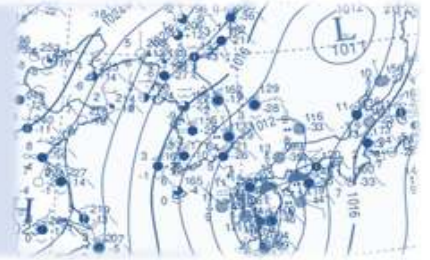


필수 예보요소 활용법과 정의

하층제트(Low Level Jet)

·발행: 예보국 ·문의: 예보기술팀(내선 657/658) ·발행일: 2011년 4월 11일(월)



하층제트의 패턴을 이용한 호우예보

남서풍의 하층제트(Low Level Jet; LLJ)와 동반된 호우 구역은 하층제트 중심(최대풍속)의 북동쪽과 남서쪽에서 발생하는 호우로 각각 나눌 수 있다(그림 1의 A와 B). 하층제트 축(streak)을 기준으로 호우 지역은 기온과 습도의 차이가 큰 축의 왼쪽에 나타난다. 상대적으로 축의 오른쪽에서는 기온과 습도의 차이가 적다.

그림 1의 A 구역은 온난 습윤한 공기가 한랭 건조한 공기와 만나 상승기류를 만들어 호우가 발생하는 지역으로써, 주로 지상 및 하층대기에서 저기압 중심의 동쪽에 위치한다. 이 구역에서는 온난전선형과 같이 따뜻하고 습한 공기가 차고 건조한 공기를 타고 북상하므로 폭 넓은 강수대를 형성한다. 그림 1의 B 구역은 온난 습윤한 기류들 향해 건조한 북서~서풍의 기류가 침투하면서 상승기류를 발생시켜 호우가 발생하는 지역이다. 이 지역은 한랭전선형 강수대와 같이 폭이 좁고 강한 비를 동반하며, 수평적(동서방향)인 기온차이보다 습도의 차이가 더 크다.

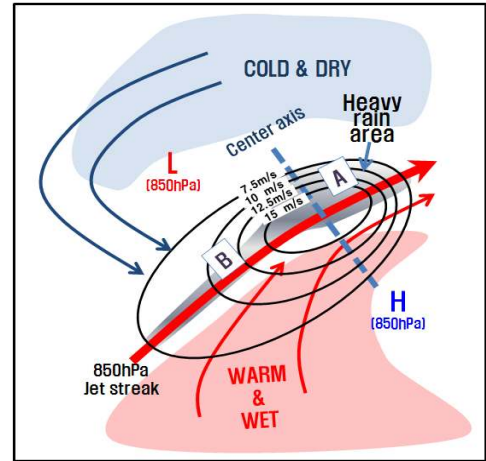


그림 1. 850hPa 최대풍속지점과 하층제트 축을 기준으로 2개의 호우구역으로 구분한 모식도

<하층제트 축을 기준으로 호우구역 찾기> 10년간(2001~2010) 우리나라의 호우경보사례를 대상으로 연구한 결과 850hPa 고도에 최대풍속 25kts 이상의 하층제트가 있을 경우 하층제트 축의 왼쪽 지역(그림 1의 A, B)에서 15kts 이상의 풍속대에서 주로 호우가 발생하였음(예보기술팀, 2011).

□ 하층제트에 의한 호우사례 분석

그림 2는 기류의 진행방향에 따라 풍속이 감소하는 지역으로써 고상당온위역과 저상당온위역이 만나는 지역인 하층제트 중심의 북동쪽에서 호우가 내린 사례이다(2009년 7월 7일). 이 지역에서 호우와 관련된

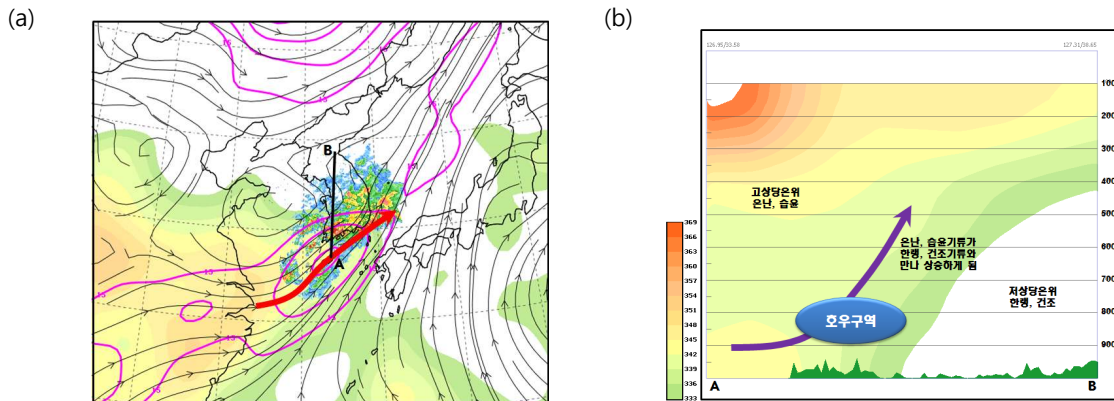


그림 2. (a)는 850hPa 상당온위(333K이상 컬러부분), 유선, 등풍속선(15kts 이상, 5kts 간격, 분홍색 실선), 레이더 영상 중첩도. (b)는 (a)의 선 A,B를 잇는 상당온위의 연직 단면도임 (2009. 7. 7. 00UTC, GDAPS 분석장)

상승운동이 발생하는 이유는 하층대기의 수평적 풍속감소분이 수직적 풍속증가분(연직상승운동)으로 변화되기 때문이다. 하층제트 중심이 통과하기까지 많은 수증기와 에너지가 계속해서 유입되므로 강수 지속시간이 다른 호우형태에 비해 길며, 폭 넓은 호우구역이 나타난다.

그림 3은 하층제트 중심(최대풍속)을 기준으로 남서쪽에서 발생하는 호우의 예이다(2009년 7월 14일). 이 지역은 온난 습윤한 기류내로 건조한 기류가 침투하면서 활발한 상승운동이 나타난다. 한랭 전선형과 같이 폭이 좁은 띠 형태의 강수대가 나타나므로 하층제트 중심의 북동쪽 호우구역(그림 1의 A지역)에 비해 강수 지속시간은 짧지만 그림 3(b)와 같이 습윤한 북태평양기단과 건조한 대륙기단이 균형을 이뤄 정체될 경우 많은 비가 내릴 수 있다.

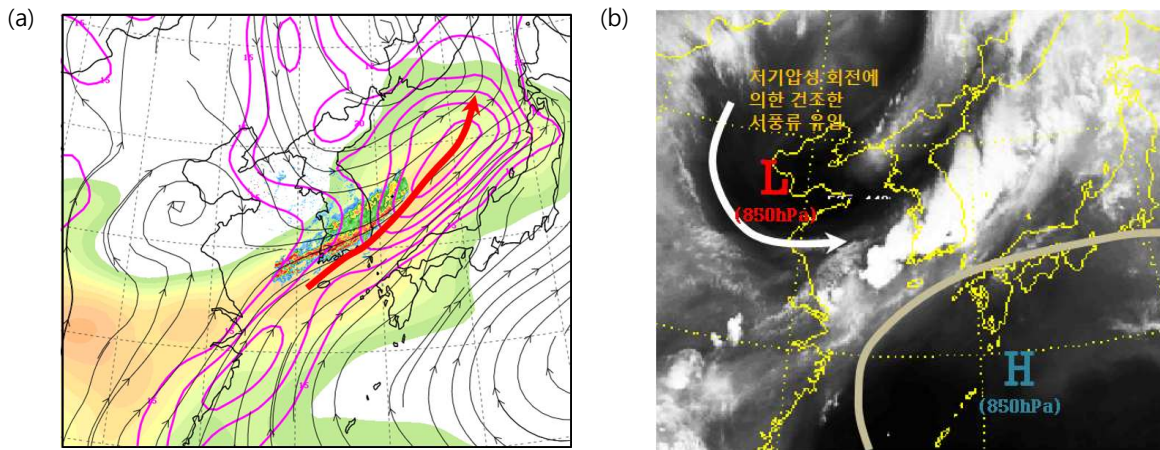


그림 3. (a)는 최대풍속지역의 서쪽에서 나타나는 호우의 예이며, 오른쪽 그림은 같은 시간 수증기 영상임 (2009. 7. 14. 18UTC, GDAPS 분석장).

호우를 발달시키는 대기구조

□ 상·하층제트 커플링

남쪽에서 북쪽으로 이동하는 하층제트는 종종 서에서 동으로 이동하는 상층제트(Upper Level Jet; ULJ)아래로 통과하면서 서로 커플링되기도 한다. 이런 커플링형태는 직접열순환(direct thermal circulation)을 만든다. 하층제트에 의한 수렴과 상승운동은 상층제트 입구의 오른쪽 발산구역에서 강화되면서 지속적으로 강한 상승운동을 만든다(그림 4). 상·하층제트 커플링의 형태로 나타나는 직접적인 열 순환은 우리나라 호우사례에서도 발견된다.

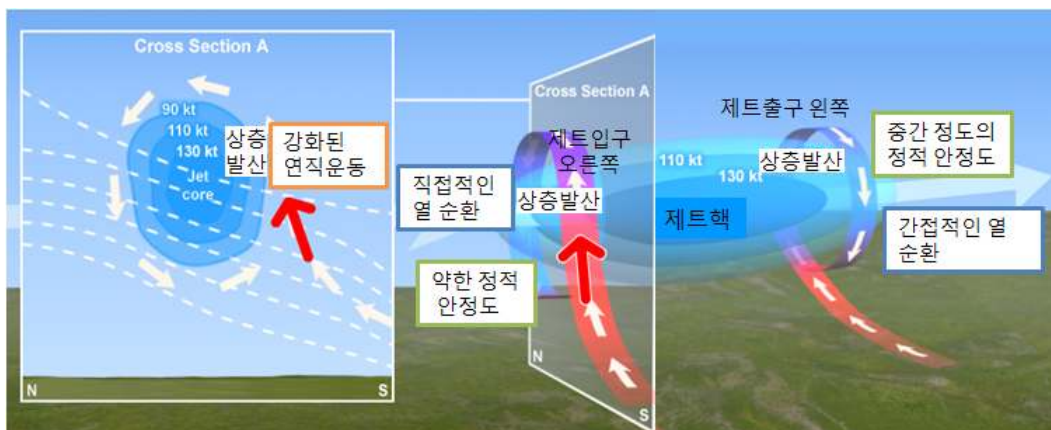


그림 4. 상층제트와 하층제트의 커플링의 형태로 나타나는 직접적인 열 순환의 모식도(Uccellini and Kocin, 1987) (출처: COMET)

그림 5는 2009년 7월 14일 사례로 상·하층 제트가 커플링 된 모습을 보여준다. 하층기류에 동반되어 남에서 북으로 이동하는 온난·습윤한 공기는 부력을 얻어 상승운동을 하게 되고 이 기류는 상층제트의 입구의 오른쪽으로 이동하면서 직접적인 열순환 구조를 갖추게 된다. 850hPa 기류의 방향이 200hPa 기류를 타고 넘는 구조로서, 중규모의 호우구역을 찾을 수 있다. 하층제트 축의 왼쪽에 해당하는 호우구역은 하층제트의 최대풍(그림 5(a), (b)의 A)에서 상층제트 축(그림 5(a), (b)의 B)까지 그은 선 내부로 한정된다. 그림 5(c)처럼 이 지역은 하층의 강한 수렴과 상층의 강한 발산의 연직구조가 잘 조직되어 호우발생 확률이 높다.

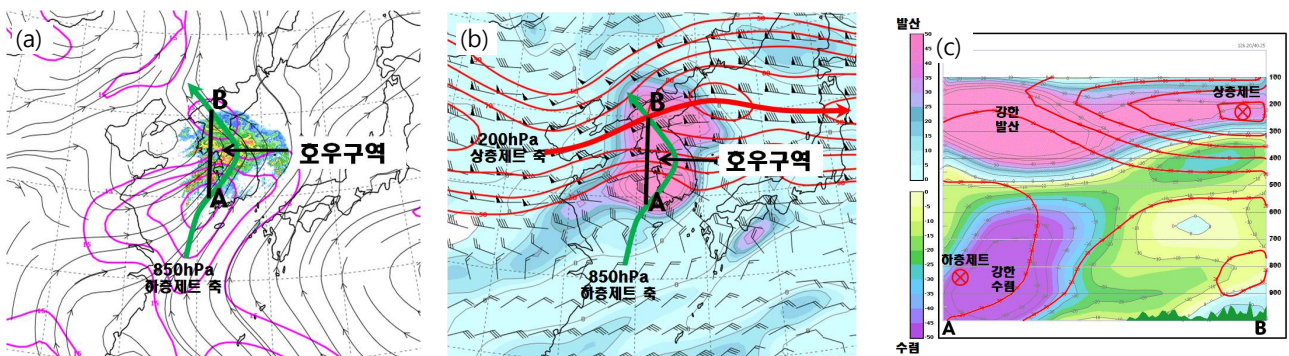


그림 5. (a) 850hPa 유선과 강풍, 레이더영상을 중첩한 일기도, (b) 200hPa 등풍속선(50kts 이상, 10kts 간격)과 발산장(컬러)의 중첩도, (c)는 (a)와 (b)의 A와 B 지점 사이의 수렴, 발산, 등풍속(10kts간격)을 보여주는 연직단면도(2009. 7. 14. 00UTC, GDAPS 분석장)

□ 야간 시간대의 대기 안정화

하층제트는 행성경계층고도 부근에 위치하기 때문에 일변화가 발생한다(Wexler 1961). 낮에는 일사에 의한 지면가열로 행성경계층고도가 높아지고 난류에 의한 마찰효과가 크지만 야간에는 지표부근이 안정화되어 마찰력이 줄어들면서 하층제트의 풍속이 증가하게 된다. 특히, 야간에는 마찰효과가 없는 상태에서 남에서 북으로 이동하는 하층제트의 특성상 코리올리힘이 증가하여 지균풍보다 더 강한 바람을 만든다. 이런 낮과 밤에 풍속차이는 고위도로 수송하는 수증기와 에너지양에 큰 차이를 만들어 비가 내리는 시점에 따라 호우의 빈도와 강수량의 차이가 발생하게 된다. 하층제트가 동반된 호우발생 빈도 연구에서 늦은 밤에서 이른 아침 사이에 발생한 호우가 낮에 발생한 호우보다 25% 이상 많은 것으로 조사된 바 있으며, 비슷한 시스템으로 발생된 호우일 경우에도 야간에 강수량이 더 많은 것으로 알려져 있다(Hoecker 1963, Hoecker 1965, Bonner 1968, Augustine and Caracena 1994, Mitchell et al. 1995).

< 참고문헌 >

- 예보기술팀, 2011: 예보관 핸드북 시리즈 2. 한눈에 보는 호우개념모델
- Augustine, J. A. and F. Caracena, 1994: Lower-tropospheric precursors to nocturnal MCS development over the Central United States. *Wea. Forecasting*, **9**, 116-135.
- Bonner, W. D., 1968: Climatology of the low level jet. *Mon. Wea. Rev.*, **96**, 833-850.
- Hoecker, W. H., 1963: Three southerly low-level jet streams delineated the Weather Bureau special pibal network of 1961. *Mon. Wea. Rev.*, **91**, 573-582.
- _____, 1965: Comparative physical behavior of southerly boundary-layer wind jets. *Mon. Wea. Rev.*, **93**, 133-144.
- Mitchell, J. F. B., R. A. Davis, W. J. Ingram, and C. A. Senior, 1995: On surface temperature, Greenhouse Gases, and Aerosols: Models and Observations. *J. Climate*, **8**, 2364-2386.
- Uccellini, L. W., and P. J. Kocin, 1987: The interaction of jet streak circulations during heavy snow events along the east coast of the United States. *Wea. Forecasting*, **2**, 289-308.
- Wexler, H., 1961: A boundary layer interpretation of the low-level jet. *Tellus*, **13**, 369-378.

<기초탄탄 코너> 제트(jet)란?

한대 제트(Polar jet)는 9~12km 상공에 폭이 좁고 속도가 강한 편서풍으로 그림 6(a)처럼 30°~50°사이의 중위도에서 하층의 남북 온도 차이에 의해 형성된다. 남북으로 다른 온도차는 대기에 서로 다른 층후를 형성하고, 이로 인한 기압경도에 의해 상층 바람은 하층에 온도차이가 큰 곳의 위쪽으로 남에서 북으로 흐르며, 가속되면서 전향력에 의해 동쪽으로 편향되어 전지구를 서에서 동으로 움직이는 바람의 통로를 형성한다. 일반적으로 한대제트를 상층제트라고 부른다.

제트가 중요한 이유는 기압계의 주 에너지 원이기 때문이다. 그림 4처럼 제트 입구의 오른쪽/제트 출구의 왼쪽에 발산장이 형성되면서 직·간접적으로 열이 순환되고, 연직운동이 강화된다. 이러한 에너지 교환은 그림 6(b)처럼 지상기압계를 발달시키고, 반대로 지상기압계가 제트를 강화시키는 상호작용을 한다.

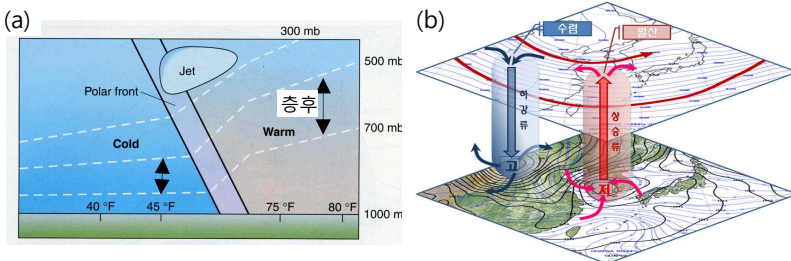


그림 6. (a) 대류권부근의 극전선 위의 제트(출처: Weather & Climate)과 (b) 2010. 1. 4. 03KST 상하층 기압계 모식도(서울경기 대설사례)

아열대제트(Subtropical jet; STJ)는 아열대 지역의 해들리셀과 페렐셀의 경계에서 약한 온도 차이에 의해 만들어진다. 적도수렴대에서 멀어질수록 각운동량 보존법칙에 의해 상층 바람의 서향 성분이 강화된다. 아열대제트는 따뜻하고 습한 공기를 북쪽으로 수송하며, 중위도 기압계를 강화시키는 역할을 한다.

하층제트(Low-Level Jet; LLJ)는 850hPa이나 925hPa에 나타나며 하층대기에서 강화된 남서풍으로 10~12.5m/s(약 20~25kts) 풍속을 갖는다. 그림 7처럼 저기압성 곡률을 갖는 한대제트 앞쪽에서 2차 순환에 의해서 강화된다. 우리나라 주변에서는 주로 여름철에 장마전선 상에서 발달한 저기압에 동반되어 하층제트가 나타난다. 하층제트는 다량의 수증기와 열을 포함한 따뜻하고 습한 공기를 북쪽으로 이류시키는데 중요한 역할을 하며 상·하층간의 대기불안정을 강화시킨다.

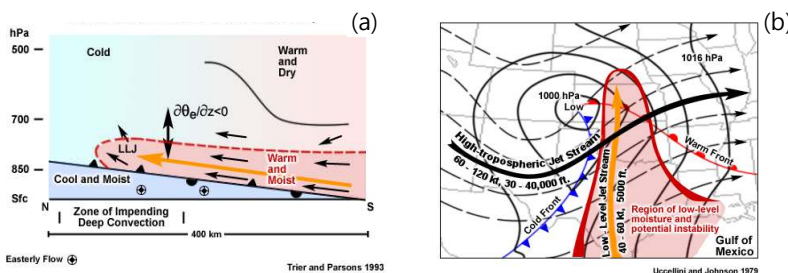


그림 7. (a)하층제트와 대류 불안정, (b)상층제트와 하층 제트의 커플링 모식도 (출처: COMET)

- 기상학자 로스비가 1956년 TIME지 기사에서 강한 서풍계열의 상층 바람을 "jet stream"이라고 쓰기 시작함.
- 상층제트의 중심최대풍속은 50~200kts정도며 250kts를 넘을 때도 있음. 겨울철이 여름철보다 남북간의 온도차가 커, 겨울철의 제트가 강함.
- 겨울철 제트기류의 핵은 250 hPa 고도에 있으며, 강한 저기압이 있는 곳에서는 300hPa 고도에 도달함.
- 상층제트의 파장은 평균적으로 경도 75°이고, 50°~130°로 다양하게 나타남.
- 200, 300hPa 일기도에서는 상층 제트축을 풍속 50kts를 시작으로 최대풍을 지나 50kts의 끝까지 5~10mm의 넓이가 일정한 적색띠로 표시하고 풍하측 끝에 화살표를 붙임(하층제트는 그림 1처럼 별도 분석).

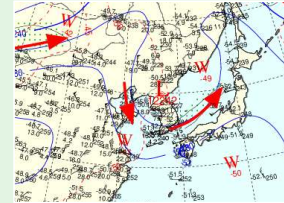


그림 8. 200hPa 일기도, 2010.6.29. 12UTC

- 위성영상을 이용해서 제트축을 찾는 방법도 있음. 그림 9(a)처럼 제트축의 고기압성 시어 쪽으로 권운 구름대가 형성, 그림 9(b)처럼 경압 구역의 권운은 없으나, 제트축이 가로지르는 곳에서 A지점처럼 구름이 흐르는 것처럼 보이거나, 그림 9(c)처럼 상층운이 없고, 하층운 구름대의 경계나 상호작용 영역에서 찾아볼 수 있음.

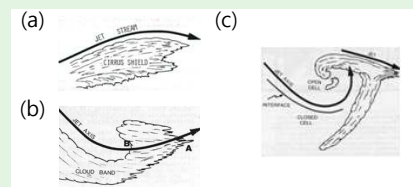


그림 9. 위성영상에서 제트 찾는 방법 (출처: Satellite Interpretation)

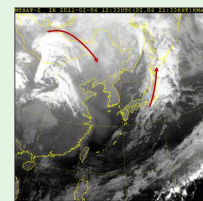


그림 10. MTSAT-2 적외영상, 2011.2.6. 12UTC

<참고문헌>

- 홍성길, 1995: 기상분석과 일기예보, 교학연구사, 108-111
 Edward Aguado, James E. Burt, 2006: Weather & Climate, Pearson Prentice Hall, 222, 299-301
 Eugene M. Weaber, Steven Wilderrotter, 1981: Satellite Interpretation, AFB, 20-23
 James T. Moore: Jet Streak Circulation, COMET, www.meted.ucar.edu
 Tim Vasquez, 2003: Weather Map Handbook, Weather Graphic Technologies, 80-82