

등엔트로피 궤적에 의한 황사의 장거리 이동 경로 분석

Isentropic Analysis for the Long Range Trajectories of Yellow Sands

윤 순 창·박 경 선

서울대학교 자연과학대학
(원고접수 : 1991. 3. 4)

Soon-Chang Yoon, Kyung-Sun Park

Department of Atmospheric Sciences, Seoul National University
(Received 4, March 1991)

Abstract

Yellow sands often occur in Korea during April and May each year, and they are believed to come from the Mongolian Gobi desert as the snow starts to melt in Spring time. Since the analysis of aerosol particulates can hardly distinguish the origin of particulates, the isentropic analysis of meteorological data is often used for the trajectories of the long range transport of yellow sand or air pollutants.

The yellow sand case of April 9~15, 1988, in Korea is analyzed for the identification of long range transport of yellow sands and their trajectories in East Asia, using isentropic analyses. We have transformed the ECMWF grid data, analyzed in pressure coordinates, into the isentropic coordinates and then have traced the 286 K and 290 K air mass which started Gobi desert. The result shows the transport of yellow sands from the Gobi desert to the Korean peninsula.

1. 서 론

한 지역에서 대기에 방출된 대기오염 물질은 바람에 의해 주변 지역으로 수송(transport)되며, 또 난류에 의해 확산(diffusion)되기도 한다. 바람에 의한 수송은 오염물질 방출 지역으로부터 수천 km 떨어진 지역까지 영향을 미칠 수 있고, 그 결과 인접 국가간의 환경 분쟁의 소지가 될 수 있으므로 인접 국가간의 환경보전을 위한 공동 노력이 절실히 요구되고 있다. 우리나라에서 해마다 봄철에 겪는 황사현상은 '바람에 의한 대기오염 물질의 장거리 수송문제'의 대표적인 '예'라고 하겠다.

대기오염 물질의 장거리 수송은 대기의 운동 즉 바람에 의해서 이류(advection)되는 현상을 말하

며, 그 수송 경로는 실제로 공기괴(air parcel)의 라그랑지적 궤적(Lagrangian trajectory)을 밝힘으로써 알 수 있다. 현재 세계기상기구에 의한 범세계적 기상자료의 표기 방법은 등압면에서의 바람장, 기온, 습도 및 지오폠펌셜 고도를 표기하므로, 등압면에 나타나는 바람장으로 공기의 이동경로를 계산할 경우에는 각 시각의 등압면상의 공기는 이미 같은 공기가 아니므로 어떤 특정 공기괴의 이동 경로를 추적할 수가 없고, 실제로 Danielsen(1961)은 등압면에서의 바람장으로 공기괴의 궤적(trajjectory)을 계산했을 경우에 등엔트로피 궤적(isentropic trajectory)과 비교하여 불과 24시간 후에 1,300 km 정도나 다른 경로를 나타냄을 보였다.

본 연구에서는 라그랑지안 궤적을 추적할 수 있는 방법인 등엔트로피 궤적을 구하는 방법(Dutton,

1976)을 이용하여 1988년 4월 9일~15간 발생한 황사 사례에 적용함으로써, 이 기간 중 발생한 황사가 몽고 고비사막에서 실제로 어떤 경로를 통하여 한반도까지 이동해왔는지를 밝히고, 장차 대기오염 물질의 장거리 이동 경로 분석에 함시적으로 활용할 수 있는 기반을 마련하고자 한다.

2. 등엔트로피 궤적(Isentropic trajectory)

일반적으로 기상 자료의 분석은 등압면에서 하게 되는데, 그 이유는 기상 예보를 위한 운동방정식에서 가장 중요한 항인 기압경도력항이 기압좌표계에서는 지오폠펜셜 고도의 경도(gradient)로만 표시되므로 일반 직교좌표계를 사용할 경우에 기압경도력 계산에 필요한 공기밀도(직접 관측 불가)를 계산할 필요가 없는 편리함 때문이다(Holton, 1979). 그러나 등압면은 물질면(material surface)이 아니므로 한 시각에 어떤 등압면(예, 700 mb면) 상에 있던 공기가 다른 시각(예, 12시간후)에 같은 등압면(700 mb면) 상에 있다고 볼 수 없다. 따라서, 한 등압면에서의 풍향, 풍속으로 공기의 이동 경로를 계산할 경우 다음 시각에는 이 공기가 같은 등압면상에 있다고 볼 수 없으므로 같은 공기를 따라가지 못하는 결과를 내게 된다. 이제 공기의 실제 이동경로를 계산하기 위해서는 같은 공기괴를 계속하여 추적하여야 하는데 이는 같은 물질면(예, 수면) 즉, 어떤 질량의 공기괴를 구성하고 있는 구성 물질(즉, 공기분자)이 주변의 다른 공기와 섞이지 않고, 그 공기괴가 가지고 있는 물리적 성질을 그대로 보존하는 면에서 궤적을 계속하여 추적하면 가능하게 된다.

대기의 운동 과정에서 보존되는 물리량은 질량, 운동량, 에너지 등이 있고, 그 중에서도 절대적으로 보존되는 또는, 좁은 의미의 보존되는 양이란

$$\frac{dQ}{dt} = 0 \tag{1}$$

를 만족하는 물리량 Q를 말한다. 실제로 대기의 운동과정에서 (1)식의 우변항이 정확하게 0이 되는 경우는 없으나, 에너지 보존식의 경우에 잠열과 복사열이 없거나 무시할 정도로 작은 경우에는 온위(potential temperature) θ 에 대하여 위의 (1)식이 성립하게 된다. 그 원리는 다음 절에서 자세히 설명되어 있다.

2.1 에너지 보존식

열역학 제 1 법칙에 의하면 공기의 내부에너지 e는

외부에서 받는 열 q와 공기 시스템이 한 일에너지 만큼 변한다. 이를 식으로 나타내면

$$de = \delta q - pdv \tag{2}$$

가 된다. 여기에서, p는 공기의 압력, v는 부피이다. 한편, 열역학 제 2 법칙에 의하면, 가역반응 경우에 대하여 열량 변화에 상응하는 엔트로피(entropy) s의 변화가

$$ds = \delta q/T \tag{3}$$

로 정의된다(Sears and Salinger, 1975). 여기에서 수증기의 상태 변화시에 방출 또는 흡수하는 잠열 L과 복사열속(radiative heat flux) R에 의한 열교환을 고려하면, 에너지 보존식은

$$T \frac{ds}{dt} = \dot{q} = -\text{Div } \vec{R} \pm \dot{L} + \text{molecular conduction} \tag{4}$$

가 되고, 상태 변화가 없는 단열 과정에서는 복사열의 대기 흡수가 작은 경우에 식 (4)의 우변항들이 무시되어 0이 된다. 한편, 식 (1)과 정역학 방정식(hydrostatic equation)으로부터 엔트로피는

$$ds = C_p d(\ln \theta) \tag{5}$$

가 되고, 여기서 C_p 는 공기의 정압비열이고, 온위 θ 는

$$\theta = T \left(\frac{1000 \text{ mb}}{p} \right)^{R/C_p} \tag{6}$$

로 표시된다(Iribarne and Godson, 1973). 여기서 R은 공기의 기체상수이다. 결과적으로 식 (4)는

$$\frac{d\theta}{dt} = 0 \tag{7}$$

가 되어, 수증기의 상태 변화가 없는 단열과정에서는 온위가 절대적으로 보존되고, 이는 다른 말로 표시하면 어떤 값의 온위(또는 엔트로피)를 가진 공기는 상태변화와 주변공기와의 복사열의 교환이 없는 한 그 온위를 계속 유지하며 이동한다고 할 수 있다(Merrill, et al., 1986). 이렇게 계산한 공기의 이동 경로를 등엔트로피 궤적(isentropic trajectory)이라고 한다.

2.2 등엔트로피 좌표계(isentropic coordinate)

등압면은 물질면이 아님을 위에서 이미 밝혔다. 연직 좌표계를 기압 대신에 온위를 사용하는 좌표계를 이용할 경우에는 온위가 일정한 면에서의 공기의 이동은 엔트로피가 보존되면서 그 온위면에서만 이

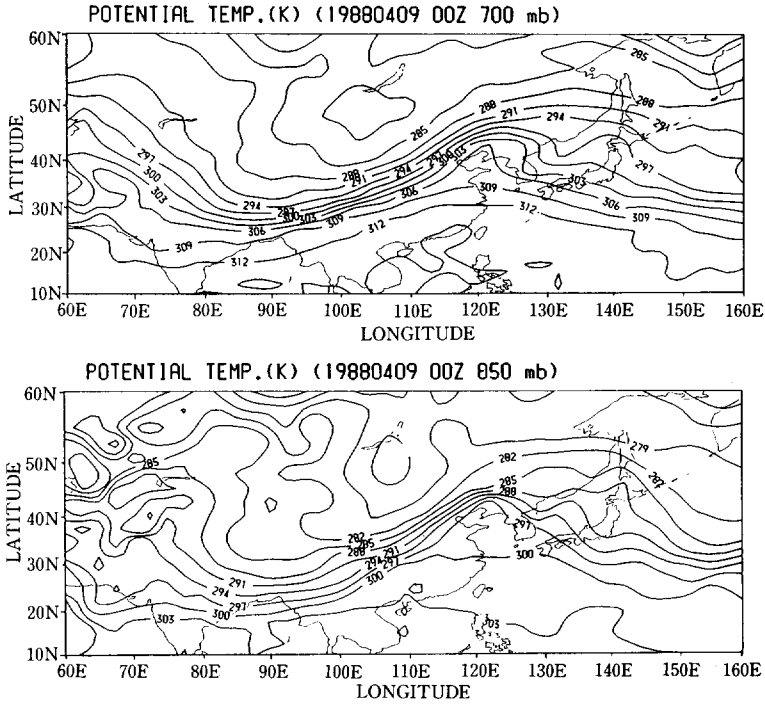


Fig. 1. Isotherms of potential temperature at 700 mb (upper panel) and 850 mb (lower panel) isobaric surfaces at 00Z, April 9, 1988.

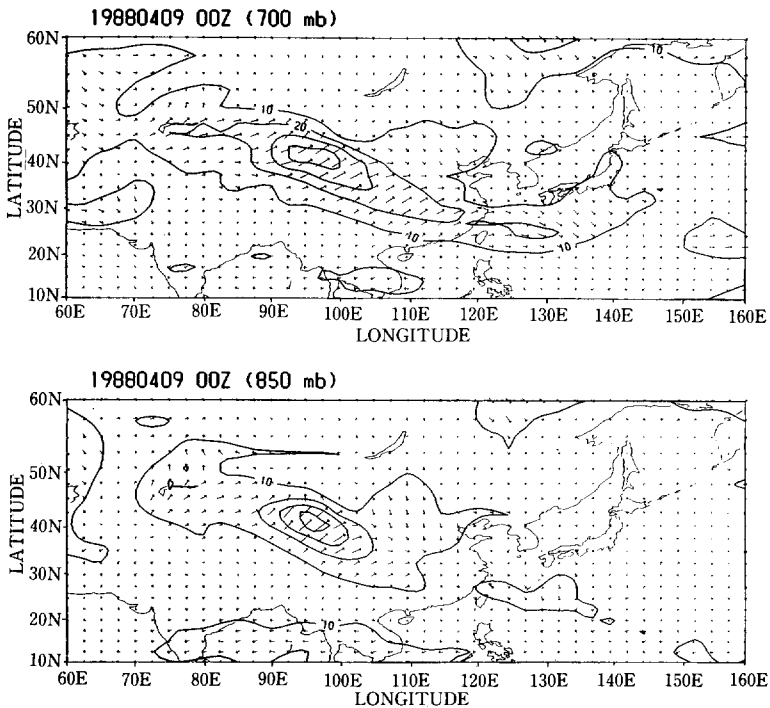


Fig. 2. Wind vectors at 700 mb (upper panel) and 850 mb (lower panel) isobaric surfaces at 00Z, April 9, 1988. isotachs are contoured at every 10 m/s interval.

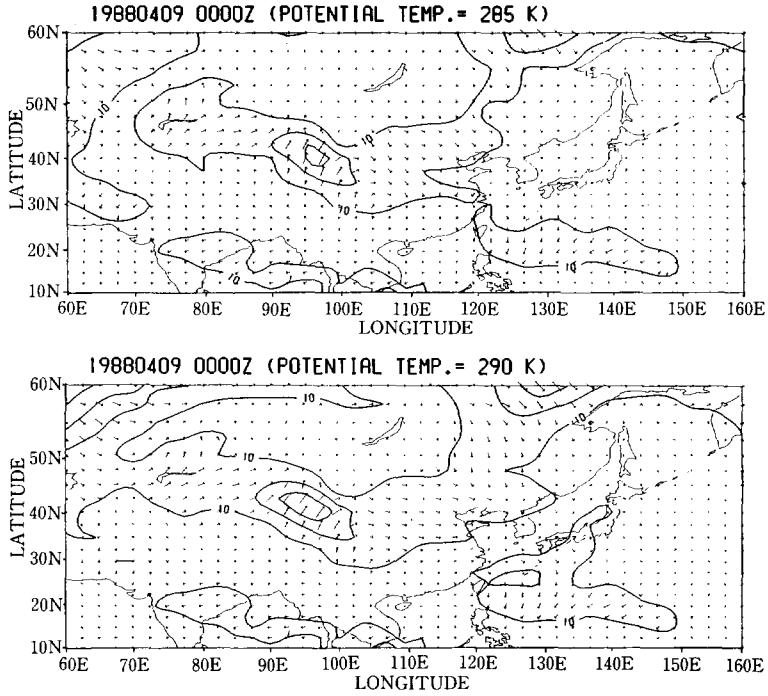


Fig. 3. Wind vectors at isentropic surfaces of 285 K and 290 K at 00Z, April 9, 1988. Isotachs are contoured at every 10 m/s.

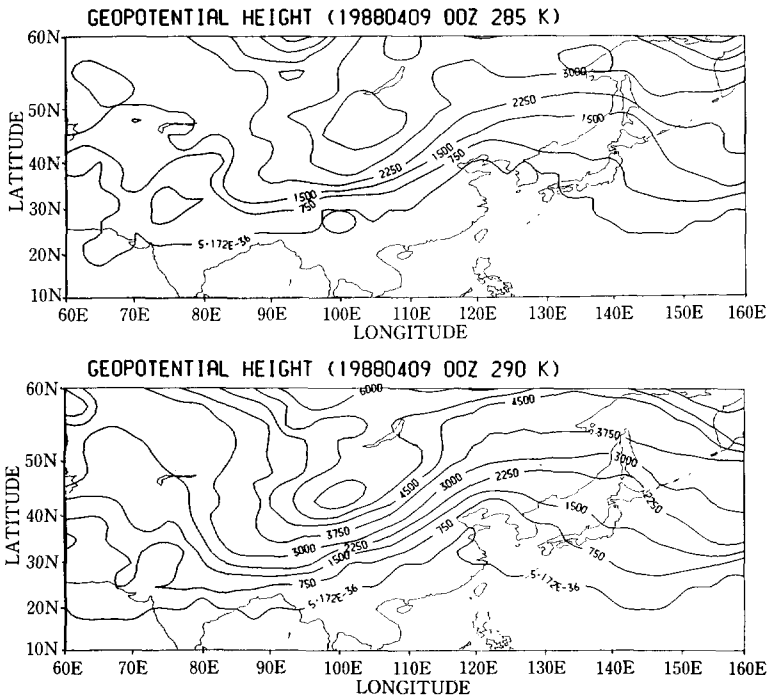


Fig. 4. Geopotential height contoured at every 750 m interval at isentropic surfaces of 285 K (upper panel) and 290 K (lower panel) at 00Z, April 9, 1988.

동하게 되므로, 온위면은 물질면이 되고 여기에서의 이동 경로는 라그랑지적 궤적이 된다(Dutton, 1976).

본 연구에서는 유럽중기예보센터(Eurorean Center for Medium Range Weather Forecasts)에서 12시간 간격(00 GMT, 12 GMT)으로, 연직 7층의 등압면(1000 mb, 850 mb, 700 mb, 500 mb, 300 mb, 200 mb, 100 mb)에서 위도와 경도 각각 2.5° 격자 간격으로 분석한 전구(global) 기상자료(풍향, 풍속, 기온, 지오폠펜설고도)를 이용하였다. 각 기압면에서의 기온 T인 공기괴를 1000 mb 고도로 단열적으로 옮기었을 때 이 공기괴가 갖게 되는 온도 즉, 온위를 위의 식 (6)에 의하여 계산하면 각 격자점에서의 온위가 계산되고, 환산 전 등압면에서의 온위와 바람장 분포는 각각 Fig. 1과 Fig. 2와 같다. 이 자료를 등아젠트로피 좌표계로 환산한 후의 등온위면에서의 바람장과 지오폠펜설 고도는 각각 Fig. 3과 Fig. 4와 같게 된다. 이 좌표 변환 과정에서는 각 지점에서의 연직 총질량이 보존되어야 하는 등의 제

한이 있어야 한다(Collins, 1983). 기압좌표계에서 엔트로피좌표계로 변환하는 프로그램은 Bleck(1984)의 연직 안정도 제한 조건이 만족되는 알고리즘을 이용하였으며, 절대온도 매 5 K 간격(예, 280 K, 285 K, 290 K)의 등온위면에서의 풍향, 풍속, 기압 및 지오폠펜설 고도로 환산하도록 하였다.

2.3 이동 경로의 계산

이 절에서는 우리나라에 황사현상이 심했던 1988년 4월 9~15일간의 사례에 대하여, 이 기간중에 몽고 지방의 고비사막을 지나는 공기(air mass)의 등엔트로피 궤적을 추적함으로써 황사의 실제 이동 경로를 제시하고자 한다.

등온위면에서의 매 시각(12시간 간격) 바람장 자료(Fig. 3)를 이용하여 황사 발생지로 추정되는 고비 사막에서의 온위와 같은 면에서의 풍속을 12시간 적분한 후, 12시간 후의 같은 온위면의 새 위치에서의 풍속으로 다음 12시간의 궤적을 계산하였다. 이와 같은 과정을 온위면이 끝날때까지, 즉 공기괴가 지면에 도달하는 시점까지, 반복하여 같은 성질(온위)을 가진 공기괴의 이동 경로를 추적하여 Fig. 5~7과 같이 라그랑지 궤적을 구하였다.

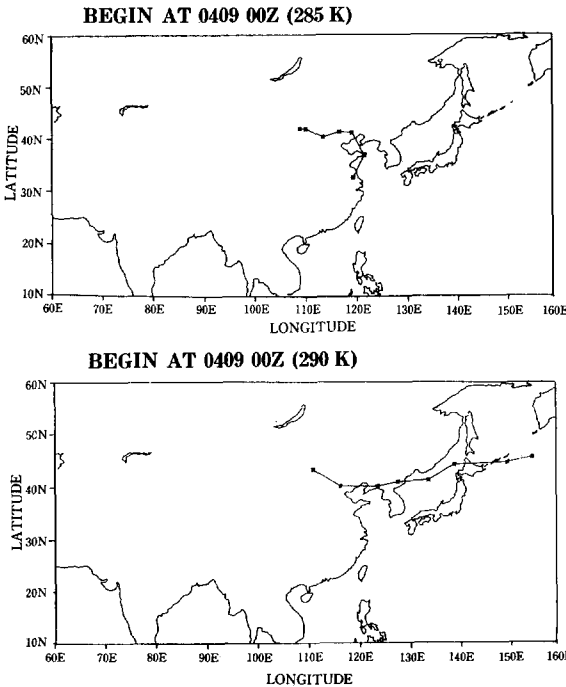


Fig. 5. Isentropic trajectory of the air mass of 285 K (upper panel) and of 290 K (lower panel) which started at a central point in the Gobi Dessert at 00Z, April 9, 1988. Position of the moving air mass are plotted as (*) every 12 hours.

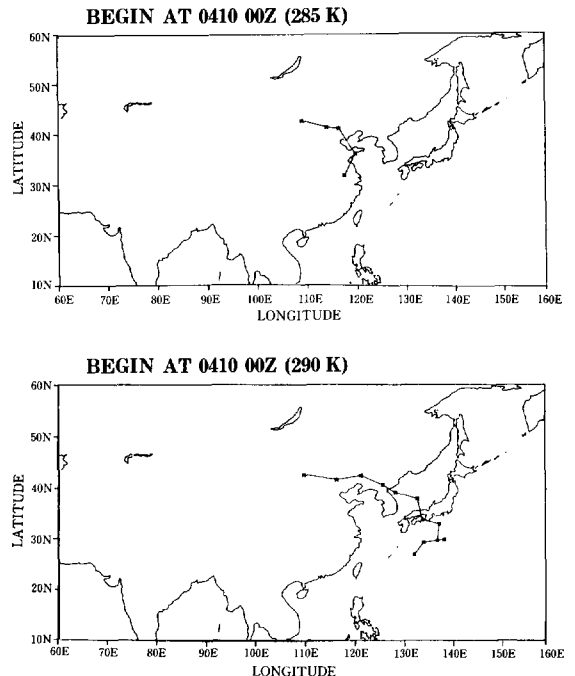


Fig. 6. Same as in Fig. 5, but started at 00Z, April 11, 1988.

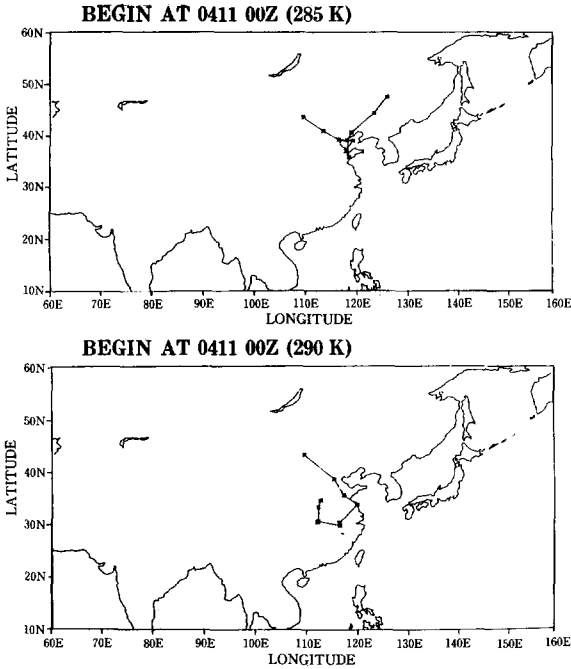


Fig. 7. Same as in Fig. 5, but started at 00Z, April 11, 1988.

이렇게 구한 궤적의 계산 과정에 대한 한가지 검증 방법으로 이 궤적이 끝나는 지점에서의 지오폠평면 실험 고도 자료가 과연 0이 되는지 확인하여 본 결과, 4월 9일 00Z에 고비 사막을 떠난 온위 285 K인 공기 (Fig. 5)는 궤적에서 나타난 바와 같이 3일간 이동한 후, Fig. 8에서 확인되는 바와 같이 산둥반도 아래 지점에서 지표면으로 하강한 것을 알 수 있다. 따라서, 이 공기체의 궤적 (Fig. 5)은 출발 3일 후 (72시간 후)까지만 이동한 것으로 나타난다.

3. 결 과

고비 사막 지역의 한 지점에서 온위가 각각 285 K와 290 K인 공기괴에 대하여, 1988년 4월 9일 00Z에 출발한 공기괴와 익일 00Z 및 이틀 후 (11일)에 출발한 공기괴의 궤적을 구한 결과는 Fig. 5~7과 같다. 이로부터 4월 9일과 10일에 온위 290 K인 공기괴가 고비 사막을 떠나서 각각 36시간 후에 한반도 부근을 도달하는 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 등엔트로피 궤적이 대기오염의 장거리 이동 경로의 추적에 효과적으로 이용될 수 있음이 일차적으로 확인되

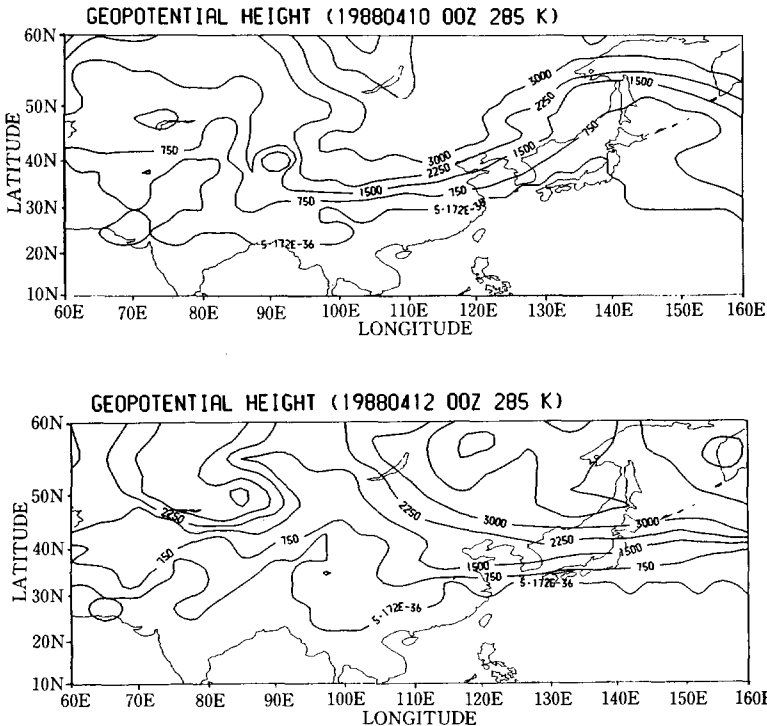


Fig. 8. Geopotential height contoured at every 750 m interval at isentropic surfaces of 285 K at 00Z, April 10 (upper panel), and at 00Z, April 12 (lower panel), 1988.

었다.

본 연구에서 사용한 기상자료보다 더 짧은 시간 간격과 격자 간격의 자료를 이용할 경우에 더욱 정확한 궤적을 구할 수 있을 것이므로 앞으로는 유럽 기상센터에서 최근에 생산하기 시작한 매 6시간 간격의 위·경도 1.125°, 연직 14층의 격자 분석 자료를 이용하는 것이 바람직하다고 하겠다. 또한 Belousov and Pagaya(1990)가 제안한 시간 적분 방법의 개선이나, Danielsen(1961)의 질량과 운동량의 보존을 고려한 방법 및 Peterson and Uccellini(1979)의 경제적 수치 해법 등의 방법을 비교·검증하여, 경제적이고 정확도가 높은 궤적 계산 알고리즘을 개발할 필요가 있다고 생각된다.

4. 감 사

본 논문을 자세히 심사하여 주신 두분의 심사위원에게 감사드린다. 이 연구는 1990년도 교육부 기초 과학육성연구비의 일부지원에 의하여 수행되었다.

참 고 문 헌

- Belousov, S.L. and T.S. Pagaya (1990) "Accuracy of some Solutions of the Problem of Determining Trajectories of Air Particles." *Meteorologiyai Gidrologia*, 9, 47 - 51.
- Bleck, R. (1984) "Vertical Coordinate Transformation of Vertically-Discretized Atmospheric Fields." *Mon. Wea. Rev.*, 112, 2535 - 2539.
- Collins, W. (1983) "Vertical Interpolation of Heights and Temperatures for Model Input/Output", NOAA/NWS/NMC Office Note 282, pp. 30.
- Danielsen, E.F. (1961) "Trajectories: isobaric, isentropic and actual." *J. Meteor.*, 18, 479 - 486.
- Dutton, J.A. (1976) *The Ceaseless Wind: An Introduction of Atmospheric Motion.*, McGraw-Hill, Inc., p. 324 - 327.
- Holton, J.R. (1979) *An Introduction to Dynamic Meteorology.* 2nd Ed., Academic Press, p. 18 - 20.
- Iribarne, J.V. and W.L. Godson (1973) *Atmospheric Thermodynamics.*, D. Reidel Pub. Co., p. 26 - 29.
- Merrill, J.T., R. Bleck and D. Boudra (1986) "Techniques of Lagrangian Trajectory Analysis in Isentropic coordinates." *Mon. Wea. Rev.*, 114, 571 - 581.
- Peterson, R.A. and L.W. Uccellini (1979) "The computation of isentropic atmospheric trajectories using a 'discrete model' formulation." *Mon. Wea. Rev.*, 107, 566 - 574.
- Sears, F.W. and G.L. Salinger (1975) *Thermodynamics, Kinetic Theory, and Statistical Thermodynamics.* 3rd Ed., Addison-Wesley Pub. Co., p. 122 - 129.