

한반도 겨울철 한파와 관련된 대기 순환과 열원의 특성

김명기* · 신성철 · 이우섭

공주대학교 대기과학과, 314-701 충남 공주시 신관동

Characteristics of Atmospheric Circulation and Heat Source related to Winter Cold Surge in Korea

Maeng-Ki Kim*, Sung-Chul Shin, and Woo-Seop Lee

Dept. of Atmospheric Science, Kongju National University, Chungnam 314-701, Korea

Abstract: This study investigates the characteristics of atmospheric circulation and the heat source (Q_1) related to the winter cold surge in Korea from 1979 to 1999. The occurrence frequency of cold surge is about one event per year and 60% of the total events occurred during the former period, before 1989. During the cold surge, the pressure pattern shows more dominant east-west dipole circulation pattern in the lower troposphere and the effect of upper level trough is stronger than normal cases. Temperature falling pattern over Korea shows that the pattern opposite to the temperature structure over Lake Baikal and temperature change has opposite signs between the low-middle level and upper level, with the boundary at 400 hPa. The analysis of heat source shows that atmospheric cooling by cold advection during the cold surge is balanced by adiabatic warming due to downward motion, indicating that the movement path of cold core is associated with that of heat sink. Therefore, the movement mechanism of the heat source and sink should be well known for understanding the maintenance mechanism of cold surge and predicting cold surges.

Keywords: cold surge, upper level trough, heat source, atmospheric circulation.

요약: 이 연구에서는 1979년부터 1999년까지 21년 동안에 한반도 겨울철 한파와 관련된 대기 순환 및 열원(Q_1)의 분포 특성을 조사하였다. 한파 발생 빈도는 1년간 약 1개로 나타났으며, 1989년을 중심으로 전반기에 전체의 60%가 발생하였다. 한파 발생 동안 하층의 대기 순환 패턴은 평년에 비해 서고동저형의 기압 패턴이 더 뚜렷하며, 상층에서도 한반도에 기압골의 영향이 더 강하게 나타난다. 한파가 발생하는 동안에 한반도 부근의 기온 하강 패턴은 바이칼호 부근의 기온 패턴과 반대로 나타나며, 기온의 연직 구조에서도 400 hPa를 기준으로 하층과 상층의 기온 편차는 반대로 나타난다. 열원에 대한 분석은 한파 발생시 한랭 이류에 의한 냉각은 하강 운동에 의한 단열 승온에 의해 균형을 이룬다는 것을 보여주는데, 이것은 한랭 핵의 이동이 열흡수원의 이동 경로와 연관되어 있음을 나타낸다. 따라서 한파의 유지 기작을 이해하고 한파를 예측하기 위해서는 열원 그리고 열흡수원의 이동 기작이 밝혀져야 할 것이다.

주요어: 한파, 상층 기압골, 열원, 대기 순환

서론

동아시아 겨울철 순환의 가장 두드러진 종관 현상 중의 하나는 대륙 내부의 시베리아로부터 찬 공기가 터져나감(cold air outbreak) 현상이다(Jeong and Hitchman, 1982; 박순용과 김성삼, 1987). 특히, 한파

는 겨울철 동아시아 지역의 악기상중 하나로, 시베리아 고기압의 생성과 유지를 필요 조건으로 하며, 시베리아 고기압의 단순한 팽창이나 시간적 변화로 나타나는 것이 아니라 시베리아 고기압에서 분리되어 나온 이동성 고기압에 의해 생성된 독립적인 역학체이다(Zhang et al., 1997). 또한 한파는 AO(Arctic oscillation), MJO (Madden-Julian oscillation) 등으로 대표되는 극 및 적도 지역의 광역규모 대기 순환과 밀접한 관련을 갖고 발생한다(Jeong and Ho, 2004; Jeong et al., 2005). 동아시아 한파는 종관 규모 대기

*Corresponding author: mkkim@kongju.ac.kr
Tel: 82-41-850-8531
Fax: 82-41-856-8527

현상에 수반되어 매우 짧은 기간(1~2일)에 발생하며, 매우 광범위한 지역에 걸쳐 나타난다(임규호, 1994). 한반도에서 한파의 내습은 시베리아 북서부로부터 한반도 쪽으로 경압 파동이 빠르게 전파해오며 동시에 중위도에서 상층의 기압골이 우리나라 부근에 위치할 때 발생한다(정영근, 1989; 정영근, 1993). 하층의 기온 급상하는 상층 등서류의 최대 강화 후 36시간 정도 지나서 일어난다. 이러한 시간 관계는 상층 제트의 최대 강도 이후 12시간 내외에서 한파가 발생하며, 이어서 최대 기온 하강이 일어난 다음 대체로 12시간이 지난 후에는 등서류의 최대 감속이 발생함을 나타낸다(임규호, 1994). 류상범(2002)과 Ryoo et al. (2005)은 한파 발생 및 한반도 한파 내습 과정을 분석하고 한파 사례들에 대한 시간 지연 합성 분석을 하였다. 그 결과 한파 내습 과정 초기에는 능이 파형 요란의 발달을 이끌고 한파 내습일 부근에는 골이 요란의 발달을 이끈다고 하였다. 그리고 임은순 외 (2004)는 겨울철 월평균 기온을 한기와 온기로 분류하여 그에 따라 우리나라 주변에서 대기 순환 패턴이 어떻게 나타나는지에 대해서 연구하여 겨울철 최저/최고/평균 기온 편차는 남방 진동 지수(southern oscillation index)보다 북극 진동 지수(arctic oscillation index)와 더 높은 상관 관계가 있음을 밝혔다. 한반도 겨울철 혹한 발생은 한기 이류와 관련된 서고동저형의 기압 배치와 한반도 북쪽의 한기역과 밀접한 관계가 있다. 한반도 주변의 서고동저형 기압 배치는 시베리아 고기압의 발달과 이동, 그리고 동중국해에서 형성되어 동아시아 해안을 따라 북동진하면서 발달하는 저기압에 의해 이루어진다(류상범과 권원태, 2002). 서고동저형의 기압배치로 인한 한반도 부근의 기압 경도의 증가와 한반도 북쪽의 한기역에 의한 강한 한기이류가 한반도 혹한 발생 기작이다. 최근 류상범(2003)은 한반도의 겨울철 혹한일 발생빈도가 감소하였음에도 불구하고 한파 발생 빈도는 전혀 변하지 않았음을 지적하였으며, 이것은 혹한일 발생 기작과 한파 발생 기작이 서로 일치하지 않기 때문임을 밝혔다. Ding and Krishnamurti(1987)는 시베리아 고기압의 영향에 따른 열원의 공간적 구조에 대하여 중국을 중심으로 분석하였다. 겨울 몬순 순환에 의하여 동아시아에 행성 규모의 발산 순환이 나타나고, 그에 따른 이류 효과와 단열 효과가 열원에 주요 영향을 주며, 현열과 복사도 열원에 영향을 주어 냉각에 기여한다고 하였다. 시베리아 고기압은 겨울동안

하층 대류권에 열흡수원이 나타난다. 그리고 열원(heat source)과 열흡수원(heat sink)이 시베리아 고기압의 수명과 인관이 있다는 것을 밝혔다.

이 연구에서는 일평균 기온 자료를 토대로 온난 사례와 한랭 사례를 선정하여 대기 순환의 차이를 고찰하였으며, 한랭 사례 중에서 극 한랭 사례에 해당하는 한파를 정의하고, 한파 발생시 나타나는 기온의 수평 및 인적 구조 그리고 대기 순환의 시·공간적 특징을 고찰하였다. 아울러 열원이 한파와 어떤 관계에 있는지를 조사하고자 한다.

자료 및 방법

이 연구에서 사용된 기상 관측 자료는 한반도 15개 기상대에서 관측된 21년간(1979~1999) 겨울철의 일평균 기온이다. 겨울철은 12월 그리고 다음 해 1월과 2월로 정의하였다. 예를 들어, "1979년 겨울"은 1979년 12월에서 1980년 2월까지로 정한다. 15개 기상대는 서울, 인천, 수원, 서산, 청주, 대전, 전주, 목포, 여수, 대구, 춘천, 속초, 강릉, 포항 그리고 부산이다. 윤년의 2월 29일은 분석의 편차를 위해 제외하였다.

대기 순환 패턴 분석에 사용된 자료는 NCEP/DOE (National Centers for Environmental Prediction/Department of Energy) Reanalysis-2 자료이며, 격자간격은 위도와 경도 모두 2.5°이며, 인적 17층이다. 분석 영역은 겨울철 한반도 기온 분포와 대기 순환 패턴을 효율적으로 보여주기 위해 한반도를 중심으로 동아시아 지역(0°~80°N, 70°E~180°)을 선정하였다.

기온 극값의 사례를 결정하는 방법은 다음과 같다. 우선 매해 겨울의 일평균 기온의 자료에서 일평균 기온의 표준편차를 넘는 날들 중에서 극값 사례를 택한다. 예를 들면 Fig. 1에서 원으로 표현 날들은 1992년 겨울의 극값 사례이고, 화선은 그 해의 $\pm 1\sigma$ 를 나타낸다. 다른 해에도 같은 방법을 적용하여 사례를 선정한다(김성, 2003). 이러한 방법으로 결정된 매해 겨울철에 온난 극값 사례와 한랭 극값 사례의 평균과 표준편차를 시계열로 나타낸 것이 Fig. 2이다. 온난 극값의 기후 평균값과 한랭 극값의 기후 평균값은 화선으로 나타내었다. 이러한 인별 사례를 기준으로 기후 평균값을 넘어서는 경우를 각각 극 온난 해와 극 한랭해로 선정하였다. 이 연구에서 한파는 한랭 극값에 해당하는 날 중에서 이들에 걸쳐 일평

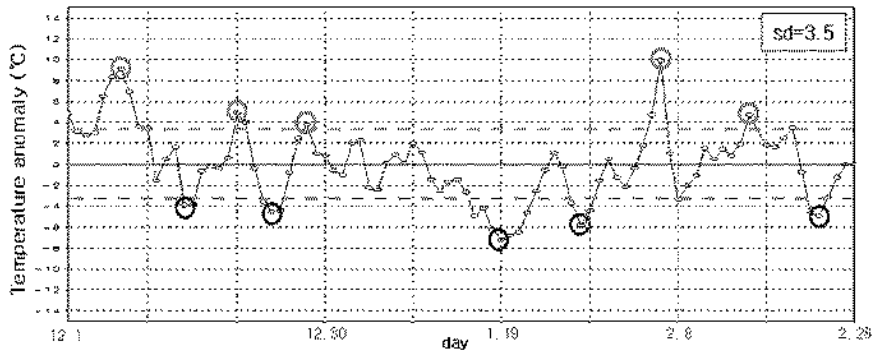


Fig. 1. The time series of daily temperature anomalies in winter, 1992. Dashed lines and circles indicate \pm one standard deviation (3.5°C) and cold/warm cases, respectively.

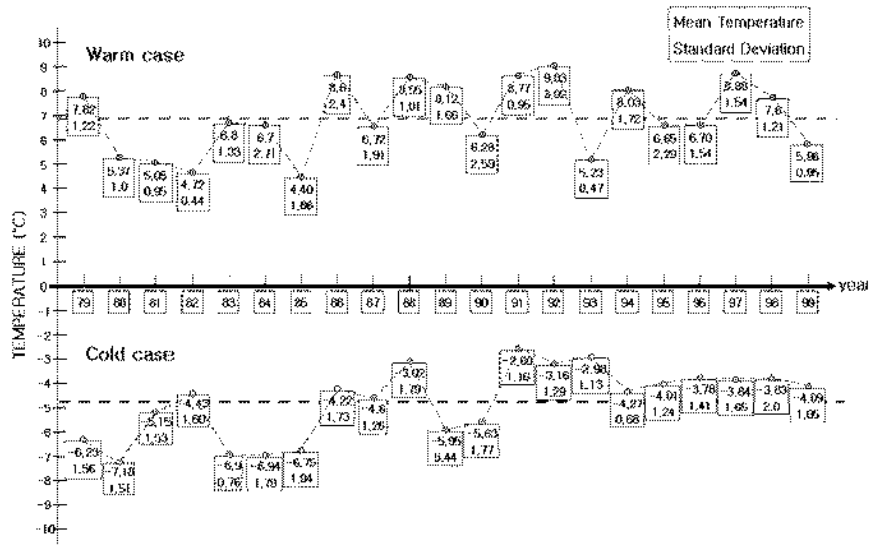


Fig. 2. The time series of composite daily mean temperature of warm extreme cases (upper line) and cold extreme cases (lower line) of each winter. Two dashed lines indicate climatological mean of warm and cold extreme cases, respectively. Daily-mean temperature of extreme cases and its standard deviation in each winter are also shown in box, respectively.

균 기온이 6.5°C 이상 떨어지는 날을 한파로 정의하였다(기상청 기상 용어 사전에서는 뚜렷한 저온의 한랭기단이 위도가 낮은 지방으로 몰아닥쳐 급격한 기온의 하강을 일으키는 현상을 한파로 정의하였다. 우리나라는 서고풍저의 전형적인 겨울형 기압배치 아래에 있을 때 북시계절풍이 강하게 불고 한파가 몰아닥치는 경우가 많다. 우리나라에서는 겨울철 시베리아고기압의 영향으로 24시간 이내에 10°C 이상의 기온 하강이 예상되면 한파주의보를 발표하고 있다. 한파 발생 이전 4일 동안의 한랭 해의 이동과 연관된 기온 구조 및 대기 순환 구조를 분석하였다. 아울

러 한랭 해의 이동과 관련하여 열원의 시·공간 구조를 조사하여 각 항이 어떻게 기여하는지를 알아보았다. 열원의 계산 방법은 다음과 같다(Yanai et al., 1973; Yanai and Tomita, 1998; Ueda et al., 2003).

$$Q_1 = C_p \left[\frac{\partial \theta}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \theta + \omega \frac{\partial \theta}{\partial p} \right] \left[\frac{p}{p_0} \right]^{\kappa} C_p \quad (1)$$

여기서 Q_1 은 열원(heat source)을 나타내며, C_p , θ , \mathbf{V} , ω , p 는 각각 정압 비열, 온도, 수평 바람, 연직 기압 속도, 기압을 나타내며, $p_0=1000 \text{ hPa}$ 을 나타낸다. Q_1 은 양의 값을 가지면 열원(Heat source)이라

하고, 음의 값을 가지면 열흡수원(Heat sink)이라 한다. 식 (1)의 우변 첫 번째항은 국지 변화항($\partial T/\partial t$), 두 번째 항은 이류항($V \cdot \nabla T$), 세 번째 항은 단열항 [$\partial \theta/\partial p$][ρ/ρ_0]^{0.2c_p}이다.

기온 극값과 연관된 대기 순환 패턴

Fig. 3은 1979-1999년의 겨울철 기후 평균한 대기 순환을 보여준다. 실선은 등고선, 파선은 등온선이며, 화살표는 바람 벡터이다. 등고선의 간격은 40 gpm(c), 60 gpm(a와 b)이다. 500 hPa 기압골(a)은 오호츠크 해에 자리 잡고 있어서 한반도에 북서 기류를 만들어 낸다. 850 hPa 기압능(b)은 아시아 대륙에서 뚜렷하여 서고동저형의 기압 패턴을 만들어 한반도에 한랭 이류를 강화시킨다. 한랭 이류의 주요 이동 경로는 바이칼호로부터 한반도를 거쳐 일본 동쪽으로 나가는 형태이다. 서고동저형의 기압 패턴은 1000 hPa(c)에서 더욱 뚜렷한 모양을 나타내며, 한반도에 북서 기류를 유입시킨다. 하층의 알류산 저기압은 850 hPa, 500 hPa로 갈수록 그 중심이 오호츠크 해에 위치하여 기압골의 중심축이 고도에 따라 서쪽으로 기울어져 있다. 그에 비해 아시아 대륙의 시베리아 고기압은 고도에 따라 상대적으로 그 중심 위치의 변화가 크지 않은 것으로 보인다. 이것은 상층 기압골이 한반도의 북동쪽에 주로 위치하여 이상적으로 발달하는 경압 시스템을 잘 나타내는 것으로 골과 마루의 축들이 고도에 따라 서쪽(또는 동상축)으로 기울어 모습을 볼 수 있다.

Fig. 4는 Fig. 2에서 나타낸 각각의 연별 극값 사례와 한랭 극값 사례에 대한 평균이며, 매년 사례 수는 다르다. (a)와 (b)는 이렇게 구해진 극 온난 사례의 1000 hPa과 500 hPa 고도의 합성장을 나타낸다. 기후 평균장과 달리 1000 hPa에서 고기압이 그리고 그 상부 500 hPa에 기압능이 일본 남부 해상에 자리 잡고 있어서 시베리아로부터 한반도로 한랭 기류의 유입을 차단한다. 반면 극 한랭 사례의 경우 1000 hPa의 동서 기압 경도가 기후 평균보다 강화되어 한랭한 북서 기류의 유입이 탁월해진다(c). 아울러 500 hPa(d)에서 오호츠크 해에 기압골이 깊어지고 남북 기압 경도를 강화시켜 강한 동서류를 유도하고 이는 동상축으로 강한 북서 기류를 한반도로 유입시키기에 좋은 조건을 보여준다. 한파 발생 이전에 눈이 피형 요란의 발달을 이끌고, 한파 발생일에는 골이 요란의

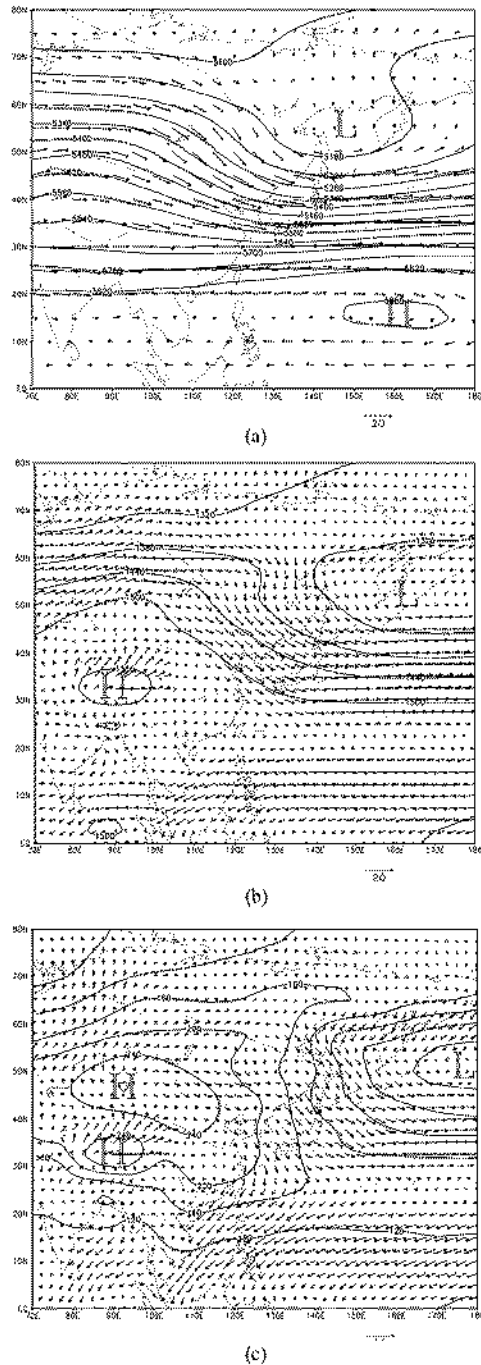


Fig. 3. Climatological distribution of geopotential height (solid line), temperature (dashed line), and wind vector at (a) 500 hPa, (b) 850 hPa, and (c) 1000 hPa pressure level. Scale of wind vectors (ms^{-1}) are also indicated in lower bottom of right corner of each panel. Contour intervals for geopotential height are 60 gpm, 60 gpm, and 40 gpm, respectively.

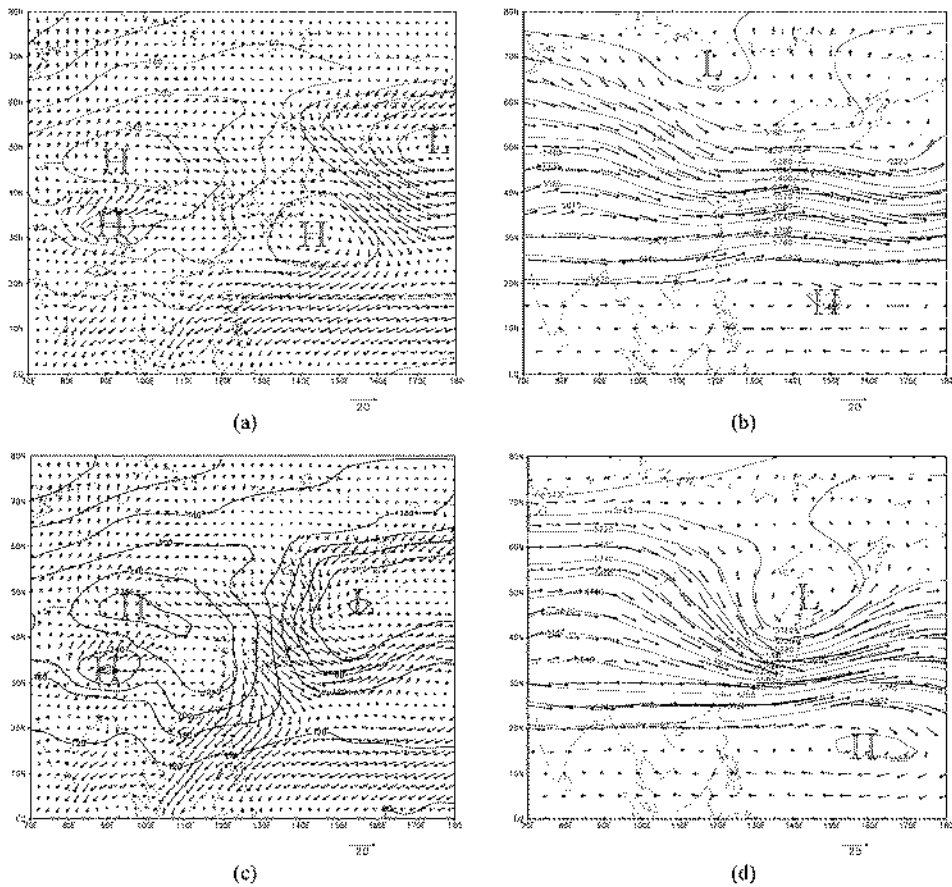


Fig. 4. Composite distribution of geopotential height (solid line), temperature (dashed line), and wind vector at 1000hPa (left panel) and 500 hPa (right panel) pressure level. Upper and lower panels indicate composite of warm and cold extreme cases, respectively. Scale of wind vectors (ms^{-1}) are also indicated in right-bottom corner of each panel. Contour intervals for geopotential height are 40 gpm (left panel), 60 gpm (right panel), respectively.

발달을 이끈다(류상범, 2002). 이를 더 분명하게 나타내기 위해 한랭 극값 사례와 온난 극값 사례의 차이를 Fig. 5에 나타내었다. 여기에서 한랭 극값 사례는 한파 발생을 나타내는 사례라 할 수 있고, 온난 극값 사례는 한파 발생 전이나 후의 사례라 할 수 있다. 음영이 있는 부분은 양의 값을 나타낸다. 1000 hPa에서 우리나라를 기준으로 동쪽과 서쪽에서 음과 양의 편차가 나타나며(a), 500 hPa에서 우리나라의 동해상에 기압골의 강화가 뚜렷하게 나타나고, 이 위치는 1000 hPa의 서고동저형의 기압 패턴 중간에 해당한다(b). 시베리아 고기압의 중심 위치에서 두 사례 사이에 큰 차이를 보이지 않고, 오히려 한반도 주변에서 80 gpm 정도의 양의 최대 편차를 보인다. 이것은 한파 발생시 시베리아 고기압이 남하하는 것이 아니라

확장 강화되는 것을 의미한다. 또한 알류산 저기압이 일본 동부지역까지 강화되어 북서기류의 강도를 증가시키는데 이것은 상층의 기압골의 강화가 동해상에서 위치하는 것과 연관되어 있다(정영근, 1994).

한랭 핵의 이동과 대기 순환

기온 극값 사례 중에서 이틀에 걸쳐 일평균 기온이 6.5°C 이상 떨어지는 날을 한파로 정의하여 분류하였다. Table 1은 한파 사례에서 이틀에 걸쳐 일평균 기온이 6.5°C 이상 떨어지는 날 중 가장 낮은 온도를 갖는 날($T_0 - T_2$)을 크기 순으로 나타낸 것이다. 표에는 T_0 를 기준으로 이전 4일까지의 기온 차를 함께 제시하였다. 조사한 21년 동안 20개의 한파 사례

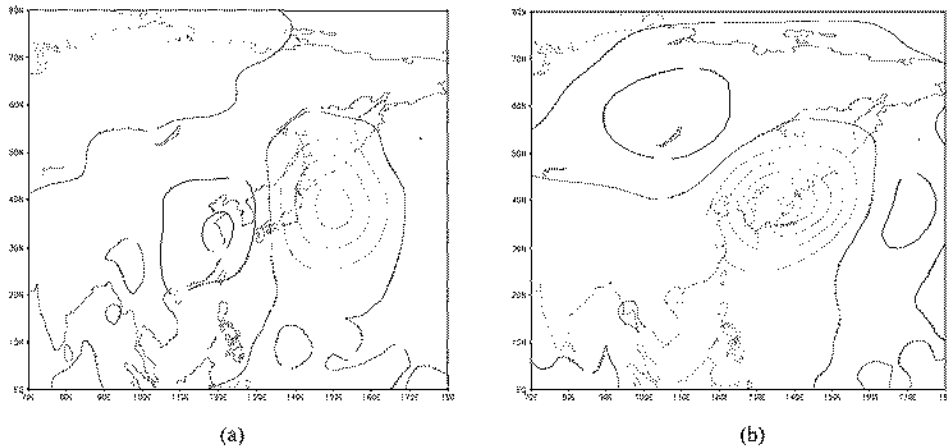


Fig. 5. The composite difference between cold and warm extreme cases of (a) 1000 hPa and (b) 500 hPa geopotential height.

Table 1. Surface air temperature difference between cold surge peak day (T_0) and the day before cold surge peak day (T_{-1}) for each cases. Cold surge peak day is defined as the day that shows the lowest temperature during each cold surge event in this study

Case	T_0	T_0-T_{-1}	T_0-T_{-2}	T_0-T_{-3}	T_0-T_{-4}	Date of T_0
1	-6.3	-9.1	-16.8	-15.8	-15.4	1983, 1, 9
2	-7.9	-2.2	-12.3	-14.7	-14.8	1980, 1, 31
3	-5.8	-3.4	-12.2	-9.8	-6.4	1980, 12, 13
4	-2.8	-2.8	-11.4	-12.9	-10.6	1987, 12, 31
5	-5.2	-3.1	-11.2	-4.1	-0.9	1988, 2, 7
6	-5.3	-2.4	-10.5	-6.1	-8.8	1982, 1, 13
7	-9.3	-4.0	-10.3	-13.7	-11.8	1981, 2, 26
8	-5.5	-1.5	-10.1	-10.2	-7.5	1988, 1, 24
9	-5.3	-3.6	-10.1	-9.2	-8.1	1999, 1, 8
10	-6.0	-4.3	-9.9	-8.9	-9.7	1998, 1, 19
11	-5.2	-2.5	-9.7	-8.8	-5.8	1994, 1, 19
12	-2.8	-3.9	-9.6	-8.0	-8.9	1982, 12, 6
13	-4.5	-4.0	-9.0	-5.4	-3.2	1990, 1, 20
14	-2.8	-8.0	-8.5	-5.1	-4.5	2000, 1, 7
15	-2.5	-5.2	-8.4	-5.4	-4.3	1987, 2, 25
16	-2.5	-3.8	-8.1	-7.1	-6.2	1993, 2, 23
17	-3.7	-3.7	-8.1	-11.8	-10.7	1997, 12, 10
18	-3.8	-2.1	-8.0	-9.4	-5.6	1996, 1, 9
19	-6.4	-2.2	-7.0	-12.5	-10.2	1986, 1, 2
20	-4.8	-1.2	-6.7	-12.2	-9.7	1988, 12, 15

가 선정되어 일년에 한 번 한파가 발생할 뿐이다. 전체 기간 21년 중에서 중심에 해당되는 1989년을 기점으로 이전(1979~1988년)에 12개 사례가 발생하였고, 그 이후(1990~1999년)에 8개 사례가 발생하였다. 또한 상위 8번째까지 1989년 이전에 발생하였다. 이는 최근으로 올수록 한파의 강도가 약화되고 그 빈도도 적어진다는 것을 의미한다. 이에 대한 정확한 논의는 더 많은 분석을 필요로 하며 여기서의 관심

사가 아니다. 이 절에서는 20개의 한파 사례를 합성하여 한파 발생일을 기준으로 이전 4일까지의 대기 순환 및 기온 구조를 고찰하였다.

Fig. 6은 한파 발생일(Lag0)과 그 이전 4일(Lag-4)까지의 -40°C 선(500 hPa)과 -24°C 선(850 hPa)의 이동을 나타낸다. 500 hPa에서 -40°C 선은 한파 발생 4일 전에 바이칼호에 중심을 둔 한랭 핵이 점차 남동진하다가 한파 발생일에 떨어져 나와 한반도 북쪽에

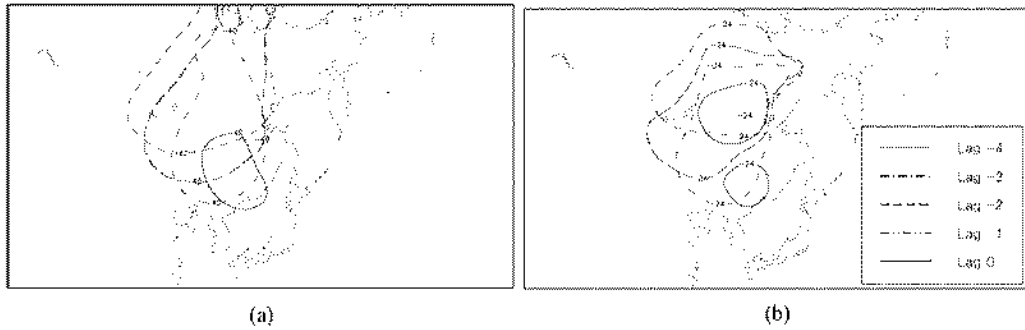


Fig. 6. Movement of cold core during four days before cold surge peak day in Korea at (a) 500 hPa (-40°C line) and (b) 850 hPa (-24°C line).

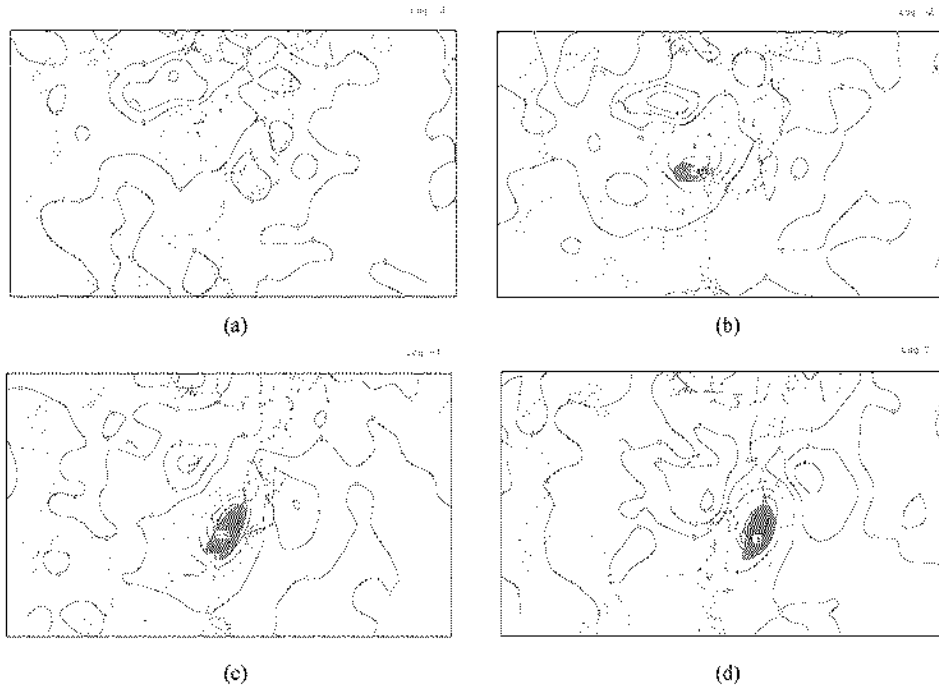


Fig. 7. The difference of 850 hPa temperature between day k and day k-1 during cold surge, where k=-3, -2, -1, 0 day before cold surge. Lag 0 indicates the difference between day -1 and day 0 before cold surge peak day. Significance levels over 5% are also shaded in different colors.

자리 잡고 있다. 850 hPa에서 -24°C선도 500 hPa의 -40°C선과 마찬가지로 한파 발생 4일전에 바이칼호 북동쪽 부근에서 한랭 핵이 위치해 있다가 점차 남동진하여 한파 발생일에 핵으로 분리되어 한반도 북쪽으로 이동해 온다. 한랭 핵의 면적은 한파 발생 1-2일전에 최대로 확장되었다가 한파 발생일에 다시 축소되거나 분리되는 특성을 보인다.

Fig. 7과 Fig. 8은 850 hPa와 200 hPa에서 한파 발

생 4일 동안에 기온 편차를 나타낸다. 기온 편차는 해당 일의 기온에서 하루 전일의 기온을 뺀 양을 의미하며, Fig. 7에서 음영이 있는 부분은 유의 수준 10% 이상인 지역을 나타내며, Fig. 8에서는 음영이 있는 부분은 기온이 증가한 지역을 나타낸다. 그리고 파선은 2°C 이상 기온이 하강한 지역을 나타낸다. 그림 우측 상단의 Lag-k는 한파 발생 k일전과 한파 발생 k-1일전의 기온의 차이를 나타낸다. Fig. 7에서 보

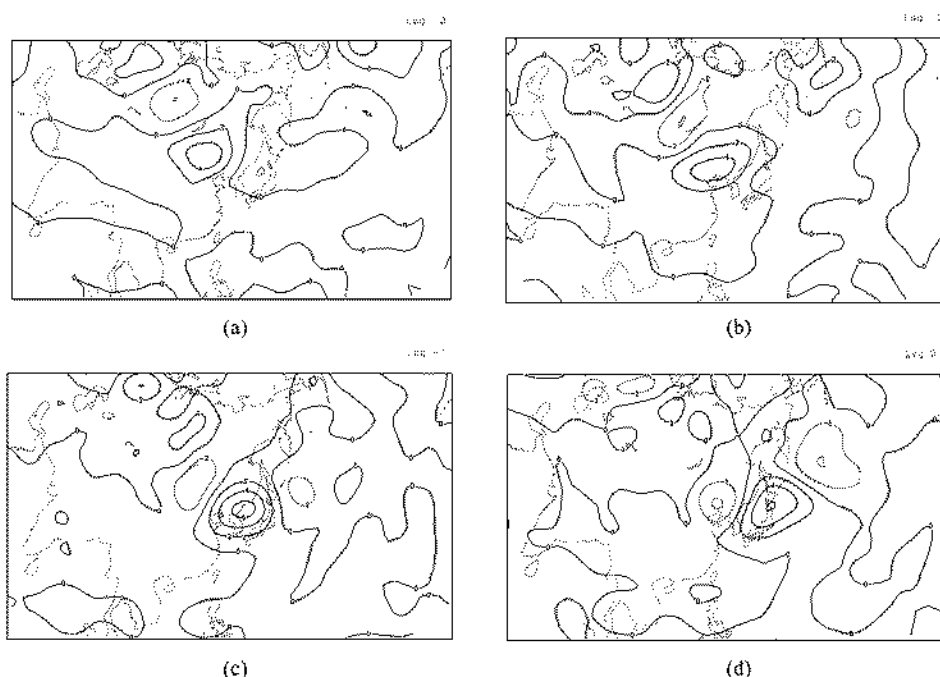


Fig. 8. The difference of 200 hPa temperature between day k and day $k-1$ during cold surge, where $k=-3, -2, -1, 0$ day before cold surge. Lag 0 indicates the difference between day -1 and day 0 before cold surge.

여주는 것처럼 바이칼호에 위치하는 한랭 핵의 중심은 점차 남동진한다. 그리고 1일 전에는 한반도에서 유의 수준 5% 이상이며, 그 중심의 편차는 -10°C 로 가장 강한 편만 아니라 한랭 핵의 넓이도 중국 남부지역에까지 미친다. 한파 발생일에는 한랭 핵의 중심이 이미 한반도를 빠져나가며, 뒤이어서 온난 핵이 한반도로 접근한다. 온난 핵의 이동은 한랭 핵의 이동을 뒤따르지만, 그 크기는 한랭 핵에 비해 작다. 한랭 핵과 온난 핵의 이동은 바이칼호 부근에서 시작하여 한반도로 왔다가 일본을 지나 알류산 저기압 쪽으로 이동해 간다. 주목할 점은 200 hPa의 기온 편차의 분포가 850 hPa의 기온 분포와 거의 반대의 위상을 보여준다(Fig. 8). 즉 한파 발생 4일전 바이칼호에 한랭 핵이 위치하고 한파 발생 1일전 한반도에 가장 강한 한랭 핵이 위치한다.

이러한 한랭 핵의 이동과 상·하층 구조를 자세히 알아보기 위해 기온의 연직 구조를 조사하였다. Fig. 9는 바이칼호(a)와 한반도(b)부근에서 한파 발생이전 4일 동안 한랭 핵의 연직 구조를 보여준다. 음영이 있는 부분은 전날에 비해 기온이 증가한 것을 의미하고, 파선은 기온이 감소한 것을 나타낸다. 바이칼

호의 온도 구조와 한반도의 온도 구조는 거의 반대의 패턴을 보여준다. 또한 400 hPa를 중심으로 상층과 하층에서 반대의 온도 편차를 보여준다. 이러한 기온의 연직 구조는 Lau and Lau(1984)와 유사하게 나타났다. 그리고 한반도의 경우 한파 발생 1일 전에 하층에 가장 강한 한랭 핵이 위치하며, 상층에 가장 강한 온난 핵이 위치한다. 400 hPa를 중심으로 상·하층간의 기온 편차가 반대로 나타나는 이유는 아직 정확히 알 수 없다.

상·하층간의 바람의 차이를 고찰하기 위하여 해면 기압 분포와 200 hPa 바람장의 변화를 조사하였다(Fig. 10). 200 hPa에서 한랭 이류가 강한 지역은 그 하층에서 고기압이 강화되고, 온난 이류가 강한 지역은 그 하층에 저기압이 강화된다. 이것은 지상의 기압계의 중심이 고도가 증가하면서 서쪽으로 기울어져 있는 것과 관련된다. 특히 한파 발생 하루 전에 한반도 상층에 저기압성 순환이 강화되는 반면, 하층에서 중국에 중심을 둔 고기압의 강화와 일본에 중심을 둔 저기압의 강화가 뚜렷하게 나타나고 이로 인하여 한반도는 강한 한랭 이류의 영향을 받는다. 한파 발생일에는 우리나라 하층 대기에 고기압 편차가 강화

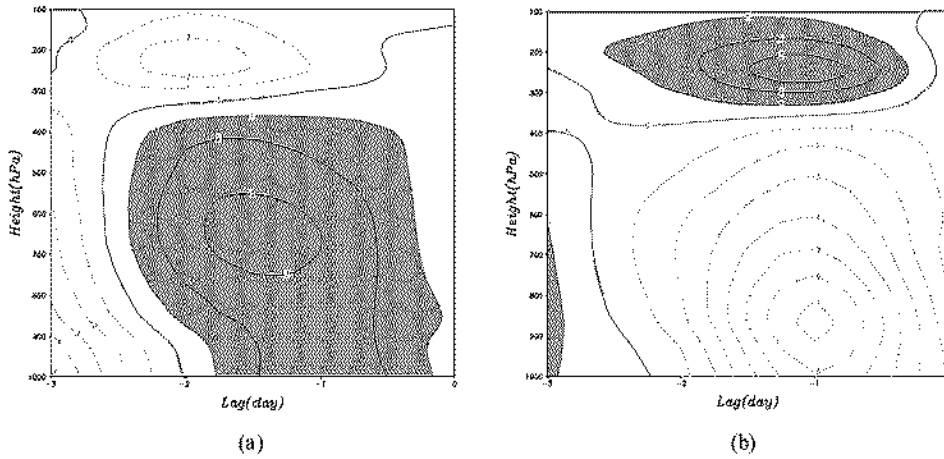


Fig. 9. Vertical profile of temperature difference between day k and day $k-1$ before cold surge, where $k=-3$ to 0 , over (a) Baikal and (b) Korea.

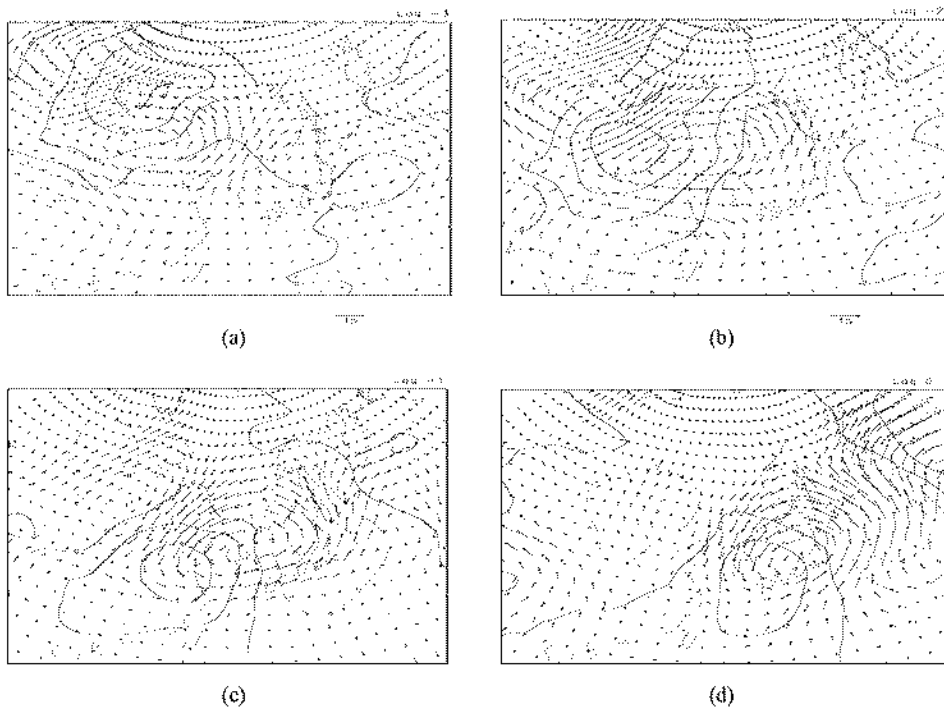


Fig. 10. The difference of 200 hPa wind (vector) and sea level pressure (contour) between day k and day $k-1$ during cold surge peak day, where $k=-3, -2, -1, 0$ day before cold surge peak day. Lag 0 indicates the difference between day -1 and day 0 before cold surge peak day. Contour interval for sea level pressure is 4 hPa.

되어 한반도로의 한랭 이류는 차단된다.

Fig. 11은 한파 발생 이전 4일 동안 시베리아 고기압과 알류산 저기압의 이동 특성을 보여준다. 1000 hPa에서 240 gpm 선이 한파 발생 4일전에 시베리아

고원에 있다가 점차 남동진하여 중국 대륙쪽으로 확장되어 간다. 240 gpm 선의 후단보다 선단의 이동이 훨씬 빠르다. 이것은 전체적인 시베리아 고기압계의 중심이 이동 한다기보다는 세력을 확장한다는 것을

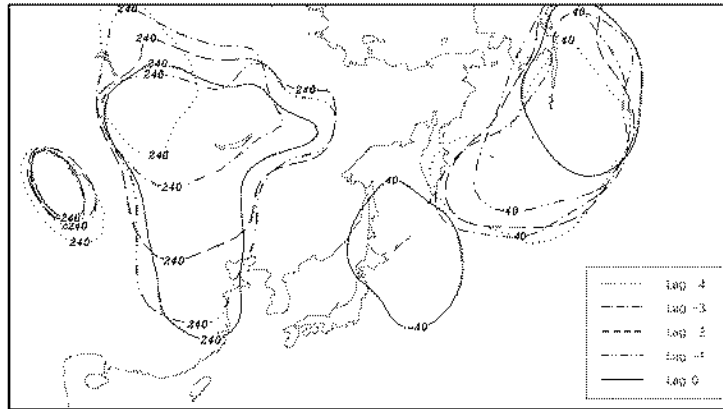


Fig. 11. Movement of 240 gpm and 40 gpm line of 1000hPa geopotential height for four days before cold surge peak day.

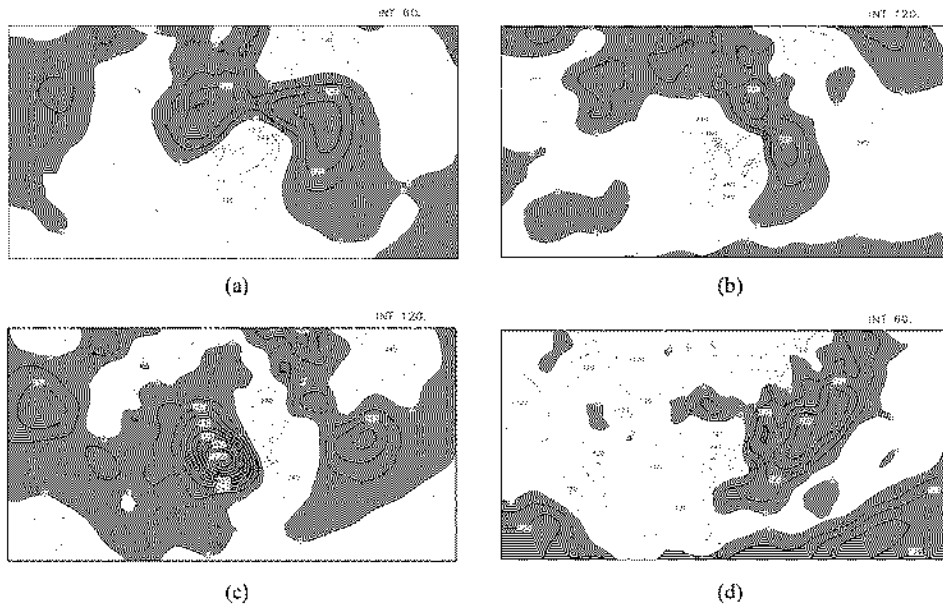


Fig. 12 Horizontal distribution of the vertically integrated (a) local change term ($\partial T/\partial t$), (b) horizontal temperature advection term ($V \cdot \nabla T$), (c) vertical temperature advection term $[[v \partial \theta/\partial p] [p/pa]^{0.5}]$, and (d) apparent heat source Q_3 at one day before cold surge. Positive area is shaded. Contour intervals in (a), (b), (c), and (d) are 60, 120, 120, 60 Wm^{-2} , respectively.

의미한다. 40 gpm 선의 이동은 한파 발생 4일전에 알류산 열도 부근에서 특정 방향으로의 이동이 없이 넓어졌다 좁아졌다하면서 진동하다가 한파 발생일에 떨어져 나와 일본 동부 해상에 위치하여 알류산 저기압의 서쪽 확장기 매우 중요함을 알 수 있다. 따라서 한파 발생일에 한반도에는 동서 기압 경도력이 강화되어 찬 기류의 한반도 유입을 강화시킨다.

한파 발생 하루 전에 강한 기압 경도에 의한 한랭이류에 의해 기온 하강이 가장 강하게 나타난다는

점을 앞서 제시한 바 있다. 이 시기에 기온의 변화에 기여하는 각 항의 크기를 고찰하기 위하여 식 (1)에 기초하여 열흡수원의 분포가 어떻게 나타나는지를 조사하였다. Fig. 12는 한파 발생 하루 전에 열원 및 각 항의 분포를 연직 적분한 값을 에너지의 단위 (Wm^{-2})로 나타낸 것이다. 한반도에서 국지 변화항의 크기는 최대 $-200 Wm^{-2}$ 에 이르며, 바이칼호 부근과 일본 동북부 해상에서 역시 $+120 Wm^{-2}$ 의 양의 값을 보여 기압 시스템의 이동에 따른 경압축의 이동을 보

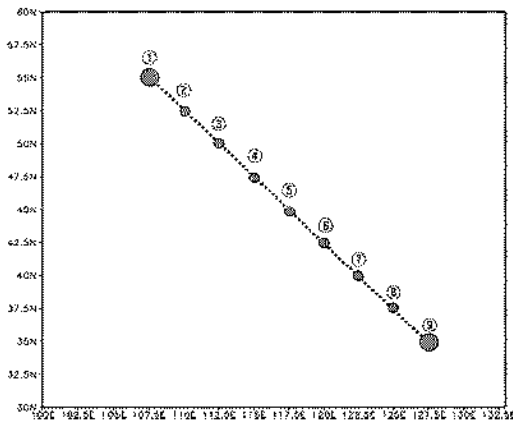


Fig 13. Horizontal line from Lake Baikal to South Korea defined for the vertical cross-section analysis of Fig. 14.

여준다(Fig. 12a). 수평 이류항도 한반도 상에서 -1000 Wm^{-2} 에 달하여 국지 변화항의 5배에 이른다(Fig. 12b). 홍머름계도 수평 이류항에 의한 막대한 에너지 손실은 단열항에 의해 거의 대부분 보상되고 있다(Fig. 12c). 이것은 Fig. 10c에서 보여준 바와 같이 한파 발생 하루 전에 한반도에 강한 한랭 이류에 의한 기온 하강이 있고, 동시에 이류되어 온 차가운 공기는 하강하여 단열 승온을 유도하기 때문에 나타난 현상이다. 따라서 국지 변화항은 적어도 한반도 주변에서 열원항의 부호와 크기에 좌우된다(Fig. 12d). 특이한 점은 아시아 대륙에서 전반적으로 열흡수원(음의 Q_1)이 존재하고, 대륙과 해양의 경계 지역에서 대체로 열원이 존재한다는 점이다. 그리고 열흡수원의 상·하층 연직 구조를 자세히 알아보기 위해 열원의 연직 구조를 조사하였다. Fig. 13은 지역별 연직구조를 알아보기 위하여 바이칼호에서 한반도까지의 격자 점을 설정하였다. Fig. 14는 Fig. 13에서 설정한 격자 점에 해당하는 한파 발생 하루 전의 각 층별 열원의 연직 구조를 나타낸 것이다. 국지 변화항에서는 기온의 연직 구조(Fig. 9)에서 나타나는 것과 같이 한반도 부근에 음의 값을 나타내고 있다(Fig. 14b). 연직 적분 분포에서도 알 수 있듯이 수평 이류항과 단열항은 서로 평형을 이루며 거의 대부분 보상 되고 있다(Fig. 14 b,c). 연직 적분 분포나 기온의 연직 구조와는 다르게 열원의 연직 구조에서는 한반도 부근에 900 hPa 을 기준으로 상층에서는 열흡수원이 나타나고 있지만, 그 하층에서는 열흡수원이 나타나고 있다(Fig. 14d). 이에 대한 원인은 복사과정이거나 현열, 잠

열과 연관이 있는지 좀 더 고찰이 필요하다. 아울러 열원에 대한 분석은 Q_2 (moisture sink)를 함께 분석하여 열원의 요인을 찾아보아야 하겠다.

결 론

겨울철 대표적인 악기상중 하나인 한파의 발생과 한랭 핵의 이동을 고찰하기 위하여 21년간(1979/1980~1999/2000년) 겨울철의 한파 관련 대기 순환 특성을 분석하였고, 한파 발생시의 한랭 핵의 이동 특성을 조사하였다. 대기 순환 패턴에서 평년 동계의 패턴에 비해 하층에서 시고동지형의 기압 패턴이 더 뚜렷해지는 모습을 보였으며, 상층에서도 한반도에 기압골의 영향이 더 크게 나타났다. 한파 발생 4일 전부터 연속적으로 보면 시페리아 고기압은 이동한다기 보다 남동쪽으로 확장하며, 알류산 저기압은 알류산 열도 부근에서 그 강도가 키졌다 작아졌다하면서 전동하다가 한파 발생일에 떨어져 나와 일본 동부 해상에 위치하게 되고 이로 인해 동시 기압 정도력을 강화시켜 한랭 기류의 한반도 유입을 강화시킨다.

한파 발생 빈도는 21년간 20개로 나타났다. 이것은 한랭 극값 사례 중에서 이틀에 걸쳐 일평균 기온 감소가 6.5°C 이상인 경우만을 분류한 것으로 극 한파(extreme cold surge)라고 할 수 있다. 이러한 한파 발생 분류는 동아시아의 북극 진동에 의한 한파 발생(Jeong and Ho, 2004)의 연구에서 조사한 연별 1.26개의 극 한파가 발생한다고 한 것과 일치한다. 1989년 이후 기간 동안에 발생한 한파 사례는 그 이전에 발생한 한파 사례보다 약 10% 정도 적었다. 이는 흑한일이 줄어든 것에 비해 한파 발생 빈도는 변하지 않았다고 했으나(류상범, 2003), 1989년 이후에 극 한파는 줄어들었다는 것을 의미한다. 그러나 연구에 사용한 자료의 기간이 길지 않기 때문에 보다 긴 기간에 대한 분석으로부터 경향성을 논의할 필요가 있다. 한파가 발생할 때, 기온 하강은 한파 발생일에 가장 크게 나타나는 것이 아니라 한파 발생일보다 하루 전날에 가장 크게 나타났다. 한파가 발생하는 동안에 한반도 부근의 기온 하강 패턴은 바이칼호 부근의 기온 하강 패턴과 반대로 나타나며, 기온의 연직 구조에서도 400 hPa 을 기준으로 하층과 상층의 기온 편차는 반대로 나타난다. 이러한 특성은 바이칼호 부근과 한반도 부근에서 한파 발생 하루 전에 가장 뚜렷하다. 한파 발생 4일 전에는 상층의 기압능이

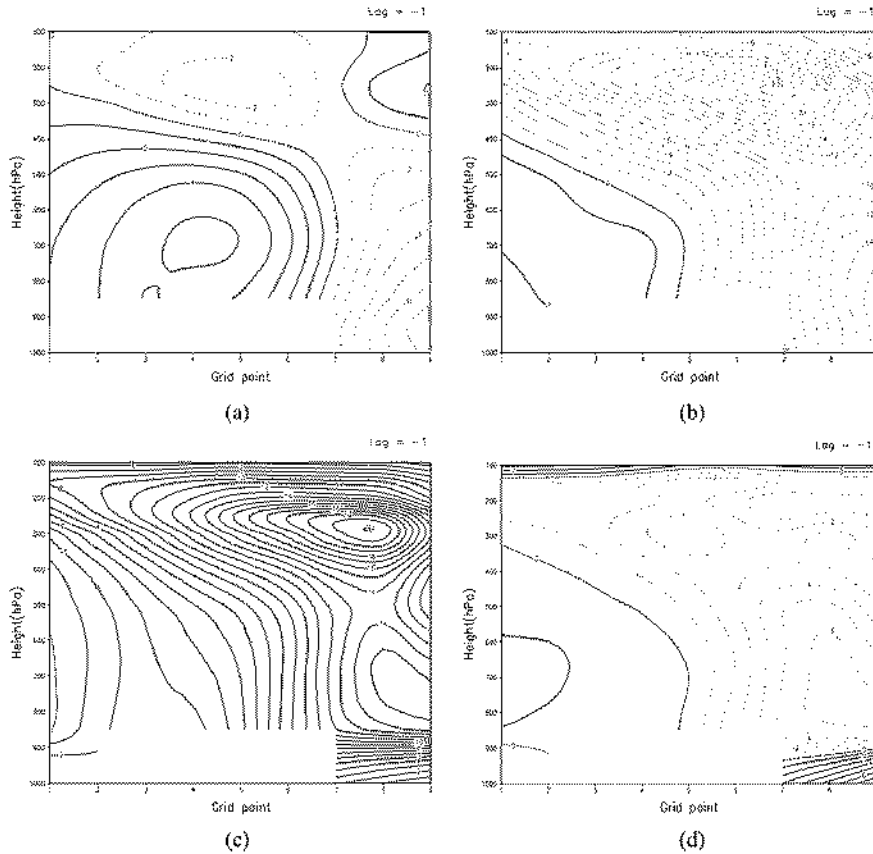


Fig. 14. Vertical cross-section of (a) local change term ($\partial T/\partial t$), (b) horizontal temperature advection term ($V \cdot \nabla T$), (c) vertical temperature advection term $[[\partial(W'\partial p)]/[\rho p]]^{LCP}$, and (d) apparent heat source Q_1 at one day before cold surge. Positive area is shaded. Contour intervals in (a), (b), (c), and (d) are 2°C day^{-1} , respectively. Grid point represents horizontal distance from Lake Baikal to South Korea as showed in Fig. 13.

한반도에 위치하며 파형 요란의 발달을 이끌고 있어서 한파 발생일에 전형적인 서고동저형의 기압 패턴을 이루며 상층 기압골이 한반도의 북동쪽에 주로 위치하여 골과 마루의 축들이 고도에 따라 서쪽(또는 동상측)으로 기울어 이상적으로 발달하는 경압 시스템의 형태로 나타나 요란의 발달을 이끌고 있다. 그러나 이에 대한 정확한 논의는 보다 많은 사례에 대한 연구로부터 추가적인 조사가 필요하다.

열원에 대한 분석 결과, 열흡수원의 이동은 한랭핵의 이동 경로와 유사하게 나타났다. 또한 수평 이류형은 단열항과 거의 반대의 부호를 나타내었다. 이것은 한랭이류에 의한 기온 하강이 하강 운동에 의한 단열 승온으로 균형을 이루고 있다는 것을 나타낸다. 열원의 연직 구조에서도 기온의 연직 구조와 유사한 형태로 나타났고 국지 변화항과 열흡수원의

분포가 유사한 형태로 나타나고 있다. 그 결과로 국지 변화항은 열흡수원의 분포와 유사한 분포를 나타낸다. 따라서 한랭 핵의 이동은 열흡수원의 이동과 밀접한 관련을 갖는다. 다만 한파 발생 하루 전과 한파 발생일에 대한 열원의 분포에서는 900 hPa의 하층에서 기온의 분포처럼 열흡수원의 형태가 나타나는 것이 아니라 열원의 형태가 나타나고 있다. 이에 대한 원인은 복사나 현열 및 잠열 등 다른 요인들과 연관하여 좀 더 고찰이 필요하다.

이 연구는 한파와 관련된 대기의 순환 및 열원의 분포에 대해 중점을 두어 연구하였다. 그러나 한파를 촉발시키는 것이 무엇인가에 대한 부분은 다루고 있지 않다. 따라서 향후 연구에서 한파를 촉발시킬 수 있는 더 광역 규모의 순환인 AO, MJO, SO와의 연관성, 열원의 변동에 기여하는 복사 과정 및 현열의

역할 등에 대해서 좀 더 많은 연구가 필요하다. 아울러 한파의 예측성 및 지속성 등에 대한 연구는 한파의 촉발, 유지 기작에 대한 연구가 이루어져야만 가능하리라 본다.

사 사

이 연구는 “충청지방 악기상 예측 시스템 개발(III)”의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 김성, 2003, 한반도 봄철 강수량과 북반구 대기 순환의 패턴 변화. 공주대학교 석사학위논문, 61 p.
- 류상변, 권위태, 2002, 남한의 한랭 겨울과 혹한일의 기후학적 특성. *대기*, 12, 288-291.
- 류상변, 2002, 우리나라 겨울철 한파 내습과정에 관하여. *대기*, 13 (1), 310-313.
- 류상변, 2003, 우리나라 겨울철 특이 기온의 최근 변화에 관하여. *대기*, 12 (3), 98-101.
- 박순홍, 김성삼, 1987, 동계(1985년 12월~1986년 2월) 한반도 한파 내습시의 동부 아시아 지역의 중관 기상 상태. *한국기상학회지*, 23 (1), 56-90.
- 임규호, 1994, 동아시아 겨울철 상층 동서류의 하층 기온 변동의 연관성. *한국기상학회지*, 30 (1), 65-72.
- 임규호, 1994, 겨울철 동 아시아 세류의 변동성과 한파 내습. *한국기상학회지*, 30 (4), 507-519.
- 임은순, 인종배, 남제철, 2004, 한반도 겨울철 기온 변동과 북극진동과의 상관성 분석. *한국 기상학회지*, 40 (4), 441-452.
- 정영근, 1989, 한반도에서 한파내습에 관한 연구: 장주기 중긴주기 단주기별 대기로관의 특성. *한국지구과학회지*, 10 (2), 203-214.
- 정영근, 1993, 북반구 겨울철 원격상관패턴과 단주기 대기 변동. *한국지구과학회 학술발표회*, p. 391.
- 정영근, 1994, 북반구 겨울철 단주기 성분 지오폭텐셜고도의 변화. *한국지구과학회지*, 15 (6), 427-438.
- Ding, Y. H., and T. N. Krishnamurti, 1987, Heat budget of the Siberian high and the winter monsoon. *Monthly Weather Review*, 115 (10), 2428-2449.
- Jeong J. H., and Ho C. H., 2004, Modulation of the occurrence of cold surges by Arctic oscillation over East Asia. Submitted to *Geophysical Research Letters*.
- Jeong J. H., Ho C. H., Kim B. M., and Kwon W. T., 2005, Influence of the Madden-Julian oscillation on wintertime surface air temperature and cold surges in East Asia. Accepted to *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*.
- Joung C. H., and M. H. Hitchman, 1982, On the role of successive downstream development in East Asian polar air outbreaks. *Monthly Weather Review*, 110 (9), 1224-1237.
- Lau, N.-C. and K. M. Lau, 1984, The structure and energetics and midlatitude disturbances accompanying cold-air outbreaks over East Asia. *Monthly Weather Review*, 112 (7), 1309-1327.
- Ryoo, S.-B., W.-T. Kwon, and J.-G. Jhun, 2005, Surface and upper-level features associated with wintertime cold-surge outbreaks in South Korea. *Advances in Atmospheric Sciences*, 22 (4), 533-548.
- Ueda, H., H. Kamahori, and N. Yamazaki, 2003, Seasonal contrasting features of heat and moisture budgets between the eastern and western Tibetan Plateau during the GAME IOP. *Journal of Climate*, 16 (14), 2309-2324.
- Yanai, M., S. Esbensen, and J. H. Chu, 1973, Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and moisture budget. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 30 (4), 611-627.
- Yanai, M. and T. Tomita, 1998, Seasonal and interannual variability of atmospheric heat sources and moisture sinks as determined from NCEP-NCAR reanalysis. *Journal of Climate*, 11 (3), 463-482.
- Zhang Y., K. R. Sperber, and J. S. Boyle, 1997, Climatology and interannual variation of the East Asian winter monsoon: Result from the 1979-95 NCEP/NCAR Reanalysis. *Monthly Weather Review*, 125 (10), 2605-2619.

2005년 5월 26일 원고 접수
 2005년 7월 3일 수정원고 접수
 2005년 7월 12일 원고 채택