분석자료의 분해능과 3DVAR 적용에 따른 WRF모의 민감도: 사례 연구

최 원¹⁾ · 이재규^{2),*} · 김유진²⁾

¹⁾국립기상연구소 재해기상연구센터

²⁾강릉원주대학교 대기환경과학과

(접수: 2012년 7월 16일, 수정: 2012년 10월 11일, 게재확정일: 2012년 10월 14일)

Sensitivities of WRF Simulations to the Resolution of Analysis Data and to Application of 3DVAR: A 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, Gangneung 210-702, Korea

²⁾Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University,
Gangneung 210-702, Korea

(Received: 16 July 2012, Revised: 11 October 2012, Accepted: 14 October 2012)

Abstract This study aims at examining the sensitivity of numerical simulations to the resolution of initial and boundary data, and to an application of WRF (Weather Research and Forecasting) 3DVAR (Three Dimension Variational data Assimilation). To do this, we ran the WRF model by using GDAS (Global Data Assimilation System) FNL (Final analyses) and the KLAPS (Korea Local Analysis and Prediction System) analyses as the WRF's initial and boundary data, and by using an initial field made by assimilating the radar data to the KLAPS analyses. For the sensitivity experiment, we selected a heavy rainfall case of 21 September 2010, where there was localized torrential rain, which was recorded as 259.5 mm precipitation in a day at Seoul. The result of the simulation using the FNL as initial and boundary data (FNL exp) showed that the localized heavy rainfall area was not accurately simulated and that the simulated amount of precipitation was about 4% of the observed accumulated precipitation. That of the simulation using KLAPS analyses as initial and boundary data (KLAPC exp) showed that the localized heavy rainfall area was simulated on the northern area of Seoul-Gyeonggi area, which renders rather difference in location, and that the simulated amount was underestimated as about 6.4% of the precipitation. Finally, that of the simulation using an initial field made by assimilating the radar data to the KLAPS using 3DVAR system (KLAP3D exp) showed that the localized heavy rainfall area was located properly on Seoul-Gyeonggi area, but still the amount itself was underestimated as about 29% of the precipitation. Even though KLAP3D exp still showed an underestimation in the precipitation, it showed the best result among them. Even if it is difficult to generalize the effect of data assimilation by one case, this study showed that the radar data assimilation can somewhat improve the accuracy of the simulated precipitation.

Key words: Heavy rainfall, radar data, 3DVAR, KLAPS, WRF

*Corresponding Author: Jae Gyoo Lee, Department of
Atmospheric and Environmental Science, Gangneung-Wonju
National University, Gangneung 210-702, Korea.

Phone : +82-33-643-2322, Fax : +82-33-643-2320

E-mail : ljgyoo@gwnu.ac.kr

1. 서 론

근래의 호우 사례 연구에서는 집중관측 자료 또는
중관 자료를 분석하고 이어서 중규모 수치모델을 구

동하여 얻어진 고해상도의 수치모의 자료들을 추가적으로 분석함으로써, 호우에 대한 이해의 폭을 보다 넓히고 있다. 예를 들면, Moteki 등 (2004)은 일본 장마 기간 동안에 집중관측 자료를 분석하였고 또한 일본 기상연구소의 Nonhydrostatic model인 MRI-NHM 수치모델을 이용한 수치모의를 수행하여 장마전선과 구분되는, 수증기 경도가 큰 수렴선 (convergence line)인 “water vapor front”의 존재를 밝혀내었다. 이지우와 홍성유 (2006)는 2005년 6월 26일부터 27일까지 경기도 양동 지역에서 발생한 집중호우 사례 연구에서 WRF (the Weather Research and Forecasting)모델을 이용하여 집중호우 역을 잘 모의할 수 있음을 보여 주었으며, 신우주 등 (2009)은 2009년 7월 16일 한반도 남부 지역에 발생한 집중호우에 관한 사례 연구에서 레이더 및 기상위성 영상 분석 그리고 WRF수치모의를 수행하여 중규모 집중호우의 발생과 진화과정을 분석하였다.

수치모델을 이용하여 집중호우를 보다 정확히 모의하기 위해서는 고해상도의 관측 자료와 초기 자료가 필요하다. 그런데 수치모델의 초기 자료는 중규모 시스템을 인식할 정도로 충분한 영향력을 발휘하지 못하는 경우가 많기 때문에 단순히 초기 자료를 이용하여 중규모 시스템의 시작을 적절하게 모의하는 것이 다소 어렵다는 것을 다수의 수치연구에서 보여 주었으며, 수치모의를 위한 초기 조건을 개선하기 위해서는 자료동화가 유용한 도구라는 것을 보여 주었다 (e.g., 위태권, 1999; Lee and Lee, 2003; Liu *et al.*, 2005; Yu, 2007; Choi *et al.*, 2011).

최정희 등 (2002)은 부산 단시간 예측시스템 (Busan short range prediction system, BSRPS)을 이용하여 AWS (Automatic Weather System) 자료를 포함한 4차원 지상 자료동화가 단시간 예측에 미치는 영향을 분석하여, 지상기온과 풍향의 단시간 (1~12 h) 예측에 있어 보다 향상된 결과를 얻었음을 보였다. 임은하 등 (2003)은 RDAPS (Regional Data Assimilation and Prediction System)에 3차원 변분법을 적용하여 레이더 자료를 동화한 사례실험에서, 3차원 변분법의 이용이 강수량 모의에 있어 보다 긍정적인 영향을 주었다고 하였으며, Ha *et al.* (2011)은 2006년 7월 11일에서 12일 사이에 중부 지역에 나타난 집중호우 사례 연구에서, WRF모델과 3DVAR (Three-Dimensional Variational data Assimilation) 시스템을 이용하여 레이더와 AWS 자료를 동화한 초기 자료를 사용하여 모델을 구동하였을 경우, 규준실험에 비해 대류시스템의 발달을 잘 모의하였으며 또한, 하층풍속이 보다 증가하였음을 보여 주었다.

수치모델의 초기 및 경계 자료로 기존에 많이 사용된 자료는 NCEP/NCAR (National Centers for Environmental

Prediction/National Centers for Atmospheric Research)에서 6시간 간격으로 제공되는 수평 간격이 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ GDAS (Global Data Assimilation System) FNL (Final analyses) 자료이다. 하지만 수평분해능이 약 100 km인 FNL자료를 이용하여 수치모의를 하게 되면 수치모델의 초기상태와 실제 초기상태의 차이가 커질 수밖에 없다. 황윤정 등 (2011)은 이러한 초기 자료의 해상도와 초기장의 개선을 위해, 수평분해능이 5 km인 국립기상연구소 예보연구과의 초단기 기상예측시스템인 KLAPS (Korea Local Analysis and Prediction System) 자료를 사용하였고, 또한 WRF 3DVAR를 이용하여 남해와 서해상의 고층관측 자료를 자료동화한 초기장을 사용하여 수치모의를 수행한 결과를 보여 주면서, 수치모의된 강수 분포가 AWS 강수 분포와 유사함을 보여 주었으며, 또한 12시간 누적 강수량에 대한 ETS (Equitable Threat Score)를 통한 검증에서도 긍정적인 효과가 있음을 보여 주었다.

이 연구에서는 2010년 9월 21일 중부 지역에 많은 비를 내리고 특히 서울 (지점번호: 47108)에서 하루 동안에 259.5 mm의 집중호우 (최대 강수 강도 71 mm h^{-1})를 동반한 사례를 대상으로, 기존의 FNL자료를 초기 및 경계장으로 이용하여 수치모의를 수행한 실험 (이하 FNL실험), KLAPS자료를 초기 및 경계장으로 이용하여 수치모의를 수행한 실험 (이하 KLAPC 실험), 그리고 3DVAR를 이용하여 KLAPS자료에 레이더 자료를 자료동화한 후, 수치모의를 수행한 실험 (이하 KLAP3D실험)을 각각 수행하여 초기 및 경계장의 분해능 그리고 WRF 3DVAR기법의 적용 여부에 따른 수치모의의 민감도 분석을 하고자 한다. 그리고 민감도를 알아보기 위하여 재분석 자료의 종류와 3DVAR의 적용 여부만 다를 뿐 모두 동일한 모델 구성을 갖고 위의 세 가지 수치모의 실험을 수행하였으며, 특히 제일 많은 비가 내린 서울 지역의 강수량 모의에 초점을 맞추었다. FNL자료와 KLAPS자료를 생산하기 위하여 사용되는 자료와 그리고 자료동화 기법에서도 어느 정도 서로 차이가 있어, FNL자료와 KLAPS자료를 초기 및 경계장으로 이용하여 수치모의를 수행한 실험결과의 차이가 전적으로 5배 정도의 차이가 나는 자료의 분해능 차이에 의해 나타난 것으로 볼 수는 없지만, 분해능 이외의 다른 요소가 수치모의 결과에 미치는 영향은 상대적으로 작을 것으로 생각된다.

2. 자 료

이 연구를 위하여 사용한 자료는 기상청의 분석일기도 및 AWS 강수 자료를 포함한 지상관측 자료, 그리고 모든 기상청 레이더 사이트의 CAPPI (Constant

Altitude Plan Position Indicator) 합성영상 자료이며, 또한, NCEP/NCAR에서 6시간 간격으로 제공되는 수평 간격이 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ GDAS FNL자료와 그리고 국립기상연구소 예보연구과의 초단기 기상예측시스템인 KLAPS자료이다.

이 연구의 자료동화를 위해 사용된 레이더 자료는 기상청에서 운영 중인 레이더 중에서 S-Band (10 cm 파장) 레이더인 광덕산, 관악산, 군산, 강릉, 면봉산 레이더 자료로, 사용된 변수는 레이더의 시선속도 (Radial Velocity)와 반사도 (Reflectivity)이다. 레이더 자료는 레이더 빔이 대기를 탐지한 그대로 저장되기 때문에 고도각 (Elevation)과 방위각 (Azimuth)을 가진 구면 좌표계로 이루어져 있다. 이러한 구면 좌표계를 수치모델에서 사용하는 카티시안 좌표계로 수정하기 위하여 NCAR에서 제공하는 SPRINT (Sorted Position Radar INterpolation)와 CEDRIC (Custom Editing and Display of Reduced Information in Cartesian space)을 이용하여 좌표계 변환과정을 수행하였다. 또한 레이더 자료를 3DVAR의 입력 자료 형태로 변환시키기 위하여 기상청 수치모델개발과에서 개발된 CEDREAD (CEDric READ)를 사용하였다.

3. 분 석

3.1. 사례 및 종관분석

2010년 9월 21일 중부 지역에 대류 밴드형 호우시스템에 동반된 집중호우가 발생하여, 중부 지역에서는 2명의 인명 피해와 7,859세대 19,479명의 이재민

Fig. 1. Distribution of 24 h accumulated precipitation ending at 1500 UTC 21 September 2010.

Fig. 2. Time series of wind direction and hourly accumulated precipitation at Seoul and Wonju.

이 발생하는 등 많은 피해를 겪었다 (이윤영 등, 2010). 특히 서울에서는 하루 동안에 전국에서 제일 많은 비 (총 누적 강수량 약 259.5 mm)가 내렸다. Fig. 1은 기상청 홈페이지 (http://203.247.66.10/weather/observation/aws_distribution_popup.jsp)에서 제공한 2010년 9월 21일 24시간 누적 강수량 분포도이다. 이 그림을 보면, 서울을 중심으로 경기 지역 그리고 강원 영서 지역을 걸쳐 밴드 모양의 분포로 많은 양의 강수가 내렸음을 알 수 있다.

Fig. 2는 2010년 9월 20일 1800 UTC부터 22일 0000 UTC까지 전국에서 비가 제일 많이 내린 서울과 그리고 강원도에서 제일 많은 비가 내린 원주의 시간당 강수량 및 풍향을 보여 주는 시계열이다. 여기서 파란색 막대는 서울의, 그리고 녹색 막대는 원주의 시간당 강수량을 보여 준다. 이 날 서울의 총 누적 강수량은 259.5 mm이었으며, 최대 강수 강도(71 mm h^{-1})는 21일 0600 UTC에 나타났으며, 원주의 총 누적 강수량은 209 mm이었고, 최대 강수 강도(49.5 mm h^{-1})는 21일 1100 UTC에 나타났다. Fig. 2를 보면, 서울의 경우, 21일 0500 UTC부터 0700 UTC까지 평균 $\sim 65 \text{ mm h}^{-1}$ 내외의 강수가 먼저 나타나고, 약 4시간 뒤에 원주에서 평균 $\sim 45 \text{ mm h}^{-1}$ 내외의 강수가 나타났음을 알 수 있는데, 이것은 집중호우 역이 서쪽에서부터 접근하여 서울에 집중호우를 일으킨 후, 이 호우 시스템이 주로 동쪽으로 이동하면서 원주에 집중호우가 내렸음을 보여 주는 것이다. 한편, 서울의 풍향 (파란색 세모)과 원주의 풍향 (녹색 동그라미)을 보면, 집중호우가 발생한 시간대의 경우, 풍향이 주로 남서풍 계열임을 알 수 있으며, 강수가 종료되는 시점에서는 북서 내지 북풍 계열의 바람으로 바뀐 것을 알 수 있는데, 이러한 풍향 변화는 호우를 동반한 정체전선이 통과하여 남하하였음을 보여 주는 것이다.

Fig. 3. (a) Surface synoptic chart and (b) 850 hPa synoptic chart at 0000 UTC 21 September 2010.

Fig. 3은 2010년 9월 21일 0000 UTC의 지상 및 850 hPa 일기도로, 서울에 집중호우가 발생하기 약 4 시간 전의 일기도이다. 먼저, 지상 일기도(Fig. 3(a))를 보면, 중심 기압이 1035 hPa인 차가운 대륙 고기압이 몽고 지역에 중심을 두고 그 세력을 보하이해와 한중 국경 부근으로 확장하고 있으며, 일본 큐슈 남쪽 해상에 중심을 둔 덥고 습한 북태평양 고기압이 우리나라 남해안으로 세력을 확장하고 있다. 이와 같이 성질이 전혀 다른 이 두 고기압 사이로 정체전선을 동반한 1010 hPa 저기압의 중심이 서해 중부 해상에 위치하고 있으며, 정체전선은 서해 먼 바다에서부터 시작하여 경기 북부 지역에 걸쳐있다. 더구나 중부 지역은 덥고 습한 남서 계절의 바람이 유입될 종관적인 상황을 갖추고 있어 호우 가능성이 높음을 알 수 있다. 850 hPa 일기도(Fig. 3(b))를 보면, 일본 큐슈 남쪽 해상에 북태평양 고기압의 중심이 위치하고 있

며 이 고기압의 가장자리를 따라 화남 및 화중 지역의 덥고 습한 공기가 우리나라 중부 지역으로 유입되고 있음을 알 수 있다. 그리고 한·중 국경지대에서부터 라오통반도 부근으로 기압골의 축이 위치하고 있으며, 이 기압골의 전면에서는 서해상에서 유입되는 덥고 습한 남서 계절의 바람이 불며, 그리고 이 기압골의 후면으로는 차고 건조한 북풍 계열의 바람이 불어 보하이해와 북한 지역으로 등온선이 조밀하게 밀집되어 있다. 이러한 남북방향으로의 강한 기온 경도는 강한 경압성 (baroclinity)을 반영하여 기압골이 발달 중에 있음을 보여 준다.

Fig. 4는 21일 1200 UTC의 지상 및 850 hPa 일기도로, 서울에 집중호우가 끝난 후, 약 4시간 뒤의 일기도이다. 먼저, 지상 일기도(Fig. 4(a))를 보면, 12시간 전에 서해 중부 해상에 위치하였던 1010 hPa 저기압의 중심은 충청도 쪽으로 이동하였고, 중심 기압이

Fig. 4. The same as in Fig. 3, except for 1200 UTC 21 September 2010.

2 hPa 정도 하강하면서 이 저기압 시스템은 발달하였음을 알 수 있다. 또한 집중호우를 발생시킨 정체전선은 충청도 지역으로 남하하여 수도권에서의 강수는 끝나가고 있으며, 이 정체전선은 12시간에 약 100 km 정도 남하하여 이동 속도가 느렸음을 알 수 있다. 850 hPa 일기도(Fig. 4(b))에는, 12시간 전에 중국 동북 지역에서부터 랴오통반도 부근에 위치하였던 기압골의 축은 12시간 동안에 약 230 km 정도 남하하여 중부 지역에 기압골의 중심이 위치하고 있다.

3.2. 레이더 영상분석

Fig. 5는 기상청 레이더 사이트의 CAPPI 합성영상 자료로 레이더 반사도를 강수 강도 (mm h^{-1})로 전환한 영상 자료이다. 서울에 집중호우가 시작되기 약 2시간 전인 0200 UTC의 레이더 영상(Fig. 5(a))을 보면, Lee and Kim (2007)의 현상학적인 분류에 따른 전형적인 대류 밴드 (convective band) 형태가 경기만에서 경기 북부 지역에 걸쳐 위치하고 있으며 특히 경기만에 위치한 대류 밴드 내의 에코의 최대 강수 강도는 $\sim 60 \text{ mm h}^{-1}$ 정도이다. 1시간 뒤인 0300 UTC (Fig. 5(b))에는 서해 중부 앞바다로부터 경기 북부 지역에 걸쳐 동-서로 형성된 강수 밴드가 있으며, 특히 인천 앞바다 쪽으로 발달된 호우 역이 위치해 있다.

비가 본격적으로 내리기 시작한 0400 UTC의 레이

더 영상(Fig. 5(c))을 보면, 40 mm h^{-1} 이상의 강수 강도를 가진 호우 역(폭이 $\sim 10 \text{ km}$ 내외)이 경기만에서부터 시작하여 서울 지역에 이르기까지 폭이 좁으면서 길게 형성되어 있으며, 또한 이 호우 역 내에서 최대 $\sim 60 \text{ mm h}^{-1}$ 정도의 강수 강도를 갖는 에코가 줄줄이 위치해 있음을 알 수 있다. 시간당 최대 강수 강도를 보였던 0500 UTC (Fig. 5(d))에는 최대 $\sim 50 \text{ mm h}^{-1}$ 정도의 강수 강도를 갖는 에코가 경기만과 서울 지역 그리고 경기 중부 지역을 덮고 있다. 0600 UTC (Fig. 5(e))에도 0500 UTC의 영상과 비슷한 모습으로 경기만과 수도권 지역에서 발달한 강수 에코가 위치하고 있으며 최대 강수 강도는 $\sim 60 \text{ mm h}^{-1}$ 정도이다. 특히 경기만에 위치한 에코 형태는 back building 형태 (Bluestein and Jain, 1985; Lee and Kim, 2007)로, 대류 밴드의 풍상측에 새로운 대류 세포들이 계속적으로 형성되어 대류 밴드의 위치가 고정된 모습이다. 여전히 0700 UTC (Fig. 5(f))에도 수도권 부근에 위치한 호우 에코는 최대 강수 강도 약 60 mm h^{-1} 정도를 계속 유지한 채 이전 시간과 유사한 위치에 정체해 있다.

0800 UTC (Fig. 5(g))에는 0400 UTC경부터 서울 지역에 지속적으로 머물렀던 대류 밴드는 서서히 남하하기 시작하여, 서해 중부 앞바다에서부터 시작하여 서울 남단을 지나 강릉에 이르기까지 동-서 방향으로 길게 형성되었으며, 서울 부근에 위치한 에코의 최대 강수 강도는 $\sim 70 \text{ mm h}^{-1}$ 정도로 이 강수 시스템은 그 세력을 계속 유지하고 있다. 1시간 뒤인 0900 UTC (Fig. 5(h))에는 대류 밴드가 보다 더 남하하여 서울 남쪽 외곽 지역에 위치하고 있어, 서울 지역의 큰 비는 끝나가고 있음을 알 수 있다. 대체적으로 볼 때, 호우를 동반한 강수 시스템이 서울 지역에 정체한 시간은 약 5시간 정도이었다.

1000 UTC (Fig. 5(i))에는 대류 밴드의 축은 여전히 동-서 방향을 유지하면서, 다소 느리게 남쪽으로 이동하여 서울을 완전히 벗어나 있으며, 이 대류 밴드 내에 위치한 에코의 최대 강수 강도는 $\sim 60 \text{ mm h}^{-1}$ 로 여전히 강한 강수 강도를 유지하고 있다. 1100 UTC (Fig. 5(j))에는 대류 밴드는 지속적으로 남하하여, 경기 남부와 강원 남부 지역에 위치하고 있다. 이 시간 이후로 강수 밴드는 계속 남하하여 1400 UTC (그림 생략)에는 강원도와 경상북도 경계 지역으로 이동하였으며 강수 강도는 급격히 약화되었다.

이 사례의 경우, 이러한 대류 밴드의 움직임에 비추어 볼 때, 정확도 높은 누적 강수량 모의를 위해서는 호우를 동반한 강수 시스템의 불규칙한 움직임과 강수 강도의 정확한 모의가 중요한데, 특히, 강수 시스템의 호우 역이 서울 부근에서 약 5시간 정도 정체하는 것을 수치모델이 어느 정도 잘 모의하느냐가 핵심 사항인 것을 잘 알 수 있다.

Fig. 5. Hourly radar images of rain rate (mm h^{-1}) from 0200 UTC to 1100 UTC 21 September 2010. Color scale for the intensity of rain rate in mm h^{-1} is given at right side of the figure. Radar images are provided by the KMA.

4. 수치결과

4.1. 수치모의 설계 및 실험

이 사례 연구를 위하여 사용한 모델은 WRF-V3.1.1 중규모 수치모델이다. 수치모의를 위한 모델영역은 126.0°E, 38°N 중심으로 한반도와 중부 지역에 초점을 맞추어 2개의 영역으로 설정하였다. 각 영역의 수평 격자 간격은 Domain 1 (D1로 칭함)이 3 km (234×282), Domain 2 (D2로 칭함)가 1.5 km (361×225)로, One-way interaction으로 Nesting 하였다 (Fig. 6). Fig. 6에

Fig. 6. Model domain for Domain 1, Domain 2 with the terrain height shaded every 50 m. Topography is represented with shading based on scale below of the figure. Hereafter, SU, WJ, DG, SC, B-GN, GN and DH in all the figures stand for Seoul, Wonju, Daegwallyeong, Sokcho, North-Gangneung, Gangneung, and Donghae, respectively.

서 x축과 y축의 숫자는 수치모델 격자 인덱스 (index)를 각각 나타내며, 뒤에 나오는 모든 수치모의 결과 그림에서 x축과 y축의 숫자는 수치모델 격자 인덱스 (index)를 각각 나타낸다.

한편, 적분 시간 간격은 D1, D2의 경우, 각각 6초, 3초이다. 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 미시 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. 장파복사 과정은 빠르고 정확한 계산을 위해 미리 설치된 표에 따라 계산되는 RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) 장파 복사 기법 (Mlawer *et al.*, 1997)을 선택하였으며, 단파복사 과정은 청정 대기에서의 산란, 수증기의 흡수를 단순히 계산하는 Dudhia 기법 (Dudhia, 1989)을 선택하였다. 지표 모델은 5-layer thermal diffusion을 사용하였고 적운 모수화 과정을 사용하지 않았다. 앞에서 언급한 실험의 종류에 따라 모델의 초기 입력 자료 및 경계 자료는 NCEP/NCAR에서 6시간 간격으로 제공되는 수평 간격이 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ GDAS FNL자료 또는 국립기상연구소 예보연구과의 초단기 기상예측시스템인 KLAPS자료를 사용하였다. 이와 같은 수치 모델의 설정을 Table 1에 요약하였다. 민감도 실험을 위해 재분석 자료의 종류와 3DVAR의 적용

Table 1. Summary of the WRF model configuration.

Model	WRF V3.1.1	
Domains	Domain 1	Domain 2
Horizontal grid spacing	3 km	1.5 km
Dimension	$234 \times 282 \times 31$	$361 \times 225 \times 31$
Time step	6 s	3 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 $1^\circ \times 1^\circ$) NIMR KLAPS data	
Microphysics	WDM 6 scheme	
Planetary Boundary Layer	YSU PBL	
Land-Surface Model	Thermal diffusion	
Longwave radiation scheme	RRTM	
Shortwave radiation scheme	Dudhia shortwave	
Integration period	1800 UTC 20~0000 UTC 22 September 2010	

여부만 다를 뿐 모두 같은 모델 구성을 갖고 수행하였으며, D1과 D2영역에 대한 수치모의 초기 시각 및 종료 시각은 각각 모두 같은 시각으로, 초기 시각은 2010년 9월 20일 1800 UTC이며 종료 시각은 22일 0000 UTC이다. 총 적분 시간은 30시간이다.

레이더 자료의 동화를 위해 WRF/3DVAR version 3.1.1의 시스템을 사용하였으며, WRF/3DVAR 시스템은 모델 초기 시각에 대한 초기 자료와 관측 자료, 그리고 배경오차장을 필요로 한다. 우선 FNL과 KLAPS 자료를 이용하여 D1영역에 대하여 적분을 수행하고, 그 결과값을 이용하여 D2영역의 초기 자료를 생성하였다. D2영역에 대한 배경오차장을 계산하기 위해서 모델의 초기시각보다 약 10일 전인 2010년 9월 10일 0000 UTC부터 9월 22일 0000 UTC까지 수치모의를 실시하였다. 위의 기간 동안 초기시각이 0000 UTC인 수치모델과 1200 UTC인 수치모델을 구동하여 동일한 시각에 대하여 12시간 예보된 값과 24시간 예보된 값의 차이를 이용하여 계산하는 NMC방법 (Parrish and Derber, 1992)을 이용하여 배경오차장을 생성하였다. D2영역에 대해 이와 같은 방법으로 생성된 배경오차장과 레이더 자료를 이용하여 자료동화를 수행하였으며, 초기 시각인 2010년 9월 20일 1800 UTC에만 레이더 자료동화가 적용되었다.

4.2. 수치모의 결과 및 분석

기존에 사용하던 FNL자료를 이용한 수치모의 실험(FNL실험)과 KLAPS자료를 이용한 수치모의 실험(KLAPS실험), 그리고 WRF 3DVAR를 이용하여 KLAPS 자료에 레이더 자료를 자료동화한 후 개선된 초기장을 이용한 수치모의 실험(KLAP3D실험)을 각각 실시하였다. 우선 초기 및 경계장의 분해능에 따른 민감도를 알아보기 위하여 FNL실험과 KLAPS실험 결과를 먼저 비교하고, 다음으로 KLAPS실험과 KLAP3D실험 결과를 비교 분석하여 레이더 자료동화에 따른 민감도를 알아보려고 하였다. 참고로 레이더 자료의 자료동화영역은 D2이고, D1영역에서는 자료동화를 실시하지 않았으며, 또한 수치모의 결과 분석은 D2영역을 중심으로 이루어졌다.

4.2.1. FNL실험과 KLAPS실험의 바람장 비교 분석

Fig. 7(a)는 FNL자료를, 그리고 Fig. 7(b)는 KLAPS 자료를 이용하여 WRF 모델이 분석한 초기 시각의 지상 바람장이다. Fig. 7(a)를 보면, 서해상에서는 대부분 남풍 계열의 바람이 지배적이고, 그리고 서울 부근에서는 약한 남동 계열의 바람이 존재한 반면에, Fig. 7(b)를 보면, 서해중부 먼바다에서는 다소 강한 남서 계열의 바람이, 그리고 서울 부근을 포함한 경기도 지역에서는 무풍 상태에 가까워, FNL실험과

Fig. 7. Simulated surface wind fields valid at initial time, 1800 UTC 20 September 2010 from (a) FNL exp and (b) KLAPC exp. Length scale for the wind vector in m s^{-1} is given at the bottom of the figure.

KLAPS실험에서 사용된 초기 바람장에서 서로가 다소 큰 차이를 보여 주고 있다.

Fig. 8(a)는 FNL자료를, 그리고 Fig. 8(b)는 KLAPS 자료를 이용하여 WRF 모델이 생성한 21일 0500 UTC (수치적분 11 hour)의 모의된 지상 바람장으로, 관측된 1시간 누적 강수량의 시계열도 (Fig. 2)에 따르면, 이 시각 전후로 서울에서 시간당 강수량이 급격히 증가하였다. Fig. 8(a)의 붉은색 타원 안을 보면, 지상 전선 역에 대응되는 강한 wind shear 역이 연평도 부근에서부터 시작하여 남서쪽 방향으로 길게 늘어져 있으며, 이 wind shear 역의 왼쪽으로는 북서 기류가 그리고 오른쪽으로는 상대적으로 보다 강한 남서 기류가 흐르고 있다. 한편, Fig. 8(b)를 보면, Fig. 8(a)에 비해 강한 wind shear 역의 축이 약 20~30 km 정도 보다 더 오른쪽 (남동 방향)으로 치우쳐져 있어, wind shear 역이 서울·경기 지역에 더 가깝게 위치하고 있음을 알 수 있다. 이러한 shear 축이 동쪽으로 약간 이동된 점을 제외하고는 FNL실험과 KLAPS실험 모두, 따뜻하고 습한 공기가 서해 중부 해상에서 시작하여 경기 북부 지역까지 강하게 유입되고 있는 것과 또한

Fig. 8. The same as in Fig. 7, except for 0500 UTC 21 September 2010.

서해 북부 해상에서 내려오는 상대적으로 차고 건조한 북풍 계열의 바람을 어느 정도 잘 모의하고 있다.

4.2.2. FNL실험의 1시간 누적 강수량 분석

Fig. 9는 서울에서 비가 내리기 시작하는 21일 0200 UTC부터 비가 종료되는 1000 UTC까지, FNL실험의 시간당 누적 강수량 분포를 2시간 간격으로 보여 준다. 0200 UTC (Fig. 9(a))의 1시간 누적 강수량 분포를 보면, 강수 밴드 (15 mm h^{-1} 이상인 영역)가 황해도 북부 지역에 좁고 길게 형성되어 있으나 수도권 부근으로는 강수를 모의하지 못하고 있음을 알 수 있다. 이 시간대에 대응되는 레이더 영상 (Fig. 5(a))과 비교하여 볼 때, 강수 강도와 강수 역의 위치에서 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 서울에 많은 비가 내리기 시작한 0400 UTC의 경우 (Fig. 9(b)), 웅진반도 부근에 새롭게 발달된 호우 역 (최대 강수 강도 $\sim 40 \text{ mm h}^{-1}$) 이 위치하고 있어 전 시간에 비해 호우 역이 다소 남쪽에 위치하고 있으나, 여전히 서울 부근으로는 강수를 모의하지 못하고 있다. 가장 많은 비가 내렸던 시간대인 0600 UTC (Fig. 9(c))에는 강화만에서 시작하여 경기 북부와 강원 북부 지역을 길게 덮고 있는 발달된 호우 역이 위치하고 있으며, 이 호우 역의 최대

Fig. 9. Simulated distributions of 1 h accumulated precipitation (mm) at 2 h intervals from 0200 UTC to 1000 UTC 21 September 2010 from FNL exp. Color scale for the intensity of rain rate in mm h^{-1} is given at right side of the figure.

강수 강도는 $\sim 40 \text{ mm h}^{-1}$ 로 어느 정도 강한 강수를 모의하고 있다. 하지만, 집중호우가 내린 이 시간대의 실제 강수 강도에 비해 다소 약하며, 또한, 경기만과 수도권 지역으로 발달된 대류 밴드가 위치하고 있는 레이더 영상 (Fig. 5(e))과 비교하여 볼 때, 모의된 강수역의 위치가 북쪽으로 약 80 km 정도 떨어진 곳에 위치하여 거리적으로도 다소 차이가 있다. 0800 UTC의 경우 (Fig. 9(d)), 강수 밴드 내에서 주 호우 역 (30 mm h^{-1} 이상인 영역)은 강원 중부 지역에 위치하고 있다. 서울 지역으로는 상대적으로 규모도 작고 강수 강도도 약한 강수 역 (최대 $\sim 20 \text{ mm h}^{-1}$)이 위치하고 있어, 서울 부근에서는 강수 역의 위치는 비슷하나 강

수 강도에 있어서는 다소 큰 차이를 보여 주고 있다. 서울 지역에서의 강수가 끝난 시간대인 1000 UTC (Fig. 9(e))에서는 모의된 강수역(최대 $\sim 20 \text{ mm h}^{-1}$)의 위치가 수도권 남쪽에 위치하여 이 시간대의 레이더 영상 (Fig. 5(i))에 나타난 대류 밴드의 위치와 다소 비슷하나 강수 강도 면에서 볼 때 여전히 약하였다. 또한, 레이더 영상에서는 수도권 이남에서 강수 강도가 여전히 가장 강하나, 이 실험의 경우, 주로 강원도 중부 지역으로 호우 역(30 mm h^{-1} 이상인 영역)이 위치한 것으로 모의하였다.

FNL실험의 경우, 큰 규모로 볼 때, 집중호우를 일으킨 강수 역의 발생 및 유지 과정은 어느 정도 모의하고 있으나 강수 역의 위치는 레이더 영상에 나타난 대류 밴드 위치와는 다소 거리가 있었다. 특히 집중호우가 내린 시간대의 경우, 호우 역의 위치를 실제보다도 약 80 km 정도 북쪽으로 모의하였으며, 이 강수 시스템이 서울 지역에 정체하는 시간대 약 2시간 정도로 짧았다. 또한 강수 밴드의 강수 강도도 상대적으로 약하게 모의하였기 때문에, 관측된 서울의 누적 강수량의 약 4% 정도인 10.3 mm 로 모의하여 큰 오차를 보였다.

4.2.3. KLAPC실험의 1시간 누적 강수량 분석

Fig. 10은 21일 0200 UTC부터 비가 종료되는 1000 UTC까지의 KLAPC실험의 1시간 누적 강수량 분포를 2시간 간격으로 보여 준다. 0200 UTC의 수치모의 (Fig. 10(a))를 보면, 강화도 북쪽으로 호우 역을 모의하고 있으며 서울 부근으로 약한 강수를 모의하고 있음을 알 수 있다. 서울에 많은 비가 내리기 시작한 0400 UTC의 경우 (Fig. 10(b)), 강화도 북쪽에 위치하였던 호우 역 (20 mm h^{-1} 이상인 영역)은 동쪽으로 이동하여 경기 북부 지역에 위치하여, 이 시간대의 FNL실험 (Fig. 9(b))과 유사하게 서울 부근으로는 호우 역을 전혀 모의하지 못하고 있다. 가장 많은 비가 내렸던 0600 UTC (Fig. 10(c))에는 강화만에서 시작하여 경기 북부와 강원 북부 지역을 걸쳐 호우 역이 위치하고 있으며, 이 호우 역 내에서 최대 강수 강도는 $\sim 35 \text{ mm h}^{-1}$ 로 어느 정도 강한 강수를 모의하고 있지만, 이 시간대의 실제 강수 강도에 비해 약하며, 또한 서울에서 가까이 있는 강수 시스템의 위치는 레이더 영상 (Fig. 5(e))에 비해 북쪽으로 약 80 km 정도 떨어진 곳에 위치하여 거리적으로 다소 차이가 있다. 이러한 모습은 0600 UTC의 FNL실험 (Fig. 9(c))과 다소 유사한 모습이다. 0800 UTC (Fig. 10(d))의 경우, 강수 밴드내에서 주 호우 역 (30 mm h^{-1} 이상인 영역)은 경기 북부 지역과 강원 중부 지역에 각각 산재해 있으며 서울 지역에는 약한 강수 역이 위치하고 있다. 서울 지역에서 강수가 끝난 시간대인 1000 UTC (Fig.

Fig. 10. The same as in Fig. 9, except for KLAPC exp.

10(e))에는 모의된 강수 시스템의 위치가 경기도 남쪽에 위치하여 이 시각의 레이더 영상 (Fig. 5(i))과 FNL 실험 (Fig. 9(e))에 비해 강수 시스템의 남하 속도가 다소 빨랐으며, 이 강수 시스템 내에서도 강원도 대관령 부근으로만 호우 역 (30 mm h^{-1} 이상인 영역)을 모의하였다.

KLAPC실험의 경우, 비가 가장 많이 내린 시간대의 경우, 집중호우 역의 위치를 실제보다 약 80 km 정도 북쪽으로 모의하였고 또한 이 강수 시스템이 빠르게 남쪽으로 이동하는 것으로 모의하여, 서울 지역에 강수 시스템이 머무르는 시간이 약 2시간 정도가 되었다. 따라서, 실제로 강수 시스템이 정체한 시간인 약 5시간에 비해 KLAPC실험에서는 정체 시간이 짧았으며 또한 강수 밴드의 강수 강도도 상대적으로 약하게 모의하였기 때문에 관측된 서울의 누적 강수량의 약 6.4% 정도인 16.5 mm 를 모의하였다.

분해능이 낮은 FNL자료를 이용하여 수치모의를 한 경우 (FNL실험)와 분해능이 높은 KLAPS자료를 이용하여 수치모의를 하였을 경우 (KLAPC실험) 모두 호우 시스템의 발생 및 유지 과정을 어느 정도 모의하였지만, 집중호우 역의 위치를 정확하게 모의하지 못하였다.

4.2.4. FNL실험과 KLAPC실험의 총 누적 강수량 분석

Fig. 11은 서울과 중부 지역에 비가 내린 20일 1800 UTC부터 21일 1500 UTC 사이의 총 누적 강수량 분포를 보여 주는 그림으로, Fig. 11(a)는 FNL실험의 결과이고 Fig. 11(b)는 KLAPC실험의 결과이다. 참고로 수치모의가 실행되기 전인 시간대인 20일 1500~1800 UTC에는 서울을 포함한 경기 지역에는 실제로 비가 내리지 않았기 때문에 수치모의가 진행된 시간대인 20일 1800 UTC부터 21일 1500 UTC 사이의 모의된 총 누적 강수량 분포는 앞의 Fig. 1의 관측된 24시간 누적 강수량 (20일 1500~21일 1500 UTC) 분포에 대응한다.

FNL실험의 결과를 보면, 실제로 많은 양의 강수가 내린 서울과 경기 지역보다는 강원 영동 지역으로 상대적으로 더 많은 양의 강수를 모의하고 있음을 알 수 있다. 반면에 KLAPC실험의 결과를 보면, 주 강수역이 경기 북부와 강원 영동 지역으로, FNL실험의 결과에 비해 경기 북부 지역으로 더 많은 비를 모의하였음을 알 수 있다. 한편, 관측된 총 누적 강수량 분포도 (Fig. 1)와 비교하여 보면 KLAPC실험의 경우가 FNL실험의 경우보다 경기 지역의 호우 역을 어느 정

도 개선한 모의 결과를 보여 주고 있으나, 이 호우 역도 관측된 총 누적 강수량 분포도 (Fig. 1) 상에 나타난 서울 부근의 주 호우 역에 비해 훨씬 북쪽에 위치하고 있다.

4.2.5. KLAPC실험과 KLAP3D실험의 바람장 비교 분석

Fig. 12는 KLAPS자료에 레이더 자료동화를 수행하여 얻은 850 hPa 초기 바람장에서 KLAPS자료를 사용하여 얻은 850 hPa 초기 바람장을 뺀 그림이다. 여기서 지상이 아닌 850 hPa 바람장의 차이도 (difference chart)를 보인 이유는, 자료동화에 사용되는 레이더 자료는 1.5 km 이상의 고도에서의 바람 정보를 담고 있어, 초기 시각의 지상 바람장 (그림 생략)에서는 레이더 자료동화 효과가 거의 나타나지 않았기 때문이다. Fig. 12를 보면, 레이더 자료동화가 반영된 850 hPa 초기 바람장에서, 레이더자료가 반영되지 않은 경우에 비해, 서해 중부 해상을 중심으로 저기압성 순환이 상대적으로 강하게 나타났음을 알 수 있다. 이와 관련하여, 경기만 부근 (Fig. 12의 붉은색 타원 안)으로 덮고 습한 남풍 계열의 바람을 상대적으로 강하게 반영하였으며, 서해 중부 먼바다 쪽으로는 차갑고 건조한 북풍 계열의 바람을 다소 강하게 반영하였음을 알 수 있다. 한편, 강릉 앞바다 쪽으로는 동풍 계열의 바람을, 그리고 강원 영동 북부 지역 및 속초 북동 해상으로는 남서 계열의 바람을 상대적으로 강하게 반영하여 동해 중부 해상에서 고기압성 순환이 강하게 나타났음을 알 수 있다. 즉, 경기만 부근의 강수 시스템은 다소 강하게 그리고 강원 북부 지역의 강수 시스템은 다소 약하게 반영한 850 hPa 초기 바람장의 모습이다.

Fig. 11. Distribution of 21 h accumulated precipitation ending at 1500 UTC September 21 from (a) FNL exp and (b) KLAPC exp. Color scale for the amount of precipitation in mm is given at right side of the figure.

Fig. 12. The difference chart of 850 hPa wind field between KLAPC exp and KLAP3D exp valid at initial time, 1800 UTC 20 September 2010. Length scale for the wind difference vector in m s^{-1} is given at the bottom of the figure.

KLAP3D exp

Fig. 13. Simulated surface wind field valid at 0500 UTC 21 September 2010 from KLAP3D exp. Length scale for the wind vector in m s^{-1} is given at the bottom of the figure.

Fig. 13은 KLAP3D실험의 결과로 21일 0500 UTC의 지상 바람장을 보여 준다. 이 그림의 붉은색 타원 안을 보면, KLAP3D실험의 모의 결과 (Fig. 8(b))에 비해, 강한 wind shear 역이 남동쪽으로 다소 내려가 보다 서울 쪽으로 치우쳐 모의하고 있다. 또한, KLAP3D 실험에서는 강한 남서 기류의 전단이 서울 이북 지역에 위치한 반면에, KLAP3D실험에서는 남서 기류의 전단이 서울 부근에 위치하고 있어, 호우를 동반한 정체전선이 서울 부근에 머무를 수 있는 바람장이 형성되었음을 알 수 있다.

4.2.6. KLAP3D실험의 1시간 누적 강수량 분석

Fig. 14는 21일 0200 UTC부터 비가 종료되는 1000 UTC까지의 KLAP3D실험의 1시간 누적 강수량 분포를 2시간 간격으로 보여 준다. 21일 0200 UTC의 1시간 누적 강수량 분포도 (Fig. 14(a))에는, 강화도 북쪽과 경기만에 호우 역 (강수 강도가 $\sim 20 \text{ mm h}^{-1}$ 이상인 영역)이 각각 위치하고 있으며 서울 부근으로는 약한 강수 역이 위치하고 있다. 서울에 많은 비가 내리기 시작한 0400 UTC의 강수량 분포도 (Fig. 14(b))에는 강화도와 서울 바로 북쪽으로 동서 방향으로 형성된 강수 밴드 (최대 강수 강도 $\sim 25 \text{ mm h}^{-1}$)가 위치하여, FNL실험 (Fig. 9(b))과 KLAP3D실험 (Fig. 10(b))에 비해, 강수 밴드의 위치가 레이더 영상이 보여주는 대류 밴드 (Fig. 5(c))의 위치에 보다 가깝게 모의되었다.

최대로 많은 비가 내렸던 시간대인 0600 UTC의 강수량 분포도 (Fig. 14(c))를 보면, 호우 역 (강수 강도 $\sim 25 \text{ mm h}^{-1}$)이 서울 지역에 위치하고 있다. 이 위치는 레이더 영상 (Fig. 5(e))에 나타난 강수 밴드의 위치와 유사함을 알 수 있으나, 강수 강도 (mm h^{-1}) 면에서는 레이더 강수 에코의 약 1/2정도이었다. KLAP3D 실험과 비교하여 보면, KLAP3D실험의 호우 역이

KLAP3D exp

Fig. 14. The same as in Fig. 9, except for KLAP3D exp.

KLAP3D실험의 호우 역에 비해 약 60 km 더 남쪽으로 치우쳐 모의함에 따라, 강화도와 서울 지역 부근으로 호우 역이 형성되어, KLAP3D실험이 KLAP3D실험에 비해 호우 시스템의 위치를 관측에 보다 가깝게 모의하고 있음을 알 수 있다.

0800 UTC (Fig. 14(d))의 경우, 서울 지역에서는 이미 약화된 강수 시스템의 가장자리가 통과하여 강수가 끝났으며, 강수 시스템에 동반된 강수 밴드는 수도권 남부 지역, 경기 중부 지역, 강원 중부 지역 그리고 강원 북부 지역에 각각 위치하고 있다. 한편, 레이더 영상 (Fig. 5(g))에서는 여전히 서해 중부 앞바다에서 서울을 지나 강릉에 이르기까지 동서 방향으로 발달한 대류 밴드가 길게 형성되어 있다. 따라서 KLAP3D실험에서도 서울을 통과하는 강수 시스템의 남하 속도가 실제에 비해 빠르게 모의되었음을 알 수 있다. 이와 같이 강수 시스템이 빠르게 남하하는 것으로 모의되었기 때문에 강수 밴드가 서울 지역에 정

Fig. 15. Distribution of 21 h accumulated precipitation ending at 1500 UTC September 21 from K LAP3D exp. Color scale for the amount of precipitation in mm is given at right side of the figure.

제할 시간이 약 2시간 내외로 관측에 비해 상대적으로 짧았고, 또한 모의된 강수 밴드의 강도도 다소 약하여, 관측에 비해 다소 적은 누적 강수량을 모의하게 되었다.

1000 UTC (Fig. 14(e))에는 서울 지역을 통과한 강수 시스템이 빠르게 남쪽으로 이동하여 경기도와 충청도 경계 지역에 시스템의 북쪽 가장자리가 위치하고 있다. 이것은 레이더 영상 (Fig. 5(i))에서 조직화된 대류 밴드가 수도권 바로 남쪽에 위치한 것과 비교하여 볼 때, 호우를 동반한 강수 시스템을 보다 더 남쪽으로 치우쳐 모의하였고, 또한, 레이더 영상에 비해 강수 밴드의 강도가 급격히 약화된 모습이다.

4.2.7. K LAP3D실험의 총 누적 강수량 분석

Fig. 15는 K LAP3D실험의 결과로, 20일 1800 UTC 부터 21일 1500 UTC 사이의 총 누적 강수량 분포도이다. 이 그림을 보면, 호우 역(강수 강도 $\sim 70 \text{ mm h}^{-1}$ 이상인 영역)이 경기만에서 서울 지역까지 걸쳐 있어, K LAP3D실험의 누적 강수량 분포가 K LAPC실험의 누적 강수량 분포 (Fig. 11(b) 참조)보다 관측에 더 유사함을 알 수 있다. 모의된 서울의 총 누적 강수량은 74 mm로 실제 관측값의 약 29% 정도 모의하여 FNL 실험과 K LAPC실험에 비해 양적으로도 제일 개선된 결과를 보여 주었다. 그러나 K LAP3D실험에서도 모의된 강수 밴드의 강도가 관측에 비해 다소 약하였고, 또한, 강수 밴드가 관측에 비해 보다 빠르게 남쪽으로 이동하는 것으로 모의되었기 때문에 실제 누적 강수량에 비해 여전히 적은 누적 강수량을 모의하였다.

4.2.8. 3시간 누적 강수량에 대한 TS (Threat Score) 분석

FNL실험, K LAPC실험, 그리고 K LAP3D실험에 대해 정량적으로 강수모의의 성능 차이를 분석하고자 3시간 누적강수량에 대하여 TS를 계산하였다. TS는 보

Table 2. Contingency tables for verification of the rainfall.

Observed	Forecast	
	Yes	No
	A (hits)	B (misses)
No	C (false alarms)	D (correct negative)

통 큰 임계값을 갖는 강수량처럼 발생횟수가 드문 사건들에 대한 결정론적 예보의 검증에 많이 사용된다 (Wilks, 1995). Table 2로부터 식(1)과 같이 예측한 사건에 대한 관측과 예측의 비율로 계산되며, 0은 미숙련을, 1은 완벽한 예보를 각각 나타낸다.

$$TS = \frac{A}{A+B+C} \quad (1)$$

강수검증을 위해, 모델의 Domain 2영역에 해당하는 410개의 지점의 AWS자료를 사용하였고, FNL실험, K LAPC실험, 그리고 K LAP3D실험에서 모의된 3시간 누적강수량을 4개의 임계값 10, 30, 50, 70 mm/3 hr으로 구분하여 예보시간별로 TS를 계산한 후, 중부 지역에 비가 내린 시간대 (21일 0000 UTC~1500 UTC)에 대해 평균하여 그래프 (Fig. 16)로 나타내었다. Fig. 16을 보면, 임계값이 가장 작은 10 mm/3 hr의 경우, K LAPC 실험이 제일 높은 점수를 보여 주며, FNL실험과 K LAP3D실험의 경우는 비슷한 점수를 보여 준다. 그러나 많은 강수량 (30, 50 그리고 70 mm/3 hr 임계값)에 대한 TS의 경우, K LAP3D실험이 FNL실험과 K LAPC실험보다 상대적으로 더 높은 TS를 보여 준다. 즉, 고분해능인 K LAPS 자료에 레이더 자료를 동화한 후 개선된 초기장을 이용한 수치모의 실험의 경우, 적은 강수량 예측보다도 많은 강수량 예측에 대해 더 좋은 결과를 보여 주었다. 이러한 이유는 앞 절에서 자

Fig. 16. Threat scores for (a) 10, (b) 30, (c) 50 and (d) 70 mm/3 hr thresholds from 0000 UTC to 1500 UTC 21 September 2010 in the FNL exp, K LAPC exp and K LAP3D exp.

세히 언급하였듯이 KLAP3D실험의 경우, 다른 두 실험에 비해 비가 집중적으로 많이 내린 시간대에 수도 권 부근으로 호우 역을 상대적으로 잘 모의하였기 때문이다.

5. 종합 및 결론

2010년 9월 21일 집중호우 사례의 경우, 폭이 좁고 강하게 발달한 대류 밴드에서 집중호우가 발생하였고, 지역적으로 강수량 편차가 컸기 때문에 정확도 높은 강수량 예보를 하기가 어려운 사례였다. 참고로 2010년 9월 28일자 기상청 보도 자료에 따르면, 이 호우 사례(서울의 총 누적 강수량 259.5 mm)에 대하여 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 모델이 예상한 서울 지역의 최대 강수량은 약 40 mm 정도, 미국 기상청 모델은 약 10 mm 그리고 일본 기상청 모델은 약 23 mm 정도 예측하였다고 하였다. 세계적으로 신뢰성을 인정받는 주요 모델들도 관측된 강수량에 비해 아주 적은 강수량을 예측하였음을 알 수 있다. 현재에도 강수량, 강수 시간 그리고 강수 지역을 정확하게 맞힌다는 것은 여전히 어려운 과제이며, 또한 수치모델 분야에서 당면하고 있는 최대의 과제이기도 하다.

이 연구에서는 2010년 9월 21일에 발생한 집중호우 사례에 대하여 분해능이 서로 다른 자료의 사용에 따른 모의 결과의 차이를 알아보기 위하여 WRF모델의 초기 및 경계 자료로 FNL과 KLAPS자료를 각각 사용하여 민감도 실험을 하였고, 또한 3DVAR를 이용하여 KLAPS자료에 레이더 자료를 동화한 후, 수치 모의를 수행하여 민감도 실험을 실시하였다.

FNL자료를 초기 및 경계장으로 이용하였을 경우(FNL실험), 우리나라 중부 지역에 정체한 호우시스템을 제대로 모의하지 못하여, 서울에 실제 내린 총 강수량(약 259.5 mm)의 약 4% (10.3 mm) 정도 모의하였으며, 또한 실제로 강수량이 집중된 지역에서 북쪽으로 약 80 km 정도 떨어진 곳에 호우 역을 모의하였다. 한편, KLAPS자료를 초기 및 경계장으로 이용하였을 경우(KLAPC실험), 호우 시스템의 발달 과정 자체는 어느 정도 모의하였지만, 실제의 호우 역에서 북쪽으로 약 80 km 정도 떨어진 곳에 호우 역을 모의하여 FNL실험과 마찬가지로 호우 역의 위치를 제대로 모의하지 못하였다. 다만, FNL실험에 비해 누적 강수량은 약간 증가하여, 관측된 강수량의 약 6.4% (16.5 mm) 정도 모의하였다.

한편, KLAPS자료에 레이더 자료를 동화하였을 경우(KLAP3D실험), FNL실험과 KLAPC실험에 비해 호우 시스템의 발달 과정을 비교적 정확하게 모의하였음을 알 수 있고 또한 집중호우가 내린 시간대에

발달한 강수 밴드가 서울 지역에 위치하여, 실제 내린 강수량의 약 29% (74 mm) 정도를 모의하였는데, 이 누적 강수량은 세 가지 수치실험이 모의한 누적 강수량 중에서 제일 관측에 근접하였다. 또한, 많은 강수량 (30, 50 그리고 70 mm/3 hr 임계값) 예측에 대한 Threat score 상에서도 KLAP3D실험이 제일 좋은 결과를 보여 주었다. 그러나 제일 좋은 모의 결과를 보였던 KLAP3D실험의 경우에서도, 모의된 강수 역이 관측된 강수 역에 비해 상대적으로 규모가 작고 강수 강도도 다소 약하였다. 또한, 강수 밴드가 남쪽으로 상대적으로 빠르게 이동하는 것으로 모의하여, 서울 부근에 강수 밴드가 머무르는 시간이 다른 실험들과 유사하게 약 2시간 정도로 짧아, 모의된 강수량은 관측 값에 비해 여전히 적었다.

이러한 수치모의 실험결과는 한 사례에 대하여 얻어진 결과이므로 일반화하기 위해서는 보다 많은 호우 사례에 대한 수치 실험이 앞으로도 있어야 할 것으로 보인다. 또한, 이와 같이 서로 다른 초기 및 경계장의 사용에 따라 산출되는 수치모의 결과물, 특히 누적 강수량과 호우 역의 강수 강도 및 이동 속도 등에서 차이가 나는 원인을 정량적인 진단과 분석을 통하여 밝혀 보는 것도 의미가 있는 또 다른 연구과제로 생각된다.

향후에는 WRF Cycling을 이용한 수치모의 방법이나 각 관측 유효 시각의 관측 증분이 예측 방정식을 통해 분석 시점에 전달되어 가면서 연속적인 대기흐름을 분석에 반영하는 4DVAR 기법을 적용한다면 보다 더 좋은 결과를 얻을 것으로 생각된다.

감사의 글

이 연구는 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 연구(2011-0013879)의 지원과 2012년 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2012-6100)의 지원으로 수행되었습니다. 이 연구에서 사용한 KLAPS자료는 국립기상연구소 예보연구과에서 제공한 자료를 사용하였습니다. 또한 이 논문을 완성하는 데 도움을 주신 심사위원들께 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

- 신우주, 이태영, 김원수, 2009: 구름무리의 형성과 진화에 관한 수치적 연구. *한국기상학회 가을 학술대회 논문집*, 44-45.
- 위태권, 1999: 중규모 대류계의 구름 분해 모의에 기초한 적운 매개 변수화. *서울대학교 대기과학과 박사학위논문*, 308 pp.

- 이윤영, 이광준, 김상선, 2010: 9월 21일 서울, 인천, 경기 집중호우 피해현황과 원인. *한국수자원학회 논문집*, **43(10)**, 106-113.
- 이지우, 홍성유, 2006: WRF 모형을 이용한 한반도 집중호우에 대한 지형 효과의 수치 모의 연구. *대기*, **16(4)**, 319-332.
- 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 기상자료동화가 단시간 예측에 미치는 영향. *대기*, **12(1)**, 377-380.
- 황윤정, 하종철, 김연희, 김기훈, 전은희, 장동언, 2011: KLAPS와 3DVAR를 이용한 ProbeX-2009 남·서해상 고층관측자료의 관측 시스템 실험 연구. *대기*, **21(1)**, 1-16.
- Bluestein, H. B. and M. H. Jain, 1985: Formation of mesoscale lines of precipitation: Severe squall lines in Oklahoma during the spring. *J. Atmos. Sci.*, **42(16)**, 1711-1732.
- Choi, H.-Y., J.-H. Ha, D.-K. Lee, and Y.-H. Kuo, 2011: Analysis and simulation of mesoscale convective systems accompanying heavy rainfall: The Goyang case. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, **47(3)**, 265-279.
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimension model. *J. Atmos. Sci.*, **46(1)**, 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.
- Lee, M. S. and D. K. Lee, 2003: An application of a weakly constrained 4DVAR to satellite data assimilation and heavy rainfall simulation. *Mon. Wea. rev.*, **131(9)**, 2151-2176.
- Lee, T.-Y. and Y.-H. Kim, 2007: Heavy precipitation systems over the Korean peninsula and their classification. *J. Korean Meteor. Soc.*, **43(4)**, 367-396.
- Liu, Y., A. Bourgeois, T. Warner, S. Swerdlin, and J. Hacker, 2005: an implementation of obs-nudging-based FDDA into WRF for supporting ATEC test operations. 2005 *WRF user workshop*. Paper 10.7.
- Lim, K.-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.
- Moteki, Q., H. Uyeda, T. Maesaka, T. Shinoda, M. Yoshizaki, and T. Kato, 2004: Structure and Development of Two merged Rainbands Observed over the East China Sea during X-BAIU-99 Part I: Meso- β -Scale Structure and Development Processes. *J. Meteor. Soc. Japan*, **82(1)**, 19-44.
- 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.
- Wilks, D. S., 1995: Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Academic Press, 467 pp.
- Yu, W., Y. Liu and T. Warner, 2007: An evaluation of 3dvar, nudging-based fdda and a hybrid scheme for summer convection forecast using WRF-ARW model. 2007 *WRF user workshop*. Paper 2.4.