

한국의 황사 출현에 영향을 미치는 요인에 관한 연구*

김선영** · 이승호***

The Study on Occurrence of Asian Dust and Their Controlling Factors in Korea*

Sunyoung Kim** · Seungho Lee***

요약 : 본 연구에서는 우리나라에 출현하는 황사에 영향을 미치는 요인을 파악하기 위하여, 우리나라의 황사 출현일수와 대기순환지수인 북극진동지수, 남극진동지수와 유라시아 대륙 적설면적과의 관계를 분석하였다. 우리나라의 황사 출현일수는 1980년대 중반 이후 증가하고 있는 경향이다. 월별로는 4월에 황사 출현일수가 집중되었고 전반기의 3.2일에서 후반기의 5.1일로 1.9일 증가하였다. 황사 출현일수와 겨울철 북극진동지수 및 남극진동지수와의 정적인 관계가 있었다. 이는 겨울철 북극진동지수와 남극진동지수가 양의 값일 때 황사 출현일수가 증가한다고 할 수 있다. 황사 출현일수와 유라시아 대륙 적설면적과는 부적의 관계가 있었다. 이는 유라시아에 적설면적이 감소하면 황사 출현일수가 증가한다고 할 수 있다.

주요어 : 황사 출현일수, 북극진동지수, 남극진동지수, 유라시아 대륙 적설면적

Abstract : This paper aims to analyze number of Asian dust days and their controlling factors in Korea. Asian dust days, Arctic oscillation index, Antarctic oscillation index and Eurasian snow cover data were used in this study. The number of Asian dust days was increasing after the middle 1980s. The number of Asian dust days was concentrated in April. The number of Asian dust days was increased second half (5.1 days) than first half (3.2 days) of the study period. The number of Asian dust days had positive relationship with winter Arctic oscillation index and Antarctic oscillation index. When the Arctic oscillation index and Antarctic oscillation index is positive, the Asian dust days will be increased. The number of Asian dust days had negative relationship with the Eurasian snow cover. When the Eurasian snow cover will be decreased, the Asian dust days will be increased.

Key Words : number of Asian dust days, Arctic oscillation index, Antarctic oscillation index, Eurasian snow cover

1. 서론

최근 봄철에는 물론 가을철에도 황사가 발생하면서 황사에 대한 일반인들의 관심이 집중되고 있다. 우리나라의 황사 발원지라고 할 수 있는 중국에서는 건조지역과 반 건조지역의 확장으로 먼지폭풍의 빈도가 증

가하고 있다. 중국에서의 목축 및 경작 등의 인간 활동으로 인한 사막화는 1950년대부터 1980년대까지 급격하게 진행되어 왔다. 1990년대의 사막화 저지 운동으로 부분적으로 감소되는 경향을 보였으나 최근 일부 지역에서 다시 증가하고 있다(이강원, 2005). 중국에서 최근 50년간 황사 발생일수를 분석한 Wang *et*

* 이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2008-4505)의 지원으로 수행되었습니다.

** 건국대학교 지리학과 박사과정(Doctoral student, Dept. of Geography, Konkuk University), sykim@konkuk.ac.kr

*** 건국대학교 지리학과 교수(Professor, Dept. of Geography, Konkuk University), leesh@konkuk.ac.kr

김선영 · 이승호

al.(2004)의 연구에 의하면, 황사일수가 1950년대의 5회에서 1990년대에 23회로 급증하였다. 우리나라에서도 황사 출현일이 꾸준히 증가하고 있으며, 특히 중부 지방에서 강한 황사의 빈도 증가가 뚜렷하다(이승호 · 김선영, 2006). 이와 같이 증가하고 있는 황사는 인간의 건강을 악화시키고, 사회활동을 제약하며, 산업에 대한 피해를 증가시키는 요인으로 인식되면서 그 피해에 대한 관심이 고조되고 있다.

지난 100년간 전 지구 평균 기온은 약 0.74℃ 상승하였으며, 특히 북반구 고위도 지역에서 기온상승 경향이 심하게 나타난다는 연구결과가 있다(IPCC, 2007). 계속되는 지구 온난화는 황사 발원지인 사막의 확대를 초래할 수 있다. 북반구 평균 기온의 상승은 강도가 강한 황사의 발생 빈도를 증가시킬 수 있다(이승호 · 김선영, 2006). 따라서 지구온난화로 인한 북반구 평균 기온의 상승이 계속된다면 우리나라에서 강도가 강한 황사의 발생 빈도가 더욱 증가할 수 있을 것이며 그로 인한 피해 또한 증가될 수 있다. 따라서 보다 장기적이고 체계적인 연구를 통해 강한 황사의 출현 빈도 증가에 대한 대책을 강구해야 할 필요가 있다.

황사는 발원지의 풍하 지역에 가까이 위치한 우리나라를 비롯한 동북아시아에 큰 영향을 주고 있고 이 지역을 중심으로 황사에 관한 연구가 다양한 측면에서 활발히 진행되어 왔다. Qian *et al.*(2002)과 Yang *et al.*(2007)은 봄철의 빈번한 저기압 활동이 중국의 황사 발생과 밀접한 관계가 있으며, 황사 입자의 장거리 수송에도 영향을 미친다고 하였다. 또한 상층 풍속과 강한 황사 발생 빈도와는 정적인 상관관계를 전년도의 강수와 토양수분과는 부적인 상관관계를 나타낸다고 하였으며(Sun *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2004), 강풍 발생 빈도 증가는 강도가 강한 황사의 발생을 증가시킨다고 하였다(Kurosaki and Mikami, 2003; Wang *et al.*, 2004; Hara *et al.*, 2006; Yamamoto *et al.*, 2007).

이처럼 황사의 발생 조건과 황사 발생빈도와의 관계를 살펴본 연구 이외에도 대규모 대기순환지수와 황사 발생 빈도와의 관계를 살펴본 연구도 있다(Gong *et al.*, 2006; Fan and Wang, 2004). Gong *et al.*(2006)은 중국의 황사 발생 빈도와 북극진동지수와 양의 상관관계가 있음을 밝혔으며, Fan and Wang(2004)은 겨울

철 및 봄철 남극진동지수와 중국에서의 황사 발생 빈도와는 음의 상관관계가 있음을 밝혔다. 동북아시아에서 이루어지고 있는 황사에 관한 연구는 황사의 발생 조건인 강력한 상승기류와 강한 풍속, 건조한 발원지의 토양상태에 관한 것이 대부분이었다.

황사의 발생은 인간의 활동과 지구온난화로 인한 황사 발원지의 사막화, 황사 물질을 장거리 수송하는 기구, 바람, 상대습도 등의 기후 요소 등의 영향을 받는다. 황사 발생과 기후요소와의 관련성 및 황사 수송에 관한 해외의 연구는 많은 편이지만, 국내에서의 연구는 드물다. 최근에 이승호 · 김선영(2006)의 연구에서 우리나라의 황사 출현빈도와 북반구 평균기온과 시베리아 고기압 강도지수 등과의 관계를 분석하여 황사 출현일이 지구 온난화와 관련이 있을 수 있다고 하였다.

우리나라의 황사 출현을 예측하기 위해서는 전구적인 관점에서 황사의 발생 특성을 파악할 필요가 있다. 또한 우리나라에 황사가 발생하기 위해서는 발원지에서 먼지 폭풍 등에 의하여 황사가 공기 중으로 상승해야 하며, 그것이 우리나라까지 이동해 와야 한다. 그러므로 우리나라의 황사 출현은 발원지의 지표 상태와 더불어 대기순환과의 관련성을 파악하는 것이 의미 있는 일이다.

따라서 본 연구는 황사 출현 가능성을 미리 예측하기 위한 연구의 일환으로 전구적인 대기순환과 우리나라의 황사 출현일의 관계를 밝히려는 것이 목적이다. 이를 위하여 우리나라에 발생하는 황사의 변화경향을 파악하고, 황사 출현에 영향을 미치는 요소로 선정한 북극진동지수, 남극진동지수, 유라시아 대륙 적설면적 등과의 관계를 파악하고자 하였다.

2. 연구자료 및 방법

본 연구의 분석 기간은 1961~2008년이다. 황사 출현일수의 분석 지점은 분석 기간 동안 관측 자료를 보유하고 있는 강릉과 서울, 인천, 울릉도, 포항, 대구, 전주, 울산, 광주, 부산, 제주, 서귀포 등이다(그림 1).

한국의 황사 출현에 영향을 미치는 요인에 관한 연구

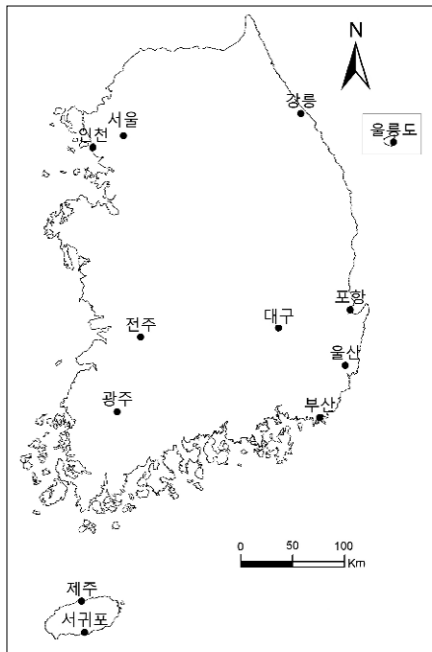


그림 1. 분석 지점

분석에 이용한 주요 자료는 기상청에서 관측하고 있는 강도별 황사 출현일수 자료와 대기 순환을 나타내어주는 북극진동지수와 남극진동지수, 유라시아 대륙 적설 면적 자료 등이다.

기상청에서는 황사를 강도에 따라 0(시정이 다소 혼탁), 1(하늘이 혼탁하고 황색먼지가 물체표면에 쌓이는 정도), 2(하늘이 황갈색으로 되어 빛을 약화시키며 황색먼지가 쌓임)로 나누어 목측으로 관측한다. 현재 기상청에서는 우리나라의 서울, 인천, 강릉, 부산 등 28개소에서 황사를 관측한다.

대기순환지수의 하나인 북극진동지수(Arctic Oscillation Index, AOI)는 Thompson and Wallace (1998)에 의해 정의된 것으로 본 연구에서는 워싱턴대 대기해양공동연구소(Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean, JISAO: <http://jisao.washington.edu/data/aots/#data>)에서 제공하는 자료를 이용하였다. 북극진동지수는 시베리아 고기압과 연동되어 나타나며 북반구 중·고위도의 대기순환 패턴 분석을 위한 지수이다. 이는 북극에서 20°N 영역의 월평균 해면기압 편차에 대한 주성분 분석의 첫 번째 모

드의 시계열을 나타내는 것으로 북극 지역과 중위도 지역에서의 기압 배치 상태에 따라 위상이 변한다.

남극진동지수는 Thompson and Wallace(2000)에 의해 정의된 것으로 미국 기상청 기후예측센터(Climatic Prediction Center, CPC: http://www.cpc.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/aao/aao.shtml)에서 제공하는 자료를 이용하였다. 남극진동지수는 20°S 이상 지역의 월평균 700hPa 고도의 경험적 직교함수(EOF: Empirical Orthogonal Function)의 첫 번째 모드의 진폭으로 정의된다. 남반구의 관측 지점 수가 적기 때문에 자료의 신뢰도를 높이기 위해 1979년부터의 남극진동지수를 본 연구에 이용하였다.

유라시아 대륙의 적설면적은 미국의 국립설빙자료센터(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)에서 제공하는 자료를 이용하였다. 본 연구에서 사용한 적설면적은 NOAA에서 제공하는 영상으로부터 추출한 자료로서 유라시아 대륙을 포함한다.

황사 출현일수의 변화를 파악하기 위하여 우리나라에 출현한 황사일을 월별, 계절별로 구분하였다. 또한 우리나라에 출현한 황사일 빈도의 월별, 계절별 비율 및 7년 이동 평균을 구하고 연구 기간 동안의 출현일수와 최근 24년 동안의 출현일수를 파악하였다. 본 연구에서는 황사 관측이 이루어지는 관측소 중 단 한곳에서라도 황사가 관측된 날을 황사 출현일로 정의하였다.

우리나라에 출현한 황사에 영향을 미치는 요인을 파악하기 위하여 황사 출현일수와 북극진동지수, 남극진동지수, 유라시아 대륙 적설면적과의 상관관계를 분석하였다. 황사 출현일수와 상관을 위하여 북극진동지수, 남극진동지수, 유라시아 대륙 적설면적을 계절별로 구분하여 변수화 하고 강도별 황사 출현일수와 상관을 분석하였다. 이 때 두 변수 간 선형성의 강도를 측정하는데 이용되는 Pearson 상관 분석 방법을 이용하였다. 비교적 상관관계가 높은 계절의 경우 그 월별 평균값을 구하여 황사 출현일수와의 상관관계를 분석하여 상관관계가 높은 계절 중 어느 달의 영향이 더 큰지를 분석하고자 하였다.

북극진동지수, 남극진동지수, 유라시아 대륙 적설면적이 우리나라의 황사 출현일수에 어느 정도의 영향을

김선영 · 이승호

미치는지를 파악하기 위하여 다중회귀분석을 실시하였다. 이때 황사 출현일수를 종속변수로 북극진동지수, 남극진동지수, 유라시아 대륙 적설면적을 독립변수로 하여 분석을 실시하였으며, 이 때 영향을 크게 미치는 지수를 제외한 나머지 변수는 제외하는 stepwise 분석 방법을 이용하였다.

3. 결과 및 토의

1) 우리나라의 황사 출현일수의 변화

황사 발원지인 중국에서의 황사 발생빈도의 증가 추세가 뚜렷하며(Gao *et al.*, 2003) 우리나라에서도 2000년대 이후 황사 출현 빈도가 증가하고 그 강도도 강해지고 있다(전영신 등, 2003; 이승호 · 김선영, 2006; Kim, 2008).

그림 2는 1961년부터 2008년까지 최근 48년간의 우리나라에 발생한 황사 출현일수의 변화를 나타낸 것이다. 황사 출현일수는 연변동이 있지만 1980년대 중반

이후 증가하고 있음을 확인 할 수 있다. 연구 기간의 연평균 황사 출현일수는 약 10.5일이고 황사 출현일수가 증가하기 시작하는 시점인 1980년대 중반 이전(1961~1985년)의 평균 황사 출현일수는 9.7일, 이후(1986~2008년)의 평균 황사 출현일수는 11.3일이다. 1989년에는 황사가 단 하루도 발생하지 않았지만 2001년에는 34일로 그 빈도가 가장 높았다. 2001년에는 중국의 내몽골 지역에 겨울부터 봄까지 극심한 가뭄이 있었다. 1999년부터 2001년의 겨울과 봄철의 내몽골 서부 지역 강수량은 11.0mm로 평년보다 32.9mm가 적었고, 중부는 23.3mm로 평년에 비하여 21.8mm, 중서부는 17.2mm로 평년보다 25.8mm가 각각 부족하였다(Gao *et al.*, 2003). Gao *et al.*(2003)에 의하면, 중국에서의 황사 빈도는 내몽골 중서부 지역의 연평균 강수량과 1년 정도의 지체 상관을 갖는다. 2001년 4월의 황사는 하바로프스크 등 러시아의 남동부지역과 캐나다 남서부와 미국 서부에까지 영향을 미쳤다(공군 73기상전대, 2002).

표 1은 우리나라에서 발생한 황사의 계절별, 월별 발생 비율을 나타낸 것이다. 우리나라에서 황사는 주로 봄철에 발생하여 3월, 4월, 5월에 집중되었다. 황사

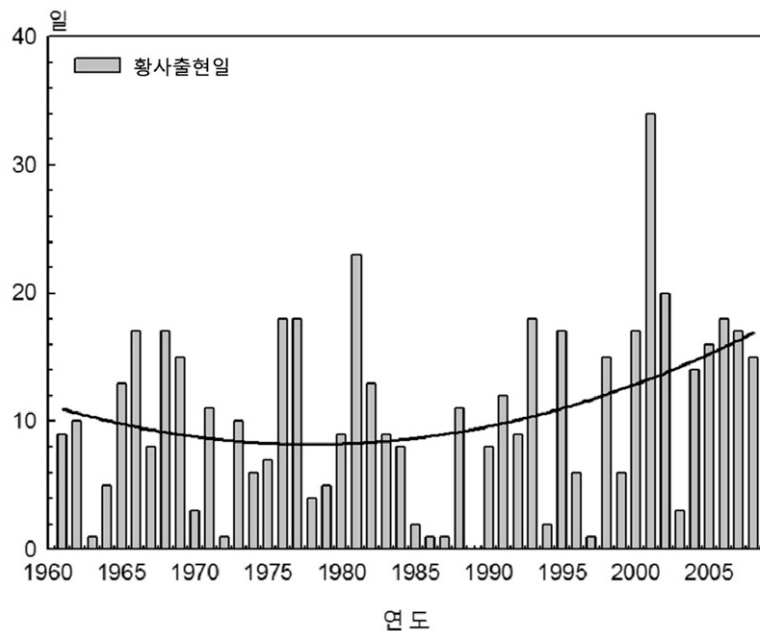


그림 2. 우리나라의 황사 출현일수의 변화

한국의 황사 출현에 영향을 미치는 요인에 관한 연구

표 1. 계절별 황사 출현 비율

계절	월	황사 출현비율(%)	
봄	3	23.9	82.9
	4	38.8	
	5	20.1	
여름	6	2.9	3.6
	7	0.0	
	8	0.7	
가을	9	0.2	2.2
	10	0.0	
	11	2.0	
겨울	12	3.8	11.3
	1	2.9	
	2	4.5	

출현일수는 봄철에 82.9%로 대부분을 차지하며, 겨울(11.3%), 여름(3.6%), 가을(2.2%)의 순이다.

봄철은 발원지에 겨울철 동안 쌓였던 눈이 녹으면서 지표상태가 건조해졌을 때, 강풍에 의하여 황사가 발생할 수 있는 적합한 시기이다. 중국에서 황사 발생빈도가 비교적 높은 바오터우(Paotou)¹⁾의 월평균 풍속을 보면 12월에 1.9m/sec로 가장 바람이 약하고, 1월에

표 2. 우리나라 봄철의 황사 출현일수 변화(일)

구분 \ 월	3	4	5
전반기(1961~1984년)	2.3	3.2	2.5
후반기(1985~2008년)	2.7	5.1	1.5

2.0m/sec를 기록한 후 2월부터 점차 풍속이 증가한다. 4월 평균 풍속이 3.5m/sec로 연중 가장 강하다. 이 지역의 월평균 황사일수도 바람이 가장 강한 4월에 5일로 가장 많고 3월과 5월은 각각 3일씩이다. 월평균 상대습도는 겨울철인 12월과 1월, 2월에 각각 61%와 63%, 64%를 기록한 후 3월부터 급격하게 습도가 낮아져, 3월 평균상대습도는 49%, 4월은 48%, 5월은 49%이다. 즉 봄철은 매달 50% 미만으로 연중 상대습도가 가장 낮은 시기이다.

이와 같은 낮은 습도와 강해지기 시작하는 바람이 황사 발생에 유리한 조건이다. 중국과 우리나라를 대상(33.5°N~52.0°N, 88.5°E~131.5°E)으로 연구한 Kurosaki and Mikami(2003)에 의하면, 봄철인 3월과 4월, 5월의 황사 발생은 이 무렵의 강풍과 관련 있으며 최근 이 시기에 강풍의 빈도가 늘고 있다고 한다. 최근

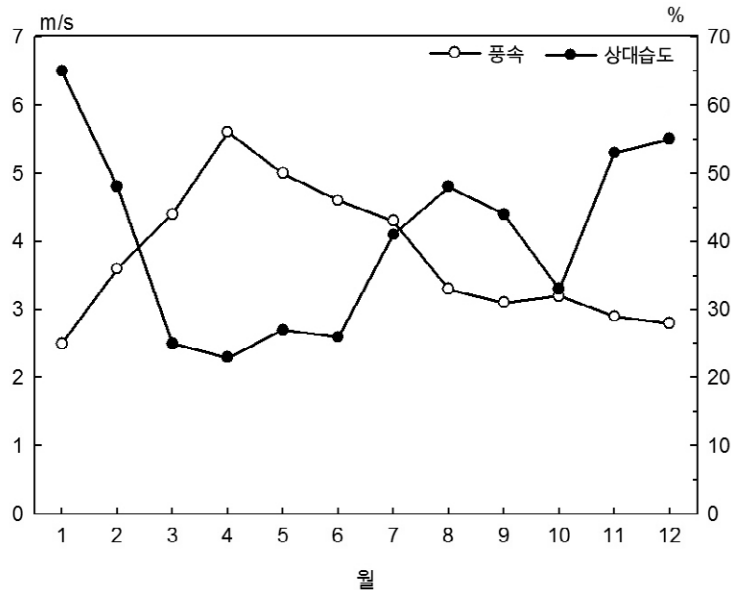


그림 3. 중국 내몽골 바이엔의 월평균 상대습도와 풍속(2006년)

자료: China Meteorological Administration

김선영 · 이승호

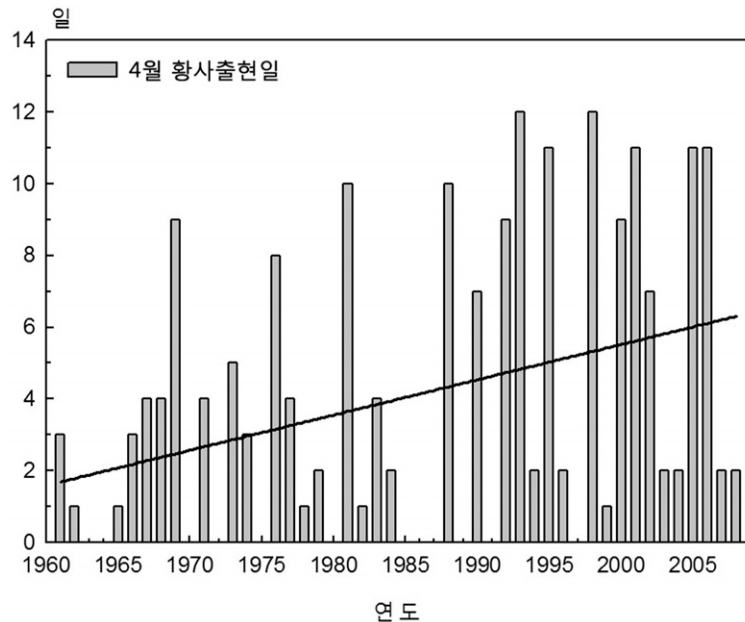


그림 4. 우리나라 4월 황사 출현일수의 변화

3년 중 우리나라에서 황사 출현일수가 가장 많았던 2006년의 경우 중국 내몽골의 바이엔 지점의 평균 상대습도와 평균풍속을 보면 4월이 황사 발생에 가장 유리한 조건이다(그림 3). 즉, 3월 이후 풍속이 급격히 증가하면서 4월에 가장 바람이 강하였고, 평균 상대습도는 2월 48%에 이어, 3월 25%, 4월에 23%를 기록하였다.

우리나라의 월별 황사 출현 비율을 살펴보면 4월이 38.8%로 가장 높고, 3월(23.9%), 5월(20.1%)의 순이다. 연구기간 중 3~5월을 제외하고는 모두 10% 미만의 비율을 보이고 있으며, 7월과 10월에는 황사가 단 한 차례도 출현하지 않았다.²⁾ 연구기간을 전반기 24년 동안(1961~1984년)과 후반기 24년 동안(1985~2008년)으로 나누어보면, 전반기에는 3.2일, 후반기는 5.1일로 후반기에 크게 증가한 것을 확인할 수 있다(표 2). 그림 4에서도 해에 따른 변동이 있지만 전반적으로 4월에 황사일수 빈도가 증가한 경향이 뚜렷하며 경향선의 기울기가 0.093에 이른다. 특히 1990년대 이후의 증가경향이 뚜렷하다. 3월의 경우는 전반기와 후반기의 차이가 0.4일에 불과하고 5월에는 오히려 후반기에 1.0일이 감소하였다. 즉, 우리나라의 최근 황사일수 증

가경향은 4월의 황사일수 증가에 의한 것이라 할 수 있다. 5월에 황사빈도가 감소하는 것은 더 규명해야 할 과제이다. 이후부터는 4월의 황사 출현일수를 중심으로 분석하였다.

2) 북극진동지수와 황사 출현의 관계

겨울철 시베리아 고기압의 세력은 북극 지역으로부터 유입되는 기류에 의해 결정되며, 이러한 기류의 이동은 북극 진동의 변동성에 의해 영향을 받는다(임은순 · 안중배, 2004). 북극진동지수는 북극에서부터 20° N 사이의 해면기압 편차에 의해서 구해지는 것이다. 북극진동지수가 양의 값일 때는 극지방의 해면기압이 평년보다 낮은 경우이며, 음의 값일 때는 극지방의 해면기압이 평년 보다 높은 경우이다. 그러므로 양의 값일 때는 중위도 지방(37°N~45°N 사이)에 극으로부터의 한기 유입이 약화되고, 음의 값일 때는 한기 유입이 강화될 수 있으므로 시베리아 고기압의 강도에 영향을 미칠 수 있다. 이승호 · 김선영(2006)의 연구에서도 시베리아 고기압 강도지수와 황사 출현일수 사이에 관계가 있음이 언급되었다.

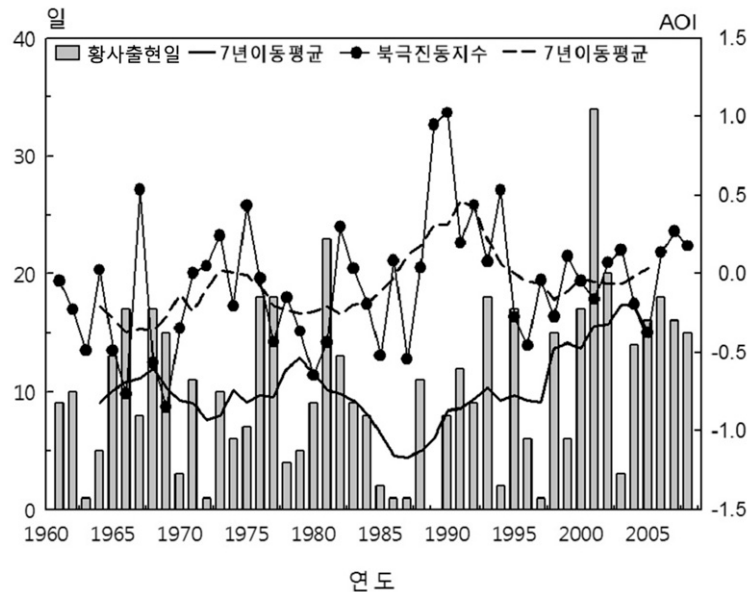


그림 5. 우리나라의 황사 출현일수와 북극진동지수의 변화경향

자료: Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean

북극진동지수는 그림 5에서와 같이 매년 변동의 노이즈(noise)를 제거한 7년 이동 평균의 경우 1990년대 초반까지의 증가추세가 뚜렷하고, 1990년대 이후 감소하는 경향이 있지만 전반적으로 증가하는 경향이 뚜렷하다. 북극진동지수는 극 주변의 기압이 낮아질 경우 중위도 지역의 기압이 상승하며 양(+)의 증가 수치를 나타내는 것으로 극지방의 기온이 지속적으로 상승하였음을 추정할 수 있다. 우리나라의 황사 출현일수와 북극진동지수의 7년 이동평균을 보면, 두 요소가 정확하게 일치하지는 않지만 거의 비슷한 경향으로 변화하는 것을 볼 수 있다. 즉, 1970년대까지의 증가와 그 후의 감소, 1980년대부터 1990년대 초반까지의 증가경향이 나타난다. 전체적으로 보면 두 요소 모두 증가경향이 있지만, 1990년대 이후 북극진동지수는 감소경향이 우세하고 황사일수는 변화가 없거나 증가하는 경향이 다른 점이다.

표 3은 우리나라의 전년의 강도별 황사 출현일수와 북극진동지수와의 상관관계를 나타낸 것이다. 강도가 강한 황사 출현일수와 봄철(3~5월)의 북극진동지수와의 $r=0.469$ 의 상관관계를 갖는다. 강도가 강한 황사일수록 북극진동지수와 유의한 관계를 갖는다. 또한 황

표 3. 우리나라의 황사 출현일수와 북극진동지수간의 상관계수(r)

북극진동지수 강도별 황사일	겨울(12~2월)	봄(3~5월)	전년
전체 황사일	0.413**	0.302*	0.264
강도 0의 황사일	0.261*	0.263**	0.278*
강도 1의 황사일	0.389**	0.320**	0.342**
강도 2의 황사일	0.315**	0.469**	0.387**

유의확률: ** $p<0.01$, * $p<0.05$

사가 주로 발생하는 시기인 봄철의 경우 그 상관 계수는 더 크다. 따라서 봄철의 북극진동지수가 양의 값일 때 강도가 강한 황사 출현의 가능성은 높아질 수 있다. 전년의 황사일수는 겨울철의 북극진동지수와도 상관 계수 $r=0.261\sim0.413$ 의 정적인 관계가 있다. 이는 선행 연구(이승호·김선영, 2006)에서 언급한 황사일수와 봄철의 시베리아 고기압 강도지수 사이에 음의 관계(상관계수 $r=-0.460$)가 있다는 것과 일치하는 결과이다. 겨울철 북극진동지수와 시베리아 고기압 강도는 서로 관련이 있으며, 북극진동지수가 양의 편차일 때 겨울철 시베리아 고기압의 강도가 약해진다는 연구결

김선영 · 이승호

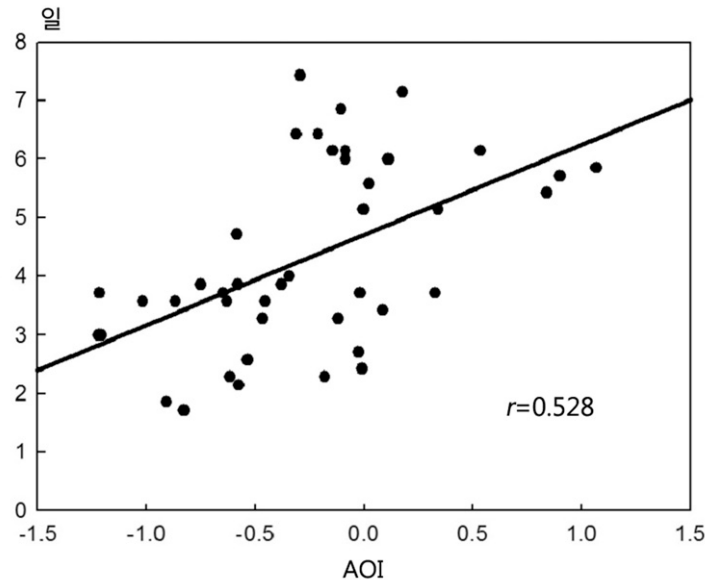


그림 6. 우리나라의 4월 황사 출현일수와 겨울철 북극진동지수의 관계

과가 있다(임은순 · 안중배, 2004; Gong and Ho, 2002).

그림 6은 우리나라 4월의 황사 출현일수와 북극진동지수와의 관계를 나타낸 것이다. 겨울철 북극진동지수와 4월의 전체 황사 출현일수와의 상관계수 $r=0.528$ 의 높은 정적인 관계가 있다. 이는 겨울철 북극진동지수가 양의 편차를 보이면 황사가 많이 발생함을 의미한다. 즉, 북극진동지수가 양의 값일 때는 북극지역으로부터 시베리아 고기압이 형성되는 중위도 지방($37^{\circ}\text{N} \sim 45^{\circ}\text{N}$ 사이)으로의 한기 유입이 약화되므로, 시베리아 고기압 강도가 약화되어 황사 출현 가능성이 커지는 것이다. 따라서 북극진동지수가 양의 값일 때, 4월의 황사 출현일수가 증가할 수 있다.

3) 남극진동지수와 황사 출현의 관계

남극진동지수는 20°S 이상 지역의 월평균 700hPa 고도의 경험적 직교함수(Empirical Orthogonal Function: EOF)의 첫 번째 모드의 진폭으로 정의된다(Thompson and Wallace, 2000). 남극진동지수는 남반구의 겨울철(6~8월)에 상대적으로 강한 편차를 보인다. 남극진동지수는 남반구 중·고위도의 기후에 주로

영향을 미치는 대기 순환 지수라고 알려져 있지만(Thompson and Wallace, 2000; Hall and Visbeck, 2002; Kwok and Comiso, 2002; Rao *et al.*, 2003), 원격상관을 통해 북반구에까지 영향을 미친다는 연구 결과도 있다(Nan and Li, 2003; Fan and Wang, 2004; Song *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2008). 그러나 남극진동지수가 북반구의 기후에 영향을 미치는 메커니즘을 명확하게 밝힌 연구는 부족하다. Fan and Wang(2004)은 남극진동지수가 양의 값을 보이면 아시아에 한랭한 날씨의 출현이 줄어들며, 겨울철(12~2월)의 남극진동지수가 양의 값을 보이는 해에는 시베리아 고기압의 강도가 약화된다고 하였다. 그러므로 겨울철의 남극진동지수가 양의 값일 때는 황사 발원지의 기온이 상승할 수 있다고 하였다. 겨울철 남극진동지수가 양의 값일 때 시베리아 고기압의 강도가 약화되므로 이승호 · 김선영(2006)이 언급한 것과 같이 황사 발원지의 기온이 상승하여 황사 출현에 좋은 조건이 형성되어 그 발생 빈도가 증가할 수 있다.

남극진동지수는 그림 7에서와 같이 매년 변동의 노이즈를 제거한 7년 이동 평균의 경우 시기별로 증가와 감소가 나타나지만 1980년대 후반부터 최근까지 꾸준히 증가하는 경향이다. 황사 출현일수도 남극진동지수

한국의 황사 출현에 영향을 미치는 요인에 관한 연구

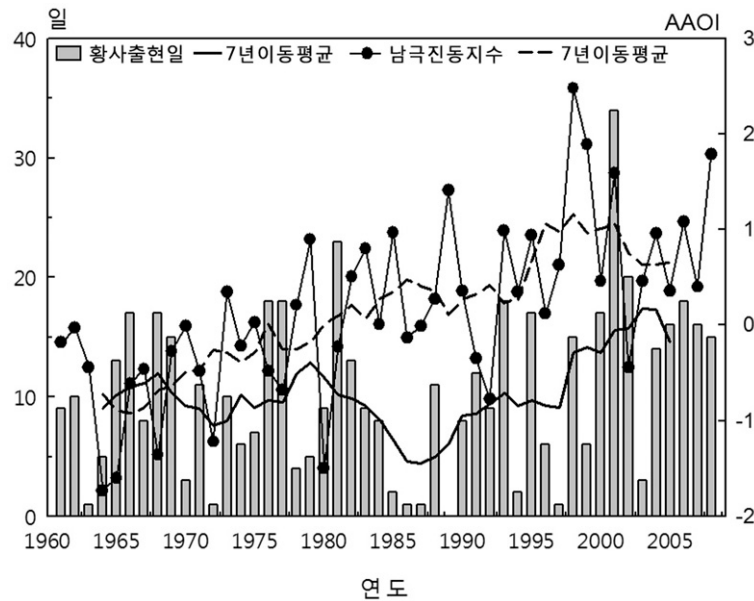


그림 7. 우리나라의 황사 출현일수와 남극진동지수의 변화 경향

자료: National Weather Service Climate Prediction Center

의 증가 경향과 마찬가지로 지속적 증가하고 있으며, 특히 1980년대 중반 이후 꾸준히 증가하고 있다.

표 4는 우리나라의 강도별 황사 출현일수와 남극진동지수와의 상관관계를 나타낸 것이다. 전체 황사일과 겨울철 남극진동지수와의 $r=0.492$ 의 정적인 관계가 있다. 겨울철의 남극진동지수와 강도 1 이상의 황사일 빈도 사이에 비교적 높은 상관관계가 있어서 통계적으로 보면 두 변수 사이에 상관관계가 인정된다. 이는 겨울철 남극진동지수와 시베리아 고기압 강도는 서로 관련이 있으며, 남극진동지수가 양의 값일 때 겨울철 시베리아 고기압의 강도가 약해진다는 연구결과(Fan and Wang, 2004)와 같은 흐름이라고 볼 수 있다.

그러나 중국의 황사 발생일수와 남극진동지수와의 관계를 연구한 Fan and Wang(2004)에 따르면 봄철과 겨울철의 남극진동지수가 황사 발원지인 중국의 황사 발생과 부적인 상관관계가 있다. 반면에 우리나라의 경우에는 황사 출현일수와 남극진동지수와의 정적인 관계를 보이고 있어서 중국의 황사를 대상으로 연구한 Fan and Wang(2004)의 결과와 상치된다. Fan and Wang(2004)의 연구에서는 1954년부터 2001년까지의

표 4. 우리나라의 황사 출현일수와 남극진동지수간의 상관계수(r)

남극진동지수 강도별 황사일	겨울(12~2월)	봄(3~5월)	전년
전체 황사일	0.492*	0.363	0.235
강도 0의 황사일	0.491*	0.373	0.233
강도 1의 황사일	0.399	0.295	0.244
강도 2의 황사일	-0.053	-0.101	-0.057

유의확률: * $p<0.05$ 표 5. 우리나라의 4월 황사 출현일수와 남극진동지수간의 상관계수(r)

남극진동지수 강도별 황사일	겨울(12~2월)	봄(3~5월)	전년
전체 황사일	0.678***	0.546**	0.367
강도 0의 황사일	0.693***	0.564**	0.386
강도 1의 황사일	0.510*	0.411*	0.407*
강도 2의 황사일	0.004	-0.258	-0.199

유의확률: *** $p<0.001$, ** $p<0.01$, * $p<0.05$

김선영 · 이승호

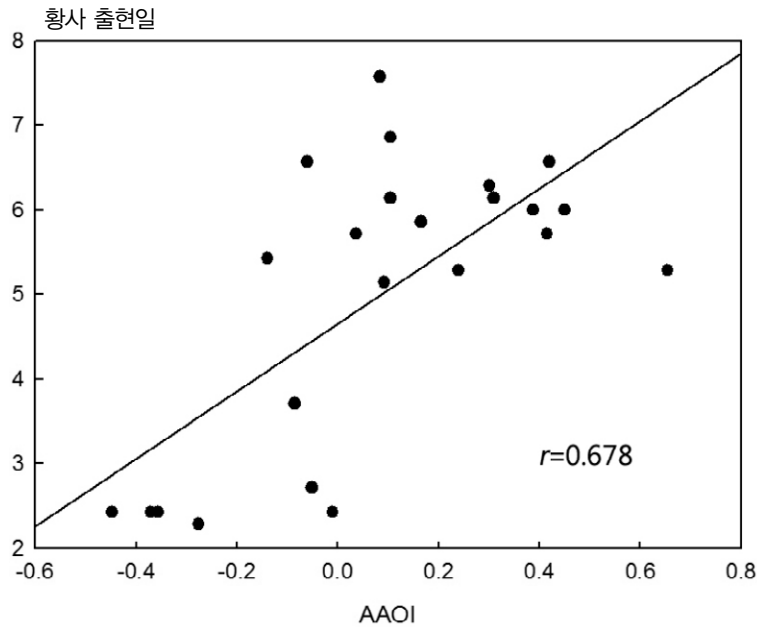


그림 8. 우리나라의 4월 황사 출현일수와 겨울철 남극진동지수의 관계

중국의 황사 발생일수가 전반적으로 감소하는 경향이 있다고 하였으며 같은 기간 동안의 봄철 및 겨울철의 남극진동지수는 꾸준히 증가하고 있다고 하였다. 그러나 다른 측면에서 보면, 중국에서도 1990년대 이후 황사의 빈도가 꾸준히 증가하고 있다(Gao *et al.*, 2003; Gong *et al.*, 2006)는 점에 주목할 필요가 있다. 즉, 보다 장기적인 면에서 관찰해보면 두 변수 사이의 관계가 명확해질 수 있다는 것을 시사한다고 할 수 있다. 그러므로 두 변수 사이의 기구를 밝히는 것과 더불어 보다 장기간의 자료를 분석하여야 할 필요가 있다.

황사가 집중되는 4월의 우리나라 황사 출현일수와 남극진동지수 사이에는 더 높은 상관관계가 있다. 표 5는 남극진동지수와 4월 황사 출현일수 사이의 상관관계를 나타낸 것으로 강도와 관계없이 두 변수 사이에 높은 상관관계가 있음을 보여준다. 즉, 강도 0, 1의 황사 출현일수와 남극진동지수 사이에 상관계수(r)는 0.407 이상이며 유의 수준 $\alpha=0.01$ 과 $\alpha=0.05$ 에서 유의한 결과이다. 앞에서 설명한 바와 같이 강도 2 이상의 황사 빈도가 낮다는 점을 고려하여 봄철과 겨울철의 강도 1 이하 황사 경우만 보면 두 변수 사이의 상관계

수(r)는 모두 0.411 이상으로 높은 값이다. 그림 8은 우리나라 4월의 전체 황사 출현일수와 겨울철 남극진동지수 사이의 관계를 보여주는 것으로 두 변수 사이의 선형의 관계($r=0.678$)가 잘 나타난다. 즉, 남극진동지수의 값이 높아질 때 황사의 발생 빈도가 높아질 수 있음을 보여주는 것이다. 특히 황사가 집중되는 4월의 황사 출현일수와 남극진동지수 사이의 높은 상관관계는 차후 4월의 황사 예측에서 남극진동지수가 중요한 변수가 될 수 있음을 보여주는 것이다.

4) 유라시아 대륙 적설면적과 황사 출현의 관계

황사가 발생하기 위해서는 강한 바람과 더불어 발원지의 지표상태가 중요하다. 황사 발원지에 눈이 덮여 있으면 황사입자가 부유하기 어려운 조건이므로 황사 발생이 불가능하다.

유라시아 대륙 적설면적은 그림 9에서와 같이 매년 변동의 노이즈를 제거한 7년 이동 평균의 경우 시기별로 증가와 감소가 반복되지만 전체적으로 감소하고 있으며 특히 1980년대 중반 이후 감소하는 경향이 뚜렷

한국의 황사 출현에 영향을 미치는 요인에 관한 연구

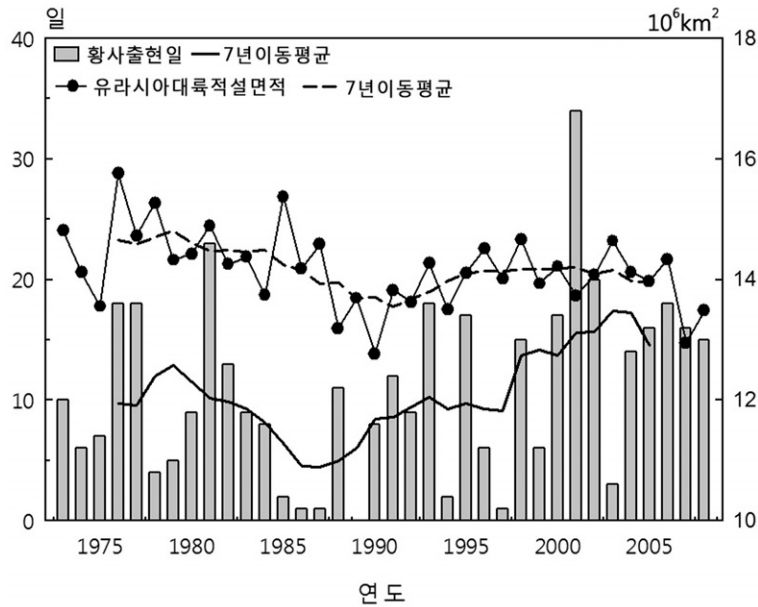


그림 9. 우리나라의 황사 출현일수와 유라시아 대륙 적설면적의 변화 경향

자료: National Snow and Ice Data Center

표 6. 우리나라의 황사 출현일수와 유라시아 대륙 적설면적간의 상관계수(r)

적설면적 강도별 황사일	겨울(12~2월)	봄(3~5월)	전년
전체 황사일	-0.214	-0.225	-0.173
강도 0의 황사일	-0.182	-0.206	-0.165
강도 1의 황사일	-0.270	-0.321	-0.289
강도 2의 황사일	-0.367*	-0.382*	-0.351*

유의확률 : * $p < 0.05$ 표 7. 우리나라의 4월 황사 출현일수와 유라시아 대륙 적설면적간의 상관계수(r)

적설면적 강도별 황사일	겨울(12~2월)	봄(3~5월)	전년
전체 황사일	-0.393*	-0.742**	-0.473**
강도 0의 황사일	-0.497*	-0.764**	-0.504**
강도 1의 황사일	-0.433*	-0.568**	-0.264
강도 2의 황사일	-0.372*	-0.539**	-0.453**

유의확률 : ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$

하다. 이에 반하여 황사 출현일수는 유라시아 대륙 적설면적의 감소 경향과는 달리 지속적으로 증가하고 있다. 특히 1980년대 이후 유라시아 대륙의 적설면적 감소와 황사 출현일수의 증가 경향이 뚜렷하다. 몽골과 중국 동부의 황토고원을 대상으로 연구한 Kurosaki and Mikami(2004)에 의하면 1998년의 적설면적은 1995년에 비해 전 지역에서 크게 감소하였으며, 황사 발생일은 1998년이 1995년보다 더 많았다고 하였다. 북반구 적설면적은 1920년대 초반부터 감소하고 있으며, 특히 1970년대 후반 이후 감소하고 있는 경향이 뚜

렷하다는 보고가 있다(IPCC, 2007). 전지구 평균기온 편차는 1980년대 이후 양의 값을 보이고 있어서 계속 되는 지구온난화로 유라시아 대륙 적설면적의 지속적인 감소를 예상할 수 있다.

표 6은 우리나라의 강도별 황사 출현일수와 유라시아 대륙 적설면적과의 관계를 나타낸 것이다. 전체 황사일이나 강도 0과 강도 1의 황사 출현일의 경우 유라시아 대륙의 적설면적과 유의한 관계가 나타나지 않았다. 그러나 강도가 강한 황사(강도 2) 출현일의 경우는 유라시아 대륙 적설면적과 $r = -0.351$ 이상의 통계적으

김선영 · 이승호

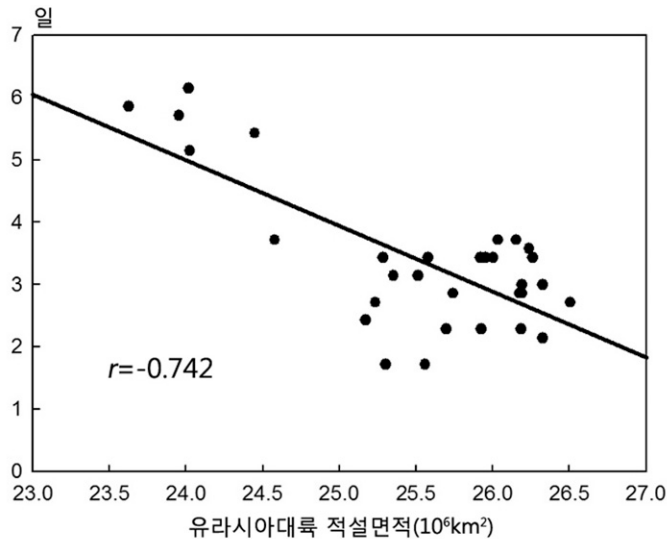


그림 10. 우리나라의 4월 황사 출현일수와 봄철 유라시아 적설면적의 관계

로 유의한 상관관계가 있다. 이는 적설면적이 감소하는 것 자체가 전년의 황사의 발생일수에 미치는 영향이 크지 않다는 것을 의미한다. 그러므로 황사가 집중되는 시기를 구별하여 파악할 필요가 있다.

황사가 집중되는 4월의 황사는 전년의 황사일과 다른 결과를 보인다. 표 7은 유라시아 대륙 적설면적과 4월 황사 출현일수 사이의 상관관계를 나타낸 것이다. 모든 강도의 황사가 유라시아 대륙 적설면적과 유의한 상관관계를 보인다. 4월 황사 출현일수와 유라시아 대륙 적설면적 사이의 상관관계수(r)는 0.372 이상이며 유의 수준 $\alpha=0.01$ 과 $\alpha=0.05$ 에서 유의한 결과이다. 특히 봄철의 적설면적과 황사 출현일수 사이에는 높은 상관관계가 있다. 우리나라의 봄철 전체 황사 출현일수는 봄철 유라시아 대륙의 적설면적과 상관관계수 $r=-0.742$ 의 높은 상관관계가 있으며, 황사의 강도에 관계없이 두 변수 사이의 상관관계수가 높은 값을 보인다. 그림 10은 우리나라의 4월 황사 출현일수와 봄철 유라시아 대륙 적설면적과의 관계를 나타낸 것으로 두 변수 사이의 선형 관계가 잘 나타난다. 이는 봄철 유라시아 대륙 적설면적이 감소하면 4월의 황사가 많이 발생함을 의미한다. 즉, 유라시아 대륙 적설면적이 감소하면 발원지의 지표 환경이 건조해져서 황사 출현 가능성이 커진다. 따라서 유라시아 대륙 적설면적이 감소할 때, 4

월의 황사 출현일수가 증가할 수 있다. 특히 황사가 집중되는 4월의 황사 출현일수와 봄철 유라시아 대륙 적설면적 사이의 높은 상관관계는 황사가 주로 집중되는 4월의 황사 예측에서 유라시아 대륙 적설면적이 중요한 변수가 될 수 있음을 보여준다.

5) 토의

우리나라의 황사 출현일수는 1980년대 이후 증가하고 있으며, 연중 황사가 가장 많이 발생하는 4월의 경우 역시 증가 경향이 뚜렷하다. 우리나라에 발생하는 황사는 여러 가지 요인에 의해 발생할 수 있다. 이상의 분석에 의하면 북극진동지수, 남극진동지수 등의 대기 순환지수와 유라시아 대륙 적설면적은 우리나라의 황사 출현일수 사이에 비교적 높은 상관관계가 있다. 특히 각 지수의 봄철 값과 4월의 황사 출현일수와 높은 상관관계가 있다.

본 연구에서 분석한 북극진동지수, 남극진동지수 및 유라시아 대륙 적설면적의 3가지 변수를 이용하여 다중 회귀분석을 실시하여, 우리나라에 출현하는 황사에 영향을 주는 위의 3가지 변수와 황사 출현일수간의 관계식(식 1)을 도출하였다. 회귀분석은 황사 출현일수를 종속변수로, 북극진동지수, 남극진동지수, 유라시아

대륙 적설면적을 독립변수로 하고 유의한 변수만을 남기고 단계별로 제외시키는 stepwise 방법으로 실시하였다. 그 결과 남극진동지수와 유라시아 대륙 적설면적을 변수로 하는 식 1이 구해졌으며, 제외된 변수인 북극진동지수까지 포함할 경우 설명력은 61.2%로 증가하지만 식 자체의 유의성이 낮아진다. 그러므로 식 1을 이들 변수 사이의 관계식으로 채택하였다. 이 식은 유의수준 $\alpha=0.05$ 에서 유의하고, 황사 출현일 총변동의 59.1%를 설명한다. 식 1에서 ADD 는 우리나라 4월의 황사 출현일수이며, $AAOI$ 는 봄철의 남극진동지수, ESC 는 봄철의 유라시아 대륙 적설면적을 나타낸다. 다른 변수가 일정할 때 남극진동지수가 증가하면 황사 출현일수는 증가하고, 유라시아 대륙 적설면적이 증가하면 황사 출현일수는 감소함을 보여준다.

$$ADD = 2.333AAOI - 1.638ESC + 32.045 \quad (1)$$

그림 11은 실제 황사 출현일수와 위 식에 의하여 구한 4월의 예측 황사 출현일수를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 잔차가 ± 2 이내이며 비선형 모델의 결과를 잘 보여주나, 1980년대 중반에서 후반 사이에

일관되게 실제 황사 출현일수보다 과대평가되고 있다. 이 시기는 앞에서 설명한 바와 같이 남극진동지수의 값이 높은 반면 황사 출현일수가 적었던 경우이다.

여기서 식 1의 결과는 각 변수를 이동평균하여 구한 것이다. 식 1을 통하여 봄철의 남극진동지수 및 유라시아 대륙 적설면적과 우리나라 4월의 황사 출현일수 사이의 관계를 알 수 있다. 즉, 식 1은 세 변수 사이의 관계를 보여줄 뿐이며, 황사 출현일수를 예측할 수 있는 것은 아니다. 그러므로 예측식을 구하기 위해서는 매년 값에 의하여 식을 구하여야 한다. 그럴 경우 위의 변수로 관계식을 구하면 설명력은 훨씬 낮아진다. 이는 우리나라의 황사 출현을 예측하기 위해서는 새로운 변수를 구하는 것이 필요하다는 것을 시사한다. 발원지인 중국에서 황사가 발생한다고 할지라도 우리나라에 황사가 발생하기 위해서는 황사 물질을 이동시킬 수 있는 기구가 필요하다. 본 연구에서는 중국에서 발생한 황사를 우리나라까지 이동시키는 기구와 관련된 변수가 논의되지 않았다. 그러므로 우리나라의 황사 출현을 예측하기 위해서는 발원지에서 우리나라까지 이동시키는 기구에 대한 변수를 선정하여 분석하는 것이 필요하다.

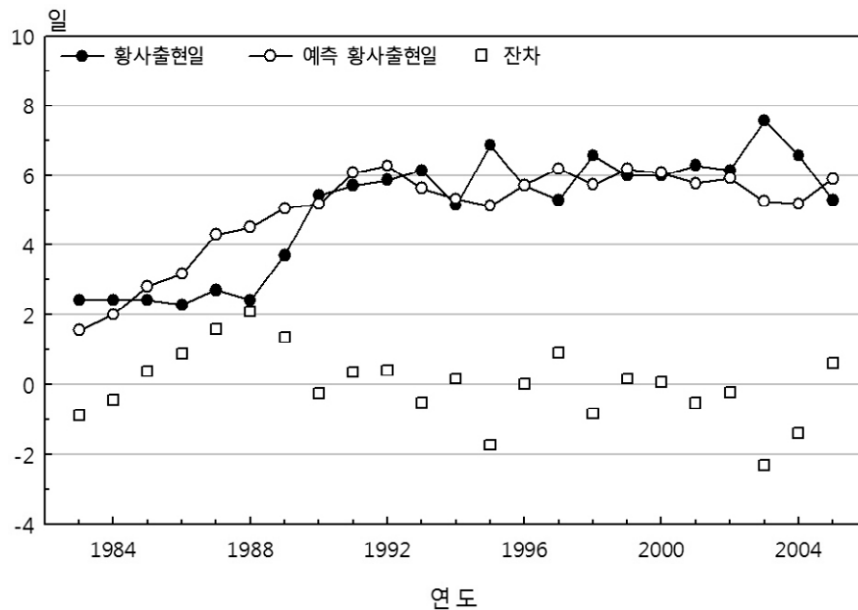


그림 11. 우리나라의 황사 출현일수와 예측 황사 출현일수의 비교

김선영 · 이승호

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 장기간 동안의 황사 관측 자료를 보유하고 있는 12개 지점의 황사 출현일수를 분석하여 우리나라에 발생하는 황사 출현일수의 변화와 그에 영향을 미치는 요인을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 황사 출현일수의 월별, 계절별 비율을 분석하고, 우리나라의 황사 출현일수와 북극진동지수, 남극진동지수 등의 대기 순환 지수 및 유라시아 대륙 적설면적과의 관계를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

우리나라의 황사 출현일수는 1980년대 중반 이후 증가 경향이 뚜렷하다. 1980년대 중반 이전의 평균 황사 출현일수는 9.7일, 이후의 평균 황사 출현일수는 11.3일로 1.6일 증가하였다. 또한 황사는 봄철에 82.9%로 가장 많이 발생하며, 4월의 발생 비율이 가장 높다. 전반기(1961~1984년)의 4월 황사 출현일수는 3.2일이며, 후반기(1985~2008년)는 5.1일로 2.9일 증가하여 전년의 경우보다 증가 폭이 크다. 봄철에 황사 출현 비율이 높은 것은 발원지의 낮은 상대습도와 강한 풍속으로 인해 황사가 발원하기에 좋은 조건이 형성되기 때문이었다.

황사 출현일수와 북극진동지수와는 정적인 관계가 있었으며, 강도가 강한 황사일수록 더 유의한 관계를 보였다. 특히 황사가 주로 발생하는 시기인 봄철의 경우 그 상관계수는 더 높았다. 이는 북극진동지수가 양의 값을 보일 때 황사 발원지로의 한기유입이 약화되어 시베리아 고기압의 강도에 영향을 미치게 된다. 이로 인해 발원지가 황사 출현에 유리한 조건을 형성하게 되어 황사 출현이 증가할 수 있다.

황사 출현일수와 남극진동지수와는 정적인 관계가 있었으며, 북극진동지수와 마찬가지로 봄철의 경우 그 상관계수는 더 높게 나타났다. 남극진동지수가 양의 값을 보일 때 아시아에 한랭한 날씨의 출현이 줄어들고, 시베리아 고기압의 강도가 약화될 수 있으므로 봄철 남극진동지수가 양의 값일 때 발원지의 기온이 상승하여 황사가 발생하기 좋은 조건이 형성된다.

황사 출현일수와 유라시아 대륙 적설면적과는 부적인 관계가 있었으며, 강도가 강한 황사일수록 더 유의

한 관계를 보였다. 유라시아 대륙 적설면적이 감소하게 되면 발원지의 지표환경이 건조해져서 황사 출현 가능성이 커질 수 있다. 최근 지구온난화로 인해 유라시아 대륙 적설면적은 꾸준히 감소하고 있으며, 이는 황사 출현일수의 증가를 초래할 수 있다.

우리나라의 황사 출현일수에 영향을 미치는 북극진동지수, 남극진동지수, 유라시아 대륙 적설면적은 앞으로의 황사 출현을 예측하기 위하여 제시될 수 있는 중요한 요인이다. 그러나 황사 출현일수를 위의 세 가지 요소만으로 예측하기에는 어려움이 많다. 보다 정확한 황사 출현 예측을 위해서는 다양한 변수가 제시되어야 할 것이다. 특히 발원지의 황사가 우리나라까지 이동시키는 기구에 대한 지수를 개발하는 것이 필요하다. 그러므로 이후 황사의 이동과 관련된 지수의 개발을 위한 연구가 계속 시행되어야 한다.

사사

본 논문을 세심하게 읽고 고견을 주신 심사위원께 깊이 감사드립니다.

주

- 1) 바오투우(Paotou)는 네이멍구 지역 서쪽에 위치한 지점이다.
- 2) 연구기간에 포함되지 않는 1928년과 2009년에는 10월에 황사가 출현했다는 기록이 있다.

참고문헌

- 공군제73기상전대, 2002, 2002년 항공기상연감, 공군제73기상전대.
- 이강원, 2005, “中國 內蒙古 東部地域の 土地 利用變化와 沙漠化 -커얼친 沙地の 사례-,” 대한지리학회지, 40(6), 694-715.
- 이승호 · 김선영, 2006, “한국의 황사 발생 빈도 분포와 변화 분석,” 환경영향평가, 15(3), 207-215.

한국의 황사 출현에 영향을 미치는 요인에 관한 연구

- 임은순 · 안중배, 2004, “한반도 겨울철 기온변동과 대규모 순환지수와의 상관성 분석,” 한국기상학회지, 40(4), 441-452.
- 전영신 · 조경숙 · 김영화 · 이종국, 2003, “만주에서 발원한 황사 현상,” 한국기상학회지, 39(2), 251-263.
- Fan, F. 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., Su, L., Ma, Q., Li, H., Li, X., and Yu, X., 2003, Climatic analyses on increasing dust storm frequency in the springs of 2000 and 2001 in Inner Mongolia, *International Journal of Climatology*, 23, 1743-1755.
- Gong, D. Y. and Ho, C. H., 2002, The Siberian High and climate change over middle to high latitude Asia, *Theoretical and Applied Climatology*, 72, 1-9.
- 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.
- Hall, A. and Visbeck, M., 2002, Synchronous variability in the Southern Hemisphere atmosphere, sea ice, and ocean resulting from the annular mode, *Journal of Climate*, 15, 3043-3057.
- Hara, Y., Uno, I., and Wang, Z., 2006, Long-term variation of Asian dust and related climate factors, *Atmospheric Environmental*, 40, 6730-6740.
- IPCC, 2007, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Kim, J., 2008, Transport routes and source regions of Asian dust observed in Korea during the past 40 years (1965-2004), *Atmospheric Environmental*, 42, 4778-4789.
- Kurosaki, Y. and Mikami, M., 2003, Recent frequent dust events and their relation to surface wind in East Asia, *Geophysical Research Letters*, 30(14), 1736, doi:10.1029/2003GL017261.
- Kurosaki, Y. and Mikami, M., 2004, Effect of snow cover on threshold wind velocity of dust outbreak, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 83A, 1-18.
- Kwok, R. and Comiso, J. C., 2002, Spatial patterns of variability in Antarctic surface temperature: connections to the Southern Hemisphere annular mode and the Southern oscillation, *Geophysical Research Letters*, 29(14), 29, 1705, doi:10.1029/2003GL017261.
- Liu, X., Yin, Z.-Y., Zhang, Z., 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.
- Nan, S. and Li, J., 2003, The relationship between the summer precipitation in the Yangtze River valley and the boreal spring Southern Hemisphere annular mode, *Geophysical Research Letters*, 30(24), 2266, doi:10.1029/2003GL018381.
- Qian, W., Quan, L., and Shi, S., 2002, Variation of the dust storm in China and its climatic control, *Journal of Climate*, 15, 1216-1229.
- Rao, V. B., Alexandre, C. M. C. D., and Sergio, H. F., 2003, Interannual variations of storm tracks in the Southern Hemisphere and their connections with the Antarctic oscillation, *International Journal of Climatology*, 23, 1537-1545.
- Song, J., Zhou, W., and Li, C., 2009, Signature of the Antarctic oscillation in the Northern Hemisphere, *Meteorology and Atmospheric Physics*, 105, 55-67.
- Sun, L., Zhou, X., Lu, J., Kim, Y.-P., and Chung, Y.-S., 2003, Climatology, trend analysis and prediction of sandstorms and their associated dustfall in

김선영 · 이승호

- China, *Water, Air, and Soil Pollution: Focus*, 3, 41-50.
- Thompson, D. W. J. and Wallace, J. M., 1998, The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields, *Geophysical Research Letters*, 25(9), 1297-1300.
- Thompson, D. W. J. and Wallace, J. M., 2000, Annular modes in the extratropical circulation, Part I: month-to-month variability, *Journal of Climate*, 13, 1000-1016.
- Wang, X., Dong, Z., Zhang J., and Liu, L., 2004, Modern dust storms in China: an overview, *Journal of Arid Environments*, 58, 559-574.
- Yamamoto, T., Yoshino, M., and Suzuki, J., 2007, The relationship between occurrence of dust events and synoptic climatological condition in east Asia, 1999-2003, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 85(2), 81-99.
- Yang, Y. Q., Hou, Q., Zhou, C. H., Liu, H. L., Wang, Y. Q., and Niu, T., 2007, Sand/dust storms over Northeast Asia and associated large-scale circulations in spring 2006, *Atmospheric, Chemistry and Physics Discussion*, 7, 9259-9281.
- 교신 : 이승호, 143-701, 서울시 광진구 화양동 1번지 건국대학교 지리학과(이메일: leesh@konkuk.ac.kr, 전화: 02-450-3380)
- Correspondence: Seungho Lee, Department of Geography, Konkuk University, 1 Hwayang-dong, Gwangjin-gu, Seoul, 143-701, Korea(e-mail: leesh@konkuk.ac.kr, phone: +82-2-450-3380)
- 최초투고일 09. 11. 10
수정일 09. 12. 04
최종접수일 09. 12. 07