지상관측자료와 레이더 자료를 이용한 자료동화가 수치모의에 미치는 영향: 사례 연구

최 원¹⁾ · 이재규^{2)*} · 김유진²⁾

¹⁾국립기상연구소 재해기상연구센터

²⁾강릉원주대학교 대기환경과학과

(접수: 2012년 12월 21일, 수정: 2013년 4월 1일, 게재확정일: 2013년 4월 8일)

The Impact of Data Assimilation on WRF Simulation using Surface Data and Radar Data: Case Study

Won Choi¹⁾, Jae Gyoo Lee^{2)*}, and Yu-Jin Kim²⁾

¹⁾High Impact Weather Research Center, National Institute of Meteorological Research,
Korea Meteorological Administration, Korea

²⁾Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University,
Gangneung, Korea

(Received: 21 December 2012, Revised: 1 April 2013, Accepted: 8 April 2013)

Abstract The effect of 3DVAR (Three Dimension Variational data Assimilation) was examined by comparing observation and the simulations of CNTL (to which data assimilation was not applied) and ALL (to which data assimilation was applied using ground observation data and radar data) for the case of a heavy snowfall event (case A) of 11-12 February 2011 in the Yeongdong region. In case A, heavy snow intensively came in the Yeongdong coastal region rather than Daegwallyeong, in particular, around the Gangneung and Donghae regions with total precipitation in Bukgangneung at approximately 91 mm according to the AWS observation. It can be seen that compared to CNTL, ALL simulated larger precipitation along the Yeongdong coastline extending from Sokcho to Donghae while simulating smaller precipitation for inland areas including Daegwallyeong. On comparison of the total accumulated precipitations from simulations of CNTL and ALL, and the observed total accumulated precipitation, the positive effect of the assimilation of ground observation data and radar data could be identified in Bukgangneung and Donghae, on the other hand, the negative effect of the assimilation could be identified in the Daegwallyeong and Sokcho regions. In order to examine the average accuracy of precipitation prediction by CNTL and ALL for the entire Gangwon region including the major points mentioned earlier, the three hour accumulated precipitation from simulations of CNTL and ALL were divided into 5, 10, 15, 20, 25 and 30 mm/3hr and threat Scores were calculated by forecasting time. ALL showed relatively higher TSs than CNTL for all threshold values although there were some differences. That is, when considered generally based on the Gangwon region, the accuracy of precipitation prediction from ALL was improved somewhat compared to that from CNTL.

Key words: Data assimilation, WRF, heavy snowfall, precipitation simulation, threat scores

*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@gnu.ac.kr

1. 서 론

우리나라는 아시아 대륙의 북동쪽에 위치한 반도로 삼면이 바다로 둘러싸인 지형을 이루고 있다. 이처럼 좁은 지역에서 지역특성이 다르므로 일기 예보를 하기가 대단히 어렵다. 특히 어려운 지역은 강원도 영동지역으로 태백산맥의 지형적인 영향과 인접한 동해의 영향으로 다른 지역과는 구별되는 기상 현상이 자주 나타난다. 이러한 영향으로 나타나는 기상 현상 중 대표적인 것으로는 영동 대설 현상을 예로 들 수 있다. 이러한 영동 대설 현상에 대하여 많은 물적 피해가 발생하여, 도시에서는 교통 소통 및 안전유지에 어려움을 겪으며, 농촌에서는 비닐하우스 및 축사 등의 피해가 발생한다.

Jhun *et al.* (1994)은 우리나라의 대설은 지역적으로 편중되어 나타나는 것이 특색이며, 10년간의 자료 분석을 통하여 우리나라에서 눈이 가장 많이 오는 지역을 제 1대설권역으로 대관령, 강릉, 그리고 속초의 순서로 규정하였고, 수치모의 실험을 통하여 대관령의 대설은 하층의 다습한 북동 기류가 현저한 경우에 지형의 효과로 인하여 대설이 나타나는 경향이 있다고 하였다. Lee (1999)는 사례 분석과 통계조사를 통하여 영동 대설시 대관령과 강릉지역에서 강설량 차이를 일으키는 종관적인 구조 특징을 조사하여 기압골의 영향으로 강릉보다 대관령의 강설량이 많은 A형과 그리고 발달된 대륙성 한대 고기압의 영향으로 대관령보다 강릉의 강설량이 많은 B형으로 처음 분류하였고, Lee (2001)는 영동 해안지역 (강릉 부근)의 강설량이 영동 산악지역 (대관령)보다 많은 사례를 ARPS (Advanced Regional Prediction System, Xue *et al.*, 1995) 수치모의 연구를 통해 대기 경계층에서의 온도, 바람, 구름물 혼합비, 상당온위 분포 등의 분석으로 산악 저지 효과와 겨울철 영동 해안에서 발생한 해안전선의 존재를 처음 언급하였다. Cho (2008)는 약 30년간의 관측 자료를 이용하여 영동지역의 겨울철 지형성 강수의 특성을 분석하였다.

그런데 강원도 영동지역처럼 복잡한 지형과 연관되어 발생하는 대설 현상을 분석하는 경우, 중규모 수치모의에 자료동화 기법 등을 적용하여 초기 및 경계조건을 개선하여 구동된 수치모의 결과 자료를 분석하는 것이 보다 더 의미가 있을 것으로 여겨진다. 최정희 등 (2002)은 부산 단시간 예측시스템에 AWS 자료를 사용한 자료동화가 적용된 경우, 지상 기온과 풍향에 대한 단시간 (1~12 h) 예측 능력이 향상되었음을 보였다. 임은하 등 (2003)은 기상청 현업모델인 RDAPS (Regional Data Assimilation and Prediction System) 배경장에 3DVAR (Three Dimension Variational data Assimilation)를 이용하여, 비종관 자료인 레이더 자료

를 동화하여 수치모델을 구동한 결과, 강수량 모의에 있어 자료동화를 하지 않은 경우에 비해 보다 긍정적인 효과가 있음을 밝혔다. 임윤진 등 (2010)은 WRF (Weather Research and Forecasting)를 이용한 태풍 나리 (NARI) 예측에서, WRF 3DVAR에 고품질 관측 자료들을 다양하게 사용하는 민감도 실험을 통하여 태풍의 진로를 보다 정확히 예측할 수 있는 가능성에 대하여 논의하였다. Kim (2010)은 영동지역의 대설 사례들을 대상으로 한 WRF 수치모의에서, 3DVAR를 이용하여 AWS, windprofiler, 그리고 radiosonde 자료를 동화하여 나타난 효과를 분석하여, 대설 사례별로 개선된 효과가 서로 다르게 나타났음을 보여주었다. Ha *et al.* (2011)은 2006년 7월 경기도 고양시에 내린 집중호우 사례를 대상으로 실시한 WRF 수치모의 실험에서, 3DVAR를 이용하여 레이더 자료 (반지름 방향속도와 반사율)를 동화하여 수치모델을 구동하였을 경우, 자료동화하여 수치모의를 한 경우가 자료동화를 하지 않은 수치모의보다 실제 관측된 강수량 분포에 보다 가깝게 모의하였음을 보여 주었다.

위와 같이 자료동화와 관련된 수치모의 연구의 경우, 대부분의 국내 연구는 태백산맥의 서쪽 지역인 영서지역에서 발생한 호우 현상을 대상으로 자료동화 기법을 적용한 수치모의 실험들이 많았다. 반면에 지형적으로 복잡한 영동지역의 대설 현상을 대상으로 자료동화 기법을 적용하여 수행한 수치모의 실험들은 부족한 형편이었다. 따라서 이 연구에서는 영동지역에 약 230여억 원의 재산 피해 (National Emergency Management Agency, 2012)를 발생시켰던 2011년 2월 11-12일 대설사례 (이하 사례 A라 칭함)를 대상으로 3DVAR를 적용하여 지상관측자료 (AWS 자료와 windprofiler 자료)와 레이더 자료를 함께 동화한 초기값으로 수치모델을 구동하였을 경우, 자료동화를 하지 않은 수치모의 실험결과와 비교하여 볼 때, 영동지역의 강수량 예측에 있어 어떤 긍정적 또는 부정적 영향이 나타났는지 사례 연구를 통하여 분석하고자 한다. 2장에서는 자료동화 기법이 적용된 사례에 대하여 종관 분석을 하였고, 3장에서는 WRF 수치모델 및 모의 설계 그리고 자료동화와 관련된 내용을 기술하였으며, 4장에서는 3DVAR가 강수량 모의에 미치는 영향을 분석하였고, 마지막으로 요약 및 결론을 5장에 제시하였다.

2. 종관분석

2.1. 사례 A

(2011. 02. 11. 0900 KST - 12. 0900 KST)

모델의 초기시각인 2011년 2월 11일 0900 KST의 지상 일기도 (Fig. 1(a))를 보면, 바이칼호 부근에 중

Fig. 1. (a) Surface and (b) 850 hPa synoptic chart at 0900 KST 11 February 2011.

심을 둔 대륙성 고기압 (1051 hPa)의 주 세력이 몽고 지역을 거쳐 중국 화남 지방까지 뻗고 있으며, 또한, 일부 세력은 한·러 국경을 거쳐 우리나라 동해 북부해상으로 뻗고 있다. 한편, 일본 열도 남쪽해상에는 전선을 동반한 저기압 (1009 hPa) 중심이 위치하고 있으며, 기압골이 영남과 영동지역으로 뻗고 있다. 이에 따라 강원도지역을 중심으로 기압 배치가 북고남저 형태가 되면서, 등압선이 동서방향으로 놓이게 되어 영동지역인 강릉과 대관령에서는 북동 계열의 바람이 불어 들어와 많은 눈이 내릴 수 있는 상황이 형성되었다.

같은 시각의 850 hPa 상층 일기도 (Fig. 1(b))를 보면, 감차가 반도에 중심을 둔 저기압으로부터 뻗어 나온 기압골이 사할린을 거쳐 동해상으로 뻗고 있다. 또한, 몽고 동쪽에 중심을 둔 한기 핵 (-25°C)에서 뻗어 나온 온도골 (thermal trough)은 동해상에 위치하고 있으며, 일본 시코쿠 부근에서 뻗어 나온 온도능 (thermal ridge)의 축은 영남지역에 위치하면서, 강원도 부근으로 등온선이 보다 조밀하게 모여 있어 경압성이 강화되고 있음을 알 수 있다. 풍상측인 한·중국경 부근에서는 등고선과 등온선의 교각이 직각에 가까워 동해상으로 강한 한기가 이류됨을 알 수 있다.

12시간 후인 11일 2100 KST의 지상 일기도 (그림 생략)를 보면, 일본 남쪽에 전선을 동반한 저기압은 동쪽으로 서서히 이동함에 따라, 영남지역으로 뻗은 기압골도 느리게 이동하여 강원도지역에서는 북고남저 형태의 기압 배치가 장시간 유지되면서 영동지역으로 북동 계열의 바람이 오랜 시간 지속되면서 많은 눈이 내린 사례임을 알 수 있다.

Figure 2는 11일 0900 KST부터 12일 0900 KST까지 북강릉과 대관령에서의 1시간 누적강수량과 풍향을 나타낸 시계열이다. 이 그래프의 왼쪽 세로축은 강수량을 나타내며 오른쪽 세로축은 풍향을 나타내고 가로축은 시간을 각각 나타낸다. 이 그래프를 보면, 북강릉에서는 11일 2300 KST에 시간당 14.5 mm의 최대 강수 극대값이 나타나, 이 시각 전후로 많은 눈이 내렸음을 알 수 있다. 한편, 약 8시간 후인 12일 0700 KST에는 고산지대인 대관령에서 시간당 7.5 mm의 최대 강수 극대값이 나타났으나 북강릉 지점에 비해 최대 강수 강도가 훨씬 약했음을 알 수 있다. 11일 0900 KST부터 12일 0900 KST까지 총 누적강수량은 북강릉 약 91 mm, 대관령 약 43 mm로 대관령보다 북강릉에 더 많은 강수량을 기록하였다. 풍향의 시계열을 보면, 11일 0900 KST부터 1700 KST까지 북강릉에서는 북서풍 계열의 바람이, 대관령에서는 동풍 계열의 바람이 불었고 또한 강수량도 대관령보다 더 많음을 알 수 있다. Cho (2008)는 강릉에서 북서풍 계열의 바람이, 그리고 대관령에서 (북)동풍 계열의 바람이 불

Fig. 2. Time series of hourly accumulated precipitation and wind direction at Bukgangneung (B-GN) and Daegwallyeong (DG) from 0900 KST 11 to 0900 KST 12 February 2011.

때, 강릉의 강수량이 대관령의 강수량보다 많음을 통계적으로 밝힌 바가 있다. 한편, 11일 2300 KST 전후로 북강릉에서는 최대 강수 강도가 기록되면서 대관령보다 훨씬 많은 강수량이 나타났는데, 이 때 북강릉에서는 북서 계열의 바람이 불었으나 독특하게 대관령에서는 남서-북서 계열의 바람이 부는 상황이 었다.

3. 수치모의 설계와 자료동화

이 사례 연구를 위하여 사용한 모델은 WRF V3.1.1 중규모 수치모델 (Skamarock *et al.*, 2008)이다. 이 사례 연구의 수치모의 영역은 강릉을 중심 (129.0°E , 37.5°N)으로 아시아, 한반도, 그리고 영동지역에 초점을 맞추어 3개의 영역으로 설정하였다 (Fig. 3). 각 영역의 수평 격자 간격은, Domain 1 (D1로 칭함)이 18 km (148×148), Domain 2 (D2로 칭함)가 6 km (148×148), 그리고 Domain 3 (D3로 칭함)이 2 km (148×148)이며, 단 방향 등지 격자 (One-way nested grid)로 구성하였다. 연직 층은 지형을 따르는 시그마 면상에서 31층으로 정의되었으며, 경계층에 있어서 최상단 기압은 50 hPa이다. 또한 측면 경계조건은 총 5개의 층으로 Specified zone이 1개 층, Relaxation zone이 4개의 층으로 이루어져 있다. 구름 미세 물리 모수화는 WDM (WRF Double Momentum) 6 Class 기법 (Lim and Hong, 2010)을 사용하였고, 행성경계층은 PBL (Planetary Boundary Layer) 꼭대기에 Entrainment layer를 취급하는 YSU (Yonsei University scheme) PBL 기법 (Hong *et al.*, 2006)을 사용하였다. 장파 복사 과정은 빠르고 정확한 계산을 위해 미리 설치된 표에 따라 계산되는 RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) 장파 복사 기법 (Mlawer *et al.*, 1997)을 선택하였으며,

Fig. 3. Model domain for Domain 1, Domain 2, and Domain 3. Topography is represented with shading based on scale right of D3. Bold paths A, B, C and D in D3 stand for a horizontal path of cross-section, passing Donghae, Daegwallyeong, Bukgangneung and Sokcho, respectively. Hereafter, SC, B-GN, GN, DG, WJ and DH in all the figures stand for Sokcho, Bukgangneung, Gangneung, Daegwallyeong, Wonju and Donghae, respectively.

단파 복사 과정은 청정 대기에서의 산란, 수증기의 흡수를 단순히 계산하는 Dudhia 기법 (Dudhia, 1989)을 선택하였다. 지표 모델에서는 Noah Land Surface Model을 사용하였다. 적운 모수화 과정은 Shallow convection을 포함하는 Kain-Fritsch 기법 (Kain and Fritsch, 1993)을 선택하였으나, D3에서는 적운모수화 과정을 사용하지 않았다. 모델의 초기 입력 자료 및 경계 자료는 NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Centers for Atmospheric

Research)에서 6시간 간격으로 제공하는, 수평 간격이 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ 인 GDAS (Global Data Assimilation System) FNL (Final analyses)을 사용하였고, 적분 시간 간격은 D1, D2, 그리고 D3의 경우, 각각 54초, 18초, 그리고 6초이다. 이와 같은 수치 모델의 설정을 Table 1에 요약하였다.

이 연구에서 자료동화를 위해 사용한 자료는 전국 68개 지점의 AWS (Automatic Weather System) 자료로, 관측 지점의 위경도, 고도, 기온, 기압, 습도, 바람

Table 1. Summary of the WRF model configuration.

Model	WRF V3.1.1		
Domains	Domain 1	Domain 2	Domain 3
Horizontal grid spacing	18 km	6 km	2 km
Dimension	148 × 148 × 31	148 × 148 × 31	148 × 148 × 31
Time step	54 s	18 s	6 s
Vertical layers/Model top	31 η vertical layers / 50 hPa		
Grid nesting	One-way		
Lateral boundary condition	Specified zone=1, Relaxation zone=4		
Initial condition	NCEP/NCAR GDAS(FNL) analysis (6-hourly 1° × 1°)		
Microphysics	WDM 6 scheme		
Planetary Boundary Layer	YSU PBL		
Cumulus parameterization	Kain-Fritsch (new Eta)		Not used
Land-Surface Model	Noah Land Surface Model		
Longwave radiation scheme	RRTM		
Shortwave radiation scheme	Dudhia shortwave		

자료가 이용되었으며, 또한 9개 지점 (철원, 문산, 강릉, 원주, 울진, 군산, 추풍령, 창원, 서해해양 종합기지)의 windprofiler 자료로, 관측 지점의 위경도, 고도, 대기 하층에서의 바람 자료 (U, V)가 이용되었다. 그리고 이용된 8개 지점의 레이더 자료는 기상청에서 운영 중인 강릉, 광덕산, 관악산, 군산, 진도, 부산, 성산, 고산 레이더 관측소의 반사도, 시선속도 (반지름 방향속도)이다. 레이더 자료는 매 10분마다 고품질 자료를 제공하고 대기의 구조를 입체적으로 제공한다. 하지만 레이더 빔이 가지는 특성으로 인해 대기 상층과 원거리의 저고도에서 관측 공백이 있으며, 지상과 바다에 의한 잡음과 불규칙한 전파, 거리 접힘 (range folding)과 속도 접힘 (velocity folding)과 같은 단점이 있다. NCAR에서 제공하는 SPRINT (Sorted Position Radar INTERpolation)와 CEDRIC (Custom Editing and Display of Reduced Information in Cartesian space)을 이용하여 레이더 자료의 구면 좌표계를 수치모델에서 사용하는 카테시안 좌표계로 전환하였으며 또한, 간단한 계산 및 잡음 제거 등 전처리 과정을 수행하였다. 이와 같이 전처리 과정을 통해 얻은 자료를 3DVAR의 입력자료 형태로 변환시키기 위하여 기상청 수치모델개발과에서 개발한 CEDREAD(CEDric READ)를 사용하였다. 지상관측자료와 레이더 자료의 자료동화는 D2 영역에 대해 실시하였다. 또한, 레이더의 관측 반경은 보통 약 250 km이기 때문에 격자 영역은 레이더를 중심으로 동서방향과 남북방향으로 각각 2.5°씩, 연직으로는 10 km이다. 수평으로 5°×5° 영역 내에서 0.02° 간격으로, 연직으로는 0.05 km간격으로 격자

자료를 만든다. 레이더의 격자자료를 바로 모델에 자료동화를 하게 되면 모델의 해상도보다 너무 조밀하게 자료가 입력되게 되므로 연직으로는 50 m, 수평으로는 2 km 간격으로 속아내기 (Thinning)를 수행하였다.

이 연구에서 WRFDA V3.1.1을 이용하여 관측 자료를 자료동화 하였으며, 수행과정을 간단히 언급하면 다음과 같다. 먼저, WRF 모델의 배경자료인 FNL 재분석 자료를 사용하여, 모델의 초기장 (First Guess)과 경계장 (lateral boundary condition)을 만들었다. 그리고 한 달 기간 (2011년 1월 10일 0000 UTC ~ 2011년 2월 11일 0000 UTC)을 대상으로 수행한 수치모의 결과에 NMC 방법 (Parrish and Derber, 1992)을 적용하여 배경오차장을 산출하였다. 자료동화를 하기 위해서 AWS와 windprofiler 자료의 경우, VAR system의 Obsproc 과정에 little_r format으로 입력하여 WRFDA의 input 자료로 만들었으며, 레이더 자료의 경우에는 이 과정을 거치지 않고 NCAR에서 개발되어진 레이더 전처리 시스템인 SPRINT, CEDRIC을 이용하여 전처리를 한 후, KMA에서 개발되어진 CEDREAD과정을 통해 little_r format으로 변환하였다. 이어서 모델의 초기장, Obsproc 과정을 거친 ascii format의 관측 자료들과 배경오차장을 사용하여 자료동화하는 da_wrfvar과정을 거쳐 양질의 초기장을 생성하였다. 그 후, 모델의 초기 경계장과 생성된 양질의 초기장을 바탕으로 개선된 Lateral boundary condition을 만들었다. 이렇게 생성된 wrfvar_output과 wrfbdy data를 WRF REAL과정의 input data로 사용하여 WRF 모델

을 구동하였다.

4. 수치모의 결과 및 분석

4.1. 사례 A에 대한 수치모의 실험 결과 분석

사례 A에 대한 WRF 수치모의 적분 시간은 2011년 2월 11일 0900 KST부터 12일 0900 KST까지 총 24 시간이다. 자료동화를 실시하지 않은 기준실험 (이하 CNTL이라 칭함)과 AWS 자료, windprofiler 자료, 그리고 레이더 자료가 모두 함께 동화된 실험 (이하 ALL이라 칭함)을 비교하여 자료동화의 효과를 분석하고자 한다. 여기서 자료동화는 D2 영역에 대해 수행하였으며, 자료동화시스템은 Fig. 4와 같이 구축하였다.

Figure 5(a)는 WRF 수치모의 초기 시각으로부터 12 시간 후인 11일 2100 KST의 지상 일기도이다. 이 일기도를 보면 화북지역에 고기압이, 그리고 일본 남쪽에 발달된 저기압에서 뻗어 나온 기압골이 영동과 영남지역에 위치해 있음을 알 수 있으며, 11일 0000 KST에 비해 이 기압골은 정체하면서 다소 발달하고 있으며, 12시간 후인 12일 0900 KST (그림 생략)에

는 이 기압골이 더욱 발달하여 하나의 닫힌 저기압이 되어 일본 돗토리 현 부근에 위치하고 있으며 이에 따라 우리나라 남동해안으로 기압경도력이 아주 조밀해지면서 북동 기류의 유입이 강화되고 있다.

Figure 5(b)는 12시간 적분 후 (11일 2100 KST)의 기준실험 결과로부터 얻어진 지상 기압장이다. 이 그림을 보면, 동해상으로 기압능이 위치하고 있으며, 영동지역으로는 북동 기류가 유입되는 기압 배치를 모의하여, 지상 일기도 (Fig. 5(a))에서 보여 주는 등압선 형태와 잘 일치하고 있다. 이는 WRF모델이 영동 지역 대설 현상과 관련된 중관규모적인 흐름을 잘 모의하고 있음을 확인할 수 있다.

Figure 6은 D2 영역의 CNTL과 ALL의 초기 예보장 (0h), 12시간 예보장 (+12 h), 24시간 예보장 (+24 h)에서의 925 hPa 혼합비와 바람에 대한 두 실험의 차이를 보여준다. 영동 대설의 경우, 대기 경계층에서 혼합비와 바람이 중요하므로 (Lee *et al.*, 2011), 925 hPa 고도에서의 혼합비와 바람을 기준으로 그 차이를 제시하였다. 925 hPa 혼합비와 바람의 초기 예보장 (Fig. 6(a))에서는 자료동화가 적용된 ALL에서는 CNTL에 비해 우리나라 남동부지역과 강원도지역으로 남풍 계열의 바람이 다소 강했으며, 혼합비의 경우, 강릉 이남의 동해안에서는 상대적으로 적은 반면에 동해연안에서는 약간 컸다. 눈이 많이 내리기 시작한 12시간 예보장 (Fig. 6(b))에서는 시간이 지남에 따라 혼합비 차이가 내륙으로 전파되어, 대부분의 중부지역에서 혼합비가 상대적으로 작았고, 동해연안과 울릉도 부근으로 혼합비가 컸다. 바람의 경우, 강릉과 동해 부근에서 서풍 계열의 바람이 강화되었다. 기압골이 약화된

Fig. 4. Model integration configuration and schematic diagram of analysis and forecasting system.

Fig. 5. (a) Surface weather chart and (b) simulated surface pressure field from CNTL valid at 2100 KST 11 February 2011.

Fig. 6. Difference of CNTL from ALL in 925 hPa water vapor mixing ratio (r) for (a) 0000 UTC 11 February 2011 (0h), (b) 1200 UTC 11 February 2011 (+12h) and (c) 0000 UTC 12 February 2011 (+24h). The difference in water vapor mixing ratio amount on the 925 hPa level is represented with shading based on scale at right of the Fig. 6c for +value (red) and -value (blue). Vectors mean the difference of wind vectors.

24시간 예보장 (Fig. 6(c))에서는 대부분의 중부지역에서는 혼합비가 상대적으로 커졌고, 강릉 부근 및 동해안 일부 지역 그리고 부산을 중심으로 한 남동지역에서는 작아졌다. 바람의 경우, 중부지역에서는 큰 차이가 나타나지 않았다. 한편, 요란의 중심이 일본 돗토리 현 부근에 위치함에 따라 돗토리 현 앞바다에는 바람의 차이가 크게 나타나며 요란의 남동쪽을 제외하고는 요란 역을 중심으로 혼합비의 증가가 뚜렷하다. 자료동화에 기인한 이러한 차이들은 수치모델의 강수 예측에 영향을 미칠 것으로 보인다. 이와 관련하여 CNTL, ALL, 그리고 AWS의 총 누적강수량을 비교분석하여 지상관측자료 (AWS 자료와 windprofiler

자료)와 레이더 자료를 함께 동화한 효과를 살펴보고자 한다.

Figure 7은 24시간 (11일 0900 KST-12일 0900 KST) 총 누적강수량 분포와 관련된 그림으로, Fig. 7(a)는 관측된 총 누적강수량을, Fig. 7(b)는 CNTL의 총 누적강수량을, Fig. 7(c)는 ALL의 총 누적강수량을 각각 보여준다. 그리고 Fig. 7(d)는 ALL과 CNTL의 총 누적강수량 차이를 보여주는 그림이다. 24시간 동안 관측된 총 누적강수량은 북강릉 약 91 mm, 대관령 약 43 mm, 속초 약 41 mm, 그리고 동해 약 82 mm로, 고산지대인 대관령보다 영동 해안지역, 특히 강릉과 동해지역 부근으로 집중되어 대설이 내렸다. Fig. 7(a)를

Fig. 7. 24 h accumulated precipitation (7 mm intervals) ending at 0900 KST 12 February 2011 from (a) the AWS observation, (b) the simulation without data assimilation (CNTL) and (c) the simulation with data assimilation (ALL), and (d) the difference chart between two simulations. The difference in 24h accumulated precipitation amount is represented with shading based on scale at right of the Fig. 7d for +value (red) and -value (blue).

보면 주 강수역 (50 mm 이상 되는 곳)이 영동 해안선을 따라 위치해 있음을 알 수 있으며, CNTL과 ALL의 총 누적강수량 분포도 (Fig. 7(b)와 7(c))에서도 관측된 총 누적강수량 분포도와 어느 정도 유사하게 영동 해안선을 따라 강수가 집중된 패턴임을 알 수 있다. CNTL과 ALL의 총 누적강수량 분포 차이를 보여주는 Fig. 7(d)를 보면, ALL이 상대적으로 속초에서 동해지역까지 이르는 영동 해안선을 따라 더 많은 강수 (붉은색 영역)를 모의하였으며, 대관령을 포함하는 내륙지역에서는 강수량을 더 적게 (푸른색 영역) 모의하였음을 알 수 있다. 이것은 CNTL이 주 강수역을 보다 내륙 쪽으로 모의하여 강릉 부근에서의 강수량

보다 대관령 부근의 강수량을 더 많이 모의하였기 때문이다.

Table 2는 영동지역의 주요 관측소인 북강릉 (B-GN), 대관령 (DG), 속초 (SC), 동해 (DH) 지점에서의 관측된 총 누적강수량, CNTL의 총 누적강수량, 그리고 ALL의 총 누적강수량을 보여준다. 여기서 주요 지점들의 강수량은 후 처리프로그램인 RIP (Read/Interpolate/Plot)을 이용하여 추출하였다.

CNTL과 ALL의 총 누적강수량과 관측된 총 누적강수량을 비교하여보면, CNTL의 경우, 북강릉과 동해에서는 관측값의 약 44%와 45%를, 그리고 ALL의 경우, 약 47%와 79%를 각각 수치모의하여 지상관측

Table 2. 24 h accumulated precipitation from the AWS observation (OBS), the simulation without data assimilation (CNTL) and the simulation with data assimilation (ALL) at Bukgangneung (B-GN), Daegwallyeong (DG), Sokcho (SC) and Donghae (DH), respectively.

	B-GN (mm)	DG (mm)	SC (mm)	DH (mm)
OBS.	91	43	41	82
CNTL	40	43	49	37
ALL	43	30	67	65

자료와 레이더 자료동화의 긍정적인 효과를 확인할 수 있다. 한편, 대관령과 속초 지점에서는 CNTL의 경우, 관측된 총 누적강수량의 약 100%와 120%를 수치모의한 반면에, ALL의 경우, 대관령에서는 관측된

총 누적강수량의 약 70%, 그리고 속초에서는 약 163% 정도를 수치모의하여, 다소 부정적인 효과도 같이 나타났다. 흥미롭게도 지상관측자료와 레이더 자료를 동화하여 수치모의를 수행한 경우, 이번 연구 사례에서 제일 눈이 많이 내린 지점인 북강릉과 동해 지점에서 보다 긍정적인 효과를 확인할 수 있는 반면에 상대적으로 눈이 적게 내린 대관령과 속초 지점에서는 과소모의와 과대모의를 각각 보여주었다.

한편, 두 실험에서 모의된 24시간 총 누적강수량을 주요 지점별로 자세히 비교하여 보면(Table 2 참조), CNTL에서는 북강릉 약 40 mm, 대관령 약 43 mm, 속초 약 49 mm, 동해 약 37 mm가 모의되었고, ALL에서는 북강릉 약 43 mm, 대관령 약 30 mm, 속초 약 67 mm, 동해 약 65 mm가 모의되었다. 즉, 관측 자료가 동화된 ALL의 경우, 영동 해안지대인 강릉, 속초,

Fig. 8. Time series of hourly accumulated precipitation and wind direction from the AWS observation (OBS), the simulation without data assimilation (CNTL) and the simulation with data assimilation (ALL) at (a) Bukgangneung, (b) Donghae, (c) Sokcho and (d) Daegwallyeong from 0900 KST 11 to 0900 KST 12 February 2011.

Fig. 9. The vertical cross-sections (passing B-GN) of horizontal wind and vertical velocity valid at 0100 KST 12 February 2011 from (a) the simulation without data assimilation (CNTL) and (b) the simulation with data assimilation (ALL). Length scales for the wind vector in m s^{-1} are given at the bottom, respectively. Vertical velocity is represented with shading based on scale at right of the Fig. 9(b).

그리고 동해에서는 CNTL에 비해 약 8%, 약 37%, 그리고 약 76%의 강수량 증가 효과가 각각 나타난 반면에, 보다 서쪽에 위치한 고산지대인 대관령에서는 CNTL에 비해 약 30%의 강수량 감소 효과가 나타났다. 따라서 지상관측자료와 레이더 자료를 함께 3DVAR로 동화하여 얻은 초기장을 이용하여 구동한 ALL이 CNTL보다 주 강수역을 보다 동쪽인 영동해안 쪽으로 모의하였고, 내륙 쪽으로는 적은 강수량을 모의하였음을 잘 알 수 있다. 이러한 두 실험의 차이는 ALL의 초기장 (Fig. 6(a))에서 영동내륙으로 혼합비를 적게 처방한 효과가 시간에 따라 증폭되어 나타난 결과로 보인다. 이와 같이 CNTL과 ALL의 모의결과에서 보여준 총 누적강수량 분포의 차이를 보다 더 잘 이해하기 위하여, 수침도의 기간 동안에 주요 지점별로 CNTL과 ALL의 시간당 강수량 차이가 가장 컸던 시간대를 선정하여 수평바람 및 연직속도 그리고 Total precipitation mixing ratio에 대한 연직단면도를 통하여 두 모의에 있어 나타난 차이점을 분석하고자 한다.

Table 2에서 CNTL과 ALL사이에서의 총 누적강수량 차이를 보면, 동해 28 mm, 속초 18 mm, 대관령 13 mm, 북강릉 3 mm 정도이다. Fig. 8은 주요 네 지점에서의 CNTL, ALL, 그리고 관측된 시간당 강수량을 보여준다. 24시간 총 누적강수량 차이가 가장 작게 난 북강릉 관측소의 경우 (Fig. 8(a)), CNTL과 ALL의 시간당 강수량 차이가 가장 컸던 시간대는 12일 0000~0100 KST로, CNTL (약 2.2 mm hr^{-1})과 ALL (약 10.5 mm hr^{-1})의 시간당 강수량 차이가 약 8 mm 정도이었다. 동해 관측소 (Fig. 8(b))의 경우, CNTL과 ALL

의 시간당 강수량 차이가 가장 컸던 시간대는 12일 0100~0200 KST로, CNTL (약 2.8 mm hr^{-1})과 ALL (약 12.6 mm hr^{-1})의 시간당 강수량 차이가 약 10 mm 정도이었으며, 속초 관측소 (Fig. 8(c))의 경우, 시간당 강수량 차이가 가장 큰 시간대는 12일 0500~0600 KST로, CNTL (약 0.9 mm hr^{-1})과 ALL (약 8.9 mm hr^{-1})의 시간당 강수량 차이가 약 8 mm 정도이었다. 대관령 관측소 (Fig. 8(d))의 경우, 시간당 강수량 차이가 가장 큰 시간대는 12일 0200~0300 KST로, CNTL (약 7.7 mm hr^{-1})과 ALL (약 2.1 mm hr^{-1})의 시간당 강수량 차이가 약 6 mm 정도이었다. 이 네 지점에서 시간당 강수량 차이가 가장 크게 나타난 시간대를 중심으로 CNTL과 ALL의 주요 기상장을 분석하고자 한다.

Figure 9는 북강릉 관측소에서 시간당 강수량 차이가 가장 컸던 시간대의 대기상태를 분석하기 위하여 북강릉을 비스듬히 지나는 경로 D (Fig. 3 참조)를 따르는 연직단면도로, 강수량 차이가 크게 나타난 시각인 12일 0100 KST의 CNTL (Fig. 9(a))과 ALL (Fig. 9(b))의 수평바람 및 연직속도에 대한 연직단면도이다. CNTL의 경우, 산 경사면 정상에서부터 동해 해안선 바깥까지 서-북서 계열의 바람이 불고, 동해상에서는 동-북동 계열의 바람이 불어, 이 두 바람이 동해 앞바다에서 만나 수렴하는 곳에 상승역이 존재함을 볼 수 있다. ALL의 경우, 산 정상에서 산 경사면을 따라 북서 계열의 바람이, 동해상에서는 북동 계열의 바람이 강하게 불고 있다. 이 두 바람은 동해 해안선 부근에서 만나 수렴하여 이곳에 아주 강한 상승역이 위치한다. 수평바람의 수렴역과 연직속도의 상승역을 살펴

Fig. 10. The vertical cross-sections (passing B-GN) of total precipitation mixing ratio valid at 0100 KST 12 February 2011 from (a) the simulation without data assimilation (CNTL) and (b) the simulation with data assimilation (ALL). Vertical velocity is represented with shading based on scale at right of the Fig. 10(b).

Fig. 11. Same as Fig. 9. except for the vertical cross-sections passing DH valid at 0100 KST 12 February 2011.

본 결과, ALL의 수렴역과 상승역의 위치가 CNTL의 수렴역과 상승역의 위치보다 해안선에 보다 가깝게 위치하며, 또한 최대 연직속도가 약 190 cm s^{-1} 로 CNTL의 최대 연직속도 약 80 cm s^{-1} 보다 훨씬 더 큼을 알 수 있다. 따라서 ALL의 경우, 해안선에 위치한 북강릉에서 더 많은 강수를 모의하였다.

Figure 10은 0100 KST의 Total precipitation mixing ratio에 대한 연직단면도로, Fig. 10(a)는 CNTL의 결과이고, Fig. 10(b)는 ALL의 결과이다. CNTL의 경우, 해안선 바깥에 Total precipitation mixing ratio (최대 0.6 g kg^{-1}) 영역이, 그리고 ALL의 경우에는 바로 해안선 부근에 보다 높은 Total precipitation mixing ratio

(최대 1.2 g kg^{-1}) 영역이 있음을 볼 수 있다. 따라서 해안선 부근에 보다 높은 Total precipitation mixing ratio 영역을 모의한 ALL의 경우가 북강릉의 강수량을 보다 더 많이 모의하였다.

Figure 11은 동해 관측소에서 시간당 강수량 차이가 가장 컸던 시간대의 대기상태를 분석하기 위하여 동해를 비스듬히 지나는 경로 A (Fig. 3 참조)를 따르는 연직단면도로, 강수량 차이가 크게 나타나기 시작한 시각인 12일 0100 KST의 CNTL (Fig 11(a))과 ALL (Fig. 11(b))의 수평바람 및 연직속도에 대한 연직단면도이다. CNTL의 경우, 산 경사면 정상에서부터 동해 해안선 멀리까지 서-북서 계열의 바람이 불

Fig. 12. Same as Fig. 10. except for the vertical cross-sections passing DH valid at 0100 KST 12 February 2011.

Fig. 13. Same as Fig. 9. except for the vertical cross-sections passing SC valid at 0500 KST 12 February 2011.

고, 동해상에서는 북동-동풍 계열의 바람이 불어, 이 두 바람이 동해 앞바다 먼 곳에서 만나 수렴하면서 강한 상승역이 이곳에 존재함을 볼 수 있다. ALL의 경우에는 산 정상에서 산 경사면을 따라 북서 계열의 바람이, 동해상에서는 북동 계열의 바람이 강하게 불고 있다. 이 두 바람은 동해 해안선 부근에서 만나 수렴하여 이곳에 아주 강한 상승역이 위치한다. 수평바람의 수렴역과 연직속도의 상승역을 살펴본 결과, ALL의 수렴역과 상승역의 위치가 CNTL의 수렴역과 상승역의 위치보다 동해안 해안선에 가깝게 위치하며, 또한 연직속도가 약 240 cm s^{-1} 로 동일한 위치에서의 CNTL의 연직속도 약 10 cm s^{-1} 보다 훨씬 더 크울 수 있다. 따라서 ALL의 경우, 해안선에 위치한 동해 지점에서 더 많은 강수를 모의하였다.

Figure 12는 0100 KST의 Total precipitation mixing

ratio에 대한 연직단면도로, Fig. 12(a)는 CNTL의 모의이고, Fig. 12(b)는 ALL의 모의이다. CNTL의 경우, 동해 해안선 멀리에 높은 Total precipitation mixing ratio (최대 1.8 g kg^{-1}) 영역이, 그리고 ALL의 경우에는 동해 해안선 부근에 높은 Total precipitation mixing ratio (최대 1.6 g kg^{-1}) 영역이 있음을 볼 수 있다. 따라서 해안선 부근에 높은 Total precipitation mixing ratio (최대 1.6 g kg^{-1}) 영역을 모의한 ALL의 경우가 동해 지점의 강수량을 보다 더 많이 모의하게 되었음을 알 수 있다.

Figure 13은 속초 관측소에서 시간당 강수량 차이가 가장 컸던 시간대의 대기상태를 분석하기 위하여 속초를 지나는 경로 C (Fig. 3 참조)를 따르는 연직단면도로, 강수량 차이가 크게 나타나기 시작한 시각인 12일 0500 KST의 CNTL (Fig. 13(a))과 ALL (Fig.

Fig. 14. Same as Fig. 10. except for the vertical cross-sections passing SC valid at 0500 KST 12 February 2011.

Fig. 15. Same as Fig. 9. except for the vertical cross-sections passing DG valid at 0200 KST 12 February 2011.

13(b))의 수평바람 및 연직속도에 대한 연직단면도이다. CNTL의 경우, 동해상에서 속초 앞바다 부근으로는 북동 계열의 바람이, 속초 해안선 부근에서 산 경사면 정상 부근으로는 북-북북동 계열의 바람이 불어, 이 두 바람이 만나 수렴하는 속초 해안선 부근으로 상승역 (최대 110 cm s^{-1})이 위치하며, 산 경사면을 따라서는 약한 하강역이 존재한다. 한편, ALL의 경우, 동해상에서는 북동 계열의 바람이, 속초 해안선 부근과 산 경사면 정상으로는 북풍 계열의 바람이 불고 있어 이 두 바람이 만나는 속초 해안선 부근에서 수렴하여 이곳에 CNTL보다 매우 강한 상승역 (최대 260 cm s^{-1})이 위치한다. 그리고 산 경사면을 따라 존재하는 하강역도 CNTL보다 강도가 강하다. 이와 관련하여 이 시각의 Total precipitation mixing ratio에 대한 연직 단면도 (Fig. 14)를 보면, CNTL (Fig. 14(a))

의 경우, 속초 내륙지역에서 산 경사면을 따라 다소 약한 Total precipitation mixing ratio (최대 0.9 g kg^{-1}) 영역이 있으며, ALL (Fig. 14(b))의 경우, 속초 해안선 부근에서 높은 Total precipitation mixing ratio (최대 1.3 g kg^{-1}) 영역이 위치해 있음을 알 수 있다. 따라서 해안선 부근에 높은 Total precipitation mixing ratio (최대 1.3 g kg^{-1}) 영역을 모의한 ALL의 경우가 CNTL의 경우보다 속초 지점의 강수량을 보다 더 많이 모의하게 되었음을 알 수 있다.

Figure 15는 대관령 관측소에서 시간당 강수량 차이가 가장 컸던 시간대의 대기상태를 분석하기 위하여 대관령을 지나는 경로 B (Fig. 3 참조)를 따르는 연직 단면도로, 강수량 차이가 크게 나타나기 시작한 시각인 12일 0200 KST의 CNTL (Fig. 15(a))과 ALL (Fig. 15(b))의 수평바람 및 연직속도에 대한 것이다. CNTL

Fig. 16. Same as Fig. 10. except for the vertical cross-sections passing DG valid at 0200 KST 12 February 2011.

의 경우, 해안선에서부터 산 경사면을 따라 북동 계열의 바람이 불고 있으며, 강한 상승역 (최대 160 cm s^{-1}) 이 4 km 이상이 되는 고도까지 위치한다. 반면에, ALL의 경우에는 해안선 부근에서는 북서 계열의 바람이, 동해상에서는 북동 계열의 바람이 불어 이 두 바람이 해안선 부근의 해상에서 만나 수렴하면서, 이곳에 상승역이 존재하나 상승 강도 (최대 100 cm s^{-1})는 CNTL보다도 훨씬 약하며 그 상승역의 고도도 약 2 km 정도로 제한되어 있다. 이와 관련하여 이 시각의 Total precipitation mixing ratio에 대한 연직 단면도 (Fig. 16)를 보면, CNTL (Fig. 16(a))의 경우, 산 경사면을 따라 산 정상 부근으로 높은 Total precipitation mixing ratio (최대 1.1 g kg^{-1}) 영역이 위치해 있으나, ALL (Fig. 16(b))의 경우, CNTL보다 훨씬 낮은 Total precipitation mixing ratio (최대 0.6 g kg^{-1}) 영역이 해안선 부근 상공 1 km 이하 되는 고도에 위치해 있음을 알 수 있다. 따라서 CNTL의 경우가 ALL의 경우보다 대관령 지점으로 보다 더 많은 강수를 모의하게 되었음을 알 수 있다.

4.2. Threat score 분석

강원지역 전체를 대상으로 평균적인 CNTL과 ALL의 강수 예측 정확도를 알아보기로 강수능력 평가지수로 사용되는 TS (Threat Score)를 추가로 계산하였으며, 계산 과정은 Wilks (1995) 방법을 따랐다. TS는 관측 강수사상과 예측 강수사상의 합에 대한 예측 강수적중 사상의 비율로 0에서 1사이의 값을 갖는데 완벽한 예보의 경우 1값을 가지며, Table 3으로부터 식 (1)과 같이 나타낸다. H (Hit)는 관측에서도 강수가 관측되었고, 모델에서도 강수를 예측한 경우, M (Miss)은 관측에서는 강수가 관측되었지만, 모델에서는 강수를 예측하지 못한 경우, 그리고 F (False alarms)는

Table 3. Contingency tables for verification of the rainfall.

	Forecast	
	Yes	No
Observed	Yes H(hit)	No M(miss)
	No F(false alarms)	D

관측에서는 강수가 관측되지 않았지만, 모델에서는 강수를 예측한 경우이다. 강수 검증을 위해 모델의 D3 영역에 해당하는 54개 지점의 AWS 자료를 사용하였고, 수치모델에서 모의된 3시간 누적강수량을 5, 10, 15, 20, 25, 30 mm/3 hr으로 구분하여 각 예보 시간대별로 TS를 계산하였다.

$$TS = \frac{\text{Correct forecast}}{\text{Total forecastcase of rainyday}} = \frac{H}{H+M+F} \quad (1)$$

Figure 17은 6개의 임계값 5, 10, 15, 20, 25, 30 mm/3 hr으로 구분한 후, 모의된 3시간 누적강수량을 대상으로 각 예보 시간대별로 TS를 계산한 그래프이다. 모든 임계값에 대해 다소 차이는 있지만 ALL이 CNTL보다 상대적으로 약간 더 높은 TS를 일관되게 잘 보여주고 있다. Fig. 18은 Fig. 17에 있는 각 예보 시간대별 TS 8개를 산술평균한 후, 각 임계값별로 나타낸 그래프이다. 모든 임계값에 대해 ALL이 CNTL보다 상대적으로 더 높은 평균 TS를 보여주는데, 임계값이 5 mm/3 hr인 경우, CNTL에서는 평균 TS가 0.256이며, ALL에서는 평균 TS가 0.289로 ALL의 경우가 CNTL보다 약 0.033정도 더 높은 점수를 보여 주며, 임계값이 10 mm/3 hr인 경우, CNTL에서는 평균 TS가 0.072이며, ALL에서는 평균 TS가 0.087로 ALL의 경우가 약 0.015정도 더 높은 점수를 보여 주었다. 임계값이

Fig. 17. Threat scores for (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 mm/3hr thresholds from the WRF simulations valid from 0000 UTC 11 to 0000 UTC 12 February 2011.

Fig. 18. Averaged threat scores for (a) 5, (b) 10, (c) 15, (d) 20, (e) 25 and (f) 30 mm/3hr thresholds from the WRF simulations during the 24 hour simulations.

15 mm/3 hr인 경우, ALL의 경우가 CNTL보다 0.011 정도, 그리고 임계값이 20 mm/3 hr인 경우, 0.008정도 더 높은 점수를 보여 주었다. 이것은 자료동화를 하지 않은 경우 (CNTL)에 비해 3DVAR 자료동화를 하여 초기장을 개선시킨 후 수치모의를 한 경우 (ALL)에 강수 예측의 정확도가 보다 향상되었음을 보여주는 것이다.

5. 요약 및 결론

영동지역에서 160여 명의 이재민과 230여억 원의 재산 피해를 일으킨 2011년 2월 11-12일 사례를 대상으로, WRF 3DVAR를 이용하여 전국 68개 지점의 AWS 자료, 9개 지점의 windprofiler 자료, 그리고 8개 지점의 레이더 자료를 동화한 수치모의 실험 (ALL)과 이러한 자료동화를 적용하지 않은 기준 수치모의 실험 (CNTL)을 비교 분석함으로써 강수량 모의에 있어 자료동화가 미치는 효과를 알아보았다.

2011년 2월 11-12일 사례의 경우, 24시간 동안 관측된 총 누적강수량 분포도를 보면, 북강릉 약 91 mm, 대관령 약 43 mm, 속초 약 41 mm, 그리고 동해 약 82 mm로, 산악지대인 대관령보다 영동 해안지역, 특히 강릉과 동해지역 부근으로 집중적으로 대설이 내렸다. CNTL과 ALL의 총 누적강수량 분포도에서도 관측된 총 누적강수량 분포도와 어느 정도 유사하게 영동 해안선을 따라 강수가 집중된 패턴을 모의하였다. 그러나 ALL의 경우, CNTL에 비해 속초에서 동해지역까지 이르는 영동 해안선을 따라 더 많은 강수를 모의한 반면에, 대관령을 포함하는 내륙지역에서는 강수량을 더 적게 모의하였다. 이러한 두 실험의 차이는 ALL의 초기장에서 영동내륙으로 혼합비를 적게 처방한 효과가 시간에 따라 증폭되어 나타난 것으로 보인다.

24시간 총 누적강수량을 주요 지점별로 자세히 비교하여 보면, CNTL에서는 북강릉 약 40 mm, 대관령 약 43 mm, 속초 약 49 mm, 동해 약 37 mm가 모의되었고, ALL에서는 북강릉 약 43 mm, 대관령 약 30 mm, 속초 약 67 mm, 동해 약 65 mm가 모의되었다. 즉, 관측 자료가 동화된 ALL의 경우, 영동 해안지대인 북강릉, 속초, 그리고 동해에서는 CNTL에 비해 약 8%, 약 37%, 그리고 약 76%의 강수량 증가 효과가 각각 나타난 반면에, 보다 서쪽에 위치한 고산지대인 대관령에서는 CNTL에 비해 약 30%의 강수량 감소 효과가 나타났다. 따라서 지상관측자료와 레이더 자료를 3DVAR로 동화하여 얻은 초기장을 이용하여 구동한 ALL이 CNTL에 비해 주 강수역을 보다 동쪽인 영동 해안 쪽으로 치우쳐 모의하였음을 알 수 있었다.

한편, 영동지역의 주요 지점에 대해 CNTL과 ALL의 누적강수량과 관측된 총 누적강수량을 비교해보면, CNTL의 경우, 북강릉과 동해에서는 관측값의 약 44%와 45%를, 그리고 ALL의 경우, 약 47%와 79%를 각각 수치모의하여 북강릉과 동해 지점에서 지상관측자료와 레이더 자료동화의 긍정적인 효과를 확인할 수 있었다. 반면에, CNTL의 경우, 대관령과 속초에서는 관측된 총 누적강수량의 약 100%와 120%를 수치모의한 반면에, ALL의 경우, 대관령에서는 관측된 총 누적강수량의 약 70%, 그리고 속초에서는 약 163% 정도를 수치모의하여, 대관령과 속초 지점에서는 지상관측자료와 레이더 자료동화의 부정적인 효과도 같이 나타났다. 즉, 이 사례에 대하여 지상관측자료와 레이더 자료를 함께 동화하였을 경우, 지점별로 볼 때, 대설이 집중된 지점에서는 긍정적인 효과가 있는 반면에 상대적으로 적게 내린 지점에서는 자료동화 효과가 부정적으로 나타났다. 그 이유의 일부는 복잡한 영동지역의 지형 효과와 자료동화 효과가 서로 겹쳐 나타나면서 지역에 따라 다른 결과가 나온 것으로 보인다.

한편, 앞에서 언급한 주요 지점을 포함한 강원지역 전체를 대상으로 평균적인 CNTL과 ALL의 강수 예측 정확도를 알아보려고 수치모델에서 모의된 3시간 누적강수량을 5, 10, 15, 20, 25, 30 mm/3 hr으로 구분하여 각 예보 시간대별로 Threat Score를 계산하였다. 모든 임계값에 대해 다소 차이는 있지만 ALL이 CNTL보다 상대적으로 더 높은 TS를 보여주는데, 특히 임계값이 5 mm/3hr인 경우, CNTL에서는 평균 TS가 0.256이며, ALL에서는 평균 TS가 0.289로 ALL의 경우가 CNTL보다 약 0.033 정도 더 높은 점수를 보여 주었다. 앞에서 언급하였듯이 지점별로 볼 때, 자료동화효과가 긍정적 또는 부정적으로 다소 다르게 나타났지만, 강원지역 전체를 대상으로 평균한 TS를 볼 때, 자료동화를 하지 않은 경우 (CNTL)에 비해 3DVAR 자료동화를 하여 초기

장을 개선시킨 후 수치모의를 한 경우 (ALL)가 강수 예측의 정확도를 다소 향상시켰음을 보여주었다. 한 사례 연구를 통하여 영동지역에서의 자료동화효과를 일반화시키기는 어렵기 때문에, 앞으로도 다양한 여러 사례에 대한 자료동화 효과를 분석할 필요가 있다고 본다.

감사의 글

이 연구는 2011년 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 연구 (2011-0013879)입니다. 그리고 레이더 자료동화 관련 자료를 제공한 기상청에 감사드립니다.

REFERENCES

- 임윤진, 조민수, 권오경, 임은하, 권하택, 이승우, 2010: WRF를 이용한 태풍 나리 예측에서 자료동화가 미치는 영향. *한국기상학회 봄 학술대회 논문집*, 76-77.
- 임은하, 김영화, 이천우, 2003: 지역용 3차원 변분 자료 동화에서 레이더 시선속도자료의 동화 효과. *대기*, **13**(1), 94-97.
- 최정희, 이용희, 장동언, 조천호, 2002: AWS 자료를 포함한 지상자료동화가 단시간 예측에 미치는 영향. *대기*, **12**(1), 377-380.
- Cho, K.-H., 2008: The Statistical Forecasting of Topographic Precipitation at Wintertime for the Yeongdong Region : Aconceptual Model Approach. Kangnung National University, 143 pp (in Korea with English abstract).
- 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.
- Ha, J. H., H.-W. Kim, and D.-K. Lee, 2011: Observation and Numerical Simulations with Radar and Surface Data Assimilation for Heavy Rainfall over Central Korea. *Adv. Atmos. Sci.*, **28**(3), 573-590.
- Hong, S.-Y., Y. Noah, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, **134**(9), 2318-2341.
- Jhun, J-G, D-K, Lee, and H-A, Lee, 1994: A Study on the Heavy Snowfalls Occurred in South Korea, Asia-Pacific *J. Atmos. Sci.*, **30**(1), 97-117 (in Korea with English abstract).
- Kain, J. M., and J. M. Fritsch, 1993: Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. The representation of cumulus convection in numerical models. *Amer. Meteor. Soc.*, **24**, 165-170.
- Kim, S.-D, 2010: The evaluation of WRF numerical simulations of heavy snowfall events using WRF 3DVAR. Gangneung-Wonju National University, 58 pp (in Korea with English abstract).
- Lee, J.-G, 1999: Synoptic Structure Causing the Difference in Observed Snowfall Amount at Taegwallyong and Kangnung: Case Study. *J. Korean Meteor. Soc.*, **35**(3), 319-334 (in Korea with English abstract).
- _____, 2001: A numerical simulation of a heavy snowfall event occurred along the Youngdong coastal area, *J. Korean Meteor. Soc.*, **37**(1), 293-308 (in Korea with English abstract).
- _____, S.-D. Kim, and Y.-J. Kim, 2011: A Trajectory Study on the Heavy Snowfall Phenomenon in Yeongdong Region of Korea. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **47**(1), 45-62.
- Lim, K.-S. S., and S.-Y. Hong, 2010: Development of and effective Double-Moment cloud microphysics scheme with prognostic Cloud Condensation Nuclei(CCN) for weather and climate models. *Mon. Wea. Rev.*, **138**(5), 1587-1612.
- 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**(D14), 16663-16682.
- National Emergency Management Agency, 2012: 2011 disaster Yearbook. National Emergency Management Agency, 995 pp (in Korean).
- Parrish, D. F., and J. C. Derber, 1992: The national meteorological center's spectral statistical-interpolation analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, **120**(8), 1747-1763.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang and J. G. Powers, 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Tech Note, NCAR/TN-475+STR, 113 pp.
- Wilks, D. S., 1995: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, 467 pp.
- Xue, M., K. K. Droegemeier, V. Wong, A. Shapiro, and K. Brewster, 1995: ARPS Version 4.0 User's Guide. [Available at <http://www.caps.ou.edu/ARPS/>], 380 pp.