Journal of Radiation Industry 13(1) :45~53(2019)

도로이동 오염원의 미세먼지 발생 분석을 위한 현장 실험 및 관측 자료를 이용한 기여도 평가

서경석[1,*] · 민병일[1] · 김소라[1] · 박기현[1] · 양병모[1] · 김지윤[1]

[1]한국원자력연구원 환경안전연구실

Field Experiments for Generation Assessment of Particulate Matter by Road Vehicles and Contribution Analysis using Measured Data

Kyung-Suk Suh[1,*], Byung-Il Min[1], Sora Kim[1], Kihyun Park[1], Byung-Mo Yang[1] and Jiyoon Kim[1]

[1]*Environment Safety Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 34057, Republic of Korea*

Abstract - Field experiments were carried out to analyze the relation between the particulate matter and the vehicle traffic in the surrounding roads near a Institute of Health and Environment (IHE) located at Yuseong-gu, Daejeon. Also, major facts to generate the particulate matter were analyzed using the past measured data. As a result of the analysis, the contribution of the particulate matter from the vehicles in a road showed to take a large portion in 2015 and 2016. As a result of connection with traffic data in Daejeon, the concentrations of particulate matter increased during rush hour and they showed the similar patterns near a IHE. The generation rates of the particulate matter from the vehicles presented a large portion in summer and winter that inflow from the surrounding cities have been relatively small, and it always occurred for the conditions without rainfall. It is anticipated that the concentration of PM_{10} generated by the road traffic would be reduced in the range of 10 $\mu g \cdot m^{-3}$~14 $\mu g \cdot m^{-3}$ through the control and detour of vehicles.

Key words : Field experiment, Particulate matter, Vehicles, Rainfall, Traffic data

서 론

미세먼지는 최근 사회적 이슈로 부상하면서 자주 발생하는 미세먼지에 의해 우리나라 국민들의 건강에 심각한 영향을 미치고 있다. 우리나라는 한국환경공단의 에어코리아(www.airkorea.or.kr)사이트를 통하여 $PM_{2.5}$와 PM_{10} 미세먼지 농도 측정 자료를 공개하고 있다(에어코리아 2019). 우리나라 환경정책기본법 시행령에 의하면 $PM_{2.5}$의 환경기준은 일평균 35 $\mu g \cdot m^{-3}$, PM_{10}은 일평균 100 $\mu g \cdot m^{-3}$로 미국과 일본의 환경기준과 유사하지만, 세계보건기구 WHO가 권고하는 기준인 일평균 $PM_{2.5}$ 25 $\mu g \cdot m^{-3}$, PM_{10} 50 $\mu g \cdot m^{-3}$ 보다는 큰 값이다(국립환경과학원 2018).

미세먼지는 산업시설의 화석연료 사용으로 인한 매연, 소각시설의 연기, 자동차 배기가스 및 건설현장의 비산먼지 등에 의해 입자형태의 1차 생성입자와 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x) 및 휘발성유기화합물(VOC)과 같은 가스형태의 배출물이 공기 중에서 광화학 반응이나 중화반응 등에 의해 발생하는 2차 생성입자가 있다(이 2017; Ryou *et al*. 2018). 미세먼지의 발생원은 국내 요인과 국외 요인으로 크게 구분되는데, 우리나라에서 관측된 미세먼지 자료 분석 및 수치모

* Corresponding author: Kyung-Suk Suh, Tel. +82-42-868-4788, Fax. +82-42-868-8943, E-mail. kssuh@kaeri.re.kr

델링 결과에 의하면, 계절적으로 편차는 있지만 국외 요인의 40~75%는 중국의 산업화로 인한 배출원이 편서풍에 의하여 우리나라로 유입되는 것으로 분석되고 있다(Kim *et al*. 2017; Lee *et al*. 2018). 국내에서 미세먼지 발생원은 2013년 기준 PM_{10}의 경우 제조업 26%, 도로이동 17%, 비도로 이동 15%, 농업 14%, 에너지산업 연소 12%, 생산공정 10%, 기타 6%의 배출 기여도를 나타내었다(김 2017b).

대전시의 경우 미세먼지 발생원의 내부 요인으로 PM_{10}의 경우 비산먼지, 도로이동 오염원, $PM_{2.5}$의 경우 도로이동 오염원 및 비산먼지 순에 의한 배출이 주원인으로 보고되었다(김 2017a). 따라서 대전시의 경우 도로이동 오염원에 의한 미세먼지 발생기여도가 높아 이에 관한 분석이 필요하다.

본 연구에서는 대전시 도로이동 오염원에 의한 미세먼지 배출기여도 분석을 위하여 현장 관측용 미세먼지 측정 장비를 이용하여 대전시 유성구 보건환경연구원 일원의 도로변에서 PM_{10} 미세먼지 농도를 측정하고 이를 분석하여 도로이동 오염원에 의한 미세먼지 발생기여도를 분석하였다. 또한 대전시를 대상으로 2015년부터 2016년까지 측정된 대기오염 측정 자료, 교통량 자료 및 기상 측정 장비에서 측정된 기상인자를 기본 자료로 상관성 분석을 통해 자료 간 상호 관련성을 파악하였다.

재료 및 방법

1. 측정장비

미세먼지($PM_{2.5}$, PM_{10}) 측정 장비는 이동형 현장 측정이 가능한 DustTrak II Aerosol Monitor 8530 (TSI Incorporated 2018)를 이용하였고, 장비의 제원은 Table 1에 나타내었다. 본 장비는 대기 및 실내공기 중의 미세 먼지 농도를 측정하는 제품으로 광산란 방식에 의한 측정값이 안정화 되는데 시간이 필요하지 않고 측정과 동시에 1초 이내에 바로 정확한 농도 값을 측정할 수 있다. 또한, 1초~60분 범위에서 원하는 저장 시간을 설정하여 자동으로 측정 및 저장이 가능하며 평균값, 최대값, 최소값 등도 함께 측정할 수 있다. 저장데이터는 별도 케이블이 필요 없이 USB에 바로 저장이 가능하고 중량법 및 베타선 측정기 등 표준 측정 장비와 비교 측정 후 측정값을 보정할 수 있는 보정 계수를 입력할 수 있다.

2. 현장 측정

도로이동 오염원에 의한 미세먼지 분석을 위하여 대전시 유성구 보건환경연구원 일원 도로변의 5개 지점을 선정하여, PM_{10} 농도를 측정하였다. Fig. 1에 5개 관측 장소를 나타내었고(P1. 대전 보건환경연구원 옥상, P2. 구성교, P3. 구성삼거리, P4. 대전 KBS, P5. 과학공원 사거리), 관측은 총 5회(2018년 7월 31일, 8월 10일, 9월 7일, 9월 13일 및 9월 28일)에 걸쳐 이루어졌다. 1회 측정 시간은 오전 7시~오후 7시로 12시간 기준으로 측정하였다. Fig. 2에 3번 지점(구성 삼거리) 도로변에 배치한 미세먼지측정 장비를 나타내었다. 관측지역 인근에는 공사 현장, 지역난방 시설, 공장 등 별도의 미세먼지 발생원이 없는 지역으로, 해당 지역은 도로이동 오염원과 외

Table 1. Technical specifications of Aerosol Monitor 8530 (TSI 2018)

Model	Aerosol Monitor 8530
Particle size range	0.1~10 μm PM_1, $PM_{2.5}$, PM_4, PM_7, PM_{10}, TSP
Resolution	0.1 μm
Flow accuracy	±5%
Aerosol concentration range	0.001~400 mg·m^{-3}
Flow rate	3.0 L·min^{-1}
Time constant	USER Adjustable, 1~60 sec.
Seonsor type	90° light scattering
Battery	6600 mAH Li-ion (2 Battery) (12 hours at 10 sec time constant)
Data logging	USB, Ethernet. 5 MB of on-board memory (>60,000 saving data points)
Screen	5.7 in VGA Color Touch
Size	135×216×224 mm
Weight	1.6 kg/ 2.0 kg(1 Battery) / 2.5 kg(2 Battery)
Operation temp	0~50°C
Storage temp	−20~60°C
Composition	Operation service manual, USB computer cables, AC Adaptor/Battery Charger, Impactor Kit and plate, Sample extension tube, Carrying case, Filter removal tool, software CD

Fig. 1. Observation locations near Institute of Health and Environment (IHE) in Daejeon city. P1: Institute of Health and Environment (IHE), P2: Guseong bridge, P3: Guseong three-way intersection, P4: Daejeon KBS, P5: Science park intersection

부 유입 미세먼지의 영향이 지배적일 것으로 판단된다.

여름과 가을의 도로 주변 미세먼지의 관측을 위해서는 장비당 두 명의 인원을 배치하고 대전 보건환경연구원 내 고정관측소를 기준으로 주변에 일정 거리를 둔 상태로 동시에 관측을 수행하였다. 이를 통해 대전 보건환경연구원 내 고정관측소를 기준으로 기상의 영향으로 인한 외부 유입 미세먼지와 유출 먼지를 파악할 수 있으며, 당시의 관측기기가 위치한 장소로 통행하는 차량의 수를 조사해 도로이동 오염물질의 기여율을 분석하였다.

Fig. 2. Measurement instrument placed on the roadside.

결과 및 논의

1. 미세먼지 기여도 분석

대전시의 기상자료와 미세먼지의 상관관계 해석을 위하여 미세먼지 관측 자료의 결측이 가장 적은 2015년과 2016년의 기상자료와 미세먼지자료를 이용하였다. 기상자료는 기상청에서 제공하는 기상자료 개방포털사이트(https://data.kma.go.kr/)의 대전 관측자료와 미세먼지는 에어코리아(www.airkorea.or.kr) 자료를 수집하여 분석하였다.

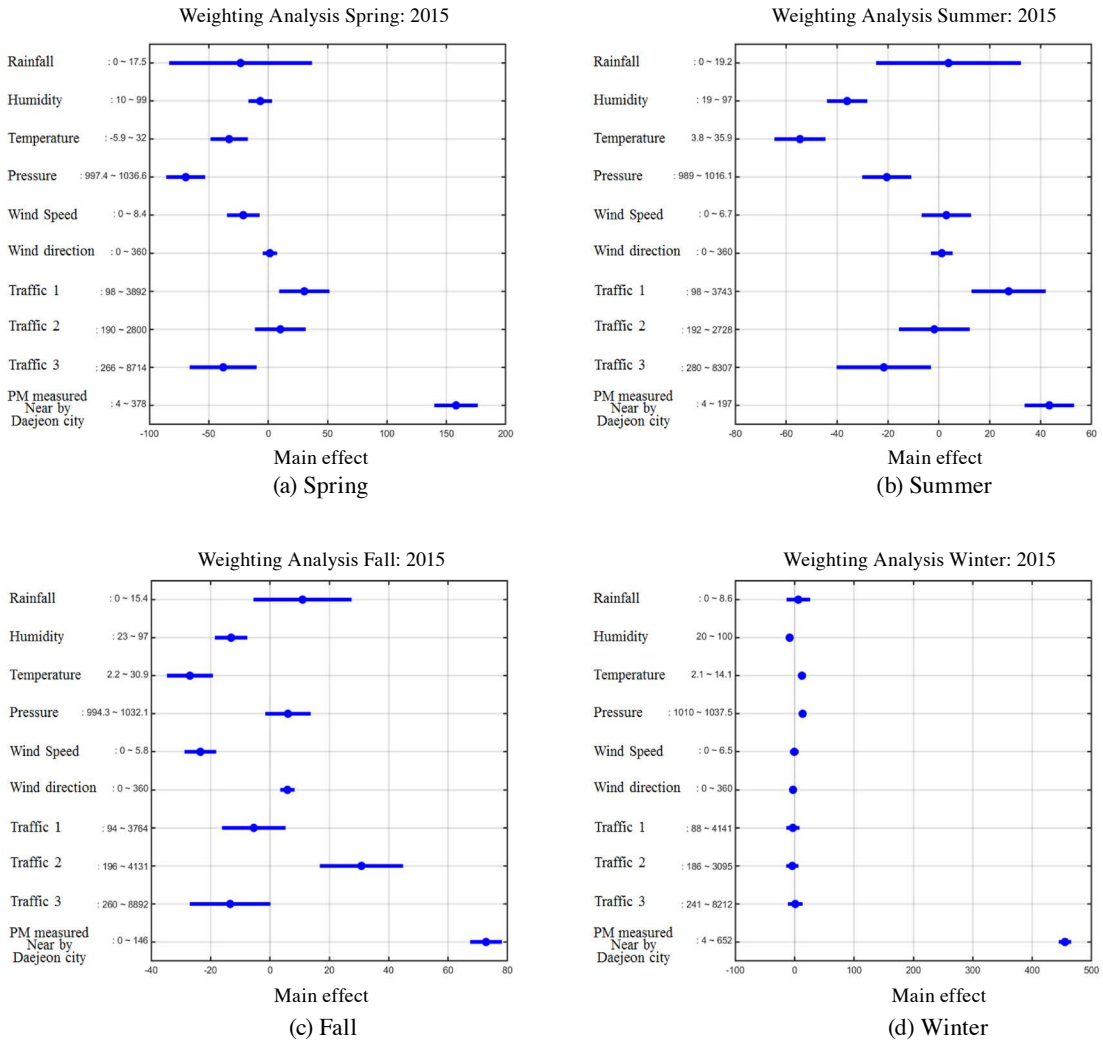


Fig. 3. Contribution analysis of PM_{10} in 2015. traffic 1: Gajeongro Yuseong-gu in Daejeon (36.38°N, 127.35°E), traffic 2: Gajangro Seo-gu in Daejeon (36.32°N, 127.38°E), traffic 3: Gapcheon city highway in Seo-gu in Daejeon (36.36°N, 127.37°E).

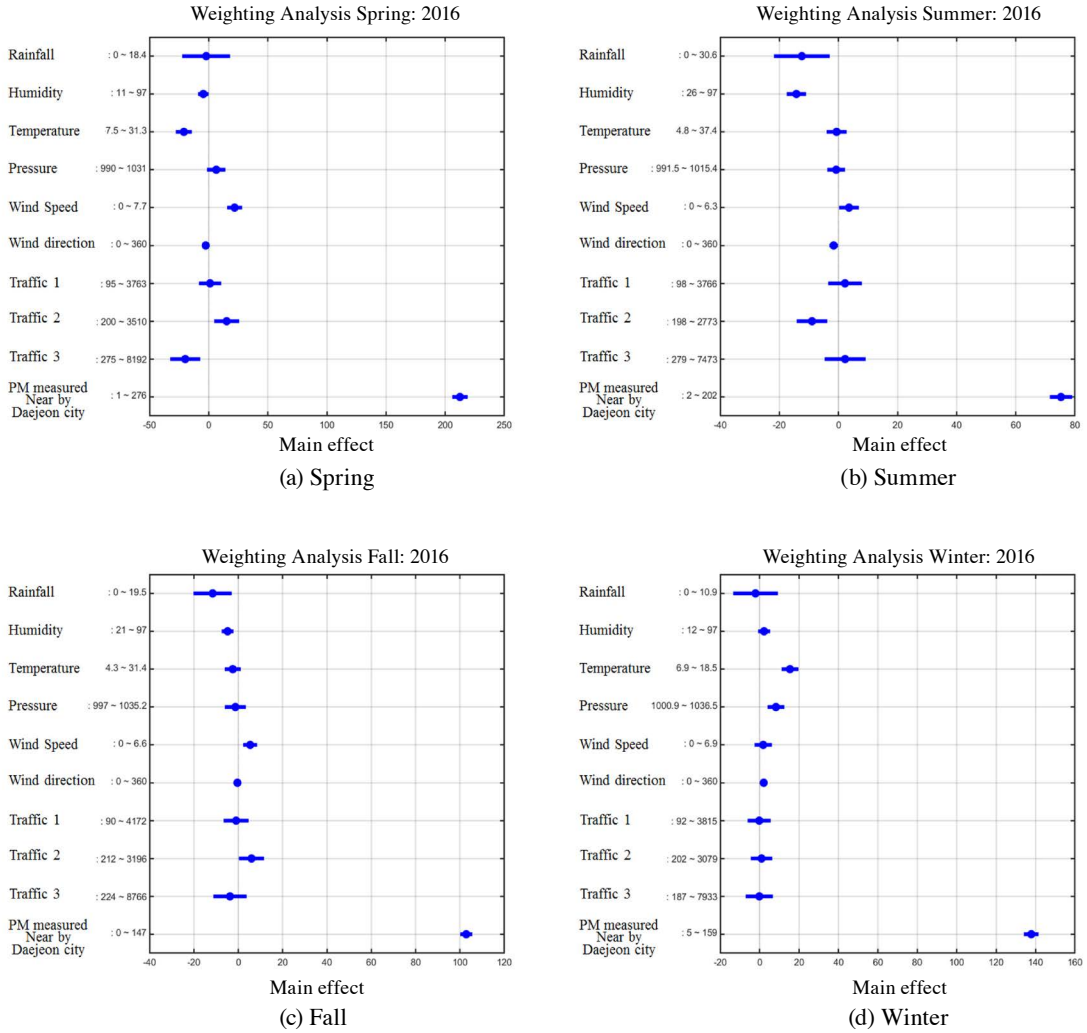


Fig. 4. Contribution analysis of PM_{10} in 2016. traffic 1: Gajeongro Yuseong-gu in Daejeon (36.38°N, 127.35°E), traffic 2: Gajangro Seo-gu in Daejeon (36.32°N, 127.38°E), traffic 3: Gapcheon city highway in Seo-gu in Daejeon (36.36°N, 127.37°E).

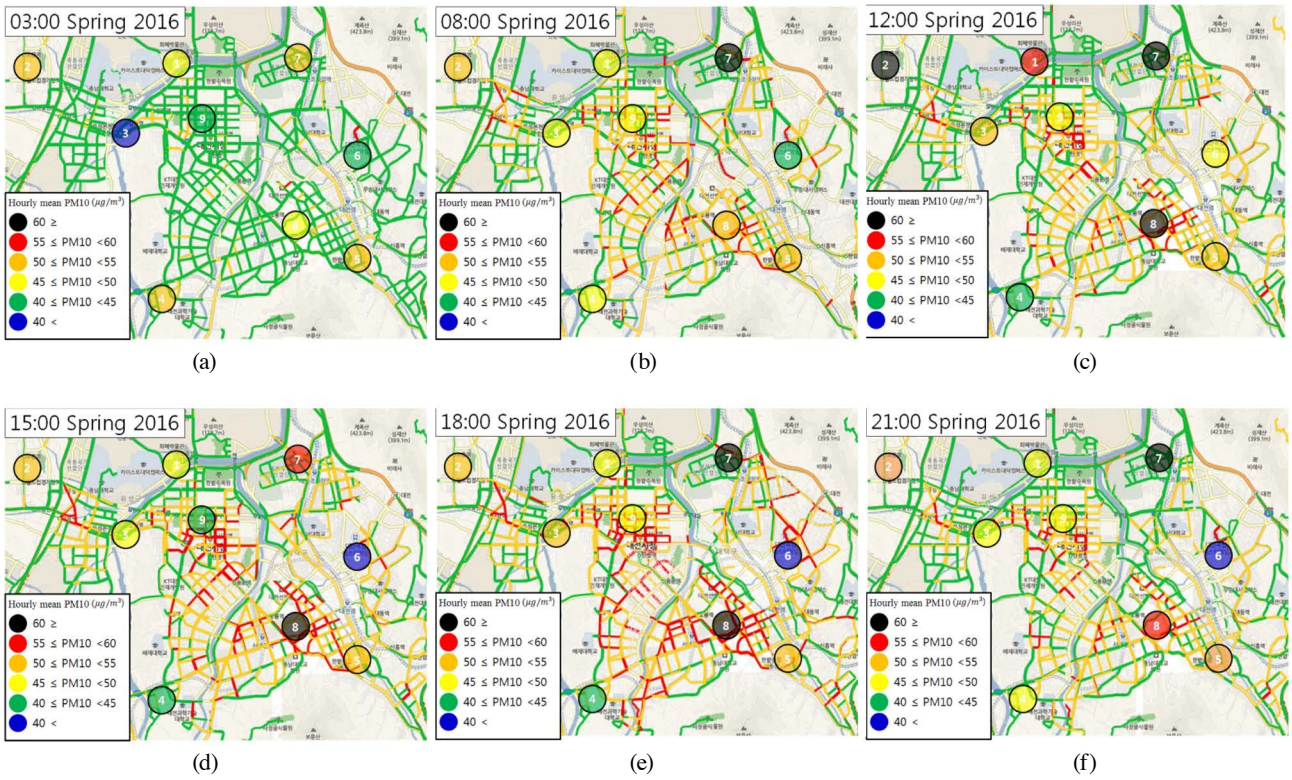
대기 오염농도의 영향인자를 알아보기 위하여 단순상관분석을 토대로 시간대별 대기오염농도를 종속변수로 하고 나머지 대기 오염물질과 기상인자를 독립변수로 한 중회귀분석(류 2003)을 수행하여 기여도 분석 결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3의 2015년 봄, 여름, 가을의 자료를 분석해 보면 주변 도시의 미세먼지 농도가 유의성이 높으며, 대전시의 도로이동 오염원(교통1, 교통2, 교통3)에 의한 기여도가 미세먼지 발생의 상당 부분을 차지하고 있다. 또한, 2015년 여름, 가을의 경우 강우에 의해 미세먼지 제거 효과가 커서 강우에 의한 유의성이 높게 분석되었다. Fig. 4의 2016년 분석 결과는 봄, 여름, 가을, 겨울 각기 주변 도시의 미세먼지의 농도가 유의성이 높으며, Fig. 3의 2015년 결과와 다르게 기상인자와 도로이동 오염원에 의한 기여도가 비슷하게 나타났다. 이는 2016년의 기상인자 변동 폭이 작아 기상변화에 의한 도로이동 오염원의 미세먼지 기여도가 적게 나온 것으로 생각된다.

Table 2. Observation locations of particulate matter in Daejeon

	Location	Address
1	Guseong-dong	Institute of Health and Environment (IHE) in Daeharo 407 Yuseong-gu
2	Noeun-dong	Noeun-dongro 87-99 in Yuseong-gu
3	Daehueong-dong	Jungro 58 in Jung-gu
4	Dunsan-dong	Dunsan seoro 84 in Seo-gu
5	Munchang-dong	Bomonro 20-38 in Jung-gu
6	Munpyung-dong	Munpyungro 18-34 in Daedeok-gu
7	Sungnam-dong	Gaejokro 368-70 in Dong-gu
8	Wolpyung-dong	Wolpyung 160-5 in Seo-gu
9	Yunae-dong	Daejeonro 1331-75 in Daedeok-gu
10	Jeongrym-dong	Jeongrym-dongro 10 in Seo-gu

2. 교통량과 미세먼지 농도 관계 분석

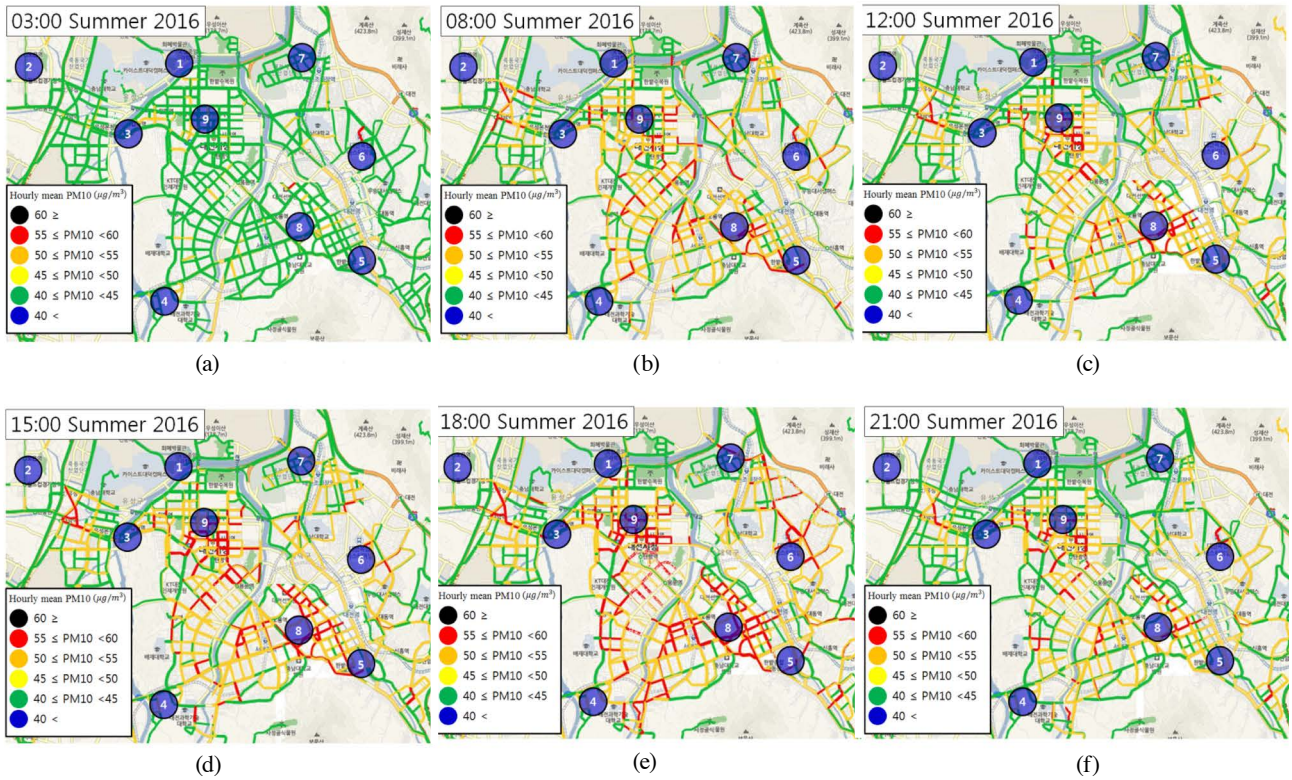
교통량과 미세먼지 농도 변화 추이 분석을 위하여 2016년 미세먼지 관측농도(PM_{10})에 대전 교통량 자료를 활용하여 시



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Fig. 5. Analysis of correlations for traffic and PM_{10} in Spring 2016 in Daejeon.



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Fig. 6. Analysis of correlations for traffic and PM_{10} in Summer 2016 in Daejeon.

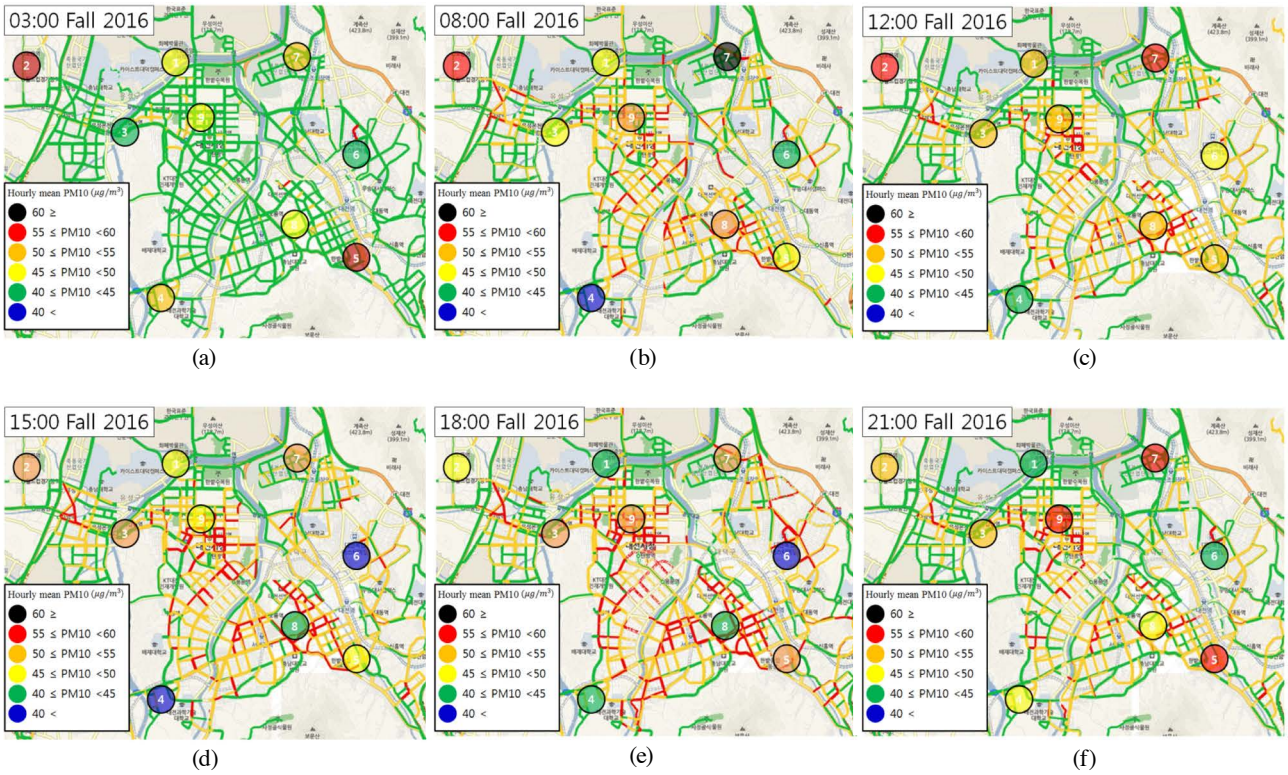


Fig. 7. Analysis of correlations for traffic and PM_{10} in Fall 2016 in Daejeon.

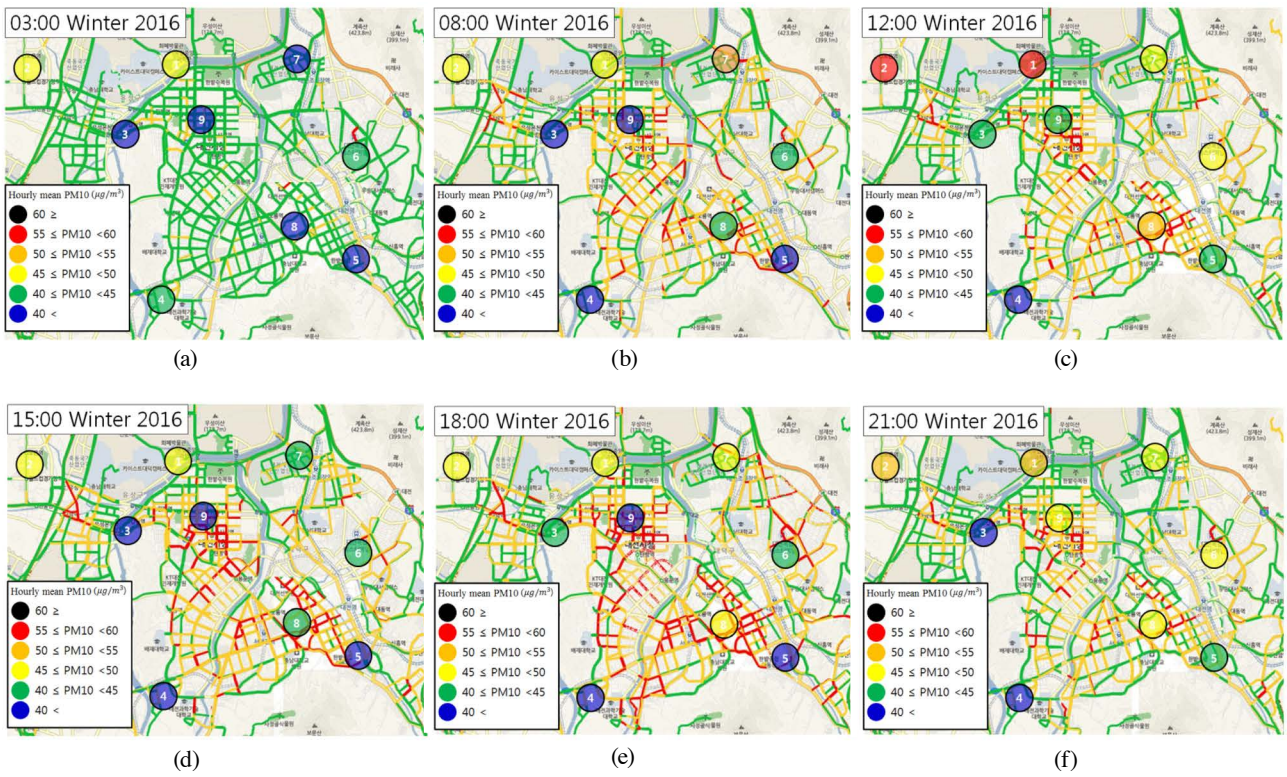


Fig. 8. Analysis of correlations for traffic and PM_{10} in Winter 2016 in Daejeon.

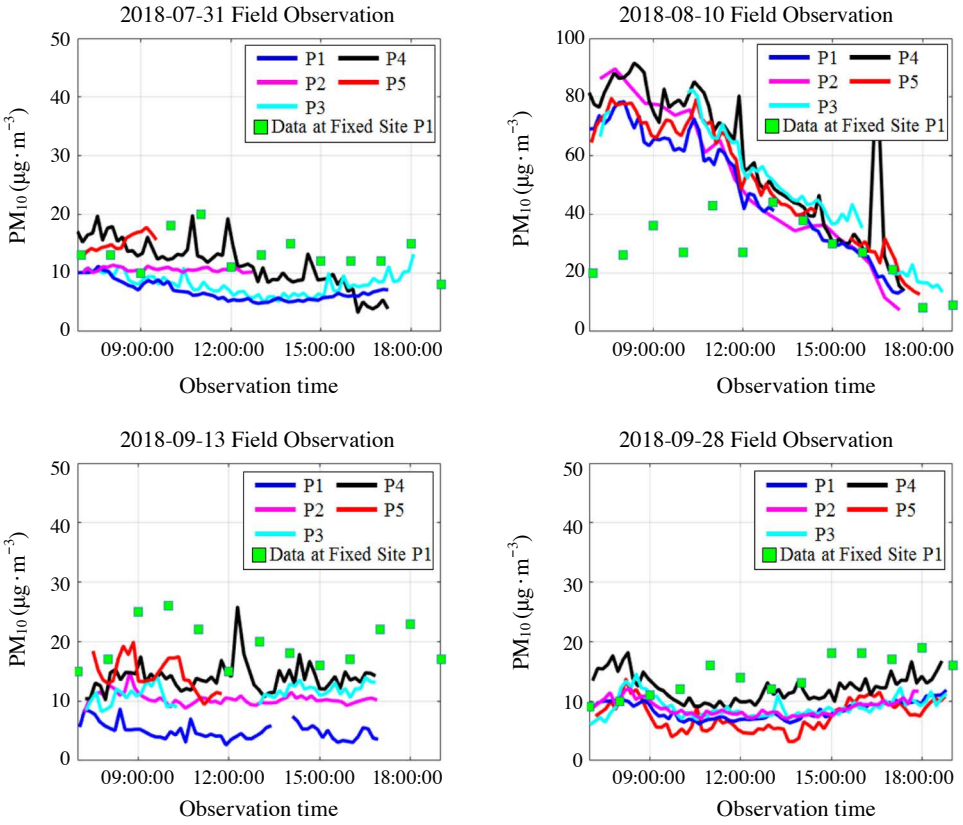


Fig. 9. Measured concentrations of PM_{10} by averaging of 10 minutes.

간별 대전시 오염 농도 지도를 작성하고 특성을 파악하였다. 미세먼지(PM_{10})자료는 에어코리아(www.airkorea.or.kr)에서 제공하는 대전시 도시 대기측정소에서의 측정 농도를 활용하였고, 공간자료로 월요일 기준의 대전 교통 데이터 분석 자료(대전교통정보센터 2019)를 통해 얻은 교통 혼잡도를 활용하였다. 미세먼지 농도 값들은 측정소에서 실측한 값으로 연도별, 계절별 이상 자료를 선별하지 않은 1시간 평균 농도의 값이다. 대전시 미세먼지 관측소 위치를 Table 2에 나타내었다.

Fig. 5에서 Fig. 8에 시간별 교통량 변화에 따른 미세먼지 농도를 나타내었다. 교통량과 오염 농도에 구간에 따라 달리 색상을 부여하였으며, 지도에 표시된 원 모양은 Table 2의 대전시 미세먼지 관측소의 1시간 평균 농도의 값을 나타낸다. 측정소별로 보면 정림동 측정소(4)와 성남동 측정소(6)는 비교적 저농도 분포를, 읍내동 측정소(7)와 대흥동 측정소(8)가 비교적 고농도 분포를 나타내고 있으며, 이는 읍내동 측정소(7)의 경우 공업지역이기 때문에 비교적 고농도를 나타내며, 정림동 측정소(4)의 경우 주거지역이므로 저농도 분포를 보인 것으로 판단된다. 계절별로 가시화하면 여름철 농도가 가장 낮으며 봄철 농도가 가장 높은 것으로 드러났다. 이는 봄철에는 중국으로부터 오는 황사의 영향으로 PM_{10}의 농도가 높은 것으로 판단되며, 여름철에 낮은 농도를 보이는 것은 여름철 강우량 증가로 인한 세정효과가 크게 영향을 미친 것으로 판단된다(김과 조 2012).

시간별 미세먼지 특성의 경우, 대기 농도에 주 영향을 미치는 교통량 차이가 시간별 농도 차이를 유발시키는 것으로 생각된다. 봄과 가을의 경우 차량 이동이 가장 적은 오전 3시경 평균적으로 가장 낮은 농도 값을 나타내며, 차량의 이동이 증가하는 오전 8시에서 오후 6시까지 평균 농도가 올라가는 특성을 보인다. 겨울철의 농도변화의 경우 오전 8시 출근 시간대에 평균 농도가 높아지며, 오후 3시경 다소 농도가 낮아지는 경향을 나타내고, 다시 오후 6시경 퇴근 시간대에 평균 농도가 높아지는 경향을 보인다. 2016년 자료가 교통량과 미세먼지 농도 특성을 완전히 반영할 수는 없지만, 향후에 요일별로 PM_{10}의 농도를 비교하여 교통량과 시간적 특성에 대한 면밀한 분석을 한다면, 좀 더 상관성 있는 결과를 도출할 것으로 생각된다.

3. 도로이동 오염원 미세먼지 현장관측 및 분석

2018년 대전시 유성구 보건환경연구원 일원에서(Fig. 1) 현장 관측을 통해 도로이동 오염원에 대한 대기 오염 미세먼지 농도의 시간별 분석을 수행하였다. 관측 위치별로 달리 색상을 도시하였으며, Fig. 9와 Fig. 10에 관측자료 농도 값을 나타내었는데, Fig. 9는 10분 평균 농도의 값을, Fig. 10에서는 30분 농도 값을 나타내었다.

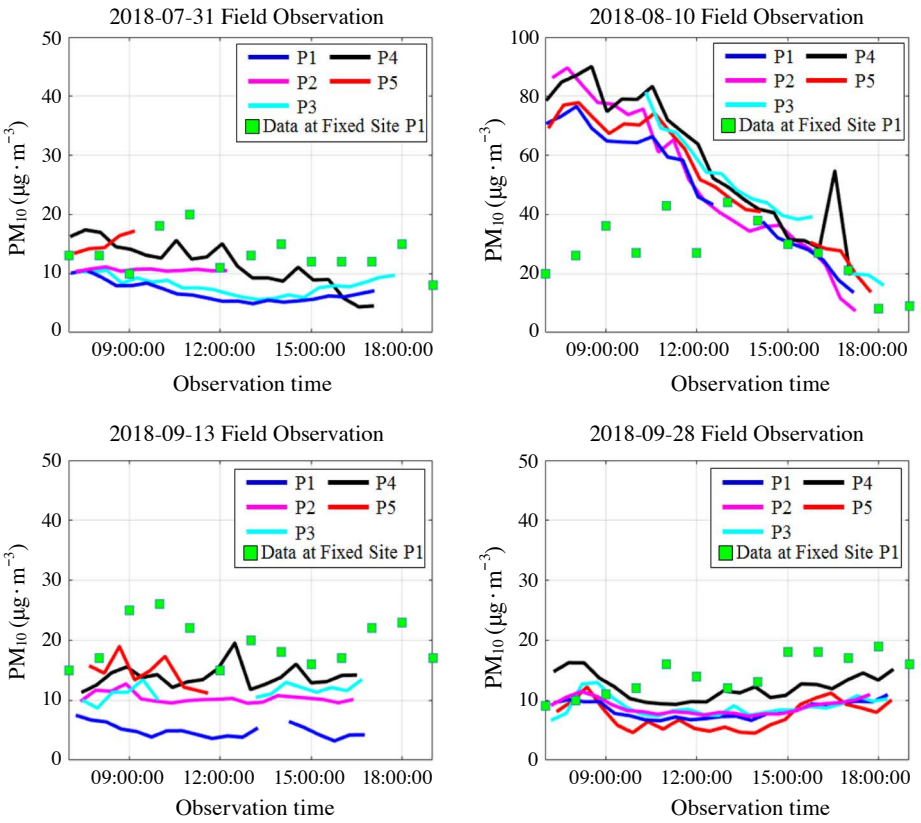


Fig. 10. Measured concentrations of PM_{10} by averaging of 30 minutes.

측정소별로 보건환경연구원(파란색)에서 비교적 저농도 분포를, KBS 앞(검은색)에서 비교적 고농도 분포를 나타내고 있으며, 이는 KBS 측정소의 경우 교통량이 상대적으로 많은 지역이기 때문으로 비교적 고농도를 나타내며, 보건환경연구원 측정소의 경우 도로이동 오염원이 없는 연구원 내 옥상에 설치하여 낮은 농도를 보인다. 교통 통행량이 많은 순서대로 나열하면 KBS 앞＞과학공원＞구성삼거리＞보건환경연구원＞구성교의 순서로 차량 통행 수를 보이며, 미세먼지 평균 농도는 KBS 앞＞과학공원＞구성삼거리＝구성교＞보건환경연구원의 순서로 교통량과 미세먼지의 농도가 영향을 미친것으로 생각된다.

결 론

대전시 유성구 보건환경연구원 미세먼지 관측소를 기준으로 주변 도로에서 발생한 미세먼지와 차량 통행량과의 상관관계를 분석하기 위한 현장관측을 수행하고, 과거 관측 자료를 활용한 미세먼지의 발생량과 주요 인자 분석을 수행하였다.

분석 결과 주변 도시의 외부 유입을 제외하고, 2015년 및 2016년에는 대전시에서는 도로이동 오염원에 의한 미세먼지 발생 기여도가 큰 것으로 나타났고, 대전시 교통 데이터와 연계한 결과 교통 혼잡도가 높은 출·퇴근 시간대에 미세먼지 농도가 증가함을 보여 주었다. 여름, 가을철의 경우 도로이동 오염원에 의한 미세먼지 발생량은 외부유입에 비해 작지 않으며, 강우와 같은 기상 요인이 없는 한 상시적으로 발생한다. 과거 관측 자료의 분석을 통해 미세먼지의 외부적 발생 요인은 다수의 요인으로 대전시 차원에서 해결이 어려운 요인이 있으나, 도로이동 오염원의 경우 출·퇴근 시 차량의 통제 및 우회 정책을 통해 시민의 미세먼지 노출도를 순간적으로 10~14 $\mu g \cdot m^{-3}$(평균 1.4 $\mu g \cdot m^{-3}$) 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

향후 대전시의 고정식 미세먼지 관측소는 대전시 교통량 통계를 고려해 신규 설치 및 주택가 인근에 설치하면, 실질적인 시민의 건강 향상을 위해 도움이 되는 자료를 제공하는 것이 가능할 것으로 기대되고, 도로의 차량 통행량을 기반으로 시민의 주요 출·퇴근 경로와 통행 제한 정책을 통해 실질적인 시민의 건강을 위한 방향으로 정책을 추진할 필요가 있는 것으로 생각된다.

사 사

본 연구는 과학기술정보통신부와 대덕특구-대전시 협력사

업의 재원으로 한국연구재단과 대전테크노파크의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: NRF-2017M2A8A4015253, NRF-2015M2A2B2034282).

참 고 문 헌

국립환경과학원. 2018. 대기환경연보 2017. 국립환경과학원.

기상자료개방포털. 2019. https://data.kma.go.kr/. 기상청.

김선태. 2017a. 대전광역시 미세먼지 발생원별 저감 방안. 대전녹색환경지원센터.

김준범. 2017b. 국내 산업 및 시도별 대기오염물질 배출량자료를 이용한 미세먼지 형성 가능성 및 인체 호흡기 영향 평가 추정. 대한환경공학회지. **39**(4):220-228.

김효정, 조완근. 2012. 공간 보간법을 이용한 도시지역 미세먼지 측정소의 배치 적절성 평가, 한구지형공간정보학회지. **20**(2):3-13.

대전교통정보센터. 2019. http://traffic.daejeon.go.kr/mainFront/atmsMain.do

류근관. 2003. 통계학. 범문사, 584pp.

에어코리아. 2019. http://www.airkorea.or.kr/. 에어코리아.

이수철. 2017. 일본의 미세먼지 대책과 미세먼지 저감을 위한 한중일 협력. 자원·환경 연구. **26**(1):57-83.

Bhardwaj P, Seo JK, Kim YH, Woo JH, Song CK, Park SY and Song CH. 2019. Recent changes of trans-boundary air pollution over the Yellow Sea: Implications for future air quality in South Korea. *Environ. Pollution*. **247**:401-409.

Kim, HC, Kim EH, Bae CH, Cho JH, KIm BU and Kim ST. 2017. Regional contributions to particulate matter concentration in the Seoul metropolitan area, South Korea: seasonal variation and sensitivity to meteorology and emissions inventory. Atmos. *Chem. Phys*. **221**:10315-10332.

Lee HM, Park RJ, Henze DK, Lee SG, Shim CS, Shin HJ, Moon KJ and Woo JH. 2017. $PM_{2.5}$ source attribution for Seoul in May from 2009 to 2013 using GEOS-Chem and its adjoint model. *Environ. Pollution*. **221**:377-384.

Ryou HG, Heo JB and Kim SY. 2018. Source apportionment of PM_{10} and $PM_{2.5}$ air pollution, and possible impacts of study characteristics in South Korea. *Environ. Pollution*. **240**:963-972.

TSI Inc. 2018. https://www.tsi.com/. TSI Incorporated USA.

Received: 29 January 2019
Revised: 26 February 2019
Revision accepted: 11 March 2019