

뉴욕 주의 악기상 현상에 대한 뉴욕 주 Mesonet 도플러 윈드 라이다의 자료동화 효과

계준경* · Tammy M. Weckwerth

미국 국립 대기연구센터

(접수일: 2024년 11월 2일, 수정일: 2024년 11월 5일, 게재확정일: 2024년 11월 6일)

Impact of Assimilation of New York State Mesonet Doppler Wind Lidar on High Impact Weather Predictions in New York State

Junkyung Kay* and Tammy M. Weckwerth

National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA

(Manuscript received 2 November 2024; revised 5 November 2024; accepted 6 November 2024)

Abstract The New York State (NYS) Mesonet consists of 126 surface weather stations across the state with 17 of the sites also instrumented with active and passive profiler systems. The NYS Mesonet (NYSM) is the first and only state-run network in the USA, that includes a combination of surface stations, Doppler wind lidars (DWL) and thermodynamic profiles from Microwave Radiometers (MWR). NYSM's continuous and extensive observations from the surface to the lower atmosphere have a wide range of applications in air quality and human health, forecasting of severe storms, and predicting renewable energy production. This study provides results of assimilating the NYSM surface station data and the DWL wind profiles. The impact of NYSM observations on predictive skill is evaluated for one tornadic supercell case that has large uncertainties in analysis with respect to low-level temperature, moisture, and wind variability. Compared to forecasts assimilating solely conventional observations except NYSM, the additional assimilation of NYSM observations effectively corrects the cold and dry biases in central New York State, resulting in a more accurate representation of surface conditions. Notably, the assimilation of NYSM DWL wind profiles improves the prediction of the location and intensity of convective systems, thereby creating an environment that increases the likelihood of supercell and tornado formation.

Key words: Lidar observations, Remote sensing, Numerical weather prediction, Data assimilation

1. 서 론

대기경계층은 지표면과 자유 대기 사이에서 열, 수분, 운동량 플럭스가 발생하는 지구 표면과 가장 가까운 층이며, 기상현상의 변화와 대기오염물질의 확산 등을 통해 인류의 삶에 직접적인 영향을 미친다.

따라서 빈번하게 발생하는 악기상 현상의 예보를 개선하기 위해서 대기경계층의 정확한 초기 조건 생성 (Zhang et al., 2006; Snook et al., 2011; Romine et al., 2013; Stensrud et al., 2013; Johnson et al., 2015; Wheatley et al., 2015; Jones et al., 2016), 지표 및 난류 과정 표현을 위한 공식 개선 (Sandu et al., 2013), 중규모 및 대규모 역학 시뮬레이션 (Chan et al., 2023) 등을 위한 노력이 이루어지고 있다. 특히 집중호우, 뇌우 등의 악기상 예보를 향상시키기 위해서는 지표면을 포함한 경계층 내의 대기 및 난류 현상에 대한

*Corresponding Author: Junkyung Kay, National Center for Atmospheric Research, 3450 Mitchell Ln #2260, Boulder, CO, USA.
Phone: +01-303-497-2637, Fax: +01-303-497-2044
E-mail: junkyung@ucar.edu

충분한 관측을 통해 수치모델의 초기 조건을 향상시키는 것이 중요하다(Coniglio et al., 2013; Romine et al., 2013; Sobash and Stensrud, 2015). 이를 위해 Turner et al. (2019)와 Wulfmeyer et al. (2015)는 높은 시간 해상도(약 15분 이하) 및 연직 해상도(약 100 m 이하)의 열역학적, 역학적 연직 프로파일의 필요성을 제안하였다. 하지만 대기의 연직방향에 대해서 대기 경계층 내의 관측 공백 현상이 두드러진다. 예를 들어, 현업 일기예보에서 사용하는 대기경계층 관측은 라디오존데와 항공기 관측이 대표적이다. 라디오존데는 전지구적 공간 분포가 성기며, 일반적으로 하루에 두 번 관측을 수행함으로써 경계층의 변동성을 표현하기에 시간 해상도가 충분치 않다. 항공기를 통한 경계층 관측은 공항 근처에서 제한되어 있으며, 항공기의 이착륙 시간에만 관측이 가능하다는 한계를 지닌다(James and Benjamin, 2017). 이 외에도 위성을 이용한 대기경계층의 원격탐사가 활용되고 있으나, 위성관측은 광학적으로 두꺼운 구름에 의해 영향을 받고 지표 근처의 대기경계층의 연직 구조에 대한 정보를 제공하는데 어려움을 겪는다. 따라서 기존의 대기 경계층 관측의 한계를 극복하기 위해 다양한 지상 기반 원격탐사 기술이 개발되고, 예보에 대한 관측 효과가 검증되어 왔다(Coniglio et al., 2019; Degelia et al., 2019; Hu et al., 2019; Degelia et al., 2020). 예를 들어, Coniglio et al. (2019)은 단일 프로파일링 시스템에서 얻은 도플러 라이더(Doppler wind lidar, DWL) 바람 프로파일과 atmospheric emitted radiance interferometer (AERI) 열역학 프로파일을 동화시킴으로써 강수 예측이 개선됨을 입증하였다. Degelia et al. (2020)은 Plains Elevated Convection At Night (PECAN) 필드 캠페인(Geerts et al., 2017)에서 수집한 AERI 및 DWL 데이터를 동화하여 강수량, 대류 발생 시기 및 위치의 예측이 체계적으로 향상됨을 확인하였다. Chipilski et al. (2020, 2022)는 AERI 열역학 프로파일을 높은 시간적 빈도로 동화할 때 대류 규모 예측을 효과적으로 개선함을 보였다.

New York State Mesoscale (NYSM; Brotzge et al., 2020)은 뉴욕 주 전역의 127개 기상관측소로 구성된 미국 유일의 주정부 운영 관측 네트워크로, 여기에서는 지표관측소 뿐만 아니라 뉴욕 전역에 프로파일링 시스템을 갖춘 17개 관측소가 포함된다. 따라서 NYSM은 지표면과 하층 대기에서 지속적인 현장 및 원격 감지 관측을 제공하며, 대기의 중규모 변화를 포착할 관측 성능을 가지고 있다. 이 네트워크는 지상관측과 DWL의 바람 프로파일 및 마이크로파 라디오미터(microwave radiometer, MWR)의 열역학적 프로파일을 통합하여 시공간적으로 고해상도의 대기경계층 관측을 제공한다. DWL과 MWR은 지표면부터 각각 3 km

와 10 km 범위에서 포괄적이고 연속적인 관측을 통해 대기질 모니터링, 폭풍 예측, 재생 에너지 예측 등 다양한 응용 분야를 지원한다(Shrestha et al., 2021). 이전 연구에서 Reese (2019)는 NYSM의 지상 및 프로파일러 네트워크가 스콜라인 통과와 관련된 지표 찬공기 풀(cold pool)의 특성을 효과적으로 파악하는 능력을 입증하였다. 특히, 프로파일러 사이트에 배치된 MWR은 찬공기 풀의 연직 구조를 명확하게 식별함을 보였다. Lin et al. (2023)은 뉴욕에서 발생한 대류성 강수 사례에 대하여 three Dimensional Variational (3DVAR) 자료동화 시스템을 이용하여 NYSM관측을 동화하였으며, 특히 DWL 바람 프로파일을 동화시켰을 때 대류의 재강화 시기와 위치가 크게 개선됨을 보였다. 반면, MWR 온도 및 수증기 프로파일 동화는 오히려 예보를 저하시켰는데, 이는 MWR 온도 데이터의 큰 오류 때문이었다. 이러한 선행 연구에도 불구하고 여전히 다양한 악기상 현상에 대해 NYSM 관측의 자료 동화가 예보에 미치는 효과에 대한 연구가 부족한 실정이다. 특히 기후학적인 배경 오차 공분산을 사용하는 3DVAR는 시공간적으로 빠르게 변화하는 중규모의 악기상 현상을 분석하기에는 여전히 많은 한계를 보인다(Reen, 2007; Sun et al., 2012; Vendrasco et al., 2016). 따라서 대기경계층 내의 연직 바람 및 수증기 구조의 변화에 민감한 대류성 악기상 예보를 향상시키기 위해 현실적인 예보 오차 공분산을 이용한 앙상블 기반의 자료동화 시스템을 활용하여 고해상도의 NSYM 프로파일러 관측을 동화하는 연구의 필요성이 강조되어 왔다(Potvin et al., 2013; Johnson et al., 2015).

따라서 본 연구에서는 현재 NYSM의 지상 관측소 데이터와 연직 프로파일 관측을 앙상블 기반의 자료동화 시스템을 이용하여 동화하였다. 이를 통해 대기 경계층 내의 온도, 습도 및 바람 변동성과 관련하여 예보에 불확실성이 큰 토네이도 발생 사례에 대해 시공간적 고해상도의 NYSM 프로파일러 네트워크가 악기상 예보에 미치는 효과를 분석하고자 한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 실험 사례, NYSM의 지상관측 및 프로파일러 관측에 대해 설명하고, 3장은 실험에 사용한 모델과 자료동화 시스템에 대해 설명하였다. 4장에서는 자료동화 실험 구성에 대한 설명 및 사례에 대해 설명한다. 5장에서는 자료동화 실험 결과를 보이며, 6장에서는 실험결과에 대한 요약 및 토의를 추가하였다.

2. 사례 및 관측

2.1 실험 사례

본 실험에서는 2023년 8월 7일 뉴욕 주에서 발생

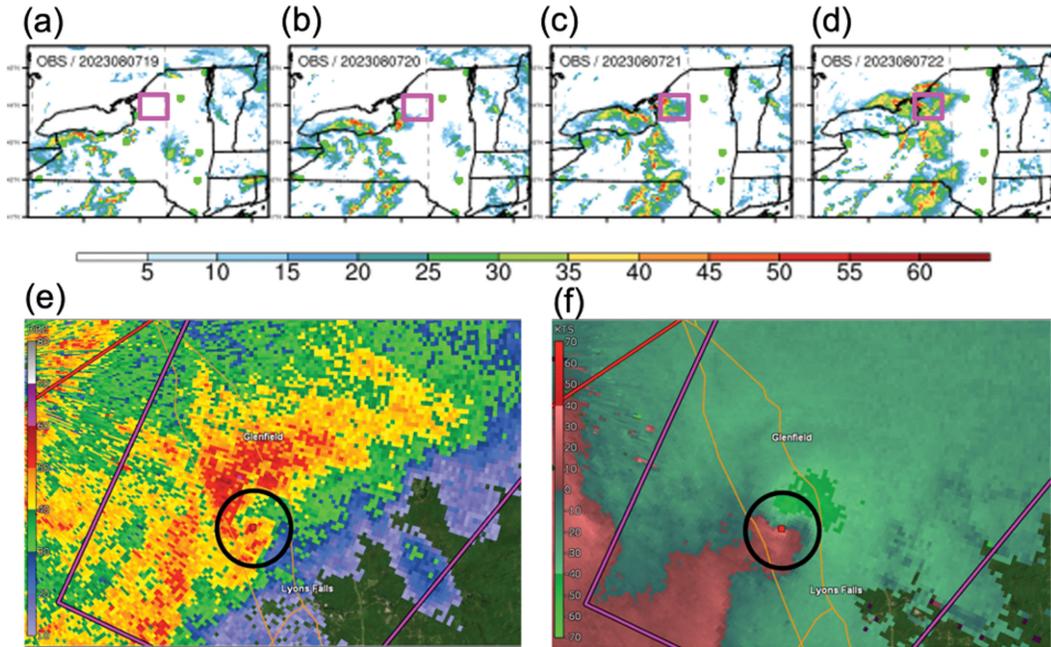


Fig. 1. (a)-(d) Composite reflectivity (dBZ; color fill) of the convection event from 1900 UTC to 2200 UTC 7 August 2023 with radar observations and (e) reflectivity and (f) radial velocity zoom in on the magenta box in (a)-(d) at 2300 UTC 7 August 2023. The black circle indicates the observed tornadic debris signature near Glenfield. The reflectivity radar observations are provided by the Multi-Radar Multi-Sensor (MRMS) project (Zhang et al., 2005).

한 토네이도 사례에 대해 자료동화 실험을 수행하였다. Figure 1은 2023년 8월 7일 뉴욕 주에 대한 Multi-Radar Multi-Sensor (MRMS) 데이터를 보여준다(Zhang et al., 2005). 이 사례는 mesoscale convective vortex (MCV)가 뉴욕 주의 남서쪽에서 발생하고 북동진하여 미국 중부를 지나 2023년 8월 7일 2200 UTC 온타리오 호수 동쪽을 통과하며 발달한 사례이다(Figs. 1a-d). Figure 1e와 f는 2023년 8월 7일 2200 UTC에 온타리오 호수 동쪽 Glenfield를 중심으로 확대한 레이더 반사도 및 시선속도이다. 이때 온타리오 호수를 통과하는 잔류성 MCV 전면에서 시작되는 토네이도형 슈퍼셀이 온타리오 호수 동쪽의 Glenfield 주변에서 다수 관측 되었다(Figs. 1e, f).

Figure 2는 2023년 8월 7일 2200 UTC의 현업 High-Resolution Rapid Refresh (HRRR; Dowel et al., 2022) 모델의 10시간 예보장 및 2023년 8월 7일 2200 UTC의 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Meteorological Assimilation Data Ingest System (MADIS) 로부터 수집한 METAR 지상 관측을 함께 보여준다. 지상 관측에서 뉴욕 주 대부분 지역의 기온은 70~79°F (21~26°C), 이슬점 온도는 60°F (15°C) 중후반을 기록하였다(Figs. 2a, b). 이처럼 높은 기온

과 이슬점 온도는 뉴욕 주의 중부 및 동부에 걸쳐 $2,000 \text{ J kg}^{-1}$ 이상의 surface-based convective available potential energy (SBCAPE)를 예보함으로써 높은 불안정성을 보였다(Fig. 2c). 하지만 8월 7일 1200 UTC에 초기화된 10시간 HRRR 예보는 관측과 비교할 때 뉴욕 중부를 통과하는 대류 시스템이 더 빨리 동진함을 보였으며, 대류 시스템의 분절된 선형 구조에 대한 예보 역시 관측과 차이를 보였다(Figs. 1d, 2d). 또한 뉴욕 주의 동남쪽에 위치한 매사추세츠 및 코네티컷 주에 대규모의 대류 클러스터를 잘못 예보함으로써 관측과 비교하여 상당한 예보 오차를 보였다(Figs. 1d, 2d). 이와 관련하여 NOAA Storm Prediction Center (SPC)는 8월 7일 1300 UTC부터 8월 8일 1200 UTC까지 대부분의 뉴욕 주를 대상으로 토네이도 발생 가능성을 예보하였으나, 그 확률은 뉴욕 주의 남동부를 제외하고 약 2%로 낮았다(Fig. 3a). 하지만 실제 SPC의 레포트에 따르면 온타리오 호수 동쪽에 약 8건의 토네이도 발생이 관측되었다(Fig. 3b). 특히 Glenfield 주변으로 Enhanced Fujita scale (EF) 3 토네이도가 관측되었으며, 이는 2014년도 이후 뉴욕 주에서 발생한 최초의 EF3 토네이도로 기록되었다(SPC storm report 2023; <https://www.spc.noaa.gov/climo/reports/today.html>).

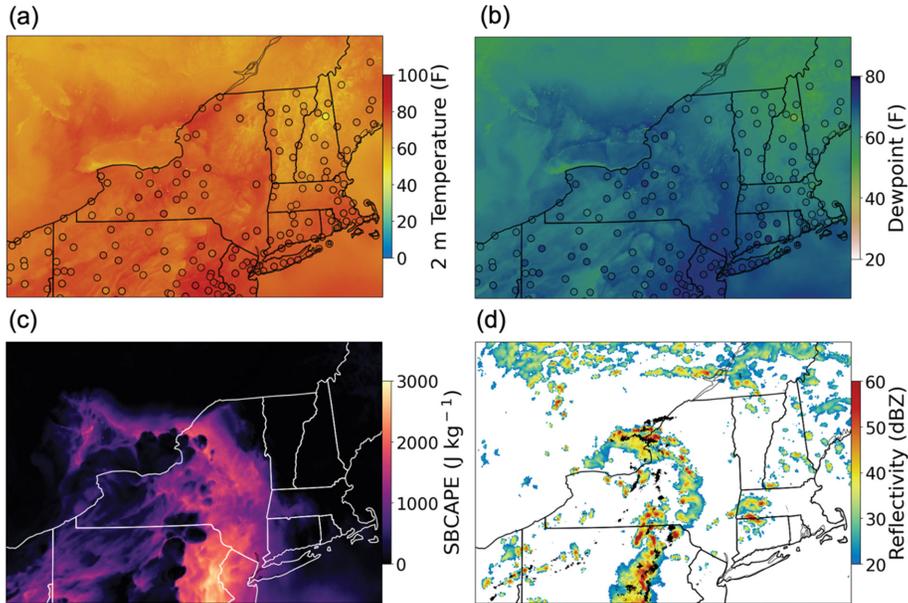


Fig. 2. 10-hour HRRR forecast for (a) 2-m temperature ($^{\circ}F$), (b) 2-m dew point temperature ($^{\circ}F$), (c) SBCAPE ($J kg^{-1}$), and (d) maximum reflectivity (dBZ) at 2200 UTC 7 August 2023. The circles filled with color in (a) and (b) represent the conventional surface station observation.

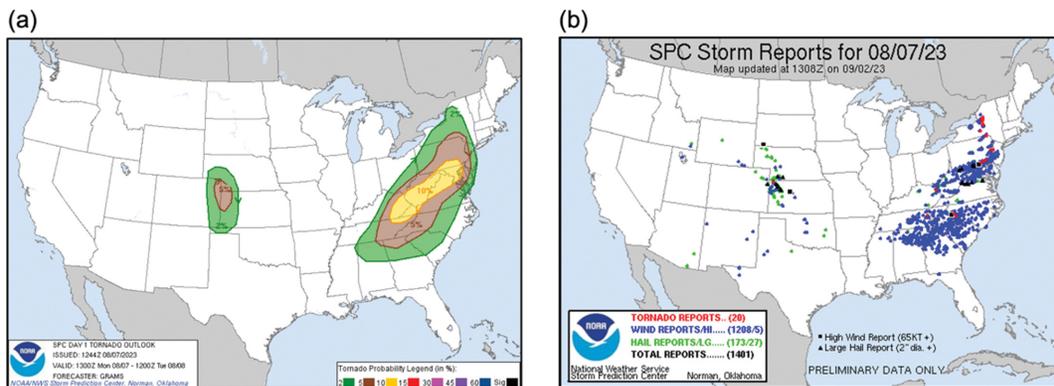


Fig. 3. (a) SPC tornado outlook issued at 1244 UTC 7 August 2023 valid from 1300 UTC 7 August to 1200 UTC 8 August 2023, and (b) SPC storm report for 2300 UTC 7 August 2023 (<https://www.spc.noaa.gov/cgi-bin-spc/getacrang.pl>).

본 사례는 현업 HRRR 수치예보가 토네이도 발생 확률을 효과적으로 예보하지 못한 사례로 기록되었다. 본 연구에서 NYSM의 지상관측 및 프로파일 관측을 동화함으로써 하층 대기의 관측이 대류성 악기상 현상의 예보에 미치는 효과를 분석하고자 한다.

2.2 NYSM 관측

NYSM은 뉴욕 주 전역에 평균 27 km 간격으로 배치된 127개의 지상 기상 관측소 네트워크이다(Brotzge

et al., 2020). NYSM은 뉴욕 주에 허리케인 Lee (2011), Irene (2011), Sandy (2012)와 관련한 폭우와 강풍 발생으로 인한 사회, 경제적인 막대한 피해 이후에 구축되었다. 다른 주의 Mesonet과 비교했을 때 NYSM의 독특한 특징은 주 전역에 걸쳐 설치된 프로파일러 네트워크를 포함하고 있다는 점이다. 이 네트워크는 17개의 DWL 및 MWR 프로파일러 사이트로 구성되어 있다(Shrestha et al., 2021). Figure 4는 NYSM의 분포도를 보여준다. 프로파일링 기기의 구매 및 유지

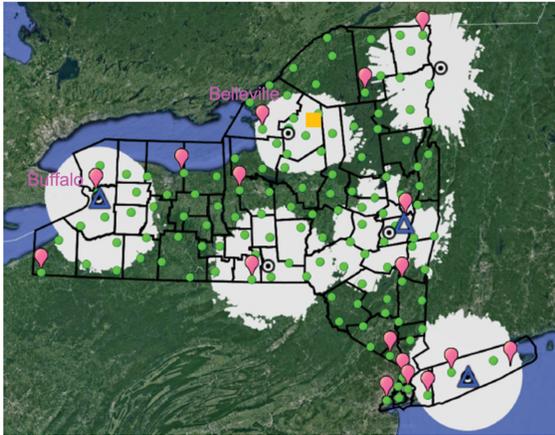


Fig. 4. Location of NYSM surface station sites (green circles), NYSM profiler sites (magenta pins), NWS radiosonde sites (blue triangles) and WSR-88D radar sites (black circles filled with white) with white shadings indicating radar coverage at 75 km radius at 1 km AGL (<https://nysmesonet.org/>). Yellow rectangle indicates the location of Glenfield.

비용의 제한으로 인해 일부 프로파일러는 인구 밀도, 산업, 교통, 그리고 중요한 기상 현상을 고려하여 뉴욕시에 7개의 프로파일 관측소가 집중 배치되어 있다 (Shrestha et al., 2021). 나머지 10개의 프로파일링 관측소는 네트워크의 공간적 범위를 극대화하기 위해 뉴욕 주의 가장자리를 위주로 배치되었다(Fig. 4). 하지만 이러한 배치로 인해 지형이 복잡하고 변화가 큰 뉴욕 주 중부 지역에 관측 공백을 갖는 한계를 지닌다.

2.2.1 NYSM Doppler Wind Lidar (Doppler Wind Lidar)

Vaisala사에서 제작한 DWL(모델명 WindCube 100S)은 광학 도플러 효과를 사용하여 대류권 하층 수평 바람의 풍향, 풍속을 측정한다(Pearson et al., 2009; Hanesiak and Turner, 2016). DWL은 근적외선(1.5 μm)에서 작동하며 DWL의 수직 범위는 에어로졸 후방 산란, 습도, 강수량 및 대기 굴절 난류의 영향을 받는다(Aitken et al., 2012). 본 실험에 사용된 DWL의 연직 관측 범위는 약 90 m에서 3 km이다. 각 프로파일러에 대한 자세한 설명은 Table 1에 설명되어 있다.

Table 1. NYSM ground-based remote sensing profilers used in this study.

Instrument	Measured variables	Vertical range	Vertical resolution/ temporal resolution
DWL	Horizontal wind component ($m s^{-1}$)	90 m - 3 km	30 m/15 min
MWR	Relative humidity (%), temperature (K)	10 m - 10 km	10 m-2 km/1 min

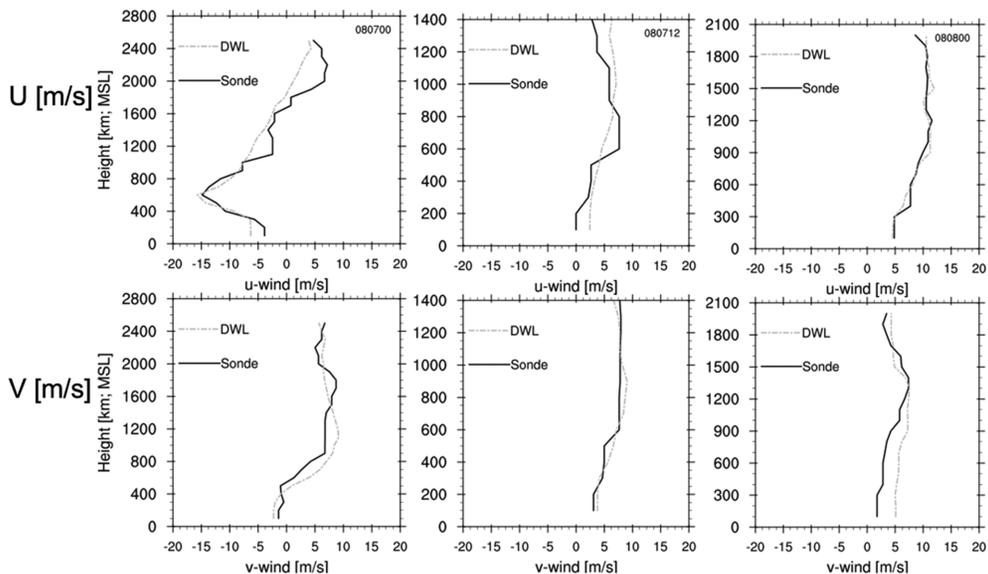


Fig. 5. Vertical profile of (upper) U-wind ($m s^{-1}$) and (lower) V-wind ($m s^{-1}$) from DWL and radiosonde at (left) 0000 UTC 7 August, (middle) 1200 UTC 7 August, and (right) 0000 UTC 8 August 2023.

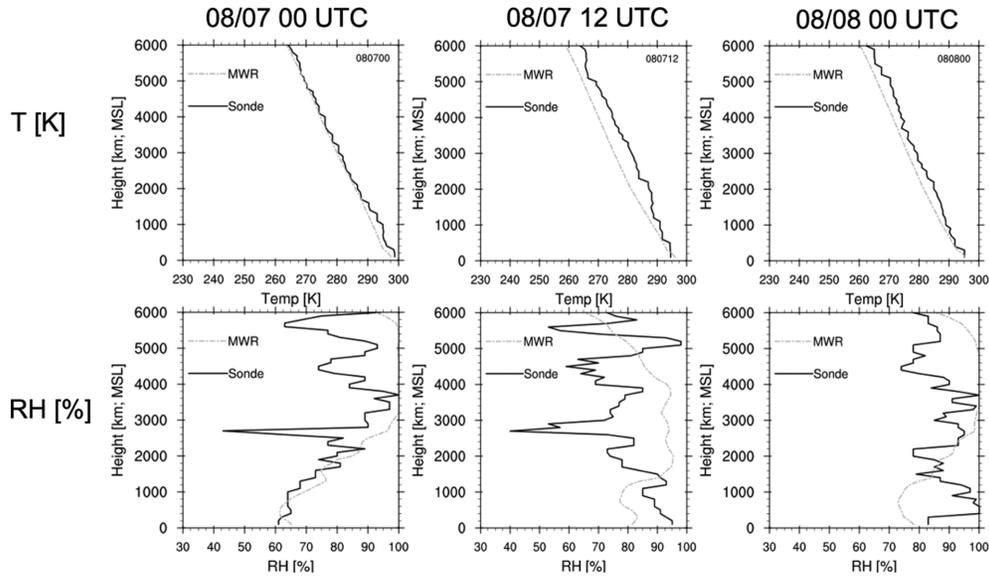


Fig. 6. Vertical profile of (upper) temperature (K) and (lower) relative humidity (%) from MWR and radiosonde at (left) 0000 UTC 7 August, (middle) 1200 UTC 7 August, and (right) 0000 UTC 8 August 2023.

Figure 5는 Buffalo 사이트(Fig. 4)에서 DWL과 라디오존데 프로파일 관측을 비교하였다. 위 패널은 U-wind, 아래 패널은 V-wind를 보여준다. 8월 8일 0000 UTC에서 DWL은 일반적으로 지상 약 1~2 km 상공까지 라디오존데의 연직 프로파일과 일치하는 반면, V-wind는 1 km 이하 구역에 비해 3~4 $m s^{-1}$ 의 편향성을 보인다.

2.2.2 NYSM MicroWave Radiometer (MRW)

Radiometrics에서 제조한 다중 채널 수동 원격 탐사 MWR(모델명 MP-3000)이 각 NYSM 프로파일러 사이트에 배치되어 있다(Fig. 4). MWR의 열역학 프로파일을 라디오존데와 비교한 결과, 약 1 km 이하 고도에서는 MWR이 라디오존데와 상대적으로 유사한 온도 프로파일을 보인다(Fig. 6). 그러나 기존 연구에서 보고된 바와 같이(Lin et al., 2023), 1 km 이상의 고도에서는 차가운 편향(cold bias)을 보인다. 상대 습도의 경우, MWR은 대부분의 고도에서 시간에 따라 라디오존데에 비해 큰 변동성과 편향을 보인다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 6 결과를 바탕으로 MWR의 열역학 프로파일은 시스템적인 오차가 크므로 자료동화 연구에 적합하지 않다고 판단하였다.

3. 모델 및 자료동화 시스템

이 사례 연구에서 사용된 수치모델은 Advanced Research version of the Weather Research and

Forecasting (WRF-ARW) 모델 버전 4.1.2이다(Skamarock et al., 2008; Powers et al., 2017). WRF-ARW는 압축성 비정역학적 중규모 모형으로, 연직 격자는 Eulerian 질량 좌표계를 사용하며, 수평격자는 Arakawa-C 격자 체계를 채택하였다. 모델 영역은 Fig. 7과 같으며 뉴욕 주를 중심으로 모델 영역을 설정하였다. 도메인은 3 km 해상도를 갖으며, 모델 최상단 50 hPa에 도달하는 71개의 연직층으로 구성되었다. 이 연구에서 사용된 물리모수화 방법은 Thompson and Eidhammer 미세물리과정 모수화(Thompson and Eidhammer, 2014), MYNN 경계층 모수화(Nakanishi and Niino, 2009; Olson et al., 2019), RRTMG 장파 및 단파 복사 모수화 기법(Clough et al., 2005; Iacono et al., 2008)을 사용하였다. 이때 3 km 모델 영역에서 대류는 모델에 의해 분해 가능하다고 가정하여 적운 대류 모수화를 사용하지 않았다. 이 모수화 조합은 미국 현업 국지규모 예보시스템인 HRRR (Dowell, 2022)의 물리과정 모수화 조합과 일치한다.

경계층 프로파일러의 관측 영향을 평가하기 위해, 우리는 National Center for Atmospheric Research (NCAR)에서 개발한 Data Assimilation Research Testbed (DART; Anderson et al., 2009) 내에서 ensemble adjustment Kalman filter (EAKF) 시스템을 사용하여 앙상블 자료동화 실험을 수행하였다. 이 전의 많은 연구에서 대류 규모 예보에 DART 시스템을 적용하여 성공적으로 자료동화를 수행하였다(Kerr et al., 2019, Schwartz et al., 2019, Kay et al., 2022). 본 실험은 50

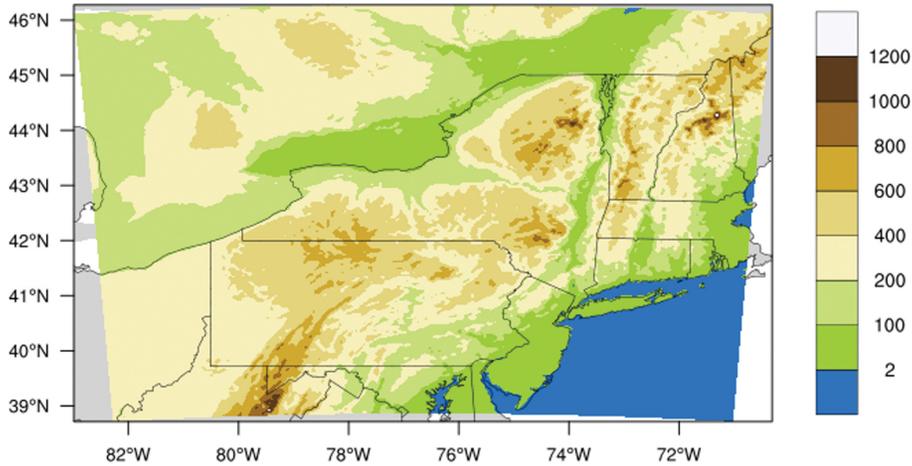


Fig. 7. Model domain with terrain height (m) used in this study.

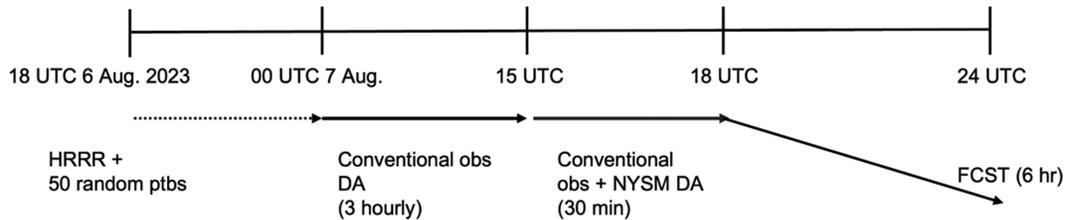


Fig. 8. Illustration of the DA timeline.

개의 앙상블을 이용하였다. 앙상블 기반 자료동화 시스템의 제한된 앙상블 크기로 인한 샘플링 오류 문제를 완화하기 위해 DART는 인플레이션 계수와 공분산 국지화 기법을 활용한다. 공분산 국지화를 위해 Gaspari와 Cohn (1999) 함수를 사용하여 분석 앙상블에 의해 추정된 거짓 상관관계를 국지화 반경 이상에서 무시하게 된다. 본 연구에서 국지화 반경은 수평/수직 방향에서 200 km/2 km로 설정하였다. 이 반경은 유사한 연직 프로파일 관측을 동화한 이전 연구와 비슷한 거리이다(Coniglio et al., 2019; Degelia et al., 2019; Kay et al., 2022). 앙상블 기반 자료동화 시스템에서 필터 발산 문제를 최소화하기 위해 3차원 인플레이션 계수를 DART 앙상블에 적용하였다. 이 연구에서는 인플레이션 계수를 통해 동화 후의 앙상블을 동화 이전의 앙상블이 갖는 스프레드의 85% 수준으로 완화하는 방식을 채택하였다(Whitaker and Hamill, 2012; Kay et al., 2022).

앙상블 자료동화 사이클링 실험을 위해 WRF 3DVAR 시스템의 정적 예보 오차 공분산에서 도출된 무작위 섭동을 2023년 8월 6일 1800 UTC에 유효한 NOAA HRRR 분석장에 추가하여 3 km 해상도의 50개 초기

조건(IC) 앙상블을 생성하였다.(Barker et al., 2004; Torn et al., 2006). 측면 경계 조건(LBC)의 앙상블은 초기 조건 앙상블 생성과 동일한 방식으로 생성하였다. 이렇게 생성된 3 km 해상도의 초기(IC) 및 배경 조건(LBC) 앙상블을 이용하여 6시간 예보를 수행하였다. 이 때 생성된 8월 7일 0000 UTC의 앙상블 예보장은 자료동화 사이클링 실험을 위한 배경장 앙상블로 사용되었다(Fig. 8).

4. 자료동화 실험 구성

본 연구는 2023년 8월 7일 0000 UTC에 유효한 6시간 앙상블 예보장을 배경장으로 사용하여 자료동화를 수행하였다. 본 연구에서는 세 가지 자료동화 실험을 수행하였으며, 각 실험에 대한 설명은 Table 2에 추가하였다. 세 가지 실험 모두 공통으로 7일 0000 UTC부터 7일 1500 UTC까지 총 15시간동안 3시간 간격으로 종관 관측(conventional observation)을 동화하였다. 이때 종관 관측은 NCEP이 현업에서 사용되는 관측들 중 지상 관측, 라디오존데, 항공기 관측 등을 포함한다. CONV은 7일 1500 UTC부터 1800 UTC

Table 2. Experimental configuration for data assimilation. Conventional observation (CONV) includes radiosonde, aircraft observations, and surface station data. NYSM surface station (SFC) measures 2-m temperature (K), 10-m horizontal wind components (m s^{-1}), 2-m relative humidity (%) and surface pressure (hPa). NYSM DWL measures horizontal wind components (m s^{-1}).

Experiment	Assimilated observations
CONV	NCEP GTS conventional observation
CONV+SFC	CONV+NYSM surface station
CONV+SFC+DWL	CONV+NYSM surface station+NYSM DWL

까지 3시간 동안 중관 관측만을 30분 간격으로 동화하였으며, CONV 실험은 NYSM 관측 자료동화의 효과와 대비되는 기준 실험이다. CONV+SFC는 7일 1500 UTC 부터 7일 1800 UTC까지 3시간 동안 중관 관측과 NYSM 지상 관측을 30분 간격으로 동화하였다. 마지막으로 CONV+SFC+DWL는 7일 1500 UTC 부터 7일 1800 UT까지 3시간 동안 3중관 관측, NYSM 지상 관측 및 DWL 바람 프로파일을 함께 30분 간격

으로 동화하였다(Table 2). 각 실험에서 중관 관측이 먼저 동화한 후 NYSM 관측을 동화하였다.

5. 결 과

5.1 분석장 결과

Figure 9은 각 자료동화 실험의 마지막 자료동화 시점(2023년 8월 7일 1800 UTC)에서 2 m 온도와 2 m

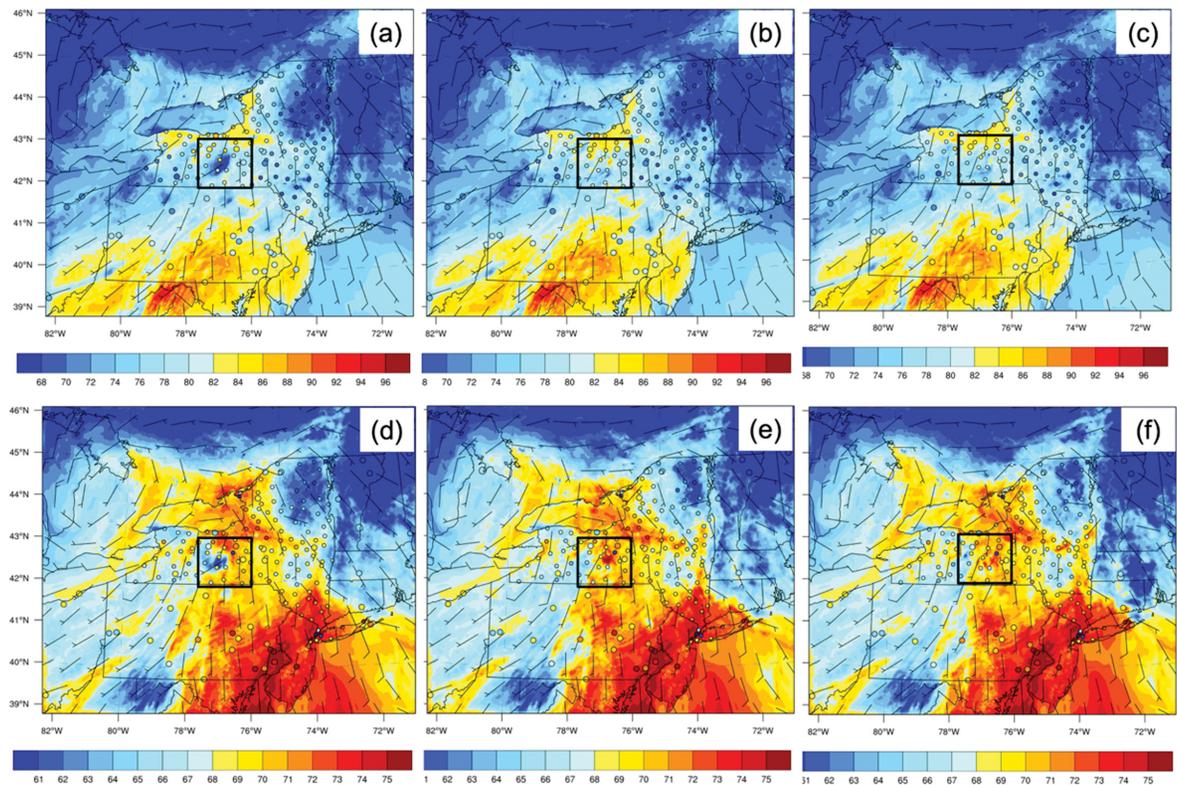


Fig. 9. 2-m temperature analysis ($^{\circ}\text{F}$) and 10-m wind vector (m s^{-1}) analysis for (a) CONV, (b) CONV+SFC and (c) CONV+SFC+DWL at 1800 UTC on 7 August 2023. Small circles filled color represent NYSM surface station temperature observation and large circles filled color represent conventional surface station temperature data at 1800 UTC on 7 August 2023. (d), (e), and (f) are the same as (a)-(c) but for 2-m dew point temperature ($^{\circ}\text{F}$).

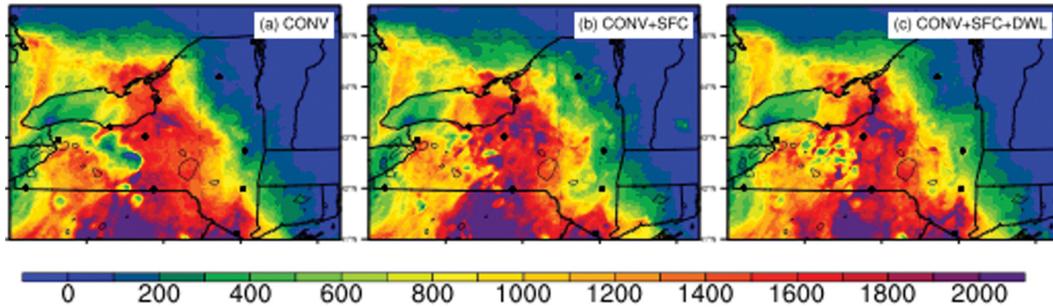


Fig. 10. Surface-Based Convective Available Potential Energy (SBCAPE) analysis for (a) CONV, (b) CONV+SFC and (c) CONV+SFC+DWL at 1800 UTC on 7 August 2023.

이슬점 온도, 10 m 바람장에 대한 분석장 상상블 평균과 종관 관측 및 NYSM 지상 관측을 함께 보여준다. 2023년 8월 7일 1800 UTC에 CONV의 분석장은 뉴욕 주 남서부와 펜실베이니아 북서부에서 관측된 MCV와 연관된 찬공기 풀을 보여주며, 이는 NYSM 지상 관측에서 확인할 수 있다(Fig. 9a). CONV 실험에서 온타리오 호수의 남쪽의 해안 경계면에서 호수 효과로 인한 내륙의 지상 온도 상승을 분석장에서 확인할 수 있으며, 이 현상은 호수 남쪽의 지상 관측과도 유사한 값을 보인다. 하지만 CONV의 분석장은 검은색 상자로 표시된 뉴욕 중남부에서 종관 및 NYSM 지상 관측에 비해 약 12°F(약 7°C) 낮은 지상 온도를 보였다(Fig. 9a). CONV+SFC는 동일한 검은색 상자 영역 안에서 CONV의 지상 온도 과소 추정이 개선되었으며, 종관 지상 및 NYSM 지상 관측과 유사한 온도 분석장을 보여준다(Fig. 9b). 이 영역 안에 지상 관측은 총 20개의 지상 관측 소가 있으며, 이 중에서 온타리오 호수 근처의 종관 관측소 2개를 제외한 17개의 NYSM 지상 관측소가 고르게 분포하고 있다. 따라서 CONV+SFC의 지상 온도 개선은 상대적으로 촘촘하게 분포한 NYSM 지상 관측의 자료동화에 기인함을 유추할 수 있다. CONV+SFC+DWL는 CONV+SFC와 매우 유사한 지상 온도 분석을 보인다(Fig. 9c).

이슬점 온도에 대해서 CONV는 뉴욕 중남부(검은색 상자)에서 약 61°F(약 16°C)의 건조한 공기의 유입을 보이는 반면 NYSM 지상 관측은 약 70°F(약 21°C)의 이슬점 온도를 관측하였다(Fig. 9d). CONV 분석장은 뉴욕 주 북동쪽(버몬트 주 경계 동쪽)의 넓은 영역에 걸쳐 약 61°F(약 16°C) 이슬점 온도의 건조 상태를 분석하였으며, 해당 지역의 NYSM 지상 관측보다(Raquette lake 및 Indian lake sites) 약 4°F(약 2°C) 정도의 건조 편향을 보인다. 반면 NYSM 지상 관측을 동화한 CONV+SFC는 CONV가 뉴욕 주 남중부에서 보여준 건조 편향을 개선하였으며, 뉴욕 주 북동쪽에 위치한 건조 편향 역시 효과적으로 개선함을 보였다

(Fig. 9e). CONV+SFC+DWL는 CONV+SFC와 비슷한 이슬점 온도 분석을 보여준다(Fig. 9f).

각 실험의 지상 온도 및 이슬점 온도 분석장은 MCV가 통과하며 대류 현상이 활발하게 발달하는 뉴욕 주 중남부에서 NYSM의 지상 관측 자료동화가 CONV 분석장의 저온 편향 및 건조 편향을 개선함을 보였다. 이는 CONV+SFC 및 CONV+SFC+DWL 분석장이 대기 하층에서 불안정성을 강화함으로써, 해당 지역에서 활발한 대류 발생 예보의 조건을 마련하였다. Figure 10은 각 실험의 분석장으로 계산한 SBCAPE이다. CONV 실험의 분석장과 비교하여(Fig. 10a) NYSM 관측을 동화한 두 실험은 뉴욕 주 중남부와 온타리오 호수 동쪽에서 더 큰 SBCAPE를 보이며(Figs. 10b, c), 특히 NYSM DWL 바람 프로파일 동화로 인해 토네이도가 발생한 온타리오 호수 동쪽의 불안정성이 가장 크게 증가함을 확인할 수 있다(Fig. 10c).

NYSM DWL의 자료동화가 연직 바람장에 미치는 효과를 살펴보기 위해 Belleville NYSM 사이트에서 각 실험의 바람 분석장의 호도그래프를 살펴 보았다(Fig. 11). Belleville 사이트는 온타리오 호수의 동쪽에 위치하며, 8월 7일 2200 UTC에 tornado가 관측된 Glenfield와 가장 가까운 NYSM 프로파일러 사이트이다(Fig. 4). 따라서 이 사이트에서 각 실험의 마지막 자료동화 시간(2023년 8월 7일 1800 UTC)의 분석장 및 NYSM DWL 바람 관측으로부터 계산한 호도그래프를 비교함으로써 DWL가 연직 바람장 분석에 미치는 효과를 살펴보았다. CONV 분석장(검은 선)과 관측(녹색 선)은 지상 바람의 방향 및 속도가 일치하며, 지표면부터 2 km 고도까지 남동풍에서 동풍으로 변화하는 veering 패턴을 보인다. 하지만 CONV 분석장은 관측보다 약 3 m s^{-1} 과대 모의하고 더 강한 바람 shear를 보인다(Fig. 11a).

CONV+SFC는 지상에서 1 km 고도까지 관측과 유사한 연직 바람 구조를 보인다(Fig. 11b). CONV와 비교할 때, CONV+SFC는 NYSM 지상 관측 동화의 효

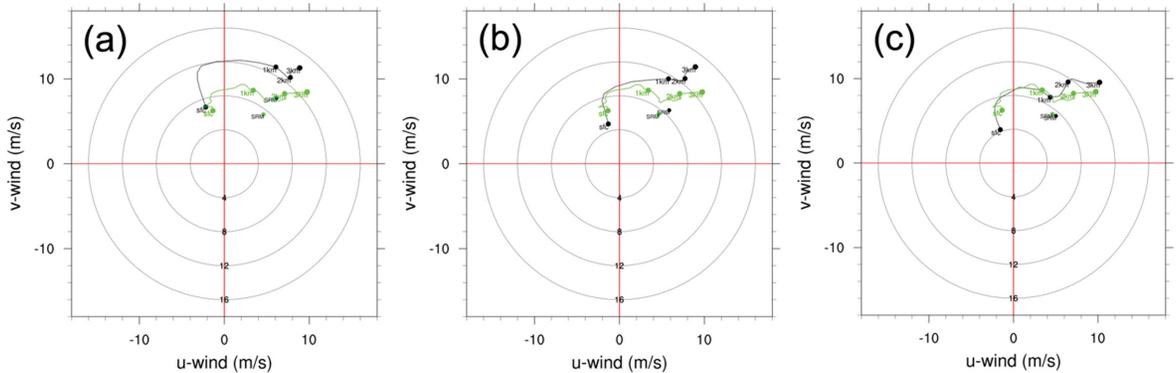


Fig. 11. Hodograph of (a) CNTL, (b) CNTL+SFC, and (c) CNTL+SFC+DWL analyses (black solid line) and DWL wind profiling observations (green solid line) at Belleville NYSM site at 1800 UTC on 7 August 2023.

과로 인해 약 1 km 이하의 대기 하층까지 바람 연직 구조를 개선하였다. 하지만 1 km 이상의 고도에서 CONV+SFC는 관측에 비해 약 3 m s^{-1} 과대 모의하는 CONV와 유사한 연직 바람 구조를 보인다(Fig. 11b). 반면에 CONV+SFC+DWL는 DWL 바람 프로파일 동화로 인해 지상에서 3 km 고도까지 관측과 가장 유사한 연직 바람 구조의 분석장을 보인다(Fig. 11c).

5.2 예보장 결과

앞선 자료동화 분석장 결과에서 NYSM 지표 관측 동화는 중관 지상 관측 동화에 비교하여 뉴욕 주 중남부의 지상 열역학 상태를 개선한다. 또한 NYSM DWL 바람 프로파일러의 동화는 NYSM 지상 관측만을 동화하는 경우에 비하여 하층 분석장 바람 프로파일을 효과적으로 개선함을 보였다. 본 장에서는 각 실험의 예보장에 대한 검증 결과를 분석하였다.

Figure 12은 대류 시스템 발달과 관련된 레이더 관측(Zhang et al., 2005; NOAA and NSSL, 2019)과 각 자료동화 실험의 분석장 양상을 평균을 이용하여 2023년 8월 7일 1800 UTC에 초기화한 반사도 예보이다.

2100 UTC에 온타리오 호수의 북동쪽 해안 경계면과 호수 남쪽에서 발달한 대류 시스템이 관측되며, 이 시스템은 북동진하여 2300 UTC에 Glenfield를 지난다(Figs. 12a-c). CONV 예보는 관측과 달리 온타리오 호수의 동쪽에 남북방향으로 발달한 중규모 대류 복합체를 예보하였으며, 이 시스템의 후면을 따라 호수 중앙과 호수 남쪽에 대류 시스템이 뒤따라 발달함을 예보하였다(Fig. 12d). 이처럼 CONV는 관측에 비해 동쪽으로 편향되어 과대모의된 대류 시스템을 예보하여 실제 토네이도가 관측된 2200 UTC 및 2300 UTC CONV의 예보는 Glenfield 부근의 대류 시스템을 예보하지 못하였다(Figs. 12e-f). NYSM 지상 관측 동화는 CONV 예보가 보여준 온타리오 호수 동쪽의 대류

복합체의 과대 모의를 개선하였으며(Figs. 12g-i), 호수 남쪽에서 발달하여 동진하는 대류 시스템을 Glenfield 부근에서 적절히 예보하였다(Fig. 12i). NYSM의 DWL 바람 프로파일 동화는 NYSM 지상 관측 동화 실험과 유사한 예보를 보인다(Figs. 12j-l). 하지만 2300 UTC에서 CONV+SFC+DWL는 CONV+SFC 보다 Glenfield를 중심으로 발달한 선형의 대류 시스템 위치와 크기 예보를 개선하였다(Fig. 12l).

Figure 13은 3개의 자료동화 실험의 반사도 예보에 대한 fractional skill score (FSS)의 시계열을 보여준다. FSS는 강수, 반사도 등의 예보에서 공간 패턴을 평가하기 위한 이웃(neighborhood) 기반 방법이다(Roberts and Lean, 2008). FSS는 고해상도 모델의 성능을 검증할 때 발생하는 이중 패널티 문제를 완화할 수 있기 때문에 고해상도 대류 허용 수치 모델의 예보 성능을 정량화하는 데 널리 사용된다(Romine et al., 2013). Roberts and Lean (2008)에 따른 FSS 대한 수식은 다음과 같다.

$$FSS = 1 - \frac{FBS}{FBS_{ref}}, \quad (1)$$

식(1)의 fractions brier score (FBS)는 다음과 같이 정의된다.

$$FBS = \frac{1}{N} \sum_i \sum_j [F_o(i, j) - F_m(i, j)]^2, \quad (2)$$

이때 i, j 는 각각 검증하고자 하는 모델 도메인의 가로, 세로 인덱스이며, N 은 도메인의 총 격자 수이다. $F_o(i, j)$ 와 $F_m(i, j)$ 는 각각 (i, j) 위치의 관측 및 모델의 부분 값(fractions)이다. 부분 값(fractions)은 일정 거리 안의 검증 영역 안에서 검증하고자 하는 대상(예: 강수 혹은 반사도)가 예보 혹은 관측된 비율로 정의하며, FBS_{ref} 는 관측 및 예보 부분에서 얻을 수 있는

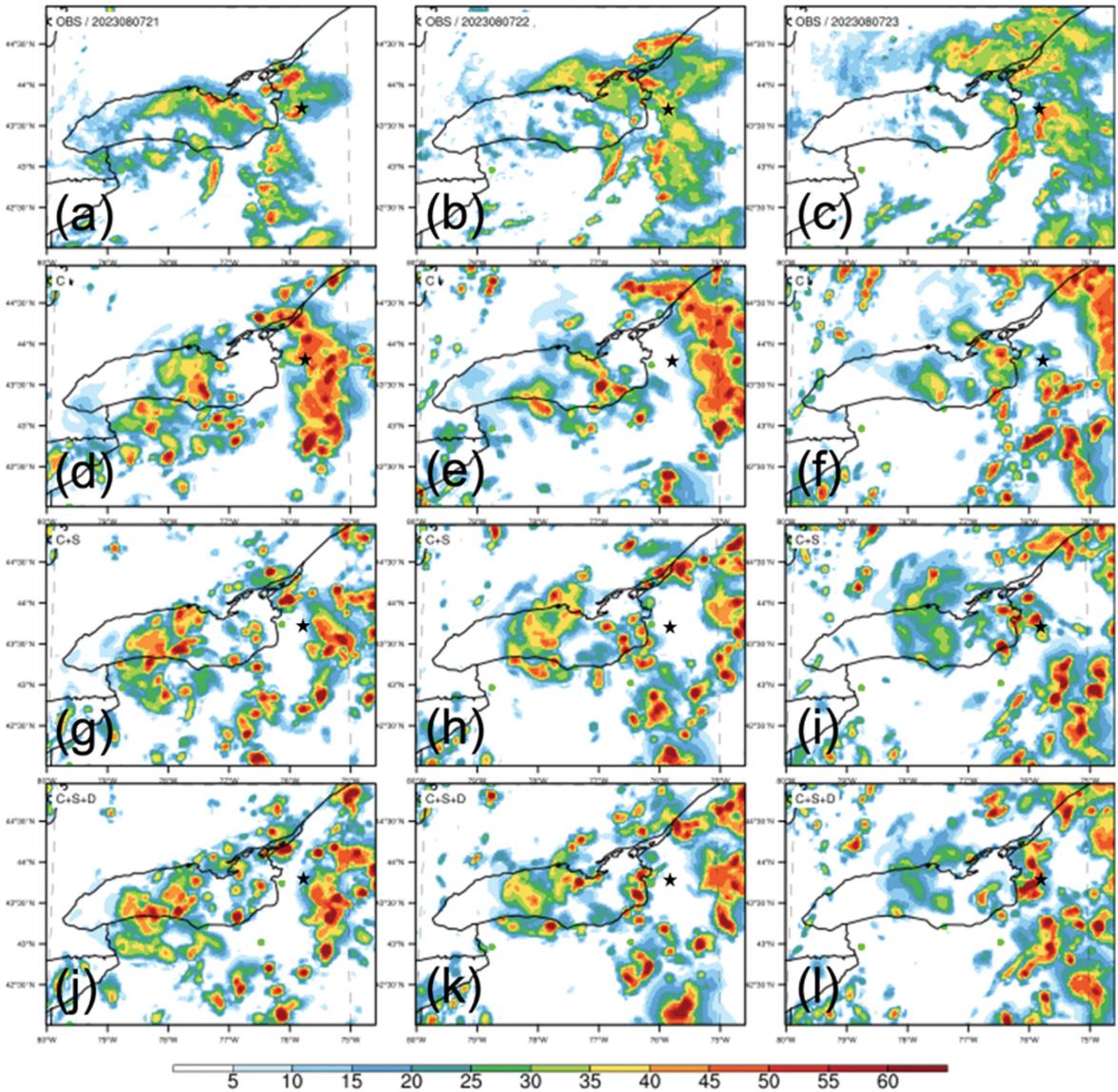


Fig. 12. (a)-(c) Composite reflectivity (dBZ; color fill) of the convection event from 2100 UTC to 2300 UTC 7 August 2023 with radar observations and predictions of composite reflectivity for (d)-(f) CONV, (g)-(i) CONV+SFC, and (j)-(l) CONV+SFC+DWL experiments initialized at 1800 UTC 7 August 2023. The reflectivity radar observations are provided by the Multi-Radar Multi-Sensor (MRMS) project (Zhang et al., 2005). The black star indicates the location of Glenfield.

가장 낮은 값으로 정의된다. 따라서 FSS 는 0에서 1 사이의 값으로 정의되며 가장 스킬이 높은 예보는 1을 갖는다.

반사도 예보의 FSS 를 계산하기 위해 우리는 레이더 관측자료를 Fig. 12의 3 km 모델 그리드로 내삽한 후, FSS 를 해당 도메인에 대해 계산하여 평균하였다. 24 km 이웃 거리에 대해서 CONV+SFC는 CONV보

다 처음 4시간의 예보에서 근소하게 우월한 예보 성능을 보이며(Fig. 13a), 48 km의 거리에서는 그 차이가 확대되었다(Fig. 13b). 이처럼 24 km보다 48 km 이웃 거리에서 CONV+SFC가 CONV보다 확연히 예보를 개선한 이유는, CONV+SFC가 CONV보다 해당 시스템의 발생 타이밍 및 구조를 잘 예보하지만 여전히 위치의 편향이 존재함을 암시한다. 24 km 및 48

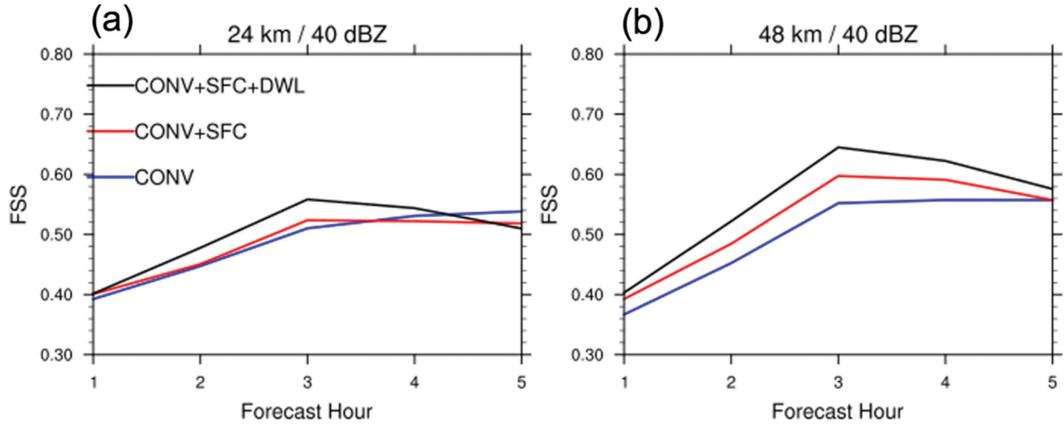


Fig. 13. Fractions skill scores for the three DA experiments defined in Table 1 calculated with a (a) 24 km and (b) 48 km neighborhood for radar reflectivity of 40 dBZ.

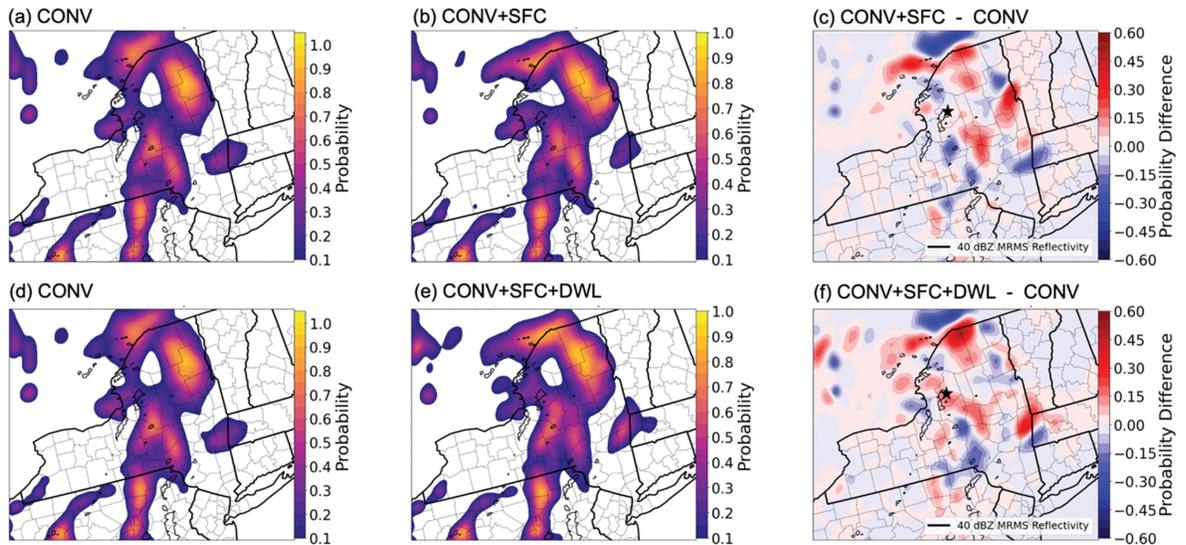


Fig. 14. NEP of (a) CONV, (b) CONV+SFC, and (c) the difference between CONV and CONV+SFC for radar reflectivity of 40 dBZ at 2300 UTC 7 August 2023. (d-f) are the same as (a-c) but for CONV+SFC+DWL in (e) and (f). The black contours in (c) and (f) represent MRMS radar reflectivity observations above 40 dBZ, and black stars in (c) and (f) indicate the location of Glenfield.

km의 이웃 거리에 대해서 계산한 FSS 모두 CONV+SFC+DWL이 대부분의 예보 시간 동안 가장 높은 예보 스킬을 보였다(Fig. 13). 이는 반사도의 수평 분포 예보 결과(Fig. 12)와 유사한 결과로서, NYSM DWL를 동화하는 것이 NYSM 지상 관측 동화 효과에 더하여 대류 시스템 예보의 공간적 분포 및 위치 예보 개선에 기여함을 보인다.

앙상블 확률 검증은 앙상블 기반 자료동화 시스템을 이용하여 각 관측이 예보에 미치는 전반적인 효과

를 평가하는 데 사용될 수 있다. 자료동화를 통해 정확한 관측 자료를 배경 앙상블에 동화하면 앙상블 멤버들이 실제 참값을 주변으로 분포하고, 성공적인 자료동화는 자료동화 사이클링 기간 동안 현실적인 분석장의 오차 분포를 형성하게 된다. Neighborhood ensemble prediction (NEP)은 이웃 기반 앙상블 확률 예보 검증 방법이다(Schwartz and Sobash, 2017). NEP는 일정 이웃 거리 내에서 목표 이벤트를 예측한 앙상블 멤버들의 비율을 계산하여 앙상블 상대 빈도를

언고, 해당 이벤트의 상대 빈도를 평균 내어 계산한다. FSS와 유사하게, 우리는 Fig. 12의 영역 안에서 임계값을 초과하는 반사도 예측에 대해 NEP 방법을 적용하였다. 본 결과에서는 24 km와 48 km의 이웃 거리 반경 내에서 40 dBZ를 초과하는 NEP 결과에 대해 논의한다.

Figure 14a와 b는 각각 8월 7일 2300 UTC에 해당하는 5시간 앙상블 예보를 이용한 NEP이며, Fig. 14c는 이 둘의 차이이다. 두 실험 모두 온타리오 호수 동쪽에서 남북으로 길게 늘어선 NEP 분포를 확인할 수 있다(Figs. 14a, b). 이 둘의 차이를 살펴보면, CONV+SFC와 CONV는 레이더 관측에서 확인되는 Glenfield의 대류 시스템에 대한 NEP의 차이가 미미하였다(Fig. 14c). CONV+SFC+DWL는 전반적으로 CONV+SFC와 비슷한 분포의 NEP를 보인다(Fig. 14e). 하지만 CONV+SFC+DWL와 CONV의 NEP 차이를 살펴보면 (Fig. 14f), CONV+SFC+DWL는 DWL 바람 프로파일을 동화함으로써 Glenfield 주변에서 반사도에 대한 앙상블 확률이 증가하였다(Fig. 14f). 즉, DWL 바람 프로파일 동화는 토네이도 발생 지역에서의 대류 시스템 예보의 확률을 증가시키고, 이 결과는 Fig. 12과 일치한다.

Figure 15은 Glenfield (Fig. 4) 지역에서 각 실험의 5시간 예보장으로 계산한 호도그래프를 보여준다. 세 실험은 서로 다른 연직 바람 구조를 나타낸다. CONV는 지상에서 5 m s^{-1} 의 남서풍을 예보하며, 연직 방향으로 backing하는 바람 구조를 예보하였다(Fig. 15a). CONV+SFC와 CONV+SFC+DWL 실험은 연직 방향으로 veering하는 바람 변화를 예보하였다(Figs. 15b, c). 특히, CONV 실험이 하층 대기에서 crosswise vorticity를 예보한 것과 달리(Fig. 15a), CONV+SFC와 CONV+SFC+DWL 실험은 하층 대기에서 streamwise vorticity를 예보하여 토네이도와 관련된 슈퍼셀 발달

에 유리한 환경을 예보하였다(Figs. 15b, c). CONV+SFC와 CONV+SFC+DWL 실험을 비교하면, CONV+SFC+DWL의 예보는 0~1 km 하층 바람 shear가 11.86 m s^{-1} , 0~1 km 하층 스톰 상대 헬리시티(Storm Relative Helicity, SRH) 값이 $119 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 로, 강력한 상승 기류 회전(updraft rotation)을 유도할 가능성이 높다. 이는 CONV+SFC+DWL이 슈퍼셀과 토네이도 발생 가능성을 다른 실험보다 높게 예보할 수 있음을 나타낸다(Fig. 15c). 반면, CONV+SFC의 예보는 바람 shear가 6 m s^{-1} , SRH 값이 $50 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 로 상대적으로 낮아, CONV+SFC+DWL이 비해 약하고 덜 조직화된 대류성 폭풍을 유발할 가능성을 예보하였다(Fig. 15b).

6. 요약 및 토의

본 연구는 2023년 8월 7일 미국 뉴욕 주에서 발생한 토네이도 발생과 관련된 대류 시스템에 대하여 NYSM의 지상 관측과 DWL 바람 프로파일러 관측의 자료동화 효과를 평가하였다. 종관 관측 자료만을 동화한 CONV 실험은 뉴욕 중남부에서 관측에 비해 낮은 지상 온도와 건조한 대기의 분석장을 보였다. 반면, NYSM의 지상관측을 동화한 CONV+SFC와 NYSM 지상관측 및 DWL 바람 프로파일을 동화한 CONV+SFC+DWL 실험은 지상 온도 및 습도의 편향을 효과적으로 개선하였고, 대류 발생을 위한 불안정성을 강화하였다. 또한, 예보장 검증에서 NYSM 관측의 동화는 종관 관측만을 동화한 실험에 비해 온타리오 호수 동쪽의 대류 복합체 과대 모의를 개선하며 더 정확한 대류 위치와 강도를 예측하였다. 특히, DWL 바람 프로파일을 동화한 CONV+SFC+DWL 실험은 연직 바람 구조를 개선하여 슈퍼셀과 토네이도 발생 가능성을 더 높게 예측했다. 본 연구는 뉴욕 주에서 운영중인 고해상도 DWL 프로파일러 관측망이 악기

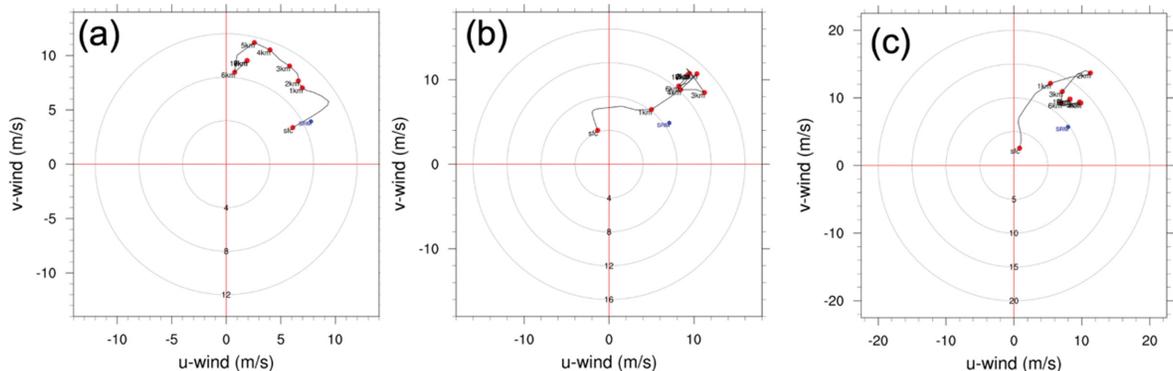


Fig. 15. Hodograph of (a) CNTL, (b) CNTL+SFC, and (c) CNTL+SFC+DWL 5-hr forecast at Glenfield at 2300 UTC on 7 August 2023.

상 예보 향상에 효과적임을 보였다. 뉴욕 주는 대한민국 보다 약 1.4배 정도 면적이 크지만, 두 곳 모두 복잡한 지형과 해안으로 구성되어 있다는 점에서 유사하다. 비록 본 연구는 한 가지 사례 분석에 불과하지만, DWL 바람 프로파일을 자료동화에 적극적으로 활용하는 것이 한국 악기상 현상 예보 향상에 기여할 수 있음을 암시한다. 특히 NYSM와 같이 인구와 산업 분포에 따라 수도권에 집중하여 설치한 DWL는 3차원 바람의 흐름 및 수렴/발산의 정보를 제공함으로써 수도권 집중 호우 예보에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

본 실험의 결과를 바탕으로, 향후에 NYSM DWL 바람 프로파일 관측 효과를 극대화 할 수 있도록 자료동화 실험을 고도화 할 계획이다. 예를 들어 DWL 바람 프로파일 동화를 위한 다양한 국지화 기법을 응용하고, 바람 프로파일과 열역학 프로파일과의 상관관계를 파악하여 자료동화에 적용할 예정이다. 이를 위해 NYSM MWR 열역학 프로파일의 편향을 보정하여 DWL 바람 프로파일을 함께 동화하여 그 효과를 검증하고자 한다. 본 연구는 한 사례에 대한 연구이기에 본 연구 결과를 일반화하기에 어려움이 있다. 따라서 향후 더 다양한 사례에 대하여 NYSM 프로파일 관측 자료동화를 수행하여 관측의 통계적 효과를 검증함으로써 본 연구의 결과의 타당성 및 일반성에 대하여 검증할 계획이다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사 드립니다. 본 연구 자료는 협력 계약 번호 1852977에 따라 미국 National Science Foundation (NSF)의 지원을 받는 주요 시설인 National Center for Atmospheric Research (NCAR)의 지원을 받아 수행된 연구에 기반합니다. 또한 NSF가 후원하는 NCAR의 Computational and Information Systems Laboratory (CISL)에서 제공하는 Cheyenne (doi:10.5065/D6RX99HX)의 고성능 컴퓨팅 지원에 감사드립니다. 본 연구는 미국 국립해양대기청의 Weather Program Office의 지원사업 (NOAA Award No. NA23OAR4590399)의 일환으로 수행되었습니다. 본 연구 결과의 분석에 도움을 주신 NSF NCAR의 Dr. James O. Pinto와 Dr. Matthew B. Wilson 께 감사드립니다.

REFERENCES

Aitken, M. L., M. E. Rhodes, and J. K. Lundquist, 2012: Performance of a Wind-Profiling lidar in the region of wind turbine rotor disks. *J. Atmos. Oceanic Tech-*

- nol.*, **29**, 347-355, doi:10.1175/JTECH-D-11-00033.1.
- Anderson, J. L., T. Hoar, K. Raeder, H. Liu, N. Collins, R. Torn, and A. Avellano, 2009: The data assimilation research testbed: A community facility. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **90**, 1283-1296, doi:10.1175/2009BAMS2618.1.
- Barker, D. M., W. Huang, Y.-R. Guo, A. J. Bourgeois, and Q. N. Xio, 2004: A three-dimensional variational data assimilation system for MM5: Implementation and initial results. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 897-914, doi:10.1175/1520-0493(2004)132<0897:ATVDAS>2.0.CO;2.
- Brotzge, J., and Coauthors, 2020: A technical overview of the New York State Mesonet standard network. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **37**, 1827-1845, doi:10.1175/JTECH-D-19-0220.1.
- Chan, S. C., E. J. Kendon, H. J. Fowler, A. Kahraman, J. Crook, N. Ban, and A. F. Prein, 2023: Large-scale dynamics moderate impact-relevant changes to organised convective storms. *Commun. Earth Environ.*, **4**, doi:10.1038/s43247-022-00669-2.
- Chipilski, H. G., X. Wang, and D. B. Parsons, 2020: Impact of assimilating PECAN profilers on the prediction of bore-driven nocturnal convection: A multiscale forecast evaluation for the 6 July 2015 case study. *Mon. Wea. Rev.*, **148**, 1147-1175, doi:10.1175/MWR-D-19-0171.1.
- _____, H. G., X. Wang, D. B. Parsons, A. Johnson, and S. K. Degelia, 2022: The value of assimilating different ground-based profiling networks on the forecasts of bore-generating nocturnal convection. *Mon. Wea. Rev.*, **150**, 1273-1292, doi:10.1175/MWR-D-21-0193.1.
- Clough, S. A., M. W. Shephard, E. J. Mlawer, J. S. Delamere, M. J. Iacono, K. Cady-Pereira, S. Boukabara, and P. D. Brown, 2005: Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **91**, 233-244, doi:10.1016/j.jqsrt.2004.05.058.
- Coniglio, M. C., J. Correia Jr., P. T. Marsh, and F. Kong, 2013: Verification of convection-allowing WRF model forecasts of the planetary boundary layer using sounding observations. *Wea. Forecasting*, **28**, 842-862, doi:10.1175/WAF-D-12-00103.1.
- _____, G. S. Romine, D. D. Turner, and R. D. Torn, 2019: Impacts of targeted AERI and doppler lidar wind retrievals on short-term forecasts of the initiation and early evolution of thunderstorms. *Mon. Wea. Rev.*, **147**, 1149-1170, doi:10.1175/MWR-D-18-0351.1.
- Degelia, S. K., X. Wang, and D. J. Stensrud, 2019: An

- evaluation of the impact of assimilating AERI retrievals, kinematic profilers, rawinsondes, and surface observations on a forecast of a nocturnal convection initiation event during the PECAN field campaign. *Mon. Wea. Rev.*, **147**, 2739-2764, doi:10.1175/MWR-D-18-0423.1.
- _____, _____, _____, and D. D. Turner, 2020: Systematic evaluation of the impact of assimilating a network of ground-based remote sensing profilers for forecasts of nocturnal convection initiation during PECAN. *Mon. Wea. Rev.*, **148**, 4703-4728, doi:10.1175/MWR-D-20-0118.1.
- Dowell, D. C., and Coauthors, 2022: The High-Resolution Rapid Refresh (HRRR): An hourly updating convection-allowing forecast model. Part 1: Motivation and system description. *Wea. Forecasting*, **37**, 1371-1396, doi:10.1175/WAF-D-21-0151.1.
- Gaspari, G., and S. E. Cohn, 1999: Construction of correlation functions in two and three dimensions. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 723-757, doi:10.1002/qj.49712555417.
- Geerts, B., and Coauthors, 2017: The 2015 plains elevated convection at night field project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 767-786, doi:10.1175/BAMS-D-15-00257.1.
- Hanesiak, J., and D. D. Turner, 2016: *FP3 University of Manitoba Doppler Lidar wind profile data (version 1.0)*. UCAR/NCAR Earth Observing Laboratory, accessed 14 March 2018, doi:10.5065/D60863P5.
- Hu, J., N. Yussouf, D. D. Turner, T. A. Jones, and X. Wang, 2019: Impact of ground-based remote sensing boundary layer observations on short-term probabilistic forecasts of a tornadic supercell event. *Wea. Forecasting*, **34**, 1453-1476, doi:10.1175/WAF-D-18-0200.1.
- Iacono, M. J., J. S. Delamere, E. J. Mlawer, M. W. Shephard, S. A. Clough, and W. D. Collins, 2008: Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res.*, **113**, D13103, doi:10.1029/2008JD009944.
- James, E. P., and S. G. Benjamin, 2017: Observation system experiments with the hourly updating rapid refresh model using GSI hybrid ensemble-variational data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, **145**, 2897-2918, doi:10.1175/MWR-D-16-0398.1.
- Johnson, A., X. Wang, J. R. Carley, L. J. Wicker, and C. Karstens, 2015: A comparison of multiscale GSI-based EnKF and 3DVar data assimilation using radar and conventional observations for midlatitude convective-scale precipitation forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 3087-3108, doi:10.1175/MWR-D-14-00345.1.
- Jones, T. A., K. Knopfmeier, D. Wheatley, G. Creager, P. Minnis, and R. Palikonda, 2016: Storm-scale data assimilation and ensemble forecasting with the NSSL experimental Warn-on-Forecast system. Part II: Combined radar and satellite data experiments. *Wea. Forecasting*, **31**, 297-327, doi:10.1175/WAF-D-15-0107.1.
- Kay, J., T. M. Weckwerth, W.-C. Lee, J. Sun, and G. Romine, 2022: An OSSE study of the impact of Micropulse Differential Absorption Lidar (MPD) water vapor profiles on convective weather forecasting. *Mon. Wea. Rev.*, **150**, 2787-2811, doi:10.1175/MWR-D-21-0284.1.
- Kerr, C. A., D. J. Stensrud, and X. Wang, 2019: Diagnosing convective dependencies on near-storm environments using ensemble sensitivity analyses. *Mon. Wea. Rev.*, **147**, 495-517, doi:10.1175/MWR-D-18-0140.1.
- Lin, H.-C., J. Sun, T. M. Weckwerth, E. Joseph, and J. Kay, 2023: Assimilation of New York State mesonet surface and profiler data for the 21 June 2021 convective event. *Mon. Wea. Rev.*, **151**, 485-507, doi:10.1175/MWR-D-22-0136.1.
- Nakanishi, M. and H. Niino, 2009: Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 895-912, doi:10.2151/jmsj.87.895.
- NOAA, and NSSL, 2019: MRMS Merged Reflectivity Composite Quality Controlled Data. Version 1.0. UCAR/NCAR - Earth Observing Laboratory. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Severe Storms Laboratory, Accessed 11 Jul 2023, doi:10.26023/4551-7ZYR-Z00J.
- Olson, J. B., J. S. Kenyon, W. A. Angevine, J. M. Brown, M. Pagowski, and K. Sušelj, 2019: A description of the MYNN-EDMF scheme and coupling to other components in WRF-ARW. NOAA Tech. Memo. OAR GSD, 61, 37 pp doi:10.25923/n9wm-be49.
- Pearson, G., F. Davies, and C. Collier, 2009: An analysis of the performance of the UFAM pulsed doppler lidar for observing the boundary layer. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **26**, 240-250, doi:10.1175/2008JTECHA1128.1.
- Potvin, C. K., L. J. Wicker, M. I. Biggerstaff, D. Betten, and A. Shapiro, 2013: Comparison between dual-Doppler and EnKF storm-scale wind analyses: The 29-30 May 2004 Geary, Oklahoma, supercell thunderstorm. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 1612-1628, doi:10.1175/MWR-D-12-00308.1.
- Powers, J. G., and Coauthors, 2017: The Weather Research and Forecasting (WRF) model: Overview, system

- efforts, and future directions. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 1717-1737, doi:10.1175/BAMS-D-15-00308.1.
- Reen, B. P., 2007: *Data assimilation strategies and land-surface heterogeneity effects in the planet boundary layer*. The Pennsylvania State University, 246 pp.
- Reese, D., 2019: *A New York State Mesonet based analysis on squall line cold pool strength*. University at Albany, State University of New York, 95 pp.
- Roberts, N. M., and H. W. Lean, 2008: Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 78-97, doi:10.1175/2007MWR2123.1.
- Romine, G. S., C. S. Schwartz, C. Snyder, J. L. Anderson, and M. L. Weisman, 2013: Model bias in a continuously cycled assimilation system and its influence on convection-permitting forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 1263-1284, doi:10.1175/MWR-D-12-00112.1.
- Sandu, I., A. Beljaars, P. Bechtold, T. Mauritsen, and G. Balsamo, 2013: Why is it so difficult to represent stably stratified conditions in numerical weather prediction (NWP) models? *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **5**, 117-133, doi:10.1002/jame.20013.
- Schwartz, C. S., G. S. Romine, M. L. Weisman, R. A. Sobash, K. R. Fossell, K. W. Manning, and S. B. Trier, 2015: A real-time convection-allowing ensemble prediction system initialized by mesoscale ensemble Kalman filter analyses. *Wea. Forecasting*, **30**, 1158-1181, doi:10.1175/WAF-D-15-0013.1.
- Schwartz, C. S., and R. A. Sobash, 2017: Generating probabilistic forecasts from convection-allowing ensembles using neighborhood approaches: A review and recommendations. *Mon. Wea. Rev.*, **145**, 3397-3418, doi:10.1175/MWR-D-16-0400.1.
- Shrestha, B., J. A. Brotzge, J. Wang, N. Bain, C. D. Thorncroft, E. Joseph, J. Freedman, and S. Perez, 2021: Overview and applications of the New York State Mesonet profiler Network. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **60**, 1591-1611, doi:10.1175/JAMC-D-21-0104.1.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, 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 doi:10.5065/D68S4MVH.
- Snook, N., M. Xue, and Y. Jung, 2011: Analysis of a tornadic mesoscale convective vortex based on ensemble Kalman filter assimilation of CASA X-band and WSR-88D radar data. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 3446-3468, doi:10.1175/MWR-D-10-05053.1.
- Sobash, R. A., and D. J. Stensrud, 2015: Assimilating surface mesonet observations with the EnKF to improve ensemble forecasts of convection initiation on 29 May 2012. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 3700-3725, doi:10.1175/MWR-D-14-00126.1.
- SPC, 2023: *SPC convective outlooks*. Storm Prediction Center, [Available online at <http://www.spc.noaa.gov/cgi-bin-spc/getacrange.pl>].
- Stensrud, D. J., and Coauthors, 2013: Progress and challenges with Warn-on-Forecast. *Atmos. Res.*, **123**, 2-16, doi:10.1016/j.atmosres.2012.04.004.
- Sun, J., S. B. Trier, Q. Xiao, M. L. Weisman, H. Wang, Z. Ying, M. Xu, and Y. Zhang, 2012: Sensitivity of 0-12-h warm-season precipitation forecasts over the central United States to model initialization. *Wea. Forecasting*, **27**, 832-855, doi:10.1175/WAF-D-11-00075.1.
- Thompson, G., and T. Eidhammer, 2014: A study of aerosol impacts on clouds and precipitation development in a large winter cyclone. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 3636-3658, doi:10.1175/JAS-D-13-0305.1.
- Torn, R. D., G. J. Hakim, and C. Snyder, 2006: Boundary conditions for limited area ensemble Kalman filters. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 2490-2502, doi:10.1175/MWR3187.1.
- Turner, D. D., and W. G. Blumberg, 2019: Improvements to the AERIoe thermodynamic profile retrieval algorithm. *IEEE J. Selected Topics Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, **12**, 1339-1354, doi:10.1109/JSTARS.2018.2874968.
- Vendrasco, E. P., J. Sun, D. L. Herdies, and C. Frederico de Angelis, 2016: Constraining a 3DVAR radar data assimilation system with Large-Scale analysis to improve Short-Range precipitation forecasts. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **55**, 673-690, doi:10.1175/JAMC-D-15-0010.1.
- Wheatley, D. M., K. H. Knopfmeier, T. A. Jones, and G. J. Creager, 2015: Storm-scale data assimilation and ensemble forecasting with the NSSL experimental Warn-on-Forecast system. Part I: Radar data experiments. *Wea. Forecasting*, **30**, 1795-1817, doi:10.1175/WAF-D-15-0043.1.
- Whitaker, J. S., and T. M. Hamill, 2012: Evaluating methods to account for system errors in ensemble data assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 3078-3089, doi:10.1175/MWR-D-11-00276.1.
- Wulfmeyer, V., R. M. Hardesty, D. D. Turner, A. Behrendt, M. P. Cadeddu, P. Di Girolamo, P. Schluessel, J. van Baelen, and F. Zus, 2015: A review of the remote sensing of lower tropospheric thermodynamic profiles and its indispensable role for the

understanding and simulation of water and energy cycles. *Rev. Geophys.*, **53**, 819-895, doi:10.1002/2014RG000476.

Zhang, F., Z. Meng, and A. Aksoy, 2006: Tests of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part I: Perfect model experiments. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 722-736, doi:10.1175/

MWR3101.1.

Zhang, J., K. Howard, and J. J. Gourley, 2005: Constructing three-dimensional multiple-radar reflectivity mosaics: Examples of convective storms and stratiform rain echoes. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **22**, 30-42, doi:10.1175/JTECH-1689.1.