서울의 봄철 황사출현빈도 변화와 관련된 중관기후학적 특징

최재원 · 차유미 · 임병환 · 박철홍

국립기상과학원

(2015년 11월 24일 접수, 2016년 3월 16일 수정, 2016년 3월 24일 게재 확정)

Synoptic Climatological Characteristics of the Asian Dust Frequency in Seoul during Spring

Jae-Won Choi · Yumi Cha · Byunghwan Lim · Cheol-Hong Park

National Institute of Meteorological Sciences

(Received 24 November 2015, Revised 16 March 2016, Accepted 24 March 2016)

Abstract : A statistical change-point analysis examined the existence of climate regime shift in the time series of the Asian dust frequency in Seoul during spring. As a result, the Asian dust frequency in Seoul during spring has sharply increased since 1993. To investigate the cause of the increasing Asian dust frequency in Seoul during spring, therefore the averages during the period of 1993 to 2011 and the differences in large-scale environment during the period of 1974 to 1992 were analyzed. According to the analysis results for 850 hPa, 500 hPa, and 200 hPa stream flows, northwesterly anomaly was formed from the Lake Baikal to the Korean Peninsula due to the intensification of anomalous anticyclonic circulation in Northern China. This northwesterly anomaly has become a major circulation that moves the sand particles from Northern China to Seoul.

Key Words : statistical change-point analysis, climate regime shift, Asian dust, Seoul

주요어 : 통계적 시점변화 분석, 기후레짐이동, 황사, 서울

1. 도입

중국 북부 및 몽골 지역의 타클라마칸과 고비 사막을 포함하는 넓은 건조지역은 아시아 지역 황사의 대표적인 발원지역이다(e.g., Gao *et al.*, 2011). 광범위한 건조지역을 포함하는 중앙 아시아는 전 지구 황사발생량의 약 절반을 차지하는 주요 발원지로서 봄철에 그 활동이 강화된다(Zhang *et al.*,

2003). 봄철 동안 이 지역들에서 발생된 많은 모래 먼지는 강한 편서풍을 타고 중국 동부, 한반도, 그리고 일본으로 이동된다(Kim, 2008; Kim *et al.*, 2010). 실제로 2002년 3월 21~23일과 4월 7~9일에 한반도에서 극심한 황사현상이 관측되었다. 이 당시 PM10 농도는 $1,500 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상이였다(Park and In, 2003; Park and Lee, 2004). 일반적으로 풍하측에 위치한 지역에서의 황사 관측은 2~3일 전

(최대 7일부터 짧게는 1일) 발원지역에 중관기상장 변화에 따른 황사 발생량뿐만 아니라 황사가 이동되는 경로에 지배적인 바람 장의 패턴 및 강도에 따른 황사 이동에도 밀접한 관련성을 보인다. 최근 선행 연구들에서는 중국 북서쪽에 위치한 발원 지역에서 1980년대 중반 이후 황사 발생량이 감소하고 있음을 밝혔으며, 이에 대한 물리적 메커니즘으로 지구온난화에 따른 유라시아 대륙 적설량의 감소와 약화된 대기 경압성을 제시하였다(Zhu *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2013). 그러나 중국 북동쪽에 위치한 내몽골 지역에서 황사 발생량은 2000년대 이후 증가되는 경향(Gao *et al.*, 2011)이 제시되었으며, 이에 따라 풍하측에 위치한 한반도와 일본지역에서 황사가 자주 관측되었다고 하였다(Kim, 2008; Lee and Sohn, 2011).

봄철 아시아 황사는 다양한 환경 조건에 의해 영향을 받으며 높은 지상기온, 건조한 토양, 적은 강수량, 강한 하층 바람과 같은 지역적인 기상조건이 황사 발생을 돕는다(Liu *et al.*, 2004). 황사가 한반도에 수송될 때의 기압계는 지상에서 한랭전선을 동반한 저기압이 통과하고 상층에서는 30~50노트의 서-북서풍이 불며, 특히 500hPa에서의 한랭핵의 남하가 뚜렷하다(Yoon, 1990). Lee(1993)는 1993년 4월 22~24일 관측된 황사현상을 정지기상위성의 가시영상 자료를 이용하여 황사영역의 위치와 규모를 확인하였다. Herman *et al.*(1997)은 Total ozone mapping spectrometer(TOMS)에서 제공되는 에어러솔 지수 자료를 이용하여 주요 에어러솔 근원지에 대하여 자외선을 흡수하는 에어러솔의 경년 변동성의 상대적인 값을 보여주었다. Jhun *et al.*(1999)은 한반도 10개 기상관측소에서 관측된 황사자료를 사용하여 우리나라 10대 도시 중 황사 관측이 가장 많이 된 곳, 봄철 30년간 총 황사일 수, 그리고 봄철 및 월별 평균 황사 빈도를 조사하였다. 뿐만 아니

라 황사의 발생은 아시아 한기 강화에 영향을 주는 북극 소용돌이 및 시베리아 고기압의 변화 등 대규모 기후 인자와도 연관지을 수 있다(Zhao *et al.*, 2004a). 그 예로, Mao *et al.*(2011)은 북극 기후 변화와 관련하여 극진동과 지역별 아시아 황사 발생 빈도의 상관성을 분석하였다. 또한 최근 급속도로 감소하고 있는 해빙은 극기후의 주요 요소 중 하나로 대기와 해양 사이에서 복사, 현열, 운동량 교환을 조절하면서 해빙-반사도 피드백 메커니즘을 통해 전구 및 동아시아 기후에 영향을 끼칠 수 있다(Zhao *et al.*, 2004b; Dethloff *et al.*, 2006; Liu and Alexander, 2007).

많은 선행 연구들에서 황사의 이동 경로에 대한 연구의 중요성을 보이고 있으나, 대부분의 선행 연구가 몇몇 개별 사례에 대한 연구이기 때문에 한반도에 황사를 동반하는 저기압에 대한 평균적인 특성을 알기는 어렵다. Yoon and Park(1991)은 1988년 봄철 동안 등엔트로피 궤적 연구를 통하여 고비사막에서 시작된 황사 입자가 한반도에 유입됨을 보였다. 또한, Chung and Park(1995)은 사례연구에 치우친 기존 연구를 보완하기 위해서 평균 종관장 분석을 시작하였다. 그들은 1983년부터 1988년까지 황사가 일어난 기간에 대하여 다양한 변수에 대한 종관장의 합성도를 작성하고 등엔트로피 분석을 통하여 황사가 한반도로 유입되는 과정을 연구하였다.

이 외에도 역학모델을 이용한 황사예측 및 민감도 분석을 한 연구들도 있다. 황사를 예측하기 위하여 황사모델(Asian dust aerosol model, ADAM)이 개발되었다. ADAM은 세계기상기구 종관관측 자료의 1996~2002년 봄철 자료를 통계분석하여 얻어진 황사발원지를 포함하고 있으며, 세계기상기구 종관 기상자료를 바탕으로 한 황사 발생 기상 조건을 포함하고 있다. 또한 발생지에서 발생하는 모토양의 입자 크기분포의 개념을 도입하고 있다.

Park and In(2003)과 Park and Lee(2004)는 ADAM을 이용하여 2002년 3월과 4월의 극심한 황사사례를 성공적으로 모의하였다. 한편 WRF-Chem 모델은 기상장과 화학장이 온라인으로 상호작용하기 때문에 지역적 또는 전지구적인 기상학적 영향과 먼지의 순환 과정을 시뮬레이션 할 수 있는 장점이 있으며(Zhao *et al.*, 2010), 이 모델을 이용해 Huang *et al.*(2013)은 중국 난징에서의 먼지 폭풍과 그로 인한 영향에 대해 Modal aerosol dynamics model for Europe/Secondary organic aerosol model(MADE/SORGAM) 에어로졸 방법(Shaw *et al.*, 2008)과 광물성 먼지 방법을 이용하여 수치모의하였고, Chen *et al.*(2014)는 동아시아 지역의 먼지 질량 균형과 복사강제력을 지역적으로 모델링하였다. 우리나라에서는 황사 발생 기간 동안 미세먼지 농도를 예측하고 관련 기상장에 대한 민감도를 분석하였다(Moon *et al.*, 2014).

우리나라에 영향을 주는 황사에 대한 종관기후학적인 연구들도 있다(Kim and Song, 2004; Song and Kim, 2005). 일반적으로 발달된 지상 저기압과 관련된 상승기류와 그 후면의 강한 바람으로 인해 발원지에서 발생한 황사가 요동반도를 지나 발해만을 거쳐 산둥반도까지 이동하여 결국 우리나라에 큰 영향을 주게 된다. 더불어 상층 편서풍의 강풍대를 따라 발원지로부터 수송된 황사가 상층 기압골의 발달과 함께 하강기류를 따라 지상으로 유입되는 종관특징을 나타낸다. 따라서 이 연구에서는 우리나라의 수도인 서울에 출현하는 봄철 황사일수의 변화를 분석하고 그 변화의 원인을 종관 분석을 통해 찾고자 한다. Lee and Kim(2006)은 우리나라에서 황사 출현일이 꾸준히 증가하고 있으며, 특히, 중부지방에서 강한 황사의 빈도 증가가 뚜렷함을 증명하였다. Kim and Lee(2009)는 우리나라의 황사 출현일수와 대기순환지수인 북극진동지수, 남극진동지수와 유라시아 대륙 적설면

적과의 관계를 분석하였다. 우리나라의 황사 출현일수는 1980년대 중반 이후 증가하고 있는 경향이 있으며, 황사 출현일수와 겨울철 북극진동지수 및 남극진동지수와는 정적인 관계가 있음을 보였다.

2. 자료 및 분석방법

이 연구는 1974~2011년(38년) 동안 우리나라 서울에서 관측된 황사관측일수의 자료를 한국 기상청(Korea Meteorological Administration)으로부터 제공받아 분석되었다. 여기서 1974년부터 자료가 사용된 이유는 1974년 이후부터 우리나라 기상 관측소의 수가 급격하게 증가하였을 뿐만 아니라, 아래에서 사용된 재분석 자료의 위성으로부터 산출 시기가 1970년대 중반 이후이기 때문이다.

또한 이 연구는 최근에 서울에서 봄철 황사출현빈도가 증가하게 된 종관환경적 원인을 알아보기 위하여 같은 기간 동안의 미국 국립환경예측센터-국립대기과학연구센터(National Center for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research, NCEP-NCAR)에서 제공하는 다음과 같은 변수를 가진 재분석 자료를 사용하였다(Kalnay *et al.*, 1996; Kistler *et al.*, 2001): 지위고도(gpm), 수평바람($m s^{-1}$), 기온($^{\circ}C$), 비습($g kg^{-1}$) 및 강수량($mm day^{-1}$). 이 자료는 위·경도 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 및 연직 17층(비습은 8층, 강수량은 단층)의 공간해상도로 구성되어 있다. 또한 중국 북부지역에서의 최근 토양의 건조 상태를 알아보기 위하여 38년 동안의 가우시안 격자로 된 적설량(water equivalent of accumulated snow depth, WEASD, $kg m^{-2}$)의 자료를 사용하였다. 적설량 자료에 대한 자세한 설명은 Wu and Kirtman(2007)을 참고하기 바란다. 위의 재분석 자료들은 모두 NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center¹⁾(CDC)에서 이

용 가능하다.

이 연구에서 두 평균 사이의 유의성 비교는 독립 표본 t-검정(independent two-sample t-test)을 사용하였다. 두 독립변수의 시계열이 모집단이 정상분포를 따르고, 표본의 평균이 각각 $\bar{x}_1$, $\bar{x}_2$ 로 정의될 경우, t-test의 식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_{x_1 x_2} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

여기서 S_{x_1} , S_{x_2} 는 표준편차이고 n_1 , n_2 는 두 시계열에서 총 개수이다. 만약 위의 식으로부터 t의 절대값이 유의수준의 문턱값보다 크게 산출되면, 귀무가설(null hypothesis)은 $\alpha(\times 100)\%$ 의 신뢰수준에서 기각되어 낮은 신뢰수준을 보이며, 기각되지 않으면 높은 신뢰 수준을 보이는 것으로 정의된다(Wilks, 1995).

또한 본 연구에서 주어진 시계열에 대해 통계적 시점변화 분석(statistical change-point analysis)이 적용되었다. 이 분석 방법을 적용하게 되면 t값이 산출되는데 t의 절대값이 가장 큰 해에 기후레짐이동이 존재한다는 것을 의미한다. 이 분석에 대한 좀 더 자세한 내용은 Elsner *et al.*(2000), Chu(2002), Ho *et al.*(2004)의 연구를 참고하기 바란다.

본 연구에서는 서울에서 황사출현빈도의 증가추세 원인을 파악하기 위해 대기순환 및 대기환경에 대한 종관상태를 분석하였다. 대기순환은 대류권 상중하층에서의 유선분석이 이루어졌고, 대기환경은 비습, 파머가뭄지수(Palmer Drought Severity index, PDSI), 적설량 등이 분석되었다.

3. 서울에서 봄철 황사출현빈도

Figure 1a는 1974년부터 2011년의 38년간 서울의 월별 황사출현빈도를 나타낸 것이다. 여름철인 6~8월 동안에는 단 한차례도 출현하지 않는 반면, 봄철인 3~5월 동안 가장 높은 출현 빈도를 나타낸다(막대그래프). 봄철의 출현빈도는 연간 전체 출현빈도의 90%를 넘는다. 11~2월 동안에 월평균 출현빈도는 0.5회 이하로 나타나는 반면, 3~5월 동안에는 월평균 1회 이상을 나타낸다. 특히 4월에는 월평균 2회를 넘는다(실선).

서울에서 연중 가장 높은 황사출현빈도를 나타내는 달인 3~5월 동안의 출현빈도에 대한 시계열이 분석되었다(Figure 1b). 최근 38년(1974~2011년) 동안 서울지역에서의 황사출현빈도는 급격하게 증가하는 경향을 나타내고 있으며(굵은 점선), 이 증가경향은 95% 신뢰수준에서 유의하다. 한편 이 시계열에서 기후레짐이동(climate regime shift)이 존재하는지 알아보기 위해 이 시계열에 통계적 시점변화 분석을 적용하였다. 분석결과 1993년에서 가장 큰 t값이 산출되었으며(파선), 따라서 황사출현 저빈도 기간(1974~1992년)과 다빈도 기간(1993~2011년)과 같이 두 기간으로 나뉘어질 수 있다. 연구기간 평균 황사출현빈도는 6회로 1974~1992년 동안에는 단 4년(1981, 1988, 1991, 1992년)만이 연구기간 평균 황사출현빈도를 넘었다. 반면 1993~2011년 동안에는 단지 7년(1994, 1996, 1997, 1999, 2003, 2004, 2009년)만이 연구기간 평균 황사출현빈도를 넘지 못했다. 따라서 1974~1992년 평균 황사출현빈도는 3.9회인 반면(파란실선), 1993~2011년 평균 황사출현빈도는 8.1회로 후자의 기간이 전자의 기간보다 평균 황사출현빈도가 2배를 넘는다(붉은실선). 두 기간 사이에 황사출현빈도의 평균차는 95% 신뢰수준에서 유의하다.

Figure 1. (a) Monthly frequency (bar graph) and climatological monthly mean frequency (solid line with a closed circle) of Asian dust in Seoul for 1960-2011 and (b) time series of Asian dust frequency for March-May in Seoul (bar graph) and t-value through statistical change-point analysis (dashed line).

4. 황사 출현 다빈도 기간 (1993~2011년)과 저빈도 기간(1974~1992년)의 차

이 연구는 후자의 기간에 서울에서 봄 황사출현 빈도가 급격하게 증가한 원인을 알아보기 위해 봄 (3~5월) 평균 종관환경요소에 대해 1993~2011년 기간과 1974~1992년 기간 사이에 차를 분석하였다. 먼저 850hPa 유선분석의 결과에서 바이칼호 남쪽에 고기압성 순환 아노말리가 형성되어 있고 북서태평양에는 저기압성 아노말리가 형성되어 있다(Figure 2a). 이는 겨울철에 전형적으로 나타나는 서고동저형의 지위고도가 강화되어 나타나는

아노말리 패턴이다. 따라서 중국북부로부터 중부 지역으로 북풍의 아노말리가 강화되어 있다.

500hPa 유선분석의 결과에서 25~45°N에 고기압성 순환 아노말리가, 바이칼호 북동지역에 저기압성 순환 아노말리가 강화되어 있다(Figure 2b). 따라서 바이칼호로부터 한반도 지역으로 북서풍의 아노말리가 형성되어 있다. 이러한 북서풍의 아노말리는 중국 북부지역에 모래입자를 서울로 이동시킬 수 있는 주요 순환이 될 수 있다.

200hPa 유선분석의 결과는 500hPa 유선분석의 결과와 유사하다(Figure 2c). 중국 중부지역으로부터 일본동쪽해상까지 고기압성 순환 아노말리가 강화되어져 있는 반면, 바이칼호 북부지역에 저기

Figure 2. Differences in (a) 850 hPa, (b) 500 hPa, and (c) 200 hPa stream flows between 1993-2011 and 1974-1992 in spring. Shaded areas are significant at the 95% confidence level.

압성 순환 아노말리가 강화되어 있다. 이러한 기압패턴 아노말리로 인해 바이칼호로부터 서울까지 북서풍의 아노말리가 형성되어 있다. 이러한 북서

풍의 아노말리는 역시 중국북부지역에 모래입자를 서울로 이동시킬 수 있는 주요 순환이 될 수 있다.

1993~2011년 봄에 바이칼호로부터 서울까지 강화된 북서풍의 아노말리의 기상학적 상태를 알아보기 위해 850hPa 기온에 대해 두 기간 사이에 차를 분석하였다(Figure 3a). 바이칼호 북서쪽으로부터 한반도까지 음의 아노말리가 강화되어 있다. 이러한 특성은 500hPa와 200hPa에서 살펴볼 수 있다(Figure 3b and 3c). 따라서 바이칼호로부터 서울에 강화된 북서풍 아노말리는 상대적으로 찬성질을 가진 기류임을 알 수 있다.

850hPa, 500hPa, 200hPa 비습에 대한 두 기간 사이에 차의 분석결과에서도 바이칼호 북서쪽지역으로부터 한반도까지 음의 아노말리가 강화되어 있음을 볼 수 있다(Figure 4a, 4b, and 4c). 따라서 1993~2011년 기간의 봄은 1974~1992년 기간의 봄 보다 서고동저형의 겨울철 지위고도 배치가 좀 더 강화되어 이로 인해 형성된 동아시아 중위도 지역에 차고 건조한 북서풍이 중국북부지역의 모래입자를 서울로 유입시킬 수 있는 좋은 환경이 형성되어 있음을 알 수 있다.

만약 중국북부지역에 봄 강수량이 많아 토지에 수분이 많다면 서울에 유입될 수 있는 모래입자가 줄어들 가능성이 있다. 따라서 두 기간에 중국 북부지역에 봄 강수량의 상태를 알아보기 위해 두 기간 사이에 강수량에 대한 차를 분석하였다(Figure 5a). 남중국해 및 벵갈만을 포함한 0~20°N에는 음의 아노말리가, 중국 중남부지역(20~40°N)에는 양의 아노말리, 중국 북부 및 몽골지역(40~55°N)에는 음의 아노말리가 강화되어 있다. 따라서 최근에 중국 북부지역 및 몽골지역에 봄 강수량이 감소하였음을 알 수 있다.

두 기간 사이에 총 운량에 대한 차의 분석에서도 중국 북부지역 및 몽골지역에 강한 음의 아노말리가 형성되어 있음을 볼 수 있다(Figure 5b). 따라서

Figure 3. Same as in Figure 2., but for (a) 850 hPa, (b) 500 hPa, and (c) 200 hPa air temperatures. Contour interval is 0.2°C. Shaded areas are significant at the 95% confidence level.

최근에 중국 북부지역 및 몽골지역에서는 강수량이 감소하여 황사가 발생할 가능성이 높으며(Choi *et al.*, 2015), 앞서 분석되었듯이 이 지역에서의 모

Figure 4. Differences in (a) 850 hPa, (b) 500 hPa, and (c) 200 hPa stream flows between 1993-2011 and 1974-1992 in spring. Shaded areas are significant at the 95% confidence level.

래입자가 북서풍 아노말리에 의해 서울로 유입될 수 있음을 알 수 있다.

최근에 중국 북부지역 및 몽골지역에서 강수량

Figure 5. Same as in Figure 2., but for (a) precipitation and (b) total cloud cover. Contour intervals are 0.5mm day⁻¹ for precipitation and 1% for total cloud cover. Shaded areas denote negative regions.

의 감소는 이 지역에서의 가뭄의 상태와 연관될 수 있다. 따라서 파머가뭄지수에 대해 두 기간 사이에 차를 분석하였다(Figure 6). 중국 북부지역 및

Figure 6. Same as in Figure 2., but for Palmer drought severity index (PDSI). Contour interval is 1. Shaded areas denote negative regions.

몽골지역에서 음의 아노말리가 형성되어 있음을 볼 수 있다. 이 지역에서 음의 아노말리는 보통 -2 이하의 값을 가지며, 동시베리아 지역에서는 -4의 값까지 관측된다. 이는 Table 1에서 볼 수 있듯이 '가뭄'의 상태를 넘어 '극심한 가뭄'의 상태라고 볼 수 있다. 따라서 이들 지역에서 가뭄의 강화로 인해 최근에 황사의 발생 가능성이 높아짐을 알 수 있다.

한편 중국 북부지역에서 대기의 수렴과 발산의 상태를 알아보기 위해 850hPa과 200hPa 수평발산에 대해 분석하였다(Figure 7a and 7b). 중국 북부지역에서는 대기의 상하층 모두에서 발산이 강화되어 있음을 볼 수 있다. 이는 앞서 분석되었듯

Table 1. Classification of Palmer drought severity index (PDSI)(Palmer, 1965).

Category	Range of index	Drought conditions
Extreme drought	Below -3.0	Damaged crops, extensive water shortage
Drought	-3.0 ~ -0.5	Slightly damaged crops, Beginning of water shortage, Request for spontaneous water saving
Normal	-0.5 ~ 0.5	Sufficient precipitation for the growth of plants
Wetness	0.5 or above	No drought conditions due to sufficient precipitation

Figure 7. Same as in Figure 2., but for (a) 850 hPa and (b) 200 hPa horizontal divergences. Contour interval is $3s-1 \times 10^7$. Shaded areas denote negative regions.

이 이 지역에서 고기압 아노말리가 강화되었기 때문이다. 따라서 최근에 이 고기압 아노말리의 강화로 인해 이 지역에 가뭄이 강화됨으로서 황사의 발생빈도가 높아지며, 따라서 서울에 영향을 주는 빈도 역시 높아졌음을 알 수 있다.

중국 북부지역에 형성된 고기압 아노말리의 발생원인을 알아보기 위해 두 기간 사이에 200hPa 지위고도를 유라시아 대륙을 중심으로 분석되었다 (Figure 8). 유럽 남쪽지역에는 음의 아노말리가, 북쪽지역에는 양의 아노말리가 형성되어 있다. 유럽지역에서 형성된 이러한 지위고도 아노말리는 파형을 이루어 동쪽으로 이어짐을 볼 수 있다. 이

Figure 8. Same as in Figure 2., but for 200 hPa geopotential height. Contour interval is 10 gpm. Shaded areas are significant at the 95% confidence level.

Figure 9. Same as in Figure 2., but for water equivalent accumulated snow depth (WEASD). Contour interval is 10 kgm^{-2} . Shaded areas are positive values.

로 인해 유라시아 대륙의 동쪽지역에서는 남고북저의 지위고도 아노말리 패턴이 형성되어 있다. 이에 대해 Fan and Wang(2004), Gong *et al.*(2006) 및 Kim and Lee(2009)는 북극진동과 남극진동이 양의 모드를 보일 때 오히려 우리나라에서 황사발생이 증가하였다는 결과를 제시한 바 있다.

중국 북부지역과 몽골지역에서의 토양의 수분 상태는 적설의 양에 영향을 받을 수 있다. 따라서 두 기간에 사이에 봄철 적설량의 차를 분석하였다 (Figure 9). 동아시아 대륙에서 50° 이남의 지역에서는 음의 아노말리를 나타낸다. 이는 최근에 이 지역에 적설량이 감소하였음을 의미한다. 따라서 최

근에 토양속에는 적설에 의한 수분 증가의 가능성이 낮아지기 때문에 황사의 발생 가능성이 높아지며, 이로 인해 서울에 영향을 주는 황사의 빈도 역시 증가할 수 있음을 알 수 있다. 이 결과는 봄철 유라시아 지역에 적설량과 황사발생빈도 사이에 음의 상관관계가 있다는 Kim and Lee(2009)의 주장과 일치한다. 따라서 중국 북부 및 몽골 지역에서 가뭄의 강화로 인해 형성되는 사막화로 최근에 황사의 발생 가능성이 높아졌으며, 서울에 출현하는 황사빈도도 최근에 증가하였음을 알 수 있었다.

5. 요약 및 결론

이 연구는 봄철 서울에 출현하는 황사 빈도의 시계열을 분석하였다. 이 시계열에 기후레짐이동이 존재하는지를 알아보기 위해 통계적 시점변화 분석을 시행하였다. 그 결과 1993년 이후로 봄철 서울에 황사출현빈도가 급격하게 증가하는 경향이 나타났다. 따라서 최근에 서울지역에서 봄철 황사출현빈도가 증가하는 원인을 알아보기 위해 중관 환경에 대해 1993~2011년 기간의 평균과 1974~1992년 기간 사이에 차를 분석하였다.

850hPa, 500hPa, 200hPa 유선분석의 결과에서 중국 북부지역에 고기압성 순환 아노말리가, 바이칼호 북동지역에 저기압성 순환 아노말리가 강화되어 있었다. 따라서 바이칼호로부터 서울로 북서풍의 아노말리가 형성되어 이러한 북서풍의 아노말리는 중국 북부지역에 모래입자를 서울로 이동시킬 수 있는 주요 순환이 될 수 있었다.

1993~2011년 봄에 바이칼호로부터 서울까지 강화된 북서풍의 아노말리의 기상학적 상태를 알아보기 위해 850hPa, 500hPa, 200hPa 기온과 비습에 대해 두 기간 사이에 차를 분석하였다. 바이칼

호 북서쪽으로부터 한반도까지 음의 기온 및 비습 아노말리가 강화되어 있었다. 따라서 바이칼호로부터 서울에 강화된 북서풍 아노말리는 상대적으로 차고 건조한 성질을 가진 기류임을 알 수 있었다.

중국 북부지역에 황사의 발생 가능성이 최근에 높아졌는지를 알아보기 위해 두 기간 사이에 강수량, 총운량, 적설량 및 파머가뭄지수에 대한 차가 분석되었다. 중국 북부지역뿐만 아니라 몽골지역까지 최근 기간의 봄철 강수량, 총운량 및 적설량은 감소하였으며, 파머가뭄지수는 ‘극심한 가뭄’의 상태를 나타내었다.

중국 북부지역에 형성된 고기압 아노말리의 발생원인을 알아보기 위해 두 기간 사이의 200hPa 지위고도를 유라시아 대륙에서 분석하였다. 유럽 남쪽지역에는 음의 아노말리가, 북쪽지역에는 양의 아노말리가 형성되어 있었다. 이로부터 파형을 이루어 동쪽으로 이어짐으로써 유라시아 대륙의 동쪽지역에서는 남고북저의 지위고도 아노말리 패턴이 형성될 수 있었다. 이 북대서양 진동은 봄철 한국에서 발생하는 황사의 계절예측에 주요 인자가 될 수 있을 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 국립기상과학원 주요사업 “예보기술 지원 활용연구”의 지원으로 수행되었습니다.

주

- 1) <http://www.cdc.noaa.gov/Datasets>

참고문헌

- Chen, S., Zhao, C., Qian, L. Y., Leung, R., Huang, J., Huang, Z., Bi, J., Wu, Z., Shi, J., Yang, L., Li, D., and Li, J., 2014, Regional modeling of dust mass balance and radiative forcing over East Asia using WRF-Chem. *Aeolian Research*, 15, 15-30.
- Choi, J. W., Kim, I. G., Kim, J. Y., Kim, B. J., Park, H. C., and Kim, D. W., 2015, The assessment of droughts in Northern China and Mongolian areas using PDSI and relevant large-scale environments. *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.4553.
- Chu, P. S., 2002, Large-scale circulation features associated with decadal variations of tropical cyclone activity over the central North Pacific, *Journal of Climate*, 15, 2678-2689.
- Chung, K. Y. and Park S. U., 1995, Characteristic Synoptic Features Associated with the Transport of yellow Sand to Korea. *Journal of the Korean Meteorological Society*, 31(1), 45-63 (in Korean).
- Dethloff, K., Rinke, A., Benkel, A., Koltzow, M., Sokolova, E., Kumar Saha, S., Handorf, D., Dorn, W., Rockel, B., von Storch, H., Haugen J.E., Røed L.P., Roeckner E., Christensen J.H., and Stendel, M., 2006, A dynamical link between the Arctic and the global climate system. *Geophysical Research Letters*, 33, L03703, doi:10.1029/2005GL02345.
- Elsner, J. B., Jagger, T., and Niu, X. F., 2000, Changes in the rates of North Atlantic major hurricane activity during the 20th century, *Geophysical Research Letters*, 27, 1743-1746.
- Fan, K. and Wang, H., 2004, Antarctic Oscillation and the dust weather frequency in North China. *Geophysical Research Letters*, 31, L10201, doi:10.1029/2004GL019465.
- Gao, T., Han, J., Wang, Y., Pei, H., and Lu, S., 2011, Impacts of climate abnormality on remarkable dust storm increase of the Hunshdak Sandy Lands in northern China during 2001-2008. *Meteorological Applications*, 19, doi:10.1002/met.251.
- Gong, D. Y., Mao, R., and Fan, Y. D., 2006, East Asian dust storm and weather disturbance: possible links to the Arctic Oscillation. *International Journal of Climatology*, 26, 1379-1396.
- Herman, J. R., Bhartia, P. K., Torres, O., Hsu, C., Seftor, C., and Celarier, E., 1997, Global distribution of UV-observing aerosols from Nimbus 7/TOMS data, *Journal of Geophysical Research*, 102, 16911-16922.
- Ho, C. H., Baik, J. J., Kim, J. H., and Gong, D. Y., 2004, Interdecadal changes in summertime typhoon tracks, *Journal of Climate*, 17, 1767-1776.
- Huang, X. -X., Wang, T. -J., Fei, J., Liao, J. -B., Cai, Y. -F., Yin, C. -Q., Zhu, J. -L., and Han, Y., 2013, Studies on a Severe Dust Storm in East Asia and Its Impact on the Air Quality of Nanjing, China. *Aerosol and Air Quality Research*, 13, 179-193.
- Jhun, J. G., Yeh, S. W., Kwon, M. H., and Chung, Y. S., 1999, Classification of atmospheric circulation patterns associated with long-range transport of yellow sands. *Journal of the Korean Meteorological Society*, 35, 575-586.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, R., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne R., and Joseph, D., 1996, The NCEP/NCAR 40-Year reanalysis project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 437-471.
- Kim, J., 2008, Transport routes and source regions of Asian dust observed in Korea during the past 40 years (1965-2004), *Atmospheric Environment*,

- 42, 4778-4789.
- Kim, S. W., Yoon, S. C., Kim, J., Kang, J. Y., and Sugimoto, N., 2010, Asian dust event observed in Seoul, Korea, during 29-31 May 2008: Analysis of transport and vertical distribution of dust particles from lidar and surface measurements, *Science of the Total Environment*, 408, 1707-1718.
- Kim, S. Y. and Lee, S. H., 2009, The study on occurrence of Asian dust and their controlling factors in Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 44, 675-690 (in Korean).
- Kim, Y. K. and Song, S. K., 2004, Synoptic analysis and transport during Asian dust events observed over Korea, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 40, 273-291 (in Korean).
- Kistler, R., Collins, W., Saha S., White, G., Woollen, J., Kalnay, E., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Kanamitsu, M., Kousky, V., van den Dool, H., Jenne, R., and Fiorino, M., 2001, The NCEP/NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and Documentation, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82, 247-267.
- Lee, E. H. and Sohn, B. J., 2011, Recent increasing trend in dust frequency over Mongolia and Inner Mongolia regions and its association with climate and surface condition change, *Atmospheric Environment*, 45, 4611-4616.
- Lee, J. G., 1993, Synoptic analysis of the yellow sand events observed over the Korean Peninsula during 22-24 April 1993. *Journal of the Korean Environmental Society*, 2, 161-177 (in Korean).
- Lee, S. H. and Kim, S. Y., 2006, The spatial distribution and change of frequency of the Yellow Sand days in Korea, *Journal of the environmental impact assessment*, 15, 207-215 (in Korean).
- Lee, Y. G., Ho, C. H., Kim, J., and Kim, J., 2013, Potential impacts of northeastern Eurasian snow cover on generation of dust storms in northwestern China during spring, *Climate Dynamics*, 41, doi:10.1007/s00382-012-1522-x.
- Liu, X., Yin, Z. Y., Zhang, X., and Yang, X., 2004, Analyses of the spring dust storm frequency of northern China in relation to antecedent and concurrent wind, precipitation, vegetation, and soil moisture conditions, *Journal of Geophysical Research*, 109, D16210, doi:10.1029/2004JD004615.
- Liu, Z. and Alexander, M., 2007, Atmospheric bridge, oceanic tunnel, and global climatic teleconnections, *Reviews of Geophysics*, 45, RG2005, doi:10.1029/2005RG000172
- Mao, R., Ho, C. H., Shao, Y., Gong, D. Y., and Kim, J., 2011, Influence of Arctic Oscillation on dust activity over northeast Asia, *Atmospheric Environment*, 45, 326-337.
- Moon, Y. S., Koo, Y. S., and Jung, O. J., 2014, Analysis of Sensibility to Prediction of Particulate Matters and Related Meteorological Fields Using the WRF-Chem Model During Asian Dust Episode Days, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 35(1), 1-18 (in Korean).
- Palmer, W. C., 1965, *Meteorological drought*, Research Paper 45. U.S. Dept. of Commerce.
- Park, S. U. and In, H. J., 2003, Parameterization of dust emission for the simulation of the yellow sand (Asian dust) observed in March 2002 in Korea, *Journal of Geophysical Research*, 108, 4618, doi:10.1029/2003JD003484.
- Park, S. U. and Lee, E. H., 2004, Parameterization of Asian dust (Hwangsapa) particle-size distributions for use in dust emission model, *Atmospheric Environment*, 38, 2155-2162.
- Shaw, W. J., Jerry Allwine, K., Fritz, B. G., Rutz, F. C., Rishel, J. P., and Chapman, E. G., 2008, An evaluation of the wind erosion module in DUSTRAN, *Atmospheric Environment*, 42, 1907-1921.

- Song, S. K. and Kim, Y. K., 2005, A case study of an Asian dust (Hwangsa) event observed in November 2002 in Korea, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 41, 707-715 (in Korean).
- Wilks, D. S., 1995, *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Academic Press.
- Wu, R. and Kirtman, B. P., 2007, Observed relationship spring and summer East Asia rainfall with winter and spring Eurasian snow, *Journal of Climate*, 20, 1285-1304.
- Yoon, S. C. and Park, K. S., 1991, Isentropic Analysis for the Long Range Trajectories of Yellow Sands, *Journal of Korean Society of Atmospheric Environment*, 7(2), 89-95 (in Korean).
- Yoon, Y. H., 1990, On the yellow sand transported to the Korean Peninsula, *Journal of the Korean Meteorological Society*, 26, 111-120 (in Korean).
- Zhang, X. Y., Gong, S. L., Zhao, T. L., Arimoto, R., Wang, Y. Q., and Zhou, Z. J., 2003, Source of Asian dust and role of climate change versus desertification in Asian dust emission, *Geophysical Research Letters*, 30, 2272, doi:10.1029/2003GL018206.
- Zhao, C., Dabu, X., and Li, Y., 2004a, Relationship between climatic factors and dust storm frequency in Inner Mongolia of China, *Geophysical Research Letters*, 31, L01103, doi:10.1029/2003GL018351.
- Zhao, C., Liu, X., Leung, L. R., Johnson, B., McFarlane, S. A., Gustafson, Jr. W. I., Fast, J. D., and Easter, R., 2010, The spatial distribution of mineral dust and its shortwave radiative forcing over North Africa: modeling sensitivities to dust emissions and aerosol size treatments, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 8821-8838.
- Zhao, P., Zhang, X., Zhou, X., Ikeda, M., and Yin, Y., 2004b, The sea ice extent anomaly in the North Pacific and its impact on the East Asian summer monsoon rainfall, *Journal of Climate*, 17, 3434-3447.
- Zhu, C., Wang, B., and Qian, W., 2008, Why do dust storms decrease in northern China concurrently with the recent global warming?, *Geophysical Research Letters*, 35, L18702, doi:10.1029/2008GL034886.

책임편집: 허인혜

영문교열: 조창현