

한반도 봄철 황사 발생시 동아시아 온대저기압의 기후학적 특징

이재연¹⁾ · 김준수²⁾ · 손석우^{1)*}

¹⁾서울대학교 지구환경과학부, ²⁾국립기상과학원 수치모델연구부 수치모델개발과

(접수일: 2016년 6월 21일, 수정일: 2016년 8월 12일, 게재확정일: 2016년 9월 22일)

Climatic Features of Extratropical Cyclones During the Spring-time Yellow Dust Events in Korea

Jaeyeon Lee¹⁾, Junsu Kim²⁾, and Seok-Woo Son^{1)*}

¹⁾School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

²⁾National Institute of Meteorological Sciences, Seoul, Korea

(Manuscript received 21 June 2016; revised 12 August 2016; accepted 22 September 2016)

Abstract The yellow dust events in Korea are often associated with extratropical cyclones (ETCs) that travel across the source regions of yellow dusts. Although such synoptic patterns are well documented, climatic features of ETCs themselves during the yellow dust events are not well understood. The present study reports climatic features of spring-time ETCs, which accompany the yellow dust events in Korea, by tracking individual ETCs with an automated tracking algorithm. By analyzing Lagrangian tracks of ETCs from 1979 to 2014, it is found that, during yellow dust events, ETCs are located around Vladivostok, Russia. They are typically originated from the leeward of Altai-Sayan mountains about three days before the onset of the yellow dust events, and travel either eastward or southeastward in time. While their tracks are not unusual, they grow faster over the source regions of the yellow dusts, possibly lifting desert dusts above the planetary boundary layer, and further develop slowly as they travel eastward.

Key words: Extratropical cyclone, yellow dust events, automated tracking algorithm

1. 서 론

주로 봄철에 발생하는 동아시아 황사는 인체적 및 경제적 피해뿐만 아니라 기후 시스템에도 영향을 줄 수 있다. 특히 대기복사 및 강수 시스템을 변화시켜 지역 기후에 큰 영향을 끼칠 수 있기 때문에 대기환경적 측면 이외 기후학적 측면에서도 황사에 대한 연구는 매우 활발히 이루어졌다(Bergstrom, 1998; Yoshioka et al., 2007; Yue et al., 2010).

기존 황사에 대한 연구들은 주로 발원지 추적이나 발생 메커니즘을 중심으로 이루어졌다. 일례로

Lim and Chun (2006)은 세계 통신 시스템(Global Telecommunication System) 자료를 분석하여 1993년부터 2004년까지 북동아시아 황사의 발원지가 고비사막과 내몽고에 집중됨을 보고하였다. Lee and Kim (2008)은 황사 발생은 발원지 근처의 주로 강한 바람과 적은 강수와 관련이 깊으며, 2002년 이후 발원지가 고비사막과 내몽고에 집중되었음을 재확인하였다. Chun (1996)은 1993년 사례를 중심으로 라그랑지안 모델링을 통하여 발원지의 배출 조건은 바람뿐만 아니라 토양의 상태에 따른 마모 속도 역시 중요함을 강조하였다. Mao et al. (2013)은 통합 풍식 모델링 시스템(Integrated Wind Erosion Modeling System)을 이용하여 1982년부터 2006년까지 봄철 몽고 남동부 지역과 북 중국 지역에서의 식생 분포의 증가가 그 지역에서의 먼지폭풍의 발생 빈도와 먼지의 부유를 감소시켰음을 밝혔다.

황사의 발원지에 대한 연구와 더불어 황사의 수송

*Corresponding Author: Seok-Woo Son, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea.
Phone: +82-2-880-8152, Fax: +82-2-883-4972
E-mail: seokwooson@snu.ac.kr

에 대한 연구도 활발히 이루어졌다. 일반적으로 봄철 황사는 몽고와 중국 북부 지역에서 발생하여 한반도로 유입될 때까지 2-4일 정도 걸리며(Chung and Kim, 1991), 주로 대기경계층 위 1.5 km 고도 전후 바람장을 따라 수송된다(Chun et al., 2001). 황사의 수송은 강한 북서풍을 필요로 하는데 이는 온대저기압과 밀접한 관련이 있다. 일례로 티벳 산맥의 풍하 측에서 발생한 풍하 저기압은 하층의 강풍을 통해 황사를 부유시키며 부유된 황사는 저기압을 따라 한반도로 이동할 수 있다(Chung and Park, 1995; Chung and Kim, 1991). 최근에는 기상 모델을 이용한 황사 분석도 활발히 이루어지고 있는데 Park et al. (2013)은 MM5 (Mesoscale Model version 5) 및 ADAM2 (Asian Dust Aerosol Model 2)를 이용하여 황사의 장거리 수송은 고기압 전면을 따라 남동쪽으로 이동하거나 저기압 후면을 따라 북동쪽으로 이동함을 보였다. 이후에 남동쪽으로 이동하는 황사는 고기압 시스템에 의해 침적을 겪어 장거리 수송에 제한이 되며, 북동쪽으로 이동하는 황사는 저기압 시스템에 의해서 부유되며 장거리 이동이 가능함을 제시하였다.

기존 연구를 종합하면 한반도에 발생하는 황사는 고비사막과 내몽고지역에서 기상상태가 건조하고 그 주변 하층바람이 강할 때 생성되며, 온대저기압 후면의 강한 바람 대를 타고 남동진하여 한반도에 도달한다. 개별 사례간 약간의 차이는 있지만 황사의 생성 및 수송은 동아시아 온대저기압의 발달 및 이동과 강한 양의 상관성을 보인다(Qian et al., 2002). 즉, 동진 혹은 남동진하는 대륙성 온대저기압은 한반도 황사 발생의 필요조건으로 알려져 있다.

황사의 이동경로를 추적하기 위해 다양한 공기과 궤적 분석이 꾸준히 이루어진 반면 황사의 장거리 이동에 직접적으로 영향을 미치는 온대저기압의 특성에 대해서는 사례분석이나 단기간 자료 분석이 대부분이었다. 특히 황사를 동반하는 저기압이 어디서 생성되는지, 어떻게 이동하는지 얼마나 빠르게 발달하는지에 대한 장기간 기후학적 연구는 전무한 실정이다. 본 연구에서는 황사의 주된 수송 수단으로 알려진 온대저기압을 직접적으로 추적함으로써 황사 발생시 온대저기압의 특징을 정성적으로 조사하였다. 단순한 합성장 분석뿐만 아니라 라그랑지안 관점에서 사례별 저기압을 추적하여 황사 발생시 동아시아 온대저기압의 발생 빈도, 강도, 이동속도, 발달속도, 이동방향 등을 정성적으로 분석하였다.

2. 자료 및 방법

2.1 황사 발생일

기상청에서는 황사 관측 시에 기본적으로 세계기상

기구(World Meteorological Organization)의 권고에 따라 목적을 하며 추가적으로 황사 특보를 위해 계기 관측 결과를 이용한다. 황사에 의해 1시간 평균 미세먼지 농도가 $400 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상이 2시간 이상 지속될 것으로 예상될 때 황사주의보를 발표하며, $800 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상이 2시간 이상 지속될 것으로 예상될 때는 황사 경보를 발표한다.

본 연구에서는 위의 기상청 황사 발표 기준을 참고하여 황사 기준 일을 정하였으며 그 중 1979년부터 2014년까지 36년간의 봄철(3월, 4월, 5월) 서울에서 관측된 황사 사례를 분석하였다. 또한 황사 발생 첫날을 황사 발생 기준으로 정하고 그 시기 한반도 황사에 영향을 줄 수 있는 온대저기압들의 기후학적인 특성을 분석하였다.

2.2 온대저기압 탐지 및 추적

온대저기압(Extratropical cyclone; ETC)은 1979년부터 2014년까지 36년 동안의 유럽 중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)의 ERA-Interim 재분석 자료를 이용하여 분석하였다(Dee et al., 2011). 일반적으로 온대저기압은 해면기압을 이용해 정의된다. 그러나 해면기압의 최소값은 저기압이 매우 잘 발달되었을 때 뚜렷하게 나타나기 때문에 초기 저기압을 감지하는 데는 제약이 따른다. 무엇보다도 복잡한 지형의 동아시아에서 해면기압은 넓은 지역에서 연속적으로 외삽한 값을 이용하게 되어 산악 지형에서는 상당한 오차를 동반한다. 이와 같은 불확실성을 극복하기 위해 최근 연구들은 등압면 상대와도를 이용해 온대저기압을 감지하고 추적하고 있다(Hoskins and Hodges, 2002; Ulbrich et al., 2009). 등압면 자료는 외삽에 의한 오차가 적을 뿐만 아니라, 상대와도를 이용함으로써 좀더 작은 규모의 저기압을 감지할 수 있는 장점이 있으며(Hoskins and Hodges, 2002) 이로 인해 상대와도로 감지된 저기압의 수가 해면기압보다 증가할 수 있다. 이는 상대와도의 최대치가 항상 해면기압의 최소치와 일치하지 않을 수 있음을 암시한다(Sinclair, 1997). 그러나 이 둘은 정성적으로는 동일한 결과를 보인다(부록참조).

본 연구에서는 해면기압 탐지의 단점을 고려하여 황사가 주로 이동하는 850 hPa 등압면의 상대와도를 이용하여 온대저기압의 발달과 이동을 분석하였다. 수평해상도는 T63 ($1.875^\circ \times 1.875^\circ$)을 이용하였으며 행성규모의 요란을 제거하기 위하여 T5에서 T63까지의 파동수를 분석에 이용하였다. 또한 황사를 동반하는 동아시아 저기압이 강한 온대저기압임을 고려하여 저기압 강도는 1 CVU (Cyclonic Vorticity Units; 10^{-5} s^{-1}) 이상이고 최소 2일 이상 지속되며, 1000 km 이상의 거리를 이동하는 저기압만을 추적하였다(Hoskins and Hodges, 2002; Grise et al., 2013).

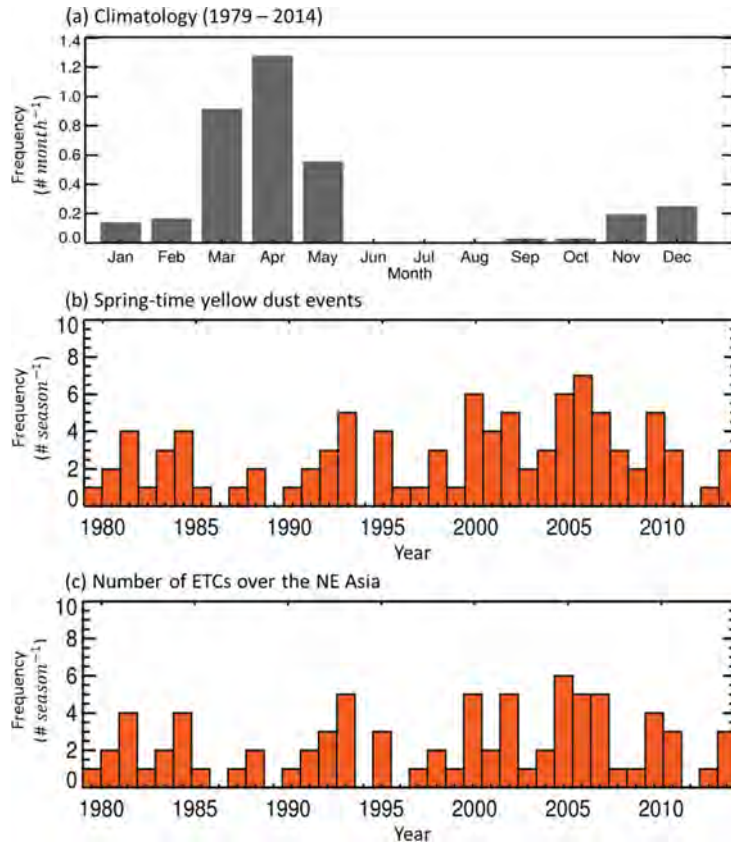


Fig. 1. (a) Monthly frequency of yellow dust events for the years of 1979~2014 (b, c). Time series of spring-time yellow dust events and number of ETCs over the North East Asia (see white box in Fig. 2).

2.3 저기압 추적 알고리즘

온대저기압을 객관적으로 추적하기 위해 자동화된 저기압 추적 알고리즘을 이용하였다(Hodges, 1994, 1995, 1999). 이 알고리즘은 먼저 상대와도의 공간장에 연결요소 라벨링(Connected Component Labeling algorithm)을 이용하여 개별 저기압을 분리한다. 이후에 격자화된 자료로부터 라벨링된 저기압의 지역 최대치를 탐지하고 6시간 간격으로 추적한다. 가능한 가장 부드러운 궤적을 얻기 위해서 연속적인 세 시간 단계($t-1$, t , $t+1$; t 는 당시의 기준이 되는 시간 단계를 의미)의 객체들의 위치들을 이용하여 얻은 이동 방향과 이동 속도로 구성된 비용함수를 이용하여 오차가 최소가 되는 궤적을 얻어낸다. 단, 연속적인 점들 사이의 이동 속도나 방향이 동일하다면 계산하지 않는다. 보다 자세한 설명은 Hodges (1994, 1995, 1999)에서 얻을 수 있다.

2.4 온대저기압 특성 정의

황사 발생시 온대저기압의 통계적인 특성을 분석하

고자 저기압 빈도수와 저기압 강도 및 저기압 성장을 중심으로 분석하였다(Plante et al., 2015). 이를 위해 먼저 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ 로 격자화된 자료에서 각 격자를 기준으로 555 km 반경의 지역을 저기압의 영향을 받는 단위 지역으로 정하였다. 이 때, 단위 지역 안에 감지된 동일한 저기압은 한번만 고려하였다.

온대저기압의 빈도수(ETC frequency)는 단위 지역 당 존재하는 저기압의 개수를 나타낸 것이며, 장기간의 빈도수의 평균을 나타낸 자료는 단위 지역을 몇 개의 저기압이 지나갔는지를 나타내준다. 온대저기압의 강도(ETC intensity)는 단위 지역에 존재하는 저기압의 평균 강도를 나타내준다. 또한 저기압의 성장률은 6시간 후의 강도에서 6시간 전의 강도를 뺀 값 중앙의 값이며, 이는 12시간 동안의 강도의 성장을 의미한다. 온대저기압의 접근 방향(ETC direction)은 저기압이 탐지되기 48시간 전의 위치에서 탐지된 당시의 위치로의 방향을 뜻한다. 추가적으로 저기압의 특성을 나타내기 위하여 지속시간과 이동속도를 추가하였다. 온대저기압의 지속시간(ETC lifetime)은 저기압

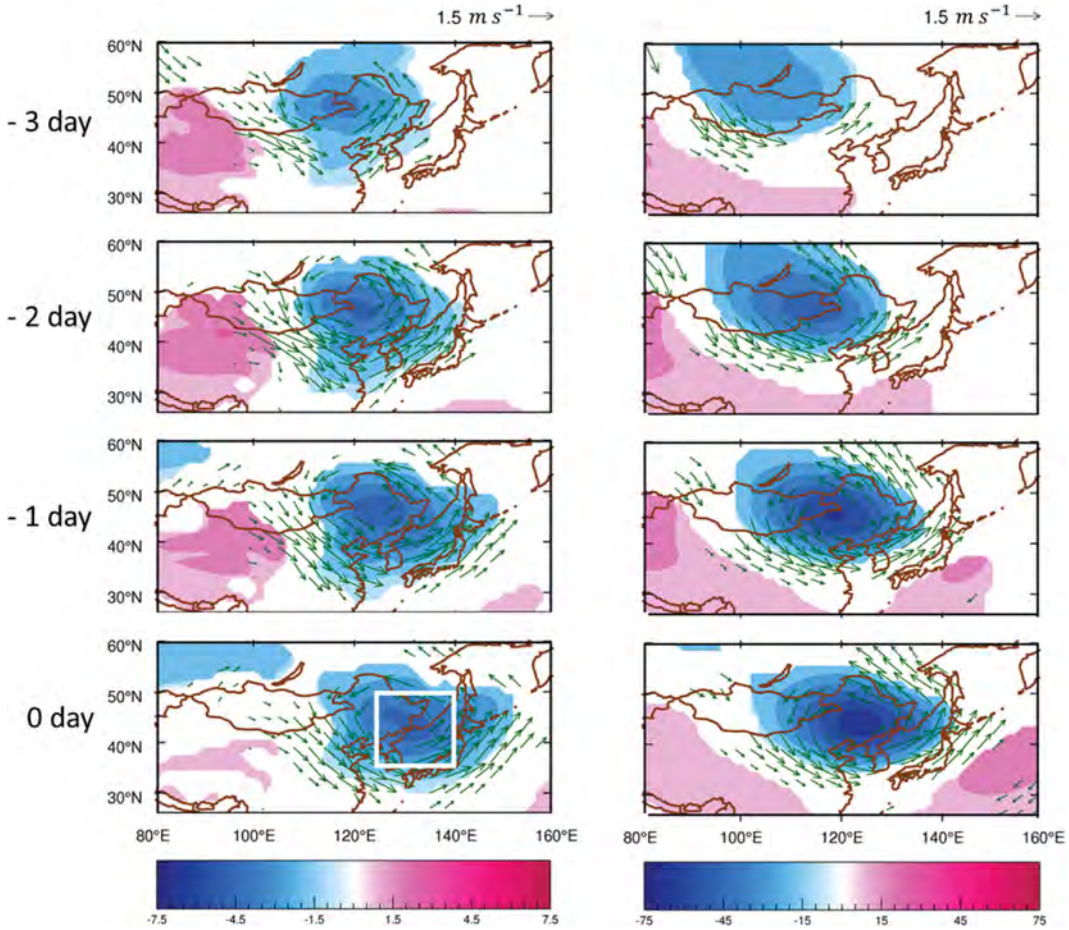


Fig. 2. Temporal evolution of (left) mean sea level pressure anomalies (hPa) with wind anomalies at 850 hPa and (right) geopotential height anomalies (m) with wind anomalies at 500 hPa from 3 days before yellow dust events to the onset date. Only statistically significant values at the 95% confidence level are shaded. The white box on left bottom panel indicates the North East (NE) Asia region.

생성 시간부터 소멸 시간까지의 총 합으로 정의하였고, 이동속도(ETC speed)는 각 시간 단계 별 이동거리를 6시간으로 나눈 값으로 1시간당 이동거리(kg h⁻¹)를 나타낸다.

3. 한반도 봄철 황사의 장기 변동성

Figure 1a는 1979년부터 2014년까지, 총 36년 동안 서울에서 관측된 황사의 발생일을 월별로 나타낸 그림이다. 세로축은 각 달에 매년 평균적으로 몇 회의 황사가 관측되었는지를 나타낸다. 이 때, 관측된 황사는 황사 발생 첫날 만을 고려하였다. 분석기간 동안의 황사는 주로 봄철(3, 4, 5월)에 집중되어 있으며 평균적으로 3월 0.9회, 4월 1.3회, 5월 0.5회의 황사가

관측되었다.

Figures 1b와 c는 봄철 황사 발생일과 황사 발생시의 온대 저기압의 발생 유무를 연도별로 나타낸 그림이다. 여기서 온대저기압 발생유무는 만주 동쪽 끝 및 블라디보스톡 근처 러시아 지역(Fig. 2 참조)에 저기압이 존재하고 있을 때를 기준으로 하였다. 총 95개의 황사 사례 중에서 약 84%인 80개의 사례에서 온대저기압이 존재한다. 예를 들어, 2010년 총 5회의 봄철 황사 사례 중에서 온대저기압을 동반한 황사 사례 수는 4회이고 단 1회만 온대저기압을 동반하지 않았다. 연간 봄철 황사 발생 횟수는 0회부터 최대 7회까지 강한 경년변동성을 보이고 있으며 황사를 동반하는 온대저기압의 빈도수 역시 강한 경년변동성을 보이는 것을 간접적으로 확인할 수 있다. 또한 황사

발생 빈도수는 2000년대 이후 급격히 늘어났고 이와 함께 저기압의 빈도수 역시 증가하는 모습을 보였다 (Fig. 1b).

4. 황사 발생시 종관장 특성

황사를 동반하는 저기압의 발달 과정을 종관규모에서 살펴보기 위하여 1979년부터 2014년까지 봄철 기간 중 황사 발생 당시의 해면기압 아노말리 합성장에 850 hPa 등압면의 바람 아노말리 합성장을 나타내었으며 동일한 방법으로 500 hPa 등압면 지위고도 아노말리 합성장에 500 hPa 등압면 바람 아노말리 합성장을 나타내었다. 결과의 통계적 유의성을 확인하기 위하여 t-검정을 이용하였으며 95%의 신뢰수준에서 유의한 결과만을 나타내었다. Figure 2는 황사 발생 3일 전부터 당일까지 하루 간격으로 해면기압 아노말리, 500 hPa 등압면 지위고도 아노말리 그리고 이와 함께 동반되는 바람 아노말리가 시간에 따라 어떻게 변화하였는지를 보여준다. 한반도 황사 발생시, 동아시아는 전형적인 서고동저형 기압배치를 보인다. 특히, 고기압은 한반도 황사 발생 이틀 전에 1.5 hPa 이상 기압이 상승하며 가장 강해진다. 황사의 주 발원지 중 하나인 내 몽고지역은 저기압과 고기압 사이의 강한 기압경도력에 의해 발생하는 강한 바람이 존재한다. 이러한 발원지의 강한 바람은 황사가 부유되기에 적합한 조건을 만든다(Lee and Kim, 2008).

온대저기압은 황사 발생 3일 전부터 황사의 주된 발원지인 고비사막 동쪽에 위치한다. 이 저기압은 시간이 지남에 따라 빠르게 발달하며 남동진한다. 이후 황사 발생 2일 전에 강도가 강해져 약 1 hPa 이상 기압이 하강하며 이 저기압은 황사 발생 당일까지 강도를 유지하며 한반도 북동쪽에 도달한다. 무엇보다, 온대저기압은 고비사막과 내몽고고원에서 강한 북서풍을 동반하고 이러한 강한 바람은 황사 발생 3일 전부터 당일까지 지속적으로 발원지에서 한반도로 황사의 유입을 초래한다. 이는 온대저기압이 황사 발원지를 통과할 때 저기압 후면의 강한 바람을 통해 황사를 부유시키고, 남동진하면서 황사를 한반도로 수송함을 시사한다(Chung and Park, 1995).

황사 발생 3일 전부터 중심기압이 빠르게 하강하며 남동진하는 패턴은 해면기압과 500 hPa 등압면 지위고도의 결과가 일치한다. 저기압 중심의 지위고도는 평년에 비하여 하루에 20 m씩 낮아지며 이는 발생 당일 날까지 지속된다. 해면고도에서의 저기압 중심과 비교하였을 때 저기압 중심이 500 hPa 등압면에서 보다 북서쪽에 위치하여 있다. 이는 황사 발생시 나타나는 서고동저형 기압패턴이 경압구조를 가짐을 의미한다.

5. 황사 발생시 온대저기압의 특성

합성장 분석은 한반도 황사 발생시 기상 일기계의 전반적인 발달 양상에 대한 정보를 제공할 수 있으나 사례별 저기압의 발달과 이동에 대한 정성적인 정보를 제공하지 못한다. 황사를 동반한 온대저기압의 특성을 보다 정성적으로 이해하기 위해, 봄철 동아시아에서 발달하는 온대저기압을 탐지하고 라그랑지안 관점에서 추적하여 기후학적 특성을 분석하였다.

5.1 봄철 북동아시아 온대저기압의 공간적 분포

황사 발생에 영향을 미치는 온대저기압의 특성 분석을 위해 적절한 기준에 따른 온대저기압 선별이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 한반도 황사 발생시에 온대저기압이 한반도 북동쪽에 집중된다는 사실을 토대로(Fig. 2) 황사 발생시 온대저기압의 분포가 높았던 지역(125°E~140°E, 35°N~50°N; Fig. 2 왼쪽 하단 box 참조)을 북동아시아 도메인(Northern East Asia domain; NE Asia domain)이라 명명하며 이 지역을 지나는 저기압을 중심으로 분석을 수행하였다.

Figures 3a와 d는 1979년부터 2014년까지 36년 동안의 봄철 북동아시아를 지나는 온대저기압들의 연간 빈도수와 평균적인 강도의 공간분포를 나타낸다. 연간 빈도수는 온대저기압의 평균적인 경로와 발생 횟수를 보여주며 평균적인 강도는 저기압들의 평균적인 발달과정 및 강도의 분포를 나타낸다. 봄철 북동아시아를 지나는 온대저기압은 매년 약 20개 정도 존재하며 대부분이 대륙에서 발달하는 저기압이다. 이러한 저기압은 산악지역 후면에서 발생하는 전형적인 풍하 저기압의 형태를 보이는데 공간적으로 그 기원은 크게 알타이-사얀 산맥과 티베트 고원으로 나뉜다(Fig. 4 참조). 이러한 두 기원을 가진 온대저기압은 평균 강도에서도 특징을 확인할 수 있다. Figure 3a에서 존재하는 저기압들의 평균적인 강도의 공간분포를 나타내는 Fig. 3d에서 한반도 서쪽에 두 개의 최고점이 존재하고 있다. 이는 각각 알타이 사얀 산맥에서 기원한 저기압과 티베트 고원에서 기원한 저기압이 이 지역에서 강하게 발달함을 암시한다.

황사를 동반한 온대 저기압(Figs. 3b, e)의 특성을 보다 자세히 분석하기 위하여 황사를 동반하지 않은 일반적인 봄철 온대저기압(Figs. 3c, f)을 비교 대상으로 분석을 진행하였다. 황사를 동반하는 온대저기압과 동반하지 않는 온대저기압 모두 빈도수에서는 뚜렷한 특징이 나타나지 않으나 평균적인 강도의 분포 양상은 상이하다. 황사를 동반하지 않은 온대저기압의 빈도수는 기후값과 비교하여 약간의 감소를 보이거나 대체로 비슷하다. 황사를 동반한 온대저기압의 빈도수는 전체 95일의 황사 사례 중 한 지점에서 최대

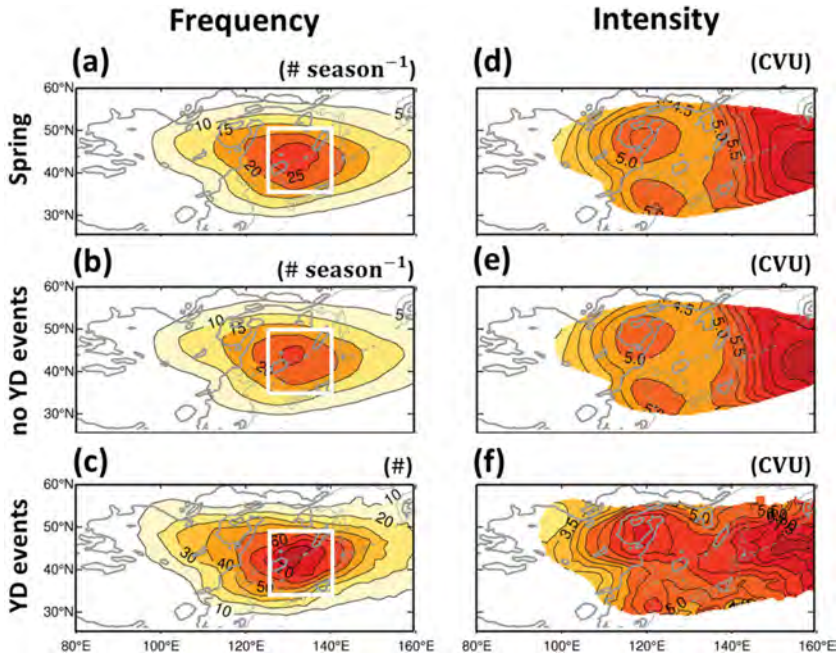


Fig. 3. The number of ETCs which pass through the Northeast Asia domain (the white box) in spring for (a) all cases, (b) no yellow dust events and (c) yellow dust events. (d, e, f) same as the left column but for mean intensity. Grey thick contours indicate 1000-m elevation topography.

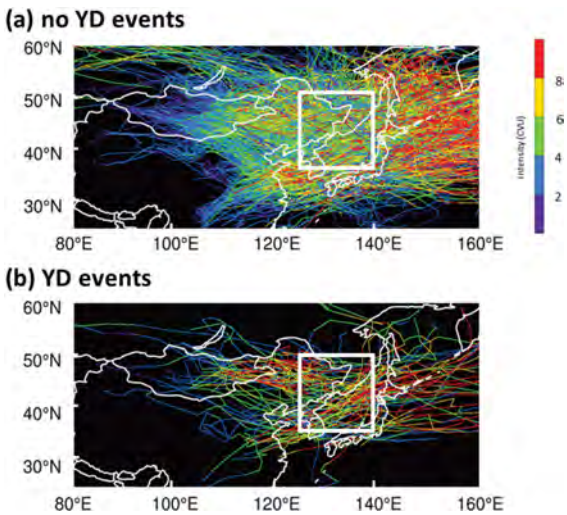


Fig. 4. Individual ETC tracks which cross North East Asia domain (125~140°E, 35~50°N) boxed in figure during (a) no yellow dust events and (b) yellow dust events. Colors denote the intensity each ETC.

80개 이상의 저기압이 집중되어 지나가는 모습을 보여주나 기후값과 황사를 동반하지 않은 온대저기압의 빈도수와 직접적인 비교는 불가하다. 하지만 평균적

인 강도는 해당 기간 동안의 평균적인 강도의 분포를 나타내는 것이므로 비교가 가능하다. 황사를 동반한 온대저기압의 강도 분포에서는 평상시보다 약 1.5 CVU이 강한 알타이-사안 기원 저기압의 발달이 뚜렷하며 황사를 동반하지 않은 온대저기압의 강도에서는 이러한 알타이-사안 기원의 저기압의 강한 발달이 보이지 않는다. 온대저기압 평균 강도의 공간분포에서 발생하는 이러한 정성적인 차이는 평상시 알타이-사안 기원의 온대저기압과 황사 발생이 양의 상관관계를 갖는다는 사실을 뒷받침한다(Qian et al., 2002).

Figure 4는 위에서 설명한 온대저기압 중 황사를 동반한 사례(Fig. 4b)와 동반하지 않은 사례(Fig. 4a)의 개별적인 궤적을 보여준다. 또한 한반도로 접근하며 변하는 강도의 변화를 포함시켰다. 이와 같은 접근 방법은 보다 직접적인 온대저기압의 경로와 발생 지점을 제시할 수 있다. Adachi and Kimura (2007)이 제시한 바와 같이 한반도에 접근하는 온대저기압의 주된 이동 경로는 크게 북서쪽에서 오는 경로와 남서쪽으로부터 오는 경로가 있다. 이는 앞서 Fig. 3에서 설명한 바와 같이 산악지역 후면 풍하 저기압 발달과 밀접한 관련이 있다. 이들 두 갈래의 온대저기압들은 공통적으로 한반도로 접근할수록 그 강도가 커지는 점이 같으나 황사 사례 동안의 온대저기압은 상대적으로 남서쪽으로부터 접근하는 저기압보다 북서쪽

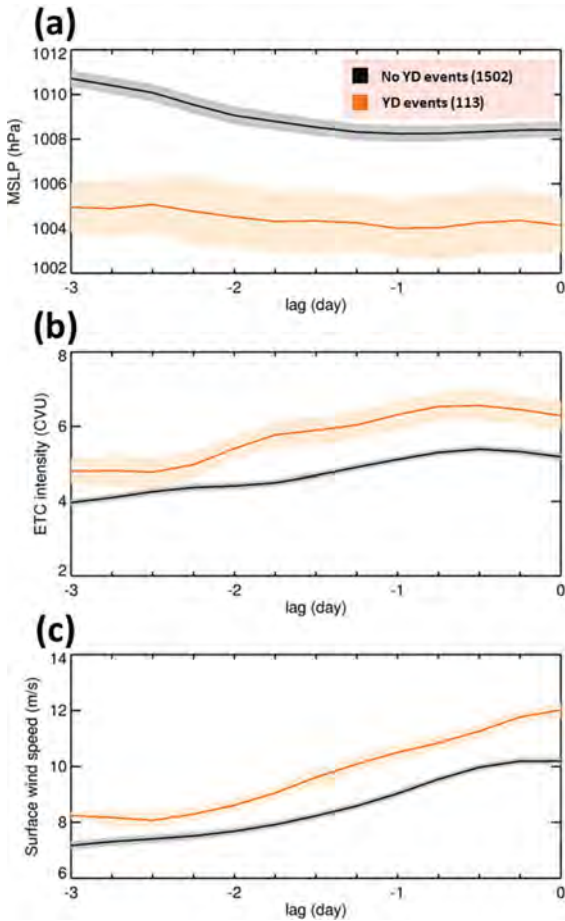


Fig. 5. Time evolution of (a) mean sea level pressure, (b) relative vorticity, and (c) surface wind speed for ETCs associated with (red) yellow dust events and (black) no yellow dust events over the North East Asia. Bright color indicates the variation of one standard deviation.

로부터 접근하는 저기압이 많다는 특징을 가진다. 한반도 황사의 주요 발원지는 한반도 북서쪽인 알타이-사안 지역에 존재하므로 위의 북서쪽에서 접근하는 저기압들의 수가 우세한 결과는 황사 발생시 대부분의 저기압들이 북서쪽의 발원지를 지나 황사를 동반하여 접근하는 온대저기압임을 재확인시켜준다.

5.2 한반도 황사에 영향을 미치는 온대저기압의 특징

4.1 절에서 봄철 36년 동안 북동아시아를 지나가는 온대저기압들을 대상으로 한반도 황사 발생시와 그렇지 않은 경우 온대저기압의 공간분포를 분석하였다. 라그랑지안 분석 방법은 각각의 저기압의 시간과 공간에 따른 변화 분석이 가능하기 때문에 추가적으로 개별 온대저기압의 발달과정을 분석하였다.

5.2.1 저기압의 발달 과정

Figure 5는 저기압의 특성 중 황사 발생과 밀접하게 관련된 변수인 표층 바람의 세기, 850 hPa 등압면의 상대와도, 해면고도 기압의 시간에 따른 변화를 보여준다. 각각의 변수들은 온대저기압들이 북동아시아에 접근하기 3일전부터 도메인에 도달할 때까지 그 위치를 추적하여 격자에 따른 변수 값들을 평균하여 나타낸 값이다. 추가적으로 각각의 그래프에 113개의 황사 발생시 온대저기압 사례들과 1502개의 황사가 발생하지 않았을 때의 온대저기압 사례들에 대한 95% 신뢰구간을 표기하였다. 전반적인 저기압의 변수들은 유의한 차이를 보인다.

황사 발생 시에 온대저기압은 북동아시아 도달 60 시간 전부터 42시간 전까지 18시간 동안 약 1 hPa이 낮아지며 성장한다(Fig. 2참조). 이후 이러한 성장을 겪은 강한 저기압은 한반도 도달까지 꾸준히 유지된다. 또한 이러한 저기압은 발생 초기부터 평소보다 약 6 hPa 정도 더 낮은 해면기압 값을 갖는 것을 확인할 수 있다(Fig. 5a). 발생 초기부터 황사를 동반하는 저기압들은 황사를 동반하지 않는 저기압과 해면기압 값의 뚜렷한 차이를 갖는다.

Figure 5a에서 관찰된 온대저기압 특성은 상대와도(Fig. 5b)와 표층 바람(Fig. 5c)에서도 확인할 수 있다. 황사 발생 시, 온대저기압의 상대와도는 앞서 Fig. 5에서 보였던 급격한 해면기압의 감소를 보였던 구간에서 빠르게 성장하며 평소보다 약 1 CVU가 더 강한 모습을 보인다. 이와 같은 지속적인 저기압의 성장은 해면기압에서는 뚜렷이 나타나지 않는다(Figs. 5a, b 비교). 이는 바람장의 변화가 질량에 충분히 반영되지 않았기 때문으로 사료된다. 실제 표층의 바람(Fig. 5c) 역시 상대와도 값의 변화와 거의 동일한 양상을 보이며 황사 발생 시 온대저기압은 평상시와 약 2 m s⁻¹ 정도의 차이를 유지하며 한반도에 도달한다. 이러한 발달 양상은 발달하는 저기압이 표층의 강한 바람을 동반하며 발원지의 황사를 강하게 부유시킬 수 있음을 나타내며 꾸준한 강도의 유지를 통하여 한반도로 황사가 유입되는 것을 알려준다.

5.2.2 저기압의 이동 방향

Figure 6은 각 사례들의 온대저기압들이 한반도에 접근하기 48시간 전부터 한반도 접근 당일 날까지 북동아시아에서 이동한 방향을 전체 저기압에 대한 비율로 나타낸 그림이다. 그림에서 “W”는 서쪽에서 접근했음을 의미한다. 추가적으로 각각의 온대저기압들이 북동아시아에 도달하기까지 최대강도를 채색하여 온대저기압들의 접근 방향뿐만 아니라 강도 별로 어느 방향에서 이동해 오는지를 나타냈다. 각 접근 방

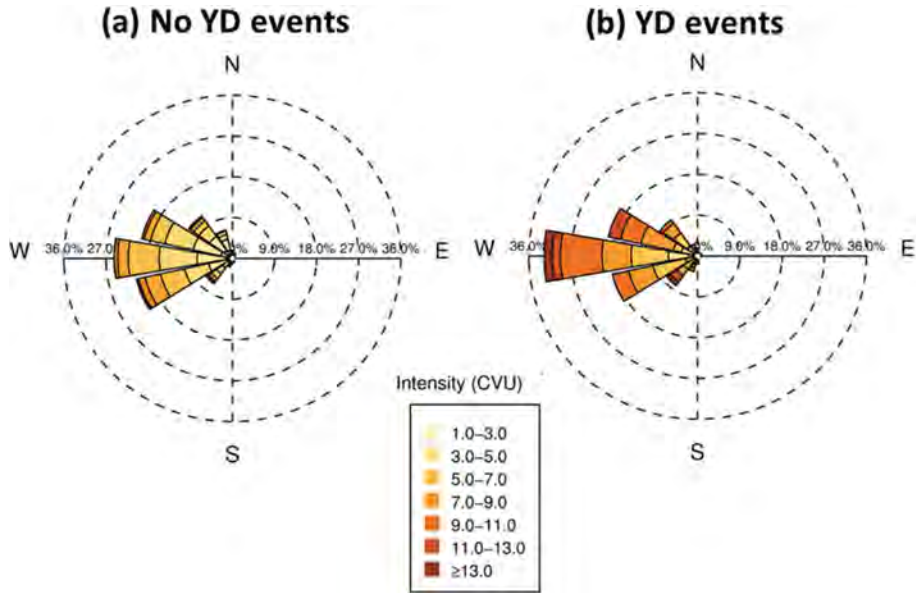


Fig. 6. Distribution of intensity and the propagation direction of the North East Asia ETCs for (a) no yellow dust events and (b) yellow dust events in a windrose form. The difference between no yellow dust events and yellow dust events are statistically significant at the 95% confidence level.

향 별로 유의한 차이를 확인하기 위하여 Pu et al. (2016)가 제안한 bootstrap을 참고하였고 95% 신뢰도를 가지는 차이가 존재하는 방향을 컬러로 표현하였다.

황사가 발생하지 않는 시기에 온대저기압들의 주요한 접근 방향은 서남서(약 21%), 서(약 25%), 서북서(약 20%), 북서(약 11%)이다. 황사 발생 시에는 서남서(약 19%), 서(약 33%), 서북서(약 20%)로 서쪽 방향의 접근 비율이 약 25%에서 약 33%로 약 8%가 증가하였으며 서남서 방향의 접근 비율이 약 21%에서 약 19%로 약 2%의 감소를 보였다. 반면 북서 방향에서는 약 2%, 서쪽 방향에서는 1% 미만의 감소를 보이며 황사 발생 시에 평상시 온대저기압의 접근 방향보다 서남서와 서쪽 방향으로부터 약간의 증가를 보이나 전반적으로 접근 방향에서의 큰 차이는 보이지 않는다.

접근 방향 비율에서 보인 양상과는 다르게 각 저기압의 최대 강도에서는 큰 차이를 보인다. 황사 발생 시기에는 대부분의 방향에서 더 강한 저기압들이 북동아시아로 접근한다. 황사가 발생하지 않은 시기에는 대부분 6 CVU 이하의 최대 강도를 갖는 저기압들이 들어오며 황사 발생 시기에는 6 CVU 이상의 최대 강도를 갖는 저기압들이 주로 접근한다. 이러한 강도 차이는 황사 발생시 평상시보다 더 강한 저기압들이 접근한다는 것을 의미하며 앞서 Fig. 3에서 보였던 결과와도 일맥상통한다.

5.2.3 저기압의 평균적인 특성

한반도 황사 발생시 관측되는 중관규모 저기압의 특성을 보다 정성적으로 파악하기 위하여 온대저기압이 북동아시아에 도달할 때까지의 최대 강도와 최대 성장률, 지속시간과 이동속도를 추가적으로 비교하였다. 이 때 최대 강도는 각 저기압이 북동아시아에 도달할 때까지 가지는 최대 상대와도의 값이고, 성장률은 24시간 동안 강도가 얼마만큼 강해지는 지를 뜻한다. 또한 지속시간의 경우, 저기압이 최초 탐지될 때부터 북동아시아에 도착할 때까지 며칠 동안 유지되는가를 나타내며, 이동속도는 6시간 간격의 이동거리를 계산한 후에 이를 시간으로 나누어 얻은 속력을 평균 낸 결과로 북동아시아 도달 시까지 평균적인 이동속도를 나타낸다.

Figure 7a는 각각의 저기압들의 최대 강도를 전체에 대한 비율로 나타낸 것이다. 한반도 황사 발생 시에 온대저기압의 최대강도는 4~5 CVU 구간과 6~7 CVU 구간을 기점으로 상이한 양상을 보인다. 5 CVU 이하의 최대강도를 가지는 온대저기압은 황사가 발생하지 않을 때에 황사 발생 시보다 2~3 CVU와 4~5 CVU구간에서 더 높은 비율의 온대저기압이 존재하며, 6 CVU 이상의 최대강도를 가지는 온대저기압은 황사 발생 시에 6~7 CVU와 10 CVU 이상 구간에서 더 높았다. 이러한 양상은 평상시에 상대적으로 낮은 강도를 가지는 저기압이 존재하며 황사 발생 시 상대적으로

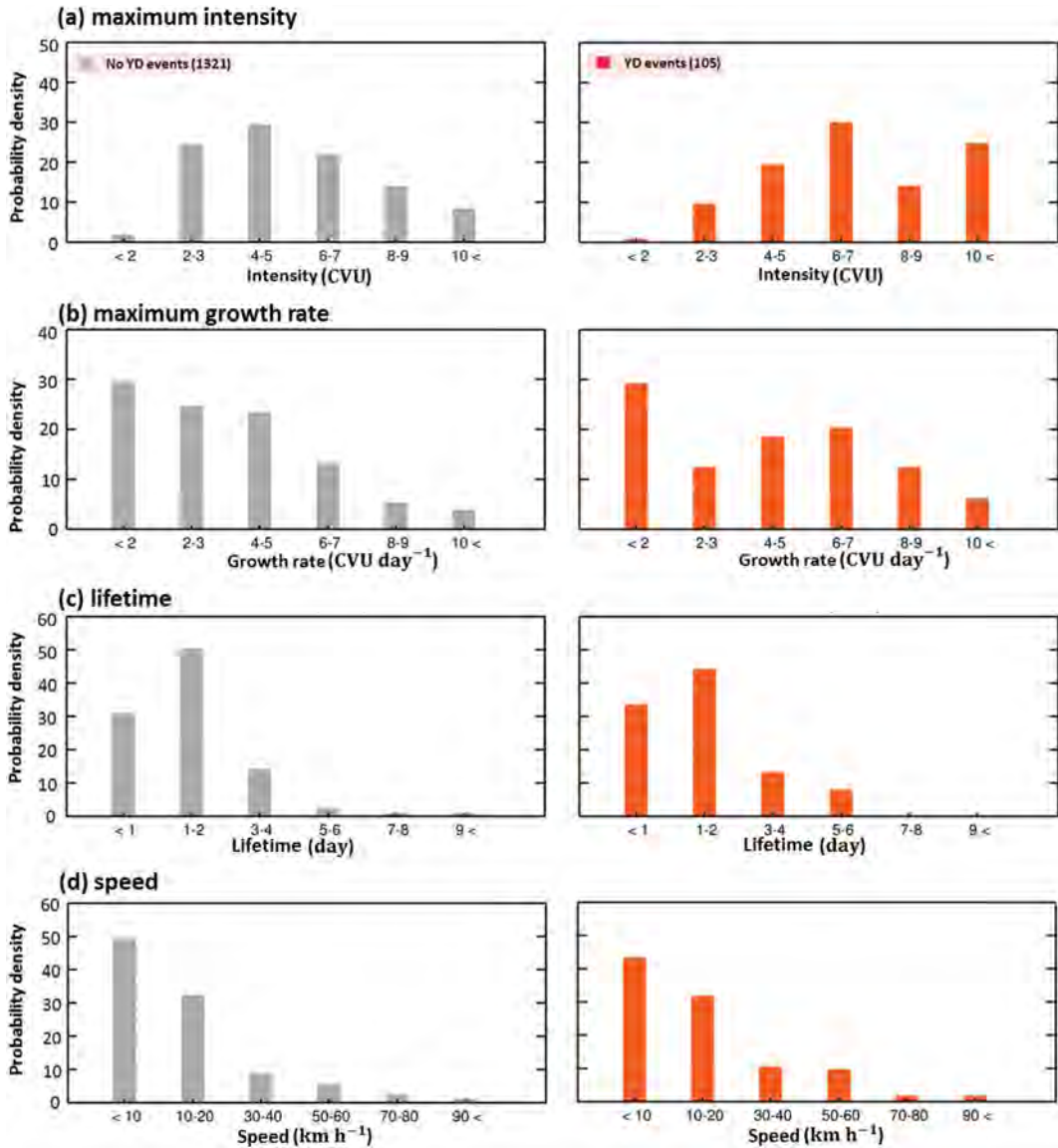


Fig. 7. Climatological characteristics of ETCs over the North East Asia: (a) intensity, (b) growth rate, (c) lifetime and (d) speed. Grey color denotes no yellow dust events (left column) whereas Red denotes yellow dust events (right column).

로 강한 저기압들이 존재함을 의미한다. Figure 7b는 각각의 온대저기압들의 최대 성장률 값을 전체에 대한 비율을 나타낸다. 성장률의 경우에도 최대 강도와 비슷한 양상을 보인다. 평상시 온대저기압은 6 CVU d⁻¹ 이하의 성장속도를 가지는 비율이 더 높으며(2~3 CVU d⁻¹ 구간) 황사 발생 시에는 6 CVU d⁻¹ 이상의 최대 성장률을 가지는 온대저기압의 비율이 높아진다. 이는 황사 발생시 온대저기압들이 더 빠르게 성장한다는 것을 의미한다. 평균 지속시간의 경우(Fig. 7c),

황사 발생시와 발생하지 않을 시의 온대저기압들의 지속시간은 전반적으로 큰 차이를 볼 수는 없다. 이러한 지속시간에서 보인 양상을 이동속도에서도 확인할 수 있다(Fig. 7d).

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 한반도 황사 발생시 나타나는 중관 패턴과 온대저기압의 발달 양상을 1979년부터 2014년

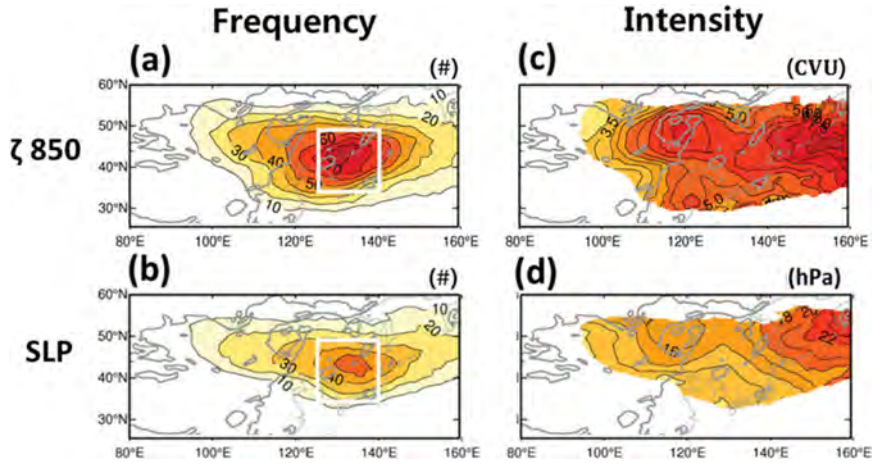


Fig. A1. (a, b) The number of ETCs which pass through the Northeast Asia domain (the white box) in spring for yellow dust events. (c, d) same as the left column but for mean intensity. ETCs which are detected by (a, c) local maxima of relative vorticity and (b, d) local minima of sea level pressure anomaly. Grey thick contours indicate 1000-m elevation topography. Note that (a, c) are identical to Figs. 7c, f.

까지 36년 동안의 장기간 자료를 통하여 살펴본 후에 라그랑지안 관점의 이러한 온대저기압들의 특성 분석을 진행하였다. 황사를 동반한 온대저기압은 최초 알타이-사얀 산악지역 풍하측에서 생성되어 전형적인 경압구조를 보이며 발달하는데 황사 발생 당일 저기압은 주로 한반도 북동쪽에 자리하여 한반도에 북서풍 계열의 바람을 초래한다.

봄철 한반도 황사를 초래하는 온대저기압의 기후학적 특성은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 봄철 한반도를 지나가는 온대저기압은 크게 두 가지 기원을 가진다. 북서쪽으로부터 들어오는 알타이-사얀 기원의 온대저기압과 티베트 고원 기원의 온대저기압이 그 예이다. 황사가 발생하지 않는 평상시에는 티베트 고원 기원의 온대저기압의 강도와 알타이-사얀 기원의 온대저기압 강도보다 평균적으로 거의 동일한 모습을 보이나, 황사 발생 시에는 알타이-사얀 기원의 온대저기압의 강도가 더 강한 양상을 보인다.

2) 황사 발생 시, 평상시보다 더 많은 온대저기압들이 한반도 북동쪽에 존재한다. 이 저기압은 평균적으로 발생 초기부터 평상시보다 더 강한 강도를 가지며, 한반도에 도달하기 60시간 전부터 42시간 전까지 18시간 동안 급격히 성장하는 모습을 보인다. 급격히 발달하는 저기압에 동반된 강풍은 황사 발원지에서의 황사의 부유를 증가시켰을 것으로 추정된다.

3) 온대저기압은 기본적으로 제트류를 따라 동진하며 한반도로 접근해 온다. 일반적으로 황사 발생시와 발생하지 않을 시에 온대저기압의 접근 방향은 서북

서, 서쪽 그리고 서남서쪽이 주요하며 이 두 사례 간의 차이는 크지 않다. 하지만 이들 접근하는 저기압들의 강도의 경우에는 두 사례 간의 뚜렷한 차이가 존재한다. 평균적으로 황사 발생 시에는 6 CVU 이상의 온대저기압이 대부분이며 평상에는 6 CVU 이하의 온대저기압들이 한반도에 접근한다. 이는 봄철 온대저기압들은 평상시 발원지를 거쳐서 들어오는 접근 방향을 가지며 이 중 황사 발생에서 중요한 조건은 온대저기압의 강도임을 암시한다.

본 연구에서는 한반도에 황사를 발생시키는 온대저기압에 대한 기존의 연구 분석 방법에 라그랑지안 관점의 기후학적 분석을 적용하고 정성적으로 온대저기압의 특징을 보였다. 그 결과, 기존의 단기간 자료를 이용한 황사의 운반 기작 또는 발원지에 대한 연구(Chung and Park, 1995)에 최근 36년간의 자료를 포함한 합성장 분석을 추가하여 보다 장기간의 평균적인 황사를 동반한 저기압의 변화를 볼 수 있었고, 기존의 사례별 황사의 이동 경로와 발원지 추적에 대한 연구(Chung and Kim, 1991)에 황사를 운반하는 온대저기압의 특성에 대한 통계적인 분석을 추가할 수 있었다. 이러한 분석 방법은 황사 발생시 저기압 특성에 대한 통계적인 분석뿐만 아니라 보다 장기적인 황사의 경향성 및 변동성에 대한 분석을 가능케 할 것으로 생각된다. 추가적으로 이러한 분석 방법은 봄철 황사와 관련된 온대저기압에 대한 분석뿐만 아니라 다른 한반도의 온대저기압과 관련된 사례에 대한 분석에도 응용이 가능하리라 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국기상산업진흥원“동아시아 이동성 저기압의 종관-기후학적 특성 분석 및 예측성 평가 (KMIPA 2015-2100)”연구의 일환으로 수행되었습니다.

Appendix. 해면기압을 이용한 결과

ERA-Interim 재분석 자료의 해면기압 아노말리를 이용하여 황사 발생 시 한반도에 도달하는 온대저기압의 빈도수와 강도에 대한 분석을 진행하였다. 본 연구에서 사용한 상대와도 자료와의 비교를 위해 동일하게 T63의 수평해상도를 이용하였으며 T5에서 T63까지의 파동수를 분석하였다. 또한 저기압 감지 시에 -50 Pa 이하의 해면기압 아노말리를 가지며 최소 2일 이상 지속되고 1,000 km 이상의 거리를 이동하는 저기압만을 분석하였다.

Figure A1은 한반도에 황사를 동반하는 저기압들의 빈도수와 평균강도를 상대와도와 해면기압 변수에 대해서 나타낸 그림이다. 상대와도와 해면기압 간의 저기압 빈도에서 약 30개 정도의 정량적인 차이가 존재한다. 그러나 북서쪽의 알타이-사안 지역으로부터 들어오는 저기압들이 발달하며 몽고의 동쪽 국경에서 가장 강해지는 모습은 두 변수에서 모두 동일하게 보였다. 결론적으로 온대저기압 분석에서 해면기압으로 추적한 경우와 상대와도로 추적한 경우 정량적인 차이는 존재하나 정성적으로는 동일한 결과를 보인다.

REFERENCES

- Adachi, S., and F. Kimura, 2007: A 36-year climatology of surface cyclogenesis in East Asia using high-resolution reanalysis data. *Sci. Online Lett. Atmos.*, **3**, 113-116.
- Bergstrom, R. W., 1998: Modeling the radiative characteristics of airborne mineral aerosols at infrared wavelengths. *J. Geophys. Res.*, **103**, 8813-8826.
- Chun, Y.-S., 1996: Long-range transport of Yellow Sand with special emphasis on the dust rise conditions in the source regions. Ph. D. Dissertation, Seoul National University, 129 pp.
- _____, K.-O. Boo, J. Kim, S.-U. Park, and M. Lee, 2001: Synopsis, transport, and physical characteristics of Asian dust in Korea. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, **106**, 18067-18074.
- Chung, K., and S. Park, 1995: Characteristic synoptic features associated with the transport of yellow sand to Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **31**, 45-63 (in Korean with English abstract).
- Chung, Y.-S., and T. K. Kim, 1991: On long range transport of air pollutants-sources and observations of yellow sand, TSP and sulphate in Korea. *J. Korean Meteor. Soc.*, **7**, 197-202 (in Korean with English abstract).
- Dee, D., and Coauthors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 553-597.
- Grise, K. M., S.-W. Son, and J. R. Gyakum, 2013: Intraseasonal and interannual variability in North American storm tracks and its relationship to equatorial Pacific variability. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 3610-3625.
- Hodges, K., 1994: A general-method for tracking analysis and its application to meteorological data. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 2573-2586.
- _____, 1995: Feature tracking on the unit sphere. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 3458-3465.
- _____, 1999: Adaptive constraints for feature tracking. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 1362-1373.
- Hoskins, B. J., and K. I. Hodges, 2002: New perspectives on the Northern Hemisphere winter storm tracks. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 1041-1061.
- Lee, J.-J., and C.-H. Kim, 2008: Characteristics of recent occurrence frequency of asian dust over the source regions - analysis of the dust occurrences since 2002. *Atmosphere*, **18**, 493-506 (in Korean with English abstract).
- Lim, J.-Y., and Y. Chun, 2006: The characteristics of asian dust events in Northeast Asia during the springtime from 1993 to 2004. *Global Planet. Change*, **52**, 231-247.
- Mao, R., C.-H. Ho, S. Feng, D.-Y. Gong, and Y. Shao, 2013: The influence of vegetation variation on Northeast Asian dust activity. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 87-94.
- Park, S.-U., A. Choe, and M.-S. Park, 2013: A simulation of Asian dust events observed from 20 to 29 December 2009 in Korea by using ADAM2. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **49**, 95-109.
- Plante, M., S. W. Son, E. Atallah, J. Gyakum, and K. Grise, 2015: Extratropical cyclone climatology across eastern Canada. *Int. J. Climatol.*, **35**, 2759-2776.
- Pu, B., R. Fu, R. E. Dickinson, and D. N. Fernando, 2016: Why do summer droughts in the Southern Great Plains occur in some La Niña years but not others? *J. Geophys. Res.*, **121**, 1120-1137.
- Qian, W., L. Quan, and S. Shi, 2002: Variations of the dust

- storm in China and its climatic control. *J. Climate*, **15**, 1216-1229.
- Sinclair, M. R., 1997: Objective identification of cyclones and their circulation intensity, and climatology. *Wea. Forecasting*, **12**, 595-612.
- Ulbrich, U., G. Leckebusch, and J. G. Pinto, 2009: Extratropical cyclones in the present and future climate: a review. *Theor. Appl. Climatol.*, **96**, 117-131.
- Yoshioka, M., N. M. Mahowald, A. J. Conley, W. D. Collins, D. W. Fillmore, C. S. Zender, and D. B. Coleman, 2007: Impact of desert dust radiative forcing on Sahel precipitation: relative importance of dust compared to sea surface temperature variations, vegetation changes, and greenhouse gas warming. *J. Climate*, **20**, 1445-1467.
- Yue, X., H. Wang, H. Liao, and K. Fan, 2010: Simulation of dust aerosol radiative feedback using the GMOD: 2. Dust-climate interactions. *J. Geophys. Res.*, **115**, D04201, doi:10.1029/2009JD012063.