), and ERA-Interim reanalysis (filled square) obtained from the nearest grid point during the 5~11 January 2013.

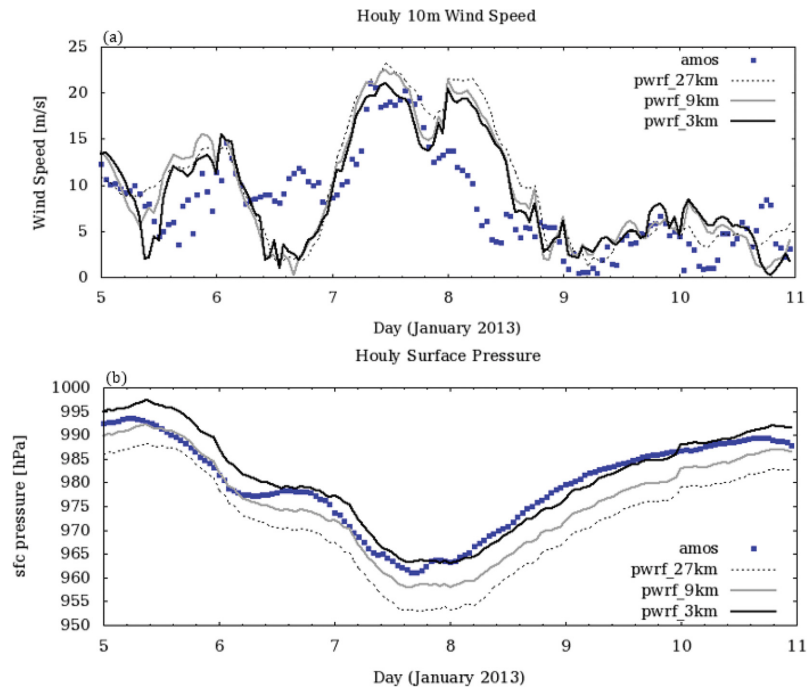


Fig. 10. Same as in Fig. 9, except for time series from AMOS (filled square) and polar WRF simulation with 27 (thin dotted line), 9 (thick gray line), 3 km (thick black line) grid resolutions.

격의 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 보인다. 이 결과로부터, 3 km의 상세 격자를 이용한 중규모 모델 실험에서의 상세 지형, 물리 및 역학과정이 극저기압의 구조를 더욱 잘 모의하여 초기조건으로 사용된 재분석 자료의 바람장을 강화시켰음을 확인하였다. 또한, 모델이 재현해 낸 바람장이 관측 결과와 대부분의 시간대에 있어 유사함으로 볼때, 초기화 이후 24시간을 스핀 업 기간으로 설정한 실험 방법이 적절하였다고 판단된다. 이 결과는 향후 극지역 지역규모 모델링 연구에 있어 참고할만한 정보를 제공한다.

Figure 10은 사례 기간에 대한 3개의 다른 격자 실험에서 모의된 세종기지 관측 지점의 풍속과 지상 기압의 시계열을 나타낸다. 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 있다. 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 있다. 모형 해상도에 따른 풍속 관측 값과의 편차(Fig. 10a)도 27, 9, 3 km 격자 실험에서 각각 -1.8 , -1.4 , -1.1 m s^{-1} 으로 작은 차이를 보임을 알 수 있다.

지면기압 모의 결과에서도 풍속 결과와 비슷한 경향을 확인할 수 있다. 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 있다. 사례 기간에 대한 지면 기압 관측 값과 각 격자 규모실험 결과의 편차는 각각 7 (27 km), 4 (9 km), -1.2 (3 km) hPa의 값을 보이며, 고해상도 실험이 극 저기압의 강도를 정확하게 모의하는데 도움이 되는 것으로 보인다.

6. 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, 극저기압 통과 사례 상세 분석을 통해 세종기지에서 관측된 강풍의 주요 원인을 분석하였다. 또한 모델 모의결과를 재분석 자료와 세종기지에서 관측된 기상관측자료와 비교함으로써 상호 검증을 수행하였다.

Polar WRF를 이용한 중규모 모의실험에 앞서 선정된 강풍사례의 기후학적 특성을 살펴보기 위해 세종

기지에서 관측된 21년(1994~2013년) 기간의 풍속 자료를 분석하였다. 1994~2013년의 일 평균 풍속장의 기후 평균값 분석을 통해 세종기지의 기후학적 특성상 계절에 따른 풍속의 변화가 크지 않음을 확인하였다. 시간 평균 풍속의 기후학적 특성에서는 일 평균 풍속 분석에서 나타나지 않은 강한 풍속 관측을 확인할 수 있었으며, 풍속 범위에 따른 관측빈도수 히스토그램에서 전체의 3% 미만에 해당하는 구간에 14 m s^{-1} 를 초과하는 강풍이 존재하였으며 순간 최대풍속의 경우, 전체의 4% 미만의 구간에서 30 m s^{-1} 를 풍속 관측 값을 보였다.

세종기지 인근지역을 통과한 극저기압 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 확인하였다. 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 보였다. 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 확인하였다. 지면기압의 경우도 큰 차이는 없으나 관측과 비교해 3 km 격자에서 모의된 기압의 변화 경향 및 값이 관측 시계열과 더욱 유사하게 모의 하였음을 확인할 수 있었다.

이상의 결과들을 종합해 볼때, Polar WRF를 활용한 고해상도 중규모 모델 실험은 남극 세종과학기지에서의 극한 강풍 사례의 주원인인 극 저기압을 모델링하고 분석하는데 있어 매우 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다. 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 판단된다.

감사의 글

이 연구는 극지연구소 “장보고 과학기지 주변 상세 지형/지물을 고려한 3차원 바람장 수치적 재현 연구(PE16250)”와 “과거 현재의 극지기후관측과 재현을 통한 기후변화 메커니즘 규명 연구(PE16010)”의 지원으로 수행하였습니다. 논문을 심사해 주시고 많은 조언을 해주신 심사위원님들과 편집위원님께 감사드립니다. 논문에서 사용된 수치모델결과 및 가시화 자료는 한국극지데이터센터(Korea Polar Data Center, <http://kpd.c.kopri.re.kr/blizzardKSJ/>)에서 확인할 수 있습니다.

REFERENCES

- 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.
- _____, 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Kolstad, E. W., 2011: A global climatology of favourable conditions for polar lows. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 1749-1761.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.