

ORIGINAL ARTICLE

부산 구덕산의 미세먼지(PM₁₀) 농도 특성과 기상학적 관련성

전병일*

신라대학교 환경공학과

Meteorological Relations and Characteristics of Fine Particles at Guducksan in Busan

Byung-Il Jeon*

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

Abstract

The study investigates the characteristics of PM₁₀ concentration in Guducksan air quality observatory and in particular, analyzes the relationship between sudden increase of PM₁₀ concentration in the morning of spring 2014 and meteorological parameters. PM₁₀ concentration in April was 46.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, the highest, followed by 45.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 44.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in March and May, and 21.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in August. The low concentration in the early morning appeared on 0800 LST in spring, summer, and fall, whereas it emerged on 0900 LST in winter. High concentration in daytime lasted from 1200 LST to 1500 LST in spring and fall, whereas it continued from 1300 LST to 1600 LST in winter. The findings of PM₁₀ concentration and change of meteorological parameters in Guducksan from April 20th to 27th in 2014 are as follows. The low concentration at dawn and in the morning decreased due to strong land breeze. Also, the sudden increase of PM₁₀ concentration in the morning was attributable to low wind speed. Lastly, the sudden decrease of PM₁₀ concentration in the afternoon was attributed to diffusion by strong sea breeze.

Key words : Guducksan, PM₁₀ concentration, Meteorological parameter, Sea breeze

1. 서론

대기 중의 입자상 물질은 대기오염, 시정감소, 지구의 기후변화, 인간의 건강을 포함하여 여러 가지 환경문제에 영향을 미친다. 자연적 오염원인가 인위적 오염원인가에 따라 미세먼지의 배출원은 다양하며, 가스상 물질은 대기 중에서 광화학 반응을 통해 2차 입자로 변환하기도 한다(Sasaki와 Sakamoto, 2005). 우리나라는 시민에게 쾌적하고 삶의 질을 높일 수 있는 대기질을 확보하기

위해 청정연료사용, 저공해 자동차 보급, 도로 물청소 확대, 미세먼지 예/경보제 등을 포함한 많은 시책과 정책을 병행하여 추진하고 있다. 서울시는 자체 오염도 뿐만 아니라 외부 유입오염물질에 대한 평가를 통하여 오염도 상승의 원인을 파악하기 위해 서울시 유입 대기오염도(한강을 통한 인천 및 산업단지에서의 유입, 신도시건설에 따른 유입 그리고 고공에서의 오염물질 유입)를 측정할 수 있는 경계 및 상공 대기오염도 측정소를 설치 운영하고 있다(Yoon 등, 2009). 점오염원, 선오염원, 면오염

Received 23 February, 2015; Revised 20 March, 2015;

Accepted 26 March, 2015

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

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

원 뿐만 아니라 광역적인 오염원으로 부터 배출된 입자상물질은 대기경계층에서 수송, 변환, 희석 그리고 소멸된다(Xiao 등, 2012). 그러므로 입자상물질의 연직 구조를 이해하는 것은 입자상 물질의 고도에 따른 물리적, 화학적 과정을 이해할 뿐만 아니라 효과적인 미세먼지 관리 대책을 수립하는데 도움을 줄 수 있다. 또한 도시가 발전함에 따라 생활공간과 근무 지역이 점차 지상에서 상공으로 확장되면서 사람들은 대기오염물질의 연직분포에 많은 관심을 가지게 되었다(Ding 등, 2005).

미세먼지의 연직 구조 특성에 관한 연구에서는 관측탑(Chan 등, 2005; Ding 등, 2005; Zhang 등, 2011; Xiao 등, 2012; Sun 등, 2013)과 빌딩(Morawska 등, 1999; Tripathi 등, 2004) 그리고 풍선(Chen 등, 2002; McKendry 등, 2004; Ferro 등, 2012; Trompeter 등, 2013)에 채취기를 설치하여 각 고도에서 미세먼지 농도를 측정하여 분석하였다. 그러나 국내에서는 이러한 관측탑, 빌딩 그리고 풍선을 이용한 미세먼지의 연직구조를 측정할 예는 없고, 다만, 서울시의 관악산과 지포 부근에서 미세먼지를 측정하여 지상과 상공의 대기질을 비교한 연구가 있다(Yoon 등, 2009). 부산지역의 미세먼지와 기상학적 특성을 연구한 예는 겨울철 고농도 미세먼지 발생일과 기상학적 관련성 그리고 미세먼지 농도 분포에 따른 기상요소 분석에 대한 연구가 있다(Jeon, 2012; Kim 등, 2013). 이는 모두 지상에서 채취한 미세먼지와 기상요소의 관련성으로서 상공에서 측정된 미세먼지와 기상요소의 관련성에 대한 아직 연구는 없는 실정이다. 특히 부산지역은 인근에 울산 및 창원 등과 같은 대도시가 있고 주변에 산악지형이 많아 이와 같은 형태의 대기오염 측정소의 운영이 요구되며, 이러한 상공의 미세먼지의 특성을 배출원과 기상학적 관점으로 해석함으로써 향후 도시 대기질 관리와 대책에 통찰력을 제공할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 구덕산에 설치된 부산시 고공 대기오염 측정소의 미세먼지 농도를 광복동과 학장동 그리고 태종대의 미세먼지농도와 비교 평가하고 특히 우리나라 고공관측소인 서울의 관악산(622 m) 및 강원도의 광덕산(1,050 m)과 비교함으로써 상공 미세먼지의 특성을 고찰하고자 한다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서 사용한 미세먼지는 Fig. 1과 같이 부산광역시 서구와 사상구 그리고 사하구의 경계를 이루는 구덕산 기상관측소에서 측정된 농도 자료이다. 구덕산 기상관측소는 레이더를 이용하여 영남지방 및 주변해상의 비구름대를 실시간 관측하는 곳으로 해발고도 518m에 위치하고 있으며, 동시에 부유분진측정기를 이용하여 황사관측망이 운영되고 있다. 본 연구에서 사용된 PM₁₀ 농도는 2006년 1월 1일부터 2013년 12월 31일까지 8년간의 자료를 사용하였다. 또한 구덕산의 농도 특성 비교를 위해서 인근의 광복동(상업지역), 학장동(공업지역) 그리고 태종대(녹지지역)를 비교지점으로 선정하였다. 광복동은 구덕산 관측소 바로 아래 해안선에 가까운 지점이며, 학장동은 구덕산으로부터 내륙에 위치한 지점으로 공업단지가 형성되어 있는 곳이다. 그리고 태종대는 구덕산으로부터 바다쪽으로 떨어진 지점으로 사면이 바다로 둘러싸여 있고 녹지지역이다.

그리고 고공 관측소의 특성을 비교하기 서울의 관악산과 강원도의 광덕산을 선정하였다. 관악산 기상관측소는 서울을 비롯한 수도권 2,000만 시민의 인명과 재산을 기상재해로부터 보호하기 위하여 호우, 태풍 등의 악기상을 실시간으로 관측하고 분석하는 임무를 수행하고 있는 곳으로 해발고도 622 m에 위치하고 있다. 광덕산 기

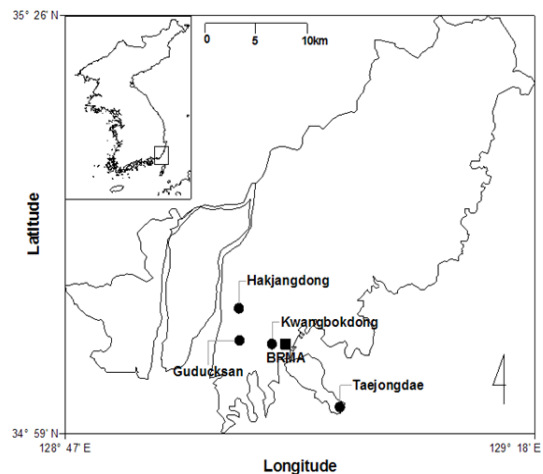


Fig. 1. Automatic air quality monitoring sites, Guducksan observatory (●) and Busan Regional Meteorological Administration (BRMA) (■) in Busan.

상관측소는 강원영서 및 경기북부지방의 태풍, 집중호우 및 위험기상으로부터 국민의 생명과 재산 피해발생을 최소화하고자 설치한 곳으로 해발고도 1,050m에 위치하고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 미세먼지농도의 연변화 및 월변화 특성

Fig. 2는 2006년부터 2013년까지 구덕산과 부산지역 도시대기 측정망(도로변 측정소를 제외)에서 측정된 PM₁₀의 연평균 농도를 나타낸 것이다. 구덕산은 2008년이 37.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았고 다음으로 2013년이 35.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 가장 낮은 농도는 2011년의 26.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 부산지역 평균 PM₁₀ 농도는 2013년을 제외하면 매년 점차 낮아지고 있는 추세를 보이고 있으며, 2009년부터 연평균 기준인 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하를 기록하였고 최근까지 계속 유지되고 있다. 2012년에는 43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮은 농도를 나타내었으나 2013년에 49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 다시 상승하였다. 구덕산 PM₁₀의 농도는 부산지역 도시대기 측정망 농도에 비해서 12.6~24.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도 낮은 값을 나타내었다. 이는 구덕산이 주변에 오염원이 없고 산악 지형으로 인해 지상보다 낮은 농도를 나타내었다고 판단된다.

Fig. 3은 2006년부터 2013년까지 8년간 구덕산에서 측정된 PM₁₀농도의 월변화와 계절변화를 나타낸 것이다. 4월이 46.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도를 보였고, 다음이 3월과 5월이 각각 45.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 44.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고 8월이 21.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 봄철인 3, 4, 5월의 평균 농도는 45.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도를 나타내었으며, 다음이 겨울로 32.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 가을이 28.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 마지막으로 여름이 25.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮은 농도를 나타내었다. 봄철은 황사의 발생과 중국으로부터 장거리 수송 및 자체 발생한 오염원에 의한 것에 의해 가장 높았으며, 여름철은 잦은 강수와 대기불안정 증가 그리고 작은 배출량에 의한 것으로 우리나라와 부산지역의 계절별 양상과 유사하게 나타났다(Jeon, 2010).

3.2. PM₁₀ 농도의 일변화 특성

Fig. 4는 2006년부터 2013년까지 부산 구덕산에서 측정된 PM₁₀ 농도의 연별 및 계절별 일변화를 나타낸 것이다. 연별 일변화를 보면 2008년, 2009년 2013년이 높은 농도를, 2011년과 2012년이 낮은 농도를 나타내었으며, 계절별 일변화를 보면 봄철이 가장 높고 여름철이 낮은 농도를 나타내었다. 연별의 일변화 양상을 보면 대체로 오전 9시부터 농도가 급상승하여 11시에 최고농도를 나타내고 15시까지 고농도가 지속되다가 17시경에 일시

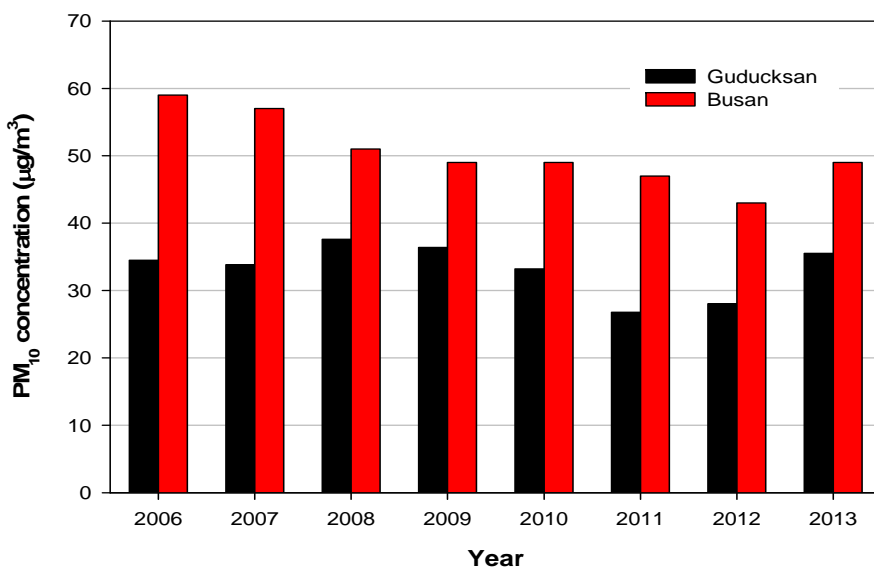


Fig. 2. Annual variation of mean PM₁₀ concentration at Guducksan and Busan area.

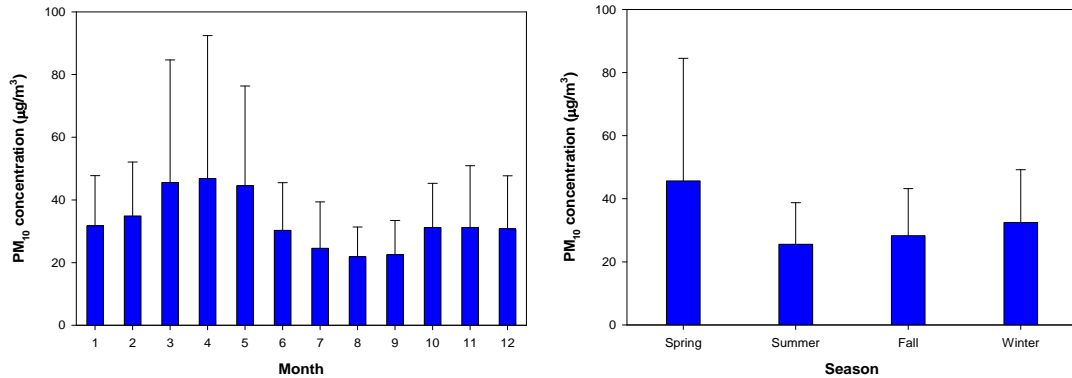


Fig. 3. Monthly and seasonal variation of mean PM₁₀ concentration at Guducsan.

적으로 저농도를 나타내고 19시에 다시 농도가 상승하였다. 그리고 이후 야간과 새벽에 일정한 농도를 나타내다가 오전 8시와 9시에 최저농도를 나타내는 양상을 보이고 있다. 계절별 일변화를 보면, 최고농도를 나타내는 시간대가 봄철은 12시부터 15시까지, 여름철은 11시에 고농도 이후 지속적으로 하강하고, 가을철은 봄철과 같이 12시부터 15시까지 고농도를 나타내었으며, 겨울철은 봄철과 가을철보다 1시간 늦은 13시부터 16시까지 고농도를 보였다. 그리고 최저농도를 나타내는 시간대를 보면, 봄철은 오전 8시와 오후 9시에 나타났고, 여름철과 가을철은 오전 8시와 오후 10시에, 겨울철은 다른 계절보다 1시간 늦은 오전 9시에 나타났다. 따라서 최고농도를 보인 시간대는 12시부터 15시까지 3~4시간 지속적으로 나타났으며, 오전 8~9시에 농도가 급강하는 양상을 보였다. 즉 오전 8~9시에 최저 농도를 보인 후 12시경부

터 농도가 급상승하는 양상을 보이는 것이 특징이었다.

Fig. 5는 2011년부터 2013년까지 부산지역 구덕산, 광복동, 학장동, 태종대에서 PM₁₀농도의 계절별 일변화를 나타낸 것이다. 4계절 모두 공업지역인 학장동의 농도가 높았고 다음으로 상업지역인 광복동과 녹지지역인 태종대가 비슷한 농도를 보였으며, 구덕산이 가장 낮은 농도를 나타내었다. 다만, 녹지지역인 태종대에서 야간과 새벽 그리고 오전까지는 광복동보다 높은 농도를 보이는 것이 특징적이었다. 그림에서 최고농도가 나타내는 시간대를 보면 학장동의 경우, 봄철과 여름철에 11시와 16시에 double peak를 보였고, 가을철과 겨울철은 10~11시 경에 뚜렷한 peak를 나타내었다. 광복동의 경우, 최고농도는 낮지만 발생한 시간대는 학장동과 비슷한 양상을 보이며, 태종대는 광복동과 비슷하나 새벽과 오전의 농도가 광복동보다 높아 농도 일변화의 변동폭이 작았다.

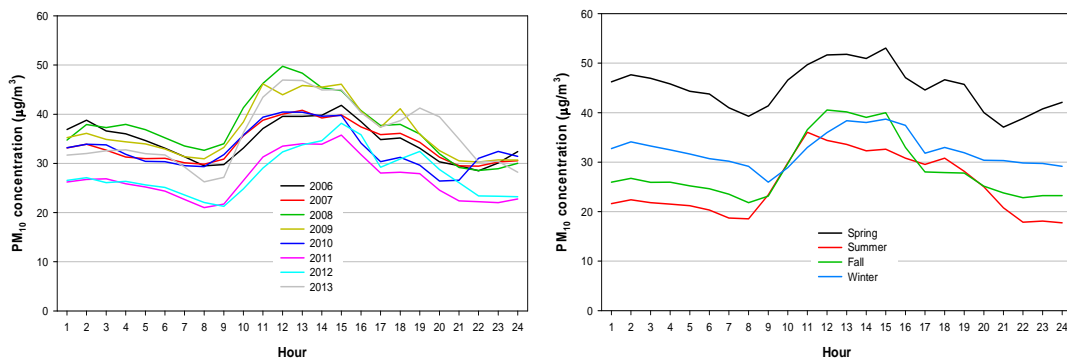


Fig. 4. Diurnal variation of annual and seasonal mean PM₁₀ concentration at Guducsan.

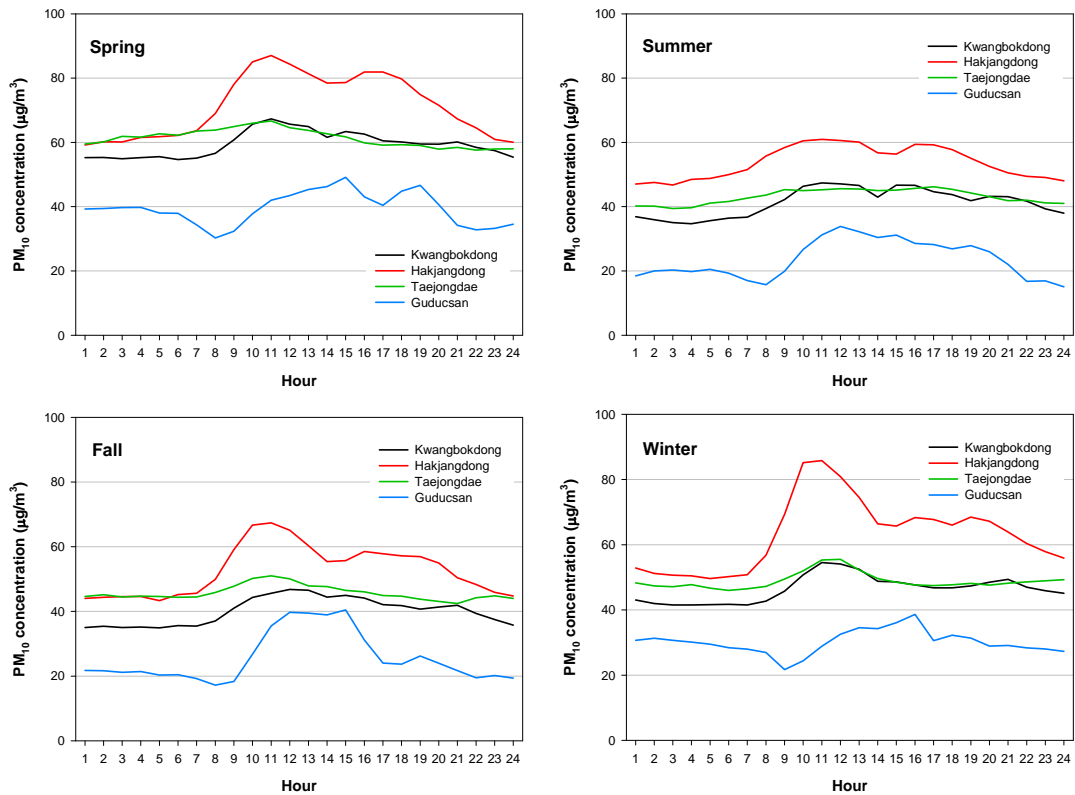


Fig. 5. Seasonal diurnal variation of mean PM₁₀ concentration at Guducsan, Kwangbokdong, Hakjangdong and Taejongdae.

전반적인 일변화 양상을 보면, 학장동은 새벽에 일정한 농도를 보이다가 출근시간대인 7시부터 농도가 급상승하고 있으며, 광복동은 학장동보다 1시간 정도 늦은 8시경부터 농도가 급상승하고, 태종대는 두 지점에 비해 아침의 농도 상승은 보여주지 못했다. 그러나 구덕산의 경우, 다른 지점에서 농도가 상승하는 시간대인 8시~9시경에 반대로 농도가 하강한다. 하강폭을 보면, 봄철이 5 µg/m³ 정도, 여름철이 3 µg/m³, 가을철이 4 µg/m³, 겨울철이 5 µg/m³ 정도의 일시적 하강이 있을 후 다시 상승하는 형태를 취하고 있다. 따라서 이와 같은 오전의 일시적인 하강을 나타내는 원인이 무엇인지 알아내는 것이 중요한 과제라고 할 수 있다. 미세먼지의 하강의 원인은 건성침적, 습성침적, 화학반응, 다른 지역으로의 수송, 혼합층 고도의 역할 등으로 볼 수 있는데, 어느 것이 큰 영향을 미쳤는지는 더 조사할 필요가 있다.

Fig. 6은 구덕산 PM₁₀농도의 일변화의 특징을 비교

고찰하기 위해 기상청이 황사관측 목적으로 설치한 고공 관측소인 서울지역의 관악산(620 m)과 송월동 그리고 강원도지역의 광덕산(1,050 m)과 춘천을 선정하여 비교하여 보았다. 서울지역의 송월동은 관악산으로부터 북쪽으로 약 16 km 떨어져 있으며 기상청 주관으로 서울에서 유일하게 황사 관측 목적으로 설치된 지점이다. 춘천은 광덕산으로부터 남동쪽으로부터 약 40 km 떨어진 지점으로 광덕산과 특성을 비교할 할 수 있는 가장 가까운 지점이다. 관악산의 경우, 봄철 농도가 가장 높고 다음으로 겨울철이며, 여름철과 가을철은 비슷한 농도를 나타내었다. 최고농도를 보인 시각은 13시~14시경과 17시~18시경으로 double peak를 보이며 15시경에 일시적 하강을 나타내었다. 그리고 야간과 새벽에 일정한 농도를 보이다가 8시(봄철, 여름철), 9시(가을철), 10시(겨울철)에 농도가 내려가는 양상을 보이는데, 이는 구덕산과 같은 현상으로 볼 수 있다. 단 차이점은 하강하는 시간대

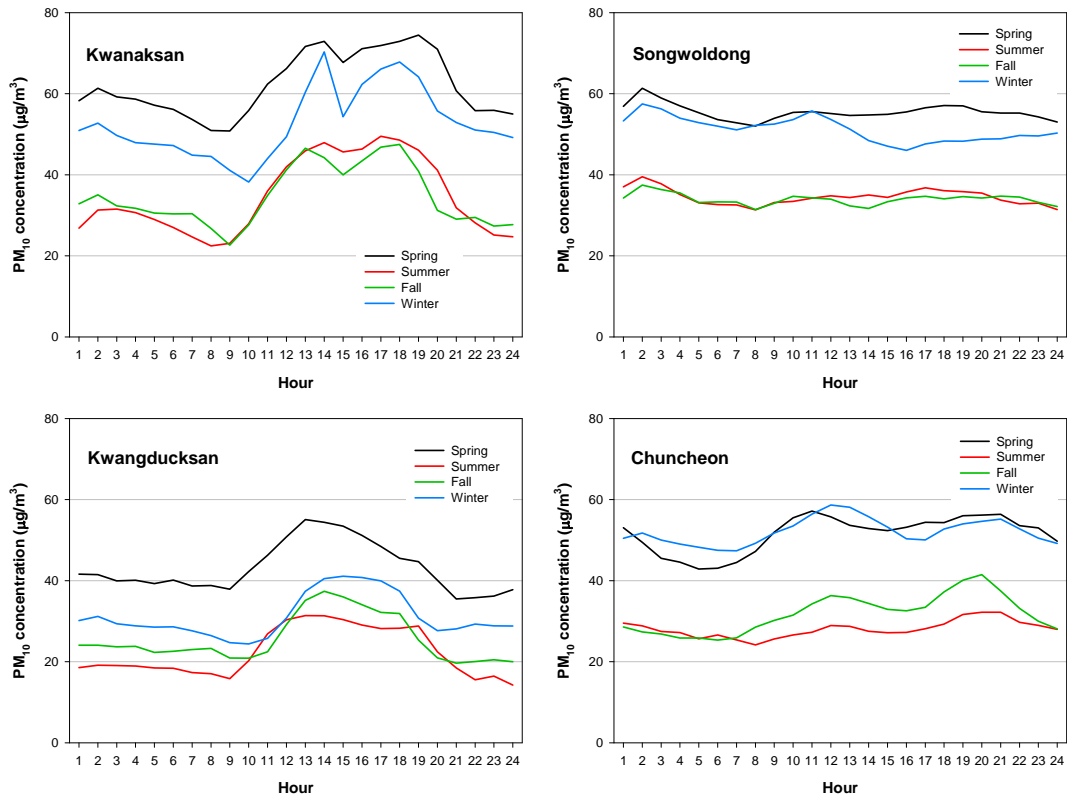


Fig. 6. Seasonal diurnal variation of mean PM₁₀ concentration at Kwanaksan, Songwoldong, Kwangduksan and Chuncheon.

가 구덕산이 관악산보다 1시간 빠르다는 것이다. 농도의 하강폭은 봄철이 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 여름철이 $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 가을철이 $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 겨울철이 $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었는데, 이는 부산 구덕산보다 하강폭이 2배 이상이었다. 그리고 관악산에서 최고농도가 나타내는 시각이 4계절 모두 오후 시간대인 것이 특징이다. 같은 서울지역인 송월동의 경우를 보면, 봄철과 겨울철, 여름철과 가을철이 비슷한 형태의 농도를 보이며, 단지, 봄철의 오후가 겨울철보다 높은 농도를 나타내었다. 새벽 2시에 일시적으로 농도가 상승한 것을 제외하면 일변화의 특성이 보이지 않는다.

광덕산의 경우를 보면, 봄철이 가장 높은 농도를 나타내었고, 다음으로 겨울철, 가을철, 여름철 순이었다. 최고농도는 봄철에 13시, 여름철은 14시~17시, 가을철은 14시, 겨울철은 13시~14시에 발생하였다. 아침의 농도 하강은 봄철과 여름철, 가을철, 겨울철 모두 9시에 발생하였다. 그 하강폭은 봄철이 $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 여름철과 가을철이 3

$\mu\text{g}/\text{m}^3$, 겨울철이 $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 부산과 비슷한 양상을 보였다. 광덕산과 인근인 춘천을 보면, 최고농도를 보인 시각은 봄철 11시와 21시, 여름철은 12시와 21시, 가을철은 12시와 20시, 겨울철은 12시와 21시로 차이는 있지만 double peak를 나타내었다. 광덕산의 최고농도는 오후 시간에 나타나 인위적인 오염원으로 볼 수 없으며, 춘천은 오전과 저녁으로 인위적인 오염에 의한 도시형으로 분류할 수 있다. 다만, 아침의 하강현상은 춘천이 광덕산보다 이른 시각에 나타났고 하강폭은 비슷하였다.

3.3. 2014년 봄철 오전 중 미세먼지 농도 급상승에 대한 사례연구

Fig. 7은 구덕산의 봄철 오전 중 미세먼지 농도 급상승을 고찰하기 위해 2014년 4월 20일부터 4월 27일까지의 PM₁₀ 농도(구덕산, 광복동, 학장동)와 기상요소의 변화(부산지방기상청, 구덕산관측소)를 나타낸 것이다. 구

덕산의 PM₁₀ 농도의 변화를 보면, 4월 20일부터 4월 27일까지 다른 지역에 비해 오전 중 PM₁₀ 농도의 급상승을 볼 수 있다. 4월 20일은 9시의 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 14시의 64 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 4월 21일은 4시의 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 14시의 136 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 4월 22일은 9시의 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 12시의 124 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 4월 23일은 8시의 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 12시의 121 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 4월 24일은 7시의 51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 최고농도는 관측자료가 없으며, 4월 25일은 2시의 21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 7시의 155 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 4월 26일은 2시의 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 6시의 107 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 4월 27일은 6시의 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 13시의 81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 농도의 급상승을 나타내었다. 이와 같은 상황을 저농도와 고농도의 발생시각을 고려하여 Table 1과 같이 두 그룹으로 구분할 수 있다. 첫 번째 그룹은 4월 22일과 23일과 같이 8~9시에 최저농도를 보인 후 정오경에 최고농도를 나타내는 경우와 두 번째 그룹은 4월 25일과 26일과 같이 새벽 2시에 최저농도를 보인 후 6~7시경에 최대농도를 보이는 것으로 구분할 수 있다. 또한 전자의 경우는 아침에 최저농도를 보이기 전날 20~21시경에 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만의 매우 낮은 농도를 보이고 있는 것이 특징이다.

그러나 인근의 학장동의 경우, 4월 22일과 4월 23일은 5~6시경에 최저농도(69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 9시경에 최고농도(135 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 나타내었으나 농도차이는 구덕산에 비해 매우 작은 편이었다. 4월 25일은 2시에 최저농도(32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 10시에 최고농도(132 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 나타내었다. 광복동의 경우, 4월 25일에 3시에 최저농도(37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 9시에 최고농도(84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 나타내었

고, 4월 26일은 5시에 최저농도(43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 10시에 최고농도(133 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 나타내었다. 학장동과 광복동은 구덕산과 비교했을 때 최저농도는 높고 최대농도는 비슷하게 나타났으나 시간에 따른 농도상승률은 구덕산에 비해 작았다.

미세먼지 농도에 영향을 미치는 기상요소로서는 풍속, 기온, 상대습도 등이 있는데, 이 중에서 가장 관련성이 큰 요소는 풍속이라고 할 수 있다(Jeon, 2012; Kim 등, 2013). 부산기상청의 기온 변화를 보면 새벽에 최저기온, 정오경에 최고기온을 나타내는 기온의 일교차가 뚜렷한 것을 알 수 있다. 그러나 구덕산 레이더관측소의 기온의 변화는 지상의 부산기상청과 달리 뚜렷하지 않다. 특징적인 것은 자정경에 기온이 하강추세에 있는 것이 아니라 오히려 소폭 상승하거나 일정한 패턴을 보여주고 있다. 풍속을 보면, 지상의 부산기상청은 정오경이나 오후에 풍속이 강하고 새벽이나 오전에는 풍속이 약한 것을 알 수 있다. 그러나 구덕산의 4월 21일부터 4월 24일까지를 보면, 자정경에 풍속이 매우 약하고 6~7시경에 6~8 m/s 의 다소 강한 바람이 불었고, 이후 정오경에는 풍속이 약해지고 오후에 다시 풍속이 강해지는 하루 중 두 번의 peak가 나타났다. 즉 지상에는 한번의 peak가 나타나는 반면에 상공에는 두 번의 peak가 나타나는 것이 특징이다.

풍향을 보면, 지상인 부산기상청은 새벽이나 야간에는 약하나 북동풍 계열이 바람이 있었고, 한낮에는 남서풍계열의 바람이 불고 있다. 따라서 야간에는 육풍, 주간에는 해풍이 불었다는 것을 알 수 있다. 구덕산의 경우, 새벽이나 아침에 첫 번째 풍속 peak가 있는 시간대는 북

Table 1. Minimum concentration and occurrence time, maximum concentration and occurrence time at Guducsan, Kwangbokdong and Hakjangdong during Apr. 22~23, Apr. 25~26, 2014

	Concentration and time	Guducsan	Hakjangdong	Kwangbokdong
Apr. 22	Mini. concen. and occur. time	37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 09 LST	69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 05 LST	
	Max. concen. and occur. time	124 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 12 LST	135 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 09 LST	
Apr. 23	Mini. concen. and occur. time	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 08 LST	59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 06 LST	
	Max. concen. and occur. time	121 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 12 LST	98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 09 LST	
Apr. 25	Mini. concen. and occur. time	21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 02 LST	32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 02 LST	37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 03 LST
	Max. concen. and occur. time	155 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 07 LST	132 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 10 LST	84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 09 LST
Apr. 26	Mini. concen. and occur. time	13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 02 LST	33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 05 LST	43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 05 LST
	Max. concen. and occur. time	107 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 06 LST	84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 11 LST	133 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 10 LST

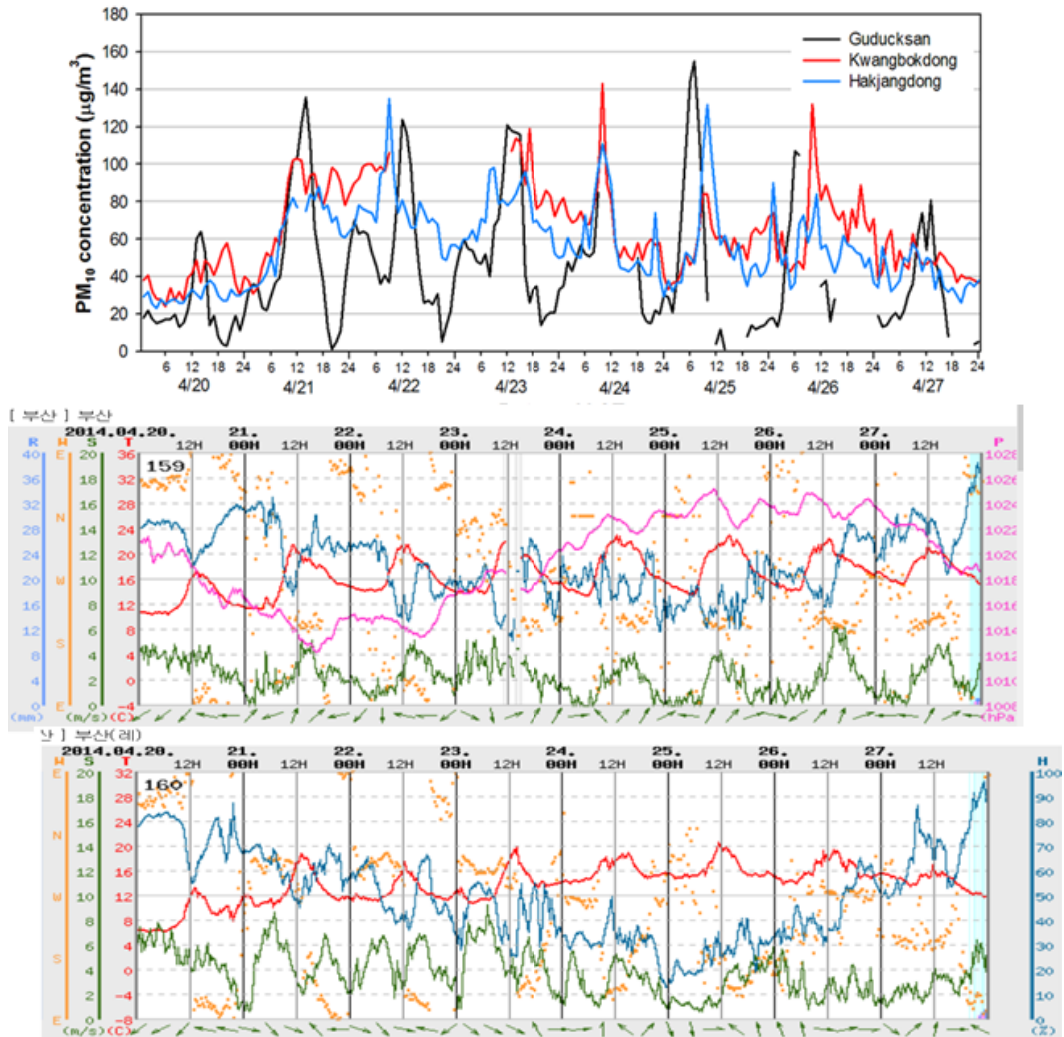


Fig. 7. Variation of PM₁₀ concentration at Guducksan, Kwangbokdong and Hakjangdong, and meteorological factors at BRMA and Guducksan from 20 to 27 Apr. 2014.

서풍 계열이 불고 두 번째 peak 시간대는 남서풍에서 남동풍계열의 바람이 불고 있다. 따라서 구덕산은 육풍이 부는 새벽에도 지상과는 달리 강한 육풍계열이 불었다고 할 수 있고, 오후에는 새벽보다는 약하지만 해풍계열이 바람이 불었다고 할 수 있다. 미세먼지와 기상요소와의 관계를 보면, 풍속이 강하면 미세먼지 농도는 낮고 풍속이 약하면 농도는 증가하는 경향이 있다(Jeon, 2010; Hu 등, 2014).

따라서 구덕산 미세먼지 농도에서 야간과 새벽의 저

농도는 강한 육풍계열의 바람에 의해 희석되고 확산되면서 농도가 급속하게 낮아졌고 오전에서 정오경 급속히 농도가 상승하는 것은 매우 낮은 풍속에 의해 미세먼지 농도가 축적되어 상승한 것으로 판단된다. 정리하면 새벽의 저농도는 강한 육풍계열의 바람에 의해 낮아졌고 오전의 농도 급상승은 낮은 풍속에 의해 의한 것이며, 오후의 급하강은 다시 해풍 계열의 강한 바람에 의해 확산되어 나타난 것으로 보인다.

4. 요약 및 결론

기상청에서 황사관측을 목적으로 설치한 부산 구덕산의 PM₁₀ 농도의 연변화, 월변화, 계절변화, 일변화 그리고 오전 중 농도의 급상승 현상을 분석한 결과 다음과 결론을 얻었다.

1) 구덕산의 PM₁₀ 농도의 연변화를 보면, 2008년이 37.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았고 2011년이 26.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이 가장 낮았으며, 부산지역 도시대기 측정망 농도에 비해서 12.6~24.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도 낮은 농도를 나타내었다.

2) 구덕산 PM₁₀의 월평균 농도를 보면, 4월이 46.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가장 높은 농도를 보였고, 다음이 3월과 5월이 각각 45.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 44.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고 8월이 21.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮은 농도를 나타내었다.

3) 구덕산 PM₁₀의 일변화 살펴보면, 야간과 새벽에 일정한 농도를 나타내고 오전 8시~9시에 일반적인 부산 지역과는 달리 농도의 하강을 나타내고, 그 이후 농도가 급상승하여 11시~12시경에 최고농도를 나타내고 15시~16시경까지 고농도가 지속되며, 17시 이후 농도가 하강한다.

4) 구덕산 PM₁₀의 계절별 일변화 보면, 이른 아침에 농도 하강을 나타내는 시간이 봄철과 여름철, 가을철은 8시에, 겨울철은 다른 계절보다 1시간 늦은 9시에 나타났고, 최고농도가 나타난 시간대는 봄철과 가을철은 12시부터 15시까지, 겨울철은 1시간 늦은 13시부터 16시까지 고농도를 나타내었고, 오전 8~9시 이후 농도가 급상승하는 형태를 보여주었다.

5) 2014년 4월 20일부터 4월 27일까지의 구덕산의 PM₁₀ 농도와 기상요소의 변화를 고찰한 결과, 새벽과 아침에 매우 낮은 농도를 나타내었고, 이후 빠른 시간에 농도가 급상승하였고 오후에 다시 농도가 급하강하는 양상을 나타내었다.

REFERENCE

- Chan, C. Y., Xu, X. D., Li, Y. S., Wong, K. H., Ding, G. A., Chan, L. Y., Cheng, X. H., 2005, Characteristics vertical profiles and sources of PM₁₀, PM_{2.5} and carbonaceous species in Beijing, *Atmos. Environ.*, 39, 5113-5124.
- Chen, C. L., Tsuang, B. J., Tu, C. Y., Cheng, W. L., Lin, M. D., 2002, Wintertime vertical profiles of air pollutants over a suburban area in central Taiwan, *Atmos. Environ.*, 36, 2049-2059.
- Ding, G. A., Chen, Z. Y., Gao, Z. Q., Yao, W. Q., Li, Y. X., Cheng, X. H., Meng, Z. Y., Yu, H. Q., Wong, K. H., Wang, S. F., Miao, Q. J., 2005, Vertical structures of PM₁₀ and PM_{2.5} and their dynamical character in low atmosphere in Beijing urban areas, *Science in China Series D-Earth Sciences*, 48(S2), 38-54.
- Ferrero, L., Cappelletti, D., Moroni, B., Sangiorgi, G., Perrone, M. G., Crocchianti, S., Bolzacchini, E., 2012, Wintertime aerosol dynamics and chemical composition cross the mixing layer over basin valleys, *Atmos. Environ.*, 56, 143-153.
- Hu, J. L., Wang, Y. G., Ying, Q., Zhang, H. L., 2014, Spatial and temporal variability of PM_{2.5} and PM₁₀ over the North China Plain and the Yangtze River Delta, China, *Atmos. Environ.*, 95, 598-609.
- Jeon, B. I., 2010, Characteristics of spacio-temporal variation for PM₁₀ and PM_{2.5} concentration in Busan, *Kor. Enviro. Sci. Soc.*, 19, 1013-1023.
- Jeon, B. I., 2012, Meteorological characteristics of the wintertime high PM₁₀ concentration episodes in Busan, *Environ. Sci.*, 21, 815-824.
- Kim, M. K., Jung, W. S., Lee, H. W., Do, W. G., Cho, J. G., Lee, K. O., 2013, Analysis on meteorological factors related to the distribution of PM₁₀ concentration in Busan, *Enviro. Sci. Inter.*, 22(9), 1213-1226.
- McKendry, I. G., Sturman, A. P., Vergeiner, J., 2004, Vertical profiles of particulate matter size distributions during winter domestic burning in Christchurch, New Zealand, *Atmos. Environ.*, 38, 4805-4813.
- Morawska, L., Thomas, S., Gilbert, D., Greenaway, C., Rijnders, E., 1999, A study of the horizontal and vertical profile of submicrometer particles in relation to a busy road, *Atmos. Environ.*, 33, 1261-1274.
- Sasaki, K., Sakamoto, K., 2005, Vertical differences in the composition of PM₁₀ and PM_{2.5} in the urban atmosphere of Osaka, Japan, *Atmos. Environ.*, 39, 7240-7250.
- Sun, X., Yin, Y., Sun, Y., Sun, Y., Liu, W., Han, Y., 2013, Seasonal and vertical variations in aerosol distribution over Shijiazhuang, China, *Atmos. Environ.*,

- 81, 245-252.
- Tripathi, R. M., Kumar, A. V., Manikandan, S. T., Bhalke, S., Mahadevan, T. N., Puranik, V. D., 2004, Vertical distribution of atmospheric trace metals and their sources at Mumbai, India, *Atmos. Environ.*, 38, 135-146.
- Trompeter, W. J., Grange, S. K., Davy, P. K., Ancelet, T., 2013, Vertical and temporal variations of black carbon in New Zealand urban areas during winter, *Atmos. Environ.*, 75, 179-187.
- Xiao, Z., Wu, J., Han, S., Zhang, Y., Xu, H., Zhang, X., Shi, G., Feng, Y., 2012, Vertical characteristics and source identification of PM₁₀ in Tianjin, *Environ. Sci.*, 24, 112-115.
- Yoon, H. G., Kim, N. J., Kim, H. J., Jo, S. H., Lee, Y. M., Jeong, G., Kim, J. Y., Kim, M. Y., 2009, Characteristics of air quality at Gwanaksan, Proceeding of the 49th Meeting of KOSAE, 678-679.
- Zhang, Y. F., Xu, H., Tian, Y. Z., Shi, G. L., Zeng, F., Wu, J. H., Zhang, X. Y., Lia, X., Zhu, T., Feng, Y. C., 2011, The study on vertical variability of PM₁₀ and the possible sources on a 220m tower, in Tianjin, China, *Atmos. Environ.*, 45, 6133-6140.