한국대기환경학회지 제 25 권 제 2 호
J. KOSAE Vol. 25, No. 2 (2009) pp. 133～140
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment

부산지역 대기측정망 자료에 나타난 미세먼지 농도의 시계열 해석

Interpretating the Spectral Characteristics of Measured Particle Concentrations in Busan

손 혜 영 · 김 철 희*
부산대학교 지구환경시스템학부 대기환경과학전공

(2009년 1월 7일 접수, 2009년 3월 31일 채택)

Hye-Young Son and Cheol-Hee Kim*
Division of Earth Environmental System, Pusan National University

(Received 7 January 2009, accepted 31 March 2009)

Abstract

In order to examine the effects of micrometeorological and climatological influences on urban scale particulate air pollutants observed in Busan, power spectrum analysis was applied to the observed particulate matter with aerodynamic diameter $\leq 10\,\mu m$ (PM_{10}) for the period from 1991 to 2006. Power spectrum analysis has been employed to the daily mean PM_{10} concentrations obtained at 13 sites to identify different scales of periodicities of PM_{10} concentrations. The results show that, aside from the typical and well-known periodicities such as diurnal and annual variations caused by anthropogenic emission influences, another two significant peaks of power spectrum density were identified: 21 day and 3～4 year of periodicities. Cospectrum analysis indicates that the intraseasonal 21 day periodicity are found to be negatively correlated with wind speed and surface pressure but shows consistently positive with relative humidity and temperature. This result implied that 21 day periodicity is presumably relevant to the secondary aerosol formation processes through the photochemical reaction that can be subsequently resulted from hygroscopic characteristics of aerosol formation. However, the interannual 3～4 year of periodicity is found to have positive correlation with pressure, and negative with temperature and relative humidity, which is rather consistent with both characteristics of air mass during the Asian dust event and the occurrence frequency of Asian dust whose periodicities have been recorded inter-annually over the Korean peninsula.

Key words : Aerosol, Power spectrum, Cross spectrum, Asian dust, Secondary aerosol formation

1. 서 론

대기 중 미세먼지의 단기 혹은 장기 농도 변화는 황사현상에 의해 많은 영향을 받는데, 예컨대 2002년 황사 발생에 따른 우리나라 평균 미세먼지 농도는 매우 높았다. 특히 2002년 4월 8일 서울 성수동 관측소는 시간 평균 3,311 $\mu g/m^3$의 기록적인 미세 먼지 농도가 나타났고 그해 11월에는 860 $\mu g/m^3$까지

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)51-510-3687, E-mail : chkim2@pusan.ac.kr

농도가 나타났다. 반면 2003～2004년에는 우리나라에 발생한 황사 현상은 급격히 줄었으며 특히, 2004년에는 황사발생이 연중 전무하여 2002년과 극히 대조를 이루었다. 이러한 황사발생의 뚜렷한 연변동성은 결국 중국의 황사 발원지에서의 지표 특성의 변화 주기 혹은 강도와 연관되는 것으로 보이며 이것은 결국 발원지에서의 지표 조건에 영향을 미치는 강수량, 풍속 등의 기상요소와도 연관되어 있을 것이다.

또한 황사와는 별개로 대도시에서 발생하는 미세먼지 농도는 지역의 배출원 종류 및 계절에 따른 연료사용량의 변화, 일일 주기로 일어나는 오염원, 미기상학적인 변동 등에 의해 큰 영향을 받는다(박옥윤과 권오열, 2006). 따라서 미세먼지 농도를 지배하는 요인 중에는 배출원을 제외하고는 가장 영향을 주는 요소는 기상현상이라 할 수 있으며(신찬기 등, 1992; 박일수 등, 1991; Wilkins, 1954), 특히, 풍향, 풍속, 기온, 습도 등의 상태에 따라 그 농도 분포가 크게 좌우된다(정용승과 정재섭, 1991; 김민영 등, 1989). 따라서 미세먼지 농도의 여러 규모별 시간에 따른 변동성을 체계적으로 연구하기 위해서는 중국 황사 발원지에서의 기후학적인 변수와 연관된 장기변동성 연구에서 시작하여 먼지 농도의 단기적 특징과 연관된 대도시 기상변수의 상관성을 동시에 분석하여야 할 것이다.

본 연구에서는 먼지 농도의 시간 변동성 연구를 위해 대도시 중의 하나인 부산지역을 대상으로 1991년에서 2006년까지 16년간 측정된 먼지 농도의 주기를 분석하고, cross spectrum을 사용하여 부산지역의 먼지농도와 국지 기상 변수인 기온, 풍속, 기압 등과의 주기적 상관관계를 살펴봄으로써 부산의 미세먼지 농도 주기의 기상학적 원인을 해석해보고자 한다. 본 연구를 통해 황사를 포함한 대도시 먼지 발생의 주기적 특성을 파악함으로써 먼지 농도 변동을 정성적으로 예측하고 그 피해를 통계적으로 평가할 수 있는 기초적인 정보를 제공할 수 있을 것이다.

2. 연구 방법

2.1 분석영역 및 자료

본 연구의 대상지역은 그림 1에서 제시된 바와 같이 부산광역시 전역과 일부 외곽지역을 포함한다. 본

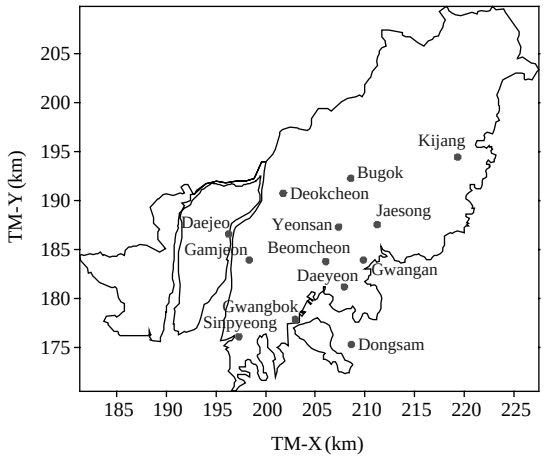

Fig. 1. Locations of the air pollution monitoring stations in Busan.

연구에 이용된 자료는 1991년부터 2006년까지 16년간 환경부가 운영하는 대기오염자동측정망 자료 중 부산지역에 위치한 13개 측정소의 시간별 먼지 농도 자료를 사용하였다. 부산 지역의 대기오염 측정시 1990년대에는 대부분 TSP (Total Suspended Particle)를 측정하였고, 1990년대 말부터 PM_{10}을 측정하기 시작하여 2000년도에는 거의 모든 지역에서 PM_{10}이 측정되었다. 따라서 1990년대의 PM_{10}자료를 정성적으로 산출하기 위하여 TSP에서 PM_{10}으로 바뀌는 시기의 전후 1년의 평균으로부터 TSP에 대한 PM_{10}의 비를 구하고, 그 비를 TSP자료에 적용하여 PM_{10}농도를 추정하였다. 이것은 과거 TSP 측정 기간의 정확한 PM_{10}농도를 추정한 것으로 보기는 어렵더라도 그 주기적 특성을 해석하는 데에는 적용가능할 것으로 판단된다. 또한 부산 지역의 PM_{10}농도와 기상변수와의 상관성을 분석하기 위하여 동 기간의 부산지방기상청 정규관측소에서 관측하는 매 시간별 기상관측 자료 중에서 온도, 풍속, 기압, 상대습도 등의 자료를 이용하였다.

또한 황사 발원지에서의 바람의 세기와 황사의 연관성을 연구하기 위하여 1998년부터 2006년까지 9년간 중국 지표면 풍속을 관측한 202개 지점의 GTS (Global Teleconnection System)자료로부터 4개로 정의한 황사 발원지(그림 2)의 일풍속 자료를 도출하여 부산지역의 PM_{10}농도와의 연관성을 규명하였다. 이때 황사발원지의 범위를 다음과 같이 단순화시켜

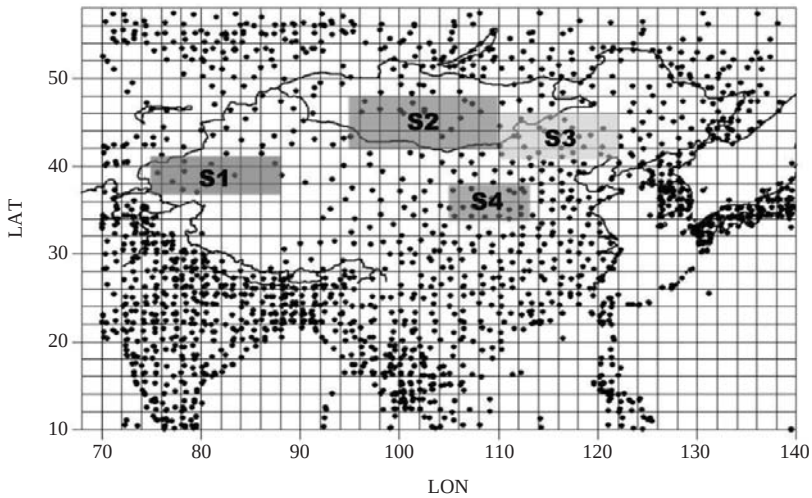

Fig. 2. Source regions of Asian dust in east Asia (S1: Taklamakan desert; S2: Gobi desert; S3: The upstream regions of the Yellow river; S4: Loess plateau).

정의하였다. 1) 타클라마칸 사막을 포함하는 티벳 고원의 북서지역(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.

2. 2 분석방법

시계열 자료의 주기를 분석한다는 것은 어떤 자료가 과거 관찰 값들의 변화 패턴과 비슷하게 현재 시점 이후에도 반복될 것이라는 전제하에서 그 반복 구간을 규명하는 것으로서 그 결과를 향후 시점의 값을 예측하는 데에도 사용될 수 있는 기법이다. 본 연구에서는 부산 지역의 PM_{10}농도의 16년간 일평균 자료의 주기를 분석하기 위하여 single power spectrum을 사용하였으며, 통계적 유의성 검정(significant test)을 동시에 수행하였다.

또한 부산 지역의 먼지 농도와 기상 변수와의 주기적 상관성을 분석하기 위하여 cross spectrum 분석을 수행하였다. single spectrum은 한 변수의 주기만을 분석하지만, cross spectrum은 두 개 변수의 각 주기에 대한 상관성을 규명하는 통계 방법으로서 주기별 두 변수의 상관계수를 살펴 볼 수 있다.

본 연구에서 사용한 cross spectrum은 이산 푸리에 변환(Discrete fourier transform, F_A)에 의해 나타낼 수 있으며, 식(1)을 통해서 주기영역에서 각 주기의 강도를 구할 수 있는데, 이 과정을 푸리에 분해(Fourier decomposition)라고 한다(Stull, 1988).

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

변수 A의 주기 n에 대한 주기강도(Spectral energy, G_A)는 $G_A=|F_A(n)|^2=F_A^*\cdot F_A$로 정의되며, F_A^*는 F_A의 켤레 복소수이다. 이 정의를 증명하기 위해 $F_A=F_{Ar}+i\cdot F_{Ai}$, 그 복소수 켤레는 $F_A^*=F_{Ar}-i\cdot F_{Ai}$로 놓고, 변수 A의 주기강도를 표현하면 식(2)와 같다(여기서 r과 i는 각각 실수부와 허수부를 나타낸다).

$$\begin{aligned}G_A&=F^*_A\cdot F_A=(F_{Ar}-iF_{Ai})\cdot(F_{Ar}+iF_{Ai})\\&=F^2_{Ar}+iF_{Ai}F_{Ar}-iF_{Ai}F_{Ar}-i^2F^2_{Ai}\\&=F^2_{Ar}+F^2_{Ai}=|F_A(n)|^2\end{aligned} \quad (2)$$

변수 B의 주기강도도 역시 동일하게 $G_B=F_B^*\cdot F_B$로 정의할 수 있다. 이것으로부터 A와 B 사이의 cross spectrum은 식(3)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}G_{AB}&=F^*_A\cdot F_B=F_{Ar}F_{Br}+iF_{Ar}F_{Bi}-iF_{Ai}F_{Br}-i^2F_{Ai}F_{Bi}\\&=(F_{Ar}F_{Br}+F_{Ai}F_{Bi})+i(F_{Ai}F_{Br}-F_{Ar}F_{Bi})\\&=Co-iQ\end{aligned} \quad (3)$$

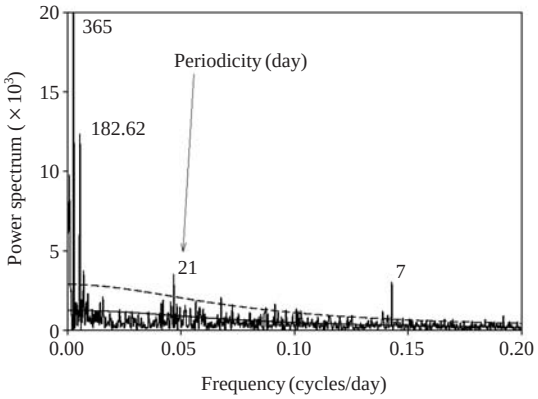

Fig. 3. Power spectrum of PM_{10} concentration for the period of 1991～2006 in Busan (— red noise, ---- 90% confidence level).

Cross spectrum은 두 변수의 주기강도의 곱의 형식으로 나타나며 Cospectrum (Co), Quadrature spectrum (Q), Amplitude spectrum (Am), Coherence spectrum (Coh), Phase spectrum (Phase)으로 나누어 각기 다른 주기 특성을 해석한다. 본 연구에서는 특정 주기에서의 두 변수 간의 상관관계를 분석하는 Cospectrum을 사용하였다. 식(3)을 실수부와 허수부로 나누면, 실수부는 Cospectrum (Co), 허수부는 Quadrature spectrum (Q)으로 정의된다. Cospectrum 분석은 두 변수 간 상관관계가 시간(주기)의 함수로 나타나는 것을 제외하면, 보통의 상관계수와 동일하다. 즉 특정 주기에서 나타난 상관관계가 양(+)의 값이라면 두 변수의 시계열이 같은 상(phase)를 가지는 것(양의 상관관계)을 의미하며, 음(−)의 값을 가지면 두 변수의 시계열이 정 반대의 상(phase)을 가지는 것(음의 상관관계)을 의미한다. 본 연구에서는 1991년부터 2006년까지 16년간 부산지역의 PM_{10}농도와 먼지농도에 영향을 주는 기상변수 즉, 기온, 상대습도, 기압, 풍속에 대한 관련성을 cospectrum을 수행하여 분석하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 부산 지역에서 관측된 먼지 농도의 주기 분석

그림 3은 1991년부터 2006년까지 16년간 부산지역 일평균 PM_{10}농도 시계열을 주기 분석한 결과를 나타낸 그림이다. 가로축은 진동수(주기)를, 세로축은 주기강도(spectrum energy density)를 표시하였고, 통계적 유의성 검토 차원에서 red noise spectrum (실선으로 표시)과 90% 신뢰수준(confidence level) (점선으로 표시)도 삽입하였다. 그 결과 예상대로 1년(그 다음으로 6개월) 주기가 가장 크게 나타났는데 이것은 계절별 대도시 배출량의 계절 변화 경향, 즉 겨울철 난방 사용량의 증가, 장마와 같은 강수과정이 여름에 집중되어 오염물질의 세정 효과가 극대화되는 점, 그리고 황사현상이 4월에 집중되는 점 등 여러 요소가 복합적으로 년 및 월변화 혹은 계절변화를 야기하는 요인이 될 것이다. 7일 주기 또한 배출량의 주말 효과 및 주중의 차량 통행량의 변화에 따른 것

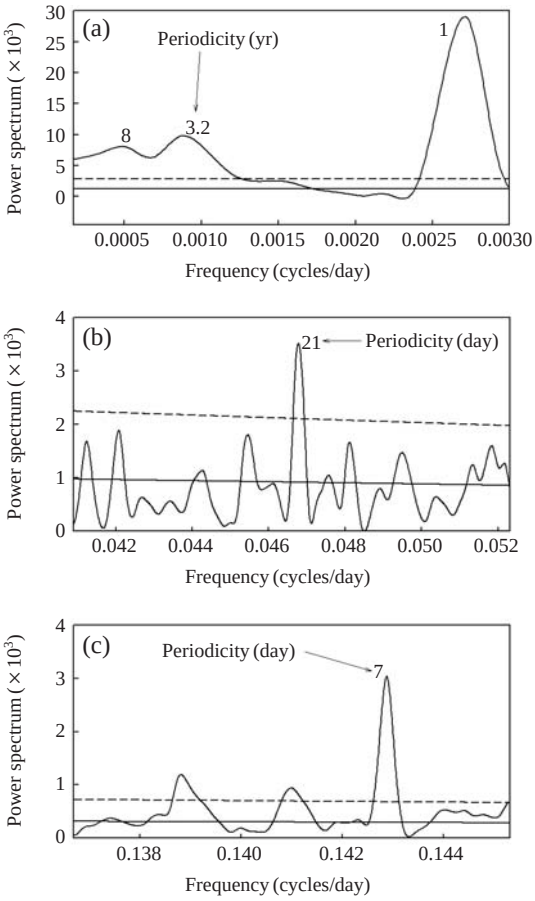

Fig. 4. Spectral peaks of PM_{10} concentration in Busan.

으로 이 역시 배출량 자체의 변화 경향으로 설명할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 이와 같이 배출량의 변화 혹은 강수 효과와 같은 기상요소의 영향은 부산지역을 포함한 대도시 시계열 먼지 농도자료 분석을 통해 충분히 설명 가능하다고 판단하여 본 연구에서는 제외한 21일과 3～4년 주기(본 연구자료 개수로 정확히 3.2년으로 계산됨)를 중점적으로 분석하였다.

그림 4는 부산지역 먼지 농도의 주기 중 7일, 21일과 3～4년 주기를 중심으로 확대하여 나타낸 그림이다. 그림 4(a)에서는 8년, 3～4년, 1년 주기의 강도를 상대적으로 비교하였는데, 3～4년 주기의 경우 1년 주기에 비해 절반 정도이지만 통계적 유의 수준 90%를 상회하였으며, 21일 주기(그림 4(b)) 또한 3～4년에 비해 상대적으로 약하게 나타났으나 통계적으로 유의한 수준으로 나타났다.

이상에서 부산지역의 먼지 농도 시계열 분석에서 나타난 여러 주기의 상대적 크기를 큰 것 순서부터 나열하고 몇 가지 energy peak의 특성을 기술하였다. 배출량과 기상현상에 의해 나타난 1년, 7일 주기, 그리고 8년 주기와 같은 현재의 자료기간(제2장 1절)으로 규명하기 힘든 주기를 제외하면, 3～4년과 21일의 주기강도가 상대적으로 매우 크게 나타났다. 본 논문에서는 현재 수집된 자료(제2장 1절)로서 분석이 가능한 3～4년과 21일 주기의 특성을 구체적으로 기술하였다. 즉, 먼지 농도 시계열 자료에 나타난 특정 주기(3～4년과 21일 주기)가 어떤 기상 변수와 연관성이 있는지를 살펴보기 위하여 수집된 여러 기상 변수와 부산지역 먼지농도 자료를 토대로 cross spectrum 분석을 반복적으로 수행하여 그 상관관계로부터 시계열 특성을 해석하였다.

3. 2 부산 지역의 먼지 농도와 기상 변수와의 상관성 분석

부산 지역의 먼지 농도 시계열자료에 나타난 3～4년과 21일 주기의 특성을 살펴보기 위하여 본 논문에 사용된 부산 지역의 PM_{10}농도가 측정된 동 기간의 기상자료들을 수집하여 시간의 순서대로 먼지 농도와 일대일로 대응시켜 cross spectrum 분석을 수행하였다. 사용된 기상 자료는 앞서 제2장 1절에 기술한 바와 같이 부산지방 기상청에서 관측한 매시간 풍속, 기온, 기압, 상대습도를 일평균하여 사용하였다.

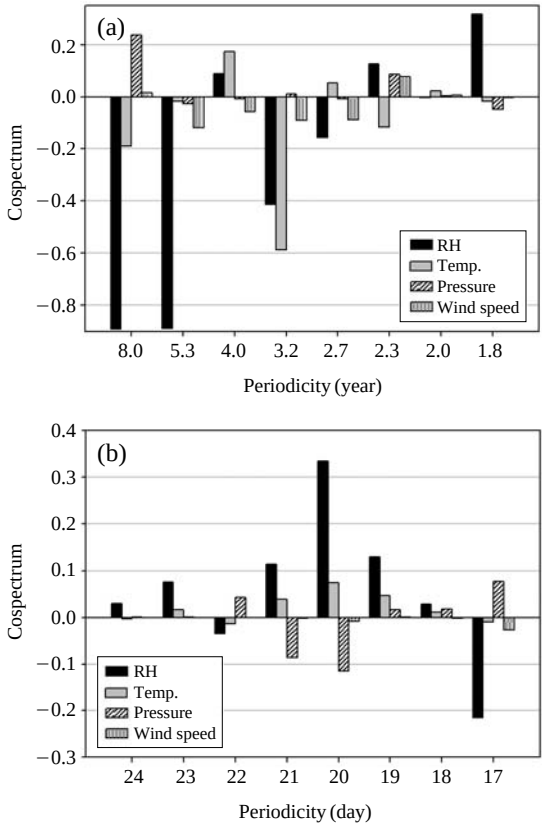

FIg. 5. Cospectrum of meteorological variables and power spectrum of PM_{10} concentration around the periodicity of (a) 3～4 year and (b) 21 day in Busan.

그림 5는 1991년부터 2006년까지 3～4년과 21일 주기를 포함한 인접한 주기에서의 부산지역의 먼지 농도와 풍속, 지상기압, 기온, 상대습도와의 cospectrum 결과를 제시한 그림이다. 그림 5(a)는 3～4년 주기와 그 인접한 주기에서의 기상변수(풍속, 기압, 기온, 상대습도)와의 cospectrum 결과를 나타내었고, 그림 5(b)는 21일 주기에서의 copsectrum 결과를 동일하게 제시하였다. 3～4년 주기를 21일 주기와 비교해 볼 때, cospectrum energy는 3～4년 주기가 21일 주기보다 기상 변수와의 상관계수가 약 10배 가까이 강하게 나타난 것을 알 수 있고, 그 경향은 온도와 상대습도에서 특히 강하게 나타난 반면, 지상기압과 풍속과의 연관성은 상대적으로 약하게 나타났다(그림 5(a)). 반면 21일 주기에서는 기상 변수 중 상대습도와의 cospectrum energy가 제일 강하게 나타났다

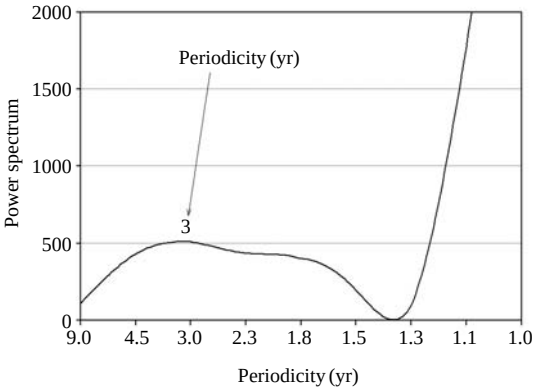

Fig. 6. Power spectrum of wind speed for the period of 1998～2006 at Asian dust source region.

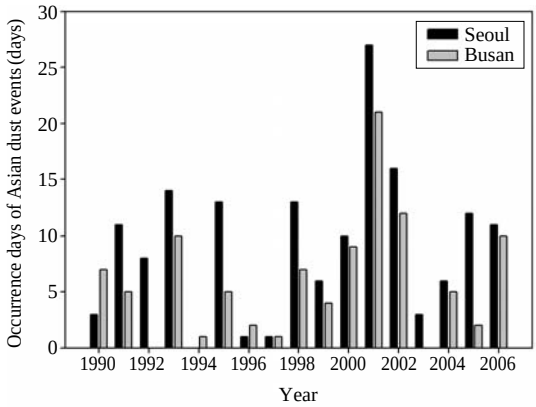

Fig. 7. Occurrence days of Asian dust events for the period of 1990～2006 in Korea.

(그림 5(b)).

첫째로, 3～4년 주기에서는 PM_{10}농도와 기압과의 cospectrum 분석결과가 양(+)의 상관관계를 보였으며, 풍속과 기온, 그리고 상대습도와의 cospectrum 분석 결과는 각각 −0.1, −0.6, −0.4로서 음(−)의 상관관계를 보였다(그림 5(a)). 여기서 풍속을 제외하고는 기온과 상대습도와의 상관관계가 −0.4 이상으로 역 상관성이 매우 높게 나타났다. 이것은 황사 발생 조건과 유사한 것으로 판단할 수 있는데, 정관영과 박순웅(1995)에 의하면, 황사 출현시 우리나라의 종관 기상 특징은 중국에서 한랭한 고기압이 발달할 시에 황사가 자주 출현하게 되고, 그 이동 고기압에 포함된 황사가 한반도로 유입된다고 보고하였다. 또 이은희 등(2003)은 황사발생시 상대습도는 40% 미만의 값을 지속적으로 나타내고 그 이상에서는 황사의 발생이 줄어듦을 보였다. 따라서 황사가 자주 발현되는 기상 조건은 기압이 높고 상대습도가 낮을 경우로 요약되며, 본 연구 결과인 부산지역의 먼지 농도 역시 기압과 양(+)의 상관관계, 상대습도와 음(−)의 상관관계를 가지는 것으로 나타난 것은 황사 발생 조건과 잘 부합되므로, 3～4년의 먼지 농도 주기는 황사의 발현과 같은 장거리 이동 현상과 연관성이 많은 것으로 판단된다.

다만 본 절에서 분석 결과로 나타난 것처럼, 부산 지역에서의 PM_{10}과 풍속의 상관관계가 음(−)의 값으로 나타난 것은, 이미 발원지에서 출발한 먼지가 수용지역인 부산 지역으로 유입되면 고기압 지배하에 부산 도심의 풍속이 약하여 오염물질의 통풍 효과가 원활하지 못한 결과에 기인한 것으로 판단된다. 반면 황사가 발현하여 한반도로 장거리 수송되기 위해서는 우리나라가 아닌 황사 발원지에서는 북서풍계열의 풍속이 강한 경우에 유리하므로, 황사의 발생 특성을 더 정확하게 분석하기 위해서 황사 발원지의 풍속자료를 수집하여 분석하였다. 발원지의 풍속자료는 WMO에 매해 보고되는 GTS 풍속자료로서, 그림 6은 1998년부터 2006년까지 9년간 자료 중 중국 발원지의 관측 자료를 발원지별로 선별하여 공간 평균한 일평균 풍속자료를 power sepctrum 분석한 결과를 제시한 그림이다. 그 결과 1년 주기를 제외하고는 황사 발원지에서의 풍속이 약 3년 주기의 강도가 제일 높은 값을 보였다. 비록 황사 발원지에서 관측된 풍속만으로 분석한 결과이지만, 결국 부산 지역에서 측정된 먼지 농도는 어느 특정 주기에서는 황사 현상을 포함한 장거리 수송에 의해 크게 영향을 받는 것으로 나타나, 황사 발원지에서의 기상 및 기후학적 특성이 한반도 대도시의 먼지 농도에 영향을 미치고 있음을 유추해 볼 수 있다.

또한 1990년부터 2006년까지 연도별 우리나라의 서울과 부산에서 발생한 황사발생일수를 그림 7에 나타내었다. 두 지역 모두 황사발생일의 연 변동성이 유사하게 나타났으나 연간 그 변동폭은 소폭 다르게 나타났다. 그러나 서울과 부산 지역 모두 1998년, 2001년, 2005년 등 황사 발생일의 주기적 변화가 최근에 더욱 뚜렷해지는 경향을 확인할 수 있으며, 이

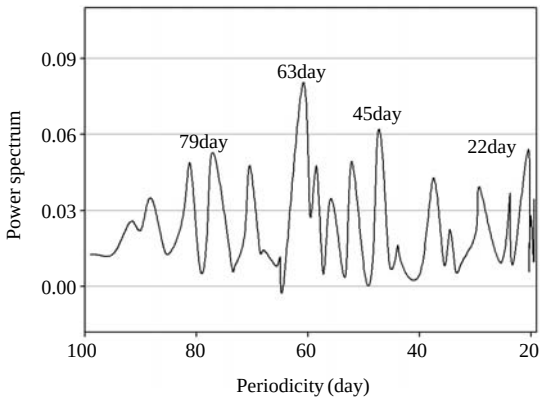

Fig. 8. Power spectrum of Relative humidity for the period of 1991～2006 in Busan.

러한 경년 변화는 결국 황사 발원지에서의 지표 특성을 설명하는 기후학적인 기상요소의 경년 변화와 연관되어 나타날 수 있음을 시사한다.

둘째로, 21일 주기에서의 부산지역 PM_{10}농도와 기상 변수들과의 cospectrum 분석에서 풍속과의 관계는 −0.001, 기압은 −0.09로서 비록 그 절대값은 작지만 음(−)의 값을 나타내었고, 기온은 0.04, 상대습도는 0.12로 나타났다(그림 5(b)). 또한 위 결과에서 다른 기상 변수들에 비해 PM_{10}농도와 상대습도가 높은 상관성을 가진 것을 볼 수 있는데, 더 정확한 결과를 제시하기 위해 부산지역 상대습도의 power spectrum 분석을 수행하였다. 그 결과 상대습도의 주기 강도가 22일, 45일, 63일, 79일 등 약 20일 간격으로 상대습도의 강약이 나타나고 있었으며, 이는 본 연구에서 나타난 21일 주기와 연관성이 있을 것으로 판단된다(그림 8). 환경부(2001)에 따르면 지상 오존 농도는 활발한 광화학 반응에 의해 생성되는데 기온이 25°C 이상, 상대습도가 75% 이하의 기상 조건에서 유리하며, 기압경도가 완만하여 풍속 4 m/s의 약풍이 지속되거나 시간당 일사량이 5 MJ/m^2 이상으로서 일사량이 많은 경우 지표 오존 농도가 높게 나타난다. 이와 같은 활발한 광화학 반응의 결과로서 핵화(nucleation)에 의해 가스상 오염물질이 입자상 오염물질로 변환되어 2차 미세먼지가 생기고, 높은 상대습도가 유지되면 응결(coagulation)하거나 성장하게 된다(Sloane and White, 1986). 또한 김지아 등(2007)의 연구에서도 대도시 PM_{10}농도가 높을수록 상대습도가 높게 나타나 이러한 대기상태일 때 PM_{10} 농도는 2차 에어로솔 생성과정과 밀접하게 연관되어 있음을 보고한 바 있다. 따라서 2차 에어로솔의 생성이 활발하기 위한 기상 조건으로서 맑은 날의 높은 기온과 높은 상대습도일 때가 유리하며, 생성된 먼지 농도는 낮은 풍속으로 그 통풍 효과가 불량할 때 대도시 먼지 농도가 높게 나타난다. 따라서 이상의 결과, 부산지역의 PM_{10}농도가 기온 및 상대습도와 양(+)의 상관관계를, 그리고 풍속과는 음(−)의 상관관계를 가지는 것은, 21일 주기의 먼지 농도는 부산지역의 가스상 물질로부터 에어로솔이 생성되는 과정과 연관되어 있음을 유추해 볼 수 있다. 이는 종관기상장의 시간 규모가 약 7일이므로 이를 분류하여 일평균 오염 농도나 최대 오염 농도 등에 대한 오염 포텐셜과의 관계를 나타낸 연구(김시완 등, 1997)와 변동 주기가 14일인 지상 기압계의 시간적인 변동 형태를 나타내는 연구 결과(임규호와 김경아, 1996)와 연관시켜 분석해 볼 때 미세먼지 농도 주기는 에어로솔 생성과정과 밀접하게 연관된 상대습도와 연관된 것으로 보이며, 이는 근본적으로 종관기상장의 주기적 변화와 복합적으로 연관된 것으로 판단된다.

4. 결 론

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 부산지역 기상 자료를 먼지 농도와 일대일 대응시켜 cross spectrum 분석을 수행하였으며 그 결과로부터 두 변수 간의 주기적 상관관계를 반복적으로 해석하였다.

그 결과 먼지농도의 배출량과 기상 변화에 의한 주기를 제외한 특징적인 주기는 약 3～4년과 21일 주기였다. 두 주기의 기상학적인 원인 및 그 특징을 규명하기 위하여 cospectrum 분석을 수행하였는데, 결과적으로 3～4년 주기는 대기 오염 물질의 장거리 수송 즉, 황사현상과 관련이 많은 것으로 판단되며, 21일 주기는 대도시 2차 에어로솔 생성 반응과 관련이 있는 것으로 나타났다. 이러한 주기의 먼지 농도

해석을 위하여 부산지역의 여러 기상요소들과의 상관성을 분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

Cross spectrum을 수행한 결과, 첫째로 3～4년 주기에서 부산지역의 PM_{10}농도와 기압은 양(+)의 상관관계, 풍속, 기온 및 상대습도는 음(−)의 상관관계가 나타났다. 결국 풍속이 강하고 상대습도가 낮을수록 황사 현상이 빈번하다는 사실에 기초하여 비록 연구에서는 풍속의 음(−)의 상관관계로 나왔지만 이것은 부산지역으로 유입된 먼지가 풍속이 약하여 통풍 효과가 원활하지 못한 것에 의한 것으로 판단되어, 황사발원지에서의 풍속을 주기 분석한 결과 약 3년 주기에서 높은 주기강도를 나타낸 것으로 보아 미세먼지의 3～4년 주기는 황사의 장거리 수송과 관련이 있는 것으로 판단하였다. 둘째, 21일 주기에서 PM_{10}의 농도와 각각의 기상변수를 cross spectrum 분석한 결과, 기온과 상대습도는 양(+)의 상관관계, 풍속은 음(−)의 상관관계로 나타났으며, 이 결과는 에어로솔이 생성될 때 기온과 상대습도가 높고, 덜 생성된 에어로솔 농도가 유지되기 위해 통풍효과가 적고 풍속이 약해야 한다는 사실에 근거하여 부산지역의 2차 에어로솔 생성 및 그 성장 과정과 연관되어 있는 것으로 판단하였다.

따라서 부산지역의 먼지농도 시계열 자료에 나타난 주기들을 해석할 때 경년 변동성 3～4년 주기는 황사를 포함한 장거리 이동과 제일 많이 관련되어 있는 것으로 보인다. 또한 황사는 기후인자 즉 발원지의 지표특성이나 강수량에 의해 주기적으로 발생할 수 있으며, 결국 기후적 측면에서 발생한 황사는 장거리 수송되어 우리나라 대도시 월평균 혹은 연평균 먼지 농도를 크게 상승시키는 주요 원인으로 작용할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 분석한 자료는 제한된 기간인 16년에 불과하지만 발원지에서 관측한 자료의 수집 및 데이터베이스 등이 지속적으로 이루어지면 보다 신뢰성이 높은 연관관계가 도출될 수 있을 것으로 사료된다. 그리고 본 논문에서 규명한 여러 주기적 현상들을 자세히 확인하기 위하여 황사발원지의 다양한 기후학적 요소들의 시계열 자료를 추가로 분석할 예정이다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2009-3212)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

김민영, 강희곤, 이상철(1989) 오존 농도의 동태 및 영향인자에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 5(2), 55-71.

김시완, 박순웅, 이보람(1997) 종관 기상장에 따른 SO_2, NO_x, CO 그리고 O_3 농도의 변화, 한국기상학회지, 33(2), 273-287.

김지아, 진형아, 김철희(2007) 부산 지역 미세먼지 농도의 시간변동 특성 및 기상인자 분석을 통한 먼지생성 해석, 한국환경과학회지, 16(10), 1157-1167.

박옥윤, 권오열 (2006) 마산과 전주지역의 대기오염농도와 기상인자의 통계분석. 한국대기환경학회 2006 춘계학술대회 논문집, pp. 412-413.

박일수, 이덕길, 강인구 (1991) 서울지역 겨울철 SO_2 농도를 지배하는 기상인자, 한국대기보전학회지, 7(2), 96-104.

신찬기, 한진석, 김윤신(1992) 대기오염농도와 기상일자의 관련성 연구, 한국대기보전학회지, 9(4), 213-220.

이은희, 인희진, 박순웅(2003) 2002년 봄철 황사 발원지에서의 먼지 발생과 기상 조건 관련성, 한국기상학회 대기지, 13(1), 246-247.

임규호, 김경아(1996) 경기 지역 대기 오염 농도의 시간 변동성과 관련된 종관 기상 상태의 전개, 한국기상학회지, 32(1), 153-167.

정관영, 박순웅(1995) 한반도에 황사 출현시의 종관 기상 특징, 한국기상학회지, 31(1), 45-63.

정용승, 정재섭(1991) 서울 수도권 지역의 광화학 오존에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 7(3), 169-179.

환경부(2001) 대기환경연보, 2000, 57-67.

Sloane, C.S. and W.H. White (1986) Visibility: an evolving issue, Environ. Sci. Technol., 20(8), 760-766.

Stull, R.B. (1988) An introduction to boundary layer meteorology, Kluwer Academic Publ., pp. 293-343.

Wilkins, E.T. (1954) Air Pollution in a London Smog, Mechancal Engineering, May, pp. 426-429.