

ORIGINAL ARTICLE

## 2015~2016년 경남지역의 PM<sub>2.5</sub>의 시·공간적 특성

손장호\*

동의대학교 환경공학과

### Spatio-Temporal Characteristics of PM<sub>2.5</sub> in Gyeongnam Province during 2015-2016

Zang-Ho Shon\*

Department of Environmental Engineering, Dong-Eui University, Busan 47340, Korea

#### Abstract

Characterization of spatio-temporal variations in PM<sub>2.5</sub> in Gyeongnam (GN) province during 2015-2016 was investigated to assess the air quality in this area in terms of fine particles. Yearly mean concentrations of PM<sub>2.5</sub> ranged from 19.1 to 29.5  $\mu\text{g m}^{-3}$ . High concentrations of PM<sub>2.5</sub> were observed in spring (21.2-30.3  $\mu\text{g m}^{-3}$ ) and winter (20.2-30.3  $\mu\text{g m}^{-3}$ ). Low concentrations of PM<sub>2.5</sub> were generally observed in fall (16.2-23.2  $\mu\text{g m}^{-3}$ ). PM<sub>2.5</sub> concentration was highest in the morning (10 AM). The fractions of PM<sub>2.5</sub> in PM<sub>10</sub> were 0.51-0.62 and two were significantly correlated ( $r=0.779-0.830$ ), suggesting common sources (fossil fuel combustion, mobile sources, etc). CO was significantly correlated with PM<sub>2.5</sub> in highly urbanized areas such as the city of Changwon (CW,  $r=0.711$ ), compared to other air pollutants (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, and O<sub>3</sub>), suggesting dominance of industrial combustion sources.

**Key words** : PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> ratio, Gyeongnam

#### 1. 서론

대기 중에 부유하고 있는 입자상물질 (Particulate Matter, PM)은 입자의 크기에 따라 부유먼지(PM<sub>10</sub>, 공기역학직경이 10 마이크로미터 이하인 입자) 와 미세먼지(PM<sub>2.5</sub>, 공기역학직경이 2.5 마이크로미터 이하인 입자)로 구분하고, 이들의 주요생성원은 해양의 해염입자(sea spray aerosol), 토양기원의 먼지 등과 같은 자연배출원과 자동차 및 산업제조, 에너지산업

등에서 사용하는 화석연료 연소에 따른 인위적 배출 원으로 구분할 수 있다. 또한 화학반응에 의한 기체상에서 입자상으로의 전환은 주요한 2차 생성 기작이다 (Seinfeld and Pandis, 2016). 최근 중국의 빠른 경제 성장에 따른 부유먼지 및 미세먼지를 포함한 기체상 대기오염물질의 장거리 수송이 국내의 PM<sub>2.5</sub> 및 PM<sub>10</sub> 농도에 크게 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Heo et al., 2009). 그러나 이들의 영향이 정확히 얼마가 되는지에 대한 기여도의 정량화가 아직 미흡한 실정이다.

Received 20 June, 2017; Revised 28 August, 2017;

Accepted 30 August, 2017

\*Corresponding author: Zang-Ho Shon, Department of Environmental Engineering, Dong-Eui University, Busan 47340, Korea  
Phone : +82-51-890-2078  
E-mail : zangho@deu.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.

국내 PM<sub>10</sub>의 오염도는 1995년 측정을 시작한 후로 조금씩 감소하다가 1999년을 기점으로 2002년까지 증가하였지만, 2002년 이후 2012년까지 PM<sub>10</sub>의 연평균 농도는 감소추세를 보이고 있다(NIER, 2016). 그러나 국내에서는 2015년도에 PM<sub>2.5</sub>를 대기환경기준물질에 포함시켜 PM<sub>2.5</sub>에 대한 장기 농도 추세를 판단하기에는 관측자료가 부족한 실정이다. 인체 유해도 측면에서는 PM<sub>2.5</sub>는 PM<sub>10</sub>보다 훨씬 영향이 큰 것으로 알려져 있다.

국내 PM<sub>10</sub> 대기환경기준은 각각 연평균 50  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ , 일평균 100  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ , PM<sub>2.5</sub>의 대기환경기준은 연평균 25  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ , 일평균 50  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ 으로 WHO의 기준(연평균 10  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ , 일평균 25  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ )로 2배 이상 높아 실제 한국환경공단에서 예보하는 “보통”수준(16 ~ 50  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ )의 농도 또한 WHO의 기준으로 살펴보면 인체에 유해한 수준이다. 2015년 주요 대도시의 PM<sub>2.5</sub> 연평균 농도는 23 ~ 29  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ 의 범위로 나타났고, 인천이 29  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ 로 가장 높았고 서울이 23  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ , 인접 대도시인 부산의 농도는 26  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ 로 중간 수준으로 나타났다(NIER, 2016). 그러나 경남지역의 PM<sub>2.5</sub> 농도 자료는 매우 부족한 실정이다. 2012 ~ 2013년도 경남 진주시

에서 측정된 PM<sub>2.5</sub>의 연평균 농도는 22.6  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ 로 부산보다 약간 낮은 수치를 보였다(Park et al., 2014). 경남지역의 PM<sub>2.5</sub> 주요 발생원은 대도시의 PM<sub>2.5</sub>의 주요 인위적 발생원과는 매우 다른 양상을 보인다. 경남은 두 개의 대규모 석탄화력발전소가 하동과 삼천포에 위치하고 있고 또한 진주시와 창원시가 존재하며 이 도시를 제외한 중소도시로 이루어져있다. 또한 거제시에 대규모 조선소가 위치하고 있어 대규모의 도장공정에 의한 휘발성 유기화합물(VOCs)의 배출에 따른 2차 생성의 기여도도 무시하지 못할 것으로 추측된다. 따라서 본 연구지역은 수도권 및 대도시와 매우 다른 PM<sub>2.5</sub>의 시공간적 특성을 가질 것으로 판단된다. 본 연구에서는 경남지역의 PM<sub>2.5</sub>의 특성을 파악하여 지역특성에 맞는 PM<sub>2.5</sub>의 저감대책을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

경상남도(경남)의 총 면적은 10,522  $\text{km}^2$ 이며 인구는 약 337만명, 8개시 10개군의 하위행정구역이 존재한다. PM<sub>2.5</sub> 측정자료는 2015년 1월1일부터 공개되었기

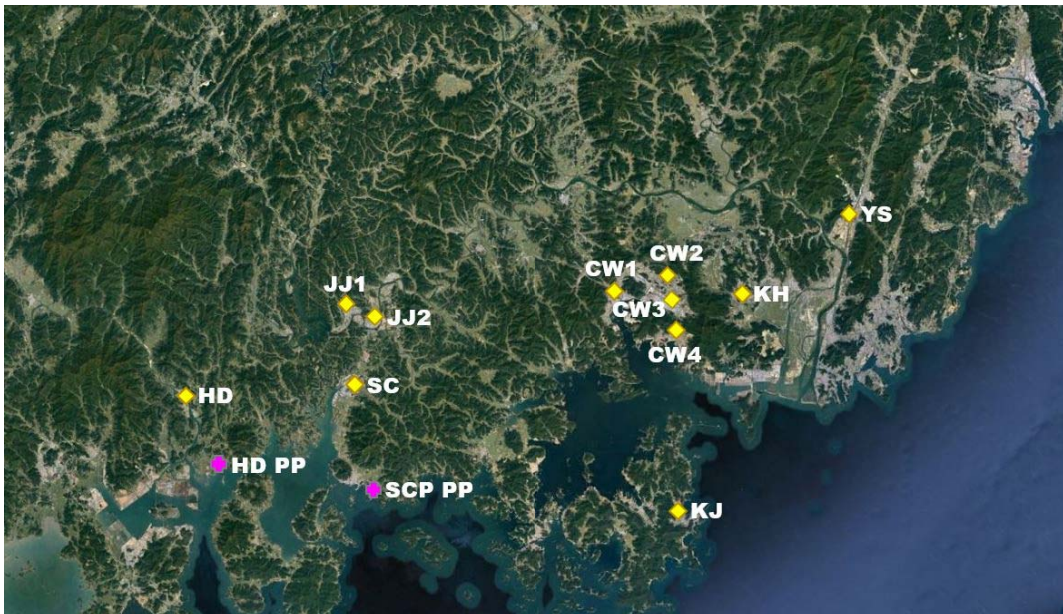


Fig. 1. Map of PM<sub>2.5</sub> sampling sites in Gyeongnam province. CW : Changwon, HD : Hadong, SC : Sacheon, KH : Kimhae, YS : Yongsan, KJ : Keoje, JJ : Jinju, HD PP : Hadong Power Plant, SCP PP : Samcheonpo Power Plant.

때문에 본 연구에서는 2015년 1월 1일부터 2016년 12월 31일까지의 2년간의 시간별 자료를 이용하여 분석하였다. 경남의 PM<sub>2.5</sub> 측정자료는 창원시(CW) 4개, 진주시(JJ) 2개, 거제시(KJ), 김해시(KH), 사천시(SC), 양산시(YS), 하동군(HD) 각각 1개 측정소의 측정자료를 이용하였다. 본 연구에 이용된 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>의 질량농도는 각각 중량농도법과 베타선 흡수법으로 측정되었다. 기체상 대기환경기준물질인 SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>의 시간별 자료도 함께 이용하였다. 이들 측정소의 위치와 경남에 소재하고 있는 삼천포화력발전소와 하동화력발전소를 Fig. 1에 나타내었다. 그리고 이들 2개 화력발전소의 석탄(유연탄)소비량 자료는 한국남동발전(<http://www.koenergy.kr/kosep/fr/main.do>)과 한국남부발전(<https://www.kospo.co.kr/>)에서 획득하였다. 측정지점(창원, 거제, 진주)의 월별 바람장미 자료는 기상청의 기상월보(3지점 자료 제공) 자료를 활용하였다([http://www.kma.go.kr/weather/climate/data\\_sfc\\_ann\\_mon.jsp](http://www.kma.go.kr/weather/climate/data_sfc_ann_mon.jsp)).

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 시간별 PM<sub>2.5</sub>의 농도 분포

Fig. 2는 경남 7개 지역의 2015년도(a-b)와 2016년도(c-d)의 PM<sub>2.5</sub> 시간별 변화를 나타낸다. 진주시, 사천시, 양산시, 창원시의 변화 양상을 살펴보면 PM<sub>2.5</sub> 변화 분포는 매우 유사하고 상관관계(진주 vs 사천,  $r=0.779$ ; 양산 vs 진주,  $r=0.890$ ; 창원 vs 양산,  $r=0.944$ )도 매우 높아 이들 지역은 주요 발생원 또는 물리과정(수송)이 매우 유사한 것으로 추정된다. 이들 도시 모두 오전 10시경에 최고치를 보이고 16시(사천), 17시(진주), 18시(양산과 창원)에 최저치를 나타내었다. 이들 4개 도시의 최고치는 23.2 ~ 34.6  $\mu\text{g m}^{-3}$  이었고, 최저치는 18.1 ~ 23.4  $\mu\text{g m}^{-3}$ 이었다. 거제, 김해, 하동은 이들 도시들과 매우 다른 양상을 보였다. 특히 김해와 하동은 주-야간의 차(0.4  $\mu\text{g m}^{-3}$  이하)가 미약한 것으로 나타났다. 김해의 주(08 ~ 18시)·야간(19 ~ 07시) 평균농도는 각각 20.9  $\mu\text{g m}^{-3}$ 과 20.5  $\mu\text{g m}^{-3}$ , 하동의 주-야간 평균농도는 26.8  $\mu\text{g m}^{-3}$ 과 26.4  $\mu\text{g m}^{-3}$ 이었다. 거제시의 경우는 주-야간 농도 차이(3.3  $\mu\text{g m}^{-3}$ )가 확연하였다. 거제시의 주간 농도는 26.5

$\mu\text{g m}^{-3}$ , 야간 농도는 23.2  $\mu\text{g m}^{-3}$ 이었다. 거제는 섬이며 따라서 자연적 배출원인 해양의 영향에 의해 농도가 낮은 것으로 예상되었으나, PM<sub>2.5</sub>농도는 다른 지역보다 낮지 않았다. 거제시의 경우 도로이동오염원에 의한 2013년도 PM<sub>2.5</sub>의 배출량은 전체 배출량의 20%를 차지한다. 해상선박운송과 같은 비도로이동오염원의 배출량은 전체 배출량의 77%를 차지한다. 그러나 거제 조선소의 도장공정에 의한 VOC 배출량은 경남지역 전체 VOC 배출량(79,053톤)의 32%를 차지하여 PM<sub>2.5</sub>의 2차 생성(VOC와 OH 및 O<sub>3</sub>의 산화반응)에 의한 기여도는 타 지역에 비해 매우 높을 것으로 추정된다.

대도시에서 비화석연료로부터 생성된 2차 유기 에어로졸의 생성량은 여름철 총 탄소량의 70% 정도 된다는 연구사례도 발표되었다(Shon et al., 2012). 서울에서 2차 유기탄소의 생성량은 총유기탄소의 15 ~ 65%를 차지하는 것으로 보고되었다(Shon et al., 2012). 창원시와 진주시의 도로이동오염원에 의한 PM<sub>2.5</sub>의 배출량은 각각 도시 전체 배출량의 7%와 26%를 차지한다(Table 1). 경남지역의 시간별 PM<sub>2.5</sub> 분포 패턴은 대도시(서울)에서 PM<sub>2.5</sub>의 시간별 변화와 비교하면 일부 유사점을 찾을 수 있다. 즉 오전(9시)에 최고치를 나타내는 것은 동일하다(Ghim et al., 2015). 그러나 야간시간(23시)에 2차 피크를 보이는 경향은 경남지역에서는 나타나지 않았다. 이는 자동차배출이외 다른 배출원이 PM<sub>2.5</sub> 시간변화에 영향을 미친다는 것을 입증한다. 창원의 경우 제조업연소가 전체 배출량의 77%를 차지하고, 하동군의 경우 에너지산업연소 부문(석탄화력발전소)이 전체 배출량의 86%를 차지한다.

#### 3.2. 일·월별 PM<sub>2.5</sub>의 농도 분포

경남 지역의 최근 2년간의 PM<sub>2.5</sub> 일변화 양상을 Fig. 3에 나타내었다. 경남 지역 모두에서 뚜렷한 일변화 양상을 나타내었으며, 특히 하동 지역이 가장 일변화 폭이 큰 것으로 나타났다. 사천, 진주, 창원의 경우 가장 최근 1년(2016년 1월 1일부터 12월 31일까지) 일변화 양상을 살펴보면, PM<sub>2.5</sub> 최대 일평균 농도가 나타난 날은 2월 27일이고 농도는 각각 55  $\mu\text{g m}^{-3}$ , 69  $\mu\text{g m}^{-3}$ , 65  $\mu\text{g m}^{-3}$ 이었다(Fig. 3). 하동과 양산은 PM<sub>2.5</sub>

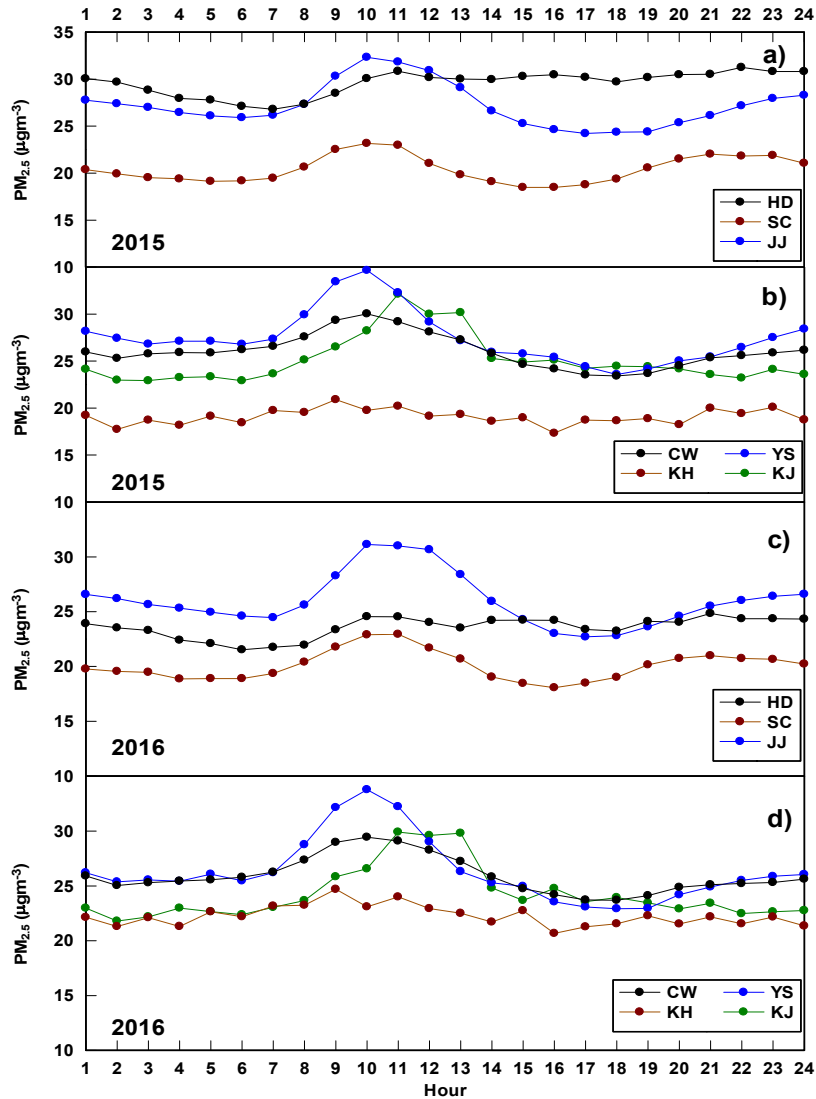


Fig. 2. Hourly variation of  $PM_{2.5}$  in seven districts of Gyeongnam province during 2015 ~ 2016.

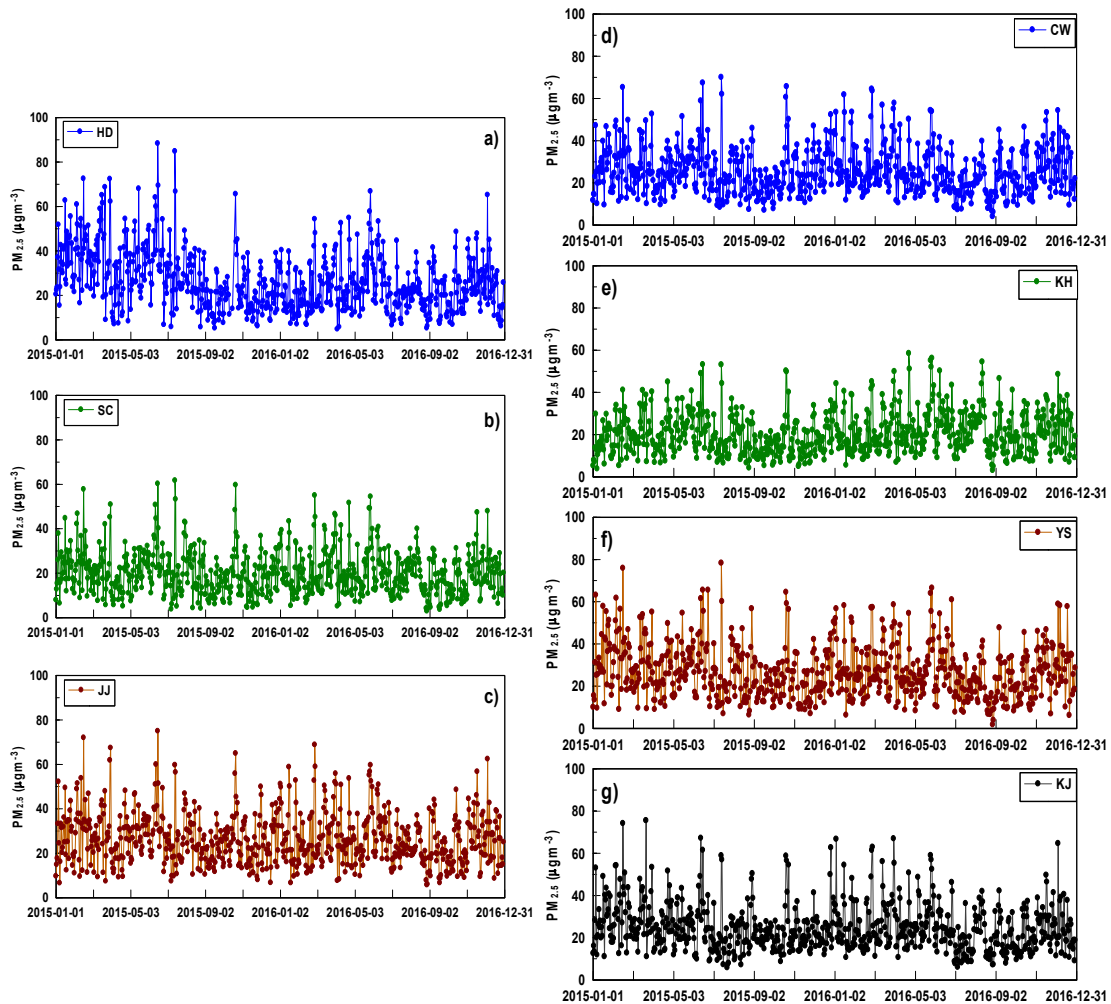
최대 일평균 농도가 나타난 날은 5월 28일  $67 \mu\text{gm}^{-3}$ 였다. 김해와 거제의 경우는 각각 4월 23일  $59 \mu\text{gm}^{-3}$ , 3월 31일  $67 \mu\text{gm}^{-3}$ 이었다. NOAA HYSPLIT 모델을 이용하여 최고 농도가 나타난 날의 5일 이전의 공기 역궤적 분석에 의하면 창원(2월 27일)의 경우 중국 산둥성 기원으로 허난성, 안후이성, 장쑤성을 거쳐서 측정소 지점에 도달하여 중국의 영향이 큰 것으로 판단된다(Fig. 4). 양산(5월 28일)의 경우 서해를 출발해서

수도권, 경북을 거쳐서 측정소에 도달하여 국내 영향이 큰 것으로 판단된다. 김해(4월 23일)와 거제(3월 31일)의 경우 역궤적 경로가 유사하며 서해 수도권을 거쳐 측정소에 도달하여 국내 영향이 큰 것으로 추정된다.

2015년과 2016년도의  $PM_{2.5}$ 의 월변화를 살펴보면, 뚜렷한 차이가 존재한다(Fig. 5). 2015년도 최대값은 2월 또는 6월에 나타나고, 2016년도는 3월 또는 5~6월에

**Table 1.** PM<sub>2.5</sub> emission rate of the sources in Gyeongnam province in 2013 (tonyr<sup>-1</sup>)

	Other area sources	On-road mobile	Off-road mobile	Non-industry combustion	Industrial process	Electric generation	Industrial combustion	Waste disposal
CW	4	207	413	16	39	-	2274	3
KH	3	152	61	7	1	-	99	1
YS	1	92	61	2	1	-	1	2
KJ	1	47	184	3	0.02	-	3	0.4
HD	1	25	35	2	0.04	380	0.1	0.1
SC	1	39	65	3	0.02	-	1	0.1
JJ	1	88	56	10	1	3	171	1
GN total	21	1035	1132	70	47	838	2701	12



**Fig. 3.** Daily variation of PM<sub>2.5</sub> in seven districts (a-g) of Gyeongnam province during 2015 ~ 2016.



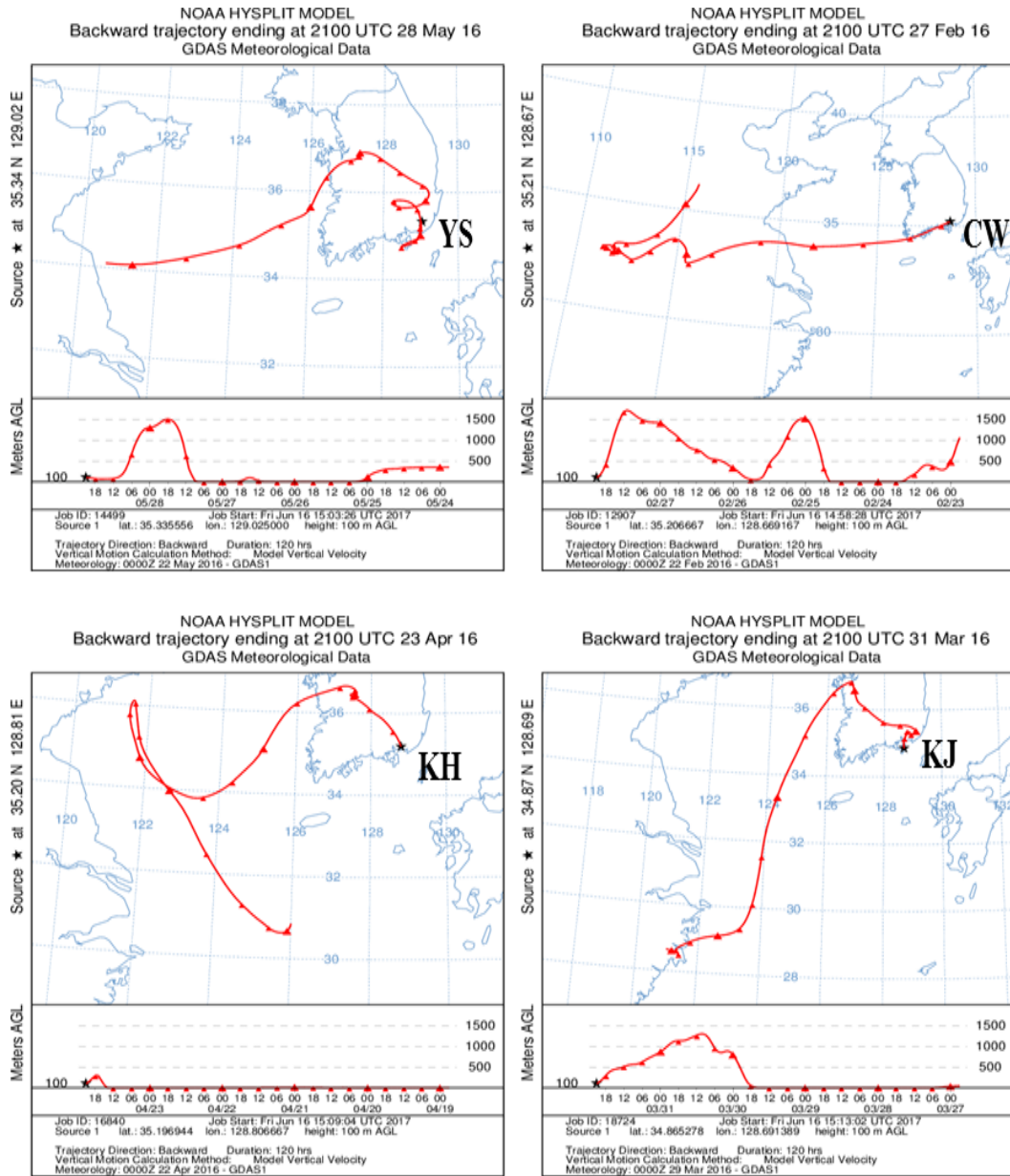


Fig. 4. Air mass back trajectories during the highest PM<sub>2.5</sub> day in Gyeongnam provinces during 2016.

나타났다. 최소값은 2015년도 9월에 집중되며, 2016 년도는 7월 또는 10월에 나타났다. 2015년도를 살펴 보면 창원, 양산, 거제시의 최대값은 2월에 각각 31.0  $\mu\text{gm}^{-3}$ , 36.4  $\mu\text{gm}^{-3}$ , 33.7  $\mu\text{gm}^{-3}$ , 하동은 3월에 40.8  $\mu\text{gm}^{-3}$ , 사천, 진주, 김해시는 6월에 각각 26.0  $\mu\text{gm}^{-3}$ ,

33.1  $\mu\text{gm}^{-3}$ , 23.4  $\mu\text{gm}^{-3}$ 를 나타내었다. 최소값은 양산 (11월 20.0  $\mu\text{gm}^{-3}$ )과 거제(7월 19.4  $\mu\text{gm}^{-3}$ )를 제외한 모든 지역에서 9월에 나타났다(12.7 ~ 16.4  $\mu\text{gm}^{-3}$ ). 한편 주풍향과 농도와의 관련성을 살펴보면 거제시의 월평균농도 패턴은 남풍계열의 주풍에서 낮은 농도를

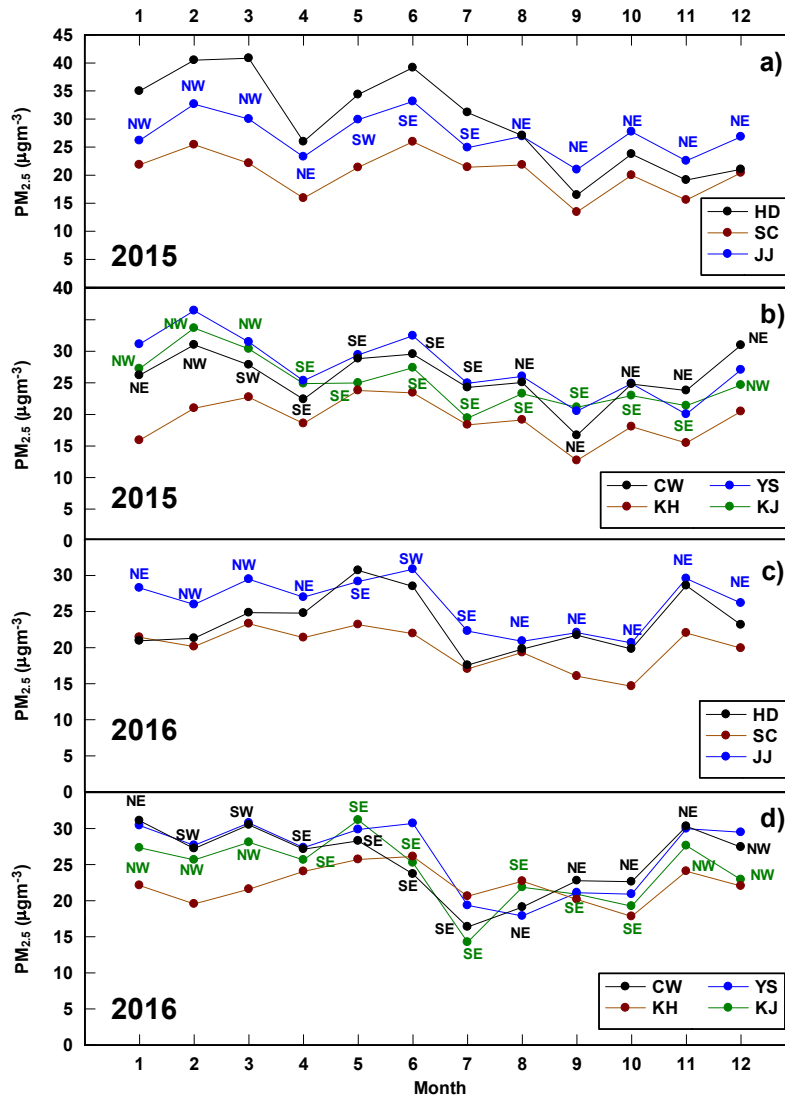


Fig. 5. Monthly variation of PM<sub>2.5</sub> in seven districts of Gyeongnam province during 2015 ~ 2016. Dominant wind directions: NE (0° ~ 90°), SE (90° ~ 180°), SW (180° ~ 270°), NW (270° ~ 360°).

보였다. 그러나 양산 및 진주시의 경우 남풍계열의 주 풍임에도 불구하고 농도가 상대적으로 낮지 않았다. 따라서 주풍향과 농도의 상관성은 낮은 것으로 판단된다.

2016년도를 살펴보면 하동과 거제의 경우 5월에 최대값(각각 30.7 µgm<sup>-3</sup>, 31.2 µgm<sup>-3</sup>)을 나타내고 창원은 1월(31.1 µgm<sup>-3</sup>), 김해와 진주는 6월에 각각 26.1

µgm<sup>-3</sup>, 30.8 µgm<sup>-3</sup>, 사천과 양산은 3월에 각각 23.3 µgm<sup>-3</sup>, 30.8 µgm<sup>-3</sup> 최대값을 나타내었다. 1월은 북동과 북서풍 계열, 3월은 남서와 북서풍 계열, 5월의 주 풍향은 남동풍 계열, 6월은 남동과 남서풍 계열로 나타났다(Fig. 5). 창원, 하동, 거제의 경우 최소값은 7월에 각각 16.4 µgm<sup>-3</sup>, 17.6 µgm<sup>-3</sup>, 14.2 µgm<sup>-3</sup>를 보이고 양산은 8월 17.9 µgm<sup>-3</sup>, 진주, 김해, 사천은 10월에 각각

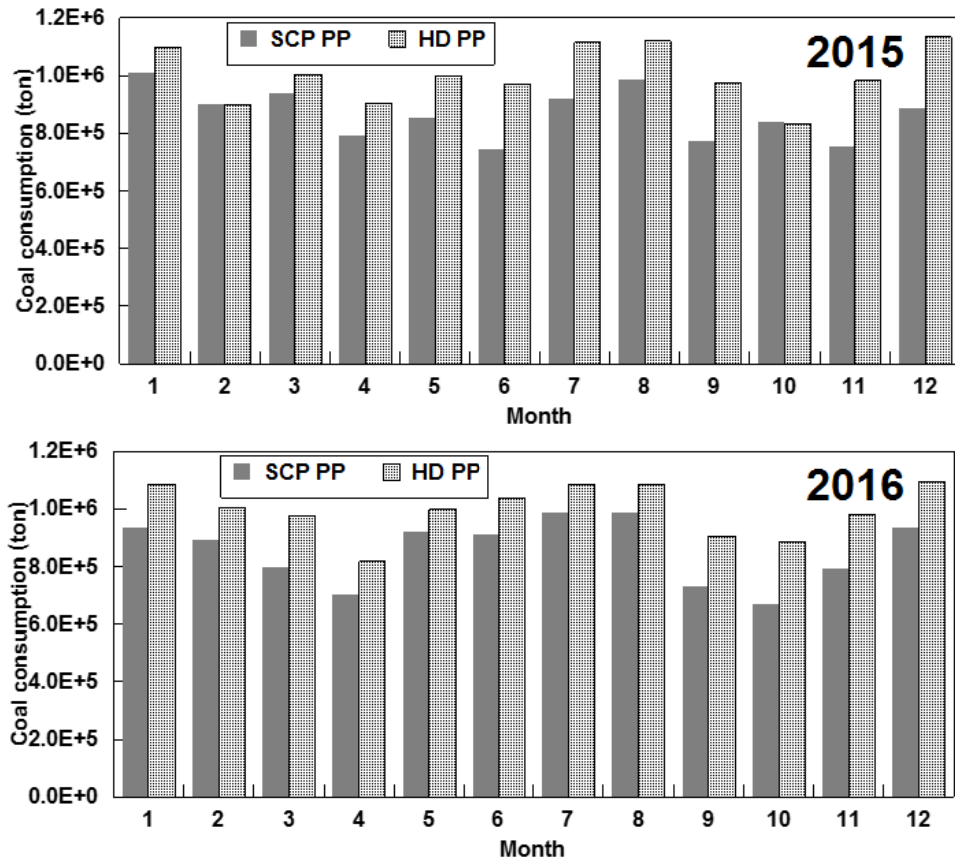


Fig. 6. Coal consumptions at two coal-fired power plants (Samcheonpo (SCP) and Hadong (HD)) during 2015 ~ 2016.

20.6  $\mu\text{g m}^{-3}$ , 17.8  $\mu\text{g m}^{-3}$ , 14.6  $\mu\text{g m}^{-3}$ 로 나타났다. 최근 2년간의 도시간의 월변화 패턴을 살펴보면 전반적으로 유사성이 높은 것으로 나타났다(Fig. 5). 진주와 양산이 가장 월변화 양상이 유사( $r=0.917$ )한 것으로 나타났다. 사천과 양산 또한 높은 유사( $r=0.838$ ) 양상을 보였다.

창원과 같은 제조업연소의 배출량이 전체 배출량의 기여도가 높은 지역에서 CO와  $\text{PM}_{2.5}$ 와의 상관관계가 높은 것으로( $r=0.711$ ) 나타남으로써  $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도는 제조업연소와 밀접한 관계가 있는 것으로 추정된다(Table 2). 경남 모든 지역에서  $\text{PM}_{10}$ 과  $\text{PM}_{2.5}$ 는 매우 높은 상관관계( $r=0.779 \sim 0.830$ )를 나타냄으로써 발생원 또는 장거리 수송과 같은 영향이 유사하게 미치는 것으로 판단된다. Park et al.(2014)에 의하면

진주시 대기 중 입자상물질의 질량농도 입경분포는 입경 약 2  $\mu\text{m}$  전후를 기준으로 bimode 분포로 나타났으며, 특히 초대입자 영역은 분리입경 3.2 ~ 5.6  $\mu\text{m}$  그리고 미세입자 영역은 분리입경 약 0.32  $\mu\text{m}$ 에서 피크를 나타내었다.  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  농도비는 창원 0.53, 하동 0.57, 거제 0.57, 김해 0.56, 사천 0.53, 양산 0.53, 진주 0.53로 나타났다. 국내에서 중량농도법으로 측정된  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 의 농도비 보고사례를 살펴보면 인천 0.62, 경기 포천 0.54, 서울 0.54, 부산 0.54 ~ 0.56(NIER, 2009; Cho et al., 2003; Jeon, 2010). 따라서 경남 지역에서의 농도비는 타 도시와 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있다. 삼천포와 하동 화력발전소의 2015 ~ 2016년 석탄(유연탄) 소비량을 살펴보면 냉난방이 이루어지는 12 ~ 2월(1.8 ~ 2.1 백만톤)과 5 ~ 8월(1.7 ~



**Table 2.** Correlation coefficients between PM<sub>2.5</sub> and ambient air pollutants (SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, and PM<sub>10</sub>) during 2015 ~ 2016

	SO <sub>2</sub> -PM <sub>2.5</sub>	CO-PM <sub>2.5</sub>	O <sub>3</sub> -PM <sub>2.5</sub>	NO <sub>2</sub> -PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub> -PM <sub>2.5</sub>
CW	0.471	0.711	0.071	0.553	0.825
KH	0.331	0.606	0.164	0.439	0.820
YS	0.271	0.494	0.000	0.588	0.779
KJ	0.362	0.541	0.241	0.431	0.827
HD	0.336	0.547	0.253	0.381	0.806
SC	0.345	0.559	0.210	0.390	0.801
JJ	0.411	0.585	0.078	0.544	0.830

2.1 백만톤)에 집중되고 있다(Fig. 6). 석탄소비량과 경남지역의 PM<sub>2.5</sub> 월 변화량은 직접적인 관계는 존재하지 않는 것으로 보인다( $r \leq 0.261$ ). 미국 펜실바니아 남서지역에서 석탄화력발전소의 폐쇄에 따른 대기질 영향 연구에 의하면 0.94  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$  (9%) 감소가 나타났다고 보고되었다(Russell et al., 2017). 동남아시아 지역에서 전기 수요의 급진적인 성장에 따른 석탄화력발전소의 배출에 따른 PM<sub>2.5</sub>의 농도 증가는 2030년에 베트남 북부지역에서 11  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$  증가할 것으로 예측하였다(Koplitz et al., 2017). 경남지역에서의 석탄화력발전소의 석탄 소비량을 고려하면 이에 대한 영향을 알아보기 위해 수치 모델링을 통한 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

### 3.3. 계절별 및 연평균 PM<sub>2.5</sub>의 농도 분포

경남 지역에서 2016년(2015) 연평균 농도는 창원 25.6(26.0), 하동 23.5(29.5), 거제 24.2(25.1), 김해 22.2(19.1), 사천 20.0(20.4), 양산 26.3(27.5), 진주

26.0(27.1)  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ 로 나타났다. 하동지역의 농도는 타 지역과 다르게 크게 개선되었으며, 김해는 다소 악화된 것을 알 수 있다. 2016년 기준으로 양산, 창원, 진주는 PM<sub>2.5</sub>의 연평균 국가기준치(25  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ )를 상회하는 것으로 나타났다. 통계기법인 일원배치법-분산분석(Analysis of Variance, ANOVA)결과에 따르면 경남 지역의 7개 지점에 대한 연평균 차이가 있다고 나타났다( $p \ll 0.0001$ ). 계절별 특성을 살펴보면, 봄철(22.8 ~ 30.3  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ ) 또는 겨울철(21.5 ~ 30.3) PM<sub>2.5</sub>의 농도가 다른 계절보다 가장 높은 것으로 나타났다(Table 3). 모든 지역에서 가을철(16.2 ~ 23.2  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ )에 농도가 가장 낮은 것으로 나타났다. 여름철의 장마에 의한 강수효과는 크지 않은 것으로 판단된다. 봄과 겨울철 고농도는 중국발 스모그의 장거리 수송과 매우 연관이 높은 것으로 판단된다. 서울 지역의 100  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ 이상의 고농도 PM<sub>2.5</sub>는 기단이 서쪽에서 기원되었을 때 나타났다고 보도되었다(Jeong et al., 2015). 최근 연구에 의하면 서울지역에서 장거리수송을 포함한 외부수송에

**Table 3.** Statistical summary of seasonal PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> mean concentrations in the Gyeongnam province during 2015 ~ 2016 (in  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ )

	PM <sub>2.5</sub>				PM <sub>10</sub>			
	Spring	Summer	Fall	Winter	Spring	Summer	Fall	Winter
CW	27.5±10.3	23.0±11.0	21.3±10.6	29.0±11.8	56.3±25.2	43.5±15.9	40.9±16.3	51.0±24.5
KH	22.8±10.4	21.7±10.3	17.0±9.5	20.2±9.2	44.3±20.7	34.0±13.0	30.5±14.4	41.5±21.6
YS	29.1±11.9	25.1±13.5	22.0±10.3	30.3±13.4	65.6±25.6	43.8±17.0	37.4±14.0	58.5±26.8
KJ	27.6±11.1	21.9±11.4	21.3±9.3	26.8±12.6	51.2±22.7	38.1±14.1	37.9±12.4	43.6±20.3
HD	30.3±14.0	27.1±13.9	20.0±10.1	26.8±13.4	57.6±26.2	44.4±15.4	39.3±18.0	45.6±24.8
SC	21.2±10.1	21.2±10.4	16.2±9.3	21.5±9.8	44.5±23.2	32.7±13.3	27.0±10.2	45.5±22.8
JJ	28.2±11.7	26.4±10.9	23.2±10.3	27.6±12.8	57.9±25.5	46.1±16.3	45.5±18.6	51.7±25.8

의한 기여도는 최대 72%인 것으로 보고되었다(Ahmed et al., 2015). Kim et al.(2017)은 서울지역에서 3차원 광화학수송모델을 이용한 외부 수송에 의한 PM<sub>2.5</sub> 농도의 기여도를 평가하였는데, 분석결과에 따르면 기여도는 계절적 차이가 있고, 봄과 가을에 높고 3월에 80%, 여름에 낮고 7월에 약 40%를 차지하는 것으로 발표하였다. 따라서 경남 지역의 PM<sub>2.5</sub> 농도 또한 봄철에 중국으로부터의 장거리 수송에 크게 영향을 받을 것으로 판단된다. 그러나 경남은 수도권과 달리 가을철에 가장 낮은 농도를 보여 이는 지역 배출원에 의해 농도 수준이 결정되는 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

경남 지역에서 2015 ~ 2016년 대기오염 자동측정망에서 측정된 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 농도자료를 이용하여, PM<sub>2.5</sub>의 계절별, 월별, 일별, 시간별 특성과 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 농도 비를 고찰하였다. 경남 지역의 PM<sub>2.5</sub> 연평균 농도는 19.1(김해) ~ 29.5(하동)  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ 로 나타났다. 양산, 창원, 진주는 PM<sub>2.5</sub>의 연평균 국가기준치(25  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ )를 상회하는 것으로 나타났다. 경남 지역에서 봄철(22.8 ~ 30.3  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ ) 또는 겨울철(21.5 ~ 30.3  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ )에 농도가 가장 높고 가을철(16.2 ~ 23.2  $\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ )에 농도가 가장 낮은 것으로 나타났다. 사천과 김해를 제외한 대다수의 경남 지역의 농도 차는 크지 않은 것으로 나타났다. 봄철 또는 겨울철 고농도 PM<sub>2.5</sub>는 중국으로부터의 장거리 수송에 크게 영향을 받은 것으로 판단된다. 그러나 경남은 수도권과 달리 가을철에 가장 낮은 농도를 보여 이는 지역 배출원에 의해 농도 수준이 결정되는 것으로 판단된다. 2015년과 2016년도의 PM<sub>2.5</sub>의 월변화를 살펴보면, 뚜렷한 차이가 존재한다(Fig. 5). 2015년도 최대값은 2월 또는 6월에 나타나고, 2016년도는 3월 또는 5 ~ 6월에 나타났다. 최소값은 2015년도 9월에 집중되며, 2016년도는 7월 또는 10월에 나타났다. 한편 주풍향과 농도와의 관련성을 살펴보면 두변수 사이의 상관성은 낮은 것으로 판단된다. 경남 지역의 시간별 PM<sub>2.5</sub> 변화 양상을 살펴보면 대다수 오전 10시경에 최고치를 나타내었다. 경남 지역의 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 농도비는 0.51 ~ 0.62로 다른 도시와 크게 다르지 않았다. 석탄화력발전소가 소재한 하

동 및 인접지역에서의 PM<sub>2.5</sub> 농도의 일차적인(선형적인) 증가를 발견하기는 어려웠다. 대규모 기체상 전구 물질인 SO<sub>2</sub>와 NO<sub>x</sub>의 배출에 의한 2차 생성에 대한 효과를 본 연구를 통하여 판단하기에 한계가 있다. 따라서 추후 3차원 광화학수송 모델을 이용한 석탄화력발전소의 영향평가는 주요하다고 판단된다.

#### 감사의 글

본 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단(NRF-2015R1A2A1A1 0053971)으로부터 지원 받아 수행된 연구사업 연구 결과입니다. 또한 이 논문은 2017학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었습니다.

#### REFERENCES

- Ahmed, E., Kim, K. H., Shon, Z. H., Song, S. K., 2015, Long-term trend of airborne particulate matter in Seoul, Korea from 2004 to 2013, *Atmos. Environ.*, 101, 125-133.
- Cho, Y. S., Lee, H. S., Kim, Y. S., Lee, J. T., 2003, A Study on chemical of fine particles in the Sungdong area, Seoul, Korea, *J. Environ. Sci. Int.*, 12(6), 665-676.
- Ghim, S., Chang, Y. S., Jung, K. W., 2015, Temporal and spatial variations in fine and coarse particles in Seoul, Korea, *Aerosol Air Qual. Res.*, 15, 842-852.
- Heo, J. B., Hopke, P. K., Yi, S. M., 2009, Source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in Seoul, Korea, *Atmos. Chem. Phys.*, 9(14), 4957-4971.
- Jeon, B. I., 2010, Characteristics of spacio-temporal variation for PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentration in Busan, *J. Environ. Sci. Int.*, 19, 1013-1023.
- Jeong, U. K., Kim, J. H., Kim, Y. J., Jung, J. S., 2015, Dependence of total and carbonaceous aerosol concentrations on transport pathways in Seoul, Korea, *Atmos. Korean Meteor. Soc.*, 25(1), 141-148.
- Kim, E. H., Bae, C. H., Kim, H. C., Cho, J. H., Kim, B. U., Kim, S. T., 2017, Regional contributions to particulate matter concentration in the Seoul metropolitan area, Korea: Seasonal variation and sensitivity to meteorology and emissions inventory, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, Manuscript under review for journal *Atmos. Chem. Phys.*

- Kopplitz, S. N., Jacob, D. J., Sulprizio, M. P., Myllyvirta, L., Reid, C., 2017, Burden of disease from rising coal-fired power plant emissions in Southeast Asia, *Environ. Sci. Tech.*, 51(3), 1467-1476.
- National Institute of Environmental Research (NIER), 2009, Study on the characteristic on physical and chemical properties of PM<sub>2.5</sub>, NIER NO. 2009-41-1097.
- National Institute of Environmental Research (NIER), 2016, Annual report of air quality in Korea 2015.
- Park, J. H., Park, G. H., Suh, J. M., 2014, Characterization of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> mass concentrations in Jinju, *J. Environ. Sci. Int.*, 23(12), 1963-1970.
- Russell, M. C., Belle, J. H., Liu, Y., 2017, The impact of three recent coal-fired power plant closings on Pittsburgh air quality: A Natural experiment, *J. Air Waste Manage.*, 67(1), 3-16.
- Seinfeld, J. H., Pandis, S. N., 2016, Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change, John Wiley & Sons, New York, 1152.
- Shon, Z. H., Kim, K. H., Song, S. K., Chae, Y. Z., Park, C. G., Jung, K. W., 2012, Fractionation of secondary organic carbon in aerosol in relation to the trafficborne emission of semivolatile organic compounds, *Atmos. Environ.*, 50, 225-233.