

2015/16 겨울 동아시아-한반도 기후 특성 분석

정지훈^{1)*} · 박태원²⁾ · 최자현¹⁾ · 손석우³⁾ · 송강현³⁾ · 국종성⁴⁾ · 김백민⁵⁾ · 김현경⁶⁾ · 임소영⁶⁾

¹⁾전남대학교 해양학과, ²⁾전남대학교 지구과학교육과, ³⁾서울대학교 지구환경과학부,
⁴⁾포항공과대학 환경공학부, ⁵⁾극지연구소, ⁶⁾기상청 기후예측과

(접수일: 2016년 5월 17일, 수정일: 2016년 6월 11일, 게재확정일: 2016년 6월 11일)

Assessment of Climate Variability over East Asia-Korea for 2015/16 Winter

Jee-Hoon Jeong^{1)*}, Tae-Won Park²⁾, Ja-Hyun Choi¹⁾, Seok-Woo Son³⁾, Kanghyun Song³⁾,
Jong-Seong Kug⁴⁾, Baek-Min Kim⁵⁾, Hyun-kyung Kim⁶⁾, and So-Young Yim⁶⁾

¹⁾Department of Oceanography, Chonnam National University, Gwangju, Korea

²⁾Department of Earth Science Education, Chonnam National University, Gwangju, Korea

³⁾School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

⁴⁾School of Environmental Science and Engineering, POSTECH, Pohang, Korea

⁵⁾Korea Polar Research Institute, Incheon, Korea

⁶⁾Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea

(Manuscript received 17 May 2016; revised 11 June 2016; accepted 11 June 2016)

Abstract This paper is to assess the state of climate over East Asia and Korea during 2015/16 winter. There was a distinct intraseasonal climate variation during the period: the record-breaking warmth in December 2015 vs. strong cold surge outbreaks in January 2016. It is suggested that the anomalous warming in December 2015 was contributed by an intensification of Kuroshio anticyclone associated with 2015/16 El Niño and polar vortex intensification. In January 2016, a strong cold surge outbreak over East Asia bringing severe cold more than two weeks. The cold surge was a blocking-type one which followed extremely negative AO developed from early January. It was suggested that the intensification of cold surge might be contributed indirectly by a strong Arctic warming and MJO activity during the period.

Key words: Winter climate, cold surge, MJO, stratospheric influence, El-Niño

1. 서 론

동아시아 겨울철 날씨와 기후는 동아시아 겨울몬순 순환에 가장 큰 영향을 받는다. 동아시아 겨울몬순은 시베리아 고기압, 동아시아 상층 제트 및 기압골의 강도 등으로 표현되며(Ding, 1990; Wang et al., 2010), 특히 시베리아 고기압 강도의 계절내 변동은 동아시아 겨울몬순의 중요한 특징인 한파의 발생과 밀접한 관련이 있다(Ding, 1990; Zhang et al., 1997). 동아시아

겨울몬순의 변동성은 엘니뇨와 Madden Julian Oscillation (MJO) 등의 열대 기후변동성(Jeong et al., 2005, 2008), 극진동 및 북대서양진동(Gong et al., 2001; Jeong and Ho, 2005), 유라시아 저지고기압(Cheung et al., 2012), 성층권 변동성(Song et al., 2015; Woo et al., 2015) 등의 외부의 다양한 인자에 영향을 받는다고 알려져있다. 알려진 내외부적 영향인자 이외에도, 장기 기후변화와 관련하여 겨울몬순의 특성이 변화하고 있으며(Woo et al., 2012), 북극해빙(Honda et al., 2009; Kug et al., 2015) 및 유라시아 눈덮임(Cohen and Jones, 2011; Jeong et al., 2011) 등 새로운 외부 영향인자들이 나타나고 있어, 최근 동아시아 지역의 겨울기후 변동성은 매우 복잡한 양상을 나타

*Corresponding Author: Jee-Hoon Jeong, Department of Oceanography, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea.
Phone: +82-62-530-3466, Fax: +82-62-530-3469
E-mail: jjeehoon@jnu.ac.kr

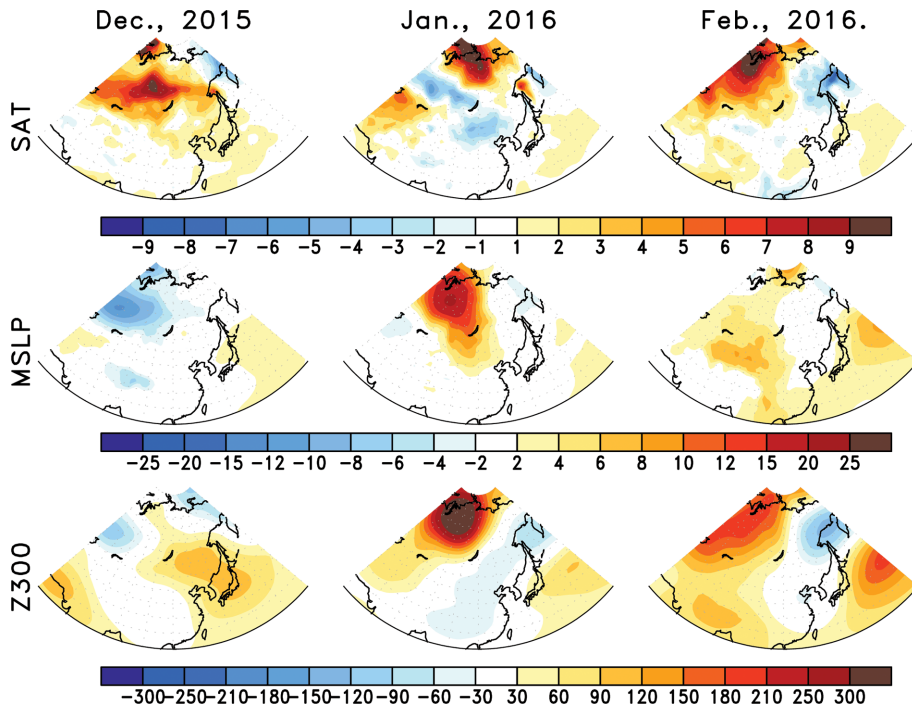


Fig. 1. Anomalies of surface air temperature (top), mean sea level pressure (middle) and geopotential height at 300 hPa (bottom) from December 2015 to February 2016.

내고 있다.

지난 2015/16 겨울철은 이미 그 시작 이전에 강력하게 발달한 엘니뇨와 북극해빙 감소에 따른 고위도 기후변동성의 영향이 복합적으로 나타날 것으로 예상되었다. 실제 동아시아 및 한반도는 12월에 이상 온난, 1월에 강한 한파 발생으로 극적인 계절내 기후대비를 보였다. 우리나라의 2015년 12월 기온은 평균 3.5°C 로 평년대비 2.0°C 높았으며 1973년 이후 관측값으로 최고값을 나타내었다. 2016년 1월에는 중순이후에 두번이상의 한파가 연이어 발생하여 18~25일에 전국 평균기온이 -6.2°C 를 나타내었다¹. 이 온도하강 기간동안에는 서해안을 중심으로 대설이 수차례 발생하여 막대한 사회경제적 비용을 초래하였다².

이 리포트에서는 지난 2015/16년 겨울 동아시아-한반도 기후 특성을 분석하였다. 겨울기간동안의 전반적인 기후 상태와 기존 선행연구들에서 제시되었던 다양한 영향인자를 고려하여, 12월에 나타났던 이상 온난현상과 관련된 엘니뇨 및 성층권 순환의 영향, 그리고 1월에 발생하였던 한랭현상과 관련된 한파의 역

학적 성인을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 2015/16년 겨울 동아시아-한반도 월별 기후 개관

Figure 1은 Japanese 55-year reanalysis 자료 (Kobayashi et al., 2015)에서 나타난 2015년 12월부터 2016년 2월까지 동아시아 지역의 기온 및 해면기압, 상층(300 hPa) 지위고도의 월평균 편차(1979~2015 평균대비)이다. 2015년 12월은 시베리아 지역의 강한 양의 온도 아노말리가 두드러지며, 바이칼호 서쪽을 중심으로 음의 기압 아노말리가 나타난다. 평년보다 시베리아 고기압의 발달이 약하거나 비슷한 수준으로 상층 기압장에서는 중국 북동부, 한반도, 일본 열도 및 북서태평양 상에 고기압 아노말리가 나타난다. 대륙-해양간 온도차이가 감소하고 동아시아 기압골 및 상층 제트기류가 약해진 형태를 보인다. 12월의 동아시아 지역에 나타난 온난현상은 강한 엘니뇨 현상과 성층권 극 소용돌이의 강화에 따른 원격영향에 의한 것으로 분석되며, 이는 2.1절에 좀더 자세히 기술하였다. 1월에는 몽골과 중국 북동부를 중심으로 음의 기온 아노말리가 나타나는데, 이 시기 기압 패턴은 우랄산맥 동쪽을 중심으로하는 양의 기압 아노말리가

¹기상청 (2016, 1월), 보도자료 - 2015년 12월 기상특성, <http://www.kma.go.kr/weather/climate/stats.jsp>.

²이후민 (2016, 1월), 발 묶이고 터지고..최강한파 폭설로 '뽕뽕'. 뉴스1코리아, retrieved from <http://www.news1.kr>.

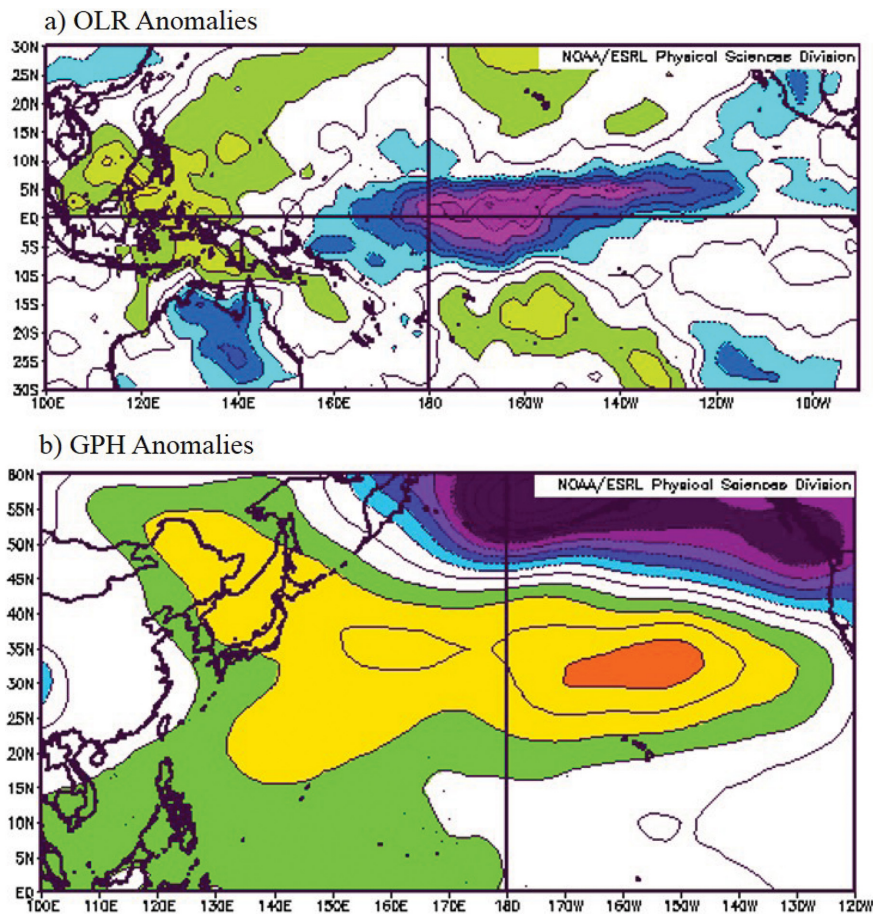


Fig. 2. a) Outgoing Longwave Radiation (OLR) anomalies and b) Geopotential Height (GPH) anomalies at 850 hPa during December 2015. (Plotted from <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/composites/day/>).

시베리아 지역까지 진출한 형태로서 시베리아 고기압의 세력이 강화된 형태를 띄고 있다. 특히 이 우랄 지역의 강한 기압 아노말리는 상층(300 hPa)까지 순압(barotropic)적 형태를 보여주고 있는데, 이는 북극해빙의 감소와 관련된 북극지역 온난화와 관련된 패턴으로 동아시아 겨울철 평균 기온 및 한파 발생에 영향을 줄 수 있다고 알려져있다(Honda et al., 2009; Kim et al., 2014; Kug et al., 2015). 특히 한파 발생과의 관련성은 2.2절에 서술되어있다. 2월에는 몽골지역을 중심으로 시베리아 고기압이 소폭 강화된 형태를 보이고 있으며 동아시아는 평년과 비슷한 수준의 기온을 나타내고 있다.

2.2 2015년 12월 이상 온난현상: 엘니뇨 및 성층권 변동성 영향

2015년 12월 열대 태평양에서는 강력한 엘니뇨가

발달하고 있었다. 3개월(10~12월) 평균 NINO3.4 지역 해수면 온도가 2.2°C 이상 상승하면서, 열대의 해양 및 대기 시스템을 크게 변화시켰다. 따뜻한 해수면 온도의 영향으로 적도 중태평양의 대류활동은 매우 활발해졌다(Fig. 2a). 반면에, 북서태평양에서는 중태평양의 대류활동에 의한 저기압성 로스비파 반응으로 인한 북풍 아노말리의 영향으로 한랭건조 이류가 발생하여 대류활동은 억제되게 된다(Ham et al., 2007). 따라서, 북서태평양에서는 강한 양의 상향장파복사(outgoing longwave radiation) 아노말리가 존재하였다(Fig. 2).

북서태평양의 대류활동 억제는 그 지역 및 동아시아 원격상관에 매우 큰 영향을 가진다. 대류활동 억제로 인한 강제력은 북서태평양 대기 하층에 고기압성 흐름을 유도한다. 이를 필리핀해 고기압이라고 부르기도 한다(Wang et al., 2010). 대기 하층이 고기압

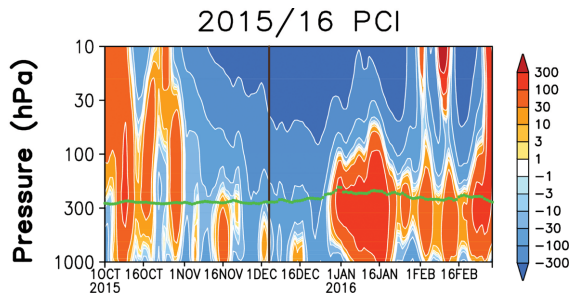


Fig. 3. Vertical profile of geopotential height anomalies averaged over 65°N-90°N (PCI) from 1 October 2015 to 28 February 2016. Shading/contour intervals are logarithmic, i.e., -300, -100, -30, -10, -3, -1, 0, 1, 3, 10, 30, 100, and 300 m. Negative PCI, which corresponds to positive NAM index, is indicated by blue color. The vertical line denotes an onset date of vortex intensification (VI) event, whereas the green line denotes a thermal tropopause.

성 흐름인데 반해 상층은 저기압성 흐름이 나타나며, 경압 연직구조를 나타낸다. 이러한 대기 순환 구조는 상층에 강한 수렴을 유도하고, 이는 로스비파 전파에 의해 중위도로의 원격상관 패턴을 유도한다. 즉, 북서 태평양 상층의 수렴은 로스비파 전파에 의해 북태평양 서쪽에 고기압성 흐름을 유도하는데, 이를 쿠로시오(Kuroshio) 고기압이라고 부른다. 이 고기압성 흐름은 대기 상층에서 하층까지 순압구조로 발달한다(Son et al., 2014). 즉, 쿠로시오 고기압은 엘니뇨 시기 서태평양의 대류활동 감소로 인한 강제력의 직접적이고 전형적인 반응이라고 이해 할 수 있다. 2015년 12월에도 쿠로시오 고기압은 Son et al. (2014)이 제시한 전형적인 엘니뇨 시기 패턴과 유사하게 발달하였다(Fig. 2b). 하지만 이 시기에는 기존 엘니뇨 시기와 달리 쿠로시오 고기압이 북태평양 동쪽까지 확장하여 나타났다. 한반도 동쪽에 위치한 이 고기압성 흐름은 남풍 아노말리를 한반도에 유도함으로써, 따뜻하고 습윤한 공기를 한반도에 공급하게 된다. 이 고기압성 흐름의 영향으로 한반도 기후는 강수가 증가하고 온도가 증가하는 경향을 가지게 된다. 따라서, 2015년 11월과 12월에 한반도에 평년보다 많은 강수와 높은 기온이 나타났던 이유는 엘니뇨가 유도한 필리핀 해 고기압과 쿠로시오 고기압의 영향으로 일부 설명할 수 있다.

하지만, 엘니뇨 시기 늦겨울로 진행되는 1월에는 한반도에 밀접하게 영향을 주는 쿠로시오 고기압이 갑자기 약화된다(Son et al., 2014; Kim et al., 2015). Kim et al. (2016)은 그 이유를 중태평양의 대류 활동 증가가 서태평양의 대류 감소 효과를 상쇄했기 때문이라고 주장하였다. 2016년 1월에도 다른 엘니뇨 시

기와 비슷하게 12월에 자리잡고 있던 쿠로시오 고기압이 매우 약화되었다(그림 생략). 이에 따라, 1월에는 성층권이나 고위도의 영향이 좀 더 뚜렷하게 나타날 수 있는 좋은 조건이 되었다.

겨울철 동아시아 지표 기온은 유라시아 눈덮힘, 북극 해빙, 적도 및 중위도 해수면 온도뿐만 아니라 성층권 변동성에도 영향을 받는 것으로 알려져있다. 일례로 Song et al. (2015)은 강한 성층권 돌연승온(Sudden Stratospheric Warming; SSW) 발생시 AO(Arctic Oscillation)가 음의 위상으로 바뀌면서 유라시아 및 동아시아 지표 기온이 낮아짐을 보여주었다.

Figure 3은 2015년 10월부터 2016년 2월까지의 북위 65도 이상 평균 지위고도장(Polar-Cap Index; PCI)의 연직구조를 나타낸다. PCI는 각 층에서 Northern Annular Mode (NAM)와 강한 음의 상관관계를 가져서(Baldwin and Thompson, 2009), NAM을 대신하여 실시간 극성층권 감시에 자주 쓰이는 변수이다. 물리적으로 성층권에서 음의 PCI는 극성층권 기온이 차고 극 소용돌이(Polar Vortex)가 강함을 의미하는 반면, 대류권 음의 PCI는 동서방향 평균 제트류가 북쪽으로 치우침을 나타낸다.

2015/16 겨울철 가장 두드러진 현상은 극 소용돌이가 전반적으로 매우 강했다는 점이다. 보통 1~2년에 한 번씩 발생하는 SSW가 발생하지 않았으며 심지어 약한 승온(Minor Warming)조차 발생하지 않았다. 극 소용돌이가 평소보다 매우 강할 때, 이를 극 소용돌이 강화(Vortex Intensification; VI) 현상으로 부르는데 2015/16 관측된 극 소용돌이는 VI의 범주에 든다. Kolstad et al. (2010)의 방법론을 따라 10-hPa PCI가 전체 자료 기간의 10 백분위 값보다 작아졌을 때를 VI의 시작으로 정의하면, VI는 2015년 12월 4일에 발생하여 1월 초까지 유지된 것으로 볼 수 있다. SSW와 마찬가지로 VI와 관련된 순환장 아노말리는 시간에 따라 대류권으로 하향 전파되는데(Baldwin and Dunkerton, 2001), 이는 2015/16 겨울철에 뚜렷히 나타나고 있다(Fig. 3). 상부 성층권 강한 음의 PCI가 시간에 따라 하향 전파되어, 11월 말부터 12월까지 대류권 전체가 음의 PCI에 의해 지배되었다. 대류권 음의 PCI가 양의 NAM/AO에 상응한다는 점에서 11월 말부터 12월 말까지 이어진 양의 AO와 이와 관련된 동아시아 온난 아노말리의 일부는 성층권에서 기인된 것으로 판단된다. 보다 정확한 인과관계를 파악하기 위해서 성층권-대류권 상호작용에 대한 면밀한 역학적 분석과 수치모델 실험이 필요할 것이다.

성층권 극 소용돌이는 1~2월까지 강하게 지속되었다. 그러나 1월 초-중순에는 강한 음의 AO가 나타났고, 2월에는 반복적인 양-음의 변동을 나타내는 것으로 보아(Fig. 4e), 이 시기에 성층권 순환장은 대류권

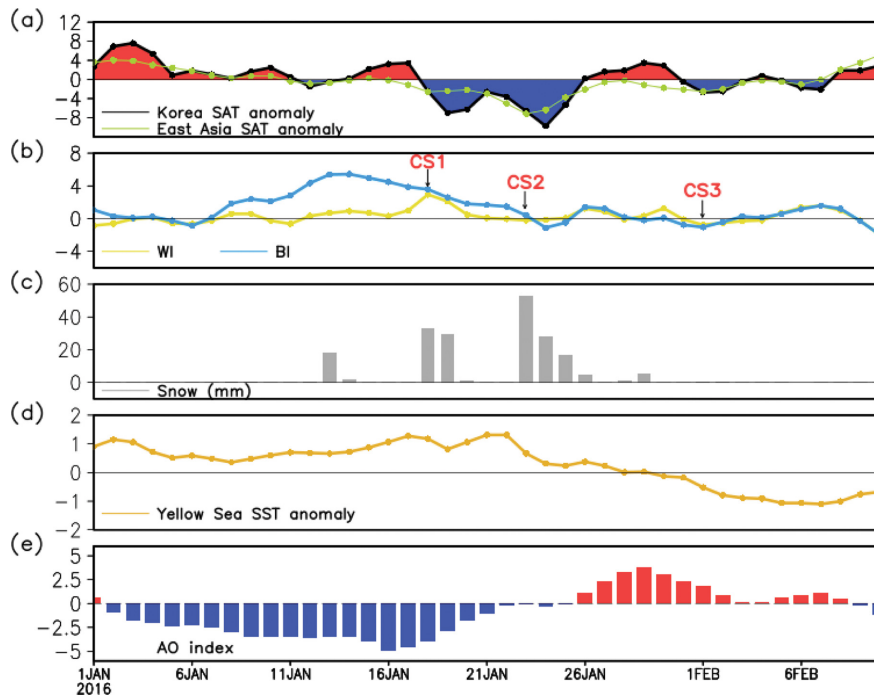


Fig. 4. Time series of a) daily mean temperature anomalies over Korea (34.8°N-37.5°N and 126.4°E-129.2°E) and East Asia (35°N-40°N and 125°E-130°E), b) cold surge indices, c) snow fall over Korea, d) sea surface temperature anomalies over the Yellow Sea (35°N-40°N and 123°E-126°E), and e) AO index.

과 상호작용을 하지 않은 것으로 판단된다. 대류권 PCI 및 지표 AO는 성층권과 관계 없이 대류권 자체의 물리-역학 과정에 의해 결정된 것으로 보인다. 특히 1월 초-중순에 나타난 기록적인 음의 AO는 2015년 12월 말 북대서양에서 발생한 기록적인 강도(최대 발달 중심기압 930 hPa)의 스톱과 관련이 있을 수 있다. 이 스톱은 노르웨이해, 바렌츠해를 거쳐 북극 중앙해로 진출하며 소멸하였는데, 이지역에 평년대비 +30°C 이상의 온도상승을 초래하였고, 해빙의 성장을 방해하였다³. 북극해, 특히 바렌츠-카라해 지역에서 해빙 감소와 관련된 기온의 상승은 음의 AO형태의 대기순환을 유도하므로(Honda et al., 2009; Mori et al., 2014; Kug et al., 2015), 1월 초-중순에 나타난 음의 AO는 이러한 과정과 어느 정도 연관되어있는 것으로 보인다.

2.3 2016년 1~2월 한파 발생 특성 분석

2016년 1~2월에는 기상청 발표 및 언론 보도를 기

준으로 총 3회의 한파(CS; cold surge)가 내습하였다(Fig. 4b; CS1-3으로 표시). 이기간동안 남한 지역의 일별 기온 변화를 살펴보면, 12월에 이어 1월 17일경까지 양의 아노말리가 유지되었으나, CS1 이후 이틀 동안 약 8°C 이상 기온이 하락하였고 3-4일간 소폭으로 기온이 회복되다 다시 큰폭으로 하락하여 평년값 대비 -8°C 정도의 극심한 한랭현상이 나타났다. 한반도는 약 열흘, 동아시아는 이보다 조금 긴 12일 정도 한랭현상이 나타났으며, 이후 2-3일간 기온이 회복되어 평년수준 이상을 회복하였고 1월 말 약한 온도 하강(CS3)이 나타났다. CS1과 CS2 시기에는 서해안을 중심으로 대설현상이 나타났다. CS1-2기간 직전까지 서해안의 해수면 온도는 평년보다 1°C 정도 높은 상태를 유지하다 CS2 이후 평년이하로 떨어졌는데, 한파에 따른 한랭한 대기가 따뜻한 해수면상을 지나면서 지역적 대설 현상이 발생한 것으로 여겨진다.

동아시아 한파는 그 발생과정의 역학적 특징으로부터 크게 유라시아 대륙 북서쪽, 우랄산맥 부근에서부터 남동진하는 대류권 상층 파동에 의해 유도되는 wavetrain type 한파와 유라시아 대륙 북동부에서 남진하는 고압계와 관련해 발생하는 blocking type 한파로 나눌 수 있다(Takaya and Nakamura, 2005; Park et

³Fritz, A. (2015, December), Freak storm pushes North Pole 50 degrees above normal to melting point. The Washington Post, Retrieved from <https://www.washingtonpost.com/>.

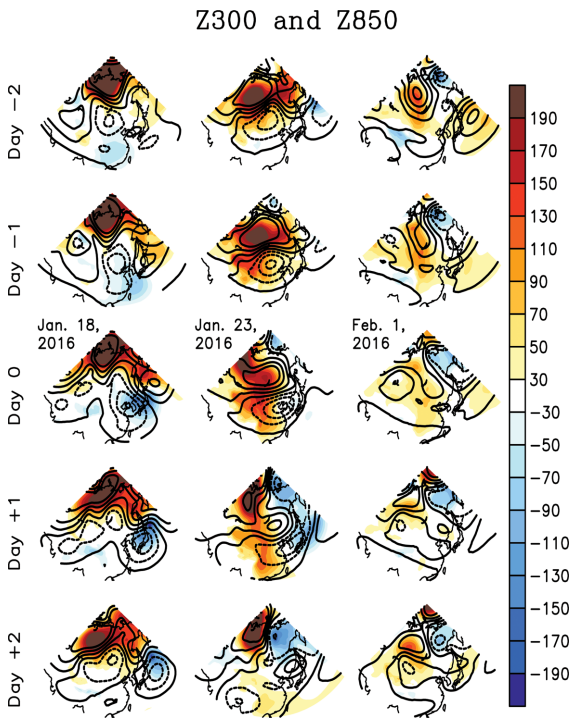


Fig. 5. Anomalies of geopotential height at 300 hPa (contours; in interval of 100 m) and at 850 hPa (shadings) during day -2 to day +2 relative to cold surge occurrences.

al., 2015). Park et al. (2015)는 상층 순환 패턴을 이용하여 한파 type을 분류하는 방법을 제시한 바 있다. 이 연구에서는 Park et al. (2015)의 방법을 참고하여, 자료의 가용성과 편의를 감안하여 blocking type 한파 지수(BI)와 wavetrain type 한파 지수(WI)를 아래와 같은 방법으로 계산하고, 이시기의 한파의 성인을 분석하였다.

$$WI = Z3 - Z2 \quad (1)$$

$$BI = Z1 - Z2 \quad (2)$$

Z1, Z2, Z3는 각각 유라시아 고위도 지역(110-140°E, 65-90°N), 북동 중국 지역(110-140°E, 35-60°N), 북서 태평양 지역(143-173°E, 30-55°N)에서의 300 hPa 지위 고도 아노말리 평균값을 의미한다.

Figure 4b는 2016년 1~2월 기간동안의 BI와 WI의 일변동을 나타낸다. 두 지수 모두 1월 6일 이전까지 평년값과 비슷한 수준을 유지하였으나, 1월 7일 이후로 상승하기 시작하여 한반도 지역에 1차 온도 하강이 나타났던 1월 16~25일 기간 약 5일 전에 최대값을 나타내었고, 이후 CS2 근처에서 평년값으로 떨어지는 양상을 보였다. BI와 WI, 그리고 동아시아 지역

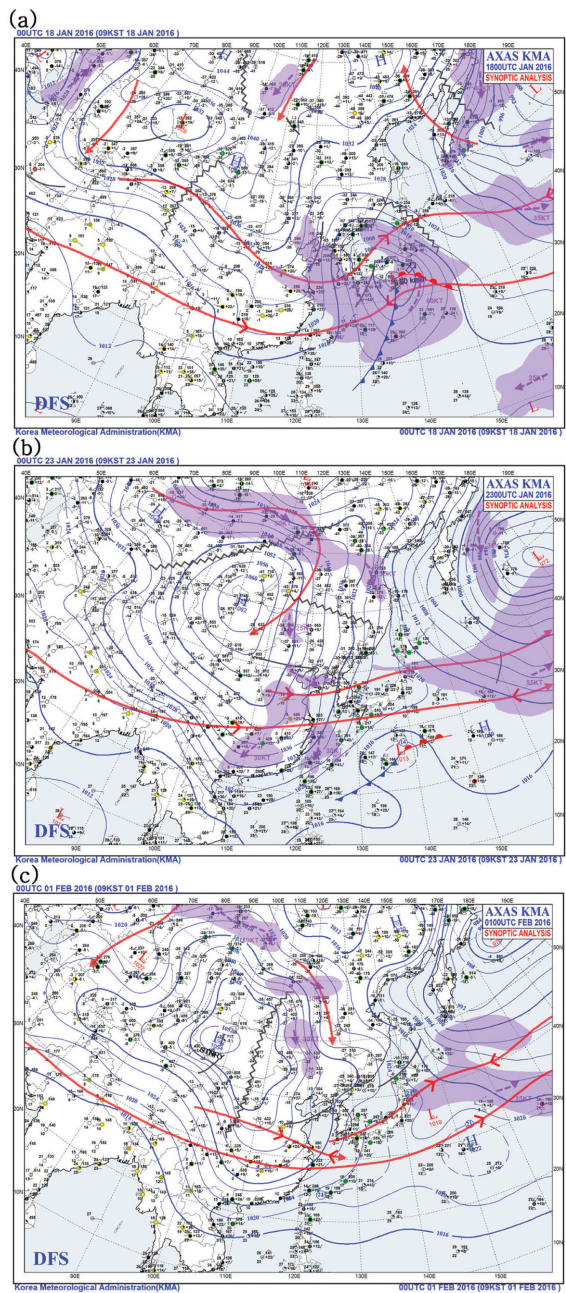


Fig. 6. Weather map around East Asia on (a) 18 January, (b) 23 January, and (c) 1 February 2016.

온도하강을 기준으로 볼 때, CS1의 경우만 Park et al. (2015) 기준의 한파로 분류되며 온도하강 직전에 WI가 상승하여 BI와 WI가 모두 높은 값을 나타낸 까닭에 혼합형(mixed type) 한파로 분류된다. CS2와 CS3의 경우 일정수준이상의 온도하강은 감지되었으나 BI

와 WI 모두 1 이하의 값을 나타내어, 시베리아 고기압의 강화와 관련된 동아시아 전체 규모의 한파현상이라기 보다, 지역적으로 나타나는 한랭현상으로 판단된다.

CS1-3 전후의 상하층 순환장을 살펴봄으로써 한파의 특성을 보다 정확하게 진단 할 수 있다. 먼저 CS1 시기전후에는 우랄 산맥 북동쪽 및 카라해를 중심으로한 고압성 아노말리가 두드러지며, 한파 발생일 전후로 중국 북동부에서 한반도, 일본열도를 지나가는 이동성 저기압이 나타난다(Fig. 6). 하층의 시베리아 고기압의 발달이 크지 않고 상층의 고압대가 정체되어있는것으로 보아, CS1 시기의 동아시아 한랭현상은 이동성 저기압의 이동과 함께 저기압 후면에서 유도된 북풍 기류에 의한 일시적인 한랭현상으로 보인다. 한파 지수상으로도 CS1 발생 직전에 WI가 급격히 상승하여 이 시기 발생한한파가 혼합형으로 분류가 되었는데, 이는 이때 지나간 저기압의 영향으로 위 (1)식에서 북서태평양지역 지위고도 지수인 Z3가 일시적으로 상승하여 나타나는 현상이다. CS1 직후 CS2 시기에서의 상하층 순환장을 살펴보면, 상층 우랄산맥 동쪽에서의 고압성 아노말리-그 남동쪽 지역에서의 저압성 아노말리가 자리하고 있으며, 이 시기 하층에서 고압성 아노말리가 남쪽으로 확장하면서 시베리아 고기압의 확장의 형태를 나타낸다. 이는 Takaya and Nakamura (2005)와 Park et al. (2015)가 제시한 전형적인 blocking type 한파의 발달형태를 보인다. 따라서 Figs. 4와 5를 고려할 때, CS1과 CS2는 우랄산맥 동쪽에서 발달한 저지고기압 아노말리에 의해 10일 이상의 시간규모를 갖는 blocking type 한파의 발달과정으로 볼 수 있으며, 지역적으로 빠르게 이동하는 중관저기압이 그 발달 과정에 기여했을 가능성이 있다.

특이할 만한 점으로 CS1-2 발생시기에는 인도양 지역의 MJO의 활동이 감지되었고 과거 연구들에서 제시한 열대-중위도 상호작용에 의한 한파 강도의 강화(amplification) 가능성이 발견된다. 1월 초순부터 중하순까지 MJO가 인도양을 가로질러 Maritime continent 까지 진행하였는데, 엘니노의 영향으로 Maritime continent 지역에서 그 강도가 약화 되었고, 이 시기는 CS1-2 시기와 일치한다(Fig. 7). Jeong et al. (2005), Jeong et al. (2008), 그리고 Park et al. (2010) 등은 MJO가 인도양에 위치할 때, 원격상관에 의해 동아시아 지역에 음의 지위고도 편차가 나타나 경압성이 강화되어 발생한 한파의 강도를 강화시키는 역할을하며, 동시에 우리나라-일본 지역에 상승운동을 유도하여 강수를 증대한다는 것을 제시하였다. 이 시기에 나타난 한파의 강한 성장과 대설현상은 이러한 MJO에 의한 원격영향을 받았을 가능성이 있다.

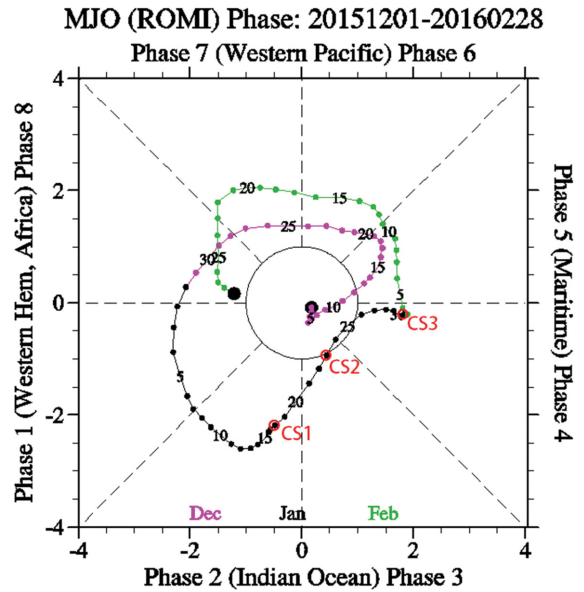


Fig. 7. Phase-space diagram of MJO index (ROMI1 and ROMI2) from 1 December 2015 to 28 February 2016. Dates of cold surge occurrences are represented by red circles.

3. 요약 및 토의

이 연구에서는 2015/16 겨울철 한반도 지역의 겨울 기후의 특성을 살펴보았다. 이 기간동안 평균기후 및 한파 발생과 관련된 열대(엘니노 및 MJO), 성층권, 고위도순환(AO 및 북극해빙)의 영향을 진단하였다. 2015년 여름-가을철 동안 강력한 엘니노가 발달하고 북극해빙의 기록적 감소가 나타나, 이와 관련된 겨울철 기후변동에 대한 관심이 높았다. 2015년 12월의 경우 엘니노와 관련된 쿠로시오 고기압의 강화, 그리고 성층권 극 소용돌이의 강화 현상이 한반도 및 동아시아 지역의 기온 및 강수 증가에 영향을 미친것으로 판단된다. 2016년 1~2월의 경우 강한 음의 AO가 발생하였고, 한반도에는 강력한 blocking type의 한파발생으로 인해 약 보름간 강한 추위가 발생하였다. 북극지방의 강력한 온난화와 열대 MJO에 의한 원격영향인 음의 AO와 한파강화에 영향을 미쳤을 가능성이 있다.

2015/16년 한반도 및 동아시아 지역의 겨울 기후는 강한 계절내 변동성을 나타냈으며, 이는 기존 많은 연구들에서 제시하였던 열대-중위도, 고위도-중위도 기후 상호작용 복합적 영향으로 보인다. 이 연구에서는 사후분석을 통해 이러한 영향을 비교적 명확하게 제시할 수 있었으나, 아직 이러한 이해를 정확한 예측에 적용하기 위해서는 많은 추가연구가 필요하다. 예를 들어 2015년 12월 온난 아노말리의 원인으로 제

시된 엘니뇨-쿠로시오 고기압과 성층권 와도 강화현상은 완전히 독립적인 현상이 아니라 서로 상호작용할 수 있다. 또한 MJO와 같은 열대 기후변동성이 북극권의 온난화를 유도할 수 있으므로(Yoo et al., 2012), 2016년 1월에 나타난 강력한 한파현상은 열대-중위도-고위도 상호작용의 결과일 수 있다. 따라서 동아시아 및 한반도 겨울철 기후변동성의 정확한 예측을 위해서는 이에 영향을 미치는 다양한 열대-고위도-성층권 인자의 파악과 그들간의 상호작용에 대한 종합적 이해가 수반되어야 한다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가정책 지원 강화사업(KMIPA 2015-2090)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Baldwin, M. P., and T. J. Dunkerton, 2001: Stratospheric Harbingers of Anomalous Weather Regimes. *Science*, **294**, 581-584.
- _____, and D. W. J. Thompson, 2009: A critical comparison of stratosphere-troposphere coupling indices. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**, 1661-1672.
- Cheung, H. N., W. Zhou, H. Y. Mok, and M. C. Wu, 2012: Relationship between Ural-Siberian Blocking and the East Asian Winter Monsoon in Relation to the Arctic Oscillation and the El Niño-Southern Oscillation. *J. Climate*, **25**, 4242-4257.
- Cohen, J., and J. Jones, 2011: A new index for more accurate winter predictions. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L21701, doi:10.1029/2011GL049626 (2011).
- Ding, Y. H., 1990: Buildup, Air-Mass Transformation and Propagation of Siberian High and Its Relations to Cold Surge in East-Asia. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **44**, 281-292.
- Gong, D. Y., S. W. Wang, and J. H. Zhu, 2001: East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2073-2076.
- Ham, Y.-G., J.-S. Kug, and I.-S. Kang, 2007: Role of moist energy advection in formulating anomalous Walker Circulation associated with El Niño. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, **112**, D24105, doi:10.1029/2007JD008744.
- Honda, M., J. Inoue, and S. Yamane, 2009: Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L08707, doi:10.1029/2008GL037079.
- 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, doi:10.1029/2005GL023024.
- _____, _____, B. M. Kim, and W. T. Kwon, 2005: Influence of the Madden-Julian Oscillation on wintertime surface air temperature and cold surges in east Asia. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, **110**, D11104, doi:10.1029/2004JD005408.
- _____, B. M. Kim, C. H. Ho, and Y. H. Noh, 2008: Systematic variation in wintertime precipitation in East Asia by MJO-induced extratropical vertical motion. *J. Climate*, **21**, 788-801.
- _____, T. Ou, H. W. Linderholm, B.-M. Kim, S.-J. Kim, J.-S. Kug, and D. Chen, 2011: Recent recovery of the Siberian High intensity. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, **116**, D23102, doi:10.1029/2011JD015904.
- Kim, B. M., S.-W. Son, S.-K. Min, J.-H. Jeong, S.-J. Kim, X. Zhang, T. Shim, and J.-H. Yoon, 2014: Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss. *Nat. Commun.*, **5**, 4646, doi:10.1038/ncomms5646.
- Kim, S., H.-S. Kim, S.-K. Min, H.-Y. Son, D.-J. Won, H.-S. Jung, and J.-S. Kug, 2015: Intra-winter atmospheric circulation changes over East Asia and North Pacific associated with ENSO in a seasonal prediction model. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **51**, 49-60.
- _____, H.-Y. Son, and J.-S. Kug, 2016: How well do climate models simulate atmospheric teleconnections over the North Pacific and East Asia associated with ENSO? *Clim. Dynam.*, 1-15.
- Kobayashi, S., and Coauthors, 2015: The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan. Ser. II*, **93**, 5-48.
- Kolstad, E. W., T. Breiteig, and A. A. Scaife, 2010: The association between stratospheric weak polar vortex events and cold air outbreaks in the Northern Hemisphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 886-893.
- Kug, J.-S., J.-H. Jeong, Y.-S. Jang, B.-M. Kim, C. K. Folland, S.-K. Min, and S.-W. Son, 2015: Two distinct influences of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia. *Nat. Geosci.*, **8**, 759-762.
- Mori, M., M. Watanabe, H. Shiogama, J. Inoue, and M. Kimoto, 2014: Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades. *Nat. Geosci.*, **7**, 869-873.
- Park, T.-W., C.-H. Ho, S. Yang, and J.-H. Jeong, 2010: Influences of Arctic Oscillation and Madden-Julian

- Oscillation on cold surges and heavy snowfalls over Korea: A case study for the winter of 2009-2010. *J. Geophys. Res-Atmos.*, **115**, D23122, doi:10.1029/2010JD014794.
- _____, _____, J.-H. Jeong, J.-W. Heo, and Y. Deng, 2015: A new dynamical index for classification of cold surge types over East Asia. *Clim. Dynam.*, 1-16.
- Son, H.-Y., J.-Y. Park, J.-S. Kug, J. Yoo, and C.-H. Kim, 2014: Winter precipitation variability over Korean Peninsula associated with ENSO. *Clim. Dynam.*, **42**, 3171-3186.
- Song, K., S.-W. Son, and S.-H. Woo, 2015: Impact of Sudden Stratospheric Warming on the Surface Air Temperature in East Asia. *Atmosphere*, **25**, 461-472 (in Korean with English abstract).
- Takaya, K., and H. Nakamura, 2005: Mechanisms of intra-seasonal amplification of the cold Siberian high. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 4423-4440.
- Wang, B., Z. W. Wu, C. P. Chang, J. Liu, J. P. Li, and T. J. Zhou, 2010: Another Look at Interannual-to-Interdecadal Variations of the East Asian Winter Monsoon: The Northern and Southern Temperature Modes. *J. Climate*, **23**, 1495-1512.
- Woo, S.-H., B.-M. Kim, J.-H. Jeong, S.-J. Kim, and G.-H. Lim, 2012: Decadal changes in surface air temperature variability and cold surge characteristics over northeast Asia and their relation with the Arctic Oscillation for the past three decades (1979~2011). *J. Geophys. Res-Atmos.*, **117**, D18117, doi:10.1029/2011JD016929.
- _____, M.-K. Sung, S.-W. Son, and J.-S. Kug, 2015: Connection between weak stratospheric vortex events and the Pacific Decadal Oscillation. *Clim Dynam.*, **45**, 3481-3492.
- Yoo, C., S. Lee, and S. B. Feldstein, 2012: Arctic Response to an MJO-Like Tropical Heating in an Idealized GCM. *J. Atmos. Sci.*, **69**, 2379-2393.
- Zhang, Y., K. R. Sperber, and J. S. Boyle, 1997: Climatology and Interannual Variation of the East Asian Winter Monsoon: Results from the 1979-95 NCEP/NCAR Reanalysis. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 2605-2619.