

지역별 미세먼지 농도의 알레르기비염 외래이용에 대한 영향 분석

박주현¹ · 박영용¹ · 이은주² · 이광수³

¹연세대학교 대학원 보건행정학과, ²국민건강보험공단 빅데이터실, ³연세대학교 보건과학대학 보건행정학과

Analysis on the Effects of Particular Matter Distribution on the Number of Outpatient Visits for Allergic Rhinitis

Ju Hyun Park¹, Young Yong Park¹, Eunjoo Lee², Kwang-Soo Lee³

¹Department of Health Administration, Yonsei University Graduate School; ²Bigdata Steering Department, National Health Insurance Service; ³Department of Health Administration, Yonsei University College of Health Sciences, Wonju, Korea

Background: This study aims to analyze the effects of air pollutants, such as particular matter, to the number of outpatient visits for allergic rhinitis in eup, myeon, and dong administrative boundaries.

Methods: Dependent variable was the number of outpatient visits for allergic rhinitis per 10,000 people by region. Independent variables were air pollutants such as PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, O₃, CO₂, NO₂, and temperature that estimated by using Kriging analysis in all eup, myeon, and dong boundaries. Panel analysis was applied for the analysis to prove the relation between outpatient visits and the concentration of air pollutants.

Results: Analysis results showed that particular matter concentration varied by regions and season. Panel analysis showed that outpatient visits for allergic rhinitis had positive relationships with PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, O₃, and CO₂ in all panel models.

Conclusion: Regional variation of particular matter concentration should be considered in establishing regional policies for allergic rhinitis.

Keywords: Demography; Allergic rhinitis; Spatial analysis; Particular matter

서 론

대표적인 알레르기질환인 알레르기비염은 전 세계적으로 증가하고 있는 추세이다. 이러한 알레르기질환의 증가는 개인의 삶의 질을 저하시키고 사회적으로는 의료비용의 증가를 가져올 수 있기 때문에 질환의 위험요인을 파악하고 체계적인 관리를 필요로 하는 질환이다. 또한 알레르기질환 중에서 상대적으로 중요성이 낮은 것으로 인지되었으나 지난 20년간 지속적으로 유병률이 증가하면서 과거에 비해 알

레르기비염의 진단과 치료가 늘어났다. 이로 인한 의료비의 증가는 국가적인 부담을 가져오고 있어 적극적인 연구가 필요한 질환으로 대두되고 있다[1,2].

최근 우리나라에서는 미세먼지에 대한 국가적인 관심이 높아지고 있는 추세이다. 우리나라 미세먼지 농도는 2012년까지 개선되는 추세였으나 2013년 이후 정체되고 있는 상태이며, 이와 함께 주의보·경보 발령횟수가 증가하는 것이 그 원인으로 보인다[3]. 초미세먼지를 포함한 미세먼지 농도의 수치 또한 세계 주요 도시와 비교했을 때

Correspondence to: Kwang-Soo Lee
Department of Health Administration, Yonsei University College of Health Sciences, 1 Yeonsedae-gil, Wonju 26493, Korea

Tel: +82-33-760-2426, Fax: +82-33-760-2519, E-mail: planters@yonsei.ac.kr

*본 연구는 제1 저자의 연세대학교 일반대학원 보건행정학과 석사학위 논문에서 발취하여 수정 및 보완하였다.

Received: October 4, 2019, Revised: November 13, 2019, Accepted after revision: December 17, 2019

© Korean Academy of Health Policy and Management
© This is an open-access article distributed under the terms of the
Creative Commons Attribution Non-Commercial License

(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

매우 높은 것으로 나타나고 있다.

Particular matter (PM)₁₀은 2016년 기준 미국의 로스앤젤레스보다 1.4배, 프랑스의 파리보다 2.2배, 영국의 런던보다 2.4배, 주변국인 일본의 도쿄와 비교했을 때는 2.8배 높은 수치를 보였다. 초미세먼지인 PM_{2.5}의 농도는 파리, 도쿄, 런던에 비해 약 2배 높았다. PM_{2.5}는 2015년 이후 측정되기 시작하여 주의보 및 경보의 횟수는 매해 증가하는 추세에 있으며, 횟수뿐만 아니라 발령시간 또한 증가하고 있다[4].

국내외에서 미세먼지 농도와 건강수준과의 관련성에 대해서는 오래 전부터 연구가 이루어지고 있으며, 일반적으로 미세먼지는 다양한 질병의 원인이 될 수 있는 것으로 알려져 있다. 최근 연구결과들은 미세먼지는 심뇌혈관질환, 뇌졸중, 중추신경계 이상, 우울증 등의 정신질환과 호흡기질환 문제에 이르기까지 다양한 질환을 일으킬 수 있는 것으로 보고하고 있다[5]. 또한 세계보건기구(World Health Organization) 산하의 국제암연구소(International Agency for Research on Cancer)는 대기오염물질 중 입자상 물질인 미세먼지를 1급 발암물질로 규정하기도 하였다[6].

여러 선행연구에 따르면 외부환경에서의 미세먼지는 대표적인 호흡기계 질환인 알레르기비염의 발병과 관련이 있을 뿐만 아니라 증상을 악화시킬 수 있는 요인이다. Oh 등[7]은 우리나라 인천에서의 대기오염물질(PM₁₀, CO, NO₂, O₃, SO₂)과 인천지역 초등학생들의 알레르기비염의 유병률 및 증상과의 관계를 연구하였으며, 대기오염물질 농도가 상대적으로 높은 집단에서 알레르기비염의 유병률이 통계적으로 유의하게 높은 결과를 제시하였다. Chen 등[8]은 대만의 일개도시 Taipei에서 대기오염수준과 알레르기비염의 의원 외래이용과의 관련성을 분석하기 위해 기온, 계절성 등을 보정하여 2006-2011년의 데이터를 통해 시계열분석을 시행하였다. 그 결과 기온이 23도 이상인

그룹에서 PM₁₀, SO₂, NO₂, CO, O₃가, 23도 이하인 그룹에서는 SO₂를 제외한 모든 물질이 외래이용건수와 연관이 있음을 제시하였다[8].

이처럼 미세먼지 농도와 환경성 질환과의 연관성을 밝히기 위한 지속적인 연구가 이루어지고 있으나, 우리나라의 선행연구들은 특정 지역만을 대상으로 분석하였거나[7,9], 미세먼지 농도 및 대기오염물질을 연평균으로 처리하여 분석하였다[10]. 또한 외부환경에서의 미세먼지 농도라는 요인의 특성에 의해 연구대상이 되는 인구집단에 그 값이 동일하게 적용된다는 제한점을 가지고 있다.

이러한 분석에서의 제한점을 해결하기 위한 하나의 방안으로 최소단위의 행정구역을 기준으로 미세먼지 등 대기오염물질 농도를 추정하는 것을 제시할 수 있다[11]. 또한 여러 국가들의 미세먼지와 관련된 코호트 자료를 비교해보았을 때 우리나라의 환자 주소자료가 상대적으로 조밀하지 않았으며, 세밀한 주소정보를 이용할 수 있다면 추정된 미세먼지 농도와 질환과의 관련성을 보다 명확히 제시할 수 있을 것이다[3].

따라서 우리나라의 가장 세밀한 행정구역단위인 읍·면·동을 대상으로 설정하고 시간을 일단위로 하여 알레르기비염의 외래이용에 대한 미세먼지 농도의 영향을 분석한다면 분석결과에 대한 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 예상된다.

연구의 구체적인 목적은 다음과 같다. 첫째 전국의 300여 개 대기오염측정망에서 측정된 자료를 이용하여 대기오염물질 농도를 추정한 후 읍·면·동 지역 간 계절별 대기오염물질 농도의 추세를 확인한다. 둘째, 2017년의 읍·면·동 지역별 일별 미세먼지 농도 변화와 인구만 명당 알레르기비염의 외래이용건수와 미세먼지 농도를 패널모형을 통해 확인하고자 한다.

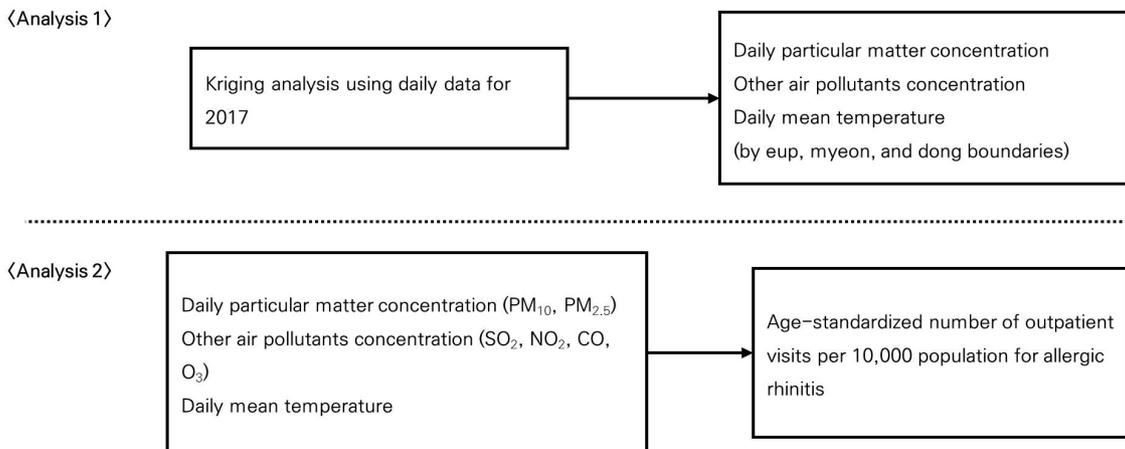


Figure 1. Study model.

방 법

1. 연구모형

Figure 1은 연구모형이다. 본 연구는 미세먼지의 농도 변화가 알레르기비염의 외래이용에 미치는 영향을 알아보기 위하여 ArcGIS ver. 10.0 (ESRI, Redlands, CA, USA)과 SAS ver. 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA), Stata ver. 15.0 (Stata Corp., College Station, TX, USA)를 이용하였으며, 다음과 같은 순서로 분석을 시행하였다.

첫 번째 단계는 Kriging 보간법을 이용하여 전체 읍·면·동에서의 대기오염물질 농도값을 추정하는 것이다. 전국 300여 개 대기오염측정망에서 측정된 미세먼지 농도(PM_{10} , $PM_{2.5}$) 및 대기오염물질(SO_2 , NO_2 , O_3 , CO) 자료를 이용하여 각각의 24시간 일평균 자료를 구축한 후, ArcGIS의 Kriging 보간법을 사용하여 전국 읍·면·동의 값을 추정하여 자료를 구축하였다.

두 번째 단계에서는 일별 대기오염 농도 변화와 외래이용건수와와의 관계를 분석하기 위하여 지역별·일별 남/여의 알레르기비염 외래이용건수를 종속변수로 설정하고, 독립변수로 위에서 구축된 일별·지역별 미세먼지 농도 및 기타 대기오염물질 농도를 설정하여 패널회귀분석(panel regression)을 시행하였다. 이때 시간지연효과(lag effect)를 고려하여 (1) 당일 모형, (2) 3일 이동평균모형, (3) 5일 이동평균모형을 각각 구축하여 분석을 실행하였다.

2. 연구 자료 및 대상

1) 연구 자료

Kriging 분석을 위해 사용된 행정구역 경계지도는 통계지리정보서비스(statistical geographic information service)에서 제공하는 센서스용 행정구역경계(읍·면·동)를 이용하였다. 또한 대기오염물질 농도 자료는 에어코리아 환경부 대기환경정보에서 관측소별로 제공하는 자료를 이용하였다. 일평균 기온은 기상청 기상자료개방포털에서 중상기상관측소, 방재기상관측소 기준으로 제공하는 일평균자료를 이용하였다.

알레르기비염의 일별·성별 연령표준화 외래이용건수는 국민건강보험공단에서 제공하는 환경성 질환 database (DB)자료를 이용하였다. 환경성 질환 DB자료는 환경성 질환 연구수요의 증가와 세부적인 지역단위와 의료이용 시점이 증가함에 맞춰 읍·면·동 지역단위로 2013-2017년 동안 환경성 질환 중 하나인 알레르기비염으로 진료를 받은 내역을 제공하고 있다.

2) 연구대상

본 연구의 분석대상은 2017년 12월 1일 기준의 읍·면·동 단위의 행정기관 코드기준 행정구역이다. 읍·면·동 단위의 행정구역은 시·군·구 단위의 행정구역보다 기간에 따른 변화가 자주 일어나기 때문에 특정 시점을 기준으로 행정구역을 결정할 필요가 있다.

환경성 질환 DB에서는 2013년부터 2017년에 걸쳐 변경 전후의 모든 행정구역이 포함되어 있기 때문에 행정구역분류기준을 참고하여 2017년 12월 1일을 기준으로 존재하는 행정구역을 대상으로 하였다. 예를 들어 세종특별자치시의 한솔동은 2017년 10월 6일 한솔동과 새롬동으로 나누어져 한솔동과 새롬동은 연구대상지역이 되며, 용인시 처인구의 모현면은 2017년 12월 11일에 모현읍으로 변경되었으나, 2017년 12월 1일 기준으로는 모현면이기 때문에 모현면이 연구대상지역이 된다.

또한 환경성 질환 DB에서는 환자들의 비식별화를 위해 행정구역 카테고리(지역, 성, 연령)별로 지역을 구분하였을 때, 한 번이라도 5미만 값이 있는 지역은 지역 거주자들의 평균 지점과 가장 가까운 지역을 선정하여 통합하는 절차를 거쳐 제공된다. 통합절차를 거친 연구대상은 인구가 거주하지 않는 읍·면·동 지역을 제외하고 최종적으로 3,449개 지역이 되었다.

3. 연구변수

1) 종속변수

본 연구의 종속변수는 전국 읍·면·동 행정구역의 인구 10,000명당 연령표준화 외래이용건수이다. 국민건강보험공단의 환경성 질환 DB에서는 각 읍·면·동 지역의 성별, 연령별(0세부터 80세 이상까지 연령의 5세 구간) 알레르기비염(J30)의 일별 외래이용건수를 제공하고 있다. 본 연구에서는 지역별 비교를 위해 이 자료를 통해 직접표준화법을 이용하여 지역별 남성과 여성의 인구 10,000명당 연령표준화 외래이용건수를 계산하여 분석에 이용하였다.

수식은 다음과 같으며, 표준인구는 국민건강보험공단의 환경성 질환 DB에서 제공하는 전국민 모수테이블에서 2017년 12월 1일 기준의 행정구역의 연령구간별 인구수, 전체 인구수를 표준인구수로 정의하여 계산하였다.

$$\frac{\sum(\text{연령구간별 외래방문율} \times \text{표준인구의 연령구간별 인구수})}{2017년 기준 표준인구수} \times 10,000$$

2) 독립변수

환경 관련 변수는 AirKorea (Korea Environment Corporation, Incheon, Korea)에서 제공하는 미세먼지 농도(PM_{10} , $PM_{2.5}$) 및 기타

대기오염물질(SO₂, NO₂, O₃, CO), 기상청 기후정보포털에서 제공하는 일평균 기온 자료를 사용하였다. 대기오염물질 중 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})의 농도는 많은 선행연구에서 알레르기비염과 관련이 있으며 질병을 발생시킬 뿐만 아니라 증상을 악화시키는 요소로 제시하였다 [8,12,13].

다양한 연구에서 미세먼지 농도뿐만 아니라 이산화황(SO₂), 이산화질소(NO₂), 오존(O₃), 일산화탄소(CO)는 미세먼지 농도와 함께 비염과 같은 호흡기질환에 악영향을 줄 수 있는 오염물질로 제시되고 있어 분석모형에 포함하였다[8,12]. 기온은 대기오염물질과 함께 알레르기비염 등의 호흡기질환과 연관이 있으며 증상을 악화시킬 수 있으므로 제시되고 있어 모형에 포함하였다[14].

본 연구에서는 전체 읍·면·동 지역의 대기오염물질 농도(PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂, CO, O₃)를 추정하기 위해 전국에 위치한 300여 개의 대기오염측정망에서 측정된 자료를 이용하였다. 에어코리아에서 제공하는 대기오염물질 자료는 시간단위로 측정되어 제공하고 있는데, 이 자료를 이용하여 각 물질의 농도값을 일평균(24시간)으로 계산하여 분석에 사용하였다.

이후 당일 모형뿐만 아니라 미세먼지 및 대기오염물질 농도가 알레르기비염의 외래이용에 영향을 미칠 수 있는 시간지연효과를 고려하여 3일 이동평균모형, 5일 이동평균모형을 계산하여 자료를 구축하였다. 이때 이동평균모형은 당일을 포함한 기간이며, 예를 들어 3일 이동평균모형은 당일을 포함하여 이전의 2일, 5일 평균모형은 당일을 포함하여 이전의 4일 동안의 농도값을 평균으로 계산한 것이다.

4. 분석방법

1) Kriging 보간법

보간법이란 실제 모든 지점에서의 속성값을 직접 측정할 수 없는 현실적인 문제를 해결하기 위한 방법으로 관측지점들에서의 실측값을 이용해 전체 지역의 값을 연속적인 표면으로 나타내는 기법이다. 보간법은 결정론적(deterministic) 방법과 지구통계학적(geo-statistical) 방법으로 구분되며, 지구통계학적 방법은 측정지점 간의 통계학적 관계 등을 포함한 통계적 모형을 기초로 한다[15].

Kriging 보간법은 지구통계학적 방법의 보간법에 속하는 방법이다. 다수의 대기오염물질인 미세먼지 농도와 의료이용에 관한 선행 연구들에서는 관측소가 없는 지역의 대기오염물질 농도를 추정하기 위해 kriging 보간법을 일반적으로 활용하고 있으며[11,16], inverse distance weighted (IDW), spline 보간법 등의 다른 보간법보다 비교적 정확한 추정을 할 수 있는 것으로 알려져 있다[17].

Kriging 보간법은 다른 보간법과 달리 관측지점 사이의 거리만을

이용한 방법이 아닌 실제 관측된 지점에서 알려진 값들 간의 공간적 자기상관(spatial autocorrelation)을 고려한 방법이며[16,18], kriging 보간법과 다른 보간법의 차이는 가중치를 계산하는 방법에서 나타난다.

Kriging 보간법에서 가중치의 계산은 semi-variogram 모형을 통해 이루어지며, 이 모형은 거리에 따른 관측값들의 분산도그래프 모양에 따라 spherical, circular, exponential, Gaussian, linear 등으로 구분할 수 있다. 자료값들의 semi-variogram 모형은 일정한 거리에 있는 자료들의 유사성을 나타내는 척도로, 공간자기상관성을 반영한다는 점에서 다른 보간법과의 차이를 보인다[18,19].

본 연구에서는 전체 읍·면·동 지역의 대기오염물질 농도(PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂, CO, O₃)를 추정하기 위해 에어코리아 환경부대기환경정보에서 제공하는 전국 300여 개의 대기오염측정망에서 시간단위로 측정되어 제공되는 자료를 통해 24시간으로 일평균 자료를 구축하였다. 이후 관측소의 위경도 위치좌표를 이용하여 지도에 나타내었다.

2017년 동안 관측소의 수에 변화가 있었으나 2017년의 모든 날짜별로 대기오염물질 농도를 추정해야 하였고 때문에 각 날짜에 해당하는 모든 관측소를 포함하여 kriging 분석을 시행하였다. 2017년의 모든 날짜의 미세먼지를 포함한 대기오염물질, 기온을 추정하기 위해 각 변수별로 365번의 kriging 분석을 시행하였다.

이때 semi-variogram 모형 및 실제 관측지점의 거리 및 최대 개수 등을 변경하며 반복 시행하는 과정을 거쳐 원자료와의 평균, 표준편차, 최대값, 최소값의 비교하였으며, 관측소가 위치한 지역에서 측정된 실제값과 추정된 결과값을 비교하여 가장 적합한 모형을 선택하였다.

2) 패널회귀분석

전국 읍·면·동을 분석대상으로 하여 의료이용이 거의 없는 공휴일 및 일요일을 제외한 2017년의 295일의 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5}) 및 기타 대기오염물질(SO₂, NO₂, O₃, CO)과 알레르기비염의 외래의료이용과의 관계를 확인하기 위하여 패널회귀분석을 사용하였다. 이때 알레르기비염의 인구 10,000명당 외래이용건수는 정규분포하지 않아 로그변환을 시행하여 모형에 포함하였다.

패널회귀분석은 패널의 개체 특성을 고려하여 패널 개체별로 다른 상수항을 가지지만 고정되어 있다고 가정하며, 기울기가 모든 패널 개체에 대해 동일한 고정효과모형(fixed effect)이나 상수항을 확률변수로 가정하는 확률효과모형으로 추정한다.

분석을 시행하기 전 패널 개체의 고정된 특성인 u_i 에 대한 검정결과, 합동 ordinary least square에 비해 고정효과모형이 적합한 것으로 나타났으며, 하우스만 검정결과를 통해 고정효과모형이 적합한 분석 모형인 것으로 판단되었기 때문에 패널모형 중 고정효과모형을 이용하여 분석을 실시하였다[20].

결 과

1. 미세먼지 및 대기오염 농도와 알레르기비염의 외래이용건수의 특성

Table 1은 전체 지역 및 모든 날짜를 기준으로 하여 계산한 계절별 남녀 인구 만 명당 알레르기비염의 외래이용건수 및 kriging 보간법을 사용하여 구축한 읍·면·동의 일별 미세먼지 농도(PM₁₀, PM_{2.5})와 기타 대기오염물질, 일평균 기온 자료의 계절별 평균의 기술통계를

다. 우리나라는 계절요인이 대기오염물질 농도에 영향을 줄 수 있으며[21], 이로 인한 분포의 차이를 보일 수 있기 때문에 봄(3-5월), 여름(6-8월), 가을(9-11월), 겨울(1-2월, 12월)로 각각 구분하여 기술통계를 실시하였다[22].

남성과 여성의 알레르기비염 외래이용건수는 계절별로 유사한 패턴을 보였으며 남성과 여성에서 겨울철에 각각 66.41, 80.79로 가장 높았으며, 여름철에 남성에서 41.24, 여성에서 48.75로 가장 낮은 외래이용을 나타내었다. 계절별 미세먼지 농도의 기술통계를 확인한 결

Table 1. Descriptive statistics of study variables by season

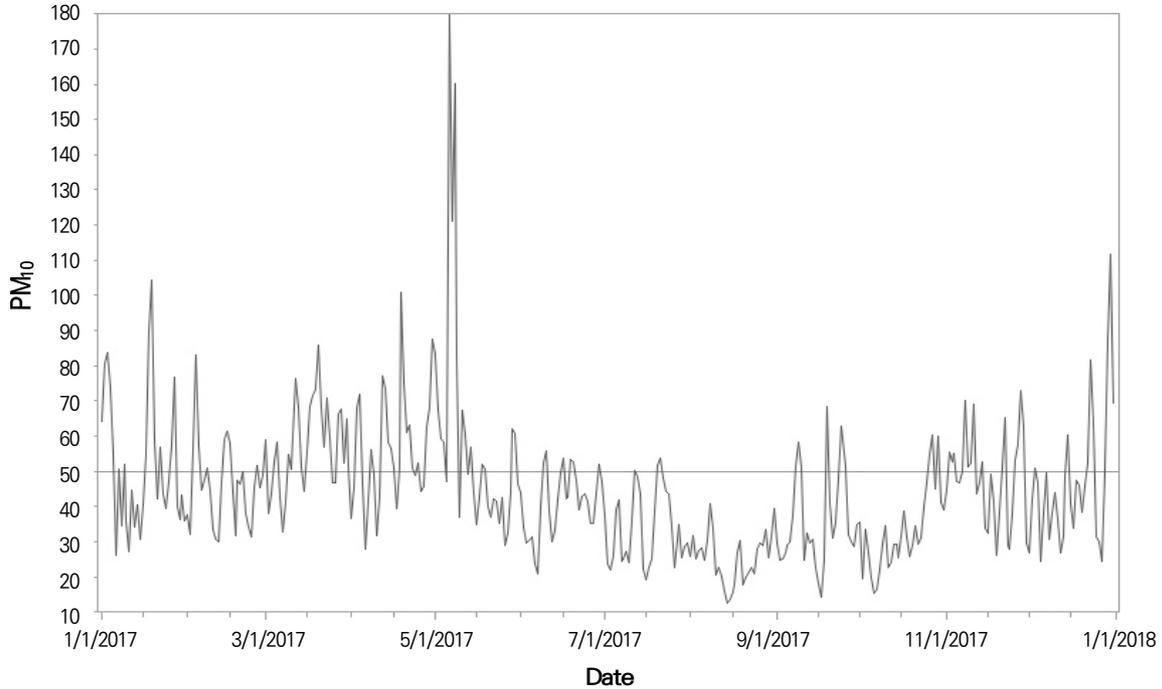
Season	Variable	Mean±standard deviation	Maximum	Minimum
Spring (March-May)	Outpatient visits (male)	64.77±38.00	957.91	0
	Outpatient visits (female)	78.90±46.55	833.91	0
	PM ₁₀	57.99±27.21	318.53	10.43
	PM _{2.5}	29.03±12.03	94.07	3.76
	SO ₂	0.0045±0.0018	0.0225	0.0010
	NO ₂	0.0233±0.0110	0.0778	0.0036
	O ₃	0.0383±0.0117	0.1146	0.0037
	CO	0.4826±0.1210	1.1431	0.1023
	Daily mean temperature	12.64±5.74	27.14	-4.99
Summer (June-August)	Outpatient visits (male)	41.24±25.63	576.22	0
	Outpatient visits (female)	48.75±30.92	640.51	0
	PM ₁₀	33.21±13.25	109.35	3.88
	PM _{2.5}	18.83±9.81	65.81	0.00
	SO ₂	0.0037±0.0017	0.0326	0.0003
	NO ₂	0.0164±0.0080	0.0584	0.0026
	O ₃	0.0329±0.0129	0.0873	0.0042
	CO	0.3937±0.1004	1.0566	0.0869
	Daily mean temperature	24.45±3.02	31.80	12.37
Fall (September-November)	Outpatient visits (male)	61.76±36.59	931.63	0
	Outpatient visits (female)	73.44±44.22	717.78	0
	PM ₁₀	39.02±16.27	117.89	6.95
	PM _{2.5}	21.63±11.26	85.24	1.06
	SO ₂	0.0035±0.0012	0.0124	0.0004
	NO ₂	0.0214±0.0105	0.0700	0.0026
	O ₃	0.0239±0.0096	0.0818	0.0015
	CO	0.1394±0.1394	1.3578	0.1169
	Daily mean temperature	14.05±6.83	27.84	-7.75
Winter (January-February, December)	Outpatient visits (male)	66.41±41.41	605.78	0
	Outpatient visits (female)	80.79±51.67	805.84	0
	PM ₁₀	48.19±20.97	169.09	9.55
	PM _{2.5}	29.73±16.76	133.34	4.71
	SO ₂	0.0045±0.0014	0.0142	0.0005
	NO ₂	0.0259±0.0124	0.0781	0.0029
	O ₃	0.0201±0.0094	0.0619	0.0013
	CO	0.5973±0.1998	1.7160	0.1242
	Daily mean temperature	0.08±3.98	13.92	-16.62

Unit: outpatient visits per 10,000 population; PM₁₀, PM_{2.5}: μg/m³, other air pollutants (SO₂, NO₂, O₃, CO): ppm.

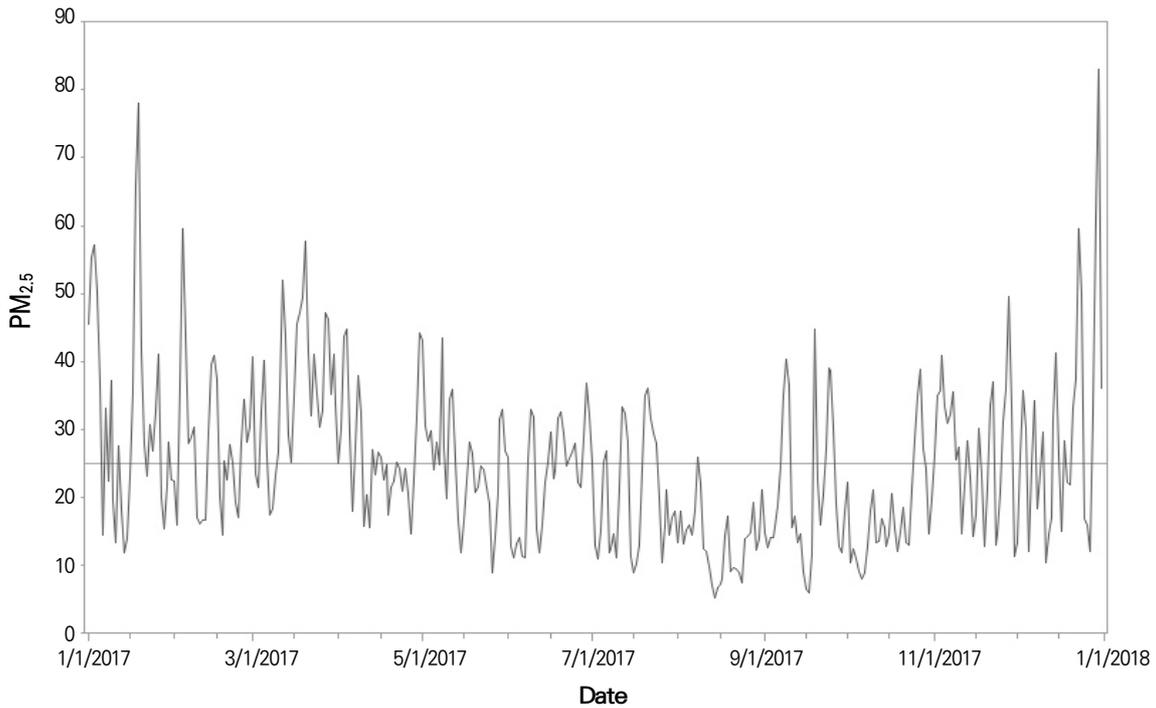
과 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도는 서로 유사한 패턴을 보이는 것으로 나타났다. PM₁₀은 봄(3-5월)에 황사의 영향을 받기 때문에 가장 높은 평균(57.99 μg/m³) 및 가장 높은 최대값(318.53 μg/m³)을 보였다. PM_{2.5}는

겨울에 가장 높은 평균(29.73 μg/m³)과 최대값(133.34 μg/m³)이 나타났다.

Figure 2는 2017년 각 읍·면·동 지역을 대상으로 추정한 일평균



A



B

Figure 2. Changes in daily average concentrations of PM₁₀ (A) and PM_{2.5} (B) in the eup, myeon, and dong boundaries in 2017.

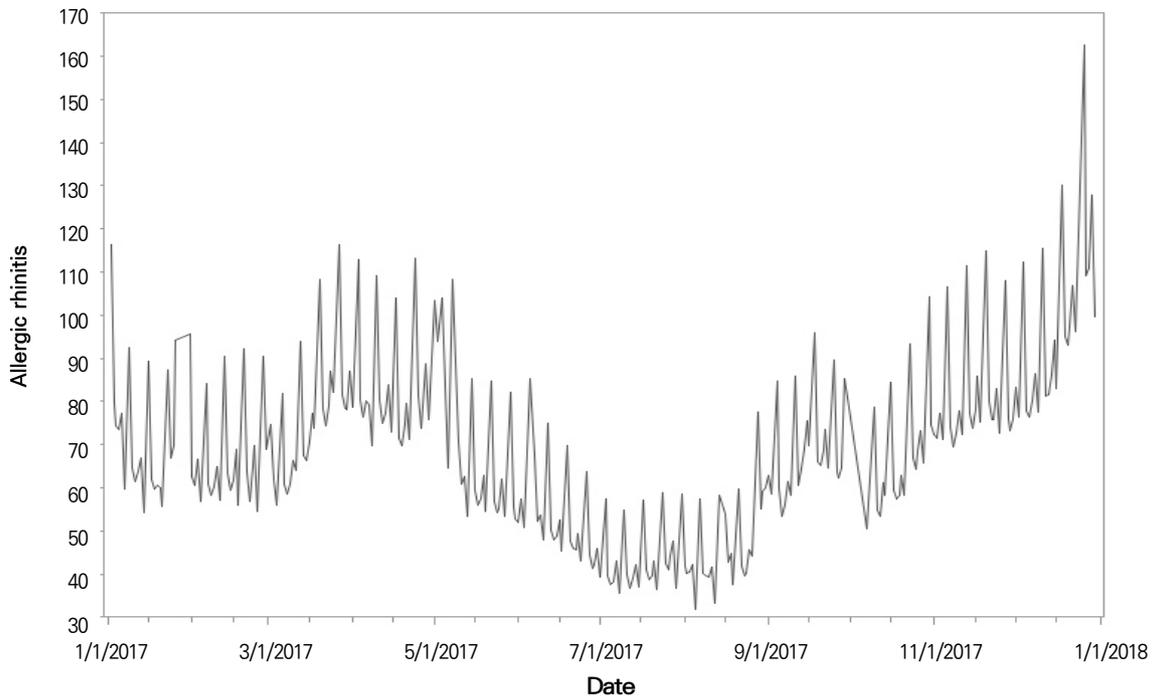


Figure 3. Change in daily average of number of outpatients per population of allergic rhinitis.

Table 2. Result of correlation analysis

	Outpatient vists	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃	Temperature
Outpatient vists	1							
PM ₁₀	0.152*	1						
PM _{2.5}	0.135*	0.761*	1					
SO ₂	0.111*	0.387*	0.409*	1				
NO ₂	0.271*	0.419*	0.500*	0.532*	1			
CO	0.155*	0.490*	0.693*	0.481*	0.671*	1		
O ₃	-0.129*	0.113*	-0.004*	-0.075*	-0.457*	-0.342*	1	
Temperature	-0.242*	-0.217*	-0.267*	-0.190*	-0.288*	-0.436*	0.395*	1

*p<0.001.

PM₁₀ 농도와 PM_{2.5} 농도의 평균을 전체 평균으로 계산하여 일별 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 일별 그래프를 확인한 결과 PM₁₀과 PM_{2.5}는 매우 비슷한 패턴을 가지는 것으로 나타났다. PM₁₀ 농도와 PM_{2.5} 농도는 6월부터 10월까지 다른 기간에 비해 상대적으로 낮았으며, 겨울에 해당하는 1월부터 2월, 12월에 농도가 높아지는 패턴을 보였다.

Figure 3은 의뢰이용이 거의 없는 공휴일, 일요일을 제외한 날짜의 전체 읍·면·동 지역의 알레르기비염의 인구 만 명당 외래이용건수의 일별 평균을 그래프로 나타낸 것이다. 그래프를 확인한 결과 기온이 높은 월에 낮고, 기온이 낮은 월에 높은 형태를 보이고 있으며, 이는 질환의 특성을 반영하는 결과이면서 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5}) 농도의 일별 추세와도 유사한 형태를 나타내었다.

Table 2는 패널분석을 시행하기 전 데이터의 알레르기비염과 독립 변수가 되는 당일의 대기오염물질들 간의 상관관계분석결과이다. 상관관계분석결과 PM₁₀과 PM_{2.5}는 상관계수가 0.761로 매우 높은 것으로 나타나 다중공선성이 우려되어 PM₁₀과 PM_{2.5}는 각각의 모형을 통해 분석할 필요가 있었다.

대기오염물질들 간 상관계수를 살펴보았을 때 0.5 이상이었던 변수들은 SO₂와 NO₂ (0.532), NO₂와 PM_{2.5} (0.500), CO와 PM_{2.5} (0.693), CO와 NO₂ (0.671)인 것으로 나타났다. 다중회귀분석을 통해 분산팽창인자(variance inflation factor, VIF) 값을 계산한 결과 CO와 NO₂ 등에서 VIF가 5 이상으로 다중공선성이 의심되었다. 따라서 패널분석 모형에서는 기타 대기오염물질 중 CO와 NO₂를 제외하여 분석을 시

행하였다.

Tables 3-6은 남성과 여성에서 알레르기비염의 인구 만 명당 외래 이용건수에 대해 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})와 대기오염물질의 영향을 패널모형을 이용해 분석한 결과이다. 고정효과모형을 통해 분석하였기 때문에 모든 개체에서 외래이용건수와 독립변수의 관계는 동일한 것으로 해석할 수 있다. Table 3과 Table 4는 PM₁₀을 주요 독립변수로, Table 5와 Table 6은 PM_{2.5}를 주요 독립변수로 설정하여 분석한 결과이다.

Table 3. Result of panel analysis for rhinitis outpatient visits with PM₁₀ (male)

Variable	Day model	3 Days model	5 Days model
PM ₁₀	0.0013*	0.0023*	0.0038*
SO ₂	0.0032*	0.0057*	0.0069*
O ₃	0.0049*	0.0076*	0.0079*
Temperature	0.0015*	0.0015*	0.0029*
Saturday (ref: weekdays)	-0.1523*	-0.1431*	-0.1317*
Season (ref: 3, 4, 5)			
Summer (6, 7, 8)	-0.0947*	-0.0401*	-0.0200*
Fall (9, 10, 11)	0.1613*	0.2335*	0.2669*
Winter (1, 2, 12)	0.1873*	0.2459*	0.2842*
_cons	1.4683*	1.1828*	1.0055*
<i>R</i> ²			
Within	0.155	0.202	0.235
Between	0.015	0.020	0.039
Overall	0.082	0.070	0.073

Ref, reference.
**p*<0.001.

Table 4. Result of panel analysis for rhinitis outpatient visits with PM₁₀ (female)

Variable	Day model	3 Days model	5 Days model
PM ₁₀	0.0014*	0.0024*	0.0041*
SO ₂	0.0034*	0.0060*	0.0073*
O ₃	0.0052*	0.0081*	0.0084*
Temperature	0.0018*	0.0017*	0.0031*
Saturday (ref: weekdays)	-0.1915*	-0.1813*	-0.1687*
Season (ref: 3, 4, 5)			
Summer (6, 7, 8)	-0.1009*	-0.0440*	-0.0215*
Fall (9, 10, 11)	0.1643*	0.2388*	0.2746*
Winter (1, 2, 12)	0.1993*	0.2590*	0.2988*
_cons	1.5372*	1.2388*	1.0500*
<i>R</i> ²			
Within	0.189	0.240	0.275
Between	0.016	0.020	0.036
Overall	0.103	0.087	0.089

Ref, reference.
**p*<0.001.

Table 5. Result of panel analysis for rhinitis outpatient visits with PM_{2.5} (male)

Variable	Day model	3 Days model	5 Days model
PM _{2.5}	0.0004*	0.0006*	0.0030*
SO ₂	0.0038*	0.0069*	0.0081*
O ₃	0.0053*	0.0084*	0.0091*
Temperature	0.0017*	0.0013*	0.0029*
Saturday (ref: weekdays)	-0.1502*	-0.1439*	-0.1324*
Season (ref: 3, 4, 5)			
Summer (6, 7, 8)	-0.1150*	-0.0699*	-0.0639*
Fall (9, 10, 11)	0.1535*	0.2222*	0.2487*
Winter (1, 2, 12)	0.1832*	0.2329*	0.2654*
_cons	1.4834*	1.2119*	1.0403*
<i>R</i> ²			
Within	0.150	0.196	0.224
Between	0.008	0.011	0.018
Overall	0.077	0.062	0.062

Ref, reference.
**p*<0.001.

남성의 PM₁₀을 주요 독립변수로 한 5일 평균모형에서 PM₁₀이 10 μg/m³ 증가함에 따라 남성의 알레르기비염 외래이용건수는 3.8% 증가하였으며, SO₂와 O₃가 한 단위 증가함에 따라 각각 0.69%, 0.79% 증가하였다(Table 3). 여성의 PM₁₀을 주요 독립변수로 한 5일 평균모형에서 PM₁₀이 10 μg/m³ 증가하게 되면 여성의 알레르기비염 외래이용건수는 4.1% 증가하는 결과를 보였다. SO₂는 한 단위 증가할 때 0.73%, O₃는 한 단위 증가할 때 0.84% 증가하는 것으로 나타났다(Table 4).

남성의 PM_{2.5}를 주요 독립변수로 한 5일 평균모형에서는 PM_{2.5}가 10 μg/m³ 증가하면 남성의 알레르기비염 외래이용건수는 3.0% 증가하는 것으로 나타났으며 SO₂와 O₃는 한 단위 증가할 때 외래이용건수가 각각 0.81%, 0.91% 증가하는 결과가 나타났다(Table 5). 여성의 PM_{2.5} 5일 평균모형에서는 PM_{2.5}가 10 μg/m³ 증가함에 따라 여성의 알레르기비염 외래이용건수는 3.3% 증가하는 결과를 보였다. SO₂가 한 단위 증가할 때 0.85%, O₃가 한 단위 증가할 때 0.97% 외래이용건수를 높이는 것으로 나타났다(Table 6).

모든 모형의 분석결과에서 대기오염물질인 PM₁₀, SO₂, O₃과 기온은 알레르기비염의 외래이용건수에 통계적으로 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 봄에 비해 여름에 알레르기비염의 외래이용건수가 낮아지는 것으로 확인되었으며, 당일의 모형에서보다 3일 평균모형에서, 3일 평균모형에서보다 5일 평균모형에서 회귀계수의 증가 및 within R²의 증가를 보였다.

Table 6. Result of panel analysis for rhinitis outpatient visits with PM_{2.5} (female)

Variable	Day model	3 Days model	5 Days model
PM _{2.5}	0.0006*	0.0007*	0.0033*
SO ₂	0.0040*	0.0073*	0.0085*
O ₃	0.0057*	0.0089*	0.0097*
Temperature	0.0020*	0.0015*	0.0031*
Saturday (ref: weekdays)	-0.1893*	-0.1822*	-0.1695*
Season (ref: 3, 4, 5)			
Summer (6, 7, 8)	-0.1225*	-0.0753*	-0.0681*
Fall (9, 10, 11)	0.1557*	0.2271*	0.2557*
Winter (1, 2, 12)	0.1946*	0.2457*	0.2795*
_cons	1.5536*	1.2684*	1.0849*
<i>R</i> ²			
Within	0.184	0.232	0.264
Between	0.008	0.011	0.017
Overall	0.097	0.078	0.076

Ref, reference.

**p*<0.001.

고 찰

본 연구는 전국 3,449여 개의 행정동 기준 읍·면·동 지역을 대상으로 2017년의 일별 미세먼지 및 기타 대기오염물질 농도와 환경성질 질환 중 호흡기질환인 알레르기비염의 관계를 분석하였다. 이를 위하여 전국에 분포해 있는 대기오염측정망 및 기상관측소에서 측정하여 제공하는 자료를 바탕으로 일별 대기오염물질 및 기온 분포를 지구통계학적(geostatistics) 방법인 kriging을 사용하여 읍·면·동 단위로 추정하여 PM₁₀, PM_{2.5}의 지역별 농도의 차이를 확인하였다. 이후 미세먼지 및 기타 대기오염물질과 알레르기비염의 외래이용건수와의 관련성을 확인하기 위하여 패널분석을 시행하였다.

미세먼지와 같은 공간통계자료는 공간상 모든 위치에 그 값이 존재할 수 있으나, 실제 현실상황에서는 모든 지역에서 값을 수집하지 못하는 제한을 가진다. 공간보간기법은 이러한 제한점을 해결하기 위해 몇 개의 지점으로부터 실제 관측된 자료를 수집한 후 미관측 지역까지 추정하여 자료를 구축하는 방법을 말하며 IDW, spline, kriging 등의 방법론이 있다[23].

그 중 kriging 보간법은 지리정보시스템(geographic information system)를 이용하여 실제 관측치 사이의 거리뿐만 아니라 공간적 자기상관성을 반영하는 보간법(interpolation)의 방법 중 하나이다[18]. Kriging 보간법은 PM₁₀ 등의 대기오염물질과 같은 연속적으로 확산성이 있는 물질 등을 예측하기 위해 일반적으로 사용되는 방법으로 다수의 대기오염측정망에서 제공하는 값들을 이용하여 관측되지 않

은 위치에서의 미세먼지 농도를 추정하는 데 적합한 방법으로 고려할 수 있다[14,24].

패널데이터는 연구대상이 되는 여러 개의 개체를 반복하여 측정하여 기록한 데이터이며, 시계열데이터의 특성과 횡단면데이터의 특성을 모두 가지고 있다고 할 수 있다. 따라서 시간의 흐름에 따른 한 개체의 특성의 변화를 측정할 수 있으며 동시에 개체들 간 관찰되지 않는 이질성 요인을 모형에서 고려할 수 있다. 또한 패널데이터를 이용한 패널회귀분석은 횡단면 또는 시계열데이터에 비해 더 많은 정보와 변수의 변동성을 통해 효율적인 추정량을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 또한 횡단면데이터를 이용한 선형회귀모형에서 발생할 수 있는 다중공선성의 문제를 완화시킬 수 있다[20].

본 연구에서는 오차항의 가설검정을 통해 선형회귀분석과 고정효과모형 중 고정효과모형이 선택되었으며, 이후 하우스만 검정을 통해 고정효과모형과 확률효과모형 중 고정효과모형이 최종적으로 선택되었다. 고정효과모형은 상수항이 패널 개체별로 다르면서 고정되어 있다고 가정하는 모형이며 기울기가 모두 동일하여 변수의 한계효과가 모든 패널 개체에 동일하게 적용된다[20].

고정효과모형을 선택하면서 분석에서 1년 단위의 시·군·구 단위의 변수들은 2017년 동안 변하지 않는 특성으로 분석모형에서 빠지게 되었다. 이러한 제한점에도 전국 읍·면·동인 여러 패널 개체를 동시에 고려하여 미세먼지 등의 대기오염물질과 환경성질환 외래이용간의 연관성을 분석하였다는 것에 의의가 있다.

본 연구에서는 대기오염물질들을 독립변수로 사용하면서 다중공선성이 우려되어 NO₂와 CO를 제외하여 분석을 시행하였다. 대기오염물질 농도를 독립변수로 하여 건강과의 연관성을 분석한 일부 선행연구들에서도 모든 대기오염물질 변수를 모형에 포함시키지 않았고, 일부 물질의 농도만을 분석에 이용하였다[25,26]. 이는 대기오염물질간 상관관계가 높아 다중공선성 문제가 생기기 때문인 것으로 생각할 수 있다[27].

패널분석결과 남성과 여성 모두에서 PM₁₀과 PM_{2.5} 및 대기오염물질 농도(SO₂, O₃)는 당일 모형, 3일 평균모형 및 5일 평균모형에서 알레르기비염의 의료이용건수에 통계적으로 유의한 영향을 주는 것으로 나타났다. 이러한 분석결과는 미세먼지를 포함한 SO₂, O₃ 등의 대기오염물질 농도가 알레르기비염의 병원 방문건수에 영향을 줄 수 있다는 선행연구와 일치하였다[12,13,28].

연구결과에서 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5}) 농도를 포함한 모든 대기오염물질은 3일 평균모형에서보다 5일 평균 모형에서 외래의료이용건수에 더 높은 영향력을 보였으며, 모형의 설명력 또한 높아지는 것을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 당일의 미세먼지와 대기오염물질 농도보다는 지속적으로 대기오염물질의 농도가 높은 경우에 외래

의료이용이 증가한다는 것으로 생각할 수 있으며, 선행연구들의 연구결과와도 유사하였다[29,30].

미세먼지 농도는 계절에 따라서 지역별로 편차가 있는 것으로 나타났다. 미세먼지를 포함한 대기오염물질 농도는 알레르기비염의 외래의료이용에 영향을 주는 것으로 나타났다. 미세먼지 농도에 영향을 받아 알레르기비염의 의료이용의 증가한다는 것은 미세먼지가 알레르기비염을 악화시켜 건강을 위협할 수 있는 것으로 이해할 수 있다. 이로 인해 미세먼지 농도의 차이로 인해 지역 간 건강불평등이나 타달 가능성이 있다고 할 수 있다.

건강은 개인적인 요인뿐만 아니라 지역사회의 환경적 요인에 의해 영향을 받을 수 있으며[31], 연구결과에 나타난 것과 같이 미세먼지와 같은 대기오염물질들은 지역 건강격차를 만들어내는 환경적 요인에 포함될 수 있다[32]. 따라서 고농도 미세먼지가 나타나는 지역을 우선적으로 미세먼지와 관련된 건강정책의 도입이 필요하다고 할 수 있다.

우리나라에서는 2019년 2월에 지역자치단체를 주체로 하여 미세먼지 농도를 절감하고 미세먼지에 의한 건강 영향에 취약한 계층을 보호하기 위한 목적으로 미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법이 시행되었다. 이를 통해 지방자치단체를 중심으로 미세먼지 농도 개선에 대한 목표를 결정하고 고농도 미세먼지가 발생할 경우 비상저감조치 등을 시행할 수 있는 제도가 마련되었다[33].

이러한 정책들이 시행되고 있음에도 불구하고 우리나라 미세먼지의 대책이 주로 미세먼지의 발생원에 초점이 맞춰져 있어 보건학적인 측면의 접근이 부족하다는 문제점이 제기되고 있다. 따라서 이후 보건분야에서 미세먼지에 대한 대책이 필요함을 제시할 수 있으며, 그 방안의 예로 미세먼지로 인한 건강영향 민감계층을 위한 대책 마련과 함께 미세먼지에 대비한 건강대응교육과 홍보 등을 제시할 수 있을 것이다[4].

고농도 지방자치단체를 중심으로 알레르기비염과 같이 미세먼지와 관련된 환경성 질환에 대한 교육과 홍보를 효율적으로 시행하기 위해 취약계층을 대상으로 하여 해당 지역의 보건소, 교육기관 등의 자원을 활용하여 체계적인 교육프로그램을 도입하는 것이 하나의 방안이 될 수 있을 것이다.

예를 들어 민감계층에 직접 찾아가 교육하는 방안을 생각할 수 있다. 보건사회연구원에서 시행한 ‘미세먼지 대비 민감계층 찾아가는 케어서비스 구축’ 연구보고서에 따르면, 정보와 지식습득에 한계가 있는 아동, 노인 등을 대상으로 지속적으로 교육을 통해 정보전달이 이루어졌을 때 미세먼지에 대비한 행동과 대응방식에 효과를 나타내는 것으로 확인되었다[34].

이러한 사업은 시범사업 중에 있으나 우선적으로 고농도 미세먼지가 나타나는 지역을 중심으로 하여 알레르기비염과 같은 환경성 질환

에 대한 교육을 시행할 수 있다면 효과적인 사업이 될 수 있을 것으로 예상된다.

또한 우리나라에서는 천식 및 알레르기비염과 같은 알레르기질환과 관련된 사업들이 시행되고 있으며, 이미 시행되고 있는 이러한 사업들과 연계하여 알레르기질환에 대한 미세먼지의 영향 및 행동요령 등을 교육한다면 효율적인 알레르기질환 관리방안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

그 예로 지방자치단체를 중심으로 천식, 알레르기비염, 아토피 등의 알레르기질환을 관리하고 지역 특성에 맞는 알레르기질환의 진단, 치료, 예방체계 개발 등을 목표로 하는 아토피·천식 교육정보센터를 들 수 있다. 아토피·천식 교육정보센터는 지역 보건소와 네트워크를 구축하여 교육에 대한 지원을 하는 등 지역을 중심으로 한 프로그램들을 시행하고 있다[35]. 따라서 추후 시행될 필요가 있는 지역사회 중심의 미세먼지와 관련된 보건사업들은 이러한 사업들을 기초로 하여 확장시킬 수 있는 방안이 필요한 것으로 생각된다.

본 연구의 제한점은 다음과 같다. 첫째, 독립변수로 사용된 미세먼지 농도(PM_{10} , $PM_{2.5}$)를 포함한 대기오염물질의 농도는 관측소에서 측정된 값을 바탕으로 추정된 값이기 때문에 실제 농도와 약간의 차이가 있을 수 있다. 그럼에도 불구하고 미세먼지 농도를 추정하는 데 있어 kriging 보간법은 다른 보간법에 비해 높은 정확도를 보이며[17], 관측소가 없는 지역들에서 가까운 관측소의 측정값을 사용하는 방법보다 지역의 미세먼지 농도 차이를 명확히 확인할 수 있다는 점에서 강점이 있다. 추후 연구에서 관측소의 실측값을 얻을 수 있는 지역들을 대상으로 분석하여 결과를 비교할 필요가 있다.

둘째, 연구대상을 지역으로 설정하였기 때문에 개인의 알레르기비염에 영향을 줄 수 있는 다양한 요인들을 고려하지 못하였다는 제한점이 있다. 이러한 제한점에는 개인이 속해 있는 실내환경, 생활습관, 유전적 요인 등이 포함될 수 있다. 추후 연구에서는 이러한 개인단위 요인들을 고려한 분석모형을 활용하는 연구를 진행한다면 더 정확한 미세먼지의 건강영향을 추정할 수 있을 것이다.

셋째, 자료의 한계로 인해 입원/외래, 계획된 외래 등의 다양한 형태의 의료이용을 구분하여 분석하지 못하였다.

결론적으로, 연구는 전국 3,449개의 읍·면·동을 대상으로 2017년 동안의 일별 미세먼지 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 농도를 추정하여 환경성 호흡기질환인 알레르기비염의 외래의료이용과의 연관성을 시간지연효과를 고려하여 당일, 3일 평균, 5일 평균의 모형으로 구분하여 고정효과모형을 통해 확인하였다. 전국의 미세먼지를 포함한 대기오염물질 농도는 ArcGIS의 kriging 보간법을 통해 추정하였으며, 이러한 방법은 단순히 관측소의 위치의 측정값을 특정 지역의 값으로 대체하였던 제한점을 극복할 수 있는 방안으로 판단된다.

분석결과에 따르면 PM₁₀과 PM_{2.5}를 포함한 대기오염물질은 알레르기비염의 외래이용량과 관련이 있는 것으로 나타났으며, 5일 평균의 모형에서 가장 높은 영향력과 모형의 적합도를 나타내었다. 이는 당일의 미세먼지 농도보다 지속적으로 미세먼지의 농도가 높은 경우 알레르기비염의 외래이용이 증가하는 것으로 생각해볼 수 있을 것이다. 이러한 결과를 통해 고농도 미세먼지가 나타나는 지역을 중심으로 알레르기비염과 관련한 보건학적인 중재방안이 필요하다는 것을 제시할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 질병관리본부 민간경상보조사업(지역 간 건강격차 원인 규명과 해소를 위한 학술활동 촉진 연구사업) 지원을 받았다.

ORCID

Ju Hyun Park: <https://orcid.org/0000-0001-8656-5958>;
 Young Yong Park: <https://orcid.org/0000-0003-3893-4733>;
 Eunjoo Lee: <https://orcid.org/0000-0002-4294-9471>;
 Kwang-Soo Lee: <https://orcid.org/0000-0003-4492-6019>

REFERENCES

1. Lee Y, Choi J, Park MR, Kim J, Kim WK, Park YM, et al. Analysis of regional prevalence of allergic diseases in Korean school children. *Allergy Asthma Respir Dis* 2015;3(1):62-69. DOI: <https://doi.org/10.4168/aard.2015.3.1.62>.
2. Lee E, Lee SY, Yang HJ, Hong SJ. Epidemiology of allergic diseases in Korean children. *Allergy Asthma Respir Dis* 2018;6(Suppl 1):S9-S20. DOI: <https://doi.org/10.4168/aard.2018.6.S1.S9>.
3. Kim OJ. The long-term exposure to particulate matter air pollution (PM₁₀) and mortality [dissertation]. Seoul: Seoul National University; 2018.
4. Lee SH. Research and adaptation measures in the field of health after the 9.26 announcement of comprehensive measures for fine dust management. *Health Welf Issue Focus* 2018;(346):1-8.
5. Kyung SY, Jeong SH. Adverse health effects of particulate matter. *J Korean Med Assoc* 2017;60(5):391-398. DOI: <https://doi.org/10.5124/jkma.2017.60.5.391>.
6. Loomis D, Grosse Y, Lauby-Secretan B, El Ghissassi F, Bouvard V, Benbrahim-Tallaa L, et al. The carcinogenicity of outdoor air pollution. *Lancet Oncol* 2013;14(13):1262-1263. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1470-2045\(13\)70487-x](https://doi.org/10.1016/s1470-2045(13)70487-x).
7. Oh SK, Seong HU, Lim DH, Kim JH, Son BK, Kim HC, et al. Relationship between air pollutants and prevalence of allergic disease/pulmonary function in students in Incheon. *Pediatr Allergy Respir Dis* 2010;20(4):264-276.
8. Chen CC, Chiu HF, Yang CY. Air pollution exposure and daily clinical visits for allergic rhinitis in a subtropical city: Taipei, Taiwan. *J Toxicol Environ Health A* 2016;79(12):494-501. DOI: <https://doi.org/10.1080/15287394.2016.1182002>.
9. Park JK, Choi YJ, Jung WS. An analysis on the distribution characteristics of PM₁₀ concentration and its relation to the death from asthma in Seoul, Korea. *J Environ Sci Int* 2015;24(7):961-968. DOI: <https://doi.org/10.5322/JESI.2015.24.7.961>.
10. Kim HM, Heo JA, Park YH, Lee JT. The effect of air pollution on allergic diseases considering meteorological factors in metropolitan cities in Korea. *Korean J Environ Health Sci* 2012;38(3):184-194. DOI: <https://doi.org/10.5668/jehs.2012.38.3.184>.
11. Gorai AK, Tuluri F, Tchounwou PB. A GIS based approach for assessing the association between air pollution and asthma in New York State, USA. *Int J Environ Res Public Health* 2014;11(5):4845-4869. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph110504845>.
12. Hajat S, Haines A, Atkinson RW, Bremner SA, Anderson HR, Emberlin J. Association between air pollution and daily consultations with general practitioners for allergic rhinitis in London, United Kingdom. *Am J Epidemiol* 2001;153(7):704-714. DOI: <https://doi.org/10.1093/aje/153.7.704>.
13. Lindgren A, Strohm E, Nihlen U, Montnemery P, Axmon A, Jakobsson K. Traffic exposure associated with allergic asthma and allergic rhinitis in adults: a cross-sectional study in southern Sweden. *Int J Health Geogr* 2009;8:25. DOI: <https://doi.org/10.1186/1476-072X-8-25>.
14. Woo KS, Park JH, Lee HJ. Sensitivity analysis of ordinary kriging interpolation according to different variogram models. *J Comput Struct Eng Inst Korea* 2008;21(3):295-304.
15. Environmental Environmental Systems Research Institute. An overview of the Raster Interpolation toolset [Internet]. Redlands (CA): Environmental Systems Research Institute; 2016 [cited 2019 May 10]. Available from: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/lat->

- est/tools/3d-analyst-toolbox/an-overview-of-the-raster-interpolation-toolset.htm.
16. Kim HJ, Jo WK. Assessment of PM-10 monitoring stations in Daegu using GIS interpolation. *J Korean Soc Geospat Inf Syst* 2012;20(2):3-13. DOI: <https://doi.org/10.7319/kogsis.2012.20.2.003>.
 17. Kim JH, Choi JH, Kim CS. Comparative evaluation of interpolation accuracy for CO2 emission using GIS. *J Environ Impact Assess* 2010;19(6):647-656.
 18. Environmental Systems Research Institute. How kriging works [Internet]. Redlands (CA): Environmental Systems Research Institute; 2016 [cited 2019 May 10]. Available from: <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm>.
 19. Lim CH, Ryu DH, Song CH, Zhu YY, Lee WK, Kim MS. Estimating precise spatio-temporal distribution of weather condition using semi-variogram in small scale recreation forest. *J Korean Assoc Geogr Inf Stud* 2015;18(3):63-75. DOI: <https://doi.org/10.11108/kagis.2015.18.3.063>.
 20. Min IS, Choi PS. STATA panel data analysis. Seoul: Jipil Media; 2016.
 21. Kim E, Bae C, Yoo C, Kim BU, Kim HC, Kim, S. Evaluation of the effectiveness of emission control measures to improve PM2.5 concentration in South Korea. *J Korean Soc Atmos Environ* 2018;34(3):469-485. DOI: <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.3.469>.
 22. Cho SH, Kim HW, Han YJ, Kim WJ. Characteristics of fine particles measured in two different functional areas and identification of factors enhancing their concentrations. *J Korean Soc Atmos Environ* 2016;32(1):100-113. DOI: <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.1.100>.
 23. Cho HL, Jeong JC. Application of spatial interpolation to rainfall data. *Spat Inf Res* 2006;14(1):29-41.
 24. Liao D, Peuquet DJ, Duan Y, Whitsel EA, Dou J, Smith RL, et al. GIS approaches for the estimation of residential-level ambient PM concentrations. *Environ Health Perspect* 2006;114(9):1374-1380. DOI: <https://doi.org/10.1289/ehp.9169>.
 25. Choi HY. Effect modification by health behaviors on the association between air pollution and allergic diseases in adolescents [dissertation]. Seoul: Seoul National University; 2019.
 26. Lee S, Lee W, Kim D, Kim E, Myung W, Kim SY, et al. Short-term PM2.5 exposure and emergency hospital admissions for mental disease. *Environ Res* 2019;171:313-320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.01.036>.
 27. Park JS. An empirical study on time series analysis of air pollutants and health effect: comparison of GAM and ARIMAX models [dissertation]. Seoul: Seoul National University; 2015.
 28. Zhang F, Wang W, Lv J, Krafft T, Xu J. Time-series studies on air pollution and daily outpatient visits for allergic rhinitis in Beijing, China. *Sci Total Environ* 2011;409(13):2486-2492. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.007>.
 29. James KA, Strand M, Hamer MK, Cicutto L. Health services utilization in asthma exacerbations and PM10 levels in rural Colorado. *Ann Am Thorac Soc* 2018;15(8):947-954. DOI: <https://doi.org/10.1513/AnnalsATS.201804-273OC>.
 30. Keet CA, Keller JP, Peng RD. Long-term coarse particulate matter exposure is associated with asthma among children in Medicaid. *Am J Respir Crit Care Med* 2018;197(6):737-746. DOI: <https://doi.org/10.1164/rccm.201706-1267OC>.
 31. Dahlgren G, Whitehead M. Policies and strategies to promote social equity in health. Stockholm: Institute for future studies; 1991.
 32. Lee S, Hwang J. Dose environmental pollution affect health care expenditure in Korea?: empirical evidence from regional governments' panel data. *Health Soc Welf Rev* 2011;31(4):382-404. DOI: <https://doi.org/10.15709/hswr.2011.31.4.382>.
 33. Special Act on Fine Dust Reduction and Management, Law No. 16303 (Mar 26, 2019).
 34. Chae SM, Cha MR. Developing a visiting health education program for groups sensitive to particulate pollution. Sejong: Korean Institute for Health and Social Affairs; 2018.
 35. Seoul Atopy Asthma Education Information Center. Prevention and management program for atopic dermatitis, asthma [Internet]. Seoul: Seoul Atopy Asthma Education Information Center; 2018 [cited 2019 Jun 10]. Available from: <https://www.atopyinfocenter.co.kr/page/1082/717.do>.