

부산지역 PM₁₀과 PM_{2.5}농도의 시간 및 공간적 변화 특성

전 병 일*

신라대학교 환경공학과

(2010년 5월 24일 접수; 2010년 6월 22일 수정; 2010년 7월 16일 채택)

Characteristics of Spacio-Temporal Variation for PM₁₀ and PM_{2.5} Concentration in Busan

Byung-II Jeon*

Department of Environmental Engineering, Silla University, Busan 617-736, Korea

(Manuscript received 24 May, 2010; revised 22 June, 2010; accepted 16 July, 2010)

Abstract

The purpose of this study was to analyze the characteristics of spacio-temporal variation for PM₁₀ and PM_{2.5} concentration in Busan. PM₁₀ concentration has been reduced for the past three year and exceeded 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ of the national standard for PM₁₀. PM_{2.5} concentration showed gradual decrease or stagnant trends and exceeded the U.S. EPA standard. Seasonal analysis of PM₁₀ and PM_{2.5} suggested spring>winter>fall>summer(by Asian dust) and winter>spring>summer>fall(by anthropogenic effect) in the order of high concentration, respectively. Characterization of diurnal variations suggests that PM₁₀ levels at all the three sites consistently exhibited a peak at 1000LST and PM_{2.5} at Jangrimdong experienced the typical PM_{2.5} diurnal trends such that a peak was observed in the morning and the lowest level at 1400LST. In the case of seasonal trends, the PM_{2.5}/PM₁₀ ratio was in the order of summer>winter>fall>spring at all the study sites, with a note that spring bears the lowest concentration. During AD events, PM₁₀ concentration exhibited the highest level at Jangrimdong and the lowest level at Joadong. And PM_{2.5}/PM₁₀ ratio in AD was 0.16~0.28.

Key Words : PM₁₀ and PM_{2.5} concentration, PM_{2.5}/PM₁₀ ratio, Diurnal variation

1. 서 론

미세먼지는 인간의 건강에 심각한 영향을 미칠 뿐만 아니라, 태양복사량을 산란시켜 장기적으로 지구적인 기후변화를 초래하고, 미세먼지에 의한 악시정이 발생할 경우에 자동차 및 항공기의 운행에 지장을 초래하며, 토양이나 연안수에 침적되어 잠재적으로

생태계에 악영향을 줄 수 있다(Wexler와 Ge, 1998; Gao 등, 2002).

미세먼지는 직접 대기 중에 방출되거나 가스상으로 방출된 기체의 상변화에 따라 대기 중에서 입자를 생성하기도 하며, 광역수송에 의해 좌우되기도 한다. 디젤엔진연료의 연소는 도시지역의 PM_{2.5}농도에 큰 부분을 차지하며(Fraser 등, 2003), 제련 등과 같은 인위적인 오염원과 산불 등과 같은 자연적인 오염원에 의해 미세먼지가 대기 중으로 배출된다. PM_{2.5}는 대기 중의 질소산화물, 황산화물, 암모니아, 휘발성유기화합물의 화학반응에 의해 2차 생성된 황산염, 질산염,

*Corresponding author : Byung-II Jeon, Department of Environmental Engineering, Silla University, Busan 617-736, Korea
Phone: +82-51-999-5056
E-mail: bijeon@silla.ac.kr

비휘발성유기물이 주요 성분이다(Seinfeld와 Pandis, 1998). $PM_{2.5}$ 는 대형발전소나 교통수단 그리고 화석 연료 연소에 의해 생성되며, 장거리 수송되어 농촌지역에 대기질 문제를 일으킬 수 있다(Wojas와 Almquist, 2007). 미국은 $PM_{2.5}$ 에 대해서 연간기준치 $15 \mu g/m^3$, 24시간기준치 $35 \mu g/m^3$ 로 설정하였고(US EPA, 1997), WHO는 연간기준치 $10 \mu g/m^3$, 24시간치 $25 \mu g/m^3$ 로 설정하여 기준을 강화하였으나(WHO, 2005), 우리나라는 PM_{10} 에 관한 기준치(연간기준치 $50 \mu g/m^3$, 24시간 기준치 $100 \mu g/m^3$)는 마련되어 있으나, $PM_{2.5}$ 에 관한 기준치는 아직 없는 실정이다.

부산시는 우리나라에서 두 번째로 큰 도시이자 제1의 항구도시로서 산업발달과 도시화에 따른 교통량의 증가에 의해 미세먼지 농도가 증가하고 그에 대한 관리대책이 시급한 과제로 대두되고 있다. 또한 선박에서 배출되는 대기오염물질과 해수에서 방출되는 해염이 부산지역의 미세먼지 형성에 영향을 미치고 있다. 과거에는 주로 총부유분진과 이산화황과 같은 대기오염물질에 관심이 많았으나(전 등, 1994), 최근에는 입경이 $10 \mu m$ 이하나 $2.5 \mu m$ 이하의 먼지에 대한 관심이 증대되고 있다. 부산지역 PM_{10} 의 시·공간적 변화나 $PM_{2.5}$ 의 화학적 조성 등에 대한 연구는 있으나(전, 2003; 전, 2007; 전과 황, 2008), 장기간에 걸친 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 시·공간적 특성을 동시에 구체적으로 연구한 경우는 아직 없는 실정이다. 따라서 본 연구는 부산지역에서 2006년 1월부터 2008년 12월까지 최근 3년간 대기오염자동측정망에서 측정된 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도자료를 이용하여, 미세먼지의 계절별, 월별, 시간별 특성과 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비의 특징을 밝혀, 향후 부산시의 미세먼지 대기질 관리대책 수립과 미세먼지 대기질 기준의 설정에 기여하고자 한다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서 사용한 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 의 측정자료는 2006년 1월부터 2008년 12월까지 3년간의 시간별 평균자료로, 부산지역 19개 자동관측망 중(도로변 2개소 포함)에서 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 를 동시에 관측하는 장림동, 기장읍, 좌동의 자료를 사용하였다. 측정자료의 선택은 일평균 자료의 경우, 24시간 중에서 70%(18시

간)이상 측정된 자료를 유효자료로서 취급하였고, 월평균 자료의 경우는 30일을 기준으로 관측치가 20일 이상일 때이고, 연평균 자료는 12개월 중 9개월 이상의 자료가 존재할 경우 유효한 자료라고 하였다(전 등, 2003). PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 를 동시에 측정하는 지점은 Fig. 1과 같이 공업지역인 장림동, 주거지역인 연산동, 기장읍, 좌동으로 세 지점이다. 그러나 연산동의 $PM_{2.5}$ 측정자료에 다소 문제가 있어 본 연구에서는 반영하지 않았다. 장림동은 중·소규모의 공장이 밀집한 지역으로 부산의 대표적인 공업단지로 자동차 통행량과 공장에서 배출되는 오염물질이 많은 곳이며, 기장읍은 부산의 남동해안에 위치한 교외지역으로서 주변에 녹지가 풍부하며 최근에는 아파트가 들어서고 있는 추세이며, 좌동은 부산의 해운대 신도시에 있으며 주변의 수많은 아파트로 둘러싸여 있는 전형적인 주거지역이다.

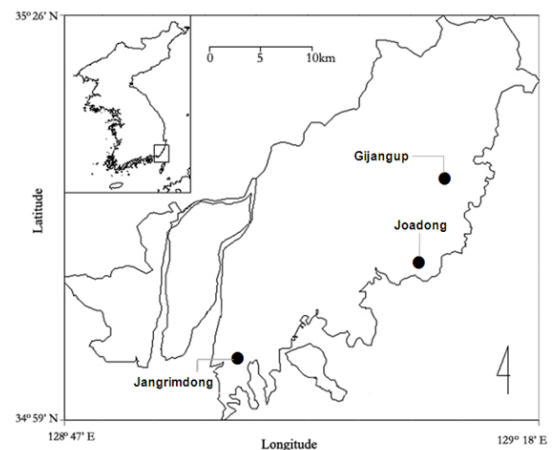


Fig. 1. Automatic air quality monitoring sites in Busan.

3. 결과 및 고찰

3.1. PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 질량농도의 특성

Table 1은 부산지역 장림동, 기장읍, 좌동에서 2006년부터 2008년까지 3년간 측정된 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 연평균농도를 나타낸 것이다. PM_{10} 농도의 경우, 세 지점 모두 2006년에서 2008년으로 갈수록 농도는 감소하고 있다. 장림동을 제외한 두 지점은 PM_{10} 의 연평균 기준치인 $50 \mu g/m^3$ 을 만족하고 있다. 그리고 장림동

은 2008년의 농도가 58.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 2007년에 비해 16.3% 감소하여 최근의 부산시 미세먼지 대책이 어느 정도 실효성을 거두고 있는 것으로 판단된다. PM_{2.5}의 경우도 PM₁₀과 마찬가지로 장림동의 농도는 매년 감소하고 있는 추세이나, 기장읍과 좌동은 거의 변함이 없다. 세 지점 모두 미국 EPA의 PM_{2.5} 기준치인 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 훨씬 초과하는 수준이다. 특히 장림동의 경우는 3년 평균 농도가 39.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 미국 EPA 기준치(15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 2.6배, WHO 기준치(10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 약 4배에 달하며, 비교적 청정지역으로 알려진 기장읍도 EPA 기준치를 약 43%나 초과하고 있어, 향후 PM_{2.5} 저감에 대한 대책이 시급히 요구된다.

Table 2는 부산지역 세 지점의 PM₁₀과 PM_{2.5}농도를 계절별로 나타낸 것이다. PM₁₀의 경우, 세 지점 모두 봄철>겨울철>가을철>여름철 순으로 봄철에 가장 높은 농도를 나타내었고, 여름철이 가장 낮은 농도를 나타내었다. 봄철은 중국이나 몽골의 사막으로부터 불어오는 황사에 포함된 미세먼지의 영향으로 고농도를 보였으며, 여름철은 우리나라의 특유한 여름철 몬순에 의한 잦은 강수와 강한 일사에 의한 대기불안정에 따른 혼합층 고도의 상승에 의한 것으로 판단된다(전, 2007). PM_{2.5}의 경우는 PM₁₀과 다소 다른 양상을 보여주고 있다. 장림동은 겨울철>봄철>가을철>여름철 순으로 겨울철이 봄철보다 높은 농도를 나타내었

다. 그 외 두 지점은 PM₁₀과 동일한 계절변화 양상을 나타내었다. 장림동의 겨울철 고농도 PM_{2.5}는 공업지역에서 난방을 위한 연료사용의 증가와 대기안정도에 의한 지표역전층 형성과 낮은 혼합층고도가 더 큰 영향을 나타내었기 때문으로 판단된다(전, 2003). 여름철의 PM₁₀은 타 계절에 비해 상당히 낮은 농도를 나타낸 것에 비해, 여름철의 PM_{2.5}는 봄철, 가을철과 비슷하거나 조금 낮은 농도를 나타내었다. 이는 미세먼지 중의 미세입자(입경 2.5 μm 이하)는 자동차 배출가스와 가스상 오염물질의 변환 등에 의해 영향을 많이 받기 때문으로 판단된다(DeGaetano와 Doherty, 2004).

Fig. 2는 부산지역 세 지점의 평균 PM₁₀, PM_{10-2.5}(조대입자), PM_{2.5}(미세입자)를 계절별로 나타낸 것이다. PM_{10-2.5}는 PM₁₀농도에서 PM_{2.5}농도를 뺀 농도 값이다. PM₁₀은 봄철>겨울철>가을철>여름철 순이고, PM_{10-2.5}는 봄철>봄철=겨울철>여름철 순이며, PM_{2.5}는 겨울철>봄철>여름철>가을철 순으로 항목별로 다른 양상을 보여주고 있다. 특히 봄철의 PM_{10-2.5}농도가 다른 계절과는 달리 PM_{2.5}보다 높은 농도를 나타내었다. 이는 우리나라의 봄철은 중국이나 몽골의 사막으로부터 날라 오는 황사에 포함된 조대입자의 영향을 받기 때문으로 판단된다(김 등, 2002).

Table 1. Annual mean values of PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations observed at Jangrimdong, Gijangup, and Joadong for 3 years(2006~2008)

Station	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
	2006	2007	2008	'06-'08	2006	2007	2008	'06-'08
Jangrimdong	72.2±49.9	70.3±62.3	58.8±45.4	67.0±53.4	43.0±25.6	43.2±26.9	32.8±21.7	39.6±25.3
Gijangup	43.3±48.1	41.6±61.4	41.3±39.9	42.1±50.7	21.8±15.5	21.1±15.5	21.1±14.4	21.4±15.1
Joadong	43.5±42.6	42.6±61.7	40.5±40.7	42.2±49.3	21.3±14.9	21.6±15.1	22.1±14.6	21.7±14.9

Table 2. Seasonal mean values of PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations observed at Jangrimdong, Gijangup, and Joadong for 3 years(2006~2008)

Station	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
	Spring	Summer	Fall	Winter	Spring	Summer	Fall	Winter
Jangrimdong	76.1±83.2	51.5±30.0	66.4±39.7	73.5±37.7	40.3±24.5	34.6±23.5	36.5±25.1	46.8±26.2
Gijangup	61.2±89.3	32.4±20.2	34.2±23.2	40.1±26.2	24.7±15.7	19.1±14.2	19.5±15.1	22.2±14.8
Joadong	60.6±86.9	31.3±18.2	34.9±23.0	41.6±25.7	25.0±15.2	19.3±13.4	19.3±14.9	23.0±15.2

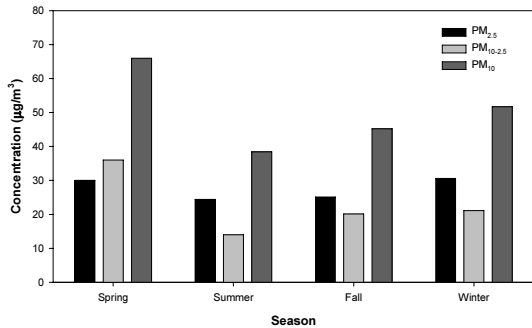


Fig. 2. Seasonal change of PM mass concentration in Busan for 3 years(2006~2008).

3.2. PM₁₀과 PM_{2.5}의 공간적 특성

Table 3은 부산지역 세 지점의 일평균 PM₁₀과 PM_{2.5}농도를 이용하여 지점간의 상관계수를 나타낸 것이다. 대각선 아래의 값이 PM₁₀의 상관계수이고 대각선 위의 값이 PM_{2.5}의 값이다. PM₁₀의 경우, 세 지점에서 0.84~0.99의 상관계수를 나타내었다. PM_{2.5}의 경우는 PM₁₀에 비해 다소 낮은 0.80~0.94의 상관계수를 나타내었다. 특히 기장읍과 좌동은 0.99(PM₁₀)과 0.94(PM_{2.5})의 매우 높은 상관계수를 나타내어 지역적으로 매우 유사한 특성을 가진 것으로 나타났다. 이는 지점간 상관관계가 높다는 것은 기상학적 조건, 오염원으로부터의 배출 등이 특별한 국지오염원이나 미세먼지농도의 상대적인 변화를 좌우할 만한 사건보다 우위에 있다는 것을 의미한다. 일반적으로 PM_{2.5}가 대기 중에서의 생애주기가 길어 균일한 분포를 하기

쉽기 때문에 PM_{2.5}의 상관관계가 PM₁₀보다 더 높는데 비해(Gehrig와 Buchmann, 2003), 본 연구에서는 반대의 결과가 나타났다.

Table 3. Correlation coefficient of the daily values PM₁₀ (lower diagonal) and PM_{2.5}(upper diagonal) between the stations for 3 years(2006~2008)

	Jangrimdong	Gijangup	Joadong
Jangrimdong		0.81	0.80
Gijangup	0.87		0.94
Joadong	0.87	0.99	

3.3. PM₁₀과 PM_{2.5}의 월변화 특성

Fig. 3은 부산지역 세 지점에서 PM₁₀과 PM_{2.5}농도의 월변화를 나타낸 것이다. PM₁₀의 경우, 세 지점 모두 유사한 월변화 경향을 나타내고 있다. 4월에 황사의 영향으로 가장 높은 농도를 나타내었고 그 후 9월까지 지속적으로 감소하다가 10월에 급작스러운 상승을 나타내고 그 농도를 12월까지 유지하고 있다. 세 지점에서의 4월의 평균농도는 86.5 µg/m³(장림동)에서 67.9 µg/m³(좌동)까지이며, 9월의 평균농도는 44.0 µg/m³(장림동)부터 25.1 µg/m³(기장읍)의 분포를 보였다. 기장읍과 좌동은 변화경향과 농도가 거의 일치하는 것을 볼 수 있으며, 장림동은 10월 이후 겨울과 봄철에도 계속 70 µg/m³ 이상의 고농도 PM₁₀을 유지하고 있다. 그러나 PM_{2.5}는 PM₁₀과 다른 월변화 양상을

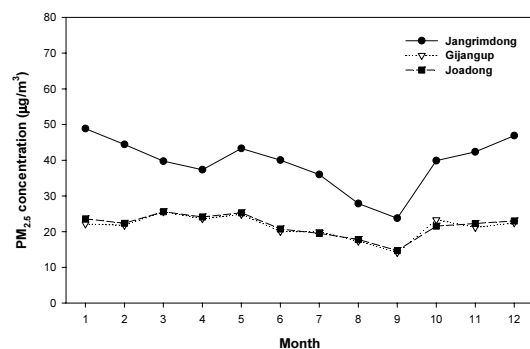
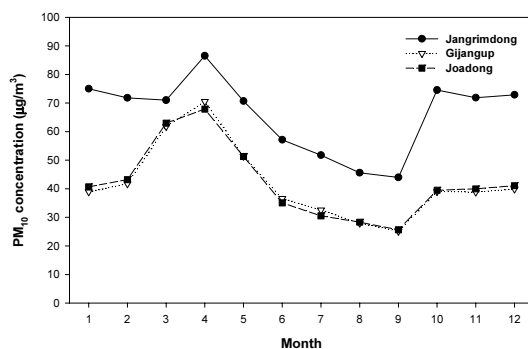


Fig. 3. Monthly variation of average PM₁₀ and PM_{2.5} concentration(µg/m³) at Jangrimdong, Gijangup, and Joadong for 3 years(2006~2008).

나타내고 있다. 장림동은 1월부터 4월까지 지속적으로 감소하다가 5월에 일시적으로 상승한 후 9월까지 다시 하강한 다음, 10월에 급하게 상승하고 그 후 12월까지 계속 농도가 상승하는 경향을 나타내고 있다. 기장읍과 좌동은 5월에 일시적으로 상승한 후 9월까지 계속 하강하고 10월에 급한 상승을 나타내고 있다. PM_{2.5}는 PM₁₀과는 달리 4월의 고농도가 없으며, 장림동을 제외하면 그 변화폭이 매우 작아진다. PM₁₀과 마찬가지로 기장읍과 좌동은 거의 동일한 월평균농도를 나타내고 있다. PM₁₀과 PM_{2.5} 모두 9월에 최저농도를 나타내고 10월 이후 미세먼지의 농도가 증가하는 양상을 나타내고 있다.

3.4. PM₁₀과 PM_{2.5}농도의 일변화 특성

Fig. 4는 부산지역 세 지점의 PM₁₀과 PM_{2.5}농도의 일변화를 나타낸 것이다. PM₁₀의 경우, 장림동은 0100LST 부터 0800LST 까지 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도의 농도를 유지하다가 1000LST에 최고농도를 나타내고 1400LST까지 지속적으로 하강한 후 자정까지 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도의 고농도를 나타내었다. 기장읍과 좌동은 거의 유사한 일변화 경향을 나타내었으며, 그 변화폭이 장림동에 비해서 매우 작았다. 이는 기장읍과 좌동은 일변화를 나타내는 기상학적 조건이나 배출요인이 작용하지 않는다는 것을 의미한다. 그리고 그림에는 나타내지 않았지만, 장림동의 계절별 최고농도가 발생한 시각이 여름은 오전 9시, 봄과 가을은 오전 10시 그리고 겨울은 오전 11시로 1시간씩 지연되고 있다. 이

는 계절별로 출근시간의 차이에 의해 발생하는 것으로 판단된다(진, 2003). PM_{2.5}의 경우, 장림동은 PM₁₀과 거의 동일한 일변화 경향을 나타내고 있다. 다만, 2000LST 이후의 상승경향이 PM₁₀보다는 강하고 2200LST 이후부터 새벽과 오전 내내 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 고농도가 지속되고 있다. 대표적인 주거지역인 기장읍과 좌동의 PM_{2.5} 일변화 경향은 거의 일치하고 있으며, 일변화폭이 매우 작으며 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 비교적 저농도를 나타내었다. Fig. 5는 부산지역 세 지점의 계절별 PM_{2.5}농도의 일변화를 나타낸 것이다. 장림동의 경우, 최고농도를 나타낸 시각이 여름은 0600~0900LST, 봄철은 0900LST, 가을철은 1000LST, 겨울철은 1100LST로 계절별로 차이가 나타났다(진 등, 1994). 미국의 뉴욕이나 중국의 북경에서는 오전 7시부터 9시 사이에 1차 peak가 나타나는데, 이는 장림동과 비교하면 약 2시간 빨리 최고농도가 발생하고 있다(DeGaetano와 Doherty, 2004; Zhao 등, 2009). 오전 7시와 9시는 러시아워에 의한 교통량이 가장 많고 대기 안정도가 정상적으로 최대가 되는 시간대이기도 하다. 타이완의 타이베이에서는 오전 10시와 오후 1시에 PM_{2.5}의 peak가 나타나는데, 오전의 peak는 아침의 러시아워에 의한 자동차배출량에 의한 것이고 오후의 peak는 약한 풍속과 광화학반응에 의한 것이라고 하였다(Lee 등, 2006).

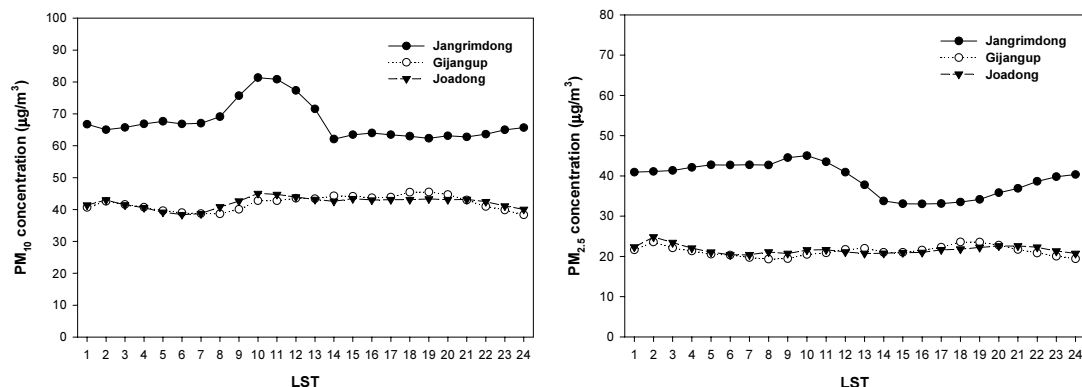


Fig. 4. Diurnal variation of PM₁₀ and PM_{2.5} at Jangrimdong, Gijangup, and Joadong for 3 years(2006~2008).

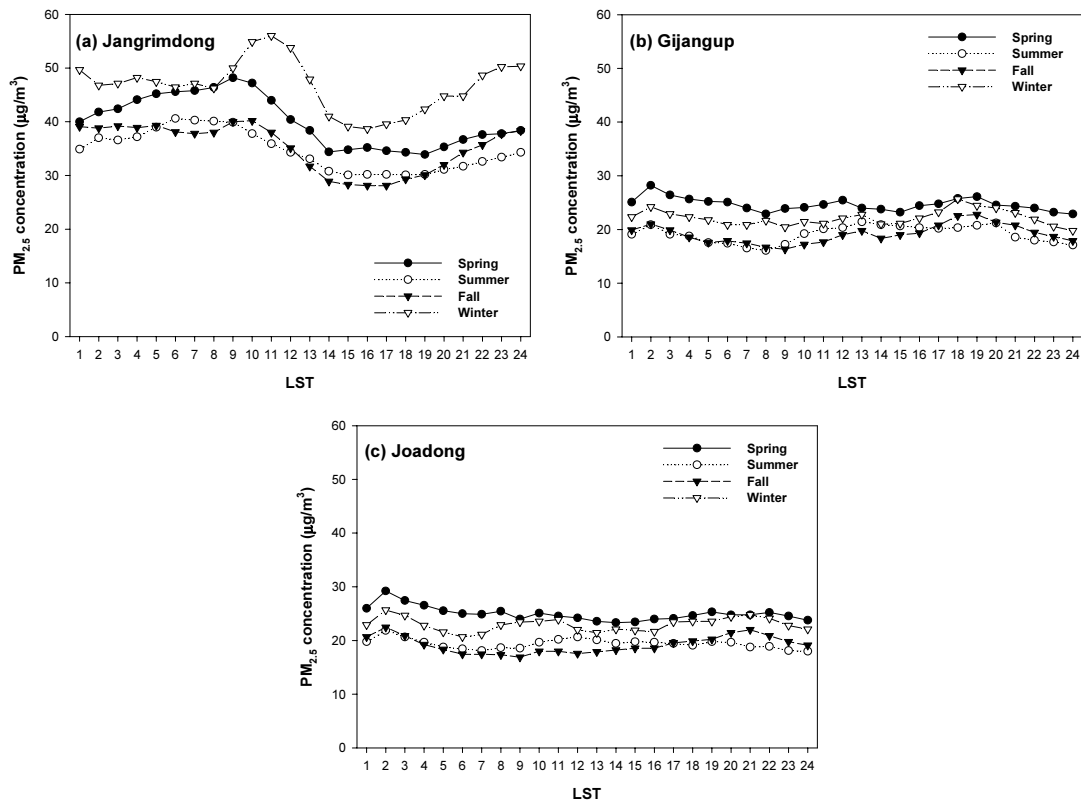


Fig. 5. Diurnal variation of seasonal $PM_{2.5}$ concentration at Jangrimdong, Gijangup, and Joadong for 3 years(2006~2008).

3.5. PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 농도의 주중 및 주말 특성

Fig. 6은 부산지역에서 3년간의 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 요일에 따른 농도변화를 나타낸 것이다. 주중 및 주말의 미세먼지농도에 영향을 미치는 요소가 아닌 황사발생일은 반영하지 않았다. PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 모두 세 지역에서 주말의 농도가 주중보다 낮게 나타났다. 장림동의 일요일 PM_{10} 농도는 $51.3 \mu g/m^3$ 으로 목요일의 $70.8 \mu g/m^3$ 에 비해 27.5%($19.5 \mu g/m^3$)정도 작게 나타났다. 특히 경제활동이 가장 왕성한 화요일($69.2 \mu g/m^3$)부터 목요일까지 높은 농도를 나타내었으며, 금요일부터 미세먼지농도가 하강하는 추세를 보였다. 그러나 아파트단지나 개인주택이 있는 기장읍과 좌동은 일요일에 각각 $35.5 \mu g/m^3$ 와 $35.7 \mu g/m^3$ 로 수요일의 $42.2 \mu g/m^3$ 와 $42.1 \mu g/m^3$ 에 비해 약 15%정도 감소하여 주중과 주말의 농도차는 공업지역인 장림동에 비해 작게 나타났다. 따라서 교통량과 인구활동이 많은 공업지역

이 주거지역보다 주중과 주말의 차이가 확실하게 나타났다. $PM_{2.5}$ 의 경우, 세 지역 모두 수요일에 가장 높은 농도를 나타내었으며(장림동 $43.1 \mu g/m^3$, 기장읍 $22.9 \mu g/m^3$, 좌동 $23.4 \mu g/m^3$) 일요일에 가장 낮은 농도(장림동 $32.5 \mu g/m^3$, 기장읍 $19.1 \mu g/m^3$, 좌동 $19.1 \mu g/m^3$)를 나타내었다. 주말의 감소효과는 장림동 24.6%, 기장읍 16.6%, 좌동 18.8%를 각각 나타내었다. Qin 등(2004)은 미국 남부 캘리포니아에서 PM_{10} 농도는 오전에 14%, 오후에 17%의 주말감소효과가 나타났다고 하였으며, Lonati 등(2006)은 $PM_{2.5}$ 보다는 $PM_{10-2.5}$ 에서 더 큰 주말 감소효과가 나타난다고 보고하였으며, 이러한 주말감소효과는 자연적인 원인보다는 인위적인 활동에 의한 것이라고 하였다. Morawska 등(2002)은 호주 Brisbane 지역에서 교통통행량과 미세먼지농도사이에는 밀접한 관계($r=0.86$)가 있으며, 금요일에 최고농도, 일요일에 최저농도를 나타낸다고 하였다.

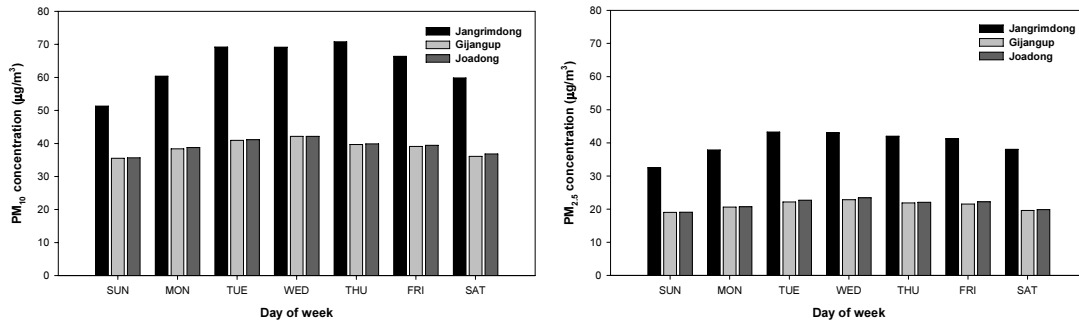


Fig. 6. PM₁₀ and PM_{2.5} concentration variation according to day of week.

3.6. PM_{2.5}/PM₁₀의 비

Table 4는 부산지역 세 지점의 연평균 및 계절별 PM_{2.5}/PM₁₀ 비를 나타낸 것이다. PM_{2.5}/PM₁₀ 비는 PM₁₀ 중에 포함된 PM_{2.5}의 기여율을 알아본다는 의미에서 매우 가치가 있다고 판단된다. PM_{2.5}는 미세입자로서 폐 속 깊숙이 스며들어 치명적으로 영향을 주는 입자로 미국을 비롯한 선진국에서는 이미 대기환경기준으로 PM_{2.5}를 설정하고 있으며, 심지어 입경이 1 µm 이하인 PM₁ 까지도 대기환경기준으로 설정하는 국가도 있다(Ehrlich 등, 2007). 최근 3년간 연평균 PM_{2.5}/PM₁₀ 비는 장림동이 가장 높아 0.59이었고, 기장읍과 좌동은 0.51로 동일하였다. 이는 북미에서 측정된 전형적인 PM_{2.5}/PM₁₀의 비인 0.60과 비슷하거나 작은 값을 나타내었다(Dockery와 Pope, 1994). Querol 등(2004)은 공업지역이 주거지역보다 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 높게 나타나고 특히 중공업지역이거나 고농도지역일수록 그 비는 높다고 하였다. PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 높다는 것은 일반적으로 질산염(NO₃), 황산염(SO₄²⁻), 암모늄(NH₄⁺) 그리고 유기물 등과 같은 2차 분진 생성에 기인된 것이고, 비가 낮다는 것은 1차 먼지나 장거리 수송에 의한 모래먼지에 의한 영향이 크다고 할 수 있

다(Duan 등, 2006). 계절별로 보면, 세 지점 모두 여름철>겨울철>가을철>봄철 순으로 여름철이 가장 높았고 봄철이 가장 낮았다. 이렇게 여름철이 높은 것은 황산염이나 유기화합물과 같은 2차 에어로졸의 기여가 큰 영향을 미치고 강한 바람에 의한 재비산이 약하기 때문이라고 할 수 있다(Tecer 등, 2008).

Fig. 7은 PM_{2.5}/PM₁₀ 비를 좀 더 구체적으로 고찰하기 위하여 월변화와 일변화를 나타낸 것이다. 월변화에서 가장 뚜렷한 것이 4월의 비가 0.4정도로 매우 작다는 것이다. 이는 계절변화에서 지적하였듯이 황사 속의 먼지에는 미세입자보다는 조대입자의 비율이 높기 때문에 상대적으로 비가 내려갔다는 것을 알 수 있다. 그 외는 0.55정도의 비율을 유지하고 있으며, 특히 장림동은 6월과 7월의 비가 0.7정도로 매우 높은 값을 나타내고 있으며, 세 지점 모두 비슷한 일변화 경향을 나타내고 있다. 대기오염농도에 영향을 주는 인자는 배출량, 기상조건 그리고 지형이다. 기장읍과 좌동은 일변화가 거의 없는데, 이는 하루 종일 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 일정하다고 하는 것은 이 비를 변화시킬만한 요소가 없다는 것을 의미한다. 기상학적인 요소이나 국지적인 요인에 의해 전혀 영향을 받지 않는다고 할 수 있다.

Table 4. Annual and seasonal mean of PM_{2.5}/PM₁₀ ratio at Jangrimdong, Gijangup, and Joadong for 3 years(2006~2008)

Station	Annual			Season				Mean
	2006	2007	2008	Spring	Summer	Fall	Winter	
Jangrimdong	0.60	0.61	0.56	0.53	0.67	0.55	0.64	0.59
Gijangup	0.50	0.51	0.51	0.40	0.59	0.57	0.55	0.51
Joadong	0.49	0.51	0.55	0.41	0.62	0.55	0.55	0.51
Mean	0.54	0.54	0.56	0.46	0.63	0.56	0.60	

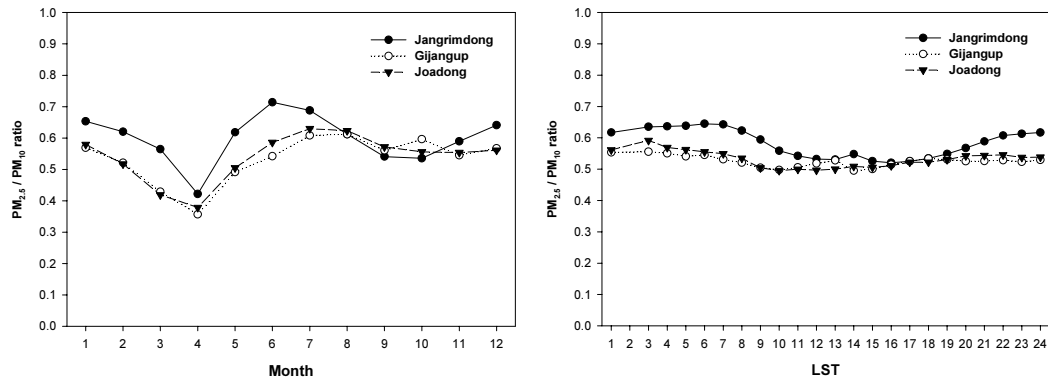


Fig. 7. Monthly and diurnal variation of $PM_{2.5}/PM_{10}$ ratios at Jangrimdong, Gijangup, and Joadong for 3 ears(2006~2008).

$PM_{2.5}/PM_{10}$ 비는 인체에 유해한 입경 $2.5 \mu m$ 이하의 미세먼지의 기여율을 알 수 있다는 면에서 중요한 의미를 가진다고 볼 수 있다. $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비에 대한 기존 연구의 예를 보면, 비교적 청정지역인 제주도 고산에서 2002년 3월 2일부터 4월 11일까지 측정된 자료에서 황사시에 0.404, 비황사시에 0.503으로(공 등, 2002), 황사시에 낮은 값을 나타내었다. 김 등(2002)이 서울시에서 2001년 봄철 황사기간에 측정된 결과를 보면, $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비가 0.516으로 비교적 낮게 나타났는데, 이는 당시 연구지역에서 잦은 공사에 의한 토양과 입자상물질의 발생과 재비산에 의한 영향 및 황사기간 중에 중국에서 유입된 에어로졸에 의한 영향을 동시에 받은 데 따른 결과라고 하였다. 외국의 사례를 보면, 레바논의 베이루트의 해안지역에서의 측정 예를 보면 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비가 0.336으로 $PM_{2.5}$ 농도의 기여율이 매우 낮았다(Shaka와 Saliba, 2004). 타이완의 교외지역과 농촌지역에서 낮과 밤의 측정 예를 보면, 교외지역의 낮에 0.70, 밤에 0.63, 그리고 농촌지역의 낮에 0.56, 밤에 0.72로서 지역과 시간에 따라 값의 차이가 나타났다(Fang 등, 1999). 홍콩의 산업과 농촌지역에서 측정된 예를 보면, 산업지역에서는 0.78, 농촌지역에서는 0.53이 나타나(Ho 등, 2003), 산업지역에서 배출된 오염물질과 자동차 배기가스에 의해 $PM_{2.5}$ 농도가 높게 나타났다.

3.7. 황사발생일의 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 특성

황사발생일의 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 농도를 알아본다는 것은 황사에 포함된 미세먼지의 특성을 규명한다는

측면에서 매우 중요한 의미를 지니고 있다. 다른 지역의 연구에서 황사발생시 조대입자에 대한 미세입자의 비율이 낮다는 연구결과가 나와 있다(김 등, 2002; 박과 임, 2006). 그러나 아직 부산지역에는 구체적으로 비율이 얼마인지는 아직 정확하게 규명된 바 없다. 2006년부터 2008년까지 3년간의 부산지역 황사발생일은 Table 5와 같다(기상청 황사정보센터). 2006년에 10일, 2007년과 2008년에 각각 5일씩으로 총 20일이었다.

Table 5. Occurrence days of Asian dust in Busan for 3 years(2006~2008)

Year	Date of Asian dust occurrence	Total
2006	3.11~12, 3.14, 3.28, 4.8~9, 4.23~25	10
2007	3.31, 4.1~2, 5.25~26	5
2008	3.2~3, 5.30~31, 12.9	5

Table 6은 2006년부터 2008년까지 3년간 시간별 자료를 이용하여 부산지역에 황사가 발생했을 때의 $PM_{2.5}$, PM_{10} 의 농도 및 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비, $PM_{10-2.5}/PM_{2.5}$ 비를 나타낸 것이다. 황사발생시의 PM_{10} 농도는 장림동이 $222.5 \mu g/m^3$ 로 가장 높았고 좌동이 $213.7 \mu g/m^3$ 로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 그리고 $PM_{2.5}$ 는 장림동이 $62.7 \mu g/m^3$ 가장 높았고 좌동이 $34.5 \mu g/m^3$ 가장 낮았다. 그리고 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비는 장림동과 0.28이었으며, 기장읍과 좌동이 각각 0.17과 0.16으로 매우 낮은 값을 나타내었다. 평상시 부산지역의 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비

Table 6. Concentration of PM_{2.5}, PM₁₀, PM_{2.5}/PM₁₀ ratio, and PM_{10-2.5}/PM_{2.5} ratio at Asian dust occurrence(2006~2008) at Jangrimdong, Gijangup, and Joadong for 3 years(2006~2008)

Station	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} /PM ₁₀	PM _{10-2.5} /PM _{2.5}
Jangrimdong	222.5±243.5	62.7±39.9	0.28	2.54
Gijangup	215.4±271.1	35.7±26.5	0.17	4.97
Joadong	213.7±273.5	34.5±22.9	0.16	5.11

는 Table 4에서와 같이 0.51~0.59인데 비해, 황사시의 PM_{2.5}/PM₁₀ 비는 0.16~0.28로 매우 낮은 값을 나타내었다. 그리고 미세먼지에 대한 조대입자의 비율인 PM_{10-2.5}/PM_{2.5}는 장림동이 약 2.5 정도이고, 기장읍과 좌동이 약 5.0 정도를 나타내고 있다. 즉 황사 시에는 입경 2.5 μm 이하의 미세입자보다는 PM₁₀에서 PM_{2.5} 사이의 크기를 가진 조대입자가 다량 수송되어 부산 지역에 영향을 미친다는 것을 의미한다. 전 등(2006)은 부산지역 패법동에서 2006년 봄철에 황사시와 비황사시의 PM_{2.5}/PM₁₀의 비가 각각 0.56과 0.68라고 한 바 있으며, 박과 임(2006)이 대구에서 2006년 2월부터 4월까지 측정한 결과에서 비황사 기간은 22.5~89.9%(평균 55.4%)이었으며, 황사기간은 22.7~39.1%(평균 33.0%)로 비황사기간에 비해 상당히 감소하였다. Chen 등(2004)은 황사시는 비황사시보다 조대입자(PM_{10-2.5})의 비중이 증가하여 비황사시에는 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 0.6~0.7이었으나, 황사시에는 0.45 이하로 감소한다고 하였다. Lee 등(2004)은 2002년 울산지역의 황사시 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 0.1인데 비해 비황사시는 0.46으로 황사시에는 PM₁₀의 대부분이 조대입자로 구성되어 있다고 하였다. 김과 정(2009)은 충북 청원의 2005년 발생한 황사사례에서 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 18.9%로 보고되어 부산의 기장읍과 좌동과 비슷한 값을 나타내었다.

4. 결론

부산지역에서 최근 3년간(2006~2008) 대기오염 자동측정망에서 측정된 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도자료를 이용하여, 미세먼지의 계절별, 월별, 시간별 특성과 PM_{2.5}/PM₁₀ 비 그리고 황사시/비황사시의 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. PM₁₀의 질량농도는 매년 감소하는 추세를 보였

으며, 장림동은 연평균 기준치인 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하였다. PM_{2.5}의 질량농도는 지역에 따라 매년 감소하거나(장림동) 변함이 없었으며(기장읍, 좌동) 미국 EPA 연간기준치를 모든 지점에서 초과하였다. 계절별 변화를 보면, PM₁₀은 봄철>겨울철>가을철>여름철 순이고, PM_{2.5}는 겨울철>봄철>여름철>가을철 순이었다.

2. 지점간의 상관성을 보면, PM₁₀은 0.87~0.99의 상관계수를 나타내었고, PM_{2.5}는 PM₁₀에 비해 다소 낮은 0.80~0.94의 상관계수를 나타내었으며, 기장읍과 좌동은 0.99(PM₁₀)과 0.94(PM_{2.5})의 매우 높은 상관도를 나타내었다.

3. 월변화 특성을 보면, PM₁₀은 4월에 가장 높은 농도를 나타내었고 9월에 가장 낮은 농도를 나타내었다. PM_{2.5}는 PM₁₀과는 달리 1월 이후 계속 하강하다가 5월에 약한 peak를 나타내었고 9월에 가장 낮은 농도를 보였으며, 이후 급한 상승을 나타내었다.

4. 일변화 특성을 보면, PM₁₀은 네 지점 모두 오전 10시 부근에 최고농도를 나타내고 이후 계속 하강하여 오후, 저녁 그리고 새벽에 일정한 농도를 나타내었다. PM_{2.5}의 경우, 장림동은 PM₁₀과 비슷하게 오전에 최고농도를 나타내고 오후 2시경에 최저농도, 그 후에 증가하는 양상을 나타내었으며, 기장읍과 좌동은 일변화경향이 뚜렷하지 않았다.

5. 주중의 미세먼지 농도는 주말보다 높은 농도를 나타내었으며, 그 변동폭은 공업지역이 주거지역보다 크게 나타나 교통량과 인구활동에 의해 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

6. PM_{2.5}/PM₁₀ 비를 보면, 장림동이 가장 높아 0.59 이었고, 기장읍과 좌동이 0.51로 동일하였다. 계절별로 보면, 세 지점 모두 여름철>겨울철>가을철>봄철 순으로 봄철이 가장 낮았다.

7. 황사발생시의 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도는 장림동이

가장 높았고 좌동이 가장 낮은 농도를 나타내었다. 그리고 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비는 장림동이 0.28이었으며, 기장읍과 좌동이 각각 0.17과 0.16으로 매우 낮은 값을 나타내었다.

8. 향후 부산지역의 미세먼지 농도에 영향을 미치는 기상인자(바람, 기온, 습도 등)를 체계적으로 분석한다면 연안지역의 미세먼지농도예측에 기여할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 공주부, 한진석, 문광주, 안준영, 정다위, 이석조, 김정은, 김영준, 2002, 제주도 고산에서의 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 성분 특성 분석, 한국대기환경학회 2002 추계학술대회 논문집, 147-148.
- 기상청 황사정보센터, <http://yellow.meteri.re.kr>.
- 김기현, 최규훈, 강창희, 2002, 2001년 봄철 서울시 북동부지점에서 관측한 중금속성분의 농도분포, 한국지구과학회지, 23(6), 514-525.
- 김학성, 정용승, 2009, 2005년 동아시아지역에서 발생한 모래폭풍과 먼지침전(황사)의 관측, 한국지구과학회지, 30(2), 196-209.
- 박지연, 임호진, 2006, 대구지역 겨울철과 봄철 미세먼지의 수용성 이온성분 특성, 한국대기환경학회지, 22(5), 627-641.
- 전병일, 2003, 부산지역 PM_{10} 농도의 시간 및 공간적 변화 특성, 한국환경과학회지, 12(10), 1033-1041.
- 전병일, 2007, 2005년 봄철 부산 서부지역 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 의 금속성분 특성, 환경영향평가, 16(5), 327-340.
- 전병일, 김유근, 이화운, 1994, 부산지역 SO_2 농도변화 특성에 관한 고찰, 한국대기보전학회지, 10(4), 245-251.
- 전병일, 황용식, 2008, 최근 5년간 부산지역의 미세먼지(PM_{10})농도 특성에 관한 연구, 환경영향평가, 17(5), 533-542.
- 전병일, 황용식, 윤장희, 2006, 2006년 봄철 부산지역 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$) 중의 중금속 농도 특성, 한국대기환경학회지 2006학년도 추계학술대회발표집, 309-310.
- Chen, S. J., Hsieh, L. T., Kao, M. J., Lin, W. Y., Huang, K. L., Lin, C. C., 2004, Characteristics of particles sampled in southern Taiwan during the Asian dust storm periods in 2000 and 2001, *Atmos. Environ.*, 38, 5925-5934.
- DeGaetano, A. T., Doherty, O. M., 2004, Temporal, spatial and meteorological variations in hourly $PM_{2.5}$ concentration extremes in New York City, *Atmos. Environ.*, 38, 1547-1558.
- Dockery, D. A., Pope, C. A., 1994, Acute respiratory effects of particular air pollution, *Annual Review Public Health*, 15, 107-132.
- Duan, F. K., He, K. B., Ma, Y. L., Yang, F. M., Yu, X. C., Cadle, S. H., Chan, T., Mulawa, P. A., 2006, Concentration and chemical characteristics of $PM_{2.5}$ in Beijing, China: 2001-2002, *Science of the Total Environment*, 355, 264-275.
- Ehrlich, C., Nolla, G., Kalkoff, W.-D., Baumbach, G., Dreiseidler, A., 2007, PM_{10} , $PM_{2.5}$ and $PM_{1.0}$ —Emissions from industrial plants—Results from measurement programmes in Germany, *Atmos. Environ.*, 41, 6236-6254.
- Fang, G. C., Chang, C. N., Wu, Y. S., Fu, P. P., Yang, D. G., Chu, C. C., 1999, Characterization of chemical species in $PM_{2.5}$ and PM_{10} aerosols in suburban and rural sites of central Taiwan, *Science of the Total Environment*, 234, 203-212.
- Fraser, M. P., Yue, Z. W., Buzcu, B., 2003, Source apportionment of fine particulate matter in Houston, TX, using organic molecular markers, *Atmos. Environ.*, 37, 2117-2123.
- Gao, Y., Nelson, E. D., Field, M. P., Ding, Q., Li, H., Sherrell, R. M., Gigliotti, C. L., Van Ry, D. A., Glenm, T. R., Eisenreich, S. J., 2002, Characterization of atmospheric trace elements on $PM_{2.5}$ particulate matter over the New York-New Jersey harbor estuary, *Atmos. Environ.*, 36, 1077-1086.
- Gehrig, R., Buchmann, B., 2003, Characterizing seasonal variations and spatial distribution of ambient PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentrations based on long-term Swiss monitoring data, *Atmos. Environ.*, 37, 2571-2580.
- Ho, K. F., Lee, S. C., Chan, C. K., Yu, J. C., Chow, J. C., Yao, X. H., 2003, Characterization of chemical species in $PM_{2.5}$ and PM_{10} aerosols in Hong Kong, *Atmos. Environ.*, 37, 31-39.
- Lee, B. K., Jun, N. Y., Lee, H. K., 2004, Comparison of particulate matter characteristics before, during, and after Asian dust events in Incheon and Ulsan, Korea, *Atmos. Environ.*, 38, 1535-1545.
- Lee, C. T., Chuang, M. T., Chan, C. C., Cheng, T. J., Huang, S. L., 2006, Aerosol characteristics from the

- Taiwan aerosol supersite in the Asian yellow-dust periods of 2002, *Atmos. Environ.*, 40, 3409-3418.
- Lonati, G., Giugliano, M., Cernuschi, S., 2006, The role of traffic emissions from weekends and weekdays fine PM data in Milan, *Atmos. Environ.*, 40, 5998-6011.
- Morawska, L., Jayaratne, E. R., Mengersen, K., Jamriska, M., Thomas, S., 2002, Differences in airborne particle and gaseous concentrations in urban air between weekdays and weekends, *Atmos. Environ.*, 36, 4375-4383.
- Qin, Y., Tonnesen, G. S., Wang, Z., 2004, Weekend/weekday differences of ozone, NO_x, CO, VOCs, PM₁₀ and the light scatter during ozone season in southern California, *Atmos. Environ.*, 38, 3069-3087.
- Querol, X., Alastuey, A., Rodri'guez, S., Viana, M. M., Artinano, B., Salvador, P., Mantilla, E., Garcia Do Santos, S., Fernandez Patier, R., De La Rosa, J., Sanchez De La Campa, A., Menendez, M., 2004, Levels of PM in rural, urban and industrial sites in Spain, *Science of the Total Environment* 334-35, 359-76.
- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., 1998, *Atmospheric chemistry and physics*, John Wiley & Sons, Inc., 1360.
- Shaka, H., Saliba, N. A., 2004, Concentration measurements and chemical composition of PM_{10-2.5} and PM_{2.5} at a coastal site in Beirut, Lebanon, *Atmos. Environ.*, 38, 523-531.
- Tecer, L. H., Suren, P., Alagha, O., Karaca, F., Tuncel, G., 2008, Effect of meteorological parameters on fine and coarse particulate matter mass concentration in a coal-mining area in Zonguldak, Turkey, *Journal of Air & Waste Manage. Assoc.*, 58, 543-552.
- US Environmental Protection Agency(US EPA), 1997, National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter, Final Rule, Federal Register, 1997, 62(138), Part II, EPA, 110.
- Wexler, A. S., Ge, Z., 1998, Hydrophobic particles can activate at lower relative than slightly hygroscopic ones: a Kohler theory incorporating surface fixed charge, *Journal of Geophy. Reser.*, 103, 6083-6088.
- WHO, 2005, World Health Organization Air Quality Guidelines Global Update, 30.
- Wojas, B., Almquist, C., 2007, Mass concentrations and metals speciation of PM_{2.5}, PM₁₀, and total suspended solids in Oxford, Ohio and comparison with those from metropolitan sites in the Greater Cincinnati region, *Atmos. Environ.*, 41, 9064-9078.
- Zhao, X., Zhang, X., Xu, X., Xu, J., Meng, W., Pu, W., 2009, Seasonal and diurnal variation of ambient PM_{2.5} concentration in urban and rural environmental in Beijing, *Atmos. Environ.*, 43, 2893-2900.