

고해상도 수치모델을 이용한 한반도 토네이도성 돌풍 사례에 대한 종관 및 중규모 발생 메커니즘 연구

변가영^{1),2)} · 김정훈^{1)*} · 박이준¹⁾

¹⁾서울대학교 지구환경과학부, ²⁾기상청 예보국

(접수일: 2024년 7월 5일, 수정일: 2024년 8월 17일, 게재확정일: 2024년 9월 19일)

Synoptic and Meso Scale Mechanisms of Reported Tornado-like Gust Wind Event in Korea Using High-resolution Numerical Simulation

Ka-young Byen^{1),2)}, Jung-Hoon Kim^{1)*}, and Yi-June Park¹⁾

¹⁾*School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea*

²⁾*Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea*

(Manuscript received 5 July 2024; revised 17 August 2024; accepted 19 September 2024)

Abstract Reported tornado event occurred in Dangjin, Chungcheongnam-do at 0650~0730 UTC on 15 March 2019 was examined using Weather Research and Forecasting model with four nested domains (dx = 5, 1, 0.2, and 0.05 km). From synoptic analysis in ERA5 reanalysis data, eastward moving upper-level trough was developed rapidly in the Yellow Sea. Strong tropopause folding with Potential Vorticity Unit (PVU) higher than 1.5 PVU moved downward to 600-hPa level in mid troposphere following the trough over the location of tornado event. Under this large-scale background condition, surface front developed very intensively in the west coast of Korea along with strong low-level jet and moisture band at 850-hPa level. In domain 2, the maximum Bulk wind shear at Dorido point was 12.86 m s^{-1} . Cold front evolved to be a comma cloud with upper-level trough and strong bulk vertical shear near Dangjin, which include eastward moving gust front revealed as a strong horizontal temperature gradient and convergence near the surface. In domains 3 and 4, the local maximum value of the simulated vertical vorticity ($24 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$) with strong updraft (8.18 m s^{-1}) near the observed tornado event along with the surface gust front was found to be a possible area for tornadogenesis from the x-z and time-z cross-sections near the simulated tornado event. In the vorticity budget analysis, the local maximum of vertical vorticity during this event was generated significantly by tilting and stretching forcings.

Key words: Tornado-like gust wind, Cold front, Bulk vertical wind shear, Vorticity budget, WRF model

*Corresponding Author: Jung-Hoon Kim, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea.
Phone: +82-2-880-6718, Fax: +82-2-871-3269
E-mail: jhkim99@snu.ac.kr

1. 서 론

토네이도(Tornado, 용오름)는 전 세계적으로 ‘급격하게 발달하는 돌풍에 의하여 피해를 주는 기상현상’으로 보고되고 있다. 대한민국에서는 “강한 바람에 의해 지표면으로부터 말아 올리는 모래먼지 및 지상 물체의 파편, 수면으로부터의 물방울 등을 수반하는 강한 소용돌이”로 정의되며(Kim, 1992), 한국에서는 용오름으로 주로 부른다. Orlanski (1975)는 토네이도는 시간적으로는 1시간 이하, 공간적으로는 200 m~1 km의 규모를 갖는 미세- α 규모의 기상현상으로 분류하였다. 한반도에서는 비교적 관측하기 힘든 현상 중 하나로 생각되었으나, 최근 한반도에 관측되는 토네이도 사례가 늘어나면서 토네이도에 관한 대중들의 관심도 증대되었다.

해외의 경우 토네이도 현상이 빈번한 국가에서는 토네이도 경보 시스템이 갖춰져 있다. 미국에서는 폭풍예측센터(Storm Prediction Center)에서 넓은 범위의 지역의 토네이도 가능성을 Tornado watch 정보를 통해 발표하고 있다. 일본의 경우 토네이도가 발생할 것으로 예상되는 날의 반나절에서 하루 전에 기상정보를 통하여 강한 돌풍에 대한 정보를 발표한다. 이후 토네이도 발생 수 시간 전까지는 뇌우 정보에서 Tornado 라는 용어를 사용하며, 토네이도가 발생하기 수 분 전까지 竜巻注意情報(토네이도 주의 정보)를 발표하여 주민들에게 토네이도와 관련된 정보를 제공한다(Table 1). 중국에서는 기상레이더와 기상위성을 통하여 원격 감시를 실시간으로 수행하고, 토네이도가 예상되기 30 분 전에 정보를 발표하는 작업을 수행한다.

Fujita (1971)의 연구에서는 토네이도의 강도에 대한

Table 2. Operational enhanced fusita scale.

Level	3-s Gust in mph (m s ⁻¹)
0	65-85 (29-38)
1	86-110 (38-49)
2	111-135 (50-60)
3	136-165 (61-74)
4	166-200 (74-89)
5	>200 (>89)

분류를 수행하였으며, 그 후 Fujita Scale은 토네이도 분류법에 널리 사용되고 있다. 이후 Edwards et al. (2010)의 연구에서 Fujita Scale을 개선한 Enhanced Fujita Scale (EF; Table 2)를 통하여 토네이도를 분류하는 방법을 연구하였다. 토네이도의 발생원인은 Houze (1993)에 의해 잘 나타나고 있으며, 변화하는 환경과 도시 상황에 따른 토네이도 위험성 연구(Coleman and Dixon, 2014), 발생 시간별 토네이도 확률과 기후학적 연구(Krocak and Brooks, 2018) 등도 수행하고 있다. Agee and Jones (2009)는 토네이도가 발생하는 원인에 따라 강한 중규모 대류 복합체(Mesoscale Convective System, MCS)에서 발생하는 슈퍼셀 토네이도(Supercell tornado; Type I)와 주로 준선형 대류계 시스템(Quasi-Linear Convective Systems, QLCS)의 주변에서 발생하는 비슈퍼셀 토네이도(Non-supercell tornado: Type II), 그 밖의 원인을 가진 토네이도성 와도(Tornado-like vorticities: Type III)의 3개의 유형과 그 세부유형으로 나누는 분류법을 제시하였다.

Tochimoto and Niino (2022)는 일본 관동지방에서 QLCS에 의해 생성된 토네이도의 환경 특성 및 형성

Table 1. Tornado alerts in USA (NOAA) and Japan (JMA).

Tornado alerts in USA (NOAA)		
Level	Definitions	Organization
Tornado Watch	Severe thunderstorms and tornadoes are possible Winds of 58 mph or higher	SPC: Storm Prediction Center
Tornado Warning	Tornado is imminent (Observation / Radar)	NWFO: Local National Weather Service Office
Tornado Emergency	Enhanced version of a tornado warning	
Tornado alerts in JAPAN (JMA)		
Issue	Definitions	Contents
Half day ~ A day before	Advisories	Risk of severe gusts such as tornadoes
~hours	Thunderstorm watch	Use “tornado” in advisories
~minutes	竜巻注意情報 Hazardous wind watch	Right now, the weather conditions are such that tornadoes are likely to occur.

과정을 파악하고 재분석자료를 통하여 고해상도 수치 시뮬레이션을 통하여 조사하는 연구를 수행하였다. 또한 일본에서는 EF Scale과 유사한 Japanese Enhanced Fujita Scale (JMA, 2015)을 사용하면서 토네이도 강도 판단의 지역화를 수행하였다. Chen et al. (2018)은 중국에서 약 50년간 관측된 토네이도 사례 중 약 76%가 F0 (Fujita scale 0) 또는 F1에 해당하였으며, 1.6%의 사례만이 F3 이상으로 발달하였다고 기술하였다. Wang et al. (2019)는 중국 동쪽지역에서 발달한 두 개의 토네이도 사례에 대한 분석을 통하여 미세물리학적 분석 및 앙상블 예측 시스템을 통하여 토네이도의 예측 가능성을 연구하였다.

한반도에서 발생한 토네이도 연구로는 2014년 고양시 인근에서 발생한 토네이도에 대한 사례분석 및 수치실험을 통한 메커니즘 분석(In et al., 2016)과 고해상도 WRF 모델링을 통하여 고양 용오름에 대하여 분석한 선행연구(Lee et al., 2016)가 있었으며, 같은 해에 발생한 부산시 기장군 인근의 토네이도에 대해 중규모 환경 분석을 수행(Lee et al., 2015)한 연구도 있다.

대한민국의 경우, 기상청에서 발표하는 토네이도에

관한 경보의 기준은 없으며, 기상정보에서 ‘돌풍’이라는 용어를 사용하며 순간적으로 발생하는 강한 바람에 대한 정보와 함께, 유인관측 기상기관(구 기상관측소 또는 기상대)에서 발행하는 일기상통계표를 통하여 토네이도 관측 자료를 제공하고 있다. 또한 기상청의 ‘특이 기상 보고’ 자료를 통하여 기록된 사회관계망서비스와 언론에 공유된 토네이도 지역 및 관측 시간에 대한 자료를 수집하였다. 이를 통해 2008년부터 2021년까지 한반도에서 발생한 22건의 관측 기록을 수집할 수 있었다. 연 평균 1~2회가 나타났으며, 2017~2021년 동안은 연 평균 3회 이상 나타나며 증가하였다. 계절별로는 여름에, 월별로는 10월에 가장 많았다. 지역별로는 동해상에서 나타난 토네이도가 가장 많았으며, 봄철과 여름철에 인천, 충남, 경기에서는 지면에 접하는 토네이도가 관측되었다(Fig. 1). 대부분의 토네이도 사례는 해상이나 시설물이 드문 논밭에서 발생하여 피해 없이 현상만 관측되거나 그 피해가 적었으나, 인천, 충남, 경기에서 발생한 토네이도는 인구 밀집 지역 인근에서 피해를 발생시킨 사례도 있었다.

특히, 실제 2019년 3월 15일 충청남도 당진시에는

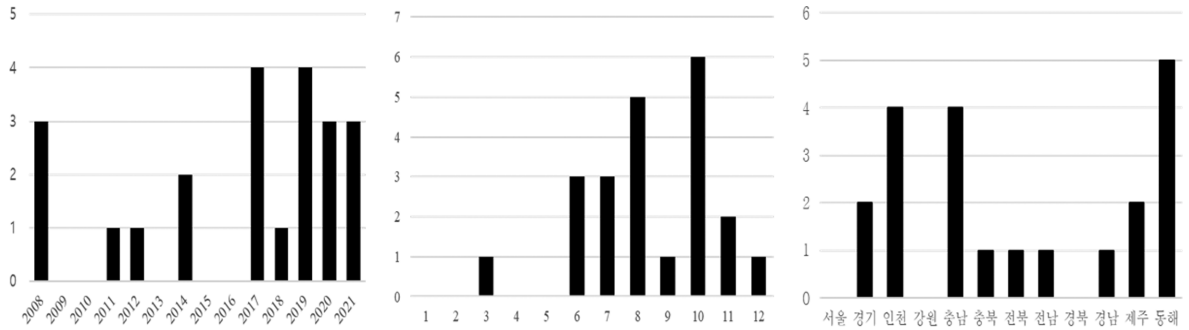


Fig. 1. Number of tornado occurrences by year (left), month (middle), and place (right) for 2008~2021 in South Korea.



Fig. 2. (a) Observed tornado path (Adapted from Lee Y. G., 2019) and (b) JTBC News about Dangjin case (Adapted from Lee S. H. et al., 2019).

토네이도에 의한 강한 돌풍이 발생한 바 있다. 해당 토네이도는 오후 3시 30분과 4시 사이에 당진시 송악읍 부근에서 육안으로 관측되었다(Fig. 2). 토네이도의 이동 경로로 추정되는 지역은 당진 제철소이다. 본 연구에서 선정한 토네이도 사례의 경우 부력에 의한 강제력을 유도할 수 있는 뇌우 혹은 조직적으로 발달한 QLCS와 같은 강한 대류 시스템이 동반되지 않았기 때문에, Agee and Jones (2009)에서 제시한 세 가지의 토네이도 유형에는 해당되지 않는다. 그럼에도 불구하고 해당 당진 토네이도 사례는 EF0에서 1 강도의 피해를 발생시켰다. 본 연구에서는 해당 토네이도 사례의 발생 원인을 이해하기 위해, 재분석자료와 가용 가능한 관측 자료를 통해 종관 규모 흐름을 파악하고 고해상도 수치 실험을 통해 토네이도 발생 과정에서 나타난 중규모 특성을 분석하였다. 본 연구의 2장에서는 본 연구에서 사용한 재분석 및 관측 자료와 수치실험 설계에 대하여 기술하였으며, 3장에서는 연구결과를 분석하였고, 4장에서는 요약 및 결론을 기술하였다.

2. 자료 및 연구방법

2.1 재분석 및 관측 자료

해당 사례에서 토네이도 발생 당시 종관 규모의 대기 흐름을 먼저 살펴보기 위해 0.25° 수평해상도를 갖는 ECMWF Reanalysis Data Version 5 (ERA5; Hersbach et al., 2020) 재분석자료를 활용하였다. 이를 통해, 사례 발생 시각을 기준으로 6시간 이전부터 종관 흐름을 파악하였다. 또한 해당 사례에서 나타난 종관 및 중규모의 대기 구조를 분석하기 위해, 가용 가능한 다양한 관측 자료를 분석하였다. 본 연구에서 사용한 관측 자료는 토네이도 발생 지역 주변의 지상 Automatic Weather Station (AWS)와 Automated Synoptic Observation System (ASOS), 고층 레원존데 자료, 기상 레이더 자료이다.

2.2 수치모델 설정

해당 사례에서 토네이도가 발생한 지역의 5 km 반경 내에는 관측소가 존재하지 않기 때문에, 현재의 관

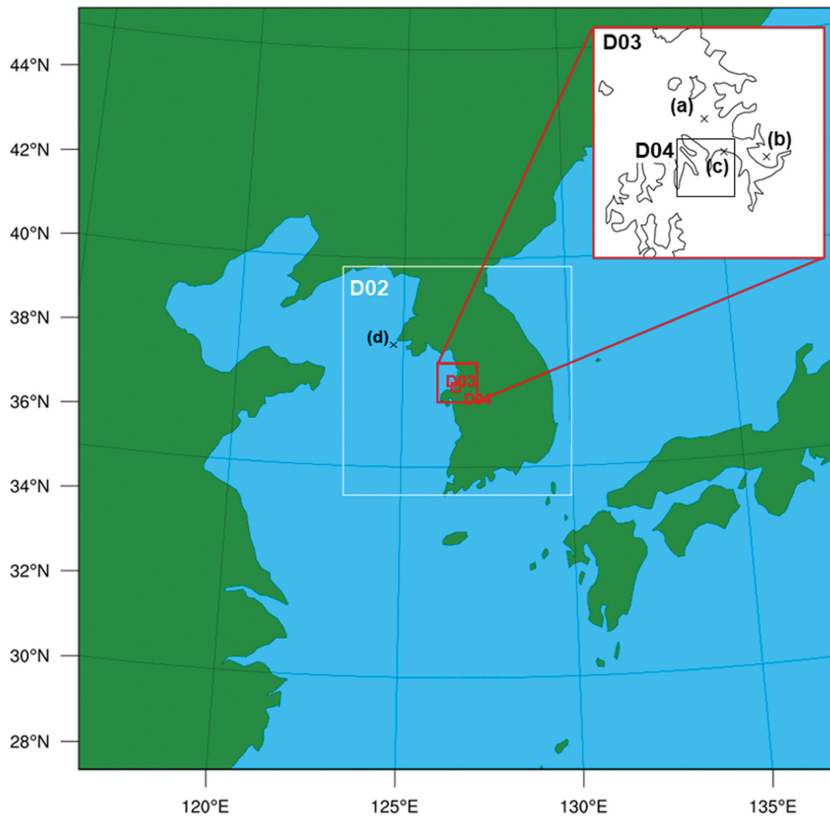


Fig. 3. Configuration of WRF - ARW domain. (a) Dori-do AWS, (b) Hyeondeok-myeon AWS, (c) the damage reported main point by tornado on 15 March 2019, and (d) Baengnyeong-do ASOS.

Table 3. Configuration of the Weather and Research Forecasting (WRF) model in this study.

Domains and Time Controls				
Initial and Boundary Conditions	ERA5 Reanalysis ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$), hourly OSTIA Analysis ($0.05^\circ \times 0.05^\circ$), daily			
Horizontal Domain	D01	D02	D03	D04
	401 × 401	601 × 601	501 × 501	501 × 501
	5 km / 60 min	1 km / 5 min	200 m / 5 min	50m / 1min
one-way nesting				
Vertical Domain	112 hybrid layers ($p_{top} = 20$ hPa)			
Time Step	15 s	5 s	1.66667 s	0.55556 s
Integration Time	1500 UTC 14 March 2019–0900 UTC 15 March 2019 (18 hours) 0000 UTC–0900 UTC 15 March 2019 (9 hours) for D04			
Physics Parameterization Schemes				
Microphysics Scheme	WDM6			
Boundary Layer Scheme	YSU	-		
Radiation Scheme	RRTMG (longwave) / Dudhia (shortwave)			
Land Surface Model	Unified Noah land-surface model			
Cumulus Parameterization Scheme	KF (new Eta) scheme			
Eddy Coefficient Option	Horizontal Smagorinsky 1st order closure		1.5 order TKE closure (3D)	

측망에서는 토네이도의 발생 및 중규모 이하의 대기 특성을 명확히 이해하는 데 한계가 존재한다. 이를 극복하기 위해, 본 연구에서는 1 km 미만(Sub-kilometer)의 고해상도 수치 실험을 수행하였다. 본 연구에 사용된 고해상도 수치모델은 Weather Research and Forecasting (WRF) 4.3 버전이며, 기상 경계 및 초기 조건으로 중관 배경 분석에 사용한 재분석자료를, 해수면 온도는 Met Office의 Operational Sea-surface Temperature and Ice Analysis (OSTIA) 분석 자료를 이용하였다. 첫 번째 도메인(D01)은 서해상과 산둥 반도, 요동반도 부근을 포함하는 지역, 두 번째 도메인(D02)은 한반도 부근, 세 번째 도메인(D03)은 아산만과 경기만 부근으로 나누었으며, 네 번째 도메인(D04)은 토네이도가 발생한 당진 부근으로 지정하였다(Fig. 3). 수평격자 해상도는 각각 5, 1, 0.2, 0.05 km로 설정하였다. 연직방향으로는 비균등격자로 112개의 층을 최고층 20 hPa까지 설정하였다. 제어 실험(Control Run, CTL)은 관측 시각의 중관 기압계 및 레이더 CMAX 관측 영상과의 비교를 통하여 재현도가 높은 실험을 선정하였다. 미세물리 모수화 방안으로는 WRF Double-Moment 6-class (WDM6) 방안(Hong and Lim, 2006)을 모든 도메인에 적용하였다. 적운 모수화는 Kain-Fritsch (new Eta) scheme (Kain, 2004)을 D01

($\Delta x = 5$ km)에만 적용하였다. 장파 복사 방안은 RRTMG 방안(Mlawer et al., 1997; Iacono et al., 2008)을 사용하였으며, 단파복사 방안은 Dudhia 방안(Dudhia, 1989)을 사용하였다. 지표면 모델로는 Unified Noah land-surface 모델(Chen and Dudhia, 2001)이 사용되었다. 행성 대기 경계층 모수화를 위해서는 비국지 방안인 YSU scheme (Hong et al., 2006)을 D01과 D02에 적용하였으며, D03과 D04에서는 coarse Large eddy simulation을 수행하였다. 난류와 혼합 설정은 D01, D02에서 2nd order diffusion term on coordinate surfaces 옵션을 사용하였으며, D03, D04에서는 3차원에서의 mixing terms in physical space (stress form) 옵션을 사용하였다. 또한 이때의 Eddy Coefficient Option에 대하여 D01, D02에서는 Horizontal Smagorinsky 1st order closure를, D03, D04에 대해서는 1.5 order TKE closure (3D)을 사용하였다(Table 3).

3. 연구 결과

3.1 중관 기압계 분석

WRF 수치모델링을 통한 중- γ 규모 와도의 중규모 발생 기작을 분석하기 앞서, 본 연구에서는 토네이도 발생 당시 중관 규모의 호조건들을 파악하기 위해

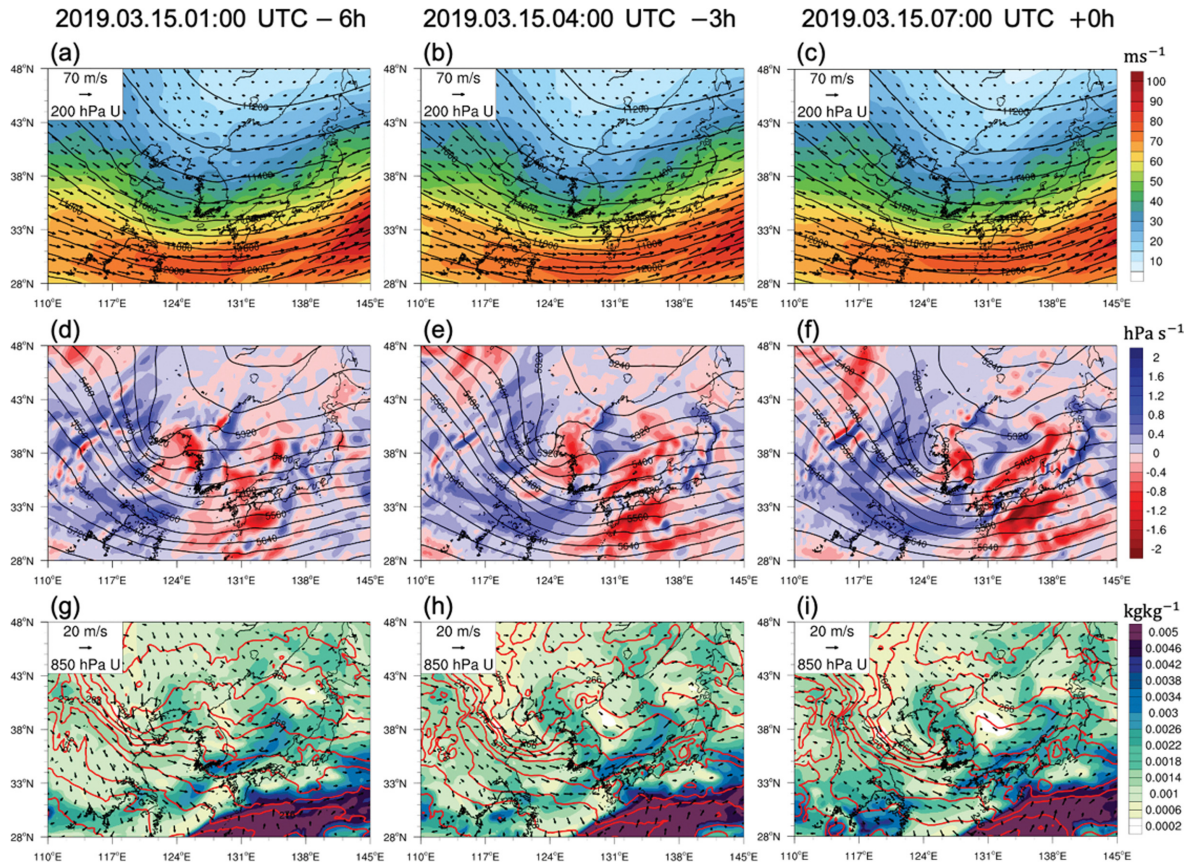


Fig. 4. (top) 200 hPa wind speed (shading), wind (vector), geopotential height (black contour), (middle) 500 hPa omega (shading), geopotential height (black contour), (bottom) 850 hPa specific humidity (shading), wind (vector), temperature (red contour) at (left) 0100 UTC, (middle) 0400 UTC, and (right) 0700 UTC on 15 March 2019.

ERA5 재분석자료를 통해 종관 배경을 분석하였다. Figure 4는 토네이도가 발생한 0700 UTC (+0 h)를 포함하여 3시간 이전과 6시간 이전 시각의 200 hPa, 500 hPa, 850 hPa 등압면의 종관 흐름을 보여준다.

본 사례 기간 동안 200 hPa 고도에는 큰 기압골이 발달해 있었으며, 토네이도 발생 시간 기준 3시간 이전에 한반도는 상층 기압골의 우측에 위치해 있다 (Figs. 4a-c). 또한, 남해 부근 상층에는 제트기류가 위치해 있으며, 중심 풍속이 70 m s^{-1} 이상으로 강하게 발달해 있었다. 한반도 상층의 기압골과 제트기류는 시간에 따라 점차 느리게 동진하였으며, 토네이도 발생 시각인 +0 h 때까지도 한반도는 기압골의 중심에 위치함과 동시에 남해 부근에 위치한 아열대 제트 기류의 입구 북쪽에 위치해 있어, 상층 기압골 또는 제트기류의 강제력이 동반될 수 있는 상황임을 알 수 있다.

500 hPa 등압면에서는 한반도 상공에 기압골이 뚜

렷하게 나타나며, 이는 6시간 전부터 발해만으로부터 점차 한반도 지역으로 동진하는 모습을 보여준다(Figs. 4d-f). 뚜렷한 기압골 전면과 후면에는 각각 상승과 하강 운동이 발생한 것을 알 수 있으며, 특히 토네이도 발생 시기에 서해상에는 하강 기류가 더욱 발달하였다. 뿐만 아니라 한반도 남쪽에 위치한 제트 기류의 북쪽에서도 하강 기류가 존재하며, 이는 비-지균 2차 순환에 의해 유도되는 것으로 예상해 볼 수 있다. 상층 기압골 후면에서 강화되는 하강 기류는 하층의 건조역 발달과 함께 전선 및 comma 구름(Fig. 2c)을 동반한 지상 저기압 발달에 중요한 역할을 하였다.

850 hPa 등압면에서는 기압골 후면 지역 지역을 거쳐 한반도 서해상으로 강한 북동풍이 나타났으며, 이로 인해 건조하고 차가운 공기가 유입되고 있는 상황임을 알 수 있다(Figs. 4g-i). 토네이도 발생 시에는 상층 기압골의 이동에 따라 기압골 후면 지역으로부터 한반도 서해안까지 건조한 공기가 침투하였다. 뿐만

아니라 찬 공기의 유입으로 서해상에는 강한 기온 경도를 이루었다. 기압골 전면에서 발생하는 상승 기류는 한반도 상공으로 동진하면서 점차 강화되지만 같은 시각의 지상에는 강한 강수가 발생하지 않았다(Figs. 2d, 4f). 하지만 서해상 상층의 하강 기류로 인한 하층의 건조 한랭 공기가 유입되는 지역의 전면에서 토네이도가 발생하므로, 토네이도 발생에는 이러한 차고 건조한 북서 기류의 종관 흐름이 중요하다는 것을 예상해 볼 수 있다.

본 연구에서는 앞서 파악한 차갑고 건조한 북서 하강 기류의 종관 흐름의 원인을 파악하기 위해, Q-벡터 형태의 준-지균폰 오메가 방정식을 활용하였다(Eq. (1); Hoskins and Pedder 1980; Holton 2013). 위 식에서 우측 항들은 각각 역학적 강제력, 베타 강제력, 비단열 강제력, 그리고 잔차항을 의미하며, 역학적 강제력은 Q-벡터의 수렴 및 발산으로 판단할 수 있다. 본 연구에서는 Q-벡터를 분석하기 앞서, ERA5 재분석장에 존재하는 중규모의 변동을 제외시키기 위해 지오퍼텐셜 장을 T42 스펙트럴 해상도로 스무딩 취하였다. Figure 5는 500 hPa 등압면 고도에서의 스무딩된 상승 속도와 Q-벡터 수렴에 두배를 취한 역학적 강제력을 나타낸다. 토네이도 발생 당시 상층 기압골 전면에서는 종관 규모의 상승 운동은 약하게 나타나는 반면, 기압골 후면 및 상층 제트 입구의 북쪽의 하강 기류는 뚜렷하게 나타났다(Figs. 5a-c). Q-벡터 수렴에

의한 역학적 강제력은 이러한 상승 및 하강 운동의 분포를 잘 설명하였다(Figs. 5d-f). 특히, 음의 역학적 강제력은 하강 운동의 분포 및 시간에 따른 변화를 잘 설명하였다.

$$\left(\sigma_0 \nabla^2 + f_0^2 \frac{\partial^2}{\partial p^2}\right) \omega = -2 \nabla \cdot \mathbf{Q} + f_0 \beta_0 \frac{\partial u_g}{\partial p} - \frac{\kappa}{p} \nabla^2 J + \varepsilon \quad (1)$$

본 연구에서는 추가로 하강 운동을 발생시키는 역학적 요소들을 파악하기 위해, 기존의 Q-벡터를 자연 좌표계를 기준으로 수직 성분(transverse)과 시어 성분(shearwise)으로 나누어 분석하였다(Eq. (2); Park et al., 2021). Q-벡터는 수평면에서 두 성분으로 나눌 수 있으며, 이들은 온도풍 벡터방향과 나란한 등층후선에 수직하는 성분의 Q-벡터(Q_n)와 등층후선과 나란한 성분의 Q-벡터(Q_s)로 계산되는 역학적 강제력에 의한 상승 운동을 의미한다(Holton, 2013; Park et al. 2021). Park et al. (2021)은 한반도에서 발생하는 집중호우 사례들에 대해 집중호우 발생 시 나타나는 Q-벡터를 위에 설명한 두 성분으로 나누고, 비단열 과정에 의한 강제력과 전향력에 의한 강제력을 포함한 전체 Q-벡터에 의한 상승류 중 Q-벡터 오메가 방정식의 각각의 강제력 항들이 기여하는 바를 정량적으로 비교, 분석한 바 있다. 해당 사례는 시간당 강수가 10 mm 이하로 매우 적기 때문에 전체 강제력 중 비단열 과정에 의한 부분보다 역학적 강제력(Q_n 과 Q_s)이 상승 및

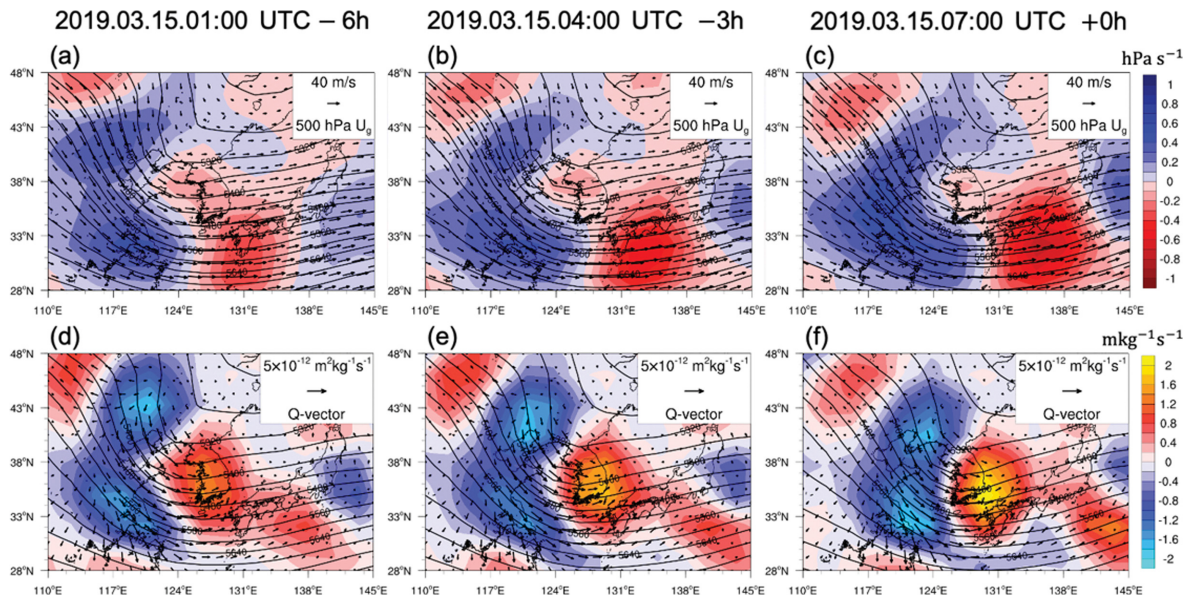


Fig. 5. (upper) 500 hPa smoothed omega (shading), geostrophic wind (vector), and geopotential height (black contour), and (lower) 500 hPa dynamic forcing (shading), Q-vector (vector), and geopotential height (black contour) at (left) 0100 UTC, (middle) 0400 UTC, and (right) 0700 UTC on 15 March 2019.

하강 운동의 분포를 잘 설명하고 있기 때문에 역학적 강제력들의 각 성분만 비교 분석하였다. Figure 6는 각 시간대의 Q_n 와 Q_s 로 계산된 역학적 강제력을 보

여준다. 두 강제력이 합은 Figs. 5d-f 그림과 동일하다. 먼저, Q_n 으로 인한 강제력은 남해 상층에 위치한 제트 기류의 입구 북쪽에서 비-지균 2차 순환에 의해 발

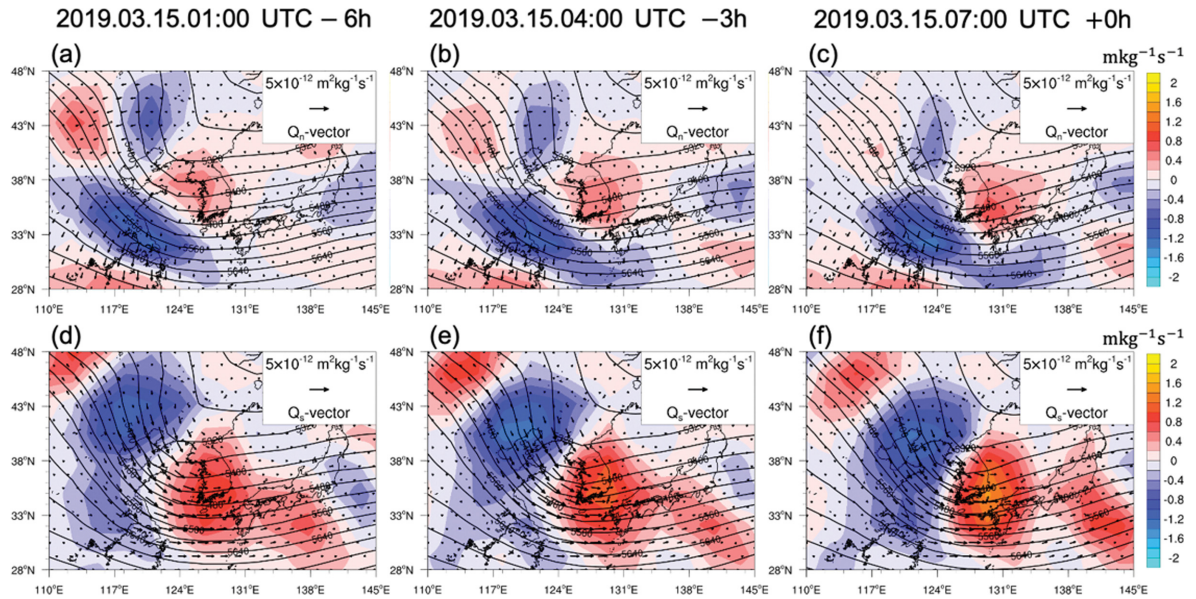


Fig. 6. (upper) 500 hPa Q_n -vector convergence (shading), Q_n -vector (vector), and geopotential height (black contour) and (lower) 500 hPa Q_s -vector convergence (shading), Q_s -vector (vector), and geopotential height (black contour) at (left) 0100 UTC, (middle) 0400 UTC, and (right) 0700 UTC on 15 March 2019.

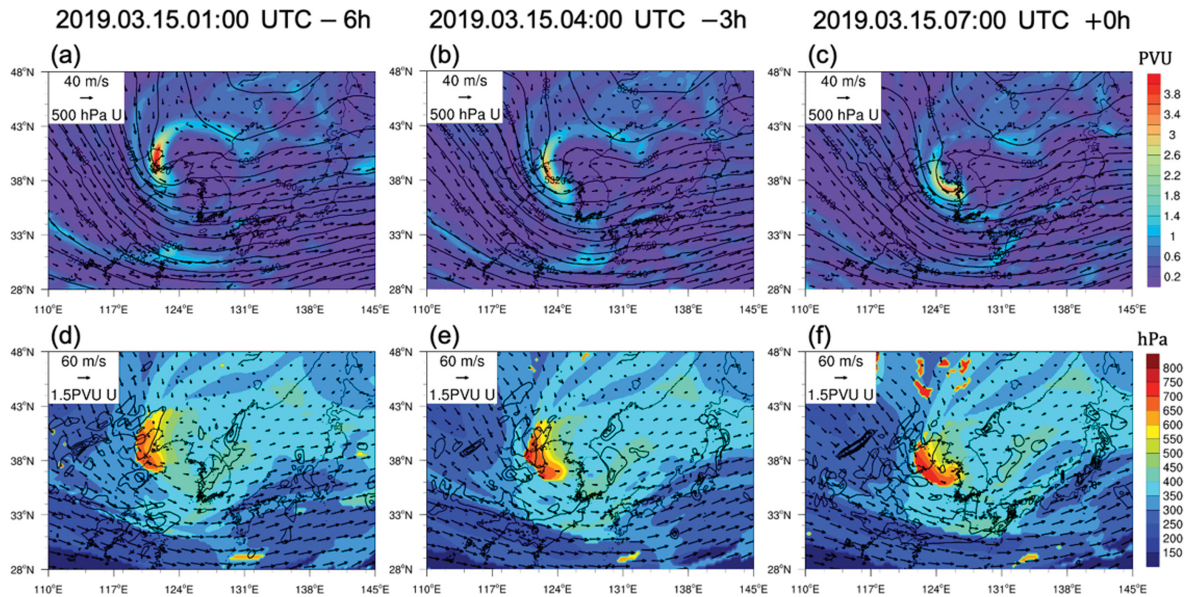


Fig. 7. (upper) 500 hPa PV (shading), wind (vector), geopotential height (black contour), and (lower) pressure (shading) and wind (vector) on 1.5 PVU surface with 500 hPa downdraft area (1.2, 1.6, 2.0 hPa s^{-1}) (black contour) at (left) 0100 UTC, (middle) 0400 UTC, and (right) 0700 UTC on 15 March 2019.

달하는 하강 기류를 잘 설명한다(Figs. 6a-c). 하지만 토네이도 발생에 가장 중요한 역할을 한 서해의 북서 기류가 발생한 위치에는 뚜렷한 하강 기류는 잘 설명하지 못하였다. 반면에 Q_x 강제력은 발해만에 위치한 기압골 전면과 후면에 발달하는 상승 및 하강 기류를 잘 설명하였다(Figs. 6d-f). 특히, 기압골 후면의 음의 역학적 강제력은 해당 지역의 하강 기류와 북서 기류의 중관 흐름과 매우 잘 일치하였다. 그러므로 본 사례에서 토네이도 발생에 중요한 서해의 하강 기류 및 북서풍 기류는 한반도 남쪽에 위치한 제트 기류보다 발해만으로부터 유입되는 상층 기압골의 영향이 더 큰 것을 알 수 있다.

$$Q = Q_x i + Q_y j,$$

where

$$Q_x = -\gamma \left(\frac{\partial V_g}{\partial x} \cdot V\theta \right) \text{ and } Q_y = -\gamma \left(\frac{\partial V_g}{\partial x} \cdot V\theta \right). \quad (2)$$

기압골 후면의 강한 하강 기류는 500 hPa 등압면 고도에서의 잠재와도 장에서도 확인할 수 있다. 본 연구에서 잠재와도는 에르텔 잠재와도 방정식을 통해

계산되었다(Eq. (3)). 토네이도 발생 시간 6시간 전부터 기압골 후면에는 4.0 Potential Vorticity Unit (PVU) 이상의 높은 양의 아노말리가 발생하였으며, 기압골의 움직임에 따라 한반도 서해안으로 동진하였다(Figs. 7a-c). 또한, 1.5 PVU 면을 따르는 풍속과 기압을 살펴보면, 기압골의 풍상측 지역의 강한 북서풍의 바람은 500 hPa 고도의 하강 기류가 발생하는 지역에서 감소하는 특징을 보였으며 1.5 PVU 면은 650 hPa 이상까지 도달하였다(Figs. 7d-f). 시간에 따라 PVU 면은 하층까지 침강하였으며, 특히 토네이도 발생 시각에는 800 hPa 등압면 고도까지 도달하였다. 이로 인해 상층 기압골 후면의 차고 건조한 고위도의 공기는 하층까지 침강하여 서해의 북서풍 바람의 흐름을 따라 경기만 내륙까지 도달한 것을 알 수 있고, 이는 토네이도 발생에 중요한 역할을 하였다.

$$P = -g(\zeta_\theta + f) \frac{\partial \theta}{\partial p} \quad (3)$$

3.2 관측 자료 분석

Figure 8는 대략적인 토네이도 발생 시간인 0700

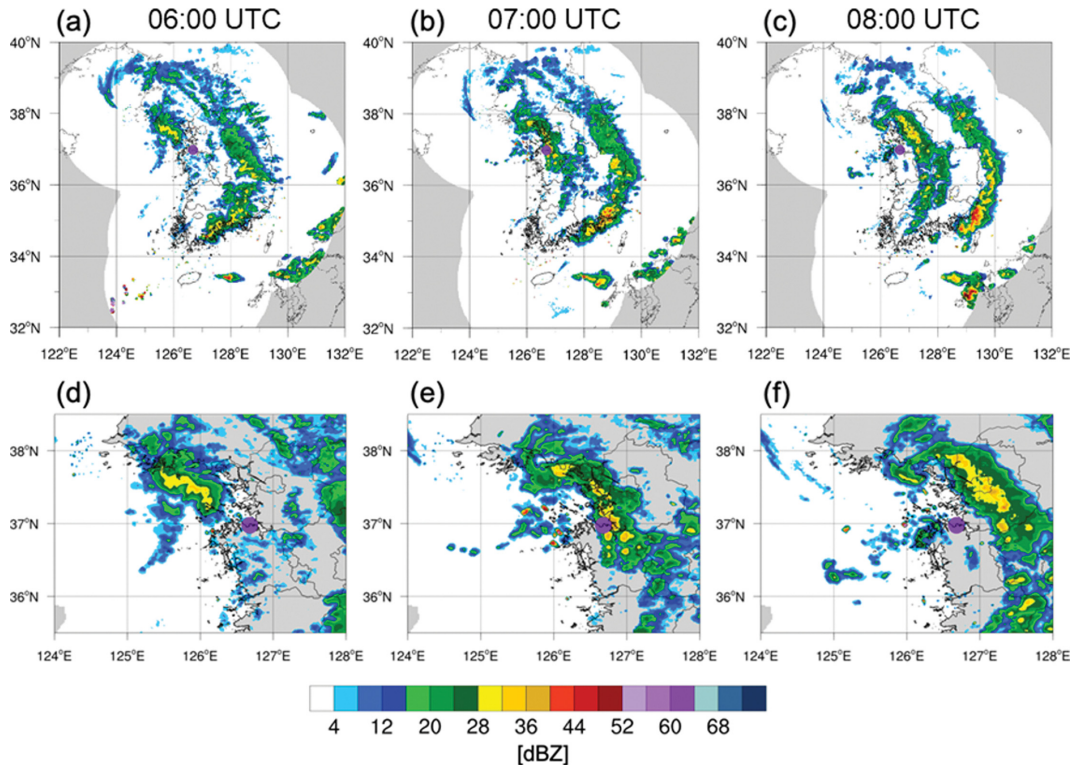


Fig. 8. Radar CMAX at (left) 0600 UTC, (center) 0700 UTC, and (right) 0800 UTC in (top) Korean Peninsula and (bottom) Gyeonggi bay.

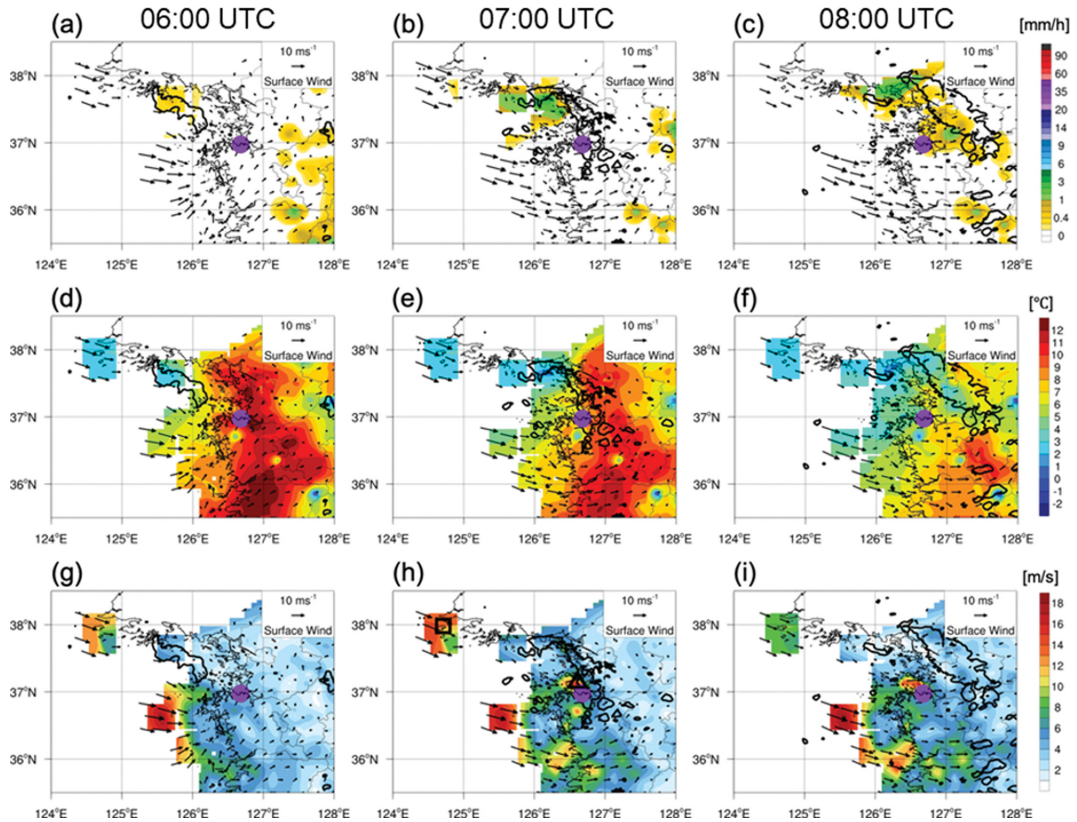


Fig. 9. Interpolated ground observation (AWS and ASOS) fields of (top) hourly accumulated precipitation (shading), (middle) surface temperature, (bottom) surface wind speed at (left) 0600 UTC, (center) 0700 UTC, (right) 0800 UTC. The vector represents the surface wind and the area where CMAX over 25 dBZ are indicated by the black contour. The location where the tornado occurred is indicated by the purple circle. The black triangle and rectangle markers in (h) refer to the location of AWS and sonde sites, showing the results in Fig. 10.

UTC 때와 1시간 전, 후의 지상 레이더 연직 최대 반사도(CMAX)를 보여준다. 토네이도가 발생한 지역은 보라색 원으로 표시되었다. 먼저, 0600 UTC 때 한반도 동쪽 내륙에는 선행하던 선형 강수대가 위치해 있으며, 경기 북부 서해안에는 매우 작은 규모의 대류가 발생한 것을 알 수 있다(Figs. 8a, d). 서해안에서 촉발된 작은 대류는 점차 내륙으로 동진하면서 선형으로 발달하였으며, 이러한 선형 에코 시스템이 충청남도 당진시를 지나면서 토네이도가 발생하였다(Figs. 8b, e). 먼저 선행하던 강수대와 토네이도 발생에 기여하였던 후방의 강수대는 시간이 지남에 따라 동진하면서 규모 및 강도 모두 강화되었으며, 잘 구조화된 지상 저기압에서 나타나는 뚜렷한 comma 형태의 에코 구조를 보여주었다(Figs. 8c, f). 레이더 영상에서 보여지는 강수 시스템의 발달 및 이동은 상층 기압골 전면의 상승 운동의 변화와 잘 일치한다

(Figs. 4d-f).

Figure 9는 토네이도 발생 기간 지상 AWS와 ASOS에서 관측된 1시간 누적 강수량, 지상 기온, 풍속의 분포를 보여준다. 레이더 CMAX에서 25 dBZ 이상인 대류 영역은 검은색 실선으로 표현되었다. 경기만으로 유입된 강수대는 점차 선형 형태로 발달하면서 충청남도 북부 및 수도권에 강수를 발생시켰다(Figs. 9a-c). 해당 시간에는 강수대 전면에서 수증기의 공급이 활발하지 않기 때문에 지상에는 시간당 5 mm 이하의 매우 적은 양의 강수가 기록되었다. 또한 대류 시스템이 선형 구조로 발달하는 과정에서 상층 기압골 후면으로부터 유도되는 종관 흐름이 서해안으로 유입되었으며, 이로 인해 대류 시스템의 후면에서는 북서풍의 지상 바람이 넓은 지역에 관측되었다. 상층으로부터 유도된 차고 건조한 북서풍의 바람이 내륙으로 유입되면서 서해안 넓은 지역에서 지상 기온이 감소하

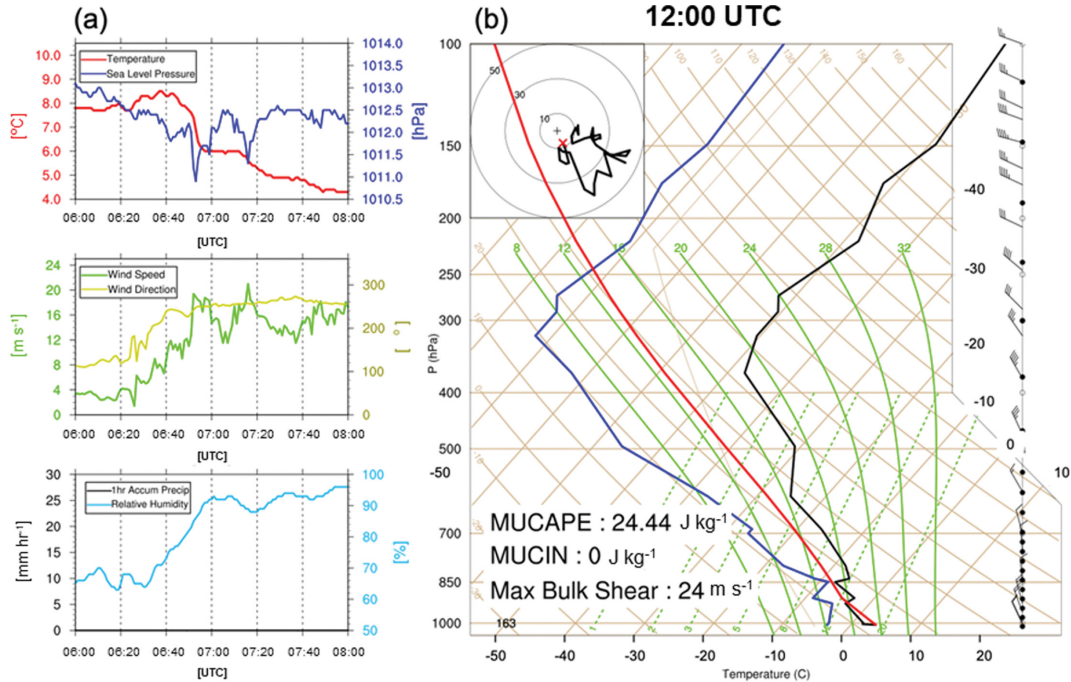


Fig. 10. (a) Timeseries of surface temperature (red), sea-level pressure (blue), surface wind direction (yellow) and speed (green), relative humidity (sky blue) of AWS at Dori-do, and (b) vertical profile of temperature (black), dew-point temperature (blue), and most-unstable parcel's temperature (red) with hodograph of rawinsonde at Baengnyeong-do. The lowest wind in the hodograph is indicated by the red "x" mark. And the most unstable convective available potential energy (MUCAPE), most unstable convection inhibition (MUCIN), and maximum bulk wind shear under 5-km height are also noted.

였으며, 특히 토네이도가 발생한 지역을 중심으로 기온의 감소 폭이 매우 크게 나타났다(Figs. 9d-f). 뿐만 아니라, 해당 기간 동안 지상 풍속 또한 증가하였고(Figs. 9g-i), 발생 지점 인근의 AWS인 도리도[Fig. 3; (a) 지점]에서는 20.8 m s^{-1} , 현덕면[Fig. 3; (b) 지점]에서는 15.8 m s^{-1} 의 강한 gust가 나타났다. 비록 토네이도의 발생이 지상 관측망에서는 관측되지 않지만, 토네이도가 발생한 주변 지역에서는 0700 UTC부터 지상 풍속이 매우 큰 폭으로 강화되어 돌풍이 발생한 것을 알 수 있다.

Figure 10는 토네이도가 발생한 0700 UTC 때의 당진시 주변 최대 풍속이 관측된 도리도 지점의 AWS 시계열과 1200 UTC 때의 백령도[Fig. 3; (d) 지점] 고층 사운딩 관측 결과를 보여준다. 먼저, 0650 UTC에 comma 구조를 가진 지상 저기압의 한랭 전선이 도리도를 지나면서, 지상 기온이 2도 이상 급격하게 감소하였다(Fig. 10a). 이때 해면 기압은 순간적으로 잠시 감소하였지만 이후 뚜렷한 변화는 보이지 않았다. 또한, 한랭 전선이 지나가면서 0650 UTC 이후 지상 바람의 풍향은 남풍에서 서 또는 북서풍으로 바뀌었으며, 풍속은 4 m s^{-1} 미만에서 20 m s^{-1} 까지 급격하게

증가하였다. 즉, 한랭 전선이 해당 지역을 지나면서 지상에는 돌풍이 발달한 것을 알 수 있다. 한랭 전선이 지나간 이후 강수량은 발생하지 않았다. 이를 통해, 지상의 급격한 기온 감소와 돌풍의 발달은 강수의 발생 및 증발 냉각으로 인한 Cold Pool이 아닌 중관 규모의 북서 기류에 의한 것임을 알 수 있다. 또한, 중요한 점은 돌풍 전선으로 인한 지상의 급격한 변화가 발생한 시점에서 주변 지역에 토네이도가 발생하였다는 것이다. 서해의 북서 기류는 토네이도 발생 시점 이후 백령도 고층 관측 자료에서도 확인해 볼 수 있다(Fig. 10b). 1200 UTC의 수평 바람에 대한 호도그래프를 보면, 대기 중층과 하층을 중심으로 30 m s^{-1} 이상의 매우 강한 북서풍이 불어오는 것을 확인해 볼 수 있다. 이 기간 차고 건조한 공기가 대기 하층에 유입되기 때문에 Most Unstable Convective Available Potential Energy (MUCAPE)는 매우 낮았다. 반면 5 km 고도 내에서 벌크 연직 바람시어의 최대값은 24 m s^{-1} 이상으로, 강한 중관 흐름에 의해 하층에는 매우 강한 바람시어가 발달하였다. 즉, 본 토네이도 사례에서는 상층 기압골 후면에서 유도된 북서풍의 중관 흐름과 이로 인한 하층 바람시어의 강화,

돌풍 전선의 발달이 토네이도 발생에 중요한 역할을 했다는 것을 예상해 볼 수 있다.

3.3 고해상도 수치실험 분석

3.3.1 관측 자료를 통한 검증

본 연구에서는 앞서 살펴본 레이더, 지상, 고층 관측 자료 분석 결과를 바탕으로 WRF 수치 실험 결과를 검증하였다. 이를 통해, 토네이도 발생 당시 나타난 현실 대기의 종관-중규모의 특성을 잘 반영한 제어 실험(CTL)을 선정하였다. Figure 11는 토네이도 발생 기간의 CTL 시험의 D02에서 모의된 CMAX를 보여준다. 각각의 시간대는 Fig. 8에서 보여준 레이더 에코의 발달 단계와 대응되며, CTL 실험과 관측 자료와의 시간 격차는 좌측 상단에 표시되었다.

CTL 실험에서 D02의 CMAX는 관측자료에서 파악된 선행하던 강수대와 후방의 강수대의 전반적인 공간 분포 및 발달 과정을 잘 모의하였다. 특히 서해안에서 국지적으로 발달한 대류가 점차 선형 구조로 발달하며 한랭전선 형태로 내륙으로 동진하는 모습을 잘 보여준다. 다만 그 발달 격차는 +5분(Figs. 11a, d),

+20분(Figs. 11b, e), +30분(Figs. 11c, f) 순으로 점차 늦어지는 것을 알 수 있었다.

CTL 실험의 D02에서 모의된 도리도 지점에서의 지면 대기의 변화를 살펴보면 대략 20분 정도의 시간 격차가 존재하지만 관측 결과와 매우 유사하게 0710 UTC 이후 지상 기온이 급격하게 하강하는 모습을 보여준다(Fig. 12a). 뿐만 아니라 같은 시간에 지상 풍속이 8 m s^{-1} 이상 급격히 강해진다. 이를 통해, CTL 실험에서도 한랭 전선의 이동 및 돌풍의 발달이 잘 모의됨을 확인할 수 있다. 하지만 온도의 감소폭과 풍속의 증가폭을 고려해보면 WRF 실험이 과소 모의한 것을 알 수 있다. 반면에, 백령도 지점에서의 CTL 실험에서 모의한 연직 프로파일을 보면, 관측 자료와 매우 유사한 연직 구조를 보여주고 있다(Fig. 12b). 하층의 북서풍을 잘 모의하였으며 대기 중층과 하층의 건조 공기의 유입으로 인해 MUCAPE 또한 낮게 발생하였다. 하지만 최대 벌크 연직 바람시어는 12.86 m s^{-1} 로 실제 관측 값과 비교하여 대략 절반 정도 밖에 미치지 못하였다. 그러므로 WRF 실험은 실제 관측된 하층 바람시어를 크게 과소 모의하는 특징을 보였다.

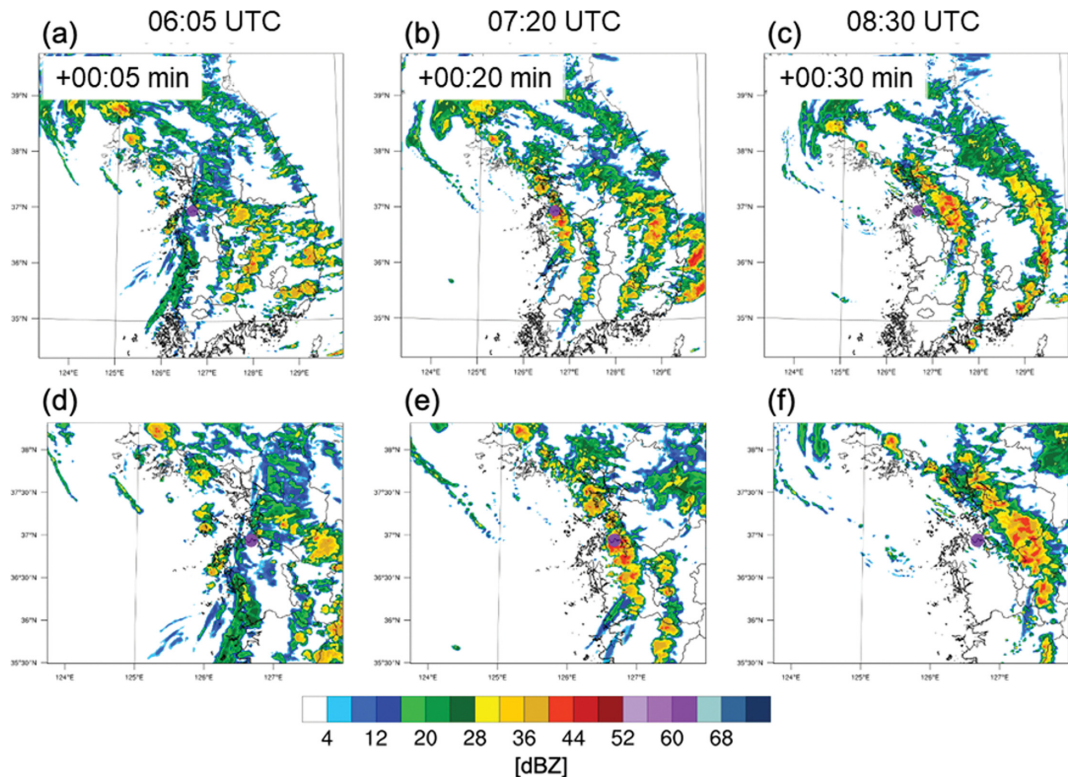


Fig. 11. Same as Fig. 8 except for WRF CTL D02 experiment. The time-lag between CTL and observation are noted.

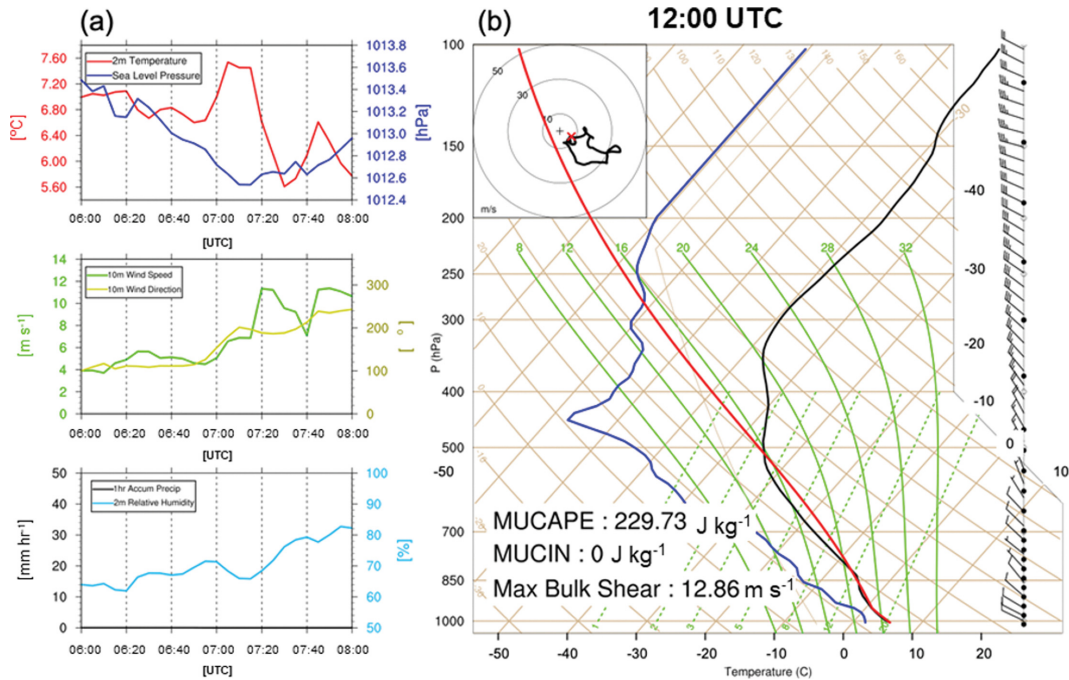


Fig. 12. Same as Fig. 10 except for WRF CTL D02 experiment.

3.3.2 돌풍 전선(Gust front) 분석

D02의 관측자료 검증을 토대로 당진 인근의 CTL 실험 D03를 살펴보았다. 0700~0710 UTC에 충남북부 서해안 주위로 서해상에서 발달하기 시작한 강한 바람시어(Fig. 13a)가 접근하였다. 0700 UTC 이전에 당진의 남서쪽에서 발달한 구름대가 접근하며 0710 UTC 이 되면 당진 부근으로 연직 바람시어의 강도가 매우 강하게 나타난다(Figs. 13b, c). 이 부근에서 풍속 또한 급격하게 변화하였다. 이를 통해 당진 부근에는 돌풍 전선(Gust front)이 형성된 것을 확인할 수 있다. 0~3 km 상대와도 최대구간(Figs. 13d-f)이 나타나며 온위가 낮은 구간(Figs. 13g-i)이 발생하였고, 시간이 지남에 따라 내륙으로 유입되며 영역이 점차 확장하였다. 당진 인근에 위치한 아미산(고도 350 m, Fig. 13g 검은 삼각형) 부근의 풍하측에서 온위의 경도가 급격히 강화되는 지역이 0705 UTC에 나타난다(Fig. 13h). 특히 이때의 상승 속도 최댓값은 8.18 m s^{-1} , 상대와도 최댓값은 $24 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 로 나타나 주변에 비하여 매우 강한 값을 보였다. 해당 지역을 확대(Fig. 13d의 grid box)하여 연직 속도와 최대 상대와도를 살펴보면 사례일 토네이도가 시작되었을 것으로 추정되는 지역(Fig. 14c I 지점)과 토네이도의 피해가 기록된 지역(Fig. 14c J 지점, Fig. 3c 지점과 같은 위치임)보다 온위의 불연속이 위치한 지역(Fig. 14c K 지점)에서 강한 상승속도와 상대와도를 확인할 수 있었다(Figs.

14a, b). 이를 기반으로 K 지역의 동서방향 16 km (Fig. 14c 검은 실선) 연직단면을 고도 2 km까지, 0700~0710 UTC 시간 동안 확인해 본 결과, K 지역 부근으로 전면에는 강한 상승류가, 후면에는 강한 하강류(Figs. 15a-c)가 나타나는 것을 알 수 있었다. 뿐만 아니라, 종관 흐름에서 확인하였던 차고 건조한 공기의 유입(Figs. 4g-i)이 전선 후면에서 이루어지고 있었으므로 이를 확인하기 위하여 K 지역 후면으로 강한 동서바람(u-wind) 변화(Figs. 15d-f)를 살펴보았으며, 차고 건조한 공기가 유입되는 것을 온위의 불연속면을 통해 알 수 있었다(Fig. 15b). 이는 강한 바람이 유입되면서 돌풍 전선 부근에서 양의 와도가 강화되었고, 토네이도성 meso vortex가 생성될 수 있음을 나타낸다. 이러한 현상이 3.3.1에서 살펴본 바와 같이 CTL에서 과소모의 하고 있으므로, 실제 관측에서는 강도가 더욱 높았을 것으로 추정할 수 있다. 추가적으로 위에서 살펴본 meso vortex의 특성을 D04에서 1분 간격으로 살펴보고자 하였다. K 지역의 주변으로 $300 \times 300 \text{ m}$ 영역(Fig. 14c의 grid box)에 대한 상대와도의 수평 영역 최댓값의 시간변화, 연직 속도 최댓값의 시간변화, 기압 최솟값의 시간변화를 살펴보았을 때, 0702~0705 UTC 부근으로 지상에서 고도 1 km까지 상대와도의 영역 최댓값(Fig. 16a)이 매우 강하고, 그보다 상층인 500 m~2 km 부근으로 연직속도 영역 최댓값이 나타난 것(Fig. 16b)을 알 수 있다. 또한 K 지

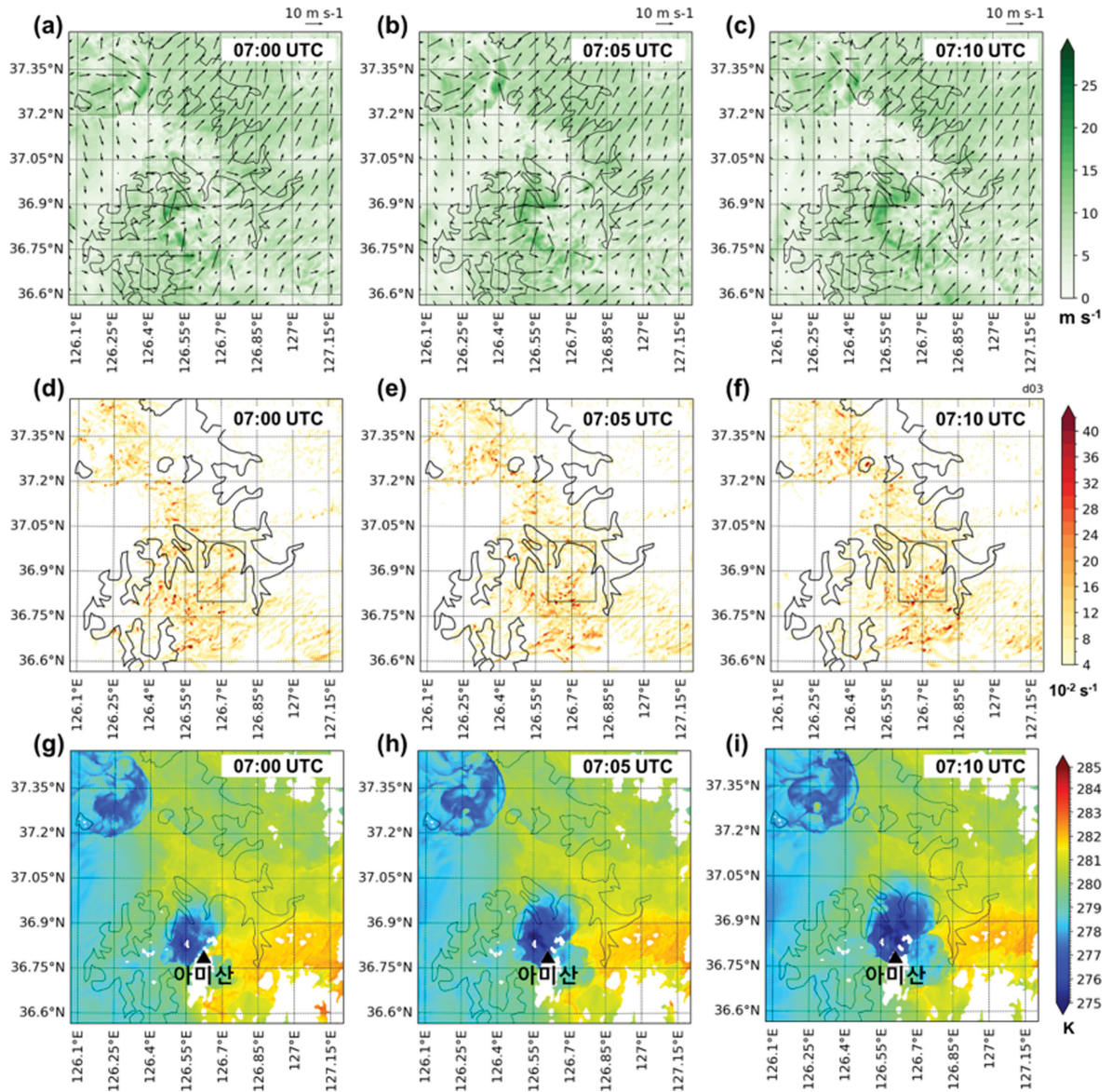


Fig. 13. (Upper) (a)–(c) Magnitude (shadings) and direction (vectors) of bulk wind shear at $z = 0\text{--}1$ km at 0700–0710 UTC, (middle) (d)–(f) max vertical vorticity at $z = 0\text{--}3$ km (shading) at 0700–0710 UTC boundary grid box for Fig. 14, and (bottom) (g)–(i) potential temperature (shading) and horizontal wind vectors at $z = 150$ m at 0700–0710 UTC, derived from the WRF model results in domain 3.

점 부근으로 고도 500 m에서의 습수가 0702 UTC를 전후하여 반시계 방향으로 회전하는 흐름이 만들어지며(Fig. 13c), 이 흐름은 0708 UTC가 되면 북쪽에서 남동진하는 습수 영역과 남쪽에서 북동진하는 습수 영역으로 둘러싸여 약해진다. 뿐만 아니라 0702 UTC의 0~1 km SRH에서는 K 지점 주위로 $400 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 이상의 높은 값을 나타내는 구역(Fig. 13d)이 위치하고

있으나, 0705 UTC 이후로는 점차 약해지는 모습을 보였다.

따라서, 본 연구에서는 K 지점 부근에서 양의 와도가 강하게 형성되고 있으며, 돌풍 전선 상에서 강한 상승 회전(spun up)으로 인하여 상대와도의 변화를 보이고 있음을 알 수 있었다. 고해상도 영역에서 K 지점 부근에서의 상대와도 시간변화에 따른 역학 강제

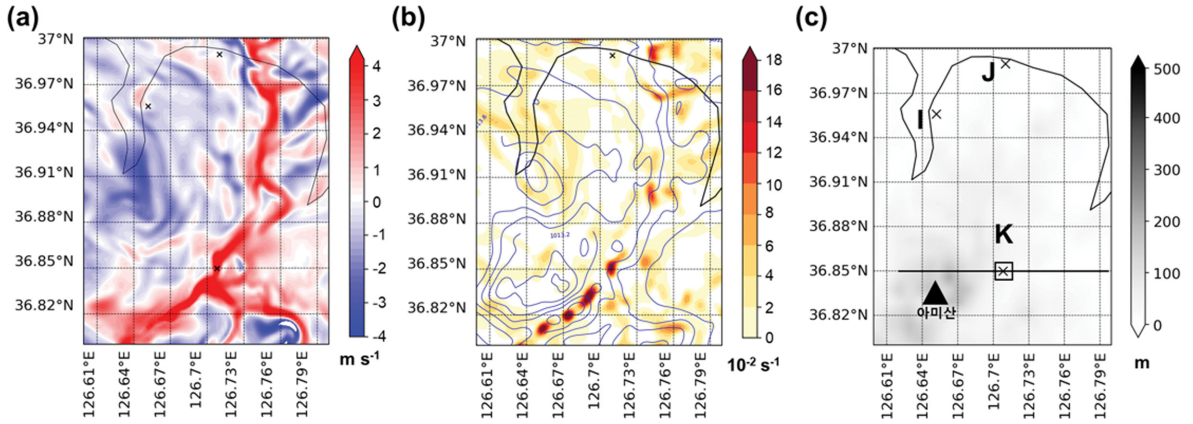


Fig. 14. WRF model results in domain 3 at 0705 UTC: (a) Vertical velocity (shading) at $z = 500$ m, (b) Relative vorticity (shading) at $z = 500$ m and sea level pressure (hPa: contour), and (c) terrain and location I, J, and K with East-West oriented cross-section line for Fig. 15, 300×300 m boundary grid box for Fig. 16c and d.

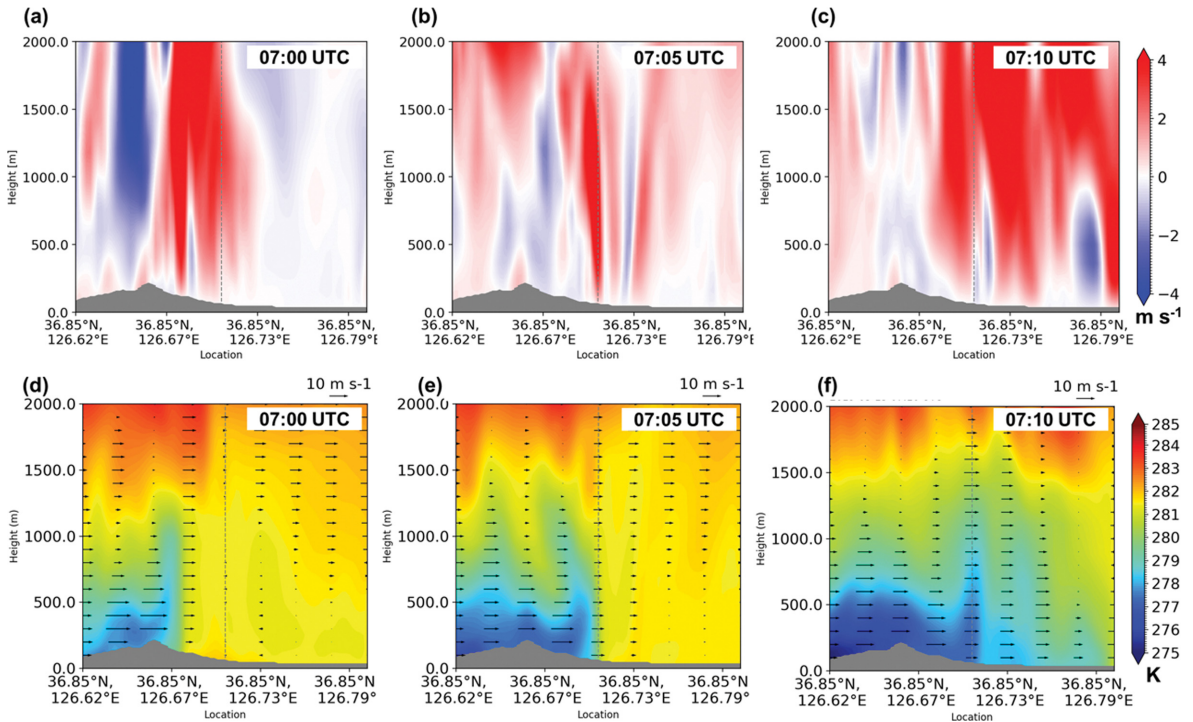


Fig. 15. East-West oriented vertical cross-sections for (upper) (a)-(c) vertical velocity (shading) and (bottom) (d)-(f) potential temperature (shading) horizontal wind (black line), derived from WRF model results in domain 3 at 0700–0710 UTC.

력 분석을 통하여 토네이도 발생 시의 패턴을 알아보고자 하였다.

3.3.3 연직 와도 수지(Vorticity budget) 분석

상대와도의 시간 변화에 대한 방정식은 Eq. 4와 같

이 나타난다. Eq. (4)에서 좌변은 상대와도의 시간변화율을 나타내며 우변의 첫 번째 항은 상대와도의 이류(Advection), 두 번째 항은 행성와도의 이류, 세 번째 항은 절대와도의 수렴(Convergence), 네 번째 항은 툴링(Tilting), 다섯 번째 항은 솔레노이드(Solenoid)이

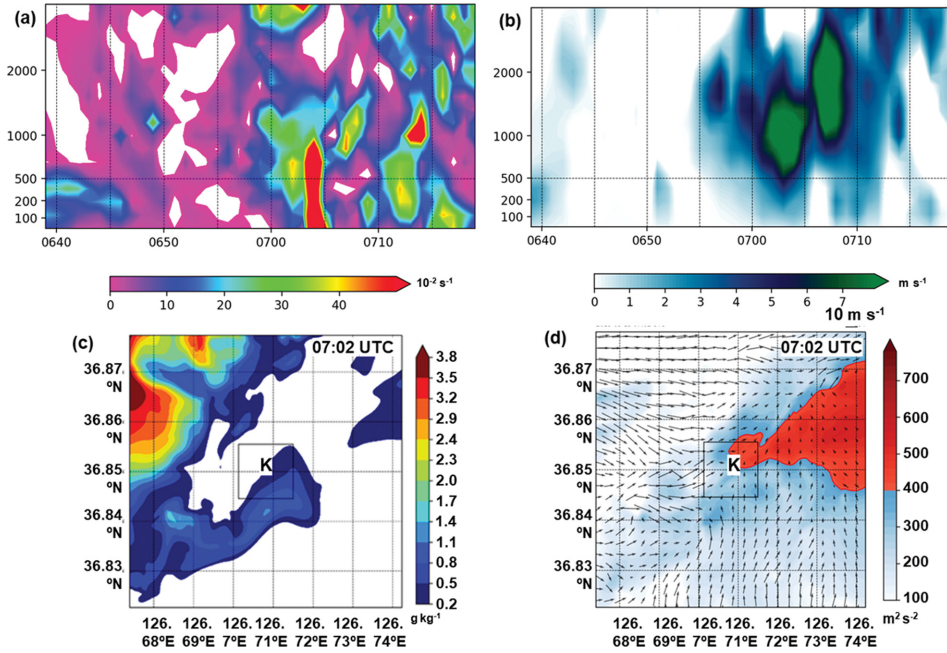


Fig. 16. Time-height cross-sections of (a) area max relative vorticity, (b) area max vertical velocity, and (c) mixing ratio ($> 0.2 \text{ g kg}^{-1}$) and (d) SRH at $z = 0\text{--}1 \text{ km}$ (shading, $>100 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$) with horizontal wind at 0702 UTC in domain 4.

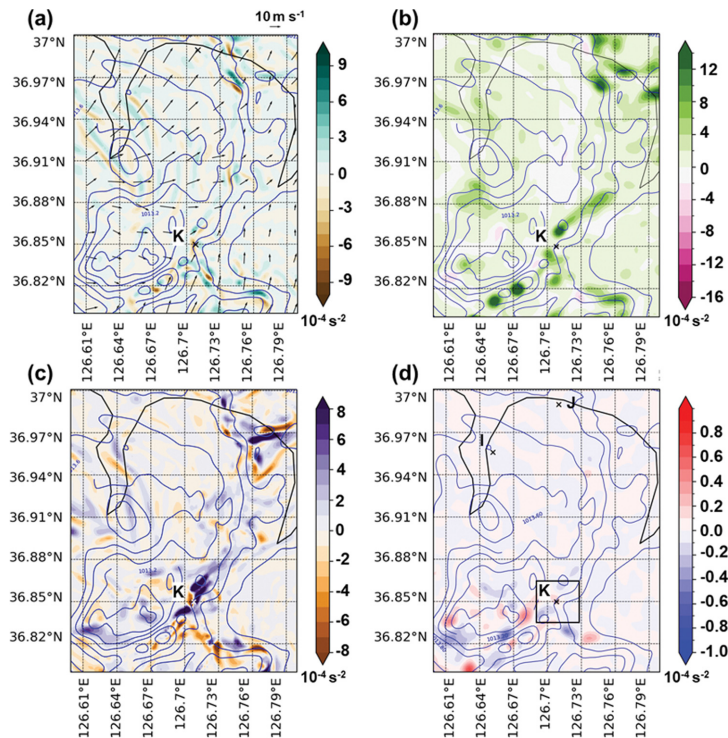


Fig. 17. Vertical vorticity budget for (a) advection term, (b) convergence term, (c) tilting term, and (d) solenoid term with surface pressure (blue contour) at 0705 UTC in domain 3 at $z = 500 \text{ m}$, $1.2 \times 1.2 \text{ km}$ boundary grid box for Fig. 18.

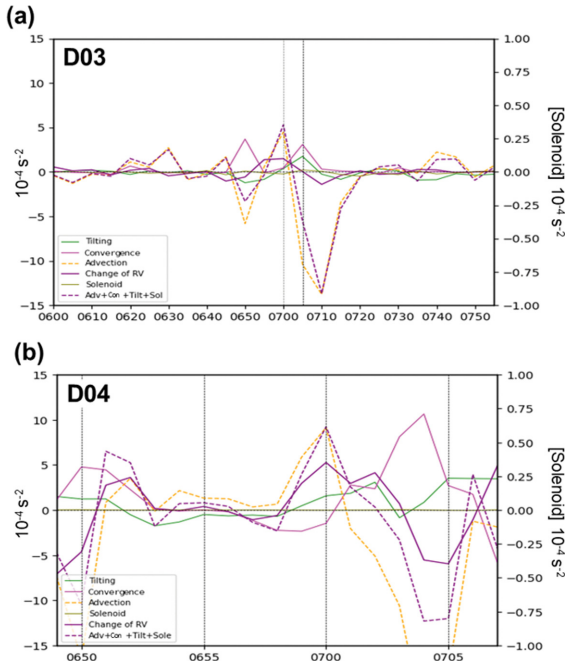


Fig. 18. Time series of vertical vorticity budget equation averaged over the area (1.2×1.2 km) around point K in (a) domain 3: 0600–0800 UTC and (b) domain 4: 0655–0706 UTC. Here, green, magenta, orange, olive, purple, and purple dashed lines are tilting term, convergence term, advection term, solenoid term, change of relative vorticity, and the sum of advection, convergence, tilting and solenoid term, respectively.

다. 선행연구(Tochimoto and Niino, 2022)에 따르면 토네이도가 발생할 때 수렴과 틸팅 항이 강한 값을 나타낸다. 이를 K 지점에서 확인하기 위하여 D03에서 K 지점을 중심으로 고도 500 m에서 이류, 수렴, 틸팅, 솔레노이드 항을 살펴보았다. 0705 UTC 이전에는 K지점이 돌풍 전선 전면에 위치하여 양의 와도 이류에 들어 있었으며, 이후에는 돌풍 전선 후면에 위치하여 음의 와도 이류 지역(Fig. 14a)에 들어있었다. 또한 이와 동시에 K 지점은 수렴 영역(Fig. 14b)에 들어 있었으며, 수평면에서의 틸팅 항(Fig. 14c)이 주변 지역에 비하여 매우 강하게 나타나는 것을 확인하였다. 솔레노이드 항(Fig. 14d)의 경우 주변지역과 비슷하거나 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서, 선행연구와 마찬가지로 당진에서 재현된 토네이도성 흐름 또한 틸팅과 수렴 항이 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\left(u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} + w \frac{\partial \zeta}{\partial z}\right) - v \frac{\partial f}{\partial y} - (\zeta + f) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right)$$

$$-\left(\frac{\partial w \partial v}{\partial x \partial z} - \frac{\partial w \partial u}{\partial y \partial z}\right) + \frac{1}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho \partial p}{\partial x \partial y} - \frac{\partial \rho \partial p}{\partial y \partial x}\right) \quad (4)$$

또한 K 지점을 중심으로 1.2×1.2 km의 영역(Fig. 17d)를 설정하여, 영역 안에서의 평균적인 와도 변화 방정식 항들의 시간 변화를 살펴보았다. D03 (Fig. 14e)에서 모의된 결과에서는 0705 UTC 전후로 수렴과 틸팅 항이 동시에 높은 값을 나타냈다. 와도 이류는 음의 값으로 나타났으며, 솔레노이드 항은 낮은 값을 보여 차이가 크지 않았다. 이를 D04의 범위(Fig. 14f)에서 모의한 결과를 살펴보면, 0700~0706 UTC에 수렴 항 값과 틸팅 항 값이 양의 변화를 보였다. 이를 통해 토네이도성 흐름이 나타나기 위해서 수렴과 틸팅 항의 값이 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 한반도의 토네이도 관측 자료를 2014년부터 2021년까지 14년간 수집하고, 이를 지역별, 월별 분포로 나누었다. 이를 통해 토네이도가 비교적 자주 발생한 인천, 경기, 충남 지역(10회)에서의 토네이도 발생 사례 중 피해가 발생한 때의 분석이 필요함을 알 수 있었다. 관측된 사례 중 비교적 최근에 피해가 보고된 사례인 당진 지역에서 2019년 3월 15일 발생한 토네이도 사례에 대한 기상 조건을 바탕으로 WRF 수치모델 모의를 통하여 중규모 및 중규모 메커니즘을 분석하였다.

발생 당시 한반도는 대기 상층과 중층(200, 500 hPa)의 기압골 중심에 위치하고 점차 서해상을 지나며 후면에서 강한 하강 기류가 발달하였으며 이는 강한 건조역의 유입과 함께 전선과 comma 구름을 강화하였다. 전선과 구름의 유입으로 인하여 대기 하층부터 지상까지 강한 기온경도가 발생하였으나, 강수량은 적어 지상의 온도 변화가 상층의 대기로부터 유래한 것임을 알 수 있었고, 전선의 후면에서 유입된 강한 건조역은 전선 전면에서의 지상 상승류를 강화하여 토네이도 발생을 유발하였다. 특히 Q-벡터를 통한 역학적 강제력(Q_n 와 Q_s)을 분석한 결과 발해만 기압골 전면과 후면에서 발달하는 상승과 하강을 파악할 수 있었고, PVU 면 분석을 통해 기압골 후면의 차고 건조한 공기가 대기 하층까지 침강하였다는 것을 파악하였다. 또한, 서해의 북서 기류를 따라 경기만, 그리고 충남 북부 서해안까지 도달하였으며, 이러한 종관적 기상상황이 토네이도 발생의 주요한 원인이 되었다. 발생 장소 부근의 AWS 관측값 중 가장 강한 순간 최대풍속은 20.8 m s^{-1} 였으며(도리도, 0652 UTC), 보고된 피해 상황으로는 EF0의 토네이도 강도를 나타냈다. D02에서 모의한 결과 WRF 실험의 한랭 전선 이

동 및 돌풍 발달이 잘 모의되었으며 이를 백령도 지점에서의 고층 관측자료(Fig. 10b)와 모델 모의 자료(Fig. 12b)를 비교해 보면 대기 연직구조 또한 잘 모의한 것을 알 수 있었다. 그러나 토네이도 관측 지점의 인근인 도리도 지점의 지상 관측자료(Fig. 10a)와 모델 모의 자료에서 나타난 온도 하강, 풍속 상승 경향(Fig. 12a)은 WRF 실험이 실제 관측 값보다 절반 정도에 미치는 등 과소 모의된 것을 알 수 있었다.

D03에서는 모의된 한랭전선이 발달하여 다가오면서 강한 연직속도와 상대와도, 온위 불연속이 나타난 것을 알 수 있었다. 이 온위 불연속(Figs. 13g, h, and i)은 돌풍 전선의 경계를 판단하는 기준이 될 수 있다. 동서방향 연직단면(Fig. 14)을 살펴보았을 때 그 경계면에서 강한 연직 상승, 전선 후면으로는 연직 하강류가 나타났다. 특히 이때의 상승 속도 최댓값은 8.18 m s^{-1} , 상대와도 최댓값은 $24 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 로 나타났다. 전선 후면에서의 차고 건조한 공기 유입을 확인하기 위하여 동서 성분의 수평 바람을 분석한 결과 0700~0705 UTC 부근으로 토네이도 발생으로 추정되는 지역의 서쪽에서 동쪽으로 풍속이 급격하게 변하는 구간이 나타났으며, 그 높이는 1 km에서 500 m로 지상에서 그리 높지 않은 대기하층에서 일어나는 것을 파악하였다. 또한 1분 간격으로 살펴본 수치모델 결과에서 x-z 및 time-z 단면을 살펴보았을 때 발생 지역 인근의 평균 상대와도가 0700~0705 UTC 시각 1 km 이하에서 매우 강하게 나타났으며, 같은 시간 해당 지역 부근에는 국지 저기압이 나타나 토네이도 발생을 유추할 수 있었다. 뿐만 아니라 와도 방정식에서 각각의 항을 시간 변화로 나타낸 결과 킬링과 수렴 항의 값이 발생 시간 전후 약 5분간 강하게 나타나는 것을 알 수 있었다.

CTL 실험이 과소모의 경향을 보임에 따라, 실제 나타난 토네이도의 사례보다 조직적이고 강한 토네이도를 나타내지는 못하였으나 그럼에도 불구하고 충분히 강한 기온, 풍속, 와도 경향을 나타낸 것 또한 파악할 수 있었다. 이를 통하여 본 연구에서 분석한 사례인 2019년 3월 15일 당진 토네이도 사례는 조직적으로 발달한 QLCS 등과 같은 현상을 동반하지 않았음에도 불구하고 상층에서 하강하는 강한 건조역이 동반될 경우 한랭전선 상에서 유의미한 인적, 물적 피해를 입힐 수 있는 강도의 토네이도가 발생할 수 있음을 보여주고 있다.

본 수치모델실험 결과, 종관 및 중규모 대류계 및 지상 전선에 대한 모의는 성공적이었으나, 고해상도 모델 모의 결과에서 지면 근처 연직 시어가 실제 관측 대비 과소 모의됨으로써, 실제와 비슷한 수준의 강한 토네이도성 와도까지는 모의되지 않았음을 확인하였다. 이는 선행연구(e.g., Kim and Chun, 2012)에서

밝힌 바와 같이 모델의 초기 조건에 따른 물리 모수화 설정 및 토네이도성 돌풍 발생 지역에서의 모델 해상도에 따른 영향을 강하게 받는 것을 확인하였다. 현재까지는 기록된 토네이도 사례가 많지 않아 적절하게 사용할 수 있는 가이던스 마련이 쉽지 않은 상황이므로, 이에 대한 추가적인 사례 수집과 분석을 통한 연구가 필요하다.

감사의 글

논문의 질을 향상시키는데 많은 도움을 주신 두 명의 심사위원 분들께 진심으로 감사드립니다. 또한, 논문의 작성을 위해 많은 도움을 주신 서울대학교 지구환경과학부 백종진 교수님, 손석우 교수님께 감사를 드립니다. 그리고, 서울대 예보분석응용실험실 동료분들과 기상청 총괄예보관의 허진호 수석 전문관님 이하 동료분들께도 감사의 인사를 드립니다. 이 연구에 참여한 김정훈 교수와 박이준 연구원의 연구 재원은 기상청 국립기상과학원 「위험기상 분석 및 예보 기술 고도화」(KMA2018-00121)와 기상청 「위험기상 선제대응 기술개발사업」(RS-2023-00233640)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Agee, E., and E. Jones, 2009: Proposed conceptual for proper identification and classification of tornado events. *Wea. Forecasting*, **24**, 609-617, doi:10.1175/2008WAF2222163.1.
- Chen, F., and J. Dudhia, 2001: Coupling an advanced land Surface-Hydrology model with the penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 569-585, doi:10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2.
- Chen, J., X. Cai, H. Wang, L. Kang, H. Zhang, Y. Song, H. Zhu, W. Zheng, and F. Li, 2018: Tornado climatology of China. *Int. J. Climatol.*, **38**, 2478-2489, doi:10.1002/joc.5369.
- Coleman, T. A., and P. G. Dixon, 2014: An objective analysis of tornado risk in the United States. *Wea. Forecasting*, **29**, 366-376, doi:10.1175/WAF-D-13-00057.1.
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a meso-scale Two-Dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3077-3107, doi:10.1175/1520-0469(1989)046<3077: NSOCOD>2.0.CO;2.
- Edwards, R., J. G. LaDue, J. T. Ferree, K. A. Scharfenberg, C. Maier, and W. L. Coulbourne, 2010: The

- enhanced Fujita scale: Past, present, and future. Preprints. *25th Conf. on Severe Local Storms, Denver, CO, Amer. Meteor. Soc.*, 4A.1, 9 pp [Available online at <https://www.spc.noaa.gov/publications/edwards/efmtg.pdf>].
- Fujita, T. T., 1971: *Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity*. SMRP Research Paper 91, University of Chicago, Chicago, 42 pp.
- Hersbach, H., and Coauthors, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1999-2049, doi:10.1002/qj.3803.
- Holton, J. R., and G. J. Hakim, 2013: *An introduction to dynamic meteorology*. Vol. 88, Academic press, 600 pp.
- Hong, S., and J. Lim, 2006: The WRF Single-Moment 6-Class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteor. Soc.*, **42**, 129-151.
- _____, 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.
- Hoskins, B. J., and M. A. Pedder, 1980: The diagnosis of middle latitude synoptic development. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **106**, 707-719, doi:10.1002/qj.49710645004.
- Houze, R., 1993: *Cloud Dynamics*. Academic Press, 573 pp.
- Iacono, M. J., J. S. Delamere, E. J. Mlawer, M. W. Shepard, 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.
- In, S.-R., S.-P. Jung, J. Shim, and B.-C. Choi, 2016: A Mechanism analysis of landspout generation occurred over Ilsan on June 10 2014 using a numerical model. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, **37**, 187-199, doi:10.5467/JKESS.2016.37.4.187 (in Korean).
- JMA, 2015: *Guidelines for the Japanese Enhanced Fujita Scale*. Japan Meteorological Agency, 113 pp [Available online at https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/kaisetsu/guideline_en.pdf].
- Kain, J. S., 2004: The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update. *J. Appl. Meteorol.*, **43**, 170-181, doi:10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2.
- Kim, J.-H., and H.-Y. Chun, 2012: A numerical simulation of convectively induced turbulence above deep convection. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **51**, 1180-1200, doi:10.1175/JAMC-D-11-0140.1.
- Kim, K. S., 1992: *Encyclopedia of Meteorology*. Hyangmunsa, 734 pp (in Korean).
- Krocak, M. J., and H. E. Brooks, 2018: Climatological estimates of hourly Tornado probability for the United States. *Wea. Forecasting*, **33**, 59-69, doi:10.1175/waf-d-17-0123.1.
- Lee, S. H., and J. B. Lee, 2015: A case study of tornadoes in Korea during the last 5 years. *Proceedings of the Autumn Meeting of KMS, Korean Meteorological Society*, 714-716 (in Korean).
- _____, W. J. Lee, and W. S. Oh, 2019: *The reason why the iron roof of the Dangjin Steel Mill was blown away was due to a 'Yong-o-reum'... Does it become more frequent?* [Available online at <https://news.zum.com/articles/51215269>] (in Korean).
- Lee, S. Y., S. K. Park, Y. Xing, and C. J. Kim, 2016: A numerical study on the Goyang Tornado in 10 June 2014 for high resolution WRF model simulation. *Proceedings of the Autumn Meeting of KMS, Korean Meteorological Society*, 920-921 (in Korean).
- Lee, Y. G., 2019: Local wind and water accidents and our attitude of preparation. *Korean Fire Protection Association webzine*, [Available online at <https://www.kfpa.or.kr/webzine/201909/sub/disasters2.html>] (in Korean).
- 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. Atmos.*, **102**, 16663-16682, doi:10.1029/97JD00237.
- Orlanski, I., 1975: A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **56**, 527-530, [Available online at <http://www.jstor.org/stable/26216020>].
- Park, C., S.-W. Son, and J.-H. Kim, 2021: Role of baroclinic trough in triggering vertical motion during summertime heavy rainfall events in Korea. *J. Atmos. Sci.*, **78**, 1687-1702, doi:10.1175/JAS-D-20-0216.1.
- Tochimoto, E., and H. Niino, 2022: Tornadogenesis in a Quasi-Linear convective system over kanto plain in Japan: A numerical case study. *Mon. Wea. Rev.*, **150**, 259-282, doi:10.1175/MWR-D-20-0402.1.
- Wang, S., X. Qiao, J. Min, and X. Zhuang, 2019: The impact of stochastically perturbed parameterizations on tornadic supercell cases in East China. *Mon. Wea. Rev.*, **147**, 199-220, doi:10.1175/MWR-D-18-0182.1.