한국환경과학회지 제21권(제2호), 189~202, 2012 http://dx.doi.org/10.5322/JES.2012.21.2.189
Journal of the Environmental Sciences

한반도내 미세먼지 발생주기의 시공간분포 특성

장재훈 · 이화운* · 이순환[1)]
부산대학교 지구환경시스템학부, [1)]부산대학교 환경연구원
(2011년 11월 7일 접수; 2011년 12월 21일 수정; 2012년 1월 26일 채택)

Spatial and Temporal Features of PM_{10} Evolution Cycle in the Korean Peninsula

Jae-hoon Jang, Hwa Woon Lee*, Soon-Hwan Lee[1)]
Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
[1)]Institute of Environmental Studies, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
(Manuscript received 7 November, 2011; revised 21 December, 2011; accepted 26 January, 2012)

Abstract

Power spectral analysis for PM_{10} observed at 10 cities in the Korean Peninsula from 2004 to 2010 was carried out to examine the spatial and temporal features of PM_{10} evolution cycle. The power spectrum analysis proposed 9 typical cycles (0.5 day, 1day, 5.4day, 8~10day, 19~21day, 26day, 56day, 180day and 365day) for PM_{10} evolution and the cycles are strongly associated with dilution and transportation due to the meterological influence. The spectrum intensity of 5.4day and 26day PM_{10} evolution cycles mainly depend on the advection cycles of synoptic pressures system and long-term variation of climatological forcing, respectively.

The intensity of PM_{10} evolution with longer temporal cycles than one day tends to be stronger in La niña period in comparison with that in El niño period. Mean of typical intensity of PM_{10} evolution in La niña period estimated to be 30% larger than El niño period. Thus the global scale meteorological phenomena such as El niño and La niña also can influence the variation of wind system in the Korean Peninsula and PM_{10} evolution. but global scale forcing tends to influence different manner for PM_{10} evolution in accordance with its temporal cycles.

Key Words : Power spectral analysis, PM_{10} concentration, Wind, Evolution cycle, Climate condition

1. 서 론

한반도의 대기환경은 최근 인구증가와 산업구조의 변화에 따라 급격하게 악화되어 왔다. 특히 서울, 부산 등 대도시는 지속적인 인구의 유입과 차량의 증가가 대기질을 악화시키는 요인으로 지목되어 왔다. 이러한 대도시의 대기오염을 줄이고 쾌적한 생활을 영위하기 위하여 정부 기관에서는 청정원료의 사용, LNG, LPG의 공급확대 등 저감정책과 배출오염물질 규제 강화를 통하여 수도권을 비롯한 한반도 7대 광역경제권내의 대기환경 개선 사업을 추진하고 있다(백과 구, 2008). 그러나 이러한 적극적인 규제에도 불구하고 도시 지역내 호흡성미세먼지(Particular matter 10 μm : PM_{10})와 같은 오염물질은 오히려 증가하는 경향을 보이고 있다(신, 2007). 최근 위해성이 급격히 증가하고 있는 미세먼지의 대부분은 자동차의 연소 과정에서

*Corresponding author : Hwa Woon Lee, Division of Earth Environmental System Pusan National University, Busan 609-735, Korea
Phone: +81-51-583-2651
E-Mail: hwlee@pusan.ac.kr

발생하며, 특히 교통수단에서 발생하는 PM_{10}은 오스트리아, 프랑스 그리고 스위스에서는 전체 사망자수의 6%를 차지하는 원인이 되며, 만성기관지염과 천식과 같은 호흡기성 질병을 일으킨다(Künzil 등 2000).

미세먼지는 자연적, 인위적, 그리고 2차적인 기원 등 다양한 경로를 통하여 생성된다. 또한 미세먼지는 체류시간이 길기 때문에 중위도 편서풍대에 위치한 한반도의 경우 장거리 수송에 의한 영향도 매우 크게 나타난다(손과 김, 2009). 그리고 지역적 분포도 다양하여 해안과 내륙 지역의 국지적 바람 조건에 따라 PM_{10}의 농도 경향이 달라질 수 있다(송 등, 2008; 이 등, 2010). 대기 중에 비산한 PM_{10}은 단순히 중규모의 바람장뿐 아니라 종관규모 이상의 바람에도 영향을 받는다. 특히 황사와 같이 국경을 넘어 장거리 수송에도 종관 규모 이상의 바람장이 작용한다(김과 이, 2009; Chun 등, 2001; Jo와 Kim, 2010).

이러한 장거리 수송에 영향을 미치는 종관규모 기류는 지구규모 기류와 상호 관련성을 가지는데 이 등(2011)은 동태평양 상에서 양의 해수온도 아노말리가 시작되면 한반도의 풍속이 감소하고, 반대로 음의 아노말리는 풍속을 증가하는 경향성이 있음을 제시하였다. 이러한 결과를 바탕으로 엘니뇨와 라니냐 같은 준지구규모의 역학과정이 한반도 전체의 종관적인 바람장에 영향을 미칠 개연성이 높다고 분석하였다.

PM_{10}의 공간 분포는 중규모뿐 아니라, 종관규모의 역학적인 특성이 반영되고 지역적으로 변화경향성의 차이가 나타날 수 있고 대기오염 방지 차원에서 특정 대도시의 개별적인 연구는 진행되었으나, 한반도 전체의 공간분포를 장기적으로 분석한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 장기 관측자료를 바탕으로 시계열 분석 중 주기분석 패턴이 정확히 도출되는 파워스펙트럼(power spectrum)분석을 이용하여 한반도 10개 도시에서 미세먼지의 변동특징을 시 공간적 발생주기를 분석하였다. 특히 종관규모 이상의 바람장에 따른 영향을 파악하기 위하여, 엘니뇨와 라니냐 발생기간에 따른 미세먼지 변동특성을 분석하였다.

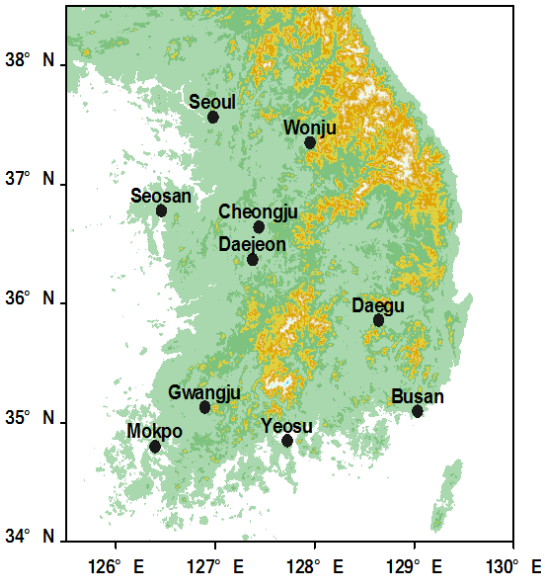

Fig. 1. Location of PM_{10} monitoring stations and topography of the Korean Peninsula. 10 stations are used in the spectral analysis.

2. 자료 및 방법

2.1. 분석 자료

환경부에서 관리하는 대기오염 자동관측망은 2010년 12월말 기준 90개 시 · 군에 440개소가 구축되어 다양한 형태의 미세먼지 자료를 생산하고 있다. 본 연구에서는 관측자료 중 10개 도시대기 측정망의 매시간 PM_{10}농도를 분석에 이용하였으며, 자료의 기간은 2004년에서 2010년까지 7년이다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 자료의 관측위치를 나타낸 것으로, 대도시에 속하는 서울, 부산, 대구, 대전, 광주지역과 중소도시에 해당하는 목포, 서산, 청주, 원주, 여수 등 총 10개 지역이다. 이들 지역 내에는 다수의 미세먼지 관측지점이 있으나, 본 연구는 미세먼지 분포의 기상학적인 영향을 분석하는데 주목적이 있기 때문에 10개 도시내 기상관측지점에 가장 근접한 미세먼지 관측지점 자료를 이용하였다.

관측지점에 따라 해안지역과 내륙지역으로 분류하였는데, 해안에서 50 km 이내에 위치하는 서울, 부산, 목포, 여수, 서산을 해안지역으로 구분하고, 50 km 이상 떨어진 대구, 광주, 대전, 청주, 원주를 내륙지역으

로 구분하여 분석하였다. 이러한 과정에서 10개 관측지점은 서소문동(서울), 광복동(부산), 만촌동(대구), 구성동(대전), 농성동(광주), 중앙동(원주), 송정동(청주), 용당동(목포), 원래동(여수), 동문동(서산)이다. 그리고 각 관측소의 결측이 20일 이상 되는 경우 관측소에서 가까운 지점인 태종대(부산), 신암동(대구), 내덕동(청주), 나불리(목포), 삼일동(여수), 독곶리(서산)의 관측소 자료를 이용하였다. 20일 미만의 결측자료는 선형내삽을 이용하여 분석하였다.

분석에 사용한 기상자료는 자료의 신뢰성을 확보하기 위하여 유인 기상대급 이상의 자료를 사용하였으며, 자료의 기간은 미세먼지 관측기간과 동일한 2004년부터 2010년 까지 7년으로 설정하였다. 분석자료는 기온, 풍속, 습도 자료이며, 본 연구에서는 풍속자료를 중심으로 분석하였다.

2.2. 자료 분석 방법

한반도내 지역별 미세먼지의 발생 주기는 파워스펙트럼을 통한 시계열 분석을 적용하였다. 파워스펙트럼을 이용한 시계열 자료의 주기분석은 어떤 자료가 과거 관찰값들의 변화 패턴과 비슷하게 현재 시점 이후에도 반복될 것이라는 전제 아래 그 반복 구간을 규명하는 것으로서 그 경과를 향후 시점의 값을 예측하는 데에도 사용될 수 있는 기법이다. 특히 파워스펙트럼 분석은 주기분석 중 가장 강도가 높은 주기를 판별하여 제시하는 방법으로 많은 기상학적인 현상 및 환경오염 자료 분석에 적용되어 왔다(손과 김, 2009; 이와 박, 1999; Choi 등, 2008; Hies 등, 2000; Salcedo 등, 1999).

본 연구에서는 Blackman과 Tukey(1958)에 의해 제안된 파워스펙트럼 분석법을 적용하였다. 이 방법은 어떤 신호가 시차(lag) k를 가질 때 분산을 나타내는 자기공분산(autocovariance)을 분석한다. 이때 시간 간격이 Δt로 일정하고 자료의 개수가 N개인 관측된 신호 x(t)의 자기공분산의 비편향추정값(unbiased estimator)은 (1)과 같다.

$$cov_{xx}(k) = \frac{1}{N-k-1}\sum_{t=1}^{N-k}(x_i - \overline{x})(x_{i+k} - \overline{x}) \quad (1)$$

자기공분산을 x(t)의 분산 σ^2로 나누면 자기상관함수(autocorrelation function)를 얻게 된다. 자기상관함수는 시계열자료에 대한 시차가 k가 주어졌을 때 자기 자신과의 상관계수를 구하는 것이다.

$$corr_{xx}(k) = \frac{cov_{xx}(k)}{cov_{xx}(0)} = \frac{cov_{xx}(k)}{\sigma_x^2} \quad (2)$$

Blackman-Tukey 방법은 (2)와 같은 자기상관함수의 복소 푸리에 변환을 사용한다.

$$X_{xx}(f) = \sum_{k=0}^{M} corr_{xx}(k) e^{i2\pi fk/f_s} \quad (3)$$

이때, M은 시차의 최대값이고 fs는 표본추출도수이다. Blackman-Tukey 파워스펙트럼 밀도(power spectral density : PSD)를 다음과 같이 추정한다.

$$PSD_{xx}(f) = |X_{xx}(f)| \quad (4)$$

실제로 통계 프로그램에선 빠른 푸리에 변환을 사용한다. 그리하여 각 주기에 PSD를 구하고 PSD 중 크게 나타나는 정상점이 보인다. 이 정상점들이 모두 유의하다고 할 수 없으므로 유의성 검정을 통하여 해당 주기의 유의성을 통계적으로 판단하였다(Trauth, 2009).

3. 결과 및 고찰

3.1. 장기관측 자료를 이용한 PM_{10} 발생 주기분석

먼저 전체적인 PM_{10}의 분포를 파악하기 위하여 한반도내 10개 관측지점에서 관측된 PM_{10}의 7년 평균농도와 표준편차를 살펴보았다(Table 1). 가장 높은 평균 농도는 강원도 원주의 64.39 μg/m^{3}이며, 가장 낮은 농도는 43.40 μg/m^{3}로 광주광역시에서 관측되었다. 전체 분포를 보면 한반도 중부 내륙에 위치한 원주와 청주와 대도시인 서울, 부산이 평균치(53.67 μg/m^3)보다 높게 나타나고, 여수, 서산, 대전 등이 전체 평균 보다 낮게 나타난다.

한반도는 편서풍이 지배적으로 작용하기 때문에 평균 바람은 서쪽에서 동쪽으로 불어온다. 따라서 상

대적으로 풍상측에 해당하는 한반도 서쪽과 동쪽지역의 PM_{10}의 분포가 다르게 나타날 수 있다. 중부내륙인 원주와 청주는 비록 발생원이 되는 산업 및 교통 시설은 다른 지역에 비하여 상대적으로 부족하지만, 중위도 편서풍대에 위치한 한반도 특히 중부 내륙인 원주와 청주는 편서풍의 풍상측에 서울, 인천 등 수도권이 위치하기 때문에 이들 지역에서 발생한 PM_{10}의 이류에 대한 영향으로 판단된다(Hies 등, 2000). 그리고 여수, 서산 등 서해안 지역의 낮은 PM_{10} 농도는 해풍의 풍상측에 바다가 위치하여 상대적으로 미세먼지가 작은 청정한 공기가 유입되기 때문에 낮은 PM_{10} 농도를 나타낸다.

PM_{10}의 표준편차를 보면, 서울이 50.62 μg/m^3 으로 가장 높았고, 서산이 40.30 μg/m^3 으로 가장 낮게 나타났다. 이것은 서울의 경우 PM_{10}의 주요 발생원이 위치하고 있으며, 이들의 계절적, 종관적 기상상태에 따른 발생량의 변화가 크게 나타남을 의미한다. 또한 서울 지역의 큰 변동성으로 인하여 풍하측에 위치한 원주와 청주에서도 큰 표준 편차치를 나타낸다.

Table 1. Mean and Standard Deviation of PM_{10} in ten cities in the Korean Peninsula from 2004 and 2010

Station	Mean value (μg/m^3)	Std. Deviation (μg/m^3)
Seoul	60.69	50.62
Busan	59.79	42.91
Daegu	49.62	41.51
Daejeon	46.71	37.80
Gwangju	45.40	40.65
Wonju	64.39	49.02
Cheongju	62.59	43.99
Mokpo	53.43	40.67
Yeosu	47.16	41.62
Seosan	46.90	40.30
Mean	53.67	42.91

Fig. 2는 한반도내 10개 도시의 7년 동안 PM_{10} 발생 주기에 대한 시계열을 나타낸 것이다. 가로축은 파워스펙트럼 분석을 통하여 산출된 진동수의 역수 즉 주기를 나타낸다. 그리고 세로축은 파워스펙트럼 밀도 즉 주기가 나타나는 강도를 의미한다. 그리고 발생주기에 따라 다양한 강도가 나타나는데 이러한 스펙트럼 강도의 유의성 검토를 위하여 auto-correlation을 이용하여 적색 잡음(red noise)을 산출하였다. 그림상의 굵은 선으로 표시된 것이 적색잡음의 경계를 나타낸다. 이 경계치 아래의 스펙트럼 강도는 통계적으로 유의성이 없는 것으로 판단한다.

스펙트럼 강도의 차이는 있지만 한반도 10개 도시의 PM_{10} 발생 주기는 0.5일, 1일, 5~7일, 8~10일, 19~21일, 26일, 56일, 180일, 365일 등 9개의 주기에서 강하게 나타나는 경향이 있다. 이전 연구에서도 동일한 주기가 제시되었는데, Kim과 Son(2011)은 계절별 대도시의 배출량의 계절 변화 경향, 즉 겨울철 난방사용량의 증가, 장마와 같은 강수 과정이 집중된 여름에 집중되어 오염물질의 세정 효과가 극대화 되는 점과 봄철에 집중되는 황사가 반복되어 365일 주기 그리고 180일 주기가 나타나는 요인이 될 것이라고 제시하였는데, 본 연구에서도 모든 도시에서 동일한 365일과 180일 주기를 가진 PM_{10}의 발생이 뚜렷하게 나타난다.

0.5일과 1일의 발생 주기는 도시지역 출퇴근 등 교통 환경과 중규모 기상의 순환과 관련된 것으로 보인다(진 등, 2003). 5.4일 주기의 PM_{10} 농도변화는 전형적인 중위도의 기압골이 통과하는 주기와 일치하기 때문에 이들 종관적인 변화에 의존하는 것으로 보인다. 또한 8~10일 주기의 PM_{10} 농도변화도 종관적인 변화에 의존하는 것으로 보인다. Chen 등(2008)과 Peng 등(2011)의 연구에서 지역오염물질과 종관 기압패턴과의 관계에 대해 말하고 있으며, 결론적으로 5.4일 주기와 8~10일 주기의 종관적인 변화인 종관 기압패턴은 지역오염물질과의 상관성을 가지고 있음을 말해준다.

21일 주기의 PM_{10} 농도는 지역의 2차 에어로졸 생성과정과 연관이 되어있고, 2차 에어로졸은 기온, 상대습도, 바람에 의해 밀접하게 관련이 있다(손과 김, 2009). 26일 주기의 PM_{10}은 준지구규모의 기후학적

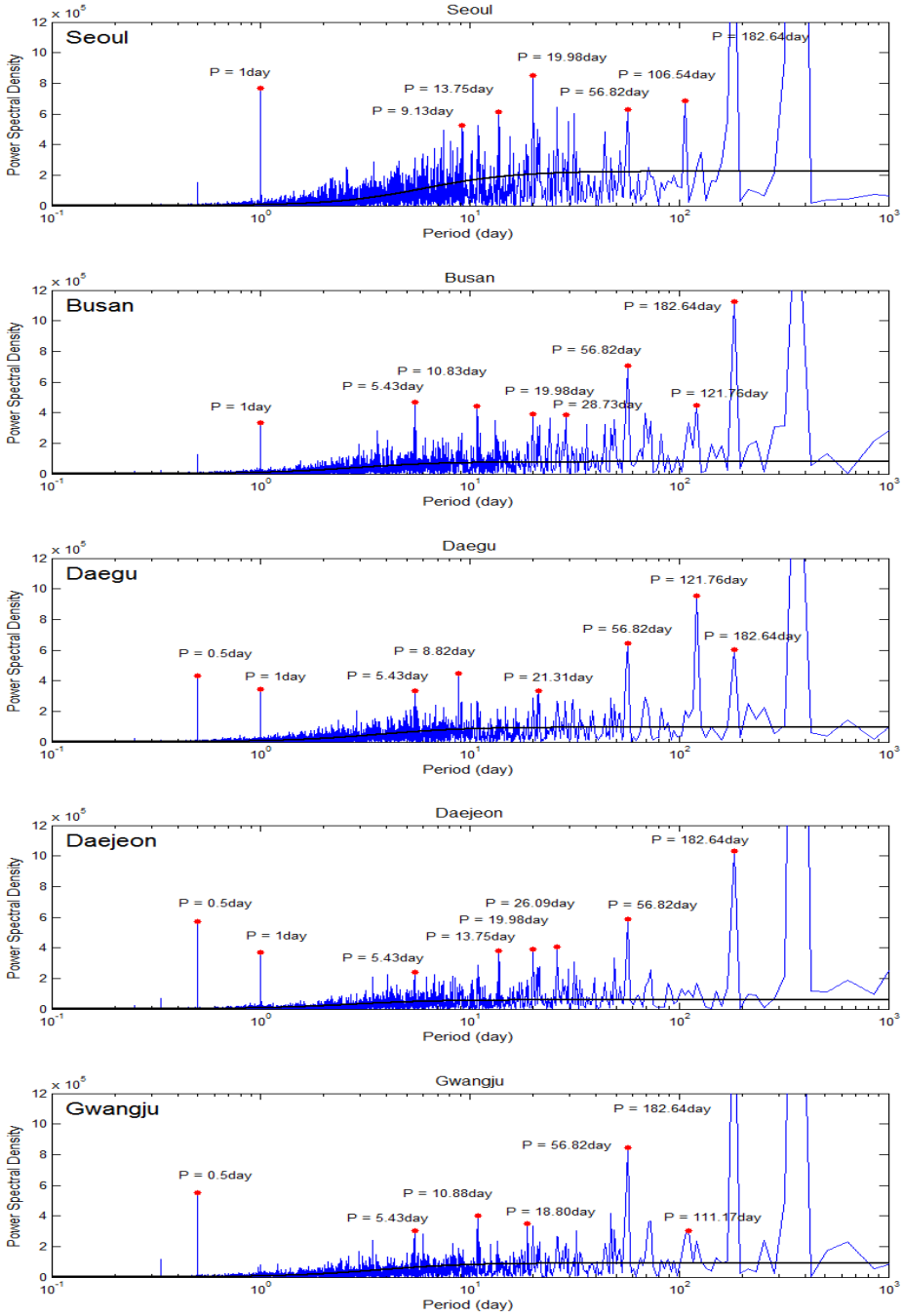

Fig. 2. Time series of spectrum power density of PM_{10} concentration in Seoul, Busan, Daegu, Daejeon, Gwangju, Wonju, Cheongju, Mokpo, Yeosu, Seosan from 2004 and 2010. X and Y axises mean the temporal cycles of PM_{10} evolution and intensity of power spectrum, respectively. Thick solid lines in the each figure indicate the red noise of PM_{10} concentration.

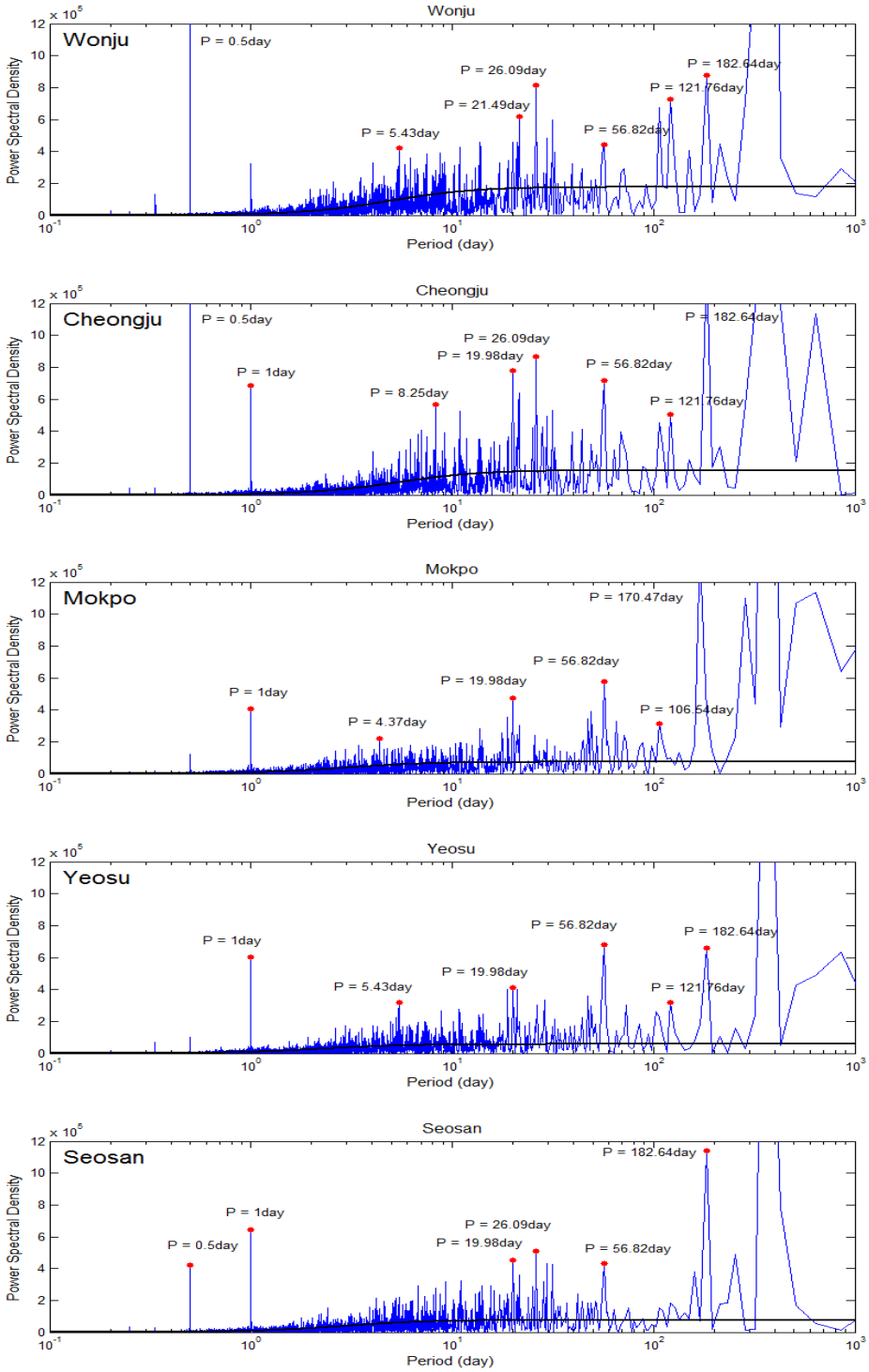

Fig. 2. (Continue).

인 요인에 의한 장거리 PM_{10} 수송의 영향으로 설명할 수 있다(김과 이, 2009; Hies 등, 2000; Jo와 Kim, 2010). 56일 주기의 경우, 월 및 계절변화와 관련되어 나타나는 주기로 판단된다(Zhang 등 2010). 이러한 주기들 가운데 본 연구에서는 56일 주기이하의 바람의 영향을 받는 주기에 대해서 비교 분석하여 특징을 살펴보겠다.

각 지역별 PM_{10} 발생 주기를 정량적으로 비교하기 위하여 파워스펙트럼 강도를 비교하였다. 그러나 파워스펙드럼의 강도의 값이 매우 크기 때문에 각 주기의 파워스펙트럼 강도를 평균하고, 각 주기의 스펙트럼 강도를 평균으로 나누어 무차원화하였다. 즉 값이 1보다 크면 평균이상의 강도를 가진 주기를 의미하며, 1보다 작은 경우 평균이하의 강도를 발생주의를 의미한다. 각지역별 무차원화된 스펙트럼 강도를 나타낸 것이 Table 2이다. 서울, 부산 목포를 제외한 모든 지역에서 0.5일과 1일 주기가 가장 강하게 나타난다. 비록 최고 강도는 아니지만 서울, 부산, 목포에서도 1일 주기의 스펙트럼 무차원 강도가 모두 1을 넘는다. 따라서 한반도내 모든 지역에서는 0.5일과 1일 주기로 발생하는 PM_{10} 발생이 주요요인으로 작용한다는 것을 의미한다. 특히 내륙에 위치한 원주, 청주, 광주, 대전, 서산은 무차원 스펙트럼 강도가 1.5 이상으로 매우 높게 나타난다.

0.5일과 1일 주기의 발생은 각각 교통량 주기와 중규모 기상장의 주기에 기인하는 것으로 판단된다. 이 두 가지 요인의 강도를 비교하기 위하여 1일 주기의 스펙트럼 강도를 0.5일 주기의 강도로 나누어 나타낸 것이 Fig. 3 이다. 서울, 부산, 여수, 목포, 서산이 1일 주기의 강도가 강하게 나타내며 광주, 원주, 청주, 대전, 대구가 0.5일 주기가 강하게 나타난다. 이것은 해안에 위치한 지역의 경우, PM_{10}의 발생 주기는 해륙풍에 의한 1일 주기의 중규모 순환장이 교통량에 의한 발생 주기보다 중요한 요인으로 작용함을 의미한다. 반면 내륙지역의 경우 교통량에 의한 PM_{10}이 중규모 요인보다 중요하게 작용한다. 즉 내륙지역의 경우 전체 PM_{10}의 제어는 교통에 의한 요인을 조절하는 것이 중요함을 의미한다.

Table 2. Spectrum power density and its normalized value for six major cycles of PM_{10} concentration in 10 cities

Station Name	**Frequency**					
	26.1	19-21	8-10	5.4	1.0	0.5
Seoul	643833	851677	523532	315063	766884	151400
	1.2	1.6	1.0	0.6	1.4	0.3
Busan	133819	391289	441917	469637	331854	125798
	0.4	1.2	1.4	1.5	1.1	0.4
Daegu	268880	332770	445557	335728	341789	447791
	0.7	0.9	1.2	0.9	1.0	1.2
Daejeon	407449	391774	288510	242375	368738	572047
	1.1	1.0	0.8	0.6	1.0	1.5
Gwangju	266002	332597	402848	302967	82485	551209
	0.8	1.0	1.2	0.9	0.3	1.7
Wonju	815121	617278	428929	421376	321726	1800787
	1.1	0.8	0.6	0.6	0.4	2.5
Cheongju	865765	776266	523465	268971	685813	1368818
	1.2	1.0	0.7	0.4	0.9	1.8
Mokpo	116022	472098	193672	107412	407786	30797
	0.5	2.1	0.9	0.5	1.8	0.1
Yeosu	132159	409186	266788	317809	602710	102336
	0.4	1.3	0.9	1.0	2.0	0.3
Seosan	512020	450353	317509	187704	645464	422703
	1.2	1.1	0.8	0.4	1.5	1.0

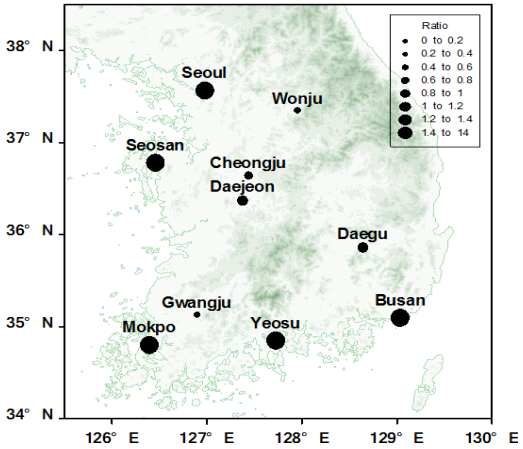

Fig. 3. Normalized spectrum power density between half and one day cycle of observed PM_{10} concentration in 10 cities.

종관규모의 PM_{10} 발생 주기의 공간 특성을 보기 위하여 5.4일 발생주기의 파워스펙트럼 강도를 나타낸 것이 Fig. 4이다. 부산, 원주, 대구가 강하게 나타나고, 목포 서산 등이 매우 약한 주기강도를 가진다. 분포상 편서풍의 풍하측에 위치하는 지역에서 강한 스펙트럼 강도가 나타나고, 풍상측에서 약한 강도가 나타난다. 따라서 5.4일 주기의 PM_{10} 발생 강도는 종관적인 고·저기압의 이동과 관련된 것으로 판단된다. 즉 종관규모의 편서풍 이동은 풍하측에서 PM_{10}의 발생에 크게 영향을 미친다고 볼 수 있다.

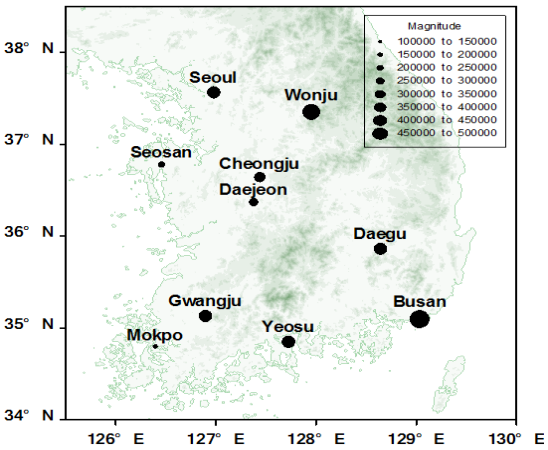

Fig. 4. Magnitude of spectrum power density for 5.4 day cycle of observed PM_{10} concentration in 10 cities.

Fig. 5는 26일 주기 PM_{10} 발생에 관한 스펙트럼 강도를 나타낸 것이다. 그림에서 보면, 상대적으로 고위도에 위치하는 원주 청주, 서울, 서산이 높게 나타나고, 저위도에 위치하는 부산, 여수, 목포, 광주, 대구가 약한 스펙트럼 강도를 가진다. 이러한 위도에 따른 명확한 분포 특성은 26일 주기가 종관장에 의한 영향보다는 기후학적인 영향이 크게 작용한다는 것을 의미한다. 종관장은 편서풍대의 이동을 바탕으로 동서 방향으로 특성이 나타나지만, 기후학적인 요인은 위도에 따른 남북 방향의 변동성이 크다. 또한 종관장에 의한 영향보다 큰 시간 규모로 나타난다. 결과적으로 26일 PM_{10} 발생주기의 경우, 남북방향의 변동성이 크다는 측면과 큰 시간 규모의 측면에서 준지구규모의 기후학적인 발생요인에 의한 장기수송으로 판단된다.

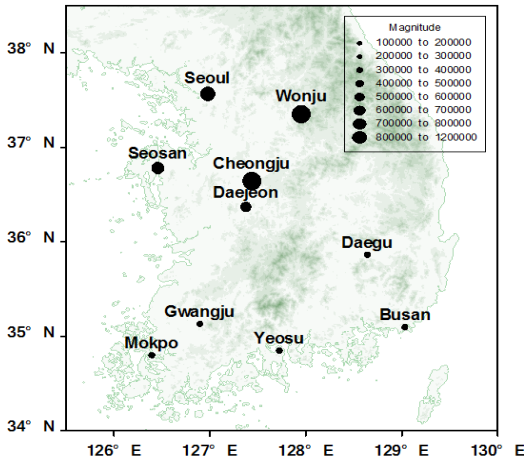

Fig. 5. Same as Fig.4 except for 26 day cycle.

3.2. 엘니뇨/라니냐에 따른 PM_{10} 분포 특성

준지구규모의 역학과정이 종관 규모이하의 바람장에 미치는 영향 명확히 살펴보기 위하여 엘니뇨와 라니냐 기간 동안 PM_{10} 발생주기에 관한 분석을 실시하였다. Fig. 6은 엘니뇨 감시구역(5°S~5°N, 170°W~120°W)에서 2004년부터 2010년까지 관측한 해수면 온도 아노말리를 나타낸 것이다. 동태평양상의 해수면 온도 아노말리를 보면, 음의 값과 양의 값이 반복적으로 나타난다. 2004년과 2005년에 강한 양의 아노말리 즉 엘니뇨가 발생하였으며, 2007년과 2008년 사이

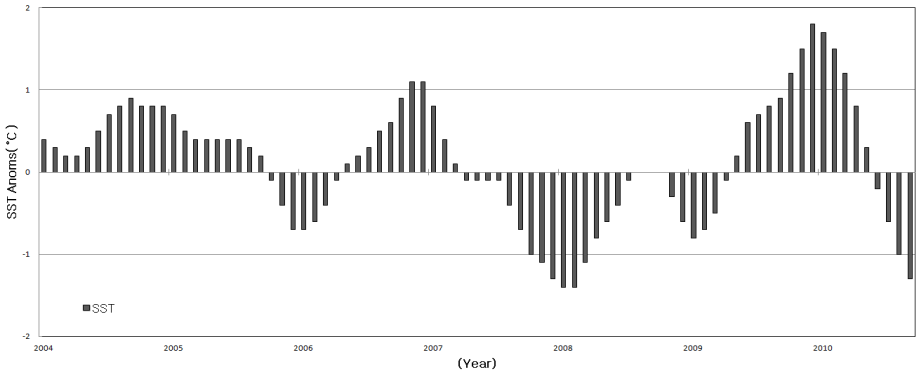

Fig. 6. Temporal variation of sea surface temperature anomalies over El Niño observation site (5°S~5°N, 170°W~120°W).

에 강한 음의 아노말리가 나타난다. 따라서 본 연구는 2004년 1월부터 2005년 12월까지 동태평양의 수온 아노말리가 증가하는 엘니뇨 기간으로 선정하였고, 2007년 4월부터 2009년 3월까지 해수면 아노말리가 음인 라니냐 기간으로 정하였다.

엘니뇨/라니냐 발생 기간 중 10개 도시의 PM_{10} 농도를 대상으로 파워스펙트럼 분석을 실시하여 강도를 분석하였다(Fig. 7). 스펙트럼 강도가 강한 주기는 앞서 보인 2004년부터 2010년까지 7년 분석 자료와 거의 유사하게 나타났다.

엘니뇨와 라니냐에 따른 PM_{10} 농도 주기의 강도변화를 보면, 엘니뇨에 비하여 라니냐 기간 동안 전체적인 스펙트럼 강도가 크게 나타난다. 특히 1일 이상의 주기에서 강도가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 6개의 주요 주기뿐 아니라 전체적인 주기 강도가 강하게 나타난다. 반면 청주와 원주를 제외한 모든 지역에서 1일 이하의 주기를 가진 스펙트럼 강도가 반대로 엘니뇨 기간 중에 강하게 나타난다.

Table 3. Spectrum power density and its normalized value for six major cycle of PM_{10} concentration in 10 cities during El Niño period

Station Name	Cycle of PM_{10} Concentrations during El Niño period (day)					
	26-34	**19-21**	**8-10**	**5-7**	**1**	**0.5**
Seoul	401596	491207	530513	503491	586998	65034
	0.9	1.1	1.2	1.2	1.4	0.2
Busan	211694	269791	102927	88143	186512	65946
	1.4	1.7	0.7	0.6	1.2	0.4
Daegu	57835	160421	72941	80877	326002	166537
	0.4	1.1	0.5	0.6	2.3	1.2
Daejeon	98661	266606	128195	176646	205720	241500
	0.5	1.4	0.7	0.9	1.1	1.3
Gwangju	125713	195287	145693	54651	6789	129252
	1.1	1.8	1.3	0.5	0.1	1.2
Cheongju	198683	520465	271679	155859	275429	437514
	0.6	1.7	0.9	0.5	0.9	1.4
Mokpo	207301	437305	283422	202225	21958	125345
	1.0	2.1	1.3	0.9	0.1	0.6
Seosan	148345	227128	164410	133120	155048	221720
	0.8	1.3	0.9	0.8	0.9	1.3
Yeosu	175423	309905	101852	90843	185169	30022
	1.2	2.1	0.7	0.6	1.2	0.2
Wonju	242425	412642	200137	169567	81102	475398
	0.9	1.6	0.8	0.6	0.3	1.8

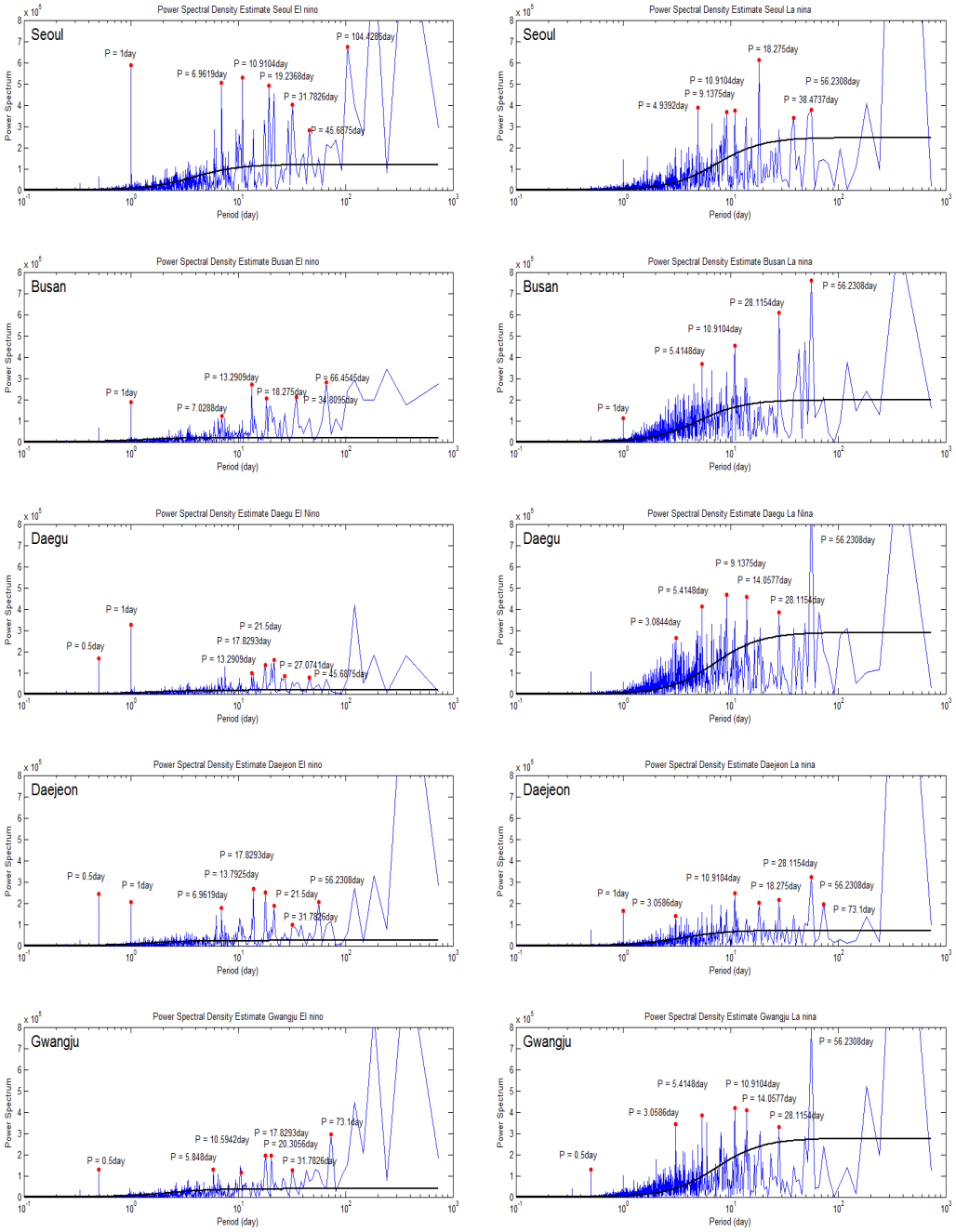

Fig. 7. Same as Fig. 2 except for PM_{10} concentration observed for 2004.01-2005.12 on the left panels and 2007.04-2009.03 on the right panels.

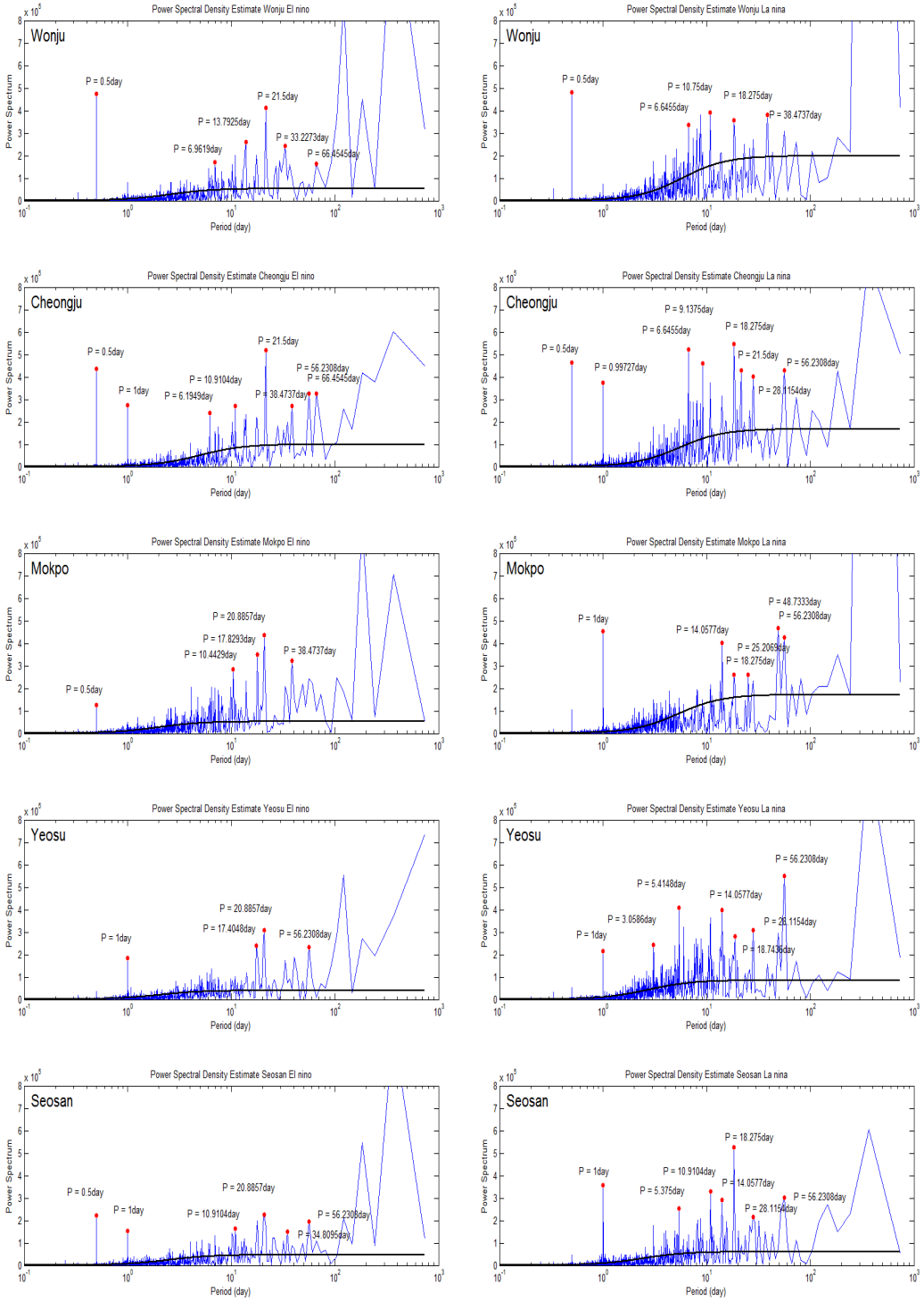

Fig. 7. (Continue)

Table 4. Same as Table 3 except for La Niña period

Station Name	Cycle of PM_{10} Concentrations during La Niña period (day)					
	26-34	19-21	8-10	5-7	1	0.5
Seoul	284953	610845	373457	106310	143331	14553
	1.1	2.4	1.5	0.4	0.6	0.1
Busan	607203	298691	454782	365617	111468	25743
	2.0	1.0	1.5	1.2	0.4	0.1
Daegu	382951	456189	341600	413730	58176	106082
	1.3	1.6	1.2	1.4	0.2	0.4
Daejeon	217159	203272	246814	135719	165268	73931
	1.3	1.2	1.4	0.8	1.0	0.4
Gwangju	329607	408933	419923	385774	100527	128178
	1.1	1.4	1.4	1.3	0.3	0.4
Cheongju	400752	545718	375331	147800	352520	462081
	1.1	1.4	1.0	0.4	0.9	1.2
Mokpo	233349	402972	215365	155368	451868	104282
	0.9	1.5	0.8	0.6	1.7	0.4
Seosan	216021	525602	329183	46742	355990	40269
	0.9	2.1	1.3	0.2	1.4	0.2
Yeosu	310129	397875	363908	409659	216209	53793
	1.1	1.4	1.2	1.4	0.7	0.2
Wonju	271734	356163	391154	109469	75543	480948
	1.0	1.3	1.4	0.4	0.3	1.7

1일 이상의 주기와 이하의 주기가 엘니뇨/라니냐 기간에 따라 다르게 나타는 것은 엘니뇨/라니냐와 같은 준지구규모 역학이 종관규모 이상의 주기성 기상현상에 영향을 미치고 이에 따라 PM_{10} 변동성이 변하는 것으로 이해할 수 있다. 한반도내에서는 엘니뇨 기간 중에 종관규모 이상의 풍속이 약화되고, 반대로 라니냐 기간 중에는 강화되는 경향이 있다(이 등, 2011). 결과적으로 이러한 종관 규모 이상의 변동에 엘니뇨 기간에는 단주기 성분인 0.5일과 1일, 라니냐 기간 중에는 장주기 PM_{10} 발생 성분인 6개의 주요 주기가 강화된다고 볼 수 있다.

두 가지 기후학적인 현상에 따른 PM_{10} 발생 주기의 정량적인 평가를 위하여 각도시의 주요 6개 PM_{10} 발생 주기에 대한 강도와 앞서 사용하였던 무차원 강도를 Table 3과 4에 제시하였다. 엘니뇨 기간 중에는 무차원 스펙트럼 강도가 평균 이상의 강도(표에서 음영이 있는 부분)를 갖는 주기에서 다양하게 분포한다. 전체적으로 19일~21일 주기가 강하게 나타나지만, 1일과 0.5일 주기도 평균보다 높은 강도로 나타난다. 그러나 라니냐 기간 동안에는 모든 지역에서 7일이상의 주기에서 평균 보다 높은 강도가 나타난다. 즉 중규모 및 미규모의 주기보다는 종관규모 이상의 주기에서 강한 주기성이 나타난다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 라니냐기간동안 종관규모 이상의 평균 풍속이 강해지는 경향이 나타나는데, 이러한 경향성이 PM_{10}의 발생 주기에도 영향을 미친 것으로 판단된다.

Table 5는 엘니뇨와 라니냐 기간 중에 나타난 주요 주기의 파워스펙트럼 강도의 평균과 그 차이를 나타낸 것이다. 비록 서울, 대전의 경우 엘니뇨 기간의 강도가 약간 강하게 나타나지만 전체적으로 라니냐 기간 중 PM_{10}의 발생 주기가 엘니뇨 기간의 발생 주기 강도에 비하여 약 31% 강하게 나타난다. 이것은 엘니뇨와 라니냐 기간의 바람장과 온도장의 차이에 의한 것으로 판단된다.

Table 5. The mean and difference of spectrum power density for six major cycle of PM_{10} concentration in 10 cities during El Niño and La Niña period

	Power Spectrum Density		
Station Name	**(a)El niño**	**(b)La niña**	**difference (a-b)**
Seoul	429806	255575	174232
Busan	154169	310584	-156415
Daegu	144102	293121	-149019
Daejeon	186221	173694	12528
Gwangju	109564	295490	-185926
Wonju	263545	280835	-17290
Cheongju	309938	380700	-70762
Mokpo	212926	260534	-47608
Yeosu	148869	291929	-143060
Seosan	174962	252301	-77339
Mean	213410	279476	-66066

4. 결 론

최근 대기오염의 주요 물질로 부상하고 있는 미세먼지는 사람들의 호흡기 질환과 정밀기기산업의 공정오차를 증가시키는 요인이 된다. 따라서 한반도내 다양한 형태로 나타나는 미세먼지의 시간 변동성을 파악하여 이들 장·단기 예측가능성을 높이는 것이 중요하다. 본 연구는 한반도내 주요 도시에서 발생하는 미세먼지의 발생 주기 특성과 이들의 변동 특성을 살펴보기 위하여 2004년 1월부터 2010년 12월 까지 한반도내 10개 자동 관측소에 측정한 매시간 PM_{10} 농도를 분석하였다. 각 도시에서 관측된 매시간 자료를 이용하여 파워스펙트럼 강도 분석을 실시하였으며, 발생하는 다양한 주기의 PM_{10} 농도를 도시별 상호 비교하여 PM_{10} 발생주기의 공간적인 차이를 살펴보았다.

PM_{10} 농도의 파워스펙트럼 분석결과 아래와 같은 결론을 도출하였다.

1) 1일 주기의 PM_{10} 발생 스펙트럼 강도는 해안지역에 위치한 도시에서 강하게 나타나며, 반대로 0.5일 주기의 발생강도는 내륙에 위치한 도시에서 강하게 나타났다. 해안지역도시의 경우 1일 주기를 가진 해륙풍의 순환이 PM_{10} 발생주기에 중요한 요소이나, 내륙지역도시에서는 0.5일 주기인 교통량 변동이 PM_{10} 발생주기에 중요하게 작용하기 때문으로 판단된다.

2) 편서풍지대에 위치한 지리적 특성상 한반도내 상대적으로 풍하측에 위치한 도시에서 종관기압계의 이동 주기와 유사한 5.4일 주기의 PM_{10} 발생 스펙트럼 강도가 강하게 나타났다. 상대적으로 풍상측에 위치한 지역에서 발생한 PM_{10}의 이류 특성에 기인한 것으로 보인다.

3) 고위도에 위치한 도시에서는 26일 주기의 강한 PM_{10} 발생 스펙트럼 강도가 나타나며, 이주기의 강도는 위도에 따라 명확하게 구분되는 특성이 나타난다. 이 주기는 고·저기압 등 종관장에 의한 영향보다 이보다 큰 시간 규모로 작용하는 준지구규모의 기후학적인 요인이 크게 작용한다고 판단된다.

4) 2004년부터 2010년까지 동태평양 해수면 온도 아노말리를 바탕으로 설정한 엘니뇨와 라니냐 기간의 PM_{10} 발생 주기에 대한 분석을 통하여, 라니냐 기간 동안에는 1일 이상의 PM_{10} 발생 스펙트럼 강도가 강화되는 특성이 있다. 1일 보다 긴 시간주기를 가진 6개 대표 PM_{10} 발생주기의 스펙트럼 강도가 엘니뇨 기간에 산출된 대표 PM_{10} 발생주기 강도에 비해 약 31% 크게 나타났다. 반면 1일 이하의 주기에서 높은 PM_{10} 발생 스펙트럼 강도는 라니냐 기간보다 엘니뇨 기간 중에 더 높은 값을 나타낸다. 따라서 엘니뇨/라니냐 등

준지구규모 기상현상도 한반도 PM_{10} 발생주기에 영향을 미치고, 또한 발생주기에 따라 영향이 다르게 나타나는 특성이 있다.

본 연구에서는 한반도 미세먼지 자료를 이용하여 파워 스펙트럼 분석을 하였다. 결과적으로 지역별 미세먼지의 발생 주기가 달리 나타났다. 또한 종관 규모 이상의 기후역학과정은 한반도 미세먼지 발생 주기에 영향을 미친다. 따라서 이러한 특성을 고려한 미세먼지 발생주기에 관한 정보는 지역적으로 특화된 대기오염 물질의 관리 및 통제 시스템을 수립하는데 주요한 역할을 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진개발사업(CATER2006-2205)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

김선영, 이승호, 2009, 한국의 황사 출현에 영향을 미치는 요인에 관한 연구, 한국지리학회지, 44(6), 675-690.

백성옥, 구윤서, 2008, 수도권 대기환경 개선사업-진단과 제언, 한국대기환경학회지, 24(1), 1-34.

손혜영, 김철희, 2009, 부산지역 대기측정망 자료에 나타난 미세먼지 농도의 시계열 해석, 한국환경과학회지, 25(2), 133-140.

송상근, 손장호, 2008, 부산시 해안 및 내륙지역에서 광화학 오염물질의 농도 차이에 영향을 주는화학 및 기상조건 분석, 한국환경과학회지, 17, 1169-1182.

신동천, 2007, 미세먼지의 건강영향, 대한의사협회지, 50, 175-182.

이동규, 박정균, 1999, 군집 분석을 이용한 남한의 여름철 강수 지역 구분, 한국기상학회지, 35(4), 511-518.

이순환, 이화운, 김동혁, 김민정, 김현구, 2011, 엘니뇨/라니냐 강도 변화에 다른 국지적 풍력자원의 변동, 한국지구과학회지, 32(2), 180-189.

이화운, 이순환, 김민정, 김현구, 박순영, 김동혁, 2010, 대기예보모형과 진단모형 결합을 통한 복잡지형 바람장 해석 능력 평가, 한국환경과학회지, 19, 27-37.

진윤하, 구해정, 김봉만, 김용표, 박순웅, 2003, 한반도 11개 도시의 1995~2000년 PM_{10}농도 변화 경향, 한국대기환경학회지, 19(2), 231-245.

Blackman, R. B., Tukey, J. W., 1958, The Measurement of Power Spectra, Dover Publications., 1- 190.

Chen, Z. H., Cheng, S. Y., Li, J. B., Guo, X. R., Wang, W. H., Chen, D.S., 2008, Relationship between atmospheric pollution processes and synoptic pressure patterns in northern China, Atmospheric Environment, 42, 6078-6087.

Choi, Y. S., Ho, C. H., Chen, Deliang, Noh,Y. H., Song, C. K., 2008, Spectral analysis of weekly variation in PM10 mass concentration and meteorological conditions over China, Atmospheric Environment, 42, 655-666.

Chun, Y. S., Boo, K.O., Kim, J. Y., Park, S. U., Lee, M. Y., 2001, Synopsis, transport, and physical characteristics of Asian dust in Korea, J. Geophys. Res., 106, 18461-18469.

Hies, T., Treffeisen, R., Sebald, L., Reimer, E., 2008, Spectral analysis of air pollutants. Part 1: elemental carbon time series, Atmospheric Environment, 34, 3495-3502.

Jo, H. Y., Kim, C. H., 2010, Characteristics of East Asia synoptic meteorological conditions in association with haze phenomena, Atmosphere, 20, 161-172.

Kim, C. H., Son, H. Y., 2011, Measurement and Interpretation of Time Variations of Particulate Matter Observed in the Busan Coastal Area in Korea, Asian Journal of Atmospheric Evironment, 5(2), 105-112.

Künzli, N., Kaiser, R., Medina, S., Studnicka, M., Chanel, O., Filliger, P., Herry, M., Horak, Jr. F., Puybonnieux-Texier, V., Quenel, P., Schneider, J., Seethaler, R.,Vergnaud, J. C., Sommer, H., 2000, Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment, Lancet, 356, 795-801.

Peng, W., Cheng, S., Li, J., Su, F., 2011, Impact of boundary-layer anticyclonic weather system on regional air quality, Atmospheric Environment, 45, 2453-2463.

Salcedo, R. L. R., Alvim Ferreaz, M. C. M., Alves, C. A., Martins, F. G., 1999, Time-Series analysis of air pollution data, Atmospheric Environment, 33, 2361-2372.

Trauth Martin, H., 2009, Matlab Recipes for Earth Sciences 2/e, Springer Press, 1-288.

Zhang, W., Xu, D., Zhuang, G., Wang, W., Guo, L., 2010, Characteristics of ambient 1-min PM2.5 variation in Beijing, Environ Monit Assess, 165, 137-146.