

수치모델에서 레이더 자료동화가 강수 예측에 미치는 영향

이지원^{1,2)} · 민기홍^{1,2)*}

¹⁾경북대학교 대학원 대기과학과, ²⁾경북대학교 대기원격탐사연구소

(접수일: 2023년 7월 16일, 수정일: 2023년 9월 21일, 게재확정일: 2023년 10월 5일)

The Effect of Radar Data Assimilation in Numerical Models on Precipitation Forecasting

Ji-Won Lee^{1,2)} and Ki-Hong Min^{1,2)*}

¹⁾*Dept. of Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu, Korea*

²⁾*Center for Atmospheric REmote Sensing, Kyungpook National University, Daegu, Korea*

(Manuscript received 16 July 2023; revised 21 September 2023; accepted 5 October 2023)

Abstract Accurately predicting localized heavy rainfall is challenging without high-resolution mesoscale cloud information in the numerical model's initial field, as precipitation intensity and amount vary significantly across regions. In the Korean Peninsula, the radar observation network covers the entire country, providing high-resolution data on hydrometeors which is suitable for data assimilation (DA). During the pre-processing stage, radar reflectivity is classified into hydrometeors (e.g., rain, snow, graupel) using the background temperature field. The mixing ratio of each hydrometeor is converted and inputted into a numerical model. Moreover, assimilating saturated water vapor mixing ratio and decomposing radar radial velocity into a three-dimensional wind vector improves the atmospheric dynamic field. This study presents radar DA experiments using a numerical prediction model to enhance the wind, water vapor, and hydrometeor mixing ratio information. The impact of radar DA on precipitation prediction is analyzed separately for each radar component. Assimilating radial velocity improves the dynamic field, while assimilating hydrometeor mixing ratio reduces the spin-up period in cloud microphysical processes, simulating initial precipitation growth. Assimilating water vapor mixing ratio further captures a moist atmospheric environment, maintaining continuous growth of hydrometeors, resulting in concentrated heavy rainfall. Overall, the radar DA experiment showed a 32.78% improvement in precipitation forecast accuracy compared to experiments without DA across four cases. Further research in related fields is necessary to improve predictions of meso-scale heavy rainfall in South Korea, mitigating its impact on human life and property.

Key words: Radar data assimilation, Mesoscale rainfall, Forecast, Numerical weather prediction, High-Resolution observations

*Corresponding Author: Ki-Hong Min, Dept. of Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, 80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Korea.
Phone: +82-53-950-6360, Fax: +82-53-950-6359
E-mail: kmin@knu.ac.kr

1. 서 론

2020년 여름, 전국적으로 시간당 80.0~100.0 mm 이상의 집중호우가 발생하며 14년 만의 최대 피해액인 1조 2,585억 원의 재산 및 인명 피해가 유발되었다(KMA, 2021). 집중호우는 급격하게 발생 및 발달하는 중규모 기상현상으로 강수 구역이 반경 20.0~30.0 km이다. 이러한 특성으로 인하여 지역별 강수 강도 및 강수량 편차가 크기 때문에 수치모델의 초기장에 중규모 구름 정보가 입력되지 않은 경우, 집중호우 예측이 어렵다. 집중호우 예측 정확도를 향상시키기 위해서는 높은 시-공간 분해능의 수치모델이 필요하며 수치모델의 해상도에 부합하는 관측자료를 동화하여 수치모델의 예측 정확도를 향상하는 과정이 필수적이다(Lahoz and Menard, 2010; Law and Zygalakis, 2015).

레이더는 대기 중의 수상체에 대한 3차원 분포 및 이동 정보를 제공하므로 중규모 현상을 이해하는 데 도움이 된다. 또한 수치모델에 레이더 자료를 동화할 경우 예보 정확도를 개선할 수 있다(Albers et al., 1996; Souto et al., 2003; Hu et al., 2006; Xiao et al., 2007; Xiao and Sun, 2007; Sugimoto et al., 2009; Abhilash et al., 2012; Sun and Wang, 2013; Wang et al., 2013; Min et al., 2015; Gao et al., 2016; Lee and Min, 2019; Lee et al., 2020; Tsai and Chung 2020; Do et al., 2022; Hastuti et al., 2023). Gao and Stensrud (2012)는 레이더 수평 반사도(향후 반사도라고 함)를 수치모델의 온도장을 사용하여 수상체(눈, 싸락눈, 비) 혼합비로 변환하는 반사도 연산자를 개발하였다. 반사도 연산자를 레이더 자료동화에 적용한 결과, spin-up 시간이 감소하고 관측과 유사한 cold pool을 모의하였으며 스톱 규모의 예측 정확도가 향상되었다. Bae and Min (2022) 연구에 따르면 레이더 자료동화를 통한 강수 개선에는 규모 의존성이 있으며 중관 규모의 강수보다 중규모 대류계 예측 시, 강수 개선율이 높게 나타났다. Wang et al. (2013)은 임계 반사도보다 큰 반사도가 관측된 지역이 포화되었다고 가정하는 연산자를 레이더 자료동화에 적용하여 수증기 혼합비를 개선하였으며 Lee et al. (2022)의 연구에 따르면 레이더 자료동화를 통한 수증기 혼합비의 증가(감소)가 강수 형성(소멸)에 가장 큰 영향을 주며 눈, 비, 싸락눈 혼합비의 영향은 상대적으로 적다는 연구 결과를 제시하였다.

우리나라에는 국토 전역을 관측하는 레이더 관측망이 구축되어 있어 한반도 상공의 수상체 정보가 고해상도로 제공된다. 따라서 레이더 자료는 한반도에 발생하는 중규모 강수 현상을 모의하기 위한 자료동화 입력자료로 적합하다. 하지만 한반도에서 급격하게 발

생 및 발달하는 강수 사례 모의 분석 및 예측 시, 레이더 자료동화를 활용한 연구는 부족한 실정이다. 또한 레이더 자료동화를 통해 바람, 수상체 및 수증기 혼합비를 개선할 수 있지만 각각의 변수가 강수 예측 정확도에 미치는 영향에 대한 연구가 부족하다.

본 연구에서는 레이더 자료를 수치예측모델에 동화하여 4가지 중규모 사례를 예측 및 분석하고 레이더 자료동화가 정량적 강수 예보에 미치는 영향을 연구하였다. 또한 바람, 수상체 및 수증기 혼합비를 개선하는 실험을 수행하여 레이더 자료동화가 강수 예측에 미치는 영향을 요소별로 분석하였다. 2장에서는 레이더 관측연산자 및 관측자료, 모델 실험 및 설계, 사례에 관하여 기술하였고 3장에서는 집중호우 사례 모의 결과에 관해 설명하였다.

2. 연구방안 및 사례

2.1 레이더 관측연산자

레이더는 대기 중으로 전파를 송신하고 수상체로부터 수신된 정보를 이용하여 시선속도와 반사도를 포함한 다양한 변수를 산출한다. 시선속도와 반사도를 수치모델에 입력하기 위해서는 관측연산자가 필요하다.

시선속도(V_r) 관측연산자는 식(2.1)과 같이 주어진다.

$$V_r = u \frac{x - x_i}{r_i} + v \frac{y - y_i}{r_i} + (w - v_t) \frac{z - z_i}{r_i} \quad (2.1)$$

u, v, w ($m s^{-1}$)는 모델의 바람 성분, x, y, z 는 레이더 위치, x_i, y_i, z_i 는 레이더 관측자료의 위치이며, r_i (m)는 레이더와 관측지점 사이의 거리, v_t ($m s^{-1}$)는 종단 낙하속도이다. 종단 낙하속도를 계산하기 위해 Sun and Crook (1997)의 계산식(식 2.2)을 이용하였다.

$$v_t = 5.40(p_0 \bar{p}^{-1})^{0.4} q_r^{0.125} \quad (2.2)$$

p_0 는 지면기압, \bar{p} 는 상태압력이며 q_r 은 비의 혼합비 ($kg kg^{-1}$)이다.

반사도는 수치모델의 온도장을 사용하여 각각의 수상체별 반사도로 분배한 후, 각 수상체의 혼합비로 변환하였다(Gao and Stensrud, 2012; Wang et al., 2013). 식(2.3)과 같이 관측된 반사도(Z_o)를 dBZ 단위에서 $mm^6 m^{-3}$ 단위인 입력 반사도(Z_e)로 변환한다.

$$Z_o = 10 \log_{10} Z_e \quad (2.3)$$

Z_e 는 비(rain, r), 눈, 싸락눈(graupel, g) 등 여러 수상체에 의해 관측되며 용해층을 고려하기 위해 눈은 온도에 따라 건설(dry snow, ds)과 습설(wet snow, ws)로 구분하여 관측연산자를 구성하였다. 이에 따라 입력 반사도는 식(2.4)와 같이 나타낼 수 있다(Dowell et al., 2011).

$$Z_e = Z_r + Z_{ds} + Z_{ws} + Z_g \quad (2.4)$$

수치모델의 온도(T)가 5°C 이상인 격자에서는 비만, 0°C < T < 5°C인 격자에서는 비와 습설, 싸락눈, -5°C < T ≤ 0°C인 격자에서는 비와 건설, 싸락눈, -5°C 이하의 격자에서는 건설과 싸락눈이 존재한다고 가정하였다 [식(2.5)-(2.8)]. 식(2.6)과 식(2.7)에 사용된 α는 모델 온도가 -5°C일 때 0, 5°C일 때 1의 값을 나타내며 온도에 따라 0과 1 사이에서 선형적으로 변화한다[식(2.9)].

$$Z = Z_r \quad 5^\circ\text{C} \leq T \quad (2.5)$$

$$Z = \alpha Z_r + (1 - \alpha)[Z_{ws} + Z_g] \quad 0^\circ\text{C} < T < 5^\circ\text{C} \quad (2.6)$$

$$Z = \alpha Z_r + (1 - \alpha)[Z_{ds} + Z_g] \quad -5^\circ\text{C} < T \leq 0^\circ\text{C} \quad (2.7)$$

$$Z = Z_{ds} + Z_g \quad T \leq -5^\circ\text{C} \quad (2.8)$$

$$\alpha = \frac{T + 5^\circ\text{C}}{10^\circ\text{C}} \quad -5^\circ\text{C} < T < 5^\circ\text{C} \quad (2.9)$$

반사도와 혼합비의 관계식을 이용하여 각 수상체의 반사도를 혼합비(kg kg⁻¹)로 변환하여 모델에 입력하였으며 ρ_a는 공기의 밀도(kg m⁻³)이다[식(2.10)-(2.13), Smith et al., 1975; Lin et al., 1983; Gilmore et al., 1998].

$$q_r = [Z_r (3.63 \times 10^9)^{-1}]^{0.57} \times \rho_a^{-1} \quad (2.10)$$

$$q_{ws} = [Z_{ws} (4.26 \times 10^{11})^{-1}]^{0.57} \times \rho_a^{-1} \quad (2.11)$$

$$q_{ds} = [Z_{ds} (9.80 \times 10^8)^{-1}]^{0.57} \times \rho_a^{-1} \quad (2.12)$$

$$q_g = [Z_g (4.33 \times 10^8)^{-1}]^{0.57} \times \rho_a^{-1} \quad (2.13)$$

레이더는 직접적으로 수증기 혼합비를 관측하지 않지만, 수치모델에 동화된 수상체가 유지 또는 성장할 수 있는 환경을 조성하기 위하여 관측 반사도가 30.0 dBZ 이상일 때, 수증기 혼합비(q_v)를 포화 수증기 혼합비(q_s)로 처방하였다[식(2.14)].

$$q_v = q_s \quad Z_o \geq 30.0 \text{ dBZ} \quad (2.14)$$

포화 수증기 혼합비는 클라우지우스-클라페롱 방정식 [식(2.15)]을 이용하여 물에 대한 포화 수증기압, e (hPa)을 구한 후, 식(2.16)과 같이 포화 수증기 혼합비를 계산하였다.

$$e = 6.112 \times \exp \left[\frac{L_{wv}}{R_v} \left(\frac{1}{273.15} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2.15)$$

$$q_s = \frac{\epsilon e}{p - (1 - \epsilon)e} \quad (2.16)$$

R_v는 수증기의 기체상수를 나타내며 461.51 J kg⁻¹ K⁻¹ 이고 L_{wv}은 융해열로 2.5 × 10⁶ J kg⁻¹이다. ε는 수증기의 기체상수에 대한 건조 공기의 기체상수 비로 0.622이며 p (hPa)는 모델의 기압이다.

본 연구에서는 10개 지점의 레이더 자료를 사용하였으며 기상레이더센터에서 제공하는 품질 관리된 Plan Position Indicator (PPI) 자료를 사용하였다(Fig. 1a). PPI 자료의 관측 고도각 개수는 9개이며 최고 고도각은 15°이다. PPI 자료를 수치모델과 동일한 수평 격자로 격자화하는 과정을 수행하였다. 레이더의 빈 해상도는 약 250.0 m로, 하나의 격자에 다수의 레이더 빈 값들이 존재하게 된다. 격자 내에 위치한 빈 값들을 역거리 가중 방법을 사용하여 하나의 격자 값으

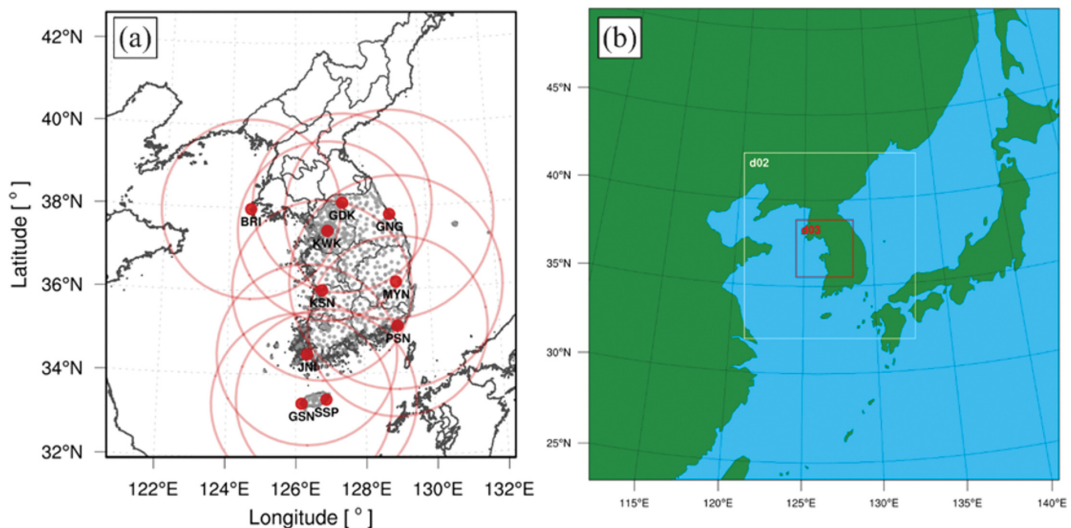


Fig. 1. (a) Radar site (red dots) and observation radius (red line), AWS and ASOS site (gray dots) and (b) model domain.

로 도출하였다. 격자 내의 레이더 빈 값들의 표준편차를 관측오차로 정의하였으며 수상체 혼합비의 관측 오차는 식(2.4)-(2.13)에 반사도의 관측오차를 대입하여 계산하였다. 격자화 된 PPI 자료를 연직으로 고도 0.25 km부터 10.0 km까지 0.25 km 간격의 Constant Altitude PPI 자료로 변환한 후, 자료동화 입력자료로 사용하였다. 반사도는 관측 공백 구역을 최소화하기 위해 모든 지점의 자료를 역거리 가중 방법을 사용하여 하나의 융합장을 생성하여 연구에 활용하였다. 시선속도는 식(2.1)과 같이 자료동화 시, 레이더 위치 정보가 필요하므로 각 지점의 자료를 활용하였다.

2.2 모델 구성 및 실험 설계

본 연구에서는 University Corporation for Atmospheric Research/National Center for Atmospheric Research (UCAR/NCAR)에서 개발한 Weather Research and Forecasting (WRF) 및 WRF Data Assimilation (DA) 4.4.1 버전(ARW; Skamarock et al., 2019)을 사용하였다. Figure 1b와 같이 집중호우가 발생한 수도권을 중심으로 9, 3, 1 km의 해상도를 가지는 3개의 등지 격자로 구성하였으며 사용한 물리과정 및 초기 및 경계 자료는 Table 1과 같다.

본 연구에서는 5가지 실험을 수행하여 레이더 자료동화가 강수 예측에 미치는 영향을 요소별로 분석하였다(Table 2). 첫 번째 실험은 자료동화를 수행하지

않고 초기 및 경계 조건만을 사용하여 9시간 예측장을 생성한 실험으로 NoDA라고 명명하였다. 레이더의 시선속도를 동화한 실험은 DA_VR, 반사도를 동화하여 수상체 혼합비를 개선한 실험은 DA_Z_HY, 반사도를 동화하여 수증기 혼합비를 개선한 실험은 DA_Z_QV라고 명명하였다. 시선속도와 반사도를 동화하여 바람, 수증기 및 수상체 혼합비를 개선한 실험은 DA_Radar라고 명명하였다. 자료동화 실험은 3차원 변분 자료동화 방법을 적용하여 수행되었으며 수식에 대한 상세한 내용은 Lee et al. (2022)에 기술되어 있다. 제어변수는 동·서, 남·북 바람성분, 온도, 위상대습도, 지상압력, 수상체(비, 눈, 싸락) 혼합비이며 National Meteorological Center (NMC) 방법을 사용하여 한반도의 여름철 동·서, 남·북 바람성분, 온도, 위상대습도, 지상 압력의 기후학적 모델 오차 공분산을 생산하였으며 수상체 혼합비의 모델 오차 공분산은 4.0 g kg^{-1} 으로 설정하였다(Parrish and Derber, 1992; Wang et al., 2013). 관측자료를 영역 2와 3에 30분 간격으로 3시간 동안, 총 7번 동화한 후 9시간의 예측장을 생성하였다.

2.3 분석사례

수도권에 호우를 유발한 4가지 사례를 선정하였으며 각각 중규모 대류(사례 1), 장마전선(사례 2, 4), 저기압(사례 3) 사례이다. Figure 2는 각 사례의 편집 일

Table 1. Options used in WRF 4.4.1 simulation.

	D01	D02	D03
Resolution	9 km	3 km	1 km
# of grids	$331 \times 331 \times 60$	$361 \times 391 \times 60$	$430 \times 361 \times 60$
Cumulus	Multi-scale Kain-Fritsch scheme (Zheng et al., 2016)		
Microphysics	WDM 6-class scheme (Lim and Hong, 2010)		
PBL	Yonsei University Scheme (Hong et al., 2006)		
Surface Layer	Revised MM5 Monin-Obukhov scheme (Jimenez et al., 2012)		
Land Model	Unified Noah land-surface model (Tewari et al., 2004)		
I.C & B.C	NCEP GFS 0.25 Degree Global Forecast Grids Historical Archive		

Table 2. Experimental design.

Experiment name	Input variable	Innovation variable
NoDA	-	-
DA_VR	Radial velocity (V_r)	Wind component (U, V)
DA_Z_HY	Reflectivity (Z)	Hydrometeors (rain, snow, graupel) mixing ratio (q_r, q_s, q_g)
DA_Z_QV	Z	Water vapor mixing ratio (q_v)
DA_Radar	V_r, Z	U, V, q_r, q_s, q_g, q_v

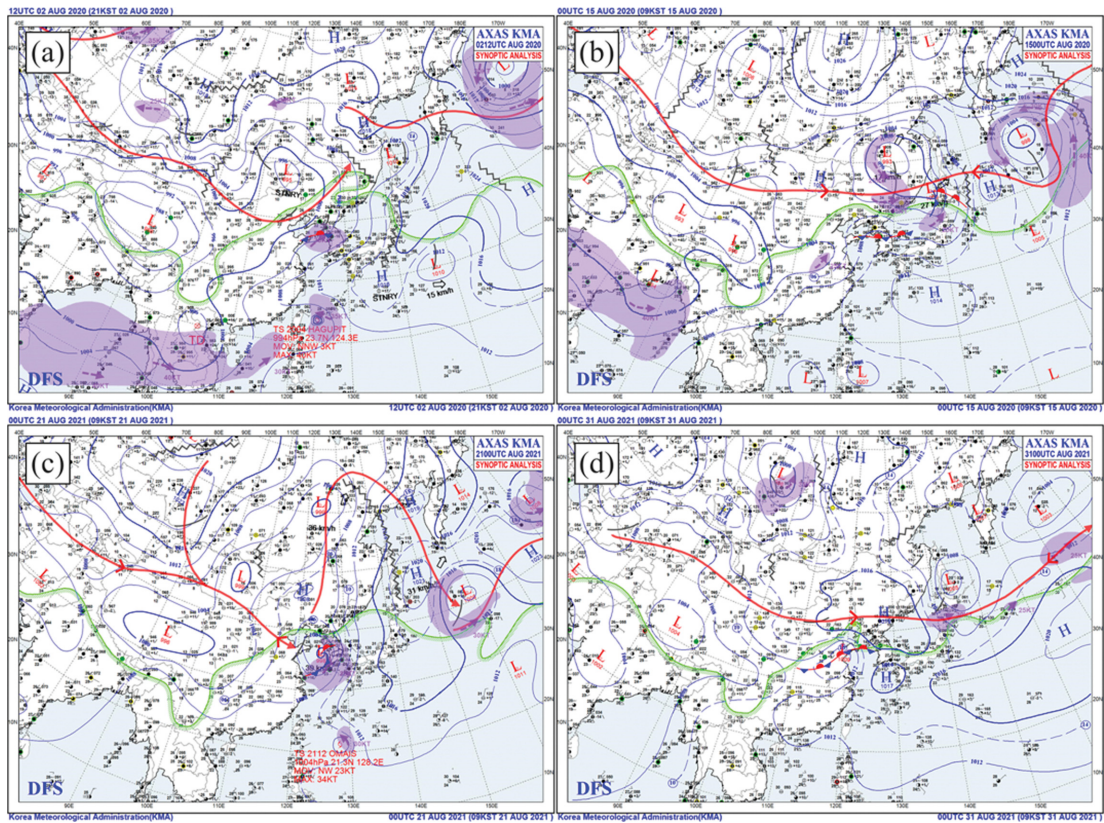


Fig. 2. Synthesis weather chart for (a) Case 1, (b) Case 2, (c) Case 3, and (d) Case 4, respectively.

Table 3. Selected cases for numerical experiments and their characteristics.

	Characteristics	Data assimilation (DA) period	Forecast period
Case 1	Mesoscale convective system	0300 UTC.02.Aug.2020 ~0600 UTC.02.Aug.2020	0600 UTC.02.Aug.2020 ~1500 UTC.02.Aug.2020
Case 2	Changma	1500 UTC.14.Aug.2020 ~1800 UTC.14.Aug.2020	1800 UTC.14.Aug.2020 ~0300 UTC.15.Aug.2020
Case 3	Low	2100 UTC.20.Aug.2021 ~0000 UTC.21.Aug.2021	0000 UTC.20.Aug.2021 ~0900 UTC.21.Aug.2021
Case 4	Changma	0000 UTC.31.Aug.2021 ~0300 UTC.31.Aug.2021	0300 UTC.31.Aug.2021 ~1200 UTC.31.Aug.2021

기도이며 특성, 자료동화 및 예측 기간은 Table 3에 정리하였다.

2020년 8월 2일(사례 1), 서해상 500 hPa 상공에 단파 골이 위치하였으며 하층에는 한반도 남동쪽에 위치한 북태평양 고기압과 북서쪽의 저기압의 흐름이 합쳐지며 서해상에 하층제트가 발생하였다. 하층제트를 따라 다량의 수증기가 서해상으로 유입되며 서해상에 중규모 대류계가 발생 및 발달하였다. 발달된 중

규모 대류계가 한반도로 이동하며 호형의 유출류 경계를 형성하였으며 9시간 동안(2020.08.02.0600 UTC~2020.08.02.1500 UTC) 경기도(신서)에 225.0 mm, 서울(강남)에 13.0 mm의 강수가 기록되었다.

사례 2 기간인 2020년 8월 15일, 200 hPa에는 중국 동북부에 제트가 존재하며 서해 상공은 해당 제트의 발산구역에 해당된다. 500 hPa에서는 몽골 상공에 -16.0°C의 차가운 공기가 위치하고 있으며 기압계의

흐름을 따라 차가운 공기가 한반도 상공으로 불어 들어오며 하강하였다(그림 생략). 하층에서는 한반도 남쪽에 위치한 북태평양 고기압의 흐름과 한반도 북쪽에 위치한 저기압의 흐름으로 인해 서해상에 수렴이 발생하였으며 다량의 수증기가 유입되었다. 한반도 중부지방에 장마전선이 위치하며 동서로 긴 형태의 강

수가 발생하였으며 경기도(대신)에 105.0 mm의 강수가 관측되었다.

2021년 8월 21일(사례 3) 500 hPa에는 한반도 북쪽에 위치한 저기압의 흐름을 따라 몽골의 차갑고 건조한 공기가 한반도로 유입되었다. 하층에서는 한반도의 동쪽에 북태평양 고기압이, 서해상에 저기압이 위

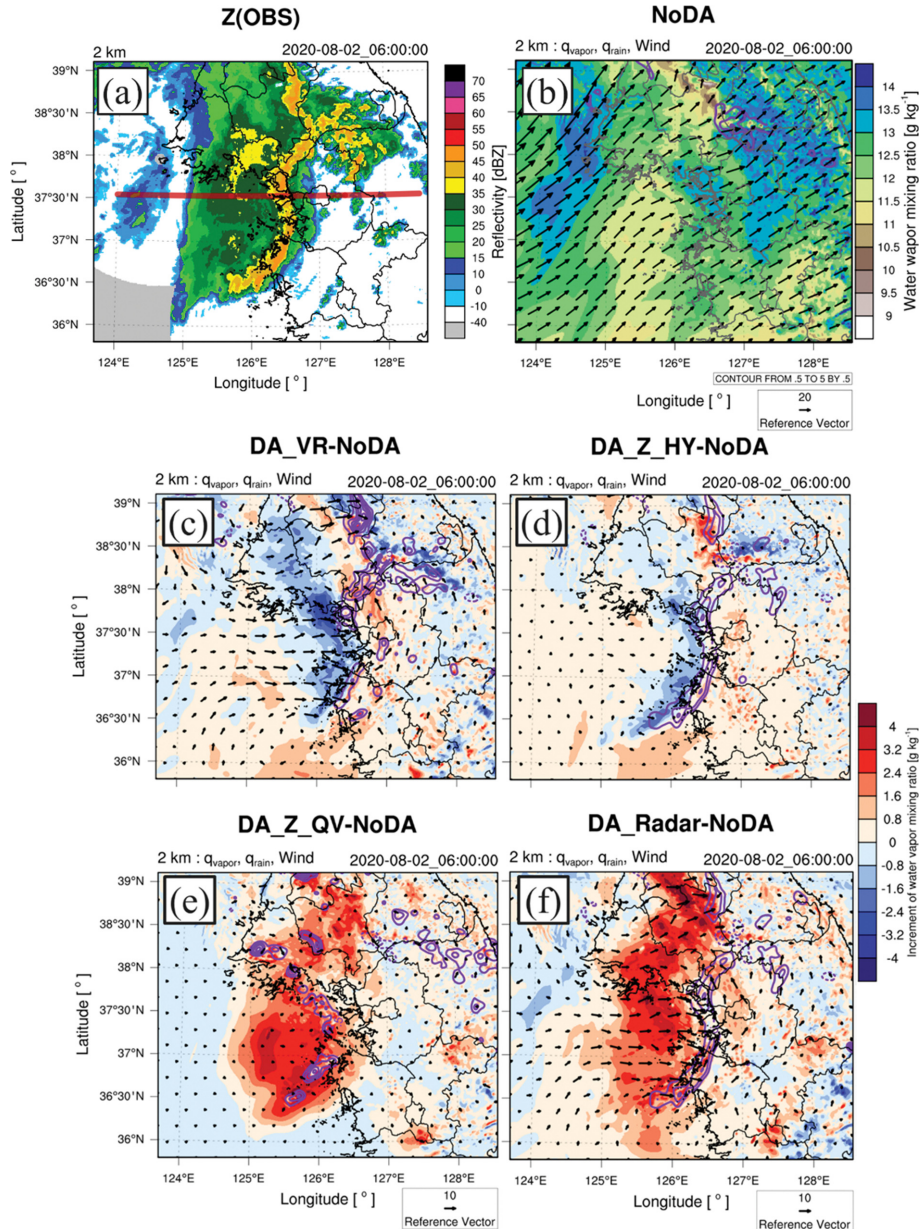


Fig. 3. 2-km (a) observed radar reflectivity (dBZ), (b) wind ($m s^{-1}$, vector), water vapor ($g kg^{-1}$, shaded) and rain mixing ratio ($0.5 g kg^{-1}$ intervals, purple line) of NoDA and rain mixing ratio and difference in wind and water vapor mixing ratio between (c) DA_VR, (d) DA_Z_HY, (e) DA_Z_QV, (f) DA_Radar and NoDA at 0600 UTC, August 02, 2020.

치하며 한반도에 강한 기압 경도가 발생하였으며 두 기압계의 흐름을 따라 서해상에 다량의 수증기 유입되었다. 이로 인해 두 기압계의 경계에 강한 강수대가 형성되었으며 사례 3에 해당하는 저기압이 서해상에 발달하며 한반도로 유입되어 2021.08.20.2100 UTC~2021.08.21.0600 UTC, 서해(덕적도)에 109.0 mm, 서울(서초)에 65.5 mm의 강수가 기록되었다.

사례 4는 장마전선 사례로 2021년 8월 31일 서해상공 200 hPa에 제트의 발산역이 위치하고 있으며 500 hPa 상공에는 골이 존재하고 한랭이류로 인해 상층이 불안정하였다(그림 생략). 하층 850 hPa에서는 북태평양 고기압의 가장자리를 따라 다량의 수증기가 유입되었으며 남쪽에서 유입해온 온난한 공기가 서해상에 수렴하며 장마전선에 동반된 저기압이 발달하였다. 강수계가 동진하며 한반도로 유입되어 동서로 긴 강수대가 형성되었으며 8월 31일 0300 UTC부터 1200 UTC 까지 수도권에 최대 79.5 mm (강남의 강수가 관측되었다).

수치모델의 강수 예측 정확도를 검증하기 위해 중관기상관측장비(Automated Synoptic Observing System, ASOS)와 무인자동기상관측장비(Automated Weather Station, AWS)에서 관측된 강수량 자료를 사용하였다.

3. 자료동화 실험 결과

수치예보에서 레이더 자료동화가 강수 예측에 미치는 영향을 분석하기 위해 시선속도와 반사도 동화 효

과가 뚜렷하게 나타난 두 사례를 선정하여 상세 분석을 수행하였다. 또한, 4개 사례에 대한 강수량 검증을 수행하여 강수 예측 정확도 개선 정도를 분석하였다.

3.1 시선속도 자료동화가 강수 예측 개선에 기여가 큰 사례: 사례 1

Figure 3은 사례 1의 자료동화가 끝난 시각(2020.08.02.0600 UTC), 고도 2.0 km의 관측 반사도, NoDA 실험의 바람, 수증기 및 비 혼합비 분포와 자료동화 실험군의 바람 및 수증기 증분 및 비 혼합비를 나타낸 그림이다. 서해상에서 발달한 중규모 대류계에서 유출류 경계가 유발되었으며 강수계가 한반도로 밀려들어오며 서해안을 따라 40.0 dBZ 이상의 호형의 반사도가 관측되었다. NoDA 실험에서는 중규모 대류계를 모의하지 못하며 20.0 m s⁻¹의 남서풍이 서해안을 지나 한반도 내륙으로 유입되어 경기 및 강원 내륙에 13.0 g kg⁻¹ 이상의 수증기 혼합비가 모의되었다. DA_VR 실험에서 시선속도가 동화되며 호형의 반사도가 관측된 구역 후면에 10.0 m s⁻¹의 서풍이 증가하였다. 이로 인해 서해안에 바람이 수렴하며 0.5 g kg⁻¹ 이상의 비 혼합비가 모의되었다. DA_Z_HY 실험에서는 호형의 반사도가 관측된 지점에 수증체가 증가하며 최고 1.5 g kg⁻¹의 비 혼합비가 모의되었다. DA_Z_QV 실험에서는 서해상에 약 2.4 g kg⁻¹의 수증기 혼합비가 증가하였으며 비 혼합비도 증가하였지만, 호형의 반사도가 관측된 구역보다는 서쪽에 수증기 및 수상

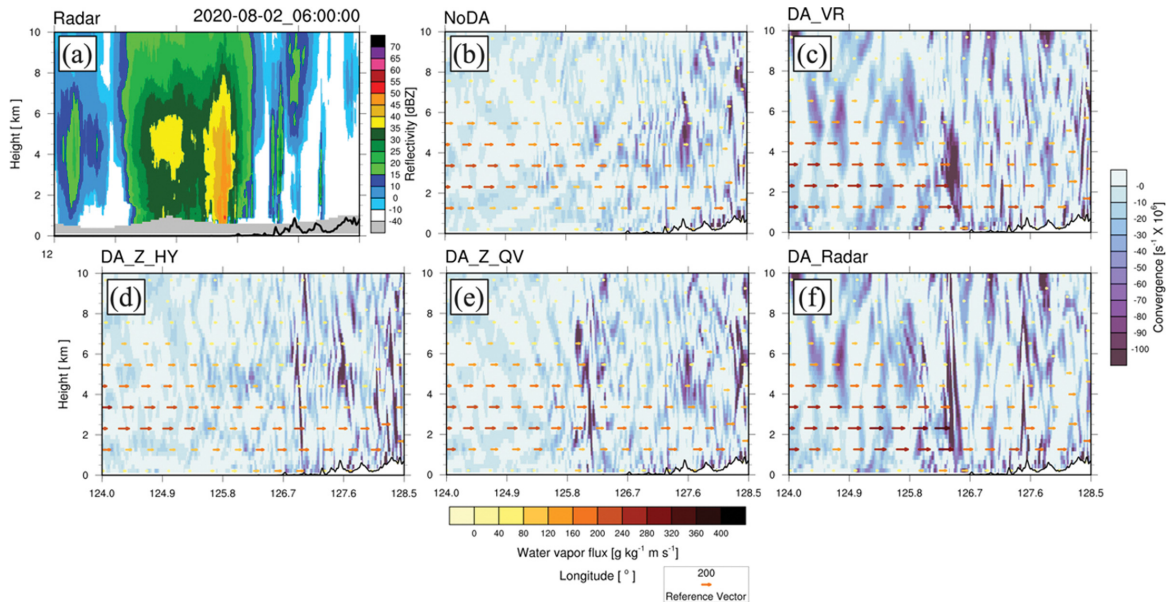


Fig. 4. (a) Observed radar reflectivity and (b)-(f) convergence (shaded) and water vapor flux (vector) vertical cross section for (b) NoDA, (c) DA_VR, (d) DA_Z_HY, (e) DA_Z_QV and (f) DA_Radar at 0600 UTC, August 02, 2020.

체가 증가하였다. DA_Radar 실험에서는 시선속도와 반사도가 모두 동화되며 호형의 반사도가 관측된 구역의 비 혼합비가 1.5 g kg^{-1} 증가하였으며 반사도 후면에서 수증기 혼합비가 증가하고 바람이 수렴하고 있다.

Figure 4는 2020.08.02.0600 UTC의 관측 반사도와 각 실험군의 수렴 및 수분 속을 나타낸 연직 단면도

이다(Fig. 3a, 붉은 선 구역). 동진하던 강수계가 서해안에 도달하며 고도 8.0 km까지 35.0 dBZ 이상의 반사도가 관측되었다. 하지만 NoDA, DA_Z_HY 실험의 분석장에서는 해당 구역에 $20.0\sim 30.0 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 의 약한 수렴이 모의되었으며 $200.0 \text{ g kg}^{-1} \text{ m s}^{-1}$ 이하의 수분 속이 존재하였다. 시선속도가 동화된 DA_VR 및

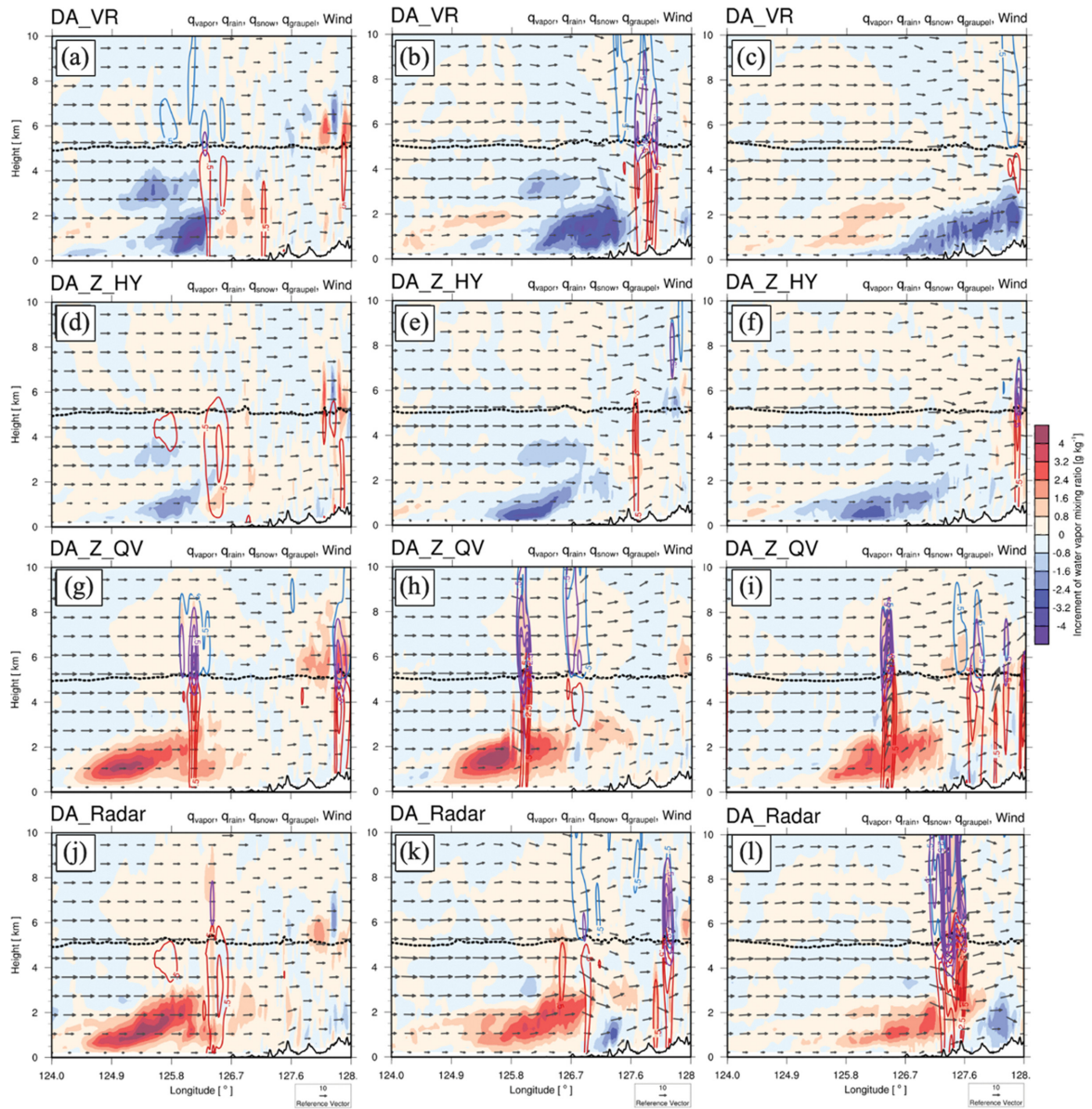


Fig. 5. Rain (red line), snow (blue line), graupel mixing ratio (0.5 g kg^{-1} intervals, purple line) and 0°C height (black dashed line) and difference in wind (m s^{-1} , vector), water vapor mixing ratio (g kg^{-1} , shaded) vertical cross section between (a)-(c) DA_VR, (d)-(f) DA_Z_HY, (g)-(i) DA_Z_QV, (j)-(l) DA_Radar and NoDA at (a), (d), (g) and (j) 0600UTC, (b), (e), (h) and (k) 0700 UTC and (c), (f), (i) and (l) 0800 UTC, August 02, 2020.

DA_Radar 실험에서는 6.0 km 상공까지 $100.0 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 이상의 수렴이 모의되었으며 강수계 후면에서 서풍이 증가하며 NoDA 실험과 비교하여 수분 속이 증가하였다. DA_Z_QV 실험에서는 약 $100.0 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 의 수렴이 모의되었으나 실제 대류셀이 위치한 지점보다 서쪽에 강한 수렴이 나타났다.

강수를 형성하는 수상체의 성장 과정을 분석하기 위해 분석장과 예측장의 연직 단면도 분석을 수행하였다. 해당 구역은 Fig. 4에서 분석한 구역과 동일한 구역이다. Figure 5는 자료동화가 끝난 시각(2020.08.02.0600 UTC) 및 예측 시작 1, 2시간 후 인, 0700 UTC, 0800 UTC의 자료동화 실험군의 바람과 수상체 혼합비 분포, NoDA 실험과의 수증기 혼합비 차이를 나타낸 그림이다. 2020.08.02.0600 UTC, DA_VR 실험에서는 2.0 km 이하 구역에서 서풍이 강해지며 대류셀이 위치한 지점에 바람이 수렴하고 10.0 km 고도까지 약 0.5 g kg^{-1} 의 수상체들이 모의되었다. 바람이 수렴하며 수증기가 수상체로 성장하였기 때문에 수증기 혼합비가 최대 4.0 g kg^{-1} 감소하였다. 예측 시작 1시간 후, 내륙에 최대 1.5 g kg^{-1} 비 혼합비를 모의하였지만 2시간 예측장에서는 대부분의 수상체들이 성장하지 못하고 증발하며 약 0.5 g kg^{-1} 비, 눈 혼합비만 예측되었다. DA_Z_HY 실험의 분석장에서는 서해안에 최대 1.0 g kg^{-1} 의 비 혼합비가 모의되었다. 하지만

예측 기간에 동화된 수상체가 발달하지 못하며 내륙에 약 1.0 g kg^{-1} 비, 눈 혼합비가 모의되었다. DA_Z_QV 실험에서는 서해상 2.0 km 이하의 구역에서 수증기 혼합비가 최대 4.0 g kg^{-1} 증가하였으며 1.0 g kg^{-1} 이상의 수상체 혼합비가 모의되었다. 예측 기간에 수증기가 수상체로 성장하며 최대 2.5 g kg^{-1} 의 수상체가 모의되었다. 하지만 다른 자료동화 실험군에 비해 강수계가 느리게 동진하며 서쪽에 위치하고 있다. DA_Radar 실험의 분석장에서는 서해안에 약 1.0 g kg^{-1} 의 비 혼합비가 모의되었으며 하층의 풍속 및 수증기 혼합비가 증가하였다. 여러 변수들이 개선되며 0700 UTC 예측장에서 내륙에 0.5 g kg^{-1} 의 이상의 수상체 혼합비가 모의되었으며 0800 UTC의 예측장에서는 다른 실험에서 예측하지 못하였던 발달된 수상체의 혼합비를 모의하였다(최대 3.0 g kg^{-1}).

Figure 6은 도메인 3 영역 내의 DA_VR, DA_Z_HY, DA_Radar 실험과 NoDA 실험의 수증기, 비, 눈 혼합비의 차이를 연직 시계열로 나타낸 그림이다. DA_VR 실험에서는 역학장이 개선되며 예측 초기에 수상체가 생성 및 발달하였으며 예측 시작 5시간 후까지 수상체 혼합비가 최대 1.0 g kg^{-1} 증가하였다. DA_Z_HY 실험의 분석장에서 6.0 km 고도까지 약 0.08 g kg^{-1} 의 비 혼합비가 증가하였으나 예측장에서는 수상체들이 유지되지 못하고 소멸하였다. DA_Radar 실험에서는

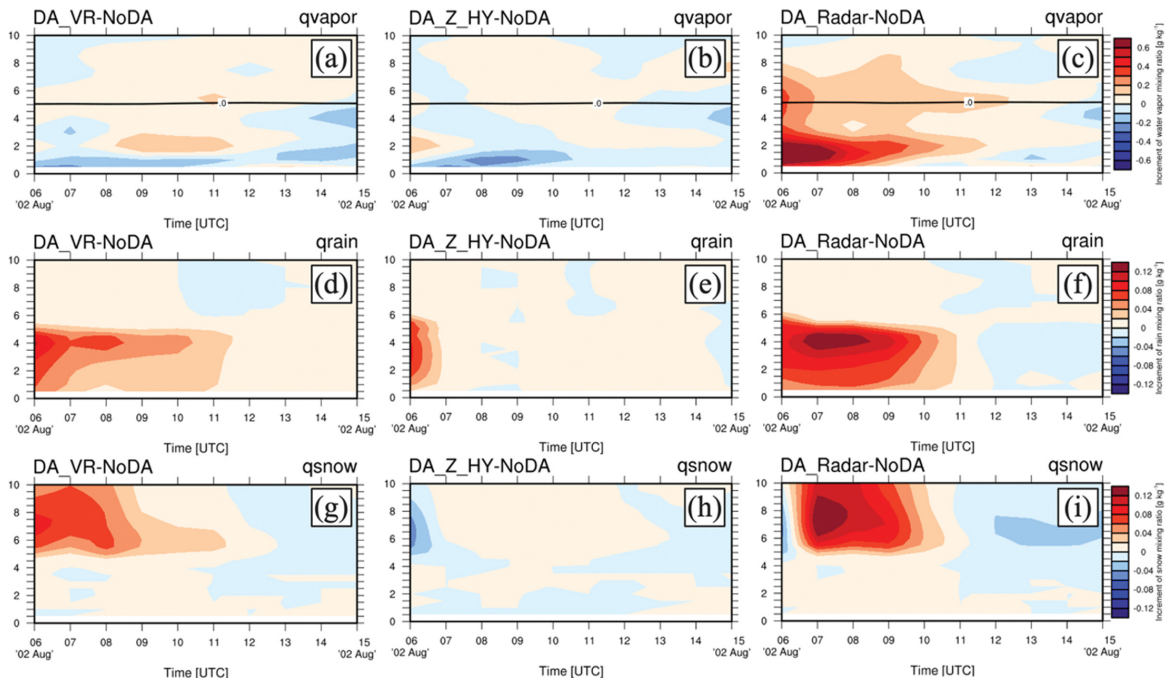


Fig. 6. 0°C height (black dashed line) and difference in (a)-(c) water vapor, (d)-(f) rain and (g)-(i) snow mixing ratio time height section of (a), (d) and (g) DA_VR, (b), (e) and (h) DA_Z_HY, (c), (f) and (i) DA_Radar and NoDA for Case 1.

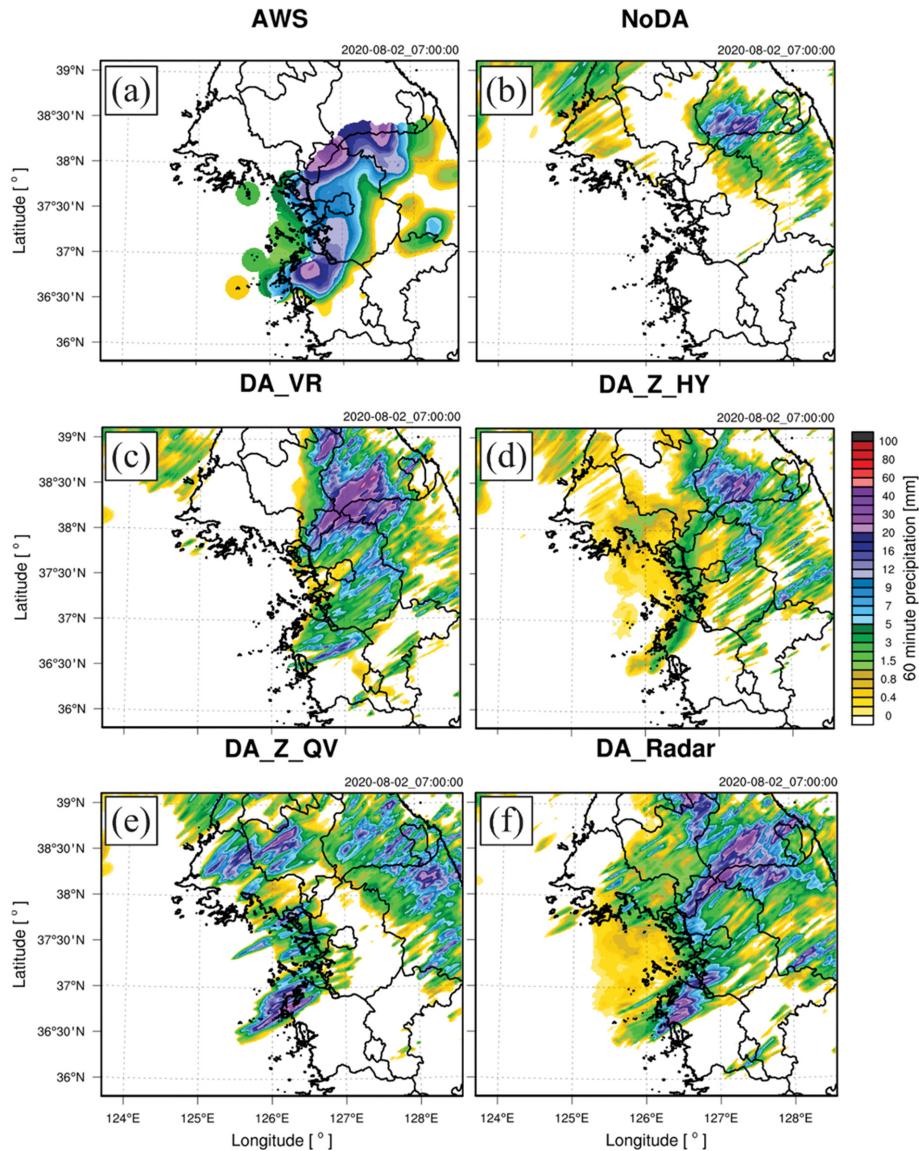


Fig. 7. (a) Observed AWS 60-min precipitation and simulated 60-min cumulative precipitation distribution (b) NoDA, (c) DA_VR, (d) DA_Z_HY, (e) DA_Z_QV and (f) DA_Radar at 0700 UTC, August 02, 2020.

DA_VR 실험에 수증기 및 수상체 혼합비가 추가로 동화되며 5시간 예측까지 DA_VR 실험의 예측장 대비 약 0.04 g kg^{-1} 많은 양의 수상체들이 모의되었다.

Figure 7은 사례 1 기간 중, 가장 많은 강수량이 관측된 2020.08.02.0700 UTC의 관측 및 예측된 60분 강수량 분포를 나타낸 그림이다. 유출류 경계가 내륙으로 이동하며 경기도 및 충청남도에 약 10.0 mm의 호형의 강수 구역이 관측되었으며 경기 북부 및 충청남도 해안에는 40.0 mm 이상의 강수가 기록되었다.

NoDA 실험에서는 경기도와 강원도의 경계 및 강원도에 강수를 모의할 뿐, 중규모 대류계로 인한 강수를 모의하지 못하였다. DA_VR 실험에서는 유출류 경계가 모의되며 경기 북부에 최대 50.0 mm의 강수를 모의하였으나 경기 중·남부와 충청북도에 관측에 비해 강수량이 적고 호형의 강수 구역이 뚜렷하게 나타나지는 않는다. DA_Z_HY 실험에서는 서해안에 위치한 호형의 강수가 모의되었으나 약 2.0 mm로 관측 대비 강수를 과소 모의하였다. DA_Z_QV 실험에서는

Table 4. 9-hr cumulative precipitation bias, root mean square error (RMSE), spatial correlation coefficient (SCC) for experiments.

	Experiment	Bias	RMSE	SCC
Case 1	NoDA	-49.35	56.81	75.83
	DA_VR	-16.57	28.46	90.82
	DA_Z_HY	-22.18	38.71	72.84
	DA_Z_QV	-13.58	34.63	64.44
	DA_Radar	-11.12	30.24	82.96
Case 2	NoDA	-15.72	32.53	69.23
	DA_VR	-16.46	35.08	62.22
	DA_Z_HY	-21.55	33.17	61.38
	DA_Z_QV	-16.91	30.49	62.99
	DA_Radar	-9.9	27.63	70.45
Case 3	NoDA	-6.03	28.7	69.36
	DA_VR	1.65	24.88	77.23
	DA_Z_HY	-0.01	32.72	66.26
	DA_Z_QV	0.59	22.77	77.32
	DA_Radar	3.44	24.31	80.04
Case 4	NoDA	-16.69	23.02	88.94
	DA_VR	-5.02	11.33	91.94
	DA_Z_HY	-17.11	22.83	89.86
	DA_Z_QV	-15.19	21.56	89.97
	DA_Radar	-4.94	12.66	91.07
Average	NoDA	-21.95	35.27	75.84
	DA_VR	-9.10	24.94	80.55
	DA_Z_HY	-15.21	31.86	72.59
	DA_Z_QV	-11.27	27.36	73.68
	DA_Radar	-5.63	23.71	81.13

최대 40.0 mm의 호형의 강수가 모의되었으나 관측과 비교하여 강수 구역이 서쪽에 위치하고 있다. DA_Radar 실험에서는 DA_VR 실험보다 뚜렷한 형태의 호형의 강수를 모의하였으며 경기 북부 및 충청남도의 40.0 mm 이상의 강수를 예측하며 관측과 유사한 강수 분포를 보였다. 9시간 누적 강수량 검증 결과, NoDA에서 강수를 과소 모의하며 -49.35 mm의 음의 오차가 나타났다. 레이더 자료동화를 통해 모든 자료동화 실험군의 강수 예측 정확도가 개선되었으며 DA_VR에서 가장 낮은 오차(root mean square error, RMSE)와 가장 높은 패턴 일치율(spatial correlation coefficient, SCC)을 보였다(Table 4).

3.2 반사도 자료동화가 강수 예측 개선에 기여가 큰 사례: 사례 2

Figure 8은 Fig. 3과 같이 자료동화가 끝난 시간인 2020.08.14.1800 UTC, 고도 2.0 km의 관측 반사도, NoDA 실험의 바람, 수증기 및 비 혼합비 분포와 자료동화 실험군의 바람과 수증기 증분 및 비 혼합비를

나타낸 그림이다. 해당 시간 남·서 및 북·동을 가로지르는 긴 장마전선이 한반도 중부지방 상공에 위치하고 있으며 장마전선을 따라 35.0 dBZ 이상의 강수 셀들이 위치하고 있다. NoDA 실험에서 20.0 m s⁻¹의 서남서풍을 따라 수증기가 유입되며 한반도 내륙에 최대 14.5 g kg⁻¹의 수증기 혼합비가 모의되었다. 서해상에도 약 13.0 g kg⁻¹의 수증기 혼합비가 모의되었지만 성장한 수상체를 모의하지 못했다(0.5 g kg⁻¹ 미만의 비 혼합비 존재). DA_VR 실험에서는 35.0 dBZ 이상의 반사도가 관측된 서해 상공, 36°7'N 지역에 남풍이 증가하며 바람이 수렴하고 있다. DA_Z_HY 실험에서 40.0 dBZ 이상의 높은 반사도가 위치한 구역에 0.5~2.0 g kg⁻¹ 비 혼합비가 모의되었으나 수증기 혼합비의 변화량은 적다. DA_Z_QV 실험에서는 서해상에 높은 반사도가 관측된 구역에 수증기 혼합비가 최대 3.2 g kg⁻¹ 증가하였으며 서해안 및 강원도의 수증기 혼합비도 증가하였다. DA_Radar 실험에서는 시선속도 및 반사도가 모두 동화되며 서해상의 강수계가 위치한 지역에 바람이 수렴하였으며 35.0 dBZ 이

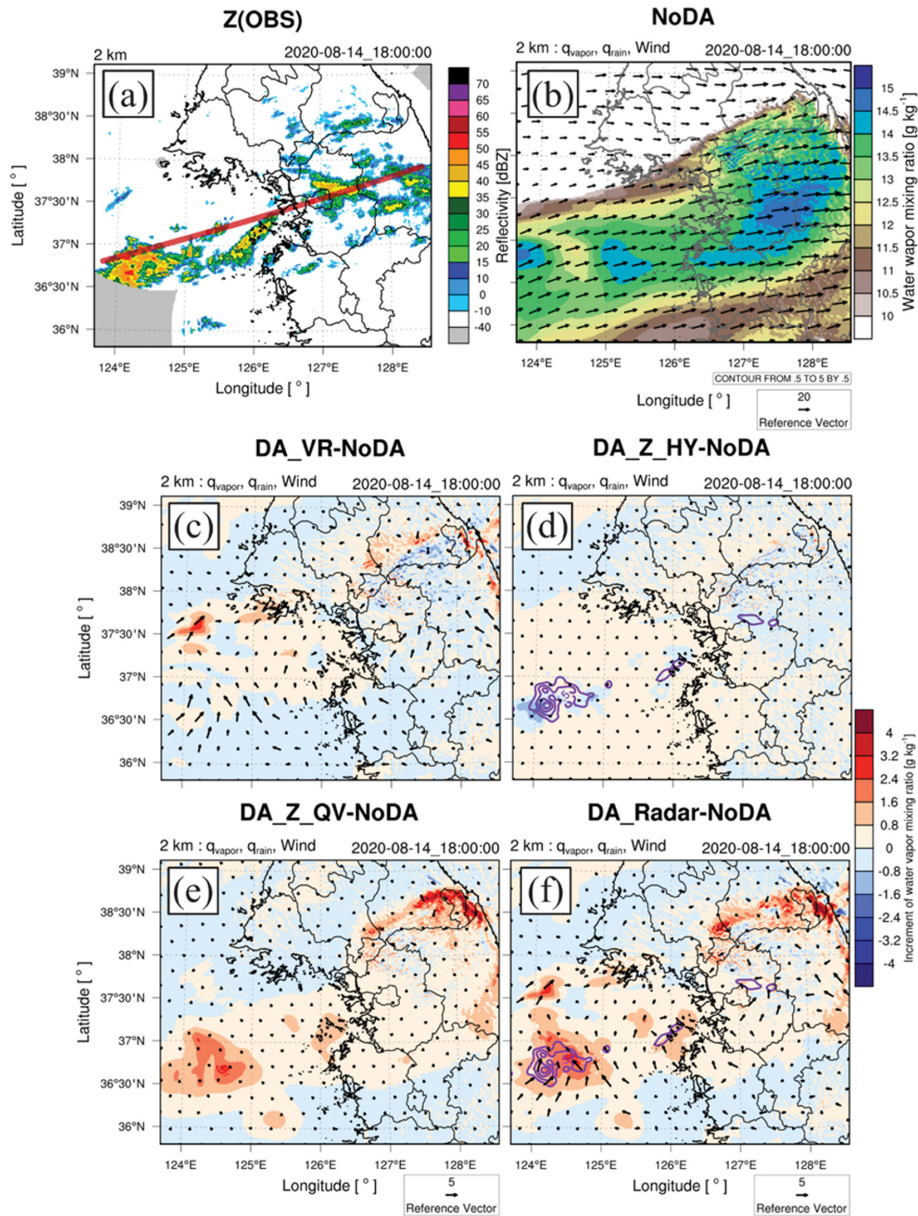


Fig. 8. The same as Fig. 3, except for 1800 UTC, August 14, 2020.

상의 반사도가 관측된 구역에 수증기 및 수상체 혼합비가 증가하였다.

Figure 9는 사례 2에 자료동화가 끝난 시각(2020. 08.14.1800 UTC) 및 예측 시작 2, 4시간 후 인, 2000 UTC, 2200 UTC의 연직 단면도 분석을 수행한 그림으로, 해당 구역은 Fig. 8의 붉은 선으로 장마전선이 위치한 구역이다. DA_VR 실험의 분석장에서 바람이 수렴하며 NoDA 실험보다 약 1.0 g kg^{-1} 의 수증기 혼

합비가 증가하였으며 2시간 예측장에서 NoDA 실험과 비교하여 서해상에 2.0 g kg^{-1} 의 수상체 혼합비가 증가하였다. 하지만 최대 강수를 유발한 125.0°E 의 대류셀을 모의하지 못하였다. DA_Z_HY 분석장에서 서해상에 최대 1.5 g kg^{-1} 의 비 수상체가 모의되었지만 예측 기간에 수상체가 성장하지 못하고 증발하여 최대 강수를 유발한 대류셀을 모의하지 못하였다. DA_Z_QV 실험의 분석장에서 수증기 혼합비가 증가

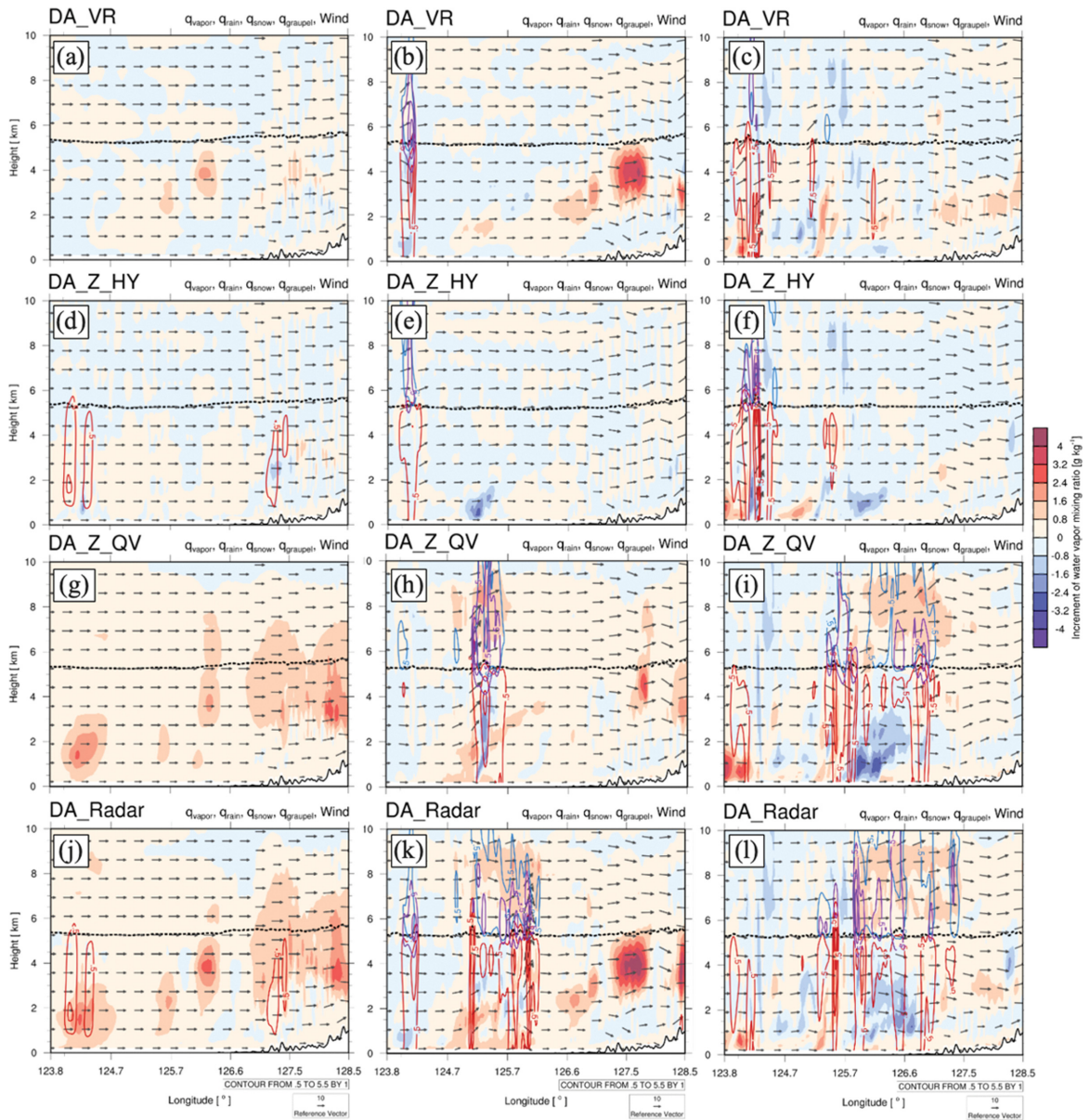


Fig. 9. The same as Fig. 4, except for (a), (d), (g) and (j), 1800 UTC, (b), (e), (h) and (k) 2000 UTC and (c), (f), (i) and (l) 2200 UTC, August 14, 2020.

하며 NoDA 실험과 비교하여 수증기 혼합비가 0.8 g kg^{-1} 증가하였다. 하지만 성장한 수상체를 모의하지는 못하였다. 예측 기간에 수증기가 수상체로 성장하며 서해상 및 수도권 상공에 약 2.0 g kg^{-1} 의 성장한 비, 눈, 싸락 혼합비를 모의하였다. DA_Radar 실험의 분석장에서 서해상에 수증기 및 수상체 혼합비가 증가하였으며 예측 2시간 후, DA_Z_QV 실험보다 짧은 시간 안에 수상체가 성장하며 서해상에 1.5 g kg^{-1} 이

상의 많은 양의 수상체 혼합비가 모의되었다. 4시간 후에는 서해 및 수도권 상공에 0.5 g kg^{-1} 이상의 수상체들이 넓은 구역에 모의되었으며 DA_Z_QV 실험과 유사한 분포 및 양이 나타났다.

Figure 10은 사례 2의 DA_Z_HY, DA_Z_QV, DA_Radar 실험과 NoDA 실험의 수증기, 비, 눈 혼합비의 차이를 연직 시계열로 나타낸 그림이다. DA_Z_HY 실험의 분석장에서 비 혼합비가 약 0.03 g kg^{-1} 증가

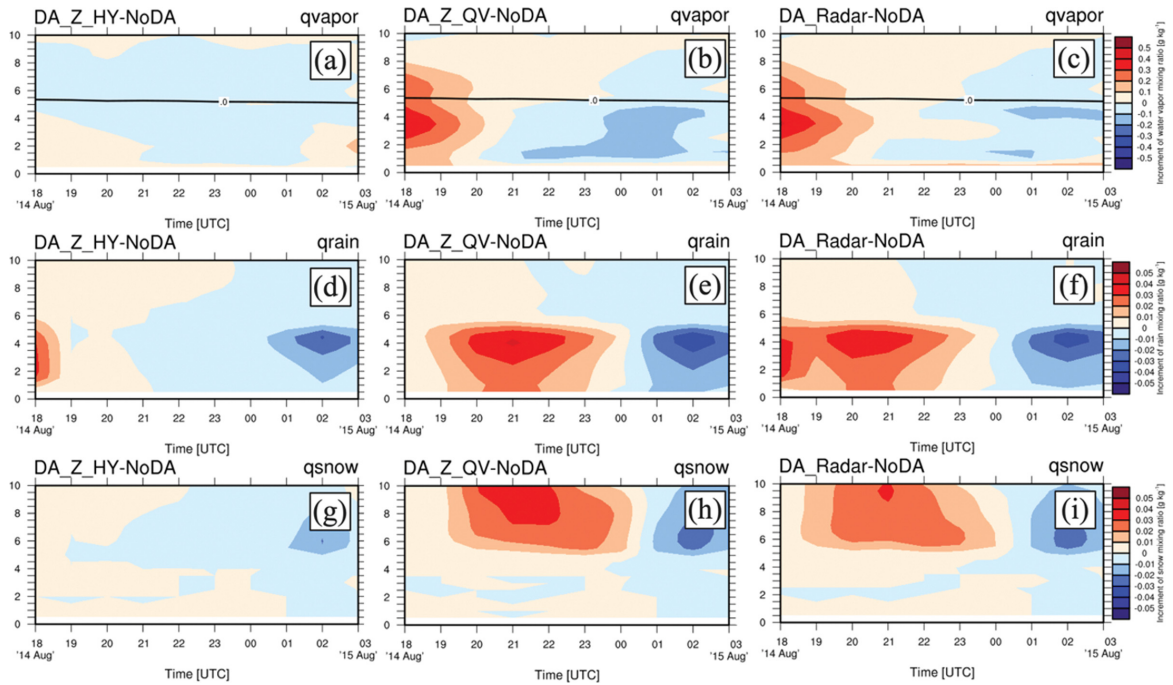


Fig. 10. The same as Fig. 5, except for (a), (d) and (g) DA_Z_HY, (b), (e) and (h) DA_Z_QV, (c), (f) and (i) DA_Radar for Case 2.

하였으나 예측 기간에 수상체들이 성장하지 못하고 증발하여 NoDA 실험과 유사한 양의 수상체 혼합비가 예측되었다. DA_Z_QV 실험에서는 분석장의 수증기 혼합비가 최대 0.4 g kg^{-1} 증가하였으며 예측 시작 후 6시간 동안 수상체들이 성장하였으며 3시간 후에 가장 많은 수상체 혼합비 증가량을 보였다. DA_Radar 실험에서는 DA_Z_QV 실험에 비해 수상체가 추가로 동화되며 spin-up 시간이 감소하여 수상체 혼합비 증가가 최대로 나타난 시간이 DA_Z_QV 실험에 비해 1시간 빠르게 나타났다.

Figure 11은 사례 2 기간 중 최대 강수가 발생한 시각인 2020.08.14.2200 UTC의 AWS와 ASOS에서 관측된 60분 강수량과 실험군에서 모의된 60분 강수량 분포이다. 장마전선상에서 발달한 강수계가 한반도로 유입되며 수도권에 최대 40.0 mm의 강수가 관측되었으며 경기 및 강원도를 동·서로 가로지르는 강수 구역이 존재한다. NoDA와 DA_Z_HY 실험에서는 내륙의 강수를 모의하지 못하였으며 DA_VR 실험에서도 5.0 mm 이하의 강수가 모의되며 강수를 과소 모의하였다. DA_Z_QV와 DA_Radar 실험에서 수도권 및 경기 서부의 40.0 mm의 강수를 모의하며 예측 정확도가 향상되었으며 DA_Radar 실험에서는 강원도의 강수를 모의하며 관측과 가장 유사하게 강수를 모의하였다. 9시간 누적 강수량 검증 결과에서도 DA_Radar 실험

에서 가장 낮은 RMSE와 가장 높은 SCC 값이 나타났으며 DA_Z_QV가 두 번째로 높은 정확도를 보였다(Table 4).

3.3 강수량 검증

AWS와 ASOS에서 관측된 강수량을 이용하여 4개 사례에 대하여 각 실험군의 9시간 누적 강수량 검증을 수행하였으며 Table 4에 평균 Bias, RMSE, SCC를 제시하였다. 자료동화를 수행하지 않은 실험인 NoDA 실험에서 급격하게 발생 및 발달하는 중규모의 강수를 모의하지 못하며 -21.95 mm 의 음의 오차가 나타났다. 자료동화를 수행한 실험군은 NoDA 실험과 비교하여 오차가 감소하였으며 시선속도와 반사도를 동시에 동화한 DA_Radar에서 가장 높은 정확도가 나타났으며 DA_VR, DA_Z_QV, DA_HY 순으로 낮은 오차를 보였다.

관측된 60분 강수량과 모델에서 모의된 60분 강수량을 사용하여 약한 비(1.0~3.0 mm 미만), 보통 비(3.0~15.0 mm 미만), 강한 비(15.0 mm 이상)의 범주를 두어 강수 모의 여부에 따른 검증을 수행하였다. Figure 12는 각 실험군 별 예측 시간에 따른 4개 사례 평균 Equitable Threat Score (ETS)를 표출한 그림으로, 강수 예측 정확도가 높을수록 ETS는 1에 가깝다. 예측 시간에 따른 각 실험군의 ETS 값은 문자로, NoDA 실험

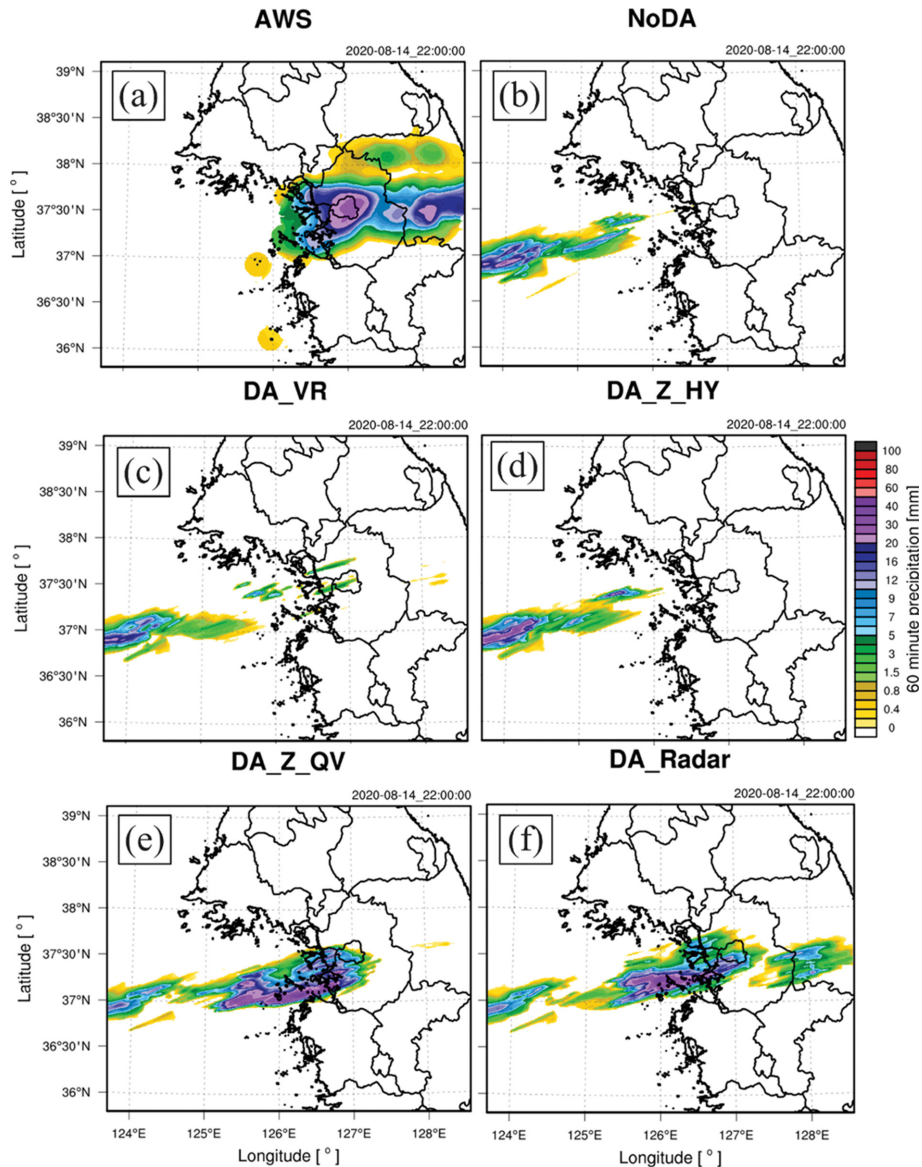


Fig. 11. The same as Fig. 6, except for 2200 UTC, August 14, 2020.

험의 ETS와 자료동화 실험군과 NoDA 실험의 ETS 차이를 채색으로 나타내었다. NoDA 실험에서는 모든 강도 및 시간에서 0.12 이하의 낮은 ETS를 보였다. DA_VR 실험에서는 보통 비에서 강수 예측 정확도 개선이 높게 나타났으며 NoDA와 비교하여 1시간 예측장의 ETS가 상대적으로 높게 나타났다. 이러한 특징이 나타난 이유는 시선속도가 동화를 통해 예측 초기 역학장이 개선되며 수상체들이 생성되어 강수가 모의되었지만 건조한 환경으로 인하여 수상체들이 성장하지 못하며 자료동화의 효과가 예측 후반까지 이

어지지 못하였기 때문이다. DA_Z_HY 실험에서는 NoDA 실험과 유사한 ETS가 나타났다. 분석장에서 강수계가 위치한 구역에 수상체들을 모의하였지만 DA_VR 실험처럼 대기 중에서 수상체들이 성장 및 유지되지 못하고 증발하며 강수를 모의하지 못하였기 때문이다. DA_Z_QV 실험에서는 4-5시간 예측에서 모의된 보통 비에서 0.15와 0.19의 ETS를 보였다. 동화된 수증기 혼합비가 빠르게 수상체로 성장하지는 못하였지만 예측 기간 동안 점차 성장하며 강수를 모의하여 예측 중반인 4-5시간 예측장에서 강수 예측

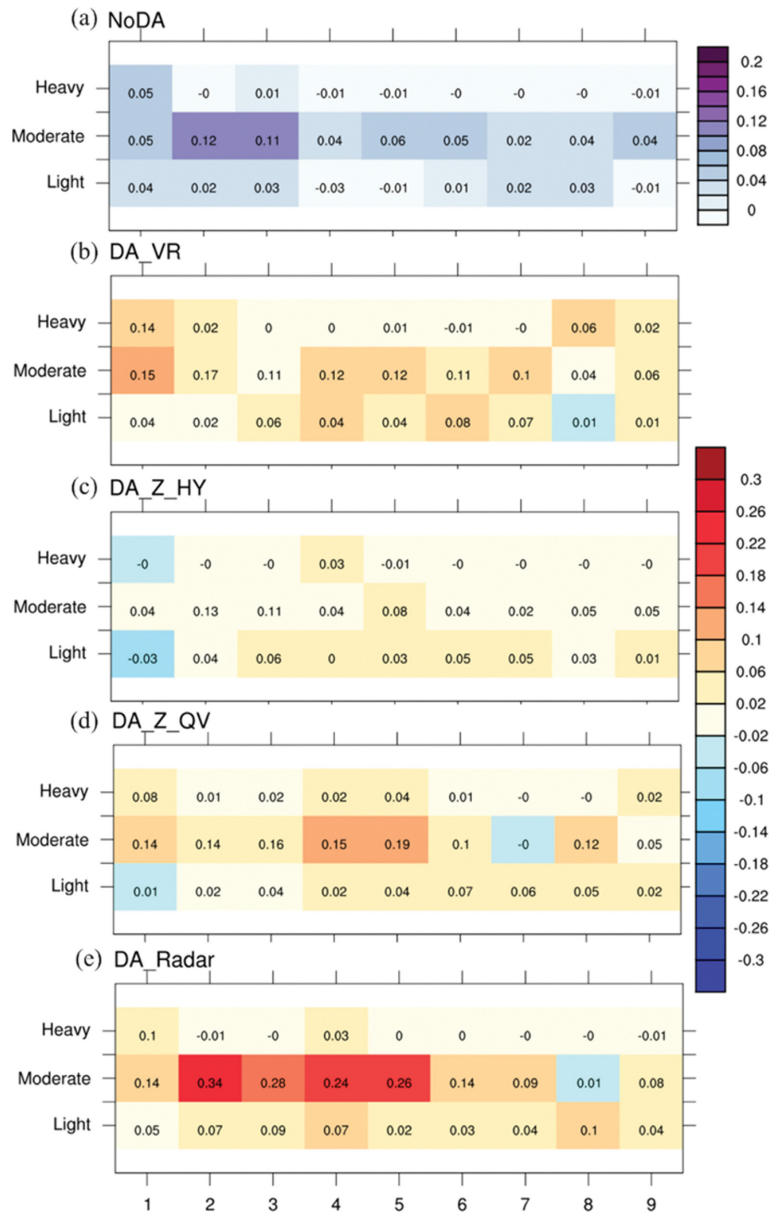


Fig. 12. Average 60-min precipitation (a) Equitable Threat Score (ETS) values for four cases by precipitation intensity over time (Light: 1.0 mm to 3.0 mm, Moderate: 3.0 mm to 15.0 mm, Heavy: 15.0 mm or more) for NoDA (both shaded and in text), ETS difference from NoDA (shaded), and ETS values (text) for (b) DA_VR, (c) DA_Z_HY, (d) DA_Z_QV, and (e) DA_Radar based on forecast time.

정확도가 개선되었다. DA_Radar 실험에서는 예측 초반부터 약 7시간까지 보통 비에 대한 예측 정확도가 향상되었다. 바람 및 수상체가 동화됨에 따라 예측 초기부터 정확한 위치에 강수를 모의할 수 있었으며 분석장에서 모의된 수상체가 습윤한 환경에서 증발되지 않고 성장하여 예측시작 4~7시간 후에도 강한 강수가

모의될 수 있었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 고분해능의 레이더 자료를 수치예보 모델에 동화하여 수증기 및 수상체 혼합비, 바람을 개

선하는 실험을 수행하였다. 레이더 자료동화가 강수 예측에 미치는 영향을 요소별로 분석한 결과, 시선속도를 동화할 경우, 역학장이 개선되며 예측 초기인 1~2시간 강수 예측 정확도는 향상하였으나 자료동화의 효과가 지속되지는 못하였다. 수상체 혼합비 동화 실험에서는 분석장의 수상체를 비교적 잘 모의하나 모든 사례에서 강수로 성장하지는 못하였다. 수상체만을 동화했을 때는 역학 및 열역학적으로 수상체가 성장할 수 있는 환경을 제공하지 못하였기 때문이다. 수증기 혼합비 동화 실험에서는 수증기 혼합비가 증가하며 수상체가 생성 및 성장하며 집중호우를 모의하였다. 하지만 역학장의 오차가 존재하는 경우 정확한 구역의 강수를 모의하지 못하였으며 수증기가 구름미세물리과정을 통해 강수로 성장하는 spin-up 과정이 필요하였다. 시선속도, 수증기 혼합비, 수상체 혼합비를 모두 동화한 실험에서 수상체의 위치 및 강도가 동화되며 정확한 위치에 초기 강수를 모의할 수 있었으며 바람 및 수증기 혼합비 개선으로 강수계 유지 및 발달할 수 있는 환경을 제공하여 집중호우를 모의하였다. 9시간 누적 강수량 검증 결과, 레이더 자료동화를 수행한 실험이 자료동화를 수행하지 않은 실험에 비해 RMSE가 32.78% 개선되었다.

반사도와 수상체 혼합비 관계식은 단일 모멘트 미세물리과정을 기반으로 산출된 식으로, 수상체의 수농도 분포의 y 축 절편을 상수로 취급하는 등 많은 가정이 포함되어 수상체 자료동화 시, 비 혼합비가 증가되는 양에 비해 눈과, 싸락의 혼합비의 증가량이 상대적으로 적은 특징이 나타난다. 또한, 배경온도장의 오차가 존재할 경우, 수상체 분류 시, 오차가 유발될 수 있다. 이중편파 레이더 변수는 수상체의 양 및 모양, 종류 등의 보다 많은 수상에 대한 정보를 포함하고 있어 자료동화 시, 보다 높은 정확도의 분석장을 생성할 수 있을 것으로 사료된다(Jung et al., 2008a, Jung et al., 2008b; Johnson et al., 2018; Liu et al., 2022). 따라서 이중편파 레이더 자료를 이용한 자료동화에 대한 연구가 필요하다. 수증기 혼합비 동화 시, 30.0 dBZ의 임계 값을 설정하여 해당 반사도 이상의 반사도가 관측된 구역의 포화수증기 혼합비를 수증기 혼합비로 입력한다. 30.0 dBZ는 강한 대류가 발생하는 지역에서 관측되는 반사도로 약한 강수나 겨울철 강수에서는 수증기 혼합비 자료동화의 효과가 적으며 과대하게 모의된 수증기 혼합비를 감소시킬 수 없다. 따라서 레이더 반사도와 라디오존데를 사용하여 반사도와 수증기 혼합비에 대한 관계식을 산출하여 자료동화에 적용하면 예측 정확도를 개선할 수 있을 것으로 예상된다. 끝으로 우리나라에서 발생하는 중규모 집중호우 현상에 대한 보다 정확한 예측과 인명 및 재산 피해를 줄이기 위하여 원격탐사 및 집중관측자

료를 이용한 자료동화에 대한 지속적인 연구 개발이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2020학년도 경북대학교 국립대학육성사업 지원비에 의하여 연구되었습니다.

REFERENCES

- Abhilash, S., A. K. Sahai, K. Mohankumar, J. P. George, and S. Das, 2012: Assimilation of Doppler weather radar radial velocity and reflectivity observations in WRF-3DVAR system for short-range forecasting of convective storms. *Pure Appl. Geophys.*, **169**, 2047-2070, doi:10.1007/s00024-012-0462-z.
- Albers S. C., J. A. McGinley, D. L. Birkenheuer, and J. R. Smart, 1996: The local analysis and prediction system (LAPS): Analyses of clouds, precipitation, and temperature. *Wea. Forecasting*, **11**, 273-287, doi:10.1175/1520-0434(1996)011<0273:TLAAPS>2.0.CO;2.
- Bae, J.-H., and K.-H. Min, 2022: Forecast characteristics of radar data assimilation based on the scales of precipitation systems. *Remote Sens*, **14**, 605, doi:10.3390/rs14030605.
- Do, P.-N., K.-S. Chung, P.-L. Lin, C.-Y. Ke, and S. M. Ellis, 2022: Assimilating retrieved water vapor and radar data from NCAR S-PolKa: Performance and validation using real cases. *Mon. Wea. Rev.*, **150**, 1177-1199, doi:10.1175/MWR-D-21-0292.1.
- Dowell, D. C., L. J. Wicker, and C. Snyder, 2011: Ensemble Kalman filter assimilation of radar observations of the 8 May 2003 Oklahoma City supercell: Influences of reflectivity observations on storm-scale analyses. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 272-294, doi:10.1175/2010MWR3438.1.
- Gao, J., and D. J. Stensrud, 2012: Assimilation of reflectivity data in a convective-scale, cycled 3DVAR framework with hydrometeor classification. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 1054-1065, doi:10.1175/JAS-D-11-0162.1.
- _____, C. Fu, D. J. Stensrud, and J. S. Kain, 2016: OSSEs for an ensemble 3DVAR data assimilation system with radar observations of convective storms. *J. Atmos. Sci.*, **73**, 2403-2426, doi:10.1175/JAS-D-15-0311.1.
- Gilmore, M. S., and L. J. Wicker, 1998: The influence of mid-tropospheric dryness on supercell morphology and evolution. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 943-958, doi:10.1175/1520-0493(1998)126<0943:TIOMDO>2.0.CO;2.

- Hastuti, M. I., K.-H. Min, and J.-W. Lee, 2023: Improving radar data assimilation forecast using advanced remote sensing data. *Remote Sens*, **15**, 2760, doi:10.3390/rs15112760.
- Hong, S. Y., Y. Noh, and J. Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2318-2341, doi:10.1175/MWR3199.1.
- Hu, M., M. Xue, J. Gao, and K. Brewster, 2006: 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D Level-II data for the prediction of the fort worth, texas, tornadic thunderstorms. Part II: Impact of radial velocity analysis via 3DVAR. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 699-721, doi:10.1175/MWR3093.1.
- Jimenez, P. A., J. Dudhia, J. F. Gonzalez-Rouco, J. Navarro, J. P. Montavez, and E. Garcia-Bustamante, 2012: A revised scheme for the WRF surface layer formulation. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 898-918, doi:10.1175/MWR-D-11-00056.1.
- Johnson, M., Y. Jung, D. Dawson, T. Supinie, M. Xue, J. Park, and Y.-H. Lee, 2018: Evaluation of unified model microphysics in high-resolution NWP simulations using polarimetric radar observations. *Adv. Atmos. Sci.*, **35**, 771-784, doi:10.1007/s00376-017-7177-0.
- Jung, Y., G. Zhang, and M. Xue, 2008a: Assimilation of simulated polarimetric radar data for a convective storm using the ensemble Kalman filter. Part I: Observation operators for reflectivity and polarimetric variables. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 2228-2245.
- _____, M. Xue, G. Zhang, and J. M. Straka, 2008b: Assimilation of simulated polarimetric radar data for a convective storm using the ensemble Kalman filter. Part II: Impact of polarimetric data on storm analysis. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 2246-2260, doi:10.1175/2007MWR2288.1.
- KMA, 2021: *Abnormal Climate Report 2020* Korea Meteorological Administration, 212 pp (in Korean).
- Lahoz, B. K. W., and R. Menard, 2010: *Data assimilation*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 718 pp.
- Law, K., A. Stuart, and L. Zygalakis, 2015: *Data assimilation*. Cham, Switzerland, Springer, 242 pp.
- Lee, J.-W., K.-H. Min, Y.-H. Lee, and G. Lee, 2020: X-Net-Based radar data assimilation study over the Seoul metropolitan area. *Remote Sens.*, **12**, 893, doi:10.3390/rs12050893.
- _____, _____, and K.-S. S. Lim, 2022: Comparing 3DVAR and hybrid radar data assimilation methods for heavy rain forecast. *Atmos. Res.*, **270**, 106062, doi:10.1016/j.atmosres.2022.106062.
- Lee, Y.-H., and K.-H. Min, 2019: High-resolution modeling study of an isolated convective storm over Seoul Metropolitan area. *Meteor. Atmos. Phys.*, **131**, 1549-1564, doi:10.1007/s00703-019-0657-2.
- Lim, K.-S. S., and S.-Y. Hong, 2010: Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1587-1612, doi:10.1175/2009MWR2968.1.
- Lin, Y.-L., R. D. Farley, and H. D. Orville, 1983: Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **22**, 1065-1092, doi:10.1175/1520-0450(1983)022<1065:BPOTSF>2.0.CO;2.
- Liu, C., H. Li, M. Xue, Y. Jung, J. Park, L. Chen, R., Kong, and C.-C. Tong, 2022: Use of a reflectivity operator based on double-moment Thompson microphysics for direct assimilation of radar reflectivity in GSI-based hybrid En3DVar. *Mon. Wea. Rev.*, **150**, 907-926, doi:10.1175/MWR-D-21-0040.1.
- Min, K.-H., S. Choo, D. Lee, and G. Lee, 2015: Evaluation of WRF cloud microphysics schemes using radar observations. *Wea. Forecasting*, **30**, 1571-1589, doi:10.1175/WAF-D-14-00095.1.
- Parrish, D. F., and J. C. Derber, 1992: The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1747-1763, doi:10.1175/1520-0493(1992)120<1747:TNMCSS>2.0.CO;2.
- Skamarock, W. C., and Coauthors, 2019: *A description of the advanced research WRF model version 4.1*, Tech. Rep, 145 pp.
- Smith, Jr. P. L., C. G. Myers, and H. D. Orville, 1975: Radar reflectivity factor calculations in numerical cloud models using bulk parameterization of precipitation processes. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **14**, 1156-1165, doi:10.1175/1520-0450(1975)014<1156:RRFCIN>2.0.CO;2.
- Souto, M. J., C. F. Balseiro, V. Pérez-Muñuzuri, M. Xue, and K. Brewster, 2003: Impact of cloud analysis on numerical weather prediction in the galician region of Spain. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **42**, 129-140, doi:10.1175/1520-0450(2003)042<0129:IOCAON>2.0.CO;2.
- Sugimoto, S., N. A. Crook, J. Sun, Q. Xiao, and D. M. Barker, 2009: An examination of WRF 3DVAR radar data assimilation on its capability in retrieving unobserved variables and forecasting precipitation through observing system simulation experiments. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 4011-4029, doi:10.1175/2009MWR2839.1.

- Sun, J., and N. A. Crook, 1997: Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part I: Model development and simulated data experiments, *J. Atmos. Sci.*, **54**, 1642-1661, doi:10.1175/1520-0469(1997)054<1642:DAMRFD>2.0.CO;2.
- _____, and H. Wang, 2013: Radar data assimilation with WRF 4D-Var. Part II: Comparison with 3D-Var for a squall line over the U.S. great plains. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 2245-2264, doi:10.1175/MWR-D-12-00169.1.
- Tewari, M., and Coauthors, 2004: Implementation and verification of the unified Noah land-surface model in the WRF Model. *Amer. Meteor. Soc.*, 14 pp.
- Tsai, C.-C., and K.-S. Chung, 2020: Sensitivities of quantitative precipitation forecasts for Typhoon Soudelor (2015) near landfall to polarimetric radar data assimilation. *Remote Sens.*, **12**, 3711, doi:10.3390/rs12223711.
- Wang, H., J. Sun, S. Fan, and X.-Y. Huang, 2013: Indirect assimilation of radar reflectivity with WRF 3D-Var and its impact on prediction of four summertime convective events. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **52**, 889-902, doi:10.1175/JAMC-D-12-0120.1.
- Xiao Q., Y.-H. Kuo, J. Sun, W.-C. Lee, D. M. Barker, and E. Lim, 2007: An approach of radar reflectivity data assimilation and its assessment with the inland QPF of Typhoon Rusa (2002) at landfall. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **46**, 14-22, doi:10.1175/JAM2439.1.
- _____, and J. Sun, 2007: Multiple-radar data assimilation and short-range quantitative precipitation forecasting of a squall line observed during IHOP_2002. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 3381-3404, doi:10.1175/MWR3471.1.
- Zheng, Y., K. Alapaty, J. A. Herwehe, A. D. Del Genio, and D. Niyogi, 2016: Improving high-resolution weather forecasts using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model with an updated Kain-Fritsch scheme. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 833-860, doi:10.1175/MWR-D-15-0005.1.