

우리나라 내륙에서 발생한

## 용오름의 발생 특징 및 분석

■ 발행: 예보국 ■ 문의: 예보기술분석과(내선 1657) ■ 발행일: 2014년 8월 14일(목)



**용오름**이란 강한 바람에 의해 지표면으로부터 말아올리는 모래먼지 및 지상 물체의 파편, 수면으로부터의 물방울 등을 수반하는 강한 소용돌이를 말하며(기상학사전 1992), 우리나라에서는 용오름, 미국에서는 토네이도(tornado) 라고 부른다. 이번 호에서는 토네이도의 발생특징과 구조를 알아보고, 2014년 6월 10일 고양시에서 발생한 용오름 사례를 중심으로 대기구조와 기상요소별 특징에 대해서 소개한다.

### ❖ 발생 특징 및 구조(tornado-genesis)

#### 1) 뇌우규모에서 토네이도 발달과정

토네이도는 기본적으로 지표부근의 하층대기에서 따뜻하고 습한 공기가 집중적으로 유입되는 지역에서 발생하며, 토네이도의 서쪽(후면)은 한랭하고 건조한 공기의 침강이 나타난다. 이런 구조는 뇌우발달 구조와 일치하는데, 토네이도는 그림 1과 같이 거대세포뇌우(super cell storm) 내부에 위치하는 것이 일반적이다.

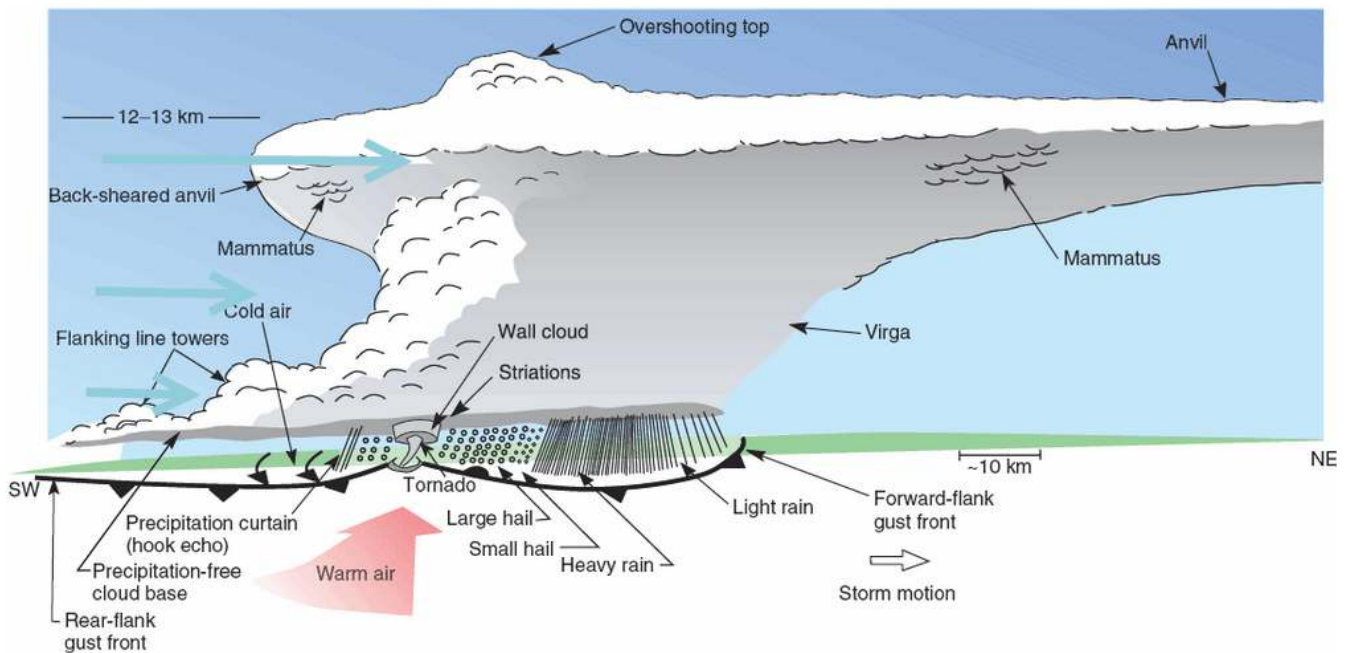


그림 1. 토네이도 모식도(Houze 1993)

발달된 거대뇌우에서 토네이도는 호우지역과 구분이 된다. 호우는 그림 1과 같이 뇌우의 전방에서 강한 상승류가 존재하는 지역에서 발생하고, 토네이도는 이 호우지역의 후면(그림 1에서 호우의 서쪽)에 위치한다.

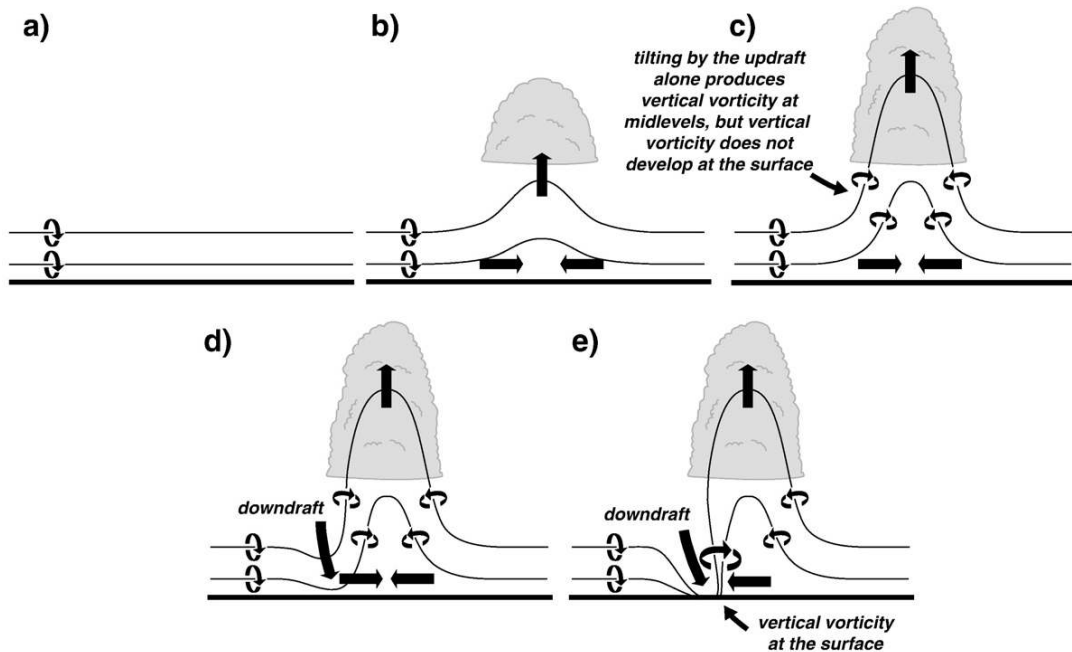


그림 2. 그림 1의 토네이도 발생지역을 중심으로 기류의 수렴에 따른 연직와도 대(vertical vortex)의 변화에 의한 토네이도(강한 상승기류) 생성과정(Markowski and Richardson 2009)

그림 2는 토네이도 형성과정을 설명하는 모식도이다. 그림 1의 토네이도 발생지역을 중심으로 지표부근 기류의 수렴과 연직 와도의 움직임은 그림 2를 보면서 생각해 보자. 그림 2의 a)는 그림 1의 토네이도 발생구역으로서, 뇌우에 의해 강한 비가 내리는 지역의 후면(서쪽)이다. 기류(지향류)는 뇌우의 수렴구역을 향해 진행한다. 즉, 서풍의 기류가 지나가며, 이때 연직와도(vertical vorticity)의 회전방향은 그림과 같다. 전방(동쪽)에 발달한 뇌우에 의해서 강한 비가 내리면 하강기류가 동반되면서 후방(서쪽)으로 기류가 발산한다. 이 때, 그림 2의 b)와 같은 동풍이 발생하고 서풍과 합류하면서 상승기류를 이끈다. 이 상승기류로 적운계열의 대류운이 발생한다. 그림 2의 c)와 같이 상승기류가 강해지면 구름은 적란운의 형태로 발달한다.

그러나 여기까지의 과정은 새로운 뇌우의 형성과정(Back-Building 형태)과 크게 다르지 않다. 토네이도는 그림 2의 d)와 같이 상층의 무거운 공기(건조공기 또는 찬 공기)가 지상까지 침강하였을 때 발생한다. 강한 하강기류(downdraft)가 지상에 도달하면 서에서 동으로 이동하던 기류가 지상에 부딪친 후 상승한다. 이후 그림 2의 e)와 같이 수렴지역에 강한 상승기류가 만들어지며, 이 때 연직와도는 상승기류 주변에 강한 저기압성 와도지역으로 바뀐다. 이 저기

압성 와도는 전방에서 수렴하는 고기압성 와도지역과 톱니바퀴 형태로 결합하면서 더욱 강화된다. 일반적으로 대류성 구름대가 발생한 후 뇌우로 발달하는 경우에는 폭이 넓은 상승기류(그림 2의 b)와 c))가 만들어지나, 밀도가 큰 건조공기가 지면까지 침투할 경우 폭이 좁은 상승기류가 그림 d)와 e)의 과정과 같이 만들어진다.

## 2) 토네이도의 형성

앞서 그림 2의 예에서 설명한 폭이 좁은 강한 상승기류가 만들어지는 과정이 토네이도 발생에 중요한 원인이며, 각 운동량 보존으로서 설명할 수 있다.

a)



b)



그림 3.

각 운동량 보존의 예  
(Ackerman and Knox 2007)

그림 3과 같이 저기압성 회전을 하는 피겨스케이터 선수를 생각해 보자. 2명은 모두 무게가 같다고 가정하고, 선수의 머리는 저기압의 상부 즉, 대류권계면이라고 가정하자.

그림 3의 a)는 키가 작고 회전반경이 크다. b)는 키가 크고 팔과 다리를 오므리고 있어서 회전반경이 작다. 이 2명 중 누가 더 빠른 속도로 회전할까? 당연히 b)와 같이 몸을 오므리고 회전하는 키가 큰 선수일 것이다. 식 1은 각 운동량 보존(Conservation of Angular Momentum)을 요약한 것이다.

$$\frac{\text{총 회전수}}{\text{저기압높이}} \Rightarrow \text{constant} \quad \text{식 (1)}$$

식 1의 각 운동량 보존에 의해서 저기압 높이와 총 회전수가 비례함을 보여준다.

$$\frac{\text{상대와도} + \text{행성와도}}{\text{저기압높이}} = \text{잠재와도} \Rightarrow \text{constant} \quad \text{식 (2)}$$

식 2의 잠재와도(potential vorticity) 관점에서 살펴보면, 저기압성 와도가 강하다는 것은 저기압의 높이와 상관성을 갖게 된다. 저기압성 와도는 곡률반경이 작을수록, 즉 그림 3의 b)와

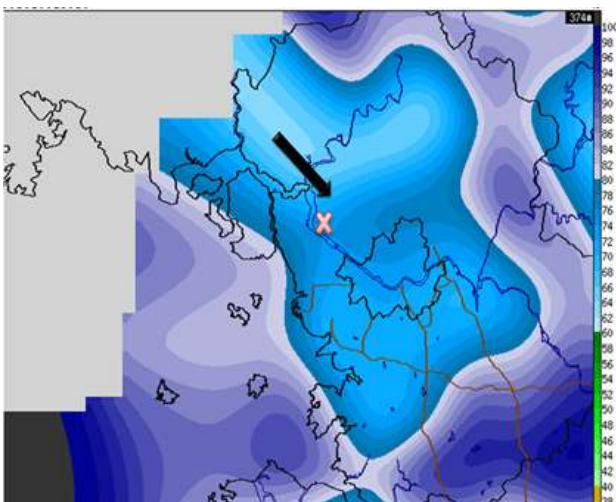
같이 회전반경이 작을수록 와도가 증가한다. 결국, 좁은 범위의 저기압성 회전은 저기압의 높이를 증가시켜 토네이도와 같은 강한 대류성 스톰을 만들어낸다.

### 3) 요약

지금까지 소개한 토네이도 발생원인을 요약하면, ①기본적으로 뇌우를 발생시킬 수 있는 열적(상·하층 온도차이), 운동학적(연직 바람시어) 대류 불안정이 필요하며, ②불안정한 대기구조에서 강한 호우대가 위치해야 한다. 다음으로 ③강한 호우지역의 후면(서쪽 혹은 남쪽)에 지표부근의 기류가 수렴하는 구역이 존재해야 한다. ④상층의 공기(건조하거나 찬 공기)가 이 수렴지역의 지면으로 침강하면, 폭이 좁은 강한 상승기류가 발생하면서 ⑤토네이도가 발생할 수 있다. 그렇지만 토네이도는 중규모 기상현상 중에서도 가장 작은 규모(일반적으로 Meso- $\gamma$ (2~20km 수평규모)이나, 우리나라 사례는 1km 이하 임)로서, 관측자료를 이용해서 수평적으로 수렴하는 기류나 지면으로 하강하는 기류를 명확하게 찾아내기는 어렵다.

## ▣ 토네이도 발생 사례 분석

이번 장에서는 2014년 6월 10일 경기도 고양시(일산 서구지역, 19:20~19:50, 30분간 발생)에서 발생한 용오름 사례에 중점을 두어 분석결과를 소개한다.



이번 용오름 사례는 그림 4와 같이 이례적으로 내륙에서 발생하여 고양시(일산 서구)에 비닐하우스 48동, 3.9ha 면적에서 15억 정도의 재산 피해가 발생했다(소방방재청 집계).

그림 4. 2014년 6월 10일 고양시 용오름 발생지역(X는 발생지역)과 19시 30분 상대습도 분포도

그림 5는 용오름이 발생했던 시각과 가까운 21시에 관측된 위성영상(수증기)과 수치모델 분석장이다. 그림 5 a)를 보면, 500hPa 고도에 차가운 공기(-15°C 이하)를 가진 절리 저기압이

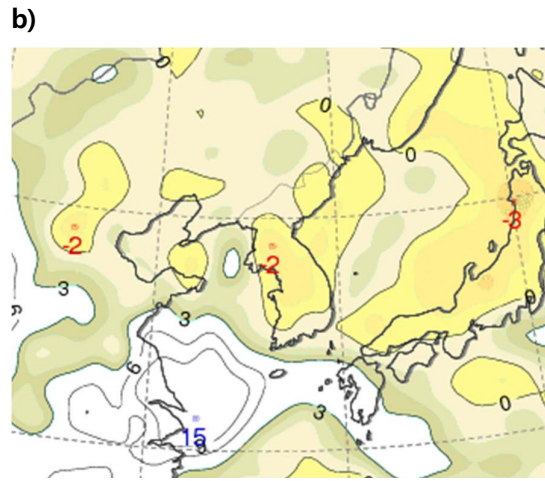
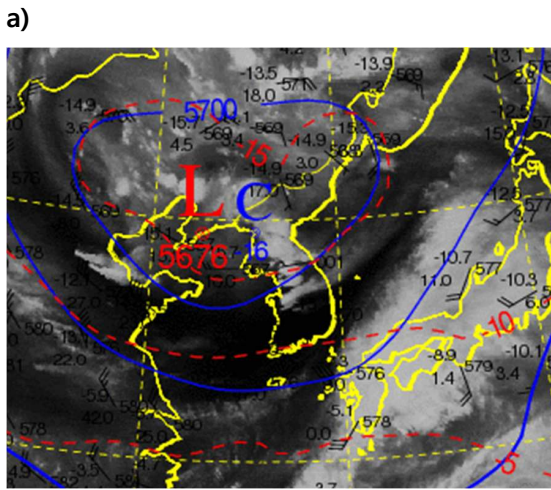


그림 5. 2014년 6월 10일 21(KST) a) 수증기영상과 500hPa 일기도, b) SSI

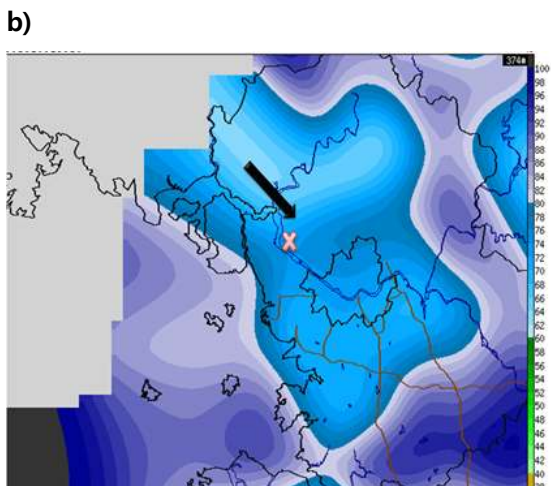
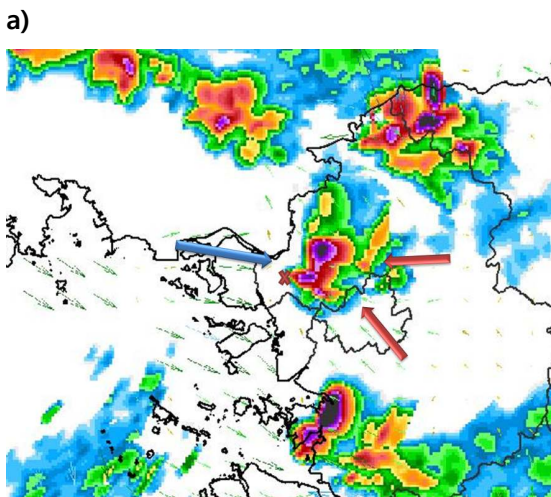


그림 6. 2014년 6월 10일 19:30(KST) a) 레이더영상과 AWS 바람장, b) AWS 상대습도 분포 (x표시는 한국건설기술연구원의 저고도 레이더가 관측한 용오름 관측지점인 고양시 일산 서구에 해당함)

요동반도에 중심을 두고 우리나라에 영향을 미치고 있으며, 수증기 영상에서 서해상과 우리나라에 건조한 공기가 지배하고 있음을 알 수 있다. 한반도 내륙에 위치한 구름대는 대부분 발달한 적란운으로서, b)의 불안정지수(SSI)에서 이 지역은 0 이하의 불안정 구역임을 확인 할 수 있다. 일몰 후 기온이 하강하는 시간대임에도 불구하고 불안정한 대기를 나타냄으로서, 강한 대류성 구름대를 발달·유지 시킬 수 있었는데, 불안정한 대기구조의 주 원인이 지면의 가열효과가 아닌 상층 찬공기의 이류였음을 알 수 있다. 종관 일기도와 위성영상의 분석결과는 우박발생의 특징과 비슷하다. 실제로 경기도 고양시에 용오름이 발생한 2014년 6월 10일 원주, 용인, 충주, 철원 등지에 우박이 내렸다. 우박이 내리는 지역은 강한 하강기류(Micro Burst)가 동반되므로, 그림 2에서 설명한 지표부근의 수렴기류를 만드는 중요한 역할을 한다.

그림 6은 용오름 발생시각에 관측된 레이더 영상과 AWS 바람장 및 상대습도를 보여준다. 강한 뇌우 구름대가 경기도 고양시에 위치하고 있다. 이 뇌우 구름대를 기준으로 서쪽에서 바람이 유입되고 있으며, 남쪽과 북쪽에 위치한 뇌우지역에서 강한 강수와 함께 하강한 바람이 지표부근에



서 퍼져나가 고양시에 위치한 뇌우로 유입되고 있음을 볼 수 있다.

같은 시각에 관측한 상대습도 분포(b)를 살펴보면, 고양시에 중심을 두고 있는 뇌우는 주변의 다른 지역에 비해 낮은 습도분포를 보인다. 앞서 소개한 토네이도 발생에 중요한 역할을 담당하는 건조공기가 지표까지 하강하였음을 추정할 수 있다.

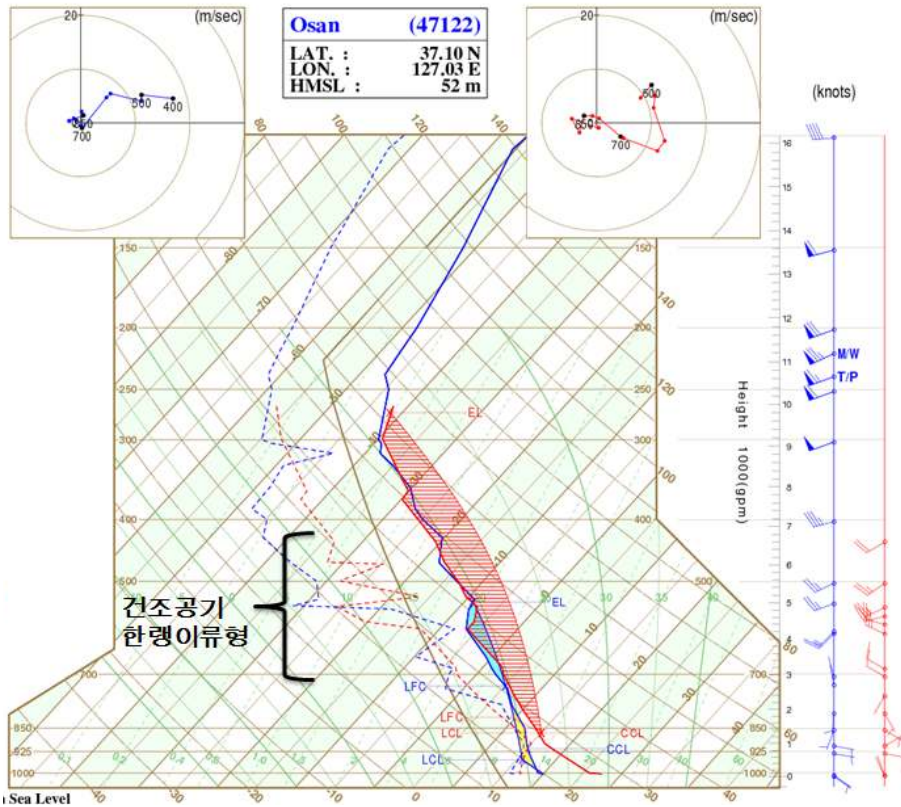


그림 7. 오산단열선도 (2014.6.10. 15시)

그림 7의 6월 10일 15시에 관측된 오산단열선도에서, LCL(상승응결고도), CCL(대류응결고도), LFC(자유대류고도)가 모두 같은 고도인 1304gpm에 위치한다. LFC 고도 이후부터는 상승하는 공기의 온도가 실제 대기기온보다 높은 양의 부력구간(대류가용 잠재에너지: CAPE)이 대류권계면 고도(약 10km)까지 위치하기 때문에 강제상승 효과가 발생하거나 가열에 의한 대류가 발생할 경우 쉽게 권계면 고도까지 구름이 발달할 수 있는 구조를 보인다. 또한, 지상의 기온이 25°C(대류온도) 이상이면 어떠한 외부의 작용이 없어도 상승하여 약 1km 부근의 고도부터 10km까지 대류형 구름이 만들어질 수 있다. 고도 3~7km(700~400hPa)에는 고도증가에 따라 바람이 북서풍에서 남서풍으로 전환되면서 반시계방향으로 회전하는(Backing) 한랭이류형 구조를 보여준다. 구간은 하층에 비해 기온과 이슬점온도의 차이가 큰 건조한 구역이 여러 층으로 구성되어 있다. 상층 저기압 주변으로 건조 공기의 유입이 일어나고 있음을 알 수 있다.

그림 8의 한반도 수증기영상에서도 고양시 부근의 발달한 대류운역 서쪽으로 암역(하강역)이 위치하고 있어, 고양시 용오름 형성에 영향을 준 상층 건조역의 하강을 추정해 볼 수 있다.

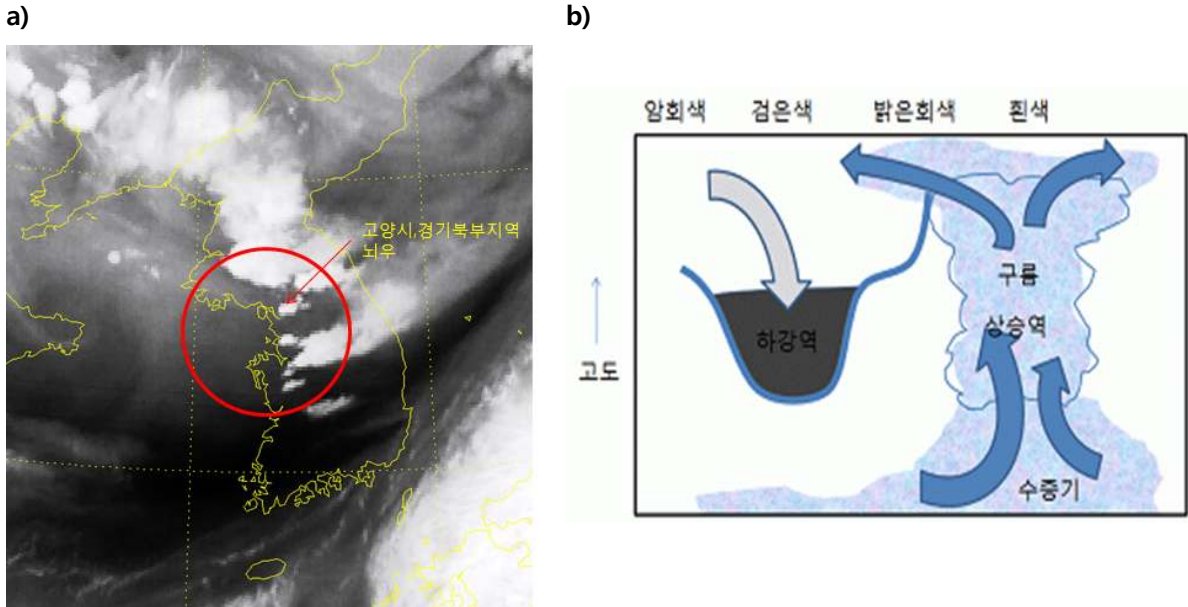


그림 8. 천리안 위성 수증기영상(2014.6.10. 19:3)과 수증기영상으로 추정된 대기 연직운동 개념도

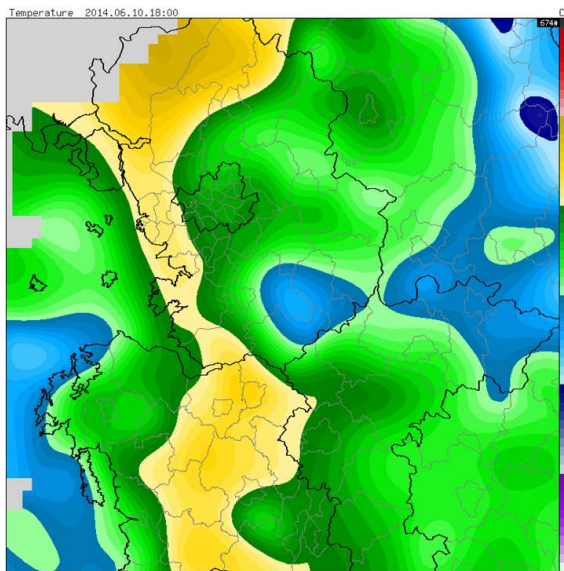


그림 9. 2014.6.10. 18시(KST) AWS 기온분포 (노란색은 25°C 이상 구역)

그림 9는 용오름이 발생하기 약 1시간 전인 18시에 관측된 AWS 지상기온 분포도이다. 경기북부지역과 서해안으로 25°C가 넘는 기온을 보이고 있다. 용오름이 발생한 고양시 일산 서구 지역은 지면부근의 공기가 상대적으로 건조하고 기온이 높았던 것을 알 수 있다.

따라서, 이번 고양시에서 발생한 용오름은 미국에서 발생하는 토네이도의 발생원인과 대기구조가 비슷하다. ①지상풍은 경기만과 그 북서쪽에서 서~북서풍이 고양시로 유입되었으며, 고양시의 북동쪽과 남쪽에 발달한 뇌우에 의해 발생한 바람(기류)이 고양시로 유입되면서 지상의 기류가 수렴하는 구조를 보였다. 이 때, ②상층의 공기가 하강하여 지면에 도달한 후 상승운동으로 전환하여 반경 폭이 좁은 저기압성 상승운동이 발생한 것으로 추정되며, ③호우구역의 하강기류가 발산

는 구조를 보였다. 이 때, ②상층의 공기가 하강하여 지면에 도달한 후 상승운동으로 전환하여 반경 폭이 좁은 저기압성 상승운동이 발생한 것으로 추정되며, ③호우구역의 하강기류가 발산

하면서 유입된 기류가 상승하면서 저기압성 회전을 가속화 시킨 것으로 보인다. 또한, ④종관장의 상층 절리저기압에 의한 저기압성 와도는 용오름이 발생할 수 있는 적합한 배경장으로 작용한 것으로 보인다. 그림 10은 이번 고양시에서 발생한 용오름 사례의 대기구조를 요약한 모식도이다.

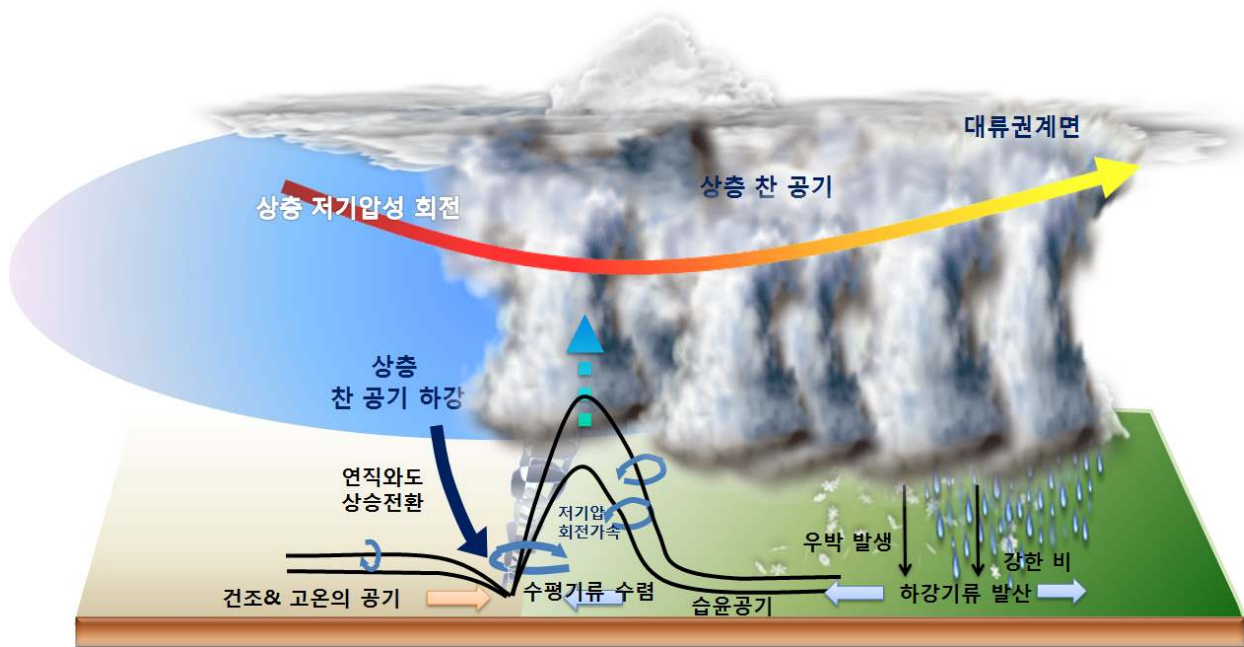


그림 10. 2014년 6월 10일 경기도 고양시 용오름 사례의 대기구조 모식도



**표 1** 우리나라 내륙에서 발생한 주요 용오름 사례의 기상요소별 특징 요약

순번	사례일	발생 지역	단열선도 특징	상층대기 특징
1	2008. 7. 20. 16:30	인천 김포 당진	<b>오산(15시)</b> CAPE <b>2041</b> SRH <b>279</b> SSI- <b>0.3</b> 하층 동풍(지상~925hPa) 상층(남~남서풍) LCL <b>401</b> CCL <b>522</b> LFC <b>602</b> (gpm) 지상기온 <b>28.2</b> 대류온도 <b>29.2</b>	200hPa 발산구역(중규모β) 700hPa 강한 상승구역 500hPa 강한 와도streak 내부
2	2008. 7. 25. 13:50	합천	<b>광주(15시)</b> CAPE <b>2070</b> SRH <b>136</b> SSI+ <b>3.9</b> 지상무풍, 850hPa 하층제트 LCL <b>833</b> CCL <b>833</b> LFC <b>833</b> (gpm) 지상기온 <b>30.2</b> 대류온도 <b>30.6</b> <b>포항(21시)</b> CAPE <b>3</b> SRH <b>202</b> SSI- <b>3.9</b> 하층 북동풍(지상~925hPa)	200hPa 중규모 발산구역 700hPa 중규모 상승구역 850hPa 수렴구역
3	2014. 6. 10. 19:00	고양	<b>오산(15시)</b> CAPE <b>559</b> SRH <b>9</b> SSI- <b>2</b> 하층 동풍(지상~850hPa) 하층습윤, 중층건조층 분포 권계면고도 10km LCL <b>1304</b> CCL <b>1304</b> LFC <b>1304</b> (gpm) 지상기온 <b>26.0</b> 대류온도 <b>27.6</b>	200hPa 중규모발산구역 700hPa 중규모상승구역 500hPa 와도streak 내부 850hPa 중규모 수렴
4	2014. 6. 12. 15:00	광주	<b>광주(15시)</b> CAPE <b>3041</b> SRH <b>0</b> SSI+ <b>0.5</b> 하층습윤, 중층건조층 분포 권계면고도 10km 이하 지상북동풍, 상층북서풍 LCL <b>1370</b> CCL <b>1370</b> LFC <b>1370</b> (gpm) 지상기온 <b>25.6</b> 대류온도 <b>25.6</b>	200hPa 약한발산구역 700hPa 약한상승구역 500hPa 와도streak 내부

표 1은 우리나라 내륙에서 발생한 것으로 추정되는 용오름 사례를 요약한 것이다. 대부분 사례들이 최고 기온이 나타나는 시간대인 오후 2시 이후부터 일몰시간 사이에서 발생했다. SSI 불안정지수는 0 이하, CAPE도 높은 값을 보여 불안정한 대기구조를 나타낸 것이 확인된다. 이외에 단열선도 분석에서 특별한 특징이 발견되는데, LCL, CCL, LFC 고도가 모든 사례에서 1.5km(850hPa)이하에서 같은 값을 보였다. 수렴에 의한 강제상승효과로 구름이 발생하는 고도와 지면가열에 의한 대류상승효과로 구름이 형성되는 고도가 모두 일치하면서 낮은 고도에 위치한다는 것은 강한 뇌우 발달에 더할 나위 없이 좋은 배경조건이 된다. 왜냐하면, 상승하는 공기의 응결고도가 낮을 경우 대류가용잠재에너지가 그만큼 더 커지기 때문이다. 특히, 각 사례별 지상기온과 대류온도가 같거나 비슷하므로, 수렴에 의한 상승효과가 없더라도 현재의 연직 기온 분포만으로도 충분히 CCL 고도부터 대류권계면 고도까지 발달한 구름을 만들 수 있는 기온 구조를 보였다.

상층의 대기는 우박이 발생하는 특징과 비슷하다. 상층의 절리 저기압이나 기압골에 동반된 차가운 공기의 이류, 저기압성 와도, 상승기류, 상층발산 등은 우박이 발생하는 중·상층 대기의 특징과 일치한다. 따라서 우박과 용오름의 차이는 지표와 하층대기에서 찾을 수 있다. 봄과 가을에 발생하는 우박은 강한 한랭이류를 동반하므로 우박을 동반한 뇌우의 진행방향을 기준으로

로 그 후면에서는 큰 폭의 기온하강이 발생한다. 그렇지만 표 1의 사례들과 같이 6, 7월에 발생하는 용오름 현상은 큰 규모의 한랭이류가 나타나지 않고, 우박발생 주변에 높은 기온분포를 보임으로서, 불안정한 대기가 계속 유지될 수 있었다. 대기불안정이 해소되지 않으면서, 우박을 동반한 뇌우에서 하강기류에 의해 퍼져나간 공기가 수렴하는 지역은 용오름과 같이 규모는 작지만 강한 강도를 가진 스톰이 발생할 수 있는 좋은 조건이 된다.

## ❖ 미국의 토네이도 예측

미국은 오클라호마에 위치한 폭풍예측센터(Storm Prediction Center)에서 개발한 확률예측모델을 이용하여 단기예보자료를 생산하고 있다. 앞서 소개한 바와 같이 토네이도의 발생 특징이 뇌우시스템에 귀속되어 있다. 즉, 뇌우 내부에서 우박이 발생하고, 우박의 대기구조는 토네이도 발생의 배경장으로서 작용한다. 그림 11은 폭풍예측센터에서 생산하는 예측자료로서 뇌우는 강도분포를, 우박과 토네이도는 확률분포 형태의 자료를 생산 및 제공하고 있다.

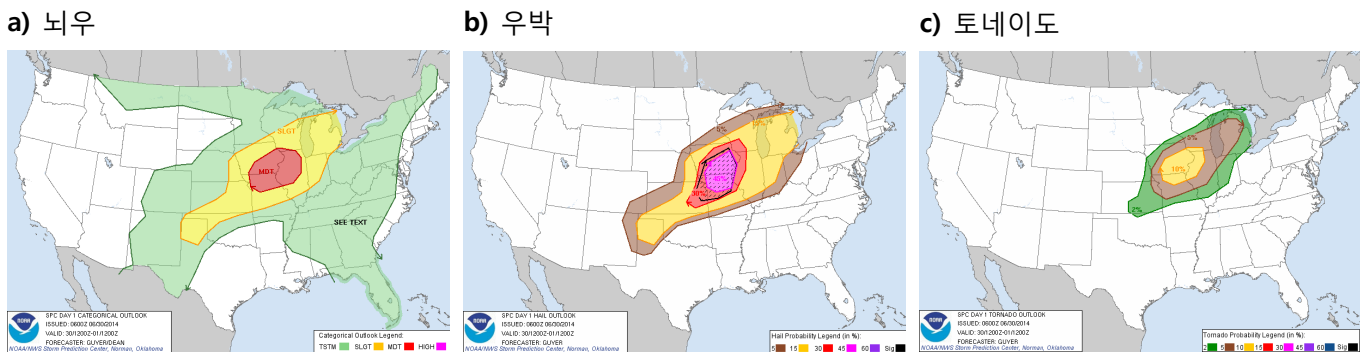
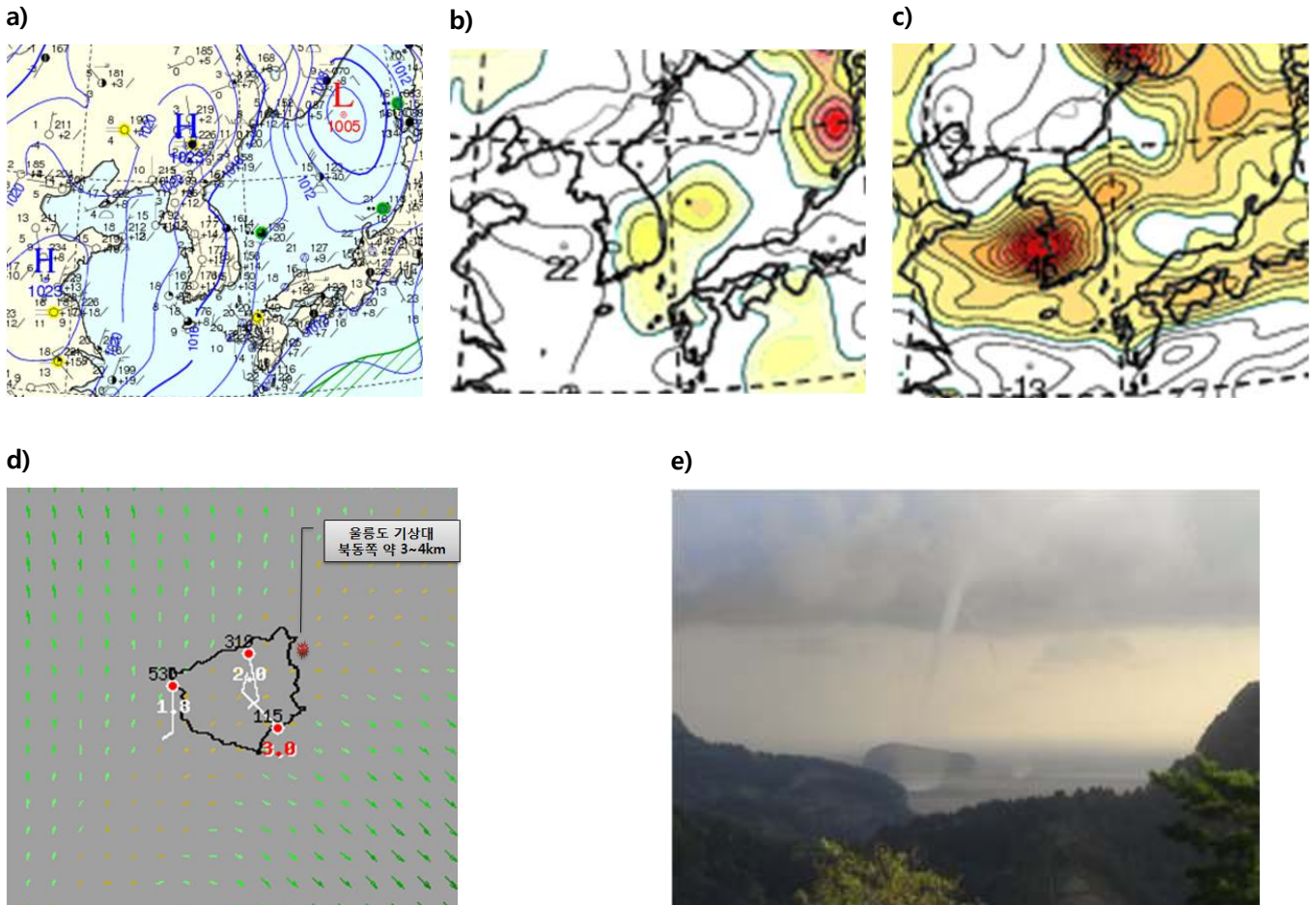


그림 11. 미국의 폭풍예측센터에서 발표하는 뇌우, 우박, 토네이도 예측자료

## ❖ 토네이도와 용오름의 차이?

우리나라에서 용오름은 토네이도(Tornado), Waterspout, Landspout를 통칭하여 사용하고 있다. 그러나 기상학적으로 용오름은 Waterspout 현상이라고 할 수 있다. 토네이도는 거대 적란운 구름대가 합쳐서 발생하는 강력한 소용돌이 형태인데 반하여, Waterspout은 적운형의 구름대에서 하층 수렴에 의해 상승하는 공기가 포화되어 생기는 소용돌이 현상으로 구분할 수 있다. 토네이도는 강한 연직 대기불안정 조건이 갖추어진 상태에서 하층 수렴지역에 건조공기가 침강 후 상승하는 기상조건이 갖추어져야 한다. 반면, Waterspout은 육지근처의 해상에서 주로 발생하며, 해륙풍(sea/land breezes)의 영향력이 큰 것으로 알려져 있다(Ackerman and Knox 2007). 미국 멕시코만 연안 지역에서는 자주 일어나는(fairly common) 현상이다. 2012년 10월 11일 07시 10분에 울릉도 기상대에서 용오름이 관측되었는데, 그림 12의 일기도와 AWS 관측 바람장을 살펴보면, 해륙풍의 특징이 발견된다. 종관일기도에서 주 풍향은 북~북동풍이

지만, 울릉도는 용오름 발생 시간대에 육풍에 의해 바람이 육지에서 해상으로 불어나가는 형태를 볼 수 있다. 지상의 바람이 수렴하고, 700hPa에 상승류와 500hPa에 양의 와도가 이 지역에 위치했으므로 수렴한 공기가 상승할 수 있는 조건이 갖추어져 있었다. 해상에서 소용돌이 구름이 육상에 비해 관측이 많이 되는 이유는 해수면 부근에 풍부한 수증기 양에서 찾을 수 있다. 해수면 부근에 수렴한 공기가 상승할 경우 단열냉각 과정을 거치면서 쉽게 응결이 되기 때문이다.



**그림 12.** 2011년 7월 11일 07시 10분에 발생한 용오름 사례. a)지상일기도, b)700hPa 상승속도, c)500hPa와도는 09시(00UTC) 분석장이며, d)는 발생위치와 AWS 바람장을, e)는 용오름 촬영사진 임(울릉도 기상대 제공).

Waterspout의 풍속은 토네이도에 비해 약하다. 강한 상승류가 없고 회전율이 토네이도에 비해 약하기 때문인데, 토네이도의 풍속에 의한 피해정도를 구분한 Fujita 등급 기준에서 F2급 이하의 풍속이 나타난다(Ackerman and Knox (2007)는 시속 160km 이하의 풍속으로 기술). 표 2는 미국에서 토네이도의 예측 및 분석에 사용하는 Fujita 등급을 보여준다. 이 표는 최초로 Fujita (1971, 1981)가 고안한 토네이도 등급을 재구성한 것이다(WSEC 2006). 이 등급은 현재 미국, 호주, 일본, 중국, 브라질 등에서 토네이도 예보 및 연구의 기준으로 활용하고 있다. Landspout은 육지에서 발생하는 Waterspout으로 볼 수 있으며, 모래먼지 등이 동반되어 상승하는 현상을 말한다.

표 2 Fujita 등급을 강화한 토네이도 등급 요약(WSEC 2006)

등급	풍속(km/h)	피해범위(m)
F0	64~116	10~50
F1	117~180	30~150
F2	181~253	110~250
F3	254~332	200~500
F4	333~418	400~900
F5	419~512	1100~

## 참고문헌

- 김광식, 1992: 기상학사전, 향문사.
- Ackerman, S. A., and Knox, J. A. 2007: Meteorology(Understanding the Atmosphere). *Thomson edu*, 282-341.
- AMS Glossary, 2000: AMS 전자기상사전. <http://amsglossary.allenpress.com/glossary>
- Fujita, T. T., 1971: Proposed characterizations of tornadoes and hurricanes by area and intensity, SMRP Research Rep. 91, The University of Chicago, IL. 15p.
- Fujita, T. T., 1981: Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. *J. Atmos. Sci.*, **38**, 1511-1534.
- Houze, R., 1993: Cloud Dynamics. *Academic Press*, 573pp.
- Markowski, P. M., and Richardson. Y. P., 2009: Tornadogenesis: Our current understanding, forecasting considerations, and questions to guide future research. *Atmospheric Research*, **93**, 3-10.
- NOAA/NWS storm prediction center: [www.spc.noaa.gov/](http://www.spc.noaa.gov/)
- WSEC, 2006: A recommendation for an enhanced Fujita scale (EF-Scale). Texas Tech, University Wind Science and Engineering Center Tech. Rep., 95 pp.