2011년 1월의 동아시아 한랭 아노말리 특성

최우갑* · 정지연 · 전종갑

서울대학교 지구환경과학부

(접수: 2012년 12월 28일, 수정: 2013년 7월 20일, 게재확정일: 2013년 10월 9일)

Characteristic Features Observed in the East-Asian Cold Anomalies in January 2011

Wookap Choi*, Jiyeon Jung, and Jong-Ghap Jhun

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

Abstract East Asia experienced extremely cold weather in January 2011, while the previous December and the following February had normal winter temperature. In this study National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) reanalysis data are used to investigate the characteristic features observed in the meteorological fields such as temperature, sea-level pressure, geopotential height, and wind during this winter period. In January the planetary-wave pattern is dominated by stationary-wave form in the mid-to-high latitude region, while transient waves are significant in the previous month. To understand the planetary-wave features quantitatively, harmonic analyses have been done for the 500-hPa geopotential height field. In the climatological-mean geopotential heights the wave numbers 1, 2, and 3 are dominant during the whole winter. In January 2011 the waves of number 1, 2, and 3 are dominant and stationary as in the climatological-mean field. In December 2010 and February 2011, however, the waves of number 4, 5, and 6 play a major role and show a transient pattern. In addition to the distinctive features in each month the planetary-wave patterns dependent on the latitude are also discussed.

Key words: Cold anomaly, East-Asia winter temperature, harmonic analysis, planetary wave

1. 서론

한반도가 위치한 동아시아 지역은 전지구 기후시스템의 구성 요소 중 하나인 동아시아 겨울 몬순의 영향을 받는다. 유라시아 대륙 동쪽의 시베리아 고기압과 북태평양 지역의 알류산 저기압은 동아시아 겨울철 몬순을 대표하는 지상 해면기압 배치이다. 동아시아 겨울 몬순의 변동성에 큰 영향을 미치며 겨울철 동아시아 지역의 급격한 기온 하강의 주된 원인이 되는 시베리아 고기압에 대한 많은 선행 연구들이 있다 (Ding and Krishnamurti, 1987; Wu and Wang, 2002; Park *et al.*, 2011). Jhun and Lee(2004)는 시베리아 고

기압뿐만 아니라 알류산 저기압의 발달 또한 동아시아의 강한 겨울 몬순과 관계가 있음을 밝혔다. 또한 Ryoo *et al.*(2002)은 시베리아 고기압과 알류산 저기압이 동서 방향 기압 경도를 만들어 아시아대륙 동쪽 해안선상에 북풍을 발생시킨다고 밝혔다.

최근 한반도 겨울철 기온 변동성과 대규모 대기 순환과의 상관성에 대한 연구들이 활발히 이루어지고 있다. 임과 안(2004)은 남방진동지수, 북극진동 지수, 시베리아 고기압 지수, 겨울몬순 지수의 한반도 겨울철 기온 변동성에 대한 기여도를 제시하였다. 그 결과 한반도 겨울철 기온 변동성은 남방진동지수보다 북극진동 지수와 더 높은 상관성이 있으며 겨울몬순 지수와 시베리아 고기압 지수와도 높은 상관성을 나타냄을 밝혔다. 김과 안(2010)은 겨울철의 주된 전지구 규모 대기 순환의 패턴은 겨울철 평균과 12, 1, 2월에 나타나는 양상이 서로 다르며, 전지구 규모 대

*Corresponding Author: Wookap Choi, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul 151-747, Korea.
Phone : +82-2-880-6711, Fax : +82-2-883-4972
E-mail : wchoi@snu.ac.kr

기 순환 패턴들 중에서도 한반도 겨울철 기온은 주로 북극진동 지수의 영향을 많이 받지만 북극진동 지수 외에 한반도 겨울철 기온에 크게 영향을 주는 패턴은 각 달마다 다르게 나타남을 제시하였다. 또한 임 등 (2012)은 우리나라 겨울철 평균기온이 상승하는 1986년을 기준으로 전기와 후기로 나누어 북반구 대기 순환 지수들과의 상관성의 변화를 제시하였다. 그 결과 한반도 겨울철 기온 변동에 주요하게 작용하는 북반구 대기 순환이 시베리아 고기압과 알류산 저기압에서 후기에 북극진동으로 바뀌었음을 밝혔다. 특히 Jeong and Ho(2005)는 북극진동이 음의 위상일 때 동아시아에 한파가 발생하기에 유리하다고 제시하였다. 북극진동이 음의 위상일 때 500 hPa 지위고도(geopotential height)에서 아시아 대륙 동쪽 해안의 기압골이 깊어지고 300 hPa 동서풍이 강해짐을 보여주고, 이러한 패턴은 한파(cold surge)가 발생하기 유리한 조건임을 밝혔다.

2011년 1월에 한반도에는 이례적인 추위가 기록되었다. 기상청(2011)에 따르면 2011년 1월에는 전국 48개 관측지점을 평균한 일 최고기온이 0.7°C 로 평년값(1981~2010 평균)인 4.5°C 보다 3.8°C 가 낮아 1973년

Fig. 1. Average 9-day running mean daily surface temperature from the 61-station data in South Korea from 1 December through 28 February for the 26-year period from 1986/87 to 2011/12. Black dashed curve denotes the mean temperature for 26 years on each day. Red curve denotes the daily temperature in 2010/11 winter.

이후 가장 낮았다. 또한 전국 평균 일 최저기온이 -10°C 이하인 일수는 13.9일로 평년보다 8.3일이 많아 1973년 이후 가장 많은 일수를 기록하였으며, 일

Fig. 2. Monthly-mean temperature from the 61-station data in South Korea in (a) December from 1986 through 2011, (b) January and (c) February from 1987 through 2012. Thick solid lines denote the 26-year averages from 1986 to 2011 for December and from 1987 to 2012 for January and February. Dotted lines denote ± 1 standard deviation from the 26-year average.

최고기온이 0°C 미만인 일수는 12.2일로 평년보다 7.7일이 많아 1973년 이후 두 번째로 많았다.

2010/11년 한반도의 겨울 기온이 과거의 겨울보다 얼마나 낮았는지 비교하기 위하여 1986/87 겨울(12, 1, 2월)부터 2011/12 겨울까지 26년간의 남한의 지상기온 변화를 Fig. 1에 보였다. 하나의 곡선은 각 해의 겨울에 대하여 남한의 61개 관측 지점에서 관측된 기온을 평균한 후 9일 이동평균(running mean)한 것이다. 관측지점의 지리적 위치는 김과 안(2010)의 Fig. 1에 있다. 30년 대신 26년의 자료를 사용한 이유는 Jung *et al.*(2002)에서 밝힌 바와 같이 한반도 겨울철 기온이 1980년대 중반 이후 뚜렷한 상승 경향을 보이기 때문이다. 최근 26년의 1월의 일 평균기온과 2011년 1월의 기온을 비교하면 2011년 1월의 기온이 현저히 낮았음을 알 수 있다.

2011년 1월의 추위에 비해 그 한달 전인 12월에는 평균에서 많이 벗어나지 않음을 알 수 있다. 또한 2월에도 다시 기온이 평균에 가깝게 회복된 것을 알 수 있다. 겨울 3달 동안 기온이 어떻게 진행되었는지 알기 위하여 12, 1, 2월의 한반도 61개 관측지점의 월 평균기온을 Fig. 2에 나타내었다. 2010년 12월(Fig. 2a)의 월 평균기온은 -0.72 표준편차(σ)로 26년간의 12월 평균값에 가까운 값을 갖는다. 반면 2011년 1월(Fig. 2b)에는 -3.20σ 로 1987년 이후로 가장 낮은 월 평균기온을 보이며, 2월(Fig. 2c)에는 0.28σ 로 다시 평년에서 많이 벗어나지 않는다. 이로부터 2010/11년 겨울은 12월과 2월에 비해 1월이 두드러지게 기온이 낮았음을 알 수 있다.

본 연구에서는 평년으로부터 많이 다르지 않은 2010년 12월 이후 이례적으로 기온이 낮았던 2011년 1월의 기온 하강의 원인을 알아보고자 2010/11년 겨울의 대규모 순환장의 특성을 조사하였다. 2절에서는 사용된 자료에 대하여 기술하였고, 3절에서는 다양한 기상 변수가 나타내는 특성에 대하여 기술하였다. 4절에서는 계절의 진행에 따라 변화하는 행성파의 특성을 정량적으로 분석하였고, 마지막으로 5절에서 요약과 토론을 하였다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서 사용한 기상청 관측 자료는 남한의 61개 관측지점의 1986년부터 2012년까지 27년간의 겨울철(12월, 이듬해 1월, 2월) 일 평균기온이다. 또한 National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) 재분석 자료의 해면기압(sea-level pressure), 동서풍(zonal wind), 남북풍(meridional wind), 기온, 지위고도, 지상기온(surface air temperature)을 사용하였다. 해면기압,

동서풍, 남북풍, 기온, 지위고도 자료는 위도방향으로 90°S 부터 90°N 까지 2.5° 간격으로, 경도방향으로 0° 부터 360° 까지 2.5° 간격으로 주어지고, 연직방향으로 1000 hPa부터 10 hPa까지 17개의 등압면 자료로 이루어져 있다. 지상기온 자료는 지표면으로부터 2m 높이에서 관측한 기온 자료로 Gaussian Grid로 되어 있다. 경도 방향으로는 0° 부터 360° 까지 1.875° 의 간격으로 균일하게 이루어져 있고, 위도 방향으로는 88.542°S 부터 88.542°N 까지 비 균일한 간격으로 이루어져 있다. 사용한 자료의 기간은 1981년부터 2011년까지 31년이다. 본 연구에서 평년값(climatological mean)은 1981년부터 2010년까지 30년의 평균으로 정의하였고 매 윤년의 2월 29일은 편리를 위해 분석에서 제외하였다.

3. 기상 특성

3.1 2011년 1월 기온 특성과 온도이류

2011년 1월 한반도의 월 평균기온은 1절에서 보인 바와 같이 이례적으로 낮았는데 동아시아 지역에서도 비슷한 패턴이 나타나는지 알기 위하여 NCEP/NCAR 재분석자료의 지면기온의 아노말리(anomaly)를 Fig. 3에 보였다. 동아시아 지역, 특히 위도 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$, 경도 $60^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 영역에서 지상기온은 강한 음의 아노말리를 보이며 전지구적으로도 가장 추웠던 지역임을 나타낸다. 따라서 2011년 1월은 한반도뿐만 아니라 동아시아 지역도 평년보다 기온이 많이 낮았음을 알 수 있다. 이와 같이 Fig. 3에 나타난 낮은 지상기온에 가장 큰 영향을 미친 것은 온도이류(thermal advection)로 여겨진다. 온도이류에 영향을 주는 850 hPa 월 평균기온과 바람장의 아노말리를 2011년 1월에 대해 보았다(Fig. 4a). 동아시아 지역의 기온은 음의 아노말리를 보이며, 특히 시베리아 고기압이 존재하는 위도 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 과 경도 $80^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 영역에서 가장 큰 음의 아노말리를 보인다. 또한 바람장에서는 한반도를 기준으로 서쪽에서 고기압성 바람의 아노말리가, 동쪽에서 저기압성 바람의 아노말리가 나타난다. 특히 한

Fig. 3. Anomalies of monthly-mean surface air temperature (K) in January 2011.

Fig. 4. (a) Anomalies of 850-hPa temperature (contour lines in K) and wind vector (arrows) in January 2011. Black, red and blue contours denote the zero, positive and negative temperature anomalies, respectively. (b) Anomalies of thermal advection (K day^{-1}) at 850 hPa in January 2011.

반도에서는 평년보다 북풍이 강하게 나타났으며, 강한 북풍으로 인해 북쪽으로부터의 차가운 공기의 이류를 짐작할 수 있다. Figure 4b는 2011년 1월 850 hPa에서 온도이류의 아노말리를 나타낸다. 동아시아의 넓은 지역에 걸쳐 음의 온도이류 아노말리가 나타나며 특히 한반도와 일본을 포함한 지역에서 한랭이류가 평년에 비해 컸다. 온도이류가 한랭 아노말리의 모든 것을 설명하리라 생각하지 않으나 따라서, 동아시아 지역의 이례적 추위의 가장 큰 원인은 이러한 한랭이류의 장기간 지속으로 추정된다.

3.2 해면기압과 지위고도 분포

위에서 언급한 한랭 이류의 아노말리가 1월에 크게 나타난 원인을 알기 위하여 기압패턴을 볼 필요가 있다. 2010/11 겨울 석 달의 시베리아 고기압과 알류산 저기압의 발달 정도를 알기 위해 Fig. 5에 해면기압의 아노말리를 보였다. 12월(Fig. 5a)에는 시베리아 고기압 위치에서 평년보다 약 0~4 hPa 정도 낮아 고기압이 약했고, 알류산 저기압은 20 hPa 이상 커서 저기압의 발달 또한 약했다. 반면에 1월(Fig. 5b)에는 평년에 비해 시베리아 고기압 위치에서 4~12 hPa의 양의 아노말리가 나타나고, 알류산 저기압 위치에서는 0~8 hPa 정도 음의 아노말리가 나타나서 시베리아 고기압과 알류산 저기압 모두 발달하였음을 알 수 있다. 2월(Fig. 5c)에는 시베리아 고기압은 평년 수준을 회복한 반면 알류산 저기압은 12월과 비슷하게 다시 기압이 높아졌다. 이로부터 2010/11년 겨울의 해면기압

Fig. 5. Anomalies of monthly-mean sea-level pressure (hPa) in (a) December 2010, (b) January 2011, and (c) February 2011. Black, red and blue contours denote the zero, positive and negative temperature anomalies, respectively.

은 시베리아 고기압보다 알류산 저기압의 변동성이 더 컸고, 12월과 2월에는 시베리아 고기압과 알류산 저기압의 발달이 평년보다 약한 반면, 1월에는 두 기압이 모두 발달했음을 알 수 있다.

2010/11 겨울 동안의 각 달 동안에 해면기압이 어떻게 변화하는지 알기 위하여 각 달을 10일씩 초순(1일~10일), 중순(11일~20일), 하순(21일~30일)으로 나누었다. 2월 하순은 21일부터 28일까지로 정의하였다. 시베리아 고기압과 알류산 저기압이 위치한 30° ~ 60°N 영역에서 경도에 따른 기압배치를 보면 12월(Figs. 6a~c)에 경도 180° 부근에서 알류산 저기압 사이로 기압이 증가하여 기압의 분포가 1월(Figs. 6d~f)에 비해서 복잡한 양상을 보인다. 시베리아 고기압은 12월 하순(Fig. 6c)에 발달하기 시작하여 1월 초순에 최대(Fig. 6d)가 되고, 그 위치와 기압의 강도는 거의 1월 한달 내내 유지된다. 이러한 고정적인 기압 배치는 Fig. 4a

Fig. 6. Ten-day mean sea-level pressure (hPa) in (a)~(c) December 2010, (d)~(f) January 2011, and (g)~(i) February 2011. The periods for each ten days are from 1 to 10, from 11 to 20, and from 21 to 30 (28 for February), respectively.

에 나타난 북풍 아노말리를 결정하게 되므로, 2011년 1월 거의 한달 동안 지속되었던 추위와 연관이 있을 것으로 생각된다. 2월 초순(Fig. 6g)에는 시베리아 고기압과 알류산 저기압의 세기가 감소하고 12월과 마찬가지로 경도 180° 부근에서 알류산 저기압 사이로 기압이 상승하여 기압배치가 1월에 비해 복잡한 양상을 나타낸다. 이러한 기압 패턴은 지구를 감싸는 대규모 행성파의 성질에 따라 결정되는데, 이에 대하여 4절에서 기술한다.

2010/11 겨울 동안의 전지구적인 대규모순환의 특성을 알기 위하여 500 hPa의 지위고도와 그 아노말리를 Fig. 7에 보였다. 일반적으로 겨울철에 동아시아 지역에 나타나는 500 hPa 기압골은 동아시아의 겨울 몬순을 설명하는 중요한 요소 중의 하나이다. 동아시아 지역의 겨울 몬순 시작과 기온 하강이 500 hPa 기압골의 깊이와 관련이 있고 기압골이 깊을 때 겨울 몬순이 강하다(Qiu and Wang, 1984; Li, 1988; Jhun and Lee, 2004). 동아시아 기압골 뒤쪽에서 대규모의 하강 운동이 복사냉각과 함께 일어나며 이것은 시베리아 고기압의 발달에 기여하게 되어 동아시아로 찬공기가 유입된다(Zhang *et al.*, 1997). 2010년 12월의

아노말리(Fig. 7d)에서는 알류산 저기압 위치에 해당되는 경도 180°에서 발달한 아노말리 고기압이 해면 기압의 아노말리(Fig. 5a)와 유사한 위치에 나타나고, 이 고기압성 아노말리에 의해 기압능이 강화된다(Fig. 7a). 500 hPa 지위고도의 동아시아 기압골은 일반적으로 한반도와 일본이 위치한 경도를 따라 넓게 나타나는데, 1월의 아노말리(Fig. 7e)를 보면 한반도와 일본 부근에서 음의 값이 보이므로 이 지역에서의 기압골이 더욱 깊어졌음을 의미한다. 이 결과는 강한 동아시아 겨울 몬순을 설명하는 특성과 일치한다. 또한 50°N을 경계로 북쪽으로는 양의 아노말리가, 남쪽으로는 음의 아노말리가 나타나는데 이러한 분포는 남북방향의 기압경도를 크게 한다. 이는 Fig. 7b에서 나타난 남북방향으로 조밀한 간격의 지위고도 등치선의 분포와 일치한다. 2월의 아노말리(Fig. 7f)에서는 해면 기압 분포와 유사하게 경도 180°의 알류산 저기압 위치로부터 한반도까지 넓게 발달한 아노말리 고기압이 나타난다. 또한 50°N 북쪽으로는 음의 아노말리가 나타나는데 이것은 1월의 아노말리 분포와 반대되는 것으로 남북방향 기압경도가 작아졌음을 의미한다. 이로 인해 1월에 비해 동아시아 기압골이 얕고 지위고

Fig. 7. Monthly-mean geopotential height (dam) at 500 hPa in (a) December 2010, (b) January 2011, and (c) February 2011, and their anomalies in (d) December 2010, (e) January 2011, and (f) February 2011. Black, red and blue contours denote the zero, positive and negative anomalies, respectively.

도 등치선의 간격이 넓어진 것을 볼 수 있다(Fig. 7c).

2010/11년 겨울의 500 hPa 지위고도의 아노말리(Figs. 7d~f)는 해면기압의 아노말리 분포(Fig. 5)와 유사함을 보이며 순압성(barotropic) 패턴을 보인다. 이러한 순압 구조가 대기 상층까지 유지되는지 보기 위하여 다른 고도에서의 지위고도 아노말리를 Fig. 8에 보였다. 850 hPa, 700 hPa, 300 hPa는 대류권, 그리고 200 hPa, 100 hPa, 70 hPa는 성층권에 속한다. 시베리아 고기압은 고도가 높아질수록 아노말리가 약하게 나타나지만 알류산 저기압은 높은 고도까지 연직으로 잘 발달해 있다. 지위고도의 아노말리는 연직 방향으로 보았을 때 수직으로 유사한 분포를 보여 한랭 아노말리의 구조가 순압성임을 보인다. 따라서 2011년 1월 한달 내 내 지속된 동아시아의 한랭 아노말리는 공간적으로 대단히 큰 규모의 현상으로 추정된다.

3.3 300 hPa 동서풍 분포

동아시아 겨울 몬순의 대표적인 특징 중 하나는 제

트기류에 나타나며 300 hPa에서 서풍의 최대값이 일본 남부에 위치한다. 시베리아 고기압이 발달함에 따라 북서풍이 강해지면 북으로부터 찬 공기가 남쪽으로 유입되어 남북 온도 경도가 더욱 커지게 되고 온도풍 관계에 의해 더욱 강한 제트기류를 만들게 된다(Jhun and Lee, 2004). 2010/11년 겨울의 제트기류 분포를 보기 위하여 300 hPa 동서풍과 그의 아노말리를 Fig. 9에 보였다. 서풍의 최대값은 일본 남부에 나타나며(Figs. 9a~c) 석 달 중 1월에 서풍이 가장 강했다. 1월의 아노말리 분포는 한반도와 일본 남부를 지나는 제트기류가 평년보다 10 m s^{-1} 이상 강해졌음을 보여 준다(Fig. 9e).

4. 겨울철 500 hPa 행성파의 변화

Figure 6에서 언급하였듯이, 1월에는 동서 방향에 대한 행성파의 스케일이 크고 단순한데 비하여 12월과 1월에는 스케일이 작고, 시간에 따른 변화도 크다.

Fig. 8. Anomalies of monthly-mean geopotential height (dam) at (a) 850, (b) 700, (c) 300, (d) 200, (e) 100, and (f) 70 hPa in January 2011. Black, red and blue contours denote the zero, positive and negative anomalies, respectively.

이와 같은 동서방향의 파동 변화를 정량화하기 위하여 조화분석(harmonic analysis)을 이용하였다. 대규모 순환의 대표적인 변화를 알기 위하여 500 hPa 지위고도를 선택하였고, 위도 $30^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{N}$ 구간에서 2.5° 간격으로, 정해진 위도에서는 경도방향으로 2.5° 간격의 144개 자료를 이용하여 계산하였다.

500 hPa의 지위고도를 12월 1일부터 2월 28일까지 매일 30년에 대하여 평균하여 평년값을 구하였고, 각 위도에 대하여 조화분석한 행성파의 진폭(amplitude)이 특정 파수에 대하여 어떻게 나타나는지 보기 위해 파수 1부터 4까지 Figs. 10a~d에 나타내었다. 파수가 커질수록 진폭이 작아지는데, 이는 30년 평균된 기압 패턴이 정체상태(stationary)의 장파 특성을 보이는 것과 일치한다. 평년의 겨울에 파수 1부터 4까지의 파수 중 파수 1의 진폭이 가장 크며 고위도에서 보다 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 에서 더욱 두드러지게 나타난다. 시간에 따른 변화를 보면 파수 1의 최대값이 12월부터 점점 남하하다가 1월 중에 가장 남쪽까지 남하하고 2월로 접어들면서 점차 북상하는 양상을 보인다. 파수 2(Fig.

10b)는 파수 1에 비해 고위도까지 더 큰 진폭을 갖는다. 파수 2는 겨울철에 500 hPa 지위고도에서 나타나는 기압골을 잘 설명해 준다. 시간에 따른 변화를 보면 기압골이 발달하기 시작하는 12월보다 기압골이 더 깊게 발달하는 1월과 2월에 진폭이 더 크게 나타난다. 파수 3(Fig. 10c)은 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 에서 진폭이 크며, 파수 2가 작게 나타나는 시기인 1월 중순경부터 2월 초순 말까지 진폭이 크게 나타난다. 파수 4(Fig. 10d)는 진폭의 크기가 파수 1, 2, 3에 비해 작은 편이다.

2010/11년 겨울철 사례(Figs. 10e~h)는 평년 겨울과 많은 차이를 보인다. 파수 1(Fig. 10e)은 평년에 비해 고위도 지역에서 진폭이 크다. 평년에 파수 1의 진폭이 큰 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 를 보면 12월과 2월에 비해 1월에 진폭이 더 크다. 파수 2(Fig. 10f)의 진폭은 500 hPa 지위고도에서 기압골이 잘 나타나는 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 에서 시간에 따른 변화를 보면 12월 초, 중순보다 12월 하순부터 1월 중순까지 크게 발달하였고, 그 이후의 시기에 더 북상하여 큰 진폭이 나타난다. 파수 3(Fig. 10g)은 평년 겨울에 진폭이 큰 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 에서 보면, 파수

Fig. 9. Monthly-mean zonal wind (m s^{-1}) at 300 hPa in (a) December 2010, (b) January 2011, and (c) February 2011, and their anomalies (m s^{-1}) in (d) December 2010, (e) January 2011, and (f) February 2011. Black, red and blue contours denote the zero, positive and negative anomalies, respectively.

2의 진폭이 작은 시기에 파수 3의 진폭이 커지는 양상이 보인다. 파수 4(Fig. 10h)는 평년 겨울에 비해 12월과 2월에 진폭이 크다. 또한 시간에 따른 변화를 보더라도 1월보다는 12월과 2월에 진폭이 크게 나타난다. 이는 2010/11년 겨울 500 hPa 지위고도를 순 별로 분석한 결과와 일치한다. 또한 500 hPa 지위고도의 위상이 비교적 정제되어 있는 2011년 1월에는 파수 1, 2가 두드러진 반면 12월과 2월에는 파수 4가 두드러졌다.

500 hPa 지위고도를 조화분석하여 얻은 위상은 각 위도에서 특정 파수 성분이 최대값을 갖는 경도(0° ~ 360°)로 정의하였다. 30°N 부터 80°N 까지 위상의 변화를 날짜에 따라 나타낸 것이 Fig. 11이다. 평년 겨울에 파수 1(Fig. 11a)의 변화를 보면 50°N 을 기준으로 북쪽은 시간에 따라 위상이 계속 변하는 반면 남쪽은 시간에 따라 위상이 크게 변하지 않고 파동이 정제되어 있다. 파수 2(Fig. 11b)는 파수 1보다 더 넓은 위도 범위에 대해 파동의 정제성을 보인다. 2010/11년 겨울의 경우 파수 1(Fig. 11c)은 50°N 을 기준으로 남쪽과

북쪽에서 위상의 변화에 다른 양상을 나타낸다. 50°N 이북은 평년과 유사하게 시간에 따른 위상의 변화가 크지만 30° ~ 50°N 위도대에서는 시간에 따른 위상의 변화가 평년과 다르게 나타난다. 12월과 2월에 비해 1월에 비교적 정제된 양상을 보인다. 파수 2(Fig. 11d) 또한 50°N 을 기준으로 남쪽과 북쪽에서 위상의 변화가 다르게 나타난다. 50°N 남쪽에서는 북쪽에 비해 위상이 크게 변하지 않는다.

각 위도에 따라 행성파의 진폭과 위상이 많이 다르므로 단순화하기 위하여 위도대를 20° 씩 나누어 평균하는 것이 편리하고, 50°N 을 경계로 선택하였다. 30° ~ 50°N 지역에 대하여 지위고도를 위도에 대하여 평균하여 “중위도대”(middle-latitude band)라고 정의하고, 50° ~ 70°N 지역을 평균하여 “고위도대”(high-latitude band)라고 정의하였다. Figs. 12와 13에 보인 결과는 위도에 대하여 평균된 지위고도로부터 구한 진폭과 위상을 이용한 것이다.

Figure 10에서 나타난 것처럼 평년 겨울에는 파수

Fig. 10. Amplitude (m) of daily 500 hPa geopotential height for wave numbers (a) 1, (b) 2, (c) 3, and (d) 4 of the climatological data from 1 December through 28 February. (e)~(h) are the same as in (a)~(d), respectively, but for the winter of 2010/11. White area indicates the amplitude larger than 150 m.

Fig. 11. Phase (degree in longitude) of daily 500 hPa geopotential height for wave numbers (a) 1 and (b) 2 from the climatological data from 1 December through 28 February. (c) and (d) are the same as in (a) and (b), respectively, but for the winter of 2010/11. Thick line can be interpreted as one line.

1, 2, 3이 두드러지게 나타난다. 이는 각 파수의 설명 분산(explained variance)을 계산하면 더욱 뚜렷하게 나타난다. 파수 1, 2, 3의 설명분산의 합과 파수 4, 5, 6의 설명분산의 합을 Fig. 12에 보였다. 평년 겨울의

파수 1, 2, 3의 합(Figs. 12a, c)은 중위도대와 고위도대 모두 약 90% 이상을 차지하며 파수 4, 5, 6의 합(Figs. 12b, d)은 약 10% 이하를 차지한다. 따라서 겨울철 500 hPa 지위고도는 파수 1, 2, 3으로 대부분 설

Fig. 12. Sum of the explained variances (%) of daily 500 hPa geopotential height for wave numbers (a) 1, 2, and 3, and (b) 4, 5, and 6 for the middle-latitude band from 1 December through 28 February. (c) and (d) are the same as in (a) and (b), respectively, but for the high-latitude band. Black and red curves denote the climatological and 2010/11 values, respectively.

Fig. 13. Phase (degrees in longitude) of daily 500 hPa geopotential height for wave numbers (a) 1, (b) 2, and (c) 3 from 1 December through 28 February for the middle-latitude band. (d)~(f) are the same as in (a)~(c), respectively, but for the high-latitude band. Black and red curves denote the climatological and 2010/11 values, respectively.

명 가능하다고 할 수 있다. 그러나 2010/11년 겨울에는 12월과 2월에 파수 4, 5, 6의 설명분산의 합이 평년에 비해 크다. 특히 중위도대(Fig. 12b)에서는 파수 4, 5, 6의 역할이 1, 2, 3보다 더 큰 기간도 있을 정도로 중요하다. 고위도대(Fig. 12d)에서는 그 중요도가 중위도보다는 적지만 역시 1월보다 12월과 2월에 크게 나타난다.

겨울철 500 hPa 지위고도 파동을 대부분 설명할 수 있는 파수 1, 2, 3의 파동성분이 시간에 따라 동서방

향으로 얼마나 진행하였는지 알기 위하여 날짜에 따른 각 파수의 위상변화를 Fig. 13에 보였다. 파수 1은 중위도대에서 12월과 2월에 비해 1월에 평년과 유사한 위상으로 정체되어 있는 것이 보인다(Fig. 13a). 그러나 고위도대에서는 12월에 비해 1월과 2월에 시간에 따른 위상변화가 더 크다(Fig. 13d). 파수 2는 중위도대에서 12월과 1월에 평년과 유사하게 정체되어 있는 양상으로 나타나지만 2월에는 시간에 따른 위상변화가 크다(Fig. 13b). 고위도대에서는 중위도대와는

다르게 1월 중에 위상변화가 크다(Fig. 13e). 파수 3은 중위도대에서 12월에는 평년과 위상도 다르게 시간에 따른 변화도 크지만 1월에는 평년과 유사한 위상으로 정체된 양상을 보인다. 또한 2월에는 파수 1, 2와 마찬가지로 시간에 따른 위상변화가 있음이 보인다(Fig. 13c). 그러나 고위도대에서는 1월 중에 시간에 따른 위상 변화가 가장 크게 나타난다. 즉 2011년 1월에는 중위도대에서는 12월과 2월에 비해 파수 1, 2, 3의 위상이 시간에 따라 크게 변하지 않고 정체되어 있는 양상이나 고위도대에서는 1월 중에 가장 급격한 위상변화를 보인다.

5. 요약과 결론

2011년 1월에 한반도는 이례적으로 기온이 매우 낮았다. 반면 2011년 1월의 한달 전후인 12월과 2월에는 평년과 많이 다르지 않았다. 본 연구에서는 2011년 1월의 동아시아에 나타난 강추위의 원인을 이해하기 위하여 겨울 3달 동안에 대하여 NCEP/NCAR 재분석 자료의 여러 가지 기상변수의 특성을 분석하였다.

동아시아 지역에 나타난 한랭 아노말리는 평년보다 강한 북풍으로 인해 북쪽으로부터의 차가운 공기의 이류가 있었기 때문일 것으로 생각된다. 시베리아 고기압과 알류산 저기압이 발달하면 동서 방향 기압 경도를 만들어 아시아대륙 동쪽 해안선상에 북풍을 발생시키는 것으로 알려져 있다(Ryoo *et al.*, 2002). 따라서 2010/11년 겨울의 해면기압 분포를 분석한 결과 12월과 2월은 시베리아 고기압과 알류산 저기압의 발달이 평년에 비해 약화된 반면에 1월에는 시베리아 고기압과 알류산 저기압 모두 발달하였다. 2010/11년 겨울내 해면기압의 변동성을 더 자세히 보기 위하여 초순, 중순, 하순으로 나누어 분석한 결과 2011년 1월에는 시베리아 고기압과 알류산 저기압이 발달한 위치와 기압의 강도가 거의 한달 내내 지속적으로 유지되었다. 이러한 고정적인 기압 배치가 2011년 1월 거의 한달 동안 지속되었던 추위와 연관이 있을 것으로 추정된다.

2010/11년 겨울 해면기압의 아노말리 분포는 500 hPa 지위고도의 아노말리 분포와 유사하기 때문에 순압성의 존재를 암시한다. 2011년 1월의 지상으로부터 성층권까지 6개의 고도에서 분석한 지위고도의 아노말리는 이와 같은 순압성을 증명한다. 특히 알류산 저기압은 성층권에 이르기까지 같은 지역에 발달해 있다.

시베리아 고기압이 발달함에 따라 북서풍이 강해지면 북으로부터 찬 공기가 남쪽으로 유입되어 남북 온도 경도가 더욱 커지게 되고 온도풍 관계에 의해 300 hPa에서 더욱 강한 제트기류를 만들게 된다(Jhun and Lee, 2004). 2010/11년 12, 1, 2월의 300 hPa에서의 동

서풍의 아노말리 분석에서는 겨울 석 달 중 1월에 한반도와 일본 남부를 지나는 제트기류가 가장 강하며 평년보다 10 m s^{-1} 이상 강해졌음을 보인다.

500 hPa 지위고도의 월 변동(Fig. 7)을 보면 1월과 2월의 파수는 뚜렷한 차이를 보이지 않지만, 12월은 1월에 비해 기압골과 기압능이 더 많이 나타나 1월보다 12월에 파수가 더 컸음을 보여준다. 이러한 파동의 성질을 정량적으로 분석하기 위하여 500 hPa 지위고도를 조화분석하였다. 500 hPa 지위고도의 위상이 비교적 정체되어 있는 2011년 1월에는 파수 1, 2가 두드러진 반면 12월과 2월에는 파수 4가 두드러진다. 이와 같은 사실은 설명분산으로 이해할 수 있는데, 중위도대에서 파동의 정체가 나타나는 2011년 1월에는 평년과 같이 파수 1, 2, 3이 주도적이거나 12월과 2월에는 파수 4, 5, 6이 중요하게 나타난다. 이로부터 2010/11년 겨울 12월과 2월에는 상대적으로 단파가 두드러졌음에 반해서 1월에는 장파가 더 큰 비중을 차지했음을 알 수 있다.

행성파는 그 시기와 위도에 따라 중요한 파수가 결정되는데, 위상속도도 다르게 나타난다. 겨울철 500 hPa 지위고도 파동을 대부분 설명할 수 있는 파수 1, 2, 3에 대하여 위상변화를 보면(Fig. 13), 1월에는 중위도대에서 12월과 2월에 비해 파수 1, 2, 3의 위상이 시간에 따라 크게 변하지 않고 정체되어 있는 양상이나 고위도대에서는 1월이 가장 급격한 위상변화를 보인다.

본 연구에서는 2011년 1월에 동아시아 지역에서 이례적으로 추웠던 원인을 이해하는 노력을 하였다. 앞으로 과거의 다른 추웠던 사례를 더 알아보고 본 연구 결과와 비교해 보고자 한다. 특히 위도대에 따른 행성파의 위상속도 변화가 다른 해에도 나타나는지 조사할 필요가 있으며 비슷한 패턴의 행성파 특성이 나타나면 그 역학적 메커니즘을 분석할 필요가 있다. 그러한 메커니즘을 밝히면 겨울철 계절 규모의 동아시아 기온 예측에도 응용이 가능하리라 본다.

감사의 글

연구조언을 해주신 허창희 교수와 컴퓨터 프로그래밍과 자료분석에 도움을 준 김유진과 김진수에게 감사 드립니다. 본 연구는 한국연구재단의 기초연구사업(2013R1A1A2013107)의 지원에 의하여 이루어졌습니다.

REFERENCES

Ding, Y. H., and T. N. Krishnamurti, 1987: Heat budget of the Siberian high and the winter monsoon. *Mon. Wea.*

Atmosphere, Vol. 23, No. 4. (2013)

- Rev.*, **115**, 2428-2449.
- Im, E. S., and J. B. Ahn, 2004: Analysis of relationship between Korean winter temperature variability and global circulation indices. *Atmos.*, **40**, 441-452.
- Jeong, J. H., and C. H. Ho, 2005: Changes in occurrence of cold surges over east Asia in association with Arctic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L14704.
- Jhun, J. G., and E. J. Lee, 2004: A new East Asian winter monsoon Index and associated characteristics of the winter monsoon. *J. Climate*, **17**, 711-726.
- Jung, H. S., Y. G. Choi, J. H. Oh, and G. H. Lim, 2002: Recent trend in temperature and precipitation over south Korea. *Int. J. Climatol.*, **22**, 1327-1337.
- Kim, H. J., and J. B. Ahn, 2010: The large-scale atmospheric circulation related to Korea winter temperature variability. *Atmos.*, **5**, 118-130.
- KMA, 2011: Press release (2011.02.07).
- Li, C. Y., 1988: Frequent activities of stronger aerotroughs in East Asia in wintertime and the occurrence of the El Nino event. *Sci. China, Chem.*, **32**, 976-985.
- Lim, S. M., S. W. Yeh, and G. R. Kim, 2012: Analysis on the relationship between the Korean temperature and the atmospheric circulation over the Northern Hemisphere during winter. *Atmos.*, **22**, 187-197.
- Park, T. W., C. H. Ho, and S. Yang, 2011 : Relationship between Arctic Oscillation and cold surges over East Asia. *J. Climate*, **24**, 68-83, doi:10.1175/2010JCLI3529.1.
- Qiu, Y. Y., and W. D. Wang, 1984: Progress in the research of medium-range prediction of cold surge. *Proceedings of Medium Range Prediction of Cold Surge*. Peking University Press, 1-10.
- Ryoo, S. B., J. G. Jhun, W. T. Kwon, and S. K. Min, 2002: Climatological aspects of warm and cold winters in South Korea. *Korean J. Atmos. Sci.*, **5**, 29-37.
- Wu, B., and J. Wang, 2002: Winter Arctic Oscillation, Siberian high and East Asian winter monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1897, doi:10.1029/2002GL015373.
- Zhang, Y., K. R. Sperber, and J. S. Boyle, 1997: Climatology and interannual variation of East Asian winter monsoon: Result from the 1979-95 NCEP/NCAR reanalysis. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 2605-2619.