

급격히 발달하는 저기압



■ 발행: 예보국 ■ 문의: 예보기술팀(내선 1656/1657) ■ 발행일: 2012년 5월 31일(목)

급격히 발달하는 저기압이란?

Sanders and Gyakum(1980)은 사례조사를 통해 위도 60° N에서 지상저기압의 중심 기압이 24시간 동안 24hPa 이상 하강하는 저기압을 “Bomb Low” 라고 정의했고, 북반구 대륙의 동안 지역에서 겨울에 자주 발생하는 사실을 발견했다. Chen et al.(1992)은 발생지역에 대한 조사를 통해 북미대륙의 동안과 우리나라와 일본이 위치한 동아시아 동안지역이 최대 발생지역임을 제시했다.

급격하게 발달하여 기압이 낮아진 저기압이기 때문에 저기압 중심 주변에 기압경도력은 매우 강하다. 따라서 강풍이 동반되며, 해안이나 섬 지역은 천둥·번개를 동반한 소낙성 강수가 내리기도 한다. 저기압 중심에서 멀리 떨어져 있더라도 동해안 지역은 너울성 파고에 의한 피해가 발생할 수 있다. 한편, 봄철이나 초겨울에는 한랭전선이 통과한 후 동해상에서 저기압이 급격히 발달하면 서쪽에 위치한 우리나라는 강한 하강류에 의해서 중국이나 몽골에서 발원한 황사 입자가 지면으로 떨어져 짙은 농도의 황사가 발생할 수 있다. 2010년 12월 2일과 3일 사이에 24시간 동안 24hPa의 기압이 떨어졌던 저기압과 2011년 4월 30일과 5월 1일 사이에 15hPa의 기압이 하강했던 저기압이 이와 관련된 사례다. 상층대기에 차가운 공기를 가진 절리저기압이 위치하기 때문에 지상저기압 중심은 동해상에 위치하더라도 서쪽에 위치한 우리나라는 대기가 매우 불안정하다. 만약 낮에 절리 저기압이 상공에 위치한다면, 일사 가열에 의해 대기는 매우 불안정해져 소낙성 강수나 천둥, 번개, 돌풍을 동반한 우박 가능성도 있다. 겨울철에 발생한 저기압일 경우 회전력에 의한 2차 전선대가 형성되고 동해안과 영동산간 지방에 많은 양의 눈이 내릴 때도 있다. 이번 호에서는 급격히 발달하는 저기압에 대한 발생 원인을 분석하고 우리나라에 적용 가능한 예측 방법을 제시하고자 한다.

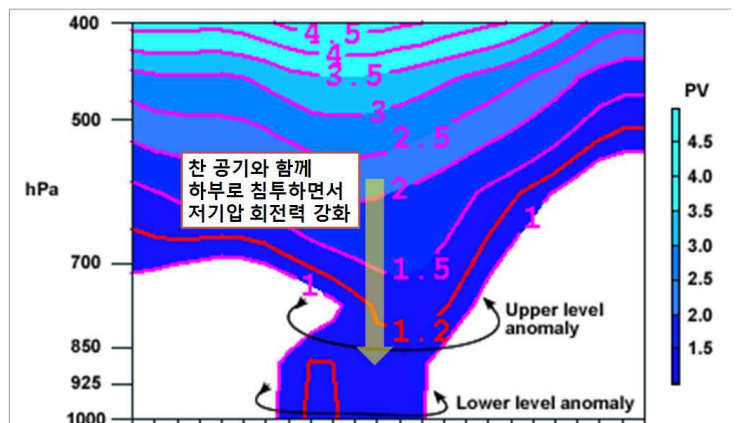


그림 1. PVU에 의한 대류권 하부 저기압성 회전력 증가 (출처: COMET)

발생원인

상층요란과 차가운 공기를 가진 절리저기압

Kuo et al.(1995)은 상층의 저기압성 요란과 잠열 방출간의 내부 작용이 저기압을 급격하게 발달시키는 중요한 원인으로 제시했다. 해상에서 많은 양의 잠열이 저기압으로 유입되고, 그림 1과 같이 성층권 하부(대류권계면 부근)에 저기압성 요란은 아래층의 공기기동을 저기압 방향으로 가속(spin up)화시켜 지상저기압을 발달시킨다.

겨울철 우리나라, 일본 등 동아시아 해안지역은 서쪽의 대륙에서 차가운 공기가 편서풍을 타고 유입되고 동쪽은 쿠로시오 난류에 의한 따뜻한 해양이 위치하면서 그림 2와 같이 지표와 낮은 대기층에서 동-서의 기온차이가 크게 나타난다.

Gyakum(1983)과 Chen et al.(1987)은 동아시아 해안선을 따라 현열의 수송과 잠열 방출과의 되먹임(feedback) 과정이 저기압을 급격히 발달시키는 에너지원으로 제시했다. 그림 2는 차가운 공기가 우리나라에 위치할 경우 동해 상공과 큰 수평기온 차이로 동해상에서 강한 상승기류와 대류발달이 강화됨을 보여주는 모식도이다. 2012년 4월 3일 동해상에서 급격하게 발달한 저기압이 위치할 당시 위성에서 관측된 해수면 온도분포를 살펴보면 울릉도 부근과 제주도

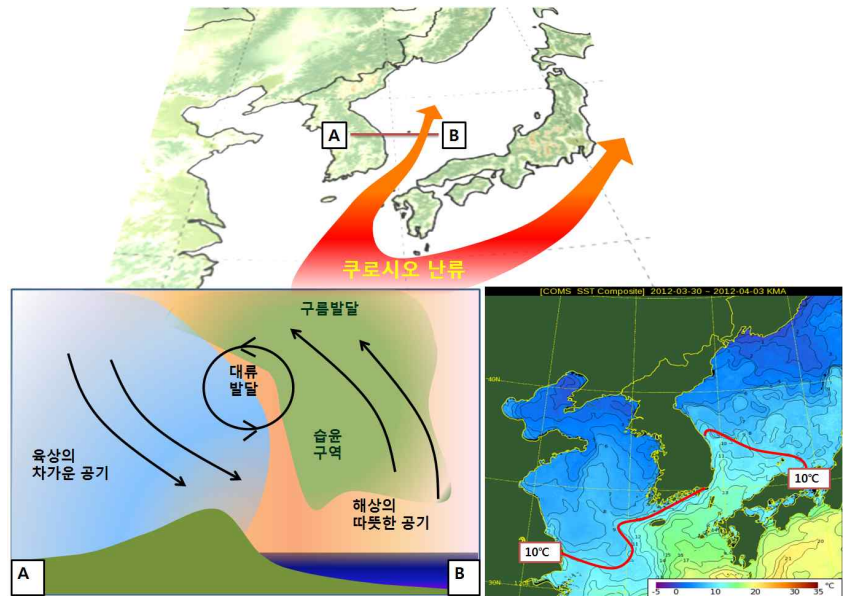
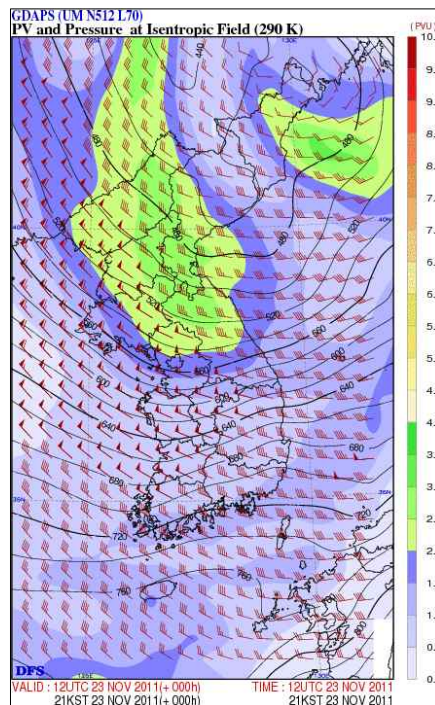
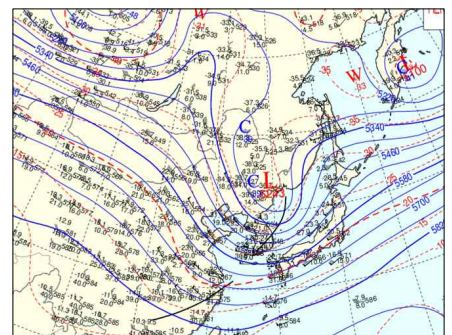


그림 2. 대류발달 모식도와 해수면 온도(COMS 2012년 4월 3일 기준 5일 평균 해수면 온도).

(a) 290K 등온위면 PVU



(b) 500hPa 일기도



(c) 지상일기도

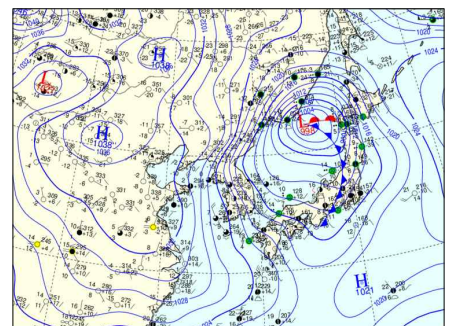


그림 3. 2011년 11월 23일 21시 일기도

부근의 수온이 약 10℃로 비슷하여 동해의 수온이 높았음을 알 수 있다.

Robber(1993)는 IPV(Isentropic Potential Vorticity)를 이용하여 저기압 발달을 조사하였는데, 대류권계면에 접해있는 성층권하부에 큰 IPV값이 대류권으로 침투하면서 급격히 저기압을 발달시킴을 보였다. 큰 IPV 값은 대류권계면 접힘(tropopause folding)현상을 동반하며, 낮은 권계면 고도는 지상과 큰 기온차이로 인한 강한 연직불안정을 만들고, 저기압성 와도를 하부로 증폭시켜 지상저기압을 발달시킨다(Uccellini et al. 1985). 등온위면에서 잠재와도의 단위는 PVU(Potential Vorticity Unit)를 사용하는데, Bluestein(1993)의 연구결과를 토대로 통상적으로 1.5PVU를 대류권계면 값으로 사용한다(기상청 2011). 이런 대류권계면 접힘현상은 500hPa 부근에서 나타나며, 일기도에서 차가운 공기핵을 가진 절리(cut-off) 저기압의 형태로 나타난다(Thorpe 1985, 이홍란 등 2002). 그림 3은 2011년 11월 22일 21시에서 23일 21시까지 24시간 동안 지상저기압 중심이 약 20hPa 정도 하강했던 사례이다. 290K 등온위면(a)에서 1.5PVU 이상 값이 우리나라 중북부 북쪽 지역과 동해북부해상에 분포한다. 이 지역은 500hPa 일기도(b)에서 차가운 공기핵을 가진 절리 저기압이 위치한 지역이다.

제트 스트리크(streak)에 의한 2차 순환

Chen et al.(1987, 1994)은 극 제트(Polar Jet)와 관계된 간접순환(2차순환)에 의해서 저기압이 급격히 발달함을 제시하였다. 제트 스트리크가 지상저기압의 남쪽에 위치하고 하층 대기에서 제트 스트리크를 가로질러 남에서 북으로 이동하는 온난·습윤 기류가 저기압 중심에서 수렴하여 상승하고 상층에서 발산하는 구조이다. 그림 4는 그림 3과 같은 날짜에 급격하게 발달한 저기압에 대한 상층제트와 관계된 간접순환의 모식도와 300hPa, 850hPa 일기도를 각각 보여준다. 850hPa 일기도(c)에서 일본 남쪽에서 동해상에 위치한 저기압의 중심과 동쪽으로 온난·습윤기류가 유입되는 모습이 보인다. 이 기류는 300hPa 제트 스트리크(b)를 가로질러 남에서 북으로 이동하는 기류이며, 상층 제트 중심(Jet core)의 출구 북쪽에 상층 발산 구역과 함께 지상저기압 중심이 위치한다. 우리나라에서는 하정자와 이동규(1984)가 동해선풍과 연관된 상층제트와의 순환관계를 설명한 바 있다.

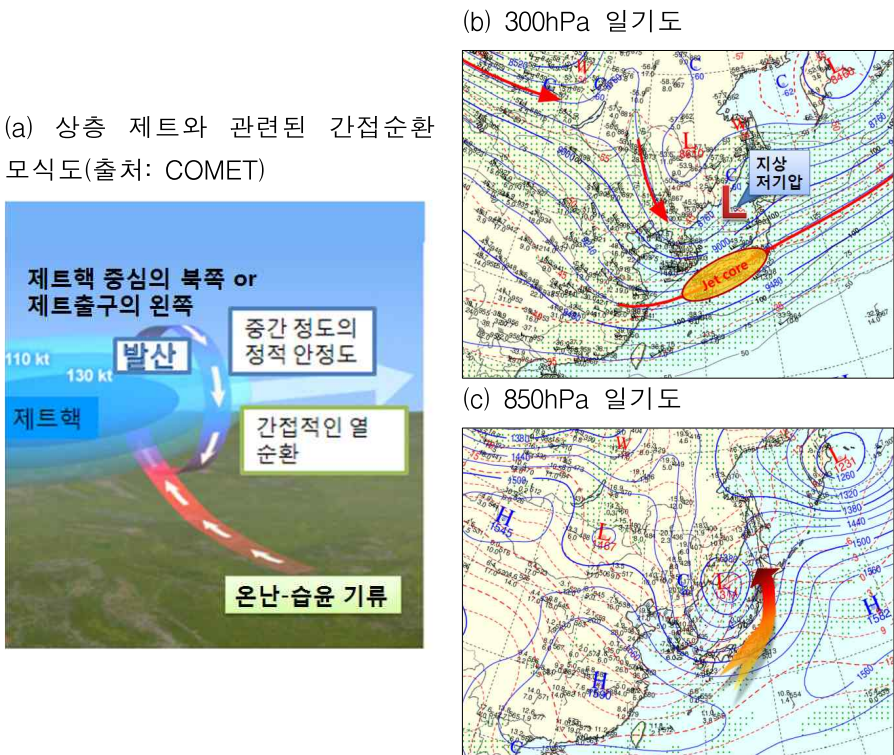


그림 4. 2011년 11월 23일 21시 제트의 간접순환 모식도와 300hPa, 850hPa 일기도

요약 및 모식도

동해상은 겨울철에도 따뜻한 수온이 유지되는 반면, 대륙은 매우 차가운 공기가 지배한다. 만약, 이동성 고기압이 일본 남쪽에 위치하고 이 고기압의 서쪽이나 북쪽 가장자리를 따라 저기압이 남서에서 북동쪽으로 이동한다면, 저기압 중심의 남쪽에서 저기압 중심과 동쪽으로 따뜻하고 습한 공기가 이동한다. 저기압 중심이 동해상에 위치하면, 해상으로부터 충분한 잠열 흡수가 가능하다. 대륙에서 차가운 기류가 편서풍을 타고 서에서 동으로 이동하기 때문에 동해상에 위치한 저기압을 중심으로 서쪽과 동쪽의 기온차는 매우 커진다. 즉, 경압불안정이 강해지고 동해상에 위치한 저기압의 상승기류는 강화되어 중심기압이 낮아진다. 이때, 대륙권 중층(500hPa 부근)에 차가운 공기를 가진 절리저기압이 이동해 온다면, 저기압은 회전력이 더해지면서 더욱 급격히 발달한다. 특히, 동해상은 수평뿐만 아니라 수직적으로도 큰 기온 차이가 동시에 발생하기 때문에 저기압이 급격하게 발달하기 좋은 지역이다.

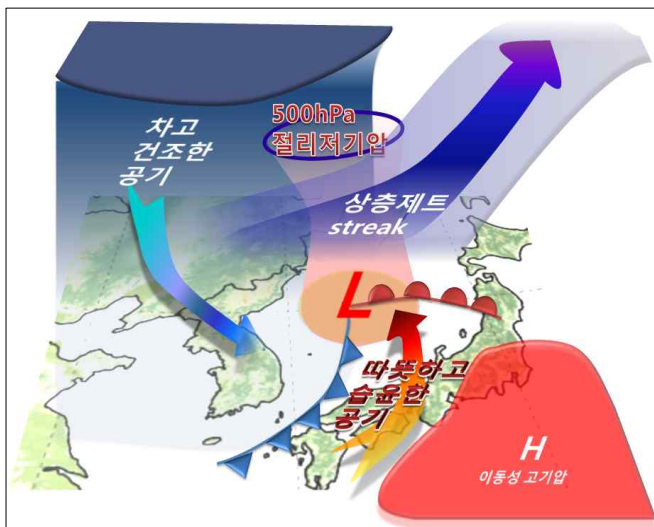


그림 5. 우리나라 동해상에서 급격히 발달하는 저기압의 3차원 모식도

동해상에서 급격히 발달하는 저기압 요약

- ① 이동성 고기압의 서쪽 가장자리에서 저기압 중심의 기온이 따뜻한 저기압 발달
- ② 북서쪽에 차가운 공기의 접근으로 서해상에서 전선형 저기압으로 발달
- ③ 500hPa 절리저기압, 500hPa부근(290~ 300K 등온위면) 1.5PVU 이상값 존재
- ④ 극 제트중심의 북쪽이 동해상에 위치할 때 급격히 발달

급격히 발달하는 저기압 예측

- ① 초기 단계에서 지상의 가열과 하층대기에 온난공기의 이류에 의해 중국에서 저기압이 발생한다.
- ② 이 저기압은 우리나라 부근에 위치한 이동성 고기압의 서쪽 가장자리에 위치하며, 고기압의 이동속도와 비슷하게 북동쪽으로 이동한다. 만일, 남쪽 방향으로 이동하게 되면, 코리올리힘이 감소되므로 저기압은 발달하지 못한다.
- ③ 서해상으로 진출하면서 북서쪽에서 접근하는 한랭한 공기와 만나게 되면 전선형 저기압으로 발달하고 중심 기압도 낮아진다.

④ 우리나라를 통과할 때, 지상저기압의 상공(500hPa)에 절리저기압(중심에 차가운 공기를 가진 저기압)이 존재해야 한다. 절리저기압과 합쳐질 경우에 지상의 저기압은 급격히 발달한다.

⑤ 4번의 일기도 패턴이 유지되면서 지상저기압이 동해상에 위치하면, 동서방향과 연직방향의 큰 기온차로 강한 경압불안정이 나타나며, 저기압 중심의 상승류가 강화되어 급격하게 발달한 저기압이 완성된다. 이 때, 300hPa 극제트는 지상저기압 중심의 남쪽에 위치하며, 제트기류 중심(최대풍속지역)을 기준으로 지상저기압은 제트기류의 출구 왼쪽인 상충발산구역에 위치한다.

표 1. 최근 7년(2006~2012)간 우리나라부근에서 발생한 급격히 발달한 저기압

사례(날짜)	중심기압 변화(hPa/24시간)
2006. 4. 1~2	12
2006. 4. 19~20	17
2007. 2. 13~14	26
2007. 3. 4~5	16
2007. 12. 28~29	17
2008. 11. 27~28	15
2009. 2. 19~20	30
2009. 3. 13~14	21
2009. 3. 21~22	20
2010. 11. 7~8	15
2010. 12. 2~3	24
2011. 4. 30~5. 1	15
2011. 11. 22~23	20
2012. 4. 2~3	39

사례분석

2012년 4월 2~3일 급격히 발달하는 저기압이 우리나라를 통과한 사례

2012년 4월 2일 21시 중심기압 1006hPa의 저기압이 서해상에 위치하였다. 이 저기압은 빠른 속도로 북동진하여 24시간 후인 3일 21시에 동해상에 위치하였는데, 이 때 중심기압이 967hPa이었다. 24시간 동안 무려 39hPa까지 기압이 하강한 사례다. 급격히 발달한 저기압의 영향으로 4월 3일 전국적으로 강풍이 불었다. 제주, 남해안, 울릉도에는 30m/s 이상의 순간풍속이 관측되었고, 내륙으로도 20m/s 내외의 강풍이 불었다(표 2 참고).

4월 1일 21시 925hPa 일기도(그림 6의 왼쪽)에서 중국 북부에 중심을 둔 저기압이 보인다. 이 저기압 중심을 지나는 15°C 등온선은 저기압 중심의 동쪽(남풍이 부는 지역)에서 급격하게 남쪽으로 기울어진 모습을 볼 수 있다. 등온선 형태로 볼 때, 이 저기압은 대륙의 가열에 의해 발생한 열저기압(중심이 따뜻한 저기압)이라고 할 수 있다. 이 저기압은 우리나라에 위치한 이동성 고기압이 동쪽으로 이동하고 바이칼호 부근에 위치한 차가운 공기가 남하하면서 동서의 기온차이가 커짐에 따라 동쪽으로 이동하였다. 24시간 후인 4월 2일 21시에 저기압은 서해상으로 이동하였고 전선을 가진 저기압으로 발달하였다(그림 7의 중앙). 이때까지 중심기압의 변화는 크지 않았다. 이 저기압 중심의 북쪽으로 300hPa 일기

표 2. 2012년 4월 3일 주요지점 일최대순간풍속

지점	일최대순간풍속(m/s)	시각
울릉군 태하	북풍 38.1	15:17
여수시 간여암	서북서풍 35.3	11:00
부산레이더	서풍 32.2	13:16
전남 여수시	북북서풍 31.0	12:24
제주 태풍센터	서북서풍 32.2	09:10
태안군 웅도	서북서풍 30.4	10:56
충남 서산시	서북서풍 26.3	14:08

도(그림 7의 왼쪽)에서 남북으로 크게 사행하는 극 제트가 보인다. 305K 등온위면(그림 7의 오른쪽)에서 PVU 2.0이상 구역(녹색 지역)이 제트 스트리크와 비슷한 지역에 위치하고 있다. 이후 이 저기압은 북동쪽으로 빠르게 이동하면서 급격하게 발달하였다.

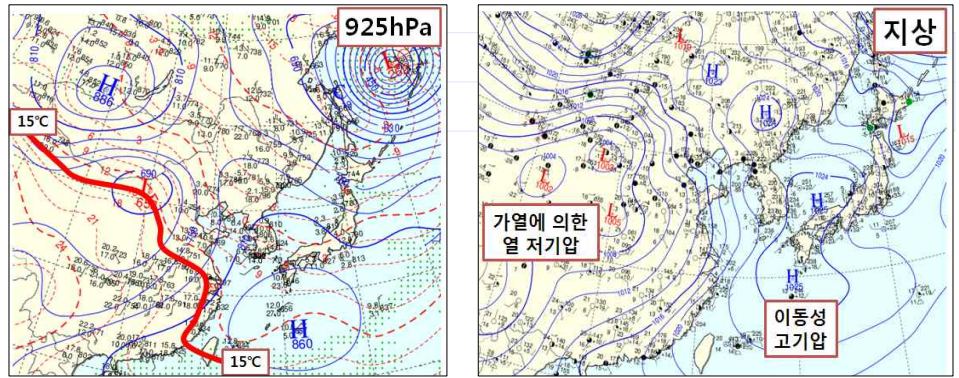


그림 6. 저기압 초기(발생) 단계의 일기도로서, 2012년 4월 1일 21시 925hPa과 지상일기도.

4월 3일 09시에 저기압 중심은 우리나라를 통과하여 동해상에 위치하였다(그림 8의 중앙). 이 때, 중심기압은 988hPa으로서, 12시간 전보다 18hPa 하강하였다.

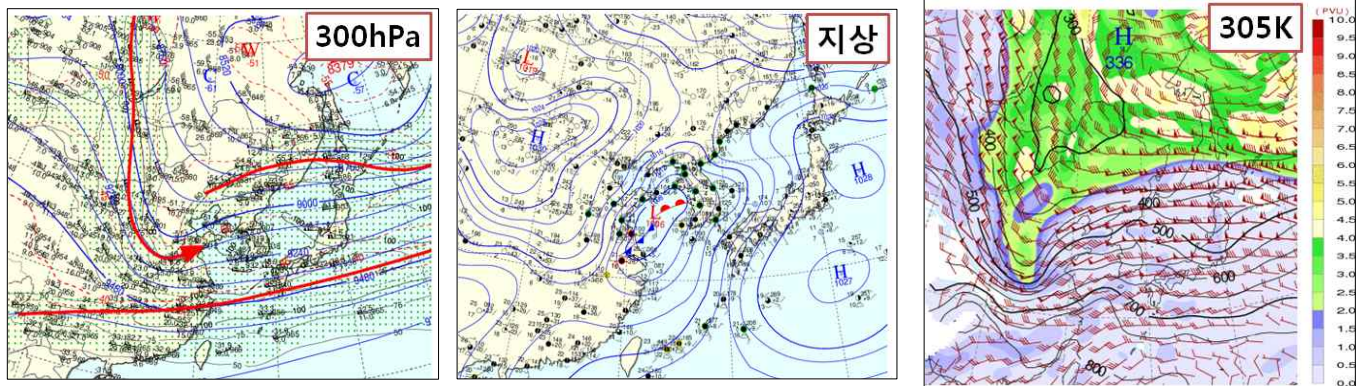


그림 7. 2012년 4월 2일 21시 300hPa, 지상일기도와 305K 등온위면 분석장.

우리나라를 통과하면서 급격하게 발달한 이유는 다음과 같이 요약할 수 있다. 저기압 중심의 서쪽으로 차가운 공기가 빠르게 이동해 오면서 동-서의 기온차이가 매우 커졌다(그림 8의 왼쪽: 925hPa 일기도에서 0°C 등온선 참고). 따뜻한 수온을 유지하는 동해상으로 저기압이 이동함에 따라 동서의 기온경도는 더욱 커질 수 밖에 없다. 둘째, 높은 PVU지역이 이 저기압 상공으로 이동해오면서 저기압의 회전력을 강화시켰다(그림 8의 오른쪽). 셋째, 극 제트가 남쪽으로 이동하면서 최대 강풍지점이 저기압의 남쪽에 위치함에 따라 상층제트 출구의 왼쪽에서 발산구역이 강화되었다. 급격하게 발달하는 저기압의 특징을 이용해 일기도 분석을 하면 다음과 같이 진행할 수 있다. 지상과 대류권 하부에 저기압의 이동경로를 분석한다.

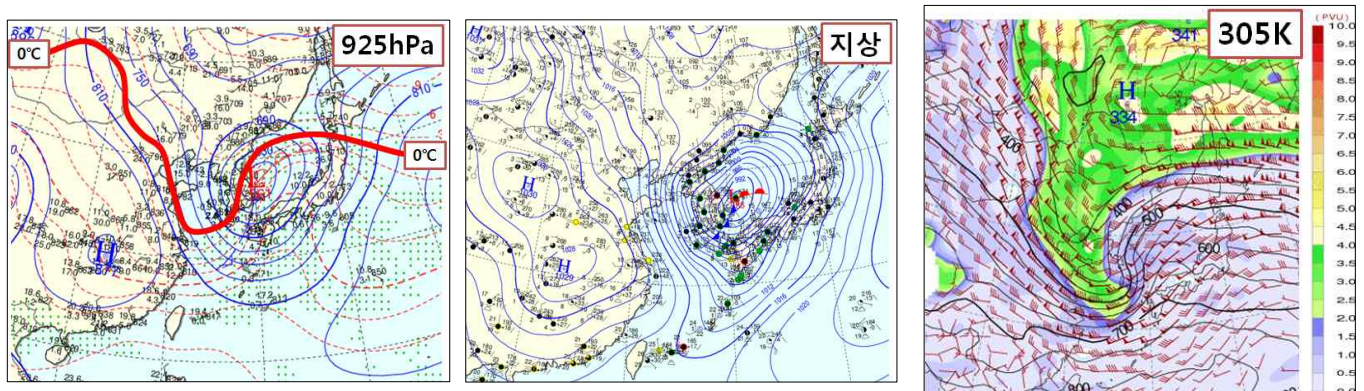


그림 8. 2012년 4월 3일 09시 925hPa 지상일기도와 305K 등온위면 분석장.

지상의 저기압이 발달하려면 북쪽으로 이동해야만 코리올리 힘의 증가에 따라 저기압이 발달할 수 있다. 상층일기도에서 500hPa은 절리(cut-off)저기압이나 남북으로 크게 발달한 기압골의 위치를 파악해야 한다. 또한, 이 상층저기압의 주위로 300hPa 제트 스트리크가 지나가야 한다. 셋째, 이 상층 시스템과 지상 저기압이 같은 위치에 놓일 때 급격히 발달하는 저기압이 완성된다. 보통 일본 사할린 섬 부근이나 오호츠크해 부근에 위치한 알류산저기압이 이런 특징이 잘 나타나지만, 따뜻한 수온이 유지되는 동해상도 좋은 조건에 해당한다. 지상저기압이 급격하게 발달된 4월 3일 21시, 300hPa 일기도(그림 9의 왼쪽)에서 최대풍속지역(Jet core)의 북동쪽에 500hPa 저기압 중심(그림 9의 중앙)과 지상저기압 중심(그림 9의 오른쪽)이 같은 위치에 있음을 알 수 있다.

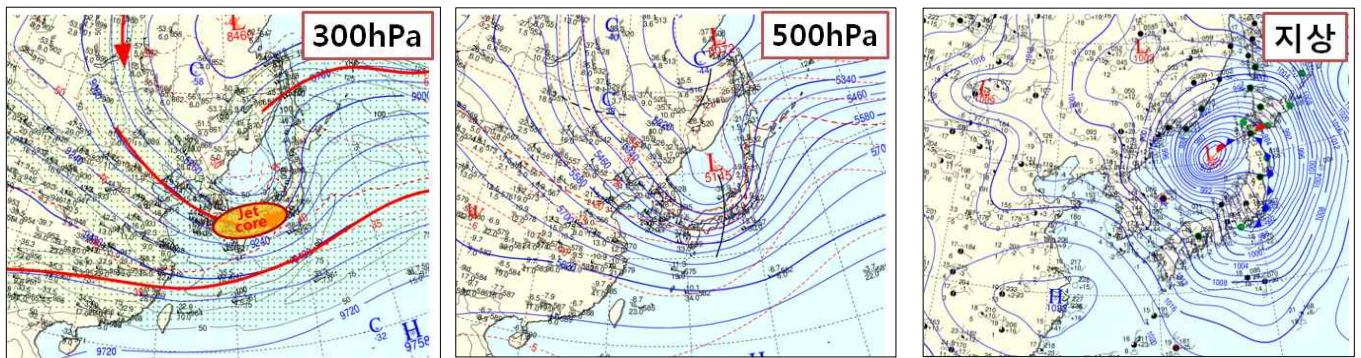


그림 9. 2012년 4월 3일 21시 300hPa, 500hPa, 지상일기도.

3일 21시 280~295K 등온위면분석장 (그림 10)을 보면 녹색으로 보이는 2.0PVU 이상지역이 지상저기압 상공에 위치해 있다. 따라서, 상층의 높은 PVU지역이 지상까지 영향을 미쳤다고 볼 수 있다. (끝)

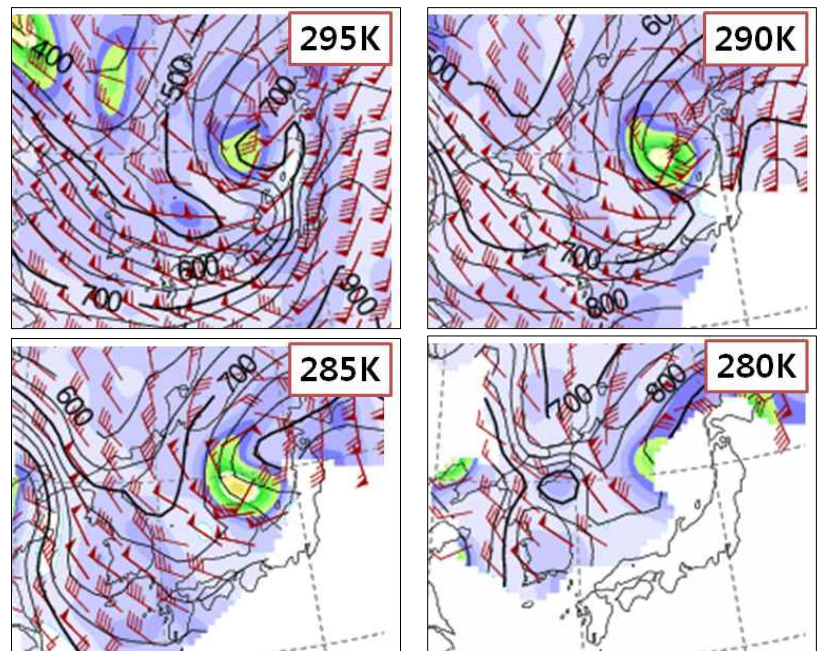


그림 10. 2012년 4월 3일 21시 등온위면 분석장.

〈참고문헌〉

예보기술팀, 2011: 손에 잡히는 예보기술. 기상청.

이홍란, 김정익, 유정문, 이우진, 2002: 급격히 발달하는 저기압과 관련된 대류권계면 파상운동. *J. Korean. Met. Sci.*, 38-5: 431-463.

하경자, 이동규, 1984: 동해선풍과 관련된 Jet 에 관한 연구. *J. Korean. Met. Sci.*, 20-1: 8-19.

Bao, C-L., 1987: Synoptic Meteorology in China. *China ocean press*, Beijing.

Bluestein, H. R., 1992: Isentropic surfaces basic concepts energy equations dimensional analysis. Vol. I, 23 pp.

---, 1993: Synoptic-dynamic meteorology in midlatitudes. Vol. II: observations and theory of weather systems. Oxford University Press, 594pp.

Chen, S-J. and L. D. Osso, 1987: A numerical case study of East Asian coastal cyclogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, 115: 477-487.

---, X. A. Chen, and Y-X, Zhang, 1994: A diagnostic study of the low-level jet during TAMEX IOP 5. *Mon. Wea. Rev.*, 122: 2257-2284.

---, Y-H. Kuo, P-Z. Zhang, and Q-F. Bai, 1992: Climatology of explosive cyclone off the East Asian coast. *Mon. Wea. Rev.*, 120: 3029-3121.

Gyakum, J. R., 1983: On the evolution the QE II storm. Part 1: Synoptic aspects. *Mon. Wea. Rev.*, 111: 1137-1155.

Kuo, Y-H., J. R. Gyakum, and Z. Gou, 1995: A case of rapid continental mesoscale cyclogenesis. part 1: Model sensitivity experiments. *Mon. Wea. Rev.*, 123: 970-998.

Robber, J. P., 1993: A dianostic case study of self-development as an antecedent conditioning process in explosive cyclogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, 121: 976-1006.

Sanders, F. and J. R. Gyakum, 1980: Synoptic-dynamic climatology of the "Bomb". *Mon. Wea. Rev.*, 108: 1589-1606.

Thrope, A. J., 1985: Diagnosis of balanced vortex structure using potential vorticity. *J. Atmos. Sci.*, 42, 397-406.

Uccellini, L. W., R. A. Petersen, K. F. Brill, P. J. Kocin, and J. J. Tuccillo, 1987: Synergistic interactions between an upper-level jet streak and diabatic processes that influence the development of a low-level jet and a secondary coastal cyclone. *Amer. Meteor. Soc.*, 115, 2227-2261.