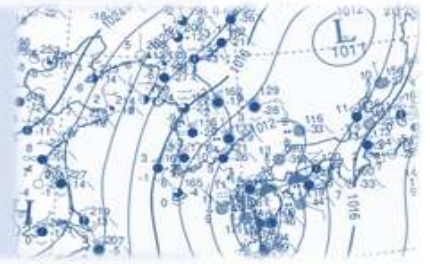


필수 예보요소 활용법과 정의

등온위면 분석 (Isentropic Analysis)

·발행: 예보국 ·문의: 예보기술팀(내선 1656/1657) ·발행일: 2011년 7월 15일(금)



등온위 분석의 기본 이해

1. 온위의 정의

온위(Potential Temperature)는 건조한 공기덩이의 압력이 표준기압 1000hPa이 될 때까지 단열적으로 압축 또는 팽창하였을 때의 온도를 말한다. 온위는 θ 로 나타내며, 그 식은 다음과 같다.

$$\theta = T \left(\frac{1000}{P} \right)^K, \quad \text{여기서 } K = \frac{R_d}{C_p}$$

모든 공기덩이는 온위값이 있으며, 이 값은 건조단열적인 운동에서는 보존된다. 위의 식에서 볼 수 있듯이 같은 온위(등온위)라면, 기압 P가 증가(감소)함에 따라 기온 T도 증가(감소)한다. 또한 중관규모 운동은 강수지역을 제외하고는 대체적으로 단열과정을 유지하므로, 온위는 중관규모 운동에서 보존된다.

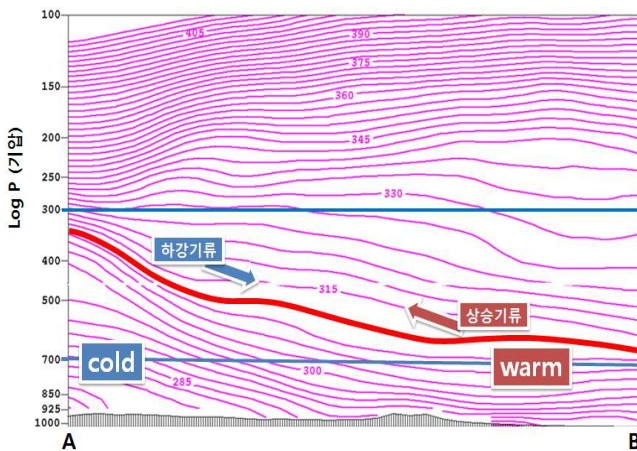


그림 1. 등온위선의 연속(기압고도) 분포. 붉은색 굵은 실선은 312K 등온위선.

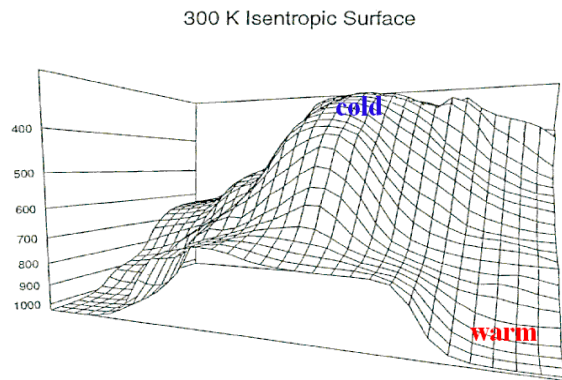


그림 2. 300K 등온위면을 묘사한 3차원 구조도 (Moore 2003)

그림 1과 같이 A와 B지점 상공으로 312K 온위선이 300~700hPa 고도사이에 위치한다면, 700hPa 고도를 기준으로 A지점 상공의 기온은 B지점 상공의 공기보다 차갑다고 할 수 있다. A지점 상공 700hPa은 약 285K, B지점 상공은 약 308K이다. 또한, 312K 등온위선은 A와 B지점 사이에 약 300hPa과 700hPa 즉, 대기상층과 중·하층의 고도차이 만큼 기온차이가 나타난다고 할 수 있다.

만약, A에서 B로 312K 등온위선을 따라 기류가 이동한다면, 하강기류와 함께 수평적으로는 한랭기류가 나타나고, B에서 A로 이동한다면 상승기류와 함께 온난기류가 나타난다. 여기에 수증기량을 이용하면, 기압면에서 해석하기 힘든 구름의 생성 및 강수 현상 등 대기운동을 이해하는데 도움이 된다.

그림 2는 특정 온위면(300K)의 3차원 구조를 묘사한 모식도이다. 기압이 낮은 지역(고도가 높은 지역)은 차가운 공기가, 기압이 높은 지역은 따뜻한 공기가 존재한다.

2. 등온위면 분석이란?

등온위면 분석은 입체적인 대기운동을 쉽게 가늠해볼 수 있는 방법으로서, 공기 분자가 변하지 않는 고유 온도(잠재온도)를 가지고 수평이동이 아닌 공간적으로 이동한다는 기본적인 개념을 바탕으로 시작한다. 공기 분자의 연직 운동은 등온위면의 고도에 따른 경사도와 바람 방향을 이해하면 쉽게 해석할 수 있다. 그림 3(a)에서 등온위면을 305K* 라고 가정하자. 녹색으로 표시된 화살표는 850hPa 등압면을 비스듬한 각도로 통과하여 상승하는 바람이다. 이 바람이 등온위면을 따라 700hPa 까지 이동한다면, 모식도에 850, 800, 750, 700hPa 등압면을 모두 통과하는 상승운동이라고 할 수 있다. 만약, 습윤한 공기가 이런 상승운동을 했다면, 구름이 생기고 비가 내릴 수 있다. 습윤한 공기의 이동에 대해서 단열선도 (Skew T Log P)를 이용해 분석해보자. 일단, 그림 3(b)의 남쪽(A) 지점을 제주도 북쪽(B) 지점을 서울로 가정하자. 305K 등온위면의 기류는 남풍으로서 제주도에서 서울로 향하는 바람이다. 제주도의 850hPa 기온과 노점온도(수증기량)가 주어진다 면 상승응결고도(LCL)를 계산할 수 있다. 만약, 상승응결고도가 800hPa 이라면 등온위면에서 기류가 800hPa 등압면을 통과하면서 상승하게 되어 공기는 포화되고 구름이 발달한다. 이 기류가 계속해서 등압선을 가로질러 700hPa까지 이동한다면, 상승응결고도(800hPa)의 포화혼합비 양에서 포화단열선을 따라 700hPa 까지 상승했을 때의 포화혼합비 양을 뺀 값만큼 대기중으로 수증기가 빠져나가게 되므로 등온위면의 기류가 800~700hPa 등압면을 통과하여 지나가는 구간에서 강수가 나타난다.

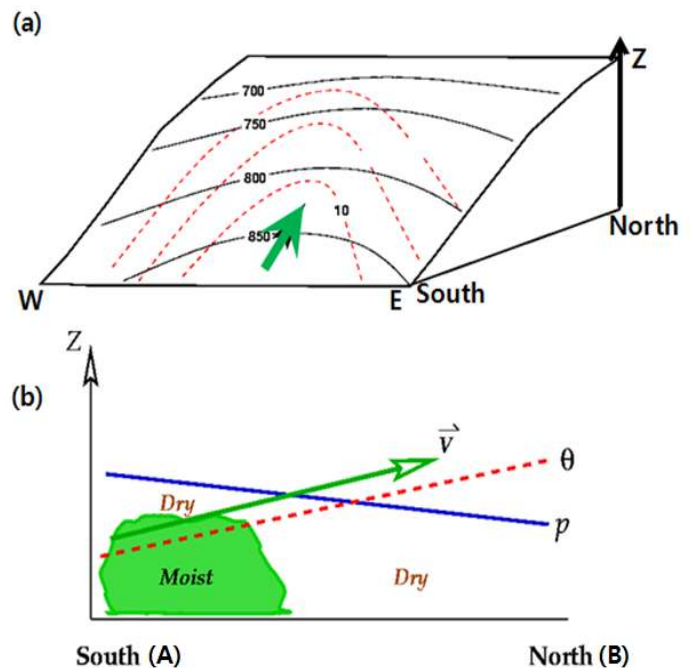


그림 3. (a) 등온위면과 고도로 이루어진 3차원 모식도. 화살표는 기류의 방향, 실선은 등압선, 붉은색 점선은 수증기량(g/Kg)임. (b) 그림(a)의 남,북 방향을 기준으로 연직좌표로 나타낸 등온위(붉은색 파선), 기압(파란색 실선), 기류의 방향(녹색 화살표). (Bluestein 1992)

* 우리나라의 여름철 300~310K 등온위면에서 남서풍의 바람은 850hPa과 700hPa 등압면을 가로지른다.

등온위 분석장 소개와 해석

1. 자료의 위치

※ 위치 : COMIS3 → 일기도 → 예보장 → 등온위면분석(UM전구, 한반도)

현재 UM 모델을 통해 아시아지역과 한반도를 대상으로 IPV(Isentropic Potential Vorticity)와 등압선, 바람벡터를 16개(275~350K : 5K 간격) 등온위면상에서 제공하고 있음.

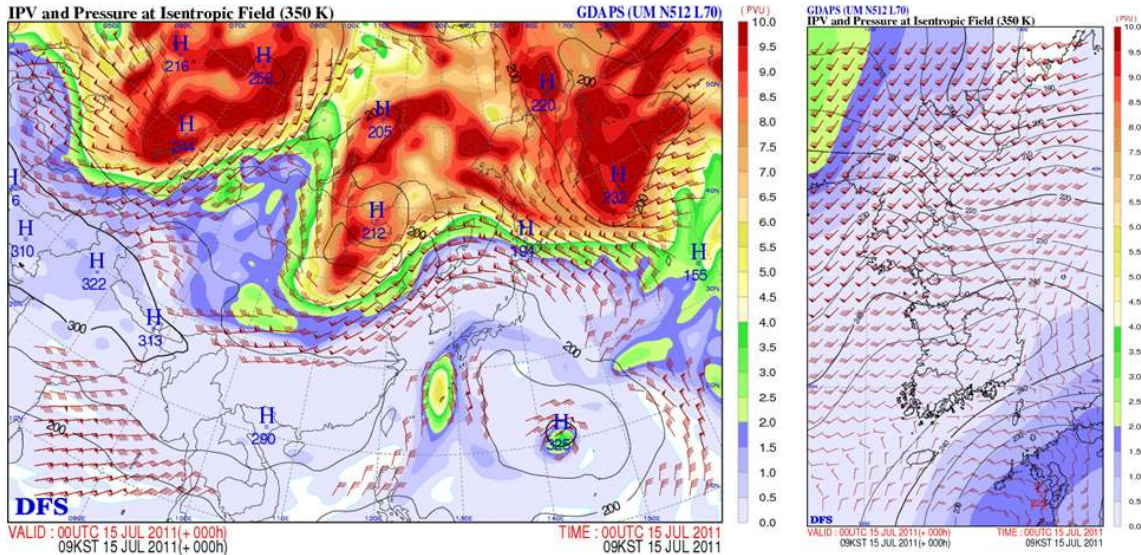


그림 4. 기상청에서 생산하는 등온위분석장 아시아영역(왼쪽)과 한반도 영역(오른쪽). 아시아영역의 바람벡터는 30KTS 이상만 표시하고 있음.

2. 등온위면에서 바람벡터와 등압선

등온위면에서 등압선을 가로질러 이동하는 공기는 연직 운동을 한다고 생각할 수 있다. 그림 5는 2010년 1월 4일 중부 지방을 중심으로 폭설이 발생된 사례이다.

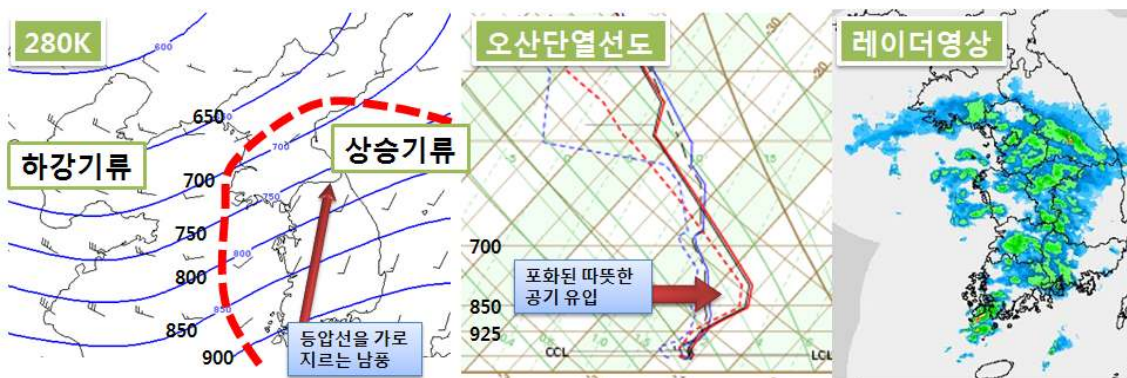


그림 5. 2010년 1월 4일 9시(KST) 280K 등온위면(왼쪽), 오산 단열선도(가운데), 레이더 영상(오른쪽)

280K 등온위면에서 우리나라는 제주도에서 북한으로 이어지는 남풍의 영향을 받고 있다. 이 바람은 지상에서 700hPa 부근까지 상승하는 기류로써, 같은 시각 오산 단열선도를 보면 약 800~925hPa 사이에 포화된 상태에서 난역의 침투로 인한 역전층이 발견된다.

제주도에서 오산까지 약 400km 거리를 횡단하면서 지상에서 800hPa까지 약 2km의 고도를 상승한 경우로서 일반적인 온난전선의 기울기인 1/200와 비슷하다(홍성길 2006). 280K 등온위면에서 붉은색 파선으로 그려진 구역의 오른쪽은 상승기류가 활발한 지역으로 레이더 영상의 강수대는 이 지역내로 한정됨을 알 수 있다.

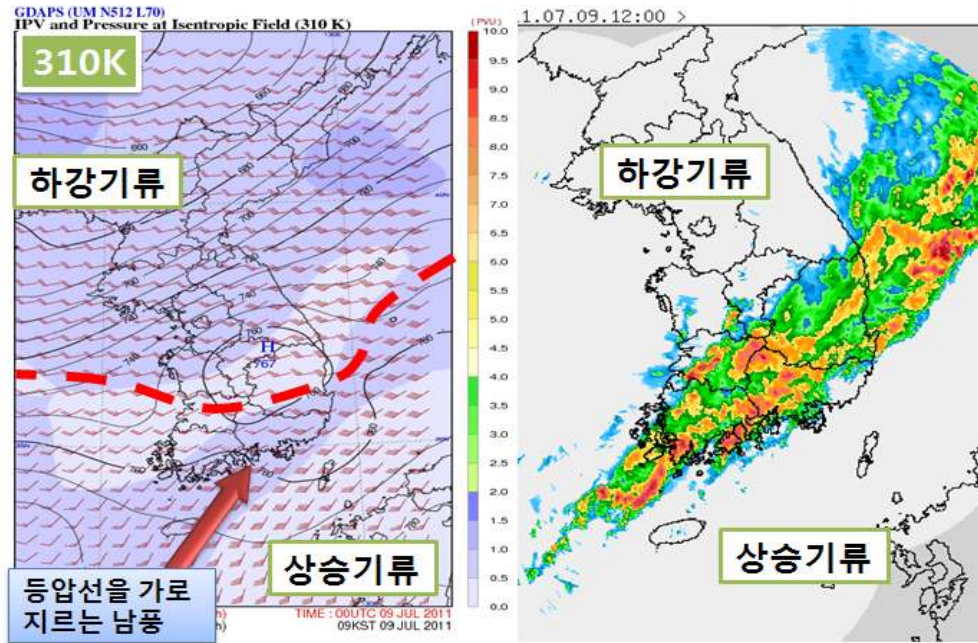


그림 6. 2011년 7월 9일 12시(KST) 310K 등온위 예상도(+3H)(왼쪽), 레이더 영상(오른쪽). 등온위면의 채색된 부분은 PVU(Potential Vorticity Unit)로서, 오른쪽 범례를 이용하여 값을 읽음

그림 6은 2011년 7월 9일 남부지방에 발생된 호우사례이다. 310K 등온위면 3시간 예측장을 보면 우리나라가 남서류의 영향을 받고 있지만, 등압선을 가로질러 이동하는 기류를 분석하면 기압이 높은데서 낮은데로 이동하는 상승기류는 붉은색 점선의 남쪽으로 한정된다. 북쪽지역은 남서풍이지만 기압이 낮은데서 높은데로 이동하는 하강기류를 의미하며, 강한 강수구역은 Potential Vorticity Unit(PVU)값이 높은 남부지방을 중심으로 위치하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 강한 강수지역은 저기압성 와도와 함께 상승기류가 강한 지역임을 알 수 있다.

표 1. 계절별 하층대기 분석에 유용한 등온위면(Namias 1940)

계절	등온위면 (K)
겨울	290~295
봄	295~300
여름	310~315
가을	300~305

Namias(1940)는 표1과 같이 계절별 하층대기 분석에 유용한 등온위면을 제시했다. 우리나라에서는 여름철 하층대기 분석에 300~310K 등온위면 분석이 유용하며, 겨울철 275~280K의 등온위면 분석이 눈 예보에 활용성이 높다. 겨울철 눈 발생 층이 대부분 대기 중·하층 고도로서 275~280K 등온위면은 925~700hPa 등압선을 가로지르기 때문이다.

3. 잠재와도(Potential Vorticity)

잠재와도는 $P = -g(\zeta_\theta + f) \frac{\partial \theta}{\partial p}$ 로 표현한다. 이 식에서 g (중력가속도)가 일정하다면, 결국 절대와도항(ζ_θ 상대와도 + f 코리올리)과 $\frac{\partial \theta}{\partial p}$ (기압의 변화량에 대한 온위의 변화)의 변화가 중요하다. 따라서, 저기압성 순환은 잠재와도의 절대값을 증가시키고, 고도에 따른 기압의 변화는 마이너스 항으로서 온위값을 증가시킨다.

간단하게 잠재와도는 $P(\text{변화량}) = \text{와도변화} \times \text{온위변화}$ 로 요약할 수 있다.

물리량을 계산한 단위 식은 $P = 10^{-6} m^2 s^{-1} K kg^{-1} = 1 PVU$ 로 사용하고 있다.

대류권계면 값으로 여러 연구에서 1~3PVU 값을 사용하고 있으나 통상적으로 1.5PVU 를 권계면 값으로 사용한다(Bluestein 1993). 1.5보다 값이 클 경우는 성층권으로 해석할 수 있는데, 대류권계면부터 고도상승(기압감소)에 따라 기온이 상승하기 때문에 온위 값은 급격하게 커진다. 1.5 PVU는 온위 값의 증가율이 급격하게 커지기 시작하는 대류권계면의 잠재와도 값이다. 반면, 대류권계면 이하에서는 고도 감소에 따라 PVU도 감소한다.

성층권에서 대류권으로 공기가 침투하면서 권계면 접힘(tropopause folding)현상이 발생하는데, 이는 하부 성층권의 높은 와도값이 대류권으로 침투하기 때문이다. 이때 권계면 고도가 낮아지면서 상층 파동이 발달한다. 파동이 발생하면 저기압 발생 및 발달에 중요한 원인을 제공하므로, 1.5PVU 이상의 잠재와도값을 분석하는 것은 매우 중요하다. 그림 7은 권계면접힘 현상이 발생한 2011년 2월 11일 285~295K 등온위면 분석장이다. 285K에서 295K로 등온위면 고도가 상승할수록 PVU값이 증가하고 범위도 넓어지는 것을 확인할 수 있다. 그렇지만, 높은 PVU값이 나타났더라도 상층 등온위면의 PVU가 증가하지 않는다면 권계면 접힘 현상이 아니라 대류권 내 저기압성 와도가 발달한 것으로 해석할 수 있다.

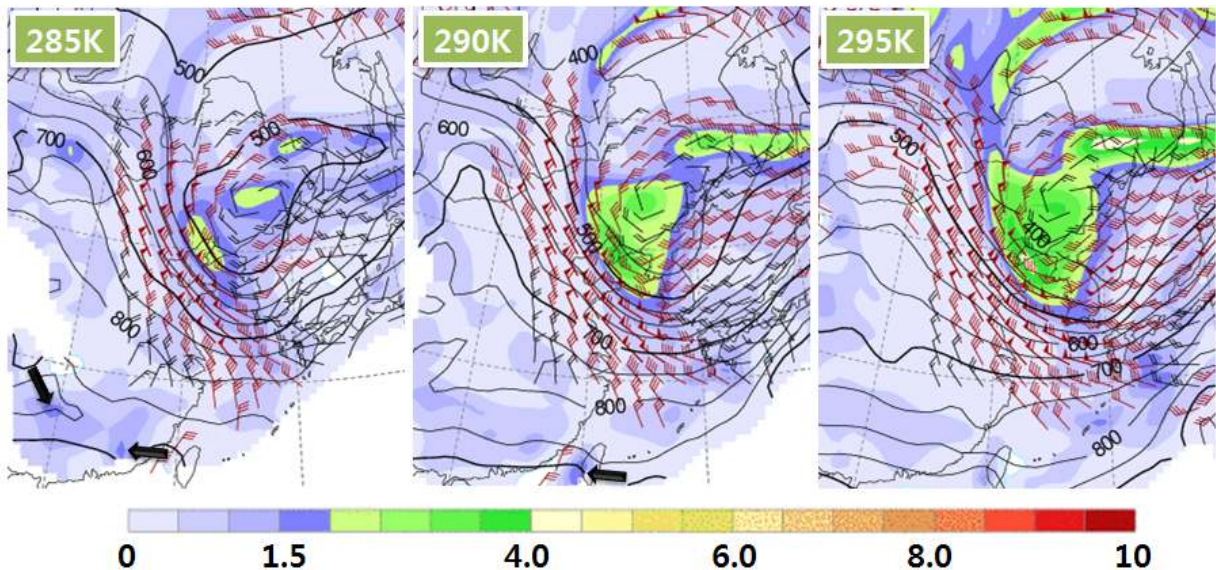


그림 7. 2011년 2월 11일 21시(KST) 등온위면 분석. 아래쪽 범례는 PVU 수치를 의미함.

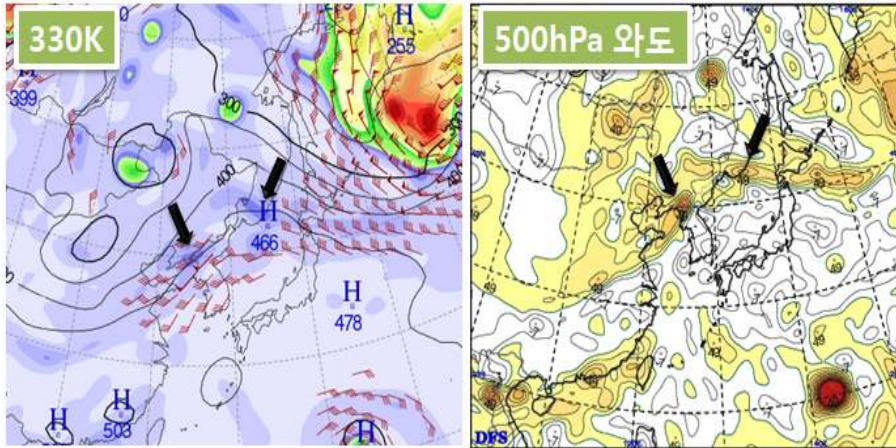


그림 8. 2011년 7월 15일 09시(KST) 330K 등온위면 분석장과 500hPa 와도장

그림 8의 330K 등온위면에서 압록강과 연해주 부근에 1.5PVU 이상의 값이 분포하고 있다. 이 값은 500hPa 와도와 정확하게 일치한다. 이 지역의 높은 PVU는 저기압성 와도가 강화되어 나타난 것이다. 330K 등온위면에서 오희츠크해 부근에 높은 PVU값은 성층권을 의미하며 그 주위의 기류를 따라 1.5PVU 값으로 상층제트가 위치하고 있다고 해석할 수 있다. 여름철 동아시아 대기는 기온이 높아 대류권계면 접힘이 겨울철만큼 잘 표현되지 않는다.

4. 연직분포를 이용한 황사분석

등온위면의 연직분포를 이용하면 공중에 부양된 황사가 언제 우리나라에 도달할지 가늠할 수 있다.

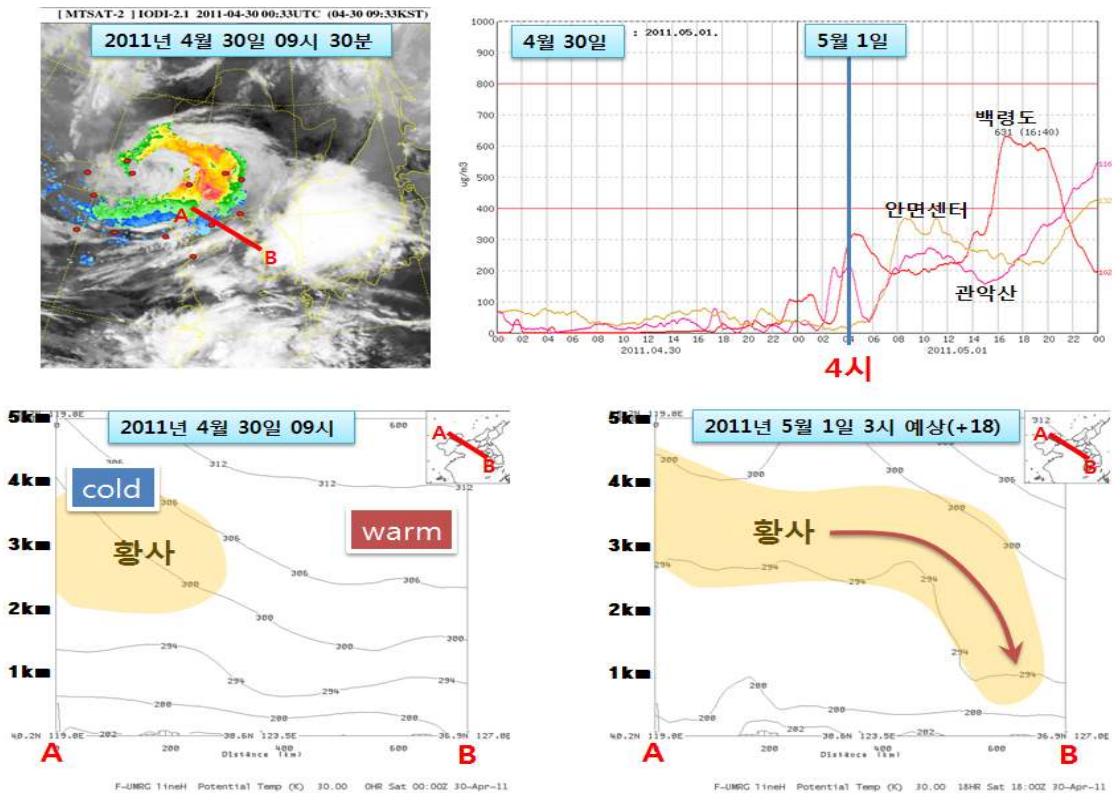


그림 9. 2011년 5월 1일 발생된 황사사례. 2011년 4월30일 09시 30분 위성영상(좌상단), 4월 30일부터 5월 1일까지 주요 3지점의 PM10 농도 시계열 그래프(우상단), UM-RDAPS 예측장을 이용한 2011년 4월 30일 09시(좌하단), 2011년 5월1일 03시(우하단) 연직 온위분석

우선, 그림 9와 같이 위성영상에서 황사가 나타났다면, 기류와 일기패턴 분석을 통해 황사구역의 이동경로를 파악한다. 다음으로, 예측한 이동경로로 연직 온위분포를 분석하면, 급격하게 등온위가 하강하는 구역이 발견되는데, 이 때 황사가 지면과 하층대기로 하강할 수 있는 시점이다. 그림 9의 하단 그림은 이런 연직 온위 분포를 보여준다. A는 위성영상에서 황사가 탐지된 발해만 부근이고 B는 태안반도이다. 등온위값이 약 3km 고도에서 1km 고도로 급격하게 하강하는 시간대에 우리나라 서쪽지방에 위치한 백령도, 안면센터, 관악산 등지에서 황사농도 값이 급격히 상승하기 시작했음을 볼 수 있다. 바람장 분석(상승-하강기류 파악)과 일기패턴 분석(시스템의 이동경로 파악)이 동시에 이루어지면 정확성을 높일 수 있다. 연직 등온위 분포는 리눅스 FAS를 이용해서 분석할 수 있다. 이 외에도 전선, 대기안정도, 파동 분석 등 여러 다양한 방면에서 온위·등온위면 분석도가 이용되고 있다.

<참고문헌>

김광식, 1992: 기상학사전, 향문사.

홍성길, 2006: 기상분석과 일기예보, 교학연구사.

Bluestein, H. R., 1992: Isentropic surfaces basic concepts energy equations dimensional analysis. Vol. I. Oxford University Press.

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

Hakim, G.J., D.Keyser, and L.F. Bosart, 1996: The ohio valley wave-merger cyclogenesis event of 25-26 January 1978. Part II: diagnosis using quasigeostrophic potential vorticity inversion. Mon. Wea. Rev., 124, 2176-2205.

James, R. H., 2004: An introduction to dynamic meteorology. Elsevier Academic Press.

Ken Crawford 2010: The value of isentropic analysis in a modern forecast office. 지식,경험,노하우(지.경.노) 발표자료.

Moore, J. T., 2003: Isentropic analysis workshop, millersville university Isentropic Workshop: 5 April 2003.

Namias, J., 1940: Isentropic analysis, in Weather analysis and forecasting by S. Petterseen. New York, McGraw-Hill.

"손에 잡히는 예보기술" 과월호 열람안내

손에 잡히는 예보기술 과월호는 예보관 온라인 가이드에서 보실 수 있습니다.

- 종합기상정보시스템 - 예보 - 예보관 가이드의 "손에 잡히는 예보기술" 메뉴

