황사 발원지 기후자료의 시계열 특성과 부산지역 먼지 농도의 연관성 분석

손혜영 · 김철희*

부산대학교 지구환경시스템학부, 609-735, 부산광역시 금정구 장전동 산 30

The Spectral Characteristics of Climatological Variables over the Asian Dust Source Regions and its Association with Particle Concentrations in Busan

Hye-Young Son and Cheol-Hee Kim*

Division of Earth Environmental System, Pusan National university, Busan 609-735, Korea

Abstract: In order to examine how climatological condition can influence on urban scale particulate air pollutants, single and cross spectrum analysis have been performed to daily mean concentrations of particulate matters (PM_{10}) in Busan together with the climatological variables over the Asian dust source regions. Single power spectrum analysis of PM_{10} concentrations in Busan shows that, aside from the typical and well-known periodicities, 3-4 year of peak periodicity of power spectrum density was identified. In cross spectrum analysis, this 3-4 year periodicity is found to have a strong positive correlation with the wind speed and pressure, and negative with the temperature and relative humidity, which is rather consistent with both characteristics of air mass during the Asian dust event whose periodicities have been recorded inter-annually over the Korean urban cities. Over the Asian dust source regions, PM_{10} vs. precipitation shows no significant periodicity from the time series of precipitation data, but the periodicity of EDI (Effective Drought Index) shows some interannual variabilities ranging from 2 to 4 years over the various source regions, suggesting that, rather than precipitation itself, the EDI could be more closely associated with the occurrence frequency of Asian dust and interannual variability of urban particle concentrations in Korean cities.

Keywords: aerosol, single spectrum, cross spectrum, Asian dust, Effective Drought Index(EDI)

요 약: 본 연구는 부산지역의 먼지 농도와 황사발원지의 기후학적 요소를 주기분석 함으로써 부산지역의 먼지농도 주기에 영향을 주는 기후학적 조건, 특히 황사 발생과의 관련성에 대하여 고찰하였다. 부산지역에서 관측된 먼지 농도 시계열 자료를 이용한 단일스펙트럼분석을 수행한 결과 배출량이나 강수 효과 등에 의해 나타난 일반적인 주기(1년, 7일) 이외에, 상대적으로 3-4년 주기가 우세하게 나타났으며, 먼지 농도와 부산지역의 기상자료 및 황사발원지에서의 풍속과의 교차스펙트럼 분석을 통한 주기 분석을 수행해 본 결과, 3-4년 주기일 때 먼지농도와 풍속, 기압은 양의 상관관계, 기온, 상대습도와는 각각 음의 상관관계가 나타났다. 이는 황사 발생 조건과 잘 부합되는 것으로 나타나, 3-4년의 먼지 농도 주기는 황사의 장거리 수송과 관련이 있는 것으로 판단된다. 또한 황사 발생은 발원지의 지표 상태에 따라 발생 빈도가 달라지므로, 여러 기후학적 요소들 중 황사발원지에서의 강수량과의 주기 분석을 수행해 본 결과, 발원지에서의 강수량 그 자체보다는 발원지에서의 가뭄지수(EDI)의 시계열이 우리나라 먼지 농도의 3-4년 주기와 더 연관이 있는 것으로 나타났고 이는 기후학적으로 황사 발원지에서의 지표건조 특성의 변동성과 연관이 있는 것으로 나타났다.

주요어: 에어로솔, 단일 스펙트럼, 교차 스펙트럼, 황사, 유효가뭄지수

*Corresponding author: chkim2@pusan.ac.kr

Tel: 82-51-510-3687

Fax: 82-51-515-1689

서론

대기 중 입자상 오염물질인 먼지는 여러 가지 발생원으로부터 직접 배출되거나, 대기 중에 배출된 여러 오염 물질들의 물리, 화학적 반응에 의해 생성 또는 성장되기도 한다. 또한, 먼지는 식물의 기공을 막거나 들어오는 일사를 차단시켜 광합성 작용을 방해하고 태양 복사를 산란 또는 흡수하는 직접 효과가 구름의 광학적 성질, 운량 및 구름의 수명 등을 변화시키는 간접 효과를 통해 지구복사 평형에 불균형을 초래함으로써(Houghton et al., 1995; Peterson and Wagman, 1977), 전 지구적인 기후변화에 영향을 미친다. 특히, 우리나라는 서풍계열의 기류가 탁월하여 한반도 서쪽에 위치한 발원지인 중국에서 발생한 황사의 일부가 이동하여 쉽게 영향을 미칠 수 있는 곳에 위치하고 있어(정관영과 박순웅, 1995), 봄철 중국으로부터 수송되어지는 모래에 의한 황사로 인해 대기 중 먼지의 농도가 급격히 증가한다.

최근 한반도에서 관측된 황사 현상은 중국 북동부의 사막화와 황사 발원지의 강수 부족으로 인해 불모지가 늘어남으로써 더욱 강해지고 있는데(이은희 외, 2003), 2002년의 경우 황사 발생에 따른 우리나라 평균 미세먼지(PM_{10}) 농도는 매우 높았다. 특히 2002년 4월 8일 서울 성수동 관측소는 시간 평균 $3,311 \mu g/m^3$ 의 기록적인 PM_{10} 농도가 관측되었고, 그해 11월에도 $860 \mu g/m^3$ 까지 농도가 나타났다. 반면 2003-2004년에는 황사발생이 연중 전무하거나 극히 적게 관측되어 2002년과 극히 대조를 이루었고, 2005년 이후부터는 점차 황사 발생이 증가하는 추세에 있다. 이러한 현상은 결국 황사 발원지에서의 지표 특성의 주기적 변화와 연관되는 것으로서 황사 발원지에서의 풍속 및 강수량의 경년 혹은 그 이상의 장기간의 연 변동 등 동아시아의 기후적인 요소와 깊이 연관되어 있을 것으로 보인다.

본 연구에서는 부산 지역의 먼지 농도 주기를 분석하고 나타난 주기들에 대한 기상학적 요소와의 연관성을 규명하였으며, 먼지 농도의 시각적 변화 경향 중 특히 장주기 변화 경향 해석을 시도하기 위하여 황사 발원지에서의 강수량과 가뭄지수의 주기를 함께 분석하였다. 이러한 연구는 황사 발원지의 풍하측(downstream) 지역에 위치한 우리나라가 보다 적극적으로 황사에 대응하고, 발원지에서의 황사 발생 기구 및 발생량을 파악하는 데에 중요한 기초연구가 될 것으로 판단된다.

Fig. 1. Locations of the air pollution monitoring stations in Busan.

연구 방법

분석영역 및 자료

본 연구의 대상지역은 Fig. 1에서 제시된 바와 같이 부산광역시 전역과 일부 외곽지역을 포함한다. 이 용된 자료는 1991년부터 2006년까지 16년간 환경부가 운영하는 대기오염자동측정망 자료 중 부산지역에 위치한 13개 측정소의 시간별 먼지 농도 자료이다. 부산 지역의 경우 1990년대 말부터 측정 항목을 TSP (Total Suspended Particle)에서 PM_{10} 으로 변경함에 따라 white noise를 최소화하고 동일한 항목의 자료의 시계열을 구성하기 위하여 측정소별 TSP에서 PM_{10} 으로 바뀌는 시기의 전후 1년의 평균 농도를 각각 구하여 그 비를 TSP자료에 적용하여 PM_{10} 자료로 추정 사용하였다. 또한 부산 지역의 PM_{10} 농도와 기상요소와의 상관성을 분석하기 위하여 동 기간의 부산지방기상청 정규관측소에서 관측하는 매 시간별 기상 관측 자료 중에서 온도, 풍속, 기압, 상대습도 등의 자료를 이용하였다.

황사 발원지에서의 풍속과 황사의 연관성을 연구하기 위하여 기상청으로부터 수집한 1998년부터 2006년까지 동아시아 GTS(Global Teleconnection System) 자료 중 4개로 정의한 황사발원지에 대하여 공간 평균한 일풍속 자료와 부산지역의 PM_{10} 농도와의 연관성을 규명하였다. Fig. 2는 황사발원지와 동아시아 GTS 관측지점을 나타낸 그림이며, 황사 발원지는 본 연구에서는 전영신 외(2002)의 자료를 참고하여 발원지의 범위를 다음과 같이 단순화 시켜 정의하였다. 1) 타클라마칸 사막을 포함하는 티벳 고원의 북서지

Fig. 2. GTS meteorological observation stations and Source regions of Asian dust over east Asia (S1: Taklimakan desert; S2: Gobi desert; S3: The upstream regions of the Yellow river; S4: Loess plateau).

역(37-41N, 75-88E; S1), 2) 고비사막(42-48N, 95-110E; S2), 3) 황하강의 상류지역(41-46N, 110-122E; S3), 4) 황토고원(34-38N, 105-113E; S4)으로 지정하였다.

황사의 발생빈도와 황사 발원지의 강수와의 관계를 연구하기 위해 1986년에서 2005년까지 20년간 NOAA/OAR/ESRL-PSD로부터 만들어진 CMAP(CPC Merged Analysis of Precipitation)의 월별 강수자료를 각 발원지별 공간적으로 평균하여 이용하였으며, 또한 강수량 자료로부터 가뭄지수(Effective Drought Index, EDI)를 계산하여 부산 지역의 먼지 농도 및 황사 발생과의 연관성을 분석하였다.

분석방법

주기 분석: 시계열 자료의 주기를 분석한다는 것은 어떤 자료가 과거 관찰 값들의 변화 패턴과 비슷하게 현재 시점 이후에도 반복될 것이라는 전제하에서 그 반복 구간을 규명하는 것인데 그 결과 향후 시점의 값을 예측하는 데에도 사용될 수 있는 기법이다. 또한 주기분석은 기상학에서도 넓게 사용되는데, 에어로솔의 주기변동에 대한 여러 연구에서 사용되었다(Hies et al., 2000; Marr and Harley, 2002; Choi et al., 2008). 본 연구에서는 부산 지역의 PM_{10} 농도의 16년간 일평균 자료의 주기와 GTS자료로부터 도출한 9년간 황사 발원지의 일풍속의 주기를 분석하기 위하여 아래 식 (1)과 같이 푸리에 분해(Fourier decomposition)를 통한 주기 강도를 계산하는 단일 스펙트럼(single spectrum) 분석을 사용하였으며(Stull, 1988), 통계적 유의성 검정(significant test)도 동시에 수행하였다.

이 때, 미세먼지의 농도는 기상현상에 의해 영향을 많이 받지만(박옥윤과 권오열, 2006), 대도시의 경우는 기상현상 뿐만 아니라 배출원이나 오염원과 같은 다른 요인에 의해서도 미세먼지(PM_{10}) 농도가 좌우되므로 본 연구에서는 년주기를 제거하지 않고 주기분석을 수행하였다.

$$F_A(n) = \sum_{k=0}^{N-1} \left[\frac{A(k)}{N} \right] e^{-i2\pi nk/N} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} A(k) \cos(2\pi nk/N) - \frac{i}{N} \sum_{k=0}^{N-1} A(k) \sin(2\pi nk/N) \quad (1)$$

여기서 n 은 주기, N 은 자료의 개수를 각각 나타낸다. 또한 부산 지역의 먼지 농도와 기상 변수와의 주기적 상관성을 분석하기 위하여 교차스펙트럼(cross spectrum) 분석을 동시에 수행하였다. 단일스펙트럼분석은 하나의 변수에 대한 주기를 규명하는 통계 방법인 반면, 교차스펙트럼분석은 두 변수의 각 주기별 상관성을 규명하는데 사용된다(Mohanakumar, 1988). 본 연구에서 사용한 교차스펙트럼분석은 상관성을 규명하고자 하는 두 변수 A 와 B 의 이산 푸리에 변환(discrete fourier transform) F_A 와 F_B 에 의해 나타낼 수 있다. 즉 변수 A 의 주기 n 에 대한 주기강도(spectral energy)를 G_A 라 하면 $G_A = |F_A(n)|^2 = F_A^* \cdot F_A$ 로 정의되며, 마찬가지로 변수 B 의 주기강도도 역시 동일하게 $G_B = F_B^* \cdot F_B$ 로 정의할 수 있다. 이 때 F_A^* 와 F_B^* 는 F_A 와 F_B 의 켤레 복소수이다. 이것으로부터 A 와 B 사이의 교차스펙트럼(cross spectrum)은 아래 식 (2)와 같이 정의된다(Stull, 1988).

$$G_{AB} = F_A^* \cdot F_B = F_{A^*} F_{B^*} + i F_{A^*} F_{B^*} - i F_{A^*} F_{B^*} - i^2 F_{A^*} F_{B^*} = (F_{A^*} F_{B^*} + F_{A^*} F_{B^*}) + i(F_{A^*} F_{B^*} - F_{A^*} F_{B^*}) = Co - iQ \quad (2)$$

여기서 Co 는 cospectrum, Q 는 quadrature spectrum이다. 따라서 교차스펙트럼은 두 변수의 주기강도의 곱의 형식으로 나타나며 cospectrum의 값으로 표현되는 두 변수간 상관관계가 시간(주기)의 함수로 나타나는 것을 제외하면, 보통의 상관계수와 동일하다. 즉 특정 주기에서 나타난 값이 양(+)의 값이라면 두 변수의 시계열이 같은 상(phase)을 가지는 것을 의미하며, 음(-)의 값을 가지면 두 변수의 시계열이 정 반대의 상(phase)을 가지는 것을 의미한다. 본 연구에서는 1991년부터 2006년까지 16년간 부산지역의 PM_{10}

농도와 먼지농도에 영향을 주는 기상변수 즉, 기온, 상대습도, 기압, 풍속에 대한 관련성과 1998년부터 2006년까지 9년간 부산지역의 PM₁₀ 농도와 황사발원지에서의 풍속의 관련성을 알아보기 위해 cospectrum을 계산하여 분석하였다.

유효가뭄지수(Effective Drought Index): 대도시 먼지 농도 시계열과 황사 발생과의 연관성을 해석하기 위해 황사 발원지에서의 강수량 및 풍속자료를 분석하였다. 발원지에서의 황사 발생빈도는 지표면 상태에 많은 영향을 받으며, 이것은 강수량 그 자체뿐만 아니라 누적 강수량과 같은 발원지의 기후학적 요소와 연관되어 있을 것으로 판단되어 발원지에서의 기후학적으로 정의되는 가뭄 지수를 계산하였다. 기후학적 가뭄은 사용 가능한 물로 전환된 강수량이 기후학적 평균에 미달하는 것을 말하는데, 기후학적 평균이 계절별, 날짜별, 지역별로 모두 다르므로 각기 해당지역, 해당 날짜의 평균치와 비교하여 가뭄의 정도를 지수화 한 것이다. 본 연구에서는 여러 가뭄지수 중 하나로서 유효가뭄지수(Effective Drought Index; EDI)를 선정하여 계산하였다(Byun and Wilhite, 1999). 이는 강수로 인해 생긴 수자원을, 시간에 따른 손실을 감안하면서 일년 이상 누적하여, 평년치와 비교하는 방법으로 가뭄의 강도를 기후학적으로 표시한 지수로서, 표준편차로 정규화한 무차원 값으로서 값이 작을수록 가뭄이 더 심함을 나타낸다. 따라서 강수량 그 자체로는 대상지역의 가뭄의 시기나 강도를 알 수 없는 반면 유효가뭄지수는 시간별 상대적 가뭄 정도를 비교할 수 있다(강경아와 변희룡, 2004).

유효가뭄지수를 구하는 방법은 다음과 같다. 먼저, 식 (3)에 의해 매일의 누적유효강수량(EP)을 계산한다.

$$EP_i = \sum_{n=1}^i \left(\left(\sum_{m=1}^n P_m \right) / n \right) \quad (3)$$

식 (3)에서 P_m은 (특정일-m)일의 일강수량으로 m 일 동안의 평균 강수량으로 합산되며, i는 누적기간, n은 1에서 i까지 1씩 증가하는 수이다(강경아와 변희룡, 2004). 여기서 강수량 부족인 날의 수를 결정하기 위해 강수량 누적기간을 정하는 것이 중요한데 본 연구에서는 전지구적으로 가장 지배적인 강수량 주기가 1년 주기이기 때문에 누적기간을 12개월로 결정하였다. 이 때 각 지점에서 강수량은 강한 1년 주기를 가지기 때문에 누적유효강수량은 day number

(즉, calendar day)별로 주어진 기간의 각 강수량 자료를 평균한다(MEP). 따라서 이 값은 기후학적 관점에서 강수량의 시계열 특성을 잘 나타내준다.

$$DEP = EP - MEP \quad (4)$$

$$EDI_i = DEP_i / ST(DEP_i) \quad (5)$$

식 (5)에서 ST(DEP)는 DEP의 표준편차이고 첨자는 누적지속기간을 나타낸다(Byun and Wilhite, 1999). 두 번째 단계에서는 식 (4)를 사용하여 특별한 날짜, 장소에서의 물(강수량)의 부족 또는 과잉을 나타내는 누적유효강수량의 편차(DEP)를 구한 후, 식 (5)를 사용하여 유효가뭄지수를 계산하였다. 본 연구에서는 중국의 황사 발원지를 4곳으로 정의하고(Fig. 2), 1986년에서 2005년까지 CMAP(CPC Merged Analysis of Precipitation) 월별 강수량 데이터를 사용하여 각 발원지별 유효가뭄지수(EDI)를 구하였으며, 이렇게 구한 가뭄지수를 주기 분석하여 부산 지역의 먼지 농도 시계열자료에서 규명한 주기와의 연관성 유무를 분석하였다.

결과 및 분석

부산 지역에서 관측된 먼지 농도의 주기 분석

Fig. 3a는 1991년부터 2006년까지 부산지역 일평균 PM₁₀ 농도 시계열을 주기 분석한 결과를, Fig. 3b는 계산된 주기 중에서 3.2년을 확대하여 나타낸 그림이다. 그 결과 예상대로 1년(그 다음으로 6개월) 주기가 가장 크게 나타났는데 이것은 계절별 대도시 배출량의 계절 변화 경향, 예를 들면 겨울철 난방 사용량 증가, 여름철 강수과정에 의한 오염물질의 세정 효과 등에 의한 월변화 혹은 계절변화 경향에 기인한 것으로 판단된다. 7일 주기 또한 배출량의 주말 효과 및 차량 통행량 등으로 설명할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 이와 같이 배출량 혹은 강수 효과 등과 연관된 특성 즉 1년, 7일 주기는 연구 대상에서 제외하였고, 현재의 자료기간으로 규명하기 힘든 8년 주기도 제외하였다. 이 외에 상대적으로 높은 주기강도가 나타난 3-4년 주기(본 연구에서는 3.2년으로 계산됨)가 어떤 기상 변수와 연관성이 있는지를 살펴보기 위하여 수집된 여러 기상 변수와 부산지역 먼지농도 자료를 토대로 교차스펙트럼분석을 수행하여 그 결과를 살펴보았다.

Fig. 3. Result of Power spectrum of PM_{10} concentration for (a) the whole periodicity and (b) around the periodicity of 3-4 year for the period of 1991-2006 in Busan (— red noise, - - - 90% confidence level).

부산 지역의 먼지 농도와 기상 변수와의 상관성 분석

부산 지역의 먼지 농도 시계열자료를 동 기간에 관측된 기상자료와 일대일로 대응시켜 교차스펙트럼 분석을 수행하였다. 사용된 기상 자료는 부산지방 기상청에서 관측한 매시간 풍속, 기온, 기압, 상대습도 자료를 일평균하여 사용하였다. Fig. 4는 1991년부터 2006년까지 3-4년 주기를 포함한 인접한 주기에서의 부산지역의 먼지 농도와 풍속, 지상기압, 기온, 상대습도와의 cospectrum 결과를 제시한 그림이다. 3-4년 주기의 경우 PM_{10} 농도와 기압과의 cospectrum 분석 결과가 양(+)의 값이 나타났으며, 풍속과 기온, 그리고 상대습도와의 cospectrum 분석 결과는 각각 -0.1, -0.6, -0.4로서 음(-)의 상관성을 보였다. 여기서 풍속을 제외하고는 기온과 상대습도와의 상관관계가 -0.4 이상으로 역 상관성이 매우 높게 나타났다. 이

Fig. 4. Cospectrum of meteorological variables and PM_{10} concentration around the periodicity of 3-4 year in Busan.

것은 황사 발생 조건과 유사한 것으로 판단할 수 있는데, 정관영과 박순웅(1995)에 의하면, 황사 출현시 우리나라의 중관 기상 특징은 중국에서 한랭한 고기압이 발달할 시에 황사가 자주 출현하게 되고, 그 이동 고기압에 포함된 황사가 한반도로 유입된다고 보고하였다. 또 이은희 외(2003)는 황사발생시 상대습도는 40% 미만의 값을 지속적으로 나타내고 그 이상에서는 황사의 발생이 줄어들음을 보였다. 따라서 황사가 자주 발현되는 기상 조건은 기압이 높고 상대습도가 낮을 경우로 요약되며, 본 연구 결과인 부산 지역의 먼지 농도 역시 기압과 양(+)의 상관관계, 상대습도와 음(-)의 상관관계를 가지는 것으로 나타난 것은 황사 발생 조건과 잘 부합되는 것으로 나타나, 3-4년의 먼지 농도 주기는 황사의 발현과 연관성이 많은 것으로 판단된다.

다만 본 절에서 분석 결과로 부산 지역에서의 PM_{10} 과 풍속의 상관관계가 음(-)의 값으로 나타난 것은 자료 관측 장소가 황사 발원지 혹은 장거리 이동하여 관통하는 영역이 아니라, 먼지가 하강하여 침적되는 수용지에서의 풍속자료임을 감안하면, 이미 부산 지역으로 유입된 먼지가 부산 도심의 풍속이 약하여 오염물질의 통풍 효과가 원활하지 못하여 먼지 농도를 높일 수 있었던 것으로 판단된다. 반면 황사가 발현하여 한반도로 장거리 수송되기 위해서는 황사 발원지에서의 북서풍 계열의 풍속이 강한 경우에 유리하므로, 황사의 발생 특성을 더 정확하게 분석하기 위해서 추가적으로 황사 발원지 자체에서의 풍속을 분석하여 그 상관성 등을 살펴보았다.

Fig. 5. Power spectrum of wind speed for the period of 1998-2006 at Asian dust source region (— red noise).

Fig. 6. Results of cospectrum for wind speed over the 4 Asian dust source regions and PM_{10} concentration for the period of 1998-2006.

황사 발원지에서의 풍속과 부산지역 먼지농도의 상관성 분석

부산지역 먼지 농도와 황사 발생과의 관계를 보다 자세히 분석하기 위하여 중국 본토의 황사 발원지에서 관측된 시계열 자료를 수집하여 부산지역의 일평균 먼지농도자료와 일대일 대응시켜 교차스펙트럼분석을 추가하였다. 특히 황사는 지표 및 대기 상태가 건조할 때, 그리고 강한 풍속이 존재할 때 빈번히 발생한다. 따라서 황사의 발생 특성을 설명하기 위해서는 이러한 지표 조건과 대기 상태를 잘 반영하는 기상 변수를 선정하여 분석하여야 하므로, 본 논문에서는 황사 발원지에서의 기상 변수 중 지표 풍속 자료를 우선 분석하였다.

황사 발원지는 총 4지역으로 구분하고, 각 발원지에서의 1998년부터 2006년까지 9년간 GTS 풍속자료를 수집하여 부산 지역의 먼지 농도 자료와 교차스펙트럼분석을 수행하였다. Fig. 5는 중국 황사 발원지의 풍속 자료를 그 자체 데이터만으로 주기 분석한 결과를 제시한 그림으로서, 3년 주기와 그 인접한 주기에 한정하여 제시한 결과이다. 그 결과 3년 주기의 주기강도가 상대적으로 높은 값을 보였고, 통계적 신뢰도 또한 유의한 것으로 나타났다. 따라서 비록 황사발원지에서 관측된 풍속만으로 분석한 상관관계이지만 결국 부산 지역에서 측정된 PM_{10} 농도는 어느 특정 주기에서는 황사현상과 같은 장거리 수송에 의해 크게 영향을 받는 것으로 나타나, 황사 발원지에서의 기상 및 기후학적 특성이 한반도 대도시의 먼지 농도에 영향을 미치고 있음을 시사하고 있다.

Fig. 6은 1998년부터 2006년까지 9년간 황사 발원지에서의 풍속 자료와 부산 지역의 PM_{10} 농도 자료의 cross spectrum 분석 결과이다. 3-4년 주기에서의 상관계수가 양(+)의 값으로 나타났는데, 앞절의 부산지역의 풍속과는 음(-)의 값으로 나타난 것과 대조적인 결과이다. 이것은 결국 발원지에서의 풍속은 강하고 부산지역의 풍속은 약할수록 부산지역 먼지 농도는 증가한다는 것을 의미한다. 발원지에서의 풍속이 강하면 황사 발생이 빈번해지고, 발생한 황사입자가 장거리 이동될 확률이 많은 것에 부합되는 결과이다.

황사 발생 주기와 황사 발원지의 기후학적 분석

발원지에서의 황사의 발현과 연관된 지표 조건을 설명할 수 있는 또 하나의 기상 변수는 강수량이다. 즉 발원지에서 지표 및 대기 상태가 건조하면 강한 풍속이 동반되어 황사가 빈번히 발생할 수 있다. 그러나 발원지에서 강수량이 많거나 눈으로 피복되어 있는 경우 황사는 발생하지 않을 가능성이 크다. 최근 중국의 북서쪽 지방이 급격하게 사막화가 진행되면서 동아시아 지역에서 황사 현상의 강도와 발생빈도가 증가하고 있는 것으로 보고되고 있는 것도 같은 맥락에서 이해할 수 있다. 따라서 황사 발원지에서의 기상 변수 중 강수량 자료를 추가적으로 분석하였고, 강수량과 연관된 장기적인 기후적 요소 등을 살펴보기 위하여 강수량으로부터 계산된 유효가뭄지수를 함께 주기 분석을 수행하였다.

Fig. 7은 1986년부터 2005년까지 20년간 4곳의 황사 발원지에서의 강수량을 주기 분석한 결과를 발원

Fig. 7. Power spectra of precipitation at Asian dust source regions; (a) Taklimakan desert, (b) Gobi desert, (c) The upstream regions of the Yellow River and (d) Loess plateau; for 1986-2005 (— red noise, ---- 90% confidence level).

지별로 나타낸 것이다. 제 2장 1절에 기술하였듯이 황사 발원지에서의 강수량 자료는 월누적 강수량이므로 자료의 특성상 월주기이하의 작은 규모 주기에 대해서는 알 수 없다. 여기서 Fig. 7a는 타클라마칸 사막, 7b는 고비사막, 7c는 황하강의 상류지역, 7d는 황토고원에서의 강수량 자료에 대한 분석 결과를 제시한 것이다. 4곳의 발원지 모두 뚜렷한 1년 주기와 6개월 주기를 제외하면 특별한 energy peak는 보이지 않았다. 따라서 발원지에서의 지표 상태를 보다 장기적인 기후 요소로 설명할 필요가 있을 것으로 판단된다.

일반적으로 가뭄(drought)을 정의하면 장기간에 걸친 강우(precipitation)의 부족 상태로 설명하는데, 강수 존재여부와 강수량 그 자체 관측값만으로 황사발원지의 가뭄과 같은 기후 요인을 설명하기에 부족하다고 판단하여 강수량 자료로부터 계산된 유효가뭄지수(EDI)를 사용하여 그 주기를 분석하고 발원지 지표 상태 변화의 주기를 해석하였다.

Fig. 8은 1986년부터 2005년 기간의 월별 계산된 EDI의 시계열을 나타낸 것이다. 제 2장에서 기술한 것처럼, EDI는 그 값이 작을수록 가뭄의 강도가 심한 것으로서, 분석 첫해인 1986년에 EDI의 값이 약 -4 정도로 가장 작게 나타났다. 이것은 분석 첫해의 경우 강수량 누적 기간을 12개월로 계산할 때 자료가 없는 이전 자료를 모두 무강수일로 가정한 결과이므로 특별한 의미가 없다. 그러나 이러한 오차를 제외하더라도 EDI의 년 변화 경향은 우리나라의 황사 발생일과 부합되어 나타남을 알 수 있다. 즉 황사 발원지 중 고비사막(S2)은 1990년대 후반에 EDI가 낮게, 2002년 황사에 의한 먼지 농도가 기록적으로 높은 해에는 EDI의 값이 매우 낮게 나타난 것을 확인할 수 있다. 또한 2004년 이후에는 EDI 값이 계속 낮아지는 경향을 볼 수 있고, 또 매우 주기적으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 예를 들어 황하강 주변의 발원지(S3)의 EDI 시계열은 1998년, 2000년 등

Fig. 8. Time series of EDI over the 4 Asian dust source regions for the period of 1986-2005.

에서 상대적으로 낮은 EDI 값이 나타나고 있다.

최근의 EDI의 시계열 변화를 자세히 살펴보기 위하여 Fig. 8의 최근 1999년에서 2001년까지의 EDI를 확대하여 Fig. 9에 나타내었다. 1999년 타클라마칸 사막(S1)에서 최소 EDI가 -1.76, 2000년 황하강 상류지역(S3)에서 최소 EDI가 -1.74, 황토 고원(S4)에서 최소 EDI가 -1.61, 2001년 고비사막(S2)에서 최소 EDI가 -1.55로서 최근 3년 기간 중 최소값을 보였다. 따라서 2000년과 2001년에 전반적으로 유효가뭄수치가 낮게 (가뭄의 강도가 심하게) 나타나, 2002년 한국에 황사발생빈도가 높았던 기록과 어느 정도 일치함을 알 수 있다.

Fig. 10은 각 발원지별 EDI를 주기 분석한 결과이다. 월 강수량 자체를 주기분석한 Fig. 7과는 달리 황사 발원지 4지역 모두 경년 변동성을 가지는 것으로 나타났다. 즉 S1(Fig. 10a)과 S4(Fig. 10d)에서는 2년, 1.3년 주기가 상대적으로 강하게 나타나고, S2(Fig. 10b)와 S3(Fig. 10c)에서는 4년, 2년, 1.25년의 주기가 상대적으로 강하였다. 따라서 황사 발원지의 황사 발생 특성은 기후학적 강수량 요소의 특성과 더 밀접하게 연관되어 있음을 시사해 준다. 결국 황사의 발생은 발원지에서의 강한 바람과 함께 강수와 연관된 기후인자에 의해 주기적으로 발생할 수 있으며, 이렇게 발생한 황사는 장거리 수송되어 우리나라 대도시 중장기 평균 먼지 농도(월평균 혹은 연평균 농도)를 상승 조절하는 일차 요인으로 작용할 수 있을 것이다.

마지막으로 1990년부터 2006년까지 연도별 우리나라의 서울과 부산에서 발생한 황사발생일수를 Fig.

Fig. 9. Time series of EDI over the 4 Asian dust source regions for the period of 1999-2001.

11에 나타내었다. 두 지역 모두 황사발생일의 연 변동성이 유사하게 나타났으나 연간 그 변동폭은 소폭 다르게 나타났다. 그러나 서울과 부산지역 모두 1998년, 2001년, 2005년 등 황사 발생일의 주기적 변화가 최근에 더욱 뚜렷해지는 경향을 확인할 수 있으며, 이러한 경년 변화는 결국 황사 발원지에서의 지표 특성을 설명하는 기후학적인 기상요소의 경년 변화와 연관되어 나타날 수 있음을 시사한다.

결론

본 논문에서는 1991년부터 2006년까지 16년간 부산지역 PM_{10} 농도의 시계열자료에 대하여 주기분석을 수행하였고, 주기 분석을 통해 규명된 먼지농도의 각 특징적인 주기를 기상학적으로 규명하였다. 이때 선정된 기상 변수로는 기온, 상대습도, 기압, 풍속이며, 이와 같은 부산 지역 기상자료를 먼지 농도와 일대일 대응시켜 교차스펙트럼분석을 수행하였으며 그 결과로부터 두 변수간의 주기적 상관관계를 해석하였다.

그 결과 먼지농도의 배출량과 기상 변화에 의한 주기를 제외한 특징적인 주기는 3-4년과 21일주기였다. 이 중에서 3-4년 주기는 대기 오염 물질의 장거리 수송 즉, 황사 현상과 관련이 많은 것으로 나타났다. 황사의 장거리 수송과 연관된 3-4년 주기의 먼지 농도해석을 위하여 황사 발원지에서의 풍속과 강수량 및 이와 연관된 기후적 요소들과의 상관성들을 분석하였고, 발원지의 기후학적인 지표 변화 주기와 관련되어 부산지역의 먼지농도 주기를 해석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

교차스펙트럼분석을 수행한 결과, 첫째로 3-4년 주

Fig. 10. Power spectra of Effective Drought Index(EDI) over the 4 Asian dust source regions for 1986-2005 (— red noise, --- 90% confidence level).

Fig. 11. Occurrence days of Asian dust events for the period of 1990-2006 in Seoul and Busan, Korea.

기에서 PM_{10} 농도와 발원지에서의 풍속은 양(+)의 관계로 나타났으며, 부산지역에서 PM_{10} 농도와 기압은 양(+)의 상관관계, 기온 및 상대습도는 음(-)의 상관관

계가 나타났다. 결국 발원지에서 풍속이 강하며 기압이 높고 상대습도가 낮을수록 황사 현상이 빈번하다는 사실에 기초하여 미세먼지의 3.4년 주기는 황사의 장거리 수송과 관련이 있는 것으로 판단하였다.

또한 3.4년 주기와 관련된 황사현상은 황사발원지에서의 지표면 상태에 따라 발생빈도가 달라지므로, 발원지 4지역을 선정하여 강수량과 EDI(유효기물지수)를 계산하여 주기분석을 수행하였다. 그 결과, 강수량 자료를 그대로 사용하였을 경우 발원지 4지역 모두 특별한 경년주기의 징후는 나타나지 않았고 통계적으로 유의하지도 않았다. 반면, 12개월 누적 강수량을 사용하여 계산한 EDI를 주기 분석한 결과 4년, 2년, 1.3년 등 발원지별 경년 변동성이 확인되었다.

따라서 부산 지역에서 관측되는 PM_{10} 자료에 나타난 주기들을 해석할 때 경년 변동성 3.4년 주기는 기후학적으로 황사의 지표 특성의 변화 주기는 유의한 것으로 나타났다. 기후인자의 주기적 변동에 따라서 황사의 발생도 주기적으로 변하며, 이러한 황사의 주

기적 변화가 대도시의 연평균 먼지 농도에도 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다. 아울러 본 논문에서 분석한 자료는 제한된 기간인 16년에 불과하지만, 장기간의 데이터를 축적하다 보면 보다 더 정확한 연구 결과가 제시될 것으로 사료되며, 발원지에서의 지표특성과 연관된 다양한 기후학적 요소들을 추가로 분석한다면 본 논문에서 규명한 여러 주기적 현상들을 보다 더 상세히 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-331-C00285).

참고문헌

강경아, 변희룡, 2004, 1982년 동아시아 가뭄의 기후학적 발달과정. 한국기상학회지, 40, 467-483.
박옥윤, 권오열, 2006, 마산과 전주지역의 대기오염농도와 기상인자의 통계분석. 한국대기환경학회 2006 춘계학술대회 논문집, 412-413.
이은희, 인희진, 박순웅, 2003, 2002년 봄철 황사 발원지에서의 먼지 발생과 기상 조건 관련성. 한국기상학회대기, 13, 246-247.
전영신, 김수현, 최병철, 정효상, 2002, 최근 10년간 황사발원지의 사막화. 한국기상학회대기, 12, 230-235.

정관영, 박순웅, 1995, 한반도에 황사 출현시의 종관 기상 특징. 한국기상학회지, 31, 45-63.
Byun, H.-R. and Wilhite, D.A., 1994, Objective Quantification of Drought Severity and Duration. Journal of Climate, 12, 2747-2756.
Choi, Y.-S., Ho, C.-H., Chen, D., Noh, Y.-H., and Song, C.-K., 2008, Spectral analysis of weekly variation in PM₁₀ mass concentration and meteorological conditions over China. Atmospheric Environment, 42, 655-666.
Hies, T., Treffeisen, R., Sebal, L., and Reimer, E., 2000, Spectral analysis of air pollutants. Part 1: elemental carbon time series. Atmospheric Environment, 34, 3495-3502.
Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callender, B.A., Harris, N., Kattenberg, A., and Maskell, K., 1996, Climate change 1995: The science of climate change. Cambridge University Press, Cambridge, England, 572 p.
Marr, L.C. and Harley, R.A., 2002, Spectral analysis of weekday-weekend differences in ambient ozone, nitrogen oxide, and non-methane hydrocarbon time series in California. Atmospheric Environment, 36, 2327-2335.
Mohanakumar, K., 1988, Spectral analysis of temperature in the middle atmosphere. Physica Scripta, 37, 455-459.
Peterson, R.K. and Wagman, J., 1977, Mass and composition of an urban aerosol as a function of particle size for several visibility levels. Journal of Aerosol Science, 8, 269-279.
Stull, R.B., 1988, An introduction to boundary layer meteorology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 666 p.

2009년 7월 6일 접수
2009년 8월 11일 수정원고 접수
2009년 10월 20일 채택