

## X밴드 이중편파레이더를 활용한 고양 토네이도 발생 사례 분석: 2014년 6월 10일

정종훈<sup>1)\*</sup> · 김연희<sup>2)</sup> · 오수빈<sup>1)</sup> · 임은하<sup>3)</sup> · 주상원<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>기상청 국립기상과학원 수치자료응용과, <sup>2)</sup>기상청 국립기상과학원 응용기상연구과,

<sup>3)</sup>기상청 국립기상과학원 관측기반연구과

(접수일: 2015년 11월 19일, 수정일: 2016년 1월 4일, 게재확정일: 2016년 1월 4일)

### Investigation of Goyang Tornado Outbreak Using X-band Polarimetric Radar: 10 June 2014

Jong-Hoon Jeong<sup>1)\*</sup>, Yeon-Hee Kim<sup>2)</sup>, Su-Bin Oh<sup>1)</sup>, Eunha Lim<sup>3)</sup>, and Sangwon Joo<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Numerical Data Application Division, National Institute of Meteorological Sciences, KMA, Seoul, Korea

<sup>2)</sup>Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, KMA, Jeju, Korea

<sup>3)</sup>Observation Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, KMA, Jeju, Korea

(Manuscript received 19 November 2015; revised 4 January 2016; accepted 4 January 2016)

**Abstract** On 10 July 2014, tornado outbreak occurred over Goyang province in Korea. This was the first supercell tornado ever reported or documented in Korea. The characteristics of the supercell tornado were investigated using an X-band polarimetric radar, surface meteorological observation, wind profiler, and operational numerical weather prediction (Regional Data Assimilation and Prediction System, RDAPS). The supercell tornado developed along a pre-existing dryline that was contributed to surface wind shear. The radar analyses examined here show that the supercell tornado indicated a hook echo with mesocyclone. The descending reflectivity core as well as detected before tornadogenesis and prior to intensification of supercell. The supercell tornado exhibited characteristics similar to typical supercell tornado over the Great Plains of the United States, such as hook echo, bounded weak echo region, and slower movement speed relative to the mean wind. Compared to the typical supercell tornado over U.S., this tornado showed horizontal scale of the mesocyclone was relatively smaller and left-mover.

**Key words:** Supercell tornado, X-band polarimetric radar, Korea

## 1. 서 론

수퍼셀(supercell)은 강한 회전성의 연직 상승 바람을 동반하는 독립된 뇌우구름으로, 돌풍, 우박, 집중호우 등을 동반하며 평균 15분 이상 지속된다(Brown

and Lemon, 1976). 이러한 수퍼셀에 동반된 토네이도(tornado)는 강한 회전성의 공기 기둥으로,  $50 \text{ m s}^{-1}$ 에 달하는 강한 바람을 발생시켜 많은 인명 및 재산피해를 유발한다(Fujita, 1981). 토네이도의 형성을 위해서는 일반적으로 강한 윈드쉬어(wind shear)와 대기불안정(instability)이 필수적이라고 알려져 있으며(Barber and Mahrt, 1981; Doswell, 2001), 그러한 원인으로 대부분의 토네이도는 주로 평원지역에서 관측되었다. 미국의 경우, 서부 대평원을 중심으로 토네이도가 빈번히 발생하여, 관측자료와 수치모델을 활용한 토네이

\*Corresponding Author: Jong-Hoon Jeong, Numerical Data Application Division, National Institute of Meteorological Sciences, KMA, 61, Yeouideabang-ro 16-gil, Dongjak-gu, Seoul 07062, Korea  
Phone: +82-70-7850-6866, Fax: +82-2-831-0295  
E-mail: jeongih737@korea.kr

도의 구조 및 형성에 관한 연구가 오래 전부터 수행되어 왔으며(Davies-Jones et al., 1978; Brooks et al., 1993; Wakimoto et al., 2003), 최근에는 집중관측을 통해 얻어진 시·공간 고해상도의 지상 및 원격탐사 기기를 활용하여 토네이도의 형성 원리를 규명하고자 하는 많은 연구들이 진행 중에 있다(Markowski et al., 2012; Wurman et al., 2012). 특히 국외의 경우에 이중편파레이더 관측자료를 이용하여 토네이도를 관측하였고, 시·공간 고해상도의 레이더 자료를 활용함으로써 토네이도의 구조 및 형성, 발달, 소멸에 관한 상세 분석들이 실시된 바 있다(Ryzhkov et al., 2005; Skinner et al., 2014; Snyder and Bluestein, 2014). 또한 중국(Meng and Yao, 2014)과 일본(Suzuki et al., 2000)의 일부 평원지역에서 토네이도가 관측되었고, 관측 자료를 활용한 사례 분석이 진행되었다.

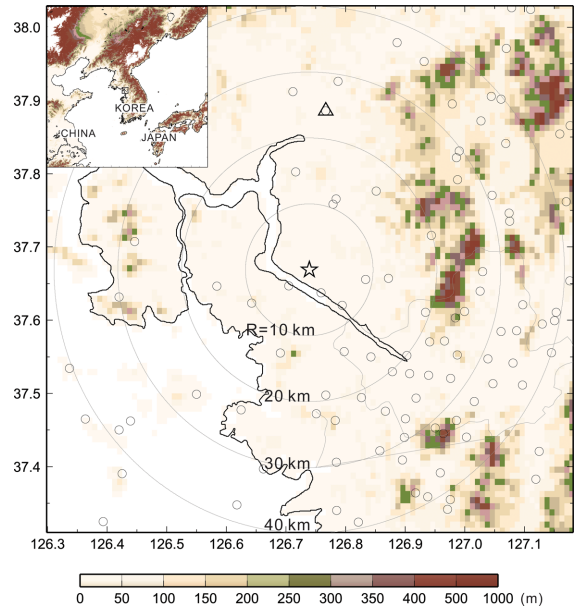
반면, 산악지역은 지형적인 영향으로 인해 저층에서의 강한 윈드쉬어 형성이 어려워지며(Bosart et al., 2006), 이러한 이유로 산악지형이 우세하게 나타나는 한반도 내륙에서는 토네이도의 발생 확률이 상대적으로 낮다고 알려져 있다.

한반도의 해양 및 인근 해안에서 발생하여 관측된 용오름(waterspout)은 약 8회이나, 발생 규모나 빈도 면에서 심각한 피해를 유발한 경우는 거의 없었다. 또한, 용오름은 지속 시간이 짧을 뿐만 아니라 해양지역에서의 관측 장비 부재로 인하여, 발생 원인 및 특성을 분석한 연구는 전무하다.

2014년 6월 10일 한반도의 내륙에 위치한 경기도 고양시 일산에서 수퍼셀에 동반된 토네이도가 이례적으로 발생하였고, 화훼농가와 비닐하우스 40여 동을 파손하여 소방방재청 추산 약 15억원의 재산 및 인명 피해를 유발하였다. 고양에서 발생한 토네이도는 이전의 용오름 사례와는 달리 지상관측자료의 활용이 가능하며, 특히 형성에서 소멸까지 약 18분 정도 지속되는 동안 건설기술연구원(Korea Institute of Civil engineering and building Technology; KICT)에서 운영하는 X밴드 이중편파레이더에서 관측되었다(KICT, 2014). KICT의 X밴드 이중편파레이더는 수평관측(Plan Position Indicator; PPI) 및 연직단면관측(Range Height Indicator; RHI) 모드의 활용을 통해 본 토네이도 사례에 대한 고해상도의 입체적 관측자료를 수집하였다. 이에 본 연구에서는 이중편파레이더 및 지상관측자료와 지역규모모델 자료를 이용하여 한반도 내륙에서 발생한 수퍼셀 토네이도의 형성 및 발달에 관한 분석을 수행하였다.

## 2. 자료 및 분석방법

2014년 6월 10일 발생한 수퍼셀에 동반된 토네이도



**Fig. 1.** Location of the KICT radar at Goyang province (☆), wind-profiler (△), and surface observation stations (○). The circle enclosed the observational areas of the KICT radar (10, 20, 30, and 40 km in radius).

의 발달 환경 및 특성을 분석하기 위해 정지궤도 천리안 통신해양기상위성(Communication, Ocean, and Meteorological Satellite; COMS)의 적외 영상을 사용하였다. 토네이도와 수퍼셀의 시·공간 고해상도의 분석을 위하여, KICT에서 운영되는 X밴드 이중편파레이더(위도: 37.67°N, 경도: 126.74°E)를 사용하였다. X밴드 레이더는 S, C밴드 레이더에 비해 시간 및 공간적으로 고해상도 관측하므로 강수시스템 분석에 더 용이하다. 연구에 활용된 X밴드 이중편파레이더는 9.41 GHz로 수평 및 수직 편파를 연속적으로 송·수신하며, 약 60 m 간격으로 40 km의 반경을 관측한다. 안테나는 parabolic dish를 사용하며, 지름은 1.8 m이고 빔 폭은 1.4°이다. Figure 1은 KICT 레이더의 위치(별표)와 관측 반경을 나타내었다. 토네이도 분석에 활용된 KICT 레이더의 주사모드는 매 1분마다 5°, 6° 수평관측(Plan Position Indicator; PPI)을 실시하며, 매 10분마다 연직단면관측(Range Height Indicator; RHI)을 18°로 간격으로 20개(17°, 35°, 53°, 71°, 89°, 107°, 125°, 143°, 161°, 179°, 197°, 215°, 233°, 251°, 267°, 287°, 305°, 323°, 341°, 359°) 방위각 방향에서 수행한다. RHI 관측은 고도각을 0~180° 회전하여 관측하며, 5분 간격의 3차원 볼륨관측자료를 생산한다(KICT, 2014).

KICT 레이더에서 관측되는 이중편파변수는 수평반사도( $Z_H$ ), 차등반사도( $Z_{DR}$ ), 차등위상차( $\phi_{DP}$ ), 교차상관

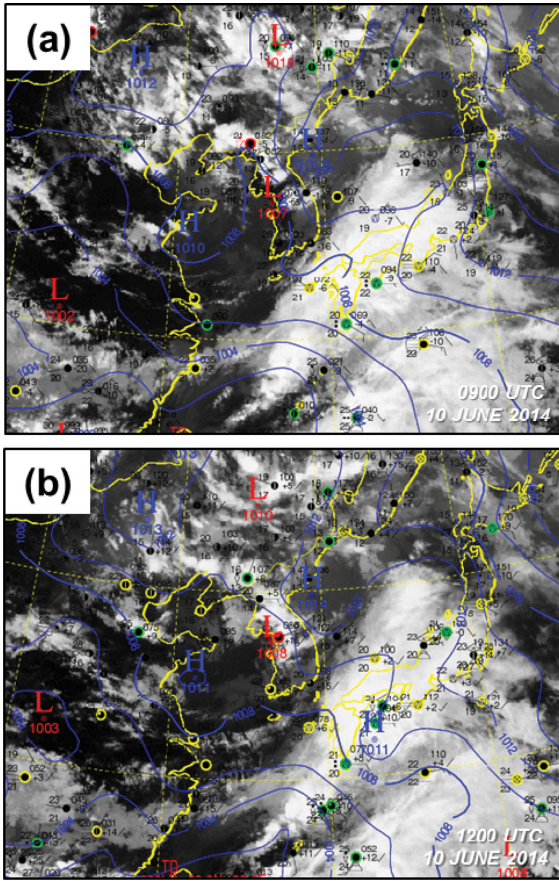


Fig. 2. Surface weather maps with superimposed COMS IR images at (a) 0900 UTC and (b) 1200 UTC 10 June 2014.

계수( $\rho_{HV}$ ), 시선속도( $V_D$ ), 스펙트럼폭( $W_S$ )이다. 본 연구에서는 레이더 자료의 품질관리를 위하여 이중편파로부터 레이더 총 수신 전력비로 계산되는 NCP (Normalized Coherent Power) 0.6 이하, 신호대잡음비 (Signal to Noise-Ratio; SNR) 5 dB 이하의 자료를 제거하였다. 또한 강수시스템 분석에 활용되는  $Z_{Hh}$ ,  $V_D$ 는  $\rho_{HV}$  0.6 이하의 자료를 제거하였다. 레이더 수평 및 연직 관측자료는 Cressman 가중함수를 활용하여 0.1 km 간격으로 내·외삽한 격자자료로 변환하였고, 영향반경은 0.15 km로 설정하였다.

토네이도 발생에 관한 환경 바람장 분석을 위하여 파주에 설치된 수직측풍장비(위도: 37.89°N, 경도: 126.77°E) 자료를 사용하였다(Fig. 1, 삼각형). 수직측풍장비는 토네이도 발생 지점으로부터 약 20 km 북쪽에 설치되어 있으며, Low mode의 연직 5 km까지 수평 풍향, 수평 풍속, 연직바람, 신호대잡음비 등의 변수들을 연직고도 70~80 m 간격으로 매 10분마

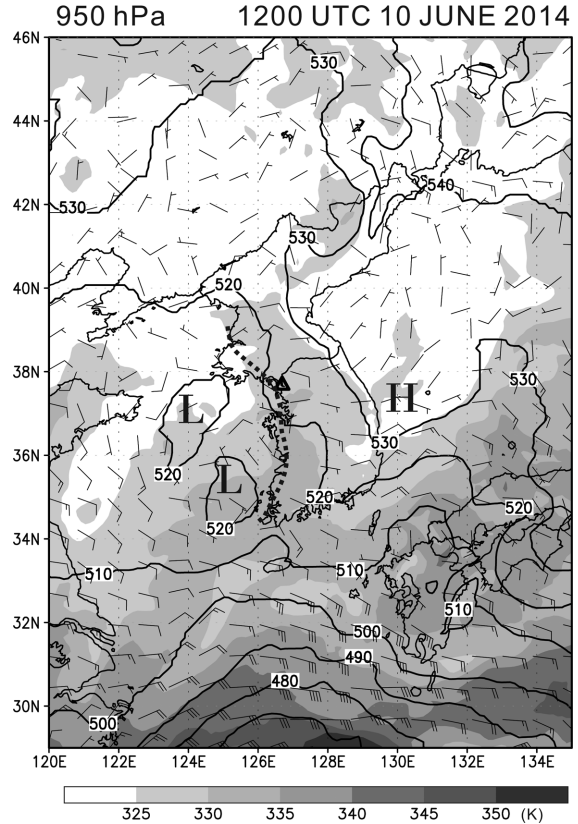
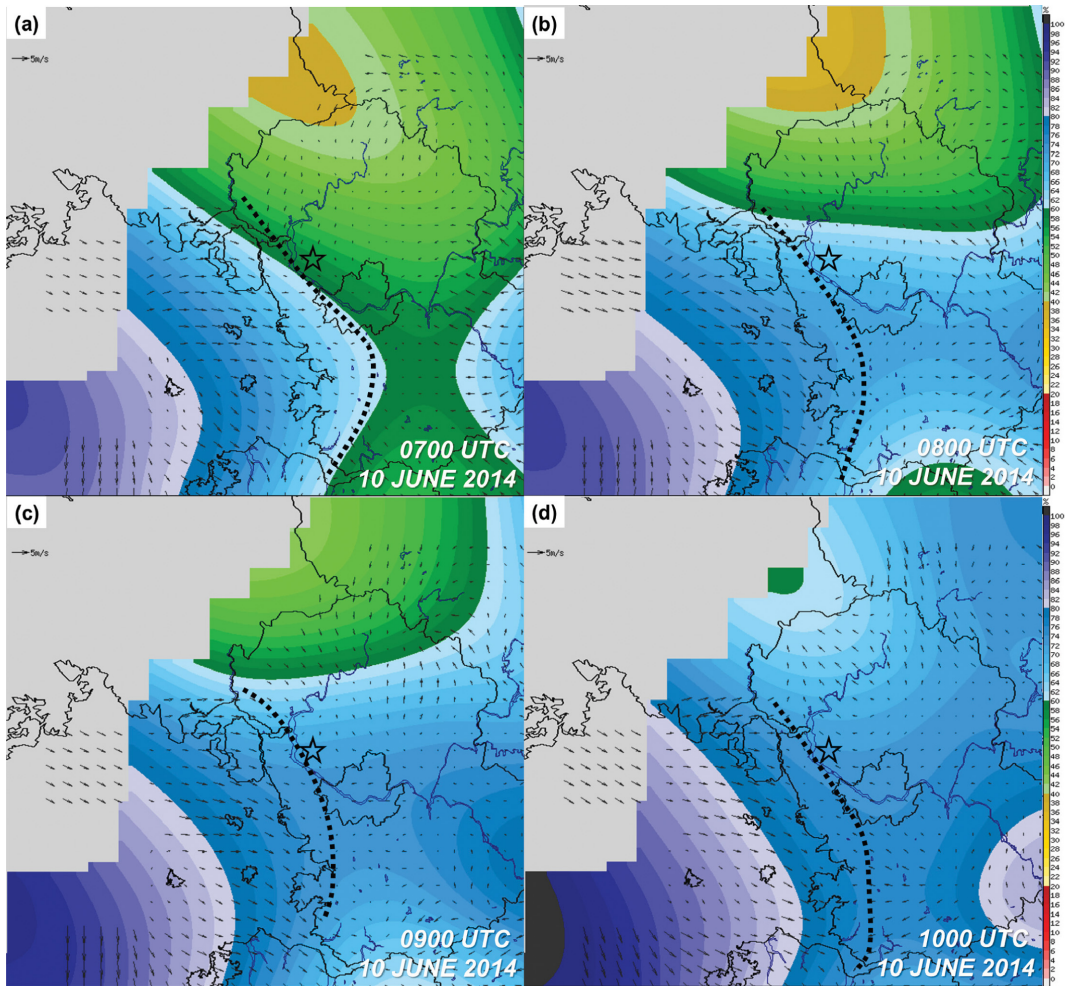


Fig. 3. Mesoscale analysis of geopotential height (gpm, solid), equivalent potential temperature (K, shaded) at 950 hPa at 1200 UTC 10 June 2014. Contour intervals are 10 gpm for geopotential height. For winds, full (half) barbs represent 5 (2.5)  $m s^{-1}$ . The location of the wind shear (dotted line) and tornado outbreak (marked by triangle) are superimposed.

다 제공한다. 수직측풍장비는 토네이도를 유발한 수퍼셀과 강수시스템 발달에 관한 대기경계층내의 수평바람 분석에 활용하였다. 또한 수퍼셀 토네이도 발생지점 인근의 지상관측자료(Fig. 1, 원)를 활용하여 수퍼셀 형성에 관한 지상 바람, 습도 분석에 활용하였다.

### 3. 종관 및 중규모 분석

수퍼셀 토네이도의 종관 환경을 분석하기 위해서 COMS 적외영상과 지상 관측 자료를 병합한 일기도를 사용하였다(Fig. 2). 수퍼셀 토네이도의 형성 1시간 이전인 0900 UTC에 한반도 서쪽에 위치한 저기압의 영향으로 서해안 지역으로는 서풍, 남서풍이 지배



**Fig. 4.** Surface humidity (% , color shading) and wind vectors ( $\text{m s}^{-1}$ ) at (a) 0700, (b) 0800, (c) 0900, and (d) 1000 UTC 10 June 2014. The position of dryline is denoted by a dashed black line.

적이며, 북동쪽에 위치한 고기압의 영향으로 내륙 지역으로는 동풍, 북동풍의 지상 바람이 지배적이다. 0900 UTC COMS 적외영상에서 구름무리는 지상 저기압과 인접한 서해안에서 발달하였다(Fig. 2a). 수퍼셀 토네이도의 형성 1시간 30분 이후인 1200 UTC에 토네이도가 발생한 고양지역을 포함하여 구름무리는 점진적으로 남쪽으로 확대되었으며, 서해안을 따라 발달하였다(Fig. 2b).

구름무리 형성에 관한 중규모 분석을 위하여 지역 규모모델(Regional Data Assimilation and Prediction System; RDAPS) 950 hPa에서의 지위고도, 포화상당온위( $\theta_e$ ), 수평바람을 사용하였다(Fig. 3). 1200 UTC의 950 hPa에서 서해안은 저기압의 영향으로 서풍, 남서풍이 나타났고, 내륙은 고기압에 의해 동풍, 남동풍이

지배적으로 나타났다. 따라서 구름무리는 고기압, 저기압의 경계에서 상대적으로 강한 수평 윈드쉬어( $> 5 \text{ m s}^{-1}$ , Fig. 3, 점선)에 평행하게 발달하였고, 이는 수퍼셀 토네이도 후면을 포함하여, 서쪽 해안선을 따라 중부지방에서부터 남부지방으로 길게 형성되었다. 특히 Fig. 2b에서 COMS의 적외영상에서 관측된 구름무리는 윈드쉬어를 따라 형성되어, 950 hPa에서의 강한 수평바람의 경도는 수퍼셀을 포함한 구름무리 형성 및 발달에 큰 영향을 미쳤음을 알 수 있다. Rotunno and Klemp (1985)은 윈드쉬어가 수퍼셀에 동반된 토네이도의 역학적 대류 형성에 중요한 원인임을 제시하였다.

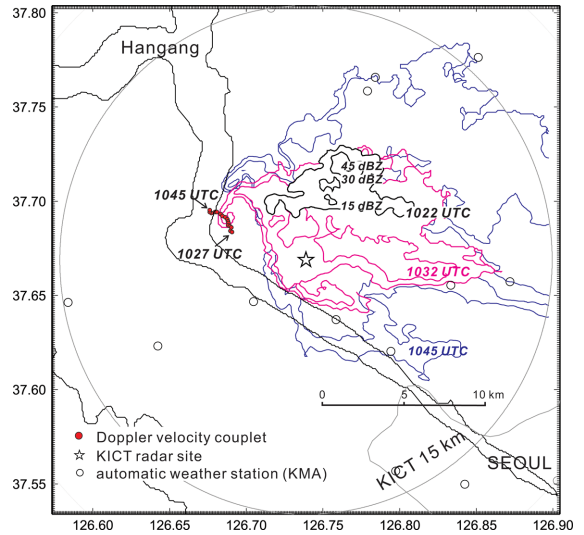
또한 한반도 서해안의 저기압은 서풍, 남서풍에 의해 저위도에서부터의 온난, 습윤한 공기를 한반도 지

역으로 공급하며, 특히 불안정한 공기의 유입으로 서해안 지역에 330 K 이상의 상대적으로 높은 포화상당온위 분포가 나타났다. 반면에 한반도 내륙지역으로 동풍, 북동풍에 의해 상대적으로 건조한 공기가 이루어졌다. 따라서 한반도 중부지역에서부터 남부지역까지 서해안 지역으로 북쪽-남쪽으로 길게 건조선(dryline)을 형성하였다. Figure 4의 제시된 건조선은 지상관측 자료에서 상대습도(5%)와 수평 바람쉬어( $3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ )가 변화하는 영역으로 설정하였다. Bluestein and Parks (1983)에서 제시한 건조선은 본 사례와 유사하게 토네이도의 형성 이전에 발생하였으며, 이는 수퍼셀 토네이도의 형성, 이동, 병합을 결정하는 요인임을 제시하였다.

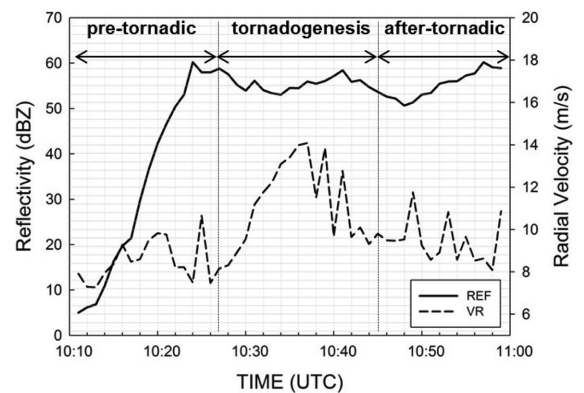
Figure 4는 수퍼셀에 동반된 토네이도의 발생 지점 주변으로 지상 습도, 바람 관측 자료를 나타내었다. 건조선(Fig. 4, 점선)의 위치는 상대습도와 수평바람의 경도가 크게 발생한 지역으로 구분하였다. 수퍼셀 토네이도 형성 3시간 이전, 0700 UTC의 건조선은 수퍼셀이 발생한 후면으로 형성되었다. 건조선의 서쪽으로 상대적으로 높은 상대습도(> 60%)를 나타내었으며, 지상바람은 평균  $5 \text{ m s}^{-1}$  이상의 서풍, 남서풍이 관측되었다(Fig. 4a). Hutchinson and Bluestein (1998)와 Schultz (2004)에 의해 제시된 것과 같이 건조선의 동쪽으로 수퍼셀 토네이도가 형성되었으며, 상대습도 60% 이하로 관측되었다. 상대적으로 낮은 상대습도가 관측된 지역은 지표 근처의 단열가열로 인하여 발생하였으며, 시간이 지남에 따라 강수의 형성으로 상대습도가 60% 이상의 지속적인 증가를 보였다(Figs. 4b-d). 지상바람은 평균  $5 \text{ m s}^{-1}$  이하의 북풍, 북동풍이 지배적이며, 건조선이 형성된 지역으로 약한 수렴을 나타내었다. 3시간이후에도 건조선을 경계로 지속적으로 지상에 윈드쉬어가 관측되었으며(Figs. 4b-d), 상대습도 차이에 의한 성질이 다른 두 공기의 수렴은 수퍼셀에 동반된 토네이도 형성 과정에 중요한 역할을 하였다(Rose et al., 2004).

#### 4. 수퍼셀 토네이도 분석

수퍼셀에 동반된 토네이도의 이동, 강도, 크기 등에 관한 특성을 분석하기 위하여 KICT의 X밴드 이중편파레이더를 활용하였다. KICT 레이더는 형성된 수퍼셀 토네이도 발생 지점으로부터 남동쪽으로 약 5.3 km 떨어진 곳에 위치하고 있으며(Fig. 5), 수평 및 연직 레이더 관측을 통하여 수퍼셀의 형성 및 발달에서부터 토네이도의 형성, 발달, 소멸에 관한 자료를 획득하였다. 토네이도의 위치는 1분 간격의 PPI 관측자료에서 레이더 관측 시선속도가 양, 음의 값으로 반복 관측(Doppler velocity couplet, Ryzhkov et al.,



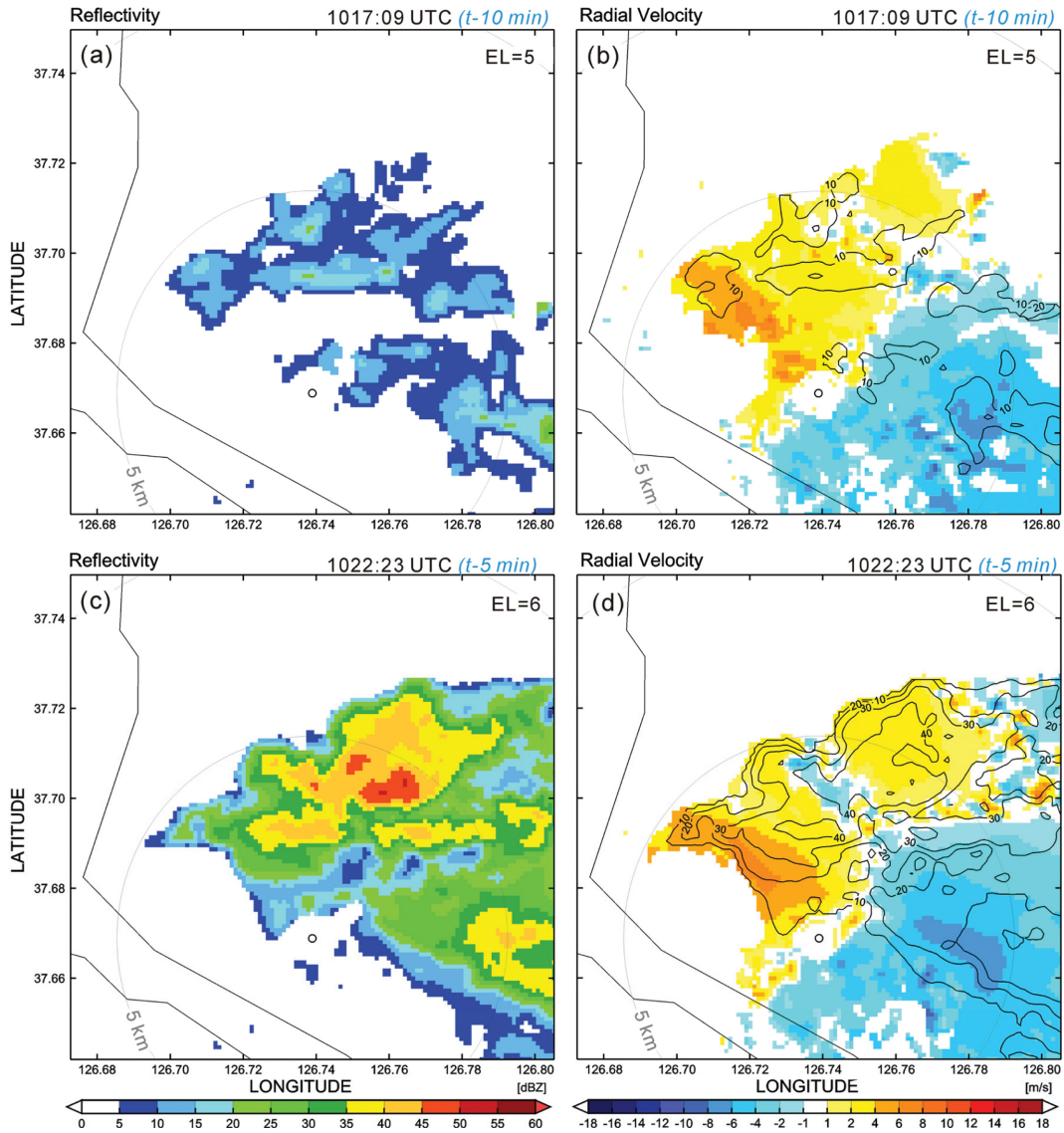
**Fig. 5.** Hook echo ( $1.5^\circ$  elevation angle) associated with Goyang supercell tornado at 1022, 1032, 1045 UTC recorded from the KICT radar. The reflectivity observed by radar indicated every 15 dBZ. Red dots represented the location of the tornado based on Doppler velocity couplet.



**Fig. 6.** Reflectivity and radial velocity profiles in PPI from 1010 to 1100 UTC 10 June 2014. The insets show the pre and after tornado genesis during this period.

2005; Skinner et al., 2014; Snyder and Bluestein, 2014) 되는 구간으로 정의하였다. Figure 6은 KICT 레이더의 1분 간격의  $5^\circ$ ,  $6^\circ$  고도각의 수평관측 반사도와 시선속도를 시계열로 나타낸 그림이다. 반사도와 시선속도의 증가에 따라 다음과 같은 단계들로 구분하였고(Fig. 6), 각각의 단계에서 나타나는 관측특성을 다음과 같이 분석하였다.

- (i) 수퍼셀 형성(1010~1026 UTC)
- (ii) 수퍼셀 토네이도 형성 및 발달(1027~1045 UTC)

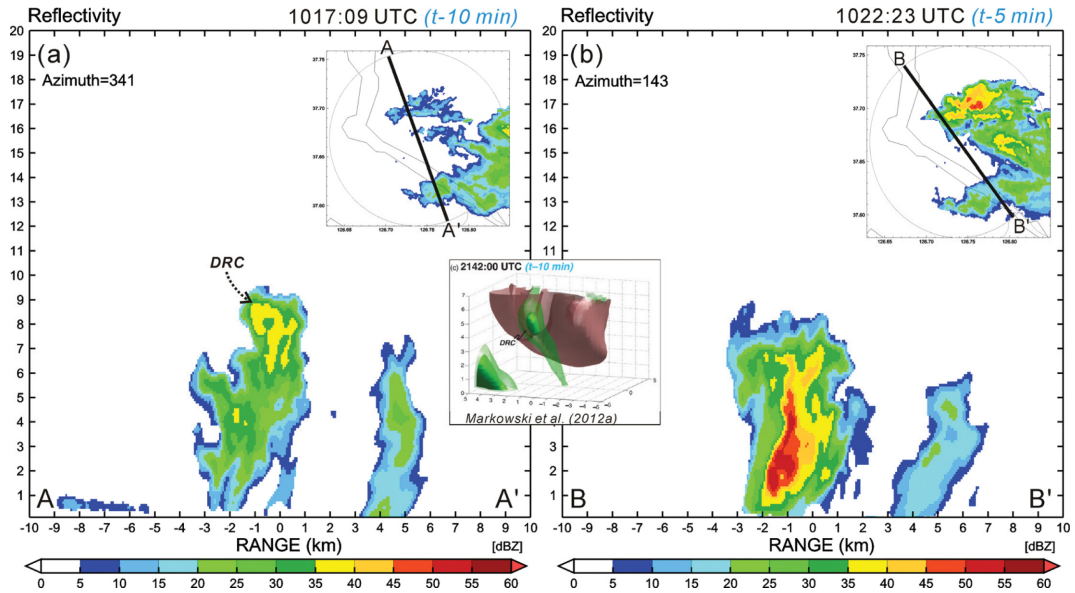


**Fig. 7.** Horizontal reflectivity (a, c) and radial velocity (b, d) plotted in PPI at 1017:09 UTC (a, b) and 1022:23 UTC (c, d) 10 June 2014 (“ $t - X$  min” indicate  $X$  min. prior to the tornado outbreak). Contours of reflectivity are overlaid on the radial velocity plotted (b, d). The location of KICT radar is indicated by circular marker.

#### 4.1 슈퍼셀 형성(1010~1026 UTC)

슈퍼셀을 유발한 강수시스템은 레이더 수평 PPI 자료에서 1012 UTC에 KICT 레이더로부터 북쪽으로 3 km 떨어진 위치에서 관측되었으며, 1017 UTC에 5° 고도각 반사도 자료에서 25 dBZ 이상으로 관측되었다(Fig. 7a). 또한 레이더 시선속도 자료에서 강수시스템이 형성되는 후면으로 남서풍이 6 m s<sup>-1</sup> 이상으로 관측되었다. 1022 UTC에 강수시스템은 급격히 발달하여 최대 60.2 dBZ를 관측하였으며(Fig. 6), 레이더

시선속도 자료에서 후면의 남서풍이 10 m s<sup>-1</sup> 이상의 값을 보이며, 점진적으로 강화되는 형태를 보였다. 강수시스템은 느린 속도(< 2 m s<sup>-1</sup>)로 북서쪽으로 이동하여, 거의 정체하는 형태를 보였다. 강수시스템이 상대적으로 느리게 이동하는 원인은 사전연구들의 Bluestein and Jain (1985)와 Corfidi et al. (1996)에서 제시되었다. 이는 강수시스템의 이동방향 및 속도가 구름 높이에서의 평균 주변 바람의 풍향, 풍속에 비례하기 때문이다. 파주 수직측풍장비(Fig. 1)의 1020



**Fig. 8.** Vertical reflectivity plotted in RHI at (a) 1017:19 and (b) 1022:23 UTC 10 June 2014. The inset is a figure from Markowski et al. (2012) showing what happens when descending reflectivity cores were formed.

UTC에 연직(1~5 km)으로 94°의 평균 풍향과 낮은 풍속(1.5 m s<sup>-1</sup>)이 나타났지만(그림 생략). 따라서 슈퍼셀의 후면에서 관측되는 시선속도 증가는 강수시스템 내부의 발달에 따른 영향임을 알 수 있다.

슈퍼셀 강수시스템이 형성되는 시기인 1017 UTC에서의 PPI 관측자료에서 15 dBZ 이하의 낮은 반사도를 관측하였지만, 강수시스템의 후면 후에코(hook echo) 발달 지역의 연직 RHI 관측 자료에서 6~9 km에서 반사도(> 35 dBZ) 이상의 상대적으로 강한 영역이 관측되었다(Fig. 8a). 이는 Rasmussen et al. (2006)에서 제시한 Descending Reflectivity Core (DRC)과 유사하며, 최근 국외의 슈퍼셀 토네이도 사례들에서 제안되었지만 국내의 강수 사례에서 처음으로 관측되었다. 선행 연구에서 DRC는 강수시스템의 상층에서 관측되는 상대적으로 강한 반사도 영역으로 제시되었으며, DRC가 슈퍼셀 토네이도의 후면에서 하층으로 하강함으로써 후에코의 형성과 저층의 회전을 강화함으로써 중규모 저기압(mesocyclone)의 형성에 큰 역할을 함을 보였다(Rasmussen et al., 2006; Kennedy et al., 2007a, 2007b; Byko et al., 2009; Markowski et al., 2012). 국외 사례(i.e., Rasmussen et al., 2006)와 비교하였을 때, 형성된 DRC의 수평 크기는 유사하지만 강도는 상대적으로 낮게 관측되었다. DRC 형성 5분 이후에 점진적으로 하층으로 하강하였으며, 1022 UTC에 강수시스템 하층은 50 dBZ 이상의 강한 반사도 영역이 관측되었고(Fig. 8b), 이후에 후에코, 중규모저기압을 형성하였다. 따라서

DRC는 사전연구 결과와 비교하여 강도는 상대적으로 낮게 발생하였지만, 본 사례의 슈퍼셀 토네이도 형성 및 발달에 중요한 역할을 한 것으로 판단된다.

#### 4.2 슈퍼셀 토네이도 형성 및 발달(1027~1045 UTC)

슈퍼셀 토네이도가 형성되는 1027 UTC에 관측된 수평 및 연직 반사도 자료에서, 슈퍼셀은 수평 약 20 km, 연직 11.6 km으로 발달하였다(Figs. 9 and 10). 또한 슈퍼셀의 후면으로 후에코가 형성되었으며, 후에코는 레이더에서 5~15 dBZ의 반사도로 관측되었다(Fig. 9a). 후에코는 슈퍼셀 토네이도에서 관측되는 특징적인 현상이며(Forbes, 1981), 연직 관측에서 echo overhang 지역으로 발생한다(Fig. 10a). 또한 슈퍼셀 후면에서 발생하는 하강류(Rear Flank Downdraft; RFD)와 함께 발생하며, 이는 지상으로 강한 바람 차이를 유발하여 gust front를 형성한다(Browning and Donaldson, 1963). 연직 RHI 레이더 관측자료에서 후에코의 연직 구조를 명확히 확인할 수 있다(Fig. 10).

후에코의 형성은 사전연구에서 슈퍼셀이 발생하는 강한 강수의 이류에 의한 형성(Fujita, 1958)과 강한 대류의 주변에서 발생하는 회전성 흐름에 의해 발생함을 제시하였으며(Fulks, 1962), 본 연구 사례에서의 후에코 형성은 최대 반사도(> 60 dBZ)가 발생하는 지역에서의 시선속도 자료에서 8 m s<sup>-1</sup> 이상의 북동풍이 강화되어, 수상체의 이류에 의한 효과가 클 것으

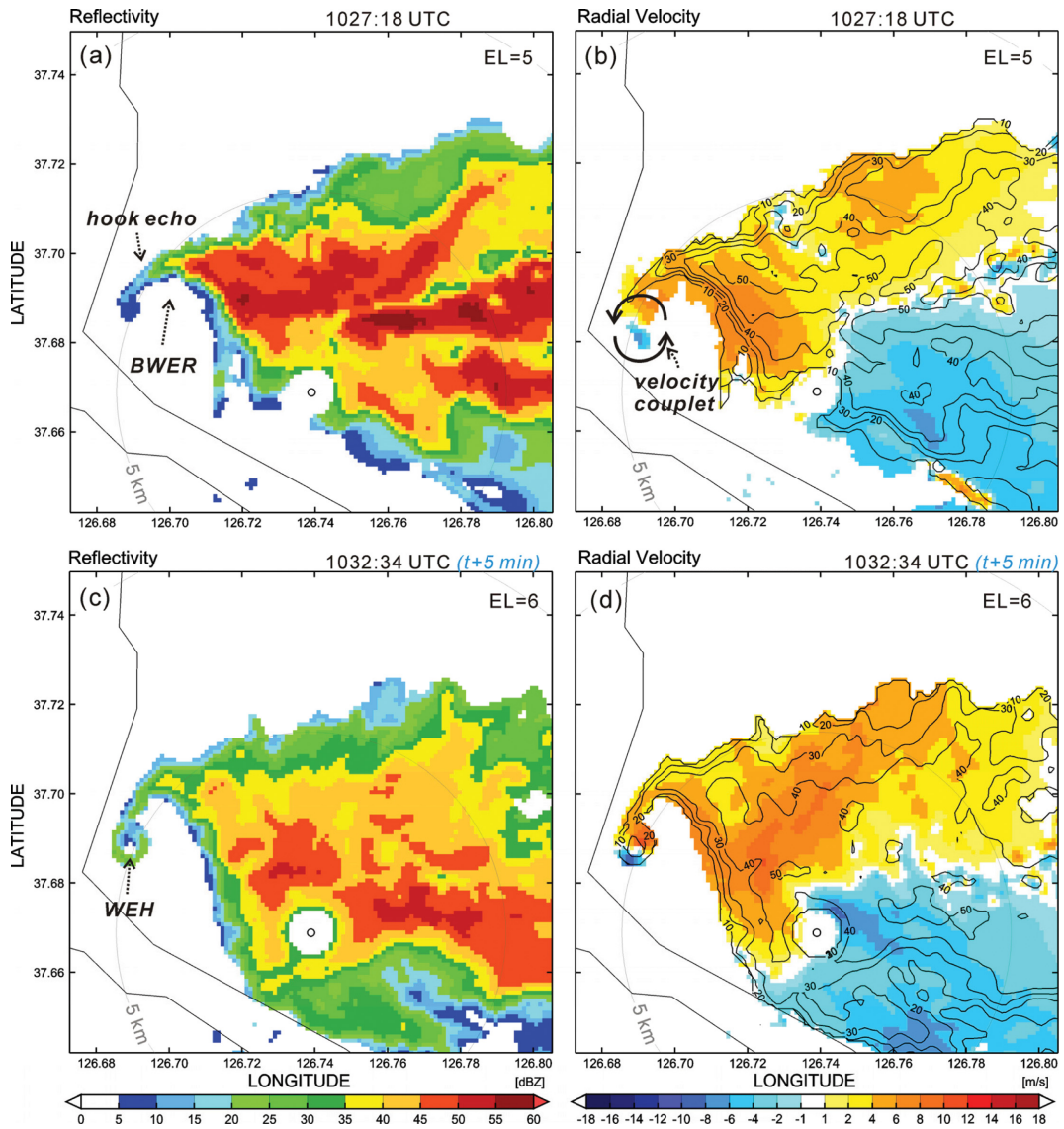


Fig. 9. Same as in Fig. 7, except for (a), (b) 1027:18 UTC and (c), (d) 1032:34 UTC 10 June 2014.

로 판단된다(Fig. 9b). 수상체의 이류는 후에코의 전면으로 상대적으로 약한 반사도 영역(bounded weak echo region, BWER)에서 발생하는 강한 상승류에 의해 형성되었다. 또한 1032 UTC에 후에코의 후면으로 약한 반사도가 링 모양으로 형성되는 weak-echo hole (WEH)를 관측하였다(e.g., Wakimoto and Martner, 1992; Wakimoto et al., 2011; Tanamachi et al., 2012). WEH는 후에코 인근에서 발생하는 토네이도의 강한 저기압성 회전에 의한 원심력으로 형성될 수 있으며, 토네이도 인근 지역에서 발생하기 때문에 토네이도의 이동 및 속도를 산출에 활용 가능하다. 따라서 레이

더 시선속도와 WEH를 활용하여 수퍼셀에 동반된 토네이도를 구분하는 기준으로 활용하여 국외에서 발생한 토네이도의 위치 및 강도와 비교하였다.

#### 4.3 수퍼셀 토네이도 국외 사례와의 비교분석

레이더 시선속도 자료의 velocity couplet과 WEH의 자료를 활용하여 토네이도의 위치 및 강도를 분석한 결과, 형성된 토네이도는 18분 동안(1027~1045 UTC) KICT 레이더에서 관측되었다(Figs. 5 and 9). 토네이도는 고양시 일산에서 발생하여 약 1.9 km 이동하여 한강에서 소멸하였으며, 평균 이동속도는 약  $1.7 \text{ m s}^{-1}$ ,



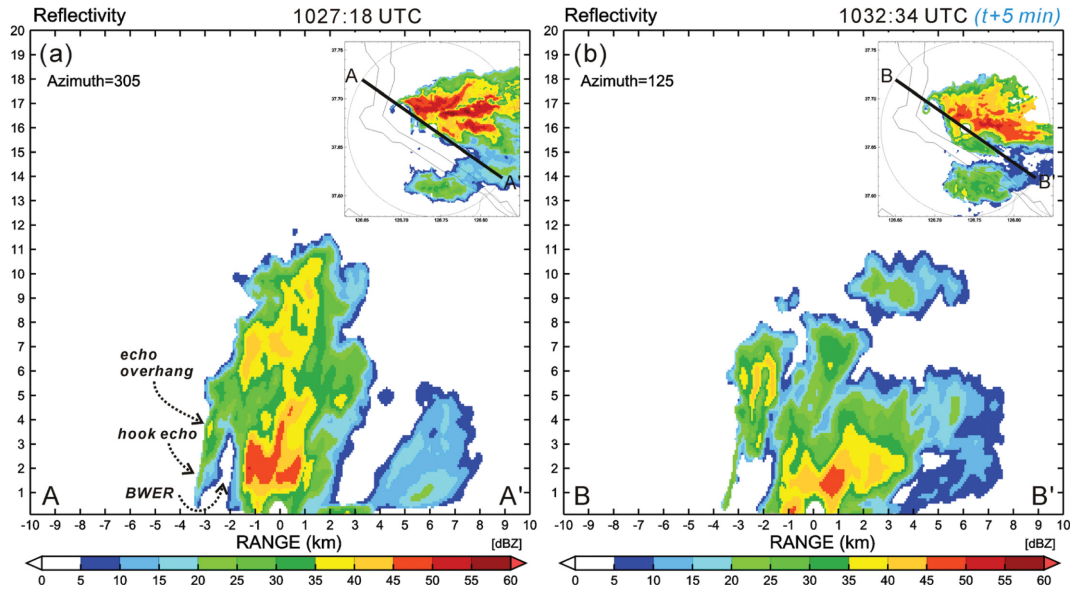


Fig. 10. Same as in Fig. 8, except for (a) 1027:18 and (b) 1032:34 UTC 10 June 2014.

Table 1. Comparison between typical supercell over Great Plains, Japan, and Korea.

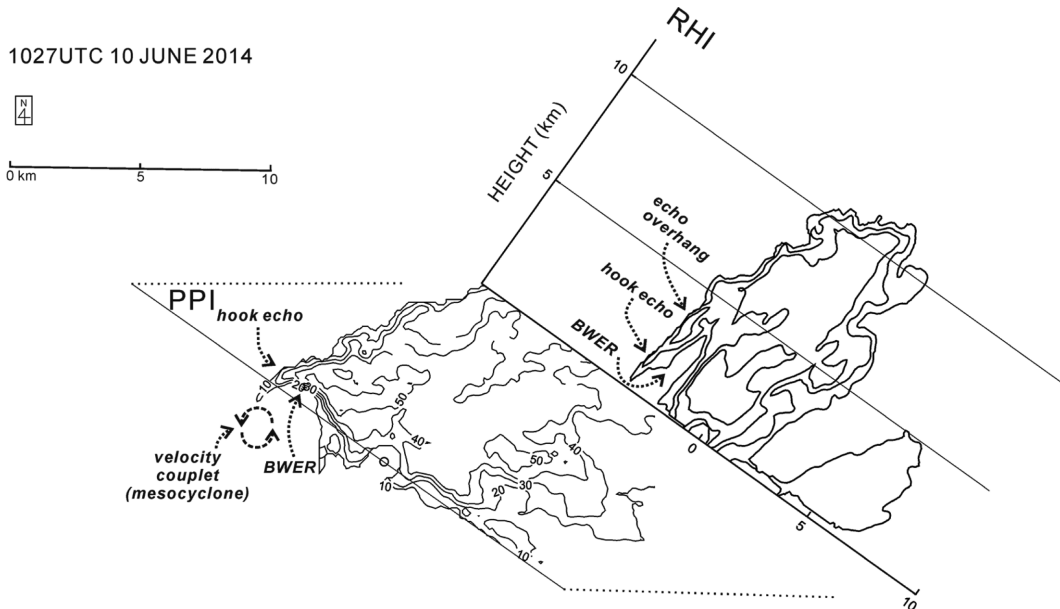
	Typical supercells over Great Plains	Mini supercells in Japan (Suzuki et al., 2000)	Supercells in Korea (10 June 2014)
Storm Environment	Dry	Moist	Dry
Morphology	Hook echo, BWER, WER	Hook echo, BWER, WER	Hook echo, BWER, WER
Storm's lifetime	Several hours	3 h in average	2 h
Horizontal scale	5.7 km in average (Burgess et al., 1979)	~1-4 km	~1 km
Mesocyclone Depth	Deep (~2/3 of the storm depth) (Burgess and Lemon, 1990)	Lower than 5 km	Lower than 5 km
Echo top height	Higher than 10 km	Lower than 10 km	Higher than 10 km
Tornado moving direction	Right	Right	Left

수평직경은 약 1 km, 연직 3.5 km으로 형성되었다. Burgess et al. (1982, 1995) 연구에 의한 미국 대평원에서 발생하는 전형적인 토네이도의 평균 수평직경은 약 6.0 km이며, 연직으로 9.2 km까지 발달하였다. Suzuki et al. (2000) 연구에 의한 일본에서 발생한 토네이도의 수평직경은 약 1~4 km이며, 연직으로 5 km 미만으로 발달하였다. Brown and Meitin (1994)에 의해 미국에서 발생한 토네이도 사례들의 이동방향을 분석한 결과, 약 90%가 오른쪽으로 이동하였고, 10%만이 왼쪽으로 이동함을 보였다. Suzuki et al. (2000) 연구 사례에서도 오른쪽으로 이동함을 보였다. 이러한 원인은 대부분의 토네이도에서 저기압성 회전이 지배적이기 때문이다. 연구사례의 경우에 레이더 시선속도 자료에서 저기압성 회전이 지배적이다(Figs. 9b and d). 하지

만 본 연구 사례는 왼쪽으로 이동하는 특성을 보였다. 토네이도를 동반한 슈퍼셀의 형태학적 특성(후에코, BWER, WEH)은 국외사례들(미국, 일본)과 비교하여 매우 유사하게 나타났으며, 발달된 슈퍼셀의 높이는 레이더 RHI 관측 자료에서의 약 11.6 km이며(Fig. 10a), 미국의 사례(> 10 km)와 비교하여 유사하게 관측되었으며(Burgess and Lemon, 1990), 일본의 사례(< 10 km)와 비교하면 상대적으로 높게 관측되었다(Suzuki et al., 2000). 상세 비교 자료들은 Table 1에 정리하여 나타내었다.

### 5. 요약 및 제언

2014년 6월 10일 고양시 일산에서 슈퍼셀에 동반된



**Fig. 11.** Schematic illustration of Goyang supercell tornado at 1027 UTC 10 June 2014. The radar reflectivity intervals were 10 dBZ from PPI and RHI scan mode.

토네이도가 발생하여 많은 재산 피해를 유발하였다. 슈퍼셀 토네이도의 발생에 관한 중규모 환경장 분석을 위해서 기상청 지역규모모델 자료를 사용하였으며, KICT X밴드 이중편파레이더를 이용하여 슈퍼셀 토네이도의 형성, 발달에 관한 상세한 분석을 실시하였다. 또한 국외의 슈퍼셀 토네이도 사례들과 비교하여 국내 내륙에서 형성된 슈퍼셀 토네이도의 특성에 관하여 연구하였다. 관련 연구내용들의 요약은 다음과 같으며, 이를 모식도로 나타내었다(Fig. 11).

슈퍼셀 토네이도의 발달에 관한 중관, 중규모 환경장은 한반도 중부지방으로 남하한 저기압과 북동쪽에 위치한 고기압의 경계에서 수평 윈드쉬어를 형성하였으며, 해양에 위치한 저기압으로부터 온난, 습윤한 불안정한 공기의 유입으로 한반도 서해안, 내륙지역으로 잠재적 불안정을 유발하였다.

한반도 중부지역에서부터 남부지역까지 서해안 지역으로 북-남쪽으로 길게 건조선을 형성하였으며, 특히 건조선은 슈퍼셀 토네이도의 후면에서 형성되어 역학적 대류 형성의 원인으로 작용하였다.

슈퍼셀은 KICT 레이더로부터 3 km 떨어진 곳에서 형성되었으며, 15분 이내에 최대 반사도 60.2 dBZ를 관측하였다. 형성된 슈퍼셀은 환경 바람의 낮은 풍속의 영향으로 상대적으로 느린 이동속도( $< 2 \text{ m s}^{-1}$ )로 북서쪽으로 이동한 것으로 판단되며, 그러한 원인은 파주 수직측풍장비의 관측자료에서 분석한 환경 바람의 낮은 풍속의 영향으로 판단된다.

KICT 레이더로부터 슈퍼셀은 후예코, 슈퍼셀에서 관측된 상대적으로 약한 반사도 지역(BWER), 후예코의 후면의 링 모양의 약한 반사도 지역(WEH)의 형태학적 특성을 관측하였으며, 또한 레이더 연직 관측자료에서 DRG가 슈퍼셀 토네이도의 후면에서 하층으로 하강함으로써 후예코의 형성과 저층의 회전을 강화함으로써 중규모저기압의 형성에 큰 역할을 함을 보였다.

토네이도는 형성되어 북서쪽으로 약 1.9 km를 이동하였다. 평균 이동속도는 약  $1.7 \text{ m s}^{-1}$ 이며, 수평직경은 약 1 km, 연직 3.5 km으로 형성되었다. 미국사례와 비교하여 수평, 수직 직경은 작게 나타났으며, 일본 사례와 비교하여 유사한 크기를 보였다.

본 연구에서는 KICT X밴드 이중편파레이더를 활용하여 슈퍼셀 토네이도의 형태학적 특성에 관하여 상세히 기술하였지만, 형성 원인에 관한 연구가 추가적으로 필요하다. 또한 토네이도는 국외 사례와의 비교를 통해 왼쪽으로 이동하는 특성을 보였다. 따라서 향후 수치모델을 이용한 모의실험을 통하여 토네이도의 형성 원인 및 이동에 관한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

X밴드 이중편파레이더 자료를 제공해주신 한국건설기술연구원에 감사드립니다. 본 연구는 국립기상과

학원 주요사업 '기상업무지원기술개발연구(NIMS-2016-3100)'의 일환으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Barber, D. A., and L. J. Mahrt, 1981: A statistical study of dependence of hailstorm severity on environmental conditions. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 1348-1352.
- Bluestein, H. B., and C. R. Parks, 1983: A synoptic and photographic climatology of low-precipitation severe thunderstorms in the southern plains. *Mon. Wea. Rev.*, **111**, 2034-2046.
- \_\_\_\_\_, and M. H. Jain, 1985: Formation of mesoscale lines of precipitation: Severe squall lines in Oklahoma during the spring. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 1711-1732.
- Bosart, L. F., A. Seimon, K. D. LaPenta, and M. J. Dickinson, 2006: Supercell tornadogenesis over complex terrain: The Great Barrington, Massachusetts, tornado on 29 May 1995. *Wea. Forecasting*, **21**, 897-922.
- Brooks, H. E., C. A. Doswell III, and R. P. Davies-Jones, 1993: Environmental helicity and the maintenance and evolution of low-level mesocyclones. *The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards, Geophys. Monogr.*, Vol. 79, Amer. Geophys. Union, 97-104.
- Brown, R. A., and L. R. Lemon, 1976: Single Doppler radar vortex recognition. Part II: Tornadic vortex signatures. *Preprints, 17th Radar Meteorology Conf.*, Seattle, WA, Amer. Meteor. Soc., 104-109.
- \_\_\_\_\_, and R. J. Meitin, 1994: Evolution and morphology of two splitting thunderstorms with dominant left-moving members. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 2052-2067.
- Browning, K. A., and R. J. Donaldson, 1963: Airflow and structure of a tornadic storm. *J. Atmos. Sci.*, **20**, 533-545.
- Burgess, D. W., and L. R. Lemon, 1990: Severe thunderstorm detection by radar. *Radar in Meteorology*, D. Atlas, Ed., Amer. Meteor. Soc., 619-647.
- \_\_\_\_\_, V. T. Wood, and R. A. Brown, 1982: Mesocyclone evolution statistics. *Preprints, 12th Conf. on Severe Local Storms*, San Antonio, TX, Amer. Meteor. Soc., 422-424.
- \_\_\_\_\_, R. L. Lee, S. S. Parker, S. J. Keighton, and D. L. Floyd, 1995: A study of mini supercells observed by WSR-88D radars. *Preprints, 27th Conf. on Radar Meteor.*, Vail, CO, Amer. Meteor. Soc., 4-6.
- Byko, Z., P. Markowski, Y. Richardson, J. Wurman, and E. Adelman, 2009: Descending reflectivity cores in supercell thunderstorms observed by mobile radars and in a high-resolution numerical simulation. *Wea. Forecasting*, **24**, 155-186.
- Corfidi, S. F., J. H. Merritt, and J. M. Fritsch, 1996: Predicting the movement of mesoscale convective complexes. *Wea. Forecasting*, **11**, 41-46.
- Davies-Jones, R. P., D. W. Burgess, L. R. Lemon, and D. Purcell, 1978: Interpretation of surface marks and debris patterns from the 24 May 1973 Union City, Oklahoma tornado. *Mon. Wea. Rev.*, **106**, 12-21.
- Doswell, C. A., III, 2001: Severe convective storms—An overview. *Severe Convective Storms*, Meteor. Monogr., No. 28, Amer. Meteor. Soc., 1-26.
- Fujita, T. T., 1958: Mesoanalysis of the Illinois tornadoes of 9 April 1953. *J. Meteor.*, **15**, 288-296.
- \_\_\_\_\_, 1981: Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. *J. Atmos. Sci.*, **38**, 1511-1534.
- Fulks, J. R., 1962: On the Mechanics of the Tornado. *National Severe Storms Project Rep.*, No. 4, U. S. Weather Bureau.
- Hutchinson, T. A., and H. B. Bluestein, 1998: Prefrontal wind-shift lines in the plains of the United States. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 141-166.
- Kennedy, A. D., E. N. Rasmussen, and J. M. Straka, 2007a: A visual observation of the 6 June 2005 descending reflectivity core. *E-J. Severe Storms Meteor.*, **2**(6).
- \_\_\_\_\_, J. M. Straka, and E. N. Rasmussen, 2007b: A statistical study of the association of DRCs with supercells and tornadoes. *Wea. Forecasting*, **22**, 1192-1199.
- Korea Institute of Civil engineering and building Technology (KICT), 2014: Operation of hydrological radar and development of a web-mobile warning platform, Korea Institute of Civil engineering and building Technology, 7 pp.
- Markowski, P. M., and Coauthors, 2012: The pretornadic phase of the Goshen County, Wyoming, supercell of 5 June 2009 intercepted by VORTEX2. Part I: Evolution of kinematic and surface thermodynamic fields. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 2887-2915.
- Meng, Z., and D. Yao, 2014: Damage survey, radar, and environment analyses on the first-ever documented tornado in Beijing during the heavy rainfall event of 21 July 2012. *Wea. Forecasting*, **29**, 702-724.
- Rasmussen, E. N., J. M. Straka, M. S. Gilmore, and R. Davies-Jones, 2006: A preliminary survey of rear-flank descending reflectivity cores in supercell storms.

- Wea. Forecasting*, **21**, 923-938.
- Rose, S. F., P. V. Hobbs, J. D. Locatelli, and M. T. Stoelinga, 2004: A 10-yr climatology relating the locations of reported tornadoes to the quadrants of upper-level jet streaks. *Wea. Forecasting*, **19**, 301-309.
- Rotunno, R., and B. Klemp, 1985: On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 271-292.
- Ryzhkov, A. V., T. J. Schuur, D. W. Burgess, and D. S. Zrnic, 2005: Polarimetric tornado detection. *J. Appl. Meteor.*, **44**, 557-570.
- Schultz, D. M., 2004: Cold fronts with and without pre-frontal wind shifts in the central United States. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 2040-2053.
- Skinner, P. S., C. C. Weiss, M. M. French, H. B. Bluestein, P. M. Markowski, and Y. P. Richardson, 2014: VORTEX2 observations of a low-level mesocyclone with multiple internal rearflank downdraft momentum surges in the 18 May 2010 Dumas, Texas, supercell. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 2935-2960.
- Snyder, J. C., and H. B. Bluestein, 2014: Some considerations for the use of high-resolution mobile radar data in tornado intensity determination. *Wea. Forecasting*, **29**, 799-827.
- Suzuki, O., H. Niino, H. Ohno, and H. Nirasawa, 2000: Tornado-producing mini supercells associated with Typhoon 9019. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 1868-1882.
- Tanamachi, R. L., H. B. Bluestein, J. B. Houser, S. J. Frasier, and K. M. Hardwick, 2012: Mobile, X-band, polarimetric Doppler radar observations of the 4 May 2007 Greensburg, Kansas, tornadic supercell. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 2103-2125.
- Wakimoto, R. M., and B. E. Martner, 1992: Observations of a Colorado tornado. Part II: Combined photogrammetric and Doppler radar analysis. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 522-543.
- \_\_\_\_\_, H. V. Murphey, D. C. Dowell, and H. B. Bluestein, 2003: The Kellerville tornado during VORTEX: Damage survey and Doppler radar analyses. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 2197-2221.
- \_\_\_\_\_, N. T. Atkins, and J. Wurman, 2011: The LaGrange tornado during VORTEX2. Part I: Photogrammetric analysis of the tornado combined with single-Doppler radar data. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 2233-2258.
- Wurman, J., D. Dowell, Y. Richardson, P. Markowski, E. Rasmussen, D. Burgess, L. Wicker, and H. Bluestein, 2012: The Second Verification of the Origins of Rotation in Tornadoes Experiment: VORTEX2. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 1147-1170.