

기류패턴에 따른 광주지역 PM₁₀ 농도 특성 및 영향 배출원 추정 연구

송형명[†] · 이대행 · 이경석 · 안상수 · 이세행 · 양윤철 · 김선정 · 전홍대 · 서광엽 · 도우곤¹ · 조영관
광주광역시 보건환경연구원 환경연구부, ¹부산광역시 보건환경연구원 환경연구부

Characterization of PM₁₀ Concentration in Urban Gwangju and Its Source Identification Based on Cluster Analysis of Air Mass Trajectory

Hyeong-myeong Song[†], Dae-haeng Lee, Kyoung-seok Lee, Sang-su An, Sae-haeng Lee, Yoon-cheol Yang, Sun-jung Kim, Hong-daen Juen, Gwang-yeob Seo, Woo-gon Do¹, and Young-gwan Cho

Gwangju Metropolitan Health & Environment Research Institute, Department of Environmental Engineering, Gwangju 61986, Korea
¹*Busan Metropolitan Health & Environment Research Institute, Department of Environmental Engineering, Busan, Korea*

Received October 17, 2017/Revised November 1, 2017/Accepted November 21, 2017

The average concentrations of PM₁₀ in Gwangju decreased from 50 µg/m³ in 2008 to 45 µg/m³ in 2010, 41 µg/m³ in 2012 and 2014, and 40 µg/m³ in 2016. PM₁₀ concentrations at Oseon-dong and Geonkun-dong were higher than those at other measurement sites. The backward trajectories for the sampling periods (2008-2016) were classified into three groups: (1) air masses related to long-range transport from China to Gwangju via the Yellow Sea (off the west coast of Korea) (clusters 1 and 2), (2) air masses related to local emissions from the Korean peninsula (clusters 3 and 4), and (3) air masses from the south (Cluster 5). The average concentrations of PM₁₀ were 41.0, 48.1, 37.6, 43.3, and 33.3 for cluster 1, 2, 3, 4, and 5, respectively. Cluster 2 had the highest PM₁₀ concentration while cluster 5 had the lowest. Air masses from Cluster 1 and 2 were 29% and 13%, more frequent, respectively, during the entire period; the higher PM₁₀ concentrations in these cases were influenced mainly by Beijing, Hebei, Shandong, Jiangsu, and Shanghai in China. This means that long-range transport aerosols contribute significantly to the PM₁₀ concentration in Gwangju. Cluster 4, which was affected by many sources on the west coast area of Korea, also showed a high PM₁₀ concentration; the slow flow of the air mass contributed to this. Therefore, the high concentration of PM₁₀ in Gwangju area is influenced comprehensively by long-range transport, local emissions and the condition of the flow of the air mass.

Key words: PM₁₀, Trajectory, Cluster analysis, Emission location

1. 서 론

미세먼지의 발생원은 자연 배출원과 인위적인 배출원이 있으며 가스상 물질들의 2차 반응 등 다양한 경로를 통하여 생성된다. 또한 미세먼지는 높은 체류시간을 가지기 때문에 중위도 편서풍대에 위치한 우리나라의 경

우 중국으로부터의 장거리 수송에 의한 영향을 많이 받고 있으며 해안과 내륙지역의 위치와 국지적 바람조건에 따라 농도 경향이 다르게 나타나기도 한다¹⁾.

우리나라의 남서쪽 내륙에 위치한 광주광역시는 대도시의 특성이 반영된 다양한 배출원 뿐만 아니라 지리적으로도 중국 동부지역과 가까이 위치해있고 해양과 가

[†]To whom correspondence should be addressed.

까운 산악지형에 의하여 다양한 국지순환이 발생하는 등 대기오염을 가중시키는 여러 가지 조건을 가지고 있다.

PM₁₀의 대기환경기준은 연간 평균이 50 µg/m³ 이하, 24시간 평균이 100 µg/m³ 이하로 설정되어 있으며 광주 지역의 PM₁₀ 연평균 농도는 2006년 55 µg/m³에서 2015년 42 µg/m³로 최근 들어 연간 환경기준을 만족하면서 전반적으로 감소하고 있는 추세이다. 그러나 24시간 환경기준초과 횟수는 2006년 14회에서 2015년 61회로 크게 증가하였으며(측정소 수는 6개소→7개소) 2014년에도 79회로 최근까지 비교적 높은 수준을 보이고 있다²⁾. 이러한 추세를 감안하면 최근 광주지역의 PM₁₀ 평균농도가 감소가 실제적인 PM₁₀의 저감과는 거리가 있음을 알 수 있으며 고농도 발생빈도의 증가를 고려하면 오히려 시민들의 건강상 위해성은 더욱 증가한 것으로 판단할 수 있다.

대기 중 PM₁₀ 저감을 위해서는 고농도 PM₁₀ 발생원인의 정확한 파악이 선행되어야 한다. 중위도 편서풍대에 위치한 광주광역시의 경우 중국으로부터의 장거리 수송에 의한 영향과 더불어 대도시의 특성이 반영된 다양한 배출원의 영향이 예상된다. 이를 위해서는 배출원과 수용지점과의 관계 정립이 선행되어야 하며 이는 대기오염 저감대책, 대기질 관리 계획 수립 등의 정책수립을 위해서도 반드시 선행되어야 하는 요소이다.

대기오염 측정자료를 이용하여 오염원과 수용지점의 관계를 규명하는 다양한 방법들이 최근에 많이 적용되고 있으며 본 연구에서는 공기괴의 역궤적 결과와 통계적 방법론(확률분석 또는 군집분석)을 결합하여 조금 더 정확한 발생원을 추정하는 PSCF 모델을 적용하였다. PSCF(potential source contribution function) 모델은 수용점에서의 분석 자료와 역궤적 자료를 결합하여 수용점에 영향을 주는 배출원에 대한 위치 정보를 알려주는 혼합 모형으로 대기오염물질의 발생원 추정 등에 가장 많이 사용되고 있다³⁾. 국내의 경우 이용미(2005)는 서울시의 특정지점에서 측정된 수은농도를 분석하고 PSCF 모델을 이용하여 발생원의 위치를 추정하였고⁴⁾ 강병욱 등(2008)은 서울시에 영향을 미치는 PM_{2.5}의 오염원별 위치를 PSCF를 사용하여 추정하였다⁵⁾.

국외의 경우 Karaca et al.(2009)은 PSCF 모델을 적용하여 터키, 이스탄불에 영향을 미치는 PM₁₀ 오염원을 추정하였고⁶⁾ Zhu et al.(2011)은 HYSPLIT 모델을 이용하여 중국, 베이징에 도달하는 기류패턴을 분류하고 패턴별 PM₁₀ 농도 특성과 영향 배출원을 추정하였다⁷⁾. Li et al.(2012)⁸⁾은 중국, 상하이에 영향을 미치는 PM₁₀

의 영향 배출원을 파악하기 위하여 HYSPLIT와 PSCF 모델을 이용하여 역궤적 패턴을 분류하고 영향 배출원의 위치를 추정하였다. 최근에는 Heo et al.(2013)⁹⁾이 미국의 위스콘신 남부지역에 대하여 PM_{2.5} 고농도 사례일의 영향배출원을 PSCF 모델을 이용하여 분석한 바가 있다.

본 연구는 광주지역 PM₁₀ 농도 분포에 영향을 미치는 기류 패턴을 분류하고 고농도 PM₁₀ 영향 배출원의 위치를 추정하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 최근 9년간(2008~2016) 광주지역의 종관패턴을 HYSPLIT 모델을 이용하여 구분하고 각 종관패턴별로 광주지역 대기오염측정소의 PM₁₀ 농도 분포 특성을 분석하였다. 또한 각각의 패턴에 대하여 PSCF 모델을 적용하여 고농도일의 PM₁₀ 영향 배출원의 위치를 추정하였다. 한편 2008~2016년간 광주지역 고농도 PM₁₀일에 대하여 CWT분석을 실시하여 고농도 발생의 원인이 되는 영향 배출원의 위치를 추정하였다. 이를 통하여 광주지역 PM₁₀의 발생원인을 규명하고 효과적인 저감대책 수립의 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1. PM₁₀ 측정자료

광주광역시의 지형지세는 영산강의 지류인 극락강이 시의 북서부를 관류하여 서남으로 흐르며, 동쪽에는 무등산, 북쪽에는 병풍산, 남쪽에는 금당산, 서쪽에는 어등산, 용진산 등으로 둘러싸인 분지를 이루고 있다. 2017년 현재 광주지역에는 7개소의 도시대기측정소가 설치되어 가동 중에 있으며, 주거지역(2개소), 상업지역(3개소), 공업지역(2개소) 등 용도지역별로 분포되어 있다. Fig. 1은 본 연구대상인 광주지역의 도시대기측정소 7개소의 위치를 나타낸 그림이다. PM₁₀ 경향을 파악하기 위해 2008~2016년, 9년간의 측정자료를 대상으로 하였고 각 측정소의 일평균 자료를 계산하였다. 또한 각 측정소별로 계산된 일평균 자료를 전체 평균하여 광주지역의 일평균 PM₁₀ 농도를 계산하였고 광주지역 PM₁₀ 농도 특성을 파악하는데 활용하였다.

2.2. HYSPLIT 모델

본 연구에서는 기류의 이동 경로를 계산하기 위하여 미국의 NOAA/ARL(National oceanic and atmospheric administration/Air research lab.)에서 개발된 HYSPLIT (HYbrid Single Particle Lagrangian Intergrated Tra-

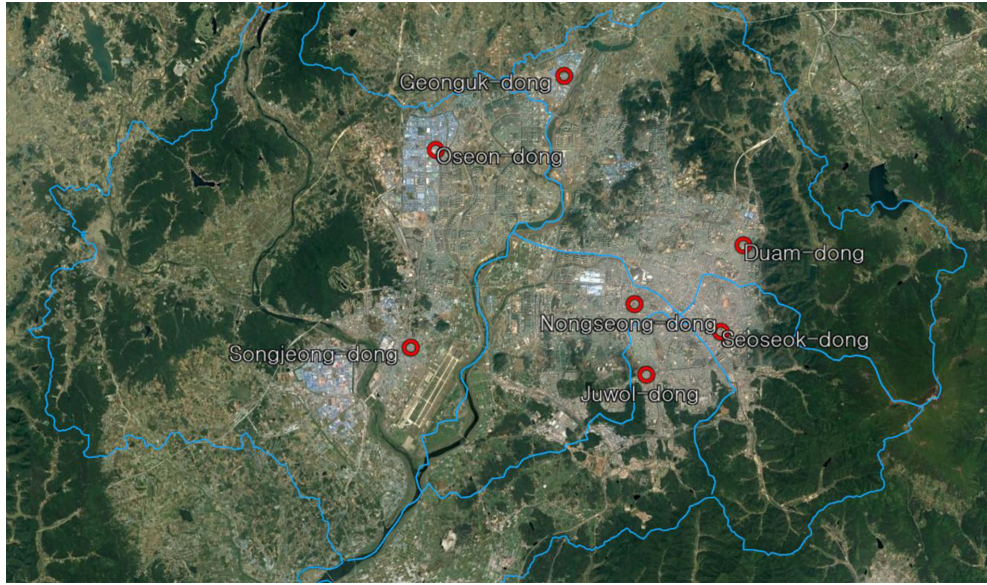


Fig. 1. Locations of air quality monitoring stations in Gwangju.

jectory) 모델을 사용하였다¹⁰⁾. HYSPLIT 모델은 각종 기상예측 모델의 결과인 격자 기상자료를 입력자료로 하여 공기괴의 이동경로를 계산한다. 기상모델로부터 얻어진 격자 기상자료는 지형자료에 선형적으로 외삽하여 적용시킨다. 기상모델로부터 도출된 수평 풍속 성분의 U와 V, 온도 T, 고도 Z, 압력 P 그리고 지표에서의 압력 P0를 이용하여 이류에 의한 3차원 궤적이 계산된다. 광주지역에 도달하는 중관규모 이상의 기류 패턴을 분류하기 위하여 HYSPLIT 모델을 사용하여 2008~2016년 간 일자별로 12시간 역궤적을 계산하였다. 입력기상자료는 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)에서 제공하는 전 지구 기상자료인 GDAS(Global Data Assimilation System) FNL(Final)를 사용하였으며 계산시간은 12시간으로 설정하였다. 모델링 시작 지점은 광주지역의 중심부에 해당되는 농성동으로 설정하였으며(Fig. 1) 역궤적 계산시 계산시작 시간은 오후 15시로 설정하였다. 전 지구 기상자료의 경우 수평해상도가 1°로 비교적 넓기 때문에 광주지역의 전반적인 중관상태를 파악하기에는 무리가 없을 것으로 판단된다. 다음으로 2008~2016년간 계산된 일자별 역궤적 계산결과를 바탕으로 역궤적 최종위치의 유사성에 따라 군집 분석을 실시하였다. 군집분석은 HYSPLIT 모델에서 제공되는 군집분석 기능을 이용하였다. 여기서는 각각의 역궤적을 대상으로 군집을 만들어가면서 endpoint 간의

거리의 제곱인, SPVAR(cluster spatial variance)를 계산하고 각 군집별로 SPVAR의 합계인 TSV(total spatial variance)의 변화량을 바탕으로 사용자가 최적의 군집수를 결정하도록 되어있다. 최적의 군집수는 TSV의 변화량이 증가하거나 변화가 적어지는 시점 이전에서 결정되며 본 연구에서는 Fig. 2에 따라 5개의 군집수가 최적의 군집수로 결정되었다.

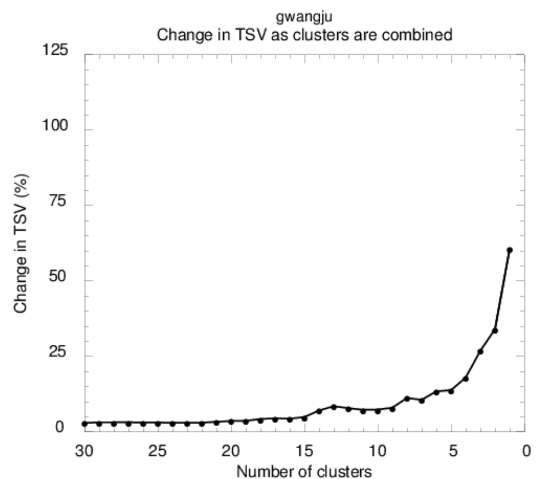


Fig. 2. Changes in total spatial variance (TSV) according to the number of clusters.

2.3. PSCF 모델

PSCF(potential source contribution function) 모델은 조건부 확률 분석으로 어떤 지리적 격자 지역을 지나는 궤적이 수용지점에 도달하여 기준치 이상의 높은 농도를 나타낼 확률이다. Ashbaugh et al.¹¹⁾ 미국 그랜드 캐니언에서 환경대기 중 황의 농도에 대하여 적용한 것을 시작으로 오염원 위치 추적에 비교적 간단한 방법으로 이용되어왔다. 오염물질이 특정위치에서 수용원으로 이동할 확률은 모든 시료채취 날에 대한 총 역계적 endpoint의 수와 특정 격자를 통과하는 역계적 endpoint 수를 N 이라 하고 특정 i 번째 격자를 통과하는 역계적 endpoint 수를 n_i 라고 한다면, 수용원에 도착한 역계적이 i 번째 격자를 통과하는 확률은 n_i/N 이고 이를 $P[A_{ij}]$ 로 표현한다. 또한 기준치보다 높은 농도를 나타낸 날의 역계적이 j 번째 격자를 m_{ij} 의 숫자만큼 통과한다면, 높은 농도를 나타내는 날의 역계적이 특정 j 번째 격자를 통과하는 확률은 m_{ij}/N 이고 이를 $P[B_{ij}]$ 라고 표현될 수 있다. 따라서 i 번째 격자의 PSCF 값은 조건부 확률인 $P[B_{ij}/A_{ij}]$ 로 나타내어지고 높은 PSCF값을 갖는 격자일 수록 주요 오염원의 위치일 가능성이 높게 된다. PSCF가 효과적으로 이용되기 위해서는 역계적 계산 시에 발생하는 무작위 오차를 상쇄하기 위하여 채취된 시료의 수가 많아야 한다. PSCF 결과를 분석하는데 있어서 몇몇 주의해야 할 점들이 있는데, 먼저 PSCF 결과는 정확한 오염원 위치를 제공하는 것이 아니라 수용지점에 영향을 줄 높은 확률을 가진 특정 격자지역의 위치만을 지정한다. 따라서, 높은 PSCF 결과를 가진 격자지역은 수용지점에 영향을 주었을 확률이 높은 잠재 오염원 지역이거나 가능한 경로이다. 다음으로 PSCF 결과는 모사된 지역의 모든 오염원의 위치를 반영하지 않는다. 즉, 실제로 고농도 오염원이 존재하더라도 궤적이 고농도 오염원을 지나지 않으면 결과에서 확인할 수 없다. 이는 수용지점과 인접하여 있는 국지지역 오염원들에 대해서도 같은 마찬가지로, 모든 궤적들은 수용지점 근처를 지나기 때문에 국지지역 오염원을 모사하는데 적절하지 않을 뿐만 아니라 HYSPLIT 역계적 모델의 오차범위가 국지지역을 모사하기에는 너무 크기 때문이다. 또 다른 문제점은 비록 높은 확률의 오염원을 갖는 격자지역이라 할지라도 소수의 궤적을 가질 경우는 큰 불확실도를 갖게 된다. 이런 문제점을 보완하기 위하여 경험가중치 $W(n_{ij})$ 가 널리 사용된다. Polissar et al.¹²⁾은 모든 격자 내 평균 궤적점 수를 기준으로 3배수보다 적은 궤적점을 갖는 격자를 큰 불확실도를 갖는다고 하였고 이들로

부터 수많은 시행착오를 통해 최종적인 경험가중치 $W(n_{ij})$ 를 선정하여 사용하였다. 본 연구에서도 Polissar et al.의 방법을 적용하여 경험가중치 $W(n_{ij})$ 를 산정하고 확률값의 계산시에 반영하였다. PSCF 위치 추적 모델은 일정 기준치(평균, 75분위수, 80분위수 등)보다 높은 농도를 나타낸 역계적들을 동일한 선상에서 계산하기 때문에 이들 중보다 높은 농도를 갖는 역계적에 대해 과소평가될 수 있고 분리해서 평가할 수 없다는 한계성을 갖는다. Hsu et al.¹³⁾은 이를 보완하기 위하여 CWT (concentration weighted trajectory) 오염원 위치 추적 모델을 제안하였다. PSCF 모델이 수용지점에서 일정기준치보다 높은 농도를 보인 역계적 만을 사용하여 오염원 위치를 추적하는 반면, CWT 모델은 전체 연구기간 중 역계적을 수용지점 농도와 결합하여 지정된 지역내의 오염원 위치별 수용지점에 대한 영향정도를 농도 경사로 표현하기 때문에 PSCF의 한계성을 극복할 수 있다. 본 연구에서는 2008~2016년간 광주지역의 고농도 PM_{10} 발생일에 대하여 CWT 분석을 실시하여 고농도 발생시 농도수준에 따른 영향 배출원의 위치를 추정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 광주지역 PM_{10} 농도분포 특성

3.1.1. PM_{10} , $PM_{2.5}$ 배출량 현황

2013년 광주지역 대기오염물질 배출량은 도로이동 오염원(34.8%) > 유기용제 사용(28.1%) > 비산업연소(14.7%) > 비도로 이동오염원(12.6%) > 에너지 수송 및 저장(3.6%) > 에너지산업 연소(1.9%) > 제조업 연소, 폐기물처리(1.3%) > 기타 등의 순으로 높게 나타났다¹⁴⁾. 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$) 배출량은 PM_{10} 463톤과 $PM_{2.5}$ 408톤으로 7대 특·광역시 가장 적은 배출량을 나타냈으며, 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$) 기여율은 도로 이동오염원(45.0%), 비도로 이동오염원(38.1%), 비산업 연소(14.7%), 기타 등으로 미세먼지(PM_{10} , $PM_{2.5}$)는 주로 이동오염원이 약 85% 차지한 것으로 나타났다. Fig. 3에 표시된 배출량 지도를 살펴보면 동구, 서구, 남구, 북구의 경계가 된 시내지역에서 배출량이 높은 것으로 나타났는데 이들 지역은 자동차 통행이 많은 지역이기 때문인 것으로 판단되며, 또한 광주공항 및 공업지역인 하남공단과 첨단산업단지에서도 비교적 배출량이 높은 것을 알 수 있다.

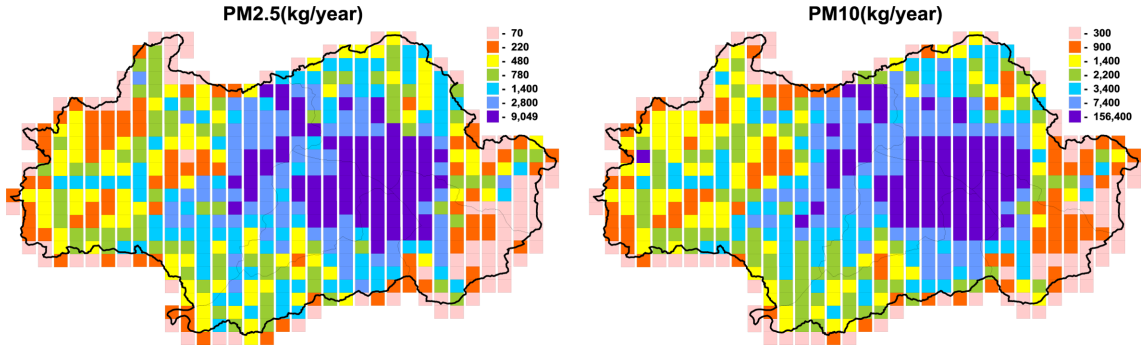


Fig. 3. Horizontal distributions of PM_{2.5} and PM₁₀ emissions levels in Gwangju, 2013.

3.1.2. PM₁₀ 농도 분포

광주지역의 PM₁₀은 1995년부터 측정되었고 2008년부터 2016년까지 9년간, 광주지역 도시대기측정소에서 측정된 PM₁₀ 일평균의 연평균, 월평균의 분포는 Fig. 4와 같다. 연도별 미세먼지 농도 경향을 살펴보면 2008년 50 ug/m³에서 2010년 45, 2012년 38, 2014년 41, 2016년 40 ug/m³으로 2012년까지는 계속해서 감소추세를 보이다가 최근 4년은 거의 비슷한 농도를 나타내고 있다.

2012년 큰 폭으로 농도가 감소하였는데 이는 2011년에 완료된 시내버스 약 980대 연료를 경유에서 천연가스로 교체한 결과로 판단된다. Fig. 4의 오른쪽 그림은 지난 지난 9년간 PM₁₀ 월평균 분포를 나타낸 그림이다. Fig. 4의 그림에서 굵은 선과 숫자는 2008년부터 2016년 전체의 월평균 PM₁₀ 농도를 나타내며 원으로 표시된 선들은 해당 년별 월평균 분포를 나타낸다. PM₁₀ 월평균 농도는 3월이 65 ug/m³으로 가장 높았고, 8월에 24 ug/m³으로 가장 낮았다. 전반적으로 봄철인 3~5월간 높은 월평균 분포를 보이고 여름철인 7, 8월에 낮은 평균 농도를 보이는 것을 알 수 있다. 월별 PM₁₀ 농도는 건

조한 기후와 황사의 영향을 많이 받는 봄철 그 중에서도 3월에 가장 높았다. 봄철의 주풍향인 서풍계열의 종관풍으로 인해 장거리 수송된 황사의 영향이 크게 작용한 것이며 여름철 농도 감소는 배출량의 감소와 더불어 하절기 강수의 집중에 따른 세정효과 때문인 것으로 판단된다.

2008년부터 2016년까지 광주지역 도시대기측정소 PM₁₀ 평균농도를 Fig. 5, 6에 나타내었다. 공업지역인 오선동과 건국동 측정소가 비교적 높게 나타났고, 주거지역인 농성동과 상업지역인 서석동 측정소가 38 ug/m³으로 가장 낮게 나타났다. 오선동과 건국동 측정소는 각각 54, 47 ug/m³으로 높게 나타났는데 두 측정소 모두 공업지역에 위치하고 있고 근거리의 호남고속도로가 관통하고 있으며, 하남공단 뒷편으로 진곡산단 조성과 나대지가 산재해있기 때문으로 판단된다.

3.2. 광주지역 종관기류 패턴 분류

3.2.1. 광주지역 종관기류 패턴분류

광주지역에 도달하는 종관규모 이상의 기류 패턴을 분

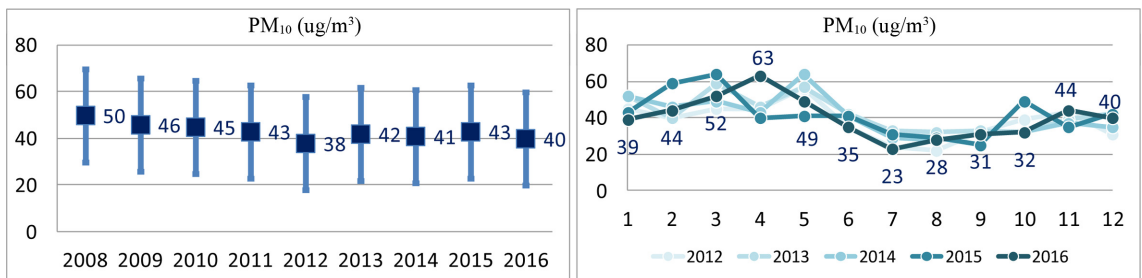


Fig. 4. The annual mean and standard deviation of PM₁₀ concentrations (left) and monthly mean PM₁₀ concentrations (right) in each year.

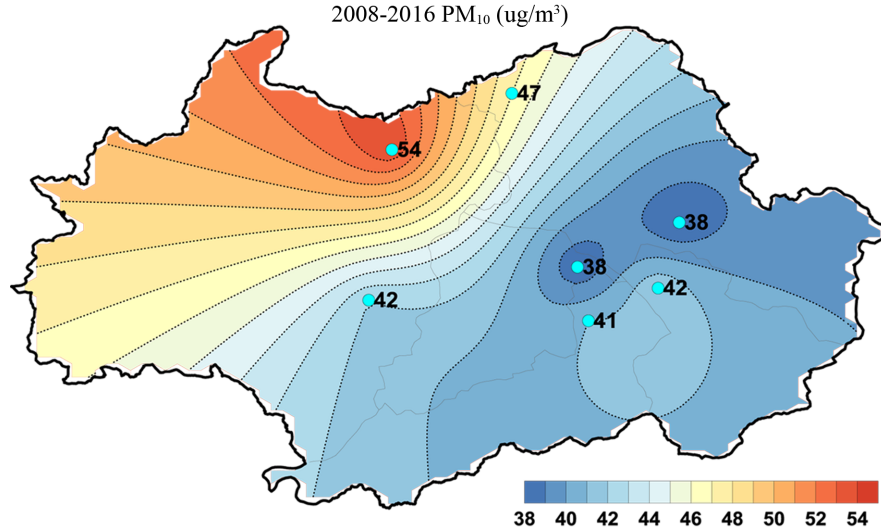


Fig. 5. Spatial distribution of the average PM₁₀ concentrations from 2008-2016 in Gwangju.

류하기 위하여 HYSPLIT 모델을 사용하여 2008~2016 년간 일자별로 12시간 역궤적을 계산하였다. 입력기상자료는 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)에서 제공하는 전 지구 기상자료인 GDAS(Global Data Assimilation System) FNL(Final)를 사용하였으며 계산시간은 12시간으로 설정하였다. 모델링 시작 지점은 광주지역의 비교적 중심에 위치한 농성동 측정소로 설정하였으며 모델링 시작 시간은 일 중의 평균적인 기류 패턴을 보기 위하여 15시로 설정하였다. 일자별 역궤적 계산결과를 바탕으로 역궤적 최종위치의 유사성에 따라 HYSPLIT 모델에서 제공되는 군집분석 기능을 적용하였다. Fig. 6은 2008~2016년간 계산된 일자별 역궤적을 end-point의 유사성에 따라 5개의 군집으로 분류하고 각 군집에 속하는 역궤적 전체와 평균적인 역궤적의 경로를 나타낸 그림이다. 연구대상 기간에 산정된 총 역궤적수는 3,288개이며 cluster1이 968일 발생하여 약 29.4%로 가장 높은 발생빈도를 보였고, cluster3이 924일, 28.1%로 cluster1과 비슷한 빈도를 보였으며 cluster5가 363일, 약 11.0%로 가장 낮은 발생빈도를 보였다. 각 군집별 평균 역궤적을 살펴보면 cluster1은 이동경로가 가장 긴 경우로 중국의 북동지역에서 서해상을 광주에 도달하는 경로로 일반적으로 황사발생시 나타나는 종관기류와 유사한 경로를 보이고 있다. Cluster2는 중국의 동부지역에서 서해상을 지나 광주에 이르는 경로를 보이고 있다. Cluster3, 4는 주로 우리나라 내에서

순환하는 기류 패턴으로 생각할 수 있는데, cluster3은 광주의 동쪽 해상에서, cluster4는 서해상에서 광주의 북쪽으로 이루어오는 경로를 보이고 있다. Cluster5는 가장 발생빈도가 낮았으며 남쪽해상에서 비교적 긴 이동 경로를 가지고 광주지역으로 이루어오는 경로를 보이고 있다. 2008~2016년간 광주지역에 계산된 일자별 역궤적을 end-point의 유사성에 따라 분류할 경우 중국에서 서해상을 거쳐 광주로 유입되는 경우(cluster1, 2)와 우리나라 내부에서 순환하는 기류(cluster3, 4), 남해상에서 유입되는 기류로 크게 분류할 수 있었다.

Fig. 7은 각 군집에 속하는 역궤적의 월별 발생빈도를 나타낸 그림이다. Cluster1의 경우 전체 연구대상 기간 중(3,288일) 968일(29.4%) 발생하였으며 여름철에 해당되는 6~9월에 10% 이하의 낮은 발생빈도를 보이고 겨울철인 1월과 12월에 각각 62.7%와 62.4%로 높은 발생빈도를 보이고 있다. 전반적으로 겨울과 봄철에 높은 발생빈도를 보이다가 여름이 되면서 발생빈도가 줄어드는 경향을 보인다. 이는 우리나라의 겨울철의 전형적인 종관패턴인 시베리아 고기압에 의한 북서 계절풍의 영향으로 판단된다. 기류의 이동경로가 중국의 북동지역을 지나 우리나라로 오는 것을 고려하면 봄철과 겨울철에 자주 나타나는 황사 발생시의 기류패턴과 유사함을 알 수 있으며 몽골내부 지역에서 사막 등의 영향으로 PM₁₀ 농도가 높아져서 황사를 발생시키는 경우로 생각할 수 있다. Cluster2는 중국의 동부 내륙에서 기원한 기류가

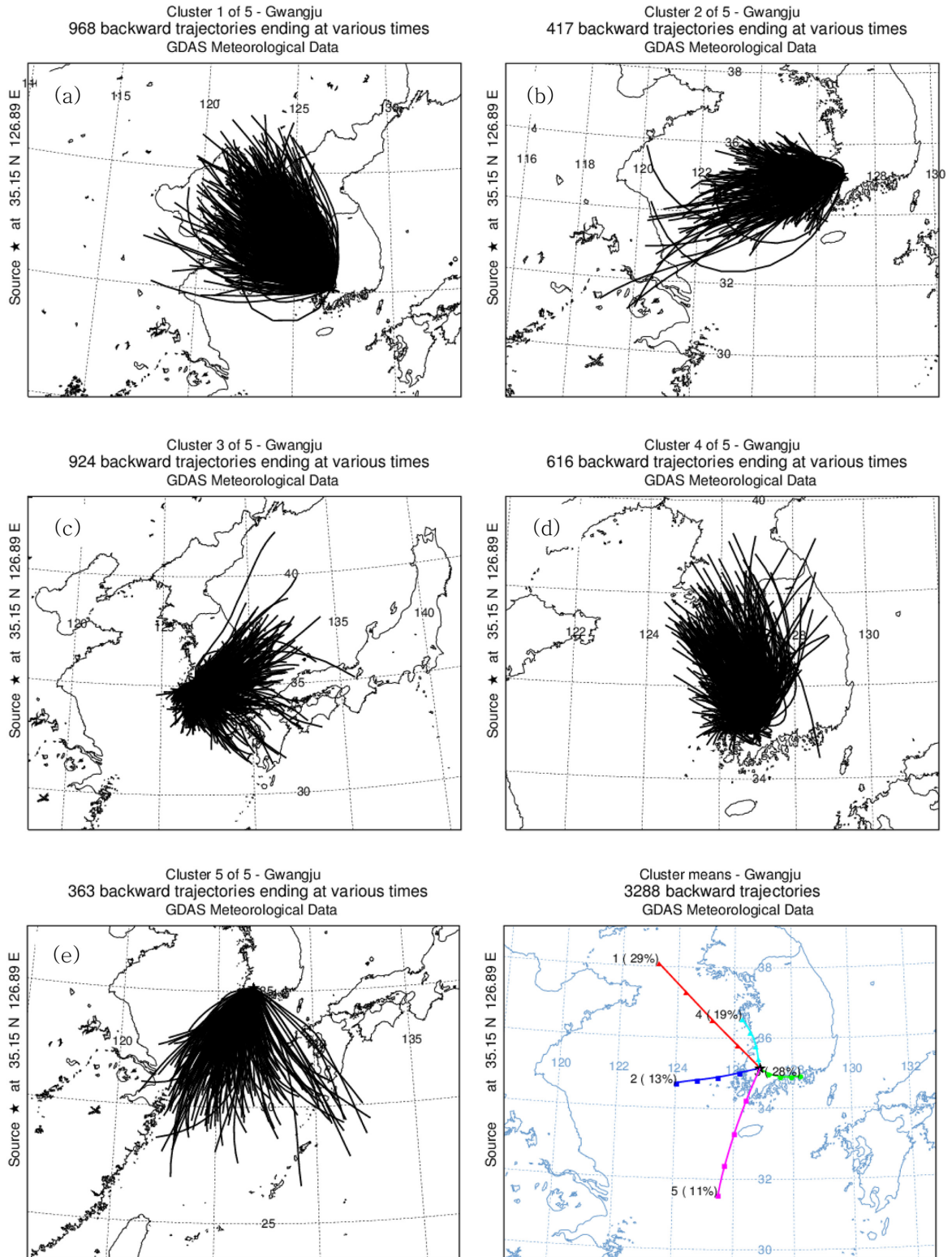


Fig. 6. The backward trajectories of the four clusters and the mean trajectories of each cluster.

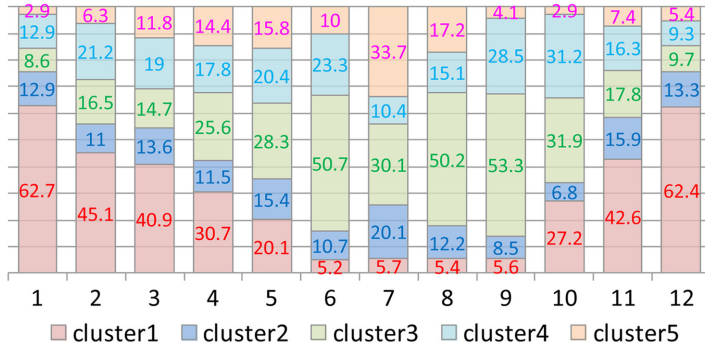


Fig. 7. The frequency of occurrence(%) of five clusters every month from 2008-2016.

서해상을 지나 우리나라에 도달하는 경로로 전체 연구 대상 기간 중(3,288일) 417일, 12.7%의 발생 빈도를 보였다. 월별 발생빈도는 7월에 20.1%로 가장 높았지만 전반적으로 매월 10% 내외의 발생빈도를 보이고 있다. Cluster2의 경우 최근 공업화와 도시화의 영향으로 높은 PM₁₀ 배출량을 보이는 중국 동부지역의 기류가 광주지역에 도달하는 경우로 계절에 관계없이 중국에서 배출되는 PM₁₀이 광주지역 PM₁₀ 농도에 일정하게 영향을 미치는 것으로 생각된다. 우리나라의 남동해상에서 광주지역에 도달하는 cluster3은 전체 연구대상 기간 중 28.1%의 발생빈도를 보여 cluster1 다음으로 높은 발생빈도를 나타내었고 9월에 53.3%로 가장 발생빈도가 높았고 1월에 8.6%로 가장 낮은 발생빈도를 보였다. Cluster3은 여름철인 6~9월간 30.1~53.3%의 높은 발생빈도를 보이고 있으며 이는 여름철 우리나라에 영향을 주는 북태평양 고기압의 영향으로 발생하는 종관패턴으로 생각할 수 있다. Cluster4는 북서 해안지역에서 광주로 유입되는 종관기류로 18.7%의 발생빈도를 보였으며 12월에 9.3%로 가장 낮은 빈도였지만 월별로 뚜렷한 패턴을 보이지 않고 전반적으로 년 중 꾸준한 발생빈도를 보이고 있다. Cluster5는 남해상에서 광주지역으로 유입되는 기류로 11.0%로 가장 낮은 발생빈도를 보이고 있으며 7, 8월을 중심으로 높은 빈도를 보이고 있어 cluster2와 더불어 여름철에 주로 발생하는 기류패턴임을 알 수 있다. 중국에서의 PM₁₀ 장거리 수송이 예상되는 cluster 1, 2의 월별 발생빈도는 여름철인 8, 9월에 가장 낮은 발생빈도를 보이고 겨울철과 봄철에 높은 발생빈도를 보였고 국내에서의 영향이 예상되는 기류패턴(cluster3, 4)은 여름철에 높은 발생빈도를 보이는 것을 알 수 있었다.

3.2.2. 기류패턴별 PM₁₀ 농도 분포

광주지역에 도달하는 종관규모 이상의 기류 패턴을 분류하기 위하여 HYSPLIT 모델을 적용하였으며 기류의 유사성에 따라 군집분석을 실시하였다. Fig. 8은 앞에서 산정된 각 군집별 PM₁₀ 농도 분포를 나타낸 그림이다. 각 군집별 평균농도는 cluster1 41.0, cluster2 48.1, cluster3 37.6, cluster4 43.3, cluster5가 33.3 ug/m³으로 cluster2가 가장 높았고 cluster5가 가장 낮았다. Cluster2는 중국의 동부 내륙에서 기원한 기류가 서해상을 지나 우리나라에 도달하는 경로로 중국의 PM₁₀ 배출량이 가장 많은 지역의 영향을 받는 경우이다. 이에 따라 광주지역의 PM₁₀ 농도도 가장 높게 나타나고 있다. Cluster5는 우리나라의 남해상에서 광주지역으로 이동해오는 경우로 상대적으로 배출원이 없는 지역을 이동해오기 때문에 가장 낮은 PM₁₀ 농도를 보이는 것으로 판단된다. Cluster4의 PM₁₀농도는 43.3 ug/m³으로 두 번째로 높은 농도를 보이고 있다. Cluster4의 경우 이동거리가 짧은 경로로 상대적으로 정체된 기류임을 알 수가 있으며 평균적으로 우리나라의 서해 해안을 거쳐 광주로 이동해오는 경로를 보이고 있다. 따라서 국내배출원의 영향으로 높은 농도를 보이는 경우로 판단이 된다. Cluster1은 평균적인 이동경로가 가장 긴 경우로 일반적으로 몽골지역에서 중국의 북동지역을 거쳐 우리나라에 도달하는 경로이다. 몽골내부 사막지역에서 PM₁₀의 농도가 높아지면 황사로 나타날 수 있으나 그렇지 않을 경우 중국의 북동지역에서 배출되는 PM₁₀의 영향을 받을 수 있는 경로이며 따라서 이들 지역에서 장거리 수송되는 PM₁₀이 광주지역의 PM₁₀ 농도 증가에 상당한 영향을 주는 것으로 생각할 수 있다. Cluster3는 평균적으로 우리나라의 남동해상과, 동해상에서 기원하는 종관기류

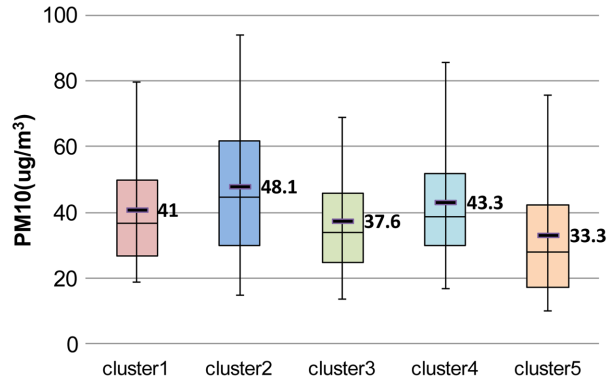


Fig. 8. PM₁₀ concentrations off the five clusters. The solid line within the box denotes the mean. The thin solid lines that make up the box indicate the 25th percentile, median, and 75th percentiles, respectively, while the lower and upper ends of the line represent the 5th and 95th percentiles, respectively.

패턴으로 전반적으로 PM₁₀ 배출원이 없는 지역을 지나 오기 때문에 평균농도도 낮게 나타나고 있다. 높은 PM₁₀ 배출량을 보이는 중국의 동부 내륙에서 기원한 기류가 서해상을 지나 광주지역으로 도달하는 경로에서 PM₁₀ 농도가 증가하는 것을 알 수 있었다.

3.3. 기류패턴별 영향 배출원 추정

2008~2016년간 각 군집별 역궤적의 계산결과와 같은 날 농성동 측정소의 일평균 PM₁₀ 농도를 PSCF 모델에 입력하여 영향 배출원의 위치를 추정하였다. 농성동 측정소는 상대적으로 광주지역의 중심에 위치하고 있어 광주지역을 대표한다고 할 수 있으며, PSCF 모델 수행시 전지점 평균농도보다는 특정지점의 농도를 적용하는 것이 좀더 타당한 해석이 가능하기 때문에 농성동측정소를 적용하였다. 모델 적용시 적은 수의 궤적점을 갖는 격자의 불확실도를 제거하기 위하여 Polissar et al.(2001)의 방법과 동일하게 3배의 평균 궤적점 수를 시작으로 Table 1과 같이 각 군집별로 가중치를 적용하였다. PSCF를 계산하기 위한 그리드는 한반도를 중심으로 1°단위의 80×35개의 격자를 구성하였고 각 군집별 역궤적수에 따

라 궤적점 수를 산정하고 격자당 평균 궤적점 수의 3배를 기준으로 각 군집별 가중치를 계산하였다.

Fig. 10은 각 군집별 PSCF 모델을 적용한 결과를 나타낸 그림이다. 그림에서 격자값은 역궤적과 일평균 PM₁₀ 농도를 바탕으로 일평균 80 ug/m³ 이상의 농도가 나타날 경우 배출원이 위치하게 되는 확률을 의미한다. Cluster1은 이동경로가 가장 긴 경우로 몽골지역과 중국의 북동지역을 거쳐 광주지역에 기류가 이동하는 경로를 가진다. Cluster1의 PM₁₀ 평균은 41 ug/m³으로 5개의 군집 중 세 번째로 높은 농도를 보이는 경우이고 우리나라에 황사가 발생할 때의 종관기류 패턴과 유사한 경우이다. PM₁₀ 평균이 80 ug/m³ 이상인 경우의 영향 배출원은 몽골지역과 중국의 Beijing과 Liaoning에 이르는 경로 상에 주로 위치하고 있다. 몽골지역에서의 인위적인 배출원은 그리 많지 않으며 중국의 Beijing과 Liaoning 일부 지역에서 높은 PM₁₀ 배출량을 보이고 있어 이들 지역이 영향 배출원으로 추정되었다.

Fig. 9(b)는 cluster2에 대하여 PSCF 분석을 수행한 결과이다. Cluster2는 중국의 동부지역에서 서해상을 지나 광주지역에 이르는 경로로 전체 연구대상 기간 중 13%

Table 1. The weight functions multiplied by the value of the potential source contribution function(PSCF) at each cluster

	cluster1	cluster2	cluster3	cluster4	cluster5
Grid structure			80×35=2,800		
Number of endpoint	968×24	417×24	924×24	616×24	363×24
	1.00(24<nij)	1.00(12<nij)	1.00(24<nij)	1.00(15<nij)	1.00(9<nij)
W(nij), weight function	0.70(16<nij<24)	0.70(8<nij<12)	0.70(16<nij<24)	0.70(10<nij<15)	0.70(6<nij<9)
	0.42(8<nij<16)	0.42(4<nij<8)	0.42(8<nij<16)	0.42(5<nij<10)	0.42(3<nij<6)
	0.17(nij<8)	0.17(nij<4)	0.17(nij<8)	0.17(nij<5)	0.17(nij<3)

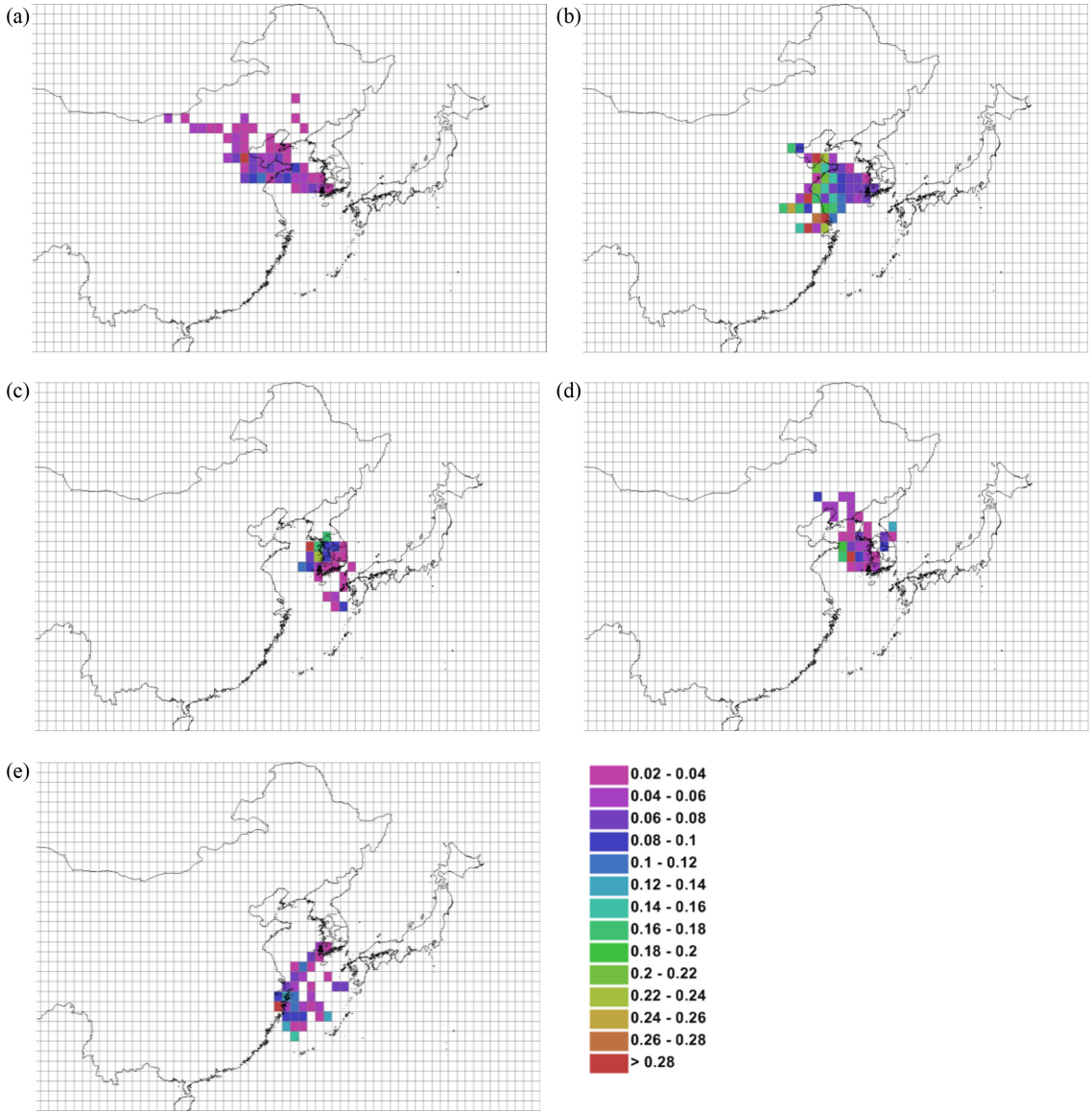


Fig. 9. Potential source locations for PM₁₀ values exceeding 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ from cluster (a) to cluster (e).

의 발생빈도를 보이는 경우이다. Cluster2의 PM₁₀ 평균은 48.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 5개의 군집 중 가장 높은 농도를 보이고 있다. PM₁₀ 평균이 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 경우의 영향 배출원은 중국의 동부지역과 서해상에 집중적으로 위치하고 있다. 주요 영향 배출원으로는 중국의 Beijing, Hebei에서 Shandong, Jiangsu, Shanghai 지역까지 넓게 분포하고 있으며 이들 지역은 PM₁₀ 배출량이 높은 지역으로 이들 지역에서 배출되는 PM₁₀이 상당한 비율로 광주지역에 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다. Clu-

ster2에 해당되는 종관기류 패턴은 빈도는 낮으나 연중 고르게 발생하고 있으며 가장 높은 PM₁₀ 평균농도를 보이는 경우로 중국 동부지역에서 배출되는 PM₁₀이 광주 지역의 PM₁₀ 농도 분포에 상당한 영향을 주는 것으로 판단할 수 있다. Cluster3는 평균적으로 우리나라의 남동해상과, 동해상에서 기원하는 종관기류 패턴이며 PM₁₀ 평균농도는 37.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 5개 군집 중 두 번째로 낮은 농도를 보이는 경우이다. 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 영향배출원도 상대적으로 배출량이 적은 우리나라 내부 또는 남

Table 2. The number of high PM₁₀ days when the daily mean PM₁₀ value exceeds 100 ug/m³ from 2008-2016 in Gwangju

Year	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Oct.	Nov.	Dec.	Total
2008	3	1	4				1	1		10
2009		4		4		1	1			10
2010	1				3			2	3	9
2011		1		1	1					3
2012					1					1
2013			2		2				1	5
2014		2			1	1				4
2016									1	1
Total	4	8	6	5	8	2	2	3	5	43

해상 일부 지역으로 한정되고 있어 낮은 PM₁₀ 농도를 보이는 것으로 판단할 수 있다. Fig. 7(d)는 cluster4에 대하여 PSCF 분석을 수행한 결과이다. Cluster4는 서해상에서 광주의 북쪽으로 이루어오는 경로를 보이고 있다. PM₁₀ 평균은 두 번째로 높은 43.3 ug/m³으로 나타났다. 이동거리가 짧은 경로로 상대적으로 정체된 기류임을 알 수가 있다. PM₁₀ 배출원의 위치도 우리나라 서해안 지역에 집중적으로 배치되어있으며 따라서 국내 배출원의 영향으로 높은 농도를 보이는 경우로 판단이 된다. Cluster5의 경우 PM₁₀ 평균농도가 33.3 ug/m³으로 가장 낮은 경우로 남해상에서 광주지역으로 유입되는 경로를 보이며 11.0%로 가장 낮은 발생빈도를 보이는 경우이다. 영향배출원의 위치도 우리나라 남서 해상에 주로 위치하고 있음을 알 수 있었다.

3.4. 고농도 PM₁₀ 일의 영향 배출원 추정

광주지역 고농도 PM₁₀ 발생일에 영향을 미치는 영향 배출원의 위치를 추정하기 위하여 CWT분석을 실시하였다. 먼저 황사발생일과 전후 일을 제외하고 2008~2016년간 일평균 PM₁₀ 농도가 100 ug/m³을 초과한 날을 광주지역 고농도 PM₁₀일로 정의하였다. Table 2는 2008~2016년간 고농도 PM₁₀일의 월별 분포를 나타낸다. 2008, 2009년 각 10일로 가장 많은 빈도를 보였고 2012년 1일까지 낮아졌으며 2013년 5일로 다소 증가한 횟수를 보여주면서 8년간 총 43일의 빈도를 보였다. 월별 분포를 살펴보면 2월과 5월이 8일로 가장 많은 빈도를 보였고 6월과 10월이 2일로 가장 낮은 발생빈도를 보였다. 본 연구에서 황사발생일은 분석에서 제외하였지만 봄철 자주 나타나는 장거리 이동의 영향으로 높은 빈도를 보이는 것으로 판단되며 전반적으로 2일 이상의 지속적인 발생 빈도를 보이는 것을 알 수 있다.

앞에서 산정된 고농도 PM₁₀일 43일에 대하여 WRF

기상모델을 활용하여 상세 기상장을 계산하였다. WRF 기상모델 결과의 적합성은 관측자료와의 비교를 통하여 확인하였으며 WRF 모델의 수행과 관련된 기술은 본 연구 주제와 거리가 있어 생략하였다. 고농도 PM₁₀일의 기류 패턴을 파악하기 위하여 3.2절과 동일하게 HYSPLIT 모델을 이용하여 역궤적을 계산하였다. HTSPLIT 모델 결과의 정확성을 높이기 위하여 앞에서의 경우와 달리 WRF기상모델 결과를 HYSPLIT의 입력 기상자료로 활용하였다. WRF기상모델은 최종적으로 1 km 격자에 대한 기상자료를 산출하기 때문에 1도 단위의 해상도를 가지는 전 지구 기상자료보다 향상된 결과를 보이는 것으로 판단된다. 2008~2016년간 고농도 PM₁₀일의 매일 15시 기류의 역궤적은 Fig. 10(a)와 같다. 43일 대부분이 중국의 동부지역에서 서해를 지나 광주지역으로 이동해 오거나 우리나라의 북서쪽지역에서 서해안을 지나 광주 지역으로 이동해오는 경로를 보이고 있다. 일부 광주의 동쪽과 남해상에서 이동해오는 패턴도 확인할 수 있었다. 중국의 동쪽에서 서해상을 지나 오는 경로는 앞의 cluster2에 해당되는 경우로 PM₁₀ 농도가 가장 높게 나타나는 경우이다. 또한 북서 쪽에서 서해안을 거쳐 오는 경우도 앞에서 제시한 cluster4와 cluster1의 경우로 발생빈도가 높거나 PM₁₀ 농도가 높은 경우에 해당이 된다. Fig. 10(b)는 기류의 이동 경로에 따라 농도분포별 영향 배출원의 위치를 나타낸 그림이다. PM₁₀ 농도 변화는 시간대에 따라 급격하게 나타나기도 하지만 본 연구에서는 일평균 농도를 사용하였고 역궤적 계산시간도 24 시간으로 수행하여 상세한 분석에는 다소 어려움이 있으나 광주지역 고농도 PM₁₀발생시의 영향 배출원이 서해상과 전라남, 북도에 주로 분포하고 있음을 알 수 있었고 광주지역에 이르는 기류의 경로와 같은 경로에 위치한 배출원들이 PM₁₀ 농도 증가에 상당한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

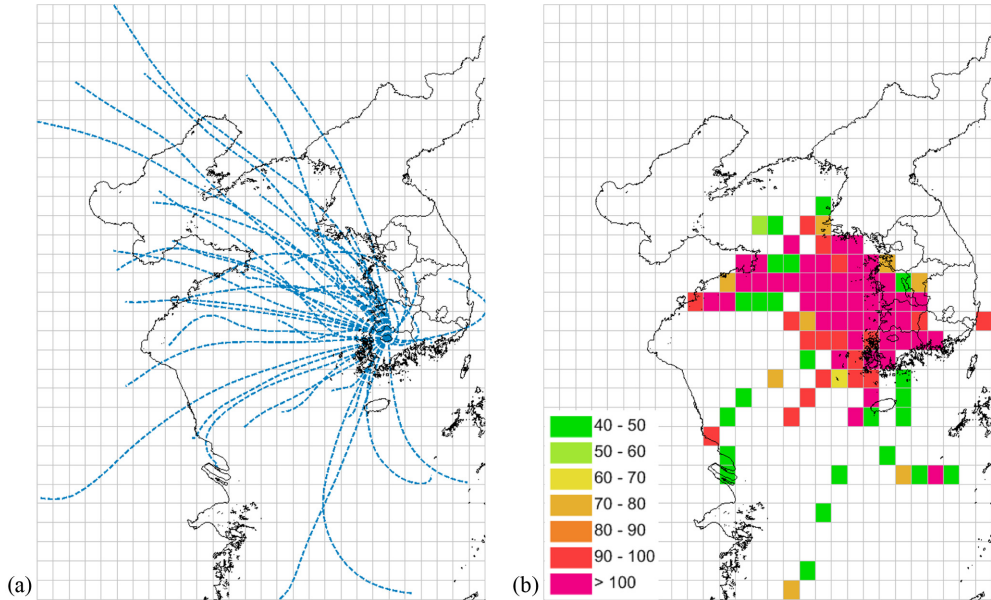


Fig. 10. Backward trajectories of the high PM_{10} days (a) and locations of potential sources according to the concentrations (b).

4. 결 론

본 연구는 광주지역 PM_{10} 농도 분포에 영향을 미치는 기류패턴을 구분하고 패턴별로 영향 배출원의 위치추정하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위하여 최근 9년간 (2008~2016) 광주지역의 종관패턴을 HYSPLIT 모델을 이용하여 구분하고 각 종관패턴에 대하여 PSCF 모델과 CWT분석을 실시하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 광주지역의 PM_{10} 평균농도는 2008년 $50 \mu g/m^3$ 에서 2010년 $45 \mu g/m^3$, 2012년 $38 \mu g/m^3$, 2014년 $41 \mu g/m^3$, 2016년 $40 \mu g/m^3$ 으로 2012년까지는 계속해서 감소추세를 보이다가 최근 4년은 비슷한 농도를 유지하는 것으로 나타났으며 지역별로는 공업지역인 오선동과 건국동 측정소가 다른 지역과 비교하여 다소 높게 나타나고 있다.

2. 2008~2016년간 광주지역에 계산된 일자별 역궤적을 end-point의 유사성에 따라 분류할 경우 중국에서 서해상을 거쳐 광주로 유입되는 경우(cluster1, 2)와 우리나라 내부에서 순환하는 기류(cluster3, 4), 남해상에서 유입되는 기류(cluster5)로 크게 분류할 수 있었으며 각 군집별 PM_{10} 평균농도는 Cluster1 41.0, Cluster2 48.1, Cluster3 37.6, Cluster4 43.3, Cluster5가 33.3 $\mu g/m^3$ 으로 Cluster2가 가장 높았고 Cluster5가 가장 낮

았다.

3. Cluster1은 이동경로가 가장 긴 경우로 몽골지역과 중국의 북동지역을 거쳐 광주지역에 기류가 이동하는 경로이며, 중국의 Beijing과 Liaoning 일부지역에서 높은 PM_{10} 배출량을 보이고 있어 이들 지역이 영향 배출원으로 추정된다.

4. Cluster2는 5개의 군집 중 가장 높은 농도를 나타내고 있고, 중국의 동부지역에서 서해상을 지나 광주지역에 이르는 경로로 전체 연구대상 기간 중 13%의 낮은 발생빈도를 보였으며 중국의 Beijing, Hebei에서 Shandong, Jiangsu, Shanghai 지역이 주요 영향 배출원으로 광주지역의 PM_{10} 농도 분포에 상당한 영향을 주는 것으로 판단할 수 있다.

5. Cluster4는 서해상에서 광주의 북쪽으로 이루어오는 경로이며 이동거리가 짧아 상대적으로 정체된 기류이고 따라서 PM_{10} 배출원의 위치도 우리나라 서해안 지역에 집중적으로 배치되어있다.

6. 광주지역 고농도 PM_{10} 발생일(43일)에 대한 영향 배출원 위치를 추정하기 위해 CWT분석을 실시한 결과 43일 대부분이 중국 동부지역과 북서쪽지역에서 서해를 지나 광주지역으로 이동해오는 기류의 이동경로에 영향을 받고 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 전병일, “부산지역 지역용도별 해안과 내륙의 PM₁₀ 농도 특성”, *한국습지학회지*, **2009**, 11, 47-54.
2. 국립환경과학원, “대기환경연보 2015”, **2016**.
3. 정장표, 이승훈, “PSCF 모형의 개발과 제어변수의 결정”, *한국대기환경학회지*, **2006**, 22, 135-143.
4. 이용미, “서울시 대기 중 총 가스상 수은의 농도와 수용원 모델을 이용한 오염원 가능 지역 위치 파악”, 서울대학교 환경보건학과, **2005**, 석사학위논문.
5. 강병욱, 강충민, 이학성, 선우영, “하이브리드 수용모델을 이용한 서울시 PM_{2.5} 오염원의 위치 추적”, *한국대기환경학회지*, **2008**, 24, 662-673.
6. F. Karaca, I. Anil, and O. Alagha, “Long-range potential source contributions of episodic aerosol events to PM₁₀ profile of a megacity”, *Atmospheric Environment*, **2009**, 43, 5713-5722.
7. L. Zhu, X. Huang, H. Shi, X. Cai, and Y. Song, “Transport pathways and potential sources of PM₁₀ in Beijing”, *Atmospheric Environment*, **2011**, 45, 594-604.
8. M. Li, X. Huang, L. Zhu, J. Li, Y. Song, X. Cai, and S. Xie, “Analysis of the transport pathways and potential sources of PM₁₀ in Shanghai based on three methods”, *Science of the Total Environment*, **2012**, 414, 525-534.
9. J. Heo, J. E. McGinnis, B. Foy, and J. J. Schauer, “Identification of potential source areas for elevated PM_{2.5}, nitrate and sulfate concentrations”, *Atmospheric Environment*, **2013**, 71, 187-197.
10. Air Resources Laboratory, HYSPLIT Home Page, 2013, http://www.arl.noaa.gov/HYSPLIT_info.php
11. L. L. Ashbaugh, W. C. Malm, and W. D. A. Sadeh, “Residence time probability analysis of sulfur concentrations at Grand Canyon National Park”, *Atmospheric Environment*, **1985**, 19, 1263-1270.
12. A. V. Polissar, P. K. Hopke, and J. M. Harris, “Source regions for atmospheric aerosol measured at Barrow, Alaska”, *Environment Science and Technology*, **2001**, 4214-4226.
13. Y. Hsu, T. M. Holsen, and P. K. Hopke, “Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago”, *Atmospheric Environment*, **2003**, 37, 545-562.
14. 국립환경과학원, “2013 국가 대기오염물질 배출량”, **2015**.