

## 2010/11년 겨울의 동아시아 한랭 아노말리와 블로킹의 연관성

최우갑\* · 김영아

서울대학교 지구환경과학부

(접수일: 2016년 1월 22일, 수정일: 2016년 2월 18일, 게재확정일: 2016년 2월 25일)

### Relationship between the East-Asian Cold Anomalies in Winter of 2010/11 and Blocking

Wookap Choi\* and Young-Ah Kim

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

(Manuscript received 22 January 2016; revised 18 February 2016; accepted 25 February 2016)

**Abstract** An anomalous cold-weather period occurred during January 2011 in East Asia, and this study investigates the event by focusing on the blocking phenomena formed at Northeastern Asia. The area of cold weather is determined to represent the characteristic features of abnormal cold temperature. The 2010/11 winter is divided into three periods P1, P2 (cold period), and P3. For the cold area (30-50°N, 115-135°E) the corresponding cold period P2 is determined to be 39 days from 23 December 2010 through 30 January 2011. During P1 and P3 temperature anomalies from the climatological mean are small with large standard deviation compared to those of P2, which has large negative anomaly and small standard deviation. The period P2 is dominated by blocking, which was determined by distributions of 500-hPa geopotential height and potential temperature on the 2 PVU surface. Correlation-coefficient analyses show that during P2 the temperature in the cold area is related with pressure of Northeastern Asia, while the temperature during P1 and P3 is related with pressure of Northwest of Korea. Also, during P1 and P3 the temperature pattern shows eastward propagation, but during P2, a stationary pattern. All the observations imply that, during the cold period P2, the temperature in the cold area is related with blocking in Northeastern Asia. During P1 and P3 temperature pattern is related with 500-hPa geopotential height in Siberia, and this relationship is also observed in the climatological mean state.

**Key words:** East-Asian winter temperature, cold temperature anomaly, cold period, blocking

### 1. 서 론

Choi et al. (2013)은 2010/11년 겨울의 동아시아 한랭 아노말리 특성 연구에서, 2011년 1월은 그 한달 전인 12월과 한달 뒤인 2월에 평년과 유사한 기온 분포를 보이는 것과 달리 거의 한달 이상 이례적인 추위가

지속되었다는 것을 보고하였다. 추위가 지속되었던 2011년 1월 동안 시베리아 고기압과 알류산 저기압이 모두 발달하였고, 지위고도의 아노말리 분포는 지상에서 성층권 고도까지 순압성을 보이며 알류산 저기압이 성층권에 이르기까지 같은 지역에 발달해 있어 공간적으로 규모가 대단히 큰 현상이었다. 500 hPa 지위고도 자료를 이용한 행성과 분석에서는, 1월에 파수 1, 2, 3의 장파가 많이 나타났으며, 중위도대(30-50°N)에서는 그 위상이 정체되어 있는 반면 고위도대(50-70°N)에서는 급격한 위상변화를 보여 12월, 2월과는 다르게 나타났다.

\*Corresponding Author: Wookap Choi, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea.  
Phone: +82-2-880-6711, Fax: +82-2-883-4972  
E-mail: wchoi@snu.ac.kr

동아시아 겨울 몬순의 영향으로 발생하는 한파를 비롯하여 한반도에서 모든 계절에 나타나는 이상 저온에 대한 선행 연구는 많이 있다(Joung, 1975; Moon, 1977; Kim and Joung, 1980; Joung and Byun, 1987; Park and Kim, 1987; Lee et al., 1988; Kim et al., 1997a, 1997b). 한편, 지구온난화의 영향으로 특히 겨울철에 기온 증가율이 크고 한랭일이 줄어드는 경향을 보였던 것에 비해 2000년 이후 겨울철의 기온이 오히려 하강하는 추세를 보이고, 2010년 이후 한반도에서 추운 겨울이 더욱 빈번하게 나타나고 있어 북극의 온난화가 가속화되는 시점과 맞물려 대규모 기후 변동성에 대한 관심이 커지고 있다(Kim et al., 2014; Min et al., 2015; Yoo et al., 2015).

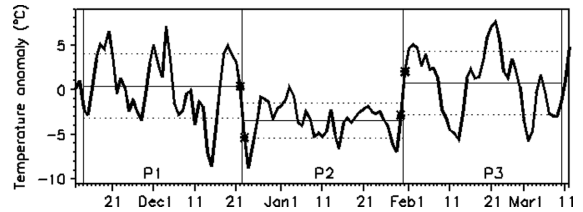
동아시아 지역에서 나타나는 겨울철의 이상 저온 현상 중에는 시베리아 고기압의 강화에 의한 것도 있고, 주로 우랄산맥 지역이나 북태평양 지역에 형성되는 블로킹(blocking)과 관련이 있는 것도 있다. 북태평양에서 기원하며 순압구조를 보이는 블로킹에 대하여 Takaya and Nakamura (2005)가 보고한 바 있는데 2011년 1월의 동아시아 기압패턴도 순압성을 보였다(Choi et al., 2013). Park et al. (2014)은 한파를 크게 파동형(wave-train type)과 블로킹형(blocking type)으로 나누고 비교하여 파동형은 경압성을 보이는데 비해 블로킹형은 순압성을 보이며 또, 블로킹형이 파동형보다 한랭 아노말리가 더 오래 지속되는 차이가 있다고 하였다. 이와 같은 여러 사항으로 미루어 볼 때 2010/11년 겨울의 이상 저온 현상은 블로킹과 연관된 것으로 보인다.

본 연구에서는 2011년 1월의 한달 이상 지속된 추위가 블로킹과 관련이 깊다고 판단하여 블로킹이 어디에 어떻게 존재하는지 결정하고, 블로킹과 관련된 지위고도 분포와 동아시아 지역의 추위와의 연관성을 분석하였다. 2절에서는 사용된 자료에 대하여 기술하였고, 3절에서는 분석 결과에 따라 블로킹의 존재와 추위와의 관계에 대하여 기술하였다. 4절에서는 얻어진 결과를 요약하였다.

## 2. 자료 및 방법

본 연구에서 사용한 자료는 National Center for Environmental Prediction - Department of Energy (NCEP-DOE) R2 재분석 자료로(Kanamitsu et al., 2002), 수평 방향으로 2.5° 격자 간격과 연직 방향으로 17개 등압면 고도에서의 일평균 지위고도(geopotential height), 기온, 동서풍(zonal wind), 남북풍(meridional wind) 등을 포함하며, 사용된 자료 기간은 1980년부터 2011년까지이다.

본 연구에서 평년값(climatological mean)은 1981년



**Fig. 1.** Daily 850-hPa temperature anomaly averaged over the cold area from 12 November 2010 through 12 March 2011. Asterisks denote 22, 23 December and 30, 31 January. Vertical solid lines represent P1, P2, and P3. Horizontal solid lines and dotted lines denote mean and  $\pm 1$  standard deviation for each 39-d period.

부터 2010년까지의 30년 평균으로 정의하였다. 단, 겨울철인 DJF 기간은 전년 12월부터 이듬해 2월까지의 연속된 기간으로 보았다. 즉, 1981년 DJF 기간은 1980년 12월부터 1981년 2월까지이다. 모든 변수의 아노말리는 일자료에서 평년값을 뺀 값을 의미한다.

## 3. 한랭 아노말리와 블로킹

### 3.1 동아시아 한랭지역의 기온변화 특성

Choi et al. (2013)의 Fig. 1에서는 2010/11년 겨울철의 기온 시계열을 남한 평균에 대해서 보였다. 본 연구에서는 동아시아 지역 기온의 대표성을 향상시키기 위하여 지상관측소 기온보다 850 hPa 기온을 사용하였고, 남한 면적보다 좀 더 넓은 동아시아 지역을 잡아서 그 지역의 평균기온을 이용하기로 하였다. NCEP 재분석자료의 격자점 중에서 서울의 위도, 경도(37.57°N, 126.95°E)와 가장 가까운 격자점(37.5°N, 127.5°E)을 선택하였다. 선택한 격자점에서의 기온 시계열은 2010/11년 겨울기간 동안 서울의 관측소 기온 변화와 비슷한 형태를 보였다.

2011년 1월 한달 동안 한국에서 지속된 추위의 특성을 공유하는 한랭 아노말리 지역을 찾기 위하여 서울에서 가장 가까운 격자점에서의 기온과 다른 격자점들의 기온 시계열 사이의 상관계수를 1월 한 달에 대하여 구하였다. 상관관계가 가장 높은 지역은 위도 30-50°N, 경도 115-135°E로 나타났고, 편의상 앞으로 이 지역을 한랭지역(cold area)이라 부르며 Fig. 4에 그 지역을 표시하였다.

2010/11년 겨울 동안 한랭지역에 대해 평균한 850 hPa 기온 아노말리의 시계열을 Fig. 1에 보였다. 기온 아노말리는 2011년 1월을 중심으로 한달 이상 음의 아노말리가 지속되었다. Choi et al. (2013)에서는 분석의 편의상 12월, 1월, 2월로 나누어 계산하였으나 실제 기온변화 특성과는 다르다고 생각되어 Fig. 1을

**Table 1.** Duration of each period P1, P2, and P3, and mean and standard deviation of 850-hPa temperature anomaly averaged over the cold area (30-50°N, 115-135°E) for each period.

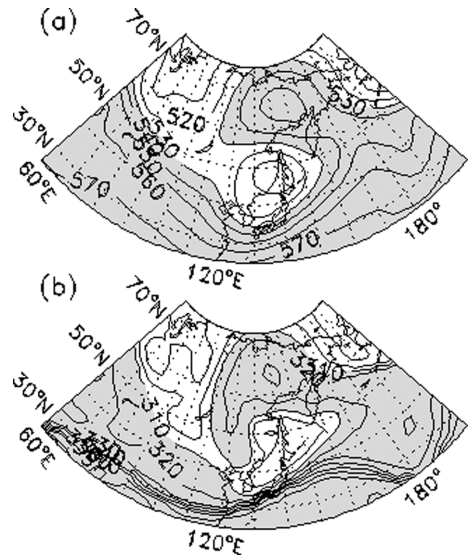
	P1	P2	P3
Duration	14 Nov 2010~22 Dec 2010	23 Dec 2010~30 Jan 2011	31 Jan 2011~10 Mar 2011
Mean (°C)	0.39	-3.42	0.74
Sd (°C)	3.61	1.93	3.57

기준으로 하여 아노말리가 음으로 지속된 2010년 12월 23일부터 2011년 1월 30일의 39일을 한랭기간(cold period)이라 정의하였다. 한랭기간과 비교하기 위하여 그 전과 후의 39일을 각각 P1(2010년 11월 14일~12월 22일)과 P3(2011년 1월 31일~3월 10일)로 정의하였다. 따라서, 앞에서 정의한 한랭기간은 시간 순서에 따라 P2에 해당된다.

Figure 1에서 세 기간 동안의 한랭지역 기온 변화는 뚜렷한 차이를 보인다. P1, P3 기간에는 큰 변동폭을 보이며 비슷한 변화 형태를 보이는 반면에 P2 기간 동안에는 음의 기온 아노말리가 지속되며 변동폭이 P1, P3 기간보다 훨씬 작다. 각 기간 동안의 평균적인 아노말리와 변동폭을 정량적으로 보이기 위해서 각 기간 동안 기온의 평균과 표준편차를 계산하였다(Table 1). 이들 값을 비교해보면, P1과 P3 기간에 평균이 각각 0.39°C와 0.74°C로 평년 값과 큰 차이가 없다. 또한 표준 편차는 P1과 P3 기간에 3.61°C와 3.57°C로 비슷하다. 그러나 P2 기간 동안에는 기온의 아노말리 평균 값이 -3.42°C로 평년에 비해 매우 낮고, 표준 편차는 1.93°C로 훨씬 작다. Figure 1과 Table 1의 값에서 추정이 가능한 것은 P2 기간 동안 한랭지역의 기온을 결정하는 메커니즘은 P1, P3 때와 다르지 않은가 하는 것이고, 장기간 지속되는 기상현상이 블로킹과 연관되는 경우가 많으므로 P2 때 블로킹의 영향을 가정하게 되었다.

### 3.2 블로킹의 위치와 기간

중위도 지역에서의 기압 패턴이 보통 편서풍을 따라 동쪽으로 이동해 가는 것과 달리 블로킹은 고위도에서 고기압 또는 능이 거의 이동하지 않고 지속적으로 위치하는 현상을 의미하는데, 이는 500 hPa 지위고도 분포에서 고위도의 고기압 또는 능으로 나타나고, 그 남쪽에 저기압이 나타나서 기압 분포가 쌍극자(dipole) 형태로 나타나는 경우가 많다. 또한, 블로킹이 나타날 때 등온위면 바람장을 이용하여 잠재와도(potential vorticity) 분석을 하면 대류권계면 부근에서 등잠재와도면 상의 온위가 고위도에서 높고 저위도에서 낮아 평소의 남북기울기와 반대가 된다는 것이 알려져 있다(Pelly and Hoskins, 2003). Pelly and Hoskins (2003)는 역학적 대류권계면으로 정의되어 있



**Fig. 2.** (a) 500-hPa geopotential height (area greater than 530 dam is shaded), and (b) potential temperature on the 2-PVU surface (area greater than 310 K is shaded) on 26 December 2010.

는 2 PVU (potential vorticity unit) 면 상에서 온위의 남북 기울기를 이용하여 블로킹을 정의하였다.

Figure 1의 P2 기간 동안에 실제로 블로킹이 나타나는지 알기 위해서 기온이 많이 내려간 12월 26일의 하루를 선택하여 기압분포를 보았다. 그 날의 500 hPa 지위고도가 Fig. 2a에 나와 있는데, 지위고도가 530 dam 이상으로 높은 지역은 오후츠크해 북쪽인 고위도 지역에 위치하고 오후츠크해 남쪽인 일본 북부 및 중위도 지역에는 지위고도가 낮은 저기압이 분포하고 있어 블로킹이 발생했을 때의 쌍극자 분포와 유사하다. 또한 2 PVU 면에서의 온위 분포(Fig. 2b)를 보면 310 K 이상으로 온위가 높은 지역이 온위가 낮은 지역 보다 북쪽에 위치하고 있어 Fig. 2a와 같이 블로킹의 특징을 보인다.

P2 기간 동안 블로킹이 존재한다는 것을 Fig. 2를 통하여 알았기 때문에 블로킹이 언제 어느 위치에 존재하였는지 알기 위해서 객관적 분석을 하였다. 블로

킹의 정의는 Barriopedro et al. (2010)에서 보이는 바와 같이 무척 많은데, 본 연구에서는 가장 일반적으로 여겨지는 500 hPa 지위고도의 남북 방향 기울기를 이용하여 정의하는 Tibaldi and Molteni (1990) 방법(TM 방법)과 잠재와도 2 PVU 면에서 온위의 남북 방향 기울기 특성을 이용하는 Pelly and Hoskins (2003) 방법(PH 방법)을 따라 두 가지로 분석하였다. 이 두 가지 방법 중 TM 방법은 500 hPa 등압면 자료를 이용하고, PH 방법은 등온위면 자료를 이용하여 계산하므로 서로 다르고, 또한 2 PVU 면이 200 hPa에 가까우므로 500 hPa 과는 고도 차이가 커서 두 방법에 의한 결과는 어느 정도 독립적이라 생각된다.

먼저, TM 방법은 60°N을 중심 위도로 하여 남북으로 각각 20°의 차이를 두고, 북쪽인 80°N과의 500 hPa 지위고도 기울기로부터 GHGN 지수를, 남쪽인 40°N과의 500 hPa 지위고도 기울기로부터 GHGS 지수를 아래의 식과 같이 계산하였다. 단, 매일의 500 hPa 지위고도 분포에 따라 중심 위도가 달라질 수 있는 점을 감안하여 ±5° 범위에서 중심위도를 바꾸어가며 계산하였고, 이는 아래 식에서 Δ로 표현되었다.

$$GHGN = \frac{z(\phi_n) - z(\phi_0)}{\phi_n - \phi_0}, GHGS = \frac{z(\phi_0) - z(\phi_s)}{\phi_0 - \phi_s}$$

단,  $\phi_n = 80^\circ N + \Delta$ ,  $\phi_0 = 60^\circ N + \Delta$ ,  $\phi_s = 40^\circ N + \Delta$ 이고,  $\Delta = -5^\circ, -2.5^\circ, 0, 2.5^\circ, 5^\circ$ 이다. 각 경도에서 Δ 값에 따라 중복 계산된 블로킹 지수의 최종 값은 GHGN의 경우 가장 작은 값을 선택하고, GHGS의 경우 가장 큰 값을 선택하였다. 최종 선택된 GHGN 지수가 -10 m 이하이고 또, GHGS 지수가 양일 때(GHGN < -10 m, GHGS > 0), 그 경도에서 블로킹 조건을 만족하는 것으로 보았고, 이렇게 블로킹 조건을 만족하는 경도 범위가 연속적으로 15° 이상일 때 그 경도 범위 전체를 블로킹 발생 가능 지역으로 보았다.

PH 방법은 중심 위도로부터 남북으로 각각 위도 15° 범위와 경도 5° 범위로 이루어진 두 개의 직사각형 모양 지역에서 2 PVU 면에서의 온위 값을 적분한 뒤 그 차이(B)를 아래와 같이 계산하고, B > 0인 경도범위가 15° 이상일 때 그 경도 범위를 블로킹 발생 가능 지역으로 보았다. PH 방법에서 중심 위도는 경도에 따라 달라지며, 본 연구에서는 온위의 남북 기울기를 잘 표현해 주는 50°N을 중심 위도로 정의하였다.

$$B = \frac{2}{\Delta\Phi} \int_{\phi_c}^{\phi_c + \frac{\Delta\Phi}{2}} \theta d\phi - \frac{2}{\Delta\Phi} \int_{\phi_c}^{\phi_c - \frac{\Delta\Phi}{2}} \theta d\phi$$

여기서,  $\phi_c = 50^\circ N$ ,  $\Delta\Phi = 30^\circ$ 이다. 따라서 B 값은 중심 위도로부터 남, 북으로 15° 위도 범위 안에 있는 온위를 적분한 값의 차이이다. 이 때, 중심위도를  $\phi_c + \Delta$  만큼 변화시켜 가며 계산하였고, 그 중 가장 큰 값

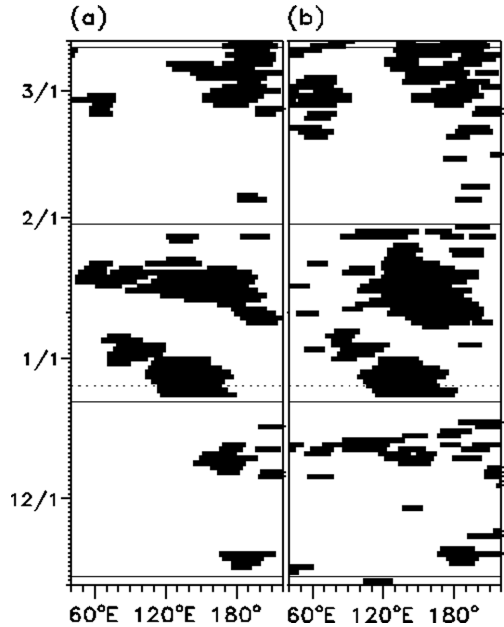


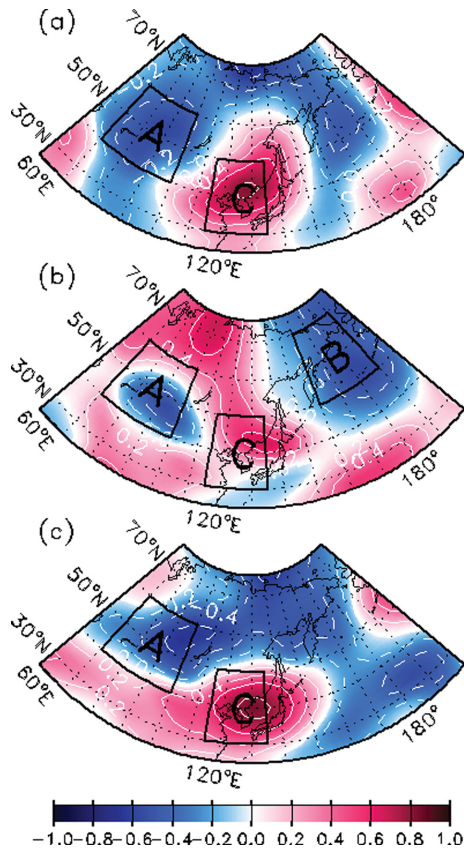
Fig. 3. Parts of longitude satisfying the blocking criterion for each day from 12 November 2010 through 12 March 2011 by using the (a) TM method, and (b) PH method. Thin solid lines denote boundaries between P1, P2, and P3, and the dotted line indicates 26 December 2010.

을 최종 B 값으로 결정하였다. 단,  $\Delta = -5^\circ, -2.5^\circ, 0, 2.5^\circ, 5^\circ$ 이다.

위의 두 방법으로 구한 블로킹 발생 가능 지역을 시간에 따라 Fig. 3에 보였다. TM 방법(Fig. 3a)과 PH 방법(Fig. 3b)으로 보인 블로킹 발생 가능 지역이 변화해 가는 모습은 전체적으로 비슷하다. 두 방법 모두 P1 기간에는 많이 나타나지 않으나 P2 기간에 120-140°E를 중심으로 블로킹 발생 가능 지역이 집중적으로 나타난다. Figure 2에서 보인 12월 26일의 위치를 Fig. 3에서 점선으로 나타내었는데 블로킹의 위치가 두 그림에서 잘 일치한다. Figure 3에서 나타낸 블로킹의 위치와 시간이 본 연구에서 살펴보고자 하는 한랭 기간과 관련이 깊음을 알 수 있다.

### 3.3 한랭지역 기온과 500-hPa 지위고도장의 관계

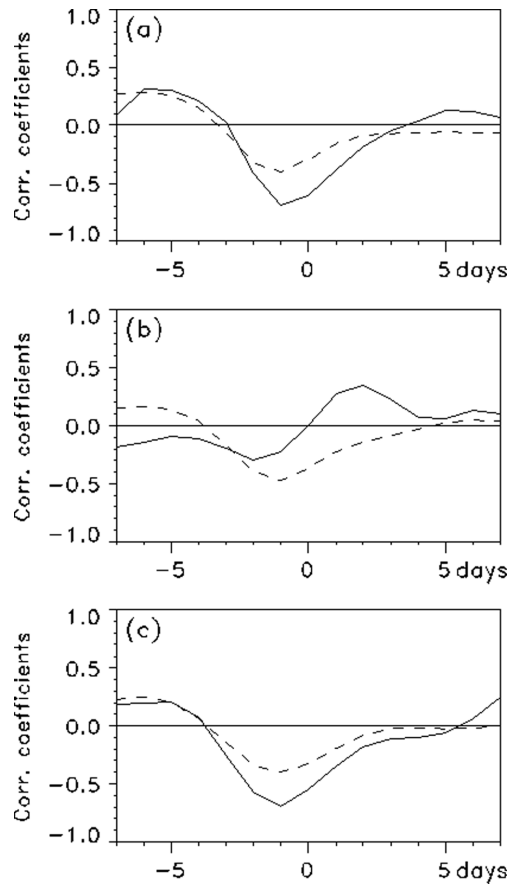
한랭지역의 기온에 영향을 미치는 블로킹 지역은 Fig. 3에서 대략적으로 나타났으나 그 지역을 좀 더 자세하게 결정하기 위하여 한랭지역 기온 아노말리의 시계열(Fig. 1)과 500 hPa 지위고도의 아노말리 시계열 사이의 상관관계를 모든 격자점에서 P1, P2, P3 기간에 대해 계산하였다(Fig. 4). 평년과 기온차이가 적은 P1과 P3 기간에는 한랭지역 북쪽에 음의 상관관계



**Fig. 4.** Correlation coefficients between the cold-area temperature anomaly and 500-hPa geopotential height anomaly field for (a) P1, (b) P2, and (c) P3. Boundaries of the area A and B, and the cold area are marked by a box and letter A, B, and C, respectively.

수가 동서로 넓게 분포하고 특히 서쪽에 강한 음의 상관계수가 보인다. 이것은 시베리아 고기압이 위치하는 한랭지역 서쪽에서의 지위고도 능의 발달이 한랭지역의 추위와 상관관계가 큼을 의미한다. P1, P3 기간에 한랭지역 서쪽에 강한 음의 상관을 보이는 지역(40-60°N, 70-100°E)을 A 지역이라고 정의하였고 Fig. 4에 나타내었다.

한랭기간인 P2 동안에는 한랭지역 북서쪽에 위치한 고위도 지역에 양의 상관이 존재하여 P1, P2 기간과는 완전히 다른 기압과 기온의 관계를 나타낸다. 평년기온에 큰 영향을 미치는 시베리아 고기압 지역의 영향도 줄어든 것으로 보인다. 한랭지역의 북동쪽에는 강한 음의 상관계수가 분포하는 지역이 있는데 이 지역을 B 지역(50-70°N, 160-190°E)이라고 정의하였다. 이 지역은 Fig. 3에서 보인 블로킹이 존재하는 지역인데, 강한 음의 상관은 한랭지역의 추위가 블로킹



**Fig. 5.** Lag-correlation coefficients between the cold-area temperature anomaly and A-area mean of 500-hPa geopotential height anomaly for (a) P1, (b) P2, and (c) P3. Solid lines and dashed lines represent 2010/11 case and climatological mean, respectively.

고기압과 관계 있음을 의미한다.

한랭지역의 기온 변화와 A 지역의 평균 500 hPa 지위고도 사이의 상관 관계를 좀 더 상세하게 이해하기 위하여 두 시계열 사이의 지연상관계수를 P1, P2, P3 기간에 대해 각각 계산 하였다(Fig. 5). 그림에서 실선은 2010/11년 자료를 이용하여 계산한 상관계수 값이고, 파선은 평년 값으로 1980~2010년 동안의 일 자료를 이용하여 매년 계산한 값을 30년 평균하였다. 평년 값을 먼저 살펴보면, P1, P2, P3 기간에 대해 모두 -1일에서 가장 큰 음의 상관관계를 보인다. 이는 과거 30년간 평균적 조건에서 겨울 내내 A 지역에서 지위고도 능이 발달한 후 1일 후에 한랭지역에서 기온의 최저값이 나타났음을 의미한다.

2010/11년의 경우를 보면 한랭지역의 기온과 A 지역의 지위고도 사이의 지연상관 곡선은 P1과 P3 기

간에 평년과 대단히 유사하다. 최대 상관계수는 평년과 같이 -1일에서 나타나며 그 값은 평년보다 더 크다. 그러나 P2 기간에는 지연상관계수의 곡선의 특징이 평년과 완전히 다르다. 이는 2010/11년의 P2 기간 동안에는 한랭지역의 기온이 시베리아 고기압 지역과 별로 관련성이 없음을 뜻하며 이는 Fig. 4b에서 이미 밝혀진 사실이다.

P2 기간 동안 한랭지역 기온 변화와 강한 음의 상관관을 보였던 B 지역의 500 hPa 지위고도에 대하여 지연상관계수를 같은 방법으로 계산하였다(Fig. 6). 곡선으로 나타난 평년 값을 보면 그 값이 매우 작아서 한랭지역 기온과 B 지역의 지위고도 사이에 의미있는 관련성이 없음을 알 수 있다. 이에 비해 2010/11년의 경우에는 0~2일 사이의 지연상관계수 값이 -0.5 정

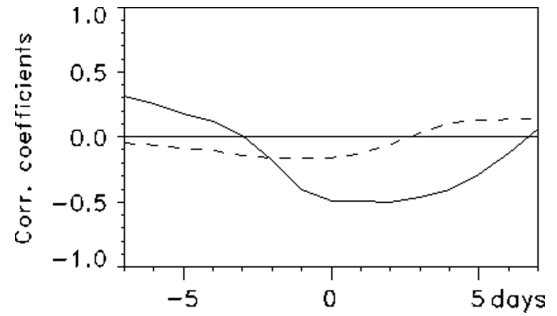


Fig. 6. Lag-correlation coefficients between the cold-area temperature anomaly and B-area mean of 500-hPa geopotential height anomaly for P2. Solid lines and dashed lines represent 2010/11 case and climatology, respectively.

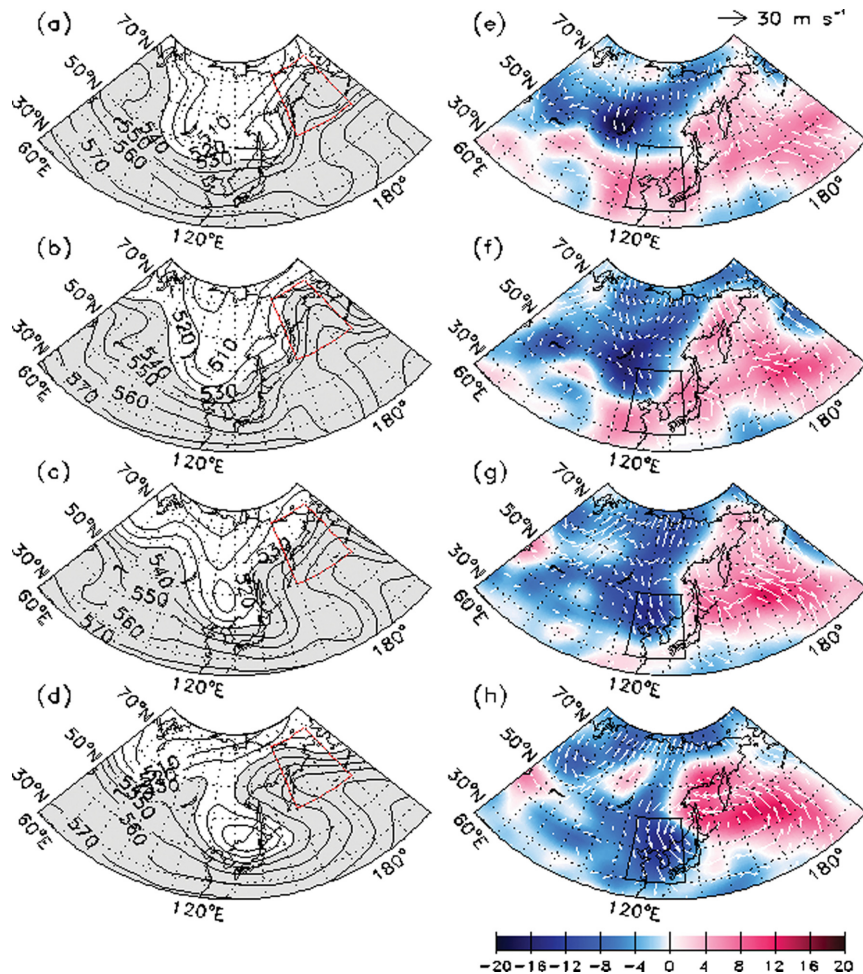
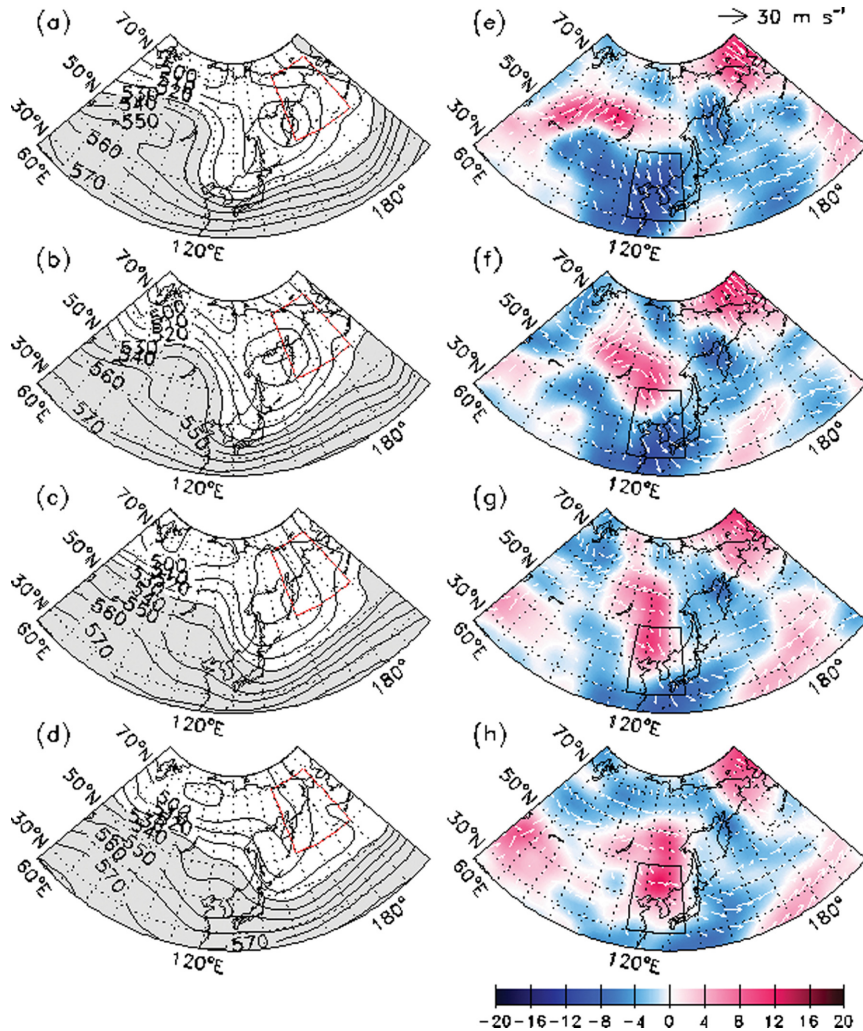


Fig. 7. 500-hPa geopotential height (area greater than 530 dam is shaded) on (a) 21, (b) 22, (c) 23, and (d) 24 December 2010, and 850-hPa temperature anomaly and wind vectors on (e) 21, (f) 22, (g) 23, and (h) 24 December 2010. Red and black boundaries denote the area B and the cold area.



**Fig. 8.** 500-hPa geopotential height (area greater than 530 dam is shaded) on (a) 29, (b) 30, (c) 31 January, and (d) 1 February 2011, and 850-hPa temperature anomaly and wind vectors on (a) 29, (b) 30, (c) 31 January, and (d) 1 February 2011. Red and black boundaries denote the area B and the cold area.

도로 80% 신뢰 수준에서 의미 있는 상관관계를 보였다. 즉, 한랭지역의 850 hPa 기온의 최저가 나타난 날 또는 하루, 이를 후에 B 지역의 500 hPa 지위고도가 가장 커지는 것을 의미한다. Figure 3에서 P2 기간에 블로킹 발생 가능 지역이 B 지역 근처에 집중적으로 나타나는 것을 보였는데, B 지역에서의 500 hPa 지위고도가 증가하는 동안 한랭지역의 기온이 최저가 된다는 것을 의미한다.

위에서 한랭지역의 기온이 P1 기간 동안에는 A 지역의 지위고도와 관계되다가 P2 기간에는 B 지역의 지위고도와 관계가 커져 바뀌는 것을 보였는데, 그 변이기간 동안에 어떤 기상형태가 나타나는지 알기 위

하여 P1 에서 P2 기간으로 바뀌는 4일(12/21~24)에 대해 500 hPa 지위고도와 850 hPa 기온 아노말리와 바람장의 분포를 Fig. 7에 보였다. P2 기간이 시작되는 12월 23일(Figs. 7c, g)과 24일(Figs. 7d, h)을 보면 500 hPa 지위고도 골이 한반도 쪽으로 깊어지고 그 북동쪽으로 블로킹이 발생하기 시작한다. 이와 함께 한랭지역의 850 hPa 기온 아노말리가 급격하게 음으로 바뀌고 그 북동쪽은 양의 기온 아노말리가 강화되며, 한랭지역에서 지위고도 분포를 따라 북동 또는 북서풍이 강화된다. 따라서, 이 기간에 한랭지역의 급격한 기온 하강이 그 동쪽의 블로킹 발생과 관련된 기상 특성 변화와 밀접히 관련되어 있는 것으로 보인다.

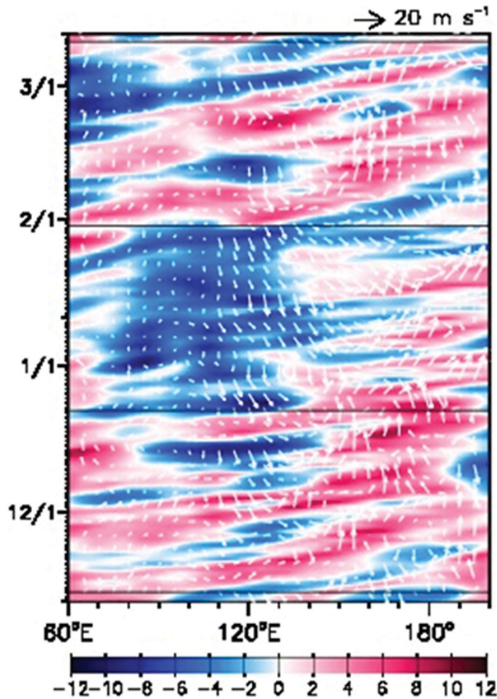


Fig. 9. Hovmoller diagram of 850-hPa temperature anomaly and wind vectors averaged over 30°-50°N. Horizontal solid lines denote boundaries between P1, P2, and P3.

P2 기간 동안 블로킹의 영향을 많이 받던 한랭지역이 그 영향을 벗어나서 P3 기간으로 바뀌는 4일(1/29~2/1)의 변이 기간 동안 나타나는 기상장을 Fig. 8에 보였다. 그 변이기간 동안 한반도 쪽으로 위치하던 500 hPa 지위고도 골의 축이 일본 쪽으로 빠르게 이동해 가고, 한랭지역의 850 hPa 기온 아노말리가 양으로 바뀐다. 또, 한반도 북쪽에 나타났던 북풍 성분이 현저히 약화되고 약한 북서풍 또는 서풍으로 바뀐다. Figures 7, 8은 일반적으로 서에서 동으로 이동하는 대기 흐름의 영향하에 있는 한랭지역이 한시적으로 북동쪽의 블로킹 영향을 강하게 받다가 39일 후에 다시 원래의 상태로 돌아가는 기상장 패턴을 잘 보인다.

Figures 7, 8에서 4일의 변이기간 동안 나타나는 한랭지역의 기온 아노말리가 바람장의 북풍 성분의 변화와 잘 일치함을 보였고, 그 두 변수의 겨울 전 기간 동안의 변화를 Fig. 9에 보였다. 850 hPa 기온 아노말리와 바람장을 한랭지역 위도대인 30°-50°N에 대해 평균하여 60°E-160°W 경도 범위에서 일변화를 보였다. P2 기간을 먼저 보면 80°-130°E 사이에서 기온 아노말리가 지속적으로 음의 값으로 나타나고, 110°-140°E 사이에서 북풍이 유지된다. 이는 P2 기간 내내 유사한 중관 패턴이 지속되는 것과 관련된다. 이에 비해 P1,

P3 기간에는 양, 음의 기온 아노말리가 번갈아 나타나고 풍향도 계속 바뀌고 있어 그 변동폭이 컸다. 특히 P1, P3 기간 동안 기온 아노말리 패턴이 시간에 따라 동진하는 모습을 볼 수 있으며, 이는 겨울철 중위도 기상패턴이 이동해가는 전형적 모습이다.

#### 4. 요약과 결론

본 연구에서는 한반도에서 2011년 1월을 중심으로 한달 이상 지속된 이례적인 추위와 블로킹과의 관계를 중심으로 조사하였다. 이례적인 추위를 특징적으로 나타낼 수 있는 동아시아 지역을 선택하여 한랭지역이라 부르고, 그 한랭지역의 850 hPa 기온 아노말리가 음으로 나타나는 39일 동안(2010년 12월 23일~2011년 1월 30일)을 한랭기간으로 정의하였다. 한랭기간을 전, 후 하여 각각 39일씩을 취해 시간 순으로 P1, P2, P3 기간으로 구분하였다. 각 기간의 기온 변화 특성을 보면 한랭기간인 P2 기간에는 평균이 낮고 변동성이 작아서 P1, P3 기간과는 뚜렷이 구분된다.

한랭기간의 추위 특성이 블로킹과 관계 있다고 생각되어 블로킹을 정의하는 대표적 두 방법인 TM 방법과 PH 방법으로 각 기간에 대하여 블로킹 발생 가능 지역을 찾아서 서로 비교하였다. 두 방법 모두 P2 기간에 120°-140°E를 중심으로 동서로 광범위하게 블로킹 가능 지역이 집중되어 나타나, P2 기간 동안 지속된 추위는 블로킹과 관련이 있음을 보인다.

P2 기간 동안 한랭지역 850 hPa 기온 변화와 500 hPa 지위고도 변화 사이에 상관관계가 큰 지역은 한랭지역 북동쪽에 위치한 B 지역으로 0~+2일 사이에 -0.5 정도의 상관관계를 보여 80% 신뢰 수준에서 의미가 있다. 이는 평년 및 P1, P3 기간에는 한랭지역 서쪽의 A 지역과의 상관계수 값이 -1일에 음으로 가장 큰 것과 차이가 있으며, P2 기간의 지속된 추위가 한랭 지역 동쪽에서 발생한 블로킹과 관련이 깊음을 보여 준다. Figure 3에서 보이는 것처럼 블로킹이 만들어지는 기간은 중관규모 기상현상의 변화기간에 비해서 길다. Figure 6이 제시하는 바는 블로킹이 형성되는 긴 과정 중에 한랭지역의 추위가 발생하고, 블로킹에 따른 고기압이 최고에 이르기 이틀 전에 기온이 가장 낮으며 그런 상태로 가장 낮은 기온이 이틀 정도 지속된다는 것이다.

한랭기간인 P2 기간을 전, 후로 일별 기상 특성을 보면 P2 기간이 시작될 때 500 hPa 지위고도 골이 한반도 주변 동아시아에서 깊게 파이고 그 동쪽으로 능이 발달하여 블로킹이 발생하기 시작하며, 한랭 지역에서 850 hPa 기온 아노말리가 급격하게 음으로 바뀌고 한반도 주변에서 북동풍 또는 북서풍이 강화된다. 이와 달리 P2 기간이 끝나면서 500 hPa 지위고도 골



이 한반도 동쪽으로 빠르게 이동하고 한랭 지역의 850 hPa 기온 아노말리가 양으로 바뀌며 한반도 주변에서 북풍 성분이 약화된다.

이상과 같은 관찰을 종합하여 2010/11년 겨울철 동아시아의 기온변화 특성을 기술하면 11월 14일부터 12월 22일까지로 정의되는 P1 기간에는 평년과 같이 시베리아 지역의 영향을 받으며, 기상패턴의 위상은 동진한다. P2가 시작되는 12월 23일 전후에 발달하는 블로킹의 영향을 받게 되면 기온의 변동성은 감소하고 음의 아노말리가 오랫동안 지속되며 기상패턴은 정체되어 있다. P2가 끝나고 P3로 들어서면서 다시 시베리아 지역의 영향을 받는 평년의 겨울기온으로 돌아간다.

### 감사의 글

자료분석 방법에 도움을 주신 김광열교수님께 감사드립니다. 본 연구는 한국연구재단의 기본연구지원사업(2013R1A1A2013107)의 지원에 의하여 이루어 졌습니다.

### REFERENCES

- Barriopedro, D., R. Garcia-Herrera, and R. M. Trigo, 2010: Application of blocking diagnosis methods to general circulation models. Part I: A novel detection scheme. *Climate Dyn.*, **35**, 1373-1391.
- Choi, W., J. Jung, and J.-G. Jhun, 2013: Characteristic features observed in the East-Asian cold anomalies in January 2011. *Atmosphere*, **23**, 1-12 (in Korean).
- Joung, C. H., 1975: A study on variation of some daily weather elements with day during polar outbreak at selected stations in South Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **11**, 1-10 (in Korean).
- \_\_\_\_\_, and H.-R. Byun, 1987: A case study of global circulation of the atmosphere during a cold surge in East Asia. *J. Korean Meteor. Soc.*, **23**, 23-33 (in Korean).
- Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.-K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter, 2002: NCEP-DOE AMIP-II REANALYSIS (R-2). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1631-1643.
- Kim, B.-M., E. Jung, G.-H. Lim, and H.-K. Kim, 2014: Analysis on winter atmospheric variability related to arctic warming. *Atmosphere*, **24**, 131-140 (in Korean).
- Kim, H.-G., K.-D. Min, K.-E. Kim, and K.-M. Lee, 1997a: Summer extraordinary low temperature in Korea and its relation to the characteristics of atmospheric circulations over northern hemisphere. Part I: Onset of the summer extraordinary low temperature and its synoptic aspects. *J. Korean Meteor. Soc.*, **33**, 137-154 (in Korean).
- Kim, H.-G., K.-D. Min, K.-E. Kim, and K.-M. Lee, 1997b: Summer extraordinary low temperature in Korea and its relation to the characteristics of atmospheric circulations over northern hemisphere. Part II: Structures and characteristics of the atmospheric circulation. *J. Korean Meteor. Soc.*, **33**, 155-177 (in Korean).
- Kim, H. J., and C. H. Joung, 1980: An observational study on the development of 500 mb level baroclinic wave during polar outbreaks. *J. Korean Meteor. Soc.*, **16**, 17-29 (in Korean).
- Lee, D.-K., S.-S. Kim, S.-U. Park, and Y.-K. Jeong, 1988: An observational study of the northern hemisphere winter circulation associated with the cold winter and the warm winter of Korea. Part I: Stationary waves. *J. Korean Meteor. Soc.*, **24**, 16-35.
- Min, S.-K., S.-W. Son, K.-H. Seo, J.-S. Kug, S.-I. An, Y.-S. Choi, J.-H. Jeong, B.-M. Kim, J.-W. Kim, Y.-H. Kim, J.-Y. Lee, and M.-I. Lee, 2015: Changes in weather and climate extremes over Korea and possible causes: A review. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **51**, 103-121.
- Moon, S. E., 1977: On the characteristics of the extraordinary weather from 1941 to 1970 in Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **13**, 51-57 (in Korean).
- Park, S.-U., and S.-S. Kim, 1987: The synoptic conditions in the East Asian region accompanying cold-air outbreaks over Korea during December 1985 through February 1986. *J. Korean Meteor. Soc.*, **23**, 56-90.
- Park, T.-W., C.-H. Ho, and Y. Deng, 2014: A synoptic and dynamical characterization of wave-train and blocking cold surge over East Asia. *Climate Dyn.*, **43**, 753-770.
- Pelly, J. L., and B. J. Hoskins, 2003: A new perspective on blocking. *J. Atmos. Sci.*, **60**, 743-755.
- Takaya, K., and H. Nakamura, 2005: Geographical dependence of upper-level blocking formation associated with intraseasonal amplification of the siberian high. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 4441-4449.
- Tibaldi, S., and F. Molteni, 1990: On the operational predictability of blocking. *Tellus*, **42A**, 343-365.
- Yoo, Y.-E., S.-W. Son, H.-S. Kim, and J.-H. Jeong, 2015: Synoptic characteristics of cold days over South Korea and their relationship with large-scale climate variability. *Atmosphere*, **25**, 435-447 (in Korean).