

최근의 황사 발원지에서의 먼지 발생 특성-2002년 이후 먼지발생 경향 분석

이종재 · 김철희*

부산대학교 지구환경시스템학부

(2008년 10월 22일 접수; 2008년 12월 29일 승인)

Characteristics of Recent Occurrence Frequency of Asian dust over the Source Regions - Analysis of the dust Occurrences Since 2002

Jong-Jae Lee and Cheol-Hee Kim*

Division of Earth Environmental System, Pusan National University

(Manuscript received 22 October 2008; in final form 29 December 2008)

Abstract

In order to examine the variational features of Asian dust outbreak in recent years, observed WMO synop data were employed for the period from 1996 to 2007. We first divided Asian dust source regions into four subregions; 1) Taklamakan, 2) Gobi, 3) Inner Mongolia-Manchuria and 4) Loess, and the meteorological variables such as wind speed, precipitation and threshold wind speed observed during the Asian dust outbreak period were compared with those during non-Asian dust period. The results showed that temporal variation of occurrence frequency of dust outbreak had a strong positive correlation with the frequency of strong wind speed and low precipitation in each of the 4 source regions. Spatial distributions of frequency of dust occurrence after 2002 showed increasing trend in Gobi and Inner Mongolia-Manchuria but decreasing trend in Loess region. This is showing a shift in main source region toward Northwest, especially since 2003.

Key words: Asian dust, dust outbreak, threshold wind speed, strong wind speed, precipitation

1. 서론

1915~2002년까지 서울에서의 평균적인 황사 관측 일수는 5.2일이었으나 (Chun *et al.*, 2002) 2000년 초, 특히 2001~2002년의 우리나라 황사 발생일은 평균적인 황사 관측 일수를 훨씬 초과하였고 그 강도 또한 매우 극심하였다. 이에 따라 우리나라 대부분의 대도시에서 매우 높은 미세먼지(PM₁₀)농도가 관측되었으며, 특히 2002년 4월 8일 서울 성수동 관측소는 시간 평균 3,311 $\mu\text{g m}^{-3}$ 의 기록적인 미세먼지 농도가 관측되기도 하였다. 그러나 이와는 극히 대조적으로 이듬해인

2003~2004년에는 우리나라 대도시에서 황사 발생이 현저히 줄었는데, 특히 2004년에는 황사발생이 연중 전국적으로 전무한 해로 기록되었다. 이러한 황사 발생의 급격한 연 변동성을 규명하기 위해서는 우선 중국의 황사 발원지에서의 원천적인 황사 발생 현황을 시간적, 공간적으로 조사하고 그 경향을 파악하는 것이 우선 중요하다.

황사 발원지는 토양이 건조하고 식생이 거의 없는 지역이며, 연 강수량이 200 mm 이하의 건조지역인 몽고고원, 중국과 몽고의 국경 부근의 고비사막, 중국 북부의 황토 고원으로 알려져 있다. 이 지역에서는 한랭전선 후면 한기역에서 강한 바람에 의해 먼지 보라가 발생한다(정관영과 박순용, 1995). 그리고 만주나 내몽골 고원에 위치한 일부지역에서도 먼지현상이 자주 발원하였으며(Chun *et al.*, 2001), 이에 따른 먼지 발생 당시의 중관기상장의 특성이 분석된 바 있다(전영신

*Corresponding Author: Cheol-Hee Kim, Division of Earth Environment System, Atmospheric Science major.
Phone: +82-51-510-3687, fax: +82-51-515-1689
E-mail: chkim2@pusan.ac.kr

외, 2003). 이러한 기존의 기상학적인 특성 분석과는 별도의 연구로서 황사 발원지에서의 직접적인 먼지 발생 현황을 파악하고 발원지별 시·공간적인 변동성을 파악하는 것은 황사 발생 특성 분석 차원뿐만 아니라 기후학적인 측면에서도 중요하다.

지난 30년간 중국에서의 먼지 발생 빈도수는 줄어드는 경향을 보이고 있으나(Yoshino, 2002), 동아시아에서의 전체 황사 발생은 최근에 매우 활성화되는 경향을 보이고 있다. 이러한 황사 발생의 최근 변동성은 여러 요인에 의해 나타날 수 있는데, 이 중 발원지의 지표 상태와 기상 조건, 특히 풍속과 강수가 제일 중요하게 연관된다. 이러한 시간적인 먼지 발생 변동 특성 연구 역시 동북아시아에 위치한 우리나라의 먼지 발생 경향을 분석할 수 있는 기초 연구로서 필수적이라 할 수 있다. 더욱이 황사 발생이 우리나라에서 극심했던 2002년과 그 이후의 황사 발생 경향 특성 혹은 여러 기상 변수와의 연관성 등의 분석적 연구는 전무하다시피 하여 최근의 황사 발생 특성을 이해하기 힘든 실정이다.

본 연구에서는 우리나라가 아닌 황사 발원지에서의 최근, 특히 2002년 이후의 먼지 발생 특성을 분석하였다. 즉, 발원지에서의 먼지 발생 빈도수, 풍속, 강수량의 변화를 연관시켜 살펴보고, 특히 2002년 이후 발원지에서의 먼지 발생의 변화 경향을 심층적으로 분석하였다. 이러한 분석적 연구는 향후 한반도에 수송되는 황사 현상의 대략적인 추세를 발원지별로 진단할 수 있는 기초를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 연구방법

2.1 자료 및 분석영역

본 연구에서는 세계기상기구(World Meteorological Organization; WMO)에 보고되어 종관규모 재분석 일기도에 사용되는 synop 자료 중 황사 발원지에서 먼지 발생과 연관되는 일기 코드와 10 m 높이의 지표 풍속 자료 그리고 강수 자료를 사용하였다. synop 자료 중 먼지 발생과 연관되는 일기 코드는 Table 1 (WMO, 1974)에 제시하였다. 분석 기간은 중국 황사 발원지에서 측정된 1996년 1월부터 2007년 12월까지의 12년간이며, 황사 발원지를 특성별로 구분하여 보고한 Chun *et al.*(2001), Lim and Chun(2006)의 내용을 참고하여, 본 연구에서도 다음의 4개의 소구역(S1~S4)으로

Table 1. Meteorological codes associated with dust phenomena.

Code	Symbol	Remarks
6	S	Widespread dust in suspension in the air, not raised by wind at the time of observation
7	\$	Dust or sand raised by wind at the time of observation
8	⊖	Well-developed dust whirl(s) seen at the station during the preceding hour, but no dust storm or sand storm
9	(S)	Dust storm or sand storm within sight at the time of observation, or at the station during the preceding hour
30	⊖	Slight or moderate dust storm or sand storm has decreased during the preceding hour
31	⊖	Slight or moderate dust storm or sand storm no appreciable change during the preceding hour
32	⊖	Slight or moderate dust storm or sand storm has increased during the preceding hour
33	⊖	Severe dust storm or sand storm has decreased during the preceding hour
34	⊖	Severe dust storm or sand storm no appreciable change during the preceding hour
35	⊖	Severe dust storm or sand storm has increased during the preceding hour
98	⊖⊖	Thunderstorm combined with dust storm or sand storm at time of observation

설정하여 발원지별 특성을 분석하였다. 각 발원지의 위치와 관측소 지점은 Fig. 1에 도시하였다.

- 1) 타클라마칸사막(37-41°N, 75-88°E; S1 지역): 면적 약 $5.01 \times 10^5 \text{ km}^2$
- 2) 고비사막(42-48°N, 95-110°E; S2 지역): 면적 약 $7.88 \times 10^5 \text{ km}^2$
- 3) 내몽골고원-만주지역(41-46°N, 110-122°E; S3 지역): 면적 약 $5.39 \times 10^5 \text{ km}^2$
- 4) 황토고원(34-38°N, 105-113°E; S4 지역): 면적 약 $3.21 \times 10^5 \text{ km}^2$

타클라마칸 사막을 포함한 S1 지역은 해발고도 2000 m 이상의 높은 고도에 위치해 있고 크고 작은 높은 유동 모래언덕(약 50 m)으로 구성되어 강한 바람에 의해 상대적으로 다른 지역보다 먼지가 쉽게 상승할 수 있는 조건을 가지고 있으며, 고비사막을 포함하는 S2 지역, 내몽골고원-만주지역을 포함하는 S3 지역, 황토고원인 S4 지역은 모두 해발고도 약 1000~1500 m로서 지표의 특성과 난류 조건이 먼지 발생에 중요하게 작용한다.

Fig. 1에 도시한 각각의 황사 발원지 S1 ~ S4 지역

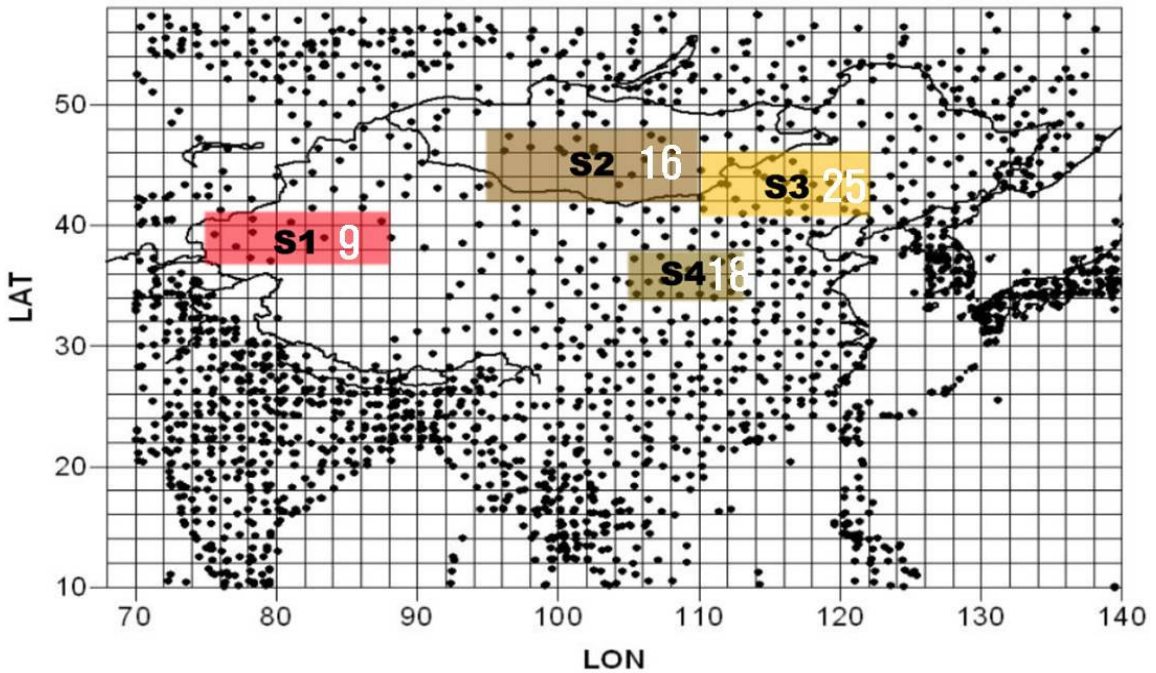


Fig. 1. Geographical distribution of Asian dust source regions, and the locations of WMO surface reporting stations in each of the 4 dust source regions.

에서 synop 자료가 보고되는 관측소 수는 각각 9, 16, 25, 18개로 조사되었으며, 본 연구에서는 조사된 관측소(Fig. 1) 자료를 특별한 자료처리 없이 모두 사용하였다.

2.2 연구방법

최근의 발생 변동성, 특히 2002년 이후의 중국 황사 발원지별 먼지 발생 빈도 및 그 특징을 살펴보기 위하여 각 발원지별 먼지 발생 빈도를 구분하여 조사하고, 아울러 기상 변수 중 강풍 및 임계 풍속의 시계열 변화, 그리고 강수량의 변동에 따른 먼지 발생 특성을 연관시켜 아래와 같이 분석하였다.

첫째로, 발생 빈도 조사는 본 연구에 사용된 발원지별 관측소 개수가 동일하지 않으므로, 먼지 발생 빈도수를 식(1) 과 같이 통계적으로 계산하였다.

시간별 자료의 개수이며, $n(GTS_{dust})(i, j)$ 는 i station에서 일 중 j 시간에서의 자료 중 먼지가 기록된 시간 자료의 유무를 나타낸 것으로서 먼지가 발생하였다면 1, 그렇지 않으면 0이다. 이를 통해 발원지 내의 관측소수에 상관없이 Fig. 1에 구분된 4개 발원지에서의 먼지 발생 경향을 통계적으로 직접 비교할 수 있다.

두번째로, 바람과 먼지 발생의 연관성을 살펴보기 위하여 풍속을 강한 바람과 임계 풍속 2가지로 나누어 분석하였다. 임계 풍속은 먼지가 발생하기 시작하는 풍속으로 많은 수치모델에서 6.5 m s^{-1} 로 사용하고 있으며(e.g., Tegen and Fung, 1994; Kurosaki and Mikami, 2003; Uno *et al.*, 2003), 최근에는 황사의 발원지의 임계 풍속을 7.5 m s^{-1} 로 경험적으로 추정한다(박순웅과 이은희, 2004). 본 연구에는 Park and In(2003)과 Park and Lee (2007)의 과정을 참고하여 각 발원지별로 구분하여 임계 풍속을 먼저 구하였다. 즉, 1 m s^{-1} 풍

$$\text{먼지 발생 빈도}(\%) = \frac{\text{먼지가 발생한 자료의 수}}{\text{발원지내의 전체 자료수}} = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M n(GTS_{dust})(i, j)}{N \times M} \times 100 \quad (1)$$

여기서 N은 한 발원지 내의 site 수이고 M은 일 중 속 단계별 먼지 발생 빈도(Fig. 2a)와 풍속 발생 빈도

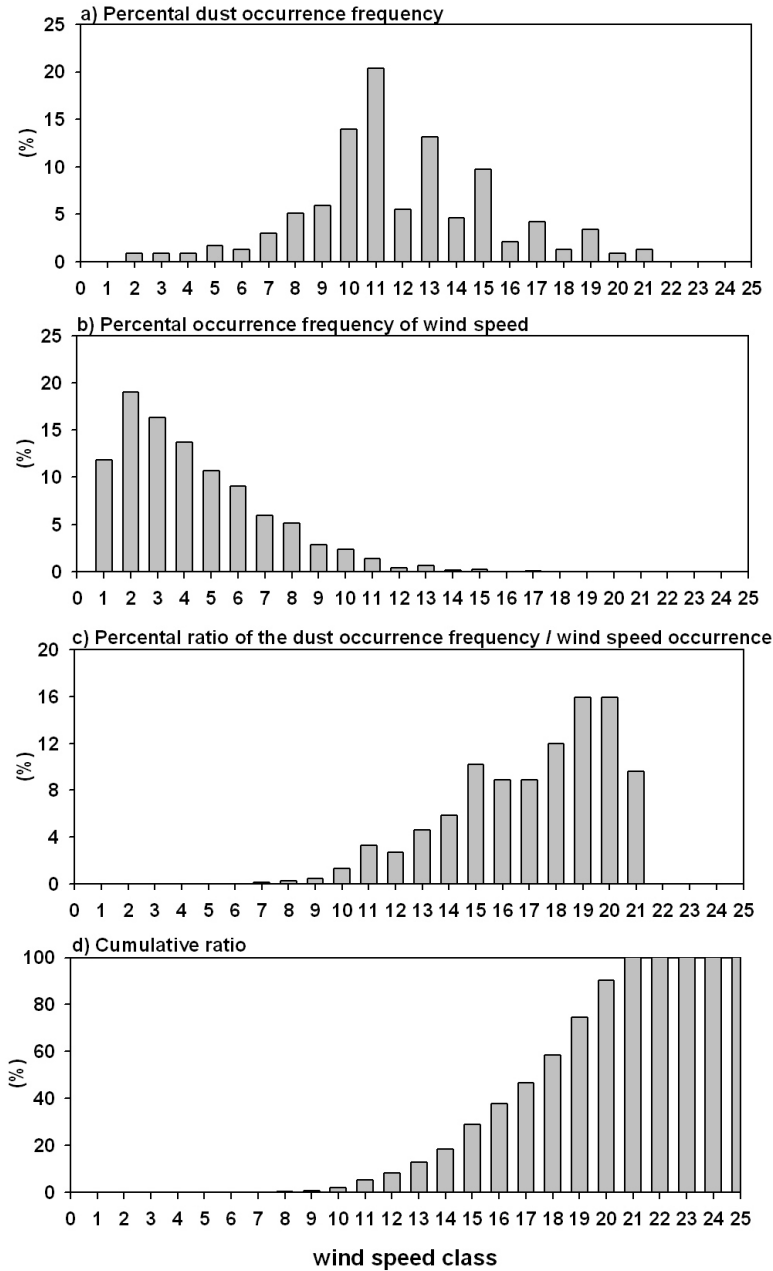


Fig. 2. An example of procedure for the estimation of threshold wind speed at the source region 3 for the 2006. (a)the occurrence frequencies of the dust rise, (b)the wind speed, (c)percent ratio of the occurrence frequency of dust rise to that of the wind speed, and (d)normalized cumulative dust occurrence percentage with respect to the wind speed.

(Fig. 2b)를 구한 후, 두 발생 빈도 사이의 percental ratio를 계산(Fig. 2c)하여, Percental ratio의 분포를 순차적으로 누적하여 그 값이 3% 이상일 때의 풍속을 임계 풍속으로 계산하였다(Fig. 2d). 그 다음으로 식 (1)의 먼지 발생 빈도 계산과 동일한 방법으로 임계 풍속 이

상의 강한 바람의 발생 빈도를 발원지 별로 구하고, 이 결과를 먼지 발생 빈도와 연관시켜 분석하였다.

세 번째로, 강수와 먼지 발생과의 연관성을 분석하기 위하여 각 구분된 발원지에서의 강수 발생 빈도와 먼지 발생 빈도와의 관련성을 식 (1)의 방식으로 구하

여 제시하였다. 마지막으로, 먼지 발생 공간분포를 연도별로 조사하여 최근의 황사 발생 경향에 대한 공간분포를 파악하고 그 특징을 논하였다.

3. 결 과

3.1 최근의 먼지 발생 빈도 시계열 분석

각 발원지별로 한 개 이상의 site에서 한 번(시간) 이상 먼지가 발생하였다면 그날 전체를 dust 발생일로 정하고 이를 연도별로 조사한 결과를 Table 2에 나타내었다. 각 발원지별 조사된 GTS site 수인 S1 지역 9개소, S2 지역 16개소, S3 지역 25개소, S4 지역 18개소 중 어느 한 site라도 한 번 이상 먼지가 존재한 날이 365일 중 얼마나 차지하는지를 계수하여 그 횟수의 백분율을 나타낸 것이다. 이러한 접근방법은 상대적

인 관측소 수를 고려하지 않으므로, 관측소 수가 많을수록 유리한 단순 먼지 발생 횟수를 나타낸다. Table 2에서 볼 때, dust 발생 횟수는 S1 지역이 연간 202.4일(55.5%)로서 제일 많았으며, 그 다음으로 S2, S3, S4 지역순으로 연간 139일(38.1%), 72일(19.7%), 50일(13.7%)로 나타났다. 우리나라와 거리가 먼 S1 지역을 제외하면, S3 지역이 S2 및 S4보다 site 수가 2배 가까이 많음에도 불구하고 그 발생 빈도가 적은 것으로 조사되었다. 우리나라에 황사가 많이 관측되는 봄철의 경우만을 조사해 본 결과, S1~S4 지역에서 각각 83.8%, 61.3%, 41.2%, 34.7%로서 발원지별 상대적인 순위는 년 평균과 변동이 없으나, 그 빈도수는 S4 지역(약 3배), S3 지역(약 2배), S1~S2 지역(약 1.5배) 모두 증가한 것으로 나타났으며, S3 지역과 S4 지역에서 상대적으로 봄철에 먼지의 발생이 집중되어 있었다(Table 2).

Table 2. Dust occurrence frequency distributions in each of the 4 dust source regions for the period of 1996-2007.

Year	S1		S2		S3		S4	
	dust days	(%)	dust days	(%)	dust days	(%)	dust days	(%)
	(for spring season only)		(for spring season only)		(for spring season only)		(for spring season only)	
1996	236 (78)	64.5% (84.8%)	106 (46)	29.0% (50.0%)	52 (30)	14.2% (32.6%)	65 (33)	17.8% (35.9%)
1997	214 (74)	58.6% (80.4%)	114 (40)	31.2% (43.5%)	38 (22)	10.4% (23.9%)	42 (23)	11.5% (25.0%)
1998	210 (74)	57.5% (80.4%)	127 (53)	34.8% (57.6%)	52 (32)	14.3% (37.8%)	55 (34)	15.1% (37.0%)
1999	229 (85)	62.7% (92.4%)	117 (38)	32.1% (41.3%)	49 (23)	13.4% (25.0%)	51 (29)	14.0% (31.5%)
2000	218 (74)	59.7% (80.4%)	137 (59)	37.5% (64.1%)	67 (38)	18.4% (41.3%)	61 (48)	16.7% (52.2%)
2001	222 (82)	60.8% (89.1%)	131 (58)	35.9% (63.0%)	76 (44)	20.8% (47.8%)	94 (58)	25.8% (63.0%)
2002	207 (86)	56.7% (93.5%)	151 (57)	41.4% (62.0%)	89 (48)	24.4% (52.2%)	50 (30)	13.7% (32.6%)
2003	70 (70)	51.0% (76.1%)	129 (57)	35.3% (62.0%)	59 (30)	16.2% (32.6%)	37 (25)	10.1% (27.2%)
2004	194 (67)	53.0% (72.8%)	144 (57)	39.3% (62.0%)	89 (38)	24.3% (41.3%)	47 (33)	12.8% (35.9%)
2005	206 (62)	56.4% (67.4%)	175 (67)	48.0% (72.8%)	103 (52)	28.2% (56.5%)	28 (15)	7.7% (16.3%)
2006	214 (81)	58.6% (88.0%)	169 (74)	46.3% (80.4%)	100 (54)	27.4% (58.7%)	40 (27)	11.0% (29.4%)
2007	209 (82)	57.3% (89.1%)	167 (63)	45.8% (68.5%)	88 (39)	24.1% (42.4%)	31 (24)	8.5% (26.1%)
Mean	202.4 (76.3)	55.5% (83.8%)	138.9 (55.8)	38.1% (61.3%)	71.8 (37.5)	19.7% (41.2%)	50.1 (31.6)	13.7% (34.7%)

Fig. 3은 연간 먼지 발생 빈도를, Fig. 4는 봄철(3~5월)의 먼지 발생 빈도를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 연간 먼지 발생 빈도는 S1 지역에서 연평균 10% 이상(봄철의 경우 20% 이상)의 먼지 발생 빈도를 보여, 높은 고도와 여러 유동 모래언덕이 강한 바람에 민감함을 알 수 있으며, S2~S4 지역에서는 S1 지역보다 발생 빈도가 낮게 나타났지만, 2002년까지는 모두 꾸준히 증가하는 경향을 보였다.

우리나라에 강한 황사가 나타났던 2000년~2002년의 먼지 발생 빈도 분포는 그 이전보다 대체로 증가된 경향을 보였다. 특히 S3 지역의 경우 먼지 발생 빈도가 1999년을 기준으로 2000년에는 약 2.5배, 2002년에는 약 4배까지 꾸준히 증가하였다. 이후 우리나라에 황사가 거의 발생하지 않았던 2003년에는 2002년의 약 1/4로 급격히 감소하였다. 이는 황사 발원지에서의 먼지 발생 빈도가 일차적으로 한반도에서 관측되는 황사 발생 빈도와 연관되어 있음을 잘

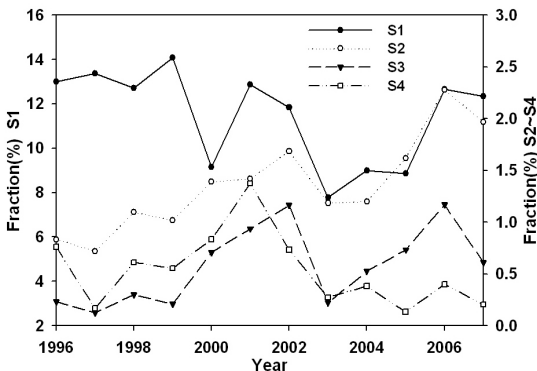


Fig. 3. Annual variations of the averaged dust outbreak frequency over each of the 4 source regions.

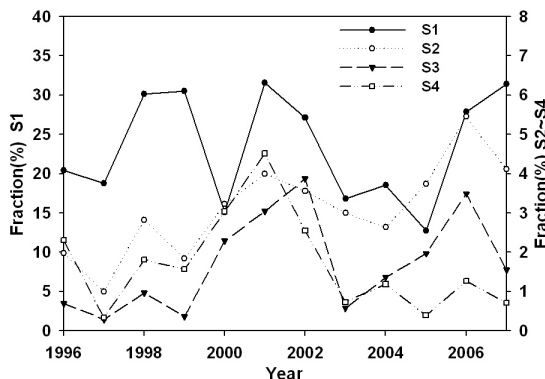


Fig. 4. Same as Fig. 3 except for the spring season only.

보여준다.

그러나 2003년부터는 발원지별로 각기 다른 경향을 보였다. 즉, S2 지역에서는 2003년 이후 계속 증가하는 경향을 보였으며, S3 지역에서도 2003년 이후 계속 증가하는 경향을 보였다. 그러나 S4 지역에서는 다른 지역과 달리 2003년 이후 최근까지 계속 감소하는 추세를 보여, S2~S3 지역의 경향과 대조를 이루었다. 이는 상대적으로 S2 지역인 고비 사막과 S3 지역인 내몽골고원-만주지역에서의 먼지 발생이 상대적으로 증가함을 뜻하는 것으로, 최근 40°N ~ 45°N, 105°E ~ 127°E로 먼지 발생 지역이 옮겨가고 있다는 Kurosaki and Mikami (2003)의 분석과 일치하였다.

1996년부터 2007년까지의 월별 평균 먼지 발생 빈도를 Fig. 5에 제시하였다. 예상대로 봄철(3월~5월)에 먼지 발생 빈도가 가장 높았으며, 특히 4월에 먼지 발생 빈도가 가장 높게 나타났다. 가을철 S1과 S2 지역에서는 2차 발생 피크가 관측되었고 S2 지역은 타 지역에 비해 겨울철에도 상대적으로 높은 먼지 발생 빈도를 유지하였다. 이것은 역으로 우리나라 겨울철 황사 발원은 S2 지역에서 주로 시작됨을 나타낸다(전영신 외, 2000; 송상근 외, 2004; 심미정 외, 2008). S2 지역에서는 S1, S3, S4 지역과 달리 3월보다 5월에 높은 먼지 발생 빈도를 보였다. 또한 월별 먼지 발생 빈도가 bi-modal 형태로서 모든 발원지에서의 4월의 1차 피크와 함께, S1~S4 지역에서 각각 9월, 10월, 12월, 12월에 2차 피크가 나타났으며, 그림으로 제시하지는 않았지만 발원지별 먼지발생 2차 피크 기간은 강풍 발생 2차 피크가 나타난 달과 일치하였다.

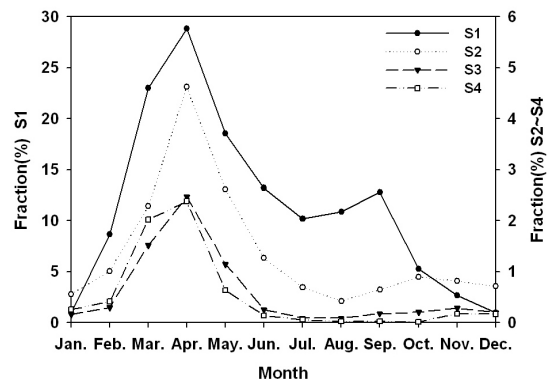


Fig. 5. Monthly variations of the averaged dust outbreak frequency over each of the 4 source regions.

3.2 바람

3.2.1 강한 바람

본 연구에서는 선행연구 결과에서 제시된 Sand region에서의 임계 풍속인 7.5 m s^{-1} 이상을 강풍으로 정의하여, 그 발생 빈도를 Fig. 6에 제시하였다. 그 결과

예상대로 강풍은 모든 발원지에서 먼지 발생 빈도와 강한 양(+)의 상관관계를 보였고, 연 중 4월에 먼지 발생 빈도와 강풍 발생 빈도가 가장 높았다.

발원지별로는 S1 지역의 경우, 강풍의 빈도가 최근 감소하는 경향을 보였으며, 특히 2001년 4월 이후 봄철 강풍 발생 빈도의 감소 추세가 매우 뚜렷하였고, 그

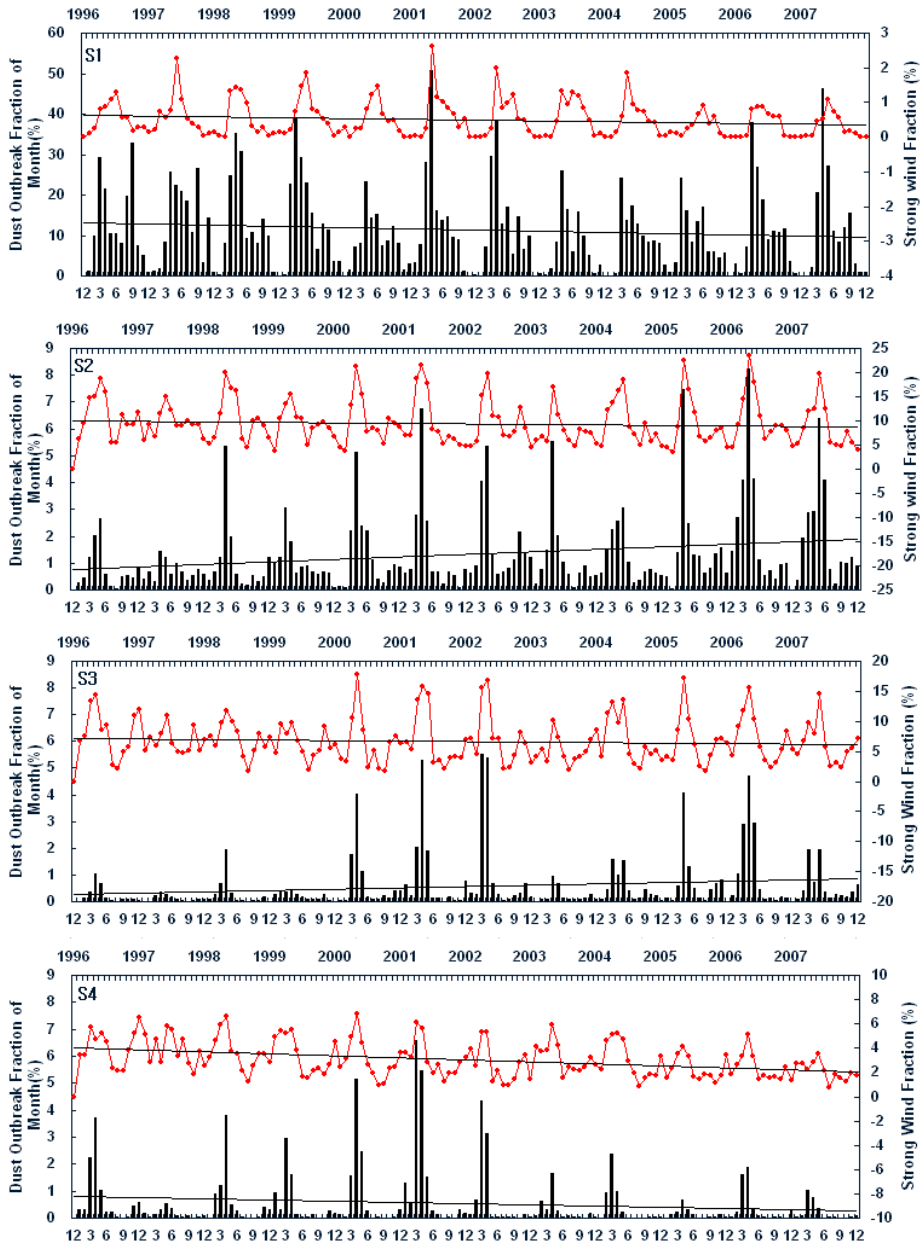


Fig. 6. Monthly variations of the occurrence frequency of strong wind speed observed more than 7.5 m s^{-1} (red dot line), and dust outbreak frequency (grey bar) for the period from Jan. 1996 to Dec. 2007.

에 따른 먼지 발생 빈도도 최근 크게 줄어들었음을 알 수 있었다(Fig. 6). S2 지역에서도 전체적으로 바람과 먼지 발생 빈도는 강한 양의 상관관계를 보인 가운데, 2006년에 특히 높은 강풍 발생 빈도를 보였으며, 먼지 발생 빈도 또한 최근 12년 동안 가장 높게 나타났다. 그러나 1996년과 2004년에는 강풍 빈도가 황사가 극심했던 2002년과 유사하였지만, 봄철 먼지 발생 빈도는 그리 높지 않았다. 따라서 이 기간에는 풍속 이외의 다른 기상 요인이 중요하게 작용한 것으로 판단되나 보다 자세한 분석적 연구가 필요할 것으로 보인다. S3 지역은 S2 지역과 매우 유사한 경향을 보였고, 봄철의 강한 바람 빈도가 증가함에 따라 먼지 발생 빈도가 선형적으로 증가하였으며, 2003년 이후 강풍 발생 빈도는 뚜렷하게 증가하였다. S4 지역은 강풍 빈도가 계속 감소하였고, 이에 따른 먼지 발생 빈도 역시 계속 감소 추세를 보였다. 특히 2001년 이후 강풍의 발생 빈도가 급격히 감소하였고, 2007년의 경우 2001년 봄철의 약 50%정도로 강풍 발생 빈도는 급감하였다(Fig. 6). 이처럼 강풍의 발생 빈도의 감소 추세가 S4 지역에서 두드러진 것은 녹지 사업 등 황사 발생 억제에 따른 지면 거칠기의 변화와 지표층 변위높이(displacement height) 증가 등이 복합적으로 기인한 것으로 판단되므로, 정확한 황사 예보를 위해서는 위성 자료 분석 등을 통한 S4 지역의 지표 특성의 변화에 대한 관측적인 연구가 계속되어야 할 것으로 판단된다.

요약하면, 시간적으로 본 황사 발원지에서의 먼지 발생 특성은 우리나라에 강한 황사가 관측된 2000~2002년의 경우 S3~S4 지역에서 먼지 발생 빈도가 급격히 증가한 결과이며, 반면 2003~2004년 우리나라에 황사발생 일수가 적었던 것은 S4 지역의 먼지 발생 빈도가 급격히 감소한 것이 주요 원인으로 판단된다. 결국 S2~S3 지역에서의 먼지 발생 빈도는 최근 꾸준히 증가하는 추세에 있으므로 향후 지속적인 관측과 감시가 필요한 지역임을 시사한다.

3.2.2 임계 풍속

발원지에서 황사의 발생은 일차적으로 강한 바람과 양의 상관관계를 보이지만 발원지의 지표 특성, 토양 성분 등에 기인한 발원지별 임계 풍속의 차이로 인해 달라질 수도 있다(Park and In, 2003). 본 연구에서는 Park and Lee (2007)의 방법으로 발원지별 임계 풍속을 구하였고, 먼지 발생 빈도와와의 상관성도 분석하였다. Table 3에는 연도별, 발원지별 봄철 임계 풍속을 나

타내었고, Fig. 7은 발원지 중 S2~S4 지역에서의 봄철 먼지 발생 빈도와 임계 풍속 이상인 바람의 출현 빈도를 나타낸 것이다. 임계 풍속은 발원지 별로 평균 1.71 m s^{-1} , 9.55 m s^{-1} , 10.75 m s^{-1} , 5.46 m s^{-1} 으로 계산되었다.

먼지 발생 빈도와 임계 풍속 이상인 바람의 출현 빈도와의 상관성은 S2~S4 지역 모두에서 3.2.1에 제시한 강한 풍속의 출현빈도와 유사한 관계가 나타났다. 즉 임계 풍속 이상인 바람의 출현 빈도 경향에 비례하여 먼지 발생 빈도 경향이 더 뚜렷이 나타났는데 특히 S3 지역에서 그 연관성이 가장 높게 나타났다.

발원지별로는 S2 지역에서 1996~2000년 동안 뚜렷한 경향이 없었고 2000~2003년에는 꾸준히 감소하는 경향을, 그리고 2003년 이후에는 급격히 증가하여 먼지 발생의 빈도를 높이는데 기여하였다. 2001~2002년 많은 먼지 발생에도 불구하고 임계 풍속 이상인 풍속의 발생 횟수가 적었던 점이 주목할 만하였다. S3 지역

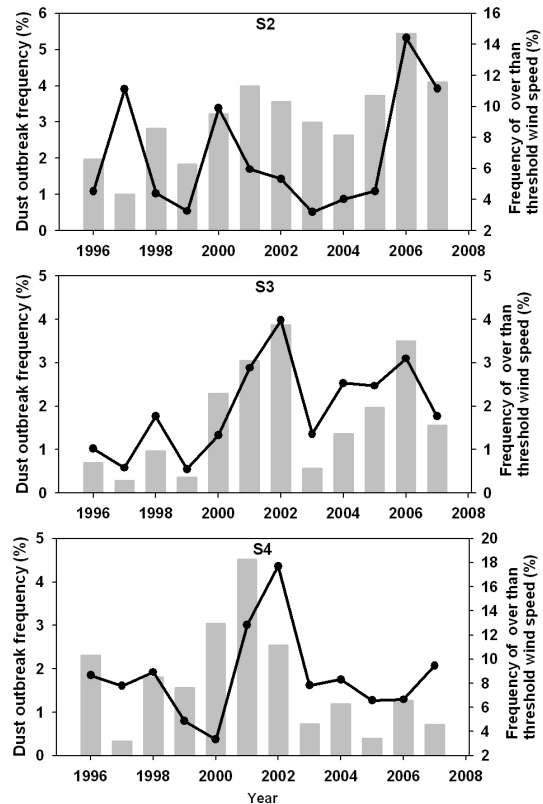


Fig. 7. Annual variations of the occurrence frequency of wind speed observed stronger than threshold wind (black dot line), and dust outbreak frequency (grey bar).

Table 3. Threshold wind speeds for each of the 4 dust source regions during the spring season.

	S1	S2	S3	S4
1996	1.5	10.3	10.4	5.7
1997	1.5	9.2	10.3	8.1
1998	2.5	9.2	10.4	4.7
1999	0.3	10.4	12.4	6.4
2000	2.7	9.7	12.3	7.3
2001	1.5	10.3	10.6	2.9
2002	1.4	10.4	9.8	4.2
2003	3.4	8.6	10.3	4.6
2004	2.5	10.3	11.3	5.7
2005	0.1	9.9	9.4	5.6
2006	1.5	7.7	10.4	6.4
2007	1.6	8.6	11.5	3.9

은 상대적으로 임계 풍속 이상인 바람의 빈도는 낮았으나, 2002년 이후 먼지 발생 빈도는 S2 지역과 유사하게 나타났다. 즉 S3, S4 지역 모두 2002년의 임계 풍속이상의 바람 및 먼지 발생 빈도가 높고, 2003년에는 정반대로 낮은 경향을 보였다. 그 이전인 1996년 ~ 2002년까지는 꾸준히 증가하는 경향을 보였으며, 2003년의 급격한 감소 후 최근까지 증가하는 경향을 보였다. S4 지역의 경우, 임계 풍속 이상의 바람의 발생 빈도는 다른 지역에 비해 약 2~4배 높았지만, 먼지 발생 빈도는 타 지역과 유사한 것으로 나타났다. 이는 발원지별 여러 지표 특성 등 다른 원인이 있을 수 있음을 암시한다.

3.3 강수일수

Fig. 8에 발원지별 강수일수와 먼지 발생 빈도와의 관계를 나타내었다. 모든 발원지에서 강수일수와 먼지 발생 빈도는 음(-)의 상관을 보였다. 먼지 발생 빈도의 평균값이 발원지별로 각각 11.34%, 1.35%, 0.57%, 0.53%이며, 강수일수는 각각 5.18%, 3.37%, 6.17%, 8.49%로서 단순히 평균값 경향으로 볼 때 두 관계는 강한 음의 상관관계임을 알 수 있다. 우리나라에 황사 강도와 횟수가 극심했던 2001-2002년의 강수 출현빈도는 S2와 S3 지역에서 3.1%, 6.03%로 나타났으며, 봄철에 국한해 볼 때 2002년, 특히 S3 지역에서 평균의 70% 수준을 보였다. 이는 토양이 건조하여 먼지가 발생하기 좋은 조건을 갖추었음을 의미한다.

봄철 강수일수 또한 바람과 마찬가지로 봄철 먼지 발생 일수에 직접 기여하는 것으로 나타나서, 그 해 봄

철 강수 빈도가 높을 경우 먼지 발생 빈도 역시 낮아지는 경향을 보였다. 우리나라에 황사가 많이 관측된 2000~2002년과 황사가 적었던 2003~2004년의 경우, 모두 강수와 먼지 발생관계는 뚜렷한 음의 상관관계를 보였으나, S2 지역은 2003년에 예외적으로 봄철 높은 강수 빈도에도 불구하고 2002년과 유사한 높은 먼지 발생 빈도를 보였다. 또한 2004년에도 봄철 강수 빈도는 2001년과 2002년보다도 적은 2.17%를 기록했지만 봄철을 비롯한 2004년의 다른 계절의 먼지 발생 빈도는 상대적으로 낮게 나타났다. 따라서 S2 지역의 경우 2003년 후반기의 상대적으로 높은 강수 빈도가 2004년의 적은 먼지 발생 빈도에 영향을 준 것으로 판단된다. 즉 S2 지역의 먼지 발생 빈도에 영향을 주는 것은 당해 연도의 강수 발생 빈도뿐만 아니라 전년도 강수 발생 또한 먼지 발생 빈도에 영향을 미치는 경우가 많음을 암시한다. 이것은 강풍 발생 빈도를 통해서도 간접적으로 알 수 있는데, S2 지역의 2004년의 강한 풍속의 빈도는 2002년과 유사하여, 풍속만으로 볼 때 먼지 발생 가능성이 상대적으로 높은 연도로 예측할 수 있을 것이다. 그러나 정 반대의 현상은 그 이전인 2003년 하반기의 강수 발생 빈도가 높아 이듬해 먼지 발생이 억제된 것으로 판단된다. 즉, 황사 발원지에서의 강수 발생 빈도는 당해 연도의 먼지 발생 뿐 아니라 지역에 따라서는 이듬해 봄철까지 영향을 줄 수 있음을 암시한다.

3.4 먼지 발생 빈도 공간 분포 분석

먼지 발생 빈도의 공간 분포를 파악하기 위하여 우선 모든 관측 지점에서의 월별 먼지 발생 빈도수를 구하였다. 연 중 그 해의 최고값이 나타난 달의 빈도수를 당해 연도의 최고 발생 빈도 값으로 정의하였다. 이렇게 계산된 연도별 먼지 발생 최대 빈도수를 우리나라에 황사가 극심했던 2000~2002년, 그 이전인 1996~1999년, 그 이후인 2003~2007년으로 세분하여 연평균 최대 먼지 발생 빈도수의 공간 분포를 Fig. 9에 제시하였다.

먼저 1996~1999 기간에는 전통적으로 황사가 많이 발원했던 고비 사막인 S2 지역과 S4 지역에서 먼지 발생이 많았으며, S3 지역에서는 상대적으로 낮은 발생 빈도를 보였다. 반면 우리나라에 황사 발생이 극심했던 2000~2002년에는 S2~S4 모두 먼지 발생이 증가하였으며, 특히 지리적으로 우리나라에 가까운 S3 지역

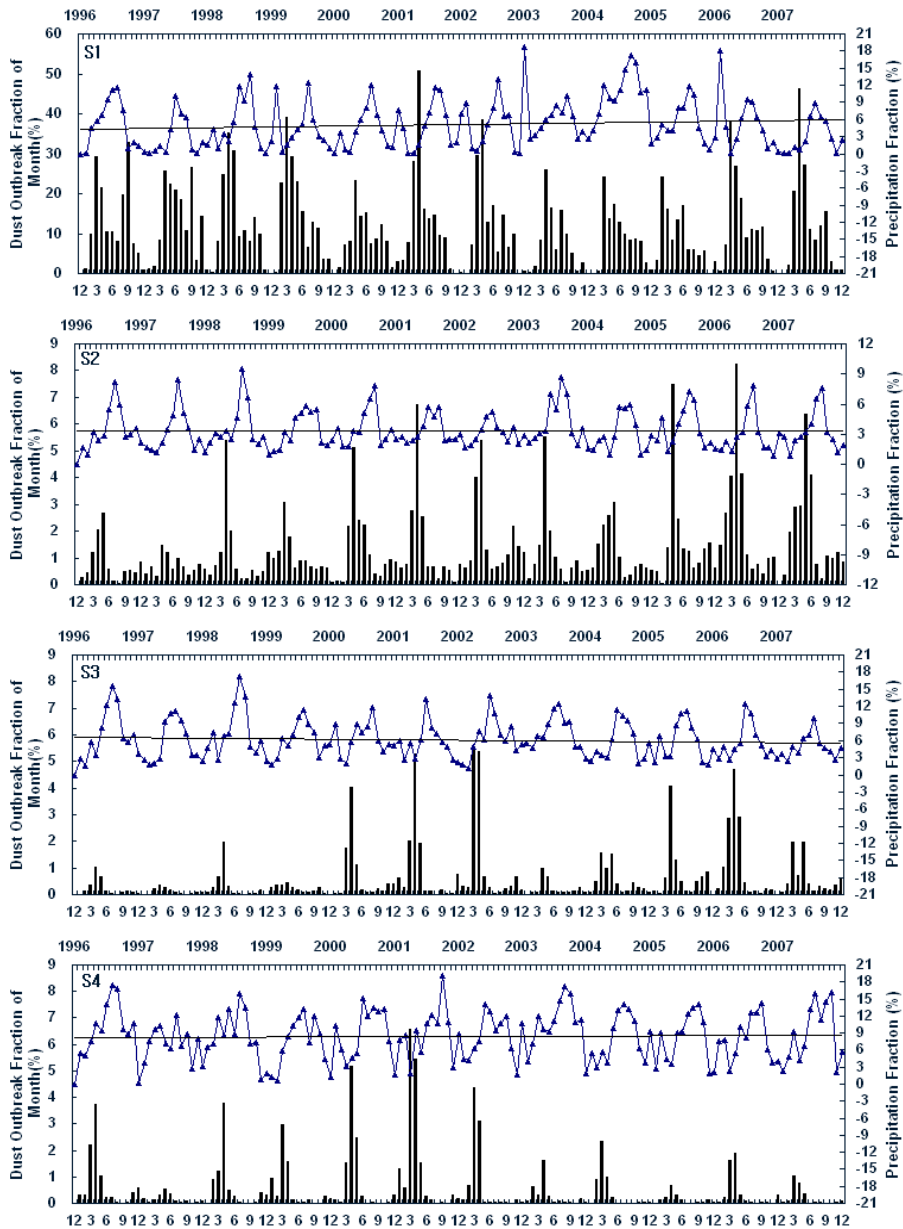


Fig. 8. Annual variations of the number of precipitation days (blue dot line), and dust outbreak frequency (grey bar).

에서 먼지 발생이 급증한 것이 특징이었다(e.g., Chun *et al.*, 2001; Kurosaki and Mikami, 2005; Lim and Chun, 2006). 또한 시간적으로 볼 때 S2, S4에서도 이전보다 먼지 발생 범위가 넓게 분포하였고 그 빈도 또한 증가하였으며, 특히 우리나라와 가까운 발원지인 S4 지역에서 발원된 먼지가 우리나라로 장거리 수송된 확률이 대단히 높았음을 짐작할 수 있다.

반면 2003~2007년에는 2000~2002년과 비교해 볼 때 매우 다른 특징을 보였다. 2000~2002년 먼지 발생이 극심했던 S3 지역에는 2003~2007년 먼지 발생이 크게 감소하였으며, 그 경향은 S3 지역의 남동쪽 지역에서 매우 뚜렷하였다. 결국 우리나라와 가까운 발원지인 S3 지역의 주요 먼지 발생 지역이 북서쪽으로 옮겨감으로써 우리나라로 황사 수송이 급격히 줄어들

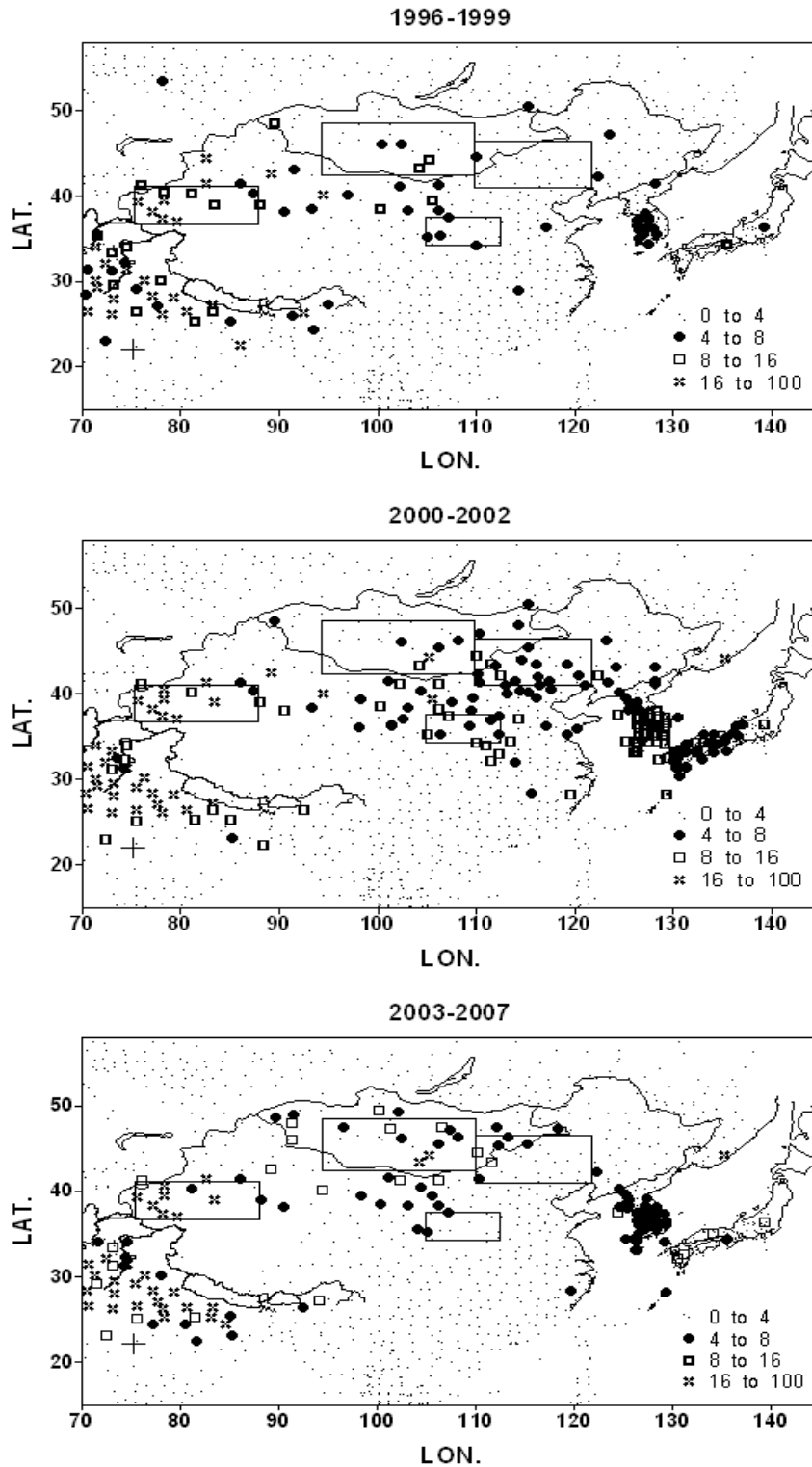


Fig. 9. Spatial distributions of the recent occurrence frequency of dust outbreak over the Northeast Asia. Dots(·), black circles (●), squares(□) and × indicate 0%~4%, 4%~8%, 8~16% and 16%~100%, respectively.

직접적인 원인이 된 것으로 판단된다. S4 지역 역시 주요 먼지 발생이 서쪽 또는 북서쪽으로 이동하여, 주요 황사 발원지가 전통적인 황사 발원지인 고비사막을 포함하는 S2 지역으로 이동하였음을 알 수 있다. 이러한 현상의 원인을 파악하기 위해서는 S3 지역과 S4 지역의 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index) 등의 연 변화를 분석하여 발원지의 지표 특성 변화를 연구하여야 할 것으로 판단된다.

3.5 2000년~2002년과 2003년 이후의 먼지 발생 분석

2000년 이후 발원지에서의 먼지 발생은 발원지별로 매우 급격한 변화를 보였다. 2002년의 우리나라에 극심했던 황사는 2004년부터 S2와 S3 지역에서만 그 발생 빈도는 꾸준히 증가하였고, 2006년에는 2002년도와 비슷한 먼지 발생 수준을 회복하였다. 특히 S2 지역의 2006년은 2002년보다도 더 높은 먼지 발생 빈도를 보였으며 이는 최근의 먼지 발생 경향이 2002년 수준으로 회복하거나 그 이상으로 계속 증가할 수 있음을 보여준다. 이러한 발원지별 먼지 발생의 변화를 설명하기 위해서는 여러 요소, 즉 발원지의 면적, 환경 변화, 여러 기상요소 등의 변화를 시, 공간적으로 살펴보아야 할 것이다. 고비 사막의 경우(S2 지역) 2000년에 그 면적이 매년 약 2400 km² 씩 증가할 것으로 보고되었고(Wang *et al.*, 2001), 또한 내몽골(S3 지역) 지역 서쪽에서는 생태환경의 악화로 먼지 발생이 증가하고 있음을 보고한 바 있다(Wang *et al.*, 2004). 본 연구에서는 2000~2002년 우리나라에 가까운 S3 지역의 급격한 발원지 증가와 더불어 중국 본토에서의 먼지 발생 지역이 눈에 띄게 증가한 것으로 나타났으나, 2003년 이후 먼지발생 지역, 특히 S3의 먼지 발생 구역 감소는 직접적으로 우리나라의 황사발생 일수의 급격한 감소를 유도한 주요 원인이 되었다. 이러한 공간변화는 위성자료를 통해 계산할 수 있는 NDVI의 연 변화를 살펴보아야 할 것이다.

반면 기상 조건과 연관된 발원지 먼지 발생 경향 또한 중요한데, 이 중 가장 중요한 요소인 강풍의 경우, 2000년~2002년의 강풍 발생 빈도는 평년보다 약 2배 정도(S3는 약 3배) 증가한 반면, 2003년에는 평년과 유사하거나 30%가량 감소하였다. 강수 발생 빈도는 2000~2002년에는 평년과 비슷하거나 다소 낮았고, 2003년에는 대체로 증가하였다. 그러나 2004년에는

S2~S4 지역에서 봄철 강수 발생 빈도가 약 20%가 감소했지만, 이러한 감소효과는 높은 먼지 발생 빈도를 유도하지 못하였는데, 이는 그 전 년도에 관측된 강수량의 특성으로 이해될 수 있다.

Fig. 10은 2004년도의 먼지 발생 빈도와 강수의 관계를 파악하기 위해서 발원지별 2001~2004년의 상반기 강수량을 나타낸 것이다. 2004년의 S2~S4 지역의 강한 풍속의 빈도는 먼지 발생이 많았던 2002년과 유사한 수준이나, S2~S4 지역의 그 이전 해인 2003년 하반기에 상대적으로 많은 강수량이 관측되었음을 알 수 있다. 이렇게 누적된 강수량은 당해 연도 하반기 먼지 발생 뿐 아니라, 이듬해 상반기까지 영향을 줄 수 있음을 암시한다. 즉, 당해의 누적된 강수량은 비록 이듬해의 적은 강수량에도 불구하고 낮은 먼지 발생을 유도하고 조절할 수 있음을 알 수 있다.

이러한 발원지에서의 강수 및 강풍에 의해 조절되는 먼지 발생량은 발원지에서의 발생 추세를 이해하고 정확한 황사의 예보 및 평가를 할 수 있는 중요한 인자로 작용할 수 있을 것이며, 보다 근본적으로는 동아시아의 기후 변동과 연관되어 나타날 것으로 판단된다. 따라서 발원지의 강수와 아시아 몬순의 영향 연구(Yoshino, 2002; Wang and Li, 1990), 겨울철 평균온도와 먼지 발생간의 관계 연구(Quan *et al.*, 2001) 등은 동아시아 기후 변화가 황사 발원지에서의 먼지 발생 연 변동성을 조절할 수 있음을 시사한다. 따라서 이러한 황사 발생의 장기 변동성을 해석하고 이에 따른 여러 황사 발원지에서의 먼지 발생 추세를 이해한다면 보다 정확한 황사의 장기 예보 및 영향평가가 가능할 것으로 판단된다.

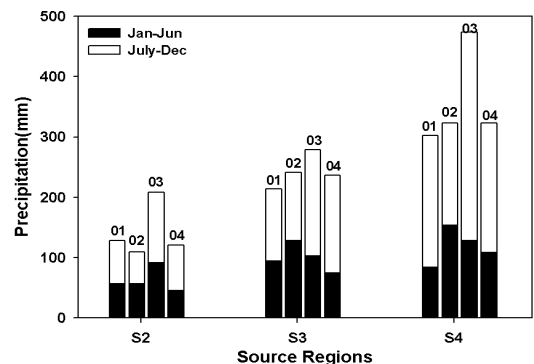


Fig. 10. 6-month accumulated precipitation(mm) for the period from 2001 to 2004 over each of the 3 source regions.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 황사 발원지를 4개 지역으로 나누고 1996년부터 2007년까지 12년간 발원지별 먼지 발생 특성을 기상변수와 연관시켜 분석하였다. 선정된 기상 변수는 7.5 m s^{-1} 이상의 강한 바람, 임계 풍속, 강수 빈도이며, 이를 발원지별 먼지 발생 빈도와 비교하였다.

그 결과, 1996년~2002년까지 S2 지역(고비사막), S3 지역(내몽골-만주지역), S4 지역(황토고원) 지역에서 먼지 발생 빈도는 증가 경향을 보였으나, 2004년의 급격한 감소 이후 최근까지 S2 지역은 증가, S3 지역 역시 증가하는 경향을 보인 반면 S4 지역은 2002년 이후 최근까지 급격한 감소 추세를 꾸준히 보였다. 계절 별로는 예상대로 봄철에 높은 먼지 발생 빈도를 보였으며, S1과 S2 지역에서는 가을철이 그 다음으로 많았다. S2 지역은 다른 지역과 달리 겨울철에도 일정 수준의 먼지 발생 빈도를 보였다.

기상 변수와의 관계에서 강한 바람과 먼지 발생 빈도는 뚜렷한 양의 상관관을 보였고, 2002년 이후 S2와 S3 지역에서는 봄철의 강풍 발생 빈도가 증가하여 먼지 발생이 증가하였다. 반면 S4 지역은 2001년 이후 급격히 감소하는 경향을 보였다. 임계 풍속과 먼지 발생 빈도 역시 뚜렷한 양의 상관관을 보였으며, S3 지역에서 가장 크게 나타났다. 임계 풍속보다 강한 바람의 빈도는 S4 지역에서 가장 많았으나 먼지 발생 빈도는 다른 지역과 유사하였다. 2002년 이후에는 임계 풍속 이상의 바람이 S2와 S3 지역에서 증가하는 경향을 보였고, 특히 S2 지역에서 현저한 증가 경향을 보였다.

강수 발생 빈도의 경우 먼지 발생 빈도와 음의 상관관을 보였으며, 2002년 이후 S2와 S3 지역에서는 여름철 강수의 감소로 인해 연평균 강수 발생 빈도가 감소하는 경향을 보였으나, S4 지역은 변화가 거의 나타나지 않았다. 지역에 따라서는 당해의 높은 강수 빈도가 이듬해의 먼지 발생 빈도에 영향을 주는 경우도 나타났다.

먼지 발생 빈도의 공간 분포를 살펴 본 결과, 우리나라에 강한 황사가 나타난 2000~2002년에는 다른 시기에 비해 넓은 지역에서 강한 먼지 발생을 보였으며, 2002년 이후에는 S3과 S4 지역에서 주요 먼지 발생이 북서쪽으로 이동하여, 주요 황사 발원지가 고비사막을 포함하는 S2 지역으로 이동하였음을 알 수 있다.

향후에도 한반도에 도달하는 황사 발생 현황에 대한 추세를 진단하고, 보다 정확한 황사의 예보 및 평가를 위해서는 발원지에서의 먼지 발생특성을 계속 연구하

여야 할 것이다. 나아가 황사 발원지에서의 먼지 발생 변동과 동아시아 겨울철 몬순 등 여러 기후학적인 연구와 연관시켜 분석할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 박순웅, 이은희, 2004: 황사와 그 연구 현황, 한국대기환경학회, 황사 Workshop 2004, 3-22.
- 송상근, 김유근, 정주희, 2004: 2002년 봄, 가을 황사현상과 관련된 기상 및 정량분석 연구. 한국기상학회 봄 학술대회 논문집, 88-89.
- 심미정, 홍성훈, 심재면, 김도형, 서애숙, 2008: 위성영상을 이용한 2007년 겨울철 황사사례 분석. 한국기상학회 봄 학술대회 논문집, 388-389.
- 전영신, 조경숙, 김영화, 이종국, 2003: 만주에서 발원한 황사 현상. *한국기상학회지*, 32(2), 251-263.
- _____, 김지영, 부경은, 김남욱, 2000: 겨울철 황사 현상의 특징. *한국대기환경학회지*, 16, 487-497.
- 정관영, 박순웅, 1995: 한반도에 황사 출현시의 종관기상 특징. *한국기상학회지*, 31(1), 45-63.
- Chun, Y. S., K. O. Boo, J. Kim, S. U. Park, M. Lee, 2001: Synopsis, transport, and physical characteristics of Asian dust in Korea, *J. Geophys. Res.*, 106, D16, 18461-18469.
- _____, S. W. Kim, K. M. Cho, and J. S. Kim, 2002: Asian dust events in Korea during the recent hundred years, *Chikyu Kankyo*, 7, 225-231.
- Lim, J. Y. and Chun, Y. S., 2006: The characteristics of Asian dust events in Northeast Asia during the springtime from 1993 to 2004, *Global and Planetary Change*, 52, 231-247.
- Masatoshi Yoshino, 2002: Kosa (Asian dust) Related to Asian Monsoon System, *Korean J. Atmos. Sci.*, Vol. 5, No. S, 93-100.
- Park, S. U. and Lee, E. H., 2007: A modification of the Asian dust Aerosol Model (ADAM) with the use of Spot/vegetation normalized difference vegetation Index (NDVI) data, 12th RDPA-Proceedings, 11-19.
- _____, and In, H. J., 2003: Parameterization of dust emission for the simulation of the yellow sand(Asian dust) event observed in March 2002 in Korea, *J. Geophys. Res.*, VOL. 108, NO. D19, 4618, doi:10.1029/2003JD003484
- Quan, L., Shi, S., Zhu, Y., Qian, W., 2001: Temporal-spatial distribution characteristics and causes of dust-day in China. *ACTA Geographica Sinica* 56, 477-485
- Tegen, L, and L Fung, 1994: Modeling of mineral dust in the atmosphere; Sources, transport, and optical thickness, *J.*

- Geophys. Res.*, 99, 22,897-22,914.
- Uno, I., Carmichael, G.R., Streets, D.G., Tang, Y., Yienger, J.J., Satake, S., Wang, Z., Woo, J.-H., Guttikunda, S., Uematsu, M., Matsumoto, K., Tanimoto, H., Yoshioka, H., Iida, T., 2003: Regional chemical weather forecasting system CFORS: model descriptions and analysis of surface observations at Japanese island stations during the ACE-Asia experiment. *J. Geophys. Res.*, 108 (D23), 8668. doi:10.1029/2002JD002845.
- Wang, T., Chen, G., Qian, Z., Yang, G., Qu, J., Li, D., 2001: Situation of sand-dust storms of China. *J. Desert Res.*, 20, 349-356.
- Wei-Chyung Wang, Kerang Li, 1990: Precipitation fluctuation over Semiarid Region in Northern China and the Relationship with El Nino/Southern Oscillation. *J. of Climate*, Vol. 5, 769-783.
- Xunming Wang, Zhibao Dong, Jiawu Zhang, Lichao Liu, 2004: Modern dust storms in China : an overview, *J. Arid Envir.*, 58, 559-574
- Yasunori Kurosaki and Masao Mikami, 2003: Recent frequent dust events and their relation to surface wind in East Asia, *Geophy. Res. Letter*, VOL.30, NO.14, 1736, doi: 10.1029/2003GL017261.
- _____, and _____, 2005: Regional difference in the characteristic of dust event in east Asia: Relationship among dust outbreak, surface wind, and land surface condition, *J. meteorol. Soc. Jpn.*, 83A, 1-18.