

겨울철 북서 태평양에서 발생하는 고위도 블로킹과 중앙 태평양 기압능이 한반도 한파에 미치는 영향 연구

조건희¹⁾ · 이은희^{1)*} · 김백민²⁾

¹⁾(재)차세대수치예보모델개발사업단, ²⁾부경대학교 지구환경시스템과학부

(접수일: 2023년 2월 7일, 수정일: 2023년 2월 22일, 게재확정일: 2023년 2월 23일)

A Study of the Blocking and Ridge over the Western North Pacific in Winter and its Impact on Cold Surge on the Korean Peninsula

Keon-Hee Cho¹⁾, Eun-Hee Lee^{1)*}, and Baek-Min Kim²⁾

¹⁾Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems (KIAPS), Seoul, Korea

²⁾Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University, Busan, Korea

(Manuscript received 7 February 2023; revised 22 February 2023; accepted 23 February 2023)

Abstract Blocking refers to a class of weather phenomena appearing in the mid and high latitudes, whose characteristics are blocked airflow of persistence. Frequently found over the Pacific and Atlantic regions of the Northern Hemisphere, blocking affects severe weather in the surrounding areas with different mechanisms depending on the type of blocking patterns. Along with lots of studies about persistent weather extremes focusing on the specific types of blocking, a new categorization using Rossby wave breaking has emerged. This study aims to apply this concept to the classification of blockings over the Pacific and examine how different wave breakings specify the associated cold weather in the Korean peninsula. At the same time, we investigate a strongly developing ridge around the Pacific by designing a new detection algorithm, where a reversal method is modified to distinguish ridge-type blocking patterns. As result, Kamchatka blocking (KB) and strong ridge over the Central Pacific are observed the most frequently during 20 years (2001~2020) of the studied period, and anomalous low pressures with cold air over the Korean Peninsula are accompanied by blocking events. When it considers the Rossby wave breaking, cyclonic wave-breaking is dominant in KB, which generates low-pressure anomalies over the Korean Peninsula. However, KB with anticyclone wave breaking appears with the high-pressure anomalies over the Korean Peninsula and it generates the warm temperature anomaly. Lastly, the low-pressure anomalies are also generated by the strong ridge over the Central Pacific, which persists for approximately three days and give a significant impact on cold surge on the Korean Peninsula.

Key words: Blocking types over the pacific, kamchatka blocking, rossby wave breaking, ridge type blocking, cold surge

*Corresponding Author: Eun-Hee Lee, Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems (KIAPS), 4F, Boramae-ro 5-gil, Dongjak-gu, Seoul 07071, Korea.
Phone: +82-2-6480-6400, Fax: +82-2-6480-6498
E-mail: ehlee@kiaps.org

1. 서 론

블로킹(Blocking)은 중위도 대기에서 발생하는 종관 규모 이상의 현상으로 발생한 지역의 대기의 흐름을 지연시키는 특성을 지니고 있으며 악기상과 깊은 연관성이 있다(Galarnau et al., 2012). 블로킹은 중위도 지역에 강한 강수의 발달, 한파 및 폭염 등을 유발하는 것으로 알려져 있는데, 이때 형성된 블로킹 구조에서의 고, 저기압 위치에 따라 발생한 악기상의 양상이 달라진다. 따라서, 블로킹은 중위도 지역에서 중요한 현상으로 연구되고 있으며, 특히 블로킹이 빈번하게 발생하는 대서양과 태평양 지역에서 발생하는 블로킹의 특성에 대한 많은 연구가 이루어졌다(Tibaldi and Molteni, 1990; D'Andrea et al., 1998; Hamill and Kiladis, 2014). 태평양 지역의 블로킹과 한반도의 한파와의 관련성에 대해서 밝혀진 것들로는 우선 Park et al. (2014)은 태평양 지역에서 발생하는 블로킹에 대해 집중하였으며, 겨울철에 형성되는 태평양 지역 블로킹과 동아시아 지역의 한파와 연관성이 있음을 제시한 바 있다. 최근 Kim et al. (2022)은 태평양의 캄차카(Kamchatka) 반도 인근에서 발생하는 블로킹을 캄차카 블로킹(Kamchatka Blocking, 이하 KB)으로 정의하였으며, KB의 영향이 유라시아 및 동아시아 지역의 겨울철 한파에 영향을 미침을 확인하여 우랄 블로킹과 더불어 KB의 중요성을 강조하였다. 또한 Hwang et al. (2022)은 역학적인 분석을 통해 KB의 구조에서 저기압이 대기 하층의 바람 구조를 변화시키고 한반도에 강화된 북풍을 야기함으로써 한반도에서 발생하는 한파와 밀접한 연관이 있음을 제시하였다.

블로킹과 악기상 관련성에 대한 많은 선행 연구들은 블로킹의 형태를 구분하고 그 각각의 구조에 따라 악기상에 영향을 미치는 메커니즘에 대해 분석해왔다. 이를 위해 우선 블로킹 탐지를 위한 방법이 요구되며 많은 블로킹 연구에서 블로킹 탐지 방법을 개발해 왔다. 블로킹을 탐지하는 방법은 크게 아노말리(Anomaly)와 반전(Reversal)을 활용한 방식으로 발전되어 왔다(Tibaldi and Molteni, 1990; Sausen et al., 1995; Davini et al., 2012; Masato et al., 2013; Dunn-Sigouin et al., 2013). 우선 아노말리 방법은 대기 중층 지위고도 평년값에 대해 지위고도의 일별 편차가 일정 수치 이상의 조건에 해당하면 블로킹으로 탐지하는 방법이다. 이러한 아노말리 방법은 강하게 발달하는 블로킹에 더 민감하여 강하게 발달한 블로킹이 악기상에 미치는 영향을 분석하는데 효과적인 방법으로 여겨진다. 그러나 지역적으로 블로킹의 강도와 특성이 상이할 때 블로킹 탐지를 위한 임계 수치를 조절해야 하는 것이 일반적이다(Sausen et al., 1995). 또다른 방법인 반전 방법은 대기 중층 지위고도 절대값의 남북 편차

가 일정 조건에 해당하면 블로킹을 탐지하는 방식으로 Tibaldi and Molteni (1990)가 제안했다. 이 방법은 기준 위도 간의 지위고도의 남북 반전을 계산하고 이 값이 일정 수치를 넘을 경우 블로킹으로 탐지하는 것으로, 초기의 방법에서 블로킹 탐지 결과는 각 경도별 블로킹의 유무 즉 1차원의 값으로 산출되었으나, Davini et al. (2012)은 이러한 방법을 2차원으로 확장하여 블로킹의 공간분포를 산출하는 것으로 발전시켰다. 반전 방법은 연구의 목적에 따라 개선 및 변형하기 용이하여 지금까지 많이 활용되고 있다.

알고리즘을 통한 정량적인 블로킹 탐지 방법의 개발 이전 연구들은 블로킹에 포함된 고기압과 저기압의 위치에 따른 정성적인 분석을 통해 오메가와 렉스 블로킹 등으로 구분하였고(Rex, 1950; White and Clark, 1975; Treidl et al., 1981) 최근에는 블로킹의 초기 발달 시 전개되는 Rossby Wave Breaking (이하 RWB)의 양상에 따라 블로킹을 세분화하여 그에 따른 영향을 보고하였다(Davini et al., 2012; Woollings et al., 2018; Sousa et al., 2021). RWB를 활용한 블로킹의 구분에는 바람의 변형장, 지위고도, 잠재와도 등의 변수들이 활용되며 대기의 회전성분 방향에 따라 저기압성 파동 정체(Cyclonic wave breaking)와 고기압성 파동 정체(Anti-cyclonic wave breaking)로 구분한다(Kunz et al., 2009). Davini et al. (2012)은 지위고도로부터 RWB를 계산하여 블로킹의 구분에 적합한 결과, 대서양에서 발생하는 대부분의 블로킹이 고기압성 파동 정체와 함께 나타나고 태평양에서는 저기압성 파동 정체의 빈도가 높음을 확인하였다. Woollings et al. (2018)은 대서양에서 발생하는 블로킹의 형태를 잠재와도로 분석하여 세분화하였으며 결과적으로 대서양 기압능, 오메가 블로킹, 렉스 블로킹과 고기압성 파동 정체, 저기압성 파동 정체로 설명하였다. Sousa et al. (2021)은 상층 제트(Jet stream)의 영향에 의해 렉스 블로킹을 세분화하여 하이브리드(Hybrid) 렉스 블로킹과 온전한 렉스 블로킹으로 분류하였고 하이브리드 렉스 블로킹을 RWB가 동반된 블로킹으로 보고하였다. 또한 RWB는 대서양과 태평양의 저위도에서부터 발달하며 열과 습기를 동반하는 블로킹 형태에 영향을 미치는 중요한 요인으로 알려져 있다(Masato et al., 2013). 이러한 연구들은 블로킹 현상을 구분하고 각각의 악기상 관련성을 밝히는데 있어서 RWB의 중요함을 제시하고 있으며, 태평양 지역의 한반도 한파를 설명하는 데 있어서도 중요한 요소가 될 수 있음을 시사한다.

한편 고위도 지역의 블로킹 외에도, 상대적으로 저위도에 나타나는 기압 정체 현상에 의한 악기상 관련성이 제시되면서 그 연구의 필요성이 대두되고 있다. Davini et al. (2012)은 반전 방법을 활용하여 기존 분

석영역을 저위도로 확장하여 블로킹을 탐지하였으며 이러한 블로킹을 저위도 블로킹(low-latitude blocking)으로 정의하였다. 또한, Woollings et al. (2018)은 반전과 아노말리 방법을 혼합한 하이브리드 방법(Barriopedro et al., 2010)을 활용하여 블로킹 탐지 및 잠재와도 분석을 통해 지속기간이 상대적으로 짧고 저위도에 위치한 블로킹을 정의하였으며 이를 기압능으로 명명하였다. Sousa et al. (2021)의 경우 반전 방법으로 탐지된 블로킹의 크기를 비교하여 특정 크기보다 작고, 일정 위도보다 저위도에서 탐지된 경우를 기압능으로 정의하기도 하였다. 공통적으로 이러한 연구들은 기압능이 악기상에 미치는 영향이 있음을 보였으며, 블로킹과 마찬가지로 기압능이 중위도 지역의 악기상에 중요한 현상임을 강조하였다.

이러한 배경하에 태평양 지역의 중/저위도 블로킹 현상이 한반도 한파에 미치는 영향을 확인할 필요성이 대두된다. 한반도 한파 사례의 일부에서 한반도 북쪽에 형성된 절리 저기압의 남하가 일본 동쪽 해상에 발달한 기압능의 영향에 의한 것임이 보고되고 있기 때문이다(Bae and Min, 2016). 이 연구는 특정 사례에 국한되어 있으며 종관 기압장에 대한 정성적인 분석을 기반으로 한다. 따라서 기존의 고위도 블로킹 연구, 혹은 최근의 일부 저위도 기압능의 탐지 연구를 확장하여 태평양 지역의 기압능을 분류하고 한반도 한파와의 정량적인 관계를 규명할 필요가 있다.

앞에서 기술한 바와 같이 블로킹의 분류와 악기상에 영향을 미치는 메커니즘에 대한 연구들은 방법론적으로도 점차 진화해가고 있으며, 기존에 파악하지 못한 새로운 특성들이 드러나고 있다. 그러나 이러한 방법들은 아직 태평양에서 발생하는 블로킹에 대해 직접적으로 적용되지 않았다. 본 연구에서는 태평양 지역에서 발생하는 블로킹과 한반도 한파의 연관성을 밝히고자 하며, 이에 있어 RWB와 어떻게 연관이 되는지 규명하고자 한다. 또한, 상대적으로 저위도에서 나타나는 블로킹 혹은 기압능의 발생 특성을 정량적으로 확인하고 한반도 한파와의 관련성을 설명하고자 한다. 이를 위해 태평양 지역의 기압능을 탐지할 수 있는 새로운 방법을 고안하고 이를 적용하였다.

본 연구의 2장에서는 블로킹과 기압능의 탐지 방법에 대하여 각각 기술하였으며, 이를 20년간의 재분석 자료에 적용하였다. 3장의 결과에서는 태평양 지역의 고위도 블로킹의 특성 및 RWB 적용에 따른 구분된 특성과 중앙 태평양 지역의 기압능과 한반도 한파와의 관련성을 각각 설명하였다.

2. 자료 및 방법

본 연구에 활용한 자료는 ERA5 전지구 재분석자료

(이하 ERA5, Hersbach et al., 2020)이다. 총 20년의 겨울철(12, 1, 2월)에 대하여 각 일별 대기 500 hPa의 지위고도(이하 Z500)와 지상 온도(2-meter temperature, 이하 T2M)를 분석하였다. 여기서 블로킹 및 기압능의 탐지를 위하여 Z500을 사용하였고 블로킹과 기압능이 한반도 겨울철 한파와의 관련성을 알아보기 위해 Z500와 함께 T2M의 아노말리를 분석하였다. 이때 자료를 내삽하여 수평해상도 $1^\circ \times 1^\circ$ 로 분석을 수행하였으며 각 일의 0000, 0600, 1200, 1800 UTC 자료를 산술 평균하여 일평균 값에 대해 분석하였다.

2.1 블로킹의 탐지

본 연구에서는 블로킹 탐지를 위해 Davini et al. (2012)(이하 DP12)에서 제시한 반전 방법(이하 DVN 지수)을 활용하였다. DVN 지수의 산출 과정은 다음과 같다.

$$GHGN(\lambda, \phi) = \frac{Z500(\lambda, \phi + \Delta) - Z500(\lambda, \phi)}{\Delta} < -10 \text{ m}^\circ$$

$$GHGS(\lambda, \phi) = \frac{Z500(\lambda, \phi) - Z500(\lambda, \phi - \Delta)}{\Delta} > -0 \text{ m}^\circ$$

$$GHGS2(\lambda, \phi) = \frac{Z500(\lambda, \phi - \Delta) - Z500(\lambda, \phi - 2\Delta)}{\Delta} < -5 \text{ m}^\circ$$

$$IB(\lambda) = 1, \text{ If } \begin{cases} GHGN(\lambda, \Delta) < -10 \\ GHGS(\lambda, \Delta) > 0 \\ GHGS2(\lambda, \Delta) < -5 \end{cases}$$

여기서 $GHGN$, $GHGS$, $GHGS2$ 는 각각 기준위도로 부터 북쪽 및 남쪽으로 위도차, Δ 및 2Δ 만큼 떨어진 지점과의 지위고도 경도(Gradient)이며, Δ 는 15° 를 사용한다. λ , ϕ 는 각각 경도와 위도이며 위도 $15^\circ\text{N} \sim 75^\circ\text{N}$ 사이에 위 방법을 적용한다. DP12에서와 같이 $GHGN$ 과 $GHGS$, $GHGS2$ 까지 만족하는 경우를 순간 블로킹(Instantaneous Blocking, 이하 IB)으로 정의하였고 이로부터 블로킹을 최종 진단한다. DP12의 경우 $GHGS2$ 를 만족하지 않고 $GHGN$, $GHGS$ 를 만족하는 경우 저위도 블로킹으로 분류하여 정의하였으나, 본 연구에서는 세 조건을 모두 만족하는 경우의 IB만을 고려하였다. 일반적으로 블로킹이 최소 5일 이상 지속되는 특성과 최소 면적을 고려하여, IB가 영역 $5^\circ(\text{위도}) \times 10^\circ(\text{경도})$ 내에 5일 이상 지속될 경우를 최종적으로 블로킹으로 정의하였다.

탐지된 블로킹에 RWB를 적용할 때는 각각의 IB로부터 파동 정체의 방향을 계산하여 고기압성 파동 정체와 저기압성 파동 정체의 형태로 구분하였다. 여기에서는 DP12에서 정의한 파동 정체 지수(Wave Breaking Index, 이하 WBI)를 활용하였다. WBI는 $IB(I) = 1$ 인 경우 다음과 같이 산출된다.

$$WBI(\lambda, \phi) = \frac{Z500(\lambda_W, \phi_S + 7.5) - Z500(\lambda_E, \phi_S + 7.5)}{\lambda_W - \lambda_E}$$

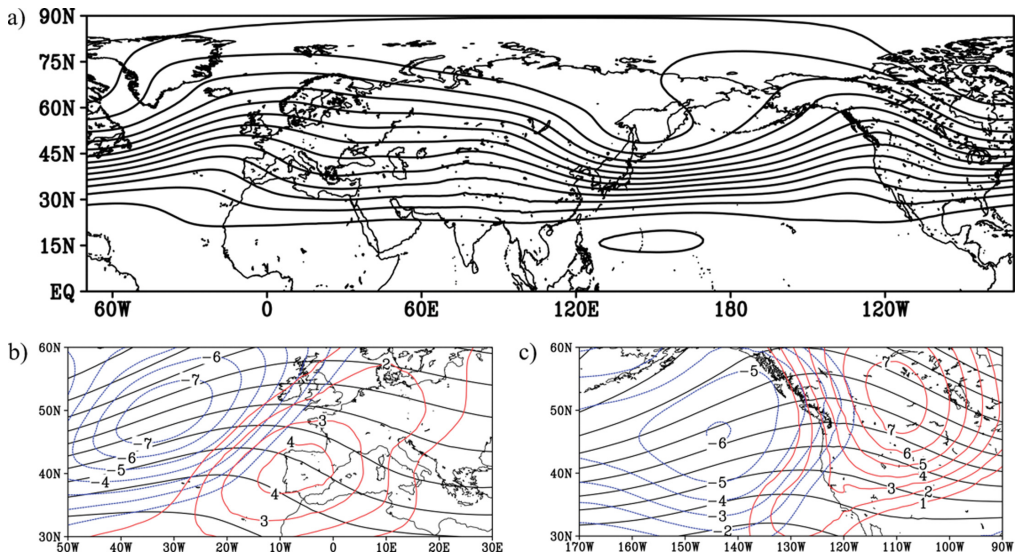


Fig. 1. (a) Global distribution of DJF mean Z500 (black) from 2001 to 2020, and its regional feature with GHGW (blue), and GHGE (red) over (a) the northeast Atlantic and (c) the northeast Pacific. Contour interval is 60 m (black) and 1 m (blue, red).

$$\lambda_W = \lambda - 7.5^\circ$$

$$\lambda_E = \lambda + 7.5^\circ$$

여기서 ϕ_s 는 각 위도에서 남쪽 15°에 해당하는 위도이며, 여기서 동, 서 7.5° 지점 간의 동서 방향 경도로 WBI를 계산한다. 각각의 IB에 대해 WBI가 0보다 작을(클) 경우의 고(저)기압성 파동 정체로 구분하였고, 블로킹 현상 기간 중에 지배적으로 나타나는 파동 정체의 부호로 블로킹을 최종 분류하였다.

2.2 기압능의 탐지

약 60°N 이상의 고위도에서 빈번하게 발생하는 블로킹과 달리 기압능은 상대적으로 저위도인 약 30°N 이상에서 형성되며 양 옆으로 기압골이 위치한다고 보고되어 왔다(Sousa et al., 2021). 이러한 특성을 활용하고자 DVN 지수를 변형하여 본 연구에서 기압능을 탐지하는 새로운 방법을 제시하고자 한다. 기압능이 저위도에서 골-마루-골 형태로 형성되는 특성을 활용하고 블로킹과 달리 남북으로 차폐되지 않는 특성을 고려하였다. 즉, 저위도에서 발생하는 기압능은 남북에 대한 지위고도의 차이보다 동서차이가 중요하며 이에 DVN 지수의 Z500 남북방향 편차를 활용하는 것이 아닌 동서방향에 대한 편차를 활용하고자 하였다. 기준 경도에서 서쪽과의 편차를 GHGW로 정의하였고 동쪽과의 편차를 GHGE로 정의하여 일정 수치, A 를 만족하는 경우 기압능으로 탐지하였다.

$$GHGW(\lambda, \phi) = \frac{Z500(\lambda - \Delta, \phi) - Z500(\lambda, \phi)}{\Delta} < A \text{ m}^\circ$$

$$GHGE(\lambda, \phi) = \frac{Z500(\lambda, \phi) - Z500(\lambda + \Delta, \phi)}{\Delta} > A \text{ m}^\circ$$

$$Ridge(\lambda) = 1,$$

$$\text{if } \ni GHGW(\lambda, \Delta) < A \wedge GHGE(\lambda, \Delta) > A$$

여기에서 Δ 는 15°이며, 15°N~75°N 범위의 위도에 적용하였다. 기압능을 만족하는 GHGW, GHGE의 두 조건이 만족되는 경우 기압능 지수(Ridge)를 1로 하였다. 사용한 임계값, A 는 20년의 겨울철 평균 Z500에서 기후적으로 형성되는 대서양과 미국 서부 해안의 기압능에서 정의하였으며 사용된 값은 3으로 적용하였다. Figure 1은 20년 평균 겨울철 Z500의 분포와, 기압능의 주요 발생 지역에서의 GHGE, GHGW를 확인한 것이다. 기후적으로 대서양과, 미국 서부 해안 인근에서 기압능이 나타나고 있음을 알 수 있다(Fig. 1a). 두 지역 각각에서 산출된 GHGE, GHGW는 각각 2~4 m와 -2~-4 m 사이의 수치를 보여준다(Figs. 1b-c). 이러한 결과를 바탕으로 기압능 지수를 산출하는 임계값 A 를 위 GHGE, GHGW 값들의 평균으로 가정하여 GHGE의 임계값은 3m, GHGW의 임계값은 -3m로 설정하였다. 즉, 본 연구에서 제안하는 기압능의 탐지 방법은 기후적인 기압능의 평균 GHGW와 GHGE의 값을 만족하면 일별 기압능으로 탐지하는 것으로 정의하였다.

3. 결 과

태평양 지역에서 20년간 발생한 블로킹 및 기압능

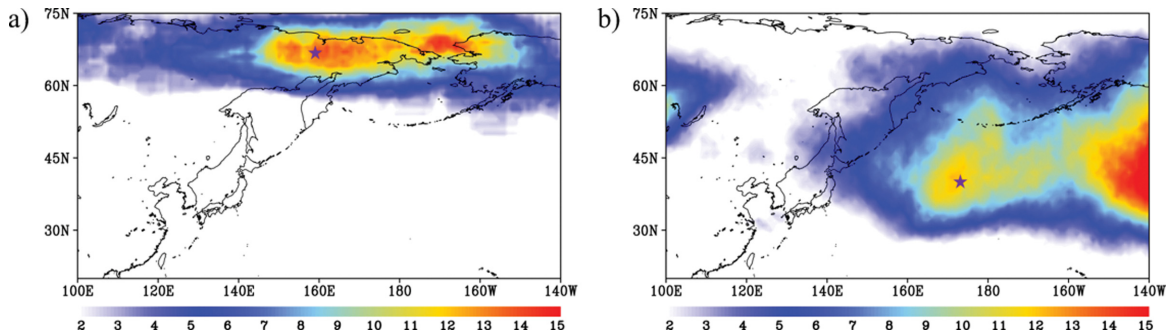


Fig. 2. Climatology of (a) blocking and (b) ridge frequency (in percentage of days) over the regions in DJF including the far northeast Asia and the central Pacific detected by DVN and Ridge index in winter. The star marks indicate maximum frequency points of KB and CPR respectively.

을 조사하였다. Figure 2는 DVN 지수로 확인된 블로킹과 Ridge 지수로 확인된 기압능의 빈도수 분포를 나타낸 것이다. Figure 2a에서 보이는 바와 같이 DVN 지수로 확인한 블로킹은 베링 해협과 캄차카 반도 북쪽 부근에 가장 빈번하게 나타나고 있으며, 최대 약 15% 정도의 빈도수를 보인다. 이러한 블로킹 중 한반도의 겨울 한파에 영향을 미치는 것으로 알려진 캄차카 반도 근처에서 형성되는 블로킹을 KB로 정의하고 이후 분석을 진행하였다. KB의 최대 발생 빈도가 나타난 지점은 67°N, 159°E이다. Figure 2b는 Ridge로 탐지한 기압능의 빈도수를 보여준다. 기압능 탐지에서는 중앙 태평양의 넓은 지역에서 높은 빈도수가 나타나는 특징이 있으며, 미국 서부 해안에서 빈도수가 매우 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 미국 서부 해안의 기압능은 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 기후적으로 기압능이 가장 빈번하게 발생하는 영역으로 지형적인 원인으로 발생하는 현상이다. 본 연구는 한반도 한파와 관련성을 분석하기 위함으로 미국 서부 지역의 기압능은 제외하고 중앙 태평양 지역의 기압능을 분석하였다. 중앙 태평양 지역의 기압능은 약 12%의 발생빈도를 보여주고 있으며 최대 빈도 발생 지점은 40°N, 173°E이다. 이 지역의 기압능을 중앙 태평양 기압능(Central Pacific Ridge, 이하 CPR)으로 정의하였다. 블로킹이 주로 60°N 이상에서 발생한 것과 달리 기압능은 상대적으로 저위도에서 발생하고 있다. KB와 CPR의 지위고도의 특징적 구조와 이때 발생하는 한반도 주변의 지상 기온 변화를 분석하였다. Figure 3은 KB와 CPR이 발생했을 때의 Z500과 T2M의 함성장을 나타낸 것이다. 또한 각각의 아노말리를 함께 제시하였는데 이 때 각 블로킹의 최대 빈도 지점을 기준으로 발생한 날과 발생하지 않은 날의 차이로써 산출하였다. KB가 발생했을 때의 대기 상층 흐름의 양상은 캄차카 반도 서쪽으로 기압골이 강하게 형

성되고 기압골의 동쪽에서 블로킹이 형성되는 모습을 보여준다. 이 때, 블로킹의 형성 위치에서 양의 Z500 아노말리가 강하게 나타나고 있고 남쪽으로 음의 Z500 아노말리가 나타나고 있다. 이러한 음의 아노말리는 KB가 발생하면서 기압골이 남쪽으로 확장함으로써 나타나는 양상이다. 이 때 한반도는 음의 Z500 아노말리 영향권에 포함되어 있다(Fig. 3a). 지상 기온의 함성장을 살펴보면, 한반도에서 약한 음의 T2M 아노말리가 나타남을 확인할 수 있다(Fig. 3b). 이러한 결과는 Kim et al. (2022)에서 블로킹 발생시 동아시아 지역에서 음의 Z500 아노말리가 지상에 낮은 온도 분포를 야기한다는 보고와 일치하는 양상으로 나타나나, 지상의 기온 아노말리는 상대적으로 약하게 나타나고 있으며 한반도의 경우 약 -0.3 K 수준으로 상대적으로 유의성이 낮은 것으로 분석되었다. Figures 3c, d는 CPR의 결과이다. Figure 3c에서 보여지는 바와 같이 CPR이 발생했을 때는 북태평양의 광범위한 영역에서 골-마루-골의 형태를 띄고 있다. 이 때 한반도는 왼편 기압골에 위치하게 된다. 이는 Z500 아노말리에서도 뚜렷하게 나타나 강한 음의 Z500 아노말리 영향권에 포함되어 있다(Fig. 3c). 이 때 한반도는 강한 음의 T2M 아노말리가 나타나며 약 -1.3 K 정도이다(Fig. 3d). KB에서 Z500 아노말리가 남북으로 형성되는 형태를 보여준 반면 CPR은 동서로 형성되는 형태를 보이고 있어 KB와 CPR은 서로 구분된 구조를 가지고 있음을 알 수 있다. CPR 패턴의 구조는 한반도 겨울철 동해-일본 저기압 발달로 인한 강한 한파 사례에서 나타나는 상층 구조와 유사하며, 지상의 저기압과 상층 기압골이 상호 연관되어 강화되는 구조로 알려져 있다(Yoo et al., 2015; Lee et al., 2018). 한반도에서의 Z500 아노말리는 CPR이 더 강한 것으로 확인되며 KB는 -11.5 m 정도이나 CPR은 -30.7 m 정도로 KB에 비해 상대적으로 강한 음의 Z500

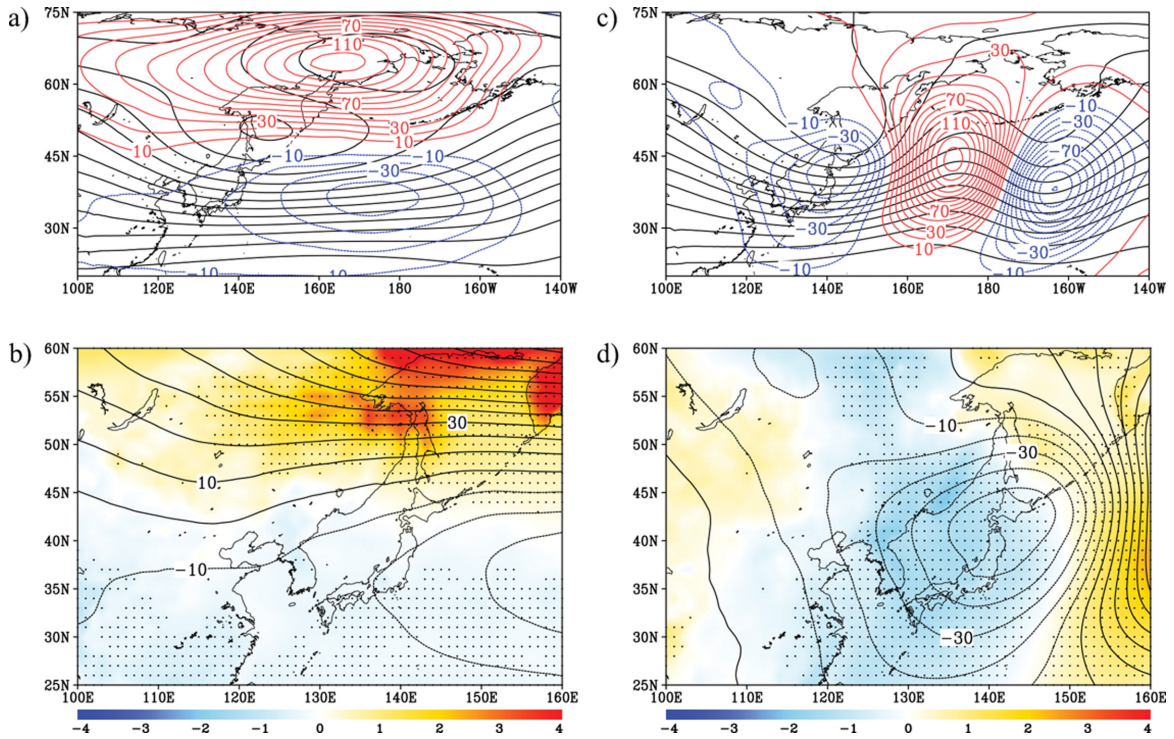


Fig. 3. Composites of Z500 (top) and T2M (bottom) for KB(a, b) and CPR(c, d). Positive (negative) anomalies of Z500 (m) are given in red (blue) contours, and those of T2M (K) are presented in shades with the same color. The black dots indicate the values that exceed the 95% confidence level for T2M. Contour interval is 60 m (Z500) and 10 m (anomalies).

아노말리 영향권에 한반도가 포함되는 것으로 나타난다. 즉, KB와 CPR이 서로 다른 형태로 형성되며 한반도에 강한 음의 Z500 아노말리를 형성하는 CPR의 형태가 상대적으로 한파와의 관련성이 크다고 분석할 수 있다.

다음으로 KB를 RWB로 구분하여 블로킹의 구조와 영향을 분석하였다. 많은 선행 연구들이 RWB로 구분된 블로킹의 구조적 형태가 다르며, 이에 따라 블로킹 발생 지역에서 악기상에 대한 영향력에 차이가 있다고 보고하였다(Davini et al., 2012; Woollings et al., 2018; Sousa et al., 2021). 이러한 RWB로 KB를 구분하여 적용하면 RWB에 따라 KB의 구조적 형태가 달라지고 한반도에 미치는 영향은 달라질 수 있기 때문에 KB를 RWB로 구분하였다. RWB의 적용은 WBI를 사용하였으며, KB 사례의 RWB를 판단하기 위해 각 사례의 IB들에 대한 WBI를 조사하고 사례 중 나타났던 지배적인 파동 정체의 방향을 기준으로 정의하였다. 즉 KB 사례 중 저기압성 파동 정체가 더 많이 발생했다면 KBc (KB with cyclonic wave breaking)로 정의하였고 고기압성 파동 정체가 많았다면 KBa (KB with anticyclonic wave breaking)로 정의하였다. Figure

4는 RWB를 적용하여 구분한 KBc와 KBa의 블로킹의 구조와 한반도의 지상 기온 아노말리이다. RWB로 구분한 KB는 서로 상이한 양상으로 나타남을 알 수 있다. KBc의 블로킹 형태는 KB와 유사하고 한반도 주변의 음의 Z500 아노말리를 형성하는 반면(Fig. 4a), KBa는 KB와 다른 형태의 블로킹 구조로 한반도 주변에서 양의 아노말리를 형성하고 있다(Fig. 4c). KBc만 고려했을 때 한반도 주변의 Z500 아노말리는 약 -15 m로 전체 KB 중 저기압성 파동 정체로 구분된 KB에서 주로 한반도에 강한 음의 Z500 아노말리와 한파를 유발한다고 볼 수 있다(Fig. 4b). KBa의 경우, 캄차카 반도 부근에 형성된 강한 기압골의 서쪽에서 블로킹이 형성되는 특징을 보이며, 블로킹의 남동쪽, 남서쪽 각각으로 음의 Z500 아노말리가 나타나는 특징을 보여준다. 이 때 나타나는 기온 변화는 주로 한반도 북쪽 블로킹 영역에서 나타나며 강한 양의 아노말리가 확인된다. 이 때 한반도 주변에서는 약 0.5 m의 양의 Z500 아노말리가 확인되며, 약한 양의 T2M 아노말리가 나타나는 것으로 확인된다(Fig. 4d).

앞선 분석에서 KB가 한반도의 한파에 미치는 영향이 작았던 것은 고기압성 파동 정체, 한파와 무관한

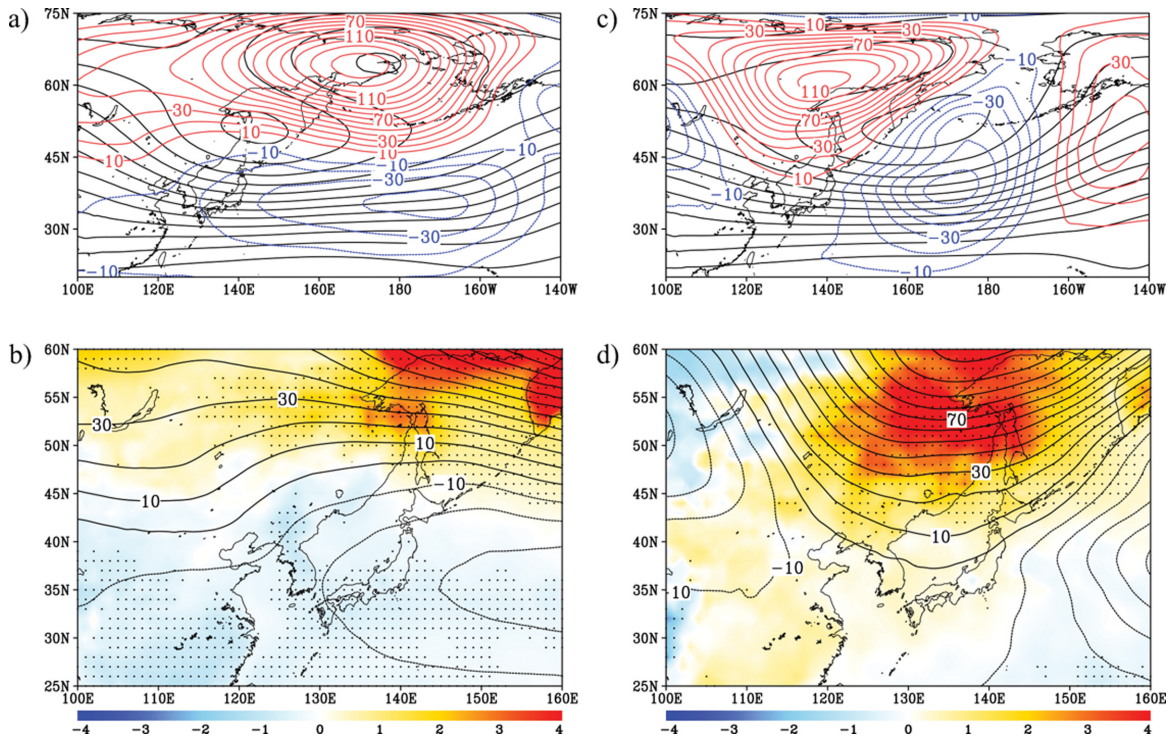


Fig. 4. The same as in Fig. 3 except KBc (a, b) and KBa (c, d).

Table 1. Blocking events, duration, frequency over the Pacific, and averaged anomalies on the Korean Peninsula according to blocking patterns.

Type	Blocking characteristics			Anomaly averaged over the Korean Peninsula	
	Number of events	Duration (day)	Frequency (%)	Z500 (m)	T2M (K)
KB	39	6.54	14.17	-11.50	-0.33
KBc	30	6.53	10.88	-15.09	-0.58
KBa	9	6.56	3.28	0.45	0.50
CPR	-	-	12.33	-30.77	-1.33

KBa를 포함한 결과였으며 KB가 RWB로 구분됨에 따라 블로킹의 구조적 차이를 보이고, 구조적인 변화는 한반도 온도에 미치는 영향이 서로 반대로 나타나 RWB가 KB를 구분할 수 있는 중요한 인자임을 확인하였다. 정리하자면, 한반도 한파에 영향을 미치는 블로킹의 형태는 CPR과 KBc로 분석되었으며, KBa는 한파와 관련이 없는 것으로 볼 수 있다.

Table 1은 블로킹의 형태에 따라 한반도에 미치는 영향에 대해 사례수 및 지속 기간과 각각의 Z500 및 T2M의 아노말리를 나타낸 것이다. 겨울철 20년간 발생한 KB의 사례는 총 39건으로, RWB로 구분한 KBc가 30건, KBa가 9건으로 분류되어 KBc의 경우가 지

배적임을 알 수 있다. 지속기간의 경우 KBc와 KBa가 유사하게 나타나 약 6.5일의 지속기간을 보인다. CPR의 경우 20년간 발생한 빈도는 12.33%로 나타났는데 이는 KB 중 한반도 한파에 영향을 주는 KBc보다 오히려 높은 빈도이다. 본 연구에서 CPR의 경우는 지속기간을 고려한 사례 구분을 정의하지 않았다. 이는 연속된 사례를 구별하기 위해서는 현상의 수평 규모에 대한 이해를 바탕으로 한 영역 기준(블로킹의 경우 $5^{\circ} \times 10^{\circ}$)이 요구되는 반면, 현재 파악된 기준값이 부재하기 때문이다. 한반도에서 나타나는 T2M 아노말리를 살펴보면 KBc의 경우 -0.58 K, CPR의 경우 -1.33 K로 CPR이 KBc보다 더 큰 것을 알 수 있다.

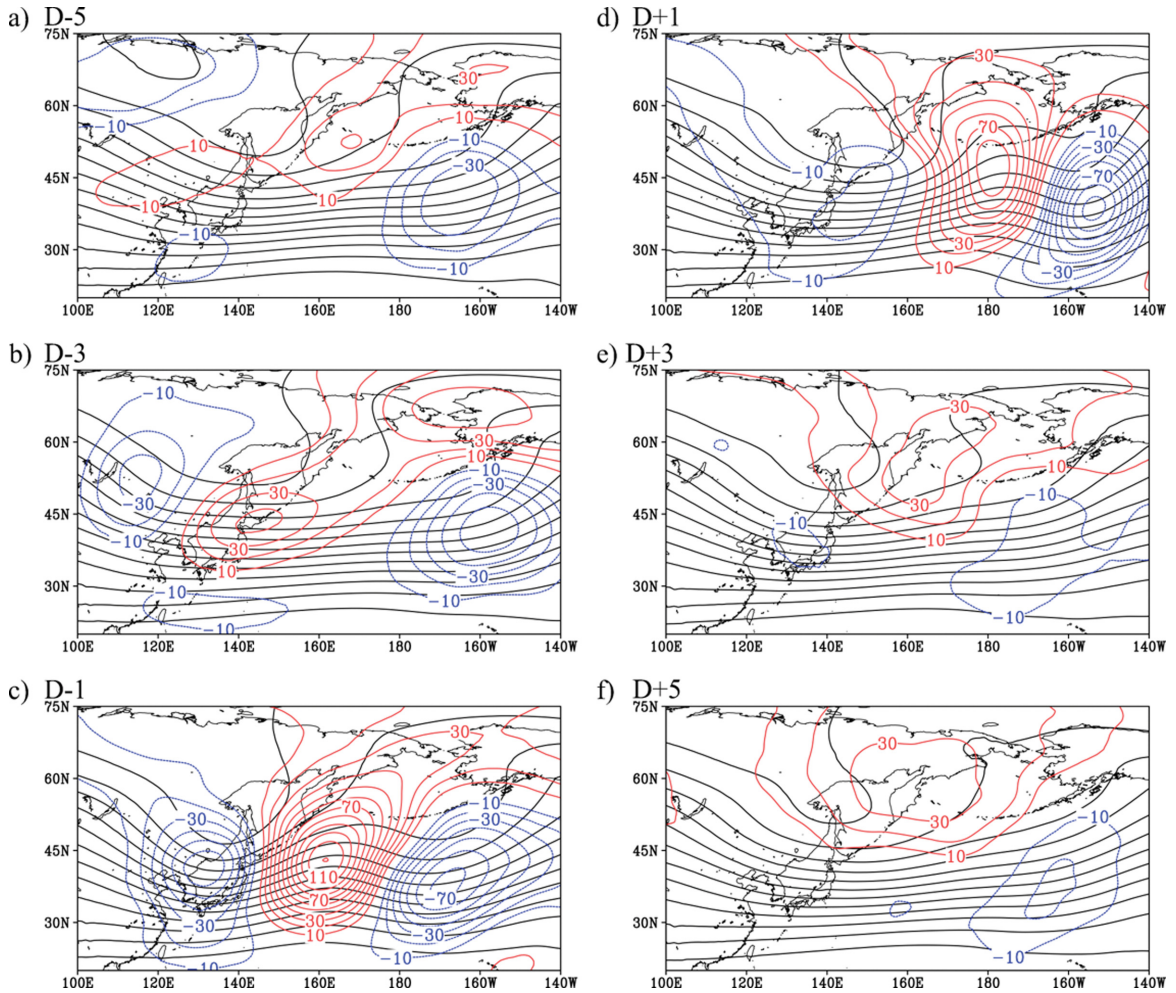


Fig. 5. Lead-lag composites of Z500 (black contour, m) of CPR cases from D-5 to D+5 with a 48h interval. Positive (negative) anomaly is presented with red (blue) contours. Contour interval is 60 m (black) and 10 m (blue, red).

CPR 지속기간 및 발달 과정에 따른 구조 변화와 한반도에 기온과의 관련성에 대한 상세한 분석을 위해, 일별로 탐지된 CPR의 탐지일 기준 5일 전부터 5일 후까지의 합성장 분석을 수행하였다. Figure 5는 CPR 탐지일 5일 전부터 2일 간격으로 나타난 Z500의 구조와 아노말리 분포이다. CPR 탐지일 5일 전에는 태평양의 160 W 부근으로 음의 Z500 아노말리가, 캄차카 반도 인근에 약한 양의 아노말리가 형성된 모습을 보여주고 있으며 이때 한반도 주변은 뚜렷한 변화가 확인되지 않는다(Fig. 5a). 3일 전에는 160 W 부근에 위치했던 음의 아노말리가 강화된 것이 확인되며, 이 때 한반도 주변의 Z500의 아노말리가 나타나기 시작해, 한반도를 중심으로 북서방향에 음의 Z500 아노말리, 동쪽으로 양의 아노말리가 형성된다(Fig.

5b). 1일 전, 베링해 남쪽의 음의 아노말리는 정체되며 더욱 강화되고, 한반도 부근부터 중앙 태평양에 걸친 영역에서 기압골-기압능-기압골의 CPR 구조가 확인되며, 한반도는 강한 음의 Z500 아노말리의 영향권에 위치한다(Fig. 5c). 1일 후까지 이러한 패턴이 유지되며 다소 약화된 모습과 동쪽으로 이동한 양상을 보인다. 이 때까지 한반도는 음의 Z500 아노말리 영향권에 포함되어 있다(Fig. 5d). 3일 후부터 CPR의 구조적인 Z500 아노말리가 사라진다(Figs. 5e-f). 한반도 기온과 직접적으로 관련되는 CPR의 구조는 탐지일 기준 1일 전부터 1일 후까지 약 3일정도 지속된다고 볼 수 있으며 CPR 구조의 발달은 베링해 남쪽에서 발달하는 음의 Z500 아노말리와 한반도 기준 서쪽에서 발달해서 동쪽으로 이동하는 Z500 아노말리가 주

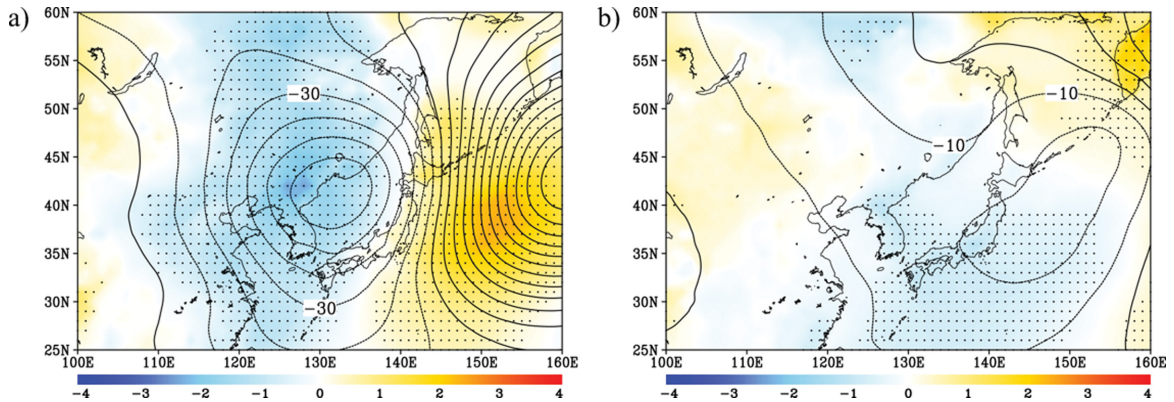


Fig. 6. Z500 (contour, m) and T2M (shading, K) anomalies of CPR cases on (a) D-1 and (b) D+1. The black dots indicate the values that exceed the 95% confidence level for T2M. Contour interval is 10 m.

요한 발달 요인으로 분석된다.

CPR이 지속되는 동안 한반도 한파의 양상을 확인하기 위해 탐지일 기준 1일 전과 1일 후의 T2M 아노말리를 확인하였다. CPR 탐지 1일 전에 한반도는 강한 음의 Z500 아노말리의 영향권에 위치하고 한반도 주변으로 남북방향으로 늘어진 비교적 강한 음의 T2M 아노말리가 형성된다. 이러한 음의 아노말리는 중국 동쪽부터 한반도 서해안까지 나타나며 일본 동쪽으로는 양의 T2M 아노말리가 나타난다. 한반도 주변에서 나타나는 기온 하강의 최대값은 만주지역에서 약 -2.5 K 정도로 확인되며 우리나라는 평균 1.5 K 정도의 기온이 강하하는 것으로 나타났다(Fig. 6a). 탐지 1일 후에는 음의 Z500 아노말리가 약해지면서 T2M 아노말리도 약해지는 것을 확인하였다(Fig. 6b). CPR이 지속되는 약 3일의 기간은 KB의 평균 지속기간보다 짧지만, 이 때 한반도 기온 감소는 큰 것으로 설명할 수 있다.

결과적으로 겨울철 한반도에 한파와 관련된 블로킹 현상은 KBc와 CPR이다. 둘은 한반도에 음의 Z500 아노말리를 형성한다는 공통점을 보이며, 이 음의 아노말리의 강도가 강할수록 한파의 강도가 강해진다. CPR은 한반도에 짧은 기간에 걸친 강한 한파와 관련되며 KBc는 상대적으로 CPR보다 긴 기간동안 한반도에 추위를 야기한다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 북서태평양 지역의 블로킹을 구분하고 구분된 블로킹의 구조 및 특성과 한반도 한파와의 관련성을 분석하였다. 한반도 주변 지역에서 발생하는 블로킹을 발생초기의 RWB 타입에 따라 분류하고 저기압성 파동 정체와 함께 나타나는 블로킹과 고기

압성 파동 정체로 나타나는 블로킹으로 구분하였다. 또한 최근에 제시되고 있는 저위도 블로킹 혹은 기압능을 분석하기 위해 새로운 탐지 방법을 제안하였다. 이 방법은 지위고도의 남북 방향 편차를 계산하여 탐지하는 블로킹 탐지 방법을 동서 방향의 편차로 계산하도록 수정하였고 일정 조건을 만족할 경우 기압능으로 탐지하도록 하였다. 이러한 탐지 방법을 적용하여 도출한 주요 결과는 다음과 같다.

우선 북서태평양에서 나타나는 두 종류의 블로킹을 KB와 CPR로 정의하였고 각각의 특성과 한반도 한파와의 관련성을 확인할 수 있었다. KB는 고위도에서 형성되고 CPR은 상대적으로 저위도에서 발생하여 지역적으로 구분되나, 한반도에 공통적으로 음의 Z500 아노말리를 보였다. Z500의 음의 아노말리와 함께 한반도에 한파가 나타났으며 한파의 강도는 Z500 아노말리의 크기와 관련이 있고 CPR이 KB보다 상대적으로 큰 Z500 아노말리와 낮은 온도를 보여주었다. KB는 감차가 반도에 강하게 형성된 기압골의 동쪽에서 정체 현상이 발생하며 약 6.5일 정도 지속되었고 CPR은 약 3일 정도 지속되는 현상으로 베링해의 남쪽에서 발달하는 음의 Z500 아노말리와 한반도에서 나타나 동쪽으로 이동하는 음과 양의 아노말리가 CPR을 형성하는 요인으로 확인하였다.

한반도 한파에 영향을 미치는 KB를 RWB로 구분하여 KBc, KBa로 구분할 수 있었으며, 두 블로킹의 상이한 구조 형태에 따라 한파에 미치는 영향을 확인하였다. 저기압성 파동 정체로 구분된 KBc의 구조는 KB와 유사하게 나타났으며 한반도에 KB보다 상대적으로 강한 음의 Z500 아노말리가 형성되며 강한 음의 T2M 아노말리를 보였다. 반면 KBa가 발생했을 때, 한반도는 음의 Z500 아노말리 영향권이 아닌 양의 아노말리가 나타나며 한파와는 무관한 즉 양

의 아노말리 온도 구조를 보여주었다. KBa 블로킹은 KB 전체에 대한 한반도 T2M 아노말리가 약한 음의 아노말로 나타나게 되는 요인이다.

결과적으로 한반도 한파와 관련이 있는 블로킹은 상대적으로 저위도에서 발달하는 CPR과 고위도에서 발달하면서 저기압성 파동 정체로 구분된 KBc였으며 KBc는 약 6.5일의 지속시간과 상대적으로 약한 한파를 동반하고 CPR은 약 3일의 지속시간과 강한 한파를 동반한다. 이러한 결과는 KB를 RWB로 구분하여 KB의 구조가 달라지고 이에 따라 한반도에 미치는 영향이 달라지는 것을 보여주었으며 새롭게 CPR 현상을 분석하여 한파와의 관계를 제시하였다. KB와 RWB의 물리적인 연관성에 대해서는 향후 추가적인 분석이 필요할 것으로 보인다. 또한 CPR 패턴의 발달 과정 및 타 현상과의 연관성에 대한 연구를 통해 현상의 규명이 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 기상청 출연사업인 (재)차세대수치예보모델개발사업단의 가변격자체계 기반 통합형수치예보모델 개발(KMA2020-02212)의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- Bae, J.-H., and K.-H. Min, 2016: Analysis of the February 2014 East coast heavy snowfall case due to blocking. *Atmosphere*, **26**, 227-241, doi:10.14191/Atmos.2016.26.2.227 (in Korean with English abstract).
- Barriopedro, D., R. García-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, doi:10.1007/s00382-010-0767-5.
- D'Andrea, F., and Coauthors, 1998: Northern Hemisphere atmospheric blocking as simulated by 15 atmospheric general circulation models in the period 1979-1988. *Climate Dyn*, **14**, 385-407, doi:10.1007/S003820050230.
- Davini, P., C. Cagnazzo, S. Gualdi, and A. Navarra, 2012: Bidimensional diagnostics, variability, and trends of Northern Hemisphere blocking. *J. Climate*, **25**, 6496-6509, doi:10.1175/JCLI-D-12-00032.1.
- Dunn-Sigouin, E., S.-W. Son, and H. Lin, 2013: Evaluation of Northern Hemisphere blocking climatology in the global environment multiscale model. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 707-727, doi:10.1175/MWR-D-12-00134.1.
- Galarneau, T. J. Jr., T. M. Hamill, R. M. Dole, and J. Perlwitz, 2012: A multiscale analysis of the extreme weather events over western Russia and northern Pakistan during July 2010. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 1639-1664, doi:10.1175/MWR-D-11-00191.1.
- Hamill, T. M., and G. N. Kiladis, 2014: Skill of the MJO and Northern Hemisphere blocking in GEFS medium-range reforecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **142**, 868-885, doi:10.1175/MWR-D-13-00199.1.
- Hersbach, H., and Coauthors, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **146**, 1999-2049, doi:10.1002/qj.3803.
- Hwang, J., S.-W. Son, P. Martineau, and D. Barriopedro, 2022: Impact of winter blocking on surface air temperature in East Asia: Ural versus Okhotsk blocking. *Climate Dyn*, **59**, 2197-2212, doi:10.1007/s00382-022-06204-5.
- Kim, S.-H., H.-J. Sung, S.-J. Kim, E.-H. Baek, J.-Y. Moon, and B.-M. Kim, 2022: Contribution of Ural and Kamchatka blockings to the amplified warm arctic-cold eurasia pattern under arctic sea ice loss and eurasian cooling. *J. Climate*, **35**, 4071-4083, doi:10.1175/JCLI-D-21-0635.1.
- Kunz, T., K. Fraedrich, and F. Lunkeit, 2009: Impact of synoptic-scale wave breaking on the NAO and its connection with the stratosphere in ERA-40. *J. Climate*, **22**, 5464-5480, doi:10.1175/2009JCLI2750.1.
- Lee, H.-Y., J. Kim, I.-G. Park, H. Kang, and H. Ryu, 2018: Local enhancement mechanism of cold surges over the Korean Peninsula. *Atmosphere*, **28**, 383-392, doi:10.14191/Atmos.2018.28.4.383 (in Korean with English abstract).
- Masato, G., B. J. Hoskins, and T. Woollings, 2013: Wave-breaking characteristics of Northern Hemisphere winter blocking: A two-dimensional approach. *J. Climate*, **26**, 4535-4549, doi:10.1175/JCLI-D-12-00240.1.
- 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, doi:10.1007/s00382-013-1817-6.
- Rex, D. F., 1950: Blocking action in the middle troposphere and its effect upon regional climate. *Tellus*, **2**, 275-301, doi:10.3402/tellusa.v2i4.8603.
- Sausen, R., W. Köenig, and F. Sielmann, 1995: Analysis of blocking events from observations and ECHAM model simulations. *Tellus A*, **47**, 421-438, doi:10.3402/tellusa.v47i4.11526.
- Sousa, P. M., D. Barriopedro, R. García-Herrera, T. Woollings, and R. M. Trigo, 2021: A new combined detection algorithm for blocking and subtropical ridges. *J. Climate*, **34**, 7735-7758, doi:10.1175/JCLI-D-20-0658.1.
- Tibaldi, S., and F. Molteni, 1990: On the operational pre-

- dictability of blocking. *Tellus A*, **42**, 343-365, doi: 10.3402/tellusa.v42i3.11882.
- Treidl, R. A., E. C. Birch, and P. Sajecki, 1981: Blocking action in the northern hemisphere: A climatological study. *Atmos. Ocean*, **19**, 1-23, doi:10.1080/07055900.1981.9649096.
- White, W. B., and N. E. Clark, 1975: On the development of blocking ridge activity over the central North Pacific. *J. Atmos. Sci.*, **32**, 489-502, doi:10.1175/1520-0469(1975)032<0489:OTDOBR>2.0.CO;2.
- Woollings, T., D. Barriopedro, J. Methven, S.-W. Son, O. Martius, B. Harvey, J. Sillmann, A. R. Lupo, and S. Seneviratne, 2018: Blocking and its response to climate change. *Current Climate Change Reports*, **4**, 287-300, doi:10.1007/s40641-018-0108-z.
- 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, doi:10.14191/Atmos.2015.25.3.435 (in Korean with English abstract).