

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

• 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건 을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer 🖃





이학석사 학위논문

2019년 3월 15일 한반도 발생 토네이도 사례의 종관 분석 및 중규모 메커니즘 연구

A Study on Synoptic Analysis and Mesoscale Mechanism for Tornado in South Korea on 15th March 2019

2023년 8월

서울대학교 대학원 지구환경과학부 대기과학전공 변 가 영

2019년 3월 15일 한반도 발생 토네이도 사례의 종관 분석 및 중규모 메커니즘 연구

지도교수 김 정 훈

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함 2023년 5월

서울대학교 대학원 지구환경과학부 대기과학전공 변 가 영

변가영의 석사 학위논문을 인준함 2023년 7월

위 원 장 <u>백 종 진 (인)</u> 부위원장 <u>김 정 훈 (인)</u> 위 원 손 석 우 (인)

초 록

전 세계에서 급격히 발달하여 피해를 주는 기상현상 중 하나인 토 네이도는 한반도에서 최근 관측이 늘어나고 있다. 2008년에서 2021년까 지 조사한 한반도 발생 토네이도의 총횟수는 22번이었으며, 본 연구에서 는 큰 피해를 발생시킨 2019년 3월 15일 충청남도 당진에서 15시 50분 부터 16시 40분 경까지 발생한 토네이도 사례를 고해상도 수치모델을 통 해 분석하였다. 수치 실험은 토네이도 발생 지점을 포함하여 수평격자 5, 1, 0.2, 0.05 km인 영역을 사용하였으며, 연직해상도는 112개의 혼합층 으로 연직 최상층을 20 hPa까지 구성하였다. 영역 1의 모델 모의 결과를 비교하였을 때, 대부분의 기압계 흐름이 일치하는 것을 확인하였다. 지 상에서 저기압의 발달은 30분 ~ 1시간 정도 느리게 진행되었으며, 300 hPa의 상층제트가 20 kts 정도 약한 것을 알 수 있었으며, 500 hPa ERA5 재분석장에서 산출된 PV의 흐름과 실험에서 산출된 흐름 및 연직 단면은 대체로 일치하였으나 실험에서 1시간 늦게 전개되는 것을 확인하 였다. 영역 2에서는 선행연구에서 논의된 토네이도 발생 조건에 부합하 는 0-1km SRH, CAPE 값이 나타났으며, 발생 지역 주변으로 벌크 윈드 시어가 강하게 나타나며 변화하였다. 영역 3과 영역 4에서는 돌풍 전선 (gust front) 분석과 vorticity 분석을 통하여 토네이도 발생 조건을 확인 하였다. 분석 결과 이번 사례는 돌풍 전선의 전후면에서 나타나는 강한 상승과 하강으로 인해 발생하는 gustnado와 유사한 형태의 토네이도라는 것을 파악할 수 있었으며, 이러한 현상이 발생하기 위한 조건 분석을 위해 와도 예산 분석을 수행한 결과 토네이도 현상의 발생에 강한 틸팅과 발산이 발생해야 한다는 것을 알 수 있었다.

주요어 : 토네이도, 중규모기상, 돌풍 전선, WRF, 와도

학 번: 2021-24468

목 차

| 제 | 1 장 서론 | 1 |
|---|------------------------------|----|
| | 제 1 절 연구 개요 | 1 |
| | 제 2 절 해외 토네이도 경보 발표 기준 | 2 |
| | 제 3 절 선행연구 | 6 |
| | 1. 해외 선행연구 | 6 |
| | 2. 국내 선행연구 | 12 |
| | 제 4 절 연구 동기 및 목표 | 12 |
| | | |
| 제 | 2 장 자료 수집 및 연구 방법 | 15 |
| | 제 1 절 자료 수집 | 15 |
| | 1. 토네이도 관측 자료 | 15 |
| | 2. 종관 및 중규모 기상 분석 자료 | 16 |
| | 3. 한반도 토네이도 발생 기록 | 16 |
| | 제 2 절 사례 지역 관측 환경 | 20 |
| | 제 3 절 실험 설계 | 24 |
| | | |
| 제 | 3 장 실험 결과 | 28 |
| | 제 1 절 종관 규모 분석 | 28 |
| | 제 2 절 중규모 기압계 분석 | 38 |
| | 제 3 절 토네이도 형성 과정 | 44 |
| | 1. Gust front 분석 ····· | 44 |
| | 2. Vorticity budget 분석 ····· | 57 |
| | | |
| 제 | 4 장 요약 및 결론(| 63 |

| 참고문헌 | •••••• | 65 |
|----------|--------|----|
| Abstract | •••••• | 71 |

표 목 차

| [Table 1.] Tornado alerts of USA (NOAA) | 4 |
|---|-------|
| [Table 2.] Tornado alerts of JAPAN (JMA) | 4 |
| [Table 3.] Fujita Scale, 2.237 m/s = 1 mile/h (Fujita, | 1971) |
| ••••••••••••••••••••••••••••••••••••••• | 9 |
| [Table 4.] Enhanced Fujita Scale (Edwards et al., 2010) | 9 |
| [Table 5.] Japanese Enhanced Fujita Scale (JMA, 2015) | 11 |
| [Table 6.] WRF - ARW Settings | 27 |

그림 목차

| [Figure 1.] Tornado warnings by European National Hydro- |
|---|
| Meteorological Services (circles). The countries that don't issue |
| tornado warnings are denoted by a square. (Rauhala and |
| Schultz,2009) 5 |
| [Figure 2.] 기상청 일기상 통계표의 토네이도 기록 (2020. 10. 16. 47152 울산) |
| [Figure 3.] 연도별, 월별, 지역별 토네이도 발생 횟수 (2008 -2021) |
| [Figure 4.] 당진 토네이도의 추정 관측 경로(이영규, 2019)22 |
| [Figure 5.] Radar HSR at 16:00 KST 22 |
| [Figure 6.] COMS at 16:00 KST23 |
| [Figure 7.] Radar C-max on 1550, 1600 KST at Mang-il san radar 23 |
| [Figure 8.] WRF - ARW domain setting 26 |
| [Figure 9.] KMA reanalysis weather chart of sea level pressure (left), Domain $1(\Delta x = 5 \text{ km})$ sea level pressure (right) at 0600 UTC 32 |
| [Figure 10.] Domain 1 Sea level pressure at 0700 UTC ··· 32 |
| [Figure 11.] KMA reanalysis weather chart of 850 hPa gpm (blue line), temperature (red dashed line), T-Td (green dots) (left), Domain 1 (Δx = 5 km) 850 hPa gpm (blue line), |
| temperature (rad dashed line), T-Td (green shading), low level |

| (right) at 0600 UTC |
|---|
| [Figure 12.] Same contours of Figure 10 right at 0700 UTC |
| 33 |
| [Figure 13.] KMA reanalysis weather chart of 300 hPa gpm (blue line), temperature (red dashed line), Strong wind (green dots, $>$ 75 kts) (left), Domain 1 (Δx = 5 km) 300 hPa gpm (blue line), temperature (rad dashed line), Strong wind (shading, $>$ 75 kts), (right) at 0600 UTC 34 |
| [Figure 14.] ERA5 reanalysis 500 hPa gpm (blue line), temperature (red dashed line), PVU (shading, $>$ 1.5), horizontal wind (left), Domain 1 (Δx = 5 km) same contours at 0700 UTC 35 |
| [Figure 15.] Domain 1 (Δx = 5 km) same contours with Figure 14 at 0800 UTC |
| [Figure 16.] South-North cross line for PVU |
| [Figure 17.] ERA5 S-N cross line PVU (shading), potential temperature (black line), u - w ind (red line) at 0700 UTC \cdots 36 |
| [Figure 18.] Domain 1 S-N cross line PVU (shading), potential temperature (black line), u - w ind (red line) at 0700 - 0900 UTC \cdots 37 |
| [Figure 19.] SRH 0-1 km (shading, m2s-2), lowest level horizontal wind (vector) (left), CAPE (shading, Jkg-1) (right), domain 3 range (yellow box) at 0655 UTC 41 |
| [Figure 20.] SRH 0-1 km (shading), (left), CAPE (shading) (right), |

| [Figure 21.] Bulk wind shear 0-1 km (vector), sea level pressure (dodge blue line), tornado observed region (red circle) 42 |
|---|
| [Figure 22.] Hodograph, SkewT-logP diagram 0700 - 0725 UTC at Dang-jin Area |
| [Figure 23.] Domain 3 (Δx = 200 m) Radar reflectivity (> 30 dBZ, shading), vertical velocity (black line > 0, black dashed line < 0), horizontal wind at z = 500 m. x-mark is tornado started place (right), damage reported (upper) and bow echo spawning(lower) place. Time from 0700 UTC to 0715 UTC. |
| [Figure 24.] Domain 3 (Δx = 200 m) max relative vorticity 0-3 km. Time from 0700 UTC to 0715 UTC |
| [Figure 25.] Domain 3 (Δx = 200 m) potential temperature and horizontal wind at z = 150 m. Time from 0700 UTC to 0715 UTC. |
| [Figure 26.] (a) Vertical velocity (shading) ($z = 500$ m) (b) Relative vorticity, see level pressure (hPa) ($z = 500$ m) (c) Cmax (0-3 km, > 37 dBZ), horizontal wind ($z = 500$ m) at 0705 UTC 51 |
| [Figure 27.] Terrain (shading), West-East cross lines for cross section 52 |
| [Figure 28.] (a) Vertical velocity (shading), Cloud + ice (black line), potential temperature (red line), freezing level (horizontal dashed black line) (b) y -component of relative vorticity |

| (shading), potential temperature (red line), <i>u-w</i> wind (vector) |
|--|
| [Figure 29.] Time series of area max relative vorticity from (60 ~ 3000 m) 54 |
| [Figure 30.] Time series of area max vertical velocity (60 ~ 3000 m) ————————————————————————————————— |
| [Figure 31.] Time series of change of area minimum pressure $(60 \sim 3000 \text{ m})$ ———————————————————————————————————— |
| [Figure 32.] Domain 4 mixing ratio (> 0.2 g/kg) at 0702 - 0708 UTC |
| [Figure 33.] Domain 4 SRH 0-1 km (> 100) at 0702 UTC56 |
| [Figure 34.] Black square: mean area near point K at domain 3 |
| [Figure 35.] 0700 - 0710 UTC: Advection term, horizontal wind at z = 500 m, sea level pressure |
| [Figure 36.] 0700 - 0710 UTC: Divergence term at z = 500 m, sea level pressure |
| [Figure 37.] 0700 - 0710 UTC: Tilting term at z = 500 m, sea level pressure 60 |
| [Figure 38.] 0700 - 0710 UTC: Solenoid term at z = 500 m, sea level pressure 61 |
| [Figure 39.] Vorticity budget time series (a) domain 3:0600 - 0800 UTC, (b) domain 4:0655 - 0706 UTC, red line: tilting term, pink line: divergence term, yellow line: advection term, green line: solenoid term, dashed lines: change of relative |

vorticity, absolute vorticity ------ 62

수식 목차

| [수식 1.] | 30 |
|---------|--------|
| [수식 2.] | 38 |
| [수식 3.] | 38 |
| [수식 4.] | 46 |
| [수식 5.] | 57 |

제 1 장 서론

제 1 절 연구 개요

토네이도(Tornado, 용오름)는 전 세계에서 '급격하게 발달하여 피해 를 주는 기상현상'으로 보고되고 있다. 미국의 해양대기청 (NOAA)에서 는 토네이도를 "A violently rotating column of air touching the ground, usually attached to the base of a thunderstorm." 으로 정의하고 있으며, 대한민국에서는 "강한 바람에 의해 지표면으로부터 말아 올리는 모래면 지 및 지상 물체의 파편, 수면으로부터의 물방울 등을 수반하는 강한 소 용돌이를 말하며, 한국에서는 용오름으로 주로 부른다. (김광식, 1992)" 고 정의한다. 토네이도는 일반적으로 강한 뇌우의 아래에서 발생하는 슈 퍼셀 토네이도(Supercell tornado)와 주로 준선형대류계시스템 (Quasi-Linear Convective Systems, QLCS)의 주변에서 발생하는 비슈퍼셀 토네이도(Non-supercell tornado), 그 밖의 원인을 가진 토네이도성 와도 (Tornado-like vorticities)로 나뉠 수 있다. 또한 토네이도성 와도에는 Landspout, Waterspout, Gustnado, Dust devil, Firenado 등의 현상이 포 함된다(Agee and Johns, 2008). 그러나 한반도 주변에서 발생하는 현상은 정확한 원인을 구분하지 않고 '용오름'으로 통칭하여 기록하고 있다. 토네이도는 한반도에서는 비교적 관측하기 힘든 현상 중 하나로 생각되 었으나, 영상촬영기기 해상도 및 위성, 레이더 정밀도 향상 등으로 인해

최근 한반도에 관측되는 토네이도 사례가 늘어나면서 토네이도에 관한 대중들의 관심도 증대되었다.

제 2 절 해외 토네이도 경보 발표 기준

해외의 경우 토네이도 현상이 빈번한 국가에서는 토네이도 경보 시스 템이 잘 갖춰져 있다. 미국에서는 폭풍예측센터(Storm Prediction Center) 에서 넓은 범위의 지역의 토네이도 가능성을 Tornado watch 정보를 통 해 발표하고 있다. Tornado watch의 범위는 일반적으로 군(county) 또는 주(State) 단위로 발표한다. 토네이도가 목측으로 관측되거나 레이더로 관측될 가능성이 있는 경우(Table 1) 지역 기상 서비스 센터(NWFO)에서 해당하는 지역에 Tornado warning을 발표한다. 주 정부에서는 이 경보가 발표될 경우 주민들의 대피를 권고하고 있다. 이후 Tornado warning이 강화되면 Tornado Emergency를 발표하고, 주민 대피 및 재해 대응 작업 을 시행한다. 일본(Table 2)의 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. 중국에서는 기상레이더와 기상위성을 통하여 원격감시를 실시 간으로 수행하고, 토네이도가 예상되기 30분 전에 정보를 발표하는 작업

을 수행한다. 또한 유럽에서는 약 31%의 국가가 토네이도 경보를 발표하고 있으며, 그 기준은 국가마다 차이가 있다(Figure 1). 선행연구 (Grieser and Haines, 2020)에 따르면 2005년에서 2019년 사이에 유럽 인근에서 관측된 토네이도 중 육지에 닿은 토네이도는 약 3792개에 이른다.

| Level | Definitions | Organization |
|----------------------|---|---------------------------------|
| Tornado Watch | Severe thunderstorms and tornadoes are possible Winds of 58 mph or higher | SPC: Storm Prediction Center |
| Tornado Warning | a tornado is imminent (Observation / Radar) | NWFO: Local National Weather |
| Tornado Emergency | enhanced version of a tornado warning | Service Office |

Table 1. Tornado alerts of USA (NOAA)

| Issue | Definitions | Contents |
|--------------|-----------------------------------|--|
| Half day ~ | A de viscovico | Risk of severe gusts such as |
| A day before | Advisories | 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. |

Table 2. Tornado alerts of JAPAN (JMA)

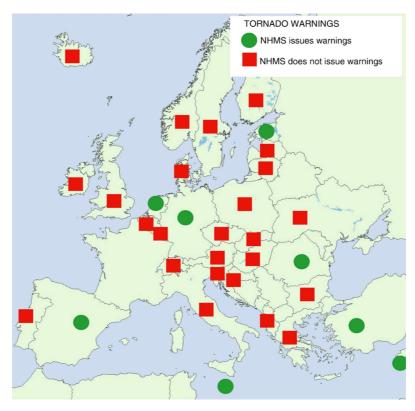


Figure 1. Tornado warnings by European National Hydro-Meteorological Services (circles). The countries that don't issue tornado warnings are denoted by a square. (Rauhala and Schultz,2009)

제 3 절 선행연구

1. 해외 선행연구

토네이도가 흔히 발생하는 미국의 경우 학계에서도 연구가 매우 활발히 이루어지고 있으며, 그 역사 또한 오래되었다. Fujita(1971)의 연구에서는 토네이도의 강도에 대한 분류(Table 3)를 수행하였으며, 그 후 Fujita Scale은 토네이도 분류법에 널리 사용되었다. 이후 Edwards et al.(2010)의 연구에서 Fujita Scale을 개선한 Enhanced Fujita Scale(EF scale, Table 4)를 통하여 토네이도를 분류하는 방법을 연구하였다. 토네이도의 발생원인은 Houze(1993)에 의해 잘 나타나고 있으며, 뿐만 아니라 토네이도 관측의 역사가 오래된 만큼, 변화하는 환경과 도시 상황에따른 토네이도 위험의 변화(Coleman and Dixon, 2014), 발생 시간별 토네이도 확률과 기후학적 연구(Makenzie et al., 2018) 등도 수행하고 있다. Agee et al.(2009)은 토네이도가 발생하는 원인에 따라 3개의 유형으로나누어, 그 안에서 세부 유형을 구분하는 토네이도 분류법을 제시하였다.

일본은 한반도와 인접한 지역에서 발생하는 토네이도에 대한 연구가이루어지고 있다. 최근 연구 중 Tochimoto(2022)에서는 일본 관동지방에서 QLCS에 의해 생성된 토네이도의 환경 특성 및 형성 과정을 관측하고 재분석자료를 통하여 고해상도 수치모델을 이용한 실험 모의를 통하여조사하는 연구를 수행하였다. 또한 일본에서는 EF Scale과 유사한

Japanese Enhanced Fujita Scale(JMA, 2015, Table 5)을 사용하면서 토네이도 강도 판단의 지역화를 수행하였다.

중국의 경우 동쪽에 대도시가 밀집해 있으므로 동쪽지역에 발생하는 토네이도에 관한 연구가 이루어지고 있다. Chen et al.(2018)은 중국에서약 50년간 관측된 토네이도 사례 중 약 76%가 FO(Fujita Scale) 또는 F1에 해당하였으며, 1.6%의 사례만이 F3이상으로 발달하였다고 기술하였다. 또한 최근 Wang et al.(2019)는 중국 동쪽지역에서 발달한 두 개의토네이도 사례에 대한 분석을 통하여 미세물리학적 분석 및 앙상블 예측시스템을 통하여 토네이도의 예측 가능성을 연구하였다. 뿐만 아니라, Chernokulsky et al.(2020)은 북부 유럽-아시아의 토네이도에 대한 통계를연구하였으며, 육지, 해상의 10세기부터 2016년까지 기록된 자료를 검토한 결과 2879개의 사례가 등록되었다.

| stimated winds | Description |
|----------------|---|
| | Light Damage. Some damage to |
| 40-72 mph | chimneys; branches broken off trees, |
| | shallow-rooted trees uprooted, sign |
| | boards damaged. |
| | Moderate damage. Roof surfaces |
| 73-112 mph | peeled off; mobile homes pushed |
| | foundations or overturned; moving |
| | autos pushed off road. |
| 113-157 mph | Considerable damage. Roofs torn |
| | from frame houses; mobile homes |
| | demolished; boxcars pushed over; |
| | large trees snapped or uprooted; light |
| | objects become projectiles. |
| 158-206 mph | Severe damage. Roofs and some |
| | walls torn from well- constructed |
| | houses; trains overturned; most trees |
| | in forested area uprooted; heavy cars |
| | lifted and thrown. Devastating damage. Well- |
| 207-260 mph | constructed houses leveled; structures |
| | with weak foundation blown some |
| | distance; cars thrown; large missiles |
| | generated. |
| | Incredible damage. Strong frame |
| | houses lifted off foundations, carried |
| 260-318 mph | considerable distances, and |
| | disintegrated; auto-sized missiles |
| | airborne for several hundred feet or |
| | more; trees debarked. |
| | 40-72 mph 73-112 mph 113-157 mph 158-206 mph 207-260 mph |

Table 3. Fujita Scale, 2.237 m/s = 1 mile/h (Fujita, 1971)

| EF Rating | 3 Second Gust (mph) | m/s |
|-----------|---------------------|-----------|
| 0 | 65-85 | 29.1~38.0 |
| 1 | 86-110 | 38.4~49.2 |
| 2 | 111-135 | 49.6~60.4 |
| 3 | 136-165 | 60.8~73.8 |
| 4 | 166-200 | 74.2~89.4 |
| 5 | Over 200 | 89.4~ |

Table 4. Enhanced Fujita Scale (Edwards et al., 2010)

| Class | Wind speed range (m/s) (3-sec average) | Primary damage (instances of damage cases for reference) | |
|-------|--|---|--|
| JEF0 | 25 to 38 | Wooden houses visibly damaged (windows broken by wind-borne debris) Roofing materials on wooden houses detached or displaced over limited areas Horticultural facility coverings (vinyl, etc.) displaced Greenhouse steel framing damaged or broken Small sheds moved or overturned / Vending machines overturned Unreinforced hollow concrete block walls damaged or largely destroyed Branches with diameters of 2–8 cm or decayed broad-leaved tree trunks snapped | |

| JEF1 | 39 to 52 | Roofing materials on wooden houses detached or displaced over relatively large areas Eaves or sheathing roofing boards on wooden houses damaged or blown away Plastic greenhouses damaged or destroyed over relatively wide region Light vehicles or ordinary vehicles (compact cars) overturned Train cars under ordinary operation overturned Pillars of ground-based standing billboards inclined or deformed Pillars of traffic signs inclined or blown over Reinforced hollow concrete block walls damaged or largely destroyed Trees uprooted or coniferous tree trunks snapped | |
|------|----------|---|--|
| JEF2 | 53 to 66 | Main frames of wooden houses deformed and walls damaged (distorted or cracked) Structural members of roof frames on wooden houses damaged or blown away Roofing materials of steel-framed warehouses detached or blown away Ordinary vehicles (minivans) or large vehicles overturned Reinforced-concrete utility poles collapsed Carport frames inclined or destroyed Reinforced hollow concrete block walls with buttresses largely destroyed Broad-leaved tree trunks snapped / Gravestones overturned or shifted | |

| JEF3 | 67 to 80 | Main frames of wooden houses severely deformed or destroyed Eaves or sheathing roof boards of steel-framed prefabricated houses damaged or blown away, or wall claddings deformed or blown away Banisters on balconies of reinforced-concrete apartment buildings deformed over relatively large areas Roofing materials of large eaves of factories or warehouses overturned or blown away over limited areas Wall claddings of steel-framed warehouses detached or blown away Asphalt pavement displaced or blown away |
|------|----------|--|
| JEF4 | 81 to 94 | Roofing materials of large eaves of factories or warehouses overturned or blown away over relatively large areas |
| JEF5 | Over 95 | Main frames of steel-framed prefabricated houses or warehouses severely deformed or destroyed Banisters on balconies of reinforced-concrete apartment buildings severely deformed or destroyed |

Table 5. Japanese Enhanced Fujita Scale (JMA, 2015)

2. 국내 선행연구

한반도에 발생하는 토네이도 연구 중 가장 대표적인 것은 2014년 고양시 인근에서 발생한 토네이도에 대한 사례분석 및 수치실험을 통한 메커니즘 분석이다(인소라 외, 2016). 선행연구에서는 한반도에서 이례적으로 내륙에서 발생한 2014년 6월 10일 고양 용오름 사례에 대해 구름분해모델(CReSS)을 이용하여 재현실험을 수행하고 발생 메커니즘을 분석하였으며, 적란운이 급격하게 발달하고 그 후면으로 토네이도가 발생한 것을모의하였다. 또한 고해상도 WRF 모델링을 통하여 고양 용오름에 대하여분석한 선행연구(이승연 외, 2016)가 있었으며, 같은 해에 발생한 부산시기장군 인근의 토네이도에 대해 중규모 환경 분석을 수행(이승호 외, 2015)한 연구도 있었다. 특히 우리나라의 토네이도 연구는 관측 기록의제한도 있어 사례분석에 대한 연구가 주를 이루고 있다.

제 4 절 연구 동기 및 목표

대한민국(Republic of Korea)의 경우, 기상청에서 발표하는 토네이도에 관한 별도의 정보 또는 경보는 존재하지 않는다. 다만, 한국 기상청에서 발표하는 날씨해설과 기상정보에서 '돌풍'이라는 용어를 사용하며 순간적으로 발생하는 강한 바람에 대한 정보를 제공하고 있으며, 이 단어의 사용은 예보관의 판단과 분석에 따른다. 항공기상청(AMO, Aviation

Meteorological Office)에서는 MBST warning, TS warning, WS warning 등을 국제 민간 항공 기구(ICAO, International Civil Organization)의 기준에 맞추어 발표하고 있으며, 토네이도에 관한 별도 의 경보는 발표하지 않는다. 이로 인해 국민들이 토네이도에 대한 충분 한 인식을 갖지 못해 대비를 할 수 없을 가능성이 있으며, 현장 업무를 수행하는 예보관들에게 토네이도에 대한 인식이 부족한 편이다. 일례로 2014년 6월 10일 경기도 고양시 일산서구 구산동 일원에서 토네이도가 발생하여 시설 및 농가에 심각한 피해를 초래하였으며(이화여대, 2016), 비교적 최근인 2019년 3월 15일에는 충청남도 당진시 당진제철소 부근에 서도 토네이도가 발생하여 피해를 입힌 기록이 있다. 예측이 어려워 발 생에 대한 대비가 부족하며, 특히 한반도 서해안 부근에서 발생하는 토 네이도는 대부분 인구 밀집 지역으로 진입하여 피해를 크게 미치는 경우 가 많다. Cook et al. (1965)은 1964년 9월 13일 서울 인근을 통과한 토네 이도에 대해 일기도와 라디오존데 관측 자료를 이용하여 분석하고 미국 이나 호주의 토네이도의 이론적인 특징과 기준이 적용됨을 보였으나, 연 구가 발표된 이후 한반도에 발생한 토네이도의 경우 강도가 EF0 - EF1 정도로 약한 것이 많았다. 특히 이러한 토네이도의 경우 외국의 토네이 도 분류 기준이 한반도 주변에서 적용하는 것이 효율적인지에 대한 논의 가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 다음과 같은 목표를 통하여 한반도에 발생하는 토네이도에 대하여 분석 및 연구해보고자 하였다. 먼저 한반도에 발생하는 토네이도에 대하여 14년(2008 - 2021)간의 자료를 수집하고, 발생 위

치와 강도, 계절적인 특징을 알아본다. 이를 통해 서해안 부근에 생기는 토네이도 중 가장 발생 메커니즘이 뚜렷하다고 생각되는 2019년 3월 15일 충청남도 당진시에서 발생한 토네이도에 대한 종관규모, 중규모 기상특징을 분석하고자 한다. 마지막으로 이 사례에 대하여 WRF 모델을 통한 고해상도 수치모의 실험을 수행하고자 한다.

제 2 장 자료 수집 및 연구 방법

제 1 절 자료 수집

1. 토네이도 관측 자료

본 연구에서는 2008년부터 2021년까지의 기상청 토네이도 관측 기록을 이용하여 통계 분석을 실시하였다. 기상청에서는 유인관측 기상기관 (구 기상관측소 또는 기상대)에서 발행하는 일기상통계표(Figure 2)를 통하여 토네이도 관측 자료를 제공하고 있다. 또한 2014년부터 2021년까지는 사회관계망서비스와 언론에 공유된 토네이도 지역 및 관측시간에 대한 자료를 수집하였다. 이 자료 중 일부 자료는 기상청의 '특이기상 보고' 자료를 통하여 기록되었다. 특히 이러한 유형의 자료에 대한 신뢰도를 확보하기 위하여, 각각의 관측기록 자료에 대하여 기상관측레이더의시선속도(Radial Velocity), CAPPI, PPIO 등의 관측자료와 자동기상관측시스템(AWS)의 대분 관측자료, 발생 위치에서 가장 가까운 지역의 라디오존데 관측자료를 이용하여 사례별 진위여부를 판별하였다.

| | 오전 | 오후 | | |
|--|----|-----|-----|--|
| ●1440-1446、●1654-1937, 1 _工 (ISE 15)0939-0639,/출산 동구 대왕암공원 인근 해상 / 울산제일일보, | | | | |
| 계절 | | 작성자 | 윤기훈 | |
| | | | | |

Figure 2. 기상청 일기상 통계표의 토네이도 기록 (2020. 10. 16. 47152 울산)

2. 종관 및 중규모 기상 분석 자료

본 연구에서는 한반도 주변에서 발생한 토네이도 사례에 대한 종관규모 분석, 중규모 대기 분석을 수행하고자 ECMWF에서 제공하는 ERA5 재분석장(The fifth generation of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts reanalysis)을 이용할 필요성이 있었다. ERA5 자료는 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 의 수평 격자를 갖고 있고, 100hPa에서 1000hPa까지 총 27개의 층으로 구성되어 있으며, 1시간 간격으로 제공되고 있다. 본 연구에서는 사례 분석을 위하여 지오포텐셜 고도, 수평바람(u, v), 연직바람(w), 평균 해면기압, 구름 얼음 물 혼합비(cloud ice water ratio), 온도, 온위, 상대습도(relative humidity)의 자료를 이용하였다. 또한 고해상도 수치모델의 초기조건으로 ERA5 자료를 이용하였다.

3. 한반도 토네이도 발생 기록

2008년 1월 1일부터 2021년 12월 31일까지 집계한 국내 토네이도 관측 사례는 22건(기상청 일기상통계표 기록사례 15건, 비공식 관측사례 7건)이며, 그 중 육상에서 관측되었거나 육상에 영향을 미친 토네이도는 11건이었다. 2016년까지의 관측자료는 드문 편이나, 2017년 이후에는 매년 최소 1건 이상, 최대 4건이 보고되고 있다. 또한 14년 간의 연평균 관측 횟수는 1~2회로 나타났지만, 2017년 이후 5년간의 평균은 연 3회로나타났다. 이는 스마트폰, CCTV 등 촬영기기의 보급과 함께 사회관계망

서비스에서 토네이도 관측 사진이 빠르게 전파될 수 있는 환경이 조성되었으며, 기상청에서 운영하는 '날씨제보 시스템' 등의 정책 홍보 효과로인하여 늘어난 것으로 보인다. 월별로는 가장 많은 달이 10월이었으며, 그 다음으로 8월이 많은 횟수를 차지했다. 겨울철과 봄철이라고 할 수있는 12월에서 5월까지는 관측기록이 드물었으며, 여름철인 6, 7, 8월에는 다른 달보다 많은 관측 자료가 수집되었다. 지역별로는 동해(울릉도, 경상동해안에서 관측된 동해상 토네이도 포함)에서 관측된 토네이도가가장 많았으나, 이는 도 단위를 특정하지 않고 동해상으로 통합하여 집계하였기 때문이다. 인천에서 관측된 대부분의 토네이도 사례는 인천 인근 해상에서 발생한 사례였으며, 이 사례는 인천 및 경기 서해안 인근지역(김포, 강화도 등)에서 동시에 관측되었으나, 공식적으로 기록된 인천기상대의 자료를 사용하였기에 인천으로 집계하였다. 분류가 나누어진 표는 Figure 3에 나타나 있다.

지역별 집계 자료를 통해 발생 지역 별 유형을 나누어 보면 먼저 한반도 동쪽과 동해상에서 발생하는 토네이도(유형 1), 수도권, 충청도, 전라서해안 등 서쪽 지역에서 발생하는 토네이도(유형 2), 그 밖의 내륙에서 산발적으로 발생하는 토네이도(유형 3), 마지막으로 제주도 부근에서발생하는 토네이도(유형 4)의 네 유형으로 나누어 볼 수 있다. 유형 1의경우 저기압이 한반도를 지나 동해상에서 급격하게 발달하면서 발생하는 토네이도가 다수였으며, 해상에서 목측으로 발견되며 인적, 물적 피해는거의 없었다. 유형 2는 인구가 밀집한 해안도시의 앞바다에서 급격하게 발달하여 육상으로 도달하는 사례와, 육상에서 발달하는 사례, 앞바다에

서 발달하여 육상까지 도달하지 못하는 사례로 크게 나뉠 수 있었다. 앞의 두 사례에서 발생한 토네이도는 모두 재산 피해를 야기하였으나, 발생이나 접안 위치가 도심지가 아닐 시 그 피해의 규모는 크지 않았다. 유형 3은 대부분 여름철 발생하였으며, 지면 가열 등 급격한 대류현상이 발생하며 소나기와 우박, 천둥번개를 동반할 수 있는 기상조건에서 나타났다. 그러나 빈도수가 많지 않아 더 많은 사례를 수집해야 할 것으로보인다. 유형 4는 제주도 부근에서 발생한 사례로, 주로 제주도 동쪽 부근에서 여름철 발생하였다. 태풍 예보와 함께 태풍의 전면 혹은 후면에서 발생하였다. 해상과 제주도 해안에 모두 영향을 미칠 수 있었으나, 그 피해는 대부분 태풍으로 인한 피해에 함께 집계되어 토네이도 현상으로인한 피해여부를 파악하기는 어려웠으며, 태풍으로 인해 대비가 이루어지고 있었다.

따라서, 한반도에 발생하는 토네이도 사례 중 인적, 물적 피해를 가장자주 일으킬 수 있는 사례는 서쪽 지역, 특히 충청남도와 경기도 부근에서 발달하는 토네이도 사례가 포함된 유형 2라고 볼 수 있다. 그 중 본연구에서 사례로 선정한 2019년 3월 15일 15시 30분에서 16시 30분 사이에 발생한 토네이도 사례의 경우 종관규모, 중규모 기상 특징이 뚜렷하다. 또한 앞바다에서 발달하여 육상으로 진입하며 제철소 부근으로 많은 피해를 내면서 최근 발생한 토네이도 사례 중 뚜렷하게 국민의 인식에 남아있는 사례라고 판단된다.

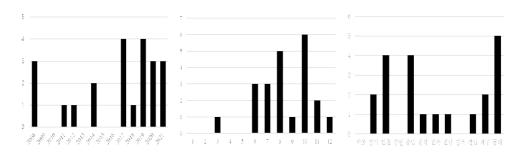


Figure 3. 연도별, 월별, 지역별 토네이도 발생 횟수 (2008-2021)

제 2 절 사례 지역 관측 환경

2019년 3월 15일 충청남도 당진시 송악읍, 송산면 일대에 발생한 토네 이도 사례는 15시 50분 경부터 16시 40분 경까지 지속되었으며, 발원지 는 충청남도 당진시 송산면 무수리이다. 토네이도는 발워지에서 약 7 km 북동진하였으며, 시속 14 km로 30 ~ 40 분 정도 유지되었다(Figure 4). 사례일 발생 지역 인근의 지형 특징은 다음과 같다. 사례 지역인 당 진시는 대체로 평탄한 지형과 낮은 해발고도를 보인다. 기상청에 설치된 사례 발생 지점(충청남도 당진시 송악읍, 송산면 일대) 인근의 AWS 관측 기기(괄호 안은 AWS 식별번호)의 해발고도를 살펴보면 당진(616)은 52m. 신평(637)은 9 m. 현덕면(358)은 35 m. 운평(515)은 10 m 등 대부분이 해 발고도가 낮은 지역으로 관측 지역의 반경 10~20 km 부근에 위치해 있 었으며. 아산만에 접해 있는 지역으로서 인근에는 지방 하천이 존재하였 다. 발생 지역의 13 km 남쪽에는 해발고도 300 m 내외의 낮은 산(아미 산: 350.8 m, 다불산: 321.3 m 등)이 위치해 있다. 따라서 발생한 토네이 도는 평탄한 지형 인근의 낮은 산으로 인한 지형효과를 받을 가능성이 있는 지역이었다. 사례 지역에서 가장 가까운 레이더는 기상청의 연구용 이중편파 X밴드 소형 레이더인 망일산 레이더였으며, 이 레이더는 23 km 남쪽에 위치하고 해발고도는 291 m로 비교적 낮은 산자락에 위치해 있었다. 소형 레이더의 경우 대형 레이더보다 관측 범위는 좁지만, 해상 도가 높아 토네이도나 작은 강수 에코에 대한 탐지가 뛰어나 이번 토네

이도 사례에도 적용하여 사용할 수 있었다. 또한 서쪽으로는 해양, 북쪽과 북동쪽에는 도심지, 남쪽은 공장지대, 남동쪽에는 숲과 비교적 층고가 낮은 주거지가 위치해 있었으며, 해안의 경우 조수간만의 차가 큰 아산만으로 수심이 5~13 m로 얕은 편이었다. 또한 사례일 토네이도가관측된 시각은 현지시각(KST)으로 15시 50분 경부터 16시 40분 정도였으며, 당진 제철소 일대에서 피해가 발생한 시각은 16시 20분경이었다. 레이더 관측 자료에서는 발생시간 인근으로 갈고리 형태의 강수 에코가 망일산 소형레이더(Figure 7)에서 관측되었으며, 레이더 합성영상(Figure 5)과 기상 위성인 COMS(Communication, Ocean and Meteorological, 천리안 1호) 가시+적외 합성영상(Figure 6)에서는 QLCS가 뚜렷하게 나타난다.

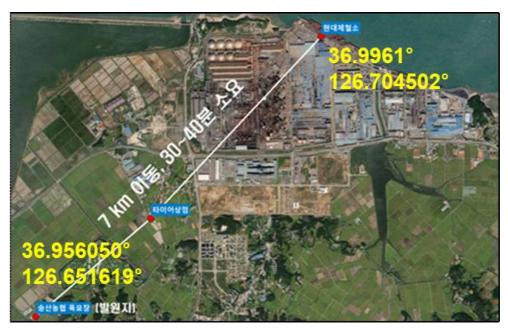


Figure 4. 당진 토네이도의 추정 관측 경로(이영규, 2019)

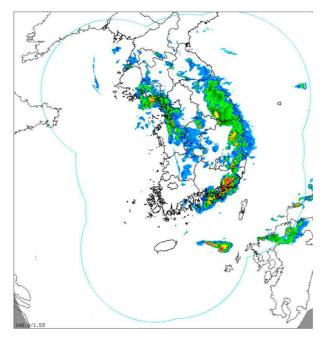


Figure 5. Radar HSR at 16:00 KST



Figure 6. COMS at 16:00 KST

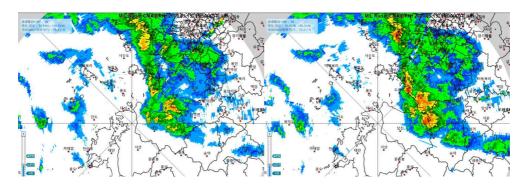


Figure 7. Radar C-max on 1550, 1600 KST at Mang-il san radar

제 3 절 실험 설계

본 연구에서는 토네이도의 종관 규모 및 중규모 분석을 위하여 사례일에 대하여 Advanced Research version of the Weather Research and Forecasting (ARW - WRF) 4.3 버전을 사용하였다. 수치 실험은 토네이도 발생 지점을 포함하여 수평격자 5, 1, 0.2, 0.05 km인 영역을 사용하였으며, 연직해상도는 112개의 혼합층으로 연직 최상층을 20 hPa까지 구성하였다. 모델 적분 시간은 영역 1, 2, 3에서 2019년 3월 14일 1500 UTC부터 3월 15일 0900 UTC까지 총 18시간을 적분하였다. 세 영역에 대하여 초기 및 측면 경계조건으로는 ECMWF의 ERA5 자료를 1 시간 간격으로 이용하였고, 해면 온도는 영국 MET Office에서 제공하는 The Operational Sea Surface Temperature and Ice Analysis (OSTIA) system 자료에서 해수면 온도 분포 자료를 1일 단위로 사용하였다. ERA5 자료는 0.25 의 수평해상도, OSTIA 자료는 0.05 의 수평해상도를 가진다. 또한 영역 4에서는 모델 적분시간을 2019년 3월 15일 0000 UTC부터 0900 UTC까지로 총 9시간을 적분하여 모의하였다.

제어 실험(control run)의 미세물리 모수화 방안으로는 WSM 6-class graupel 방안 (Hong & Lim, 2006)을 모든 영역에 적용하였다. 적운 모수 화는 Kain-Fritsch (new Eta) scheme을 영역 $1(\Delta x = 5 \text{ km})$ 에만 적용하였다. 장파 복사 방안은 RRTMC 방안(Iacono et al., 2008; Mlawer et al., 1997)을 사용하였으며, 단파복사 방안은 Dudhia 방안(Dudhia, 1989)을 사

용하였다. 지표면 모델로는 Unified Noah land-surface 모델(Chen and Dudhia, 2001)이 사용되었다. 행성 대기 경계층 모수화를 위해서는 비국지 방안인 YSU scheme을 영역 1과 영역 $2(\Delta x=1 \text{ km})$ 에 적용하였으며, 영역 $3(\Delta x=200 \text{ m})$ 과 영역 $4(\Delta x=50 \text{ m})$ 에서는 coarse large-eddy simulation(LES)을 수행하였다. 난류와 혼합 설정은 영역 1, 2에서 2nd order diffusion term on coordinate surfaces 옵션을 사용하였으며, 영역 3, 4에서는 3차원에서의 mixing terms in physical space (stress form) 옵션을 사용하였다. 또한 이때의 Eddy Coefficient Option에 대하여 영역 1, 2에서는 Horizontal Smagorinsky 1st order closure를, 영역 3, 4에 대해서는 1.5 order TKE closure (3D)을 사용하였다. 사용된 실험 영역과 설정은 다음 Figure 8, Table 6과 같다.

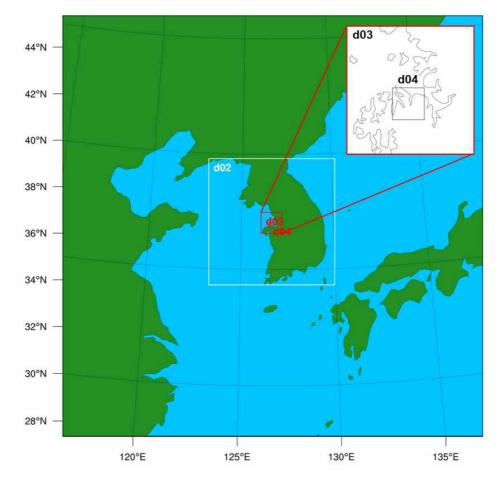


Figure 8. WRF - ARW domain setting

| 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 | 50 m / 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 | WDM 6-class scheme | | | |
| Boundary Layer Scheme | YSU PBL scheme | | - | |
| Radiation Scheme | RRTMG longwave/ Dudhia shortwave radiation scheme | | | |
| Land Surface Model | Unified Noah land-surface model | | | |
| Cumulus Parameterization Scheme | Kain-Fritsch (new Eta) scheme (1st domain only) | | | |
| Turbulence and Mixing option | 2nd order diffusion term | | mixing terms in physical space (stress form) | |
| Eddy Coefficient Option | Horizontal Smagorinsky 1.5 order TKE closure (3D) | | | |

Table 6. WRF - ARW Settings

제 3 장 실험 결과

제 1 절 종관 규모 분석

수치모델 실험 결과와 관측의 일치성을 확인하기 위해 먼저 종관 규모 분석을 수행하였다. 기상청에서 발행하는 분석 일기도(KMA ASFE, AUAS)와 ERA5 분석장, 영역 1의 모델 모의 결과를 비교하였을 때, 대부분의 기압계 흐름이 일치하는 것을 확인하였다. 분석일기도와 모의된 예상일기도의 종관 기압계 일치성을 확인하기 위하여 지상, 850 hPa, 300 hPa의 토네이도가 관측된 시간과 가장 유사한 0600 UTC 일기도를 살펴보았다. 또한 종관 기압계의 연직 상호관계를 알아보기 위하여 500 hPa 일기도의 경우 0700 UTC의 ERA5 자료와 수치 모의된 예상일기도를 비교하였다.

기상청 분석일기도에 기록된 지상(Figure 9, 왼쪽)에서 발달하는 저기압의 중심기압은 약 1013 hPa였으며, 그 위치는 연평도 남쪽 약 50 km 부근이었다. 또한 산둥반도 북서쪽에 고기압이 위치하고 있었으며, 이는실험 Domain 1(Figure 9, 오른쪽)에서도 동일한 패턴으로 나타난다. 다만 0600 UTC 모델에서 모의한 저기압의 중심은 백령도 부근으로, 관측 분석된 값에서 남동쪽으로 약 120 km 정도 떨어진 곳에 위치해 있다. 0700 UTC(Figure 10)에 모의된 저기압의 중심은 충청남도 당진 부근에위치해 있다. 이에 따라 저기압의 발달이 30분 ~ 1시간 정도 느리게 진

행되는 것을 파악할 수 있었다.

850 hPa에서는 기압골과 온도골, 습수(T-Td)는 기상청 분석장(Figure 11, 왼쪽)과 모델 모의장(Figure 11, 오른쪽)에서 동일한 패턴을 가지며, 모델에서는 서해상에서 당진 부근으로 20 ms⁻¹ 이상의 하층제트(Low level jet, LLJ)가 북서풍에서 남서풍으로 바뀌며 유입되는 것을 알 수 있다. 또한 한반도 북쪽, 중국 요동반도 부근에 위치하던 습수가 0700 UTC(Figure 12)에는 활 형태를 그리며 한반도 서쪽 경기만과 아산만으로 유입되면서 대기 하층에 수증기를 공급한다. 이 분석장을 통하여 지상 부근으로는 QLCS 형태의 강수형태가 나타났음이 모의되었으며, 이는 지상 레이더 반사도와 일치한다.

300 hPa 기상청 분석장(Figure 13, 왼쪽)과 모델의 결과(Figure 13, 오른쪽)도 대체로 일치하였으나, 서해상에서는 모델에서 모의된 상층제트가 분석장보다 풍속이 약한 것을 알 수 있었다. 그 차이는 약 20 kts 정도였다. 한반도는 제주도 남쪽에 위치한 제트 입구의 북쪽에 위치하고 있었으며, 입구 북쪽에서는 수렴이 유도되므로 한반도 주변의 공기는 연직 하강하는 흐름이 만들어진다.

500 hPa의 기상청과 ERA5 재분석장, 모델 모의 결과는 거의 일치하였다. 이때 상층에서 강하게 하강하는 흐름을 분석하기 위하여 PV(Potential vorticity)분석을 실시하였으며, 이를 통하여 대류권계면 접힘(tropopause folding) 현상을 확인하고자 하였다. 본 연구에서는 선행연구(Bluestein, 1993)에 따라 대류권계면의 값으로 $1.5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 값을 이용하였으며, 이를 간단하게 나타내기 위하여 일기도에는 PVU를 표기하

였다. 잠재와도의 변화량은 와도의 변화와 온위 변화량의 곱과 같으며, 이는 절대와도와 정적안정도의 곱으로 표현할 수 있다. PV는 (1)과 같은 식으로 계산된다.

$$P = -g(\xi_{\theta} + f) \frac{\partial \theta}{\partial p}$$
 (1)

이때 ζ_{θ} 는 상대와도이며, f는 코리올리의 힘, θ 는 온위, p는 압력, g는 중력가속도를 나타낸다.

기상청 분석장은 PVU를 기본으로 제공하지 않고 있어, ERA5 재분석장과 모델 모의 결과를 비교하였을 때 북서쪽에서 남동쪽으로 이동하는 대류권계면 접힘 현상을 확인할 수 있었다. 이로 인해 경기만과 충남 부근으로 대기 상층의 차고 건조한 공기가 유입될 수 있을 것으로 판단되었다. 재분석장이 1시간마다 제공되므로 토네이도가 관측된 시간과 가장가까운 0700 UTC(Figure 14, 왼쪽)의 자료를 비교해 볼 수 있다. ERA5의PV 유입속도보다 모델에서 모의한 PV 유입속도(Figure 14, 오른쪽)가 느리게 나타나며, 0800 UTC(Figure 15)의 PV 분포와 유사하게 나타난다.

PV의 분포를 남북방향 연직 단면 분석을 통해 권계면 접힘 현상을 구체적으로 살펴보았다. 또한 지상까지 전파하는 것을 확인 할 수 있다. ERA5 재분석장과 모델 모의 결과물을 0600 UTC부터 0900 UTC까지 살펴보았을 때, 대류권계면 접힘으로 인한 하층으로의 높은 PVU 영역이 북쪽에서 남쪽으로 전파되고 있다. 또한 온위가 국지적으로 낮은 경향성을 보임과 함께, u 방향의 바람장을 살펴보면 권계면 접힘이 일어나는 전면에서 남쪽(그림의 A 부근)은 서풍, 북쪽(그림의 B 부근)은 동풍류를

보였다. 특히 관측지점 부근으로 0700 UTC u 방향의 바람과 온위의 변화가 큰 구간이 존재하였다.

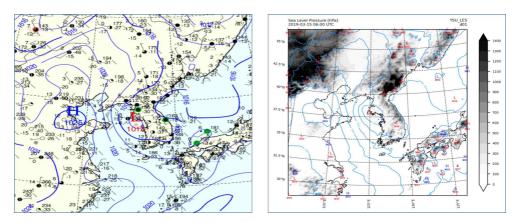


Figure 9. KMA reanalysis weather chart of sea level pressure (left), Domain $1(\Delta x = 5 \text{ km})$ sea level pressure (right) at 0600 UTC

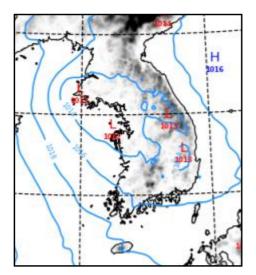


Figure 10. Domain 1 Sea level pressure at 0700 UTC

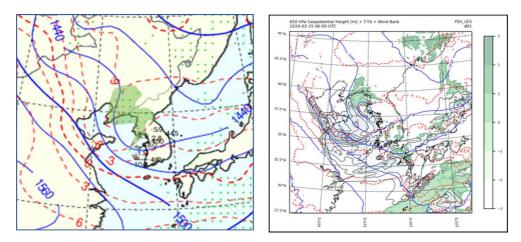


Figure 11. KMA reanalysis weather chart of 850 hPa gpm (blue line), temperature (red dashed line), T-Td (green dots) (left), Domain 1 (Δx = 5 km) 850 hPa gpm (blue line), temperature (rad dashed line), T-Td (green shading), low level jet (grey line and blue shading, > 25 kts), horizontal wind (right) at 0600 UTC

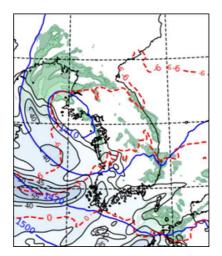


Figure 12. Same contours of Figure 10 right at 0700 UTC

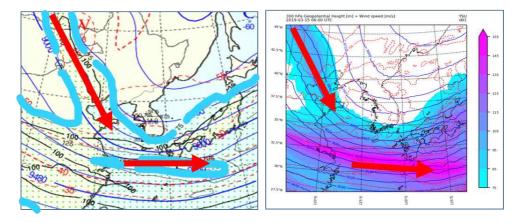


Figure 13. KMA reanalysis weather chart of 300 hPa gpm (blue line), temperature (red dashed line), Strong wind (green dots, > 75 kts) (left), Domain 1 (Δx = 5 km) 300 hPa gpm (blue line), temperature (rad dashed line), Strong wind (shading, > 75 kts), (right) at 0600 UTC

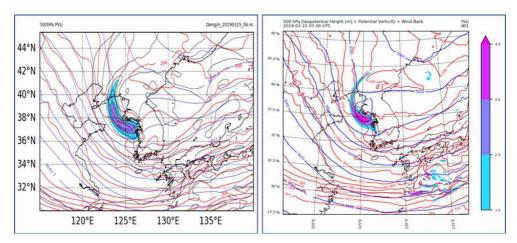


Figure 14. ERA5 reanalysis 500 hPa gpm (blue line), temperature (red dashed line), PVU (shading, > 1.5), horizontal wind (left), Domain 1 ($\Delta x = 5$ km) same contours at 0700 UTC

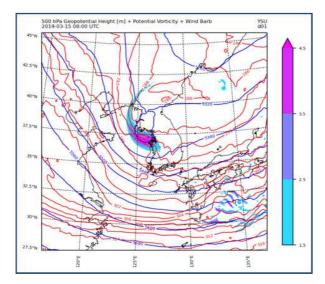


Figure 15. Domain 1 ($\Delta x = 5$ km) same contours with Figure 14 at 0800 UTC

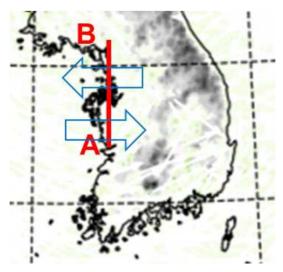


Figure 16. South-North cross line for PVU

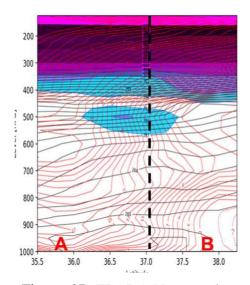


Figure 17. ERA5 S-N cross line PVU (shading), potential temperature (black line), u-wind (red line) at 0700 UTC

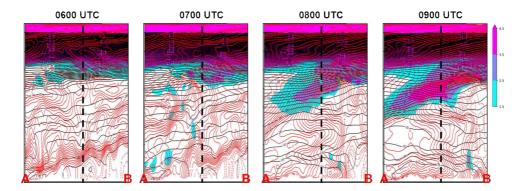


Figure 18. Domain 1 S-N cross line PVU (shading), potential temperature (black line), u-wind (red line) at 0700 - 0900 UTC

제 2 절 중규모 기압계 분석

중규모 기상 메커니즘을 알아보기 위하여 영역 2에서 1 km 격자 간격을 이용하여 조사하였다. 먼저 모델 모의 값과 관측 값을 비교하였다. 실제 토네이도 관측 지역으로부터 북서쪽으로 떨어져 있지만 고층 관측지점 중에서는 비교적 가깝다고 판단되는 오산(47122)의 0600 UTC 레윈존데에서 관측된 SRH 값은 194 m²s²²로 나타났으며, CAPE 값은 29 Jkg²²로 나타나, 0600 UTC 모델의 해당 위치 값과 유사하였다. SRH (Storm Relative environmental Helicity) 계산을 위해서 Markowski and Richardson (2010)의 식을 이용하였으며, 그 식은 아래 (2)와 같다. 이때 높이 d는 1 km로 설정하였다. CAPE는 Hobbs and Wallace (1977)의 연구에서 계산된 값을 이용하였으며, 아래의 식 (3)과 같이 계산하였다.

$$SRH = \int_0^d (\bar{v} - c) \overline{w_h} dz \qquad (2)$$

$$CAPE = -R_d \int_{LFC}^{EL} (T_{parcel} - T_{env}) dln(p)$$
 (3)

산출된 SRH (Figure 19, 왼쪽)는 QLCS를 잘 나타내고 있으며, 영역 3의 범위 안에서 SRH는 최대 733 m²s⁻², 평균 204 m²s⁻²로 나타났다. 특히 토네이도의 경우 미국에서 연구한 선행연구(Kis and Straka, 2010, Thompson et al., 2003)에 따르면, 0-1 km SRH의 경우 최소 168 m²s⁻² 이상, 평균적으로 400 m²s⁻² 이상의 값을 보일 때 발생한다고 연구되고

있으며, 0-3 km SRH의 경우 180 - 250 m²s²² 이상의 값을 보여야 한다고 분석되었다. 이를 통해 영역 2 범위 내에서 산출한 SRH 값을 Figure 19의 왼쪽에서 확인할 수 있다. 또한, 0655 UTC에서 영역 3의 범위 내에서의 CAPE(Figure 19, 오른쪽)의 최대값은 571 Jkg¹, 평균값은 196 Jkg¹으로 나타났다. 본 실험에서 모의한 값과 비교해 보면 영역 3 범위 내에서 대부분의 지역이 토네이도가 발생할 수 있음을 알 수 있다. 이는 ERA5 재분석장(Figure 20, 왼쪽)의 0700 UTC에서 비교적 낮게 계산되었던 것과는 차이를 보인다.

뿐만 아니라, 토네이도 관측 지점에서의 SkewT-logP 단열선도와 호도 그래프(Figure 22)를 분석해 볼 때, 선행연구(Tochimoto, 2022)에서 연구된 토네이도 관측 지점에서 모의된 바람 변화 경향과 거의 일치한다. 0-1 km 벌크 윈드시어(bulk wind shear, Figure 21)에서는 관측 예상 시간 (0705 - 0715 UTC) 동안 윈드시어의 방향이 남동에서 남서로 변화하고 있으며, 토네이도 관측 지점을 중심으로 윈드시어의 수렴구간이 나타난다.

다만 1 km 격자에서 토네이도 발생을 진단하기에는 어려움이 있다고 판단해, 200 m 격자의 영역 3 수치 실험을 추가 진행하였다. Domain 3 수치 실험에서는 서해상에서 발달하며 다가오는 돌풍 전선(gust front)의 발달을 파악할 수 있다. NOAA의 gust front 구조 모식도에 따르면, gust front로 인하여 형성되는 강수 구름은 전선과 함께 형성되지만, 위치는 그 후면이며, 전선에 가까운 쪽에서는 전선면을 따라 온난이류가 발생하며 roll cloud (혹은 arc cloud)가 형성된다. (Martner, B. E., 1997;

Luchetti et al., 2020)

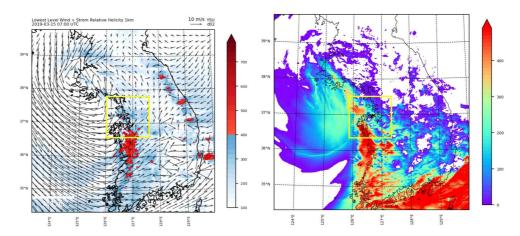


Figure 19. SRH 0-1 km (shading, m²s⁻²), lowest level horizontal wind (vector) (left), CAPE (shading, Jkg⁻¹) (right), domain 3 range (yellow box) at 0655 UTC

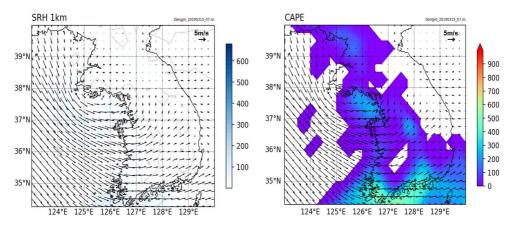


Figure 20. SRH 0-1 km (shading), (left), CAPE (shading) (right), lowest level horizontal wind (vector) at 0700 UTC

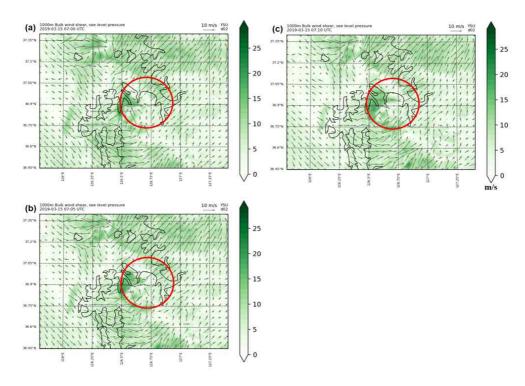


Figure 21. Bulk wind shear 0-1 km (vector), sea level pressure (dodge blue line), tornado observed region (red circle)

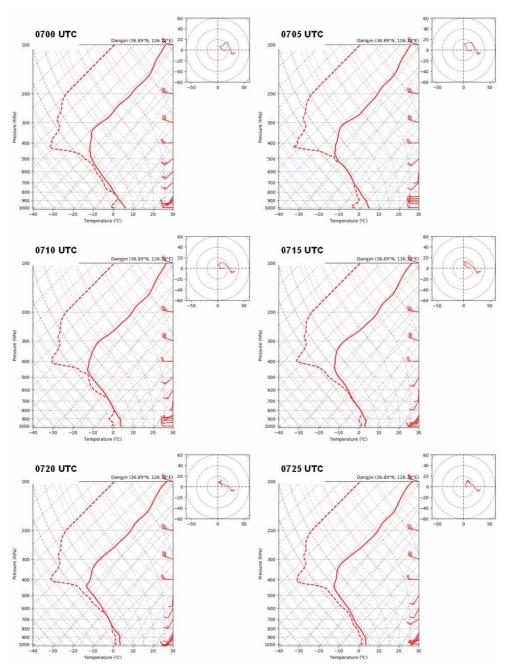


Figure 22. Hodograph, SkewT-logP diagram 0700 - 0725 UTC at Dang-jin Area

제 3 절 토네이도 형성 과정

1. Gust front 분석

사례 지점의 gust front 분석이 필요함에 따라, 고도 500 m 수평면에 서의 0700에서 0715 UTC 동안 레이더 반사도와 수평 바람(uv), 연직 풍 속(w)를 분석해 보았다(Figure 23). 이때 상승류는 활(bow) 형태(Figure 23의 검은 실선)로 나타나고 있으며, 나타나는 활형 상승류의 뒤쪽으로 강한 강수 구름대(Figure 23의 채색 부분)가 발달하는 것을 알 수 있다. 또한 바람은 상승류의 후면에서 남서풍, 전면에서는 남풍이 나타나 두 바람이 수렴하는 구간을 보였다. 같은 시간 동안 0-3 km에서의 최대 상 대와도(max relative vorticity)를 살펴보면 실제 관측된 두 지점보다 활형 에코가 수렴하는 지역에서 더욱 강한 상대와도가 나타나는 것을 알 수 있다(Figure 24). 강한 상대와도 구역은 0705 UTC에 유입되기 시작하여 0715 UTC가 되면 당진과 그 인근 대부분의 지역으로 퍼져 나간다. 고도 150 m의 온위와 수평 바람을 살펴보면 강한 하강기류가 존재함에 따라 낮은 온위 영역이 활 형태를 만들고 있다(Figure 25). 선행연구(Trapp et al., 2005; Atkins et al., 2004 등)에 따르면 활 형태의 중간 부근에서 토 네이도가 발달할 수 있는 가능성이 있으며 이 지역 부근으로 토네이도성 흐름의 확인이 필요하였다.

실제 토네이도 발생 추정 지점(I), 피해 발생 지점(J), 실험에서의 토네이도 발생 추정 지점(K)에서의 연직속도, 상대와도, 0-3 km

Cmax(Column max of radar reflectivity)를 고도 500 m에서 살펴보았다. 세 지점 중 실제 토네이도 발생 추정시간 인근인 0630 - 0730 UTC를 살 펴본 결과 K 지점에서 강한 연직속도 불연속(Figure 26. (a))이 나타났으 며, 높은 와도 구간(Figure 26. (b))은 당진 인근 아미산(350.8 m)의 풍하 측에 나타났다. 또한 이 지점 부근으로 Cmax의 흐름(Figure 26. (c))이 시간적으로 반시계 방향을 나타내고 있어 K 지점에서 동서방향 연직단 면(Figure 27)을 통하여 gust front의 흐름을 알아보고자 하였다. 동서방 향 연직 단면은 지점을 중심으로 16 km(Figure 27의 검은 실선)를 살펴 보았다. 0700, 0705, 0710 UTC 동안 K 지점을 중심으로 온위의 경계면 (281 K)이 뚜렷하게 나타났으며, 이를 따라 연직 상승속도가 매우 강하 게 나타났다(Figure 28, (a)). 빙결고도(0℃, Figure 28 (a)의 검은 점선)는 서에서 동으로 이동하며 낮아졌고, 강한 하강기류가 gust front의 후면에 발생하면서 급격하게 낮아지는 것을 알 수 있었다. 또한 구름이 front 후 면에서 발달하기 시작하며, 0705 UTC 부근에서 매우 낮아지기 시작하는 것을 알 수 있었으며 이에 따라 온위도 파동 형태를 나타내었다. 이를 통해 K 지점에서 0705 UTC에 강한 상승과 하강류의 변화가 있었을 것 으로 예상되며, gust front에서의 후방 유입 제트(Rear Inflow Jet, RIJ)을 판단하기 위하여 상대 와도의 $y(\omega_y)$ 성분을 분석해 보았다(Figure 28, (b)). ω_y 는 (4)의 식으로 표현할 수 있다. 이를 통하여 나타낸 전선면에서 의 와도 변화를 살펴보면, gust front의 후면 경계에서 상대와도의 y 성 분이 양에서 음으로 급격하게 변하는 구간이 0705 UTC 일 때 고도 500 m에서 300 m로 하강하며 나타난다. 이를 통하여 gust front의 후면에 후 방 유입 제트가 유입되었다고 추정할 수 있으며, 이 부근에서 강한 동서 방향 바람 변화가 나타난다. 따라서 토네이도 발생 또한 0705 UTC 부근 으로 나타났다고 판단할 수 있었다.

$$\omega_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \tag{4}$$

또한, 이를 더욱 면밀히 판단하기 위하여 Domain $4 (\Delta x = 50 \text{ m})$ 에서 의 K 지점 인근 지역에서 변수들의 시간 변화를 분석하였다. 표출 값은 K 지점을 중심으로 한 300 × 300 m의 수평 격자에서 1분 값으로 나타 내었으며 시간에 따른 고도별 상대와도의 최댓값(Figure 29), 연직 속도 의 최댓값(Figure 30), 기압의 최솟값(Figure 31)으로 나타내었다. 고도는 3 km까지 나타내었다. 이를 통하여 상대와도의 최솟값은 0702 - 0706 UTC에 매우 강한 양의 값을 가지는 것을 알 수 있으며, 이 고도가 약 1 km 부근까지 상승해 있는 것을 알 수 있다. 연직 속도의 최댓값은 0655 UTC에 고도 1.5 km 부근에서 나타나기 시작하여 시간이 지날수록 점차 낮은 고도로 이동하는 것을 알 수 있으며, 상대와도 최댓값이 나타나는 구간의 상층 부근에서 매우 강한 값을 나타내다가 이후 다시 최댓값이 나타나는 위치가 상승하는 것을 알 수 있다. 연직 속도 최댓값이 가장 낮은 고도에서 모의된 시각은 0703 UTC였다. 기압의 최소값의 변화는 0702 - 0707 UTC에 나타났으며 음의 기압 변화는 지상보다는 고도 1~3 km 부근에서 강하게 나타났다. 또한 분석한 K 지점 인근에서의 습수 (Mixing ratio)를 살펴보면 0702 UTC에서 북서에서 남동으로 이동하는 습 수의 흐름(Figure 32)에서 저기압성 회전을 보이는 형태가 나타나며, 0705 UTC에 가장 강해졌다가 0708 UTC가 되면 이 흐름은 남서쪽에서 북동쪽으로 이동하는 흐름에 합쳐지는 것을 알 수 있다. 이를 통하여 gust front에서의 토네이도성 흐름을 파악할 수 있으며, 다만 그 지속 시간은 매우 짧았을 것으로 예상된다. 이는 0-1 km SRH의 분포(Figure 33)가 0700 - 0705 UTC에 K 지점 부근에서 약 400 m²s⁻² 이상으로 매우 강하지만 시간이 지남에 따라 점차 약해지는 모습에서도 판단할 수 있다.

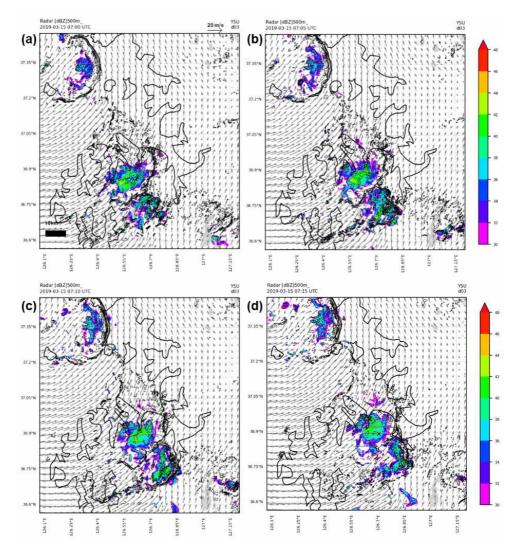


Figure 23. Domain 3 (Δx = 200 m) Radar reflectivity (> 30 dBZ, shading), vertical velocity (black line > 0, black dashed line < 0), horizontal wind at z = 500 m. x-mark is tornado started place (right), damage reported (upper) and bow echo spawning(lower) place. Time from 0700 UTC to 0715 UTC.

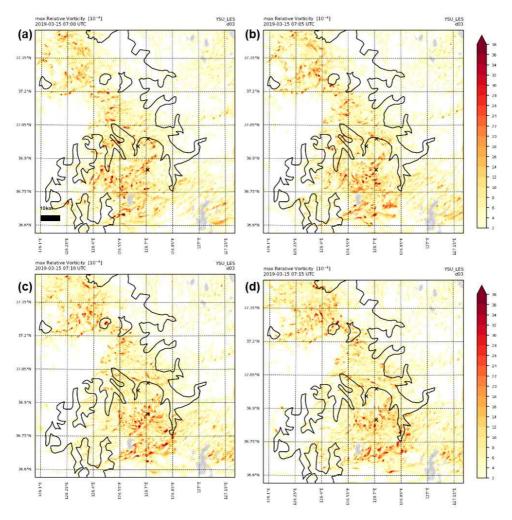


Figure 24. Domain 3 (Δx = 200 m) max relative vorticity 0-3 km. Time from 0700 UTC to 0715 UTC.

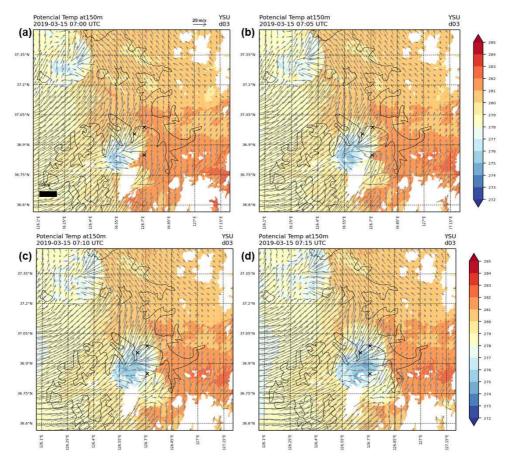


Figure 25. Domain 3 (Δx = 200 m) potential temperature and horizontal wind at z = 150 m. Time from 0700 UTC to 0715 UTC.

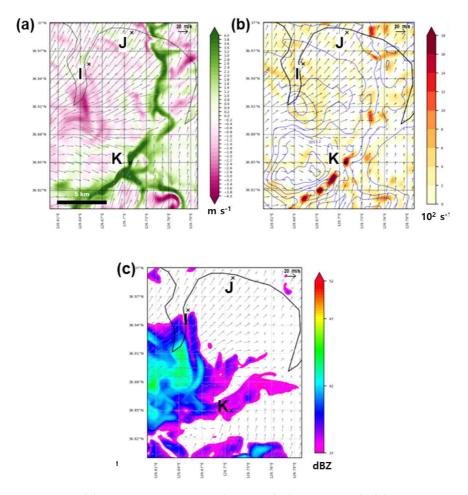


Figure 26. (a) Vertical velocity (shading) (z = 500 m) (b) Relative vorticity, see level pressure (hPa) (z = 500 m) (c) Cmax (0-3 km, > 37 dBZ), horizontal wind (z = 500 m) at 0705 UTC

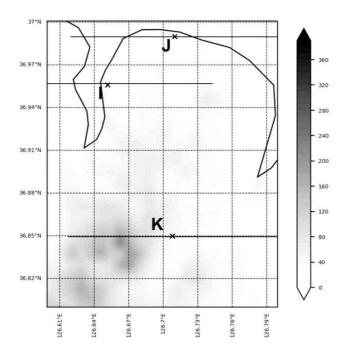


Figure 27. Terrain (shading), West-East cross lines for cross section

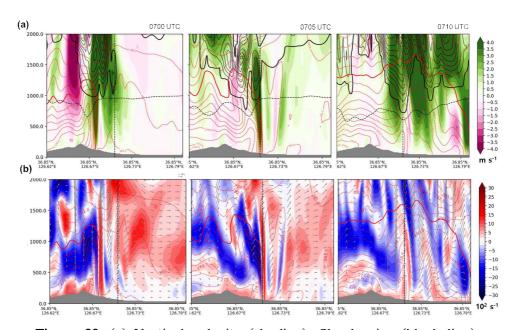


Figure 28. (a) Vertical velocity (shading), Cloud + ice (black line), potential temperature (red line), freezing level (horizontal dashed black line) (b) y-component of relative vorticity (shading), potential temperature (red line), u-w wind (vector)

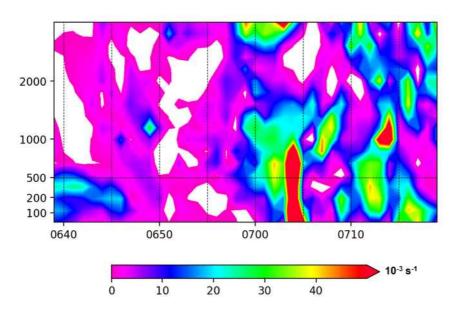


Figure 29. Time series of area max relative vorticity from (60 \sim 3000 m)

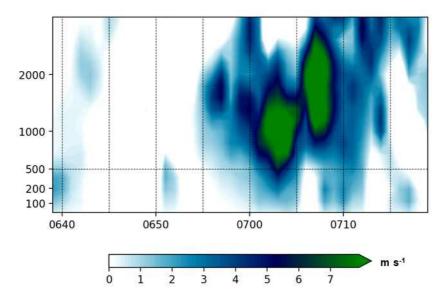


Figure 30. Time series of area max vertical velocity (60 \sim 3000 m)

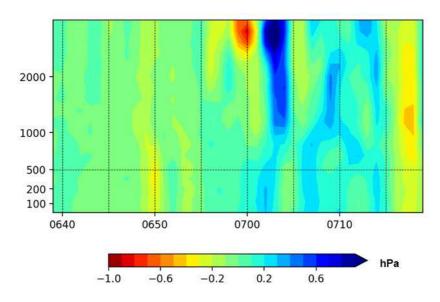


Figure 31. Time series of change of area minimum pressure $(60 \sim 3000 \text{ m})$

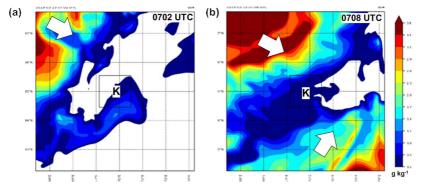


Figure 32. Domain 4 mixing ratio (> 0.2 g/kg) at 0702 - 0708 UTC

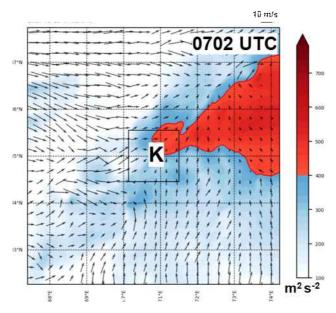


Figure 33. Domain 4 SRH 0-1 km (> 100) at 0702 UTC

2. Vorticity budget 분석

와도 예산 분석을 위하여 z 평면에서의 와도의 시간에 따른 변화 방정식을 나타내면 다음 (5)의 식과 같다. 여기서 좌변의 항은 시간에 따른 상대와도의 변화량이며, 절대와도(상대와도 ζ + 행성와도 f)의 시간 변화에서 f는 시간에 대해 동일하므로 상대와도의 시간 변화량과 같다. 우변의 첫번째 항은 상대와도의 이류(Advection), 두번째 항은 행성와도의이류, 세번째 항은 절대와도의 발산(Divergence or Stretching), 내번째항은 틸팅(Tilting), 다섯번째 항은 솔레노이드(Solenoid) 항이다.

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

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

$$- \left(\frac{\partial w}{\partial x}\frac{\partial v}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial y}\frac{\partial u}{\partial z}\right) + \frac{1}{\rho^2}\left(\frac{\partial \rho}{\partial x}\frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\partial \rho}{\partial y}\frac{\partial p}{\partial x}\right)$$
(5)

토네이도가 예상되는 0705 UTC에서의 이류, 발산, 틸팅, 솔레노이드 항의 수평면(z=500 m)에서의 값을 Domain 3 ($\Delta x=200$ m)에서 살펴보면 Figure 35-38과 같다. 이때 시간은 토네이도 모의 추정 시각인 0700 UTC에서 0710 UTC를 나타냈다. Figure 35-38의 청색 선은 지상기압을 나타낸다. 지상 기압의 경우 gust front가 통과하기 전까지는 기압이 낮아지다가, gust front의 통과 후 강한 하강류가 나타나는 구역(K 지점 부근)에서 기압이 높아지는 현상을 보였다.

먼저 K 지역 부근에서 가장 큰 값인 이류항은 양에서 음으로 변하고 있으며, 이는 gust front의 전면에서는 PVA (positive vorticity advection)

을 보이고 후면에서는 NVA (negative vorticity advection)을 보이는 현상 을 나타낸다. 이로 인하여 500 m 고도에서 와도의 변화가 급격하게 나 타나고 있음을 알 수 있다. 발산항은 토네이도 발생 추정 지점에서는 비 교적 적은 값을 나타내고 있으나, 주변에서는 매우 큰 값을 나타내고 있 는 것을 알 수 있다. Tilting 항은 K 지점 부근에서 매우 강한 값을 나타 내며, 그 변화 경향도 매우 강하다. 따라서 0705 UTC 부근으로 세 항 중 토네이도성 흐름에 가장 큰 영향을 미친 요소는 Tilting이라고 판단할 수 있다. Solenoid 항은 다른 항에 비하여 2차원 정도 적은 값을 보였으며, K 지점 주변에서는 뚜렷한 변화를 관측하기 힘들었다. 이를 1.2×1.2 km 격자 내에서 평균한 값으로 시간 변화를 알아보면 다음 그림과 같 다. 발산항과 Tilting 항은 0700 - 0705 UTC 동안 양의 값을 보이며 증가 하다가 서서히 감소하였고, 그 밖의 항은 큰 변화가 없었다. 특히 모든 항을 더한 값과 상대와도의 변화량이 일치하지 않는 경향을 보였다. 이 는 시간 변화량이 5분 간격으로 비교적 길었기 때문인 것으로 판단된다. 이를 위하여 Domain $4(\Delta x = 50 \text{ m})$ 의 값의 시간 변화량을 나타내 본 결 과, Domain 3에서의 시간 변화와 비슷한 흐름을 보여주고 있으며 0705 UTC에서 두 값이 모두 양의 값을 보였다.

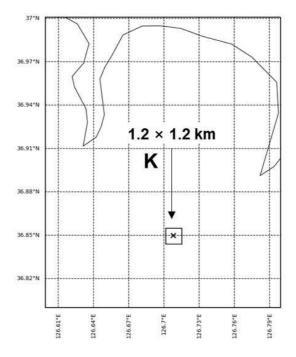


Figure 34. Black square: mean area near point K at domain 3

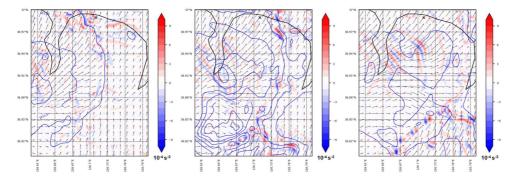


Figure 35. 0700 - 0710 UTC: Advection term, horizontal wind at z = 500 m, sea level pressure

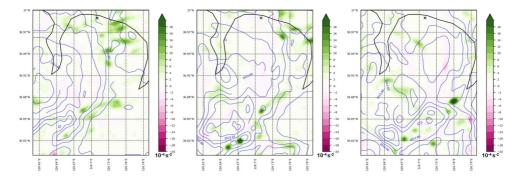


Figure 36. 0700 - 0710 UTC: Divergence term at z = 500 m, sea level pressure

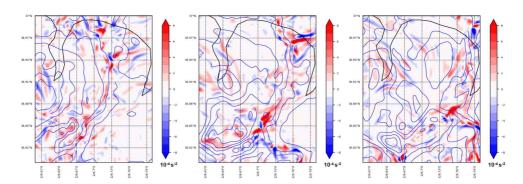


Figure 37. 0700 - 0710 UTC: Tilting term at z = 500 m, sea level pressure

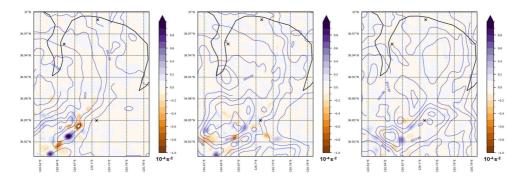


Figure 38. 0700 - 0710 UTC: Solenoid term at z = 500 m, sea level pressure

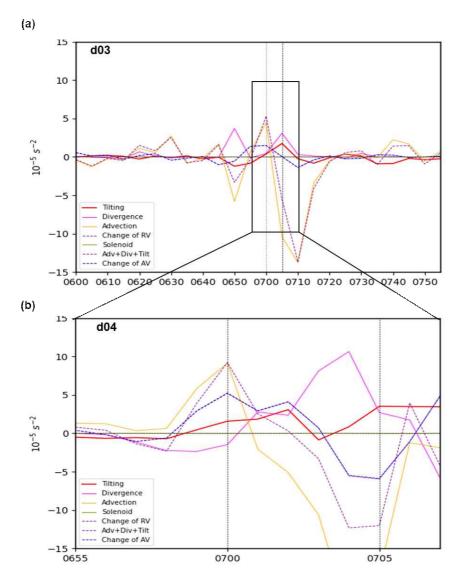


Figure 39. Vorticity budget time series (a) domain 3:0600 - 0800 UTC, (b) domain 4:0655 - 0706 UTC, red line: tilting term, pink line: divergence term, yellow line: advection term, green line: solenoid term, dashed lines: change of relative vorticity, absolute vorticity

제 4 장 요약 및 결론

본 연구의 목적은 QLCS 상에서 gust front에 의한 토네이도성 흐름이 한반도에서 발생하는지 확인하는 것에 있다. 최근 한반도 인근에서 발생하는 토네이도에 대한 관측 빈도수가 증가하고 이에 대한 사회적 관심 또한 크게 늘어남에 따라 한반도 인근에서 발생하는 토네이도에 관한 연구의 필요성 또한 증대되고 있다. 본 연구에서는 2008년부터 2021년까지 14년간의 토네이도 사례를 수집하고 이를 연도별, 월별, 지역별로 분류하였다. 분류 결과 기존 연평균 1 - 2 회에서 최근 5년간 연평균 3회 이상으로 늘어나는 경향을 보였다. 특히 지역별로는 서쪽(인천, 경기, 충남)지역에서 관측하는 토네이도 사례에서 피해가 보고된 경우가 많았으며, 본 연구에서는 그 중 추정 강도는 EFO-1이었으나 EF2 정도의 피해를 야기한 2019년 3월 15일 당진에서 발생한 용오름 사례를 고해상도 수치모 델을 통하여 재현하였다.

실험 결과 gust front 상에서 토네이도성 흐름이 재현되었으며, 그 위치는 실제 관측된 위치에서 남동쪽으로 15 km 부근에서 나타났다. 시간은 약 30분가량 지연되어 나타났다. 종관 기압계와 중규모 기상현상은 관측과 대체로 일치하였다. 다만 ERA5 재분석장에서는 SRH, CAPE 등의 토네이도 발생 가능성 판단에 사용되는 지수들이 비교적 낮게 나타났으나 1km 격자로 모의한 수치모델 모의 실험에서는 지수가 충분히 높게나타난 것을 확인하였다. 그뿐만 아니라 레이더와 위성 관측으로 확인된

QLCS의 형태와 방향 이동속도가 잘 구현되었으며, 종관적으로는 권계면 접힘이 나타나 지상 기압계 발달에 영향을 주었을 것으로 판단된다.

중규모 이하에서는 대기 하층에 gust front를 구현하였으며, 연직속도가 당진 부근으로 매우 강하고, 차가운 하강기류로 인한 온위 하강이 나타났다. 또한 습수를 통하여 수증기 유입을 확인할 수 있었으며, 지상기압계가 국지적으로 저기압을 이루는 지점에서 gust front 후면에서 나타나는 gustnado 형태의 토네이도가 발생하였을 것으로 판단하였다. 또한 와도 예산 분석을 통하여 토네이도가 발생할 때 Tilting 항과 Divergence 항이 중요한 역할을 한다는 것을 파악할 수 있었다. 토네이도의 지속시간은 약 7분 정도로 분석되었으나 토네이도 전후 부는 돌풍현상을 포함하면 관측 사례와 같이 피해가 10분 이상 나타날 수 있다.

본 사례의 연구를 통하여 토네이도 현상의 면밀한 분석을 위해서는 최소 1 km 이하의 격자를 가진 수치모델에서의 모의가 필요함을 알 수 있었다. 이는 중규모 이하 기상현상의 분석에 있어서 고해상도 수치모델이 필요한 이유이기도 하다. 또한 차후 gust front 상에서 발생하는 돌풍및 토네이도 현상에 대해 본 연구에서 분석한 사례 이외의 사례 분석을 통하여 공통된 특징을 분석하는 연구가 필요하다. 뿐만 아니라 본 연구에서 토네이도 모의 예상지역이 낮은 산의 풍하측인 것을 고려할 때, 연구에서 사용한 지형자료(30″ 자료)의 해상도가 실제 지형을 충분히 반영하지 않았을 것이라 가정할 수 있으며, 향후 수치모의 연구에서는 이를 반영해야 할 필요성이 있다.

참 고 문 헌

- 김광식, 1992: *기상학사전.* 향문사
- Agee, E. and Jones, E., 2009: Proposed conceptual for proper identification and classification of tornado events. *Wea. Forecasting.* **24**, 609–617.
- Jenni Rauhala, David M. Schultz, 2009: Severe thunderstorm and tornado warnings in Europe. *Atmospheric Research*, **93**(1–3), p 369–380
- Grieser, J.; Haines, P. Tornado Risk Climatology in Europe. *Atmosphere* 2020, 11, 768
- Fujita, T. T., 1971: Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity. SMRP Research Paper 91,
 University of Chicago, Chicago, p. 42
- Edwards, R. et al., 2010: The enhanced Fujita scale: Past, present, and future. Preprints. *25th Conf. on Severe Local Storms, Denver, CO, Amer. Meteor. Soc.*, 4A.1.
- Houze, R., 1993: Cloud Dynamics, Academic Press, p. 573
- Timothy A. Coleman and P. Grady Dixon, 2014: An Objective Analysis of Tornado Risk in the United States, *Wea. Forecasting*, **29**(2), p. 366-376
- Makenzie J. Krocak and Harold E. Brooks, 2018: Climatological Estimates of Hourly Tornado Probability for the United States, *Wea. Forecasting*, **33**, 59–69

- Agee, E. and Jones, E., 2009: Proposed conceptual for proper identification and classification of tornado events. *Wea. Forecasting*, **24**, 609-617
- Eigo Tochimoto et al., 2022: Tornadogenesis in a Quasi-Linear

 Convective System over Kanto Plain in Japan: A Numerical Case

 Study, MWR, 150(1), p. 259-282
- Guidelines for the Japanese Enhanced Fujita Scale:

 https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/kaisetsu/jefs
 cale en.html
- Jiayi Chen et al., 2018: Tornado climatology of China. *Int. J. Climatol.*, **38**, p. 2478–2489
- Shizhang Wang et al., 2019: The Impact of Stochastically Perturbed Parameterizations on Tornadic Supercell Cases in East China. MWR, 147(1), p. 199–220
- WSEC, 2006: A recommendation for an enhanced Fujita scale

 (EF-scale). Texas Tech University Wind Science and Engineering

 Center Rep., p. 95
- Alexander Chernokulsky et al., 2020: Tornadoes in Northern Eurasia: From the Middle Age to the Information Era, *Mon. Wea. Rev.*, **148**(8), 3081–3110
- 인소라외, 2016: 수치모델을 활용한 2014년 6월 10일 일산 용오름 발생 메커니즘 분석. *J. Korean Earth Sci. Soc.*, v. 37, no. 4, p. 187-199,

- 이승연, 박선기, Yu Xing, and 김춘지, 2016: 고해상도 WRF 모델 시뮬레이션을 통한 2014년 고양 토네이도 분석. *한국기상학회 학술대회 논문집*, 2016.10, 920-921.
- 이승호, 이재병, 2015: 최근 5년간 우리나라에서 발생한 토네이도 사례 연구. 한국기상학회 학술대회 논문집, 2015.10, 714-716
- 항공기상청, 2020: 공항경보 및 급변풍경보 지침
- ICAO, 2010: Annex 3 Meteorological Service for International Air

 Navigation
- 이화여대, 2016: *한반도 용오름 현상의 사례분석 및 중규모 기상특성* 분석 보고서
- Cook, C., Kim, S.-S., and Lee, C., 1965: On the seoul tornado of September 13 1964. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 1(1), 1-7. (in Korean)
- 이영규, 2019: 국지성 풍수재 사고와 우리의 대비 자세. 화제보험협회 웹진, **88**
- Hong, S. and Lim, J., 2006: The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6). *Journal of the Korean Meteorological Society*, **42**, 129-151.
- Mlawer E.J., et al., 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the long wave. *J. Geophys. Res.* **102D**, 16 663–16 682
- 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.*, b. D13103

- Dudhia, J., 1989: Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 3077-3107,
- Chen, F. and Dudhia, J., 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.
- Bluestein, H.B., 1993: *Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes, vol.***II.Oxford University Press, UK, 594 p.
- Markowski, P. et al., 2010: *Mesoscale Meteorology in the Midlatitudes*. Wiley, p.430
- Peter V. Hobbs and John M. Wallace, 1977: Atmospheric Science: An Introductory Survey. Academic Press, p. 350
- Thompson, R. L., R. Edwards, J. A. Hart, K. L. Elmore, and P. Markowski, 2003: Close Proximity Soundings within Supercell Environments Obtained from the Rapid Update Cycle. *Wea. Forecasting*, **18**, 1243–1261
- Martner, B. E., 1997: Vertical Velocities in a Thunderstorm Gust Front and Outflow. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **36**, 615–622,
- Luchetti, N. T., K. Friedrich, C. E. Rodell, and J. K. Lundquist, 2020:

 Characterizing Thunderstorm Gust Fronts near Complex Terrain.

 Mon. Wea. Rev..148. 3267–3286
- Trapp, R. J., S. A. Tessendorf, E. S. Godfrey, and H. E. Brooks, 2005:

 Tornadoes from Squall Lines and Bow Echoes. Part I:

 Climatological Distribution. *Wea. Forecasting*, **20**, 23–34

Atkins, N. T., J. M. Arnott, R. W. Przybylinski, R. A. Wolf, and B. D. Ketcham, 2004: Vortex Structure and Evolution within Bow Echoes. Part I: Single-Doppler and Damage Analysis of the 29 June 1998 Derecho. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 2224-2242

Abstract

A Study on Synoptic Analysis and Mesoscale Mechanism for Tornado in South Korea on 15th March 2019

변 가 영(Byen Ka-young) 지구환경과학부 대기과학전공 (School of Earth and Environmental Sciences, Atmospheric Science department) The Graduate School Seoul National University

Although tornadoes are rare in Korea, the interest in them has recently increased. In this study, the case of a tornado that occurred in Dangjin, Chungcheongnam-do on March 15th, 2019, 0650 - 0730 UTC was analyzed through the WRF modeling through four domains (Δx = 5, 1, 0.2, 0.05 km). At 300 hPa in domain 1, tornado occurred place was located north of the entrance of the upper-level jet, and downdraft was simulated around this area. At 500 hPa, strong potential

vorticity flowed into Dangjin, confirming tropopause folding. At 850 hPa,

a low-level jet and low-level moisture flowed into Dangjin. In domain 2,

SRH and CAPE were strongly simulated and strong wind shear and gust

fronts appeared. The gust front was clearly identified in domain 3 and

4, and a strong updraft and radar reflectivity appeared in the front

side of the gust front. Its simulated location was located 15 km south

of the tornado observed location. Low-level moisture also occurred at

mock locations in the form of hooks. As a result of examining the

vertical cross-section in the east-west direction, the potential

temperature change was significant, and the rear inflow jet was flowed

into the tornado simulated place. In the time series of each term of

the vorticity equation strong tilting and divergence appeared around

0700 - 0705 UTC. In this study, it was confirmed that the tropopause

folding and the LLJ coupled to Dangjin strengthened the gust front,

causing strong updraft and tilting which could cause tornado.

keywords: Tornado, WRF, Gust front, Vorticity, Mesoscale

Student Number: 2021-24468

- 72 -

감사의 글

막연한 궁금증으로 시작했던 석사 과정을 마치게 되었습니다. 2년의 학교생활을 하며 주변의 도움이 없었다면 졸업과 논문 작업을 이루어 낼 수 없었을 것입니다.

먼저 석사 학위 과정을 보내며 길을 찾지 못하던 저를 응원과 격려로 이끌어 주신 김정훈 지도교수님께 깊은 감사를 드립니다. 입학하기 전부터 지금 이 순간까지 학문의 길에서 롤 모델이 되어 주신 멋진 교수님이자 학문의 선배님이셨습니다. 늘 깊은 조언을 아끼지 않고 해 주신 백종진 심사위원장님과 손석우 교수님께도 이 자리를 빌려 인사를 전하고 싶습니다. 부족한 학생에게 교수님들의 조언은 뚜렷한 이정표가 되어 길을 밝혀 주었습니다. 수업과 강연에서 해 주신 말씀들도 앞으로 과학자로서, 예보관으로서, 한 사람으로서 어떤 자세로 살아가야 할지 생각해 본기회가 되었습니다.

직장과 학교를 병행하며 예보분석응용 연구실의 많은 학우분과 연구원분들의 도움을 받았습니다. 지면에는 그 도움들을 다 적지 못할 정도로 많습니다. 프로그래밍 선생님이 되어 주셨던 김정회 학우, 항상 열정적인 모습으로 반짝반짝 빛났던 신예원 학우, 연구실의 업무에 가장 앞서 나서 주었던 김은태 학우, 물리 과정을 청산유수로 설명해 준 이주현학우는 입학한 그 날부터 항상 마음속의 든든한 선배님들이었습니다. 비슷하게 입학해 공감대가 많았던 양성일 소령님, 기상청에 관심이 많아함께 이야기할 수 있는 분야가 많았던 김정민 학우, 멋진 차트와 분석력으로 상담 상대가 되어 준 박이준 학우에게도 감사 인사를 전합니다. 누

구보다 일찍 나는 새처럼 꽉 찬 생활을 하는 김주섭 학우, 옆자리에서 항상 격려와 응원을 나누었던 박준석 학우, 관측 경험으로 현장의 이야기를 해 주었던 정민혁 학우, 새로운 분야를 개척하고 있는 김준희 학우에게도 많은 것을 배우는 시간이었습니다. 학교생활에 대한 조언을 아낌없이 해 준 백성호 학우, 발표 때마다 내 일처럼 살펴주신 이단비 박사님, 김수현 박사님, 민재식 선생님께도 다시 한번 감사 말씀드립니다. 지면에는 다 적지 못했지만, 연구실 분들뿐만 아니라 같은 수업을 수강한학우분들께도 많은 도움을 받았습니다. 또한, 지환부 행정실의 선생님들께서 챙겨주신 많은 일정 덕분에 제가 놓치지 않고 졸업할 수 있었습니다. 정말 감사드립니다.

기상청 총괄예보관실 분들께도 감사 말씀드립니다. 2년 동안 직장과학업을 병행할 수 있었던 것은 함께 일하는 동료들의 배려가 있었기 때문이라는 것을 절실히 느끼고 있습니다. 처음 대학원 합격 소식을 전했을 때도 걱정이 많으셨을 허진호 과장님, 대학원 문화를 전혀 모르던 저에게 경험을 들려주신 변건영 과장님과 임보영 사무관님, 바로 옆자리에서 늘 저를 응원해주신 이예숙 전문관님, 힘들어하는 저를 항상 웃을 수있도록 위로해 주신 박지훈 사무관님, 예보 분석에 대한 노하우를 알려주신 김희아 사무관님, 토네이도에 대한 연구를 처음 함께할 수 있는 배경을 만들어 주신 홍근도 주임님, 석사 선배님으로 제가 항상 질문으로 귀찮게 해 드렸을 박성희 주임님, 함께 해외 논문을 찾아보며 이야기를 나누었던 엄윤섭 주임님, 논문 작성 경험을 알려주신 장재훈 주임님, 학업을 수행할 동안 함께 근무하며 희노애락을 나눌 수 있어 행복했습니다. 제가 가장 폐를 많이 끼쳤을 총괄 4과의 막내들, 임다솔 주임님과 윤태영 주임님이 계셔서 안심하고 추진력을 얻으며 일하고 공부할 수 있

었습니다.

무엇보다 석사 학위 과정을 행복하게 보낼 수 있게 해 주셨던 변량근 선생님, 정미경 선생님께, 그리고 옆에서 저를 응원해 준 석호에게도 사 랑과 감사를 전하고 싶습니다. 가족들의 도움과 응원이 아니었다면 지난 2년이 너무 힘들었을 것입니다. 석사 학위 과정을 시작할 때 걱정을 하 면서도 과감히 등을 떠밀어준 친구들과 2년 동안 제 모습을 응원해 준 많은 분들은 제 마음속의 빛이자 등대였습니다.

아프리카의 속담에는 한 아이를 키우는데 온 마을이 필요하다는 말이 있다고 합니다. 학업을 하면서 저는 그것이 아이에게 국한된 말이 아니라는 것을 온몸으로 느꼈습니다. 주변 사람들의 응원과 위로, 도움과 배려, 그리고 애정이 아니었다면 저는 더 자랄 수 없었을 것입니다. 저도 언젠가 누군가에게 힘을 줄 수 있는 사람, 그리고 누군가에게 충실한 조언자가 될 수 있는 선배, 반딧불이처럼 어둠을 밝히는 과학자가 되기를 소망합니다. 감사합니다.