

영동 대설 사례를 대상으로 한 WRF Simulation의 Nudging 방법에 따른 민감도 연구

최지원 · 이재규*

강릉원주대학교 대기환경과학과

(접수일: 2014년 11월 19일, 수정일: 2014년 12월 19일, 게재확정일: 2014년 12월 29일)

A Sensitivity Study of WRF Model Simulations to Nudging Methods for A Yeongdong Heavy Snowfall Event

Ji Won Choi and Jae Gyoo Lee*

Department of Atmospheric and Environmental Sciences Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Korea

(Manuscript received 19 November 2014; revised 19 December 2014; accepted 29 December 2014)

Abstract To investigate the influences of the observational nudging and the analysis nudging on the WRF simulation for the heavy snowfall event in Yeongdong area on 26 February 2012, the sensitivity experiments in relation to nudging effects were conducted. We initially set the magnitude of nudging coefficient of $6.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ to apply to the analysis nudging experiments and observational experiments. To select the optimized options for the observational nudging, the radius influence experiment was carried out with radii ranging from 10 to 25 km at 5 km intervals. Among the observational nudging experiments, the experiment, which was conducted with the option of the radius influence of 15 km and that of the nudging coefficient of $6.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (ONG exp.), showed a best result. As giving the nudging effect only directly on D1 and D2 brought about a better result for the analysis nudging, we set the analysis nudging experiment as above (ANG exp.). We compared and analyzed the results from the control experiment, ONG experiment, and ANG experiment to reveal nudging effects. It was found that the control experiment brought about a result that it overestimated its precipitation in comparison with the observation and failed to properly simulate the time zone of rainfall concentration. When either of the two nudging (observational and analysis nudging) was applied to the data assimilation, it brought about a better result than the control experiment. Especially the observational nudging led to a meaningful result for the wind field, while the analysis nudging had the best result for the precipitation distribution among the experiments.

Key words: WRF simulation, sensitivity, observational nudging, analysis nudging, heavy snowfall

1. 서 론

수치 모델의 예측 정확도를 향상시키기 위해 다양

한 수치 모의 기법들에 관한 연구들이 진행되고 있으며, 그 중에서도 고해상도의 다양한 관측 자료를 이용하여 최적의 모델 초기장을 생성하는 자료동화 방법들에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다(Stauffer and Seaman, 1990, 1991; Choi et al., 2002; Lee, 2006; Yu et al., 2007; Choi et al., 2009; Lee et al., 2009; Choi et al., 2013). 자료동화 방법은 그 종류가 다양하고 각 시스템과 사용되는 관측 자료에 따라 그 결과의

*Corresponding Author: Jae Gyoo Lee, Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung 210-702, Korea.
Phone : +82-33-643-2322, Fax : +82-33-643-2320
E-mail : ljgyoo@gwnu.ac.kr

차이가 있으며, 최근에는 중규모 모델에 많이 적용되고 있는 FDDA (Four Dimensional Data Assimilation)를 이용한 실험들이 증가하는 추세이다. FDDA 과정은 향상된 경계 조건을 만들고, 역학적 초기화를 사용하여 초기 조건에 대한 잡음을 제거하여 초기장을 완화시킴으로써, 모델 초기장을 개선하여 spin-up 현상을 완화시킬 수 있다(Ryu and Cho, 2010). WRF (Weather Research and Forecasting) 모델의 FDDA인 너징(Nudging)은 관측 너징(Observational Nudging)과 분석 너징(Analysis Nudging)으로 나눌 수 있다. 그 중 관측 너징은 시간창(time window) 내에서 각 격자점을 중심으로 영향반경(radius of influence) 내에 있는 관측 지점들과 그 격자점 간의 차이값을 거리에 따라 가중치를 두어 평균값을 계산하고, 이 값을 해당 격자점으로 내삽하는 방법이다. 분석 너징은 기존 배경장의 격자점과 관측 간의 차이를 구하여 새로운 초기장의 격자점으로 내삽하는 방법으로, 대기 경계층 및 원하는 층 이상으로 효과를 주는 공간 분석 너징(3D Analysis Nudging)과 모델 최하층 이하의 약 10 m에 효과를 주는 지상 분석 너징(Surface Analysis Nudging)으로 구분할 수 있다.

Choi et al. (2002)은 AWS (Automatic Weather System) 자료를 사용하여 공간 분석 너징과 지상 분석 너징을 함께 적용한 경우, 단시간의 예측력을 크게 향상시켰고, 특히 지상 기온과 풍향에 가장 큰 영향을 준다고 밝혔다. Yu et al. (2007)은 여름철 대류 현상에 대해 3DVAR (Three Dimensional Variational data Assimilation), 관측 너징, 그리고 분석 너징을 적용한 실험들을 비교·분석한 결과, 세 자료동화 방법들이 0~12시간 예측에 있어 악천후의 발달 및 움직임의 기본적인 특징을 잘 예측하였고, 특히 관측 너징은 넓은 격자나 미세 격자에 상관없이 모든 격자에 자료동화가 잘 수행되며 관측과 모델 방정식 간의 밀접한 상호작용을 가지는 이점이 있다고 밝혔다. Choi et al. (2009)은 복잡한 지형을 대상으로 관측 너징을 적용한 자료동화 실험에서 너징 계수 및 영향반경의 크기 변화에 따라 수치 모의 결과에 미치는 영향에 대해 연구한 결과, 종관 강제력이 큰 사례(15 m s^{-1} 의 SW풍의 영향이 지속적 나타남)에서는 영향 반경이 큰 경우(10 km)와 계수 크기가 작은 경우($0.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)일 때 가장 유의한 결과를 보인 반면, 종관 강제력이 약한 사례($6\sim 7 \text{ m s}^{-1}$ 의 WSW풍이 우세함)에서는 영향 반경이 작은 경우(4 km)와 계수 크기가 큰 경우($6.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$)일 때 유의한 결과를 보였다고 밝혔다. Lee et al. (2009)은 국지 바람장에 대한 자료동화 연구에서 관측 너징을 적용한 동화의 경우, 관측과 유사한 모의 결과를 얻기 위해 영향반경은 종관장의 상태보다는 지역적 특성의 영향을 받고, 동화 계수

의 경우에는 지역적 특성보다는 종관장의 상태가 주요한 요인임을 보였다. Deng et al. (2009)은 CAPTEX (Cross-Appalachian Tracer Experiment)-83 사례를 대상으로 4개의 실험(기준 실험, 관측 너징 실험, 공간 분석 너징 실험, 그리고 관측 너징과 공간 분석 너징을 함께 적용한 실험)을 수행하여 정성적·정량적 검증을 한 결과, 모든 도메인에서 관측 너징과 분석 너징을 함께 적용한 실험이 가장 관측과 유사한 모의 결과를 보였다고 하였다. Yang (2012)은 강원 지역의 호우 사례를 대상으로 기준 실험과 관측 너징 실험, 지상 분석 너징 실험을 수행하여 비교·분석한 결과, 하층의 영향을 많이 받는 종관구조의 호우 사례는 지상 분석 너징을, 국지적인 호우 사례에서는 관측 너징을 적용한 실험의 결과가 관측과 더 유사함을 보였다.

이러한 수치 모델의 예측 정확도를 높이기 위해 수행된 자료동화 기법들에 관한 국내 연구들은 주로 수도권 지역 또는 남부 지역을 대상으로 연구되었다 (eg., Choi et al., 2002; Choi et al., 2009; Lee et al., 2009; Yoon, 2010). 지형적으로 복잡한 영동 지역을 대상으로 자료동화를 수행한 연구는 Yang (2012)과 Choi et al. (2013)의 연구 외에는 찾아보기 어려우며, 더구나 기상재해를 빈번히 일으키는 영동 지역의 대설 사례를 대상으로 너징을 적용한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 지형적으로 복잡한 영동 지역에서 발생한 대설 사례를 대상으로, 국지적으로 관측 자료의 효과를 볼 수 있는 관측 너징과 도메인 전체적으로 관측 자료의 효과를 볼 수 있는 분석 너징을 WRF 수치 모델에 적용하여, 국지성이 강한 영동 지역에서의 바람 및 강수에 대한 수치 모의 결과를 개선하고자 한다. 따라서 영동 지역에 최적화된 옵션을 선정하기 위해, 관측 너징은 영향 반경에 대한, 그리고 분석 너징은 도메인 영역에 대한 민감도 실험을 각각 수행하고자 한다. 이러한 민감도 실험으로부터 선정된 너징 옵션을 적용한 관측 너징 실험과 분석 너징 실험, 그리고 자료동화를 적용하지 않은 기준 실험(이하 CNTL 실험)을 관측(강수량과 바람)과 비교·분석하여, 너징 실험들이 CNTL 실험보다 얼마나 개선된 결과를 보이는지 살펴보고, 어느 너징 기법이 관측된 강수 및 바람과 보다 유사한 결과를 보이는지 알아보하고자 한다. 이 연구를 위하여 cP 고기압 확장에 동반된 영동 지역 대설 사례(2012년 2월 26일)를 선정하였는데, 그 이유는 영동 내륙 지역의 북서 계열의 바람과 동해상으로부터 유입된 북동 계열의 바람이 수렴하는 영동 해안 지역이 산악 지역인 대관령보다 더 많은 강수가 관측되어 바람과 강수의 국지성이 뚜렷하게 나타났기 때문이다.

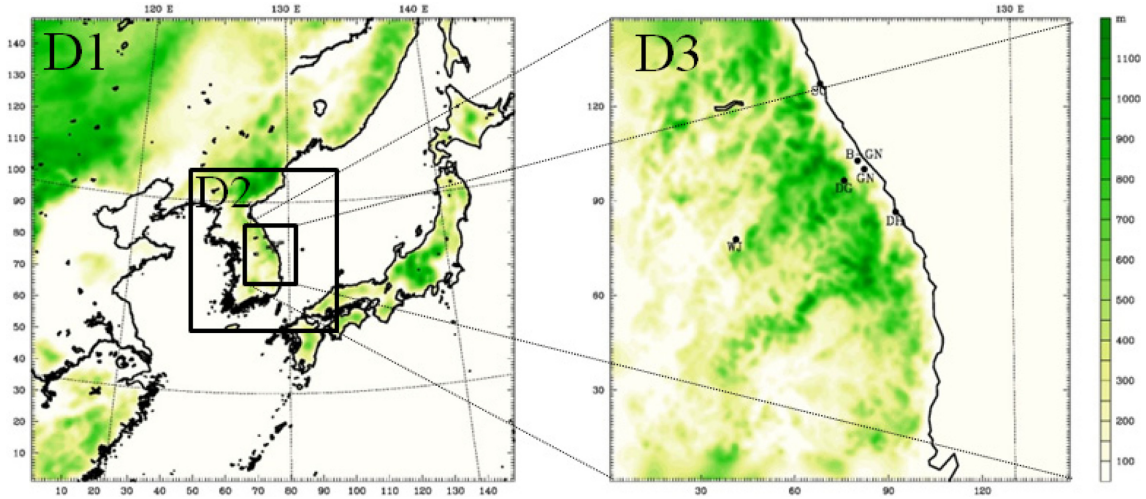


Fig. 1. Model domains for Domain 1 (D1), Domain 2 (D2) and Domain 3 (D3). Topography is represented with shading based on scale right of D3. Hereafter, SC, B-GN, GN, DG, DH and WJ in all the figures stand for Sokcho, Bukgangneung, Gangneung, Daegwallyeong, Donghae and Wonju, respectively.

2. 수치 실험 설계와 연구방법

2.1 WRF 수치 실험 설계

본 연구에서 사용한 모델은 WRF 3.2버전의 중규모 수치 모델이다(Skamarock et al., 2008). 수치 모의 적분 시간은 2012년 2월 26일 0300 LST부터 27일 0300 LST까지의 24시간이며, 양방향 동지화 기법(Two-way interaction)을 적용하였다. 분석 지역은 강릉 지역(129.0°E, 37.5°N)을 중심으로 아시아와 한반도, 그리고 영동 지역에 중점을 두어 3개의 영역으로 설정하였다(Fig. 1). 각 도메인(Domain) 영역의 수평 격자 간격은 도메인 1 (이하 D1)이 18 km, 도메인 2 (이하 D2)가 6 km, 도메인 3 (이하 D3)이 2 km이다. 복사 과정에서 장파 복사 기법과 단파 복사 기법은 각각 RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) scheme (Mlawer et al., 1997)과 Dudhia scheme (Dudhia, 1989)을 사용하였다. 적운 모수화 과정은 Shallow convection을 포함하는 Kain-Fritsch (new-eta) scheme (Kain, 2004)을 사용하였으며, D1과 D2에만 적용하였다. 그리고 구름미세물리 모수화 과정은 WSM (WRF Single Momentum) 6-Class graupel Scheme (Hong and Lim, 2006)을 적용하였고, 행성 경계층(Planetary Boundary Layer, PBL)은 YSU (YonSei University) PBL Scheme (Hong et al., 2006)을 사용하였다.

초기 입력 자료는 NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Centers for Atmospheric Research)에서 제공하는 수평 간격 1.0° × 1.0°인 GDAS (Global Data Assimilation System) FNL

(Final analyses) 자료를 사용한다. 관측 너징과 분석 너징에 사용된 자료는 영동 지역의 4개 지점(속초, 북강릉, 대관령, 그리고 동해)의 ASOS (Automated Surface Observing System) 자료와 1개 지점(속초)의 라디오존데 자료이다. Figure 2는 자료동화를 위한 자료 입력 및 예측 시스템의 도식을 나타낸 것이다. 이 그림을 보면, 1시간 간격의 지상 자료(ASOS)와 12시간 간격의 상층 자료(라디오존데)를 함께 사용하여 1시간마다 너징을 수행하는 너징 시스템을 보여준다. 여기서 ASOS 자료는 관측 지점의 위경도, 고도, 기온, 상대 습도, 기압, 바람 등의 자료이며, 라디오존데 자료는 고도에 따른 기압, 기온, 습도, 바람 등의 자료이다.

2.2 연구 방법

관측 자료와 재분석 자료를 결합시켜 WRF 수치 모델에 적용시키기 위해서 객관 분석 프로그램인 OBSGRID를 이용하였다. 이 프로그램은 WPS (WRF Preprocessing System)의 METGRID 과정으로부터 얻어진 분석장과 고해상도의 관측 자료를 통합하여 너징에 사용되는 자료들을 생성한다. 여기서 생성된 자료들을 WRF REAL 과정의 입력 자료로 사용하여 1시간마다 너징을 적용하여 24시간 수치 모의를 수행한다.

본 연구에서는 2012년 2월 26일에 발생한 영동 지역의 대설 사례를 대상으로 최적화된 옵션을 적용한 관측 너징 실험과 분석 너징 실험, 그리고 CNTL 실험을 각각 수행하여 상호 비교·분석하고자 한다. 관측을 내삽할 때 사용되는 너징 계수는 계산상의 안정성을 고려하여 설정해야 한다. 너징 계수는 값이 너

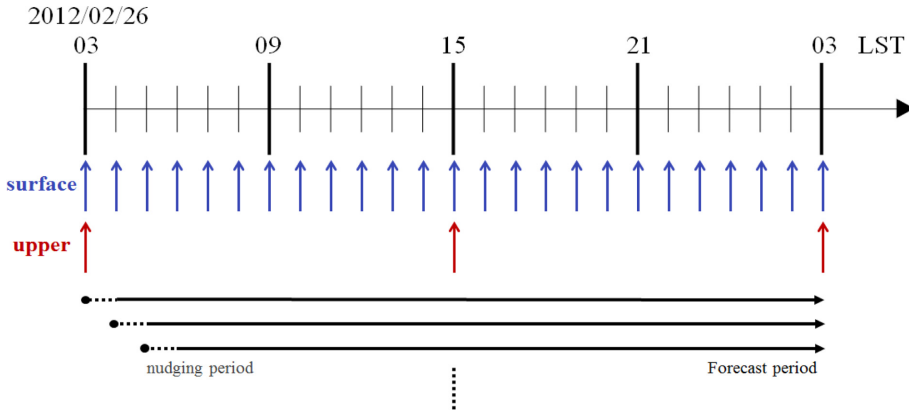


Fig. 2. The setup for FDDA runs is shown above. Surface data (ASOS) is available every 1 hr. Upper data (radiosonde) is available every 12 hrs. Nudging experiments is cycled from 0300 LST 26 to 0300 LST 27 February 2012 with a 1 hr interval.

무 크면 관측값이 모델 내에 너무 강하게 내삽되어 모델의 불균형을 초래할 수 있으며, 반대로 계수의 값이 너무 작으면 모델 상태의 발달에 아주 작은 영향을 미치게 되어, 기상장을 효과적으로 개선하기 어렵다(Stauffer and Seaman, 1990). Choi et al. (2009)는 종관 강제력이 약한 사례의 경우, 너징 계수의 크기를 $6.0 \times 10^{-4} s^{-1}$ 으로 설정하여 자료동화를 하였을 때에 유의한 결과를 얻을 수 있다고 하였다. Kumar et al. (2014)은 30 km의 수평 격자 간격(120×90)으로 설정한 도메인 영역에 $6.0 \times 10^{-4} s^{-1}$ 의 계수를 적용하여 자료동화를 수행하였으며, 또한, Eiserloh (2014)은 모도메인(parent domain)을 12 km의 수평 격자 간격(121×121)으로, 동지 격자를 3 km (221×273)로 설정한 도메인 영역에 너징을 적용할 때, $6.0 \times 10^{-4} s^{-1}$ 의 계수를 적용하여 자료동화 실험을 수행하였다. 따라서 이 연구를 위해 관측 너징과 분석 너징에 사용되는 너징 계수의 값은 이 대설 사례의 종관장과 수평 격자를 고려하여 $6.0 \times 10^{-4} s^{-1}$ 으로 설정하였다.

각 너징 실험에 대해 최적화된 옵션을 선정하기 위한 실험은 다음과 같이 수행한다. 먼저 관측 너징의 경우, 각 격자점과 그 격자점을 중심으로 영향반경 내에 있는 관측 지점들간의 차이값을 거리에 따라 가중치를 두어 평균값을 계산하여, 그 값을 해당 격자점으로 내삽하는 방법으로, 자료동화에 사용된 관측 자료가 적절하게 영향을 미치는 영향반경을 설정할 필요가 있다. 그러므로 자료동화에 사용된 관측 지점간의 실제 거리를 고려하여 영향 반경을 10 km부터 5 km간격으로 25 km까지 설정하여 실험(이하 영향반경 실험)을 수행한다.

분석 너징의 경우, 너징을 적용하고자 하는 도메인 영역에 따라 너징 효과가 미치는 강도가 다르게 나타난다. 즉, D1에만 너징을 적용하는 경우, D1과 D2에

만 너징을 적용한 경우, 그리고 D1에서 D3 영역까지 모두 너징 효과를 준 경우, 각 도메인에 미치는 너징 효과의 강도가 각각 다르다. D1에만 너징을 적용한 경우, 도메인끼리 서로 상호작용(양방향 등지화 기법)하기 때문에 D1에 적용된 너징 효과가 D2와 D3에 간접적으로 영향을 미치고, D1과 D2에만 너징을 적용한 경우에는 D1과 D2에는 직접적인 너징 효과가 적용되고 D3에는 D1과 D2로부터 간접적인 영향을 받는다. D1에서 D3 영역까지 모두 너징을 적용한 경우에는 D1, D2, 그리고 D3 모두에 직접적으로 너징 효과가 나타난다. 따라서 분석 너징의 경우, 너징 효과가 가장 효율적으로 반영될 수 있는 도메인 영역을 선정하고자 하는 실험(이하 도메인 실험)을 수행하고자 한다. D1에만 너징 효과를 준 경우에 D2와 D3가 받는 너징 효과가 약해지므로 여기서는 D1에만 너징 효과를 준 실험은 수행하지 않고, D1과 D2에만 너징 효과를 준 실험과 모든 도메인 영역(D1에서 D3까지)에 너징 효과를 준 실험만 수행하고자 한다. 이러한 실험 결과들의 시간당 강수량 및 풍향에 대한 시계열, 주요 지점의 총 누적강수량, 그리고 총 누적강수량 분포도를 분석하여, 분석 너징이 적용되는 도메인 영역을 선정한다.

이렇게 선정된 최적의 옵션을 적용한 두 가지의 너징 실험과 CNTL 실험을 비교하여, 영동 지역의 강수량 분포와 바람장 모의에 있어 상호 어떠한 차이가 있는지 살펴보고, 관측 너징 실험과 분석 너징 실험 중 어느 실험이 관측과 더 유사하게 나타나는지 정성적·정량적 분석을 하고자 한다. 여기서 정량적인 검증은 위해 D3 영역 내의 강수 지점들의 3시간 누적 강수량과 매시간 바람(x성분과 y성분)에 대한 RMSE (Root Mean Square Error), ME (Mean Error), 그리고 IOA (Index of Agreement)를 구하여 비교하고자 한다.

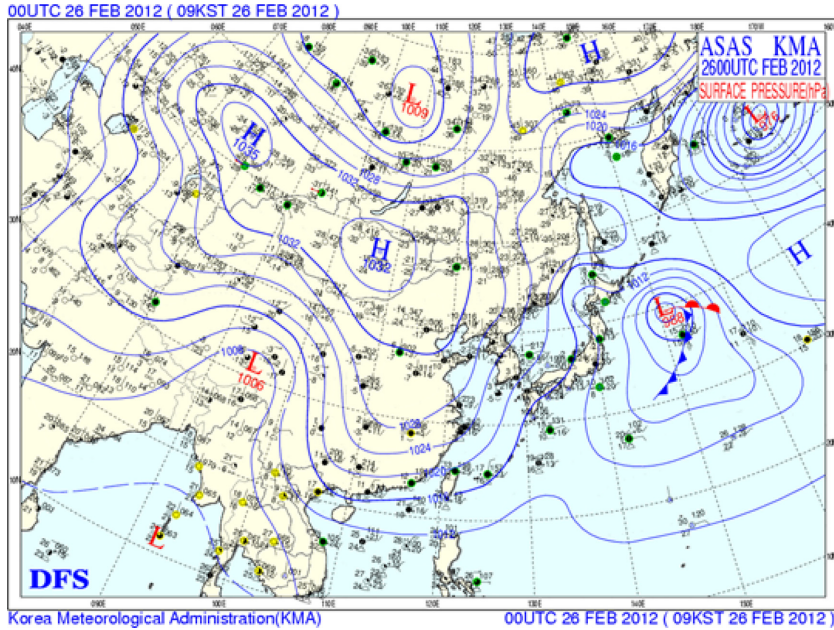


Fig. 3. Surface synoptic chart at 0900 LST 26 February 2012.

RMSE, ME, 그리고 IOA를 다음과 같이 계산한다.

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

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i), \quad (2)$$

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|F_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (3)$$

여기서, F_i 는 모의값, O_i 는 관측값, \bar{F} 는 평균 모의값, \bar{O} 는 평균 관측값을 각각 나타낸다.

본 연구에서는 관측값과 수치 실험 결과를 적설량 대신에 강수량을 기준으로 논의하고자 한다. 그 이유는 신적설량의 경우, 일정 이상 쌓이게 되면 눈의 무게로 인해 내려앉거나 다져지고, 기온에 따라 상변화를 일으켜 관측 오차가 빈번하게 발생하므로 정확한 관측 데이터를 얻기 힘들기 때문이다.

3. 종관 및 관측 분석 (2012. 02. 26. 0300 LST - 27. 0300 LST)

Figure 3은 영동 해안 지역으로 눈이 내리기 시작하는 2012년 2월 26일 0900 LST의 지상일기도이다.

바이칼 호 부근에 위치한 시베리아 고기압(1032 hPa)이 중국 화중 지역과 동해상으로 확장하는 동시에, 일본 홋카이도 동쪽 해상으로 전선을 동반한 저기압(988 hPa)이 위치하여, 서고동저형의 기압패턴을 보이면서 영동 해안 지역으로 북동기류가 유입되는 상황이다. 925 hPa 일기도(그림생략)에서는, 동해상에서 등고선은 남북방향으로, 그리고 등온선은 등고선이 놓인 방향의 수직방향인 거의 동서방향으로 놓여있어, 동해상과 영동 해안 지역으로 찬 공기 이류가 강함을 알 수 있다. 이러한 종관장에서는 호수효과(Lake-effect)에 따라 차가운 기단이 상대적으로 따뜻한 해면 위를 지날 때, 해면 바로 위의 대기가 해수면으로부터 열과 수분의 공급을 받아 불안정해져 대류 운동이 활발하게 일어나고, 그로 인해 하층운이 발달하여 영동 지역에는 종종 대설이 내린다(Anderson and Nilson, 1990; Lee and Kim, 2008; Nam et al., 2014).

Figure 4는 26일 0300 LST부터 27일 0300 LST까지의 북강릉(영동 해안 지역을 대표)과 대관령(산악 지역을 대표)의 시간당 누적강수량과 풍향을 나타낸 시계열로, 이 그래프의 왼쪽 세로축은 강수량을, 오른쪽 세로축은 풍향을 각각 나타내며, 가로축은 시간(LST)을 나타낸다. 북강릉에서는 26일 1200 LST에 2.0 mm의 시간당 강수 극대값이 나타나며, 이 시간 전후로 강수가 집중되었다. 반면, 대관령은 북강릉에 비해 강수량이 거의 없음을 알 수 있다. 사례기간 동안의 총 누적강수량은 북강릉이 약 10.5 mm, 대관령

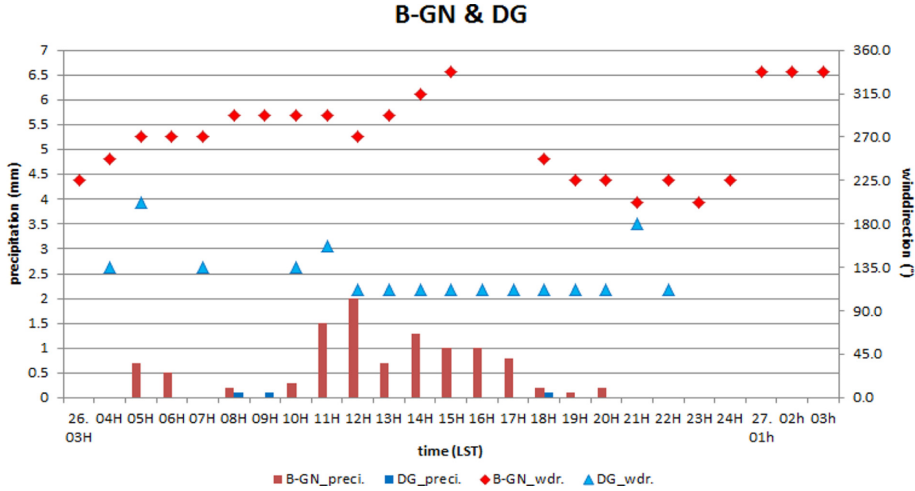


Fig. 4. Time series of hourly accumulated precipitation and wind direction at Bukgangneung (B-GN) and Daegwallyeong (DG) from 0300 LST 26 to 0300 LST 27 February 2012.

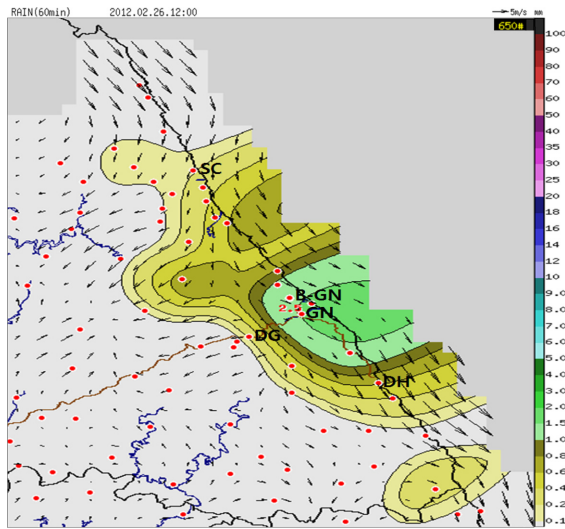


Fig. 5. Objectively analyzed 1 hr accumulated precipitation (mm) distribution and surface wind field at 1200 LST 26 February 2012. Adopted from KMA. Length scale for the wind vector in $m s^{-1}$ is given at the upper right corner of the figure. Amount of precipitation is represented with shading based on scale at right of the figure.

이 약 0.3 mm로 관측되어, 대관령보다 북강릉에서 약 10 mm 이상 더 많은 누적강수량이 기록되었다. 즉, 영동 해안 지역이 산악 지역보다 더 많은 눈이 내린 유형이다. 풍향은 26일 0300~1500 LST 동안에 북강릉은 서북서 계열의 바람이, 강릉은 북서 계열의 바람(그림생략)이, 대관령에서는 남동풍 계열의 바람이

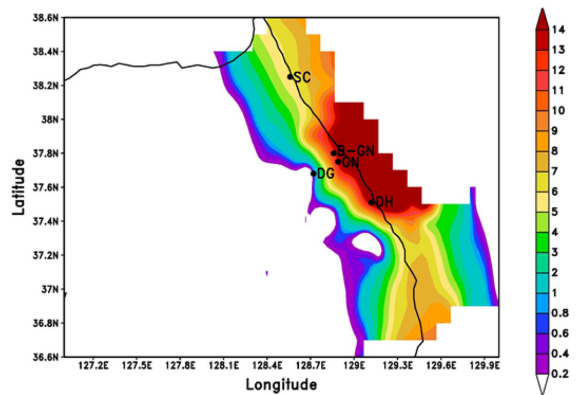


Fig. 6. 24 hr accumulated precipitation (mm) distribution ending at 0300 LST 27 February 2012 from the AWS observation. Amount of precipitation is represented with shading based on scale at right of the figure.

각각 관측되었다. Cho et al. (2004)은 산악 지역보다 해안 지역으로 강수가 더 많이 관측되는 해안형 강수의 경우, 대관령에서 동풍 계열의 바람이, 강릉에서 북서 계열의 바람이 분다는 사실을 정성적·정량적으로 밝혔는데, 이 사례에서도 유사하게 서북서 계열의 바람이 관측된 북강릉이 동풍 계열의 바람이 불었던 대관령보다 더 많은 강수를 기록하였다.

Figure 5는 기상청 홈페이지(<http://www.kma.go.kr>)의 자료로, 북강릉에서 강수 Peak를 기록한 시간(26일 1200 LST)의 객관 분석된 1시간 누적강수량 분포도와 지상 바람장을 보여준다. 속초부터 동해시에 이르는 영동 해안 지역 및 그 앞바다에는 북서 계열의

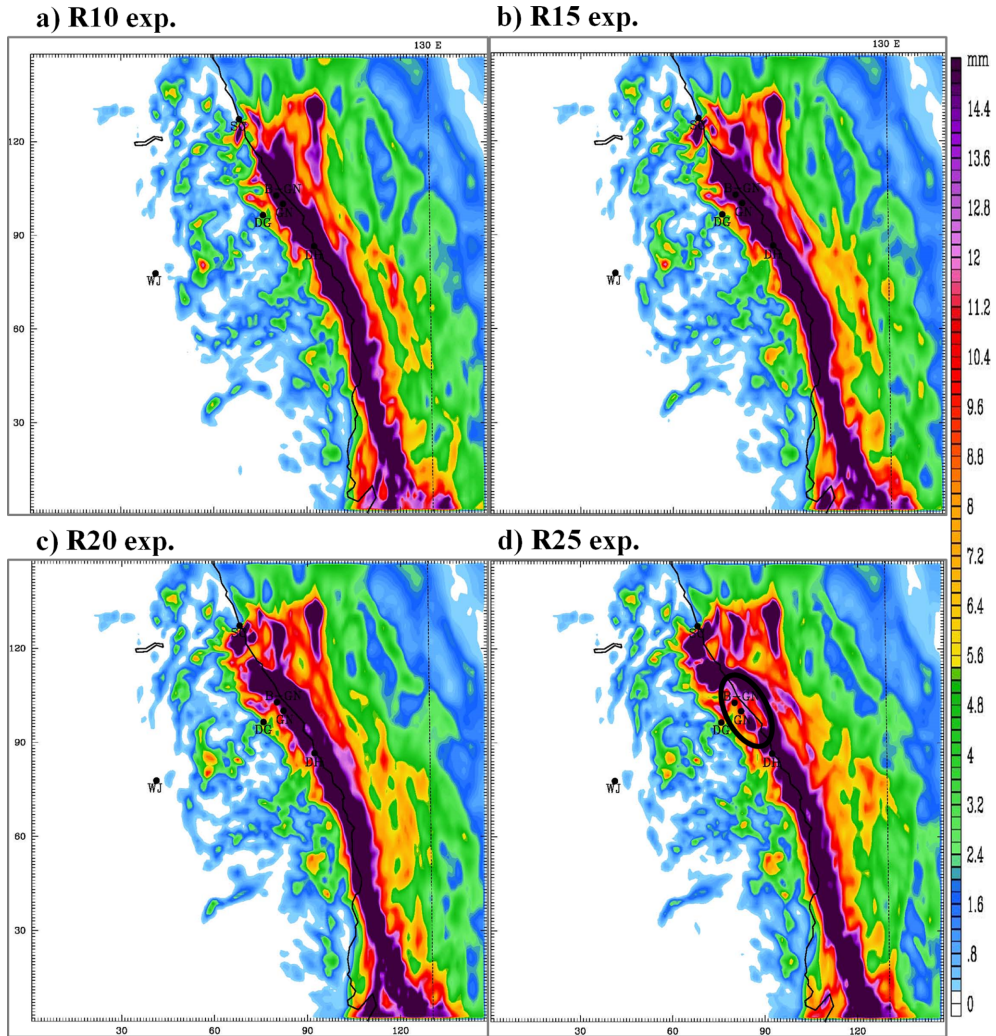


Fig. 7. 24 hr accumulated precipitation (mm) distributions ending at 0300 LST 27 February 2012 from (a) R10 exp., (b) R15 exp., (c) R20 exp. and (d) R25 exp.. Amount of precipitation is represented with shading based on scale at right of the figure.

바람이 불었고, 강수는 주로 영동 해안 지역에서만 관측되었으며, 특히 북강릉과 강릉 부근으로 강수가 집중되었다. Figure 6은 사례기간 동안에 내린 AWS의 24시간 총 누적강수량 분포도로, 북강릉에서 동해시에 이르는 해안 지역을 따라 강수가 집중되었으며, 영동 내륙 지역으로 들어갈수록 강수량이 적어져 대관령에서는 강수량이 매우 적음을 보여준다.

4. 수치 모의 결과 분석

4.1 너징 옵션 민감도 실험

4.1.1 관측 너징(Observational Nudging)

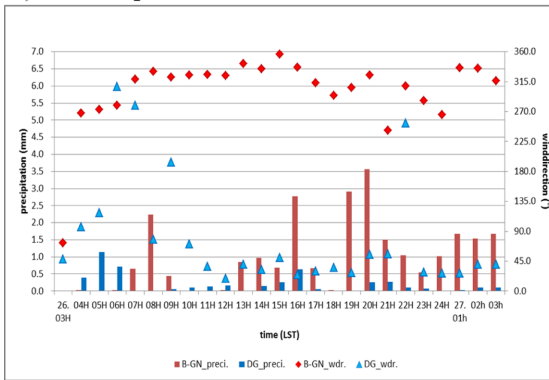
최적의 너징 옵션으로 관측 너징을 수행하기 위해,

너징에 사용된 관측 자료가 적절하게 영향을 미치는 영향반경을 선정하기 위한 실험(영향반경 실험)을 우선적으로 수행할 필요가 있다. 먼저 $6.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 의 너징 계수를 고정한 후, 자료동화에 사용된 관측 지점 간의 실제 거리를 고려하여 반경을 10 km부터 5 km 간격으로 25 km까지 설정하여 실험을 수행하였다. 그 중에서 어느 영향반경을 설정하였을 때 가장 관측과 유사한 결과를 보이는지 알아보기 위해, 각 실험의 결과로부터 얻어진 총 누적강수량 분포도, 그리고 속초, 북강릉, 강릉, 동해, 대관령의 총 누적강수량을 분석하였고, 이어서 영동 해안 지역과 산악 지역을 대표하는 북강릉과 대관령의 시간당 강수량 및 풍향에 대한 시계열도 분석하였다.

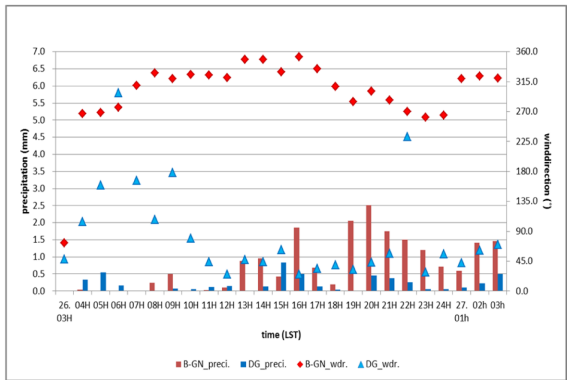
Table 1. 24 hr accumulated precipitations at Sokcho (SC), Bukgangneung (B-GN), Gangneung (GN), Donghae (DH) and Daegwallyeong (DG) from the ASOS observation (OBS), the CNTL exp., R10 exp., R15 exp., R20 exp. and R25 exp., respectively. Units in mm/24 hr.

OBS		CNTL exp.		R10 exp.		R15 exp.		R20 exp.		R25 exp.	
Point	Total	Point	Total	Point	Total	Point	Total	Point	Total	Point	Total
SC	5.8	SC	0.3	SC	0.9	SC	2.2	SC	3.0	SC	4.3
B-GN	10.5	B-GN	28.6	B-GN	24.8	B-GN	19.1	B-GN	13.3	B-GN	8.4
GN	12.5	GN	36.9	GN	23.1	GN	19.3	GN	16.8	GN	9.8
DH	13.2	DH	18.9	DH	19.1	DH	17.3	DH	14.1	DH	14.4
DG	0.3	DG	2.7	DG	4.8	DG	5.1	DG	5.2	DG	6.2

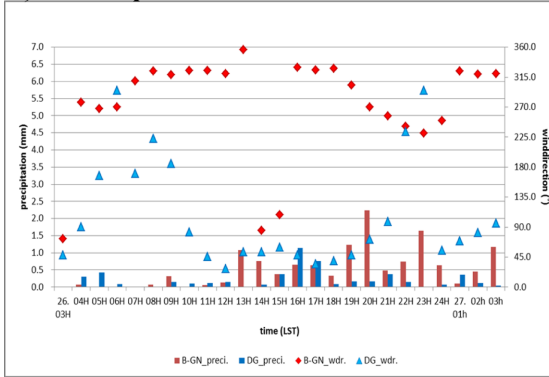
a) R10 exp.



b) R15 exp.



c) R20 exp.



d) R25 exp.

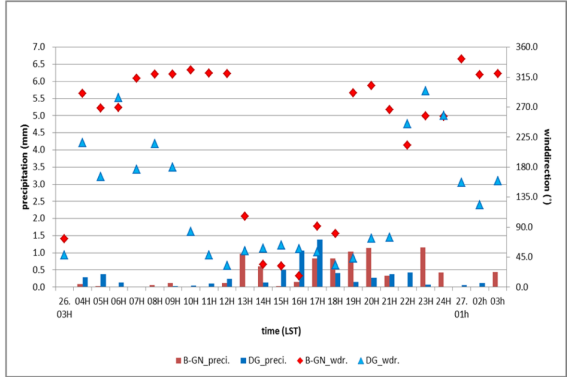


Fig. 8. Time series of hourly accumulated precipitation and wind direction from (a) R10 exp., (b) R15 exp., (c) R20 exp. and (d) R25 exp. at B-GN and DG from 0300 LST 26 to 0300 LST 27 February 2012.

Figure 7은 영향반경을 각각 10 km, 15 km, 20 km, 25 km로 설정한 실험(이하 R10, R15, R20, R25 실험)의 총 누적강수량 분포도이다. R10, R15, 그리고 R20 실험(Figs. 7a, b and c)들의 경우, 영동 해안 지역 및 인근 앞바다로 강수가 집중되어 관측된 총 누적강수량 분포도(Fig. 6)와 유사한 강수량 분포를 보였다. 그러나 R25 실험(Fig. 7d)의 경우, 강수가 많이 관측되

었던 북강릉 인근 지역(검정색 원 영역)으로 다른 실험들 보다 상대적으로 적은 강수량 분포를 보였으며, 관측된 총 누적강수량 분포도와 어긋나는 결과를 보였다.

Table 1은 주요 지점에서 관측된 총 누적강수량, 그리고 대응되는 CNTL 실험 및 영향반경 실험들의 총 누적강수량을 보여주는 표이다. CNTL 실험과 R10 실험은 북강릉의 총 누적강수량이 각각 28.6 mm와 24.8

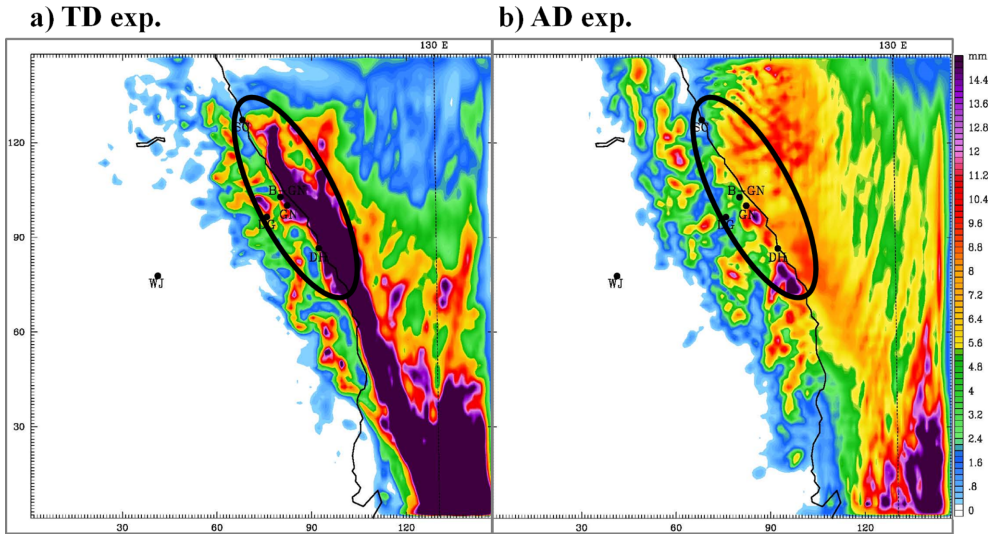


Fig. 9. 24 hr accumulated precipitation (mm) distributions ending at 0300 LST 27 February 2012 from (a) TD exp. and (b) AD exp..

mm로, 관측에 비해 강수량을 과대 모의 하였다. R25 실험은 북강릉의 총 누적강수량(8.4 mm)과 대관령의 총 누적강수량(6.2 mm)의 차이가 2.2 mm 정도로, 북강릉과 대관령에서 관측된 총 누적강수량 차이(10.2 mm)에 비해 매우 작은 차이값을 보였다. 북강릉의 총 누적강수량은 영향반경이 클수록 줄어드는 경향을 보이고, 이와 반대로 대관령의 총 누적강수량은 증가하는 것을 볼 수 있다. 이에 따라 북강릉의 강수량을 과대 모의한 R10 실험과, 북강릉과 대관령의 강수량 차이를 매우 작게 모의한 R25 실험은 관측과 어긋나는 결과를 보여주었고, 북강릉의 강수량은 R15 실험(약 19.1 mm)과 R20 실험(약 13.3 mm)이 관측된 강수량(10.5 mm)과 유사한 총 누적강수량을 모의한 것으로 볼 수 있다.

Figure 8은 영향반경 실험에서 모의된 시간당 강수량 및 풍향의 시계열이다. 26일 0300~1300 LST 동안의 북강릉의 풍향은 영향반경 실험들 모두 서풍 계열의 바람을 모의하여, 관측된 풍향과 유사하게 나타났다. 그러나 1400~1500 LST 동안의 북강릉의 풍향을 보면, R10 실험과 R15 실험은 북북서풍을, 그리고 R20 실험과 R25 실험은 동풍 계열의 바람을 각각 모의하였다. 그런데 이 시간대의 관측 자료에 의하면 북서 계열의 바람이 불었기 때문에, R20 실험(Fig. 8c)과 R25 실험(Fig. 8d)은 관측된 풍향과는 확연히 다르게 모의하였다.

본 사례에서는 선행 연구에 따라 $6.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 의 너징 계수를 사용할 경우, 영향반경을 15 km로 설정하여 관측 너징을 적용한 실험(R15 실험)이 가장 관측

과 유사한 결과를 보였다. 이러한 결과는 본 연구에서 사용된 관측 지점의 실제 거리와 연관이 있는 것으로 여겨진다. 북강릉과 대관령 사이의 실제 거리는 약 9 km이며, 속초와 북강릉 사이의 거리는 약 56 km, 북강릉과 동해 사이의 거리는 약 39 km로, 영향반경이 25 km인 경우, 풍향에 있어 큰 차이가 있는 대관령과 북강릉 지점의 영향반경이 서로 중첩되기 때문에 강수와 바람에서 큰 오차를 발생시킨 것으로 판단되며, 영향반경을 10 km로 설정한 경우에는 영향반경이 너무 작아 너징의 효과가 관측지점 주위로만 미미하게 발생하기 때문에 적합하지 않게 나타난 것으로 보여진다. Choi et al. (2009)의 연구 결과에서 약한 종관 강제력이 작용한 사례의 경우에 영향반경이 작을수록 유의한 결과를 보인다고 하였는데, 이와 관련해서도 영향 반경이 20 km인 경우보다는 영향반경이 15 km인 경우에 관측과 더 유사한 결과를 보여, 선행 연구와 어느 정도 일치하는 결과를 보였다. 이와 같이 영향반경 실험에서 선정된 R15 실험을 뒤에서 언급할 분석 너징 실험과 비교될 실험으로 선정하였으며, R15 실험을 ONG 실험이라 명하였다.

4.1.2 분석 너징(Analysis Nudging)

이 절에서는 가장 효과적으로 너징 기법을 적용하기 위해, 도메인 영역에 따른 너징 효과를 알아보고자, 어느 도메인 영역에 너징 효과를 준 경우가 가장 좋은지를 알아보기 위한 실험(도메인 실험)을 수행하였고, 그 실험 결과를 비교·분석하기 위해 총 누적강수량 분포도와 주요 지점에서의 총 누적강수량, 북

Table 2. 24 hr accumulated precipitations at SC, B-GN, GN, DH and DG from the ASOS observation (OBS), the CNTL exp., TD exp. and AD exp., respectively. Units in mm/24 hr.

OBS		CNTL exp.		TD exp.		AD exp.	
Point	Total	Point	Total	Point	Total	Point	Total
SC	5.8	SC	0.3	SC	2.2	SC	0.7
B-GN	10.5	B-GN	28.6	B-GN	9.4	B-GN	4.2
GN	12.5	GN	36.9	GN	13.5	GN	7.6
DH	13.2	DH	18.9	DH	8.6	DH	5.5
DG	0.3	DG	2.7	DG	7.6	DG	3.6

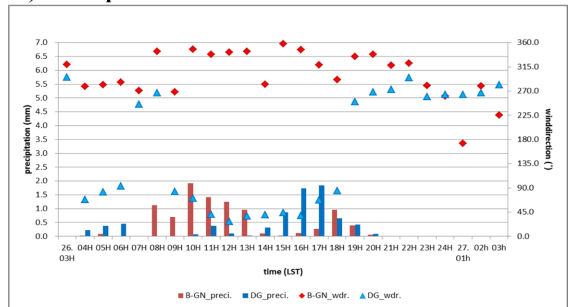
강릉과 대관령의 시간당 강수량 및 풍향의 시계열을 분석하였다.

Figure 9는 D1과 D2 영역에 너징 효과를 준 실험(이하 TD 실험)과 D1에서 D3 영역까지 모든 도메인에 너징 효과를 준 실험(이하 AD 실험)으로부터 얻어진 총 누적강수량 분포도이다. 관측된 총 누적강수량 분포도(Fig. 6)와 비교하면, TD 실험(Fig. 9a)의 경우, 영동 해안 지역 및 앞바다를 따라 길게 늘어진 띠 모양의 강수역을 보였다. 반면에 AD 실험(Fig. 9b)의 경우, TD 실험보다 전반적으로 적은 양의 강수를 모의하였으며, 지역적으로 비교하였을 경우에도 북강릉의 총 누적강수량(약 4.0 mm)을 적게 모의하였다. 또한, 관측된 북강릉과 대관령에서의 총 누적강수량의 차이는 약 10.0 mm인 반면, TD 실험에서는 두 지역의 총 누적강수량의 차이가 약 1.0 mm 정도로, 관측에 비해 매우 작은 차이를 보였다. 따라서 북강릉 부근의 해안 지역 및 그 앞바다로 집중된 누적강수량 분포를 보인 TD 실험이 AD 실험보다 관측과 유사함을 알 수 있다.

Table 2는 주요 지점의 관측된 총 누적강수량을, 그리고 대응되는 CNTL 실험 및 도메인 실험들의 총 누적강수량을 보여주는 표이다. Table 2에서 북강릉의 총 누적강수량을 보면, CNTL 실험은 28.6 mm, TD 실험은 9.4 mm, 그리고 AD 실험은 4.2 mm임을 알 수 있다. 관측값(북강릉 10.5 mm)과 비교하여 보면, TD 실험이 북강릉의 총 누적강수량을 가장 유사하게 모의하였음을 알 수 있다. 그리고 대관령에서의 총 누적강수량을 보면, CNTL 실험은 2.7 mm, TD 실험은 7.6 mm, 그리고 AD 실험은 3.6 mm로, 대관령에서 관측된 0.3 mm에 비해 모두 총 누적강수량을 과대 모의한 경향을 보였다.

Figure 10은 TD 실험과 AD 실험으로부터 얻어진 북강릉과 대관령에서의 시간당 강수량 및 풍향에 대한 시계열이다. 먼저 풍향에 대해 살펴보면, 26일 0500~1500 LST 동안에 관측된 북강릉의 경우, 서북서 계열의 바람이 지배적이었는데, TD 실험(Fig. 10a)과 AD 실험(Fig. 10b) 모두 서북서 계열의 바람을 어

a) TD exp.



b) AD exp.

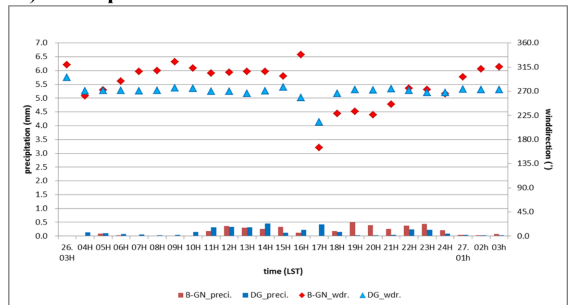


Fig. 10. Time series of hourly accumulated precipitation and wind direction from (a) TD exp. and (b) AD exp. at B-GN and DG from 0300 LST 26 to 0300 LST 27 February 2012.

는 정도 잘 모의하였다. 한편, 26일 0900~1800 LST 동안에 관측된 대관령에서의 풍향의 경우, 남동풍 계열의 바람이 지배적이었는데, TD 실험은 주로 북동 계열의 바람을, AD 실험은 서풍 계열의 바람을 각각 모의하여, TD 실험이 AD 실험보다 관측과 유사한 풍향을 모의하였다. 시간당 강수량에 대한 시계열을 살펴보면, 26일 1000~1700 LST 동안의 북강릉에서 관측된 강수 집중 시간대와 비교하면(Fig. 4), TD 실험은 초기시각으로부터 5시간 이후인 0800~1400 LST 동안에 북강릉에서 강수 집중 시간대를 보인 반면, AD 실험은 1100 LST부터 북강릉의 강수가 시작되었지만, 강수량이 적고 뚜렷한 강수 집중 시간대를 보

Table 3. Summary of Nudging experimental design.

	Observational Nudging (ONG)			Analysis Nudging (ANG)		
	D1 (18 km)	D2 (6 km)	D3 (2 km)	D1 (18 km)	D2 (6 km)	D3 (2 km)
Nudging coefficient	$6.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$					
Nudging area	used			used	not used	
Rinxy	15 km					
Time window	0.67 hr					

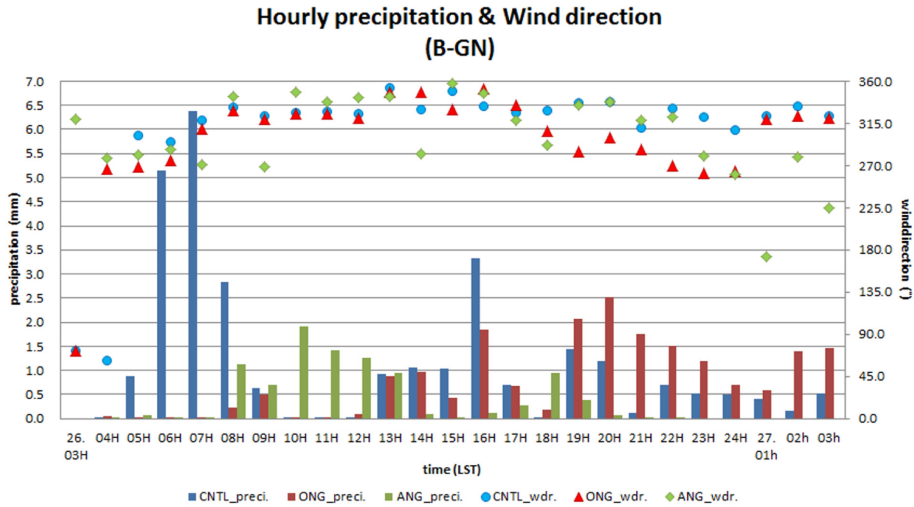


Fig. 11. Time series of hourly accumulated precipitation and wind direction from the CNTL exp., ONG exp., and ANG exp. at B-GN from 0300 LST 26 to 0300 LST 27 February 2012.

여주지 않았다.

즉, TD 실험은 북강릉 부근의 해안 지역 및 그 앞 바다로 집중된 누적강수량 분포를 잘 보여주었고, 북강릉에서의 총 누적강수량을 관측값과 유사하게 모의하였다. 그리고 관측과 유사하게 26일 0800~1400 LST 동안에 강수 집중 시간대를 모의하여, AD 실험보다 더 개선된 결과를 보였다. 따라서 $6.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 의 너징 계수를 사용할 때, D1과 D2에만 분석 너징을 적용하여 수행한 실험(TD 실험)이 가장 관측과 유사한 결과를 보였다. 이와 같이 도메인 실험에서 선정된 TD 실험을 관측 너징 실험과 비교될 실험으로 선정하였으며, TD 실험을 ANG 실험이라 명하였다.

4.2 관측 너징(Observational Nudging) 대 분석 너징(Analysis Nudging)

이 절에서는 관측 너징 실험에서 선정된 ONG 실험, 그리고 분석 너징 실험에서 선정된 ANG 실험을 정성적 · 정량적으로 비교·분석하였다. ONG 실험과 ANG 실험을 위해 설정된 너징 관련 옵션은 Table 3

에 정리하였다. 두 너징 실험에서 얻어진 지상 바람 장, 수렴 · 발산장, 1시간 누적강수량 분포도, 그리고 관측 자료 등을 함께 분석하여, 관측 너징과 분석 너징을 적용한 실험 결과들 간에는 어떠한 차이가 있는지, 그리고 너징이 적용되지 않은 CNTL 실험에 비해 ONG 실험과 ANG 실험이 어느 정도 긍정적인 효과를 보였는지 분석하였다. 주요 관심 시간은 북강릉에서 강수 Peak 시간대인 26일 1200 LST이다. 강수량과 바람에 대한 정량적인 검증을 위해, 관측과 두 너징 실험에서 얻어진 주요 지점의 3시간 누적강수량 자료와 매시간 바람의 x성분(u)과 y성분(v) 자료를 이용하여, RMSE, ME, 그리고 IOA를 각각 계산하였다.

4.2.1 ONG 실험과 ANG 실험 결과에 대한 정성적 비교 · 분석

Figure 11은 CNTL 실험, ONG 실험, 그리고 ANG 실험에서 얻어진 북강릉에서의 시간당 강수량 및 풍향의 시계열이다. 모의 실험 모두 사례기간 동안에서 북서 계열의 풍향을 모의하였다. 위의 세 가지 실험

Table 4. 24 hr accumulated precipitations at SC, B-GN, GN, DH and DG from the ASOS observation (OBS), the CNTL exp., ONG exp. and ANG exp., respectively. Units in mm/24 hr.

OBS		CNTL exp.		ONG exp.		ANG exp.	
Point	Total	Point	Total	Point	Total	Point	Total
SC	5.8	SC	0.3	SC	2.2	SC	2.2
B-GN	10.5	B-GN	28.6	B-GN	19.1	B-GN	9.4
GN	12.5	GN	36.9	GN	19.3	GN	13.5
DH	13.2	DH	18.9	DH	17.3	DH	8.6
DG	0.3	DG	2.7	DG	5.1	DG	7.6

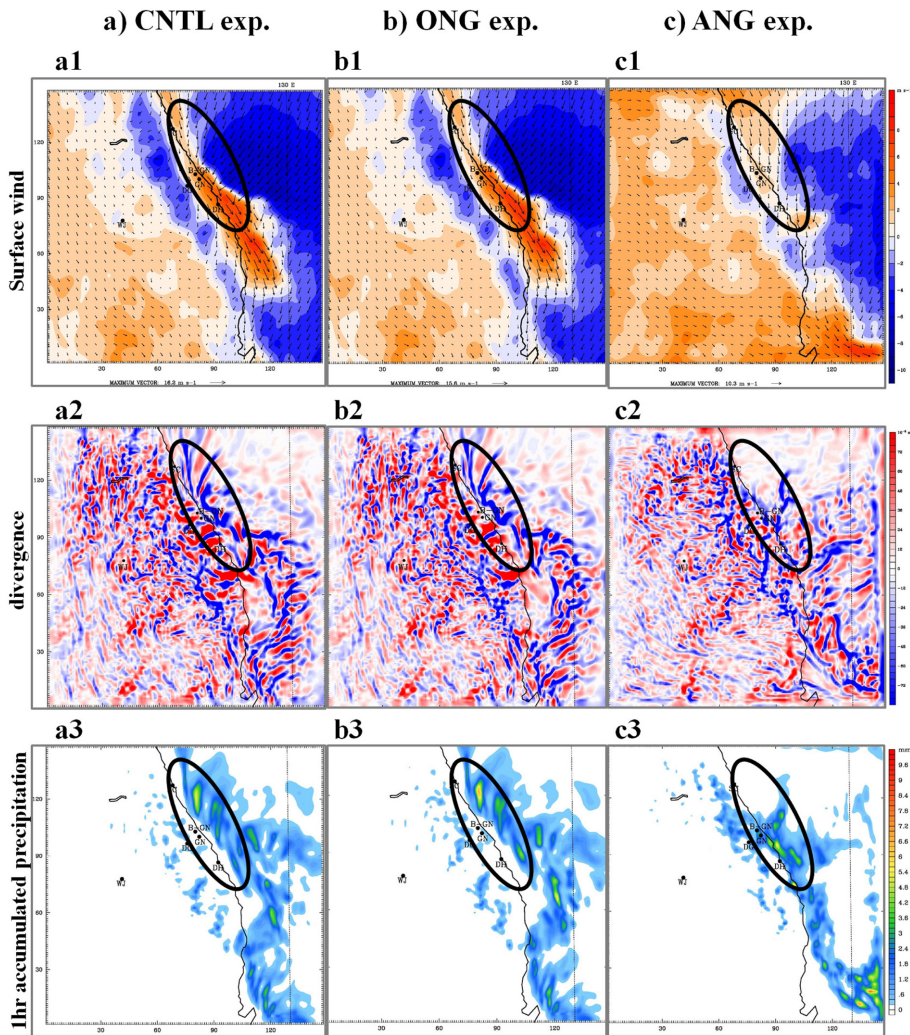


Fig. 12. Surface wind fields (top panels), convergence and divergence fields (middle panels), and distributions of 1 hr accumulated precipitation (bottom panels) from (a) CNTL exp., (b) ONG exp., and (c) ANG exp. (left to right) at 1200 LST 26 February 2012. Length scales for the wind vector in m s^{-1} are given at the bottom of the surface wind fields. The magnitude of x-component of the wind is represented with shading based on scale (m s^{-1}) at right of Fig. 12c1. Convergence (blue) and divergence (red) are represented with shading based on the scale at right of Fig. 12c2. Amount of precipitation is represented with shading based on scale at right of Fig. 12c3.

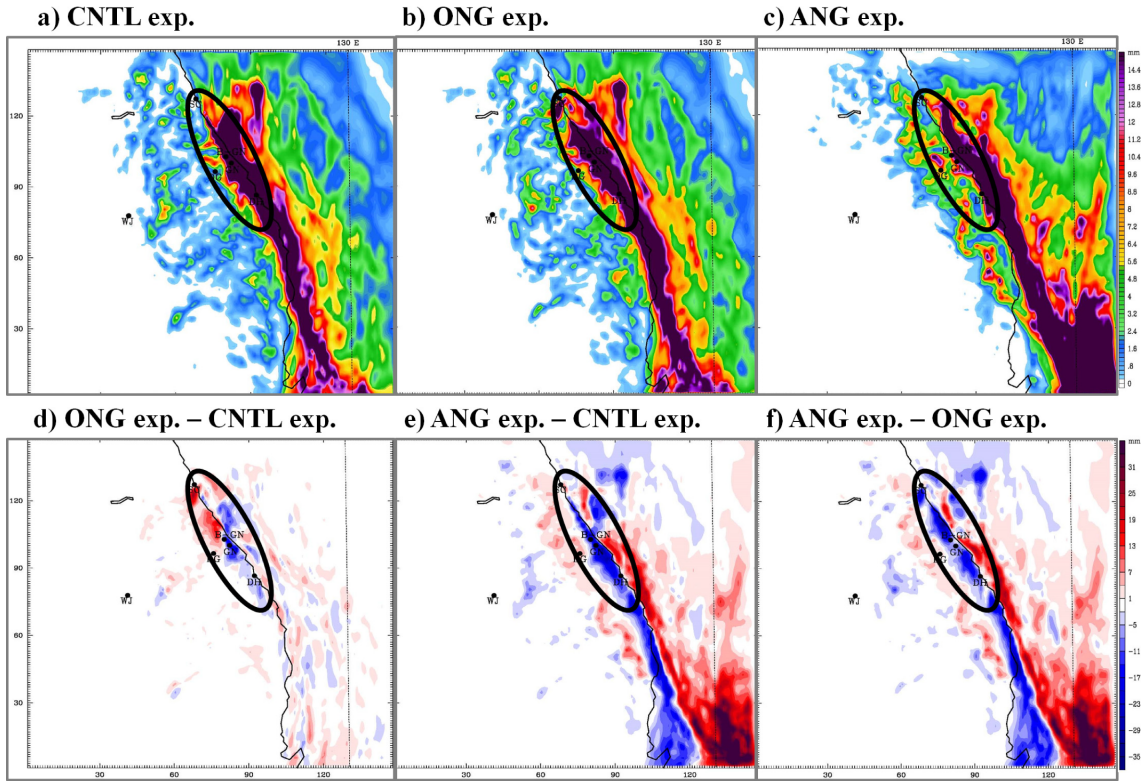


Fig. 13. 24 hr accumulated precipitation (mm) distributions ending at 0300 LST 27 February 2012 from (a) CNTL exp., (b) ONG exp. and (c) ANG exp.. Differences of CNTL exp. from (d) ONG exp. and from (e) ANG exp.. Difference of ONG exp. from (f) ANG exp.. The difference in 24 hr accumulated precipitation amount is represented with shading based on scale at right of the Fig. 13f.

사이에서 시간당 강수량 차이가 크게 난 시간은 26일 0700 LST로, CNTL 실험과 두 너징 실험 간의 강수량 차이가 약 6.4 mm 정도였다. 관측에서 북강릉의 강수가 집중된 시간대는 26일 1000~1700 LST이며, CNTL 실험의 경우, 두 번의 강수 집중 시간대를 보이는데, 26일 0500~0900 LST와 1300~1700 LST이다. ONG 실험은 초기시각 후 약 10시간 뒤인 26일 1300 LST부터 강수가 시작되었으며, 26일 2000 LST 전후로 강수가 집중된 반면에, ANG 실험의 경우에는 26일 0800~1300 LST 동안에 강수가 집중되어, ANG 실험이 관측과 유사한 강수 집중 시간대를 보였다.

각 실험별, 그리고 주요 지점별로 총 누적강수량을 나타낸 표(Table 4)를 보면, 영동 해안 지역인 북강릉의 경우, 관측은 10.5 mm, CNTL 실험은 28.6 mm, ONG 실험은 19.1 mm, 그리고 ANG 실험은 9.4 mm로, ANG 실험의 총 누적강수량이 관측과 가장 유사하게 나타났으며, CNTL 실험과 ONG 실험은 ANG 실험에 비해 과대 모의한 경향을 보였다. 반면에 산악 지역인 대관령의 경우, 관측은 0.3 mm, CNTL 실험

은 2.7 mm, ONG 실험은 5.1 mm, 그리고 ANG 실험은 7.6 mm로, CNTL 실험이 관측과 가장 유사하게 나타났다.

Figure 12는 CNTL 실험, ONG 실험, 그리고 ANG 실험의 결과로, 북강릉에서 강수 Peak를 기록한 시간인 26일 1200 LST의 지상 바람장, 수렴·발산장, 그리고 1시간 누적강수량 분포를 각각 보여준다. 지상 바람장에서 주황색 음영과 푸른색 음영은 바람의 x성분의 양의 값(서풍)과 음의 값(동풍)을 각각 나타내며, 수렴·발산장에서 푸른색 음영과 붉은색 음영은 수렴역과 발산역을 각각 나타낸다. CNTL 실험(Fig. 12a)과 ONG 실험(Fig. 12b)의 경우, 속초부터 동해시를 잇는 해안 지역 및 그 인근 앞바다에는 북서 계열의 바람이 불며, 그 동쪽으로는 북동 계열의 바람이 분다. 이 북서 계열의 바람과 북동 계열의 바람이 만나는 곳에 수렴역이 형성되었고(Figs. 12a2, b2), 이 수렴역이 형성된 영동 앞바다 부근으로 강수가 집중되었다(Figs. 12a3, b3). 한편, ANG 실험(Fig. 12c)의 경우, 지상 바람장을 보면 북강릉에서 동해시에 이르는

해안 지역을 따라 북서 또는 북풍 계열의 바람이 불고 있으며, 그 해안 지역의 동쪽에는 북풍 또는 북동 계열의 바람이 불고 있다. 북강릉 내륙 지역을 포함하여 북강릉에서 동해시에 이르는 해안가로 수렴역이 형성되었으며(Fig. 12c2), 이 수렴역에서 강수가 집중되어(Fig. 12c3), 객관 분석된 1시간 누적강수량 분포도(Fig. 5)와 유사한 강수량 분포를 보였다. 한편, 이 세 실험들의 결과와 객관 분석된 바람장(Fig. 5)을 비교하여 보면, CNTL 실험과 ONG 실험은 속초부터 동해시에 이르는 해안 지역 및 인근 앞바다의 북서풍을 잘 모의하여 객관 분석된 바람장과 유사한 결과를 보였으나, ANG 실험은 영동 해안 지역으로 뚜렷한 북서 계열의 바람을 잘 모의하지 못하였다.

Figures 13a, b, c는 CNTL 실험, ONG 실험, 그리고 ANG 실험의 총 누적강수량 분포도이다. CNTL 실험과 ONG 실험의 경우, 주 강수량(약 13 mm 이상)의 강수량 분포를 보이는 영역이 북강릉에서 동해시에 이르는 영동 해안 지역이며, ANG 실험의 경우, 주 강수량이 영동 해안선 부근에서 약간 동쪽으로 치우쳐있다. ONG 실험과 CNTL 실험 간의 총 누적강수량 차이를 보여주는 분포도(Fig. 13d)를 보면, 속초에서 북강릉에 이르는 지역은 ONG 실험이, 그리고 강릉과 동해시 부근에서는 CNTL 실험이 총 누적강수량을 더 많이 모의하였다. ANG 실험과 CNTL 실험 간의 총 누적강수량 차이를 보여주는 분포도(Fig. 13e)를 보면, 속초에서 동해시를 잇는 영동 해안 지역은 CNTL 실험이, 그리고 영동 앞바다에서는 ANG 실험이 더 많은 총 누적강수량을 모의하였다. ANG 실험과 ONG 실험 간의 총 누적강수량 차이를 보여주는 분포도(Fig. 13f)를 보면, 영동 내륙 지역에서는 ONG 실험이, 그리고 그 앞바다에서는 ANG 실험이 더 많은 총 누적강수량을 모의하였다. 또한, Fig. 13d와 Fig. 13e를 비교해보면, 분석 너징이 적용된 실험(ANG 실험)의 경우, 관측 너징이 적용된 실험(ONG 실험)의 경우에 비해 너징 효과의 강도가 상대적으로 큼을 알 수 있다.

4.2.2 ONG 실험과 ANG 실험 결과에 대한 정량적 비교 · 분석

Table 5는 관측 자료와 세 가지 모의 실험(CNTL 실험, ONG 실험, 그리고 ANG 실험)으로부터 구한 3시간 누적강수량 간의 RMSE, ME, IOA를 보여주는 표이다. RMSE, ME, IOA의 순서로 그 크기를 나열해 보면, CNTL 실험의 경우 2.085, 0.938, 0.228, ONG 실험의 경우 1.673, 0.540, 0.245, 그리고 ANG 실험의 경우 1.263, 0.014, 0.350이다. 따라서 ANG 실험은 RMSE와 ME로부터 가장 작은 오차를 보였고, IOA로부터 시간 변동성에 있어 가장 관측과 일치함을 보

Table 5. Root Mean Square Error (RMSE), Mean error (ME) and Index of Agreement (IOA) of precipitation (mm/3 hr) from the CNTL exp., ONG exp. and ANG exp..

	CNTL exp.	ONG exp.	ANG exp.
RMSE	2.085	1.673	1.263
ME	0.938	0.540	0.014
IOA	0.228	0.245	0.350

Table 6. Root Mean Square Error (RMSE), Mean error (ME) and Index of Agreement (IOA) of x-component and y-component of the wind from the CNTL exp., ONG exp. and ANG exp..

	CNTL exp.	ONG exp.	ANG exp.
RMSE	3.169	2.760	2.793
ME	-2.431	-2.073	-0.680
IOA	0.569	0.614	0.581

여주었으며, ONG 실험 결과 역시 CNTL 실험보다 관측과의 오차가 작고 시간 변동성에 있어 잘 일치하는 결과를 보였다.

Table 6은 관측 자료와 세 가지 모의 실험으로부터 구한 매시간 바람(x성분과 y성분) 간의 RMSE, ME, 그리고 IOA를 보여주는 표이다. RMSE, ME, IOA의 순서로 그 크기를 나열해 보면, CNTL 실험은 3.169, -2.431, 0.569, ONG 실험은 2.760, -2.073, 0.614, 그리고 ANG 실험은 2.793, -0.680, 0.581이다. 따라서 ONG 실험과 ANG 실험 모두 CNTL 실험보다 관측과의 오차가 작고 시간 변동성에 있어 잘 일치하는 결과를 보였으며, 특히 ONG 실험은 RMSE, IOA로부터 관측과의 오차가 작고 시간 변동성에 있어 잘 일치하는 결과를, 그리고 ANG 실험은 ME로부터 관측과의 오차가 작은 결과를 각각 보였다.

5. 요약 및 결론

2012년 2월 26일에 영동 해안 지역으로 많은 눈이 내린 사례를 대상으로 너징 방법에 최적화된 옵션을 적용하여 관측 너징 실험과 분석 너징 실험을 각각 수행하였다. 각 실험들의 결과와 CNTL 실험의 결과를 비교하여, 지형적으로 복잡한 영동지역에서의 강수량 분포와 바람장 예측에 있어 각 실험들이 얼마나 관측과 유사하게 모의하였는지, 그리고 너징 방법에 따라 실험 결과의 차이는 어떠한지 분석하였다.

관측 너징과 분석 너징에서 관측값을 내삽할 때 사용되는 너징 계수의 경우, 먼저 선행 연구에 따라 종관장과 수평 격자를 고려하여 $6.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 으로 설정한 후, 관측 너징과 분석 너징에 대해 최적화된 옵션

을 선정하기 위한 실험을 수행하였다. 관측 너징 실험의 경우, 영향반경을 10 km부터 5 km 간격으로 25 km까지 설정하여 실험을 수행한 결과, 영향반경을 15 km로 설정한 R15 실험이 가장 관측과 유사한 결과를 보여주어, R15 실험을 최적화된 관측 너징 실험으로 선정하였으며, R15 실험을 ONG 실험이라 명하였다. 한편, 분석 너징 실험의 경우, 적절한 너징 적용 도메인을 선정하기 위해, D1과 D2에만 너징 효과를 준 실험과 모든 도메인 영역(D1~D3까지)에 너징 효과를 준 실험을 수행한 결과, D1과 D2에만 분석 너징을 적용하여 수행한 TD 실험이 가장 관측과 유사한 결과를 보여주어, TD 실험을 최적화된 관측 너징 실험과 비교될 실험으로 선정하였으며, TD 실험을 ANG 실험이라 명하여 ONG 실험 및 CNTL 실험과 상호 비교 분석하였다.

북강릉에서의 시간당 강수량 및 풍향의 시계열에서 CNTL 실험의 경우, 26일 0500~0900 LST 동안과 1300~1700 LST 동안에 걸쳐 두 번의 강수 집중 시간대를 보였고, ONG 실험의 경우, 26일 2000 LST 전후로 강수가 집중된 반면, ANG 실험은 26일 0800~1300 LST 동안에 강수가 집중되어, ANG 실험이 보다 관측과 유사한 강수 집중 시간대를 보였다. 북강릉의 총 누적강수량의 경우, 관측은 10.5 mm, CNTL 실험은 28.6 mm, ONG 실험은 19.1 mm, 그리고 ANG 실험은 9.4 mm로, ANG 실험의 총 누적강수량이 관측과 가장 유사하게 나타났으며, CNTL 실험과 ONG 실험은 ANG 실험에 비해 과대 모의한 경향을 보였다. 반면, 산악 지역인 대관령의 총 누적강수량의 경우, 관측은 0.3 mm, CNTL 실험은 2.76 mm, ONG 실험은 5.1 mm, 그리고 ANG 실험은 7.6 mm로, CNTL 실험이 관측과 가장 유사하게 나타났다.

북강릉에서 강수 Peak를 기록한 시간인 26일 1200 LST의 CNTL 실험, ONG 실험, 그리고 ANG 실험의 지상 바람장, 수렴 · 발산장, 그리고 1시간 누적강수량 분포도를 분석한 결과, CNTL 실험과 ONG 실험의 경우, 속초에서 동해시에 이르는 해안 지역 및 인근 앞바다의 북서풍을 잘 모의하여 객관 분석된 바람장과 유사한 결과를 보였다. 또한, 속초에서 동해시에 이르는 해안 지역 및 그 인근 앞바다로 부는 북서 계열의 바람과 그 동쪽에서 부는 북동 계열의 바람이 만나 수렴역이 형성되고, 이 수렴역이 형성된 영동 앞바다 부근으로 강수가 집중되었다. 한편, ANG 실험의 경우, 북강릉에서 동해시에 이르는 해안 지역을 따라 북서 또는 북풍 계열의 바람이 불었으며, 그 해안 지역의 동쪽으로부터 북풍 또는 북동 계열의 바람이 유입되어, 북강릉의 내륙 지역을 포함하여 북강릉에서 동해시에 이르는 해안가로 수렴역이 형성되었다. 이 수렴역이 형성된 지역으로 강수가 집중됨에 따라,

1200 LST의 객관 분석된 1시간 누적강수량 분포도와 유사한 강수 분포를 보였다.

총 누적강수량 분포에서, CNTL 실험과 ONG 실험의 경우, 북강릉에서 동해시에 이르는 영동 해안 내륙지역으로 주 강수량(약 13 mm 이상의 강수분포를 보이는 영역)이 위치한 반면, ANG 실험의 경우, 영동 해안선 부근으로 주 강수량이 위치하였다. ONG 실험과 CNTL 실험 간의, 그리고 ANG 실험과 CNTL 실험 간의 총 누적강수량 분포 차이를 비교해보면, 분석 너징이 적용된 실험의 경우, 관측 너징이 적용된 실험의 경우에 비해 너징 효과의 강도가 상대적으로 큼을 알 수 있다. 그리고 관측 너징과 분석 너징 실험 간의 차이를 분석한 결과, 분석 너징의 경우, 상대적으로 영동 해안 지역으로는 누적강수량을 적게, 그리고 그 앞바다로는 누적강수량을 많게 모의하는 경향을 보였다.

한편, 강수량과 바람에 대한 정량적인 검증을 위해, 관측과 두 너징 실험(ONG 실험과 ANG 실험)에서 얻어진 3시간 누적강수량 자료와 매시간 바람의 x성분(u)과 y성분(v) 자료를 이용하여 RMSE, ME, 그리고 IOA를 각각 구하였다. 3시간 누적강수량에 대해서, ANG 실험은 RMSE, ME, IOA에서 각각 1.263, 0.014, 0.350의 값을 보여 RMSE와 ME에서 관측과의 오차가 작고 IOA에서 시간 변동성에 있어 잘 일치하는 결과를 보였으며, ONG 실험 역시 CNTL 실험보다 개선된 통계 수치를 보였다. 매시간 바람(x성분과 y성분)에 대해서, ONG 실험과 ANG 실험 모두 CNTL 실험보다 개선된 통계 수치를 보였으며, 특히 ONG 실험은 RMSE와 IOA에서 관측과의 오차가 작고 시간 변동성에 있어 잘 일치하는 결과를, 그리고 ANG 실험은 ME에서 관측과의 오차가 작은 결과를 보였다.

영동 지역의 대설 사례를 대상으로 자료동화를 하지 않은 수치 모의 실험(CNTL 실험)의 경우, 강수량을 다소 과대 모의하고 강수집중 시간도 잘 모의하지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 개선시키고자 관측 너징과 분석 너징 기법을 각각 적용한 수치 모의 실험을 수행하였다. 그 결과, 관측 너징을 적용한 경우와 분석 너징을 적용한 경우 모두 바람과 강수량에 대한 예측 모의능력이 CNTL 실험의 경우보다 개선되어 관측과 유사한 결과를 보였다. 특히 바람의 경우, 관측 너징 실험이 분석 너징 실험과 CNTL 실험보다 관측과 더 유사한 결과를, 그리고 강수량의 경우, 분석 너징 실험이 관측 너징 실험과 CNTL 실험보다 관측과 더 유사한 결과를 각각 보였다. 이러한 결과는 cP 확장에 따른 북동기류에 의한 대설 사례를 대상으로 구한 결과이며, 차후, 이와는 다른 종관 강제력에 의해 발생한 대설 사례에 대한 다양한 너징 실험도 이루어질 필요가 있다고 본다.

감사의 글

본 연구는 2012년 기상청 기상지진기술개발사업 (CATER 2012-6100)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Anderson, T., and S. Nilson, 1990: Topographically induced convective snowbands over the Baltic Sea and their precipitation distribution. *Amer. Meteor. Soc.*, **5**, 299-312.
- Cho, K.-H., Y.-J. Cho, and T.-Y. Kwon, 2004: Characteristics of air mass related with precipitation events in Yeongdong region. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **40**, 381-393 (in Korean with English abstract).
- Choi, H.-J., H. W. Lee, K.-H. Sung, and M.-J. Kim, 2009: The effect of atmospheric flow field according to the radius influence and nudging coefficient of the objective analysis on complex area. *J. Environ. Sci.*, **18**, 271-281 (in Korean with English abstract).
- Choi, J. H., Y. H. Lee, D. E. Chang, and C. H. Cho, 2002: The impact of surface data assimilation on short-range prediction using AWS data. *Atmosphere*, **12**, 377-380 (in Korean).
- Choi, W., J. G. Lee, and Y.-J. Kim, 2013: The impact of data assimilation on WRF simulation using surface data and radar data : Case study. *Atmosphere*, **23**, 143-160 (in Korean with English abstract).
- Deng, A., and Coauthors, 2009: Update on WRF-ARW end-to-end multi-scale FDDA system. *Proceedings of the 10th Annual WRF users' workshop*, Boulder, CO., USA, NCAR, 1.9.
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a meso-scale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3077-3107.
- Eiserloh, A. J., 2014: WRF-Model data assimilation studies of landfalling atmospheric rivers and orographic precipitation over Northern California. M. S. thesis, San Jose State University.
- Hong, S.-Y., and J.-O. J. Lim, 2006: The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**, 129-151.
- _____, Y. Noah, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318-2341.
- Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, **43**, 170-181.
- Kumar, R., M. C. Barth, G. G. Pfister, M. Naja, and G. P. Brasseur, 2014: WRF-Chem simulations of a typical pre-monsoon dust storm in northern India: influences on aerosol optical properties and radiation budget. *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 2431-2446.
- Lee, H. W., M.-J. Kim, D.-H. Kim, H.-G. Kim, and S.-H. Kim, 2009: Investigation of the assimilated surface wind characteristics for the evaluation of wind resources. *J. Korean Environ. Sci. Soc.*, **25**, 1-14 (in Korean with English abstract).
- Lee, J. G., and Y. J. Kim, 2008: A numerical simulation study using WRF of a heavy snowfall event in the Yeongdong coastal area in relation to the northeasterly. *Atmosphere*, **18**, 339-354 (in Korean with English abstract).
- Lee, J. Y., 2006: Impact of nudging and resolution on the monthly weather prediction. M. S. thesis, Yonsei University (in Korean with English abstract).
- Mlawer, E. J., S. J. Taubman, P. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, **102**, 16663-16682.
- Nam, H.-G., B.-G. Kim, S.-O. Han, C. K. Lee, and S.-S. Lee, 2014: Characteristics of easterly induced snowfall in Yeongdong and its relationship to air-sea temperature difference. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 541-552.
- Ryu, C. M., and I. H. Cho, 2010: Sensitivity analysis of KWRF model using analysis nudging method in relate to forecasting precipitation. *Proceedings of the 2010 Autumn Meeting of Korean Meteorological Society*, 246-247 (in Korean).
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A description of the advanced research WRF version 3. *NCAR Technical Note TN-475+STR*, 125 pp.
- Stauffer, D. R., and N. L. Seaman, 1990: Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area meso-scale model. Part I: Experiments with synoptic-scale data. *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 1250-1277.
- _____, and _____, 1991: Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part II: Effects of data assimilation within the planetary boundary layer. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 734-754.
- Yang, A.-R., 2012: A sensitivity study of WRF to the choice of observational data used in nudging. M. S. thesis, Gangneung-Wonju National University (in Korean with English abstract).

- Yoon, M. J., 2010: The sensitivity analysis of WRF model with various nudging methods and physics scheme. M. S. thesis, Anyang University (in Korean with English abstract).
- Yu, W., Y. Liu, and T. Warner, 2007: An evaluation of 3DVAR, nudging-based FDDA, and a hybrid scheme for summer convection forecasts using the WRF-ARW model. *Proceedings of the 22nd Conference on Weather Analysis and Forecasting/18th Conference on Numerical Weather Prediction*, Park City, UT, Amer. Meteor. Soc., P2.8.